

Akoestische aspecten in klaslokalen met betonkernactivering

Onderzoek naar oplossingen van het akoestische probleem bij de
toepassing van betonkernactivering

TU-Delft faculteit der Bouwkunde

Status document : Rapportage afstudeerproject MSC.4
Versie : 3.0
Datum : 3-1-2005

Naam : J.B. van der Linde
Studienummer : BK9519124
Adres : Lisztstraat 163
Postcode : 2625 BP Delft
Telefoon : 015-2620079 / 06-28404828
E-mail : j.b.vanderlinde@student.tudelft.nl

Afstudeerlab. : Building Technology – Environments
Hoofdmentor : dhr. ir. L. Nijs
2^e Mentor : dhr. ir. M.H. Meijs
Praktijkmentor : dhr. dr. ir. P.J.W. van den Engel

Samenvatting

In dit rapport worden de mogelijkheden voor een goede akoestiek in klaslokalen met betonkernactivering verkend. Vanuit de probleemstelling waarin wordt gesteld dat de toepassing van betonkernactivering voornamelijk ontwikkeld is vanuit het thermische comfort en het akoestische comfort weinig belangstelling heeft gekregen. Omdat voor een goed begrip van de materie het noodzakelijk is dat de werking van betonkernactivering bekend is, is in de hoofdstukken 2 en 3 de werking van het systeem uitgelegd. In hoofdstuk 4 wordt een inleiding gegeven op het begrip geluid en de daarbijbehorende aspecten. In de hoofdstukken 5 en 6 worden numerieke beoordelingscriteria behandeld, zoals de nagalmtijd en verschillende numerieke benaderingsmethode van de spraakverstaanbaarheid. In hoofdstuk 7 wordt het werkgebied verkleind tot de klaslokalen en gekeken wat er aan normen en richtlijnen zijn voor de akoestiek in een klaslokaal. In de hoofdstukken 8 en 9 worden de gebruikte aspecten, op het akoestische vlak, van het klaslokaal belicht. In de hoofdstukken 12 tot en met 14 zijn de deelonderzoeken besproken, daarin een casusstudie opgenomen en onderzoek gedaan naar mogelijke oplossingen. In hoofdstuk 15 zijn de conclusies opgenomen welke leidde tot een ontwerp middel bij het ontwerpen van klaslokalen met betonkernactivering, wat beschreven is in hoofdstuk 16.

0.2 Betonkernactivering (BKA)

Betonkernactivering is vanuit energetisch oogpunt een goed systeem doordat er gekoeld wordt met relatief hoge temperaturen en verwarmd wordt met relatief lage temperaturen. Betonkernactivering zet het accumulerend vermogen van beton in voor de koeling en verwarming van gebouwen. Het systeem is netzo als vloerverwarming een met water gevulde kunststofleidingen. Maar in tegenstelling toe het vloerverwarmingssysteem is de waterleiding niet in de dekvloer aangebracht maar in de kern van de betonnen vloerconstructie. Afhankelijk van de watertemperatuur wordt de betonmassa opgewarmd of afgekoeld. De betonmassa slaat de warmte of koude op. Afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de ruimte en het betonoppervlak staat het vloeroppervlak langzaam warmte af of neemt het juist warmte op. Deze uitwisseling tussen betonmassa en vertrek gaat voor ongeveer $2/3$ door middel van straling en voor $1/3$ door middel van convectie. Het stralingsaandeel werkt alleen als er tussen het vertrek en de betonmassa geen barrières, zoals verlaagde plafonds, bevinden.

0.3 Geluid

Geluid is in ons dagelijks leven niet weg te denken. Het kan een bron van plezier zijn, maar ook van hinder. Beide ervaringen kunnen bij hetzelfde geluid hand in hand gaan. Geluid is in principe alles dat met het gehoor wordt waargenomen. Het ontstaat door een bron die trillingen uitstraalt. Bijvoorbeeld een luidspreker. Deze trillingen planten zich voort door de lucht of door een constructie en worden vervolgens door ons waargenomen.

0.4 Spraakverstaanbaarheid

Spraakverstaanbaarheid wordt in de zaalakoestiek beschouwd als een intrinsieke eigenschap van de ruimte. Het is de invloed die de ruimte uitoefent op de kwaliteit van een gesproken signaal bij de overdracht tussen spreker en luisteraar. Spraak is

ontegensprekelijk één van de belangrijkste middelen waarmee informatie in de klas wordt overgebracht. Een onvoldoende spraakverstaanbaarheid resulteert dan ook automatisch in een slechtere informatieoverdracht. Numeriek is op verschillende manieren de akoestische kwaliteit te benaderen. D.m.v. RT60, G, AI, C-50, U-50, ALcons, STI, STI-N. Meetbare aspecten voor deze waarden zijn onder andere. De nagalmtijd, signaalsterkte achtergrondruis. Deze drie factoren zijn het belangrijkste voor de spraakverstaanbaarheid. De nagalmtijd wordt bepaald door hoeveelheid geluidabsorberend materiaal. In klaslokalen is de gemiddelde absorptiecoëfficiënt het makkelijkste aan te passen. Hierin zal dan ook de oplossing van het probleem gezocht moeten worden. Gecombineerd met een open plafond kan het absorberende materiaal niet alleen aan het plafond bevestigd worden maar moeten de wanden ook gebruikt worden. Op die manier is een goed thermisch en akoestische klimaat realiseerbaar in de klaslokalen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
0.2 Betonkernactivering (BKA)	1
0.3 Geluid	1
0.4 Spraakverstaanbaarheid	1
Inhoudsopgave	3
Formules	8
Tabellen	9
Figuren	9
INLEIDING	12
1 Inleiding	12
1.1 Probleemgebied	12
1.2 Probleemstelling	12
1.3 Doelstelling.....	12
LITERATUURSTUDIE	14
2 Betonkernactivering	14
2.1 Inleiding	14
2.2 Principe betonkernactivering (BKA)	14
2.3 Toepassingsgebied	14
2.4 Voordelen en nadelen t.o.v. traditionele klimaatsystemen in gebouwen.	15
3 Werking van BKA	16
3.1 Zelfregelend effect.	16
3.1.1 Straling.....	16
3.1.2 Zichtfactoren.....	17
3.1.3 Convectie	18
3.1.4 Worp	20
3.1.5 Berekeningsvoorbeeld zelfregelend effect.	23
3.1.6 Accumulatie of warmteopslagcapaciteit	23
3.1.7 berekening van warmtecapaciteit van bouwmasa rond leidingen.....	26
3.2 Regeling van BKA	26
3.2.1 watertemperatuurregeling	26
3.2.2 Voorbeeld berekening	27
3.2.3 Verschillende regelingen in relatie tot comfort.....	28
3.2.4 Operatieve temperatuur	29
3.2.5 PMV (Predicted Mean Vote)	30
3.2.6 Op. temperatuur – gewogen temperatuuroverschrijdingsuren (GTO-uren). 30	
3.2.7 Stralingstemperatuur θ_r	31

3.2.8	<i>Dauwpunt</i>	31
3.2.9	<i>Oppervlaktetemperaturen</i>	32
3.2.10	<i>Te grote stralingsasymmetrie</i>	32
3.3	Bouwkundige aspecten	32
3.3.1	<i>Gevelconstructie</i>	32
3.3.2	<i>Vloeren voor Thermische Betonkern Activering</i>	33
3.3.3	<i>Vloerafwerking</i>	36
3.4	<i>Vergelijk met een klimaatplafond.</i>	36
4	Geluid	38
4.1	<i>Inleiding</i>	38
4.2	<i>Luchtgeluid</i>	38
4.2.1	<i>Metten van de luchtgeluidisolatie van een constructie</i>	38
4.2.2	<i>geluidlekken door kieren</i>	40
4.3	<i>Contactgeluid</i>	40
4.3.2	<i>Homogene vloerconstructies</i>	41
4.4	<i>Geluidsabsorptie</i>	42
4.4.2	<i>Bepaling van absorptiecoëfficiënt</i>	43
4.4.3	<i>Absorptiecoëfficiënt - transmissiecoëfficiënt</i>	43
4.4.4	<i>Geluidsisolatie – geluidsabsorptie</i>	44
4.4.5	<i>Noise Reduction Coëfficiënt (NRC)</i>	44
4.5	<i>Weging en beoordeling van geluid</i>	46
4.5.1	<i>Luidheid</i>	46
4.5.2	<i>Foon</i>	46
4.5.3	<i>Soon</i>	46
4.5.4	<i>A-, B-, C- en D-weging van niveaus</i>	46
4.5.5	<i>NR-Curves (Noise-Rating-Curves)</i>	47
5	Nagalmtijd	49
5.2	<i>Sabine</i>	50
5.3	<i>Eyring</i>	50
5.4	<i>Vergelijking theorieën - metingen</i>	51
5.4.1	<i>Ducourneau en Planeau</i>	51
5.4.2	<i>Neubauer en Kostek</i>	53
5.5	<i>Het bepalen van de nagalmtijd in een testopstelling</i>	55
5.5.1	<i>ISO3382</i>	55
5.5.2	<i>NEN5077</i>	56
5.6	<i>Mean free path</i>	57
5.7	<i>Theoretische benadering van de formule van Sabine</i>	57
6	Spraakverstaanbaarheid	59
6.1	<i>Inleiding</i>	59
6.2	<i>De geluidsterkte van spraak</i>	60
6.3	<i>Signaal-Ruis verhouding (SNR signal-noise ratio)</i>	62
6.4	<i>Strength (G)</i>	62
6.5	<i>Articulation Index (AI)</i>	63
6.6	<i>Early energy fraction C-50</i>	64

6.7	Useful-to-detrimental sound ratio (U).....	65
6.8	Articulation loss of consonants (ALcons).....	65
6.9	Spraak transmissie index STI	66
6.10	Speech Transmission Index in Noise (STI-N).....	67
7	Normen en richtlijnen.....	69
7.1	Nederlandse norm.	69
7.2	Internationale normen.	69
7.3	Richtlijnen.....	71
7.3.1	<i>Nagalmtijd</i>	71
7.3.2	<i>Geluiddrukkniveau</i>	71
8	Invloedfactoren op de spraakverstaanbaarheid in klaslokalen	73
8.1	Signal to noise ratio	73
8.1.1	<i>Geluidsterkte van het “signaal” (spreker)</i>	73
8.1.2	<i>Achtergrond geluidniveau</i>	74
8.2	Materialen	74
8.3	Bezetting	75
9	Absorptie en nagalm in klaslokalen	78
9.1	De plaats van de absorberende materialen.	78
9.1.1	<i>Absorptie in klaslokalen</i>	78
9.1.2	<i>Nagalm in klaslokalen</i>	79
9.2	Ruimte geometrie	79
9.2.1	<i>Indeling van vergaderzalen, auditoria en collegezalen</i>	79
AANPAK		81
10	Aanpak	81
10.1	Rekenhulpmiddel voor de berekening van α -gemiddeld	81
10.2	Casestudy.....	81
10.2.1	<i>Metingen in 2 bestaande lokalen</i>	81
10.2.2	<i>Model van deze lokalen in CATT</i>	81
10.3	Effect van de locatie absorptie op de spraakverstaanbaarheid	81
10.4	Straling afname door geluidabsorberend materiaal	82
10.4.1	<i>zichtfactoren</i>	82
10.4.2	<i>Oppervlakte temperaturen</i>	82
DEELONDERZOEKEN		83
11	Catt voorbereidingen	83
11.1	Invoer van een klaslokaal.....	83
11.1.1	<i>Inleiding</i>	83
11.2	Geluidsterkte.....	83
11.2.1	<i>Geluidsniveau van de bron (spreker)</i>	83
11.2.2	<i>Achtergrondgeluid</i>	83
11.3	Aanpassingen.....	84
11.4	Resultaten(voorbeeld).....	84

11.5	Conclusie	84
11.6	Directivity van de bron	85
11.6.1	<i>Singers</i>	85
11.6.2	<i>Seanger</i>	85
11.6.3	<i>Luidspreker</i>	85
12	Atlas college Triade Edam.....	86
12.1	Inleiding	86
12.1.1	<i>De School</i>	86
12.1.2	<i>De lokalen</i>	86
12.2	Meetopstelling	88
12.3	Berekeningen	88
12.3.1	<i>Handberekening</i>	88
12.3.2	<i>CATT-acoustics</i>	88
12.4	Uitvoer	90
12.5	Beoordeling	90
12.5.1	<i>Beoordelingscriteria</i>	90
12.5.2	<i>Beoordeling van Lokaal 1_03</i>	91
12.5.3	<i>Beoordeling van Lokaal 1_22</i>	92
12.5.4	<i>Conclusie naar aanleiding van de beoordeling</i>	93
12.6	Bezetting	93
12.7	Verschillende bron	93
12.8	Aanpassingen	93
12.9	Uitvoer ‘aanpassingen’	95
12.10	Conclusie	96
12.10.1	<i>STI in ruis</i>	96
12.10.2	<i>Praktijk</i>	96
13	Locatie absorptie.....	97
13.1	Inleiding	97
13.1.1	<i>Het model</i>	97
13.1.2	<i>Het absorberend materiaal</i>	97
13.1.3	<i>De locatie van het absorberende materiaal</i>	98
13.2	Resultaten	98
13.2.1	<i>Nagalmtijden</i>	98
13.2.2	<i>Absorptiecoëfficiënt</i>	99
13.2.3	<i>STI</i>	99
13.3	Conclusie	99
14	Straling.....	100
14.1	Inleiding	100
14.2	Methode	100
14.2.1	<i>Temperaturen</i>	100
14.2.2	<i>Model</i>	100
14.3	Berekening	101
14.3.1	<i>Oppervlaktetemperaturen</i>	101
14.3.2	<i>Zichtfactoren</i>	101

14.4	Resultaten	103
14.4.1	Temperaturen	103
14.4.2	Zichtfactoren	103
14.5	Conclusie	103
15	Locatie absorptie.....	104
15.1	Wandabsorptie.....	104
15.1.1	Bevestiging wandpanelen.	104
15.2	Plafond absorptie	104
15.2.1	Eilanden.....	105
15.2.2	Randen	105
15.2.3	Stroken	106
15.2.4	Baffles	106
16	Conclusies en aanbevelingen	108
16.1	Conclusie	108
16.2	Aanbevelingen.....	108
17	Ontwerphulpmiddel.....	109
17.1	Aanleiding	109
17.2	Inleiding.....	109
17.3	Rekensheet	109
17.3.1	Invoer - VO	109
17.3.2	Invoer-aanpassingen.....	109
17.3.3	Aanpassingen.	110
17.3.4	Invoer – DO	110
17.3.5	Uitvoer	110
17.4	Informatie-site	110
17.4.1	Betonkernactivering	110
17.4.2	Akoestiek.....	110
17.4.3	Rekensheet	111
18	Literatuurlijst	112
18.1	Boeken en normen	112
18.2	College sheets.....	113
18.3	Onderzoeksrapporten	113
18.4	Publicaties	113
18.4.1	<i>American Journal of Audiology</i>	113
18.4.2	<i>Applied Acoustics</i>	114
18.4.3	<i>The Journal of the Acoustical Society of America</i>	114
18.4.4	<i>TVVL magazine</i>	115
18.4.5	<i>Verwarming & Ventilatie</i>	115
18.4.6	<i>tijdschriften overig</i>	116
18.4.7	<i>overig</i>	116
18.5	Internetbronnen	117
19	Bijlagen	118

Formules

formule 3.1 stralingscomponent warmteoverdrachtscoëfficiënt.....	16
formule 3.2 gemiddelde stralingstemperatuur in vertrekken.....	17
formule 3.3 bolvormig elementje gelegen boven een hoek van een rechthoekig vlak.....	17
formule 3.4 bolvormig element midden boven vlak.....	18
formule 3.5 convectieve aandeel warmtetransport.....	18
formule 3.6 convectiecomponent warmteoverdrachtcoëfficiënt bij vrije convectie.....	19
formule 3.7 convectiecomponent warmteoverdrachtcoëfficiënt bij gedwongen convectie.....	19
formule 3.8 getal van Archimedes.....	20
formule 3.9 afbuiging van de luchtstroom in de ruimte.....	21
formule 3.10 Accumulatievermogen.....	24
formule 3.11 Operatieve temperatuur.....	29
formule 4.1 Geluidisolatie.....	39
formule 4.2 Massawet loodrecht voor de berekening van de geluidweerstand van een wand.....	39
formule 4.3 Massawet schuin voor de berekening van de geluidweerstand van een wand.....	39
formule 4.4 Massawet alzijdig voor de berekening van de geluidweerstand van een wand.....	39
formule 4.5 geluidweerstand van een samengestelde constructie.....	40
formule 4.6 genormeerd contactgeluidniveau.....	41
formule 4.7 contactgeluid.....	41
formule 4.8 contactgeluid eenvoudig.....	42
formule 4.9 Absorptiecoëfficiënt.....	43
formule 4.10 Transmissiecoëfficiënt.....	44
formule 4.11 Transmissiecoëfficiënt.....	44
formule 4.12 NRC berekening.....	45
formule 4.13 omrekenformule foon-soon.....	46
formule 5.1 Sabine.....	50
formule 5.2 α -gemiddeld.....	50
formule 5.3 Geluidsnelheid in lucht.....	50
formule 5.4 Eyring.....	50
formule 5.5 α -gemiddeld.....	50
formule 5.6 berekening van de ruimtehoek.....	51
formule 5.7 berekening van de gemiddelde α voor Sabine vanuit de ruimtehoek.....	51
formule 5.8 berekening van de gemiddelde α voor Eyring vanuit de ruimtehoek.....	51
formule 5.9 minimale afstand tussen bron en microfoon.....	55
formule 5.10 Mean free path.....	57
formule 5.11 Volume van een bol.....	57
formule 5.12 oppervlakte van een bol.....	57
formule 5.13 gemiddelde afstand.....	57
formule 5.14 mean free path.....	57
formule 5.15 energie afname van 60 dB.....	57
formule 5.16 Aantal reflectie per tijdseenheid.....	58
formule 5.17 tijdsduur voor een energieafnamen van 60 dB.....	58
formule 5.18 tijdsduur afhankelijk van V , S en α	58
formule 5.19 Nagalmtijd Sabine.....	58
formule 6.1 Geluiddrukkniveau.....	63
formule 6.2 Strength.....	63
formule 6.3 Strength.....	63
formule 6.4 Strength.....	63
formule 6.5 Articulation Index.....	64
formule 6.6 Clarity-50.....	64
formule 6.7 U_{50}	65
formule 6.8 C_{50}	65
formule 6.9 U_{50} berekend vanuit C_{50}	65
formule 6.10 D_{ci} Kritische afstand.....	66

formule 6.11 ALcons'71 voor D_{ci}	66
formule 6.12 ALcons'71 na D_{ci}	66
formule 6.13 ALcons'88.....	66
formule 6.14 ALcons \rightarrow STI.....	66
formule 6.15 Modulation reduction factor.....	67
formule 6.16 Apparent Signal-Noise Ratio.....	67
formule 6.17 Speech Transmission Index.....	67
formule 6.18 omrekenen STI \rightarrow STI-NOISE stap 1.....	68
formule 6.19 omrekenen STI \rightarrow STI-NOISE stap 2.....	68
formule 6.20 omrekenen STI \rightarrow STI-NOISE stap 3.....	68
formule 6.21 omrekenen STI \rightarrow STI-NOISE stap 4.....	68
formule 6.22 omrekenen STI \rightarrow STI-NOISE stap 5.....	68
formule 8.1 Geluidniveau.....	73
formule 8.2 Bronsterkte spreker.....	73
formule 8.3 Absorptie bezette klaslokaal.....	73
formule 8.4 Ventilatiegeluidniveau bezet klaslokaal.....	74
formule 8.5 geluid van het ventilatiesysteem.....	74
formule 8.6 geluid van de activiteit van scholieren.....	74

Tabellen

tabel 3.1 Berekeningsvoorbeeld zelfregelend effect.....	23
tabel 3.2 Overzicht temperaturen betonkernactivering ($t_{bi} = 21^{\circ}\text{C}$).....	26
tabel 3.3 verband tussen PMV en PPD.....	30
tabel 4.1 Normwaarden luchtgeluid isolatie.....	39
tabel 4.2 Normwaarden contactgeluidisolatie.....	41
tabel 4.3 Normwaarden contactgeluiddrukkniveau.....	42
tabel 5.1 Aantal meetposities voor het bepalen van de nagalmtijd.....	56
tabel 5.2 Minimale afstand tussen ontvanger en obstakel.....	56
tabel 6.1 SNR tabel voor klaslokalen.....	62
tabel 6.2 AI weefactor.....	64
tabel 6.3 Spraakverstaanbaarheid indeling sti.....	67
tabel 8.1 Meetresultaten en berekende absorptiecoëfficiënt.....	76
tabel 8.2 Absorptiecoëfficiënt per leerling.....	76
tabel 12.1 Beoordeling STI.....	90
tabel 12.2 Overzichttabel normen en richtlijnen.....	91
tabel 12.3 Toe te voegen m^2 aan de hand van de richtlijnen.....	92
tabel 12.4 Absorberende oppervlakken per richtlijn.....	92
tabel 12.5 Toe te voegen m^2 aan de hand van de richtlijnen.....	92
tabel 12.6 Absorberende oppervlakken per richtlijn.....	93
tabel 12.7 Toe te voegen m^2	94
tabel 14.1 Vermogens plafonds bij $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$	103

Figuren

figuur 3.1 bolvormig elementje gelegen boven een hoek van een rechthoekig vlak.....	17
figuur 3.2 bolvormig element midden boven vlak.....	17
figuur 3.3 Capaciteitsgrafiek betonkernactivering vermogen uitgezet tegen de ΔT	19
figuur 3.4 Luchtcirculatie t.g.v. inductie.....	20
figuur 3.5 worplengte van een ventilatiooster.....	20
figuur 3.6 Afbuiging bij een niet-isotherme luchtstroom.....	21

figuur 3.7	Mogelijke luchtstromingen bij verschillende Archimedesgetallen	22
figuur 3.8	Alpha-waarden betonoppervlak. in relatie tot temperatuurverschil	23
figuur 3.9	Schema temperatuurverloop; C warmer;	25
figuur 3.10	Warmteverlies van warmwaterleidingen in beton	26
figuur 3.11	Warmtebelasting kantoorvertrek (interne warmte last + zon)	27
figuur 3.12	Gemiddelde temperaturen in het kantoor vertrek zonder naregeling	28
figuur 3.13	Gemiddelde temperaturen in kantoorvertrek met geregelde watertemperatuur	28
figuur 3.14	Relatie tussen buitenluchttemperatuur en de aanvoertemperatuur (voorbeeld)	29
figuur 3.15	breedplaatvloer	33
figuur 3.16	waterleidingnet op breedplaatvloer	33
figuur 3.17	bubbledeckvloer met BKA	34
figuur 3.18	rib-cassettevloer	35
figuur 3.19	Vloeropbouw	35
figuur 3.20	Principe tekening van een combinatie BKA en koelplafond	37
figuur 3.21	Koelement met koppeling naar BKA	37
figuur 4.1	voorplanting van geluid van vertrek naar vertrek	38
figuur 4.2	geluidenergie-wand	42
figuur 4.3	Absorptiecoëfficiënt bepaling met een staandegolf	43
figuur 4.4	verschillende α -waarden met de zelfde NRC-50	45
figuur 4.5	A- B- C- D-Filter	47
figuur 4.6	NR-korven	48
figuur 5.1	Nagalmtijd	49
figuur 5.2	Bepaling van de ruimtewinkel van een vlak	51
figuur 5.3	Bepaling van de ruimtewinkel van een vlak	52
figuur 5.4	tekening vertrek1	52
figuur 5.5	relatieve fout van de berekende nagalmtijd van vertrek1	52
figuur 5.6	tekening vertrek2	53
figuur 5.7	relatieve fout van de berekende nagalmtijd van vertrek2	53
figuur 5.8	Vergelijking tussen meetwaarden en berekende waarden met Sabine	54
figuur 5.9	Vergelijking tussen meetwaarden en berekende waarden	54
figuur 6.1	geluidsterkte van spraak op 1 m	60
figuur 6.2	Spraak spectrum man/vrouw voor 4 spraakniveaus; normaal, verheffen, luid en schreeuwen	61
figuur 6.3	Geluiddruk niveau rondom het hoofd	61
figuur 6.4	(C-50, vroeg / laat - geluid)	64
figuur 6.5	vergelijk AL_{cons} en STI	66
figuur 7.1	nagalmtijd norm België	69
figuur 7.2	nagalmtijd norm Frankrijk	70
figuur 7.3	nagalmtijd norm Italië	70
figuur 7.4	nagalmtijd norm Italië	70
figuur 7.5	nagalmtijd norm Portugal	71
figuur 8.1	Verloop nagalmtijd bezet en onbezet klaslokaal	75
figuur 8.2	Verbetering van STI ten gevolge van bezetting	77
figuur 8.3	Afname van de nagalmtijd ten gevolge van bezetting	77
figuur 9.1	positie van absorptie	78
figuur 9.2	signaal-ruis verhouding	80
figuur 12.1	lokale IC_2.2 en IC_03	86
figuur 12.2	Afmetingen klaslokaal en plafondeiland	87
figuur 12.3	Verdeling van de tafels in het lokaal	87
figuur 12.4	afmetingen klaslokaal en plafondeiland	88
figuur 12.5	verdeling van de tafels in het klaslokaal	88
figuur 12.6	Variant V2	89
figuur 12.7	Variant V3	89
figuur 12.8	Variant V4a	89
figuur 12.9	enkelzijdige toekenning absorptie	89
figuur 12.10	dubbelzijdige absorptie	89
figuur 12.11	Doorsnede uiteindelijke model (V10c)	90

figuur 12.12	schets van optie 1.....	94
figuur 12.13	schets van optie 2.....	94
figuur 12.14	nagalmtijd en STI uitgezet tegen toegevoegde absorptie in lokaal 1C_03.....	95
figuur 12.15	nagalmtijd en STI uitgezet tegen toegevoegde absorptie in lokaal 1C_2.2.....	95
figuur 13.1	Geluidabsorptie materiaal	98
figuur 13.2	aanvullende wensen nagalmtijd.....	99
figuur 13.3	controle op aanvullende wensen.....	99
figuur 14.1	afmetingen baffles.....	101
figuur 14.2	baffles in een hal.....	101
figuur 14.3	profiel van een gevouwen en geperforeerde staalplaat.....	101
figuur 14.4	Trisco invoer en werkelijkheid	101
figuur 14.5	geperforeerde staalplaat.....	101
figuur 14.6	meetpunten in het lokaal	102
figuur 14.7	zichtlijnen bij baffles.....	102
figuur 14.8	zichtlijnen bij een gevouwen staalplaat	102
figuur 15.1	wandpaneel zonder bescherming.....	104
figuur 15.2	wandpaneel met bescherming.....	104
figuur 15.3	plattegrond.....	105
figuur 15.4	richten van de ventilatiestroom.....	105
figuur 15.5	Plattegrond.....	106
figuur 15.6	Ventilatiestroom.....	106
figuur 15.7	Plattegrond.....	106
figuur 15.8	Ventilatiestroom.....	106
figuur 15.9	plattegrond.....	107
figuur 15.10	Ventilatiestroom Worp	107

INLEIDING

1 Inleiding

1.1 Probleemgebied

Het akoestische comfort van gebruikersruimten met toepassing van betonkernactivering is in veel gevallen een probleem.

Het kenmerk van betonkernactivering is dat de leidingen in de kern van de vloer cq. plafond zijn aangebracht en niet in de dekvloer. Betonkernactivering is het beïnvloeden van de bouwmassa met als doel een aangenaam en weldadig binnenklimaat te creëren. Het principe is gebaseerd op accumulatie van warmte en koude in de bouwconstructie.

Wegens uitstekende isolatie van de moderne gebouwen is slechts een beperkte capaciteit nodig voor verwarmen of koelen. Als gevolg hiervan en door het grote verwarmend/koelend oppervlak van plafond en vloer, hoeft het temperatuurverschil tussen de lucht in de ruimte en het oppervlak van de vloer en het plafond slecht klein te zijn om aan de warmte- of koudebehoefte te voldoen.

Het akoestische probleem ontstaat doordat het toepassen van een bouwkundige afwerkingconstructie in principe niet gewenst is. Onder die afwerkingconstructie vallen; verlaagde plafonds, computervloeren en zwevende vloeren. Terwijl juist deze constructies het akoestische comfort verhogen.

De reden dat bij betonkernactivering deze afwerkingconstructies niet worden toegepast is dat het beste resultaat wordt bereikt wanneer de vertrekklucht in direct contact staat met het beton.

Het weg laten of veranderen van bovengenoemde afwerkingconstructies heeft onder andere effect op geluidsaspecten zoals; het akoestische comfort van de betreffende ruimte, maar ook met geluidsoverdracht naar de naast, boven en onder gelegen vertrekken.

1.2 Probleemstelling

Bij de toepassing van betonkernactivering is in eerste instantie alleen gerekend met het thermische comfort en energiebesparing. De akoestische gevolgen zijn nog bijna niet bekeken. De probleemstelling is dan ook of zowel thermisch als akoestisch goede resultaten haalbaar zijn met Betonkernactivering

1.3 Doelstelling

De doelstelling van mijn afstuderen is het in kaart brengen van mogelijke akoestische problemen van de vertrekken waar betonkernactivering wordt toegepast. In mijn afstuderen wil ik me vooral richten op klaslokalen. Hierin zullen waarschijnlijk bij verschillend gebruik verschillende problemen voorkomen.

Van de verwachte problemen zijn de ruimteakoestische problemen het grootst. Die wil ik dan verder gaan beoordelen. In de beoordeling wil ik verder gaan dan de Nederlandse Norm, omdat bekend is dat het akoestische comfort een strengere wens heeft.

Het installatieadviesbureau Deerns past in veel projecten betonkernactivering toe; bij het in kaart brengen van de problemen kunnen dan ook metingen verricht worden.

Voor de ruimteakoestische problemen wil ik een of meerdere oplossingen ontwikkelen. Waarbij ook andere (bouwfysische)aspecten worden beoordeeld; thermische gedrag, ventilatie-effectiviteit en installatietechnisch.

Dit zou ik dan samen kunnen doen met Deerns, omdat Deerns veel andere aspecten van betonkernactivering heeft onderzocht/onderzoekt. Hierin wil ik niet uitsluiten dat het akoestische comfort nooit te lijden heeft door de toepassing van Betonkernactivering en een goede combinatie niet haalbaar is.

LITERATUURSTUDIE

2 Betonkernactivering

2.1 Inleiding

De nationale Dubo-lijst voor utiliteitsgebouwen beveelt een aantal maatregelen aan die het gebruik van vloerkoeling stimuleren. Dit zijn:

- Beperk het ventilatorvermogen ten behoeve van mechanische ventilatie
- Maak gebruik van alternatieve koelsystemen
- Pas stralingskoeling toe
- Pas onderhoudsvriendelijke installaties toe

Alhoewel onder ‘pas laag temperatuurverwarmingssysteem toe’ verwezen wordt naar het verbeteren van het exergetisch rendement van verwarmingssystemen wordt de stap naar ‘pas hoog temperatuurkoelsysteem toe’ ter verbetering van het exergetisch rendement van koelsystemen nog niet gezet.¹

Steeds betere isolatie van de gebouwen is de oorzaak van een toenemende vraag naar koeling. Sinds een jaar of vijftien is het koelen met een vloerverwarmingssysteem ook actueel. Door koud water door het systeem te voeren worden de vloeren in temperatuur verlaagd.

2.2 Principe betonkernactivering (BKA)

Betonkernactivering is een volgende stap hierin. Betonkernactivering zet het accumulerend vermogen van beton in voor de koeling en verwarming van gebouwen. Het systeem is lijkt op als vloerverwarming een met water gevulde kunststofleidingen. Maar in tegenstelling toe het vloerverwarmingssysteem is de waterleiding niet in de dekvloer aangebracht maar in de kern van de betonnen vloerconstructie. Afhankelijk van de watertemperatuur wordt de betonmassa opgewarmd of afgekoeld. De betonmassa slaat de warmte of koude op. Afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de ruimte en het betonoppervlak staat het vloeroppervlak langzaam warmte af of neemt het juist warmte op. In dit systeem wordt water gebruikt als warmtegeleider. Indien het plafond en de vloer volledig benut kunnen worden is een watertemperatuur van 18 – 20 °C voldoende om het gebouw ‘s zomers binnen het acceptabele behaaglijkheidsgebied van 23 – 26 °C te houden. In de wintersituatie levert een aanvoertemperatuur van 26 – 28 °C meestal voldoende vermogen voor een ruimtetemperatuur tussen 20 en 24 °C

2.3 Toepassingsgebied

Het systeem is voornamelijk geschikt voor utiliteitsbouw met een normale warmte- en koellast.

Het gebouw moet aan een aantal voorwaarden voldoen voor de toepassing van BKA.

Het accumulerend vermogen van het gebouw is de drijvende kracht achter het systeem. Dit is het grote verschil met bijvoorbeeld een koelplafond; bij een koelplafond wordt alle warmte afgevoerd terwijl bij betonkernactivering het grootste deel van de warmteenergie

¹ CAUBERG, BW, 2003

wordt opgeslagen in het beton. Het is dus van belang dat de vloeren van (vrijwel massief) beton zijn. Maar ook hier zijn er grenzen, de meewerkende massa is eindig, de eerste 10cm van de betonmassa werkt effectief mee; dit hangt af van de tijdsconstante, bij een dagcyclus is dit ongeveer 10cm. Buiten deze massa neemt het effect van de warmte opslag sterk af.

De warmtebelasting van het gebouw mag niet te hoog zijn. Dit stelt dus eisen aan zowel de Rc waarde van de gevels, ZTA-waarde en glaspercentage, de externe component, als aan de interne belasting. Voor een effectief systeem is het van belang dat het vertrek in direct contact staat met de betonmassa. Verlaagde plafonds staan de werking in de weg, dit heeft tot gevolg dat alle leidingen en systemen die normaal achter dit plafond worden weggewerkt in het zicht komen te liggen. Het feit dat de leidingen zoveel mogelijk in de kern van de constructie moeten liggen heeft tot gevolg dat het systeem alleen in nieuwbouw toegepast kan worden.

2.4 Voordelen en nadelen t.o.v. traditionele klimaatsystemen in gebouwen.

De mogelijkheid tot gebruik van duurzame energiebronnen zoals aardwarmtewisselaars, zonne-energie enz. wordt met dit systeem vergroot, omdat het gebruik maakt van relatief hoge watertemperaturen voor koeling en relatief lage watertemperaturen voor verwarming. Dit heeft namelijk een positieve invloed op het rendement van verwarmingsketels, warmtepompen en koelmachines. Het geeft een hoog thermische comfort door grote stralingsoppervlakken, met een klein temperatuurverschil. Het luchtbehandelingsysteem kan kleiner gedimensioneerd worden, daar dit nog slechts alleen de benodigde ventilatielucht behoeft te verplaatsen. Hierdoor heeft men ten opzichte van een all-airstelsel minder last van tocht, geluid en stofverplaatsing. Voor architecten betekent de integratie van installatie en constructie daarnaast een grote ontwerprijheid. De grote afmetingen van traditionele luchtbehandelingkanalen bezorgen menigeen hoofdbrekens, vooral omdat installatieadviseurs vaak pas in een laat stadium van het ontwerp bij het project worden betrokken en er altijd meer ruimte nodig is dan is voorzien. Door de integratie van installatie en constructie is het een eerste vereiste dat alle betrokkenen: opdrachtgever, architect, installatieadviseur, installateur, constructeur, aannemer en leverancier in een vroeg stadium bij de plannen betrokken worden en mee kunnen denken. Verder kan door het ontbreken van verlaagde plafonds de bouwhoogte gereduceerd worden.

Een belangrijke voorwaarde voor een goede werking van het systeem is dat de betonoppervlakken zoveel mogelijk vrij worden gehouden. Systeemplafonds kunnen dus niet worden toegepast. Voor akoestische voorzieningen en verlichting zullen oplossingen moeten worden gezocht. Een ander nadeel is dat betonkernactivering een collectief en traag systeem is dat niet op de individuele wens van de gebruiker kan ingaan. Betonkernactivering realiseert een gelijkmatige basistemperatuur voor het hele gebouw die voor het grootste deel van de omstandigheden voldoet. Met een beperkte naregeling via ventilatie met behulp van een convector kan de ruimtetemperatuur desgewenst eenvoudig worden beïnvloed en aan individuele wensen tegemoetkomen. Tevens is het koelend vermogen begrensd door de maximale temperatuurverschillen tussen de vertrektemperatuur en de oppervlaktetemperatuur.

3 Werking van BKA

Het systeem wordt in vloeren en plafonds verwerkt. Hiervoor moeten de vloeren en daken van beton zijn gemaakt. Door te kiezen voor geen verlaagd plafond is het plafond bruikbaar als verwarming- of koelvlak. Door de goede isolatie van moderne gebouwen is een beperkte verwarmings- of koelcapaciteit nodig. Als gevolg hiervan en als gevolg van het grote verwarmend/koelend oppervlak van plafond en vloer, behoeft het temperatuurverschil tussen de lucht in het vertrek en het oppervlak van de vloer en plafond slechts klein te zijn om aan de warmte- of koudebehoefte te voldoen.

De installatie werkt bij een klein verschil tussen toe- en afvoertemperatuur en hoge koel- en lage verwarmingstemperaturen. Deze temperatuur is globaal gekoppeld aan de buitentemperatuur. In het tussen seizoenen wanneer er niet verwarmd of gekoeld wordt, kan het van belang zijn het water in de installatie te laten circuleren. Hierdoor ontstaat een temperatuurvereffening tussen de zon- en schaduwgevel

3.1 Zelfregelend effect.

Het thermische actieve beton kent net als andere vlaksystemen een zogenaamd zelfregulerend effect. Dit betekent dat bij het wijzigen van de zogenaamde overtemperatuur (= verschil tussen de ruimtetemperatuur en de gemiddelde temperatuur van de vloer en/of plafond) door de verandering van de interne en/of externe belastingen de warmte afgifte of opname sterk zal af- of toenemen. Het vermogen dat wordt geleverd, is op natuurlijke wijze afhankelijk van de warmtebelasting. De α -waarde is afhankelijk van het temperatuurverschil $\alpha_{\text{beton}} = \alpha_{\text{convectie}} + \alpha_{\text{straling}}$. In alle gevallen bedraagt het stralingsaandeel² α_{straling} ca. 5,5 W/(m²*K); het resterende gedeelte is convectie

3.1.1 Straling

De stralingscomponent is afhankelijk van een aantal factoren:

- de oppervlaktetemperatuur van het bouwdeel;
- de eigenschappen van het materiaal zoals de emissiegraad en de reflectiefactor;
- de gesteldheid van de oppervlakte, meestal aangegeven met de vormfactor en de oppervlaktefactor.

Deze eigenschappen bepalen de mate waarin de warmteoverdracht plaatsvindt tussen het bouwdeel en de omhullende lucht.

Voor de stralingscomponent wordt de formule voor warmteoverdrachtscoëfficiënt³:

$$\alpha_{\text{rad}} = \epsilon_{\text{bouwdeel}} \cdot \sigma \cdot \theta$$

formule 3.1 stralingscomponent warmteoverdrachtscoëfficiënt

met:

α_{rad} = warmteoverdrachtscoëfficiënt stralingscomponent [W/m²K]

$\epsilon_{\text{bouwdeel}}$ = emissiefactor van de bouwdelen

σ = constante van Stefan-Boltzmann [W/m²K⁴]

$\theta_{\text{bouwdeel-ruimte}} = (T_{\text{bouwdeel}}^4 - T_{\text{ruimte}}^4) / (T_{\text{bouwdeel}} - T_{\text{ruimte}})$

De constante van Stefan-Boltzmann⁴ is ongeveer 5,67•10⁻⁸ W/m²K⁴ en de emissiefactor voor bouwdelen is 0,9. Uit een theoretische benadering van de warmtecoëfficiënt voor de stralingscomponent is aantoonbaar dat met een gemiddelde $\theta_{\text{bouwdeel-ruimte}}$ van 1,05•10⁸ K³ een gemiddelde waarde voor α_{rad} van 5,5 W/m² wordt gevonden.

² HANDBOEK WTH

³ DE SCHREVEL, V&V, 2002

⁴ SMITH STAMMERS, 1973

3.1.2 Zichtfactoren

De stralingstemperatuur in een ruimte is te berekenen door de zichtfactor te vermenigvuldigen met de oppervlakte temperatuur.

$$t_s = \Phi_1 t_1 + \Phi_2 t_2 + \Phi_3 t_3 + \Phi_4 t_4 + \Phi_5 t_5 + \Phi_6 t_6$$

formule 3.2 gemiddelde stralingstemperatuur in vertrekken

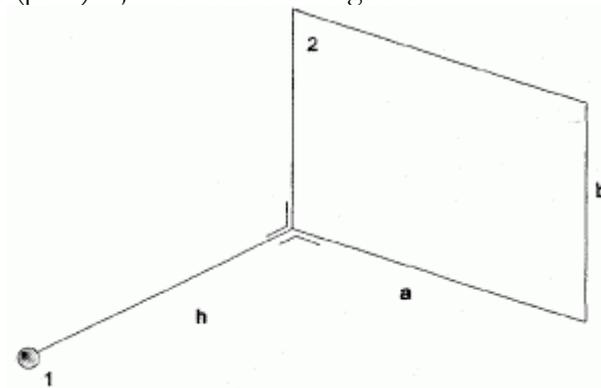
met:

t_i = de temperatuur van de verschillende vlakken in °C

Φ = zichtfactor [-]

In gevallen met zeer kleine verschillen tussen de diverse wandtemperaturen, zoals bij inpandige ruimten, kan met de gemiddelde stralingstemperatuur ook redelijk benaderen door de wandtemperaturen eenvoudig naar oppervlak te middelen.

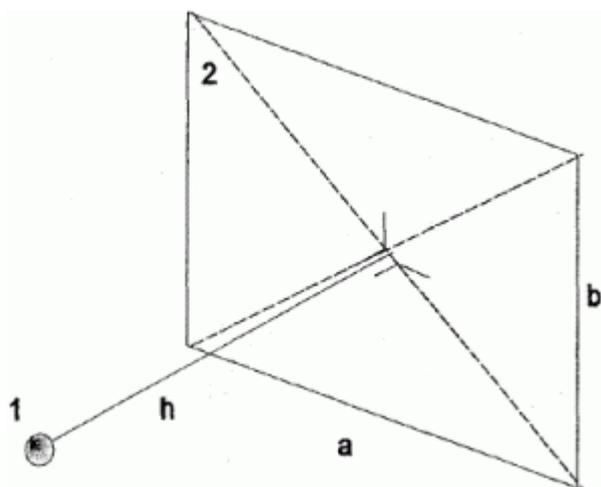
Echter, zodra er een vlak niet volledig zichtbaar is, door baffles, gaat dit niet meer op. Voor het bepalen van de gemiddelde stralingstemperatuur op een willekeurige plaats in een vertrek, kan men zich in dat punt een bol-oppervlak van willekeurig kleine afmetingen voorstellen, dat warmtestraling uitwisselt met alle wanden van het vertrek. Voor zo'n bolvormig elementje (punt) zijn zichtfactoren afgeleid.



figuur 3.1 bolvormig elementje gelegen boven een hoek van een rechthoekig vlak

$$\Phi = \frac{1}{4\pi} \cdot \arctg \frac{a \cdot b}{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}$$

formule 3.3 bolvormig elementje gelegen boven een hoek van een rechthoekig vlak



figuur 3.2 bolvormig element midden boven vlak

$$\Phi = \frac{1}{\pi} \cdot \arctg \frac{\frac{a}{2h} \cdot \frac{b}{2h}}{\sqrt{\left(\frac{a}{2h}\right)^2 + \left(\frac{a}{2h}\right)^2 + 1}}$$

formule 3.4 bolvormig element midden boven vlak

voorbeeld

Gegeven:

Vertrek met afmetingen 7,5*9*3(b*d*h)

In het midden van het vertrek op 1 meter boven de vloer is een meetpunt gelegen.

Leeg vertrek

Aan de hand van de gegeven formules krijg je voor de verschillende vlakken de volgende zichtfactoren

plafond	vloer	bordwand	gangwand	achterwand	Raamwand	Totaal
0,299	0,392	0,064	0,091	0,064	0,091	1

De sommatie van de verschillende zichtfactoren moet 1 zijn.

Situatie met baffles.

De baffles hangen op 200 mm vanaf het plafond en hebben een onderlinge afstand van 300 mm en een hoogte van 300 mm.

Door de baffles zal de zichtfactor van het plafond afnemen.

plafond	vloer	bordwand	gangwand	achterwand	Raamwand	Totaal
0,121	0,392	0,064	0,091	0,064	0,091	0,822

De resterende 0,178 van de zichtfactor is toe te rekenen aan de baffles, om zowel aan een totale zichtfactor van 1 te komen.

Voor de stralingswarmte die vanaf het plafond naar het punt straalt blijft 40% over van de oorspronkelijke waarde. Er vanuit gaande dat de baffles de ruimte temperatuur aannemen.

3.1.3 Convectie

De convectiecomponent is afhankelijk van:

- de verschiltemperatuur tussen het bouwdeel en de lucht;
- de stromingssnelheid van de lucht;
- het soort stroming (laminair of turbulent);
- de richting van de warmtestroom(naar boven of naar beneden);
- de ruwheid van de oppervlakte;
- de geometrie van het plafond.

Het warmtetransport bij convectieve overdracht kan worden weergegeven als⁵

$$Q_{conv} = \alpha_{conv} \cdot (T_{ruimte} - T_{bouwdeel})$$

formule 3.5 convectieve aandeel warmtetransport

Q_{conv} = convectieve aandeel warmtetransport [W/m²]

α_{conv} = warmteoverdrachtscoëfficiënt convectieve component [W/m²K]

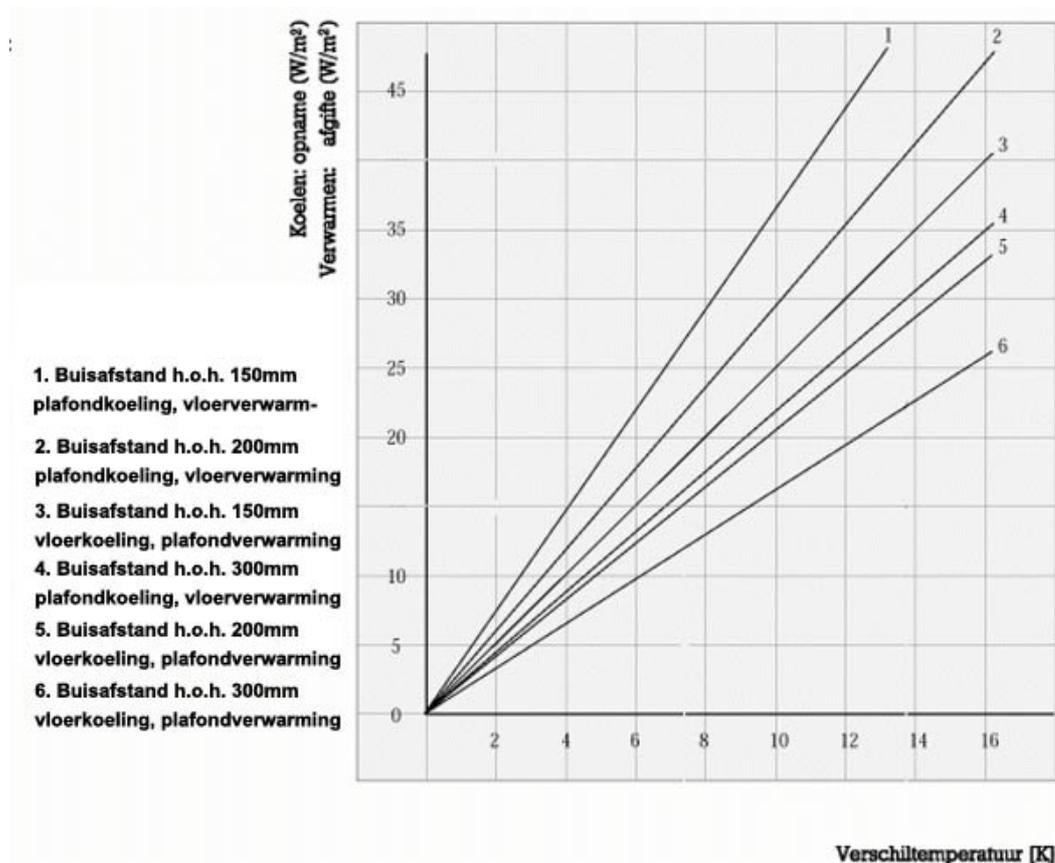
$T_{bouwdeel}$ = temperatuurbouwdeel

T_{ruimte} = temperatuuruimte

⁵ OLESEN MICHL BONNEFOI DE CARLI, ASHRAE, 2000

Doordat warme lucht op stijgt en koude lucht daalt zal het vermogen voor plafond koeling groter zijn dan plafondverwarming en voor de vloeren geldt dat vloerverwarming een groter vermogen heeft dan vloerkoeling.

Deze vermogens zijn in figuur -3.3- terug te vinden uitgezet tegen ΔT ; het verschil tussen de toevoertemperatuur en de vertrektemperatuur.



figuur 3.3 Capaciteitsgrafiek betonkernactivering vermogen uitgezet tegen de ΔT

Doordat de convectie afhankelijk is van de luchtstroom wordt er onderscheid gemaakt tussen vrije convectie en gedwongen convectie.

Het vermogen van vrije convectie bij een luchttemperatuur van ongeveer 20°C en een temperatuur verschil van kleiner dan 15 °C is dan:

$$\alpha_{conv} = 3,5 + 0,09 \cdot \Delta T$$

formule 3.6 convectiecomponent warmteoverdrachtcoëfficiënt bij vrije convectie

α_{conv} = warmteoverdrachtcoëfficiënt convectieve component [W/m²K]

ΔT = temperatuur verschil tussen bouwdeel en ruimte [K]

Bij gedwongen convectie is het vermogen een stuk hoger.

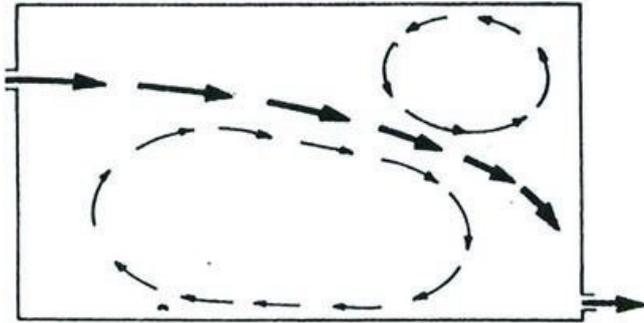
$$\alpha_{conv} = 5,6 + 4,0 \cdot v$$

In een klaslokaal is de instroom luchtsnelheid (v) ongeveer 1,25 m/s

formule 3.7 convectiecomponent warmteoverdrachtcoëfficiënt bij gedwongen convectie

Bij berekening van het vermogen bij gedwongen convectie moet rekening gehouden worden met het feit dat de ventilatielucht niet over het hele plafond dezelfde snelheid zal

hebben. Dit is afhankelijk van de worplengte van de ventilatieroosters, het coanda-effect en het getal van Archimedes.



figuur 3.4 Luchtcirculatie t.g.v. inductie

3.1.4 Worp

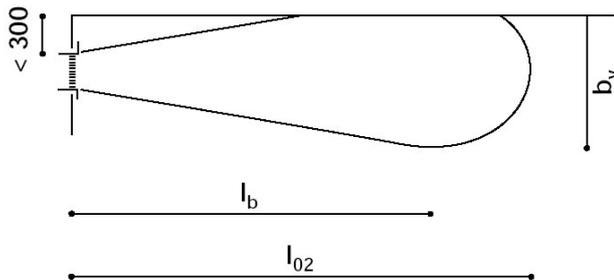
De luchtstroom zal deels door het coanda-effect aan het plafond kleven, maar lucht is ook onderhevig aan zwaartekracht. Als de inblaaslucht kouder is dan de aanwezige lucht zal de koude en zwaardere lucht gaan dalen en neemt de gedwongen convectie af.

Hoe lang de lucht aan het plafond blijft hangen is deels te berekenen met het getal van Archimedes.

3.1.4.1 Coanda-effect

Als de lucht wordt aangevoerd langs een begrenzingoppervlak, bijv. een plafond, ontstaat er een onderdruk tussen de luchtstraal en het plafond, waardoor de straal aan het plafond gaat “kleven” (het zogenaamde coanda-effect). Dit effect is van grote betekenis, met name bij de aanvoer van gekoelde lucht. Om een zo groot mogelijk coanda-effect te krijgen, moet de lucht worden toegevoerd in kleine hoeveelheden per rooster, met een zo groot mogelijke spreiding op het plafond en met een zo groot mogelijke snelheid. Het effect verdwijnt geheel bij snelheden beneden de 0,35 m/s.

Als een wandrooster op minder dan 300 mm van het plafond is gemonteerd, dienen de waarden voor de worplengte I_{02} te worden vermenigvuldigd met 1,4. I_{02} is de worp lengte die door fabrikanten wordt opgegeven voor de roosters.



figuur 3.5 worplengte van een ventilatierooster

3.1.4.2 Getal van Archimedes

Dit Archimedes getal geeft de verhouding tussen de thermische kracht en de traagheidskracht. In formule vorm:

$$Ar = \frac{g \cdot l \cdot \beta \cdot \Delta T}{v^2}$$

formule 3.8 getal van Archimedes

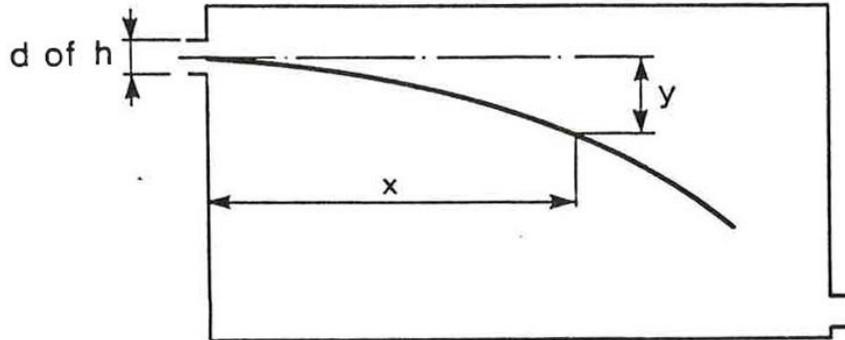
g = versnelling van de zwaartekracht

l = hoogte van de spleetvormige opening

ΔT = temperatuurverschil tussen vertreklucht en inblaaslucht

β = kubieke uitzettingscoëfficiënt

v = luchtsnelheid in de inblaasopening



figuur 3.6 Afbuiging bij een niet-isotherme luchtstroom

Volgens Regenscheit wordt de baan van de hartlijn van een niet-isotherme vlakke luchtstraal beschreven als:

$$\frac{y}{h} = 0,4\sqrt{m} \cdot Ar \cdot \left[\frac{x}{h} \right]^{2,5}$$

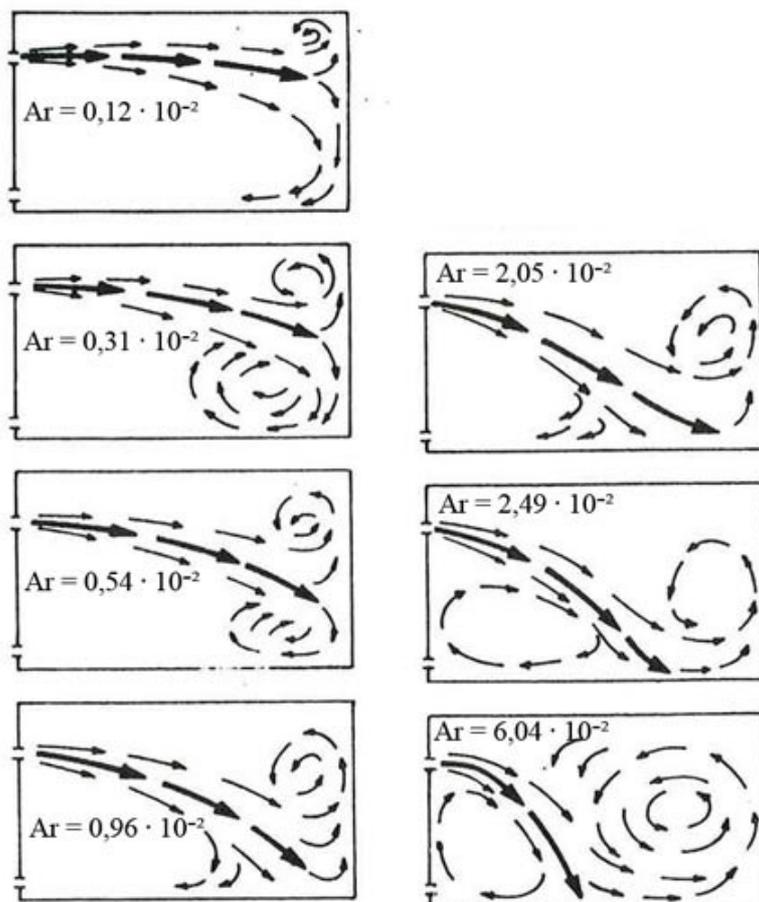
formule 3.9 afbuiging van de luchtstroom in de ruimte

x, y, h : (zie figuur)

m = massastroom

Ar = Getal van Archimedes [-]

Bij een relatief weinig massastroom van lucht (30-40 dm³/s.m) zal door inductie van de omringende lucht en de turbulentie de lengte van de luchtstraal niet groot zijn; meestal 1-2m bij koudelucht(0°C)



figuur 3.7 Mogelijke luchtstromingen bij verschillende Archimedesgetallen

3.1.5 Berekeningsvoorbeeld zelfregelend effect.

Koeling via het plafond

Standaard:

Ruimtetemperatuur: 21 °C

T gem. Vlaksysteem: 19 °C

 ΔT 2K α 9,56 W/(m²*K)

Na wijziging van de interne last:

Ruimtetemperatuur: 25 °C

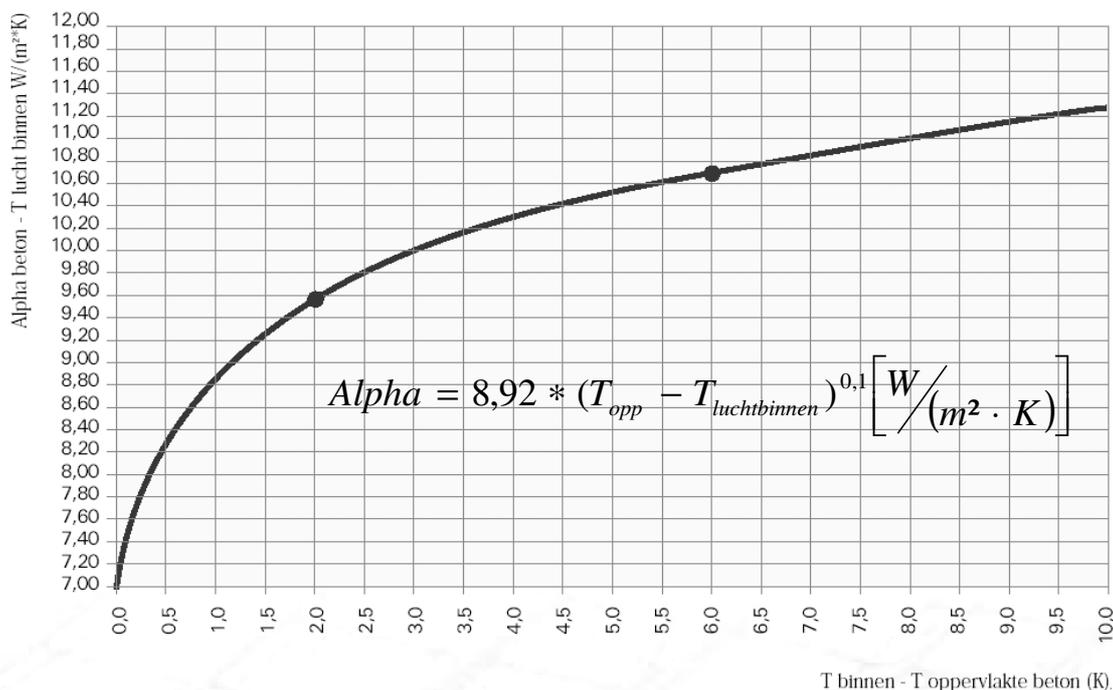
T gem. Vlaksysteem: 19 °C

 ΔT 6K α 10,67 W/(m²*K)

$$P_{\text{koel}} = 2\text{K} * 9,56 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) = 19 \text{ W}/\text{m}^2$$

tabel 3.1 Berekeningsvoorbeeld zelfregelend effect

$$P_{\text{koel}} = 6\text{K} * 10,67 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) = 64 \text{ W}/\text{m}^2$$



figuur 3.8 Alpha-waarden betonoppervlak. in relatie tot temperatuurverschil

3.1.6 Accumulatie of warmteopslagcapaciteit

Door gebruik te maken van de grote massa en soortelijke warmte van betonconstructies kan de warmte afgifte of –opname gedurende een lange tijd plaatsvinden, waarbij de temperatuur van de constructie maar langzaam zal wijzigen.

Wanneer tijdens de nacht wordt gekoeld, waarbij de in- en externe belastingsfactoren, zoals personen, verlichting, machines, elektrische apparaten en zon ontbreken of sterk gereduceerd zijn, kan de bouwmassa enkele graden afgekoeld worden. Hierdoor wordt voor de dagsituatie een groter accumulerend vermogen bereikt. Het zal daarom langer duren voordat deze massa weer is opgewarmd en een temperatuuroverschrijding in de ruimte zal minder vaak optreden.

Voorbeeld:

28 cm dikke betonplaat met een massa van 2400 kg/m³ een soortelijke warmte van 0,880 kJ/(kg*K). Het accumulatievermogen bedraagt voor 1 uur:

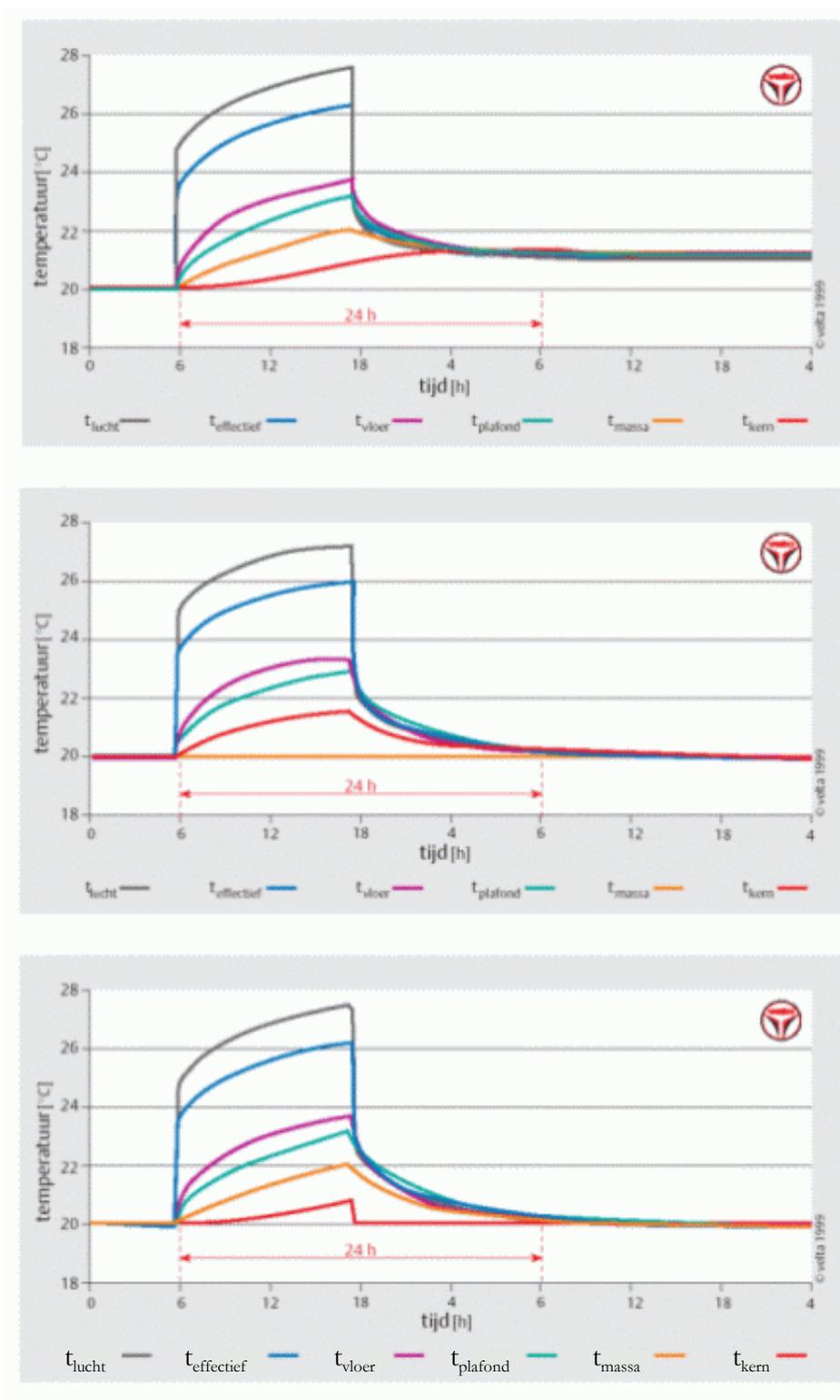
6 HANDBOEK TBA

$$\frac{0,880 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 2400 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,28m}{3600sec} = 164 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

formule 3.10 Accumulatievermogen

Uit deze berekening volgt een warmteopslag vermogen van 164 W/(m²*K), hetgeen dus inhoud 164 W/m² bij 1K temperatuurswijziging.

Wanneer de koelbehoefte van het kantoor 30 W/m² bedraagt, kan hiermee 164/30 = 5.48 uur koelvermogen geleverd worden per graad temperatuurverandering van de constructie. Wanneer de massa tijdens de nacht bijvoorbeeld 2K gekoeld word, dan beschikt men dus over 2 * 5,48 = 10,95 uur opslagcapaciteit in de betonconstructie. Praktijkmetingen hebben aangetoond dat aan dit dynamische proces; met een dagcyclus, slechts de buitenste tien centimeter deelnemen. Bij een bouwdeeldikte van 20 centimeter is een actief betonsysteem een goed werkende oplossing.

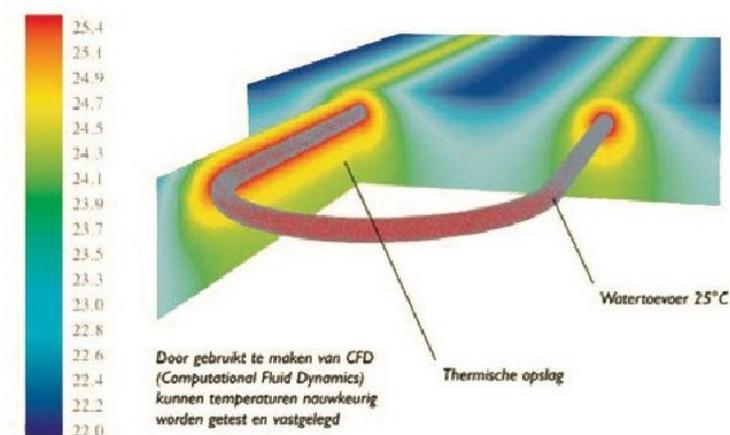


figuur 3.9 Schema temperatuurverloop; C warmer;
 Zonder betonkernactivering is de massa telkens na een productiedag en afkoeling 1,5°C warmer;
 Met betonkernactivering 24 uur in bedrijf constant op 20°C, na 245 uur is het startpunt weer bereikt;
 Met betonkernactivering alleen in werking buiten de belastingsperiode, ook dan is na 24 uur het startpunt bereikt.
 Na 6 uur is de ruimtetemperatuur iets hoger dan bij constante werking.

3.1.7 berekening van warmtecapaciteit van gebouwmassa rond leidingen

Een benadering van de warmtebuffering rondom de ongeïsoleerde leidingen in de betonmassa volgt uit de verhouding tussen de meewerkende betonmassa en de waterinhoud in de leiding. Bij een veronderstelde invloed van tot 75 mm van de buis op basis van eerder onderzoek aan tapwaterleidingen⁷ zorgt het beton voor een warmtecapaciteit van 5.600 maal de warmtecapaciteit van het circulerende water.⁸

Doordat niet de volledige massa meewerkt is er een verschil tussen de watertemperatuur en de oppervlakte temperatuur. Hiervoor zijn rekenmodellen opgesteld. Daarin wordt rekening gehouden met de watertemperatuur de h.o.h. afstand van de leidingen, de afstand tot het oppervlak en de vloerafwerking. Voor het bepalen van het vermogen wordt gerekend met de oppervlakte temperatuur.



figuur 3.10 Warmteverlies van warmwaterleidingen in beton

Uitgaande van een betonvloer van 320 mm dik en een warmwaterbuis in de kern van de vloer h.o.h. 150 mm en een vloerafwerking met een R-waarde van 0,1 m²K/W en een binnen temperatuur van 21°C zijn de oppervlakte temperaturen weer gegeven in de volgende tabel

T _{aanvoer} [°C]	T _{vloer} [°C]	T _{plafond} [°C]
34	23,5	30,1
37	24,0	32,2
41	24,7	34,9

tabel 3.2 Overzicht temperaturen betonkernactivering ($t_{bi} = 21^\circ\text{C}$)⁹

3.2 Regeling van BKA

Het watersysteem van BKA wordt met een installatiesysteem verwarmd of gekoeld. Het verwarmen kan door middel van een verwarmingsketel en het koelen door middel van een koeltoren. Maar ook kan er voor gekozen worden te verwarmen en te koelen met een warmtewisselaar in de grond.

3.2.1 watertemperatuurregeling

Indien er geen watertemperatuurregeling zouden toepassen en de watertemperatuur wordt vast in gesteld op 22 °C, dan zou de vloer- en plafondtemperatuur tussen de

⁷ AFINK, V&V, 2002

⁸ BOOTSVELD VAN DER HOFF, TVVL, 2005

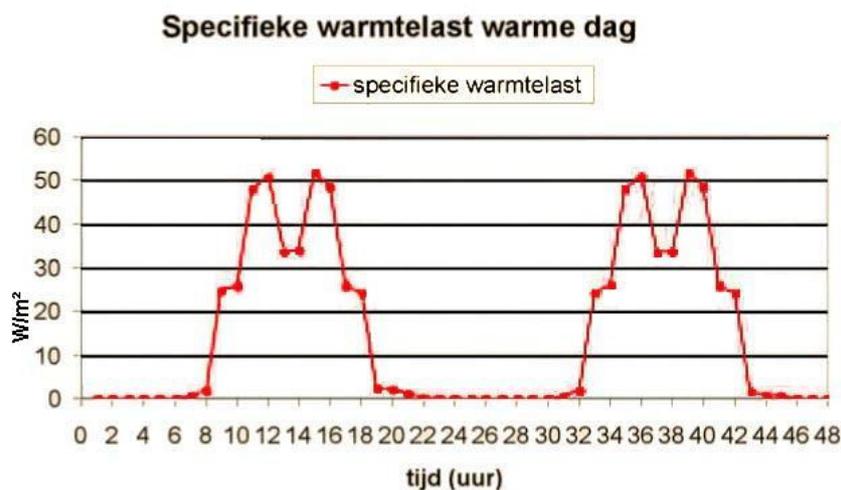
⁹ HNADBOEK TBA

watertemperatuur en de ruimtetemperatuur in liggen. Dus zal in de winter de vloer of het plafond de ruimte gaan verwarmen en in de zomer gaan koelen. Dit geeft nogmaals aan hoe het zelfregelend effect werkt. Door continu doorstromen van het water in het systeem is het mogelijk dat bij deze omstandigheden het systeem in de ene ruimte koelt en de warmte aan een andere ruimte overbrengt; dit noemt men temperatuurvereffening.

Maar er wordt gebruik gemaakt van een watertemperatuurregeling. Hiermee wordt het effect van het systeem versterkt. De regeling reageert op buiten- en binnentemperatuur en kan bijvoorbeeld gevelgewijze zijn ingedeeld. Door het trage karakter van BKA heeft het temperatuurregelen per ruimte geen zin. Dit is ook een reden dat BKA soms aangevuld wordt met een ander systeem.

3.2.2 Voorbeeld berekening

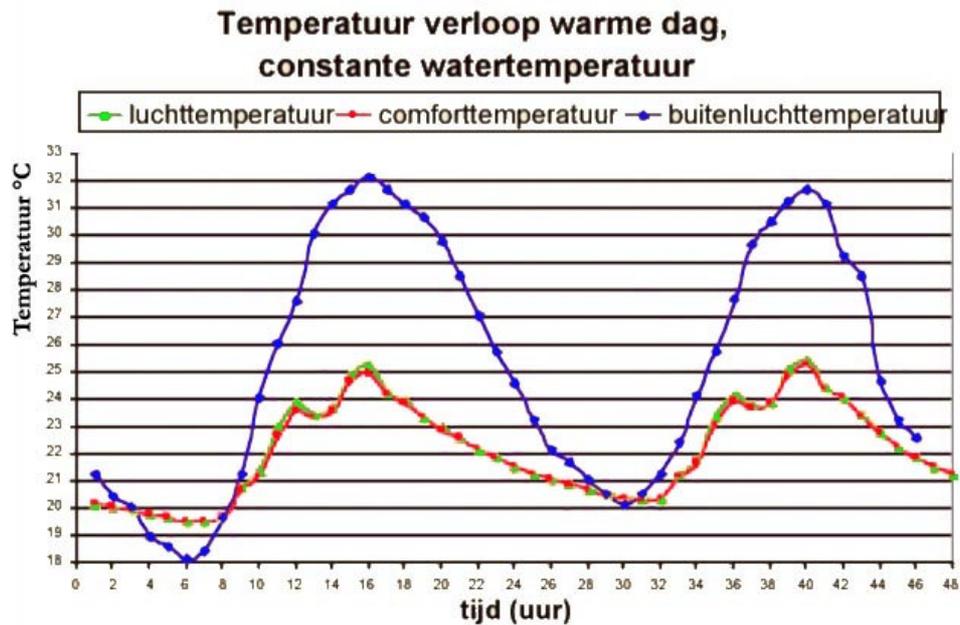
Voor een voorbeeldproject is het effect van een wisselende interne warmtelast, doorgerekend voor een zomerperiode.¹⁰ Hierbij is gebruik gemaakt van een temperatuuroverschrijdingsberekening (VA 114), waarmee de gemiddelde temperatuur is berekend in de ruimte. Bij een wisselende warmtebelasting, zoals weergegeven in figuur -3.11-, resulteert een verloop van de lucht- en comforttemperatuur, zoals weergegeven in figuur -3.12-. Hieruit blijkt dat de gemiddelde temperatuur binnen de comfortgrenzen valt, bij een sterke wisseling van de warmtebelasting. Wel treedt er binnen een werkdag een stijging op van 5 °C. De zelfregelende werking kan immers pas gaan werken als er een temperatuurverschil ontstaat tussen de ruimte en het betonnen plafond. Met toename van het temperatuurverschil neemt ook het koelvermogen toe. Uitgangspunt voor deze berekening was een constante aanvoertemperatuur van het water en een constante inblaasttemperatuur van de ventilatielucht. Door de watertemperatuur te variëren, kan men de stijging reduceren tot 3 °C (figuur -3.13-). Een meer flexibele regeling wordt verkregen door de inblaasttemperatuur van de ventilatielucht na te regelen.



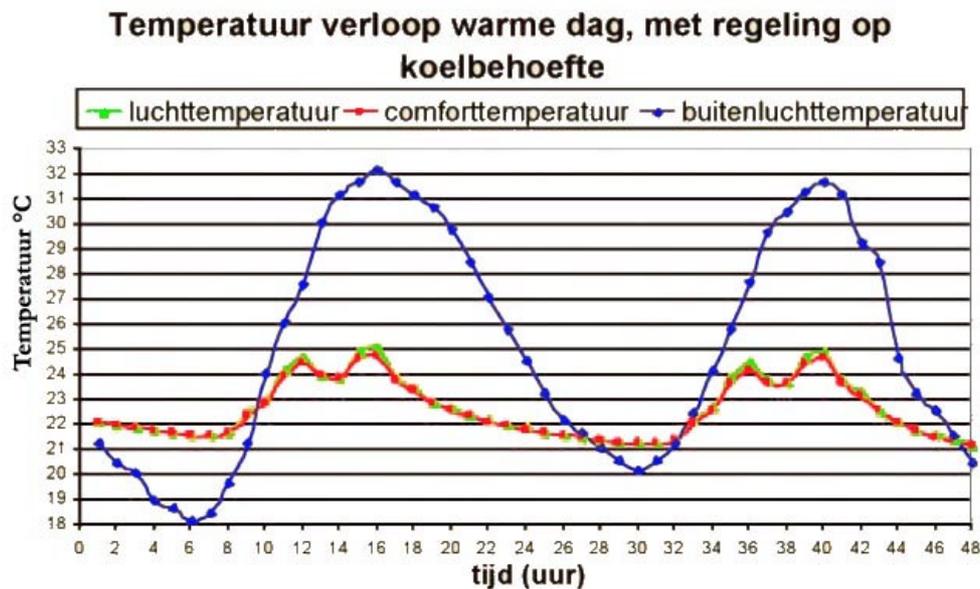
Warmtebelasting kantoorvertrek (interne warmtelast + zon).

figuur 3.11 Warmtebelasting kantoorvertrek (interne warmte last + zon)

¹⁰ WISSE, TVVL, 2004



figuur 3.12 Gemiddelde temperaturen in het kantoor vertrek zonder naregeling



figuur 3.13 Gemiddelde temperaturen in kantoorvertrek met geregelde watertemperatuur

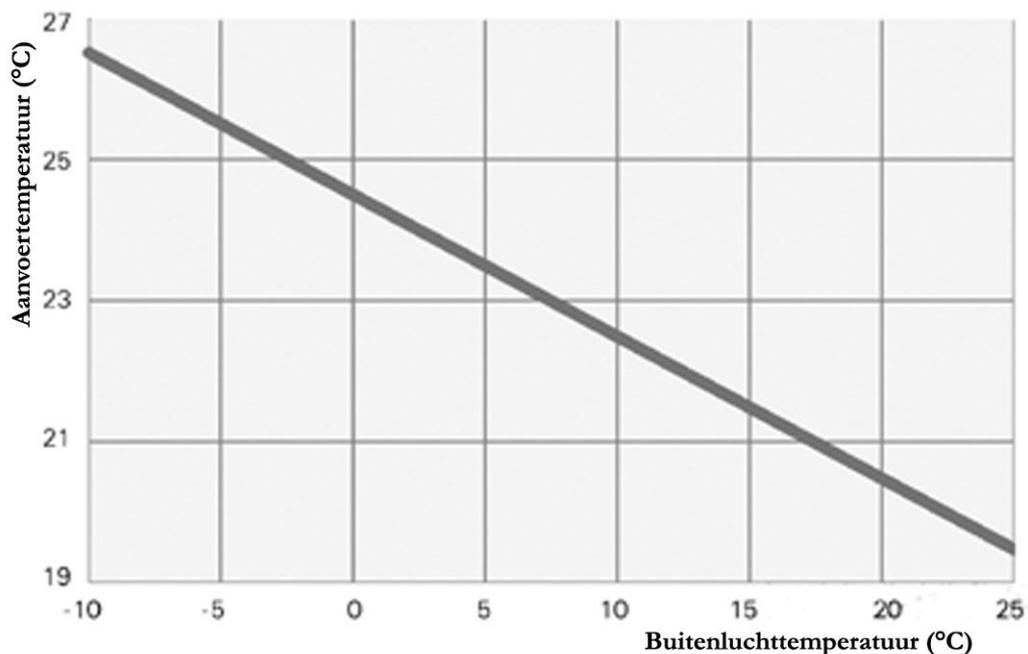
3.2.3 Verschillende regelingen in relatie tot comfort

Afhankelijk van het gebruik van het gebouw en de daaruit voortvloeiende interne warmtelast worden twee verschillende regelstrategieën onderkend. Voor een gebouw met hoge interne warmtelast en een transparante constructie wordt gekozen voor een continu regelproces, waarbij de installatie in bedrijf blijft. Het verloop van gemiddelde buitentemperatuur en de operationele temperatuur zijn parameters die bepalen hoe en wanneer het systeem wordt geregeld. Deze operationele temperatuur wordt meestal gebruikt bij comfortcondities en is samengesteld uit een aantal parameters gemeten aan een referentiepunt. Bij overwegend zittende werkzaamheden ligt dit referentiepunt op 0,6 meter hoogte en bij staande werkzaamheden op 1,1 meter.

Zoals reeds vermeld heeft het systeem een grote mate van zelfregelbaarheid. Bij de tweede optie wordt de retourwatertemperatuur bewaakt. Door hiervoor een grenswaarde te

kiezen kan in de tussenseizoenen water worden rondgepompt (alleen circulatiepomp inschakelen), waardoor de reeds genoemde temperatuurvereffening in het hele gebouw plaatsvindt. Daarnaast wordt de koeling (in de nachtelijke uren) ingeschakeld. Bij voorkeur is dit vrije koeling, bijvoorbeeld met een bron- of bodemwarmtewisselaar, maar het kan ook een compressiekoelmachine zijn. Bij gebouwen met een normale warmtelast en een normale tot zware bouwwijze is dit een zeer economisch model. Een mogelijke relatie tussen de wateraanvoertemperatuur en de buitenluchttemperatuur is weergegeven in figuur -3.13-.

Vertaald naar het regelsysteem kan deze karakteristiek sterk worden vereenvoudigd, in verband met de eigenschappen van het actieve betonsysteem.



figuur 3.14 Relatie tussen buitenluchttemperatuur en de aanvoertemperatuur (voorbeeld)

3.2.4 Operatieve temperatuur

In veel publicaties en vakliteratuur worden richtlijnen voor het binnenklimaat gegeven welke zijn gebaseerd op de zogenaamde 'operatieve temperatuur'. Deze wordt gedefinieerd als de uniforme temperatuur van de omgeving, waarin de aanwezige personen dezelfde hoeveelheid warmte uitwisselen door convectie en straling als in de werkelijke omgeving.

De operatieve temperatuur wordt berekend met:

$$\theta_o = A \cdot \theta_a + (1 - A) \cdot \theta_r$$

formule 3.11 Operatieve temperatuur

waarin:

θ_o = operatieve temperatuur (°C)

θ_r = gemiddelde stralingstemperatuur (°C)

θ_a = luchttemperatuur (°C)

A = factor, functie van de relatieve luchtsnelheid V_{ar} t.o.v. het lichaam (-)

V_{ar} [m/s]	A [-]
< 0,2	0,5
0,2 – 0,6	0,6
0,6 – 1,0	0,7

In de praktijk zal lagere oppervlakte temperatuur van het plafond en de vloer in de zomersituatie er voor zorgen dat voor het comfort de luchttemperatuur 1 à 2 °C hoger mag liggen in vergelijking met een ruimte die verwarmd wordt door een klimaatsysteem gebaseerd op convectie.

3.2.5 PMV (Predicted Mean Vote)

De PMV (Predicted Mean Vote)-waarde geeft in één getal aan wat de gemiddelde uitspraak van een grote groep mensen zal zijn over het thermische binnenklimaat. Deze waarde is een functie van de klimaat- en persoonsafhankelijke parameters. De PMV-waarde loopt van -3 tot +3 (koud tot heet). Een verband afgeleid tussen de PMV-waarde en het percentage ontevreden is de PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) –waarde

PMV	+3	+2	+1	+0,5	0	-0,5	-1	-2	-3
gevoel	heet	warm	licht warm		neutraal		licht koel	koel	koud
PPD	90%	75%	25%	10%		10%	25%	75%	90%

tabel 3.3 verband tussen PMV en PPD

3.2.6 Op. temperatuur – gewogen temperatuuroverschrijdingsuren (GTO-uren).

Oorspronkelijk werd door de Rgd¹¹ een maximale onder- c.q. overschrijding van de operationele temperaturen van 20°C en 25,5°C toegestaan van elk 5% van de gebruikstijd op jaarbasis, zijnde 100 uur. Deze temperaturen komen overeen met de comfortgrenzen van -0,5 en +0,5, Bovendien gold voor de operationele temperaturen van 18°C en 28°C een maximale onder- c.q. overschrijding van 1% van de gebruikstijd op jaarbasis, zijnde 20 uur. Momenteel wordt deze onder- c.q. overschrijding, met name voor verblijfsruimten met kantoorfuncties, uitgedrukt in gewogen temperatuuroverschrijdingsuren (GTO-uren). De mate van overschrijding van de comfortgrenzen wordt hierbij gewogen op basis van het product van het PPD en de tijd dat zich dit percentage voordoet. Eén uur met een PMV van 0,7 (PPD ca. 15%) weegt bijvoorbeeld even zwaar als anderhalf uur met een PMV van 0,5 (PPD ca. 10%). Door de totale gewogen onder- c.q. overschrijdingstijd gedurende de winter- en zomerperiode te sommeren, wordt de totale weegtijd gevonden, uitgedrukt in ‘gewogen temperatuuroverschrijdingsuren’ of ‘gewogen temperatuuroverschrijdingsuren’ (GTO-uren).

Rgd-richtlijn, onderwijsgebouwen, nieuwbouw

Het samenspel van gebouw, gebouwinstallaties, regelingen en het te verwachten gebruik van het gebouw moet tijdens de gebruiksuren in verblijfsruimten met een onderwijsfunctie een temperatuur bewerkstelligen waarbij de operationele temperatuur bepaald conform NEN-ISO 7730:

- niet meer dan 2% van de gebruikstijd op jaarbasis onder de 18°C komt;
- niet meer dan 10% van de gebruikstijd op jaarbasis onder de 20°C komt;
- niet meer dan 10% van de gebruikstijd op jaarbasis boven de 25,5°C komt;
- niet meer dan 2% van de gebruikstijd op jaarbasis boven de 28°C komt.

Opmerking: De gebruikstijd op jaarbasis is afhankelijk van het soort schooltype. Deze tijd wordt niet gecorrigeerd voor vakanties. Hierdoor zijn ook de percentages verhoogd t.o.v. die van de ‘overige gebouwen’.

¹¹ RGD-RICHTLIJNEN

3.2.7 Stralingstemperatuur θ_r

Als stralingstemperatuur geldt de uniforme temperatuur van een (voor warmtestraling) zwarte omgeving waarbij een persoon evenveel warmtestraling verliest als in de werkelijke situatie. In de werkelijke situatie zal de temperatuur van alle vlakken niet gelijk zijn, ook de emissiecoëfficiënten van de vlakken kunnen verschillend zijn, voor de meeste oppervlakken is deze echter gelijk aan $\epsilon = \text{ca. } 0,9$. De stralingstemperatuur kan worden benaderd door de temperatuur van alle omringende wanden gewogen te middelen. Als weegfactoren worden daarbij zichtfactoren (geometrische factoren) gebruikt. In een ruimte waarin de wandtemperaturen niet zoveel verschillen, of voor personen midden in een ruimte, kan men ook wel volstaan met het eenvoudig naar oppervlakte middelen van de wandtemperaturen. Hiermee worden uiteraard ook de temperaturen van vloer en plafond bedoeld. De fout die men dan maakt zal hooguit enkele tienden van een graad bedragen. Als een persoon zich dicht bij een vlak met een duidelijk afwijkende temperatuur bevindt (koud glasvlak, warme radiator), wordt de fout vanzelfsprekend groter. Deze kan oplopen tot $0,5$ à $1,0$ °C bij afstanden kleiner dan ca. 1,5 meter. Overigens gaat dan ook de asymmetrie van de stralingsbelasting een rol spelen. Vooral bij verwarming met stralingspanelen aan het plafond e.d. moet men hiermee oppassen. In het algemeen treden geen problemen op als tegenover elkaar liggende vlakken in een vertrek niet meer dan ca. 10 °C verschillen in gemiddelde oppervlaktetemperatuur. Methoden voor het nauwkeuriger rekening houden met stralingsasymmetrie vindt men bij Fanger en Mc Intyre¹²

3.2.8 Dauwpunt

Bij het gebruik van oppervlakte koelsystemen is het belangrijk om de oppervlaktetemperaturen of de watertemperaturen te begrenzen, om condensatie te voorkomen. Een mogelijkheid hiervoor is het instellen van een minimale temperatuur voor het aanvoerwater in relatie tot de dauwpuntstemperatuur van de referentieruimte, d.w.z. in relatie tot de absolute vochtigheid in de ruimte. Vaak worden oppervlakte verwarmings- en koelsystemen gecombineerd met een mechanisch ventilatiesysteem. Via de ventilatie kan de lucht worden gedroogd zodat condensatie wordt voorkomen en het rendement wordt verhoogd.

Voor de behaaglijkheid ligt de bovengrens voor het vochtgehalte van de lucht volgens DIN 1946, deel 2 op 11,5 g water/kg droge lucht. Dit komt overeen met een dauwpunt van 16,5°C en een relatieve vochtigheid van 55% bij een temperatuur van 26°C. De oppervlaktetemperatuur van het bouwdeel moet daarom hoger zijn dan 16,5°C. Omdat bij lage oppervlaktetemperaturen van zowel het plafond als de vloer ook klachten optreden over de ervaren behaaglijkheid, is een oppervlakte temperatuur in de zomer voor actieve betonsystemen van 22°C of hoger een ontwerp eis. Er zullen dus geen problemen kunnen optreden met betrekking tot vochtvorming op actieve betondelen. Een groot voordeel van deze hogere temperaturen van de bouw delen is dat men de ramen kan openen zonder gevolgen voor condensatie.

Indien in de zomer de ramen open worden gezet en er dus een vermenging plaats vindt van buiten lucht en binnen lucht zal de relatieve luchtvochtigheid stijgen.

In Nederland hebben we een gemiddelde 's zomerse luchtvochtigheid van 70%.

Bij een temperatuur van 30°C komt dat over een met een waterdampspanning van 2972 N/m². Ervan uitgaand dat de binnenluchttemperatuur 23°C is en een luchtvochtigheid van 60% (1687 N/m²) zal bij een meningsverhouding van 1:2 (buitenlucht:binnenlucht) de

¹² FANGER MCGRAW, THERMAL COMFORT

luchtvochtigheid stijgen tot 75% en het dauwpunt zal dan liggen op 18,5°C. Dit heeft echter wel gevolgen voor de koelcapaciteit, want er komt met de buitenlucht ook de warmte binnen die weer weggekoeld moet worden.

Bijkomend voordeel van de actieve betonsystemen ten opzichte van klimaatplafonds is de mogelijkheid om een kleine hoeveelheid vocht op te nemen. Die mogelijkheden van vochtopname ligt in het feit dat beton hygroscopisch is. Indien het beton is afgewerkt met een stuuklaag wordt is dit effect nog groter. Door de hygroscopische werking zal om lokaal niveau, dicht op het plafond, de luchtvochtigheid afnemen omdat de vocht wordt opgenomen in de stuuklaag. Door de afname van de luchtvochtigheid zal het dauwpunt dalen. En hiermee worden de risico's op druppelvorming nog verder verkleind.

Bij een klimaatplafond waar het oppervlakte materiaal gemaakt is van metaal zal dit niet gebeuren.

Doordat bij koeling de watertemperatuur door de leidingen lager is dan het oppervlakte temperatuur kan er condens op de leidingen ontstaan. Zijn de leidingen opgenomen in een niet dampdicht bouwdeel, dan de condens naar de oppervlakte komen. Het is daarom raadzaam om in zo'n geval een dauwpuntsregeling toe te passen. Tevens moeten de watervoerende leidingen en units die aan de lucht blootgesteld zijn dampdicht worden geïsoleerd.

3.2.9 Oppervlaktetemperaturen

Voor de vloertemperatuur kan men in normale situaties uitgaan van 19 tot 26 °C. Temperaturen onder de 19 °C dienen te worden vermeden i.v.m. koude voeten en mogelijke condensvorming. De keuze van het materiaal waaruit de afwerking van de vloer bestaat is hierbij ook van belang.

3.2.10 Te grote stralingsasymmetrie

Stralingsasymmetrie ontstaat ten gevolge van de verschillende oppervlaktetemperaturen van de omgevende wanden, ramen, vloer en plafond. Door bijvoorbeeld een verwarmd plafond en een groot glasoppervlak in de buitengevel kan er een groot temperatuurverschil optreden wat aanleiding kan geven tot klachten. Om deze klachten te voorkomen dient men rekening te houden met de maximale temperatuurverschillen van de afzonderlijke vlakken. Dit is voor een kantoor <5K verticaal en <10K horizontaal.

3.3 Bouwkundige aspecten

3.3.1 Gevelconstructie

Aan de gevel worden eisen gesteld ten aanzien van de isolatiewaarde (Rc- waarden) en zon- en lichttoetredingsfactoren (ZTA- en LTA- waarde) van het glas. Deze waarden bepalen in grote mate de externe belastingsfactoren op de ruimte. Aangezien er een beperkt koelvermogen geleverd kan worden met TBA worden hieraan strenge eisen gesteld.¹³

- ZTA-waarde van glas $\leq 0,40$
- U-waarde van gevel (incl. vensters en ramen) $\leq 0,90 \text{ W/m}^2\text{K}$
- U-waarde wanden en daken $\leq 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Liefst automatische buitenzonwering toepassen
- ZTA-waarde (glas en buitenzonwering) $< 0,15$

¹³ WELVY

- Belasting verlichting < 11 W/m²
- Gecontroleerde ventilatie toepassen

3.3.2 Vloeren voor Thermische Betonkern Activering

In Nederland worden de volgende vloeren in de utiliteitbouw toegepast:

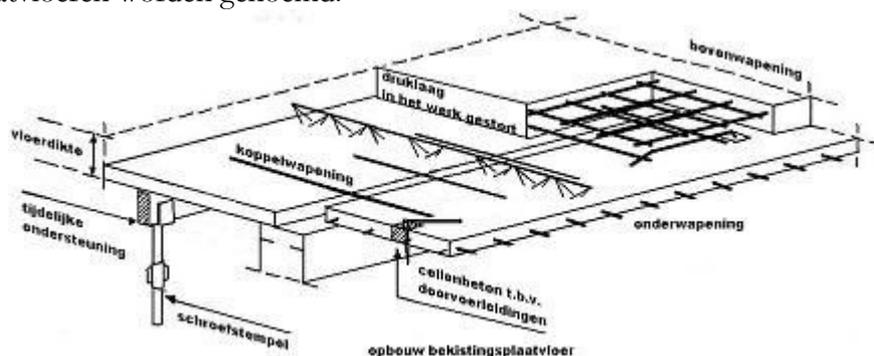
Breedplaatvloer

Kanaalplaatvloer

PS-casettevloer en rib-casettevloer

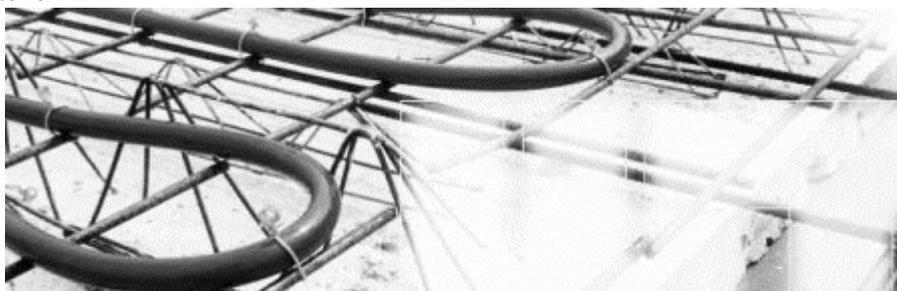
3.3.2.1 Breedplaatvloer

De breedplaatvloer, ook wel bekistingsplaatvloer genoemd, is een vrijdragende systeemvloer. Deze is samengesteld uit relatief dunne geprefabriceerde vloerelementen die breedplaatvloeren worden genoemd.



figuur 3.15 breedplaatvloer

De vloerplaten zijn gemaakt van beton en voorzien van betonstaal of voorspanwapening. Nadat de platen in het werk zijn geplaatst en wapening is aangebracht, wordt op de platen een constructief meewerkende betonlaag gestort. De betonkwaliteit die men hiervoor gebruikt is B25 of hoger. In deze laag wordt het waterleidingnet voor de BKA aangebracht.



figuur 3.16 waterleidingnet op breedplaatvloer

De gewapende bekistingsplaatvloer is voorzien van tralieliggers die over de volledige lengte gedeeltelijk in de beton zijn gestort. Hieraan ontleen de elementen hun sterkte en stijfheid, die voor het transport, het hijsen en tijdens de bouw nodig zijn. De onderwapening voor de constructieve vloer is in de bekistingsplaatvloer opgenomen. De hoofdwapening van de bekistingsplaatvloer kan met betonstaal of met voorspanwapening worden uitgevoerd.

De bovenwapening wordt op de bouwplaats aangebracht. Deze kan bestaan uit gepuntlaste wapeningsnetten of staven; een combinatie van beide is gebruikelijk. De tralieliggers dienen meestal als ondersteuning van de bovenwapening.

Zowel breedplaatvloeren met betonstaal als die met voorspanwapening zijn voorzien van tralieliggers. In de bekistingplaten met wapening van betonstaal zijn over de gehele lengte van het element tralieliggers ingestort. Voor de elementen met voorspanwapening is een tralieligger over de gehele lengte van het element niet altijd noodzakelijk. Tralieliggers zijn driedimensionale vakwerkliggers van betonstaal, die tijdens de prefabricage voor een deel in de bekistingsplaatvloer worden ingestort. De dikte van de bekistingsplaatvloer varieert tussen de 50 en 100 mm en wordt in overleg met de afnemer vastgesteld. De vloerhoogte van de bekistingsplaatvloer is variabel en afhankelijk van de dikte van het in het werk te storten beton. Deze vloer wordt veelvuldig op verdiepingen toegepast. Ook in combinatie met in het werk gestorte stroken ter plaatse van kolommen.

Deze breedplaatvloer is ook als bubbledeckvloer uit te voeren. Het waterleidingnet voor de BKA wordt dan tussen de ballen aangebracht.



figuur 3.17 bubbledeckvloer met BKA

3.3.2.2 Kanaalplaatvloer

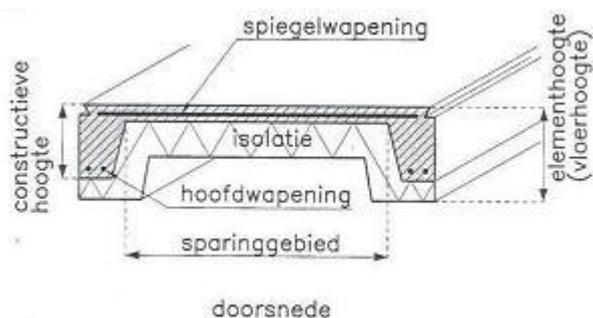
Kanaalplaatvloeren, ook wel holle vloerplaten genoemd, zijn vrijdragende systeemvloeren, die voorzien zijn van holle kanalen, waardoor op grondstoffen en op bouwgewicht wordt bespaard. De kanaalplaatvloer wordt in de meeste gevallen als verdiepings- en dakvloer in zowel woning- als utiliteitsbouw toegepast.

De montage van de vloerelementen gebeurt volgens het legplan van de fabrikant. Wanneer een vloerveld op de bouwplaats is aangebracht, eventueel voorzien van paselementen, kunnen de voegen tussen de platen worden afgestort. Meestal krijgt de vloer een afwerklaag. In specifieke gevallen, bijvoorbeeld bij zware belastingen, kan de vloer voorzien worden van een constructieve druklaag.

Door dat op de bouw alleen nog een afwerklaag wordt toegevoegd moet het waterleidingnet al in de fabriek worden toegevoegd. Dit net wordt dan tussen de kanalen gelegd en daarna worden de elementen gestort. Het is ook mogelijk om het net in de druklaag op te nemen.

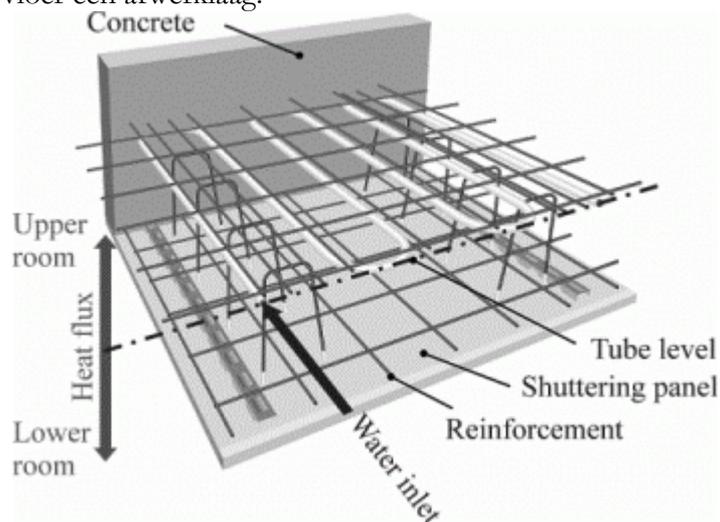
3.3.2.3 PS-cassettevloer en rib-cassettevloer

Een ribbenvloer is een vrijdragende systeemvloer van geprefabriceerde vloerelementen die in de lengterichting (overspanningrichting) en in de breedterichting van ribben zijn voorzien, ook wel ribcassettevloer genoemd. De dwarsribben en ook de betonnen nokken aan de uiteinden van de platen zijn geschikt voor het opnemen van bouwmuurbelastingen. Ribbenvloeren zijn aan de onderzijde altijd voorzien van thermisch isolatiemateriaal. Ze worden in woning- en utiliteitsbouw gebruikt voor begane grondvloeren boven de kruipruimten.



figuur 3.18 rib-cassettevloer

De montage van de elementen gebeurt volgens het legplan van de fabrikant. Wanneer een vloerveld op de bouwplaats is aangebracht, eventueel voorzien van paselementen, kunnen de langsvoegen worde afgestort. Hierop wordt bij BKA het waterleidingnet aangelegd en daarna krijgt de vloer een afwerklaag.



figuur 3.19 Vloerbouw

De meest geschikte vloer voor BKA is de breedplaatvloer. Deze dient op alle verdiepingen te worden toegepast. Het dak van het gebouw moet ook zo worden uitgevoerd. De uitvoering van de beganegrondvloer kan bijvoorbeeld het rib- of polystyreen systeem zijn. De breedplaat moet in de fabriek worden voorzien van speciale doorvoerdozen. Deze doorvoerdozen zorgen er voor dat het ingestorte leidingennet aangesloten kan worden op een ringleiding. Deze doorvoerdozen zijn aan de plafondzijde bereikbaar.

In de meeste gevallen worden de leidingen in de neutrale laag van de vloer ingestort.

Al deze vloeren zijn geschikt voor het toepassen van Thermische Betonkern Activering.

De vloeren met de grootste massa hebben ook de grootste warmteopslagcapaciteit.

Voor de goede werking van het systeem is het toepassen van een gesloten verlaagd plafond uitgesloten. Open verlaagde plafonds of het weglaten van verlaagde plafonds vragen meestal om geluiddempende aanpassingen. (Zie ook hoofdstuk 4)

De installatie is onzichtbaar weggewerkt. Door het achterwege blijven van uitgebreide installaties wordt veel bouwvolume uitgespaard.

Bouwprocessen

Globaal beschouwen we twee processen:

A) Kunststof buizen worden op de bouwplaats in beton gestort.

B) Kunststof buizen worden in de fabriek in betonnen elementen verwerkt en in het werk aan elkaar gekoppeld.

Bij het in beton storten van de buizen op de bouwplaats dient vaak een breedplaat vloer als uitgangspunt. De buizen worden op de basisplaat aan het wapeningsnet bevestigd en daarna wordt de vloer gestort.

Deze werkwijze kan overigens bij alle bouwdelen, die op de bouwplaats worden gestort, worden toegepast. Vaak zijn er extra wapeningsnetten en afstandhouders of supports nodig om de bouwstaalnetten met leidingen goed te kunnen positioneren.

In toenemende mate wordt er met prefab betonelementen gewerkt. In dit geval zijn de buizencircuits per element meestal van beperkte lengte en worden ze ter plaatse aan elkaar gekoppeld. De koppelingen kunnen al of niet bereikbaar weggewerkt worden in vloer of wand. Het aanbrengen van de leidingen in de neutrale zone heeft over het algemeen geen invloed op de sterkte van de constructie. In het ontwerpstadium van een gebouw dient al rekening te worden gehouden met het toepassen van dit systeem.

3.3.3 Vloerafwerking

Het spreekt voor zich dat het verwerken van isolerende materialen in de afwerklaag voor vloerverwarming en vloerkoeling vermeden moet worden.

Textiel-, nylon- en vinylvloerbedekking is in principe goed toe te passen mits het geen vaste foamlaag heeft van meer dan 3 mm en de totaaldikte van de vloerbedekking niet meer dan 10 mm bedraagt. Ook vloerbedekking, zoals novylon of marmoleum goed toepasbaar. Op de droge vloer kan de vloerbedekking gespannen, los gelegd of direct verlijmd worden met een zelfhardende lijm, zonder bellen of blazen. Omdat vloerbedekking de warmteafgifte van de vloer vermindert, dient men bij de keuze van de vloerbedekking daarmee rekening te houden.

In ieder geval dient de vloerbedekking bij het berekenen van het vermogen in de warmtetechnische berekening opgenomen te worden, zodat een juiste warmteafgifte gewaarborgd is.

Zogenaamde ondertapijten mogen niet toegepast worden. De maximale R-waarde van het tapijt mag niet meer dan 0,20 m² K/W bedragen.

Plavuizen, tegels en natuursteen kunnen in principe direct in de deklaag gezet worden. De leidingen dienen volledig in de mortel laag opgenomen zijn, dat wil zeggen zonder holle ruimtes. Bij het verlijmen van de tegels of plavuizen dient een speciaal lijmsort te gebruiken, die geschikt is voor vloerverwarming. Bij verlijming moet zo min mogelijk luchtinsluiting plaats vinden.

Parketvloeren zijn in een aantal soorten toepasbaar. In het algemeen kan gesteld worden dat zachte houtsoorten niet toegepast kunnen worden. Daarnaast dient de maximale dikte 10 mm te bedragen. Door de afwezigheid van een ondervloer geeft parket wel een probleem bij contactgeluidisolatie.

3.4 Vergelijk met een klimaatplafond.

In een vergelijk met een klimaatsysteem waarin ook gekoeld wordt met water en zomin mogelijk lucht, komen we op een klimaatsysteem met een klimaatplafond.

Dit systeem heeft als voordeel t.o.v. BKA dat een veel kleiner deel van het plafond gebruikt wordt voor koeling/verwarming.

Akoestische gezien zijn hier bij makkelijkere oplossingen te vinden voor een goede ruimteakoestiek. Het klimaatplafond kan worden opgenomen in een verlaagd plafond.

Comfort technisch heeft een klimaatplafond een grotere regelbaarheid op lokaalniveau.

Elk element is in principe apart regelbaar. Het grote verschil tussen een klimaatplafond en betonkernactivering is dat bij een klimaatplafond alle warmte door middel van stromend water wordt afgevoerd en weggekoeld. Terwijl bij betonkernactivering het grootste deel

van de warmte wordt opgenomen in het beton. Het waterleidingnet voert alleen overtollige warmte weg.

Milieutechnisch ligt in BKA het voordeel omdat de massa wordt gebruikt bij het koelen en verwarmen tevens zijn de kosten van het systeem lager. Dit zorgt voor lage energie kosten voor verwarmen en koelen.

En 's nachts kan er een buffer worden opgebouwd. Dit zorgt er voor dat de capaciteit van bijvoorbeeld de koeltorens lager kan zijn. 's Nachts is de buitentemperatuur lager dan overdag dus kan er meer warmte worden afgegeven en kan het systeem efficiënter gekoeld worden. Maar ook is het gebruik van warmteopslag in de grond mogelijk.

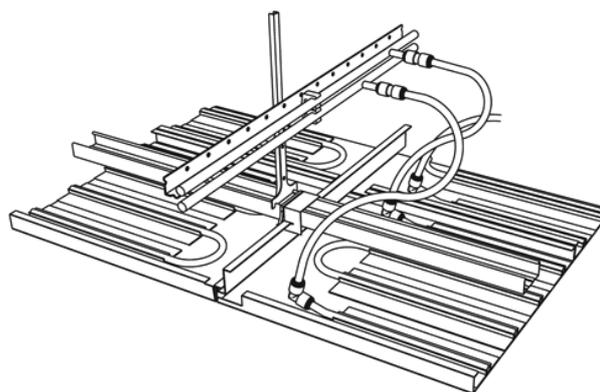
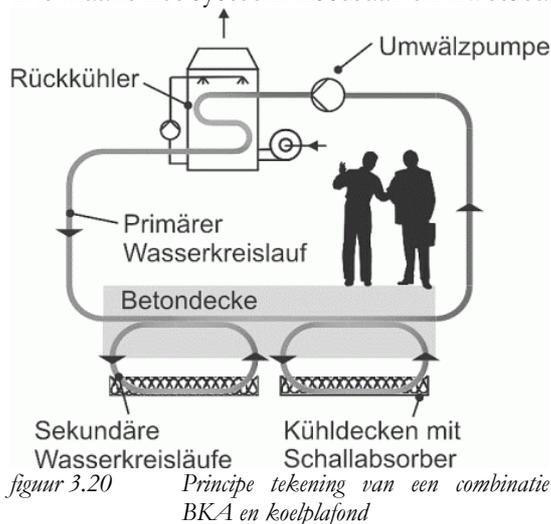
Doordat de werking van BKA sterker wordt bij een grotere ΔT , zal uiteindelijk de vertrektemperatuur constanter worden.

Gezien deze punten is het misschien ook mogelijk om een combinatie van deze systemen te maken. BKA als primaire systeem en een secundair systeem van klimaatplafonds die indirect gekoppeld is aan het beton en zo dus de warmte vanuit het vertrek naar het plafond brengt. Zie figuur -3.19- Om dit systeem zo effectief mogelijk te krijgen moet het secundair systeem zo kort mogelijk op het primaire systeem zitten. Om zo de opgenomen warmte in het klimaatplafond snel weer af te geven aan het beton.

Technisch gezien krijg je dus twee waterleidingnetten in het beton te liggen.

Eén voor de BKA en één voor het klimaatplafond. Voor de aansluiting van dat tweede net op koelelementen krijg je veel doorvoerpunten aan het plafond.

Dit maakt het systeem kostbaar en kwetsbaar.

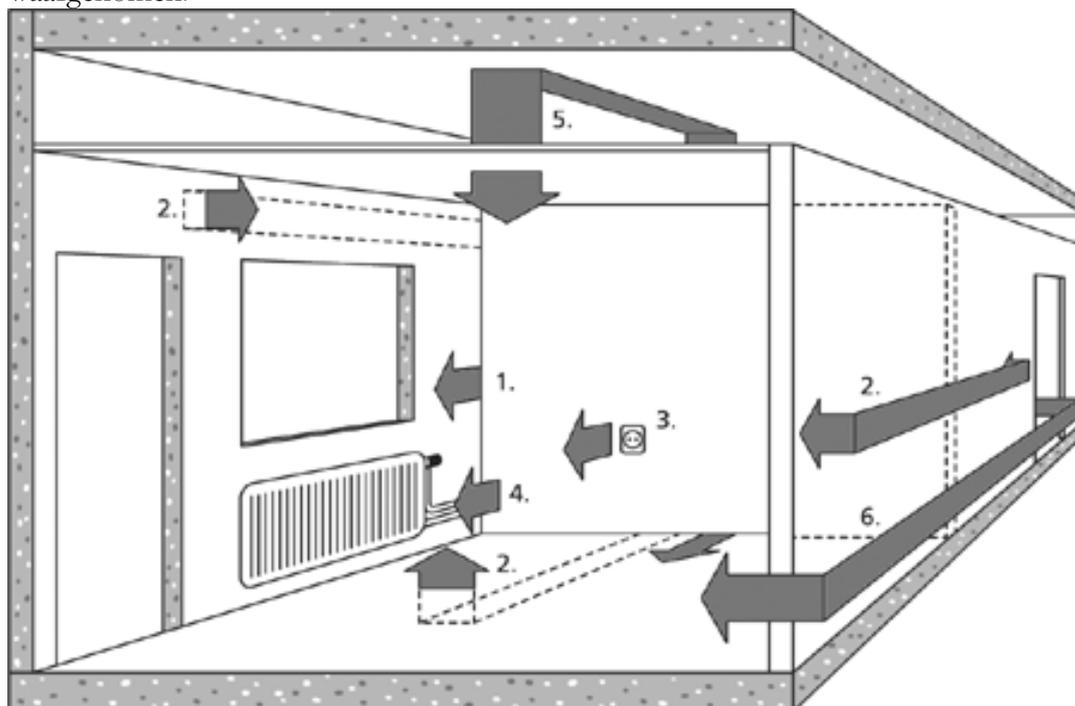


figuur 3.21 *Koelelement met koppeling naar BKA*

4 Geluid

4.1 Inleiding

Geluid is in ons dagelijks leven niet weg te denken. Het kan een bron van plezier zijn, maar ook van hinder. Beide ervaringen kunnen bij hetzelfde geluid hand in hand gaan. Geluid is in principe alles dat met het gehoor wordt waargenomen. Het ontstaat door een bron die trillingen uitstraalt. Bijvoorbeeld een luidspreker. Deze trillingen planten zich voort door de lucht of door een constructie en worden vervolgens door ons waargenomen.



figuur 4.1 voorplanting van geluid van vertrek naar vertrek

4.2 Luchtgeluid

Met luchtgeluid bedoelen we geluidgolven opgewekt door één of andere geluidbron in de beschouwde ruimte die de omringende lucht in trilling brengt. Er bestaat geen rechtstreeks contact tussen de geluidbron en de scheidende muren. Luchtgeluidisolatie is dus de isolatie van geluid wat als medium, tussen bron en wand, lucht heeft. De wand wordt door de luchttrillingen in trilling gebracht en niet door het aanstoten met een voorwerp.

Een radio of tv-toestel, gesprekken, zijn daarom bronnen van luchtgeluid. De overdracht van luchtgeluid van de ene ruimte naar de andere is te dus te beschrijven als: bron - lucht - constructie - lucht.

4.2.1 Meten van de luchtgeluidisolatie van een constructie

Voor het bepalen van de luchtgeluidisolatie van een constructie worden in een laboratorium speciale proefkamers gebruikt. De twee kamers worden zodanig naast elkaar gebouwd dat er geen flankerend geluidoverdracht mogelijk is. In een kamer (zendvertrek) wordt met behulp van een geluidbron luchtgeluid opgewekt. In beide kamers wordt dan het geluidniveau gemeten. De geluidisolatie kan dan als volgt worden berekend.

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

formule 4.1 Geluidisolatie

Waarin:

L_1 = geluidrukniveau; zendvertrek [dB]

L_2 = geluidrukniveau; ontvangvertrek [dB]

R = geluidisolatie van de scheidingsconstructie [dB]

S = oppervlak van de scheidingsconstructie [m^2]

A = totale absorptie; ontvangvertrek [m^2]

De correctie term $10 \log(S/A)$ is nodig om de werkelijk doorgelaten hoeveelheid geluid van de wand te bepalen. Immers, het geluidrukniveau in het ontvangvertrek wordt mede bepaald door de geluidabsorptie in het vertrek en het oppervlak van de wand.

Voor geluidisolatie, die een eigenschap is van de te onderzoeken constructie, moet altijd dezelfde waarde worden gevonden, onafhankelijk van de ruimten waartussen hij de scheiding vormt.

Door per octaafband van de berekende DnT-waarde de normwaarde¹⁴ uit NEN 5077 voor deze frequentie af te trekken, worden vijf isolatieverschillen verkregen. De onderstaande tabel geeft de normwaarden uit NEN 5077.

Frequentie (Hz)	125	250	500	1000	2000
Normw. NEN 5077	34	43	50	53	54

tabel 4.1 Normwaarden luchtgeluid isolatie

Uit de verkregen vijf isolatieverschillen worden drie nieuwe getallen berekend, te weten:

- het gemiddelde van de vijf isolatieverschillen,
- het gemiddelde van de twee kleinste isolatieverschillen + 2 dB,
- het kleinste isolatieverschil + 4 dB.

De isolatie-index voor luchtgeluid (I_{lu}) is het kleinste getal van deze drie getallen afgerond op het dichtstbijzijnde gehele getal. Als het niet afgeronde getal op een halve eenheid eindigt, moet dit worden afgerond op het dichtstbijzijnde even getal. Wordt met de waarde van de isolatie-index verder gerekend, dan dient niet te worden afgerond.

Wanneer men de luchtgeluidsisolatie van een homogene constructie beschouwt, dan kan men de geluidisolatie berekenen met behulp van de massawet. De berekening is afhankelijk van de hoek waarmee de geluidsgolf inslaat op de constructie. Onderscheid wordt gemaakt tussen loodrecht, schief en alzijdig.

Loodrecht:
$$R = 20 \log \frac{\omega m}{2 \rho c} [dB]$$

formule 4.2 Massawet loodrecht voor de berekening van de geluidweerstand van een wand

Schuin
$$R_{\phi} = 20 \log \frac{\omega m \cdot \cos \theta}{2 \rho c} [dB]$$

formule 4.3 Massawet schuin voor de berekening van de geluidweerstand van een wand

Alzijdig
$$R_{alz} \approx 20 \log \frac{\omega m}{2 \rho c} - 5 [dB]$$

formule 4.4 Massawet alzijdig voor de berekening van de geluidweerstand van een wand

¹⁴ NEN5077

$$\omega = 2\pi f$$

f = frequentie

m = massa per m²

$\rho_{\text{lucht}} = 1,21 \text{ kg/m}^3$

c = snelheid geluid

θ = invalshoek t.o.v. de normaal van het vlak

4.2.2 geluidlekken door kieren

Een scheidingconstructie zal niet altijd een homogeen oppervlak vormen. De berekening van de geluidweerstand van de afzonderlijke delen moet bij elkaar worden opgeteld en wel op de volgende manier.¹⁵

$$R = -10 \log \left(\frac{S_1}{S_{\text{tot}}} 10^{-R_1/10} + \frac{S_2}{S_{\text{tot}}} 10^{-R_2/10} + \dots + \frac{S_{\text{lek}}}{S_{\text{tot}}} 10^{0/10} \right)$$

formule 4.5 geluidweerstand van een samengestelde constructie

De laatste term slaat op de lek die onvermijdelijk in een scheidingsconstructie voorkomt. Dit wordt ook wel aangeduid als de kierterm K. Het is mogelijk om de kierterm te schatten. Voor zeer goede gevels kan $K=10^{-6}$ worden ingevuld. Een klein gaatje in een kitrand kan de geluidwerking al sterk omlaag brengen. Bij wanden met draaiende delen; ramen en deuren, wordt de kierterm meestal omlaag gebracht door het aanbrengen van rubber aanslagprofielen. Echter pas bij een dubbele aanslag zijn kiertermen in de orde van 10^{-5} mogelijk. Invullen dan de kierterm in de formule levert een geluidweerstand in dB. Indien de waarden van R van de vaste geveldelen tot oneindig naderen, nadert R_{tot} bij $K=10^{-3}$ tot 30 dB. Bij $K=10^{-6}$ tot 60 dB. In het algemeen zijn 'gaten' funest voor de geluidweerstand. Uit metingen is gebleken dat het verschil in isolatie tussen een gepleisterde en een ongepleisterde wand 5 a 10 dB kan bedragen. Het verschil zit daarbij dus in het luchtdicht afsluiten van de constructie en niet in de massa toename.

Omtrent een goede geluidsisolatie is de eenvoudigste basisvereiste; de luchtdichtheid.

4.3 Contactgeluid

Bij een bepaling van de contactgeluidisolatie tussen twee ruimten wordt gebruik gemaakt van de hamermachine ofwel contactgeluidgenerator. Deze machine heeft vijf hamers die elk twee keer per seconde over een valhoogte van 40 mm vallen. De hamers, elk met een massa van 500 gr en een diameter van 30 mm, zijn in lijn opgesteld met een onderlinge afstand van 100 mm. De te gebruiken hamermachine moet voldoen aan vastgestelde normen.

Onder normale omstandigheden moet de hamermachine uitgerust zijn met metalen hamerkoppen. In het geval dat de vloer schade zou kunnen oplopen door het gebruik van de metalen hamers, bestaat de mogelijkheid de hamers te voorzien van rubber koppen. Wel behoeven de meetresultaten daarna een correctie.

De bepaling van de contactgeluidisolatie-index verloopt vrijwel identiek aan die van de luchtgeluidisolatie-index. Met de hamermachine wordt in de zendruimte een constructiegeluid opgewekt. Vervolgens worden in de ontvangruimte het door de hamermachine veroorzaakte geluidsdrukkniveau (L_{co}) en de nagalmtijd (I) gemeten. Hieruit wordt, volgens onderstaande formule, het genormeerde contactgeluidsdrukkniveau (L_{nT}) berekend.

¹⁵ NIJS, DUBBELDIKTAAT, 2000

$$L_{nT} = L_{co} - 10 \log \frac{T}{T_0}$$

formule 4.6 genormeerd contactgeluidniveau

L_{nT} = genormeerde contactgeluidniveau

L_{co} = gemeten geluidrukniveau in de ontvangruimte

T = gemeten nagalmtijd in de ontvangruimte

T_0 = genormeerde nagalmtijd

Hierin is T_0 de genormeerde nagalmtijd. Voor ruimten in woningen en woongebouwen wordt voor T_0 een waarde van 0.5 seconden gehanteerd, voor alle overige ruimten een waarde van 0.8 seconden.

Voor de vijf octaafbanden met middenfrequenties van 125 Hz tot en met 2000 Hz geeft de norm NEN 5077 normwaarden voor het contactgeluidrukniveau. De onderstaande tabel geeft de normwaarden uit NEN 5077.

Frequentie [Hz]	125	250	500	1000	2000
Norm [dB]	70	66	66	66	70

tabel 4.2 Normwaarden contactgeluidisolatie

Van deze normwaarden wordt het berekende contactgeluidrukniveau (L_{nT}) afgetrokken. Uit de aldus verkregen vijf verschillen worden drie nieuwe getallen berekend, te weten:

- het gemiddelde van de vijf niveauverschillen,
- het gemiddelde van de twee kleinste niveauverschillen + 2 dB,
- het kleinste niveauverschil + 4 dB.

De isolatie-index voor contactgeluid (I_{co}) is het kleinste getal van deze drie, afgerond op het dichtstbijzijnde gehele getal. Als het niet afgeronde getal op een halve eenheid eindigt, moet dit worden afgerond op het dichtstbijzijnde even getal. Wordt met de waarde van de isolatie-index verder gerekend, dan dient niet te worden afgerond. Er bestaat geen karakteristieke isolatie-index voor contactgeluid.

4.3.2 Homogene vloerconstructies

Het te meten contactgeluidrukniveau is met een formule ook te benaderen.¹⁶

$$L_n \approx 155 - 30 \log m' + 10 \log T_s + 10 \log \sigma + 10 \log \frac{f}{f_{ref}}$$

formule 4.7 contactgeluid

m' = massa per oppervlakte [kg/m²]

T_s = Nagalmtijd [s]

σ = radiation factor for free bending waves

f_{ref} = referentie frequentie; 1000 Hz

¹⁶ 12354-2

In de tabel zijn een aantal voorbeelden voorgerekend.

In de laatste kolom is de waarde berekend met de formule waarin alleen de massa wordt gebruikt.

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 \log m'$$

formule 4.8 contactgeluid eenvoudig

Deze vergelijking is voor homogene betonnen vloeren van 100 – 600 kg/m²

constructie	m' [kg/m ²]	Genormaliseerde geluiddrukkniveau [dB] per octaafband [Hz]						L _{n,w,eq}
		63	125	250	500	1k	2k	
100mm beton + 20 mm toplaag	268	65	73	78	78	78	78	80
180mm beton + 50 mm toplaag	509	64	60	65	66	67	68	69
200mm lichtgewichtbeton	260	65	72	78	77	77	76	77
300mm lichtgewichtbeton	390	64	68	70	70	70	70	71

tabel 4.3 Normwaarden contactgeluiddrukkniveau

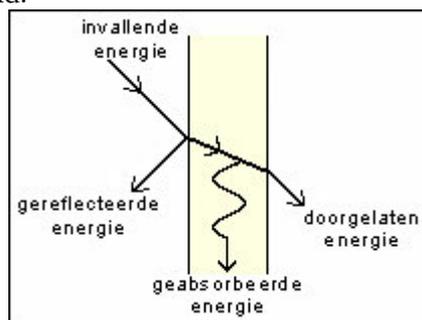
4.4 Geluidsabsorptie

Geluidsabsorptie is het vermogen van een materiaal om geluidsenergie om te zetten in wrijvingsenergie. Het geluid (trillende luchtdeeltjes) kan zich in zachte, poreuze, ook wel opencellige materialen binnendringen. Daarin ondervindt de heen en weer gaande luchtdeeltjes wrijving in de poriën van het materiaal. Door deze wrijving wordt de geluidenergie (beweging) omgezet in warmte. Het geluid wordt door het materiaal geabsorbeerd; verdwijnt dan eigenlijk in het materiaal. Om te zorgen dat geluid het materiaal kan binnendringen moet dit zo poreus mogelijk zijn.

Andersom geldt dat hoe harder het materiaal, hoe minder geluid wordt geabsorbeerd; het geluid wordt dan meer gereflecteerd.

In het algemeen zal van een geluidsgolf die op een wand invalt een gedeelte van de akoestische energie worden gereflecteerd, een gedeelte worden geabsorbeerd en een gedeelte worden doorgelaten.

In de onderstaande figuur is schematisch de invallende, gereflecteerde, geabsorbeerde en doorgelaten energie getekend.



figuur 4.2 geluidenergie-wand

De absorptiecoëfficiënt is de fractie van het verschil tussen de invallende en de gereflecteerde intensiteit en de invallende intensiteit. Dit is hetzelfde als de fractie van de som van de geabsorbeerde en de doorgelaten intensiteit en de invallende intensiteit. In formulevorm ziet dat er als volgt uit:

$$\text{absorptiecoëfficiënt} = \frac{\text{invallend} - \text{gereflecteer}}{\text{invallend}} = \frac{\text{geabsorbeerd} + \text{doorgelaten}}{\text{invallend}}$$

formule 4.9 Absorptiecoëfficiënt

De absorptiecoëfficiënt is dus in feite een maat voor de niet gereflecteerde energie. Als 100% van de energie wordt geabsorbeerd (open raam) dan is de absorptiecoëfficiënt gelijk aan 1 en indien alles wordt gereflecteerd is de absorptiecoëfficiënt gelijk aan 0.

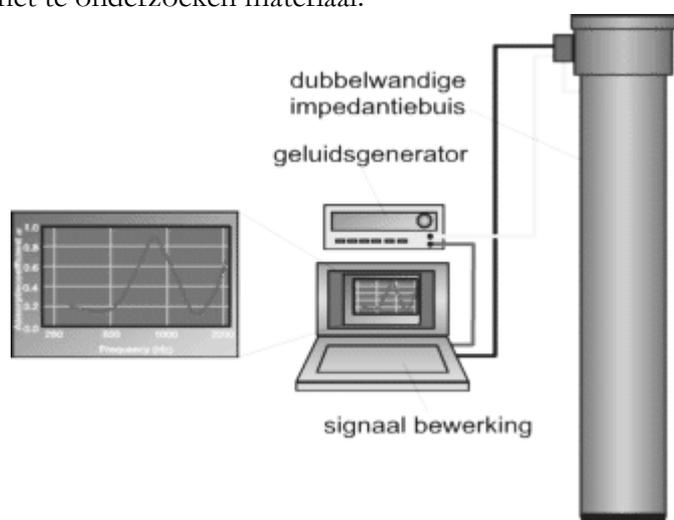
De hoeveelheid absorptiemateriaal in een ruimte bepaalt het gedrag van het geluid in afgesloten ruimten.

4.4.2 Bepaling van absorptiecoëfficiënt

De absorptiecoëfficiënt als materiaalgrootheid is, behalve van het materiaal en de dikte, ook afhankelijk is van de frequentie, de hoek van inval van de golf en de wijze van bevestiging van het materiaal.

absorptiecoëfficiënt voor normale inval.

Deze grootheid wordt onder laboratoriumomstandigheden gemeten. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een staandegolfbuis waarvan één van de uiteinden is afgesloten met een monster van het te onderzoeken materiaal.



figuur 4.3 Absorptiecoëfficiënt bepaling met een staandegolf

Een tweede absorptiecoëfficiënt is de Sabine absorptiecoëfficiënt.

Dit is de waarde die volgt uit een standaardmeting aan een monster van 10-12m², in een galmkamer met een vrijwel diffuus geluidveld. De Sabine absorptiecoëfficiënt kan dan worden berekend uit de snelheid waarmee het geluidniveau in die kamer afneemt indien wordt gemeten met en zonder monster.

Fabrikanten en leveranciers van absorberende materialen geven vrijwel altijd de waarde volgens Sabine op. Deze absorptiecoëfficiënt wordt in de praktijk het meest gebruikt.

4.4.3 Absorptiecoëfficiënt - transmissiecoëfficiënt

Is de absorptiecoëfficiënt een maat voor de geabsorbeerde energie, de transmissiecoëfficiënt is een maat voor de door een akoestisch medium doorgelaten energie.

$$\text{transmissiecoëfficiënt} = \frac{\text{doorgelaten}}{\text{invalend}}$$

formule 4.10 Transmissiecoëfficiënt

De transmissiecoëfficiënt is een maat voor de isolerende werking van een materiaal. Vaak wordt de mate waarin een materiaal geluid kan isoleren aangegeven met de isolatie-index of de R-waarde.

$$R = 10 \log \frac{1}{\text{transmissiecoëfficiënt}} = 10 \log \frac{\text{invallend}}{\text{doorgelaten}}$$

formule 4.11 Transmissiecoëfficiënt

4.4.4 Geluidsisolatie – geluidsabsorptie

Geluidsisolatie en geluidsabsorptie zijn twee duidelijk te onderscheiden fenomenen.

Ten aanzien van akoestische materialen is het van belang om goed onderscheid te maken tussen de absorberende en de isolerende eigenschappen ervan. Een bron van verwarring hierbij is dat materialen waarmee een hoge thermische isolatie kan worden bereikt, zoals bijvoorbeeld steenwol, akoestisch slecht isoleren. Akoestisch gezien is steenwol geen geluidsisolerend materiaal, maar wel een absorberend materiaal.

De absorberende eigenschappen van een materiaal hebben betrekking op de mate waarin dat materiaal geluid reflecteert terwijl isolerende eigenschappen betrekking hebben op de mate waarin het materiaal geluid al dan niet verzwakt doorlaat.

Geluidabsorptie materialen zijn in het algemeen licht van gewicht en bezitten meestal een poreuze open structuur.

Geluidisolatiematerialen hebben een kleine transmissiecoëfficiënt en derhalve een grote isolatie-index. Deze materialen zijn van belang indien moet worden voorkomen dat geluid vanuit een ruimte naar buiten treedt. Isolatiematerialen zijn niet poreus, hebben vaak een grote massa per oppervlak en maken meestal deel uit van de constructie.

Luchtgeluid heeft dus te maken met de transmissie van geluidsgolven, geluidsabsorptie, met het al of niet reflecteren van de golven. Het toepassingsgebied is dan ook duidelijk te onderscheiden, toch worden in de praktijk beide regelmatig verward.

Het verkeerde begrip hieromtrent heeft te maken met het feit dat de nagalmtijd van een lokaal en onze subjectieve over de lawaaiërigheid ervan omgekeerd evenredig reageert op de geluidsabsorptie. De luidheidsdruk aan zend- en ontvangzijde reageert echter logaritmisch. Om de nagalmtijd te halveren, moeten gewoon de absorptie verdubbelen, om de luidheidsdruk te halveren zouden wij de absorptie moeten vertienvoudigen, wat fysisch onrealistisch is.

$$L_2 = L_1 - R + 10 \log \frac{S}{A} \quad T_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{A}$$

Bij een halvering van het (L_2) geluidsdrukkniveau in het ontvangende vertrek, zal in de eerste de eerste formule A met een factor 10 moeten toe nemen.

Voor een halvering van de nagalmtijd moet A verdubbelen. In grote lijnen moet worden besloten: geluidsabsorberende materialen laten toe een aangepast akoestische binnenklimaat te realiseren, geluidsisolatie dient apart daarvan worden bekeken.

4.4.5 Noise Reduction Coëfficiënt (NRC)

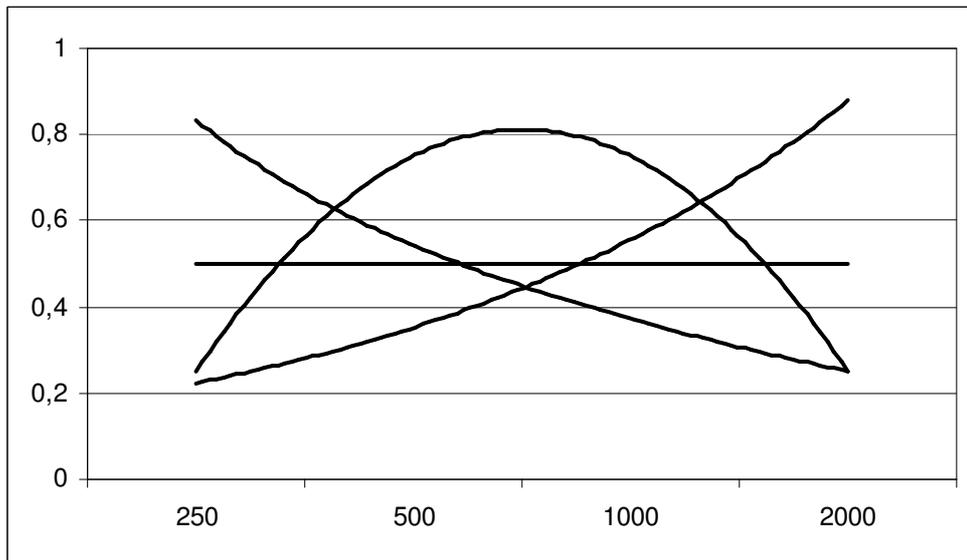
Veel fabrikanten geven in plaats van de absorptiewaarden per frequentieband een eengetalsaanduiding.

Deze eengetalsaanduiding is de NRC-waarde. Deze waarde neemt het gemiddelde van de α -waarden van de octaafbanden 250, 500, 1k 2k Hz. Deze waarde wordt afgerond op 0,05.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4}$$

formule 4.12 NRC berekening

De NRC-waarde heeft als voordeel dat er snel mee gerekend kan worden. In plaats van voor meerder octaafbanden de nagalmtijd te berekenen, wordt met de NRC-waarde een gemiddelde nagalmtijd berekend. Het nadeel van de NRC-waarde is dat door deze middeling de karakteristiek van het absorptie materiaal verloren gaat. In onderstaande grafiek worden een viertal voorbeelden gegeven met verschillende α -waarden met allemaal dezelfde NRC-waarde.



figuur 4.4 verschillende α -waarden met de zelfde NRC-50

4.5 Weging en beoordeling van geluid

4.5.1 Luidheid

De sterkte van een geluid kan worden uitgedrukt in objectieve (fysische) grootheden zoals de geluiddruk en geluidintensiteit. Als zodanig zeggen deze grootheden weinig over de luidheidsensatie die een geluidssignaal veroorzaakt. Luidheid is een subjectieve ervaring. In het verleden is er onderzoek gedaan met als doel het begrip luidheid te kwantificeren. Hiertoe werd de luidheid die verschillende signalen bij de luisteraar veroorzaken onderling vergeleken. Voor sinustonen is op deze wijze het verband tussen geluiddrukkniveau, frequentie en luidheid vastgelegd in curven van gelijke luidheid, de zogenaamde isofonen. Er zijn twee maten voor luidheid in gebruik te weten de foon en de soon die beide zijn gerelateerd aan een zuivere toon van 1000 Hz.

4.5.2 Foon

Zo is het luidheidniveau van een toon in foon gelijk aan het geluiddrukkniveau van een even luide toon van 1000 Hz. De luidheidschaal in foon loopt dus globaal van 0 foon bij de gehoordrempel tot 120 foon bij de pijngrens. Toename van het luidheidniveau met 10 foon wordt ervaren als een verdubbeling van de luidheid. De A,B,C,D-wegingen in §4.5.4 zijn ook gebaseerd op deze isofonen.

4.5.3 Soon

Een wat recentere maat voor de luidheid is de soon. Een toon met een luidheid van 1 soon klinkt even luid als een toon van 1000 Hz met een geluiddrukkniveau van 40 dB. Indien een toon als tweemaal zo luid wordt beoordeeld als een toon met een luidheid van 1 soon heeft deze een luidheid van 2 soon. De luidheid uitgedrukt in soon verdubbelt voor iedere 10 dB toename van het geluiddrukkniveau.

$$S = 2^{\left(\frac{F-40}{10}\right)}$$

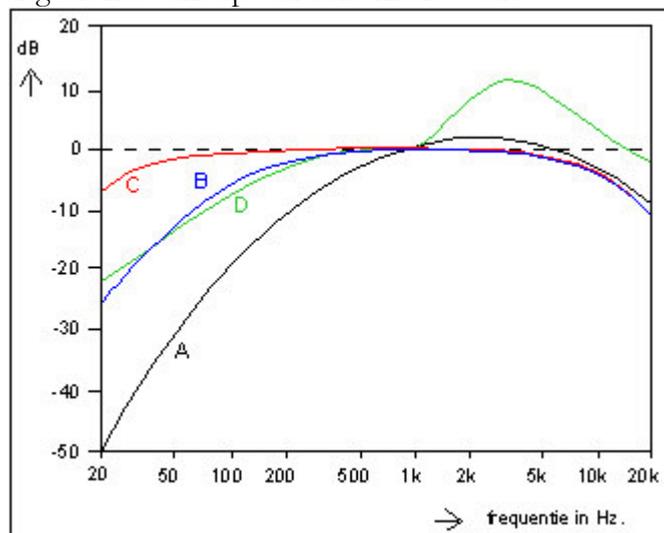
formule 4.13 omrekenformule foon-soon

De wijze waarop ons gehoorzintuig de luidheid opbouwt van niet sinusvormige signalen en dus breedbandige signalen is uitermate gecompliceerd. Voor de luidheid van breedbandige signalen is de zogenaamde kritieke band van belang. Binnen de kritieke band, die een breedte heeft van ongeveer 150 Hz, wordt witte ruis waargenomen met een luidheid die gelijk is aan die van een zuivere toon met een frequentie in het midden van die band en hetzelfde geluiddrukkniveau. Indien de bandbreedte van een signaal groter is dan de kritieke band dan wordt een luidheid waargenomen die groter is dan die van een zuivere toon in die band met gelijk geluiddrukkniveau. Er zijn verschillende methoden in gebruik om de luidheid van een willekeurig geluidssignaal te berekenen.

4.5.4 A-, B-, C- en D-weging van niveaus

De gevoeligheid van ons gehoorzintuig is niet voor alle frequenties gelijk. De grootste gevoeligheid bezit ons gehoor voor frequenties rond de 1000 Hz. Lagere en hogere tonen worden minder goed waargenomen. Dat de luidheid van een bepaalde toon zoals wij die ervaren behalve van het geluiddrukkniveau ook nog sterk afhangt van de frequentie blijkt uit het verloop van de zogenaamde isofonen. Doordat het oor niet voor alle frequenties even gevoelig is, is het gewone lineair gemeten geluiddrukkniveau geen goede maat voor de ondervonden hinder van een bepaald geluid. Een veel betere hindermaat wordt verkregen

indien het meetinstrument waarmee wordt gemeten niet alle frequenties even sterk meetelt. Dit wordt bereikt door het instrument te voorzien van een filter dat qua vorm de karakteristiek van ons gehoorzintuig benadert. De met ingeschakeld filter gemeten niveaus worden gewogen niveaus genoemd. Er is op het signaal een frequentieafhankelijke weging toegepast. In het geval weging is toegepast op de geluiddruk spreekt men niet meer van een geluiddrukniveau maar van een geluidniveau. Er zijn vier genormeerde filters voor de weging van geluid beschikbaar die als A-,B-,C-, en D-filter worden aangeduid. Niveaus met deze filters gemeten geeft men aan met dB(A), dB(B), dB(C) en dB(D). De onderstaande figuur geeft het verloop van deze filters weer.

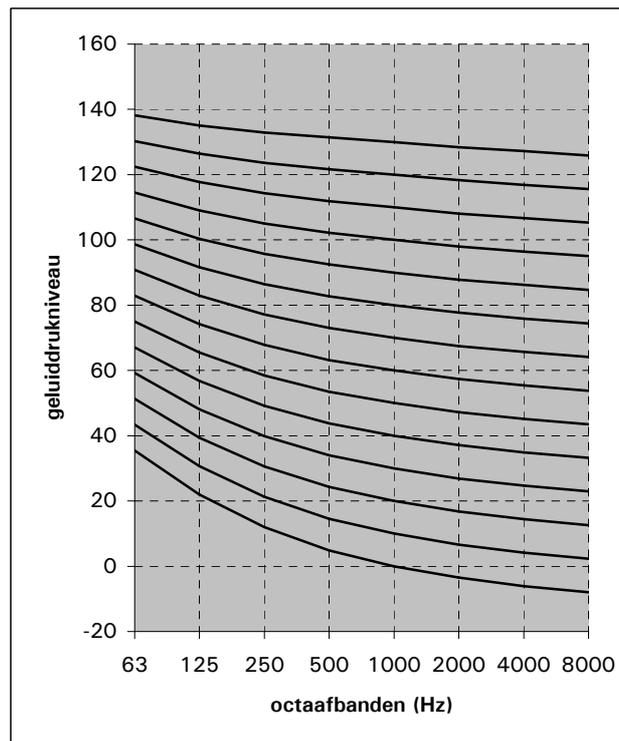


figuur 4.5 A- B- C- D-Filter

Het A-filter sluit zo goed mogelijk aan bij de 40 foon isofoon en is geschikt voor niveaus onder de 55 dB. Het B-filter is geschikt voor niveaus tussen 55 dB en 85 dB en sluit aan bij de 70 foon lijn terwijl het C-filter geschikt is voor niveaus daarboven en zo goed mogelijk overeenkomt met de 100 foon lijn. Het D-filter is speciaal ontwikkeld voor de hinderbepaling van luchtverkeerslawaaai. Het geeft een extra opwaardering van de frequenties die juist daar zeer vaak voorkomen. Hoewel er voor verschillende niveaus dus verschillende filters moeten worden gebruikt, wordt in de praktijk met uitzondering van luchtverkeerslawaaimeetingen, vrijwel altijd weging met het A-filter toegepast. Gebleken is namelijk dat juist dit filter over een groot gebied van niveaus een goede hindermaat dan wel de basis daarvoor oplevert. Voor ongewogen niveaus is de dB de correcte eenheid. Deze worden echter ook wel aangeduid als het lineaire niveau dB-lin. Zowel in het geval van een totaal geluidniveau als voor een niveau in een octaaf- of een tertsbands kan worden gewerkt met gewogen niveaus.

4.5.5 NR-Curves (Noise-Rating-Curves)

Naast de hiervoor genoemde mogelijkheden is er nog een methode op door middel van normwaarden complexe geluiden te kwalificeren. Een internationaal genormaliseerd systeem werd door de ISO-TC43 aangegeven in de publicatie "Noise Rating with respect to annoyance". Deze aanbeveling bevat een diagram waarin krommen zijn getekend die ongeveer hetzelfde verloop hebben als de isofonen. De krommen zijn genummerd, oplopend met 5. Het nummer van een NR-kromme correspondeert met het geluiddrukniveau in dB in de octaafband met 1000 Hz als middenfrequentie, zie figuur -4.6-.



figuur 4.6 NR-krommen

Om geluid te kunnen karakteriseren, wordt het geluiddrukkniveau hier van in de octaafbanden gemeten. Met behulp van de gevonden waarden wordt het geluidsspectrum in het diagram getekend. De laagste NR-kromme die niet door het spectrum wordt overschreden karakteriseert het gemeten geluid. De NR-krommen worden ook wel geluidhinderkrommen genoemd, omdat ze vooral gebruikt worden bij beoordeling van geluidhinderkwesities. NR0 komt ongeveer overeen met de gehoordrempel. Voor geluidsterktes lager dan de gehoordrempel wordt de NR-kwalificatie negatief.

NR-Curve worden heel vaak gebruikt om het achtergrondniveau, dat in concertzalen en studio's vooral veroorzaakt wordt door de installaties, vast te leggen. Bij betonkernactivering is het ventilatieoud minimaal en is de achtergrondruis van het systeem ook lager.

5 Nagalmtijd

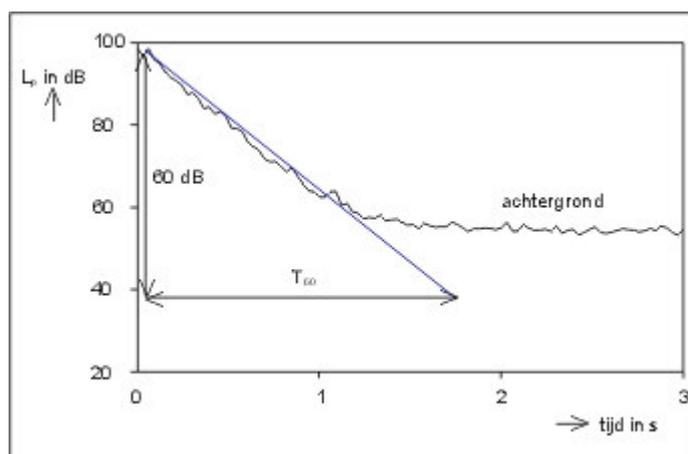
De nagalmtijd is de tijd waarin het geluiddrukkniveau, na het uitschakelen van de bron, met 60 dB gedaald is ten opzichte van het geluiddrukkniveau van de bron.

De nagalmtijd is frequentieafhankelijk. Hoewel deze definitie zeer eenvoudig oogt, is het meten van de nagalmtijd geen eenvoudige opgave. De voornaamste reden hiervoor is dat het niveauverschil van 60 dB tussen het signaal van de bron en het achtergrondniveau moeilijk haalbaar is. Bovendien hebben sommige meettoestellen geen dynamiek van meer dan 60 dB. In de praktijk zijn er twee methoden om de nagalmtijd te bepalen.

De “onderbroken ruis methode” meet de afname van het geluiddrukkniveau na het onderbreken van een ruissignaal. Dit afnemend niveau, de galmcurve, zal men zo nauwkeurig mogelijk benaderen door een rechte, hetzij manueel en visueel, hetzij met een kleinste kwadraten benadering. Aan de hand van de helling van die benaderende rechte wordt dan de nagalmtijd berekend.

De andere methode, de “geïntegreerde pulsresponsie methode”, gaat uit van de opgemeten pulsresponsie, ongeacht de manier waarop deze bekomen is. Hier wordt de galmcurve bepaald door een achterwaartse integratie van de gekwadrateerde pulsresponsie. Dit levert het verloop van de energie in functie van de tijd op, wat grafisch door de Schroeder-curve wordt weergegeven. Om de negatieve invloed van de energie van het achtergrondlawaai op het einde van de pulsresponsie zoveel mogelijk uit te schakelen, beperkt men de integratie tot een welbepaald ogenblik in plaats van tot oneindig. Ook hier zal een kleinste kwadraten benadering van de curve een rechte opleveren waaruit de nagalmtijd berekend kan worden. Om de metingen van de nagalmtijd vergelijkbaar te maken heeft ISO, in haar norm ISO 3382, niveaus vastgelegd waartussen de galmcurve benaderd moet worden, ongeacht de gebruikte methode.

In dit kader spreekt men van de nagalmtijden T_{20} en T_{30} . Voor T_{30} wordt de galmcurve berekend over een niveauverschil van 30 dB, namelijk van 5 dB tot 35 dB onder het oorspronkelijke niveau. Wanneer dit niveauverschil met de achtergrond slechts 35 dB bedraagt, kan men enkel T_{20} bepalen. Hiervoor zal de galmcurve benaderd worden over een niveauverschil van 20 dB, tussen 5 dB en 25 dB onder het oorspronkelijke geluidniveau.



figuur 5.1 Nagalmtijd

5.2 Sabine

De nagalmtijd kan ook geschat worden uit de gegevens van de ruimte; Volume, absorberend oppervlak en oppervlak. Sabine definieerde als eerste een formule om deze tijd te berekenen.

$$T_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}}$$

formule 5.1 Sabine

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{\sum S_i}$$

formule 5.2 α -gemiddeld

waar:

V - zaalvolume [m³]

S - totaal oppervlak [m²]

α -gemiddelde absorptiecoëfficiënt

0,16 - coëfficiënt die eerst empirisch werd geïntroduceerd. Daarom kunnen in de literatuur, waarden gelijk aan 0,16, 0,161, 0,162, 0,163, en 0,164 worden gevonden. Sabine leidde experimenteel een waarde van 0,164 af.

De 0,16 is afhankelijk van de geluidsnelheid c. c is bij 20°C 343 m/s. $55,3/c=0,16$.

$$c = 331 + 0,6 \times t \left[\frac{m}{s} \right]$$

formule 5.3 Geluidsnelheid in lucht

Zoals van in de vergelijking kan worden afgelezen, is T_{60} afhankelijk van volume en de absorptiefactor. De vergelijking veronderstelt dat de geluidsenergie diffuus en gelijkmatig door de ruimte wordt verspreid (d.w.z. homogeen en isotoop).

5.3 Eyring

Eyring paste de klassieke formule van Sabine aan, omdat die niet klopt wanneer er veel absorberend materiaal aanwezig is. Als de absorptiecoëfficiënt nadert naar 1 nadert de nagalmtijd niet naar nul. Hierom pas hij de formule van Sabine aan. In plaats van te delen door α , deelt Eyring door $-\ln(1 - \alpha)$. Dit omdat Eyring veronderstelt dat het geluid dat uit een bron in een ruimte komt vervolgens door wanden, die een gemiddelde α -coëfficiënt hebben, weerspiegeld wordt. Elke keer dat een golf tegen één van de grenzen slaat, wordt een (α) fractie van de energie geabsorbeerd, en een fractie $(1 - \alpha)$ wordt weerspiegeld.

$$T_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

formule 5.4 Eyring

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \cdot \alpha_i$$

formule 5.5 α -gemiddeld

5.4 Vergelijking theorieën - metingen

Het berekenen van de nagalmtijd heeft naast Sabine en Eyring nog vele anderen beziggehouden. Zo zijn er verschillende formules ontwikkeld om aan de hand van de absorptie van de materialen de nagalmtijd van het vertrek te kunnen berekenen.

De meest bekende formules naast die van Sabine en Eyring zijn die van; Millington en Sette, Fitzroy Arau en Kuttruf.

Voor dit onderzoek gaat het te ver om deze verschillende methodes te bespreken.

Wel van belang is de nauwkeurigheid van de berekende waarde en de gemeten waarden. In alle formules wordt gerekend met een gemiddelde α ; Fitzroy en Arau splitsen dit nog wel op in 3 richtingen x,y,z.

5.4.1 Ducourneau en Planeau¹⁷

In een onderzoek van Ducourneau en Planeau is naast de onderlinge vergelijking van de formules ook gekeken naar een niet uniforme verdeling van de absorptie. Uit metingen is gebleken dat de nagalmtijd langer wordt indien het absorberende materiaal verder van de bron wordt geplaatst.

Om dit effect mee te nemen in de formule is niet gekeken naar het aanwezige absorberende oppervlak maar naar het zichtbare absorberende oppervlak berekend met behulp van de ruimte hoek.

$$\Omega = \iint_s \frac{\cos \theta \cdot d\sigma}{r^2}$$

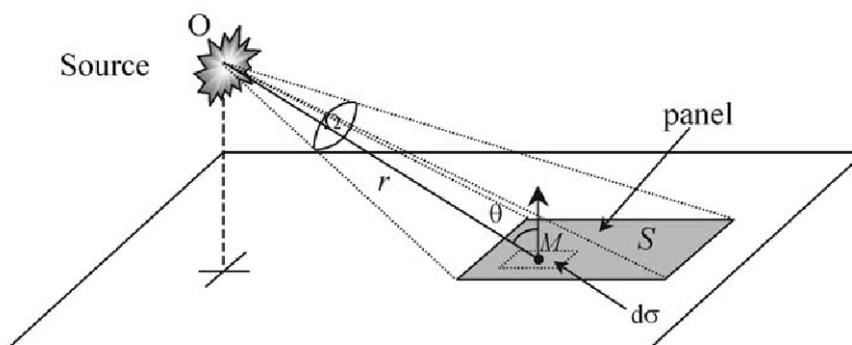
formule 5.6 berekening van de ruimtehoek

$$\bar{\alpha}' = \frac{1}{\Omega_{tot}} \sum_i \Omega_i \alpha_i$$

formule 5.7 berekening van de gemiddelde α voor Sabine vanuit de ruimtehoek.

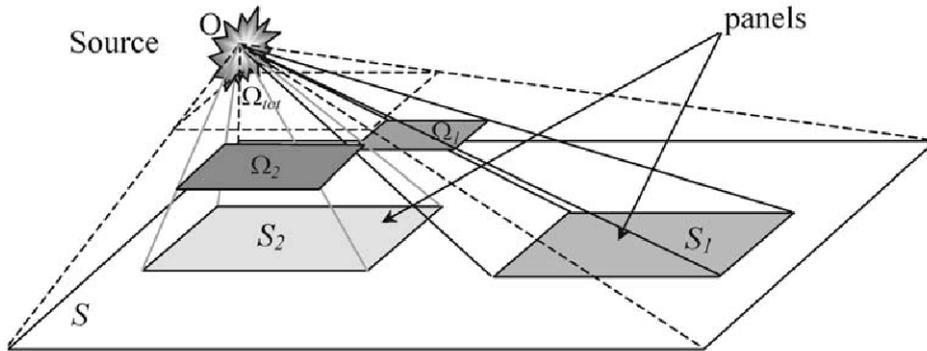
$$\bar{\alpha}'_{Ey} = -\ln(1 - \bar{\alpha}')$$

formule 5.8 berekening van de gemiddelde α voor Eyring vanuit de ruimtehoek.



figuur 5.2 Bepaling van de ruimtehoek van een vlak

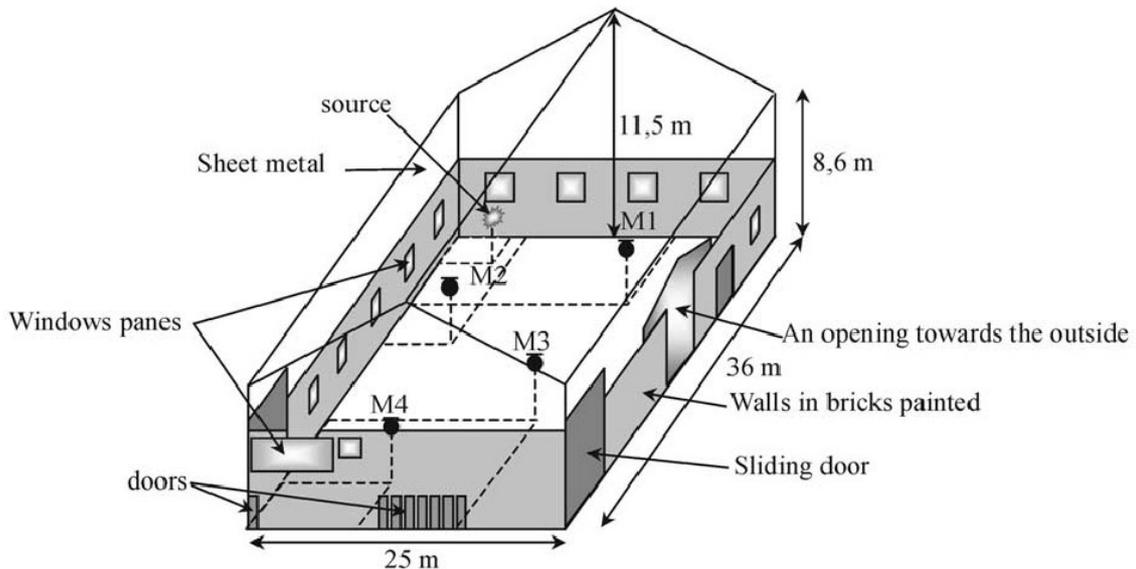
¹⁷ DUCOURNEAU PLANEAU, AA, 2003



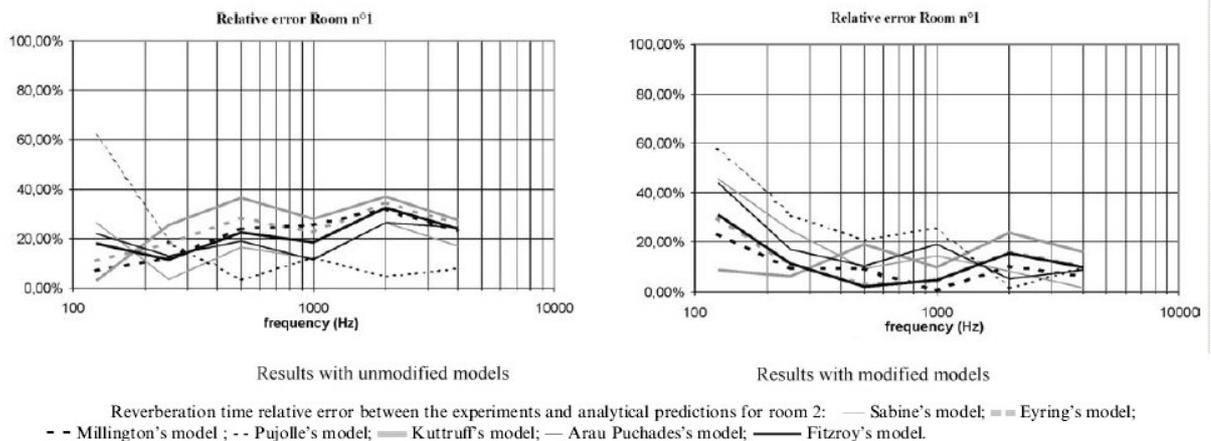
figuur 5.3 Bepaling van de ruimtehoek van een vlak

5.4.1.2 Voorbeeld

Voor vertrek1 gaven de ongewijzigde modellen theoretische nagalmtijden die dichtbij bij de meetwaarden lagen. Ruimte1 was een vrij grote ruimte en de meeste wanden waren reflecterend (beton, baksteen) Het plafond voorzien van glaswolpanelen. Als voor de theoretische waarden de correctie van de ruimtehoek wordt meegenomen worden de uitkomsten nauwkeuriger. De relatieve fout verminderde met ongeveer 10%.



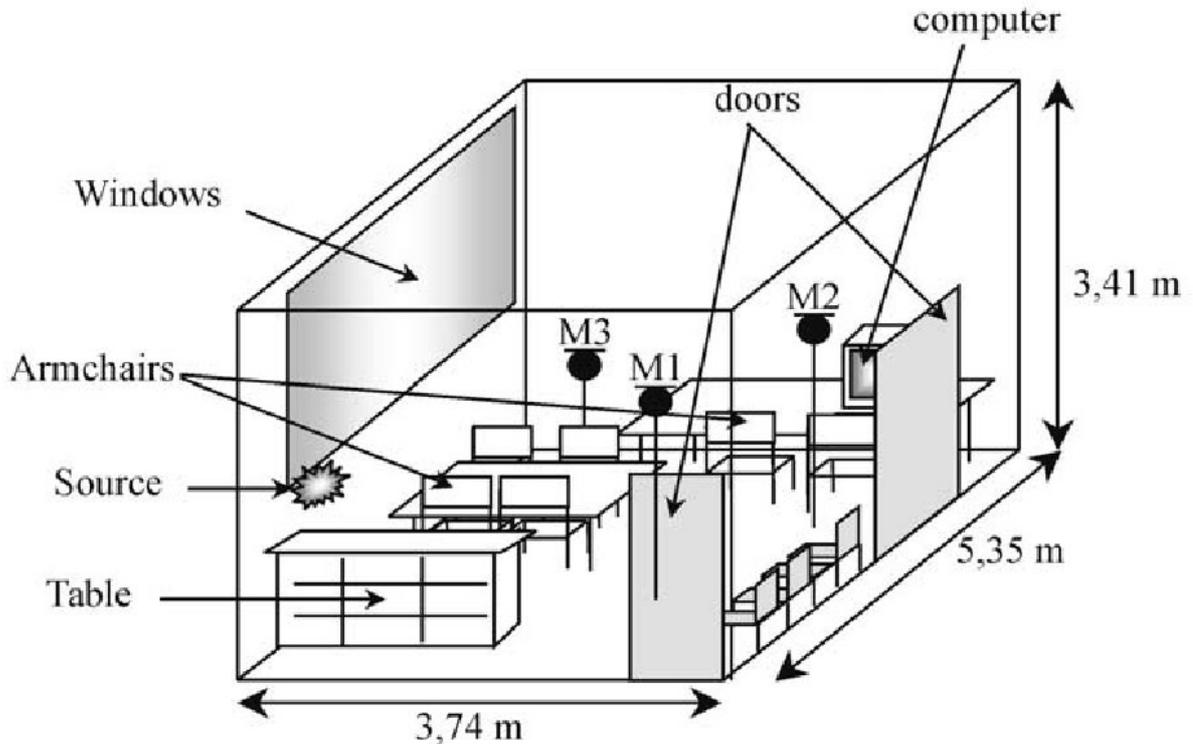
figuur 5.4 tekening vertrek1



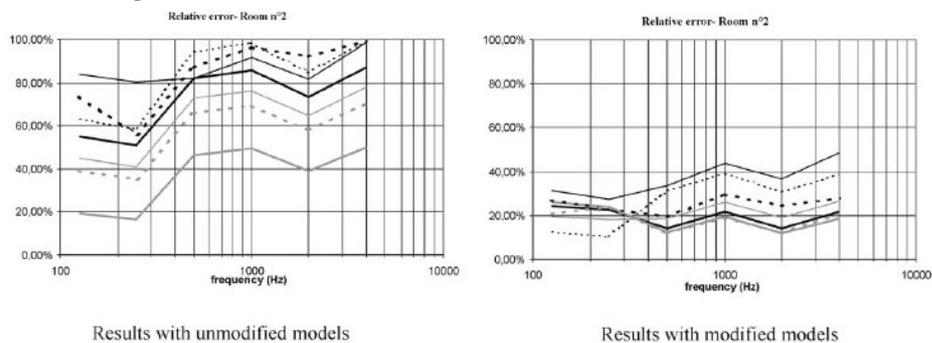
figuur 5.5 relatieve fout van de berekende nagalmtijd van vertrek1

Vertrek2 was een kleine ruimte met reflecterende muren. De nagalmtijd was kort. Dit werd voornamelijk veroorzaakt door het meubilair. De nagalmformules die een diffuus geluidveld veronderstellen zijn hiervoor minder van toepassing. De theoretische resultaten die zonder wijziging van de ruimtehoek worden verkregen zijn zeer verschillend van de meetresultaten (relatieve fout tussen de 20 en 100%).

Als voor de theoretische waarden de correctie van de ruimtehoek wordt meegenomen worden de uitkomsten nauwkeuriger. De relatieve fout van de nagalmtijd ligt dan tussen de 10 en 45%.



figuur 5.6 tekening vertrek2



Reverberation time relative error between the experiments and analytical predictions for room 2: — Sabine's model; = = Eyring's model; - - Millington's model; - - Pujolle's model; — Kuttruff's model; — Arau Puchades's model; — Fitzroy's model.

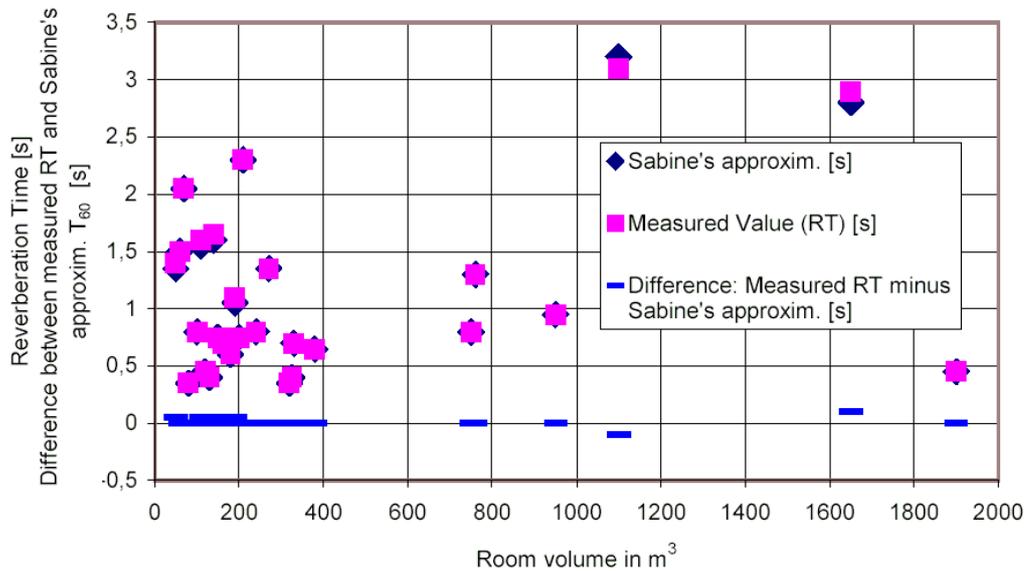
figuur 5.7 relatieve fout van de berekende nagalmtijd van vertrek2

5.4.2 Neubauer en Kostek¹⁸

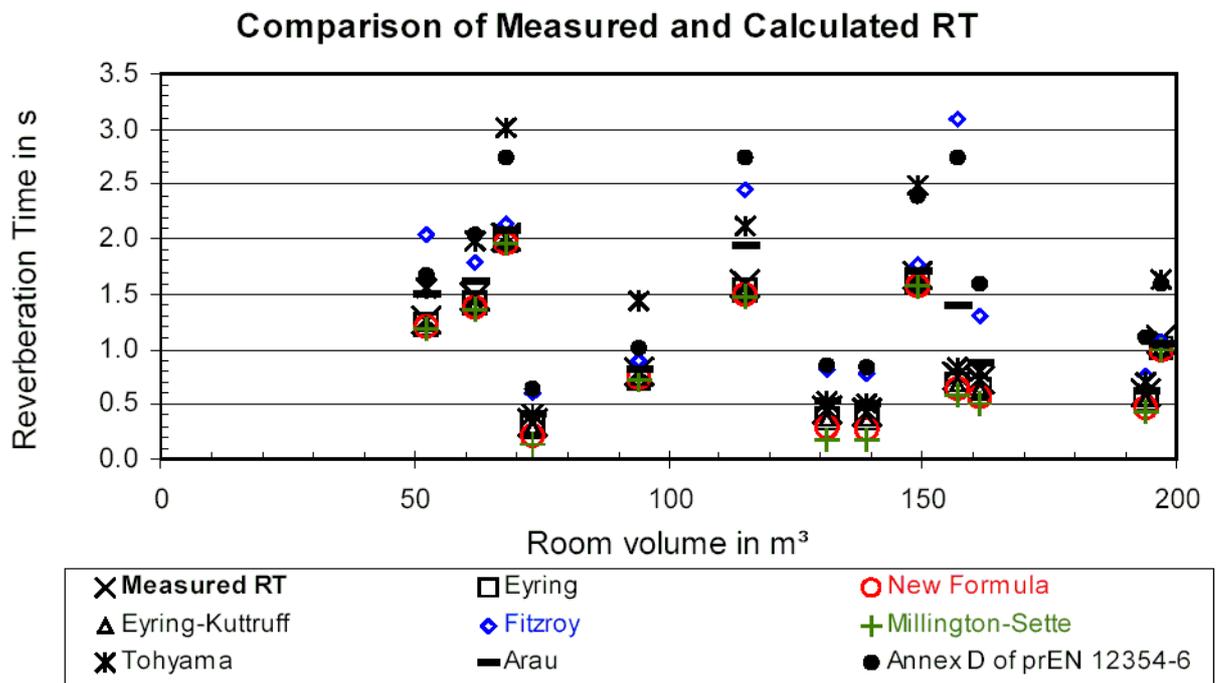
In een ander onderzoek van Neubauer en Kostek is gekeken naar de voorspelde nagalmtijden m.b.v. verschillende formules en gemeten waarden. In de eerste grafiek is een vergelijking gemaakt tussen de berekende waarde en de gemeten waarden. In de tweede grafiek zijn m.b.v. verschillende formules de nagalmtijden berekend en samen met

¹⁸ NEUBAUER KOSTEK, *AofA*, 2001

de meet waarden in één grafiek gezet. Uit de eerste grafiek komt naar voren dat de uitkomsten van Sabine goed overeenkomen met de gemeten waarden. In de tweede grafiek is te zien dat er een aantal berekenen methodes significant afwijken van de gemeten waarden. Dit zijn vooral Fitzroy, Tohyama en EN12354-6



figuur 5.8 Vergelijking tussen meetwaarden en berekende waarden met Sabine



figuur 5.9 Vergelijking tussen meetwaarden en berekende waarden

In “NEN 12354-6; Geluidwering in gebouwen – Berekening van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van bouwelementen – Deel6: Geluidabsorptie in gesloten ruimten.”¹⁹ Wordt de berekening voor de nagalmtijd ook afhankelijk gemaakt van de drie richtingen van de begrenzende vlakken.

Hierin wordt ook per richting ook nog rekening gehouden met de spreidingscoëfficiënt en de objecten in de ruimte. De uiteindelijke nagalmtijd is een middeling van de nagalmtijden in de drierichtingen plus een ruimte nagalmtijd.

5.5 Het bepalen van de nagalmtijd in een testopstelling.

Doordat de nagalmtijd in een ruimte deels afhankelijk is van de meetposities zijn het voor het bepalen van de nagalmtijd van een vertrek normen op gesteld.

In de ISO3382 en de NEN 5077 worden op twee manieren de opstelling van de metingen weer gegeven.

Een derde manier is de meetwaarden gebruiken van de microfoon posities die op de mean free path afstand liggen.

5.5.1 ISO3382

bron

De bron moet geplaatst worden op de positie waar in normale situatie de spreker staat. En in het ‘midden’ van het veld waar de stoorbron zich bevindt.

ontvanger

De microfoon posities moeten op z’n minst een halve golflengte uit elkaar staan, i.e. een minimum afstand van ongeveer 2 m voor de normale frequentie reeks. De afstand van een microfoonpositie tot de dichtstbijzijnde reflecterende wand, inclusief de vloer, moet om z’n minst een kwart golflengte zijn, i.e. normaal ongeveer 1m. Er mag geen microfoonpositie te dichtbij de bron geplaatst worden. Om zo de grote invloed van het directe geluid te vermijden. De minimum afstand d_{\min} in meters, kan berekend worden met:

$$d_{\min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{cT}}$$

formule 5.9 minimale afstand tussen bron en microfoon

V= Volume

c= geluid snelheid in meters per seconde

T= schatting van de te verwachten nagalmtijd

Aantal metingen

Voor een nauwkeurige berekening moeten meerdere metingen worden uitgevoerd. Het aantal is afhankelijk van de grootte van het vertrek. Het aantal microfoon posities is minimaal 6 met minimaal 2 bron posities. Deze minimaal 12 metingen worden gemiddeld.

Berekening

Bij metingen met gebruik van de onderbroken geluidsmethode, bepaald de waarde van de afname-lijn over het gebied van 5 dB tot 35 dB onder het begin niveau for T_{30} . In dit gebied moet een lijn berekend worden: een rechte lijn die zo goed mogelijk overeenkomt met de afname-lijn. Het laagste punt in de meetreeks moet voldoende boven het niveau van de achtergrondruis liggen. Voor metingen van T_{30} moet het achtergrond geluid op z’n minst 45 dB onder het start niveau liggen.

¹⁹ 12354-6

Bij een hoog niveau van de achtergrondruis kan ook gekozen worden voor T_{20} . Hierbij wordt de waarde bepaald van de afname-lijn over het gebied van 5dB tot 35 dB onder het begin niveau. Voor metingen van T_{20} moet het achtergrond geluid op z'n minst 45 dB onder het start niveau liggen.

Staat van de resultaten

Bij de bepaling van de nagalmtijd de resultaten kunnen gespecificeerd in een meer beknopte manier door de gemiddelde waarde van de resultaten in koppels van octaven. Dus 125 en 250 HZ als gemiddelde nagalmtijd voor lage frequenties; 500 en 1000 Hz als gemiddelde nagalmtijd voor de midden frequenties en 2000 en 4000 hZ als gemiddelde voor de hoge frequenties.

Octaafbanden

Voor het bepalen van de nagalmtijd wordt gerekend met de octaafbanden 125Hz tot 4kHz.

5.5.2 NEN5077

Plaatsing luidsprekers De NEN-5077 geeft een aantal mogelijkheden voor de plaatsing van de luidsprekers. Luidspreker positie 1 ligt in de drievlakshoek die wordt gevormd door: een wand, de vloer en de buitengevel (uitwendige scheidingsconstructie). Bij de opstelling van de luidspreker dient er voor gezorgd te worden dat het midden niet samenvalt met de symmetrieas van de hoek waar deze wordt opgesteld. Daarnaast moet de afstand luidspreker - hoek maximaal 1,5 meter zijn. De directe omgeving van de geluidbron dient vrij gehouden te worden van objecten, obstakels of personen. Microfoonposities Voor de bepaling van de nagalmtijden moeten metingen worden verricht op ten minste het aantal meetposities als aangegeven in de tabel.

Vloeroppervlakte m ²		Minimaal aantal meetposities	Per meetpositie en per octaafband nagalmregistraties	Totaal minimaal per octaafband vereiste aantal nagalm registraties
Groter dan	tot en met			
-	4	1	2	2
4	12	2	2	4
12	30	3	1 of 2	4
30	-	4	1 of 2	6

tabel 5.1 Aantal meetposities voor het bepalen van de nagalmtijd

De microfoonposities moeten zowel in horizontale als in verticale richting gelijkmatig over de ruimte worden verdeel. Tussen de meetposities en de begrenzingen van de ruimte en andere obstakels moeten ten minste de afstanden worden aangehouden als gegeven in de tabel.

Aard van het obstakel	Minimaal aan te houden afstand [m]
Geluidbron	1
Begrenzingen van de ruimte	0,5
Persoen in de ruimte	0,5
Objecten met een oppervlakte groter dan 0,5m ²	0,5
Overige meetposities	1

tabel 5.2 Minimale afstand tussen ontvanger en obstakel

Berekenen

Bepaal na het uitschakelen van de bron de punten waarop het geluidrukniveau 5 dB en 25 dB is gedaald. Bepaal voor het gedeelte van de nagalmcurve tussen deze punten de best passende rechte lijn. Bij het bepalen van het ruimte gemiddelde nagalmniveau wordt per octaafband de gemiddelde nagalmtijd T door rekenkundige middeling bepaald.

5.6 Mean free path

De ‘mean free path’ (gemiddelde vrije weg) is gedefinieerd als de gemiddelde afstand dat een geluidsgolf af legt voordat het gereflecteerd wordt. Een benaderde waarde voor de ‘mean free path’ door Sabine; een vroege pionier van statistische ruimteakoestiek is:

$$\bar{d} = \frac{4V}{S} [m]$$

formule 5.10 Mean free path

Deze formule ontstaat door te redeneren vanuit een bol.

Van een bol weten we dat:

$$V = \frac{4\pi r^3}{3}$$

formule 5.11 Volume van een bol

$$S = 4\pi r^2$$

formule 5.12 oppervlakte van een bol

Als we deze formules omschrijven en r voor het ‘=’teken halen krijgen we

$$r^3 = \frac{3}{4\pi} V$$

$$r^2 = \frac{1}{4\pi} S$$

$$r = \frac{3V}{S}$$

Voor dit geval is bekend dat de vrije weg lengte l met de volgende formule berekend kan worden.

$$\bar{d} = \frac{\text{Volume van de ruimte}}{\text{dwarsdoorsnede}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{\pi r^2} = \frac{4r}{3}$$

formule 5.13 gemiddelde afstand

Vul r uitgedrukt in V en S in deze formule en je krijgt:

$$\bar{d} = \frac{4V}{S} [m]$$

formule 5.14 mean free path

5.7 Theoretische benadering van de formule van Sabine

De nagalmtijd is gedefinieerd als de tijd dat het duurt om na uitschakeling van de bron het geluiddrukkniveau 60 dB te laten dalen.

Of met andere woorden

De nagalmtijd is gedefinieerd als hoelang het duurt voor dat de energie in het vertrek is gereduceerd tot 1-miljoenste van het originele niveau, i.e.

$$E_n = E_0 * 10^{-6}$$

$$E_0(1 - \alpha)^n = E_0 * 10^{-6}$$

formule 5.15 energie afname van 60 dB

Neem hiervan de logaritmes

$$n \log_e(1 - \alpha) = \log_e(10^{-6})$$

De tijd dat het kost om n-reflecties te maken is afhankelijk van de afstand tussen de reflecties en de geluidssnelheid.

$$n = \frac{tc}{d}$$

formule 5.16 Aantal reflectie per tijdseenheid

De hier berekende n wordt ingevuld in de daarvoor genoemde formule en geeft dan

$$\frac{tc}{d} \log_e(1 - \alpha) = \log_e(10^{-6})$$

$$t = \frac{\bar{d} \cdot \log_e(10^{-6})}{c \cdot \log_e(1 - \alpha)}$$

formule 5.17 tijdsduur voor een energieafnamen van 60 dB

Als we in deze formule in plaats van d ; $4V/S$ en voor c , de geluidssnelheid van 343 m/s en $\log_e(10^{-6})$ uitrekenen krijgen we.

$$t = \frac{-0,16V}{S \log_e(1 - \alpha)}$$

formule 5.18 tijdsduur afhankelijk van V , S en α

Wetende dat:

$$\log_e(1 - \alpha) = -\alpha - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\alpha^3}{3} - \frac{\alpha^4}{4} - \dots - \frac{\alpha^n}{n} \approx -\alpha$$

$$t = \frac{-0,161 \cdot V}{-\alpha \cdot S}$$

En dit geeft uiteindelijk de formule van Sabine voor de nagalmtijd.

$$RT = \frac{0,16 \cdot V}{A} [s]$$

formule 5.19 Nagalmtijd Sabine

6 Spraakverstaanbaarheid

6.1 Inleiding

Spraakverstaanbaarheid wordt in de zaalakoestiek beschouwd als een intrinsieke eigenschap van de ruimte. Het is de invloed die de ruimte uitoefent op de kwaliteit van een gesproken signaal bij de overdracht tussen spreker en luisteraar. Deze wordt bepaald door het invallen van geluidsgolven op de begrenzingsen en de voorwerpen in de ruimte, alsmede door het geluid dat behalve het signaal in de ruimte aanwezig is, het zogenaamde achtergrondlawaai.

Spraak is ontegensprekelijk één van de belangrijkste middelen waarmee informatie in de klas wordt overgebracht. Een onvoldoende spraakverstaanbaarheid resulteert dan ook automatisch in een slechtere informatieoverdracht. Want stel u eens voor dat u in elke zin die u hoort enkele woorden mist. Bij volwassenen en oudere leerlingen wordt dit euvel nog gedeeltelijk gecompenseerd. Zij kunnen immers vaak uit de context van het verhaal de ontbrekende woorden aanvullen. Maar jongere leerlingen en leerlingen wiens moedertaal niet het de gesproken taal is, beschikken nog niet over de nodige woordenschat en taalervaring om deze leegtes op te vullen.

Wanneer men over spraakverstaanbaarheid spreekt, bedoelt men de mate waarin het geheel van akoestische kenmerken van een ruimte de verstaanbaarheid van een spreker beïnvloedt. Twee elementen in het bijzonder spelen hierin een rol.

De geluidabsorptie van de materialen waarmee de ruimte is bekleed, omdat de absorptie de nagalmtijd bepaalt en dus ook de mate waarin klanken in elkaar overvloeien.

Het andere element is het lawaai (het niet-nuttige geluid) dat in de ruimte aanwezig is, voornamelijk bepaald door de geluidisolatie van de wanden. De spraakverstaanbaarheid kan op verschillende manieren bepaald worden. Er zijn meerdere spraaktesten. Hierbij moeten luisteraars de woorden opschrijven die geoefende sprekers voorlezen. Hoewel deze methode de werkelijke situatie nauwkeurig simuleert en meteen een resultaat oplevert, is ze zeer omslachtig vanwege het groot aantal personen dat hierbij betrokken moet worden. In die zin zijn de metingen op basis van fysische grootheden een stuk eenvoudiger. Deze metingen zijn gebaseerd op één van de volgende concepten. Hier worden de verschillende concepten kort aangestipt, in de opvolgende paragrafen zullen ze verder worden uitgewerkt.

De signaal-ruisverhouding (*signal-to-noise ratio* (SNR)); waarbij het achtergrondniveau en het geluiddrukkniveau van het uitgezonden signaal afzonderlijk op de positie van de ontvanger gemeten wordt. Op dit concept is onder meer de articulatie-index (*articulation index* (AI)) gebaseerd. Via de signaal-ruisverhouding in elke octaafband wordt dan uiteindelijk een articulatie-index tussen 0 en 1 verkregen, die een maat vormt voor de spraakverstaanbaarheid op de positie van de ontvanger.

Een andere manier van geluidbeoordeling is gebaseerd op geluid-energieverhoudingen. Deze grootheden zijn verwant met de vroeg-tot-laatverhoudingen die gebruikt worden om de akoestische kwaliteit van zalen te bepalen. Deze methode heet *clarity* (*C*); voor spraak wordt de grens tussen vroeg en laat gelegd op 50 ms

In plaats van de verhouding te nemen tussen de geluidenergie die vroeg en later aankomt, maakt men de verhouding tussen de geluidenergie die nuttig en nadelig is voor de spraakverstaanbaarheid (*useful-to-detrimental sound ratio* (U)). De nuttige energie is de energie die vroeg bij de ontvanger aankomt. De nadelige energie daarentegen omvat de energie

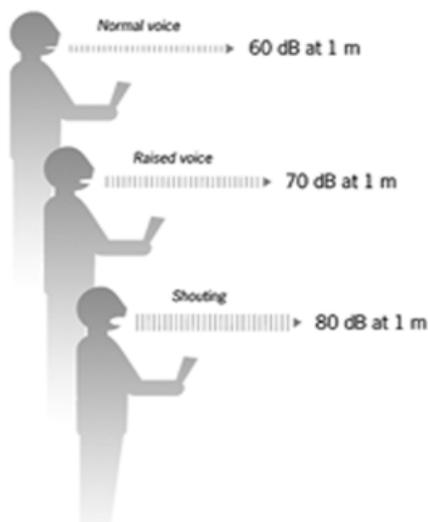
van het achtergrondlawaai en de energie die pas later aankomt bij de ontvanger. Voor spraak wordt hier de grens gelegd bij 50ms (U_{50})

Het volgende concept is de *articulation loss of consonants* (AL_{cons}). Deze sluit nauw aan bij het concept van de energieverhoudingen. Hier wordt echter de geluidenergie gemeten van het directe geluid dat invalt op de ontvanger, samen met de energie van het weerkaatste geluid en van het achtergrondlawaai. Deze energieën worden dan samengevoegd tot parameters waaruit uiteindelijk een articulatieverlies tussen 0 en 100 % bekomen wordt.

En verder is er de *Speech Transmission Index* (STI). Deze grootte heeft als uitgangspunt een karakteristieke eigenschap van spraak als akoestisch signaal. Spraak wordt namelijk gekenmerkt door een voortdurende schommeling van de intensiteit in de verschillende frequentiebanden. Deze intensiteitsmodulatie wordt verminderd onder invloed van omgevingslawaai en de akoestische eigenschappen van de ruimte. Aan de hand van deze uitvlakking kan dan een STI-waarde tussen 0 en 1 berekend worden.

6.2 De geluidsterkte van spraak

De geluidsterkte van gemoedelijke spraak is gemiddeld 1 microwatts wat in een gemiddeld drukniveau van ongeveer 60 dB bij 1m voor de spreker resulteert. Deze geluidsterkte kan tot rond 10 microwatts worden verhoogd wanneer de spreker zo luid mogelijk spreekt zonder de stem te vermoeien, dit verhoogt het drukniveau bij 1m tot ongeveer 70 dB. Door te schreeuwen, kan de geluidsterkte verder verhogen tot ongeveer 100 microwatts dit is drukniveau van ongeveer 80 dB.²⁰ In subjectieve termen, betekent dit dat een spreker de luidheid van de stem kan ongeveer verdubbelen door zeer luid te spreken en het opnieuw te verdubbelen door te schreeuwen.



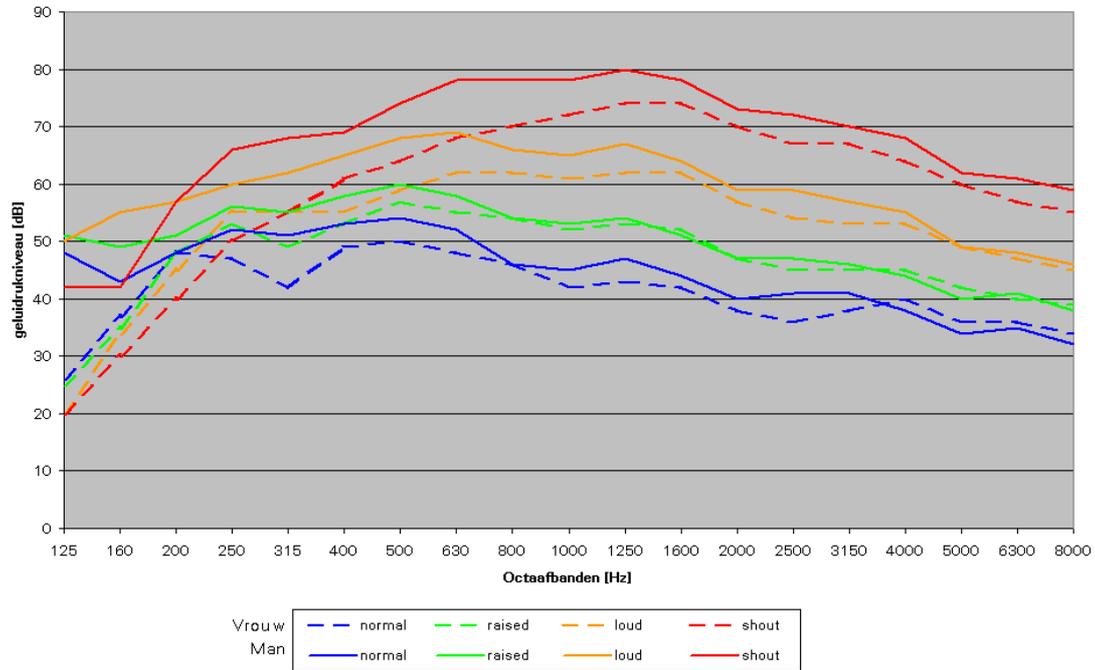
figuur 6.1 geluidsterkte van spraak op 1 m

Het is ook wenselijk om de aard, of nuances en intonaties, van toespraak te bewaren. Dit is bijzonder relevant aan taalonderricht en voor het uitvoeren van drama. De frequenties van geluid in spraak gaan van 125 Hz tot 8 kHz. De klinkers kenmerken de toonhoogte van de stem van de spreker. De stemmen van mannen hebben de laagste gemiddelde hoogte (120 Hertz), vrouwen een middenhoogte (225 Hertz), en kinderen de hoogste hoogte (265 Hertz). De klinkers bevatten het grootste deel van de geluidenergie in spraak maar de erkenning van de medeklinkers is de belangrijkste factor voor hoge begripelijkheid. De begripelijkheid van spraak hangt van zijn hoorbaarheid evenals zijn

²⁰ BB93

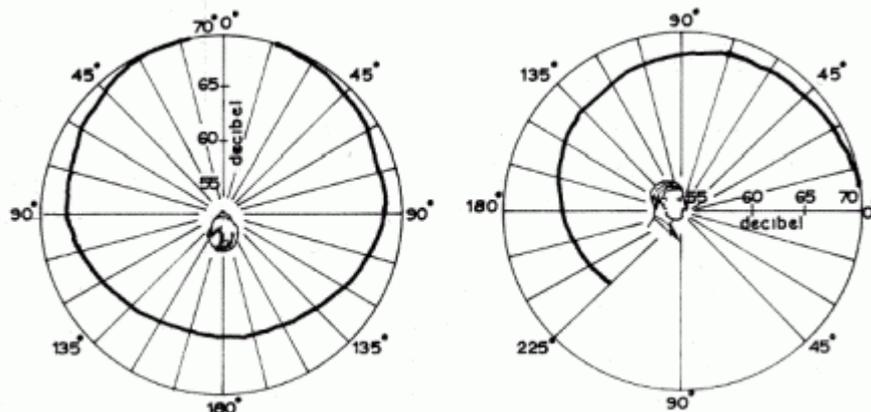
duidelijkheid af. De hoorbaarheid wordt beïnvloed door de luidheid van de toespraak met betrekking tot het achtergrondgeluid.

Een verhoging van de achtergrondgeluiden zal een groter deel van de spraak maskeren en daardoor zal de verstaanbaarheid verminderen. Het is mogelijk om luider te spreken maar dit effect is beperkt en kan ook tot stemvermoeïng leiden.



figuur 6.2 *Spraakspectrum man/vrouw voor 4 spraakniveaus; normaal, verheffen, luid en schreeuwen.*²¹

Een spreker straalt niet in alle richtingen evenveel energie uit. Figuur -6.3- geeft de richtkarakteristieken voor het horizontale en verticale vlak, zoals deze gelden voor een gemiddelde spreker. De meeste geluidsenergie gaat naar voren. De richtkarakteristiek toont aan welke opstelling de toehoorder dient in te nemen ten opzichte van de geluidsbron.²²



figuur 6.3 *Geluidrukniveau rondom het hoofd*

²¹ OLSEN, AJA, 1998

²² CAUBERK, KB ZAALAKOESTIEK

6.3 Signaal-Ruis verhouding (SNR signal-noise ratio)

Deze grootte wordt vaak in combinatie met de nagalmtijd gebruikt om de spraakverstaanbaarheid te karakteriseren. Terwijl de nagalmtijd een akoestische eigenschap van de ruimte is, is de SNR afhankelijk van het stemniveau van de spreker, de afstand tussen de spreker en de luisteraar en het achtergrondniveau. Naarmate de signaalruisverhouding groter is, zal het effect op de spraakverstaanbaarheid gunstiger zijn. Een hoge signaal-ruisverhouding, welke vaak vereenvoudigd wordt tot het *verschil* van de A-gewogen signaal- en ruisniveaus, betekent immers een groter overwicht van het ontvangen 'spraak-niveau' (signaal) ten opzichte van het 'lawaaï-niveau' (ruis), met name de hinder vanwege geluid voortgebracht binnen of buiten de begrenzingen van de ruimte, het achtergrondniveau. Optimale SNR-waarden zijn enkel terug te vinden in de literatuur. De meest aanbevolen waarde voor de SNR situeert zich, in combinatie met bovengenoemde optimale nagalmtijd, rond 15 dB(A). Volgens Finitzo – Hieber²³ varieert de verstaanbaarheid van éénlettergrepige woorden van 95% voor een SNR-waarde van 12 dB in klaslokalen, tot 46% wanneer de verhouding 0 is.

De ideale *signal-to-noise ratio* van 15 dB tussen het geluidniveau van de vocale output op 1 m afstand recht voor de spreker ($L_{sp,1m}$) en het achtergrondniveau (L_n).²⁴ Voor jonge kinderen, ouderen, mentaal gehandicapten en slechthorenden gelden uiteraard ook hier strengere eisen. Waar voor de eerste twee groepen, met name jonge kinderen en ouderen, weinig concrete waarden voor de SNR worden opgegeven, vermeldt de literatuur voor verstandelijk gehandicapten en slechthorenden in de meeste gevallen een optimale waarde van 20 dB voor de SNR.²⁵ Dit zijn erg hoge waarden, in een samenvatten artikel in Language, Speech, And Hearing Services In Schools is de volgende tabel opgenomen. Uit deze tabel blijkt dat een positieve SNR al voldoende is.

<i>Study</i>	<i>Signal-to-noise ratio</i>
Sanders (1965)	+1 to +5
Paul (1967)	+3
Blair (1977)	-7 to 0
Markides (1986)	+3
Finitzo-Hieber (1988)	+1 to +4

tabel 6.1 SNR tabel voor klaslokalen²⁶

6.4 Strength (G)

De 'sterkte' (G) is gedefinieerd als het verschil in geluidniveau (dB) op een luisteraar positie in een ruimte en dezelfde bron gemeten op 10 meter van de bron in het vrije veld. De 'sterkte' van het geluid is gerelateerd aan de luidheid; en moet zo uniform mogelijk over de ruimte verdeeld zijn. Deze uniformiteit is uiteraard alleen wenselijk in spreekruimten; auditoria / collegezalen enzovoort.

²³ FINITZO HIEBER JSHR, 1978

²⁴ BISTAFA BRADLY, JASA, 107, 2000

²⁵ BERLO 2000

²⁶ LSHSS

De factor (G) is ingevoerd om uitspraken te doen over het luidheidsniveau, onafhankelijk van de bron. Om dit aan te tonen is onderstaand de strength (G) afgeleid. Vergelijking (1) geeft de algemene vergelijking van het sound pressure level.

$$L_p(r) = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha)}{\alpha} \right)$$

formule 6.1 Geluiddrukniveau

- L_w = geluidvermogensniveau
- Q = richtingsfactor van bron
- r = de afstand tussen de ontvanger en de bron
- α = absorptiecoëfficiënt

Wanneer men de sound power level van de bron vergelijkt met een omni-directionele bron in het vrije veld op tien meter (dode kamer), dan elimineert men de invloed van sound power van de eigenlijke bron.

Formule -6.2- geeft deze stap weer, het rechterdeel van de vergelijking geeft onmindirectionele bron in het vrije veld weer met een meetpunt op tien meter van die bron.

$$G_r = 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha)}{\alpha S} \right) - 10 \log \left(\frac{1}{4\pi 10^2} \right) [\text{dB}]$$

formule 6.2 Strength

$$G_r = 31 + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha)}{\alpha S} \right) [\text{dB}]$$

formule 6.3 Strength

Opvalt is dat in formule -6.3- de invloed van de bron, op (Q) de richting van de bron na volledig is geëlimineerd.

Men kan de Strength (G) ook berekenen uit de Schröder curve. Zie formule -6.4-.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(\tau) d\tau}$$

formule 6.4 Strength

De teller staat voor de bron gemeten op 1 meter; de noemer staat voor dezelfde bron gemeten in het vrije veld (dode kamer) op 10 meter.

6.5 Articulation Index (AI)

Bij de bepaling van de Articulation Index (AI) laat men een spreker een willekeurige rij lettergrepen, logatomen genaamd, na elkaar uitspreken. Logatomen zijn éénlettergrepige combinaties van een klinker met medeklinkers, die niet noodzakelijk een bestaand woord hoeven te vormen. Bij het samenstellen van de logatomenlijsten wordt rekening gehouden met de frequentie waarmee bepaalde klanken in onze taal voorkomen. De AI is dan het percentage lettergrepen dat correct werd verstaan door de luisteraar. Deze proef wordt uitgevoerd voor een aantal 'normale' sprekers en luisteraars. Na middeling volgt uit die resultaten de spraakverstaanbaarheid voor een bepaalde spreker- en luisteraarpositie. Op die manier kunnen we de spraakverstaanbaarheid voor de volledige ruimte in kaart brengen.

$$AI = \frac{G_{[i]}}{30dB} \sum_{i=1}^5 (L_{sa} - L_{na} + 12)$$

formule 6.5 Articulation Index

L_{sa} = Het geluidrukniveau van de spreker met een A-weging

L_{na} = geluidrukniveau van het achtergrondgeluid ook met een A-weging

AI loopt van 0 tot 1 daardoor zal $L_{sa}-L_{na}$ liggen tussen de -12dB en 18 dB Boven de 18dB is AI 1 en onder de -12 dB is AI 0

Frequentie [Hz]	Weegfactor (G[i])
250	0,072
500	0,144
1000	0,222
2000	0,327
4000	0,234

tabel 6.2

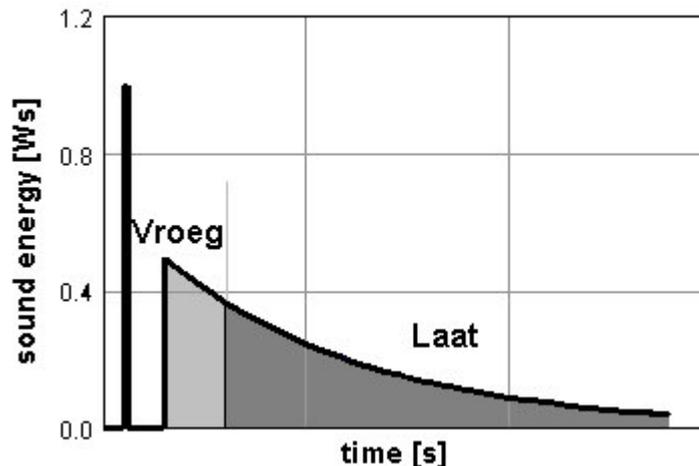
AI weegfactor

6.6 Early energy fraction C-50

De C-50 methode is een verbetering op de Signaal - Ruis verhouding. De C-50 methode zegt iets over vroeg en laat geluid, respectievelijk gewenst en ongewenst geluid. De early energy fraction C wordt berekend uit de impulsresponsie. Ze is gebaseerd op een verhouding tussen vroege en late energie. Als vroege energie beschouwen we de energie die gedurende de eerste 50 ms vanaf de aankomst van het directe signaal bij de luisteraar toekomt. Alles wat daarna komt, noemen we late energie. De vroege energie kunnen we nuttige energie noemen omdat ze bijdraagt tot een goede spraakverstaanbaarheid. Late energie kan hinderlijk zijn voor de spraakverstaanbaarheid. Gesteld kan worden; hoe hoger de waarde C hoe beter de spraakverstaanbaarheid van de ruimte is. In grafiek is de relatie / verhouding tussen vroeg, en laat geluid weergegeven.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_{0.05}^{\infty} p^2(t) dt} = dB.$$

formule 6.6 Clarity-50



figuur 6.4 (C-50, vroeg / laat - geluid)

De verticale lijn in de grafiek, vertegenwoordigt het vroege geluid. De aflopende lijn geeft het late / ongewenste geluid weer. De verticale lijn loopt van 0 tot 0,5 msec. De aflopende lijn loopt van 50 msec. tot oneindig. De intergraal berekent het oppervlak onder deze lijn.

6.7 Useful-to-detrimental sound ratio (U)

useful-to-detrimental sound ratio (U) is gebaseerd op geluidenergieverhoudingen. Deze grootheden zijn verwant met de vroeg-tot-laotverhoudingen (clarity) die gebruikt worden om de akoestische kwaliteit van zalen bestemd voor muziek te bepalen. In plaats van de verhouding te nemen tussen de geluidenergie die vroeg en later aankomt, maakt men voor spraak de verhouding tussen de geluidenergie die nuttig en nadelig is voor de spraakverstaanbaarheid (*useful-to-detrimental sound ratio* (U)). De nuttige energie is de energie die vroeg op de ontvanger invalt. De nadelige energie daarentegen omvat de energie van het achtergrondlawaai en de energie die pas later invalt op de ontvanger.

$$U_{50} = 10 \log \left(\frac{E_{early}}{E_{late} + E_{noise}} \right)$$

formule 6.7 U_{50}

Useful-to-detrimental sound ratio (U) wordt dan ook berekend vanuit de Clarity methode.

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{E_{early}}{E_{late}} \right)$$

formule 6.8 C_{50}

$$U_{50} = C_{50} - 10 \log \left(1 + \frac{E_{noise}}{E_{tot}} \left(1 + 10^{C_{50}/10} \right) \right)$$

formule 6.9 U_{50} berekend vanuit C_{50}

6.8 Articulation loss of consonants (ALcons).

Deze sluit nauw aan bij het concept van de energieverhoudingen. Hier wordt echter de geluidenergie gemeten van het directe geluid dat invalt op de ontvanger, samen met de energie van het weerkaatste geluid en van het achtergrondlawaai. Deze energieën worden dan samengevoegd tot parameters waaruit uiteindelijk een articulatieverlies tussen 0 en 100 % bekomen wordt.

In het algemeen wordt aangenomen dat een verlies van meer dan 15 % van de medeklinkers onacceptabel is. Waarden onder 15%-ALcons worden als goed tot zeer goed beschouwd.

Bij metingen wordt er gemeten op de middelste tertsbands van 2kHz ($2^{-1/6}$ tot $2^{1/6}$ maal 2kHz; 1780 Hz tot 2245 Hz). Het akoestische gedrag van de ruimte wordt op de andere frequenties niet onderzocht.

De ALcons kan ook berekend worden; berekening is gebaseerd op:

De afstand tot de bron

De richtinggevoeligheid van de bron

Het volume van de ruimte

De nagalmtijd RT_{60} .

De ruis.

De AL_{cons} wordt in twee formules gegeven; 1 waarbij de afstand tussen de spreker en de luisteraar binnen de kritische grens valt en de tweede waarde afstand groter is dan de kritische grens. De kritische grens is vergelijkbaar met de galmstraal.

$$D_{ci} = 0,2 \sqrt{\frac{QV}{RT_{60}}} [m]$$

formule 6.10 D_i Kritische afstand

$$AL_{cons} = \frac{200D^2RT_{60}^2}{QV} + a$$

formule 6.11 $AL_{cons}'71$ voor D_i

$$AL_{cons} = 9RT_{60} + a$$

formule 6.12 $AL_{cons}'71$ na D_i

In de loop van de jaren is dit concept door Peutz verder uitgewerkt. Niet alleen de bron en de nagalmtijd zijn bepalend voor de spraakverstaanbaarheid, ook de achtergrond ruis heeft een invloed op de spraakverstaanbaarheid. Dit heeft geleid tot een aanpassing in de formule.

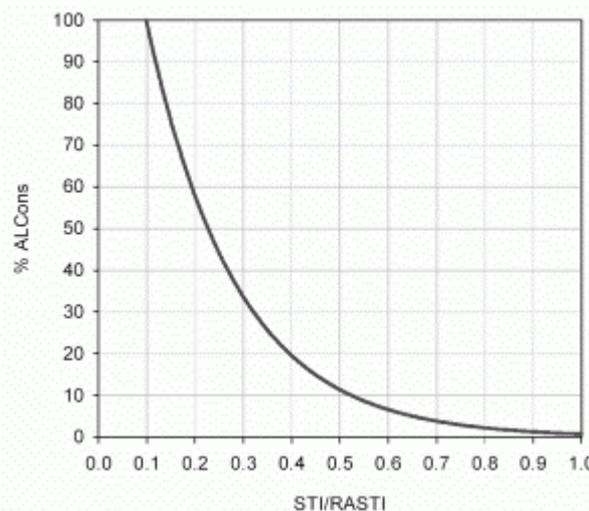
$$AL_{cons} = 100 * 10^{\left(\left[\frac{Lp_s - Lp_n + 10}{35} \right] \cdot \log \left(2 \frac{D^2 RT_{60}^2}{QV} \right) \right)}$$

formule 6.13 $AL_{cons}'88$

Voor een vergelijk met STI is AL_{cons} om te rekenen naar STI. Ondanks dat STI op een andere manier wordt berekend dan AL_{cons} komt deze formule goed over een.

$$STI = \frac{\ln \left(\frac{AL_{cons}}{170.5405} \right)}{-5.419}$$

formule 6.14 $AL_{cons} \rightarrow STI$



figuur 6.5 vergelijk AL_{cons} en STI

6.9 Spraak transmissie index STI

Spraak is weinig meer dan een opeenvolging van klanken. Fysisch wordt elke klank gekenmerkt door een specifiek frequentiespectrum. Bekeken in één frequentieband levert gesproken tekst dus een 'omhullende functie' op die bestaat uit een opeenvolging van pieken in de intensiteit, naargelang de klanken die uitgesproken worden. Allerhande invloeden, zoals lawaai en galm, zullen de 'modulatie' in deze omhullende kleiner maken en bijgevolg ook de spraakverstaanbaarheid verminderen.

Om deze opeenvolging van pieken in de intensiteit afhankelijk te beoordelen is er de *Speech Transmission Index* (STI). Deze grootte heeft als uitgangspunt een karakteristieke eigenschap van spraak als akoestisch signaal. Spraak wordt namelijk gekenmerkt door een voortdurende schommeling van de intensiteit in de verschillende frequentiebanden. Deze

intensiteitmodulatie wordt sterk afhankelijk van omgevingslawaai en de akoestische eigenschappen van de ruimte. Aan de hand van deze uitvlakking kan dan een STI-waarde tussen 0 en 1 berekend worden.

Voor het berekenen van de STI-waarde moeten een aantal stappen genomen worden.

Eerst wordt de modulation reduction factor berekend. Dit wordt voor alle 7 octaven met de 14 modulatiefrequenties berekend: Dit levert dus 98 getallen op. Deze berekening wordt gedaan met de volgende formule:

$$m(F_i, f_j) = \frac{1}{\sqrt{1 + (T(f) \cdot 2\pi F / 13,8)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-L_{SN}(f)/10}}$$

formule 6.15 Modulation reduction factor

- $m(F_i, f_j)$: modulation reduction factor.
- $T(f)$: de locale EDT, T_{10} .
- L_{SN} : $L_S - L_N$ (Sound-Noise ratio)
- F_i : 0.63, 0.8, 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.15, 4.0, 5.0, 6.30, 8.0, 10.0 en 12.5 Hz
- f_j : 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 en 8000 Hz

Met de berekende $m(F, f)$ waarden wordt de schijnbare signaal-ruisverhouding berekend.

$$SN_{app} = 10 \log \left(\frac{m}{1 - m} \right) dB$$

formule 6.16 Apparent Signal-Noise Ratio

Om uit eindelijk STI te kunnen berekenen

$$SN_{app} \leq -15 \text{ gelijk gesteld aan } SN_{app} = -15$$

$$SN_{app} \geq 15 \text{ gelijk gesteld aan } SN_{app} = 15$$

$$STI = \frac{1}{30} \left\{ 15 + \sum_{j=1}^7 k_j \cdot \left(\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SN_{app}(F_i, f_j) \right) \right\}$$

formule 6.17 Speech Transmission Index

k_j = wegingsfactoren (0.13, 0.14, 0.11, 0.12, 0.19, 0.17 en 0.14 voor respectievelijk f_j 125, ..., 8000Hz)

Spraak transmissie index (STI)	Spraakverstaanbaarheid
0 - 30	beroerd
30 - 45	slecht
45 - 60	redelijk
60 - 75	goed
75 - 100	uitstekend

tabel 6.3 Spraakverstaanbaarheid indeling sti

In de literatuur wordt vaak gesproken over de RASTI (Rapid Speech Transmission Index), dit is een vereenvoudigde methode op de STI. De term "vereenvoudigd" richt zich in dit kader op de rekentijd die nodig is. De STI rekt met zeven octaafbanden en veertien frequenties, de RASTI rekt met twee octaafbanden, namelijk die van 500 en 2000 Hz en daarin met vier respectievelijk vijf frequenties. De STI geeft bijgevolg een betere benadering dan de RASTI.

6.10 Speech Transmission Index in Noise (STI-N)

De Speech Transmission Index (STI) kan alleen worden gebruikt in die situaties waarin men te maken heeft met één bron. Indien er achtergrondruis / stoorbronnen aanwezig zijn kan de berekening niet meer worden toegepast. Om toch een uitspraak te kunnen

doen over de “spraakverstaanbaarheid” heeft men de "Speech Transmission Index in Noise " (STI-N) opgesteld. Hetzelfde geldt ook voor de Spraaktransparantie (C_{50}) die ook geldt voor één bron, indien er stoorbronnen aanwezig zijn wordt er gerekend met de "Useful to Detrimental Sound Ratio" (U_{50}).

De Speech Transmission Index (STI) is afgeleid van de Modulation Transfer Function (MTF) die uitgebreid is behandeld onder de paragraaf (3.6.2), welke (bij een één bron situatie) afhankelijk is van de nagalmtijd.

De STI wordt gemeten voor de gestandaardiseerde octaafbanden, en een aantal modulatie frequenties; die een relatie hebben met de menselijke spraak. Vanuit de (MTF) wordt een tweede waarde berekend; namelijk de Signal to Noise Ratio (S/R).

De berekening geschiedt als volgt: STI=70% en S/N = 0 dB. Eerst wordt de “interne” signaal / ruisverhouding Q bepaald.

$$STI = \frac{Q+15}{30} = 0,70 = \frac{Q+15}{30} \Rightarrow Q = 6$$

formule 6.18 omrekenen STI → STI-NOISE stap 1

In de volgende stap wordt de modulation transfer function bepaald:

$$Q = 10 \log\left(\frac{m}{1-m}\right) = 6 = 10 \log\left(\frac{m}{1-m}\right) \Rightarrow m = 0,8$$

formule 6.19 omrekenen STI → STI-NOISE stap 2

Bovenstaande definitie laat zien dat de STI wordt bepaald door het in rekening brengen van het (bron) spraakvolume en de nagalmtijd. Verder wordt het geluidsveld diffuus verondersteld; bijgevolg zal het gereflecteerde geluid (afname curve) beschreven worden als een exponentiële tijdfunctie. Tot zover is de berekening van de STI gelijk aan die van de STI in noise. Nu kan met behulp van de externe signaal / ruisverhouding de modulation transfer function in noise wordt bepaald.

$$M_{noise} = \frac{m}{1 + 10^{\frac{-S/N}{10}}} = \frac{0,8}{1 + 10^{-0}} = 0,4$$

formule 6.20 omrekenen STI → STI-NOISE stap 3

$$Q = 10 \log\left(\frac{M_{noise}}{1 - M_{noise}}\right) = 10 \log\left(\frac{0,4}{1 - 0,4}\right) = -1,76$$

formule 6.21 omrekenen STI → STI-NOISE stap 4

Nu kan de STI in Noise worden berekend.

$$STI_{NOISE} = \frac{Q+15}{30} = \frac{-1,76+15}{30} = 44\%$$

formule 6.22 omrekenen STI → STI-NOISE stap 5

De afstand tot de bron en de “target” ontvanger + de nagalmtijd deed de STI verslechteren tot 70%. De signaal / ruisverhouding van 0 dB deed de STI verslechteren van 70 naar 44%. Hieruit blijkt dat men altijd met de STI in noise moet rekenen; omdat de STI op zichzelf geen goede spraakverstaanbaarheid indicator is.

7 Normen en richtlijnen

7.1 Nederlandse norm.

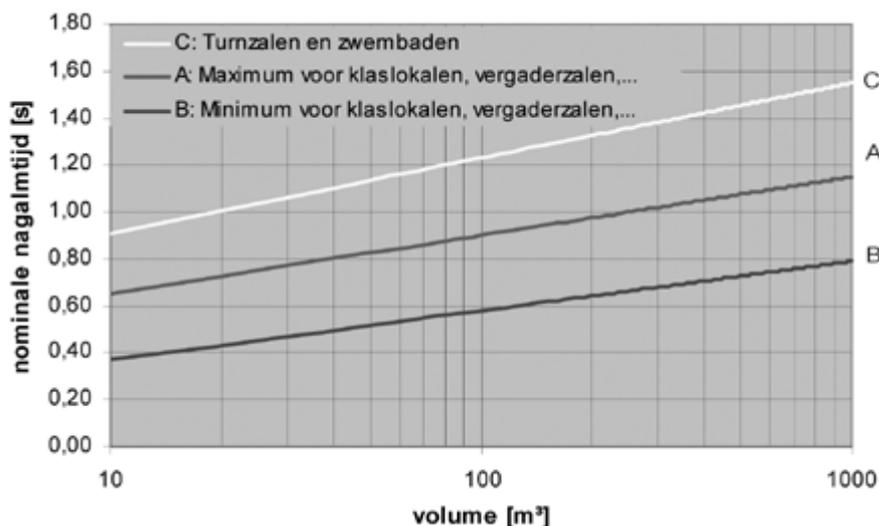
De eis voor schoollokalen is in Nederland vastgelegd in het bouwbesluit. Als akoestische variabele wordt daarin alleen de nagalmtijd genoemd die een maximale waarde van 1 s niet mag overschrijden. De Rijksgebouwendienst besteedt maar weinig aandacht aan ruimteakoestiek in het onderwijs in de Rgd-richtlijnen. Deze richtlijnen ondersteunen de wettelijke eisen uit het bouwbesluit en vullen ze verder aan.

Paragraaf 7.4 van de Rgd-richtlijnen gaat over ruimteakoestiek en begint met de openingsstelling: “de akoestische eigenschappen van een ruimte moeten zodanig zijn dat de spraakverstaanbaarheid goed is.”²⁷

7.2 Internationale normen.

De nagalmtijd, die samen met de signaal-ruis verhouding, de belangrijkste parameter voor spraakverstaanbaarheid uitmaakt, is onder meer genormeerd in landen als België, Frankrijk, Italië en Portugal.²⁸

In België wordt de maximale nagalmtijd gekoppeld aan het volume van de ruimte. Ze maken onderscheid in het gebruik van het lokaal. Klaslokalen vallen onder de noemer ‘gemeenschappelijke lokalen’ en dienen te voldoen aan volgende voorwaarde: de nagalmtijd moet voor iedere frequentie vallen tussen de lijnen A en B [Figuur –7.1-].



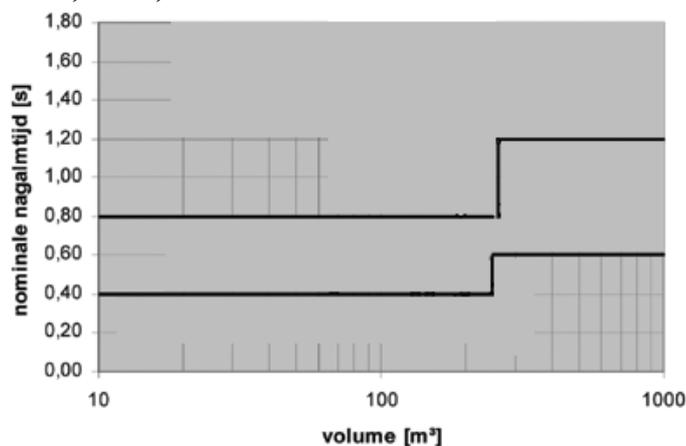
figuur 7.1 nagalmtijd norm België

De boven- en ondergrens van de toegelaten nagalmtijd nemen logaritmisches toe met het volume van de ruimte. Grotere lokalen veroorzaken immers langere nagalmtijden, zoals berekend kan worden met de formule van Sabine: Het opgeven van een maximaal en minimaal toelaatbare waarde voor de nagalmtijd toont alvast aan dat noch een bovenmaatse (te veel galm), noch een ondermaatse (te droge akoestiek) nagalmtijd bevorderlijk is voor de spraakverstaanbaarheid. De optimale nagalmtijd ligt tussen deze grenzen. Voor een lokaal van $7 \times 10 \times 3 \text{ m}$ ($= 210 \text{ m}^3$) is dit concreet tussen 0,65 en 0,95s.

²⁷ RGD-RICHTLIJNEN

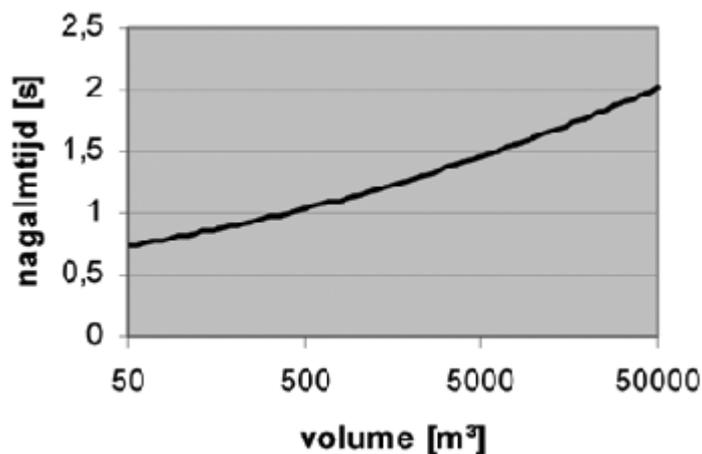
²⁸ VAN DEN BERGH WUYTS, KULEUVEN, 2002

De Franse norm legt ook een verband met het volume van de ruimte. Voor klaslokalen kleiner dan 250 m^3 moet de nagalmtijd liggen tussen de 0,4 en 0,8 s. Voor lokalen groter dan 250 m^3 wordt dit 0,6 en 1,2 s.

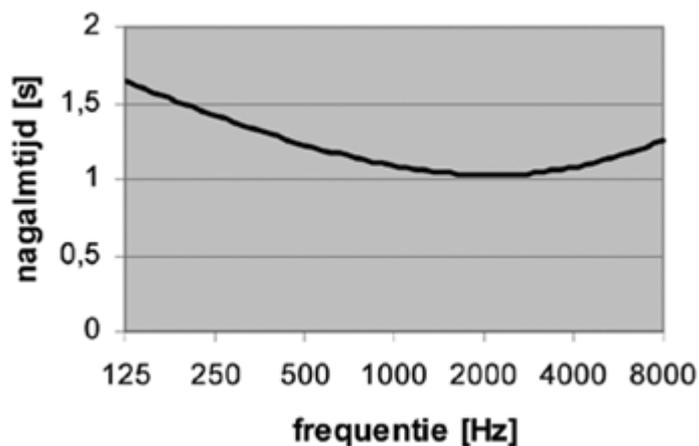


figuur 7.2 nagalmtijd norm Frankrijk

In Italië is de maximaal toelaatbare nagalmtijd een functie van zowel de frequentie als het volume van de ruimte. Zie [figuur -7.3-]. De maximaal toegelaten nagalmtijd bereikt een minimum van 1 seconde voor de frequentie van 2kHz. [Figuur -7.4-]. Voor hogere en lagere frequenties zijn hogere nagalmtijden toegestaan.

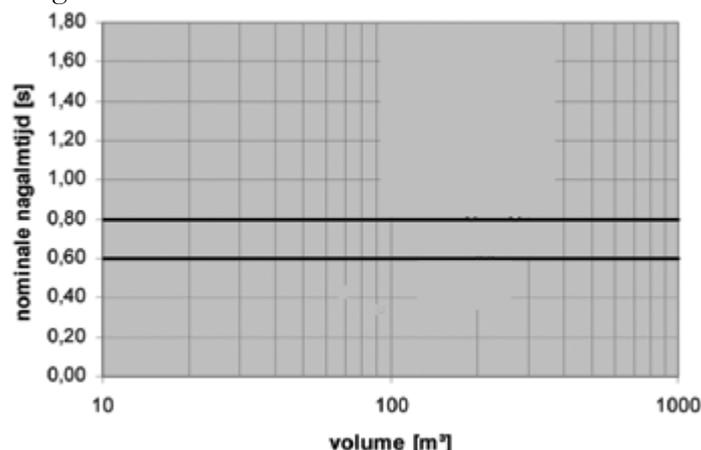


figuur 7.3 nagalmtijd norm Italië



figuur 7.4 nagalmtijd norm Italië

In Portugal wordt de maximale nagalmtijd gekoppeld aan de frequentie: voor het frequentie-interval van 500 - 4kHz mag de nagalmtijd in klaslokalen maximaal 0,8 s en minimaal 0,6 s bedragen.



figuur 7.5 nagalmtijd norm Portugal

7.3 Richtlijnen

7.3.1 Nagalmtijd

In de vakbladen worden richtwaarden voor de aangewezen nagalmtijd in klaslokalen teruggevonden. In tegenstelling tot de vermelde waarden voor de nagalmtijd, hebben deze richtwaarden betrekking op klaslokalen met bezetting. Zo bevelen Bistafa en Bradley nagalmtijden van 0,4 – 0,5 s aan voor een spraakverstaanbaarheid van 100% in bezette klaslokalen.²⁹ Deze bevindingen komen overeen met de aanbevelingen van de *Acoustical Society of America*, met name 0,4 – 0,6 s of minder voor bezette klaslokalen. De waarden voor de nagalmtijd gelden zowel voor de 1000 Hz octaafband als voor de gemiddelde nagalmtijd over de octaafbanden van 500 tot en met 4000 Hz. Houtgast, Steeneken en Plomp geven dan weer een optimale nagalmtijd van 0,8 s aan.³⁰ Aanbevelingen van Knudsen en Harris situeren zich rond de waarde van 0,7 s voor een ruimte van 300 m³.³¹ In *Building Bulletin 93* worden de verschillende ruimten van een schoolgebouw apart beoordeeld. Ook hier in wordt een onderscheid gemaakt tussen primary school en secondary school. Dit is ook in de geadviseerde nagalmtijd terug te vinden respectievelijk 0.6 en 0.8 s. Hierbij wordt gerekend met de gemiddelde nagalmtijd van de frequenties 500, 1000 en 2000 Hz.³²

7.3.2 Geluidrukniveau.

Voor jonge volwassenen is een geluidrukniveau van 55 dB wenselijk bij een achtergrondgeluidniveau van ongeveer 35 dB. Bij kinderen onder de 13 jaar hebben een minder ontwikkelde luistervaardigheid, hierdoor is een geluidrukniveau van 70 dB noodzakelijk voor een maximale verstaanbaarheid nodig. Testen die zijn uitgevoerd onder deze omstandigheden tonen aan dat de optimale nagalmtijd voor kinderen op tienjarige leeftijd onder de 0,4 s gelegen is. Een nagalmtijd van 0,4 s levert voor hen een woordherkenningscore van 94% op, waar dit voor jong volwassen bijna 100 % bedraagt.

²⁹ BISTASFA BRADLY, JASA, 107, 2000

³⁰ HOUTGAST STEENEKEN PLOMP ACUSTICA 1980

³¹ BRADLEY, JASA, 1986

³² BB93

Enmaal boven de 0,8 s duikt de score onder de 90% waar de spraakverstaanbaarheid voor jong volwassen nog steeds rond de 95% schommelt.³³

³³ NABELEK ROBINSON, *JASA*, 71 1982

8 Invloedfactoren op de spraakverstaanbaarheid in klaslokalen

Volgens de definitie van de *Speech Transmission Index* (STI) is de waarde van deze grootheid afhankelijk van alle mogelijke invloeden die de intensiteit van het signaal verzwakken. In het geval van klaslokalen gaat het dan voornamelijk over de invloed van het achtergrondlawaai en de galm.

8.1 Signal to noise ratio

De invloed van het achtergrondlawaai kan bepaald worden aan de hand van de *signal to noise ratio* (SNR), het verschil tussen het geluiddrukkniveau L_p van het uitgezonden signaal en dat van het achtergrondlawaai BGN_o (Background-noise level), beide gemeten ter plaatse van de ontvanger en uitgedrukt in dB.

8.1.1 Geluidssterkte van het "signaal" (spreker)

De signaal sterkte is afhankelijk van de afstand tussen de ontvanger en de bron. Bij een verdubbeling van de afstand zal de geluidssterkte met 6dB afnemen.

$$L_p = L_w + 10 \times \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4(1 - \alpha_{gem})}{A_{totaal}} \right)$$

formule 8.1 Geluidniveau

Hierin is L_p het geluiddrukkniveau ter plaatse van de ontvanger. L_w is het geluiddrukkniveau van de bron.

Naar aanleiding van 18 metingen in 11 college zalen hebben Hodgson Rempel Kennedy³⁴ op empirische wijze een formule op gesteld om L_w ; VN (Ventilation Noise) en SAN(Student Activity Noise) te voorspellen.

Voor de bronsterkte geldt een nauwkeurigheid van 57%

Voor het ventilatiegeluidniveau geldt een nauwkeurigheid van 41% dit komt op dat de verschillende toegepaste systemen grote verschillen geven.

Voor de Student Activity Noise geldt een nauwkeurigheid van 69%

Zij zijn ervan uitgegaan dat het spreekniveau van de docent afhankelijk is van;

$$I_{sex}, I_{man}=0; I_{vrouw}=1$$

SAN; de student activity noise (zie § Achtergrond geluidniveau)

V; het volume van de collegezaal en

A_o het absorberend oppervlak

$$LW_o = 54,8 - 2,6I_{sex} + 0,5SAN_o + 0,016V - 9,6 \log(A_o)$$

formule 8.2 Bronsterkte spreker

Hierin is A_o het totale absorptieoppervlak van het bezette klaslokaal; deze wordt berekend vanuit het totale absorptieoppervlak van het onbezette klaslokaal (A_u) en wordt vermeerderd met de absorptie die de leerlingen vertegenwoordigen.³⁵

$$A_o = A_u + 0,7 \cdot (C \cdot A_{1p})$$

formule 8.3 Absorptie bezette klaslokaal

C is het aantal leerlingen en A_{1p} is de absorptie oppervlak per persoon bij 1kHz, deze waarde varieert in de literatuur tussen 0,42 en 0,81 m²

Deze formule voorspelt dat het spreekniveau varieert met ruimteakoestische eigenschappen van het klaslokaal. Specifieker; het niveau neemt toe bij een toename van

³⁴ HODGSON REMPEL KENNEDY, JASA, 105, 1999

³⁵ HODGSON, AA, 2004

de activiteit van de scholieren, het volume van de ruimte en op een complex manier met bezette-ruimte absorptie.

8.1.2 Achtergrond geluidniveau

BGN_o is het niveau van de achtergrondgeluid in bezette klaslokalen. Dit is een combinatie van geluid van het ventilatiesysteem (VN_o) en geluid van de activiteit van de scholieren (SAN_o).

De waarde voor VN_o voor een bezet klaslokaal wordt berekend door middel van het diffuus-veld theorie, met de gelijkwaardige waarde voor onbezette klaslokalen VN_u .

$$VN_o = VN_u + 10 \log \frac{\left(\frac{4}{A_u}\right)}{\left(\frac{4}{A_o}\right)}$$

formule 8.4 Ventilatiegeluidniveau bezet klaslokaal

De variatie in ventilatie geluid is sterk afhankelijk van het toegepaste installatiesysteem. Maar ook dit is te middelen. En om te zetten in formule vorm.

Deze formule is op gezet vanuit een empirische relatie tot het aantal studenten (n) de breedte van het lokaal (b) en het totale absorptie van het vertrek (A_o).

$$VN_o = 57.6 + 10.3 \log n + 0.68b - 21.3 \log A_o$$

formule 8.5 geluid van het ventilatiesysteem

SAN_o ; Student Activity Noise, wordt voorspeld door middel van de volgende empirische relatie.

$$SAN_o = 83.0 + 10 \log(0.7 \cdot C) - 34.4 \log(A_o) + 0.081A_o$$

formule 8.6 geluid van de activiteit van scholieren

Bistafa en Bradley betogen dat het achtergrondgeluid niveau in bezette klaslokalen niet over de 35 dB mag gaan voor een uitstekende spraakverstaanbaarheid. Bistafa en Bradley beoordelen een SNR van 25 dB als uitstekend. Dus terugrekenend vanuit een normaal spreekniveau van 60dB kom je op een achtergrondgeluid van 35 dB.³⁶

In een onderzoek aan de UBC (The University of British Columbia)³⁷ van 14 gerenoveerde klaslokalen zijn waarden voor VN_o gevonden tussen 28 en 50 dB(A). Voor SAN_o zijn waarden gevonden van 37-46 dB(A) met een gemiddelde van 42 dB(A). Uit dit onderzoek is dan ook duidelijk dat een SNR van 25 dB niet haalbaar zijn in een klaslokaal met leerlingen.

8.2 Materialen

In een Belgisch onderzoek³⁸ naar spraakverstaanbaarheid in klaslokalen zijn in het totaal een dertigtal verschillende materialen aangetroffen en dit in alle mogelijke combinaties. Daarin is opgemerkt dat er geen duidelijke verbanden tussen materiaalgebruik en spraakverstaanbaarheid gelegd kan worden. Meer algemene trends zijn wel af te leiden. Een akoestisch plafond staat garant voor een STI boven 0,70 en met de huidige generatie akoestische plafonds op basis van minerale wol zijn zelfs STI-waarden boven 0,80 haalbaar. Toch zijn er ook andere materialen mogelijk om een gelijkaardige spraakverstaanbaarheid te verkrijgen. Zo behoren de klaslokalen met vier wanden in poreuze betonblokken of met een volledig verlaagd plafond met houtenschootjes ook tot

³⁶ BISTAFA BRADLEY, JASA, 107, 2000

³⁷ SHIELD DOCKRELL, JASA, 115, 2004

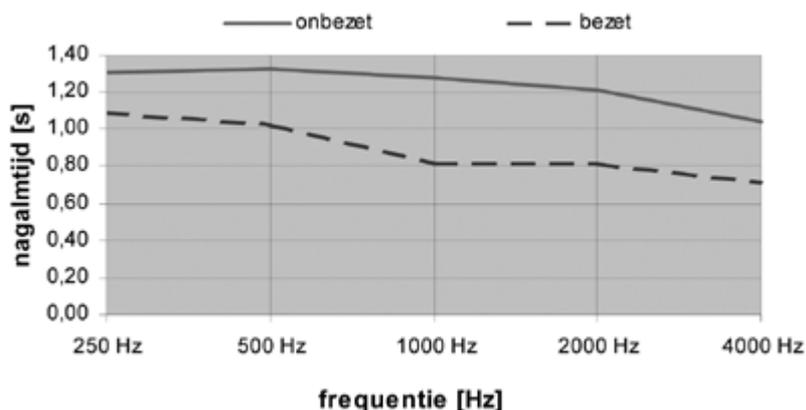
³⁸ VAN DEN BERGH WUYTS, KULEUVEN, 2002

deze categorie. Het is dan ook niet verwonderlijk dat klaslokalen met een combinatie van een verlaagd akoestisch plafond en wanden in betonblokken een STI boven 0,75 behalen. Maar ook hierop zijn er enkele uitzonderingen op de succesformule van het verlaagd akoestisch plafond. Meer algemeen kunnen we stellen dat klassen waarvan minstens 25% van de totale oppervlakte, bij benadering de oppervlakte van een plafond, bestaat uit sterk absorberende materialen ($\alpha \geq 0,5$) een hoge STI ($STI \geq 0,7$) hebben. Toch zijn er ook enkele plafondafwerkingen die slechter scoren dan algemeen verwacht wordt. Ook de akoestische prestaties van spuitpleister laat te wensen over. Hoewel dit materiaal toch voornamelijk om akoestische redenen aangebracht wordt, verschilt de STI-waarde nauwelijks van klassen waar het plafond met een gewone pleister is afgewerkt. De onverwacht lage STI kan voor dit materiaal verklaard worden door het typische verloop van de nagalmtijd in ruimten met spuitpleister. Dit materiaal dempt behoorlijk goed bij hoge frequenties, maar bij de frequenties tot 1000 Hz, die voor spraak belangrijker zijn, is de absorptiecoëfficiënt beduidend lager. Dit komt omdat de laag te dun is. Een tweede nadeel van een spuitpleister is dat bij het overschilderen de absorberende werking nog verder terug zal lopen omdat de opening dichtgesmeerd worden. Niet aan te raden is een harde afwerking van alle wanden van een klaslokaal. Voor klassen in middelbare scholen levert dit meestal een STI onder de grens van het aanvaardbare. Klassen op basisscholen halen door hun rijkere aankleding deze grens meestal wel, maar ook daar zal STI niet boven 0,70 uitstijgen.

8.3 Bezetting

Leerlingen vormen een belangrijke bron van bijkomende absorptie. Tijdens het lesgeven zal door de bezetting van het lokaal de nagalmtijd dalen en daardoor de spraakverstaanbaarheid toenemen. Naast gegeven waarden voor de gemiddelde absorptie die verkregen wordt door de aanwezigheid van mensen in een vertrek heb ik ook een uitgewerkt onderzoek meegenomen. Deze zal ik verkort meenemen.

Door middel van twee metingen uitgevoerd op twee posities in een klaslokaal: eenmaal in de onbezette klas, en tien minuten later in dezelfde klas met leerlingen. Het gekozen lokaal heeft een hoge nagalmtijd zodat de gevolgen van de bezetting duidelijk zichtbaar zijn. Figuur -8.1- toont de resultaten van deze metingen. In Tabel -8.1- zijn deze waarden voor elke octaafband met de formule van Sabine omgezet in absorptiewaarden. Uit het verschil tussen de waarden bij de bezette en de onbezette klas is dan de absorptie vanwege de bezetting bepaald. De deling van dit verschil door het aantal leerlingen (21) of door de vloeroppervlakte (57,1 m²) levert respectievelijk de absorptiecoëfficiënt voor de bezetting per leerling en per m² vloeroppervlakte [Tabel -8.1-].



figuur 8.1 Verloop nagalmtijd bezet en onbezet klaslokaal

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
nagalmtijd onbezet	1,31	1,32	1,27	1,27	1,04
bezet	1,09	1,02	0,81	0,81	0,71
absorptie A [m ²] onbezet	28,07	27,86	28,96	28,96	35,36
bezet	33,74	36,05	45,4	45,4	51,8
absorptie A _{bezetting} [m ²]	5,67	8,19	16,44	16,44	16,44
A _{bezetting} per leerling [m ²]	0,27	0,39	0,78	0,78	0,78
A _{bezetting} per m ² vloeropp.	0,1	0,14	0,29	0,29	0,29

tabel 8.1 Meetresultaten en berekende absorptiecoëfficiënt

Andere waarden uit de literatuur [Tabel -8.2-] geven een gelijksoortig beeld. Hoogfrequent sluiten de absorptiecoëfficiënten aan bij de waarden die Hodgson³⁹ heeft afgeleid uit metingen in klaslokalen van universiteitsgebouwen. Laagfrequent vinden we gelijkaardige waarden terug bij Irvine & Richards⁴⁰, die zijn afgeleid voor kinderen die ruim uit elkaar zitten, en bij Harris & Knudsen⁴¹, afgeleid voor leerlingen aan een bank.

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Hodgson	0,47	0,68	0,81	0,83	0,84
Irvine & Richards	0,25	0,36	0,42	0,49	0,42
Harris & Knudsen	/	0,39	/	0,43	/
onderzoek	0,27	0,39	0,78	0,78	0,78

tabel 8.2 Absorptiecoëfficiënt per leerling

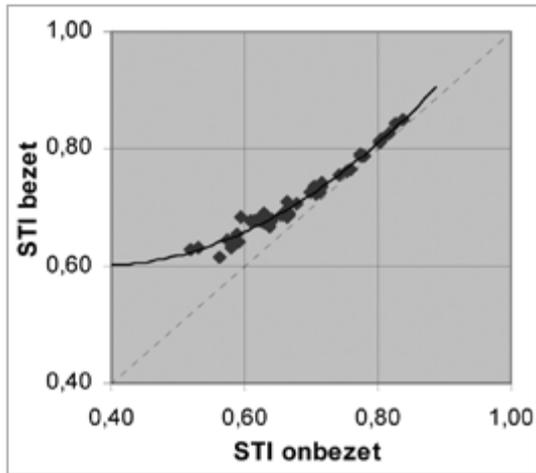
Ten gevolge van de afname van de nagalmtijd bij bezetting stijgt STI van 0,60 naar 0,66. Ter illustratie wordt in figuren⁴² -8.2- en -8.3- de afname van de nagalmtijd en de verbetering van de spraakverstaanbaarheid ten gevolge van de bezetting nagegaan. Hierbij wordt uit de gemeten nagalmtijd de absorptie bij 1000 Hz berekend via de formule van Sabine. Bij deze berekende absorptiewaarde wordt de absorptie vanwege 20 leerlingen geteld, zijnde 15,6 m². Hieruit kan dan de nagalmtijd met bezetting bepaald worden. Het verschil tussen beide nagalmtijden kan eveneens omgezet worden in de toename van STI. Zoals te verwachten, verandert er bij de betere klassen nauwelijks iets. De nagalmtijd daalt met ongeveer 0,1 s, maar de verandering in spraakverstaanbaarheid is niet merkbaar. Bij de slechtere klassen doet bezetting daarentegen wonderen. De nagalmtijd wordt hierbij zowaar gehalveerd en STI klimt tot boven de kritische grens. Vooral bij de kleinere klassen is de verbetering zeer opmerkelijk, bij grotere klassen vormt het grote volume een hinderpaal voor dezelfde spectaculaire verbeteringen. Gelukkig ligt in deze grotere lokalen de bezetting meestal wel boven de 20 leerlingen, zodat de spraakverstaanbaarheid ook in deze klassen behoorlijk zal toenemen onder invloed van deze bezetting.

³⁹ HODGSON MURRAY, *JASA*, 106, 1999

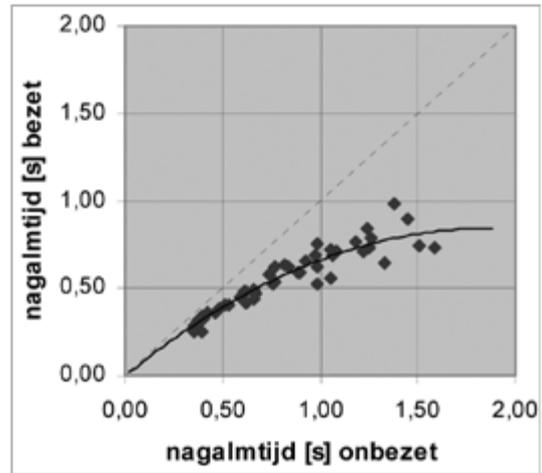
⁴⁰ IRVINE RICHARD, *HANDBOOK*, 1998

⁴¹ KNUDSEN HARRIS *ACOUSTICAL DESIGN*, 1978

⁴² VEN DEN BERGH WUYTS, *KULEUVEN*, 2002



figuur 8.2 Verbetering van STI ten gevolge van bezetting



figuur 8.3 Afname van de nagalmtijd ten gevolge van bezetting

9 Absorptie en nagalm in klaslokalen

9.1 De plaats van de absorberende materialen.

De plaats van akoestische absorptie binnen een ruimte is belangrijk. De traditionele berekening van nagalmtijd veronderstelt dat de absorberende vlakken gelijkmatig in een ruimte worden verdeeld. Als dit niet zo is, is de formule van de nagalmtijd niet nauwkeurig genoeg. Lokaal kunnen er ongewenste variaties in het akoestische comfort optreden, in het bijzonder in grote ruimten of zalen. De grote vlakken van akoestisch reflecterend materiaal kunnen ook leiden tot echo's, geluidsconcentraties en staande golven.

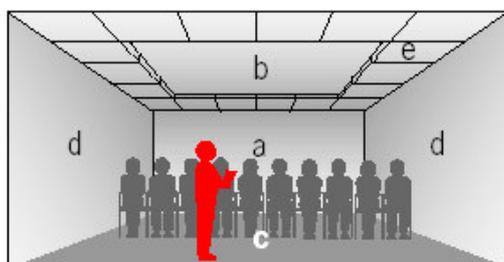
9.1.1 Absorptie in klaslokalen

Voor klaslokalen en andere ruimten voor toespraken, zijn er twee benaderingen van de plaatsbepaling van de akoestische absorptie⁴³:

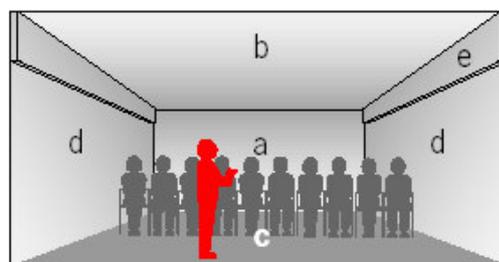
1. Het plafond wordt hoofdzakelijk absorberend gemaakt. In de meeste gevallen zal een standaard absorberend verlaagd plafond de noodzakelijke absorptie verstrekken.

In het geval van ruimten met een open plafond voor direct contact met het beton (thermische massa verstrekken om het oververhitten in zomer te beperken) kunnen voor het akoestische comfort absorberende baffles worden gebruikt. In het ideale geval is het centrale deel van het plafond open en dus reflecterend en zijn de randen, absorberend. zie Figuur -9.1-

2. Het plafond is akoestisch weerspiegelend (pleister, gipsplaat, beton, enz.) en de akoestische absorptie wordt toegevoegd aan de muren. In deze gevallen is het raadzaam om van de meeste de absorptie op hoog niveau de plaats te bepalen en wat op de achtermuur; de muur waar de spreker naar toe kijkt. Dit is belangrijk als de achtermuur gebogen is of de afstand van de spreker aan de achtermuur groter is dan 8,5 m. zie Figuur -9.1-.



(a) Surface finishes in classroom or lecture theatre:
 a. Rear wall - sound absorbing or diffusing
 b. Ceiling - sound reflective (eg plasterboard)
 c. Floor - sound absorbing (eg carpet)
 d. Walls - sound reflective
 e. Ceiling - sound absorbing



(b) Surface finishes in classroom or lecture theatre:
 a. Rear wall - sound absorbing or diffusing
 b. Ceiling - sound reflective (eg plasterboard)
 c. Floor - sound absorbing (eg carpet)
 d. Walls - sound reflective
 e. Top of walls - sound absorbing or diffusing

figuur 9.1 positie van absorptie

In grote ruimten, kunnen de reflectie van de achtermuur storend zijn voor een spreker als zij later dan 50 milliseconden aankomen nadat er gesproken is. Dit kan gebeuren als de afstand tussen de spreker en achtermuurafstand groter is dan 8,5 m. Om dit probleem te vermijden, zou de achtermuur akoestisch absorberend, of akoestisch diffuus moeten worden gemaakt.

⁴³ BB93

9.1.2 Nagalm in klaslokalen

Om nagalm binnen 50 milliseconden na het directe geluid te versterken, moeten de harde oppervlakten binnen een bepaalde afstand van de spreker en de luisteraar worden gevestigd. In de meeste ruimten, is het centrumdeel van het plafond het belangrijkste oppervlak en zou hard en geluidreflecterend moeten zijn. Andere nuttige oppervlakten die vroege nagalm verstrekken zijn zijmuren dichtbij de spreker, en schuine plafondpanelen. De extra weg die door het gereflecteerd geluid wordt afgelegd zou niet groter moeten zijn dan 17 m meer dan de weg die directe geluidsweg tussen spreker en de luisteraars waar de nagalm aankomt.

$$50\text{ms} \cdot 343 \frac{\text{geluidsnelheid in lucht}}{\text{m/s}} = 17\text{m}$$

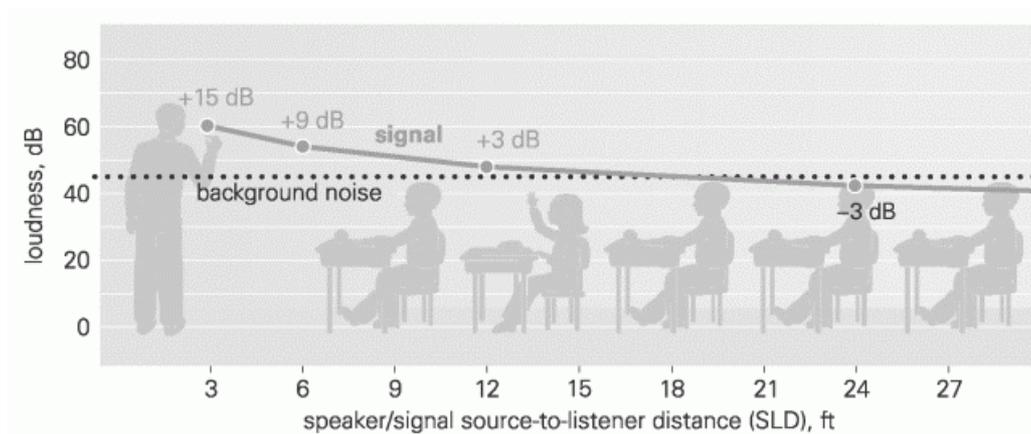
Zo zal de nagalm die na meer dan 50 milliseconden na het directe geluid bij een luisteraar of terug bij de spreker aankomt storend zijn. Deze zijn in schoolzalen meestal de nagalm via de achtermuur. De achtermuren kunnen het geluid absorberen of het geluid verspreiden om dit te vermijden.

9.2 Ruimte geometrie

Om adequate luidheid voor alle luisteraars in een ruimte te bereiken, is het noodzakelijk dat het directe geluid van spreker naar luisteraar een rechtstreeks en ongehinderde weg heeft. De luidheid van het directe geluid kan door sterke, korte reflecties van ruimteoppervlakten worden verbeterd. Deze korte reflecties zouden bij de luisteraar binnen één twintigste van een seconde (50 milliseconden) van het directe geluid moeten aankomen, dat is ongeveer de tijd die voor het oor wordt vereist om dergelijke reflecties met het directe geluid te integreren. De sterke reflecties na 50 milliseconden verminderen de spraakverstaanbaarheid, en uiteindelijk, als de vertraging lang genoeg is, zullen zij als verschillende echo's worden waargenomen.

9.2.1 Indeling van vergaderzalen, auditoria en collegezalen.

De meeste schoolzalen worden hoofdzakelijk gebruikt voor spraakfuncties zoals vergaderingen, meetings en drama. Het algemene probleem in schoolzalen is bovenmatige nagalm die de oorzaak zijn van hoge geluidsniveaus en slechte spraakverstaanbaarheid. Het directe geluid van spreker aan luisteraar moet zo sterk mogelijk zijn bij alle posities. Omdat dit geluid snel afneemt; bij verdubbeling van de afstand neemt het niveau af met 6 dB. Deze afname is berekend zonder de akoestische eigenschappen van de ruimte. Zo zou de gemiddelde afstand tussen spreker en luisteraar zo klein mogelijk moeten worden gehouden. Hoe verder van de bron verwijderd hoe groter het effect is van de nagalm in de eerste 50 ms. Verder moeten er geen obstakels in de directe geluidsweg zijn.



figuur 9.2 signaal-ruis verhouding⁴⁴

Voor grote ruimten zoals schoolzalen, moeten de extra factoren met betrekking tot het directe geluid worden overwogen.

Ten eerste moet bij het inrichtingsplan er op gelet worden dat de luisteraars binnen een hoek van 140° zitten.⁴⁵ Dit omdat de geluidsterkte buiten deze hoek snel afneemt.

Ten tweede wordt het geluid verzwakt door de aanwezige personen. Daarom zouden de luisteraars als het mogelijk is op een helling worden geplaatst. Het is algemeen bekend dat als de luisteraars de spreker niet kunnen goed kunnen zien, de luisteraars de spreker ook slecht verstaan.

Het is vaak noodzakelijk dat zalen in scholen een vlakke vloer hebben. In deze gevallen, zouden de sprekers op een platform moeten plaatsnemen dat voldoende hoog is om ervoor te zorgen dat er een vrije zichtlijn met de achterrijen van de zaal wordt verkregen.

Het directe geluid van spreker aan luisteraar kan door sterke vroege nagalm worden verbeterd die binnen 50 milliseconden aankomen. Deze vroege nagalm verhogen de luidheid van het directe geluid op en daarom de begrijpelijkheid van de toespraak. Zij zijn bijzonder nuttig bij de verre zitplaatsen waar de luidheid van het directe geluid door afstand is verminderd.

⁴⁴ BB93

⁴⁵ BB93

AANPAK

10 Aanpak

Het vervolg van mijn afstuderen zal de volgende punten bevatten die als middelen fungeren om mijn einddoel te behalen, zie §1.3.

- rekenhulpmiddel voor de berekening van α gemiddeld
- metingen in 2 bestaande lokalen
- model in CATT-acoustic maken van 2 bestaande lokalen
- onderzoek met CATT-acoustic naar het effect op de spraakverstaanbaarheid ten gevolge van de locatie van het absorptie materiaal
- model in Trisco maken om het effect op de warmtestraling door toevoeging van absorberende materialen

10.1 Rekenhulpmiddel voor de berekening van α -gemiddeld

Het optimum van de spraakverstaanbaarheid ligt bij een gemiddelde absorptiecoëfficiënt van 25 à 35%. Dus voor een snelle en simpele controle op de spraakverstaanbaarheid is α -gemiddeld een goede richtlijn. Maar doordat α gemiddeld berekend wordt aan de hand van de sommatie van de verschillende vlakken is het handig om hier een Excel sheet voor te maken om zo snel en accuraat α -gemiddeld te kunnen bepalen. In deze rekensheet zal ook een koppeling gemaakt worden met de ruisniveau en het spraakniveau in het klaslokaal

10.2 Casestudy

10.2.1 Metingen in 2 bestaande lokalen

Voor het model wat ik in CATT-acoustic ga invoeren wil ik twee referenties hebben, om daaraan mijn computer model te kunnen controleren. Hiervoor wil ik de nagalmtijd en ver luidheid op verschillende plekken in het lokaal gebruiken.

10.2.2 Model van deze lokalen in CATT

Aan de hand van de gedane metingen wil ik een model in CATT-acoustic maken welke ik dan kan gebruiken om de verschillende varianten mee door te rekenen.

10.3 Effect van de locatie absorptie op de spraakverstaanbaarheid

Doordat bij betonkernactivering het beton zo veel mogelijk vrij gelaten moet worden is het niet goed mogelijk om het absorberende materiaal gelijkmatig in de ruimte te verdelen. En tevens is ook uit de literatuur gebleken dat de achterwand als absorberend vlak eerder in aanmerking komt dan de bordzijde. Hierom wil ik een aantal opties met CATT-acoustic doorrekenen wat het effect is op de spraakverstaanbaarheid bij verschillende locaties van het absorberend materiaal

10.4 Straling afname door geluidabsorberend materiaal

10.4.1 Zichtfactoren

Door de afname van de zichtfactor is wel te voorspellen wat de afname is van de stralingsbijdrage vanaf het plafond. De zichtfactor wordt van twee situaties bekeken en vergeleken met een volledige kaal plafond.

Situatie 1 Baffles

Situatie 2 gevouwen en geperforeerde staalplaat

10.4.2 Oppervlakte temperaturen

Voor de beide situaties zijn ook de oppervlakte temperaturen berekenen. Voor de baffles is voor al de stralingscomponent van belang. Zal de oppervlakte temperatuur van de baffles tussen de vertrektemperatuur en het beton liggen of is een van beide dominant.

Voor de gevouwen staalplaat is vooral de geleiding van de staalplaat van belang voor de oppervlakte temperaturen.

DEELONDERZOEKEN

11 Catt voorbereidingen

11.1 Invoer van een klaslokaal.

11.1.1 Inleiding

Voor de invoer van vertrekken in CATT-acoustic zijn de materiaaleigenschappen van de gebruikte materialen van belang. De belangrijkste eigenschap is de absorptiecoëfficiënt. Deze waarden zijn terug te vinden in bijvoorbeeld het bouwfysisch tabellarium. De invoer in CATT-acoustic gaat in meters. De vlakken worden ingevoerd aan de hand van de hoekpunten. De hoekpunten worden gedefinieerd in een xyz-assenstelsel. Voordat er met CATT-acoustic gerekend kan worden zijn naast de materiaaleigenschappen ook de geluiddruk niveaus van de geluidbronnen van belang. Naast het niveau van de bron is de geluidsterkte in het lokaal ook afhankelijk van de richting waar mee gesproken wordt, de geluidsterkte van een bron is niet in elke richting gelijk. Daarom is ook de richtingsafhankelijkheid van de bron van belang.

In een klaslokaal zijn globaal genomen drie geluidsbronnen.

-de spreker/docent

-de leerlingen als achtergrondruis

-overige achtergrondruis, voornamelijk van het ventilatiesysteem.

11.2 Geluidsterkte

11.2.1 Geluidsniveau van de bron (spreker)

De bronsterkte is afhankelijk van een aantal variabelen. In een onderzoek van Hodgson is gekozen het bronvermogen afhankelijk te maken van; het geluidniveau van de scholieren, het volume van het leslokaal en van het absorberende oppervlak

Met behulp van de formules die in §8.1.1 is gegeven kan de bronsterkte worden berekend. In diezelfde paragraaf wordt ook een globale verdeling over de verschillende octaafbanden gegeven.

Een tweede optie om de bronsterkte te bepalen is door middel van de tabel waarin verschillende spectra zijn opgenomen voor normale spraak, spreken met stemverheffing e.d. voor mannen vrouwen en kinderen. Deze tabel is in de bijlage opgenomen -A2-tabel 6-.

In het vervolg onderzoek is de bronsterkte bepaald met behulp van de formule uit §8.1.1

11.2.2 Achtergrondgeluid

In het onderzoek van Hodgson is niet alleen gekeken naar de bronsterkte in een leslokaal, maar ook naar het geluidniveau van de achtergrondruis.

De achtergrondruis is op te splitsen in twee delen. Het geluid dat door de scholieren wordt geproduceerd en het overige geluid zowel extern geluid als het geluid van het ventilatiesysteem. Olsen maakt in zijn onderzoek deze geluidniveaus afhankelijk van; het aantal studenten(n) de breedte van het lokaal (b) en het totale absorptie van het vertrek (A_0). Zie §8.1.2 In het vervolg onderzoek is met deze formules verder gerekend.

11.3 Aanpassingen

De geluiddrukkniveau van zowel de bron als van het achtergrondgeluid is afhankelijk van het absorberend oppervlak. Bij verandering van de gemiddelde α -waarde zal dus niet alleen de nagalmtijd veranderen.

Door verhoging van de α -waarde zal de achtergrondruis lager worden. Indien de achtergrond ruis in de uitgangssituatie bekend is moet deze worden aangepast indien de α -waarde wordt veranderd. Deze verandering is gelijk aan de verandering van Strength (G). Het verschil van het achtergrondgeluiddrukkniveau is gelijk aan het verschil tussen de Strength (G) in de uitgangssituatie en de aangepaste situatie.

Ook het bronniveau zal anders worden; in de formule van voor de bronsterkte is dit terug te vinden als “ $-9.6 \log A_o$ ”. Dus bij een verdubbeling van de α -waarde zal de bronsterkte met ongeveer 3 dB afnemen.

11.4 Resultaten(voorbeeld)

Om de theorie te verduidelijken is voor een eenvoudig voorbeeld de bronsterkte en het geluidniveau van het achtergrondgeluid uitgerekend.

De afmetingen van het vertrek.

Breedte 8 meter

Diepte 7 meter

Hoogte 3 meter

Volume 168 m³

Oppervlak 202 m²

Absorptie oppervlak 40,4 m² (Om hierbij toch met een vaste waarde snel te berekenen is gekozen voor een absorptiecoëfficiënt van 20%.)

Aantal leerlingen 24

LW_o = 61,6 dB (vrouw)

VN_o = 43,0 dB

SAN = 43,3 dB

De uitgebreide berekeningen zijn opgenomen in de bijlage (zie bijlage –A1-)

11.5 Conclusie

In het onderzoek van Hodgson ea is heel sterkt het verband gelegd tussen de ruimte (afmetingen en akoestiek) en het bron- en ruisniveau. Wat ook werd verwacht komt in de formule terug.

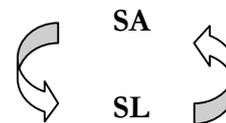
De spreker past zijn spreekniveau aan aan de akoestische kwaliteiten van het vertrek, maar ook aan het niveau dat de scholieren produceren (SA).

Maar andersom is ook een verband te vinden.

De ruis die de scholieren produceren is ook in verband te brengen met het spreekniveau van de spreker.

$$SA = 9,22 + 6,4 \log n + 0,71SL + 1,53I_{sex} - 8,0 \log A_o$$

Door de cirkel redenering die hierdoor ontstaat is gekozen de SA alleen afhankelijk te maken van de ruimte-eigenschappen.



Bij de berekening van het ruis-niveau komt naar voren dat dit niet onderschat mag worden. Uit de berekening van het voorbeeld lokaal komt een achtergrondruisniveau van 43 dB. Dit niveau is ongeveer gelijk door het hele lokaal.

Het geluidrukniveau van de spreker 60 dB. Dit niveau neemt bij elke verdubbeling van de afstand met 3 dB af. Het is dan ook niet realistisch om een S-R-verhouding van 15 dB te hanteren. Voor in het lokaal is dit wel haalbaar maar achterin bij lange na niet.

11.6 Directivity van de bron.

Hoewel het mogelijk is om de precieze gerichtheid van de bron in te voeren kan het verstandig zijn om het niet toe te passen. De reden is kan dat een spreker altijd zijn hoofd draait (zelfs omgekeerd; naar een bord of naar een projectiescherm kijkend). Het is daarom nuttiger om niet de nauwkeurige gerichtheid te gebruiken, maar met een iets lagere 'Directivity'. Zodat het een gemiddelde weergeeft van de richting van de bron.

-Bijlage B-

11.6.1 Singers

Catt-acoustic geeft zelf twee directivity's voor zangers, hierbij is meegenomen dat een zanger nooit alleen recht vooruitzing. Het verschil tussen de 'normale'-singer en de bass-singer is de belangrijkste richting van de zanger. Een Bass-zanger zingt meestal met zijn kin op de borst dus zal de hoofdrichting van zijn zang iets naar beneden zijn. Het andere bestand gaat uit van een zanger die recht vooruit zingt.

De overeenkomsten tussen de bestanden zijn is dat het geluidrukniveau aan de achterkant met 5-10dB afneemt.

11.6.2 Seanger

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) geeft voor CATT-acoustic ook een directivity voor een zanger. De directivity van deze zanger vertoont grote overeenkomsten met de zanger die standaard in CATT-acoustic zit. Het verschil hierbij is dat het geluid recht naar beneden sterk wordt gereduceerd. Voor een realistischere STI is de directivity van de bron ook een aspect waar op gelet moet worden. In de directivity van een zanger wordt ook mee genomen dat de bron niet alleen recht vooruit zingt maar ook iets met zijn hoofd draait. Dit is voor een docent in een klaslokaal een vergelijkbare situatie.

In verder onderzoek zal daarom ook gerekend worden met een 'zanger' van PTB als bron-directivity.

11.6.3 Luidspreker

Het is ook mogelijk om handmatig de gerichtheid van de bron in te voeren. Dit is dan ook gedaan voor de luidspreker die bij de metingen is gebruikt. VC4220802_lau.SD0

12 Atlas college Triade Edam

12.1 Inleiding

In mijn afstudeeronderzoek naar de akoestische aspecten in klaslokalen met betonkernactivering (BKA) heb ik een case-study gedaan in een school in Edam. Voor deze school is gekozen, omdat dit voor het raadgevende ingenieurs bureau Deerns de meest recente gerealiseerde school was waarvan zij adviseur voor de klimaatinstallatie waren.

Dit rapport is in drie delen opgesplitst:

- 1a – meetresultaten en verwerking van deze resultaten
- 1b – handberekening van de lokalen en een vergelijking met de meetresultaten
- 2 – modelleren van de lokalen in CATT-acoustic en een vergelijking met de meetresultaten
- 3 – Aanpassingen naar aanleiding van de handberekening en de uitvoer uit CATT

12.1.1 De School

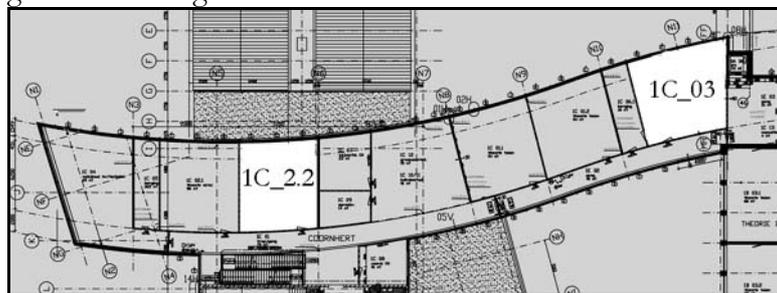
De Triade in Edam is een vestiging van het Atlas college. Het Atlas College is een openbare scholengemeenschap voor gymnasium, atheneum, havo, vmbo en lwoo met locaties in Hoorn, Edam en Medemblik.

De school is verdeeld in drie deelscholen. Deelschool Zuiderzee biedt VMBO onderbouw en leerwegondersteunend onderwijs (LWOO). Deelschool Coornhert biedt HAVO/VWO onderbouw en LWOO aan. Deelschool Bovenbouw biedt VMBO BKG(techniek), Theoretisch(techniek, economie, zorg en welzijn, landbouw) en leerwerktraject (LWT) aan. Oorspronkelijk was het de ambachtschool. Bij de uitbreiding van het onderwijs met de onderbouw van HAVO/VWO is aan de bestaande school een extra vleugel toegevoegd. Met daarin op de eerste verdieping theorielokalen. Deze nieuwbouw is uitgevoerd met BKA; de keuze komt voornamelijk voort uit de goede ervaringen met BKA op de vestiging in Hoorn.

12.1.2 De lokalen

In twee verschillende lokalen zijn geluidmetingen uitgevoerd.

De beide lokalen liggen in de nieuwbouw vleugel op de eerste verdieping en zijn allebei lokalen waar in theorielessen worden gegeven. De afwerking van beide lokalen is aan elkaar gelijk. De scheidingswanden zijn licht uitgevoerd en afgewerkt met een glasvezelbehang met sauswerk.

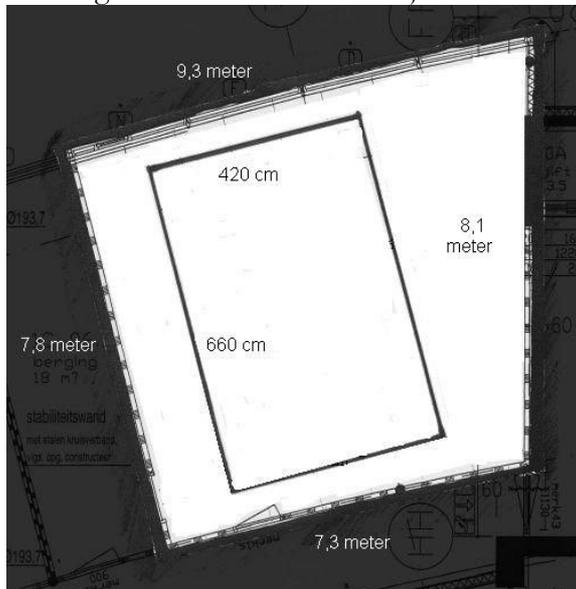


figuur 12.1 lokalen 1C_2.2 en 1C_03

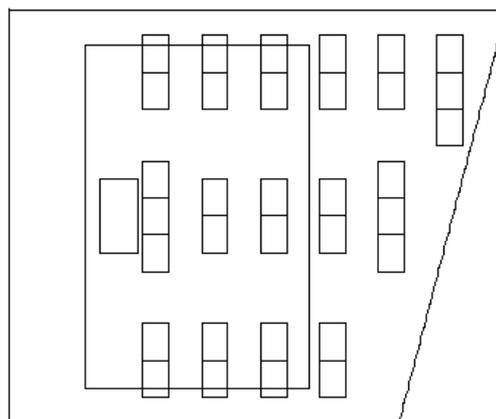
12.1.2.2 Lokaal 1C_03

Het eerste lokaal (1C_03) is het grootste lokaal. Het heeft een oppervlak van $\pm 66 \text{ m}^2$ en een inhoud van $\pm 218 \text{ m}^3$.

Door een lichte kromming van zowel de buitengevel als de gangwand zijn de hoeken van het lokaal niet 90°. Doordat dit lokaal het laatste lokaal is van deze vleugel en hier de aansluiting op het bestaande gebouw plaats vindt staat de achterwand schuin t.o.v. de 'bordwand'. Voor het akoestische comfort is er een plafondeiland toegevoegd van $\pm 28\text{m}^2$. In het plafondeiland zijn de verlichtingsarmaturen aangebracht. Een paar weken voordat de metingen zijn gedaan is het aantal armaturen van 8 uitgebreid tot 13. Voor in de klas staat 1 groot bureau en verder zijn er 34 tafels/stoelen voor de scholieren.



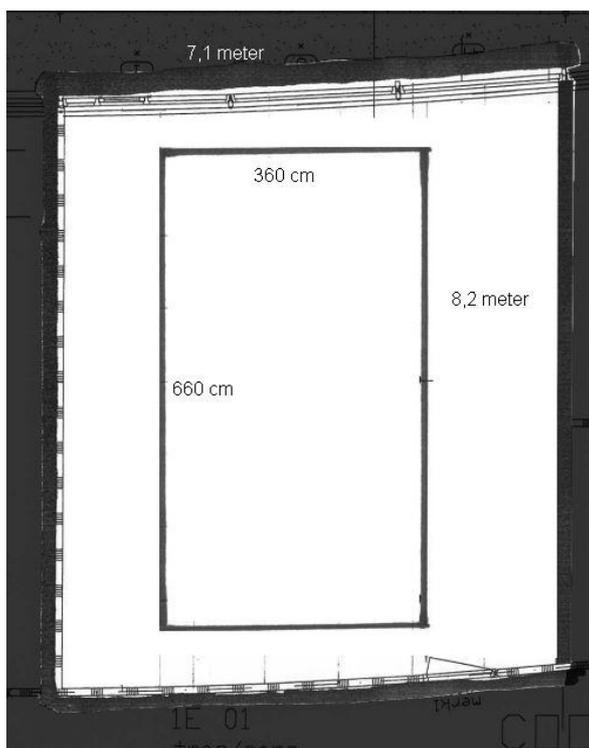
figuur 12.2 Afmetingen klaslokaal en plafondeiland
12.1.2.3 Lokaal 1C_2.2



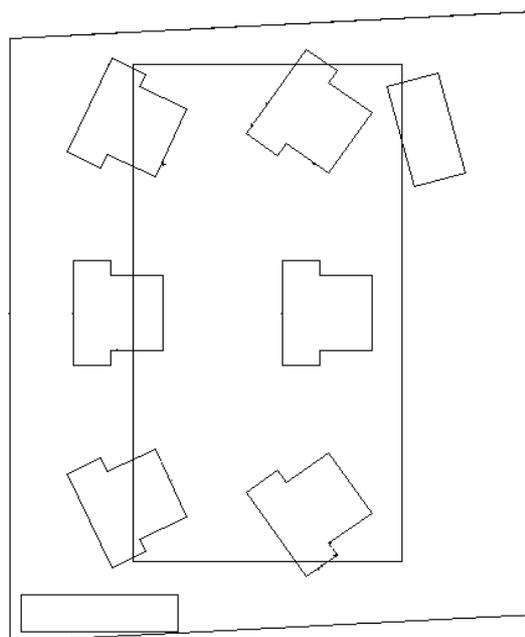
figuur 12.3 Verdeling van de tafels in het lokaal

Het tweede lokaal (1C_2.2) is ongeveer even groot als de ander lokalen. Het heeft een oppervlak van $\pm 56\text{m}^2$. Ook hier is een plafondeiland toegepast met een oppervlak van $\pm 24\text{m}^2$

In dit plafond eiland zitten 6 armaturen. Voor en achter het eiland zijn 2 armaturen toegevoegd. Voor in dit lokaal staat 1 groot bureau en verder zijn er 24 tafels/stoelen voor de scholieren.



figuur 12.4 afmetingen klaslokaal en plafondeiland



figuur 12.5 verdeling van de tafels in het klaslokaal

12.2 Meetopstelling.

In beide lokalen is een raster van 1*1meter uitgezet. Dit raster is gemeten vanuit het midden van de 'bordwand' en verder loodrecht op deze wand. Op dit raster zijn respectievelijk 14 en 11 meetpunten uitgezet. Voor de bronpositie is het punt genomen dat 1 meter voor het midden van af de 'bordwand' ligt.

Als bron is een luidspreker gebruikt. Het gebruikte geluidsignaal is een zogenaamde 'sweep'. De bronsterkte is afgesteld op 10,0 mV. Het geluidsignaal wordt met een microfoon opgevangen en verwerkt in twee stappen; met een matlab programma en met Mlaus versie 63 een programma geschreven in C++. Voor de werking van deze software verwijst ik door naar *Impulse Response measurements in a room – A brief introduction and manual to using the MATLAB-based impulse response measurement system* en *The calculation of acoustical parameters from measured impulse responses – manual plus software description of the program Mlaus*.

De plattegrond met het raster staat in de bijlage (zie bijlage –C2-)

12.3 Berekeningen

12.3.1 Handberekening

Aan de hand van de vertrekafmetingen en de absorptiecoëfficiënten (uit de literatuur) is ook de nagalmtijd bepaald. De nagalmtijd is berekend met de formule van Sabine. Deze berekeningen zijn ook gebruikt om mogelijke aanpassingen door te rekenen

12.3.2 CATT-acoustics

12.3.2.1 CATT-acoustics

In Catt-acoustic is zijn beide lokalen ook ingevoerd. Voor de methode van invoer m.b.t. tot de materialen, geometrie en bron invoer verwijst ik naar "CATT-voorbereiding" en de

bijlage. Deze modellen zijn gebruikt om bij de aanpassingen niet alleen te kijken naar de verandering van de nagalmtijd maar ook de STI te bepalen. In de bijlage zijn de uitvoerbestanden opgenomen. Als controlepunten van de modellen is gekeken naar de gemiddelde absorptie, de nagalmtijd ($T-30$) en naar de STI.

De modellen zijn in dit onderzoek stukje bij beetje aangepast zodat de uitvoer zoveel mogelijk overeenkomt met de werkelijkheid.

De aanpassingen die zijn gedaan hebben geleid tot een aantal varianten (V#).

De eerste aanpassingen die zijn gedaan hebben betrekking op het plafond eiland.

In de eerste variant (V2) ligt het eiland in het vlak van het plafond, terwijl in de werkelijkheid het plafondeiland 30 cm lager ligt. (zie figuur 8)

In de tweede variant (V3) is het eiland wel verlaagd maar in de handleiding wordt er op gewezen dat hier bij fouten kunnen ontstaan. (zie figuur 9)

“Geometrisch onjuiste methode waar de volumeraming, de oppervlakte en de gemiddelde absorptie verkeerd zullen zijn (Sabine RT). De geluidstralen zullen ook door het plafondeiland gaan.”

In de derde variant (V4a) hier in is het plafond dicht gezet. (zie figuur 10)



figuur 12.6

Variant V2



figuur 12.7

Variant V3



figuur 12.8

Variant V4a

12.3.2.2 Meubilair.

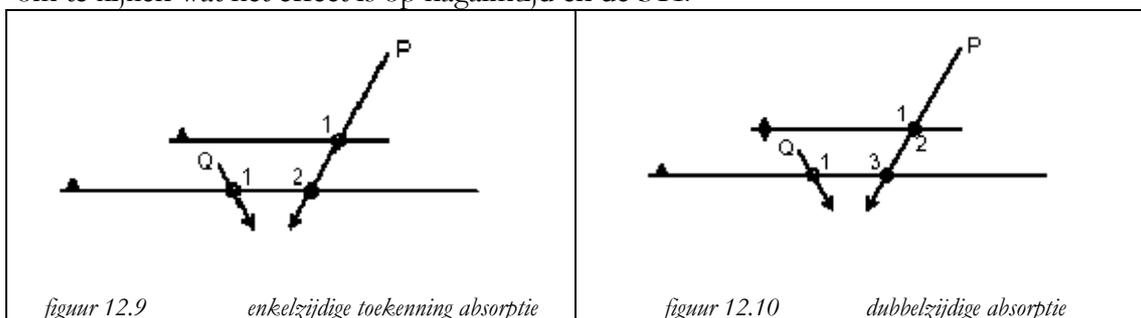
Voor het meubilair, wat in deze lokalen vooral bestond uit tafels, ontstond een zelfde soort probleem.

Omdat de ruimte onder de tafels veel groter is dan boven het eiland is het hier niet realistisch om de tafels als een blok te modelleren. Daarom is bij de tafels gekozen om het tafelblad zowel aan de boven als aan de onderkant te definiëren.

“Geometrisch correcte methode maar volumeraming, de oppervlakte en de gemiddelde absorptie kunnen verkeerd zijn (Sabine RT). De geluidstralen zullen ook onder de tafel doorgaan.”⁴⁶

In de eerste variant (V6) is alleen aan de bovenkant een absorptiecoëfficiënt toegekend.

In de tweede variant (V8) is aan de onderkant een absorptiecoëfficiënt van 0 toegekend, om te kijken wat het effect is op nagalmtijd en de STI.



figuur 12.9

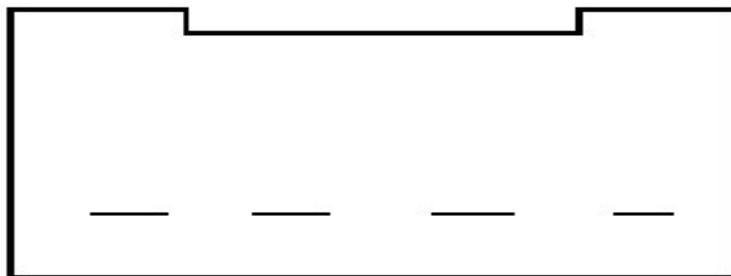
enkelzijdige toekenning absorptie

figuur 12.10

dubbelszijdige absorptie

Het uiteindelijke model (V10c) heeft aan de boven en aan de onderkant dezelfde absorptiecoëfficiënt toegekend en een dichtgezet verlaagd plafond.

⁴⁶ CATT-ACOUSTIC BLZ 2-48



figuur 12.11 Doorsnede uiteindelijke model (V10c)

12.3.2.3 'Directivity' van de Bron

Voor de spraakverstaanbaarheid is de richting van de bron van belang. Het is niet onrealistisch als de docent met zijn gezicht richting het bord staat te praten. Aan de achterkant van het hoofd is het stemgeluid zachter dan aan de voorkant. Het geluid zal dan vooral via de reflectie van het bord bij de leerlingen aan komen. Tijdens de metingen is gebruik gemaakt van een luidspreker, die ook zijn eigen richtingskarakteristiek heeft. In het model is daarom ook gerekend met de 'directivity' van de luidspreker. In de vergelijking tussen de omni-bron en de luidspreker is het verschil het beste te merken als de bron wordt om gedraaid en dus niet richt het lokaal in staat maar naar het bord gericht is.

12.4 Uitvoer

De uitvoer van de metingen, handberekeningen en Catt-acoustic zijn opgenomen in de bijlage (Zie bijlage -C.4.2 - C.4.3 - C.5.2 - C.5.3 -)

12.5 Beoordeling

Bij de beoordeling van de meetresultaten is gekeken naar: de STI en de nagalmtijd. Aan de hand van de nagalmtijd is met de formule van Sabine de absorptiecoëfficiënt bepaald.

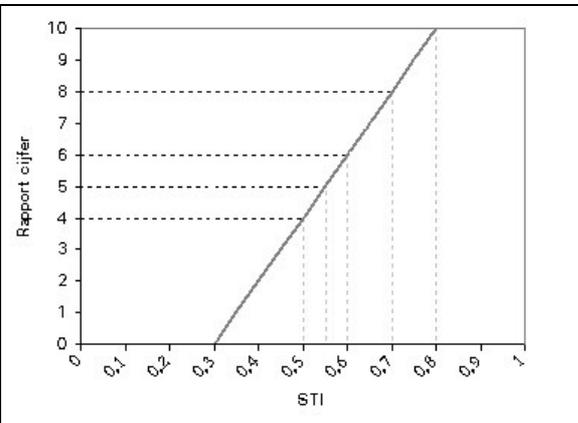
12.5.1 Beoordelingscriteria

12.5.1.1 STI

Voor STI is de onderstaande beoordelingschaal toegepast.

Spraak transmissie index (STI)	Spraakverstaanbaarheid
0 - 30	beroerd
30 - 45	slecht
45 - 60	redelijk
60 - 75	goed
75 - 100	Uitstekend

tabel 12.1 Beoordeling STI



12.5.1.2 Nagalmtijden

Voor de nagalmtijd zijn er geen normen voor middelbare scholen. Wel is er een norm voor basisscholen en speciaal voortgezet onderwijs. Deze norm is 1s. Als indicatie is dit wel gebruikt.

Als richtlijn voor een goede spraakverstaanbaarheid streef ik naar een nagalmtijd van 0,8 – 0,6 s.

Voor een bezet klaslokaal geeft de *Acoustical Society of America* een richtlijn van 0,6 – 0,4 s. Per leerling kan gerekend worden met ongeveer 0,75m² absorberend oppervlak. Gerekend wordt met een bezettingsgraad van 75%.

Ook kan de gemiddelde absorptiecoëfficiënt gebruikt worden om te streven naar een bepaalde waarde. Deze manier van beoordelen is onafhankelijk van de ruimteafmetingen en dus makkelijk om verschillende ruimten te vergelijken. Een streefwaarde hierbij is 25%. Samengevat in de volgende tabel.

RT [s]	1	0,8	0,6		0,4
alfa [-]				0,25	

tabel 12.2 Overzichttabel normen en richtlijnen

12.5.2 Beoordeling van Lokaal 1_03

12.5.2.1 Spraak transmissie index

Voor de STI vinden we in lokaal 1_03 een gemiddelde van 59. In vergelijking met de beoordeling komen we dan op een spraakverstaanbaarheid die op de grens ligt van redelijke en goed. Maar als we kijken naar de beoordelingschaal van 1 tot 10 is een STI van 59 net geen zesje.

12.5.2.2 Nagalmtijd.

De gemiddelde nagalmtijd van het vertrek is bepaald aan de hand van de metingen in de punten A3, D4 G3. Deze punten liggen ongeveer op de afstand die *mean free path* wordt genoemd. In deze punten zijn de nagalmtijden genomen voor 500, 1k 2k Hz. Dit geeft dus negen waarden; drie nagalmtijden in drie meetpunten. Van deze negen waarden is het gemiddelde genomen.

Voor lokaal1_03 komt de gemiddelde nagalmtijd uit op 1,33 s.

Met de formule van Sabine levert dit een absorberend oppervlak van 25,9 m² op.

In dit lokaal kunnen maximaal 33 leerlingen. Omdat het niet waarschijnlijk is dat de bezetting van het lokaal altijd 100% zal zijn is in de berekening gerekend met een bezettinggraad van 75%. Bij een bezettingsgraad van 75% zitten er 25 leerlingen in het lokaal. Voor elke leerling geldt een absorptie van ± 0,75 m². Uit eindelijk kan er ongeveer nog 18,75 m² absorberen oppervlak worden toegevoegd door de aanwezigheid van leerlingen.

De in de vorige paragraaf genoemde richtlijnen zijn in een tabel gezet; voor de verschillende varianten is naast de nagalmtijd en de absorptiecoëfficiënt ook de STI en de strength(G) berekend op de mean free path afstand.

Lokaal 1C_0.3	Basis					
RT [s]	1,33	1	0,8	0,6	0,58	0,4
alfa [-]	0,11	0,15	0,18	0,24	0,25	0,36
G [dB]	22	21	20	18	18	16
STI [-]	52	59	64	70	71	78
A [m ²]	25,9	34,4	43,0	57,3	59,1	86,0
Toevoegen [m ²]		8,5	17,1	31,5	33,3	60,1
Volume [m ³]	213,64					

S(oppervlak) [m ²]	236,57
--------------------------------	--------

tabel 12.3 Toe te voegen m² aan de hand van de richtlijnen

Absorberen	opp. [m ²]	leerlingen [m ²]
1 seconden	8,5	
0,6- 0,8 sec onbezet	31,5 – 17,1	
0,4 – 0,6 s bezet	41,35 – 12,75	18,75
25 %	14,55	18,75

tabel 12.4 Absorberende oppervlakken per richtlijn

12.5.3 Beoordeling van Lokaal 1_22

12.5.3.1 Spraak transmissie index

Voor de STI vinden we in lokaal 1_22 een gemiddelde van 61. In vergelijking met de beoordeling komen we dan op een spraakverstaanbaarheid die op de grens ligt van redelijke en goed. Maar als we kijken naar de beoordelingschaal van 1 tot 10 is een STI van 61 net een zesje.

12.5.3.2 Nagalmtijd.

De gemiddelde nagalmtijd van het vertrek is bepaald aan de hand van de metingen in de punten A3, D4 G3. Deze punten liggen ongeveer op de afstand die *mean free path* wordt genoemd. In deze punten zijn de nagalmtijden genomen voor 500, 1k 2k Hz. Van deze negen waarden is het gemiddelde genomen.

Voor lokaal1_22 komt deze gemiddelde nagalmtijd uit op 1,14 s.

Met de formule van Sabine levert dit een absorberend oppervlak van 26,8 m² op.

In dit lokaal kunnen maximaal 24 leerlingen; bij een bezettingsgraad van 75% zitten er 18leerlingen in het lokaal. Voor elke leerling geldt een absorptie van $\pm 0,75$ m². Uit eindelijk moet er dus nog 13,5 m² absorberen oppervlak worden toegevoegd.

De in de vorige paragraaf genoemde richtlijnen zijn in een tabel gezet; voor de verschillende varianten is naast de nagalmtijd een de absorptiecoëfficiënt ook de STI en de strength(G) berekend op de mean free path afstand.

Lokaal 1C_2.2	Basis	1	0,8	0,6	0,56	0,4
RT [s]	1,14					
alfa [-]	0,12	0,14	0,18	0,24	0,25	0,35
G [dB]	22	22	20	19	18	16
STI [-]	56	59	64	70	71	78
A [m ²]	26,8	30,6	38,2	51,0	53,9	76,4
Toevoegen [m ²]		3,8	11,4	24,1	27,1	49,6
Volume [m ³]	189,88					
S(oppervlak) [m ²]	215,53					

tabel 12.5 Toe te voegen m² aan de hand van de richtlijnen

Absorberen	opp. [m ²]	leerlingen [m ²]
1 seconden	3,8	
0,6- 0,8 sec onbezet	24,1 – 11,4	
0,4 – 0,6 s bezet	36,1 – 10,6	13,5
25 %	13,6	13,5

tabel 12.6 Absorberende oppervlakken per richtlijn

12.5.4 Conclusie naar aanleiding van de beoordeling

Voor beide lokalen is de STI redelijk, maar is deze beoordeling ook van toepassing op klaslokalen. Is voor een klaslokaal een waardig goed niet een minimale vereiste. Daarom wil ik streven naar een STI-waarde van minimaal 70

Als we naar de nagalmtijd en naar α -gemiddeld kijken zien we dat beide lokalen te kort komen.

Voor een uitstekende akoestisch comfort moet er bij een bezet lokaal $1C_{03} \pm 20m^2$ en voor lokaal $1C_{2.2} \pm 15m^2$ absorberend oppervlak worden toegevoegd.

12.6 Bezetting

Door de aanwezigheid van mensen zal het absorberend oppervlak toe nemen. Om dit effect ook voor de STI te bekijken zijn mensen in het model toegevoegd. Deze zijn sterk vereenvoudigd tot rechthoekige blokken, waaraan een absorptiecoëfficiënt is toegekend.

Voor de octaafbanden 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz respectievelijk de volgende waarden; 15, 15, 21, 42, 42, 42. Voor zitten de mensen is een rechthoekige volume van $20*60*100$ cm genomen. De absorptiecoëfficiënten komen uit het literatuuronderzoek §8.3. Daar worden de absorberende oppervlakken per leerling gegeven; 0,27; 0,39; 0,78; 0,78; 0,78. De ingevoerd rechthoekige volume heeft een oppervlak van $1,84m^2$. Om de α -gemiddelde te berekenen wordt het absorptie oppervlak per leerling gedeeld door het oppervlak per leerling ($0,27m^2/1,84m^2=15\%$; $0,39m^2/1,84m^2=21\%$; ...)

12.7 Verschillende bron

Door de gerichtheid van de bron zijn in de verschillende meetpunten ook verschillen voor de STI te vinden. De grote verschillen zijn te vinden in het punt recht voor de bron. STI is hier het hoogst voor de luidspreker. Dat komt omdat de luidspreker de meeste energie recht naar voren uitzend. De omni-bron geeft een 'vlakker' resultaat. De seanger geeft een resultaat dat tussen de luidspreker en de omni-bron ligt.

Het verschil in de gerichtheid van de bron komt ook sterk naar voren als de situatie wordt bekeken waar in de bron omgedraaid wordt.

Dit is ook in de meetopstelling in het lokaal gedaan. (zie bijlage -??-)

12.8 Aanpassingen

De mogelijke aanpassingen om de in de vorige paragraaf genoemde richtlijnen te behalen zijn uitgedrukt in het aantal vierkante meters absorptie die moeten worden toegevoegd. Dit maakt de vergelijking tussen de verschillende aanpassingen makkelijker.

Het thermische comfort is met het huidige plafondeiland goed. Bij de verbetering van het akoestische comfort zal dit eiland in eerste instantie niet vergroot worden. De toename van het absorberende oppervlak zal dus op de wanden geschieden.

Voor de aanpassingen heb ik naar twee opties gekeken.

Optie1

De achterwand en de gangwand worden deels bekleed met houtwolcement; hetzelfde materiaal als het plafond eiland.

Afmetingen; de onderkant voor optie 1 is om 1,5 meter gelegd om zo beschadiging te voorkomen en de bovenkant op 3 meter. Daar boven zal de effectiviteit afnemen omdat het paneel dan hoger komt dan het plafond eiland dat op 3 meter hangt

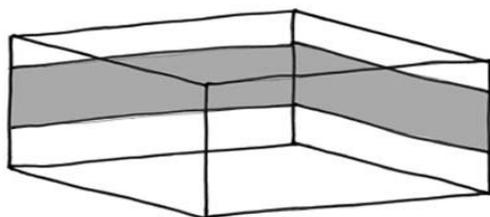
Optie 2

Het absorberende materiaal moet de functionaliteit van het lokaal verhogen; de wandbekleding moet ook als prikbord/magneetbord fungeren om zo dus werkstukken en poster op te kunnen hangen. Als materiaal heb ik gekozen voor een akoestisch paneel die afgewerkt is met een geperforeerde staalplaat.

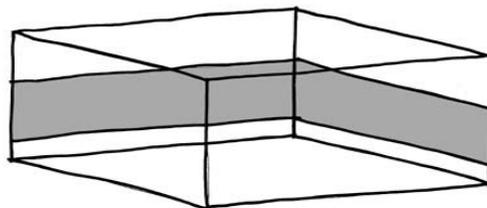
Die staalplaat fungeert dan ook als magneetbord.

Afmetingen; voor optie 2 ligt die onderkant en de bovenkant lager omdat dat de functionaliteit van het paneel verhoogd. De onderkant van het paneel ligt op ongeveer 1 meter.

Voor allebei is de hoogte ±1,50 meter.



figuur 12.12 schets van optie 1



figuur 12.13 schets van optie 2

Absorptiecoëfficiënt

Het paneel in optie 1 heeft een absorptiecoëfficiënt van ± 0,7.

Het paneel in optie 2 heeft een absorptiecoëfficiënt van ± 0,8.

	Lokaal 1C_03		Lokaal 1C_2.2	
	wenselijk		wenselijk	
$S^* \alpha$ [m ²]	20		15	
	Optie1	Optie2	Optie 1	Optie 2
S [m ²]	23	23	23	23
$S^* \alpha$ [m ²]	16,1	18,4	16,1	18,4

tabel 12.7 Toe te voegen m²

Deze oplossingen gebruiken alleen de achterwand en de gangwand.

De bordwand is bewust niet gebruikt, omdat reflectie op deze wand de spraakverstaanbaarheid verhoogt. Vooral in het geval dat de docent niet recht de leerlingen toespreekt.

De raamwand is voor het grootste deel van glas. De bovenkant van het kozijn ligt op ongeveer dezelfde hoogte als het plafondeiland. En de onderkant van het kozijn ligt op ligt op 90 centimeter boven de vloer, dus komt maar iets boven de tafels uit.

Voor het tweede lokaal ligt in deze opties de oplossing voor het akoestische comfort.

Voor het eerste lokaal blijkt dit niet voldoende te zijn en kan te weinig materiaal worden toegevoegd.

In dit lokaal moet er gezocht worden naar aanvullende mogelijkheden.

Een van de mogelijkheden is van dit lokaal het plafondeiland te vergroten. Hierdoor zal het koelvermogen wel iets afnemen.

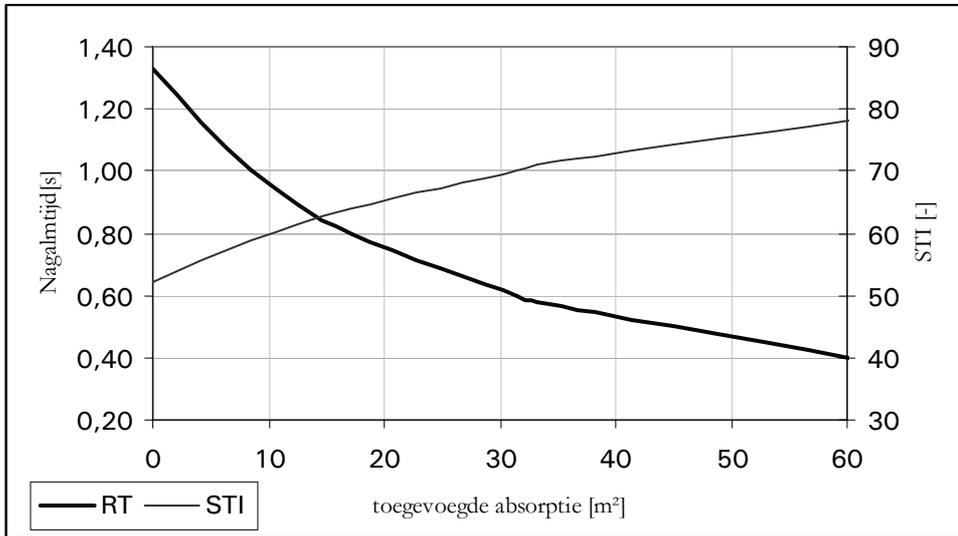
$(0,1 \text{ (W/m}^2_{\text{vloeroppervlak}}) / \text{toegevoegde m}^2)$

$(5,5 \text{ w/m}^2) / 65\text{m}^2$

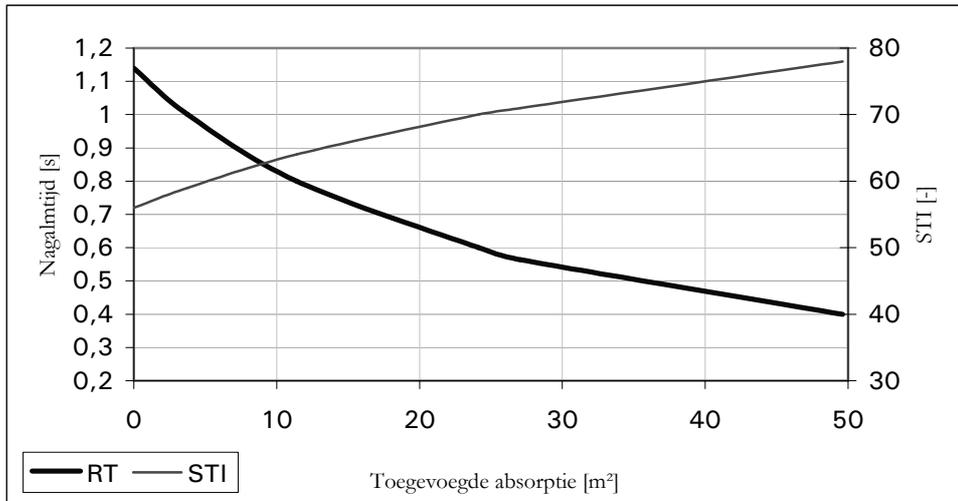
Bijlage - C.4.4 - C5.4 –

12.9 Uitvoer ‘aanpassingen’

De aanpassingen zijn beoordeeld op de nagalmtijd en de STI waarden. Als bron is de seanger gekozen. Voor de aanpassingen is gerekend met een leeg lokaal en een vol lokaal. In de bijlage zijn zowel de uitkomsten van een bezet als een onbezet lokaal opgenomen; variant 10c is het lege lokaal en variant 20 is het volle lokaal.



figuur 12.14 nagalmtijd en STI uitgezet tegen toegevoegde absorptie in lokaal 1C_03



figuur 12.15 nagalmtijd en STI uitgezet tegen toegevoegde absorptie in lokaal 1C_2.2

12.10 Conclusie

De spraakverstaanbaarheid in de beide klaslokalen laat te wensen. Aanpassingen zijn nodig om dit te verbeteren. De aanpassingen die in hoofdstuk 14 worden voorgesteld zorgen voor een aanzienlijke verbetering. De nagalmtijden worden verlaagd voor een leeg klaslokaal van ruim 1 seconden naar waarden tussen de 0,6 en 0,8 seconden. De Spraaktransmissie index is in de huidige situatie ongeveer 60 en zal door de aanpassingen stijgen naar ruim 70.

12.10.1 STI in ruis

In de berekening van STI is geen rekening gehouden met de achtergrondruis. Voor een goede beoordeling van de spraakverstaanbaarheid in een klaslokaal is het van belang dat de STI-waarde wordt omgerekend naar STI-in-ruis.

Omdat het bepalen van de ruis in een klaslokaal niet erg eenvoudig is, is dit in dit onderzoek niet gebeurd. Hoe STI-in-ruis berekend kan worden van uit STI is beschreven in §6.10.

12.10.2 Praktijk

In het huidige bouwbesluit wordt geen eis gesteld aan de nagalmtijd. Dus is het van belang dat in het ontwerpproces van scholen eerder en duidelijke door bouwfysische adviseurs gewezen worden op de akoestische eigenschappen van de lokalen.

13 Locatie absorptie

13.1 Inleiding

Plafond en/of wandabsorptie.

In dit onderzoek is gekeken wat het effect is van de locatie van de absorptie op de spraakverstaanbaarheid. Verbeterd de spraakverstaanbaarheid indien een gelijke hoeveelheid absorberend oppervlak op verschillende plekken in het lokaal wordt aangebracht.

Voor de meeste efficiënte werking van betonkernactivering moet het plafond zo vrij mogelijk gelaten worden. Hierdoor is in de verschillende varianten gekozen voor een plafondabsorptie die een deel van het totale plafond oppervlak gebruikt. De resterende vierkante meters zijn op de wanden aangebracht.

Van de vier wanden zijn twee wanden minder makkelijk te gebruiken.

De bordwand is om twee redenen niet gebruikt; uit het literatuuronderzoek kwam naar voren dat de reflectie op de bord wand wenselijk zijn omdat daardoor de spraakverstaanbaarheid wordt verbeterd, doordat het vroege geluid wordt versterkt. Een tweede reden is meer vanuit praktisch oogpunt. Het school bord neemt een aanzienlijk deel van de bordwand in beslag en kan dus niet absorberend worden gemaakt.

De andere wand die niet gebruikt kan worden is de raamwand. In de meeste scholen is het glasoppervlak van deze gevel zo groot dat er weinig effectief oppervlak overblijft om te voorzien van absorberend materiaal.

13.1.1 *Het model*

Het model is een klaslokaal van 7 bij 8 meter en een hoogte van 3 meter.

Voor in het lokaal staat de bron (A0) en in het lokaal zijn 6 verschillende meetpunten geplaatst.

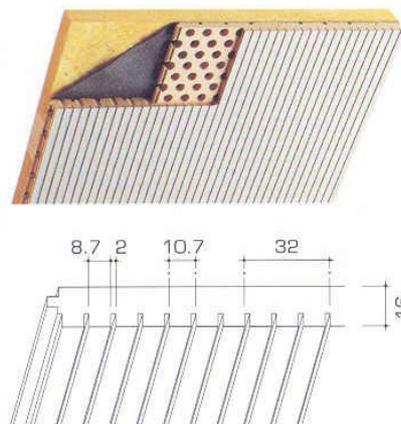
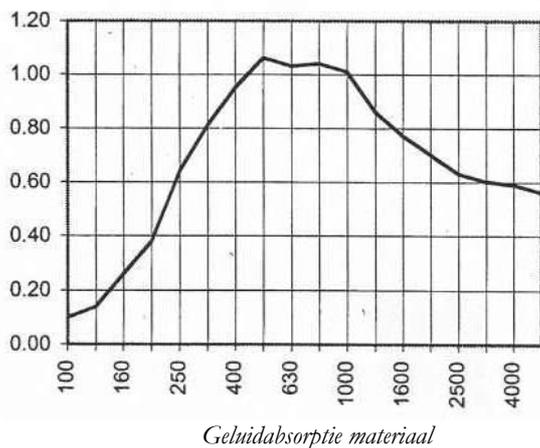
Het basis model heeft vier wanden die zijn opgebouwd uit dubbele gipsplaten op een houten regelwerk; de gipsplaten zijn afgewerkt met een glasvezelbehang en een sauslaag. De buitengevel heeft een glasvlak dat over de volle lengte van de wand loopt.

Deze buitengevel heeft een borstwering van 90 cm en tussen het glas en het plafond zit 10 cm. Het plafond is volledig van beton. De vloer is een betonnenvloer en afgewerkt met linoleum.

13.1.2 *Het absorberend materiaal*

Voor de varianten is aan het basis model ± 50 m² absorberend materiaal toegevoegd.

Het gekozen materiaal is een geluid absorberend element dat zowel als plafond als wandelement kan worden toegepast.



13.1.3 De locatie van het absorberende materiaal

Voor de locatie van het absorberende materiaal is gekozen voor het plafond en twee wanden.

De verschillende varianten hebben een absorberend plafond van 60% van het totaal plafond oppervlak, 33,6 m².

Hierbij is gekeken naar het effect op de spraakverstaanbaarheid bij verschillende locaties van die 33,6 m². De overige 16m² is verdeeld over of de achterwand of de gangwand of allebei; respectievelijk 2 meter op de achterwand; 2,4 meter op de gangwand; 1,1 meter op de achter en gangwand.

Twee varianten zijn gemaakt met een oppervlak van 23m² plafondpanelen en 27 m² wandpanelen. Voor plafond betekent dit dat het absorberende deel 40% is van het totale plafond oppervlak. In - bijlage E - zijn de verschillende varianten door middel van plafondplattegronden en 3D-plaatjes weergegeven.

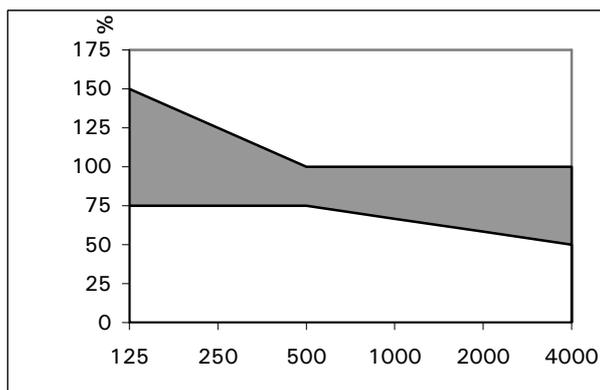
13.2 Resultaten

De resultaten zijn opgenomen in de bijlage.

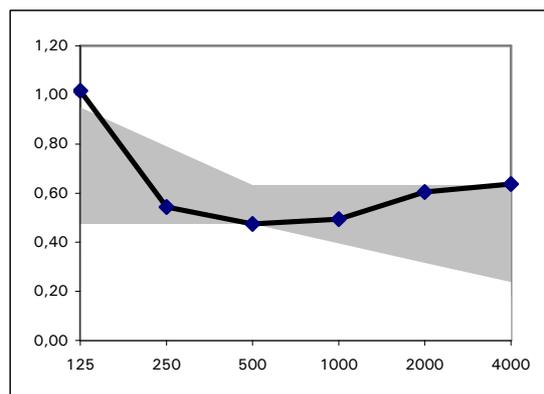
13.2.1 Nagalmtijden

Voor de vereiste nagalmtijd T geldt, volgens de Rgd-richtlijnen voor klaslokalen $T \leq 1$ s. Deze waarde is de gemiddelde nagalmtijd in de oktaafbanden met de middenfrequenties 125 Hz t/m 2000 Hz. Omdat te grote afwijking tussen de diverse oktaafbanden leidt tot een onbevredigende

ruimteakoestische kwaliteit wordt, rekeninghoudend met het feit dat in de lage frequenties meestal sprake is van een langere nagalmtijd respectievelijk in de hogere frequenties van een kortere nagalmtijd, aanvullend geformuleerd:



figuur 13.2 aanvullende wensen nagalmtijd



figuur 13.3 controle op aanvullende wensen

13.2.2 Absorptiecoëfficiënt

De wens voor de absorptiecoëfficiënt is 25%. Als het gemiddelde over de octaafbanden 250; 500; 1k en 2k Hz wordt genomen is het gemiddelde 25,1%. Dit geldt voor een onbezet lokaal.

Voor een bezet lokaal zal het percentage met 1,5-2% toe nemen.

13.2.3 STI

De gemiddelde STI waarden van de verschillende varianten schommelen tussen 70 en 74

13.3 Conclusie

Uit de resultaten komt naar voren dat bij de aanwezigheid van voldoende absorberend oppervlak de spraakverstaanbaarheid in het hele lokaal goed is.

De lokatie van het materiaal zorgt voor een verbetering van ongeveer 4 op de schaal van 0-100 STI., van 70 tot 74 STI.

Een betere spreiding over de verschillende vlakken geeft wel een hogere STI-waarde. Dus benut ook de wanden ipv alleen het plafond.

De verbetering van 70-73 STI is niet significant, voor het ontwerpen van een goed klaslokaal is het dus belangrijker dat er voldoende geluidabsorberend materiaal wordt toegepast, dan de plek van het materiaal.

14 Straling

14.1 Inleiding

De stralingscomponent is afhankelijk van een aantal factoren: (zie §3.1)

- de oppervlaktetemperatuur van het bouwdeel;
- de zichtfactor van het bouwdeel

Deze eigenschappen bepalen de mate waarin de warmteoverdracht plaatsvindt tussen het bouwdeel en de omhullende lucht. Voor beide eigenschappen geldt hoe groter de waarde hoe hoger het stralingsvermogen komt te liggen

Het toevoegen van materiaal kan op meerdere manieren. Die in drie groepen zijn onder te verdelen:

- plafondeilanden; hier bij is het snel duidelijk wat de vermindering is van de zichtfactor en de oppervlaktetemperatuur zal niet veel afwijken van de vertrektemperatuur.
- Baffles; bij baffles zijn de afmetingen en de onderlinge afstand sterk bepalend voor de vermindering van de zichtfactor, de oppervlakte temperatuur zal ook in de buurt liggen van de vertrek temperatuur. Al zal dat in dit onderzoek nog verder bekeken worden.
- Het systeem van een gevouwen staalplaat. De idee hier achter is dat de holle ruimte benut kunnen worden voor geluidabsorptie en dat de staalplaat de warmte goed geleidt en dus de oppervlakte temperatuur dichter bij de betontemperatuur zal liggen dan bij de vertrektemperatuur. Ook bij dit systeem zal de zichtfactoren moeten worden bepaald.

14.2 Methode

14.2.1 Temperaturen

De oppervlaktetemperatuur bij BKA is niet constant omdat door de tijd zowel de beton temperatuur als de vertrektemperatuur veranderen. Het is een dynamisch systeem. Daarom wordt voor de werking van het systeem vaak gewerkt met VA114. Daarin kan het verloop van de verschillende temperaturen worden berekend. Dit gaat voor dit onderzoek te ver. Daarom is gekozen om het systeem stationair te bekijken.

14.2.2 Model

14.2.2.1 Klaslokaal

Voor de berekening is gewerkt met één modelvertrek. Het model is een klaslokaal van 7 bij 8 meter en een hoogte van 3 meter. Dit komt overeen met het model dat gebruikt is bij het onderzoek naar de locatie van het absorberende materiaal. De vrije hoogte boven de vloer in een klaslokaal moet minimaal 2,4 meter zijn. Dit is bij de baffles de afstand tussen vloer en de onderkant van de baffles. De afstand tussen het plafond en de onderkant van de baffles mag niet groter zijn dan 60 cm.

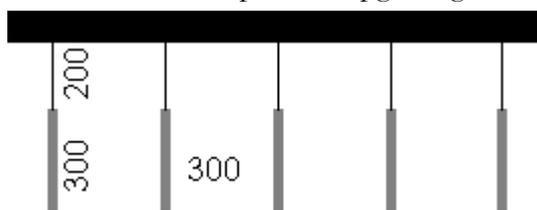
14.2.2.2 plafonddetail

Voor de invoer van Trisco is een plafonddeel genomen van 1m². De waterleidingen van de BKA liggen in het midden van de betonnenvloer. Omdat in het stationaire systeem het warmte transport naar boven en naar beneden aan elkaar gelijk is, is er een adiabatische

rand gelegd halverwege het vloerpakket. Uit een voorbeeld berekening is een watertemperatuur van 20°C en een vertrektemperatuur van 26°C gehaald. Uit dit voorbeeld kwam ook een oppervlakte temperatuur van 23°C. De waterleidingen liggen op een h.o.h. afstand van 200mm. Het stromende water is gemodelleerd als een warmtelek in het model; de warmte wordt door het stromende water afgevoerd.

14.2.2.3 baffles

Bij de baffles is er vanuit gegaan dat deze over de volle breedte worden toegepast en een hoogte hebben van 300mm en een h.o.h. afstand hebben van 300 mm. De baffles worden 200mm onder het plafond opgehangen.



afmetingen baffles



figuur 14.2

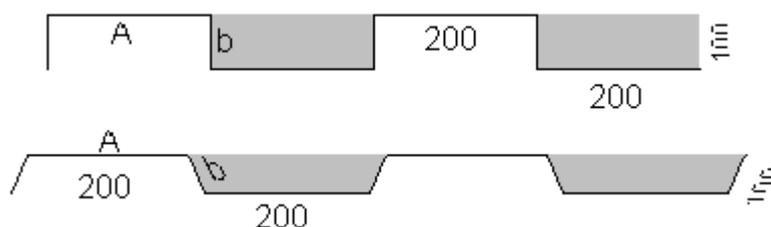
baffles in een hal

14.2.2.4 Gevouwen staalplaat



figuur 14.3 profiel van een gevouwen en geperforeerde staalplaat

De staalplaat is voor trisco gemodelleerd als een plaat die met rechte hoeken is gezet.



figuur 14.4 Trisco invoer en werkelijkheid



geperforeerde staalplaat

Bij de aanpassing van de vorm is gekozen om de buiten afmetingen gelijk te houden.

14.3 Berekening

Voor de berekening van het stralingsvermogen dienen de zichtfactoren en de oppervlakte temperatuur berekend te worden. In dit onderzoek is vooral van belang wat het effect is op aanpassingen van het basissituatie, waarin het hele plafond zichtbaar is.

14.3.1 Oppervlaktetemperaturen

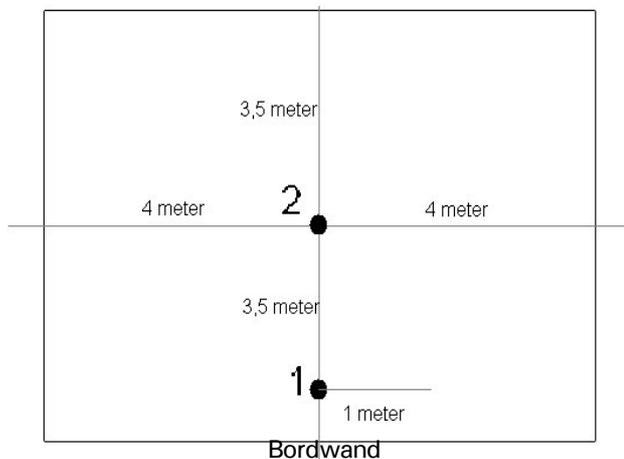
Bij de berekening van de oppervlakte temperaturen is het basissysteem vergeleken met twee andere systemen. Deze berekening is gedaan met Trisco. In Trisco zijn drie modellen ingevoerd en door gerekend.

14.3.2 Zichtfactoren

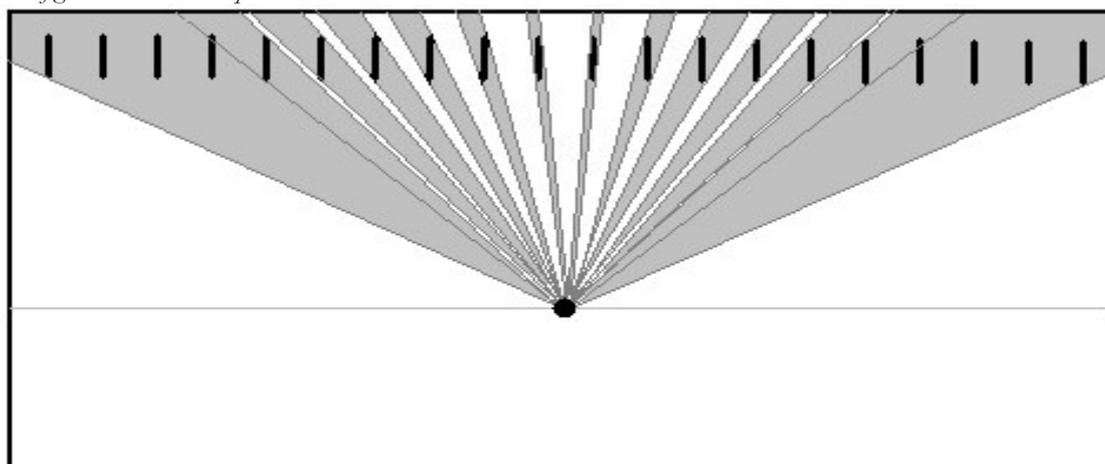
Aan de hand van de gegeven formules zijn voor de drie situaties de zichtfactoren berekend. Omdat de afmetingen van de vertrekken verschillen is gekozen om een excel

sheet op te zetten waar in snel de variabelen ingevoerd kunnen worden zodat verschillende situaties later nog eens vergeleken kunnen worden. In dit onderzoek zijn de resultaten toegespitst op één oplossing.

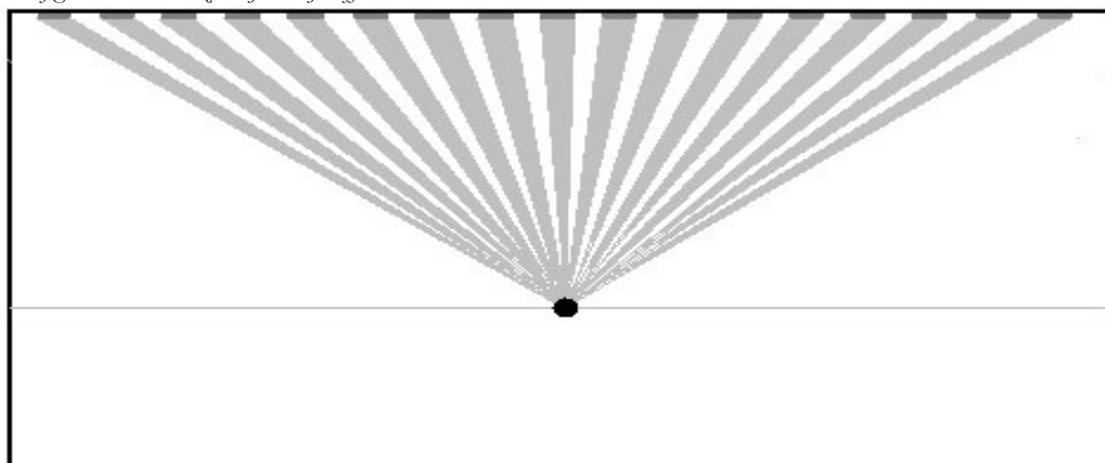
De zichtfactoren is op twee locaties in het lokaal berekend. Locatie 1 is de plek van de docent; in het midden voorin het lokaal 1 meter vanaf de bordwand. Locatie 2 is in het midden van het lokaal. Voor beide punten is een hoogte van 1,1 meter genomen.



figuur 14.6 meetpunten in het lokaal



figuur 14.7 zichtlijnen bij baffles



figuur 14.8 zichtlijnen bij een gevouwen staalplaat

14.4 Resultaten

14.4.1 Temperaturen

(zie bijlage -F-)

14.4.2 Zichtfactoren

(zie bijlage -F-)

14.5 Conclusie

Alles wat tussen het vertrek en het beton in komt heeft een negatief gevolg op het stralingsvermogen. Indien de elementen die tussen het beton en het vertrek een lagere temperatuur hebben dan de vertrektemperatuur zal dit een positief effect hebben op het uiteindelijke stralingsvermogen.

Beoordelend naar het straling is het vermogen van de geperforeerde staalplaat bijna twee maal zo groot als het voorbeeld met de baffles.

Maar het totale vermogen bestaat naast het stralingsvermogen ook nog uit een convectief vermogen.

Dus voor een goed vergelijk moet dit vermogen ook berekend worden.

Dit is beschreven in Hoofdstuk 3 van het literatuuronderzoek.

Als we van deze voorbeelden ook het convectieve vermogen uitrekenen kunnen we het totale vermogen berekenen en beoordelen.

	Basis	Baffles	Staalplaat
Straling [W/m ²]	14,9	6,4	11,4
Convectie [W/m ²]	2,3	2,3	1,6
Totaal [W/m ²]	17,2	8,7	13,0

tabel 14.1 Vermogens plafonds bij $\Delta T=3^{\circ}C$

Ook als het convectiedeel wordt meegenomen in de berekening is de uitvoering met Baffles minder aantrekkelijk dan met de geperforeerde en gevouwen staalplaat.

Akoestische gebruikt de gevouwen staalplaat de helft van het totale plafondoppervlak.

Het oppervlak van de baffles is gelijk aan het oppervlak van het plafond. Dus akoestisch gezien is er een hogere absorptie mogelijk met baffles dan met de gevouwen staalplaat.

Bij het convectieve deel is alleen uitgegaan van vrije convectie, maar zoals in de literatuur studie is beschreven in §3.1.3 is het convectieve vermogen bij gedwongen convectie veel groter. Bij een kosten overweging is het dan veel goedkoper om te kiezen voor baffles of plafond eilanden met de gedwongen convectie dan voor de gevouwen staalplaat; de kosten voor een geperforeerde staalplaat zijn al gauw €100,- per m².

15 Locatie absorptie

Voor een goed akoestisch comfort in een klaslokaal moet gestreefd worden naar een gemiddelde absorptiecoëfficiënt van 25%.

Door het vermijden van een volledige gesloten plafond is het noodzakelijk dat 1 of meerdere wanden van het lokaal worden gebruikt om het geluid te absorberen.

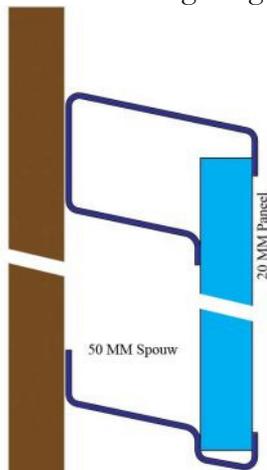
Wand absorptie is niet alleen noodzakelijk maar ook mogelijk. Wel is het goed om een aantal zaken mee te nemen bij het maken van absorberende wanden.

15.1 Wandabsorptie

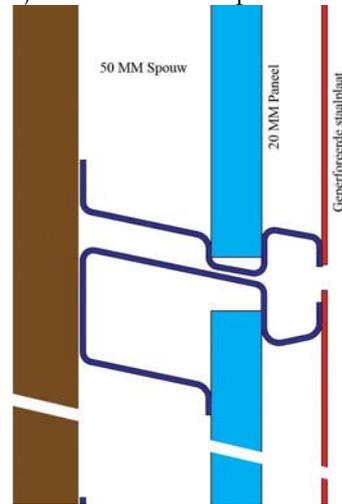
Akoestisch materiaal is meestal vrij kwetsbaar. Bescherming van het materiaal is noodzakelijk. Deze bescherming kan door middel van een hard en geperforeerde plaat. Door dat de wanden van een klaslokaal ook worden gebruikt om werkstukken en posters op te hangen mag deze functie niet verloren gaan als de wand voorzien is van absorberende panelen. Bij de keuzen van een stalen geperforeerde plaat ter bescherming van het absorptie materiaal is het mogelijk de plaat te gebruiken als magneetbord.

15.1.1 Bevestiging wandpanelen.

Het is van belang om te weten dat de spouw achter het paneel meewerkt aan de absorptiecoëfficiënt van het paneel. De panelen zijn dus minder effectief indien ze direct tegen de achterconstructie worden bevestigd. Dit is dan ook in de detaillering meegenomen. Om te voorkomen dat er te veel ruimte verlies optreedt is bij de detaillering voor een spouw van maximaal 50 mm gekozen. Voor de panelen is uitgegaan van bestaande plafond panelen die is een metalen frame aan de wand bevestigd kan worden. Door de vormgeving van het frame is het mogelijk de individuele panelen te verwisselen.



figuur 15.1 wandpaneel zonder bescherming



figuur 15.2 wandpaneel met bescherming

15.2 Plafond absorptie

Voor de invulling van het plafond zijn ook meerdere mogelijkheden mogelijk.

Niet alleen het gebruikte percentage van het plafond oppervlak kan variëren tussen de 0 en 100 % ook in de vormgeving is veel mogelijk.

De vormgeving is onder te verdelen in een viertal varianten.

Eiland, randen, stroken en baffles. Al deze varianten kunnen toegepast worden bij betonkernactivering. Bij alle varianten zijn er voor en nadelen.

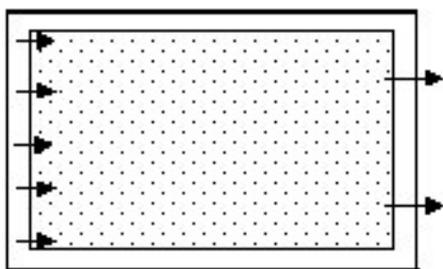
15.2.1 Eilanden

Voordelen,

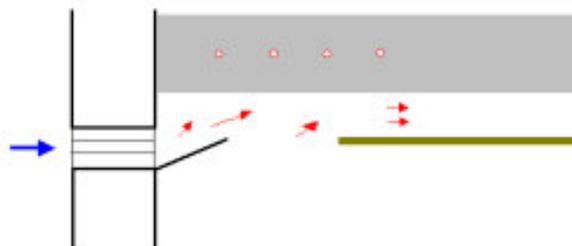
1. per vertrek kan voldaan worden met 1 eiland.
2. Bij een goede sturing van de ventilatie lucht wordt goed gebruik gemaakt van de convectie.
3. grote van het plafond kan oplopen tot 80%

Nadelen

1. Niet efficiënt gebruik van de BKA; het stralingsaandeel wordt voor een groot deel te niet gedaan. Alleen de vloer bijdrage is significant.
2. luchtstroom moet gestuurd worden om goed boven het verlaagde plafond te komen.
3. bij een groot eiland moet gezorgd worden dat de circulatie in het vertrek goed is. En de verse lucht niet direct weer wordt afgezogen.



figuur 15.3 plattegrond



figuur 15.4 richten van de ventilatiestroom

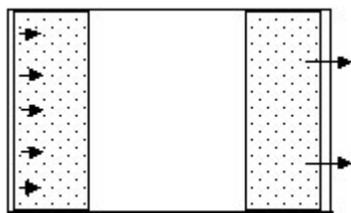
15.2.2 Randen

Voordelen

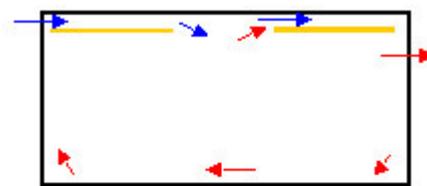
1. Door het gebruik van de randen blijft de zichtfactor het grootst. Voorbeeld 40% plafond oppervlak wordt gebruikt als verlaagd plafond. Indien die 40% als een eiland midden in het lokaal onder het plafond hangt blijft er van de totale zichtfactor op het plafond slechts 30% over (gemeten midden in het lokaal op 1 meter boven de grond). Indien de 40% als randen langs 2 of 4 wanden onder het plafond hangt blijft er ongeveer 80% van de totale zichtfactor op het plafond over.
2. De ventilatie kan gebeuren met natuurlijke aanvoer en mechanische afvoer. De buitenlucht komt boven het verlaagde plafond binnen en zal daar, in de winter situatie, verwarmt worden en dus een koude val voorkomen.
3. door de aanwezigheid van 2 randen zal de lucht in het lokaal beter circuleren.

Nadelen

1. De verlichtingsarmaturen kunnen niet allemaal in het plafond geïntegreerd worden. In het midden van het lokaal zullen de armaturen 'los' onder het plafond komen te hangen.
2. Om te voorkomen dat het 'gat' wat overblijft niet te klein wordt is het maximale plafond percentage ongeveer 50%



figuur 15.5 Plattegrond



figuur 15.6 Ventilatiestroom

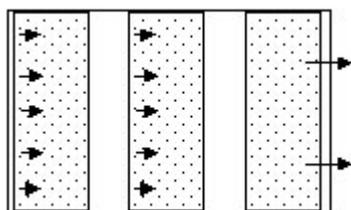
15.2.3 Stroken

Voordelen

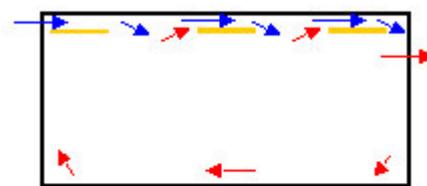
1. Door dat er een betere spreiding van het verlaagde plafond is is er een minder sterke afname van de zichtfactor.
2. Door de betere spreiding van het verlaagde plafond is een integratie van de verlichtingsarmaturen beter mogelijk.
3. Bij de keuze voor een vast stramien is mogelijkheid tot flexibele indeelbaarheid van de vertrekken
4. door de aanwezigheid van meerdere stroken zal de lucht in het lokaal beter circuleren.

Nadelen

1. Het is een duurere oplossing omdat er meer randen zijn en dus meer rand afwerking.
2. per lokaal moeten meerdere stroken worden bevestigd.



figuur 15.7 Plattegrond



figuur 15.8 Ventilatiestroom

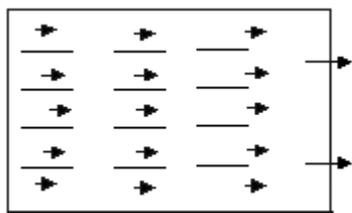
15.2.4 Baffles

Voordelen

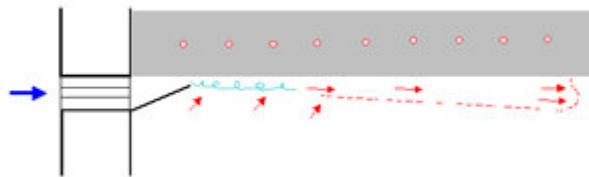
1. De zichtfactor neemt ook af, maar er blijft een groot deel over.
Voorbeeld. Bij een baffle hoogte van 300 mm en een onderlinge afstand van 300 mm is de zichtfactor 43%: qua effectief oppervlak zit je aan bijna 100%
Globaal is de zichtfactor met de volgende formule te berekenen:
 $0,1 * \text{'onderlinge afstand'} + (-0,055 * \text{hoogte} + 26) \pm 6\%$
2. Door een grote spreiding en een hoge dichtheid is de combinatie van baffles en verlichtingsarmaturen goed mogelijk.

Nadelen

1. Om het convectieve deel goed te benutten is een verre worp van de inkomen de lucht nodig. Door de afwezigheid van een verlaagd plafond moet de lucht zelf aan het plafond 'hangen'. Dit vraagt om een hoge inblaas snelheid.
2. baffles geven snel een industrieel beeld



figuur 15.9 plattegrond



figuur 15.10 Ventilatiestroom Worp

16 Conclusies en aanbevelingen

16.1 Conclusie

Om het akoestische comfort in een klaslokaal goed te krijgen is een gemiddelde absorptiecoëfficiënt nodig van 25%. Omdat in klaslokalen tot 100m²(10*10m) de afstand tussen bron(leerkracht) en ontvanger(leerlingen) niet heel erg groot is, is de locatie van het absorberende materiaal niet heel erg belangrijk. De aanwezigheid is belangrijker. Naast de algemeen gangbare oplossing om al het absorberende materiaal aan het plafond te bevestiging kan het netzo goed aan de wanden worden bevestigd.

Om het thermische comfort in een klaslokaal met betonkernactivering goed te krijgen is het van belang dat er zoveel mogelijk een direct contact is tussen het vertrek en de betonnen constructie. Deze voorwaarde is vooral van belang om de stralingscomponent van het systeem te benutten.

Voor de invulling van het plafond met een absorberend materiaal is theoretisch gezien alles mogelijk tussen de 0 en 100% van het plafond oppervlak en voor het akoestische comfort aangevuld met wandabsorptie. Thermisch gezien blijft het thermisch comfort goed tot een afname van 40% van het stralingsvermogen door afname van de zichtfactor op het plafond.

Indien de afname meer dan 40% is moet het vermogen vergroot worden. Dit kan gedaan worden door ΔT te vergroten.

Een tweede optie is het convectieve vermogen te vergroten, door de ventilatie lucht die voor de luchtverversing noodzakelijk is langs het plafond te sturen en zo zorgt voor een gedwongen convectie.

In goed overleg met een installatieadviseur zijn vele plafondvarianten mogelijk. De ontwerper behoudt nog vele vrijheden.

16.2 Aanbevelingen.

Akoestisch zijn de randvoorwaarden duidelijk. Met die randvoorwaarden moet er thermisch nog verder naar gekeken worden.

Thermische gezien is een gesloten plafond niet mogelijk. Maar wat is het maximale mogelijke plafond waarbij het thermische comfort nog steeds goed is.

Wat is dus het maximale convectieve vermogen wat BKA kan leveren?

Absorptiecoëfficiënten van plafond panelen wordt altijd opgegeven met een plenum hoogte. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat het plenum afgesloten is. Bij plafond eilanden is het plenum open. Wat is hiervan het gevolg voor de absorptiecoëfficiënt van het materiaal.

17 Ontwerphulpmiddel

17.1 Aanleiding

Uit het afstudeeronderzoek is naar voren gekomen dat een goed akoestisch comfort in combinatie met betonkernactivering op verschillende manier te realiseren is. Maar uit de casestudy bleek dat het in de praktijk het akoestische comfort nog al eens tegen valt. Hierom is contact gezocht met een drietal architectenbureaus om met hen in gesprek te gaan over klaslokalen met betonkernactivering en het akoestische comfort. Uit deze gesprekken kwam naar voren dat doordat betonkernactivering een tamelijk nieuw systeem is de architectenbureaus er nog weinig ervaring mee hebben en dus niet weten wat de mogelijkheden zijn. Een tweede aspect is dat een akoestisch adviseur pas laat in het ontwerptraject aanbod komt. Deels door de beperkte budgetten voor scholenbouw. Door gebrek aan akoestische kennis van de architect val hier dus ook een gat. Er bestaat wel een behoefte naar een ontwerphulpmiddel met betrekking tot het akoestische comfort in klaslokalen met betonkernactivering.

17.2 Inleiding

Het ontwerphulpmiddel bestaat uit twee delen. Het eerste deel bestaat uit een rekenprogramma, die op een eenvoudige manier oppervlakte geeft van de benodigde absorberende materialen en een uitvoer waarin het eindresultaat beoordeeld kan worden op een aantal akoestische parameters. Het tweede deel is een informatie-site waarop wat basis kennis met betrekking tot betonkernactivering en ruimte-akoestiek is te vinden. Tevens worden van verschillende oplossingsvarianten de voor en nadelen gegeven.

17.3 Rekensheet

Met de rekensheet kan met een minimale invoer een optimaal resultaat verkregen worden. De invoer is bewust eenvoudig gehouden zodat een leek op het gebied van akoestiek er ook me uit de voeten kan.

De rekensheet is globaal in drie delen op te splitsen: Invoer; aanpassingen en uitvoer.

Door stapsgewijs het proces door te lopen is er altijd een oplossing te vinden.

In bijlage -G- zijn de verschillende in- en uitvoer bladen afgedrukt.

17.3.1 Invoer - VO

Omdat in het voorlopige ontwerp nog vele oplossingen mogelijk zijn, is er voor gekozen om de rekensheet in die fase al in te kunnen zetten. In deze fase wordt gebruik gemaakt van de eenvoudige invoer. De keuze van materialen is geminimaliseerd tot: beton, baksteen en lichte bouw. Tevens zijn de vertrek afmetingen van belang voor het berekenen van de nagalmtijd en absorptiecoëfficiënt.

17.3.2 Invoer-aanpassingen

In de eenvoudige invoer is er nog weinig geluidabsorptie. De nagalmtijd zal nog te lang zijn. Voor de aanpassingen is het noodzakelijk dat er een percentage van het plafond oppervlak gereserveerd wordt voor het akoestische plafond. Dit percentage geldt als randvoorwaarde bij de mogelijke oplossingen.

17.3.3 Aanpassingen.

Aan de hand van de vertrek invoer en de randvoorwaarden voor de aanpassingen worden de aanpassingen in twee delen weergegeven. Het eerste deel is het oppervlak van het akoestische plafond. Omdat er meerdere varianten mogelijk zijn om dit akoestische plafond te verdelen worden er 11 varianten gegeven met de afmetingen. Het tweede deel is het oppervlak dat aanvullend op de wanden bevestigd moet worden om het akoestische comfort goed te krijgen.

17.3.4 Invoer – DO

De tweede manier van invoer is gericht op de controle van het DO. Bij deze invoer is het mogelijk meer dan 6 vlakken te definiëren. Bij deze invoer dienen de gekozen akoestische voorzieningen ook ingevoerd te worden. Omdat het een controle middel is, worden er geen aanpassingsvoorstellen gegeven.

17.3.5 Uitvoer

Deze uitvoer bestaat uit drie grafieken en een plattegrond met 6 meetpunten. In de grafiek met de nagalmtijd wordt de nagalmtijd van het vertrek weergegeven. Tevens is in de grafiek de streefwaarden van 0,6-0,8 s. aangegeven. In de grafiek absorptiecoëfficiënt worden de absorptiecoëfficiënten weergegeven. Tevens is in de grafiek de streefwaarde van 20-30% weergegeven. In de laatste grafiek wordt het ruisniveau en het signaalniveau weergegeven. Hierbij is het van belang dat het signaalniveau 12 dB boven het ruisniveau blijft. Dit is in de grafiek ook aangegeven door middel van een gekleurde balk. De onderkant is het ruisniveau en de bovenkant is het ruisniveau + 12 dB.

17.4 Informatie-site

Op de informatie-site worden verschillende aspecten uitgelegd, zoals wat basis informatie over betonkernactivering en akoestiek, een kort handleiding voor de rekensheet en wat voorbeelddetails voor de bevestiging van wandpanelen. Op de site staat ook de rekensheet. Vanuit de rekensheet is het mogelijk om direct door gelinkt te worden naar de site mbt de keuze van de akoestische materialen.

17.4.1 Betonkernactivering

Onder deze kop wordt een korte samenvatting gegeven wat betonkernactivering is en hoe het werkt

17.4.2 Akoestiek

Over akoestiek wordt eerst wat theoretische feiten gegeven met betrekking tot een aantal objectieve rekenmethodes. Voor deze objectieve rekenmethodes worden de richtlijnen gegeven voor een goede spraakverstaanbaarheid in een klaslokaal. Voor de oplossingen met betrekking tot het akoestische comfort zijn worden twee mogelijkheden uit gewerkt; absorptie in het plafondvlak en absorptie in het wandvlak. Voor het plafond zijn meerdere varianten mogelijk hiervoor worden de voor en nadelen gegeven. Voor wandabsorptie worden naast een aantal aanbevelingen ook bevestigingsmethoden gegeven.

17.4.3 Rekensheet

Op de site komt ook de handleiding voor de rekensheet. Hierin wordt in 4 tot 6 stappen uitgelegd hoer de rekensheet werkt en hoe met de uitvoer omgegaan moet worden. Van uit de rekensheet is het mogelijk bij de keuze van een akoestische materiaal naar de site door-gelinkt te worden. Op de site staat onderverdeeld naar fabrikant extra informatie over de opbouw van het akoestische paneel. Dit biedt tevens de mogelijkheid om verschillende akoestische panelen te bekijken.

18 Literatuurlijst

Notatie voetnoten

18.1 Boeken en normen

-
- o.l.v. prof.ir. A.C. Verhoeven
BOUWFYSISCHE TABELLARIUM
Faculteit der Civiele techniek
BOUWFYSISCHE TABELLARIUM
- Vakgroep Bouwfysica
Bouwfysica 1
Delft University Press, 1997
BOUWFYSICA1
- Vakgroep Bouwfysica
Bouwfysica; deel 2 Akoestiek/licht
Faculteit der Civiele techniek
BOUWFYSICA2
- L. Nijs
Dubbeldiktaat; 1 Eengetalsaanduidingen bij de geluidwering van gevels, 2 VABI-computerprogramma voor de berekening van de geluidisolatie van gevels
TU Delft juli 2000
NIJS, DUBBELDIKTAAT, 2000
- prof.ir. J.J.M. Cauberg
Kennisbank Bouwfysica; Zaalakoestiek
Dictaat ct4220 Bouwfysica II
TU-Delft Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
CAUBERK, KB ZAALAKOESTIEK
- Bouwfysische kwaliteit Rijkshuisvesting
Wettelijke eisen en Rgd-richtlijnen
H7 Akoestisch comfort
september 1999
RGD-RICHTLIJNEN
- NEN 5077 - *Geluidwering in gebouwen – Bepalingsmethoden voor de grootbeden voor luchtgeluidisolatie, contactgeluidisolatie, geluidwering van scheidingsconstructies en geluidniveaus veroorzaakt door installaties*
NEN 5077
- NEN 12354-1 – *Geluidwering in gebouwen – Berekening van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen - Deel 1: luchtgeluidisolatie tussen ruimten*
NEN 12354-1
- NEN 12354-2 – *Geluidwering in gebouwen – Berekening van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen - Deel 2: Contactgeluidisolatie tussen ruimten*
NEN 12354-2
- NEN 12354-6 – *Geluidwering in gebouwen – Berekening van de akoestische eigenschappen van gebouwen met de eigenschappen van de bouwelementen - Deel 6: Geluidabsorptie in gesloten ruimten*
NEN 12354-6
- Building Bulletin 93
Acoustic design of school
Architects and building branch
<http://www.teachernet.gov.uk/management/resourcesfinanceandbuilding/schoolbuildings/designguidance/sbenvironmentalhs/acoustics/>
BB93
- CATT-Acoustic v8.0
Room Acoustics prediction and desktop auralisation
User's manual
www.catt.se
CATT-ACOUSTIC
- Handboek TBA (Thermische Betonkern Activering)*
WTH Vloerverwarming (www.wth.nl)
HANDBOEK TBA
- P.O. Fanger, McGraw Hill
Thermal Comfort
FANGER, MCGRAW, THERMAL COMFORT
-

New York, 1972

D. McIntyre

Indoor Climate

Applied Science Publishers – Ltd., 1980

MCINTYRE, INDOOR
CLIMATE

Irvine Richards

Acoustics and noise control handbook for architects and builders

Krieger publishing, Malabar (Florida), 1998.

IRVINE RICHARD,
HANDBOOK, 1998

V.O. Knudsen C.M. Harris

Acoustical Design in Architecture,

John Wiley & Sons, 1978.

KNUDSEN HARRIS
ACOUSTICAL DESIGN,
1978

j.m.m. Smith E. Stammers

Fysische Transportverschijnselen I

Delftsche uitgevers maatschappij, 1973

SMITH STAMMERS,
1973

18.2 College sheets

L. Nijs

Luchtgeluidisolatie; Master1 BT

TU Delft Bouwkunde 2002

NIJS,
LUCHTGELUID
ISOLATIE

L. Nijs

Inleiding Ruimteakoestiek: Bsc6 BT

TU Delft Bouwkunde 2002

NIJS,
RUIMTEAKOESTIEK

Electroacoustic System Design

School of Acoustics and Electronic Engineering

University Of Salford

ELECTROACOUSTIC
SYSTEM DESIGN

18.3 Onderzoeksrapporten

J. van den Bergh, D. Wuyts

Spraakverstaanbaarheid in klaslokalen

KULeuven 2002

VAN DEN BERGH
WUYTS,
KULEUVEN, 2002

R. Boonekamp

Beoordelingsinstrument "auralisatie"; onderzoek naar de mogelijkheden van auralisatie als beoordelingsinstrument voor de ruimteakoestiek

Verslaglegging P2

TU Delft Bouwkunde 2005

BOONEKAMP,
TUDELFT, 2005

P van den Engel

Healthy climate in schools due to ventilation and slab heating

Deerns raadgevende ingenieurs

April 2005

VAN DEN ENGEL,
DEERNS, 2005

ing. M. van der Steeg

Geluidbinder in laboratoria beoordeeld met de NVN 3438 norm

VU Amsterdam, 1999

VAN DER STEEG, VU
AMSTERDAM, 1999

18.4 Publicaties

18.4.1 *American Journal of Audiology*

H.A. Knecht; P.B. Nelson; G.M. Whitelaw; L.L. Feth

KNECHT NELSON

Background Noise Levels and Reverberation Times in Unoccupied Classrooms: Predictions and Measurements
American Journal of Audiology, vol. 11, No. 2, 65-71, 2002

WHITEHEAD, FETH,
AJA, 2002

Wayne O. Olsen

Average Speech Levels and Spectra in Various Speaking/Listening Conditions: A Summary of the Pearson, Benett & Fidell (1977) Report

OLSEN, AJA, 1998

American Journal of Audiology, vol. 17, No. 2, 21-25, 1998

18.4.2 Applied Acoustics

E. Sala, V. Viljanen

Improvement of acoustic conditions for speech communication in classrooms

SALA Viljanen 1995

Applied Acoustics, vol. 45, 81-91, 1995

C. Díaz, C. Velazquez

A live evaluation of the RASTI-Method

DIÁZ VELÁZQUEZ,
AA, 1995

Applied Acoustics, vol. 46, 363-372, 1995

J. Nannariello, M. Hodgson, F.R. Fricke

Neural network predictions of speech levels in university classrooms

NANNARIELLO
HODGSON FRICKE,
AA, 2001

Applied Acoustics, vol. 62, 749-767, 2001

M. Hodgson

Case-study evaluations of the acoustical design of renovated university classrooms

HODGSON, AA, 2004

Applied Acoustics, vol. 65, No.1, 69-89, 2004

J. Ducourneau, V. Planeau

The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption

DUCOURNEAU
PLANEAU, AA, 2003

Applied Acoustics, vol. 64, 845-862, 2003

18.4.3 The Journal of the Acoustical Society of America

S.J. van Wijngaarden and T. Houtgast

Effect of talker and speaking style on the Speech Transmission Index (L)

VAN WIJNGAARDEN
HOUTGAST, AA, 2004

J. Acoust. Soc. Am., vol. 115, No 1, 38-41, 2004

B. Shield, J.E. Dockrell

External and internal noise surveys of London primary schools

SHIELD DOCKRELL,
JASA, 115, 2004

J. Acoust. Soc. Am. Vol. 115, No. 5, 730-738, 2004

J.E. Summers, R.R. Torres, Y. Shimizu

Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics

SUMMERS TORRES
SHIMIZU,
JASA, 116, 2004

J. Acoust. Soc. Am., vol. 116, No. 2, 958-969, 2004

J. S. Bradley S. R. Bistafa

Relating speech intelligibility to useful-to-detrimental sound ratios (L)

BRADLEY BISTAFÁ,
JASA, 112, 2002

J. Acoust. Soc. Am., vol. 112, No. 1, 27-29, 2002

M. Hodgson

Rating, ranking, and understanding acoustical quality in university classrooms

HODGSON,
JASA, 112, 2002

J. Acoust. Soc. Am., vol. 112, No. 2, 568-575, 2002

M. Hodgson, E-M Nosal

Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms

HODGSON NOSAL,
JASA, 112, 2002

J. Acoust. Soc. Am., vol. 112, No. 2, 931-939, 2002

S.R. Bistafa, J.S. Bradley

Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption

BISTAFÁ BRADLEY,
JASA, 109, 2001

J. Acoust. Soc. Am., vol. 109, No. 4, 1474-1482, 2001

- S.R. Bistafa, J.S. Bradley
Reverberation time and maximum background noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics
 J. Acoust. Soc. Am., vol. 107, No. 2, 861-875, 2000
 BISTAFA BRADLY, JASA, 107, 2000
- S.R. Bistafa, J.S. Bradley
Predicting reverberation times in a simulated classroom
 J. Acoust. Soc. Am., vol. 108, No. 4, 1721-1731, 2000
 BISTAFA BRADLY, JASA, 108, 2000
- Hodgson, Murray;
 Investigation of the acoustical characteristics of university classrooms
 J. Acoust. Soc. Am., vol. 106, No. 4, pp. 1810-1819, 1999
 HODGSON MURRAY, JASA, 106, 1999
- M. Hodgson, R. Rempel, S. Kennedy
Measurement and prediction of typical speech and background noise levels in university classrooms during lectures
 J. Acoust. Soc. Am., vol. 105, No. 1, 226-233, 1999
 HODGSON REMPEL, KENNEDY, JASA, 105, 1999
- A.K. Nabelek and P.K. Robinson.
Monaural and binaural speech perception in reverberation for listeners of various ages.
 J. Acoust. Soc. Am., vol. 71, No. 5, 1242--1248, 1982
 NABELEK ROBINSON, JASA, 71 1982
- J. S. Bradley
Speech intelligibility studies in classrooms
 J. Acoust. Soc. Am, vol. 80, Issue 3, 846-854, 1986
 BRADLEY, JASA, 1986
- Classroom Acoustics
This publication was prepared for the Technical Committee on Architectural Acoustics of the
 Acoust. Soc. Am., 2000
 CLASSROOM ACOUSTICS, JASA, 2000

18.4.4 TVVL magazine

- N.R. Bootsveld en M.B.A. van der Hoff
Individueel comfort met lokale warmtepompen
 TVVL magazine, No. 3, 11-17, 2005
 BOOTSVELD VAN DER HOFF, TVVL, 2005
- Dr ir C.J. Wisse
Comfort en regelbaarheid van betonkernactivering
 TVVL magazine, No. 9, 32-36, 2004
 WISSE, TVVL, 2004
- W. Maassen, A. Wijsman, W. Plokker
Betonkernactivering in VA114 gebouwsimulatie
 TVVL magazine, No. 9, 38-41, 2004
 MAASSEN WIJSMAN PLOKKER, TVVL, 2004
- dr b. Yu, ir J.P. Ruchti, prof.ir. P.G. Luscuer
Dynamische simulatie schoollokaal met betonkernactivering
 TVVL magazine, No. 9, 52-58, 2004
 YU RUCHTI LUSCUERE, TVVL 2004

18.4.5 Verwarming & Ventilatie

- G.J Afink
Energieverlies in uittapleidingen voor warm water
 Verwarming & Ventilatie, november, 855-859, 2002
 AFINK, V&V, 2002
- W.F.G. Hooijkaas
Betonkernactivering, innovatief en energiebesparend
 V&V, januari, 25-29, 2002
 HOOIJKAAS, V&V, 2002
- R.A.M. De Schrevel
Betonkernactivering, een nieuwe manier van gebouwklimatisering
 V&V, 2002
 DE SCHREVEL, V&V, 2002

V&V, juli/augustus, 579-585, 2002

18.4.6 tijdschriften overig

- Prof.ir. J.J.M. Cauberg
Ruimte-akoestiek bij vloerkoeling in kantoren CAUBERG, BW, 2003
Bouwwereld, No. 1, 42-44, 2003
- I. ter Borch
Slimme jongens die Romeinen: 1 + 1 = 3 BORCH, CEMENT, 2002
Cement, No. 7 74-77, 2002
- L. Nijs, G. Vermeir
Akoestische kwaliteit in klaslokalen in België en Nederland: Enkele eisen en aanbevelingen voor bouwkundig ontwerp NIJS VERMEIR, BF, 2004
Bouwfysica, vol. 17, No. 4, 13-22, 2004
- R. Neubauer, B. Kostek
Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Sound Absorption NEUBAUER KOSTEK, AofA, 2001
Archives of Acoustics, vol. 26, No. 3, 183-201, 2001.
- R. Reich, J. Bradley
Optimizing Classroom Acoustics Using Computer Model REICH BRADLEY, CA/AC, 1998
Canadian Acoustics/Acoustique Canadienne, vol. 26 No. 4, 15-22, 1998
- J. Keränen, P. Larm, V. Hongisto
Simple application of sti-method in predicting speech transmission in classrooms KERANEN LARM HONGISTO, JB-NAM 2004
Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004, 8-10 June 2004, Mariehamn, Åland
- Angelo Farina, Patrizio Fausti
misure dell'isolamento al rumore aereo, del rumore di calpestio e del tempo di riverberazione FARINA FAUSTI, EeA 1998
atti del convegno Edilizia e Ambiente, Trento, 18-20 febbraio 1998.
- T. Finitzo-Hieber and T. Tillman.
Room Acoustics Effects on Monosyllabic Word Discrimination Ability for Normal and Hearing- Impaired Children FINITZO HIEBER, JSHR 1978
Journal of Speech and Hearing Research vol.21, 440-458, 1978
- Houtgast T, Steeneken HJM, Plomp R,
Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function, I. General room acoustics, HOUTGAST STEENEKEN PLOMP ACUSTICA 1980
Acustica 46, 60-72, 1980
- C.C. Crandell, J.J. Smaldino
Classroom acoustics for children with normal hearing and with hearing impairment LSHSS
Language, speech and hearing services in schools, vol. 31, 362-370, 2000

18.4.7 overig

- Berlo D. van (eds.);
Akoestische aanpassingen in zorginstellingen voor mensen met een verstandelijke handicap en slechthorendheid. BERLO 2000
TU-Delft, Delft, 2000.
- Philips Communication & Security Systems
Sound System Reference Manual SOUND SYSTEM REFERENCE MANUAL
Breda The Netherlands, 1998
- Thermo – Actieve – Bouwdeel – Systeem (TABS)* WELVY
Warmtetechniek Welvy
- C.A. Nierop, et al.
Begrippenlijst Geluidstechniek (herzien) NIEROP, VOG, 1997

- Uitgave Vereniging van fabrikanten en ontwerpers van producten en installaties (VOG), Gorinchem (NL), (1997)
- Ad Vreeswijk
Hogere Cursus Bouwakoestiek, Meetmethoden & Procedures Pag.
PHTO-Amsterdam, 1997
VREESWIJK,
PHTO, 1997
- Geluid in een afgesloten ruimte*
INTEC, Universiteit Gent
INTEC, UNI GENT
- Isover en geluid; Theorie en praktijk over geluidsisolatie en geluidabsorptie*
Isover Benelux
ISOVER
- Johan van der Werff
What You Specify Is What You Get – 1; Predicting intelligibility with the Peutz'71 algorithms and its successors
VAN DER WERF,
PEUTZ'71
- Johan van der Werff
What You Specify Is What You Get – 2; Predicting ALcons based on early / late ratio using the Peutz'88 algorithms
VAN DER WERF,
PEUTZ'88
- B.W. Olesen E Michel F Bonnefoi M. de Carli
Heat exchange coefficient between floor surface and space by floor cooling – Theory or a question of definition
ASHRAE transactions symposium, Dallas, 684-694, 2000
OLESEN MICHL,
BONNEFOI DE CARLI,
ASHRAE, 2000
- E. Hulsebos en L. Nijs
Impulse Response measurements in a room – A brief introduction and manual to using the MATLAB-based impulse response measurement system;
versie Lau-Manuel_45.doc - April 2003
HULSEBOS2003
- L. Nijs
The calculation of acoustical parameters from measured impulse responses – manual plus software description of the program Mlaus.
september 2003
NIJS2003

18.5 Internetbronnen

- http://www.phy.duke.edu/~dtl/36hj_eqn.html
http://213.132.211.216/referentieprojecten_detail.php?id=11 (www.nathan.nl)
http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/12851/---/l=1
http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/5383/---/l=1
http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/4427/---/l=1
<http://www.kuleuven.ac.be/bwf/onderwijs/geluidisolatie/default.htm>
<http://www.kuleuven.be/bwf/projects/klaslokalen/index.htm>
http://www.sonus.nl/dutch/begrippen/lijsta_e.html
<http://www.peutz.nl/alcons/>
http://www.kemt.fei.tuke.sk/Predmety/KEMT320_EA/_web/Online_Course_on_Acoustics/index_acoustics.html
<http://www.mcsquared.com/speech.htm>
<http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/index.html>
<http://www.audiologieboek.nl/>
<http://www.acour.com/baffles/>
<http://adapto.oticon.es/eprOtiScripts/Files/encyclopedia/dir.asp?selectedletter=a&selectedlanguage=12>
<http://www.lhgkanalflakt.fi/pdf/theory.pdf>

19 Bijlagen