

AKOESTIEK VAN OPENLUCHT-THEATERS IN KAART GEBRACHT

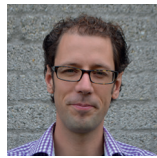
In het project 'Ancient Acoustics' zijn drie klassieke openluchttheaters akoestisch in kaart gebracht. Voor het uitvoeren van de metingen is een meetprocedure ontwikkeld waarbij een groot aantal impulsresponsies in korte tijd konden worden gemeten. Hierbij is in het bijzonder aandacht besteed aan de nauwkeurigheid van de meetresultaten. De resultaten van zowel de zitplaatsen als het podium zijn tot in detail gepresenteerd en vervolgens vergeleken met de resultaten van geometrische simulatiemodellen. In dit artikel vindt u de 'highlights' van dit onderzoeksproject.



ir. C.C.J.M. (Constant) Hak, Technische Universiteit Eindhoven, unit Building Physics and Services



ing. M.C. (Marco) van der Wilt, TU/e, unit BPS



ir. R.H.C. (Remy) Wenmaekers, Level Acoustics, TU/e, unit BPS



ir. N. (Niels) Hoekstra, TU/e, unit BPS



ir. A. (Adonia) Diakoumis, TU/e, unit BPS



R.C. (Chris) van Loenen, BSc., TU/e, unit BPS



ir. B.P.A. (Bas) Peeters, TU/e, unit BPS



ing. B. (Bareld) Nicolai, TU/e, unit BPS

INTRODUCTIE

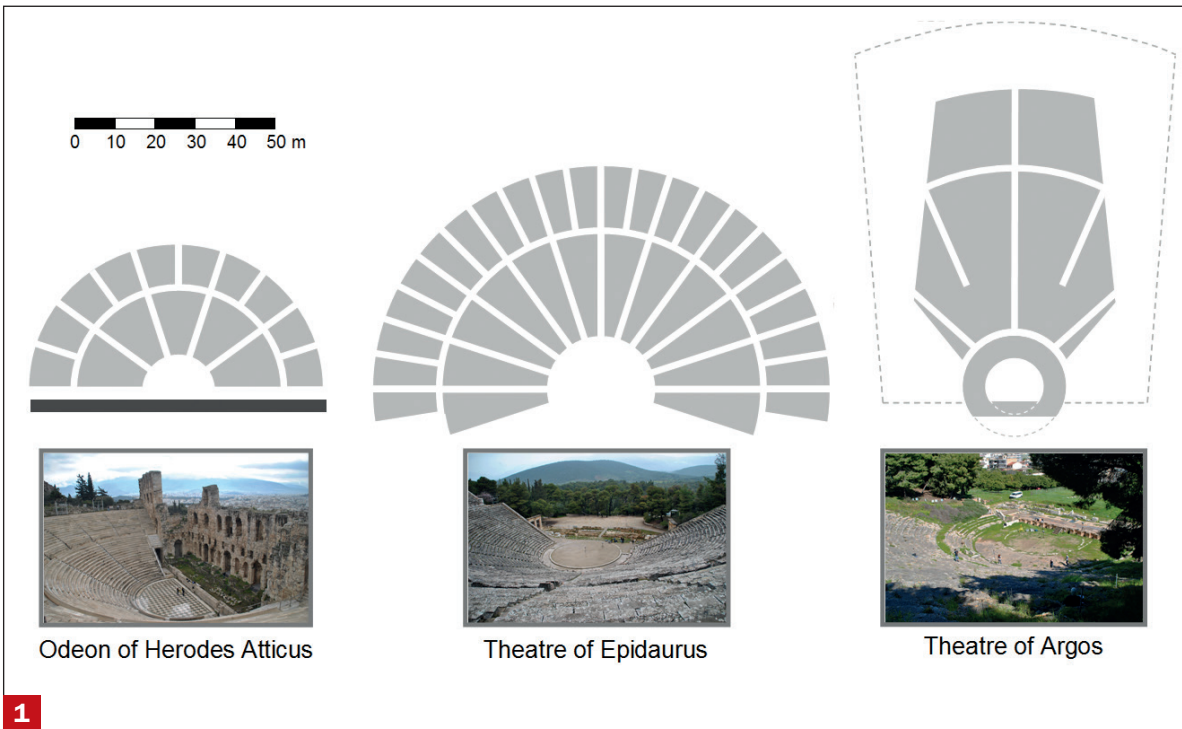
Openluchttheaters zijn eeuwen geleden ontstaan uit de noodzaak om grote groepen mensen toe te kunnen spreken. In eerste instantie werden hiervoor plekken gebruikt met een natuurlijk halfronde vorm. Door deze halfronde vorm wordt de gemiddelde afstand tussen spreker en luisteraar teruggebracht tot een minimum. Deze natuurlijk gevormde plekken hebben aan de basis gestaan van de ontwikkeling van het Griekse openluchttheater. Aanvankelijk werden Griekse theaters gebruikt voor het uitvoeren van ceremonies en later voor het opvoeren van drama-voorstellingen. De Romeinen hebben het theater verder ontwikkeld door dit uit te breiden met een achterwand, een verhoogd podium en een overkapping. Een theater ontwikkeld voor de opvoering van muziek wordt Odeon genoemd [1]. De klassieke openluchttheaters worden genoemd om hun goede, bijna mythische akoestiek, vooral wat betreft de spraakverstaanbaarheid [2]. Men zou een spreker staand in het centrum van het theater tot op de achterste rij perfect kunnen verstaan. Klassieke openluchttheaters worden vandaag de dag nog voor veel doeleinden gebruikt, waaronder hedendaagse muziekvoorstellingen. Iets waar ze in principe niet voor bedoeld zijn. Dit levert een aantal problemen op, onder andere het gebrek aan levendigheid door weinig late reflecties [3].

Ondanks het feit dat de akoestiek van openluchttheaters al veel akoestische experts bezig heeft gehouden, is er geringe wetenschappelijke onderbouwing die de geclaimde bijzonder goede geluidsoverdracht en spraakverstaanbaarheid aantoont. Dit komt onder andere door de meetmethode en het beperkte aantal meetposities waaruit conclusies werden getrokken [4]. Resultaten uit simulatiemodellen worden vaak gepresenteerd als 'mappings' waarbij de akoestiek van de volledige theaters wordt getoond. Door het kleine aantal metingen waarmee deze resultaten zijn vergeleken, kan niet met zekerheid worden aangenomen dat deze resultaten representatief zijn voor de werkelijkheid. Bovendien wordt er in de literatuur weinig aandacht besteed aan de betrouwbaarheid van de meetresultaten [5].

Bovenstaande was voor zes studenten en twee begeleiders van de Technische Universiteit Eindhoven aanleiding voor het opzetten van een groot onderzoeksproject genaamd 'Ancient Acoustics' [4-7]. Speciaal hiervoor is een meetprocedure ontwikkeld waarbij in een korte tijd een groot aantal impulsresponsies kan worden gemeten. De theaters waarin metingen zijn verricht zijn het Odeon van Herodes Atticus gelegen in Athene, het theater van Epidaurus en het theater van Argos [5]. Hierbij moet worden opgemerkt dat de tand des tijds en eerder uitgevoerde (globale) restauraties invloed hebben gehad op de huidige staat van de theaters. Voorbeelden hiervan zijn het ontbreken van het dak van het Odeon van Herodes Atticus en de beschadigde en geërodeerde trappen van het theater van Argos. De vorm van de theaters is schematisch weergegeven in figuur 1. De meetresultaten zijn gebruikt om de theaters nauwkeurig akoestisch in kaart te brengen [5,7]. Daarnaast zijn de resultaten van het Odeon van Herodes Atticus en het theater van Epidaurus vergeleken met simulatieresultaten [6].

MEETTECHNIEK

Om de vermeende goede akoestiek van klassieke openluchttheaters te bevestigen of tegen te spreken of om akoestische rekenmodellen te 'toetsen' zijn er in het verleden veel metingen gedaan. Diverse pulsieve signalen zoals handgeklap, ballonnen, rotjes, alarmpistolen, maar ook deterministische signalen zoals pseudorandom ruis en sweeps, afgespeeld via geluidbronnen, zijn gebruikt om impulsresponsies te verkrijgen. De hieruit afgeleide

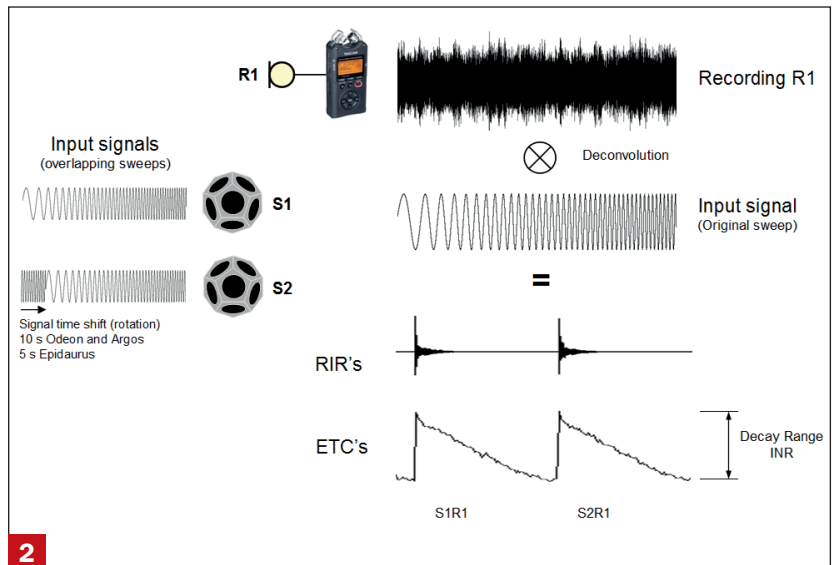


1 Schematische plattegrond en foto van de drie verschillende theaters waarin metingen zijn verricht. De licht grijze delen tonen de zitplaatsen, het donkergrijze deel de achterwand. De gestippelde lijn is de originele contour van het theater van Argos

parameterwaarden zijn daarbij meestal gepresenteerd zonder de kwaliteit van de gebruikte impulsresponsies te benoemen waardoor geen uitspraak kan worden gedaan over de betrouwbaarheid van de uitkomsten.

Het bepalen van een geschikte meetmethode voor ‘standaard’ zaalakoustische metingen in een concertzaal of theaterzaal is altijd een afweging tussen tijd en meetnauwkeurigheid, onder andere bepaald door het type meetsignaal en het aantal metingen. Voor betrouwbare meetresultaten worden er in de ISO 3382 voor een aantal parameters eisen gesteld aan de gemeten impulsresponsies in de vorm van een minimum ‘decay range’ (vervalwaarde in dB) zoals weergegeven in figuur 2. Deze waarde wordt berekend/geschat met behulp van de INR (Impulse response to Noise Ratio) en kan worden gezien als kwaliteitsparameter voor een gemeten impulsresponsie [8]. Een belangrijk doel van dit onderzoeksproject was het ontwikkelen van een meetprocedure om met een team van acht personen, in korte tijd en een minimum aan apparatuur, zoveel mogelijk ‘openlucht-impulsresponsies’ te verkrijgen. Uit deze impulsresponsies zouden alle gewenste parameters met een meetnauwkeurigheidseis van 1 JND (Just Noticeable Difference) kunnen worden bepaald. Hierbij is het openluchttheater ‘Kersouwe’ in Heeswijk-Dinther gebruikt als test- en oefenlocatie.

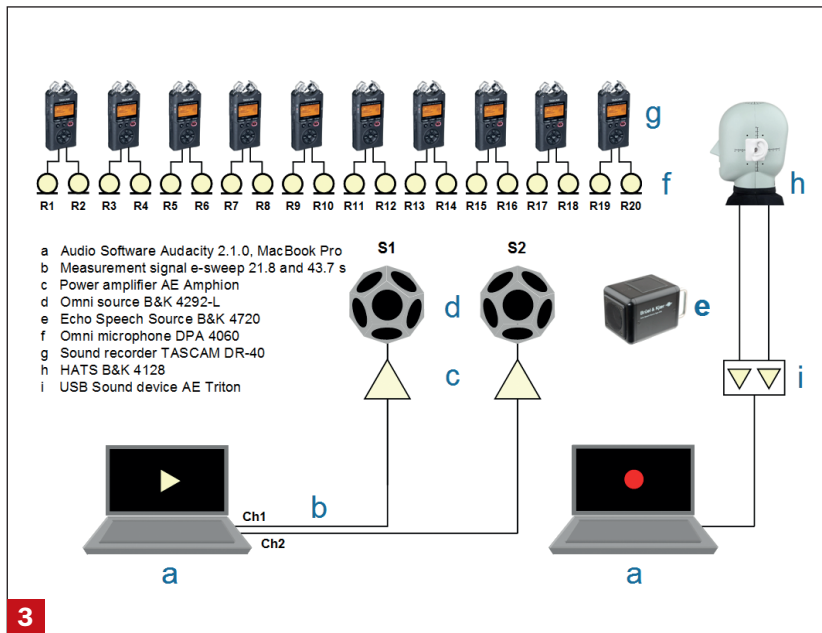
Om de meettijd te beperken is voor dit onderzoek een speciale meetopstelling samengesteld waarbij asynchrone (open-loop/draadloze) metingen kunnen worden uitgevoerd voor meerdere, simultane, omnidirectionele geluidbronnen. De meetopstelling die is gebruikt voor dit onderzoek is schematisch weergegeven in figuur 3. Deze techniek heeft zich al eerder bewezen bij een evenement tijdens de Dutch Design Week van 2014, waarbij in een grote, volledig bezette concertzaal van het



2 Setup voor de 2-kanaals asynchrone impulsresponsiemeting

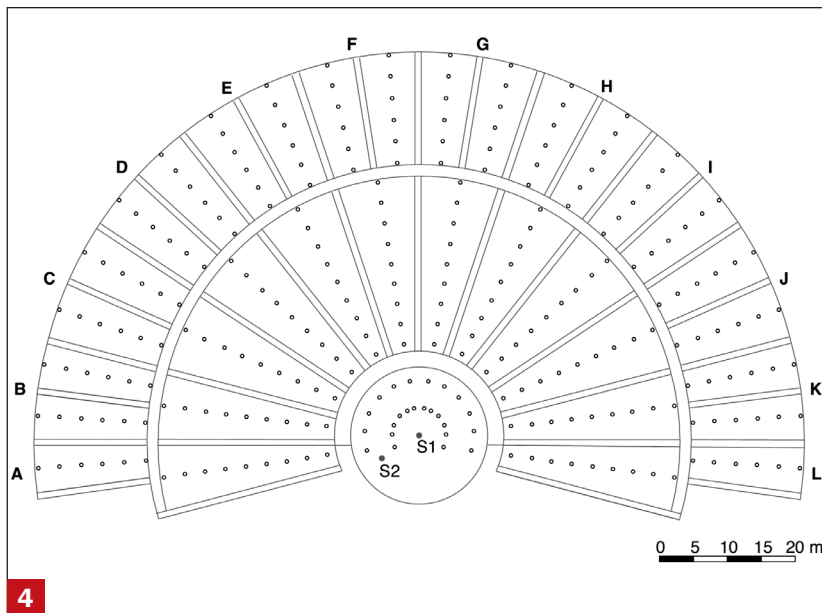
Muziekgebouw in Eindhoven, simultaan, acht omnidirectionele bronnen zijn gebruikt [9]. In combinatie met meerkanaals-opnametechnieken en relatief (noodzakelijk) lange meetsignalen kan deze techniek veel tijd besparen. Hierbij is rekening gehouden met het effect van asynchroniteit ten gevolge van klokverschillen in de meetketen, afwijkingen in de richtwerking van de gebruikte geluidbronnen, systeemvariantie door meteorologische invloeden ten gevolge van wind en temperatuurschommelingen en het effect van stoorgeluid of achtergrondruis op de kwaliteit van de gemeten impulsresponsies.

Met de beperkte beschikbare tijd van twee dagen per theater (inclusief bepaling geometrie en voorbereiding), heeft de gebruikte asynchrone meettechniek in combinatie met de simultaan gegenereerde meetsignalen geresul-



3

Signaalanalyse van één digitaal opnamekanaal. Deconvolutie van het opgenomen signaal met de originele e-sweep resulteert in een ‘responsietrein’. De afzonderlijke impulsresponsies of de hiervan afgeleide Energie-Tijd-Curven (ETC’s) representeren één van de twee bronposities



4

Meetplattegrond voor het theater van Epidaurus. Omnidirectionele bronnen (S1 en S2) zijn aangegeven met donkere stippen (●), omnidirectionele ontvangers met lichte stippen (○)

teerd in meer dan 10.000 betrouwbare impulsresponsies. Voor de gemeten ISO 3382 parameters geldt dat gemiddeld meer dan 95% van alle resultaten voldoet aan de vooraf gestelde meetnauwkeurigheidseis van 1 JND. Voor de IEC 60268-16 spraakparameters (speciale spraakbron met MLS als bronsignaal) geldt een gemiddeld ‘1 JND-percentage’ van 90% voor de RASTI-waarde, voor meer duidelijkheid zie tabel 1. Uit de verkregen meetresultaten blijkt tevens dat, gebruik makend van dezelfde meetopstelling en -procedure, eventuele avond- of nachtmetingen zouden hebben geleid tot een 1 JND-percentage van 100%.

MEETRESULTATEN

Als voorbeeld worden alleen de metingen besproken die zijn verricht in het theater van Epidaurus. Voor deze meting zijn twee omnidirectionele bronnen, één spraakbron en 20 omnidirectionele microfoons gebruikt. Voor de metingen met de bolbronnen is gebruik gemaakt van een e-sweep signaal. De omnidirectionele bronnen zijn hierbij gedraaid in vijf gelijkhoekige stappen om richtwerking voor hoge frequenties uit te middelen. Er is gebruik gemaakt van twee bronposities (S1 en S2) om het effect van het verplaatsen van de bron uit het centrum van het theater mee te nemen. De spraakbron wordt gebruikt voor het meten van de spraakverstaanbaarheid, uitgedrukt in de Speech Transmission Index (STI). De meetposities liggen op radialen vanuit het centrum van het theater over de zitplekken zoals afgebeeld in figuur 4. In het hoger gelegen deel van de tribunes worden de lijnen gesplitst voor een betere verdeling van meet/ontvanger posities, wat resulteert in 264 meetposities.

In figuur 5 zijn voor beide bronposities ‘mappings’ weergegeven van gemeten akoestische grootheden geluidsterkte (G), nagalmtijd (T_{20}) en helderheid (C_{80}). De gemiddelde waarden van de vijf gelijkhoekige bronrotaties zijn gepresenteerd als eengetalswaarden (500-1000 Hz) zoals omschreven in de ISO 3382-1. In figuur 5a is te zien dat de bronpositie een geringe invloed heeft op de verdeling van de geluidsterkte, deze neemt over de hele ronding van het theater uniform af. Wanneer er in figuur 5b wordt gekeken naar de nagalmtijd T_{20} , valt op dat wanneer de bron in het centrum van het theater staat (S1), de nagalmtijd gemiddeld 0,3 s langer is in de zijkanen van het theater. Dit effect verdwijnt wanneer de bron wordt verplaatst naar positie S2. De verlengde

Tabel 1: Percentage van alle gemeten impulsresponsies die een zekere decay range (INR) overstijgen

Theater	Omnidirectionele geluidbron						Spraakbron		
	INR>25 dB	INR>35 dB		INR>45 dB			INR>25 dB		
	125-4K	125-4K	500-1K*	125-2K	250-4K	500-1K*	125-8K	250-8K	500-2K**
Odeon van Herodes Atticus (‘s ochtends)	100%	97%	100%	81%	45%	83%	25%	82%	91%
Odeon van Herodes Atticus (‘s avonds)	100%	100%	100%	97%	95%	98%	43%	92%	100%
Theater van Epidaurus	100%	93%	100%	88%	52%	52%	83%	83%	90%
Theater van Argos	100%	96%	96%	56%	56%	56%	55%	78%	85%

* eengetalswaarde in overeenstemming met de ISO 3382-1

** RASTI in overeenstemming met de IEC 60268-16

nagalmtijd kan worden verklaard door wederzijdse beïnvloeding van tegenover liggende tribunedelen. De helderheid C_{80} zoals afgebeeld in figuur 5c laat een vergelijkbaar beeld zien, hier is het effect bij beide bronposities aanwezig.

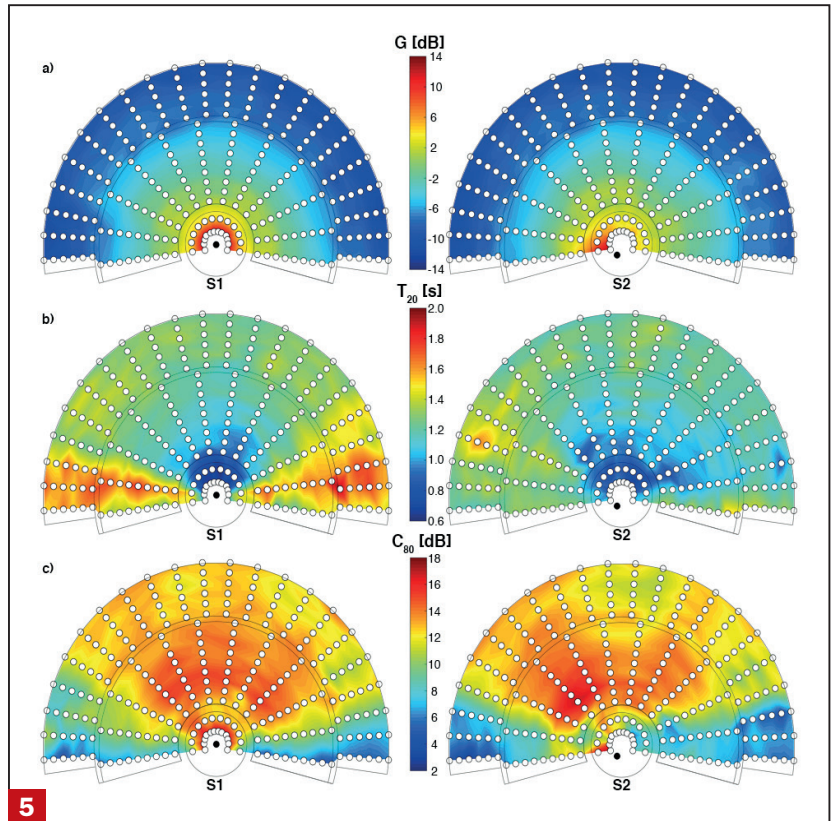
In figuur 6 is de gemeten spraakverstaanbaarheid (STI) als functie van afstand weergegeven voor een rechte lijn vanuit het centrum van het theater door het midden van de tribune (lijn F, figuur 4). Hierin wordt de spraakverstaanbaarheid voor een normale stem (60 dB(A)), een verheven stem (82,3 dB(A)) en voor een normale stem met een oneindige grote signaal-ruisverhouding getoond. De waarden van de normale en verheven stem zijn berekend met de achtergrondniveaus uit tabel 2. De meetresultaten laten zien dat normale spraak achterin het theater slecht zal worden verstaan. Bij een verheven stem is de spraakverstaanbaarheid grotendeels ‘goed’ (STI > 0,6). De resultaten voor een stem met een oneindige grote signaal-ruisverhouding zijn in figuur 6 opgenomen omdat deze waarden voor uitstekende spraakverstaanbaarheid overeenkomen met waarden die zijn gevonden in de literatuur. Het is aannemelijk dat resultaten uit eerder onderzoek op basis van een ‘oneindig’ hoge signaal-ruisverhouding zijn gebruikt.

De meetresultaten laten zien dat ondanks het open karakter van het theater en het ontbreken van een achterwand, er nog enige vorm van akoestiek aanwezig is. Van een uitstekende spraakverstaanbaarheid is echter geen sprake. Met een normale steminspanning is het voor een spreker in het centrum van het theater (ook zonder publiek) nagenoeg onmogelijk zich verstaanbaar te maken op de achterste rij. Alleen met stemverheffing is het mogelijk de spreker te verstaan. Dit blijkt zowel uit meetresultaten als uit eigen ervaring tijdens een voorstelling.

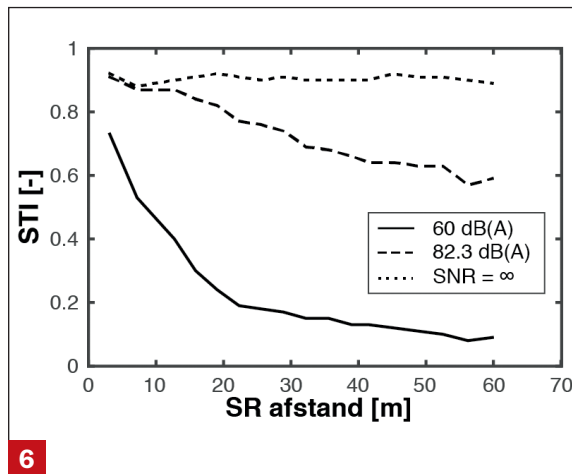
MEETRESULTATEN PODIUM

De podiumomgeving van een klassiek openluchttheater wordt gevormd door een ronde vorm, genaamd ‘Orchestra’, met daarachter een verhoogd podium omgeven door een versierde achterwand. Er zijn voorstellingen bekend waarbij gedanst, gezongen en gemusiceerd werd in de ronde vorm, terwijl enkele acteurs op het verhoogde podium acteerden, zie figuur 7. In tegenstelling tot een hedendaagse concertzaal of operaal gaat het in een klassiek openluchttheater om een relatief kleine muziekgroep en er wordt in principe alleen gezongen vóór het podium. Ondanks deze verschillen zal de akoestiek van de podiumomgeving ook in de oude theaters invloed hebben gehad op het samenspel tussen musici onderling en op het samenspel tussen musici en acteurs.

De samenspelcondities kunnen beoordeeld worden met de akoestische grootheden Early Support (ST_{early}) en



5 Mappings van gemeten grootheden (A) geluidssterkte G, (b) nagalmtijd T_{20} en (c) helderheid C_{80} . Verkregen met de omnidirectionele bron op posities (S1 en S2)

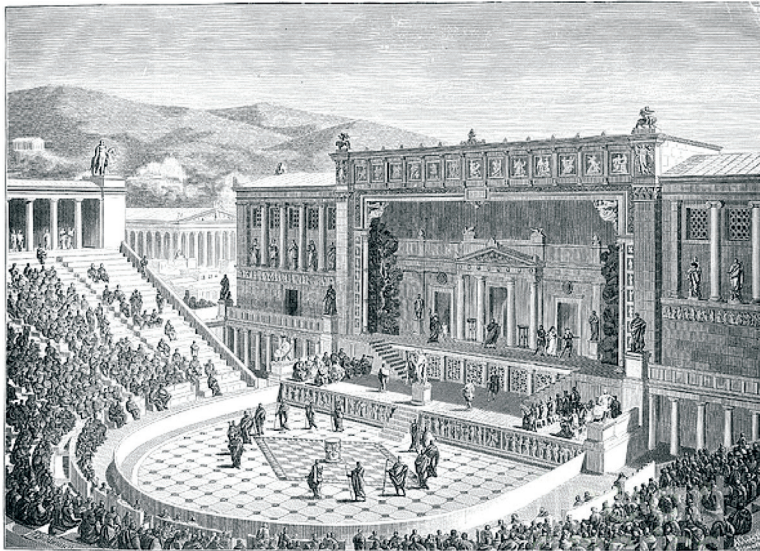


6 Gemeten spraakverstaanbaarheid STI als functie van de bron-ontvanger afstand (SR afstand). Weergegeven zijn waarden voor normale steminspanning (doorgetrokken lijn), verhoogde steminspanning (gestreepte lijn) en steminspanning met oneindig hoge signaal-ruis verhouding (gestippeld)

Late Support (ST_{late}). Hierbij wordt de hoeveelheid vroege en late energie gemeten met een omnidirectionele geluidbron en microfoon. Volgens de ISO 3382-1 moeten deze grootheden gemeten worden op één meter

Tabel 2: Gemiddelde achtergrondgeluidniveaus verzameld uit metingen in de drie bezochte theaters

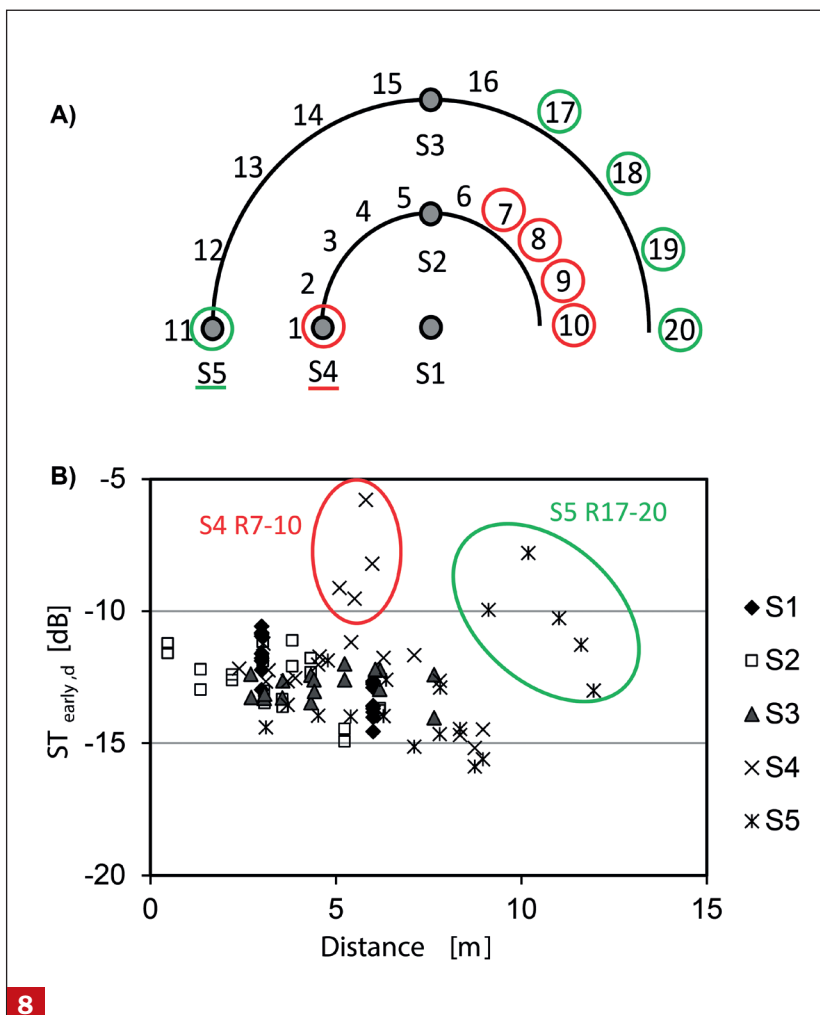
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	(A)
L_{eq} achtergrond (dB)	40,0	36,0	37,0	34,9	32,3	28,8	23,6	39,8



THEATRE OF DIONYSOS AT ATHENS.
Restored from recent excavations.

7

Schets met mogelijke cirkelvormige opstelling



8

(a) Meetposities op de 'Orchestra' Odeon van Herodes Atticus,
(b) $ST_{early,d}$ Odeon van Herodes Atticus

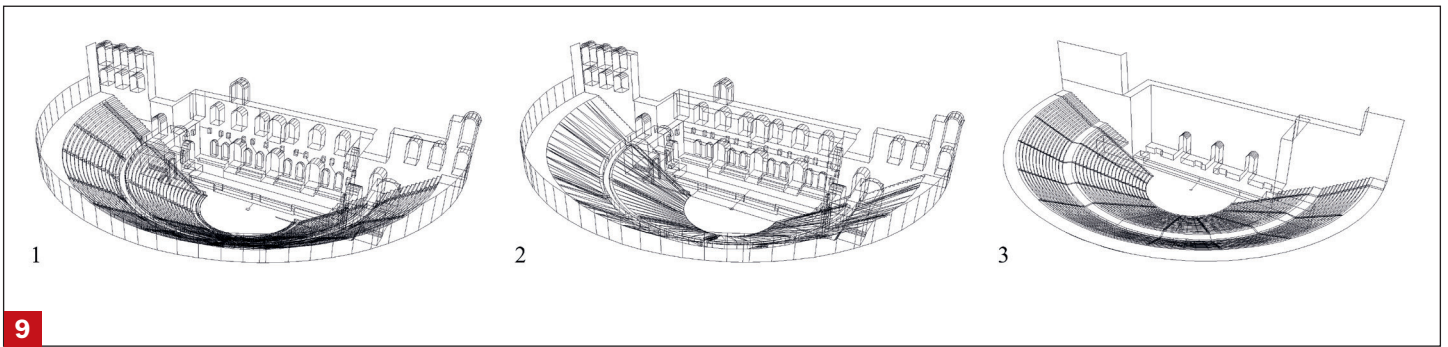
afstand van de bron. Echter is het ook mogelijk de aan-
gepaste grootheden $ST_{early,d}$ en $ST_{late,d}$ te meten op grotere
afstanden van de bron. Uit eerdere metingen op conc-
ertzaalpodia, in orkestbakken en in oefenruimtes is
gebleken dat $ST_{early,d}$ logaritmisch afneemt met de
afstand. Deze afname verschilt per zaal. Meer informa-
tie over de logaritmische afname is te vinden in [7]. In
dit onderzoeksproject zijn de podiumparameters $ST_{early,d}$
en $ST_{late,d}$ gemeten in het Odeon van Herodes Atticus en
het theater van Argos. Hierbij moet rekening worden
gehouden met het feit dat er in het Odeon geen podi-
umvloer meer aanwezig is en dat in Argos de achter-
wand ontbreekt en de treden voor een groot deel
beschadigd zijn. Het is vooral interessant om de twee
theaters te vergelijken en het verloop van de parameters
als functie van de afstand te bestuderen.

In figuur 8 zijn enkele meetposities in het Odeon van
Herodes Atticus en het meetresultaat voor $ST_{early,d}$ in de
'Orchestra' weergegeven (voor meer resultaten zie [7]).
De meeste resultaten tonen een puntenwolk waarin een
afname te zien is van de $ST_{early,d}$ met de afstand. Er zijn
opvallende uitschieters ten opzichte van de wolk. Derge-
lijke sterke uitschieters zijn niet gevonden bij metingen in
zalen. Het blijkt dat de uitschieters in beide theaters voor-
komen wanneer bron en ontvanger zich (ongeveer) punt-
symmetrisch bevinden ten opzichte van het midden van
de cirkelvorm. De ronde vorm van de theaters veroor-
zaakt focussing op deze plekken. Het belangrijkste vers-
chil tussen de twee theaters is de achterwand en de bete-
re staat van de treden in het Odeon ten opzichte van
Argos. In het Odeon is er door de achterwand een
opbouw van galm mogelijk waardoor de $ST_{late,d}$ hoger is
dan in Argos. Het ontbreken van de achterwand, de ruwe
vorm van de treden en de grotere 'Orchestra' zorgen in
Argos voor een lagere $ST_{early,d}$.

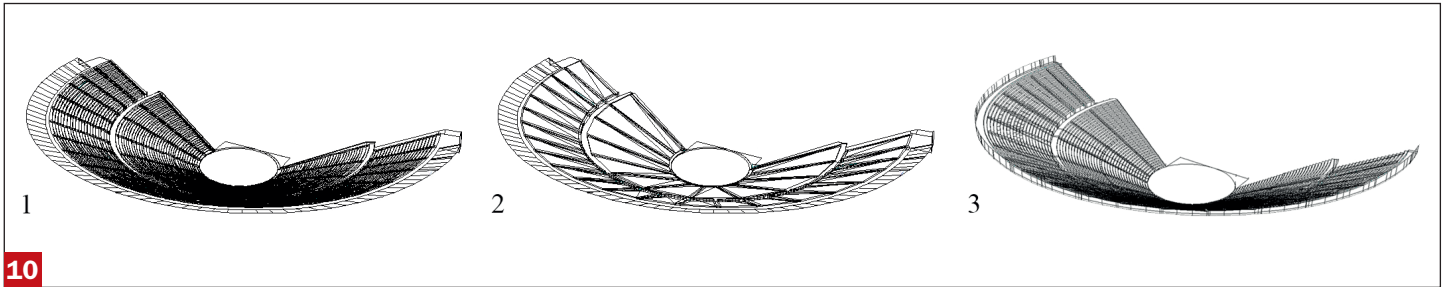
In de klassieke openluchttheaters wordt het focuserings-
effect door menig bezoeker waargenomen wanneer hij of
zij met de handen klapt in het midden van de 'Orchestra'.
Verstrooiing van geluid op de concentrische treden zorgt
voor reflectie terug naar de bron, versterkt door focusse-
ring. Door de olopende vertraging tussen de aankomst
van het geluid van twee opeenvolgende treden ontstaat er
een karakteristiek reflectiepatroon dat ervaren wordt als
een exponentieel dalende toon, een zogenaamde 'chirp'.
Uit de meetresultaten blijkt dat deze chirp ook gehoord
wordt wanneer twee personen punt-symmetrisch ten
opzichte van het centrum gaan staan, waarbij één per-
soon klapt en de andere luistert. Het is denkbaar dat de
verkleurende werking van de focussing ook door de
oude Grieken is gehoord omdat ze waarschijnlijk in een
cirkelvorm musiceerden rondom een altaar in het midden
van de 'Orchestra'. Het is een vreemde akoestische erva-
ring: het is alsof je een concertzaal bezoekt waar je eigen
handklap klinkt als in een dode kamer terwijl ander-
mans handklap een tonale stortvloed aan reflecties teweeg-
brengt!

SIMULATIES

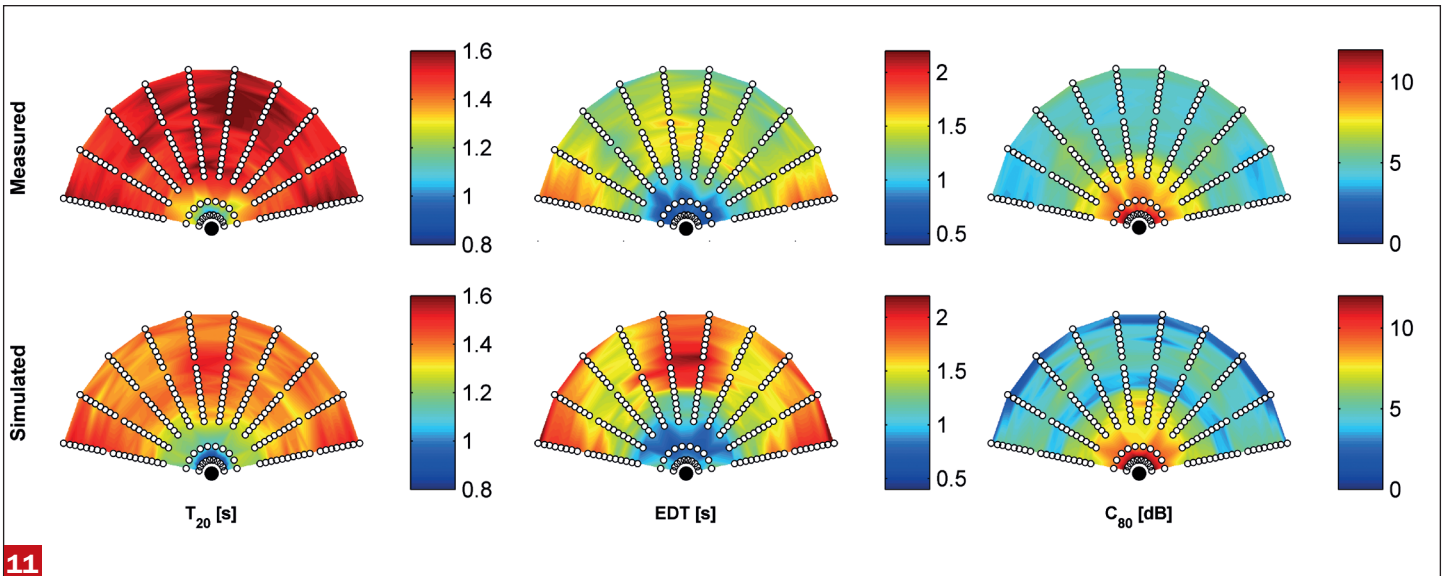
Bij het modelleren van klassieke openluchttheaters is men
vaak benieuwd naar de akoestiek in de originele of eerde-
re staat. De modellen van theaters in de literatuur zijn



Ruimtemodellen van het Odeon van Herodes Atticus zoals verkregen met behulp van Odeon (software). Van links naar rechts, het gedetailleerde model (1), het versimpelde model (2), en het model zoals verkregen vanuit de literatuur [11] (3)



Ruimtemodellen van het theater van Epidauros zoals verkregen met behulp van Odeon (software). Van links naar rechts, het gedetailleerde model (1), het versimpelde model (2), en het model zoals verkregen vanuit de literatuur [11] (3)



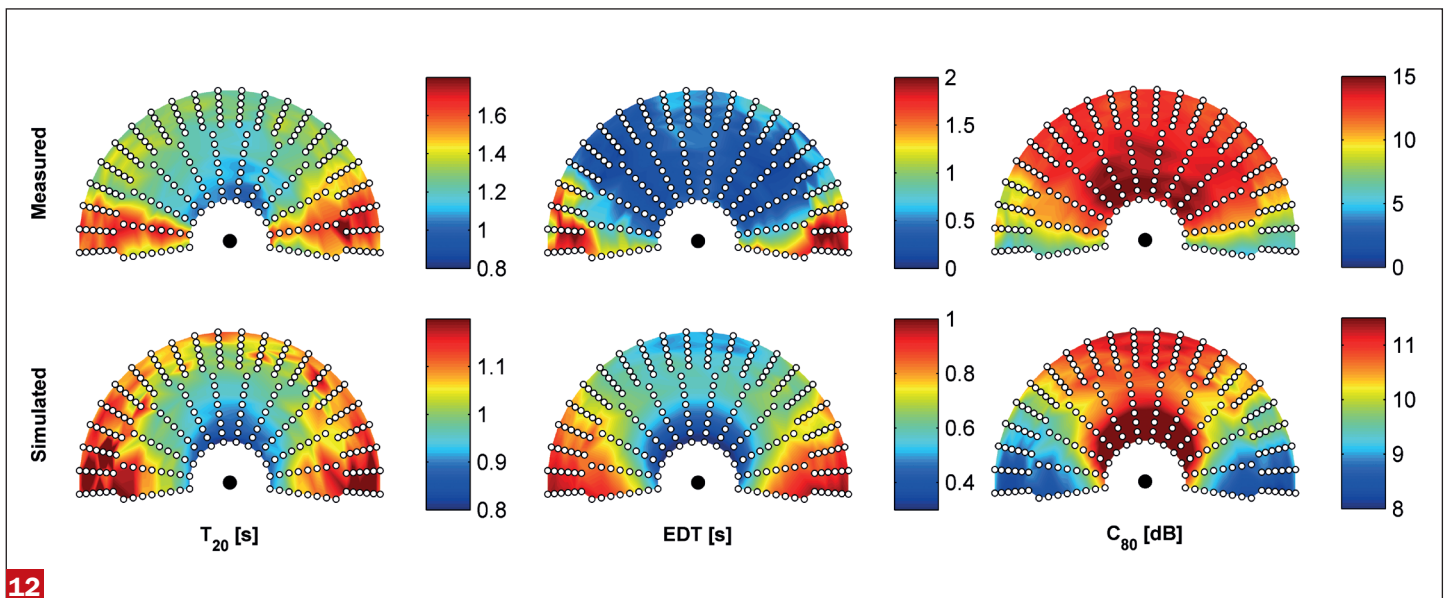
Mappings van de T_{20} , EDT, en C_{80} zoals verkregen met materiaal set 1 toegepast op het gedetailleerde model van het Odeon van Herodes Atticus. Boven: gemeten, beneden: gemodelleerd

vaak gebaseerd op aannames met betrekking tot de geometrie en de materiaaleigenschappen wat resulteert in onzekerheden en schattingen [6]. De invoereigenschappen van deze akoestische modellen worden vaak aangepast zodat de uitkomsten van het model aansluiten bij de resultaten van beschikbare metingen. Dit proces wordt aangeduid als kalibratie. Het blijft uiteraard onduidelijk of simulaties afwijken van de gemeten waarden door een verkeerde modelinvoer of een onjuiste modelbenadering.

De kalibratie van een model is meestal gebaseerd op een beperkt aantal bron-ontvanger combinaties. De metingen tijdens dit onderzoeksproject leverden een grote hoeveelheid hoge kwaliteit impulsresponsies per theater op. Als onderdeel van dit project zijn er geometrische akoestische modellen van het Odeon van Herodes Atticus en

het theater van Epidauros gemaakt. Voor beide theaters is het vormgeven van deze modellen gedaan op basis van meetdata verkregen met behulp van een theodoliet. Vervolgens is een parametrische studie gedaan naar de invloed van materiaaleigenschappen en geometrische vormgeving.

In figuur 9 en 10 zijn de modellen zoals gebruikt in dit onderzoek van het Odeon van Herodes Atticus en het theater van Epidauros afgebeeld. Van elk theater zijn drie verschillende modellen gemaakt: een gedetailleerd model op basis van de theodolietmetingen (links); een versimpeld model waarin alle trappen en zitvlakken vervangen zijn door een hellend vlak (midden); en een model op basis van literatuur (rechts) [11]. Om de invloed van materiaaleigenschappen te onderzoeken zijn



12

Mappings van de T_{20} , EDT, en C_{80} zoals verkregen met materiaal set 6 toegepast op het gedetailleerde model van het theater van Epidauros.

Boven: gemeten, beneden: gemodelleerd

aan het gedetailleerde model zes verschillende sets van materiaaleigenschappen toegekend. Deze materiaaleigenschappen zijn gebaseerd op waarden voor de absorptiecoëfficiënt en de verstrooiingscoëfficiënt zoals gevonden in literatuur [3, 10]. De onderzochte akoestische parameters zijn de nagalmtijd (T_{20}), Early Decay Time (EDT) en helderheid (C_{80}). De set materiaaleigenschappen die de kleinste afwijking (JND) in modelresultaat gaven zijn toegekend aan de overige geometrische modellen. Voor het Odeon van Herodes Atticus was dit set 1 (materiaaleigenschappen uit literatuur) en voor het theater van Epidauros zijn set 5 en 6 onderzocht (absorptiecoëfficiënt uit de literatuur in combinatie met een hoge en lage verstrooiingscoëfficiënt).

De berekende resultaten voor de T_{20} zijn voor beide gedetailleerde modellen lager dan de gemeten waarde. De verdeling van de gesimuleerde T_{20} over het publiekvlak volgt wel de gemeten waarden. De gesimuleerde EDT en C_{80} vertonen afwijkingen hoger dan de JND. Hoewel de absolute waarden afwijken, reproduceert het gedetailleerde model trends die gevonden zijn met de metingen, zie figuren 11 en 12. Voor beide theaters toont het simpele model de grootste afwijking met de metingen. Voor het theater van Epidauros zorgt een hoge verstrooiingscoëfficiënt van de afgevlakte tribunes en trappen er wel voor dat de gesimuleerde waarden dicht bij de waarden van het gedetailleerde model liggen. Het literatuurmodel van het Odeon van Herodes Atticus geeft hogere T_{20} waarden en heeft daardoor een hogere overeenkomst met de gemeten waarden. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat het literatuurmodel minder openingen in de achterwand heeft vanwege de beperkte gegevens over de achterwand in de gebruikte bron. Deze vermindering in 'absorptie' is de reden voor hogere T_{20} waarden.

In het algemeen is het voor beide theaters niet mogelijk om correct gesimuleerde waarden te verkrijgen met de gebruikte geometrische modelbenadering. Materiaaleigenschappen veranderen, of gebruik maken van modellen met een hoger detailniveau als invoer heeft niet

geleid tot voldoende verbetering van de uitkomst van het model. Trends die gevonden zijn in de metingen konden wel bevestigd worden door gebruik te maken van het rekenmodel.

CONCLUSIE

De voor dit onderzoek ontwikkelde meetprocedure (asynchroon met simultane geluidbronnen) is zeer effectief gebleken. Het grote aantal bruikbare impulsresponsies dat hierdoor is verkregen maakte het mogelijk om in detail akoestische trends en effecten zichtbaar te maken. In eerder simulatieonderzoek beschreven trends en effecten zoals wederzijdse beïnvloeding van tegenover elkaar gelegen tribunedelen zijn wederom gevonden met behulp van rekenmodellen, maar nu ook bevestigd door metingen. Naast het bekende 'chirp' en geluidversterkend effect waarbij bron en ontvanger zich in het middelpunt van het theater (moeten) bevinden is hetzelfde effect gevonden bij een overdracht tussen twee afzonderlijke posities waarbij de bron zich bevindt op de ene positie en de 'chirp' alleen kan worden waargenomen op de andere positie.

Het zou interessant zijn om voor meerdere ruimten gedetailleerde 'mappings' te bepalen, zowel gemeten als berekend. De meetprocedure die voor dit onderzoek is ontwikkeld biedt in ieder geval de mogelijkheid om ruimten in zowel onbezette als bezette toestand snel en nauwkeurig in kaart te brengen. Een enthousiast onderzoeksteam staat voor een volgende uitdaging.

Dankwoord

Dank gaat uit naar de sponsors die het project 'Ancient Acoustics' mogelijk hebben gemaakt. Zonder hun bijdrage was dit project niet mogelijk geweest. Dank aan de unit Building Physics and Services en de leerstoel Building Acoustics van de Technische Universiteit Eindhoven, Level Acoustics, Pelsers Hartmann, Da Capo, DGMR, Acoustics Engineering en LBP Sight. Het expeditieteam (zie figuur 13) kijkt terug op een zeer geslaagd onderzoeksproject.



13

Het team achter de meetexpeditie. Van links naar rechts: Adonia Diakoumis, Marco van der Wilt, Chris van Loenen, Constant Hak, Bareld Nicolai, Bas Peeters, Niels Hoekstra en Remy Wenmaekers

Meer informatie over dit project kunt u vinden op de website (www.ancient-acoustics.nl). ■

BRONNEN

- [1] Long, M., *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, Burlington USA, 2006
- [2] Vassilantonopoulos, S.L., & Mourjopoulos, J.N., A study of ancient Greek and Roman Theater Acoustics. *Acta Acustica united with Acustica* 89, 2003
- [3] Vassilantonopoulos, S.L., & Mourjopoulos, J.N., The Acoustics of Roofed Ancient Odeia: The Case of Herodes Atticus Odeion, *Acta Acustica united with Acustica* 95, 2009
- [4] Hoekstra, N., Nicolai, B., Peeters, B., Hak, C., & Wenmaekers, R., Project Ancient Acoustics part 2 of 4: Large-Scale Acoustical measurements in the Odeon of Herodes Atticus and the theaters of Epidaurus and Argos. *Proceedings of the 23rd international congress on sound & vibration*, Athens Greece, 2016
- [5] Hak, C., Hoekstra, N., Nicolai, B., & Wenmaekers, R., Project Ancient Acoustics part 1 of 4: A method for accurate impulse response measurements in large open air theatres, *Proceedings of the 23rd international congress on sound & vibration*, Athens Greece, 2016
- [6] Loenen, C., Wilt, M. van der, Diakoumis, A., Wenmaekers, R., & Hak, C., Project Ancient Acoustics part 3 of 4: Influence of geometrical and material assumptions

- on ray-based acoustic simulations of two ancient theatres. *Proceedings of the 23rd international congress on sound & vibration*, Athens Greece, 2016
- [7] Wenmaekers, R., Nicolai, B., Hoekstra, N., & Hak, C., Project Ancient Acoustics part 4 of 4: Stage acoustics measured in the Odeon of Herodes Atticus and the theatre of Argos. *Proceedings of the 23rd international congress on sound & vibration*, Athens Greece, 2016
- [8] Hak, C.C.J.M., Wenmaekers, R.H.C., & Luxemburg, L.C.J. van, Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *Acta Acustica united with Acustica* 98(6), 2012
- [9] Hak, C.C.J.M., & Wenmaekers, R.H.C., Measuring impulse responses in a fully occupied concert hall. *Proceedings of Auditorium Acoustics*, Paris France, 2015
- [10] Chourmouziadou, K., & Kang, J., Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres, *Applied Acoustics* 69, 2008
- [11] Sear, F., *Roman Theatres: An Architectural Study (Oxford Monographs on Classical Archaeology)*. Oxford University Press, Oxford USA, 2006