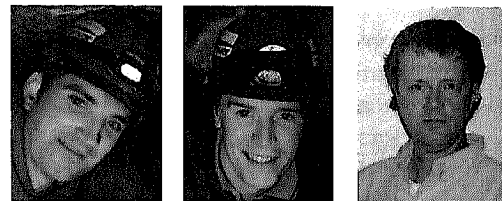


COMMUNICATIE OVER LANGE AFSTAND IN ONDERGRONDSE STEDEN CAPPADOCIË

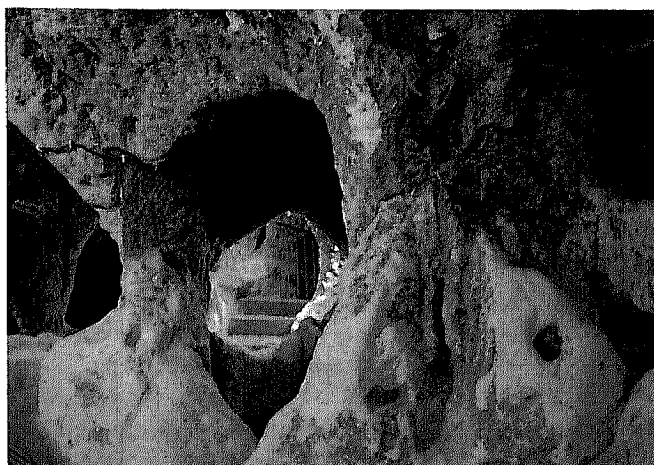


Pieter-Jan Hoes, Jan Persoon en Constant Hak, Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bouwkunde, Unit Building Physics and Systems.

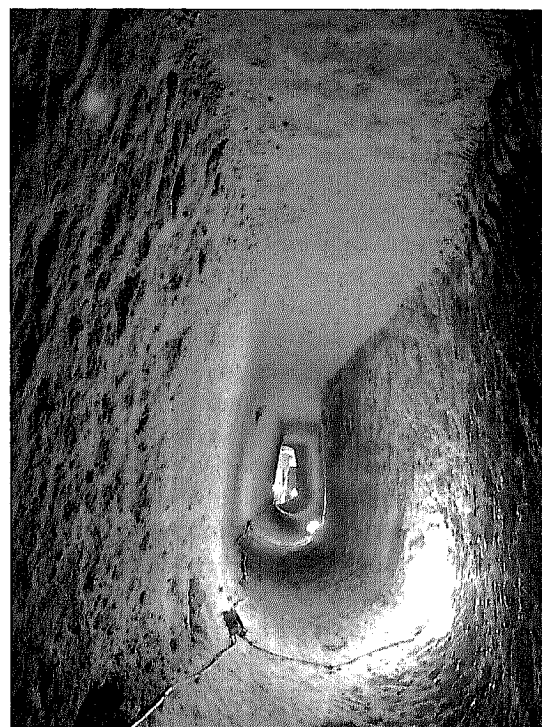
De verschillende ondergrondse steden werden vroeger verbonden door kilometers lange gangen. Deze gangen werden gebruikt om te communiceren tussen de steden. In de ondergrondse stad Derinkuyu in Cappadocië is onderzoek gedaan naar de voortplanting van geluid door de ondergrondse gangen. Hoe de communicatie precies plaatsvond is de vraag. In dit onderzoek is onderzocht of de communicatie kon plaatsvinden door het gebruik van geluid. In de stad zijn metingen verricht naar de afname van het geluiddrukkniveau over verschillende afstanden. In het laboratorium is vervolgens de geluidsabsorptiecurve van het gesteente in de stad bepaald. Uit de afname van het geluiddrukkniveau blijkt laagfrequent geluid ver door te klinken in de stad. Uit de metingen en de geluidsspectra van oude slaginstrumenten kan worden aangenomen dat er slaginstrumenten zijn gebruikt voor de communicatie tussen de steden.

INLEIDING

Een ondergrondse stad is in essentie compleet anders dan een normale, bovengrondse stad. Zo ook vanuit stedenbouwfysisch oogpunt. Boven de grond is het geluidveld bij een weg bijvoorbeeld onderhevig aan vrije veld condities, terwijl een verkeersroute in een ondergrondse stad een omsloten ruimte is. Verder is een ondergrondse stad een groot netwerk van aaneengesloten ruimten en gangen in tegenstelling tot de moderne stad, waarbij woningen als solitaire vormen in de ruimte staan. Dit zijn verschillen die een compleet andere stedenbouwfysische benadering vergen om antwoord te kunnen geven op stedenbouwfysische vragen. Welke mate van privacy is er mogelijk in een ondergrondse stad? Is de stad



Figuur 1: Poreus netwerk van gangen en kamers



Figuur 2: Eén van de lange gangen in de ondergrondse stad

een geleider van geluid? Is er een goede communicatie mogelijk in de stad?

In één van de ondergrondse steden werd een stelsel van communicatiekanalen aangetroffen (hier wordt verder op ingegaan in een ander deelonderzoek); het leek interessant om te onderzoeken of er naast deze bewust aangelegde communicatiekanalen ook communicatie mogelijk was via de verkeerskanalen (looproutes). Via deze verkeerskanalen zou over een grote afstand (tussen steden) gecommuniceerd kunnen worden.

Vroeger werden de steden namelijk onderling verbonden door tientallen kilometers lange gangen. Deze gangen zijn nu gedeeltelijk ingestort, maar werden gebruikt om te communiceren tussen de steden in tijd van oorlog. Een gang verbond bijvoorbeeld twee steden. Het is niet bekend hoe de communicatie precies plaatsvond. Een mogelijke manier is dat op een bepaald tijdstip vanuit de twee steden mensen door de gang richting de andere stad liepen. In het midden van de gang tussen de steden werd dan informatie uitgewisseld. Deze gangen bleken echter levensgevaarlijk. In de donkere gangen stierven dikwijls mensen, doordat ze in gaten vielen of verdwaalden in de gangenstelsels. Het lijkt dus waarschijnlijker dat de communicatie via deze gangen op een andere manier heeft plaatsgevonden.

MEETEXPEDITIE IS IMPROVISEREN

Het is een normale gang van zaken dat ruim voordat de metingen van een onderzoek worden gestart, eerst een uitvoerig meetplan wordt geschreven. Ook voordat deze Meetexpeditie begon zijn van te voren door elke onderzoeksgroep doelstellingen en meetmethoden beschreven.

Aangekomen in Cappadocië bleek geen literatuuronderzoek opgewassen tegen de werkelijke situatie, met als gevolg dat het merendeel van de onderzoeksplannen de prullenbak in kon. Dit leverde de avond na het eerste bezoek aan de ondergrondse steden al de nodige gezellige tafereelen op. De meeste onderzoeksgroepen kwamen bij elkaar op de kamer om nieuwe onderzoeken te formuleren. Ook de vooraf gemaakte planning met betrekking tot het gebruik van de meetapparatuur moest worden herzien. Even leek het pension waarin we verbleven een crisiscentrum, maar na goed overleg werd een nieuwe planning gemaakt en was de rust wedergekeerd. Naast het onbekende waarin men terecht komt, is een Meetexpeditie dikwijls meten onder extreme omstandigheden. Bij eerdere Meetexpedities waren het vooral de lage temperaturen die het de onderzoekers moeilijk maakten. Deze expeditie leverde enkele volledig andere problemen op. Ten eerste bleek stof een grote bron van ellende. Geen enkel meetinstrument bleek bestand tegen de fijne stofdeeltjes die overal in de ondergrondse ruimten ronddwarrelden. Haperende apparatuur en noodzakelijke reparaties veroorzaakten onverwachte vertragingen in de meetplannen. Ook de luchtwegen van de onderzoekers kregen na een lange week rondlopen in de ondergrondse steden een flinke opdonder. Een geïrriteerde keel en veel gekuch waren het onvermijdelijke resultaat.

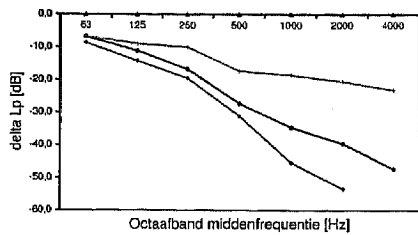
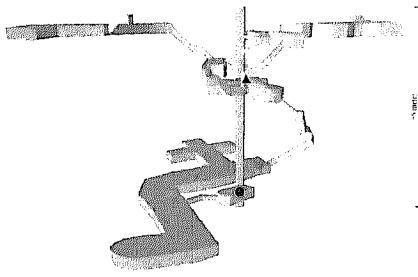
Het grootste deel van de metingen van deze Meetexpeditie werd verricht in een redelijk goed toegankelijke ondergrondse stad. Dit bracht echter een nadeel met zich mee, namelijk toeristen. Dit was naast de stofdeeltjes een tweede probleem. Doordat we bij veel metingen afhankelijk waren van de openingstijden van de ondergrondse stad konden de metingen alleen plaatsvinden in het bijzijn van toeristen. Tientallen groepen toeristen trokken gedurende de dag langs de meetruimten en de meetopstellingen. Voor de geluidmetingen betekende dit bijvoorbeeld dat de bezoekersstromen gestuurd moesten worden om zo ongewenste achtergrondgeluiden van de toeristen te voorkomen. Met name de metingen in de Parlementszaal waren moeilijk uit te voeren. Dit is namelijk een centraal knooppunt in de stad waar veel toeristen langskomen (zie figuur 1). Ook de nieuwsgierigheid van de mens bleek een probleem. Passerende toeristen vroegen continu waar de onderzoekers mee bezig waren en wilden weten hoe alles werkt. Hier bleek weliswaar waardering uit voor de onderzoekers, maar het kwam de voortgang van de metingen allerm minst ten goede.



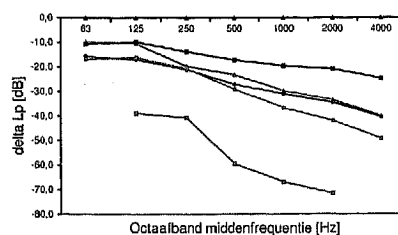
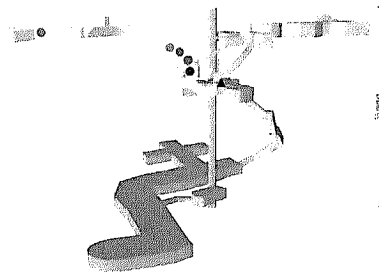
Figuur 1: bezoekers verstoren metingen

Naast het veroorzaken van de nodige frustraties bij de onderzoekers, bleken de toeristen de onderzoekers ook echt nodig te hebben. Op een gegeven moment stond een grote groep toeristen in een zeer kleine ruimte, 50 meter onder de grond. Op dat moment was een CO₂-meting aan de gang. Nadat het behoorlijk benauwd was geworden, een enkele toerist viel bijna flauw, onderbrak onze onderzoeker het verhaal van de gids en wees hem erop dat het CO₂-gehalte inmiddels tot een gevaarlijk hoge waarde was gestegen. Het advies luidde om zo snel mogelijk de ruimte te verlaten, aangezien er nauwelijks aanvoer van verse lucht was. Zo bleken de onderzoekers naast het wijzen van de weg in de stad, dus ook nog van levensbelang voor de toeristen!

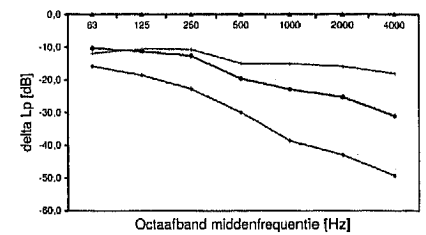
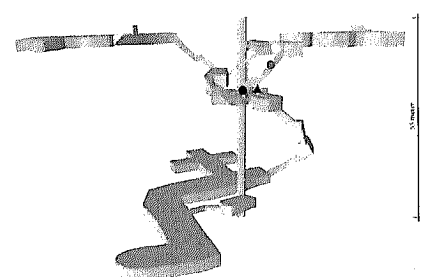
Buiten het produceren van stoorgeluid vormden de toeristen voor de geluidmetingen nog een tweede obstakel. Vanwege de zeer smalle gangen in de stad, is het alleen mogelijk de routes lopend achter elkaar af te leggen. Dit betekende dat de toeristen het grootste deel van de tijd de verkeersroutes bezet hielden. De enige mogelijkheid om dit probleem te omzeilen, bleek door buiten de openingstijden te meten. Na onderhandelingen met de beheerder van de stad, werd er toestemming gegeven om tot een half uur na sluitingstijd metingen uit te voeren. Op het moment dat de laatste toerist was verdwenen, begon het rennen door de ondergrondse stad. Met de geluidbron centraal opgesteld en een geluiddrukkniveaumeter in de hand moest er binnen dertig minuten op alle ontvangposities door de complete ondergrondse stad gemeten worden. Meten was voor even echte topsport!



Figuur 1a: Grafische weergave van de afname van het geluidsdrukkniveau op verschillende punten (stippen in 3D-model) langs de rode route (Parlement-Mortuarium)



Figuur 1b: Grafische weergave van de afname van het geluidsdrukkniveau op verschillende punten (stippen in 3D-model) langs de gele route (Parlement-Mortuarium)



Figuur 1c: Grafische weergave van de afname van het geluidsdrukkniveau op verschillende punten (stippen in 3D-model) langs de gele route (Parlement-Mortuarium)

Het onderzoek richtte zich op de vraag of het mogelijk was te communiceren over grotere afstanden in en tussen de steden én op de vraag op welke manier dit mogelijk zou kunnen zijn geweest.

METHODOLOGIE

Door op verschillende afstanden en over verschillende routes in de stad de afname van het geluidsdrukkniveau te bepalen, kan een uitspraak gedaan worden over de voortplanting van het geluid door het netwerk van gangen en kamers. In een centraal gelegen ruimte, de Parlementszaal, wordt geluid geproduceerd in de vorm van een sweepsignaal, waarbij het bronvermogen maximaal wordt benut. Dit is zeker van belang bij meten over grote afstand, waarbij een hoog vermogen vereist is. In één meting worden na elkaar korte sweeps aangeboden. Uit de overblijfselen van de aangeboden sweeps op grote afstand wordt het equivalente geluidsdrukkniveau gemeten. Door op een aantal punten langs drie verschillende routes in de stad de metingen te verrichten wordt inzicht verkregen in het karakteristieke verloop van het geluidsdrukkniveau in de ondergrondse stad. Op elke meetpositie wordt tevens het heersende achtergrondgeluidsdrukkniveau gemeten. Het gewenste signaal wordt verkregen uit:

$$L_{eq,sweep} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{eq}(sweep+stoer)}{10}} - 10^{\frac{L_{eq,stoer}}{10}} \right)$$

$L_{eq,sweep}$ = equivalente geluidsdrukkniveau gedurende 10 seconden, gecorrigeerd voor het achtergrondgeluid

$L_{eq}(sweep+stoer)$ = gemeten equivalente geluidsdrukkniveau gedurende 10 seconden

$L_{eq,stoer}$

= gemeten equivalente stoorgeluid gedurende 10 seconden

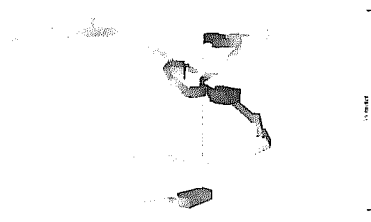
RESULTATEN

De resultaten worden gepresenteerd in grafieken, waarin het signaal gemeten op één meter vóór de bron gelijk is gesteld aan nul decibel. Alle niveaumetingen per meetpositie zijn gerelateerd aan dit referentieniveau. De kleuren van de grafieken corresponderen met de stippen in het driedimensionale model van de ondergrondse stad (zie figuur 1a,b en c).

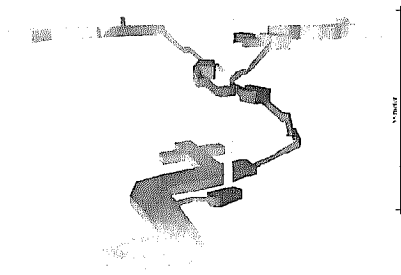
Uit de resultaten komt duidelijk naar voren dat de lage frequenties tot op grote afstand in de ondergrondse stad doorklinken (zie figuur 2 en 3). Dit overgebleven laagfrequente geluid kan het best worden omschreven als de dreunende bas uit een "getuned Golf GTI staande voor een rood stoplicht". Bij de hoge frequenties neemt bij toename van de afstand het geluidsdrukkniveau snel af; bij lage frequenties niet. Er is echter één meetpositie die een onverwacht hoog geluidsdrukkniveau oplevert, aan het eind van de rode route (Parlement-Mortuarium, figuur 1a). Dit komt door de directe verbinding via de verticale ventilatieschacht (blauwe lijn in figuur 1a).

CONCLUSIES

Er kan worden gesteld dat geluid in de ondergrondse stad over een grote afstand kan doorklinken. Dit zou onder andere verklaard kunnen worden door de absorberende eigenschappen (bepaald in het Lab voor Akoestiek aan de TU/e, zie figuur 4) van het tufsteen waaruit de ondergrondse stad bestaat. Het blijkt dat de absorptiewaarden hoger worden naarmate de frequentie toeneemt, waardoor het karakter-



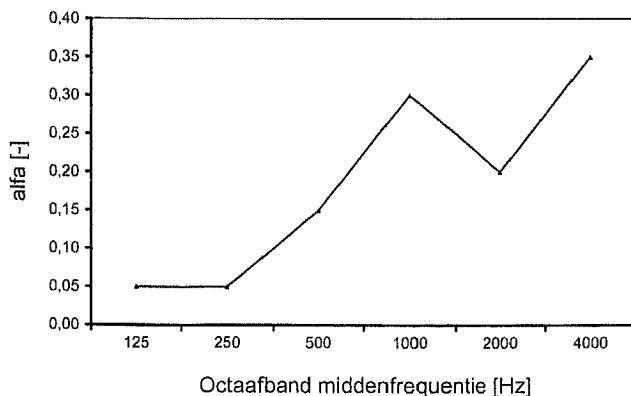
Figuur 2: Voortplanting midden- en hoogfrequent geluid (vanaf 500 Hz) in de ondergrondse stad. De afname van het geluidrukniveau in deze frequenties wordt weergegeven door het vervagen van de kleuren



Figuur 3: Voortplanting laagfrequent geluid (125-250 Hz) in de ondergrondse stad. De afname van het geluidrukniveau in deze frequenties wordt weergegeven door het vervagen van de kleuren

ristieke verloop van het geluidrukniveau in de ondergrondse stad verklaard zou kunnen worden.

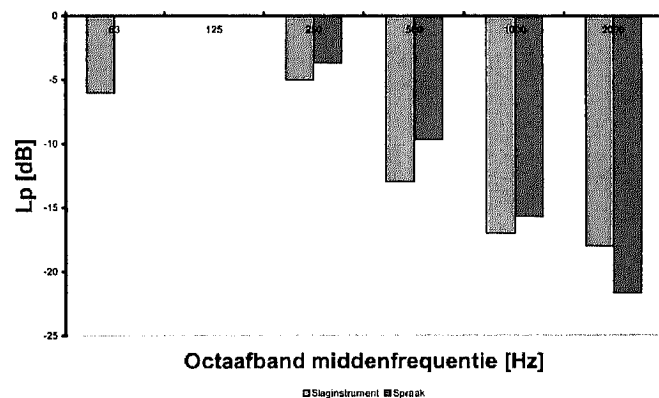
Verder zou de typische afmeting van de gangen een grote rol kunnen spelen (zie afbeelding 2). De relatief kleine doorsnede van de gang zorgt ervoor dat de kleine golflengten van de hoge frequenties in de dwarsdoorsnede van de gang passen. Dit in tegenstelling tot de grotere golflengten van de lagere frequenties. Hierdoor zouden de lagere frequenties zich als een vlakke lopende golf door de gangen kunnen verplaatsen, waarbij weinig geluidniveau verloren gaat. Het verval van het geluidniveau bij deze lage frequenties wordt grotendeels veroorzaakt door de absorberende eigenschappen van de gang.



Figuur 4: Absorptiewaarden (α) tufsteen

Het lijkt door deze resultaten discutabel dat men de gevaarlijke tocht door de gangen maakte om informatie uit te wisselen. Het is aannemelijk dat voor communicatie over lange afstand instrumenten met een laagfrequent karakter zijn gebruikt. In figuur 5 zijn de karakteristieke geluidspectra te zien van twee bronnen die vroeger veel gebruikt werden: een slaginstrument en de stem. Ondanks hetzelfde verloop van het spectrum heeft een slaginstrument voordelen opzichte van de stem. Het absolute geluidniveau dat bereikt kan worden met het slaginstrument is aanzienlijk hoger dan dat van de stem. Verder is van belang dat in spraak de belangrijkste informatie zich bevindt in het frequentiegebied tussen 500 en 1000 Hz, frequenties die niet verdoorklinken in de ondergrondse stad. Over een grote afstand zal door de stem dus weinig informatie kunnen worden overgebracht in de vorm van spraak.

Het lijkt aannemelijk dat er in de ondergrondse steden over lange afstand gecommuniceerd werd met behulp van bepaalde codes in geluid. Dit zou kunnen door gebruik te maken van (het laagfrequente deel van) de stem of van slaginstrumenten. Door het hogere absolute geluidniveau, zal er waarschijnlijk een voorkeur zijn geweest voor een slaginstrument. Communiceren via codes in geluid lijkt veel sneller en veiliger dan de lange tocht door de gevaarlijke ondergrondse gangen.



Figuur 5: Relatief spectrum van een trommel (blauw) en spraak (rood)