

DE GELUIDABSORBERENDE VLOER VAN HET SCHEEPVAARTMUSEUM

Het meest in het oog springende element van het gerenoveerde Scheepvaartmuseum in Amsterdam is ongetwijfeld de glasoverkapte binnenplaats. Een interessante uitdaging in het ontwerp van de binnenplaats was de ruimteakoestiek; de overkapte ruimte diende immers geschikt te zijn als multifunctionele ruimte met het akoestisch karakter van een open plein. Door de toepassing van een speciaal voor deze ruimte ontwikkeld geluidabsorberend vloersysteem is uiteindelijk een passende ruimteakoestiek gerealiseerd.



ir. J (Jeroen) Vugts,
LBP | SIGHT, Nieuwegein

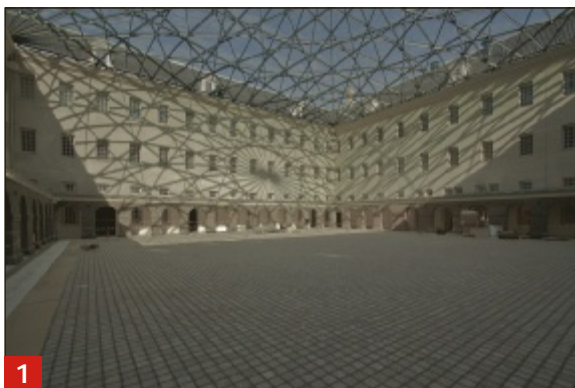
AANLEIDING

De afgelopen jaren is het Scheepvaartmuseum in Amsterdam grondig gerenoveerd. Deze renovatie was noodzakelijk omdat de bouwkundige staat slecht was, de klimaatinstallaties ernstig verouderd waren en het museum een sterke behoefte had aan een impuls waarmee het kon inspelen op de hedendaagse publiekswensen. Zo bestond de wens om de tentoonstellingen opnieuw in te richten en meer ruimte in het museum te realiseren om de extra bezoekersstromen te kunnen onderbrengen. Voor dit laatste aspect is door de architect een plan ontwikkeld om de centrale binnenplaats door middel van een glazen overkapping meer te betrekken bij het museum. De binnenplaats zou daardoor een duidelijker publieksfunctie kunnen krijgen, waarbij deze als centrale ontmoetingsruimte van het museum functioneert van waaruit de verschillende vleugels van het gebouw bereikbaar zijn. Bovendien bestaat zo de mogelijkheid om de ruimte ook na sluitingstijd van het museum te gebruiken als evenementenlocatie. Het idee van de glasoverkapte ruimte is vormgegeven door Ney & Partners uit Brussel. De overkapping bestaat uit een gebogen kap, bestaande uit stalen profielen waar tussen zonwerende beglazing is opgenomen. De profielen in het hart van de overkapping hebben daarbij een configuratie die overeenkomt met een 'windroos' die op oude zeekaarten is terug te vinden.

In de oorspronkelijke situatie bestond de binnenplaats uit een open plein dat was voorzien van klinkerbestrating, met rondom het plein een overkapte omloop. Deze 'buitenruimte' vormde een open plein waar een aantal kanonnen stond opgesteld, maar had verder een beperkte functie. De binnenmaten van het plein zijn circa 29,4 x 29,4 m, de afmetingen tussen de gevels betreffen circa 33,7 x 34,1 m en de hoogte tot de dakrand bedraagt 14,3 m.

AKOESTIEK BINNENPLAATS

Voor de nieuwe situatie werd als randvoorwaarde meegegeven dat de binnenplaats ook met overkapping het karakter van een open plein diende te hebben. Akoestisch gezien komt dit er op neer dat de ruimteakoestiek in de glasoverkapte ruimte zodanig dient te zijn dat het publiek niet de indruk heeft zich in een gesloten ruimte te bevinden. Het toevoegen van de overkapping resulteert echter in een gesloten ruimte, waardoor het in de ruimte geproduceerde geluid niet meer kan verdwijnen door het 'open dak'. Om in dat geval een akoestisch vergelijkbare situatie te creëren, zou in theorie een equivalent aan absorptie ter grootte van het open dak aangebracht moeten worden. Wanneer we ervan uitgaan dat alle geluidabsorptie in de bestaande open situatie werd gerealiseerd door het 'open dak', dan was circa 1.156 m² o.r. (open raam) aanwezig.



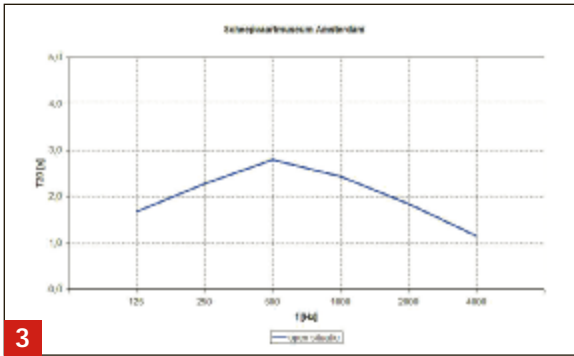
1

De glasoverkapte binnenplaats van het Scheepvaartmuseum met geluidabsorberende vloer

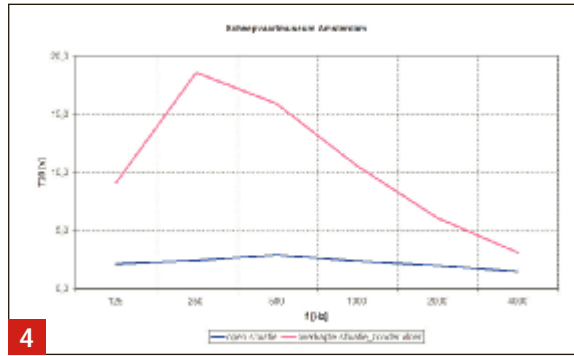


2

Open binnenplaats (oude situatie)



3 Gemeten gemiddelde nagalmtijd in de binnenplaats zonder overkapping



4 Berekende waarden voor de nagalmtijd in de binnenplaats in de open situatie en na overkapping (zonder geluidabsorptie)

Om de ruimte niet te galmend te laten zijn, kan een voorwaarde worden gesteld aan de nagalmtijd in de ruimte. De aanvaardbare maximale nagalmtijd van een grote ruimte is daarbij afhankelijk van het volume. Voor een grote publieksruimte kan de gewenste nagalmtijd worden beschreven met de volgende algemene relatie:

$$T \leq \log\left(\frac{V}{20}\right) \quad (1)$$

Aangezien het volume van de overkapt binnenplaats circa 19.500 m³ bedraagt, betekent dit dat een nagalmtijd in de orde van grootte van 3,0 s nog toelaatbaar is. Behalve het beperken van de nagalmtijd is het voorkomen van een te luide ruimte eigenlijk nog van grotere invloed op de akoestische beleving. In een te galmende ruimte met hoog achtergrondgeluidniveau hebben mensen namelijk de onwillekeurige neiging om harder te gaan praten. Het onvermijdelijke gevolg daarvan is dat het geluidniveau in de ruimte verder toeneemt, waardoor de spreker gedwongen wordt nog luider te praten om zich verstaanbaar te maken. Het resultaat hiervan is dat te hoge geluidniveaus en een oncontroleerbare brei aan geluid ontstaan en spraakoverdracht onmogelijk wordt gemaakt. Dit psychoakoestische fenomeen staat ook wel bekend als het Lombard-effect en manifesteert zich vaak in grote publieksruimten. Beruchte voorbeelden hiervan zijn onder andere zwembaden of atria, waarin relatief weinig geluidabsorptie en veel bronnen (spelende kinderen, pratende mensen) aanwezig zijn. Dit effect, waarbij het geluid wordt opgeslingerd, treedt over het algemeen op wanneer het geluidniveau in het nagalmveld ten gevolge van de aanwezige bronnen circa 65 dB(A) bedraagt. Een te luide ruimte zal hierdoor al snel resulteren in een ruimte die niet meer bruikbaar is voor het beoogde gebruik als multifunctionele publieksruimte.

Zowel het reduceren van de nagalmtijd in de overkapt binnenplaats als het reduceren van de luidheid wordt bereikt door het aanbrengen van geluidabsorptie. Om ervoor te zorgen dat de overkapt binnenplaats ook als multifunctionele publieksruimte bruikbaar is, was het noodzakelijk dat in het ontwerp werd voorzien in het toevoegen van voldoende geluidabsorberende voorzieningen.

VOORONDERZOEK

Als eerste stap in het akoestisch ontwerpproces zijn metingen verricht van de nagalmtijd op de binnenplaats in de oorspronkelijke situatie, dus zonder overkapping. De metingen zijn verricht met behulp van impulsres-

ponsmetingen met het programma Dirac. De resultaten van die metingen zijn opgenomen in figuur 3. Uit de metingen kan worden opgemaakt dat de over de binnenplaats gemiddelde nagalmtijd T_{20} (over de octaafbanden 250 tot en met 2.000 Hz) circa 2,2 s bedraagt. Wel wordt opgemerkt dat in de bestaande situatie sprake was van enige hoorbare galm, als gevolg van de reflecties tegen de harde gevels van de bouwdelen rondom het plein. Het gros van het geluid wordt echter geabsorbeerd door het 'open' dak. Geconcludeerd wordt dat in de bestaande situatie ruimschoots werd voldaan aan de richtwaarde voor de nagalmtijd. (Op basis van formule (1) en een ruimtevolumen van circa 16.500 m³ zou een nagalmtijd tot 2,9 s nog acceptabel zijn.)

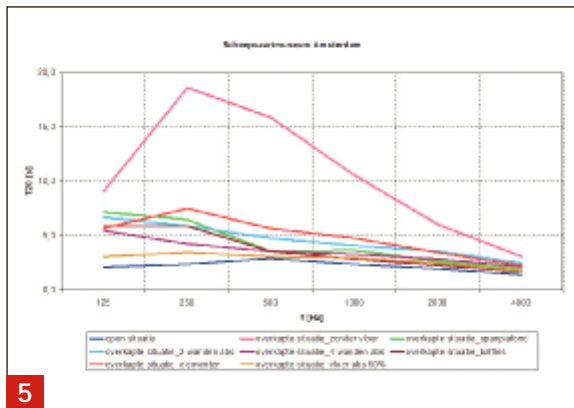
De effectief aanwezige geluidabsorptie in de open situatie kan daarbij worden benaderd met onderstaande formule:

$$T = \frac{V}{6 \times A} \quad (2)$$

Op basis van dit verband is in de bestaande situatie een effectieve geluidabsorptie van circa 1.250 m² open raam aanwezig. Dit komt nagenoeg overeen met de aanname dat alle geluidabsorptie in de open situatie aanwezig is in de vorm van het 'open dak'. De overige omhullende constructies zijn immers hoofdzakelijk hard (steenachtig).

Om inzicht te krijgen in de akoestische situatie die ontstaat in de overkapt ruimte, zijn berekeningen met een akoestisch simulatiemodel uitgevoerd (CATT-Acoustics). Als eerste stap is het simulatiemodel gefit aan de in de open situatie gemeten waarden. Vervolgens is berekend wat het effect van de overkapping op de gemiddelde nagalmtijd inhoudt. De resultaten van deze berekeningen zijn samengevat in figuur 4.

Zoals te verwachten zou de overkapping leiden tot bijzonder lange waarden voor de nagalmtijd. De berekende gemiddelde nagalmtijd bedraagt circa 12,8 s (250 tot en met 2.000 Hz), waarbij sprake is van een ongelijkmatig spectrum. Dit is het directe gevolg van het ontbreken van absorptie en het optreden van sterke reflecties tegen de harde vlakken (wanden en dak). Stel dat in dat geval circa 50 mensen tegelijkertijd in de ruimte aanwezig zijn, die allen op normale gesprekstonen praten (60 dB(A)). Dit resulteert dan in een galmniveau dat hoger zal zijn dan 65 dB(A). Het is niet ondenkbaar dat dit niveau ten gevolge van het beschreven opslingereffect nog verder zal toenemen tot circa 75 dB(A). Wanneer sprake is van een



5

Berekende waarden voor de nagalmtijd in de binnenplaats bij verschillende varianten

hogere bezetting - bijvoorbeeld meerdere schoolklassen tegelijkertijd of tijdens evenementen - kunnen de geluidsniveaus zelfs oplopen tot ruim boven de 80 dB(A). Dit zou tot een onbruikbare ruimte leiden.

ONTWIKKELING GELUIDABSORBERENDE VLOER

Om de overkapte binnenplaats geschikt te maken voor het beoogde gebruik is het noodzakelijk dat veel geluidabsorptie wordt toegevoegd. Met behulp van CATT-Acoustics zijn verschillende oplossingsrichtingen onderzocht, waarbij in eerste instantie is onderzocht wat het effect is van de volgende meer of minder praktisch uitvoerbare oplossingen:

- Geluidabsorptie onder het dak in de vorm van een spanplafond of plafondeiland.
- Het aanbrengen van geluidabsorberend pleisterwerk tegen de binnengevels aan de binnenplaats.
- Het toevoegen van geluidabsorberende en -diffuserende elementen in de ruimte door inrichting.
- Het toevoegen van geluidabsorptie op en onder de omloop.
- Het geluidabsorberend uitvoeren van de vloer.

Uit studies bleek dat met name deze laatste oplossing, in combinatie met toevoeging van absorptie in de omloop, bijzonder effectief is doordat de in de ruimte aanwezige bronnen (pratende mensen) zich dan relatief dicht bij het geluidabsorberende vlak bevinden. De resultaten van deze variantberekeningen zijn weergegeven in figuur 5. Doordat de overkapping niet belemmerd mocht worden, het toevoegen van losse inrichtingselementen niet acceptabel was en het bestaande pleisterwerk tegen de binnengevels van monumentale waarde was (oudste in Nederland bekende portlandcement pleisterwerk), bleef het idee van de vloer als geluidabsorberend oppervlak als enige optie over. Aangezien hiervoor nog geen systemen op de markt waren, diende een dergelijke vloer te worden

ontwikkeld. Bij de ontwikkeling van deze vloer werden echter een aantal randvoorwaarden gesteld.

- De vloer diende steenachtig te zijn, in verband met de gewenste buitenuitstraling.
- De vloer moet goed reinigbaar kunnen zijn, ook met water.
- De vloer moest sterk genoeg zijn, ook om hoogwerkers te kunnen dragen.
- De afmeting van openingen in de vloer diende zodanig te zijn, dat naaldhakken niet weg zouden zakken.

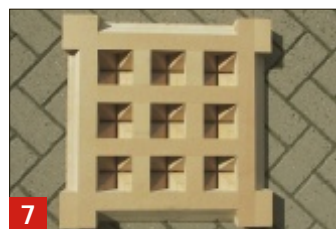
De eerste ideeën waren om een harde tegelvloer te maken voorzien van perforaties met een diameter van 4 mm. Door de tegelvloer op een frame te monteren ontstaat, onder de tegelvloer, een spouw waarin geluid kan worden geabsorbeerd. Door deze toepassing van een 'geperforeerd' paneel - waarachter per perforatie een zeker luchtvolume - ontstaat een zogeheten Helmholtz-resonator. Wanneer de perforatiegraad van de tegel en het achterliggende luchtvolume op elkaar worden afgestemd, kan de resonantiefrequentie (absorptiepiek) van het systeem worden geoptimaliseerd. Door toepassing van een poreus materiaal in de spouw kan ook in de frequenties boven deze waarde nog geluidenergie worden geabsorbeerd, zodanig dat een absorberend vlak ontstaat dat effectief is in het spraakgebied. Later in het ontwerp is afgestapt van de perforaties en is gekozen voor spleten met een breedte van 4 mm en een hoogte van eveneens 4 mm, door toepassing van afgeschuinde tegelranden. Uiteindelijk is een constructie bedacht met grote vloertegels van 600 x 600 mm en een dikte van 70 mm, waarop 16 kleinere tegels. De kleinere tegels worden daarbij in principe in natuursteen uitgevoerd op een frame van beton. Hiermee ontstaat een 'geperforeerde' vloer met een perforatiegraad van circa 4%. Op grond van eerste rekenstudies zou de spouw onder de vloertegels tussen 50 mm en 150 mm moeten komen te liggen om nog een optimale geluidabsorberende werking te bezitten.

LABORATORIUMMETINGEN

Gezien het belang enerzijds en het innovatieve karakter anderzijds, is ervoor gekozen om een proefvloer te ontwikkelen waarvan de geluidabsorptie kon worden getest in het akoestisch laboratorium. De proefvloer bestond uit 30 in MDF uitgevoerde modellen van de beoogde tegels, zodat een vloerfragment ter grootte van 10,8 m² kon worden getest. De MDF-tegeltjes zijn daarbij aan de bovenzijde gelakt om de nog aanwezige poriën in het MDF af te dichten. De tegels zijn daarbij op verstelbare kunststof pootjes geplaatst, waarmee gevarieerd is in spouwhoogte onder de tegelvloer. Bij de metingen is tevens gevarieerd met type spouwvulling, waarbij onder andere minerale wol en geëxpandeerde kleikorrels zijn getest.



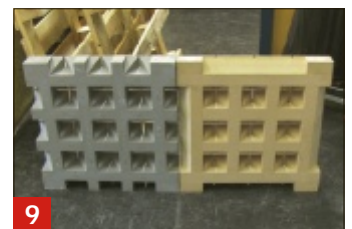
6 Bovenzijde houten proefmodel



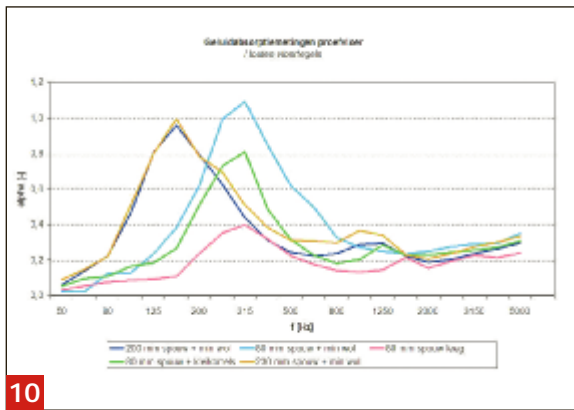
7 Onderzijde houten proefmodel



8 Testopstelling houten proefvloer in het akoestisch laboratorium

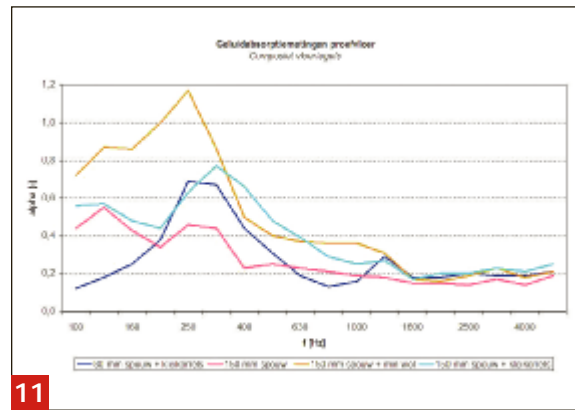


9 Compositietegel en houten proeftegels (onderzijde)



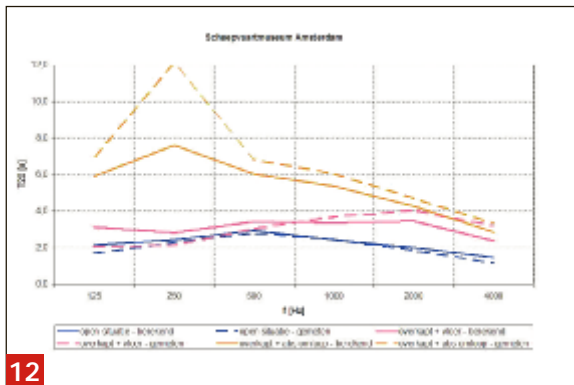
10

Gemeten absorptiecoëfficiënten houten proefvloer met verschillende spouwafmeting en -vulling



11

Gemeten absorptie-coëfficiënten de nieuwe composiet proefvloer



12

Gemeten gemiddelde nagalmtijd in de binnenplaats voor en na overkapping

aantal modificaties aan het tegeldraagsysteem - de kunststof pootjes zijn vervangen door sterkere doorgaande stalen kokers - en het toevoegen van bodembakken onder de vloertegels om de gewenste luchtspouw van 70 mm te realiseren, bleek nog een optimalisatie in de te realiseren geluidabsorptie mogelijk te zijn. Zie ook figuur 11. Op grond van de resultaten van deze metingen, bleek een berekende gemiddelde nagalmtijd van 3,0 s in de overkapt binnenplaats haalbaar te zijn.

PRAKTIJKMETINGEN

Om een beeld van de akoestische situatie in de overkapt binnenplaats te vormen zijn tijdens de uitvoeringsfase metingen van de nagalmtijd verricht. In eerste instantie zijn daarbij metingen van de nagalmtijd verricht in de situatie waarbij de binnenplaats was voorzien van de glazen overkapping, maar zonder geluidabsorberende vloer. Wel was de in het ontwerp voorziene geluidabsorptie op en onder de omloop tijdens deze metingen al aanwezig. Deze metingen gaven de mogelijkheid om het akoestisch simulatiemodel van de overkapt situatie te valideren. Uit deze metingen bleek dat de in de binnenplaats gemiddelde nagalmtijd circa 6,0 s bedraagt, waarbij wordt opgemerkt dat er sprake is van een grote spreiding in de gemeten waarden, veroorzaakt door de in de ruimte optredende flutterecho's. Wanneer we echter de met het model berekende gemiddelde nagalmtijd in de ruimte vergelijken met de gemeten gemiddelde waarde, kan worden geconcludeerd dat dit bijzonder veel overeenkomst vertoont.

Uiteindelijk zijn ook metingen van de nagalmtijd verricht in de situatie waarbij de geluidabsorberende vloer is toegepast. De gemeten gemiddelde nagalmtijd bedraagt circa 3,0 s en voldoet daarmee aan de gewenste waarde. Wanneer deze waarden worden vergeleken met de berekende nagalmtijd, dan valt op dat er een beperkte verschuiving van het spectrum aanwezig is, maar dat het resultaat heel aardig overeenkomt met de berekeningen. De resultaten van de metingen en berekeningen zijn samengevat in figuur 12.

Het eindresultaat is dat een overkapt binnenplaats is gerealiseerd die prima geschikt is voor de beoogde functies. Door de toepassing van het innovatieve geluidabsorberende vloersysteem, waarvoor inmiddels twee prijzen zijn gewonnen (De Vernufteling 2011 en Bouwtechniek Award 2012), wordt galm in voldoende mate onderdrukt en wordt een te luide ruimte voorkomen. ■

Op grond van de metingen in het akoestisch laboratorium aan de houten proefvloer is geconcludeerd dat de vloertegels de gewenste geluidabsorptie kunnen hebben. Bij toepassing van een luchtspouw onder de tegelvloer van circa 80 mm met 50 mm spouwvulling (minerale wol of kleikorrels) komt de absorptiepiek veroorzaakt door resonantie rond 315 Hz te liggen. Door de toepassing van spouwvulling ontstaat boven deze frequentie bovendien een vrij gelijkmatige absorptie, zie ook de resultaten in figuur 10. Op basis van de resultaten van de laboratoriummetingen is berekend wat het gevolg voor de nagalmtijd in de glasoverkapt ruimte is wanneer de gehele vloer binnen de omloop wordt uitgevoerd met de beoogde vloertegels. Een gemiddelde nagalmtijd van circa 3,4 s was haalbaar; weliswaar iets hoger dan de gewenste 3 s, maar goed in de buurt.

DEFINITIEVE VLOER

De uiteindelijke vloertegels zijn uitgevoerd in een composiet materiaal, waarbij iedere tegel een maat heeft van 600 mm x 600 mm en 80 mm dik is. De tegel bestaat uit een onderframe waarin een vulling is aangebracht waarop 16 kleinere natuursteen tegels (147,5 mm x 147,5 mm) zijn aangebracht. Tussen deze kleinere tegels zijn spleten aangebracht met een breedte van circa 4 mm. De perforatiegraad van de definitieve tegel bedraagt daarmee net als bij de proeftegel circa 4%.

De effectiviteit van deze composiettegels is eveneens in het akoestisch laboratorium onderzocht. Uit deze metingen bleek dat de geluidabsorberende werking van de composiettegels nagenoeg overeenkomt met de eerder geteste houten vloertegels. Na het doorvoeren van een