

Bouwen met bio-ecologische materialen: detaillering van de muurvoet

Ineke Rosseneu, Astrid Vrebos

Studentennummers: 01702468, 01711242

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman

Begeleiders: Raf De Preter, Katrien Devos

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

Academiejahr 2021-2022

BOUWEN MET BIO-ECOLOGISCHE MATERIALEN

Detallering van de muurvoet

Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos

Promotoren: prof.arch. Jan Moens en prof.dr.ir.-arch. Marijke Steeman

Begeleiders: arch. Raf de Preter en ir.-arch. Katrien Devos

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad:

Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2021-2022

Bouwen met Bio-ecologische Bouwmaterialen

Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos

Student number: 01702468 - 01711242

Supervisors: Prof. Jan Moens, Prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman
Counsellor: Raf De Preter

Master's dissertation submitted in order to obtain the academic degree
of Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academic year 2021-2022

VOORWOORD

In deze masterproef onderzochten de detaillering van de muurvoet bij toepassing van bio-ecologische bouwmaterialen als alternatief voor het standaard bouwdetail, met beton en een spouwmuur, zoals vandaag de dag algemeen wordt toegepast in België. Deze zoektocht vond zijn aanleiding in een eerder project, genaamd MEISMEST, dat uitgevoerd werd voor het 'Atelier Architectuurontwerp en bouwdetail' uitgevoerd in academiejaar 2020-2021. Hier was het doel om een volledig composteerbaar paviljoen te ontwerpen in de plantentuin van Meise. Tijdens het ontwerp van dergelijk paviljoen ontdekten we de wereld van bio-ecologisch bouwen maar maakten we ook kennis met de uitdagingen ervan, zoals onder meer de vochtproblematiek ter plaatse van de funderingsaanzet. Hieruit ontstond het idee om deze detaillering van de muurvoet verder te gaan onderzoeken in de hoop dat dit een startpunt kan zijn voor de verdere implementatie van bio-ecologische materialen in de bouwsector.

Allereest willen we graag onze promotoren Jan Moens, Marijke Steeman en begeleiders Raf de Preter en Katrien Devos bedanken voor het mogelijk maken van deze thesis en hun interesse in het onderwerp. Ook bedanken we hen voor de aangename en leerrijke begeleidingen waarin ze hun uitgebreide kennis deelden met ons.

Verder bedanken we graag de groepsleden van het project MEISMEST, Sien van de Velde en Damien Gilliard, voor de fijne samenwerking en de blijvende interesse en steun in dit onderzoek. Hierbij willen we ook Martijn Vincke en Dries Mouton bedanken voor hun input op vlak van duurzaamheid en stabiliteit. Daarnaast ook Hilde Vanwildemeersch van Woonder om even tijd voor ons te maken en met ons samen te zitten om onze bouwdetails te bespreken, architectengroep Barchi en Wim Hujtens om enkele prangende vragen over strobalembouw op te lossen. En Stéphanie Van Linden voor haar hulp bij de detailleringen in TRISCO.

Tenslotte bedanken we ook graag onze familie en vrienden voor hun onvoorwaardelijke steun en interesse tijdens dit proces doorheen het jaar. De beide mama's voor het nalezen van al onze pagina's tekst en papa (Astrid) voor al het advies en nuttige opmerkingen. Febe voor onze dagen toch juist iets vrolijker te maken met alle lachmomentjes voor tijdens en na het werk, Kyuni voor haar eeuwige sarcastische opmerkingen maar ook de nodige hulp en advies op momenten waar we het zelf even niet wisten, Raven en Tina om naar ons te luisteren als we het even niet meer zagen zitten, Nina voor haar ongedwongen interesse in ons werk en Laurens voor het nalezen en om Astrid nu en dan even van achter haar computer te sleuren. Tenslotte, Davis Danke en Leo grazie mille.

Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos

(Gent, 3 juni 2022)

TOELATING TOT BRUIKLEEN

"De auteur(s) geeft (geven) 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."

"The author(s) gives (give) permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In all cases of other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state explicitly the source when quoting results from this master dissertation."

3 juni 2022,

Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos

NOTA

“Deze masterproef vormt een onderdeel van een examen. Eventuele opmerkingen die door de beoordelingscommissie tijdens de mondelinge uiteenzetting van de masterproef werden geformuleerd, werden niet verwerkt in deze tekst.”

“This master's dissertation is part of an exam. Any comments formulated by the assessment committee during the oral presentation of the master's dissertation are not included in this text.”

ABSTRACT

Bouwen met bio-ecologische materialen: detaillering van de muurvoet.

Studenten: Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos

Promotoren: prof.arch. Jan Moens en prof.dr.ir.-arch. Marijke Steeman

Begeleiders: arch. Raf de Preter en ir.-arch. Katrien Devos

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad: Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur (Architectuurontwerp en bouwtechniek)

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Vakgroepvoorzitter: prof.dr.ir.-arch. Johan Lagae

Academiejaar 2021-2022

Trefwoorden: bio-ecologisch, muurvoet, strobalebouw, stampaarde, duurzaamheid

Eén van de grootste aandachtspunten bij bouwen met bio-ecologische materialen is vocht. Vaak zijn deze materialen hier niet tegen bestand en wordt er snel teruggegrepen naar beton en de plaatsing van membranen. Toch is er potentieel te vinden in het gebruik van bio-ecologische materialen maar reiken de Belgische normen en standaarddetailleringen te kort als algemeen referentiekader voor de bouwer en consument. In deze masterproef wordt er daarom op zoek gegaan naar een alternatieve detaillering van de muurvoet, de meest kritische plek op vlak van vochtproblematieken. Dit met het toepassen van bio-ecologische materialen en minimaal gebruik van membranen. De beschikbare materialen in België worden opgelijst en beoordeeld op basis van parameters zoals lokale beschikbaarheid en productie, omkeerbaarheid, recycleerbaarheid, chemische bewerking en tools als TOTEM en Nibe. Op basis van dit onderzoek wordt een functietabel opgesteld met de goedgekeurde materialen. Twee bouwmethoden worden gekozen als basis voor de detaillering, stampaarde en strobouw, waarvan de normen en standaarden van andere landen buiten België worden geanalyseerd. Op basis van deze kennis worden enkele detailleringen van de muurvoet voorgesteld en met elkaar vergeleken op vlak van kost, milieu-impact en levensduur. Het wordt duidelijk dat het bouwen zonder membranen, het dampopen bouwen, nog verder onderzoek vergt om in de toekomst breder gebruikt te worden. Door enkel op de meest cruciale punten een membraan te plaatsen, wordt het gebruik van bio-ecologische materialen reëel en kan het op deze manier zijn weg naar het grote publiek vinden.

Building with bio-ecological materials: design of the wall base

Ineke Rosseneu and Astrid Vrebos

Supervisor(s): Prof. Dr. Ir. Arch. Marijke Steeman, Prof. Arch. Jan Moens, Ir. Arch. Katrien Devos
and Arch. Raf De Preter

Abstract In Belgium, concrete and brick are still considered as the standard and preferred building materials. However, this way of building has a significant effect on the environment by producing a large amount of carbon dioxide. The building industry today is responsible for 40% percent of the total energy use in Europe. It is clear that something needs to change. New concepts such as circularity and bio-ecological building start to arise as a response to this issue that effects all. In this paper alternative details for the wall base are being researched and designed while focusing on bio-ecological materials and re-use or circularity. Two building methods, straw bale construction and rammed earth, were chosen as the topic. As a conclusion, both methods were compared to the standard Belgian cavity wall and to each other. From this, the best possible design solution can be chosen in terms of lifespan, cost and environmental impact.

Keywords Bio-ecological, rammed earth, straw-bale, wall base, sustainability

I. INTRODUCTION

A. Objective

Before designing a building detail with bio-ecological building materials, a definition of this topic needs to be determined. It is important to know what lies within the scope of bio-ecological building and which materials it includes.

Bio-ecological building can be characterized by the following demands:¹

- Use of bio-ecological and durable materials
- Reversibility and Dismountability
- Simplicity
- Re-use
- Stratification according to lifespan
- Expandability and change of function
- Water and energy-efficient building

Bio-ecological materials were defined by VIBE as 'A building material that exists only out of inexhaustible natural basic raw materials, with as little as possible or without chemical additives, without heavy environmental impact and without harmful consequences for the human health'.² This shows there is a clear preference for renewable or

rapidly growing sources which are amply present in Belgium. This also includes by-products that are not damaging to human beings and the earth and bio-based materials. A last important factor that needs to be listed is the focus on local materials and a short-chain process to reduce CO₂ emissions and transport costs to a minimum. Within this paper, local is determined as 'mined and produced in Belgium'.

Furthermore, certain parameters were fixed for the reference building used as a basis for the design of the building detail. It concludes a single-family home, one-story tall, in Brussels periphery. Additionally, the wall base was chosen as the considered building detail. This detail contains the connection of the wall and the foundation which is why it is very delicate. Factors such as stability and water tightness play a big part as they determine the well-fare of the building. Often bio-ecological materials aren't suited for purposes like this, so a solution needs to be found for designing a stable and watertight wall base without compromising on the aspect of bio-ecological building.

B. Literature review

Once the objective is set, more detailed research can commence. In this section several topics are being discussed in their relation to the objective. First, a short economical study of Belgium is done to gain a better view at the import and export flows of the country. With this we try to define which raw materials are to be called sustainable. This depends on the export vs demand ratio. When a product is being exported in such amounts that our own demand can not be supplied, a product is no longer sustainable. Then a better solution for the use of this product needs to be sought for it to be accepted within the scope of bio-ecological building. This is for example the case for wood which is being bought in large amounts and exported back to Belgium by China.

Secondly a short overview is given on different ancient building methods throughout the world that were once the standard option but are now forgotten

about. These methods were usually built with very little energy use while also using almost exclusively bio-based materials. Therefore, these methods contain very useful information and have the capacity to be the base point for new bio-ecological building methods. It must be noted that these methods are not to be literally copied but instead altered to fit into the guidelines and conditions of today. As a conclusion three methods were denoted as possible reference points for further research, namely Cob or rammed earth, wattle and daub and dry stacked stone.

Further, raw materials often form the base for bio-ecological materials and are therefore of the utmost importance. To get a better view on the presence of such materials in Belgium, we look at the geology and what is being mined. From this it quickly became clear that Belgium has access to a lot of natural stone. Multiple mines are spread across both the northern and southern part of Belgium. The main mined materials are sand and clay for the northern region and limestone and sandstone for the southern region. Many other kinds of natural stone such as slate or blue stone are available across the country but mainly gathered in the southern part.

Lastly, an extensive search is done on the available materials available and produced in Belgium. This includes bio-based materials, by-products and membranes. For each of the sections an overview is given of the corresponding materials and their properties. Each material needs to meet certain set criteria to be denoted as bio-ecological and accepted to be used in the design of the wall base. These criteria are defined per section. For the section on bio-based materials and by-products, the products can't undergo chemical processes, need to be produced and available in Belgium and accepted in both Nibe and TOTEM. These last two programs define the environmental impact of materials and rate them according to their own criteria and calculation procedure. Because they apply their own system, their results don't always meet. To create a stricter selection, both programs are used as a criterion. The final section on membranes determines a few different criteria: reversibility of the connection, recyclability and harmful substances. For each of these sections a summary table is made, showing which materials from the list are accepted within this scope.

C. Application table

As a conclusion, every material that satisfied the criteria from its specific section, is gathered in an application table. Here, every field of application is

shown for the chosen materials. It also includes in which physical shapes the materials are available on the market. When designing a building detail, you can revert to this table to find suitable bio-ecological materials for a specific application. The different applications are formulated as structural, insulation, airtightness, finishing and soil sealing.

II. BUILDING METHODS: GUIDELINES

For the design of a bio-ecological wall base we base ourselves on two types of building methods, straw bale construction and rammed earth, as the structural elements. Both don't have a large field of application in Belgium until now, mainly because of the lack of knowledge about them. This also means no standards were publicized for building with straw or rammed earth in Belgium. Therefore, guidelines and standards need to be found in other countries who have a tradition of working with such materials. These guidelines are essential for designing building details as they often determine minimum dimensions and capacity or characteristics.

A. Building with straw bales

Straw is described as dried stems of cereal plants after the grain has been removed.³ This is why it can be considered as a by-product of the food industry. As a result, the price of straw is relatively small. Another benefit is that straw can be recycled and composted after the building has been taken apart. Additionally, it also stores carbon dioxide during its grow process. When straw is pressed into straw bales, it possesses a good specific heat factor of 2 kJ/(kgK). This and a low effusivity ensure a balanced indoor temperature. Straw also is a good thermal insulator in its raw form with a decent heat conductivity factor of 0.049-0.07 W/(mK) depending on the culm direction.⁴

Straw is however sensitive to the presence of moisture or water. Too much moisture in the straw bale would lead to fungi and decay. On the other hand, straw has proven to be a vapor open material, which makes it possible for moisture to be absorbed by straw and later returned to the environment. By building with vapor open materials, a more constant relative humid level can be obtained in the indoor environment.⁵ Straw does need to be protected from direct rain and air infiltration, this can be solved by using a plaster on both the inside and the outside. Again, these plasters need to be vapor open to allow moist to exit the construction.⁶

Fire safety is often a great concern when thinking about building with straw, which is valid if loose straw would be used. Straw bales on the other hand

do obtain a fire resistance of 90-120 minutes. This is due to a combination of pressing of the straw bales that causes very little oxygen to be present in the straw bale and the plaster finishings.⁷ Much research was already done on the behaviour of straw bales in the presence of fire. Each time the conclusion was, when the bales are properly constructed and produced, the fire resistance that is obtained is more than sufficient.

Lastly, research is done on the sustainability of straw bale construction. In TOTEM, a comparison was made between standard wall constructions and a straw bale wall, as is seen in table 1. From this comparison was concluded that straw bale has a significantly lower material impact than for example a cavity wall but does require a greater land use for the cultivation of cereal plants. When analysing a straw bale wall in Nibe, similar results are shown. The wall has an environment classification of 1A, which indicates that this product is on a technical environmental level the best choice.⁸

Table 1: Material points in TOTEM comparison with straw bale construction⁹

Material points in TOTEM	
	Material points [mPt/FE]
Cavity wall	13
ETICS	11
Timber frame	9,6
Straw bale wall	6,7

B. Building with Rammed earth

There are two main concerns when building with rammed earth: the stability and the resistance to water and moisture. Therefore, measures need to be taken to assure a stable and durable construction. This implies certain limits to the construction with rammed earth: a maximum building height of 6,5 meters and a minimum thickness of the wall of 250mm.¹⁰ Additionally, the wall needs to be protected from environmental conditions by applying a plinth, a canopy and protection of the surface. If all these terms are fulfilled and a correct earth mixture is used, which entails 50-60% fine gravel and sand, 30% loam and 5-15% clay¹¹, both concerns can be dismissed. You do however need to install a correct foundation base for the rammed earth wall. This also acts as the plinth and rises at minimum 225mm above surface level. The foundation can be erected in either reinforced concrete, masonry or reinforced rammed earth.¹²

Rammed earth needs to be protected at the surface to avoid erosion and eventually loss of stability. This protection of the surface, inside and outside, can be

executed with a plaster, linseed oil, stone, a lime wash or additional rammed earth mass.¹³ All of these methods need to be vapor open, as well as the earth wall for the same reason as it was valid for straw bale construction.

Rammed earth isn't an insulator, this shows in the high values of the heat transmission coefficient, which is 2,86 W/(m²C°) for a 250mm wall. It does however have a very good thermal inertia, which means the rammed earth wall can absorb heat and later slowly release it in the indoor space. With this a constant indoor temperature can be assured and a lower level of energy will be required for additional heating. Nevertheless, it is still required to provide additional insulation on either the inside or the outside to comply with the comfort demands.¹⁴ A great benefit of rammed earth is that it is non-combustible and has a fire resistance of 120 minutes for a wall of 150mm thick. This is a big advantage and an increased level of safety.¹⁵

For the aspect of sustainability, rammed earth has proven to be a great example. It requires very little energy, is produced locally and can be recycled after use. When analysed in TOTEM, see table 2, it becomes clear that rammed earth does indeed have a lower material impact than standard building methods but only if the earth is being reused from the same or a different site. If new earth is used, the material impact is significantly higher and thus not accepted. As for stability, research has proven a lifespan of approximately 62,5 years for a non-stabilized rammed earth wall.¹⁶ The general demand for a durable rammed earth wall is that the thickness of the wall can not be reduced more than 5% or more than 30mm. If these values are exceeded, the wall can no longer be deemed as stable or safe.¹⁷

Table 2: Material points in TOTEM comparison with rammed earth construction¹⁸

Material points in TOTEM	
	Material points [MPT/FE]
Rammed earth: new	13
Rammed earth: ex situ reuse	8,5
Rammed earth: in situ reuse	7,8
Cavity wall	11
Timber Frame	8
ETICS	5,3

III. DESIGN OF THE WALL BASE

For the final phase of this paper, a few building details for both straw bale and rammed earth construction are designed. For each construction method, two basic details are designed and used for the final comparison. Other details were also made as a variation upon the basic details to show the possibilities of the building methods. All details consider the wall base, as this is a crucial intersection due to the presence of rain- and groundwater and a challenge to reduce the number of membranes that are applied in a general wall base. Because of this last demand and the characteristics of both materials, the decision was made to design a vapor open wall base. Vapor open design allows for the transport of air and vapor through the various construction elements. This ensures a breathing internal environment where there is a natural vapor and temperature regulation.¹⁹ A few conditions are however in place. No dampproof courses or materials can be applied in the finishing layers and every material should be vapor open so that vapor can be transported through the construction and doesn't cause problems such as condensation.

A. Wall base of a straw bale construction

In the following images, the two basic details of the wall base design for a straw bale construction are shown.

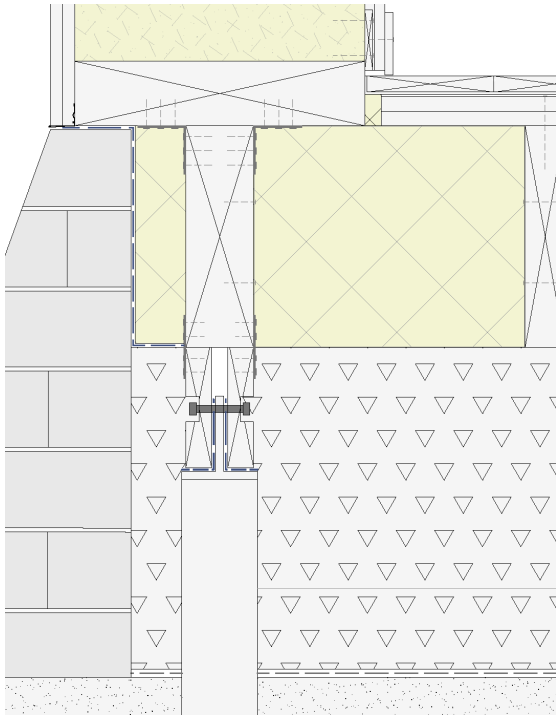


Figure 1: Detail wall base design with straw bales and a screw pile

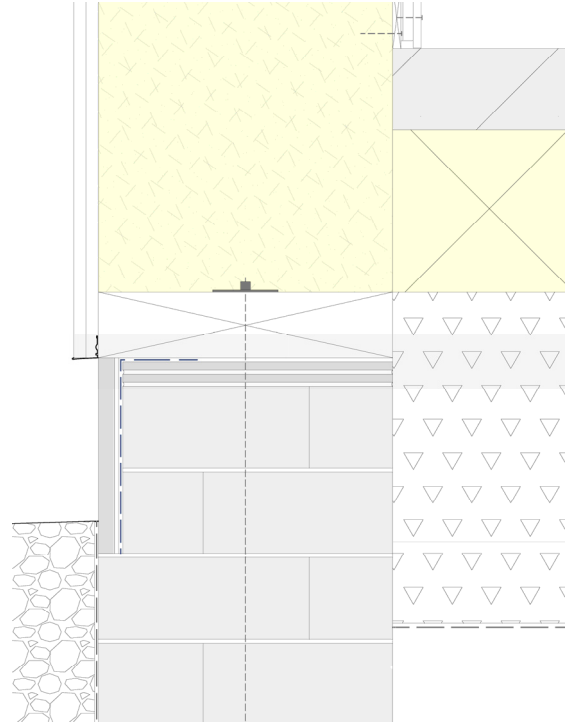


Figure 2: Detail wall base design with straw bales and a Rubble trench

B. Wall base of a rammed earth construction

In the following images, the two basic details of the wall base design for a rammed earth construction is shown.

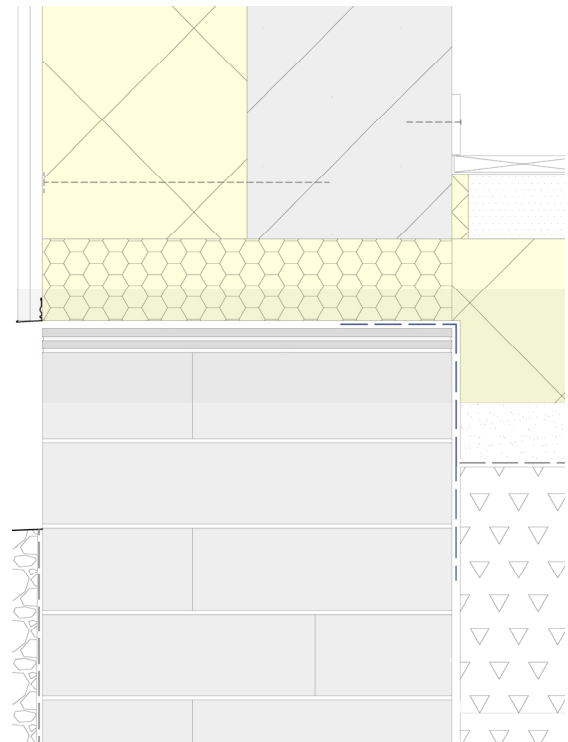


Figure 3: Detail wall base design with rammed earth and a Rubble trench

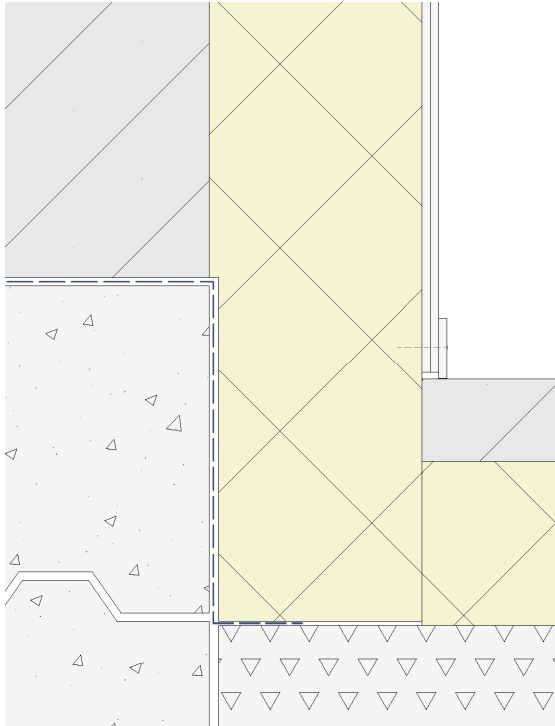


Figure 4: Detail wall base design with rammed earth and prefabricated concrete stacking blocks

IV. COMPARISON OF BUILDING DETAILS

The four details above are compared with three standard building details. This includes a cavity wall, a timber frame construction and an ETICS construction. This comparison was done on different parameters which give a notion on the sustainability, cost and circularity of the building details. The parameters are determined as the shadow costs from Nibe, the material points and reversibility of TOTEM, the building cost and the lifespan. A few assumptions had to be made to fill in the gaps inherent to Nibe and TOTEM regarding the availability of information on all used materials. From this comparison a final conclusion can be made on the best scoring building detail.

The comparison was done in two parts. In the first part the wall and floor composition of each detail was considered and compared to the other details. In the second part the foundation was considered, because the different foundation designs are interchangeable for most details. The included foundations are a concrete foundation, a Rubble trench, a screw pile and prefabricated concrete stacking blocks.

In the first part it became clear that all bio-ecological details gained better results as opposed to the standard details for the shadow costs and material points. On the other side, they did score less for the aspect of reversibility, due to the use of glued earth blocks instead of rammed earth in TOTEM as a

mandatory assumption, and building cost. This last part is probably due to the limited availability of these relatively unknown products and the high prices of natural raw materials and rammed earth. In the end, the straw bale construction can be seen as the best scoring option. Rammed earth gains a lower score but is still considered as the better option compared to standard building details.

In the second part, the bio-ecological foundations score better than standard details on the aspect of material points and reversibility. They do however score worse on the aspect of shadow costs. The reason is found in the great cost of limestone and slate. These costs can be reduced when reused materials are applied instead of newly mined raw materials. Reuse of such materials is preferred because the mining of raw materials should be limited to a minimum to prevent exhaustion and because these materials are perfectly fitted for the application of reuse. As a result, the prefabricated concrete stacking blocks come out with the best overall result and are therefore considered as the best option. It is shown that the use of fresh poured concrete as a foundation is not a sustainable or circular option compared to other options.

In total we conclude that the best option for the wall base detail based on the discussed parameters is the straw bale construction detail with the prefabricated concrete stacking blocks. This has to be nuanced by the possibility of reuse of materials. If this is the case, a Rubble trench foundation can be seen as an equal option. The rammed earth details score a little less than straw bale details but still remain better than standard details.

V. CONCLUSION

As a conclusion for this research, building with bio-ecological materials can be regarded as a valid building method for the wall base detail that complies with contemporary demands and standards. It proves to be a more sustainable alternative than standard details especially compared to the cavity wall.

Because these materials are still mainly present in the background of the building environment, the prices are on the more expensive side. Therefore, when applying these methods, it has to be seen as an investment in a healthy and comfortable environment and interior living space. This is substantiated by the advantages of building with bio-ecological materials in regard of human and environmental health. A lot of insecurities and gaps in the knowledge about these materials do however still exist. These gaps can be filled by doing more

research and gaining experience by applying the materials in the building environment. It is only then that a broad and further detailed analysis can be made, regarding all aspects of sustainability and circularity. Then a path is made for bio-ecological building to enter the standard practice.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the suggestions of many people, but most importantly supervisors Prof. Dr. Ir. Arch. Marijke Steeman, Prof. Arch. Jan Moens, Ir. Arch. Katrien Devos and Arch. Raf De Preter.

REFERENCES

- [1] OVAM. *24 ontwerprichtlijnen veranderingsgericht bouwen*.
- [2] VIBE. *Dossier: Wat is bio-ecologisch bouwen?*. België: Antwerpen.
- [3] FASBA: Fachverband Stroballenbau Deutschland. *Straw Bale Building Guide: English language version, 2020*. Aller 2020.
- [4] Strobouw Nederland. *Stro kenmerken: Alle cijfers op een rij*. 2019.
- [5] Batic2. *Isolatiematerialen: stro*. Interreg. Last accessed in November 2022. https://www.batic2.eu/sites/default/files/Doc%20Techno%20Commercieaux%20-%20Stro_Paill.pdf.
- [6] FASBA: Fachverband Stroballenbau Deutschland. *Straw Bale Building Guide: English language version, 2020*. Aller 2020.
- [7] Batic2. *Isolatiematerialen: stro*. Interreg. Last accessed in November 2022. https://www.batic2.eu/sites/default/files/Doc%20Techno%20Commercieaux%20-%20Stro_Paill.pdf.
- [8] Nibe. *Strobalen (standaard) met wapeningsnet; inclusief leemstuc afwerking*. Last accessed April 2022.
- [9] TOTEM-Building. Last accessed in May 2022. <https://www.totem-building.be/pages/project/project.xhtml?id=8599&selection=ets8599>.
- [10] New Zealand standards. *Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998*. 1998.
- [11] Southern African development community cooperation in standardization's. *Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014*. 2014.
- [12] Southern African development community cooperation in standardization's. *Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014*. 2014.
- [13] New Zealand standards. *Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998*. 1998.
- [14] New Zealand standards. *Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998*. 1998.
- [15] Middleton G.F. *Bulletin 5: Earth-wall construction*. CSIRO Division of building, construction and engineering. 1987.
- [16] Bui Q.B., Morel J.C., Venkatarama Reddy B.V. and Ghayad W. *Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering*. Building environment 44. Elsevier. 2009. P.912-919.
- [17] New Zealand standards. *Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998*. 1998.
- [18] TOTEM-Building. Last accessed in May 2022. <https://www.totem-building.be/pages/project/project.xhtml?id=8599&selection=ets8599>.
- [19] Bouwgezond. *Hoe werkt dampopen bouwen en isoleren*. Last accessed in May 2022. <https://bouwgezond.nl/bouwgezond-wiki/veelgestelde-vragen-gezond-bouwen/hoe-werkt-dampopen-bouwen-en-isoleren/>.

DUURZAAMHEIDSREFLECTIE

Het woord duurzaamheid is tegenwoordig niet meer weg te denken uit ons dagelijks leven. Deze bewustwording is noodzakelijk indien we het klimaatakkoord van Parijs tegen 2050 willen halen. De bouwsector is verantwoordelijk voor 40% van het totale energiegebruik wereldwijd. Er is dus dringend nood aan verandering, zo zorgen we ervoor dat de behoeftes en de toekomst van toekomstige generaties niet in het gedrang komen. Één van de mogelijkheden om verandering te brengen in de bouwsector is het gebruik van bio-ecologische materialen. Via deze thesis trachten we bio-based materialen meer onder de aandacht te brengen en een pad te effenen voor verder onderzoek. Niet enkel onderzoek is nodig voor deze duurzaamheidstransitie, ook een sociale transitie is nodig. Dit vergt vooral een wijziging in ons huidig denkpatroon.

We willen de lezers er ook graag op wijzen dat tussen het moment van opstellen en het moment van raadplegen van deze masterproef ongetwijfeld nieuw onderzoek werd uitgevoerd naar deze materialen. Deze masterthesis kan dus mede een aanzet geven tot het gebruik van bio-ecologische materialen of bouwtechnieken maar dit moet steeds gereflecteerd worden naar nieuw onderzoek. De masterproef kan dus niet worden beschouwd als een eenduidige richtwijze of norm voor het bio-ecologisch bouwen.

INHOUDSOPGAVE

1.	INLEIDING.....	1
1.1.	Context.....	3
1.2.	Onderzoek.....	3
2.	INTRODUCTIE TOT BIO-ECOLOGISCH BOUWEN.....	7
2.1.	Definities	9
2.1.1.	Durable en sustainable	9
2.1.2.	Ecologische materialen.....	9
2.1.3.	Ecologisch bouwen	9
2.1.4.	Bio-based materialen.....	9
2.1.5.	Herbruikbare en gerecycleerde materialen	9
2.1.6.	Lokale materialen	10
2.1.7.	Korte keten materialen.....	10
2.1.8.	Bio-ecologisch materialen	10
2.1.9.	Restproducten	10
3.	VOORONDERZOEK	13
3.1.	Economiestudie	15
3.1.1.	Conclusie.....	19
3.2.	Bouwen doorheen de tijd.....	20
3.2.1.	Bouwmethodes in de wereld	20
3.2.2.	Bouwmethodes in België.....	21
3.2.3.	Conclusie.....	22
3.3.	Geologie van België	23
3.4.	Bio-based materialen in België.....	27
3.4.1.	Hennep.....	27
3.4.2.	Vlas.....	28
3.4.3.	Gras.....	29
3.4.4.	Zeegras.....	30
3.4.5.	Stro.....	30
3.4.6.	Riet	31
3.4.7.	Hout	31
3.4.8.	CLT.....	33
3.4.9.	Bamboe.....	33
3.4.10.	Kurk.....	34
3.4.11.	Kokos.....	35
3.4.12.	Schelpen.....	35
3.4.13.	Cellulose.....	36

3.4.14.	Schapenwol.....	36
3.4.15.	Pluimen	37
3.4.16.	Bijenwas	37
3.4.17.	Kalk.....	37
3.4.18.	Leem	38
3.4.19.	Conclusie.....	38
3.5.	Restproducten	42
3.5.1.	Recycork.....	42
3.5.2.	Houtvezels	42
3.5.3.	Katoen.....	42
3.5.4.	Carbstone klinkers	43
3.5.5.	Cellenglas	43
3.5.6.	Urban mining	43
3.5.7.	Conclusie.....	45
3.6.	Membranen	47
3.6.1.	Bitumen.....	48
3.6.2.	TPO.....	48
3.6.3.	PP folie	48
3.6.4.	PE folie	48
3.6.5.	PVC.....	49
3.6.6.	PU.....	49
3.6.7.	DPC.....	49
3.6.8.	POCB	49
3.6.9.	Cementgeboden coating	49
3.6.10.	Plantaardig membraam	49
3.6.11.	EPDM	49
3.6.12.	Conclusie.....	50
3.7.	Functietabel	51
4.	CONCEPTEN	57
4.1.	Klassieke opbouw: spouwmuur.....	59
4.1.1.	Stabiliteit.....	59
4.1.2.	Waterdichtheid.....	59
4.1.3.	Thermische isolatie.....	60
4.1.4.	Luchtdichtheid	61
4.1.5.	Toegankelijkheid	61
4.1.6.	Akoestiek.....	62

4.1.7.	Brandveiligheid	62
4.1.8.	Esthetiek	62
4.1.9.	Sustainability	62
4.1.10.	Durability and EOL	63
4.2.	Dampopen bouwen	64
4.3.	Strobalenbouw.....	66
4.3.1.	Stabiliteit.....	66
4.3.2.	Waterdichtheid en luchtdichtheid	68
4.3.3.	Thermische isolatie.....	69
4.3.4.	Toegankelijkheid	70
4.3.5.	Akoestiek.....	70
4.3.6.	Brandveiligheid	71
4.3.7.	Afwerking	74
4.3.8.	Sustainability	75
4.3.9.	Durability en EOL	81
4.4.	Stampaarde.....	87
4.4.1.	Stabiliteit.....	88
4.4.2.	Waterdichtheid	91
4.4.3.	Luchtdichtheid	92
4.4.4.	Thermische isolatie.....	92
4.4.5.	Toegankelijkheid	93
4.4.6.	Akoestiek.....	93
4.4.7.	Brandveiligheid	94
4.4.8.	Afwerking	94
4.4.9.	Sustainability	95
4.4.10.	Durability en EOL	100
5.	BOUWDETAILS	107
5.1.	Algemene aannames bouwdetail	109
5.2.	Muurvoet strobalenbouw.....	111
5.2.1.	Uitvoering	111
5.2.2.	Opbouw van de muur	114
5.2.3.	Fundering	114
5.2.4.	Isolatie.....	116
5.2.5.	Folie.....	118
5.2.6.	Stabiliteit berekening.....	119
5.2.7.	Trisco analyse.....	122

5.3.	Muurvoet stamperde.....	124
5.3.1.	Uitvoering	124
5.3.2.	Opbouw van de muur	126
5.3.3.	Fundering.....	126
5.3.4.	Isolatie.....	127
5.3.5.	Folie.....	129
5.3.6.	Stabiliteit berekening.....	130
5.3.7.	Trisco analyse.....	131
6.	VERGELIJKING BOUWDETAILS	135
6.1.	Methode van vergelijking	137
6.2.	Milieu-impact.....	141
6.2.1.	Schaduwkosten.....	141
6.2.2.	Materiaalpunten.....	141
6.2.3.	Omkeerbaarheidsindex	142
6.3.	Levensduur.....	147
6.4.	Kost per jaar	151
6.4.1.	Wand en vloer	151
6.4.2.	Fundering.....	151
6.5.	Conclusie.....	152
7.	CONCLUSIE.....	155
	BIBLIOGRAFIE	163
	LIJST MET BIJLAGEN	181

LIJST MET FIGUREN

Figuur 1: Import en export in België	16
Figuur 2: Rondhoutstromen in Vlaanderen	19
Figuur 3: Quartaire delfstoffen in Vlaanderen (gebaseerd op: Cartogis UGent)	23
Figuur 4: Grondsoorten in België (gebaseerd op: De Roeck, M en Timont, J., 1956).....	24
Figuur 5: Steengroeven in België (gebaseerd op: Goemans, A, Vanderhallen D)	24
Figuur 6: Bio-based materiaalpunten per m ² TOTEM	27
Figuur 7: Hennep blok.....	28
Figuur 8: Toepassingen van vlas en hennep Figuur 9: Vlas isolatie matten	29
Figuur 10: Emissie van broeikasgassen in kg CO ₂ -eq/ha (gebaseerd op: Leendertse P. et al.).....	29
Figuur 11: Grasisolatie Figuur 12: Zeegrass	30
Figuur 13: Milieupunten per m ² voor houtvezel, kurk en stro in de toepassing isolatie wand	31
Figuur 14: Milieu-impact houten plaatmaterialen (gebaseerd op: De Roeck M., Vanroelen M., 2018)	32
Figuur 15: Milieu-impact CLT ten opzichte van beton (gebaseerd op: Oldenburger J. et al.).....	33
Figuur 16: Milieukost van 1kg bamboe stam (eerste figuur) en bamboe paneel (tweede figuur) (gebaseerd op: P. Van der Lugt, A. Van den Dobbelsteen and R. Abrahams).....	34
Figuur 17: Milieukost bamboepanelen tegenover standaard plaatmaterialen (gebaseerd op: P. Van der Lugt et al)	34
Figuur 18: Vergelijking isolatiematerialen in geveltoepassing (gebaseerd op: Vrebos A. en Meiresonne E. 2021) ..	35
Figuur 19: : Kokos isolatie.....	35
Figuur 20: Vergelijking hennep-houtvezel-cellulose-schapenwol voor de toepassingen isolatie wand en vloer.....	37
Figuur 21: Map bio-based materialen in België	39
Figuur 22: Carbstone klinkers	43
Figuur 23: Map restproducten in België.....	45
Figuur 24: Milieuklasse en schaduwkosten van membranen.....	47
Figuur 25 :Materiaalpunten TOTEM	47
Figuur 26: Funderingsaanzet (gebaseerd op: WTCB, 2022) (zie bijlage 10a).....	59
Figuur 27: Overzicht basisregels voor het vermijden van koudebruggen	61
Figuur 28: Funderingsaanzet met drainage (gebaseerd op: WTCB, 2022) (zie bijlage 10b)	62
Figuur 29: : Houtskelet.....	66
Figuur 30: Post and beam structuur strobalewand (foto genomen door: Woonder en Architectengroep Barchi)	67
Figuur 31: GREB wand	67
Figuur 32: Lambda waarde stro afhankelijk van halmrichting	69
Figuur 33: Opbouw muren; 1: Load-bearing strobalewand, 2: Post and Beam strobalewand, 3: Houtskelet, 4: GREB, 5: Houtskelet, 6: Massiefbouw wand (gebaseerd op: BAST architects and engineers, 2014)	76
Figuur 34: Vergelijking wandtypes (gebaseerd op: BAST architects and engineers, 2014).....	76
Figuur 35: Impact per materiaal (gebaseerd op: BAST architects and engineers, 2014)	76
Figuur 36: Milieu-impact van twee buitenmuren met een verschillende draagstructuur en isolatie.....	78
Figuur 37: Vergelijking materiaalimpact bij verschillende opbouwen van een wand in TOTEM.....	78
Figuur 38: Impact per indicator TOTEM	80
Figuur 39: Verdeling van de schaduwkosten NIBE	81
Figuur 40: Mogelijke degradaties van een strobalebouw (gebaseerd op: RFCP Réseau français de la construction en paille, 2018)	82
Figuur 41: Vereisten van een dragende stamperde muur (gebaseerd op: Dachverband Lehm e.V., 2014).....	87
Figuur 42: Voortgang erosie na verloop van tijd bij toepassing van traskalk mortel	91
Figuur 43: : Uitvoering stamperde muur met erosie checks	92
Figuur 44: Vergelijking stamperde muur met 1) Nieuwe grondstoffen stamperde, spouwmuur, ETICS en houtskeletwand; 2) Met nieuwe, ex-situ en in-situ grondstoffen	97
Figuur 45: LCA stamperde – proces met input en output. (gebaseerd op: Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., 2019)	98
Figuur 46: Milieu-impact voor verschillende muur opbouwen (Gebaseerd op: Ben-Alon L., Loftness V., Harries K.A. and Cochran Hameen E., 2021).....	99
Figuur 47: Lastendaling plannen en snedes.	109

<i>Figuur 48: Muurvoet stobalen 1: Schroefpalen (zie ook in bijlage 9.1)</i>	111
<i>Figuur 49: Muurvoet stobalen 2: Grindfundering (zie ook in bijlage 9.4)</i>	113
<i>Figuur 50: Structuur opties in stobalenwand</i>	114
<i>Figuur 51: Opbouw standaard Rubble trench</i>	116
<i>Figuur 52: Warmtestroom doorheen muurvoet (stobalenbouw bouwdetail 1: schroefpalenfundering)</i>	123
<i>Figuur 53: Warmtestroom doorheen muurvoet (stobalenbouw bouwdetail 2: grindfundering)</i>	123
<i>Figuur 54: Muurvoet stampaarde 1: Buitenisolatie (zie ook in bijlage 9.9)</i>	124
<i>Figuur 55: Muurvoet stampaarde 2: Binnenisolatie (zie ook in bijlage 9.12)</i>	125
<i>Figuur 56: Warmtestroom doorheen muurvoet (stampaarde bouwdetail 1: buitenisolatie)</i>	132
<i>Figuur 57: Warmtestroom doorheen muurvoet (stampaarde bouwdetail 2: binnenisolatie)</i>	132
<i>Figuur 58: Functionele eenheid methode voor vloer/wand en fundering van muurvoet</i>	138
<i>Figuur 59: Opbouw funderingen in TOTEM (zie bijlage 16.8)</i>	139
<i>Figuur 60: Omkeerbaarheid van materialen: visuele weergave op muurvoeten (zie bijlagen 17.1 tot 17.7))</i>	145
<i>Figuur 61: Levensduur van materialen: visuele weergave op muurvoeten (zie bijlagen 17.1 tot 17.3 en 17.8 tot 17.11))</i>	150

LIJST MET TABELLEN

Tabel 1: Belgische export 2019 (gebaseerd op: OEC) (zie bijlage 1)	17
Tabel 2: Belgische import 2019 (gebaseerd op: OEC) (zie bijlage 2).....	17
Tabel 3: Geologie (zie bijlage 3).....	26
Tabel 4: Totaal bosoppervlakte en totaal landbouwoppervlakte	27
Tabel 5: Aanvaardingscriteria Nibe	39
Tabel 6: Bio-based materialen (zie bijlage 4)	40
Tabel 7: Bio-based producten.....	41
Tabel 8: Hergebruik van materialen (zie bijlage 5).....	44
Tabel 9: Restproducten (zie bijlage 6)	46
Tabel 10: Materiaalpunten TOTEM.....	48
Tabel 11: Membranen (zie bijlage 7).....	50
Tabel 12: Functietabel (zie bijlage 8).....	52
Tabel 13: Vochtgehalte stro (gebaseerd op : RFCP Réseau Français de la Construction en Paille, April 2018)....	68
Tabel 14: Thermische eigenschappen stro (gebaseerd op: Strobouw Nederland, 2019. + Lambda, 2022.)	69
Tabel 15: Brandeigenschappen stro (gebaseerd op: Strobouw Nederland, 2019.)	71
Tabel 16: Observatie brandtest (Gebaseerd op: Laboratoire d'essai au feu, 2018.).....	73
Tabel 17: Materiaalpunten TOTEM	79
Tabel 18: Wandopbouwen in TOTEM analyse	79
Tabel 19: Officiële duurzaamheidsklasse (gebaseerd op: Geldof P., 2007.)	83
Tabel 20: Levensduur hout uitgedrukt in aantal jaren (gebaseerd op: Geldof P., 2007.).....	84
Tabel 21: Gebruiksklassen (gebaseerd op: Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, 2015.).....	84
Tabel 22: Gebruiksklassen gerelateerd aan duurzaamheidsklassen (gebaseerd op: Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, 2015.).....	85
Tabel 23: Verduurzaming hout (gebaseerd op: Van Leemput M).....	85
Tabel 24: Vergelijking minimum breedte stampaarde muur in normen (gebaseerd op: New Zealand Standards, 1998 Dachverband Lehm e.V, 2014; Middleton G.F , 1987.)	88
Tabel 25: Minimum breedte van lijnfundering in stampaarde (gebaseerd op: Southern African development community cooperation in standardization's, 2014.)	90
Tabel 26: Toepassingen van stampaarde (gebaseerd op: Dachverband Lehm e.V., 2014.).....	90
Tabel 27: U-waarde van een stampaarde muur afhankelijk van de dikte (gebaseerd op: New Zealand Standards, 1998.).....	92
Tabel 28: Lambda-waarde van verschillende isolatiematerialen in vergelijking met stampaarde (gebaseerd op: Dickson T. and Pavia S., 2021.).....	93
Tabel 29: Opties voor afwerking stampaarde muur aan binnen-en buitenzijde	94
Tabel 30: CO2 uitstoot van verschillende materialen in vergelijking met stampaarde (gebaseerd op: Ávila F., Puertas E. and Gallego R., 2021.)	95
Tabel 31: Materiaalpunten TOTEM.....	97
Tabel 32: Milieu-impact en embodied energy van 1m ² buitenmuur (gebaseerd op: Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., 2019.).....	98
Tabel 33: Lambda-waarde materialen	110
Tabel 34: U-waarden verschillende opties voor muuropbouw.....	116
Tabel 35: U-waarden vloer afhankelijk van de gebruikte isolatie	117
Tabel 36: U-waardes vloer met hennep isolatie	118
Tabel 37: Lasten.....	119
Tabel 38: Kolommen houtskelet berekening	120
Tabel 39: Berekening op knik van kolommen in houtskelet	120
Tabel 40: Houten rooster berekening.....	121
Tabel 41: Houten verdeelbalk berekening.....	121
Tabel 42: Lijnlasten op dragende muren.....	122
Tabel 43: Minimum funderingsbreedte	122
Tabel 44: Trisco berekeningen – bouwdetails met strobalen.....	123
Tabel 45: Vergelijking van U-waarde en dikte bij isolatiematerialen op stampaarde muur	128
Tabel 46: U-waarde muur stampaarde met verschillende isolatiematerialen	129

<i>Tabel 47: Eisen afmeting fundering volgens normen.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabel 48: Lijnlasten op dragende muren.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabel 49: Minimum funderingsbreedte.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabel 50: Sterkte van een stamperde muur.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabel 51: Trisco berekeningen – bouwdetails met stamperde.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabel 52: Overzicht van de vergelijking van bouwdetails voor de muurvoet (zie bijlage 14).....</i>	<i>140</i>
<i>Tabel 53: Score van de verschillende bouwdetails op basis van kleurencode.....</i>	<i>152</i>

LIJST MET AFKORTINGEN

Lijst met afkortingen

Afkorting	Betekenis
CLT	Cross Laminated Timber
CO ₂	Koolstofdioxide
DPC	Damp Proof Course
EN	Europese norm
EOL	End Of Live / Eind van de levensduur
EPDM	Ethyleen Propyleen Dieen Monomeer
EPS	Geëxpandeerd Polystyreen
ETICS	External Thermal Insulation Composite System
FSC	Forest Stewardship Council
GREB	Groupe de recherches Ecologiques de la Baie in Canada
HSB	Houtskeletbouw
ISO	International Organisation for Standardization
LCA	Life Cycle Assesment / Levenscyclusanalyse
MDF	Medium Density Fibre Board
NBN	Normalisation Belge / Belgische Normalisatie
NEN	Nederlandse Norm
NIBE	Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie
N ₂ O	Distikstofmonoxide
OEC	Observatory of Economic Complexity
OSB	Oriented Strand Board
OVAM	Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij
PE	Polyetheen of polyethyleen
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certifications schemes
PIR	Polyisocyanuraat
POCB	Polyolefinen (PO) met co-polymeer bitumen (CB)
PP	Polypropyleen
PU	Polyurethaan
PUR	Polyurethaan
PVC	Polyvinylchloride
RFCP	Réseau Français de la Construction en Paille
SF ₆	Sulfur Hexafluoride
TOTEM	Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials
TMB	Totale Materiaal Behoeften
TPO	Thermoplastisch Polyolefinen
VIBE	Vlaams Instituut voor Bio-ecologisch Bouwen en wonen
VOC	Volatile Organic Compound
WTCB	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf
XPS	Geëxtrudeerd polystyreen
λ [W/(mK)]	Warmtegeleidingscoëfficiënt
U [W/(m ² K)]	Warmtedoorgangscoefficiënt
R [m ² K/w]	Thermische weerstand
f _{0,2}	Temperatuursfactor
Ψ_e [W/(mK)]	Warmtedoorgangscoefficiënt

1. INLEIDING

1.1. Context

De Belg heeft een baksteen in zijn maag, een gekend gezegde dat nog steeds van toepassing is. In België wordt er tot op de dag van vandaag voornamelijk gebouwd met materialen als beton en baksteen. Dit komt voort uit decennialang onderzoek en praktijkervaringen waaruit de standaardbouwdetails met spouwmuren en betonnen funderingen, zoals we ze nu kennen en bestuderen in de academische en toegepaste wereld, werden gevormd. Naast beton en baksteen worden er ook veel membranen toegepast. Deze methode van bouwen, die bijna vanzelfsprekend is geworden, heeft een enorme impact op het milieu omwille van de grote hoeveelheid CO₂ die wordt uitgestoten. De bouwsector verantwoordelijk voor 40% van het energieverbruik van Europa tegelijkertijd worden we meer en meer geconfronteerd met grondstof schaarste. Het is duidelijk dat er nood is aan een nieuwe visie, een nieuwe methode van bouwen die rekening houdt met de aarde en de mens. Nieuwe concepten als circulair bouwen of gebruik van bio-ecologische materialen treden op de voorgrond en oude bouwtechnieken worden van onder het stof gehaald. Bio-ecologische materialen, die steeds meer op de markt komen en soms al eeuwenoud zijn maar in de vergetelheid raakten, hebben vaak een lagere milieu-impact en creëren een gezonder binnenklimaat. Er is jammer genoeg nog relatief weinig concrete informatie te vinden over deze materialen en hoe ze moeten worden toegepast in de praktijk. Om het idee van bouwen met bio-ecologische materialen concreet te kunnen maken, moeten er standaardbouwdetails gegenereerd worden die een alternatief bieden voor de klassieke Belgische spouwmuur. Dit is een proces van lange adem en zal dan ook niet van de ene op de andere dag gerealiseerd kunnen worden. Om het bouwdetail als volwaardig alternatief te kunnen beschouwen is er nood aan bijkomend onderzoek over het gedrag van de materialen op lange termijn en moeten er ook nieuwe normen geschreven worden.

1.2. Onderzoek

In deze masterproef gaan we op zoek naar een alternatieve detaillering van de muurvoet aan de hand van bio-ecologische materialen. De muurvoet is een kritieke plaats in de gebouwschil waar door het samenkomen van de muur en de vloer zowel problemen met vocht als koudebruggen kunnen optreden. In deze thesis willen we een eerste aanzet geven tot het gebruik van bio-ecologische materialen in de muurvoet en analyseren of ze inderdaad een meer sustainable alternatief bieden. Het kan daarom ook niet beschouwd worden als een absolute waarheid aangezien verder onderzoek op vele vlakken nog in proces is.

Hoofdstuk 2: Introductie tot bio-ecologisch bouwen

Aangezien bio-ecologisch bouwen en bio-ecologische materialen voor veel mensen nog onbekende begrippen zijn, worden eerst enkele definities uitgeschreven. Op deze manier wordt een kader gegeven voor de eerste hoofdstukken van deze thesis.

Hoofdstuk 3: Vooronderzoek

In hoofdstuk drie wordt er een inleidende studie gedaan naar de economische toestand van België op vlak van import en export van materialen. Op deze manier willen we de in België geproduceerde materialen die in grote mate worden geëxporteerd waardoor we niet meer aan de binnenlandse vraag voldoen, uit de scope van ons onderzoek verwijderen. Omdat deze materialen niet meer sustainable te noemen zijn. Daarnaast geeft het ook een eerste idee van de beschikbare grondstoffen in België. Verder bekijken we enkele traditionele bouwmethodes die vandaag de dag niet meer toegepast worden maar een interessant startpunt vormen voor bio-ecologisch bouwen wanneer ze worden aangepast aan de huidige eisen. Hierbij geven we een overzicht van de materialen die bio-ecologisch zijn in België. Het is niet alleen belangrijk om gebruik te maken van materialen met een lage milieu-impact maar er moet

ook gestreefd worden naar materialen met een korte keten. Er werd hiervoor onderzoek gedaan naar de geologische materialen, bio-ecologische materialen, restproducten en membranen. Uit dit onderzoek bekomen we uiteindelijk een functietabel die een lijst van alle goedgekeurde materialen en hun functies toont. Op basis van deze tabel wordt het mogelijk om snel en makkelijk de juiste materialen te selecteren voor de juiste functie.

Hoofdstuk 4: Concepten

Er worden twee bouwmethoden gekozen om te onderzoeken en toe te passen op de muurvoet, namelijk strobalembouw en stampaarde. Aan de hand van een standaardbouwdetail voor een spouwmuur werden de eigenschappen en aandachtspunten gekaderd. De principes van dampopen bouwen worden kort geschetst omdat deze werkwijze meestal wordt toegepast in het bio-ecologisch bouwen. Daarna wordt er voor beide methodes een inleidend onderzoek gedaan naar de bestaande normen en regelgeving om zo een beter idee te krijgen van de mogelijkheden ervan alsook de eisen waar rekening mee dient gehouden te worden. Er werd nagekeken of men via deze bouwmethode kan voldoen aan de huidige Belgische regelgeving. We willen hierbij nogmaals aanhalen dat het onderzoek in deze bouwmethodes nog loopt en dat informatie en aannames die in deze thesis werden gemaakt ondertussen achterhaald kunnen zijn. Extra onderzoek blijft noodzakelijk.

Hoofdstuk 5: Bouwdetails

Via enkele aannames passen we tenslotte het onderzoek van *Hoofdstuk 4: Concepten* toe op het ontwerp van de muurvoet. Hiervoor worden steeds materialen gebruikt uit de vooropgestelde functietabel. Deze bouwdetails worden zowel op stabiliteit als op koudebruggen gecontroleerd. Er worden vier hoofd-details aangeboden met daarop verschillende variaties in materiaalgebruik en opbouw.

Hoofdstuk 6: Vergelijking bouwdetails

Als laatste onderdeel worden deze twee voorgestelde bouwdetails vergeleken met enkele standaardbouwdetails en met elkaar. Op deze manier wordt er gezocht naar de beste oplossing op vlak van levensduur, kost en milieu-impact. Zo kunnen we uiteindelijk de vraag beantwoorden of deze alternatieve vormen werkelijk een milieuvriendelijkere en betaalbare oplossing bieden.

INTRO

De termen ecologisch bouwen en ecologische materialen zijn voor veel mensen nog steeds een vaag en abstract begrip. Ecologisch betekent milieuvriendelijk¹ maar ook deze term gaat niet in op de specifieke eigenschappen en kenmerken. Daarom wordt hieronder een overzicht gegeven van de belangrijkste definities zoals ze gehanteerd zullen worden in deze thesis.

2. INTRODUCTIE TOT BIO-ECOLOGISCH BOUWEN

2.1. Definities

2.1.1. Durable en sustainable

In het Nederlands heeft het woord duurzaam twee verschillende betekenissen namelijk het Engelse sustainable en durable. Doorheen ons onderzoek gebruiken we het woord durable in relatie met de levensduur van het object. Het woord sustainable wordt gebruikt wanneer het object een minimale impact op het milieu heeft. Er wordt dus niet meer over duurzaamheid gesproken.

2.1.2. Ecologische materialen

Voor de term ecologische materialen starten we vanuit de opsomming gegeven door Bica Smaranda en collega's in *"What Characteristics Define Ecological Building Materials"*^{II} aangevuld met extra kenmerken die volgens ons ook thuishoren in deze lijst.

Ecologische bouwmaterialen zijn, in willekeurige volgorde:

- *Gezond voor de gebruiker*
- *Recycleerbaar*
- *Herbruikbaar*
- *Lokale materialen (in deze thesis worden producten uit België beschouwd als lokaal.)*
- *Ze hebben een kleine productie-energie, voorkeur voor natuurlijke materialen*
- *Hoge isolatiewaarden zijn noodzakelijk*
- *Ze hebben eventueel een positief effect op het milieu*
- *Ze hebben lage milieu-impact in LCA*^{III}
- *Het zijn geen zeldzame producten*
- *Het ontginningsproces veroorzaakt geen grote schade aan het milieu*

2.1.3. Ecologisch bouwen

We starten vanuit de 24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen van OVAM^{IV}, de term ecologisch bouwen wordt hier niet gebruikt maar het algemene idee van dit rapport sluit wel nauw aan bij onze gedachte over ecologisch bouwen.

De kenmerken van ecologisch bouwen zijn in willekeurige volgorde:

- *Gebruik van bio-ecologische en duurzame materialen*
- *Omkeerbaarheid*
- *Eenvoud*
- *Hergebruik*
- *Gelaagdheid volgens levensduur*
- *Demonteerbaarheid*
- *Uitbreidbaarheid, veranderlijke functieverdeling en inspelen op functiewijziging*
- *Energiezuinig bouwen*
- *Waterzuinig bouwen*

2.1.4. Bio-based materialen

Bio-based materialen worden beschreven door C-M Popescu in *"Wood as bio-based Building Material"*^V als producten van hernieuwbare bronnen met het criteria dat het product sneller wordt geproduceerd dan dat het wordt ontgonnen. Meestal worden deze materialen ook met weinig energie geproduceerd en doen ze dienst als een CO₂ opslagplaats.

2.1.5. Herbruikbare en gerecycleerde materialen

Herbruikbare materialen zijn materialen die na hun eerste gebruik nogmaals gebruikt worden voor hetzelfde of een ander doel. Op deze manier worden er minder rauwe grondstoffen ontgonnen.^{VI}

In tegenstelling tot herbruikbare materialen zijn er voor gerecycleerde materialen eerst nog fysische en/of chemische processen nodig om het materiaal terug te kunnen toepassen. Hierdoor vormen gerecycleerde producten dus een grotere belasting voor het milieu en gaat onze voorkeur uit naar herbruikbare materialen.^{VII} Daarnaast kan het product tijdens het recyclen ook worden gedowncycled. Dit betekent dat na recyclage het initiële product is gerecycleerd naar een product met een kleinere waarde. Een voorbeeld hiervan is de overgang van houten balken naar papier.

2.1.6. Lokale materialen

Lokale materialen zijn materialen die in de omgeving van de constructiesite worden geproduceerd en/of ontgonnen. Hierdoor worden de transportkosten en de CO₂-productie door het transport tot een minimum beperkt. In deze thesis worden lokale materialen beschouwd als producten die ontgonnen en/of geproduceerd worden in België.

2.1.7. Korte keten materialen

Korte keten materialen zijn materialen met een lokaal en kort productieproces. Zo wordt zowel de lokale economie als ecologie ondersteund. Het wordt gekenmerkt door de nauwe band tussen producent en consument. Door het ontbreken van tussenactoren in de keten verkrijgt men een eerlijk en transparante prijs voor de producten. Daarom worden enkel producten aanvaard die zo weinig mogelijk chemische processen en verbrandingen ondergaan. Daarnaast moet het product ook een lage CO₂-uitstoot hebben. Hierdoor heeft het product een minimale belasting op het milieu.^{VIII}

2.1.8. Bio-ecologisch materialen

De keuze voor bio-ecologische materialen is slechts één van de vier pijlers voor bio-ecologisch bouwen. De andere kenmerken zijn het verbruik van energie, water en ruimte. Naast ecologie is gezondheid een belangrijk punt in het bio-ecologisch bouwen en dus voor bio-ecologische bouwmaterialen.^{IX}

Volgens VIBE is een bio-ecologisch bouw materiaal: *‘Een bouw materiaal dat bestaat uit (quasi) onuitputtelijke natuurlijke basisgrondstoffen, met zo weinig mogelijk of zonder chemische toevoegstoffen, zonder zware milieubelasting en zonder schadelijke gevolgen voor de menselijke gezondheid.’*^X

Er is een duidelijke voorkeur naar hernieuwbare of teelbare materialen en ruim aanwezige mineralen zoals zand, klei, leem, Ook restproducten worden aanvaard als ze niet te schadelijk zijn voor de menselijke gezondheid. Synthetische materialen op basis van fossiele grondstoffen, zeldzame mineralen of restproducten die schadelijke gezondheidseffecten kunnen veroorzaken, worden niet als bio-ecologische bouwmaterialen beschouwd.^{XI}

Bio-based bouwmaterialen zijn een onderdeel van bio-ecologische materialen maar dit laatste omvat een bredere range of producten. Onder bio-based materialen worden enkel materialen van een natuurlijke oorsprong aanvaardt.

2.1.9. Restproducten

Het gebruik van restproducten kan in vraag gesteld worden bij ecologisch bouwen. Omdat restproducten meestal worden verkregen uit heel vervuilende industrieën zoals de staal-, cement- of glasindustrie. We besloten om voor deze thesis toch met restproducten te werken indien ze lokaal geproduceerd worden en een verminderde CO₂-productie hebben tegenover het moedermateriaal.

Hierbij moet worden opgelet dat het restproduct door een stijgende vraag geen hoofdproduct wordt in de productieketen. Indien dit het geval is, zijn natuurlijk alle voordelen voor het gebruiken van een restproduct verdwenen.

EINDNOTEN

^I Van Dale, "*Betekenis ecologisch*."

^{II} Bica Smaranda, Rosiu Liliane, Radoslav Radu. "*What Characteristics Define Ecological Building Materials*.", Roemenië: Timisoara (Departement of Architecture University of Timisoara), 2016.

^{III} Nibe Milieuclassificaties.

^{IV} OVAM, "*24 ontwerprichtlijnen veranderingsgericht bouwen*."

^V Popescu, C.M. , "*Wood as bio-based Building Material*.", Performance of bio-based Building Materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing), 2017.

^{VI} Packhelp. "*Eco eigenschappen Herbruikbaar*."

^{VII} Rotor with Sophie Seys, Lionel Billiet, Maarten Gielen en Michaël Ghyoot. "*De recuperatie van bouwmaterialen uit publieke gebouwen haalbaar maken*.", België: Anderlecht (Rotor), 2016.

^{VIII} West-Vlaanderen, "*BATIC2*."

^{IX} TDS Engineering Adviseurs voor technische installaties, "*Bio-ecologisch bouwen*."

^X VIBE, "*Dossier: Wat is bio-ecologisch bouwen?*", België: Antwerpen, p.5.

^{XI} VIBE, "*Dossier: Wat is bio-ecologisch bouwen?*", België: Antwerpen.

INTRO

In het tweede onderdeel van ons onderzoek gaan we verder in op bio-ecologische materialen. Dit vormt het vooronderzoek dat ons zal helpen bij het definiëren van de materialen die toepasbaar zijn binnen de vooropgestelde scope. Het vooronderzoek omvat allereerst een economiestudie over de productstromen in België. Er wordt gekeken naar de bouwmethodes in Europa en België van vroeger en nu, als een mogelijke bron van inspiratie. Daarna onderzoeken we de beschikbare grondstoffen in de bodem in het onderdeel geologie. Verder wordt er ook een overzicht gemaakt van de bio-based materialen die beschikbaar zijn in België en wordt er een beoordeling over geformuleerd. Hetzelfde wordt gedaan voor de membranen die nodig zullen zijn voor de water- en luchtdichtheid van de bouwdetail. Na het vooronderzoek kunnen we enkele materialen schrappen op basis van de vooropgestelde parameters. Zo kan er uiteindelijk een functietabel worden opgesteld met de goedgekeurde materialen en hun mogelijke functie. Er wordt gebruik gemaakt van TOTEM en Nibe om de milieu-impact van de materialen in kaart te brengen. Beide tools worden gebruikt omdat de score van een materiaal sterk kan verschillen. Dit wordt veroorzaakt doordat beide tools andere wegingsfactoren gebruiken in het berekenen van de schaduwkosten van het materiaal.

3. VOORONDERZOEK

3.1. Economiestudie

Er wordt eerst een klein onderzoek gedaan naar de productiestromen in België. Op deze manier verkrijgen we een idee over de import en export van producten naar of uit België. Als er in België een materiaal in grote hoeveelheden wordt geëxporteerd in die mate dat we niet meer aan de binnenlandse vraag kunnen voldoen en we het product daarom moeten importeren, kunnen we dus niet meer spreken van lokale producten. Bijgevolg zijn deze producten minder sustainable dan initieel gedacht.

Om de productiestromen in Vlaanderen beter te begrijpen kijken we naar de “Totale materiaal behoeften” van Vlaanderen. De TMB is de totale hoeveelheid primaire grondstoffen die een regio ontgint om in te zetten in haar economie (handel en diensten inbegrepen). Zowel de eigen ontgonnen grondstoffen en grondstoffen afkomstig door import worden meegerekend samen met hun verborgen stromen. Verborgene stromen zijn grondstoffen die niet verder worden gebruikt maar wel het milieu belasten. Kortom de TMB geeft aan hoeveel grondstoffen een regio ontgint of importeert en gebruikt voor haar economie en tegelijk de druk op het milieu.^I

Vlaanderen heeft een hoge TMB, dit heeft twee redenen. De eerste is onze grote metaalverwerkende nijverheid die bijna volledig wordt geëxporteerd. Daarnaast zorgt de diamantsector voor een groot aandeel van de TMB doordat deze in dollars wordt uitgedrukt. In Vlaanderen worden zeer veel goederen geïmporteerd hierdoor maakt import gemiddeld 86% van de totale TMB uit. Het Europees gemiddelde is slechts 40%. Dit grote overwicht van geïmporteerde ten opzichte van eigen grondstoffen is karakteristiek voor kleinere gebieden met hoog Bruto Binnenlands Product (BBP) zoals Vlaanderen, en kan verklaard worden door het ontbreken van eigen ontginning van metalen, fossiele brandstoffen en mineralen met grote verborgen stromen.^{II}

Als we dan naar de milieu-impact kijken van de Vlaamse productie blijkt dat het grootste deel (41-52%) afkomstig is voor de intermediaire vraag van Vlaanderen, hierna volgt de impact voor de productie voor export (34-46%). Slechts 11 tot 18% van de milieu-impact wordt geproduceerd voor de productie voor Vlaamse finale vraag. Ook vanuit het finale vraagperspectief blijkt dat het grootste deel van de impact van de Vlaamse productie, 64% tot 73%, afhankelijk van de impact-categorie, toe te wijzen is aan producten bestemd voor export. De rest van de impact is gekoppeld aan producten bestemd voor de Vlaamse finale vraag.^{III}

Hieruit kunnen we reeds afleiden dat Vlaanderen en bij uitbreiding België over weinig natuurlijke grondstoffen bezit. Hierdoor is onze economie zich gaan focussen op het importeren en exporteren van grondstoffen en producten.

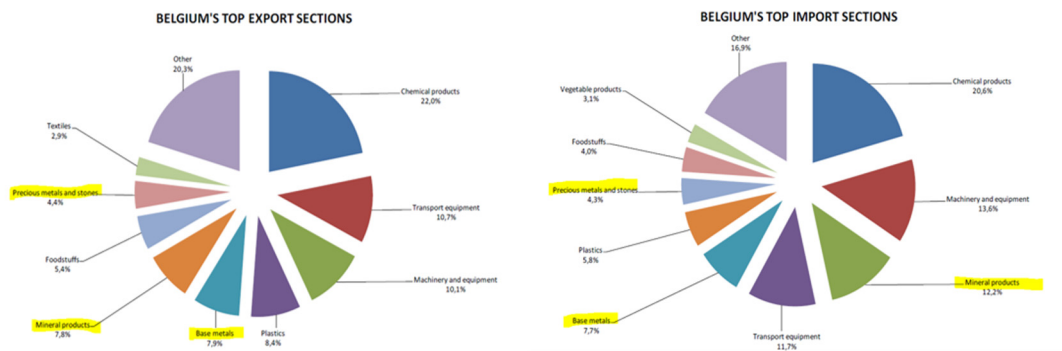
In Vlaanderen zelf worden vier groepen grondstoffen onttrokken: landbouwproducten, uitgravingen, mineralen en als laatste categorie producten van bosbouw, visvangst en jacht. De ontginning van hout leverde tussen 1992-2001 een opbrengst tussen 308 en 335 kiloton. De ontginning van mineralen is goed voor gemiddeld 31% van de eigen grondstoffenextractie. Uitgravingen zijn een belangrijke verborgen stroom die gemiddeld 34% van de totale TMB vormen. Hiervan is 3% afkomstig van uitgravingen voor infrastructuurwerken en 57% wordt toegeschreven aan baggerwerken.^{IV}

Vlaanderen bevat vier groepen primaire delfstoffen: klei en leem; ophoog-, beton- en metselzand; wit zand en grind. Dit wordt verder uitgebreid beschreven in ‘3.3 Geologie van België’.^V

Als we kijken naar meer recente import en exportcijfers van het OEC.^{VI}

“In July 2021, the top exports of Belgium were pharmaceutical products (€7.28 B), Vehicles; other than railway or tramway... (€2.79 B), Natural, cultured pearls; precious, semi-precious stones; (€2.75 B), Mineral fuels, mineral oils and products... (€2.29 B), and Nuclear reactors, boilers, machinery and mechanical... (€1.97 B). In July 2021 the top imports of Belgium were Mineral fuels, mineral oils and products... (€3.71 B), Vehicles; other than railway or tramway... (€3.14 B), Pharmaceutical products (€2.53 B), Nuclear reactors, boilers, machinery and mechanical... (€2.25 B), and Organic chemicals (€2.01 B).”^{VII}

Hieruit kunnen we afleiden dat bouwproducten niet de voornaamste import- en exportgoederen van Vlaanderen zijn. We bekijken dit meer in detail.



Figuur 1: Import en export in België^{VIII}

Uit de taartdiagrammen van figuur 1 valt op dat België 24 748 176,7 kg aan minerale producten invoerde maar slechts 16 846 341,9kg uitvoerde gedurende de periode januari- juni. Deze materialen worden waarschijnlijk in België verwerkt tot (semi-)afgewerkte producten. België heeft een belangrijke metaalverwerkende industrie, een deel van deze mineralen zal hier dus worden gebruikt. Als we naar de cijfers van de base metals kijken, zien we dat er meer base metals worden geëxporteerd dan geïmporteerd (15 654 120,5 kg import, 16 921 038,5 kg export). Een deel van deze base metals zijn geïmporteerde mineralen die in België worden verwerkt tot base metals.

Zoals hierboven werd aangehaald, produceert België zelf hout, cement, zanden, plaaster en stenen. Bij allen zien we dat de import en export niet veel van elkaar verschillen. Bij houtproducten kan de invoer van tropisch hardhout voor de hoge importcijfers zorgen maar hierover vonden we verder geen informatie dus weten we dit niet zeker. De import van cement, zand en plaaster kunnen we niet verklaren.

Via de gegevens van het OEC proberen we een beter inzicht te krijgen in de afzonderlijke producten die worden ingevoerd in België.

Belgische export 2019					
	Subtotaal (10 ⁹ \$)	% van subtotaal	Exportprijs product (€)	Prijs per kg (€/kg)	Export gewicht (10 ³ t)
<i>Mineralen</i>	38,3				
Petroleum (Refined, gas en rauwe)		82,42	35871431818,18	1,67	21522,86
Kolen		5,69	2476443181,82	0,52	4762,39
Zink erts		1,80	783409090,91	0,23	3447,00
Cement		0,58	252431818,18	0,21	1202,06
Grind en steenslag		0,43	187147727,27	0,15	1247,65
Zand		0,33	143625000,00	0,06	2393,75
<i>Metalen</i>	31,8				
Ijzer (gecoat en gewalst, gewalst, structuren, koud-gewalst)		35,62	12871772727,27	0,26	49506,82
Stainless steel		9,32	3367909090,91	1,60	2104,94
Staal		6,30	2276590909,09	0,85	2678,34
Aluminum platen en staven		4,58	1655045454,55	1,45	1141,41
Koper		3,85	1391250000,00	6,50	214,04
Ruwe zink		3,23	1167204545,45	1,50	778,14
<i>Stenen en glas</i>	4,2				
Glasvezels		16,00	763636363,64	1,56	489,51
Veiligheidsglas		9,55	455795454,55	4,25	107,25
Cement		8,64	412363636,36	0,21	1963,64
Float glas		7,23	345068181,82	1,47	235,27
Rotswol		3,97	189477272,73	0,48	396,18
Baksteen		3,85	183750000,00	0,31	600,00
Asfalt		2,38	113590909,09	0,72	158,20
Pleister		2,06	98318181,82	2,64	37,26
Snelbouwstenen		1,35	64431818,18	0,18	368,18
Ongeglazuurde keramiek		1,32	63000000,00	0,31	205,71
<i>Houten producten</i>	2,95				
Houten fiberboard		21,00	703977272,73	1,72	410,25
Gezaagd hout		18,40	616818181,82	3,40	181,42
Ruw hout		14,10	472670454,55	1,35	350,13
Spaanplaat		10,40	348636363,64	3,27	106,65
Multiplex		7,28	244045454,55	4,70	51,92
Schrijnwerk		7,23	242369318,18	7,00	34,62
<i>Diverse</i>	4,35				
Prefab gebouwen		5,27	260505681,82	50000,00	0,01

Tabel 1: Belgische export 2019 (gebaseerd op: OEC ^{IX}) (zie bijlage 1)

Belgische import 2019					
	Subtotaal (10 ⁹ \$)	% van subtotaal	Exportprijs product (€)	Prijs per kg (€/kg)	Export gewicht (10 ³ t)
<i>Mineralen</i>	47,10				
Petroleum (Refined, gas en rauwe)		78,30	41908295454,55	1,67	25144,98
Kolen		5,66	3029386363,64	0,52	5825,71
Zink erts		2,27	1214965909,09	0,23	5345,85
Cement		0,36	192681818,18	0,21	917,53
Grind en steenslag		0,19	101693181,82	0,15	677,95
Zand		0,30	160568181,82	0,06	2676,14
<i>Metalen</i>	27,40				
Ijzer (gecoat en gewalst, gewalst, structuren, koud-gewalst)		29,41	9157204545,45	0,26	35220,02
Koper (ruw en afval)		8,73	2718204545,45	6,50	418,19
Aluminum (ruw, platen en staven)		6,35	1977159090,91	1,45	1363,56
Staal		3,92	1220545454,55	0,85	1435,94
Stainless steel		2,24	697454545,45	1,60	435,91
Ruwe zink		2,21	688113636,36	1,50	458,74
<i>Stenen en glas</i>	4,00				
Glasvezels		8,25	375000000,00	1,56	240,38
Veiligheidsglas		11,30	513636363,64	4,25	120,86
Ongeglazuurde keramiek		7,93	360454545,45	0,31	1176,99
Cement		4,61	209545454,55	0,21	997,84
Snelbouwstenen		3,25	147727272,73	0,18	844,16
Float glas		3,15	143181818,18	1,47	97,62
Rotswol		2,86	130000000,00	0,48	271,82
Baksteen		1,25	56818181,82	0,31	185,53
Asfalt		0,94	42727272,73	0,72	59,51
<i>Houten producten</i>	3,16				
Gezaagd hout		25,00	897727272,73	3,40	264,04
Schrijnwerk		9,43	338622727,27	7,00	48,37
Multiplex		9,20	330363636,36	4,70	70,29
Houten fiberboard		8,76	314563636,36	1,72	183,32
Ruw hout		7,48	268600000,00	1,35	198,96
Spaanplaat		4,65	166977272,73	3,27	51,08
<i>Diverse</i>	7,17				
Prefab gebouwen		1,91	155621590,91	50000,00	0,00

Tabel 2: Belgische import 2019 (gebaseerd op: OEC ^X) (zie bijlage 2)

Omdat deze cijfers worden aangegeven in Amerikaanse dollars zetten we deze om naar kilogrammen om een betere vergelijking te kunnen maken. Voor de omzetting van dollar naar euro werd een wisselkoers van 0,88 gebruikt. De gemiddelde prijs per product geeft enkel een indicatie, deze waarden zijn afkomstig van de sites van verschillende producenten. Deze cijfers zullen dus niet helemaal correct zijn maar zijn zo makkelijker te vergelijken. Dit is te zien in tabel 1 en 2.

Het valt op dat bij de categorie mineralen vooral petroleum en kolen worden verhandeld en dat metaalertsen maar een zeer klein percentage uitmaken van de totale goederenstroom betreffende import en export. Dit komt door de gigantische hoeveelheid petroleum en kolen die worden in- en uitgevoerd, nodig voor energieopwekking en raffinage in andere producten. We kunnen hieruit dus niet concluderen dat België maar weinig metaalertsen in- en uitvoert. Hiervoor zoomen we eerst even dieper in op de metalen waardoor duidelijk wordt dat België veel metaalertsen moet invoeren om de grote metaalexport te verklaren. Deze verklaring kan kloppen aangezien de totale massa van de in- en uitgevoerde metaalertsen vele malen groter is dan die van in- en uitgevoerde metalen. Deze metaalertsen zullen in België dus worden verwerkt tot volwaardige metaalproducten om ze dan te exporteren of te gebruiken in eigen land.

Bij de metalen zien we dat we het percentage voor export groter is dan deze voor import. Als we kijken naar de export van metalen in Europa dan zien we dat België de vijfde plaats inneemt, voorgegaan door Duitsland, Italië, Rusland en Frankrijk. Dit is opvallend aangezien deze landen vele malen groter zijn dan België. Op wereldbasis bekleedt België de negende positie. Bij de import van metalen heeft België de zesde plaats, voorafgegaan door Duitsland, Frankrijk, Italië, Nederland en het Verenigd Koninkrijk. Op wereldbasis bevindt België zich op de dertiende positie. De staal- en ijzerindustrie wordt apart bekeken. Hierbij zien we dat België nog een prominentere plaats inneemt dan bij de metaalindustrie. Voor de export wordt België enkel voorafgegaan door Duitsland en Rusland op Europees vlak en bekleedt het de zesde plaats op wereldniveau. Op importvlak scoort België toch wat lager. Op Europees vlak bekleedt het de vijfde positie na Duitsland, Italië, Frankrijk en Nederland. Op wereldbasis is België de elfde grootste importeur van staal en ijzer. We kunnen dus concluderen dat de Belgische metaalindustrie en zeker de staal- en ijzerindustrie zeer belangrijk is op wereldbasis en dat deze sterk op de export is gericht. Dit is wel niet zo relevant voor de bouwindustrie aangezien deze metalen vooral gebruikt worden voor de metaalindustrie.

Bij stenen en glas zien we dat het percentage voor export groter is dan die voor import. Dit is logisch aangezien België zowel wit zand als klei ter beschikking heeft als grondstoffen, die nodig zijn om deze materialen te produceren.

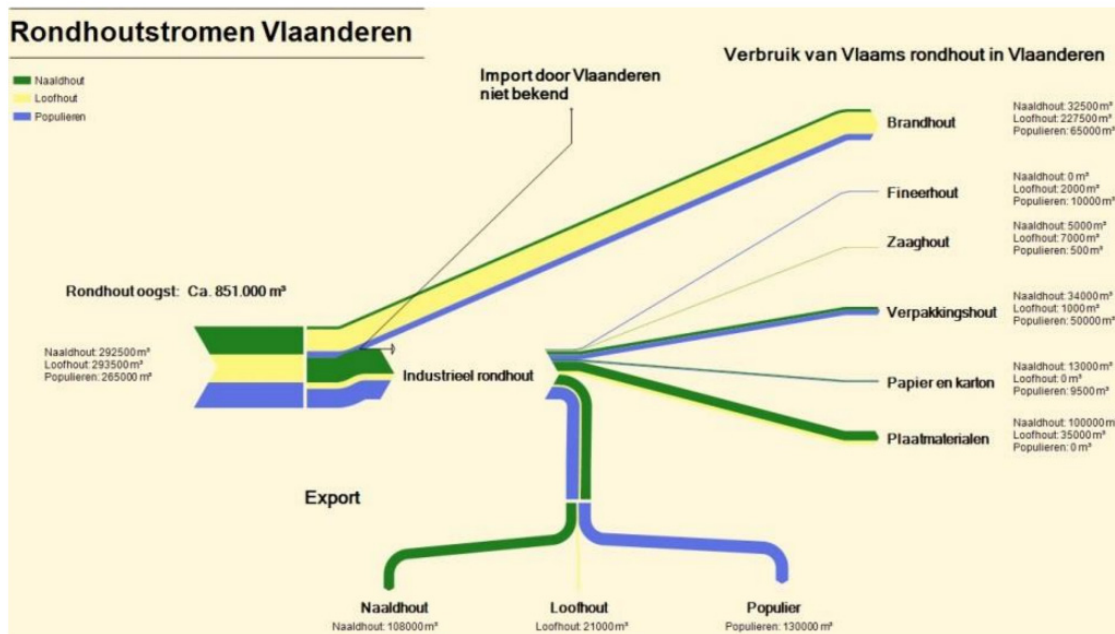
Bij de houtproducten valt op dat houten timmerwerk veel meer wordt geïmporteerd dan geëxporteerd. We hebben hier niet direct een verklaring voor. Daarnaast worden houten vezelplaten meer geëxporteerd dan geïmporteerd. Deze zullen dus waarschijnlijk in België worden geproduceerd. Als we de som van al het geëxporteerde hout en van al het geïmporteerde hout vergelijken zien we dat er veel meer hout wordt geëxporteerd dan geïmporteerd. We kunnen dus concluderen dat we in België lokaal geproduceerd hout gebruiken. Een groot deel van de houtimport is waarschijnlijk afkomstig van tropisch hardhout aangezien deze houtsoort een langere levensduur heeft en extremere omstandigheden aankan. Daarnaast wordt er in België over het algemeen naaldhout gekapt in plaats van loofhout. Naaldhout levert echter minder kwalitatief hout hierdoor zal er in België dus een grotere vraag zijn naar kwalitatief hout.

Als we wat dieper inzoomen op de houtstromen in België dan kunnen we berekenen dat 37% van het naaldhout, 71% van het loofhout en 49% van het populierhout in Vlaanderen wordt geëxporteerd,

zie figuur 2. Dit zijn zeer hoge cijfers maar doordat cijfers over de invoer ontbreken, is het moeilijk om hier meer uit te concluderen.

Uit een artikel van de VRT^{XI} blijkt dat China grote hoeveelheden van het Belgisch loofhout opkoopt en daarna terug invoert tegen een lage prijs. Er wordt dan wel gebruik gemaakt van Belgisch, lokaal hout maar door de transportafstanden van en naar China kunnen we dit hout natuurlijk niet meer sustainable noemen.

Opmerkelijk is dat prefab gebouwen een groot deel uitmaken van de Belgische export.



Figuur 2: Rondhoutstromen in Vlaanderen^{XII}

3.1.1. Conclusie

Een antwoord op de eerder gestelde onderzoeksvraag 'Als er in België een materiaal in grote hoeveelheden wordt geëxporteerd in die mate dat we niet meer aan de binnenlandse vraag kunnen voldoen en we het product daarom moeten importeren, kunnen we dus niet meer spreken van lokale producten. Bijgevolg zijn deze producten minder sustainable dan initieel gedacht.' is niet eenduidig te geven. We kunnen concluderen dat materialen zoals stenen en glas in België gedolven en geproduceerd worden. Deze materialen zijn bijgevolg dus sustainable. Voor houten producten is het antwoord complexer, er is waarschijnlijk wel genoeg lokaal Belgisch hout maar door de tussenkomst van China is dit niet meer sustainable te noemen. Bij het gebruik van houtproducten moet dus bijzondere aandacht worden gegeven aan de producenten. Mineralen en ertsen worden duidelijk ingevoerd en uitgevoerd op vergelijkbare basis, maar deze materialen zijn niet te vinden in België en moeten dus vanbuiten worden geïmporteerd.

3.2. Bouwen doorheen de tijd

Aangezien bio-based en lokale materialen vaak gebruikt werden in bouwmethodes die enkele decennia geleden de norm waren, is het interessant om deze ook te betrekken in ons onderzoek. Het kan niet alleen een bron van inspiratie zijn maar ook duidelijkheid brengen in de do's en de don'ts van het bio-ecologisch bouwen in België. Hiervoor maken we eerst een analyse van wat er in de wereld gebeurde op vlak van bouwen, daaruit worden conclusies gemaakt waarom bepaalde producten geen toepassing kennen in België omwille van klimaat, milieu-impact, kosten etc. Daarna wordt er verder ingegaan op de geschiedenis van België en waarom bepaalde methodes vervangen werden of juist terug hun toepassing vinden in de hedendaagse bouwsector.

3.2.1. Bouwmethodes in de wereld

Over heel de wereld worden er verschillende methodes gezocht voor het maken van een verblijfplaats voor de mens. Vroeger werd dit meestal gedaan aan de hand van materialen die lokaal te vinden waren en zorgde dit voor eenvoudige constructies. Die bouwmethodes verschillen daarom van plaats tot plaats en zullen dan ook niet overal toepasbaar zijn. Naast het feit dat de materialiteit enorm verschilt, kunnen we de huidige comfort- en bouwnormen niet vergeten, ook deze zijn soms zeer uiteenlopend en leiden tot een grote verscheidenheid aan constructies. In sommige landen zijn de normen niet hetzelfde zijn als in België. Daarom kan het zijn dat een bepaalde methode nog steeds uitgevoerd wordt in het desbetreffende land maar in België als absoluut onaanvaardbaar wordt beschouwd. Toch mogen we ook deze bouwwijzen niet vergeten, ook al voldoen ze niet aan de normen, we kunnen ze via de nodige aanpassingen toch gebruiken in België.

Eén van de oudste, bestaande bouwmethodes die wereldwijd gebruikt wordt tot op de dag van vandaag, zijn de adobe huizen. Adobe is een mix van aarde, water en een organisch product zoals stro, dat laatste zorgt ervoor dat er bij het drogen van de mix geen scheuren ontstaan. Adobe huizen worden opgebouwd uit adobe bakstenen die in tegenstelling tot bakstenen die we in België kennen, drogen aan de lucht. Ze worden aan elkaar verbonden door een adobe mengsel dat fungeert als mortel. Bijkomend worden de binnen- en buitenmuren vaak afgewerkt met een pleisterlaag (een mix van klei, zand, water en stro)^{xiii} als bescherming tegen regen, deze moet regelmatig vervangen worden. Dit type van constructie is echter enkel bruikbaar voor laagbouw omwille van het lage draagvermogen en zou in België mogelijks voor problemen kunnen zorgen vanwege het regenachtige klimaat. Een oplossing is het gebruik van een overkapping en een sokkel. Regelmatig onderhoud is nodig maar dit is niet altijd economisch voordelig.^{xiv} Tenslotte is deze constructie ook gevoelig aan seismische activiteit en kan hierdoor enorme schade ondervinden. Dit laatste vormt geen groot probleem in België.

Hieraan verwant zijn de constructies gemaakt uit cob, dit is een mix van kleiige grond, water, zand en stro. In tegenstelling tot adobe, kan cob gebruikt worden in zeer koude en regenachtige klimaten omdat het bestand is tegen hevige regenval. Bijkomend kan een kalk-zand pleister worden toegepast op de buitengevel als een extra winddichting van de muur.^{xv} De opbouw van deze muren gebeurt net zoals bij stampaarde in lagen. Na het plaatsen van een laag moet deze eerst uitdrogen vooraleer hierop een nieuwe laag gevormd kan worden. De vorm van de muur moet versmallen naar boven toe omwille van stabiliteit en vergt een dikte van minimum 30cm. Cob muren hebben een lager draagvermogen dan adobe muren en kunnen gebruikt worden in laagbouw constructies. Ook voor deze techniek moet een overkapping en een sokkel toegepast te worden.^{xvi}

Een tweede methode die ook al een tijdje meegaat maar vandaag de dag minder frequent wordt gebruikt, is het droog stapelen van stenen zonder mortel. Deze muren worden opgebouwd uit stenen die lokaal te vinden zijn en kunnen na afbraak opnieuw gebruikt worden aangezien er geen bindmiddel aanwezig is. Een mogelijk struikelpunt is de sterkte van deze muren, deze is afhankelijk van de correcte

stapeling van de stenen. Daarnaast moet de muur moet versmallen naar boven toe.^{xvii} Toch zijn er nog steeds onzekerheden over de effectieve sterkte van deze muren aangezien dit niet direct berekenbaar is. Daarnaast werkt het uitzicht van een los gestapelde muur vaak niet positief op het vertrouwen van de mens in de stevigheid van de constructie. Er zijn hierover wel al enkele onderzoeken aan de gang, met name het creëren van een algoritme voor de juiste plaatsing van de stenen, dit valt onder de naam “Cyclopean Masonry”.

Een derde opbouw kan gevonden worden in de “Wattle and Daub” methode, ook deze is eeuwenoud. Deze constructie wordt opgebouwd door een algemene dragende houtconstructie met daartussen een opvulling van verticale houten stokken waarin horizontale takken worden geweven. Deze primaire constructie wordt dan opgevuld en bedekt langs beide kanten met klei of modder.^{xviii} De laag klei droogt uit aan de lucht en wordt later bedekt met een soort kalkpleister gemaakt van zand, kalk en versterkt met dierenharen of plantvezels als extra bescherming.^{xix} De muren moeten net zoals de adobe muren beschermd worden en regelmatig onderhouden.

In Azië wordt bamboe frequent gebruikt voor het bouwen van allerlei soorten constructies. In dit gebied is er een grote voorraad aan bamboe en wordt dit materiaal vaak toegepast. Bamboe is net zoals hout een sterk materiaal met een goed draagvermogen en absorbeert daarnaast ook een grote hoeveelheid CO₂ tijdens zijn levensduur. Bamboe is een graag gezien product omwille van zijn snelle groeitijd. Maar er zijn natuurlijk ook enkele zaken waar rekening mee moet worden gehouden bij het gebruik van bamboe, zo moet het ten alle tijden drooggehouden worden, beschermd worden tegen insecten en vergt het enkele bewerkingen vooraleer het effectief bruikbaar is. Het grootste probleem bij de toepassing van dit product in België is het transport, dit brengt een grote milieu-impact met zich mee waardoor het minder interessant wordt.

Een volgende bouwmethode die nog een relatief nieuw karakter heeft, is de kalkhennepbouw. Deze vindt zijn oorsprong in Frankrijk waar het gebruikt werd voor de renovatie en herstelling van oude vakwerkhuisen. Deze waren na verloop van tijd gerenoveerd zonder het juiste resultaat. Ze vervingen de oorspronkelijk, dampopen opvullingen opgebouwd uit stro en leem met een nieuwe cementmortel die niet dezelfde dampopen eigenschap had. Daarom besloten ze deze opvullingen te vervangen door een kalkhennepmix die wel voldeed aan de noden van een vakwerkhuis.^{xx} De mix bestaat hierbij uit kalk, hennepvezels en enkele additieven.

Een laatste methode is de strobalenbouw die al een rijke geschiedenis achter zich heeft. Strobalenbouw vindt zijn grootste toepassing in de thermische isolatie van een houtskeletbouw, hoewel het ook een dragende functie kan hebben. In vele landen waaronder ook Frankrijk en Duitsland wordt deze methode nog steeds rijkelijk uitgevoerd en werd er al een regelgeving rond gevormd, in België staat het daarentegen nog in zijn kinderschoenen.

3.2.2. Bouwmethodes in België

Een voorbeeld uit België zijn de vakwerkhuisen, zoals degene die nu nog te bezichtigen zijn in het park Bokrijk of in de provincies Limburg en Luik. Deze constructies zijn een vorm van ‘Wattle and daub’, waarbij de daub een mengsel is van stro (of vlas of koeharen) en leem of gewoon klei. De houten constructie en invulpanelen met geweven houten takken, vaak wilgen, werd ook hier gebruikt. De leemlaag bestond uit verschillende lagen waarbij de hoeveelheid stro steeds verminderde. Daarnaast werkte men de buitenkant af met een leemlaag waar kalk en paardenurine aan werd toegevoegd om het waterafstotend te maken. Deze laag moet ook af en toe vervangen worden. In se is een constructie als deze volledig recyclebaar omwille van de natuurlijke producten die worden gebruikt.^{xxi} Daarnaast is deze opbouw ook herbruikbaar aangezien het gemakkelijk kan afgebroken worden en terug opgebouwd worden. Later werd de invulling soms ook vervangen door bakstenen.^{xxii}

Een variant op de adobe is de techniek op basis van stampleem, die in België onderzocht wordt en in praktijk wordt omgezet door het bedrijf BC Materials. Ze maken gebruik van grondverzet uit de Brusselse werven. Hierdoor krijgen hun producten een korte keten karakter aangezien ze vooral in en rond Brussel projecten neerzetten. Een andere optie die door hen wordt voorzien zijn leemstenen die een alternatief kunnen bieden voor de klassieke bakstenen, leemstenen moeten wel voldoende bescherming tegen water krijgen.^{XXIII}

Tegenwoordig worden er in België ook steeds meer ecologische of duurzame gebouwen neergezet, al wordt dit meestal niet volledig doorgetrokken. Zo wordt er meer rekening gehouden met demonteerbaar bouwen, krijgt het gebruik van na-groeibare materialen meer belang, experimenteert men met nieuwe (dampopen) opbouwen voor vloeren en wanden en gaat men over naar energie neutrale of energiezuinige woningen. Enkele voorbeelden hiervan zijn te bekijken op de website van Ecobouwers.^{XXIV}

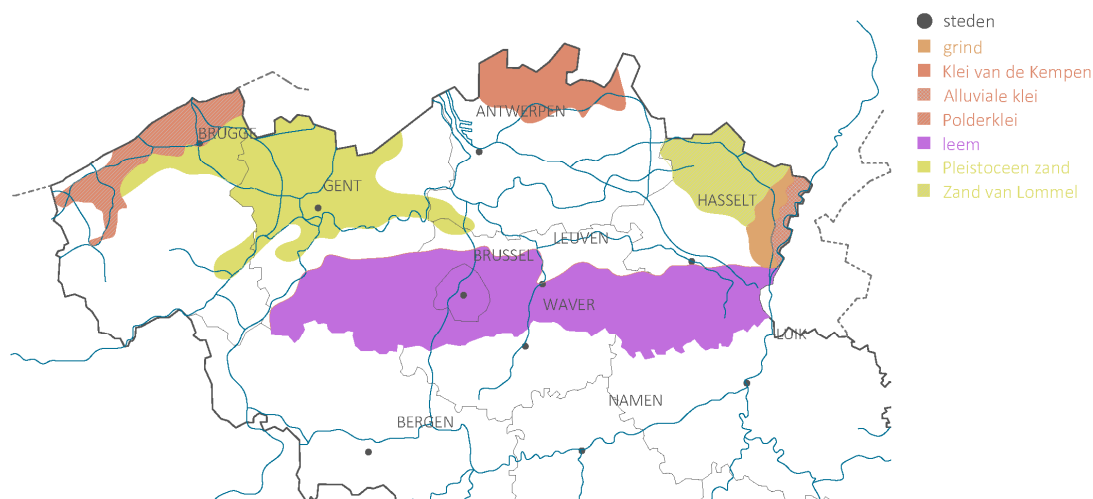
3.2.3. Conclusie

Er zijn vier methodes die mogelijk hun toepassing kunnen vinden in België. Het gaat hier dan om de Cob huizen, 'Wattle and daub' of vakwerkhuisen, los gestapelde stenen muren en strobalembouw. Deze methodes kunnen mits onderhoud, aanpassingen in het ontwerp en verder onderzoek toegepast worden binnen onze lokale context en een alternatief bieden ten opzichte van de heersende, conservatieve bouwmethodes.

3.3. Geologie van België

Om een beter beeld te verkrijgen van de geologische grondstoffen die verkrijgbaar zijn in België is het interessant om enkele bodemkaarten te analyseren. In onze thesis focussen we op het gehele Belgische grondgebied.

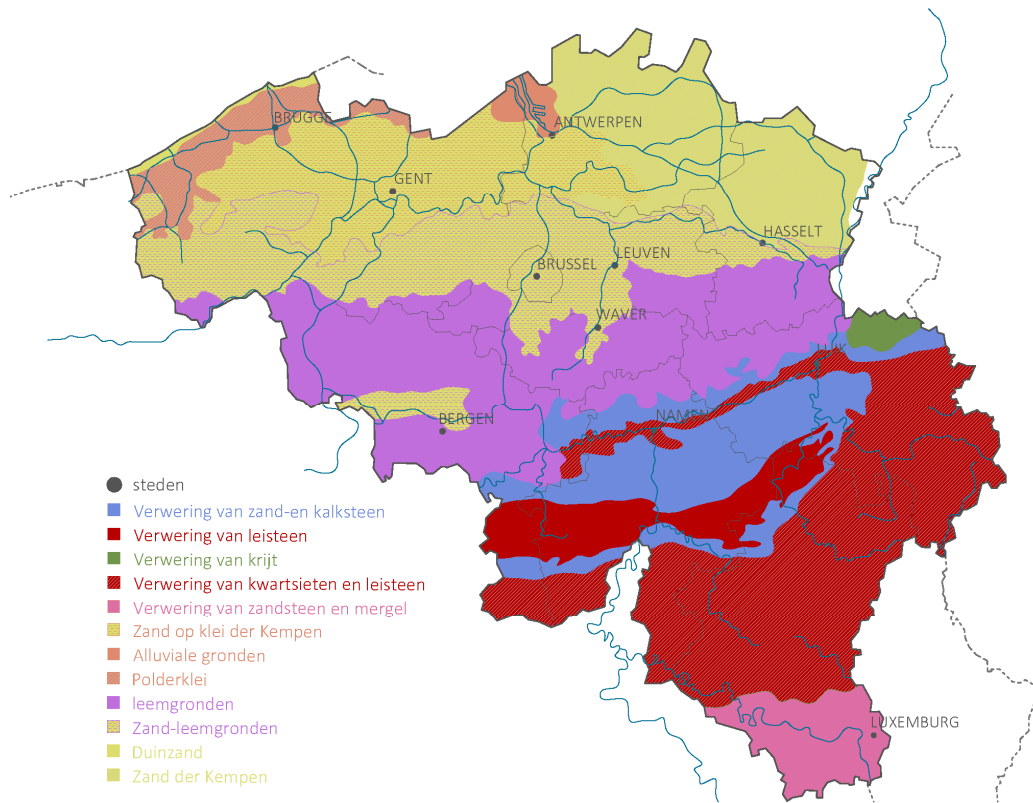
Als we kijken naar Vlaanderen in figuur 3, zijn er vier quartaire delfstoffen te vinden, dit zijn losse gesteenten die dicht bij het oppervlak te vinden zijn: leem, zand, grind en verschillende soorten klei. Het valt op dat klei de voornaamste delfstof is, te vinden in bijna alle provincies. Er bestaan verschillende samenstellingen van klei, zo beschikt België over Alluviale klei, Polderklei, Kempense klei etc. Maar ook zand heeft een belangrijke omvang, dit wordt voornamelijk gedolven in West-Vlaanderen, Oost-Vlaanderen en Limburg. Ten slotte vinden we ook leem in Vlaams-Brabant, en Zuid-Limburg en grind in het noorden van Limburg.^{xxv}



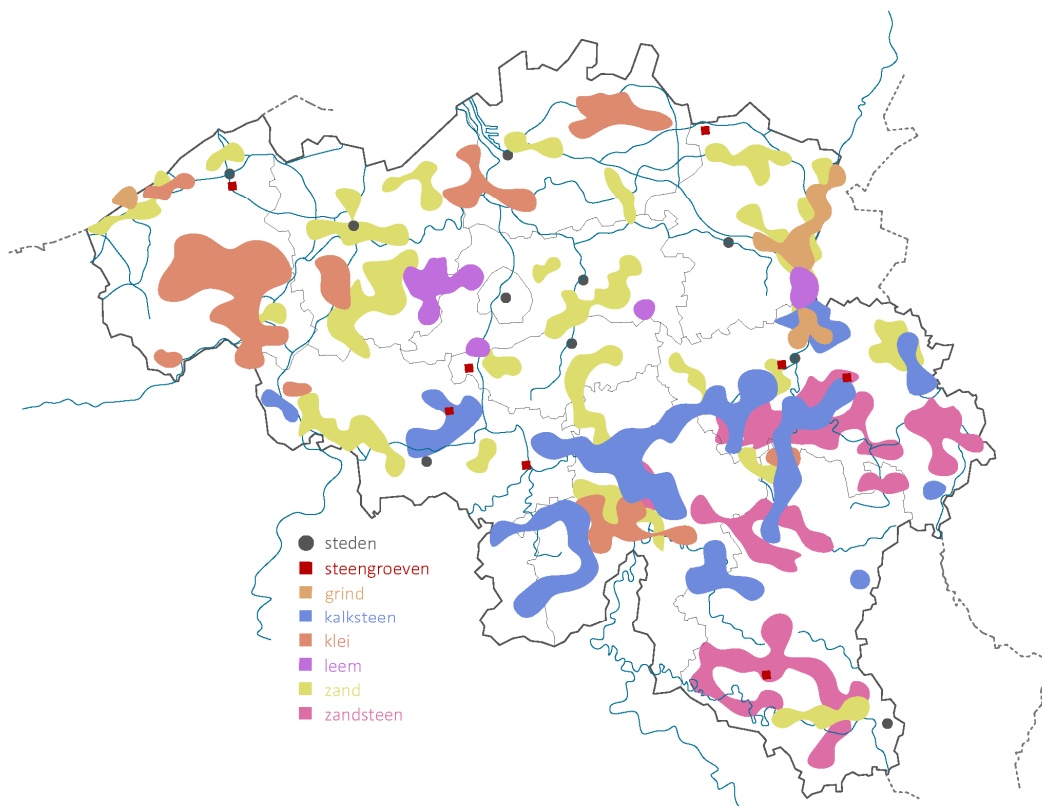
Figuur 3: Quartaire delfstoffen in Vlaanderen (gebaseerd op: Cartogis UGent)^{xxvi}

De toepassingen van deze grondstoffen zijn zeer traditioneel. Klei wordt voornamelijk gebruikt voor het maken van bakstenen en dakpannen. Terwijl zand zijn toepassing vindt in beton, metselwerk en glas. Naast deze voor de hand liggende toepassingen kunnen zand en klei ook gebruikt worden in de productie van isolatie.^{xxvii} Klei komt hierbij voor in de vorm van geëxpandeerde kleikorrels.^{xxviii} Zand krijgt dan weer de functie van bodemafluiting bij bouwen met kruipruimtes door zijn capillaire werking en soortelijk gewicht.^{xxix}

Naast losse gesteenten, vinden we uiteraard ook vaste gesteenten terug in ons land. Deze bevinden zich voor het grootste deel in Wallonië. Zo onderscheiden we in figuur 4 van noord naar zuid zand- en kalksteen, leisteen en krijt, kwartsiet en zandsteen en mergel. Ook verschillende soorten natuursteen kunnen teruggevonden worden in onze bodem. Tegelijk zien we dat er in Vlaanderen en Midden-België een grote aanwezigheid is van zand en leem en klei langs de oevers van de grote rivieren.



Figuur 4: Grondsoorten in België (gebaseerd op: De Roeck, M en Timont, J., 1956)^{xxx}



Figuur 5: Steengroeven in België (gebaseerd op: Goemans, A, Vanderhallen D)^{xxxi}

Dit kan worden afgeleid uit de steengroeven in ons land zoals aangeduid op figuur 5. De grootste openluchtsteengroeve van Europa bevindt zich in Quenast in Wallonië, hier wordt porfier, een natuursteen, gedolven. Deze wordt gebruikt voor kasseien, ballast of steengruis.^{xxxii} In Henegouwen wordt blauwe steen ontgonnen bij de steengroeve Carrières de Hainaut.^{xxxiii} Natuursteen en zandsteen wordt gehaald uit de steengroeve Carrières de Rochettes in de provincie Luxemburg.^{xxxiv} In Vlaanderen bevinden zich verschillende groeven met zandontginning, zoals zeezand uit Brugge of witzand uit Lommel. Kalksteen kan daarnaast ook op enkele locaties gevonden worden zoals Monceau-sur-Sambre, Cimescaut matériaux, Engis etc. Tenslotte vinden we zandsteen in de regio van Lustin.^{xxxv}

Op de kaart in figuur 5 wordt er een overzicht gegeven over de aanwezigheid van steengroeven in België, de voornaamste gesteenten of grondstoffen zijn: zand en klei in Vlaanderen en kalksteen en zandsteen in Wallonië.

In tabel 3 wordt een overzicht gegeven van de beschikbare geologische grondstoffen in België. Door de materialen aan verschillende criteria te laten voldoen, zoeken we uit welke van de bovenstaande, materialen sustainable zijn en welke niet. Er wordt gekeken naar de regio van ontginning, de steengroeven die opereren en de afstand ten opzichte van onze theoretische bouwplaats. Tegelijk wordt bekeken of de grondstoffen schaars zijn in de Belgische ondergrond en steengroeven. Zo is het bijvoorbeeld interessanter, als deze keuze bestaat, om een grondstof te gebruiken die dichtbij de werf gedolven wordt maar ook op meerdere plaatsen voorkomt om uitputting van een enkele bron te voorkomen. Wanneer dit niet het geval is, moet overwogen worden om het materiaal enkel voor kleinere toepassingen aan te wenden. Zo is leisteen nog in grote mate aanwezig in de Waalse Ardennen maar wordt deze nog slechts in één steengroeve ontgonnen nadat de meeste steengroeven hun deuren sloten in de periode na 1960.^{xxxvi} Kalksteen, waaronder ook blauwe hardsteen behoort, wordt daarentegen momenteel in verschillende groeven ontgonnen.

De conclusie die in deze tabel 3 naar voor komt, is een aanzet en werd gebaseerd op een inleidend onderzoek. Verder gedetailleerd onderzoek per grondstof kan nog aanleiding geven tot verdere nuances of diepere inzichten. Dit is echter geen onderdeel meer van deze thesis en daarom wordt er op basis van deze uitkomsten verder gewerkt.

Geologie						
Grondstof	Regio in België	Steengroeve	Afstand tot Brussel	Schaars	Ecologie	
					Ecologisch in België	Aanbod in België
Leem	Midden	Quenast +Brussel	25 km	nee	x	x
Zand	Noord-West-Midden	Quenast + Brugge + Lommel	25 -110 km	nee	x	x
Grind	Limburg-Midden	Quenast + Rochettes + Maasmechelen	115-150 km	nee	x	x
Klei	Kust-Noord-Midden	Quenast + Beerse + Kortemark +Rumst	25-100 km	nee	x	x
Natuursteen						
Zandsteen	Zuid-Midden	Lustin + Rochettes + Quenast + Bierghes	25-150 km	nee	x	x
Kalksteen	Midden-Zuid	Antoing + Monceau-sur-sambre + Quenast	25-85 km	nee	x	x
Blauwe steen	Zuid	Hainaut + Ouffet +Sprimont	50-120 km	nee	x	x
Krijt	Midden	Haccourt	110 km	nee	x	x
Porfier	Midden	Quenast + Lessines +Bierghes	25-60 km	nee	x	x
Leisteen	Midden	Herbeumont	160 km	nee	x	x

Tabel 3: Geologie (zie bijlage 3)

3.4. Bio-based materialen in België

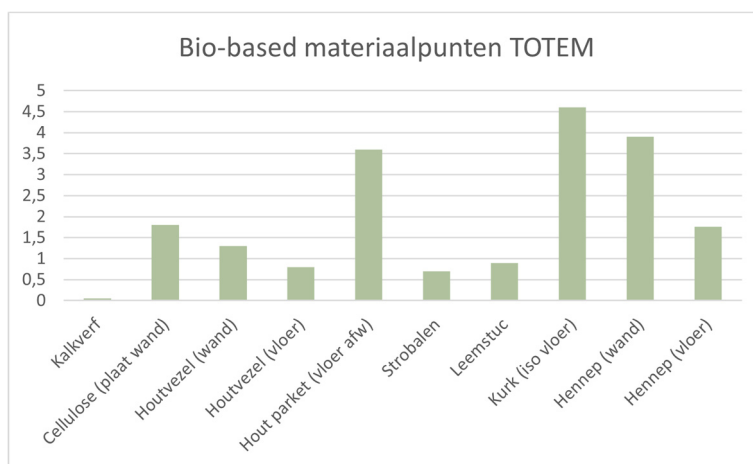
In de definitie van bio-ecologische materialen worden niet alleen natuurlijke grondstoffen meegenomen maar ook nagroeibare bio-based materialen. Omdat we in een lokale context werken, onderzoeken we het aanbod ervan in België en de toepassingen ervan.

Allereerst geven we enkele indicatieve waarden over het grondgebruik in België om zo een idee te krijgen van de hoeveelheid natuurlijke, beschikbare producten. Er valt op dat er voornamelijk gefocust wordt op landbouw. Tegelijk is er een relatief groot oppervlakte bezet met bossen, wat de mogelijkheid biedt om via duurzaam bosbeheer meer in te zetten op houtbouw. Ook tarwe en gras blijken interessante gewassen om verder te exploiteren. Dit is te zien in tabel 4.

Grondgebruik België		
	Oppervlakte (hectare)	Procent België (%)
België	3 068 800	100
Landbouwgrond oppervlakte	1 644 399	5400%
Bosoppervlakte	605 361	2000%
Vlasareaal	14 000-16 000	1%
Tarwe	59 700	2%
Gerst	16 300	1%
Grasland	234 000	8%

Tabel 4: Totaal bosoppervlakte en totaal landbouwoppervlakte^{xxxvii}

Verder onderzoeken we de behandelde materialen ook via Nibe en TOTEM. Hieruit kunnen we bepaalde materialen uitsluiten door hun slechte milieu-impact. Bij TOTEM passen we als functionele eenheid telkens dezelfde dikte toe, TOTEM en Nibe werden geraadpleegd in December 2021. In figuur 6 worden alle onderzochte materialen getoond met hun materiaalpunten in TOTEM.



Figuur 6: Bio-based materiaalpunten per m² TOTEM

3.4.1. Hennep

De hennepplant wint steeds meer belang in de bouwwereld door zijn zeer korte groeicyclus en bijgevolg onuitputtelijkheid. Hennep groeit sneller dan hout en kan het tot vier meter hoog worden. Daarnaast absorbeert het een grote hoeveelheid CO₂ waardoor het een positieve milieu-impact krijgt. Zo verwijdert één ton hennep 1,62 ton CO₂ uit de lucht.^{xxxviii} Recent zijn er in België enkele hennepplantages opgestart om de oogst te gebruiken als isolatiemateriaal. Een hennepplantage zorgt voor een goede luchtzuivering van de omgeving. Voorbeelden hiervan zijn te vinden in Molenbeek door de ontwikkelaar Revive^{xxxix}, in Turnhout door Jeni Real Estate^{xl} ook in Bokrijk wordt er hennep geteeld.

Door de lokale productie en de lage productie-energie is de milieu-impact van henneproducten zeer klein. Het isolatiemateriaal is te zien in figuur 7.

Wanneer we hennep in toepassing van wand- of vloerisolatie vergelijken in TOTEM, scoort voornamelijk de vloertoepassing zeer positief. Als vloerisolatie worden er hennepblokken gebruikt met een hoge drukvastheid, deze kunnen op een betonnen vloerplaat of een drainerende laag worden geplaatst.^{XLII}

Hennep wordt vaak in combinatie met kalk gebruikt, het wordt dan kalkhennep genoemd. Kalkhennep is een product dat isolerend werkt en naast een vochtregulerende functie ook goede akoestische eigenschappen bezit. Voor kalkhennep worden de hennepvezels uit de stengels gemengd met een bindmiddel op basis van kalk waaraan ook enkele additieven worden toegevoegd.^{XLIII} Ze zijn verkrijgbaar in granulaatvorm of blokken, ideaal als vloerisolatie, als stucwand, in prefab blokken en het kan in zijn natte mengvorm ook gespoten of gegoten worden.^{XLIII} Doordat er nagenoeg geen chemische additieven nodig zijn, kan het product na gebruik ook hergebruikt worden.

De in-situ gespoten of gegoten toepassing vraagt wel enkele aandachtspunten. Doordat kalkhennep een vochtregulerende werking heeft, biedt het een voordeel aan het binnenklimaat, voornamelijk in de toepassing van renovaties, maar heeft het nood aan een afwerking met een dampopen kalk-of leempleister. Daarnaast moet er ook rekening worden gehouden met de lange uitdrogingstermijn, die gewaarborgd moet worden om een gezond binnenklimaat te garanderen.



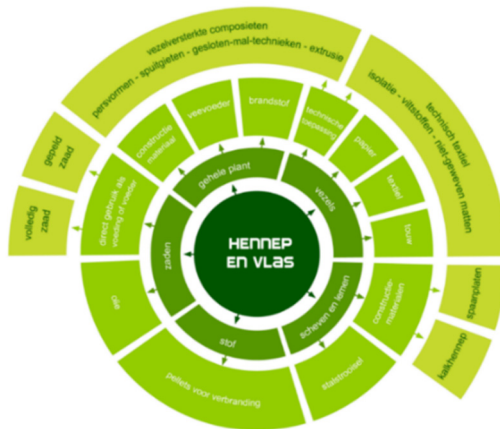
Figuur 7: Hennep blok^{XLIV}

3.4.2. Vlas

Vlas wordt in België in grote hoeveelheden geproduceerd voornamelijk in West-Vlaanderen. Er zijn in België 50 vlasbedrijven actief met een oppervlakte van ongeveer 15000-16000 hectare.^{XLV} Samen met Frankrijk zijn ze goed voor 80% van de wereldproductie.^{XLVI} Vlas vindt vele toepassingen van textiel en touw tot linoleum en isolatie, zoals zichtbaar in figuur 8. Net zoals hennep neemt vlas een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ in zich op, het gaat hier om zeven ton CO₂ per hectare vlas, dit is iets minder dan hennep dat tien ton per hectare opneemt. Er kan gesteld worden dat vlas en hennep evenveel CO₂ uit de lucht halen tijdens één groeicyclus van ongeveer vier tot vijf maanden als één hectare bos gedurende een jaar.^{XLVII} Vlas verbruikt meer energie tijdens zijn productie dan hennep volgens figuur 10. De toepassing in de bouwsector is isolatie, voornamelijk als vlaswol, vlaswolvlokken of platen. Het isolatiemateriaal is te zien in figuur 9.

Vlaswol is een restproduct van de linnenindustrie en gebruikt de overgebleven korte vezels tijdens de productie van vlas tot linnen.^{XLVIII} Uiteindelijk is de CO₂ uitstoot tijdens de productie van vlas beperkt maar er moet wel rekening gehouden worden met de toevoeging van boorzouten. Deze stoffen zijn nodig om de isolatie brandwerend en schimmelbestendig te maken, de impact hiervan is beperkt op de totale impact van vlas isolatie. Vlas heeft niet alleen goed isolatiewaarden maar is tevens een goede akoestische isolator en heeft een vochtregulerend effect. In Nibe behoort het isolatieproduct tot milieuklasse 1A (wand) of 2C (vloer), wat wijst op een zeer goede optie voor beide toepassing.

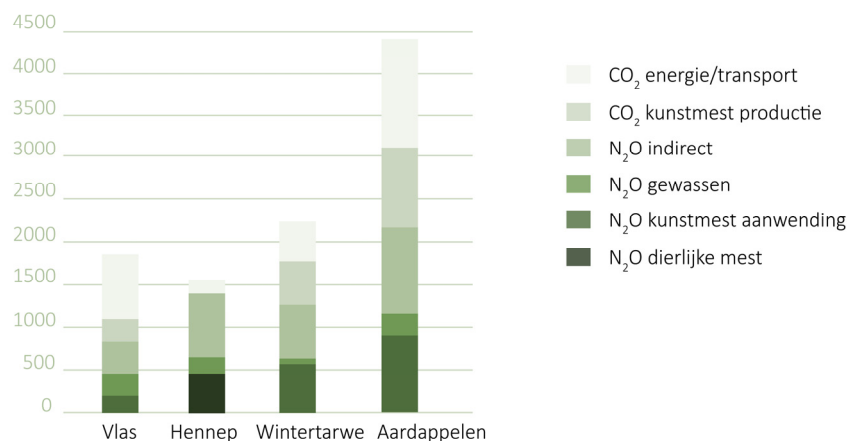
De vlaszaden kunnen ook benut worden wanneer ze geperst worden tot lijnzaadolie. Deze olie wordt gebruikt als verf, vernis of als behandeling van een stampoem vloer.^{XLIX} Door het ademende vermogen van de verf reguleert het de vochtthuishouding en onderdrukt het schimmelvorming.^L Ook houtproducten kunnen hiermee behandeld worden. De verf is een milieuvriendelijkere oplossing dan de chemische varianten.^{LI} Tenslotte is lijnzaadolie ook de belangrijkste component van linoleum, een vloerbedekking. Linoleum is een mengeling van enkele natuurlijke stoffen zoals houtmeel, dennenhars, jute en kalksteen.^{LII} Het biedt een alternatieve duurzame optie naast houten of stenen vloeren.



Figuur 8: Toepassingen van vlas en hennep^{LIII}



Figuur 9: Vlas isolatie matten^{LIV}



Figuur 10: Emissie van broeikasgassen in kg CO₂-eq/ha (gebaseerd op: Leendertse P. et al.)^{LV}

3.4.3. Gras

Een nieuw product is grasisolatie, dit worden gemaakt op basis van de eerste en tweede snede van gras waarbij de derde snede bewaard wordt voor dierenvoeding. De grasvezels worden omgezet tot grasisolatieplaten.^{LVI} Het product is te zien in figuur 11. In België is er 234 000 ha grasland beschikbaar, waardoor de mogelijkheden van dit product aanzienlijk zijn. Dat grasland dient echter ook andere functies. Momenteel is er één producent van grasisolatie, Gramitherm, actief in België. Voor de productie van 200m³ isolatie is één hectare weidegras nodig. Dit lijkt veel maar gras groeit overal en is nagroeibaar met een enorm korte groeicyclus. Het is een natuurlijk product dat CO₂ absorbeert (één kg Gramitherm absorbeert 1,5kg CO₂) en helemaal gecomposteerd kan worden. De brandwerendheid en de weerstand tegen schimmels wordt gegarandeerd door de toevoeging van minerale zouten.^{LVII}



Figuur 11: Grasisolatie^{LVIII}



Figuur 12: Zeegras^{LIX}

3.4.4. Zeegras

In Duitsland werd Neptutherm ontwikkeld. Dit is een natuurlijk isolatiemateriaal gemaakt uit dode vezels afkomstig uit de Middellandse zee. Het zeegras moet bijgevolg een aanzienlijke afstand afleggen tot de plaats van productie waardoor het niet langer als een korte keten kan beschouwd worden. De dode vezels worden Neptunus-ballen genoemd en bestaan uit zeegrasbladen van de Posidoniaplant. De ballen zijn te zien in figuur 12. Het product vergt verder geen chemische processen om een goede brandwerendheid of schimmelbestendigheid te verzekeren. Doordat het een afvalproduct is en geen aanvullende bewerkingen ondergaat is de productie-energie beperkt. Zeegras isolatie is vochtregulerend en composteerbaar. Het product kan worden ingeblazen of gegoten en mag worden toegepast in dak of muur.^{LX}

3.4.5. Stro

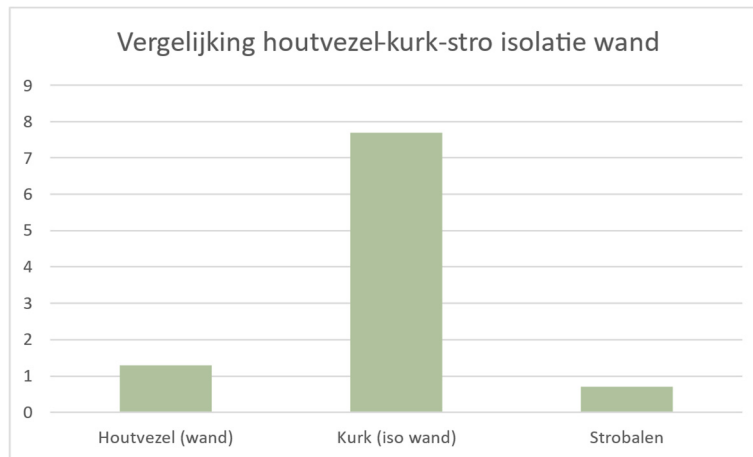
Stro is naast een bio-based product ook een restproduct dat overblijft wanneer tarwe of gerst geoogst wordt. Stro is een restproduct en gaat niet in strijd met de voedselproductie. Hiernaast heeft het product een lage energiebehoefte en is het eenvoudig te installeren.

De productie van strobalen is zeer eenvoudig. Het stro wordt na het oogsten bijna onmiddellijk geperst in een strobaal en heeft het verder geen chemische bewerking nodig. Daarna worden de strobalen getransporteerd naar de werf. Ook dit zal een beperkte impact hebben indien oogstplaats en bouwplaats relatief dicht bij elkaar gelegen zijn. De energie die nodig is voor het persen van strobalen, is slechts een fractie van de energie die nodig is voor het telen van tarwe of gerst. Tarwe en gerst moeten tijdens hun groei voldoende water krijgen en men maakt gebruik van chemische producten bij de onkruidbestrijding. Na de groei wordt het graan geoogst waarbij de korrels worden afgescheiden van het stro.^{LXI} Hierna worden de zaden getransporteerd en verwerkt in verschillende voedingswaren.

Stro komt voor in de vorm van strobalen of stromatten die gemaakt worden uit geperst stro. Na afbraak kan het product hergebruikt worden voor verschillende toepassingen of gecomposteerd. Voor de brandveiligheid van stro zijn geen chemische stoffen nodig indien de balen worden afgewerkt met een leem- of kalkpleister. Deze pleister dient ook als bescherming tegen ongedierte.

En derde optie zijn de strovlokken, deze kunnen worden toegepast als dakisolatie of na-isolatie van een muur. Hierbij worden de vlokken, die een mengsel zijn van stro en additieven voor de brandwerendheid, ingeblazen of gestort.^{LXII}

Er heerst de gedachte dat strobalenbouw een dikker muuropbouw nodig heeft, volgens onderzoek van Batic2.eu is dit ver van de realiteit. Zo zou strobalenbouw langs twee zijden bepleisterd en met een U-waarde van 0,18W/m²K een dikte van 40 cm nodig hebben, wat te vergelijken is met een massiefbouw van 42cm of een houtskeletbouw van 38cm.^{LXIII} Wanneer we strobalen bekijken in Nibe en TOTEM wordt dit bij beide positief bevonden. In Nibe gaat het om milieuklasse 1A en bij TOTEM is er een significant verschil te zien ten opzichte van houtvezel of kurk. Dit wordt getoond in figuur 13.



Figuur 13: Milieupunten per m² voor houtvezel, kurk en stro in de toepassing isolatie wand

3.4.6. Riet

Riet wordt voornamelijk gebruikt voor toepassingen als isolatieplaat, pleisterdrager in de vorm van rietstengels of als dakafwerking. Wanneer het als isolator wordt gebruikt, worden de rietstengels samengeperst tot een dense plaat en dan samengebonden. Hierdoor wordt er lucht vastgehouden tussen de stengels en verkrijgt het geheel een goede thermische en akoestische isolatiewaarde. Ze kunnen geplaatst worden op muren, daken en verdiepingsvloeren. In vloeren dient het voornamelijk als contactisolator.

Als het gaat om een pleisterdrager, worden de rietstengels éénlaags aan elkaar verbonden met telkens een kleine speling, om zo een goede hechting te voorzien. Beide toepassingen vergen geen chemische additieven.^{LXIV}

3.4.7. Hout

Een van de voornaamste alternatieven voor massiefbouw is houtskeletbouw. Dit type van constructie kan op verschillende manieren worden uitgevoerd onder andere de demonteerbare methode. Dit maakt het makkelijker om de gehele constructie te demonteren en daarna eventueel te hergebruiken. Hout is in België voldoende beschikbaar, er is een bosoppervlakte van meer dan 600 000 ha, uiteraard is dit niet allemaal bedoeld voor de bouwsector. In Vlaanderen wordt jaarlijks 851 000 m³ rondhout geoogst waarvan 12 500 m³ verbruikt wordt als zaaghout en 135 000 m³ als plaatmaterialen.^{LXV} Hout is een natuurlijk materiaal dat net zoals de anderen CO₂ opneemt en vasthoudt gedurende zijn levensduur, het gaat om 20-30kg CO₂ per boom, per jaar.^{LXVI} Er moet rekening gehouden worden met de milieu-impact die meekomt met de productie van houtproducten, deze kan sterk variëren maar wordt deels gecompenseerd door de CO₂ opname van de bomen. Als we hout over het algemeen bekijken in Nibe en TOTEM, zowel in de vorm van houtvezels, houtskelet en vloerafwerking, blijkt het een goede optie te zijn. Volgens Nibe behoort massief hout tot milieuklasse 1A, houtvezelplaten tot 2A en parketvloeren tot 1C. In TOTEM komt houtvezel isolatie naar voren als betere optie in vergelijking met schapenwol of kurk. Ook parket blijkt beter te zijn dan keramiek of graniet vloeren.

Uiteraard kunnen we er niet zomaar vanuit gaan dat al het geproduceerde hout ook ecologisch verantwoord is. Ecologisch hout moet afkomstig zijn van duurzaam bosbeheer waar het behoud en onderhoud van de bossen wordt gegarandeerd. Om dit te garanderen zijn er verschillende hout labels. Dit wordt meer in detail besproken in *Hoofdstuk 4.3.8. Sustainability*.

3.4.7.1. OSB

Oriented strand board (OSB) wordt samengesteld uit houtspanen, die met een bepaalde richting in de plaat worden geplaatst. De plaat bestaat meestal uit drie lagen waarbij de richting van vezels wisselt per plaat-laag. De houtspanen worden aan elkaar verlijmd via fenolformaldehydelijm of isocyanaatlijmen en worden gevormd tot plaat door het te persen onder hoge druk. Tegelijk worden er ook enkele brandvertragende en schimmelwerende toeslagstoffen bijgevoegd en wordt paraffine gebruikt om de waterafstotendheid van de plaat te vergroten.^{LXVII}

3.4.7.2. Houtspaanplaat

Een variatie hierop is de houtspaanplaat, hiervoor worden houten spaanders gebruikt die nu in willekeurige richting worden gelegd verlijmd. Enkele voorbeelden van bindmiddelen zijn: ureumformaldehyde, melamine formaldehyde, fenolformaldehyde of polyurethaanlijm.

3.4.7.3. Houtvezelplaat

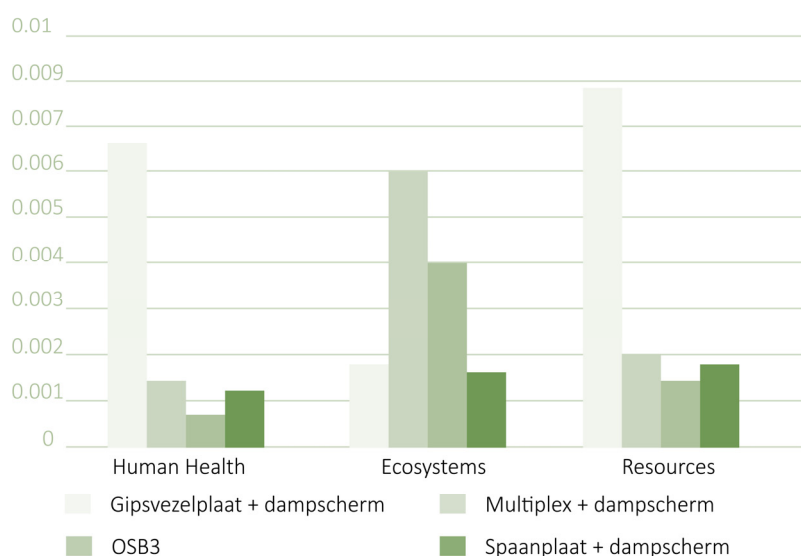
Houtvezelplaat wordt geproduceerd door houtvezels onder druk en warmte te verwerken. De verbinding van de elementen gebeurt via kunstharslijmen maar er zijn ook alternatieven bij de zachte houtvezelplaten en hardboard waar de natuurlijke lignine uit de vezels wordt gebruikt. Bij het type MDF wordt er wel telkens een lijmproduct toegepast, zoals bij de houtspaanplaten.

3.4.7.4. Multiplex

Multiplex bestaat uit drie of meer gelijkde fineerlagen met een bepaalde vezelrichting, telkens wisselend per laag waardoor de vezels loodrecht op elkaar staan. De lagen worden aan elkaar verlijmd met kunstharsen.^{LXVIII}

3.4.7.5. Vergelijking houtproducten

In een analyse via TOTEM over de milieu-impact van enkele houten plaatmaterialen, werd hun impact op vlak van human health en ecosystems onderzocht. Dit is te zien in figuur 14. Hieruit bleek dat de bindmiddelen, gebruikt bij OSB, spaanplaat en multiplex, een beperkte milieu-impact hebben in vergelijking met een gipsvezelplaat. De invloed op vlak van ecosystems is echter significant groter, vooral als we kijken naar multiplex. In spaanplaten worden er houtresten geïmplementeerd bij de productie, wat de iets lagere impact verklaart. Dit laatste geldt ook voor de MDF platen.^{LXIX}



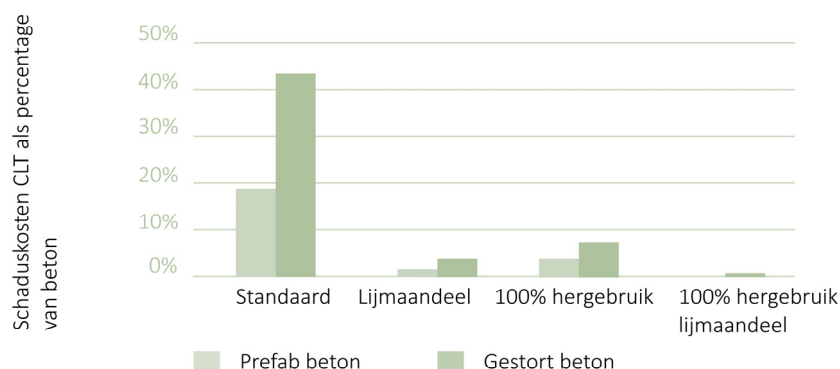
Figuur 14: Milieu-impact houten plaatmaterialen (gebaseerd op: De Roeck M., Vanroelen M., 2018)^{LXX}

Spaanplaten worden afgewerkt met een vinyl- of melaminelaag, dit wordt afgeraden omdat het product hierdoor niet meer herbruikbaar is. OSB en multiplexplaten worden gemaakt uit nieuw hout, wanneer het gaat om hout met het FSC-label is dit milieu-verantwoord.

De lijmen hebben een belangrijke invloed, voornamelijk ureumformaldehyde blijkt schadelijk te zijn voor de gezondheid doordat er kankerverwekkende dampen kunnen uit ontsnappen. In spaanplaten, MDF en multiplex is de hoeveelheid lijm ten opzichte van hout aanzienlijk, waardoor de invloed ervan significant is. Bij OSB is dit minder, waardoor dit de voorkeur krijgt. Zachte houtvezelplaten en hardboards zijn een beter optie doordat er geen kunsthars aan te pas komt.^{LXXI}

3.4.8. CLT

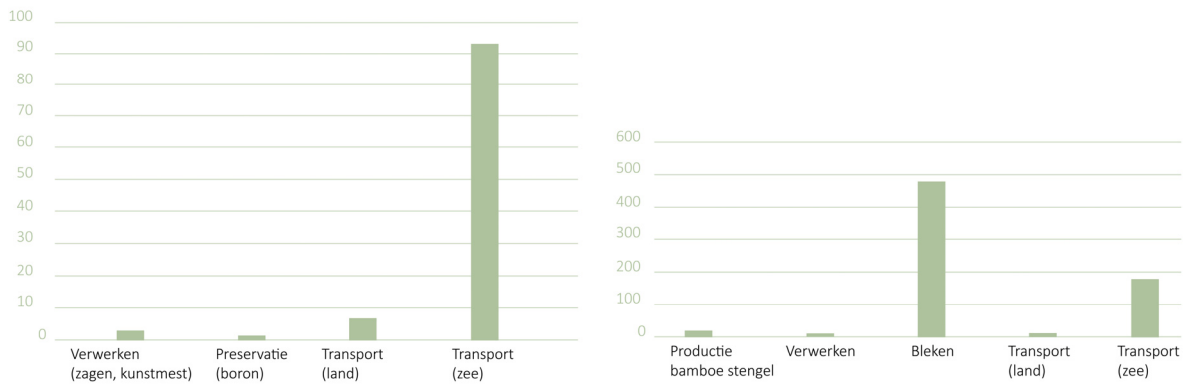
Cross Laminated Timber bestaat uit massieve houten planken die worden verlijmd in verschillende lagen. Elke laag wordt kruislings op de voorgaande laag gelijmd. Ongeveer één procent van de volumieke massa is lijm, de voornaamste soorten zijn: resorcinol, PU en MUF. In een onderzoek van stichting Probos onderzochten ze de milieu-impact van deze lijmen, resorcinol komt hier als slechtste uit en PU als beste. Verder keken zij ook naar de milieu-impact ten gevolge van afvalverwerking. Hieruit bleek dat storten en recyclen een grote invloed hadden terwijl de impact van het hergebruik zeer miniem was. Tenslotte werd ook onderzocht wat de schaduwkosten van CLT waren ten opzichte van beton of staal, zoals te zien in figuur 15. Hieruit bleek dat de schaduwkosten voor toepassing van CLT in een wand overeenkwamen met 20-45% van de schaduwkosten van een betonnen wand. Voor de lijmcomponent van CLT was dit slechts 3%.^{LXXII} Beide verschillen worden beschouwd als een significant.



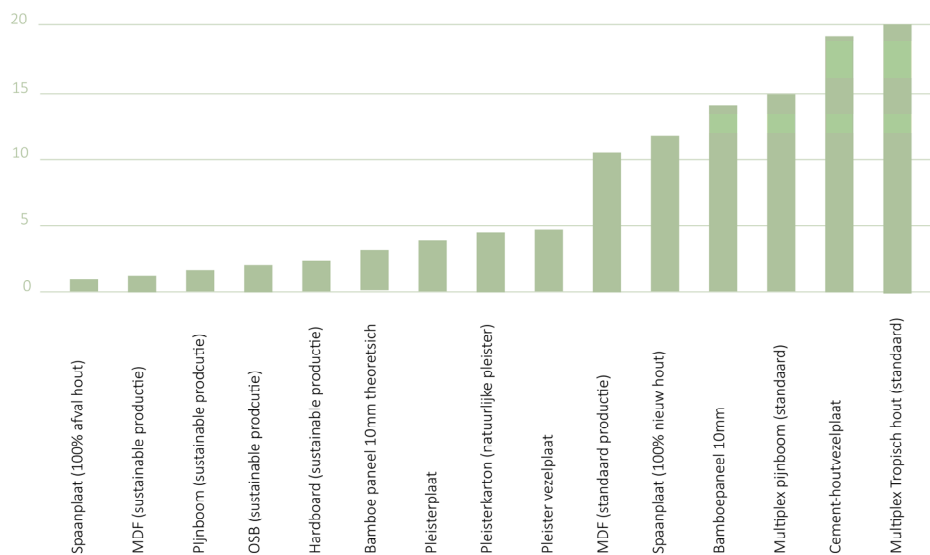
Figuur 15: Milieu-impact CLT ten opzichte van beton (gebaseerd op: Oldenburger J. et al.)^{LXXIII}

3.4.9. Bamboe

Een alternatief voor hout is bamboe. Het is even sterk, nagroeibaar en neemt CO₂ op. Maar bamboe groeit in tropische en subtropische gebieden op grote afstanden van België wat betekent dat de milieu-impact van het transport hoog zal liggen. Bamboe is een interessant bio-ecologisch materiaal en kan gebruikt worden als constructiemateriaal. Hierbij moet wel vermeld worden dat het dan vaak gaat om bewerkte bamboe, omdat het gebruik makkelijker is dan de gekromde, holle stammen. Uit een kritische literatuurstudie over bamboe voor het vak 'Bouwchemie', bleek dat er bedenkingen zijn over de milieu-impact.^{LXXIV} Als men bamboe bekijkt in zijn originele vorm en hiervan de milieu-impact bepaalt, rekening houdend met het transport over zee, is dit in vergelijking met andere materialen nog steeds minimaal, dit is te zien in figuur 16. Maar van zodra je bamboe bekijkt in zijn bewerkte vorm, bijvoorbeeld gelamineerd bamboe, komt men terecht in een heel andere situatie zoals te zien is in figuur 17. Door chemische processen zoals het bleken, stijgt de milieu-impact enorm, daarnaast blijft transport over zee nog altijd een belangrijke factor. Als men deze producten vergelijkt, is de milieu-impact gelijkwaardig aan die van MDF of multiplex. Het is daarom niet langer interessant om structureel bamboe te gebruiken in de Belgische context, aangezien dit ecologisch niet te verantwoorden is.



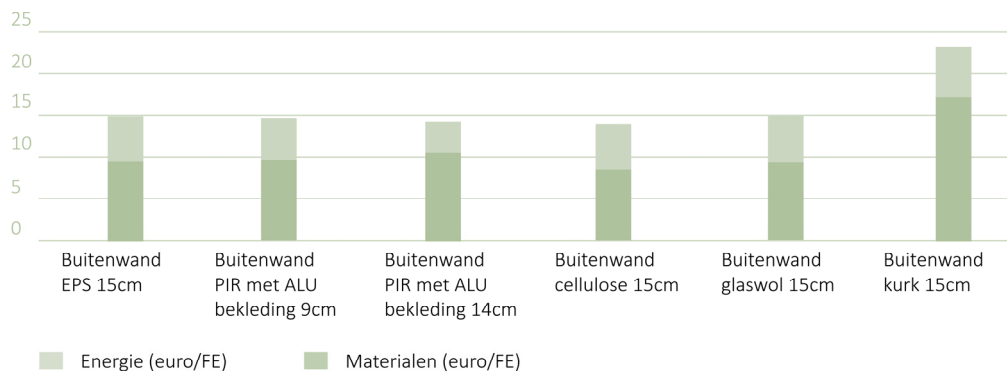
Figuur 16: Milieukost van 1kg bamboe stam (eerste figuur) en bamboe paneel (tweede figuur) (gebaseerd op: P. Van der Lugt, A. Van den Dobbelsteen and R. Abrahams)^{LXXV}



Figuur 17: Milieukost bamboepanelen tegenover standaard plaatmaterialen (gebaseerd op: P. Van der Lugt et al)^{LXXVI}

3.4.10. Kurk

Kurk is een product dat op vele manieren kan worden toegepast. In de bouwsector is het voornamelijk gekend als isolatie of vloerafwerking. Beide komen voor in verschillende vormen, zoals geëxpandeerde kurkkorrels of kurkplaten. Kurk heeft enkele interessante eigenschappen, het is een goede thermische en akoestische isolator, geeft een warm gevoel en is bruikbaar in vochtige omgevingen. Het wordt zowel voor vloer-, wand- als dakisolatie gebruikt. Kurkbomen groeien voornamelijk in de Portugese en Spaanse regio waardoor het transport een grote factor is voor de milieu-impact. Uit een analyse die gemaakt werd voor het vak 'Duurzaam bouwen' komt dit ook naar boven.^{LXXVII} Hierin werd kurk in TOTEM vergeleken met enkele andere isolatiematerialen zoals EPS en PIR bij geveltoepassing, zoals te zien is in figuur 18. Daaruit bleek dat de materiaalimpact van kurk significant hoger is. Dit is vermoedelijk het gevolg van de korte levensduur van kurk en het transport. In de vergelijking werd ook cellulose isolatie meegenomen, deze toepassing kwam er als beste uit en toont een halvering in materiaalimpact ten opzichte van kurk. Bijkomend is kurk ook veel duurder dan cellulose. Ook wanneer we kurk analyseren in TOTEM voor enkele toepassingen zoals vloer- of wandisolatie en vloerafwerking, wordt deze telkens als slechtste optie of net aanvaardbare naar voren geschoven, zie figuur 6 en 13. Daarom schrappen we het materiaal uit onze tabel.



Figuur 18: Vergelijking isolatiematerialen in geveltoepassing (gebaseerd op: Vrebos A. en Meiresonne E. 2021)^{LXXVIII}

Er zijn producenten van kurk in België aanwezig. De kurkboom zelf moet niet omgehakt worden na gebruik aangezien de schors weer nagroeibaar is. Een bijkomend voordeel is dat de kurkboom ook CO₂ absorbeert, zo wordt de milieu-kost veroorzaakt door het transport deels geneutraliseerd. De groeicyclus van de schors is wel relatief lang, zo mag de boom pas na 25 jaar voor het eerst ontschorst worden en daarna om de 9 jaar.^{LXXIX}

We hebben in dit deel enkel kurk beschouwd die valt onder de categorie 'nieuw' product, waarbij we uitgaan van verse kurk van de kurkboom die geoogst werd met dit doel. Deze categorie kunnen we niet aanvaarden omwille van redenen die hierboven aangehaald werden. Wel is het de moeite waard om de gerecycleerde variant ervan te bekijken, dit wordt dan beschouwd als restproduct. In het *Hoofdstuk 3.5.1 Recycork* wordt hier verder op ingegaan.

3.4.11. Kokos

Kokosisolatie wordt voornamelijk gebruikt omwille van zijn winddichtheid. Het product is te zien in figuur 19. De kokosvezels kunnen gevormd worden in strips en vinden hun toepassing in de akoestische contactgeluidisolatie in de vloer en opvulling rond ramen. Het kan in combinatie met kurk ook in plaatvorm verkregen worden, dit product is bedoeld als akoestische muurisolatie of als isolatie van vochtige muren.^{LXXX} Een vraag die meteen opkomt is waar de kokosvezels vandaan komen. Kokos is geen inheemse plant in België en groeit voornamelijk in warme gebieden. Er zijn daarentegen wel enkele producenten in België aanwezig. De grote transportafstand kan een negatieve invloed hebben op de milieu-impact van het product. Aan de andere kant is de kokospalm wel nagroeibaar en absorbeert het CO₂. Toch nemen we dit product niet meer in beschouwing aangezien er betere alternatieven ter beschikking zijn.



Figuur 19: : Kokos isolatie^{LXXXI}

3.4.12. Schelpen

Schelpen vinden voornamelijk hun toepassing in kruipruimte-isolatie. Hierbij wordt de ruimte opgevuld met schelpen of gebroken schelpen. Ook worden er vloeren op volle grond uitgevoerd met schelpen, deze bezitten in hun aangestampde vorm ook een draagkracht en vermijden het capillair opstijgen van vocht in de verdere vloerafwerking. Tegelijk creëren ze een kleine isolatiewaarde. Die isolatiewaarde

van de schelpen zelf voldoet niet aan de norm en wordt daarom aangevuld met een isolatiemateriaal op de schelpplaat.^{LXXXII} Schelpen zijn 100% natuurlijk en kunnen daarbij ook makkelijk hergebruikt worden. De schelpen van hoofdproducent Isoschelp en Ecoschelp worden rechtevreeks uit de Noordzee gehaald langs de Nederlandse kust maar kunnen evengoed uit België komen. Het is een quasi onuitputtelijke bron, de schelpen liggen namelijk in een constant aangroeiende laag op de zeebodem. Omdat een te grote extractie het ecosysteem in gevaar zou kunnen brengen, worden er maximale hoeveelheden bepaald en blijft het beperkt tot enkele vastgelegde oogstplaatsen. De productie is kort en eenvoudig, de schelpen moeten slechts tweemaal gezeefd en gewassen worden waarna ze onmiddellijk gebruikt kunnen worden.^{LXXXIII} Wanneer we schelpen in Nibe bekijken als bodemafsluiter blijkt het product milieuklasse 4B te hebben, dit is niet het zo goed als een bodemafsluiting van zand, maar het is nog steeds aanvaardbaar. Daarom schrappen we het ook niet uit de tabel.

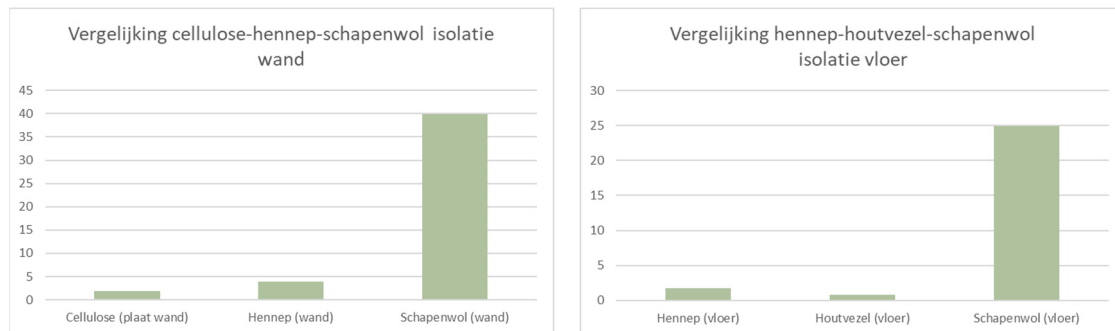
3.4.13. Cellulose

Cellulose wordt gebruikt als isolatiemateriaal en bestaat uit gerecycleerd papier waardoor het ook beschouwd kan worden als restproduct. Het komt voor in de vorm van vlokken of panelen voor vloer-, dak- en muurisolatie. Daarnaast kan het ook in hoge densiteit worden toegepast als akoestische isolatiepanelen.^{LXXXIV} Het is een goede keuze voor de isolatie van vochtige ruimtes omdat het 30% van zijn gewicht in vocht kan opnemen, indien een goede ventilatie gegarandeerd worden. Om het materiaal te kunnen toepassen moeten er boorzouten worden toegevoegd. In een HSK beschermen de boorzouten het hout mee tegen insecten en verbeterd het de brandwerendheid.^{LXXXV} Wanneer het product bekeken werd in TOTEM bleek het een lage materiaalimpact te bezitten en kan het de milieu-impact van een component sterk kan verminderen, zie figuur 18. Tegelijk kan ook geconcludeerd worden dat deze chemische stoffen geen uitzonderlijke impact hebben op indicatoren als menselijke toxiciteit of klimaatverandering wanneer cellulose vergeleken wordt met PIR of glaswol. Daarom beschouwen we cellulose als interessant materiaal binnen deze thesis. De productie vergt daarnaast een lage productie-energie. In België wordt het product IQ3 geproduceerd, dit is inblaasisolatie bestaande uit cellulose dat gebruikt wordt in daken, vloeren en wanden. Deze methode brengt een beperkte plaatsingskost met zich mee en kan ook gebruikt worden bij het opvullen van speciale vormen. Wel moet er opgelet worden dat de ruimte volledig afgesloten is.^{LXXXVI} Uit een analyse in Nibe, kunnen we concluderen dat cellulose, als ingeblazen isolatie of in plaatvorm wandisolatie een goede optie is met een milieuklasse 1A. Als vloerisolatie verkrijgt het slechts een milieuklasse 6A. Hiervoor blijken er betere alternatieven op de markt te zijn. Daarom wordt cellulose als toepassing in vloerisolatie geschrapt.

3.4.14. Schapenwol

Naast het gebruik van schapenwol in de textielindustrie kan het ook worden toegepast als isolatiemateriaal. Als isolatiemateriaal moet het bewerkt worden met boorzouten om het te beschermen tegen ongedierte en om een brandwerend effect te verkrijgen. Dit heeft uiteraard een invloed op de milieu-impact ervan, tegelijk is de milieu-impact van schapenhouderij ook een belangrijke factor. Niet alleen hebben deze dieren veel land en water nodig, ze stoten ook nog methaan uit tijdens het eten. Samen met geiten en schapen produceren ze 75% van alle methaan uit de veehouderij.^{LXXXVII} Methaangas is qua broeikaseffect nog sterker dan CO₂, hierdoor kan de milieu-impact van schapenwol sterk stijgen. In België waren er in 2009 nog 126.219 schapen, in de jaren ervoor zagen we wel een grote daling, de kans dat dit getal vandaag lager ligt is groot.^{LXXXVIII} We bekijken binnen deze categorie enkel wol die voor het grootste deel verkregen wordt van schapen die niet bedoeld zijn voor de voedingsindustrie. Hiervoor zijn de resultaten uit Nibe en TOTEM niet bemoedigend. Schapenwol behoort volgens Nibe tot milieuklasse 7C of slechter. Ook bij de berekeningen in TOTEM heeft schapenwol een zeer hoge milieu-impact. Dit is te zien in figuur 20. De hoge impact komt door de oorsprong van de schapenwol. De volgende mix van wol wordt toegepast in TOTEM: 22% is afkomstig

van wol als restproduct van de vleesindustrie maar de overige 78% is afkomstig van schapen die worden gehouden voor hun wol. De 78% wordt beschouwd als hoofdproduct en draagt daarom de volledige milieupact. Het is dan ook niet verantwoord om met dit materiaal verder aan de slag te gaan en het wordt daarom geschrapt.



Figuur 20: Vergelijking hennep-houtvezel-cellulose-schapenwol voor de toepassingen isolatie wand en vloer

3.4.15. Pluimen

Gelijkaardig aan schapenwol is isoleren met eendenveren. Dit product wordt onder de naam Batiplum geproduceerd in Frankrijk. De veren zijn afkomstig uit de voedingsindustrie, de pluimen van eenden die terechtkomen in Franse slachthuizen worden verzameld. Deze veren worden daarna tweemaal gewassen, in de tweede wasbeurt worden ze ook thermisch behandeld. Het product bestaat voor 70% uit eendenveren, 10% wol en 20% polyester. Het isolatiemateriaal isoleert zowel thermisch als akoestisch. Tegelijkertijd kunnen de veren vocht uit de lucht opnemen en op die manier een goede vochtinhouding garanderen.^{LXXXIX} Ze worden geproduceerd in de vorm van rollen en kunnen in daken en muren worden toegepast.

3.4.16. Bijenwas

Als afwerking voor muren en plafonds kan verf gebruikt worden, de standaardopties bevatten een heleboel VOC's die schadelijk kunnen zijn voor de mens. Door het gebruik van verven op waterbasis is dit al deels verbeterd maar het is nog steeds geen ecologische optie. Daarom bekijken we ook natuurlijke verfsoorten binnen onze thesis, waaronder wasverf. Deze verf gebruikt bijenwas als bindmiddel en wordt voornamelijk gebruikt voor het behandelen van hout en voor muurschilderingen.^{XC} Ze werd reeds bij de Romeinen toegepast om fresco's te beschermen.

3.4.17. Kalk

Een andere optie is verf op basis van kalk, dit is zowel binnen als buiten toepasbaar. Een voorbeeld hiervan is Calcatex. Dit is een verf op basis van luchtkalk en wordt daarom in poedervorm verkocht. Er moeten geen conserveermiddelen worden toegevoegd, enkel de juiste verhouding water moet worden toegevoegd. Voor een kalkverf moet er eerst een voorbereidende laag (Precal) worden aangebracht, zoals een primer, deze laag bestaat uit hydraatkalk en natuurlijke proteïnes.^{XCI}

De kalkverf kan ook in combinatie met een kalkpleister worden aangebracht, deze techniek wordt kaleien genoemd. Hiervoor wordt er eerst een dunne laag kalkpleister op de muur aangebracht waarna er een tweede laag wordt aangebracht met kalkverf, deze laatste bepaald de kleur. Deze techniek is ideaal toe te passen op een buitengevel omwille van zijn vochtinhoudende functie. Het beschermt de muur tegen weersomstandigheden en is dampopen. Kalei bestaat uit drie grondstoffen: kalk, zand en toeslagstoffen (puzzolanen, kleurpigmenten of acrylaten).^{XCII}

Een andere variant is tadelakt. Dit is een kalkpleister op basis van hydraatkalk waaraan nog enkele additieven, zoals pigmenten, zijn toegevoegd. Het vormt een waterafstotende laag die toepasbaar is op binnenmuren van vochtige ruimtes. Daarmee vormt het een alternatief voor tegels. Het kan ook op

buitengevels worden toegepast al is dat minder evident in het Belgische klimaat. De naam tadelakt verwijst naar de techniek waarbij het product wordt ingewreven op de muur. De afwerking gebeurt door het te polijsten met een steen, tegelijk heeft het materiaal ook voldoende onderhoud nodig. Dit gebeurt met olijfoliezeep die wordt ingesmeerd op de muren. Het product bestaat in Nederland onder de naam Tierrafino stone en wordt nog steeds als lokaal beschouwd, zeker omdat kalk ruim aanwezig is in België en omstreken.^{XCIII}

Kalk gebruikt als kalkpleister behoort in Nibe tot milieuklasse 2C, dit is aanvaardbaar maar in vergelijking met een leempleister is de laatste een betere optie. Kalkverf daarentegen is wel een zeer goed optie, zowel binnen Nibe als TOTEM. Bijkomend is er het voordeel dat kalksteen ruim voorradig is in België en dus een verantwoorde grondstof is.

Een bijkomende toepassing van kalk is een chape op basis van zand waarbij kalk als bindmiddel fungeert. Hierbij moet vermeld worden dat dit type chape een langere droogtijd nodig heeft dan zijn klassieke cementbasis variant. Deze chape kan gebruikt worden onder tegelvloeren of als afwerkingslaag boven een vloer op volle grond uitgevoerd met schelpen en kalkhennep isolatie.^{XCIV}

3.4.18. Leem

Ook leempleister kan gebruikt worden als afwerking van de binnenmuren en als alternatief voor verf. Een voorbeeld is Tierrafino base, deze leempleister bestaat uit de natuurlijke grondstoffen klei, zand en slib gedolven in Duitsland. Hierdoor zijn er geen schadelijke VOC's aanwezig en zorgt het tegelijk ook voor een goed vochthuishouding zoals kalei. Het wordt ook toegepast als afwerkingslaag op een rieten pleisterdrager of op kalkhennep.

Bijkomend bestaan er ook leemverven, al dan niet vermengd met zand en pigmenten. Dit product en alle andere leemproducten bevatten warmte en vochtregulerende eigenschappen die een comfortabel binnenklimaat bevorderen. De leemverf wordt net zoals een leempleister geproduceerd door het bedrijf Tierrafino in Nederland waarbij de grondstoffen gedolven worden in Europese groeven.^{XCV}

Leem kan ook worden gebruikt als stampleem, waarbij het een dragende of niet dragende functie verkrijgt in muren. Hierbij wordt vochtige leem aangestampt in lagen, meestal wordt gebruik gemaakt van een mix met verschillende andere stoffen zoals klei. Enkele voordelen zijn de warmteopslag en vochtregulatie. Het kan ook verwerkt worden in vloeren waarbij een behandeling met lijnzaadolie noodzakelijk is.^{XCVI}

In TOTEM en Nibe is leempleister een goed optie en verkrijgt het daarom ook onze voorkeur. Ook wanneer het gaat om stampleem met een structurele functie, behoort dit nog tot milieuklasse 1C – 2B, dit is iets minder goed dan bijvoorbeeld houtskelet of strobalen maar nog steeds een degelijke optie. Leem is beschikbaar in Midden-België en is daarbij in voldoende mate aanwezig. Dit is te zien in figuur 4.

3.4.19. Conclusie

Ook voor de bio-based materialen werd een overzichtstabel, zie tabel 6, gegeven met verschillende criteria waaraan de materialen moeten voldoen. Hierdoor werden enkele materialen geschrapt. Er werd gekeken naar de plaats van productie en de afstand ten opzichte van onze theoretische bouwplaats, dit wordt getoond in figuur 21. Verder bekijken we of het materiaal aanwezig en geproduceerd wordt in België. Als dit niet zo is bekijken we of het in Europa geproduceerd wordt en of het dan nog als ecologisch kan beschouwd worden. Wanneer het product wel aanwezig is in België maar geproduceerd wordt in Europa wordt dit aanvaard, zo niet wordt het materiaal niet meer aanvaard. Daarnaast is ook de chemische bewerking van belang. Dit zorgt niet direct voor het schrappen van het materiaal maar het materiaal wordt dan eerder als een back-up gezien. Tenslotte worden de

geschapt. De grenzen worden bepaald in tabel 5. Hierover werd nog een gedetailleerde tabel, zie tabel 7, gemaakt die de verschillende producten beschouwd binnen een bepaalde materiaalcategorie. Zo kan het zijn dat het product aanvaard wordt in een bepaalde toepassing maar niet in een andere. Aan de hand van gekleurde kruisjes wordt aangeduid of er voldaan wordt aan een parameter, zo betekent een rood kruisje dat aan die bepaalde parameter niet voldaan wordt en een groen kruisje dat het materiaal wel voldoet aan de eis.

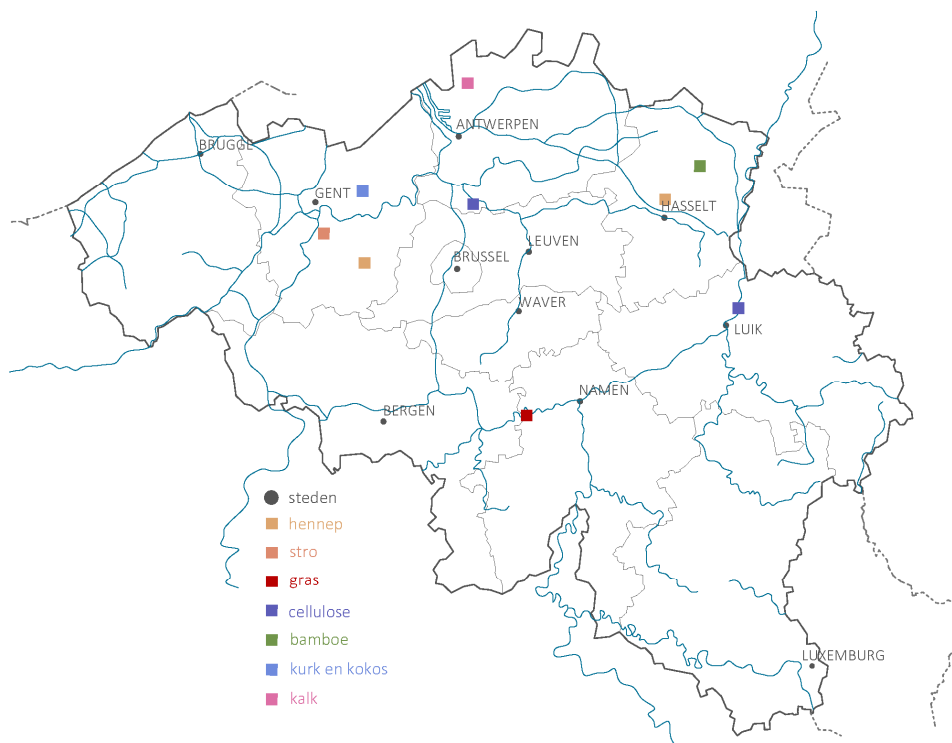
Voor de aanvaarding binnen TOTEM vergelijken we de materiaalpunten van verschillende materialen binnen een bepaalde productcategorie en maken daaruit een beslissing welk materiaal te verkiezen is.

Voor de bepaling of het materiaal aanvaard wordt in Nibe, hanteren we volgende grenzen:

Min milieuklasse	Max milieuklasse	(Niet) aanvaard
1a	2c	Aanvaard
3a	5c	Back-up
6a	-	Niet aanvaard

Tabel 5: Aanvaardingscriteria Nibe

De conclusie die in deze tabellen naar voor komt, is een aanzet en werd gebaseerd op een inleidend onderzoek. Verder gedetailleerd onderzoek per materiaal kan nog aanleiding geven tot verdere nuances of diepere inzichten. Dit is echter geen onderdeel meer van deze thesis en daarom wordt er op basis van deze uitkomsten verder gewerkt. Ook wanneer het gaat om de parameter 'chemische bewerking' werd er enkel gekeken naar de toepassing van middelen als boorzouten of bleekmiddelen als eerste indicatie. Uiteraard zijn er nog vele andere chemische stoffen die toegepast kunnen worden, met elk een bepaald milieu-impact. Een verdere analyse van dergelijke milieu-impacten kan leiden tot een genuanceerdere onderscheiding van aanvaarde en niet aanvaarde producten.



Figuur 21: Map bio-based materialen in België

Bio-Based materialen									
Materiaal	CO2 absorptie	Ecologie			Productie	Afstand tot Brussel	Chemische bewerking	NIBE	TOTEM
		Productie Europa + ecologisch in België	Productie in België	Materiaal aanwezig in België					
Hennep	10 ton CO2 per ha		x	x	Herzele + Heusden zolder	50-90 km			x
Vlas	7 ton CO2 per ha	x	x	x	Oisterwijk	140 km	x	x	
Gras	1,5 kg CO2 per kg		x	x	Sambreville (Gramitherm)	65 km			
Stro			x	x	Gelselaar + Baalegem	50-280 km		x	x
Riet		x		x					
Hout	20-30 kg per boom		x	x	Uitgebreid aanbod	0-200km	niet perse	x	x
Bamboe		x	x	x	Oudsbergen	100 km	x	x	
Kurk		x	x	x	Lokeren	55 km		x	x
Kokos		x	x	x	Lokeren	55 km			
Schelpen		x	x	x	Yerseke (Isoschelp)	110 km		x	
Cellulose			x	x	Mechelen +Herstal	35-105 km	x	x/x	x
Schapenwol		x	x	x	Blaricum +Southminster	200-400 km	x	x	
Pluimen		x	x	x	Sainte Hermine	730 km			
Bijenwas				x					
Kalk			x	x	Kalmthout	85 km		x	x
Leem		x	x	x	Amsterdam	215 km		x	x
Zeegras		x	x	x	Karlsruhe	440 km			

Tabel 6: Bio-based materialen (zie bijlage 4)

Bio-based producten				
Product	NIBE	Milieu-klasse	TOTEM	Materiaalpnt
Schelpen (bodem)	x	4b		
Zand (bodem)	x	2b		
Kalkverf	x	1b	x	0,05
Kalkstuc	x	2c		
Natuurverf hout	x	3c		
Cellulose ingeblazen	x	1a		
Cellulose (plaat wand)	x	4b	x	1,8
Cellulose (plaat vloer)	x	6a		
Vlas (plaat wand)	x	1a		
Vlas (plaat vloer)	x	2c		
Houtvezel (wand)	x	2a	x	1,3
Houtvezel (vloer)			x	0,8
Houtskelet	x	1a		
Hout (vloer afw)	x	1a		
Hout parket (vloer afw)	x	1c	x	3,6 - 4
Schapevool (vloer)	x	7c	x	24,9
Schapevool (wand)	x	7c	x	39,9
Strobalen	x	1a	x	0,7
Stroplaat			x	3,2
Stamplaat	x	1c		
Leemstuc	x	1a	x	0,9
Bamboe (vloer afw)	x	1b		
Kurk (vloer afw)	x	2b		
Kurk (iso wand)			x	7,7
Kurk (iso vloer)			x	4,6
Hennep (wand)			x	3,9
Hennep (vloer)			x	1,76

	Niet aanvaard
	Back-up
	Aanvaard

Tabel 7: Bio-based producten

3.5. Restproducten

3.5.1. Recycork

Als alternatief voor de standaard kurkisolatie zoals beschreven in 3.4.10. *Kurk* wordt er ook kurkisolatie geproduceerd uit gerecycleerde kurkstoppen. Dit heeft enkele voordelen, zo worden de kurkbossen eerst en vooral niet overbelast, vermindert de invloed van transport en krijgt het materiaal een tweede leven. Kurk is een uitermate geschikt materiaal voor toepassingen als isolatie of vloerbedekking maar omwille van de slechte beoordeling in TOTEM en Nibe waren we genoodzaakt dit materiaal te schrappen. Een oplossing kan gevonden worden in het product Recycork, dit wordt aangeraden door VIBE in hun eco-bouwgids. Het product wordt gemaakt van gerecycleerde kurkproducten zoals kurkstoppen, kurkisolatie, kurk onderleggers etc. te vermalen en te granuleren waarvoor weinig energieverbruik nodig is. Hierdoor blijven de eigenschappen van kurk, zoals de lange levensduur, intact en kunnen ze opnieuw gebruikt worden in de bouw. Het kan worden toegepast als isolatie van wanden, vloeren en daken. Tegelijk bestaat er ook een variant waarin enkel gerecycleerde geëxpandeerde kurk isolatieplaten worden gebruikt, hierdoor verkrijgt dit type een betere weerstand tegen vochtige omstandigheden.^{XCVII}

Productie van geëxpandeerde kurkplaten gebeurt als volgt. Eerst wordt de boom ontschorst en wordt deze schors gedroogd. Deze wordt getransporteerd van Portugal naar België waar de schors vermalen wordt tot korrels. De worden korrels in een autoclaaf onder hoge druk en temperatuur geëxpandeerd. De harsen van de kurk zorgen hierbij voor het samenklitten van de korrels. Tenslotte wordt de plaat vermalen of verzaagd tot het eindproduct.^{XCVIII}

Dit hele proces behoeft de nodige energie, alhoewel op de sites van producenten vermeld wordt dat men hiervoor gebruik maakt van bio-massa. Toch zien we een opmerkelijk verschil in productie energie ten opzichte van Recycork, deze bevat enkel het transport binnen België van inzamelpunt tot productieplaats en het vermalen van de isolatieplaten. Het is daarom zeer interessant om dit materiaal verder mee te nemen.

3.5.2. Houtvezels

Een tweede restproduct zijn houtvezels. Dit geldt enkel wanneer ze gemaakt worden van overschotten die normaal niet worden gebruikt in de houtindustrie. De vezels worden gemaakt door houtchips te vermalen. De houtvezels kunnen daarna gebonden worden tot isolatieplaat door een nat of droog procedé. Bij het natte procedé wordt water toegevoegd en fungeert de natuurlijke lignine die aanwezig is in het hout als bindmiddel. In het droge procedé daarentegen wordt er wel een bindmiddel toegevoegd, maar er zijn milieuvriendelijke opties beschikbaar.^{XCIX} Onze voorkeur gaat uit naar houtvezelplaten geproduceerd via het natte procedé. Tot deze categorie behoren de hardboards en zachtboards. Bij hardboards komen er praktisch geen toeslagstoffen aan te pas en worden de vezels geperst tot een plaat waardoor de lignine vrijkomt. Slechts 1% fenolharsen worden toegevoegd en soms worden paraffine of olie gebruikt om de vochtbestendigheid te verbeteren. Bij de zachtboards komt er geen pers aan te pas, hier worden de vezels aan elkaar vervild en wordt er een kleine hoeveelheid paraffine toegevoegd.^C Deze platen zijn recycleerbaar en composteerbaar.^{CI}

3.5.3. Katoen

Gerecycleerd katoen, afkomstig van de textielindustrie kan worden hergebruikt als isolatie. Katoen heeft namelijk goede thermisch en akoestische kwaliteiten. Over de hele wereld wordt katoen toegepast bij het maken van kledij er is dus in de meeste regio's een grote hoeveelheid beschikbaar katoen. De eigenlijke productie van katoen is zeer milieuonvriendelijk, daarom is het interessant om het product te recyclen en zo de milieu-impact te verminderen. In België wordt het product Metisse gemaakt, hiervoor wordt katoen gebruikt uit een depot in Rijsel, de korte afstand zorgt voor een lage

CO₂ productie ten gevolge van transport.^{CII} Voor de productie worden enkel stoffen gebruikt die 100% uit katoen bestaan, de weefsels worden gescheurd in kleine vezels en behandeld met verschillende stoffen waarbij de voorkeur gaat naar ecologische alternatieven. Deze additieven zorgen voor de brand- en schimmelwerendheid. Als bindmiddel wordt polyester toegevoegd, door de verhitting tot 100°C smelt het polyester en wordt het samen met de katoenvezels één massa. Op deze manier worden dekens, platen of vlokken geproduceerd.

3.5.4. Carbstone klinkers

Carbstone klinkers worden gemaakt uit restproducten, namelijk de staalslakken van de staalindustrie. Ze worden getoond in figuur 22. De slakken worden eerst vermaalt tot een poeder waarna ze met toevoeging van water in een vorm worden gegoten. In een afgesloten kamer wordt CO₂ ingepompt, hierdoor nemen de stenen de CO₂ op en start het proces van carbonisatie waardoor calciumcarbonaat gevormd wordt. Het product neemt CO₂ op en stoot het niet uit, zo neemt één kubieke meter carbstone klinkers 350kg CO₂ op.^{CIII} Er is tegenwoordig een omschakeling bezig van portlandcement naar hoogovencement waardoor de vraag naar hoogovenslak zal toenemen. Hierdoor is er een grotere vraag naar hoogovencement dan dat er aanbod van hoogovenslak is. Daardoor is het mogelijk dat hoogovenslak een hoofdproduct wordt waardoor het idee van CO₂ reductie niet meer valabel is. Daarom keuren we dit product op dit moment af.^{CIV}



Figuur 22: Carbstone klinkers^{CV}

3.5.5. Cellenglas

Glasschuim wordt in België geproduceerd onder de productnaam FOAMGLAS. Dit product bestaat minimaal uit 60% gerecycleerd glas en 40% uit andere grondstoffen zoals zand en kalk. Het wordt daarom beschouwd als restproduct van de glasindustrie. Het glas wordt eerst vermalen en gemengd met koolstof waarna het in de oven wordt geëxpandeerd. Enkele eigenschappen zijn: thermische isolator, onbrandbaarheid, goed druksterkte en waterbestendigheid.^{CVI} Zijn voornaamste toepassing zit in de isolatie van daken, vloeren en muren waarbij het voorkomt in de vorm van platen en granulaten. Het kan daarnaast in de grond gebruikt worden als randisolatie en als vloer op volle grond waarbij het de betonplaat vervangt zoals de variant met schelpen.

3.5.6. Urban mining

Binnenin restproducten kan er ook gekeken worden naar urban mining. Dit zijn bouwmaterialen die worden ontgonnen uit een afgebroken project en daarna worden hergebruikt in een nieuw project.^{CVII} Dit is een bijzonder brede categorie waar momenteel nog verder onderzoek over wordt uitgevoerd. Het is zeker nog geen standaardpraktijk om een gebouwschil zorgvuldig te demonteren en de materialen opnieuw toe te passen. Er zijn enkele initiatieven die zich hier op inzetten zoals ROTOR of Opalis. Daarom willen we dit ook in deze thesis vermelden als optie zonder hier een must van te maken. Als er bijvoorbeeld hout wordt toegepast in de bouwdetails, dan kan er ook gekozen worden om met hergebruikt hout te werken in plaats van nieuw gekapt hout.

In tabel 8 worden enkele materialen opgelijst die binnen deze toepassing vallen. Er wordt ook telkens aangegeven welke functie deze materialen zouden kunnen vervullen.

Hergebruik van materialen										
Materiaal	Vloer	Vloerbekleding			Wandbekleding		Gevelbekleding		Vloer	Fundering
		Vochtige ruimtes	Niet vochtige ruimtes	Intensief gebruik	Niet-intensief gebruik	Waterdicht	Niet-waterdicht	Stijl/regel		
HOUT										
Steenschotten			x							
Scheepshout			x							
Constructiehout								x		
Gelijmd gelamelleerd hout								x		
Schuurhout						x				
Plankenvloer in massief hout			x							
BAKSTEEN										
Vol keramisch										
Straatbaksteen	x									x
LEIEN										
Natuurleiste							x			
TEGELS										
Ongeglazuurde keramische tegels		x								
Ongeglazuurde terracotta tegels			x		x					
Faience tegels					x					
Cementtegels			x	x						
Verhoogde vloeren									x	
BETON										
Betonbreuksteen									x	x

Tabel 8: Hergebruik van materialen (zie bijlage 5)

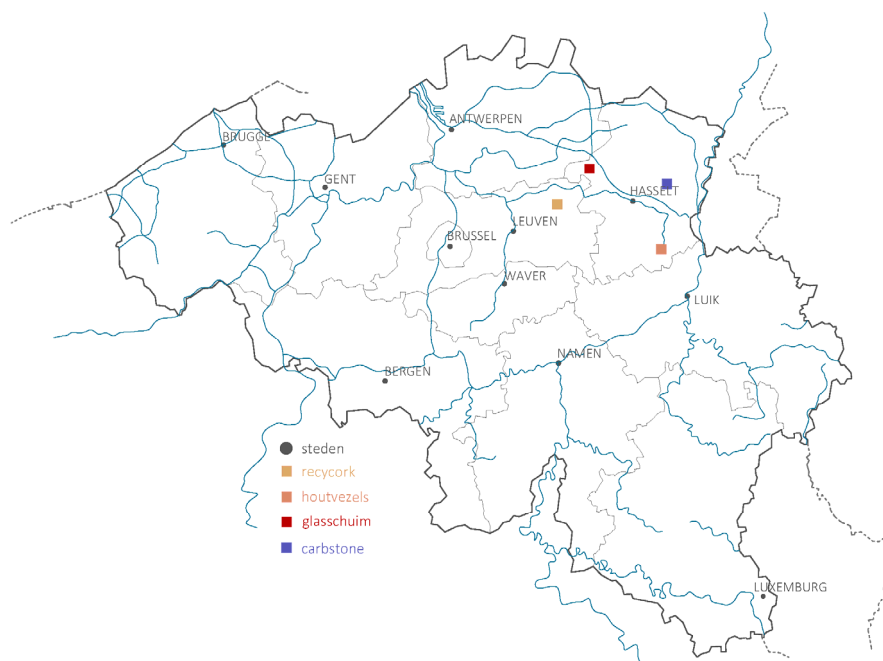
3.5.7. Conclusie

Uit deze korte analyse wordt duidelijk dat er enkele interessante restproducten op de markt zijn voor de toepassing binnen het bio-ecologische bouwen. Ze zorgen er niet alleen voor dat de bijproducten of afval van andere productieprocessen of materialen niet verloren gaan maar beschikken daarnaast ook over een lagere CO₂ uitstoot dan het hoofdproduct. Een belangrijke opmerking, is dat het restproduct nooit het hoofdproduct mag worden. Hiermee wordt bedoeld dat de vraag naar het restproduct in zijn rauwe vorm niet groter mag zijn dan het aanbod ervan waardoor het restproduct geproduceerd wordt als doel op zich zonder nog de status van bijproduct te bezitten. Dan verliest het zijn positief effect en kan het niet langer als bio-ecologisch product beschouwd worden. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de carbstone klinkers.

Verder zien we ook het nut van het hergebruik van bestaande materialen. Deze kunnen aangewend worden wanneer deze optie zich voordoet als alternatief voor een nieuw bio-ecologisch materiaal. Het gaat voornamelijk over producten voor de afwerking van vloer, wand en gevel. De beschikbaarheid van dergelijke materialen kan echter sterk verschillen waardoor de keuze gelimiteerd kan zijn en het per project moet bekeken worden wat de mogelijkheden op dat moment zijn. Dit is de reden waarom deze producten in deze thesis nog niet toegepast worden. Door hier in de toekomst verder in te investeren en meer materialen bij afbraak te bewaren kan dit een onderdeel worden van de standaard praktijk.

In tabel 9 worden de producten getoond en beoordeeld op basis van enkele criteria zoals productieplaats, aanwezigheid in België, chemische bewerking etc. Wanneer het product niet voldoet aan een enkel criterium, wordt het niet langer aanvaard. Met gevolg dat het niet meer wordt opgenomen in de functietabel. In figuur 23 worden de productieplaatsen van deze producten in België visueel weergegeven.

De conclusie die in deze tabel 9 naar voor komt, is een aanzet en werd gebaseerd op een inleidend onderzoek. Verder gedetailleerd onderzoek per materiaal kan nog aanleiding geven tot verdere nuances of diepere inzichten. Ook zijn er uiteraard nog meerdere materialen of producten die binnen deze categorie vallen. Dit is echter geen onderdeel meer van deze thesis en daarom wordt er op basis van deze uitkomsten verder gewerkt.



Figuur 23: Map restproducten in België

Restproducten									
Materiaal	CO2 absorptie	Ecologie			Productie	Materiaal	Afstand tot Brussel	Risico verschuiving van bij- naar hoofdproduct	Chemische bewerking
		Productie Europa + ecologisch in België	Productie in België	Materiaal aanwezig in België					
Recycork			x	x	Scherpenheuvel	Recycork	70 km		
Houtvezels	20-30 kg per boom		x	x	Tongeren	Houtvezels	90 km		Niet noodzakelijk
Katoen		x	x	x	Billy-Berclau (Metisse)	Katoen	130 km		
Carbstone	350 kg per 1m³		x	x	Genk	Carbstone	100 km	x	
Glasschuim			x	x	Tessenderlo	Glasschuim	68 km		

3.6. Membranen

Om een goede waterdichting van het gebouw te kunnen garanderen worden membranen gebruikt. Het merendeel van de membranen wordt van aardolie gemaakt. Dit valt niet in lijn met de opzet van de thesis maar als de waterdichting niet voldoende verzekerd kan worden op een andere manier zullen we hier toch gebruik van moeten maken. We proberen dan wel de meest sustainable variant te gebruiken.

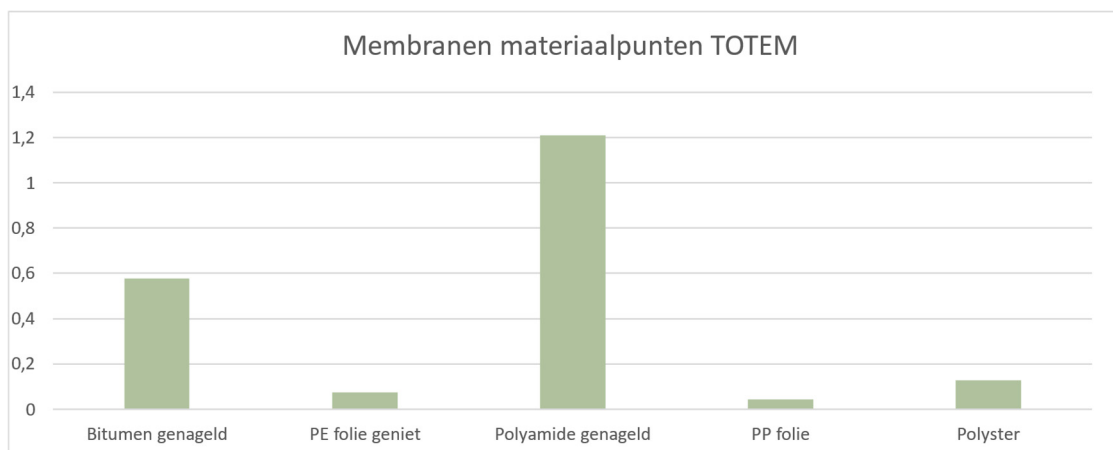
Voor een eerste selectie van de membranen werd er gekeken naar TOTEM en Nibe. Materialen die duidelijk slechter scoren dan de anderen werden niet verder onderzocht. Bij Nibe selecteerden we enkel producten die tot milieuklasse 1 en 2 behoren. Dit was het geval voor polyamide, het plantaardig membraam en het bitumineus membraam. Bij TOTEM werden enkel de membranen met elkaar vergeleken en geen volledige vloeropbouw. Als functionele eenheid werd de U-waarde genomen deze is steeds 5,88 W/(m²K).

Daarnaast leggen we nog drie andere eisen op aan de membranen: de omkeerbaarheid van de verbinding, de recycleerbaarheid van het membraam en de afgifte van schadelijke stoffen. De recycleerbaarheid is moeilijk te controleren, fabrikanten vernoemen dit vaak maar dat betekent niet dat het gebeurt. We zijn er nu van uit gegaan dat het product recycleerbaar is als de basisgrondstof recycleerbaar is en als het product omkeerbaar verbonden is. We beschouwen het product als omkeerbaar verbonden indien deze ook mechanisch verbonden kan worden, dit is het geval voor de meeste folies. De resultaten uit TOTEM en Nibe worden getoond in figuur 24 en 25 en tabel 10. (TOTEM en Nibe werden beiden gecheckt eind november 2021.)

De materialen werden:

Membranen in Nibe		
	Milieuklasse	Schaduwkosten
EPDM 1,5mm (mech. bevestigd en gelijmd)	1a	€ 1,23
EPDM 1,5mm (mech. bevestigd en gelast)	1a	€ 1,26
POCB 3,2mm met retoursysteem (mech. bevestigd)	1b	€ 1,39
EPDM, sbs cachering 2,5mm (mech. bevestigd)	1c	€ 1,66
TPO banen 1,2mm (mech. bevestigd)	2a	€ 2,19
PVC banen 1,5mm (mech. bevestigd)	2a	€ 2,22
Plantaardig membraan 3,0mm (mech. bevestigd)	3a	€ 3,85
Bitumen APP 7mm (mech. bevestigd)	3c	€ 4,92
Bitumen SBS 7mm (mech. bevestigd)	3c	€ 5,06

Figuur 24: Milieuklasse en schaduwkosten van membranen^{CVIII}



Figuur 25 :Materiaalpunten TOTEM

Materiaalpunten TOTEM	
Materialen (mPt/FE)	
Bitumen genageld	0,58
PE folie geniet	0,07
Polyamide genageld	1,21
PP folie	0,04
Polyster	0,13

Tabel 10: Materiaalpunten TOTEM^{CIX}

3.6.1. Bitumen

Bitumen kunnen in de natuur worden teruggevonden in Canada. Daarnaast komen ze ook voort uit de industrie waar ze achterblijven als zwaarste bestandsdeel tijdens het destilleren van ruwe olie. Bitumen worden gebruikt voor wegbedekking maar het is ook één van de meest gekende producten voor de afdichting van platte daken. Er zijn twee soorten bitumendakbedekking namelijk bitumen op basis van elastomeren (SBS) en bitumen op basis van plastomeren (APP). Door de toevoeging van elastomeren wordt de elasticiteit, hechtcracht en flexibiliteit van de bitumen sterk verhoogd. APP bitumen zijn daarentegen beter bestand tegen UV-straling en extreme temperaturen.^{CX} Maar door de slechte resultaten uit Nibe wordt dit product direct geschrapt, zie figuur 24. Daarnaast zijn er bronnen die melden dat bitumen watervervuiling kunnen veroorzaken door uitloging van de aanwezige mineralen via regenwater.^{CXI} Andere onderzoeken en bronnen spreken dit dan weer tegen.^{CXII}

3.6.2. TPO

TPO of Thermoplastisch Polyolefinen is een thermoplastisch elastomeer op basis van olefinen.^{CXIII} Thermoplastische elastomeren zijn gemakkelijk te recyclen omwille van hun chemische structuur. De crosslinks tussen de verschillende polymeerketens breken bij rijzende temperaturen en hervormen zich bij het afkoelen van het materiaal. Hierdoor zijn ze naast recycleerbaar ook makkelijk te vervormen.^{CXIV} In tegenstelling tot PVC wordt er geen chloor toegevoegd. Er worden echter wel stabilisatoren voor een verbetering van de UV- en brandbestendigheid toegevoegd.^{CXV} Bekijken we de drie voorwaarden opgesteld voor membranen, dan zien we dat TPO slaagt voor alle drie. Het materiaal is zoals beschreven makkelijk recycleerbaar, het laat geen giftige stoffen vrij en de verbinding is omkeerbaar.

3.6.3. PP folie

Polypropyleen of PP is een thermoplast daarom is het makkelijk te lassen en te recyclen.^{CXVI} Dit werd reeds beschreven in '3.6.2. TPO'. Daarnaast is het zeer goed bestand tegen chemicaliën, bacteriën, corrosie en is het hittebestendig. PP membranen zijn dun maar hebben toch een hoge sterkte. Ze bieden daarnaast een volledige bescherming tegen vocht.^{CXVII} Dit product voldoet bijgevolg aan de drie eisen.

3.6.4. PE folie

PE staat gekend als polyetheen of polyethyleen en is een van de meest gebruikte kunststoffen op dit moment. Dit omdat het heel sterk, slijtvast en goedkoop is. Het geeft geen schadelijke stoffen vrij tijdens gebruik omdat het bestendig is tegen bacteriën en corrosie.^{CXVIII} Ook UV-licht tast de structuur van PE niet aan als de juiste additieven worden toegevoegd. De additieven zorgen ervoor dat bij de verbranding van PE, giftige stoffen vrij komen.^{CXIX} Als we echter naar de resultaten uit TOTEM kijken, is de milieu impact van PE eerder laag. We moeten voor ogen houden dat het verbranden van kunststoffen altijd voor problemen zal zorgen maar doordat de resultaten in TOTEM zo positief zijn over PE keuren we het materialen nog niet af. PE is een thermoplast en is daardoor ook recycleerbaar. Mechanische verbindingen zijn daarnaast ook mogelijk, hierdoor scoort PE positief op de drie eisen.

3.6.5. PVC

Polyvinylchloride of PVC is een thermoplast die goedkoop, recycleerbaar en eenvoudig te bewerken is. Het is een licht materiaal dat waterbestendig en dampdoorlatend is. Het staat echter bekend als een minder sustainable product dan de andere membranen. Dit komt door de toevoeging van verschillende weekmakers, loodhoudende stabilisatoren en gechloreerde koolwaterstoffen. Daarom wordt het materiaal afgekeurd.^{CXX}

3.6.6. PU

Polyurethaan is een polymeer bestaande uit twee segmenten, een hard en een zacht segment. Hierdoor wordt het een rubberachtige vloeistof die buigzaam maar tegelijk ook sterk en slijtvast is. Polyurethaan wordt vaak gebruikt in de vorm van een schuim, dit biedt een naadloze waterdichting door binnen te dringen in alle capillaire scheuren. Dit type van verbinding is onomkeerbaar en daarom keuren we PU-schuim af. Daarbij kan PU ook schadelijk zijn voor de gezondheid, daarom keuren we PU helemaal af in deze thesis.^{CXXI}

3.6.7. DPC

DPC staat voor Damp Proof Course en wordt geproduceerd op basis van gerecycleerd polyethyleen. Het wordt meestal toegepast als een waterdichte en vochtwerende folie voor opstijgend vocht in de muurvoet maar kan ook worden gebruikt in kelders, funderingen, raamaansluitingen,

Als we de drie testen bekijken, zien we dat DPC op alle drie positief scoort. De folie is al gemaakt van gerecycleerd materiaal en kan later eventueel ook zelf terug worden gerecycleerd. Het laat geen schadelijke stoffen vrij zelfs als de folie in brand zou vliegen. Daarnaast is het ook bestand tegen zuren die aanwezig zijn in het grondwater. Het is echter niet bestand tegen UV-straling. DPC-folies worden best gelijmd maar kunnen indien gewenst ook geniet worden waardoor de verbinding toch omkeerbaar is, dit laatste krijgt natuurlijk onze voorkeur.^{CXXII}

3.6.8. POCB

POCB bestaat uit twee verschillende componenten: een kunststof en polyolefinen (PO) met copolymeer bitumen (CB). Het is een éénlaags membraam dat makkelijk te verwijderen en te recyclen is op het einde van zijn levensduur.^{CXXIII} Ze worden zonder open vlam maar met hete lucht geplaatst, hierdoor wordt het risico op brand sterk vermindert. Daarnaast komen er ook geen schadelijke stoffen vrij tijdens de levensduur van het materiaal.^{CXXIV} Hierdoor scoort POCB op alle drie de eisen positief.

3.6.9. Cementgeboden coating

Cementgebonden coatings bestaan uit zand, organische en anorganische chemicaliën en silica gebaseerde stoffen. Door middel van een hydratatiereactie ontstaat de waterdichte afsluiting. Maar aangezien het product geen onomkeerbare verbinding kan voorzien, wordt het geschrapt.^{CXXV}

3.6.10. Plantaardig membraam

Nibe vermeldt ook een plantaardig membraam, het is onduidelijk welk membraam wordt bedoeld maar na enige research werd een plantaardig, wit dakmembraam van Derbipure gevonden.^{CXXVI} Dit membraam wordt gemaakt uit twee biologische restproducten namelijk: plantaardige oliën, een restproduct bij de productie van biodiesel of biopolymeren, en harsen, een restproduct afkomstig van de papierindustrie.^{CXXVII} Maar aangezien het product nog niet aanwezig lijkt te zijn op de markt en niet voldoet aan de eis opgelegd in Nibe, wordt het afgekeurd in dit onderzoek.

3.6.11. EPDM

EPDM of Ethyleen Propyleen Dieen Monomeer is een veelgebruikt, synthetisch rubber dat voldoet aan onze drie eisen. EPDM kan mechanisch worden bevestigd, is recycleerbaar en geeft geen giftige stoffen af. Omwille van dit laatste wordt EPDM vaak gebruikt in combinatie met groendaken en regenwateropvang.^{CXXVIII} Daarnaast heeft het ook een lange levensduur van minstens 50 jaar. Een

onderzoek door het Duits kunststofcentrum SKZ uit Würzburg in opdracht van de Duitse rubberindustrie 'WDK' en de Benelux vereniging van EPDM-producenten 'VESP', meldt zelfs een levensduur van 70 jaar.^{CXXIX} Hierdoor en ten gevolge van de lage productie-energie wordt EPDM vaak gezien als het meest sustainable alternatief voor waterdichting. Organisaties als Greenpeace beschouwen EPDM dan ook als een ecologisch verantwoord bouw materiaal.^{CXXX}

Een studie door the GreenTeam toont aan dat de ecologische voetafdruk van EPDM op lange termijn significant beter scoort dan andere membranen. Uit de studie blijkt dat de manier van bevestiging eigenlijk weinig tot geen impact heeft op de voetafdruk van de membranen. Aan het eind van de studie heeft het GreenTeam vastgesteld hoeveel jaar elk daksysteem zou moeten presteren om de CO₂-uitstoot, ontstaan tijdens de fabricage en installatie, teniet te doen. EPDM bleek de laagste levensduurequivalenten te hebben. Wat betekent dat een EPDM-systeem minder onderhoudstijd nodig heeft om koolstofneutraal te worden dan zijn tegenhangers. Gecombineerd met zijn lange levensduur is het makkelijk te verklaren dat EPDM beschouwd wordt als een van de meeste duurzame en sustainable systemen.^{CXXXI}

3.6.12. Conclusie

In tabel 11 wordt een overzicht gegeven van het voorgaande onderzoek over membranen. De membranen werden op drie eisen gecontroleerd nl: de omkeerbaarheid van de verbinding, de recycleerbaarheid van het membraam en de afgifte van schadelijke stoffen. Daarnaast werden ook Nibe en TOTEM gecontroleerd. Materialen die duidelijk slechter scoren dan de anderen werden niet verder onderzocht. Bij Nibe selecteerden we enkel producten die tot milieuklasse 1 en 2 behoren. Bij TOTEM werden enkel de membranen met elkaar vergeleken en geen volledige vloeropbouw. Als functionele eenheid werd de U-waarde genomen deze is steeds 5,88 W/(m²K). Zodra een product op een van de vijf opgelegde eisen faalden werd het niet verder onderzocht op de andere eisen. Dit werd aangegeven met een rood kruisje. Materialen in het groen worden goedgekeurd over de hele lijn.

Membranen					
	Omkeerbare verbinding	Recycleerbaar	Schadelijke stoffen	Nibe oke	TOTEM oke
Bitumen				X	
TPO	X	X	X	X	
PP folie	X	X	X		X
PE folie	X	X	X		X
PVC			X		
PU	X (Schuim)		X		
DPC	X	X	X	X	
POCB	X	X	X	X	
Cementgebonden coating	X				
Plantaardig membraam				X	
EPDM	X	X	X	X	

Tabel 11: Membranen (zie bijlage 7)

3.7. Functietabel

Als laatste stap stelden we een functietabel, tabel 12, op van de verschillende materialen. Hierin wordt getracht een overzicht te geven van het toepassingsgebied van de goedgekeurde materialen en kan de tabel werken als een tool bij het toepassen van bio-ecologische materialen. Alle materialen die in bovenstaande hoofdstukken werden afgekeurd zijn dus niet meer te vinden in deze overzichtstabel.

We onderscheiden zes functies en delen deze op in hun verschijning. Zo werd 'Structuur' opgedeeld in een volle structuur of een skeletvorm en 'Isolatie' in matten, harde platen, inblaas of akoestische isolatie. 'Waterdichting' werd onderverdeeld in membranen en andere types. Onder de term anders vinden we de schelpen terug en producten die voor een goede vochthuishouding zorgen binnen het gebouw. Luchtdichting werd onderverdeeld in membranen, pleisters en andere types. "Afwerking" werd opgedeeld in de categorieën buitengevel, pleister, verf en vloer, waarbij de laatste drie gelden voor toepassing in het interieur. Als laatste onderscheiden we ook nog 'Bodemafdichting' hieronder beschouwen we materialen die gebruikt worden in kruipkelders en de bodem afsluiten.

Het is duidelijk dat het aanbod aan bio-ecologische materialen uitgebreid is maar dat er ook enkele relatief onbekende materialen op de markt zijn waar vandaag nog weinig aandacht aan besteed wordt. De reden hiervoor is hun nieuwe karakter en daardoor vaak ook beperkte kennis en onderzoek van hun karakteristieken en gedragingen op lange termijn. Hierdoor moet er teruggevallen worden op informatie van producent of ervaringen van gebruikers voor de toepassing ervan. Deze zijn vaak nog niet volledig wetenschappelijk onderbouwd en behoeven verdere scherpstelling. Tegelijk worden deze producten vaak in kleine volumes op de markt gebracht waardoor de toepassing in grote hoeveelheden nog niet mogelijk is.

Functietabel														
Materialen	Structuur		Isolatie			Waterdichting		Luchtdichting			Afwerking			Bodemafsluiting
	Brik/Blok/Vol	Skelet	Matten/Rol	Harde platen	Inblaas	Akoestisch	Membraam	Anders	Membraam	Pleister	Buitengevel	Pleister	Verf	Vloer
<i>Geologie</i>														
Leem	X									X	X			X
Zand	X										X			
Grind	X										X			
Klei	X										X			X
Zandsteen	X										X			X
Kalksteen	X										X			X
Porfier	X										X			X
Leisteen	X							X			X			X
<i>Plantaardig</i>														
Hennep			X	X	X	X		X		X				
Vlas			X	X	X	X		X						
Gras			X			X								
Stro	X			X										
Riet				X		X				X				
Hout	X	X									X			X
Hout- OSB		X												X
Hout- Houtspaanplaat		X												X
Hout- Houtvezelplaat		X		X										X
Hout- Multiplex		X												X
Hout- CLT		X									X			X
Cellulose			X		X	X								
Schelpen			X		X			X						
Pluimen					X								X	
Bijenwas													X	
Kalk									X			X	X	
<i>Restproducten</i>														
Kurk					X									
Houtvezels			X	X		X								
Katoen			X	X	X									
Cellenglas				X	X									
Urban mining														X
Hierin zijn er verschillende mogelijkheden meer onderzoek is echter noodzakelijk.														
<i>Membranen</i>														
TPO														
PP folie														
PE folie														
DPC														
POCB														
EPDM														

Tabel 12: Functietabel (zie bijlage 8)

EINDNOTEN

-
- ^I De Ridder Bart et al., *“Berekening van de grondstoffenconsumptie in Vlaanderen (1991-2001).”*, MIRA, 2002.
- ^{II} De Ridder et al. *“Berekening van de grondstoffenconsumptie in Vlaanderen (1991-2001)”*.
- ^{III} Vercalsteren An, Van der Linden Ann, Dils Evelien en Geerken Theo. *“Milieu-impact van productie- en consumptieactiviteiten in Vlaanderen.”*, Vlaamse Milieumaatschappij en MIRA, 2012.
- ^{IV} De Ridder et al., *“Berekening van de grondstoffenconsumptie in Vlaanderen (1991-2001)”*.
- ^V De Ridder et al., *“Berekening van de grondstoffenconsumptie in Vlaanderen (1991-2001)”*.
- ^{VI} OEC, *“Belgium.”*, Datawheel.
- ^{VII} OEC, *“Belgium.”*.
- ^{VIII} Belgian Foreign Trade Agency, *“Belgium Foreign Trade.”*.
- ^{IX} OEC, *“Belgium.”*.
- ^X OEC, *“Belgium.”*.
- ^{XI} VRT. *“China koopt massaal hout in ons land boven de marktprijs waardoor zagerijen in de problemen komen, zegt beroepsvereniging.”*.
- ^{XII} Oldenburger Jan, Dries Van der Heyde, Fons Voncken en Bert De Somviele. *“Werkpakket 3- Vraag en aanbod op de houtmarkt in Nederland en Vlaanderen, Activiteit 1 –Houtstromen in kaart brengen.”*, Interreg, 2017.
- ^{XIII} Treehugger, *“Are adobe houses sustainable.”*.
- ^{XIV} Middleton G.F. *“Bulletin 5: Earth wall construction”*, CSIRO, 1995.
- ^{XV} O.O. Akinkulore, et al., *“Engineering Properties of Cob as a Building Material.”*, 2006.
- ^{XVI} Designing buildings, *“Cob building”*.
- ^{XVII} Fast company, *“Why we should be building like ancient Greeks”*.
- ^{XVIII} Britannica, *“Wattle and Daub.”*.
- ^{XIX} Ian Pritchett, *“Wattle and Daub”*.
- ^{XX} Orio architecten, *“Kalkhennep.”*.
- ^{XXI} Houtwereld, *“Er is weer oog voor vakwerkhuisen”*.
- ^{XXII} Bokrijk, *“Van houten skelet tot strodak”*.
- ^{XXIII} BC Materials, *“Producten.”*.
- ^{XXIV} Ecobouwers, *“Opendeur 2021”*.
- ^{XXV} Cartogis UGent. *“3.7 Delfstoffen”*.
- ^{XXVI} Cartogis UGent, *“3.7 Delfstoffen”*.
- ^{XXVII} Cartogis UGent, *“3.7 Delfstoffen”*.
- ^{XXVIII} JBhome, *“Isolatiebedrijf klei”*.
- ^{XXIX} De bodem afsluiter, *“Werking zand isolatie en bodemafsluiting”*.
- ^{XXX} De Roeck, M; Timont, J. *“Algemene Atlas.”*, Namen (Destination bw: esmael-charlier NV), 1956.
- ^{XXXI} Goemans, A, Vanderhallen D., *“Onze geologie staat in het landschap gegroefd.”*
- ^{XXXII} Sagrex, *“Quenast”*.
- ^{XXXIII} Carrieres de Hainaut, *“Belgian Bluestone”*.
- ^{XXXIV} Carrieres des Rochettes, *“Onze producten”*.
- ^{XXXV} Sagrex, *“Quenast”*.
- ^{XXXVI} Cupa Pizarra, *“Leisteen geschiedenis België.”*.
- ^{XXXVII} Atlas Belgique, *“Landschappen, platteland en landbouw”*.
- ^{XXXVIII} Huntjens W., *“Voordelig isoleren met een natuurlijk materiaal”*. Ik ga bouwen en renoveren, 2018, p.41-46.
- ^{XXXIX} Trends Knack, *“Gentse projectontwikkelaar teelt half miljoen hennepplanten op bouwsite”*.
- ^{XL} Made in, *“Hennepplantage op voormalige Philips-site in Turnhout”*.
- ^{XLI} Isohemp, *“Vloerisolatie met behulp van hennepblokken”*.
- ^{XLII} Huntjens W., *“Voordelig isoleren met een natuurlijk materiaal”*.
- ^{XLIII} Exie, *“Ecologisch bouwen met kalkhennep, het circulaire isolatiemateriaal”*.
- ^{XLIV} Eco-bouwmaterialen. *“Hennepblok 20cm.”*
- ^{XLV} Leendertse P. et al., *“Bijdrage van vlas en hennep aan de milieu-en klimaatdoelstellingen van het toekomstig EU-landbouwbeleid”*, CLM, April 2020.
- ^{XLVI} Landbouwleven, *“Vlas in de kustprovincie, het Texas van Vlaanderen”*.
- ^{XLVII} Leendertse P. et al., *“Bijdrage van vlas en hennep aan de milieu-en klimaatdoelstellingen van het toekomstig EU-landbouwbeleid”*.
- ^{XLVIII} Ecobouwers, *“Vlas isolatie als bio-ecologisch bouw materiaal”*.
- ^{XLIX} Restol, *“Natuurlijke lijnzaadolie”*.
- ^L Ecomat, *“Lijnolieverf: de verf van het verleden en vooral de toekomst”*.
- ^{LI} Restol, *“Natuurlijke lijnzaadolie”*.
- ^{LII} Forbo, *“Marmoleum natuurlijke grondstoffen”*.
- ^{LIII} Leendertse P. et al., *“Bijdrage van vlas en hennep aan de milieu-en klimaatdoelstellingen van het toekomstig EU-landbouwbeleid”*.
- ^{LIV} Stihu. *“Vlaswol.”*
- ^{LV} Leendertse P. et al., *“Bijdrage van vlas en hennep aan de milieu-en klimaatdoelstellingen van het toekomstig EU-landbouwbeleid”*.
- ^{LVI} Habitos, *“Isolatiematerialen uit nagroeibare grondstoffen”*.

-
- LVII Gramitherm, "Isolatiepanelen uit plantenvezels".
- LVIII C-bouwers. "Gramitherm."
- LIX Baustoffe. "Seegras."
- LX Neptugmbh, "Wat is Neptutherm".
- LXI Novifarm. "Tarwe".
- LXII Exie. "E-Xi Fibres Technische Fiche".
- LXIII Batic2. "Isolatiematerialen: stro", Interreg.
- LXIV Ecomat, "Ecomat rietrol".
- LXV Oldenburger J., Van der Heyden D., Voncken F., De Somviele B., "Eco2eco werkpakket 3 – Vraag en aanbod op de houtmarkt in Nederland en Vlaanderen. activiteit I – Houtstromen in kaart brengen", België: Gontrode (BOS+ Vlaanderen vzw), augustus 2017.
- LXVI Encon, "Berekening CO2 compensatie bomen".
- LXVII Het houtblad, "OSB: Oriented Strand Board.", Centrum Hout Almere, September 2011.
- LXVIII Vibe. "Houten plaatmateriaal", Vibe keuzefiche.
- LXIX De Roeck M., Vanroelen M., "Analyse van de milieu-impact van houtskeletwanden.", Masterproef.2018-2019.
- LXX De Roeck M., Vanroelen M., "Analyse van de milieu-impact van houtskeletwanden.", Masterproef.2018-2019.
- LXXI Vibe. "Houten plaatmateriaal", Vibe keuzefiche.
- LXXII Oldenburger J. et al., "Meer houtbouw in Nederland.", Stichting Probos.
- LXXIII Oldenburger J. et al., "Meer houtbouw in Nederland.", Stichting Probos.
- LXXIV Rosseneu I. en Vrebos A., "Critical evaluation of a novel construction material: bamboo", 2021.
- LXXV Van der Lugt P., Van den Dobbelsteen A., Abrahams R., "Bamboo as a building material alternative for Western Europe? A study of the environmental performance, costs and bottlenecks of the use of bamboo(products) in Western Europe.", In J. Bamboo and Rattan: Vol.2, No.3, 2003, p.205-233.
- LXXVI Van der Lugt P., Van den Dobbelsteen A., Abrahams R., "Bamboo as a building material alternative for Western Europe? A study of the environmental performance, costs and bottlenecks of the use of bamboo(products) in Western Europe.", In J. Bamboo and Rattan: Vol.2, No.3, 2003, p.205-233.
- LXXVII Vrebos A., Meiresonne E., "Projectoefening duurzaam bouwen", 2021.
- LXXVIII Vrebos A., Meiresonne E., "Projectoefening duurzaam bouwen", 2021.
- LXXIX Ecomat, "Kurkisolatieplaten".
- LXXX Ecomat, "Kokostrips en platen".
- LXXXI Kurk. "Kurkisolatie."
- LXXXII Ecomat, "Isoschelp".
- LXXXIII Isoschelp, "Hoe werken wij".
- LXXXIV Ecomat, "Cellulosevezel".
- LXXXV Bouwen en wonen, "Duurzame isolatie: voor- en nadelen van cellulose isolatie".
- LXXXVI Isoproc, "IQ3 cellulose isolatie".
- LXXXVII Wageningen university and research, "Dossier Methaan".
- LXXXVIII Vlaanderen, "Schaphouderij".
- LXXXIX Batiweb, "Batiplum premier isolant naturel breveté avec un avis technique CSTB".
- XC Schilderwerkensnel, "Kenmerken en prijzen van encaustic".
- XCI Ecomat, "Calcatex kalk caseïneverf".
- XCII Kalei, "Wat is kalei".
- XCIII Tierrafino, "Marokkaanse tadelakt". /
- XCIV KampC, "Cementloze dekvloer in't centrum", 30 september 2021.
- XCV Tierrafino, "Leemverf".
- XCVI Ecomat, "Stampleem".
- XCVII Recycork, "Home".
- XCVIII Kurkfabriek van Avermaet, "Geëxpandeerde kurkplaten".
- XCIX Eurabo, "Houtvezelisolatie".
- C Houtinfo, "Houtproducten plaatmaterialen". Infoblad 11, 2015.
- CI Soprema, "De zes voordelen van isoleren met houtvezelisolatie".
- CII Eurabo, "Métisse katoenisolatie".
- CIII Vito, "Gent draagt een duurzaam steentje bij".
- CIV Abt. "Hoogovenslak in beton en duurzaamheid; Hoe zit dat nou echt?".
- CV Stad Gent, "Eerste circulaire voetpad in Gent".
- CVI Foamglas, "Wat is cellulaire glasisolatie?".
- CVII Opalis, "Bouwen en renoveren met hergebruik".
- CVIII Nibe Milieuclassificaties.
- CIX TOTEM-Building.
- CX Technische werken, "Wat is bitumen en waarvoor wordt bitumen gebruikt?".
- CXI Gids voor duurzaam bouwen, "Elementen voor een duurzame keuze".
- CXII Architecture, "Bitumendaken hebben geen negatieve impact op de kwaliteit van gerecupereerd regenwater".
- CXIII Decorexpro, "Membraan waterdichting: soorten materialen en de voordelen van het gebruik".

-
- ^{CXIV} Wikipedia, *"Thermoplastisch elastomeer."*
- ^{CXV} BMT, *"Duurzaamheidsstudie EPDM."*
- ^{CXVI} Recycling, *"Wat is PP polypropyleen? PP polypropyleen is uitstekend recyclebaar."*
- ^{CXVII} KLV, *"Polypropyleen eigenschappen – PP voordelen en nadelen."*
- ^{CXVIII} UNIK, *"De unieke eigenschappen van polyethyleen."*
- ^{CXIX} Wikipedia, *"Polyetheen."*
- ^{CXX} Decorexpro, *"Membraan waterdichting: soorten materialen en de voordelen van het gebruik."*
- ^{CXXI} Vochtbestrijdingsnel, *"7 Soorten waterdichte materialen."*
- ^{CXXII} EPDMXL, *"EPDM of DPC gebruiken als waterkeringsfolie?"*
- ^{CXXIII} Dakdekker, *"POCB: Dakbedekking."*
- ^{CXXIV} BMT, *"Duurzaamheidsstudie EPDM."*
- ^{CXXV} Vochtbestrijdingsnel, *"7 Soorten waterdichte materialen."*
- ^{CXXVI} Architectura, *"Derbipure: een plantaardig dakmembraam."*
- ^{CXXVII} Pajot, *"Wereldprimeur: Belgische Derbigum lanceert Derbipure, het eerste plantaardig dakmembraam ter wereld"*
- ^{CXXVIII} Intratrade, *"EPDM."*
- ^{CXXIX} Vesp, *"Over EPDM, Nibe."*
- ^{CXXX} Interexpress, *"EPDM meest duurzame dakbedekking, Hoe milieuvriendelijk is EPDM nu echt?"*
- ^{CXXXI} Rubberbond, *"Sustainability of EPDM."*

INTRO

In dit onderdeel wordt een theoretisch onderzoek gedaan naar de eisen van de Belgische klassieke muurvoet zoals elke architect, aannemer en bouwkundig ingenieur deze kan tekenen. Dit onderzoek schept een kader voor de detaillering van muurvoeten uitgevoerd met bio-based materialen. Er werd gekozen om een strobalembouw en een stampaardeconstructie uit te werken. Omdat bij beide bouwmethodes meestal dampopen wordt gebouwd, schetsen we in het volgende onderdeel kort de situatie. De strobalembouw werd gekozen omwille van de opkomende interesse en zijn geschiedenis in België en Nederland. Om ook een massieve variant aan te bieden, werd er gekozen voor de muurvoet in stampaarde. Voor beide methodes werden alle eisen in verband met de muurvoet theoretisch beschreven aan de hand van papers en normen uit andere landen. Dit onderzoek schept een kader voor het gebruik van deze twee technieken. Extra onderzoek naar deze bouwmethodes is echter noodzakelijk, hierdoor kunnen informatie en aannames die in deze thesis werden gemaakt ondertussen achterhaald zijn.

De definitie van het WTCB over bouwdetails luidt als volgt:

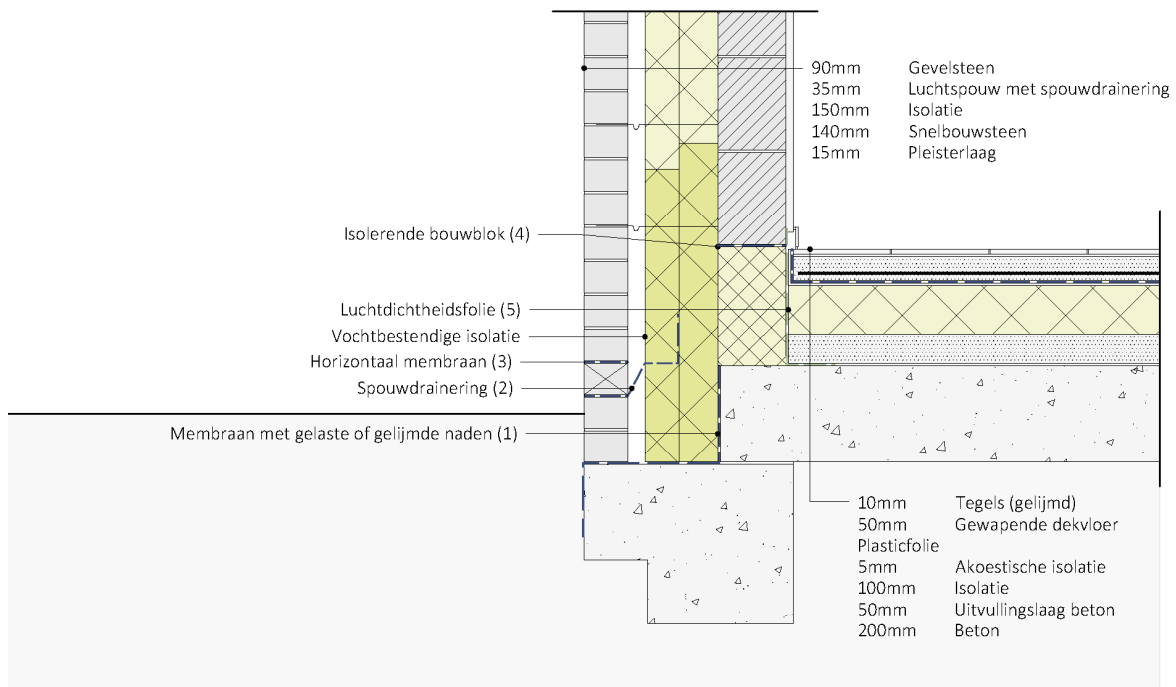
‘Het begrip ‘bouwdetail’ mag niet verward worden met de term ‘bouwknoop’ uit de EPB-regelgeving. Een bouwdetail duidt op elke verbinding of aansluiting tussen de elementen of onderdelen van een gebouw (bv. aansluiting muur-dak, muur-schrijnwerk), maar ook op elke lineaire of puntvormige onderbreking in een wand (bv. de doorboring van een wand voor de doorvoering van leidingen, het inwerken van elementen zoals stopcontacten of spots in een wand, de doorboring van een dak door het schoorsteenkanaal ...). Een bouwknoop is altijd een bouwdetail. Het omgekeerde is niet noodzakelijk waar!’¹

De muurvoet is een bouwdetail, meer specifiek waar de buitenmuur en gelijkvloers samenkomen. Het is een cruciaal punt waar bijzondere aandacht naar waterdichtheid en isolatie van belang is.

4. CONCEPTEN

4.1. Klassieke opbouw: spouwmuur

Bouwdetails moeten aan verschillende eisen voldoen voordat ze aanvaard kunnen worden in de normen. De eisen hebben te maken met stabiliteit, waterdichtheid, luchtdichtheid, In onderstaande tekst worden alle eisen kort toegelicht. De basis van deze eisen is algemeen en niet afhankelijk van de bouwmethode.



Figuur 26: Funderingsaanzet (gebaseerd op: WTCB, 2022)^{II} (zie bijlage 10a)

4.1.1. Stabiliteit

Dit is een van de basiscriteria voor bouwknoopen. De stabiliteit van het gebouw moet in elk element verzekerd worden gedurende de volledige levensduur van het gebouw.

Voor de muurvoet betekent dit dat het horizontale element alle verticale krachten moet kunnen opvangen en overdragen naar de grond. Indien nodig moet men de fundering plaatselijk wat breder maken zodat de hele muur ondersteund wordt. Dit is ook te zien in figuur 26. Extra maatregelen zijn nodig als het nabijgelegen maaiveld grote belastingen ondergaat zoals het geval is bij een parking. Hierbij is een stabiele gevelsteen en drukvaste isolatie misschien van toepassing.

Bij kleine belastingen (vloeren met een overspanning van vijf tot zes meter zoals bij residentiële gebouwen) en wanneer zowel de vloerelementen als de dragende muur of balk voldoende vlak zijn, kunnen deze balken ook rechtstreeks opgelegd worden. Indien de rotatie ter plaatse van de oplegging te verwaarlozen is, kan een droge oplegging ook aanvaard worden. Indien rotatie wel een probleem kan vormen is een extra verbinding nodig.^{III}

4.1.2. Waterdichtheid

Om de regendichtheid te verzekeren worden er verschillende membranen aangebracht, daarnaast zou de draagvloer zich eveneens hoger dan het maaiveld of de verharding rondom het gebouw moeten bevinden. Dit moet bekeken worden in samenspraak met de toegankelijkheid van de woning.

Er moeten een drietal folies worden aangebracht. Het eerste membraam (nr. 1 op figuur 26). wordt geplaatst onder de muuraanzet zodat er geen vocht vanuit de fundering in de muur kan binnendringen. Het tweede membraam (nr. 2 op figuur 26) dient voor de spouwdrainering en leidt het water in de spouw via de open stootvoegen naar buiten. Het derde membraam (nr. 3 op figuur 26) is optioneel en verhindert dat het water dat via de open stootvoegen wordt afgeleid via de bovenkant van de stootvoeg binnendringt in de muur. De continuïteit van de membranen rond de muurvoet is zeer belangrijk, daarom moeten de naden steeds gelast of gelijmd worden

4.1.3. Thermische isolatie

De thermische isolatie zorgt niet enkel voor thermisch comfort in de woning maar vermijdt ook de groei van schimmels. Om een EPB-aanvaarde bouwdetail te bekomen bestaan er drie basisregels, deze worden ook getoond in figuur 27:

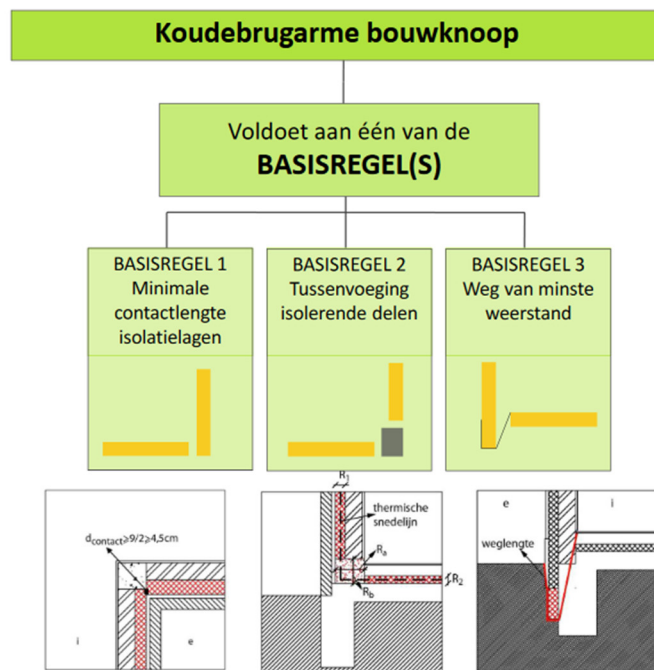
Basisregel 1 “Continuïteit van de isolatielagen door een minimale contactlengte”: de isolatielagen sluiten rechtstreeks op elkaar aan met een minimale contactlengte. De contactlengte wordt bepaald aan de hand van volgende formule:

$$d_{contact} \geq \frac{1}{2} * \min (d_1, d_2). \text{ (formule 1)}$$

Met $d_{contact}$ bedoelt men de contactlengte van de isolatielagen gemeten tussen de koude en warme zijde en d_1 en d_2 de diktes van de isolatielagen van de 2 samenkomende scheidingsconstructies.^{IV}

Basisregel 2 “Continuïteit van de isolatielagen door tussenvoeging van isolerende delen”: de isolatielagen sluiten niet rechtstreeks op elkaar aan maar er zijn wel isolerende elementen tussengevoegd zodat de thermische snede behouden blijft. Dit gebeurt ook op figuur 26 waar nr.4, een isolerend bouwblok, voor de continuïteit van de isolatie zorgt. Men moet hier wel opletten dat de stabiliteit van de muur nog steeds behouden blijft.^V

Basisregel 3 “Minimale lengte van de weg van de minste weerstand”: de isolatielagen sluiten hierbij niet rechtstreeks op elkaar aan en de thermische snede kan niet behouden blijven, maar de weg van de minste weerstand is voldoende lang. Als deze basisregel wordt toegepast, dient men ervoor te zorgen dat de lengte van de weg van de minste weerstand minstens één meter bedraagt.^{VI}



Figuur 27: Overzicht basisregels voor het vermijden van koudebruggen^{VII}

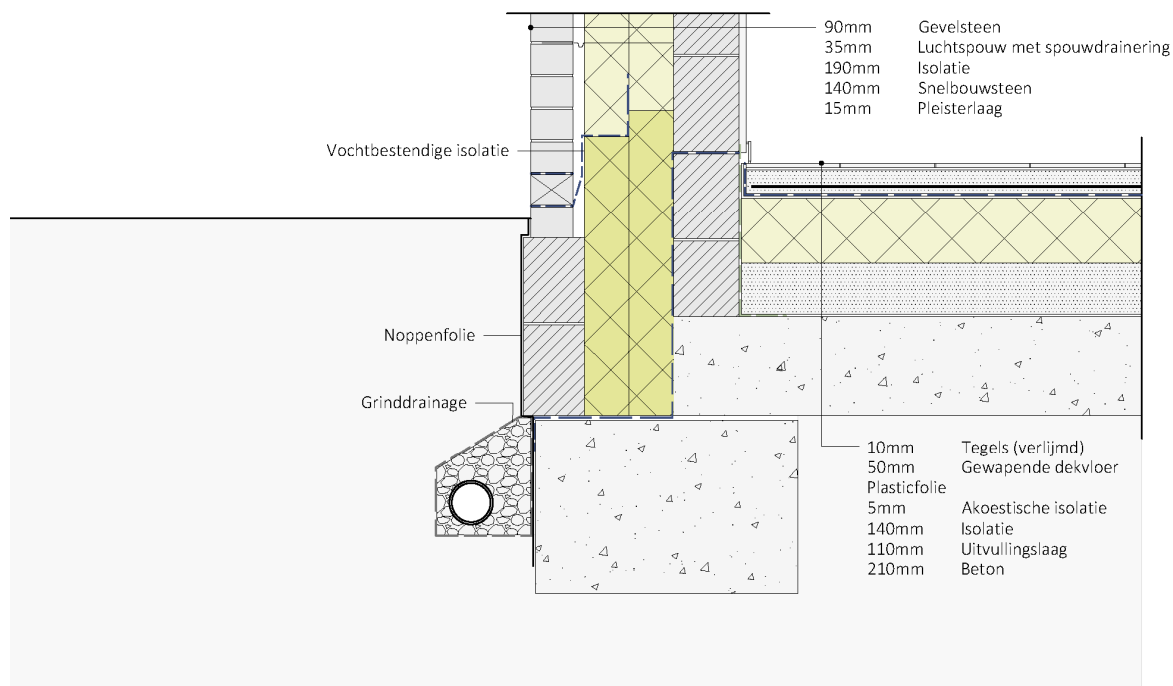
Voor de uitvoering is het belangrijk dat de isolatieplaten nauw tegen elkaar en tegen de draagmuur aansluiten om een goede isolatiewaarde te voorzien. Indien de isolatie in meerdere lagen wordt uitgevoerd is het ook belangrijk de naden te laten verspringen. Wanden en vloeren moeten voldoen aan de eis van $U \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

4.1.4. Luchtdichtheid

De luchtdichtheid wordt meestal voorzien door een gipsgebonden bepleistering op het binnenspouwblad. Deze kan echter niet helemaal tot aan de vloer worden aangebracht aangezien er dan vocht vanuit de muurvoet of door het poetsen van de vloer kan binnendringen in de pleister. Dit zou vochtvlekken kunnen veroorzaken. De continuïteit van de luchtdichtheid moet ook in de bouwdetail verzekerd worden, daarvoor kan een geschikt (bepleisterbaar) membraan of een dun aangebracht vloeibaar product, een vochtbestendige muurvoetbepleistering (bv. een luchtdichte cementering) met een toereikende dikte of het spouwmembraan (nr.5 in figuur 26) worden gebruikt.^{VIII}

4.1.5. Toegankelijkheid

Doordat de bovenzijde van de draagvloer zich hoger bevindt dan het maaiveld (150mm), kan de toegankelijkheid van de woning een probleem vormen. Als men dit niveauverschil verlaagt groeit echter de kans op waterinfiltraties. Omdat een hoogteverschil van 200-300mm niet altijd toegankelijk is voor rolstoelgebruikers, streeft men meestal naar een maximaal hoogteverschil van 20mm ter plaatse van de deuropeningen. Dit is mogelijk met een afvoer voor de opening. Deze lijnafwatering voor openingen zorgt ervoor dat regenwater moeilijker naar binnen kan stromen. Daarnaast wordt er ook aangeraden om het terrein rond de woning in een helling van minimaal 1,5% te leggen, aflopend weg van de woning in combinatie met een drainering langs de fundering zoals te zien is op figuur 28. De drainering bestaat uit drie elementen: een collectorbuis, een drainerend materiaal en een filterdoek. De drie elementen moeten allemaal aangepast zijn aan de eigenschappen van de grond. Daarnaast moet de collectorbuis ook onder een toereikende helling geplaatst worden (0,5 % tot 1 % en nooit in tegenhelling) zodat de stroomsnelheid van het water hoog genoeg is.^{IX}



Figuur 28: Funderingsaanzet met drainage (gebaseerd op: WTCB, 2022)^x (zie bijlage 10b)

4.1.6. Akoestiek

Akoestiek is vooral belangrijk in grotere gebouwen waar een massa-veer-massa tussenlaag vereist is om contactgeluiden tegen te gaan. Voor een eengezinswoning is dit vaak niet van toepassing. De norm NBN S 01-400-1 geeft verschillende eisen voor de akoestiek op site. Aangezien we enkel beschikken over gegevens van laboratorium testen is het moeilijk om deze eis toe te passen. Daarom zullen we de R_w -waarde van stobalen en stampaarde vergelijken met verschillende andere materialen. Op deze manier kan toch een beeld gevormd worden van hun prestaties. De R_w -waarde of Sound Reduction Index (SRI) geeft in één getal de geluidsisolatie aan. Dit gebeurde omdat de (lucht)geluidsisolatie van een bouwcomponent afhankelijk is van de frequentie van dat geluid en men al deze waardes wou samenvatten in één getal. Hoe hoger de R_w -waarde, hoe beter isolerend het bouwelement.^{xI}

4.1.7. Brandveiligheid

Ook de brandveiligheid van een gebouw moet nagekeken worden. Bouwdetails mogen het gebouw niet minder brandveilig maken.^{xII} Voor een eengezinswoning zijn er in de Belgische wetgeving geen brandveiligheidsvereisten maar dit wordt toch kort besproken bij de toepassing van de verschillende muurvoeten voor de volledigheid van deze thesis en het vormen van een veilige omgeving.

4.1.8. Esthetiek

Als laatste aandachtspunt volgens het WTCB moet de bouwdetail ook esthetisch in de architectuur van het gebouw passen. Zo moet het bouwdetail langs de buitenzijde niet opvallen in het gevelaanzicht.^{xIII}

4.1.9. Sustainability

Bij meer en meer opdrachtgevers speelt sustainability een belangrijke rol. Bij sommige projecten worden verschillende opbouwen vergeleken op basis van LCA om zo de opbouw met de kleinste impact op het milieu te zoeken. Dit kan gebeuren via TOTEM of het programma Simapro. Sustainable materialen worden echter nog niet frequent gebruikt wegens een gebrek aan kennis, ervaring en naamsbekendheid. Als een project dan toch duurzame materialen gebruikt, wordt dit vaak niet doorgetrokken in alle elementen van het bouwdetail. De reden is het gebrek aan kennis met betrekking tot de reactie van bio-ecologische materialen op vocht en hoe lang ze hun eigenschappen behouden.

4.1.10. Durability and EOL

De levensduur van de gebruikte materialen in een gebouw wordt steeds belangrijker. Verschillende materialen hebben andere soorten onderhoud nodig en dit ook op verschillende tijdstippen. Het is belangrijk om hier rekening mee te houden voor de opbouw van de constructie. Dit concept werd uitgewerkt door Steward Brand in zijn 'Concept van Shearing Layers.'^{xiv} Daarnaast kan het ook interessant zijn om de levensduur van het gebouw en van de materialen met elkaar te vergelijken. Op deze manier kan men inschatten hoe snel de materialen vervangen zouden moeten worden. Dit kan de keuze voor het materiaal sterk beïnvloeden. Dergelijke berekeningen worden automatisch meegenomen in LCA-berekeningen.

Tenslotte speelt ook het einde van de levensduur een grotere rol. Materialen of producten moeten op het einde van hun levensduur liefst herbruikbaar, recycleerbaar of composteerbaar zijn. Regels over het recyclen van bouwmaterialen tijdens de opbouw, renovatie of afbraak van een project worden steeds strenger en er komt vanuit de overheid meer interesse naar hergebruik. Maar ook bij bouwheren, architecten en aannemers groeit de interesse gestaag. Om materialen te kunnen hergebruiken, recyclen of te composteren is het belangrijk dat alle verbindingen omkeerbaar gebeuren. Het gebruik van lijm, gespoten isolatie en andere niet omkeerbare verbindingen wordt om deze reden afgeraden.

4.2. Dampopen bouwen

Dampopen of dampregulerend bouwen verkreeg de laatste jaren opnieuw een grote interesse. Dit komt door de toename van het ecologisch en bio-based bouwen. Dampopen bouwen laat het transport van lucht en water toe doorheen de constructie-elementen. Dit zorgt voor een ademend binnenklimaat waardoor er een natuurlijke vocht- en warmteregulering ontstaat.^{xv} Op deze manier probeert men de relatieve vochtigheid binnenshuis tussen 40% en 60% te houden zodat astmatische reacties, mijten, schimmels en het overlevingspercentage van besmettelijke bacteriën en virussen worden verminderd.^{xvi} Volgens verschillende bronnen zorgt dit voor meer comfort en kwaliteit in de woning en een optimaal leefklimaat.^{xvii} Het is wel belangrijk om materialen te gebruiken die bestand zijn tegen deze vochthuishouding.

Het tegengestelde van dampopen bouwen, het dampdicht bouwen is onze huidige gekende stijl van bouwen. Hierbij gebruikt men meerdere folies om de woning water- en luchtdicht te maken. Dit werd reeds besproken in 4.1.2. *Waterdichtheid* en 4.1.4 *Luchtdichtheid*. Deze laatste methode wordt door de voorstanders van het dampopen bouwen ook wel “het leven in een plastieken zak” genoemd. Zo wordt er bij het aanbrengen van de isolatie gewerkt met een dampscherm aan de warme kant. Dit wordt geplaatst aan de binnenzijde van de constructie. Het scherm moet voorkomen dat vocht binnendringt en condenseert in de isolatie waardoor het zijn thermische kwaliteiten verliest. Indien dit vocht daarna niet verdwijnt door de ventilatie kan dit leiden tot schimmels en vochtophopingen. Wanneer het dampscherm niet naadloos wordt aangebracht kunnen kleine perforaties tot grote problemen leiden.^{xviii}

Bij dampopen bouwen wordt de damp opgenomen door de muur en terug afgegeven aan de omgeving wanneer de lucht droger is. Ook dampopen bouwen moet worden aangevuld met ventilatie aangezien de dampstromen doorheen de constructie een factor 50-100 kleiner zijn dan de benodigde hoeveelheid voor een minimale ventilatie.^{xix} Dampopen bouwen kan de kwaliteit van de binnenlucht in gebouwen sterk verbeteren, door binnenshuis een stabielere luchtvochtigheid te voorzien. Een dampopen bouwschil kan een vangnet bieden en vergeeft eerdere constructiefouten en toekomstige storingen in andere systemen of delen van de gebouwschil, die zullen optreden tijdens de levensduur van een gebouw. Wetenschappers ontdekten ook dat een doorlatende, hygroscopische gebouwschil die voornamelijk van hout is gemaakt, de concentratie van CO₂, SF₆ en waterdamp positief kan beïnvloeden. Een dergelijke gebouwschil kan de CO₂-concentratie verlagen maar dit mechanisme neemt af wanneer mechanische ventilatie wordt toegepast. Een hygroscopische gebouwschil reduceerde de vochtschommelingen in een ruimte aanzienlijk, zowel in goed geventileerde als in slecht geventileerde omstandigheden. Daarnaast toonde simulaties ook aan dat hygroscopische materialen de piekvochtigheidsniveaus kunnen verlagen. Meer onderzoek is nodig om deze methode van bouwen beter te ondersteunen en onzekerheden te elimineren.^{xx}

Er gelden enkele voorwaarden bij het dampopen bouwen. Er mogen absoluut geen dampdichte materialen zoals EPDM, bitumen.... gebruikt worden in de afwerking. Alle materialen moeten dampopen zijn zodat vocht ongehinderd getransporteerd kan worden. Daarbij moet verzekerd worden dat de materiaalkarakteristieken niet beïnvloed worden door het vochttransport. Vezelrijke isolatiematerialen, zoals vlas, hennep, houtvezel, papier, katoen of schapenwol, zijn hiervoor geschikt aangezien ze zowel doorlatend als hygroscopisch zijn. De materialen behoren dampopener te worden naarmate men meer aan de buitenzijde van de constructie komt. Tegelijkertijd moet de constructie wind-, en luchtdicht zijn langs de buitenkant.^{xxi} Er kan eventueel een dampopen folie worden geplaatst aangezien deze regen en sneeuw buitenhoudt zonder de dampstromen te stoppen.^{xxii} Uit een gesprek met Hilde Vanwildemeersch van Woonder bleek het grootste aandachtspunt het niet opsluiten van de materialen zodat damptransport overal mogelijk is.

Een argument tegen dampopen bouwen is dat door het vochtig worden van de materialen warmteverliezen zullen optreden. In bouwmaterialen met een verhoogd vochtgehalte kunnen 2-9% meer warmteverliezen optreden door toename van de thermische geleidbaarheid en latente warmte-effecten. Zo treedt er voor bakstenen een verschil op van 37% en voor een lichtgewicht structuur gemaakt van minerale wol een verschil van 228% voor zijn specifieke warmteverliescoëfficiënt, bij blootstelling aan natte omstandigheden. Deze waarden werden gemeten bij een luchtvochtigheid van 90% na 40 uur. Een bijkomend tegenargument is de schrik voor het sneller optreden van schimmelgroei wanneer men natuurlijke materialen gebruikt. Maar doordat deze materialen meer hygroscopisch zijn en dus een meer uniforme vocht distributie hebben, reduceert het risico op schimmels. De meeste waterlekken veroorzaken geen problemen bij een gebouwschil met een hoge hygrische buffercapaciteit, terwijl kleine lekkages problematisch kunnen zijn wanneer de hygrische buffercapaciteit laag is.^{xxiii}

In de bouwtechnieken die gecombineerd worden met dampopen bouwen wordt vaak gewerkt met een uitstekende dakrand om de constructie te beschermen. Uit simulaties blijkt dat de prestatie van de dakoversteek afhangt van de grootte, de windsnelheid en de windhoek maar niet van de horizontale regenintensiteit. Hieruit bleek dat gebouwen met een dakoversteek veel minder problemen hadden met vocht dan gebouwen zonder. Zo had 90% van de wanden zonder oversteek problemen terwijl slechts 25% van de wanden met een oversteek van 60cm of meer problemen had.^{xxiv}

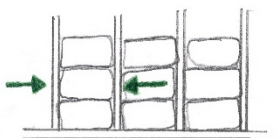
4.3. Strobalenbouw

Stro wordt beschreven als de gedroogde stengels van graan. Aan de stengels zijn de gedorste aren vaak nog bevestigd en maken dan ook mee deel uit van het stro.^{xxv} Stro wordt al eeuwenlang gebruikt als isolatiemateriaal in Amerika. Pas rond het begin van de 20ste eeuw kwam er in Europa steeds meer en meer interesse in het bouwen met stro en werden de eerste projecten gerealiseerd.^{xxvi} Strobalenbouw kent geen grote bekendheid in Vlaanderen ondanks dat stro wel ruim aanwezig is. Door de huidige interesse in sustainable materialen kent de strobalenbouw een opmars maar aangezien Belgische normen, technische voorschriften of bouwdetails ontbreken moet men naar documenten uit onze buurlanden, met name Frankrijk, Duitsland en Nederland teruggrijpen voor de realisatie van een strobalenbouw. Door het gebrek aan regelgeving en ervaring wordt strobalenbouw vaak niet toegepast. Toch heeft strobalenbouw verschillende voordelen. Er zijn geen droogperiodes bij het bouwen met stro. Hierdoor kan de bouw zeer snel gaan en daarnaast is het ook geschikt voor zelfbouw. Stro is een restproduct van de voedselindustrie, hierdoor is de prijs voor stro niet zo hoog als bij vele andere bio-based isolatiematerialen. Bij afbraak wordt het originele materiaal terug bekomen waardoor het kan worden hergebruikt of gecomposteerd. Doordat stro een natuurlijk product is, slaat het CO₂ op tijdens zijn groeifase dat wordt afgegeven bij de afbraak.

4.3.1. Stabiliteit

Stro kan in een zelfdragend systeem worden toegepast. Hierbij hebben de strobalen zowel een thermische als een dragende functie. Deze techniek wordt soms toegepast in Amerika maar door de beperkte draagkracht van stro is slechts één bouwlaag mogelijk. Hierdoor wordt stro vaak in combinatie met een skelet gebruikt. Dit skelet kan gemaakt worden uit staal, bamboe, hout... waarvan hout het meest gebruikt wordt. Dit materiaal sluit ook het meest aan bij onze thesis aangezien bamboe werd afgekeurd in voorgaande *Hoofdstuk 3.4.9. Bamboe* en we elementen uit staal zoveel mogelijk proberen te vermijden. Bamboe kan in landen waar het van nature groeit wel een goede optie zijn voor een strobalenbouw.

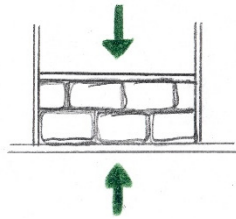
Voor het skelet kunnen verschillende technieken worden gebruikt:



Houtskelet: Dit is de meest eenvoudige structuur. Om de één à twee strobalen worden houten stijlen geplaatst, deze kunnen dezelfde lengte hebben als het stro maar kunnen ook kleiner zijn. Deze stijlen kunnen vervangen worden door I-profielen. Een voorbeeld van deze techniek is te zien in figuur 29.



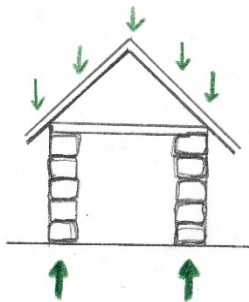
Figuur 29: : Houtskelet^{xxvii}



Post and beam strobalenwand: Ook hier maakt men gebruik van een houten skelet maar nu staan de stijlen veel verder uit elkaar waardoor de dimensies van deze stijlen sterk vergroot om de juiste draagkracht te voorzien. Hierdoor kunnen de strobalen in een halfsteensverband worden geplaatst. Voor extra stabiliteit en om de strobalen op hun plaats te houden wordt er om de twee rijen strobalen een houten balk geplaatst. Deze balk spant de houten stijlen aan en duwt de strobalen samen zodat deze op hun plaats blijven liggen. Het is belangrijk deze balk goed aan te spannen, dit is te zien in de rechtse foto in figuur 30. Vroeger werd dit ook gedaan met spankabels zoals te zien is op de linkse foto in figuur 30. Daarnaast zorgt deze balk voor extra knikstabiliteit van de houten stijlen. Ook hier kunnen de houten stijlen vervangen worden door houten I-profielen.^{xxviii}



Figuur 30: Post and beam structuur strobalenwand (foto genomen door: Woonder en Architectengroep Barchi)^{xxix xxx}



GREB wand: Dit type wand werd ontwikkeld door Groupe de Recherches Ecologiques de la Baie in Canada. De wand wordt opgebouwd met houten stijlen waarbij na elke rij strobalen een metalen strip wordt geplaatst. Vervolgens wordt de constructie bekist en wordt er een mengsel van cement, zand, kalk en zaagsel gebruikt om de constructie te verstevigen. Dit gebeurt per strobalenlaag. De metalen elementen worden gebruikt voor extra stabiliteit. Op deze manier wordt een veel draagkrachtigere muur gerealiseerd. In tegenstelling tot de andere opbouwen is er hier wel sprake van een droogproces door de toevoeging van cement.^{xxxi} In figuur 31 wordt deze techniek getoond.



Figuur 31: GREB wand^{xxxii}

Voor de constructie met strobalen is het belangrijk dat de strobalen geen enkel teken van verrotting vertonen. Doorheen de levensduur van de strobalenwand moeten de strobalen ook beschermd zijn tegen regen en vochtindringing. Daardoor zijn er maximale waarden opgelegd voor het vochtgehalte dat de balen mogen hebben tijdens productie, tijdens stockage en vlak voor het gebruik in de constructie.^{xxxiii} Stro blijft tijdens het transport en de stockage best droog. Dit is te zien in tabel 13. Verrotting kan men opmerken aan de kleur, een strobaal moet een goud-gele of een lichtgele kleur hebben. Grijs of donkere vlekken tonen de aanwezigheid van schimmels aan, daarnaast zal het stro ook een beschimmelde, aardachtige geur hebben. Indien dit het geval is mag het stro niet meer worden gebruikt. Om het risico op schimmels te verkleinen stelt men in Duitsland een referentieklimaat van 23°C en een relatieve vochtigheid van 50% op om een strobalenbouw te construeren. Maar er wordt aangegeven dat de constructie doorheen het hele jaar kan plaatsvinden zolang de strobalen voldoende zijn beschermd tegen vocht. Er moet extra aandacht besteed worden bij het plaatsen van de pleister, deze moet voldoende kunnen drogen.^{xxxiv}

Vochtgehalte stro			
Vochtgehalte tgv het drooggewicht van stro (%)	Productie	Stockage	Plaatsing
<20	Ja	Ja (1)	Ja
Tussen 20 en 30	Ja	Niet aan te raden (2)	Nee
>30	Nee	Nee	Nee
(1) De strobalen zijn droog opgeslagen en beschermd tegen de weersomstandigheden			
(2) De strobalen worden achtergelaten op het veld totdat ze gedroogd zijn			

Tabel 13: Vochtgehalte stro (gebaseerd op : RFCP Réseau Français de la Construction en Paille, April 2018^{xxxv})

4.3.2. Waterdichtheid en luchtdichtheid

Stro is een natuurlijk materiaal en daardoor ook gevoelig aan vocht. Indien er te veel vocht aanwezig is in de strobaal kan dit leiden tot schimmel of het rotten van de baal.

Normaal gezien wordt stro afgewerkt met een kalkpleister langs de buitenzijde, dit werkt zoals een ETICS-systeem. De pleistering van ETICS-systemen kan best 30cm boven de grond starten en een zone met grind rondom het gebouw wordt aangeraden. Hierdoor wordt het risico op opspattend water kleiner, wordt de afwatering van oppervlaktewater verbeterd en plantengroei op de gevel wordt vermeden.^{xxxvi}

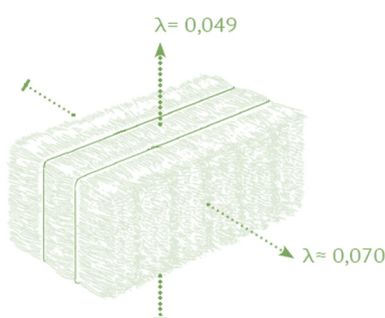
Stro heeft een waterdampdiffusieweerstand $\mu=2$. Deze waarde toont hoeveel beter het materiaal waterdamp tegenhoudt tegenover een stilstaande luchtlaag met dezelfde dikte. Hierdoor wordt de s_d waarde van een strobaal $2 \cdot 0,37m = 0,74m$, dit toont de equivalente luchtlaag met dezelfde dampdiffusieweerstand.^{xxxvii} Indien we dit vergelijken met verschillende s_d -waardes voor materialen met een dikte van 100mm: EPS-plaat met een s_d -waarde van 9m, glaswol heeft een $s_d = 0,1m$, hout een s_d -waarde van 5-20m, schapenwol bezit een s_d -waarde van 0,4 -0,5m. Stro heeft op deze dikte een s_d -waarde van 0,2m. Hieruit blijkt dat stro niet goed scoort en dus een dampopen materiaal is.

Meestal wordt stro gebruikt in een dampopen systeem, hierdoor is het niet erg dat vocht ophoopt in de constructie aangezien het achteraf terug wordt afgegeven aan zijn omgeving. Hierdoor wordt het risico op vochtophoping en condensatie in het binnenklimaat verkleind.^{xxxviii} De wand kan als het ware ademen en zo vocht transporteren.^{xxxix} Dit heeft volgens enkele bronnen een positief en gezond effect op het binnenklimaat. Aangezien stro ook geen giftige stoffen bevat, wordt het binnenklimaat niet vervuild. De pleister aan beide zijden van de strobalenwand vervullen zowel de functie van regenscherm als luchtscherm. Volgens de Duitse bouwrichtlijnen is het nefast om stro rechtstreeks te beschermen met een membraam maar kan het beter beschermd worden door een capillair absorberend bouw materiaal zoals een pleister of een houtvezelplaat.^{xl} Dit is een basisregel van het dampopen bouwen, hier werd in *Hoofdstuk 4.2 Dampopen bouwen* verder op ingegaan.

In België werd er éénmaal met HAM-simulaties via DELPHIN 5 onderzoek gedaan naar de hygrothermische eigenschappen van stro. Deze simulaties toonden aan dat strobaalwanden in het Belgisch klimaat tijdens de wintermaanden kwetsbaar zijn voor schimmelgroei door de hoge vochtgehaltes in het stro. Dit werd onderzocht voor een wand met Noordelijke oriëntatie. Uit de simulaties blijkt dat de herverdeling van het vocht vooral belangrijk is als luchtconvecties aanwezig zijn. Aangezien strobalen luchtopen zijn, zijn deze convecties dus inderdaad aanwezig. Dit leidt tot verhoogd vochtgehalte en bijgevolg een verhoogd schimmelrisico aan de koude kant van de muur. De warmteverliezen vergroten slechts met 2,3% ten gevolge van de convectie waaruit geconcludeerd kan worden dat ze geen grote gevolgen hebben voor de thermische prestatie. Dit fenomeen zal ook optreden indien het binnenklimaat voldoende is geventileerd. Het artikel zelf duidt aan dat deze uitkomst niet overeenkomt met metingen op site maar deze zijn vaak niet zeer uitgebreid uitgevoerd.^{XLII} Een Canadese studie toonde daarentegen aan dat een dampopen strobalegebouw perfect kan functioneren in een koud klimaat zonder schimmelgroei en vochtophopingen.^{XLIII} We concluderen dat meer onderzoek nodig is.

4.3.3. Thermische isolatie

Indien stro wordt gebruikt heeft het steeds een isolerende eigenschap naast de al dan niet dragende functie. De lambda-waarde van strobalen hangt af van de halmrichting zoals te zien is in figuur 32. Stro kan ook gebruikt worden als inblaasisolatie. Indien dit het geval is, verkrijgt het stro een andere warmtegeleidingscoëfficiënt zoals te zien is in tabel 14. In deze tabel kunt u ook de isolatiewaarde van verschillende meer gekende isolatiematerialen terugvinden. Het is duidelijk dat stro minder goed zal isoleren dan industriële isolatiematerialen.^{XLIII}



Figuur 32: Lambda waarde stro afhankelijk van halmrichting^{XLIV}

Thermische eigenschappen stro	
Materiaal	Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/(mK))
Stro haaks op de richting	0,048-0,049
Stro parallel aan de halmrichting	0,06-0,08
Inblaasstro	0,041-0,043
PUR	0,022-0,028
Glaswol	0,031-0,044
Cellulose	0,035-0,04
Kurk	0,038-0,042
Hennep	0,038-0,042
Vlas	0,038

Tabel 14: Thermische eigenschappen stro (gebaseerd op: Strobouw Nederland, 2019.^{XLV} + Lambda, 2022.^{XLVI})

Stro wordt meestal gebruikt in geperste vorm, het wordt dan geplaatst tussen een houtskelet of tegen een muur, in de vorm van matten. Naast de goede isolatiewaarde heeft stro een lage thermische effusiviteit waardoor het materiaal sneller warm zal aanvoelen. Vervolgens beschikt stro ook over een goede warmteopslag met een specifieke warmte van 2 kJ/(kgK). Hierdoor blijft het koel in de zomer en

warm in de winter en wordt er een evenwichtige binnentemperatuur bekomen. Beide eigenschappen zorgen voor een aangenaam comfort in de woning. Om deze reden wordt stro ook vaak gebruikt in passiefwoningen aangezien het gemakkelijk een U -waarde $< 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ behaalt.^{XLVII} Zelfs energiezuinige of energie-neutrale woningen zijn mogelijk. Een extra voordeel van stro tegenover meer gekende isolatiematerialen zoals polystyreen is de hoeveelheid primaire energie. Voor polystyreen is 33 keer meer energie nodig om 1 m^2 muur van een passiefhuis te isoleren. Voor een natuurlijk isolatiemateriaal is stro relatief goedkoop aangezien het in Europa overal beschikbaar is via de graanbouw. De kosten lopen echter op door de detaillering en afwerking maar zijn uiteindelijk wel vergelijkbaar met een conventionele wandopbouw met gelijke isolatiewaarde.^{XLVIII}

4.3.4. Toegankelijkheid

De toegankelijkheid van het gebouw zou een probleem kunnen vormen omdat men het hout wil beschermen door het een twintigtal centimeter boven het maaiveld te plaatsen. Men zal dus een trapje moeten aanbrengen om in de woning te geraken of zelfs een kleine helling voor rolstoelgebruikers. Daartegenover staat dat door het grote hoogteverschil water minder snel de woning zal binnendringen langs deuropeningen.

4.3.5. Akoestiek

Stro is een heterogeen materiaal waardoor het een groot bereik van frequenties en golflengtes kan absorberen, daardoor wordt stro vaak gezien als een goede akoestische isolator. Daarnaast zorgt de samenpersing van de strobaal voor een goede luchtdichtheid en volumieke massa die voor een goede demping van luchtgeluiden zorgt. Stro is ook geen star materiaal waardoor het kan fungeren als een akoestische veer of akoestische ontkoppeling.^{XLIX} Ook de leempleister heeft een dempend effect op geluid.^L

Het MDPI heeft testen voor de akoestiek uitgevoerd op tarwestrobaalwanden volgens ISO140-4:1998. De testen werden uitgevoerd op drie verschillende ruimtes gescheiden door twee strobalenmuren. De afwerking van muur A bestond aan de ene kant uit pleister en aan de andere kant uit een vlasplaat, de afwerking van muur B was aan beide kanten een vlasplaat. Voor de test werd er in één ruimte een zender geplaatst en in de andere een ontvanger. Daarna wordt de gemiddelde akoestische isolatie gemeten, dit is respectievelijk 49,5dB en 49dB. Deze waarden tonen het gewogen gestandaardiseerde niveauverschil, uitgedrukt in decibel, tussen de gemiddelde geluidsdruk in de bronruimte en de ontvangende ruimte. De lucht die circuleert in de holle ruimte tussen de strobalenwand en de bekleding ervan droeg bij tot een demping van de geluidsgolven door de scheidingswanden. Hierdoor toont de wand met pleister een hogere waarde dan deze met de vlasplaat. De akoestische prestatie van een bepleisterde strobalenmuur zijn beter dan deze voor een onbepleisterde strobalenmuur, dit komt door de hogere densiteit van de pleister en de luchtbellen tussen het stro en de pleister waardoor het geluid nogmaals wordt gedempt.^{LI}

Volgens het RFCP (Réseau française de la construction en paille) ligt de geluidsisolatie tussen de 43 en 45 dB indien de muur wordt bepleisterd aan 2 zijden.^{LII}

Als we deze waardes vergelijken met enkele andere R_w -waardes zien we dat strobalen ongeveer even goed scoren dan glas 13-16-9 (special, glued). Dit materiaal heeft een R_w -waarde van 48dB. Keramische of betonnen materialen hebben allemaal een hogere waarde. Omdat we in bronnen over strobalenbouw nergens extra akoestische isolatie terugvinden, gaan we er vanuit dat dit niet nodig is. Hierdoor zullen we dus geen extra akoestische isolatie plaatsen in deze muuropbouw, dit kan natuurlijk altijd worden toegevoegd indien dit nodig wordt geacht door een van de actoren van het bouwproces.

4.3.6. Brandveiligheid

Voor een eengezinswoning zijn er volgens de Belgische norm geen brandveiligheidsvereisten maar aangezien stro en hout beide natuurlijke materialen zijn, rijzen er toch veel vragen over de brandveiligheid.

4.3.6.1. Stro

Over de brandveiligheid van stro bestaan vele twijfels maar strobalen hebben een goede brandklasse en hun verbrandingspatroon is gelijkaardig aan een dikke houten balk. De vlammen verkolen de buitenste laag waarna het vuur vanzelf dooft.^{LIII} Los stro is zeer brandbaar maar door het persen, verkrijgen strobalen een structuur waarin zeer weinig zuurstof aanwezig is. Samen met de extra bescherming van de pleisterlaag verkrijgt stro dan een brandweerstand van 90-120min.^{LIV} Stro heeft geen toevoeging van giftige stoffen nodig voor de brandveiligheid. Het is de afwerking, meestal een pleisterlaag, die de strobalen de nodige brandweerstand geeft.^{LV}

Strobalenbouw Nederland geeft in onderstaande tabel 15 de brandweerstand voor een strobalenmuur weer. Deze waarden worden ook teruggevonden in andere bronnen.^{LVI} Uit onderstaande tabel kunnen we aflezen dat een strobalenwand met leemstuc een brandgedrag B vertoont, dit betekent dat de muur maar gelimiteerd gaat deelnemen aan de brand oftewel dat er geen flashover gaat optreden bij een beginnende brand. Daarnaast heeft deze opbouw een gelimiteerde rookproductie (s1) en ontstaan er geen druppels bij brand (d0).^{LVII}

Brandeigenschappen stro	
Eis	Resultaat
Brandklasse stro volgens EN 13051-1	E
Brandklasse stro met leemstuc van min 8mm volgens EN 13051-1	B-s1,d0
Brandwerendheid houtskelet-strowand met leemstuc van minstens 8mm	F30
Brandwerendheid houtskelet-strowand met kalstuc van minstens 10mm	F90
Stro met massadichtheid 100kg/m ³	

Tabel 15: Brandeigenschappen stro (gebaseerd op: Strobouw Nederland, 2019. ^{LVIII})

De brandweerstand en het gedrag van strobalen bij brand werd in verschillende papers beschreven.

Door het gebrek aan zuurstof in een geperste strobaal zal deze enkel verkolen aan zijn oppervlakte en blijven smeulen. Dit werd aangetoond door enkele branden op een gebouwde strobalenwand in het veld en door een zogenaamde 'hoektest' uitgevoerd door de Richmond Field Station of the University of California in april 1996. Eenmaal de wand is gepleisterd langs 2 kanten kan het een brandweerstand van 1-2h krijgen en is het volgens de Australian Bushfire code zelfs onontvlambaar. Dit komt door de combinatie van het onbrandbaar oppervlak van het pleisterwerk en het isolerende effect van de strobalen die niet smelten of opbranden.^{LIX}

Een andere twee uur durende brandweerstand-test uitgevoerd op een strobalenwand toont een iets lagere brandweerstand. Deze testwand was 425cm lang en 365cm hoog en was opgebouwd uit strobalen met afmetingen van 91,5*46*35,5 cm en een gewicht van 19,2kg. Elke strobaal werd samengehouden door 2 polypropyleen touwen. Beide kanten van de muur waren afgewerkt met een gewapende pleister. De pleister was in twee lagen van 13 mm aangebracht. De pleister had de kans om 36 dagen te drogen voordat men met de testen begon. Voor de testen volgde men de temperatuur-tijd curve ASTM 119 gedurende twee uur. Tijdens de test weerstond de muur de brand zonder vlammen of gassen die warm genoeg waren om aan de andere kant van de muur een katoenen doek te laten ontvlammen. De temperatuur aan de andere kant van de muur werd nooit hoger dan 163°C en behaalde een gemiddelde temperatuur van 120°C. Hierdoor kreeg deze muuropbouw een brandweerstand van 120 minuten. Er werden ook proeven uitgevoerd op dragende elementen. Wanden behaalden een

brandwerendheid REI 120, wat betreft het draagvermogen, integriteit en isolatie voor een standaardbrand van 120 minuten. Wandpanelen, omlijst met houten balken en opgevuld met stobalen, belast met 20 kN/m, doorstonden een standaardbrand gedurende één uur en zes minuten, en kregen de brandwerendheidsklasse REI 60.^{LX}

Ook het MDPI verzamelde in een van zijn papers over stobalen gegevens en testen over het brandgedrag van stro. Apte et al. testten de brandwerendheid van stobalen en kwamen tot de conclusie dat een strobaal met aan alle zijden een pleisterlaag van 4cm, gedurende 10 minuten overleefde onder een hitteflux van 29kW/m, zonder ernstige scheuren in de bepleistering of ontbranding van het stro. De brandwerendheid nam toe dankzij de pleisterlaag, aangezien deze een isolerende barrière vormde tegen de warmtebron en de zuurstofoverdracht van de atmosfeer naar het stro beperkte. Markovic en Milic toonden aan dat met stro gevulde constructies een verrassend goede weerstand tegen brandbelasting vertonen en de tijd verlengde om de constructie te laten instorten startend vanaf het ontstaan van de brand. De wand werd gedurende 85min blootgesteld aan de brandbelasting, met een temperatuur van 800°C aan de door het vuur getroffen zijde. Tijdens de test was er geen sprake van instorting van de constructie of een verstoring van het draagvermogen. Teslík et al. rapporteerden de eerste stap van het onderzoek naar de reactie op brand. De ontbrandbaarheidstest met een kleine tijd van aanval door de vlam toonde aan dat samengeperst stro, geplaatst in de constructie, weinig bijdraagt tot de verspreiding van vuur.^{LXI}

Een ASTM E84-98 test op onbepleisterde stobalen door de Omega Point Laboratories gesponsord door Katerina Hayes passeerde de test met gemak. De vlamsnelheid was 10 waar het maximum volgens de code 25 is en een rookhoeveelheid van 320 terwijl het maximum 450 is.^{LXII}

Dit onderzoek riep wel de vraag op naar de functie van het touw dat de stobalen samenbindt. Als dit doorbrandt zouden losse strohalmen op de grond kunnen vallen, deze strohalmen zijn wel heel brandbaar en zullen het vuur extra voeden. Onafgewerkte stobalen komen echter enkel voor tijdens de constructiefase, waardoor er twee nieuwe vragen opkomen: hoe goed is het touw beschermd tegen smelten eenmaal de muur is bepleisterd en als het touw smelt, zal de pleister de strobaal dan samenhouden. Op deze vraagstukken zijn nog geen antwoorden gegeven maar doordat het touw meestal een paar centimeter in de strobaal zit, lijkt de kans dat dit zich voordoet eerder klein. De paper vergeleek ook verschillende branden en de hierdoor aangebrachte schade. Opmerkelijk is dat de kans op een totaal verlies van de constructie bijna nul is indien de muren zijn gepleisterd. Zo werden zes schadegevallen onderzocht die waren bepleisterd, hiervan was er maar één brand die tot een totaal verlies van de constructie leidde doordat deze begon in de dakconstructie. De andere vijf branden hadden enkel lokale beschadigingen. Daarentegen leidden zes van de acht branden op een stobalenconstructie zonder bepleistering tot een totaal verlies van de constructie. De overige twee schadegevallen vertoonden slechts lokaal schade. Meestal ontstond de brand doordat er los stro op de grond achterbleef tijdens de constructie wat daarna tot flashover leidde op de stobalen en het houten geraamte. Eenmaal het houten geraamte begon te branden leidde dit in alle gevallen tot een totaal verlies van de constructie. In vijf van bovenstaande gevallen begon het vuur te smeulen tussen de stobalen, dit was zo goed als onmogelijk te blussen met een brandslang.^{LXIII}

Volgens het Koninklijk besluit over brandgedrag zou de gehele gevel een brandklasse B-s3-d1 en een brandweerstand van EI60 moeten bezitten om conform met de Belgische norm te zijn. Een materiaal voldoet aan deze norm als dit is getest in België of één van de Europese lidstaten. Een stobalenwand behaalt deze brandklasse volgens Nederland, daardoor wordt deze ook goedgekeurd in België. De brandweerstand werd getest in Bosnië-Herzegovina. Dit land is nog geen lid van de Europese Unie en daarom worden deze testen niet aanvaard in België.^{LXIV} Maar ook in Luik heeft men een brandtest op een stobalenwand gedaan. Deze muur met dimensies 2950*3000*400mm was opgebouwd uit een

houten frame gevuld met strobalen en afgewerkt met een synthetisch traliewerk en bepleistering. Deze bepleistering was aan de vuurkant gemaakt met vijf tot zes liter water per 25kg pleister en aan de niet-vuurkant met negen liter water per 30kg. Men volgde de genormaliseerde temperatuurcurve volgens de norm NBN EN 1363-1:2012 hoofdstuk 5.1 met een druk van 20Pa op de testwand volgens de norm NBN EN 1364-1:2015. Gedurende de test werden deze observaties gemaakt. De strobalen wand weerstond de temperatuurcurve voor 89 minuten. Hierdoor voldoet stro dus ook aan de vereiste brandweerstand van 60 min.^{LXV} De observaties doorheen de test worden weergegeven in tabel 16.

Observaties brandtest		
Tijd (min)	Positie op de wand	Observaties
17	Hoek	Een minimale hoeveelheid damp en rook komen vrij.
32	Uniform	Men hoort de wand kraken.
36	Hoek	Er ontstaan scheuren aan de aan het vuur blootgestelde kant, delen van de bekleding vallen naar beneden waardoor de helft van het binnenste gedeelte van de strobalen zichtbaar is
60	Midden	Een minimale hoeveelheid damp en rook komen vrij.
66	Midden	Delen van de bekleding vallen naar beneden.
69	Hoek	Er vertonen zich lichte sporen van vochtigheid.
80	Uniform	Delen van de bekleding vallen naar beneden.
89	/	Einde van de test.

Tabel 16: Observatie brandtest (Gebaseerd op: Laboratoire d'essai au feu, 2018. ^{LXVI})

Voordat men deze testen deed in Luik werd er in België gebruik gemaakt van een technisch advies van een Duitse brandproef.^{LXVII} Deze test werd uitgevoerd op een strobalenwand met een houten raamwerk uit naaldhout met een sectie van 120*120 mm en een hart-op-hart afstand van 1440mm. De strobalen hadden volgende dimensies 460*770*350mm en een massadichtheid van 96kg/m³. De wand werd afgewerkt met een leempleister van minimaal 30mm dikte en een massadichtheid van 1665kg/m³. Volgens de Belgische norm NBN 713.020 van 1968 behaalt de wand een brandweerstand van 90 minuten.^{LXVIII} Ook dit document voldoet dus aan de Belgische eisen voor brand.

4.3.6.2. Hout

Hout is een natuurlijk, brandbaar materiaal. Onbehandeld hout heeft een brandklasse D, s2, d0, dit betekent dat hout een belangrijke bijdrage heeft aan de brand ofwel dat flashover binnen de 10 minuten zal optreden, dat het tot een gemiddelde rookontwikkeling zal leiden en dat druppelvorming niet zal optreden.^{LXIX} Ondanks de brandbare eigenschappen van hout heeft het wel goede brandwerende eigenschappen. De verkoling of carbonisatie van de oppervlakte van het hout zorgt ervoor dat de binnenkant van het hout zijn draagkracht behoudt totdat ook de binnenkant rechtstreeks wordt aangetast door de brand.^{LXX}

Een houtskeletwand en –vloer moeten door hun brandklasse D daarom steeds worden beschermd aangezien de stijlen van het regelwerk relatief kleine dimensies hebben en niet berekend worden op een overdikte (extra sectie) die mag verloren gaan tijdens brand. Hiervoor dekt men houtskeletwanden of –vloeren steeds af met een gipskartonplaat, spaanplaat of multiplex om de constructie de gewenste brandweerstand te geven. Daarnaast moet ook de isolatie aan voorwaarden voldoen. Deze moet onbrandbaar zijn en indien dit niet het geval is moet deze stabiel zijn tijdens de brand. Aangezien strobalenbouw een lichtelijk ander systeem is dan een gewone houtskeletwand lijkt het ons dat het testen van de strobalenwand met een houtskelet voldoende is om de brandweerstand van de wand te verzekeren. Indien met een houten vloer wordt gewerkt moet deze volgens het Koninklijk besluit een brandweerstand van R120 bezitten.^{LXXI}

4.3.7. Afwerking

De afwerking aan de binnen- en buitenkant van de muur gebeurt met een pleister. De pleisters zorgen voor de lucht- en waterdichtheid van de muur en geven de muur de nodige brandwerende eigenschappen. De pleister is meestal 30-40mm dik maar het kan dunner om materiaal te besparen. Dit is mogelijk door het scheren van de stobalen zeer zorgvuldig uit te voeren. Voor de binnenafwerking wordt een leempleister aangeraden terwijl voor de buitenafwerking kalkpleister aangeraden wordt. Zowel binnen- als buitenafwerking kunnen ook afgewerkt worden met een ander materiaal zoals hout of gispkartonplaten. Hiervoor is op de stobalenwand eerst een draagsysteem nodig om de afwerking te kunnen ondersteunen. Indien hier gebruik van wordt gemaakt, moet men wel extra aandacht geven aan de luchtdichtheid, waterdichtheid en brandeisen van de wand. Zo moet er voor een gevelbekleding van hout of een ander materiaal goed geventileerd worden. En is er nood aan een waterdichte folie om het stro te beschermen.^{LXXII}

Zoals reeds vermeld in *Hoofdstuk 4.3.1. Stabiliteit* en *Hoofdstuk 4.3.2. Waterdichtheid en luchtdichtheid* het belangrijk om het stro steeds te beschermen tegen vocht. Dit gebeurt via een waterdichte pleister met een kleine kans op scheurvorming, die ervoor zorgt dat het stro niet nat kan worden. De pleister moet minstens 2cm dik zijn op deze manier kan ook ongedierte niet aan het stro. Daarnaast kan men ook gebruik maken van een overhangende dakrand en een sokkel. De sokkel beschermt de pleister tegen opspattend water.^{LXXIII} Voor de durability van de pleister is het belangrijk deze goed af te werken en een druiplijst en een pleisterdrager te voorzien aan de onderkant van de pleisterlaag. De pleister kunnen bijkomend versterkt worden door paarden- of koeienhaar toe te voegen.

Leempleister

Leempleister of kleipleister kan direct aangebracht worden op de stobalen. De pleister kan vocht opnemen en later afgeven wat volgens gebruikers voor een aangenaam en gezond binnenklimaat zorgt. Dit wordt gegarandeerd doordat de relatieve vochtigheid van de ruimte constant rond 50% wordt gehouden.^{LXXIV} Leem is dampopen en daarom ook geschikt voor dampopen bouwen. Een leembepreistering bevat klei, zand en eventueel stro. Hierdoor is het materiaal volledig natuurlijk en kan het samen met het stro op de composthoop worden gegooid. De ontginning, productie en de verwerking van het leem vragen weinig energie waardoor de pleister een zeer lage ecologische voetafdruk heeft.^{LXXV} Kortweg is leempleister een natuurlijke pleister op basis van ongebakken aarde.^{LXXVI} Daarnaast bevat leempleister ook goede akoestische eigenschappen en zal het door zijn porositeit geluid opnemen en dempen.^{LXXVII} Leempleister heeft ook een zekere thermische inertie, deze heeft meestal geen grote invloed omdat de pleister maar een fractie van het gewicht van de muur is. Bij zeer lichte constructies zoals een houtskeletbouw in combinatie met een dikke pleisterlaag kan dit wel een invloed hebben op de thermische inertie van het gebouw.^{LXXVIII}

Men moet wel opletten in vochtige ruimtes zoals badkamers. Leem is hiervoor niet de geschikte oplossing. Omdat pleister is opgebouwd uit organische materialen, bestaat de kans dat het beschimmelt. Dit kan makkelijk vermeden worden door de ruimtes genoeg te verluchten en de leempleister niet in vochtige ruimtes te gebruiken. Indien men om deze reden geen leempleister wil gebruiken, biedt kalkpleister een oplossing.^{LXXIX} Daarnaast kunnen ook de bindingskrachten van leempleister afnemen omdat het in contact komt met grote hoeveelheden water. Dit komt doordat de uitharding van pleister gebeurt door een fysisch proces dat omkeerbaar is als de pleister in contact komt met water.^{LXXX} Verder kan het ook makkelijk beschadigd worden. Tijdens de droogfase kan leem gemakkelijk krimpscheuren vertonen, daarom moet pleister in meerdere lagen worden aangebracht. Door wapening in de vorm van stro of vlashaksel toe te voegen verkleint dit probleem.^{LXXXI}

Kalkpleister

Kalkpleister beschermt de buitenkant van de stobalenmuur tegen regen en zorgt voor een dampopen afwerking zodat overtollig vocht kan worden afgevoerd. Kalkpleister kan zeer hoge luchtvochtigheden aan waarbij het vocht zal opnemen en daarna terug afgeven.^{LXXXII} Tegelijk bezit het een zeer hoge alkaliteit van 13pH, dit is te hoog voor de meeste schimmels en bio-organismes. Hierdoor kan het gebruikt worden in buitenomgeving maar ook in vochtige ruimtes zoals badkamers zonder het risico op schimmelvorming. Deze pleister wordt op basis van kalk gemaakt waardoor ook dit materiaal op de composthoop kan gegooit worden. Kalk moet voordat het bruikbaar is, gebrand worden. Dit zorgt voor een hogere CO₂ uitstoot en productie energie.^{LXXXIII} Kalkpleister is ook gekend onder de naam tadelakt, een pleister die uit het Midden-Oosten komt waar ze vaak werd gebruikt in badhuizen.

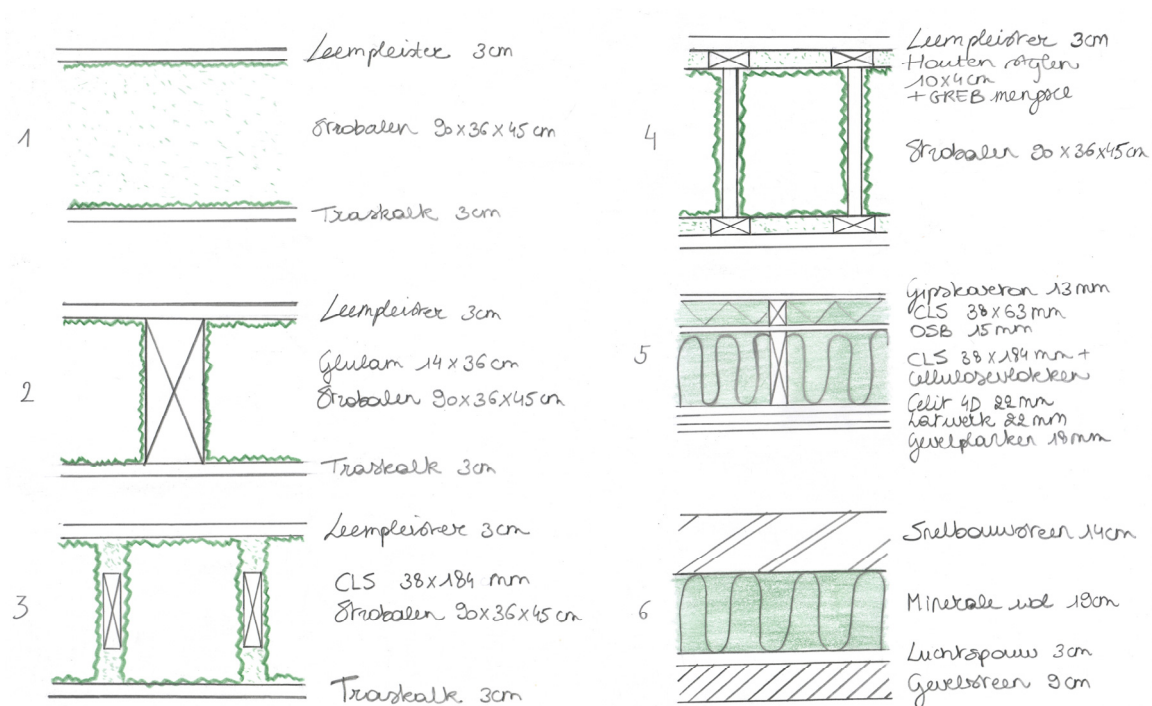
Langs de buitenzijde van de muur wordt een strook grind geplaatst, deze heeft 2 functies. Enerzijds leidt het water weg van de muurvoet waardoor deze droger zal staan. Anderzijds zal het beletten dat planten vlak naast de muren zullen groeien en de pleister beschadigen. In plaats van grind kan men ook met schelpen werken deze hebben dezelfde functie als het grind en zullen de grond evengoed draineren.

De regelgeving van ETICS muren raadt aan de pleister pas te starten 30cm boven de grond, in ons detail is dit maar 20cm. We denken toch dat dit een veilige oplossing is aangezien deze materialen ook een ander bouwmethode vragen. Zo wordt er aangeraden om met een dakoversteek te werken hierdoor zal er minder regenwater invallen op de gevel en zal de pleister dus langer meegaan.

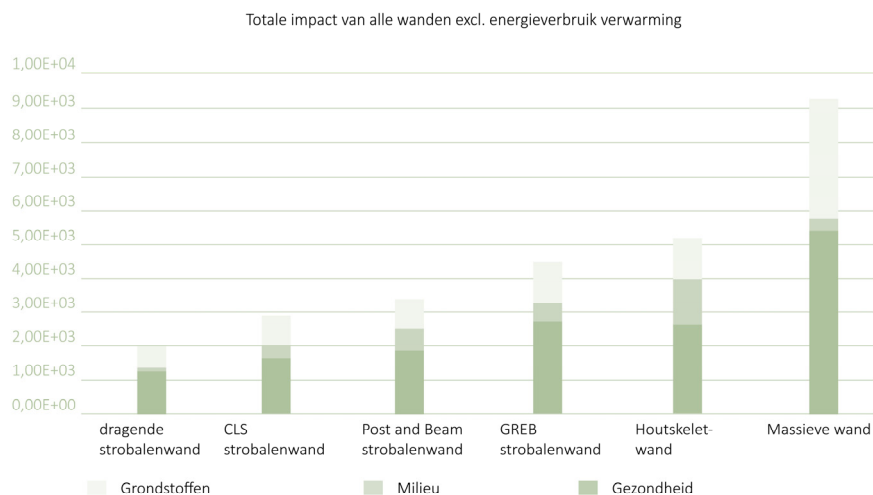
4.3.8. Sustainability

Stro wordt over het algemeen gezien als een sustainable materiaal om een woning te isoleren. Dit is geen vreemde conclusie als je weet dat stro lokaal kan worden geteeld, het van natuurlijke oorsprong is en dus achteraf kan teruggegeven worden aan de natuur, de productie weinig energie vereist en het een restproduct van de voedselindustrie is. Om de echte impact van een stobalenwand op het milieu te weten moet men gebruik maken van LCA.

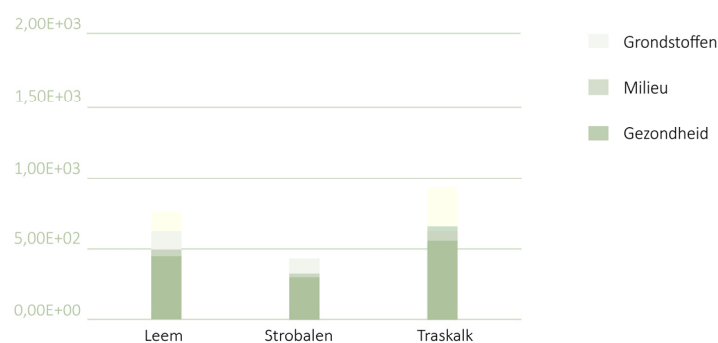
Een eerste studie werd gemaakt door BAST architects and engineers voor het tijdschrift 'Wonen met de Natuur'.^{LXXXIV} Ze vergeleken verschillende opbouwen van een stobalenwand tegenover een houtskeletbouw en een massiefbouw. Zo werd onder andere een load-bearing stobalenwand bekeken waarbij het stro naast een isolerende functie ook een dragende functie heeft en er dus geen gebruik wordt gemaakt van een skeletstructuur (afbeelding 1 in figuur 33). Daarnaast werd een CLS -houskelet structuur bekeken (afbeelding 2 in figuur 33). De stijlen van deze structuur waren 3,8x14cm om de 45cm met de stobalen recht op tussen de stijlen, waardoor de muurdikte 36cm bedroeg. Men bekeek ook een Post and Beam stobalenwand: hier wordt er gewerkt met een zware glulam kolom van 14x36cm die om de 4m staat. Hiertussen worden de stobalen in halfsteensverband geplaatst met om de twee rijen een balk om de constructie aan te spannen en de stobalen op hun plaats te houden (afbeelding 3 in figuur 33). Ook de GREB wand werd bekeken. De wand wordt opgebouwd met houten stijlen van 4x10 cm. De constructie wordt verstevigd met een mengsel van cement, zand, kalk en zaagsel en stalen strips na elke rij stobalen (afbeelding 4 figuur 33) Alle stobalenwanden worden afgewerkt met een leem- en traskalkpleister. De houtskeletwand wordt opgebouwd uit een CLS - houtskelet met stijlen van 38x184 cm om de 45cm en opgevuld met cellulosevlokken. De buitenzijde wordt afgewerkt met een houtvezelplaat en een houten latwerk van 22mm om de gevelplanken te kunnen dragen van 18mm. De binnenzijde wordt afgewerkt met een OSB-plaat, een leidingspouw met stijlen van 38x63cm om de 45cm, geïsoleerd met houtwol en de afwerking van de binnenzijde bestaat uit een gipskartonplaat (afbeelding 5 figuur 33). De massiefbouwwand is een spouwmuur met snelbouwsteen en geïsoleerd met een laag minerale wol van 19cm (afbeelding 6 figuur 33).



Figuur 33: Opbouw muren; 1: Load-bearing strobalenwand, 2: Post and Beam strobalenwand, 3: Houtskelet, 4: GREB, 5: Houtskelet, 6: Massiefbouw wand (gebaseerd op: BAST architects and engineers, 2014)^{LXXXV}



Figuur 34: Vergelijking wandtypes (gebaseerd op: BAST architects and engineers, 2014)^{LXXXVI}



Figuur 35: Impact per materiaal (gebaseerd op: BAST architects and engineers, 2014)^{LXXXVII}

In bovenstaande figuur 34 kunnen de verschillende wanden met elkaar worden vergeleken. Daarnaast werd ook de impact per materiaal voor de verschillende opbouwen bekeken. In deze studie werd stro als een restproduct bekeken waardoor de productie van het stro dus niet meegenomen wordt in de LCA-berekeningen. Als functionele eenheid werd de isolatiewaarde genomen, deze werd gelijk gehouden aan de U-waarde van de strobalenwand. Het valt meteen op dat de strobalenwanden veel beter scoren dan de massiefbouwwand. Er is een verschil van ongeveer 50% tussen de massieve wand en de slechtst scorende strobalenwand, namelijk de GREB wand, dit verschil is significant te noemen. Daarnaast is er een duidelijk verschil tussen de massieve wand en de houtskeletwand. Het verschil tussen de slechtst scorende strobalenwand, de GREB-wand en de houtskeletwand is dan wel niet significant te noemen (slechts 16%) maar is wel ruim. Het verschil met de houtskelet strobalenwand en het houtskelet (ongeveer 60%) is daarentegen wel zeker significant te noemen.

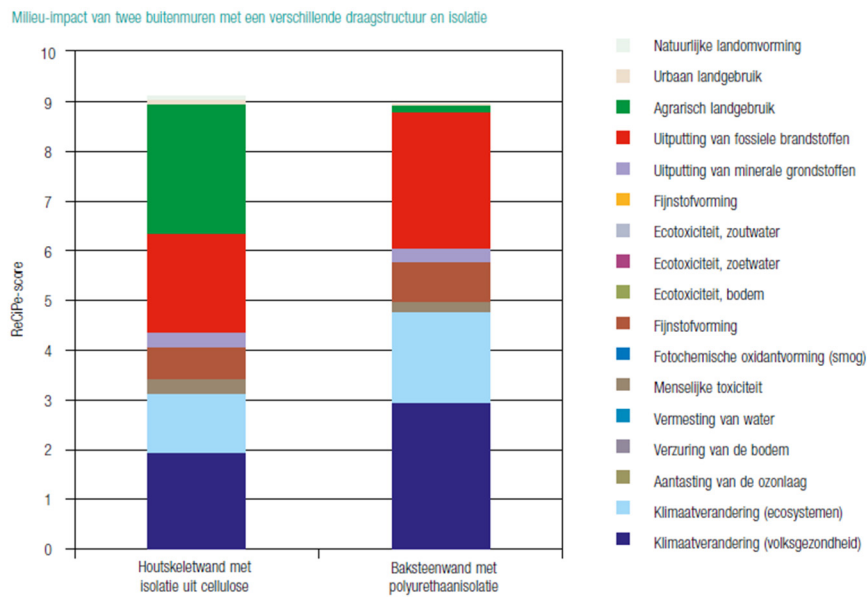
De dragende strobalenwand scoort duidelijk het beste. Dit is niet verwonderlijk aangezien er heel weinig materialen worden gebruikt voor deze opbouw. Het valt wel op dat de milieu-impact van de pleister zeker niet te verwaarlozen is ondanks het kleine volume dat hiervoor nodig is. Dit is te zien in figuur 35.

Zowel voor de houtskelet en Post and Beam strobalenwand wordt de stijging van de milieu-impact veroorzaakt door de grotere hoeveelheid hout die wordt gebruikt. Dit wordt verklaard door de land-use van het hout. De land-use houdt rekening met een bepaald grondoppervlakte dat bomen nodig hebben om te groeien. Bij een Post and Beam wand vergroot het volume hout door de aanwezigheid van aanspanbalken.

Zoals te verwachten viel, scoort de GREB wand het slechtst van alle strobaalwanden. Dit komt door het mengsel op basis van cement. Het productieproces van cement vraagt veel energie aangezien klei of kalksteen verhit moet worden tot 1500°C.

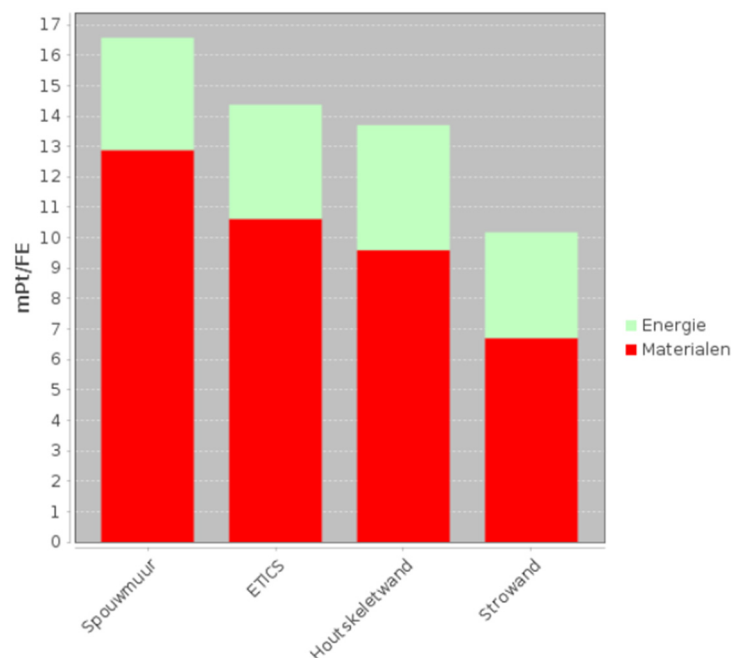
Opmerkelijk is ook het grote verschil tussen de houtskeletbouw en de massieve bouw. Volgens deze studie bedraagt het verschil tussen beiden zo'n 40%. Dit komt echter niet overeen met de studie gemaakt door het WTCB^{LXXXVIII}.

Het WTCB voerde een studie uit om de LCA van een houtskeletbouw en een massieve muur te vergelijken. Ook hier was de massieve muur een traditionele spouwmuur opgebouwd uit baksteen maar werd deze geïsoleerd met polyurethaanplaten. De houtskeletmuur bestaat uit stijlen van 45x220 mm op een afstand van 60cm en opgevuld met cellulose. De buitenkant werd afgewerkt met een houtvezelplaat en een bakstenen gevel. De binnenzijde werd afgewerkt met een OSB-plaat, lucht- en dampscherm, een houten latwerk en een gipskartonplaat. Zoals te zien is in onderstaande figuur 36, zijn de waarden van beide muur opbouwen vrij gelijkaardig. Het is enkel wanneer men dieper inzoomt op de verschillende impacten dat men verschillen opmerkt. Men zou verwachten dat de impact op de klimaatverandering (donker- en lichtblauw weergegeven in de grafiek) veel kleiner zou zijn bij de houtskeletbouw. Echter, door al de processen die worden uitgevoerd op het hout valt de positieve milieu-impact tijdens de groei weg. De houtskeletbouw kent een grote impact op het agrarisch landgebruik door de oppervlakte die het hout nodig heeft om te groeien. De uitputting van fossiele brandstoffen is afkomstig van de isolatiematerialen en is gelijkaardig indien beide opbouwen dezelfde isolatie krijgen. Het is logisch dat door de afwerking met baksteen de milieu-impact van de houtskeletbouw nu vele malen dichterbij de massieve muur dan in de studie van BAST-architects and engineers waar de muur werd afgewerkt met houten stijlen.



Figuur 36: Milieu-impact van twee buitenmuren met een verschillende draagstructuur en isolatie^{LXXXIX}

We bekeken dit ook zelf in TOTEM in april 2022, hieruit werd volgend resultaat bekomen dat te zien is in figuur 37 en tabel 17. Tabel 18 toont de gebruikte wandopbouwen. De functionele eenheid was de U-waarde die werd gelijk gehouden rond $0.15W/(m^2K)$, alle elementtypes komen rechtstreeks uit de TOTEM bibliotheek en werden enkel aangepast om de U-waarde te corrigeren. Hiervoor werd er bij de ETICS- en houtskeletwand een extra isolatielaag toegevoegd. In onderstaande tabel wordt de opbouw van elk muurtype behandeld.



Figuur 37: Vergelijking materiaalimpact bij verschillende opbouwen van een wand in TOTEM

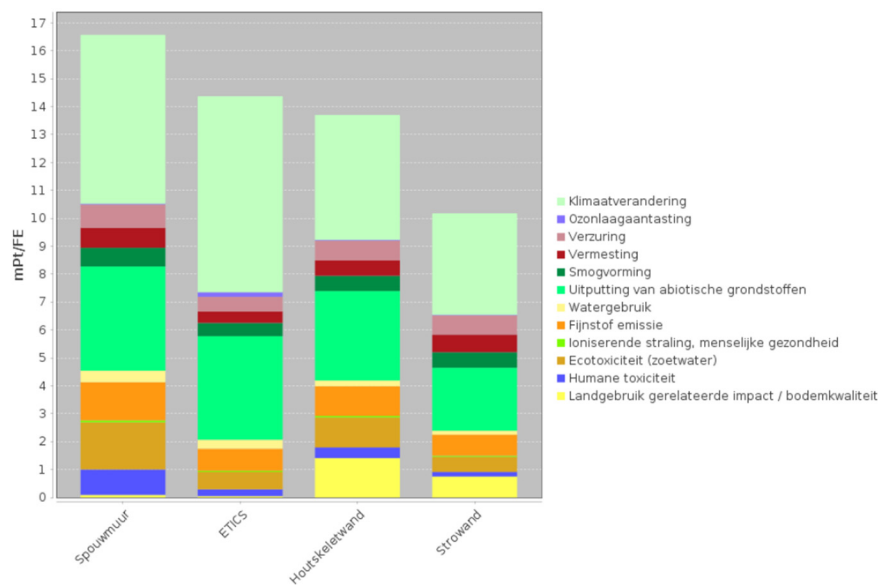
Materiaalpunten TOTEM		
Wandtype	Materiaalpunten [mPt/FE]	% verschil met spouwmuur
Spouwmuur	13	100%
ETICS	11	15%
Houtskeletwand	9,6	26%
Strowand	6,7	48%

Tabel 17: Materiaalpunten TOTEM ^{xc}

Wanden-TOTEM		
Lagen	Element	Afmetingen (mm)
<i>Spouwmuur: U-waarde= 0,15 W/(m²K), dikte= 0,42m</i>		
1	Stenen in cementmortel	188*88*48
2	Luchtlaag-niet geventileerd	30
3	Spouwhalen	
4	Isolatieclips PVC	
5	PUR met aluminium cacherings	70
6	PUR met aluminium cacherings	82
7	Betonblokken in cementmortel	290*140*190
8	Gipspleister	12
9	Acrylverf	
<i>ETICS: U-waarde 0,15 W/(m²K), dikte= 0,38m</i>		
1	Dikke gipspleister	7
2	XPS gelijmd en gefixeerd met pluggen	130
3	EPS grafiet gelijmd en gefixeerd met pluggen	40
4	EPS grafiet gelijmd en gefixeerd met pluggen	40
5	Isolerende baksteen in cementmortel	288*138*138
6	Kleipleister	20
<i>Houtskeletwand: U-waarde 0,16 W/(m²K), dikte= 0,43m</i>		
1	Vezelcementbeplating geschroefd	8
2	Latten in onbehandeld naaldhout geschroefd	38*38
3	Geventileerde luchtlaag	20
4	Gebitumineerde houtvezel geschroefd	18
5	PE folie	
6.1	Genageld onbehandeld loof- en naaldhout (20%)	220
6.2	Rotswol ingeklemd (80%)	220
7	OSB geschroefd	18
8	PP folie getapet	
9.1	Genageld behandeld naaldhout (20%)	45
9.2	Glaswol ingeklemd (80%)	45
10.1	Genageld behandeld naaldhout (20%)	45
10.2	Glaswol ingeklemd (80%)	45
11	Gipspleister -geschroefd	12,5
12	Acrylverf	
<i>Strobalenwand: U-waarde 0,14 W/(m²K), dikte= 0,53m</i>		
1	Kalkpleister	30
2.1	Behandeld-verankerd naaldhout (11%)	480
2.2	Stro (89%)	480
3	Kleipleister	20

Tabel 18: Wandopbouwen in TOTEM analyse

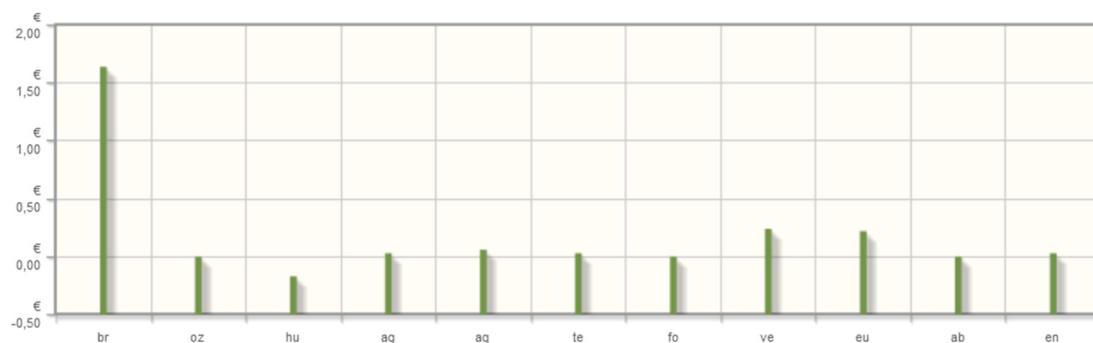
We merken meteen op dat de strobale wand het best scoort en de spouwmuur het slechtst. In TOTEM spreekt men van een significant verschil indien het verschil groter is dan 20%. Dit is zowel het geval bij de vergelijking van een houtskelet en spouwmuur als bij de vergelijking van strobaal en spouwmuur. Maar ook de strobale wand vertoont een significant verschil met de houtskeletbouw. Hieruit kunnen we concluderen dat een strobale bouw qua materialiteit inderdaad de beste keuze is. Bekijken we de impact per indicator in figuur 38 dan zien we dat bij de strobale bouw het landgebruik veel groter is dan bij de drie andere wandtypes. Dit is logisch aangezien men grote akkers nodig heeft voor de teelt van graan. De humane toxiciteit en ioniserende straling ligt bij de strobaal wel veel lager dan bij de andere drie wandtypes. Bekijkt men de impact per component dan valt het ons ook op dat de invloed van de pleisterlaag zeer groot is bij de strobale wand. De kalkpleister aan de buitenkant is goed voor 62% van de totale materiaalimpact.



Figuur 38: Impact per indicator TOTEM

Volgens Nibe hebben strobale wanden met een dragend houten frame (afmetingen 350x460x920mm met een gewicht van 154kg/m²), extra stalen trekkers voor de stabiliteit van de wand en een afwerking van een 15mm dikke leemstuc aan 1 zijde van de strobaal, een milieuklasse 1A en een schaduwkost van 2,08€. Milieuklasse 1A toont aan dat het product milieutechnisch de beste keuze is. Het grote gewicht van de strobale wand veroorzaakt een nadelig effect op de milieueffecten van het transport. Het is dan ook duidelijk in onderstaande figuur 39 dat de broeikasgassen het grootste effect hebben op de milieucriteria volgens Nibe. Voor het onderhoud en het gebruik voor een levensduur van 70 jaar is geen energie nodig, zijn er geen milieu-effecten en dus geen schaduwkosten en is ook vervanging niet nodig. In de afvalfase of recycling fase worden -165.5% van de schaduwkosten veroorzaakt. De meeste milieukosten worden gemaakt tijdens de productiefase, deze produceert 212,5% van de schaduwkosten. Het transport is goed voor 22,8% van de schaduwkosten. Daarentegen geeft ook de constructiefase negatieve schaduwkosten van -7,2%.^{XCI} (Nibe werd in April 2022 geraadpleegd.)

Emissies			Landgebruik	
br	broeikaseffect	3,28E+1	kg CO ₂ eq	
oz	ozonlaagaantasting	1,23E-6	kg CFC-11 eq	Hinder ten gevolge van
hu	humane toxiciteit	-1,84E+0	kg 1,4 DB eq	
aq	aquatische toxiciteit (zoet)	1,03E+0	kg 1,4 DB eq	
aq	aquatische toxiciteit (zout)	6,23E+2	kg 1,4 DB eq	
te	terrestische toxiciteit	4,21E-1	kg 1,4 DB eq	
fo	fotochem. toxiciteit	-2,22E-3	kg C ₂ H ₄ eq	
ve	verzuring	5,88E-2	kg SO ₂ eq	
eu	eutrofiëring (vermesting)	2,49E-2	kg PO ₄ eq	
Uitputting				
ab	abiotische grondstoffen	5,36E-5	kg Sb eq	
en	energiedragers	1,87E-1	kg Sb eq	



Figuur 39: Verdeling van de schaduwkosten NIBE

Voor hout bestaan er ook verschillende duurzaamheidslabels waaronder het FSC-label, waarschijnlijk het meest bekende label. FSC of Forest Stewardship Council verzekert sustainable, durable en sociale houtkap. Dit gebeurt via strenge eisen: hout op locaties met een hoge erosiegevoeligheid mag niet worden gekapt, kwetsbare bossen of bossen met een hoge natuurwaarde mogen niet worden gekapt. Na het kappen van een bepaald gebied moet dit gebied een aantal jaar rust krijgen zodat nieuwe bomen kunnen groeien, de arbeiders moeten in veilige en goede omstandigheden kunnen werken en moeten een loon krijgen dat voldoende hoog is.^{XCII} Het FSC-label is niet enkel te vinden voor massieve houten elementen maar ook voor papier en producten waarin hout verwerkt wordt zoals OSB platen.^{XCIII} In België is er momenteel ongeveer 28 600 ha bos gecertificeerd met het FSC label.

Een ander duurzaamheidslabel is het PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certifications schemes) als antwoord van Europa op het FSC-label. Dit initiatief ontstond doordat de houtindustrie in Europa niet kon voldoen aan de eisen van het FSC-label aangezien de bosoppervlaktes in Europa te klein zijn.^{XCIV} Het PEFC-label verzekert net als het FSC-label dat het hout afkomstig is uit duurzaam bosbeheer maar in tegenstelling tot het FSC-label bevat het geen eisen op sociaal vlak.^{XCV} Het label focust meer op de nationale criteria van bosbeheer waardoor de duurzaamheid van het hout dus zal afhangen van het land waar het werd gekapt.^{XCVI}

4.3.9. Durability en EOL

4.3.9.1. Durability van stro

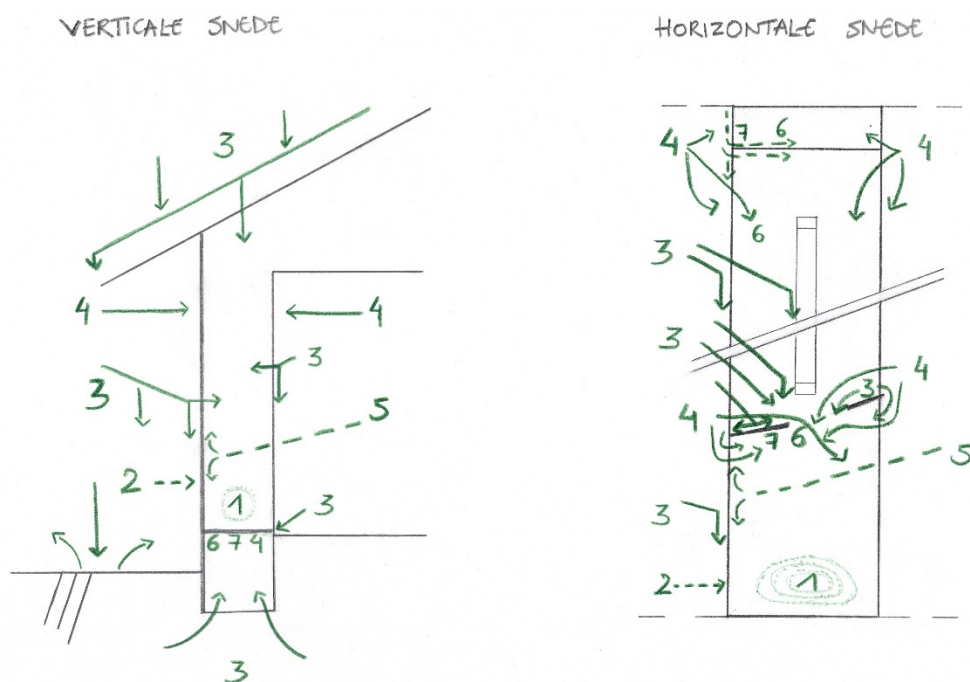
Over de durability van stro bestaan er twee grote twijfels door ongedierte en relatieve vochtigheid. De eerste factor kan direct ontkracht worden. Na de verwerking tot strobaal heeft het stro geen voedingswaarde meer, wordt het niet meer gebruikt om te nestelen en wordt het bijkomend beschermd door de pleisterlaag. Dit zorgt ervoor dat ongedierte niet aan het stro kan. Men kan een schelpenlaag aanbrengen als extra bescherming. Deze worden vaak in kruipruimtes gebruikt aangezien de scherpe randen van gebroken schelpen ongedierte weren. De schelpen zullen de constructie van een extra beschermingslaag tegen ongedierte voorzien.^{XCVII}

De relatieve vochtigheid daarentegen zou wel voor problemen kunnen zorgen aangezien vocht kan leiden tot degradatie van het stro. Hoe hoger het vochtgehalte, hoe sneller de degradatie van stro zal gebeuren. Daarnaast zorgt een hoog vochtgehalte ook voor de kans op schimmelvorming. Eenmaal

schimmel aanwezig is zal dit blijven groeien ook als de relatieve vochtigheid daalt. Testen toonden aan dat problemen optraden bij een relatieve vochtigheid boven 80% maar de hoeveelheid schimmel was minder groot dan verwacht.^{xcviii} Schimmel zou geen probleem mogen vormen indien het stro droog is verwerkt en correct is beschermd tegen vocht en regen.^{xcix}

Er zijn verschillende schademechanismen die kunnen plaatsgrijpen op stro, deze worden weergegeven in onderstaande figuur 40.^c Vooral vocht kan een probleem geven bij strobalenbouw maar indien de constructie correct wordt uitgevoerd, zou dit geen probleem mogen vormen.

Er wordt algemeen aangenomen dat stro een levensduur van 50 -70 jaar heeft.^{ci cii}



- 1: Onvoldoende strodichtheid
- 2: Degradatie van de bekleding (bv. Scheur, spleet) na impact bv. Boren
- 3: Water dat de muur binnendringt (bv. regen, afvloeiend water, water van binnenuit, gebruik ...)
- 4: Slechte waterdichtheid
- 5: Indringing en interne blokkering van waterdamp
- 6: Condensatie van waterdamp
- 7: Warmtemigratie door capillaire werking

Figuur 40: Mogelijke degradaties van een strobalenbouw (gebaseerd op: RFCP Réseau français de la construction en paille, 2018)^{ciii}

4.3.9.2. Durability van hout

Hout is een natuurlijk materiaal dat kan worden aangetast door schimmels en insecten. De aantasting van hout gebeurt niet enkel via biologische invloeden maar even goed door mechanische belasting en de atmosfeer (zonlicht, stofdeeltjes, ...). Niet elke vorm van is even schadelijk voor de constructie. Sommige aantastingen veroorzaken enkel esthetische schade zoals de vergrijzing van hout en tasten het hout enkel oppervlakkig aan.^{civ}

Om deze reden wordt hout heel vaak chemisch geïmpregneerd met synthetisch-chemische stoffen die giftig zijn voor insecten en schimmels maar ook voor de mens. Volgens Vibe is dit helemaal niet nodig. Tegenwoordig worden vele stoffen bestempeld als schadelijk voor de mens en mogen deze niet meer

worden gebruikt. Daarom is de industrie waterdragende emulsies beginnen te gebruiken maar ook deze zijn niet nodig indien het hout correct wordt gekozen en geplaatst.^{CV} Aan de hand van constructieve houtbescherming kan de levensduur van houten constructies worden verlengd zonder gebruik te maken van chemische verduurzamingsmiddelen. Dit gebeurt door de vochtbelasting zo klein mogelijk te houden zodat het risico op schimmelaantasting beperkt wordt. Concreet betekent dit dat het hout altijd vlot moet kunnen drogen.^{CVI}

Schimmels hebben nood aan vier elementen, als 1 van deze niet aanwezig is zal schimmelgroei ook niet optreden. Als eerste heeft men nood aan een gepast vochtgehalte van meer dan 20%, over een langere periode vervolgens zuurstof, de juiste voedingsbodem en een temperatuur tussen de 5-40°C. Enkel aan de eerste eis kan een ontwerper iets doen door het hout niet te lang vochtig te houden. Een houtvochtigheid van 20% komt enkel voor bij een relatieve vochtigheid van 90% of in aanwezigheid van water. Hierdoor ontstaan er al enkele eenvoudige ontwerpregels om schimmels te vermijden volgens VIBE: hout mag nooit in direct contact komen met de grond aangezien het dan permanent met vocht in aanraking komt; hout moet langs alle kanten voldoende verlucht worden; plaats hout zo vaak mogelijk in een helling, hierdoor kan water snel van het hout afdruipe; vermijd dat stof en vocht kunnen ophopen; houd rekening met het krimp- en zwel gedrag van hout; vooral kopshout zuigt veel vocht op, dit hout moet dus extra worden beschermd; bescherm hout tegen rechtstreekse en frequente bevochtiging door neerslag en kies voor kwartiers gezaagd hout (hout gezaagd parallel met de stam en parallel met de straal van het hout). Daarentegen rot hout, dat de hele tijd onder water staat, niet weg aangezien er dan geen zuurstof aanwezig is.^{CVII CVIII}

Hout heeft van nature een zekere weerstand tegen schimmels en/of insecten. Deze natuurlijke duurzaamheid wordt onderverdeeld in 5 officiële duurzaamheidsklassen volgens NEN-EN 350-1, zoals te zien is in onderstaande tabel 19. Het geeft daarbij ook de verwachte levensduur van het hout. Deze duurzaamheidsklassen worden bepaald voor hout in contact met de grond en houdt enkel rekening met kernhout. Daarnaast wordt in deze klassen enkel rekening gehouden met schimmels.^{CIX} Deze tabel zegt ook niet alles. Als men hetzelfde houten element gebruikt maar het ene element heeft een grotere dikte dan het andere, dan zal dit element een langere levensduur hebben. Deze levensduur speelt een belangrijke rol in de klassen. Dit is te zien in tabel 20.^{CX} Er moet bij beide tabellen rekening worden gehouden met afwijkingen die op deze klassen kunnen optreden. Vaak is deze variatie terug te brengen op verschillen in herkomst (groeiomstandigheden, bodem, klimaat, ...).^{CXI}

Officiële duurzaamheidsklasse		
Klasse	Weerstand tegen schimmels	Levensduur
I	Zeer duurzaam	>25 jaar
II	Duurzaam	15-20 jaar
III	Matig duurzaam	10-15 jaar
IV	Weinig duurzaam	5-10 jaar
V	Niet duurzaam	<5 jaar

Tabel 19: Officiële duurzaamheidsklasse (gebaseerd op: Geldof P., 2007. ^{CXII})

Levensduur in aantal jaar			
Houtsoort	Duurzaamheidsklasse	Buiten, blootgesteld	Buiten, onder dak
Robinia	I (-III)	150	200
Eiken	II - III	100	150
Douglas	III	65	120
Lorken (Lariks)	III (- IV)	65	120
Noords Grenen	III - IV	60	100
Olm (Iepen)	IV	100	130
Vuren (Sparren)	IV	55	60
Beuken	V	30	50
Essen	V	30	50
Berken	V	20	20
Populieren	V	20	20
Elzen	V	20	20

Tabel 20: Levensduur hout uitgedrukt in aantal jaren (gebaseerd op: Geldof P., 2007.^{CXIII})

Er wordt een verschil gemaakt tussen kern- en spinthout. Kernhout is afkomstig van het centrum van de stam en spinthout bevindt tussen het kernhout en de bast van de boom. Spinthout is niet verkernd hout en heeft daardoor een slechtere natuurlijke weerstand en wordt daardoor vrijwel altijd geplaatst in duurzaamheidsklasse 5.^{CXIV}

Daarnaast maakt men ook gebruik van 5 gebruiksklassen, deze bepalen het risico op schimmelaantasting afkomstig door de omgeving. Ze tonen aan of het hout voldoende weerstand kan bieden aan aantastingen door organismen (schimmels en/of insecten) die mogelijk aanwezig kunnen zijn in de voorziene toepassing. Tabel 21 met gebruiksklassen gedefinieerd in NBN-EN 335-1, bepaalt de 5 risicoklassen afhankelijk van de bevochtigingsgraad en dus het houtvochtgehalte, de duur van de bevochtiging en de mogelijkheid tot drogen. Afhankelijk van de gebruiksklassen en levensduur kan men een houtsoort kiezen met de vereiste duurzaamheidsklassen zoals te zien is in tabel 22. Deze is gebaseerd op de Europese norm NBN EN 460. Men kan ook gebruik maken van een houtsoort met een lagere duurzaamheidsklasse maar dan moet het hout wel verduurzaamd worden.^{CXV}

Gebruiksklassen			
Gebruiksklassen	Gebruiksomgeving	Risico op uitlogging	Voorbeelden
1	Hout gebruikt binnenin gebouwen in constant droge omstandigheden (luchtvochtigheid lager dan 70%)	Geen	Binneninrichtingen vochtigheidsgraad altijd onder 20%
2	Hout niet in contact met de grond en normaal niet blootgesteld aan weersinvloeden of uitlogging maar tijdelijke bevochtiging is mogelijk	Laag	Timmerhout, dakgebinten vochtigheidsgraad occasioneel boven 20%
3	Hout zonder grondcontact maar blootgesteld aan de weersomstandigheden of condensatie	Hoog	Hout niet in grondcontact maar met risico op condensatie of blootgesteld aan weersinvloeden
4	Hout permanent in grondcontact of permanent in zoetwatercontact	Zeer hoog	Koeltorens en hout in grondcontact
5	Hout in zoutwatercontact	Zeer hoog	Havenconstructies enzovoort

Tabel 21: Gebruiksklassen (gebaseerd op: Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, 2015.^{CXVI})

Gebruiksklasse - Duurzaamheidsklasse			
Gebruiksklasse	Houtvochtgehalte	Vereiste duurzaamheidsklasse	
		Levensduur 25 jaar	Levensduur 10 jaar
1	Permanent <20	I - II - III - IV - V	I - II - III - IV - V
2	Incidenteel kortdurend >20%	I - II - III	I - II - III - IV
3	Regelmatig kortdurend >20%	I - II - III	I - II - III - IV
4	Permanent >20%	I - II	I - II - III
4	Permanent >20% + grondcontact	I	I - II - III
5	Permanent >20% in zout water	I	I - II

Tabel 22: Gebruiksklassen gerelateerd aan duurzaamheidsklassen (gebaseerd op: Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, 2015.^{CXVII})

Daartegenover formuleert het WTCB een advies dat wel aanraadt om hout te verduurzamen. Dit omdat het hout afwisselend droge en natte periodes zal kennen en waarschijnlijk nooit helemaal zal kunnen uitdrogen. Hout is een natuurlijk materiaal en is daardoor gevoelig voor biologische afbraakprocessen, deze zullen hoe dan ook ingrijpen op hout. Om hout hiertegen te beschermen moet men het in een omgeving plaatsen waar dit proces geen kans maakt of hout met een hoge resistentie tegen deze aanvallen kiezen. Dit kan via de natuurlijk resistentie van het hout maar kan ook vergroot worden door verduurzaming. Dit laatste is noodzakelijk maar enkel waar nodig. Deze verduurzamingsprocessen zijn afhankelijk van de risicoklasse. Indien het risico op aantasting vergroot zal het verduurzamingsproces veel zwaarder zijn. Het verduurzamingsproces hangt ook af van de houtsoort. Sommige houtsoorten zijn moeilijker te impregneren dan andere, hiervoor moet dan een andere techniek worden gebruikt. In het document van Vibe werd weinig tot niets vermeldt over de aantasting door insecten, het document van het WTCB houdt hier wel rekening mee. Hout voor daktimmerwerk blijft theoretisch gezien droog al is een luchtvochtigheid van 70% niet uitzonderlijk.

Daarnaast kan het hout ook tijdelijk bevochtigd worden zoals tijdens de constructieperiode wanneer de buitenafwerking nog niet is geplaatst. Hierdoor heeft het hout een verduurzamingsbehandeling A2.1 nodig, het is belangrijk hiervoor een certificaat te bezitten.^{CXVIII} Uit onderstaande tabel 23 blijkt dat deze behandeling bestaat uit een bescherming tegen insecten en schimmels.^{CXIX}

Verduurzaming van hout							
Verduurzamingsproces	I	P	BI	W	E	M	Beschrijving omgeving
A1	X	X					Binnen droog
A2.1	X	X					Binnen met risico op bevochting
A2.2	X	X	X				Idem A2.1 + gelijmd gelamelleerd hout
A3	X	X	evt	X			Buiten blootgesteld
A4.1	X	X	evt		X		Contacten grond of plantengroei
A4.2	X	X			X		Contact zoet water
A5	X	X				X	Contact zout water
Acties: I= insectenwerend, P= schimmelwerend, BI= antiverblauwing							
Weerstand tegen: W= uitlogen, E= zachtrot, M= mariene boorders							

Acties: I= insectenwerend, P= schimmelwerend, BI= antiverblauwing

Weerstand tegen: W= uitloggen, E= zachtrot, M= mariene boorders

Tabel 23: Verduurzaming hout (gebaseerd op: Van Leemput M^{CXX})

Houtverduurzaming is echter niet verplicht volgens de Belgische wetgeving. Maar de Belgische rechtbanken maken wel gebruik van de STS en TV's over houtverduurzaming.^{CXXI} Hout hoeft niet chemisch behandeld te worden om het te verduurzamen. Indien verduurzamen nodig blijkt maar men geen gebruik wil maken van chemische toeslagstoffen, biedt thermische verduurzaming een oplossing. Dit gebeurt door het hout op te warmen tot een temperatuur van 200°C. Door deze hoge temperaturen verandert de celstructuur van het hout en veranderen enkele karakteristieken van het hout. Door de voedingsstoffen voor schimmels en insecten onherkenbaar te maken, verkrijgt het hout een grote weerstand tegen insecten. Het hout neemt ook beduidend minder snel vocht op waardoor er 50-90% minder krimp- en zwelgedrag zal optreden. Het hout krijgt een donkerdere kleur maar de tekeningen blijven behouden.^{CXXII} Dit heeft wel een groot energieverbruik tot gevolg.^{CXXIII} De levensduur van hout kan ook verhoogd worden door het hout te schilderen. Dit kan eventueel met een natuurlijk product.

Het is buiten de scope van deze thesis om een antwoord te geven op de vraag of de verduurzaming van hout al dan niet nodig is, meer onderzoek op dit thema is nodig.

4.3.9.3. End of life/EOL

The end of life van een constructie is sterk afhankelijk van de opdrachtgever en aannemer bij de afbraak. Aangezien alle verbindingen buiten het pleisteren omkeerbaar zijn, kunnen de meeste elementen worden hergebruikt of gerecycleerd. Doordat de pleisters natuurlijk materialen zijn zonder toevoegstoffen^{CXXIV} kan het samen met het stro worden gerecycleerd. De gehele muuropbouw is hierdoor 100% composteerbaar of kan hergebruikt worden. Ook in de vloeropbouw kan elk materiaal behalve de folies worden gecomposteerd of hergebruikt.

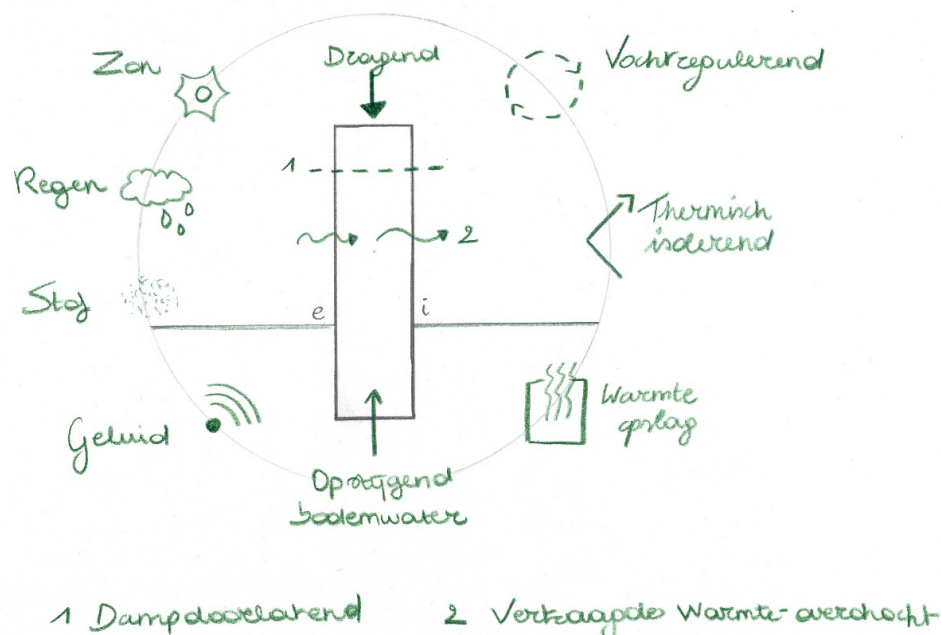
Het hout kan ook worden gerecycleerd maar dit zal dan onder de term downcyclen zijn. Op deze manier wordt het hout verwerkt tot papier, OSB platen of andere toepassingen waarvoor het hout eerst moet worden versnipperd.

4.4. Stampaarde

De tweede bouwmethode die we toepassen op de muurvoet is een vorm van massiefbouw, bouwen met stamphaarde. Het werd 3000jaar geleden voor het eerst toegepast in Carthage waarna het verspreid werd over de Middellandse zeegebied en verder naar Marokko en Spanje. Daarna vond het ook zijn toepassing in Zuid-Europa^{CXXV}. Deze methode is eeuwenoud maar wordt vandaag nog zelden aangewend in België. Er bestaat hier dan ook geen Belgische norm van. Wel zijn er normen en publicaties uitgegeven in landen of regio's zoals Nieuw-Zeeland (NZS 4297:1998 en NZS4298:1998) Australië (*Bulletin 5: Earth-wall construction*), Afrika (*SADC ZW HS 983:2014*), Frankrijk (*Guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue*), het Verenigd Koninkrijk en Duitsland (*Dachverband Lehm* bau). We gebruiken deze als referentiepunt voor deze thesis. De normen bevatten wel enkele verschillen en zijn dus niet allemaal volledig overlappend qua conclusie of regelgeving. Dit kan te maken hebben met verschillende parameters zoals klimaatcondities, testmethoden en resultaten of andere ervaringen met het materiaal.

We baseren ons op de meest uitgebreide normen, namelijk de Nieuw-Zeelandse, Australische en Afrikaanse normen. Hieruit halen we de belangrijkste punten waar rekening mee gehouden moet worden en zoeken we een passende conclusie. Wanneer deze normen op bepaalde vlakken ontoereikend zijn, wordt er gekeken naar de Duitse, Franse en UK-publicaties.

Eerst en vooral zijn er enkele elementen waar in het architecturaal ontwerp rekening mee moet gehouden worden bij het bouwen met stamphaarde. Aangezien stamphaarde een goede thermische inertie bezit moet dit zo veel mogelijk benut worden. Dit is mogelijk door efficiënt gebruik te maken van zonlicht en zonnearmte. Hiervoor zijn er enkele ontwerp oplossingen die men kan toepassen. Zo kan er best een rechthoekig plan geïmplementeerd worden waarbij $L = 1.5-2 * B$. In deze thesis wordt er een eengezinswoning in beschouwing genomen van acht bij twaalf meter. Daarnaast moet de longitudinale as van het gebouw oost-west georiënteerd zijn en implementeer je zoveel mogelijk ramen in de zuidfaçade. Aanvullend zorgt de overkapping ter bescherming van de stamphaarde muur ervoor dat de lage winterzon kan binnentreden maar de hoge zomerzon wordt geweerd.^{CXXVI} Verder moet er rekening gehouden worden met de vereisten van een stamphaarde muur bij het ontwerp ervan. Deze worden in onderstaande figuur 41 weergegeven.



Figuur 41: Vereisten van een dragende stamphaarde muur (gebaseerd op: Dachverband Lehm e.V., 2014)^{CXXVII}

4.4.1. Stabiliteit

De stabiliteit van een stamperde muur is een delicate kwestie. Hoewel gestampte aarde een degelijke sterkte heeft, zijn er toch limieten waar rekening mee gehouden dient worden. Zo zijn er eisen voor de maximale hoogte, minimale dikte en de samenstelling van de aarde. Hieronder geven we aan welke eisen wij zullen volgen in deze thesis op basis van de bovengenoemde normen. Ten eerste moet de maximale uitvoerhoogte, dit wil zeggen van sokkel tot top van de muur, beperkt worden tot 6.5 meter.^{CXXVIII} Dit houdt een gelijkvloers en eerste verdieping in. In academische literatuur en in de praktijkvoorbeelden wordt er hier en daar al uitgegaan van een hogere uitvoerhoogte tot drie bouwlagen. Deze aanname werd echter nog niet bevestigd door de normen omwille van de onzekerheid over het gedrag van stamperde bij dergelijke toepassingen, hiervoor moet nog verder onderzoek gedaan worden. Ten tweede wordt er een minimale muurdikte gegeven voor een stamperde muur, deze waarde verschilt van norm tot norm, zoals te zien in tabel 24. Daarom passen we in deze thesis een gemiddelde, minimale waarde van 250mm toe.

Minimum muurbreedte	
Norm	Muurbreedte
Australië	200 mm
Nieuw-Zeeland	250 mm
Afrika	300 mm

Tabel 24: Vergelijking minimum breedte stamperde muur in normen (gebaseerd op: New Zealand Standards, 1998 Dachverband Lehm e.V, 2014; Middleton G.F, 1987.^{CXXIX})

Tenslotte is de samenstelling van de aardemix van belang, deze voorziet de muur van sterkte en weerstand tegen regen en wind. Het mengsel bestaat daarom uit 50-60% fijn grind en zand, 30% leem en 5-15% klei.^{CXXX} Er zijn vier elementen nodig voor de aardemix, namelijk grind of grof zand, fijn zand, leem en klei. Elk van deze elementen heeft zijn eigen functie. Zo voorziet het grind de sterkte, vormt het fijn zand de opvulling tussen het grind en werken het leem en de klei als bindmiddel voor alle elementen.^{CXXXI} Verder bepaalt ook het type grind mee de eigenschappen van de aardemix. Zo zorgt afgerond grind ervoor dat het grind goed vermengd in de mix terwijl scherper grind ervoor zorgt dat de mix sterker wordt en je bijgevolg hoger kan bouwen.^{CXXXII} Aan de mix kan indien gewenst een stabilisator toegevoegd worden zoals stro- of hennepvezels, zand of (gehydrateerde) kalk met eventueel puzzolanen. Ze worden toegevoegd om ervoor te zorgen dat de scheuren in de muur gecontroleerd blijven en niet voor overmatige instabiliteit zorgen, tegelijk zorgen ze er ook voor dat de muur voldoende homogeen wordt bij het drogen. Er mag niet te veel stro worden toegevoegd aangezien de drukweerstand van stamperde daalt met de toename van het aandeel stro in de mix.^{CXXXIII} Een belangrijke opmerking is dat de aardemix niet een van de volgende substanties mag bevatten: organisch materiaal dat kan rotten of afbreken in de muur, in wateroplosbare zouten en grote aggregaten. Om de negatieve gevolgen van de krimp van stamperde tegen te gaan mag er geen te grote hoeveelheid klei aan de mix worden toegevoegd. Tegelijk zorgt de klei er wel voor dat de deeltjes een goede binding verkrijgen met elkaar.^{CXXXIV} Klei geeft de aardemix een meer samenhangende geheel maar zorgt er langs de andere kant wel voor dat er meer scheuren ontstaan bij het drogen, dat de mix moeilijker te maken is en dat het sneller verweerd door de weersomstandigheden.^{CXXXV} Het is dus uitermate belangrijk om hier een goed evenwicht in te vinden. Om deze reden worden er best verschillende mengsels gemaakt en getest om zo het beste resultaat te verkrijgen.

In vele voorbeelden wordt er cement toegevoegd aan de aardemix om deze van een grotere sterkte te voorzien. Dit is echter contradictorisch ten opzichte van het initiële doel om met aarde te werken, het bio-ecologische aspect en het weren van milieu-schadelijke producten als cement. Hierdoor verhoogd de CO₂ productie alsook het energieverbruik en worden eigenschappen als dampopenheid en hygroscopiciteit nadelig beïnvloed. Een bijhorend gevolg is de onmogelijkheid om deze aarde na de

levensduur van het gebouw opnieuw te gebruiken of te recyclen.^{CXXXVI} In het boek “Refined Earth Construction and Design with Rammed Earth” wordt deze problematiek ook aangekaart. Rauch vermeldt daarbij dat stampaarde de toevoeging van cement niet nodig heeft om weerstand te bieden aan de klimatologische omstandigheden. Echter, een stampaarde muur zal na verloop van tijd door deze omstandigheden verweren maar tegelijk verharderen aan het oppervlak waarbij het grind zorgt voor de stabiliteit van de muur. De aarde tussen de stenen zit weliswaar nu dieper maar zal bij regen expanderen waardoor verdere infiltratie van water wordt verhinderd en zo ook de erosie. Zo ontstaat er uiteindelijk een evenwicht tussen het verweren van de muur en zijn levensduur.^{CXXXVII} Ook andere onderzoekers ondersteunen deze visie en ondergraven het gebruik van cement in stampaarde. Zij claimen dat een degelijk ontwerp met een beschermend dak en sokkel alsook enkele maatregelen die capillaire opzuiging van grondwater voorkomen, een goede durability tonen.^{CXXXVIII} Dit werd bevestigd door een analyse die hierover werd gemaakt waaruit bleek dat de milieu-impact zeer zwaar werd beïnvloed door de cementproductie en -transport.^{CXXXIX} Dit alles wordt duidelijk wanneer je naar de vele voorbeelden kijkt van constructies die meer dan 100 jaar geleden gebouwd werden uit stampaarde zonder toevoeging van cement en vandaag nog steeds gebruikt worden zoals de Chinese muur en de traditionele Hakka huizen in China.

Fundering

De fundering wordt voornamelijk gemaakt uit gewapend beton of stenen metselwerk. Deze heeft dezelfde breedte als de muur en/of een breedte volgens de minimale eisen van de berekening en moet minimaal 225mm boven grondniveau geplaatst worden. Als de grond afgewerkt is met stenen, kan dit verminderd worden tot 150mm. Deze maatregel werd ingesteld om de vochtproblematiek gerelateerd aan stampaarde tegen te gaan. Zo werkt de fundering als een soort sokkel en verhindert het de afbrokkeling van de aarde door regen- of grondwater.^{CXL} Volgens de Afrikaanse norm moet deze hoogte opgetrokken worden tot 300mm wanneer de grondwaterstand minder dan 750mm diep zit.^{CXLI} Ook een fundering in stampaarde behoort tot de mogelijkheden al wordt dit nog niet vaak uitgevoerd. Het voordeel is dat de muur kan doorgetrokken worden tot aan de funderingsaanzet. Naarmate men meer naar onder gaat is het aangeraden om de breedte stelselmatig te vergroten. Hierdoor wordt een grotere stabiliteit verkregen net als een betere verdeling van de lasten. Bij deze uitvoering horen enkele nadelen. Eerst en vooral is werken met stampaarde op dit moment nog relatief duur. De geschatte kost voor een stampaarde mix is ongeveer 500 euro per m² muur. Beton wordt maar op een 110 euro per m² geschat wat ongeveer 1/5 van de prijs voor stampaarde is. In Duitsland werd de kost met installatiekosten geschat op 1500-1700 euro per m² stampaarde.^{CXLII} Een fundering uit stampaarde betekent een stijging in de kostenraming terwijl dit met de andere methodes goedkoper kan. Het tweede nadeel is de samenstelling van de aardemix, deze moet voor de toepassing als fundering en sokkel bestaan uit een gestabiliseerde aardemix met ongeveer 5% cement. Dit impliceert dat de aardemix na gebruik niet meer op de composthoop terecht kan komen en schendt dan ook de waarden en eisen bij bio-ecologisch bouwen. Het is interessant te weten dat deze uitvoering bestaat omdat ze in verschillende normen wordt vermeld. In tabel 25 wordt aangegeven welke funderingsbreedte en -dikte moet worden gebruikt afhankelijk van het type grond waarop gefundeerd wordt met stampaarde.

Minimum breedte van lijnfundering in stampaarde		
Grondtype	Funderingsbreedte = F	Funderingsdikte
Rots	Breedte muur = W	/
Grind/zand [dens]	Breedte muur = W	/
Klei/zanderig klei [stijf]	400 mm	Max van [(F-W)/2] of breedte muur
Klei/zanderig klei [stevig]	500 mm	Max van [(F-W)/2] of breedte muur
Zand [los]	In andere laag funderen	
Leem/klei [zacht]	In andere laag funderen	

Tabel 25: Minimum breedte van lijnfundering in stampaarde (gebaseerd op: Southern African development community cooperation in standardization's, 2014.^{CXLIII})

Stampaarde muur

Voor de uitvoering van een stampaarde muur zijn er verschillende opties. Zo kan er gebruik gemaakt worden van adobe stenen. Dit zijn gedroogde stenen gemaakt van aarde en gevormd in een mal. De aarde bevat klei, zand en leem alsook een eventuele stabilisator zoals stro. Adobe wordt in situ geplaatst waarbij de vochtige mix in een mal wordt geplaatst en zo een muur gevormd wordt met aardemortel.^{CXLIV} Hierbij moet er rekening gehouden worden met enkele zaken. De plek waar de stenen gevormd worden, moet voldoende vlak en gedraineerd zijn en er mogen geen onzuiverheden uitsteken. Als er mortel wordt gebruikt, dan bestaat deze uit dezelfde mix als de stenen maar zonder de toevoeging van stro.^{CXLV} Deze stenen moeten in de zon drogen om hun uiteindelijke sterkte en vorm te verkrijgen, dit is in het Belgische klimaat niet altijd even makkelijk omdat er lange periodes zonder zon kunnen voorkomen. Voor deze methode is soms een bindende mortel nodig om de stenen op elkaar te metselen. Wanneer hiervoor geen biologische mortel wordt gebruikt, is het nadien niet mogelijk om de aardemix te recyclen door de verontreiniging ervan. Omdat de stenen ter plaatse moeten gevormd en geplaatst worden, is dit een arbeidsintensief proces. Om die redenen gaat de voorkeur uit naar bouwen met stampaarde.

Stampaarde is een vochtige aardemix die in een bekisting wordt aangedrukt tot een stevige massa. Dit proces gebeurt in verschillende lagen waarbij elke laag moet aanhechten aan de vorige om een homogene massa te genereren, daarbij moet de krimp van elke laag zo goed mogelijk beperkt blijven om onthechting te voorkomen. Een van de varianten binnen deze categorie is cob, dit is een redelijk eenvoudige aardemix bestaande uit zand, klei en stro en wordt gevormd zonder bekisting, waardoor het minder interessante optie is dan stampaarde.^{CXLVI} Bij een stampleem mengsel kan een specifieke mix gemaakt worden met de juiste eigenschappen voor een bepaalde toepassing. In het algemeen kan gestampte aarde zowel in situ als prefab gemaakt worden. Bij het in situ plaatsen van stampaarde wordt er een houten bekisting geplaatst, hierin wordt telkens een laag van 10cm aarde gevormd. Om de verdeling van de horizontale lasten te verbeteren wordt er tussen elk verdiep een ringbalk geplaatst uit hout. Voor de prefab methode worden er in de werkplaats blokken gemaakt die daarna ter plaatse op en naast elkaar worden gezet en worden verbonden met de aardemix om een uniform geheel te vormen.^{CXLVII} Afhankelijk van het type mengsel kunnen er andere applicaties verwezenlijkt worden zoals te zien in tabel 26.

Toepassingen van stampaarde								
	Stampleem	Cob	Stroleem	Lichte leem	Leemschutting	Leemmortel	Leemsteen	Leemplaaf
Vloer	X				X			
Dragende muur	X	X				X	X	
Niet dragende muur	X	X	X	X		X	X	X
Dak			X	X	X		X	X
Droogbouw							X	X
Pleister			X	X		X		

Tabel 26: Toepassingen van stampaarde (gebaseerd op: Dachverband Lehm e.V., 2014.^{CXLVIII})

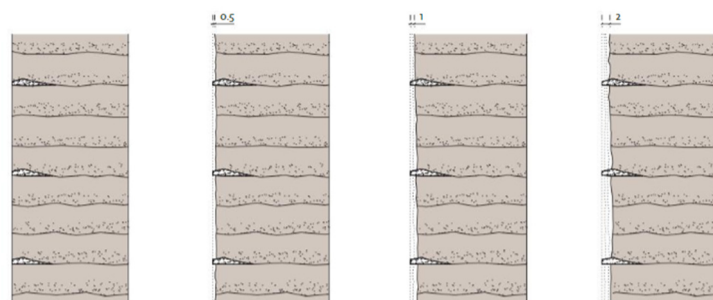
Om de stabiliteit van een stamperde muur te vergroten kan er gebruik gemaakt worden van verstevigingsmethoden zoals wapeningsstaven of gewezen draadnetten. Wanneer men gebruik maakt van stalen wapeningsstaven moeten deze uiteraard verankerd worden. Dit kan op drie manieren: in beton, rond een andere wapeningsstaaf of in een houten blok of plaat.^{CXLIX} Er wordt enkel aangeraden te werken met wapening als men hoger wil bouwen dan twee bouwlagen. Als men de normen volgt en daarmee niet hoger dan de aangeraden hoogte van twee bouwlagen bouwt is er voldoende stevigheid te verkrijgen door de dikte van de muur en is er geen nood aan wapening.^{CL} Dit is dan ook wat er in deze thesis wordt beschouwd. Een stamperde muur heeft een drukweerstand rond de 2MPa.^{CLI} De karakteristieke waarde voor drukweerstand bevindt zich rond 0,4-0,6N/mm².^{CLII} De treksterkte daarentegen is van een minder grote orde, dit is dan ook de reden waarom stamperde voornamelijk voor verticale muren wordt gebruikt.

4.4.2. Waterdichtheid

Constructies uit stamperde verkrijgen een natuurlijke resistentie tegen weersomstandigheden doorheen de tijd. Toch is er nood aan externe bescherming om een goede bestendigheid tegen erosie en water te kunnen garanderen. Dit houdt in: een overkapping bovenaan de muur, een sokkel onderaan de muur en de afwerking van het oppervlakte.

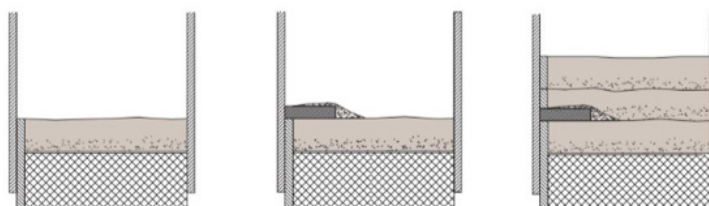
Met de overkapping wordt er vermeden dat stagnerend water terecht komt tegen de muur, wat kan leiden tot erosie. Bescherming aan de voet van de muur kan niet alleen in de vorm van een sokkel uit steen of beton maar kan ook door middel van een beschermde laag aan de voet. Deze laag kan een pleister, stenen, een extra slijtmasa of gestabiliseerde stamperde zijn. Dit laatste wordt meestal toegepast wanneer een stamperde fundering wordt gebruikt.^{CLIII} Daarnaast moet er een horizontale waterkering worden geplaatst tussen de stamperde muur en de sokkel of fundering, zo wordt er vermeden dat vocht capillair wordt opgezogen tot hogere hoogtes in de muur.^{CLIV}

Naast deze verplichte toevoegingen zijn er nog enkele andere maatregelen die genomen kunnen worden. Zo kunnen zogenoemde 'erosie checks' worden geïmplementeerd. Dit zijn stenen, vuurvaste klei of traskalkmortel die om de 40-60cm horizontaal in de stamperde muur worden geplaatst. Ze remmen de snelheid van het regenwater dat over de muur stroomt, alsook de hoeveelheid water die erover stroomt omdat ze twee centimeter uitsteken ten opzichte van de muur. Hierdoor wordt de erosie van de muur beperkt.^{CLV} Er moet hierbij opgemerkt worden dat de uitvoering van dergelijke constructies een hogere moeilijkheidsgraad in zich heeft en dat niet de volledige oppervlakte beschermd zal zijn. Zo zullen voornamelijk de zones net onder de stenen beschermd blijven en een verminderde erosie ondervinden. De zones boven de stenen zullen in grotere maten eroderen en worden ook belast door opspattend water van de uitstekende stenen. In onderstaande figuur 42 wordt dit proces doorheen de tijd getoond.



Figuur 42: Voortgang erosie na verloop van tijd bij toepassing van traskalk mortel^{CLVI}

Er is dan ook verder onderzoek nodig voor de implementatie van deze oplossing. In figuur 43 wordt de opbouw van een stampaarde muur met erosie checks getoond waarbij duidelijk wordt dat een het een arbeidsintensief proces is dat meer tijd zal vragen in vergelijking met een standaard stampaarde muur.



Figuur 43: : Uitvoering stampaarde muur met erosie checks^{CLVII}

Bijkomend kan er ook een 'slijtmassa' in rekening worden gebracht, dit houdt in dat de muur een grotere breedte krijgt dan in essentie nodig is voor de stabiliteit. Dit laat toe dat enkele centimeters aarde wegslijten na verloop van tijd, tot een evenwicht bereikt wordt tussen verwerking en levensduur, zonder de stabiliteit van de muur in gevaar te brengen.^{CLVIII} Tenslotte kan er ook in de grondmassa rond de funderingsvoet een drainerende laag, zoals grind, ter vervanging van de initiële grondmassa voorzien worden. Dit kan in combinatie met een leiding in de grond worden gecombineerd zodat het water van het gebouw wordt weggeleid.^{CLIX}

Verder is stampaarde ook een dampopen materiaal waardoor de toepassing van dampopen bouwen aan te raden is.

4.4.3. Luchtdichtheid

De luchtdichtheid van een stampaarde constructie is van nature zeer efficiënt. De aardemix wordt zo samengesteld dat er een homogeen geheel wordt gevormd waarbij kleine granulaten de lege ruimte tussen grote granulaten opvullen. Daardoor is het moeilijk voor lucht om hier een weg door te banen. Dit wordt verder versterkt door het aanstampen van de aarde. Hierbij wordt alle lucht die zich nog in de massa zou bevinden, eruit geperst. Stampaarde wordt echter niet beschouwd als volledig luchtdicht, daarom moet men gebruik maken van een pleisterlaag aan binnen- of buitenzijde. Deze pleisterlaag kan bestaan uit kalk- of leempleister, deze zijn luchtdicht maar wel dampopen. Wanneer de pleister aan de buitenzijde wordt aangebracht gaat het best om een waterbestendige kalkpleister.

4.4.4. Thermische isolatie

Stampaarde is zelf geen isolatiemateriaal, dit is te zien in tabel 27 waar de U-waarde wordt weergegeven van verschillende muurdiktes. Een stampaarde muur met de minimum dikte van 250mm heeft een U-waarde van 2,86W/(m²K), een muur van bijna de dubbele breedte zorgt voor een U-waarde die ongeveer 1/3 lager is.^{CLX} Deze waarden voldoen niet aan de Belgische norm waar een U-waarde van 0,24W/(m²K) wordt geëist voor een muur. Voor de berekening van de R-waarde van een stampaarde muur bestaat volgende formule: $R=2,04 \cdot (\text{dikte muur} + 0,12)$ ^{CLXI}

U-waarde van stampaarde muur	
Muurdikte [mm]	U-waarde [W/(m²K)]
250	2,86
300	2,56
350	2,33
400	2,14
450	1,97

Tabel 27: U-waarde van een stampaarde muur afhankelijk van de dikte (gebaseerd op: New Zealand Standards, 1998.^{CLXII})

Wanneer de U-waarde vergeleken wordt met beton, die voor een muurdikte van 250mm een U-waarde heeft van $6,8\text{W/m}^2\text{K}$, scoort stampaarde goed. Dit wordt genuanceerd wanneer men naar de lambda-waarde van stampaarde kijkt in vergelijking met andere materialen, zie tabel 28. Daar scoort stampaarde enkel beter dan baksteen en kalkpleister. Isolatiematerialen zoals hennep, cellulose of kurk scoren significant beter.^{CLXIII} Dit is logisch aangezien stampaarde geen isolatiemateriaal is. Stampaarde zorgt voor de stabiliteit van de constructie als we materialen zoals beton en baksteen vergelijken met stampaarde dan scoort stampaarde wel goed. Het is dan hierdoor duidelijk dat een stampaarde muur of vloer een extra isolatielaag vergt om aan de eisen te kunnen voldoen.

λ-waarde materialen	
Materiaal	λ [W/(m²K)]
Houtvezelplaat	0,05
Schapenwol	0,039
Cellulose	0,039
Kurk	0,04
Hennep	0,071
Kalkpleister	0,8
Baksteen	0,84
Stampaarde	0,643

Tabel 28: Lambda-waarde van verschillende isolatiematerialen in vergelijking met stampaarde (gebaseerd op: Dickson T. and Pavía S., 2021.^{CLXIV})

Indien de aarde correct wordt georiënteerd, werkt het door zijn groot eigengewicht, als thermische massa. Stampaarde heeft een thermische inertie van $590\text{Wh}/(\text{m}^3\text{K})$.^{CLXV} Dit betekent dat warmte wordt geabsorbeerd en opgeslagen in de muren en op een later tijdstip traag wordt afgegeven en zo de ruimte opwarmt. Hierdoor is de binnentemperatuur minder onderhevig aan de temperatuurverschillen van de buitenomgeving en wordt de binnentemperatuur constant gehouden.^{CLXVI} Tegelijk bezit het ook een lage thermische effusiviteit wat ervoor zorgt dat de muur warm zal aanvoelen. Dit zorgt voor extra comfort. Bijkomende isolatie, hetzij aan de binnen- of buitenzijde, is nodig om aan de comforteisen te voldoen. In prefab muren is het mogelijk om isolatie tussen twee lagen stampaarde te plaatsen.

4.4.5. Toegankelijkheid

Bij een stampaarde muur is er een hoogteverschil tussen het grondniveau en de aanzet van de muur omwille van de sokkel. Dit hoogteverschil is respectievelijk voor een spouwmuur en een stampaarde muur 150mm en 225mm. Dit kan overbrugd worden met twee treden in plaats van één zoals bij een standaard spouwmuur. Uiteraard zal er voor een rolstoeltoegankelijke woning een helling moeten voorzien worden om dit hoogteverschil te overbruggen of zal er een lijnafwatering moeten voorzien worden ter plaatse van de toegang en moet het vloerniveau verlaagd worden waardoor rolstoelgebruikers de woning makkelijker kunnen betreden.

4.4.6. Akoestiek

Een aardemuur heeft goede akoestische eigenschappen. Voor akoestische isolatie bestaan er twee systemen. Het eerste is een massa-veer-massa systeem, hierbij fungeert een flexibel isolatiemateriaal als de veer tussen twee massa's. De geluidstrillingen worden dan gedempt door de veer.^{CLXVII} De andere methode is louter gebaseerd op de massawet waarbij de geluidsisolatie zal verbeteren bij een grotere massa. Zo neemt de geluidsisolatie met 6dB toe bij een verdubbeling van de massa.^{CLXVIII} Dit principe wordt ook gebruikt bij een stampaarde muur, die een dichtheid tussen $1700\text{--}2200\text{ kg/m}^3$ heeft.^{CLXIX} Een stampaarde muur heeft een sound reduction index (SRI), $R_w = 50\text{dB}$.^{CLXX} Als men dit vergelijkt met glaswol, dat een waarde van 45dB heeft, is dit best goed. Dit wil zeggen dat geluiden die niet impact gerelateerd zijn, voldoende worden gedempt door de muur zodanig dat het geen storend element in

de ruimte is. Zo zal men een normaal gesprek niet meer kunnen horen in de naastgelegen ruimte. In academische literatuur wordt zelfs gesproken van een R_w -waarde tot 57dB^{CLXXI}, wat enkel luide geluiden zou doorlaten.

4.4.7. Brandveiligheid

Op vlak van brandveiligheid scoort stampaarde goed. Er wordt in de normen vermeld dat een stampaarde muur onbrandbaar is. Stampaarde heeft een brandweerstand van 120min voor een muurdikte van 150mm.^{CLXXII} Volgens het Koninklijk besluit over brandgedrag zou de gehele gevel een brandklasse B-s3-d1 en een brandweerstand van EI60 moeten bezitten om conform met de Belgische norm te zijn. De brandweerstand van stampaarde is duidelijk voldoende. De brandklasse vormt geen probleem omdat stampaarde onbrandbaar is.

4.4.8. Afwerking

De stampaarde muur moet zowel aan de binnen- als buitenzijde afgewerkt en beschermd worden. Deze afwerkingen moeten dampopen zijn en bescherming bieden tegen regen, een vochtig binnenklimaat en stof. Hiervoor selecteerden we vier opties voor de buitenafwerking en twee opties voor de binnenafwerking die binnen de visie van bio-ecologisch bouwen passen. De opties worden in tabel 29 opgesomd.

Afwerking stampaarde		
	Binnen/buiten	Extra
Kalk(hennep)pleister	Binnen en buiten	Kalkverf om te vereffenen
Klei- of leempleister	Binnen en buiten	Leemverf
Lijnzaadolie	Binnen en buiten	
Erosie checks	Buiten	Om de 40-60 cm + 2cm uitstekend
Slijtmassa	Buiten	5% van de muurbreedte toe te voegen

Tabel 29: Opties voor afwerking stampaarde muur aan binnen-en buitenzijde

Afwerking buitenzijde

Om de esthetische waarde van een stampaarde muren niet teniet te doen zijn de meest passende oplossingen de toepassing van een slijtmassa of afwerking met lijnzaadolie. Slijtmassa is een goede optie maar hiervoor moet er extra materiaal gebruikt worden dat uiteindelijk opgeofferd wordt. Dit is in theorie een vorm van materiaalverspilling. Daarnaast kan het zand dat vrijkomt bij de erosie de grinddrainage onder aan de muur doen verstoppen. Lijnzaadolie is daarentegen een eenvoudige methode om de muur te verstevigen zonder het uitzicht te veranderen omdat het doorzichtig is. Een andere oplossing is het gebruik van erosie checks die geplaatst worden in de muur. Dit zou volgens Martin Rauch al een degelijke bescherming moeten bieden maar deze methode wordt nog niet vermeld in de normen.

De buitenafwerking van de stampaarde muur moet dampopen zijn, dit is nodig omdat een stampaarde muur water absorbeert. Dat water mag niet in de muur blijven vastzitten maar moet deze kunnen verlaten tijdens de droogperiodes. Daarom mag een stampaarde muur niet worden afgewerkt met een dampdichte laag zoals cement. Als men een dampopen afwerking voorziet, is een stampaarde structuur voldoende bestand tegen de weersomstandigheden.^{CLXXIII} Hier zijn er enkele opties: een wassing met kalk, een pleister zoals aardepleister of kalkpleister, olieverf of lijnzaadolie, stenen of tegels of een slijtmassa.

Afwerking binnenzijde

Ook de binnenafwerking heeft nood aan een beschermende laag. Deze keer niet tegen regenwater maar wel als bescherming tegen de productie van waterdamp in de ruimte zelf. Daarom moet deze afwerking dampopen zijn zodat de muur geen onnodig vocht vasthoudt en dat het geabsorbeerd vocht terug kan vrijgeven aan de ruimte om een gezond binnenklimaat te realiseren. De opties zijn hiervoor te vinden in een coating (verf of lijnzaadolieolie), pleister of tegels.

De eigenschappen van de kalk- en leempleister werden al besproken in 4.3.7. *Afwerking*. Een kalkpleister kan versterkt worden met hennepvezels zodat de muur warm zal aanvoelen en kleine oppervlakteschuren vermeden worden. Dergelijk pleisterwerk kan verder afgewerkt worden met kalkverf zodat de hennepvezels in het oppervlak vereffend worden en zorgt voor een kleur. Onze voorkeur gaat uit naar een leempleister hierdoor wordt het uitzicht van een aarde muur deels binnengebracht. Daarnaast heeft leempleister een lagere milieu-impact dan kalkpleister. Ook leempleister kan afgewerkt worden met leemverf of een extra sierpleister. De totale dikte van een pleisterlaag mag tot 30mm dik zijn en bestaat uit twee lagen.

Ook wanneer er binnenisolatie wordt toegepast, moet een afwerking voorzien worden aan de hand van een pleisterlaag, hiervoor gelden dezelfde opties. Bij toepassing van kalkhennepisolatie kan dit zonder pleisterdrager worden toegepast terwijl bij houtvezelisolatie een jutte pleisterdrager voorzien dient te worden voor.

4.4.9. Sustainability

Stampaarde wordt gezien als een constructiemateriaal met een lage CO₂ uitstoot waardoor het een milieuvriendelijkere variant is ten opzichte van standaard bouwmaterialen. In een studie gemaakt aan de Universiteit van Granada, werd de uitstoot van stampaarde onderzocht. Hieruit bleek dat stampaarde inderdaad een veel lagere uitstoot genereert dan beton en baksteen, voornamelijk wanneer het gaat over ongestabiliseerde stampaarde. Het aantal kilogram CO₂ per kilogram stampaarde is maar liefst 3,5 keer kleiner dan die van een betonnen constructie. Wanneer er 7,5% cement wordt toegevoegd aan de stampaarde mix, verkleint naar 2,3 keer minder kilogram CO₂ per kilogram materiaal. Ook adobe scoort iets minder positief ten opzichte van ongestabiliseerde stampaarde, hierdoor is het binnen de visie van bio-ecologisch bouwen interessanter om gebruik te maken van ongestabiliseerde stampaarde. De betreffende waarden zijn te vinden in tabel 30.^{CLXXIV}

CO ₂ uitstoot	
Materiaal	kg CO ₂ /kg
Stampaarde	0,004
Stampaarde met 7,5% cement	0,06
Adobe	0,06
Beton	0,14
Gewapend beton	0,18
Volle baksteen	0,19

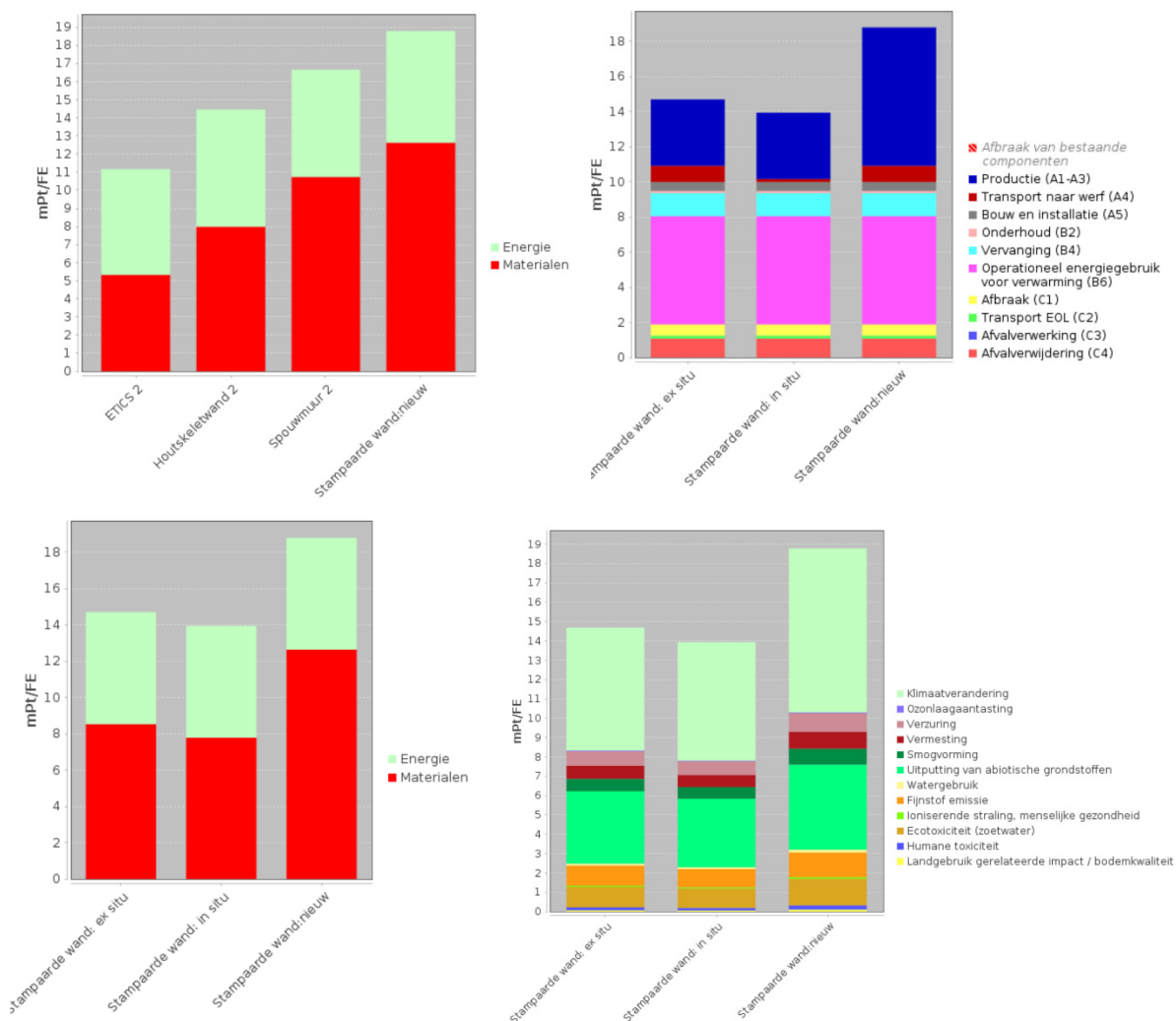
Tabel 30: CO₂ uitstoot van verschillende materialen in vergelijking met stampaarde (gebaseerd op: Ávila F., Puertas E. and Gallego R., 2021.^{CLXXV})

Ten slotte is stampaarde een ideaal materiaal om te recyclen. Wanneer er geen cement wordt toegevoegd, kan het na zijn levensduur rechtstreeks worden teruggegeven aan de aarde.

Voor een verdere analyse wordt de stampaarde muur bekeken in Nibe. Hier wordt momenteel stampaarde enkel als dragende binnenwand beschreven. Stampaarde verkrijgt voor deze toepassing een milieuklasse 2B wat betekent dat het milieutechnisch een goede keuze is. Opvallend is dat de

milieuklasse verbeterd wanneer men een stampaarde muur bekijkt met een kleinere sterkte en dikte. Dit komt door de grote massa van de aarde die de milieu-effecten ten gevolge van transport verhoogt. Ook de schaduwkosten vertonen hetzelfde patroon, deze zijn voor een stampaarde muur met kleine sterkte 3,12€ terwijl een muur met een grotere sterkte 5,47€ schaduwkosten in zich heeft. Hierbij zijn de broeikasgassen de grootste bijdrage aan de schaduwkosten. Wanneer je dit vergelijkt met gewapend beton of bakstenen metselwerk, hebben deze ongeveer dezelfde of een betere milieuklasse, dit heeft te maken met het grote gewicht van stampaarde. Dit hoort genuanceerd te worden aangezien stampaarde lokaal en met aanwezige grondstoffen geproduceerd kan worden en het na zijn levensduur zonder veel energie gerecycleerd kan worden. Beton heeft deze mogelijkheid niet. (Nibe werd geraadpleegd in mei 2022).

Dit werd ook duidelijk wanneer een stampaarde muur in TOTEM bekeken wordt. In TOTEM moet er echter gebruik gemaakt worden leemstenen gelegd in kalkmortel in plaats van gestampte aarde. Dit zal een effect hebben op de materiaalimpact, die hierdoor vermoedelijk hoger zal liggen. Wanneer men stampaarde bekijkt als een nieuw product waarbij grondstoffen gedolven worden voor het project, wordt al snel duidelijk dat de materiaalimpact hiervan bijna gelijkwaardig aan een spouwmuur. Dit is voornamelijk te danken aan de productie en transportfase, deze vergen veel energie en grondstoffen. Deze impact kan verkleind worden door gebruik te maken van al eerder gebruikte of bestaande grondstoffen. In deze situatie gaat het om aarde die uitgegraven wordt op een werf voor het maken van de bouwput. De aarde kan daarna zowel ex-situ als in-situ toegepast worden in de vorm van stampaarde. Op deze manier wordt de transportafstand verkleind, daalt het energieverbruik en de hoeveelheid nieuw gedolven grondstoffen. Het is dan ook sterk aangeraden om gebruik te maken van een aardemix in-situ of wanneer dit niet mogelijk is ex-situ. Dit wordt verduidelijkt in figuur 44 uit TOTEM waar de drie opties vergeleken worden met elkaar. Zowel de totale materiaalimpact als de impact van productie of de impact op klimaatverandering verminderen significant. Het verschil tussen ex-situ en in-situ is niet significant te noemen. Het gebruik van nieuwe aarde voor een stampaarde constructie wordt niet gezien als een valabele optie, aangezien het significant slechter scoort dan een houtskeletwand en ETICS-wand en zelfs slechter dan een spouwmuur. Dit terwijl stampaarde vervaardigd uit grondstoffen in-situ, significant beter scoren dan een spouwmuur en ETICS-wand en beter dan een houtskeletwand. Deze waarden zijn te vinden in tabel 31. (TOTEM werd geraadpleegd in mei 2022.)



Figuur 44: Vergelijking stampeerde muur met 1) Nieuwe grondstoffen stampeerde, spouwmuur, ETICS en houtskeletwand; 2) Met nieuwe, ex-situ en in-situ grondstoffen

Materiaalpunten TOTEM			
Opbouw	Materiaalpunten	% verschil tov stampeerde: nieuw	% verschil tov stampeerde: in situ
Stampaarde nieuw	13		40,00%
Stampaarde ex situ	8,5	34,62%	8,24%
Stampaarde in situ	7,8	40,00%	
Spouwmuur	11	15,38%	29,09%
Houtskeletbouw	8	38,46%	2,50%
ETICS	5,3	59,23%	32,05%

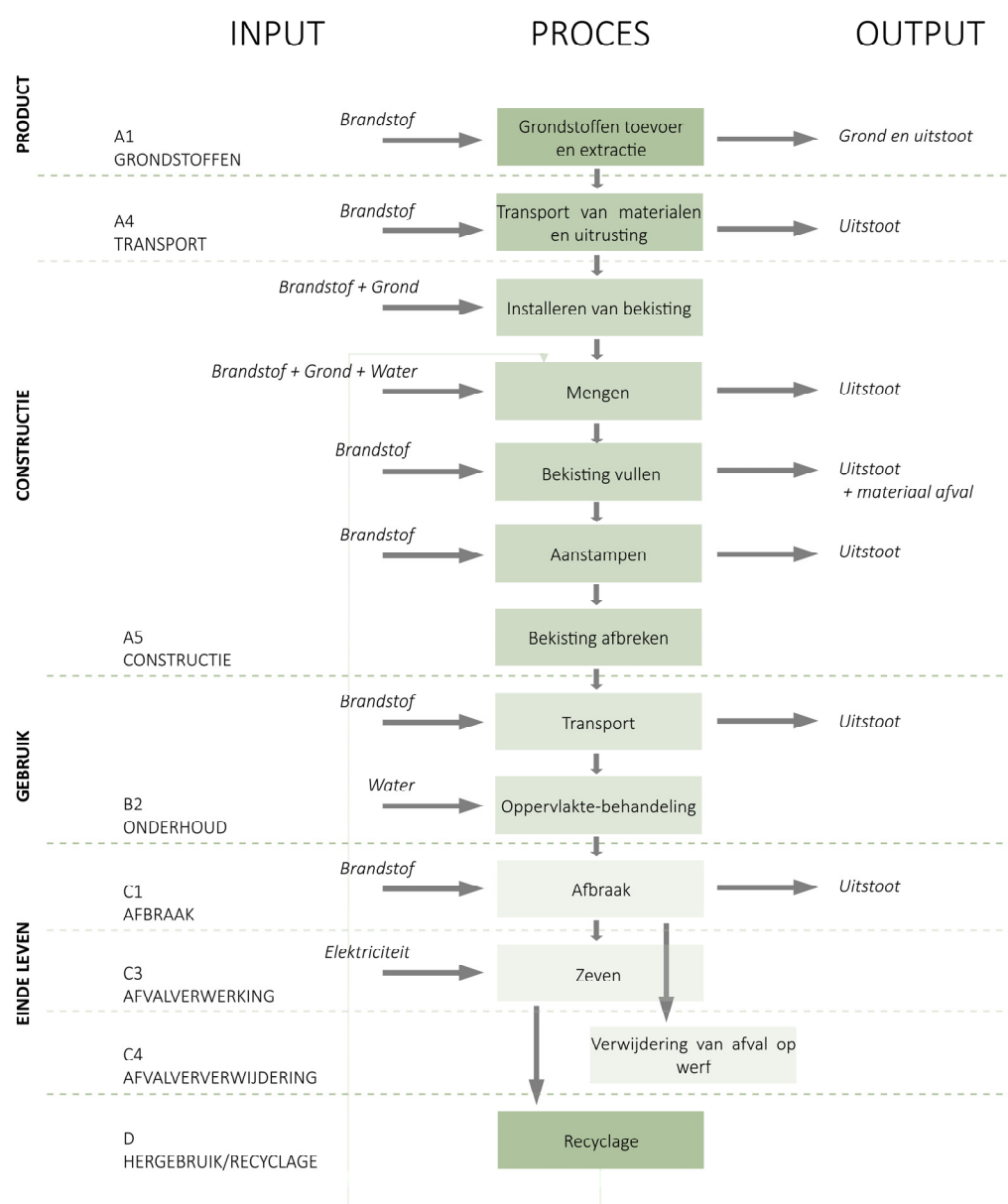
Tabel 31: Materiaalpunten TOTEM^{CLXXVI}

Verder werden er verschillende LCA-onderzoeken bekeken waarbij stampeerde vergeleken wordt met standaard materialen of bouwmethoden. In een eerste onderzoek van Fernandes et al. wordt het hele proces van het bouwen van een stampeerde muur, zoals te zien is in figuur 45, bekeken. En werd de milieu-impact van al deze stappen onderzocht waarbij stampeerde werd vergeleken met baksteen en betonsteen. Tabel 32 geeft weer dat stampeerde op alle vlakken significant beter scoort dan betonsteen. Daarnaast scoort het ook op bijna alle vlakken significant beter dan baksteen. Op vlak van aantasting van de ozonlaag en verzuring scoort het beter dan baksteen maar niet significant. Zo is bijvoorbeeld de embodied energy van stampeerde 50% kleiner dan die van betonsteen wat het verschil aan benodigde energie voor productie, installatie en verwerking inhoudt.

Op vlak van aantasting van de ozonlaag en verzuring van het milieu is het verschil tussen stampaarde en baksteen eerder klein. Toch toont dit onderzoek aan dat het gebruik van stampaarde gepaard gaat met een kleinere milieu-impact dan andere standaard materialen zoals betonsteen en baksteen met dezelfde functie.^{CLXXVII}

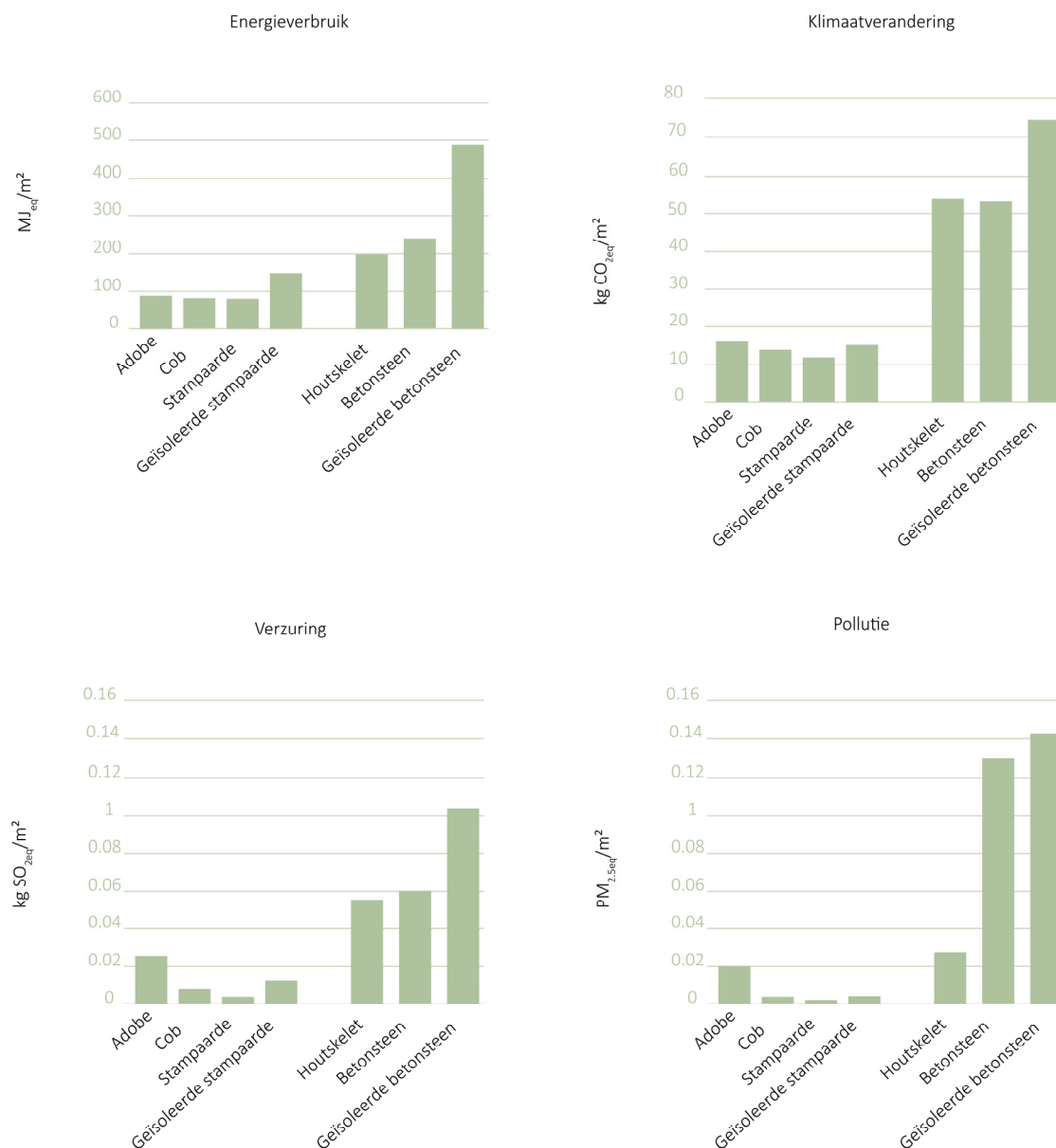
Milieu-impact en ingebedde energie van 1m ² buitenmuur				
Impact categorie	Eenheid	Stampaarde (60cm)	Baksteen (26cm)	Betonsteen (29cm)
Uitputting van abiotische minerale elementen	kg Sb eq.	1,29E-05	8,21E-05	9,56E-05
Uitputting van abiotische fossiele brandstoffen	MJ	3,43E+02	4,61E+02	6,04E+02
Global warming potential	kg CO ₂ eq.	2,85E+01	5,74E+01	8,26E+01
Aantasting van de ozonlaag	kg CFC 11 eq.	3,60E-06	3,87E-06	2,80E-06
Verzuring	kg SO ₂ eq.	1,55E-01	1,63E-01	4,19E-01
Ingebedde energie	MJ	3,58E+02	5,40E+02	7,23E+02

Tabel 32: Milieu-impact en embodied energy van 1m² buitenmuur (gebaseerd op: Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., 2019.^{CLXXVIII})



Figuur 45: LCA stampaarde – proces met input en output. (gebaseerd op: Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., 2019)^{CLXXIX}

In het onderzoek van Ben-Alon et al. komt dezelfde conclusie naar voor, zie figuur 46. Hierbij wordt er gekeken naar het verschil in milieu-impact tussen verschillende vormen van bouwen met aarde, waaronder cob, adobe, stampaarde en geïsoleerde stampaarde. Aan de geïsoleerde stampaarde muur werd 5,1cm PIR-isolatie toegevoegd. De milieu-impact wordt bekeken voor energieverbruik, klimaatverandering, verzuring en pollutie. Dezelfde bemerkingen komen tevoorschijn wanneer men de verschillende aarde materialen vergelijkt met standaard materialen als betonsteen en houtskelet. Over de volledige lijn scoren aarde materialen significant beter, voornamelijk op vlak van klimaatverandering en pollutie. Ook tussen de aarde materialen zijn er verschillen te bemerken. Zo komt stampaarde eruit als de best scorende optie op alle vlakken. Cob, een mix van stro, zand en klei, vertoont slechts een klein verschil ten opzichte van stampaarde en kan beschouwd worden als een gelijkwaardige optie. Adobe en geïsoleerde stampaarde scoren beiden slechter dan stampaarde en cob maar zijn nog altijd een betere optie vergeleken met houtskelet of betonsteen.^{CLXXX}



Figuur 46: Milieu-impact voor verschillende muur opbouwen (Gebaseerd op: Ben-Alon L., Loftness V., Harries K.A. and Cochran Hameen E., 2021)^{CLXXXI}

4.4.10. Durability en EOL

Een stamperde muur wordt verondersteld 50 jaar te blijven staan als de dikte niet vermindert met meer dan vijf procent van de initiële dikte of met meer dan 30mm. Dit geldt enkel als men het verplichte onderhoud, wat het herstel van schade of de achteruitgang van de muuroppervlakte en het verwijderen van een bron van vocht inhoudt, uitvoert op de stamperde.^{CLXXXII}

Zoals al eerder werd vermeld, kan krimp een nadelig effect hebben op een stamperde muur. Als er krimpseuren ontstaan die een dermate grote afmeting verkrijgen, meer dan 3mm breed volgens de Australische standaard, kunnen deze voor een structurele instabiliteit zorgen. Via enkele maatregelen kan dit worden vermindert. De meest evidente maatregel is het aanpassen van de aardemix zodat deze minder klei bevat of door de toevoeging van een stabilisator zoals stro. Ook kan het werken met kleinere afmetingen van de aangestampte onderdelen een oplossing bieden. Een andere oplossing kan het bijwerken van de scheuren zijn na de plaatsing van de muur. Hierbij moet worden opgelet dat structurele problemen niet worden weggestopt.^{CLXXXIII} Bijkomend is het ook voordelig om grote grindgranulaten niet te dicht bij het oppervlak te plaatsen, een goed gemengde uniforme aarde mix te gebruiken en enkele uitzettingsvoegen te implementeren in de vloer die beweging van de massa toelaten.^{CLXXXIV}

In het magazine 'Building and Environment' werd een studie gedaan naar de durability van stamperde. In dit onderzoek werd gekeken naar de levensduur van een stamperde muur. Hierin werd duidelijk dat de erosie van een dergelijke muur niet lineair was in functie van de tijd maar dat deze zich stabiliseerde na enige tijd. Dit fenomeen werd eerder al aangehaald door Martin Rauch. De muur erodeerde voornamelijk aan de oppervlakte dat niet meer beschermd werd door het overhangende dak. De oorzaak zou de compactheid van de aarde zijn. De massa aan het oppervlak van de bekisting is vaak minder compact dan de massa binnenin waardoor deze ook makkelijker erodeert. Zodra de eerste laag is geërodeerd, komt een meer compacte massa aan het oppervlak die veel moeilijker verweert waardoor de erosie stabiliseert. Om de levensduur te kunnen bepalen moest er wel gebruik gemaakt worden van een lineaire functie. Deze gaf aan dat een niet gestabiliseerde stamperde muur een levensduur van 62,5 jaar heeft vooraleer de maximale erosiegraad van 5% van de muurdikte wordt bereikt. Doordat er in realiteit een non-lineair verband is, kan een levensduur langer dan 62,5 jaar worden verwacht. Dit werd bevestigd door een proef, waarbij een stamperde muur gedurende 20 jaar aan de weersomstandigheden onderhevig was. De muur had na deze periode een erosiegraad van 1,6% wat geëxtrapoleerd kan worden naar een levensduur langer dan 60 jaar. Hieruit kunnen we concluderen dat een niet gestabiliseerde stamperde muur, in omgevingen waar niet meer dan 1000mm regen valt per jaar, zonder problemen gebruikt worden.^{CLXXXV} Als men dit vergelijkt met de gemiddelde levensduur van woningen in België die rond de 50-60 jaar ligt en een gemiddelde regenval van 950mm per jaar, is dit een positief vooruitzicht.

EINDNOTEN

- ^I WTCB, “Het bouwdetail: een ware eisenbundel”, 2015, p.4.
- ^{II} WTCB, “Bouwdetails.”
- ^{III} WTCB, “TV264: Referentiedetails voor spouwmuren.”, 2017.
- ^{IV} E+engineering Professionele Energieprestatieberekeningen, “EPB Bouwknopen.”.
- ^V Vlaanderen, “Basisregels voor een EPB aanvaarde bouwknop.”.
- ^{VI} Vlaanderen, “Basisregels voor een EPB aanvaarde bouwknop.”.
- ^{VII} Janssens Arnold, “Cursus Bouwfysische aspecten van de bouwheid: Les 7.”, 2019-2020, p19.
- ^{VIII} WTCB, “TV264: Referentiedetails voor spouwmuren.”
- ^{IX} WTCB, “TV264: Referentiedetails voor spouwmuren.”
- ^X WTCB, “Muurvoet-aansluiting op een vloer op de volle grond.”.
- ^{XI} Joostdevree, “Rw-waarde.”.
- ^{XII} WTCB, “Het bouwdetail: een ware eisenbundel”, 2015.
- ^{XIII} WTCB, “Het bouwdetail: een ware eisenbundel”.
- ^{XIV} Steenmans Marijke, “Cursus Duurzaam bouwen”, 2021.
- ^{XV} Bouwgezond, “Hoe werkt dampopen bouwen en isoleren.”.
- ^{XVI} Bastien Diane, Winther-Gaasvig Martin, “Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope.”, Energy Volume 164, 1 December 2018, p.288-297.
- ^{XVII} Joostdevree, “Dampopen bouwen.”.
- ^{XVIII} Bouwgezond, “Hoe werkt dampopen bouwen en isoleren.”.
- ^{XIX} Eco, “Damp-open isoleren.”.
- ^{XX} Bastien Diane, Winther-Gaasvig Martin, “Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope.” Energy Volume 164, 1 December 2018, p.288-297.
- ^{XXI} Bouwgezond, “Hoe werkt dampopen bouwen en isoleren.”.
- ^{XXII} Joostdevree, “Dampopen bouwen.”.
- ^{XXIII} Bastien Diane, Winther-Gaasvig Martin, “Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope.” Energy Volume 164.
- ^{XXIV} Bastien Diane, Winther-Gaasvig Martin, “Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope.” Energy Volume 164.
- ^{XXV} FASBA: Fachverband Stroballenbau Deutschland, “Straw Bale Building Guide: English language version, 2020.”, Aller 2020.
- ^{XXVI} Van Holm Sara, Van Grieken Leen en Versele Alexis (BAST architects and engineers), “Levenscyclus van strobale wanden.”, Wonen met de natuur nr.72, 2014.
- ^{XXVII} Nieuwsblad, “Binnenkijken in een huis van strobale wanden.”, 2013.
- ^{XXVIII} Van Holm S., Van Grieken L., Versele A. (BAST architects and engineers), “Levenscyclus van strobale wanden.” Wonen met de natuur nr.72, 2014.
- ^{XXIX} Village terre et vie, “Construire paille selon technique de greb.”.
- ^{XXX} Archief Architectengroep Barchi en Woonder.
- ^{XXXI} La Rosa Céline, “Contribution aux mesures mécaniques sur la construction paille. Selon a technique du G.R.E.B.”, Juni 2008.
- ^{XXXII} Pinterest, “Auto-construction d’une maison en paille (technique de greb).”.
- ^{XXXIII} RFCP Réseau français de la construction en paille, “Règles professionnelles de construction en paille – Remplissage isolant et support d’enduit -Règles CP2021 révisées-3^e édition.”, April 2018.
- ^{XXXIV} FASBA: Fachverband Stroballenbau Deutschland, “Straw Bale Building Guide: English language version, 2020.”, Aller 2020.
- ^{XXXV} RFCP Réseau français de la construction en paille, “Règles professionnelles de construction en paille – Remplissage isolant et support d’enduit -Règles CP2021 révisées-3^e édition.”, April 2018.
- ^{XXXVI} Lignian ing., “ETICS op houtskeletbouw: aansluiting op de muurvoet.”, WTCB, Maart 2018.
- ^{XXXVII} FASBA: Fachverband Stroballenbau Deutschland, “Straw Bale Building Guide: English language version, 2020.”, Aller 2020.
- ^{XXXVIII} Interreg Bâti C2, “Isolatiematerialen: stro.”.
- ^{XXXIX} Strobouw Nederland, “Bouwen met stro: Stro als ecologisch isolatiemateriaal.”, 2017.
- ^{XL} FASBA: Fachverband Stroballenbau Deutschland, “Straw Bale Building Guide: English language version, 2020.”, Aller 2020.
- ^{XLI} Langmans Jelle, Versele Alexis en Roels Staf, “On the hygrothermal performance of straw bale wall elements in Belgium.”, Vol3: Sustainability in Energy and Buildings (SEB-14-007), p.37-42.
- ^{XLII} Bastien Diane, Winther-Gaasvig Martin, “Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope.”, Energy Volume 164.
- ^{XLIII} Strobouw Nederland, “Stro kenmerken: Alle cijfers op een rij.”, 2019.
- ^{XLIV} Strobouw Nederland, “Stro kenmerken: Alle cijfers op een rij.”, 2019.
- ^{XLV} Strobouw Nederland, “Stro kenmerken: Alle cijfers op een rij.”, 2019.
- ^{XLVI} Lambda. “Lambda waarde van alle materialen.”.
- ^{XLVII} Interreg Bâti C2, “Isolatiematerialen: stro.”.
- ^{XLVIII} Strobouw Nederland, “Bouwen met stro: Stro als ecologisch isolatiemateriaal.”, 2017.
- ^{XLIX} Interreg Bâti C2, “Isolatiematerialen: stro.”.
- ^I Architectura, “Het gebruik van leempleister als binnenafwerking.”.

- ^{LI} MDPI met Cacone Stefano, Rapisarda Renata, Cascone Dario, "Physical Properties of Straw Bals as a Construction Material: A Review.", 19 Juni 2019.
- ^{LII} RFCP Réseau français de la construction en paille, "Remplissage isolant en bottes de paille (issue de l'agriculture conventionnelle).", Juni 2015.
- ^{LIII} Ecobouwadvies, "Strobalenbouw-Brandveiligheid."
- ^{LIV} Interreg Bâti C², "Isolatiematerialen: stro."
- ^{LV} Strobouw Nederland, "Bouwen met stro: Stro als ecologisch isolatiemateriaal.", 2017.
- ^{LVI} RFCP Réseau français de la construction en paille, "Caractéristiques Techniques."
- ^{LVII} Strobouw Nederland, "Stro kenmerken: Alle cijfers op een rij.", 2019.
- ^{LVIII} Strobouw Nederland, "Stro kenmerken: Alle cijfers op een rij.", 2019.
- ^{LIX} Theis Bob, "Straw Bale Fire Safety: A review of testing and experience to date.", 30 Juli 2003.
- ^{LX} Dzidic Sanin, "Fire resistance of the Straw Bale Walls.", Bosnië-Herzegovina: Bihac (University of Bihac), 2017.
- ^{LXI} Interreg Bâti C², "Isolatiematerialen: stro."
- ^{LXII} Theis Bob, "Straw Bale Fire Safety: A review of testing and experience to date.", 30 Juli 2003.
- ^{LXIII} Theis Bob, "Straw Bale Fire Safety: A review of testing and experience to date.", 30 Juli 2003.
- ^{LXIV} Federale overheidsdienst Binnenlandse Zaken Algemene Directie Veiligheid en Preventie- Directie Brandpreventie, "Koninklijk besluit van 7 Julie 1994 Tot vaststelling van de basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing waaraan de gebouwen moeten voldoen.", Juli 1994.
- ^{LXV} Laboratoire d'essai au feu, "Rapport d'essai.", Luik, mei 2018.
- ^{LXVI} Laboratoire d'essai au feu, "Rapport d'essai.", Luik, mei 2018.
- ^{LXVII} Gruppe Angepaßte Technologie, "Prüfbericht über das Brandverhalten einer Strohballenwand (mit Innen- und Außenputz).", Oostenrijk: Wenen (Technische Universität Wien), 2000.
- ^{LXVIII} Instituut voor brandveiligheid vzw, "Verlenging van technisch advies 2012-A-075 op basis van een analyse van beproevingsresultaten.", België: Gent, 2012.
- ^{LXIX} Merci Bart, "Cursus Brandbeveiliging van gebouwen 2021-2022.", België: Gent (UGent), Academiejaar 2021-2022.
- ^{LXX} WTCB, "Brandbeveiliging van houtbouw.", Januari 2013.
- ^{LXXI} Federale overheidsdienst Binnenlandse Zaken Algemene Directie Veiligheid en Preventie- Directie Brandpreventie, "Koninklijk besluit van 7 Julie 1994 Tot vaststelling van de basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing waaraan de gebouwen moeten voldoen.", Juli 1994.
- ^{LXXII} Strobouw Nederland, "Moderne strobouw."
- ^{LXXIII} FASBA: Fachverband Strohballenbau Deutschland, "Straw Bale Building Guide: English language version, 2020.", Aller 2020.
- ^{LXXIV} Ecobouwen, "Voor- en nadelen van leemstuc."
- ^{LXXV} Ecobouwers, "Leempleister als bio-ecologisch bouw materiaal."
- ^{LXXVI} Dirkx I, "Het gebruik van leemstuc als binnenafwerking.", WTCB-DOSSIERS 2021/4.5.
- ^{LXXVII} Ecobouwen, "Voor- en nadelen van leemstuc."
- ^{LXXVIII} Dirkx I, "Het gebruik van leemstuc als binnenafwerking.", WTCB-DOSSIERS 2021/4.5.
- ^{LXXIX} Ecobouwers, "Leempleister als bio-ecologisch bouw materiaal."
- ^{LXXX} Dirkx I, "Het gebruik van leemstuc als binnenafwerking.", WTCB-DOSSIERS 2021/4.5.
- ^{LXXXI} Ecobouwers, "Leempleister als bio-ecologisch bouw materiaal."
- ^{LXXXII} Ecobouwen, "Kalkstuc voor een gezond woonklimaat."
- ^{LXXXIII} GezondVerstandig, "Kalkpleister en kalkverf: de belangrijkste eigenschappen."
- ^{LXXXIV} Van Holm S., Van Grieken L., Versele A. (BAST architects and engineers), "Levenscyclus van strobalenwanden.", Wonen met de natuur nr.72, 2014.
- ^{LXXXV} Van Holm S., Van Grieken L., Versele A. (BAST architects and engineers), "Levenscyclus van strobalenwanden." 2014.
- ^{LXXXVI} Van Holm S., Van Grieken L., Versele A. (BAST architects and engineers), "Levenscyclus van strobalenwanden." 2014.
- ^{LXXXVII} Van Holm S., Van Grieken L., Versele A. (BAST architects and engineers), "Levenscyclus van strobalenwanden." 2014.
- ^{LXXXVIII} WTCB, "Milieu-impact van houtskeletbouw.", Januari 2013.
- ^{LXXXIX} WTCB, "Milieu-impact van houtskeletbouw.", Januari 2013.
- ^{XC} TOTEM-Building.
- ^{XCI} Nibe, "Strobalen (standaard) met wapeningsnet; inclusief leemstuc afwerking."
- ^{XCII} Milieu centraal: Keurmerkenwijzer, "FSC 100% (Hout)."
- ^{XCIII} FSC Forest Stewardship Council Nederland, meerdere tabbladen.
- ^{XCIV} Vibe door ir. Peter Geldof, "Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.", maart 2007.
- ^{XCv} PEFC, meerdere tabbladen.
- ^{XCvi} Geldof Peter ir., "Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.", Vibe, Februari 2007.
- ^{XCvii} Interreg Bâti C², "Isolatiematerialen: stro."
- ^{XCviii} MDPI met Cascone Stefano, Rapisarda Renata, Cascone Dario, "Physical Properties of Straw Bals as a Construction Material: A Review.", 19 Juni 2019.
- ^{XCix} Strobouw Nederland, "Bouwen met stro: Stro als ecologisch isolatiemateriaal.", 2017.
- ^c RFCP Réseau français de la construction en paille, "Règles professionnelle de construction en paille – Remplissage isolant et support d'enduit -Règles CP2021 révisées-3^e édition.", April 2018.
- ^{ci} Nibe, "Strobalen (standaard) met wapeningsnet; inclusief leemstuc afwerking."

- ^{cii} RFCP Réseau français de la construction en paille, “Remplissage isolant en bottes de paille (issue de l’agriculture conventionnelle).”, Juni 2015.
- ^{ciii} RFCP Réseau français de la construction en paille, “Règles professionnelle de construction en paille – Remplissage isolant et support d’enduit -Règles CP2021 révisées-3^e édition.”, April 2018.
- ^{civ} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cv} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cvi} Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, “Duurzaamheid van hout.”, 2 Februari 2015.
- ^{cvi} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cvi} Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, “Duurzaamheid van hout.”, 2 Februari 2015.
- ^{cix} Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, “Duurzaamheid van hout.”, 2 Februari 2015.
- ^{cx} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cx} Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, “Duurzaamheid van hout.”, 2 Februari 2015.
- ^{cxi} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cxi} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cxi} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cxi} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, Februari 2007.
- ^{cxv} Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, “Duurzaamheid van hout.”, 2 Februari 2015.
- ^{cxvi} Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, “Duurzaamheid van hout.”, 2 Februari 2015.
- ^{cxvii} Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, “Duurzaamheid van hout.”, 2 Februari 2015.
- ^{cxviii} Houtinfobois, “Houtverduurzaming.”.
- ^{cxix} Van Leemput Marc voor wood.be, “Codes voor houtbehandeling.”.
- ^{cxix} Van Leemput Marc, “Codes voor houtbehandeling.”.
- ^{cxix} Houtinfobois, “Houtverduurzaming.”.
- ^{cxix} Houtshop, “Houtwijzer: ThermoWood / thermo hout.”, juni 2017.
- ^{cxix} Geldof Peter ir., “Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.”, Vibe, februari 2007.
- ^{cxix} Ecobouwers, “Leempleister als bio-ecologisch bouw materiaal.”.
- ^{cxix} Gauzin-Müller D. en Vissac A., “Terrafibra”, (TERRAFIBRA award), 2022.
- ^{cxix} Maniatidis V. and Walker P., “A review of rammed earth construction.”, Verenigd Koninkrijk: Bath (University of Bath), mei 2003.
- ^{cxix} Dachverband Lehm e.V., “Lehmbau info: verbraucherinformation.”, Maart 2014.
- ^{cxix} New Zealand standards, “Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998”, 1998.
- ^{cxix} New Zealand standards, “Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998”, 1998.; Dachverband Lehm e.V., “Lehmbau info: verbraucherinformation.”, Maart 2014.; Middleton G.F., “Bulletin 5: Earth-wall construction.”, (CSIRO Division of building, construction and engineering), 1987.
- ^{cxix} Southern African development community cooperation in standardization’s, “Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014.”, 2014.
- ^{cxix} Graham Mchenry P., “Adobe and rammed earth buildings: design and construction.”, Verenigde staten: Tucson (University of Arizona press), 1989.
- ^{cxix} Kapfinger O. and Sauer M., “Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.”, Detail, 2016
- ^{cxix} Maniatidis V. and Walker P., “A review of rammed earth construction.”, Verenigd Koninkrijk: Bath (University of Bath), mei 2003.
- ^{cxix} New Zealand standards, “Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998”, 1998.
- ^{cxix} Kapfinger O. and Sauer M., “Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.”, Detail, 2016
- ^{cxix} Gauzin-Müller D. en Vissac A., “Terrafibra”, (TERRAFIBRA award), 2022.
- ^{cxix} Kapfinger O. and Sauer M., “Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.”, Detail, 2016
- ^{cxix} Bui Q.B., Morel J.C., Venkatarama Reddy B.V. and Ghayad W., “Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering.”, Building environment 44, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2009, p.912-919.
- ^{cxix} Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., “Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks.”, Journal of cleaner production 241, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2019.
- ^{cxix} New Zealand standards, “Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998”, 1998.
- ^{cxix} Southern African development community cooperation in standardization’s, “Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014.”, 2014.
- ^{cxix} Dachverband Lehm e.V., “Lehmbau info: verbraucherinformation.”, Maart 2014.
- ^{cxix} Southern African development community cooperation in standardization’s, “Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014”, 2014.
- ^{cxix} New Zealand standards, “Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998”, 1998.
- ^{cxix} Middleton G.F., “Bulletin 5: Earth-wall construction.”, (CSIRO Division of building, construction and engineering), 1987.
- ^{cxix} New Zealand standards, “Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998”, 1998.
- ^{cxix} Kapfinger O. and Sauer M., “Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.”, Detail, 2016
- ^{cxix} Dachverband Lehm e.V., “Lehmbau info: verbraucherinformation.”, Maart 2014.

-
- CLXIX New Zealand standards., "Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998", 1998.
- CL Middleton G.F., "Bulletin 5: Earth-wall construction.", (CSIRO Division of building, construction and engineering), 1987.
- CLI Evrard C., "Seminarie duurzaam bouwen: Ongebakken aarde en de hedendaagse gebouwen in Brussel.", Februari 2021.
- CLII Maniatidis V. and Walker P., "A review of rammed earth construction.", Verenigd Koninkrijk: Bath (University of Bath), mei 2003.
- CLIII Southern African development community cooperation in standardization's, "Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014.", 2014.
- CLIV Middleton G.F., "Bulletin 5: Earth-wall construction.", (CSIRO Division of building, construction and engineering), 1987.
- CLV Kapfinger O. and Sauer M., "Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.", Detail, 2016
- CLVI Kapfinger O. and Sauer M., "Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.", Detail, 2016
- CLVII Kapfinger O. and Sauer M., "Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.", Detail, 2016
- CLVIII Evrard C., "Seminarie duurzaam bouwen: Ongebakken aarde en de hedendaagse gebouwen in Brussel.", Februari 2021.
- CLIX Southern African development community cooperation in standardization's, "Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014.", 2014.
- CLX New Zealand standards, "Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998", 1998.
- CLXI New Zealand standards, "Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998", 1998.
- CLXII New Zealand standards, "Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998", 1998.
- CLXIII Dickson T. and Pavia S., "Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials.", Renewable and sustainable energy reviews 140, Nederland: Amsterdam (Elsevier), April 2021.
- CLXIV Dickson T. and Pavia S., "Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials.", Renewable and sustainable energy reviews 140, Nederland: Amsterdam (Elsevier), April 2021.
- CLXV Hopfe C.J. and Hall M.R., "Fabric insulation, thermal bridging and acoustics in modern earth buildings.", Verenigd Koninkrijk: Sawston (Woodhead Publishing Limited), 2012, p.41-71.
- CLXVI Fernandes J., Mateus R., Gervásio H., Silva S. and Bragança L., "Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance.", Renewable energy 142, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2019, p.345-363.
- CLXVII Isover, "Geluidsisolatie.", 3 Oktober 2019.
- CLXVIII H.G.I.-geluidsadvies, "Hoe werkt geluidsisolatie en hoe niet..".
- CLXIX Gauzin-Müller D. en Vissac A., "Terrafibra", (TERRAFIBRA award), 2022.
- CLXX Middleton G.F., "Bulletin 5: Earth-wall construction.", (CSIRO Division of building, construction and engineering), 1987.
- CLXXI Ávila F., Puertas E., Gallego R., "Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review.", Construction and building materials 270, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2021.
- CLXXII Middleton G.F., "Bulletin 5: Earth-wall construction.", (CSIRO Division of building, construction and engineering), 1987.
- CLXXIII Evrard C., "Seminarie duurzaam bouwen: Ongebakken aarde en de hedendaagse gebouwen in Brussel.", Februari 2021.
- CLXXIV Ávila F., Puertas E., Gallego R., "Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review.", Construction and building materials 270, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2021.
- CLXXV Ávila F., Puertas E., Gallego R., "Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review.", Construction and building materials 270, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2021.
- CLXXVI TOTEM-Building.
- CLXXVII Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., "Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks.", Journal of cleaner production 241, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2019.
- CLXXVIII Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., "Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks.", Journal of cleaner production 241, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2019.
- CLXXIX Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., "Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks.", Journal of cleaner production 241, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2019.
- CLXXX Ben-Alon L., Loftness V., Harries K.A., Cochran Hameen E., "Life cycle assessment(LCA) of natural vs conventional building assemblies.", Renewable and sustainable energy reviews 144, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2021.
- CLXXXI Ben-Alon L., Loftness V., Harries K.A., Cochran Hameen E., "Life cycle assessment(LCA) of natural vs conventional building assemblies.", Renewable and sustainable energy reviews 144, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2021.
- CLXXXII New Zealand standards, "Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998", 1998.
- CLXXXIII New Zealand standards, "Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998", 1998.
- CLXXXIV Maniatidis V. and Walker P., "A review of rammed earth construction.", Verenigd koninkrijk: Bath (University of Bath), mei 2003.
- CLXXXV Bui Q.B., Morel J.C., Venkatarama Reddy B.V. and Ghayad W., "Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering.", Building environment 44, Nederland: Amsterdam (Elsevier), 2009, p.912-919.

INTRO

In het volgende onderdeel wordt er aan de hand van voorgaand theoretisch onderzoek over de verschillende bouwmethoden enkele reële ontwerpen voor de muurvoet uitgewerkt. Deze voldoen aan de eisen en normen die werden benoemd om zo een degelijk ontwerp te kunnen realiseren. Omdat er gewerkt wordt met bio-ecologische materialen, wat ook bio-based materialen inhoudt, wordt er uitgegaan van een dampopen bouwmethode. Dit is mede omwille van het streven naar zo min mogelijk membranen in de muurvoet. Voor zowel de bouwmethode met stampaarde als die met strobalen worden enkele details uitgetekend voor de muurvoet. Hiervan worden er per bouwmethode twee hoofddetails besproken als referentie. Er zijn echter nog verschillende variaties van deze bouwdetails mogelijk, deze worden kort aangehaald en getoond in bijlagen 9, hierin worden ook enkele fragmenten van de bouwdetails getoond. Deze bouwdetails steunen op verschillende aannames en informatie die nog verder wetenschappelijk onderzoek nodig heeft. Daarom vragen we de lezer deze bouwdetails als een aanzet te zien in plaats van de juiste oplossing.

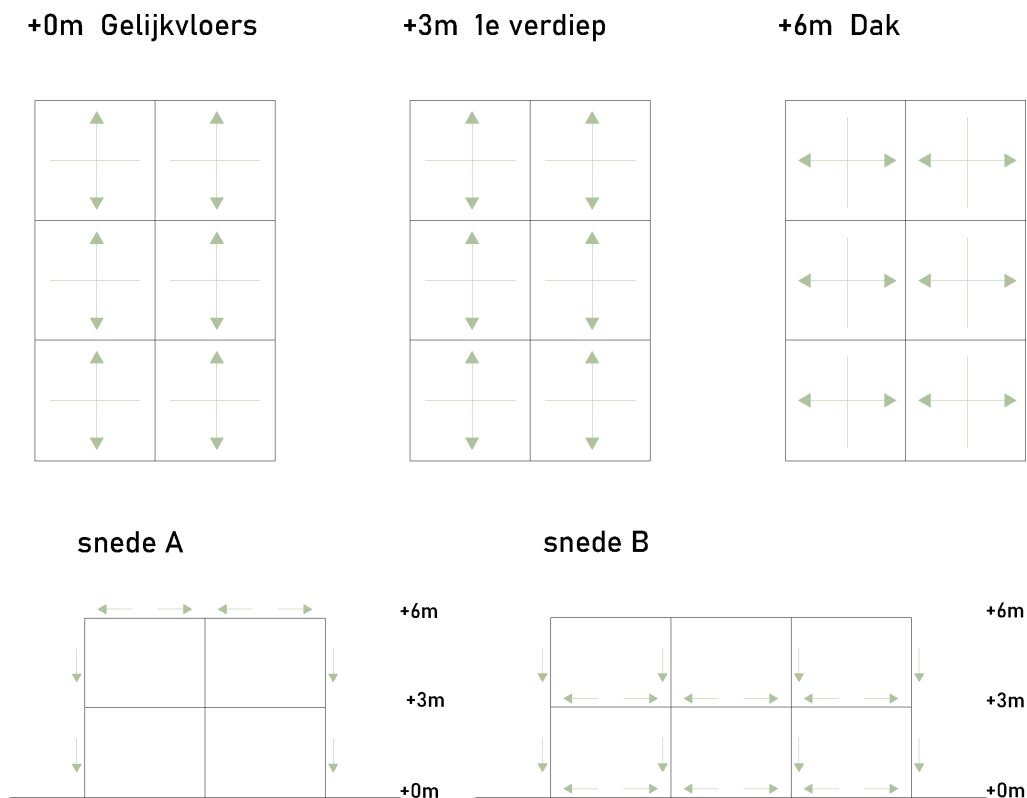
5. BOUWDETAILS

5.1. Algemene aannames bouwdetail

Om het onderzoek en het ontwerp van het bouwdetail reëler te maken, werd een algemeen kader uitgewerkt als vertrekpunt. Er werd gekozen om de detaillering van een ééngezinswoning uit te werken omdat ook op deze schaal nog geen uitgebreid onderzoek is gebeurd naar een muurvoet met bio-ecologische materialen.

Als locatie kozen we Brusselse Rand omwille van de centrale ligging in België. Op deze manier kunnen we de transportafstanden, die het product moet afleggen van de fabriek tot de bouwplaats, minimaliseren. Daarnaast willen we ook lokaal werken, wat betekent dat materialen lokaal geteeld of aanwezig moeten zijn maar ook dat de productie lokaal gebeurt.

Zoals vermeld, wordt er gewerkt met een ééngezinswoning. Deze is opgebouwd uit een grid van vier op vier meter en is in totaal acht op twaalf meter. Het dak wordt afgedragen op de langse buitenmuren terwijl de vloerplaten worden afgedragen op de kopse muren. Hierdoor draagt de langse binnenmuur enkel zijn eigengewicht. Door deze verdeling worden de lasten verdeeld over de verschillende muren en moeten alle krachten niet door één muur gedragen worden. In onderstaande figuur 47 wordt dit verduidelijkt.



Figuur 47: Lastendaling plannen en snedes.

We houden rekening met de verbinding van de verschillende materialen. We willen zoveel mogelijk verbindingen omkeerbaar maken zodat de producten op het einde van hun levenscyclus makkelijk vervangen kunnen worden. Op deze manier is recyclage en hergebruik makkelijker toe te passen.

Zoals reeds aangehaald focussen we op bio-ecologische materialen. Hierdoor vallen synthetische materialen op basis van fossiele grondstoffen of zeldzame mineralen en restproducten, die schadelijk zijn voor de menselijke gezondheid, buiten onze scope. Dit werd al onderzocht in het *Hoofdstuk 3. Vooronderzoek*.

Daarnaast werden de lambda-waardes ook uniform gehouden doorheen de hele thesis. In tabel 33 worden deze opgesomd. In TRISCO2D werd uitgegaan van een buitentemperatuur van 0°C en een binnentemperatuur van 20°C.

λ-waarde materialen	
Materiaal	λ [W/(m²K)]
Schelpen	0,155
Kalkhennep/kalkpleister/kalkchape	0,07
Grond	2
Cellenglas	0,036
Zand	1,9
OSB	0,13
Houtvezelplaat	0,038
Riet	0,09
Stro	0,048
Hout	0,15
Leempleister	1,7

Tabel 33: Lambda-waarde materialen

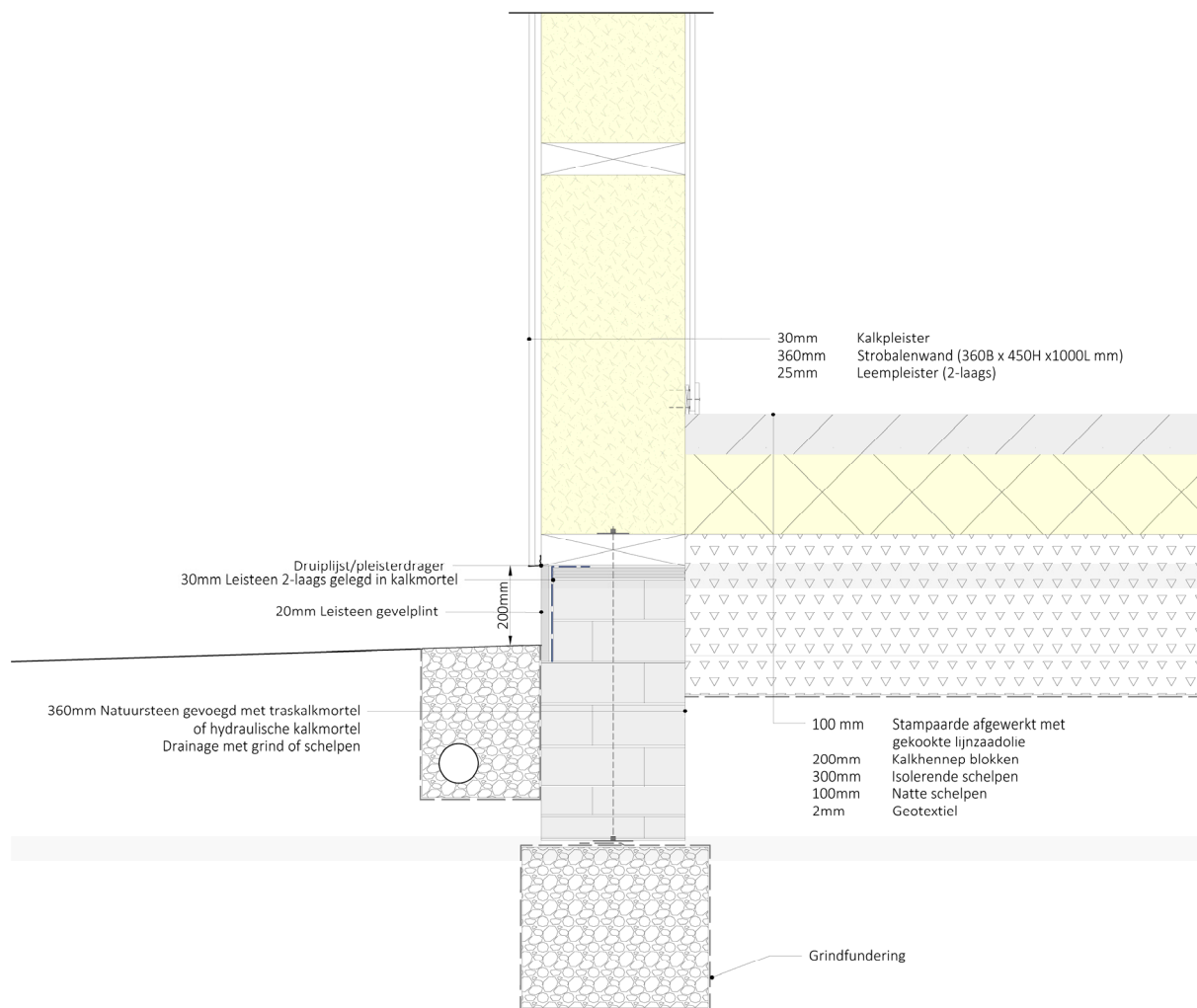
Figuur 48 toont de opbouw van dit bouwdetail. De muuropbouw is een typisch strobale wand. Hierin worden strobale gecombineerd met een houtskelet voor de stabiliteit en wordt het aan de binnenkant afgewerkt met leempleister van 25mm en aan de buitenkant met een kalkpleister van 30mm. Om de muurdikte te beperken wordt het stro op zijn kant gedraaid waardoor de strobale 360mm in plaats van 450mm dik zijn. De stijlen van het houtskelet worden om de vier meter geplaatst.

De vloeropbouw bestaat van onder naar boven uit geotextiel, scherp zand, geotextiel, schelpen, een houten roostering met riet isolatie ertussen met daarop twee OSB-platen, een houtvezelplaat en een vloerafwerking. Ter vervanging van de teelaarde, een propere werkvloer te creëren en het gewicht van de schelpen beter te laten afdragen wordt er een laag van 200mm scherp zand geplaatst. Het geotextiel zorgt ervoor dat het zand niet verdrongen wordt in de grond. Hierop komt een laag van 400mm schelpen, deze zorgen ervoor dat de constructie droog blijft en vullen daarnaast ook de ruimte op onder de vloer zodat er geen koude luchtstromen onder de constructie doordringen en weren ongedierte. De eerste 100mm schelpen wordt beschouwd als natte schelpen. De overige 300mm heeft een licht isolerende functie. De schelpenlaag krijgt deze dikte om de houten verdeelbalk 200mm boven het grondniveau te kunnen plaatsen en deze te beschermen tegen vocht. Het geotextiel zorgt ervoor dat de schelpen niet worden weggedrongen en zich mengen met de zandlaag. De houten roostering draagt de lasten van de vloer over op de fundering. De riet isolatie geeft de vloer de benodigde U-waarde. Beide OSB-platen zorgen ervoor dat de vloer luchtdicht is afgewerkt, daarnaast dragen ze ook de vloerafwerking. De houtvezelplaat zorgt voor een extra akoestische isolatie. De vloerafwerking gebeurt met een houten plankenvloer.

De fundering gebeurt met een schroefpaal waarop de houten verdeelbalk afdraagt. Om condens tussen het staal en het hout te vermijden wordt er tussen deze elementen een rubber geplaatst. Om de ruimte onder de houten vloerroostering af te dichten van de buitenomgeving wordt een natuurstenen muurtje geplaatst. Door gebruik te maken van leisteen of kalksteen is deze waterdicht anders moet er achter deze muur nog een waterdichte folie geplaatst worden. Dit muurtje kan verbreed worden zodat het in plaats van de schroefpaal mee fungeert als de fundering samen met de grindfundering, zoals uitgewerkt in de variaties op dit detail. Naast de funderingsaanzet wordt er een drainerende grindlaag geplaatst hierdoor zal de muurvoet droger staan en zal het plantengroei, die het pleisterwerk kan beschadigen, vlak naast het gebouw beletten.

Het is duidelijk dat dit bouwdetail met schroefpalen niet de elegantste of eenvoudigste oplossing is en dat de variaties hierop veel interessanter lijken. Ook uit *Hoofdstuk 6: Vergelijking bouwdetails* zal nogmaals blijken dat de schroefpalen niet de beste optie is. We tonen dit detail toch om de mogelijkheid te demonstreren.

5.2.1.2. Strobalen Bouwdetail 2: Grindfundering



Figuur 49: Muurvoet strobalen 2: Grindfundering (zie ook in bijlage 9.4)

Figuur 49 toont de opbouw van bouwdetail 2 bij strobalenbouw. Hier wordt gebruik gemaakt van dezelfde muuropbouw als in *Bouwdetail 1: Schroefpalenfundering*

De vloeropbouw bestaat uit een geotextiel, een laag schelpen, hennep isolatie met daarop stampaarde. De schelpen worden in de grond geplaatst en dienen ook hier voor de waterdichting van de vloer daarnaast hebben ze een licht isolerend effect en dragen ze de krachten van de vloer rechtstreeks af op de grond. Ook hier zorgt de eerste 100mm van de schelpenlaag om de vloer droog te houden de overige 300mm geeft wel een licht isolerend effect. Om ervoor te zorgen dat de schelpen door deze lasten niet worden weggedrongen in de grond maakt men gebruik van een geotextiel. De hennep isolatie zorgt ervoor dat de vloer voldoet aan de isolatie eisen. Op de hennep isolatie komt een stampaarde vloer als afwerking.

De fundering wordt voorzien in de vorm van een Rubble trench of grindsleuf. Hierop komt een natuurstenen muurtje gevoegd met traskalkmortel of hydraulische kalkmortel dat boven het maaiveld uitreikt. Een houten verdeelbalk op dit muurtje zorgt ervoor dat de muur hier vlot op kan geplaatst

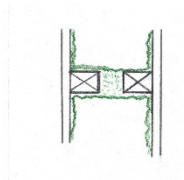
worden. Ook hier wordt een drainerende grindlaag geplaatst om dezelfde reden als bij bouwdetail 1 beschreven.

5.2.2. Opbouw van de muur

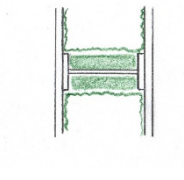
Een strobalenmuur kan worden opgebouwd met verschillende technieken zoals besproken in 4.3.1. *Stabiliteit*.

Voor de opbouw van de muur werden drie technieken beschreven namelijk: een houtskelet structuur, een Post and Beam strobalenwand en een GREB-wand. We kiezen om te werken met de Post and Beam structuur. De GREB-wand werd afgeschreven omdat men gebruik maakt van cement. Dit zorgt niet enkel voor een grote CO₂ uitstoot en het zorgt ook voor een onomkeerbare verbinding. Bijkomend kan het stro na de behandeling niet gecomposteerd of hergebruikt worden. De houtskelet structuur en Post and Beam strobalenwand zijn vrij gelijkaardig opgebouwd maar het percentage hout nodig in de Post and Beam strobalenwand is iets groter dan in de houtskeletstructuur. Uit een gesprek met Hilde Vanwildemeersch van Woonder blijkt dat de Post and Beam vaker wordt gebruikt. Daarom wordt er hier ook voor gekozen.

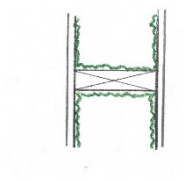
Binnenin deze structuur dachten we na over verschillende mogelijkheden, dit wordt visueel weergegeven in figuur 50:



1. Met over-gedimensioneerde balken (80*360mm) op deze manier overspannen ze de hele strobaal. Dit zal zorgen voor een makkelijke opbouw. Maar is de overdimensionering van het hout wel ecologisch verantwoord is? Daarnaast is er ter plekken van de houten stijlen geen isolatiemateriaal tussen de binnen en buitenomgeving.



2. Met twee kleine houten balkjes (90*120mm) aan de zijkanten van de strobalenwand. De ruimte die ontstaat tussen de houten balkjes en strobalen, kan opgevuld worden met los stro dat reeds aanwezig is op de werf door het verwerken van de strobalen. Deze techniek zal duidelijk een betere lambda-waarde hebben maar vraagt wel meer arbeidsuren en zal dus duurder uitvallen.



3. Er wordt gebruik gemaakt van houten I-profielen waarbij men tussen de flenzen houtvezelplaten plaatst.

Figuur 50: Structuur opties in strobalenwand

5.2.3. Fundering

Voor de fundering werden twee verschillende concepten uitgewerkt. Een schroefpalenfundering en een fundering met grind en natuursteen. Beide types laten andere mogelijkheden toe in het bouwdetail.

Schroefpalenfundering

Een eerste optie is te werken met een stalen schroefpaal. Een strobalenbouw of houtskeletbouw draagt zijn lasten over in bepaalde punten, meer specifiek waar de houten stijlen zijn geplaatst. Om hierop in te spelen werd een optie uitgewerkt met een puntfundering. Staal is geen bio-ecologisch materiaal maar hetzelfde type fundering met houten palen is geen optie omdat het hout door het contact met de grond snel zal degraderen en daardoor de stabiliteit van de constructie niet kan garanderen. Staal produceert

480kg CO₂ per ton wat in vergelijking met beton op basis van portlandcement, dat 860kg CO₂ per ton produceert, beter scoort. Daarnaast kunnen de schroefpalen worden hergebruikt na afbraak van de woning.

De paalfundering ondersteunt een houten verdeelbalk die alle lasten van de muur en vloer opneemt en doorgeeft aan de fundering. Hierop komt een houten roostering die de vloer zal dragen en waartussen de isolatie wordt geplaatst.

“Rubble trench”

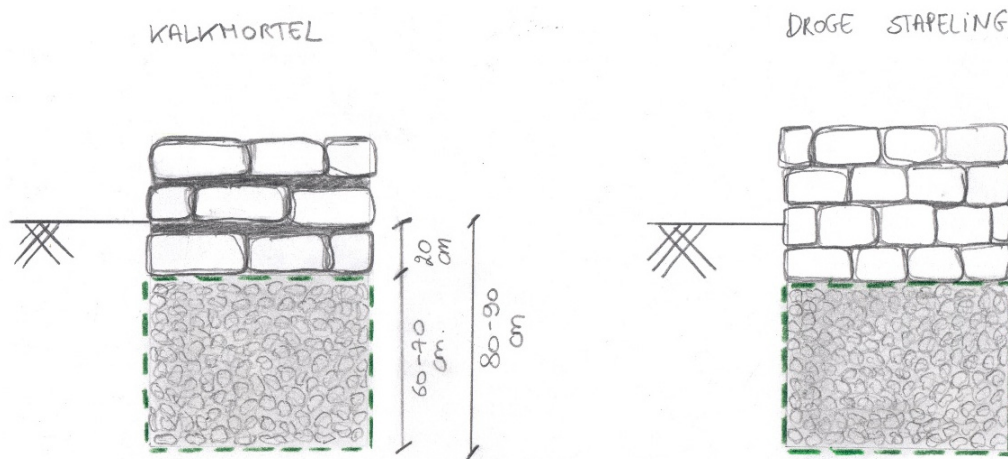
Als tweede mogelijkheid wordt het alternatieve funderingsontwerp van Rubble trench of steenslag geul bekeken. Hier wordt er gebruik gemaakt van een steenslag of grind lijnfundering, waarop een sokkel wordt gemetseld uit natuursteen. Deze uitvoeringsmethode werd al uitgevoerd door architect Frank Lloyd Wright en wekt vandaag de dag opnieuw interesse. Door gebruik te maken van grind garandeer je niet alleen een stevige ondergrond maar zorg je ook voor een goede drainage van het grondwater. Dit is zowel voor een strobale constructie en een stampaarde constructie zeer belangrijk. Hiervoor moet de geul van grind in een helling gelegd worden met een hoogteverschil van drie cm per meter waardoor het water wordt afgevoerd tot buiten het gebouw.¹

De constructie bestaat uit verschillende elementen. Er wordt eerst een geul gegraven tot aan de vorstvrije diepte, deze is in België ongeveer 80-90cm diep. De breedte van de fundering moet minimaal 300mm zijn. In de geul wordt een grindmassa geplaatst en aangedrukt tot ongeveer 15-20cm onder het maaiveld. Rondom de grindmassa wordt er een geotextiel voorzien. Deze heeft twee functies, enerzijds zorgt het ervoor dat er geen grondpartikels terechtkomen in de grindmassa en daardoor de drainage zouden kunnen verstopen maar ook dat het grind niet zomaar weggeduwd wordt in de grondlaag. Door het gewicht van het gebouw zou de grindlaag kunnen verschuiven en vermengd geraken met de omliggende grondlagen. Een geotextiel kan dit beperken en ervoor zorgen dat de grindmassa afgelijnd blijft. Door de grote massa van de constructie blijft het geotextiel op zijn plaats en zal het niet kunnen openplooien aan de bovenzijde.

Ongeveer 20cm onder het maaiveld start het natuurstenen metselwerk. Dit neemt dezelfde of een smallere breedte aan als de grindlaag. Voor deze fase zijn er twee opties. De eerste optie is het droog stapelen van natuursteen, dit is enkel mogelijk met de hulp van een vakkundige werkmans/werkvrouw. Als het om kleine stenen gaat moeten de stenen zo worden gestapeld dat ze elkaar allemaal raken. Of men kan grote stenen gebruiken die de volledige breedte dekken. De tweede methode houdt in dat er wordt gemetseld met een kalkmortel.² Zo wordt er extra stabiliteit verkregen. Beide methodes zijn goede opties maar in het perspectief van bio-ecologisch bouwen gaat de voorkeur naar de droge stapeling. Omdat we niet zeker zijn van de stabiliteit van deze optie kiezen we toch om de natuursteen te verbinden met kalkmortel. Kalkmortel produceert minder CO₂ en de verbinding is ook minder destructief dan cementmortel. Deze constructiemethode wordt getoond in figuur 51.

De laag natuursteen moet boven het maaiveld uitkomen om de functie van sokkel te kunnen uitvoeren. Zo vermijdt het de opzuiging van water door de muur, het spatten van water tegen de muuroppervlakte en de aantasting door kleine dieren of insecten. Als extra bescherming wordt er een horizontale barrière gevormd tussen de sokkel en de stobalen of stampaarde muur. Op deze manier wordt de verplaatsing van vocht naar de muur volledig stopgezet en komt het inwendig vocht van de muur ook niet terecht in de fundering. Voor deze barrière moet een folie gebruikt worden die bestand is tegen het aanstampen van de aarde. Indien men geen folie wil gebruiken, kan men ook een dunne slab (10-20mm) natuursteen zoals leisteen gebruiken. Bij deze laatste toepassing is het aangeraden om stenen slabs te gebruiken die over de gehele breedte van de muur reiken en ze dan overlappend te plaatsen zodat een dichte schil

gecreëerd wordt. Om deze dichte schil te creëren is het mogelijk dat de stenen in twee lagen gelegd moet worden. Dit zorgt dan weer voor een grotere dikte.



Figuur 51: Opbouw standaard Rubble trench

In de praktijk passen we deze techniek lichtjes aan. We laten we deze constructie werken zoals een betonnen funderingszool. Hierbij verkrijgt de grindmassa een grotere breedte dan de natuurstenen sokkel zodat deze kan fungeren als funderingszool en de breedte van de uitgegraven sleuf vult. De grindmassa wordt idealiter in de vorm van een trapezium gevormd zodat de verspreiding van de lasten verbeterd kan worden. Daarnaast wordt de grindmassa niet doorgetrokken tot 20cm onder het maaiveld maar verkrijgt het de minimale hoogte van een funderingssokkel na berekening. Hierdoor wordt de natuurstenensokkel verhoogt en fungeert deze als funderingswand. Aangezien de natuurstenen blokken worden gemetseld, wordt een grotere stevigheid verzekerd dan wanneer men gebruik maakt van een sokkel vervaardigd uit grind. Het ondergronds metselwerk wordt gevoegd met traskalkmortel of hydraulische kalkmortel. Deze is bestand tegen het vochtige milieu ondergronds. Wel moet er een vochtig klimaat gegarandeerd worden voor een voldoende lange tijd zodat de mortel kan uitharden. Dit is vooral belangrijk wanneer het gaat om een traskalkmortel aangezien de kalk anders zou kunnen carbonateren waardoor het niet meer bindt met de tras. Bovengronds kan een gewone kalkmortel op basis van luchtkalk gebruikt worden.^{III}

5.2.4. Isolatie

Isolatie muur

Voor de keuze van de isolatiematerialen en wandopbouw werd gebruik gemaakt van Trisco 2D om de U-waarde te berekenen. Er werden verschillende muuropbouwen gemodeleerd in Trisco 2D om deze daarna met elkaar te vergelijken en de beste optie te selecteren. De resultaten zijn te vinden in onderstaande tabel 34.

Voor de muuropbouw werden 3 verschillende manieren voor de structuur uitgerekend, deze werden getoond in figuur 50.

U-waarden muur		
	U-waarde [W/(m²K)]	Lambda waarde [W/(mK)]
Optie 1	0,122	0,051
Optie 2	0,119	0,050
Optie 3	0,117	0,049

Tabel 34: U-waarden verschillende opties voor muuropbouw

De drie wanden voldoen aan de eis van $U \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. De U-waarde van optie drie is het laagste, zoals te verwachten was. De keuze van het type muur zal mee afhangen van de keuze van de bouwheer en aannemer. Het is duidelijk dat optie twee en drie arbeidsintensievere opbouwen zijn. De stabiliteitsberekeningen sluiten geen van de keuzes uit zoals beschreven is in 5.2.6.1. *Stabiliteit muur*. We kiezen uiteindelijk voor optie 1 met de balken die de hele muur overspannen omdat dit de makkelijkste manier van bouwen is.

Isolatie vloer - houten roostering

Voor de vloeropbouw van bouwdetail 1 werden verschillende isolatiematerialen, onder andere hennep, vlas, riet en houtvezelplaten met elkaar vergeleken. Stro werd niet bekeken omdat strobalen te groot zijn om tussen de houten roostering van de vloer te worden geplaatst. De berekeningen werden uitgevoerd met TRISCO 2D en de U-waarden worden getoond in tabel 35. We zien dat elke vloeropbouw voldoet aan de eis van $U \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

U-waarden vloer		
	U-waarde [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	Lambda waarde [$\text{W}/(\text{mK})$]
Hennep	0,059	0,073
Vlas	0,058	0,071
Riet	0,079	0,097
Houtvezelplaat	0,059	0,073

Tabel 35: U-waarden vloer afhankelijk van de gebruikte isolatie

De isolatie bevindt zich 40cm boven de grond en wordt beschermd door de schelpen maar we eisen toch dat de isolatie vochtbestendig is. Hieronder lijsten we de belangrijkste eigenschappen van alle plaat-isolatiematerialen op ter herinnering. Vlas wordt door zijn chemische bewerking gezien als een back-up optie, dus wordt dit materiaal geschrapt. Ook de houtvezelplaten worden niet goedgekeurd omdat deze niet bestand zijn tegen vocht. Hennep en riet worden beide beschouwd als een goede oplossing. Riet isolatie is vochtbestendig en hennep isolatie kan 20% van zijn eigen gewicht opnemen aan vocht. Aangezien we in de andere vloeropbouw al met hennep werken, kiezen we hier voor een toepassing met riet. De vloerisolatie wordt gecombineerd met een schelpenlaag.

Isolatie vloer - hennep en schelpenvloer

Een gekende vloeropbouw in het dampopen bouwen is een schelpenlaag met daarop hennep isolatie. We gebruiken deze vloeropbouw in bouwdetail 2 en voor de bouwdetails met stampaarde. De vloeropbouw werd ook door IsoHemp Natural Building uitgetekend in één van hun bouwdetails. Deze vloeropbouw bestaat uit een laag schelpen van 40cm waarop een laag hennep isolatie komt. Enkel de bovenste 30cm van deze laag heeft een isolerende functie. De schelpenlaag zorgt ervoor dat de vloer droog blijft en geeft daarnaast ook de nodige stabiliteit voor de gehele vloer. De schelpenlaag kan ook worden vervangen door glasgranulaten. Tussen de schelpen en de hennep isolatie kan eventueel een zandlaag worden geplaatst om een vlakke ondergrond te maken voor de hennep isolatie. Indien de hennep isolatie wordt gespoten is dit in principe niet nodig maar moet wel een geotextiel worden voorzien. De hennepblokken zijn vormvast, daardoor kan het nodig zijn om de ondergrond eerst vlak te maken met een zandlaag. Indien een zandlaag wordt toegepast is het noodzakelijk om een geotextiel te plaatsen tussen de schelpen en het zand. De afwerking gebeurt met een chape en de definitieve vloerafwerking. Deze chape wordt normaal gezien gewapend. Als de vloerafwerking gebeurt met stampaarde kan deze direct worden aangebracht op de isolatie, de kalkchape kan dus worden vermeden. Bij het weglaten van de stabiliserende zandlaag en de kalkchape kan men een heleboel materiaal besparen. De berekening van de U-waarde wordt getoond in tabel 36. Hieruit volgt dat de vloer met en zonder zandlaag en kalkchape voldoet aan de eis van $U \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Het is logisch dat

door de materiaallagen de optie met de kalkchape en zandlaag de laagste U-waarde heeft. Het verschil is echter te klein om het materiaalgebruik te rechtvaardigen. Daarom gaat onze voorkeur ook uit naar de optie zonder zandlaag en kalkchape.

U-waarde vloer - hennep isolatie			
Laag	Dikte [m]	λ [W/(mK)]	R= d/ λ
Rse			0,04
Schelpen	0,3	0,16	1,94
Zand	0,7	1,90	0,37
Kalkhennep	0,2	0,07	2,86
Kalkchape	0,08	0,07	1,14
Stampaarde	0,1		0,45
Rsi			0,10
		R [(m ² K)/W]	6,89
		U [W/(m ² K)]	0,145

U-waarde vloer hennep isolatie			
Laag	Dikte [m]	λ [W/(mK)]	R= d/ λ
Rse			0,04
Schelpen	0,3	0,16	1,88
Zand	0,07	1,90	0,04
Kalkhennep	0,2	0,07	2,86
Kalkchape	0,08	0,07	1,14
Houten planken	0,02	0,15	0,45
Rsi			0,10
		R [(m ² K)/W]	6,50
		U [W/(m ² K)]	0,15

U-waarden vloer	
	U-waarde [W/(m ² K)]
Zand-kalkhennep-kalkchape	0,145
Kalkhennep-kalkchape	0,153
Kalkhennep	0,153

Tabel 36: U-waarden vloer met hennep isolatie

Daarnaast moeten ook de eisen van de EPD-regels worden bekeken. Ter herinnering wordt basisregel 1 nogmaals vermeld:

$$d_{\text{contact}} \geq \frac{1}{2} * \min(d_1, d_2)$$

Met d_{contact} de contactlengte van de isolatielagen gemeten tussen de koude en warme zijde en d_1 en d_2 de diktes van de isolatielagen van de 2 samenkomende scheidingsconstructies. In bouwdetail 2 van strobalen is d_{contact} gelijk aan 10cm en d_1 en d_2 zijn 36 en 30cm. Dit voldoet dus niet aan de eis. Daarom wordt de hele vloeropbouw hoger geplaatst waardoor de isolatie van de vloer rechtstreeks aansluit op de strobalenmuur.

Akoestische isolatie

Verder moet ook de akoestische isolatie verzekerd worden ter plaatse van de vloeraansluiting. Hiervoor wordt een akoestische ondervloer voorzien onder de vloerafwerking door een 2mm houtvezelplaat ondervloer. Bijkomend wordt er randisolatie geplaatst tussen de vloerafwerking en de muur waar nodig. Dit wordt uitgevoerd met een 20mm dikke houtvezelplaat. Op deze manier wordt verspreiding van contactgeluiden naar naastgelegen ruimtes beperkt omdat het transport van de geluidsgolven wordt onderbroken.

5.2.5. Folie

Het doel van deze thesis is natuurlijk om met zo weinig mogelijk folies te werken maar zijn op enkele plaatsen toch nodig om de waterdichtheid van de constructie te verzekeren.

Bij bouwdetail 1 zijn er folies nodig tussen het hout en het staal om ervoor te zorgen dat er geen condens gevormd kan worden dit zou nadelig zijn voor het hout. Doordat de vloer 40cm boven het maaiveld ligt, moet er extra aandacht worden besteed aan de luchtdichtheid van de vloer. Om extra folies te vermijden werken we met 2 lagen OSB waarop de vloerafwerking wordt bevestigd. Dit kan zowel een houten als een stenen vloer zijn. In het geval van stenen waarbij de voegen worden opgevuld met mortel zou luchtdichtheid geen probleem meer mogen vormen maar moet er gecontroleerd

worden of de OSB-platen het gewicht van de stenen kunnen weerstaan. Daarnaast is de verbinding tussen de stenen en de OSB-plaat onomkeerbaar door de mortel of lijm.

Bij beide bouwdetails zal een extra folie moeten worden aangebracht om de wateroverdracht via de natuurstenen sokkel te vermijden. In de 3.7. *Functietabel* komen nog vier opties naar voor, namelijk DPC, EPDM, PE of PP. Elk van deze opties vertoont de vereiste eigenschappen.

Indien met leisteen wordt gewerkt is dit niet nodig omdat leistenen water niet absorberen en daardoor een dichte schil vormen. Maar vocht zou zich kunnen verplaatsen tussen de voegen van de lei-of natuursteen. Daarom worden er op kritieke plaatsen een waterdichte folie geplaatst dit geldt voor beide bouwdetails.

Daarnaast zullen ook enkele geotextielen nodig zijn om de lagen van elkaar te scheiden. Ze komen voor in de vloeropbouw, de grinddrainage en de grindfundering.

5.2.6. Stabiliteit berekening

Om de stabiliteitsberekening te kunnen maken, worden eerst de eigengewichten van de vloeren en wanden bepaald. Voor de binnenmuren, binnenvloeren en het dak worden aannames gemaakt waarbij er van de ergste situatie wordt uitgegaan. Deze kunt u terugvinden in tabel 37. Er werd gekozen voor Belgisch naaldhout met een natuurlijke verduurzamingsbehandeling A2.1 op waterbasis. Dit hout heeft een sterkteklasse C24.

LASTEN			
Permanente lasten [kN/m ²]			
Component	Last [kN/m ²]	Opp [m ²]	Last [kN]
Vloer	1	8	8
Dak	1	8	8
Eigengewicht [kN/m ²]			
Vloer	4	8	32
Gelijkvloers	16,9	8	135,0
Dak	3	8	24
Buitenmuur	1,0	12	12,6
Binnenmuur	2	12	24
Mobiele lasten [kN/m ²]			
Vloer	2	8	16
Gelijkvloers	3	8	24
Dak	1	8	8

Tabel 37: Lasten

5.2.6.1. Stabiliteit muur

De vier wandtypes (binnenmuur kops en langs, buitenmuur kops en langs) worden elk apart berekend. De last per element wordt berekend naar de last per stijl indien deze om de één of twee meter zou staan. Vervolgens wordt dit gedeeld door de druksterkte van timmerhout met een klasse C24 om de nodige doorsnede van de stijlen te berekenen. In tabel 38 worden de berekeningen weergegeven.

Kolommen houtskelet								
	Last per element		Last per kolom om de 1m		Last per kolom om de 4m		mm² nodig	
Binnenmuur kops	142,80	kN	35,70	kN per stuk	142,80	kN per stuk	142800 N per stuk	6800,00
Binnenmuur langs	64,80	kN	16,20	kN per stuk	64,80	kN per stuk	64800 N per stuk	3085,71
Buitenmuur kops	111,90	kN	27,98	kN per stuk	111,90	kN per stuk	111902 N per stuk	5328,65
Buitenmuur langs	89,10	kN	22,28	kN per stuk	89,10	kN per stuk	89102 N per stuk	4242,94

Tabel 38: Kolommen houtskelet berekening

Daarna wordt bekeken wat de minimale benodigde afmetingen van de houten stijlen zijn. Vervolgens wordt de knik van de kolommen berekend dit is te zien in tabel 39.

Knik kolommen houtskelet		
	Voor 1 massieve balk	Voor 2 kleine balkjes
Diepte	80	90
Hoogte	360	120
Traagheidsstraal	23,09	25,98
Slankheid	129,90	115,47
Maximale spanning hout	5,84	7,39
Draagkracht (N)	168270,51	159725,52
Draagkracht (kN)	168,27	159,73

Tabel 39: Berekening op knik van kolommen in houtskelet

Hieruit blijkt dat we een minimale houtafmeting nodig hebben van 80*360mm indien de houten stijlen de gehele breedte van de muur overspannen. Indien er wordt gewerkt met twee aparte houten stijlen waartussen los stro wordt geplaatst dan kan er gebruik gemaakt worden van hout met afmetingen 90*120mm. In beide gevallen zijn de stijlen licht overgedimensioneerd. Voor de berekening van het I-profiel gingen we ervan uit dat de berekening voor de 2 kleine balkjes voldoende waren. We gebruiken hiervoor dus dezelfde afmetingen.

5.2.6.2. Strobalen Bouwdetail 1: Schroefpalenfundering

Voor de schroefpalenfundering moeten er berekeningen worden gedaan voor de houten roostering en de houten verdeelbalk. De houten roostering draagt de vloerafwerking en de lasten op de vloer. De houten verdeelbalk ligt onder de houten roostering en draagt bij gevolg de lasten van de muren en de vloer over naar de paalfunderingen. Beide houten elementen werden getest op draagkracht en doorbuiging.

Houten roostering in de vloer

Voor de draagkracht werd de last berekend met veiligheidsfactoren waarna deze werd vermenigvuldigd met de afstand tussen de balken die 40cm bedraagt. Hieruit werd het moment berekend. Daarnaast werd de spanning die het hout aan kan berekend voor timmerhout met een klasse C24. Vervolgens werd hieruit het weerstandsmoment berekend waardoor men de minimale doorsnede van de balk vindt.

De doorbuiging werd berekend zonder veiligheidsfactoren op de lasten. Vervolgens werd de formule van de doorbuiging gelijkgesteld aan de maximale doorbuiging, $L/400$. Hieruit kan het traagheidsmoment bepaald worden en vind je de minimale doorsnede van de balk.

Beide eisen werden naast elkaar gelegd om uiteindelijk te voldoen aan de strengst eis. We kozen uiteindelijk voor een balk met doorsnede van 50*275mm. De berekeningen worden hieronder getoond in tabel 40. Het is ook belangrijk om houten kipbalken te voorzien zodat de houten vloerroostering op zijn plaats blijft.

HOUTEN ROOSTER	
Draagkracht	
Last	8,10 kN/m ²
Last per balk	3,24 kN/m
Moment	6,48 kNm
Spanning die het hout kan opnemen	11,08 N/mm ²
Weerstandsmoment	585000
Stel b=50 dan is h	264,95 mm
Doorbuiging	
Last voor houten roostering vloer	0,48 kN/m
Last voor houten roostering vloer	0,48 N/mm
Traagheidsmoment	2,70E+07 mm ⁴

Tabel 40: Houten rooster berekening

Houten verdeelbalk

De berekeningen werden gelijkaardig uitgevoerd aan die van de houten roostering. Hier moest men wel rekening houden met de lijnlast van de muur. Er zijn vier verschillende berekeningen voor de vier wandtypes. Er werd uiteindelijk gekozen voor twee balken met doorsneden 32*125mm. De berekeningen worden in tabel 41 getoond.

HOUTEN VERDEELBALK					
Draagkracht					
Binnenmuur kops			Binnenmuur langs		
Puntlast		kN/m ²	Puntlast		kN/m ²
Gespreide belasting	142,80	kN/m ²	Gespreide belasting	64,80	kN/m ²
Moment	285,60	kNm	Moment	129,60	kNm
Spanning die het hout kan opnemen	11,08	N/mm ²	Spanning die het hout kan opnemen	11,08	N/mm ²
Weerstandsmoment	25783333,33		Weerstandsmoment	11700000	
Stel b=73 dan is h	1455,74	mm	Stel b=73 dan is h	980,63	mm
Buitenmuur kops			Buitenmuur langs		
Puntlast		kN/m ²	Puntlast		kN/m ²
Gespreide belasting	111,90	kN/m ²	Gespreide belasting	89,10	kN/m ²
Moment	223,80	kNm	Moment	178,20	kNm
Spanning die het hout kan opnemen	11,08	N/mm ²	Spanning die het hout kan opnemen	11,08	N/mm ²
Weerstandsmoment	20204480,83		Weerstandsmoment	16087814	
Stel b=73 dan is h	1288,66	mm	Stel b=73 dan is h	1149,91	mm
Doorbuiging					
Last voor houten verdeelbalk					
Puntlast door lastendaling			Gespreide belasting door gelijkvloers		
Binnenmuur kops	142,80	kN per	Binnenmuur kops	1,27	kN/m
		kN per			Dak al in puntlast en
Binnenmuur langs	64,80	stuk	Binnenmuur langs	0	neemt geen vloer op
Buitenmuur kops	111,90	stuk	Buitenmuur kops	0,64	kN/m
		kN per			Dak al in puntlast en
Buitenmuur langs	89,10	stuk	Buitenmuur langs	0	neemt geen vloer op
Traagheidsmoment bij fundering om 4 m			Traagheidsmoment bij fundering om 2m		
Binnenmuur kops	6,00E+07	mm ⁴	Binnenmuur kops	7,18E+06	mm ⁴
Binnenmuur langs	1,17E+06	mm ⁴	Binnenmuur langs	0,00E+00	mm ⁴
Buitenmuur kops	3,07E+07	mm ⁴	Buitenmuur kops	3,59E+06	mm ⁴
Buitenmuur langs	1,61E+06	mm ⁴	Buitenmuur langs	0,00E+00	mm ⁴

Tabel 41: Houten verdeelbalk berekening

5.2.6.3. Strobalen Bouwdetail 2: Grindfundering

De breedte van de funderingsvoet wordt bepaald volgens dezelfde methode als bij een betonnen funderingszool. Er wordt aangenomen dat de aanwezige grondlaag een compacte zandgrond is. Voor de lasten worden enkele referentiewaarden aangenomen waarbij het eigengewicht van het gelijkvloers en de buitenmuur wordt gebaseerd op de muuropbouw zoals beschreven in deze thesis. De lastendaling werd al eerder beschreven in 5.1. *Algemene aannames bouwdetail* en zorgt voor lijnlasten op de twee

muurtypes. Deze verkrijgen de volgende waarden in tabel 42. Op basis van deze lijnlasten wordt het draagvermogen van de grond en de minimum funderingsbreedte bepaald in tabel 43. De minimum funderingsbreedte bedraagt 15cm. Deze is smaller dan de muurbreedte waardoor we de funderingsaanzet verbreden tot de breedte van de muur.

Lijnlasten op dragende muren (combi 1)			Lijnlast op dragende muren (combi 2)		
Kopse muur	111,9 kN	28,0 kN/m	Kopse muur	82,7 kN	20,7 kN/m
Langse muur	89,1 kN	22,3 kN/m	Langse muur	65,9 kN	16,5 kN/m

Tabel 42: Lijnlasten op dragende muren

Minimum funderingsbreedte		
Muur type	Combi 1	Combi 2
Kopse muur	10 cm	13 cm
Langse muur	8 cm	10 cm

Tabel 43: Minimum funderingsbreedte

5.2.7. Trisco analyse

De bouwdetails moeten aan twee eisen voldoen de temperatuurfactor $f_{0,2} \geq 0,7$ en lineaire warmtedoorgangscoefficiënt $\Psi_e \leq \Psi_{e,lim}$ met $\Psi_{e,lim} = 0,5 \text{ W/(mK)}$.

De warmtedoorgangscoefficiënt wordt berekend aan de hand van volgende formule:

$$\Psi_e = \frac{\phi_{2D}}{L \cdot (\theta_i - \theta_e)} - \frac{A_1 \cdot U_1}{L} - \frac{\phi_{2D,a}}{L \cdot (\theta_i - \theta_e)} - \Psi_{e,edge} \quad (\text{Formule 2})$$

Met

- ϕ_{2D} [W]: De totale tweedimensionale stationaire warmtestroom die de binnenomgeving verlaat, berekend met numerieke software. Dit wordt in Trisco weergegeven als de Q waarde bij het gehele bouwdetail.
- L [m]: Dit is de lengte waarover het lineaire bouwdetail wordt gemodelleerd, aangezien we werken in Trisco 2D wordt deze gelijkgesteld aan 1m.
- θ_i en θ_e [K]: Respectievelijk de binnen- en buitentemperatuur.
- A_1 [m²]: Dit is de oppervlakte van de muur tussen de binnen- en buitenomgeving via de buitenafmetingen aangezien we werken in Trisco 2D wordt deze gelijkgesteld aan 1m².
- U_1 [W/(m²K)]: De warmtedoorgangscoefficiënt van de muur.
- $\phi_{2D,a}$ [W]: De totale tweedimensionale warmtestroom die de binnenomgeving verlaat berekend met de gevalideerde numerieke software met specifieke aanpassingen in het model. In het model worden de muur en de fundering niet meegenomen in de warmtestroom.
- $\Psi_{e,edge}$ [W/(mK)]: Deze factor is de lijnwarmtedoorgangscoefficiënt van de randisolatie. Indien er in deze thesis geen gebruik wordt gemaakt van randisolatie wordt deze factor steeds gelijk gesteld aan nul.

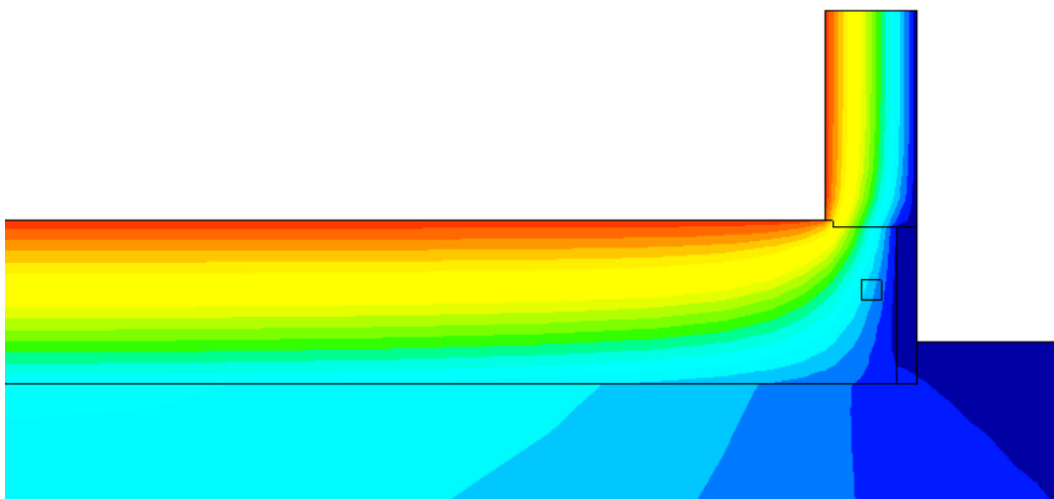
Voor bouwdetail 1 blijkt uit Trisco2D dat de temperatuurfactor gelijk is aan 0,939 waarmee bouwdetail 1 voldoet aan de eerste eis. De temperatuur factor voor bouwdetail 2 bedraagt 0,948 en voldoet hiermee ook aan de eis.

De tweede eis wordt berekend volgens formule 2. Hieruit blijkt dat beide bouwdetails voldoen aan de eis. De berekeningen worden getoond in tabel 44. De psi-waarde voor bouwdetail 1 is gelijk aan -0,0011 W/(mK). Ook bouwdetail 2 voldoet aan deze eis met een psi-waarde van 0,1004 W/(mK). We kunnen hieruit concluderen dat deze bouwdetails geen probleem zullen vormen in de thermische schil van het gebouw en dat er geen schimmelgroei zal optreden.

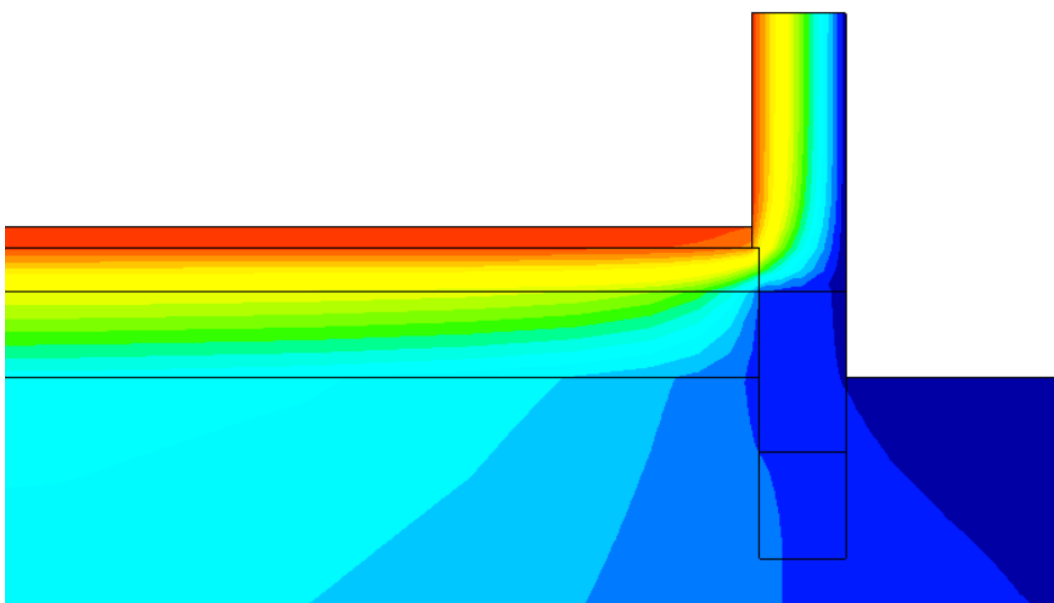
In figuren 52 en 53 wordt de warmtestroom doorheen de bouwdetails getoond.

TRISCO - Bouwdetail Stro								
	ϕ_{2Da} [W]	θ_e [K]	θ_i [K]	A_1 [m ²]	L_1 [m]	U_1 [W/(m ² K)]	ϕ_{2D} [W]	Ψ_e [W/(mK)]
Optie 1	9,051	273	293	1	1	0,122	11,469	-0,0011
Optie 2	9,803	273	293	1	1	0,122	14,25	0,1004

Tabel 44: Trisco berekeningen – bouwdetails met strobalen



Figuur 52: Warmtestroom doorheen muurvoet (strobalenbouw bouwdetail 1: schroefpalenfundering)



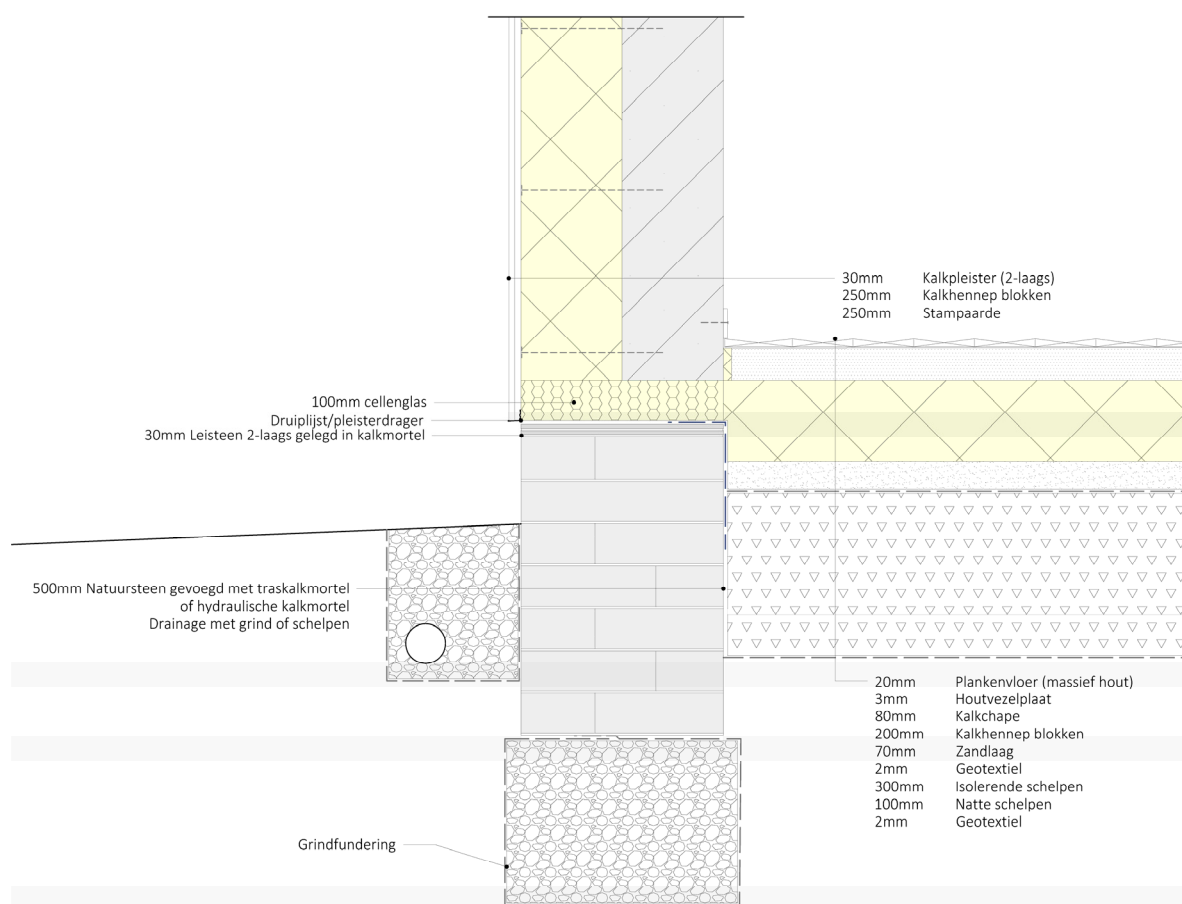
Figuur 53: Warmtestroom doorheen muurvoet (strobalenbouw bouwdetail 2: grindfundering)

5.3. Muurvoet stamperde

5.3.1. Uitvoering

Hieronder kunnen de uiteindelijke bouwdetails worden bekeken en worden alle elementen en hun functie per bouwdetail opgesomd. Deze bouwdetails zijn een suggestie en kunnen daarom in verschillende varianten voorkomen. Er zijn verscheidene mogelijkheden voor de afwerking van muur en vloer, voor de funderingsmethode en opbouw van de muur. Zo kan de lezer zijn eigen passende bouwdetail determineren volgens deze aanzet. Ook voor stamperde werken we met twee hoofdconstructies met verschillende variaties hierop. Het bouwdetail 1 van stamperde werkt met buitenisolatie en heeft twee variaties terwijl bouwdetail 2 binnenisolatie toepast en twee variaties heeft. Alle details zijn ook te vinden in bijlage 9.9 tot 9.17.

5.3.1.1. Stamperde Bouwdetail 1: Buitenisolatie



Figuur 54: Muurvoet stamperde 1: Buitenisolatie (zie ook in bijlage 9.9)

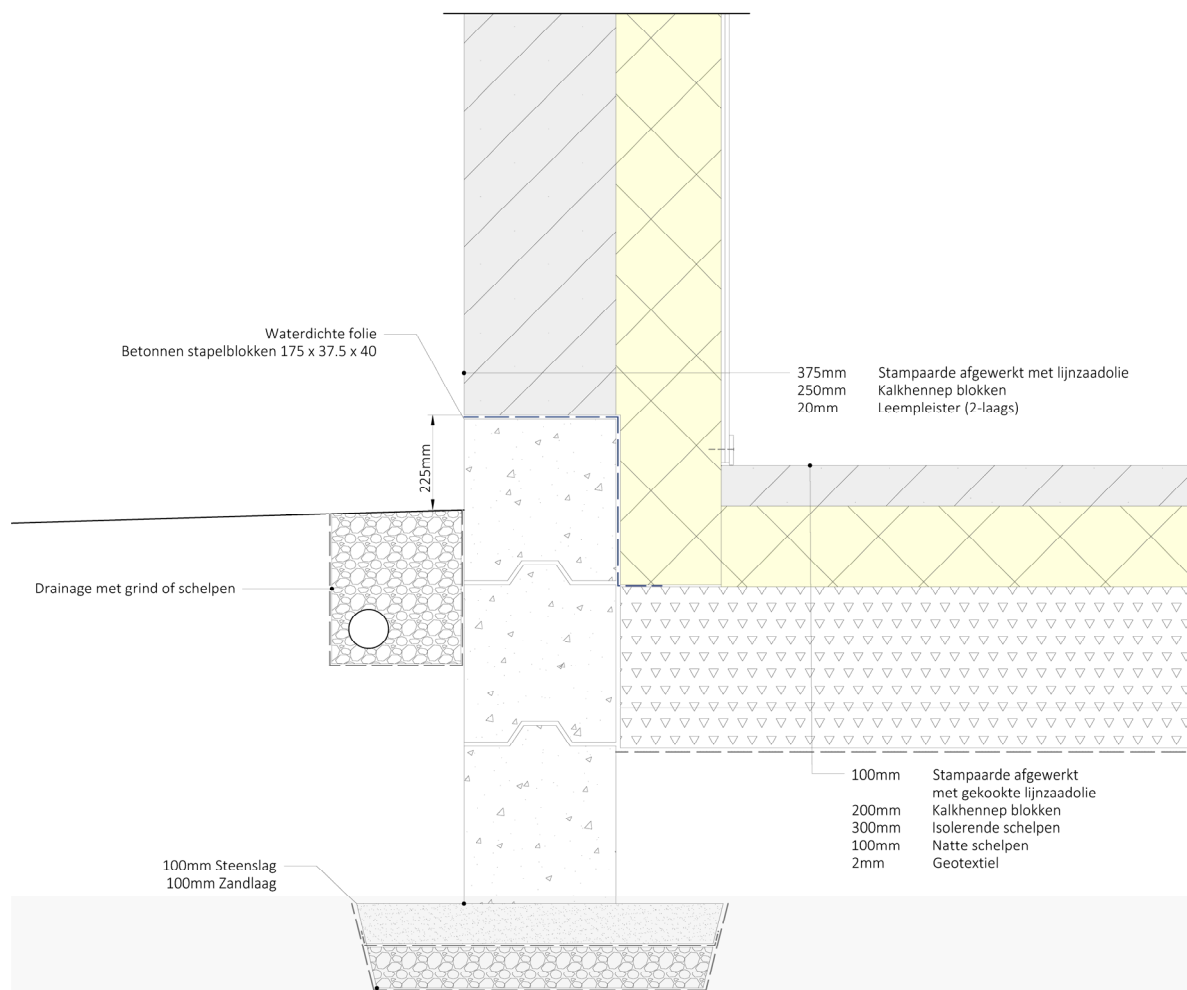
Het bouwdetail wordt getoond in figuur 54. In het eerste bouwdetail wordt de isolatie aan de buitenzijde van de stamperde muur geplaatst. Dit wordt uitgevoerd zoals een ETICS-systeem waarbij de isolatie verlijmd wordt op de constructie. Er moet rekening gehouden worden met de minimale afstand van isolatie tot het maaiveld die minimaal 30cm moet bedragen. In dit detail worden kalkhennepblokken toegepast, verlijmd met kalkmortel en afgewerkt met een twee-laagse kalkpleister die bestand is tegen regen. Deze worden bijkomend in de stamperde muur bevestigd aan de hand van rozetten, 1 rozet per 2m². Hierbij moet de bevestiging 2 keer dieper in de stamperde worden bevestigd dan het geval is bij beton.^{IV} De opening tussen maaiveld en isolatie wordt opgevuld met waterbestendige en drukvaste

isolatie, met een druksterkte tussen 500-1600kPa, in de vorm van cellenglas. Zo kan de thermische schil gesloten worden tussen muur en vloer. De structuur van de muur bestaat uit een 25cm dikke stampaarde muur die aan de binnenzijde wordt beschermd tegen stof en vocht door middel van gekookte lijnzaadolie. Het geheel wordt ondersteund aan de hand van een Rubble trench fundering die reikt tot de vorstvrije diepte. Het grindmassief wordt omringd door een geotextiel zodat het grind niet wordt verdrongen in de grond.

Naast de fundering wordt een drainerende grindlaag geplaatst omringd door een geotextiel en gescheiden van de fundering door deze folie. Hierin wordt een geperforeerde drainagebuis geplaatst die het water wegleidt van het gebouw.

Er wordt dezelfde vloeropbouw als bij Strobalen Bouwdetail 2 toegepast waarbij de afwerking bestaat uit een plankenvloer in plaats van stampaarde.

5.3.1.2. Stampaarde Bouwdetail 2: Binnenisolatie



Figuur 55: Muurvoet stampaarde 2: Binnenisolatie (zie ook in bijlage 9.12)

Figuur 55 toont de opbouw van het bouwdetail. Voor het tweede bouwdetail wordt gebruik gemaakt van isolatie aan de binnenzijde van de muur. Hierdoor wordt de thermische schil vereenvoudigd en blijft de aarde zichtbaar aan de buitenzijde. Een afwerking aan de buitenzijde van de stampaarde muur is voor dit detail niet nodig omdat een voldoende dikke slijtmasa aanwezig is ten gevolge van de

funderingsbreedte maar kan eventueel een versterking verkrijgen door middel van lijnzaadolie. Aan de binnenzijde wordt de kalkhennep isolatie afgewerkt met een twee-laagse leempleister. Ook hier wordt dezelfde vloeropbouw toegepast. De luchtdichtheid en de waterdichtheid dienen in dit bouwdetail verzekerd te worden door de toepassing van één folie. Deze wordt geplaatst ter hoogte van de scheiding tussen de betonnen blokken en de muurisolatie en ter hoogte van de scheiding tussen fundering en stamperde.

De fundering bestaat uit een droge stapeling van betonnen stapelblokken. Deze worden aangezet op een laag gebroken steenslag met daarop een zandlaag die de volledige breedte van de bouwput vult, telkens gescheiden door een geotextiel. Er wordt een bijkomend drainerend grindmassief geplaatst ter hoogte van de schelpenlaag om zo opspattend vocht en plantengroei naast de funderingsaanzet te vermijden alsook horizontaal vochttransport naar de vloeropbouw.

5.3.2. Opbouw van de muur

Een stamperde muur bouwen kan op drie manieren, met stampleem, cob of adobe stenen. Onze voorkeur gaat uit naar bouwen met stampleem zoals beschreven in 4.4.1. *Stabiliteit*. Dankzij de uitvoeringsmethode van een stamperdemuur, verkrijgt de muur een bijzonder mooi en uniek uitzicht. Dit komt door de methode van aanstampen, de dikte van de lagen en de aardemix. De aardemix die gebruikt wordt is nooit helemaal dezelfde en bepaald het kleurenpalet en oppervlaktestructuur. Een stamperde muur is daarom nooit hetzelfde maar heeft een uniek karakter.

5.3.3. Fundering

Voor de fundering van een stamperde ééngezinswoning worden er twee opties uitgewerkt, enerzijds een fundering opgebouwd uit grind en natuurstenen metselwerk en anderzijds een fundering gemaakt uit een stapeling van betonnen stapelblokken, ook wel gekend als 'betonnen legoblokken' omwille van de vormgeving. Beide opties werden aangenomen omdat ze na hun levensduur ontmantelt, hergebruikt of gerecycleerd kunnen worden. De reden hiervoor is dat er geen permanente verbindingen worden toegepast. De vloeropbouw van de woning blijft daarentegen nagenoeg gelijk.

Betonnen stapelblokken

Betonnen stapelblokken worden vaak gebruikt als keermuur, scheidingsmuur of wanden van een opslagplaats. Ze worden prefab gemaakt waardoor ze ook uit restbeton kunnen bestaan. Hierdoor gaan minder beton en grondstoffen verloren en wordt afval hergebruikt. Onze voorkeur gaat dan ook naar deze optie. De stapelblokken in deze thesis gebruikt, hebben de dimensie L x B x H = 175 x 37,5 x 40cm. Om het effect van opspattend water op de stamperde muur te vermijden, zal de muur een breedte moeten aannemen van 375mm in plaats van de minimale 250mm. Het voordeel hiervan is dat een betere U-waarde kan worden gerealiseerd en de overige aarde als slijtmasa kan fungeren maar tegelijk wordt ook meer ruimte ingenomen en zal de hoeveelheid benodigd materiaal bijna verdubbelen. Dit heeft uiteraard gevolgen op de totale kost van de constructie.

De constructie gebeurt volgens een droog procedé waarbij geen mortel of lijm wordt gebruikt tussen de verschillende blokken. Ze klikken in elkaar als legoblokken, waarbij de ronde noppen van de onderste blok perfect passen in de openingen van de bovenste blok. Zo worden verschuivingen van de blokken onderling tegengegaan, zeker wanneer een halfsteensverband wordt toegepast en verloopt de constructie snel. In theorie zouden de blokken op een vlakke en draagkrachtige laag moeten geplaatst worden zonder bijkomende funderingszool. We kiezen ervoor om toch gebruik te maken van een verbrede zool zodat de spanningen op de grond niet worden weggenomen bij afgraven maar ook om een vlakke werkvloer te verkrijgen. Dit wordt uitgevoerd door middel van grondvervanging met eerst een laag verdichte steenslag waarop een laag compact zand wordt geplaatst. Deze totale laag vult de

volledige oppervlakte van de bouwput van de fundering zodat een afgelijnde massa gevormd wordt en worden al te grote verzakkingen of verschuivingen voorkomen.

Een laatste belangrijk voordeel is de recycleerbaarheid van de blokken. In het Project C2CA werd bekeken of men oud beton kan recyclen en opnieuw tot beton kan vormen met dezelfde kwaliteit. Hieruit bleek dat dergelijk beton niet slechter presteert dan het primair toeslagmateriaal.^V Ook stapelblokken zouden uit gerecycleerd beton kunnen gemaakt worden waardoor de milieu-impact zal verminderen en waardoor het in een circulair proces terechtkomt. Voorlopig wordt dit nog niet toegepast in de praktijk maar het kan in de toekomst wel een positieve oplossing bieden.

Het product zelf is durabel en kan het na toepassing meerdere malen opnieuw gebruikt worden omdat er geen mortel aan te pas komt. Wanneer je dan rekent op tweemaal hergebruik, kan dit ook in rekening worden gebracht bij de milieu-impact, die zo weer een stukje verkleint.

“Rubble trench”

Deze funderingsmethode werd al eerder besproken in 5.2.3. *Fundering* bij strobalenbouw maar kan ook bij een stamperde constructie worden geïmplementeerd. Hierbij gelden dezelfde eisen en uitvoeringsmethode.

Voor een stamperde constructie is er een bijkomende eis waarbij de laag natuursteen of de betonnen stapelblokken minimaal 225mm boven het maaiveld moeten uitkomen om de functie van sokkel degelijk te kunnen uitvoeren. Zo vermijdt het de opzuiging van water door de stamperde muur, het spatten van water tegen het muuroppervlakte en de aantasting door kleine dieren of insecten. Als extra bescherming wordt een barrière gevormd tussen de sokkel en de stamperde muur zoals beschreven werd in 5.2.3. *Fundering*.

5.3.4. Isolatie

Isolatie muur

Omdat we de esthetische waarde van de stamperde muur aan de buitenzijde willen bewaren, wordt de isolatie voor het eerste bouwdetail aan de binnenzijde van de wand geplaatst. Dit zorgt ervoor dat een goed aansluitende thermische schil kan gevormd worden zonder koudebruggen. Het nadeel van binnenisolatie is dat het effect van de thermische massa van de stamperde verloren gaat waardoor het bufferen van de temperatuur minder efficiënt zal verlopen.

Bij het tweede bouwdetail wordt de isolatie aan de buitenzijde van de wand geplaatst. Het voordeel hiervan is dat de esthetische waarde van een stamperde muur aan de binnenzijde vrij blijft en dat de stamperde muur nu ook als thermische massa fungeert en zo de binnentemperatuur kan reguleren. Het gevolg van buitenisolatie is dat er een meer complex detail ontstaat omdat de thermische schil onderbroken wordt door de stamperde muur. Dit wordt opgelost door de plaatsing van een cellenglas isolatieblok onder de stamperde muur. Ook de aansluiting vergt meer aandacht, zo mag de isolatie niet minder dan 30cm boven het maaiveld starten. Die overige ruimte wordt opgevuld met de sokkel en 10cm cellenglas om de thermische schil te sluiten.

De muurisolatie moet de volgende eigenschappen bevatten:

- Dampopen: Het vocht dat zich in de stamperde muur bevindt moet de muur kunnen verlaten, het is essentieel dat de muur kan drogen zowel naar de binnen- als naar de buitenzijde. Bijkomend moet de afwerking op de isolatie dampopen zijn.
- Plaatvorm: Om een goede plaatsing te garanderen maar ook voor de aanhechting van een pleisterlaag, is isolatie vereist die in plaat- of blokvorm verkrijgbaar is.

- Goede λ -waarde: Om aan de thermische eisen van de Belgische regelgeving te voldoen, moet de isolatie een voldoende lage λ -waarde vertonen.

In *Hoofdstuk 3.7. Functietabel*, vinden we vijf opties die verkrijgbaar zijn in plaatvorm: hennep, riet, stro, vlas en houtvezelplaten. Omdat vlas als back-up optie werd beschouwd door de chemische bewerking, schrappen we dit uit de lijst. Vervolgens bekijken we de benodigde dikte van de isolatieplaten, deze willen we zo minimaal mogelijk houden aangezien de stampaarde muur zelf al een behoorlijke dikte aanneemt. Stro moet in grote diktes worden geplaatst om een goede isolatiewaarde te verkrijgen. Daarom schrappen we dit ook. Riet daarentegen, behoeft geen al te grote dikte maar wordt niet geproduceerd in zelfdragende stijve panelen of blokken en is moeilijk af te werken met een pleisterlaag. De resterende opties zijn hennep en houtvezelplaten. Wanneer gekeken wordt naar de lambda-waarde scoort een houtvezelplaat met waarde van 0,038W/(mK) beter dan hennepblokken met een waarde van 0,07W/(mK). De berekeningen worden getoond in tabel 45.

U-waarde van stampaarde muur		
Materiaal	U-waarde [W/(m ² K)]	Dikte muur [m]
Aanvaard		
Kalkhennep	0,21	0,52
Houtvezelplaat	0,2	0,41
Niet aanvaard wegens: te grote dikte		
Stro	0,1	0,67
Niet aanvaard wegens: niet zelfdragend of stijf		
Riet	0,21	0,52
Cellulose	0,2	0,4
Back-up optie functietabel		
Vlas	0,2	0,41

Tabel 45: Vergelijking van U-waarde en dikte bij isolatiematerialen op stampaarde muur

Hieruit blijkt dat beide muur opbouwen, voldoen aan de eis van $U \leq 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Voor de U-waarde van de stampaarde werd gebruik gemaakt van tabel 27 en formule 1 beschreven in 4.4.4. *Thermische isolatie*. Hierdoor moet er 15cm houtvezelplaat worden voorzien in tegenstelling tot 25cm kalkhennep om dezelfde U-waarde te bekomen. Daarentegen heeft hennep het voordeel dat het zelfdragend is en daardoor geen secundaire constructie nodig heeft. De blokken worden met halfsteensverband gemetst met mortel bestaande uit pleister, zand en luchtkalk. Houtvezelplaten hebben wel nood aan een secundaire constructie, hiervoor zullen er eerst houten stijlen moeten geïnstalleerd worden waartussen de platen geplaatst worden. Bijkomend heeft het een pleisterdrager uit jute nodig voor de afwerking met leempleister wat bij hennepblokken niet nodig is. Beide isolatiematerialen hebben voordelen en nadelen en worden daarom als volwaardige oplossingen beschouwd. In tabel 46 worden de berekeningen van de U-waardes van de muur met toepassing van verschillende isolatiematerialen getoond.

U-waarde stampaarde muur- Hennep				U-waarde stampaarde muur- Hennep			
Laag	Dikte [m]	λ [W/(mK)]	R= d/ λ	Laag	Dikte [m]	λ [W/(mK)]	R= d/ λ
Rse			0,04	Rse			0,04
Stampaarde	0,375		1,06	Kalkpleister	0,015	0,07	0,21
Kalkhennep	0,25	0,07	3,57	Kalkhennep	0,25	0,07	3,57
Leempleister	0,02	1,7	0,01	Stampaarde	0,25		0,75
Rsi			0,13	Rsi			0,13
		R [(m ² K)/W]	4,81			R [(m ² K)/W]	4,71
		U [W/(m ² K)]	0,21			U [W/(m ² K)]	0,21

U-waarde stampaarde muur -Houtvezelplaat			
Laag	Dikte [m]	λ [W/(mK)]	R= d/ λ
Rse			0,04
Kalkpleister	0,015	0,07	0,21
Houtvezelplaat	0,15	0,038	3,95
Stampaarde	0,25		0,75
Rsi			0,13
		R [(m ² K)/W]	5,09
		U [W/(m ² K)]	0,20

Tabel 46: U-waarde muur stampaarde met verschillende isolatiematerialen

Dezelfde principes gelden als in 5.2.4. *Isolatie*.

Akoestische isolatie

Dezelfde principes gelden als in 5.2.4. *Isolatie*.

5.3.5. Folie

Het doel van deze thesis is natuurlijk om met zo weinig mogelijk folies te werken omdat we uitgaan van een dampopen opbouw. Toch zullen deze op enkele plaatsen nodig zijn om de waterdichtheid en luchtdichtheid van de constructie te kunnen verzekeren.

In de muurvoet moet een waterkerende folie worden geïntegreerd om de stampaarde te beschermen van opstijgend of stagnerend vocht ter plaatse van de grens tussen stampaarde en sokkel. Deze folie moet flexibel zijn om eventuele verschuivingen of vervormingen te weerstaan maar moet ook een slijtvast karakter bezitten zodat het de grote druk bij aanstampen van de aarde kan ondergaan zonder schade. Daarnaast is het essentieel voor de omkeerbaarheid van de constructie dat de folie met een mechanische verbinding bevestigd wordt of door gewicht wordt vastgezet. Een andere optie is de toepassing van leisteen. Dezelfde opties gelden hier als in 5.2.5. *Folie*.

Ook een verticale waterkering is in beide details nodig voor het eventuele horizontale vochttransport boven het maaiveld naar de isolatie en binnenomgeving tegen te houden.

Tenslotte zal op verschillende plaatsen nood zijn aan een geotextiel. Dit is nodig voor de scheiding van verschillende lagen maar ook om de verdringing van het materiaal in de grondlaag tegen te gaan. Zo zal het geplaatst moeten worden rondom de grindfundering en drainage alsook onder en boven de schelpenlaag.

5.3.6. Stabiliteit berekening

Op basis van de normen kunnen er minimum afmetingen worden gevonden voor de fundering. In tabel 47 worden deze samengevat, hierbij moet worden opgemerkt dat het gaat om betonnen en stamperde funderingen waardoor deze normen eerder als indicatie fungeren. In de praktijk kunnen deze afmetingen grotere of kleinere waarden aannemen ten gevolge van de heersende lasten op de structuur. Daarom worden enkele berekeningen gemaakt op basis van het algemeen kader (zie *Hoofdstuk 5.1. Algemene aannames bouwdetail*) voor de werkelijke afmetingen van de fundering en muur.

Eisen afmeting fundering en muur volgens normen					
Norm	Breedte funderingszool	Diepte funderingszool	Sokkel hoogte boven maaiveld		Breedte muur
			Afgewerkte bestrating	Maaiveld	
Australië	min. breedte muur of 300mm max. 400mm	min. 300mm max. 400mm	150mm	225mm	200mm
Nieuw-Zeeland	min. breedte muur of 280mm max. 450mm	min. 150mm in grind max. 300mm in andere gronden			250mm
Afrika	min. breedte muur in zand of grind max. 500mm in klei	max. breedte muur of (breedte fundering-breedte muur)/2		150mm	300mm

Tabel 47: Eisen afmeting fundering volgens normen

Eerst wordt berekend wat de minimale breedte van de funderingsvoet moet te zijn. Dit wordt bepaald volgens dezelfde methodiek als 5.2.6.3 *Strobalen Bouwdetail 2: Grindfundering*. Deze verkrijgen de volgende waarden in tabel 48. Op basis van deze lijnlasten, die zowel voor combinatie 1 en 2 worden berekend, en het draagvermogen van de grond wordt de minimum funderingsbreedte bepaald in tabel 49.

Lijnlasten op dragende muren (combi 1)			Lijnlast op dragende muren (combi 2)		
Kopse muur	347,4 kN	86,8 kN/m	Kopse muur	257,1 kN	64,3 kN/m
Langse muur	330,0 kN	82,5 kN/m	Langse muur	244,3 kN	61,1 kN/m

Tabel 48: Lijnlasten op dragende muren

Minimum funderingsbreedte		
Muur type	Combi 1	Combi 2
Kopse muur	27 cm	35 cm
Langse muur	25 cm	34 cm

Tabel 49: Minimum funderingsbreedte

Vervolgens wordt de minimum breedte van de muur bepaald op basis van de lasten. De karakteristieke druksterkte van stamperde werd volgens de Nieuw-Zeelandse norm bepaald op 0,5MPa. Op basis van deze sterkte wordt de weerstand van een stamperde muur bepaald afhankelijk van de dikte. De weerstand moet uiteraard groter zijn dan de heersende last op de muur, deze is te vinden in tabel 50. Bij een bepaalde dikte van de muur zal dit zo zijn. Dit wordt dan beschouwd als de minimumeis. Hierbij moet rekening gehouden worden met de minimum breedte van 250mm zoals bepaald in de normen. In tabel 50 worden op basis van beide voorwaarden de minimale diktes bepaald.

Sterkte stamperde muur					
Muur type	f_{ck} [N/mm ²]	Dikte [mm]	N_{Rd} [kN/m]	N_{ed} [kN/m]	$N_{Rd} > N_{ed}$
Kopse muur	0,5	250	125	86,8	OK
Langse muur	0,5	250	125	82,5	OK

Tabel 50: Sterkte van een stamperde muur

Hieruit wordt besloten dat de minimum breedte van de funderingszool 350mm moet bedragen, dit voldoet aan de indicatieve normen. Deze breedte wordt evenwel aangenomen als minimale breedte van de kalksteenmuur wanneer het gaat om een Rubble trench, aangezien de kalksteenmuur best

besloten op een minimum van 400mm aangezien het hier gaat om een Rubble trench en deze een voldoende dikte behoeft om de lasten te kunnen spreiden op de grondlaag. De algemene diepte van de fundering, inclusief funderingsmuur en -zool moet doorgetrokken worden tot vorstvrije diepte. Om werken te vergemakkelijken wordt voor beide muurtypen een minimale funderingsbreedte van 350mm aangehouden. Om een correcte aansluiting te kunnen maken met de muuropbouw zullen deze afmetingen hier soms van afwijken. Hierbij voldoen ze wel nog steeds aan de minimale eis.

5.3.7. Trisco analyse

Ter herinnering worden hierbij de eisen opgesomd waaraan de bouwdetails moeten voldoen. Zo moet de temperatuurfactor $f_{0,2} \geq 0,7$ en de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt $\Psi_e \leq \Psi_{e,lim}$ met $\Psi_{e,lim} = 0,5 \text{ W/(mK)}$ zijn. De warmtedoorgangscoefficiënt wordt berekend aan de hand van volgende formule 2 beschreven in 5.2.7. *Trisco analyse*.

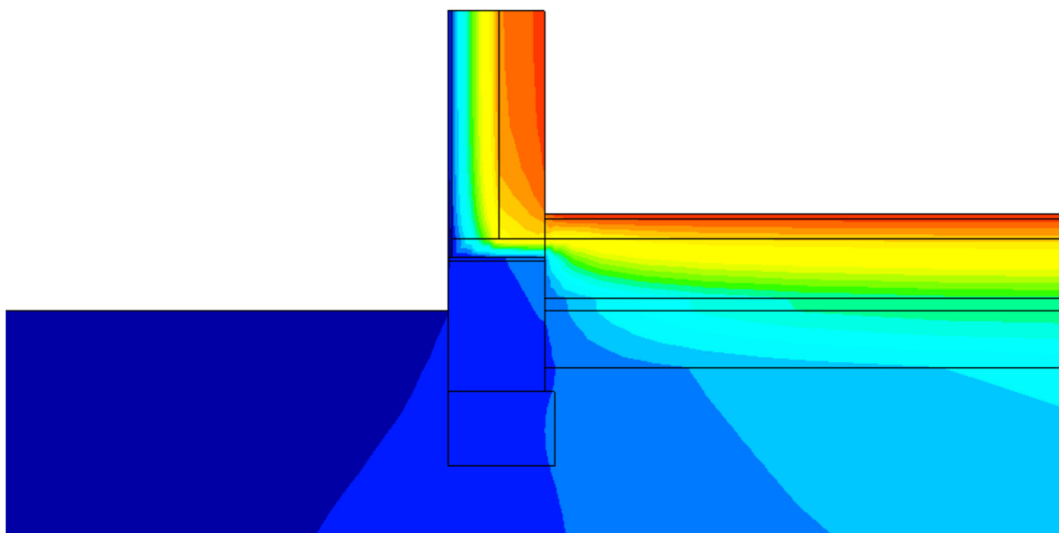
Voor bouwdetail 1 blijkt uit Trisco2D dat de temperatuurfactor gelijk is aan 0,899, waarmee bouwdetail 1 voldoet aan de eerste eis. De temperatuurfactor voor bouwdetail 2 bedraagt 0,938 en voldoet hiermee aan de eis.

De tweede eis wordt berekend volgens formule 2, hieruit blijkt dat beide bouwdetails voldoen aan de eis. De berekeningen worden getoond in tabel 51. Hieruit bleek dat voor bouwdetail 1 heeft psi-waarde van 0,1972W/(mK) en hiermee voldoet aan de eis. Bouwdetail 2 voldoet aan deze eis met een psi-waarde van 0,1111 W/(mK). We kunnen hieruit concluderen dat deze bouwdetails geen probleem zullen vormen in de thermische schil van het gebouw en dat er geen schimmelgroei zal optreden.

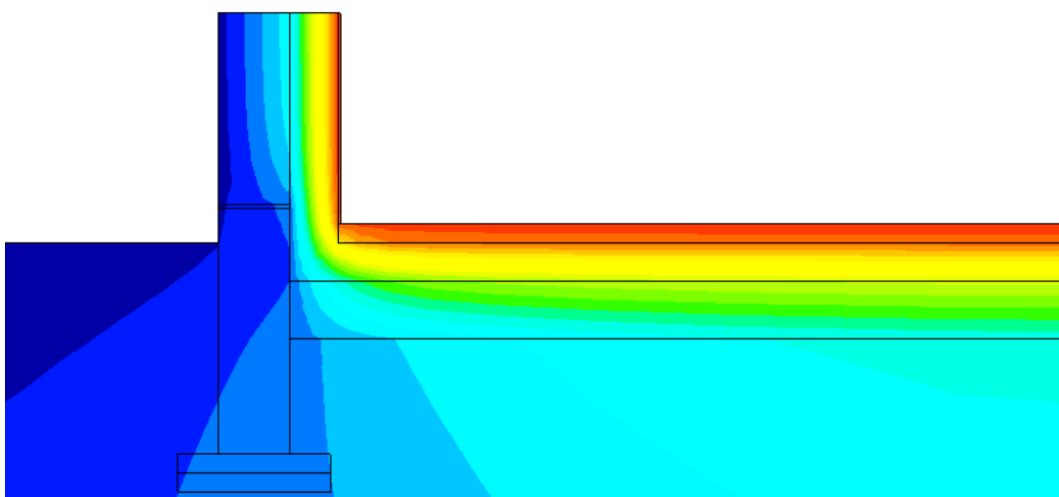
In onderstaande figuren 56 en 57 wordt de warmtestroom doorheen de bouwdetails getoond.

TRISCO - Bouwdetail Stampaarde								
	ϕ_{2Da} [W]	θ_e [K]	θ_i [K]	A_1 [m ²]	L_1 [m]	U_1 [W/(m ² K)]	ϕ_{2D} [W]	Ψ_e [W/(mK)]
Optie 1	7,536	273	293	1	1	0,21	15,679	0,1972
Optie 2	10,312	273	293	1	1	0,2	16,534	0,1111

Tabel 51: Trisco berekeningen – bouwdetails met stampaarde



Figuur 56: Warmtestroom doorheen muurvoet (stampaarde bouwdetail 1: buitenisolatie)



Figuur 57: Warmtestroom doorheen muurvoet (stampaarde bouwdetail 2: binnenisolatie)

EINDNOTEN

ⁱ Natural homes, *"The rubble trench foundation (RTF)."* .

ⁱⁱ Momnumentenwacht vlaanderen vzw, *"Onderhoud en herstel van historisch metselwerk."* , januari 2013.

ⁱⁱⁱ Rob van Hees et al. , *"Het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden."* ,2003.

^{iv} Isohemp, *"Plaatsingsgids: alle tips voor het plaatsen van de producten van Isohemp."* .

^v CBR, *"Duurzaam beton mogelijk op basis van gerecycleerd materiaal."* .

INTRO

De door ons opgestelde bouwdetails worden vergeleken met elkaar en met drie standaardbouwdetails om zo te onderzoeken of de bio-ecologische bouwdetails inderdaad beter zijn. Voor stampaarde en strobalebouw werden telkens de twee hoofd-details gebruikt in de vergelijking. De standaardbouwdetails bevatten een typische Belgische spouwmuur, een ETICS-wand en een houtskelet. In bijlagen 9.1, 9.4, 9.9, 9.14 en 10.1 tot 10.3 worden alle beschouwde details getoond. De details worden op drie punten met elkaar vergeleken namelijk milieu-impact, kost en levensduur.

De milieu-impact wordt opgesplitst in drie onderdelen: de materiaalpunten volgens TOTEM [Mpt/FE], de schaduwkosten volgens Nibe [€/FE] en de omkeerbaarheidsindex volgens TOTEM [Pt]. Deze drie parameters werden omgerekend naar procenten per materiaal en per element om ze onderling te kunnen vergelijken.

Aangezien niet alle materialen aanwezig zijn in de bibliotheek van TOTEM of Nibe werden daarvoor enkele aannames gedaan. Dit wordt steeds in de algemene tabel vermeldt, zie bijlage 12 en 13. Alle cijferwaardes werden geraadpleegd in mei 2022.

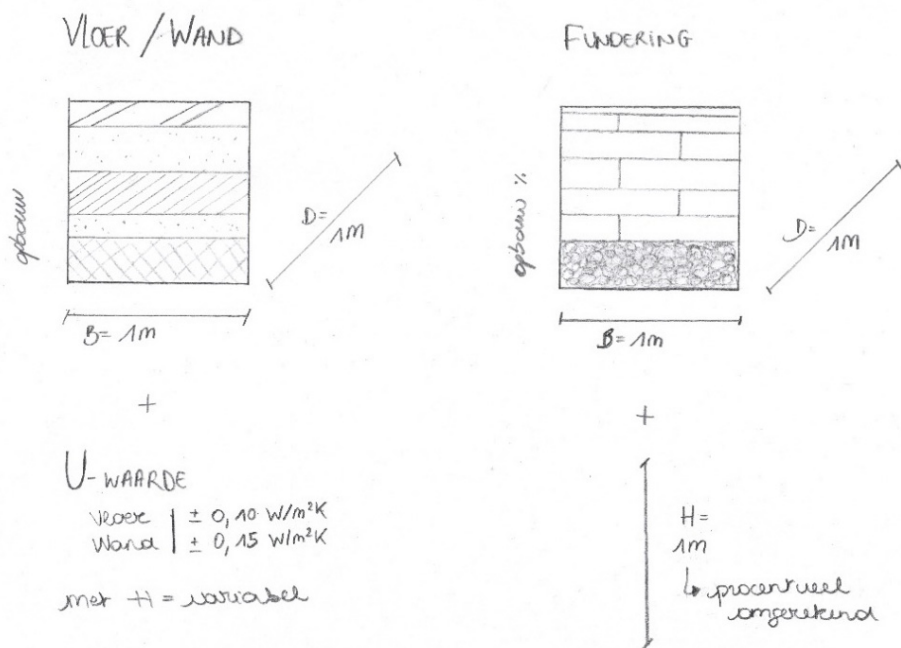
6. VERGELIJKING BOUWDETAILS

6.1. Methode van vergelijking

Om de vergelijking van de bouwdetails op een correcte manier uit te voeren moeten enkele zaken in beschouwing worden genomen. Omdat er gewerkt wordt op de muurvoet, moeten de wand, vloer en de fundering in de vergelijking worden betrokken. TOTEM biedt enkel een vergelijkingsmethode voor verschillende opbouwen van wanden en vloeren door gebruik te maken van een functionele eenheid. Dit houdt in: één vierkante meter oppervlak, een levensduur van 60 jaar en een bijkomende parameter zoals U-waarde of dikte. Elk materiaal, dat toegepast wordt in het bouwdetail, met een levensduur korter dan 60 jaar, zal meerdere malen moeten meegerekend worden op vlak van kostprijs, materiaalpunten en schaduwkosten. Zo wordt de vervanging van het materiaal mee in rekening genomen. Voor de vergelijking van de wanden en de vloeren uit de muurvoet wordt als functionele eenheid de U-waarde genomen. Deze wordt bepaald op basis van de U-waarde van de strobale muurvoet. De U-waarde van de strobale muur ligt vast door de afmetingen van de strobaal, daarom werd de strobale muur als referentie genomen. Omdat we ons voor de vergelijking van de wanden en vloeren willen baseren op één detail werd daarom gekozen voor het strobale detail met de laagste U-waarde in de vloer. Bouwdetail 1 van strobale is hier dus als referentie gebruikt. Zo wordt voor de wand een U-waarde aangehouden van ongeveer $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ en voor de vloer $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

De fundering kan echter niet op dezelfde manier vergeleken worden. Zo kan je niet uitgaan van eenzelfde U-waarde omdat dit niet van toepassing is op dit onderdeel. Daarnaast bestaat er in TOTEM nog geen categorie voor de opbouw van een fundering, waardoor men moet vertrekken van een wand- of vloeropbouw. Daarom moet een andere methode worden aangenomen. Hiervoor wordt de fundering in TOTEM opgebouwd als een wand waarbij de oppervlakte ook hier 1m^2 inhoudt. Als bijkomende functionele eenheid wordt hier een gelijke diepte van de fundering aangenomen wat neerkomt op een gelijke dikte van de wandopbouw. Deze wordt vastgelegd op 1m. Aangezien niet alle funderingen 1m diep zijn, wordt de opbouw van de fundering procentueel omgevormd. Waarbij de dikte van de laag in TOTEM bepaald wordt door het procentuele aandeel in de werkelijke fundering. Bijkomend wordt de bouwkost hier berekend voor 1m^3 in vergelijking met de wand en vloer waar de prijs per 1m^2 wordt berekend. Deze methode is experimenteel en behoeft verder onderzoek of verfijning om tot gedetailleerde uitkomsten te komen maar biedt wel een startpunt om de vergelijking op te baseren. De methode wordt schetsmatig getoond in figuur 58.

FUNCTIONELE EENHEID



Figuur 58: Functionele eenheid methode voor vloer/wand en fundering van muurvoet

Uiteindelijk wordt het bouwdetail in twee onderdelen vergeleken. Als eerste onderdeel worden de vloer- en wandopbouw per muurvoet samen bekeken en vergeleken. Hieruit kan een eerste conclusie worden gemaakt op vlak van de bovengenoemde vergelijkende parameters en bepaald worden welke opbouw hierin het beste scoort. Ten tweede worden de funderingen onderling vergeleken op vlak van dezelfde parameters en kan ook hier een conclusie uit getrokken worden. Deze conclusie vormt een aanvulling op de vergelijking van de verschillende wand- en vloeropbouwen. Door beide methoden te combineren kan men uiteindelijk de best scorende (bio-ecologische) muurvoet bepalen.

Voor elke opbouw worden de toegepaste materialen opgelijst en wordt de waarde van elke parameter bepaald. Deze waarde wordt omgerekend naar een procentuele waarde die weergeeft hoe slecht of hoe goed een bepaald materiaal scoort ten opzichte van de gemiddelde waarde van de gehele opbouw. Deze berekening wordt getoond in bijlagen 12 en 13. Dit wordt niet alleen gedaan op materiaalniveau maar ook op niveau van de wand- en vloeropbouw en de fundering. Zo kunnen de muurvoeten ook onderling procentueel vergeleken worden waarbij wordt aangegeven hoe slecht of hoe goed een bepaalde muurvoet scoort ten opzichte van het gemiddelde van alle bouwdetails. Via het overzicht in tabel 52 wordt bepaald welke opbouw of fundering het beste scoort. Dit wordt nogmaals verduidelijkt aan de hand van een kleurensysteem. Hierin worden de groene waardes als het beste beschouwd en de rode het slechtste. Daarna kan aan de hand van tabel in bijlagen 12 en 13 onderzocht worden waarom dit bouwdetail slechter scoort of welke aannames werden gemaakt.

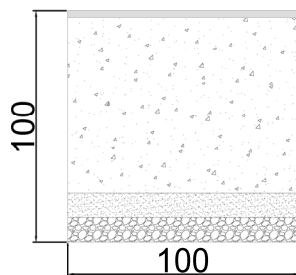
Voor de vergelijking worden de bouwdetails ingevoerd in TOTEM. Aangezien niet alle materialen aanwezig zijn in de bibliotheek van TOTEM of Nibe werden daarvoor enkele aannames gedaan. Deze worden vermeld in de tabel van bijlagen 12 en 13. Om te voldoen aan de opgelegde functionele eenheid moeten enkele aanpassingen worden doorgevoerd op de details om een correcte vergelijking te kunnen garanderen. Voor de wand- en vloeropbouw wordt dezelfde U-waarde aangehouden waardoor er een dikker isolatiepakket zal nodig zijn bij verschillende opbouwen. Deze aanpassingen worden getoond in bijlage 16.1 tot 16.7, waar het werkelijke detail naast het aangepaste wordt getoond. Voor de fundering wordt een gelijke diepte van 1m aangenomen waardoor de afmetingen van de lagen

procentueel moeten herwerkt worden. Deze worden getoond in figuur 59. De schroefpalenfundering heeft een verdere herwerking aangezien deze bestaat uit verschillende componenten naast en op elkaar bevestigd. Daarom wordt deze opgedeeld in twee onderdelen: één met het natuurstenen metselwerk en de houten verdeelbalk en één met de schroefpaal zelf. Dan wordt het procentueel aandeel berekend van elk van deze onderdelen. Hierbij neemt het eerste onderdeel 9% op en het tweede onderdeel, namelijk de schroefpaal, 91% omwille van zijn grote lengte. Volgens deze procentuele waarden worden dan de parameters meegerekend in de vergelijking.

(Alle cijferwaardes werden geraadpleegd in mei 2022.)

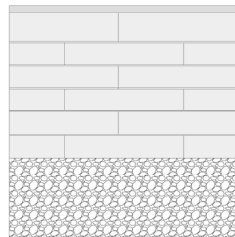
Betonnen stapelblokken

(MET of ZONDER leisteen)



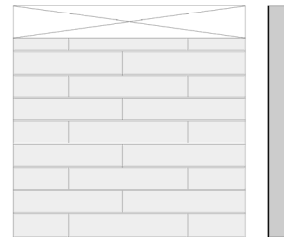
Rubble trench

(MET of ZONDER leisteen)

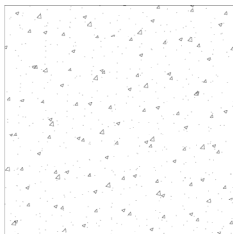


Schroefpaal

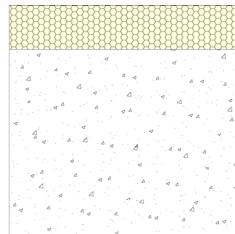
(Houten balk + natuursteen + schroefpaal)



Betonnen fundering



Betonnen fundering met cellenglas



Figuur 59: Opbouw funderingen in TOTEM (zie bijlage 16.8)

Overzicht Vergelijking									
Element	Totaal / gemiddelde	Nibe schaduwkost [€]	Nibe schaduwkost [%]	TOTEM Materiaalpunten [mPt/FE]	TOTEM Materiaalpunten [%]	Omkeerbaarheid [Pt]	Omkeerbaarheid [%]	Kost per jaar [€/m³] of [€/m³]	Kost per jaar [%]
Vergelijking wand en vloer									
Klassieke spouwmuur	Gemiddelde	€ 4,18		5,00		3,00	109,97%	€ 0,42	
	Totaal	€ 58,51	157,95%	55,05	142,64%			€ 5,81	58,83%
ETICS met betonnen fundering	Gemiddelde	€ 3,84		4,25		2,76	101,34%	€ 0,32	
	Totaal	€ 61,39	165,72%	51,04	132,25%			€ 5,38	54,42%
Houtskeletwand met betonnen fundering	Gemiddelde	€ 2,95		2,90		2,21	80,95%	€ 0,95	
	Totaal	€ 67,90	183,32%	52,14	135,11%			€ 22,73	230,08%
Strobalenwand - Bouwdetail 1	Gemiddelde	€ 1,11		2,47		2,14	78,55%	€ 0,50	
	Totaal	€ 12,17	32,86%	29,68	76,91%			€ 6,95	70,37%
Strobalenwand - Bouwdetail 2	Gemiddelde	€ 4,11		2,75		2,71	99,49%	€ 0,94	
	Totaal	€ 16,43	44,35%	19,26	49,91%			€ 6,57	66,47%
Stampaarde - Bouwdetail 1	Gemiddelde	€ 1,70		3,50		3,10	113,63%	€ 0,68	
	Totaal	€ 18,66	50,37%	35,04	90,79%			€ 6,76	68,40%
Stampaarde - Bouwdetail 2	Gemiddelde	€ 4,04		4,66		3,17	116,07%	€ 2,49	
	Totaal	€ 24,24	65,44%	27,94	72,40%			€ 14,96	151,44%
Fundering									
Klassieke spouwmuur	Gemiddelde	€ 8,82		19,50		4,00	169,11%	€ 8,38	
	Totaal	€ 17,63	20,14%	39,00	124,97%			€ 16,77	14,88%
	Gemiddelde	€ 4,00		14,70		2,20	93,01%	€ 5,84	
ETICS met betonnen fundering	Totaal	€ 19,98	22,82%	44,10	141,31%			€ 29,19	25,89%
	Gemiddelde	€ 15,70		45,00		4,00	169,11%	€ 12,76	
	Totaal	€ 15,70	17,94%	45,00	144,20%			€ 12,76	11,32%
Houtskeletwand met betonnen fundering	Gemiddelde	€ 84,36		3,32		2,17	91,60%	€ 59,26	
	Totaal	€ 506,19	578,26%	13,27	42,53%			€ 355,59	315,46%
	Gemiddelde	€ 3,30		6,28		1,43	60,40%	€ 12,92	
Strobalenwand - Bouwdetail 2	Totaal	€ 23,12	26,41%	25,10	80,43%			€ 90,43	80,23%
	Gemiddelde	€ 3,30		6,28		1,43	60,40%	€ 13,19	
	Totaal	€ 23,12	26,41%	25,10	80,43%			€ 92,31	81,89%
Stampaarde - Bouwdetail 1	Gemiddelde	€ 0,78		5,38		1,33	56,37%	€ 21,33	
	Totaal	€ 7,02	8,02%	26,88	86,13%			€ 192,01	170,34%

Tabel 52: Overzicht van de vergelijking van bouwdetails voor de muurvoet (zie bijlage 14)

6.2. Milieu-impact

6.2.1. Schaduwkosten

6.2.1.1. Wand en vloer

Wanneer we de wand- en vloeropbouwen vergelijken op vlak van schaduwkosten valt het op dat alle klassieke opbouwen hierin slecht scoren ten opzichte van de vier bio-ecologische bouwdetails. De reden hiervoor is de hoge schaduwkost van €15,70 van het beton.

Binnen de bio-ecologische bouwdetails scoren de strobalenwanden over het algemeen beter dan de stampaarde wanden. Strobale bouwdetail 1 verkrijgt hier de beste score. Dit is vreemd aangezien deze opbouw wel het meeste materialen bevat. Al deze materialen hebben echter een zeer lage schaduwkost. De stampaarde muren scoren meer dan 20% slechter dan strobale wand bouwdetail 1. De oorzaak hiervan is de hoge schaduwkost van stampaarde. Deze bedraagt €10,94 en is lager dan de schaduwkost van beton maar beduidend hoger dan de andere toegepaste materialen. De slechte score van de stampaarde heeft ook een invloed op strobale wand bouwdetail 2, waar dezelfde wandopbouw wordt gebruikt als strobale wand bouwdetail 1 maar de vloerafwerking bestaat uit stampaarde. Ook in stampaarde bouwdetail 2 is dit effect duidelijk zichtbaar. Dit bouwdetail scoort het slechtst van de vier bio-ecologische details doordat het zowel stampaarde in de wand als vloer bevat.

6.2.1.2. Fundering

Bij de vergelijking van de funderingen zien we een omgekeerde situatie ten opzichte van de conclusie bij de wand- en vloeropbouw. Hier scoren de klassieke bouwdetails over het algemeen beter dan de bio-ecologische varianten. Beide bouwdetails met strobale en het eerste bouwdetail van stampaarde scoren slecht door de hoge schaduwkost van kalksteen. De kalksteen werd aangenomen als de natuursteen. Deze kost moet wel genuanceerd worden aangezien men in Nibe een cementmortel meerekent terwijl wij gebruik maken van een kalkmortel. De schroefpaalfundering scoort het slechtst door de hoge schaduwkost van het staalprofiel. De fundering met de betonnen stapelblokken scoort daarentegen verrassend goed. De reden hiervoor zijn de lage schaduwkosten van het beton en de EPDM folie. In plaats van vers gestort, gewapend beton werd er hier gebruik gemaakt van betonsteen metselwerk met een beduidend lagere schaduwkost. Betonsteen metselwerk is een aanname die gemaakt werd aangezien de betonnen stapelblokken niet beschikbaar zijn in Nibe of TOTEM.

6.2.2. Materiaalpunten

6.2.2.1. Wand en vloer

In de analyse van de materiaalpunten uit TOTEM scoren de bio-ecologische versies van wand- en vloeropbouw opnieuw beter dan de drie klassieke details. De strobale wand bouwdetail 1 scoort van alle bio-ecologische details het slechtst. We nemen aan dat dit veroorzaakt wordt door de grote hoeveelheid materialen die worden gebruikt. Bouwdetail 2 bij stampaarde scoort slechter door de grotere dikte van de stampaarde muur en doordat er ook met stampaarde in de vloer wordt gewerkt. Door de hoge waarde van de materiaalpunten voor stampaarde lopen de materiaalpunten in dit detail hoog op.

Bij de klassieke bouwdetails scoort de spouwmuur duidelijk het slechtst, zeker bij de vloeropbouw. Dit is vreemd aangezien men in beide andere klassieke details ook gebruik maakt van beton en harde keramische tegels die een hoge waarde aan materiaalpunten hebben. Het is echter de PUR-isolatie in de vloer die even slecht scoort als het gewapend beton in de vloer en daardoor een negatieve invloed heeft. Dit is verrassend hoog, zeker in vergelijking met de andere isolatiematerialen.

6.2.2.2. Fundering

In het onderdeel fundering scoort vooral de schroefpaal zeer goed. Er moet hier wel worden opgemerkt dat er in TOTEM gebruik gemaakt werd van een stalen profiel met een maximale lengte van één meter. Daarnaast maakt men in dit detail ook geen gebruik van leien. We vermoeden dat hierdoor de waarde van de materiaalpunten veel lager ligt.

De veel hogere score van de andere bio-ecologische bouwdetails is te wijten aan de kalksteen in cementmortel en de leien. In onze bouwdetails werd er aangeraden met kalkmortel te werken, aangezien dit niet beschikbaar is in TOTEM werd er gebruik gemaakt van cementmortel. Ook hier gebruiken we kalksteen als natuursteen. Bij bouwdetail 2 van stampaarde zorgen de betonnen elementen voor de hoge score. De EPDM folie heeft daarentegen wel een veel lagere score dan de leistenen. Indien er echter gebruik gemaakt wordt van hergebruikte materialen kunnen de materiaalpunten aanzienlijk dalen. Als de betonblokken hergebruikt worden ex-situ dalen de materiaalpunten met 50%. Indien de kalksteen ex-situ wordt hergebruikt dalen de materiaalpunten met 30%. Als de leisteen hergebruikt wordt ex-situ dalen de materiaalpunten met 35%. Al deze aanpassingen geven significante verschillen, het is dus inderdaad vele malen beter om met hergebruikte materialen te werken. Dit werd ook eerder aangehaald in deze thesis.

Bij de klassieke details scoort de HSK het slechtst. Dit komt doordat er hier gerekend werd met één kubieke meter beton. Bij de twee andere klassieke details werd er steeds een laag cellenglas meegerekend. De ETICS optie scoort hier slechter dan de spouwmuur doordat men nog een grinddrainage plaatst naast de muurvoet.

6.2.3. Omkeerbaarheidsindex

6.2.3.1. Visuele weergave

In onderstaande tekeningen, zie figuur 60 en bijlagen 17.1 tot 17.7, wordt op een grafische manier de omkeerbaarheidsindex getoond van de verschillende elementen uit de bouwknopen. Deze index wordt uit TOTEM gehaald en bestaat uit vier categorieën, aangeduid door een kleur gaande van rood naar groen.

- Rood [4]: Niet omkeerbare verbinding
- Oranje [3]: Omkeerbare verbinding met niet-herstelbare schade
- Geel [2]: Omkeerbare verbinding met lichte herstelbare schade
- Groen [1]: Omkeerbare verbinding

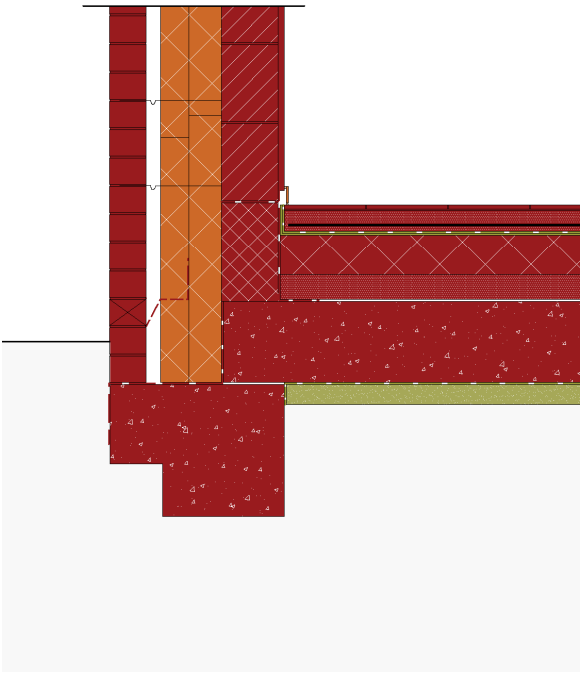
Zo kan geanalyseerd worden welke materialen met een omkeerbare verbinding geplaatst zijn en daardoor na zijn levensduur kunnen afgebroken en hergebruikt worden zonder bijkomende schade. Tegelijk kan zo ook bekeken worden of er materialen met een omkeerbare verbinding geplaatst werden achter of onder een materiaal zonder omkeerbare verbinding. Dit kan een zorgvuldige afbraak van het gebouw voor hergebruik bemoeilijken en moet daarom zo veel mogelijk vermeden worden. Het is dan ook aangeraden om waar het kan de verbinding van materialen zo omkeerbaar mogelijk te maken. Voor deze tekeningen worden de basisbouwdetails aangewend in plaats van de aan TOTEM aangepaste bouwdetails aangezien deze index toepasbaar is op niveau van het materiaal en niet afhankelijk van de functionele eenheid.

In de details zien we het volgende. Het valt op dat vooral bij de strobale details veel meer verbindingen omkeerbaar zijn. De stampaardedetails scoren even goed als de HSK. Bij de klassieke spouwmuur en de ETICS zijn bijna alle verbindingen onomkeerbaar.

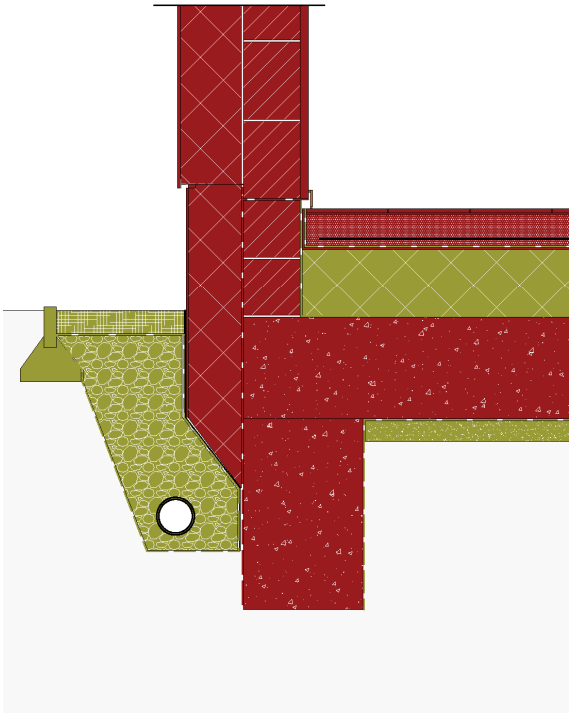
MUURVOET SPOUWMUUR

LEGENDE
Omkeerbaarheidsindex

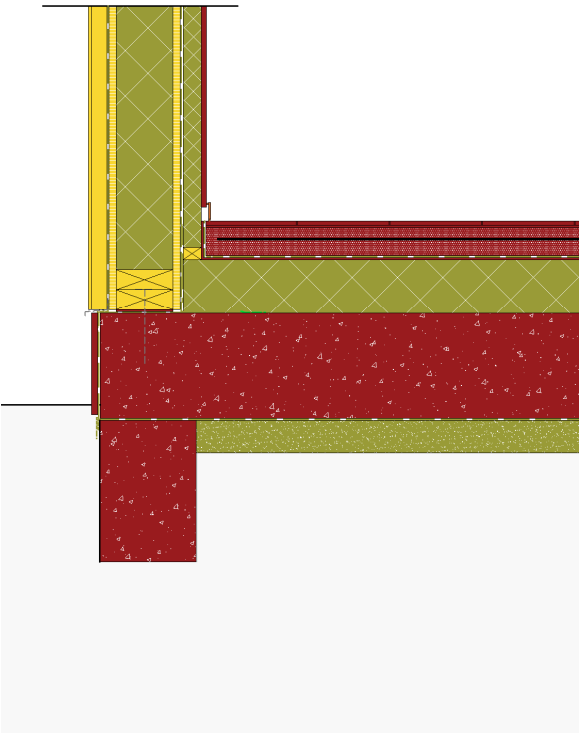
	4
	3
	2
	1



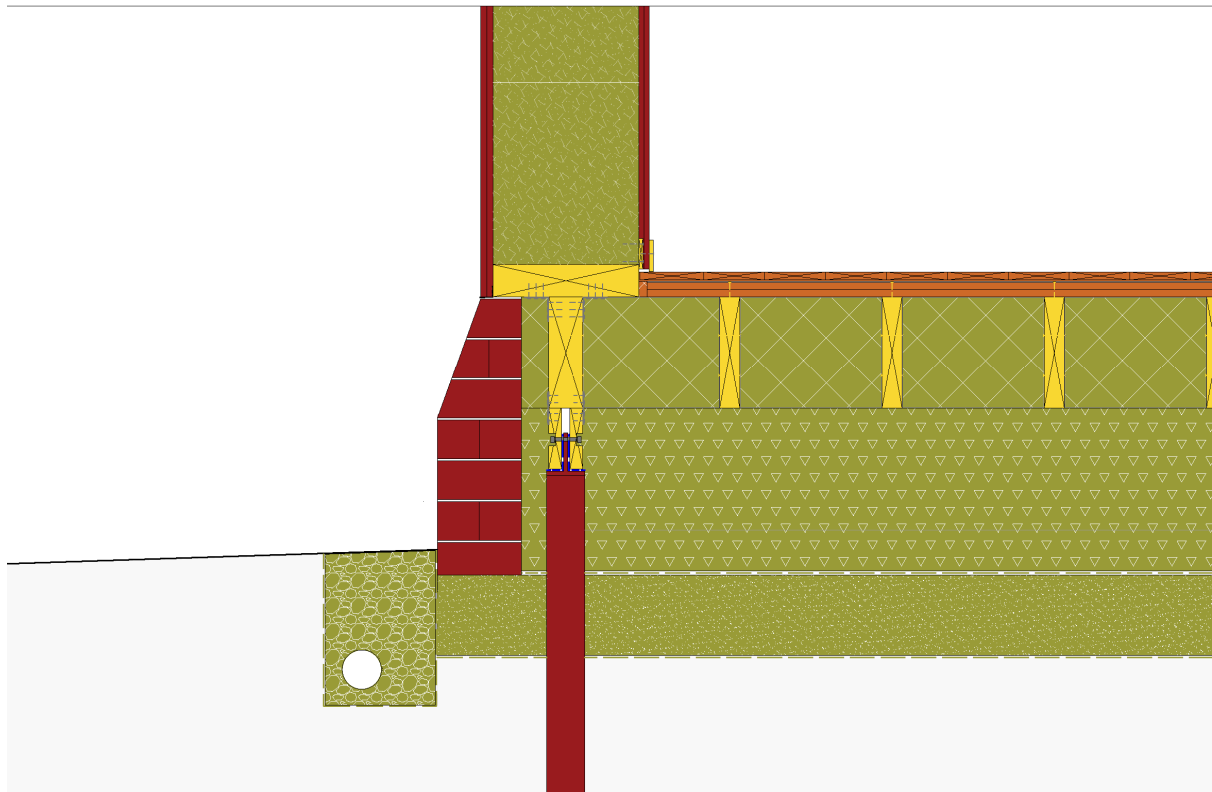
MUURVOET ETICS



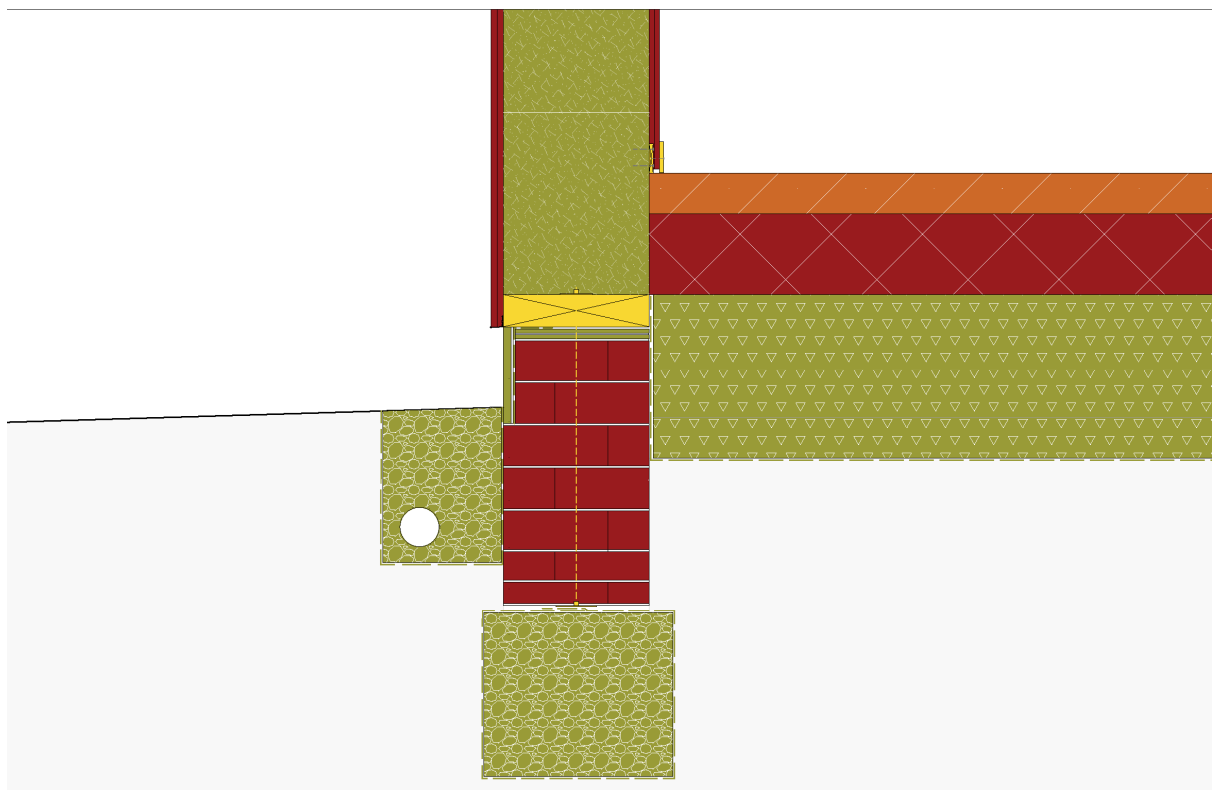
MUURVOET HOUTSKELETBOUW



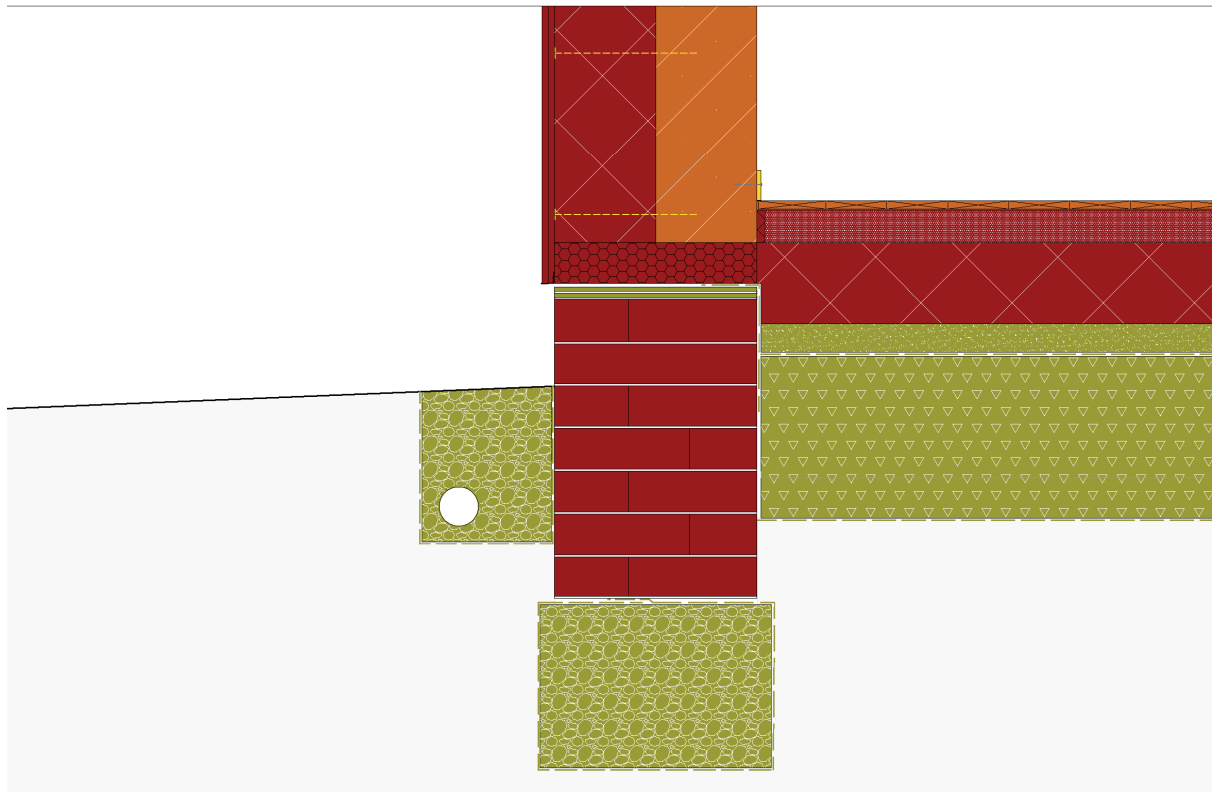
MUURVOET STROBALEN 1



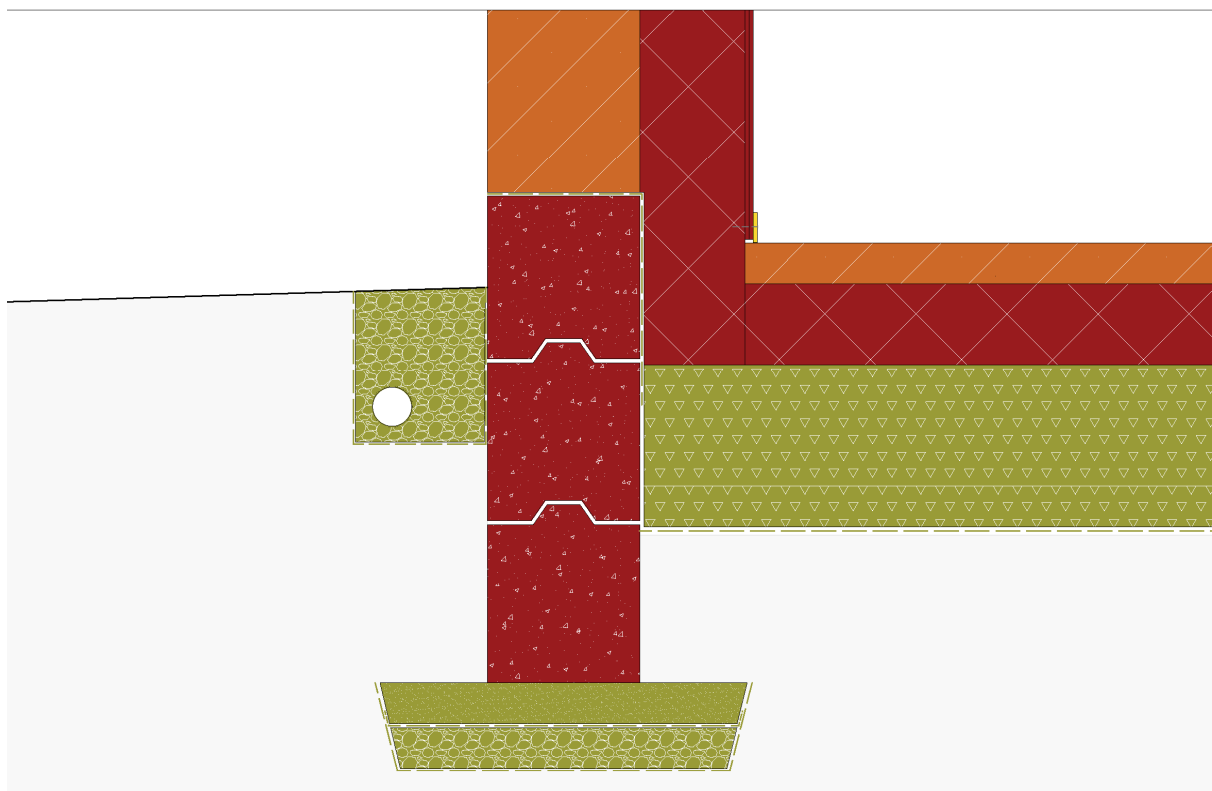
MUURVOET STROBALEN 2



MUURVOET STAMPAARDE 1



MUURVOET STAMPAARDE 2



Figuur 60: Omkeerbaarheid van materialen: visuele weergave op muurvoeten (zie bijlagen 17.1 tot 17.7))

6.2.3.2. Wand en vloer

Voor deze parameter scoren de gewone HSK en bouwdetail 1 van de stobalen het beste. De HSK scoort iets slechter door zijn betonnen vloeropbouw. Bouwdetail 1 van de stobalen scoort hier goed omdat zowel vloer en wand uit een houtskeletstructuur bestaan.

Over het algemeen lijken de klassieke opbouwen beter te scoren dan de bio-ecologische details. Alle details waar stampleem wordt toegepast (dit zijn beide bouwdetails van stampleem en stobalenbouw bouwdetail 2) verkrijgen een zeer slechte score doordat in TOTEM gebruik gemaakt moet worden van gelijmde stampleem blokken. Hierdoor is de verbinding niet meer omkeerbaar. In de bio-ecologische details met stampaarde wordt er echter gewerkt met gestampde aarde en wordt er dus geen lijm of ander bindmiddel gebruikt. We verwachten dus dat deze bouwdetails in realiteit beter zullen scoren en eerder een gele kleur zullen krijgen wanneer de juiste materialen en technieken worden aangenomen. Daarnaast scoort de kalkhennep isolatie slecht omdat ook deze wordt gelijmd. Dit is effectief zo geïmplementeerd in de bio-ecologische details maar kan worden opgelost door losse vlokken kalkhennep isolatie te gebruiken. Hierbij moet men dan wel gebruik maken van een houten roostering om de vlokken bij elkaar te houden. Indien dit wordt toegepast op de muur zorgt de houten roostering ervoor dat de vlokken op hun plaats blijven zitten en niet naar beneden uitzakken. Door het grotere materiaalgebruik hebben we dit niet toegepast in onze details maar dit is zeker mogelijk.

6.2.3.3. Fundering

Voor de omkeerbaarheid van de fundering scoren de bio-ecologische details opnieuw beter. Alle klassieke details maken gebruik van beton waardoor de verbinding niet meer als omkeerbaar wordt beschouwd in TOTEM. De ETICS fundering scoort opmerkelijk beter dan de andere. Dit komt door de aanwezigheid van de grinddrainage aangezien grind in TOTEM wordt gezien als een materiaal waarvan de verbinding totaal omkeerbaar is en de gemiddelde waarde van de omkeerbaarheidsindex per opbouw wordt gebruikt.

Het verschil tussen de Rubble trench fundering (bouwdetail 2 bij stobalen en bouwdetail 1 bij stampaarde) en de fundering met stapelblokken uit beton (bouwdetail 2 bij stampaarde) is klein. Indien men in figuur 60 kijkt naar beide types, ontdekt men dat beide funderingen slechts één onomkeerbare verbinding hebben en dat alle andere verbindingen omkeerbaar zijn. Aangezien de fundering met betonnen stapelblokken meer elementen vraagt, weegt de enkele onomkeerbare verbinding minder door.

Hierbij willen we nog enkele opmerkingen maken. In TOTEM werd gebruik gemaakt van cementmortel terwijl wij spreken van traskalkmortel. Traskalkmortel heeft een minder destructief effect op de natuursteen dan cementmortel waardoor de natuursteen makkelijker kan worden gerecupereerd. Daarnaast werden de betonblokken in TOTEM verlijmd terwijl ze in onze bouwdetails los op elkaar liggen. Hierdoor zal de verbinding wel omkeerbaar zijn en zullen ze dus groen scoren in plaats van rood.

6.3. Levensduur

De levensduur wordt bepaald via TOTEM en wordt ook samengevat in figuur 61 en bijlagen 17.1 tot 17.3 en 17.8 tot 17.11. Hierin worden de bouwdetails getoond met een kleurenindex. Hoe donkerder de kleur, hoe langer de levensduur van het materiaal is. Deze index gaat van 60 jaar tot 10 jaar, zie de legende bij figuur 61. TOTEM definieert de levensduur van materialen in verschillende categorieën van materialen. Zo kunnen we de levensduur van materialen die niet beschikbaar zijn in de TOTEM bibliotheek bepalen door te kijken naar de levensduur van materialen binnen dezelfde categorie. Voor deze tekeningen worden, zoals bij de losmaakbaarheidsindex, de basisbouwdetails aangewend.

Met deze tekeningen kunnen we op een grafische manier zien of de materialen met een korte levensduur niet geplaatst worden achter materialen met een langere levensduur. Dit is nadelig aangezien bij vervanging van het materiaal met de kortere levensduur ook het materiaal met de langere levensduur moet worden afgebroken en heropgebouwd of vervangen. Dit brengt naast een grote extra kost bijgevolg ook extra materiaalverspilling met zich mee.

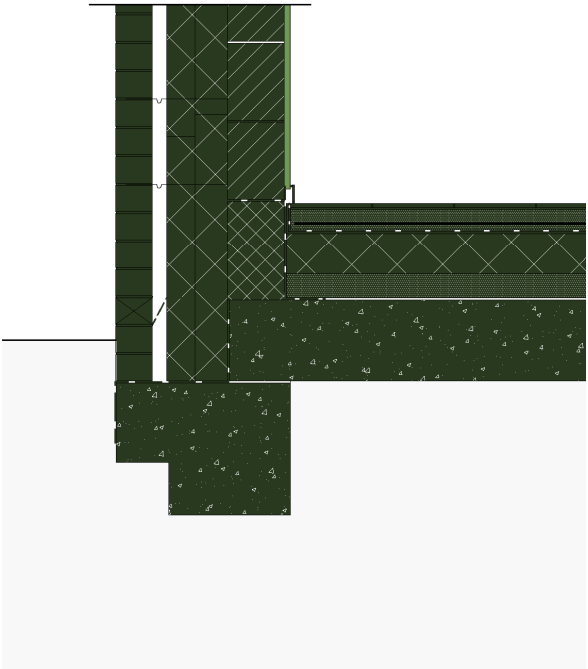
Wanneer we de tekeningen bekijken zien we dat de spouwmuur zeer goed scoort op vlak van levensduur. Alle materialen buiten de afwerking aan de binnenzijde hebben een levensduur van 60 jaar. Daarnaast is het ook makkelijk om de afwerking te vervangen zonder andere elementen te beschadigen. Bij de andere twee klassieke details zitten de materialen met een kortere levensduur steeds langs de buitenkant. Op deze manier kunnen deze materialen probleemloos worden vervangen wanneer nodig.

Bij de vier bio-ecologische details vormen de muuropbouwen geen probleem op vlak van levensduur. Ook hier moet enkel de afwerking worden vervangen tijdens de volledige levensduur van het gebouw. Stampleem krijgt in TOTEM slechts een levensduur van 50 jaar. Volgens verschillende bronnen die werden geraadpleegd voor dit onderzoek was er echter sprake van een levensduur van minstens 57-60 jaar zoals werd besproken in 4.4.10. *Durability en EOL*. De opbouw van de vloer kan daarentegen wel tot problemen leiden indien men de kalkhennep achter een materiaal met een levensduur langer dan 50 jaar steekt zoals het geval is bij de plankenvloer in bouwdetail 1 bij stamperde.

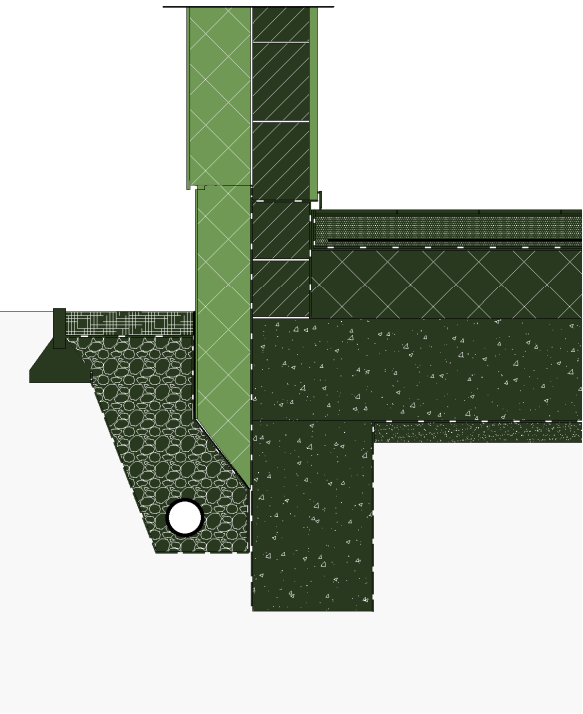
MUURVOET SPOUWMUUR

LEGENDE
Levensduur van materialen

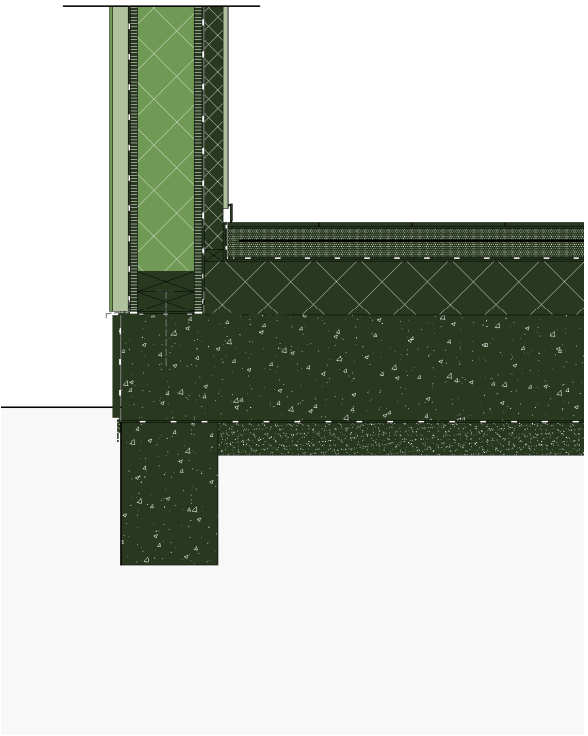
	60 jaar
	50 jaar
	40 jaar
	30 jaar
	20 jaar
	10 jaar



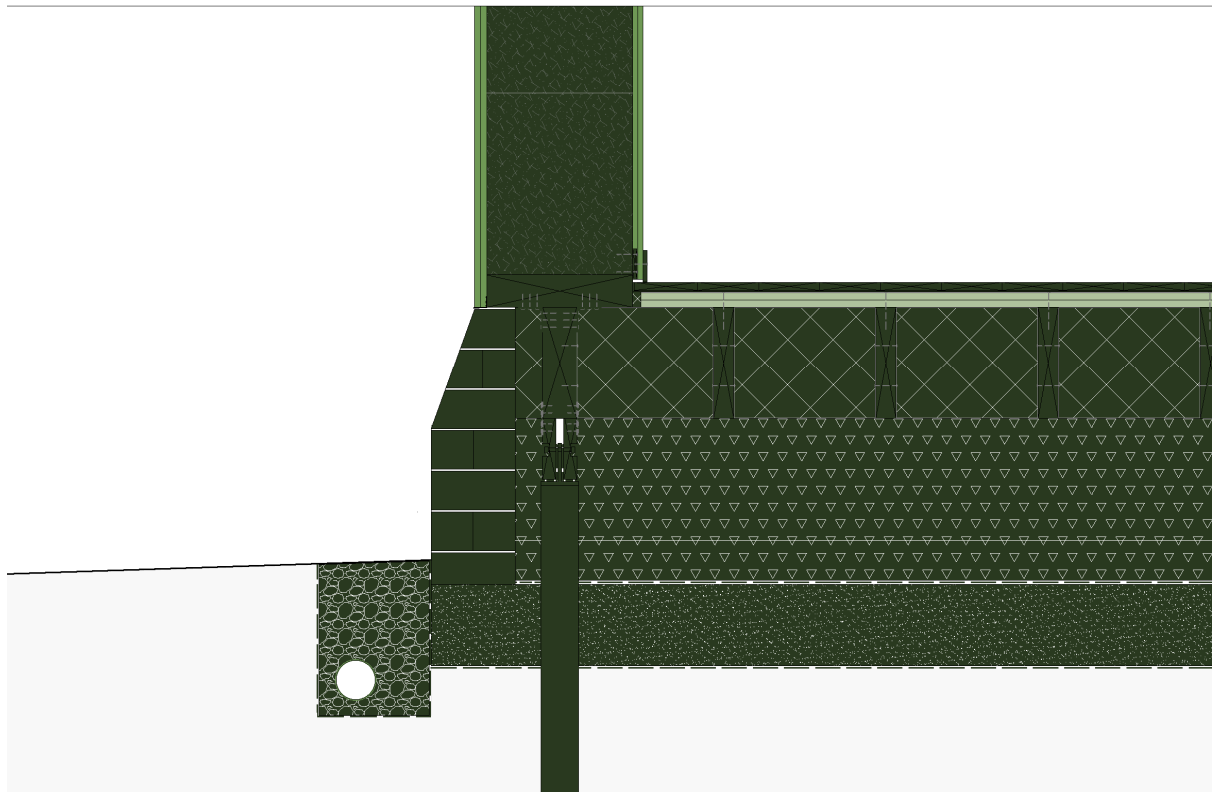
MUURVOET ETICS



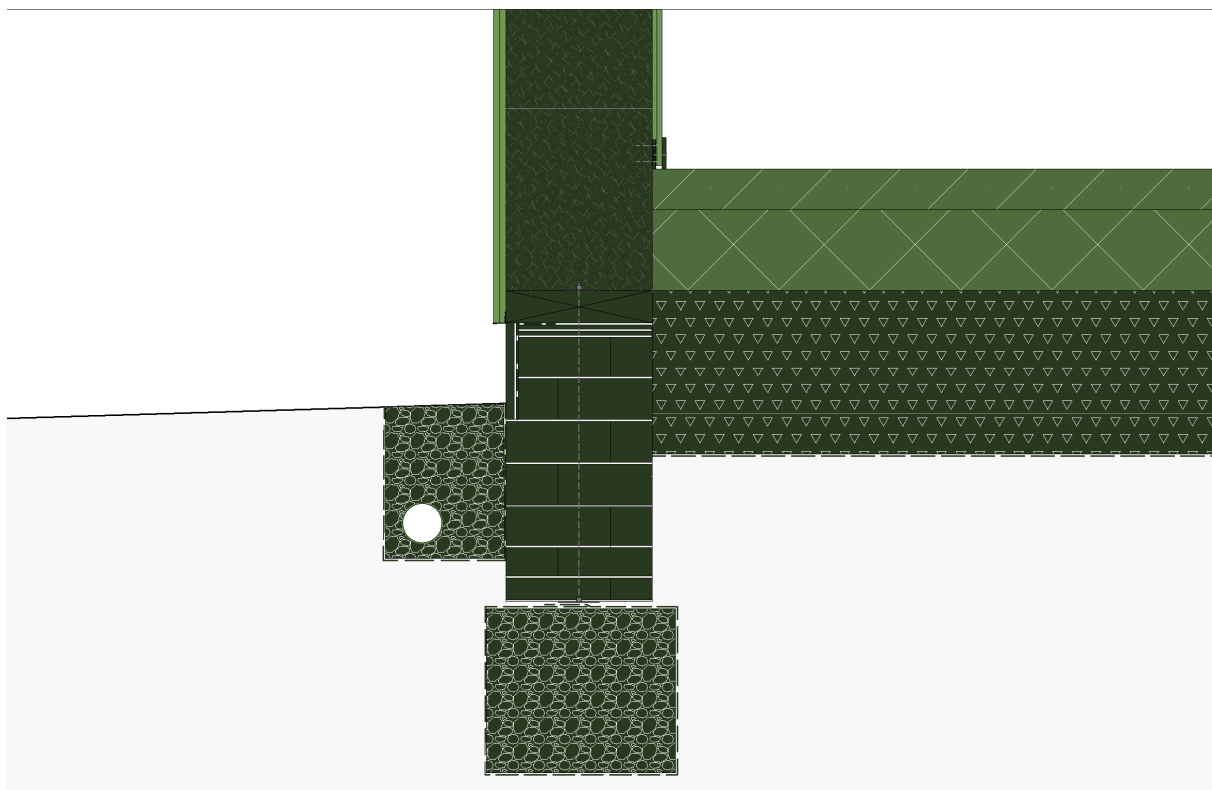
MUURVOET HOUTSKELETBOUW



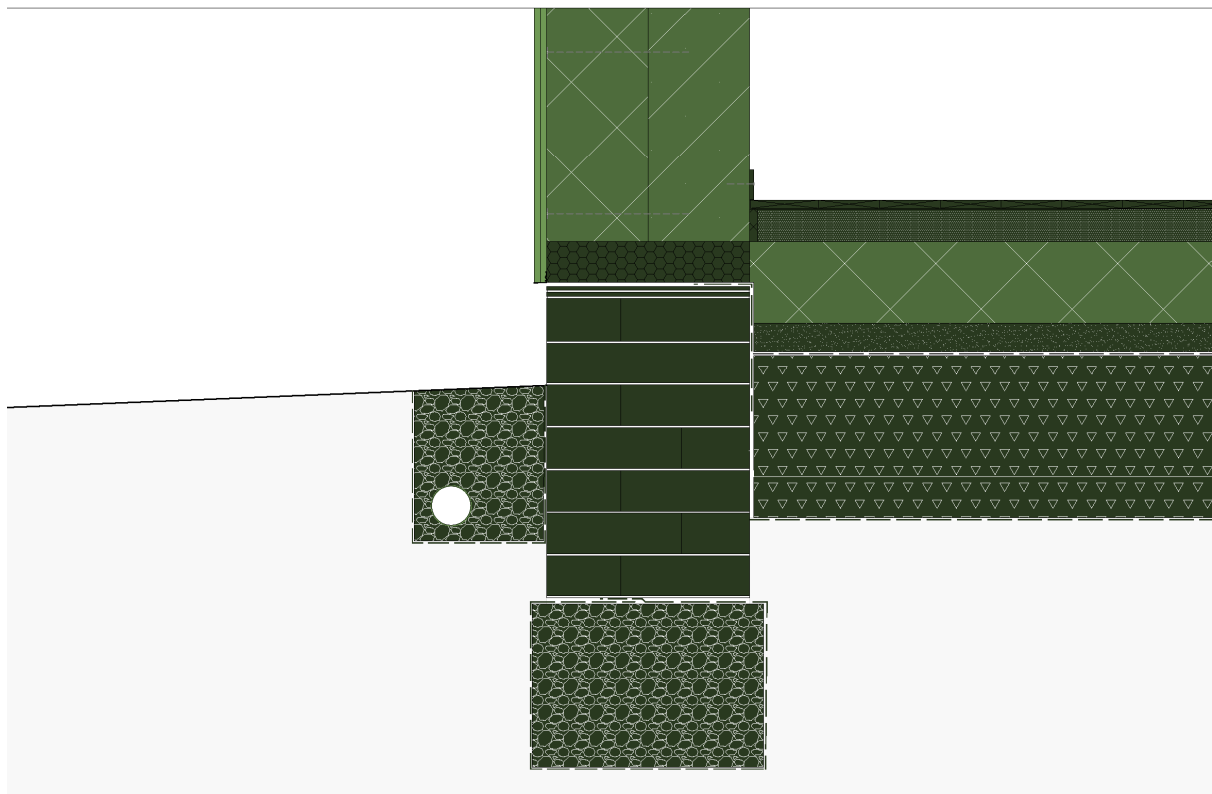
MUURVOET STROBALEN 1



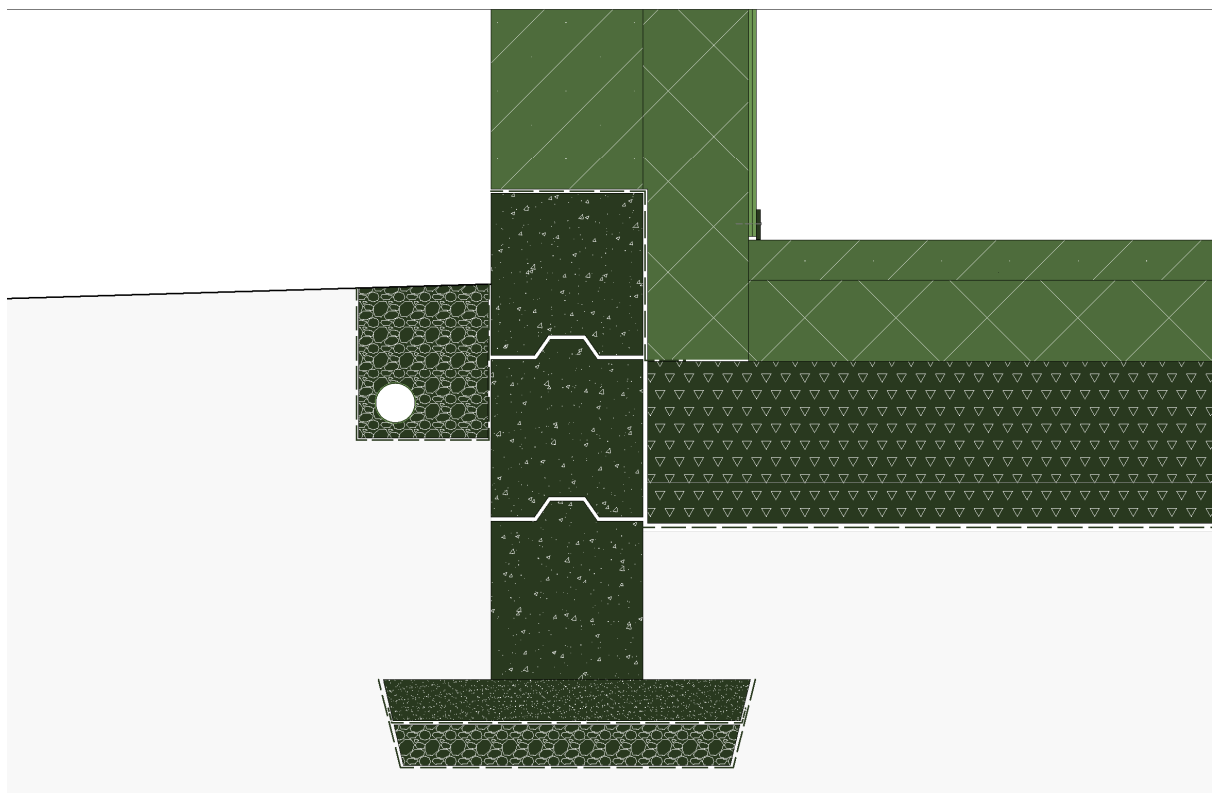
MUURVOET STROBALEN 2



MUURVOET STAMPAARDE 1



MUURVOET STAMPAARDE 2



Figuur 61: Levensduur van materialen: visuele weergave op muurvoeten (zie bijlagen 17.1 tot 17.3 en 17.8 tot 17.11))

6.4. Kost per jaar

De prijs van de materialen werd gebaseerd op de prijzen van verschillende producenten. Deze prijzen werden geraadpleegd in mei 2022 en zijn dus onderhevig aan verandering. Een overzicht van de verschillende gebruikte sites is te vinden in bijlage 15. Aan de hand van de levensduur van de materialen en de gemiddelde levensduur van een gebouw, 60 jaar, wordt de kost van de materialen berekend per jaar. Zo wordt de prijs van een materiaal met een levensduur van 30 jaar twee keer meegerekend.

6.4.1. Wand en vloer

De prijs voor de materialen uit de wand- en vloeropbouwen werd berekend per vierkante meter. De spouwmuur en de ETICS-wand scoren hier duidelijk het best. De bio-ecologische details scoren slechter aangezien er meer materialen vervangen moeten worden tijdens de levensduur van het gebouw, onder andere de kalkhennep isolatie en de stampleem. Hierbij moet wel bemerkt worden dat TOTEM uitgaat van een lagere levensduur van stamperde dan werd bekomen uit eerder vermelde onderzoeken. Zo werd er daar een levensduur langer dan 60 jaar bekomen terwijl TOTEM uitgaat van 50jaar. Voor de bio-ecologische details scoren de strobale wanden het best aangezien deze niet moeten vervangen worden. Bouwdetail 2 van stamperde scoort vele malen slechter dan bouwdetail 1 aangezien men hier werkt met een veel groter volume aan stamperde. De HSK is zeer duur door de grote hoeveelheid aan materialen.

6.4.2. Fundering

De prijs van de fundering werd berekend per kubieke meter. Ook hier zijn de klassieke details vele malen goedkoper dan de bio-ecologische varianten. Dit komt door de hoge prijs van de leistenen en de kalksteen. De fundering met ETICS scoort slechter doordat er hier gewerkt wordt met een bijkomende grinddrainage. Detail 1 van de strobale wand scoort duidelijk het slechtst. Dit komt door de hoge prijs van de schroefpaal. We willen wel opmerken dat het hier de aangenomen prijs voor één kubieke meter schroefpaal betreft, omwille van de aanname die werd gedaan waardoor de prijs zeer hoog is. De betonnen stapelblokken scoren ook negatief, dit komt door de hoge prijs van de EPDM folie. We willen hierbij opmerken dat dit een prijs per kubieke meter is. Als de prijs per vierkante meter wordt vergeleken tussen EPDM en leien ligt de prijs van de EPDM veel lager, respectievelijk €13,69 en €120.

6.5. Conclusie

Voor de uiteindelijke conclusie en de vergelijking van de wand- en vloeropbouw samen met de fundering maken we gebruik van een puntensysteem. De kleuren die werden weergegeven in tabel 53 krijgen elk een bijhorende waarde. Groen krijgt één punt, geel twee, oranje drie en een rood vak krijgt vier punten. Op deze manier wordt op een eenvoudige wijze duidelijk welke opbouw, welke fundering en welke combinatie het best scoort. Om de vergelijking te vervolledigen werden ook de variaties op het bouwdetail toegevoegd. Hierbij moet worden opgemerkt dat er gewerkt wordt met de punten van het bouwdetail dat hier het meest op leek. Dit aangezien er in de variaties ook opbouwen werden toegepast die niet in de vergelijking werden meegenomen. Indien er grote verschillen waren werd er een extra punt toegevoegd.

Score			
Bouwdetail	Score wand en vloer	Score fundering	Totaal score
Klassieke spouwmuur	12	10	22
ETICS	10	11	21
Houtskelet	12	11	23
Strobalen wand bouwdetail 1	6	12	18
Strobaal 1b	6	10	16
Strobaal 1c	6	8	14
Strobalen wand bouwdetail 2	7	10	17
Strobaal 2b	7	8	15
Stampaarde wand bouwdetail 1	10	10	20
Stampaarde 1b	10	10	20
Stampaarde 1c	9	8	17
Stampaarde wand bouwdetail 2	12	8	20
Stampaarde 2b	12	10	22

Tabel 53: Score van de verschillende bouwdetails op basis van kleurencode

Wanneer we enkel naar de wand- en vloeropbouw kijken scoren de vier bio-ecologische details duidelijk beter op vlak van schaduwkosten en materiaalpunten. De omkeerbaarheid van de bio-ecologische details blijkt nu minder goed te zijn maar zal waarschijnlijk een betere score verkrijgen indien men uitgaat van stampaarde in plaats van gelijmde blokken stampleem. Vanwege deze bedenking nemen we aan dat de bio-ecologische opbouwen inderdaad beter scoren dan de klassieke details op vlak van sustainability. Dit voordeel wordt teniet gedaan door de kostprijs. Wat logisch is aangezien in de bio-ecologische details gebruik gemaakt werd van eerder onbekende materialen die nog niet breed beschikbaar zijn op de Belgische of Europese markt. Binnen de bio-ecologische details scoren de strobalen opbouwen beter dan die met stampaarde maar opnieuw wordt dit deels veroorzaakt doordat er gewerkt is met gelijmde stampleem blokken. Voor de opbouw van een strobalenwand zal er effectief minder productie-energie nodig zijn en zal ook de uitstoot door transport een lagere waarde aannemen door de lagere massadichtheid van het stro tegenover de stampaarde. Toch scoort stampaarde nog steeds vele malen beter dan de klassieke spouwmuur.

Indien we enkel naar de fundering kijken, dan scoren de bio-ecologische varianten maar net beter dan de klassieke betonnen fundering. De fundering met betonnen stapelblokken vormt hier een uitzondering op. Deze laatste scoort vooral zeer goed bij de schaduwkosten aangezien hier gebruik werd gemaakt van prefab betonsteenmetselwerk en een EPDM folie. Voor de parameters materiaalpunten en omkeerbaarheid scoren de bio-ecologische details in het algemeen wel beter. Ook

hier vormt de prijs van de bio-ecologische details een struikelpunt. Vooral de leien en de kalksteen doen de prijs hoog oplopen. De conclusie is over het algemeen hier moeilijker te maken maar toch is het wel duidelijk dat de schroefpalenfundering geen goede keuze is. Hierbij willen we nogmaals melden dat de methode voor het vergelijken van de fundering experimenteel is en dat deze dus onzuiverheden kan bevatten door het gebruik van de aannames.

Indien we kijken naar de beste combinaties voor de muurvoet zijn dit de opbouwen van strobalenbouw met een betonnen stapelblokkenfundering. Hierna komen de andere details met strobale en een Rubble trench fundering. Bij stampaarde scoort detail 1 en zijn varianten beter dan detail 2 aangezien hier minder stampaarde voor werd gebruikt. Ook hier geldt de combinatie met de betonnen stapelblokken fundering als beste optie, gevolgd door een Rubble trench fundering. De combinaties met de betonnen stapelblokken komen hier nu zeer positief naar voren maar indien de leien en kalksteen van de Rubble trench funderingen zouden worden hergebruikt zullen deze een betere score verkrijgen en een evenwaardige optie vormen.

We kunnen hiermee stellen dat de bio-ecologische varianten beter scoren dan de eerder klassieke details en dat ze daarom meer in de kijker zouden moeten gezet worden. Toch is er nog steeds nood aan een verdere uitbreiding van kennis over deze materialen, niet alleen op het niveau van onderzoek maar ook in toepassingen zoals Nibe en TOTEM om op die manier de vergelijking op punt te kunnen zetten zonder aannames te moeten doen.

7. CONCLUSIE

Het doel van deze thesis was het onderzoeken van de mogelijkheden van bio-ecologisch bouwen en hieruit een alternatieve detaillering ontwerpen voor de muurvoet. De reden hiervoor is het grote aandeel van de bouwsector in de CO₂-uitstoot en energieverbruik van Europa en zijn daardoor niet sustainable karakter. Er is nood aan verandering maar deze komt traag op gang door het gebrek aan kennis en praktijkervaring. Deze thesis wil dan ook een aanzet zijn voor verder onderzoek en implementatie van bio-ecologisch bouwen. Want alleen door verder onderzoek en door het onder de aandacht brengen van de mogelijkheden kunnen concepten als deze hun weg naar het grote publiek vinden en onderdeel worden van de standaardpraktijk.

De definitie van een bio-ecologisch materiaal werd als volgt besproken:

“Een bouw materiaal dat bestaat uit (quasi) onuitputtelijke natuurlijke basisgrondstoffen, met zo weinig mogelijk of zonder chemische toevoegstoffen, zonder zware milieubelasting en zonder schadelijke gevolgen voor de menselijke gezondheid.”¹

Bio-ecologische materialen bestaan met andere woorden uit: bio-based materialen (hernieuwbare of teelbare materialen en ruim aanwezige mineralen of grondstoffen), restproducten die niet schadelijk zijn voor de menselijke gezondheid en hergebruikte materialen.

Er werd onderzoek gedaan naar de beschikbaarheid van deze materialen op de Belgische markt. Waarbij ze beoordeeld werden op verschillende parameters zoals locatie, omkeerbaarheid, chemische bewerkingen en hun score in Nibe (milieuclassificatie) en TOTEM (materiaalpunten). Op basis van deze parameters, die per materiaalcategorie verschillend zijn, werden de materialen al dan niet aanvaard als bio-ecologisch materiaal binnen de context van België. Dit uitte zich in de functietabel waar voor elk materiaal de verschillende functies werden aangegeven en zo een tool vormt voor het gebruik van deze materialen. Uit dit onderzoek bleek dat er een vrij groot aanbod is aan deze materialen waaronder ook enkele relatief onbekende materialen die nu nog in beperkte mate op de markt zijn. Het gevolg van deze onbekendheid en lage productienummers is dat er vaak weinig onderzoek beschikbaar is over de materialen en men moet terugvallen op informatie gegeven door de fabrikant of uitvinder. Hierdoor zijn de karakteristieken en gedragingen niet altijd scherpgesteld en moet er gesteund worden op aannames en ervaringen van gebruikers en fabrikant.

Er is niet alleen verder onderzoek nodig naar bio-ecologische materialen maar ook specifiek naar het effect van chemische bewerkingen, die uitgevoerd worden voor bijvoorbeeld de bescherming tegen schimmel of brand, op vlak van milieu-impact alsook hun CO₂-uitstoot of -opname en eventuele schaarste die zich kan voordoen bij grote vraag naar het product. Deze vragen werden kort behandeld in deze thesis maar hebben nood aan verdere analyse. Zo kan de keuze van materialen verder verfijnd worden of uitgebreid.

We bekijken de muurvoet als onderzoeksvoorwerp omwille van zijn specifieke situatie. Het is namelijk onderhevig aan vocht. In de standaardpraktijk wordt deze problematiek aangepakt door de toepassing van materialen als beton en veelvuldig gebruik van membranen. Beide materialen worden niet beschouwd als bio-ecologisch waardoor de noodzaak voor een alternatief zich opdringt. Het is echter niet evident om deze problematiek op te lossen met bio-ecologische, voornamelijk bio-based materialen, aangezien zij niet dezelfde vochtwerende karakteristieken bezitten en hier gevoelig aan zijn. In deze thesis werden hiervoor enkele oplossingen voorgelegd in de bouwdetails met bio-ecologische materialen maar werd ook duidelijk dat een membraanloze muurvoet nog niet volledig gerealiseerd kan worden. Wel kan dit aandeel voor het overgrote deel verlaagd worden door de toepassing van materialen als leien (natuurstenen), grind en schelpen alsook door dampopen te bouwen.

Dampopen bouwen laat het transport van lucht en water toe doorheen de constructie-elementen. Dit zorgt voor een ademend binnenklimaat waardoor er een natuurlijke vocht- en warmteregulering ontstaat.¹¹ Hierbij gelden enkele voorwaarden waar rekening mee dient gehouden te worden. Zo mogen er geen dampdichte materialen gebruikt worden in de afwerking, moeten alle materialen dampopen zijn zodat vocht goed getransporteerd kan worden en moet daarbij verzekerd worden dat de materiaalkarakteristieken niet beïnvloed worden door het vochttransport.

Er werden twee bouwmethoden aangewend als basis voor de bouwdetails, voortkomend uit het materialenonderzoek en heersende hedendaagse interesse. Dit werden stampaarde en strobalembouw. Beide methoden komen steeds meer op de voorgrond van onderzoek en toepassing maar missen Belgische normeringen en standaarden. Daarom werd er gekeken naar buitenlandse normeringen voor de toepassing van deze materialen en hun kenmerken. Voor strobalembouw was dit Frankrijk, Nederland en Duitsland, voor stampaarde was dit Nieuw-Zeeland, Australië en Afrika. Het is duidelijk dat het allebei interessante materialen zijn voor de constructie van een gebouw. Dit blijkt dan ook uit de analyse op vlak van sustainability in TOTEM waar ze beiden een positieve score verkrijgen ten opzichte van standaardproducten. Maar ze ondervinden wel enkele beperkingen door hun kleinere capaciteit op vlak van stabiliteit. Hierdoor worden er limieten opgelegd op de bouwhoogte en verkrijgen ze grote diktes in muur en vloer. Zo varieert een stampardemuur van 250mm tot zo'n 450mm, afhankelijk van de toepassingseisen. Verder onderzoek, dat leidt tot het vormen van een Belgische normering voor deze materialen, is wat deze materialen nodig hebben om te kunnen behoren tot de standaardpraktijk. Momenteel moet er dan ook voornamelijk gesteund worden op praktijkervaringen van doe-het-zelvers en een (te) beperkt aantal deskundigen wanneer men deze producten zelf wil toepassen waardoor men vaak gelimiteerd is. Architecten, bouwdeskundigen etc kunnen vaak nog te weinig kunnen terugvallen op expertise en normering waardoor de toepassing ervan gelimiteerd wordt.

Voor beide bouwmethoden werden twee basisbouwdetails voor de muurvoet uitgewerkt die verder geanalyseerd en vergeleken zullen worden. Op elk van deze basisdetails werden ook enkele varianten gemaakt door toepassing van andere afwerkingen, funderingen, materialen of combinaties. Het wordt zo duidelijk dat er vele opties zijn waardoor men afhankelijk van eigen noden en eisen, zoals bijvoorbeeld dikte, milieu-impact, afwerkingsgraad etc., de best mogelijke optie kan toepassen.

Tijdens dit onderzoek werden enkele vooroordelen doorbroken over deze bouwmethoden. Zo is het een ongegronde stelling dat strobalembouw niet bestand is tegen ongedierte of brand. Strobalembouw zijn hier op zichzelf wel gevoelig aan maar door de juiste verwerking en toepassing alsook de juiste opbouw worden deze gevoeligheden vereffend en vormt het een degelijke en veilige constructie. Ook bij stampaarde heerst er onzekerheid over de erosiegevoeligheid en daardoor ook de stabiliteit van het materiaal. Stampaarde is inderdaad onderhevig aan erosie door water en andere klimatologische omstandigheden. Daarom worden er verschillende maatregelen genomen bij de uitvoering van een stampaarde constructie om deze te beschermen maar ook te verstevigen. Dit kan door toepassing van een dakoversteek, een sokkel en een oppervlaktebescherming. In deze laatste categorie zijn er verschillende mogelijkheden zoals pleister, olie of stenen. Wanneer men deze voorzorgsmaatregelen neemt en zich houdt aan het nodige onderhoud, vormt deze erosie geen onoverkomelijk probleem. Bijkomend verkrijgt stampaarde na verloop van tijd een interne weerstand tegen erosie.

Er zijn enkele voor- en nadelen verbonden aan deze bouwmethoden. Beide methoden vormen geen probleem wanneer ze in het programma TRISCO worden bekeken. Dit geeft aan dat er een gezond binnenklimaat zonder condens- en schimmelproblemen kan gecreëerd worden. Ook zorgen beide methoden voor een goede U-waarde die voldoet aan de hedendaagse normen, voornamelijk de strobalembouw. Door de bescherming van houten of stampaarde elementen tegen indringing van grondwater, zorgt voor een slechtere toegankelijkheid, dit voornamelijk bij de strobalembouw. Deze kan zich makkelijk 30cm of meer boven het maaiveld bevinden waardoor er nood is aan trappen of een helling voor rolstoelgebruikers.

We zouden nogmaals willen vermelden dat tussen het moment van opstellen en het moment van raadplegen van deze masterproef ongetwijfeld nieuw onderzoek werd uitgevoerd naar deze materialen en bouwtechnieken. Deze masterthesis kan dus mede een aanzet geven tot het gebruik van bio-ecologische materialen maar dit moet steeds gereflecteerd worden naar nieuw onderzoek. De masterproef kan dus niet worden beschouwd als een eenduidige richtwijze of norm voor het bio-ecologisch bouwen.

Tenslotte werden de bio-ecologische details vergeleken met standaardbouwdetails. De standaarddetails hielden een spouwmuur, een houtskeletconstructie en een ETICS-wand in. De vergelijking werd gedaan op vlak van verschillende parameters die een notie geven van de sustainability, kost en circulariteit van de details en werd gedaan voor zowel de wand- en vloeropbouw als de fundering. Voor deze vergelijking moesten enkele aannames worden gedaan omwille van de tekortschieting van Nibe en TOTEM op bepaalde vlakken. Hieruit kon een conclusie worden gemaakt over het best scorende detail op voorgenoemde parameters en of een bio-ecologisch bouwdetail werkelijk een betere optie kan bieden voor mens en milieu.

Voor het eerste onderdeel dat de wand- en vloeropbouw bevat, scoren de bio-ecologische opbouwen beter volgens zowel de milieuclassificatie uit Nibe als de materiaalpunten in TOTEM. Aan de andere kant scoren ze wel iets minder op vlak van omkeerbaarheid. Dit is echter te wijten aan enkele aannames die gedaan werden zoals het gebruik van gelijmde stamplamblokken in TOTEM in plaats van stamplam. Ook de bouwkost valt hoger uit dan het standaarddetail voortkomend uit de beperkte beschikbaarheid van de materialen en de hoge prijs van geologische grondstoffen. De strobalembouw komt naar voren als de beste optie, stampaarde scoort iets slechter maar nog steeds beter dan de klassieke details vooral wanneer een beperkte muurdikte van stampaarde wordt toegepast.

In het tweede onderdeel, de fundering, scoren de bio-ecologische funderingen beter op vlak van materiaalpunten en omkeerbaarheid in TOTEM. Het valt op dat de schaduwkosten volgens Nibe en de bouwkosten vaak groter zijn dan deze bij de standaardfunderingen met beton. Dit is het gevolg van de hoge prijzen voor kalksteen en leisteen. Deze kunnen echter gedrukt worden door hergebruikte materialen toe te passen in plaats van nieuw gedolven. Dit geniet dan ook onze voorkeur aangezien de delving van nieuwe grondstoffen tot een minimum beperkt dient te worden en deze materialen zich zeer goed lenen tot hergebruik. Dit hergebruik geldt ook voor de prefab betonnen stapelblokken. Zij komen naar voren als de beste optie ook al worden ze nog niet als hergebruikt in beschouwing genomen.

In het algemeen kon geconcludeerd worden dat een strobalembouw met toepassing van een betonnen stapelblokken fundering de best scorende optie is. Deze conclusie werd genuanceerd door de mogelijkheid van hergebruik waardoor ook de optie met een grindfundering als een degelijke optie naar voren komt. Stampaarde scoort over het algemeen slechter dan strobalembouw maar dient zich nog steeds aan als betere optie dan een standaarddetail.

Zo komen we tot de conclusie dat door het bouwen met bio-ecologische materialen er een degelijk alternatief kan gevonden worden dat voldoet aan de normen en eisen van vandaag en in vergelijking met de standaarddetails een meer sustainable alternatief biedt. Doordat deze methoden en materialen nog op de achtergrond aanwezig zijn, zijn de prijzen hiervoor vaak duurder. Dit moet dan ook gezien worden als een investering in een gezond en comfortabel binnenklimaat en -omgeving en in een beter milieu en toekomst. Er blijven nog veel onzekerheden en gaten in de kennis rond bio-ecologische materialen die door onderzoek en ervaring kunnen opgevuld worden waardoor een bredere en gedetailleerde analyse mogelijk wordt en waardoor ook meer mensen aangezet worden tot de toepassing van deze materialen wanneer zij op de hoogte zijn van hun voordelen.

EINDNOTEN

^I VIBE, *“Dossier: Wat is bio-ecologisch bouwen?”*, België: Antwerpen, p.5.

^{II} Bouwgezond, *“Hoe werkt dampopen bouwen en isoleren.”*.

BIBLIOGRAFIE

A

- Abt., “*Hoogovenslak in beton en duurzaamheid; Hoe zit dat nou echt ?*”, geraadpleegd in mei 2022.
<https://www.abt.eu/actueel/blog/hoogovenslak-in-beton-en-duurzaamheid-hoe-zit-het-nou-echt.aspx>
- Architectengroep Barchi, “*Strobalenbouw.*”, geconsulteerd door Astrid Vrebos.
- Architecture, “*Bitumendaken hebben geen negatieve impact op de kwaliteit van gerecupereerd regenwater.*”, geraadpleegd in december 2021. <https://architectura.be/nl/dossiers/platte-daken/14515/>.
- Architectura, “*Derbipure: een plantaardig dakmembraam.*”, geraadpleegd in december 2021.
<https://architectura.be/nl/nieuws/2012/derbipure-een-plantaardig-dakmembraam>.
- Architectura, “*Het gebruik van leempleister als binnenafwerking.*”, geraadpleegd in april 2022.
<https://architectura.be/nl/nieuws/53111/technische-info-het-gebruik-van-leempleisters-als-binnenafwerking>.
- Asdrubali, Francesco, and Francesco D'Alessandro: Samuele Schiavoni. “*A review of unconventional sustainable building insulation materials.*”, Sustainable materials and technologies. 2015.
- ASTM E 119-05a Fire Tests of Building Construction and Materials, “*2-hr Fire Resistance Test of a Non-Loadbearing Wheat Straw Bale Wall.*”, 9 Juli 2007.
- Atlas Belgique, “*Landschappen, platteland en landbouw.*”, geraadpleegd in november 2021. <https://www.atlas-belgique.be/index.php/nl/digitale-atlas/landbouw/>.
- Ávila F., Puertas E., Gallego R., “*Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review.*”, Elsevier, Construction and building materials 270. 2021.

B

- Bardage, S. L. “*Performance of buildings.*”, Performance of bio-based building materials. United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing), 2017.
- BAST architects and engineers by Van Holm S., Van Grieken L., Versele A., “*Levenscyclus van strobalenwanden.*”, Wonen met de natuur nr 72. 2014.
- Bastien Diane, Winther-Gaasvig Martin, “*Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope.*”, Energy Volume 164. 1 December 2018. Pagina's 288-297. Online available:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218314920>.
- Batic2, “*Isolatiematerialen: stro.*”, Interreg, geraadpleegd in november 2022.
https://www.batic2.eu/sites/default/files/Doc%20Techno%20Commercieaux%20-%20Stro_Paill.pdf.
- Batiweb, “*Batiplum premier isolant naturel breveté avec un avis technique CSTB.*”, geraadpleegd in december, 2021. <https://www.batiweb.com/actualites/nouveaux-produits-du-btp/batiplum-1er-isolant-naturel-brevete-avec-un-avis-technique-cstb-1632>.
- Belgian Foreign Trade Agency, “*Belgium Foreign Trade.*”, geraadpleegd in november 2021. https://www.abh-ace.be/en/statistics/buitenlandse_handel_belgie.
- Ben-Alon L., Loftness V., Harries K.A., Cochran Hameen E., “*Life cycle assessment(LCA) of natural vs conventional building assemblies.*”, Elsevier, Renewable and sustainable energy reviews 144. 2021.
- Betonhuis Constructief Prefab, “*Handboek prefabbeton.*”, geraadpleegd in maart 2022. <https://handboek-prefab-beton.betonhuis.nl/>.
- Bezdičká Pert, Černýa Robert, “*Effect of cyclic wetting and drying on microstructure, composition and length changes of lime-based plasters.*”, Cement and Concrete Composites 104 103411. 2019.

- BC Materials, “*Producten.*”, geraadpleegd in januari 2022. https://www.bcmaterials.org/nl_22_producten.html.
- BC Materials, “*Stampaarde en kalkhennep.*”, geconsulteerd door Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos.
- Bica Smaranda, Rosiu Liliane, Radoslav Radu, “*What Characteristics Define Ecological Building Materials.*”, Departement of Architecture University of Timisoara. 2016.
- Birschke, C. “*Modelling.*” Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing). 2017.
- Birschke, C., and M. Humar. “*Performance of the bio-based materials.*” Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing). 2017.
- BMT, “*Duurzaamheidsstudie EPDM.*”, geraadpleegd in december 2021. <https://www.bmt.nl/technische-informatie/technische-verklaring-uitleg/duurzaamheidstudie-epdm>.
- Bokrijk, “*Van houten skelet tot strodak.*”, geraadpleegd in oktober 2021. <https://www.bokrijk.be/nl/van-houten-skelet-tot-strodak>.
- Bouwbestel, “*PE-folie: Wat is PE-folie en hoe is PE-folie te gebruiken.*”, geraadpleegd in december 2021. <https://www.bouwbestel.nl/blog/pe-folie-wat-is-pe-folie-en-hoe-is-pe-folie-te-gebruiken-.html>.
- Bouwen en wonen, “*Eendenveren isoleren daken en muren.*”, geraadpleegd in december, 2021. <https://www.bouwenwonen.net/artikel/Eendenveren-isoleren-daken-en-muren/11614>.
- Bouwen en wonen, “*Duurzame isolatie: voor- en nadelen van cellulose isolatie.*”, geraadpleegd in december 2021. <https://www.bouwenwonen.net/artikel/Duurzame-isolatie-voor--en-nadelen-van-cellulose-isolatie/34265>.
- Bouwgezond, “*Hoe werkt dampopen bouwen en isoleren.*”, geraadpleegd in mei 2022. <https://bouwgezond.nl/bouwgezond-wiki/veelgestelde-vragen-gezond-bouwen/hoe-werkt-dampopen-bouwen-en-isoleren/>.
- Bouwtotaal, “*Isoleren met stro.*”, geraadpleegd in maart 2022. <https://www.bouwtotaal.nl/2016/04/isoleren-met-stro/>.
- Brancart, Stijn. “*Eerste hulp bij circulair bouwen.*”, Ik ga bouwen. april 2021. Pagina’s 138-142.
- Britannica, “*Wattle and daub.*”, geraadpleegd in oktober 2021. <https://www.britannica.com/technology/wattle-and-daub>.
- Bruno Martina, Abis Marco, Kuchta Kerstin, Simon Franz-Georg, Grönholm Raul, Hoppe Michel, Fiore Silvia. “*Material flow, economic and environmental assessment of municipal solid waste incineration bottom ash recycling potential in Europe.*”, Journal of Cleaner Production no.317. 2021.
- Brustaert Bram en Focke Thibo, “*Milieu-impact van bio-gebaseerde bouwmaterialen: analyse van vloeren op volle grond.*”, Masterthesis University of Ghent. 2020-2021.
- Bui Q.B., Morel J.C., Venkatarama Reddy B.V. and Ghayad W., “*Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering.*”, Elsevier, Building environment 44. 2009. Pagina’s 912-919.
- Buildings, “*EPDM, Sustainability, and the Environment.*”, geraadpleegd in December 2021. <https://www.buildings.com/articles/33732/epdm-sustainability-and-environment>.
- Buyse Tim. “*Rapport: De interregionale input-outputtabel 2010.*”, Brussel. 2016.

C

- C² Bâtiscap, “*Catalogus van bio-ecologisch bouwen.*”. 2018.
- Carrieres de Hainaut, “*Belgian bluestone*”, geraadpleegd in november 2021. <https://www.carrieresduhainaut.com/nl/over-ons/de-groeve>

Carrieres des Rochettes, “Onze producten.”, geraadpleegd in november 2021.
<https://www.carrieredesrochettes.be/nl>

Cartogis UGent, “3.7 Delfstoffen.”, geraadpleegd in november 2021.
http://cartogis.ugent.be/geologis/geologis/37_delfstoffen.html.

Casnedi Ludovica, Cappai Marta, Cincotti Alberto, Delogu Francesco, Pia Giorgio, “Porosity effects on water vapour permeability in earthen materials: Experimental evidence and modelling description.”, Journal of Building Engineering 27 100987. 2020. Online available:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219309908>.

CBR, “Duurzaam beton mogelijk op basis van gerecycleerd materiaal.”, geraadpleegd in mei 2022.
<https://www.cbr.be/nld/c2ca>.

Cementbouw, “CB Megablokken.”, geraadpleegd in maart 2022.
<https://www.cementbouw.nl/divisie/recycling/cb-megablokken/>.

Construction Products Group Europe, “FDES: Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire.”, geraadpleegd in april 2022. https://www.illbruck.com/fr_FR/services/blog/fdes/.

Cupa Pizarraas, “Leisteen geschiedenis België.”, geraadpleegd in mei 2022. <https://www.cupapizarraas.com/be-fl/nieuws/leisteen-belgie-geschiedenis/>

Curling, S. “Test methods for bio-based building materials.”, Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead Publishing). 2017.

D

Dachverband Lehm e.V., “Lehmbau info: verbraucherinformation.”, maart 2014.

Dakdekker, “POCB: Dakbedekking.”, geraadpleegd in december 2021. <https://www.dakdekker.nl/pocb-dakbedekking/>.

Dakrubbercentrale, “Is EPDM wel een ecologisch dakbedekking?”, geraadpleegd in december 2021.
<https://www.dakrubbercentrale.be/is-epdm-wel-een-ecologisch-dakbedekking/>.

Dakvernieuwen, “Bitumen.”, geraadpleegd in december 2021. <https://www.dakvernieuwen.nl/bitumen>.

De Bock D., “Wat je absoluut moet weten.”, WTCB. Januari 2019.

De bodem afsluiter, “Werking zand isolatie en bodemafsluiting”, geraadpleegd in november 2021.
<https://www.debodemafsluiter.be/zandblazen/werkingzandisolatieenbodemafsluiting/index.html>.

De Keij, “Legioblokken.”, geraadpleegd in maart 2022. <https://www.dekeij.nl/legioblokken/>.

De Pot I., “Welke regels en normen gelden er in België.”, WTCB. Januari 2019.

Decorexpro, “Membraan waterdichting: soorten materialen en de voordelen van het gebruik.”, geraadpleegd in december 2021. <https://nl-n.decorapro.com/gidroizolyaciya/membrannaya/>

De Roeck M., Vanroelen M, “Analyse van de milieu-impact van houtskeletwanden.”, Masterproef. 2018-2019.
https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/494/911/RUG01-002494911_2018_0001_AC.pdf.

De Roeck, M; Timont, J., “Algemene Atlas.”, Destination bw,bWesmael-Charlier NV, Namen. 1956.

Designing buildings, “Cob building.”, geraadpleegd in oktober 2021.
https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Cob_building.

De Ridder Bart, Goeminne Gert, Mazijn Bernaerd, Vanhoutte Griet, Backaert Joris, De Mol Johan, Van Roo Jan, “Berekening van de grondstoffenconsumptie in Vlaanderen (1991-2001).”, MIRA. 2002.

D’hooghe Andres, “Specifieke Toepassingen en karakteristieken van verschillende biogebaseerde isolatiematerialen.”, Bachelorproef Odisee Hogeschool. 2019-2020.

- Dickson T. and Pavia S., *"Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials."*, Elsevier, Renewable and sustainable energy reviews 140. april 2021.
- Dienst landbouw en platteland, *"Land- en tuinbouw in Oost-Vlaanderen, meer dan cijfers."*, Provincie Oost-Vlaanderen. 2014. <https://dms.oost-vlaanderen.be/download/152a5244-9328-48b7-8397-7dd0530342ca/Brochure%20Land-%20en%20tuinbouw%20in%20Oost-Vlaanderen,%20meer%20dan%20cijfers.pdf>.
- Dirkx I., *"Het gebruik van leemplesiter als binnenafwerking."*, WTCB-DOSSIERS 2021/4.5.
- Division of Building, Construction and Engineering: Middleton G.F., *"Earth wall constructions, fourth edition."* New-Sealand. 1987.
- Dzidic Sanin, *"Fire resistance of the Straw Bale Walls."*, Univerzitet u Bihaca. 2017. Online available: https://www.researchgate.net/publication/316463900_Fire_Resistance_of_the_Straw_Bale_Walls.
- Duboknipoog, *"Bouwknopen."*, geraadpleegd in februari 2022. <https://duboknipoog.wordpress.com/bouwknopen/>.
- Dusar, Michiel, marleen De Ceukelaire, Francis Tourneur. *"Excursie natuursteengroeven langs de Maas."*, Belgische Geologische dienst. 2014.

E

- E+engineering Professionele Energieprestatieberekeningen, *"EPB Bouwknopen."*, Online beschikbaar: <https://bouw-energie.be/nl-be/bouwknopen/details-varia>.
- Eco, *"Damp-open isoleren."*, geraadpleegd in mei 2022. <https://www.eco-logisch.nl/kennisbank-Damp-open-isoleren-139>.
- Ecobouwen, *"Voor- en nadelen van leemstuc."*, geraadpleegd in april 2022. <https://www.ecobouwen.nl/voor-en-nadelen-leemstuc-op-een-rij/>.
- Ecobouwen, *"Kalkstuc voor een gezond woonklimaat."*, Geraadpleegd in Mei 2022 <https://www.ecobouwen.nl/stucen/kalkstuc/>.
- Ecobouwers, geraadpleegd in november 2021. <https://www.ecobouwers.be/>.
- Ecobouwers, *"Opendeur 2021."*, geraadpleegd in oktober,2021.<https://www.ecobouwers.be/>.
- Ecobouwers, *"Vlas isolatie als bio-ecologisch bouw materiaal."*, geraadpleegd in december,2021. <https://www.ecobouwers.be/duurzaam-bouwen/artikels/vlas-isolatie-als-bio-ecologisch-bouw-materiaal>.
- Ecobouwers, *"Katoen isolatie als bio-ecologisch bouw materiaal."*, geraadpleegd in december 2021. <https://www.ecobouwers.be/duurzaam-bouwen/artikels/katoen-isolatie-als-bio-ecologisch-bouw-materiaal>.
- Ecobouwers, *"Strobalen als biologisch circulair isolatiemateriaal."*, geraadpleegd in februari 2022.
- Ecobouwers, *"Leempleister als bio-ecologisch bouw materiaal."*, geraadpleegd in april 2022. <https://www.ecobouwers.be/duurzaam-bouwen/artikels/leempleister-als-bio-ecologisch-bouw-materiaal>.
- Ecobouwadvies, *"Strobalenbouw-Brandveiligheid."*, geraadpleegd in maart 2022. <https://ecobouwadvies.be/ecologische-bouwmaterialen/ecologische-isolatiematerialen/strobalenbouw/strobalenbouw-brandveiligheid/>.
- Ecobouwadvies, *"Strobalenbouw met houtskelet."*, geraadpleegd in maart 2022. <https://ecobouwadvies.be/ecologische-bouwmaterialen/ecologische-isolatiematerialen/strobalenbouw/strobalenbouw-met-houtskelet/>.

Ecobouwadvies, "*Deel 4 vloerplaat en vloeropbouw.*", geraadpleegd in maart 2022.
<https://ecobouwadvies.be/ons-bouwavontuur-ecologische-verbouwing-tot-passiefhuis/deel-4-vloerplaat-en-vloeropbouw/>.

Ecomat, "*Strobalenbouw.*" geraadpleegd in februari 2022. <https://ecomat.be/kennisbank/detail/sbb-strobalenbouw>.

Ecomat, "*Cellulosevezel.*", geraadpleegd in december 2021. <https://ecomat.be/kennisbank/detail/cellulosevezel>.

Ecomat, "*Kurkisolatieplaten.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://ecomat.be/producten/detail/kurkisolatieplaten>.

Ecomat, "*Kokostrips en platen.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://ecomat.be/producten/detail/kokostrips-platen>.

Ecomat, "*Ecomat rietrol.*", geraadpleegd in december 2021. <https://ecomat.be/bestandenbank/ecomat-rietrol-19.pdf>.

Ecomat, "*Ecomat rietplaat.*", geraadpleegd in december 2021. <https://ecomat.be/bestandenbank/ecomat-rietplaat-17.pdf>.

Ecomat, "*Calcatex kalk caseïneverf.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://ecomat.be/producten/detail/calcatex-kalk-caseïneverf>.

Ecomat, "*Leemstuc.*", geraadpleegd in december 2021. <https://ecomat.be/producten/detail/leemstuc>.

Ecomat, "*Stampleem.*", geraadpleegd in december 2021. <https://ecomat.be/producten/detail/stampleem>.

Ecomat, "*Lijnolieverf: de verf van het verleden en vooral de toekomst.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://ecomat.be/kennisbank/detail/lijnolieverf-de-verf-van-het-verleden-en-vooral-de-toekomst>.

Ecomat, "*Isoschelp.*", geraadpleegd in januari 2022.
<https://ecomat.be/producten/detail/isoschelp#:~:text=Op%20de%20schelpen%20kan%20een,van%20parket%20mogelijk%20te%20maken>.

Ekologio- Bio-ecologisch bouwen, "*Duurzaamheid van hout.*". 2 Februari 2015.
<http://ekologio.be/blog/2015/02/duurzaamheid-van-hout/>.

Encon, "*Berekening CO2 compensatie bomen.*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.encon.be/nl-BE/berekening-co2-compensatie-bomen>.

Entpe, "*Contribution aux mesures mecanques sur la construction paille (selon la technique du G.R.E.B).*". Julie 2003.

EPDMXL, "*EPDM of DPC gebruiken als waterkeringsfolie?*", geraadpleegd in december 2021.
<https://www.epdmxl.nl/blog/epdm-of-dpc-gebruiken-als-waterkeringsfolie>.

Eurabo, "*Métisse katoenisolatie.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://www.eurabo.be/nl/producten/metisse-katoenisolatie>.

Eurabo, "*Houtvezelisolatie.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://www.eurabo.be/nl/lexicon/houtvezelisolatie>.

Europages, "*Grondstoffen.*", geraadpleegd in november 2021.
<https://www.europages.nl/ondernemingen/Belgi%C3%AB/grondstoffen.html>.

Evrard C. "*Seminarie duurzaam bouwen: Ongebakken aarde en de hedendaagse gebouwen in Brussel.*". februari 2021.

Exie, "*Ecologisch bouwen met kalkhennep, het circulaire isolatiemateriaal.*", geraadpleegd in november, 2021. <https://exih2.be/>.

Exie, "*E-Xi Fibres Technische Fiche.*", geraadpleegd februari 2022.

F

FASBA: Fachverband Stroballenbau Deutschland, "*Straw Bale Building Guide: English language version, 2020.*" Aller. 2020.

Fast company, "*Why we should be building like Ancient Greeks.*", geraadpleegd in oktober, 2021.
<https://www.fastcompany.com/90165067/why-we-should-be-building-like-ancient-greeks>.

Federale overheidsdienst Binnenlandse Zaken Algemene Directie Veiligheid en Preventie- Directie Brandpreventie, "*Koninklijk besluit van 7 Julie 1994 Tot vaststelling van de basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing waaraan de gebouwen moeten voldoen.*". Julie 1994.

Federale overheidsdienst economie K.M.O middenstand en Energie, "*STS 23 ADD-2 Houtbouw Massiefbouw.*" .1994.

Federale overheidsdienst economie K.M.O middenstand en Energie, "*STS 23 ADD-2 Houtbouw Addendum en toelichting.*". 1983.

Federale overheidsdienst economie K.M.O middenstand en Energie, "*STS 31 Timmerwerk.*" .2008.

Fernandes J., Peixoto M., Mateus R. and Gervásio H., "*Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks.*", Elsevier, Journal of cleaner production 241. 2019.

Fernandes J., Mateus R., Gervásio H., Silva S. and Bragança L., "*Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance.*", Elsevier, Renewable energy 142. 2019. Pagina's 345-363.

Foamglas, "*Wat is cellulaire glasisolatie?*", geraadpleegd in januari 2022. <https://www.foamglas.com/nl-nl/kenniscentrum/general-advice/what-is-cellular-glass-production-process>

Forbo, "*Marmoleum natuurlijke grondstoffen.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://www.forbo.com/flooring/nl-nl/marmoleum-live-forward/hoe-het-wordt-gemaakt/marmoleum-natuurlijke-grondstoffen/pzghyr>.

FSC Belgium, "*Lespakket: Duurzaam bosbeheer en het FSC.*", <http://www.fsc.be/preview.fsc-lespakket-voor-scholen.a-414.pdf>

FSC Forest Stewardship Council Nederland, verschillende tabbladen, geraadpleegd in april 2022.
<https://nl.fsc.org/nl-nl/kies-voor-fsc/het-belang-van-fsc>.

G

Gauzin-Müller D. en Vissac A., "*Terrafibra.*", TERRAFIBRA award. Barcelona: Ingoprint. maart 2022.

Geertsma P., "*Wat is een paalfundering en waarvoor is deze fundering geschikt?*", Technische werken. 23 February 2015. <https://www.technischwerken.nl/kennisbank/techniek-kennis/wat-is-een-paalfundering-en-waarvoor-is-deze-fundering-geschikt/>.

Geldof Peter, "*Keuzefiche: Hout zonder chemische verduurzaming.*" VIBE. Februari 2007. Online available: https://www.vibe.be/wp-content/uploads/2016/06/KF_hout_zonder_verduurzaming.pdf.

Gids voor duurzaam bouwen, "*Elementen voor een duurzame keuze.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://www.guidebatimentdurable.brussels/nl/elementen-voor-een-duurzame-keuze.html?IDC=5951>.

Gids duurzame gebouwen, "*Vergelijking van halfharde isolatiematerialen op basis van plantaardige stoffen.*", geraadpleegd in maart 2022.

Goemans, A, Vanderhallen D, "*Onze geologie staat in het landschap gegroeft.*", Atlasnieuwsbrief. November 2019. Plantyn. https://www.plantyn.com/files/Atlasnieuwsbrief_2019_november_Geologie_van_Belgie.pdf.

Gullentops F., Wouters L., "*Delfstoffen in Vlaanderen.*", Ministerie van de Vlaamse gemeenschap.
file:///C:/Users/gebruiker/Downloads/Delfstoffen_in_Vlaanderen_1996.pdf.

Graham Mchenry P., "*Adobe and rammed earth buildings: design and construction.*", University of Arizona press.
 1989.

Gramitherm, "*Isolatiepanelen uit plantenvezels.*", https://gramitherm.ch/wp-content/uploads/2021/01/Brochure01_A4_NL_NO_NAME_Europe_Grami-HR2021.pdf.

GREB, "*La techniques du GREB.*", geraadpleegd in april 2022.
http://www.greb.ca/GREB/Technique_du_GREB.html.

Groener wonen, "*Nut en belang van isolatie.*", geraadpleegd in februari 2022. <https://groenerwonen.com/nut-en-belang-van-isolatie/>.

Gruppe Angepaßte Technologie, Technische Universität Wien, "*Prüfbericht über das Brandverhalten einer Strohballenwand (mit Innen- und Außenputz).*", Wenen. 2000.

H

Habitos, "*Welke materialen gebruik ik om bio-ecologisch te bouwen?*", geraadpleegd in november 2021.
<https://www.habitos.be/nl/duurzaam-wonen/welke-materialen-gebruik-ik-om-bio-ecologisch-te-bouwen-4026>.

Habitos, "*Isolatiematerialen uit nagroeibare grondstoffen.*", geraadpleegd in november 2021.
<https://www.habitos.be/nl/bouwen-verbouwen/isolatiespecialist-isolatiematerialen-uit-nagroeibare-grondstoffen-6069>.

Het houtblad, "*OSB: Oriented Strand Board.*", Centrum Hout Almere. September 2011.
https://houtinfo.nl/sites/default/files/Houtproducten_OSB_sept2011_0.pdf

Hermans-Vermeulen Nv, "*Ecologische bouwmaterialen: een nieuwe trend.*", geraadpleegd in november 2021.
<https://www.hermans-vermeulen.be/blog/ecologische-bouwmaterialen/>.

H.G.I.-geluidsadvies, "*Hoe werkt geluidsisolatie en hoe niet.*", geraadpleegd in mei 2022. <http://www.hgi-geluidsadvies.nl/hpe-werkt-geluidsisolatie-en-hoe-niet>.

Home Renovates, "*Erectie van zelfklevende funderingen: voor – en nadelen.*", geraadpleegd in maart 2022.
<https://homerenovates.com/nl/records/4559>.

Hopfe C.J. and Hall M.R., "*Fabric insulation, thermal bridging and acoustics in modern earth buildings.*", Woodhead Publishing Limited. p.41-71. 2012.

Houtinfo, "*Houtproducten plaatmaterialen.*", Infoblad 11. 2015.
https://www.houtinfo.nl/sites/default/files/Houtproducten_Plaatmaterialen_Index_nov2015.pdf.

Houtinfo Bois, "*Houtbouw.*", geraadpleegd in maart 2022.
<https://www.houtinfo Bois.be/nl/applications/houtbouw/>.

Houtinfo Bois, "*Houtverduurzaming.*", geraadpleegd in maart 2022. <https://www.houtinfo Bois.be/nl/technische-informatie/de-materialen/houtbehoud/>

Houtshop, "*Houtwijzer: ThermoWood / thermo hout.*", 15/06/2017. <https://www.houtshop.be/nl/blog/190-houtwijzer-thermo-hout#procedure>.

Houtwereld, "*Er is weer oog voor vakwerkuizen.*", geraadpleegd in oktober 2021.
<https://www.houtwereld.nl/houtnieuws/er-is-weer-oog-voor-vakwerkuizen/>.

Humar, M. "*Protection of the bio-based material.*", Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing). 2017.

Huntjens W., "*Voordelig isoleren met een natuurlijk materiaal.*", Ik ga bouwen en renoveren (april 2018): 41-46.
<https://www.vibe.be/wp-content/uploads/2020/10/IGB409-kalkhennep.pdf>.

Huntjens Wim, *“Strobalenbouw en bouwknopen.”*, geconsulteerd door Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos.

I

Icopal, *“Soorten dakbedekking.”*, geraadpleegd in december 2021.
<https://www.icopal.nl/producten/dakbedekkingen.aspx>.

Instituut voor brandveiligheid vzw, *“Verlenging van technisch advies 2012-A-075 op basis van een analyse van beproevingsresultaten.”* Gent. 2012.

Interexpress, *“EPDM meest duurzame dakbedekking, Hoe milieuvriendelijk is EPDM nu echt?”*, geraadpleegd in december 2021. <https://www.interexpress.nl/blog/epdm-meest-duurzame-dakbedekking>.

Intratrade, *“EPDM.”*, geraadpleegd in december 2021. <https://www.goshops.nl/over-epdm/>

Ismail Brahim, Belayachi Naima, Hoxha Dashnor, *“Optimizing performance of insulation materials based on wheat straw, lime and gypsum plaster compostes using natural additives.”*, Construction and Building Materials 254 118959. 2020.

Isohemp, *“Isohemp gids: 10 belangrijke tips voor een comfortabel, betaalbaar en duurzaam huis.”*, Isohemp SA - NV.

Isohemp, *“Vloerisolatie met behulp van hennepblokken.”*, geraadpleegd in januari 2022.
<https://www.isohemp.com/nl/vloerisolatie-met-behulp-van-hennepblokken>

Isoschelp, *“Hoe werken wij.”*, geraadpleegd in december, 2021. <https://www.isoschelp.nl/hoe-werken-wij>.

Isohemp, *“Plaatsingsgids: alle tips voor het plaatsen van de producten van Isohemp”*. Ecomat.

Isoproc, *“IQ3 cellulose isolatie.”*, geraadpleegd in december, 2021.
<https://www.isoproc.be/nl/solutions/producten/detail/isoproc-inblaaisolatie/882>.

Isover, *“Geluidsisolatie.”*, 3 Oktober 2019. <https://www.isover.be/nl/tags/geluidsisolatie>.

J

Jansen Bart en Gerlo Joeri, *“Worldwide environmental impacts of consumption and production in Flanders: feasibility of an environmental input-output model for Flanders.”*, Flemisch Environment Agency. 2006.

Janssens Arnold, *“Cursus Bouwfysische aspecten van de bouw huid: Les 7.”*. 2019-2020. page 19.

Janssens, Tim, *“Natuurlijk verven: gezond en milieuvriendelijk.”*, Ik ga bouwen en renoveren. april 2017. Pagina's 105-108.

Janssens, Tim, Mieke Vandenbroucke, Gunter Van den Bossche, *“Zwammen: het bouw materiaal van de toekomst?”*, Ik ga bouwen en renoveren. mei 2017. Pagina's 2-5.

Janssens, Tim, *“Kurk: natuurlijk bouw materiaal met vele gedaantes.”*, Ik ga bouwen en renoveren. juli-augustus 2017. Pagina's 49-54.

Janssens, Tim, *“Hergebruik van bouwmaterialen. Op naar een circulaire mindset”*. Ik ga bouwen en renoveren. december 2018-januari 2019. Pagina's 45-51.

JBhome, *“Isolatiebedrijf klei.”*, geraadpleegd in november 2021. <https://jbhome.nl/isolatiebedrijf-klei/>.

Jermana Miloš, Scheinherrová Lenka, Medveďa Igor, Krejšová Jitka, Doleželová Magdaléna, Petr Bezdička Petr, Černý Robert, *“Effect of cyclic wetting and drying on microstructure, composition and length changes of lime-based plasters.”*, Cement and Concrete Composites 104 103411. 2019.

Joostdevree, *“Warmtegeleidingscoëfficiënt.”*, geraadpleegd in maart 2022.
<https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/warmtegeleidingscoefficient.htm>.

Joostdevree, "*Dampopen bouwen.*", geraadpleegd in mei 2022.

https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/dampopen_bouwen.htm.

Joostdevree, "*Rw-waarde.*", geraadpleegd in mei 2022. <https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/rw-waarde.htm>.

Joseph Aneeta M., Snellings Ruben, Van den Heede Philip, Matthys Stijn en De Belie Nele, "*The use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View.*", MDPI. 2018.

Jones D., "Introduction to the performance of bio-based building materials." Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing). 2017.

K

Kalei, "*Wat is.*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.kalei.be/wat-is/>.

KampC., "*Cementloze dekvloer in't centrum.*", 30 september 2021.

<https://www.kampc.be/artikel/2021/09/30/Cementloze-dekvloer-in-t-Centrum>

Kapfinger O. and Sauer M., "*Martin Rauch: Refined earth construction and design with rammed earth.*", Detail. 2016.

KLV, "*Polypropyleen eigenschappen – PP voordelen en nadelen.*", geraadpleegd in december 2021.

<https://kunststoflassen.com/polypropyleen-lassen/polypropyleen-eigenschappen/>.

Kurkfabriek van Avermaet, "*Geëxpandeerde kurkplaten.*", geraadpleegd november 2021.

https://www.kurk.be/media/files/Ge%c3%abxpandeerde_kurkplaten_VA.pdf

Kutnik, M., E. Suttie, and C. Birschke, "*Durability, efficacy and performance of bio-based construction materials: Standardisation background and systems of evaluation and authorisation for the European market.*" ,Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing). 2017.

L

La Rosa Céline, "*Contribution aux mesures mécaniques sur la construction paille. Selon a technique du G.R.E.B.*". Juni 2008.

Labelinfo, "*PEFC.*", geraadpleegd in april 2022. <https://www.labelinfo.be/label/pefc>.

Labelinfo, "*Home.*", geraadpleegd in november 2021. <https://www.labelinfo.be/nl>.

Laboratoire d'essai au feu, "*Rapport d'essai.*", Luik. mei 2018.

Lambda, "*Lambda waarde van alle materialen.*", geraadpleegd in maart 2022.

<https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/warmtegeleidingscoefficient.htm>.

Landbouwcijfers Vlaanderen, "*Landbouwareaal.*", geraadpleegd in november 2021.

<https://landbouwcijfers.vlaanderen.be/landbouw/totale-landbouw/landbouwareaal>).

Landbouwleven, "*Vlas in de kustprovincie, het Texas van Vlaanderen.*". 6 December 2019.

<https://www.landbouwleven.be/art/d-20191203-3XKJGK>.

Langmans Jelle, Versele Alexis en Roels Staf, "*On the hygrothermal performance of straw bale wall elements in Belgium.*" Vol3: Sustainability in Energy and Buildings (SEB-14-007). Pagina's 37-42. Online available: <https://strawbuilding.eu/on-the-hygrothermal-performance-of-straw-bale-wall-elements-in-belgium/>.

Legioblock, "*Zoutloodsen.*", geraadpleegd in maart 2022. <https://www.legioblock.com/oplossingen/zoutloodsen>.

Leendertse P., Lageschaar L. Hees E., van Well E., Rietberg P., "*Bijdrage van vlas en hennep aan de milieu-en klimaatdoelstellingen van het toekomstig EU-landbouwbeleid.*", CLM. April 2020.
<https://www.clm.nl/uploads/pdf/1020-CLM%20rapport%20vlas%20en%20hennep.pdf>.

Lignian ing "*ETICS op houtskeletbouw: aansluiting op de muurvoet.*", WTCB. Maart 2018.

M

Made in, "*Henneplantage op voormalige Philips-site in Turnhout.*", geraadpleegd in november 2021.
<https://www.made-in.be/kempen/henneplantage-op-voormalige-philips-site-in-turnhout/>.

Maniatidis V. and Walker P., "*A review of rammed earth construction.*", University of Bath. mei 2003.

Martin Y en Poppe P, "*Nieuwe oplossingen voor houtskeletgevels die voldoen aan de brandveiligheidseisen.*", WTCB. maart 2015.

Marysse, Laurens, "*Cellulose: een veelzijdig isolatiemateriaal.*", Ik ga bouwen. september 2021. Pagina's 39-42.

Marysse, Laurens, "*Milieuvriendelijke materialen voor je interieur.*", Ik ga bouwen. april 2020. Pagina's 89-94.

Masterbloc, geraadpleegd in maart 2022. <https://www.masterbloc.be/>.

Mazijn B., Devriendt S., Blommaert C. en Borgo E. (2018). "*Onderzoek en analyse van de megatrend 'toenemende schaarste van belangrijke grondstoffen' en de impact van deze trend op het behalen van de Sustainable Development Goals (SDGs) – Samenvatting.*", Instituut vóór Duurzame Ontwikkeling vzw, Brugge, FIDO. 2018.

MDPI met Cacone Stefano, Rapisarda Renata, Cascone Dario, "*Physical Properties of Straw Bals as a Construction Material: A Review.*". 19 Juni 2019.

Merci Bart, "*Cursus Brandbeveiliging van gebouwen 2021-2022.*". Academiejaar 2021-2022.

Middleton G.F., "*Earth wall construction.*", Bulletin 5. CSIRO. 1995.

Middleton G.F., "*Bulletin 5: Earth-wall construction.*", CSIRO Division of building, construction and engineering. 1987.

Mijts, Alexander, Mieke Vandenbroucke, Laurens Marysse, Inge De Maesschalk, Stijn Brancart, Eva Heuts, "*Wat is milieuverantwoord en gezond bouwen?*", Vibe vzw. december 2019.

Milieu centraal, Keurmerkenwijzer, "*FSC 100% (Hout).*", geraadpleegd in april 2022.
<https://keurmerkenwijzer.nl/keurmerken/fsc-100-hout/>.

Monumentenwacht vlaanderen vzw, "*Onderhoud en herstel van voegen in historisch metselwerk.*", januari 2013.

N

Natural homes, "*The rubble trench foundation (RTF).*", geraadpleegd in mei 2022.
<http://naturalhomes.org/permahome/rubble-trench-foundation.htm>.

NBD, "*Derbipure plantaardig witte dakbaan.*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.nbd-online.nl/product/130331-derbipure-plantaardige-witte-dakbaan/documentatie>.

Neptugmbh, "*Wat is Neptutherm.*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.neptugmbh.de/was-ist-neptutherm.html>.

New Zealand standards, "*Engineering design of earth buildings, NZS 4297:1998; Materials and workmanship for earth buildings, NZS4298:1998*". 1998.

Nibe Milieuclassificaties, geraadpleegd in academie jaar 2021-2022. <https://www.nibe.info/nl>.

Nibe, "*Classificatietabel: dakbedekking plat dak, mechanisch bevestigd.*", geraadpleegd december 2021.
<https://www.nibe.info/nl/members#group-228-105>.

Nibe, "*Handleiding voor gebruik.*", geraadpleegd in december 2021.
https://www.nibe.info/nl/handleiding_voor_gebruik.

Nibe, "*Strobalen (standaard) met wapeningsnet; inclusief leemstuc afwerking.*", geraadpleegd in april 2022.

Nieuwsblad, "*Binnenkijken in een huis van strobalen.*", geraadpleegd in mei 2022.
<https://www.pinterest.com/pin/454863631084676658/>.

Novifarm, "*Tarwe.*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.novifarm.nl/producten/tarwe/>.

Nunes L., "*Nonwood bio-based materials.*" Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing). 2017.

O

OEC, "*Belgium.*", Datawheel, geraadpleegd in november 2021. <https://oec.world/en/profile/country/bel#yearly-exports>.

Oldenburger J., Van der Heyden D., Voncken F., De Somviele B., "*Eco2eco werkpakket 3 – Vraag en aanbod op de houtmarkt in Nederland en Vlaanderen. activiteit I – Houtstromen in kaart brengen.*", BOS+ Vlaanderen vzw, Gontrode. augustus 2017.
https://www.grensregio.eu/assets/files/site/eco2eco_WP3_Act1_eindrapport.pdf.

Oldenburger J., Reichgelt A., Klaassen R., de Munck E., Broek K., "*Meer houtbouw in Nederland.*", Stichting Probos. 2021. <https://www.vbne.nl/klimaatlimbosennatuurbeheer/uploads/1-3-eindrapportage-meer-houtbouw-in-nederland.74814c.pdf>.

O.O. Akinkulore, Cangru Jiang, A.T. Oyediran, O.I. Dele- Salawu and A.K. Elensinnla, "*Engineering Properties of Cob as a Building Material.*", Journal of Applied Sciences 6. 2006. Pagina's 1882-1885.
<https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2006.1882.1885>.

Oppervlaktedelfstoffenkaart van Vlaanderen. Departement omgeving, afdeling Vlaams planbureau voor omgeving. januari 2002. <https://www.vlaanderen.be/publicaties/oppervlaktedelfstoffenkaart-van-vlaanderen>.

Orio architecten, "*Kalkhennep.*", geraadpleegd in januari 2022. <https://orioarchitecten.nl/kalkhennep/>

OVAM, "*24 ontwerprichtlijnen veranderingsgericht bouwen*". n.d.

P

Packhelp, "*Eco eigenschappen Herbruikbaar*", geraadpleegd in januari 2022. <https://packhelp.com/nl-nl/ecoproperties/recycleerbaarheid/herbruikbaar/?fbclid=IwAR1IPuTD9reRLjwg68ecXg1h3hcmjhCtJze5-co-N7-ize2z63lXrm4OJkA>.

Paduart, Anne, Stijn Brancart, Mieke Vandenbroucke, "*Circulair en veranderingsgericht bouwen. Alternatief voor traditionele renovatie.*", Ik ga bouwen en renoveren. september 2018. Pagina's 47-51.

Pajot, "*Wereldprimeur: Belgische Derbigum lanceert Derbipure, het eerste plantaardig dakmembraam ter wereld.*", geraadpleegd in december 2021. <https://editiepajot.com/regios/9/articles/14634>.

PEFC, meerdere tabbladen, geraadpleegd in april 2022. <https://pefc.nl/over-pefc/>.

Pinterest, "*Auto-construction d'une maison en paille (technique de greb).*", geraadpleegd in mei 2022.
<https://www.pinterest.com/pin/401172279291209517/>.

Popescu C.M., "*Wood as bio-based building material.*", Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing). 2017.

Prefunko, geraadpleegd in maart 2022. <https://www.prefunko.nl/betonelementen>.

Pritchett Ian, " *Wattle and Daub.*", Building conservation door, geraadpleegd in oktober 2021.
<https://www.buildingconservation.com/articles/wattleanddaub/wattleanddaub.htm>.

R

Recycling, " *Wat is PP polypropyleen? PP polypropyleen is uitstekend recyclebaar.*", geraadpleegd in december 2021. <http://www.recycling.nl/recycling/pp-recycling-polypropyleen/wat-is-pp-polypropyleen.html>.

Recycork, " *Home.*", geraadpleegd in december 2021. <http://www.recycork.be/nl/producten>.

Regge hout, " *Duurzaamheidsklasse en sterkteklasse.*", geraadpleegd in april 2022.
<https://www.reggehout.nl/houtsoorten/duurzaamheidsklasse-en-sterkteklasse/>.

Restol, " *Natuurlijke lijnzaadolie.*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.restol.info/nl/natuurlijke-lijnzaadolie/>.

RFCP Réseau français de la construction en paille, " *Remplissage isolant en bottes de paille (issue de l'agriculture conventionnelle).*", Juni 2015.

RFCP Réseau français de la construction en paille, " *Règles professionnelle de construction en paille – Remplissage isolant et support d'enduit -Règles CP2021 révisées-3^e édition.*", Slechts deels beschikbaar. April 2018. Online available: https://www.rfcp.fr/librairie/regles-professionnelles-de-construction-en-paille-v3/?doing_wp_cron=1650117517.7908849716186523437500.

RFCP Réseau français de la construction en paille, " *Caractéristiques Techniques.*", geraadpleegd in maart 2022.
<https://www.rfcp.fr/caracteristiques-techniques/>.

Rob van Hees, Matth van Rooden, Bert van Bommel, Jeroen van Rhijn, Michiel van Hunen en Koen van Balen, Kalkboek. " *Het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden.*" Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Zeist. 2003

Rosseneu I., Vrebos A., " *Critical evaluation of a novel construction material: bamboo.*", 2021.

Rotor with Sophie Seys, Lionel Billiet, Maarten Gielen en Michaël Ghyyoot, " *De recuperatie van bouwmaterialen uit publieke gebouwen haalbaar maken.*". België: Anderlecht (Rotor). 2016.

Rotor vzw en Brussel Hoofdstedelijk Gewest, " *Vademecum voor hergebruik buiten de bouwsite: De recuperatie van bouwmaterialen uit publieke gebouwen haalbaar maken.*". 06 juni 2016.

Rubberbond, " *Sustainability of EPDM.*", geraadpleegd in december 2021.
<http://rubberbond.co.uk/sustainability-of-epdm/>.

S

Sagrex, " *Quenast.*", geraadpleegd in november 2021. <https://www.sagrex.be/nl/quenast>.

Schilderwerkensnel, " *Kenmerken en prijzen van encaustic.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://schilderwerkensnel.be/kenmerken-en-de-prijs-van-encaustic/>.

Soiltek, " *Staalharde schroefpaalfunderingen.*", geraadpleegd in maart 2022. <https://www.schroefpalen.com/nl>.

Soprema, " *De zes voordelen van isoleren met houtvezelisolatie.*", geraadpleegd in december 2021.
<https://www.soprema.be/nl/article/conseil/de-zes-voordelen-van-isoleren-met-houtvezelisolatie-2>.

Southern African development community cooperation in standardization's, " *Rammed earth structures- code of practice, SADC ZW HS 983:2014.*". 2014.

Srfb, " *De Belgische bossen.*", geraadpleegd in november 2021. <https://www.srfb.be/nl/informatie-over-de-bossen/de-belgische-bossen/>.

Strobouw Nederland, " *Stro kenmerken: Alle cijfers op een rij.*". 2019.

Strobouw Nederland, " *Bouwen met stro: Stro als ecologisch.*".

Strobouw Nederland, "*Moderne strobouw.*", in 2022. <https://strobouw.nl/bouwen-met-stro/moderne-strobouw/>.

Suttie E., et al., "*Environmental assessment of bio-based building materials* Performance of bio-based building materials, United Kingdom: Elsevier (Woodhead publishing 2017).

T

TDS Engineering Adviseurs voor technische installaties, "*Bio-ecologisch bouwen.*", geraadpleegd in november 2021. <https://www.tds-engineering.nl/services/bio-ecologisch-bouwen/>.

Technische werken, "*Wat is PU en waarvoor wordt PU gebruikt?*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.technischwerken.nl/kennisbank/techniek-kennis/wat-is-polyurethaan-pu-en-waarvoor-wordt-polyurethaan-gebruikt/>.

Technische werken, "*Wat is bitumen en waarvoor wordt bitumen gebruikt?*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.technischwerken.nl/kennisbank/techniek-kennis/wat-is-bitumen-en-waarvoor-wordt-bitumen-gebruikt/>.

Theis Bob, "*Straw Bale Fire Safety: A review of testing and experience to date.*" . 30 Juli 2003.

Tierrafino, "*Marokkaanse tadelakt.*", geraadpleegd in december 2021. <https://tierrafino.nl/marokkaanse-tadelakt/>.

Tierrafino, "*Leemverf.*", geraadpleegd in december 2021. <https://tierrafino.nl/leemverf/>.

Treehugger, "*Are adobe houses sustainable.*", geraadpleegd in oktober 2021. <https://www.treehugger.com/are-adobe-houses-sustainable-5116189>.

Trends Knack, "*Gentse projectontwikkelaar teelt half miljoen hennepplanten op bouwsite.*", geraadpleegd in november 2021. <https://trends.knack.be/economie/bedrijven/gentse-projectontwikkelaar-teelt-half-miljoen-hennepplanten-op-bouwsite-video/article-longread-1745001.html>.

TOTEM-Building, geraadpleegd in academiejaar 2021-2022. <https://www.totem-building.be/pages/project/project.xhtml?id=8599&selection=ets8599>.

U

UNIK, "*De unieke eigenschappen van polyethyleen.*", geraadpleegd in december 2021. <https://www.hetkanmetkunststof.nl/polyethyleen-eigenschappen/>.

UP straw en Interreg, "*Nederlandse vertaling van ETA 17/0247 Baustroh (bouwstobalen) gevolgd door het originele Duitse document.*", originele document. 2017.

V

Van Dale, "*Betekenis ecologisch.*". 2021, <https://www.vandale.nl/gratis-woordenboek/nederlands/betekenis/ecologisch#.YYeM9brvJPY>.

Van Dam Jan en Van Den Oever Martien, "*Catalogus biobased bouwmaterialen: Het groene bouwen.*", Nederland: Wageningen. 2012.

Van der Lugt P., Van den Dobbelsteen A., Abrahams R., "*Bamboo as a building material alternative for Western Europe? A study of the environmental performance, costs and bottlenecks of the use of bamboo(products) in Western Europe.*", In J. Bamboo and Rattan, Vol.2, No.3, 205-233. VSP. 2003.

Van Holm Sara, Van Grieken Leen en Versele Alexis (BAST architects and engineers), "*Levenycylus van stobalenwanden.*", Wonen met de natuur nr72. 2014.

Van Leemput Marc, "*Codes voor houtbehandeling.*", Wood.be.

Van Rossem Kris, "*Materialen die eeuwig leven.*", Ik ga bouwen en renoveren. november 2017. Pagina's 51-55.

Vanwildemeersch Hilde, *“Strobalenbouw en bespreking bouwknopen.”*, geconsulteerd door Ineke Rosseneu en Astrid Vrebos. 17 mei 2022.

Vercalsteren An, Van der Linden Ann, Dils Evelien en Geerken Theo, *“Milieu-impact van productie- en consumptieactiviteiten in Vlaanderen.”* Vlaamse Milieumaatschappij en MIRA. 2012.

Vesp, *“Over EPDM, Nibe.”*, geraadpleegd in december 2021. http://www.vesp-benelux.com/cms/?page_id=126.

Vesp, *“Over EPDM, SKZ-studie.”*, geraadpleegd in december 2021. http://www.vesp-benelux.com/cms/?page_id=128.

VIBE, *“Dossier: Wat is milieuverantwoord en gezond bouwen?”*, België: Antwerpen. December 2019.

VIBE, *“Dossier: Wat is bio-ecologisch bouwen?”*, België: Antwerpen.

VIBE, *“Houten plaatmateriaal.”*, Vibe keuzefiche. 2013. <https://www.vibe.be/wp-content/uploads/2016/06/KF-houten-plaatmaterialen.pdf>.

Village terre et vie, *“Construire paille selon technique de GREB.”*, geraadpleegd in mei 2022. <https://www.villageterreetvie.org/formation/ateliers-decouvertes/construire-paille-selon-technique-de-greb/>.

Vinkkunststoffen, *“Polypropyleen-PP: Meest toegepaste kunststof in de industrie.”*, geraadpleegd in december 2021. <https://www.vinkkunststoffen.nl/kunststofsoorten/pp-polypropeen>.

Vlaanderen Departement Landbouw en Visserij, *“Voorlopige arealen landbouwteelten uit de verzamelaanvraag 2020.”*, geraadpleegd in november 2021. <https://lv.vlaanderen.be/nl/nieuws/voorlopige-arealen-landbouwteelten-uit-de-verzamelaanvraag-2020>.

Vlaanderen, *“Schapenhouderij.”*, Vakkundig 1. juli 2013. <https://www.vlaanderen.be/publicaties/schapenhouderij-vakkundig-1>.

Vlaanderen, *“Basisregels voor een EPB aanvaarde bouwknop.”*, geraadpleegd in februari 2022. <https://www.energiesparen.be/EPB-pedia/bouwknopen/EPB-aanvaard/basisregels>.

Vochtbestrijdingsnel, *“7 Soorten waterdichte materialen.”*, geraadpleegd in december 2021. <https://www.vochtbestrijdingsnel.be/soorten-waterdichte-materialen>.

Vrebos A., Meiresonne E., *“Projectoefening duurzaam bouwen.”*. 2020.

VRT, *“China koopt massaal hout in ons land boven de marktprijs waardoor zagerijen in de problemen komen, zegt beroepsvereniging.”*, geraadpleegd in januari 2022. https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2021/10/17/_china-koopt-steeds-meer-hout-in-ons-land-en-verstoort-daardoor/.

W

Wageningen university and research, *“Dossier Methaan.”*, geraadpleegd in december 2021. <https://www.wur.nl/nl/Dossiers/dossier/Methaan-1.htm>

Wallonie service public SPW, *“Carte géologique de Wallonie.”*, geraadpleegd in november 2021. <http://geoapps.wallonie.be/Cigale/Public/#CTX=CGEOL#BBOX=138641.43717594363,266303.1508327043,-1767.1595418765646,200639.4952714331>.

Walraedt S., *“Het nut van isolatie in twijfel trekken is onverantwoord.”*, Knack. Februari 2018. https://trends.knack.be/economie/immo/het-nut-van-isolatie-in-twijfel-trekken-is-onverantwoord/article-opinion-968477.html?cookie_check=1645520410.

West-Vlaanderern, *“BATIC2.”*, geraadpleegd in november 2021. <https://www.projectendatabank.be/nl/projecten/batic2-114/>.

Wikipedia, *“Bitumen.”*, geraadpleegd in december 2021. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Bitumen>.

Wikipedia, "*Polyetheen*.", geraadpleegd in december 2021. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Polyetheen>.

Wikipedia, "*Polyster*.", geraadpleegd in december 2021. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Polyester>.

Wikipedia, "*Polyvinylchloride*.", geraadpleegd in december 2021.
<https://nl.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchloride>.

Wikipedia, "*Polyurethaan*.", geraadpleegd in december 2021. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Polyurethaan>

Wikipedia, "*Thermoplastisch elastomeer*.", geraadpleegd in december 2021.
https://nl.wikipedia.org/wiki/Thermoplastisch_elastomeer.

WITS, "*Belgium Trade*," geraadpleegd in november 2021,
<https://wits.worldbank.org/CountryProfile/en/Country/BEL/StartYear/1999/EndYear/2018/TradeFlow/Import/Indicator/MPRT-TRD-VL/Partner/ALL/Product/UNCTAD-SoP1>.

WTCB, "*TV264: Referentiedetails voor spouwmuren*.". 2017. Online available:
<https://www.wtcb.be/publicaties/technische-voorlichtingen/264/>.

WTCB, "*Het bouwdetail: een ware eisenbundel*.". 2015. Online available: <https://www.wtcb.be/publicaties/wtcb-dossiers/2015-01.01/>.

WTCB, "*Muurvoet-aansluiting op een vloer op de volle grond*.", geraadpleegd in februari 2022.
<https://www.wtcb.be/bouwdetails/1331/?constructionElementExtra=Buitenmuur&constructionElements=Buitenvloer&houseFilterId=f1a02bd8-1723-506b-c528-0a478d96e0bf&pageId=1&materials=Metselwerk>.

WTCB, "*Milieu-impact van houtskeletbouw*.". Januari 2013.

WTCB, "*Houtskeletbouw: een systeem in volle ontwikkeling*.". 2006.

WTCB, "*Brandbeveiliging van houtbouw*.". Januari 2013.

Z

Zwembadenpro, "*TPO FOLIE WATERDICHTING – Een kleurrijke folie met lange levensduur*.", geraadpleegd in december 2021. <https://zwembadenpro.be/zwemvijver/tpo-folie-waterdichting-een-kleurrijke-folie-met-lange-levensduur>.

LIJST MET BIJLAGEN

Lijst met bijlagen	
1	Belgische import 2019
2	Belgische export 2019
3	Geologie
4	Bio-based materialen
5	Hergebruik van materialen
6	Restproducten
7	Membranen
8	Functietabel materialen
9	Bouwdetails
9.1	Strobalen 1
9.2	Strobalen 1b
9.3	Strobalen 1c
9.4	Strobalen 2
9.5	Strobalen 2b
9.6	Strobalen detail 1 en 1b
9.7	Strobalen detail 1c
9.8	Strobalen detail 2 en 2b
9.9	Stampaarde 1
9.10	Stampaarde 1b
9.11	Stampaarde 1c
9.12	Stampaarde 2
9.13	Stampaarde 2b
9.14	Stampaarde 2c
9.15	Stampaarde detail 1 en 1b
9.16	Stampaarde detail 1c en 2c
9.17	Stampaarde detail 2 en 2b
10	Standaard bouwdetails
10.1	Spouwmuur
10.2	Houtskelet
10.3	ETICS
11	Spouwmuur met drainage
12	Vergelijking wand en vloer
13	Vergelijking fundering
14	Overzicht vergelijking bouwdetails
15	Bronnen kostprijs materialen
16	Theoretische bouwdetails versus TOTEM bouwdetails
16.1	Spouwmuur
16.2	Houtskelet
16.3	ETICS
16.4	Strobalen 1
16.5	Strobalen 2
16.6	Stampaarde 1
16.7	Stampaarde 2
16.8	Funderingen
17	Kleurenindex omkeerbaarheid en levensduur op bouwdetails
17.1	Spouwmuur: omkeerbaarheid en levensduur
17.2	Houtskelet: omkeerbaarheid en levensduur
17.3	ETICS: omkeerbaarheid en levensduur
17.4	Strobalen 1: omkeerbaarheid
17.5	Strobalen 2: omkeerbaarheid
17.6	Stampaarde 1: omkeerbaarheid
17.7	Stampaarde 2: omkeerbaarheid
17.8	Strobalen 1: levensduur
17.9	Strobalen 2: levensduur
17.10	Stampaarde 1: levensduur
17.11	Stampaarde 2: levensduur

BIJLAGE 1: Belgische Import

Belgische import 2019					
	Subtotaal (10^9\$)	% van subtotaal	Exportprijs product (€)	Prijs per kg (€/kg)	Export gewicht (10^3t)
Mineralen 47,1					
Petroleum (Refined, gas en rauwe)	78,3	41908295455	1,666666667	25144,97727	
Kolen	5,66	3029386364	0,52	5825,743007	
Zink erts	2,27	1214965909	0,227272727	5345,85	
Cement	0,36	192681818,2	0,21	917,5324675	
Grind en steenslag	0,19	101693181,8	0,15	677,9545455	
Zand	0,3	160568181,8	0,06	2676,136364	
Metalen 27,4					
Ijzer (gecoat en gewalst, gewalst, structuren, koud-gewalst)	29,41	9157204545	0,26	35220,01748	
Koper (ruw en afval)	8,73	2718204545	6,5	418,1853147	
Aluminum (ruw, platen en staven)	6,35	1977159091	1,45	1363,557994	
Staal	3,92	1220545455	0,85	1435,935829	
Stainless steel	2,24	697454545,5	1,6	435,9090909	
Ruwe zink	2,21	688113636,4	1,5	458,7424242	
Stenen en glas 4					
Glasvezels	8,25	375000000	1,56	240,3846154	
Veiligheidsglas	11,3	513636363,6	4,25	120,855615	
Ongeglazuurde keramiek	7,93	360454545,5	0,30625	1176,994434	
Cement	4,61	209545454,5	0,21	997,8354978	
Snelbouwstenen	3,25	147727272,7	0,175	844,1558442	
Float glas	3,15	143181818,2	1,466666667	97,62396694	
Rotswol	2,86	130000000	0,47826087	271,8181818	
Baksteen	1,25	56818181,82	0,30625	185,528757	
Asfalt	0,94	42727272,73	0,718	59,50873639	
Houten producten 3,16					
Gezaagd hout	25	897727272,7	3,4	264,0374332	
Schrijnwerk	9,43	338622727,3	7	48,37467532	
Multiplex	9,2	330363636,4	4,7	70,2901354	
Houten fiberboard	8,76	314563636,4	1,715961098	183,3162982	
Ruw hout	7,48	268600000	1,35	198,962963	
Spaanplaat	4,65	166977272,7	3,269073569	51,07785713	
Diverse 7,17					
Prefab gebouwen	1,91	155621590,9	50000	0,003112432	

BIJLAGE 2: Belgische Export

Belgische export 2019					
	Subtotaal (10^9\$)	% van subtotaal	Exportprijs product (€)	Prijs per kg (€/kg)	Export gewicht (10^3t)
Mineralen 38,3					
Petroleum (Refined, gas en rauwe)		82,42	35871431818	1,666666667	21522,85909
Kolen		5,69	2476443182	0,52	4762,390734
Zink erts		1,8	783409090,9	0,227272727	3447
Cement		0,58	252431818,2	0,21	1202,056277
Grind en steenslag		0,43	187147727,3	0,15	1247,651515
Zand		0,33	143625000	0,06	2393,75
Metalen 31,8					
Ijzer (gecoat en gewalst, gewalst, structuren, koud-gewalst)		35,62	12871772727	0,26	49506,81818
Stainless steel		9,32	3367909091	1,6	2104,943182
Staal		6,3	2276590909	0,85	2678,342246
Aluminum platen en staven		4,58	1655045455	1,45	1141,410658
Koper		3,85	1391250000	6,5	214,0384615
Ruwe zink		3,23	1167204545	1,5	778,1363636
Stenen en glas 4,2					
Glasvezels		16	763636363,6	1,56	489,5104895
Veiligheidsglas		9,55	455795454,5	4,25	107,2459893
Cement		8,64	412363636,4	0,21	1963,636364
Float glas		7,23	345068181,8	1,466666667	235,2737603
Rotswol		3,97	189477272,7	0,47826087	396,1797521
Baksteen		3,85	183750000	0,30625	600
Asfalt		2,38	113590909,1	0,718	158,2046088
Pleister		2,06	98318181,82	2,6388	37,2586713
Snelbouwstenen		1,35	64431818,18	0,175	368,1818182
Ongeglazuurde keramiek		1,32	63000000	0,30625	205,7142857
Houten producten 2,95					
Houten fiberboard		21	703977272,7	1,715961098	410,2524663
Gezaagd hout		18,4	616818181,8	3,4	181,4171123
Ruw hout		14,1	472670454,5	1,35	350,1262626
Spaanplaat		10,4	348636363,6	3,269073569	106,6468393
Multiplex		7,28	244045454,5	4,7	51,9245648
Schrijnwerk		7,23	242369318,2	7	34,62418831
Diverse 4,35					
Prefab gebouwen		5,27	260505681,8	50000	0,005210114

BIJLAGE 3: Geologie

Geologie						
Grondstof	Regio in België	Steengroeve	Afstand tot Brussel	Schaars	Ecologie	
					Ecologisch in België	Aanbod in België
Leem	Midden	Quenast +Brussel	25 km	nee	x	x
Zand	Noord-West-Midden	Quenast + Brugge + Lommel	25 -110 km	nee	x	x
Grind	Limburg-Midden	Quenast + Rochettes + Maasmechelen	115-150 km	nee	x	x
Klei	Kust-Noord-Midden	Quenast + Beerse + Kortemark +Rumst	25-100 km	nee	x	x
Natuursteen						
Zandsteen	Zuid-Midden	Lustin + Rochettes + Quenast + Bierghes	25-150 km	nee	x	x
Kalksteen	Midden-Zuid	Antoing + Monceau-sur-sambre + Quenast	25-85 km	nee	x	x
Blauwe steen	Zuid	Hainaut + Ouffet +Sprimont	50-120 km	nee	x	x
Krijt	Midden	Haccourt	110 km	nee	x	x
Porfier	Midden	Quenast + Lessines +Bierghes	25-60 km	nee	x	x
Leisteen	Midden	Herbeumont	160 km	nee	x	x

BIJLAGE 4: Bio-based materialen

[illegible]

BIJLAGE 5: Hergebruik van materialen

Hergebruik van materialen												
Materiaal	Vloer	Vloerbekleding				Wandbekleding	Gevelbekleding		Vloer	Structuur		Fundering
		Vochtige ruimtes	Niet vochtige ruimtes	Intensief gebruik	Niet-intensief gebruik		Waterdicht	Niet-waterdicht		Stijl/regel	Vol	
HOUT												
Steenschotten			x									
Scheepshout			x									
Constructiehout										x		
Gelijmd gelamelleerd hout										x		
Schuurhout							x					
Plankenvloer in massief hout			x									
BAKSTEEN												
Vol keramisch											x	
Straatbaksteen	x											
LEIEN												
Natuurleiste								x				
TEGELS												
Ongeglazuurde keramische tegels		x				x						
Ongeglazuurde terracotta tegels			x		x							
Faience tegels						x						
Cementtegels			x	x								
Verhoogde vloeren									x			
BETON												
Betonbreuksteen									x			x

BIJLAGE 6: Restproducten

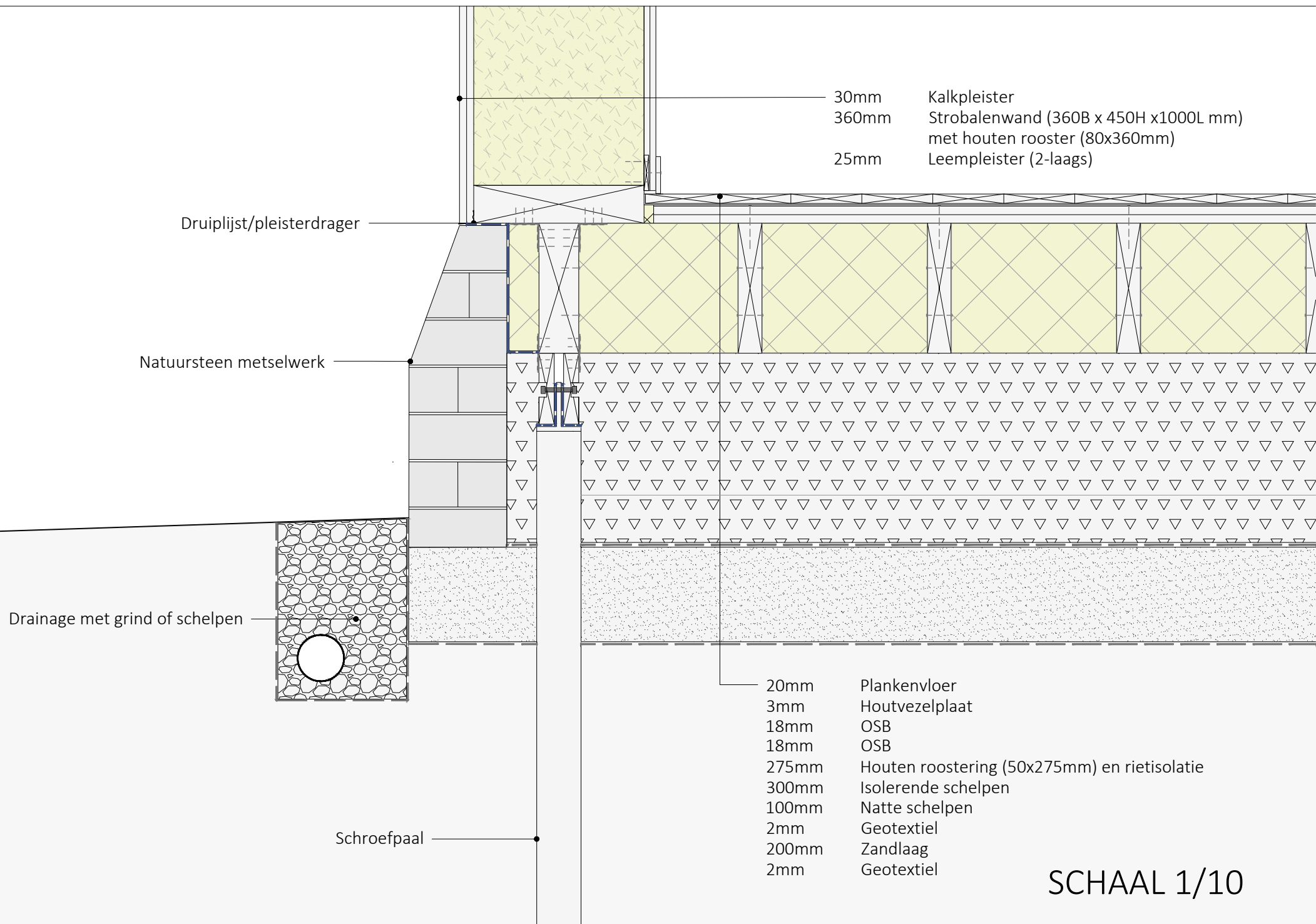
Restproducten									
Materiaal	CO2 absorptie	Ecologie			Productie	Materiaal	Afstand tot Brussel	Risico verschuiving van bij- naar hoofdproduct	Chemische bewerking
		Productie Europa + ecologisch in België	Productie in België	Materiaal aanwezig in België					
Recycork			x	x	Scherpenheuvel	Recycork	70 km		
Houtvezels	20-30 kg per boom		x	x	Tongeren	Houtvezels	90 km		Niet noodzakelijk
Katoen		x	x	x	Billy-Berclau (Metisse)	Katoen	130 km		
Carbstone	350 kg per 1m ³		x	x	Genk	Carbstone	100 km	x	
Glasschuim			x	x	Tessenderlo	Glasschuim	68 km		

BIJLAGE 7: Membranen

Membranen					
	Omkeerbare verbinding	Recycleerbaar	Schadelijke stoffen	Nibe oke	TOTEM oke
Bitumen				X	
TPO	X	X	X	X	
PP folie	X	X	X		X
PE folie	X	X	X		X
PVC			X		
PU	X (Schuim)		X		
DPC	X	X	X	X	
POCB	X	X	X	X	
Cementgebonden coating	X				
Plantaardig membraam				X	
EPDM	X	X	X	X	

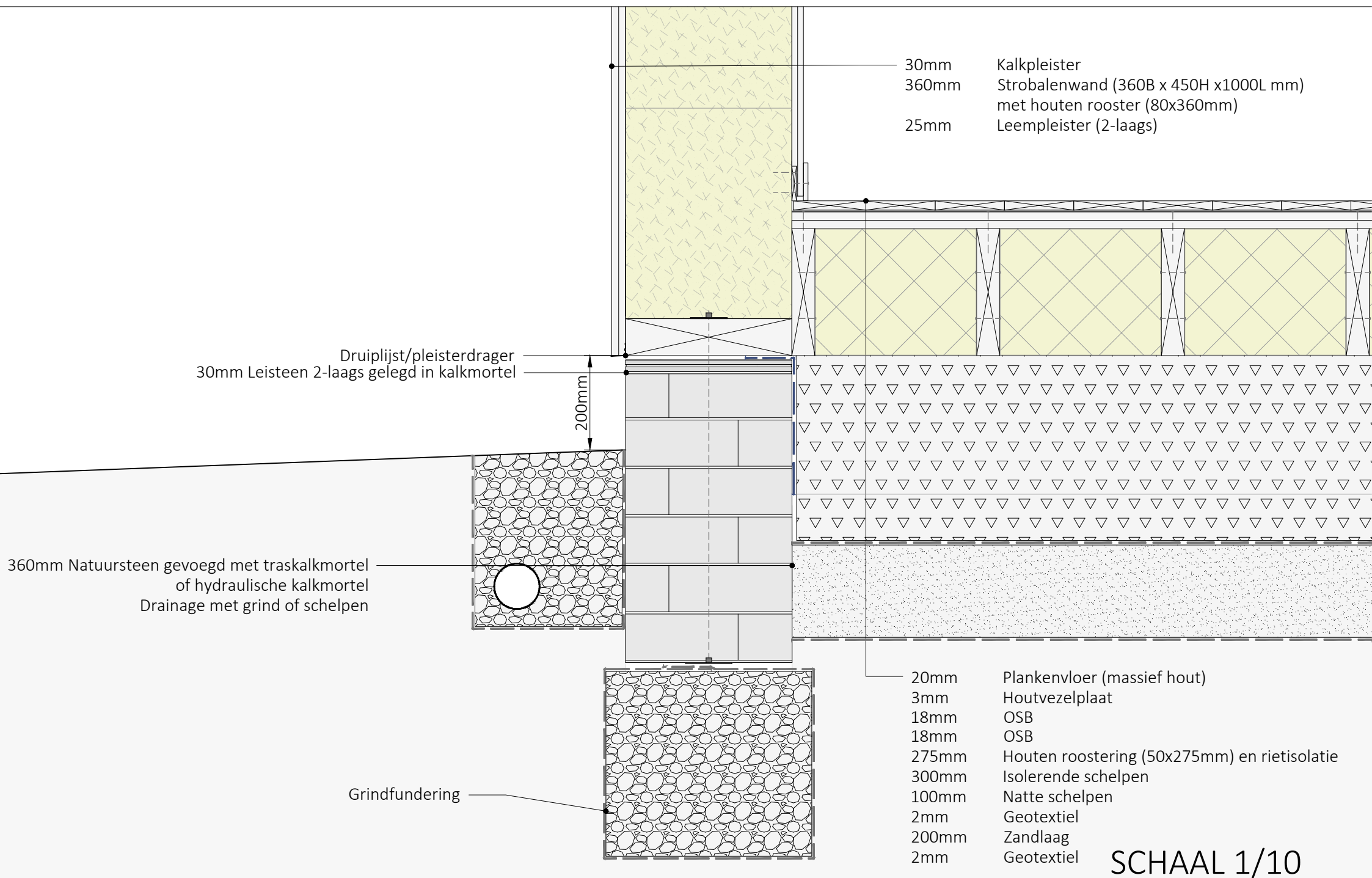
BIJLAGE 9

BIJLAGE 9.1 - MUURVOET STROBALEN 1: Schroefpalen

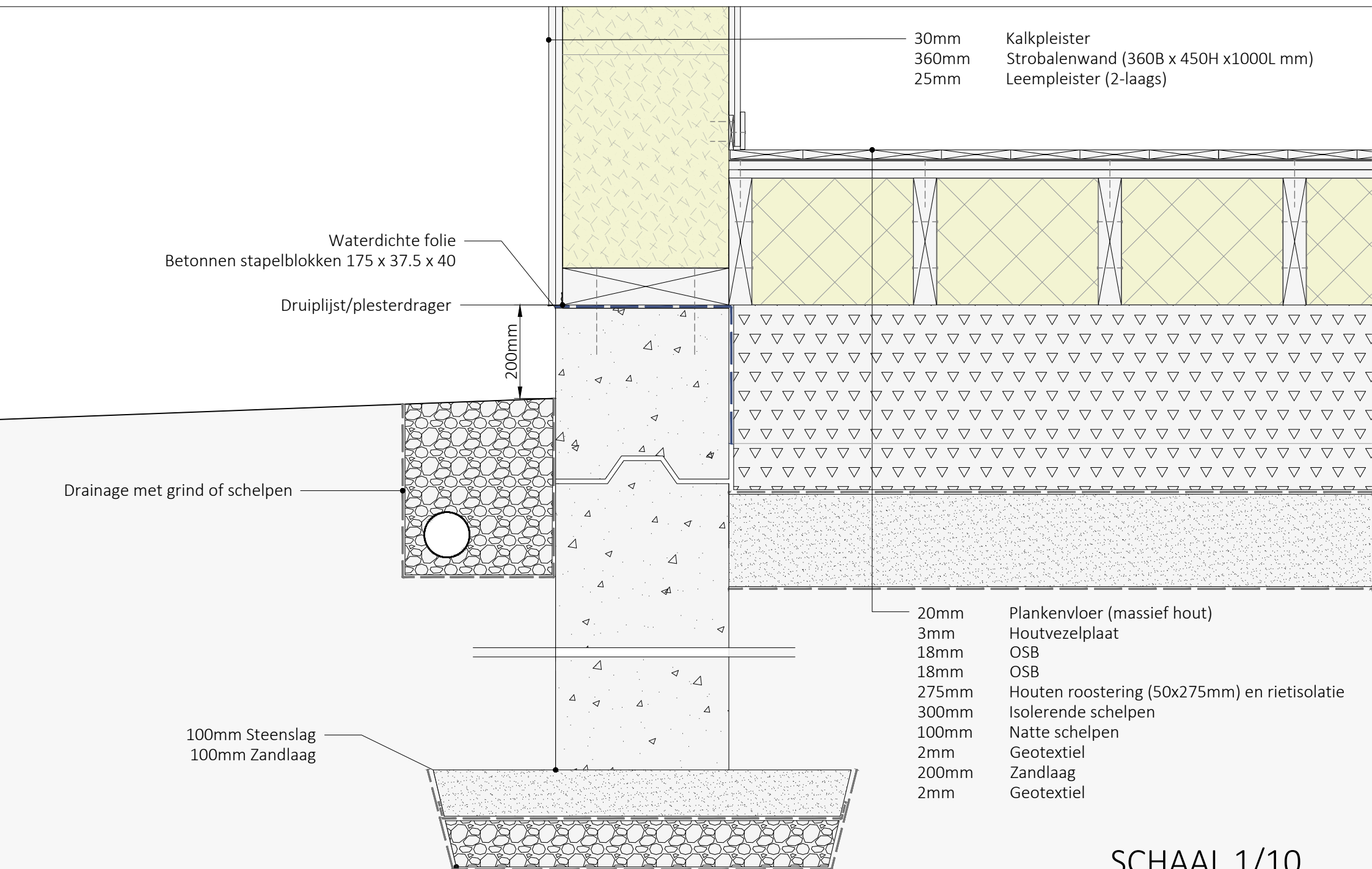


SCHAAL 1/10

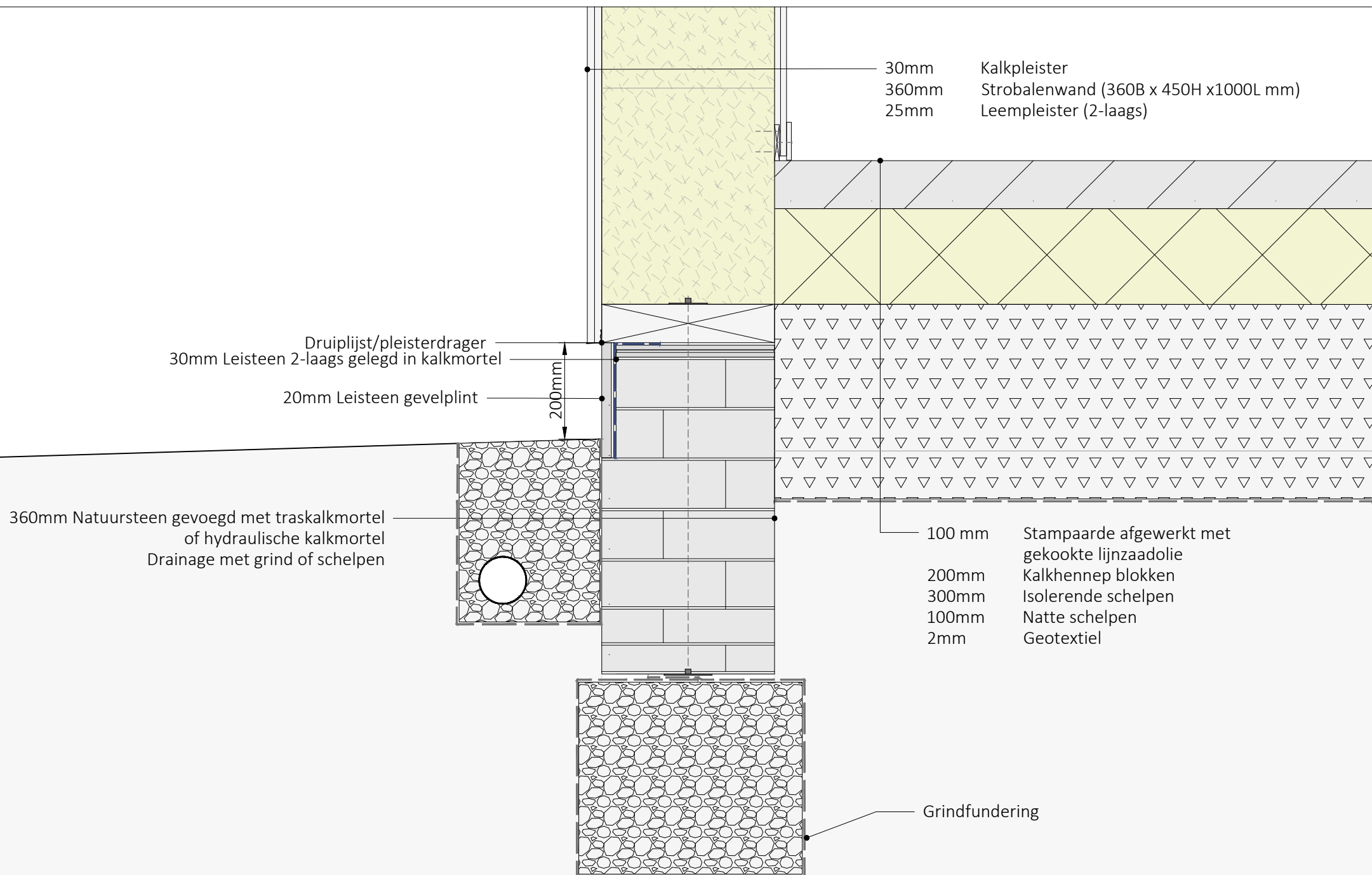
BIJLAGE 9.2 - MUURVOET STROBALEN 1b: Grindfundering



BIJLAGE 9.3 - MUURVOET STROBALEN 1c: Betonnen stapelblokken

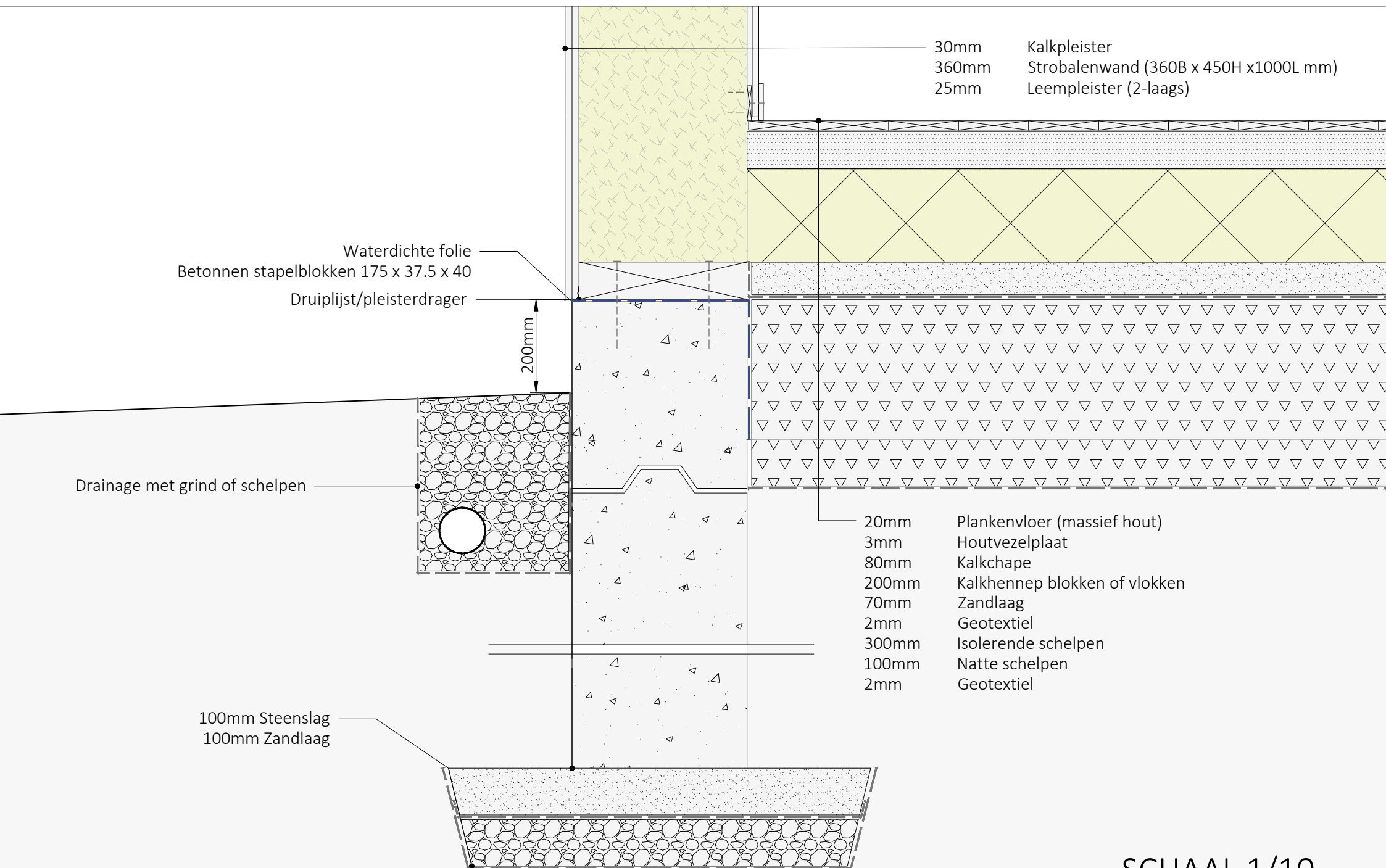


BIJLAGE 9.4 - MUURVOET STROBALEN 2: Grindfundering

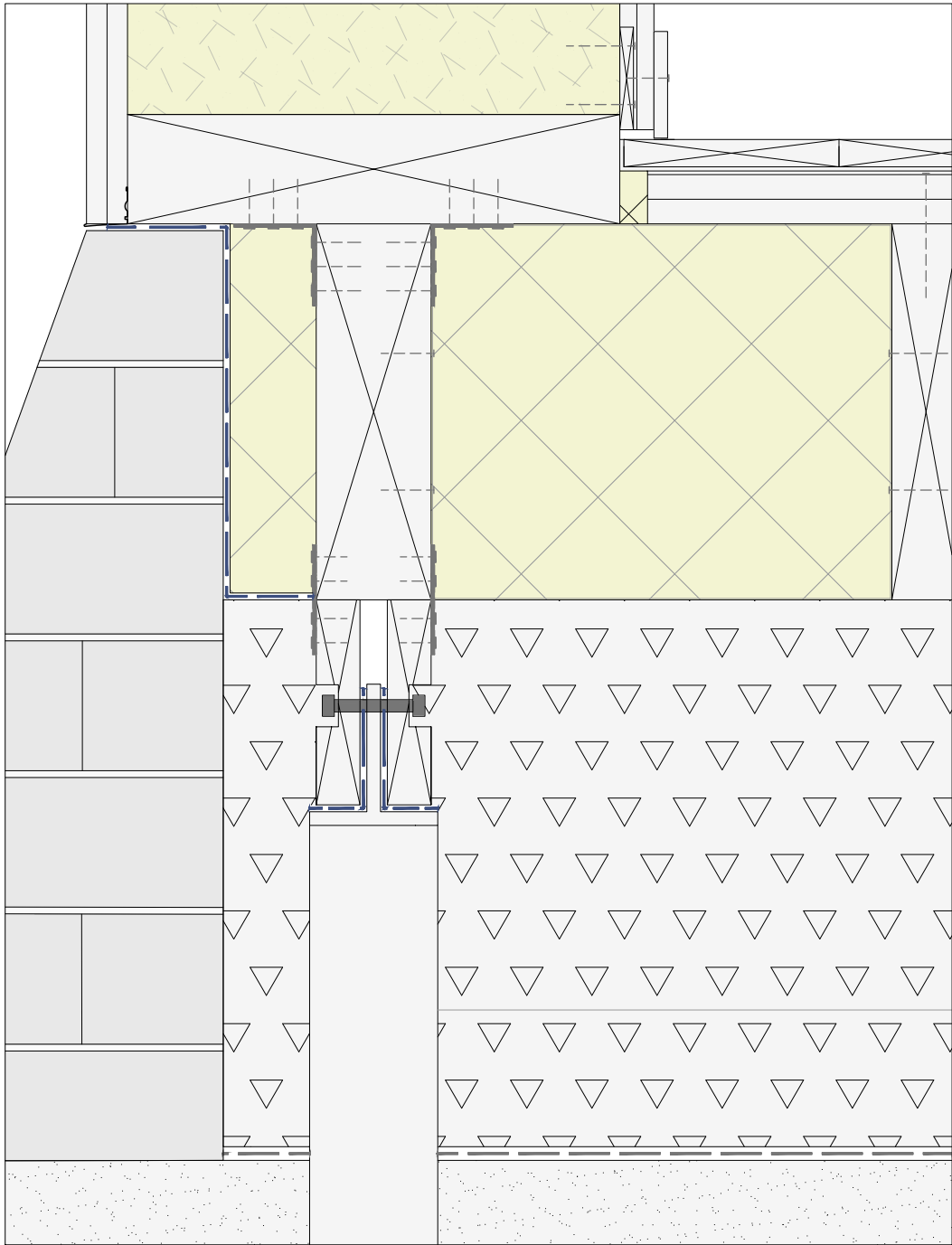


SCHAAL 1/10

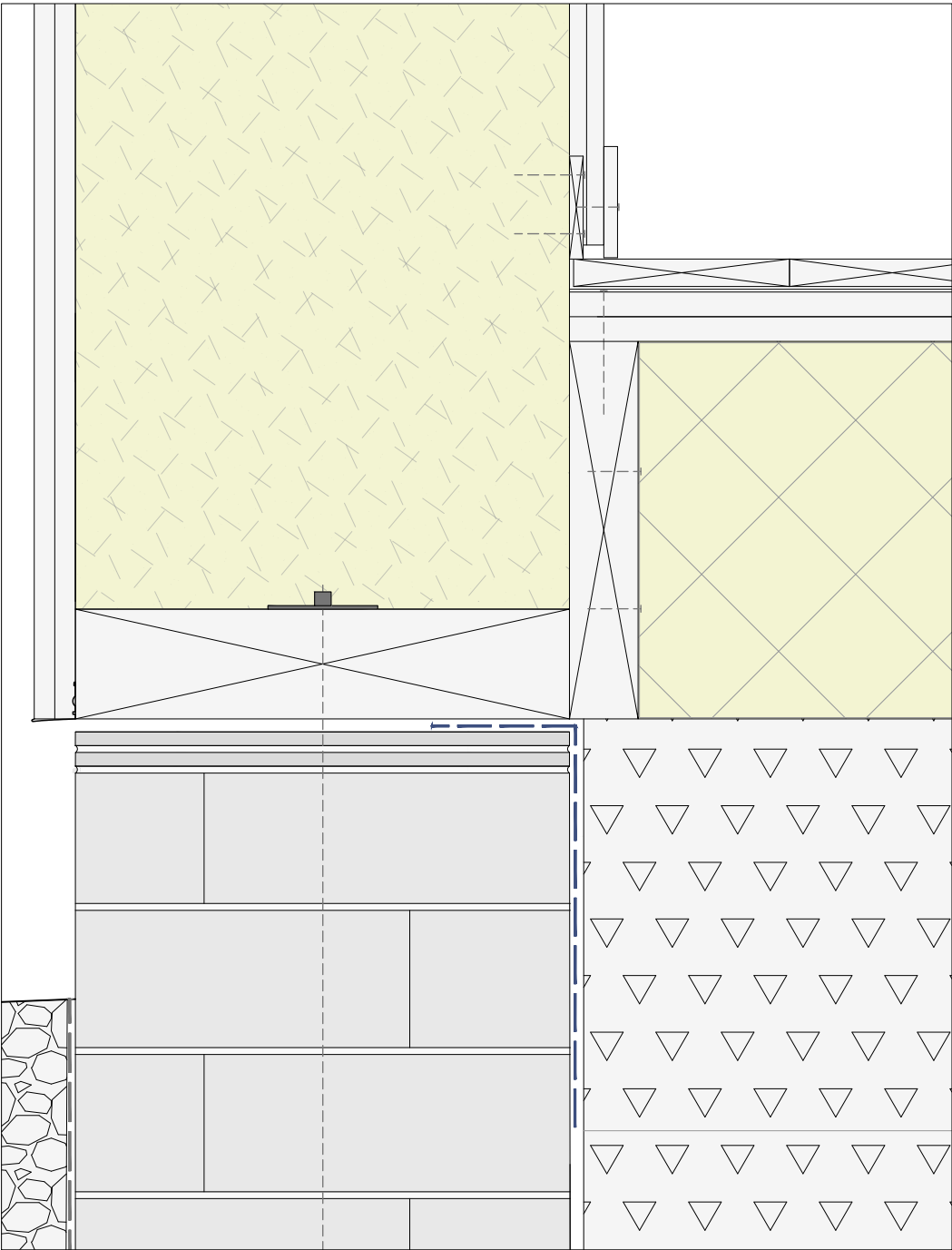
BIJLAGE 9.5 - MUURVOET STROBALEN 2b: Betonnen stapelblokken

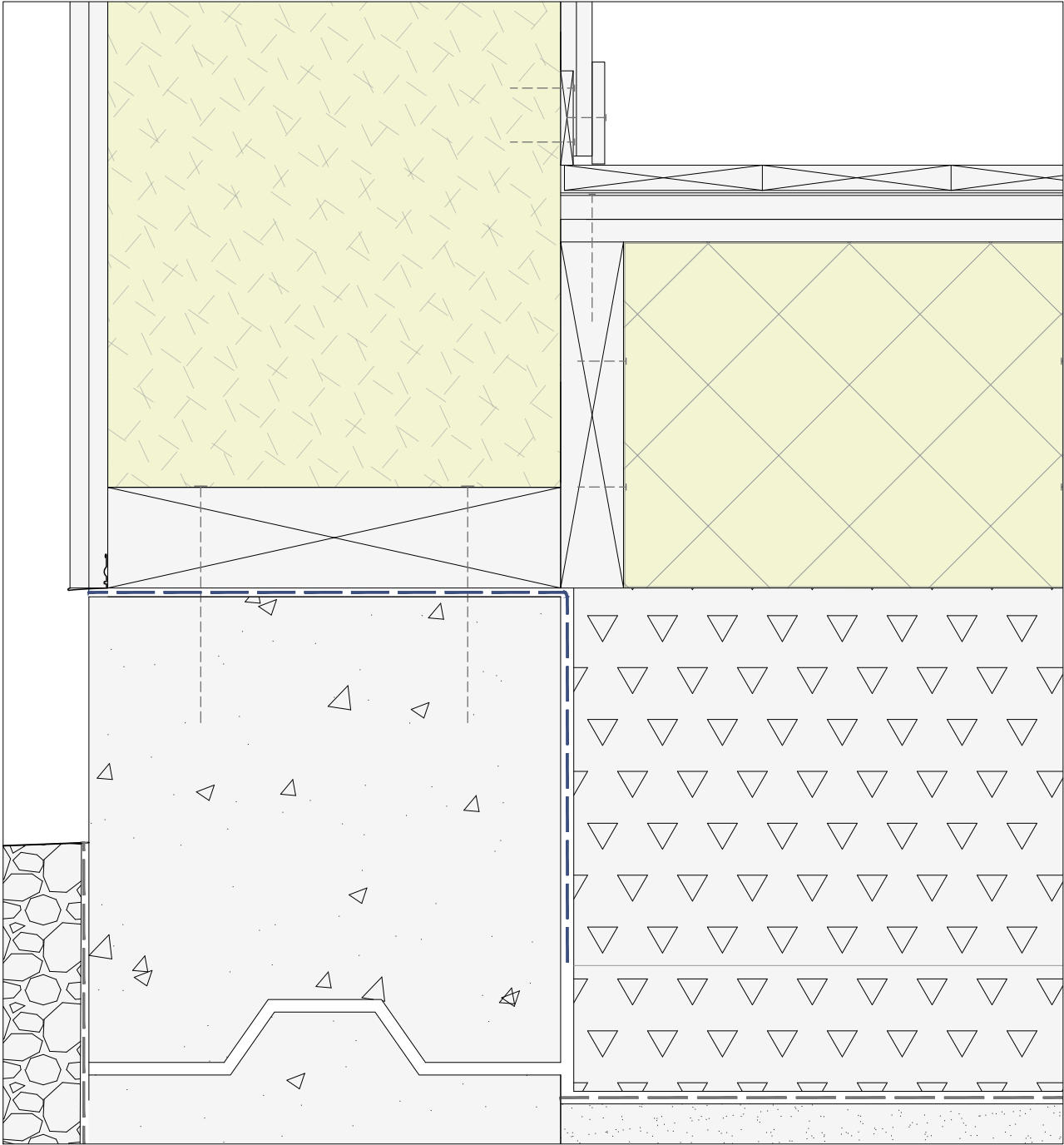


BIJLAGE 9.6: Strobalen 1

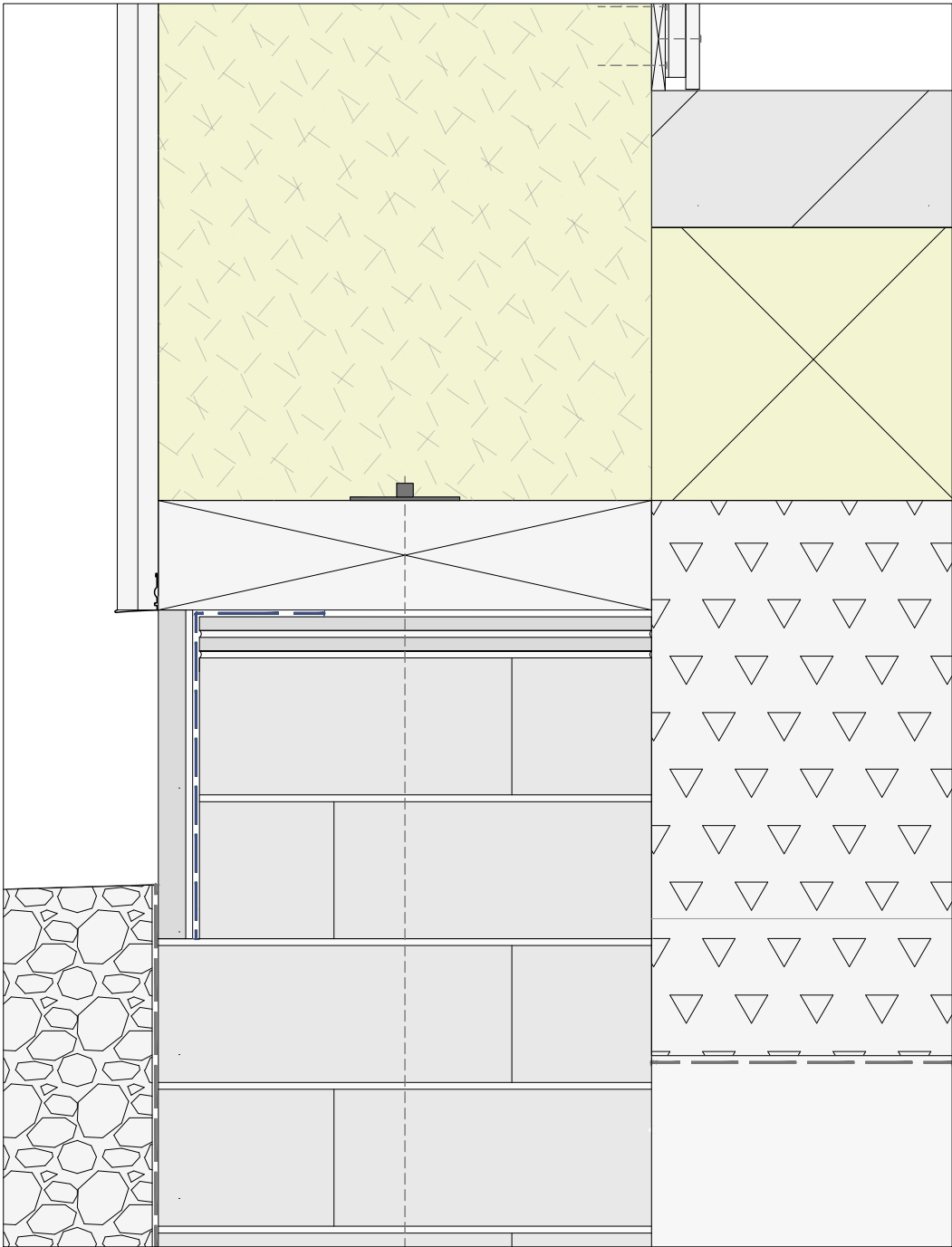


Strobalen 1b

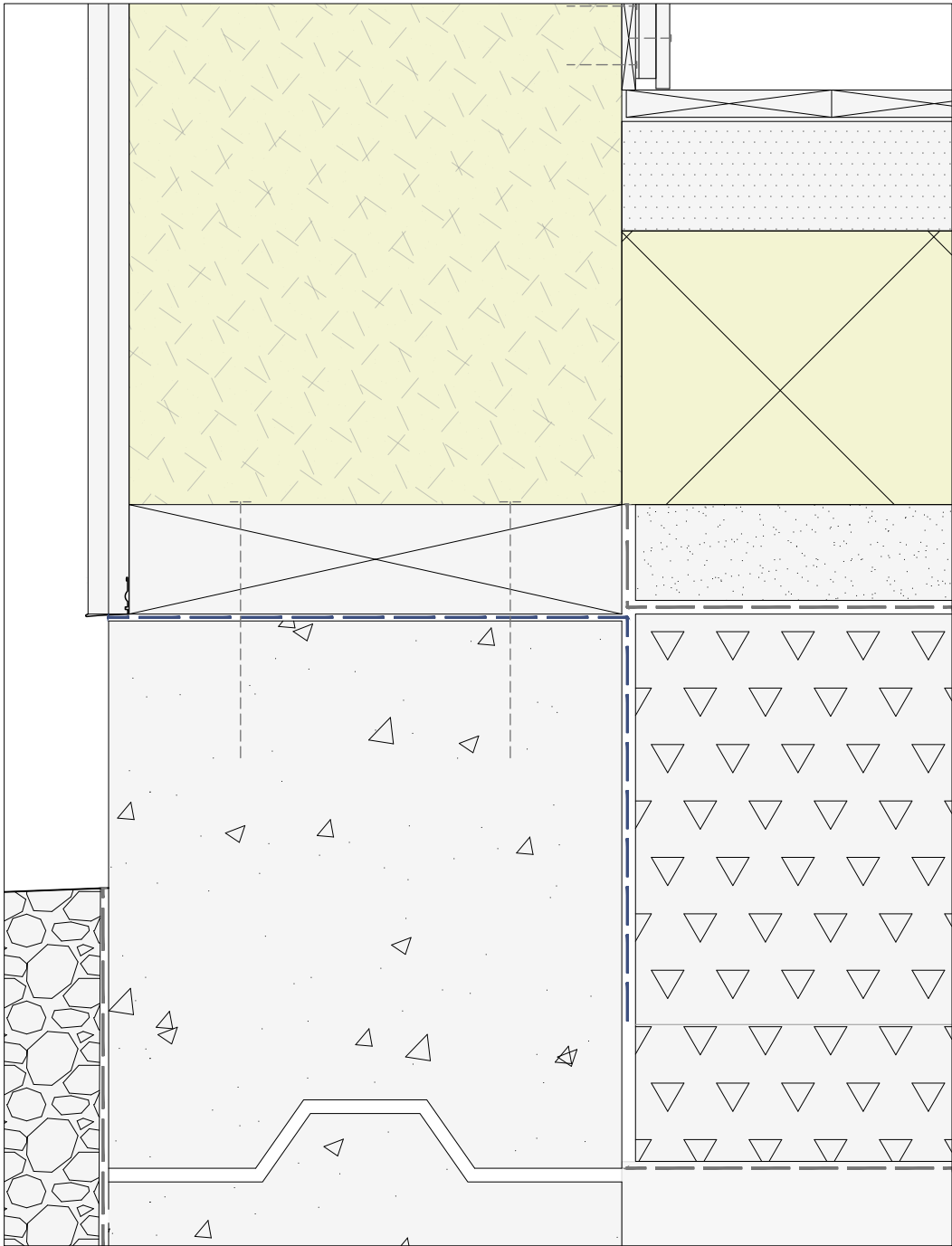




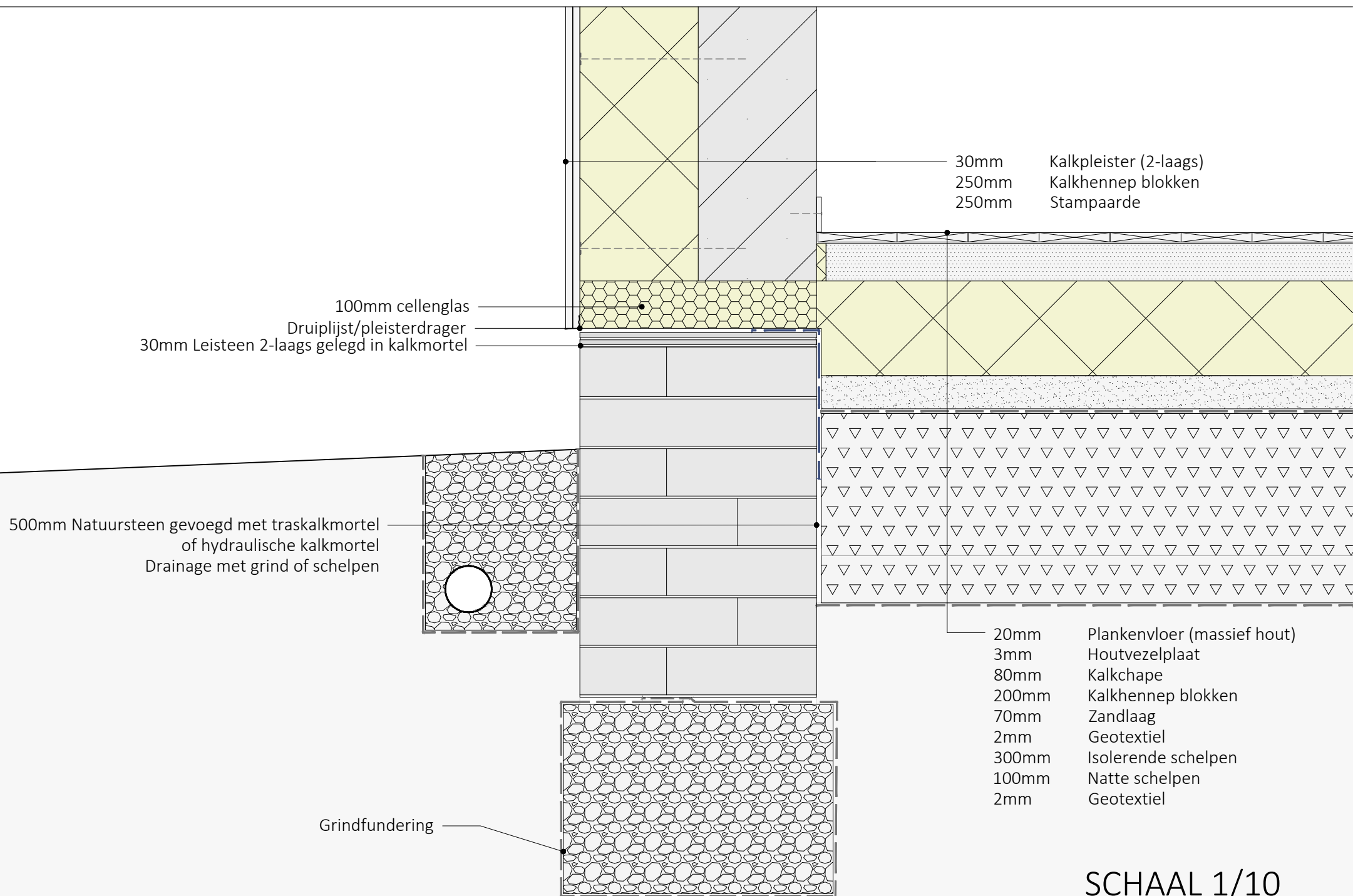
BIJLAGE 9.8: Strobalen 2



Strobalen 2b

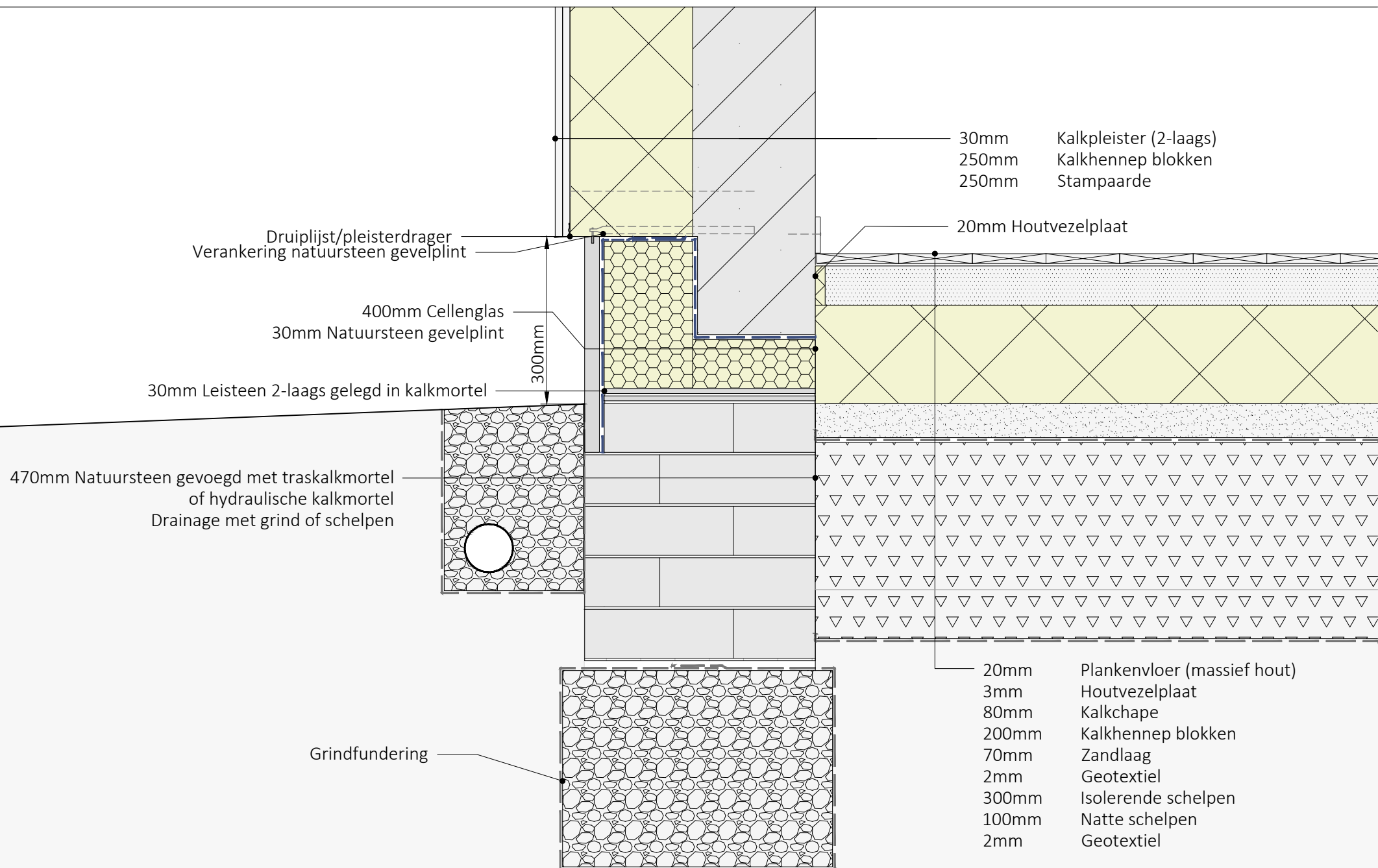


BIJLAGE 9.9 - MUURVOET STAMPAARDE 1: Buitenisolatie



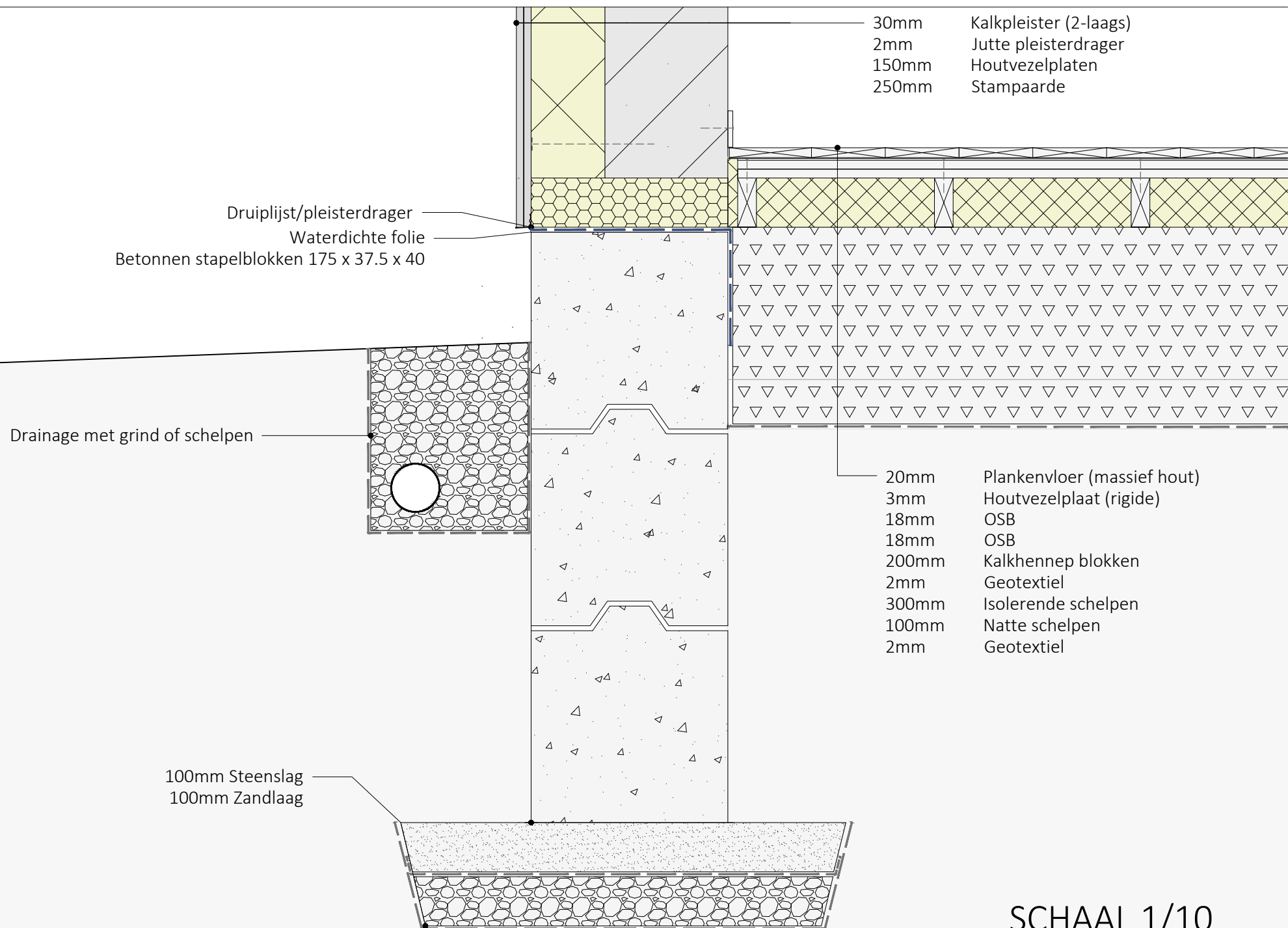
SCHAAL 1/10

BIJLAGE 9.10 - MUURVOET STAMPAARDE 1b: Buitenisolatie



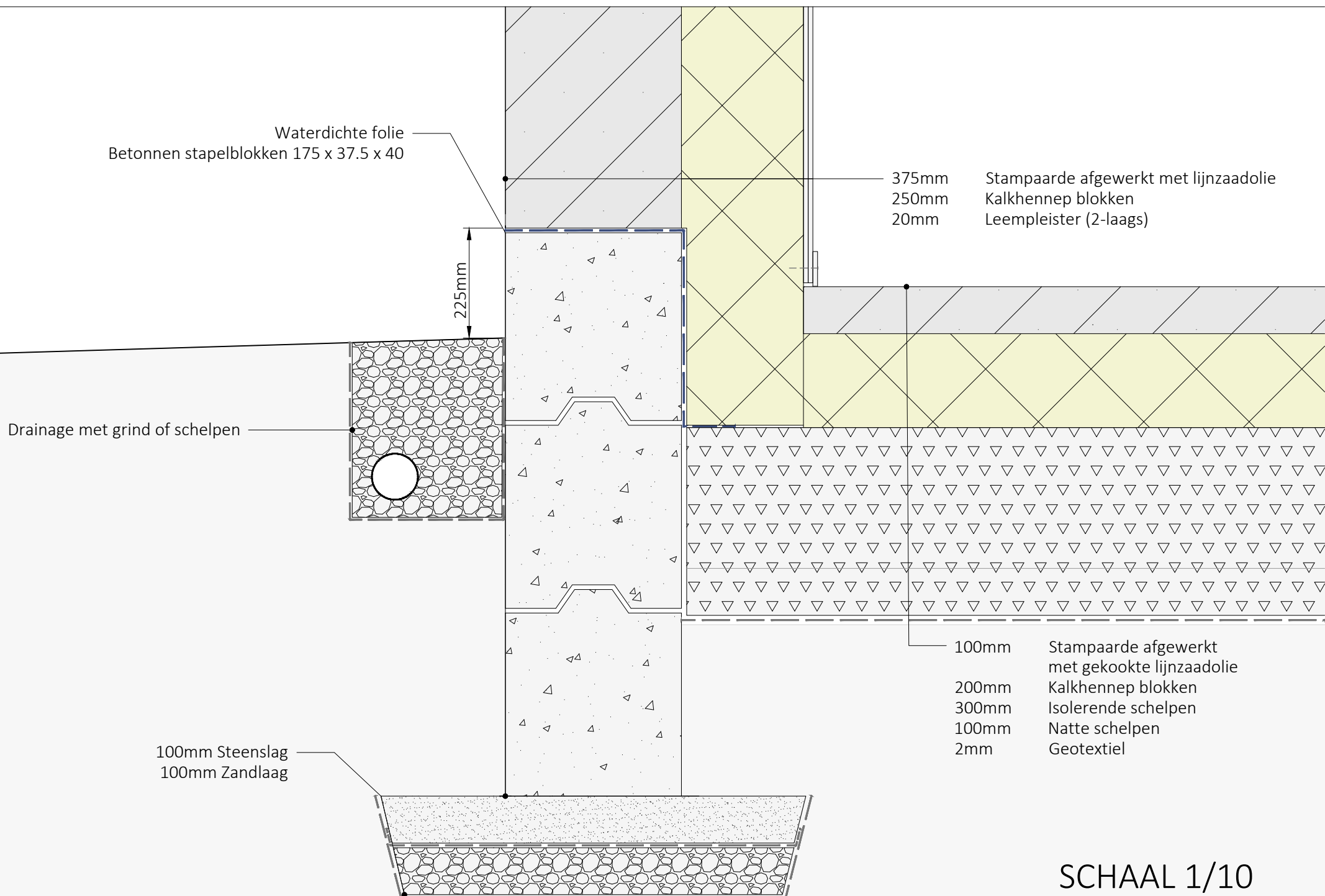
SCHAAL 1/10

BIJLAGE 9.11 - MUURVOET STAMPAARDE 1c: Buitenisolatie (houtvezelplaat)



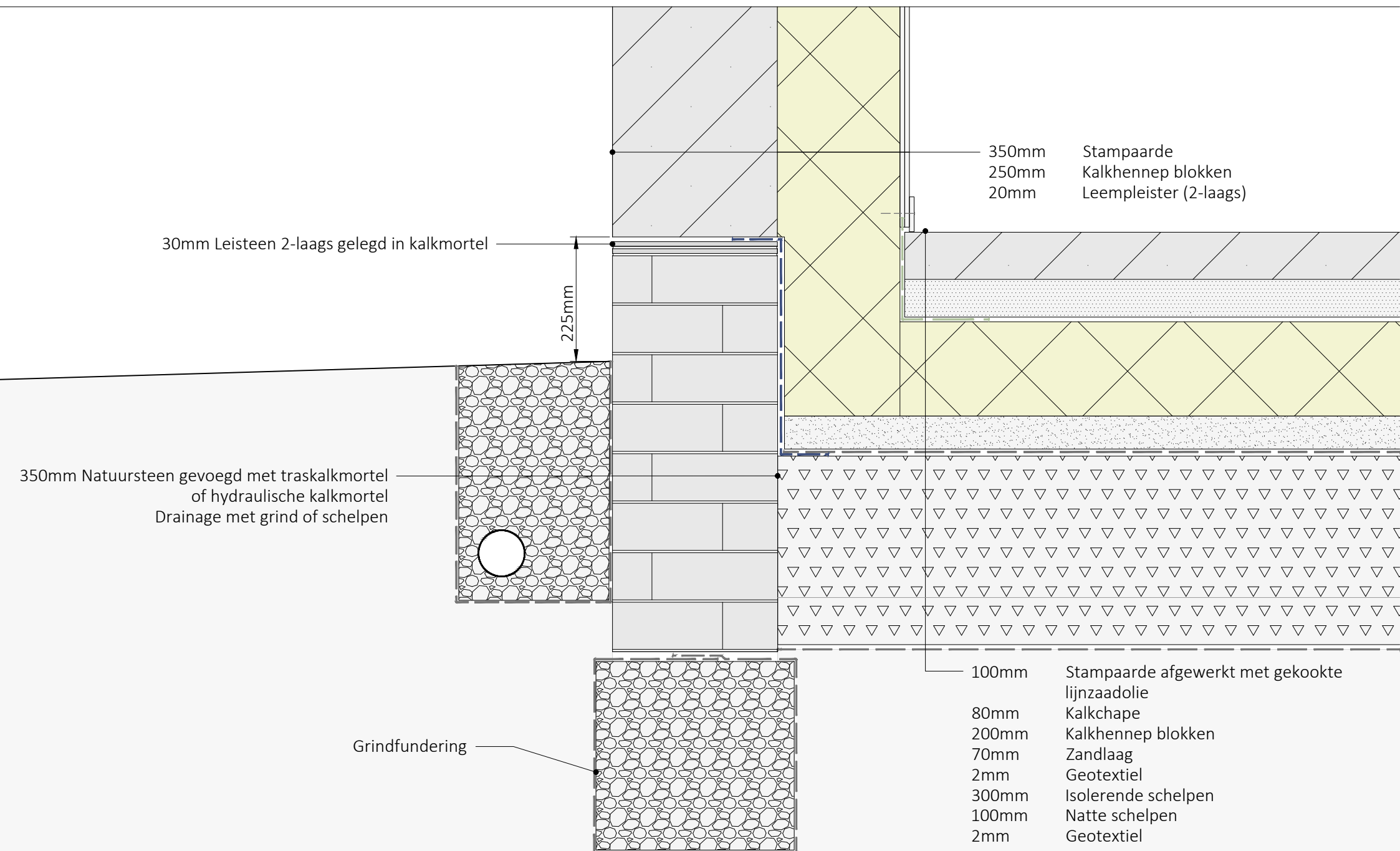
SCHAAL 1/10

BIJLAGE 9.12 - MUURVOET STAMPAARDE 2: Binnenisolatie



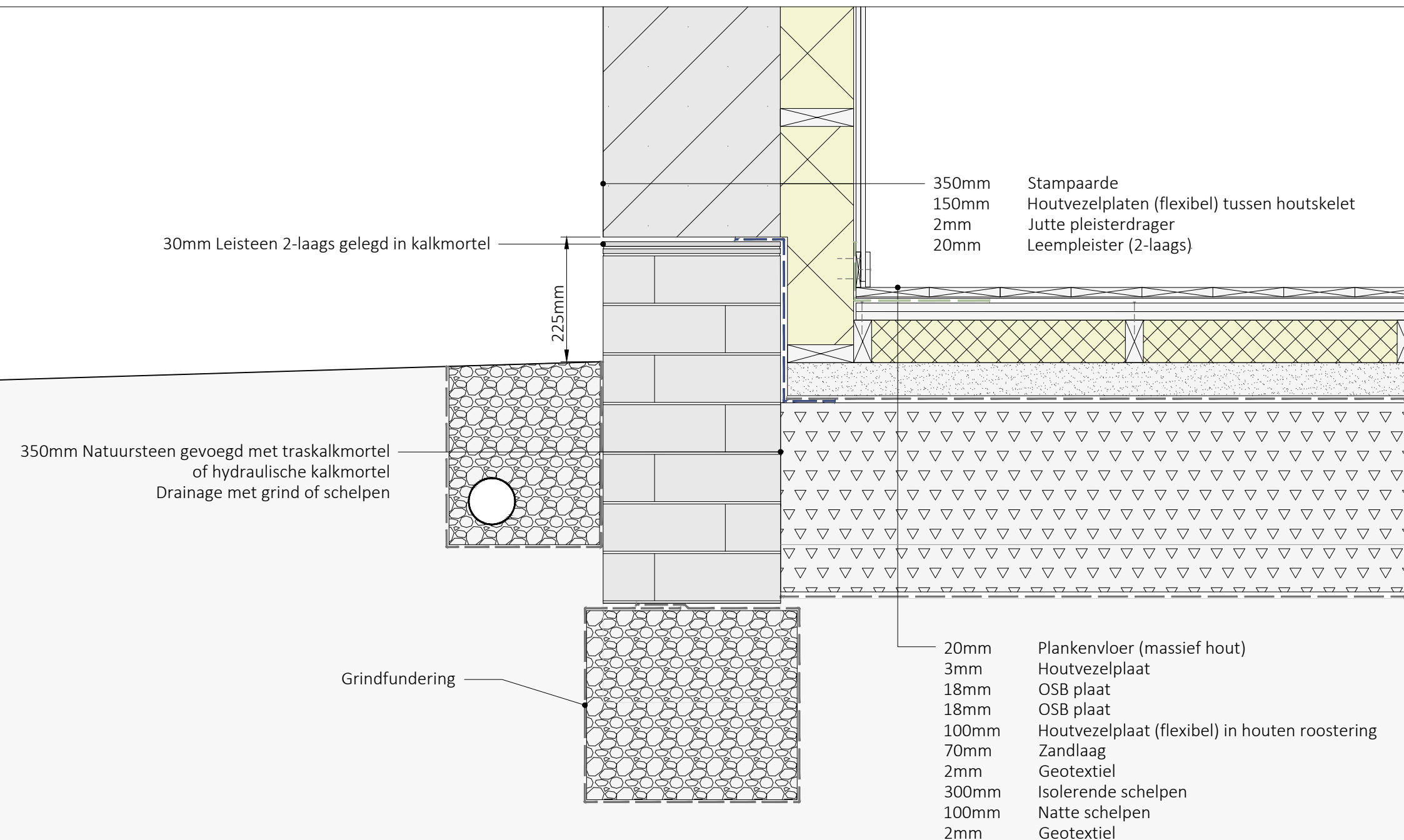
SCHAAL 1/10

BIJLAGE 9.13 - MUURVOET STAMPAARDE 2b: Binnenisolatie (grindfundering)



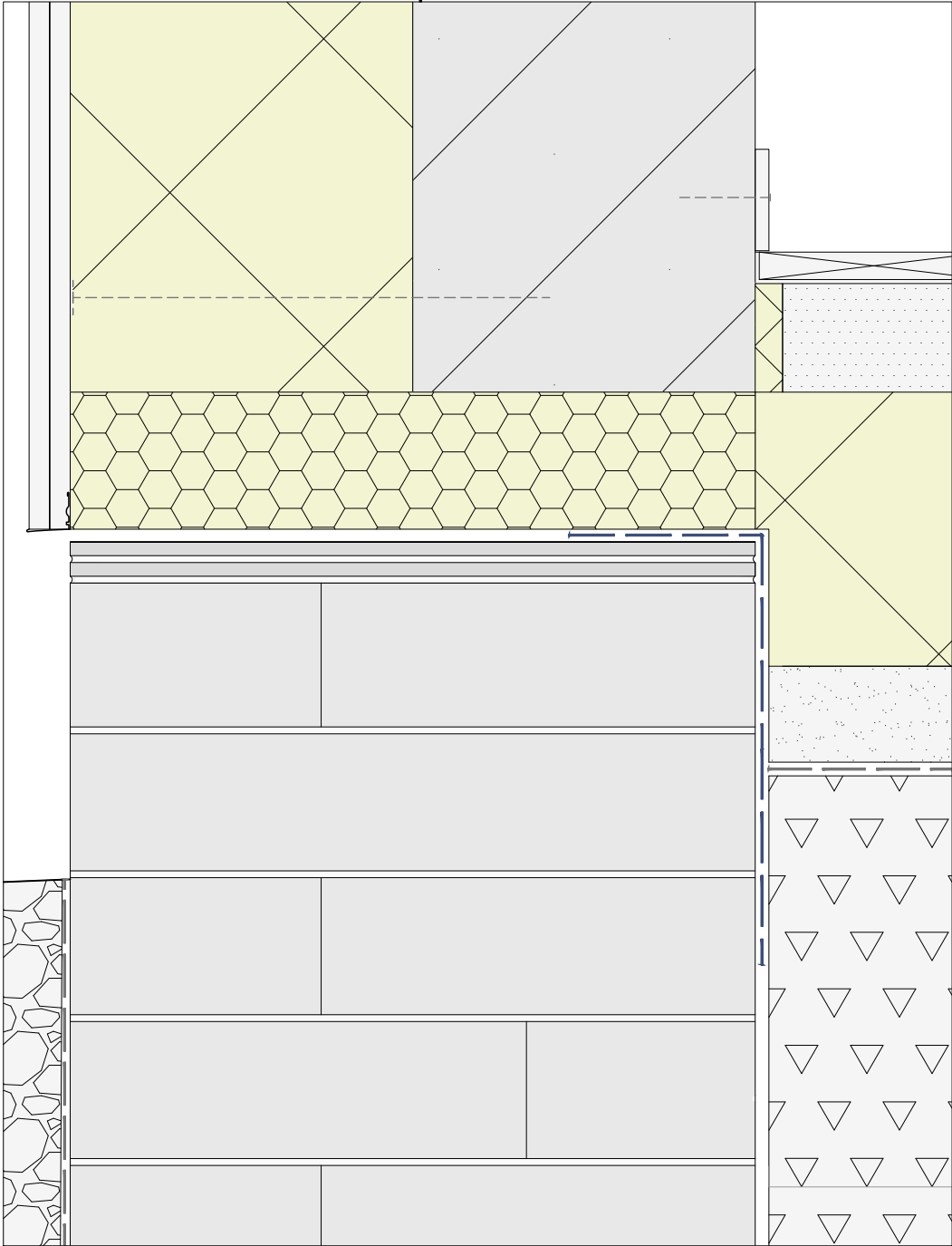
SCHAAL 1/10

BIJLAGE 9.14 - MUURVOET STAMPAARDE 2c: Binnenisolatie (houtvezelplaat)

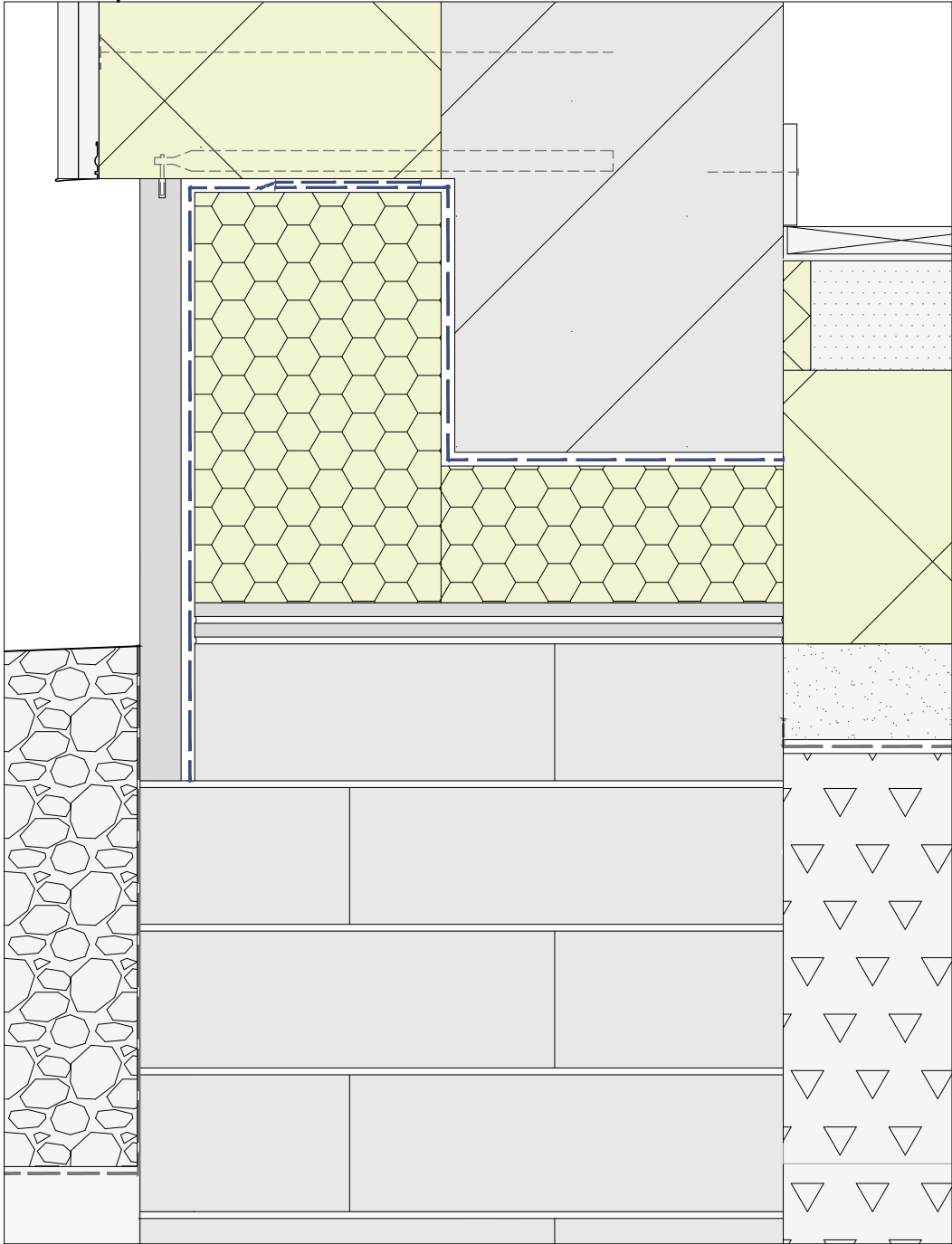


SCHAAL 1/10

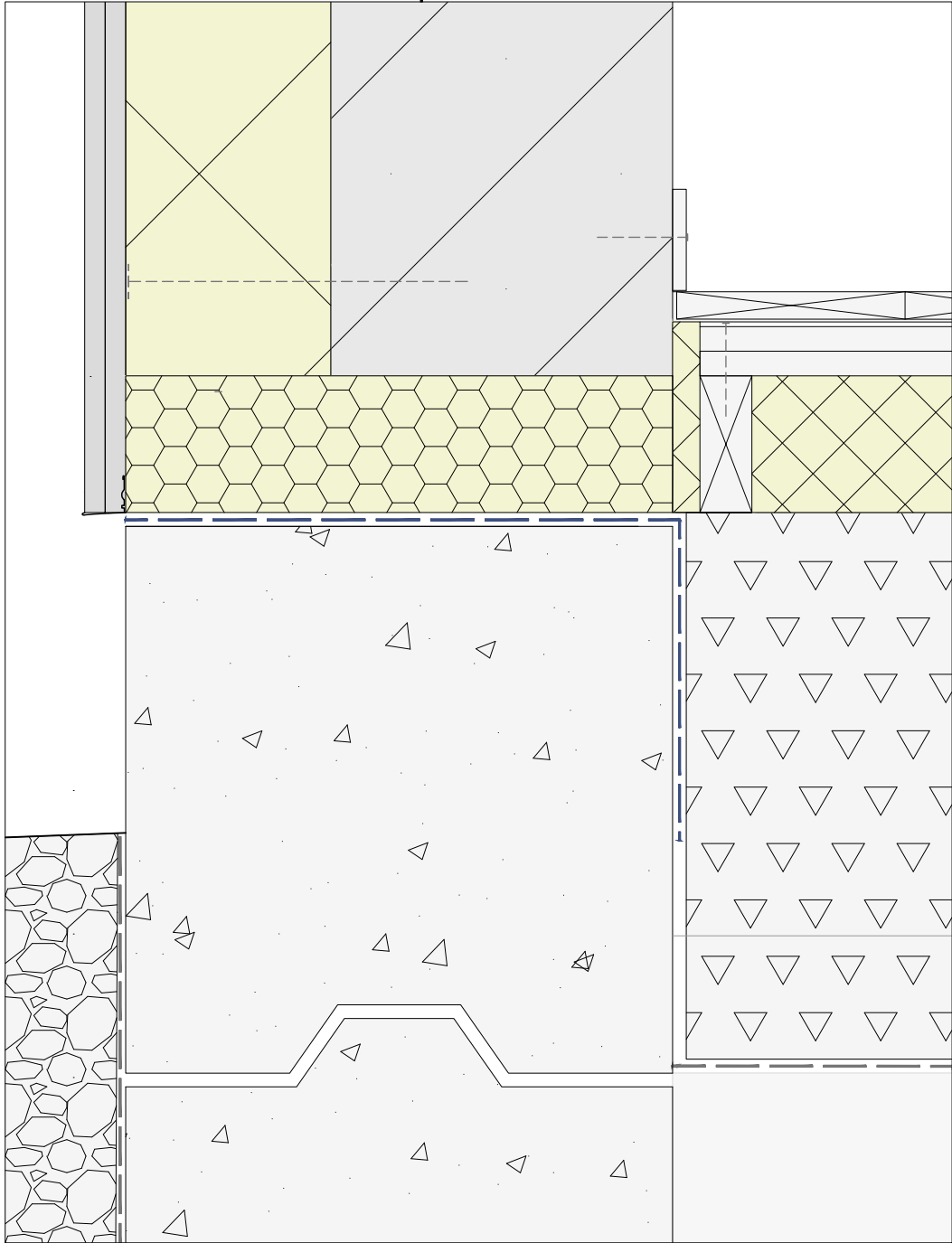
BIJLAGE 9.15: Stampaarde 1



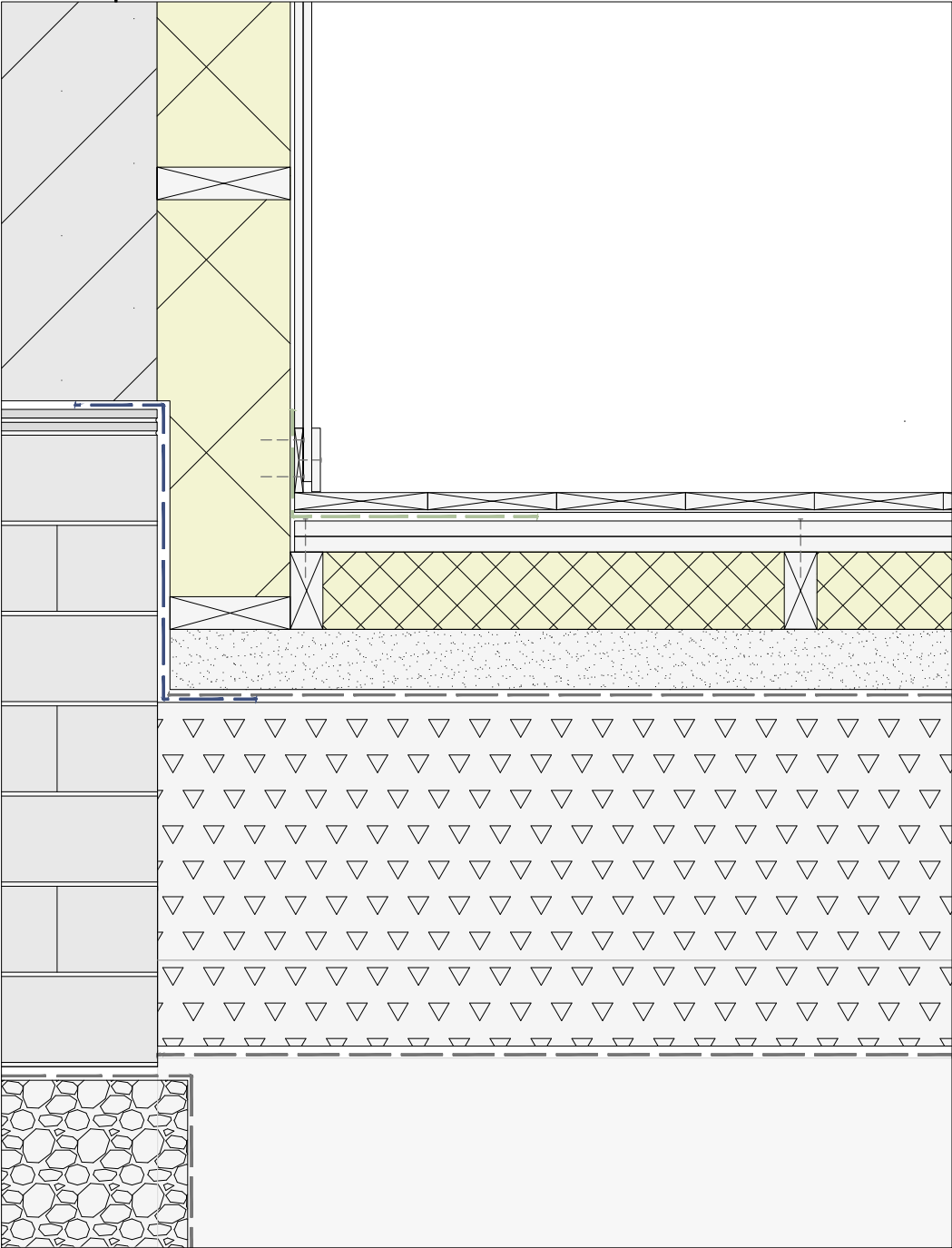
Stampaarde 1b



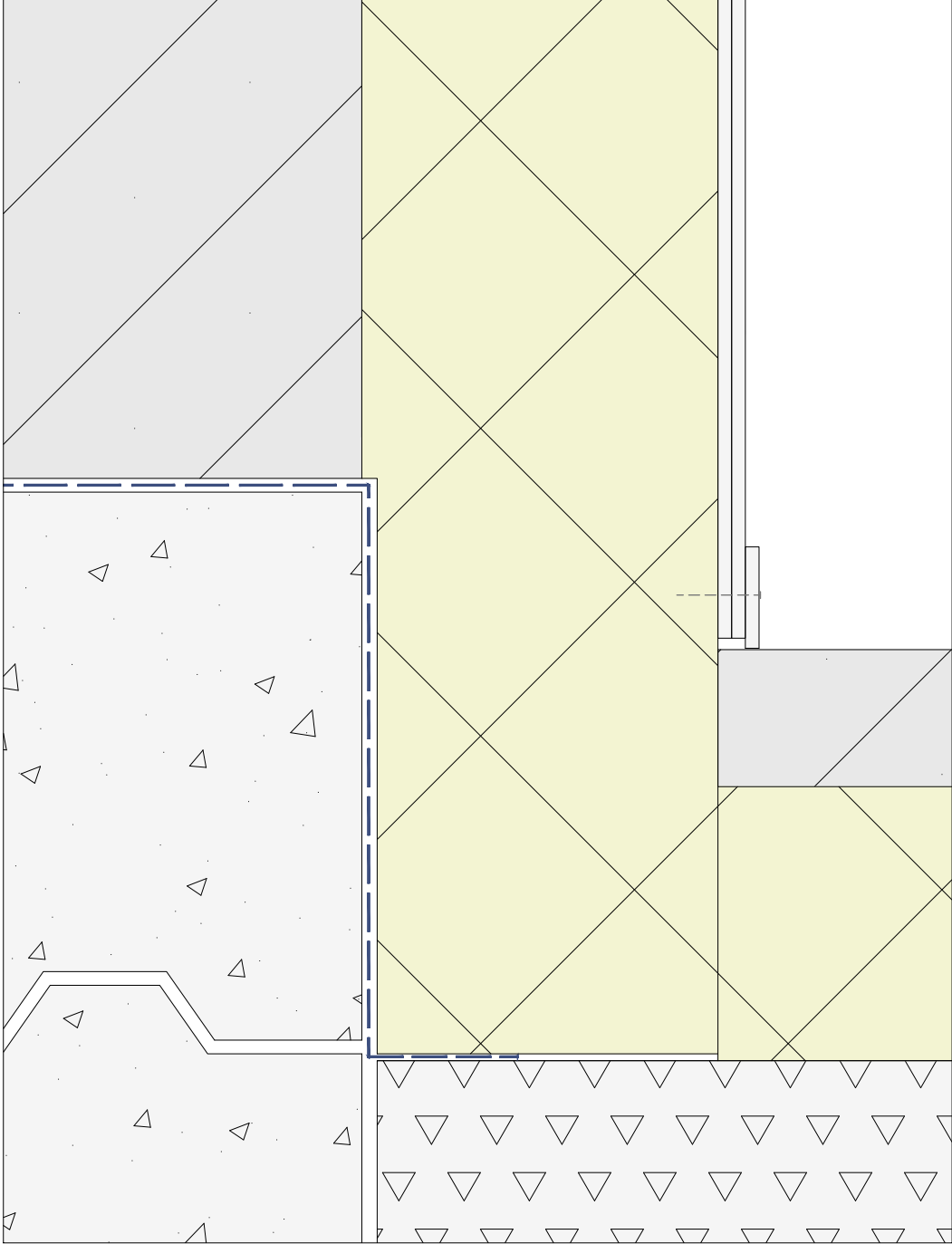
BIJLAGE 9.16: Stampaarde 1c



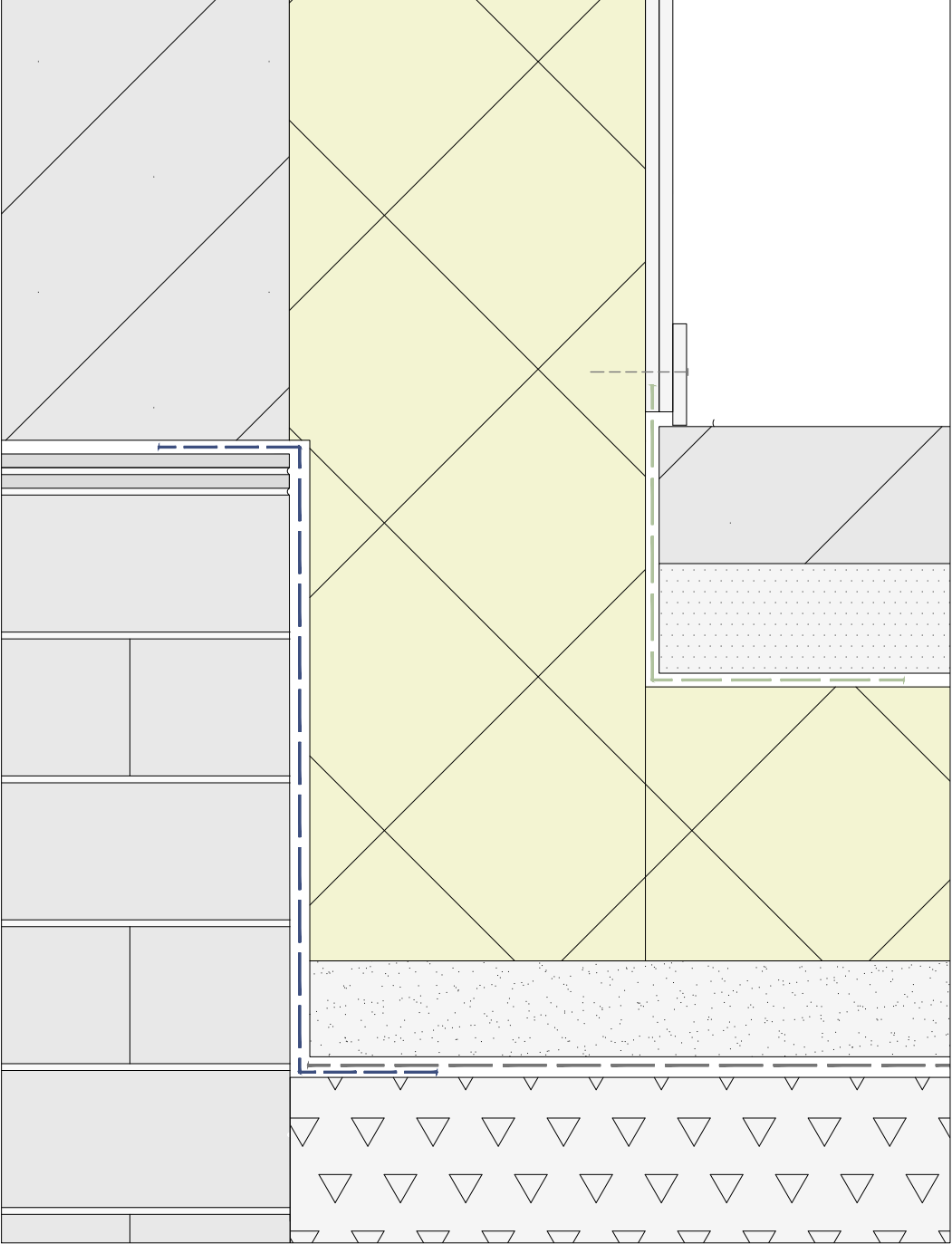
Stampaarde 2c



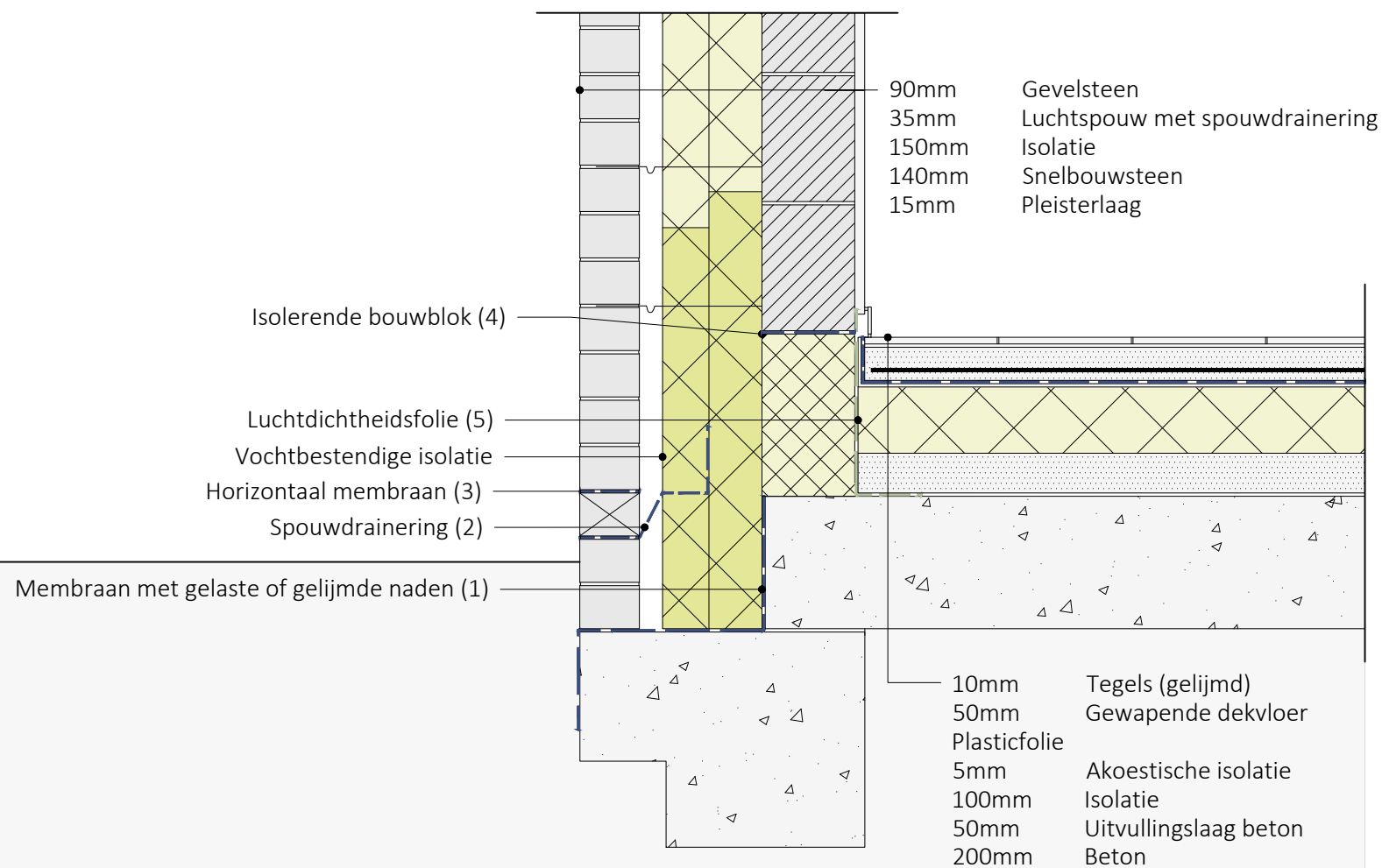
BIJLAGE 9.17: Stampaarde 2

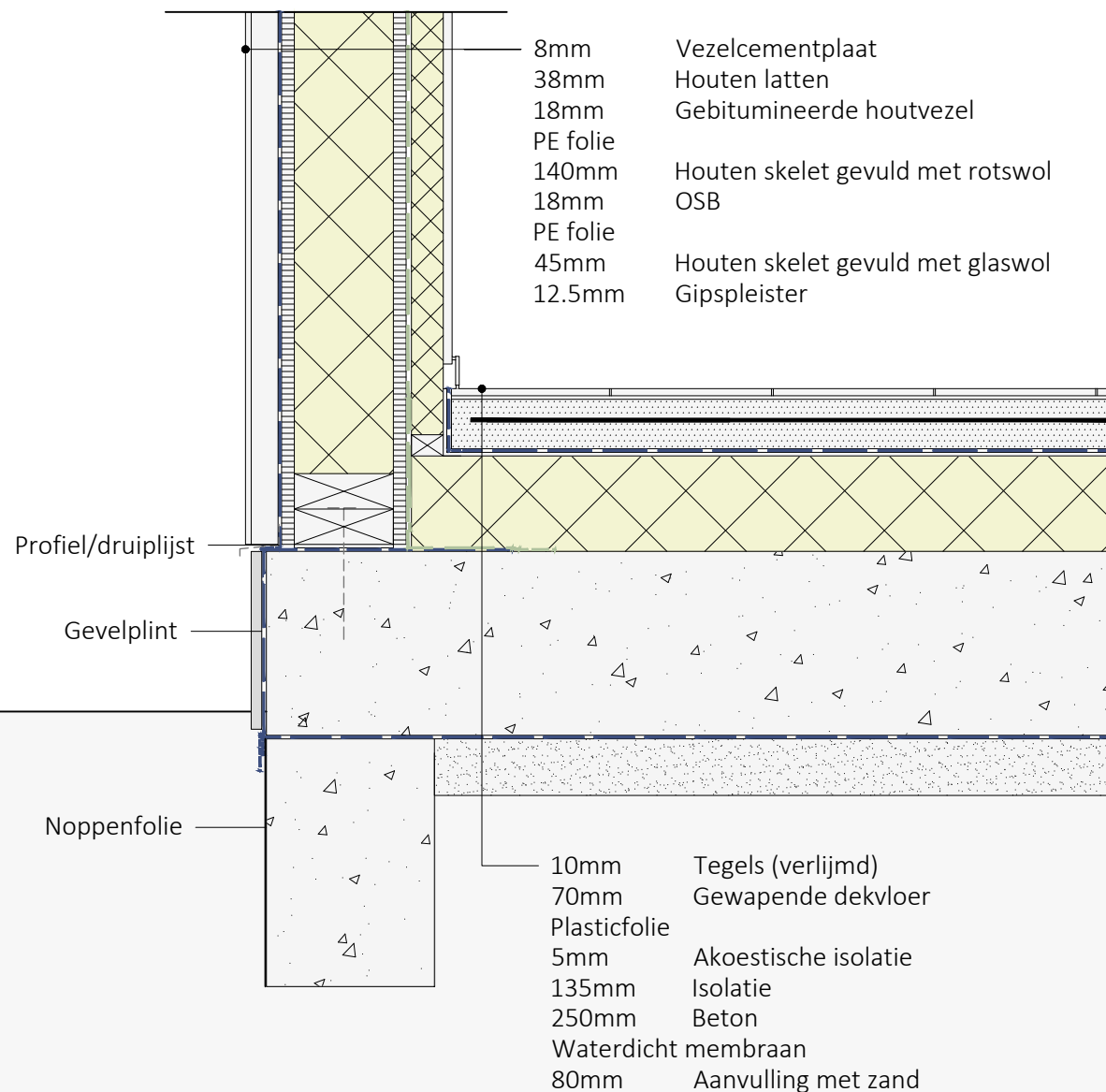


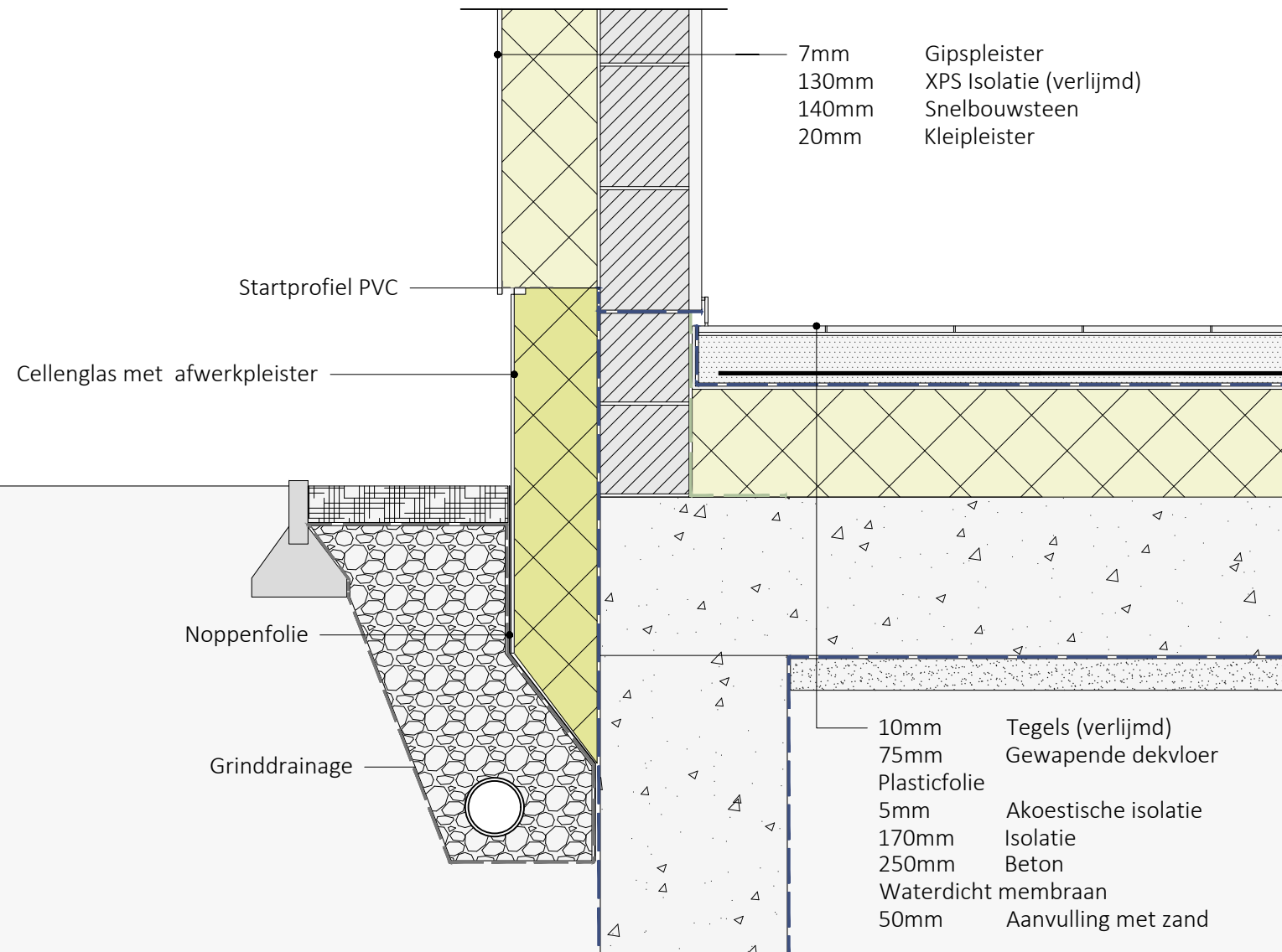
Stampaarde 2b

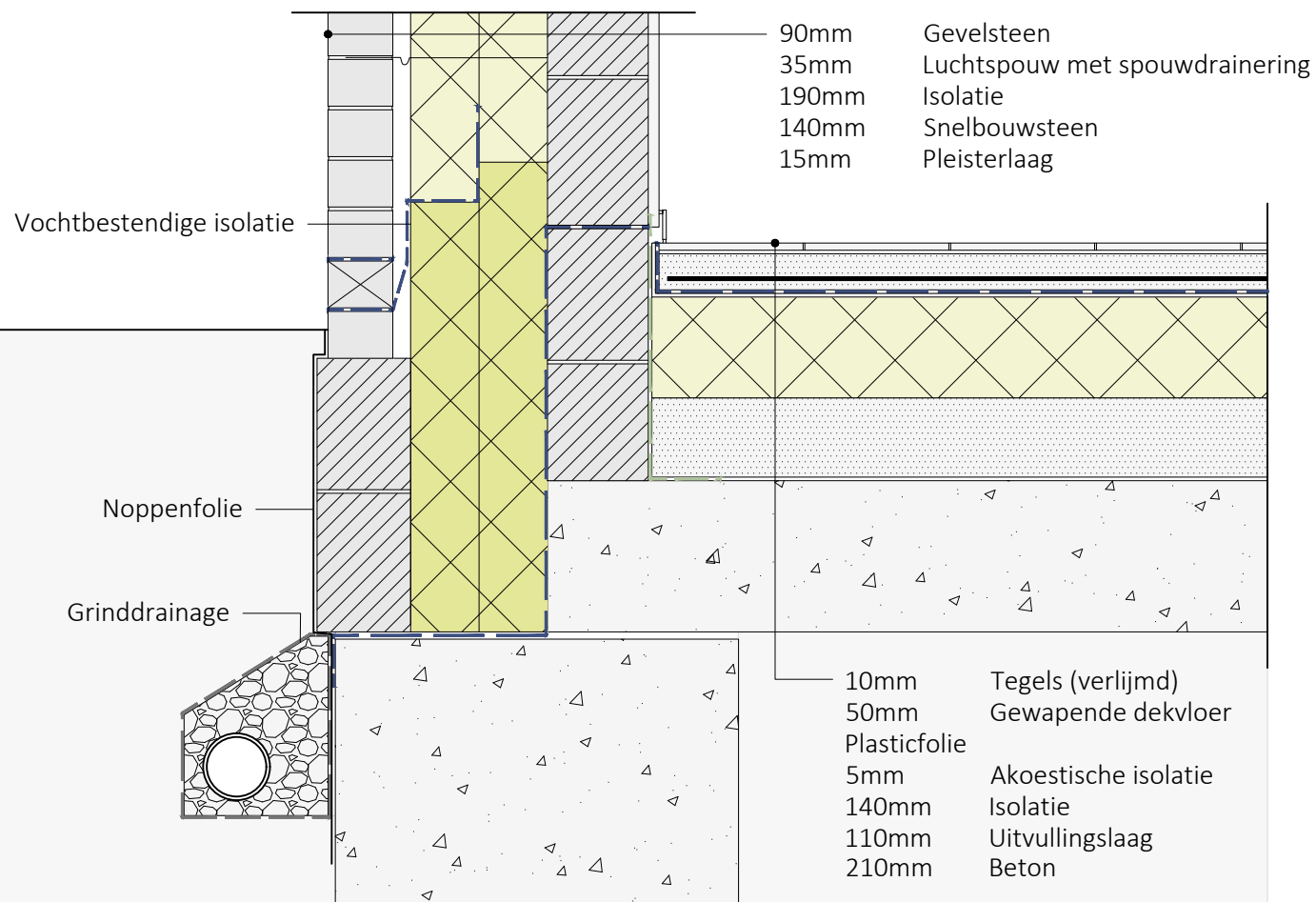


BIJLAGE 10









BIJLAGE 12: Vergelijking wand en vloer

Vergelijking wand en vloer											
Lagen	Element	Nibe schaduwkost [€]	Nibe schaduwkost [%]	TOTEM Materiaalpunten [mPt/FE]	TOTEM Materiaalpunten [%]	Omkeerbaarheid [Pt]	Omkeerbaarheid [%]	Levensduur TOTEM [jaar]	Bouwkost [€/m²]	Kost per jaar [€/m²]	Kost per jaar [%]
<i>Klassieke Spouwmuur</i>											
1	Stenen in cementmortel	€ 2,64	63%	2,73	55%	4	133%	60	€ 37,74	€ 0,63	152%
2	PUR met aluminium cachering	€ 1,65	39%	2,34	47%	3	100%	60	€ 14,96	€ 0,25	60%
3	PUR met aluminium cachering	€ 1,65	39%	2,73	55%	3	100%	60	€ 21,17	€ 0,35	85%
4	Beton blokken in cementmortel	€ 4,81	115%	3,51	70%	4	133%	60	€ 25,36	€ 0,42	102%
5	Gipspleister	€ 0,60	14%	0,78	16%	4	133%	40	€ 0,06	€ 0,00	0%
6	Acrylverf	€ 5,34	128%	6,24	125%	4	133%	10	€ 0,40	€ 0,04	10%
7	Harde tegels - geglaazuurde keramiek - gelijmd	€ 4,71	113%	12,60	252%	4	133%	60	€ 12,15	€ 0,20	49%
8	Dekvloer - gewapend cement	€ 15,70	376%	1,08	22%	4	133%	60	€ 30,00	€ 0,50	120%
9	PE folie - los gelegd	€ 0,17	4%			1	33%	60	€ 0,70	€ 0,01	3%
10	Beplating - geëxpandeerde kurk	€ 2,35	56%			1	33%	60	€ 39,49	€ 0,66	159%
11	PUR schuim	€ 2,67	64%	11,16	223%	4	133%	60	€ 32,50	€ 0,54	130%
12	Ter plaatste gestort gewapend beton	€ 15,70	376%	11,16	223%	4	133%	60	€ 114,80	€ 1,91	461%
13	PE folie - los gelegd	€ 0,17	4%			1	33%	60	€ 0,70	€ 0,01	3%
14	Aanvulling gecompacteerd zand	€ 0,35	8%	0,72	14%	1	33%	60	€ 16,64	€ 0,28	67%
	Gemiddelde	€ 4,18		5,00		3,00	110%			€ 0,42	
	Totaal	€ 58,51	158%	55,05	143%					€ 5,81	59%
<i>ETICS met betonnen fundering</i>											
1	Dikke gipspleister	€ 0,60	16%	0,44	10%	4	145%	40	€ 0,12	€ 0,00	1%
2	XPS gelijmd en gefixeerd met pluggen	€ 6,42	167%	12,1	284%	4	145%	40	€ 7,32	€ 0,18	58%
3	EPS grafiet gelijmd en gefixeerd met pluggen	€ 2,28	59%	1,76	41%	4	145%	40	€ 5,23	€ 0,13	41%
4	EPS grafiet gelijmd en gefixeerd met pluggen	€ 2,28	59%	1,76	41%	4	145%	40	€ 5,23	€ 0,13	41%
5	Isolerende baksteen in cementmortel	€ 3,83	100%	2,64	62%	4	145%	60	€ 2,64	€ 0,04	14%
6	Kleipleister (leempleister in Nibe)	€ 0,24	6%	0,66	16%	4	145%	40	€ 1,74	€ 0,04	14%
7	Harde tegels - geglaazuurde keramiek - gelijmd	€ 4,71	123%	12,48	293%	4	145%	60	€ 12,15	€ 0,20	64%
8	Dekvloer - cement	€ 15,70	409%	0,96	23%	4	145%	60	€ 30,00	€ 0,50	158%
9	Maas versterkingsstaal	meegerkend in 8		0,32	8%	4	145%	60	€ 7,71	€ 0,13	41%
10	PE folie - los gelegd	€ 0,17	4%			1	36%	60	€ 0,70	€ 0,01	4%
11	Beplating - geëxpandeerde kurk	€ 2,35	56%			1	33%	60	€ 39,49	€ 0,66	159%
12	Beplating -XPS	€ 3,21	84%	6,40	150%	1	36%	60	€ 18,50	€ 0,31	98%
13	Beplating -XPS	€ 3,21	84%	meegerekend in 12		1	36%	60	€ 40,08	€ 0,67	211%
14	PE folie - los gelegd	€ 0,17	4%			1	36%	60	€ 0,70	€ 0,01	4%
15	Ter plaatste gestort gewapend beton	€ 15,70	409%	11,2	263%	4	145%	60	€ 114,80	€ 1,91	605%
16	PE folie - los gelegd	€ 0,17	4%			1	36%	60	€ 0,70	€ 0,01	4%
17	Aanvulling gecompacteerd zand	€ 0,35	9%	0,32	8%	1	36%	60	€ 25,60	€ 0,43	135%
	Gemiddelde	€ 3,84		4,25		2,76	101%			€ 0,32	
	Totaal	€ 61,39	166%	51,04	132%					€ 5,38	54%
<i>Houtskeletwand met betonnen fundering</i>											
1	Vezelcementbeplating geschroefd	€ 6,10	207%	4,42	152%	2	91%	40	€ 1,74	€ 0,04	5%
2	Latten in onbehandeld naaldhout geschroefd	€ 0,13	5%	0,38	13%	2	91%	30	€ 158,17	€ 5,27	557%
3	PE folie	€ 0,17	6%			3	136%	60	€ 0,70	€ 0,01	1%
4	Gebitumeerde houtvezel geschroefd	€ 5,98	203%	0,48	17%	2	91%	60	€ 8,53	€ 0,14	15%
5.1	Genageld onbehandeld loof- en naaldhout (20%)	€ 0,07	2%	1,34	46%	2	91%	60	€ 51,29	€ 0,85	90%
5.2	Rotswol ingeklemd (80%)	€ 1,81	61%	0,77	27%	1	45%	60	€ 27,23	€ 0,45	48%
6	OSB geschroefd	€ 0,80	27%	1,15	40%	2	91%	60	€ 13,89	€ 0,23	24%
7	PE folie getapt	€ 0,17	6%			3	136%	60	€ 0,70	€ 0,01	1%
8.1	Genageld behandeld naaldhout (20%)	€ 0,07	2%	0,29	10%	2	91%	60	€ 155,33	€ 2,59	273%
8.2	Glaswol ingeklemd (80%)	€ 1,38	47%	0,58	20%	1	45%	60	€ 4,19	€ 0,07	7%
9.1	Genageld behandeld naaldhout (20%)	€ 0,07	2%	0,29	10%	2	91%	60	€ 155,33	€ 2,59	273%
9.2	Glaswol ingeklemd (80%)	€ 1,38	47%	0,58	20%	1	45%	60	€ 4,19	€ 0,07	7%
10	Gipspleister -geschroefd	€ 0,60	20%	1,54	53%	4	181%	30	€ 4,48	€ 0,15	16%
11	Acrylverf	€ 5,34	181%	6,34	219%	4	181%	10	€ 0,40	€ 0,04	4%
12	Harde tegels - geglaazuurde keramiek - gelijmd	€ 4,71	160%	12,58	434%	4	181%	60	€ 12,15	€ 0,20	21%
13	Dekvloer - cement	€ 15,70	532%	1,02	35%	4	181%	60	€ 25,00	€ 0,42	44%
14	Maas versterkingsstaal	meegerekend in 13		0,34	12%	4	181%	60	€ 7,71	€ 0,13	14%
16	PE folie - los gelegd	€ 0,17	6%			1	45%	60	€ 0,70	€ 0,01	1%
11	Beplating - geëxpandeerde kurk	€ 2,35	56%			1	33%	60	€ 39,49	€ 0,66	159%
15	Beplating - geëxpandeerde kurk	€ 2,35	80%	8,50	293%	1	45%	60	€ 192,92	€ 3,22	340%
15	Beplating - geëxpandeerde kurk	€ 2,35	80%	meegerekend in 15		1	45%	60	€ 192,92	€ 3,22	340%
16	PE folie - los gelegd	€ 0,17	6%			1	45%	60	€ 0,70	€ 0,01	1%

BIJLAGE 12: Vergelijking wand en vloer

17	Ter plaatste gestort gewapend beton	€ 15,70	532%	11,22	387%	4	181%	60	€ 114,80	€ 1,91	202%
18	Aanvulling gecompacteerd zand	€ 0,35	12%	0,34	12%	1	45%	60	€ 25,60	€ 0,43	45%
	Gemiddelde	€ 2,95		2,90	100%	2,21	81%			€ 0,95	
	Totaal	€ 67,90	183%	52,14	135%					€ 22,73	230%
<i>Strobalenwand - Bouwdetail 1</i>											
1	Kalkpleister	€ 3,95	357%	8,31	336%	4	187%	40	€ 100,00	€ 2,50	503%
2.1	Behandeld-verankerd naaldhout (11%)	meegerekend in 1		1,88	76%	2	93%	60	€ 37,26	€ 0,62	125%
2.2	Stro (89%)	meegerekend in 1		0,40	16%	1	47%	60	€ 27,61	€ 0,46	93%
3	Leempleister (Klei in TOTEM)	meegerekend in 1		0,54	22%	4	187%	40	€ 1,75	€ 0,04	9%
4	Parket - Belgisch hardhout -genageld en oppervlaktebehandeld	€ 2,25	203%	3,64	147%	3	140%	60	€ 30,00	€ 0,50	101%
5	Houtvezelplaat	€ 0,36	33%	1,14	46%	3	140%	60	€ 7,05	€ 0,12	1420%
6	Beplating OSB	€ 1,60	145%	4,42	179%	3	140%	30	€ 13,93	€ 0,46	2805%
7	Beplating OSB	€ 1,60	145%	4,42	179%	3	140%	30	€ 13,93	€ 0,46	2805%
8.1	Belgisch naaldhout en loofhout - genageld en behandeld (30%)	€ 0,07	6%	1,95	79%	2	93%	60	€ 36,00	€ 0,60	7250%
8.2	Riet (70%) (Stro in TOTEM)	€ 0,30	27%	0,26	11%	1	47%	60	€ 7,92	€ 0,13	1595%
9	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	€ 1,02	92%	1,30	53%	1	47%	60	€ 34,52	€ 0,58	6952%
10	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,34	31%			1	47%	30	€ 0,70	€ 0,02	141%
11	Aanvulling zand	€ 0,35	32%	1,43	58%	1	47%	60	€ 25,60	€ 0,43	5156%
12	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,34	31%			1	47%	30	€ 0,70	€ 0,02	141%
	Gemiddelde	€ 1,11		2,47		2,14	79%			€ 0,50	
	Totaal	€ 12,17	33%	29,68	77%					€ 6,95	0,703713915
<i>Strobalenwand - Bouwdetail 2</i>											
1	Kalkpleister	€ 3,95	96%	8,31	302%	4	147%	40	€ 100,00	€ 2,50	267%
2.1	Behandeld-verankerd naaldhout (11%)	meegerekend in 1		1,88	68%	2	74%	60	€ 37,26	€ 0,62	66%
2.2	Stro (89%)	meegerekend in 1		0,40	15%	1	37%	60	€ 27,61	€ 0,46	49%
3	Leempleister (Klei in TOTEM)	meegerekend in 1		0,54	19%	4	147%	40	€ 1,75	€ 0,04	5%
4	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	€ 10,94	271%	0,92	20%	3	95%	50	€ 47,34	€ 0,95	38%
5	Blokken kalkhennep gelijmd (vlas in Nibe)	€ 0,52	13%	6,26	134%	4	126%	50	€ 70,94	€ 1,42	57%
6	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	€ 1,02	25%	0,97	21%	1	32%	60	€ 34,52	€ 0,58	23%
	Gemiddelde	€ 4,11		2,75		2,71	99%			€ 0,94	
	Totaal	€ 16,43	44%	19,26	50%					€ 6,57	66%
<i>Stamphaarde - Bouwdetail 1</i>											
1	Kalkpleister	€ 0,60	35%	5,28	151%	4	129%	40	€ 80,00	€ 2,00	296%
2	Kalkhennep blokken - gelijmd	€ 0,26	15%	7,56	216%	4	129%	60	€ 36,81	€ 0,61	91%
3	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	€ 10,94	645%	4,20	120%	3	97%	50	€ 47,34	€ 0,95	140%
4	Parket - Belgisch hardhout -genageld en oppervlaktebehandeld	€ 2,25	133%	1,50	43%	3	97%	60	€ 0,27	€ 0,00	1%
5	Houtvezelplaat	€ 0,36	33%	3,00	121%	3	140%	60	€ 7,05	€ 0,12	1420%
6.1	Dekvloer - traskalk mortel	€ 0,73	43%	5,85	167%	4	129%	60	€ 22,56	€ 0,38	56%
6.2	Maas versterkingsstaal	€ 1,29	76%	0,15	4%	4	129%	60	€ 7,71	€ 0,13	19%
7	Blokken kalkhennep gelijmd (vlas in Nibe)	€ 0,52	13%	6,30	229%	4	147%	50	€ 70,94	€ 1,42	151%
8	Aanvulling zand	€ 0,35	32%	0,30	12%	1	47%	60	€ 34,52	€ 0,58	6952%
9	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,34	20%					30	€ 0,70		
10	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	€ 1,02	60%	0,90	26%	1	32%	60	€ 34,52	€ 0,58	85%
	Gemiddelde	€ 1,70		3,50		3,10	114%			€ 0,68	
	Totaal	€ 18,66	50%	35,04	91%					€ 6,76	68%
<i>Stamphaarde - Bouwdetail 2</i>											
1	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	€ 10,94	271%	12,40	266%	3	95%	50	€ 568,05	€ 11,36	456%
2	Kalkhennep blokken - gelijmd	€ 0,26	6%	6,20	133%	4	126%	60	€ 36,81	€ 0,61	25%
3	Leempleister	€ 0,56	14%	1,20	26%	4	126%	40	€ 1,75	€ 0,04	2%
4	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	€ 10,94	271%	0,92	20%	3	95%	50	€ 47,34	€ 0,95	38%
5	Blokken kalkhennep gelijmd (vlas in Nibe)	€ 0,52	13%	6,26	134%	4	126%	50	€ 70,94	€ 1,42	57%
6	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	€ 1,02	25%	0,97	21%	1	32%	60	€ 34,52	€ 0,58	23%
	Gemiddelde	€ 4,04		4,66		3,17	116%			€ 2,49	
	Totaal	€ 24,24	65%	27,94	72%					€ 14,96	151%
	GEMMIDELDE VAN DE TOTALEN	€ 37,04		38,59		2,73				€ 9,88	

BIJLAGE 13: Vergelijking fundering

Vergelijking fundering											
Lagen	Element	Nibe schaduwkost [€]	Nibe schaduwkost [%]	TOTEM Materiaalpunten [mPt/FE]	TOTEM Materiaalpunten [%]	Omkeerbaarheid [Pt]	Omkeerbaarheid [%]	Levensduur TOTEM [jaar]	Bouwkost [€/m³]	Kost per jaar [€/m³]	Kost per jaar [%]
<i>Klassieke Spouwmuur</i>											
1	Cellenbeton	€ 1,93	22%	3,12	62%	4	100%	60	€ 240,83	€ 4,01	48%
2	Ter plaatste gestort gewapend beton	€ 15,70	178%	35,88	184%	4	100%	60	€ 765,30	€ 12,76	152%
	Gemiddelde	€ 8,82		19,50		4	169%			€ 8,38	
	Totaal	€ 17,63	20%	39,00	125%					€ 16,77	15%
<i>ETICS met betonnen fundering</i>											
1	Cellenglas	€ 3,00	75%	3,12	21%	4	182%	60	€ 335,56	€ 5,59	96%
2	Ter plaatste gestort gewapend beton	€ 15,70	393%	35,88	244%	4	182%	60	€ 765,30	€ 12,76	219%
3	Grinddrainage	€ 0,51	13%	5,10	35%	1	45%	60	€ 138,80	€ 2,31	40%
4	Drainage buis (in Nibe PVC)	€ 0,60	15%			1	45%	40	€ 107,64	€ 2,69	46%
5	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	4%			1	45%	60	€ 350,00	€ 5,83	100%
	Gemiddelde	€ 4,00		14,70		2,20	93%			€ 5,84	
	Totaal	€ 19,98	23%	44,10	141%					€ 29,19	26%
<i>Houtskeletwand met betonnen fundering</i>											
1	Ter plaatste gestort gewapend beton	€ 15,70	100%	45,00	100%	4	100%	60	€ 765,30	€ 12,76	100%
	Gemiddelde	€ 15,70		45,00		4	169%			€ 12,76	
	Totaal	€ 15,70	18%	45,00	144%					€ 12,76	11%
<i>Strobalenwand - Bouwdetail 1</i>											
1	Houten verdeelbalk	€ 0,01	0%	0,41	3%	2	92%	60	€ 158,00	€ 2,63	1%
2	Schroefpaal (UPN-sectie profielstaal in TOTEM)	€ 503,42	99%	6,46	49%	4	185%	60	€ 20.347,14	€ 339,12	95%
3	Kalksteen in cementmortel (in Nibe natuursteenmetselwerk)	€ 1,48	0%	1,30	10%	4	185%	60	€ 179,96	€ 3,00	1%
4	Grinddrainage	€ 0,51	0%	5,1	38%	1	46%	60	€ 138,80	€ 2,31	1%
5	Drainage buis (in Nibe PVC)	€ 0,60	0%			1	46%	40	€ 107,64	€ 2,69	1%
6	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	0%			1	46%	60	€ 350,00	€ 5,83	2%
	Gemiddelde	€ 84,36		3,32		2,17	92%			€ 59,26	
	Totaal	€ 506,19	578%	13,27	43%					€ 355,59	315%
<i>Strobalenwand - Bouwdetail 2</i>											
7	Leibedekking - gehaakt -inheems	€ 4,71	20%	7,60	30%	1	70%	60	€ 2.400,00	€ 40,00	44%
8	Kalksteen in cementmortel (in Nibe natuursteenmetselwerk)	€ 16,45	71%	10,60	42%	4	280%	60	€ 1.999,60	€ 33,33	3553%
9	Aanvulling grind	€ 0,51	2%	1,80	7%	1	70%	60	€ 26,03	€ 0,43	46%
10	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	1%			1	70%	60	€ 350,00	€ 5,83	622%
11	Grinddrainage	€ 0,51	2%	5,10	20%	1	70%	60	€ 138,80	€ 2,31	247%
12	Drainage buis (in Nibe PVC)	€ 0,60	3%			1	70%	40	€ 107,64	€ 2,69	287%
13	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	1%			1	70%	60	€ 350,00	€ 5,83	622%
	Gemiddelde	€ 3,30		6,28		1,43	60%			€ 12,92	
	Totaal	€ 23,12	26%	25,10	80%					€ 90,43	80%
<i>Stampaarde - Bouwdetail 1</i>											
11	Leibedekking - gehaakt -inheems	€ 4,71	20%	7,60	30%	1	70%	60	€ 2.400,00	€ 40,00	43%
12	Kalksteen in cementmortel (in Nibe natuursteenmetselwerk)	€ 16,45	71%	10,60	42%	4	280%	60	€ 1.999,60	€ 33,33	36%
13	Aanvulling grind	€ 0,51	2%	1,80	7%	1	70%	60	€ 138,80	€ 2,31	3%
14	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	1%			1	70%	60	€ 350,00	€ 5,83	6%
15	Grinddrainage	€ 0,51	2%	5,10	20%	1	70%	60	€ 138,80	€ 2,31	3%
16	Drainage buis (in Nibe PVC)	€ 0,60	3%			1	70%	40	€ 107,64	€ 2,69	3%
17	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	1%			1	70%	60	€ 350,00	€ 5,83	6%
	Gemiddelde	€ 3,30		6,28		1,43	60%			€ 13,19	
	Totaal	€ 23,12	26%	25,10	80%					€ 92,31	82%
<i>Stampaarde - Bouwdetail 2</i>											
7	EPDM	€ 1,34	19%	0,66	2%	1	75%	60	€ 9.778,57	€ 162,98	85%
8	Massieve blokken beton - in cementmortel (Nibe betonsteenmetselw	€ 3,20	46%	20,24	75%	4	300%	60	€ 125,00	€ 2,08	1%
9	Aanvulling zand	€ 0,35	5%	0,44	2%	1	75%	60	€ 128,00	€ 2,13	1%
10	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	2%			1	75%	60	€ 350,00	€ 5,83	3%
11	Aanvulling grind	€ 0,51	7%	0,44	2%	1	75%	60	€ 138,80	€ 2,31	1%
12	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	2%			1	75%	60	€ 350,00	€ 5,83	3%
13	Grinddrainage	€ 0,51	7%	5,10	18,97%	1	75%	60	€ 138,80	€ 2,31	1%
14	Drainage buis (in Nibe PVC)	€ 0,60	9%			1	75%	40	€ 107,64	€ 2,69	1%
15	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	€ 0,17	2%			1	75%	60	€ 350,00	€ 5,83	3%
	Gemiddelde	€ 0,78		5,38		1,33	56%			€ 21,33	
	Totaal	€ 7,02	8%	26,88	86%					€ 192,01	170%
	GEMMIDDELDE VAN DE TOTALEN	€ 87,54		31,21		2,37				112,72	

BIJLAGE 14: Overzicht vergelijking bouwdetails

Overzicht Vergelijking									
Element	Totaal / gemiddelde	Nibe schaduwkost [€]	Nibe schaduwkost [%]	TOTEM Materiaalpunten [mPt/FE]	TOTEM Materiaalpunten [%]	Omkeerbaarheid [Pt]	Omkeerbaarheid [%]	Kost per jaar [€/m²] of [€/m³]	Kost per jaar [%]
<i>Vergelijking wand en vloer</i>									
Klassieke spouwmuur	Gemiddelde	€ 4,18		5,00		3,00	109,97%	€ 0,42	
	Totaal	€ 58,51	157,95%	55,05	142,64%			€ 5,81	58,83%
ETICS met betonnen fundering	Gemiddelde	€ 3,84		4,25		2,76	101,34%	€ 0,32	
	Totaal	€ 61,39	165,72%	51,04	132,25%			€ 5,38	54,42%
Houtskeletwand met betonnen fundering	Gemiddelde	€ 2,95		2,90		2,21	80,95%	€ 0,95	
	Totaal	€ 67,90	183,32%	52,14	135,11%			€ 22,73	230,08%
Strobalenwand - Bouwdetail 1	Gemiddelde	€ 1,11		2,47		2,14	78,55%	€ 0,50	
	Totaal	€ 12,17	32,86%	29,68	76,91%			€ 6,95	70,37%
Strobalenwand - Bouwdetail 2	Gemiddelde	€ 4,11		2,75		2,71	99,49%	€ 0,94	
	Totaal	€ 16,43	44,35%	19,26	49,91%			€ 6,57	66,47%
Stampaarde - Bouwdetail 1	Gemiddelde	€ 1,70		3,50		3,10	113,63%	€ 0,68	
	Totaal	€ 18,66	50,37%	35,04	90,79%			€ 6,76	68,40%
Stampaarde - Bouwdetail 2	Gemiddelde	€ 4,04		4,66		3,17	116,07%	€ 2,49	
	Totaal	€ 24,24	65,44%	27,94	72,40%			€ 14,96	151,44%
<i>Fundering</i>									
Klassieke spouwmuur	Gemiddelde	€ 8,82		19,50		4,00	169,11%	€ 8,38	
	Totaal	€ 17,63	20,14%	39,00	124,97%			€ 16,77	14,88%
ETICS met betonnen fundering	Gemiddelde	€ 4,00		14,70		2,20	93,01%	€ 5,84	
	Totaal	€ 19,98	22,82%	44,10	141,31%			€ 29,19	25,89%
Houtskeletwand met betonnen fundering	Gemiddelde	€ 15,70		45,00		4,00	169,11%	€ 12,76	
	Totaal	€ 15,70	17,94%	45,00	144,20%			€ 12,76	11,32%
Strobalenwand - Bouwdetail 1	Gemiddelde	€ 84,36		3,32		2,17	91,60%	€ 59,26	
	Totaal	€ 506,19	578,26%	13,27	42,53%			€ 355,59	315,46%
Strobalenwand - Bouwdetail 2	Gemiddelde	€ 3,30		6,28		1,43	60,40%	€ 12,92	
	Totaal	€ 23,12	26,41%	25,10	80,43%			€ 90,43	80,23%
Stampaarde - Bouwdetail 1	Gemiddelde	€ 3,30		6,28		1,43	60,40%	€ 13,19	
	Totaal	€ 23,12	26,41%	25,10	80,43%			€ 92,31	81,89%
Stampaarde - Bouwdetail 2	Gemiddelde	€ 0,78		5,38		1,33	56,37%	€ 21,33	
	Totaal	€ 7,02	8,02%	26,88	86,13%			€ 192,01	170,34%

BIJLAGE 15: Bronnen kostprijs materialen

Vergelijking		
Lagen	Element	Bron prijs
Klassieke Spouwmuur		
1	Stenen in cementmortel	https://www.bouwinfo.be/news/ruwbouw/ruwbouw/gevelwerken/hoeveel-kosten-gevelstenen https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-cement-25-kg/p/B397138
2	PUR met aluminium cachering	https://www.bouwdepot.be/recticel-eurowall-50mm-rd225-pak-72-m.html
3	PUR met aluminium cachering	https://www.bouwdepot.be/recticel-eurowall-82mm-rd370-pak-432-m.html
4	Beton blokken in cementmorel	https://www.bouwdepot.be/betonblok-hol-29x14x19-lbxh-cm.html
5	Gipspleister	https://www.gamma.be/nl/assortiment/knauf-goldband-pleistergips-20-kg/p/B609235
6	Acrylverf	https://www.gamma.be/nl/assortiment/histor-monodek-muur-en-plafondverf-10-l-wit/p/B517332
7	Harde tegels - geglazuurde keramiek - gelijmd	https://www.gamma.be/nl/assortiment/vloertegel-keram-line-beige-30x30-cm-1-44-m2/p/B399887
8	Dekvloer - gewapend cement	https://www.verbouwkosten.com/vloer/cementdekvloer-kosten/
9	PE folie - los gelegd	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
10	Beplating - geëxpandeerde kurk	https://www.dekurwinkel.nl/isolatie-kurk/geexpandeerde-kurkplaat-50mm.html
11	PUR schuim	https://www.isolatie-info.be/prijzen
12	Uitvullingsbeton	https://www.livios.be/nl/bouwinformatie/ruwbouw/fundering-en-kelder/23105/richtprijzen-fundering-en-beton/
13	Ter plaatste gestort gewapend beton	https://www.livios.be/nl/bouwinformatie/ruwbouw/fundering-en-kelder/23105/richtprijzen-fundering-en-beton/
14	PE folie - los gelegd	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
15	Aanvulling gecompacteerd zand	https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-rivierzand-0-2-25-kg/p/B219950
16	Cellenbeton	https://www.gamma.be/nl/assortiment/ytong-cellenbetonblok-60x20x10-cm/p/B336718
17	Ter plaatste gestort gewapend beton	https://www.livios.be/nl/bouwinformatie/ruwbouw/fundering-en-kelder/23105/richtprijzen-fundering-en-beton/
ETICS met betonnen fundering		
1	Dikke gipspleister	https://www.gamma.be/nl/assortiment/knauf-goldband-pleistergips-20-kg/p/B609235
2	XPS gelijmd en gefixeerd met pluggen	https://www.gamma.be/nl/assortiment/isolatieplaat-xps-125x60x2-cm-r-0-61-polystyreen/p/B121579
3	EPS grafiet gelijmd en gefixeerd met pluggen	https://www.bouwdepot.be/eps-isomo-isolatie-60-4cm-rd105-pak-30m.html
4	EPS grafiet gelijmd en gefixeerd met pluggen	https://www.bouwdepot.be/eps-isomo-isolatie-60-4cm-rd105-pak-30m.html
5	Isolerende baksteen in cementmortel	https://www.bouwkampioen.be/nl/snelbouwsteen-29-x-14-x-14-per-stuk.html https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-cement-25-kg/p/B397138
6	Kleipleister (leempleister in Nibe)	https://www.americanclay.com/features-and-costs
7	Harde tegels - geglazuurde keramiek - gelijmd	https://www.gamma.be/nl/assortiment/vloertegel-keram-line-beige-30x30-cm-1-44-m2/p/B399887
8	Dekvloer - cement	https://www.verbouwkosten.com/vloer/cementdekvloer-kosten/
9	Maas versterkingsstaal	https://www.groothandel.be/p/begetube-verzinkte-staaldraadmat-1200-x-2100-x-3-mm-maas-100-x-100-mm-stuk-252-m%C2%B2-prijs-per-m%C2%B2-verkoop-per-stuk/
10	PE folie - los gelegd	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
11	Beplating - geëxpandeerde kurk	https://www.dekurwinkel.nl/isolatie-kurk/geexpandeerde-kurkplaat-50mm.html
12	Beplating -XPS	https://www.isolatiemateriaal.nl/xps/xps-isolatieplaten/jackodur-kf-300-1250x600x100mm-rd285-4plpk-300-m2
13	Beplating -XPS	https://www.isolatiemateriaal.nl/xps/xps-isolatieplaten/jackodur-kf-300-gefiniert-gl-1250x600x200mm-rd555-2plpk-150-m2
14	PE folie - los gelegd	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
15	Ter plaatste gestort gewapend beton	https://www.livios.be/nl/bouwinformatie/ruwbouw/fundering-en-kelder/23105/richtprijzen-fundering-en-beton/
16	Aanvulling gecompacteerd zand	https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-rivierzand-0-2-25-kg/p/B219950
17	Cellenglas	https://www.bouwdepot.be/perinsul-hl-145xh10xb10cm-pak-15-stuks-675lm.html
18	Ter plaatste gestort gewapend beton	https://www.livios.be/nl/bouwinformatie/ruwbouw/fundering-en-kelder/23105/richtprijzen-fundering-en-beton/
19	Grinddrainage	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
20	Drainage buis	https://www.bouwdepot.be/drainagebuis-pp-wikkel-50m-diam100.html
21	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
Houtskeletwand met betonnen fundering		
1	Vezelcementbeplating geschroefd	https://www.cedral.world/nl-be/gevel/gevelstroken/cedral-lap/
2	Latten in onbehandeld naaldhout geschroefd	https://www.etsy.com/nl/listing/1190887682/vierkant-hout-30-x-30-mm-vierkante?click_key=d36dba0821a36bfd90e848c0bd8dbbcd64ca5707f3A1190887682&click_sum=c0409bf0&ref=sim_items_sameshopitems-1&variation0=2623497853
3	PE folie	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
4	Gebitumineerde houtvezel geschroefd	https://www.eurabo.be/nl/producten/celit-3d
5.1	Genageld onbehandeld loof- en naaldhout (20%)	https://www.limtrade.nl/geschaafd-50x200mm
5.2	Rotswol ingeklemd (80%)	https://www.bouwdepot.be/rockwool-rockroef-flexi-rockflex-224-22cm-rd625-rol-2m.html
6	OSB geschroefd	https://www.hubo.be/nl/p/osb-3-met-tand-groef-244x59-cm-18mm/5768.html
7	PE folie getapt	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
8.1	Genageld behandeld naaldhout (20%)	https://www.etsy.com/nl/listing/1210467306/vierkant-hout-vierkant-45-x-30-mm?click_key=36546b9d64c602f1f7c171d51df8b651d1b8f6c0%3A1210467306&click_sum=3ff3bb2a&ref=sim_items_sameshopitems-4&variation0=2594744080
8.2	Glaswol ingeklemd (80%)	https://www.karwei.nl/assortiment/isover-isolatieplaat-glaswol-120-x-60-cm-dikte-4-5-cm/p/B424422
9.1	Genageld behandeld naaldhout (20%)	https://www.etsy.com/nl/listing/1210467306/vierkant-hout-vierkant-45-x-30-mm?click_key=36546b9d64c602f1f7c171d51df8b651d1b8f6c0%3A1210467306&click_sum=3ff3bb2a&ref=sim_items_sameshopitems-4&variation0=2594744080
9.2	Glaswol ingeklemd (80%)	https://www.karwei.nl/assortiment/isover-isolatieplaat-glaswol-120-x-60-cm-dikte-4-5-cm/p/B424422
10	Gipspleister -geschroefd	https://www.gamma.be/nl/assortiment/gypproc-gipsplaat-260x60-cm-9-5-mm/p/B346746
11	Acrylverf	https://www.gamma.be/nl/assortiment/histor-monodek-muur-en-plafondverf-10-l-wit/p/B517332
12	Harde tegels - geglazuurde keramiek - gelijmd	https://www.gamma.be/nl/assortiment/vloertegel-keram-line-beige-30x30-cm-1-44-m2/p/B399887
13	Dekvloer - cement	https://www.verbouwkosten.com/vloer/cementdekvloer-kosten/
14	Maas versterkingsstaal	https://www.groothandel.be/p/begetube-verzinkte-staaldraadmat-1200-x-2100-x-3-mm-maas-100-x-100-mm-stuk-252-m%C2%B2-prijs-per-m%C2%B2-verkoop-per-stuk/
15	PE folie - los gelegd	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
16	Beplating - geëxpandeerde kurk	https://www.dekurwinkel.nl/isolatie-kurk/geexpandeerde-kurkplaat-50mm.html

BIJLAGE 15: Bronnen kostprijs materialen

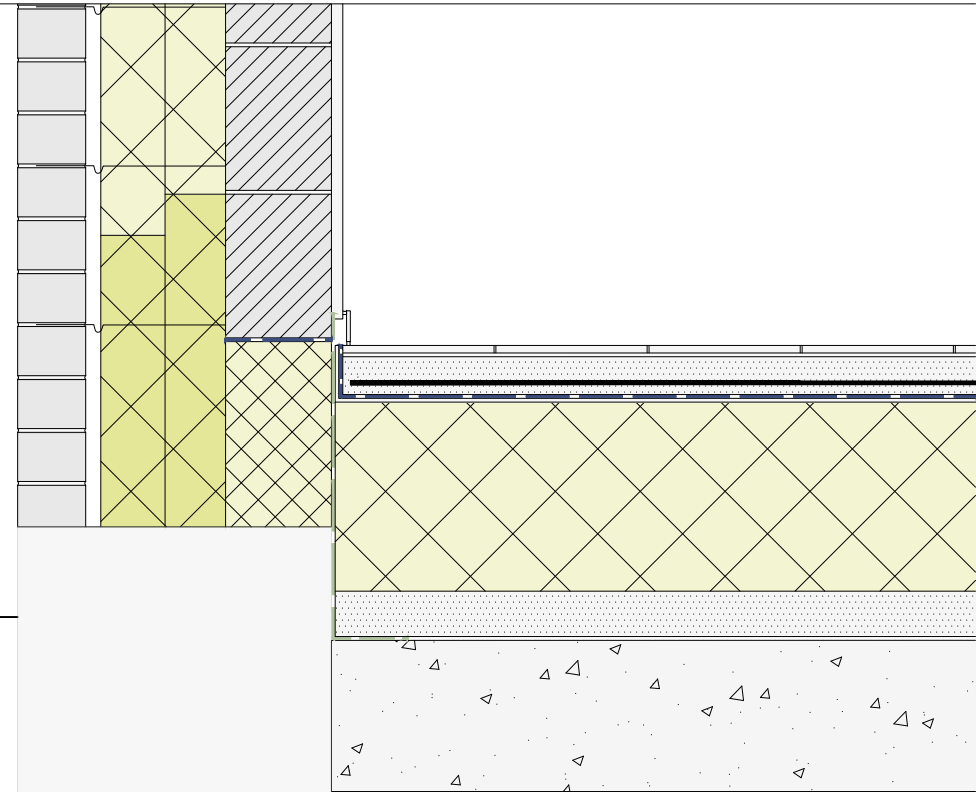
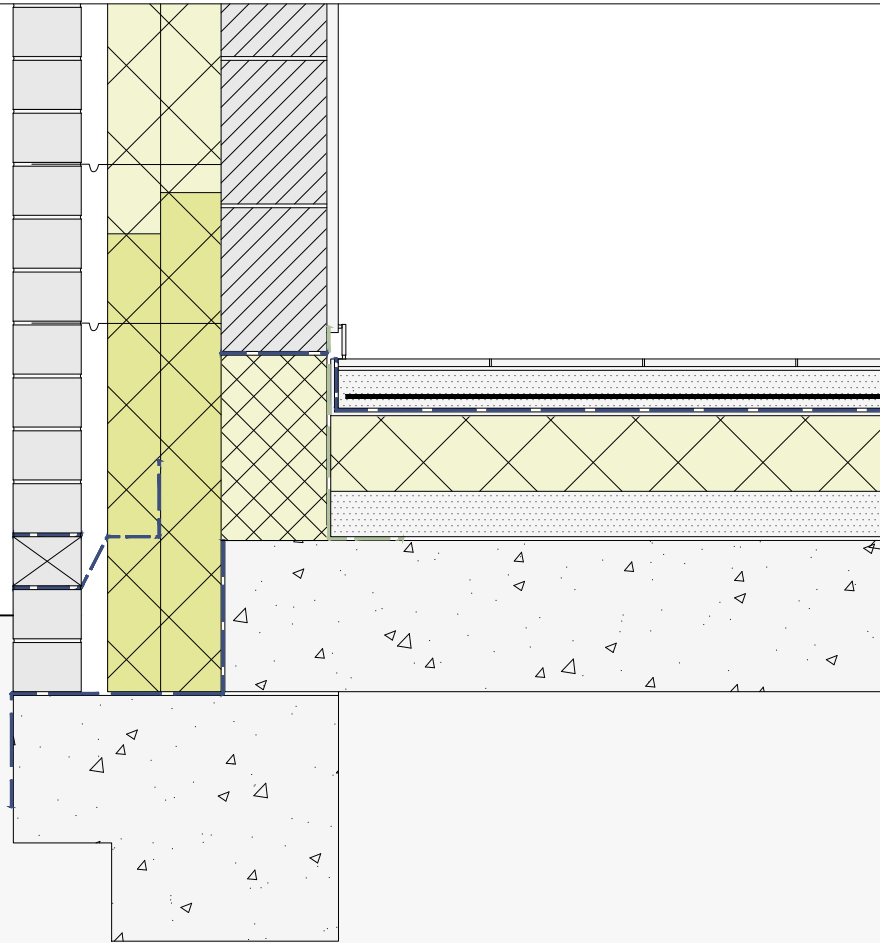
17	Beplating - geëxpandeerde kurk	https://www.prosuber.com/isoleren-met-kurk-2/kurk-prijslijsten/
18	Beplating - geëxpandeerde kurk	https://www.prosuber.com/isoleren-met-kurk-2/kurk-prijslijsten/
19	PE folie - los gelegd	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
20	Ter plaatste gestort gewapend beton	https://www.livos.be/nl/bouwinformatie/ruwbouw/fundering-en-kelder/23105/richtprijzen-fundering-en-beton/
21	Aanvulling gecompacteerd zand	https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-rivierzand-0-2-25-kg/p/B219950
22	Aanvulling gecompacteerd zand	https://www.gamma.be/nl/assortiment/knauf-stabilise-25-kg/p/B281656
23	Ter plaatste gestort gewapend beton	https://www.livos.be/nl/bouwinformatie/ruwbouw/fundering-en-kelder/23105/richtprijzen-fundering-en-beton/
Strobalenwand - bouwdetail 1		
1	Kalkpleister	https://ecobouwmaterialen.be/cat_php?hcat=muurbezetting&hc=2&cat=Kalk%20binnenpleister&cc=7
2.1	Behandeld-verankerd naaldhout (11%)	https://www.eurabo.be/nl/producten/vuren-fsc-pefc-sls-clis-45mm
2.2	Stro (89%)	https://www.agriwebshop.com/stro-baal
3	Leempleister (Klei in TOTEM)	https://www.tintelijjn.com/shop/product/claytec-basisleem-unterputz-25-kg-10-110-865?category=166&attr=
4	Parket - Belgisch hardhout - genageld en oppervlaktebehandeld	https://vandaagwonen.be/prijs-parketvloer/
5	Houtvezelplaat	https://www.isolatiemateriaal.nl/ecologische-isolatie/houtvezel/pavacoustic-platen/pavacoustic-brut-houtvezelplaat-2500x1200x20mm-rd040-3m2
6	Beplating OSB	https://www.gamma.be/nl/assortiment/osb3-plaat-244x59-cm-dikte-12-mm-met-4-zijdige-tong-en-groef/p/B597485
7	Beplating OSB	https://www.gamma.be/nl/assortiment/osb3-plaat-244x59-cm-dikte-12-mm-met-4-zijdige-tong-en-groef/p/B597485
8.1	Belgisch naaldhout en loofhout - genageld en behandeld (30%)	https://www.eurabo.be/nl/producten/vuren-fsc-pefc-sls-clis-45mm
8.2	Riet (70%) (Stro in TOTEM)	https://www.natuurmatten.nl/website/index.php?Show=WebShopBasket
9	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	https://www.grind.be/schelpen-gewassen-lsggestort
10	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
11	Aanvulling zand	https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-rivierzand-0-2-25-kg/p/B219950
12	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
13	Houten verdeelbalk	https://www.houtdirect.nl/hout-tuinhout/grenen/balken/grenen-balken-os-50x150-mm?filter=1096
14	Schroefpaal	https://www.limtrade.be/unp-200
15	Kalksteen in cementmortel	https://www.impermo.be/nl/search?search_query=====tegels&layered_category=249&orderby=popular_items&orderway=desc
16	Grinddrainage	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
17	Drainage buis	https://www.bouwdpot.be/drainagebuis-pp-wikkel-50m-diam100.html
18	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
Strobalenwand - bouwdetail 2		
1	Kalkpleister	https://ecobouwmaterialen.be/cat_php?hcat=muurbezetting&hc=2&cat=Kalk%20binnenpleister&cc=7
2.1	Behandeld-verankerd naaldhout (11%)	https://www.eurabo.be/nl/producten/vuren-fsc-pefc-sls-clis-45mm
2.2	Stro (89%)	https://www.agriwebshop.com/stro-baal
3	Leempleister (Klei in TOTEM)	https://www.tintelijjn.com/shop/product/claytec-basisleem-unterputz-25-kg-10-110-865?category=166&attr=
4	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	https://www.rammedearthenterprises.com.au/rammed-earth-cost/#
5.1	Dekvloer - traskalk mortel	https://www.warmgreen.nl/product/traskalk-raaplaag-tpk-m-25-kg/
5.2	Maas versterkingsstaal	https://www.groothandel.be/p/begetube-verzinkte-staaldraadmat-1200-x-2100-x-3-mm-maas-100-x-100-mm-stuk-252-m%C2%B2-prijs-per-m%C2%B2-verkoop-per-stuk/
6	Blokken kalkhennep gelijmd (vlas in Nibe)	https://www.groenebouwmaterialen.nl/hennep-isolatieblokken.html?id=161309025&quantity=1
7	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
8	Aanvulling zand	https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-rivierzand-0-2-25-kg/p/B219950
9	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
10	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	https://www.grind.be/schelpen-gewassen-lsggestort
11	Leibedekking - gehaakt - inheems	https://www.renovatie-gids.be/renovatie-dakwerken/leien-dak/
12	Kalksteen in cementmortel	https://www.impermo.be/nl/search?search_query=====tegels&layered_category=249&orderby=popular_items&orderway=desc
13	Aanvulling grind	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
14	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
15	Grinddrainage	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
16	Drainage buis	https://www.bouwdpot.be/drainagebuis-pp-wikkel-50m-diam100.html
17	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
Stampaarde - bouwdetail 1		
1	Kalkpleister	https://ecobouwmaterialen.be/cat_php?hcat=muurbezetting&hc=2&cat=Kalk%20binnenpleister&cc=7
2	Kalkhennep blokken - gelijmd	https://www.eco-logisch.be/isohep-Hennep-Kalk-blokken-8031
3	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	https://www.rammedearthenterprises.com.au/rammed-earth-cost/#
4	Parket - Belgisch hardhout - genageld en oppervlaktebehandeld	https://vandaagwonen.be/prijs-parketvloer/
5.1	Dekvloer - traskalk mortel	https://www.warmgreen.nl/product/traskalk-raaplaag-tpk-m-25-kg/
5.2	Maas versterkingsstaal	https://www.groothandel.be/p/begetube-verzinkte-staaldraadmat-1200-x-2100-x-3-mm-maas-100-x-100-mm-stuk-252-m%C2%B2-prijs-per-m%C2%B2-verkoop-per-stuk/
6	Blokken kalkhennep gelijmd (vlas in Nibe)	https://www.groenebouwmaterialen.nl/hennep-isolatieblokken.html?id=161309025&quantity=1
7	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
9	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	https://www.grind.be/schelpen-gewassen-lsggestort
10	Leibedekking - gehaakt - inheems	https://www.renovatie-gids.be/renovatie-dakwerken/leien-dak/
11	Kalksteen in cementmortel	https://www.impermo.be/nl/search?search_query=====tegels&layered_category=249&orderby=popular_items&orderway=desc
12	Aanvulling grind	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
13	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
14	Grinddrainage	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
17	Drainage buis	https://www.bouwdpot.be/drainagebuis-pp-wikkel-50m-diam100.html
18	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html

BIJLAGE 15: Bronnen kostprijs materialen

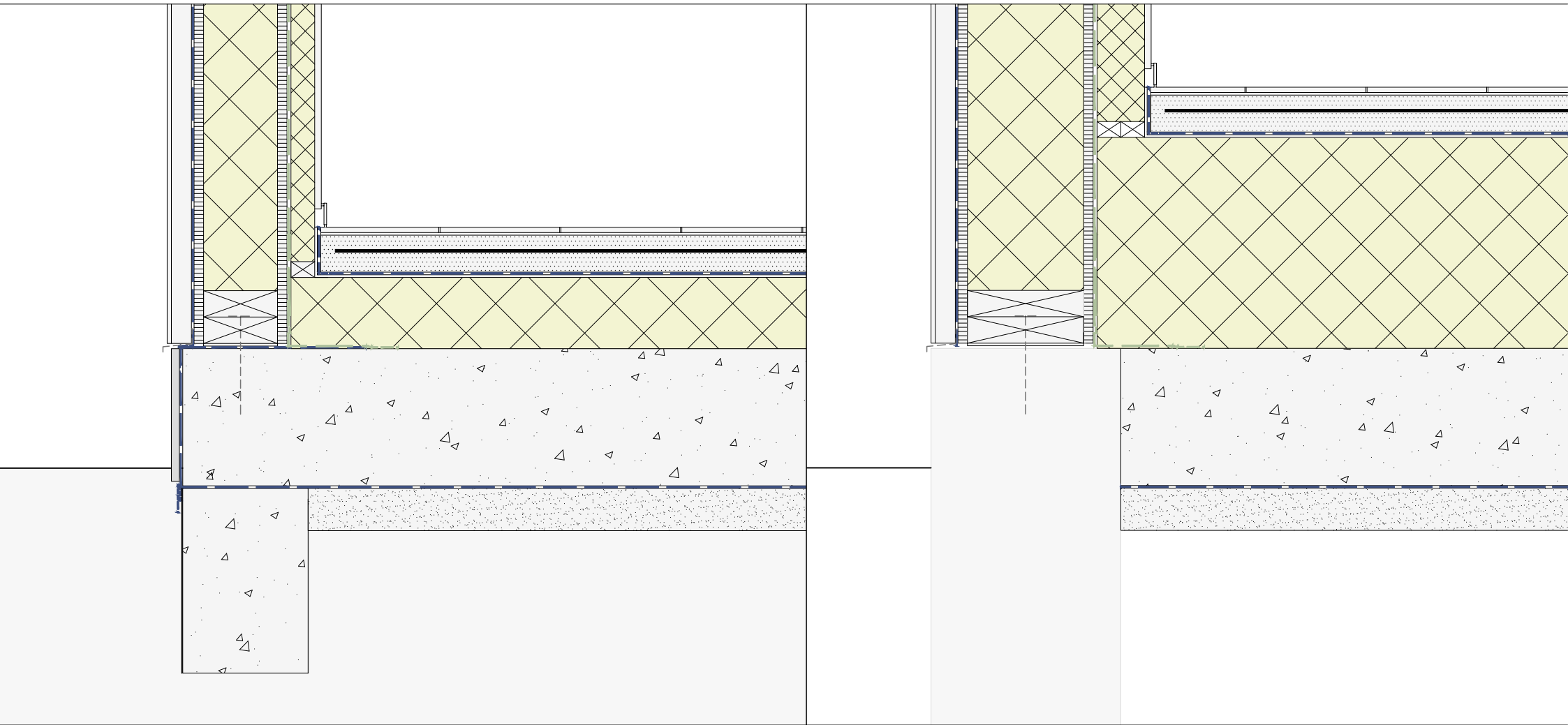
Stampaarde - bouwdetail 2		
1	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	https://www.rammedearthenterprises.com.au/rammed-earth-cost/#
2	Kalkhennep blokken - gelijmd	https://www.eco-logisch.be/sohemp-Hennep-Kalk-blokken-8031
3	Leempleister	https://www.tintelijjn.com/shop/product/claytec-basisleem-unterputz-25-kg-10-110-865?category=166#attr=
4	Stampleem (Geperste aarde blokken - gelegd in kalkmortel in TOTEM)	https://www.rammedearthenterprises.com.au/rammed-earth-cost/#
5	Blokken kalkhennep gelijmd (vlas in Nibe)	https://www.groenebouwmaterialen.nl/hennep-isolatieblokken.html?id=161309025&quantity=1
6	Aanvulling schelpen (grind in TOTEM)	https://www.grind.be/schelpen-gewassen-losgestort
7	EPDM	https://www.epdmmarkt.be/epdm-folie-1-14-mm-breedte-2-28-m
8	Massieve blokken beton - in cementmortel	https://www.marktplaats.nl/v/doe-het-zelf-en-verbouw/overige-doe-het-zelf-en-verbouw/m1817424135-stapelblokken-betonblokken-legoblokken-jumboblok
9	Aanvulling zand	https://www.gamma.be/nl/assortiment/gamma-rivierzand-0-2-25-kg/p/B219950
10	jute (PE in TOTEM en Nibe)	https://www.vanderstuyf.be/koop/jute-doe-per-m/
11	Aanvulling grind	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
12	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html
13	Grinddrainage	https://www.grind.be/steenslag/diabas-split?code=1000
14	Drainage buis	https://www.bouwdepot.be/drainagebuis-pp-wikkel-50m-diam100.html
15	Geotextiel (PE folie in TOTEM)	https://www.bouwkampioen.be/nl/visqueen-pe-bouwfolie-0-2-mm-grijs-per-m.html

BIJLAGE 16

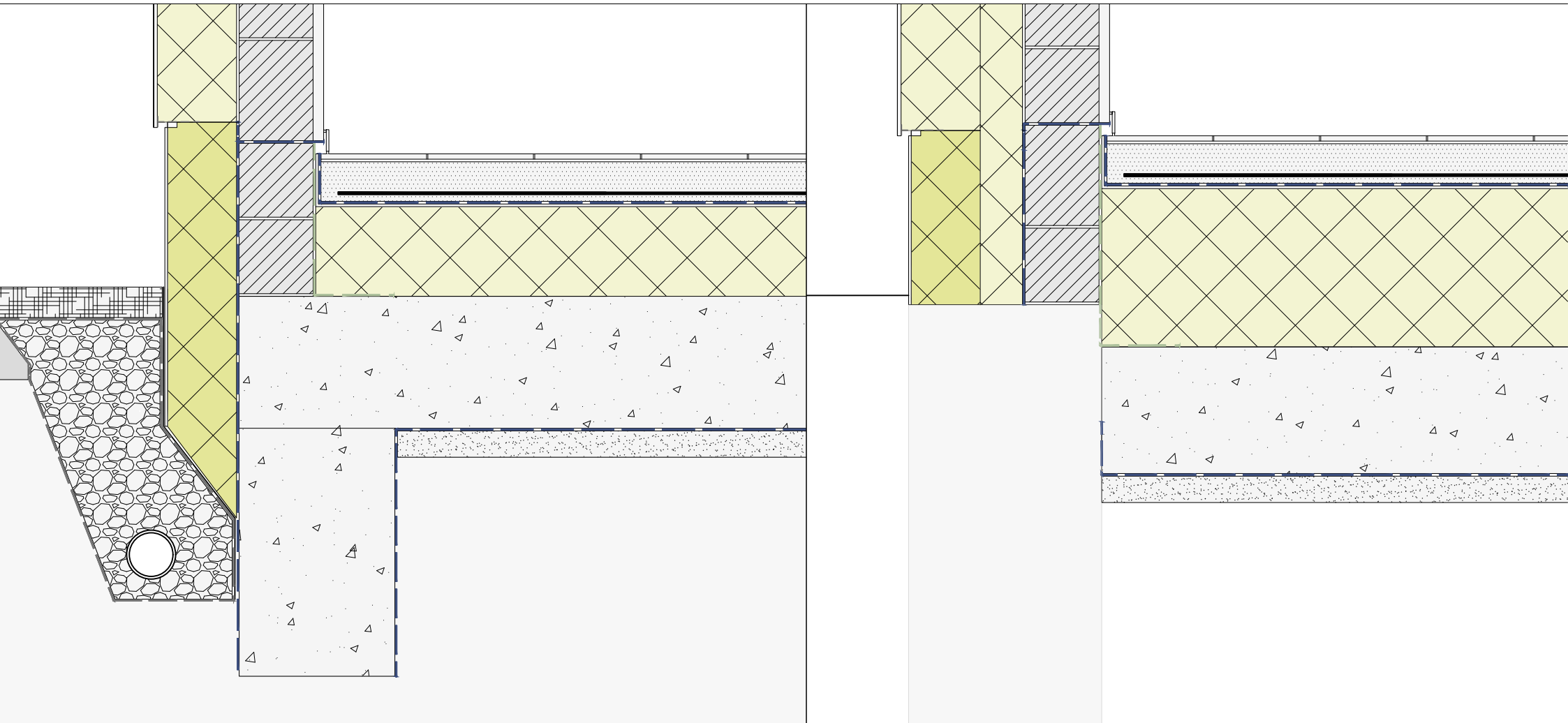
BIJLAGE 16.1 - MUURVOET Spouwmuur



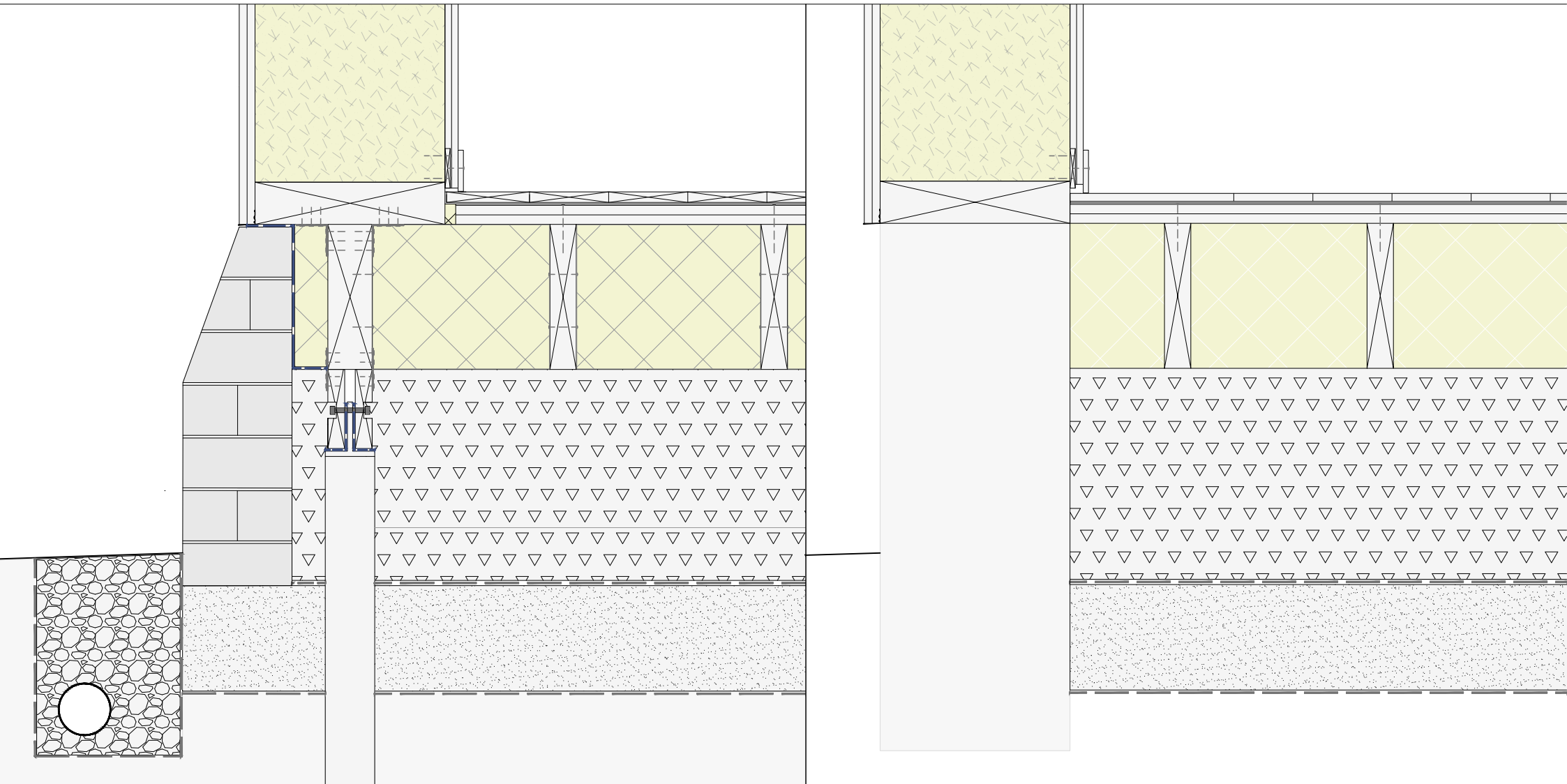
BIJLAGE 16.2 - MUURVOET Houtskelet



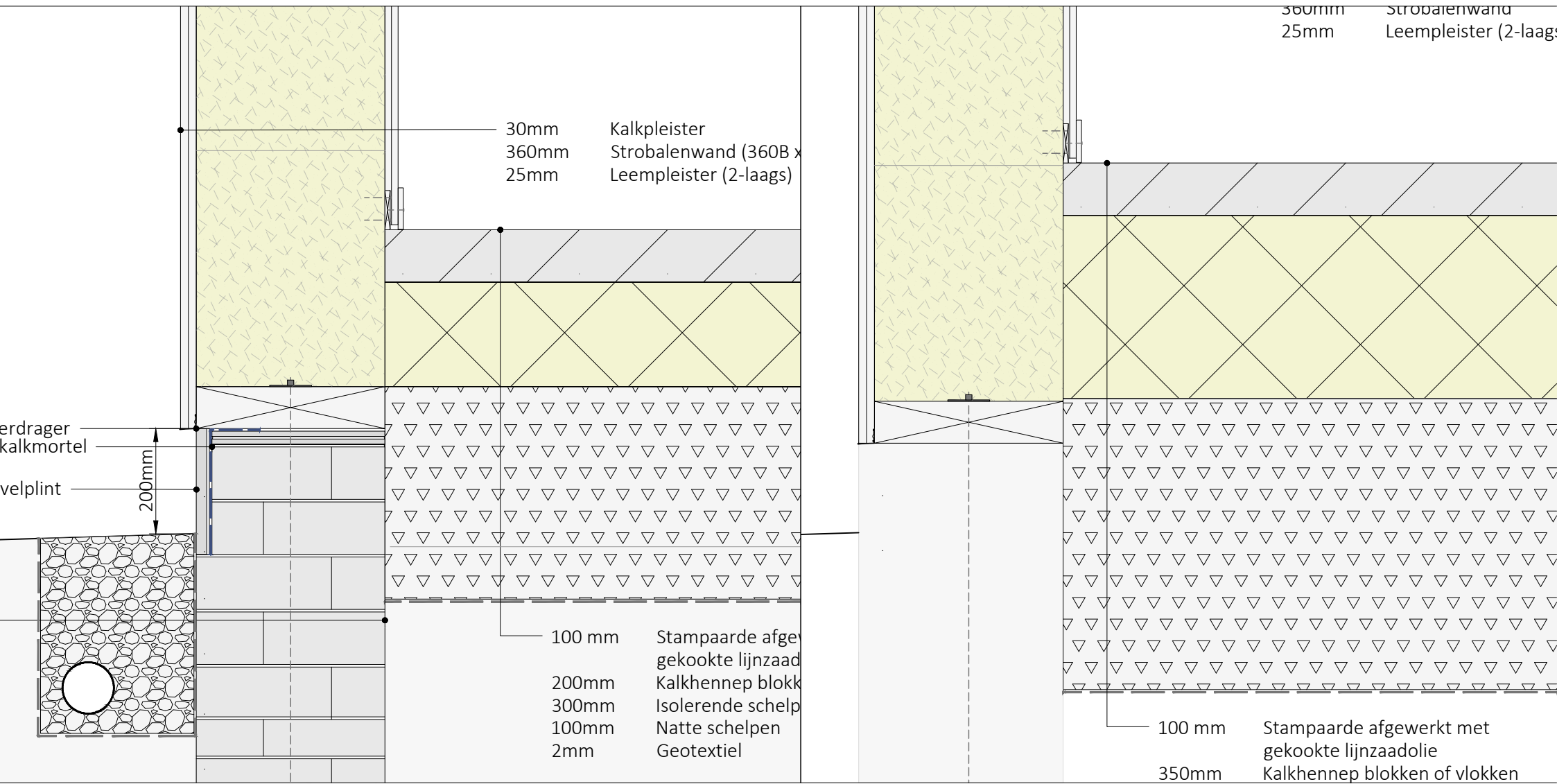
BIJLAGE 16.3 - MUURVOET ETICS



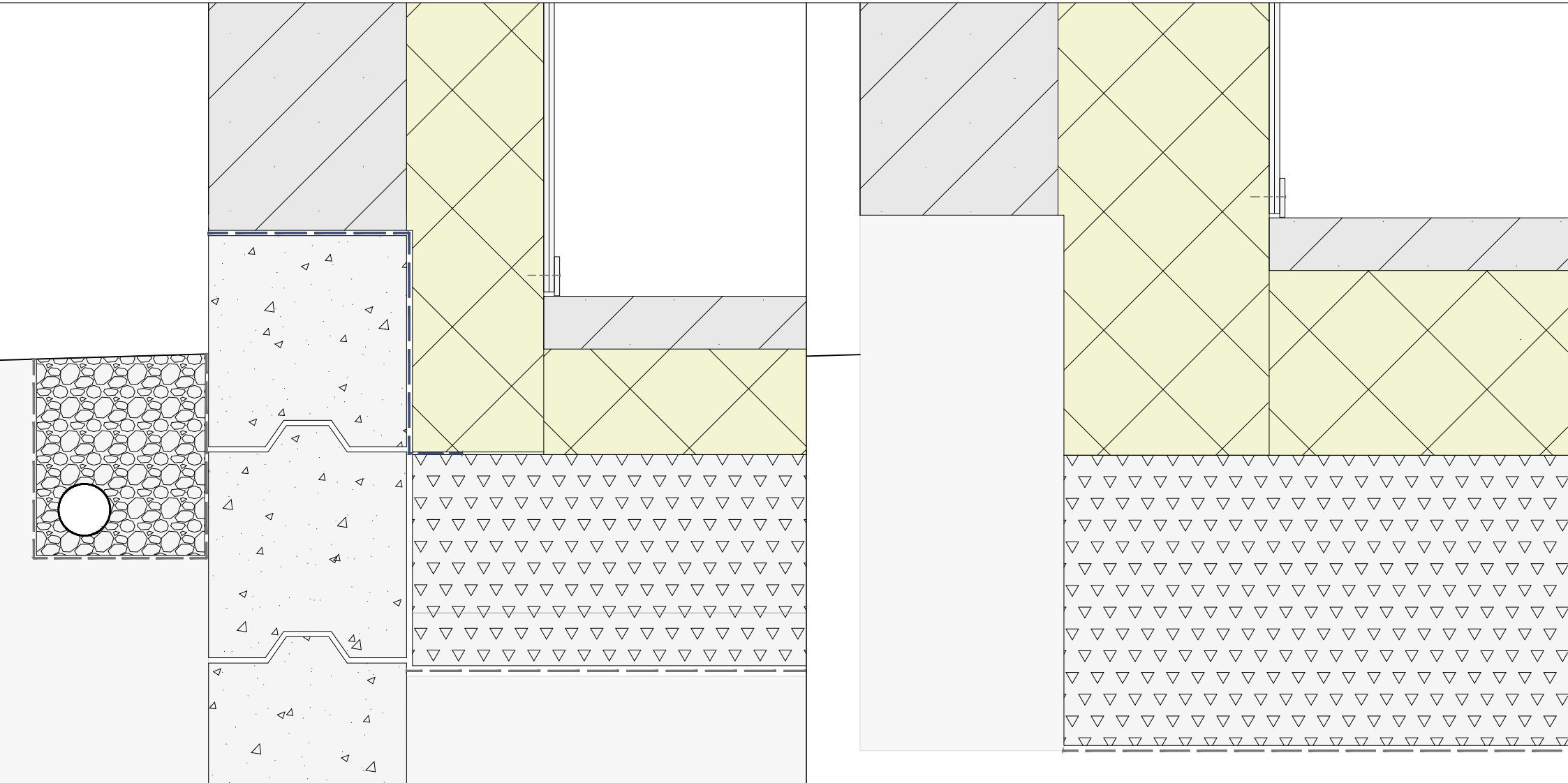
BIJLAGE 16.4 - MUURVOET STROBALEN 1: Schroefpaal



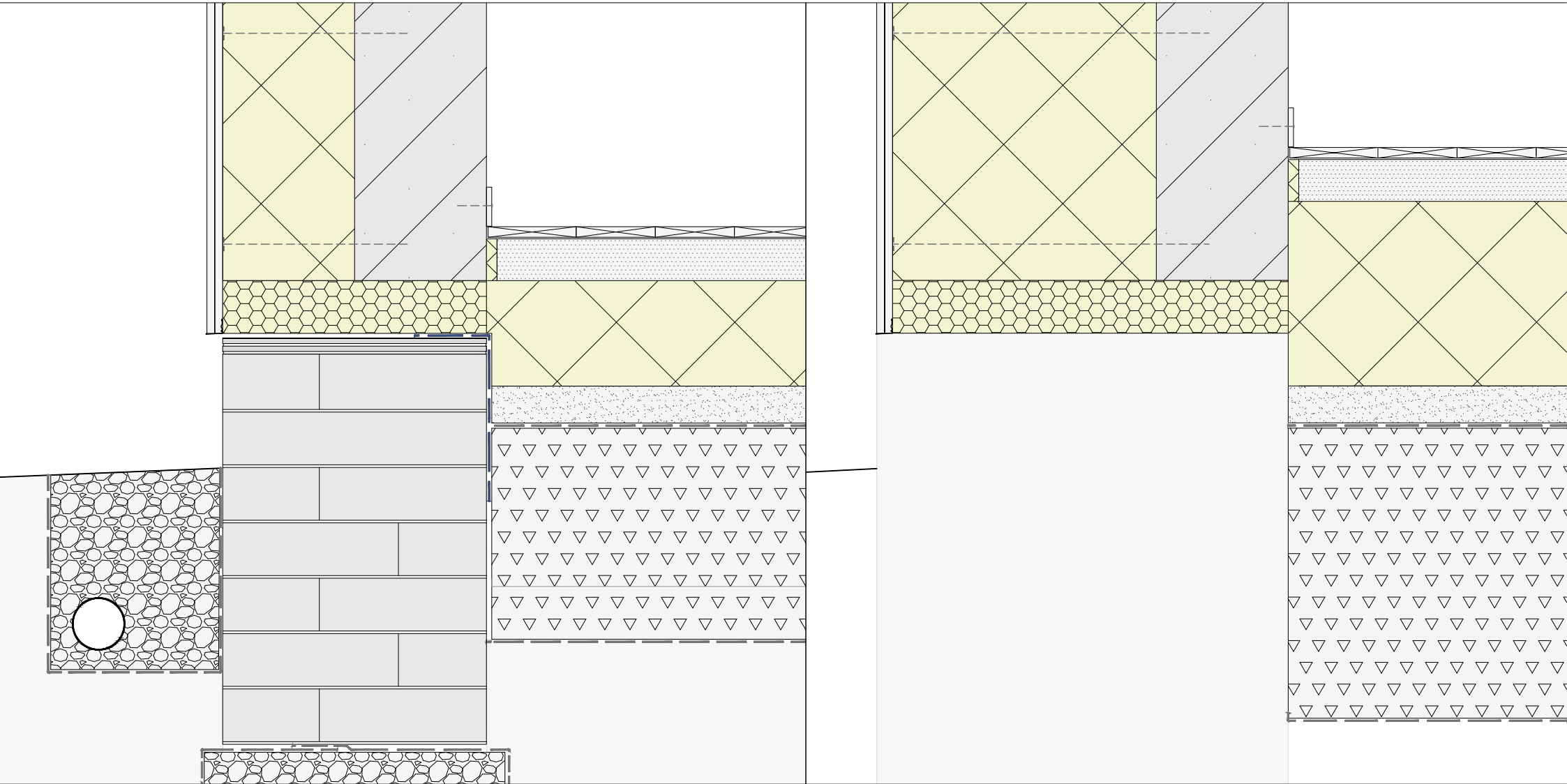
BIJLAGE 16.5 - MUURVOET STROBALEN 2: Grindfundering



BIJLAGE 16.6 - MUURVOET STAMPAARDE 1: Betonnen stapelblokken



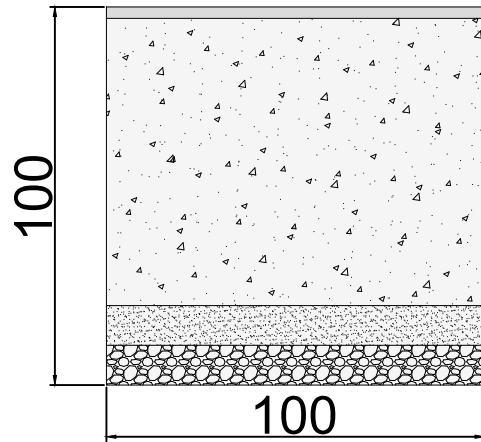
BIJLAGE 16.7 - MUURVOET STAMPAARDE 2: Grindfundering



BIJLAGE 16.8 - Funderingen

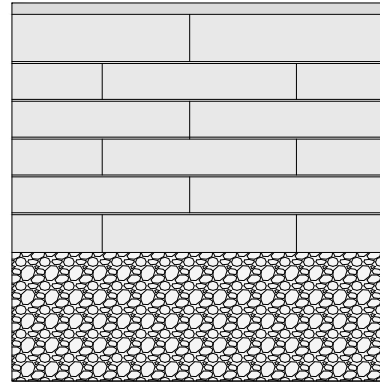
Betonnen stapelblokken

(MET of ZONDER leiste)



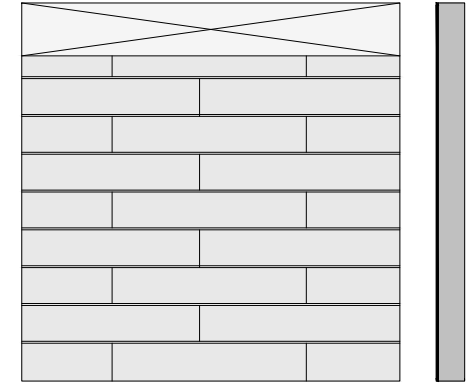
Rubble trench

(MET of ZONDER leiste)

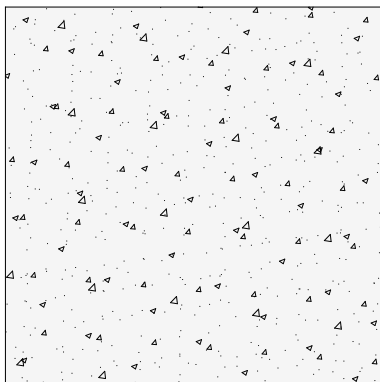


Schroefpaal

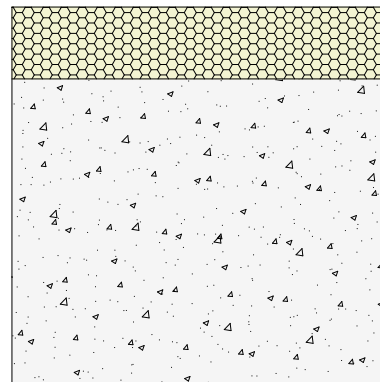
(Houten balk + natuursteen + schroefpaal)



Betonnen fundering

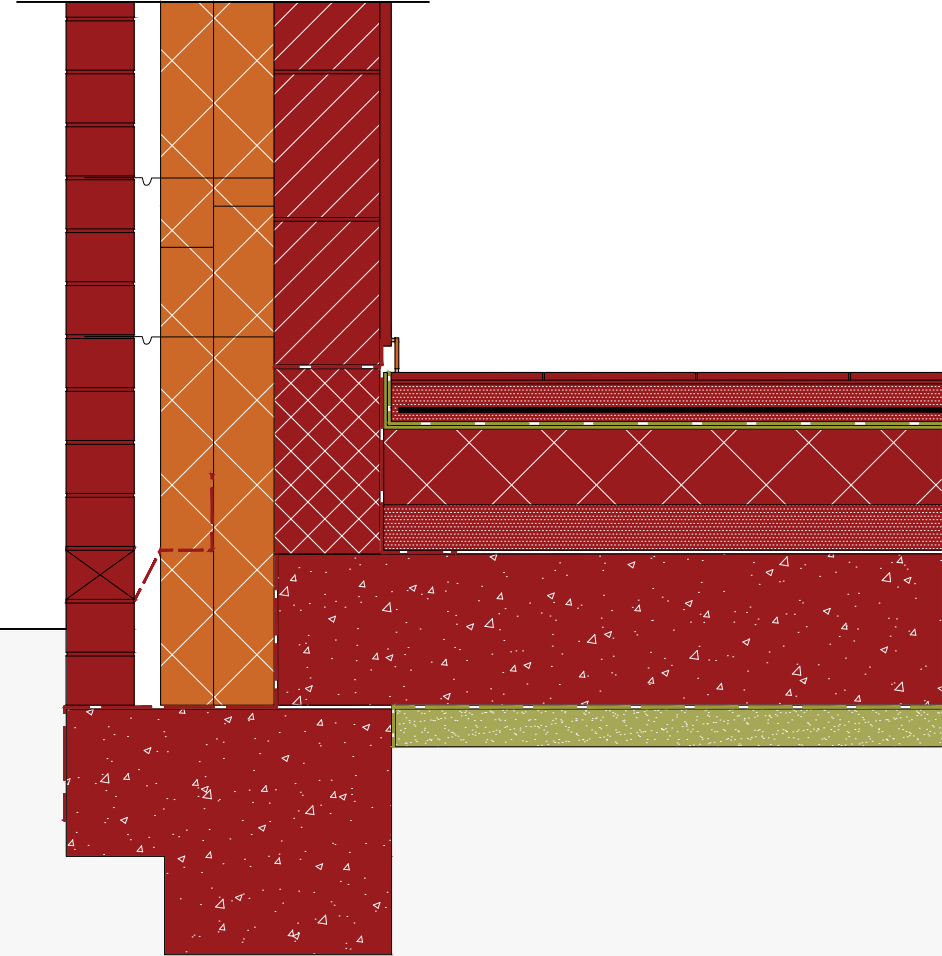
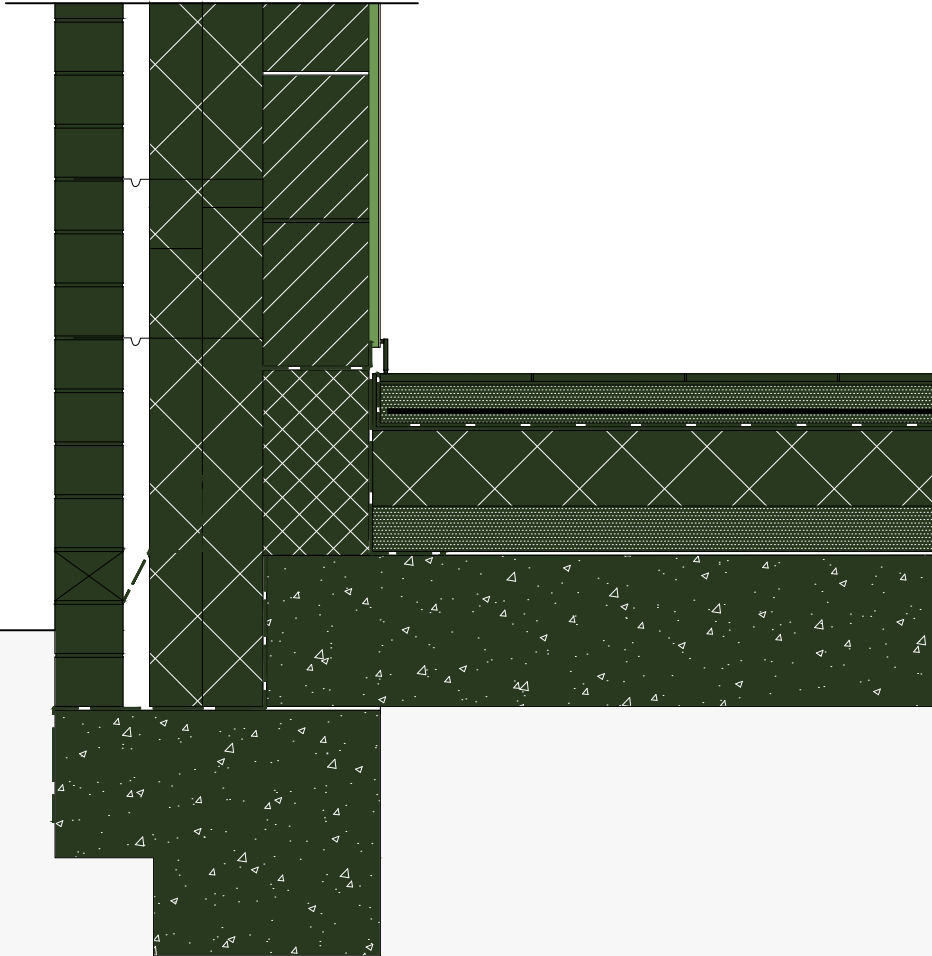


Betonnen fundering met cellenglas

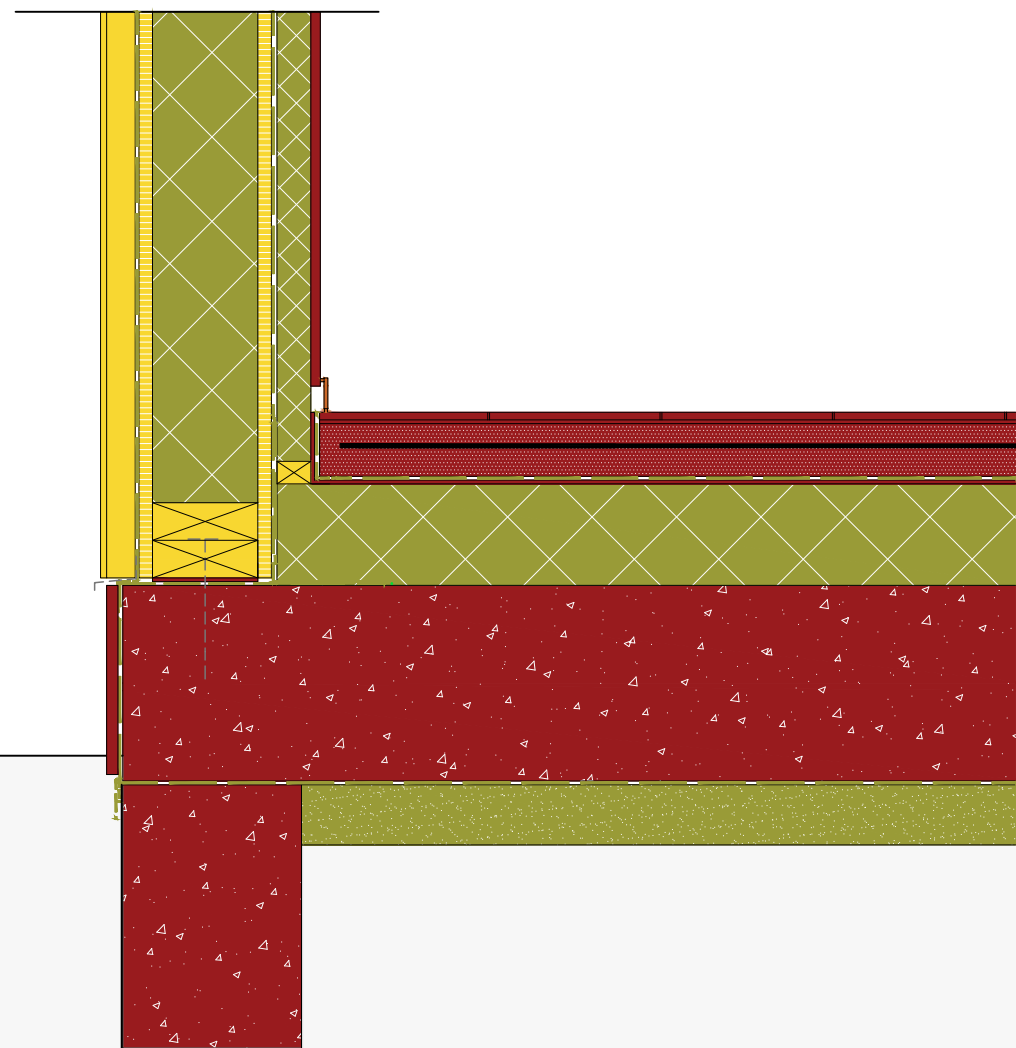
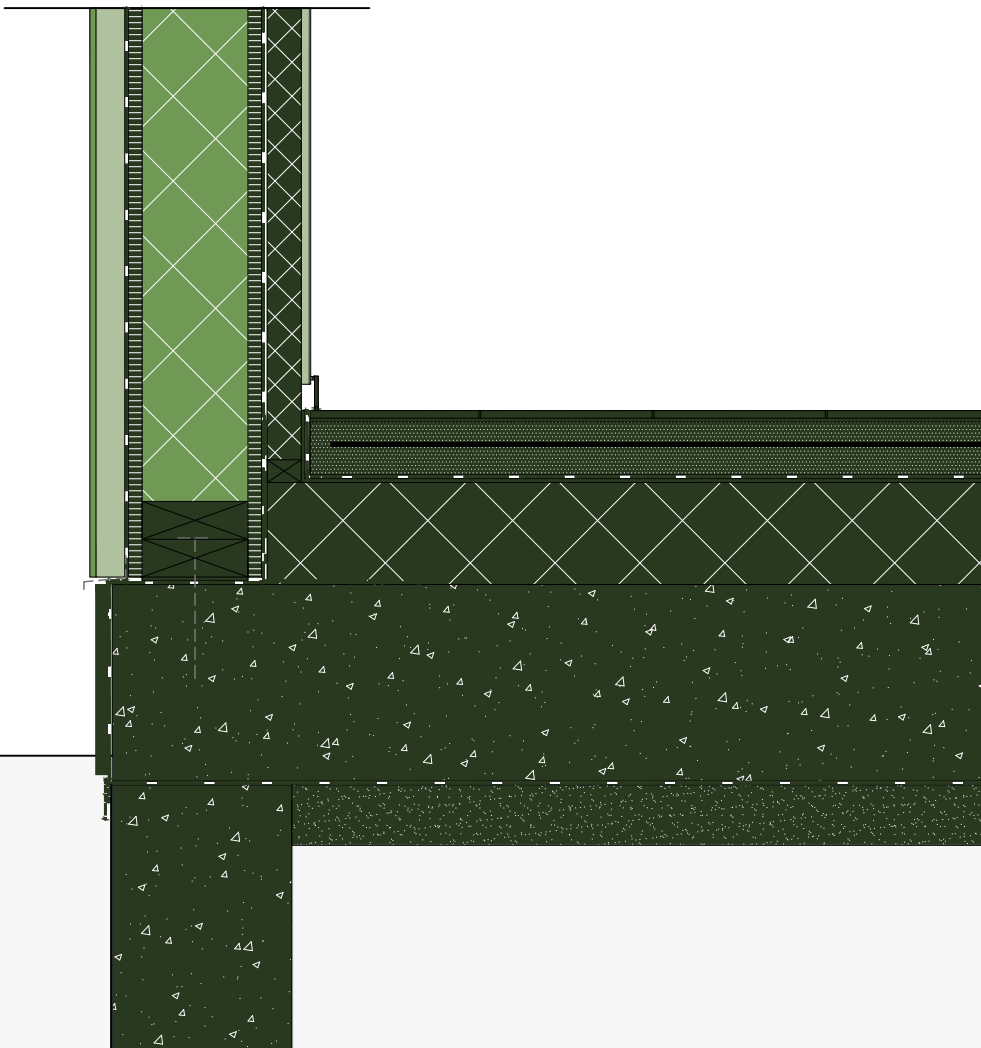


BIJLAGE 17

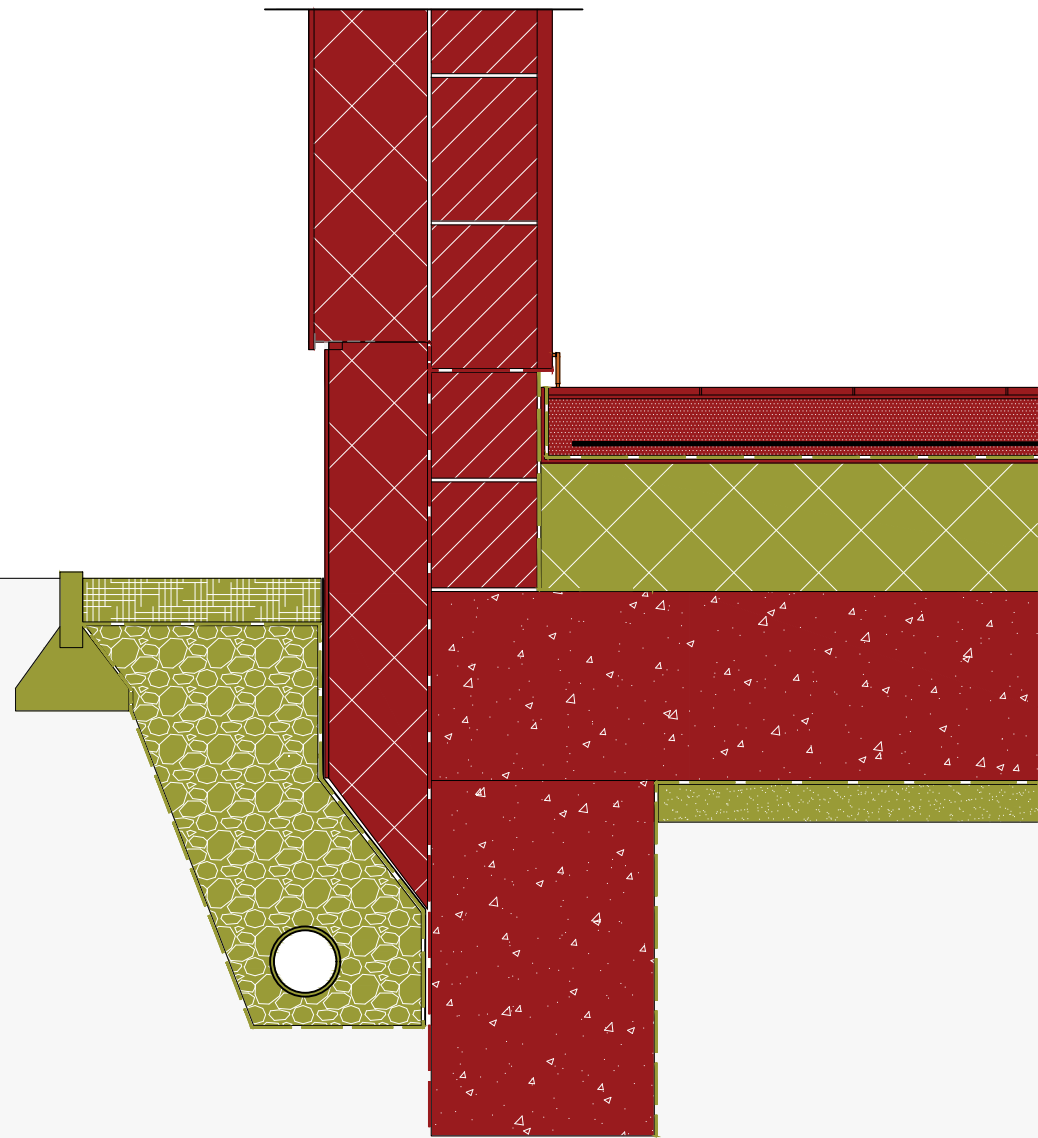
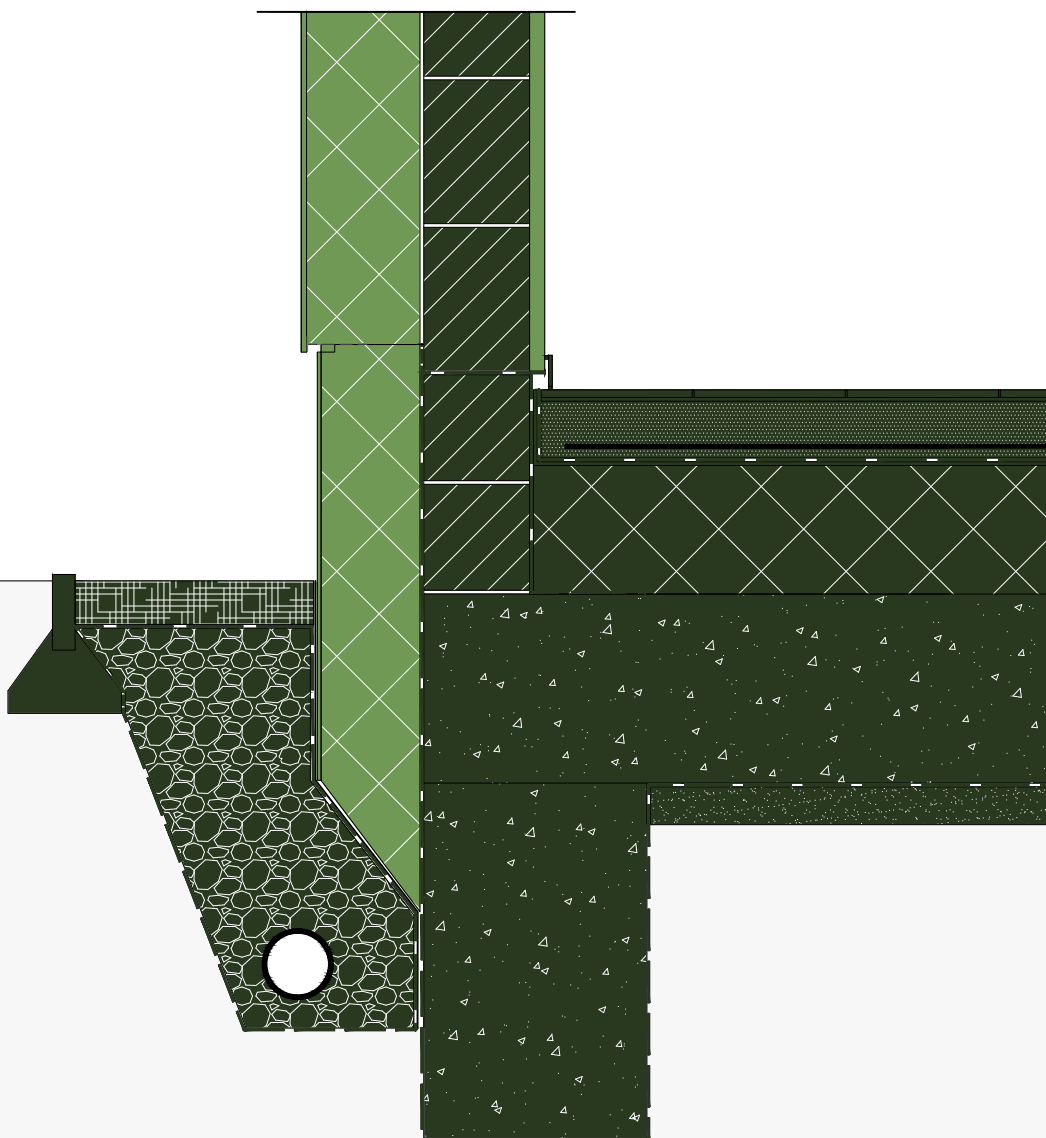
BIJLAGE 17.1 - MUURVOET SPOUWMUUR



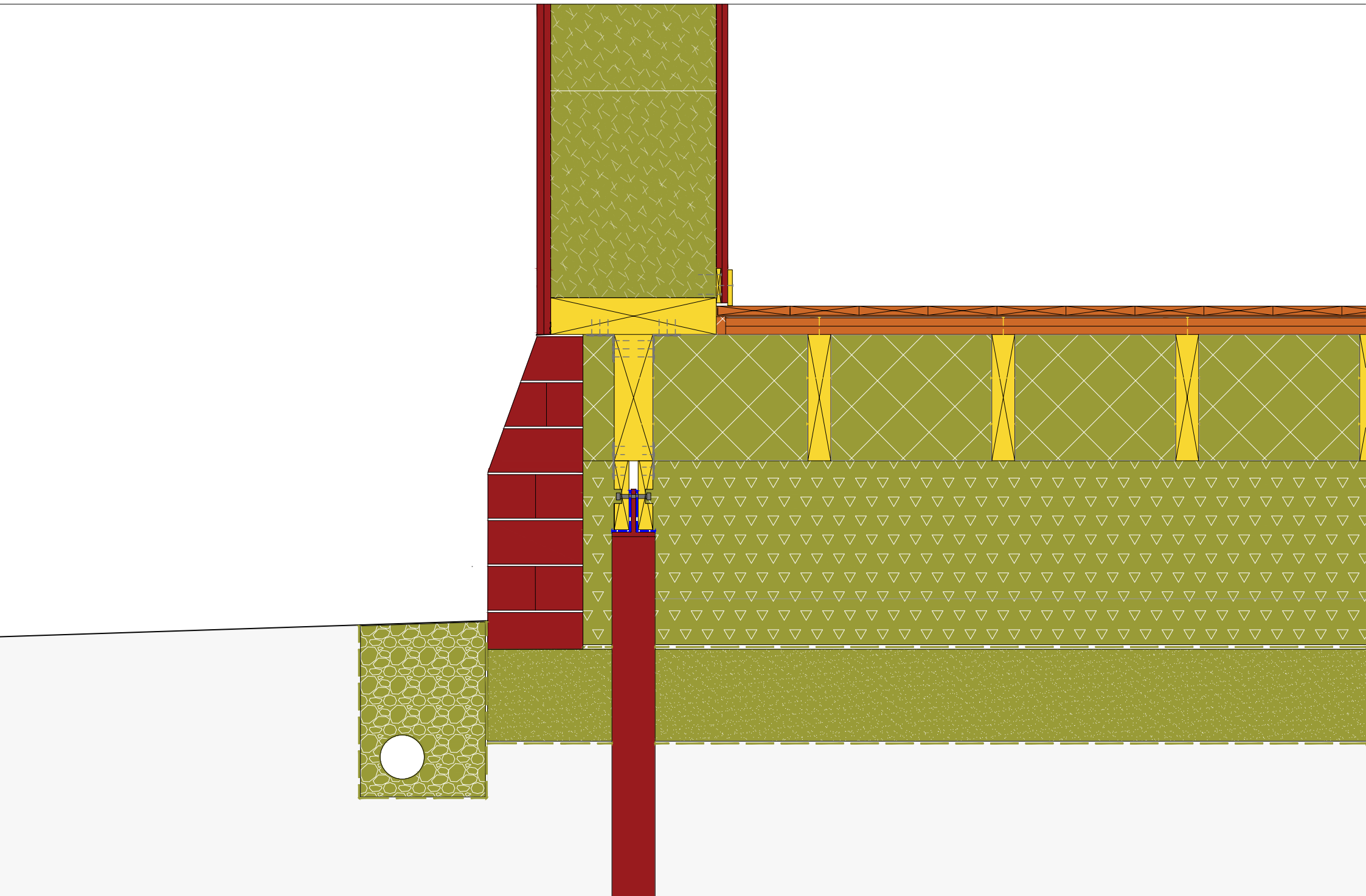
BIJLAGE 17.2 - MUURVOET HOUTSKELETBOUW



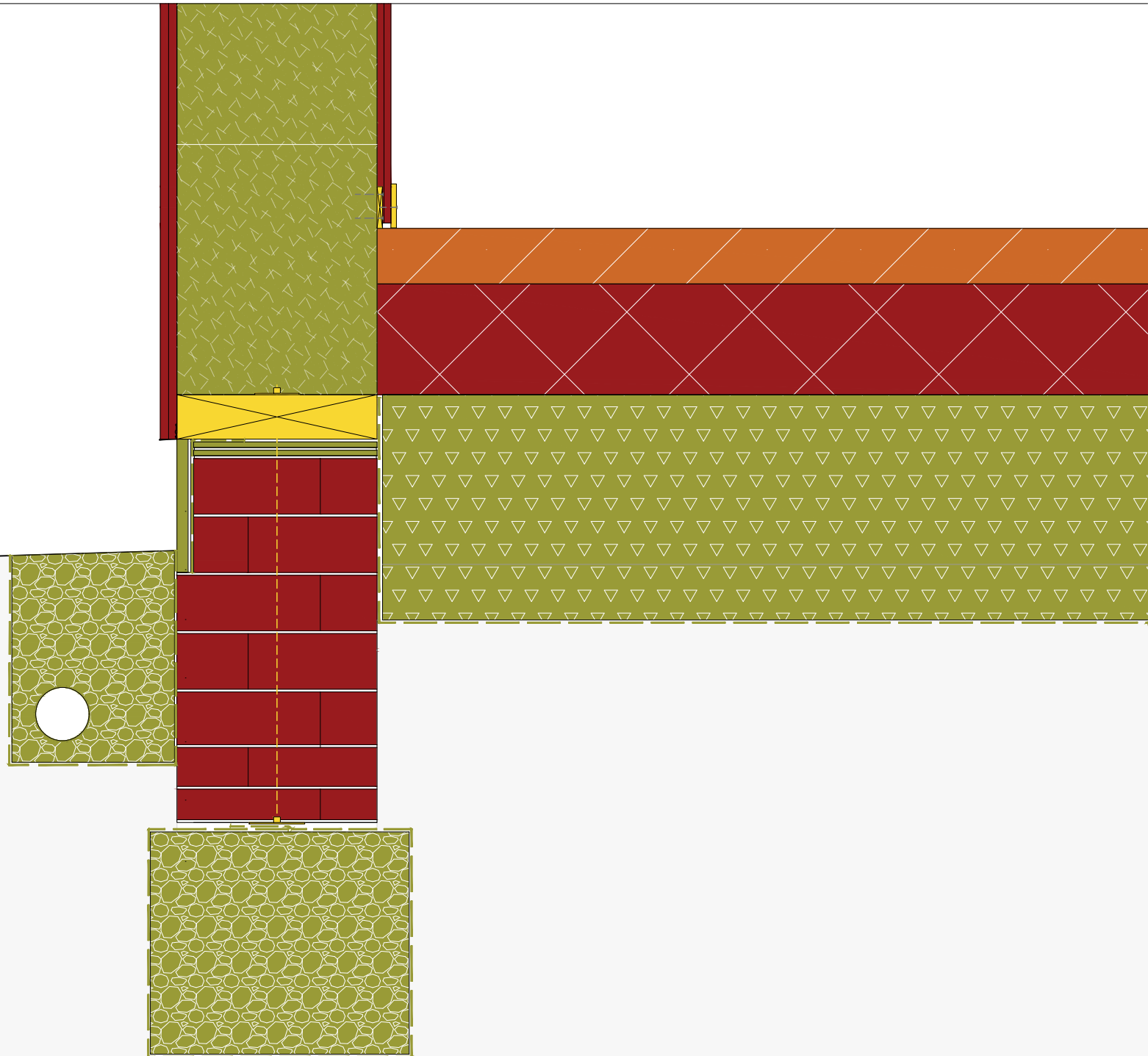
BIJLAGE 17.3 - MUURVOET ETICS



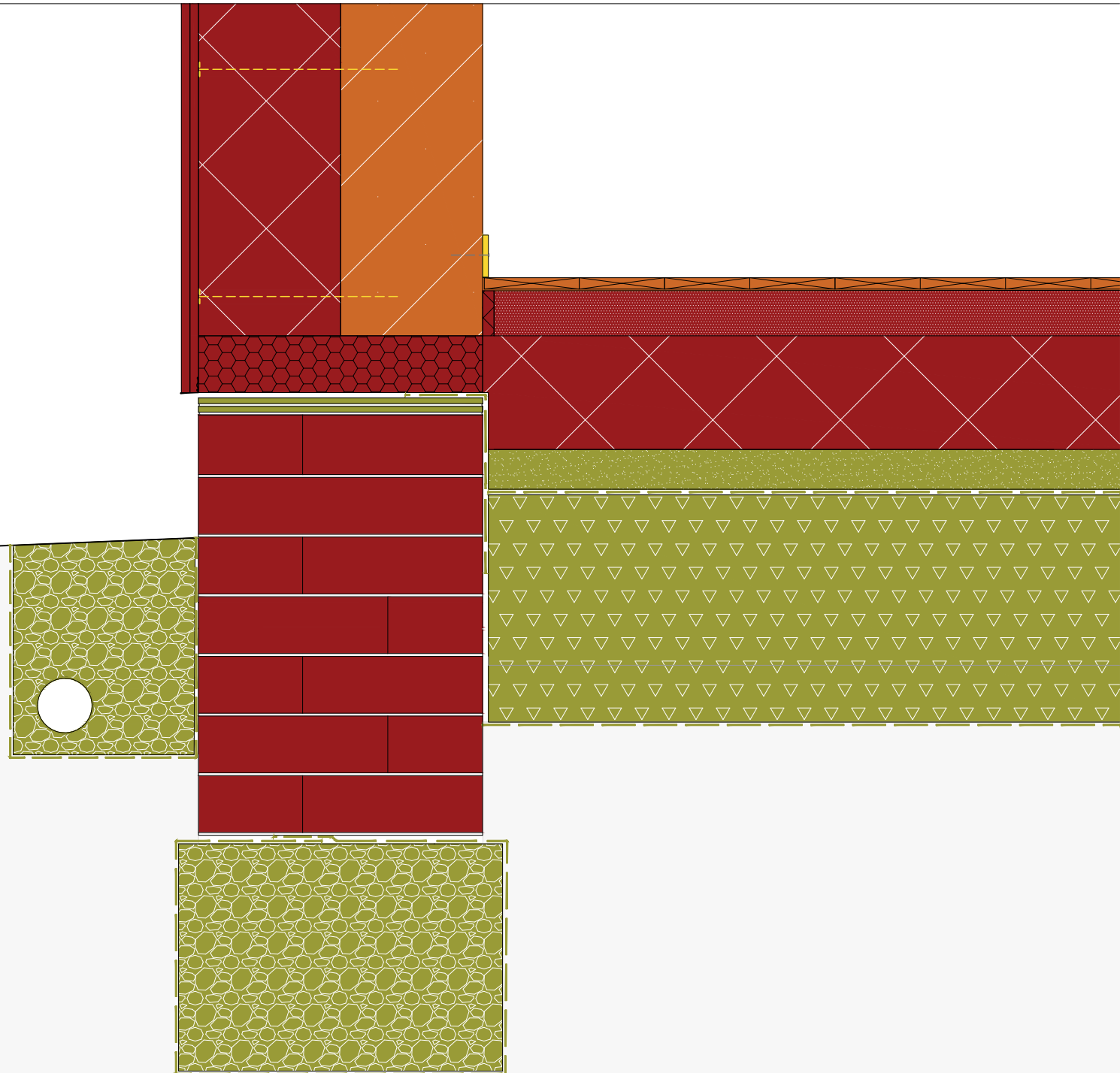
BIJLAGE 17.4 - MUURVOET STROBALEN 1



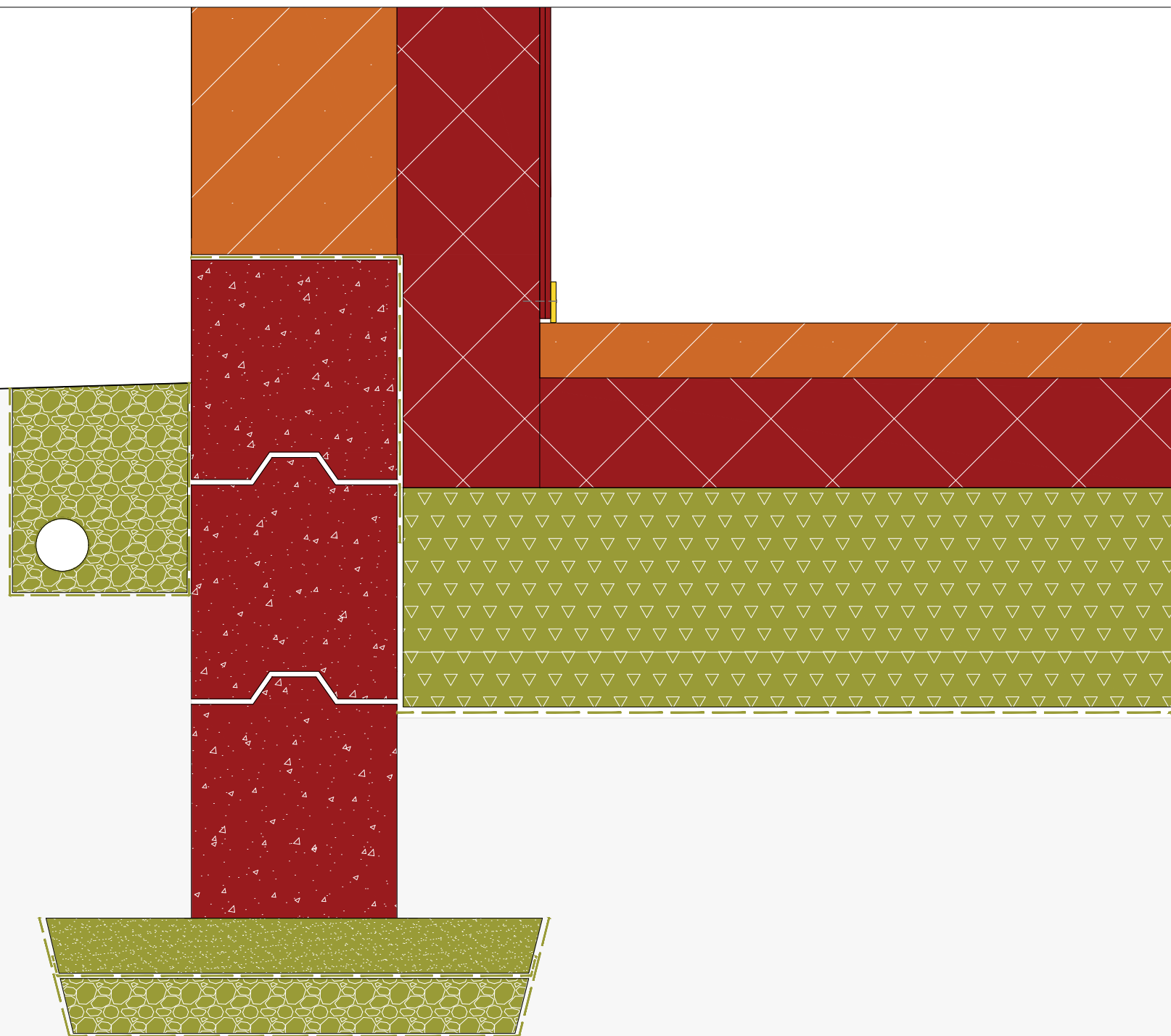
BIJLAGE 17.5 - MUURVOET STROBALEN 2



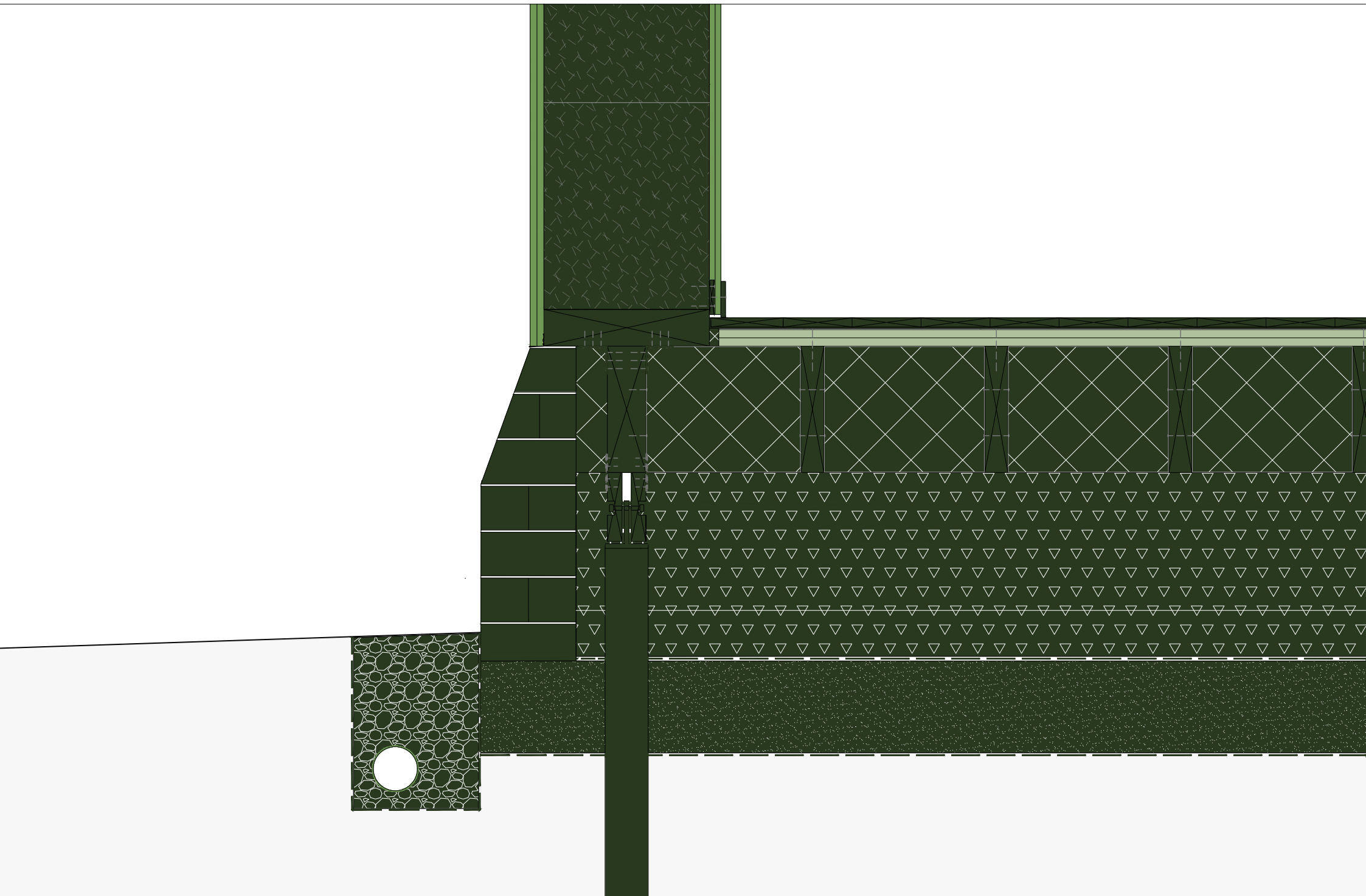
BIJLAGE 17.6 - MUURVOET STAMPAARDE 1



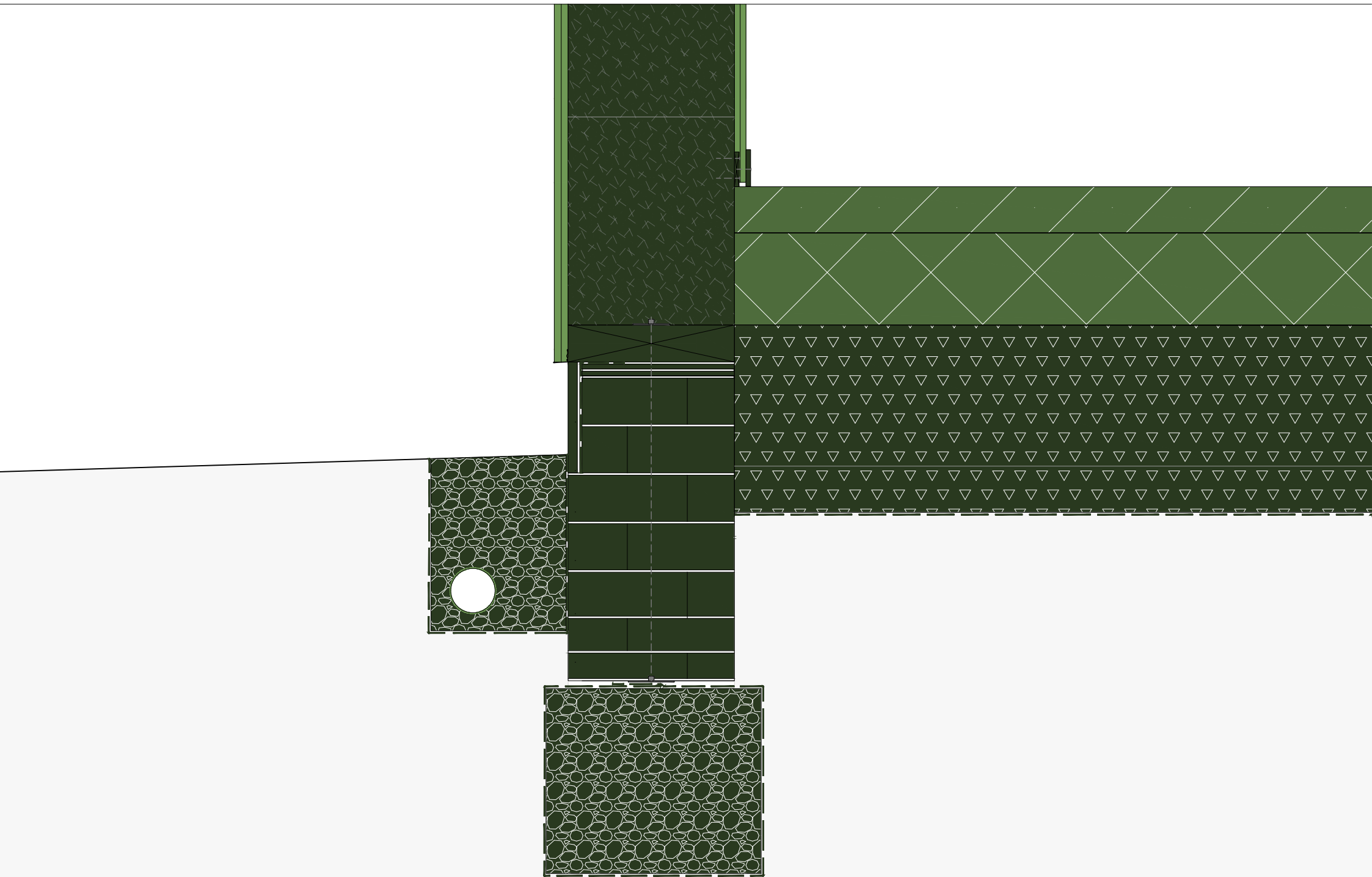
BIJLAGE 17.7 - MUURVOET STAMPAARDE 2



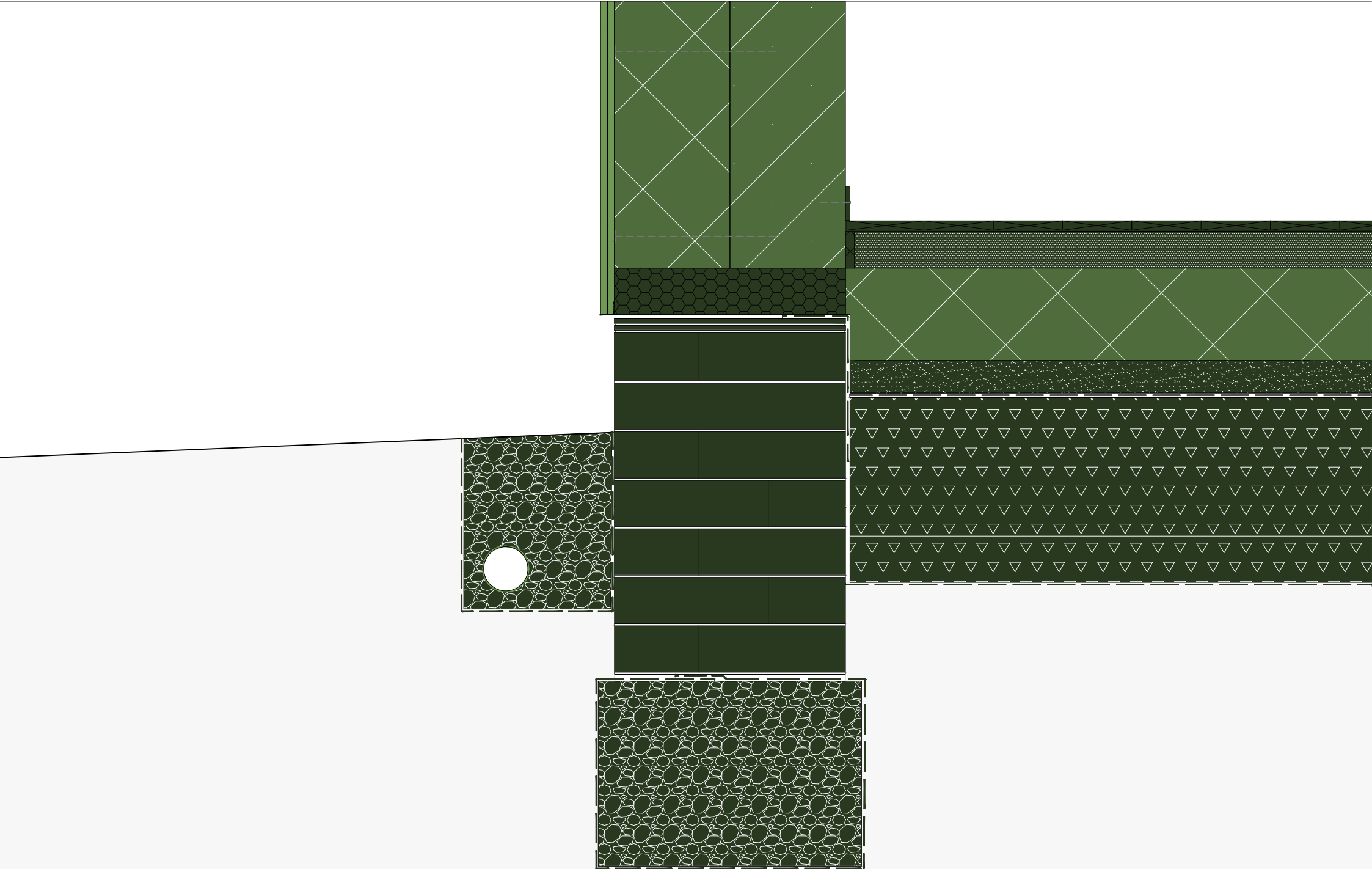
BIJLAGE 17.8 - MUURVOET STROBALEN 1



BIJLAGE 17.9 - MUURVOET STROBALEN 2



BIJLAGE 17.10 - MUURVOET STAMPAARDE 1



BIJLAGE 17.11 - MUURVOET STAMPAARDE 2

