

Eindverslag bouwtechnisch onderzoek

AKOESTISCH BETON

*Onderzoek naar het verbeteren van de akoestiek
in een ruimte met de toepassing van beton*

Kevin van der Weijden

Studienummer: 1275402

 **TU Delft**
Delft University of Technology

WESTO
PREFAB BETON SYSTEMEN

Eindverslag bouwtechnisch onderzoek

AKOESTISCH BETON

*Onderzoek naar het verbeteren van de akoestiek
in een ruimte met de toepassing van beton*

Student: Kevin van der Weijden
Studienummer: 1275402
Afdeling Architectuur, leerstoel materialisatie –
Strategic Architectural Design Development

Eerste begeleider: ir. F.R. Schnater
Afdeling Bouwtechnologie, leerstoel bouwtechnisch
ontwerpen – Ontwerpen van bouwconstructies

Tweede begeleider: Dr. ir. arch. M.J. Tenpierik
Afdeling Bouwtechnologie, leerstoel klimaatontwerp –
Bouw fysica

21 januari 2011

Faculteit der Bouwkunde
Technische Universiteit Delft

Final report building technology research

ACOUSTIC CONCRETE

*Research on improving the acoustics
in a room with the use of concrete*

Student: Kevin van der Weijden
Student number: 1275402
Department Architecture, chair
Materialisation – Strategic Architectural
Design Development

First mentor: ir. F.R. Schnater
Department Building Technology, chair
Architectural Engineering – Design of
Construction

Second mentor: Dr. ir. Arch. M.J. Tenpierik
Department Building Technology, chair
Climate Design – Building Physics

I Voorwoord

Vanuit architectonisch opzicht is er een thema dat mij persoonlijk zeer interesseert: monolithisch. Is het in de hedendaagse bouwcultuur met al zijn regels en eisen nog mogelijk om met één enkel materiaal iets te creëren? Een gebouw of een ruimte? De vierde *Concrete Design Competition* heeft dit jaar eenzelfde thema: monolithisch – verkenning van de veelzijdigheid. Een link met het materiaal beton is daarna snel gemaakt en vormt de grootste inspiratiebron voor dit bouwtechnische onderzoek.



Afb. Ia: *Church of the Light* van Tadao Ando.

De student architectuur in mij is namelijk zeer onder de indruk van beton als bouw materiaal en de expressie die het kan bieden, zoals bijvoorbeeld in de *Church of the Light* van de Japanse architect Tadao Ando zeer sterk tot uiting komt. Het is een veelzijdig materiaal met een groot scala aan toepassingsmogelijkheden, het heeft een grote verscheidenheid aan eigenschappen en is in vele manieren zeer vormbaar. Doordat beton in de basis een hard en glad materiaal is kan het afhankelijk van de eisen van een ruimte een negatief effect hebben op de akoestiek. Ruimten met veel schoon beton echoën vaak te veel en worden daardoor onaangename ruimtes om in te verblijven. In dit onderzoek heb ik getracht de vormbaarheid van beton te gebruiken om de akoestiek in een ruimte te kunnen verbeteren en de veelzijdigheid van het materiaal verder te verkennen. Een onderwerp waar tot op heden nog weinig onderzoek naar is gedaan, onderzoeken die zich richten op beton en akoestiek gaan namelijk meestal over geluidsoverdracht en –isolatie in plaats van het effect op de akoestiek in een ruimte zelf.

Dit eindverslag is geschreven in het kader van mijn duale afstudeerproject in de richtingen Architectuur en Bouwtechnologie bij de leerstoel *Materialisation and Design Development* aan de Faculteit der Bouwkunde van de TU Delft. De begeleiding werd verzorgd door Martin Tenpierik en Frank Schnater. Ik dank hen zeer voor hun opmerkingen en reacties gedurende het project. Tevens dank ik Westo Prefab Beton Systemen en dan met name Stefan Braakhuis en Rieks Kuik voor het beschikbaar stellen van hulp, materiaal en ruimte voor mijn onderzoek.

Kevin van der Weijden
Student Bouwkunde aan de TU Delft

Nieuwkoop, januari 2011

II Samenvatting

Architecturale fascinaties voor het materiaal beton en het thema monolithisch vormen het uitgangspunt voor dit verkennende onderzoek. Er is onderzocht hoe in een ruimte door uitsluitend gebruik te maken van beton voor de afwerking een voor de specifieke functie goede akoestiek kan worden gerealiseerd. Hiervoor zijn allereerst de akoestische eisen voor twee ruimten, een auditorium en een werkplek, opgesteld.

Vervolgens zijn er proefstukken ontworpen voor zowel reflectie als absorptie van geluid, de proefstukken gericht op geluidsabsorptie zijn onder te verdelen volgens drie absorptiemechanismen: poreuze materialen, geperforeerde panelen en ongeperforeerde panelen. Hiervan zijn drie proefstukken, één met poreus beton, één met gestraald poreus beton en één met een geperforeerd paneel van standaard beton in combinatie met poreus beton geproduceerd voor nader onderzoek.

Met de proefstukken zijn indicatieve metingen verricht om de absorptiespectra te kunnen bepalen waaruit bleek dat de spectra van de proefstukken met poreus beton veel weg hebben van de karakteristieke absorptiespectra. De waarden van de absorptiecoëfficiënten zijn voor het poreus beton zonder bewerking 1, 16, 40, 56, 49 en 52 procent voor de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz. Voor dezelfde frequenties zijn de absorptiecoëfficiënten van gestraald poreus beton respectievelijk 0, 19, 40, 59, 46 en 47 procent. Bij het proefstuk met een geperforeerd paneel vertoont het absorptiespectrum een piek rond de 500 Hz, de resonantiefrequentie, die overeenkomt met de resonantiefrequentie die vooraf voor het proefstuk met behulp van de theorie is bepaald. De gemeten absorptiecoëfficiënten van dit proefstuk zijn 3, 21, 58, 47, 50 en 38 procent voor de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz.

Met de door de productie van de proefstukken opgedane kennis zijn ontwerpen gemaakt voor drie prototypen: een sandwich wandelement bestaande uit meerdere lagen beton voor het auditorium, een omgekeerde TT-plaat als plafondelement voor dezelfde ruimte en een breedplaatvloer als plafondelement voor de werkplek.

Met simulaties in het programma CATT-Acoustic is vervolgens het akoestische klimaat van de ruimten onderzocht en is duidelijk geworden dat de toepassing van poreus beton daar een positieve invloed op heeft, maar dat het ontoereikend is om met enkel beton één

Summary

Architectural fascinations with the material concrete and the theme monolithic are the basis of this exploratory study. In the study is researched how in a room, by solely using concrete for the finishing, a good acoustic climate for the specific function can be achieved. At first are the acoustic requirements drawn of two rooms, an auditorium and a workplace.

Thereafter are specimens designed for both reflection and absorption of sound, the specimens intended for sound absorption are subdivided following three absorption mechanisms: porous materials, perforated panels and unperforated panels. Of the designed specimens three were produced, a porous concrete panel, a sanded porous concrete panel and a specimen with a panel of perforated standard concrete combined with porous concrete, for further research.

The specimens were used to execute indicative measurements to determine absorption spectra which proved that the spectra of the specimens resemble the characteristic absorption spectra. The values of the absorption coefficients of porous concrete without extra processing are 1, 16, 40, 56, 49 and 52 percent for the respective frequencies 125, 250, 500, 1.000, 2.000 and 4.000 Hz. For the same frequencies the absorption coefficients of the sanded porous concrete are 0, 19, 40, 59, 46 and 47 percent. For the specimen with the perforated panel the absorption spectrum exhibits a peak around 500 Hz, the resonance frequency, which matches the in advance determined resonance frequency of the specimen for which the theory was used. The measured absorption coefficients of this specimen are 3, 21, 58, 47, 50 and 38 percent for the respective frequencies 125, 250, 500, 1.000, 2.000 and 4.000 Hz.

With the knowledge acquired during the production of the specimens three designs for prototypes were made: a sandwich wall element consisting of multiple layers of concrete intended for the auditorium, a reverse TT-plate as a ceiling element intended for the same auditorium and a wide-slab floor as a ceiling element intended for the workplace.

Simulations in the program CATT-Acoustics were used to research the acoustic climate of the rooms and made clear that application of porous concrete has a positive influence on the acoustic climate, but it is insufficient to use solely concrete

ruimte te kunnen materialiseren. Er zijn aanvullende akoestische maatregelen nodig waarbij in het geval van het auditorium baffles onder het plafond en tapijt op de vloer uitkomst boden en in de werkplek eveneens tapijt op de vloer en daarnaast ook een paneelconstructie nodig was voor een goed akoestisch klimaat.

Geluidsabsorberend beton heeft wel degelijk potentie wanneer het gaat om de toepassing ervan. Zo is het met een sandwichelement met een geperforeerd paneel en poreus beton mogelijk om de resonantiefrequentie te bepalen waardoor het element op specifieke akoestische eisen kan worden afgestemd. Daarnaast is het wellicht interessant als toepassing in sportzalen waar het harde geluidsabsorberende materiaal kan worden aangebracht op plekken waar alternatieven zouden beschadigen.

Tot slot is er nog ingegaan op het integreren van de bevindingen in het architectonische deel van het afstudeerproject waar dit verkennende onderzoek deel van uitmaakt.

to materialize a room. Additional acoustic measures are required, in the auditorium baffles under the ceiling and carpet on the floors provided a good acoustic climate and in the workplace also carpet on the floors in combination with a panel construction were needed.

Sound absorbing concrete does have potential when it comes to its application. The research shows that in a sandwich element consisting of a perforated panel and porous concrete it is possible to determine the resonance frequency of the element so it can adapt to specific acoustic requirements. It is also perhaps interesting as application in sport halls where the hard sound absorbing material can be applied on places where alternatives would be damaged.

Finally, the report focuses on the integration of the findings in the architectural part of the graduation project of which this exploratory research is a part.

III	Inhoudsopgave	
1.0	Inleiding	1
1.1	Probleemstelling	2
1.2	Doelstelling	2
1.3	Onderzoeksvragen	3
1.3.1	<i>Onderzoeksvraag</i>	3
1.3.2	<i>Deelvragen</i>	3
2.0	Akoestiek in een ruimte	5
2.0.1	<i>Auditorium</i>	5
2.0.2	<i>Akoestiek in een auditorium</i>	9
2.0.3	<i>Werkplek</i>	12
2.0.4	<i>Akoestiek in een werkplek</i>	13
2.1	Programma van eisen	14
3.0	Onderzoek	16
3.1	Proefstukken	16
3.1.1	<i>Oppervlaktebewerking</i>	17
3.1.2	<i>Poreus beton</i>	19
3.1.3	<i>Geperforeerde panelen</i>	22
3.1.4	<i>Ongeperforeerde panelen</i>	25
3.1.5	<i>Beperkingen</i>	27
3.2	Metingen	31
3.2.1	<i>Meetruimte</i>	32
3.2.2	<i>Meetmethode</i>	34
3.2.3	<i>Frequenties</i>	35
3.2.4	<i>Meetresultaten</i>	36
4.0	Prototype	45
4.0.1	<i>Wandelement</i>	46
4.0.2	<i>Plafondelement</i>	51

5.0	Simulaties	55
5.0.1	<i>Auditorium</i>	55
5.0.2	<i>Werkplek</i>	61
6.0	Conclusies en aanbevelingen	68
6.0.1	<i>Conclusies</i>	68
6.0.2	<i>Aanbevelingen</i>	71
7.0	Integratie met architectuur	72
8.0	Bronnenlijst	75
9.0	Bijlagen	77
9.0.1	<i>Bijlage I – Proefstukken</i>	77
9.0.2	<i>Bijlage II – Productomschrijving Liapor 2-4/450</i>	90
9.0.3	<i>Bijlage III – Verwerking meetresultaten</i>	91
9.0.4	<i>Bijlage IV – CATT-Acoustic modellen</i>	96

1.0 Inleiding

Bij de oplevering van een gebouw lijken de lege ruimten vaak groter dan de compleet ingerichte ruimten. De kale wanden, vloeren en plafonds laten het geluid dat in de ruimte wordt geproduceerd echoën waardoor deze vaak een kille indruk geven. In de fase nadat de ruwbouw gereed is, wanneer de meeste oppervlakten vaak nog vooral uit beton bestaan, zijn de echo's nog heviger en geven de ruimten een nog killere indruk. Het afwerken van de ruimten en inrichten ervan dragen daarna bij aan de verbetering van de ruimte-akoestiek. Het inrichten is hierbij een onvermijdelijk proces om de ruimten bruikbaar te kunnen maken voor verschillende doeleinden, maar het afwerken van de ruimten is eigenlijk niets meer dan een extra laag toevoegen bovenop de wanden, vloeren en plafonds na de ruwbouwfase. Zou het niet mogelijk zijn om deze stap te kunnen integreren in de ruwbouwfase? Zodat de interne oppervlakten al over de vereiste afwerking beschikken die moet zorgen voor bijvoorbeeld een goede akoestiek in de ruimten en tevens voldoen aan de esthetische eisen die de architect eraan stelt.

Het meest voor de hand liggende materiaal om dit mee te realiseren is beton. Beton is namelijk een veelzijdig bouw materiaal met een groot scala aan toepassingsmogelijkheden en wordt in de huidige bouw wereld veel toegepast als materiaal voor onder andere vloeren, die een groot aandeel hebben in het totale oppervlak van de ruimten in een gebouw. Het materiaal heeft een grote verscheidenheid aan eigenschappen. Het kan namelijk zware druklasten opnemen en als het beton met staal wordt gewapend kan het eveneens zware treklasten opvangen. Daarnaast is een betonvloer een goede geluidsisolator om geluidsoverdracht tussen ruimten te voorkomen. Het is een brandwerend materiaal dat gebruikt kan worden om de compartimentering in een gebouw te verzorgen. Het kan gebruikt worden als thermische massa en doordat beton wordt gestort kunnen installaties in het beton worden opgenomen.

Het productieproces van beton heeft naast de mogelijkheid om installaties erin te kunnen integreren nog een ander groot voordeel: beton kan doordat het wordt gestort vele vormen aannemen. De expressie van het materiaal kan verder nog op vele manieren worden aangepast. Dit kan bijvoorbeeld door het gebruik van toeslagen in het betonmengsel, maar ook door het achteraf bewerken van het uitgeharde materiaal. Doordat beton veelal wordt gezien als constructief bouw materiaal komen in veel betontoepassingen deze potentiële esthetische kwaliteiten echter niet aan de orde (Köhne, et al., 2005).

De vele mogelijkheden die beton biedt – met name de vormvrijheid en verscheidenheid in materiaalexpressie – maken het architectonisch een heel interessant materiaal. Beton is tevens een materiaal in ontwikkeling: er zijn betonsoorten die bijvoorbeeld steeds meer drukkracht kunnen opnemen, samenstellingen die steeds lichter beton als resultaat hebben. En meer recentelijk is er een betonsoort in ontwikkeling waarbij de wapeningsstaven zijn vervangen door staalvezels in het betonmengsel voor een nog grotere vormvrijheid (Bouw wereld, 2010).

Beton heeft echter niet enkel positieve kanten, zo is beton, met name het cement dat in beton wordt verwerkt, niet heel duurzaam als bouw materiaal. Het is lastig her te gebruiken of te recyclen, er is veel energie nodig voor de productie van cement, een belangrijk bestandsdeel van beton, en het transport van beton vereist eveneens veel energie. Een ander nadeel, doordat beton meestal wordt uitgevoerd met een glad oppervlak, is dat veel geluid dat op het oppervlak valt wordt weerkaatst. De reflectie kan positief gebruikt worden om bijvoorbeeld geluid bij een publiek te krijgen, maar kan ook zorgen voor vervelende echo's. Het is zaak dat hier de juiste balans wordt gevonden voor geluid dat wordt gereflecteerd en geabsorbeerd. Beton biedt op dit vlak ruimte voor verbetering en vormt hiermee het startpunt van dit onderzoek.

1.1 Probleemstelling

Het materiaal beton heeft als bouwproduct, in de vele toepassingsmogelijkheden, een hoop eigenschappen die benodigd of gunstig zijn voor het creëren van een ruimte: constructieve capaciteiten, vormvrijheid, verschillende materiaalexpressies, thermische massa, geluidsisolatie, brandwerendheid, mogelijkheid tot integratie van andere bouwonderdelen. Het veelzijdige materiaal biedt de architectuur een aantal middelen om in te zetten om een optimale ruimte te kunnen creëren.

Naast de voordelen die beton biedt zijn er echter ook nadelige eigenschappen die het materiaal heeft bij de toepassing ervan. Één van deze nadelen is de vaak slechte akoestische werking, in de vorm van veel galm en een hoog geluidsdrukkniveau, van een ruimte waar veel beton in het oppervlak is verwerkt. Ruimten met veel beton worden vaak achteraf afgewerkt met andere materialen om de akoestiek te verbeteren. Hierdoor kan de expressie die beton heeft te bieden niet tot uiting komen.

Als de akoestiek in een ruimte door het gebruik van beton is te verbeteren biedt dit echter wel de mogelijkheid om de materiaalexpressie van beton te gebruiken zonder dat er andere ingrepen nodig zijn voor het verbeteren van de akoestiek. Naast de mogelijkheid om de expressie van beton te gebruiken zou dit ook betekenen dat er geen toegevoegde afwerkingslagen nodig zijn in een ruimte.

Ook biedt de verbetering van de akoestische werking van beton mogelijkheden voor de toepassing van betonkernactivering, een duurzame manier om gebouwen te koelen en verwarmen. Deze techniek, waarbij c.v.-leidingen in het beton zijn opgenomen, maakt namelijk gebruik van de thermische massa die beton heeft. Veelal zijn de leidingen verwerkt in betonnen vloerelementen, waardoor het is gewenst om geen verlaagd plafond in een ruimte te hebben. Hierdoor hebben zowel de verdieping onder als boven een vloer met betonkernactivering baat bij deze techniek in plaats van enkel de verdieping boven de vloer. Het verlaagde plafond heeft normaliter twee functies: het verbergen van installaties en het verbeteren van de akoestiek in de ruimte door het geluidsabsorberende vermogen. Het verbergen van installaties is niet noodzakelijk voor een ruimte en mocht het daarnaast mogelijk zijn om de akoestiek in de ruimte te verbeteren met de toepassing van beton dan verliest het verlaagde plafond helemaal haar bestaansrecht zodat er meer profijt kan worden gehaald uit betonkernactivering.

1.2 Doelstelling

Het onderzoek richt zich op de akoestiek in een ruimte in relatie tot het materiaal beton. Door de veelzijdigheid van beton te verkennen, de toepassing als akoestisch materiaal, wordt de mogelijkheid bekeken om een monoliete ruimte te kunnen creëren waarin constructie, expressie, akoestiek en installaties zijn geïntegreerd. Dit weerslaat op het architectonische thema dat één van de inspiratiebronnen vormt voor dit onderzoek: monolithisch.

De resultaten van dit verkennende onderzoek worden gebruikt in het architectonische ontwerp voor een nieuwe Bouwkunde faculteit dat onderdeel is van de afstudeeropdracht. Naast het onderzoek naar de ruimte zal er tevens worden gekeken naar de mogelijkheden voor een eventuele toepassing in de bouwpraktijk. Een ontwerp voor een prototype vormt hierbij het middel om de resultaten van het onderzoek toepasbaar te maken.

1.3 Onderzoeksvragen

1.3.1 Onderzoeksvraag

- Hoe kan in een ruimte door uitsluitend gebruik te maken van beton voor de afwerking een voor de specifieke functie goede akoestiek worden gerealiseerd?

1.3.2 Deelvragen

De onderzoeksvraag is ontleed in meerdere deelvragen die een inzicht moeten geven in de benodigde akoestische kennis voor het onderzoek, de kennis van de mogelijkheden die beton biedt en hoe deze zijn te gebruiken om te kunnen integreren in een architectonisch ontwerp:

- Welke akoestische eisen worden er gesteld aan een auditorium en een werkruimte?
- Aan welke variabelen kan je sleutelen om de akoestiek in een ruimte te beïnvloeden?
- Hoe valt de afwerking van een betonnen oppervlak te veranderen ten behoeve van de geluidsverstrooiing en geluidsabsorptie?
- Wat kan er aan de samenstelling van beton veranderen om de structuur te verbeteren ten behoeve van de geluidsabsorptie?
- Is het mogelijk een volledig betonnen ruimte te creëren met een voor de betreffende functie goede akoestiek?
- Is het reëel om akoestische verbeteringen in beton te integreren als het wordt vergeleken met andere, traditionelere maatregelen?

De deelvragen geven tevens de stappen in het onderzoek aan. Allereerst wordt er gekeken naar de ruimte-akoestiek, specifiek gericht op de ruimten waarin het akoestisch beton dienst moet gaan doen. De volgende stap is om te kijken wat er kan veranderen aan de ruimten ten behoeve van de ruimte-akoestiek. Na het analyseren van de ruimten komt het materiaal beton aan bod. De vormbaarheid wordt onderzocht in relatie tot de akoestische werking, maar ook gericht op de architectonische expressie. Tevens wordt er gekeken naar de mogelijkheden die er zijn op het gebied van de structuur van beton. Vervolgens wordt er getracht, met het oog op het duale afstudeerproject, om de bevindingen te integreren in een architectonisch ontwerp. Om de mogelijkheden van beton op de ultieme manier te kunnen toetsen wordt er uiteindelijk getracht een volledig betonnen ruimte te ontwerpen waarin een goed akoestisch klimaat heerst. Tenslotte wordt er nog gekeken of de integratie van akoestische maatregelen in beton reëel is.

*Welke akoestische eisen worden er gesteld
aan een auditorium en een werkruimte?*

*Aan welke variabelen kan je sleutelen om
de akoestiek in een ruimte te beïnvloeden?*

2.0 Akoestiek in een ruimte

Het idee voor dit onderzoek is ontstaan vanuit persoonlijke en architectonische fascinaties voor het materiaal beton en de bouwphysica van de ruimte-akoestiek. Het architectonische project, een ontwerp maken voor een nieuwe Bouwkunde faculteit voor de TU Delft, vormt dan ook de grondslag voor dit onderzoek. De ruimte staat centraal.

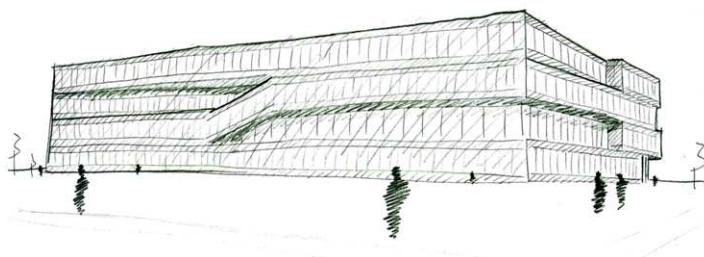
Er is gekozen om twee typen ruimten te gebruiken in het onderzoek: een auditorium en een werkruimte, beide zijn terug te vinden in het programma van eisen voor de Bouwkunde faculteit. De keuze voor een auditorium laat zich baseren op het feit dat het een ruimte is waar een goede akoestiek belangrijk is voor de verstaanbaarheid van de spreker. Het gaat om een auditorium waar lezingen en colleges zullen worden gehouden, spraak vormt hier de belangrijkste bron van geluid. De werkruimte, in het programma van eisen terug te vinden onder de benaming studio's en kantoren, is een meer generieke ruimte – een ruimte die ook in andere gebouwen is terug te vinden. Het gaat om een werkplek met de indeling van een kantoortuin waar tevens het geluid van sprekende mensen de belangrijkste bron van geluid is, maar nu als storende factor geldt.

Het gedrag van geluid in een ruimte laat zich lastig voorspellen, een groot aantal factoren spelen een rol in de ruimte-akoestiek. Er zijn echter wel aannames die kunnen worden gedaan om meer kennis te krijgen van de akoestiek in een te ontwerpen ruimte, daarvoor is het wel nodig om de functie van de ruimte in acht te nemen.

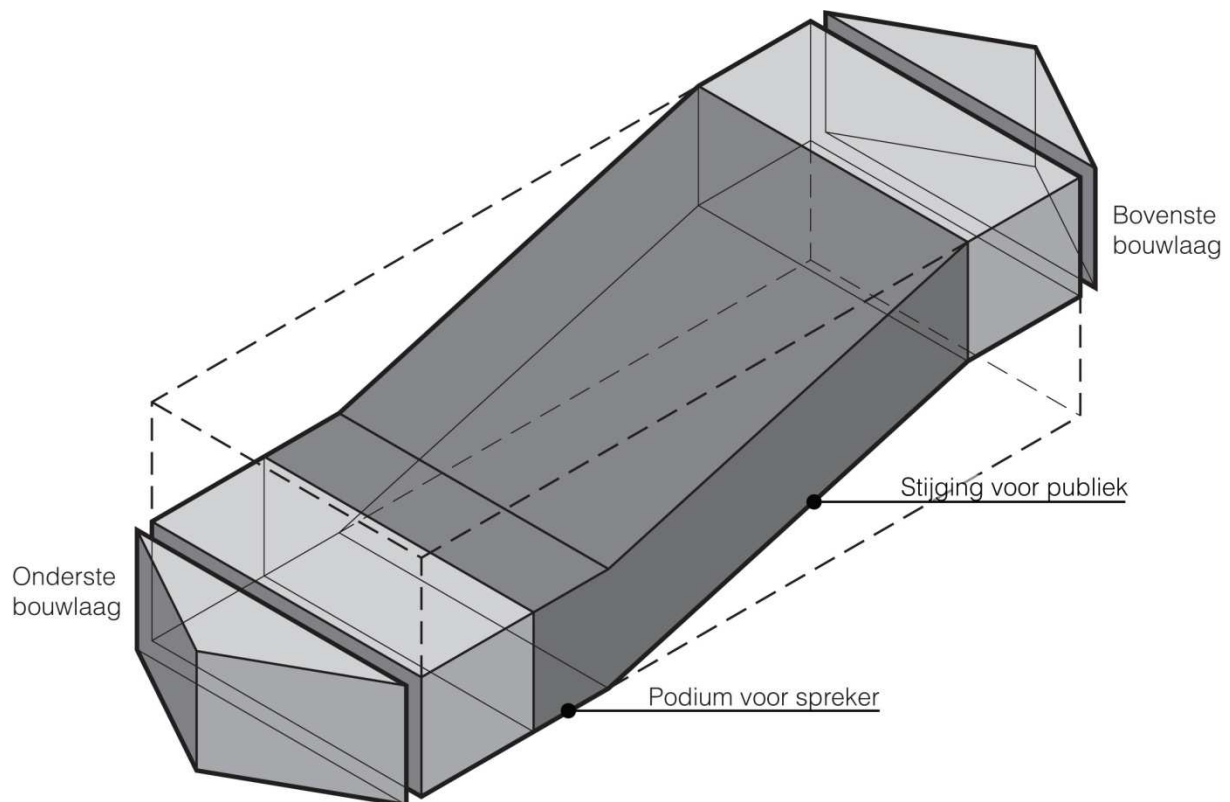
2.0.1 Auditorium

De eerste ruimte die wordt gebruikt voor de toepassing van akoestisch beton is, zoals eerder is vermeld afkomstig uit het programma van eisen, een auditorium voor het ontwerp van een Bouwkunde faculteit. Het gaat om een auditorium dat plaats moet bieden aan vijfhonderd toehoorders die een lezing of college volgen. In het programma van eisen is 700 m² opgegeven als oppervlakte voor het auditorium wat neerkomt op 1,4 m² per toehoorder. Verder heeft de ruimte een minimale hoogte van drie meter en een maximale hoogte van acht meter (Anon., 2009).

Voor het ontwerp van de Bouwkunde faculteit is al een schetsontwerp gemaakt, als onderdeel van het duale afstudeertraject. Het concept voor dit ontwerp is afgeleid uit een vooronderzoek naar de ideale studioruimte voor Bouwkunde studenten. Het principe hiervan – een tweedeling tussen werk en informele functies gescheiden door een buffer – is gebruikt voor de functionele indeling van het gebouw. Voor het grotere geheel, de faculteit met vele verschillende functies, is daarna een concept ontstaan waarbij een kleiner element wordt verlengd waarmee het grotere geheel wordt gevormd door een groter continu doorlopend element. De auditoria vormen in dit concept de verticale stijgpunten van het continue element, de stijging die moet worden overbrugd is 6,9 meter.



Afb. 2.0.1a: Ontwerp van de Bouwkunde faculteit.



Afb. 2.0.1b: Concept auditorium.

Voor het auditorium zijn een aantal akoestische voorwaarden te formuleren waar de ruimte aan moet voldoen om te zorgen dat deze bruikbaar is (Cauberg, 2005):

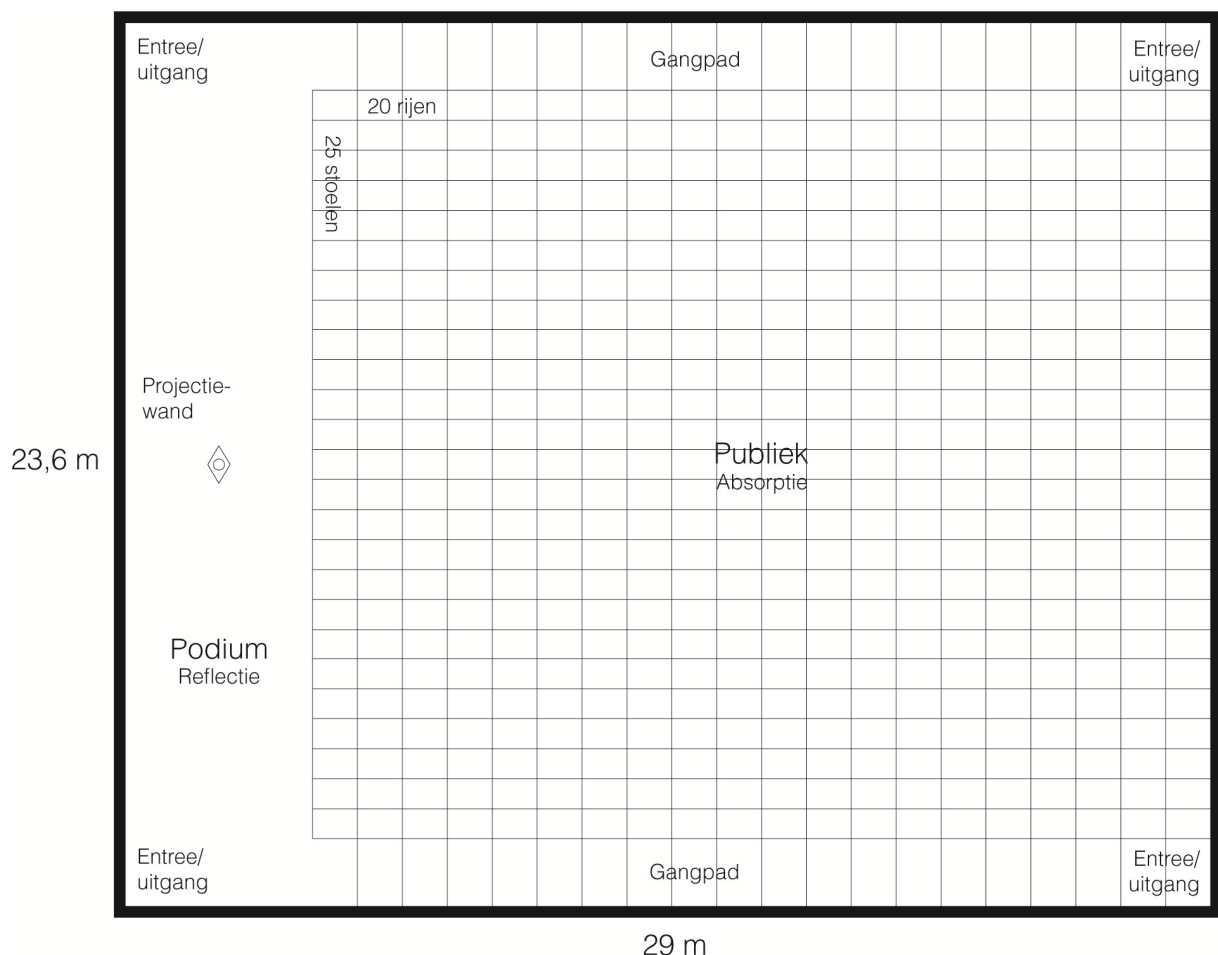
- een voor het volume zo gunstig mogelijke nagalmtijd moet worden gerealiseerd;
- de vorm dient ondersteunende geluidsreflecties op te leveren, een goede geluidsverdeling te bezitten en echo's te vermijden;
- het storende achtergrondgeluidsniveau moet zo laag mogelijk zijn;
- er dient voldoende direct geluid te zijn;
- er dient eveneens voldoende verstrooiing van het geluid te zijn.

Daarnaast zijn er ook uit functioneel oogpunt voorwaarden waar de ruimte aan moet voldoen:

- alle toeschouwers dienen vanaf de tribune goed zicht hebben op het podium en de wand waar presentaties via een beamer op worden geprojecteerd (Cauberg, 2005);
- aan een ontsluitingsroute kunnen uit oogpunt van brandveiligheid en bruikbaarheid maximaal 16 stoelen grenzen (Gebruiksbesluit, 2008).

Deze voorwaarden in acht nemend kan er een auditorium worden ontworpen dat de basis vormt voor het latere ontwerp van de Bouwkunde faculteit en tevens gebruikt kan worden om de bevindingen die worden gedaan met het onderzoek naar akoestisch beton in te verwerken en te testen, te beginnen bij de plattegrond.

Allereerst wordt er gekeken naar de ruimte die nodig is voor het publiek. Het aantal toehoorders waarvoor in de zaal plaats moet zijn is vijfhonderd. Per toehoorder is een minimale ruimte nodig van zestig bij negentig centimeter (Neufert, et al., 2002). Dit zijn echter wel de minimale afmetingen, er is daarom gekozen om de plaatsen zowel breder als dieper te maken, respectievelijk 90 bij 120 centimeter, zodat het gemakkelijker is elkaar te passeren en er meer ruimte is voor tassen, aantekeningen en dergelijke. Deze maten zijn vervolgens gebruikt om rijen te vormen voor het publiek. Doordat het gewenst is om twee gangpaden aan weerszijden van de ruimte te hebben en geen gangpad in het midden, zodat men zo kort mogelijk op de spreker kan zitten en mensen die tijdens lezingen aankomen of vertrekken zo min mogelijk overlast veroorzaken, is het maximum aantal stoelen dat op een rij kan 32. Er is gekeken naar de configuratie van de stoelen tussen 16 tot 32 stoelen per rij. De afstand tot de spreker moet zo klein mogelijk zijn terwijl ook de hoek voor de spreker ten opzichte van de zaal niet te groot mag worden in verband met de richtingskarakteristiek van de menselijke stem (Cauberg, 2005). Bij een configuratie van 25 stoelen per rij en 20 rijen blijkt de afstand van de verste plaats tot de spreker zo kort mogelijk – 27 meter, net als bij de configuratie met 32 stoelen per rij – en is de hoek van de spreker ten opzichte van de zaal kleiner dan bij 32 stoelen per rij.



Afb. 2.0.1c: Plattegrond auditorium, schaal 1:200.

De plattegrond kent verder een simpele rechthoekige vorm. De keuze voor de rechthoekige vorm laat zich baseren op het feit dat is gebleken dat in rechthoekige zalen een goede akoestiek is te bereiken (Tenpierik, 2010a). Zo wordt ook voorkomen dat er op sommige plaatsen hinderlijke geluidsconcentraties kunnen ontstaan door bijvoorbeeld concave

Diagram illustrating the sound propagation in a lecture hall, showing the path of sound waves from the podium to the audience.

The hall is divided into two levels:

- Onderste bouwlaag (Lower level): 4,6 m high.
- Bovenste bouwlaag (Upper level): 3 m high.

The total height of the hall is 6,9 m.

The sound source is located on the podium, which is 8,3 m wide. The distance from the podium to the back of the hall is 6,2 m.

The sound waves are labeled:

- Projectie-wand (Projection wall)
- Reflectie (Reflection)
- Absorptie (Absorption)
- Technische ruimte (Technical room)
- Publiek (Audience)

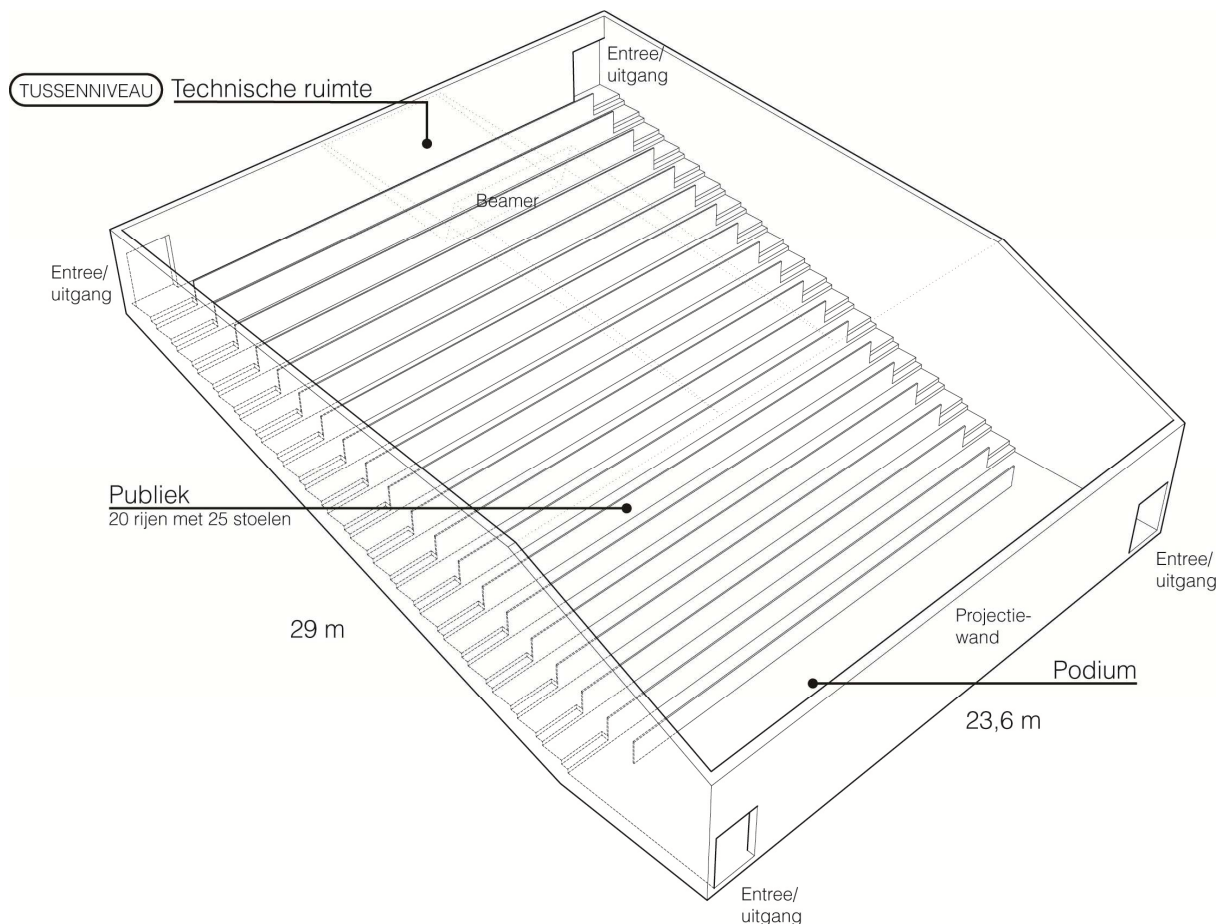
The angle of the floor is 17°.

De ondersteunende reflectie is dus terug te vinden in de doorsnede, evenals de stijging van 6,9 meter. De stijging wordt gebruikt om een tribune te creëren voor het publiek zodat alle toehoorders goed zicht hebben op het podium en de wand achter de spreker. De complete doorsnede is ook te bevatten binnen de grenzen die worden gesteld door het concept en verder is de hoogte van de ruimte zo laag mogelijk gehouden voor zover de projectiemogelijkheden van de beamer het toelaten, aangezien het volume van de spreekzaal zo laag mogelijk moet zijn om een kortere nagalmtijd te kunnen realiseren. De nagalmtijd T [in s] volgens Sabine (Cauberg & Nederlof, 2005b) is namelijk afhankelijk van een aantal variabelen:

V: volume van de ruimte in m^3 ;
 c_{lucht} : snelheid van het geluid in de lucht in m/s ;
 A: totale absorptie in de ruimte in m^2 o.r.

8

belangrijke factor zijn, eventueel extra absorptie kan worden gerealiseerd door akoestisch beton toe te passen. Dit alles resulteert in dit voorlopige ontwerp van een auditorium:



Afb. 2.0.1e: Voorlopig ontwerp auditorium.

2.0.2 Akoestiek in een auditorium

In het auditorium geeft een spreker een lezing of college die goed verstaanbaar moet zijn voor de toehoorders. Hiervoor zijn een aantal objectieve akoestische waarden te gebruiken waaruit moet blijken of dit mogelijk is met het eerder gevormde auditorium. In eerste instantie wordt er uitgegaan van een compleet betonnen ruimte zonder aanpassingen aan het materiaal.

De eerste waarde is de al eerder gebruikte nagalmtijd. De ruimte is zo gevormd dat binnen het architectonische concept het volume zo klein mogelijk is gehouden. Voor de nagalmtijd kan met de gegevens van het voorlopige ontwerp een eerste aanname worden gedaan, de meeste geluidsabsorptie komt namelijk voor rekening van het publiek en de totale absorptie kan voor de eerste aanname bij een frequentie van 500 Hz worden vervangen door $1,07 \cdot S_{\text{publiek}}$ – het totale oppervlak van het publiek in m² (Barron, 2000).

$$T = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot A} \approx \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot 1,07 \cdot S_{\text{publiek}}} = \frac{55,3 \cdot 3.739}{343 \cdot 1,07 \cdot 480} = 1,17 \text{ s}$$

De nagalmtijd van 1,17 seconde is voor een auditorium dat voor spraak wordt gebruikt aan de hoge kant. Het is wenselijker om een lagere nagalmtijd te realiseren zodat er geen hinder

wordt ondervonden van geluidsreflecties en de spraakverstaanbaarheid verbeterd. Er moet getracht worden dat de nagalmtijd onder één seconde en het liefst in de buurt van 0,8 seconde komt te liggen (Nave, 2002). Het verkorten van de nagalmtijd zal echter een negatief effect hebben op het geluidsdrukkniveau dat lager zal worden doordat meer geluid wordt geabsorbeerd. Mocht het nodig zijn dan is het verlies in geluidsdrukkniveau op te vangen door gebruik te maken van versterkers.

Naast de nagalmtijd is ook de signaal-ruisverhouding van belang, het gaat hier om achtergrondruis van bijvoorbeeld een ventilatiesysteem of van de toehoorders zelf die de spreker, het signaal, kunnen hinderen. Ook de signaal-ruisverhouding S/N [in dB] is te schatten met een formule (Tenpierik, 2010b):

$$S/N = 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) - 10 \log \left(\frac{4n(1 - \bar{\alpha})}{A} \right)$$

Q: richtingsfactor van de geluidsbron;
 r: afstand van spreker tot toehoorder in m;
 n: het aantal equivalente stoorbronnen
 $\bar{\alpha}$: gemiddelde absorptiecoëfficiënt;
 A: totale absorptie in de ruimte in m^2 o.r.

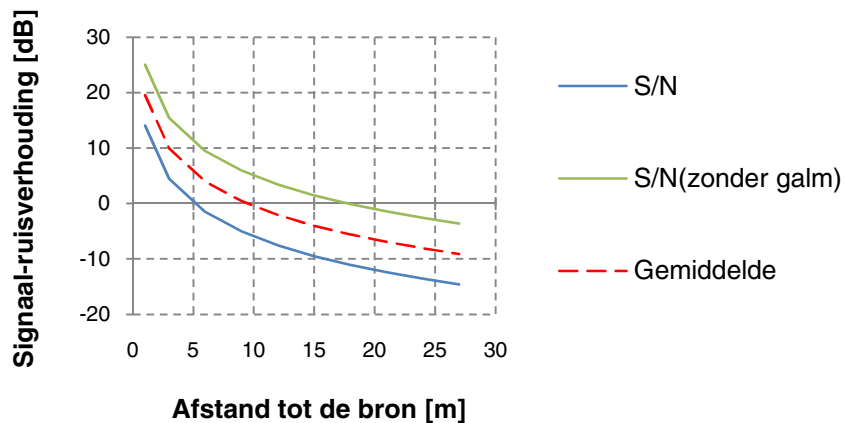
Voor het compleet in glad beton uitgevoerde auditorium is met het voorlopige ontwerp ook een eerste aanname te doen van de signaal-ruisverhouding. Voor het gemak is hier enkel voor de frequentie van 500 Hertz deze verhouding berekend. Het totaal van alle interne oppervlakten is 2.047 m^2 , op 480 m^2 na – het gedeelte van het publiek – is dit uitgevoerd in glad beton dat bij de vastgestelde frequentie een absorptiecoëfficiënt heeft van 0,02. Het publiek heeft bij 500 Hz een absorptiecoëfficiënt van 0,85 (van der Linden, 2006). Hiermee is de gemiddelde absorptiecoëfficiënt in de ruimte te berekenen, die is 0,21. Voor de totale absorptie in de ruimte wordt het product genomen van de gemiddelde absorptiecoëfficiënt en het totaal van alle interne oppervlakten. Verder is er in de schatting uitgegaan van een ideale situatie: een stil publiek en geruisloze ventilatie. Dit resulteert in de volgende S/N waarden:

Afstand tot de bron [m]	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27
S/N bij 500 Hertz [dB]	+10	+1	-5	-9	-11	-13	-15	-16	-17	-18

In het geval van een auditorium kleeft er echter aan het gebruik van de signaal-ruisverhouding een nadeel, in de formule wordt namelijk uitgegaan van een gelijk geluidsdrukkniveau van de geluidsbron en de stoorbronnen. Een situatie die niet op gaat voor een auditorium. Een alternatief is om het geluidsdrukkniveau van de spreker af te zetten tegen een constant gangbaar stoorniveau wat neerkomt op $S/N_{\text{zonder galm}} = \text{signaal} - \text{ruis}$. Een luide spreker, geluidsdrukkniveau 70 dB op 1 m, en een stoorniveau van 45 dB resulteren in de volgende $S/N_{\text{zonder galm}}$ waarden:

Afstand tot de bron [m]	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27
$S/N_{\text{zonder galm}}$ [dB]	+25	+15	+9	+6	+3	+1	0	-1	-3	-4

Hierbij wordt echter het effect van galm niet meegenomen in de berekening, waardoor de werkelijkheid ergens tussen de S/N en de $S/N_{\text{zonder galm}}$ in zal liggen. Daarnaast wordt in beide gevallen geen rekening gehouden met de eerste ± 50 ms van het indirecte geluid, de eerste reflecties, die positief bijdragen aan het geluidssignaal waardoor de resultaten negatiever uitvallen dan ze in werkelijkheid zullen zijn.



Afb. 2.0.2a: Signaal-ruisverhouding in het auditorium bij 500 Hertz.

Er is te zien dat naarmate de afstand tot de bron groter wordt de ruis steeds hinderlijker wordt. Op het verloop van de grafiek, en dus ook de formule, kan wel een aanmerking worden gemaakt: de grafiek zal minder aflopen doordat reflecties positief bij zullen dragen aan het signaal, waardoor het geluidsniveau (van het nagalmveld) toeneemt, die niet in de formule worden vertegenwoordigd, bij de laatste rijen zou de grafiek in de werkelijkheid zelfs kunnen toenemen door de nabijheid van de achterwand en de reflecties daarvan. Desalniettemin zijn het zeer lage waarden en moet er gestreefd worden naar een betere signaal-ruisverhouding. Voor spraak is +15 dB en hoger een uitstekende waarde, bij 0 dB is het geluid nog redelijk te horen en bij -6 dB wordt het vrijwel onverstaanbaar (Nijs, 2010b).

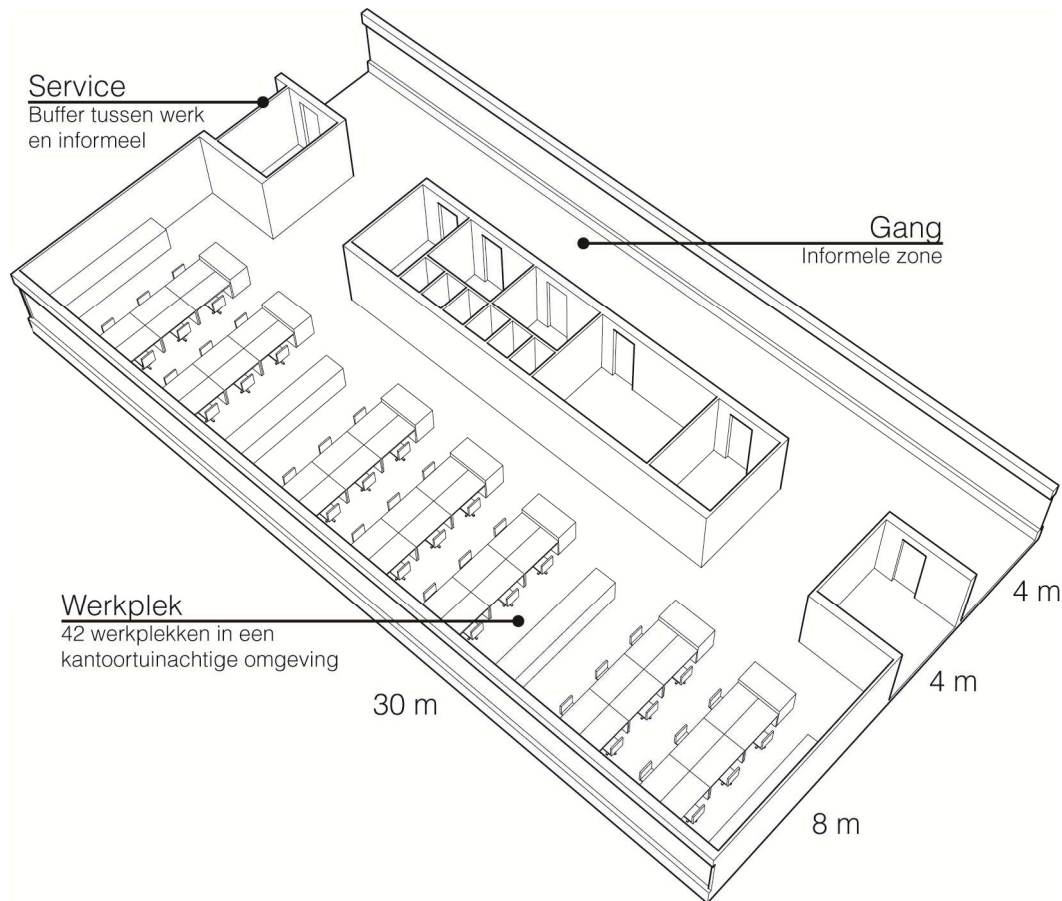
De signaal-ruisverhouding is van belang voor het bepalen van de spraakverstaanbaarheid van de spreker. Een andere, meer complexe en betere, methode om de spraakverstaanbaarheid te bepalen is het gebruik van de Speech Transmission Index, afgekort tot STI. In tegenstelling tot de signaal-ruisverhouding wordt bij de STI ook rekening gehouden met de 'omhulling' van het geluidssignaal, naast het directe geluid wordt ook de eerste 50 milliseconden van het indirecte geluid gerekend tot het signaal (Vermeir, et al., 2000). De waarden die volgen uit de berekening van de signaal-ruisverhouding geven dus een iets te negatief beeld en zullen daarom alleen in deze aanname worden gebruikt, voor de simulaties in een later stadium van het onderzoek zal de STI worden gebruikt.

Met de gevonden waarden voor de nagalmtijd en de signaal-ruisverhouding is een eerste aanname te maken van de akoestiek in het auditorium. Er is duidelijk geworden dat de situatie in de compleet betonnen ruimte nog verre van ideaal is, de nagalmtijd moet lager en de signaal-ruisverhouding moet hoger worden om de akoestiek in deze ruimte te verbeteren. Dit heeft betrekking op het geluidsabsorberende vermogen van het te ontwikkelen akoestische beton, er zal om een nagalmtijd van 0,8 seconde te kunnen bereiken in totaal minimaal 778 m² o.r. aan absorptie nodig zijn. Dit komt neer op een gemiddelde absorptiecoëfficiënt 0,38. Naast de absorptie van geluid is het ook interessant om de reflectie van geluid te bekijken, dit in verband met eventuele flutterecho's (hinderlijke geluidsconcentraties) die kunnen ontstaan in het rechthoekige auditorium. Het is wenselijk om het oppervlakte te bewerken voor een meer diffuse spreiding van geluid dan bij een glad oppervlak. Daarnaast zorgt een geprofileerd vlak voor meer oppervlakte waarop een betere geluidsabsorptie gerealiseerd kan worden en zou hier dus een gunstige invloed op kunnen hebben. Het is echter lastig om objectieve waarden aan de geluidsspreiding te koppelen.

2.0.3 *Werkplek*

De tweede ruimte waarvoor de toepassing van akoestisch beton voor het verbeteren van de ruimte-akoestiek gebruikt gaat worden is de werkplek. In tegenstelling tot het auditorium gaat het hier niet om een ruimte waar specifieke akoestische eisen aan zijn verbonden voor de bruikbaarheid van de ruimte, het wordt echter wel als storend ervaren als er geen rekening wordt gehouden met de akoestiek. In een ruimte met een slechte akoestiek kan men hier namelijk hinder van ondervinden, wat een nadelig effect heeft op de werkomstandigheden. Zo kan het bijvoorbeeld zijn dat telefoongesprekken slecht zijn te voeren of dat sprekende mensen veel overlast veroorzaken, wat met name bij geconcentreerd werk hinderlijk is.

De werkplek heeft net als het auditorium een plek in het ontwerp voor de Bouwkunde faculteit. Zoals eerder al is vermeld is het principe van het vooronderzoek naar de ideale studioruimte gebruikt voor de functionele indeling in het schetsontwerp. De ruimte van de werkplek is een open ruimte die plaats biedt voor zowel groepen studenten als individuen. Het programma van eisen schrijft voor dat de ruimte tussen de drie en zes meter hoog is (Anon., 2009). Omdat het een ruimte moet worden die vergelijkbaar is met andere kantoorruimtes is er gekozen om de hoogte dan ook minimaal te houden. Het is een rechthoekige ruimte van acht meter breed en dertig meter lang met aan één langszijde een groot glasoppervlak, de buitengevel. In de ruimte zijn bureaus van 160 bij 80 centimeter te vinden met bijbehorende bureaustoelen in clusters van zes langs deze gevel. Aan de kop van de clusters staat een open kast voor berging. Verder zijn er kasten die de clusters tafels van elkaar scheiden en zo verschillende plekken voor kleinere groepen creëren. Evenwijdig aan de werkplek loopt een informele gang, deze is vier meter breed en tussen de twee ruimtes ligt het buffergebied welke gebruikt wordt voor de ondersteunende diensten. De bufferzone is net als de informele gang vier meter breed. De werkplek en de gang staan op twee plaatsen in open verbinding met elkaar door overgangsgebieden van vier meter breed die het buffergebied doorkruizen.



Afb. 2.0.3a: Voorlopig ontwerp werkplek.

Aan de ruimte zelf is in dit geval weinig gedaan om de akoestiek te verbeteren, aangezien het een generieke kantoorruimte betreft die ook in andere gebouwen is terug te vinden. De akoestiek zal door de toepassing van akoestisch beton aantoonbaar moeten worden verbeterd.

2.0.4 Akoestiek in een werkplek

De werkplek heeft dus geen specifieke eisen die eraan worden gesteld, er kan hier echter net als bij het auditorium worden gekeken naar de waarden voor de nagalmtijd en de signaal-ruisverhouding. De nagalmtijd is hierbij de belangrijkste factor, een lange nagalmtijd heeft namelijk veel hinderlijk geluid tot gevolg en versterkt aanwezige storende geluidsbronnen – wat weer in relatie staat met de signaal-ruisverhouding. Een eerste aanname voor de nagalmtijd bij 500 Hertz in de kale ruimte, zonder meubilair, van de werkplek is:

$$T = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot A} ; \frac{55,3 \cdot 720}{343 \cdot 38} = 3,05 \text{ s}$$

Dit is voor een kantoorruimte een zeer lange nagalmtijd. Voor een kantoorruimte wordt veelal genoeg geluidsabsorberend materiaal aangebracht zodat de nagalmtijd tussen de 0,5 en 0,7 seconde ligt. Grotere kantoorruimtes zoals deze kunnen volstaan met een hogere nagalmtijd zolang deze dan maar tussen de 0,7 en 1,1 seconde ligt (Waterman, 2006). Dat de nagalmtijd in eerste instantie zo lang is heeft vooral te maken met het feit dat er zo weinig geluidsabsorberend oppervlak is doordat de toegepaste materialen lage

absorptiecoëfficiënten hebben – 0,02 voor beton en 0,03 voor glas bij een frequentie van 500 Hertz (van der Linden, 2006). De meeste geluidsabsorptie wordt gerealiseerd door de overgangsgebieden. Daarnaast zijn in deze berekening de aanwezige meubels niet meegenomen die een gunstig effect hebben op de nagalmtijd.

Minder van belang dan de nagalmtijd is de signaal-ruisverhouding, men hoeft immers niet op grote afstand verstaanbaar te zijn zoals in het auditorium. Het is zelfs gunstig als de waarden laag zijn zodat bijvoorbeeld een gesprek tussen twee personen niet voor afleiding zorgt bij andere personen in een ruimte. Op korte afstand, waarop een gesprek wordt gevoerd, is een hoge signaal-ruisverhouding gewenst en op grote afstand juist een lage. Uitgaande van een situatie waarin alle 42 werkplekken bezet zijn waarbij ongeveer vijftien tot twintig procent van de mensen praat is het aantal stoorzenders zeven. Voor de afstand van één meter tot een geluidsbron geldt dan het volgende:

$$S/N = 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) - 10 \log \left(\frac{4n(1 - \bar{\alpha})}{A} \right) ; 10 \log \left(\frac{1}{4\pi 1^2} \right) - 10 \log \left(\frac{4 \cdot 7(1 - 0,05)}{38} \right) = -9 \text{ dB}$$

Op de afstand van één meter is het vrijwel onmogelijk om goed verstaanbaar een gesprek te voeren (Nijs, 2010b), de waarde zal daarom flink moeten worden verbeterd. Deze uitgangssituatie is minder gunstig dan die van het auditorium en doordat er minder oppervlak is te gebruiken voor de toepassing van akoestisch beton, zoals de glazen buitengevel, kan het lastig worden om met enkel akoestisch beton goede akoestische omstandigheden te creëren.

2.1 Programma van eisen

Nu de randvoorwaarden bepaald zijn is bekend waar akoestisch beton voor gebruikt moet worden en aan welke eisen het moet voldoen, zowel akoestisch als esthetisch.

Akoestisch:

- Het integreren van de akoestiek in het beton moet een hoogwaardig alternatief kunnen zijn voor hedendaagse akoestische maatregelen.
- Het eindproduct moet een meetbare verbetering kunnen realiseren van de akoestiek in een ruimte.
- Een verbetering van de akoestische eigenschappen moet voortkomen uit de mogelijkheden die het materiaal beton biedt, dus niet door de toevoeging van bijvoorbeeld een extern product in de oppervlaktelaag.

Esthetisch:

- Om een hoogwaardig alternatief te kunnen zijn voor hedendaagse akoestische maatregelen is het vereist dat het eindproduct over een hoge esthetische waarde beschikt.
- Het eindproduct moet tevens een hoge esthetische waarde hebben, geschikt voor een auditorium en werkplek, om ervoor te zorgen dat er geen extra afwerkingslagen worden toegevoegd die de akoestische werking kunnen verslechteren en dat het mogelijk is alles te integreren in één laag – de monoliet.

*Hoe valt de afwerking van een betonnen oppervlak
te veranderen ten behoeve van de akoestiek?*

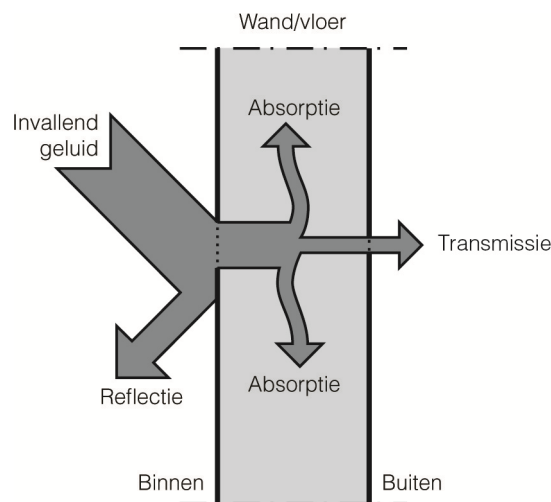
*Wat kan er aan de samenstelling van beton veranderen om de structuur
te verbeteren ten behoeve van de geluidsabsorptie?*

3.0 Onderzoek

Met de gestelde eisen aan het eindproduct kan er worden gekeken naar de mogelijkheden die het veelzijdige materiaal beton biedt. Dit is gedaan aan de hand van proefstukken die zijn geproduceerd en vervolgens getest. Doordat één van de eisen is dat de verbetering moet voortkomen uit de mogelijkheden die beton biedt is er gezocht naar varianten waarbij de bewerking daadwerkelijk is geïntegreerd in het betonproduct, in ofwel de bekisting, productiemethode en/of samenstelling van het betonmengsel.

3.1 Proefstukken

De proefstukken zijn te verdelen in twee categorieën: proefstukken waarbij het oppervlakte is bewerkt ten behoeve van een diffuse spreiding van geluid en proefstukken gericht op de absorptie van geluid. Dit heeft te maken met het gedrag van geluid in een ruimte, de geluidsgolven die vanuit de bron worden verzonden zorgen voor invallend geluid op de wanden, vloer en plafond. Hiervan wordt een deel gereflecteerd, een deel geabsorbeerd en een deel slaat door naar de naastgelegen ruimte.



Afb. 3.1a: Invallend geluid slaat door, wordt geabsorbeerd en gereflecteerd.

Beton, gebruikt in een constructie als bijvoorbeeld een vloer of dragende wand, is een zwaar en dicht materiaal en is daarmee een goede geluidsisolator. Van het in een ruimte geproduceerde geluid dat zich via de lucht verplaatst zal maar weinig doorslaan naar een naastgelegen ruimte, minder dan bij bijvoorbeeld een houten vloer met gelijke constructieve eigenschappen. De geluidsdoorslag zal in dit onderzoek echter buiten beschouwing worden gelaten, omdat er wordt gekeken naar de akoestiek in de ruimte. Het invallend geluid is daarom op te delen in absorptie en reflectie waardoor er geldt (van der Linden, 2006):

$$\alpha + r = 1 \text{ of } \alpha = 1 - r$$

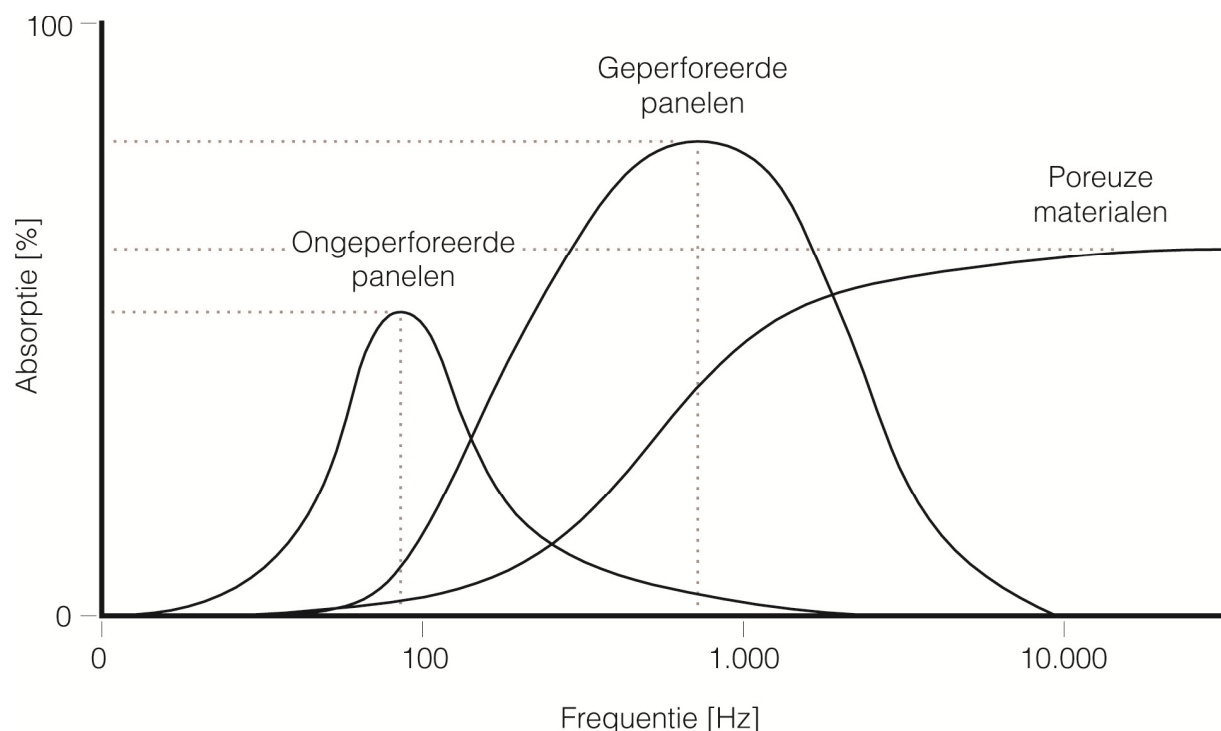
α : absorptiecoëfficiënt (het geabsorbeerde geluid);

r : reflectiecoëfficiënt (het gereflecteerde geluid).

Als de absorptiecoëfficiënt één is, dan wordt al het invallend geluid geabsorbeerd en is deze nul, dan wordt er niks van het invallende geluid geabsorbeerd en alles gereflecteerd. Vanuit de eigenschappen die beton heeft beschikt het over een zeer lage absorptiecoëfficiënt – voor de frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz is de absorptiecoëfficiënt [in %] 1, 1, 2, 2, 3 en 4 (van der Linden, 2006) – wat inhoudt dat veel geluid wordt gereflecteerd. Deze

reflectie is in het auditorium goed te gebruiken ter plaatse van het podium voor ondersteunende geluidsreflecties om het signaal van de spreker te versterken. Het nadeel van het reflecterende vermogen van beton is, zoals eerder is vermeld, dat er flutterecho's kunnen ontstaan bij aanwezigheid van twee evenwijdige wanden. Hiervoor zijn een aantal proefstukken ontwikkeld die onder het onderdeel oppervlaktebewerking vallen met het doel een diffuse verstrooiing van invallend geluid te realiseren.

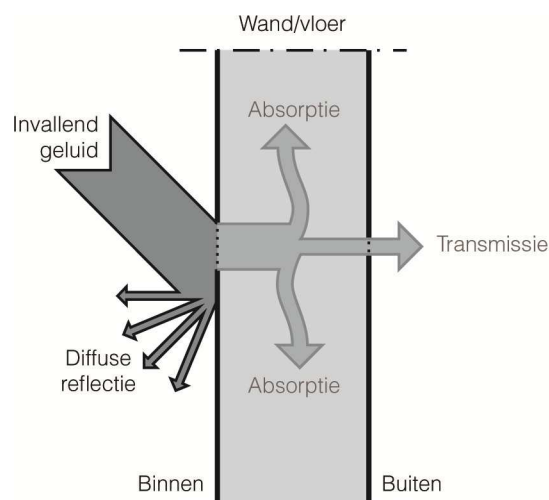
Naast het gebruiken van de reflectie van beton is er ook gekeken wat er kan veranderen aan de structuur van het materiaal. De lage geluidsabsorptie van beton komt door de hoge dichtheid van het materiaal, een open structuur, tenzij deze te open is, zou in een veel hogere absorptie moeten resulteren. Dit is goed te integreren in de samenstelling van beton doordat de verhoudingen van het betonmengsel zijn aan te passen en het is zelfs mogelijk toeslagmaterialen aan het mengsel toe te voegen. Binnen de proefstukken die hiervoor zijn ontwikkeld, voor de absorptie van geluid, is een onderscheid gemaakt tussen verschillende typen van geluidsabsorptie, welke overeenkomen met verschillende frequenties. Deze typen zijn gebaseerd op de verschillende absorptiemechanismen: poreuze materialen, geperforeerde panelen en ongeperforeerde panelen; deze zijn te gebruiken voor geluidsabsorptie van respectievelijk hoge frequenties, middenfrequenties en lage frequenties:



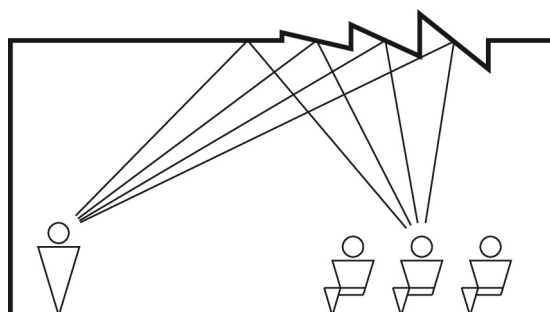
Afb. 3.1b: Karakteristieke absorptiespectra van paneelconstructies (van der Linden, 2006).

3.1.1 Oppervlaktebewerking

Door de bekisting aan te passen is het mogelijk om het oppervlakte van het beton te bewerken, ten behoeve van de diffuse spreiding van geluid. Om een diffuse geluidspreiding te kunnen realiseren is het nodig om een profiel in de elementen te verwerken. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan een ruimtelijk patroon van piramidevormige elementen om het invallende geluid diffuus te reflecteren. Het geluid wordt dan niet gereflecteerd in één richting, maar gespreid.



Afb. 3.1.1a: Diffuse reflectie van invallend geluid.



Afb. 3.1.1b: Reflecties zorgen voor hinderlijke geluidsconcentraties.

Met de oppervlaktebewerking kan worden voorkomen dat er flutterecho's ontstaan. Door de diffuse reflectie van het invallend geluid zal het niet voorkomen dat geluid tussen twee evenwijdige wanden blijft weerkaatsen.

Voor deze categorie zijn vier varianten ontwikkeld met verschillende profielen: twee piramidepatronen met verschillende afmetingen, een golfpatroon en een variërend patroon. De piramidepatronen zijn profielen die gelijk zijn in de twee richtingen die het oppervlak heeft, het golfpatroon en variërende patroon hebben één richting. Door voor het piramidepatroon twee verschillende afmetingen te gebruiken kan er bij een test worden gekeken naar de invloeden hiervan op de akoestiek in de ruimte. In eerste instantie hadden het kleine en grote patroon de afmetingen 20 bij 20 mm en 100 bij 100 mm en een hoek van 45 graden, wat resulteert in piramides met een hoogte van 10 en 50 mm. Dit komt echter overeen met enkel de hoge golflengtes van geluid. De golflengte λ van het geluid [in m] is namelijk afhankelijk van de snelheid van het geluid en de frequentie (van der Linden, 2006):

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

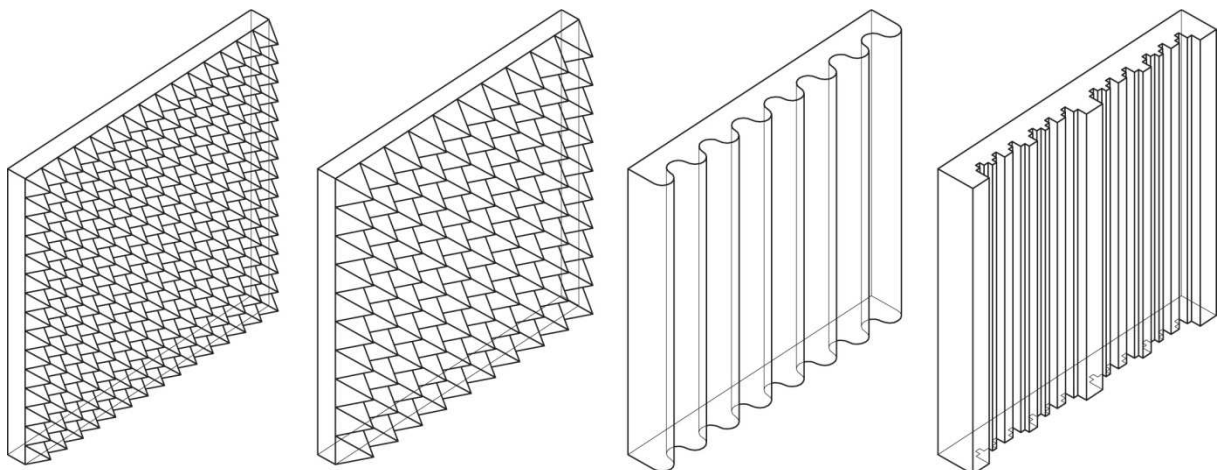
c : snelheid van het geluid in m/s;
 f : frequentie van het geluid in Hz.

Voor het patroon van 20 bij 20 mm ligt de frequentie waarbij het element invloed begint te hebben op de geluidsgolven op 17.000 Hz en voor het grote patroon van 100 bij 100 mm ligt deze frequentie op 3.400 Hz. Voor de menselijke spraak zijn dit echter minder interessante frequenties gezien de hoogste geluidsniveaus die voor spraak worden geproduceerd tussen de 250 en 500 Hz liggen (Lamoré et al., 2009). Om deze reden is het kleine patroon aangepast naar 100 bij 100 mm – wat dus eerst het grote patroon was – en is voor het grote patroon gekozen voor piramides van 150 bij 150 mm waarbij de frequentie rond de 2.000 Hz ligt. Daarnaast is de hoek verkleind naar 27 graden, waardoor er scherpere piramides ontstaan van respectievelijk 100 en 150 mm, zodat geluid dat loodrecht op het oppervlak invalt niet rechtstreeks wordt teruggekaatst en de profilering van de plaat toeneemt. Voor de productie van de proefstukken hebben de piramides van 150 bij 150 mm gecombineerd met de solide basis van het proefstuk, welke een dikte heeft van 100 mm, de maximale grootte waarbij het zwaartepunt van het totale proefstuk bij verticale plaatsing nog binnen de solide basis ligt.

Dat vanuit de theorie is gebleken dat er grote patronen nodig zijn om een goede diffuse reflectie van geluid te kunnen realiseren kan voor in de praktijk lastige elementen opleveren. Het excentrische zwaartepunt dat hierdoor ontstaat is niet gunstig wanneer het element een draagkrachtige functie heeft. De sterke profilering die resulteert in beton met scherpe punten is niet een ideaal patroon voor een gebruiksvriendelijke wand. Het is tevens mogelijk dat bij de productie en later tijdens het gebruik van dergelijke elementen in beton de scherpe punten afbreken. Bij de productie zal daarom een afbreeklijn moeten worden geïntroduceerd waarbij de toppen van de piramides worden afgesneden.

Naast de piramidepatronen die in twee richtingen lopen is het ook interessant om patronen te bekijken die één richting hebben. Er is gekozen om een golfpatroon te gebruiken waarbij de pieken en dalen 200 mm uit elkaar liggen, wat overeen komt met een frequentie van 1.700 Hz. Door het golfpatroon ontstaan er geen scherpe punten of hoeken wat resulteert in een gebruiksvriendelijker element. En er is de mogelijkheid bekeken om een variërend patroon te gebruiken dat overeenkomt met meerdere frequenties. Dit is gedaan door verschillende maten te gebruiken in het patroon – 25, 50, 75, 150, 300, 600 mm – die overeenkomen met verschillende frequenties – respectievelijk 13.600, 6.800, 4.533, 2.267, 1.133, 567 Hz. Door de afmetingen van de proefstukken zit er een limiet aan de maten in het patroon, in de praktijk is het mogelijk om eventueel grotere maten te verwerken in de elementen die overeenkomen met lagere frequenties. Dit variërende patroon is ook esthetisch gezien interessant doordat je hier met één element een heel gevarieerd oppervlak kan creëren. Uiteindelijk heeft dit tot de volgende vier proefstukken geleid waarbij het oppervlak is bewerkt:

- A.01 – Piramidepatroon, klein;
- A.02 – Piramidepatroon, groot;
- A.03 – Golfpatroon;
- A.04 – Variërend patroon.

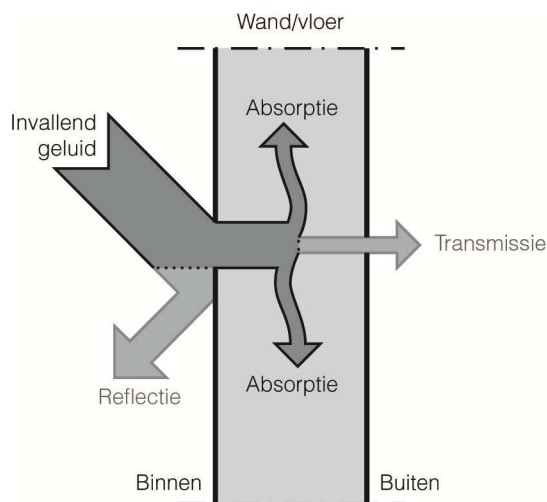


Afb. 3.1.1c: Proefstukken ten behoeve van diffuse spreiding van geluid, v.l.n.r.: piramidepatroon, klein [A.01], piramidepatroon, groot [A.02], golfpatroon [A.03] en variërend patroon [A.04].

3.1.2 Poreus beton

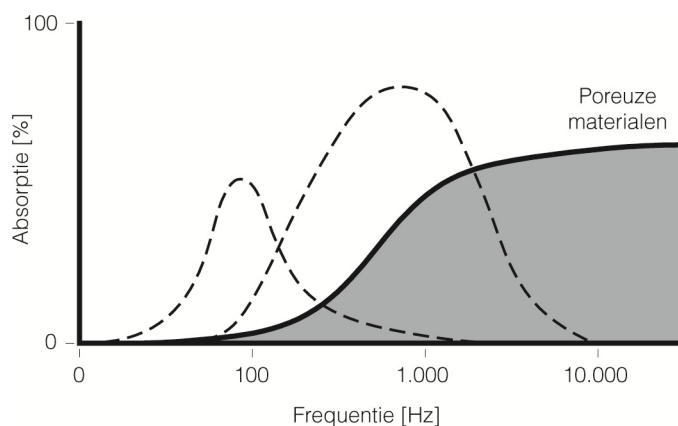
Naast het gebruiken van de reflectie die het materiaal beton heeft is het interessant om te kijken naar de mogelijkheden die beton kan bieden op het vlak van absorptie. Het is hiervoor nodig om de structuur van het beton aan te passen, wat in de basis een glad en niet-poreus

materiaal is met een hoge dichtheid – met als gevolg een lage absorptiecoëfficiënt. Het invallende geluid moet namelijk het materiaal in kunnen dringen waar de trillende luchtdeeltjes weerstand ondervinden en door wrijving energie dissiperen met als gevolg geluidsabsorptie. Zowel de dikte als de structuur van het poreuze materiaal hebben invloed op de mate van geluidsabsorptie. Door de dikte van het materiaal te vergroten wordt de ruimte in het materiaal waar wrijving plaatsvindt groter en de structuur moet zorgen voor open toegankelijke poriën die niet te klein zijn zodat de geluidsgolven het materiaal kunnen binnendringen, maar ook niet te groot omdat er dan nauwelijks wrijving zal plaatsvinden (Cauberg & Nederlof, 2005a).



Afb. 3.1.2a: Absorptie van invallend geluid.

Door de structuur van beton aan te passen, waarbij het geluid het materiaal binnen kan dringen door poriën die aan het oppervlak liggen en verder in het materiaal doorlopen, is het mogelijk om beton meer geluidsabsorberende capaciteiten te geven. Beton wordt dan een poreus materiaal wat volgens het karakteristiek absorptiespectrum van poreuze materialen geschikt is voor het absorberen van geluid van met name hoge frequenties.



Afb. 3.1.2b: Karakteristiek absorptiespectrum poreuze materialen.

Beton tot een poreus materiaal maken kan worden bereikt door de samenstelling van het materiaal te wijzigen, dat bestaat uit water, een bindmiddel – cement – en toeslagmaterialen – zand, grind. Door als toeslagmateriaal geen grind, maar geëxpandeerde kleikorrels te gebruiken zoals bijvoorbeeld in lichtbeton wordt gedaan is het mogelijk de poriën in de kleikorrels te gebruiken, mits het mogelijk is deze aan het oppervlakte te krijgen. In het begin

van dit verkennend onderzoek werd er gekeken naar grote kleikorrels met een doorsnede rond de 15 mm om als toeslagmateriaal te gebruiken in combinatie met zand. Door het stortingsproces zal in de bekistingsmal aan de buitenzijde een cementlaag ontstaan welke voorkomt dat de poriën aan het oppervlakte komen te liggen. Deze cementlaag van enkele millimeters moet vervolgens worden verwijderd door het proefstuk te polijsten. Een tweede optie is het proefstuk achteraf zandstralen om de buitenste cementlaag weg te halen waardoor het element ook iets meer profiel krijgt wat eveneens een bijdrage zou kunnen leveren aan de akoestiek in de ruimte, niet door absorptie, maar door een meer diffuse reflectie van invallend geluid, zoals bij de proefstukken A.01 tot en met A.04.



Afb. 3.1.2c: Poreus betonnen geluidswand langs de Bundesautobahn 4 ter hoogte van Chemnitz (Liadur, 2008).

Na overleg met Liapor, de leverancier van de kleikorrels, is echter besloten om de proefstukken niet op deze manier te vervaardigen. Liapor heeft namelijk zelf ook dergelijke toepassingen onderzocht en zelfs producten als geluidswanden langs snelwegen, onder de naam Liadur, waar geluidsabsorptie wordt toegepast (Liadur, 2008). Uit tests was gebleken dat de poriën in de kleikorrels zelf maar een beperkte geluidsabsorptie konden realiseren doordat deze zeer kort zijn, het ingevallen geluid legt een korte afstand af waarbij de geluidsgolven relatief weinig wrijving ondervinden. Als de poriën in verbinding kunnen staan moet het ingevallen geluid een langere weg afleggen, dat resulteert in meer geluidsabsorptie. Hiervoor worden geen grote kleikorrels gebruikt, maar juist kleine korrels met doorsneden rond de 3 mm waarbij niet de poriën in de korrels worden gebruikt, maar de poriën die ontstaan tussen de korrels in (Vos, 2010). Het is hierbij van belang dat er geen zand wordt gebruikt in het betonmengsel waardoor de poriën verstopten dat leidt tot een

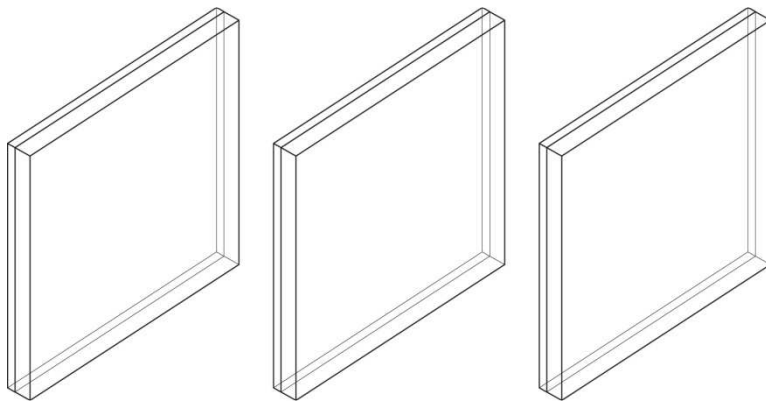
afname van de geluidsabsorptie van het beton. Ook is het in het productieproces van belang dat de proefstukken niet worden verdicht in de mal door een trilnaad, maar in de mal worden gedrukt door een kleine trilplaat om te voorkomen dat de poriën dichtslibben. Voor de afmetingen van de korrels is gekozen voor kleikorrels met een zeeflengte, de maat waarop de korrels worden gesorteerd, van 2 tot 4 mm. Hoe kleiner de korrels, hoe nauwer de poriën zijn die ontstaan waardoor het ingevallen geluid meer weerstand zal ondervinden van wrijving. Daarnaast is de korte zeeflengte ook van belang, kleine korrels kunnen namelijk net als zand in de poriën gaan zitten die ontstaan door de grotere korrels. En bovenal hadden tests uitgevoerd door Liapor uitgewezen dat van de verschillende korrelgroottes de zeeflengte 2 tot 4 mm het beste resultaat gaf voor geluidsabsorptie (Vos, 2010).

Het uiteindelijke mengsel voor het poreuze beton bestaat uit 220 kg/m³ cement, type CEM I 52,5 N, 95 kg/m³ water en 417 kg/m³ kleikorrels, type Liapor 2-4/450 (zie *Bijlage II – Productomschrijving Liapor 2-4/450* voor de productspecificaties). De water/cementfactor van het betonmengsel die hieruit volgt is 0,44.

Naast het poreuze beton is er ook een draagkrachtige laag nodig, omdat door de poreuze structuur het beton veel van zijn draagkrachtige capaciteiten zal verliezen. Dit wordt opgevangen door een laag van vijf centimeter standaard beton achter de tien centimeter dikke poreuze betonlaag te creëren, deze dichte laag zorgt er tevens voor dat het element geen geluid door laat.

Door de proefstukken op deze manier te vervaardigen, met bovengenoemde toeslagmaterialen en wijzigingen in het productieproces, wordt ook voorkomen dat er een cementlaag aan het oppervlakte van het beton de poriën afsluit. Het is daarom vanuit akoestisch oogpunt niet meer noodzakelijk om de proefstukken te polijsten of zandstralen. Vanuit esthetisch oogpunt kan het echter interessant zijn om de proefstukken te zandstralen waardoor er uiteindelijk drie varianten zijn voor poreus beton:

- B.01 – Poreus beton;
- B.02 – Poreus beton, gepolijst;
- B.03 – Poreus beton, gestraald.

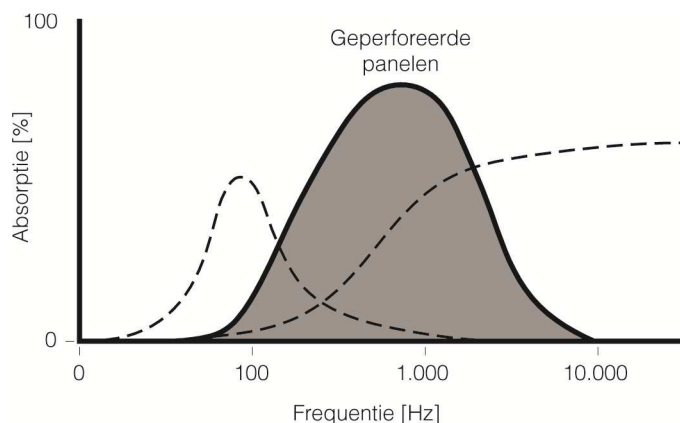


Afb. 3.1.2d: Proefstukken met poreus beton voor geluidsabsorptie van hogere frequenties, v.l.n.r.: poreus beton [B.01], poreus beton, gepolijst [B.02] en poreus beton, gestraald [B.03].

3.1.3 Geperforeerde panelen

Wanneer beton wordt gebruikt als poreus materiaal is het voor de absorptie van geluid vooral interessant voor de hogere frequenties. Daarnaast is het poreuze materiaal esthetisch niet de fraaiste oplossing om van beton een geluidsabsorberend materiaal te maken. Het

integreren van een gladde betonlaag aan het oppervlak kan esthetisch interessantere oplossingen bieden – het is mogelijk voor de architect om het paneel te ontwerpen in relatie tot de ruimte – en helpen voorkomen dat het poreuze beton, met de open structuur, beschadigd gedurende het gebruik. Door een geperforeerd paneel van beton te gebruiken wordt het mogelijk om geluid op een andere manier te absorberen. Er is hier sprake van een Helmholtz resonator, de lucht in de perforaties vormt hierbij een massa en de lucht achter het paneel vormt een veer. Wanneer er geluid invalt op het paneel zal de lucht in de perforaties bij een bepaalde frequentie gaan resoneren, het absorptiespectrum geeft hier een piek. De lucht achter het geperforeerde paneel moet worden opgevuld met een open poreus materiaal zodat er wrijving plaatsvindt met de invallende geluidsgolven. Hierdoor wordt tevens het frequentiegebied waarop de constructie betrekking heeft verbreed – iets wat ten koste kan gaan van de waarde van de absorptiecoëfficiënt in de piek (Cauberg & Nederlof, 2005c).



Afb. 3.1.3a: Karakteristiek absorptiespectrum geperforeerde panelen.

Door hier gebruik van te maken is het mogelijk om ook in lagere frequentiegebieden geluid te absorberen, de middenfrequenties – 300 tot 1.500 Hz. De resonantiefrequentie f_r [in Hz] voor geperforeerde panelen is te bepalen met de volgende formule (Cauberg & Nederlof, 2005c):

$$f_r = 54 \sqrt{\frac{e}{dD}}$$

e: perforatiegraad van het paneel;
d: dikte van de geperforeerde plaat in m;
D: dikte van de poreuze laag in m.

Bij deze formule moet in acht worden gehouden dat de perforatiegraad kleiner moet zijn dan dertig procent, anders zal de geluidsabsorptie werken alsof er geen geperforeerde plaat aanwezig is en dus als poreus materiaal. Door de resonantiefrequentie op 500 Hz te stellen is een proefstuk ontwikkeld. De perforatiegraad van het paneel is vastgesteld op 25% waardoor er beton in twee richtingen kan doorlopen om zo in een smal paneel voldoende stevigheid te behouden. De grootte van de perforaties is 20 bij 20 mm. Voor de dikte van de poreuze laag is 100 mm genomen, gelijk aan de dikte van de proefstukken met enkel de poreuze materialen, om de elementen zo goed mogelijk te kunnen vergelijken. Dit resulteert in een dikte van 30 mm voor het geperforeerde betonnen paneel dat hiervoor zit.

Zonder hierbij variabelen aan te passen is het mogelijk om meerdere varianten te maken voor het proefstuk door de grootte van de perforatie aan te passen. In deze categorie is

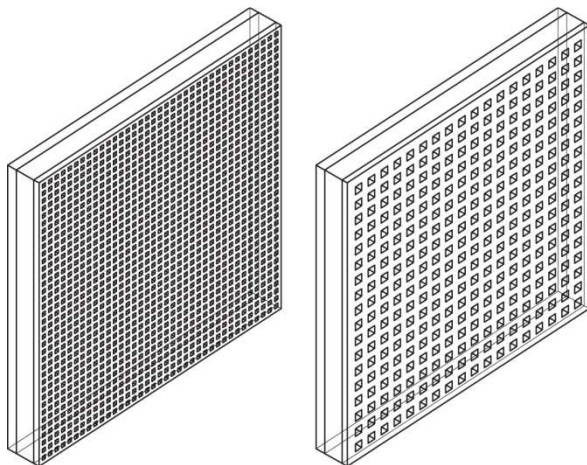
daarom nog een tweede proefstuk ontworpen waarbij de afmetingen van de perforatie zijn vergroot tot 40 bij 40 mm. Hierbij kan er worden gekeken of er in de metingen eventuele verschillen zijn te ontdekken tussen de proefstukken die volgens de theorie eenzelfde piek hebben in hun absorptiespectra – de mate van de geluidsabsorptie zou bijvoorbeeld kunnen verschillen.

Bij de productie van deze proefstukken moet er tevens rekening worden gehouden met het stortingsproces. Er worden namelijk twee verschillende soorten beton gebruikt, glad beton voor het geperforeerde paneel en een draagkrachtige laag en poreus beton voor de tussenliggende laag. Allereerst moet er rekening worden gehouden met de bekisting van het geperforeerde paneel, waar de perforaties moeten worden afgeschuind om het proefstuk naderhand uit de mal te verwijderen. Ten tweede is er de moeilijkheid om een smal paneel van beton te realiseren, het is lastig om te verdichten en de productie moet uitwijzen of de tussenliggende laag van poreus beton voldoende hechting biedt tussen de draagkrachtige en geperforeerde laag. Zelfverdichtend beton van een betonmengsel zonder grind is hier de meest voor de hand liggende oplossing. Tevens kan het wapenen van een smal paneel moeilijkheden veroorzaken, staalvezels in plaats van vast wapeningsstaal bieden hiervoor wellicht een oplossing. En tot slot kan het gebruik van de twee verschillende betonsoorten voor moeilijkheden zorgen bij het storten, de geperforeerde laag wordt weliswaar eerst gestort, maar kan in het poreuze beton trekken waardoor de absorberende werking kan afnemen.

De proefstukken met de geperforeerde panelen bieden van alle proefstukken vanuit de theorie veel perspectief met betrekking tot het frequentiebereik, de middenfrequenties die bij de menselijke spraak het meeste worden gebruikt. En vanuit esthetisch en praktisch oogpunt wordt het interessant doordat het mogelijk is verschillende ontwerpen te gebruiken voor de geperforeerde panelen en de panelen zorgen voor een beschermende laag van het poreuze materiaal. Voor de proefstukken is minder op de esthetische mogelijkheden ingespeeld aangezien het eerst interessant is om te kijken naar de akoestische werking en op deze manier de productie zo eenvoudig mogelijk wordt gehouden:

C.01 – Perforatie, klein;

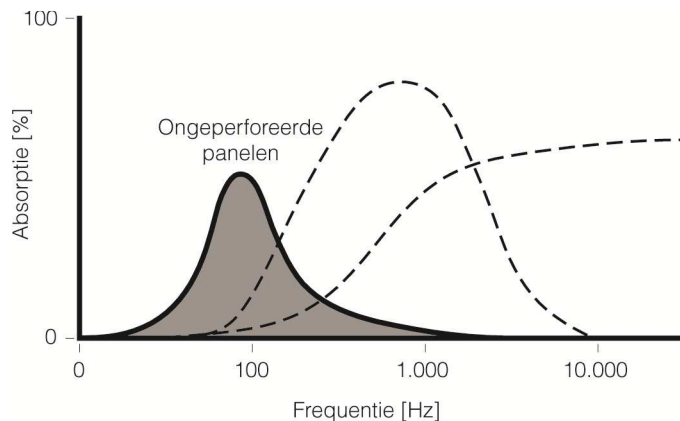
C.02 – Perforatie, groot.



Afb. 3.1.3b: Proefstukken met geperforeerde panelen in combinatie met poreus beton voor geluidsabsorptie van middenfrequenties, v.l.n.r.: perforatie, klein [C.01] en perforatie, groot [C.02].

3.1.4 Ongeperforeerde panelen

Als laatste categorie is de mogelijkheid onderzocht om beton in te zetten als een samengestelde wand, met een spouw. Het principe van de paneelabsorptie met ongeperforeerde panelen baseert zich op de mogelijkheid het paneel mee te laten trillen met het geluid dat er op valt, wanneer de frequentie van het invallende geluid overeenkomt met de resonantiefrequentie. Dit resoneren van het paneel komt voor bij lage frequenties (Cauberg & Nederlof, 2005c).



Afb. 3.1.4a: Karakteristiek absorptiespectrum ongeperforeerde panelen.

De resonantiefrequentie f_r [in Hz] voor ongeperforeerde panelen is te bepalen door de formule (Cauberg & Nederlof, 2005c):

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{mD}}$$

of bij kleine panelen (Cauberg & Nederlof, 2005c):

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{(m + 0,6\sqrt{ab})D}}$$

m: massa van het ongeperforeerde paneel in kg/m^2 ;

D: diepte van de spouw in m.

a, b: afmetingen van het paneel in m.

Als het ongeperforeerde paneel 20 mm dik zou zijn en van gewapend beton, dat een massa heeft van 2.400 kg/m^3 , heeft het paneel een massa van 48 kg/m^2 . Gecombineerd met een spouw van 50 mm resulteert dit in een resonantiefrequentie van 39 Hz, wat veel lager ligt dan het frequentiegebied waarop wordt getracht de geluidsabsorptie te realiseren. Om een proefstuk te maken met een hogere resonantiefrequentie is het mogelijk om zowel de massa van het ongeperforeerde paneel te verlagen als de spouw te versmallen. Dit kan door het paneel te versmallen, maar 20 mm is al erg smal voor een betonpaneel wil dit niet afbrokkelen en sterk genoeg blijven. Het kan ook door een lichtere betonsoort te gebruiken met bijvoorbeeld de eerder genoemde geëxpandeerde kleikorrels die worden gebruikt voor de proefstukken met poreus beton. Binnen het 20 mm smalle paneel is dit echter ook beperkt mogelijk gezien de sterkte die het moet behouden en de cementlaag die langs de buitenzijde wordt gevormd. Er kan beter worden gekeken naar het versmallen van de spouw, het nadeel

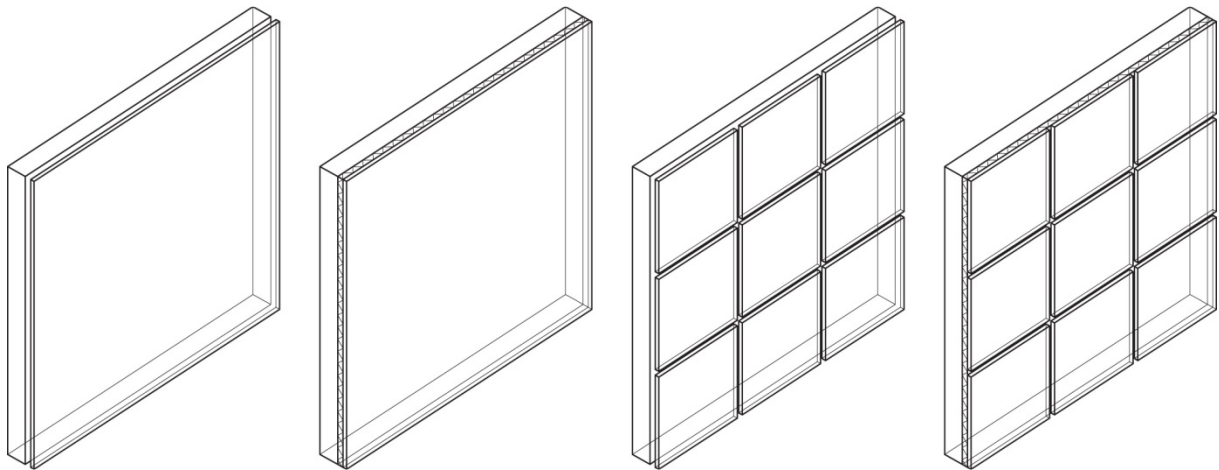
hiervan is alleen dat de spouwankers door de kleine afstand meer star zijn dan bij een grotere spouw waardoor het lastiger is voor het paneel om te resoneren.

Voor het verhogen van de resonantiefrequentie van de proefstukken is er gekozen om beide middelen in te zetten. Er wordt lichter beton te gebruiken – met een massa van 2.000 kg/m^3 – en de spouw wordt versmald tot 30 mm. De bijbehorende resonantiefrequentie is dan 55 Hz, wat nog steeds laag is. Het absorberen met ongeperforeerde panelen moet ook meer worden gezien als aanvulling op andere absorptiemechanismen en niet als een op zichzelf staand mechanisme dat in combinatie met beton waarschijnlijk niet veel potentie zal hebben.

Door de spouw uit te vullen is het nog mogelijk om net als bij de geperforeerde panelen de piek van de resonantiefrequentie te verbreden, het is echter wel vereist dat dit een zacht materiaal is dat mee kan bewegen met het resonerende paneel. Hiervoor komt beton niet in aanmerking en zal er een ander materiaal moeten worden gebruikt. Dan is het nog interessant om te kijken naar verschillende afmetingen van panelen en of hier verschillen zijn te meten in de mate van geluidsabsorptie. De afmetingen van het paneel hebben immers invloed op de frequentie waarop deze resoneren (Cauberg & Nederlof, 2005c).

Uiteindelijk zijn er in deze categorie vier proefstukken ontworpen. Twee waarbij het gaat om één groot betonnen paneel van 1.500 bij 1.500 mm en twee varianten waarbij er negen panelen van 480 bij 480 mm worden gebruikt. Voor zowel een de proefstukken met een enkel betonnen paneel als de proefstukken met negen panelen is er één uitgevuld met een zacht poreus materiaal:

- D.01 – Gehele, lege spouw;
- D.02 – Gehele, gevulde spouw;
- D.03 – Gedeeltelijke, lege spouw;
- D.04 – Gedeeltelijke, gevulde spouw.



Afb. 3.1.4b: Proefstukken met spouw voor geluidsabsorptie van lagere frequenties, v.l.n.r.: gehele, lege spouw [D.01], gehele, gevulde spouw [D.02], gedeeltelijke, lege spouw [D.03] en gedeeltelijke, gevulde spouw [D.04].

Zie *Bijlage I – Proefstukken* voor meer tekeningen met betrekking tot de verschillende proefstukken.

3.1.5 Beperkingen

Doordat dit een verkennend onderzoek is, is er gekeken naar de verschillende mogelijkheden waarop de akoestiek in de ruimte kan worden verbeterd met het materiaal beton. In totaal zijn hiervoor dertien proefstukken ontworpen die interessant zijn om nader te onderzoeken. Dit zou betekenen dat er zesentwintig panelen moeten worden gemaakt – van elk proefstuk twee maal, bij een officieel onderzoek zouden dit er zelfs vijf per proefstuk moeten zijn – van 1.500 bij 1.500 mm om tests mee uit te voeren. Door financiële en technische beperkingen was het echter niet mogelijk om alle proefstukken te produceren en testen, er konden maximaal vier proefstukken worden geproduceerd met de middelen die beschikbaar waren. Daarom is er een afweging gemaakt om de proefstukken die de meeste potentie hebben en waarbij het mogelijk was om adequate metingen uit te voeren te produceren en testen.

De proefstukken waarbij het oppervlak was bewerkt ten behoeve van de diffuse spreiding van geluid vielen om de laatstgenoemde reden af. Het is namelijk lastig om de spreiding van het geluid te meten in een ruimte, zeker met de beschikbare meetinstrumenten en de ruimte. Deze meting, waarbij het verschil in geluidsdruk niveau wordt gemeten op verschillende plaatsen met een continue geluidsbron, vereist daarnaast veel oppervlak – minstens één intern oppervlak moet helemaal bekleed zijn met de te testen proefstukken. Hierdoor waren er waarschijnlijk zelfs meer dan twee panelen per proefstuk nodig, wat gezien de beperkte middelen en praktische uitvoerbaarheid van de test, het gaat hier namelijk om zware betonnen elementen die op de juiste plaats gezet moeten worden in een geïmproviseerde meetruimte, niet optimaal was.

Naast de proefstukken ten behoeve van de diffuse spreiding van geluid waren er ook de varianten waarbij geluidsabsorberend beton wordt gerealiseerd. Het belangrijkste onderdeel hiervan komt voort uit de proefstukken die de mogelijkheden van poreus beton verkennen. Poreus beton vormt zelf een geluidsabsorberend materiaal, maar is tevens onderdeel van de varianten met geperforeerde panelen. Daarnaast is het voor poreuze materialen lastig om te voorspellen hoe de geluidsabsorptie zal zijn en dus interessant om te meten. Van de proefstukken met poreus beton is besloten om proefstukken B.01, gewoon poreus beton, en B.03, gestraald poreus beton, uit te voeren. Er is gekozen voor B.01 om te kijken naar de basis van het materiaal zonder enige bewerking en voor B.03 om de mogelijkheid te bekijken het element een ruw oppervlak te geven en het effect daarvan te meten op de geluidsabsorptie.

Naast de proefstukken met enkel poreus beton was er nog de mogelijkheid om twee proefstukken te produceren en testen. De keuze viel hierbij op de geperforeerde panelen. Theoretisch was het namelijk mogelijk om proefstukken te maken waarbij de resonantiefrequentie hoger lag dan bij ongeperforeerde panelen, rond de 500 Hertz in plaats van rond de 50 Hertz, wat voor spraak een veel interessantere frequentie is. Het nadeel van de geperforeerde panelen was wel dat het lastige elementen waren om te produceren, maar ook bij de ongeperforeerde panelen waren dergelijke moeilijkheden. Het voorste paneel diende daarbij namelijk zo dun en licht mogelijk te worden uitgevoerd iets wat lastig is te realiseren in beton en eigenlijk helemaal niet in de natuur van het materiaal ligt. Daarnaast is een zo smal mogelijke spouw lastig uit te voeren en zijn hiervoor flexibele spouwankers nodig om een gunstige akoestische werking te realiseren. De lage piek van de absorptie van de ongeperforeerde panelen had tevens het nadeel dat het mogelijk is dat deze leiden tot onaccurate meetgegevens bij juist de lage frequenties (Nederlands Normalisatie-instituut, 2003). En afgaand op de karakteristieke absorptiespectra van ongeperforeerde en geperforeerde panelen hadden de geperforeerde panelen meer potentie voor een hogere geluidsabsorptie.



Afb. 3.1.5a: Proefstuk B.01 – poreus beton.



Afb. 3.1.5b: Detailfoto van proefstuk B.01 – poreus beton.



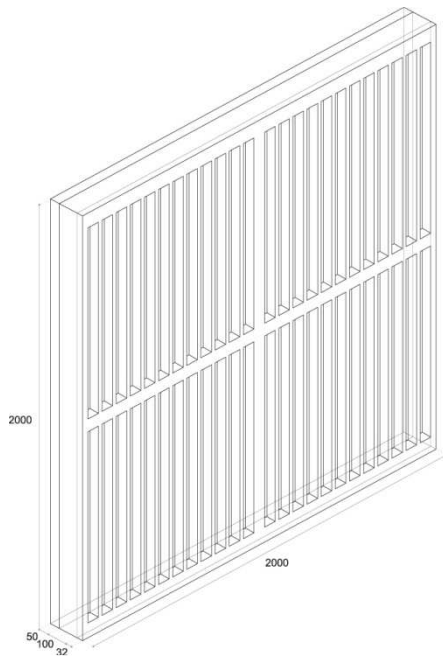
Afb. 3.1.5c: Proefstuk B.03 – poreus beton, gestraald.



Afb. 3.1.5d: Detailfoto van proefstuk B.03 – poreus beton, gestraald.

Voor de geperforeerde panelen is vervolgens getracht om de twee varianten te maken. Het bleek echter een uitdaging om de bekisting voor de geperforeerde panelen te maken, er is daarom gekozen voor een alternatief met een gelijke dikte en perforatiegraad, maar met langere rechthoekige verticale perforaties in plaats van meerdere vierkante perforaties. Er is vervolgens gekozen om één bekistingsplaat te maken en bij de productie te zoeken naar eventuele alternatieven voor het tweede proefstuk. Er waren echter geen geschikte alternatieven voorhanden waardoor het in totaal bij drie proefstukken is gebleven.

Tevens is er aan de afmetingen van de elementen een wijziging doorgevoerd. Er is gekozen om in plaats van per onderdeel twee proefstukken van 1,5 bij 1,5 meter, dat gelijk is aan $2 \cdot 2,25 \text{ m}^2 = 4,5 \text{ m}^2$, één proefstuk van 2 bij 2 meter te maken, wat neerkomt op 4 m^2 . De invloed op de nagalmtijd wordt hierdoor wel iets kleiner en daarmee de meetonzekerheid groter, maar dit zorgde voor een sneller stortingsproces en bovenal kon het proefstuk hierdoor in één keer in de meetruimte worden gezet.



Afb. 3.1.5e: Het uiteindelijke ontwerp voor het proefstuk met het geperforeerde paneel.



Afb. 3.1.5f: Proefstuk C.01 – geperforeerd beton.

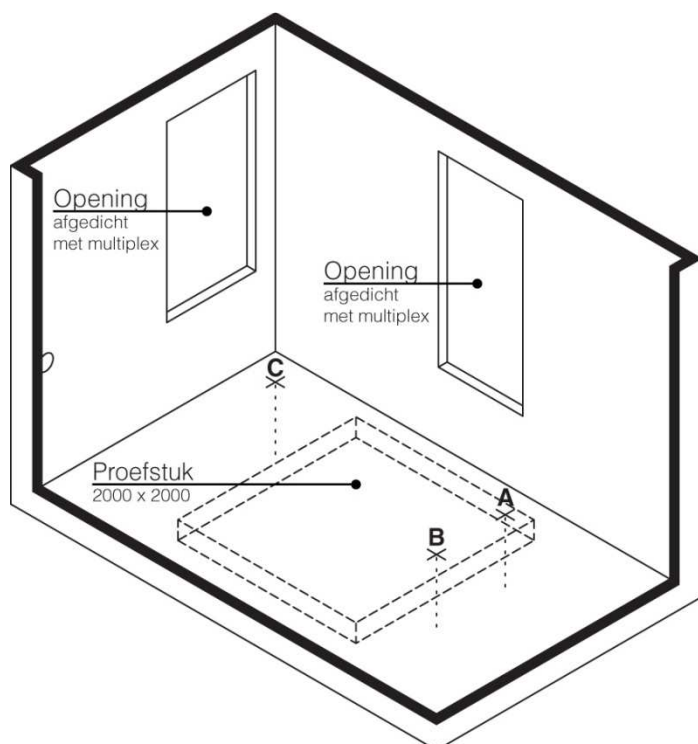


Afb. 3.1.5g: Detailfoto van proefstuk C.01 – geperforeerd beton.

3.2 Metingen

Op 14 juli 2010 zijn de metingen met de proefstukken uitgevoerd. De metingen zijn naar de mogelijkheden zoveel mogelijk uitgevoerd conform NEN-EN-ISO 354:2003 *Akoestiek – Meting van geluidsabsorptie in een nagalmkamer*. Door gebrek aan financiële middelen en praktische moeilijkheden is er uitgeweken naar de beste alternatieven die voorhanden waren.

3.2.1 Meetruimte



Afb. 3.2.1a: Nagalmkamer.



Afb. 3.2.1b: De meetopstelling in de nagalmkamer voor de referentiemeting, A.00.

De metingen zijn uitgevoerd op het terrein van Westo Prefab Beton Systemen, dit in verband met de afmetingen en het gewicht van de betonnen proefstukken, die niet in de categorie goed handelbaar vallen. De ruimte die het meest geschikt was voor dergelijke metingen was een kaal glasvezelhuis dat op het gegeven moment in productie was. Het glasvezelhuis is compleet uit tien centimeter dik beton opgetrokken en heeft een interne lengte van 4,58 meter, breedte van 2,77 meter en hoogte van 3,19 meter. Het volume van de ruimte is 27,78 m³, wat kleiner is dan het benodigde minimum van 150 m³ zoals in de voorschriften is vastgelegd (Nederlands Normalisatie-instituut, 2003). Andere beschikbare ruimtes waren echter groter dan het vastgelegde maximum van 500 m³, waardoor het niet mogelijk was om nauwkeurig de nagalmtijd voor hogere frequenties te meten door de geluidsabsorptie van de lucht, en daarnaast vereisten die ruimtes veel grotere proefstukken. De oppervlakte van de proefstukken, $S_{\text{proefstuk}}$ [in m²], moet namelijk in verhouding staan met de nagalmkamer (Nederlands Normalisatie-instituut, 2003):

$$S_{\text{proefstuk}} = S_{200} \left(\frac{V}{200} \right)^{2/3}$$

S_{200} : oppervlakte van het proefstuk in een nagalmkamer van 200 m³ in m²;
V: volume van de nagalmkamer in m³.

Hoe groter de nagalmkamer, hoe groter het proefstuk moet zijn. De oppervlakte van het proefstuk in een nagalmkamer van 200 m³ ligt tussen de 10 en 12 m², de beschikbare nagalmkamer was 27,78 m³:

$$10 \left(\frac{27,78}{200} \right)^{2/3} \leq S_{\text{proefstuk}} \leq 12 \left(\frac{27,78}{200} \right)^{2/3} ; 2,68 \leq S_{\text{proefstuk}} \leq 3,22$$

De verhouding is bedoeld voor proefstukken in nagalmkamers die groter zijn dan 200 m³ en gaat niet helemaal op voor kleinere nagalmkamers, de ondergrens van een proefstuk is bepaald op 10 m². Toch is deze verhouding als richtlijn gebruikt om de afmetingen van het paneel te bepalen in verband met de beperkende omstandigheden – het ontbreken aan voldoende financiële middelen en tijd. Door het kleinere volume van de nagalmkamer was het voor de tests daarom mogelijk om in verhouding kleinere proefstukken te gebruiken, de invloed van een klein paneel wordt eerder gemeten in een kleine ruimte.

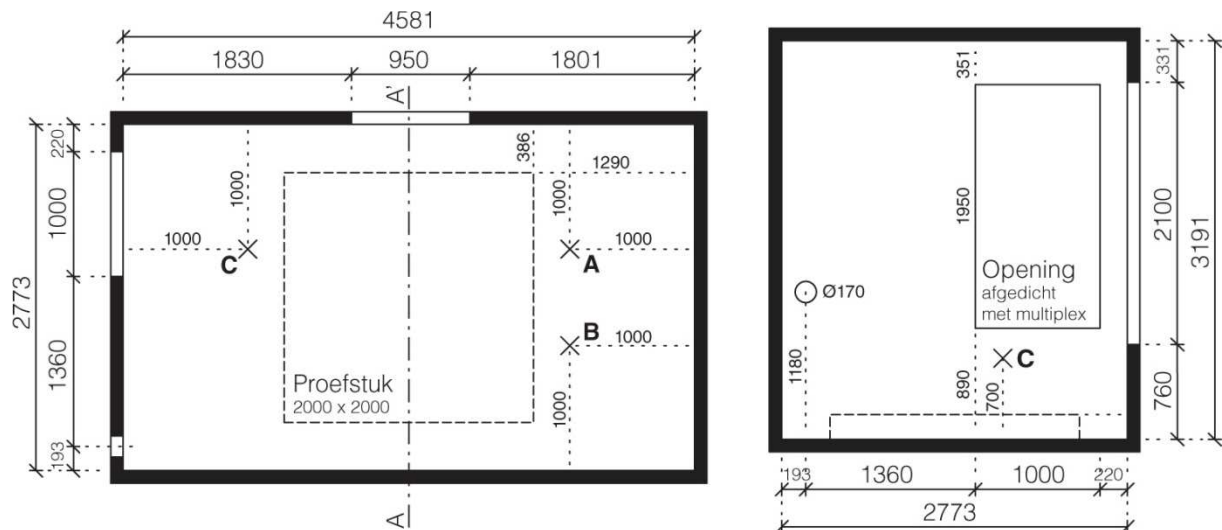
De kleine omvang van de nagalmkamer betekent echter dat de betrouwbaarheid van de metingen bij lagere frequenties geringer is dan volgens de norm zou moeten. Ervan uitgaande dat bij een nagalmkamer van 100 m³ metingen onder de 63 Hz onbetrouwbaar worden, geldt dat bij een nagalmkamer van 30 m³ dat metingen onder de 115 Hz minder betrouwbaar zijn:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{V_0}{V_1}} = 63 \sqrt{\frac{100}{30}} = 115 \text{ Hz}$$

In de nagalmkamer zijn de twee grote openingen afgedicht met multiplex platen, de kleine opening met een doorsnede van 170 mm is open gehouden zodat de persoon die de metingen verricht, en feitelijk wordt opgesloten in de ruimte, kan communiceren met de personen buiten de nagalmkamer. Daarnaast is er een bouwlamp in de meetruimte geplaatst als lichtvoorziening. Verder zijn er in de ruimte geen wijzigingen aangebracht zoals bijvoorbeeld het ophangen van diffuserende panelen, hierdoor kunnen de verkregen meetresultaten minder betrouwbaar zijn doordat er een minder diffuus geluidsveld in de

nagalmkamer is. Over het algemeen is gebleken dat voor een acceptabel diffuus geluidsveld in een rechthoekige ruimte er diffuserende panelen nodig zijn die tezamen een oppervlak hebben van 15 tot 25% van het totale interne oppervlak van de ruimte (Nederlands Normalisatie-instituut, 2003), maar omdat het hier gaat om een verkennend onderzoek dat een eerste indicatie moet geven van wat er mogelijk is, is er vooral gekeken naar wat praktisch de beste oplossingen waren. Na de referentiemeting A.00 is gebleken dat in de lege nagalmkamer de nagalmtijd bij 500 Hz boven de vijf seconde lag:

Frequentie [Hz]	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Nagalmtijd [s]	7,48	7,09	5,14	2,77	2,29	1,57



Afb. 3.2.1c: Plattegrond van de nagalmkamer en doorsnede A-A', schaal 1:50.

3.2.2 Meetmethode

Om de absorptiecoëfficiënt, en dus de geluidsabsorptie, van de proefstukken te kunnen bepalen was het nodig om de nagalmtijd te meten. Hiervoor is bij de metingen gebruik gemaakt van een geluidsniveaumeter van de fabrikant Norsonic, type Nor140. Verder waren in de ruimte aanwezig het statief voor de geluidsniveaumeter, de persoon die de metingen uitvoerde, benodigdheden om de resultaten te noteren en ballonnen die benodigd waren bij de meting. Allereerst werd er een referentiemeting uitgevoerd in de ruimte zonder een proefstuk. Hierbij werd de nagalmtijd gemeten door een ballon te laten knappen en dit vervolgens vijf maal te herhalen. In totaal is dus zes maal de nagalmtijd gemeten, twee maal voor de locaties A, B en C zoals aangegeven op afbeelding 3.2.1c.

Na de referentietest werden de proefstukken om de beurt in het midden van de nagalmkamer plat op de bodem geplaatst waarna wederom zes maal de nagalmtijd is gemeten gelijk aan de referentietest en met ongewijzigde omstandigheden. Hierdoor is het mogelijk de absorptiecoëfficiënt van de proefstukken te berekenen volgens de formule van Sabine voor de nagalmtijd. Voor de referentietest waarbij de nagalmtijd T_0 in een lege nagalmkamer wordt gemeten geldt namelijk:

$$T_0 = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot A_0}$$

Hierbij zijn het volume V en de snelheid van geluid door de lucht c_{lucht} bekend. De nagalmtijd wordt gemeten en als de formule wordt herschreven kan hiermee de tot totale absorptie A_0 worden berekend:

$$A_0 = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot T_0}$$

Voor de metingen met de proefstukken gaat hetzelfde op en kan de totale absorptie A_1 in de ruimte met het proefstuk worden berekend. Het verschil tussen deze twee absorptiewaarden is de totale absorptie $A_{\text{proefstuk}}$ die wordt gerealiseerd door het proefstuk:

$$A_{\text{proefstuk}} = A_1 - A_0 = \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}}} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Als de totale absorptie is bepaald die door het proefstuk wordt gerealiseerd is de absorptiecoëfficiënt $\alpha_{\text{proefstuk}}$ van het proefstuk te bepalen:

$$\alpha_{\text{proefstuk}} = \frac{A_{\text{proefstuk}}}{S_{\text{proefstuk}}}$$

Naast de bepaling van de absorptiecoëfficiënt volgens de formule van Sabine wordt ook de formule van Eyring gebruikt om de absorptiecoëfficiënt te bepalen. Hierbij geldt voor de referentietest de volgende T_0 (Cauberg & Nederlof, 2005b):

$$T_0 = - \frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot S_{\text{totaal}} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_0)}$$

V : volume van de ruimte in m^3 ;

c_{lucht} : snelheid van het geluid in de lucht in m/s ;

S_{totaal} : het totaal omhullend oppervlak in m^2 ;

$\bar{\alpha}_0$: gemiddelde absorptiecoëfficiënt in de referentietest.

Met de snelheid van het geluid in de lucht, het totaal omhullend oppervlak en het volume van de ruimte als bekende variabelen en de gemeten nagalmtijd T_0 is de gemiddelde absorptiecoëfficiënt in de referentietest $\bar{\alpha}_0$ te bepalen:

$$\bar{\alpha}_0 = 1 - e^{-\frac{55,3 \cdot V}{c_{\text{lucht}} \cdot S_{\text{totaal}} \cdot T_0}}$$

Voor de metingen wordt eenzelfde methode toegepast en kan de gemiddelde absorptiecoëfficiënt $\bar{\alpha}_1$ worden berekend. De absorptiecoëfficiënt van het proefstuk $\alpha_{\text{proefstuk}}$ is vervolgens te bepalen door het verschil te nemen in beide gemiddelde waarden en te vermenigvuldigen met het totaal omhullend oppervlak en te delen door het oppervlak van het proefstuk:

$$\alpha_{\text{proefstuk}} = \frac{(\bar{\alpha}_1 - \bar{\alpha}_0) \cdot S_{\text{totaal}}}{S_{\text{proefstuk}}}$$

3.2.3 Frequenties

De nagalmtijd wordt gemeten voor verschillende frequenties. Er wordt hierbij gebruik gemaakt van tertsbanden, ook wel 1/3 octaafbanden genoemd. Door het gebruik van tertsbanden in plaats van octaafbanden geven de meetresultaten fijnere frequentie informatie

en is het gedrag van de panelen nauwkeuriger te bepalen. Elke octaafband – 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000 Hz – is hierbij opgedeeld in drie tertsbanden. De tertsbanden die zijn gebruikt in de meting komen overeen met de door het Nederlands Normalisatie-instituut vastgestelde centrumfrequenties voor de meting van geluidsabsorptie in een nagalmkamer – 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000, 5.000 Hz. Daarnaast zijn er ook metingen gedaan voor frequenties die hier buiten vallen – 6.300, 8.000 Hz. De metingen onder de eerder berekende ondergrens van 115 Hz zijn buiten beschouwing gelaten, omdat het lastig kan zijn om betrouwbare meetresultaten te verkrijgen door de lage modale dichtheid in de nagalmkamer (Nederlands Normalisatie-instituut, 2003).

3.2.4 Meetresultaten

Er zijn in totaal vier verschillende metingen gedaan, waarbij voor elke meting zes maal de nagalmtijd werd gemeten op de verschillende locaties in de meetruimte. Dit zijn de metingen A.00 – Referentietest, B.01 – Poreus beton, B.03 – Poreus beton, gestraald en C.01 – Geperforeerd beton.

Bij de testpositie is aangegeven op welke locatie, A, B of C, de gegevens zijn vergaard en het cijfer geeft aan of het de eerste of tweede meting op dezelfde locatie betreft. De laatste kolom geeft de gemiddelde waarden per meting.

Testpositie	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM
-------------	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	-----

A.00 – Referentietest

B.01 – Poreus beton

Freq. [Hz]	Nagalmtijd [s]							Nagalmtijd [s]						
125	8,80	7,49	8,25	7,66	6,15	6,54	7,48	5,96	5,96	7,09	8,01	6,13	7,83	6,83
160	6,86	6,31	7,23	8,39	7,71	7,32	7,30	4,12	4,24	3,97	4,08	4,34	3,69	4,07
200	7,23	6,71	7,27	6,48	6,94	7,01	6,94	4,40	4,72	3,68	3,86	3,36	3,10	3,85
250	7,01	7,44	6,90	6,99	7,15	7,03	7,09	3,74	4,10	3,79	3,59	3,00	2,89	3,52
315	6,42	6,22	5,99	6,26	5,68	6,23	6,13	2,43	2,65	2,54	2,46	2,43	2,20	2,45
400	5,54	5,63	5,60	6,03	5,48	5,79	5,68	2,30	1,95	2,40	2,27	1,97	2,04	2,16
500	5,49	5,35	5,17	4,90	4,84	5,08	5,14	1,85	1,84	1,72	1,73	1,80	1,79	1,79
630	4,44	4,38	4,51	4,20	4,70	4,89	4,52	1,51	1,48	1,54	1,64	1,51	1,37	1,51
800	4,10	3,68	3,89	3,61	3,83	3,59	3,78	1,29	1,29	1,32	1,36	1,36	1,27	1,32
1000	2,79	2,88	2,72	2,58	2,91	2,75	2,77	1,17	1,15	1,08	1,07	1,19	1,13	1,13
1250	2,42	2,48	2,50	2,46	2,41	2,54	2,47	1,24	1,29	1,16	1,15	1,19	1,21	1,21
1600	2,53	2,47	2,46	2,38	2,36	2,39	2,43	1,30	1,20	1,23	1,32	1,21	1,08	1,22
2000	2,31	2,35	2,34	2,24	2,36	2,16	2,29	1,14	1,17	1,14	1,07	1,08	1,09	1,12
2500	2,03	1,95	2,04	2,01	1,85	1,96	1,97	1,00	1,10	0,99	0,96	1,01	0,99	1,01
3150	1,89	1,84	1,84	1,71	1,83	1,91	1,84	1,03	1,03	0,99	1,00	0,97	1,01	1,01
4000	1,55	1,64	1,60	1,50	1,57	1,58	1,57	0,95	0,91	0,86	0,85	0,86	0,85	0,88
5000	1,42	1,38	1,43	1,41	1,39	1,35	1,40	0,85	0,83	0,84	0,83	0,85	0,83	0,84
6300	1,28	1,21	1,28	1,31	1,26	1,18	1,25	0,81	0,80	0,79	0,75	0,74	0,73	0,77
8000	0,97	0,99	1,02	1,03	0,99	1,02	1,00	0,64	0,68	0,69	0,65	0,64	0,66	0,66

Testpositie	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM
-------------	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	-----

B.03 – Poreus beton, gestraald

C.01 – Geperforeerd beton

Freq. [Hz]	Nagalmtijd [s]							Nagalmtijd [s]						
125	6,32	8,68	-	6,73	11,6	6,26	7,92	6,15	6,81	6,47	6,63	5,78	5,66	6,25
160	4,36	4,60	4,61	4,65	4,99	4,35	4,59	3,66	3,87	3,69	3,52	3,72	3,72	3,70
200	3,80	3,73	3,48	3,20	3,94	3,17	3,55	2,82	2,88	2,79	2,84	2,90	2,53	2,79
250	3,45	3,66	3,43	2,87	2,97	3,03	3,24	3,19	3,54	3,21	3,17	2,47	2,95	3,09
315	2,65	2,71	2,50	2,27	2,59	2,67	2,57	2,37	2,55	2,50	2,23	1,88	2,16	2,28
400	2,33	2,30	2,32	1,91	2,10	2,04	2,17	1,61	1,66	1,82	1,80	1,64	1,75	1,71
500	1,70	1,70	1,59	2,05	1,76	1,90	1,78	1,62	1,26	1,16	1,33	1,48	1,50	1,39
630	1,50	1,34	1,65	1,47	1,30	1,36	1,44	1,48	1,61	1,27	1,37	1,45	1,33	1,42
800	1,19	1,20	1,23	1,23	1,44	1,23	1,25	1,34	1,28	1,42	1,28	1,29	1,29	1,32
1000	1,10	1,05	1,25	1,03	1,06	1,11	1,10	1,28	1,23	1,29	1,28	1,13	1,28	1,25
1250	1,16	1,15	1,29	1,27	1,21	1,14	1,20	1,17	1,14	1,22	1,22	1,14	1,18	1,18
1600	1,31	1,17	1,31	1,22	1,29	1,28	1,26	1,21	1,13	1,16	1,25	1,09	1,17	1,17
2000	1,19	1,21	1,17	1,11	1,18	1,08	1,16	1,07	1,05	1,15	1,15	1,10	1,12	1,11
2500	1,02	1,08	1,04	0,99	1,04	1,10	1,05	1,14	1,06	1,15	0,99	1,05	1,02	1,07
3150	0,91	0,95	0,99	0,95	1,05	0,99	0,97	1,11	1,08	1,10	1,12	1,10	1,10	1,10
4000	0,95	0,89	0,95	0,93	0,95	0,87	0,92	1,05	1,04	1,00	0,95	0,97	1,00	1,00
5000	0,81	0,83	0,86	0,82	0,84	0,82	0,83	0,91	0,93	0,97	0,94	0,93	0,98	0,94
6300	0,74	0,71	0,74	0,76	0,74	0,80	0,75	0,87	0,85	0,89	0,90	0,82	0,91	0,87
8000	0,68	0,64	0,63	0,63	0,65	0,67	0,65	0,72	0,72	0,76	0,76	0,77	0,78	0,75

Tijdens het meten werd duidelijk dat de proefstukken een positieve invloed hadden op de nagalmtijd in de ruimte. De afname in de nagalmtijd ten opzichte van de referentietest waren hoorbaar. Voor 500 Hz bijvoorbeeld verkortte de nagalmtijd van 5,14 seconde bij de referentietest A.00 tot 1,79 en 1,78 seconde bij respectievelijk test B.01 en B.02, de varianten met poreus beton. Bij de meting C.01 – Geperforeerd beton was de nagalmtijd bij 500 Hz zelfs nog maar 1,39 seconde.

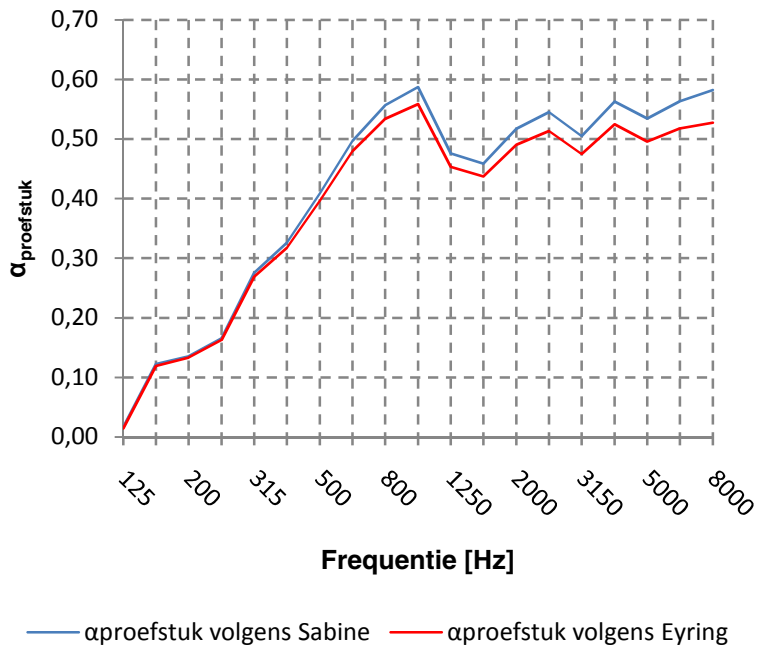
Bij de frequenties onder de 115 Hz en zelfs één maal voor 125 Hz ontbraken soms de resultaten, tevens variëren de verkregen meetresultaten hier hevig. Hieruit is gebleken wat eerder werd vermoed, namelijk dat het voor lage frequenties lastig is om betrouwbare meetresultaten te verkrijgen.

Met de nagalmtijden verkregen uit de metingen is vervolgens voor de drie verschillende proefstukken de absorptiecoëfficiënt volgens Sabine en eveneens volgens Eyring bepaald met de methode die is beschreven bij de meetmethode. Zie *Bijlage III – Meetresultaten* voor de tussenstappen.

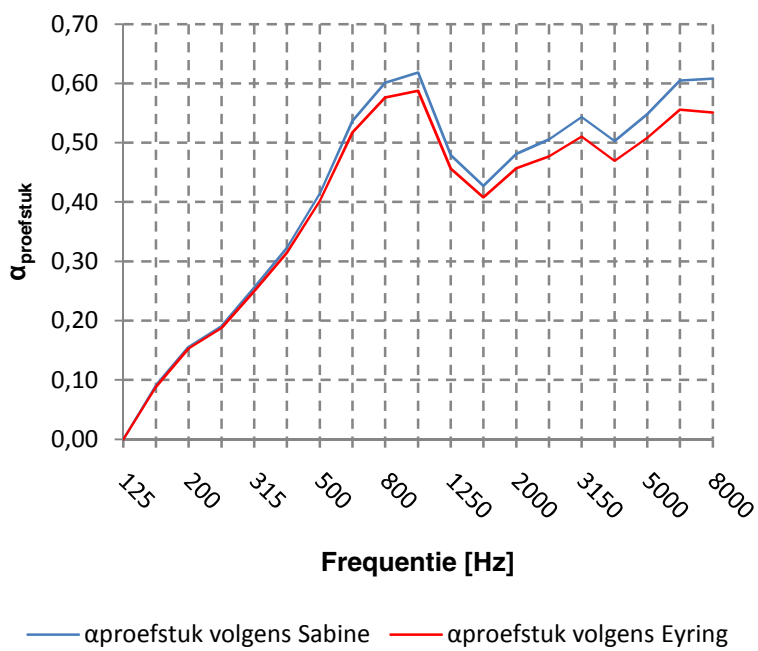
B.01 – Poreus beton B.03 – Poreus beton, gestraald C.01 – Geperforeerd beton

<i>Freq. [Hz]</i>	<i>$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine</i>	<i>$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Eyring</i>	<i>$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine</i>	<i>$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Eyring</i>	<i>$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine</i>	<i>$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Eyring</i>
125	0,02	0,01	-	-	0,03	0,03
160	0,12	0,12	0,09	0,09	0,15	0,15
200	0,14	0,13	0,16	0,15	0,24	0,24
250	0,17	0,16	0,19	0,19	0,21	0,21
315	0,28	0,27	0,26	0,25	0,31	0,31
400	0,33	0,32	0,32	0,31	0,46	0,44
500	0,41	0,40	0,41	0,40	0,60	0,58
630	0,50	0,48	0,54	0,52	0,55	0,53
800	0,56	0,53	0,60	0,58	0,56	0,53
1000	0,59	0,56	0,62	0,59	0,50	0,47
1250	0,48	0,45	0,48	0,46	0,50	0,47
1600	0,46	0,44	0,43	0,41	0,50	0,48
2000	0,52	0,49	0,48	0,46	0,52	0,50
2500	0,55	0,51	0,51	0,48	0,48	0,46
3150	0,51	0,47	0,54	0,51	0,41	0,38
4000	0,56	0,52	0,50	0,47	0,41	0,38
5000	0,53	0,50	0,55	0,51	0,39	0,36
6300	0,56	0,52	0,60	0,56	0,39	0,36
8000	0,58	0,53	0,61	0,55	0,38	0,34

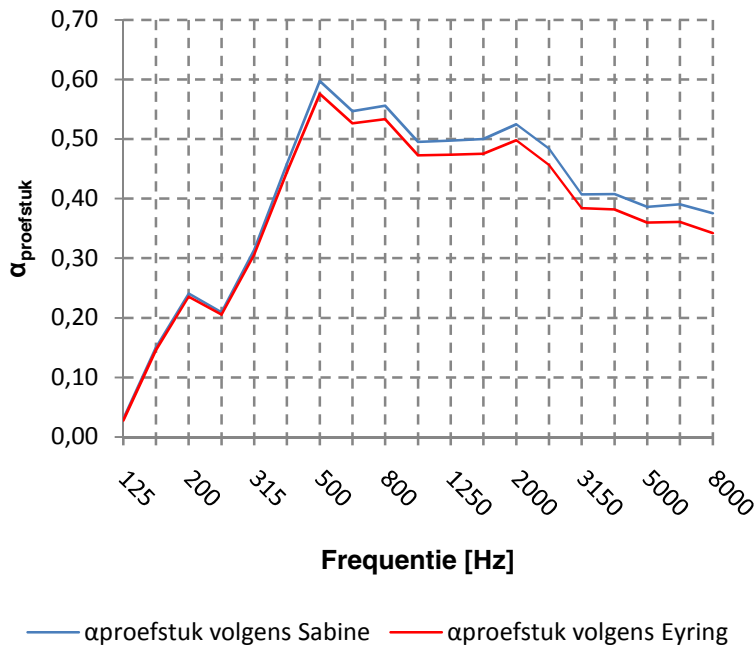
Uit de waarden van de absorptiecoëfficiënten volgen de absorptiespectra van de verschillende proefstukken. De absorptiespectra, bepaald met de formules van Sabine en Eyring, behorend bij de verschillende proefstukken lopen uiteen. Vooral bij de hogere frequenties lopen de waardes uiteen. Deze verschillen zijn terug te voeren op de gebruikte formules voor de nagalmtijd. Bij de formule van Sabine, die veronderstelt dat geluidsgolven zich door een ruimte verplaatsen en achtereenvolgens verschillende oppervlakken tegenkomen waarbij het geluid deels wordt geabsorbeerd en gereflecteerd, is het mogelijk dat er absorptiecoëfficiënten groter dan 1,00 worden gevonden. Bij de formule van Eyring, die veronderstelt dat alle in de ruimte aanwezige oppervlakken tegelijk worden getroffen door de eerste geluidsgolf en dat bij opeenvolgend gelijktijdig treffen het geluid wordt verminderd door de gemiddelde absorptiecoëfficiënt van de ruimte, is het niet mogelijk dat er absorptiecoëfficiënten worden gevonden met een waarde groter dan 1,00 (Beranek, 2006). Voor de simulaties in het vervolg van dit onderzoek is het vereist dat er geen absorptiecoëfficiënten worden gebruikt die een waarde groter dan 1,00 hebben waardoor er is besloten de absorptiecoëfficiënten en –spectra te gebruiken die zijn gevonden volgens de formule van Eyring.



Afb. 3.2.4a: Absorptiespectrum van proefstuk B.01 – Poreus beton.



Afb. 3.2.4b: Absorptiespectrum van proefstuk B.03 – Poreus beton, gestraald.



Afb. 3.2.4c: Absorptiespectrum van proefstuk C.01 – Geperforeerd beton.

In de meetresultaten, zoals die tot hier zijn gepresenteerd, is nog niet de meetonzekerheid meegenomen. De totale meetonzekerheid van de absorptiecoëfficiënten wordt beïnvloed door twee effecten: de onzekerheid die zit in de gemeten nagalmtijd en de invloeden van de complete meetopstelling met inbegrip van de nagalmkamer en de plaatsing van het proefstuk (Nederlands Normalisatie-instituut, 2003). Om deze meetonzekerheid mee te nemen in de verwerking van de meetresultaten is een standaarddeviatie van de nagalmtijd op T_{20} [s] te berekenen (Nederlands Normalisatie-instituut, 2003):

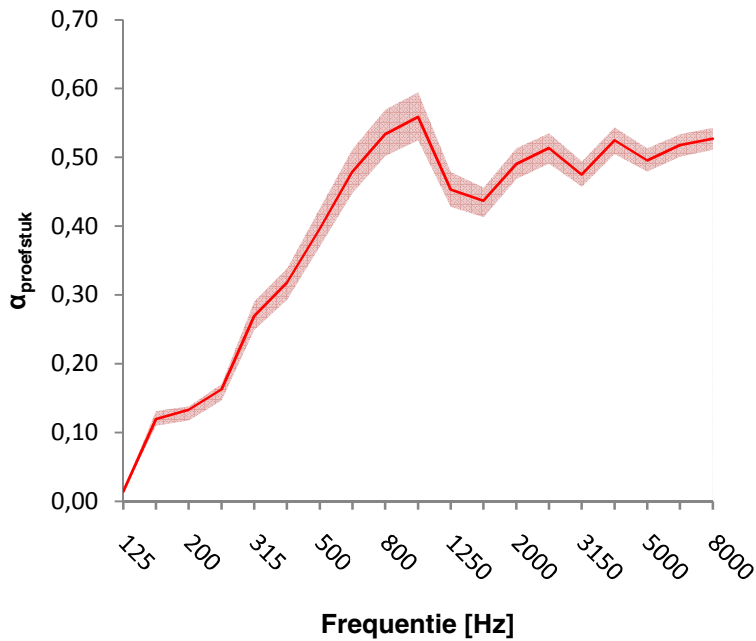
$$\varepsilon_{20}(T) = T \cdot \sqrt{\frac{2,42 + 3,59/N}{f \cdot T}}$$

T : gemeten nagalmtijd in s;

f : middenfrequentie van de tertsband in Hz;

N : aantal metingen.

Met deze standaarddeviatie van de nagalmtijd op T_{20} is zowel een ondergrens ($T_{20} - \varepsilon_{20}$) als bovengrens ($T_{20} + \varepsilon_{20}$) te bepalen van de gemeten nagalmtijd. Door vervolgens deze onder- en bovengrens te gebruiken in de berekening van de absorptie-coëfficiënten volgens Eyring is de standaarddeviatie $\Delta\alpha$ van de absorptiecoëfficiënten te bepalen.



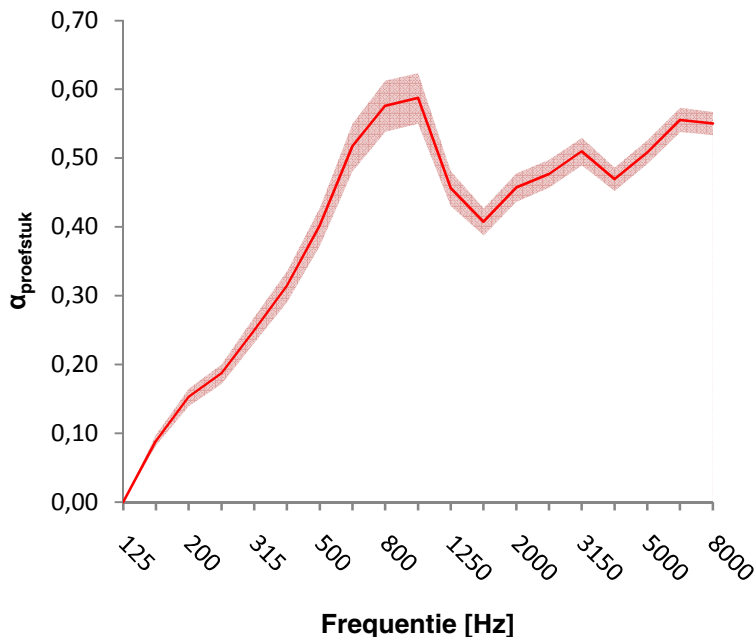
Afb. 3.2.4d: Absorptiespectrum van proefstuk B.01 – Poreus beton volgens Eyring met de standaarddeviatie.

Het absorptiespectrum van het eerste proefstuk, B.01 – Poreus beton, heeft veel weg van het karakteristieke absorptiespectrum van een poreus materiaal, te zien in afb. 3.1b, en verloopt dus zoals aanvankelijk werd verwacht. De grafiek heeft alleen een grilliger verloop, met name bij de hogere frequenties boven de 1.000 Hz. Zo was het betonmengsel van het poreuze beton niet optimaal, doordat er te weinig beton in de in verhouding te grote mixer werd gemengd, waardoor er klonten zijn ontstaan. Daarnaast zit er in de dikte van de poreuze laag enige variatie doordat deze handmatig werd aangestampt tijdens het productieproces en is het onduidelijk in hoeverre het gewone beton van de draagkrachtige laag in de poriën aan de achterzijde is gelopen. De waarde van de absorptiecoëfficiënt loopt op van 0,01 bij 125 Hz tot 0,56 bij 1.000 Hz, waarna deze varieert tussen de 0,44 en 0,53 tot aan 8.000 Hz. Het poreuze beton absorbeert dus vooral goed geluid bij hoge frequenties.



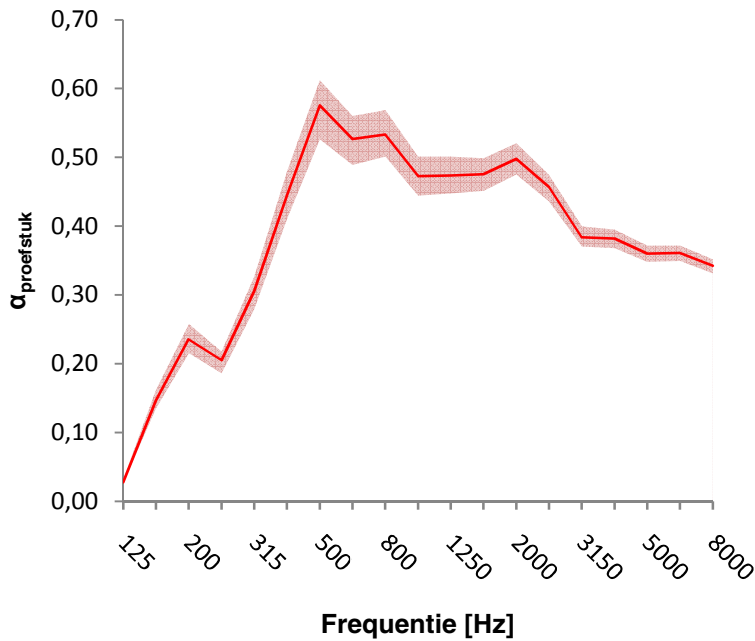
Afb. 3.2.4e: Klonten die zijn ontstaan, hier zichtbaar aan het oppervlak van het proefstuk.

Het grillige verloop kan ook het resultaat zijn van de opslinging van staande golven die optreedt. De eerste en tevens grootste inzinking na de top ligt rond de 1.700 Hz, dat komt overeen met een halve golflengte van tien centimeter, de dikte van de poreuze betonlaag. De daaropvolgende inzinkingen rond de 3.400 Hz en 5.100 Hz komen eveneens overeen met respectievelijk een hele en anderhalve golflengte van tien centimeter, waardoor dit de meest voor de hand liggende conclusie is voor het grillige verloop van het absorptiespectrum.



Afb. 3.2.4f: Absorptiespectrum van proefstuk B.03 – Poreus beton, gestraald volgens Eyring met de standaarddeviatie.

Bij het tweede proefstuk, B.03 – Poreus beton, gestraald, is een absorptiespectrum gevonden dat weinig verschilt van het absorptiespectrum van het eerste proefstuk. De waarde van de absorptiecoëfficiënt loopt op van 0,00 bij 125 Hz tot 0,59 bij 1.000 Hz, waarna deze varieert tussen de 0,41 en 0,56 tot aan 8.000 Hz. De maximale absorptiecoëfficiënt van het proefstuk, 0,59 bij 1.000 Hz, ligt iets hoger dan het maximum van het eerste proefstuk, 0,56 bij 1.000 Hz. Dit kan het resultaat zijn van de opengebroken kleikorrels aan het oppervlak als gevolg van het stralingsproces, maar de waarde is niet significant groter en kan ook voortkomen uit meetonzekerheden. Als de toename van de absorptiecoëfficiënt het gevolg is van de opengebroken kleikorrels dan heeft dit proefstuk wel duidelijk gemaakt dat bij de vervaardiging van de proefstukken de juiste keuze is gemaakt om te werken met kleine kleikorrels waartussen poriën ontstaan in plaats van grotere kleikorrels die worden opengebroken om gebruik te maken van de poriën in de kleikorrels.



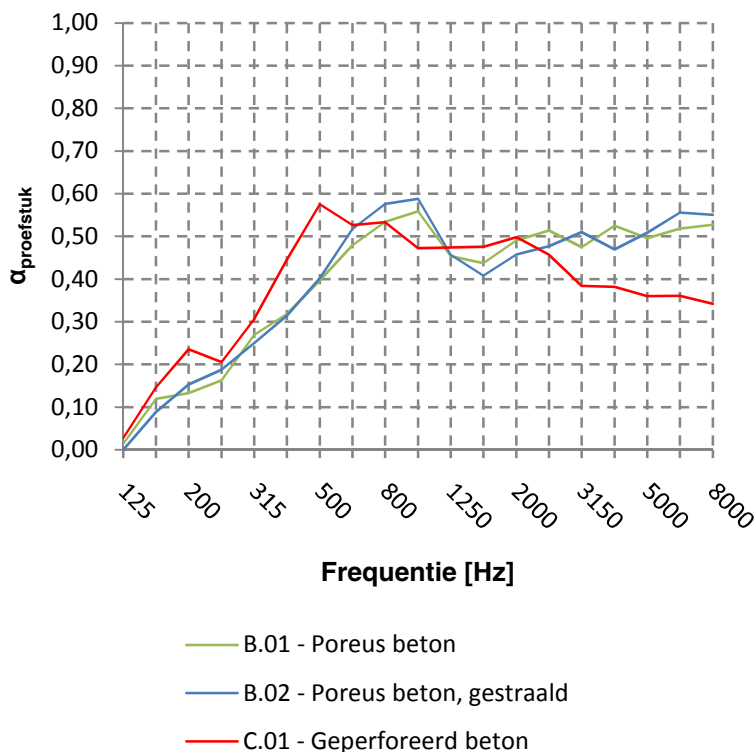
Afb. 3.2.4g: Absorptiespectrum van proefstuk C.01 – Geperforeerd beton volgens Eyring met de standaarddeviatie.

Het absorptiespectrum van het derde proefstuk, C.01 – Geperforeerd beton, wijkt af van de eerdere absorptiespectra, in dit spectrum is duidelijk een piek te zien. De absorptiecoëfficiënt loopt op van 0,03 bij 125 Hz tot 0,58 bij 500 Hz. In tegenstelling tot de proefstukken met de poreuze materialen ligt het maximum bij het geperforeerde beton in combinatie met poreus beton bij 500 Hz. Dit komt overeen met het verwachtingspatroon, er is namelijk getracht om het proefstuk zo te ontwerpen dat de resonantiefrequentie op 500 Hz ligt. De waarde van de absorptiecoëfficiënt bij deze frequentie – 0,58 – is met 45 procent toegenomen ten opzichte van de waarden die werden gerealiseerd bij de proefstukken met enkel poreus beton, in beide gevallen was deze waarde 0,40. Dit resultaat kan worden toegekend aan de werking van het geperforeerde betonnen paneel als Helmholtzresonator.

Het absorptiespectrum loopt na de piek bij 500 Hz af tot 0,34 bij 8.000 Hz. Bij deze hoge frequenties absorbeert het proefstuk nog geluid dankzij het poreuze beton achter de geperforeerde gladde betonnen plaat, alleen in mindere mate doordat het poreuze beton maar voor 25 procent aan het oppervlak ligt, waardoor er minder toetreding van geluidsgolven kan plaatsvinden.

Bij dit derde proefstuk is bij de lage frequenties een kleine piek te zien rond de 200 Hz. Deze piek zou het gevolg kunnen zijn van paneelabsorptie, maar door de hoge stijfheid van de poreuze betonnen tussenlaag is dit onwaarschijnlijk. De kleine piek van 0,24 bij de 200 Hz is echter minder interessant als er wordt gekeken naar het algehele verloop van het absorptiespectrum. Dit proefstuk absorbeert namelijk vooral geluid in het frequentiebereik van 500 tot 2.000 Hz, wat deze methode van geluidsabsorptie interessant maakt wanneer het om een ruimte gaat waarin spraak een belangrijke functie heeft.

In de onderstaande afbeelding zijn duidelijk de verschillen te zien tussen de absorptiespectra van de verschillende proefstukken:



Afb. 3.2.4h: Absorptiespectra van de verschillende proefstukken volgens Eyring.

Met de absorptiespectra van de verschillende proefstukken naast elkaar is goed te zien dat ondanks dat het proefstuk met het geperforeerde beton minder poreus beton aan het oppervlak heeft er pas bij de frequentie van 3.150 Hz grote verschillen ontstaan in de absorptiecoëfficiënten met de andere twee proefstukken. Daarnaast is duidelijk te zien dat de piek bij 500 Hz in het spectrum van proefstuk C.01 niet hoger is dan de maximale waarde van het proefstuk met het gestraalde poreuze beton bij 1.000 Hz, maar er is wel gebleken dat het mogelijk is om dit maximum in ieder geval te verschuiven zodat bij de lage frequenties en middenfrequenties meer geluid wordt geabsorbeerd.

Van de proefstukken waarvoor de absorptiespectra zijn bepaald is om het materiaal te vergelijken ook de ééngetalsaanduiding, volgens EN-ISO 11654, te gebruiken om de absorptieklasse vast te stellen. Hiervoor wordt de gemiddeld gewogen absorptiecoëfficiënt α_w berekend welke wordt vergeleken met een referentiecurve. Voor zowel de proefstukken met poreus beton als het proefstuk met het geperforeerde paneel is de ééngetalsaanduiding bepaald op $\alpha_w = 0,50$. Dit komt overeen met geluidsabsorptie klasse D, waarbij A de hoogste klasse is en E de laagste en materialen met een gemiddeld gewogen absorptiecoëfficiënt lager dan 0,15 worden niet geclassificeerd (Nederlands Normalisatie-instituut, 1997).

4.0 Prototype

De meetresultaten hebben aangetoond dat de toepassing van beton potentie heeft wanneer het gaat om het absorberen van geluid, beton is op dit vlak aanzienlijk te verbeteren door beton met een meer poreuze structuur te creëren. Praktisch gezien is het geluidsabsorberend maken van beton minder interessant aangezien de structuur van dergelijk beton bijvoorbeeld verminderde draagkrachtige capaciteiten heeft. Om het materiaal verder te ontwikkelen zijn daarom ontwerpen gemaakt van prototypen waarin poreus beton is verwerkt. Uitgangspunt is dat deze prototypen als bouwkundige elementen kunnen worden toegepast in de eerder behandelde ruimten van de te ontwerpen nieuwe Bouwkunde faculteit, het auditorium en de werkplek.



Afb. 4.0a: Het aanstampen van het poreuze betonmengsel in de mal van proefstukken B.01 en B.03.

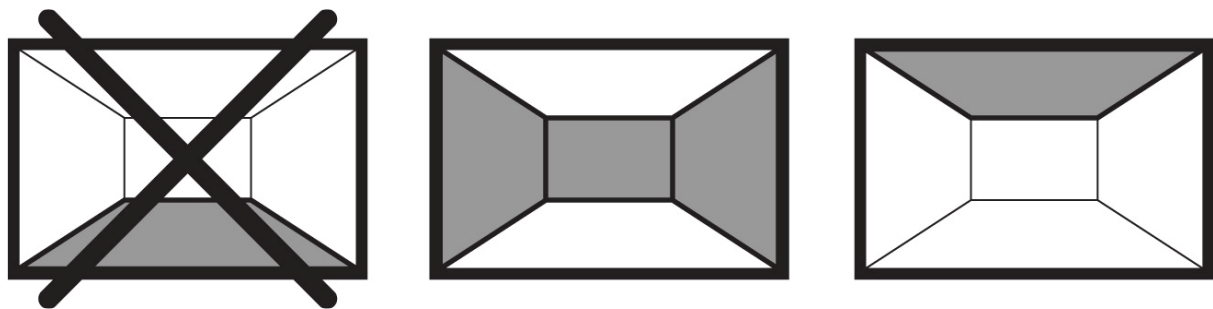
Bij het ontwerpen van een prototype in beton moet eerst de afweging worden gemaakt of het een in het werk gestort of geprefabriceerd element moet worden. De productie van de proefstukken heeft duidelijk gemaakt dat poreus beton bij voorkeur wordt toegepast in geprefabriceerde elementen. Het belangrijkste argument hiervoor is dat tijdens het storten het materiaal moet worden verdicht door het aan te drukken in de mal. Wanneer dit zogeheten aanstampen met de hand wordt gedaan is het een arbeidsintensieve klus waarbij het lastig is om het materiaal gelijkmatig in de mal aan te stampen. Dit kan in de fabriek beter worden gecontroleerd dan op de bouwplaats, tevens biedt dit meer mogelijkheden om het aanstampen machinaal te laten verlopen waardoor er nog meer controle over is. Daarnaast is het poreuze beton niet geschikt als draagkrachtig materiaal en moet er in meerdere fasen worden gestort met verschillende typen beton om een element te verkrijgen dat kan worden

toegepast in een gebouw. In de fabriek is de afstand tot de betonmixer kleiner waardoor dit proces sneller kan verlopen.

Dat het poreuze beton niet geschikt is als draagkrachtig materiaal heeft een meting van de karakteristieke kubusdruksterkte van het poreuze beton, zoals gebruikt in de proefstukken, uitgewezen. Het kan een drukkracht aan van circa 4 N/mm² en bezwijkt met amper vervorming. De gemeten kubusdruksterkte van 4 N/mm² komt overeen met de bevindingen van Liapor (Liapor, 2006). Het poreuze beton kan dus een veel lagere drukkracht aan dan beton dat gebruikelijk wordt toegepast bij in het werk gestorte projecten in de bouw, dat een karakteristieke kubusdruksterkte heeft van 25 N/mm², en beton dat wordt gebruikt voor geprefabriceerde onderdelen dat zelfs nog meer drukkracht kan opnemen (Gerrits, 2006). Daarentegen heeft het poreus beton door zijn open structuur een veel lagere soortelijke massa, het poreuze beton gebruikt voor de proefstukken heeft een soortelijke massa van 800 kg/m³, dan gewoon beton dat een soortelijke massa heeft van 2.000 tot 2.400 kg/m³, en is daarom geschikt om als extra laag aan een sterker betonelement toe te voegen zonder dat deze buitenproportioneel wordt verzwaard.

Door de structuur van het poreuze beton, waarbij de kleikorrels zijn omhuld door een laag cement die zorgt voor de onderlinge samenhang, is het zeer broos. Dit verklaart waarom het materiaal bezwijkt met amper vervorming, het heeft een lage elasticiteitsmodulus. Deze structuur heeft ook het nadeel dat elementen gemaakt uit poreus beton makkelijk kunnen afbrokkelen, zeker nabij randen en hoeken. Hier dient in het ontwerp van het prototype rekening mee te worden gehouden aangezien er tijdens het gebruik van de elementen, maar ook zeker gedurende het transport en de plaatsing ervan, veel schade aangericht kan worden. De structuur sluit ook het gebruik als vloerelement uit, ondanks dat het mogelijk was om op de proefstukken te staan zonder dat deze beschadigden. Het is echter onpraktisch bij het onderhoud ervan en meubilair kan door de hogere puntlasten die het genereert op de vloer deze eerder beschadigen dan een persoon die erop gaat staan.

Door de bezwaren om poreus beton toe te passen als vloerelement blijven er nog twee typen oppervlakken over in een ruimte waar de akoestiek moet worden verbeterd door een hogere geluidsabsorptie te realiseren: de wand en het plafond.

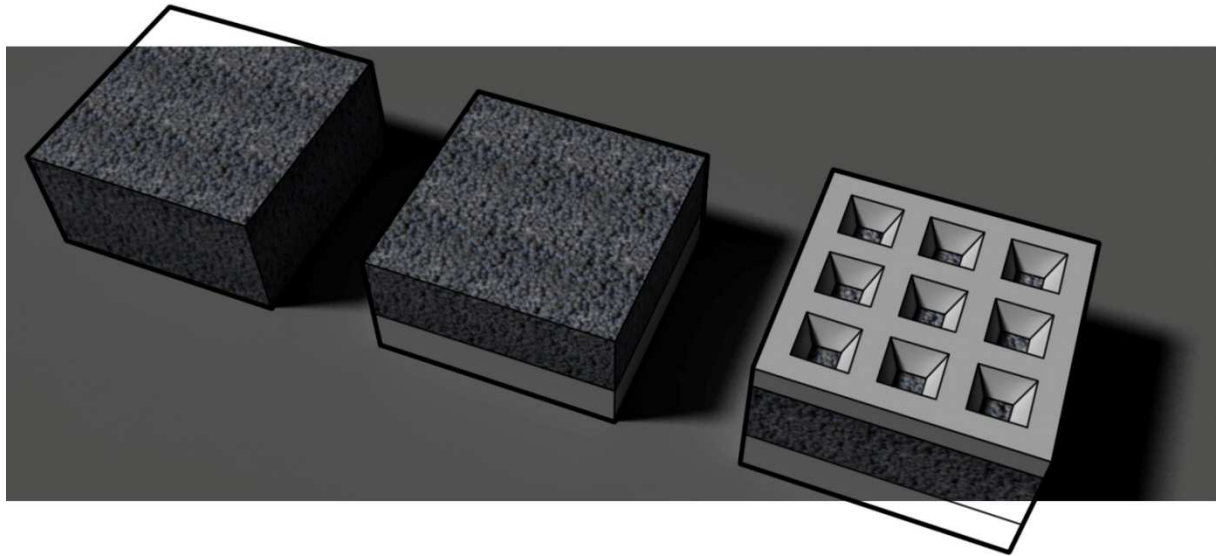


Afb. 4.0b: Poreus beton is niet geschikt voor een toepassing als vloermateriaal, maar wel geschikt voor de wanden en het plafond.

4.0.1 Wandelement

Voor het eerste prototype zal er worden gekeken naar de toepassing als wandelement in het auditorium. Er is gekozen voor het auditorium omdat de wanden hier een aanzienlijk aandeel hebben in het totale oppervlak van de interne oppervlakken, bij de werkplek vormen de wanden een kleiner deel van het totale oppervlak. Voor het ontwikkelen van een prototype is onderscheid te maken tussen drie verschillende samenstellingen van poreus beton en standaard beton: een compleet poreus betonnen element, een element waarbij poreus beton

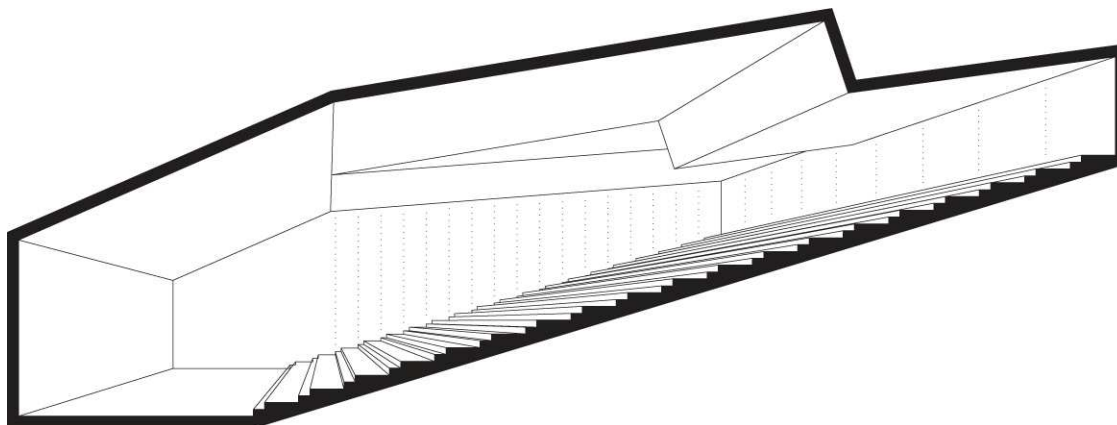
wordt ondersteund door een draagkrachtige laag van standaard beton en een sandwichelement waar poreus beton tussen twee lagen van geperforeerd en massief beton zit geklemd.



Afb. 4.0.1a: Compleet poreus beton, poreus beton met een draagkrachtige laag van standaard beton en een sandwichelement met een geperforeerde en massieve betonnen laag met daartussen poreus beton.

Bij een element van compleet poreus beton is het akoestisch oppervlak, het oppervlak waar geluid het materiaal binnen kan dringen, groot. Daar staat tegenover dat het bijna onmogelijk is om een bouwelement hiervan te maken omdat het een lage draagkracht heeft en broos is. Tevens is de geluidsisolatie laag doordat geluid dat niet wordt geabsorbeerd er gewoon doorheen gaat. Daarnaast is het esthetisch niet de fraaiste oplossing. Door de poreuze laag te verstevigen met een draagkrachtige laag van standaard beton wordt het mogelijk een element te maken dat draagkrachtige capaciteiten heeft en dus kan worden toegepast in de bouw. Het akoestisch oppervlak blijft groot, maar ook dit element heeft een broos oppervlak en is esthetisch niet fraai. De meest voor de hand liggende samenstelling voor een wandelement is het sandwichelement. Hier wordt de draagkracht van het beton gecombineerd met de akoestische werking van het poreuze beton, welke wordt beschermd door een geperforeerde plaat van beton die het oppervlak meer rigide maakt en tevens esthetisch veel meer mogelijkheden biedt. Daarnaast is gebleken dat het mogelijk is om met dit element de resonantiefrequentie te bepalen waardoor het element toegespitst kan worden op de functie van de ruimte.

De wanden van de ruimte, in dit geval het auditorium, kunnen waar gewenst worden uitgevoerd met de te ontwikkelen elementen. De wanden die geschikt zijn voor geluidsabsorptie zijn de achterwand en tweederde van de zijwanden, vanaf de achterwand gemeten. De wandelementen dienen draagkracht te combineren met geluidsabsorptie en een fraai esthetisch oppervlak dat aansluit bij de functie van de ruimte. De afmetingen van verschillende wandelementen zullen variëren doordat de hoogte van de geschikte wanden voor geluidsabsorptie ongelijk lopen. Voor de breedte is wel een vaste maat aan te houden van 1.200 mm, dit is de maat van de aantrede van de stapsgewijze vloer.



Afb. 4.0.1b: De stippellijnen geven de scheiding tussen de panelen aan op de zij- en achterwand van het auditorium.

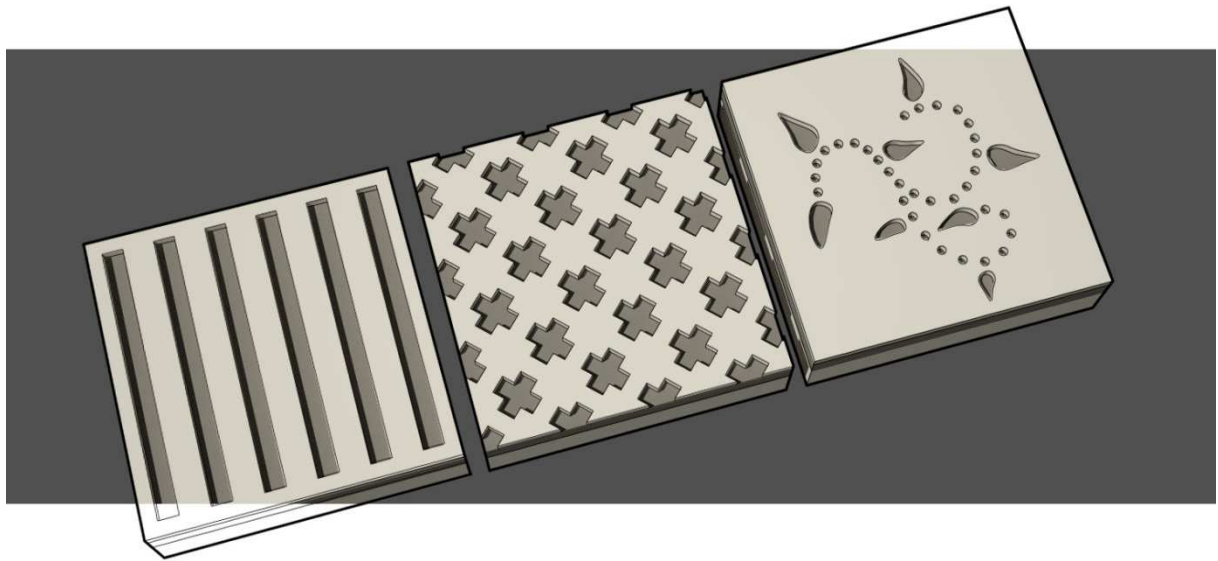
Het wandelement is onder te verdelen in drie lagen: de draagkrachtige laag, de akoestische laag en de esthetische laag. Elke laag kan worden afgestemd op de eisen die eraan worden gesteld en samen vormen ze één geheel. De draagkrachtige laag is de dikste laag en moet zoals de naam al zegt zorgen voor de krachtsafdracht door het element. Bij het dimensioneren van deze laag zal rekening moeten worden gehouden met de doorbuiging in horizontale positie, ondanks dat het element verticaal geplaatst wordt. Tijdens de productie wordt het element namelijk horizontaal gestort en moet worden getransporteerd op een dergelijke manier. In deze situaties mag het gehele element niet teveel doorbuigen omdat de broze akoestische laag snel kan beschadigen. Om voldoende trekkracht te realiseren zal er wapeningsstaal nodig zijn ondanks dat dit in het gebruik van het element, waarbij vooral drukkrachten door het element worden afgevoerd naar de fundering, niet nodig zal zijn. Een dikte van 200 mm voor deze laag is voor het ontwerp van dit prototype voldoende om te zorgen dat de elementen die een breedte hebben van 1.200 mm en een hoogte die varieert van 3.000 tot 7.500 mm niet te ver doorbuigen wanneer deze horizontaal worden verplaatst. Doordat het element horizontaal wordt gestort is de achterkant de stortzijde, deze is hierdoor minder glad dan de voorzijde met de geperforeerde plaat. Wanneer het element wordt gebruikt om ruimtes te scheiden zal deze zijde in het werk verdere afwerking behoeven.

De akoestische laag bestaat uit het poreuze beton en heeft een dikte van 100 mm. De tests hebben uitgewezen dat een laag van 100 mm poreus beton in combinatie met het geperforeerde paneel een geluidsabsorptie van vijftig tot zestig procent kan realiseren voor het frequentiebereik van 500 tot 2.000 Hz. Door het product verder te ontwikkelen is het waarschijnlijk mogelijk om deze laag te reduceren, een vergelijkbaar product heeft namelijk maar een dikte van 50 mm en levert tevens meer geluidsabsorptie (Liaver, 2009). Door de open structuur van deze laag dient die goed beschermd te worden tegen beschadigingen. De geperforeerde plaat die ervoor zit zorgt hier grotendeels voor, daarnaast wordt het poreuze beton aan de zijkanten afgeschermd door schoon beton dat eerder wordt gestort die meer bescherming moet bieden tegen beschadigingen. Deze rand kan tevens de hoogte aangeven waarop het poreuze beton moet worden aangestampt in de mal.

De derde laag is de geperforeerde plaat, ofwel de esthetische laag. Deze laag dient ter bescherming van het poreuze beton, maar is nog belangrijker als de afwerking van het element. Maar ook de akoestische eigenschappen ervan moeten niet worden vergeten, zo is uit de meting gebleken dat het mogelijk is om met deze laag een zekere resonantiefrequentie te realiseren waarbij de absorptiecoëfficiënten rond deze frequentie toenemen. Van belang is ook de samenhang in deze laag, aangezien het hier maar om een dunne betonplaat gaat. Zo waren in proefstuk C.01 al scheuren zichtbaar als gevolg van de druk die ontstond door het

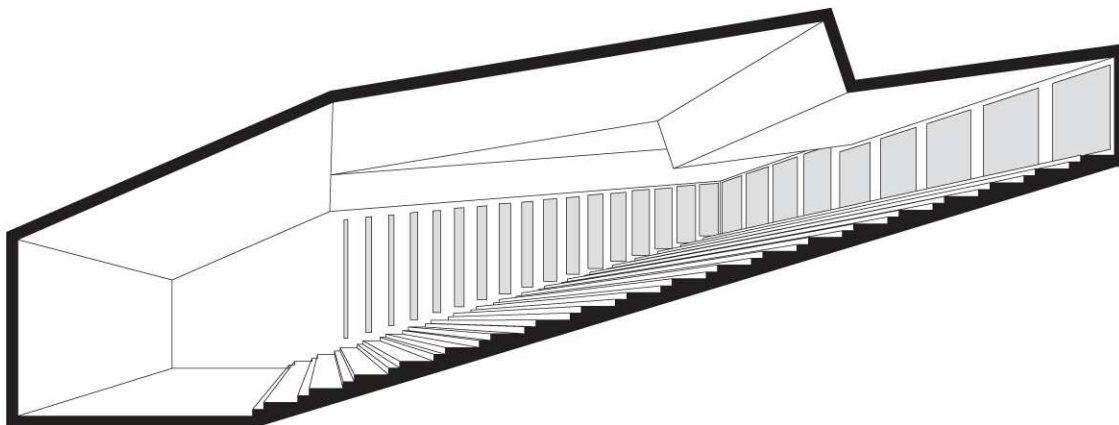
aanstampen van het poreuze beton dat er bovenop werd gestort. De drie centimeter dunne geperforeerde plaat van het proefstuk was misschien iets te dun, waardoor voor dit prototype is gekozen om een geperforeerde laag van vijf centimeter te gebruiken. Dit heeft wel gevolgen voor de resonantiefrequentie die nu bij de 380 Hz ligt, maar dit valt nog wel in het frequentiebereik van menselijke spraak en hierdoor kan zelfs het absorptiespectrum van het element gunstiger worden.

Voor het patroon van de perforaties zijn oneindig veel mogelijkheden te bedenken, onder de voorwaarde dat de perforatiegraad 25% blijft. De verticale stroken die werden gebruikt bij het proefstuk bevielen alleen minder. Voor het produceren van de bekisting was dit praktisch gezien de beste oplossing, maar het patroon miste de samenhang dat een rooster bijvoorbeeld heeft, en is waarschijnlijk debet aan de scheuren die zijn ontstaan in deze laag in het proefstuk.



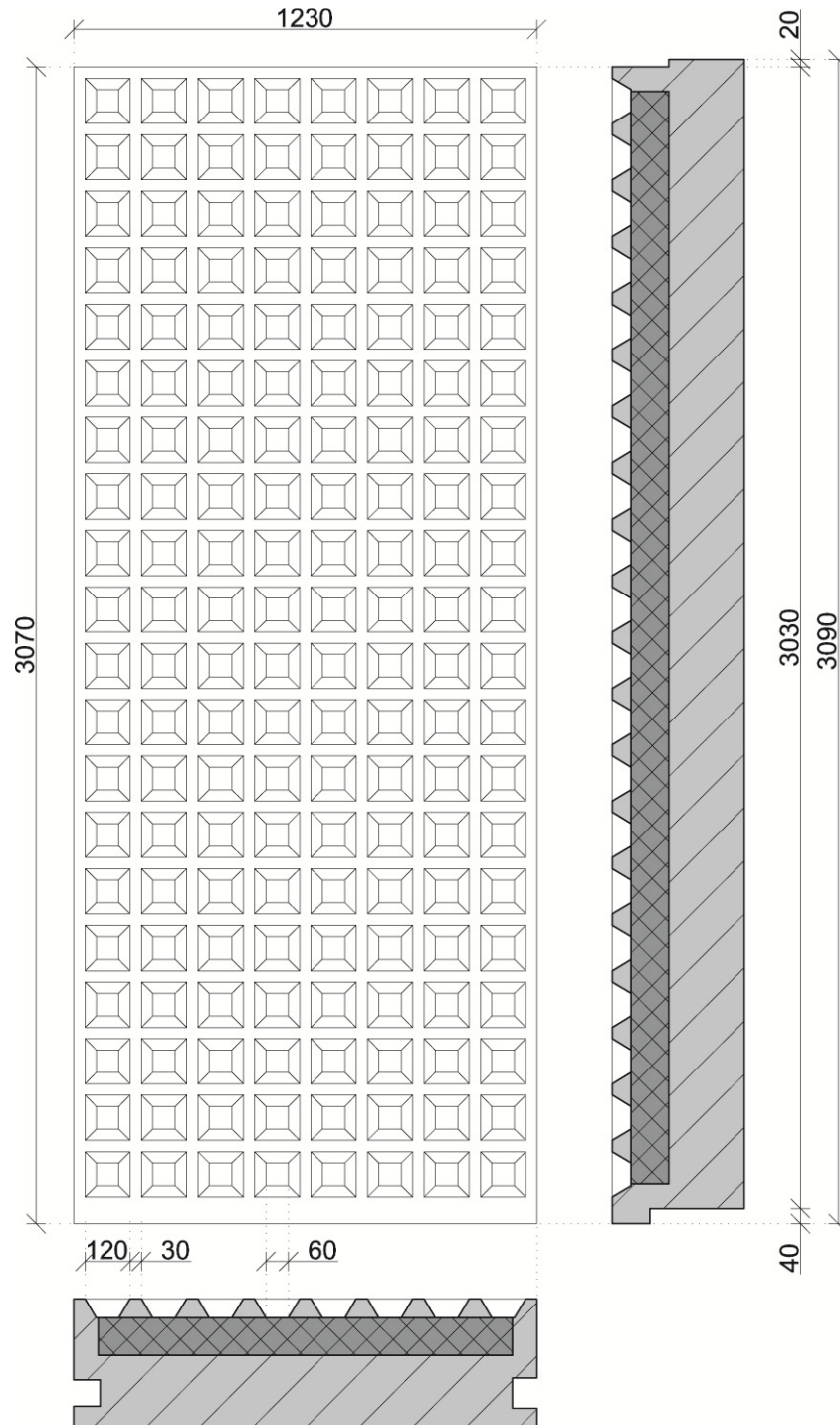
Afb. 4.0.1c: Verschillende oplossingen voor de geperforeerde plaat.

Doordat de panelen in de zijwand verschillende afmetingen hebben, wat nadelig is voor het stortproces aangezien de bekistingsmal telkens moet worden aangepast, zijn de mogelijkheden die de ontwerper van de wandelementen heeft nog groter, het is hierdoor namelijk mogelijk om te variëren in de vormgeving van de elementen en dus ook de ruimte. Je kan hierbij denken aan een patroon dat over meerdere elementen loopt of een patroon dat naar de achterwand toe steeds meer toeneemt.



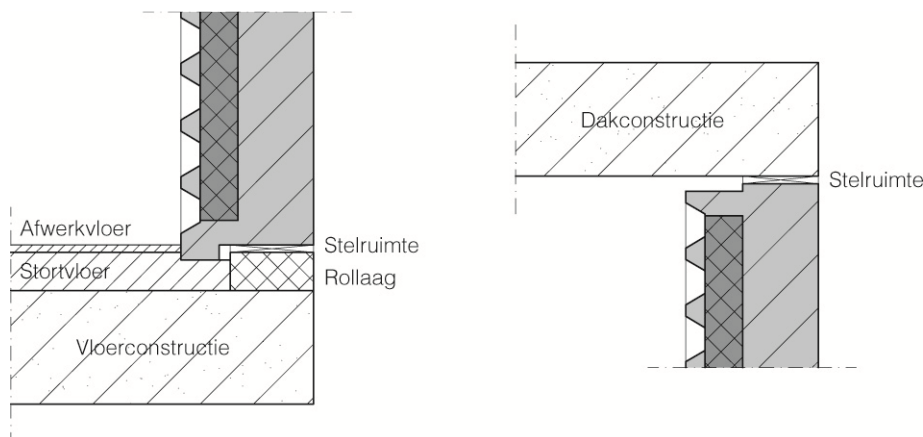
Afb. 4.0.1d: Verschillende afmetingen van de panelen geeft een grote ontwerpvrijheid in de aankleding van de ruimte.

Uiteindelijk is er gekozen voor een simpel patroon van vierkanten waarbij duidelijk is dat de perforatiegraad 25% is, maar zoals eerder is gezegd zijn de mogelijkheden voor de vormgeving hiervan eindeloos.



Afb. 4.0.1e: Het aanzicht, horizontale doorsnede en verticale doorsnede van het prototype van een wandelement, schaal 1:20.

In de doorsneden is goed de opbouw van het element te zien uit verschillende lagen. In de horizontale doorsnede zie we sparings in de zijkant van het wandelement waar ruimte is voor een veerconstructie voor de aansluiting met andere elementen. De naden dienen hierbij te worden dicht gekit om geluidsoverdracht van binnen de ruimte en vice versa te voorkomen. In de verticale doorsnede is bovenaan het element plaats voor een oplegging te zien. Het middenpunt waar de bovenliggende constructie wordt opgelegd ligt hierdoor in het hart van de draagkrachtige laag, waardoor het poreuze beton en de geperforeerde laag worden ontzien. Tevens ontstaat in het aansluitdetail met de dakconstructie hierdoor een naad langs de bovenrand van het element waardoor deze visueel wordt gescheiden van de bovenliggende constructie en beschadiging bij doorbuiging van de dakconstructie wordt voorkomen. Onderaan de verticale doorsnede is een rand te zien die bij de aansluiting met de vloer tevens werkt als plint waardoor de afwerkvloer netjes kan aansluiten op het wandelement



Afb. 4.0.1f: Schematische aansluitdetails van het prototype, schaal 1:20.

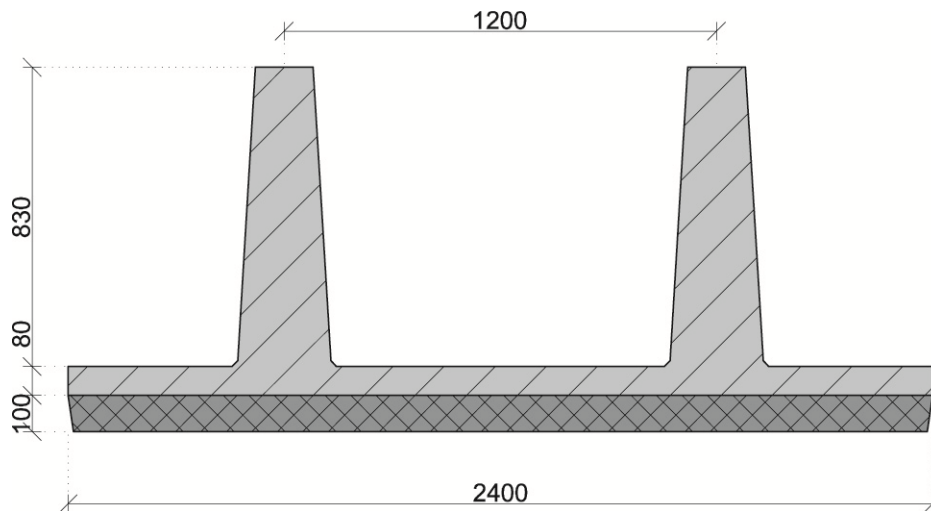
4.0.2 Plafondelement

Het tweede prototype betreft een plafondelement. Hier kan net als bij het wandelement de afweging worden gemaakt tussen een compleet poreus betonnen element, een element met een combinatie van poreus beton en standaard beton of een sandwichelement. Een element bestaande uit enkel poreus beton valt hier af, omdat door de draagkrachtige capaciteiten die het materiaal heeft daar enkel plafondtegels van gemaakt kunnen worden. Hierbij is de akoestische afwerking niet geïntegreerd met de dak- of vloerconstructie die erboven ligt. Omdat het hier een plafond betreft zijn de esthetische eisen die eraan worden gesteld lager, men kijkt immers minder naar het plafond dan de wanden. Er is daarom gekozen voor de combinatie van poreus beton en standaard beton. De geperforeerde laag van het sandwichelement is namelijk overbodig aangezien de esthetische eisen lager zijn en de poreuze betonlaag minder bescherming behoeft, omdat deze buiten het bereik van de gebruikers van de ruimte ligt.

Bij het ontwerpen van dit prototype is gekeken naar zowel het auditorium als de werkplek, twee ruimtes met verschillende eisen wat heeft geleid tot twee verschillende ontwerpen voor een prototype. In het auditorium is een element vereist die de gehele 24 meter brede ruimte kan overspannen en tevens de dak- of vloerconstructie kan vormen voor de laag erboven. Er is hier gekozen voor een omgekeerde TT-plaat, met poreus beton tegen de onderzijde. Bij de TT-plaat zijn de balken en het vloerdek geïntegreerd in één element. Door deze om te draaien wordt niet een vloer, maar een plafond gevormd door de plaat. De plaat heeft een breedte van 2.400 mm en een dikte van 80 mm. De poreuze laag is 100 mm dik en is aan de

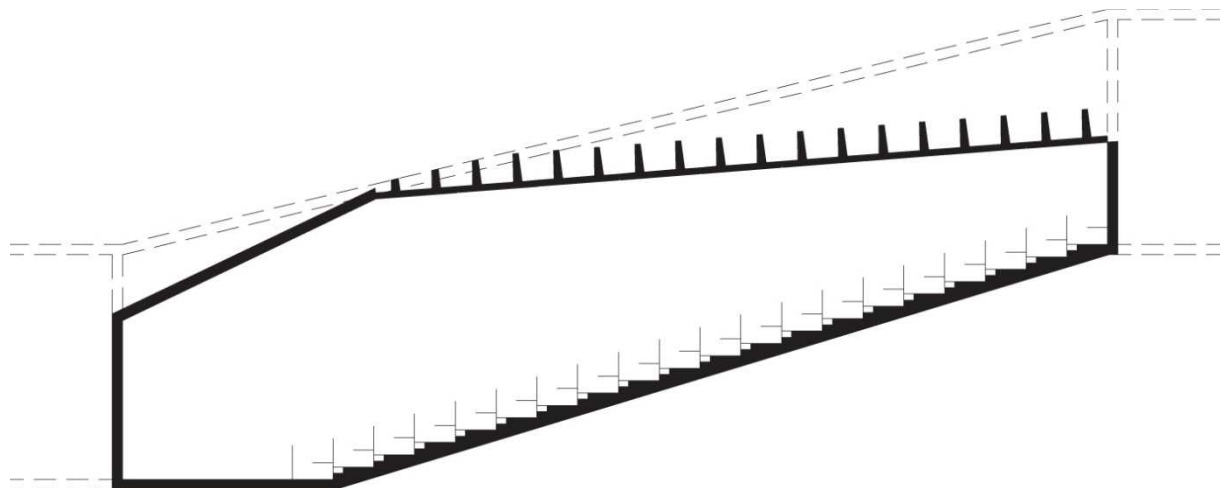
zijanten afgeschuind om schade bij plaatsing en transport te voorkomen. De balken hebben een hoogte van 830 mm en liggen hart op hart 1.200 mm uit elkaar.

Het storten van de TT-plaat in combinatie met het poreuze beton is nog een lastig punt. Zo dient allereerst het poreuze beton in de mal gestort en aangestampt te worden en vervolgens moet de TT-plaat ondersteboven gestort worden. Dit is voor het storten lastig, aangezien het beton lastig in de 80 mm dunne plaat zal lopen. Een alternatief is het storten in losse delen die later worden samengevoegd, zo kan het poreuze beton eerst worden aangestampt waarna de plaat eroverheen wordt gestort met uitstekende stekken. Na een korte droogperiode kunnen vervolgens de balken worden gestort.



Afb. 4.0.2a: Het prototype van het plafondelement in het auditorium, schaal 1:20.

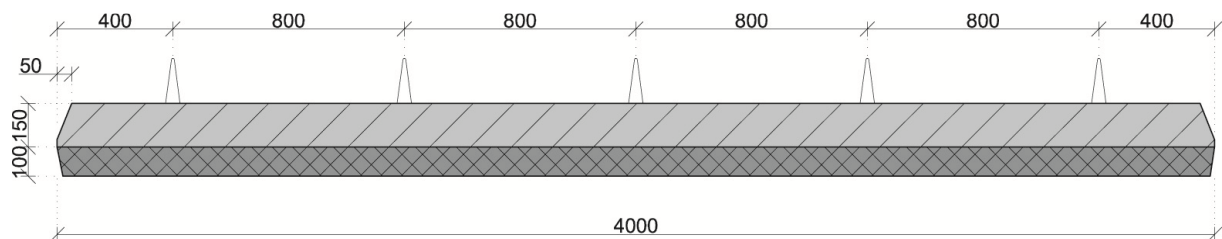
Dit element wordt in het ontwerp van het auditorium gebruikt voor het achterste gedeelte van het plafond. Binnen het architectonische concept van het auditorium van de nieuwe Bouwkunde faculteit is plaats voor hoge balken boven het auditorium, de loze ruimte boven het auditorium wordt hierdoor benut.



Afb. 4.0.2b: De doorsnede van het auditorium met de TT-platen waarvoor ruimte is binnen het concept, schaal 1:200.

In de werkplek moet het prototype aan andere eisen voldoen. De overspanning is bijvoorbeeld veel kleiner – maximaal acht meter – en installaties moeten kunnen worden

geïntegreerd in de constructie, aangezien het plafond tevens de vloer vormt voor de verdieping erboven. Er is hierbij goed gekeken naar het enige praktijkvoorbeeld van een dergelijke toepassing, namelijk het Radix gebouw te Wageningen. In dit gebouw zijn breedplaatvloeren gebruikt, opgelegd op kolommen (Henket, 2009). Het grote voordeel van de breedplaatvloeren is de mogelijkheid om installaties tijdens de bouw te verwerken in de vloerconstructie, iets wat bij bijvoorbeeld kanaalplaten een stuk lastiger gaat. Tevens kan er aan het poreuze beton niks worden opgehangen, doordat het dan te gemakkelijk zou afbreken. De draagkrachtige laag kan hiervoor de oplossing bieden. Deze laag moet wel dikker worden uitgevoerd dan bij een standaard breedplaatvloer omdat er nu een 100 mm dikke poreuze betonlaag onder zit, waarbij de zijanten zijn afgeschuind. Om te voorkomen dat het element niet te dik wordt is de overspanning beperkt tot vier meter, waardoor er in de ruimte kolommen nodig zijn om de elementen op te plaatsen. Hiervoor zullen in de hoeken van het element oplegnokken nodig zijn.



Afb. 4.0.2c: Het prototype van het plafondelement van de werkplek, schaal 1:20.

In tegenstelling tot het plafondelement van het auditorium is dit prototype minder specifiek voor één ruimte ontworpen en daardoor eerder toepasbaar in andere gebouwen. De gesuggereerde ontwerpen voor de verschillende prototypes moeten gezien worden als indicatie van wat er mogelijk is om poreus beton toe te gaan passen in de bouwpraktijk en zullen in geval van toepassing verder moeten worden uitgewerkt. Doordat meerdere functies, in dit geval constructie en akoestiek, in één element worden verwerkt vereist het ontwikkelen ervan een goede afstemming met het gebouwontwerp, vooraf plannen is dus noodzakelijk. Door de bewerkelijkheid van beton is het een ideaal materiaal om beton met een meer poreuze structuur te integreren in één bouwelement.

*Is het mogelijk een volledig betonnen ruimte te creëren met
een voor de betreffende functie goede akoestiek?*

*Is het reëel om akoestische verbeteringen in beton te integreren als
het wordt vergeleken met andere, traditionelere maatregelen?*

5.0 Simulaties

In eerste instantie is er getracht om een miniatuurmodel te maken van het auditorium van de te ontwerpen Bouwkunde faculteit waarmee kon worden getest of de akoestiek in deze ruimte goed was voor de functie ervan. Dit bleek gebruikelijk te gebeuren met een model met de schaal 1:10 en dat de uiterste maat voor dergelijke metingen 1:20 is. Dit zou een model van 1,45 bij 1,18 meter betekenen dat in beton is uitgevoerd. Ook worden in de test hogere frequenties gebruikt zodat de test verschaalt met het model, daardoor is het niet mogelijk om de materialen te gebruiken die zijn gebruikt bij de metingen voor de proefstukken, deze moeten namelijk ook worden geschaald. Al met al bleek een miniatuurmodel van het auditorium niet haalbaar waardoor er is gekozen om twee computermodellen te maken, van het auditorium en de werkplek, in CATT-Acoustic waarbij simulaties zijn gedaan in verschillende situaties.

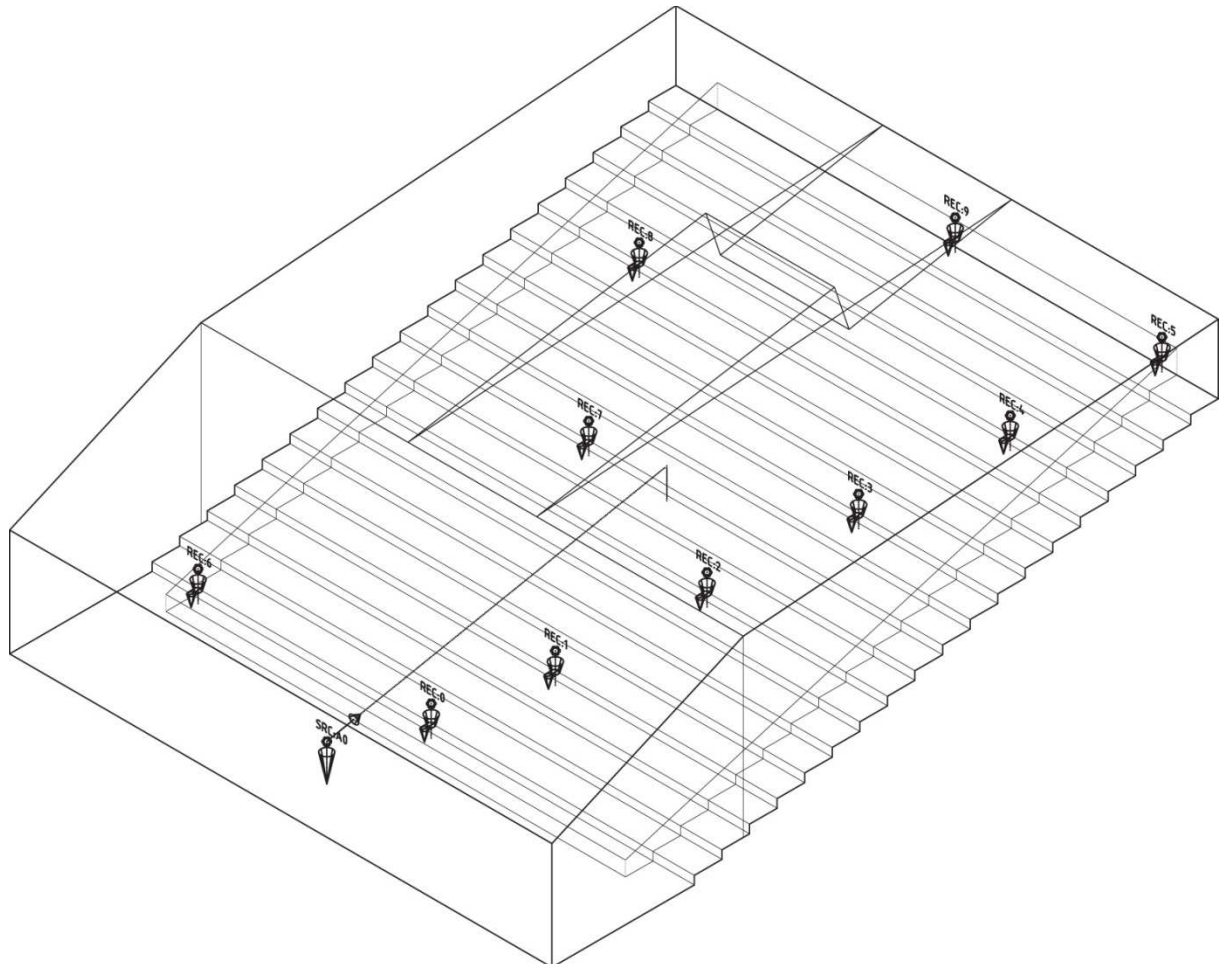
Per model zijn drie simulaties gedaan waarbij de nagalmtijd van de ruimte is berekend evenals de Speech Transmission Index en het geluidsdrukkniveau op verschillende plaatsen in de ruimte. Met deze gegevens is een aanname te maken van de akoestiek in de ruimte. In de eerste simulatie wordt de ruimte nagebootst zonder aanpassingen aan het materiaal na, in de tweede simulatie is de ruimte waar mogelijk aangepast met akoestisch beton – de absorptiecoëfficiënten verkregen bij de metingen van de proefstukken zijn hier ingevoerd. Daarna is er nog een simulatie gedaan in meerdere stappen waarin extra maatregelen zijn genomen om de akoestiek in de ruimte, de nagalmtijd, STI en het geluidsdrukkniveau, op het gewenste niveau te krijgen.

5.0.1 Auditorium

Het auditorium is een ruimte van 23,6 meter breed en 29 meter lang, de hoogte varieert door het schuine plafond en de stapsgewijze opbouw van de vloer. Deze geometrie vormt de basis voor het CATT-Acoustic model dat gemaakt is van het auditorium. In het midden van het plafond zit verder nog een verspringing voor een beamer die mee is genomen in het model. Deuropeningen in de voor- en achterwand van het auditorium zijn niet meegenomen. In de ruimte zonder aanpassingen zijn alle interne oppervlakken gematerialiseerd als gladbeton, dat voor de frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz absorptiecoëfficiënten – in procenten – heeft van respectievelijk van 1, 1, 2, 2, 3 en 4 (van der Linden, 2006). In de geometrie is verder nog één meter boven de vloer een vlak aangebracht dat het publiek moet nabootsen dat aan de onderzijde voor alle frequenties een absorptiecoëfficiënt heeft van nul procent en aan de bovenzijde absorptiecoëfficiënten van 52, 68, 85, 97, 93 en 85 procent voor de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz (van der Linden, 2006). Naast de geometrie is er één geluidsbron toegevoegd in de vorm van een spreker met een normaal stemniveau. Deze staat centraal op het podium en is gericht op het midden van het publiek. Verder zijn er tien ontvangers geplaatst in de ruimte, van deze ontvangers zitten de nummer nul tot en met vijf op één lijn vanaf de spreker naar de achterste hoek van de ruimte. De afstand van deze ontvangers tot de spreker bedraagt respectievelijk 4, 8, 13, 18, 23 en 28 meter. De ontvangers met de nummers zes tot en met negen zitten verspreid over de ruimte. Zie *Bijlage IV – CATT-Acoustic modellen* voor het geometrie-, ontvanger- en bronbestand van dit model.

De te verwachten nagalmtijd in het auditorium, berekend met de formule van Sabine, is terug te vinden in hoofdstuk 2.0.2 *Akoestiek in een auditorium* en zal rond de 1,17 seconde liggen voor 500 Hz, dat langer is dan de 0,8 seconde die gewenst is. Voor de spraakverstaanbaarheid wordt de STI berekend, die onder te verdelen is in de classificaties slecht [0 tot 0,3], matig [0,3 tot 0,45], redelijk [0,45 tot 0,6], goed [0,6 tot 0,75] en uitstekend [0,75 tot 1]. De classificatie slecht is hierbij onverstaanbaar (Nijs, 2010a). Omdat het hier een auditorium betreft dat gericht is op spraak is de eis die eraan wordt gesteld om minimaal de classificatie

goed te behalen op elke locatie in het publiek. Verder wordt gekeken naar het geluidsdrukkniveau op de verschillende locaties in het auditorium. Voor een goede verstaanbaarheid van de spreker dient deze bij voorkeur 10 dB en minimaal 5 dB boven het ruisniveau van de achtergrond uit te komen dat 40 dB is (Nijs, 2010a). Door het toevoegen van geluidsabsorberende materialen om de nagalmtijd te verkorten en de STI te verbeteren zal echter het geluidsdrukkniveau dalen, mocht het uiteindelijk ontoereikend zijn dan is het misschien nodig om te zorgen voor een microfoon en elektrische versterking van het geluidssignaal.



Afb. 5.0.1a: De geometrie van het CATT-Acoustic model van het auditorium met daarin de locaties van de geluidsbron en ontvangers.

In de eerste simulatie – simulatie 1 – is de akoestiek nagebootst zonder aanpassingen te doen aan het eerder geschetste model. De akoestiek in de ruimte voldeed nog niet aan de eisen die eraan werden gesteld, zoals was te verwachten. Met CATT-Acoustic werden de nagalmtijd met de formules van Eyring en Sabine bepaald en daarnaast werd met het model de nagalmtijd T-30 berekend:

<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1.000	2.000	4.000
<i>Nagalmtijd volgens Eyring [s]</i>	2,06	1,57	1,19	1,02	1,00	0,93
<i>Nagalmtijd volgens Sabine [s]</i>	2,13	1,65	1,27	1,11	1,07	0,99
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	2,62	2,28	1,87	1,68	1,68	1,24

De verwachte nagalmtijd van 1,17 seconde bij 500 Hz blijkt hoger uit te vallen. Deze verschilt niet veel van de nagalmtijd die is berekend volgens Sabine, maar wel veel met de nagalmtijd T-30 wat kan worden gezien als preciezere benadering van de nagalmtijd, omdat hier ook de geometrie van de ruimte in is meegenomen. De waarde van de STI voldoet net als de nagalmtijd niet aan de eis en ligt in de classificaties redelijk en goed. Het geluidsdrukkniveau is daarentegen wel hoog genoeg, deze ligt namelijk voor alle locaties boven de minimaal vereiste 45 dB en komt tot 13 meter afstand van de spreker zelfs nog boven de gewenste 50 dB uit.

<i>Ontvanger (afstand tot de spreker in [m])</i>	0 (4)	1 (8)	2 (13)	3 (18)	4 (23)	5 (28)
<i>STI - Speech Transmission Index [%]</i>	67	60	46	47	47	55
<i>SPL – Geluidsdrukkniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]</i>	54	52	50	49	49	48

Ondanks de aanzienlijke hoeveelheid geluidsabsorptie die het publiek in deze situatie levert voldoet deze nog niet aan de eisen en zijn er, zoals in het verwachtingspatroon lag, aanpassingen aan de ruimte nodig. Voor de tweede simulatie – simulatie 2 – is daarom poreus beton toegevoegd aan de interne oppervlakken waar mogelijk. Er is gekozen om dit toe te voegen aan de oppervlakken waarop reflecties van geluidsgolven minder gewenst zijn. Het gaat hier om het plafond en de wanden vanaf de knik in het plafond – die ter hoogte van de tweede traptrede in de vloer ligt, zie ook afb. 2.0.1c – tot aan de achterzijde van de ruimte. Voor het poreuze beton zijn de absorptiecoëfficiënten gebruikt die in de metingen van proefstuk B.01 zijn gevonden, in procenten zijn dit 1, 16, 40, 56, 49 en 52 voor de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz. De nagalmtijd voor het auditorium die hieruit volgt is aanzienlijk verbeterd, vooral bij de hoge frequenties is de positieve invloed van het poreuze beton zichtbaar. Voor de frequenties 125 en 250 Hz, waar poreus beton weinig geluid van absorbeert, is echter geen zichtbare verbetering te constateren.

<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1.000	2.000	4.000
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	2,68	2,08	1,34	1,19	1,12	0,93

Ondanks de verbetering voldoet de nagalmtijd nog steeds niet aan de eis om bij 500 Hz een duur te hebben van 0,8 seconde. Naast de nagalmtijd is ook de spraakverstaanbaarheid verbeterd, de waarden van de STI zijn toegenomen, maar voldoen evenmin aan de eis. Voor het midden van de ruimte, ontvangers nummer 2 tot en met 4, is deze nog steeds geclassificeerd als redelijk, de overige ontvangers zitten allemaal in de classificatie goed. Opvallend hierbij is dat voor de verste ontvanger op 28 meter de STI goed is, dit komt doordat deze ontvanger het dichtst bij de achter- en zijwand zit waardoor deze het meeste voordeel heeft van positieve reflecties die het geluidssignaal versterken. Door de geluidsabsorptie is het geluidsdrukkniveau verder afgenomen en heeft voor de grootste afstand tot de spreker nog maar net de minimale waarde van 5 dB boven het ruisniveau van de achtergrond.

<i>Ontvanger (afstand tot de spreker in [m])</i>	0 (4)	1 (8)	2 (13)	3 (18)	4 (23)	5 (28)
<i>STI - Speech Transmission Index [%]</i>	71	64	53	54	56	63
<i>SPL – Geluidsdrukkniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]</i>	54	51	49	47	46	45

Door enkel poreus beton toe te voegen waar mogelijk voldoet de akoestiek in de ruimte nog niet aan de eisen die eraan worden gesteld. De nagalmtijd is vooral voor de lage frequenties te lang, om dit tegen te gaan is er een aanpassing gedaan in de vorm van baffles – simulatie 3a. Deze bleken van verschillende mogelijkheden laagfrequent de hoogste geluidsabsorptie te kunnen realiseren. De baffles zijn geplaatst onder het plafond aan de linker- en rechterzijde van de inkeping die dient voor de beamer. Ze zijn gemodelleerd als twee vlakken die één meter onder het plafond hangen. Deze manier van modelleren is weliswaar sneller dan alle losse baffles één voor één te modelleren, maar hierdoor is er de kans dat het effect op de akoestiek in de simulatie minder sterk is doordat ze deels het poreuze beton afschermen dat erboven zit, terwijl ze in de werkelijkheid recht naar beneden hangen. De absorptiecoëfficiënten van de baffles die zijn toegevoegd aan het model zijn voor de frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz respectievelijk 66, 65, 99, 98, 95 en 96 procent dat geldt voor één baffle van 1.000 mm breed, 600 mm hoog en 50 mm dik per vierkante meter (Merford, 2009). Deze absorptie is aangewezen aan de onderzijde van de vlakken, de bovenzijde heeft net als de onderzijde van het publiekvlak absorptiecoëfficiënten van 0 voor alle frequenties. In de berekende nagalmtijd die na deze simulatie volgt blijkt dat vooral bij de lage frequenties de baffles invloed hebben op de nagalmtijd, bij de frequenties 500 tot 4.000 Hz is amper verbetering te constateren. De geringe verbetering bij de hoge frequenties komt doordat de baffles het plafond afschermen die hoogfrequent ook een goede absorptie heeft.

<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	2,21	1,66	1,25	1,29	1,14	0,93

Ook bij de STI waarden is maar een marginale toename te constateren. Het geluidsdrukkniveau daalt door deze verbetering achterin de zaal onder het niveau waarop het boven de ruis van het achtergrond uitkomt. Omdat de geluidsbron een spreker betreft met een normaal spraakniveau is het mogelijk dat deze door zijn stem te verheffen nog wel verstaanbaar is achterin, maar het is beter om in dit geval te zorgen voor een microfoon en elektrische versterking van het signaal.

<i>Ontvanger (afstand tot de spreker in [m])</i>	0 (4)	1 (8)	2 (13)	3 (18)	4 (23)	5 (28)
<i>STI - Speech Transmission Index [%]</i>	72	66	54	55	58	63
<i>SPL – Geluidsdrukkniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]</i>	53	51	48	46	45	43

Om de akoestiek in de ruimte op het gewenste niveau te krijgen zijn de baffles in combinatie met het poreuze beton niet voldoende. Er is daarom verder gekeken naar mogelijkheden in de ruimte om de akoestiek te kunnen verbeteren zonder de geometrie van de ruimte aan te passen – simulatie 3b. Hiervoor is de vloer gebruikt, hoewel deze deels wordt afgeschermd door het publiek, waarop een afwerking van tapijt is aangebracht met een onderlaag van 8 mm vilt als afwerking dat absorptiecoëfficiënten heeft van 5, 13, 60, 24, 28 en 32 procent voor de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz (van der Linden, 2006). Door deze aanpassing benadert de nagalmtijd de eis van 0,8 seconde bij 500 Hz.

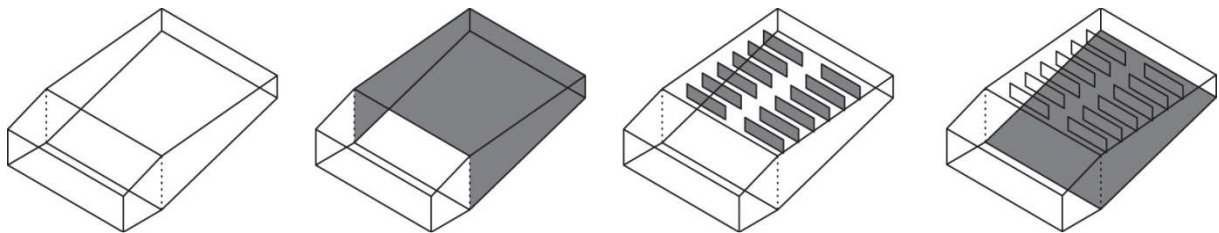
<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	1,78	1,32	0,90	0,90	0,79	0,71

Als de waarschijnlijke negatieve afwijking veroorzaakt door het modelleren van de baffles wordt meegenomen in de resultaten is het te verwachten dat de nagalmtijd voor alle

frequenties lager uitvalt dan de tabel aangeeft en dat de nagalmtijd bij 500 Hz dus dichterbij, of zelfs onder, de 0,8 seconde ligt. In deze situatie voldoet de ruimte ook aan de eisen die worden gesteld aan de spraakverstaanbaarheid van de spreker. Op alle afstanden tot de spreker wordt een classificatie gehaald van minimaal goed en tot acht meter is er zelfs sprake van de classificatie uitstekend. Het geluidsdrukniveau is vanaf 18 meter tot de spreker ontoereikend geworden. Een microfoon en elektrische versterking van het geluid wordt noodzakelijk.

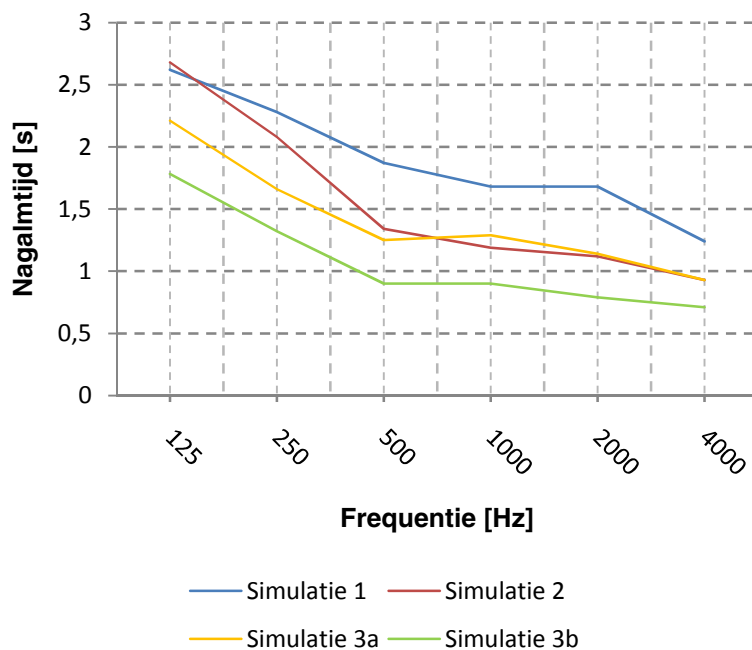
Ontvanger (afstand tot de spreker in [m])	0 (4)	1 (8)	2 (13)	3 (18)	4 (23)	5 (28)
STI - Speech Transmission Index [%]	78	75	64	64	67	69
SPL – Geluidsdrukniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]	53	50	47	45	43	42

Met de extra aanpassingen, baffles en tapijt op de vloer, naast de toepassing van poreus beton is in het auditorium een goed akoestisch klimaat te creëren voor de functie als spreekzaal. Een betere oplossing, waarbij de extra aanpassingen waarschijnlijk niet nodig zijn, is om de ruimte per persoon te verkleinen van de ruime 90 bij 120 centimeter tot bijvoorbeeld 60 bij 90 centimeter. Hierdoor wordt het totale volume van de ruimte kleiner waardoor de nagalmtijd zal afnemen en de afstand van het publiek tot de spreker wordt verkort, met als gevolg een betere spraakverstaanbaarheid en hoger geluidsdrukniveau.



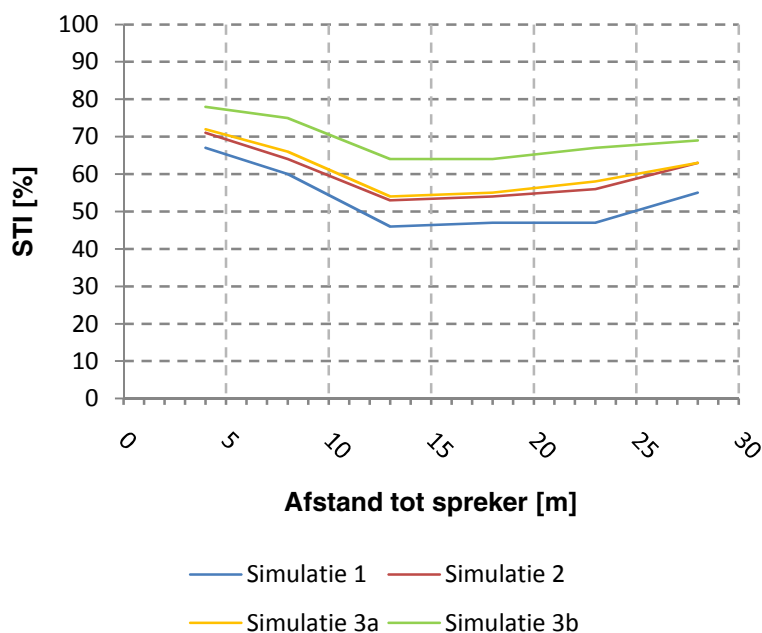
Afb. 5.0.1b: Schematisch overzicht van de aanpassingen die zijn gedaan aan het model in de verschillende simulaties. Van links naar rechts: simulatie 1, simulatie 2, simulatie 3a en simulatie 3b.

De verbeteringen die aan de akoestische eigenschappen van de ruimte zijn ter verduidelijking grafisch weergegeven waarbij de curve van de nagalmtijd zichtbaar daalt naarmate er meer aanpassingen aan de ruimte worden gedaan.



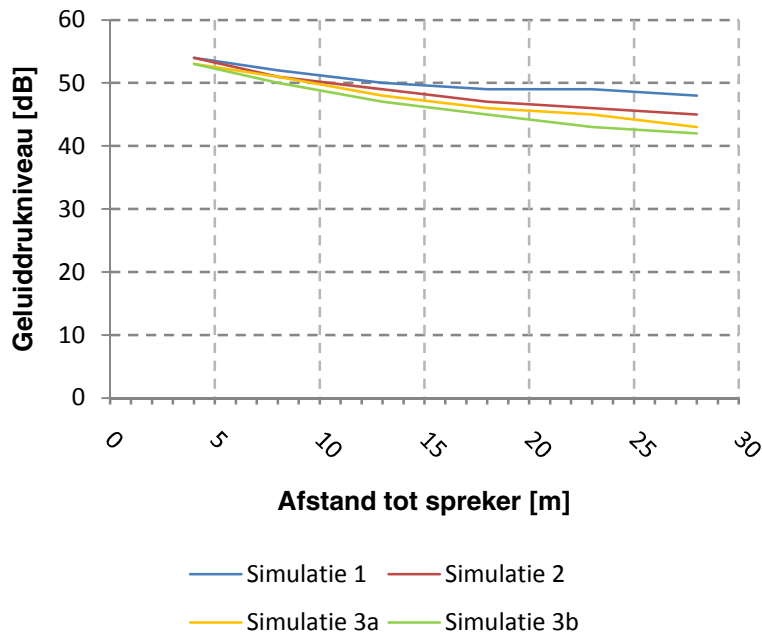
Afb. 5.0.1c: De nagalmtijd als functie van de frequentie in de verschillende situaties.

De Speech Transmission Index verbetert naarmate er meer maatregelen worden getroffen en bij de laatste situatie ligt deze in zijn geheel boven de 60%, de grens tussen de classificaties redelijk en goed. Ook is duidelijk de toename van de curven te zien aan het einde van de ruimte, nabij de achterwand die een positief effect heeft op de spraakverstaanbaarheid.



Afb. 5.0.1d: De STI als functie van de afstand in de verschillende situaties.

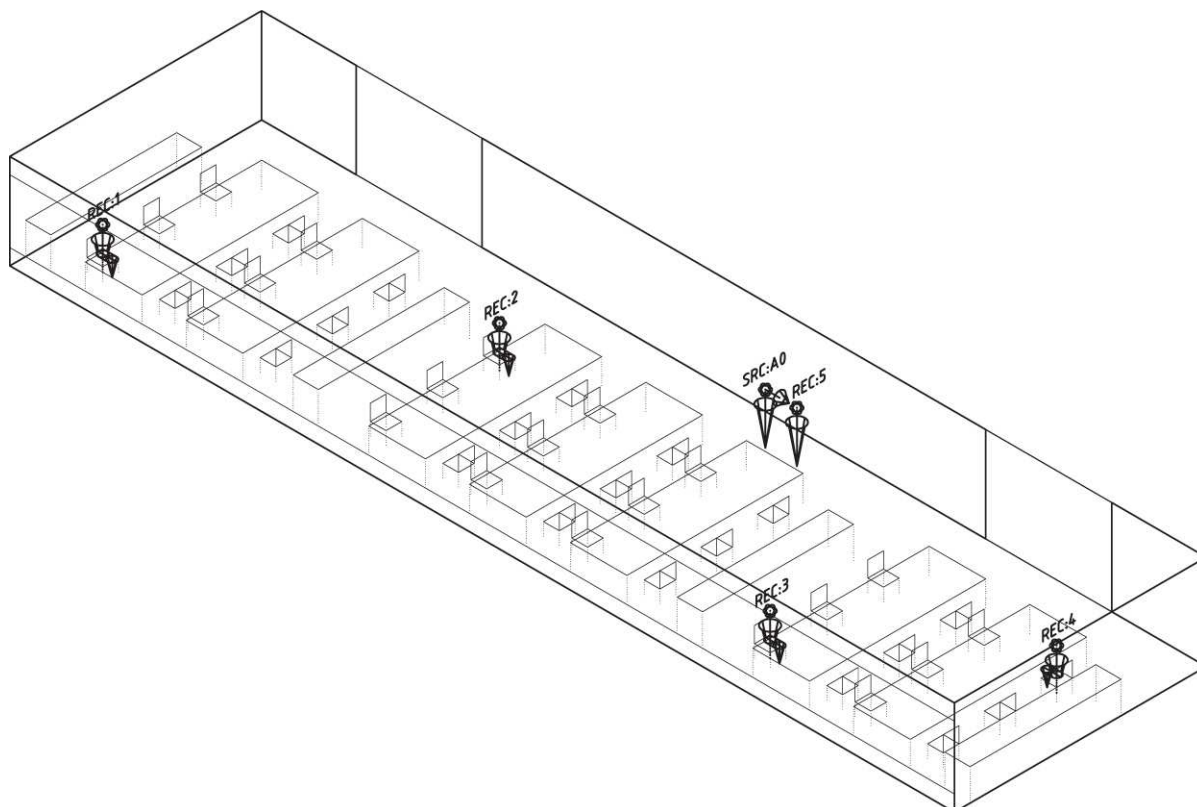
Bij het geluidsdrukkniveau is te zien dat deze door de toegevoegde absorptie vooral op grote afstand van de spreker afneemt.



Afb. 5.0.1e: Het geluidsdrukkniveau als functie van de afstand in de verschillende situaties.

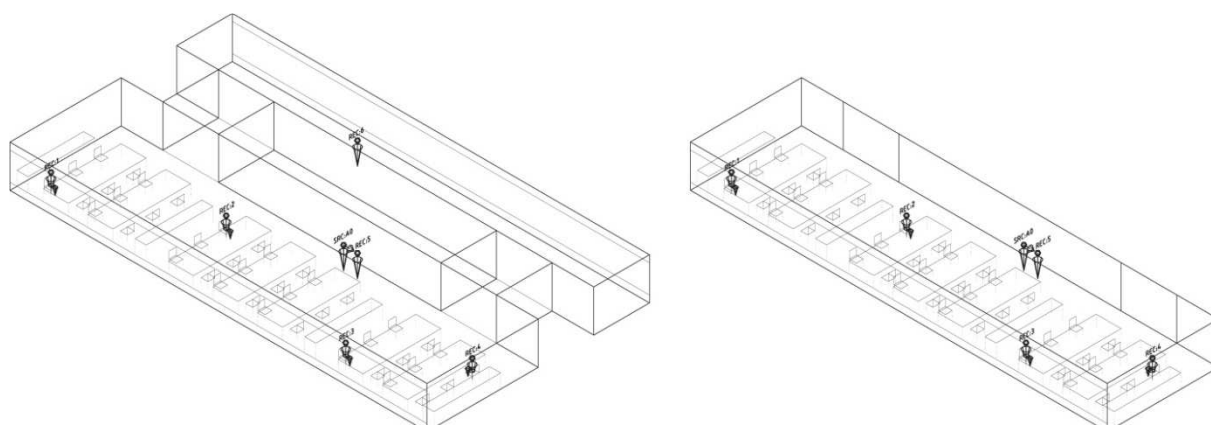
5.0.2 Werkplek

De werkplek is een rechthoekige ruimte van 30 meter lang en 8 meter breed voornamelijk gematerialiseerd in glad beton. Uitzondering hierop zijn de gevel waarin een glasoppervlak zit van twee meter hoog over de gehele lengte van de ruimte en de twee openingen van vier meter breed in de tegenliggende wand. Voor het beton zijn dezelfde absorptiecoëfficiënten gebruikt als bij het auditorium model, het glas heeft voor de frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz respectievelijk de absorptiecoëfficiënten 10, 4, 3, 2, 2 en 2 procent (van der Linden, 2006) en voor de openingen is de absorptiecoëfficiënt voor alle frequenties 90 procent. Dat de absorptie van de openingen geen 100 procent is heeft te maken met het CATT-Acoustic programma dat moeite bleek te hebben met de absorptiecoëfficiënten met een waarde gelijk aan 100 procent. Verder zijn in de ruimte nog tafels, stoelen en kasten gemodelleerd als dubbelzijdige vlakken met de absorptiecoëfficiënten 2, 2, 2, 4, 4 en 3 procent behorend bij de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz (van de Linden, 2006). In de ruimte is verder één geluidsbron geplaatst met een normaal stemniveau, gericht op één van de ontvangers. In totaal zijn er vijf ontvangers, verspreid over de ruimte te vinden, waarvan ontvanger nummer 5 de persoon voorstelt waar de geluidsbron tegen spreekt. Zie *Bijlage IV – CATT-Acoustic* modellen voor het geometrie-, ontvanger- en bronbestand van het werkplek-model.



Afb. 5.0.2a: De geometrie van het CATT-Acoustic model van de werkplek met daarin de locaties van de geluidsbron en ontvangers.

Voordat het model met deze geometrie is gemodelleerd is er eerst geprobeerd om met een groter model te werken waarbij ook de gang en overgangszones tussen de gang en werkplek waren gemodelleerd. Er was in dat model ook plaats voor een extra ontvanger in de gang, waarmee gemeten kon worden hoeveel te horen was van de converserende persoon in de werkruimte. Deze zorgde echter voor foutmeldingen waarna de keuze is gemaakt om deze weg te laten. Daarnaast is het voor het verkrijgen van precieze resultaten van de nagalmtijd beter om de gang en overgangszones weg te laten, zodat alleen de eigenschappen van de werkplek worden meegewogen.



Afb. 5.0.2b: De aanpassing aan de geometrie van het CATT-Acoustic model van de werkplek.

Net als bij het auditorium wordt ook voor de werkplek de nagalmtijd berekend, evenals de STI en het geluidsdrukkniveau voor de verschillende ontvangers. De akoestische eisen die aan de ruimte worden gesteld zijn dat de nagalmtijd acceptabel is tussen de 0,7 en 1,1 seconde (Waterman, 2006), maar dat deze bij voorkeur lager is en tussen de 0,5 en 0,7 seconde ligt. De STI en het geluidsdrukkniveau zijn vooral interessant voor ontvanger nummer 5, de persoon tegen wie de bron spreekt, maar kunnen ook gebruikt worden om een indicatie te geven op de andere locaties hoe storend het is wanneer in de gedeelde werkruimte andere mensen een gesprek voeren. Hier spelen twee tegenstrijdigheden: de STI moet voor ontvanger 5 zo goed mogelijk zijn, terwijl deze voor de andere ontvangers bij voorkeur lager is en het geluidsdrukkniveau moet voor ontvanger 5 hoog zijn, terwijl bij de andere ontvangers het gewenst is om een laag geluidsdrukkniveau te meten.

Voor de eerste simulatie – simulatie 4 – is de nagalmtijd berekend met de geometrie zoals deze eerder is beschreven. De te verwachten nagalmtijd in deze simulatie ligt rond de 3,05 seconde voor 500 Hz, berekend met de formule van Sabine in hoofdstuk 2.0.4 *Akoestiek in een werkplek*. Er moet wel worden vermeld dat bij deze berekening het meubilair niet is meegenomen waardoor de nagalmtijd in de eerste simulatie wel iets lager kan uitvallen.

<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Nagalmtijd volgens Eyring [s]</i>	2,98	3,25	2,72	2,43	2,01	1,54
<i>Nagalmtijd volgens Sabine [s]</i>	3,02	3,28	2,76	2,47	2,05	1,57
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	3,00	3,28	2,75	2,45	2,04	1,53

De resultaten van de berekening van de nagalmtijd met CATT-Acoustic geven een iets positiever beeld van de akoestiek in de ruimte, die voornamelijk bestaat uit beton. Opvallend is dat de nagalmtijden volgens de formules van Sabine en Eyring meer overeenkomen met de berekende nagalmtijd T-30. De nagalmtijd is voor alle frequenties echter nog veel te hoog en komt bij lange na niet in de buurt van de 0,7 seconde. De spraakverstaanbaarheid is volgens de classificatie van de Speech Transmission Index op een afstand van één meter nog redelijk te noemen. Dit komt overeen met de aanname die is gedaan met behulp van de signaal-ruisverhouding in hoofdstuk 2.0.4 *Akoestiek in een werkplek*, die ook redelijk was voor eenzelfde afstand. Deze waarde zal echter omhoog tot boven de 75 procent voor een classificatie van uitstekend. Opvallend is ook dat het geluidsdrukkniveau voor alle ontvangers hoog is, dit is te verklaren door de galm als gevolg van de lange nagalmtijd.

<i>Ontvanger (afstand tot de spreker [m])</i>	5 (1)	2 (7)	3 (8)	4 (12)	1 (16)
<i>STI - Speech Transmission Index [%]</i>	68	39	48	49	40
<i>SPL – Geluidsdrukkniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]</i>	66	58	60	62	61

Om het akoestische klimaat te verbeteren is de eerste stap om het poreuze beton te gaan toepassen op de plaatsen die daar geschikt voor zijn. Veruit het grootste beschikbare oppervlak hiervoor is het plafond, daarnaast is ook de binnenwand met de twee openingen geschikt voor de toepassing van poreus beton. De absorptiecoëfficiënten die hiervoor worden gebruikt zijn net als bij het poreuze beton dat is toegepast in het auditorium de coëfficiënten die zijn gevonden bij de metingen van proefstuk B.01. Verder zijn in deze simulatie – simulatie 5 – geen aanpassingen gedaan aan de geometrie van het model. Als gevolg van deze aanpassing is de nagalmtijd voor de frequenties 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz drastisch gedaald. Bij 1.000 Hz, de frequentie waarop het poreuze beton het meeste geluid absorbeert, is zelfs de 0,7 seconde voor de nagalmtijd al benaderd.

<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	3,01	1,48	1,18	0,79	0,96	0,93

Deze grote verandering is te verklaren doordat het plafond en de binnenwand met de openingen samen een groot aandeel hebben in de gehele oppervlakte van de ruimte en dat de ruimte daarbij een in verhouding klein volume heeft. De verhouding inhoud – totaal interne oppervlakken van de ruimte is bij de werkplek nagenoeg 1 op 1, terwijl dit bij het auditorium 1,8 op 1 is, met als gevolg dat de verbeteringen bij het auditorium met kleinere stappen gepaard gingen. Verder is de STI voor de ontvanger op één meter uitstekend, maar ook voor de andere ontvangers is deze aanzienlijk groter geworden. Het verschil tussen ontvangers 1, 2 en 3, 4 is te verklaren door de richting die de geluidsbron heeft, de ontvangers 3 en 4 bevinden zich in het gezichtsveld van de spreker en hebben dus ook meer last van het geluid dat deze produceert. Ook is te zien dat de waarden voor het geluidsdrukkniveau zijn afgenomen doordat veel meer geluid in deze situatie wordt geabsorbeerd.

<i>Ontvanger (afstand tot de spreker [m])</i>	5 (1)	2 (7)	3 (8)	4 (12)	1 (16)
<i>STI - Speech Transmission Index [%]</i>	88	58	70	70	57
<i>SPL – Geluidsdrukkniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]</i>	64	54	57	56	52

De situatie met enkel poreus beton is een flinke stap in de goede richting, maar voldoet nog niet helemaal aan de eisen. In de volgende simulatie – simulatie 6a – zal daarom het andere grote vlak in deze ruimte benutten, de vloer. Door deze te bedekken met tapijt met een onderlaag van 8 mm vilt krijgt deze meer geluidabsorberend vermogen ten opzichte van de betonnen vloer. Voor de frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz heeft het toegepaste tapijt respectievelijk de absorptiecoëfficiënten van 5, 13, 60, 24, 28 en 32 procent (van der Linden, 2006).

<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	2,42	1,14	0,96	0,80	1,07	0,74

Door de toevoeging van het tapijt is vooral bij de lagere frequenties 125, 250 en 500 Hz, waar het poreuze beton minder effectief is een verbetering van de nagalmtijd te constateren. De STI en het geluidsdrukkniveau laten een marginale verbetering zien ten opzichte van de situatie bij de vorige simulatie.

<i>Ontvanger (afstand tot de spreker [m])</i>	5 (1)	2 (7)	3 (8)	4 (12)	1 (16)
<i>STI - Speech Transmission Index [%]</i>	91	60	73	75	60
<i>SPL – Geluidsdrukkniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]</i>	64	53	56	55	51

Voor laagfrequent is er behoefte aan meer geluidsabsorptie, het meest geschikt hiervoor zijn paneelconstructies. In deze simulatie – simulatie 6b – zijn de binnenwanden, die de ruimte van andere werkplekken moet scheiden, uitgevoerd met een dergelijke paneelconstructie. Er is gekozen voor een constructie met houten latten van 85 mm breed en 12 mm dik bevestigd met een tussenruimte van 25 mm voor een spouw van 200 mm diep. In de spouw is verder een akoestisch materiaal, bijvoorbeeld een houtwolcementplaat, bevestigd van 50 mm dik. Deze paneelconstructie heeft voor de frequenties 125, 250, 500,

1.000, 2.000 en 4.000 Hz absorptiecoëfficiënten van respectievelijk 60, 85, 80, 82, 70 en 62 procent (van der Linden, 2006). Ondanks dat de gebruikte wanden hiervoor de kleinste oppervlakken zijn die de ruimte omhullen is de nagalmtijd voor alle frequenties veel korter geworden.

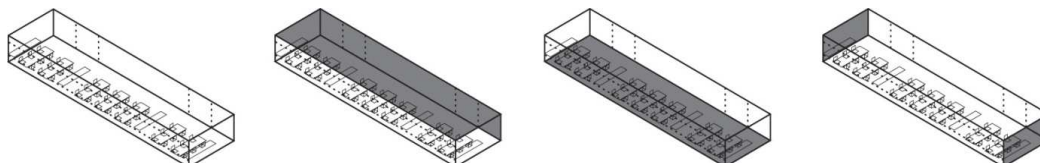
<i>Frequentie [Hz]</i>	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Berekende nagalmtijd T-30 [s]</i>	1,52	0,71	0,38	0,35	0,38	0,43

De waarden van de nagalmtijd ligt voor de frequenties van 500 Hz en hoger zelfs onder de ideale waarde van 0,5 tot 0,7 seconde. Het geluid dat wordt geproduceerd in deze ruimte kan hierdoor te droog gaan klinken, wat net als een te lange nagalmtijd ongewenst is. De STI is in deze situatie voor alle posities van de ontvangers hoog en met de laatste aanpassing is het geluiddrukkniveau vooral voor op grotere afstand van de geluidsbron afgenomen.

<i>Ontvanger (afstand tot de spreker [m])</i>	5 (1)	2 (7)	3 (8)	4 (12)	1 (16)
<i>STI - Speech Transmission Index [%]</i>	93	69	84	86	68
<i>SPL – Geluiddrukkniveau voor Σ (125-4.000 Hz) [dB]</i>	64	52	55	52	47

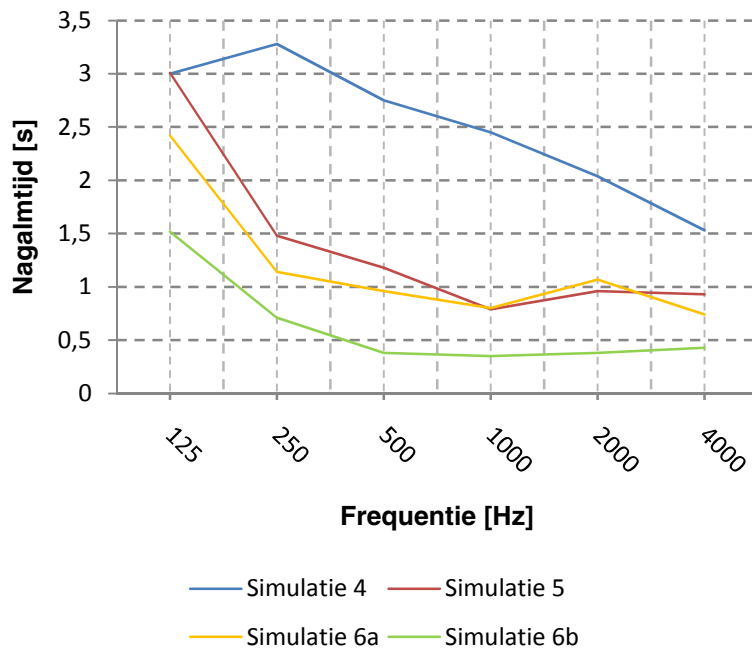
De werkplek kan dus aan de eisen voldoen met minder ingrepen die zijn gedaan in alle simulaties tezamen. Maar het is in dit geval, omdat het een ontwerp van een ruimte betreft, ook mogelijk om de ruimte aan te passen door deze bijvoorbeeld te verhogen waardoor het volume toeneemt en de nagalmtijd voor alle frequenties weer zal toenemen.

Het poreuze beton heeft echter nog de mogelijkheid om verder te worden ontwikkeld waarbij waarschijnlijk betere waarden zijn te realiseren voor de geluidsabsorptie. De combinatie met tapijt zal dan waarschijnlijk al voldoende zijn om een degelijk akoestisch klimaat in de ruimte te realiseren. Alleen voor de lage frequenties van 125 en 250 Hz zal eventueel een extra ingreep nodig zijn in de vorm van een specifiek laagfrequent paneel dat alleen voor deze frequenties geluid absorbeert.

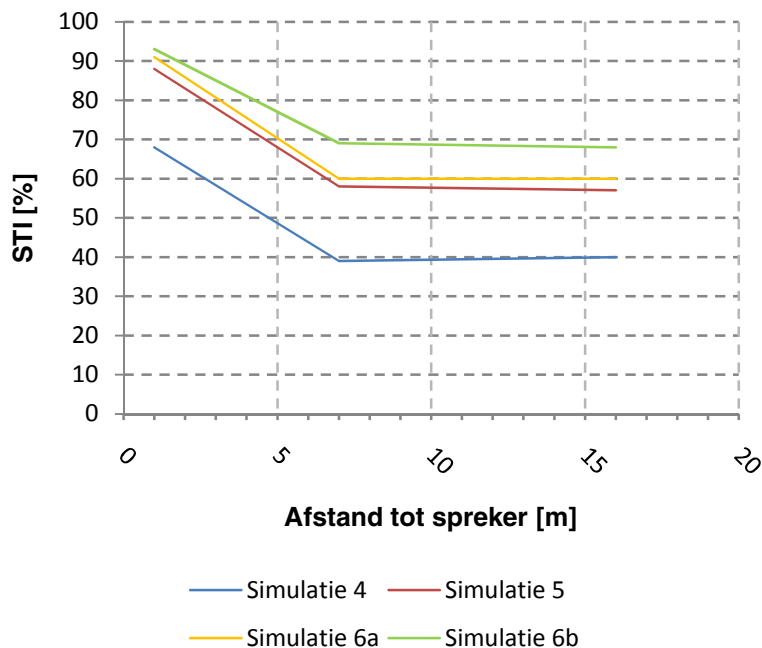


Afb. 5.0.2c: Schematisch overzicht van de aanpassingen die zijn gedaan aan het model in de verschillende simulaties. Van links naar rechts: simulatie 4, simulatie 5, simulatie 6a en simulatie 6b.

In de grafiek van de nagalmtijd in de verschillende situaties is goed te zien dat vooral de toevoeging van het poreuze beton een zeer effectieve maatregel is om deze te verlagen. Daarnaast hebben ook de paneelconstructies van simulatie 6b een significante invloed op de nagalmtijd en dan met name voor de lage frequenties.



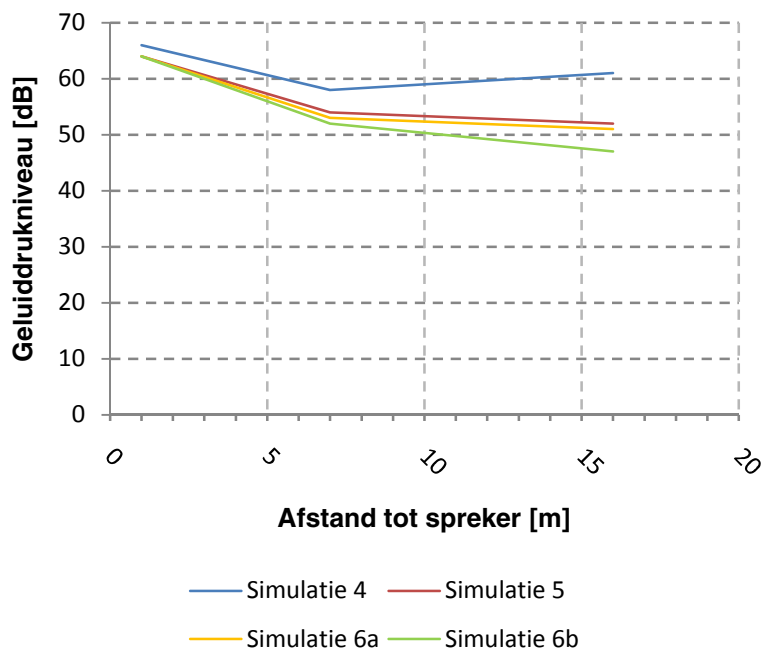
Afb. 5.0.2d: De nagalmtijd als functie van de frequentie in de verschillende situaties.



Afb. 5.0.2e: De STI als functie van de afstand in de verschillende situaties.

Een verbetering van de Speech Transmission Index voor de ontvanger op één meter gaat gepaard met een verbetering voor alle overige gebruikers. De informatie die een spreker

overdraagt kan hierdoor duidelijker worden voor deze overige gebruikers en gaan afleiden, maar dit is een probleem dat onlosmakelijk is verbonden met het type werkplek in de categorie kantoortuin. Het enige wat hiertegen gedaan kan worden is afscheidingen plaatsen voor de personen die op een korte afstand zitten en voldoende geluidsabsorptie realiseren voor de personen die op een grotere afstand van de geluidsbron zitten. De afname van het geluidsdrukkniveau van het geluidssignaal maakt het in ieder geval minder storend voor de overige gebruikers van de ruimte.



Afb. 5.0.2f: Het geluidsdrukkniveau als functie van de afstand in de verschillende situaties.

6.0 Conclusies en aanbevelingen

Het hele onderzoek is opgebouwd rond de onderzoeksvraag: hoe kan in een ruimte door uitsluitend gebruik te maken van beton voor de afwerking een voor de specifieke functie goede akoestiek worden gerealiseerd? Aan de hand van de deelvragen is er getracht hier een antwoord op te vinden waar vervolgens verschillende conclusies uit zijn getrokken.

6.0.1 *Conclusies*

- Welke akoestische eisen worden er gesteld aan een auditorium en een werkruimte?

Wanneer er wordt gekeken naar de akoestiek van een ruimte is het van belang dat de specifieke eisen die eraan worden gesteld bekend zijn. Hiervoor is het van belang om te weten welke functie de ruimte gaat vervullen zodat de eisen hierop afgestemd kunnen worden. Voor dit verkennende onderzoek, waarin de potenties de toepassing van het materiaal beton zijn onderzocht om de akoestiek in een ruimte te verbeteren, zijn twee typen ruimten als uitgangspunt genomen: een auditorium en een werkplek. In het auditorium worden er hoge eisen gesteld aan de akoestiek, de ruimte is immers bedoeld om een spreker een boodschap te laten overdragen aan de toehoorders. Hierbij is de nagalmtijd van belang, welke onder de één en bij voorkeur rond de 0,8 seconde dient te liggen (Nave, 2002). Daarnaast zijn ook de Speech Transmission Index, een maat waarmee spraakverstaanbaarheid kan worden geclassificeerd, evenals het geluiddrukkniveau, de luidheid van het signaal, belangrijk voor verschillende posities van de toehoorders. De werkplek is een meer generieke ruimte waarbij net als in het auditorium de nagalmtijd van belang is, welke bij voorkeur tussen de 0,5 en 0,7 seconde dient te liggen en acceptabel is tussen de 0,7 en 1,1 seconde (Waterman, 2006). De STI is vooral van belang bij een gesprek tussen personen en is voor andere ontvangers een maat van hoe duidelijk het gesprek te horen is. Het geluiddrukkniveau geeft daarnaast aan hoe luid dit gesprek is te horen.

- Aan welke variabelen kan je sleutelen om de akoestiek in een ruimte te beïnvloeden?

De akoestiek in een ruimte is op verschillende manieren te beïnvloeden. Één van de belangrijkste factoren is het volume van de ruimte welke een grote invloed heeft op de nagalmtijd ervan. Daarnaast is ook de vorm van de ruimte van invloed op de akoestiek, hierbij is de verhouding inhoud – totaal interne oppervlakken van de ruimte interessant omdat meer interne oppervlakken in verhouding tot de inhoud betekent dat de absorptie en reflectie van de oppervlakken van grotere invloed is op de akoestiek in de ruimte. Ook kan de vorm van de ruimte worden gebruikt om reflecties van geluidsgolven naar een bepaald deel van de ruimte te leiden. Verder is de materialisatie van de ruimte belangrijk met betrekking tot de akoestiek. Geluidsgolven die op de oppervlakken in de ruimte vallen worden namelijk deels gereflecteerd en geabsorbeerd. In dit onderzoek is gekeken naar hoe het materiaal beton kan worden bewerkt om de akoestische eigenschappen, de reflectie en absorptie van geluidsgolven, te veranderen om daarmee de akoestiek in een ruimte te kunnen beïnvloeden.

- Hoe valt de afwerking van een betonnen oppervlak te veranderen ten behoeve van de geluidsverstrooiing en geluidsabsorptie?

Het materiaal beton heeft het grote voordeel dat het een bewerkelijk materiaal is dat in een vloeibare vorm wordt gestort waarna het uithardt. Door dit stortingsproces is het mogelijk om beton op vele manieren vorm te geven. Door de vorm aan te passen is een betonnen oppervlak te bewerken waarmee de reflectie van geluidsgolven die op het oppervlak vallen kan worden beïnvloed. Het materiaal beton kan hierdoor zonder de structuur aan te passen

een bijdrage leveren aan de akoestiek in de ruimte, door bijvoorbeeld een meer diffuus reflectiepatroon te genereren. In dit onderzoek is hier niet verder op ingegaan dan het ontwerp van een aantal proefstukken waarbij is gekeken naar de theoretische mogelijkheden die er zijn.

- Wat kan er aan de samenstelling van beton veranderen om de structuur te verbeteren ten behoeve van de geluidsabsorptie?

De focus heeft namelijk meer gelegen op de samenstelling van beton om de structuur te verbeteren ten behoeve van geluidsabsorptie, waarvoor eveneens ontwerpen zijn gemaakt voor verschillende proefstukken. Deze proefstukken zijn in te delen in drie categorieën gebaseerd op verschillende absorptiemechanismen: poreuze materialen, geperforeerde panelen en ongeperforeerde panelen. Van deze proefstukken zijn er in totaal drie uitgevoerd en getest, twee volgens het absorptiemechanisme van de poreuze materialen en één volgens het mechanisme van geperforeerde panelen.

Bij de poreuze materialen is onderzoek gedaan naar de samenstelling van beton om een meer poreuze structuur te genereren. Er is gebleken deze open structuur is te creëren met een betonsamenstelling bestaande uit water, cement en kleikorrels met een doorsnede van twee tot vier millimeter. Van de ontworpen proefstukken met poreus beton zijn twee varianten gemaakt en getest: proefstuk B.01 – Poreus beton en proefstuk B.03 – Poreus beton, gestraald. Hierbij werd voor beide proefstukken een absorptiespectrum gevonden dat overeenkomt met het karakteristieke absorptiespectrum van poreuze materialen. De grootste absorptiecoëfficiënten, 0,56 voor proefstuk B.01 en 0,59 voor proefstuk B.03, lagen in beide spectra bij de 1.000 Hz en vervolgens varieerden deze vanaf 1.000 Hz tot en met 8.000 Hz tussen de 0,4 en 0,6. Een absorptiecoëfficiënt van 0,6 wil zeggen dat 60% van het geluid dat op het oppervlak valt wordt geabsorbeerd. Dit is een significante verbetering ten opzichte van standaard glad beton dat in de bouw wordt gebruikt dat een maximale absorptiecoëfficiënt heeft van 0,02 bij 1.000 Hz (van der Linden, 2006). Tussen het gewone poreuze beton en de variant die achteraf is gestraald waren de verschillen marginaal, waaruit geconcludeerd kan worden dat de poriën in de kleikorrels zelf niet veel bijdragen aan de geluidsabsorptie die vooral wordt gerealiseerd door de poriën die zijn ontstaan in de structuur tussen de kleikorrels. Door de toevoeging van de kleikorrels aan de samenstelling van beton en het weglaten van toeslagmaterialen als zand en grind is dus daadwerkelijk de structuur van beton te verbeteren ten behoeve van de geluidsabsorptie.

Dit poreuze beton is vervolgens gebruikt bij de ontwerpen van de proefstukken met de geperforeerde panelen waarbij een combinatie is gebruikt van standaard beton zoals in de bouw wordt gebruikt en het ontwikkelde poreuze beton. Volgens de theorie behorend bij het absorptiemechanisme van geperforeerde panelen is het mogelijk om door te sleutelen aan de dikte en de perforatiegraad van het geperforeerde paneel en de dikte van de achterliggende laag met een poreus materiaal de resonantiefrequentie te bepalen. Om dit te controleren is er één proefstuk gemaakt waarbij de resonantiefrequentie vooraf op 500 Hz werd bepaald. Na de metingen kan er geconcludeerd worden dat het inderdaad mogelijk is om met enkel, verschillende soorten, beton volgens dit absorptiemechanisme een geluidsabsorberend element te maken waarbij de resonantiefrequentie met de theorie is te bepalen. De grootste absorptiecoëfficiënt in het absorptiespectrum van het proefstuk lag hierbij op de 500 Hz en liet 0,58 meten, wat 45 procent boven de absorptiecoëfficiënt van 0,4 ligt die is gemeten bij beide proefstukken met enkel poreus beton. Het absorptiespectrum vertoonde een duidelijke piek op de frequentie van 500 Hz. Doordat het hier een verkennend onderzoek betreft is dit enkel een indicatie van de mogelijkheden die beton biedt, maar het is zeker dat beton potentie heeft op het vlak van geluidsabsorptie.

- Is het mogelijk een volledig betonnen ruimte te creëren met een voor de betreffende functie goede akoestiek?

Uitgaande van de technieken die werden gebruikt tijdens het productieproces van de proefstukken is het mogelijk om daarmee verschillende prototypen te ontwikkelen die toegepast kunnen worden in de bouwpraktijk, of in het geval van dit onderzoek in het ontwerp van een nieuwe Bouwkunde faculteit. De technieken zijn echter nog niet optimaal en behoeven meer aandacht wanneer er over wordt gegaan op een daadwerkelijke productie van een dergelijk element.

Wanneer er wordt uitgegaan van het poreuze beton dat is getest met de proefstukken is het niet mogelijk om een volledig betonnen ruimte te creëren met een akoestiek die voldoet aan de eisen van een auditorium of werkplek. Het idee van een monoliete betonnen ruimte in het ontwerp van een nieuwe Bouwkunde faculteit ligt momenteel nog buiten het bereik. Het toepassen van poreus beton op oppervlakken die daarvoor geschikt waren bleek in de verschillende simulaties die zijn gedaan wel een stap in de goede richting, zeker in het geval van de werkplek, maar voor de lage frequenties absorbeert poreus beton nog te weinig geluid – voor 125 Hz was bij poreus beton een absorptiecoëfficiënt gemeten van 0,01 – en voor de overige frequenties bleken er eveneens aanvullende maatregelen nodig om de akoestiek op het gewenste niveau te krijgen. Mogelijk valt er aan de verschillende onderdelen van het poreuze beton nog te sleutelen, de zeeflengte van de kleikorrels, de gebruikte hoeveelheid cement etc. om poreus beton verder te ontwikkelen.

- Is het reëel om akoestische verbeteringen in beton te integreren als het wordt vergeleken met andere, traditionelere maatregelen?

Één van de inspiraties om beton te gebruiken voor het verbeteren van akoestiek in de ruimte is het creëren van een monoliete ruimte. Uit het onderzoek is gebleken dat het verbeteren van de geluidsabsorptie van beton is te realiseren door de structuur van het materiaal aan te passen, dit heeft het nadelige gevolg dat de draagkrachtige capaciteiten van beton drastisch verminderen. Voor het integreren van een dergelijke akoestische verbeteringen in beton in één bouwelement dat tevens de goede eigenschappen van standaard beton combineert is het nodig om meerdere soorten beton te gebruiken. Dit maakt het productieproces een stuk gecompliceerder waardoor het minder reëel wordt om een element te maken waarbij de geluidsabsorptie is geïntegreerd in het beton.

Ook als de waarden van de absorptiecoëfficiënten, die zijn bepaald voor de verschillende proefstukken, worden vergeleken met bestaande akoestische materialen blijkt dat er in verhouding een dikker pakket nodig is voor evenveel geluidsabsorptie. Er moet bij de vergelijking van de resultaten van de metingen wel rekening worden gehouden met de meetomstandigheden die niet conform NEN-ISO-EN 354 waren waardoor ze enkel kunnen worden gebruikt als indicatie en niet als officieel bepaalde waarden. Bij een dikte van 100 mm heeft het gewone poreuze beton de absorptiecoëfficiënten 1, 16, 40, 56, 49 en 52 procent voor de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz. Terwijl bijvoorbeeld een houtwolcementplaat met een dikte van slechts 25 mm, bevestigd op een harde ondergrond, absorptiecoëfficiënten heeft van 15, 23, 23, 51, 73 en 75 procent voor de respectievelijke frequenties 125, 250, 500, 1.000, 2.000 en 4.000 Hz (van der Linden, 2006). Met minder materiaal is dus voor alle frequenties, op de frequentieband 500 Hz na, bij een even groot oppervlak meer geluidsabsorptie te realiseren. Hierbij moet wel worden vermeld dat er geen dunnere varianten zijn getest die misschien niet veel onderdoen voor de 100 mm dikke laag. Het proefstuk met geperforeerd beton heeft meer potentie, omdat hierbij de resonantiefrequentie is te bepalen waarop een verbeterde geluidsabsorptie is te realiseren waardoor een dergelijk element kan worden afgestemd op de specifieke eisen die er aan worden gesteld.

Met behulp van de absorptieklasse, klasse D, van de proefstukken is poreus beton eveneens te vergelijken met andere geluidsabsorberende materialen. Poreus beton heeft niet een hoge classificatie en behoort daarom niet tot de beste geluidsabsorberende materialen, maar is wel degelijk geschikt als geluidsabsorberend materiaal. Een vergelijkbaar product qua structuur van het materiaal zijn plafondtegels van geëxpandeerde glaskorrels. Op een vaste ondergrond bevestigd hebben deze bij een dikte van 50 mm een gemiddeld gewogen absorptiecoëfficiënt van 0,90 wat overeenkomt met geluidsabsorptie klasse A (Liaver, 2009). Beton als akoestisch materiaal is dus nog niet ideaal, maar heeft wel degelijk potentie.

6.0.2 Aanbevelingen

De potentie die beton heeft op het gebied van de akoestiek in een ruimte is interessant doordat zowel reflectie als absorptie van het geluid is te veranderen. De geluidsabsorptie die is gerealiseerd met de proefstukken in dit onderzoek hebben een indicatie gegeven wat er mogelijk is. Er zal verder onderzoek nodig zijn om te kijken of de geluidsabsorberende kwaliteiten zijn te verbeteren, evenals het diffuus reflecterend vermogen. Vanuit de samenstelling gezien is poreus beton nog ver door te ontwikkelen. Een vergelijkbaar product van geëxpandeerde glaskorrels levert bijvoorbeeld al een veel hogere geluidsabsorptie, de mogelijkheid is er om poreus beton dergelijke waardes te laten bereiken.

Het meest interessant is waarschijnlijk de variant met geperforeerd standaard beton in combinatie met poreus beton waarbij de absorptie is af te stemmen op een bepaalde resonantiefrequentie. Daarnaast biedt deze variant esthetisch de meeste mogelijkheden om een hoogwaardig bouwelement te ontwikkelen waarbij meerdere goede kwaliteiten zijn geïntegreerd.

Een belangrijk aspect om rekening mee te houden is het productieproces die gemoeid gaat met poreus beton. De gebruikte methode, waarbij het poreuze beton werd aangestampt in een mal, is arbeidsintensief en niet geheel nauwkeurig, tevens ontstonden hierdoor scheuren in de dunne geperforeerde betonplaat. Staalvezels in het betonmengsel zouden uitkomst kunnen bieden wanneer de betonplaat te dun is om wapening in aan te brengen.

In het onderzoek hebben het auditorium en de werkplek centraal gestaan bij de ontwikkeling van het materiaal. In dergelijke ruimten is een toepassing goed mogelijk, en kan deze de voorkeur dienen boven andere akoestische maatregelen. Maar een interessantere toepassing is wellicht te vinden in sportzalen waar een te lange nagalmtijd kan worden veroorzaakt door een gebrek aan absorptie of door flutterecho's die meestal ontstaan als al het absorptiemateriaal is geconcentreerd op het plafond en aan de bovenzijde van de wanden (Nijs, 2009). Poreus beton kan hiervoor de oplossing bieden omdat het een hard geluidsabsorberend materiaal is. Door de stevigheid er van is het mogelijk om het geluidsabsorberende materiaal ook op de lagere delen van de wanden aan te brengen zonder dat dit gedurende het gebruik van de zaal beschadigd zal raken. In het geval van een dergelijke toepassing zal er wel aandacht uit moeten gaan naar de onderlinge samenhang in het materiaal zodat deze niet te broos is.

7.0 Integratie met architectuur

De achterliggende gedachte achter dit onderzoek is dat de bevindingen die zijn gedaan kunnen worden gebruikt in het architectonische deel van het afstudeerproject. Om die reden vormden architecturale fascinaties de uitgangspunten voor het onderzoek en stonden ruimten centraal die terug zijn te vinden in het programma van eisen van het ontwerp van een nieuwe Bouwkunde faculteit. De ruimten die zijn gebruikt zijn gevormd volgens het concept van het te maken ontwerp, hierdoor wordt het gemakkelijker om de bevindingen te integreren in het ontwerp.

Met de ontwerpen van prototypen, het wandelement en de twee plafondelementen, is gekeken naar de praktische problemen met betrekking tot de toepassing van geluidsabsorberend beton in directe relatie tot de ruimten. Bij het ontwerpen van deze bouwelementen is rekening gehouden met de architecturale fascinaties die ten grondslag liggen aan het onderzoek, het thema monolithisch is er daar één van en is op verschillende manieren te interpreteren. Zo kan er worden gedacht aan een authentieke monoliet, een massief geheel bestaand uit één materiaal, maar ook aan de samenstelling van de oppervlakken die een ruimte omhullen die uit één enkel materiaal zijn opgetrokken en zo voor de ruimte een monoliete uitstraling hebben. Deze laatste variant is interessant omdat het hier om architectuur gaat en in de huidige bouwpraktijk bestaan de oppervlakken die een ruimte vormen meestal uit meerdere lagen doordat er steeds meer eisen aan worden gesteld. Uit het onderzoek is echter gebleken dat zelfs als er één materiaal, zoals beton, wordt gebruikt het waarschijnlijk is dat hierin verschillende structuren nodig zijn waardoor de elementen die een ruimte vormen nog steeds in essentie opgebouwd zijn uit lagen, wat tegen het principe van een monoliet ingaat. Daarentegen is met dergelijke elementen wel mogelijk om de ruimte met één materiaal te materialiseren, maar ook daarbij zullen verschillen zichtbaar zijn doordat het materiaal verschillende structuren heeft. Daarnaast is ook de opbouw in elementen nadelig voor een monoliete uitstraling doordat bij de vorming van de ruimte op deze manier naden ontstaan. De oplossing om naden te voorkomen is om het beton in het werk te storten, maar dat is geen optie bij poreus beton, omdat dat problematisch is voor het productieproces. Bij de toepassing van de geschetste prototypen voor een bouwelement in het ontwerp zal goed moeten worden nagedacht over het geheel dat wordt gevormd en in hoeverre hier de architecturale fascinatie van een monoliete ruimte nog een rol speelt.

Ook de simulaties hebben uitgewezen uit dat het lastig is om een ruimte te creëren met een goed akoestisch klimaat die in zijn geheel uit beton is opgetrokken. Zowel in het auditorium als bij het ontwerp van de werkplek zijn aanvullende maatregelen nodig naast het geluidsabsorberende beton om te zorgen voor een goed akoestisch klimaat. In beide gevallen bleek het gebrek aan geluidsabsorptie voor lage frequenties, met name 125 Hz, problematisch voor de nagalmtijd van dezelfde frequenties. In het auditorium boden de toevoeging van baffles in combinatie met vloerbedekking de oplossing en bij de werkplek vormde vooral de binnenwanden uitgevoerd als spouwmuur een goede aanvulling op het poreuze beton. Een eventuele mogelijkheid om de akoestische maatregelen meer te integreren in het ontwerp is door bij het auditorium de baffles achterwege te laten en te vervangen door een betonnen balkconstructie met aan het oppervlak poreus beton. Toch zal er ook dan in het auditorium plaats moeten worden gemaakt voor bijvoorbeeld een paneelconstructie die laagfrequent geluid kan absorberen.

De simulaties die zijn gedaan voor de werkplek wezen uit dat door de toepassing van poreus beton op het plafond gecombineerd met poreus beton op de binnenwand parallel aan de gevel, tapijt op de vloer en een paneelconstructie voor de overige twee binnenwanden de nagalmtijd in de ruimte zeer laag wordt, tegen het onaangename aan, waardoor geluid geproduceerd in de ruimte droog overkomt. Het is dus mogelijk om met minder akoestische

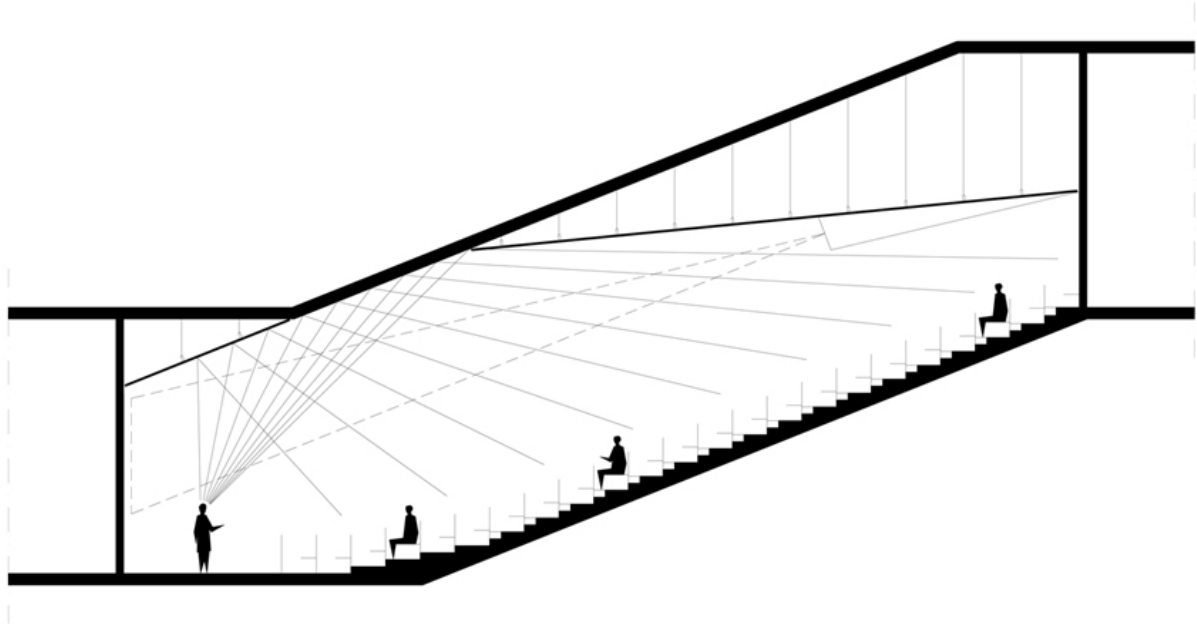
maatregelen de akoestiek in de ruimte op een goed niveau te krijgen, maar het is ook een optie om het volume van de werkplek te vergroten met als gevolg een langere nagalmtijd. Een vergroting van de ruimte in de lengterichting is interessant omdat het ontwerp een flexibele indeling moet hebben die kan variëren per functie en tevens is een vergroting in de hoogterichting interessant om meer geveleppervlak te kunnen creëren waardoor er meer oppervlak beschikbaar is voor een natuurlijke lichtinval, wat gewenst is bij de functie van ontwerpstudio waar een groot deel van het programma van eisen uit bestaat (Anon., 2009).

Uiteindelijk kan aan de hand van dit verkennende onderzoek met zekerheid worden geconcludeerd dat het toepassen van geluidsabsorberend beton in het ontwerp van een nieuwe Bouwkunde faculteit mogelijk is wanneer er afdoende aanvullende akoestische maatregelen worden genomen. In de studio's en kantoren is poreus beton aangebracht op een breedplaatvloer ter plaatse van de werkplekken. Tevens is op de vloer tapijt gebruikt dat samen met het poreuze beton moet zorgen voor voldoende geluidsabsorptie.



Afb. 7.0a: De doorsnede van de module van de studio's en kantoren in de Bouwkunde faculteit. In het zwart is de locatie van poreus beton aangegeven.

Zeker voor het auditorium is poreus beton een interessant middel gebleken doordat de persoonlijke voorkeur voor de materialisatie van de ruimte bij beton ligt. De grootste verandering naar aanleiding van dit onderzoek is echter de aanpassing van het volume, de ruimte per persoon is verkleind tot 60 bij 90 centimeter. In tegenstelling tot het ontwikkelde prototype van de omgekeerde TT-plaatvloer is gebruik gemaakt van poreus betonnen plafondtegels voor de dakconstructie.



Afb. 7.0b: De doorsnede van het auditorium in het uiteindelijk ontwerp.

Er is in ieder geval één ruimte in het ontwerp die helemaal uit beton is opgetrokken, dat zelfs mogelijk is zonder dat het materiaal geluidsabsorberend dient te zijn, en dat is het bouwfysica laboratorium, die eveneens dienst kan doen als nagalmkamer. Maar bovenal zijn de opgedane akoestische inzichten op het gebied van de akoestiek van een ruimte, en dan met name van het auditorium en de werkplek, nuttig gebleken bij het ontwikkelen van het architectonische ontwerp.

8.0 Bronnenlijst

Anon., 2009. *PvE Bouwkunde*. Delft: leerstoel Materialisation and Design Development aan de faculteit Bouwkunde van de TU Delft.

Barron, M., 2000. *Auditorium acoustics and architectural design*. 3^e ed. London: E & FN Spon.

Beranek, L.L., 2006. Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(3), pag.1399-1410.

Bouwwereld, 2010. *Wereldprimeur – casco van staalvezelbeton*. [Online] (Geüpdatet: 25 mei 2010) Beschikbaar op: <http://www.bouwwereld.nl/web/Actueel/Nieuws/Nieuws/10509/Wereldprimeur-casco-van-staalvezelbeton.htm> [bekeken op 1 juni 2010].

Cauberg, J.J.M. & Nederlof, L., 2005a. *Kennisbank Bouwfysica – Absorptiemechanismen*. [Online] Delft: Vakgroep Bouwfysica, TU Delft. Beschikbaar op: http://blackboard.tudelft.nl/courses/1/tu-hbo-bouwfysika/content/_316335_1/A_5_absorptiemechanismen.pdf [bekeken op 6 april 2010].

Cauberg, J.J.M. & Nederlof, L., 2005b. *Kennisbank Bouwfysica – Nagalmtijd*. [Online] Delft: Vakgroep Bouwfysica, TU Delft. Beschikbaar op: http://blackboard.tudelft.nl/courses/1/tu-hbo-bouwfysika/content/_316338_1/A_8_nagalmtijd.pdf [bekeken op 10 maart 2010].

Cauberg, J.J.M. & Nederlof, L., 2005c. *Kennisbank Bouwfysica – Paneelabsorptie*. [Online] Delft: Vakgroep Bouwfysica, TU Delft. Beschikbaar op: http://blackboard.tudelft.nl/courses/1/tu-hbo-bouwfysika/content/_316336_1/A_6_paneelabsorptie.pdf [bekeken op 6 april 2010].

Cauberg, J.J.M., 2005. *Kennisbank Bouwfysica – Zaalakoestiek*. [Online] Delft: Vakgroep Bouwfysica, TU Delft. Beschikbaar op: http://blackboard.tudelft.nl/courses/1/tu-hbo-bouwfysika/content/_316861_1/A_10_zaalakoestiek.pdf [bekeken op 10 maart 2010].

Gebruiksbesluit, 2008. WD. 2008/327, Den Haag: VROM.

Gerrits, J.M., 2006. *Draagconstructie Basis*. Delft: TU Delft.

Henket, M., 2009. Flexibel en gezellig – Radix gebouw in Wageningen door DP⁶ architectuurstudio. *De Architect*, 40(6), pag.70-73.

Köhne, H. et al., 2005. *Beeld Schoon Beton*. 's-Hertogenbosch: ENCI Media.

Lamoré, P.J.J. et al., 2009. *Nederlands Leerboek Audiologie*. [Online] Leiden: Nederlandse Vereniging voor Audiologie. Beschikbaar op: <http://www.audiologieboek.nl/niveau2/indexniv2.htm> [bekeken op 14 april 2010].

Liadur, 2008. *Noise barriers*. [Brochure] Liadur, s.r.o.

Liapor, 2006. *Vom Keller bis zum Dach*. [Brochure] Liapor GmbH & Co. KG.

Liaver, 2009. *Reapor – the sound absorber*. [Brochure] Liaver GmbH & Co. KG.

Linden, A.C. van der, 2006. *Bouwfysica*. 6^e ed. Zutphen: Thieme Meulenhoff.

Merford, 2009. *Soundstone baffles*. [Online] Gorinchem: Merford Noise Control. Beschikbaar op: <http://www.noisecontrol.nl/media/newmedia/bestanden/NCS.P.2110.1.1%20Soundstone%20Baffles%20%28NL%29.pdf> [bekeken op 17 augustus 2010].

Nave, R., 2002. *Auditorium acoustics*. [Online] Atlanta: Department of Physics and Astronomy, Georgia State University. Beschikbaar op: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/acoustic/auditcon.html> [bekeken op 8 maart 2010].

Nederlands Normalisatie-instituut, 1997. NEN-EN-ISO 11654:1997 *Akoestiek - Geluiddempers voor gebruik in gebouwen - Eengetal-aanduiding voor de geluidabsorptie*. Delft: NEN.

Nederlands Normalisatie-instituut, 2003. NEN-EN-ISO 354:2003 *Akoestiek – Meting van geluidsabsorptie in een nagalmkamer*. Delft: NEN.

Neufert, E., et al., 2002. *Architects' Data*. 3^e ed. Oxford: Blackwell Science Ltd.

Nijs, L., 2009. Akoestiek in sportzalen. *Bouwfysica*, 20(4), pag.2-11.

Nijs, L., 2010a. *Ontwerpregels – Spreekzalen*. [Online] Delft: Nijsnet. Beschikbaar op: http://bk.nijsnet.com/04050_Spreekzaal.aspx [bekeken op 15 maart 2010].

Nijs, L., 2010b. *Theorie – Signaal en ruis*. [Online] Delft: Nijsnet. Beschikbaar op: http://bk.nijsnet.com/02090_Signaal_Ruis.aspx [bekeken op 16 maart 2010].

Tenpierik, M., 2010a. *Projectbegeleiding met betrekking tot het auditoriumontwerp*. [Begeleiding] (Persoonlijke communicatie, 25 maart 2010).

Tenpierik, M., 2010b. *Room acoustics*. [PowerPoint slides] Delft: Vakgroep Bouwfysica, TU Delft [bekeken op: 6 april 2010].

Vakgroep Bouwfysica TU Delft, 2003. *Bouwfysica 1*. 2^e ed. Delft: Delft University Press.

Vermeir, G. et al., 2000. *Speech Transmission Index – STI*. [Online] Leuven: Laboratorium Bouwfysica, KU Leuven. Beschikbaar op: http://www.kuleuven.be/bwf/onderwijs/zaal/N_spra_vers_STI_1.htm [bekeken op 14 juli 2010].

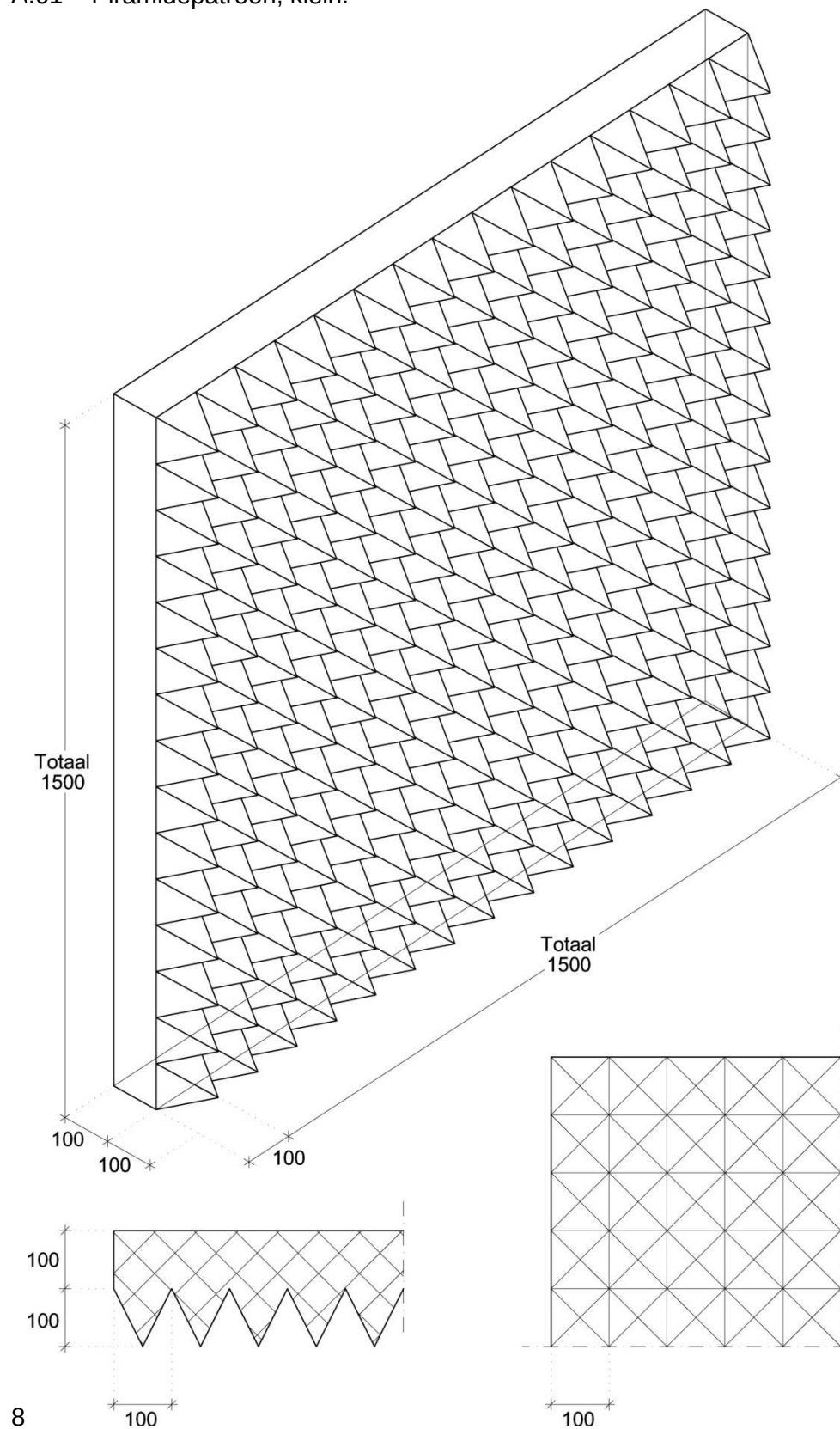
Vos, H., 2010. *Bespreking over de productie van de proefstukken bij Westo samen met Dhr. Vos van Liapor*. [Bespreking] (Persoonlijke communicatie, 7 juni 2010).

Waterman, E., 2006. *Vaak gestelde vragen over geluid*. [Online] Beschikbaar op: http://www.tonelly.nl/geluid/faq_geluid.htm [bekeken op 6 april 2010].

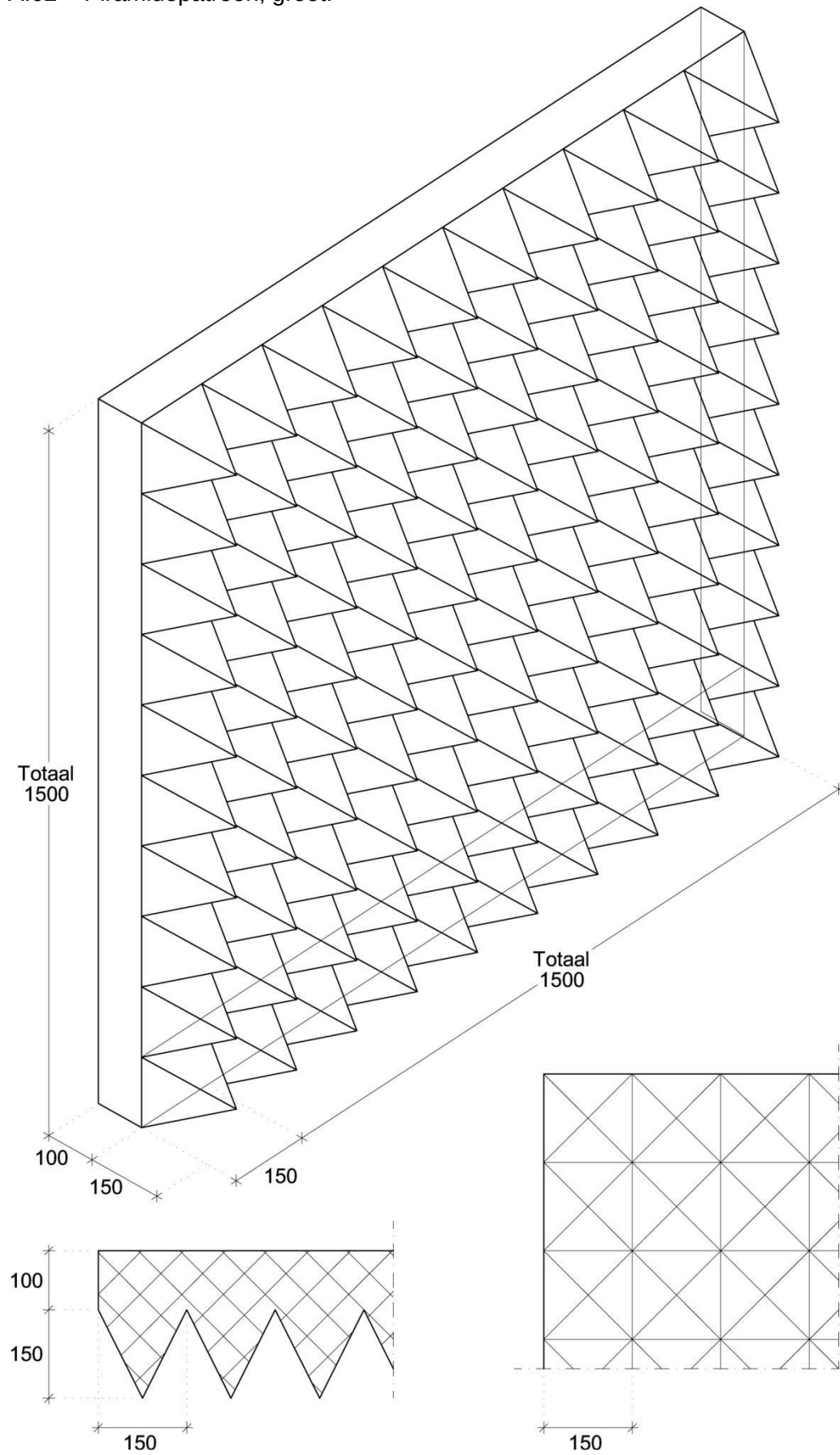
9.0 Bijlagen

9.0.1 Bijlage I – Proefstukken

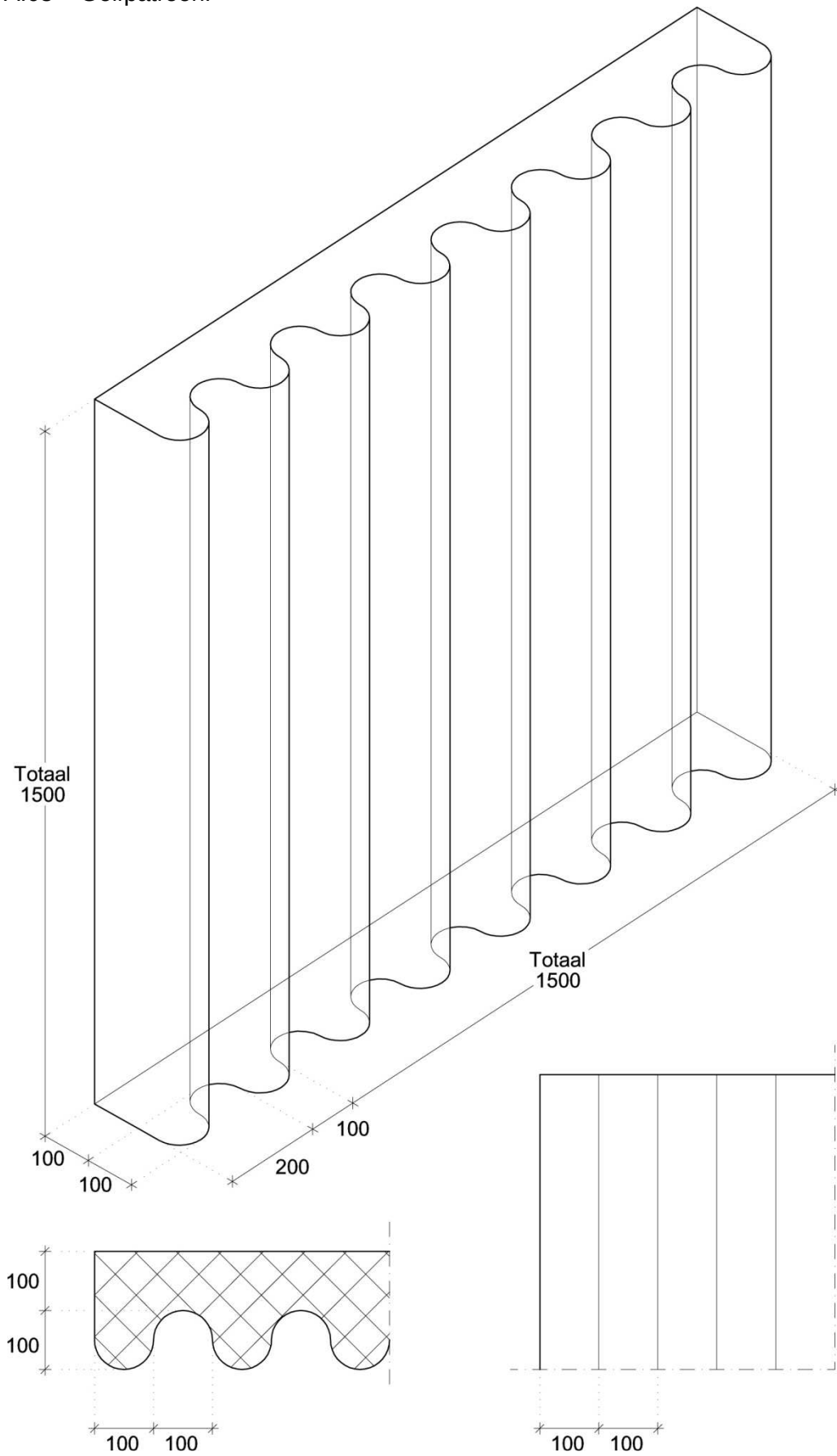
A.01 – Piramidepatroon, klein.



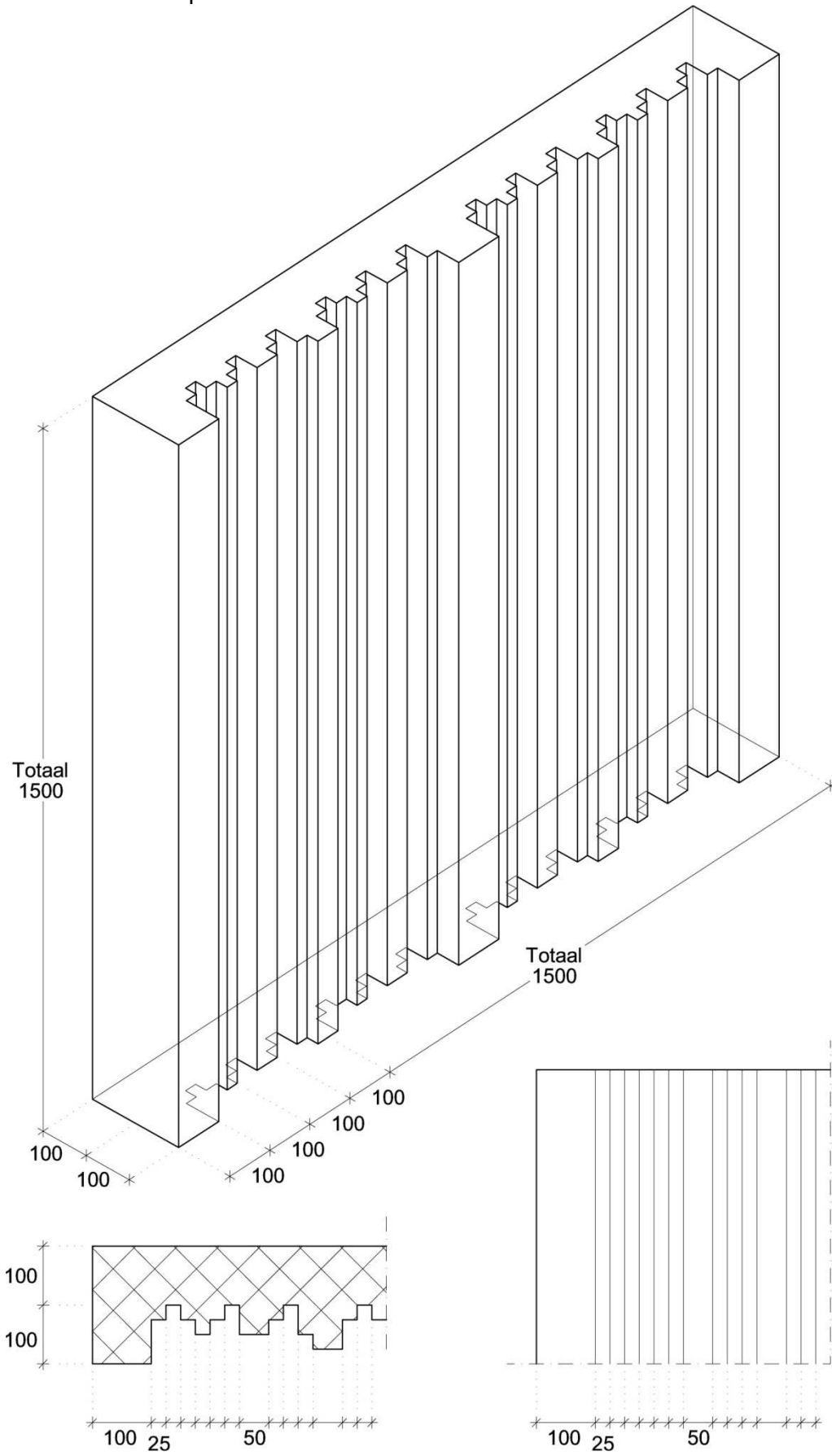
A.02 – Piramidepatroon, groot.



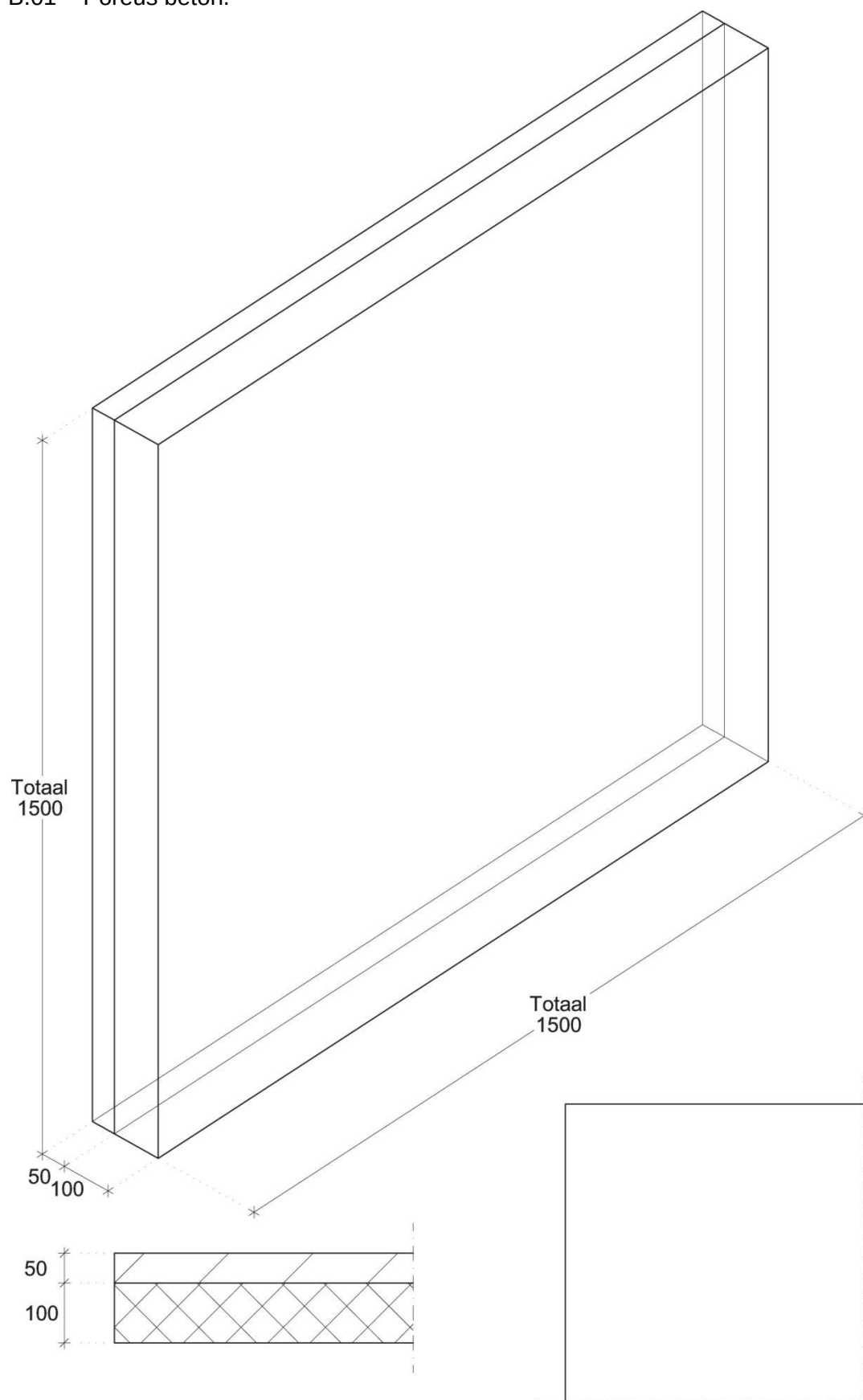
A.03 – Golfpatroon.



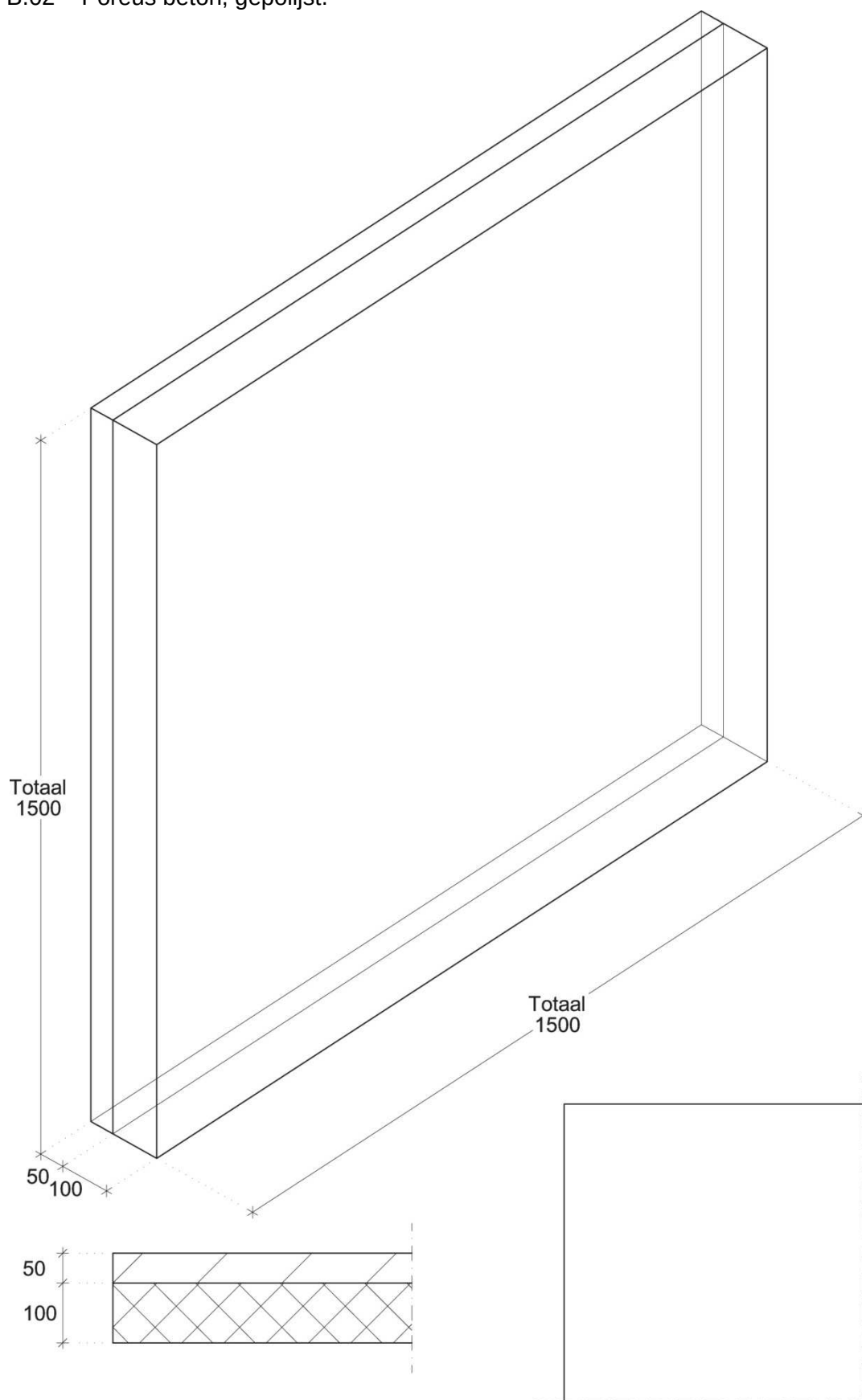
A.04 – Variërend patroon.



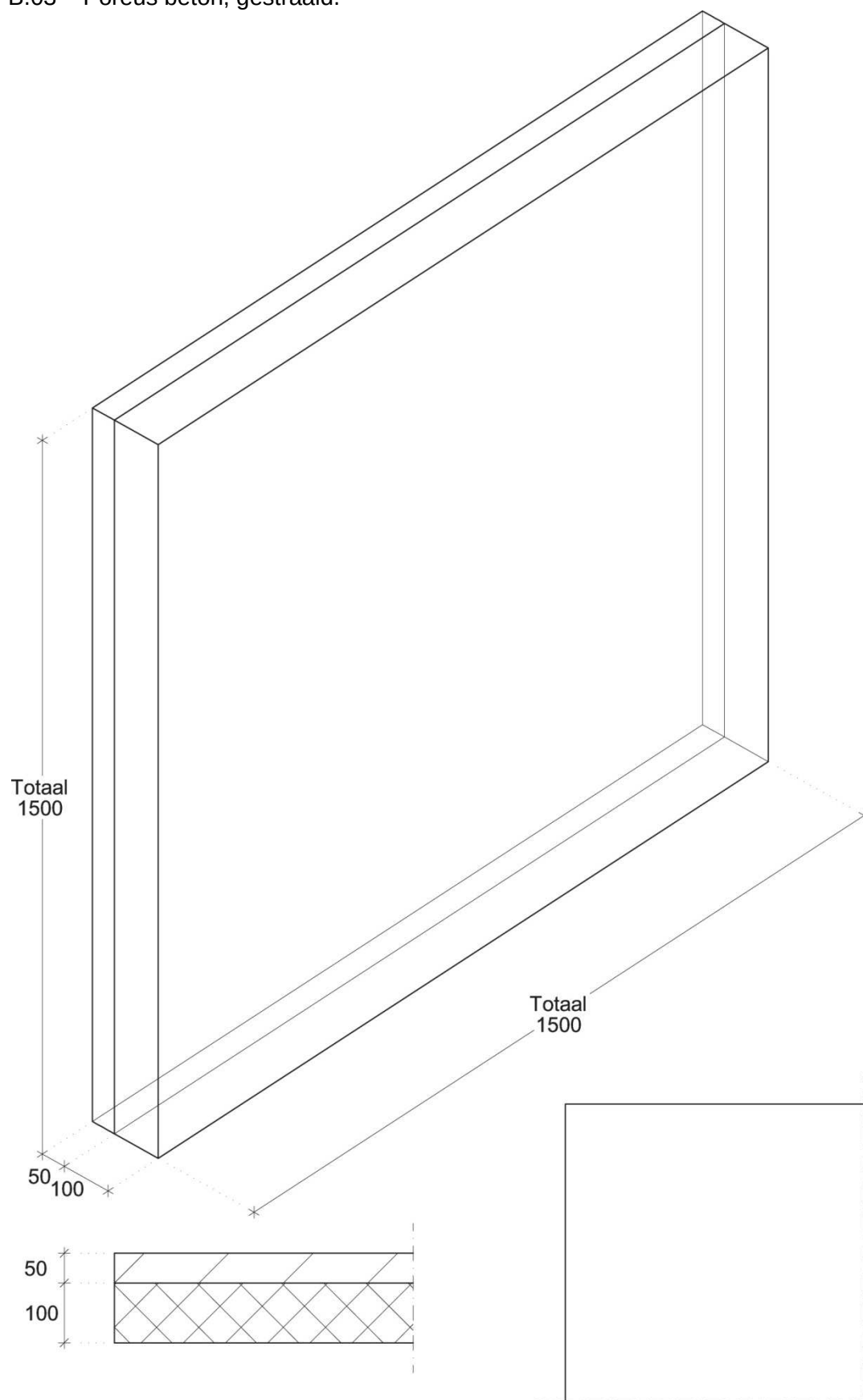
B.01 – Poreus beton.



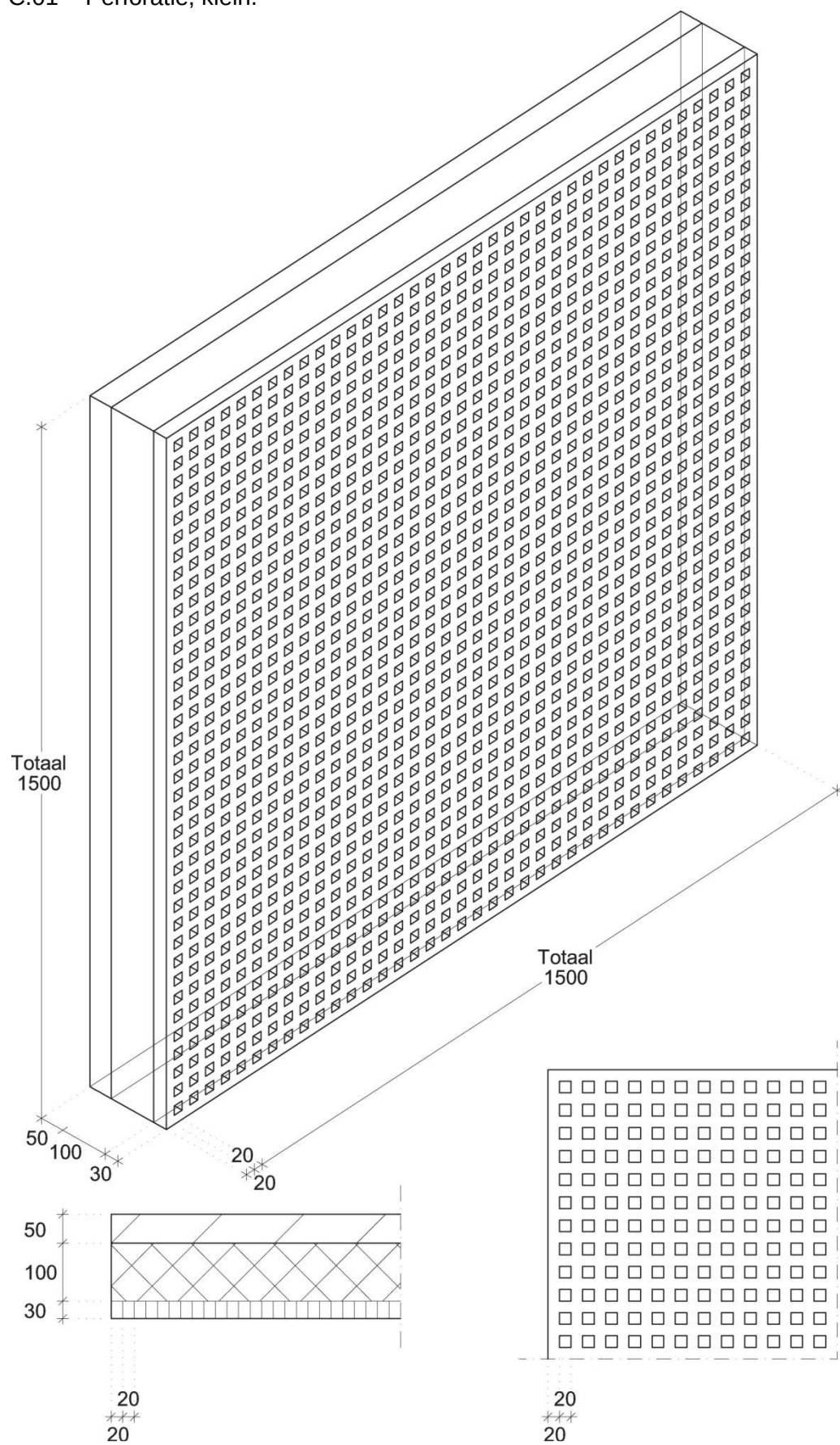
B.02 – Poreus beton, gepolijst.



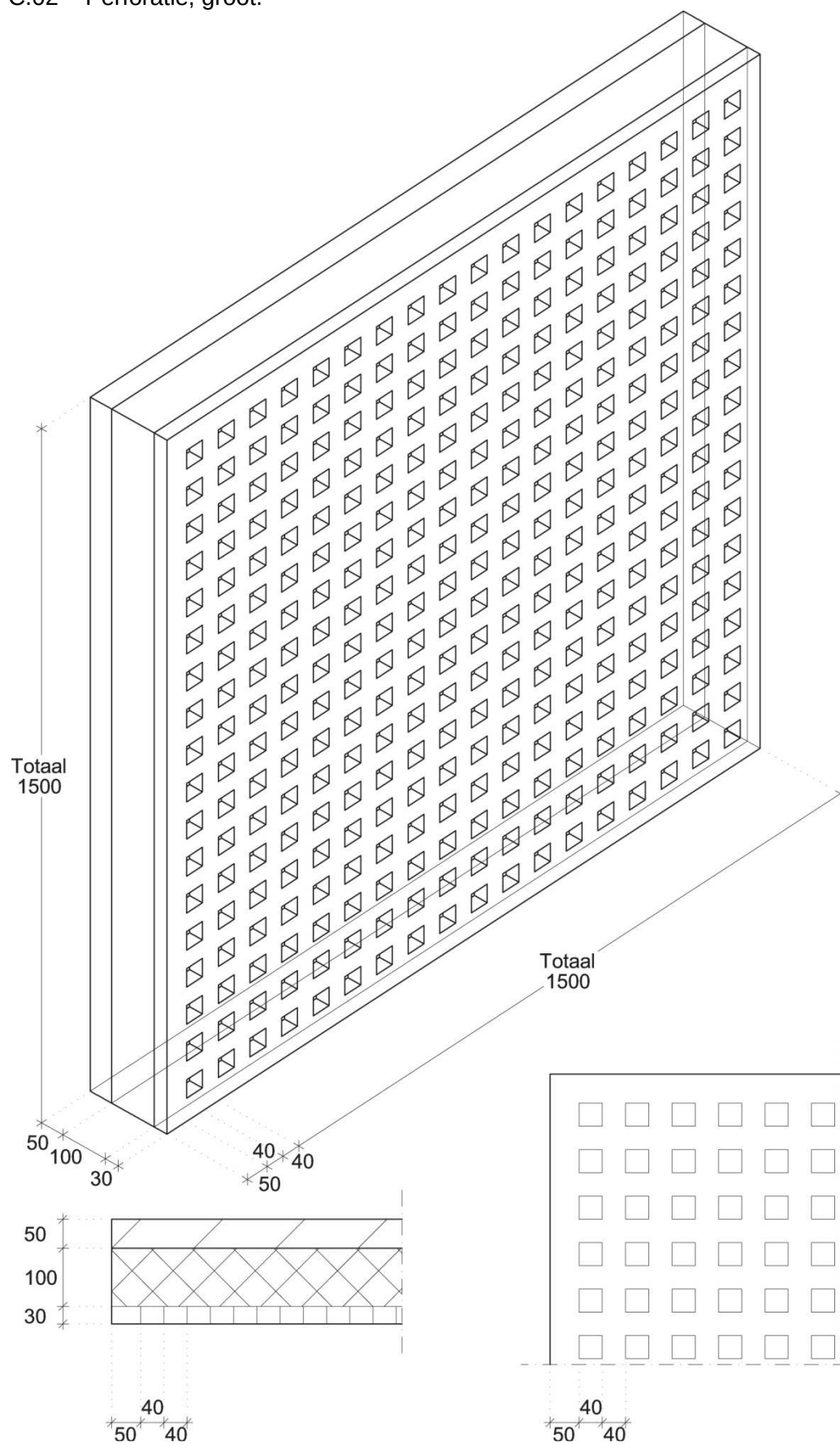
B.03 – Poreus beton, gestraald.



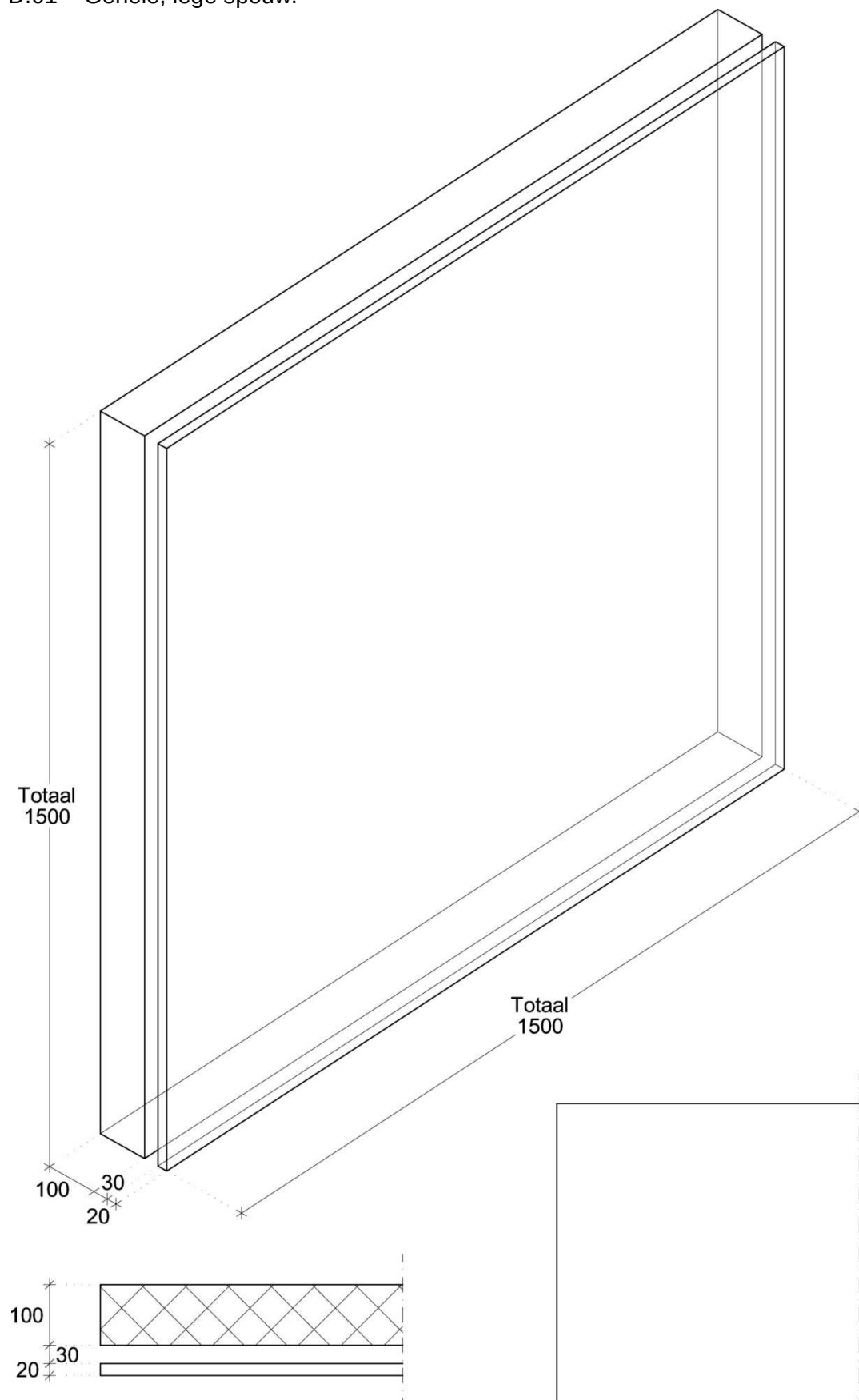
C.01 – Perforatie, klein.



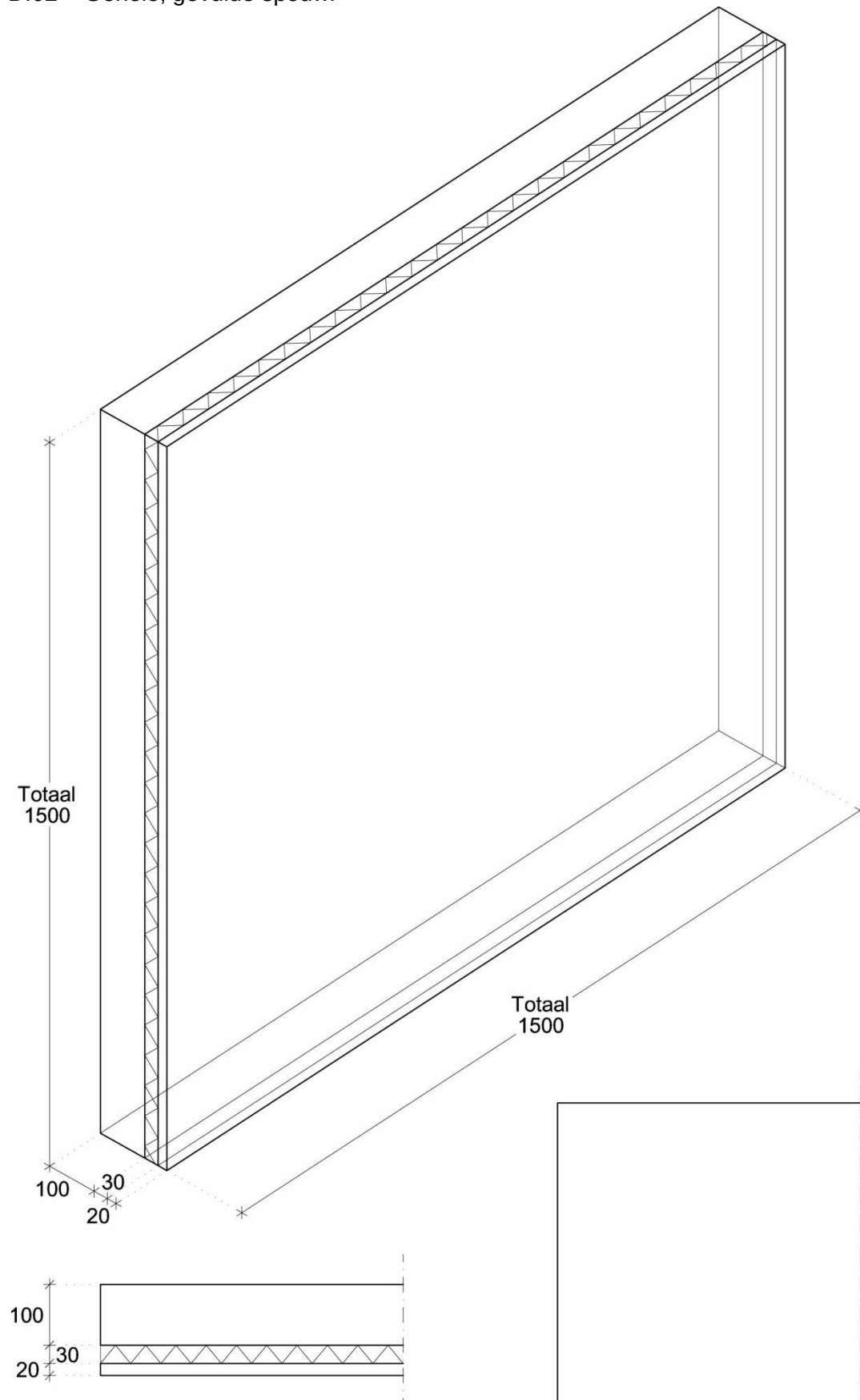
C.02 – Perforatie, groot.



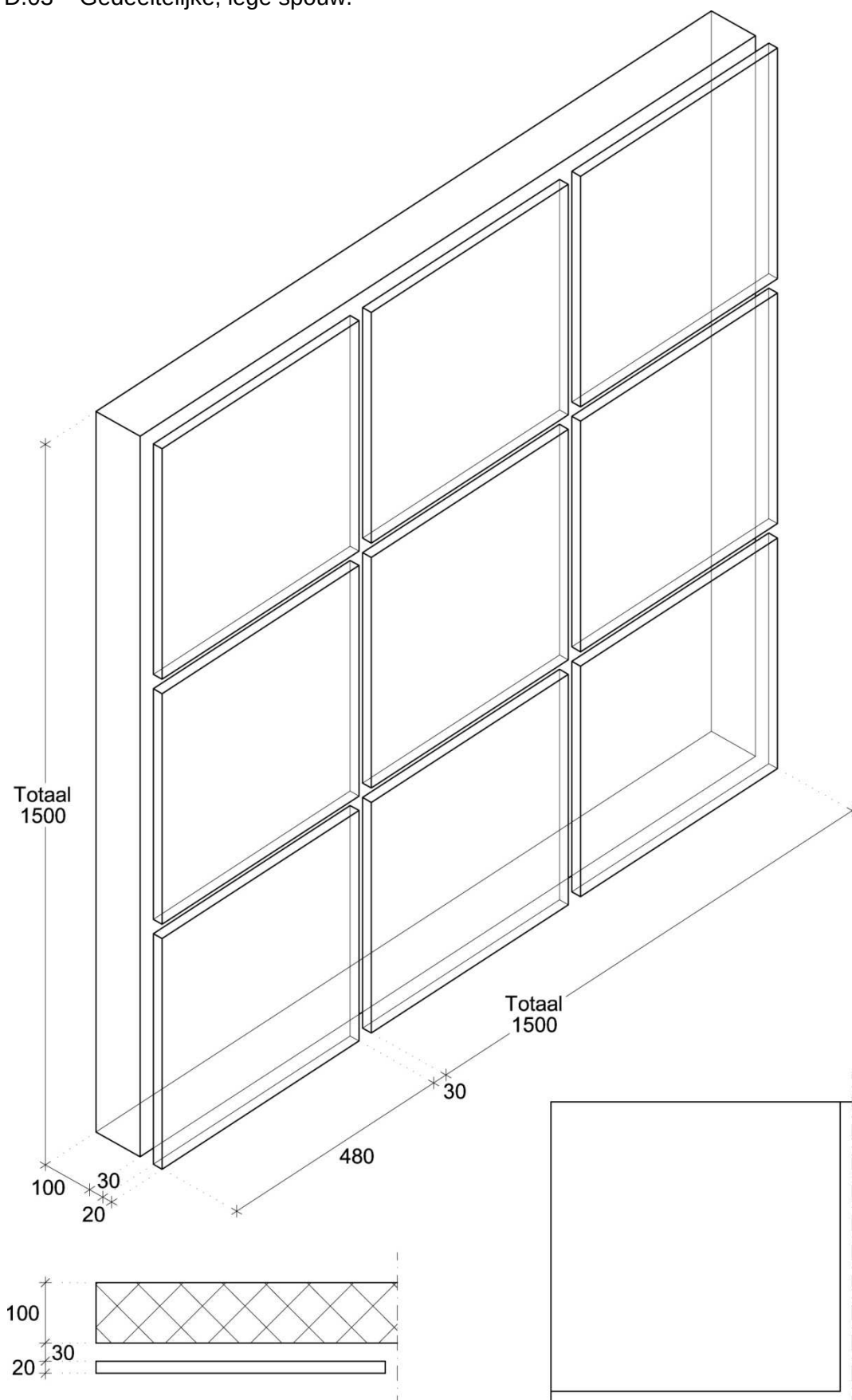
D.01 – Gehele, lege spouw.



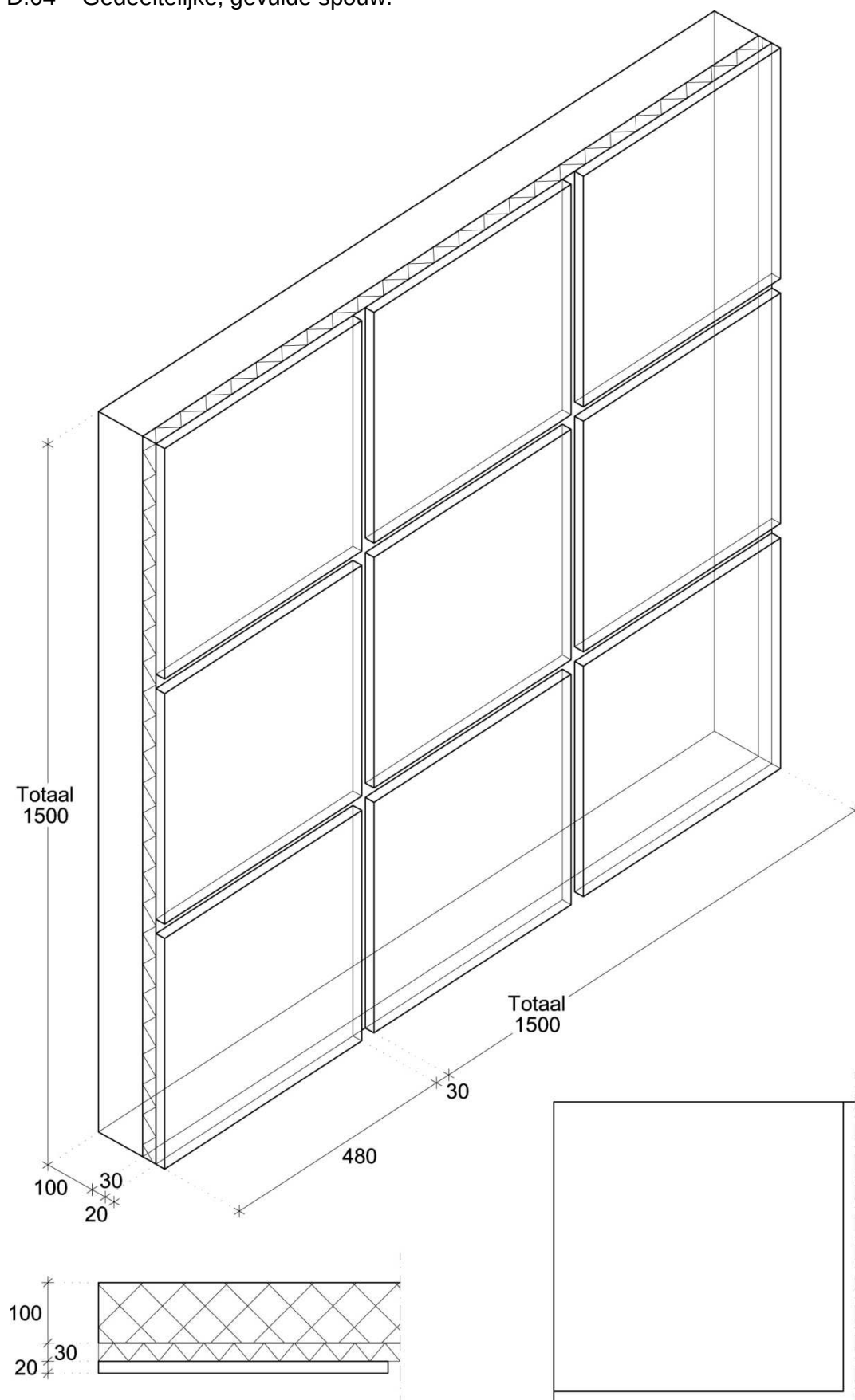
D.02 – Gehele, gevulde spouw.



D.03 – Gedeeltelijke, lege spouw.

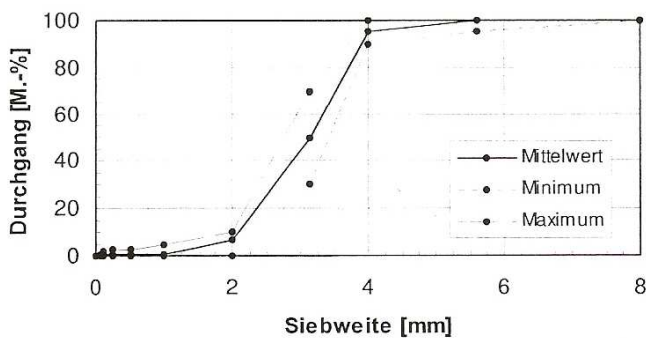


D.04 – Gedeeltelijke, gevulde spouw.



Produktdatenblatt

Sorte	Liapor 2-4/450	
Grundsätzliche Eigenschaften		
Materialart	Blähton	
Kornform	rund, geschlossen	
Geometrische Eigenschaften		
Korngruppe	1/4	mm
Feinanteile (< 0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Physikalische Eigenschaften		
Schüttdichte	0,450 ± 15 %	kg/m³
Kornrohdichte	0,850 ± 15 %	kg/m³
Wasseraufnahme w ₃₀	3 ± 2	M.-%
Wasseraufnahme w ₆₀	4 ± 2	M.-%
Kornfestigkeit (lose)	> 2,1	MPa
Kornfestigkeit (gerüttelt)		MPa
Frostwiderstand	< 4,0	M.-%
Chemische Eigenschaften		
Chloride	< 0,02	M.-%
Säurelösliches Sulfat	< 0,2	M.-%
Gesamtschwefel	< 0,2	M.-%
Chemische Zusammensetzung		
SiO ₂	55 ± 5	%
Al ₂ O ₃	24 ± 5	%
Fe ₂ O ₃	14 ± 5	%
CaO	5 ± 5	%
Spurenelemente	2 ± 2	%
Sonstige Eigenschaften		
Wärmeleitfähigkeit	n.n.	W/(mK)
Brandklasse	A1 (DIN 4102)	
Sieblinie		



Siebweite [mm]	Mittelwert [M.-%]	Minimum [M.-%]	Maximum [M.-%]
0	0	0	0
0.5	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	50	30	70
4	100	100	100
6	100	100	100
8	100	100	100

Liapor GmbH & Co. KG

Internet: www.liapor.comE-Mail: info@liapor.com

Werk Lias Vintřov
 Lias Vintřov, Lehký stavební materiál, k.s.
 CR-35744 Vintřov

Fon (00420) 168 66 53 42
 Fax (00420) 168 66 58 08



09/2002-Th

9.0.3 Bijlage III – Verwerking meetresultaten

Testpositie	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM
-------------	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	-----

A.00 – Referentietest

B.01 – Poreus beton

Freq. [Hz]	$A_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine [m^2 o.r.]							$A_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine [m^2 o.r.]						
50	0,77	0,40	0,71	-	0,59	-	-	0,38	1,84	-	0,19	-	0,24	-
63	0,82	-	1,11	-	0,72	-	-	0,72	0,14	0,26	0,53	0,01	-	-
80	0,58	0,64	0,74	0,62	0,46	0,55	0,60	0,32	0,21	0,39	0,16	0,42	0,43	0,27
100	0,51	0,82	0,60	1,10	0,62	0,60	0,71	0,41	0,16	0,75	0,13	0,23	0,15	0,26
125	0,51	0,60	0,54	0,58	0,73	0,68	0,61	0,15	0,15	0,03	0,04	0,13	0,03	0,07
160	0,65	0,71	0,62	0,53	0,58	0,61	0,62	0,47	0,44	0,51	0,48	0,42	0,60	0,49
200	0,62	0,67	0,62	0,69	0,65	0,64	0,65	0,37	0,30	0,57	0,52	0,69	0,80	0,54
250	0,64	0,60	0,65	0,64	0,63	0,64	0,63	0,57	0,46	0,55	0,62	0,86	0,92	0,66
315	0,70	0,72	0,75	0,72	0,79	0,72	0,73	1,11	0,96	1,03	1,09	1,11	1,31	1,10
400	0,81	0,80	0,80	0,74	0,82	0,77	0,79	1,16	1,51	1,08	1,18	1,48	1,41	1,30
500	0,82	0,84	0,87	0,91	0,93	0,88	0,87	1,55	1,56	1,73	1,72	1,62	1,63	1,63
630	1,01	1,02	0,99	1,07	0,95	0,92	0,99	1,98	2,04	1,92	1,74	1,98	2,28	1,99
800	1,09	1,22	1,15	1,24	1,17	1,25	1,19	2,29	2,29	2,21	2,11	2,11	2,34	2,22
1000	1,61	1,56	1,65	1,74	1,54	1,63	1,62	2,21	2,28	2,53	2,57	2,15	2,35	2,35
1250	1,85	1,81	1,79	1,82	1,86	1,76	1,82	1,80	1,66	2,05	2,08	1,95	1,89	1,90
1600	1,77	1,81	1,82	1,88	1,90	1,87	1,84	1,60	1,89	1,80	1,55	1,86	2,31	1,84
2000	1,94	1,91	1,91	2,00	1,90	2,07	1,96	1,98	1,88	1,98	2,23	2,19	2,16	2,07
2500	2,21	2,30	2,20	2,23	2,42	2,29	2,27	2,21	1,80	2,25	2,40	2,17	2,25	2,18
3150	2,37	2,43	2,43	2,62	2,45	2,35	2,44	1,91	1,91	2,09	2,04	2,18	2,00	2,02
4000	2,89	2,73	2,80	2,99	2,85	2,84	2,85	1,87	2,08	2,36	2,42	2,36	2,42	2,25
5000	3,15	3,25	3,13	3,18	3,22	3,32	3,21	2,06	2,19	2,13	2,19	2,06	2,19	2,14
6300	3,50	3,70	3,50	3,42	3,56	3,80	3,58	1,96	2,03	2,10	2,40	2,48	2,56	2,25
8000	4,62	4,52	4,39	4,35	4,52	4,39	4,47	2,53	2,12	2,03	2,43	2,53	2,32	2,33

B.03 – Poreus beton, gestraald

C.01 – Geperforeerd beton

Freq. [Hz]	$A_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine [m^2 o.r.]							$A_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine [m^2 o.r.]						
50	0,76	0,01	0,15	-	-	0,08	-	-	0,67	-	0,09	0,37	-	-
63	0,01	0,50	-	-	-	-	-	-	0,22	0,12	0,07	-	0,26	-
80	0,33	0,34	0,38	0,20	0,18	0,37	0,17	-	0,41	0,28	0,22	0,78	0,26	-
100	0,09	0,08	0,22	0,09	-	0,12	-	-	0,09	0,54	0,39	0,76	0,36	-
125	0,11	0,08	-	0,07	0,21	0,12	-	0,13	0,06	0,09	0,08	0,18	0,19	0,12
160	0,41	0,36	0,36	0,35	0,28	0,42	0,36	0,61	0,54	0,60	0,66	0,59	0,59	0,60
200	0,53	0,56	0,64	0,75	0,49	0,77	0,62	0,94	0,91	0,96	0,93	0,90	1,13	0,96
250	0,67	0,59	0,67	0,93	0,88	0,85	0,76	0,77	0,63	0,76	0,78	1,18	0,89	0,84
315	0,96	0,92	1,06	1,24	1,00	0,95	1,02	1,16	1,03	1,06	1,28	1,65	1,34	1,25
400	1,13	1,16	1,14	1,56	1,34	1,41	1,29	1,99	1,91	1,67	1,70	1,94	1,77	1,83
500	1,76	1,76	1,95	1,31	1,67	1,49	1,66	1,89	2,68	2,99	2,50	2,15	2,11	2,39
630	2,00	2,35	1,72	2,06	2,45	2,30	2,15	2,04	1,79	2,54	2,28	2,10	2,38	2,19
800	2,58	2,55	2,46	2,46	1,93	2,46	2,40	2,16	2,32	1,97	2,32	2,29	2,29	2,22
1000	2,46	2,65	1,97	2,73	2,61	2,42	2,47	1,88	2,03	1,86	1,88	2,35	1,88	1,98
1250	2,05	2,08	1,66	1,71	1,89	2,11	1,92	2,01	2,11	1,86	1,86	2,11	1,98	1,99
1600	1,58	1,99	1,58	1,83	1,63	1,66	1,71	1,86	2,12	2,02	1,74	2,27	1,99	2,00
2000	1,81	1,75	1,88	2,08	1,84	2,19	1,93	2,23	2,31	1,94	1,94	2,12	2,05	2,10
2500	2,12	1,88	2,04	2,25	2,04	1,80	2,02	1,66	1,96	1,63	2,25	2,00	2,12	1,94
3150	2,48	2,28	2,09	2,28	1,83	2,09	2,17	1,60	1,71	1,63	1,56	1,63	1,63	1,63
4000	1,87	2,19	1,87	1,97	1,87	2,30	2,01	1,42	1,46	1,63	1,87	1,77	1,63	1,63
5000	2,32	2,19	2,00	2,26	2,13	2,26	2,19	1,72	1,61	1,41	1,56	1,61	1,36	1,54
6300	2,48	2,74	2,48	2,32	2,48	2,03	2,42	1,57	1,70	1,46	1,40	1,89	1,35	1,56
8000	2,12	2,53	2,65	2,65	2,43	2,22	2,43	1,76	1,76	1,43	1,43	1,35	1,28	1,50

Testpositie	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM
-------------	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	-----

A.00 – Referentietest

B.01 – Poreus beton

Freq. [Hz]	$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine							$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine						
50								0,09	0,46	-	0,05	-	0,06	-
63								0,18	0,03	0,06	0,13	0,00	-	-
80								0,08	0,05	0,10	0,04	0,10	0,11	0,07
100								0,10	0,04	0,19	0,03	0,06	0,04	0,06
125								0,04	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02
160								0,12	0,11	0,13	0,12	0,10	0,15	0,12
200								0,09	0,08	0,14	0,13	0,17	0,20	0,14
250								0,14	0,12	0,14	0,15	0,22	0,23	0,17
315								0,28	0,24	0,26	0,27	0,28	0,33	0,28
400								0,29	0,38	0,27	0,30	0,37	0,35	0,33
500								0,39	0,39	0,43	0,43	0,40	0,41	0,41
630								0,49	0,51	0,48	0,44	0,49	0,57	0,50
800								0,57	0,57	0,55	0,53	0,53	0,59	0,56
1000								0,55	0,57	0,63	0,64	0,54	0,59	0,59
1250								0,45	0,41	0,51	0,52	0,49	0,47	0,48
1600								0,40	0,47	0,45	0,39	0,46	0,58	0,46
2000								0,49	0,47	0,49	0,56	0,55	0,54	0,52
2500								0,55	0,45	0,56	0,60	0,54	0,56	0,55
3150								0,48	0,48	0,52	0,51	0,54	0,50	0,51
4000								0,47	0,52	0,59	0,61	0,59	0,61	0,56
5000								0,52	0,55	0,53	0,55	0,52	0,55	0,53
6300								0,49	0,51	0,52	0,60	0,62	0,64	0,56
8000								0,63	0,53	0,51	0,61	0,63	0,58	0,58

B.03 – Poreus beton, gestraald

C.01 – Geperforeerd beton

Freq. [Hz]	$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine							$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Sabine						
50	0,19	0,00	0,04	-	-	0,02	-	-	0,17	-	0,02	0,09	-	-
63	0,00	0,12	-	-	-	-	-	-	0,05	0,03	0,02	-	0,06	-
80	0,08	0,08	0,09	0,05	0,05	0,09	0,04	-	0,10	0,07	0,05	0,20	0,07	-
100	0,02	0,02	0,05	0,02	-	0,03	-	-	0,02	0,14	0,10	0,19	0,09	-
125	0,03	0,02	-	0,02	0,05	0,03	-	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,03
160	0,10	0,09	0,09	0,09	0,07	0,10	0,09	0,15	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15
200	0,13	0,14	0,16	0,19	0,12	0,19	0,16	0,24	0,23	0,24	0,23	0,22	0,28	0,24
250	0,17	0,15	0,17	0,23	0,22	0,21	0,19	0,19	0,16	0,19	0,20	0,30	0,22	0,21
315	0,24	0,23	0,27	0,31	0,25	0,24	0,26	0,29	0,26	0,27	0,32	0,41	0,34	0,31
400	0,28	0,29	0,29	0,39	0,34	0,35	0,32	0,50	0,48	0,42	0,42	0,49	0,44	0,46
500	0,44	0,44	0,49	0,33	0,42	0,37	0,41	0,47	0,67	0,75	0,62	0,54	0,53	0,60
630	0,50	0,59	0,43	0,51	0,61	0,58	0,54	0,51	0,45	0,63	0,57	0,52	0,59	0,55
800	0,65	0,64	0,61	0,61	0,48	0,61	0,60	0,54	0,58	0,49	0,58	0,57	0,57	0,56
1000	0,61	0,66	0,49	0,68	0,65	0,60	0,62	0,47	0,51	0,46	0,47	0,59	0,47	0,50
1250	0,51	0,52	0,41	0,43	0,47	0,53	0,48	0,50	0,53	0,46	0,46	0,53	0,50	0,50
1600	0,39	0,50	0,39	0,46	0,41	0,41	0,43	0,46	0,53	0,50	0,44	0,57	0,50	0,50
2000	0,45	0,44	0,47	0,52	0,46	0,55	0,48	0,56	0,58	0,49	0,49	0,53	0,51	0,52
2500	0,53	0,47	0,51	0,56	0,51	0,45	0,51	0,41	0,49	0,41	0,56	0,50	0,53	0,48
3150	0,62	0,57	0,52	0,57	0,46	0,52	0,54	0,40	0,43	0,41	0,39	0,41	0,41	0,41
4000	0,47	0,55	0,47	0,49	0,47	0,58	0,50	0,35	0,37	0,41	0,47	0,44	0,41	0,41
5000	0,58	0,55	0,50	0,56	0,53	0,56	0,55	0,43	0,40	0,35	0,39	0,40	0,34	0,39
6300	0,62	0,68	0,62	0,58	0,62	0,51	0,60	0,39	0,42	0,36	0,35	0,47	0,34	0,39
8000	0,53	0,63	0,66	0,66	0,61	0,56	0,61	0,44	0,44	0,36	0,36	0,34	0,32	0,38

Testpositie	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM
-------------	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	-----

A.00 – Referentietest

B.01 – Poreus beton

Freq. [Hz]	Gem. α_{ruimte} volgens Eyring							Gem. α_{ruimte} volgens Eyring						
50	0,01	0,01	0,01	-	0,01	-	-	0,02	0,04	-	0,01	-	0,01	-
63	0,01	-	0,02	-	0,01	-	-	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	-	-
80	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
100	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
125	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
160	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
200	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
250	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
315	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
400	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
500	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
630	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05
800	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
1000	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07
1250	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
1600	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06
2000	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
2500	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07
3150	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,07
4000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08
5000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
6300	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10
8000	0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

B.03 – Poreus beton, gestraald

C.01 – Geperforeerd beton

Freq. [Hz]	Gem. α_{ruimte} volgens Eyring							Gem. α_{ruimte} volgens Eyring						
50	0,02	0,01	0,01	-	-	0,01	-	-	0,02	-	0,01	0,02	-	-
63	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	0,01	-	0,02	-
80	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	-	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	-
100	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	-	-	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	-
125	0,01	0,01	-	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
160	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
200	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
250	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
315	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03
400	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
500	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06
630	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05
800	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
1000	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06
1250	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06
1600	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06
2000	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
2500	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07
3150	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
4000	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07
5000	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
6300	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09
8000	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10

Testpositie	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM	A1	A2	B1	B2	C1	C2	GEM
-------------	----	----	----	----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	-----

A.00 – Referentietest

B.01 – Poreus beton

Freq. [Hz]	$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Eyring							$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Eyring						
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0,08	0,05	0,09	0,04	0,10	0,10	0,06	0,08	0,05	0,09	0,04	0,10	0,10	0,06
100	0,09	0,03	0,17	0,02	0,05	0,05	0,05	0,09	0,03	0,17	0,02	0,05	0,05	0,05
125	0,04	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,04	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
160	0,12	0,11	0,13	0,12	0,10	0,15	0,12	0,12	0,11	0,13	0,12	0,10	0,15	0,12
200	0,09	0,07	0,14	0,13	0,17	0,20	0,13	0,09	0,07	0,14	0,13	0,17	0,20	0,13
250	0,14	0,11	0,14	0,15	0,21	0,23	0,16	0,14	0,11	0,14	0,15	0,21	0,23	0,16
315	0,27	0,23	0,25	0,27	0,27	0,32	0,27	0,27	0,23	0,25	0,27	0,27	0,32	0,27
400	0,28	0,37	0,26	0,29	0,36	0,34	0,32	0,28	0,37	0,26	0,29	0,36	0,34	0,32
500	0,38	0,38	0,42	0,42	0,39	0,40	0,40	0,38	0,38	0,42	0,42	0,39	0,40	0,40
630	0,48	0,49	0,46	0,42	0,48	0,55	0,48	0,48	0,49	0,46	0,42	0,48	0,55	0,48
800	0,55	0,55	0,53	0,51	0,51	0,56	0,53	0,55	0,55	0,53	0,51	0,51	0,56	0,53
1000	0,53	0,54	0,60	0,61	0,51	0,56	0,56	0,53	0,54	0,60	0,61	0,51	0,56	0,56
1250	0,43	0,40	0,49	0,49	0,46	0,45	0,45	0,43	0,40	0,49	0,49	0,46	0,45	0,45
1600	0,38	0,45	0,43	0,37	0,44	0,55	0,44	0,38	0,45	0,43	0,37	0,44	0,55	0,44
2000	0,47	0,45	0,47	0,53	0,52	0,51	0,49	0,47	0,45	0,47	0,53	0,52	0,51	0,49
2500	0,52	0,43	0,53	0,56	0,51	0,53	0,51	0,52	0,43	0,53	0,56	0,51	0,53	0,51
3150	0,45	0,45	0,49	0,48	0,51	0,47	0,47	0,45	0,45	0,49	0,48	0,51	0,47	0,47
4000	0,44	0,48	0,55	0,56	0,55	0,56	0,52	0,44	0,48	0,55	0,56	0,55	0,56	0,52
5000	0,48	0,51	0,49	0,51	0,48	0,51	0,50	0,48	0,51	0,49	0,51	0,48	0,51	0,50
6300	0,45	0,47	0,48	0,55	0,57	0,59	0,52	0,45	0,47	0,48	0,55	0,57	0,59	0,52
8000	0,57	0,48	0,46	0,55	0,57	0,53	0,53	0,57	0,48	0,46	0,55	0,57	0,53	0,53

B.03 – Poreus beton, gestraald

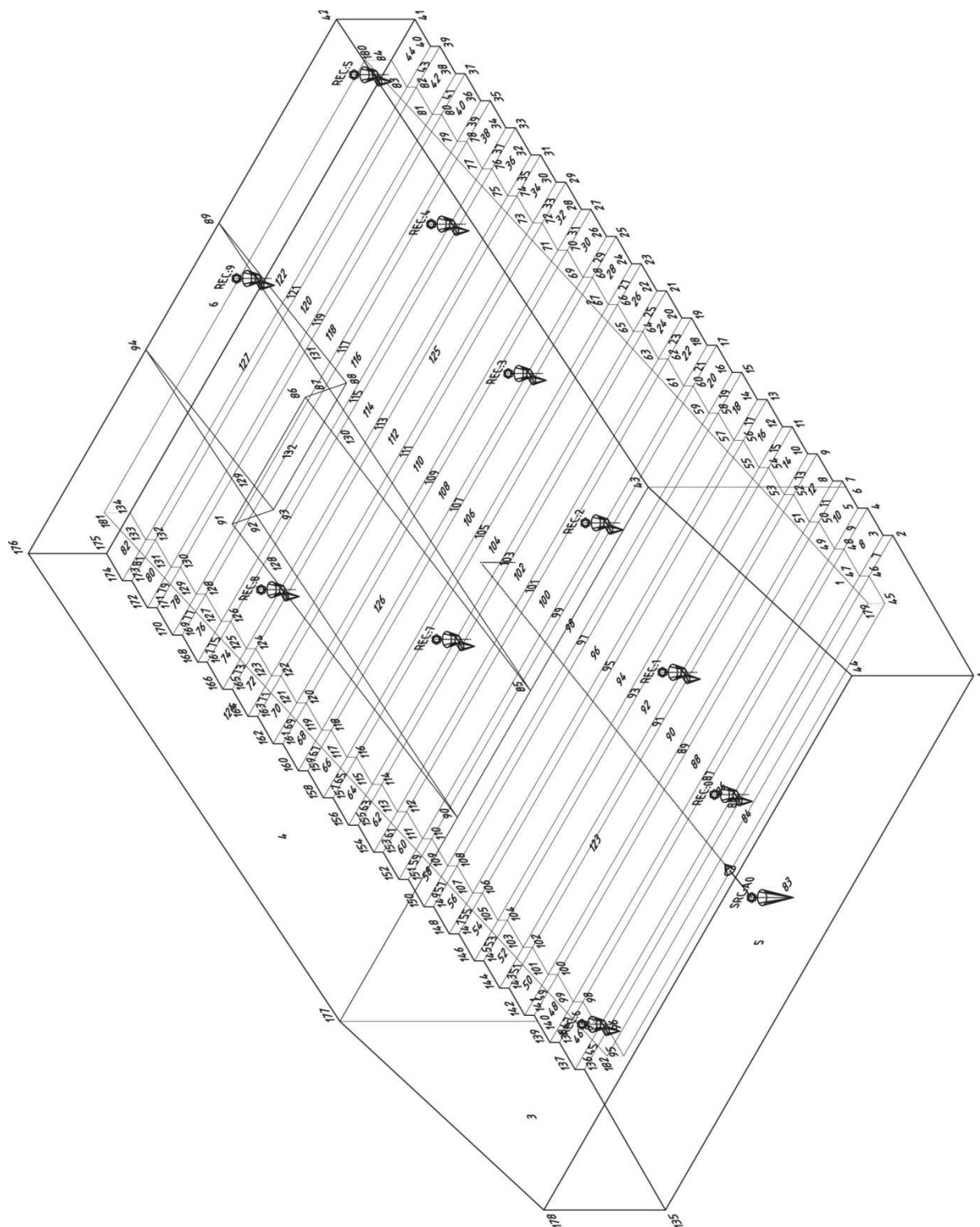
C.01 – Geperforeerd beton

Freq. [Hz]	$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Eyring							$\alpha_{\text{proefstuk}}$ volgens Eyring						
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0,08	0,08	0,09	0,05	0,05	0,09	0,04	-	0,10	0,06	0,05	0,19	0,06	-
100	0,01	0,01	0,07	0,01	-	0,02	-	-	0,01	0,12	0,09	0,18	0,08	-
125	0,02	0,02	-	0,01	0,06	0,03	-	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,03
160	0,10	0,09	0,09	0,09	0,07	0,10	0,09	0,15	0,13	0,15	0,16	0,14	0,14	0,15
200	0,13	0,14	0,16	0,19	0,12	0,19	0,15	0,23	0,22	0,24	0,23	0,22	0,28	0,24
250	0,16	0,15	0,17	0,23	0,21	0,21	0,19	0,19	0,16	0,19	0,19	0,29	0,22	0,21
315	0,23	0,23	0,26	0,30	0,24	0,23	0,25	0,28	0,25	0,26	0,31	0,40	0,33	0,31
400	0,28	0,28	0,28	0,38	0,33	0,34	0,31	0,48	0,46	0,41	0,41	0,47	0,43	0,44
500	0,43	0,43	0,47	0,32	0,41	0,36	0,40	0,46	0,65	0,72	0,60	0,52	0,51	0,58
630	0,48	0,57	0,42	0,50	0,59	0,55	0,52	0,49	0,43	0,61	0,55	0,51	0,57	0,53
800	0,62	0,61	0,59	0,59	0,46	0,59	0,58	0,52	0,56	0,47	0,56	0,55	0,55	0,53
1000	0,58	0,63	0,47	0,65	0,62	0,58	0,59	0,45	0,48	0,44	0,45	0,56	0,45	0,47
1250	0,49	0,49	0,40	0,41	0,45	0,50	0,46	0,48	0,50	0,44	0,44	0,50	0,47	0,47
1600	0,38	0,47	0,38	0,44	0,39	0,40	0,41	0,44	0,50	0,48	0,42	0,54	0,47	0,48
2000	0,43	0,42	0,45	0,49	0,44	0,52	0,46	0,53	0,55	0,46	0,46	0,50	0,49	0,50
2500	0,50	0,44	0,48	0,53	0,48	0,43	0,48	0,39	0,46	0,38	0,53	0,47	0,50	0,46
3150	0,58	0,53	0,49	0,53	0,43	0,49	0,51	0,38	0,40	0,39	0,37	0,39	0,39	0,38
4000	0,44	0,51	0,44	0,46	0,44	0,54	0,47	0,33	0,34	0,38	0,44	0,41	0,38	0,38
5000	0,54	0,51	0,46	0,52	0,49	0,52	0,51	0,40	0,37	0,33	0,36	0,37	0,32	0,36
6300	0,57	0,63	0,57	0,53	0,57	0,47	0,56	0,36	0,39	0,34	0,32	0,44	0,31	0,36
8000	0,48	0,57	0,60	0,60	0,55	0,50	0,55	0,40	0,40	0,33	0,33	0,31	0,29	0,34

B.01 – Poreus beton**B.03 – Poreus
beton, gestraald****C.01 – Geperforeerd
beton**

<i>Freq. [Hz]</i>	<i>Standaarddeviatie nagalmtijd [±s]</i>	<i>Standaarddeviatie nagalmtijd [±s]</i>	<i>Standaarddeviatie nagalmtijd [±s]</i>
50	0,69	0,68	0,55
63	0,57	0,65	0,47
80	0,47	0,51	0,42
100	0,40	0,45	0,36
125	0,41	0,44	0,39
160	0,28	0,29	0,26
200	0,24	0,23	0,21
250	0,21	0,20	0,19
315	0,15	0,16	0,15
400	0,13	0,13	0,11
500	0,10	0,10	0,09
630	0,09	0,08	0,08
800	0,07	0,07	0,07
1000	0,06	0,06	0,06
1250	0,05	0,05	0,05
1600	0,05	0,05	0,05
2000	0,04	0,04	0,04
2500	0,03	0,04	0,04
3150	0,03	0,03	0,03
4000	0,03	0,03	0,03
5000	0,02	0,02	0,02
6300	0,02	0,02	0,02
8000	0,02	0,02	0,02

9.0.4 Bijlage IV – CATT-Acoustic modellen



Auditorium-model – Simulatie 1:*Geometry-bestand van het auditorium-model:*

;Afstudeerproject Kevin van der Weijden

;Akoestisch beton - Auditorium:

MASTER.GEO

;Materialen (van der Linden, 2006)

ABS publiek = <52 68 85 97 93 85> L <30

40 50 60 70 80> {150 0 0}

ABS glabeton = <1 1 2 2 3 4> L <30 30 30

30 30 30> {150 150 150}

ABS porbeton = <1 16 40 56 49 52> L <30

30 30 30 30 30> {50 50 50}

ABS okpubl = <0 0 0 0 0 0> L <30 30 30

30 30 30> {0 0 0}

CORNERS

;Rechterwand

1	0	0	0
2	6.2	0	0
3	6.2	0	0.363
4	7.4	0	0.363
5	7.4	0	0.726
6	8.333	0	0.726
7	8.6	0	0.726
8	8.6	0	1.089
9	9.8	0	1.089
10	9.8	0	1.453
11	11	0	1.453
12	11	0	1.816
13	12.2	0	1.816
14	12.2	0	2.179
15	13.4	0	2.179
16	13.4	0	2.542
17	14.6	0	2.542
18	14.6	0	2.905
19	15.8	0	2.905
20	15.8	0	3.268
21	17	0	3.268
22	17	0	3.632
23	18.2	0	3.632
24	18.2	0	3.995
25	19.4	0	3.995
26	19.4	0	4.358
27	20.6	0	4.358
28	20.6	0	4.721
29	21.8	0	4.721
30	21.8	0	5.084
31	23	0	5.084
32	23	0	5.447
33	24.2	0	5.447

34	24.2	0	5.811
35	25.4	0	5.811
36	25.4	0	6.174
37	26.6	0	6.174
38	26.6	0	6.573
39	27.8	0	6.573
40	27.8	0	6.9
41	29	0	6.9
42	29	0	9.9
43	8.333	0	8.3
44	0	0	4.663
;Rechterzijde publiek			
45	5	1.8	0
46	6.2	1.8	0
47	6.2	1.8	0.363
48	7.4	1.8	0.363
49	7.4	1.8	0.726
50	8.6	1.8	0.726
51	8.6	1.8	1.089
52	9.8	1.8	1.089
53	9.8	1.8	1.453
54	11	1.8	1.453
55	11	1.8	1.816
56	12.2	1.8	1.816
57	12.2	1.8	2.179
58	13.4	1.8	2.179
59	13.4	1.8	2.542
60	14.6	1.8	2.542
61	14.6	1.8	2.905
62	15.8	1.8	2.905
63	15.8	1.8	3.268
64	17	1.8	3.268
65	17	1.8	3.632
66	18.2	1.8	3.632
67	18.2	1.8	3.995
68	19.4	1.8	3.995
69	19.4	1.8	4.358
70	20.6	1.8	4.358
71	20.6	1.8	4.721
72	21.8	1.8	4.721
73	21.8	1.8	5.084
74	23	1.8	5.084
75	23	1.8	5.447
76	24.2	1.8	5.447
77	24.2	1.8	5.811
78	25.4	1.8	5.811
79	25.4	1.8	6.174
80	26.6	1.8	6.174
81	26.6	1.8	6.573
82	27.8	1.8	6.573
83	27.8	1.8	6.9
84	29	1.8	6.9
;Plafond			
85	8.333	9	8.3

86	21.3	9	10.446
87	21.672	9	9.333
88	21.934	9	8.549
89	29	9	9.9
90	8.333	14.6	8.3
91	21.3	14.6	10.446
92	21.672	14.6	9.333
93	21.934	14.6	8.549
94	29	14.6	9.9
;Linkerzijde publiek			
95	5	21.8	0
96	6.2	21.8	0
97	6.2	21.8	0.363
98	7.4	21.8	0.363
99	7.4	21.8	0.726
100	8.6	21.8	0.726
101	8.6	21.8	1.089
102	9.8	21.8	1.089
103	9.8	21.8	1.453
104	11	21.8	1.453
105	11	21.8	1.816
106	12.2	21.8	1.816
107	12.2	21.8	2.179
108	13.4	21.8	2.179
109	13.4	21.8	2.542
110	14.6	21.8	2.542
111	14.6	21.8	2.905
112	15.8	21.8	2.905
113	15.8	21.8	3.268
114	17	21.8	3.268
115	17	21.8	3.632
116	18.2	21.8	3.632
117	18.2	21.8	3.995
118	19.4	21.8	3.995
119	19.4	21.8	4.358
120	20.6	21.8	4.358
121	20.6	21.8	4.721
122	21.8	21.8	4.721
123	21.8	21.8	5.084
124	23	21.8	5.084
125	23	21.8	5.447
126	24.2	21.8	5.447
127	24.2	21.8	5.811
128	25.4	21.8	5.811
129	25.4	21.8	6.174
130	26.6	21.8	6.174
131	26.6	21.8	6.573
132	27.8	21.8	6.573
133	27.8	21.8	6.9
134	29	21.8	6.9
;Linkerwand			
135	0	23.6	0
136	6.2	23.6	0
137	6.2	23.6	0.363

138	7.4	23.6	0.363
139	7.4	23.6	0.726
140	8.333	23.6	0.726
141	8.6	23.6	0.726
142	8.6	23.6	1.089
143	9.8	23.6	1.089
144	9.8	23.6	1.453
145	11	23.6	1.453
146	11	23.6	1.816
147	12.2	23.6	1.816
148	12.2	23.6	2.179
149	13.4	23.6	2.179
150	13.4	23.6	2.542
151	14.6	23.6	2.542
152	14.6	23.6	2.905
153	15.8	23.6	2.905
154	15.8	23.6	3.268
155	17	23.6	3.268
156	17	23.6	3.632
157	18.2	23.6	3.632
158	18.2	23.6	3.995
159	19.4	23.6	3.995
160	19.4	23.6	4.358
161	20.6	23.6	4.358
162	20.6	23.6	4.721
163	21.8	23.6	4.721
164	21.8	23.6	5.084
165	23	23.6	5.084
166	23	23.6	5.447
167	24.2	23.6	5.447
168	24.2	23.6	5.811
169	25.4	23.6	5.811
170	25.4	23.6	6.174
171	26.6	23.6	6.174
172	26.6	23.6	6.573
173	27.8	23.6	6.573
174	27.8	23.6	6.9
175	29	23.6	6.9
176	29	23.6	9.9
177	8.333	23.6	8.3
178	0	23.6	4.663
;Publiek			
179	5	1.8	0.637
180	29	1.8	7.9
181	29	21.8	7.9
182	5	21.8	0.637

PLANES

;Wanden

[1 rw voor \ 1-6 43 44 \ glabeton]

[2 rw achter \ 6-43 \ glabeton]

[3 lw voor / 135-140 177 178 / glabeton]

[4 lw achter / 140-177 / glabeton]

[5 w voor / 135 178 44 1 / glabeton]

[6 w achter / 41 42 176 175 / glabeton]
;Rechtertrap
[7 trap1 / 2 3 47 46 / glabeton]
[8 trap2 / 3 4 48 47 / glabeton]
[9 trap3 / 4 5 49 48 / glabeton]
[10 trap4 / 5 7 50 49 / glabeton]
[11 trap5 / 7 8 51 50 / glabeton]
[12 trap6 / 8 9 52 51 / glabeton]
[13 trap7 / 9 10 53 52 / glabeton]
[14 trap8 / 10 11 54 53 / glabeton]
[15 trap9 / 11 12 55 54 / glabeton]
[16 trap10 / 12 13 56 55 / glabeton]
[17 trap11 / 13 14 57 56 / glabeton]
[18 trap12 / 14 15 58 57 / glabeton]
[19 trap13 / 15 16 59 58 / glabeton]
[20 trap14 / 16 17 60 59 / glabeton]
[21 trap15 / 17 18 61 60 / glabeton]
[22 trap16 / 18 19 62 61 / glabeton]
[23 trap17 / 19 20 63 62 / glabeton]
[24 trap18 / 20 21 64 63 / glabeton]
[25 trap19 / 21 22 65 64 / glabeton]
[26 trap20 / 22 23 66 65 / glabeton]
[27 trap21 / 23 24 67 66 / glabeton]
[28 trap22 / 24 25 68 67 / glabeton]
[29 trap23 / 25 26 69 68 / glabeton]
[30 trap24 / 26 27 70 69 / glabeton]
[31 trap25 / 27 28 71 70 / glabeton]
[32 trap26 / 28 29 72 71 / glabeton]
[33 trap27 / 29 30 73 72 / glabeton]
[34 trap28 / 30 31 74 73 / glabeton]
[35 trap29 / 31 32 75 74 / glabeton]
[36 trap30 / 32 33 76 75 / glabeton]
[37 trap31 / 33 34 77 76 / glabeton]
[38 trap32 / 34 35 78 77 / glabeton]
[39 trap33 / 35 36 79 78 / glabeton]
[40 trap34 / 36 37 80 79 / glabeton]
[41 trap35 / 37 38 81 80 / glabeton]
[42 trap36 / 38 39 82 81 / glabeton]
[43 trap37 / 39 40 83 82 / glabeton]
[44 trap38 / 40 41 84 83 / glabeton]
;Linkertrap
[45 trap39 / 96 97 137 136 / glabeton]
[46 trap40 / 97 98 138 137 / glabeton]
[47 trap41 / 98 99 139 138 / glabeton]
[48 trap42 / 99 100 141 139 / glabeton]
[49 trap43 / 100 101 142 141 / glabeton]
[50 trap44 / 101 102 143 142 / glabeton]
[51 trap45 / 102 103 144 143 / glabeton]
[52 trap46 / 103 104 145 144 / glabeton]
[53 trap47 / 104 105 146 145 / glabeton]
[54 trap48 / 105 106 147 146 / glabeton]
[55 trap49 / 106 107 148 147 / glabeton]
[56 trap50 / 107 108 149 148 / glabeton]
[57 trap51 / 108 109 150 149 / glabeton]

[58 trap52 / 109 110 151 150 / glabeton]
[59 trap53 / 110 111 152 151 / glabeton]
[60 trap54 / 111 112 153 152 / glabeton]
[61 trap55 / 112 113 154 153 / glabeton]
[62 trap56 / 113 114 155 154 / glabeton]
[63 trap57 / 114 115 156 155 / glabeton]
[64 trap58 / 115 116 157 156 / glabeton]
[65 trap59 / 116 117 158 157 / glabeton]
[66 trap60 / 117 118 159 158 / glabeton]
[67 trap61 / 118 119 160 159 / glabeton]
[68 trap62 / 119 120 161 160 / glabeton]
[69 trap63 / 120 121 162 161 / glabeton]
[70 trap64 / 121 122 163 162 / glabeton]
[71 trap65 / 122 123 164 163 / glabeton]
[72 trap66 / 123 124 165 164 / glabeton]
[73 trap67 / 124 125 166 165 / glabeton]
[74 trap68 / 125 126 167 166 / glabeton]
[75 trap69 / 126 127 168 167 / glabeton]
[76 trap70 / 127 128 169 168 / glabeton]
[77 trap71 / 128 129 170 169 / glabeton]
[78 trap72 / 129 130 171 170 / glabeton]
[79 trap73 / 130 131 172 171 / glabeton]
[80 trap74 / 131 132 173 172 / glabeton]
[81 trap75 / 132 133 174 173 / glabeton]
[82 trap76 / 133 134 175 174 / glabeton]
;Podium
[83 podium / 1 2 46 45 95 96 136 135 / glabeton]
;Vloer publiek
[84 publiek1 / 45 46 96 95 / glabeton]
[85 publiek2 / 46 47 97 96 / glabeton]
[86 publiek3 / 47 48 98 97 / glabeton]
[87 publiek4 / 48 49 99 98 / glabeton]
[88 publiek5 / 49 50 100 99 / glabeton]
[89 publiek6 / 50 51 101 100 / glabeton]
[90 publiek7 / 51 52 102 101 / glabeton]
[91 publiek8 / 52 53 103 102 / glabeton]
[92 publiek9 / 53 54 104 103 / glabeton]
[93 publiek10 / 54 55 105 104 / glabeton]
[94 publiek11 / 55 56 106 105 / glabeton]
[95 publiek12 / 56 57 107 106 / glabeton]
[96 publiek13 / 57 58 108 107 / glabeton]
[97 publiek14 / 58 59 109 108 / glabeton]
[98 publiek15 / 59 60 110 109 / glabeton]
[99 publiek16 / 60 61 111 110 / glabeton]
[100 publiek17 / 61 62 112 111 / glabeton]
[101 publiek18 / 62 63 113 112 / glabeton]
[102 publiek19 / 63 64 114 113 / glabeton]
[103 publiek20 / 64 65 115 114 / glabeton]
[104 publiek21 / 65 66 116 115 / glabeton]
[105 publiek22 / 66 67 117 116 / glabeton]
[106 publiek23 / 67 68 118 117 / glabeton]
[107 publiek24 / 68 69 119 118 / glabeton]
[108 publiek25 / 69 70 120 119 / glabeton]

[109 publiek26 / 70 71 121 120 / glabeton]
 [110 publiek27 / 71 72 122 121 / glabeton]
 [111 publiek28 / 72 73 123 122 / glabeton]
 [112 publiek29 / 73 74 124 123 / glabeton]
 [113 publiek30 / 74 75 125 124 / glabeton]
 [114 publiek31 / 75 76 126 125 / glabeton]
 [115 publiek32 / 76 77 127 126 / glabeton]
 [116 publiek33 / 77 78 128 127 / glabeton]
 [117 publiek34 / 78 79 129 128 / glabeton]
 [118 publiek35 / 79 80 130 129 / glabeton]
 [119 publiek36 / 80 81 131 130 / glabeton]
 [120 publiek37 / 81 82 132 131 / glabeton]
 [121 publiek38 / 82 83 133 132 / glabeton]
 [122 publiek39 / 83 84 134 133 / glabeton]
 ;Plafond
 [123 p voor / 178 177 43 44 / glabeton]
 [124 pl achter / 177 176 94 90 / glabeton]
 [125 pr achter / 85 89 42 43 / glabeton]
 [126 pm voor / 90 91 86 85 / glabeton]
 [127 pm achter / 93 94 89 88 / glabeton]
 [128 pm linksvoor / 90 92 91 / glabeton]
 [129 pm linksachter / 94 93 92 / glabeton]
 [130 pm rechtsvoor / 85 86 87 / glabeton]
 [131 pm rechtsachter / 87 88 89 /
 glabeton]
 [132 pm midden / 88 86 91 93 / glabeton]
 ;Publiek
 [133 publiekvlak boven / 179-182 / publiek]

[134 publiekvlak onder / 182 181 180 179 /
okpubl]

*Receiver-bestand van het auditorium-
model:*

;Afstudeerproject Kevin van der Weijden
;Akoestisch beton - Auditorium: REC.LOC

RECEIVERS

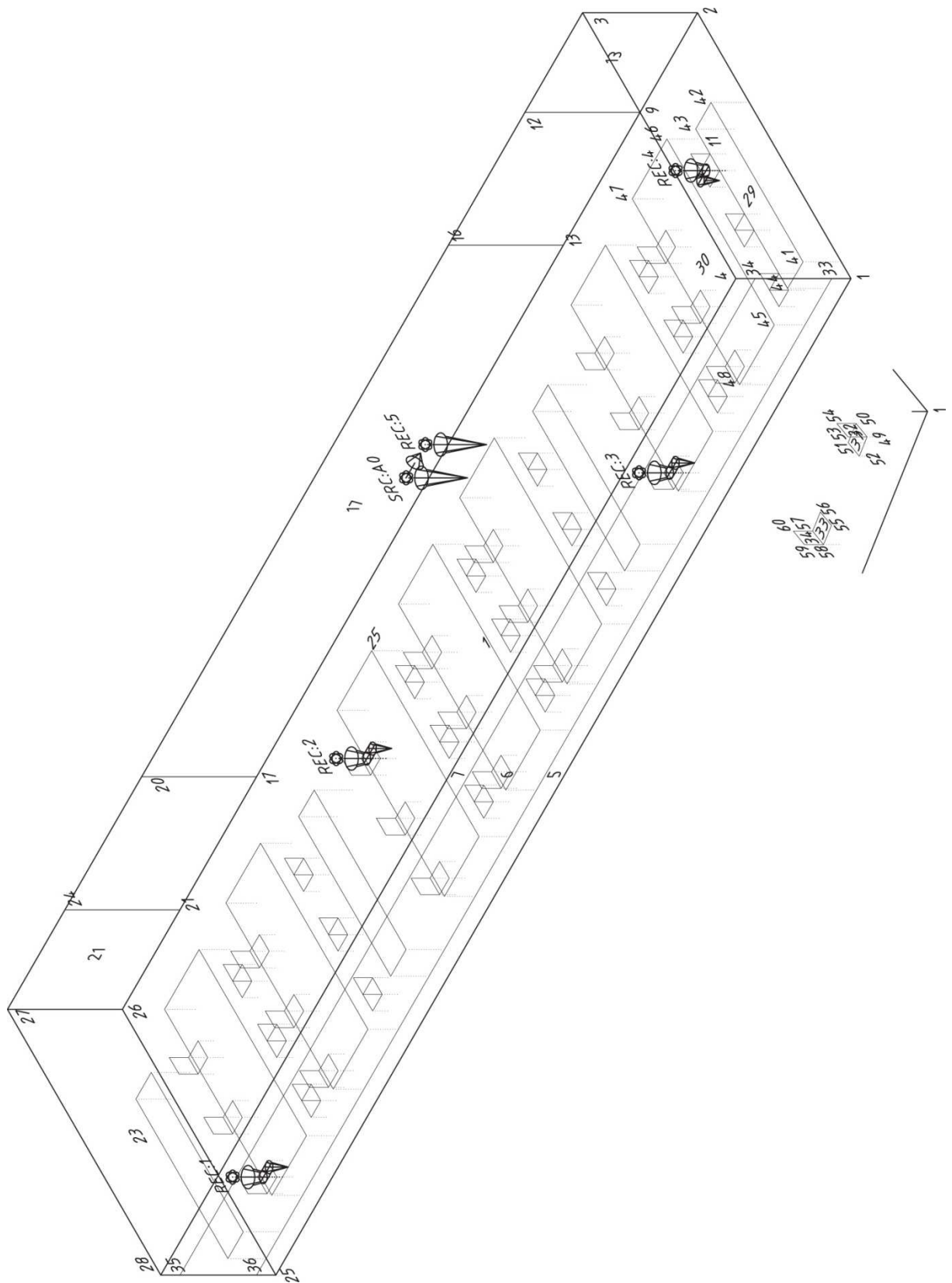
0	6	11.25	1.3
1	9.6	9.45	2.389
2	14.4	7.65	3.842
3	19.2	5.85	5.295
4	24	4.05	6.747
5	28.8	2.25	8.2
6	6	21.4	1.3
7	16.8	15.2	4.568
8	22.8	19	6.384
9	28.8	11.25	8.2

Source-bestand van het auditorium-model:

;Afstudeerproject Kevin van der Weijden
;Akoestisch beton - Auditorium: SRC.LOC

SOURCEDEFS

A0 2 11.8 1.6 talker.SD1 16.8 11.8 4.568
Lp1m_a = Lp_voice_normal



Werkplek-model – Simulatie 1.

Geometry-bestand van het werkplek-model:

;Afstudeerproject Kevin van der Weijden

;Akoestisch beton - Werkplek:

MASTER.GEO

;Materialen (van der Linden, 2006)

ABS meubels = <2 2 2 4 4 3> L <30 30 30 30 30 30> {255 255 255}

ABS glas = <10 4 3 2 2 2> L <30 30 30 30 30 30> {0 50 150}

ABS open = <90 90 90 90 90 90> L <30 30 30 30 30 30> {0 0 0}

ABS glabeton = <1 1 2 2 3 4> L <30 30 30 30 30 30> {150 150 150}

ABS porbeton = <1 16 40 56 49 52> L <30 30 30 30 30 30> {50 50 50}

CORNERS

;Ruimte

1	0	0	0
2	8	0	0
3	8	0	3
4	0	0	3
5	12	0	0
6	16	0	0
7	16	0	3
8	12	0	3
9	8	3	0
10	12	3	0
11	12	3	3
12	8	3	3
13	8	7	0
14	12	7	0
15	12	7	3
16	8	7	3
17	8	23	0
18	12	23	0
19	12	23	3
20	8	23	3
21	8	27	0
22	12	27	0
23	12	27	3
24	8	27	3
25	0	30	0
26	8	30	0
27	8	30	3
28	0	30	3
29	12	30	0
30	16	30	0
31	16	30	3

32	12	30	3
33	0	0	0.5
34	0	0	2.5
35	0	30	2.5
36	0	30	0.5
37	16	0	0.5
38	16	0	2.5
39	16	30	2.5
40	16	30	0.5

;Kasten

41	0.5	0	1
42	5.3	0	1
43	5.3	0.8	1
44	0.5	0.8	1
45	0.5	8.5	1
46	5.3	8.5	1
47	5.3	9.3	1
48	0.5	9.3	1
49	0.5	20.7	1
50	5.3	20.7	1
51	5.3	21.5	1
52	0.5	21.5	1
53	0.5	29.2	1
54	5.3	29.2	1
55	5.3	30	1
56	0.5	30	1

;Bureaus

57	0.5	1.9	0.8
58	6.1	1.9	0.8
59	6.1	3.7	0.8
60	0.5	3.7	0.8
61	0.5	5.1	0.8
62	6.1	5.1	0.8
63	6.1	6.9	0.8
64	0.5	6.9	0.8
65	0.5	10.9	0.8
66	6.1	10.9	0.8
67	6.1	12.7	0.8
68	0.5	12.7	0.8
69	0.5	14.1	0.8
70	6.1	14.1	0.8
71	6.1	15.9	0.8
72	0.5	15.9	0.8
73	0.5	17.3	0.8
74	6.1	17.3	0.8
75	6.1	19.1	0.8
76	0.5	19.1	0.8
77	0.5	23.1	0.8
78	6.1	23.1	0.8
79	6.1	24.9	0.8
80	0.5	24.9	0.8
81	0.5	26.3	0.8
82	6.1	26.3	0.8
83	6.1	28.1	0.8

84	0.5	28.1	0.8	130	3.35	4.6	0.4
;Stoel1				131	3.35	4.6	0.9
85	1.55	1.9	0.4	132	2.85	4.6	0.9
86	1.05	1.9	0.4	;Stoel9			
87	1.05	1.4	0.4	133	5.15	5.1	0.4
88	1.55	1.4	0.4	134	4.65	5.1	0.4
89	1.55	1.4	0.9	135	4.65	4.6	0.4
90	1.05	1.4	0.9	136	5.15	4.6	0.4
;Stoel2				137	5.15	4.6	0.9
91	3.35	1.9	0.4	138	4.65	4.6	0.9
92	2.85	1.9	0.4	;Stoel10			
93	2.85	1.4	0.4	139	1.05	6.9	0.4
94	3.35	1.4	0.4	140	1.55	6.9	0.4
95	3.35	1.4	0.9	141	1.55	7.4	0.4
96	2.85	1.4	0.9	142	1.05	7.4	0.4
;Stoel3				143	1.05	7.4	0.9
97	5.15	1.9	0.4	144	1.55	7.4	0.9
98	4.65	1.9	0.4	;Stoel11			
99	4.65	1.4	0.4	145	2.85	6.9	0.4
100	5.15	1.4	0.4	146	3.35	6.9	0.4
101	5.15	1.4	0.9	147	3.35	7.4	0.4
102	4.65	1.4	0.9	148	2.85	7.4	0.4
;Stoel4				149	2.85	7.4	0.9
103	1.05	3.7	0.4	150	3.35	7.4	0.9
104	1.55	3.7	0.4	;Stoel12			
105	1.55	4.2	0.4	151	4.65	6.9	0.4
106	1.05	4.2	0.4	152	5.15	6.9	0.4
107	1.05	4.2	0.9	153	5.15	7.4	0.4
108	1.55	4.2	0.9	154	4.65	7.4	0.4
;Stoel5				155	4.65	7.4	0.9
109	2.85	3.7	0.4	156	5.15	7.4	0.9
110	3.35	3.7	0.4	;Stoel13			
111	3.35	4.2	0.4	157	1.55	10.9	0.4
112	2.85	4.2	0.4	158	1.05	10.9	0.4
113	2.85	4.2	0.9	159	1.05	10.4	0.4
114	3.35	4.2	0.9	160	1.55	10.4	0.4
;Stoel6				161	1.55	10.4	0.9
115	4.65	3.7	0.4	162	1.05	10.4	0.9
116	5.15	3.7	0.4	;Stoel14			
117	5.15	4.2	0.4	163	3.35	10.9	0.4
118	4.65	4.2	0.4	164	2.85	10.9	0.4
119	4.65	4.2	0.9	165	2.85	10.4	0.4
120	5.15	4.2	0.9	166	3.35	10.4	0.4
;Stoel7				167	3.35	10.4	0.9
121	1.55	5.1	0.4	168	2.85	10.4	0.9
122	1.05	5.1	0.4	;Stoel15			
123	1.05	4.6	0.4	169	5.15	10.9	0.4
124	1.55	4.6	0.4	170	4.65	10.9	0.4
125	1.55	4.6	0.9	171	4.65	10.4	0.4
126	1.05	4.6	0.9	172	5.15	10.4	0.4
;Stoel8				173	5.15	10.4	0.9
127	3.35	5.1	0.4	174	4.65	10.4	0.9
128	2.85	5.1	0.4	;Stoel16			
129	2.85	4.6	0.4	175	1.05	12.7	0.4

176	1.55	12.7	0.4
177	1.55	13.2	0.4
178	1.05	13.2	0.4
179	1.05	13.2	0.9
180	1.55	13.2	0.9
;Stoel17			
181	2.85	12.7	0.4
182	3.35	12.7	0.4
183	3.35	13.2	0.4
184	2.85	13.2	0.4
185	2.85	13.2	0.9
186	3.35	13.2	0.9
;Stoel18			
187	4.65	12.7	0.4
188	5.15	12.7	0.4
189	5.15	13.2	0.4
190	4.65	13.2	0.4
191	4.65	13.2	0.9
192	5.15	13.2	0.9
;Stoel19			
193	1.55	13.6	0.4
194	1.05	13.6	0.4
195	1.05	14.1	0.4
196	1.55	14.1	0.4
197	1.55	14.1	0.9
198	1.05	14.1	0.9
;Stoel20			
199	3.35	13.6	0.4
200	2.85	13.6	0.4
201	2.85	14.1	0.4
202	3.35	14.1	0.4
203	3.35	14.1	0.9
204	2.85	14.1	0.9
;Stoel21			
205	5.15	13.6	0.4
206	4.65	13.6	0.4
207	4.65	14.1	0.4
208	5.15	14.1	0.4
209	5.15	14.1	0.9
210	4.65	14.1	0.9
;Stoel22			
211	1.05	15.9	0.4
212	1.55	15.9	0.4
213	1.55	16.4	0.4
214	1.05	16.4	0.4
215	1.05	16.4	0.9
216	1.55	16.4	0.9
;Stoel23			
217	2.85	15.9	0.4
218	3.35	15.9	0.4
219	3.35	16.4	0.4
220	2.85	16.4	0.4
221	2.85	16.4	0.9
222	3.35	16.4	0.9

;Stoel24			
223	4.65	15.9	0.4
224	5.15	15.9	0.4
225	5.15	16.4	0.4
226	4.65	16.4	0.4
227	4.65	16.4	0.9
228	5.15	16.4	0.9
;Stoel25			
229	1.55	17.3	0.4
230	1.05	17.3	0.4
231	1.05	16.8	0.4
232	1.55	16.8	0.4
233	1.55	16.8	0.9
234	1.05	16.8	0.9
;Stoel26			
235	3.35	17.3	0.4
236	2.85	17.3	0.4
237	2.85	16.8	0.4
238	3.35	16.8	0.4
239	3.35	16.8	0.9
240	2.85	16.8	0.9
;Stoel27			
241	5.15	17.3	0.4
242	4.65	17.3	0.4
243	4.65	16.8	0.4
244	5.15	16.8	0.4
245	5.15	16.8	0.9
246	4.65	16.8	0.9
;Stoel28			
247	1.05	19.1	0.4
248	1.55	19.1	0.4
249	1.55	19.6	0.4
250	1.05	19.6	0.4
251	1.05	19.6	0.9
252	1.55	19.6	0.9
;Stoel29			
253	2.85	19.1	0.4
254	3.35	19.1	0.4
255	3.35	19.6	0.4
256	2.85	19.6	0.4
257	2.85	19.6	0.9
258	3.35	19.6	0.9
;Stoel30			
259	4.65	19.1	0.4
260	5.15	19.1	0.4
261	5.15	19.6	0.4
262	4.65	19.6	0.4
263	4.65	19.6	0.9
264	5.15	19.6	0.9
;Stoel31			
265	1.55	23.1	0.4
266	1.05	23.1	0.4
267	1.05	22.6	0.4
268	1.55	22.6	0.4

269	1.55	22.6	0.9
270	1.05	22.6	0.9
;Stoel32			
271	3.35	23.1	0.4
272	2.85	23.1	0.4
273	2.85	22.6	0.4
274	3.35	22.6	0.4
275	3.35	22.6	0.9
276	2.85	22.6	0.9
;Stoel33			
277	5.15	23.1	0.4
278	4.65	23.1	0.4
279	4.65	22.6	0.4
280	5.15	22.6	0.4
281	5.15	22.6	0.9
282	4.65	22.6	0.9
;Stoel34			
283	1.05	24.9	0.4
284	1.55	24.9	0.4
285	1.55	25.4	0.4
286	1.05	25.4	0.4
287	1.05	25.4	0.9
288	1.55	25.4	0.9
;Stoel35			
289	2.85	24.9	0.4
290	3.35	24.9	0.4
291	3.35	25.4	0.4
292	2.85	25.4	0.4
293	2.85	25.4	0.9
294	3.35	25.4	0.9
;Stoel36			
295	4.65	24.9	0.4
296	5.15	24.9	0.4
297	5.15	25.4	0.4
298	4.65	25.4	0.4
299	4.65	25.4	0.9
300	5.15	25.4	0.9
;Stoel37			
301	1.55	26.3	0.4
302	1.05	26.3	0.4
303	1.05	25.8	0.4
304	1.55	25.8	0.4
305	1.55	25.8	0.9
306	1.05	25.8	0.9
;Stoel38			
307	3.35	26.3	0.4
308	2.85	26.3	0.4
309	2.85	25.8	0.4
310	3.35	25.8	0.4
311	3.35	25.8	0.9
312	2.85	25.8	0.9
;Stoel39			
313	5.15	26.3	0.4
314	4.65	26.3	0.4

315	4.65	25.8	0.4
316	5.15	25.8	0.4
317	5.15	25.8	0.9
318	4.65	25.8	0.9
;Stoel40			
319	1.05	28.1	0.4
320	1.55	28.1	0.4
321	1.55	28.6	0.4
322	1.05	28.6	0.4
323	1.05	28.6	0.9
324	1.55	28.6	0.9
;Stoel41			
325	2.85	28.1	0.4
326	3.35	28.1	0.4
327	3.35	28.6	0.4
328	2.85	28.6	0.4
329	2.85	28.6	0.9
330	3.35	28.6	0.9
;Stoel42			
331	4.65	28.1	0.4
332	5.15	28.1	0.4
333	5.15	28.6	0.4
334	4.65	28.6	0.4
335	4.65	28.6	0.9
336	5.15	28.6	0.9

PLANES

;Vloer

[1 vl werkplek / 1 2 26 25 / glabeton]

;Wanden

[2 opening1 / 9 12 16 13 / open]

[3 opening2 / 17 20 24 21 / open]

[5 voor onder / 25 36 33 1 / glabeton]

[6 voor midden / 36 35 34 33 / glas]

[7 voor boven / 35 28 4 34 / glabeton]

[11 rw voor / 1 4 3 2 / glabeton]

[13 tw rechts1 / 2 3 12 9 / glabeton]

[17 tw midden1 / 13 16 20 17 / glabeton]

[21 tw links1 / 21 24 27 26 / glabeton]

[23 lw voor / 25 26 27 28 / glabeton]

;Plafond

[25 pl werkplek / 3 4 28 27 / glabeton]

;Kasten

[D 29 kast / 41-44 / meubels]

[D 430 kast / 45-48 / meubels]

[D 31 kast / 49-52 / meubels]

[D 432 kast / 53-56 / meubels]

;Bureaus

[D 233 bureau / 57-60 / meubels]

[D 34 bureau / 61-64 / meubels]

[D 235 bureau / 65-68 / meubels]

[D 36 bureau / 69-72 / meubels]

[D 237 bureau / 73-76 / meubels]

[D 38 bureau / 77-80 / meubels]

[D 239 bureau / 81-84 / meubels]
;Stoelen
[D 40 zitvlak1 / 85-88 / meubels]
[D 241 leuning1 / 87-90 / meubels]
[D 42 zitvlak2 / 91-94 / meubels]
[D 243 leuning2 / 93-96 / meubels]
[D 44 zitvlak3 / 97-100 / meubels]
[D 245 leuning3 / 99-102 / meubels]
[D 46 zitvlak4 / 103-106 / meubels]
[D 247 leuning4 / 105-108 / meubels]
[D 48 zitvlak5 / 109-112 / meubels]
[D 249 leuning5 / 111-114 / meubels]
[D 50 zitvlak6 / 115-118 / meubels]
[D 251 leuning6 / 117-120 / meubels]
[D 52 zitvlak7 / 121-124 / meubels]
[D 253 leuning7 / 123-126 / meubels]
[D 54 zitvlak8 / 127-130 / meubels]
[D 255 leuning8 / 129-132 / meubels]
[D 56 zitvlak9 / 133-136 / meubels]
[D 257 leuning9 / 135-138 / meubels]
[D 58 zitvlak10 / 139-142 / meubels]
[D 259 leuning10 / 141-144 / meubels]
[D 60 zitvlak11 / 145-148 / meubels]
[D 261 leuning11 / 147-150 / meubels]
[D 62 zitvlak12 / 151-154 / meubels]
[D 263 leuning12 / 153-156 / meubels]
[D 64 zitvlak13 / 157-160 / meubels]
[D 265 leuning13 / 159-162 / meubels]
[D 66 zitvlak14 / 163-166 / meubels]
[D 267 leuning14 / 165-168 / meubels]
[D 68 zitvlak15 / 169-172 / meubels]
[D 269 leuning15 / 171-174 / meubels]
[D 70 zitvlak16 / 175-178 / meubels]
[D 271 leuning16 / 177-180 / meubels]
[D 72 zitvlak17 / 181-184 / meubels]
[D 273 leuning17 / 183-186 / meubels]
[D 74 zitvlak18 / 187-190 / meubels]
[D 275 leuning18 / 189-192 / meubels]
[D 76 zitvlak19 / 193-196 / meubels]
[D 277 leuning19 / 195-198 / meubels]
[D 78 zitvlak20 / 199-202 / meubels]
[D 279 leuning20 / 201-204 / meubels]
[D 80 zitvlak21 / 205-208 / meubels]
[D 281 leuning21 / 207-210 / meubels]
[D 82 zitvlak22 / 211-214 / meubels]
[D 283 leuning22 / 213-216 / meubels]
[D 84 zitvlak23 / 217-220 / meubels]
[D 285 leuning23 / 219-222 / meubels]
[D 86 zitvlak24 / 223-226 / meubels]
[D 287 leuning24 / 225-228 / meubels]
[D 88 zitvlak25 / 229-232 / meubels]
[D 289 leuning25 / 231-234 / meubels]
[D 90 zitvlak26 / 235-238 / meubels]
[D 291 leuning26 / 237-240 / meubels]

[D 92 zitvlak27 / 241-244 / meubels]
[D 293 leuning27 / 243-246 / meubels]
[D 94 zitvlak28 / 247-250 / meubels]
[D 295 leuning28 / 249-252 / meubels]
[D 96 zitvlak29 / 253-256 / meubels]
[D 297 leuning29 / 255-258 / meubels]
[D 98 zitvlak30 / 259-262 / meubels]
[D 299 leuning30 / 261-264 / meubels]
[D 100 zitvlak31 / 265-268 / meubels]
[D 301 leuning31 / 267-270 / meubels]
[D 102 zitvlak32 / 271-274 / meubels]
[D 303 leuning32 / 273-276 / meubels]
[D 104 zitvlak33 / 277-280 / meubels]
[D 305 leuning33 / 279-282 / meubels]
[D 106 zitvlak34 / 283-286 / meubels]
[D 307 leuning34 / 285-288 / meubels]
[D 108 zitvlak35 / 289-292 / meubels]
[D 309 leuning35 / 291-294 / meubels]
[D 110 zitvlak36 / 295-298 / meubels]
[D 311 leuning36 / 297-300 / meubels]
[D 112 zitvlak37 / 301-304 / meubels]
[D 313 leuning37 / 303-306 / meubels]
[D 114 zitvlak38 / 307-310 / meubels]
[D 315 leuning38 / 309-312 / meubels]
[D 116 zitvlak39 / 313-316 / meubels]
[D 317 leuning39 / 315-318 / meubels]
[D 118 zitvlak40 / 319-322 / meubels]
[D 319 leuning40 / 321-324 / meubels]
[D 120 zitvlak41 / 325-328 / meubels]
[D 321 leuning41 / 327-330 / meubels]
[D 122 zitvlak42 / 331-334 / meubels]
[D 323 leuning42 / 333-336 / meubels]

Receiver-bestand van het werkplek-model:

;Afstudeerproject Kevin van der Weijden
;Akoestisch beton - Werkplek: REC.LOC

RECEIVERS

1	1.3	28.35	1.3
2	4.9	19.35	1.3
3	1.3	7.15	1.3
4	4.9	1.65	1.3
5	7	12	1.6

Source-bestand van het werkplek-model:

;Afstudeerproject Kevin van der Weijden
;Akoestisch beton - Werkplek: SRC.LOC

SOURCEDEFS

A0 7 13 1.6 talker.SD1 7 11 1.6
Lp1m_a = Lp_voice_normal