

# Rapport

Reductie Overige Broeikasgassen;  
consequenties toepassing geluidwerende beglazingen zonder SF6

Rapportnummer R 833-1 d.d. 16 april 2002

Dit project werd gefinancierd door het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer in het kader van het programma Reductie Overige Broeikasgassen 2002. Novem beheert dit programma

Novem projectnummer: 0373-01-01-05-0012

Opdrachtgever: Novem

Rapportnummer: R 833-1

Datum: 16 april 2002

Ref.: MV/TV/DB/R 833-1-RA

Opgesteld door: Ir. A.G.J. Vervoort  
Ir. M.L.S. Vercammen

Lid ONRI  
ISO-9001 gecertificeerd

Adviesbureau  
Peutz & Associés B.V.  
Paletsingel 2, Postbus 696  
2700 AR Zoetermeer  
Tel. (079) 361 49 92  
Fax (079) 361 49 85  
zoetermeer@peutz.nl

Adviesbureau  
Peutz & Associés B.V.  
Lindenlaan 41, Molenhoek  
Postbus 66, 6585 ZH Mook  
Tel. (024) 388 00 77  
Fax (024) 358 51 50  
mook@peutz.nl

Peutz Consult GmbH  
Kolberger Strasse 19  
40599 Düsseldorf  
Tel. +49 211 999 582 60  
Fax +49 211 999 582 70  
dus@peutz.de

Peutz & Associés S.A.R.L.  
34 Rue de Paradis  
75010 Paris  
Tel. +33 1 452 305 00  
Fax +33 1 452 305 04  
peutz@club-internet.fr

Opdrachten worden aanvaard en uitgevoerd volgens de 'Regeling van de verhouding tussen opdrachtgever en adviserend ingenieursbureau' (RVOI-1998). Ingeschreven KvK onder nummer 12028033. BTW identificatienummer NL004933837B01

Inhoud	pagina
SAMENVATTING	4
1. INLEIDING	5
1.1. Doelstelling van het onderzoek	6
1.2. Inhoud onderzoek	6
2. THEORIE	7
2.1. Inleiding	7
2.2. Samenvatting en conclusies Hoofdstuk 2	7
2.3. Dubbelglas met lucht als spouwvulling	9
2.4. Massa-veer resonantie	10
2.5. Coïncidentie	14
2.6. Gelamineerd glas	15
2.7. Invloed resonantie en coïncidentie op de isolatiecurve	16
2.8. Invloed gasvulling op geluidisolatie	16
3. GELUIDISOLATIE OP BASIS VAN PRAKTIJK/REKEN GEGEVENS	20
3.1. Inleiding	20
3.2. NEN en ISO normen	20
3.3. Bepaling invloed gasvulling volgens rekenmodellen	21
3.4. Beperkingen rekenprogramma's	23
4. GELUIDISOLATIE METINGEN	25
4.1. Inleiding	25
4.2. Bepaling geluidisolatie	25
4.3. Glaskeuze op basis van meetresultaten	30
5. KOSTENANALYSE	32
5.1. Inleiding	32
5.2. Kostprijzen glas	32
5.3. Thermisch isolerende beglazing	33
5.4. Detaillering	34
6. CONCLUSIE	36

7. LITERATUUR

38

## SAMENVATTING

In het kader van het programma Reductie Overige Broeikasgassen van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer is onderzoek verricht naar de consequenties van het toepassen van geluidwerende beglazing zonder SF6. SF6 wordt in de spouw van dubbele beglazing gebruikt om de geluidisolerende eigenschappen van de beglazing te verbeteren. Omdat SF6 een bijdrage levert aan het broeikaseffect is in dit rapport onderzocht of het gebruik van dit gas vermeden kan worden.

In dit rapport is het onderzoek verricht door Adviesbureau Peutz gepresenteerd. Het onderzoek heeft zich gericht op verschillende onderdelen. Om inzicht te verschaffen in de geluidisolerende werking van dubbele beglazing is eerst een theoretische uiteenzetting van het gedrag van geluidgolven in dubbele beglazing gegeven.

Het verdere onderzoek heeft zich speciaal gericht op het verschillende typen beglazingen die in de praktijk gebruikt worden. Op basis van gegevens van standaard rekenmethoden en gegevenstabellen is een analyse gemaakt van de samenstelling van verschillende glastypen en hun geluidisolatiewaarden. Deze methoden worden in de praktijk veel gebruikt voor het bepalen van de benodigde beglazing.

Daaropvolgend zijn ruim 100 verschillende beglazingen geanalyseerd zoals die in het Laboratorium voor Akoestiek van Adviesbureau Peutz & Associés gemeten zijn. De meetresultaten voor de diverse beglazingen zijn vergeleken met de waarden die op basis van rekenmethoden verwacht kunnen worden. Hieruit blijkt dat de veelgebruikte empirische rekenmodellen de werkelijke geluidisolatie onvoldoende nauwkeurig voorspellen. De werkelijke geluidisolatie is slechts nauwkeurig te bepalen door het glas volgens de bijbehorende normen te meten.

Op basis van glasprijzen, opgegeven door een representatief deel van de Nederlandse glasleveranciers, is een vergelijking gemaakt van de prijzen van gasgevulde en luchtgevulde beglazing die een zelfde geluidisolatiewaarde hebben. Hieruit is gebleken dat er geen overwegende financiële overwegingen zijn voor het gebruik van SF6 als spouwvulling. Toepassing van lucht- of Argongevulde spouw is te prefereren in verband met beperking van de emissie van broeikasgassen en verhoging van de thermische isolatie.

## 1. INLEIDING

Belangrijke bron voor het opwarmen van de aarde, het broeikaseffect, is de uitstoot van CO<sub>2</sub>. Naast deze belangrijkste bron leveren ook andere stoffen een bijdrage aan het broeikaseffect. Deze “overige” broeikasgassen zijn onder andere methaan (CH<sub>4</sub>), lachgas (N<sub>2</sub>O) en fluorverbindingen. Een ander overig broeikasgas is zwavelhexafluoride ofwel SF<sub>6</sub>. SF<sub>6</sub> is het zwaarste broeikasgas. Dit gas wordt onder andere toegepast in de glasindustrie als spouwvulling van dubbelglas. De goede akoestische eigenschappen van dubbelglas met het zware gas SF<sub>6</sub> als spouwvulling zijn bekend en het wordt dan ook veelvuldig toegepast op plekken waar een hoge geluidsisolatie noodzakelijk is. Dit is onder meer het geval op locaties met veel lucht- of weg/railverkeergeluid. De prognose is dat de vraag naar geluidsreducerend glas in de toekomst zal blijven stijgen.

Naar aanleiding van het Kyoto protocol is door het ministerie van VROM het programma Reductie Overige Broeikasgassen (ROB) gestart met als doel de uitstoot van deze schadelijke stoffen te beperken. Naast de bekende ‘grote emissiebronnen’ van deze gassen geeft het onderzoek van DHV Milieu en Infrastructuur BV [1] een overzicht van de uitstoot van verschillende ‘kleine’ bronnen die tot op dat ogenblik voor Nederland niet gekend of niet gekwantificeerd waren. Hieruit bleek SF<sub>6</sub> ook in Nederland gebruikt te worden bij de productie en gebruik van geluidsisolerend glas. Een belangrijk deel wordt uitgestoten door lekverliezen tijdens de productie van dubbele beglazing met SF<sub>6</sub> vulling (40% van de gebruikte hoeveelheid). Tijdens het gebruik wordt aangenomen dat jaarlijks 1% van de voorraad uit de glasspouw weglekt.

Het ministerie van VROM heeft medio 2001 in het kader van het ROB een project gestart om te kijken op welke wijze het gebruik en de emissie van deze SF<sub>6</sub> bron kan worden teruggedrongen. Novem coördineert de uitvoering van dit project.

Om de reductie van het gebruik van SF<sub>6</sub>, en dus ook de emissie, voor dubbelglasproductie te beperken, moet gezocht worden naar alternatieve beglazingen die dezelfde geluidwerende eigenschappen hebben maar niet langer gebruik maken van SF<sub>6</sub>. Deze alternatieven moeten naast dezelfde geluidisolatie eigenschappen ook wat het kostenaspect betreft haalbaar zijn. Deze alternatieven mogen geen andere milieuproblemen veroorzaken. Dit is de enige manier om het gebruik van deze alternatieven op vrijwillige basis te stimuleren. De verwachting is dat significant duurdere alternatieven binnen de sector in de praktijk niet gebruikt zullen worden tenzij de wetgeving op dit gebied aangepast wordt.

### 1.1. Doelstelling van het onderzoek

Beschreven in dit rapport is het onderzoek verricht door Adviesbureau Peutz & Associés in opdracht van Novem naar de alternatieven voor het gebruik van geluidisolerende dubbele beglazing gevuld met SF<sub>6</sub>. Deze rapportage over de alternatieven en de consequenties van het niet gebruiken van SF<sub>6</sub> als spouwvulling in dubbele beglazing kan gebruikt worden als ondersteuning van besluitvoering ten aanzien van het bestrijden van het gebruik van SF<sub>6</sub> in dubbele beglazing. Het kan daarbij fungeren als een technische uiteenzetting van de redenen voor het gebruik van SF<sub>6</sub> en de mogelijke alternatieven. Dit wordt bereikt door een opzet waarbij zowel theorie en gegevens uit de literatuur alsook de resultaten van laboratoriumonderzoek belicht worden. Hieruit zal een advies volgen over de haalbaarheid van alternatieven met de beste prijs / kwaliteit verhouding.

### 1.2. Inhoud onderzoek

In dit project zijn verschillende werkzaamheden verricht om een overzicht te krijgen van de mogelijkheden op het gebied van dubbele beglazing. Als startpunt is gekozen voor een analyse van de gegevens die bekend zijn in de literatuur. Hiertoe behoort zowel een theoretische uiteenzetting van de invloed van gasvulling op de geluidisolatie alsook een analyse van de experimentele resultaten zoals beschreven in de literatuur. De theorie wordt behandeld in hoofdstuk 2. Voor een goed begrip van de verdere hoofdstukken is lezing van de samenvatting van de theorie in paragraaf 2.2 in principe voldoende.

Verder zijn laboratoriummetingen geanalyseerd van verschillende beglazingen met verschillende gasvullingen, die uitgevoerd zijn in het Laboratorium voor Akoestiek van Adviesbureau Peutz & Associés. Een uitgebreide set metingen die interessant is omdat ze uitgevoerd zijn onder dezelfde meetcondities in hetzelfde laboratorium. Hierdoor is een hoge nauwkeurigheid verkregen en is het een ideale set om geluidisolaties van dubbele beglazing met verschillende gasvullingen te vergelijken.

Daaropvolgend is een kostenanalyse uitgevoerd waaruit glassoorten met een goede prijs / kwaliteit verhouding geselecteerd worden en deze zullen verder belicht worden. Hieruit zal een overzicht opgesteld worden van relevante SF<sub>6</sub> beglazingen en de mogelijke alternatieven zonder SF<sub>6</sub>.

## 2. THEORIE

### 2.1. Inleiding

Om een goed inzicht te krijgen van het effect van geluidsisolerende dubbele beglazing zal in dit hoofdstuk de theorie over de interactie van geluidgolven met dubbele beglazing uiteengezet worden. De invloeden van de verschillende variabelen als massa en spouwdikte op de geluidisolatie kunnen uit deze theorie afgeleid worden. Bestudering van deze theoretische toelichting kan de verschillende fysische verschijnselen die de geluidisolatie van dubbelglas bepalen verklaren. Deze technische uiteenzetting kan een bijdrage leveren voor diegenen die geïnteresseerd zijn in de achtergrond van het gedrag van geluidsisolerend dubbelglas. Het volledig doorgronden van de theorie in dit hoofdstuk is echter niet essentieel voor het begrip van het verdere rapport. De bedoeling is om een overzicht te geven van de relatie tussen de verschillende parameters van dubbele beglazing met de geluidisolatie, de complexe theoretische afleiding van deze relaties valt buiten de strekking van dit rapport. Hiervoor verwijzen wij naar de literatuur. Een samenvatting en conclusie van hetgeen besproken wordt in dit hoofdstuk (2.3 t/m 2.8) wordt gegeven in 2.2. Deze is onafhankelijk van de rest van dit hoofdstuk te lezen.

### 2.2. Samenvatting en conclusies Hoofdstuk 2

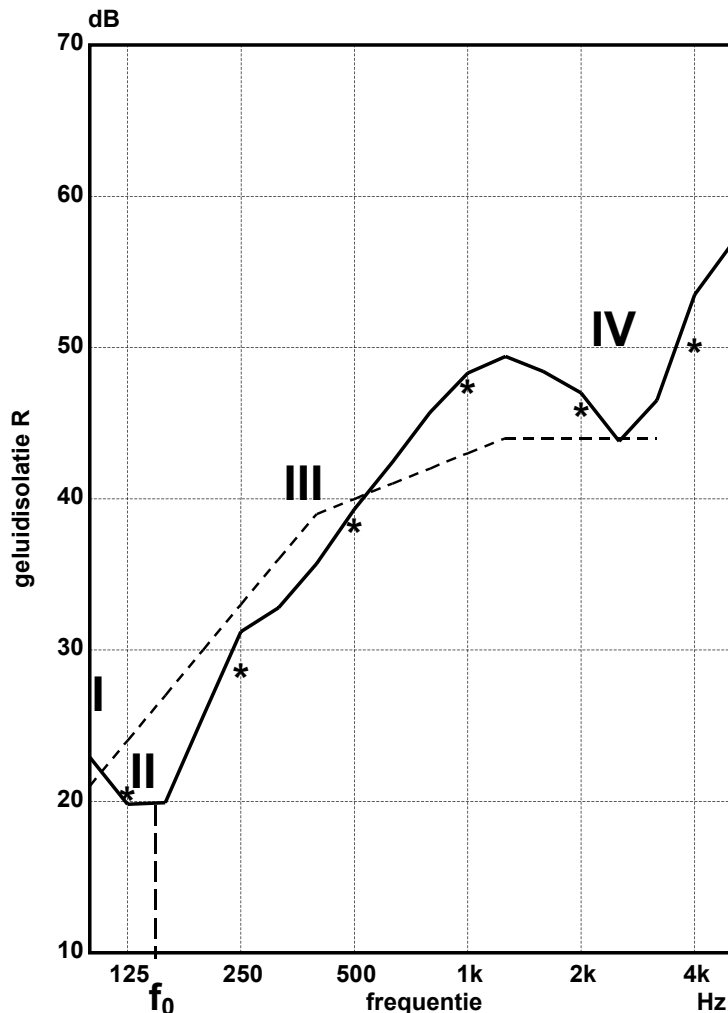
De gevoeligheid van het menselijk oor is afhankelijk van de frequentie van het geluid. De gevoeligheid neemt toe met de frequentie tot 2000Hz, na 2000Hz neemt de gevoeligheid af met de frequentie.

De geluidisolatie van dubbele beglazing hangt af van de frequentie van het invallend geluid. De frequentieafhankelijkheid van de geluidisolatie wordt weergegeven in een geluidisolatiecurve zoals figuur 2.1. Hierin is te zien dat het glas beter isoleert voor hogere frequenties. In de geluidisolatiecurve zijn vier karakteristieke gebieden te onderscheiden zoals ook aangegeven in figuur 2.1. In elk gebied speelt een ander fysisch verschijnsel een rol. Deze verschijnselen zullen hier kort besproken worden.

Gebied I is het stijfheidsgebied, hier wordt de geluidisolatie beschreven door de theoretische massawet. Dit lage frequentiegebied is meestal niet interessant vanwege de afnemende gevoeligheid van het menselijk oor bij lage frequenties. In dit gebied neemt de geluidisolatie toe met 6dB per octaaf.

Bij toenemende frequentie komen we in gebied II, het resonantiegebied. Hier volgt de curve niet meer de massawet uit gebied I maar neemt sterk af met een minimum bij de resonantiefrequentie  $f_0$ . De geluidgolf die invalt op het glas brengt de plaat waarop hij invalt in trilling. Deze plaat is dan via de luchtlaag die als veer fungeert gekoppeld aan de andere glasplaat. Bij een bepaalde frequentie van de geluidgolf zal het systeem in

resonantie raken. De luchtveer geeft dan de trilling van de ene plaat goed door aan de ander plaat, bij deze resonantiefrequentie is de geluidisolatie dan dus minimaal. Dit is te zien aan de dip in de resonantiecurve in gebied II.



**Figuur 2.1:** Voorbeeld van een geluidisolatiecurve van dubbele beglazing. De vaste lijn verbindt meetdata voor verschillende octaafbanden, de stippellijn is een referentiecurve zoals gedefinieerd in ISO 717-1:1996; I) Stijfheidsgebied; II) Resonantiegebied; III) Massagegebied; IV) Coïncidentiegebied

Boven dit resonantiegebied komt het massagegebied waar de geluidisolatie sterk zal stijgen met toenemende frequentie (gebied III). Boven de massa-veer frequentie ontstaat ontkoppeling tussen de beide spouwbladen. Hier blijkt ook het belang van de resonantiefrequentie. De geluidisolatie neemt namelijk sterk toe boven deze frequentie, des te lager  $f_0$  des te eerder zal deze toename optreden. Dit heeft dan als resultaat dat de geluidisolatiecurve hoger is in het interessante frequentiegebied. De resonantiefrequentie verloopt volgens formule 2.1, hieruit blijkt dat een verhoging van glasmassa en/of



spouwbreedte de resonantiefrequentie verlaagt. Op deze manier kan een hogere geluidisolatie in het middenfrequente gebied verkregen worden.

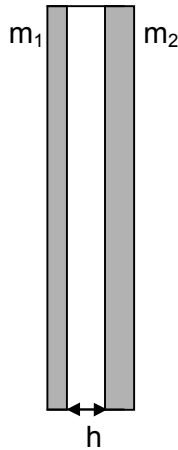
In frequentiegebied IV is sprake van coïncidentie. Coïncidentie treedt op als de golflengte van de invallende geluidsgolf samenvalt met de vrije golf van het glas. De vrije golf is een beweging die een plaat uitvoert als er een beginaanstoting is gegeven (vergelijkbaar met het golfpatroon als je een steentje in een plas water gooit). Als de golflengte van de luchtgeluidsgolf die op de plaat valt samenvalt met de golflengte van de vrije golf in de glasplaat zal de geluidsgolf minder weerstand vinden en wordt dan dus minder gedempt. Dit resulteert in een hogere geluidafstraling aan de andere kant van het glas. Omdat de combinatie van frequentie en hoek van inval bepaalt of een geluidsgolf coïncideert, komt bij alzijdige inval in een breed frequentiegebied coïncidentie voor. Dit is de verklaring van de afnemende geluidisolatie in gebied IV in de isolatiecurve.

Het coïncidentiegebied in de isolatiecurve kan bepalend zijn voor de geluidisolatie van dubbele beglazing. Het coïncidentieverschijnsel kan verminderd worden door het gebruik van gelamineerd glas.

SF6 gas kan gebruikt worden als spouwvulling bij dubbele beglazing. Dit zware gas heeft als resultaat dat enerzijds de geluidisolatie in het resonantiegebied (II) afneemt (de dip wordt smaller en dieper) en anderzijds dat de geluidisolatie toeneemt in het middenfrequentiegebied III. De beweging van de platen ten opzichte van de spouw verandert doordat de spouw nu met een zwaarder gas gevuld is. Hierdoor wordt de beweging van het massa-veer systeem beïnvloed met een positief resultaat op de geluidisolatie.

### 2.3. Dubbelglas met lucht als spouwvulling

Het dubbel bladig systeem bestaat uit twee glasplaten met daartussen een spouw [2], zie figuur 2.2. De wandmassa per oppervlakte-eenheid [ $\text{kg/m}^2$ ] zijn voor blad 1 en 2 respectievelijk  $m_1$  en  $m_2$ , de breedte van de spouw is  $h$ . Dit zijn ook de variabelen van het systeem, verder kan in plaats van lucht een ander gas (Argon of SF6) als spouwvulling gebruikt worden. Ook kunnen in plaats van homogene glasplaten gelamineerde glasbladen gebruikt worden. Bij gelamineerd glas is een van beide glaslagen opgebouwd uit twee (of meer) glaslagen verbonden via een harslaag, folie of een dunne luchtlaag. Dit wordt gebruikt om zogenaamde coïncidentie effecten te vermijden, dit wordt besproken in hoofdstuk 2.5. In de volgende beschouwing gaan we uit van niet-gelamineerd glas en lucht als spouwvulling. In hoofdstuk 2.6 zal aandacht besteed worden aan gelamineerd glas en in hoofdstuk 2.8 wordt de invloed van gasvulling op de geluidisolatie besproken.



Figuur 2.2: Het dubbelbladig systeem met lucht als spouwvulling

Een geluidsgolf die van links invalt op de constructie zal plaat 1 in beweging brengen. Het systeem bestaat uit een evenwicht tussen de twee platen en de tussenliggende spouw. De beweging van plaat 1 zal het gas in de spouw in beweging brengen en deze zal weer plaat 2 in beweging brengen. De beweging van plaat 2 zal een geluidsgolf in de ruimte rechts van de constructie veroorzaken. De intensiteit van het doorgelaten geluid zal bij een goed isolerende constructie veel kleiner zijn dan de invallende drukgolf.

Het rekenmodel voor een dergelijk systeem is gebaseerd op een dynamisch evenwicht tussen de twee glasbladen verbonden door een verend systeem (de spouwvulling fungeert hier als verend systeem). De manier waarop dit massa-veer systeem zich gedraagt is afhankelijk van de frequentie van de geluidsgolf die op het systeem invalt. De geluidisolatiemetingen worden dan ook altijd voor alle verschillende frequentiebanden gemeten. In het spectrum van de geluidisolatie staat de geluidisolatie uit tegen de frequentie.

Als een dergelijk bouwelement in trilling wordt gebracht zullen effecten als resonantie en coïncidentie een rol spelen. Deze effecten zijn herkenbaar in het spectrum van de geluidisolatie. Er treden bij verschillende frequenties effecten op die positief of negatief op de geluidisolatie werken. Deze verschillende verschijnselen in de geluidisolatiecurve zullen hieronder besproken worden. Met de kennis van deze verschijnselen kunnen de verschillende gebieden in het spectrum geanalyseerd en verklaard worden.

#### 2.4. Massa-veer resonantie

We gaan uit van een dubbel glas element dat in trilling wordt gebracht door een geluidsgolf die loodrecht op het glas invalt. Zoals gezegd is dit te modelleren als een massaveersysteem met de luchtlaag als luchtveer met een zekere veerweerstand. Door het dynamisch evenwicht tussen de spouwbladen en de lucht vulling zal dit massaveersysteem bij een specifieke frequentie gaan resoneren. Deze frequentie waarbij

de glasbladen op de luchtveer resoneren is de massa-veer resonantiefrequentie  $f_0$ . De frequentie van het invallende geluid past bij de trilling die het systeem zelf uit zou voeren als het in een vrije trilling verkeert.

Bij spouwconstructies als dubbelglas is deze resonantie van grote invloed op de geluidwering. De geluidsgolf wordt bij deze frequentie grotendeels doorgelaten en de geluidsisolatie is bij deze frequentie zeer gering. Deze resonantiefrequentie is gegeven door de volgende vergelijking waarin de massa's van de wanden en de dikte van de spouw als variabelen optreden:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho c^2}{h} \left[ \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right]} \quad (2.1)$$

Waarin:

$m_1$  = massa wand 1 per oppervlakte-eenheid [ $\text{kg/m}^2$ ],

$m_2$  = massa wand 2 per oppervlakte-eenheid [ $\text{kg/m}^2$ ],

$h$  = spouwbreedte [m],

$c$  = de geluidssnelheid in lucht [m/s],

$\rho$  = de dichtheid van lucht [ $\text{kg/m}^3$ ]

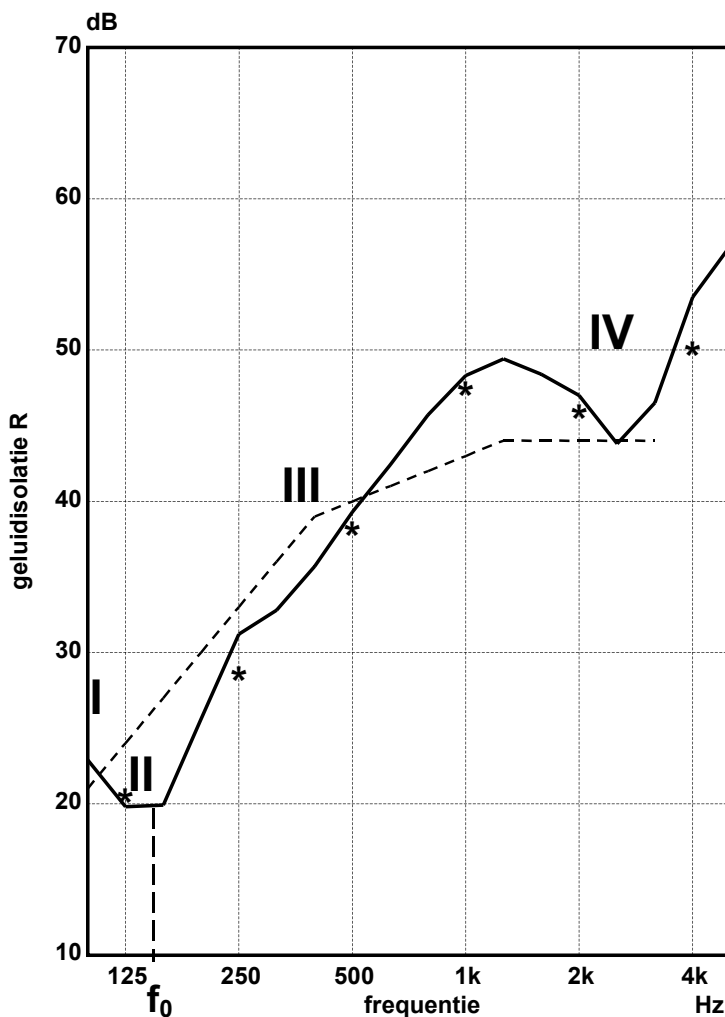
In bovenstaande formule is de resonantiefrequentie bepaald voor een geluidsgolf die loodrecht op wand 1 invalt. Hierbij is  $\omega = 2\pi f$ . Als geluid onder een hoek invalt moet de resonantiefrequentie gecorrigeerd worden met een factor  $1/\cos\theta$ . Het effect van alzijdig invallend geluid kan bepaald worden door geluid onder inval van  $45^\circ$  als gemiddelde te nemen en hiervoor de resonantiefrequentie te bepalen.

De massa-veer resonantiefrequentie  $f_0$  deelt het totale frequentiegebied op in drie gebieden. De geluidsisolatie verschilt in de gebieden  $f \ll f_0$ ,  $f = f_0$  en  $f \gg f_0$ . In figuur 2.1 is een voorbeeld van een gemeten geluidsisolatiecurve van een type dubbele beglazing getoond. Gebied I met  $f \ll f_0$  is het stijfheidsgebied, gebied II het resonantiegebied en gebied III het massagebied. De afname in gebied IV hangt samen met coïncidentie en zal in onderdeel 2.5 besproken worden.

De geluidsisolatie  $R$  in gebied I (zie figuur 2.1) kan benaderd worden met de geluidsisolatie voor een enkele wand constructie, de zogenaamde theoretische massawet. Voor de afleiding van de theoretische massawet voor enkele wanden verwijzen we naar literatuur over dit onderwerp. Deze theoretische massawet voor een enkele wand met massa  $m$  is gegeven door:

$$R = 20 \log \frac{\omega m}{2\rho c} \quad (2.2)$$

Om deze relatie toe te passen bij het dubbele wandstelsel in dit frequentie gebied moet voor de massa het totaalgewicht van de twee wanden ingevoerd worden  $m=m_1+m_2$ . Deze formule geeft aan dat de geluidisolatie toeneemt met 6dB per octaaf (bij verdubbeling van de frequentie) en ook 6dB bij verdubbeling van de massa.



Figuur 2.1 (nogmaals): Voorbeeld van een geluidisolatiecurve van dubbele beglazing. De vaste lijn verbindt meetdata voor verschillende octaafbanden, de stippellijn is een referentiecurve zoals gedefinieerd in ISO 717-1:1996; I) Stijfheidsgebied; II) Resonantiegebied; III) Massagebied; IV) Coïncidentiegebied

Bij  $f=f_0$  is de geluidisolatie minimaal. De dip in de isolatiecurve bij  $f_0$  is duidelijk zichtbaar in figuur 2.1. Boven de resonantiefrequentie neemt de isolatie weer toe tot het coïncidentiegebied (IV) bereikt wordt. Voor gebied III gedraagt de geluidisolatie zich volgens:

$$R = 20 \log \frac{\omega m_1}{2\rho c} + 20 \log \frac{\omega m_2}{2\rho c} + 20 \log \frac{2\omega h}{c} \quad (2.3)$$

Deze formule geeft duidelijk weer hoe de geluidisolatie van dubbel glas zich verhoudt tot de geluidisolatie in het geval van een enkele glasplaat met massa  $m=m_1+m_2$ . Een geluidwerende constructie die bestaat uit een enkele wand met massa  $m_1+m_2$  kan hiermee vergeleken worden met de geluidisolatie van een dubbele wand met massa  $m_1$  en massa  $m_2$ . Voor het eerste geval geldt de massawet 2.2 voor de globale massa  $m_1+m_2$ . In het geval van twee platen verloopt de geluidisolatie volgens 2.3. Dit levert in dit gebied een geluidisolatie van 18 dB per octaaf voor een dubbele wand ten opzichte van 6 dB per octaaf in het geval van de enkele wand. Hierdoor kan met een dubbele wand een geluidisolatie gehaald worden die hoger is dan de geluidisolatie van een enkele wand met dezelfde massa

De positie van de massa-veer resonantiefrequentie is op deze manier gerelateerd aan het verloop van de isolatiecurve. Hoe lager  $\omega_0$  des te eerder begint de stijging in de geluidisolatiecurve met als resultaat een verbetering van de geluidisolatie in het interessante frequentiegebied volgens vergelijking 2.3.

Als de resonantiefrequentie in het interessante frequentiegebied ligt moet gestreefd worden naar een zo laag mogelijke afname van de isolatie bij deze frequentie, dus een beperking van de "dip" in de curve bij  $f_0$ .

De positie van de resonantiefrequentie wordt bepaald door vergelijking 2.1. Het vergroten van de massa heeft een verschuiving van de resonantiefrequentie tot gevolg wat ervoor zorgt dat de geluidisolatie al bij een lagere frequentie toe begint te nemen. Dit resulteert in een hogere geluidisolatie in gebied III. Een grotere spouwbreedte heeft hetzelfde effect, ook hiermee wordt de geluidisolatie verbeterd.

Praktisch betekent formule 2.3 dus dat de geluidisolatie verbeterd kan worden door de massa van de glasplaten te vergroten (dikkere glasplaten) en door de spouwdikte te vergroten. Gebruik van dikker glas zal direct leiden tot duurdere glasplaten. Het vergroten van de spouw kan tot op zekere hoogte een verbetering opleveren tegen (zeer) geringe meerkosten.

## 2.5. Coïncidentie

Als een enkele wand door een puls kort wordt aangestoten zal zich in die wand een vrije buiggolf voortplanten, vergelijkbaar met een steentje in een vijver. Deze golf wordt geïnitieerd door de beginaanstoting, de voortplanting van de trilling is een eigenschap van de plaat zelf en wordt bepaald door materiaaleigenschappen zoals buigstijfheid, elasticiteit, dikte en massa. Deze golf die ontstaat door een prikkel en waarvan de voortplanting alleen bepaald wordt door de eigenschappen van het materiaal zelf noemen we een *vrije* buiggolf. De voortplantingssnelheid van deze golf is  $c_{\text{vrij}}$ .

In het geval dat een vlakke geluidgolf onder een bepaalde hoek op de plaat valt zal er op de plaat een patroon van over- en onderdrukken ontstaan. Dit dwingt de plaat in een bepaalde vorm. Deze vorm zal met de over- en onderdrukken van de geluidgolf meereizen en zich op deze manier door de plaat voortplanten. De voortplantingssnelheid van deze golf is  $c_{\text{gedwongen}}$ . In deze situatie zal de drukgolf de plaat in de trilvorm van de drukgolf zelf mee te laten bewegen. De plaat wordt als het ware gedwongen om met de geluidgolf mee te bewegen. Dit principe noemen we de *gedwongen* golf. Dit golfsysteem wordt volledig bepaald door de invallende geluidgolf en is onafhankelijk van de eigenschappen van de plaat.

Bij een invallende geluidgolf zijn in de plaat dus twee golfsystemen tegelijk aanwezig, de vrije trilling die de plaat uit wil voeren en de gedwongen trilling die hem door de geluidgolf wordt opgelegd. Als een geluidgolf op een plaat invalt is er altijd een frequentie waarbij de golflengte van de gedwongen golf overeenkomt met de golflengte van de vrije golf in het materiaal. Bij deze frequentie past de golf die door het systeem wordt opgelegd bij de eigen vrije buiggolf van het systeem. Dit resulteert in een sterke trilling in de plaat en grote geluidafstraling. Geometrisch betekent dit dat het spoor van de invallende golf past bij het spoor van de zich vrij voortplantende buiggolf. De golfsnelheid  $c_{\text{gedwongen}} = c_{\text{vrij}}$ . Dit verschijnsel waar de golflengtes samenvallen heet coïncidentie. Theoretisch wordt de golf dan vrij doorgelaten en is er bij deze frequentie ook een zeer geringe geluidisolatie. De frequentie waarbij zich dit coïncidentieverschijnsel voordoet is afhankelijk van de hoek van de invallende geluidgolf. Bij verschillende hoeken past de geluidgolf bij een andere frequentie bij de buiggolf in de plaat. Bij een alzijdig invallende golf op een enkele plaat zal coïncidentie dus optreden in een breed frequentiegebied. De laagste frequentie waarvoor coïncidentie optreedt is de grensfrequentie  $f_{\text{gr}}$ . Deze wordt gegeven door:

$$f_{\text{g}} \cdot d = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12\rho}{E}} \quad (2.4)$$

waarin  $\rho$  de dichtheid,  $d$  de dikte van de wand en  $E$  de elasticiteitsmodulus ( $\text{N/m}^2$ ) van het glas. Het product van grensfrequentie en dikte van het glas is dus een constante. Deze constante is bepaald door de eigenschappen van het materiaal.

In dubbelglas hebben we ook te maken met coïncidentie. Hier treedt ook een afname op van de geluidisolatie als gevolg van het coïncideren van vrije en gedwongen golven. Een

afleiding van de precieze verbanden voert buiten het bestek van deze rapportage. In dit geval spelen namelijk twee golfgetallen een rol, die van plaat 1 en plaat 2. Beide platen hebben hun eigen vrije buiggolf. De mate van coïncidentie hangt af van de eigenschappen van de platen. Bij gelijke diktes hebben beide platen dezelfde grensfrequentie, het coïncidentie-effect is hier dan zelfs sterker dan bij een enkelvoudige wand. In de praktijk worden dan ook platen gebruikt met ongelijke diktes om zo een hogere isolatie te krijgen. De afname van de isolatie van plaat 1 bij de grensfrequentie wordt dan opgevangen door de geluidisolatie van de tweede plaat.

De geluidisolatie zal voor dubbele beglazing vanaf de grensfrequentie opvallend dalen. De grensfrequentie ligt meestal in de orde van 2000 Hz à 3000 Hz. Het coïncidentiegebied is in figuur 2.1 aangegeven als gebied IV. In de praktijk is dit hoorbaar als een specifiek suizen, dit met name bij schuine inval (zoals hoger gelegen flats). Vaak heeft dit gebied een relatief beperkte invloed op de geluidisolatiewaarde voor wegverkeer zoals besproken zal worden in hoofdstuk 3.2.

## 2.6. Gelamineerd glas

Om bovengenoemd coïncidentieprobleem in dubbele beglazing te voorkomen kunnen bij dubbelglas constructies behalve enkelvoudige bladen ook bladen toegepast worden met een elastische tussenlaag. Hierbij wordt een van beide glasplaten opgebouwd uit twee dünnere platen gescheiden door een elastische tussenlaag. Dit kunnen één of meer lagen PVB -folie zijn, een laag acrylaathars of een luchtlaag.

Door een tussenlaag te gebruiken zal de bewegingsvorm van de glasplaat gewijzigd worden. De twee glasplaten die via de tussenlaag gekoppeld zijn bewegen niet meer als één plaat. De platen bewegen als twee gekoppelde platen met de helft van de dikte en niet meer als één plaat met dikte  $h$ . Door deze afname in dikte zal de grensfrequentie verschuiven naar hogere frequenties (zie vergelijking 2.4). Verder zal het coïncidentie-effect verminderd worden doordat de tussenlaag de beweging van de platen zal dempen.

Het resultaat is dus tweeledig: de grensfrequentie schuift omhoog waardoor coïncidentiegebied naar hogere frequenties verschuift en het effect van coïncidentie op de geluidisolatie wordt verminderd door de demping van de elastische tussenlaag. De verbetering van dit gelamineerde glas op de geluidisolatie vergeleken met de geluidisolatie van ongelamineerd glas hangt af van de gebruikte tussenlaag.

- Als een PVB - folie gebruikt wordt als elastische tussenlaag zal dat een vermindering van de afname van de geluidisolatie in het coïncidentiegebied tot gevolg hebben. De geluidisolatie in gebied IV zal hoger zijn. De verbetering in dit gebied kan zorgen voor een belangrijke verbetering van de geluidisolatie als geheel.
- Indien acrylaathars gebruikt wordt verschuift het coïncidentieverschijnsel naar hogere frequenties. Tevens treedt een afname van het verschijnsel op waardoor het minder duidelijk is of zelfs helemaal verdwijnt. De isolatie bij lagere frequenties neemt ook iets toe.

- Ook een dunne luchtlaag kan gebruikt worden als elastische tussenlaag. Dit geeft ook een verschuiving van het coïncidentieverschijnsel naar hogere frequenties. Ook is er een positief effect op de geluidisolatie zij het beperkter dan bij het toepassen van acrylaathars.

#### 2.7. Invloed resonantie en coïncidentie op de isolatiecurve

Nu de resonantie en coïncidentie besproken zijn kunnen deze effecten gecombineerd worden om een totaaloverzicht te krijgen op de isolatiecurve van figuur 2.1. Bij de beschrijving van de massaveer resonantie in paragraaf 2.3 wordt het frequentiegebied verdeeld in het gebied I, II, III en IV. In het stijfheidsgebied I geldt de massawet (formule 2.2), in resonantiegebied II een afname van de geluidisolatie. In massagebied III geldt vergelijking 2.3 wat theoretisch een geluidisolatie van 18dB per octaaf oplevert. Het coïncidentie-effect treedt op in gebied IV en zorgt hier voor een afname in de geluidisolatie. Deze afname kan eventueel verminderd worden door gebruik van gelamineerd glas.

In de praktijk zijn deze verschillende gebieden vaak goed te onderscheiden bij isolatiemetingen. Het is dan mogelijk om op basis van de isolatiecurve te bepalen waar de zwakke punten zitten. Dit is een tool die gebruikt kan worden om te onderzoeken welke mogelijkheden er zijn om de geluidisolatie van glasproducten te verbeteren. Het voorbeeld in figuur 2.1 is een isolatiecurve waarbij een van beide glasplaten gelamineerd is. De gestippelde lijn is een referentiecurve die gebruikt wordt om de  $R_w$  waarde te berekenen volgens ISO 717-1:1996. Deze wordt besproken in hoofdstuk 3.2.

#### 2.8. Invloed gasvulling op geluidisolatie

Tot nu toe is uitgegaan van een dubbele beglazing met luchtvulling. Door een zwaarder gas als spouwvulling te gebruiken veranderen de geluidisolerende eigenschappen van de beglazing. Het resultaat van een spouwvulling met een zwaarder gas is een verbeterde geluidisolatie in het middenfrequentie gebied (400Hz tot 1400Hz). Hier staat tegenover dat de geluidisolatie in het resonantiegebied afneemt. De invloed van het zware gas op de geluidisolatie kan verklaard worden door de invloed van de stijfheid van het gas op de massa-veer beweging [3].

De stijfheid van een spouwvulling kan vergeleken worden met de veerconstante in een massa veersysteem. Bij schuin invallend geluid neemt de stijfheid toe. Dit komt doordat bij schuin invallend geluid het dynamisch evenwicht opgesteld wordt door de snelheidscomponenten loodrecht op de wand. De stijfheid van de spouw is dus afhankelijk van de hoek van inval en voor grotere hoeken van inval zal de stijfheid toenemen. De stijfheid  $s$  wordt gegeven door de volgende vergelijking:



$$s = s(\theta) = s_0 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{c_G}{c_L}\right)^2 \sin^2 \theta} \quad (2.5)$$

met:

$$s_0 = \frac{\rho_G \cdot c_G^2}{h} \quad (2.6)$$

waarin:

- $\theta$  = hoek van inval
- $c_G$  = geluidsnelheid in het vulgas
- $c_L$  = geluidsnelheid in lucht
- $\rho_G$  = dichtheid gas

De term  $s_0$  is nagenoeg onafhankelijk van het gas, als de dichtheid toeneemt neemt de geluidsnelheid af. De hoekafhankelijkheid van de stijfheid wordt bepaald door de noemer in 2.5. Hierin is te zien dat bij loodrechte inval  $s(\theta) = s_0$ . De stijfheidsterm  $s_0$  voor  $\theta=0^\circ$  is direct terug te vinden in de massaveer resonantie frequentie (vgl 2.1). Bij schuine inval neemt de stijfheid toe met de hoek van inval. Schuin invallende golven worden dus beter doorgelaten. Als de hoekafhankelijkheid van de stijfheid vergeleken wordt voor lucht en voor een zwaar gas volgt uit 2.5 dat de hoekafhankelijkheid voor het zwaar gas kleiner is dan voor lucht. Dit wordt veroorzaakt door de factor  $(c_G/c_L)^2$  voor de hoekafhankelijke term. De stijfheid voor alzijdig invallend geluid zal in het geval van een zwaar gas dan lager zijn dan voor lucht.

De massa veer beweging van de glasplaten en gaslaag wordt bepaald door de stijfheid van het spouwgaz. Omdat de stijfheid van het gas afhankelijk is van de hoek van inval zal ook de massa-veer resonantie van de hoek van inval afhankelijk zijn, dit volgens

$$\omega_0(\theta) = \sqrt{s(\theta) \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)} \quad (2.7)$$

Doordat de stijfheid in het geval van SF6 in mindere mate hoekafhankelijk is dan voor lucht vulling zal ook de resonantiefrequentie in het geval van een zwaar gas minder hoekafhankelijk zijn. De resonantiefrequenties voor de diverse hoeken zullen dichtbij elkaar liggen wat resulteert in een smalle resonantie dip voor alzijdig invallend geluid. In het geval van lucht vulling zal de resonantiefrequentie sterker afhankelijk zijn van de hoek. De invloed van de verschillende hoeken van inval zal zorgen bij lucht vulling voor een bredere resonantie dip doordat de individuele resonantiefrequenties meer verdeeld zijn. De resonantie van dubbel glas met een zwaar gas als spouwvulling zal dus resulteren in een massa-veer resonantie bij een lagere frequentie dan het lucht gevulde systeem.

Tevens zal de afname dieper zijn omdat de frequenties vanuit de verschillende hoeken dichter bij elkaar liggen.

Ook volgt hieruit dat boven de resonantiefrequentie voor alzijdig invallend geluid de geluidisolatie bij vulling met een zwaar gas eerder begint toe te nemen dan bij lucht vulling. Hierop is de verbeterde geluidisolatie in het midden frequentiegebied bij gebruik van SF6 gebaseerd. De invloed van de zware gasvulling op de isolatie kan verklaard worden in het resonantiegebied en tot ongeveer 2 octaven daarboven. Bij hogere frequenties gaan andere effecten (met name coïncidentie) een rol spelen en kan niet volstaan worden met de theorie zoals weergegeven in dit hoofdstuk.

De verbetering van de isolatie is dus afhankelijk van de geluidssnelheid in het spouwgaz. Een zwaarder gas met een lagere geluidssnelheid zorgt voor een verbeterde geluidisolatie. Hier zit echter wel een maximum aan. Een zwaarder gas dan SF6 blijkt geen invloed meer te hebben. De geluidssnelheid in lucht is 340 m/s, in SF6 is dat 149 m/s. Spouwvulling met een nog zwaarder gas zoals bijvoorbeeld C4F8 met een geluidssnelheid van 107 m/s geeft geen verdere verbetering van de geluidisolatie. Overigens wordt opgemerkt dat ook C4F8 een broeikasgas is en dus niet in aanmerking komt als alternatief voor SF6. Spouwvulling met Argon, dat weliswaar iets zwaarder is dan lucht, heeft geen significant effect op de geluidisolatie, wel zorgt dit gas voor een verbeterde thermische isolatie.

Samenvattend kan gesteld worden dat bij dubbele beglazing met SF6 de volgende veranderingen optreden vergeleken met een luchtgevulde constructie. Deze veranderingen zijn gebaseerd op empirische gegevens.

- De massa veer resonantie  $f_0$  treedt op bij een lagere frequentie dan bij lucht vulling. De resonantiedip is dieper dan bij een luchtgevulde spouw.
- In het gebied boven de resonantiefrequentie stijgt de isolatie veel sterker dan bij lucht vulling. Deze stijging hangt ook af van de samenstelling van het gas, een hoger percentage SF6 zorgt voor een grotere stijging van de isolatie. Met empirische rekenmethoden [4,5] kan het gedrag van de geluidisolatie bepaald worden.
- Bij hogere frequenties treden geen verschillen op tussen de verschillende beglazingen. SF6 heeft dus geen invloed op de isolatie in het gebied rond en boven de grensfrequentie. De isolatiecurve van met zwaar gas gevulde beglazingen sluit bij de grensfrequentie aan bij de geluidisolatie van luchtgevulde beglazingen.

Meestal wordt de lagere isolatie rond de resonantiefrequentie ruimschoots gecompenseerd door de winst die er te behalen valt in het midden/hoge frequentiegebied. Dit is echter mede afhankelijk van het belang van de verschillende frequentiegebieden.

De geluidisolatie wordt meestal bekeken aan de hand van een referentiespectrum voor de geluidbelasting (zie hoofdstuk 3.2). De vorm van de geluidisolatiecurve kan voor

verschillende geluidbronnen andere effecten hebben. Railverkeergeluid heeft bij lage frequenties een lager niveau dan wegverkeergeluid. Omdat de geluidisolatie bij het gebruik van zware gassen verbetert in het middenfrequentiegebied zal dit meer invloed hebben op het railverkeerlawaai dan op wegverkeerlawaai. Dit omdat bij wegverkeer het geluidniveau meer bepaald wordt door de lage frequenties waar de isolatie niet verbetert door het zware gas in de spouw. Hierdoor zal de verbetering van de geluidisolatie door het gebruik van SF6 bij een specifieke glassamenstelling hoger zijn voor het spectrum railverkeer dan van wegverkeer. Het geluidsspectrum dat door het glas tegengehouden moet worden bepaald dus mede het nut van het gebruik van SF6.

Het doel van dit theoretisch gedeelte is om de effecten die te vinden zijn in de geluidisolatiecurve te kunnen herleiden tot oorzaken die door de interactie van geluidgolven met het isolerend medium te verklaren zijn. In de praktijk zullen de isolatiecurves niet uit de theorie berekend kunnen worden. Invloeden van randeffecten en dergelijke komen in deze theorie niet terug. Dit maakt het moeilijk om de precieze waarden uitsluitend uit de theorie te voorspellen. Om de geluidisolatie van constructies vooraf te bepalen verdient het de voorkeur empirische modellen te gebruiken die gebaseerd zijn op eerdere metingen.

### 3. GELUIDISOLATIE OP BASIS VAN PRAKTIJK/REKEN GEGEVENS

#### 3.1. Inleiding

In hoofdstuk 2 is de theorie van het geluidsisolerend gedrag van dubbele beglazing besproken. De bepaling van de geluidisolatie van beglazingen wordt in de praktijk gebaseerd op empirische gegevens en een empirisch rekenmodel. De samenstelling van een bepaalde glassoort dient als invoer en op basis van een empirisch verband kan hier het geluidisolatiespectrum van dat specifieke glas mee berekend worden. Een veel gebruikte methode is de rekenmethode volgens Geluidwering Gevels, publicatie WG-HR-05-02 [4]. Mogelijke beglazingen zijn enkel glas en dubbelglas. In de hierin opgenomen rekenmethode kan naast standaard dubbele beglazing ook gebruik gemaakt worden van gelamineerd glas met 1 mm PVB folie of een harslaag van 2 mm. Ook kan gekozen worden voor gasvulling in de spouw.

De berekening wordt uitgevoerd met algoritmes die gebaseerd zijn op empirische gegevens. Deze methode ligt ook ten grondslag aan de waarden voor de geluidisolatie zoals die in de Herziening Rekenmethode Geluidwering Gevels [6] gegeven zijn. Deze "herziening" uit 1989 zal nu vervangen worden door de Nederlandse Praktijkrichtlijn, Geluidwering in Gebouwen [7] die op dit moment (maart-2002) als ontwerp (NPR 5272) beschikbaar is. Volgens de "Herziening" wordt bij deze geluidisolatiewaarden een marge gehanteerd van ca. 1,0 dB (zie pag. 26) dB ten opzichte van de laboratoriumwaarden. Met deze marge zouden effecten van spreiding van producten, spreiding tussen laboratoria en invloeden door glasafmetingen verdisconteerd worden.

#### 3.2. NEN en ISO normen

Om de geluidisolatie van verschillende beglazingen op een eenvoudige manier te kunnen vergelijken zijn een aantal ééngetalswaarden voor de geluidisolatie gedefinieerd. Deze waarden worden bepaald uit de geluidisolatiecurve zoals figuur 2.1. In de praktijk worden een aantal verschillende ééngetalswaarden gebruikt. Welke ééngetalswaarde gebruikt wordt, hangt af van de situatie. In de praktijk wordt vaak de A-gewogen geluidisolatie voor standaard buitengeluid gebruikt, het spectrum voor standaard buitengeluid komt overeen met spectrum wegverkeer. Verder zijn ook de geluidspectra voor railverkeer en luchtverkeer vastgelegd. Deze zijn vastgelegd in NEN 5079:1990. Ook worden de  $R_w$ -waarde en de  $R_{At}$ -waarde gebruikt zoals gedefinieerd in ISO 717-1:1996. De verschillende grootheden zullen hier kort besproken worden, voor een volledige beschrijving wordt verwezen naar bijbehorende normen.

##### Nederlandse Norm: NEN 5079:1990

In deze NEN norm is de bepaling van de A-gewogen geluidisolatie voor buitengeluid (wegverkeer)  $R_{A,V}$  vastgelegd. Het geluidisolatiespectrum voor een glastype wordt op de volgende manier gebruikt om de  $R_{A,V}$  waarde te bepalen:

Uitgangspunt is het wegverkeerspectrum aan de bronzijde. Op dit geluidsspectrum voor wegverkeer wordt een standaard correctie (A-weging) toegepast om de frequentieafhankelijke gevoeligheid van het menselijk oor mee te wegen. Dit A-gewogen spectrum voor wegverkeer is vastgesteld in deze NEN. Op basis van dit gewogen geluidsspectrum wordt het A-gewogen geluidsspectrum aan de ontvangzijde bepaald. Dit gebeurt door de geluidisolatie (figuur 2.1) per frequentieband van het A-gewogen referentiespectrum af te halen. Het resultaat is het A-gewogen binnenspectrum. Het verschil in geluidrukniveau tussen het A-gewogen wegverkeergeluid en het A-gewogen binnengeluid is dan de "A-gewogen" geluidisolatie voor wegverkeer  $R_{A,V}$ . Op een zelfde manier worden de  $R_{A,r}$  en de  $R_{A,l}$  bepaald voor respectievelijk railverkeer- en luchtverkeergeluid.

#### Internationale norm: ISO 717-1:1996

In deze ISO norm is de bepaling van de Weighted Sound Reduction Index  $R_w$  vastgelegd. Hiervoor wordt het geluidisolatiespectrum (figuur 2.1) vergeleken met de gestippelde referentiecurve in dezelfde figuur. Deze referentiecurve wordt zo verschoven totdat de gemiddelde onderschrijding van de gemeten isolatiecurve ten opzichte van de referentie een bepaalde waarde bedraagt. Na deze verschuiving van de referentiecurve geeft de waarde van de referentiecurve bij 500Hz de  $R_w$  waarde.

In deze ISO 717-1 is ook de  $R_{Atr}$  vastgelegd. Het is een waarde die net als de  $R_{A,V}$  waarde bepaald wordt op basis van een referentiespectrum. Dit referentiespectrum lijkt veel op het spectrum voor verkeerslawaaï uit de NEN5079. Vaak wordt de  $R_{Atr}$  waarde niet direct aangegeven maar worden  $R_w$  en de "spectrum-adaptatieterm"  $C_{tr}$  gegeven, er geldt dan  $R_{Atr} = R_w + C_{tr}$ .

De vorm van de geluidisolatiecurve kan van grote invloed zijn op de uiteindelijke geluidisolatie uitgedrukt in één getal. Een hoge geluidisolatie in het lagere frequentiegebied heeft namelijk meer invloed op een spectrum wat juist in dat frequentiegebied een hoog niveau heeft. Het is daarom van belang te weten welk spectrum en dus welke ééngetalswaarde voor de situatie van toepassing is.

#### 3.3. Bepaling invloed gasvulling volgens rekenmodellen

In de Herziening Rekenmethode Geluidwering Gevels worden de geluidisolatiewaarden aangegeven door de A-gewogen geluidisolatie voor buitengeluid  $R_{A,V}$ . In de ontwerp NPR 5272 wordt de geluidisolatiewaarde aangegeven in  $R_{Atr}$ . Enerzijds omdat de NPR nog in ontwerpfase verkeerd en anderzijds omdat de voorliggende gegevens voornamelijk betrekking hebben op de  $R_{A,V}$ , zullen in de volgende analyse de waarden uit de Herziening gebruikt worden. Het referentie spectrum voor de bepaling van de  $R_{Atr}$  waarde verschilt niet significant van het referentiespectrum voor het bepalen van de  $R_{A,V}$  waarde en de volgende analyse zal dan ook niet significant verschillen voor beide kentallen. Voor rail- en luchtverkeerslawaaï kunnen er wel verschillen optreden.

Op basis van de gegevens in de Herziening Rekenmethode Geluidwering Gevels kan een vergelijking gemaakt worden van de geluidisolatie van gasgevulde en luchtgevulde beglazingen. Uitgaande van een reeks van geluidisolaties ( $R_{A,V}$ ) is per geluidisolatie één beglazing met en één zonder SF6 geselecteerd die hieraan voldoet. Uitgangspunt bij deze selectie is dat de overige eigenschappen (zoals thermische isolatie) voor zover mogelijk gelijk blijven.

Geen rekening is gehouden met de invloed van windbelasting in combinatie met glasafmetingen op de minimale dikte van het glas.

Indien er bij de selectie van het glas uit de lijst meer mogelijkheden zijn dan is steeds de goedkoopste samenstelling van spouw en glas gekozen.

De goedkoopste manier om de isolatie van dubbel glas te verbeteren is door in eerste instantie de (lucht)spouw te vergroten. In de gegevens is dit ook terug te zien door het feit dat bij een groot gedeelte van de beglazingen de spouw zo groot mogelijk wordt gemaakt. De maximale spouwdikte die in de beglazingen voorkomt is 24mm. Een bredere spouw kan behaald worden door voozetramen te gebruiken deze vallen buiten de strekking van deze tekst. Een tweede (duurdere) stap naar betere geluidisolatie is het gebruik van dikker glas. De dikte van de verschillende glasplaten wordt op verschillende manieren gecombineerd om ongewenste effecten als coïncidentie en dergelijke te vermijden en zo een optimale geluidisolatie te bereiken. Hierbij wordt geprobeerd de totale glasdikte van de twee ruiten zo dun mogelijk te houden om op die manier het materiaalgebruik en kosten te beperken. Een derde stap in kostenniveau is het gebruik van gelamineerd glas (hars of folie) voor één van beide glasplaten. Een laatste stap is het gebruik van gelamineerd glas voor beide ruiten.

De resultaten die op deze manier verkregen zijn staan aangegeven in onderstaande tabel. Hierbij is de samenstelling aangegeven als: glasdikte1/ spouwdikte/ glasdikte2. Gelamineerd glas met 1 laag PVB folie wordt aangegeven door .1 achter de glasdikte, gelamineerd glas met ca. 2mm acrylaathars door .2 achter de glasdikte. Een glasblad van 6mm glas, 2mm hars en 4 mm glas wordt dus genoteerd als 10.2. Een blad met 6mm glas, 1 laag PVB en 4mm glas als 10.1.

**Tabel 1** Mogelijke beglazingen voor bijbehorende geluidisolatie  $R_{a,v}$  op basis van de Herziening Rekenmethode Geluidwering Gevel

$R_{a,v}$ dB(A)	SF <sub>6</sub> gevuld	Luchtgevuld	Verskil in Spouwdikte (lucht-SF <sub>6</sub> )	Materiaal verschil (lucht - SF <sub>6</sub> )
28	4/12/8	4/12/4	0	- 4 mm glas
29	4/20/4	4/12/6	-8 mm	+ 2 mm glas
30	4/16/6	4/24/4	+8 mm	- 2 mm glas
31	4/24/4	6/20/6	-4 mm	+ 4 mm glas
32	4/20/6	4/24/6	+ 4 mm	
33	6/26/6	6/20/10	- 6 mm	+ 4 mm glas
34	6/24/10	8/24/12	0	+ 4 mm glas
35	6/24/12.1	8/24/12.1	0	+ 2 mm glas
	4/24/10.2	6/24/10.2	0	+ 2 mm glas
36	6/24/10.2	8/24/10.2	0	+ 2 mm glas
37	8/24/10.2	8/24/12.2	0	+ 2 mm glas
38	8.1/20/12.2	10.2/20/10.2	0	- PVB + hars
39	10.2/24/10.2	10.2/20/10.2	-4 mm	

Om de luchtgevulde en gasgevulde beglazingen goed te kunnen vergelijken is in de rechtse kolommen het verschil in luchtspouw en materiaal tussen de twee aangegeven. Het blijkt dat het gebruik van SF<sub>6</sub> niet altijd een reductie van het benodigde materiaal betekent. Op basis van deze gegevens blijkt bij de lage isolatiewaarden soms minder materiaal nodig te zijn. Over het algemeen is echter 2 tot 4 mm meer glas nodig om zonder SF<sub>6</sub> dezelfde geluidisolatie te bereiken als met SF<sub>6</sub> als spouwvulling. Dit verschil lijkt relatief constant te zijn bij geluidisolatiewaarden boven 30dB(A). Duurdere gelamineerde beglazing in plaats van ongelamineerd glas lijkt niet nodig te zijn om dezelfde geluidisolatie te krijgen. De kosten zullen in hoofdstuk 5 verder besproken worden.

#### 3.4. Beperkingen rekenprogramma's

Bij het gebruik van de rekenmethode c.q. de "herziening" treden er enkele beperkingen op:

- Het is met de programma's alleen mogelijk te kiezen voor gas- of lucht vulling. In de praktijk gebruiken glasfabrikanten vaak gasmengsels. Vaak wordt een mengsel van Ar en SF<sub>6</sub> gebruikt. Dit kan in allerlei verhoudingen gebruikt worden, bij de metingen in het laboratorium van Peutz zijn onder andere gasmengsels van 70% Ar en 30% SF<sub>6</sub> tot 30% Ar en 70% SF<sub>6</sub> gebruikt. Deze verhoudingen zijn niet in te voeren in de rekenmodellen.

- In het geval van gelamineerd glas kan alleen gekozen worden voor een PVB folie van 1mm of een harslaag van 2mm. Het is niet mogelijk de dikte van de folie te variëren of om de positie van de folie aan te geven. Glasproducenten proberen verschillende technieken en samenstellingen van beglazingen uit om tot een zo goed mogelijke geluidisolatie te komen. Vaak worden meerdere lagen folie gebruikt of wordt de harslaagdikte veranderd terwijl het rekenmodel slechts 1mm PVB of 2mm hars toestaat. Ook zijn er verbeterde folies op de markt die, door een hogere inwendige demping, een groter effect hebben op de geluidisolatie, dan de folies waarop indertijd het model is gebaseerd. Deze mogelijkheden zijn niet in de rekenmethodes en op dit moment ook niet in de tabellen van de ontwerp NPR 5272 opgenomen.
- Er bestaat enige twijfel omtrent de betrouwbaarheid van de resultaten van het model. Hierop zal in het volgende hoofdstuk teruggekomen worden.



## 4. GELUIDISOLATIE METINGEN

### 4.1. Inleiding

Naast de gegevens uit het rekenmodel en de “Herziening” zijn er door de industrie een groot aantal metingen verricht van de geluidisolatie van samengestelde beglazingen, in verschillende laboratoria. Ten opzichte van de oorspronkelijke metingen zijn de normen (m.n. ISO 140-3) inmiddels aangepast, welke van invloed zijn op de nauwkeurigheid van de verrichte metingen. Vergelijking van metingen aan vergelijkbare beglazingen gemeten in verschillende laboratoria en in verschillende perioden (voor en na aanpassing ISO 140-3) laat een relatief grote spreiding zien.

In het kader van saneringsproject Schiphol zijn bij Adviesbureau Peutz & Associés geluidisolatiemetingen verricht aan een uitgebreide set beglazingen. De metingen zijn verricht in het Laboratorium voor Akoestiek van het adviesbureau in de periode januari 2000 tot februari 2002. Bij die metingen is dubbele beglazing van verschillende samenstelling en van verschillende fabrikanten gemeten onder dezelfde condities in hetzelfde laboratorium. Dit laboratorium voldoet aan de eisen volgens ISO 140-3 en is voor o.m. geluidisolatiemetingen geaccrediteerd door de Raad voor de Accreditatie (ingeschreven in het STERLAB register onder nr. L334).

Analyse van deze dataset geeft een groot voordeel omdat er een hoge herhaalbaarheid bereikt wordt en verschillen in meetresultaten daardoor toe te schrijven zijn aan verschillen in opbouw en niet aan verschillen in laboratoria onderling. De verschillende beglazingen zijn divers van soort. Naast variaties in glasdiktes en spouwbreedtes is er gemeten aan beglazingen met en zonder gelamineerd glas. Ook is er met akoestisch isolerend glas (dus met SF6) en met thermisch isolerend glas (dus zonder SF6) gemeten. Vooral dit laatste is erg belangrijk om de alternatieven op het gebruik van akoestisch isolerend glas te kunnen aangeven.

### 4.2. Bepaling geluidisolatie

De geluidisolatiemetingen zijn verricht volgens ISO 140-3. De geluidwerende constructie wordt in een opening tussen twee ruimtes geplaatst. In de ene ruimte wordt door middel van luidsprekers een homogeen diffuus geluidveld opgebouwd waarna in beide ruimten het geluiddrukkniveau gemeten wordt, afhankelijk van de frequentie. De geluidisolatie wordt dan berekend uit:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \left( \frac{S}{A} \right) \quad (4.1)$$

waarin:

- $L_1$  = geluiddrukkniveau in de zendruimte
- $L_2$  = geluiddrukkniveau in ontvangruimte
- $S$  = oppervlak van het te testen object

A = equivalente geluidabsorptie [m<sup>2</sup>] in de ontvangruimte berekend volgens de formule van Sabine:

$$A = \frac{0.161V}{T} \quad (4.2)$$

waarin:

V = volume ontvangruimte

T = nagalmtijd ontvangruimte

Volgens deze norm wordt dus rekening gehouden met de nagalmtijd en volume van de ontvangruimte. De geluidisolatie volgens formule 4.1 wordt bepaald bij de verschillende frequentiebanden waaruit de geluidisolatiecurve volgt.

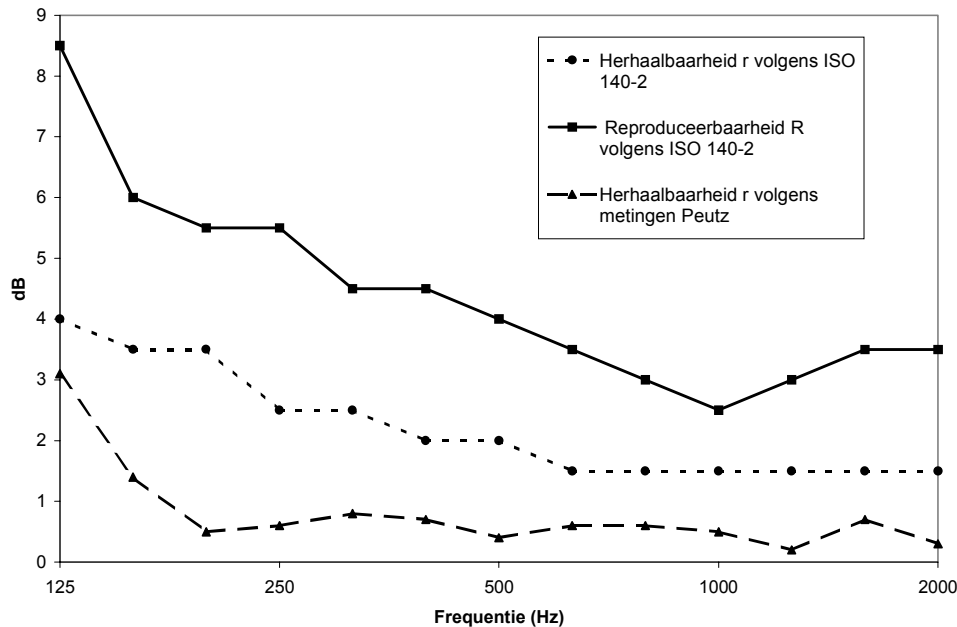
De metingen zijn verricht aan beglazingen met een afmeting van 1,25x1,5 m (conform ISO 140-3). Na aanlevering hebben de ruiten tenminste 5 dagen in het laboratorium gestaan om de randverbinding te laten uitharden.

De metingen zijn verricht tussen meetruimte 1 en 2 (zie figuur in bijlage 1). De metingen zijn uitgevoerd in twee richtingen en vervolgens gemiddeld. Hiermee wordt een verbetering van de herhaalbaarheid bereikt.

De nauwkeurigheid van de berekende geluidisolaties kan getalsmatig worden uitgedrukt in termen van de herhaalbaarheid r (binnen één laboratorium) en de reproduceerbaarheid R (tussen verschillende laboratoria). Wanneer kort na elkaar twee keer een geluidisolatiemeting wordt uitgevoerd met een zelfde methode aan een identiek meetobject onder gelijkblijvende omstandigheden in een zelfde laboratorium is de waarschijnlijkheid 95% dat het verschil tussen de twee metingen onderling maximaal r bedraagt.

Wanneer twee keer een geluidisolatiemeting wordt uitgevoerd met een zelfde methode aan een identiek object in verschillende laboratoria is de waarschijnlijkheid 95% dat het verschil tussen de twee metingen onderling maximaal R bedraagt.

De waarden waaraan de herhaalbaarheid en reproduceerbaarheid moeten voldoen staan beschreven in ISO 140-2. Deze waarden zijn aangegeven in figuur 4.1. Ook staan de herhaalbaarheid aangegeven zoals die bepaald is volgens ISO 140-2 bij het Laboratorium voor Akoestiek bij Peutz in Mook. Uit deze metingen blijkt dat de herhaalbaarheid r ruim onder de herhaalbaarheids-eis ligt. Aan de herhaalbaarheid volgens ISO 140-2 is dus ruim voldaan. Boven de 200Hz blijft de herhaalbaarheid onder de 1.0 dB. Daarmee is de goede herhaalbaarheid binnen het laboratorium aangetoond. Dit zorgt ook voor de grote betrouwbaarheid van de set metingen die besproken worden in dit hoofdstuk.



**Figuur 4.1** Herhaalbaarheid-eis en reproduceerbaarheid-eis volgens ISO 140-2 en de herhaalbaarheid zoals bepaald bij Adviesbureau Peutz

Zoals eerder aangegeven wordt in het kader van dit rapport de analyse van de geluidisolatie gebaseerd op het wegverkeerspectrum  $R_{A,V}$ . Dit spectrum is in de praktijk het meest van toepassing. Deze waarden zijn in het Laboratorium voor Akoestiek bij Peutz bepaald voor verschillende beglazingen. In deze set metingen zijn beglazingen van verschillende fabrikanten opgenomen.

Allereerst is een vergelijking gemaakt tussen enerzijds de gemeten geluidisolaties en anderzijds de te verwachten geluidisolatie op grond van het in hoofdstuk 3 besproken empirische rekenmodel. Bij de vertaling van de door de fabrikant aangegeven samenstelling naar het rekenmodel is hierbij van het volgende uitgegaan:

- Indien door de fabrikant aangegeven is dat SF6 of “een akoestisch gas” als spouwvulling is gehanteerd dan is dat ook als zodanig in het rekenmodel meegenomen.
- Indien door de fabrikant een mengsel is aangegeven van bijvoorbeeld SF6 en argon dan is dit als akoestisch gas beschouwd indien het aandeel SF6 tenminste 70 % bedraagt (zie ook ontwerp NPR 5272); indien een lager aandeel SF6 is aangegeven dan zijn deze metingen verder als “gemengd gevuld” aangeduid.
- Één of meerdere folies zijn als 1 laag PVB folie ingevoerd.
- Harslagen zijn, onafhankelijk van de dikte, ingevoerd als met acrylaathars gelamineerd glas.

Om bij de analyse onderscheid te kunnen maken zijn de glassoorten onderverdeeld in zes categorieën:

Categorie

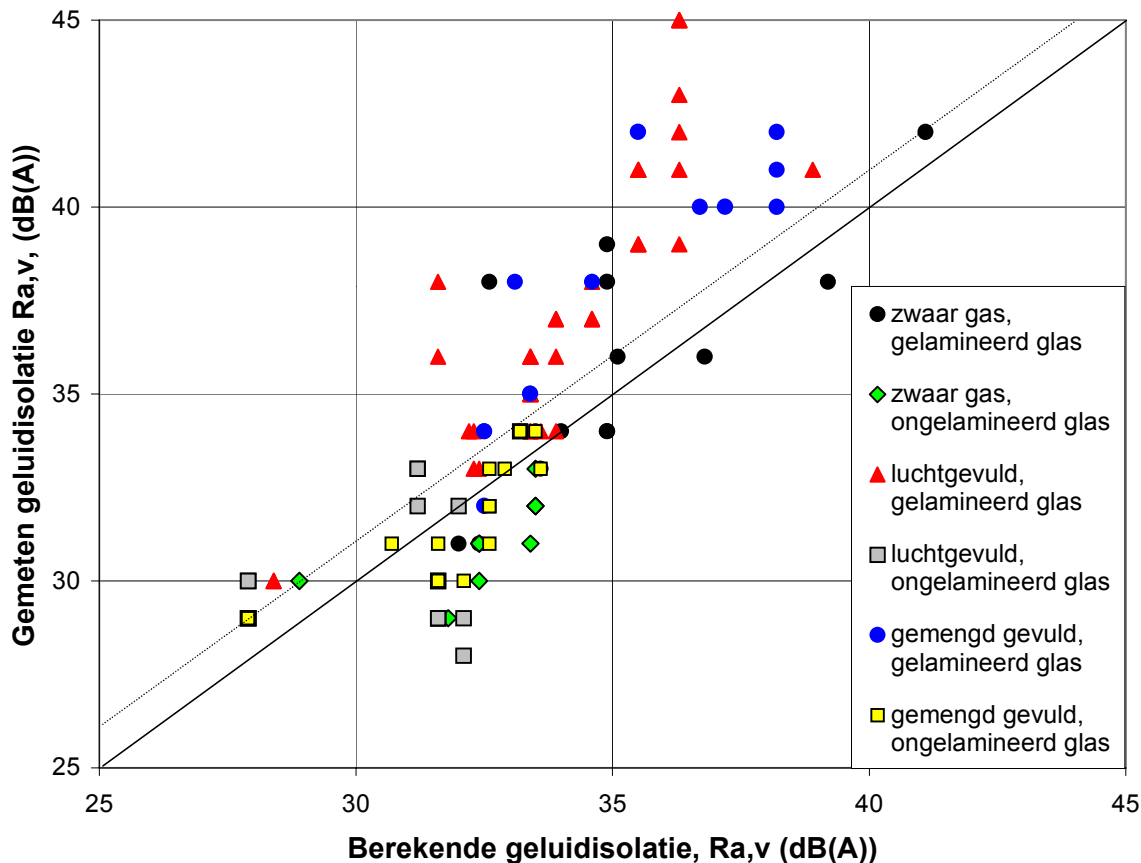
- 1: luchtgevuld, ongelamineerd;
- 2: luchtgevuld, gelamineerd;
- 3: gasgevuld, ongelamineerd;
4. gasgevuld, gelamineerd;
5. gemengd gevuld, ongelamineerd;
6. gemengd gevuld, gelamineerd.

In de NPR 5272 spreekt men over gasvulling indien het spouwgas voor minimaal 70% uit SF6 bestaat. In de metingen die gedaan zijn komen veel verschillende gassamenstellingen voor. Bij een gasvulling met 70% SF6 of meer wordt het ingedeeld in categorie 3 of 4. Bij 100% lucht vulling in 1 of 2. In de tussenliggende gevallen behoort het tot geen van de categorieën 1 t/m 4. De categorieën 5 en 6 bevatten de glassoorten die SF6 bevatten maar waar het percentage lager is dan 70%. De geluidisolatie van deze categorieën wordt berekend aan de hand van beglazing met lucht vulling.

In figuur 4.2 is de gemeten geluidisolatie van de verschillende beglazingen uitgezet tegen de berekende geluidisolatie volgens de rekenmethode [4]. Alleen de beglazingen die ingedeeld kunnen worden in de verschillende categorieën zijn gebruikt. In figuur 4.2 is de doorgetrokken lijn  $R_{A,V}(\text{laboratorium}) = R_{A,V}(\text{berekening})$  aangegeven. Als de berekende waarden gelijk zijn aan de gemeten waarden moeten de punten allemaal op deze lijn liggen. Zoals eerder gemeld wordt in de Herziening een marge gehanteerd waardoor de geluidisolatiemetingen in het laboratorium gemiddeld 1.0 dB(A) hoger zouden moeten uitvallen dan de waarde die uit de rekenmodellen volgt. Als de gemeten geluidisolatie uitgezet wordt tegen de berekende geluidisolatie zouden de punten op een rechte lijn moeten liggen volgens  $R_{A,V}(\text{laboratorium}) = R_{A,V}(\text{berekening}) + 1\text{dB(A)}$ , deze lijn is in de figuur als stippellijn aangegeven. Hieruit blijkt dat de aanname dat de laboratoriumwaarde 1dB(A) hoger ligt niet in overeenstemming is met de resultaten. Uit deze serie metingen blijkt dat de spreiding van de gemeten waarde rond de berekende waarde aanmerkelijk groter is dan in de Herziening beschreven.

Op grond van deze vergelijking kunnen wordt het volgende geconstateerd:

- De grootste onderschrijdingen (van maar liefst 3 à 4 dB(A)) treden op bij het ongelamineerde glas, zowel bij lucht- als bij gasvulling. Opgemerkt wordt dat dit in de praktijk bij woningisolatie ook de meest voorkomende glassoorten zijn. Het kan voorkomen dat gasgevulde beglazing aanbevolen wordt terwijl de vereiste waarde daarmee niet gehaald kan worden.
- Het luchtgevulde gelamineerde glas laat geen onderschrijdingen zien. In enkele gevallen is de gemeten luchtgeluidisolatie beduidend hoger dan de berekende (tot ca. 8 dB(A)). Dit laatste wordt waarschijnlijk veroorzaakt door innovaties bij gelamineerd glas (de geluiddempende folies). Deze folies zouden dus vaker een alternatief kunnen zijn dan op basis van de huidige rekenmodellen voorspeld wordt.
- Bij gasgevuld gelamineerd glas zijn zowel onder- als overschrijdingen van de berekende waarde geconstateerd.



Figuur 4.2 Gemeten geluidisolatie tegen de berekende geluidisolatie

Uit de figuur 4.2 blijkt duidelijk dat de geluidisolatie van dubbele beglazing niet voldoende nauwkeurig voorspeld kan worden uit de rekenmethode. Dit geldt zowel voor de ongelamineerde beglazingen als voor de gelamineerde beglazingen waarbij de laatste jaren sprake is van productinnovaties.

De in de ontwerp NPR 5272 opgenomen geluidisolaties bieden derhalve ook onvoldoende zekerheid dat deze waarden ook in de praktijk gerealiseerd kunnen worden. Beter zou het zijn te verwijzen naar meetresultaten van de fabrikant, dan wel op basis van deze metingen aangepaste getallen op te nemen.

Verder speelt de te hanteren marge tussen laboratoriummetingen en praktijkwaarden een rol. Op grond van de te verwachten spreiding tussen laboratoria en de invloed van andere factoren zoals glasafmetingen, verharding van randverbindingen e.d. is 1,5 dB volstrekt onvoldoende. Afhankelijk van de beoogde mate van zekerheid zijn marges van 3 à 5 dB(A) nodig.

#### 4.3. Glaskeuze op basis van meetresultaten

In tabel 1 in hoofdstuk 3 is een voorspelling gemaakt van de beglazing die nodig is om een bepaalde geluidisolatie te halen. Dit is gedaan op basis van gegevens uit de Herziening en NPR die weer gebaseerd zijn op de rekenmethode. In deze paragraaf wordt een vergelijkbare tabel opgezet maar dan op basis van de gemeten geluidisolaties in het laboratorium. Uitgangspunt is ook hier weer het zoeken naar de mogelijkheden om met een gasgevulde en met een luchtgevulde constructie een bepaalde geluidisolatie te halen. Daarvoor is een lijst gemaakt met de geluidisolatie (waarvoor dus de  $R_{A,V}$  waarde is gebruikt) van gasgevulde constructies met daarnaast een alternatief zonder gasvulling.

Het bleek niet mogelijk om op basis van de dataset van metingen voor elke geluidisolatie een bijbehorende glassoort te vinden. De lege posities zijn in tabel 2 met een sterretje aangegeven. De resultaten lijken iets willekeuriger te zijn dan de waarden die op basis van rekengegevens zijn gepresenteerd in tabel 1. Bij bepaalde geluidisolaties is de hoeveelheid materiaal gelijk, in geen geval is meer dan 4mm extra glas nodig om dezelfde geluidisolatie zonder SF6 te halen. Dit komt overeen met het resultaat dat gevonden is in hoofdstuk 3.4. Op basis van zowel tabel 1 als tabel 2 blijkt dat het niet nodig is het duurdere gelamineerde glas te gebruiken om een zelfde geluidisolatie als met SF6 te behalen.

Opgemerkt wordt dat in enkele gevallen gasgevuuld glas met slechts 60% SF6 is aangegeven. Dit is minder dan volgens de ontwerp NPR 5272 nodig is om van akoestisch gas te spreken (>70%).

Tabel 2 Mogelijke beglazingen voor bijbehorende geluidisolatie op basis van laboratoriummetingen Peutz

R <sub>A,V</sub>	SF6 gevuld	Lucht/Argon gevuld	Vershil in spouwdikte (lucht-SF6)	Materiaal verschil (lucht - SF6)
28	*	8/24/4	*	*
29	5/15/8	6/15/4	0 mm	- 3 mm glas
30	4/24/6	4/15/6	- 9 mm	0
31	4/24/6	*	*	*
32	8/24/5	5/20/8	- 4 mm	0
33	8/24/5	10/15/6	- 9 mm	+ 3 mm glas
34	(60% SF6 40% Ar) 10/24/6	10/24/6	0 mm	0
35	6/20/6-1-6PVB	6/20/6-1-6PVB	0 mm	0
36	5-1-5Hars/20/6	5-1.5-5Hars/12/10	- 8 mm	+ 0.5 mm hars + 4 mm glas
37	*	44.2EP/24/12	*	*
38	(60% SF6 40% Ar ) 12/24/4-2-4PVB	4-2-4folie/24/12	0 mm	0
39	4-2-4PVB/20/6-2-4PVB	8-2-6Folie/24/4-2-4folie	+ 4 mm	+ 4 mm glas
40	10/24/5-1-5Hars	*	*	*
41	5-2-5Hars/20/5-2-5Hars	5-1.5-5/24/5-1.5-5	+ 4 mm	- 1mm hars
42	8-2-6Folie/24/4-2-4Folie	8-2-6Folie/24/6-2-6Folie	0 mm	+ 4 mm glas

## 5. KOSTENANALYSE

### 5.1. Inleiding

In hoofdstuk 3 en 4 is besproken welke beglazingen in aanmerking komen bij een bepaalde geluidisolatie-eis. Hierbij zijn de verschillen tussen SF6 gevuld en lucht/argon gevuld dubbelglas geanalyseerd. Op basis van de gegevens blijkt het verschil zich te beperken tot enkele millimeters dikker glas in het geval dat geen SF6 gebruikt wordt. Ook is in hoofdstuk 4 opgemerkt dat bij de bespreking van de gemeten beglazingen niet meegenomen is uit welk materiaal de elastische tussenlaag in de gelamineerde glasplaten opgebouwd is. Fabrikanten proberen met de elastische laag de akoestische eigenschappen van de beglazing te verbeteren. Speciale akoestische folies worden ontwikkeld en gebruikt om de geluidisolerende eigenschappen te verbeteren. Ook de kosten van verschillend gelamineerd glas, met verschillende folies kunnen dus uiteenlopen.

In de kostenvergelijking spelen meer aspecten dan alleen de directe aanschafkosten van het glas. Genoemd worden:

- Met Lucht/Argonvulling kan een hogere thermische kwaliteit gehaald worden dan met SF6. Dit heeft een positief effect op het energieverbruik. Hierop wordt in paragraaf 5.3 nader ingegaan. Dit positieve effect is vooralsnog niet meegenomen in de kostenvergelijking.
- Door vergroting van glasdikte of spouwmaat neemt de totale dikte van de glassamenstelling toe. Dit kan tot gevolg hebben dat zwaardere kozijnen en/of zwaarder raamhout geselecteerd moet worden. Hierop wordt in paragraaf 5.4 nader ingegaan. Dit aspect is meegenomen in de kostenopstelling.

### 5.2. Kostprijzen glas

Om een betrouwbare vergelijking van de kosten van beglazing met SF6 of lucht/argon vulling te maken zal in dit hoofdstuk de kostprijs van diverse beglazingen besproken worden. Deze is gebaseerd op richtprijzen per m<sup>2</sup> die bij de glasleveranciers opgevraagd zijn. Deze gemiddelde prijzen zijn genoteerd in tabel 3.

Opgemerkt wordt dat het hier gaat om gemiddelde prijzen van meerdere leveranciers. Geconstateerd is dat de prijzen per leverancier sterk kunnen verschillen. De range is eveneens in de tabel aangegeven.

De resultaten geven aan dat voor geluidisolaties tot 32 dB(A) het gasgevulde glas over het algemeen duurder is dan het luchtgevulde equivalent met dezelfde geluidisolatie. Bij hogere geluidisolaties is de gasgevulde variant over het algemeen iets goedkoper. Bij twee geluidisolatiewaarden (34 en 38 dB(A)) is dit verschil 19%. Dit prijsverschil ligt in dezelfde orde van grootte als de range in prijzen per leverancier voor hetzelfde glas.



**Tabel 3** Glaskosten analyse op basis van gegevens van fabrikanten

Nr.	R <sub>A,V</sub> dB(A)	SF6 gevuld				Lucht gevuld				Glas prijs verschil (SF6-lucht) (€/m <sup>2</sup> )	Verschil als percentage van glasprijs SF6 gevuld glas
		samenstelling	Totale ruitdikte (mm)	Glas prijs (€/m <sup>2</sup> )		samenstelling	Totale ruitdikte (mm)	Glas prijs (€/m <sup>2</sup> )			
				Gem.	range			Gem.	Range	Gem.	%
1	28	4/12/8	24	35.72	32-40	4/12/4	20	23.27	21-25	12.45	35%
2	29	4/20/4	28	31.23	25-35	4/12/6	22	26.75	24-28	4.66	15%
3	30	4/16/6	26	30.98	28-34	4/24/4	32	27.71	25-31	3.27	11%
4	31	4/24/4	32	32.98	27-37	6/20/6	32	33.13	29-36	-0.16	0%
5	32	4/20/6	30	34.75	30-39	4/24/6	34	30.88	27-34	3.86	11%
6	33	6/24/6	38	40.12	35-47	6/20/10	36	43.00	38-47	-2.88	-7%
7	34	6/24/10	40	49.57	43-57	8/24/12	44	59.11	50-63	-9.54	-19%
8	35	6/24/12.1	43	70.77	54-81	8/24/12.1	45	71.97	59-78	-1.20	-2%
		4/24/10.2	40	94.11	74-103	6/24/10.2	42	90.51	77-100	3.60	4%
9	36	6/24/10.2	42	94.12	77-106	8/24/10.2	44	95.73	82-107	-1.61	-2%
10	37	8/24/10.2	44	99.70	83-113	8/24/12.2	46	100.95	88-118	-1.25	-1%
11	38	8.1/20/12.2	43	120.89	98-143	10.2/20/10.2	44	143.95	118-162	-23.06	-19%
12	39	10.2/24/10.2	48	148.84	121-168	10.2/20/10.2	44	143.95	118-162	4.88	3%

### 5.3. Thermisch isolerende beglazing

Bij de analyse van alle glassoorten zijn de geselecteerde beglazingen gebaseerd op de akoestische eigenschappen van de beglazingen. In de praktijk is echter ook de thermische isolatie van beglazingen relevant.

Het gebruik van SF6 in akoestisch isolerend glas heeft een negatieve invloed op de thermische isolatie van de beglazing. Vergeleken met lucht/argon is SF6 een betere warmte geleider. Dubbele beglazing met Argon als spouwvulling daarentegen verbetert de thermische isolatie ten opzichte van lucht. Argon heeft echter geen significante invloed op de geluidisolerende eigenschappen. Aangezien Argon geen broeikasgas is kan het samen met lucht zonder probleem als niet-zwaar gas worden benoemd.

De betere thermische isolatie laat zich vertalen in een besparing op het energieverbruik. Door het contant maken van deze besparing is in principe de invloed op het investeringsniveau te bepalen. Deze invloed is vooralsnog niet meegenomen.

Bij de keuze van de beglazing is het van belang rekening te houden met de eisen die gesteld worden aan de thermische isolatie van het glas bij het betreffende gebouw. In dit verband wordt opgemerkt dat met SF6 gevuld glas niet de HR++ kwaliteit ( $U \leq 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) gerealiseerd kan worden. In die situaties dat dit vereist is (op grond van EPN en/of DuBo maatregelen) is SF6 dus überhaupt geen mogelijkheid. De trend is dat steeds meer

HR++ beglazing wordt toegepast. De praktijk is overigens dat niet of nauwelijks getoetst wordt op dergelijke tegenstrijdige eisen. Het glas dat feitelijk aangebracht wordt voldoet dan niet aan hetzij de akoestische, hetzij de thermische eis.

#### 5.4. Detaillering

Bij het bespreken van de kosten is het wel van belang alle bijkomende materiaal kosten mee te nemen. Naast de kosten voor het glas moeten ook de kosten voor het kozijn en raamhout meegenomen worden. Bij een keuze voor dikker glas kan het nodig zijn dikkere (duurdere) kozijnen toe te passen. Dit kan voor het gebruik van luchtgevuld glas met enkele millimeters dikker glas in sommige gevallen betekenen dat net een grens overschreden wordt en een duurder kozijn of raamhout nodig is. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen beglazing in het vast deel (kozijn) en beglazing in het draaiend deel (raamhout). Het blijkt dat het over het algemeen niet nodig is bij dikkere beglazing ook dikker kozijnhout toe te passen. Wel verandert de detaillering, dit heeft echter geen significante kostenconsequenties. De invloed van de dikte van de beglazing op de afmetingen van het raamhout van het draaiend deel kan wel relevant zijn en wordt hier verder uitgewerkt.

Bij een draaiend raam vindt de omslag naar dikker raamhout plaats bij 31mm. Tot 31 mm is raamhout 67x102 mm toepasbaar. Bij glas dat dikker is dan deze 31 mm dient uitgegaan te worden van 80x114 mm. Prijzen van raamhout worden gegeven per strekkende meter, de meerkosten van het zwaardere raamhout zijn in de orde van €1/m'. Een volgende omslagpunt ligt bij 45mm dik glas. Ook hier is een andere detaillering nodig, de kosten bedragen ook hier weer €1/m'.

De kosten voor kozijn zijn per strekkende meter, terwijl de kosten van de beglazingen aangegeven zijn per m<sup>2</sup> glas. Op grond van de Novem-referentiewoningen [8] is de verhouding bepaald van benodigde m' raamhout per m<sup>2</sup> beglazing. Hiervoor is de referentie tuinkamerwoning (tussenwoning) gebruikt. Hieruit blijkt dat 5 m' raamhout nodig is per m<sup>2</sup> glas.

Bij het draaiend deel zal de overgang naar glas dikker dan 31mm dus zorgen voor een meerprijs van €5 per m<sup>2</sup> glas. Bij glas dikker dan 45mm is ook weer een andere detaillering van toepassing, de meerkosten bedragen ook hier weer €5/m<sup>2</sup>, dus €10/m<sup>2</sup> vergeleken met glas dunner dan 31mm. Bij beglazingspakketten die door het toepassen van lucht- in plaats van gasvulling genoemde grens overschrijden, zijn de meerkosten van de benodigde kozijnen meegenomen in tabel 4. Hieruit volgen uiteindelijk de laatste twee kolommen waarin het prijsverschil tussen gasgevulde en luchtgevulde beglazing aangegeven staat, in de een na laatste kolom in €/m<sup>2</sup> en in de laatste kolom als percentage van de glasprijs voor SF6 gevulde beglazing. Hierbij is het prijsverschil opgegeven dusdanig dat een positief verschil een meerprijs voor SF6 gevulde beglazing betekent.

Tabel 4 Kosten inclusief kozijn

Nr.	SF6 gevuld			Lucht gevuld			Verschil meerkosten kozijnhout (SF6-lucht)	Totale prijsverschil beglazing en kozijn (€/m <sup>2</sup> ) (SF6-lucht)
	Totale ruitdikte	Meerkosten glasdikte >31mm	Meerkosten glasdikte >45mm	Totale ruitdikte	Meerkosten glasdikte >31mm	Meerkosten glasdikte >45mm		
1	24	-	-	20	-	-	0	13
2	28	-	-	22	-	-	0	5
3	26	-	-	32	5	-	-5	-2
4	32	5	-	32	5	-	0	0
5	30	-	-	34	5	-	-5	-1
6	38	5	-	36	5	-	0	-3
7	40	5	-	44	5	-	0	-10
8	43	5	-	45	5	-	0	-1
	40	5	-	42	5	-	0	4
9	42	5	-	44	5	-	0	-2
10	44	5	-	46	-	10	-5	-6
11	43	5	-	44	5	-	0	-23
12	48	-	10	44	5	-	5	10

Opgemerkt wordt dat een dergelijke benadering van toepassing is op nieuwbouw woningen met houten kozijnen. Daar waar kunststof of aluminium kozijnen worden toegepast (woning- of utiliteitsbouw) zullen andere overwegingen van toepassing zijn. Vaak is er dan een sprake van een maximale glasmaat. Het overschrijden van deze glasmaat kan dan grote gevolgen hebben omdat voor een ander systeem gekozen moet worden. Omdat de maximale maten per systeem zullen verschillen en ook de kostenconsequenties niet op voorhand zijn aan te geven wordt dit aspect verder niet beschouwd.

## 6. CONCLUSIE

Onderzoek is uitgevoerd naar voornamelijk de economische consequenties van het niet meer toepassen van SF6 in de spouw van samengestelde beglazingen. SF6 is een zwaar gas en heeft, bij toepassing als spouwvulling, over het algemeen, een positief effect op de geluidisolatie.

Op grond van empirische data en specifieke meetgegevens worden in dit rapport alternatieven voor gasgevulde beglazingen benoemd.

Uit een vergelijking van gemeten en berekende data blijkt dat de gebruikelijke empirische rekenmodellen de geluidisolatie van samengestelde beglazingen onvoldoende nauwkeurig berekenen. Aangezien de keuze van de beglazing in de praktijk meestal gebaseerd is op de empirische rekenmodellen kan het in de praktijk voorkomen dat beglazing gebruikt wordt die een te lage geluidisolatie levert.

Alvorens een glaskeuze gemaakt wordt zou op basis van meetgegevens verkregen in een gecertificeerd laboratorium gecontroleerd dienen te worden of de beglazing daadwerkelijk voldoet aan de vereiste geluidisolatie. Hierbij dient een marge van 1,5 à 2 dB gehanteerd te worden in verband met invloed afmetingen, kozijnen e.d.

Van de gas- en luchtgevulde beglazingen zijn de gemiddelde kosten bepaald en vergeleken. De glasprijsverschillen in tabel 3 geven aan dat het verschil in kosten tussen SF6 gevulde en luchtgevulde beglazingen niet erg constant is. De prijzen bij lagere geluidisolatiewaarden (28 dB(A) tot 32 dB(A)) zijn op basis van tabel 3 hoger bij het gebruik van SF6 gevuld glas. Het gebruik van SF6 heeft hier geen positieve invloed op de geluidisolatie van de beglazing. De beglazing met geluidisolatiewaarden in dit gebied wordt in de praktijk het meest toegepast.

Hiermee is aangetoond dat voor de standaard gebruikte beglazing in de woningbouw het gebruik van SF6 gevuld glas geen alternatief is. Voor deze veelgebruikte geluidisolatiewaarden tot 32 dB(A) is het gebruik van SF6 gevuld glas zelfs duurder dan luchtgevulde beglazing.

Bij geluidisolatiewaarden boven deze 32 dB(A) zijn prijzen voor luchtgevuld glas over het algemeen hoger dan SF6 gevuld glas, zij het in geringe mate. De hoogste meerkosten worden gevonden bij beglazing van 34 en 38 dB(A). Daar bedragen de meerkosten ca. € 10 resp. € 23 (=19%). Deze verschillen liggen in dezelfde orde van grootte als de prijsverschillen tussen dezelfde producten van verschillende fabrikanten. De meerkosten zijn derhalve, ook voor deze twee geluidisolatieniveaus, nauwelijks significant te noemen.

De meerkosten ten gevolge van het toepassen van zwaardere kozijnen of raamhout blijken slechts beperkt invloed te hebben op de totale kosten.

Samengevat mogen we concluderen dat er geen doorslaggevende akoestische of financiële overwegingen zijn voor het gebruik van SF6 als spouwvulling. Toepassing van lucht- of Argongevulde spouw is te prefereren in verband met beperking van de emissie van broeikasgassen en verhoging van de thermische isolatie tot een HR++ kwaliteit.

Dit rapport bestaat uit 39 pagina's

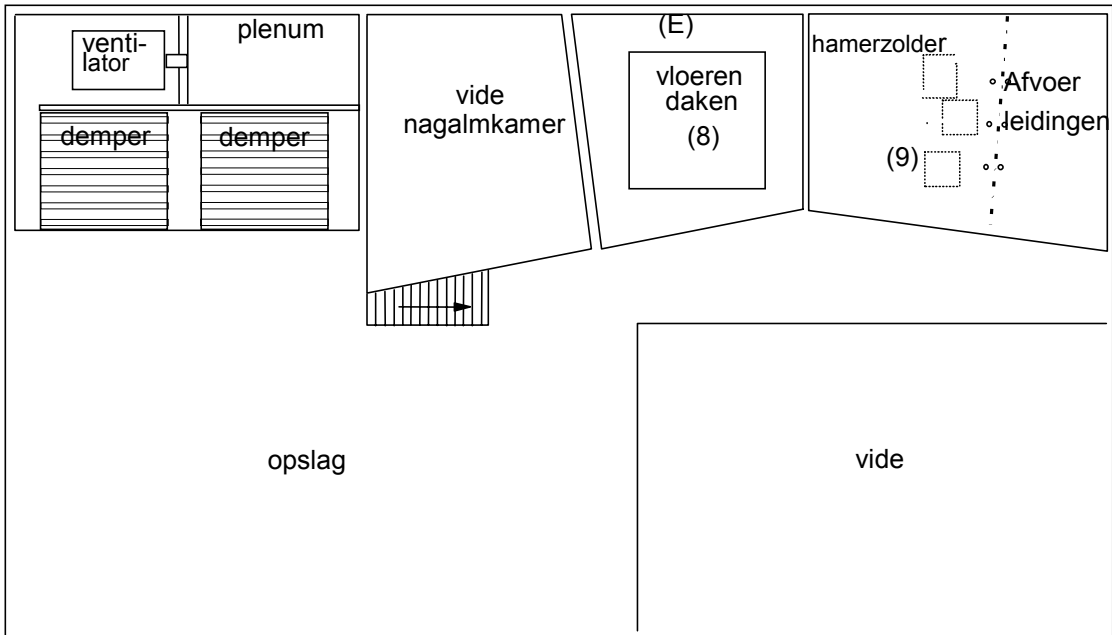
Mook,

## 7. LITERATUUR

- [1] DHV Milieu en Infrastructuur BV, Overzicht en toelichting resultaten project "Identificatie onbekende bronnen van overige broeikasgassen
- [2] Interne opleiding, Adviesbureau Peutz
- [3] H. Ertel, M. Finkenberger, F.P. Mechel, Zum einfluß von Gasfüllungen auf die Schalldämmung von Isolierglasscheiben im Resonanzbereich, IBP Mitteilung, 10 (1982) Neue Forschungsergebnisse
- [4] Rglas-Rglas92, programma geluidisolatie glas door TNO-TPD, bewerking van BASlab [3] voor adviesbureau Peutz
- [5] BASlab, computerprogramma, Stichting Bouwresearch, (1997)
- [6] Herziening Rekenmethode Geluidwering Gevels, VROM publikatie 112 (1989)
- [7] Ontwerp NPR 5272, Geluidwering in gebouwen - Aanwijzingen voor de toepassing van het rekenvoorschrift voor de geluidwering van gevels op basis van NEN-EN 12354-3, (2001)
- [8] Novem, Referentiewoningen 98

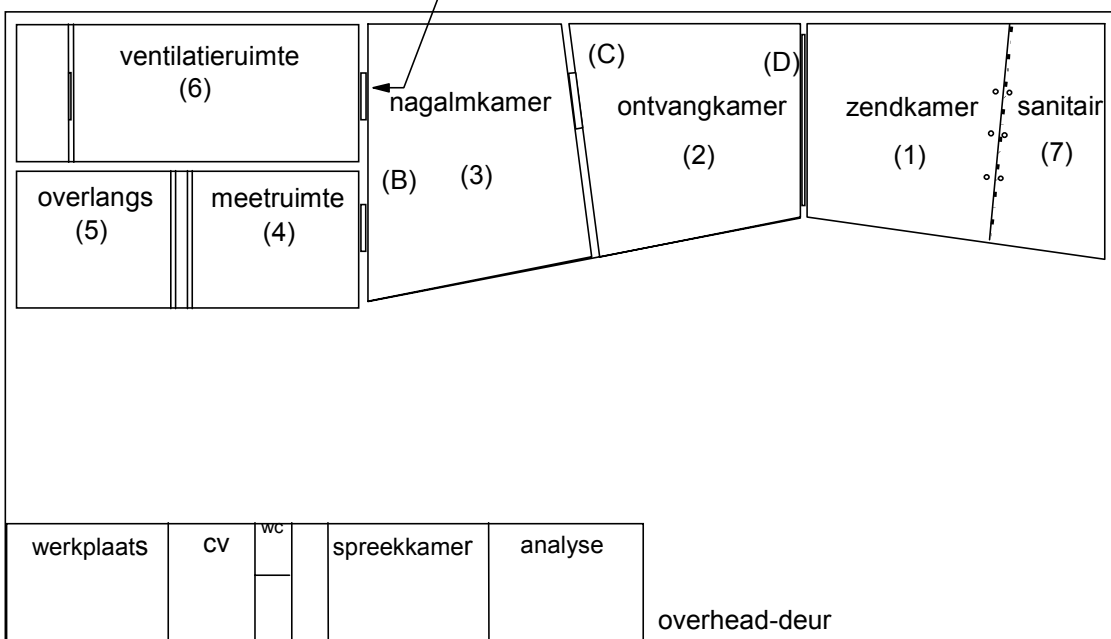
BIJLAGE 1

Verdieping



Begane grond

(afgesloten doorvoeroening  
b x h = 1.30 x 1.80



MEETOPENINGEN (b x h in

- (B) 1000 x 2200
- (C) 1500 x 1250
- (D) 4300 x 2800
- (E) 4000 x 4000

0 1 2 3 4 5 m

— schaal —