



BOUWFYSICA

Kwartaalblad van de
Nederlands Vlaamse Bouwfysica Vereniging



In dit nummer:

- Akoestische studie naar de historische buitenlocatie van het parlement in IJsland
- Akoestische kwaliteit in klaslokalen in België en Nederland
- Thermische breuk: zonwerend glas onder spanning?
- EPN niet in lijn met Europese normen

AKOESTISCHE KWALITEIT IN KLASLOKALEN IN BELGIË EN NEDERLAND



ENKELE AANBEVELINGEN VOOR HET BOUWKUNDIG ONTWERP

Lau Nijs, TU Delft, faculteit Bouwkunde, sector Bouwfysica
Gerrit Vermeir, Laboratorium Akoestiek en thermische
Fysica te Leuven

In een klaslokaal gaat het essentieel om goede verbale communicatie. Een klas met een 'goede akoestiek' maakt het voor de leraar of lerares makkelijker om zich voor alle leerlingen goed verstaanbaar te maken. Hij of zij hoeft dan minder stemspanning leveren, het is makkelijker om iedereen bij de les te houden en ook leerlingen met een gehoorprobleem komen minder snel in de moeilijkheden.

De vraag is nu wat met een goede akoestiek juist bedoeld wordt. Het is voor iedereen wel duidelijk dat de leeromgeving beter niet te galmend is en dat storend geluid van verkeer of installaties zal moeten vermeden worden. Maar kan men ook niet overdrijven, en de klasruimten te 'dood' maken? De spraakverstaanbaarheid wordt bepaald door een subtiel samenspel van geluidgolven. De toehoorder hoort eerst de geluidsgolf die rechtstreeks van de spreker komt, dan hoort hij de eerste weerkaatste golven en uiteindelijk hoort hij de 'statistische' nagalm. Maar mogelijk speelt ook het eigen achtergrondgeluid van de groep leerlingen een rol en desgevallend ook lawaai uit de omgeving of het installatielawaai. In deze tekst willen wij die samenhang analyseren om zo tot goed onderbouwde ontwerprichtlijnen te komen.

THEORIE

De nagalmtijd

In een voorgaand artikel is de spraakverstaanbaarheid in een gymzaal, sportzaal of sporthal besproken (Nijs & Schuur, 2004). Essentieel voor de spraakverstaanbaarheid wordt daar de verhouding genoemd tussen "vroeg geluid" en "laat geluid". Onder vroeg geluid verstaan we het geluid dat van de spreker naar de toehoorder (via reflecties tegen de wanden) een looptijd aflegt die korter is dan globaal 0,05 s (50 ms). Dat geluid is gunstig voor de spraakverstaanbaarheid; laat geluid (na 50 ms) is ongunstig.

Een looptijd van 50 ms komt overeen met een loopweg van ongeveer 17 m en daaruit kan worden afgeleid dat een sporthal essentieel anders is dan een klaslokaal: in een sporthal arriveren vrijwel alle reflecties zo laat dat er nauwelijks vroege reflecties zijn en is de bijdrage van het directe geluid essentieel. De akoestiek in een klaslokaal daarentegen staat of valt met een goede verhouding tussen vroege en late reflecties. Het directe geluid speelt een belangrijke rol op 1 m van de leerkracht, maar reeds bij een afstand van 2 m bereikt het grootste deel van de geluidenergie van een leerling via reflecties.

Om de akoestische kwaliteit van een klaslokaal te karakteriseren wordt meestal gebruik gemaakt van de nagalmtijd T [s]. Deze is benaderend te bepalen met Sabines formule :

$$T = \frac{0.161 V}{A} \quad (1)$$

Hierbij is V [m³] het volume van de ruimte en A [m²] de totale hoeveelheid geluidabsorptie in de ruimte. De oppervlaktegewogen gemiddelde absorptiecoëfficiënt $\bar{\alpha}$ over de gehele ruimte wordt gegeven door:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S_{tot}} \quad (2)$$

S_i en α_i geven het oppervlak en de geluidabsorptiecoëfficiënt van elke lokaalwand, S_{tot} is het totale oppervlak van alle lokaalwanden samen. Meubilair en aanwezige personen vergroten de hoeveelheid absorberend oppervlak en verlagen daarom de nagalmtijd.

Meestal wordt aangenomen dat een kortere nagalmtijd leidt tot een betere spraakverstaanbaarheid, maar er zijn twee redenen om voorzichtig te zijn:

1. De gewenste nagalmtijd is afhankelijk van het volume van de ruimte. Bij de sportaccommodaties uit het voorgaande artikel was de variatie in volumes buitengewoon groot. Echter, we zullen in het huidige artikel aannemen dat alle lokalen een volume hebben in de orde van 150 tot 200 m³ en dan behoeft met dit aspect geen rekening te worden gehouden.
2. De nagalmtijd kan ook te kort zijn. In situaties met zeer hoge absorptie (op de heide bijvoorbeeld) is de spraakverstaanbaarheid bij één toespreker op korte afstand voortreffelijk. Bij meerdere toehoorders zijn er grote onderlinge verschillen als de afstanden verschillend zijn of als luisteraars zich zowel aan de voor- als aan de achterkant van de spreker bevinden. In die omstandigheden is er een gebrek aan reflecties dat duidelijk nadelig blijkt.

Het eerste punt wordt hier verder niet behandeld; het tweede punt komt uitgebreid aan de orde.

C50 en U50

In een ruimte wordt het geluiddrukkniveau beschreven als:

$$L_{\text{total}} = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{A} \right)$$

Hierin is L_W het akoestisch vermogenniveau van de bron. De afstand tussen bron en ontvanger wordt gerepresenteerd

door r . De grootheid Q staat voor de richtingsfactor van de bron. Bij een mens wordt hier meestal $Q = 2,5$ ingevuld indien we recht voor de mond meten; aan de achterkant van het hoofd zijn de waarden van Q kleiner dan 1. De grootheid Q is afhankelijk van de frequentie, maar daar is in de literatuur merkwaardig weinig over te vinden. De eerste term binnen de haken van formule (3) betreft de energie die de toehoorder rechtstreeks bereikt; de tweede staat voor de energie van alle reflecties.

Heeft men te maken met het uitklinken van de geluidenergie volgens een ideale e -macht (en dus het geluidrukniveau volgens een rechte lijn) dan kunnen we de formule splitsen in twee delen voor de respectievelijke sterkte van het vroege en het late geluid. Indien de grens wordt genomen op 0,05 s voor spraak vinden we:

$$L_{\text{vroege}} = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{A} \times (1 - e^{-0,05/\tau}) \right) \quad (4)$$

$$L_{\text{laat}} = L_W + 10 \log \left(\frac{4(1-\bar{\alpha})}{A} e^{-0,05/\tau} \right) \quad (5)$$

$\tau = T/13,8$ is de tijdconstante bij een ideale exponentiële uitklinkcurve met nagalmtijd T .

De grootheid C_{50} is nu niets anders dan het verschil tussen beide waarden:

$$C_{50} = L_{\text{vroege}} - L_{\text{laat}} \quad (6a)$$

waarbij dus het bronvermogen eruit valt.

Bij grotere afstanden tussen bron en ontvanger (en in een klaslokaal is dat meestal al op 2 à 3 m) valt de eerst term binnen de vergelijkingen (3) en (4) weg. We bevinden ons dan in het “diffuse veld”. Als dan $T = 1$ s wordt ingevuld, komt C_{50} vrijwel op 0 dB uit.

De grootheid C_{50} geeft de spraakverstaanbaarheid waarbij uitsluitend de galm van de spreker zelf als storend ervaren wordt. In veel gevallen is er in een ruimte ook “ruis”, bijvoorbeeld ten gevolge van geluid van buiten, van ventilatiegeluid of van stoorgeluid dat door de toehoorders zelf wordt geproduceerd. Deze ruis, met sterkte L_{ruis} , kan aan L_{laat} worden toegevoegd door middel van logaritmische somming (aangeduid met het symbool \oplus), waarna de spraakverstaanbaarheid weer op een overeenkomstige manier wordt berekend. Het is gebruikelijk om dan een ander symbool te definiëren:

$$U_{50} = L_{\text{vroege}} - (L_{\text{laat}} \oplus L_{\text{ruis}}) \quad (6b)$$

Het is interessant om te zien dat stemverheffing niet helpt om C_{50} te vergroten, want L_W uit de formules (4) en (5) wordt geëlimineerd in formule (6a). U_{50} wordt wel vergroot door stemverheffing; de spreker tracht dan boven het omgevingslawaai uit te komen.

De speech transmission index, TI , STI en STI -in-ruis

De verhouding tussen nuttige en latere geluidenergie (met toevoeging van ruis) zou dus de spraakverstaanbaarheid

bepalen. Nochtans kan men vermoeden dat spectrale effecten en specifieke reflecties (echo's) moeten meespelen.

Aldus is er in de zeventiger jaren een meer omvattend concept ontwikkeld (Houtgast en Steeneken, 1980). Men gaat er daarbij van uit dat spraakverstaanbaarheid in hoofdzaak een zaak is van modulatieoverdracht. Hiermee is bedoeld dat de variaties in sterkte die gepaard gaan met spraak op een voldoende wijze wordt overgebracht. Inderdaad, in aanwezigheid van sterke galm of van achtergrondlawaai wordt de amplitudovariatie onderdrukt. Het zou dus volstaan om deze kwaliteit te meten en vertrekkend daarvan een index tussen 0 en 1 af te leiden.

Dit is precies wat men voor de bepaling van de speech transmission index (STI) doet. Voor verschillende frequentiebanden van de spraak en voor verschillende modulatie ritmes wordt de modulatietransferfunctie bepaald.

De meting en/of berekening van de overdracht geschiedt in octaafbanden. Het is gebruikelijk om de overdracht in één octaafband TI te noemen. Voor een spreekzaal zijn de banden 125 tot 8000 Hz maatgevend en uit deze 7 waarden wordt één getal berekend (STI genaamd) via een gewogen somming. De weegfactoren worden bepaald door het belang van de desbetreffende band voor de spraak. In echte spraak is de octaafband van 2000 Hz het belangrijkste. TI_{2000} telt daarom mee voor 31 % resp. 33% voor mannen of vrouwen. TI_{125} telt bij mannen mee voor 8%; bij de spraak van vrouwen doet 125 Hz zelfs helemaal niet mee.

Vijfentwintig jaar geleden was de meting van STI geen sinecure. Daarom is toentertijd een vereenvoudigde meetmethode ontworpen met twee octaafbanden: 500 en 2000 Hz. Die grootheid wordt $RASTI$ genoemd. Volgens Houtgast (mondelinge communicatie) is deze grootheid voor hedendaags gebruik eigenlijk te simpel. Anderzijds blijft het een zeer handige waarde voor de beoordeling van een bouwkundig ontwerp in het eerste stadium.

STI kan worden gemeten bij gelijktijdige aanwezigheid van ruis (via een tweede luidspreker). Wij zullen die grootheid steeds aanduiden met STI -in-ruis. De aanduiding STI blijft dan gereserveerd voor een meting of berekening waarbij alleen de eigen galm als storend wordt beschouwd. De verhouding tussen STI en STI -in-ruis is dus min of meer gelijk aan die tussen C_{50} en U_{50} .

STI is vooral geschikt voor akoestische specialisten. Aan architecten of beginners in het vak is C_{50} makkelijker uit te leggen (via de formules 4 t/m 6). In de literatuur heft met name Bradley onderzoek verricht naar de correlatie tussen STI -waarden en C_{50} (Bradley, 1986). Die uitkomsten zijn niet geheel eenduidig, maar ook uitgaande van eigen ervaring kunnen we stellen:

- $STI = 0,60$ komt overeen met $C_{50} = 1$ à 2 dB
- $STI = 0,70$ wordt vrijwel steeds gevonden indien C_{50} tussen 5 en 6 dB ligt.

Een stap in STI van 0,05 komt dus overeen met een stap van +2 dB in C_{50} .

Bradley toont ook aan dat een net-hoorbare verbetering wordt bereikt bij 1,1 dB en dat een ophoging van 3 dB in een klaslokaal een direct waarneembare verbetering is (Bradley et al, 1999).

WETTELIJKE EISEN PLUS DOOR ONS GEHANTEERDE GRENZEN

Gewenste STI en C_{50}

Men hanteert de volgende subjectieve waardering voor STI :

<0,30	betreft slechte spraakverstaanbaarheid
0,30-0,45	zwakke spraakverstaanbaarheid
0,45-0,60	redelijke spraakverstaanbaarheid
0,60-0,75	goede spraakverstaanbaarheid
>0,75	excellente spraakverstaanbaarheid

De waarde $STI = 0,60$ wordt vaak gehanteerd als een wenselijke grens voor de spraakverstaanbaarheid. Echter, een “zinsverstaanbaarheid” van 100% wordt pas gehaald bij $STI = 0,75$. De verstaanbaarheid van “betekenisvolle woorden” is dan 98%; de verstaanbaarheid van “nonsenswoorden” is 81% (Lawaai-beheersing, 1984-2001). Kennelijk haalt een luisteraar zoveel informatie uit het zinsverband dat ook bij $STI = 0,60$ nog zeer veel informatie overkomt. Er is ook onderzoek gedaan naar de spraakverstaanbaarheid bij “ouderen” (dus bij een redelijk gehoorverlies) en bij “non-native” luisteraars en sprekers. De ophoging van STI blijkt minimaal 0,10 te moeten zijn en in veel gevallen is een ophoging van 0,15 à 0,20 noodzakelijk (Duquesnoy, A.J. & R. Plomp, 1980).

Voor klaslokalen betekent dit, naar onze mening, dat $STI = 0,60$ in een klaslokaal te laag is als een na te streven waarde; een waarde van 0,70 is voor een klaslokaal eerder gewenst.

Als de gewenste waarden van STI en C_{50} worden teruggerekend naar een nagalmtijd, blijkt een nagalmtijd van 1,0 s (overeenkomend met $C_{50} = 0$ dB) te lang te zijn voor goede spraakverstaanbaarheid in het diffuse veld. Een ondergrens van $C_{50} = 1,0$ dB ($STI \approx 0,60$) leidt tot een nagalmtijd van 0,85 s. Die waarde daalt zelfs tot circa 0,5 s indien in een schoollokaal de waarde $C_{50} = 5,0$ dB ($STI \approx 0,70$) wordt nagestreefd.

Wettelijke eisen aan de nagalmtijden in klaslokalen

De eis voor schoollokalen is in Nederland vastgelegd in het Bouwbesluit (1999). Als akoestische variabele wordt daarin alleen de nagalmtijd genoemd die een maximale waarde van 1,0 s niet mag overschrijden. Bij de invoering van het nieuwe Bouwbesluit in 2003 is deze waarde helaas niet aangepast aan voortschrijdend inzicht.

In België wordt een wettelijke eis genoemd in het *Typebestek 110* (Ministerie van Openbare werken, 1979). Daar wordt de maximale nagalmtijd (terecht) afhankelijk gekozen van het volume van de ruimte. De grens van 1,0 s wordt bereikt bij ca. 250 m³, maar de meeste moderne schoollokalen zijn in de orde van 180 m³, waardoor de waarde in de orde ligt van 0,90 tot 0,95 s. De Belgische norm kent ook een minimumwaarde die bij de gebruikelijke afmetingen tussen 0,6 en 0,7 s ligt.

Indien deze waarden worden vergeleken met deze van enkele andere Europese landen, zien we het beeld uit tabel 1.

	minimum	maximum
België	0,7	1,0
Nederland	–	1,0
Frankrijk	0,4	0,8
Italië	–	1,0
Portugal	0,6	0,8

Tabel 1: Eisen gesteld aan een klaslokaal van 200 m³.

In de akoestische literatuur over klaslokalen worden doorgaans veel lagere waarden genoemd. De voorgestelde waarde voor een leeg lokaal ligt dan op 0,5 s, soms zelfs op 0,2 s in rustige klaslokalen (Hodgson & Nosal, 2002). Voor bezette klaslokalen worden in de literatuur meestal waarden voorgesteld die variëren tussen 0,4 en 0,6 s (Bistafa & Bradley, 2000, Coffeen, 2000). In een Nieuw-Zeelands onderzoek (Dodd et al, 2001) werd een daadwerkelijke verlaging van de nagalmtijd van 0,6 naar 0,4 s begeleid door enquêtes. Dat werd wel degelijk als een “verbetering” ervaren. Het volume van de lokalen was echter iets kleiner dan bij ons gebruikelijk.

METINGEN IN KLASLOKALEN

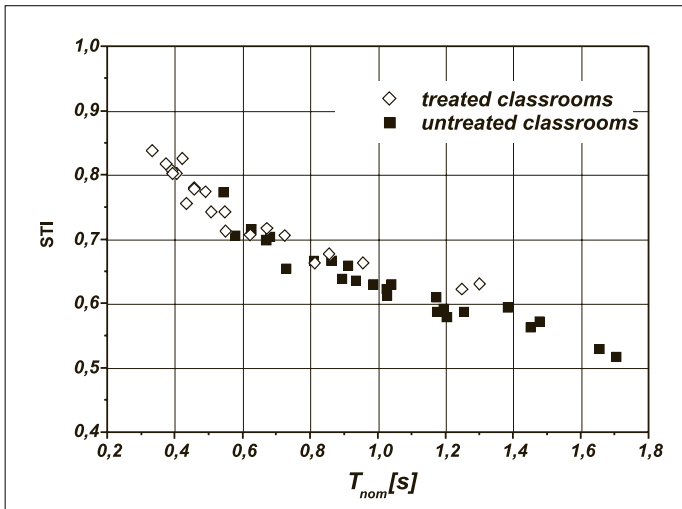
Inleiding en meetmethode in België en Nederland

Dit artikel steunt op twee onderzoeken uitgevoerd in België en in Nederland. In het Belgische werk werd grootschalig onderzoek gedaan in 47 klaslokalen om de huidige nagalmtijden en STI -waarden in kaart te brengen. Daarbij werd steeds gemeten in onbezette klaslokalen (wel meubilair, geen kinderen), waarbij achtergrondruis zoveel mogelijk werd uitgeschakeld. Over het onderzoek is in meer detail gerapporteerd in een congresbijdrage (Vermeir & van de Bergh, 2003).

In het Nederlandse onderzoek is verondersteld dat er (gezien de bestaande normen) in de breedte nauwelijks verschil met België zal zijn. Daarom zijn metingen verricht in slechts één school, maar ditmaal werd STI vooral onderzocht in relatie met de ruis in een klaslokaal. De onderliggende hypothese is daarbij dat de akoestische kwaliteit van een lokaal beter kan worden afgelezen uit STI -in-ruis dan uit STI .

Meetresultaten in België

Figuur 1 geeft de meetresultaten van de Belgische klaslokalen, waarbij STI en de “nominale” nagalmtijd T_{nom} tegen elkaar worden uitgezet. De correlatie tussen STI en T_{nom} blijkt hoog en voldoet aan de theoretische relaties die in voorgaande paragrafen is uiteengezet.

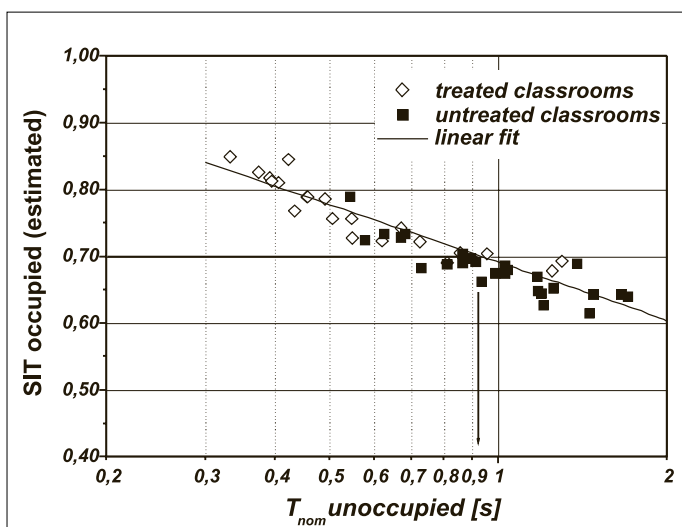


Figuur 1: De relatie tussen de nominale nagalmtijd en de speech transmission index. De nominale nagalmtijd is gemeten uit de Schroedercurve over een interval van 20 dB en gemiddeld over de waarden in de octaafbanden van 500 en 1000 Hz. Er is een onderscheid tussen lokalen met een absorberend plafond ("treated"), en onbehandelde lokalen ("untreated").

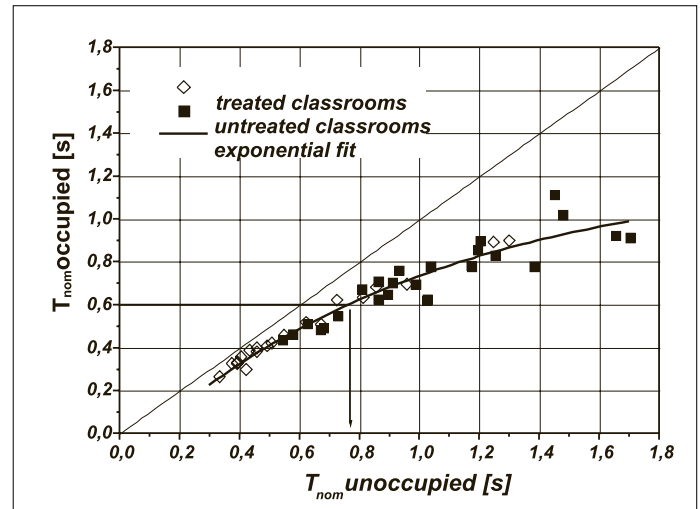
De meetresultaten zijn verdeeld in twee categorieën: met plafondabsorptie, waarbij het plafond meestal bestaat uit een verlaagd plafond met geluidabsorberende tegels, en zonder plafondabsorptie. Uit figuur 1 blijkt dat de behandelde lokalen een betere spraakverstaanbaarheid hebben, behalve in twee gevallen waar het plafond was behandeld met een niet-werkzame akoestische pleister¹. Ook sommige onbehandelde klaslokalen bereiken een hoge STI-waarde. Die lokalen zijn dan gebouwd met poreuze betonstenen. De slechtste waarden worden gevonden bij de lokalen waarin zowel de wanden als het plafond zijn gepleisterd².

Leerlingen als absorptiemateriaal

In figuur 1 staan de waarden van STI en T_{nom} voor een onbezet klaslokaal. De aanwezigheid van leerlingen vergroot



Figuur 3: De relatie tussen STI voor een gevulde klas en de nagalmtijd voor een lege klas.



Figuur 2: Het gesimuleerde effect van de aanwezigheid van 20 leerlingen in een klaslokaal

echter de hoeveelheid absorptie en verlaagt dus de nagalmtijd. Dat effect wordt geïllustreerd in figuur 2. Via een omrekening van het totale absorberende oppervlak in de ruimte kan nu de waarde van T_{nom} in lege toestand worden vergeleken met STI bij aanwezigheid van 20 leerlingen.

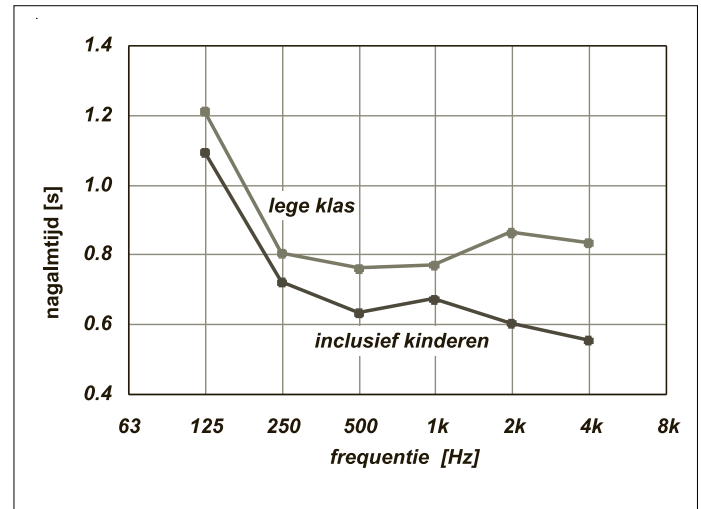
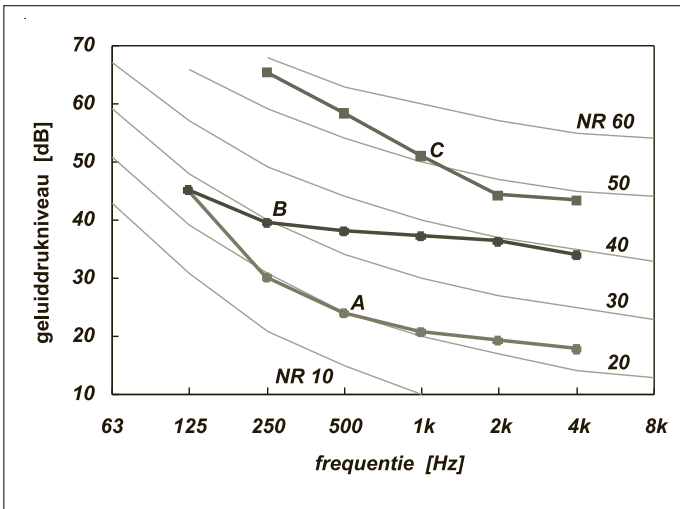
Bij de berekening is per leerling $0,39 \text{ m}^2$ absorberend oppervlak toegevoegd in de 500 Hz band en $0,78 \text{ m}^2$ bij 1000 Hz. Die waarde is ontleend aan bestaande tabellen. In het Nederlandse onderzoek (zie paragraaf 4.4) is daadwerkelijk gemeten (echter in slechts één klaslokaal), waarbij de waarde voor 500 Hz prima bleek te kloppen maar bij 1000 Hz een iets lagere absorptie werd gevonden.

Figuur 3 geeft de consequentie van figuur 2. Daarin worden de STI-waarden voor een gevulde klas gerelateerd aan nagalmtellingen in een lege klas. Bij de gehanteerde methode wordt de grens van $STI = 0,7$ (gevulde klas) bereikt indien de nagalmtijd in het lege lokaal onder $0,9 \text{ s}$ blijft. Het is ook te zien dat een akoestisch behandeld klaslokaal daaraan altijd wel voldoet, tenzij een inferieure akoestisch pleister wordt gebruikt.

De invloed van achtergrondruis door leerlingen

Leerlingen veroorzaken "ruis". Zelfs als ze stil zijn schuifelen er altijd wel voeten en knispert er altijd wat papier. In een modern klaslokaal kan ook mechanische ventilatie extra ruis veroorzaken. In figuur 4 wordt een voorbeeld gegeven van een meting.

- 1 Bij de brede introductie van dit soort pleisters (ca. een decennium geleden) zijn veel te optimistische absorptiecoëfficiënten gehanteerd waardoor in veel gevallen de pleisters in te dunne lagen zijn aangebracht. Zoals alle absorptiematerialen vereisen ook akoestische pleisters een minimale dikte; een laag van bijvoorbeeld 3 mm vraagt om moeilijkheden. Overigens lijken bij de pleisters van nu de kinderziekten wel overwonnen.
- 2 De moderne niet-akoestische pleisters zijn een ramp voor de akoesticus. De absorptiecoëfficiënten liggen in de orde van die voor glas. Bij microscopische beschouwing zijn geen poriën aanwezig die in "ouderwetse" pleisters vaak wel aanwezig waren.



Figuur 4: Linker figuur: Drie geluidcurven weergegeven in een set NR-curven. Curve A: metingen van het ventilatiesysteem, dB(A)-waarde is 31,3 dB(A). Curve B: metingen van ventilatie plus stil werkende leerlingen, 42,5 dB(A). Curve C: Genormeerd-

de spraak van een vrouw op normale sterkte op 1 m afstand in de as recht voor de mond; 60 dB(A). Rechter figuur: Nagalmtijden gemeten in een lege klas en in een klas gevuld met leerlingen.

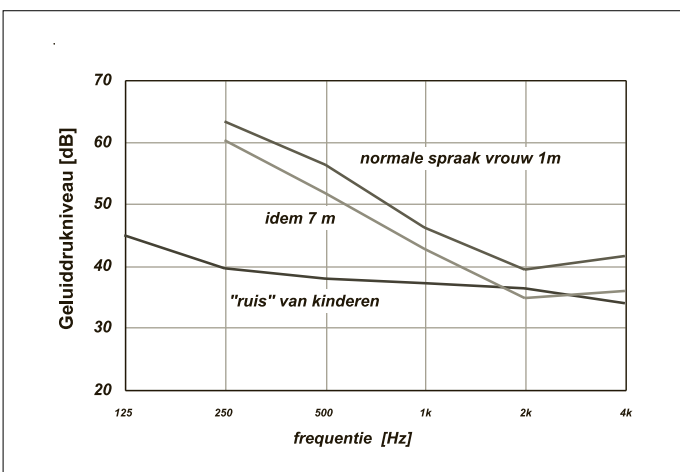
Curve A in de linker figuur geeft de geluiddrukniveaus in octaafbanden in een lege klas met een ingeschakeld luchtverversingssysteem. De meetresultaten zijn weergegeven in een grafiek met NR-curven. Het ventilatiesysteem voldoet dus ongeveer aan NR 26, hetgeen in de praktijk meestal "uitstekend" wordt genoemd. Desondanks is de bromtoon bij 125 Hz goed hoorbaar. Curve B is een representatieve meting van het geluid van de ventilatie plus de ruis veroorzaakt door leerlingen in een stil werkende klas. Ter vergelijking geeft curve C de geluiddrukniveaus voor een vrouwenstem op 1 m afstand, recht voor de mond, op "normale" sterkte. Die curve is niet gemeten, maar ontleend aan de literatuur³.

daalt als functie van de frequentie, doordat absorberende poreuze materialen meestal een continu stijgende absorptiecurve vertonen. Het valt op dat dat hier niet het geval is en dat de nagalmtijden in de banden 1000, 2000 en 4000 Hz hoger zijn dan verwacht. Dat komt omdat het lokaal is voorzien van plafondabsorptie, waarbij gekozen is voor een (modieus) type waarbij sleuven zijn gemaakt in gipsplaten. Volgens de specificaties ligt de maximale absorptie van die platen inderdaad bij 500 Hz. Door de relatief lage absorptiewaarden bij de hogere frequenties vernoemt de leerkracht het lokaal als "schel klinkend".

In de rechter figuur worden de resultaten gegeven van nagalmmetingen. Gebruikelijk is dat een nagalmmcurve continu

Spraak versus ruis in een klaslokaal

In figuur 5 is de ruis uit figuur 4 opnieuw uitgezet. Ditmaal echter is de theoretische curve voor spraak uit figuur 4 gecombineerd met metingen zoals die in het klaslokaal zijn uitgevoerd.



Figuur 5: Geluidniveaus afgeleid uit metingen in een schoollokaal. De afmetingen van het lokaal zijn 9,5 x 6,2 x 3,0 m³. Het ruisniveau is overgenomen uit figuur 4. Er is rekening gehouden met een staande leerkracht en zittende scholieren, zodat het resulterende geluidniveau wat lager is dan in figuur 4; leerlingen op 1 m bevinden zich nu niet precies in de as van de mond van de leerkracht.

In dB(A)-waarden uitgedrukt lijkt de signaal-ruisverhouding tussen spraak en ruis in orde: de spraak vertegenwoordigt 57 dB(A) en het ruisniveau is gelijk aan 42,5 dB(A). Een verschil van 15 dB wordt algemeen als uitstekend ervaren. Echter, juist bij de zeer kritische frequenties rond 2000 Hz is de signaal-ruisverhouding achter in de klas negatief. Een berekening van RASTI, illustreert dit. Op grond van de heersende nagalmtijd in het lokaal (in de orde van 0,7 s) is TI voor beide octaafbanden 500 en 2000 Hz min of meer gelijk: $TI = 0,67$. Voor TI -in-ruis (dus per afzonderlijke frequentieband) vinden we echter slechts 0,63 en 0,35, zodat RASTI (een gewogen gemiddelde waarbij de eerste waarde meetelt voor 4/9-de en de tweede voor 5/9-de) gelijk is aan 0,47. Ondanks een gemiddelde nagalmtijd van 0,7 s is de spraakverstaanbaarheid slechts matig.

3 In een mannenstem zit meer vermogen in de lage frequenties (bijvoorbeeld ook in de 125 Hz band), maar aangezien de leerkracht in het desbetreffende lokaal een vrouw was, zullen we ons daartoe beperken.

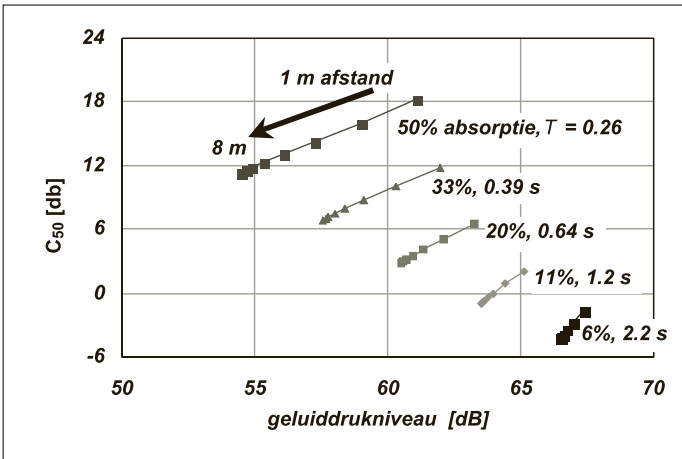
Theoretische invloed van de absorptiecoëfficiënt

TI, STI en RASTI (al of niet in ruis) lenen zich niet zo goed voor een simpele berekening van de spraakverstaanbaarheid. We nemen daarom onze toevlucht tot C_{50} en U_{50} volgens de formules (6a) en (6b).

In figuur 6 staat een berekening voor een klaslokaal waarvan vloer, plafond en wanden allemaal dezelfde absorptiecoëfficiënt hebben. Er is in dit geval geen ruis toegevoegd. Er wordt een serie microfoonpunten doorgerekend met oplopende afstand en per microfoonpunt is telkens het geluiddruk-niveau berekend plus C_{50} . De gebruikte waarden van de absorptiecoëfficiënt zijn zodanig gekozen dat invulling in formules (3) t/m (6) stappen van 3,0 dB oplevert in het diffuse veld. De nagalmtijden staan vermeld in de figuur en zijn berekend met Sabines formule (1). De berekeningen dragen geen informatie over de frequentie; toch is er een bronvermogen aangenomen waarbij het geluiddruk-niveau gelijk is aan 60 dB op 1 m in de dode kamer (dus als de absorptiecoëfficiënt nadert tot 100%), hetgeen dus representatief is voor spraak.

In de figuur vinden we bij 50% absorptie een waarde van 61,1 dB, waaruit blijkt dat een deel van de geluidenergie wordt geleverd door reflecties tegen de wanden. Indien de absorptiecoëfficiënt stapsgewijs wordt verlaagd tot 6%, stijgt het geluid-niveau tot meer dan 67 dB en is het aandeel van het directe geluid gering ten opzichte van het gereflecteerde deel. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Hoe meer absorptie des te beter, want C_{50} stijgt bij toenemende absorptie.
- Absorptiecoëfficiënten van 6 en 11 % zijn te laag voor een goede spraakverstaanbaarheid. De absorptiecoëfficiënt dient, volgens deze figuur, minimaal 20% te zijn om ook achter in de klas de grens van $C_{50} = +1$ dB ($STI \approx 0,60$) te bereiken. Voor de grens van +5 dB ($STI \approx 0,70$) moet nog meer absorptie worden toegevoegd.

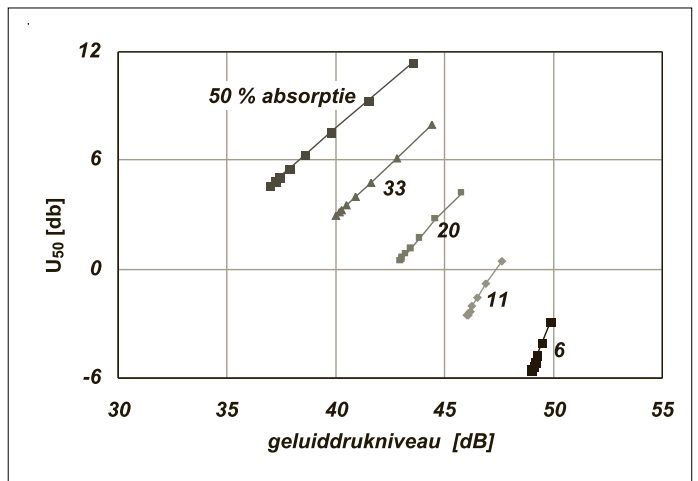
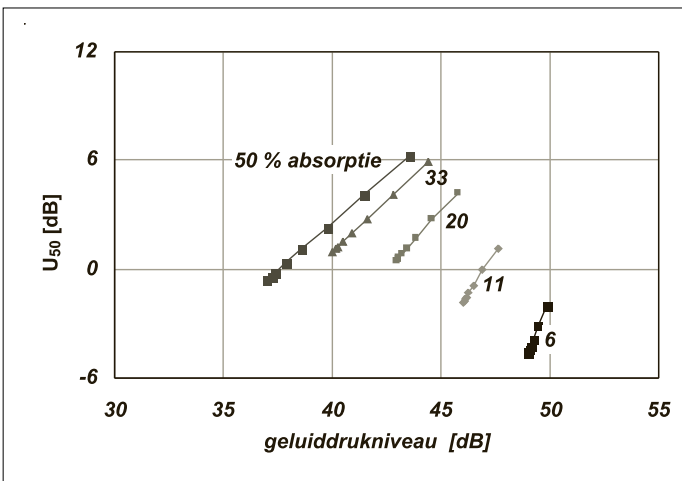


Figuur 6: Berekening van C_{50} voor een klaslokaal van $8 \times 6 \times 3 \text{ m}^3$, dus iets kleiner dan het lokaal waarin daadwerkelijk is gemeten. De afstanden tussen bron en microfoon zijn 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 6, 8 m plus "oneindig" waarbij de eerste term in vergelijking (3) is verwaarloosd.

Om de matige spraakverstaanbaarheid te verbeteren zijn er twee mogelijkheden:

1. De leerkracht verheft haar stem waardoor het spraak-niveau omhoog schuift terwijl het ruisniveau gelijk blijft. Dat is de meest gebruikte oplossing, maar een goed akoestisch klimaat bedient zowel de leerlingen als de leerkracht.
2. Toevoeging van absorptiemateriaal verlaagt zowel het spraakniveau als het ruisniveau. Echter, theoretisch daalt het ruisniveau sterker dan het spraakniveau, omdat de spraak ook wordt bepaald door direct geluid.

Betekent dit tweede punt dan ook dat een geluiddode kamer de beste plaats is om les te geven?



Figuur 7: De spraakverstaanbaarheid in een klaslokaal bij variërende absorptie. Ten opzichte van de voorgaande figuur is de horizontale as verschoven omdat nu uitsluitend wordt gerekend in de 1000 Hz band. Het akoestisch vermogen is gekozen op 53,5 dB (re 10^{-12} W).

In de linker figuur is het ruisniveau onafhankelijk van de absorptie van de wanden; in de rechter figuur is het vermogen van de ruis constant, waardoor het geluiddruk-niveau van de ruis afneemt met toenemende absorptie.

- Op de achterste rij is de spraakverstaanbaarheid lager dan op de voorste rij. Dat is niets nieuws: zolang er onderwijs wordt gegeven, worden leerlingen met matige oren op de voorste rij geplaatst.
- De verschillen in spraakverstaanbaarheid tussen de voorste en de achterste rij worden groter naarmate de absorptie toeneemt.

In figuur 6 is uitgegaan van een ideale ruimte met één spreker en geen ruis. In figuur 7 wordt nagegaan wat er gebeurt als er wel ruis wordt meegerekend.

Voor de berekening van figuur 6 is een geluidniveau verondersteld van 60 dB op 1 m in de dode kamer. Figuur 5 liet zien dat de geluidrukniveaus voor spraak verschillen per frequentieband en, zoals eerder gemeld, *STI* en *RASTI* worden berekend uit een gewogen somming van de afzonderlijke *TI*-waarden per octaafband. Zo'n procedure zou dus eigenlijk ook voor U_{50} moeten worden gevolgd, maar om onze aanpak te illustreren, beperken we ons tot één octaafband die (voorlopig) als maatgevend wordt aangenomen: 1000 Hz. Het daarbij behorende akoestisch vermogen van de spraak is aangenomen als 53,5 dB.

Figuur 7 (links) toont de uitkomsten indien een normaal sprekende vrouw (bij 1000Hz) wordt geplaatst in een ruimte waarin het geluidrukniveau van de ruis steeds gelijk is aan 37 dB. Het beeld uit figuur 6 verandert aanzienlijk. Voor in de klas is de toevoeging van absorptie nog steeds het beste middel, maar achterin kan de hoeveelheid absorptie te groot worden. Het geluidrukniveau ten gevolge van de spraak wordt zo laag dat de signaal-ruisverhouding te laag wordt. Echter, bij de berekening van figuur 7 (links) is een foute aanname gedaan. Toevoeging van absorptie verlaagt uiteraard ook het geluidniveau ten gevolge van de ruis en daarmee is in de rechter figuur rekening gehouden. Het ruisniveau is voor 20% absorptie weer gelijk aan 37 dB gekozen (zodat die curven links en rechts hetzelfde zijn). Bij iedere

stap ter verhoging of verlaging van de absorptie wordt de ruis 3 dB aangepast en dan blijkt: hoe meer absorptie, des te beter de spraakverstaanbaarheid in ruis, maar het verschil tussen de voorste en de achterste rij wordt steeds groter naarmate in het lokaal meer absorptie wordt aangebracht.

Waarom is dan de onrealistische figuur 7 (links) getoond?

Onze hypothese is dat een leerkracht zijn/haar geluidniveau automatisch aanpast aan de akoestische omgeving. Er bestaan redelijk wat onderzoeksresultaten over de geluidniveaus plus terugkoppeling in kantoren en restaurants, recente voorbeelden zijn Bradley (2003) en Kang (2002), maar naar de terugkoppeling van de akoestische omgeving op het spraakvermogen in een klaslokaal is merkwaardig weinig onderzoek gedaan.

Indien in een restaurant bijvoorbeeld één tafeltje is bezet kunnen de gasten elkaar meestal prima verstaan. Als het restaurant volloopt gaan de oorspronkelijke gasten steeds harder praten om elkaar te verstaan, en des te meer als de ruimte galmt⁴.

Wij veronderstellen nu dat in een schoollokaal soortgelijke processen kunnen worden waargenomen. Als de leerkracht zich op een tamelijk laag geluidniveau richt tot de eerste rij, kan de spraakverstaanbaarheid op de achterste rij onvoldoende zijn. Dit is naar onze mening ongewenst. Een belangrijk doel bij het architectonisch ontwerp moet niet alleen zijn dat de spraakverstaanbaarheid voldoende is op alle plaatsen in de klas, maar ook dat er een constante kwaliteit door het gehele klaslokaal wordt bereikt. En dat dan alles bij een zo laag mogelijke vocale inspanning van de leerkracht.

De aanpassing van het bronvermogen was in de figuren 7 niet verwerkt. Daarom worden in figuur 8 de curven uit figuur 7 herhaald, maar nu wordt verondersteld dat van de "winst" van 3 dB per absorptiestap, weer 1,5 dB door de leerkracht wordt gebruikt om zachter te kunnen praten. Het resultaat blijkt dan tussen die van de linker en rechter figuren 7 in te liggen.

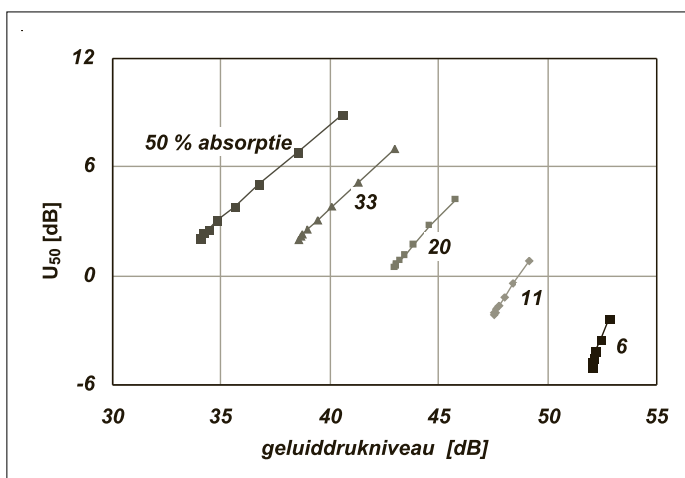
De ondergrens $U_{50} = +1$ dB ($TI = 0,60$) wordt achter in de klas gehaald indien de absorptiecoëfficiënt minimaal gelijk is aan 20%. Dat komt in dit voorbeeld overeen met een nagalmtijd van 0,64 s. De waarde $U_{50} = +5$ dB ($TI = 0,70$) wordt bij 20% nergens in de klas gehaald. Bij 33% en 50% absorptie wordt die waarde alleen voor in de klas behaald. Een leerkracht moet dus altijd het bronvermogen wat opschroeven om de signaal-ruisverhouding voor het gehele klaslokaal te verbeteren.

De berekeningen worden alleen gepresenteerd voor 1000Hz. Bij 500 Hz is het verschil tussen spraak en ruis een stuk gunstiger, maar bij 2000 Hz blijkt het verloop desastreus. Alleen voor in de klas wordt de waarde van $U_{50} = 1$ dB gehaald.

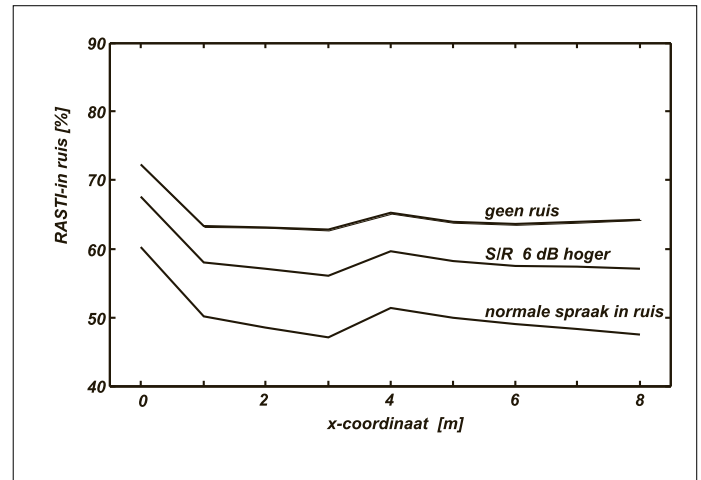
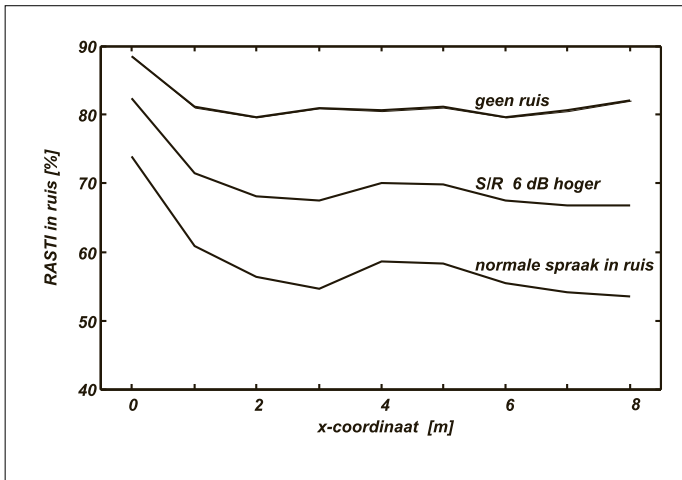
Een rekenvoorbeeld met een ray-tracing model

De berekeningen uit de voorgaande paragrafen zijn herhaald met behulp van een computermodel. Het model heeft een paar voordelen:

- 4 Fascinerend is dat harder praten eigenlijk niet helpt. Als alle gasten in een vol restaurant bijvoorbeeld 5 dB zachter praten blijft de onderlinge verhouding en dus de spraakverstaanbaarheid gelijk.



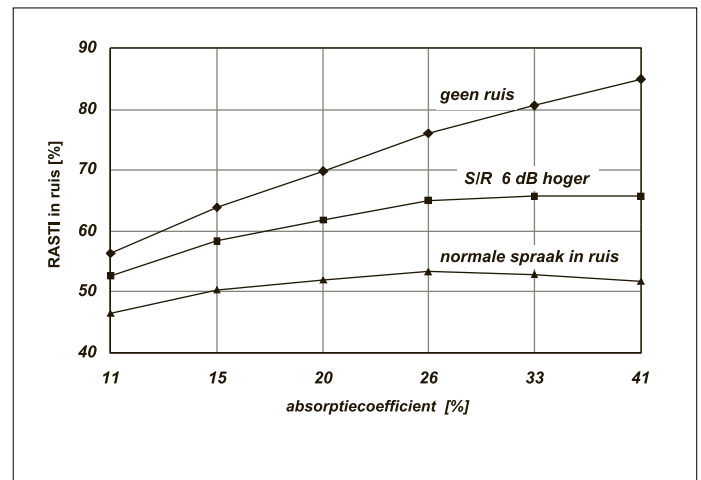
Figuur 8: De spraakverstaanbaarheid in een klaslokaal bij variërende absorptie. Het vermogen van de spraak is gekozen op 53,5 dB (re 10-12 watt) bij 20% absorptie; bij 33% en 50% neemt het vermogen af met 1,5 en 3 dB, bij 11% en 6% neemt het vermogen met dezelfde stappen toe. Het vermogen van de ruis is constant.



Figuur 9: De waarde van RASTI-in-ruis door een klaslokaal van $9,5 \times 6,2 \times 3,0 \text{ m}^3$. De linker figuur is berekend bij 15% absorptie, de rechter bij 33 % absorptie. Het geluidniveau van de ruis daalt (zoals in figuur 8) met 3 dB per verdubbeling van

de absorptie. Het vermogen van de spraak is in beide gevallen gekozen volgens figuur 5. De overeenkomstige nagalmtijden volgens Sabine zijn 0,90 s en 0,41 s.

1. In concertzalen is aangetoond dat het diffuse-velddoelmodel slechts een benadering is (Barron, 1993). In een concertzaal zijn de geluidniveaus achter in de zaal altijd een paar dB lager dan voorspeld. Waarschijnlijk geldt dat ook in een klaslokaal al zijn de afstanden tussen bron en toehoorder daar veel kleiner dan in een concertzaal.
2. Eventueel kan in een ray-tracing model een bron worden gebruikt die een richtingskarakteristiek heeft overeenkomend met een spreker, waarbij recht voor de mond een hoger geluidniveau kan worden gemeten dan aan de achterzijde.
3. Absorberende materialen kunnen inhomogeen door de ruimte worden aangebracht.
4. Er kan meubilair worden geïntroduceerd.



Figuur 10: De waarde van RASTI-in-ruis door een klaslokaal van $9,5 \times 6,2 \times 3,0 \text{ m}^3$ als functie van de absorptiecoëfficiënt. Het geluidniveau van de ruis daalt (zoals in figuur 8) met 3 dB per verdubbeling van de absorptie. Het geluidvermogen van de spraak daalt met 1,5 dB per verdubbeling van de absorptie. De onderste curve representeert normale spraak in ruis. De middelste curve geldt als het verschil tussen het spraakvermogen en het vermogen van de ruis 6 dB hoger is. Dat staat dus voor verminderde ruis of voor “stemverheffing”.

Het tweede punt is object van lopend onderzoek (Rychtarikova, 2003). Over het derde punt zijn in de literatuur interessante gegevens gepubliceerd (Reich et al, 1998) die wel degelijk moeten worden bestudeerd voor een uitgekiend ontwerp voor een klaslokaal. Echter, in het huidige artikel komt alleen het eerste punt aan de orde, omdat slechts voorbeelden worden gegeven voor een “omnidirectionele bron in een homogene ruimte”.

Alle modelberekeningen zijn uitgevoerd in een “schoendoos” van $9,5 \times 6,2 \times 3,0 \text{ m}^3$; alle wanden, plafond en vloer hebben dezelfde absorptiecoëfficiënt. In het lokaal staat een bron op 1 m van de zijwand en 1 m van de “bordzijde”; de bronhoogte is 1,5 m. Deze opstelling komt ongeveer overeen met de opstelling in het doorgemeten Nederlandse klaslokaal. De microfoons (hoogte 1,2 m) zijn gedacht in één rij in de lengterichting van het lokaal op 1 m uit de andere zijwand. De “x-coördinaat” uit de volgende figuren slaat op de afstand tussen bron en microfoon in de lengterichting van het lokaal en dat is dus niet de echte afstand van bron tot microfoon. Daartoe moeten ook de minimale afstand in y-richting (dus 4,2 m) en z-richting (0,3 m) worden meegerekend.

In figuur 9 worden de resultaten gegeven van RASTI-in-ruis indien het bronvermogen van de spraak en het ruisni-

veau worden gekozen volgens figuur 5 voor de octaafbanden van 500 en de 2000 Hz. De bovenste curve in figuur 10 (“geen ruis”) is voor de ideale situatie waarin geen ruis aanwezig is. Dat is dus eigenlijk RASTI i.p.v. RASTI-in-ruis. De onderste curve (“normale spraak in ruis”) wordt gevonden bij de ruisniveaus volgens figuren 4 en 5. De middelste curve geldt indien de verhouding tussen stemvermogen en ruis 6 dB hoger wordt. Dat kan dus zijn omdat het ruisniveau wordt verlaagd (al zouden wij niet weten hoe) of omdat de leerkracht haar stem verheft om boven de ruis uit te komen.

Zelfs in de rechter figuur wordt de waarde *RASTI-in-ruis* = 0,60 bij normale spraak in ruis slechts op een paar plaatsen in het lokaal gehaald. Bij stemverheffing (met 6 dB) bereikt de waarde in de linker figuur net 60%. In de rechter figuur is het vooral interessant dat stemverheffing daar meer helpt dan in de linker. De extra 6 dB tilt de *RASTI-in-ruis*-waarde naar circa 70%.

In figuur 10 worden overeenkomstige modeluitkomsten gepresenteerd, maar langs andere assen. Bovendien wordt nu weer rekening gehouden met het dalen van het spraakvermogen bij toenemende absorptie zoals in figuur 8. Er is telkens een gemiddelde berekend voor de ontvangposities in het lokaal, maar omdat rekening is gehouden met een wisselend bronniveau is een directe vergelijking met de uitkomsten van figuur 9 slechts globaal mogelijk. De *RASTI-in-ruis*-waarden vallen daardoor ook iets lager uit.

De figuur is te gebruiken om een uitspraak te doen over de gewenste hoeveelheid absorptie in een ruimte. Waarden in de orde van 15 % dienen te worden vermeden. Dat komt overeen met een nagalmtijd van 0,90 s (inclusief leerlingen). Een waarde rond 20 % (overeenkomend met een nagalmtijd van 0,67 s), is de ondergrens voor goede spraakverstaanbaarheid (*RASTI-in-ruis* groter dan 60%).

Een leerkracht moet *altijd* de stem enigszins verheffen om de grens van 60% voor *RASTI-in-ruis* te halen. De ideale waarde voor de absorptiecoëfficiënt ligt volgens deze berekening tussen 25 en 30%. De nagalmtijd is dan in de orde van 0,5 s. Die waarden lijkt voor de Belgische en Nederlands praktijk laag, maar internationaal zijn waarden onder 0,6 s heel gebruikelijk. Een nagalmtijd in de orde van 0,4 s, die in sommige literatuur wordt bepleit, komt overeen met 33% absorptie en is dus volgens figuur 10 wellicht net wat aan de korte kant. Terugkijkend naar de resultaten van figuur 3 zien we dat dergelijke klaslokalen in België in iedere geval wel degelijk bestaan⁵.

CONCLUSIES

Indien in België de wettelijke grenswaarde van 1,0 s voor de nagalmtijd in lege klaslokalen wordt aangehouden, moeten er 16 van de 50 worden afgekeurd. Waarschijnlijk is dat in Nederland niet veel beter, maar dat is niet onderzocht. Echter, een nagalmtijd van 1,0 s (in een leeg lokaal gemeten) garandeert nog geen optimale spraakverstaanbaarheid; daartoe moet de nagalmtijd lager zijn. Een nagalmtijd (in een leeg lokaal) van maximaal 0,9 s is nodig om in een klaslokaal van 180 m³, en gevuld met ideaal stille kinderen, een waarde van *STI* = 0,70 te halen. Die waarde wordt als grens gehanteerd voor uitstekende spraakverstaanbaarheid, maar bij hoorstoornissen of “non-native” kinderen is het aan te bevelen om die waarde nog 0,10 hoger te kiezen.

Omdat leerlingen ook altijd voor ruis zorgen is het aan te bevelen om ook *STI-in-ruis* te beschouwen. Dan blijkt de nagalmtijd nog verder omlaag te moeten. De uiterste nagalmtijd ligt dan voor een leeg lokaal bij 0,8 s, hetgeen leidt tot een nagalmtijd van 0,6 s in een klas gevuld met leerlingen. Dat is een waarde die ook veel meer aansluit bij waarden die in de literatuur worden genoemd.

Om de spraakverstaanbaarheid in ruis te verbeteren kan de leerkracht zijn/haar stem verheffen. Simpele berekeningen laten zien dat de stemverheffing (in dB) geringer kan zijn bij lagere nagalmtijden.

Er is een nadeel aan zeer korte nagalmtijden: het verschil in geluidsdruk niveau van de spraak tussen de voorste en de achterste rij kan zo groot worden dat de signaal-ruisverhouding te veel verschilt tussen voor en achter in de klas. De leerkracht zal dan de leerlingen voor en achter in de klas op een verschillend niveau moeten aanspreken. Overigens is er over de terugkoppeling van de akoestische omgeving op het spreekgedrag weinig bekend. In de toekomst zal op dit gebied nader onderzoek worden gedaan.

De optimale gemiddelde absorptiecoëfficiënt ligt bij 30%. Bouwkundig gezien is het een kleine moeite om dit soort waarden ook daadwerkelijk te verwezenlijken. Een goed absorberend plafond doet wonderen, dat wordt mede aangetoond door de metingen in de Belgische klaslokalen. Het verdient wel aanbeveling om over de juiste verdeling van de materialen over plafond en wanden (de achterwand komt bijvoorbeeld eerder in aanmerking voor behandeling dan de bordzijde) na te denken en daartoe eventueel advies in te winnen.

In de normen wordt gestreefd naar een vlak verlopende nagalmscurve als functie van de frequentie. Gezien het karakter van de spraak en de aanwezige ruis verdient het naar onze mening aanbeveling om de absorptie enigszins te laten toenemen met de frequentie, waarmee de nagalmtijd langzaam daalt. Gezien het karakter van de meeste absorptiematerialen kan dat ook welhaast vanzelf gaan.

LITERATUUR

Barron, M, Auditorium Acoustics and Architectural design, 1993, London, E&FN Spon.
Bouwbesluit, 1999, Deventer.

Bistafa, S.R. & J.S. Bradley, Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics, *J. Acoust. Soc. Am*, 2000, **107**, pp. 861-875.

Bradley, J.S, *Speech intelligibility studies in classrooms*, *J. Acoust. Soc. Am*, 1986, **80**, pp. 846-854.

Bradley, J.S, R. Reich, S.G. Norcross, *A just noticeable difference in C₅₀ for speech*, *Applied Acoustics*, 1999, **58**, pp. 99-108.

Bradley, J.S, *A renewed look at open office acoustical design*, in: *Proceedings Inter-Noise 2003*, Seogwipo, Korea, paper N 1034.

5 De *STI*-waarden uit figuur 3 moeten worden vergeleken met de curve “geen ruis” uit figuur 10. Ze blijken voortreffelijk overeen te komen.

Coffeen, B. (ed.), *Classroom Acoustics - A resource for creating learning environments with desirable listening conditions*, 2000, Acoust. Soc. of America, Techn. Committee on Architectural Acoustics.

Dodd, G, O. Wilson, J. Valentine, M. Halstead, K. McGunnigle, *Classroom Acoustics - a New Zealand Perspective*, in: "Proceedings of the Int. Congr. on Acoustics", Rome, 2001.

Duquesnoy, A.J. & R. Plomp, *Effect of reverberation and noise on the intelligibility of sentences in case of presbycusis*, J. Acoust. Soc. Am. 1980, **68**, pp. 537-544.

Plomp, R. & A.J. Duquesnoy, *Room acoustics for the aged*, J. Acoust. Soc. Am. 1980, **68**, pp. 1616-1621.

Hodgson, M, & E.M. Nosal, *Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms*, J. Acoust. Soc. Am, 2002, **111**, pp. 931-939.

Houtgast, T, H.J.M. Steeneken, R. Plomp, *Predicting speech intelligibility in rooms from the MTF, I general room acoustics*, Acustica, 1980, **46**, pp. 60-72.

Kang, J, *Numerical modelling of the speech intelligibility in dining spaces*, Applied Acoustics, 2002, **63**, pp. 1315-1333.

Lawaai beheersing, Handboek voor Milieubeheer, 1984-2001, Alphen aan den Rijn.

Nijs, L. & A. Schuur, *Het gebruik van de nagalmtijd bij de normstelling van sportzalen*, Bouwfysica, 2004, **17**, pp 9-17.

Reich, Rebecca & John Bradley, *Optimizing classroom acoustics using computer model studies*, Canadian Acoustics, 1998, **26**, pp 15-21

Rychtáriková, M, L. Nijs, M. van der Voorden, K. Saher, *The relevance of modelling the sound source directivity in ray-tracing software*, Acoustics '03, Proceedings of the 7th International Colloquium, Zvolen, 2003, pp 31-34.

Vermeir, G, & J. van den Bergh, *Classroom acoustics in Belgian schools: requirements, analysis, design*, in: Proceedings of "Research in Building Physics", 2003, Leuven

Ministerie van Openbare werken - Bestuur der Gebouwen, TYPE-BESTEK 110, geldend als vaste bijlage bij de bijzondere bestekken betreffende offerteaanvragen voor geïndustrialiseerde gebouwen, 1979.