

# Geluidsvoortplanting in stedelijk gebied onder de numerieke loupe

**Wegverkeerslawaaï is de meest frequente oorzaak van geluidshinder in stedelijk gebied. In centra van steden zijn het de gebouwen die voor afscherming kunnen zorgen. De invloed van de afstand tussen de gebouwen en de vorm en afwerking van de gevels spelen een rol en kunnen numeriek gesimuleerd worden. Dit artikel geeft een aantal simulatieresultaten weer.**

Timothy Van Renterghem, Erik Salomons en Dick Botteldooren

Centra van steden zijn vaak opgebouwd uit straten, binnenplaatsen en pleintjes, ingesloten door (hoge) gebouwen. Wanneer de afmetingen van de ingesloten ruimten klein zijn ten opzichte van de hoogte van de bebouwing spreekt men van zogenaamde 'city canyons'. Enquêtes leren dat inwoners van een drukke stad die op een eenvoudige manier toegang hebben tot een 'stille plaats' minder gehinderd zijn.<sup>1</sup> Een dergelijke stille plaats is bijvoorbeeld een ingesloten achtertuintje. Het 'bewaren' van deze geluidsarme locaties in stedelijke omgeving kan het aantal gehinderden doen dalen, en wint dan ook aan belang bij beleidsmaatregelen op Europees vlak.

De rekenmodellen die doorgaans gebruikt worden bij het opstellen van geluidskarten zijn onvoldoende nauwkeurig om te begroten hoe de afmetingen en inrichting van de straatcanyon het geluidsdrukniveau in een achtertuintje beïnvloeden. In deze studie werd daarom gekozen voor meer gedetailleerde numerieke modellen die de voortplanting van een geluidspuls in de tijd van de bron naar de ontvanger volgen. Omdat de afgeleiden in de akoestische vergelijkingen in een dergelijk model door eindige verschillen worden benaderd, spreekt men van een eindige-

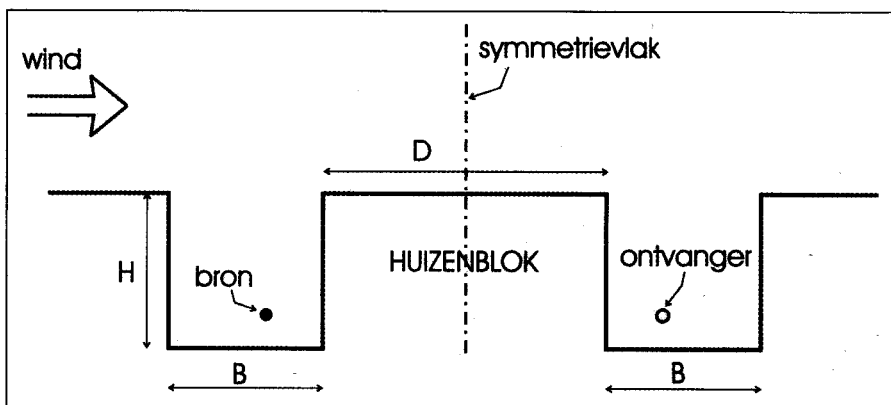
differenties-in-het-tijdsdomeinmodel (Engelse afkorting: FDTD).<sup>2-3</sup> Deze methode laat niet alleen toe om de reflecties op gevels (rekening houdend met absorptiegraad, oneffenheden en balkons) en diffractie over de dakrand te begroten, maar kan eveneens het effect van wind- en temperatuursgradiënten in de stedelijke atmosfeer in rekening brengen. Deze laatste hebben immers een niet te verwaarlozen invloed op het bestudeerde probleem. De tijdsdomeinbenadering geeft bovendien leuke plaatjes.

Omdat de rekenlast verbonden aan het gebruik van zo'n numeriek model zeer groot is, wordt de bestudeerde geometrie sterk vereenvoudigd: de huizenblokken worden als een balk met plat dak voorgesteld en zowel straten (broncanyons) als achtertuintjes (ontvangercanyons) worden oneindig lang en perfect recht verondersteld (figuur 1). Om de bereke-

ningen verder te vereenvoudigen wordt de geometrie symmetrisch verondersteld. Een laatste benadering bestaat erin om te veronderstellen dat boven de daken het geluid zich enkel voortplant van links (bron) naar rechts (ontvanger). Dit laat toe om een groot deel van de propagerende golven te verwaarlozen. Deze benadering wordt de parabolische-vergelijkingsbenadering (engelse afkorting: PE) genoemd naar de vorm van de vergelijking die hierbij ontstaat.<sup>4</sup> Voor meer details over de gebruikte methode kan de geïnteresseerde lezer terecht in de vakliteratuur.<sup>5-6</sup>

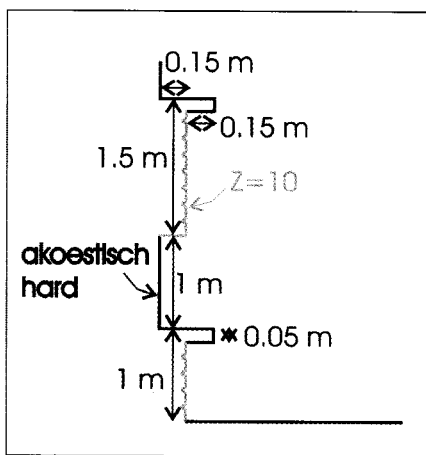
## PARAMETERSTUDIE

Verkeersgeluid plant zich in de onderzochte (geïdealiseerde) situatie voort van de bron (straat) naar de afgeschermd ontvanger. De tweedimensionale benadering impliceert naast oneindig lange en rechte canyons ook een oneindige lange,



FIGUUR 1. GEBRUIKTE GEOMETRIE VOOR DE PARAMETERSTUDIE.

**Over de auteurs:** Dr. ir. T. Van Renterghem en prof. dr. ir. D. Botteldooren zijn respectievelijk wetenschappelijk medewerker en hoogleraar aan de onderzoeksgroep akoestiek (vakgroep Informatietechnologie) van de Universiteit Gent. Dr. E.M. Salomons is wetenschappelijk medewerker van de groep Akoestiek van TNO in Delft.



FIGUUR 2. DETAIL EN AFMETINGEN VAN DE DIFFUUS-REFLECTERENDE GEVEL.

coherente lijnbron. In deze parameterstudie is de invloed van volgende parameters onderzocht: de breedte-hoogte verhouding van de canyons, de absorptie-eigenschappen van de gevels, het effect van diffuus-reflecterende gevels, het voorkomen van balkons, en het effect van windafwaartse geluidsvoortplanting van bron naar ontvanger. Een typisch verkeersspectrum voor personenwagens, rijdend aan een snelheid van 50 km/u, is gebruikt om het effect van de onderzochte parameters op het totale A-gewogen verkeersgeluidsniveau te begroten. Telkens wordt de vergelijking gemaakt met het totale A-gewogen verkeersgeluidsniveau in de hieronder beschreven referentiesituatie.

#### DE REFERENTIESITUATIE

De referentiesituatie is als volgt gedefinieerd. De bron en ontvanger bevinden zich op een hoogte van 1 m boven de grond, ongeveer in het midden van de canyon. De breedte (=B) en de hoogte (=H) van de canyons zijn beiden 10 m. De afstand tussen de canyons (=D) bedraagt 50 m. De gevels zijn vlak, en worden gekarakteriseerd door middel van een lokaal-reagerende, genormalizeerde, reële impedantie van 10. Dit komt overeen met een reflectiecoëfficiënt van 82% bij loodrechte inval (typisch voor bakstenen). De horizontale vlakken (straatbedekking en daken) worden akoestisch hard verondersteld. De atmosfeer is in rust en volledig homogeen. In het vervolg van dit artikel worden enkel de wijzigingen ten opzichte van deze referentiesituatie vermeld.

#### RESULTATEN

##### Invloed van breedte-hoogte verhouding van de canyon

Canyons met breedte-hoogte verhoudingen van 0,5, 1, 1,5 en 2 werden gesimuleerd. De hoogte van de canyons bleef constant op 10 m. Resultaten zijn terug te vinden in Tabel 1. Enkel voor de zeer

nauwe canyon met B/H verhouding van 0,5 zien we een belangrijk verschil met de referentiesituatie: een sterkere afscherming wordt waargenomen. Met stijgende B/H verhoudingen stijgt het niveau bij de ontvanger in lichte mate. Twee effecten spelen hier een rol. Enerzijds is bij een bredere canyon de invalshoek op het diffractie punt op het dak minder scherp, hetgeen de afscherming verkleint.

Anderzijds hebben de meervoudige reflecties in de broncanyon een grotere weg afgelegd alvorens gediffracteerd te worden. Deze zullen dus minder energie bevatten, hetgeen de afscherming verhoogt. Bij de bredere canyons overweegt het hoekeffect in lichte mate.

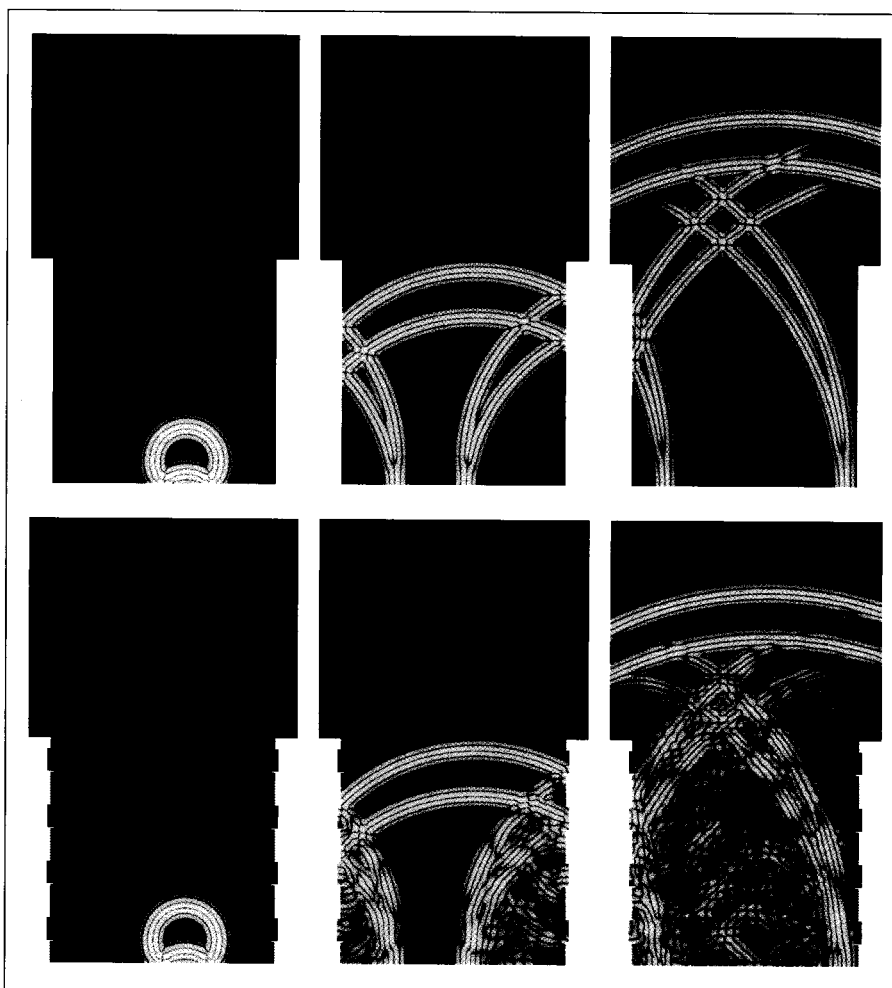
##### Invloed van de absorptie aan de gevels

De reflectie-eigenschappen van vlakke gevels werden onderzocht. Lokaal-reagerende, genormalizeerde, reële impedanties van 5 en 10, alsook perfect reflecterende gevels werden gesimuleerd. Dit komt overeen met geluidsreflectiecoëfficiënten (bij loodrechte inval) gelijk aan respectievelijk 0,67, 0,82 en 1. Uit tabel 1 blijkt dat de invloed van gevelreflectie groot is. Het introduceren van enige absorptie aan

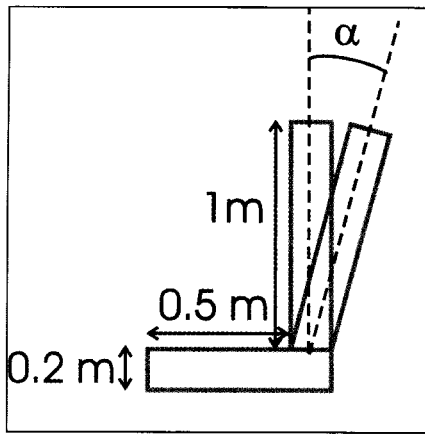
de gevels resulteert direct in een sterke stijging van de afscherming. De oorzaak van dit grote effect is dat er veelvuldige interacties zijn tussen de geluidsgolven en de gevels, alvorens de broncanyon verlaten wordt. Gevels opgebouwd uit grote - akoestisch harde - glaspartijen leiden tot een (nadelige) stijging van de geluidsniveaus op afgeschermd plaatsen.

##### Invloed van diffuse reflectie en balkons

Gevels van gebouwen bestaan vaak uit een aantal in- en uitsprongen, naast allerhande oneffenheden. Bij volledig vlakke gevels treedt enkel spiegelende reflectie op. Het voorkomen van oneffenheden zal ervoor zorgen dat naast spiegelende reflectie, ook een deel van de akoestische energie diffuus zal reflecteren. In veel modellen wordt enkel met spiegelende reflectie rekening gehouden. Talrijke studies duiden echter op het belang van diffuse reflectie in stedelijk gebied.<sup>7</sup> Met het FDTD-model is het mogelijk om oneffenheden expliciet te modelleren. De invloed van een gevel, zoals voorgesteld in figuur 2, op geluidsniveaus in de ontvangercanyon is onderzocht. Insprongen voor ramen, uitsprongen voor vensterbanken,



FIGUUR 3. OGENBLIKKELIJKE DRUKVELDEN IN DE BRONCANYON, OP 3 GESELECTEERDE TIJDSTAPPEN, NA EMISSIE VAN EEN GELUIDSPULS (BEKIJK DE FIGUURTJES VAN LINKS NAAR RECHTS). IN DE FIGUURTJES BOVENAAN ZIJN DE GEVELS VLAK, ONDERAAN IS HET GEVELPROFIEL UIT FIGUUR 2 GEBRUIKT.



FIGUUR 4. DETAIL EN AFMETINGEN VAN BALKON.

alsook een ruwe, gemetselde muur is gemodelleerd. Vensters (en ramen) en vensterbanken zijn akoestisch hard, de muur heeft een genormalizeerde impedantie gelijk aan 10 (82 % reflectie bij loodrechte inval).

De introductie van diffuse reflectie heeft een positief effect op de afscherming. Met stijgende frequentie wordt het effect groter. Bij elke interactie tussen geluidsgolf en wand wordt een deel van de akoestische energie meer opwaarts of neerwaarts gestuurd dan bij zuivere spiegelende reflectie. Deze energie zal niet steeds het diffractie punt bereiken. Het resultaat is dat de directiviteit van de bron canyon wijzigt: het afstralingspatroon is meer vertikaal gericht, en minder geluid wordt waargenomen bij de ontvanger. Om puur het effect van het niet-vlak zijn van de gevel te berekenen, is in tabel 1 voor de parameter diffuse reflectie afgeweken van de referentiesituatie. De vergelijking is gemaakt met een vlakke gevel, met op elke hoogte dezelfde impedantie als in figuur 2.

Een tijdsdomeinmodel zoals FDTD laat toe de geluidsgolven te visualiseren in functie van de tijd. In figuur 3 is het geluidsveld na een aantal reflecties van een akoestische puls in de bron canyon weergegeven. Het effect van de diffuse reflectie is duidelijk zichtbaar. Bij elke interactie met de gevels wordt een deel van de energie van het speculaire veld overgebracht naar het diffuse veld.

Ietwat analoog aan diffuse reflectie is het effect van balkons. Over de volledige hoogte van de gevels werden (kleine) balkons gesimuleerd (zie figuur 4). Het balkon heeft een impedantie gelijk aan 10. De berekening werd herhaald waarbij de borstwering iets overhelde ( $\alpha=30$  graden) naar het centrum van de canyons toe. We berekenen een belangrijk positief effect wanneer we vergelijken met een gevelvlak zonder balkons: de afschermwaarden nemen toe. Het laten overhellen van de borstwering resulteert in een bijkomende afscherming.

#### INVLOED VAN WINDAFWAARTSE GELUIDSVOORTPLANTING

Bij windafwaartse geluidsvoortplanting treedt neerwaartse afbuiging van geluid op. In stedelijke omgeving zal dit effect versterkt worden door het voorkomen van sterke gradiënten in de windsnelheid boven de canyons, ter hoogte van de daken. Bovendien is de windstroming boven een stad sterk turbulent, door de vele interacties met obstakels windopwaarts.

Het windveld in de buurt van de canyons werd in detail gesimuleerd met stromingssoftware. Deze informatie werd gebruikt voor de geluidsvoortplantingsberekeningen met FDTD en PE. Turbulente verstrooiing van akoestische golven werd

gemodelleerd tijdens de PE berekeningen.<sup>4</sup> Een simulatie werd verricht voor een windsnelheid gelijk aan 3.75 m/s en 7.5 m/s, op 20 m hoogte ten opzichte van het straatniveau (dus op 10 m boven de daken). Een sterk turbulente atmosfeer werd verondersteld.

Uit Tabel 1 blijkt dat het effect van wind belangrijk is. Voor beide simulaties werd een daling in afscherming van meer dan 5 dB berekend (in vergelijking met een windstille atmosfeer) voor het totale A-gewogen verkeersgeluid. Met toenemende windsnelheid wordt de invloed van de wind iets groter. Berekeningen leerden verder (niet weergegeven) dat met stijgende afstand tussen de canyons en met stijgende frequentie, het (negatief) verschil met een windstille atmosfeer vergroot.

#### BESLUIT

Gebruik makende van gesofistikeerde numerieke modellering werd de geluidsvoortplanting van een bron canyon naar een identieke ontvangercanyon onderzocht, in een tweedimensionale rekenruimte. De breedte-hoogte verhouding B/H van de canyons blijkt vooral van belang bij zeer nauwe canyons: de afscherming voor B/H=0.5 is aanzienlijk sterker dan voor B/H=1. Bij grotere B/H verhoudingen daalt de afscherming in beperkte mate. De absorptie-eigenschappen van de gevels zijn van groot belang. Zo zijn akoestisch harde en vlakke gevelafwerkingen nadelig voor de afscherming naar de ontvangercanyon. Diffuse reflectie en het voorkomen van balkons zorgen dan weer voor verhoogde afscherming in vergelijking met volledig vlakke gevels. Windafwaartse geluidsvoortplanting zorgt voor een te verwachten daling in de afscherming in vergelijking met een windstille atmosfeer.

parameter	details	verschil (dB(A))	referentie
B/H verhouding	B/H=0.5	7,4	B/H=1
	B/H=1.5	-0,9	B/H=1
	B/H=2	-2,7	B/H=1
absorptie gevels	hard	-16,8	Z=10
	Z=5	8,3	Z=10
diffuse reflectie	profiel Figuur 2	5,2	vlakke gevel (Z=10 + hard)
balkons	verticale borstwering	7,4	geen balkons
	helling borstwering=30 graden	8,2	geen balkons
windeffect (windafwaarts)	$u_{20m}=3.75$ m/s	-5,5	windstille atmosfeer
	$u_{20m}=7.5$ m/s	-5,8	windstille atmosfeer

TABEL 1. INVLOED VAN ONDERZOCHE PARAMETERS VOOR TOTAAL A-GEWOGEN VERKEERSGELUID BIJ DE ONTVANGER, TEN OPZICHT VAN DE REFERENTIESITUATIE. POSITIEVE WAARDEN DUIDEN OP EEN STERKERE AFSCHERMING. OM PUUR HET EFFECT VAN HET NIET-VLAK ZIJN VAN DE GEVEL TE BEGROTEN, IS EEN ALTERNATIEVE REFERENTIE GEKOZEN BIJ DE BEREKENING VAN DE INVLOED VAN DIFFUSE REFLECTIE.

#### LITERATUUR

1. E. Öhrström: Psycho-social effects of traffic noise exposure. Journal of Sound and Vibration 151 (1991) 513-517.
2. R. Blumrich, D. Heimann: A linearized Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects. Journal of Acoustical Society America 112 (2002) 446-455.
3. T. Van Renterghem: De eindige-differenties-in-tijdsdomeinmethode voor de simulatie van geluidspropagatie in een bewegend medium. Doctoraatsthesis, Universiteit Gent (2003).
4. E. Salomons: Computational atmospheric acoustics. Kluwer, Dordrecht (2001).
5. T. Van Renterghem, E. Salomons, D. Botteldooren: Efficient FDTD-PE model for sound propagation in situations with complex obstacles and wind profiles. Acta Acustica united with acustica 91 (2005) 671-679.
6. T. Van Renterghem, E. Salomons, D. Botteldooren: Parameter study of sound propagation between city canyons with coupled FDTD-PE model. Proceedings of Forum Acusticum 2005, Budapest, Hongarije.
7. J. Kang: Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries. Journal of Acoustical Society America 107 (2000) 1394-1404.