

BOUWFYSICA BOVEN DE POOLCIRKEL

Meetexpeditie studenten TU/e onder extreme omstandigheden

“Tegen half 8 werd ik wakker. Toen ik mijn ogen opende zag ik alleen maar wit. In eerste instantie dacht ik dat mijn ogen bevroren waren, maar even rondkijken deed mij eraan herinneren dat ik in het ijshotel lag. Het omhoog brengen van mijn voeten ging ook moeizaam; zouden zij zijn vastgevroren? Nee, het bleek dat mijn kleren die ik onderin mijn slaapzak had gestopt over de rand van het bed waren gevallen waardoor ik deze omhoog moest trekken.”

Bouwen met sneeuw. Na hevige sneeuwval hebben we het in Nederland allemaal wel eens geprobeerd. Veel verder dan iets dat op een muurtje lijkt komen we dan niet. En na een paar dagen is de sneeuw weer weg.

In andere klimaten ligt het meer voor de hand om met sneeuw te bouwen. De meest bekende sneeuwwooning is ongetwijfeld de iglo. Inuïts wonen al sinds jaar en dag in deze sneeuw hutten. We weten dat het in zo'n iglo niet zo heel koud is; anders reddden de bewoners het niet. Een aantal jaren geleden hebben enkele commerciële instellingen een succesformule gevonden voor het bouwen met sneeuw. In Canada, Zweden en Finland zijn complete hotels uit sneeuw en ijs opgetrokken. Een metershoge sneeuwmassa biedt toeristen bescherming tegen het extreme klimaat als ze er tegen een niet geringe prijs een nacht doorbrengen.

Dit themanummer gaat over een reis naar zo'n hotel. Niet zomaar een reis, maar een reis die je misschien nog het beste zou kunnen omschrijven als een bouwfysische meetexpeditie.

De expeditie is in februari van dit jaar ondernomen door een groep van 15 studenten en 3 medewerkers van de capaciteitsgroep FAGO (Technische Universiteit Eindhoven).

Doel was een reis, waarbij iets actief met het vakgebied gedaan zou worden, in een extreem gebouw, onder extreme omstandigheden. Het ijshotel (of is het een sneeuwhotel?), gelegen op een desolate, witte vlakte bij Jykkasjärvi in

Zweden, bleek perfect te voldoen aan de hiervoor beschreven randvoorwaarden.

Na maanden van voorbereiding en met een gezonde dosis bouwfysische nieuwsgierigheid, negen koffers vol meetapparatuur, drie notebooks en tassen vol warme kleding is de groep in de nacht van 9 op 10 februari vanuit Eindhoven naar het ijshotel afgereisd.

“De stilte, het licht en de geur in het ijshotel zijn moeilijk te omschrijven. Ondanks dat zich overdag en 's nachts veel mensen in het ijshotel bevinden, heb je het gevoel dat je er alleen bent. De ervaring “ijshotel” is uniek.”

Op 11 en 12 februari hebben de deelnemers in het ijshotel in groepen hard gewerkt aan diverse onderzoeksthema's: warmte en vocht, comfort, ruimte-akoestiek, geluidisolatie en licht. Ook is het hotel bouwkundig en installatietechnisch geïnventariseerd.

Met sneeuwballen werden kabels aan de wanden bevestigd. De warmte- en vochtgroep had moeite met het bepalen van de warmteweerstand van een sneeuw wand door het geringe temperatuurverschil over de wand. Doordat de sneeuwconstructies veel geluid absorberen, moest de akoestiekgroep het volledige vermogen van de bolbron benutten om in de zendruimte voldoende hoge geluiddruk niveaus op te wekken, teneinde een goede overdrachtsmeting te kunnen doen.

Hamerklappen leverden de longitudinale voortplantingsnelheid van sneeuw op. Er werd met tien man gesprongen in een slaapkamertje om het ventilatievoud te bepalen. Sensoren op de lichamen van onze logés in het ijshotel registreerden de huidtemperaturen. Een lichtmeter liet het tijdelijk afweten.

Het enthousiasme van de medewerkers in het ijshotel was ongekend. Overdag, 's avonds en 's nachts konden we zelf bepalen waar we metingen uitvoerden. Het komt er feitelijk op neer dat we praktisch ongestoord bijna 16 uur achter elkaar metingen konden doen in een gebouw dat openbaar toegankelijk is. Waar maak je dat nou mee?

Hoewel het in het ijshotel slechts $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ was, kregen sommigen het toch best koud na een lange dag meten.

“Terwijl bij bepaalde personen de euforie een hoogtepunt bereikte vanwege de prachtige meetresultaten, stonden anderen inmiddels vastgevroren aan de grond. Dus het was tijd om alles af te breken en in te pakken en lekker naar bed te gaan; het was inmiddels na enen. Om half 3 lag ik in bed en daarna weet ik niets meer...”

Deze twee dagen hebben een zeer grote hoeveelheid goede data opgeleverd.

Na terugkomst in Nederland is veel tijd besteed aan het uitwerken van de meetresultaten, de interpretatie daarvan en het schrijven van verslagen en de artikelen voor dit blad.

Dit themanummer begint met een algemeen artikel over het ijshotel en de functionele en bouwkundige opzet ervan. Daarmee vormt dit artikel de basis van de andere artikelen. De artikelen die volgen behandelen alle een bouwfyfisch thema. Niet alleen meetresultaten zijn beschreven; ook simulaties zijn uitgevoerd, deels op basis van de in het ijshotel bepaalde materiaalparameters. Verder is het ijshotel geplaatst binnen de context van het Bouwbesluit.

Deze reis zou niet zo geslaagd zijn geweest zonder het enthousiasme van de deelnemers en van de medewerkers van het ijshotel.

Maar zonder de financiële steun van de Nederlands Vlaamse Bouwfyfysica Vereniging en de hieronder genoemde sponsors was deze reis überhaupt niet mogelijk geweest:

- capaciteitsgroep FAGO, TU/e;
- Kenniscentrum TNO TU/e;
- TNO Bouw;
- Acoustics Engineering;
- Adviesbureau Tielemans;
- Continu Engineering;
- De Meeuw;
- DGMR;
- Euflex;
- Jansen Raadgevend Ingenieursbureau;
- Lichtveld Buis & Partners.

Veel plezier bij het lezen!

Susanne Bron-van der Jagt
Maarten Hornikx
Constant Hak

Wilt u de foto's in dit blad in kleur zien? Ga dan naar de website van de NVBV: www.nbv.com.

Rectificatie artikel hygrisch en mechanisch gedrag van hout bij veranderende vochtomstandigheden

Helaas zijn bij het converteren van het artikel 'Hygrisch en mechanisch gedrag van hout bij veranderende vochtomstandigheden' van ir. Nicole van Hout (nummer 2/2002) een aantal fouten opgetreden. Per abuis zijn een aantal teksten dubbel afgedrukt en zijn teveel afbreekstreepjes geplaatst.

IJSHOTEL TE JUKKASJÄRVI



Nancy Westerlaken

LOCATIE IJSHOTEL

Het ijshotel is gesitueerd 200 kilometer boven de noordpoolcirkel, nabij het dorpje Jukkasjärvi. De naam van dit dorp komt uit het Saami, de taal van de Lappen, en betekent ontmoetingsplaats.

Jukkasjärvi ligt ongeveer 15 kilometer van de stad Kiruna, op

20°20' O.L. en 67°49' N.B., zie ook figuur 1. Het op 323 m boven de zeespiegel gelegen IJshotel ligt aan het Jukkasjärvimeer, een verbreding van rivier de Torne.

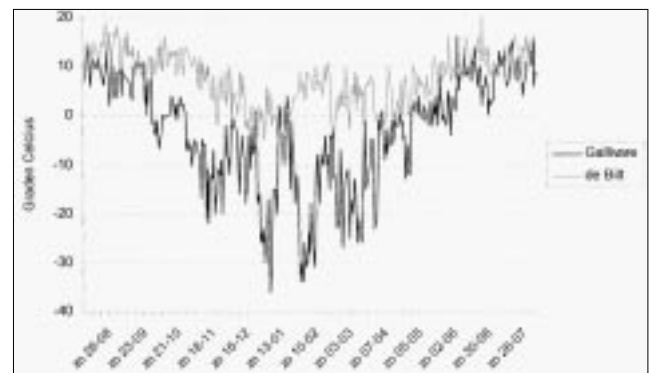
Ten tijde van de metingen kwam de zon op om 08.13 uur en ging onder om 15.34 uur.

KLIMAAT

In afbeelding 2 is zowel de minimale dagtemperatuur in de Bilt NL als de minimale dagtemperatuur in Gällivare SW uitgezet voor de periode januari tot december. Gällivare ligt ongeveer 100 kilometer ten zuiden van Jukkasjärvi, de heersende klimaten in Gällivare en Jukkasjärvi komen met elkaar overeen.



FIGUUR 1: LANDKAART ZWEDEN MET HIEROP LOCATIE IJSHOTEL AANGEGEVEN.



FIGUUR 2: DE MINIMALE DAGTEMPERatuur IN DE BILT (NEDERLAND) EN GÄLLIVARE (ZWEDEN).

Figuur 2 laat zien dat de spreiding in temperatuur in Zweden zeer groot is in vergelijking tot Nederland. Daarentegen was, ten tijde van de meetexpeditie, de variatie in temperatuur over een etmaal kleiner (zeer beperkt) ten opzichte van Nederland (in Nederland was een groot verschil tussen dagen en nachttemperatuur). De gemiddelde luchtvochtigheid in Kiruna lag ten tijde van de meetexpeditie rond de 90 procent. In de maand februari viel er bij een gemiddelde temperatuur van -13°C 80 tot 100 cm sneeuw.

Het klimaat in Jukkasjärvi leidt ertoe dat het hotel geopend is van december tot mei, daarna smelt het hotel weg. In de periode dat de metingen zijn uitgevoerd (11 en 12 februari), was het met temperaturen van -8°C overdag en -12°C 's nachts vrij zacht voor de tijd van het jaar.

BOUWKUNDIGE ASPECTEN

12 Jaar geleden werd er op het bevroren Jukkasjärvimeer in een cilindervormige sneeuwiglo met een vloeroppervlak van 60 m^2 een expositie van ijssculpturen gehouden. Enkele

bezoekers van de expositie brachten slapend op rendierhuiden de nacht door in de iglo. Ze beschreven de overnachting als een warme en indrukwekkende ervaring. Meer mensen wilden overnachten in de expositieruimte en het idee van een hotel werd geboren. Sindsdien wordt er ieder jaar in november gestart met de bouw van het IJshotel. Door de populariteit van het hotel wordt het hotel haast ieder jaar uitgebreid, in het seizoen 2001-2002 kende het hotel 60 kamers. De eerste hotels werden gebouwd door blokken van sneeuw en ijs op elkaar te stapelen om zo tot de paraboolvorm te komen, heden ten dage wordt er gebruik gemaakt van paraboolvormige stalen mallen. Hierop wordt met behulp van sneeuwkanonnen en shovels een sneeuwpakket van ongeveer anderhalve meter dikte aangebracht (zie figuur 3).



FIGUUR 3: SNEEUW WORDT OP DE MALLEN GESPOTEN.

Na ongeveer twee dagen heeft de sneeuw voldoende samenhang verkregen om zelfstandig belasting af te kunnen dragen en wordt de mal weggetrokken. Door middel van wanden van sneeuwblokken worden er kamers in de tunnel gecreëerd. Tunnels evenwijdig aan en haaks op elkaar vormen het uiteindelijke ijshotel, uitzondering hierop is de Icebar (zie figuren 6 en 7). Het dak van de Icebar is koepelvormig en heeft een overspanning van 12 meter. Om het dak voldoende stevigheid te geven wordt de sneeuw versterkt met wapeningsstaal in de vorm van staven en netten.

Blokken ijs, die uit de rivier de Torne worden gezaagd, zijn op diverse plaatsen in de (sneeuw)gevel opgenomen en zorgen voor daglichttoetreding in het ijshotel. In de hoofdgang van het hotel zijn kolommen van ijs geplaatst ter ondersteuning



FIGUUR 4: ENTREE IJSHOTEL (VAN BINNENUIT GEZIEN), KOLOMMEN VAN IJS ONDERSTEUNEN DE BOOG VAN SNEEUW.

van de boogvorm (zie figuur 4). Wat op deze afbeelding nog opvalt is de toegangsdeur. Deze is net als de overige 3 toegangsdeuren in het hotel van hout, bekleedt met rendierhuiden (zie ook figuur 6).

Een maand na de start van de bouw, wordt het IJshotel 'opgeleverd'. Voor de bouw is dan 30.000 ton sneeuw en 3.000 ton ijs gebruikt. Het hotel heeft een oppervlakte van ongeveer 4000 m² (circa 70 bij 46 m²). Omdat voor de bouw veel meer sneeuw dan ijs wordt gebruikt, is het de vraag of wel van een ijshotel gesproken kan worden: sneeuwhotel lijkt een betere benaming.

Door het eigen gewicht van de sneeuw wanden en het pakket sneeuw dat gedurende het seizoen op het ijshotel valt, zakt het ijshotel langzaam in. Studenten van de universiteit van Luleå (Zweden) meten 1 maal per week met behulp van een theodoliet het IJshotel in. Dit om te controleren of er zakkingen plaatsvinden en of deze toelaatbaar zijn. Ook bepalen zij na een periode van dooi of de dikte van de wanden nog voldoende is om krachten af te dragen, of dat de wanden weer op sterkte moeten worden gebracht door een laag sneeuw aan te brengen. Dit alles om de veiligheid van de bezoekers te waarborgen.

INDELING IJSHOTEL

Het hotel herbergt de volgende functies:

- slapen ;
- expositie;
- recreatie;
- bezinning.

In hoofdzaak is het ijshotel een hotel met 60 slaapkamers, echter een tweede belangrijke functie van het hotel is die van expositieruimte. Overdag is het gehele IJshotel opengesteld voor publiek. Dit kan in de expositieruimte de ijssculpturen bekijken (zie figuur 5). Opvallend aan deze sculpturen is de helderheid van het ijs. Het heldere en zeer snelstromende water in de Torne is hier credit aan. Eigenlijk dient het gehele hotel als expositieruimte. In veel slaapkamers is het bed namelijk in een ijssculptuur verwerkt.



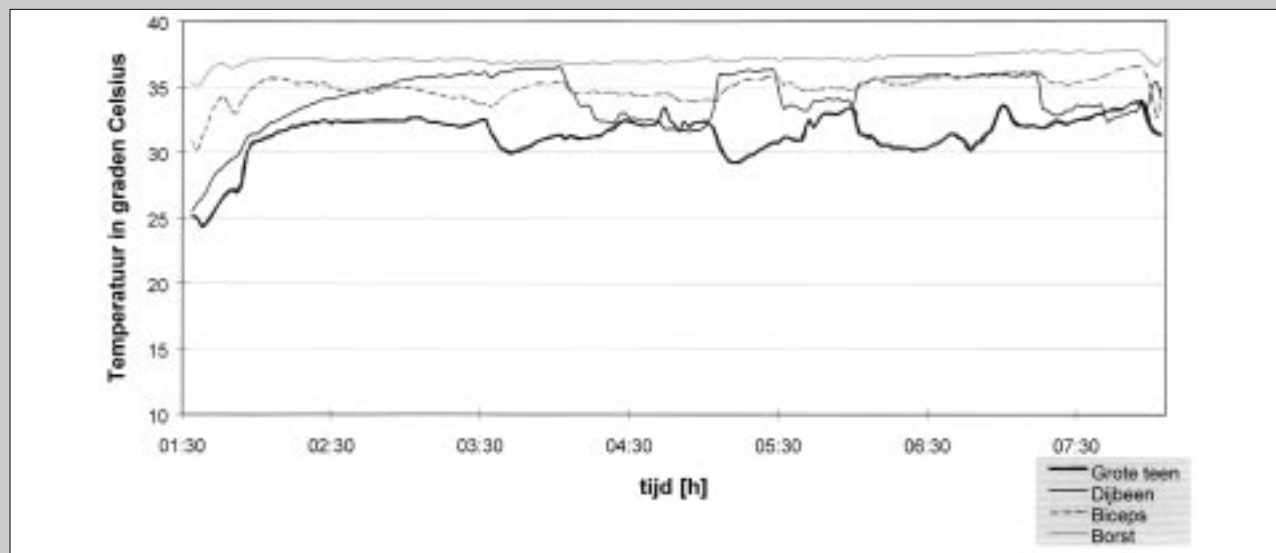
FIGUUR 5: DOOR HET HELE HOTEL VINDT MEN IJSSCULPTUREN.

In het hotel vindt men recreatie in de vorm van een bar en een bioscoop. Het hotel kent ook een kapel; deze wordt gebruikt voor 'gewone' kerkdiensten, maar vooral voor trouwerijen. Het hotel kent een vrijwel constante binnentemperatuur van

OVERNACHTEN IN HET IJSHOTEL

Vier deelnemers aan de meetexpeditie hebben overnacht in het ijshotel (nacht van 11 op 12 februari 2002). Bij deze vier personen is de huidtemperatuur op vier verschillende plaatsen gelogd: op de borst, biceps, dijbeen en grote teen. De kamers waarin de vier proefpersonen verbleven, waren de kamers 706 en 708. Deze liggen aan de achterste gang van het ijshotel en grenzen daarmee eveneens aan de buitengevel. In de slaapkamer was een tweepersoonsbed aanwezig, bestaande uit poten van ijs met daarop een houten pallet, matras (dikte 70 mm) en rendierhuiden. De personen lagen in een slaapzak, die ontwikkeld is voor temperaturen tussen de -10 en -25 °C.

In onderstaande grafiek zijn de huidtemperaturen voor de lichaamsdelen van één proefpersoon weergegeven.



FIGUUR 1: HUIDTEMPERATUREN VOOR VERSCHILLENDE LICHAAMSDLEN VAN PROEFPERSON V1

In tabel 1 zijn de over de nacht gemiddelde huidtemperaturen in 0 °C per proefpersoon per lichaamsdeel en gemiddeld over de lichaamsdelen weergegeven. Deze laatste waarden corresponderen met een bepaalde gevoelsuitdrukking, zoals beschreven in de ASHREA-7-puntsbeoordelingsschaal.

TABEL 1: GEMIDDELDE HUIDTEMPERATUREN IN °C EN GEVOELSUITDRUKKING

Proefpersoon	Grote teen	Dijbeen	Biceps	Borst	Gemiddeld	Gevoelsuitdrukking
V1 – 21 jaar	31,3	34,1	34,9	37,1	34,4	lichtelijk warm - warm
V2 – 24 jaar	27,5	32,8	34,5	35,9	32,7	lichtelijk koel - neutraal
M1 – 22 jaar	22,4	33,5	33,3	34,9	31,0	lichtelijk koel
M2 – 40 jaar	15,1*	32,7	33,2	33,9	28,8	koud

* onbetrouwbare meetwaarde, opnemer losgeraakt

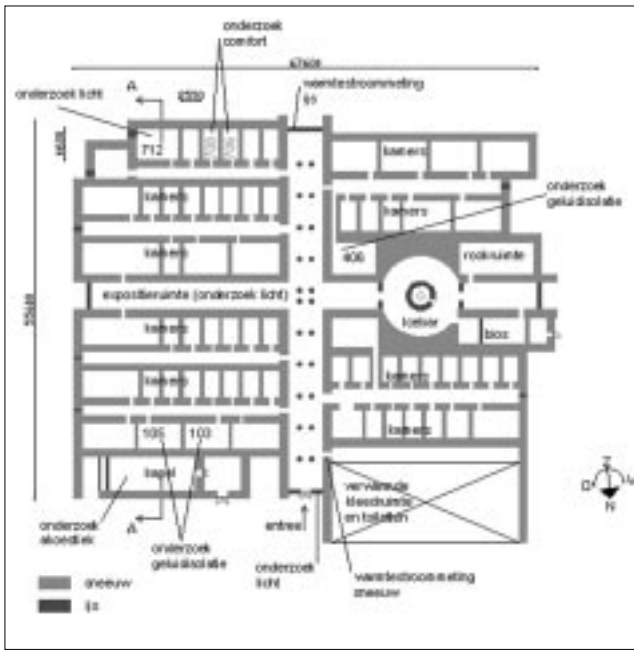
In de onderstaande tabel is beschreven welke kleding de proefpersonen gedurende de nacht droegen. Verder lagen zij allen in een zelfde slaapzak (zie boven).

TABEL 2: KLEDING VAN DE PROEFPERSONEN EN GESCHATTE I_{CLO} (EXCLUSIEF SLAAPZAK)

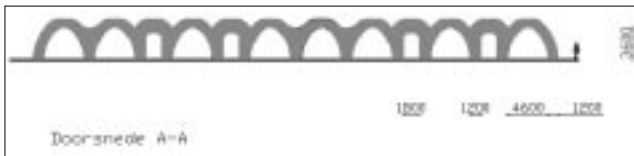
Proefpersoon	Ondergoed	Pyjama	Sokken	Muts	Sjaal	Schatting I_{clo} [clo]
V1 - 21	×	×	×	×	×	1.1
V2 - 24	×	×	×	×		1.0
M1 - 22	×	(×)*			×	0.8/1.0
M2 - 40	×	×				0.9

* pyjama halverwege nacht aangetrokken

-5 °C. Om bezoekers en gasten tegemoet te komen zijn kleedruimten en toiletten in een verwarmde ruimte ondergebracht, zie ook figuur 6.



FIGUUR 6: PLATTEGROND EN FUNCTIES IJSHOTEL (KAMERNUMMERS EN ONDERZOKSLOCATIES AANGEGEVEN).



FIGUUR 7: DOORSNEDE IJSHOTEL.

Het afgelopen winterseizoen lag de temperatuur soms boven het vriespunt (zie figuur 2). Hierdoor is het ijshotel gaan smelten. Vooral in de Icebar zorgt dit voor problemen. Het koepelvormige dak, dat een grote afstand moet over-

spannen, smelt dan in geringe mate weg. Hoewel de koepel van wapening is voorzien, ontstaat er toch instortingsgevaar. Om de dikte van het dakpakket weer op peil te brengen, wordt het dak gerestaureerd door er sneeuwballen tegen aan te plakken, zie figuur 8.



FIGUUR 8: RESTAURATIE VAN HET DAK MBV SNEEUWBALLEN.

DE GELUIDISOLATIE VAN SNEEUW

Marieke Schopmeijer
Dick Bergmans
Linda Mascini



De luchtgeluidwering tussen twee hotelkamers in het ijsshotel in Jukkasjärvi is vergeleken met een traditioneel hotel. Uit de voorspellingen en metingen is gebleken dat de geluidoverdracht tussen de kamers in het ijsshotel overwegend bepaald wordt door geluidoverdracht via de directe scheidingswand en dat de flankerende geluidoverdracht nauwelijks een rol speelt. De karakteristieke isolatie-index voor luchtgeluid voldoet aan het Bouwbesluit.

Een simulatie in het computerprogramma BASlucO, waarin dikke plaattheorie wordt gebruikt, geeft voor hoge frequenties een te lage geluidisolatie. Een handberekening, waarin uitsluitend dunne plaattheorie is verwerkt, geeft juist wel vergelijkbare resultaten. Onduidelijk is waardoor deze afwijking optreedt. Mogelijk is het te verklaren door niet-homogeen gedrag van de scheidingsconstructie.

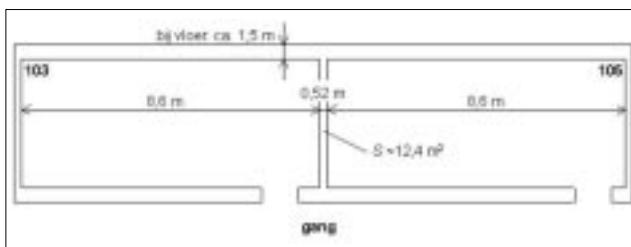
AANLEIDING

Hoe is dat nou: slapen in een hotelkamer met wanden van sneeuw en ijs, met een gordijntje als 'deur'? Als de burens al zin hebben in diepgaande middernachtelijke gesprekken, zullen die je dan uit je slaap houden? En hoe zit het met door de gangen dwalende gasten die veelvuldig bezoeken aan het toilet brengen? Om objectieve uitspraken te doen over de akoestische beleving van het ijsshotel, zijn op 11 en 12 februari 2002 metingen uitgevoerd.

Insteek van dit onderdeel van de meetexpeditie is het vergelijken van meetgegevens over de geluidwering van een scheidingswand in het ijsshotel met enerzijds voorspellingen voor de geluidisolatie en anderzijds met de eis voor de geluidisolatie tussen hotelkamers in het Bouwbesluit.

De voorspellingen zijn waar mogelijk uitgevoerd met parameters die ter plekke gemeten of bepaald zijn, zoals de voortplantingssnelheid van geluid in sneeuw en de trillingsoverdrachtdemping van de bouwkundige knopen.

In figuur 1 is de situatie weergegeven.



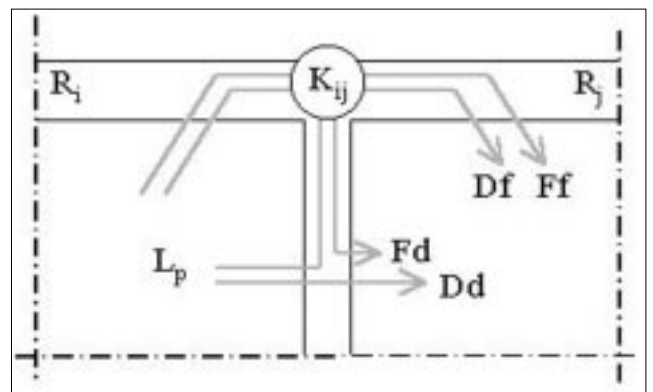
FIGUUR 1: SITUATIEBESCHRIJVING

THEORIE GELUIDISOLATIE

De geluidisolatie van een constructie kan onder andere aangegeven worden met D_{nT} en R . D_{nT} is de **luchtgeluidwering** van een praktijk-constructie, waarbij alle overdrachtswegen worden beschouwd (zie figuur 2 en het kader 'Trillingsoverdrachtverzwakking'). R is de **luchtgeluidisolatie** van de scheidingsconstructie (Dd in figuur 2) onder laboratoriumomstandigheden (in feite een materiaaleigenschap). Deze grootheden kunnen bepaald worden met de nagalmtijd (T), de referentienagalmtijd (T_0), het oppervlak van de scheidingsconstructie (S) en de geluidabsorptie van het ontvangvertrek (A) volgens:

$$D_{nT} = L_{p,zend} - L_{p,ontv} + 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (1)$$

$$R = L_{p,zend} - L_{p,ontv} + 10 \lg \frac{S}{T} \quad (2)$$



FIGUUR 2: OVERDRACHTWEGEN LUCHTGELUID VOOR ALLE BOUWKUNDIGE KNOOPPUNTEN

VOORSPELLINGEN

Luchtgeluidwering tussen de hotelkamers

Met behulp van het computerprogramma BASlucO [7] is de geluidwering tussen de hotelkamers voorspeld. Waar van toepassing wordt door dit programma met dunne-plaattheorie gerekend, nl. als geldt:

$$f < \frac{c_L}{6 \cdot d} \Rightarrow \frac{1250}{6 \cdot 0,52} \Rightarrow f < 400 \text{ Hz}$$

De ingevoerde waarden voor c_L en d zijn door meting bepaald (zie ook kader 'Longitudinale voortplantingssnelheid'). Door de grote dikte van de constructie en de lage longitudinale voortplantingssnelheid geldt de dikke-plaattheorie (ver-

geleken met een traditioneel hotel) voor een groot gedeelte van het frequentiegebied.

BASlucO kent beperkingen wat betreft de in te voeren geometrie: alleen een rechthoekige constructie en een maximale in te voeren constructiedikte van 1000 mm. De doorsnede van de ruimten in het ijshotel is echter paraboolvormig en sommige wanden zijn tot 1,5 m dik.

Bij de simulatie is de verliesfactor door inwendige demping (η) een in te voeren constante grootte. Voor een sneeuw wand in het ijshotel is de totale verliesfactor η bepaald. η wordt bepaald door inwendige demping, afstraling en randkoppelingen en wordt gevonden uit de uitklinktijd (T_s) volgens:

$$\eta = \frac{2,2}{f \cdot T_s} \quad (3)$$

In tabel 1 is de aan de hand van metingen bepaalde η voor een sneeuw wand per octaafband weergegeven.

TABEL 1: TOTALE VERLIESFACTOR PER OCTAAFBAND

f [Hz]	η [-]
250	0,30
500	0,17
1000	0,11
2000	0,09
4000	0,06

In principe is η (in geval van alleen inwendige demping) frequentie-onafhankelijk voor massieve, homogene constructies. In de resultaten voor η is vooral in de lagere frequenties een grotere demping te zien, die waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de randkoppelingen. Voor η is daarom in de simulatie een frequentie-onafhankelijke waarde van 0,10 (gemiddelde waarde over de hogere frequentiebanden) gebruikt.

In BASlucO is een simulatie uitgevoerd (zie ook kaders 'Longitudinale voortplantingssnelheid' en 'Trillingsoverdrachtverzwakking') met de invoergegevens zoals weergegeven in tabel 2.

TABEL 2: INVOERGEGEVENS SIMULATIE BASLUCO

Grootheid	Waarde	Opmerkingen
c_L		Gemeten waarden
K_{ij}		Gemeten waarden
S	3,6 x 3,6 x 0,52 m ³	Gelijk aan oppervlak in situatie
V	106 m ³	
ρ	500 kg·m ⁻³	Gemiddelde praktijkwaarde
η	0,10	
G/E	0,384	

De flankerende wanden zijn ingevoerd als 'doorlopend'.

LONGITUDINALE VOORTPLANTINGSSNELHEID

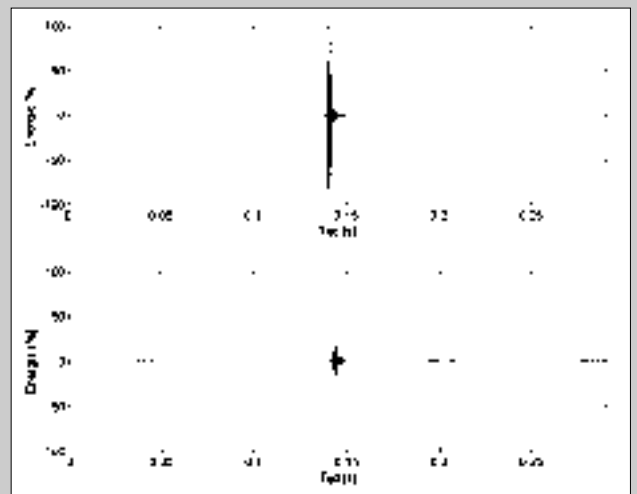
De longitudinale voortplantingssnelheid van geluid in sneeuw (c_L) is af te leiden uit de literatuurwaarde van de elasticiteitsmodulus (E) en de dichtheid (ρ) met:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

c_L is bepaald op de ca. 13 m lange zijwand van kamer 402. Twee versnellingsopnemers zijn met een pin op de wand bevestigd en via een voorversterker verbonden met de laptop. Vervolgens is de wand op de kopse kant met een houten hamer aangeslagen (zie figuur 1). Met Dirac zijn de veranderende energieniveaus van de versnellingsopnemers geregistreerd en geanalyseerd; uit het tijdsverschil tussen de twee signalen is de c_L bepaald (zie figuur 2).



FIGUUR 1: MEETMETHODE



FIGUUR 2: ZENDSIGNAAL (BOVEN) EN ONTVANGSIGNAAL (ONDER) VAN VERSNELLINGSONMETERS GEREGISTREERD IN DIRAC

Resultaten

De meetgegevens zijn gebruikt voor de berekening van c_L . Er zijn zes verschillende waarden voor c_L bepaald. Deze waarden zijn rekenkundig gemiddeld waarbij de grootste afwijking van het gemiddelde 21 % bedraagt. Gemiddeld is een c_L van ca. 1250 m·s⁻¹ gemeten.

Discussie en conclusie

In de literatuur is geen c_L door sneeuw gevonden. Als c_L uit E bepaald wordt vinden we:

$$c_L = \sqrt{\frac{10^9}{500}} = 1400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2)$$

Het aantal meetwaarden voor c_L dat bruikbaar is en waarover gemiddeld is bedraagt slechts zes. Concluderend moet gesteld worden dat de gevonden waarde voor c_L met enige reserve gebruikt moet worden.

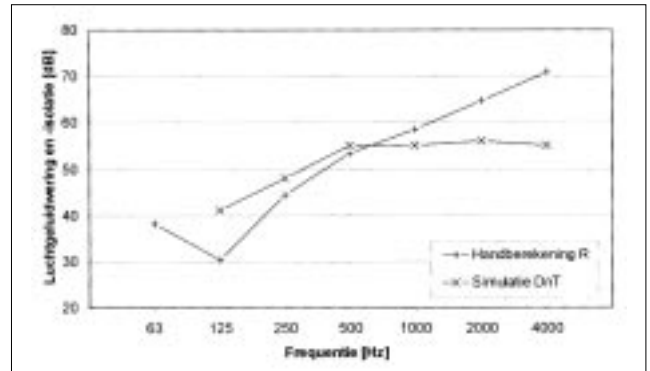
Uit de BASluco-simulatie blijkt dat flankerende geluidoverdracht nauwelijks een rol speelt in de totale geluidoverdracht: 97% van de geluidoverdracht is direct. Daarom kan uit een berekening van de luchtgeluidisolatie van de directe scheidingsconstructie ook een goede indicatie van de geluidwering tussen de ruimten verkregen worden.

Luchtgeluidisolatie van de directe scheidingsconstructie

Met de handberekening van de geluidisolatie zijn uit de theoretische afstraalfactoren voor gedwongen en vrije buiggolven (zie kader 'Afstraalfactor') de transmissieverliezen voor de drie gebieden (frequenties onder f_g , rond f_g en boven f_g) theoretisch bepaald volgens NEN 12354-1 [3]. Voor deze berekening zijn dezelfde invoergegevens voor de verschillende grootheden gebruikt als bij de simulatie in BASluco.

Resultaten

De resultaten van de simulatie (D_{nT}) en handberekening (R) zijn in één figuur weergegeven (zie figuur 3).



FIGUUR 3: RESULTATEN SIMULATIE EN HANDBEREKENING

De isolatie-indices voor luchtgeluid die hieruit kunnen worden afgeleid zijn weergegeven in tabel 3.

Deze resultaten worden verderop in dit artikel vergeleken met de meetresultaten (zie paragraaf 'Vergelijking resultaten').

AFSTRAALFACTOR

Net als de afstraalfactor (s) is de grensfrequentie (f_g) een parameter die het akoestisch gedrag van een constructie karakteriseert:

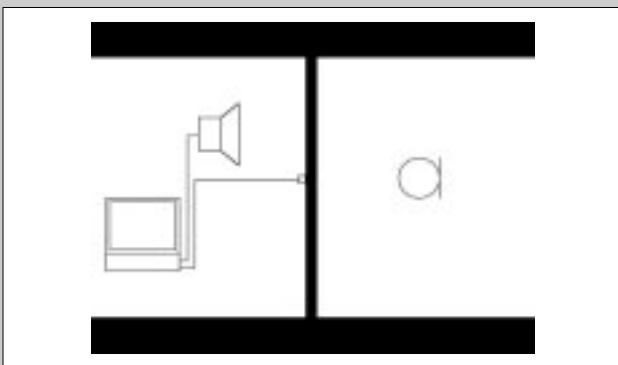
$$f_g = \frac{64.000}{c_L \cdot d} \quad (1)$$

Volgens Cremer c.s. is de afstraalfactor de verhouding van het door een plaat afgestraalde vermogen W en het geluidvermogen dat door een zuiger met dezelfde gemiddelde trillingssnelheid (v_{gem}) en dezelfde oppervlakte (S) zou worden afgestraald [6]:

$$\sigma = \frac{W}{\rho \cdot c \cdot v^2 \cdot S} \quad (2)$$

Na meting van het versnellingsniveau (L_{agem}) is σ tussen de kamers 103 en 105 bepaald uit het gemiddelde snelheidsniveau (L_{vgem}) en het geluidvermogeniveau (L_W).

De versnellingsopnemer is met een stalen pin aan de zenzijde van de scheidingsconstructie bevestigd (zie figuur 1 voor de meetopstelling). Er wordt vanuit gegaan dat de versnellingsopnemer niet significant gevoelig is voor luchtgeluid, m.n. omdat de opnemer strak tegen de scheidingsconstructie bevestigd wordt. De meetwaarden zijn gecalibreerd met een pistonfoon.



FIGUUR 1: MEETOPSTELLING BEPALING AFSTRAALFACTOR

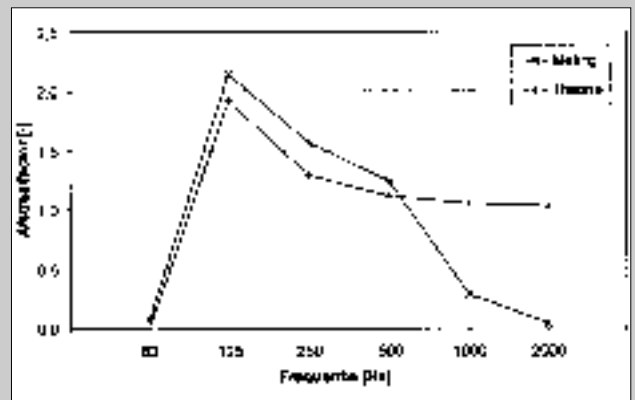
Voor vrije buiggolven is σ_v theoretisch bepaald volgens Leppington c.s. [5]. Ten behoeve van de handberekening van R (zie paragraaf 'Voorspellingen') is σ_d voor gedwongen buiggolven theoretisch bepaald volgens Sewell [4].

Resultaten

Voor deze constructie bedraagt f_g :

$$f_g = \frac{64.000}{c_L \cdot d} = \frac{64.000}{1250 \cdot 0,52} = 99 \text{ Hz} \quad (3)$$

In figuur 2 zijn de theoretisch bepaalde en de gemeten waarden voor σ per octaafband weergegeven.



FIGUUR 2: AFSTRAALFACTOR VOLGENS THEORIE EN METING PER OCTAAFBAND

Discussie en conclusie

Voor de octaafbanden tot en met 500 Hz komen de meetwaarden en de theoretisch bepaalde waarden tamelijk goed overeen. Voor de hogere frequenties (1000 en 2000 Hz) nemen de meetwaarden voor de afstraalfactor te veel af ten opzichte van de theorie.

Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door de meetmethode: de pin die gebruikt is om de versnellingsopnemers aan de wand te bevestigen geeft onbetrouwbare resultaten voor deze frequenties. Voor de bepaling van de afstraalfactor is slechts één meting van de geluidisolatie gebruikt. De reden hiervoor is dat de uitkomsten van andere metingen (of gemiddelden daarvan) onrealistische waarden voor de afstraalfactor opleverden. Daarbij moet nog opgemerkt worden dat voor alle meetsets de piek bij 125 Hz duidelijk zichtbaar is, net als de lage waarde bij 63 Hz en de afnemende waarden voor de hogere frequenties.

De piek bij 125 Hz wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat in deze frequentieband de grensfrequentie ligt. Daaronder vindt nauwelijks afstraling plaats.

METINGEN

In het ijshotel zijn de volgende metingen verricht:

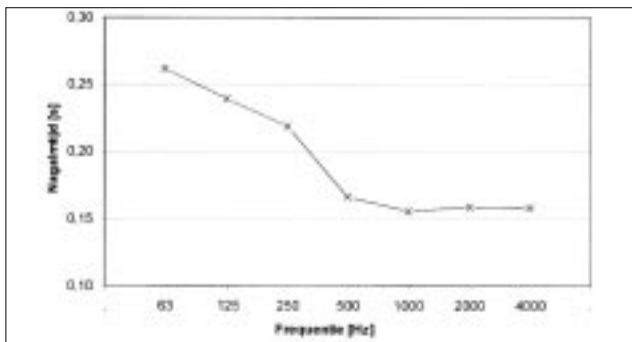
- Meting ter bepaling van de luchtgeluidwering D_{nT} tussen de hotelkamers 103 en 105
- Meting van diverse geluidtechnische parameters, die gebruikt zijn in de voorspellingen (zie kaders 'Afstraalfactor', 'Longitudinale voortplantingssnelheid' en 'Trillingsoverdrachtverzwakking')

Meetmethode

Voor de meting van de D_{nT} tussen twee ruimten zijn de kamers 103 en 105 gebruikt. Kamer 103 is het zendvertrek, kamer 105 het ontvangvertrek. In het zendvertrek is de bolbron opgesteld en deze wordt aangestuurd door de laptop in combinatie met een vermogensversterker. Van kamer 105 is de nagalmtijd bepaald en daarnaast zijn op verschillende punten in de ruimten de ontvang- en zendniveaus gemeten. Door de sterke geluidabsorptie van de ruimten (zoals ook te zien is in de resultaten voor de nagalmtijd, zie figuur 4) bleek het moeilijk een diffuus geluidveld op te bouwen. Omloopgeluid via de gang bleek geen significante bijdrage te leveren aan de geluidoverdracht, door de grote geluidabsorptie van de ruimten en de gang.

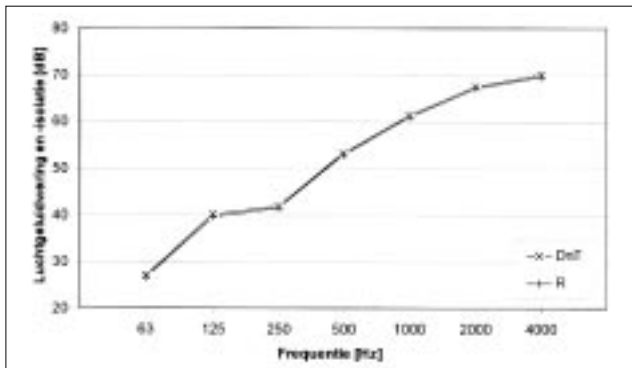
Resultaten

In figuur 4 is de nagalmtijd T_{20} van kamer 105 weergegeven als functie van de frequentie.



FIGUUR 4: NAGALMTIJD KAMER 105

Met behulp van de gemeten T_{20} is D_{nT} bepaald volgens (1). Omdat er, op basis van de simulatieresultaten met BASlucO, vanuit is gegaan dat flankerende geluidoverdracht niet relevant was, is R bepaald volgens (2). In figuur 5 zijn de op basis van T_{20} bepaalde meetwaarden voor R en D_{nT} per octaafband weergegeven.



FIGUUR 5: GEMETEN LUCHTGEUIDWERING EN -ISOLATIE PER OCTAAFBAND

TRILLINGSOVERDRACHTVERZWAKKING

Akoestisch gezien loopt de geluidoverdracht tussen twee ruimten via verschillende paden (zie figuur 2 in het hoofdartikel). De verzwakking die optreedt door het knooppunt wordt de trillingsoverdrachtverzwakking (K_{ij}) genoemd. K_{ij} kan bepaald worden met behulp van een aantal grootheden, zoals de uitklinktijd (T_s), de gemiddelde verbindingsdemping ($D_{v,ij}$), de lengte van de knoop (l_{ij}) en het oppervlak (S) volgens:

$$K_{ij} = \overline{D_{v,ij}} + 10 \cdot \lg \frac{I_v}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \quad (1)$$

$$a = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S}{c_0 \cdot T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}}; \quad f_{ref} = 1000 \text{ Hz} \quad (2)$$

$$D_{v,ij} = 10 \lg \frac{\int_0^t \tilde{v}_i dt}{\int_0^t \tilde{v}_j dt} \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

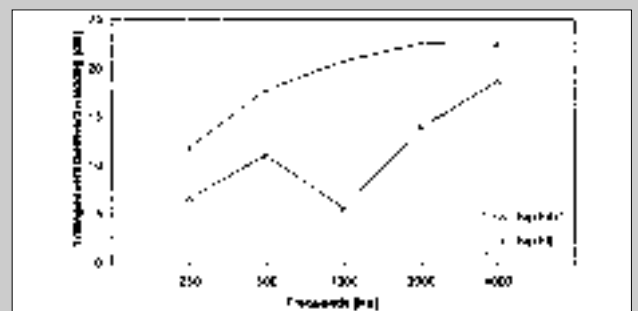
Op grond van de symmetrie van de constructie wordt aangenomen dat $D_{v,ij} = D_{v,ji}$. Beide paden worden gemeten en gemiddeld volgens:

$$\overline{D_{v,ij}} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

K_{ij} karakteriseert de trillingsoverdracht bij constructieverbindingen, onafhankelijk van de situatie waarin deze koppeling zich bevindt en is vergelijkbaar met de geluidisolatie van een constructie (R), die de geluidoverdracht ook min of meer onafhankelijk van de situatie karakteriseert. De constructie wordt aangeslagen door een hamer ('kaal' en met een rubber matje eronder). Op twee vlakken (afhankelijk van welk overdrachtspad gemeten wordt) wordt een versnellingsopnemer bevestigd. Uit de verschillen in de strength G (volgens ISO 3382) van de signalen zijn de waarden voor $\overline{D_{v,ij}}$ bepaald.

Resultaten

In figuur 1 zijn de op basis van metingen bepaalde waarden voor K_{ij} weergegeven (zie ook figuur 1 in het hoofdartikel).



FIGUUR 1: OP BASIS VAN METINGEN BEPAALDE WAARDEN VOOR DE TRILLINGSOVERDRACHTVERZWAKKING

Discussie en conclusie

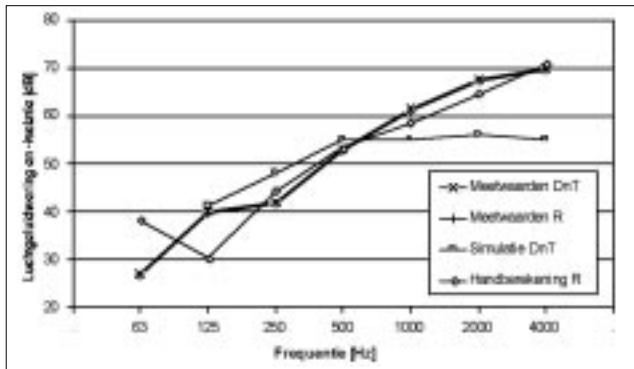
Volgens de theorie (op basis van de massaverhoudingen) is de verwachting voor een massieve, homogene scheidingsconstructie dat K_{ij} tussen 250 en 1000 Hz een min of meer constante waarde van rond de 8 dB heeft. De waarden voor K_{ij} (FF) lijken realistisch, doch iets te hoog. De oorzaak van de dip in de meetwaarde van K_{ij} (Fd) bij 1000 Hz is niet duidelijk aan te geven. Een verklaring kan zijn dat de resonantiefrequentie van de combinatie pin en versnellingsopnemer, die normaal gesproken buiten het beschouwde frequentiegebied ligt, in deze situatie binnen dat gebied schuift. Het is moeilijk te bepalen bij welke frequentie deze precies ligt.

Discussie en conclusie

In figuur 5 is een plateau tussen 125 en 250 Hz te zien. Voor de hogere frequenties zijn R en D_{nT} erg hoog voor een bouwkundige scheidingsconstructie. Dat het aandeel van de flankerende overdracht klein is, zoals uit de simulatie is gebleken, is te zien aan het feit dat de meetcurven van R en D_{nT} vrijwel op elkaar liggen: de randeffecten hebben blijkbaar nauwelijks invloed.

VERGELIJKING RESULTATEN

In figuur 6 zijn de resultaten van de simulatie, de handberekening en de meetwaarden weergegeven.



FIGUUR 6: RESULTATEN GELUIDISOLATIE SIMULATIE, HANDBEREKENING EN METINGEN

Voor het frequentiegebied onder ca. 400 Hz komen de resultaten van de simulatie en handberekening tamelijk goed overeen met de meetwaarden.

Voor frequenties boven ca. 400 Hz maakt BasLuco gebruik van de dikke-plaattheorie. De resultaten wijken hier sterk af van de meetwaarden. De resultaten van de handberekening, die voor die frequenties geen gebruik maakt van de dikke-plaattheorie, komen wel goed overeen met de meetwaarden. Onduidelijk is waardoor deze afwijking optreedt. Mogelijk kan deze afwijking verklaard worden doordat de constructie zich lijkt te gedragen als een niet-homogene wand.

Met de gemeten en voorspelde waarden voor D_{nT} -en R zijn de luchtgeluidisolatie-index (I_{lu}) en de karakteristieke luchtgeluidisolatie-index ($I_{lu;k}$) bepaald volgens NEN 5077 [1]. In tabel 3 zijn de resultaten voor I_{lu} en $I_{lu;k}$ weergegeven.

TABEL 3: ISOLATIE-INDICES SIMULATIE, HANDBEREKENING EN MEETRESULTATEN

	I_{lu}	$I_{lu;k}$
Simulatie	4	-1
Handberekening	3	-2
Meting	3	-2

De waarden voor zowel I_{lu} als $I_{lu;k}$ komen tamelijk goed overeen wanneer de resultaten van de metingen en de resultaten van de simulatie en de handberekening vergeleken worden. $I_{lu;k}$ voldoet zowel bij de simulatie en de handberekening als bij de meetwaarde aan de eis in het Bouwbesluit voor de scheiding tussen twee hotelkamers: $I_{lu;k}$ mag niet kleiner zijn dan -5 dB.

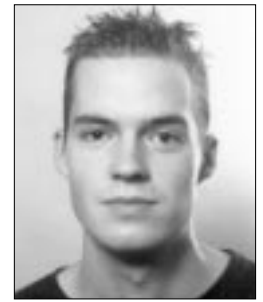
EPILOOG

Van burengerucht zul je als gast in het ijsshotel geen last hebben; zelfs de bron die is gebruikt om de geluidisolatie te bepalen had maar nauwelijks voldoende vermogen om het ontvangniveau boven het ruisniveau uit te laten komen. Mensen die door de gangen liepen of om een hoekje stonden te praten waren ook al nauwelijks hoorbaar. De verwachtingen van de akoestische beleving van het ijsshotel zijn geheel ontkracht: in plaats van hard en galmend kwam de binnenruimte over alsof de wanden met watten bedekt waren: het geluid wordt direct grotendeels geabsorbeerd. De perfecte studentenkamer dus: de stereo op vol vermogen zonder overlast voor de burens!

LITERATUURLIJST

- [1] NEN 5077, NNI
- [2] Bouwbesluit 2001, Ministerie van VROM
- [3] NEN-EN 12354-1, pagina 30, mei 2000
- [4] Sewell, E.C. (1970), Transmission of reverberant sound through a single leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle, Journal of Sound and Vibration, 12, 21-32
- [5] Leppington, F.G., Broadbent, E.G. and Heron, K.H. (1982), The acoustic radiation efficiency of rectangular panels, Proceedings of the Royal Society of London, A382, 245-71
- [6] Cremer, L., Heckl, M. and Ungar, E.E., Structure-Borne Sound, second edition Springer Verlag Berlin, Heidelberg 1988, 495
- [7] BASluco, TNO TPD
- [8] Dirac 2.5, Acoustics Engineering

BEPALING VENTILATIEVOUD EN CO₂-CONCENTRATIES IN HOTELKAMER IJSHOTEL JUKKASJÄRVI



Joost van Hoof

Een onderdeel van de bouwfysische metingen die zijn uitgevoerd in het ijshotel in het kader van de meetexcursie omvatte het meten van de binnenconcentraties CO₂. Deze metingen moesten een beeld geven van het ventilatievoud van een hotelkamer en het verloop van de aldaar aanwezige concentraties CO₂-gas. Een reden voor het uitvoeren van deze metingen was de afwezigheid van een mechanisch ventilatiesysteem. De vraag was of enkel een natuurlijke wijze van ventilatie voldeed.

RUIMTE EN METHODE

Voor het bepalen van het ventilatievoud is gebruik gemaakt van een door het reisgezelschap gereserveerde slaapruiimte (zie figuur 1). Deze voor de metingen in beschouwing genomen kamer betrof de standaard tweepersoonshotelkamer 706. Het volume van dit vertrek bedroeg 31,6m³, met aftrek van het volume van het bed en enkele meubelstukken blijft



FIGUUR 1: DE MEETLOKATIE: EEN SLAAPKAMER IN HET IJSHOTEL

daar een luchtvolume van circa 30m³ van over. De kamer werd afgesloten met een nylon gordijn; een zeer luchtopen constructie in vergelijking tot een gebruikelijke hoteldeur. De toegangsopening van de kamer had voorts de volgende dimensies; een breedte van 0,65m met een doorloophoogte van 1,8 tot 1,9m.

In de top van het plafond van de kamer bevond zich als enige verbinding met buiten een rond ventilatiekanaal met een diameter van ongeveer 0,15m die bij benadering voor 40% dicht was gesneeuwd. De dakopening en de toegang tot de



FIGUUR 2: HET METEN VAN DE BINNENCONCENTRATIE CO₂ TER BEPALING VAN HET VENTILATIEVOUD VAN EEN HOTELKAMER EN HET VERLOOP VAN DE ALDAAR AANWEZIGE CONCENTRATIES CO₂-GAS. EEN REDEN VOOR HET UITVOEREN VAN DEZE METINGEN WAS DE AFWEZIGHEID VAN EEN MECHANISCH VENTILATIESYSTEEM. DE VRAAG WAS OF ENKEL EEN NATUURLIJKE WIJZE VAN VENTILATIE VOLDEED.

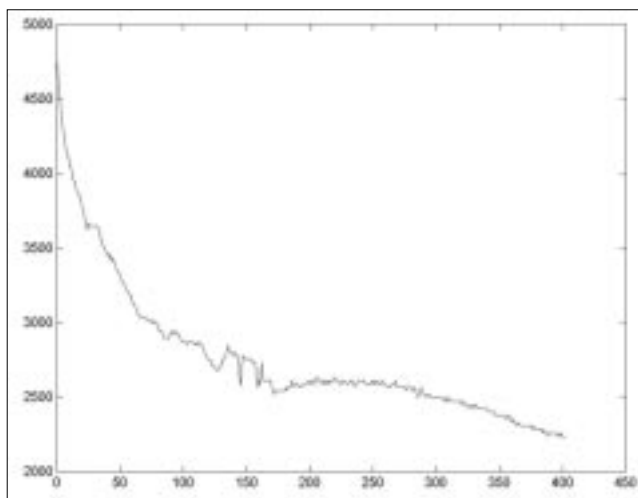
kamer waren de enige openingen waardoor luchtverversing plaats kon vinden op natuurlijke wijze. In het hele hotel was namelijk geen enkele vorm van mechanische ventilatie aanwezig.

Behalve als ruimte om te slapen zijn de hotelkamers overdag ook opengesteld voor het publiek. De voor toeristen toegankelijke kamers worden dan gedurende de gehele dag bezocht en bekeken. Deze bezoekers produceren CO₂ tijdens hun tocht langs alle kamers. Om het effect hiervan in de meting van de slaapkamer te laten terugkomen is door een groep van 11 studenten over een periode van 40 minuten rondgelopen in de meetkamer, die voor toeristen was afgezet. In de nacht van 11 op 12 februari sliepen twee personen in de meetkamer. Gedurende de twee meetdagen zijn de concentraties CO₂ gemeten (zie figuur 2). Na een opbouw van CO₂-gas tijdens de dag en nacht, is er na het vertrek van twee personen om 08:00 uur een verval in de concentratie CO₂ zichtbaar in de metingen. Met behulp van dit verval is later het ventilatievoud van de kamer bepaald.

RESULTATEN

Na het bewerken van de meetdata is een ventilatievoud gevonden dat $\pm 0,016$ h-1 bedraagt.

Behalve het bepalen van het ventilatievoud is ook gekeken naar de CO₂-concentraties op diverse tijdstippen in de hotelkamer. De gevonden waarden zijn opmerkelijk hoog. Tijdens de nacht zijn concentraties van ruim 5200ppm gemeten! Om 08:00 uur bedroeg de concentratie ruim 4700ppm en op het einde van de curve die is gebruikt voor bepaling van het ventilatievoud zo'n 2200ppm.



FIGUUR 3: CONCENTRATIEVERLOOP CO₂ IN HOTELKAMER 706. OP DE X-AS DE TIJD IN MINUTEN (MET T₀ = 08:00 UUR), OP DE Y-AS DE CONCENTRATIE CO₂ UITGEDRUKT IN PPM (PARTS PER MILLION).

DISCUSSIE

Het gevonden ventilatievoud is zeer laag. Dit is enigszins te verklaren uit de weersomstandigheden tijdens de meting. Het temperatuurverschil tussen binnen en buiten was op het moment erg klein zodat de thermische trek door de ventilatieopening beperkt was. Het effect van eventuele warmteproducerende bronnen zoals lichamen, wat voor thermische trek zou kunnen zorgen, wordt gecompenseerd door het smelten van ijs. Hierdoor wordt een constante lage temperatuur

bereikt. Voorts was er buiten weinig tot geen wind. De dakopening was zoals reeds is opgemerkt voor een deel bedekt met sneeuw. Op grond van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten, wat tijdens de metingen varieerde tussen 3 en 7°C, zou een ventilatiestroom van 18 tot 25 m³/h verwacht worden door het ventilatiekanaal. Blijkbaar was het ventilatiekanaal verder met sneeuw geblokkeerd dan visueel was vast te stellen.

Uit luchtsnelheidsmetingen die ten behoeve van comfortmetingen zijn uitgevoerd bleek dat de gevonden snelheden dermate laag waren dat uitwisseling van lucht via de deuropening zeer gering moet zijn geweest. Door deze feiten zou gesteld mogen worden dat hier sprake was van een worst case scenario.

De norm voor de maximaal aanvaardbare concentratie (MAC-waarde) CO₂ is in Nederland 5000ppm. De meeste van de in het ijshotel gevonden concentraties bevinden zich onder de MAC-waarde, hoewel tijdens de nacht deze waarde enkele keren is overschreden. Het grootste gedeelte van de gemeten concentraties zijn lager. Dit wil echter niet zeggen dat de waarden acceptabel zijn. De Rijksgebouwendienst hanteert in hun publicatie "Bouwfysische kwaliteit Rijkshuisvesting, Wettelijke eisen en Rgd-richtlijnen, september 1999"¹ namelijk de volgende richtlijnen; voor een goede luchtkwaliteit wordt een concentratie van minder dan 1000ppm aanbevolen, met een grenswaarde van 1200ppm. Er is voorts een incidentele afwijking van 1500ppm toegestaan bij een tijdelijk verhoogde productie van CO₂. Aan al deze waarden wordt niet voldaan. Er bestaat ook een richtwaarde op basis van de samenhang van CO₂ met geuren. Deze waarde bedraagt ruim 1100ppm. Deze waarde wordt in het ijshotel ruimschoots overschreden. In het hotel is sprake van stankoverlast, zoals door alle deelnemers is geconstateerd. Dit is waarschijnlijk afkomstig van menselijke bronnen en niet van uitdamping uit bouwmaterialen zoals sneeuw en ijs. Een persoon in rust produceert tijdens de ademhaling zo'n 70g CO₂ per m³ uitgedemde lucht. De ademhaling bedraagt zo'n 0,5m³/h. Dit levert dus 35 gram per uur. De benodigde ventilatie per persoon om niet boven 2g/m³ uit te komen is 18m³/h. Per persoon is er in de hotelkamer per uur slechts 0,24m³ verse lucht beschikbaar. Ter vergelijking: het Bouwbesluit stelt een eis van 25,2 m³/h/persoon, wat tevens de wettelijke richtlijn voor woningbouw is in Nederland, en de Arbo-wet stelt een minimale luchtverversing van 30 m³/h/persoon. De in het ijshotel gevonden waarde is ruim onvoldoende. Behalve stankoverlast kunnen bezoekers ook last krijgen van prikkelende ogen, vermoeidheid en een gevoel van lusteloosheid.

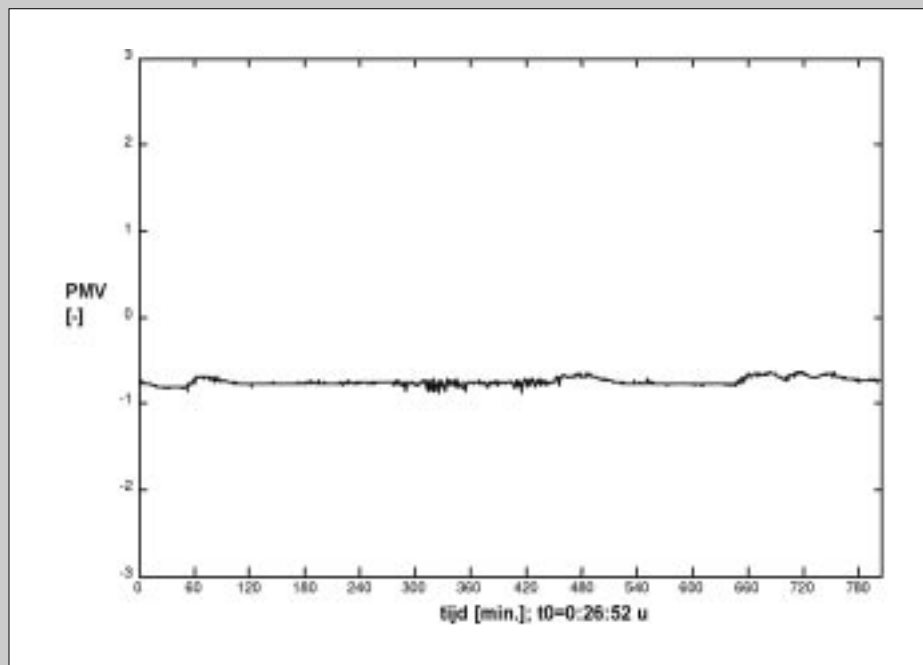
Ondanks de beperkte verblijftijd van de meeste gasten in het ijshotel, zou men bij het ontwerp voor komend seizoen meer aandacht aan de luchtkwaliteit moeten besteden. De luchtkwaliteit is slecht, voornamelijk door de geringe beschikbaarheid van doeltreffende ventilatiemogelijkheden. Een suggestie voor het nieuwe ontwerp zou kunnen zijn dat er luchtafvoerkanalen in het plafond worden aangebracht die minder snel dichtsneeuwen.

Het eventueel toepassen van mechanische ventilatie zou tot een betere en constante luchtkwaliteit kunnen lijden. Men moet dan wel voorkomen dat eventuele luchtstromen leiden tot een verminderde behaaglijkheid van de gasten.

¹) <http://www.rijksgebouwendienst.nl/bouwfys/Bouwfysica.htm>

PMV GEDURENDE HET VERBLIJF IN EEN KAMER IN HET IJSHOTEL

In kamer 706 in het ijshotel zijn gedurende het verblijf de luchtsnelheid, luchttemperatuur, stralingstemperatuur, relatieve vochtigheid en concentratie CO₂ gemeten. De gemiddelde luchtsnelheid over de meetperiode bedroeg 0,105 m/s, de gemiddelde luchttemperatuur -3,8 °C en de gemiddelde stralingstemperatuur -4,3 °C. Op basis van deze parameters, een gemiddeld metabolisme van 120 W/m² (staande persoon, die metingen uitvoert) en de warmteweerstand van de kleding (dikke winterkleding), waarvoor 2 clo is aangehouden, is de Predicted Mean Vote (PMV), conform Fanger, bepaald. Het resultaat is weergegeven in de onderstaande grafiek.



FIGUUR 1: PMV IN KAMER 706 VAN HET IJSHOTEL, UITGEZET TEGEN DE TIJD (START-TIJD 0.26 UUR OP 12 FEBRUARI 2002)

handen en neus, niet apart in het waarde-oordeel is verwerkt. Dit blijkt ook uit een vergelijking met de enquêteresultaten. De onderzoeksresultaten zijn in de onderstaande tabellen samengevat.

TABEL 1: ENQUÊTERESULTATEN; PMV GEMIDDELD OVER 18 PROEFPERSONEN

tijdstip	omgeving	PMV
dag 1	binnen	-1,6
	buiten	-1,2
nacht	binnen	-2,1
dag 2	binnen	-1,2
	buiten	-1,7

TABEL 2: ENQUÊTERESULTATEN; PMV GEMIDDELD OVER 18 PROEFPERSONEN

lichaamsdeel	PMV
romp	0,7
voeten	-1,4
neus	-1,4
wangen	-1,1

TABEL 3: VERGELIJKING RESULTATEN VAN DE VERSCHILLENDE BEPALINGSMETHODEN

enquête	Fanger	Gagge			
PMV	PMV	PMV	PPD	DISC	TSENS
-1,2	-0,8	-0,77	18	-1,74	-0,08

De PMV bedroeg gemiddeld -0,8, hetgeen ongeveer overeenkomt met het waarde-oordeel "lichtelijk koel".

Enquête

Door middel van een enquête onder de 18 deelnemers aan de meetexpeditie is de ervaring van het thermisch binnenklimaat aan de hand van de ASH-REA-7-puntsbeoordelingschaal (PMV) vastgelegd. De aldus bepaalde PMV-indices zijn vergeleken met de bepaling van de PMV, conform de modellen van Fanger (zie boven) en Gagge, hoewel geen van beide modellen ontwikkeld is voor (extrem) koude klimaatomstandigheden. De modellen geven een te positief

waarde-oordeel, aangezien het effect van relatief koude lichaamsdelen, zoals de voeten,

LICHT IN HET IJSHOTEL



ir. Marieke Krijnen, thans werkzaam bij Grontmij | Bravenboer & Scheers.
Hanneke van Schijndel

De gedachte aan een ijshotel roept een sprookjesachtig beeld op en schept hoge verwachtingen met betrekking tot vormgeving, materiaalgebruik en verlichting. Bovendien maakt het extreme klimaat op 150 kilometer boven de poolcirkel qua daglicht nieuwsgierig naar de toegepaste oplossingen. Daglichttoetreding vindt plaats via puien van ijs en voor aanvullende verlichting wordt gebruik gemaakt van spots en kaarsen. De ruimten in het ijshotel komen op de bezoeker licht over. Dit in tegenstelling tot wat de meetresultaten laten zien. Door meer gebruik te maken van lichttechnische mogelijkheden zou het bijzondere karakter van een dergelijk gebouw beter tot zijn recht kunnen komen.

INLEIDING

Het ijshotel dat in het extreme klimaat op 150 kilometer boven de poolcirkel is gebouwd, vormt een interessant onderwerp om metingen uit te voeren aan de toegepaste lichttechnische oplossingen. De invloed van licht in een ijshotel roept veel vragen op. Twee elementen maken het gebruik van licht in een dergelijk bijzonder gebouw interessant: (1) de beleving en (2) de invloed van de gebruikte materialen. Hoe wordt ijs toegepast zó dat er een prettige ruimte ontstaat? Wat gebeurt er met het ijshotel als het donker begint te worden? Maar ook, wat is de verlichtingssterkte ten gevolge van ijs en sneeuw? Wat is de LTA van ijs? Voldoet het ijshotel aan ons Bouwbesluit, of mag men het ijshotel helemaal niet aan het Bouwbesluit toetsen? Dit onderzoek is gebaseerd op deze en andere vragen.

Een bezoek aan het ijshotel is een niet alledaagse ervaring. Licht speelt een belangrijke rol bij de sfeerbeleving in een dergelijk speciaal gebouw. Alvorens ingegaan wordt op de lichttechnische aspecten zal – middels een rondwandeling – een idee gegeven worden van de verschillende ruimten in het ijshotel.



FIGUUR 1: INANGANG IJSHOTEL



FIGUUR 2: INRICHTING KAMER

EEN WANDELING DOOR HET IJSHOTEL

De voorgevel van het ijshotel bestaat uit een opeenstapeling van ijsblokken. In het midden van de gevel zit een grote, houten deur bekleed met rendierhuiden (figuur 1). Iets verder naar links bevindt zich de ingang van het kapelletje.

De deur gaat open en daarmee opent zich de wereld van het ijshotel. De entree bestaat uit een grote gang met kolossale ijskolommen. Aan het begin van de gang bevindt zich de balie van het ijshotel. Deze balie is vervaardigd uit ijs. Ook staat er een bank van ijs met daarop een rendiervel. De gang wordt van daglicht voorzien door twee ijspuien die zich bevinden aan de voor- en achterkant van de gang. Kunstlicht wordt slechts toegepast om de ijssculpturen aan te lichten. Er is geen aanvullende werkverlichting aanwezig bij de balie.

Vanuit de centrale gang kan men de gangen naar de hotelkamers bereiken. Deze gangen zijn niet van daglicht voorzien. Aan weerszijden van de gangen liggen de hotelkamers. Er is geen daglichttoetreding in deze hotelkamers, op enkele uitzonderingen na. Door middel van kaarsen wordt hier in de lichtbehoefte voorzien.

De kamers zijn grofweg in te delen in twee typen. Het ene type is de "iglo". Dit zijn inpanidige ruimtes van sneeuw met daarin alleen een bed. Deze kamers hebben geen daglichtopening en worden door kaarsen en een indirecte gekleurde TL-verlichting onder het bed verlicht. De andere kamers zijn een stuk luxueuzer en ingericht door verschillende kunstenaars. In deze kamers is vaak gebruik gemaakt van een combinatie van daglicht en kunstlicht. Elke kamer is anders en volgens een bepaald thema ingericht. Zo wordt in de ene kamer gebruik gemaakt van blauw licht om de golven van de



FIGUUR 3: INRICHTING KAMER

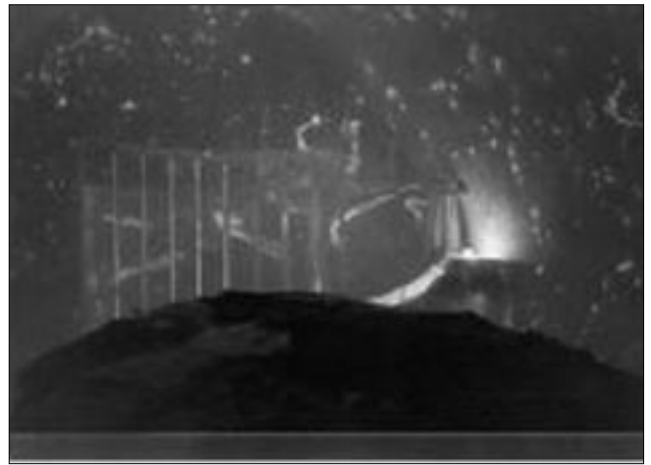
zee na te bootsen. In een andere kamer kan de gast zijn eigen sfeer kiezen door met een mengpaneel de muziek en de kleur van het licht aan te passen. In deze laatste kamer werd ook gebruik gemaakt van een special effect met black light. In de figuren 2 t/m 5 zijn foto's opgenomen van verschillende inrichtingen van hotelkamers.

In het midden van het ijs hotel is een tentoonstellingsruimte ingericht met ijssculpturen. De reeks sculpturen is gemaakt door de kunstenaar Lena Kriström. De belichting van de sculpturen is niet erg bijzonder. De sculpturen zijn meestal alleen belicht door een spotje. In de kamers is er meer bijzondere verlichting toegepast dan in de expositiegang.

Het ontmoetingspunt van het ijs hotel is de bar. De bar is gesitueerd onder een grote koepel van ongeveer 14 meter hoog. In het midden van de ruimte staat een ronde bar vervaardigd



FIGUUR 4: INRICHTING KAMER



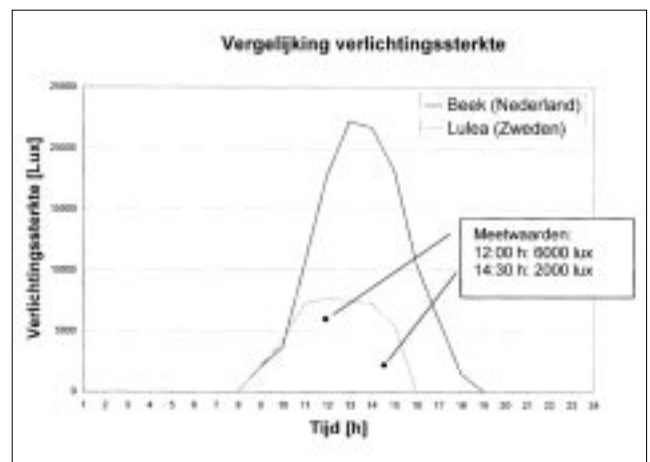
FIGUUR 5: INRICHTING KAMER

van ijs. De bar wordt belicht met een kroonluchter van ijs. De kroonluchter is opgebouwd uit kleine lampjes en ijsdruppels. Door de reflecties van het licht in de ijsdruppels ontstaat er een bijzondere manier van verlichten. De bar wordt van binnen uit verlicht. Er is geen daglichttoetreding.

Het ijs hotel is niet ingericht om er te werken of te lezen. De kamers zijn alleen voorzien van een bed. Een tafel en een stoel ontbreken. De aanwezige verlichtingssterkte in de kamers is laag, maar hoog genoeg om je te oriënteren in de ruimte.

VERLICHTINGSSTERKTE IN HET VRIJE VELD

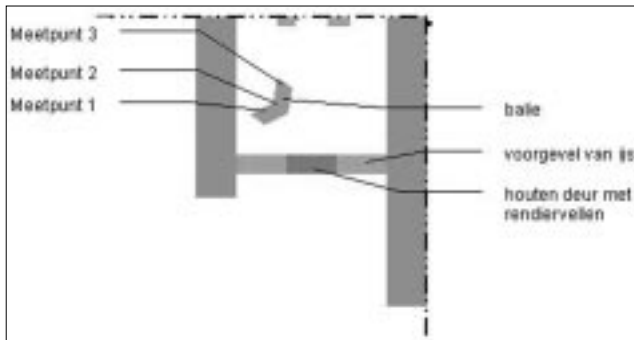
De zon komt in Zweden en in Nederland ongeveer op dezelfde tijd op. De maximale verlichtingssterkte is in Zweden aanzienlijk lager dan in Nederland. Onderstaande grafiek geeft de verlichtingssterkte op 11 februari weer ter plaatse van de meteostations in Beek (Nederland) en Lulea (Zweden). Deze meteostations liggen het dichtst bij Eindhoven respectievelijk Kiruna. De in de grafiek gepresenteerde waarden zijn verkregen met behulp van het programma Meteororm 4.0. De meetwaarden komen aanzienlijk lager uit dan die van Meteororm. Een mogelijke oorzaak hiervoor kan zijn dat de metingen uitgevoerd zijn terwijl de hemel zwaar bewolkt was. Er moet echter wel een kanttekening geplaatst worden bij deze vergelijking: er was geen mogelijkheid om in het vrije veld te meten.



FIGUUR 6: VERGELIJKING VAN DE VERLICHTINGSSTERKTE IN BEEK (NEDERLAND) EN LULEA (ZWEDEN) OP 11 FEBRUARI

VERLICHTINGSSTERKTE ENTREE

De receptie van het ijshotel bevindt zich niet in het ijshotel zelf, maar in een ander gebouw. Bij de balie in het ijshotel beginnen de rondleidingen, kan entree betaald worden en kunnen bezoekers terecht voor informatie. De taken van een balie-medewerker beperken zich tot het wisselen van geld en het informeren van bezoekers. In Nederland ligt de norm voor werkverlichting tussen 200 en 800 lux [1]. De werkzaamheden van de balie-medewerker zijn echter zodanig, dat er volgens NEN 1890 [2] volstaan kan worden met 200 lux. Hiermee kunnen grove details waargenomen worden.



FIGUUR 7: SCHEMATISCHE PLATTEGROND VAN DE ENTREE

TABEL 1: MEETWAARDEN VERLICHTINGSSTERKTE IN DE ENTREE

	Norm [lux]	Meetpunt 1 [lux]	Meetpunt 2 [lux]	Meetpunt 3 [lux]
11:45 h	200	650	550	510
15:00 h	200	100	76	64

Om 11:45 uur voldoet de verlichtingssterkte aan de minimaal vereiste waarde.

Om 15:00 uur is de verlichtingssterkte zover gedaald tot een niveau dat geklassificeerd wordt als oriëntatieverlichting. Om ook 's middags goed te kunnen werken achter de balie is dus aanvullende verlichting nodig.

VERLICHTING SLAAPKAMER

Verlichtingssterkte

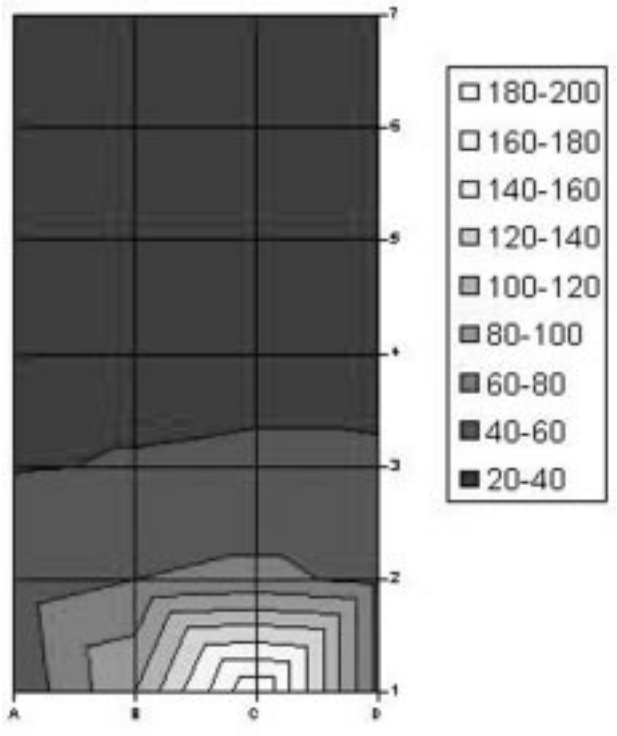
In een van de slaapkamers is de verlichtingssterkte gemeten. Hoewel deze ruimte als licht ervaren werd, toonden meetresultaten het tegendeel aan. Tijdens de schemerperiode werden de contrasten kleiner. Hierdoor waren de elementen van ijs minder goed van de achtergrond te onderscheiden. De gemeten verlichtingssterkte komt volgens Nederlandse normen overeen met oriëntatieverlichting. Dit is verlichting in de ruimte die niet of slechts kortdurend als werkruimte wordt gebruikt en waar de visuele taak niet moeilijk is.

Gelijkmatigheidsindex

De gelijkmatigheidsindex definieert de variatie in de verlichtingssterkte over de ruimte.

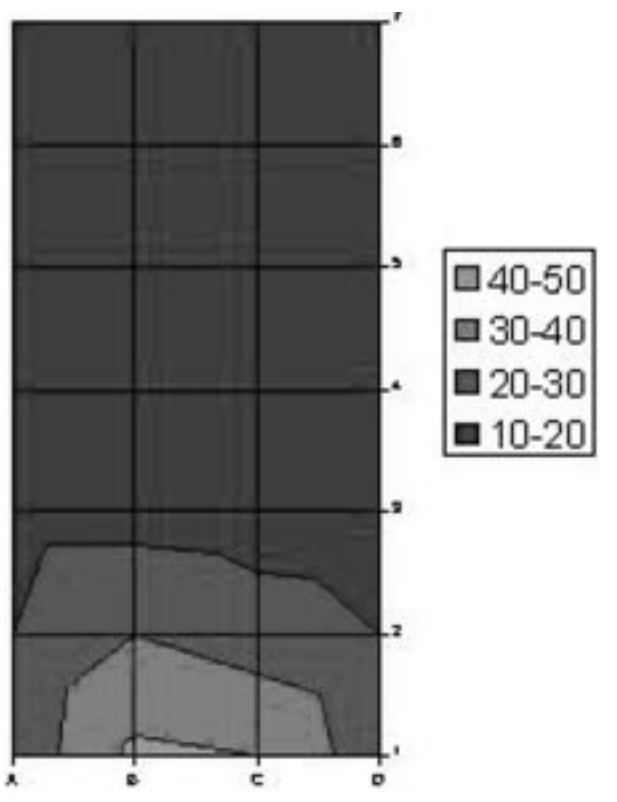
$$g = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$$

Tijd: 11:45 uur.
 $E_{\text{buiten}} = 6000 \text{ lux}$



FIGUUR 8: VERLICHTINGSSTERKTE IN LUX OM 11:45 H IN SLAAPKAMER, ZIE FIGUREN 2 EN 13

Tijd: 14:30 uur
 $E_{\text{buiten}} = 2000 \text{ lux}$



FIGUUR 9: VERLICHTINGSSTERKTE IN LUX OM 14:30 H IN SLAAPKAMER, ZIE FIGUREN 2 EN 13

Voor de slaapkamer ligt de gelijkmatigheidsindex tussen de 0,5 en 0,6 en is afhankelijk van de verlichtingssterkte buiten. In de NEN 1890 [2] wordt uitgegaan van gelijkmatigheidsindexen die variëren tussen de 0,75 en 0,85.

Daglichtfactor

De verhouding tussen de optredende verlichtingssterkte binnen en de verlichtingssterkte op een horizontaal vlak in het vrije veld wordt de daglichtfactor genoemd.

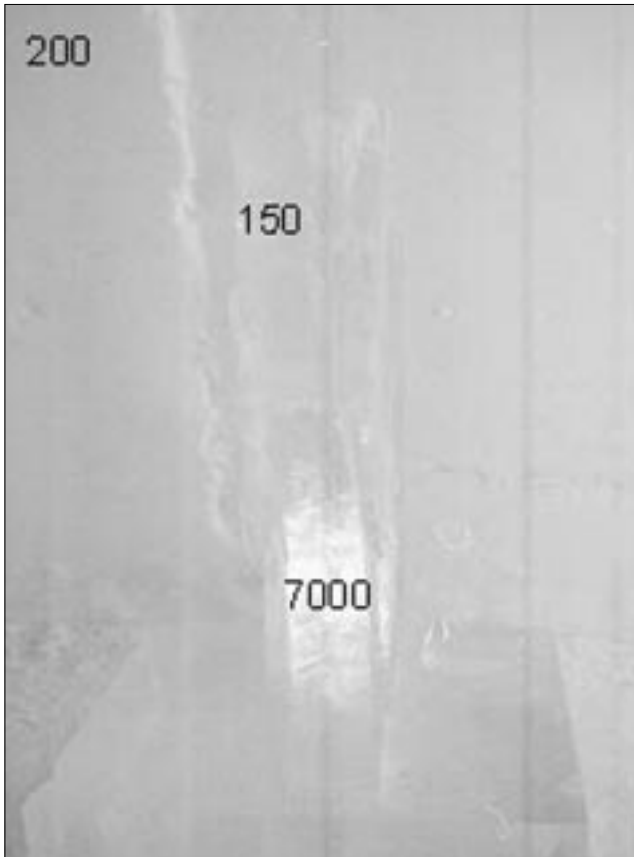
$$T_D = \frac{E_{binnen}}{E_{buiten}}$$

De daglichtfactor in de slaapkamer varieert met de verlichtingssterkte buiten en is gelijk aan: $T_D = 0,0075 - 0,0088$.

LUMINANTIE

De sculpturen worden zowel overdag als 's avonds aangelicht met halogeenspots. De ijssculpturen komen 's avonds beter tot hun recht. Door het ontbreken van daglicht ontstaat er een interessant spel tussen de belichte en onbelichte delen.

Onderstaande foto's van de sculpturen laten het verschil zien tussen de dagsituatie (13:00 h) en de avondsituatie (20:30 h). In de foto's zijn de bijbehorende luminanties vermeld. Bij het meten van de luminanties zijn telkens drie punten genomen. Het eerste punt is het punt waar de hoogste luminantie gemeten wordt ten gevolge van het halogeenspotje dat op de sculptuur schijnt. Het tweede punt is op een donkere plek op de sculptuur zelf. Het derde punt is op de wand achter of naast de sculptuur genomen.



FIGUUR 10: DE LUMINANTIE OM 13:00 H OP EN IN DE OMGEVING VAN EEN SCULPTUUR



FIGUUR 11: DE LUMINANTIE OM 20:30 H OP EN IN DE OMGEVING VAN EEN SCULPTUUR

REFLECTIEFACTOREN

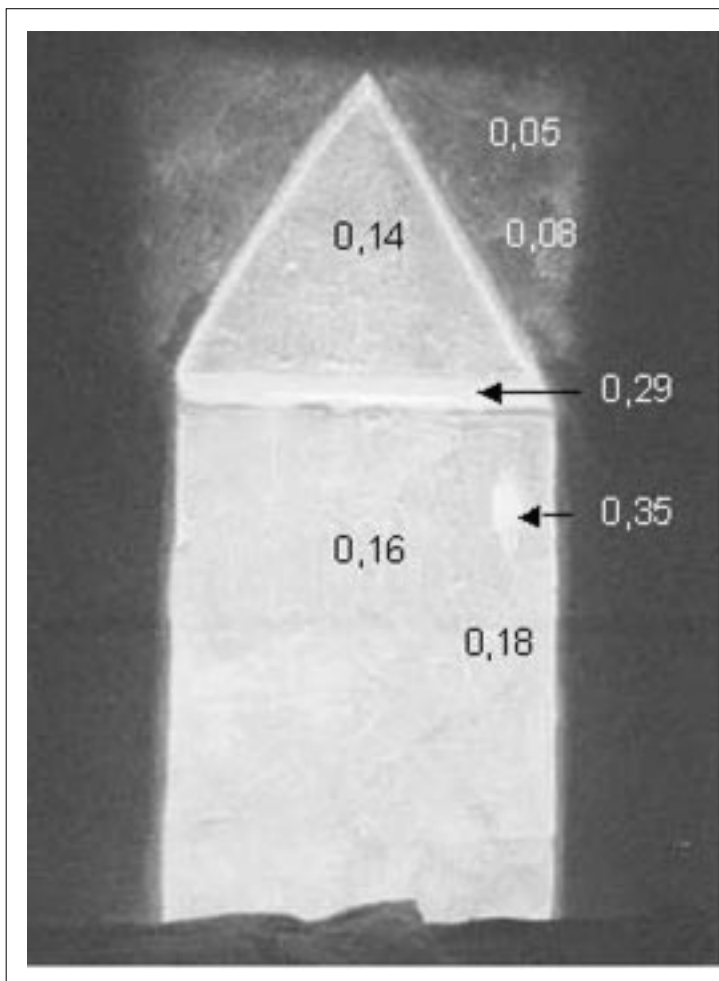
Zowel de wanden, het plafond als de vloer zijn vervaardigd uit sneeuw. De reflectiefactoren van al deze vlakken zullen dan ook ongeveer even groot zijn. Voor verse sneeuw wordt een reflectiefactor van 0,75 opgegeven en voor oude sneeuw een factor 0,65 [3]. De vloer van het ijshotel is schoongehouden dus ook voor de vloer mag een hoge reflectiefactor aangenomen worden.

In de gebouwde omgeving komen over het algemeen geen vloeren voor met zo'n hoge reflectiefactor (maximaal 0,4). Het voordeel van een hoge reflectiefactor van de vloer is dat het verlichtingsrendement enorm stijgt, waardoor de ruimte veel lichter lijkt.

In het ijshotel is dit fenomeen duidelijk waarneembaar. Hoewel de ruimtes erg licht lijken, wijzen metingen uit dat de verlichtingssterkte erg laag is. In bijvoorbeeld de ijsbar is de hoogst gemeten waarde 30 lux. Gemiddeld is de verlichtingssterkte in deze ruimte slechts 5 lux. Dit komt overeen met een donker bruincafé.

LTA-WAARDE

De lichtdoorlaatfactor (LTA-waarde) van ijs is bepaald voor twee verschillende ijswanden. Dit is gedaan door tegelijkertijd de verlichtingssterkte aan de binnen- en buitenkant van de ijswand te meten met behulp van twee verlichtingssterktemeters.



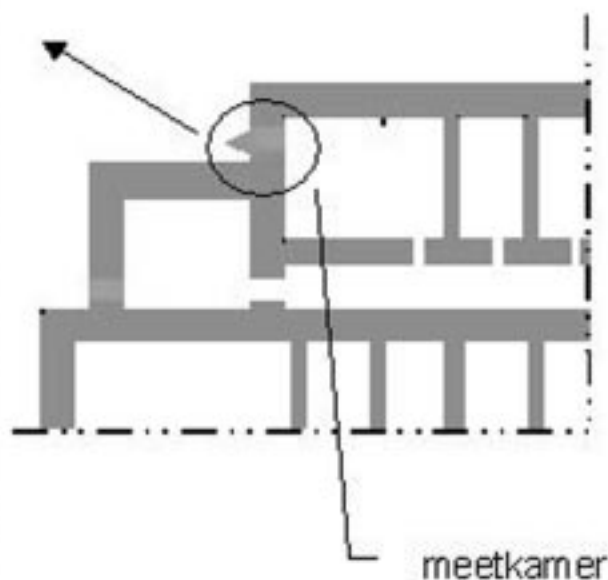
FIGUUR 12: LTA AANGEGEVEN OP DE IJSPUI

De ijswand bij de entree is opgebouwd uit ijsblokken met een dikte van ongeveer 200 mm. De ijsblokken zijn vervaardigd uit ijs dat uit de nabij gelegen rivier gehaald is. De LTA-waarde van deze blokken varieert tussen de 0,44 en 0,6. Deze variatie kan verklaard worden door de inhomogeniteit van het materiaal. De LTA-waarde van deze ijspui komt overeen met een LTA-waarde van glazen bouwstenen en wit diffuus glas [3]. De ijspuien zijn wel translucet, maar niet transparant.

De ijswand in de slaapkamer (zie bovenstaande foto) is uit een blok ijs gehouwen. De doorsnede van deze ijswand is te zien in figuur 12. De LTA-waarde is door de variabele dikte van het ijs afhankelijk van de positie. De LTA-waarde van deze ijswand varieert tussen de 0,05 en 0,35. De hoogste waarde is gemeten op een positie waar het laagje opgevroren condens van de ijswand verwijderd is. Deze waarde is bijna twee keer zo groot als de LTA-waarde van ijs van gelijke dikte maar dan met daarop een laagje opgevroren condens. De LTA-waarde van 0,35 komt overeen met die van melkglas. De LTA-waarde van 0,16 - 0,18 komt overeen met die lichte gordijnstof (0 - 7% open).

CONCLUSIES

Er is niet op uitgebreide schaal gebruik gemaakt van licht in het ijshotel, terwijl licht toch erg belangrijk is in een dergelijke bijzondere omgeving. Sculpturen zijn minimaal belicht en ook in de slaapkamers is weinig gebruik gemaakt van licht.



FIGUUR 13: SCHEMATISCHE PLATTEGROND VAN DE SITUATIE

De verlichtingssterkte in de verschillende ruimtes is erg laag. Door toepassing van materialen met een hoge reflectiefactor wordt dit echter niet als hinderlijk ervaren. Het (gebrek aan) licht in het ijshotel zorgt voor een bijzondere, mysterieuze sfeer.

Het ijshotel is vanwege het thermisch comfort niet geschikt om gedurende langere perioden als verblijfsruimte te dienen. Het ijshotel is echter ook niet bedoeld als louter functioneel gebouw, maar meer als een experiment. Hierdoor is de waarde van een goede verlichting van ondergeschikt belang. Het voldoen aan bijvoorbeeld het Bouwbesluit en andere Nederlandse normen is om dezelfde reden geen reële eis.

De verlichtingssterkte ter plaatse van de balie is hoog in vergelijking met de andere ruimtes in het ijshotel. Dit komt door de grote wand van ijs die zorgt voor veel daglicht. De LTA van deze wand is ongeveer gelijk aan 0,55, te vergelijken met melkglas. De LTA neemt sterk af bij toenemende ijsdikte. Na verloop van tijd vormt zich een laagje rijp op het ijs. Dit zorgt ook voor een afname van de LTA.

Ter plaatse van de sculpturen had – tijdens de meting in de avonduren – de achtergrond slechts een verlichtingssterkte van 5 lux. Een fel punt op het sculptuur had daarbij een verlichtingssterkte van 7000 lux. Men zou denken dat dit erg hinderlijk aan de ogen zou zijn. Er treedt echter geen verblindingshinder op. Dit is verwonderlijk, aangezien de verhoudingen meer dan 1:1000 zijn. Nergens in het ijshotel is dit

het geval, ondanks dat veel vlakken relatief grote hoeveelheden licht doorlaten en reflecteren. Een verklaring hiervoor is dat alle vlakken diffuus zijn. Het licht wordt hierdoor in alle richtingen gereflecteerd en concentreert zich niet op één punt. Hierdoor verlopen de overgangen van licht naar donker geleidelijk.

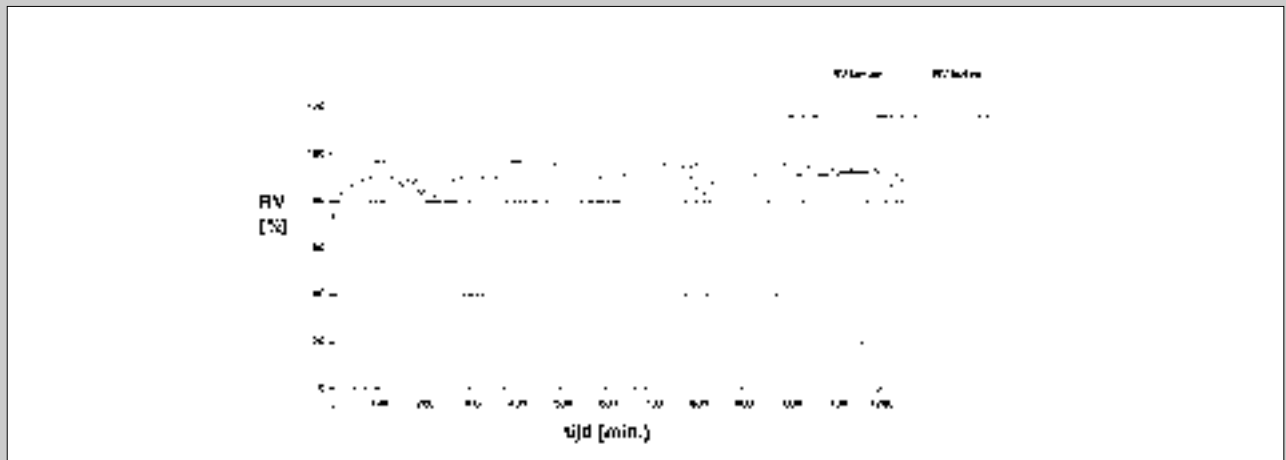
In tegenstelling tot de verwachtingen werden de ruimten in het ijshotel ervaren als erg monotoon. Slechts in een enkele ruimte wordt met lichteffecten gespeeld, waardoor de ruimte veel meer allure krijgt. Er is veel aandacht besteed aan de inrichting van het ijshotel, maar helaas geldt dit niet voor de verlichting. Naar onze mening is dit een gemiste kans.

LITERATUURLIJST

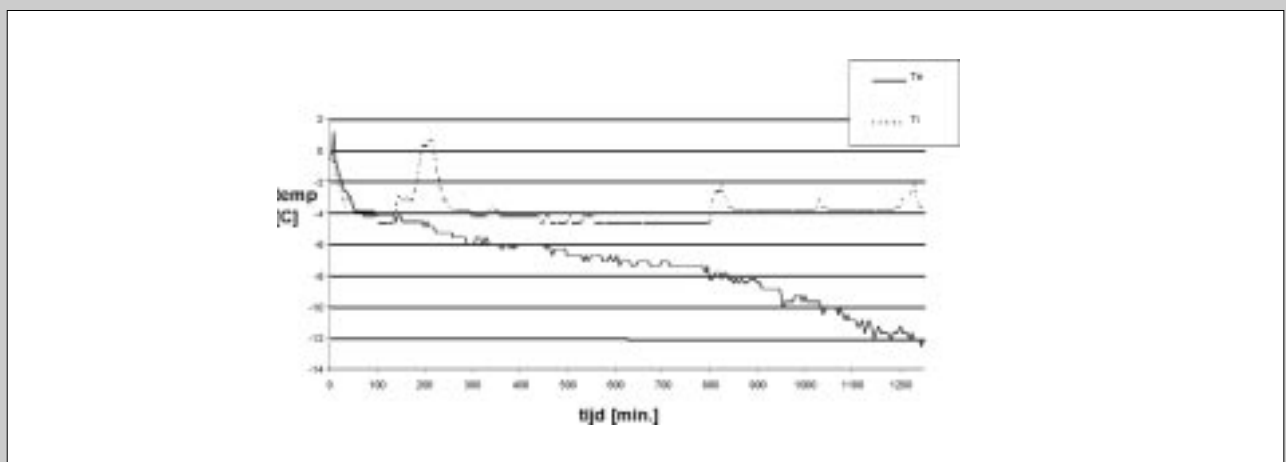
- [1] NEN 3087, Visuele ergonomie in relatie tot verlichting, principes en toepassingen, Nederlands Normalisatieinstituut (NNI), Delft (1991)
- [2] NEN 1890, Binnenverlichting, functionele eisen, Nederlands Normalisatieinstituut (NNI), Delft (1991)
- [3] Rutten, A.J.F., Diktaat Bouwfysica Licht, Technische Universiteit Eindhoven, 1996
- [4] Handbuch für Beleuchtung, 4, völlig neu bearbeitete auflage, Verlag W. Girardet, Essen 1975, pp 321-323: Hotel
- [5] Illuminating Engineering Society of North America, IES Handbook, 1981
Application volume, pp 7-17 t/m 7-25: Hotel/motel and food service facilities
- [6] Internationale Licht-Rundschau 14, 1963, 6, pp 186-232: Beleuchtung von Hotels und Restaurants

GEGEVENS BINNEN- EN BUITENKLIMAAT IJSHOTEL

Gedurende de hele meetexpeditie zijn de luchttemperatuur en relatieve vochtigheid geregistreerd. De gegevens gedurende een etmaal tijdens het verblijf in het ijshotel zijn in de onderstaande grafieken opgenomen.



FIGUUR 1: RELATIEVE VOCHTIGHEID BUITEN EN BINNEN, UITGEZET TEGEN DE TIJD (OP 11/12 FEBRUARI 2002)



FIGUUR 2: LUCHTTEMPERATUUR BUITEN (T_e) EN BINNEN (T_i), UITGEZET TEGEN DE TIJD (OP 11/12 FEBRUARI 2002)

BEPALING WARMTEGELEIDINGS- COËFFICIËNT VAN SNEEUW EN IJS



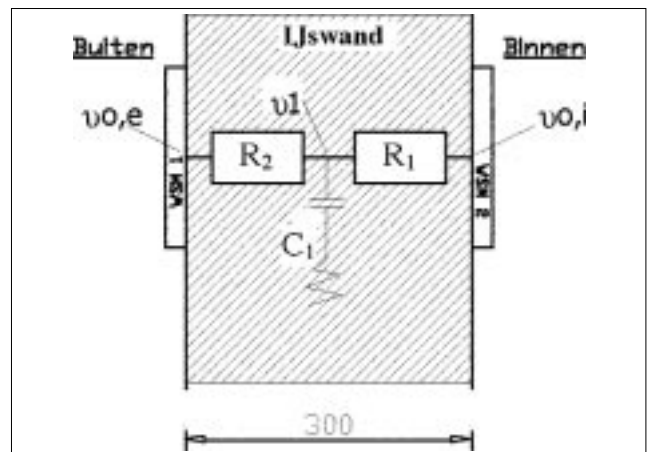
ir. Dionne Neilen, thans werkzaam bij Technische Universiteit Eindhoven, vakgroep FAGO
ir. Vivian Timmermans, thans werkzaam bij Prinssen Bus en Partners

In het ijshotel in Jukkasjärvi zijn metingen uitgevoerd aan een sneeuw- en een ijswand om zodoende de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ -waarde) van sneeuw en ijs te bepalen. De metingen zijn uitgevoerd met behulp van warmtestroommeters en PT100 temperatuursensoren en een GRANT Squirrel 1200 datalogger.

INLEIDING

In het verleden is er bij de Capaciteitsgroep FAGO onderzoek gedaan naar de warmteweerstand van sneeuw en ijs. Uit experimenten bleek dat het moeilijk was een eenduidig getal voor deze warmteweerstand te verkrijgen. De samenstelling van sneeuw en ijs is nooit precies hetzelfde, de materiaaleigenschappen dus ook niet. Toen er gesproken werd over een meetexpeditie naar het ijshotel in Jukkasjärvi, was het idee dan ook snel geboren om de uitdaging aan te gaan en in de praktijk te gaan meten aan constructies die bestaan uit sneeuw en ijs.

Na een aantal bijeenkomsten is besloten om te proberen de warmteweerstand van sneeuw en ijs te bepalen. Dit is geprobeerd door de warmtestroom en de oppervlaktetemperaturen van een sneeuw- en een ijswand te meten.



FIGUUR 1: POSITIE MEETSENSOREN

Uitleg symbolen figuur 1:

- $\theta_{o,e}$ = oppervlaktetemperatuur buiten
- θ_1 = temperatuur in knooppunt
- $\theta_{o,i}$ = oppervlaktetemperatuur binnen
- R_1, R_2 = warmteweerstand van de wand
- C_1 = capaciteit van de wand
- WSM1, 2 = warmtestroommeters

METHODE

Onder stationaire omstandigheden is de warmteweerstand van een constructie te bepalen uit het temperatuurverschil ($\Delta\theta$) over de constructie en de warmtestroomdichtheid (q) door de constructie, zie formule (1).

$$R_c = \frac{\Delta\theta}{q} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (1)$$

Onder dynamische omstandigheden moet bovenstaande formule over de tijd geïntegreerd worden. Zodoende wordt er een gemiddelde R_c -waarde berekend uit het gemiddelde temperatuurverschil en de gemiddelde warmtestroomdichtheid.

De meting is uitgevoerd door twee warmtestroommeters aan weerskanten van de constructie tegenover elkaar te plaatsen. Daarmee worden de warmtestromen aan het binnen- en buitenoppervlak door de constructie gemeten. Gedurende dezelfde meetperiode worden de oppervlaktetemperaturen aan de binnen- en buitenzijde van de constructie gemeten met behulp van PT100 temperatuursensoren (zie figuur 1). Uit deze meetwaarden is vervolgens getracht de warmteweerstand voor de constructie te bepalen.

λ -WAARDE VAN IJS

De eerste constructie waarvan de λ -waarde bepaald is bestaat uit ijs en is ca 300 mm dik. Deze ijswand is een buitenwand van de hoofdgang van het ijshotel. Aan de buitenzijde van de constructie heerst het buitenklimaat en aan de binnenzijde van de constructie heerst het binnenklimaat (het binnenklimaat varieert tussen -5 en -7°C).

Doordat de buitentemperatuur voortdurend varieert (van ca -8°C overdag tot ca -12°C 's nachts), en het een vrij dikke wand betreft, is gedurende de meting geen stationaire situatie bereikt over de ijswand. Om de λ -waarde van het ijs toch te kunnen bepalen is daarom met behulp van een eerste orde model een simulatie gemaakt van de gemeten periode.

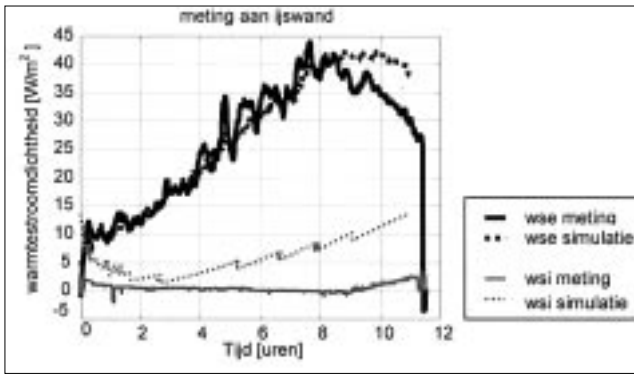
Onderstaande vergelijking is voor de simulatie in MatLab gebruikt.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_{o,e} - 2 \cdot \theta(1) + \theta_{o,i}}{R_{1+2} \cdot C_1} \quad \text{met} \quad R_{1+2} = R_1 + R_2 = \frac{d}{\lambda}$$

$$C_1 = \rho \cdot c \cdot d$$

- $d = 0,30$ [m]
- λ = nader te bepalen
- $\rho = 917$ [kg/m^3]
- $c = 2200$ [J/kgK]

Aan het binnen- en buitenoppervlak van het model zijn de oppervlaktetemperaturen opgelegd die gemeten zijn gedurende een periode van 12 uur. Het simulatieprogramma bepaalt hieruit de warmtestroomdichtheid van de constructie over weerstand 1 en 2. Dit resulteert in een warmtestroom aan de binnenzijde van de constructie en aan de buitenzijde van de constructie (wsi respectievelijk wse). In deze simulatie wordt de waarde voor de λ -waarde van het ijs aangepast totdat het simulatieresultaat en de meetwaarden over elkaar vallen en dus de warmtestroomdichtheid door de constructie verkregen is (zie figuur 2). Op deze manier wordt de λ -waarde van de constructie bepaald.



FIGUUR 2: METING EN SIMULATIE VAN DE WARMTESTROOMDICHTHEID DOOR DE IJSWAND

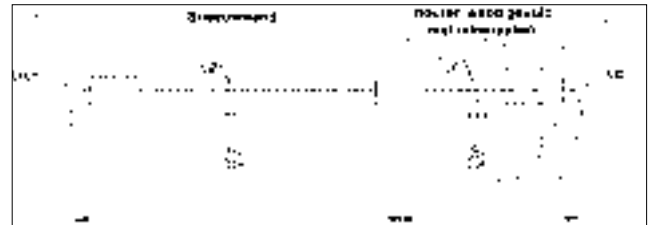
In figuur 2 is zichtbaar dat de simulatie van de warmtestroom aan de binnenzijde (wse) na ca 8 uur afwijkt van de gemeten warmtestroom. Dit komt omdat het om ca 8 uur 's ochtends weer licht wordt. De opvallende zonnestraling zorgt ervoor dat de warmtestroom door de constructie afneemt. Met deze zonnestraling is in de simulatie overigens geen rekening gehouden en dit resulteert dus in een afwijkende warmtestroom. Na ca. 11 uur is de meting afgebroken en is dus een terugval van de wse zichtbaar.

De λ -waarde voor ijs die uit onze simulaties volgt bedraagt ca. 2,1 W/m.K en ligt in de zelfde orde van grootte als de in de literatuur gegeven waarde (2,1 – 2,5 W/m.K). Vanwege het instationaire karakter is het zeer moeilijk om een foutenanalyse uit te voeren.

λ -WAARDE VAN SNEEUW

Voor de bepaling van de λ -waarde van sneeuw is een zelfde meting verricht als voor de ijswand. Er was echter geen sneeuw wand beschikbaar waarbij de kabeltjes van de meet-sensoren door de constructie heen gevoerd konden worden. Daarom is gezocht naar een plek waarbij de sensoren wel op de datalogger aangesloten kon worden. Deze plek is bij de toiletten gevonden. De wand tussen de toiletten en de gang van het ijshotel bestond uit een houten – met minerale wol geïsoleerde – constructie (370mm dik) die tegen een sneeuw wand (720mm dikte) was aangebracht (zie figuur 3).

Aan de kant van de toiletten heerste een temperatuur van 8°C, in de gang van het ijshotel een temperatuur van -5°C. Om de temperatuur aan beide zijden van de constructie niet te veel te beïnvloeden zijn de toiletten tijdelijk afgesloten. Omdat de toiletten maar een uur afgesloten mochten worden heeft deze meting slechts een uur geduurd.



FIGUUR 3: POSITIE MEETSSENSOREN OP DE SNEEUWCONSTRUCTIE

Van deze meting is een vergelijkbare simulatie met MatLab opgezet als voor de ijswand. Omdat de constructie uit meerdere materialen is opgebouwd zijn er meerdere vergelijkingen ingevoerd:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\frac{\theta_{o,s} - \theta_1}{R_1} - \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_2}}{C_1}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\frac{\theta_1 - \theta_2}{R_2} - \frac{\theta_2 - \theta_{o,s}}{R_3}}{C_2}$$

$$R_1 = 0,5 \cdot \frac{d_m}{\lambda_m}$$

$$R_2 = \left(0,5 \cdot \frac{d_m}{\lambda_{sw}}\right) + \left(0,5 \cdot \frac{d_{mw}}{\lambda_{mw}}\right)$$

$$R_3 = 0,5 \cdot \frac{d_{mw}}{\lambda_{mw}}$$

$$C_1 = \rho_{sw} \cdot c_{sw} \cdot d_m$$

$$C_2 = \rho_{mw} \cdot c_{mw} \cdot d_{mw}$$

$$d_{sn} = 0,72 \text{ [m]}$$

$$\lambda_{sn} = \text{nader te bepalen}$$

$$\rho_{sn} = 550 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$c_{sn} = 2300 \text{ [J/kgK]}$$

$$d_{mw} = 0,37 \text{ [m]}$$

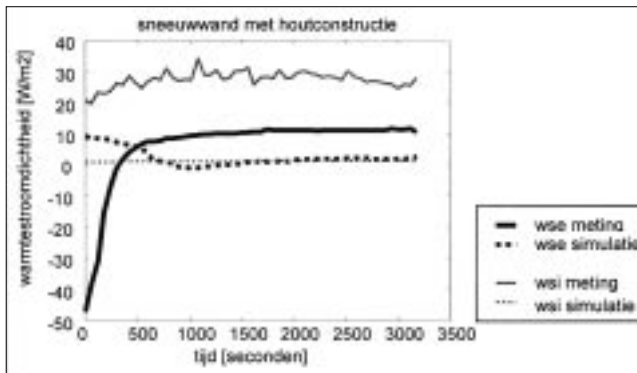
$$\lambda_{mw} = 0,04 \text{ [W/mK]}$$

$$\rho_{mw} = 35 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$c_{mw} = 840 \text{ [J/kgK]}$$

Aan het binnen- en buitenoppervlak van het model zijn de oppervlaktetemperaturen opgelegd zoals ze gemeten zijn gedurende de periode van een uur. Het simulatieprogramma bepaalt hieruit de warmtestroomdichtheid van de constructie over weerstand 1 en 3. Dit resulteert in een warmtestroom aan de binnenzijde van de constructie en aan de buitenzijde van de constructie. (wse respectievelijk wsi).

Zoals in figuur 4 te zien is, wijkt de simulatie sterk af van de meting. Er is geen enkele λ -waarde te vinden waarvoor de grafiek van de simulatie die van de meting benadert. (Figuur 4 is opgezet aan de hand van een λ -waarde van 1,2 W/m.K). Wel is in figuur 4 te zien, dat de warmtestroomdichtheid naar een quasi-stationaire toestand gaat. Als hieruit de R_c -waarde bepaald wordt, komt deze niet overeen met de in de literatuur gegeven waarden



FIGUUR 4: METING EN SIMULATIE VAN DE WARMTESTROOM-DICHTHEID DOOR DE WAND VAN SNEEUW EN HOUT

De sneeuw wand is een dikke constructie die traag reageert op temperatuurschommelingen. Waarschijnlijk is de meetperiode van een uur veel te kort geweest. Bovendien zijn de exacte materiaaleigenschappen van de houtconstructie niet bekend. Om een idee te krijgen over de tijd die nodig is voor de constructie om te reageren op temperatuurveranderingen aan het oppervlak, is nog een simulatie gemaakt. Dit keer met het programma FlexPDE.

Simulatie sneeuw wand met FlexPDE

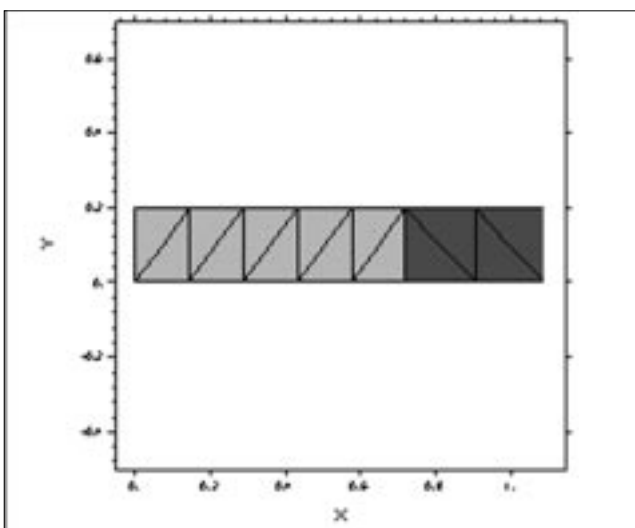
FlexPDE is een eindig elementen programma voor het oplossen van (gekoppelde) differentiaalvergelijkingen. Het is in een studentenversie beschikbaar op www.PDEsolutions.com

De simulatie met FlexPDE is uitgevoerd om te onderzoeken hoe lang het duurt totdat de warmtestroom door de constructie stationair is. Om te zien hoe de warmteverdeling over de constructie eruit ziet, is de constructie ingevoerd in het simulatieprogramma FlexPDE. In dit programma is de volgende differentiaalvergelijking ingevoerd:

Met behulp van FlexPDE wordt gekeken hoe lang het duurt

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = a \cdot \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} \quad \text{met} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

voordat de sneeuw reageert op een verandering in het temperatuurverschil over de constructie. Om te kijken hoe de warmteverdeling loodrecht op de constructie is, is een stukje

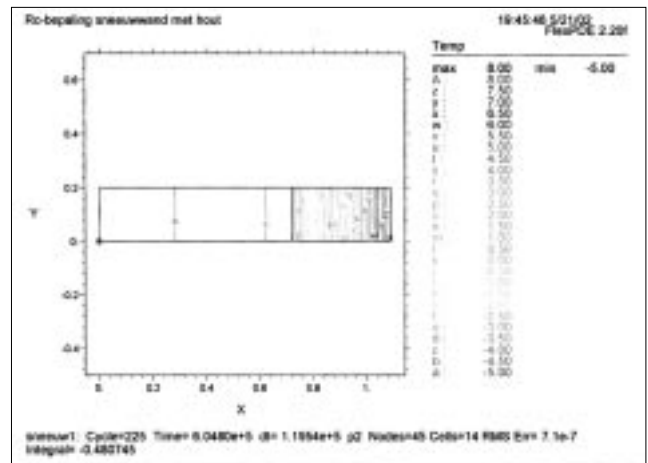


FIGUUR 5: INVOER CONSTRUCTIE SNEEUW EN HOUT IN FLEXPDF

van de wand ingevoerd. De afmetingen van de wand in de simulatie bedraagt $(h \cdot b) = 0,2 \cdot (0,72 + 0,37)$

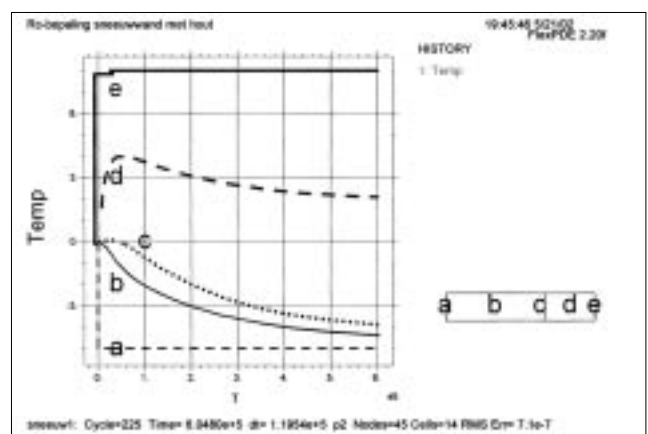
In figuur 5 is deze invoer te zien. Het programma verdeelt de constructie in eindige elementen met knooppunten, waarover de temperatuurverdeling berekend wordt. Als randvoorwaarde zijn oppervlaktetemperaturen opgelegd van -5°C aan de buitenkant (aan de gang van het ijshotel) en $+8^{\circ}\text{C}$ aan de binnenkant (toiletten).

In figuur 6 is de berekende warmteverdeling over de constructie weergegeven. Bij deze simulatie is uitgegaan van constante temperaturen aan het binnen- en buitenoppervlak van respectievelijk $+8^{\circ}\text{C}$ en -5°C .



FIGUUR 6: TEMPERATUURVERDELING OVER DE CONSTRUCTIE

Het blijkt dat deze constructie ongeveer een week nodig heeft om van de beginsituatie (waarin de temperatuur van de gehele constructie 0°C is), te komen tot een stationaire situatie bij de opgelegde oppervlaktetemperaturen. Het verloop van de temperatuur op verschillende plaatsen in de constructie is weergegeven in figuur 7.



FIGUUR 7: VERLOOP TEMPERATUUR OP DIVERSE POSITIES IN DE CONSTRUCTIE IN DE TIJD

Conclusies meting sneeuw wand

Het ijshotel is reeds in oktober 2001 opgebouwd en sindsdien heeft er een vrijwel constant temperatuurverschil over de constructie gestaan. Uit de simulatie die met FlexPDE gemaakt is, zou men verwachten dat er op het moment dat er (in februari) gemeten werd, een stationaire situatie aanwezig was. Uit de metingen blijkt dit ook. Toch is de ingaande

warmtestroomdichtheid niet gelijk aan de uitgaande warmtestroomdichtheid.

Deze afwijking kan de volgende oorzaken hebben:

- *Het smelten van de sneeuw*
In figuur 7 is te zien dat de sneeuwwand aan de zijde van de houtconstructie een temperatuur van ca. 0°C kan bereiken. Dit betekent dat de sneeuw gaat smelten, waarvoor warmte nodig is.
- *Warmte-lekken*
Vanwege praktische omstandigheden is de meting uitgevoerd nabij een deurpost. De warmte zal de weg van de minste weerstand kiezen en wellicht aan de zijkant de constructie verlaten. Dit is achteraf niet meer te controleren.
- *Thermische kortsluiting*
De minerale wol die in de houtconstructie zit, heeft een zeer kleine dichtheid. Vanwege deze lage dichtheid is het mogelijk dat er convectieve stromingen in het materiaal ontstaan, die een thermische kortsluiting veroorzaken.

CONCLUSIES WARMTESTROOMMETINGEN IJSHOTEL

- De λ -waarde voor ijs die uit onze metingen volgt bedraagt ca 2,1 W/m.K en ligt in dezelfde orde van grootte als de in de literatuur gegeven waarde.
- De λ -waarde van sneeuw is met deze metingen niet te bepalen.
- Er moet rekening gehouden worden met het weglekken van warmte uit de constructie. Dit kan komen door openingen in de houtconstructie, of door het smelten van de sneeuw aan de kant van de houtconstructie.
- Er treden mogelijk convectieve stromingen op in de minerale wol, waardoor er een thermische kortsluiting ontstaat.
- De positie van de metingen over de sneeuwwand was niet goed. Een andere locatie was om praktische redenen echter niet mogelijk.

DE AKOESTIEK VAN EEN IJSKAPEL

Froukje van Dijken
Maarten Hornikx



In de kapel van het ijsotel zijn zaalakoestische metingen verricht. Met behulp van MLS-techniek zijn op 3 bronposities en 13 microfoonposities diverse zaalakoestische parameters bepaald. Resultaten laten een gemiddelde nagalmtijd van 0,2 s en een STI van 0,88 zien. De ruimte is hiermee 'droog' en mede door de stilte zeer geschikt voor spraak. Simulaties van de kapel met 'traditionele' bouwmaterialen laten zien hoe extreem de gemeten akoestische eigenschappen van de sneeuwkapel zijn.



FIGUUR 1: EEN IMPRESSIE VAN DE IJSKAPEL

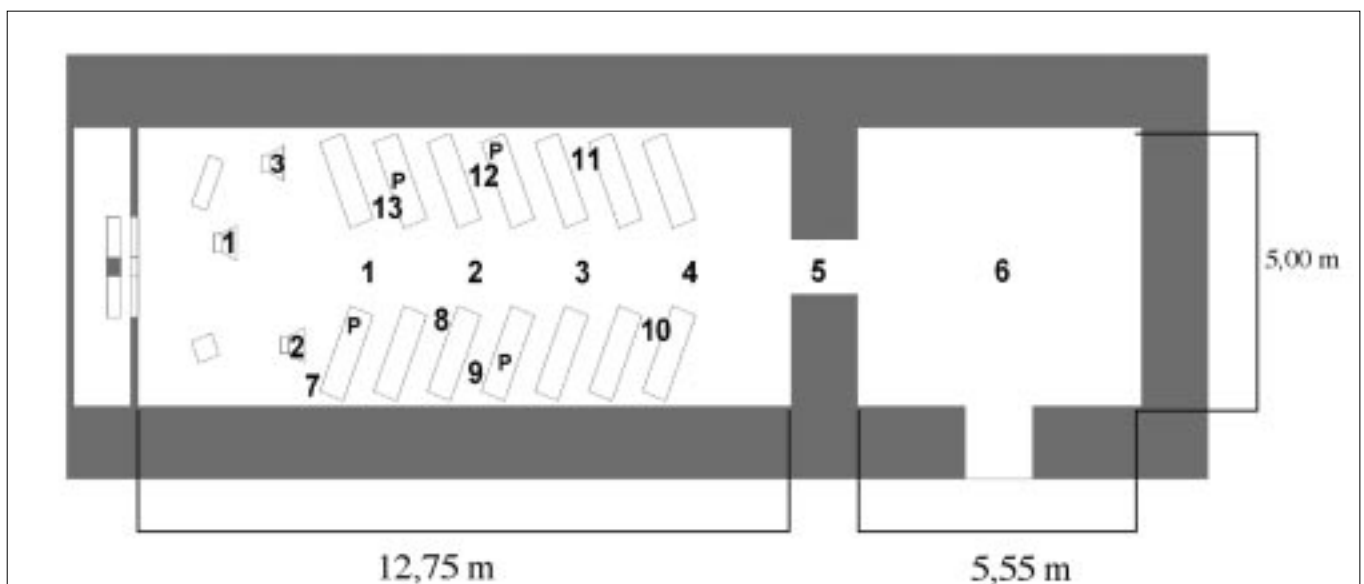
INLEIDING

Een van de speciale ruimtes van het ijsotel is de kapel. Deze kapel is tegen het hotel gelegen en van buiten bereikbaar. Jaarlijks worden honderden huwelijken gesloten onder de uit sneeuw gevormde parabolische gewelven. Het altaar en de wand daar achter, evenals de banken voor het publiek zijn uit ijs gehouwen.

Bij een temperatuur van $-4,5^{\circ}\text{C}$ en een RV van 85% zijn zaalakoestische metingen verricht in de trouwkapel van het ijsotel. Doel van dit onderzoek was de bepaling van de zaalakoestische kwaliteit van de ruimte voor de betreffende functie aan de hand van parameters voor spraakverstaanbaarheid en ruimtelijkheid. Vervolgens wordt de vraag gesteld hoe de resultaten zich verhouden tot de waarden van zaalakoestische parameters verkregen uit een simulatie van een kapel met dezelfde geometrie, maar met traditionele bouwmaterialen.

METINGEN

Voor het uitvoeren van de zaalakoestische metingen is gebruik gemaakt van het computerprogramma Dirac 2.5[1]. Dirac berekent impulsresponsies (akoestische overdracht), gebruik makend van een PC voorzien van een geluidkaart, met daarop aangesloten een microfoon en een geluidbron. De impulsresponsie wordt bepaald uit een correlatie van het MLS-sigitaal (Maximum Length Sequence) van bron- en ontvangpositie. Dit signaal wordt met behulp van de computer door Dirac gegenereerd. Uit de impulsresponsies bepaalt Dirac het frequentiespectrum en zaalakoestische parameters.



FIGUUR 2: PLATTEGROND IJSKAPEL MET BRON- EN ONTVANGRUIMTES. P = PERSOON

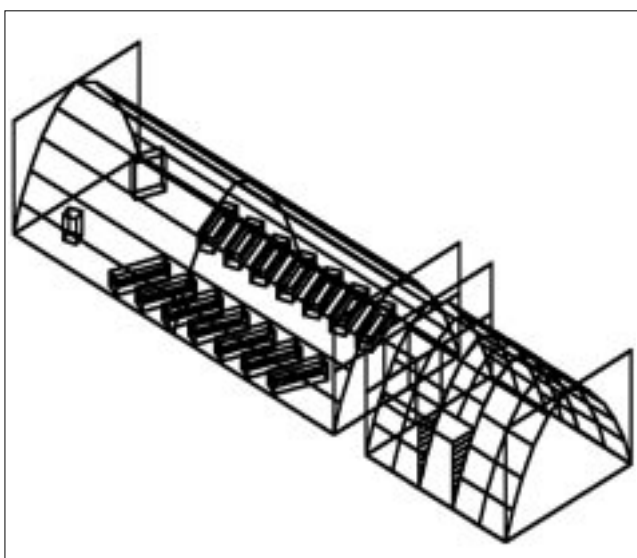
De meting is verricht met behulp van een omschakelbare omni- / bidirectionele microfoon (kogel-acht microfoon) en een omnidirectionele luidspreker bron. Met de kogel-acht microfoon kunnen metingen worden verricht ten behoeve van de ruimtelijkheid (laterale energie metingen). De microfoon was telkens zodanig gepositioneerd, dat deze overeenkwam met de luisterrichting van de toehoorder.



FIGUUR 4: MEETOPSTELLING IN DE IJSKAPEL

De meting is uitgevoerd volgens ISO 3382[4]. Er is gekozen voor bronposities 1 en 2 en 13 ontvangposities (zie figuur 2). Voor elke combinatie bron-ontvangpositie werd de bron 4 maal 90° geroteerd om de verticale as. Hiermee werd de richtingsafhankelijkheid van de gebruikte bolbron ten opzichte van de theoretische omnidirectionele luidsprekerbron als het ware uitgesmeerd. De microfoonhoogte was gesteld op 1,25 m, de hoogte van de bolbron was 1,20 m voor bronpositie 1 en 1,60 m voor bronpositie 2. Bij bronpositie 2 was het aantal ontvangposities beperkt tot 5, te weten de punten 3, 8, 10, 11 en 13.

Om de spraakverstaanbaarheid (STI) te bepalen volgens IEC 60268.16[5] is gebruik gemaakt van een gewijzigde meetopstelling. De bolbron was hierbij vervangen door een bron met de richtingskarakteristiek van een spreker. Er was hierbij gemeten op de microfoonposities 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11 en 13. Er is gebruik gemaakt van bronpositie 1 en bronpositie 3.



FIGUUR 3: ODEON-MODEL

SIMULATIE

Om de ijskapel te kunnen vergelijken met een kapel, zoals die fictief in Nederland gebouwd zou kunnen zijn is in het ray-trace programma ODEON[3] een simulatie uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de geometrie van de ijskapel. De ruimte werd begrensd met 'traditionele' bouwmaterialen; keramische vloertegels, bakstenen wanden, glazen kopgevel en houten banken. Bron- en microfoonposities in de simulatie kwamen overeen met de bron- en microfoonposities tijdens de metingen. Ter validatie van het model is eveneens een simulatie uitgevoerd met de gemiddelde geluidabsorptiecoëfficiënt α verkregen uit de metingen. Voor bepaalde parameters berekende Odeon een te grote afwijking ten opzichte van de metingen om een uitspraak te kunnen doen.

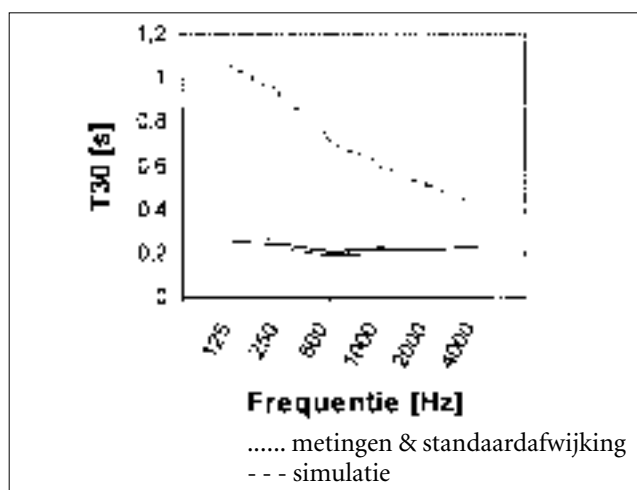
RESULTATEN

De zaalakoestische kwaliteit van een ruimte kan men toetsen aan bepaalde zaalakoestische parameters. Elke specifieke functie voor een ruimte vergt andere richtwaarden van de parameters. Naast de waarden van de parameters geeft de spreiding ervan over de ruimte informatie over de kwaliteit van deze ruimte.

Verskillende parameters werden na metingen in de ijskapel bepaald. Vijf parameters [2] worden geanalyseerd.

De **nagalmtijd** (T_{30} [s]) is gedefinieerd als het verval van het geluiddrukkniveau na uitschakeling van de bron van -5 tot -35 dB, geëxtrapolerd naar een verval van 60 dB. Omdat de INR (Impuls to Noise Ratio) voor alle octaafbanden hoger is dan 45 dB is het gebruik maken van de T_{30} als nagalmtijd ook gerechtvaardigd.

De T_{30} ligt tussen 125 Hz en 4000 Hz net boven de 0,2 s (zie figuur 5).



FIGUUR 5: T_{30}

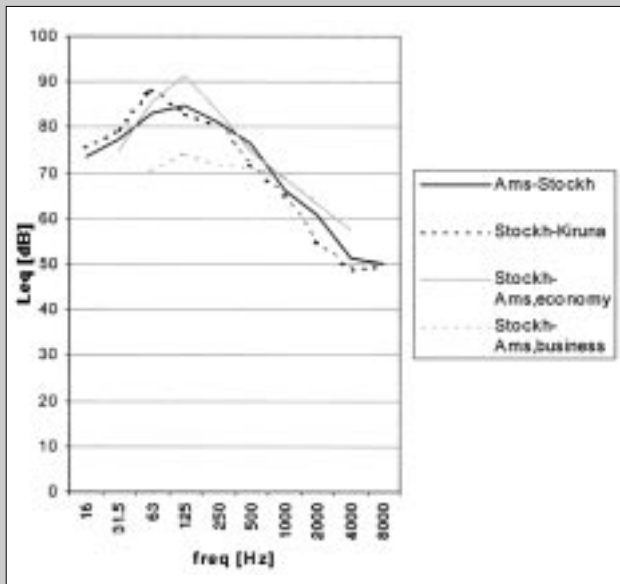
In Nederland kan voor een gunstige nagalmtijd in een kerk een waarde tussen 1,5 en 2,5 seconden worden aangehouden voor een goede ruimteakoestiek. De nagalmtijd is echter ondermeer evenredig met het volume van een ruimte. Doordat de trouwkapel een aanzienlijk kleiner volume heeft zou een nagalmtijd van 1,0 s een acceptabele aanname voor een ruimte met deze functie zijn. De waarden gemeten in de

IS HET IN DE BUSINESS-CLASS STILLER?

De resultaten spreken voor zich!



FIGUUR 1: UITVOERING VAN GELUIDMETINGEN IN HET VLIEGTUIG



FIGUUR 2: RESULTATEN VAN GELUIDMETINGEN IN HET VLIEGTUIG TIJDENS STATIONAIR VLIEGEN (NIET OPTREKKEN/REMMEN); GELUIDDRUKNIVEAUS LAAGFREQUENT BEPAALD DOOR GELUID VAN MOTOREN, HOOGFREQUENT DOOR GELUID VAN LUCHTBEHANDELINGSINSTALLATIE.

Gegevens:

- heenreis vlucht Ams-Stockh: toesteltype onbekend, luchtvaartmaatschappij: SAS ($L_{Aeq} = 76,8$ dB(A));
- heenreis vlucht Stockh-Kiruna: toesteltype onbekend, luchtvaartmaatschappij SAS ($L_{Aeq} = 78,4$ dB(A));
- terugreis vlucht Stockh-Ams: toesteltype: MD-87, luchtvaartmaatschappij: SAS ($L_{Aeq,ec} = 79,4$ dB(A), $L_{Aeq,buss} = 73,3$ dB(A)).

trouwkapel zijn dus extreem laag. Opvallend is dat de nagalmtijd nagenoeg constant is over deze octaafbanden.

Om een schatting van de **gemiddelde absorptiecoëfficiënt** van de ijskapel te kunnen maken, is gebruik gemaakt van de formule van Eyring. Een gebruikelijke T60 berekening is in deze extreme situatie in principe niet mogelijk. De formule van Eyring is echter het beste alternatief om een schatting te maken:

$$T = \frac{1}{6 S \ln[(1 - \bar{\alpha})^{-1}]}$$

Met:

V volume van de ruimte [m^3]

S totaal oppervak aan sneeuw in de ijskapel [m^2]

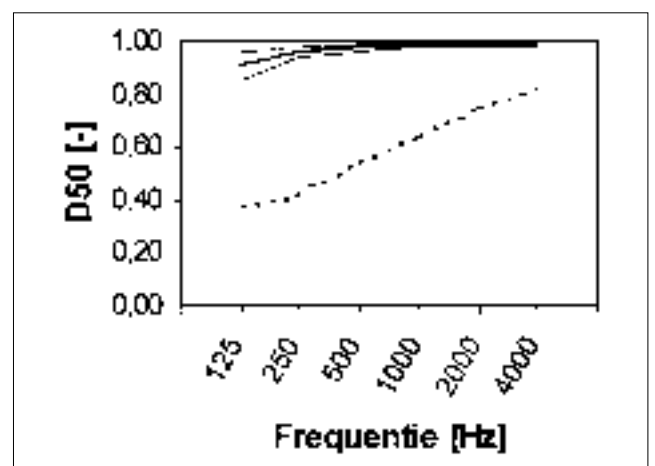
TABEL 1. GEMIDDELDE ABSORPTIECOËFFICIËNT

Octaafband	125	250	500	1k	2k	4k
[Hz]						
Gem. α	0,39	0,41	0,45	0,45	0,45	0,44

De **Deutlichkeit** (D_{50} [-]) is een maat voor de spraakverstaanbaarheid. Deze wordt als volgt gedefinieerd:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [-]$$

De waarden van de D_{50} (zie figuur 6) liggen zeer hoog. Dit houdt in dat relatief veel geluidenergie vroeg de luisteraars bereikt. Laagfrequent zijn de waarden lager dan hoogfrequent.



FIGUUR 6: D_{50}

De **Speech Transmission Index** (STI [-]) is een parameter die de spraakverstaanbaarheid kwantificeert op basis van nagalmtijd en signaal-ruis verhouding in een ruimte. In dit

geval levert de STI betrouwbare waarden vanwege de hoge waarden van de SNR (Signal to Noise Ratio).

Een STI tussen 0,6 en 0,75 komt overeen met een goede spraakverstaanbaarheid, een STI tussen 0,75 en 1 komt overeen met een uitstekende spraakverstaanbaarheid.

De STI-waarden gemiddeld over de ruimte (zie tabel 2) geven de uitstekende spraakverstaanbaarheid van de kapel weer. Er is weinig spreiding van deze waarden in de ruimte.

TABEL 2: STI

	STI _{male}	STI _{female}
avg	0,88	0,88
sd	0,05	0,05

De **Laterale energie Fractie** (LF [-]) is een maat voor de ruimtelijkheid. Ze is gedefinieerd als:

$$LF = \frac{\int_0^{80} p_l^2(t) dt}{\int_0^{80} p^2(t) dt} \quad [-]$$

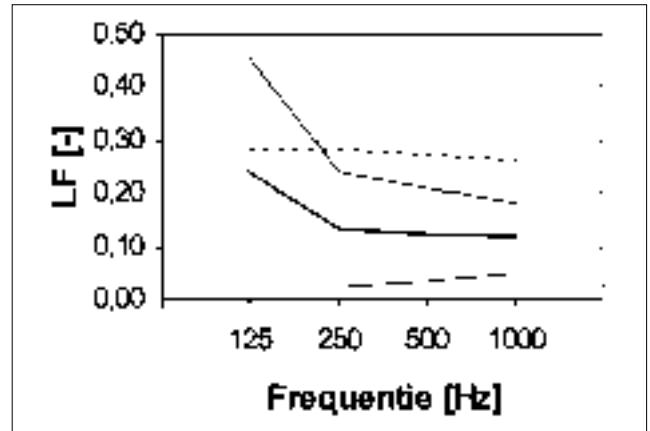
Met:

$p_l^2(t)$ evenredig met de lateraal invallende geluidenergie op de microfoonpositie [Pa²]

$p^2(t)$ evenredig met de totaal binnenkomende geluidenergie [Pa²]

De ééngetalsaanduiding voor de LF is de waarde volgend uit de middeling in de octaafbanden 125 tot en met 1000 Hz.

De resultaten van de LF vertonen een grote spreiding over de ruimte, met name laagfrequent.



FIGUUR 7: LF

De waarden van de LF duiden op een lage mate van ruimtelijkheid in de kapel.

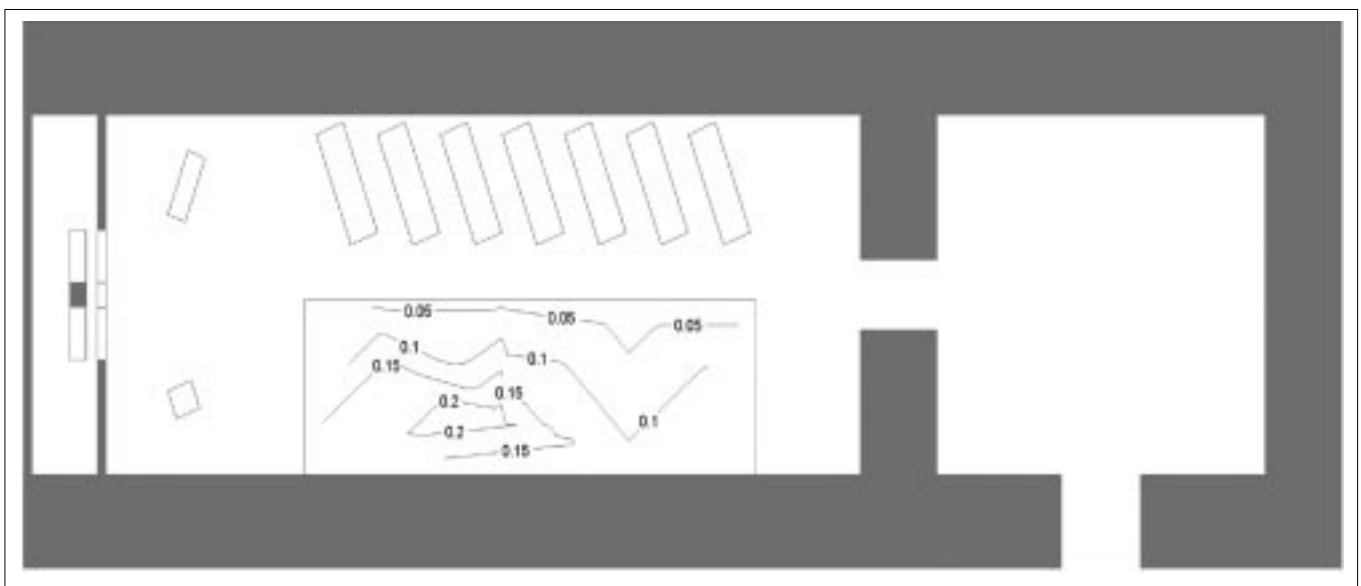
De **Strength** (G [dB]) is een absolute maat voor de luidheid in de ruimte. Deze is niet als zodanig gebruikt. Met behulp van de G is de luidheidsverdeling bepaald. Wel kan een luidheidsverdeling worden bepaald. Deze luidheidsverdeling is gerelateerd aan microfoonpositie 1. De definitie is volgens ISO 3382:

$$G = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

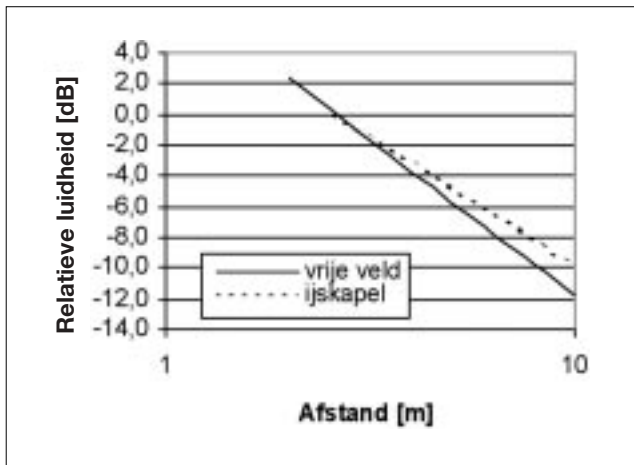
Met:

$p(t)$ geluidsdruk op een positie in de zaal [Pa]

$p_{10}(t)$ geluidsdruk op 10m afstand van dezelfde bron in het vrije veld [Pa]



FIGUUR 8: DE 2-D PLOT LAAT ZIEN, DAT DE LF HET KLEINST IS OVER DE LENGTE-AS VAN DE RUIMTE. DICHTER BIJ DE ZIJKANTEN VAN DE RUIMTE NEMEN DE WAARDEN VAN DE LF TOE.



FIGUUR 9: VERVAL LUIDHEID OVER LENGTE-AS. DE RELATIEVE LUIDHEID IS TEGEN DE LOGARITMISCHE AFSTAND TEN OPZICHTE VAN DE BRON UITGEZET. HET PUNT OP 2,6 METER AFSTAND VAN DE BRON IS HET REFERENTIEPUNT.

Alleen de metingen voor bronpositie 1 zijn verwerkt.

Uit de luidheidverdeling in de kapel blijkt een duidelijk verval van het geluid over de lengte van de ruimte; de ruimteomhulling absorbeert veel geluidenergie en de LF over de lengte-as van de ruimte is laag. Het verval van het geluid over de symmetrie-as van de ruimte benadert het verval van het geluid in het vrije veld.

Over de lengte-as heeft de luidheid een verval van 5 dB per afstandverdubbeling. De theoretische waarde in een vrij veld bedraagt 6 dB.

CONCLUSIES

In de ijskapel zijn de waarden voor de T_{30} opvallend laag en nauwelijks frequentieafhankelijk. De LF kenmerkt zich door lage waarden en een grote spreiding. Hierdoor is de ijskapel veel te droog voor muziek. Voor spraak daarentegen is de ijs-

kapel wel geschikt. Mede door het extreem lage achtergrondgeluidniveau van ongeveer 25 dB(A) is de spraakverstaanbaarheid erg goed. Door de lage nagalmtijd zal de spreker echter het idee hebben dat hij zijn stem moet verheffen, waardoor spreken vermoeiend kan zijn.

De akoestische eigenschappen van de ijskapel komen overeen met de streefwaarden voor het ontwerp van een controeruimte van een studio of een spreekcel.

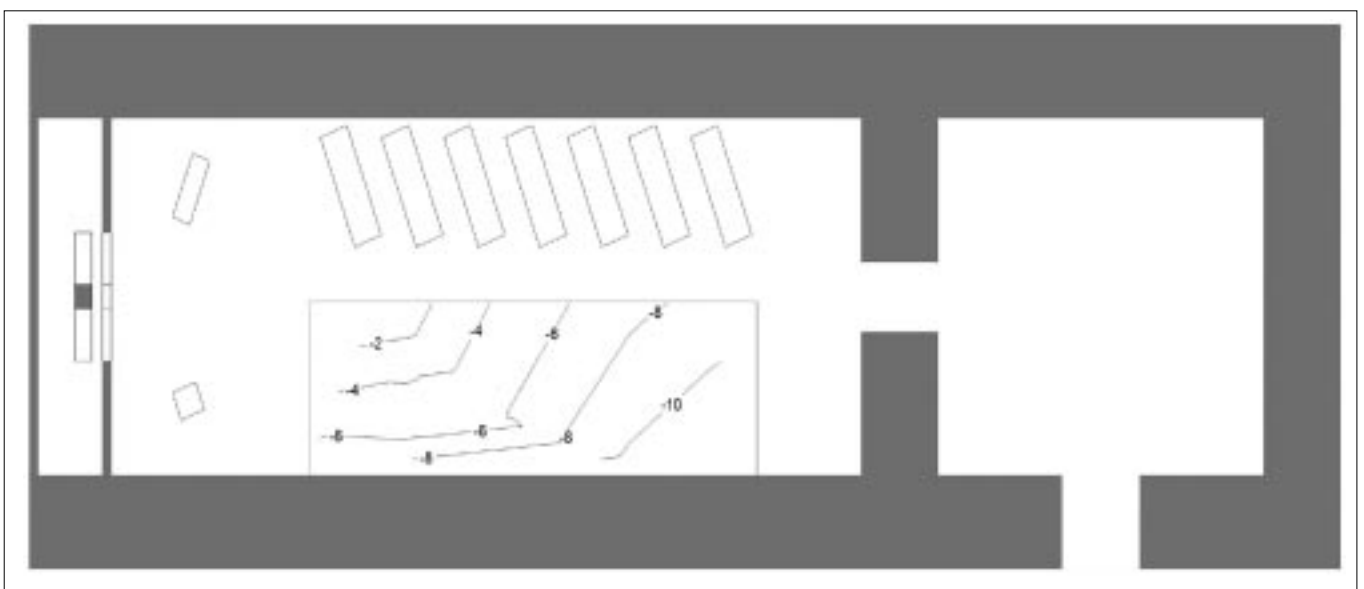
Met een T_{30} oplopend tot boven de 1 s en hogere waarden voor de LF lagen de resultaten bij de simulatie met traditionele bouwmaterialen meer in de buurt van richtwaarden voor een kapel. De spraakverstaanbaarheid was in deze kapel echter geringer.

NAWOORD

De eerste indruk bij het betreden van de ijskapel was dat de ruimte ontzettend stil was. De metingen bevestigen dit. Onze voorstelling van een ijskapel bleek totaal onjuist. Misschien zou 'sneeuwkapel' een betere benaming zijn geweest. Deze benaming zal in ieder geval betere verwachtingen scheppen.

LITERATUURLIJST

- [1] Acoustics-Engineering, Dirac 2.5, Dual input room acoustics calculator, 2002.
- [2] Hak, C.C.J.M., Martin, H.M., 'zaalakoestiek', collegedictaat TU/e, 1999.
- [3] Lyngé, C., Odeon, Room Acoustics Program, Version 3.1, 1998.
- [4] ISO 3382 (1977) Acoustics-Measurements of reverberation time in auditoria, 1977.
- [5] IEC 60268-16 Sound system equipment Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index, 1988.



FIGUUR 10: DE 2-D PLOT GEEFT DE GELUIDVERDELING OVER DE RUIMTE WEER. ER IS EEN DUIDELIJK VERVAL OVER DE LENGTE VAN DE RUIMTE. EEN VERKLARING HIERVOOR IS TE VINDEN IN DE ABSORPTIE VAN DE WANDEN EN DE LF.



Onze opdrachtgever, VKS Raadgevend Ingenieurs b.v., is een onafhankelijk raadgevend ingenieursbureau met expertise op de vakgebieden: bouw, milieu, akoestiek en bouwfysica. VKS heeft vestigingen in Assen, Deventer en Almelo en onderscheidt zich door de multidisciplinaire benadering van projecten. Momenteel bestaat het VKS-team uit 30 professionals, ieder gespecialiseerd op zijn/haar eigen vakgebied. VKS werkt voor een zeer diverse klantenkring: bedrijven (groot industrieën en MKB), overheden en instellingen. Zie voor meer informatie over de organisatie en de diensten ook: www.VKS-ri.nl

De functie:

U adviseert opdrachtgevers op het gebied van bouwfysica, waaronder vocht, ventilatie, bouwakoestiek, warmte, energie, thermische behaaglijkheid en brandveiligheid. U vertaalt problemen vanuit uw actuele vakkennis en inzicht naar toepasbare oplossingen.

strategisch niveau mee te denken en te communiceren.

U bent werkzaam binnen de vakgroep Bouwfysica en geeft leiding aan de bouwfysici.

Reageren:

Vragen over de functie, organisatie of procedure, kunt u stellen per

(SENIOR) ADVISEUR BOUWFYSICA
enthousiaste deskundige met daadkracht, standplaats Assen

U bent verantwoordelijk voor de gehele projectvoortgang en in staat om projecten te verwerven en succesvol af te ronden. U onderhoudt contacten met opdrachtgevers, intermediairs en leveranciers en bent in staat om boven uw vakgebied uit te stijgen en op

Gevraagd wordt:

Technische HBO-opleiding, bijvoorbeeld HTS-Bouwkunde, aangevuld met vakgerichte cursussen. Meerdere jaren relevante werkervaring, bij voorkeur bij een adviesbureau. Actuele kennis van relevante wet- en regelgeving. Goede schriftelijke- en mondelinge uitdrukkingsvaardigheid.

e-mail: info@dewinteradviesgroep.nl of telefonisch van maandag t/m zaterdag tot 21.00 uur: (0598) 36 17 17. Uw C.V. met een beknopte motivatie kunt u binnen 10 dagen richten aan bovenvermeld e-mailadres of per post aan: De Winter Consultancy b.v., t.a.v. de heer E.A. Klomp, Postbus 125, 9600 AC Hoogezand.

DE WINTER



CONSULTANCY

Werving en Selectie • Psychologisch onderzoek • Personeelsadvies • Trainingen