

Ventilatiesysteem in ondergrondse stad Derinkuyu

In centraal Turkije ligt het gebied Cappadocië. Cappadocië staat bekend om de zachte bodem en de sprookjesachtige formaties die door erosie zijn ontstaan in valleien. Door de bewoners van het gebied is in het verleden dankbaar gebruik gemaakt van de zachte bodem. In de bodem zijn ruimtes uitgehakt voor bewoning en complete ondergrondse steden zijn ontstaan om te schuilen tegen aanvallen van vijanden. Bij het aanleggen van de steden is gebruik gemaakt van verticale stijlpunten om de stad uit te breiden en afval snel af te voeren. Een tweede functie van de verticale schachten was het zorgen voor een goede ventilatie in de stad.

Het in dit artikel beschreven onderzoek is erop gericht meer inzicht te verkrijgen in de werking van het ventilatiesysteem. Met behulp van een aantal metingen is onderzocht hoe het systeem werkt en de effectiviteit ervan is beoordeeld. Getracht is een uitspraak te doen over de werking van het ventilatiesysteem toen de stad nog was bewoond.

- door D. Jansen, BSc*, mw. L. van Oeffelen BSc* en prof.dr.ir. M. de Wit**

In centraal Cappadocië in Turkije ligt de grootste ondergrondse stad Derinkuyu, die bekend staat om haar ingenieuze natuurlijke ventilatiesysteem. Een deel van de oorspronkelijke stad is uitgegraven en opengesteld voor toeristen. Het te bezoeken deel ligt rond één ventilatieschacht. In figuur 1 is dit stadsdeel schematisch weergegeven. In het gebied rond deze schacht zijn nog 51 andere schachten ontdekt [1]. In het verleden was de stad veel groter en maakten meerdere verticale schachten onderdeel uit van de stad. Verwacht wordt dat nu ongeveer 5 % van de oorspronkelijke stad is ontdekt. Globaal kan het te bezoeken deel in drie

niveaus worden verdeeld. In figuur 1 zijn deze gescheiden van elkaar weergegeven. Omdat de stad werd gebruikt om gedurende langere tijd onder te duiken, zijn er ruimtes aanwezig met verschillende functies. Op het eerste niveau onder maaiveld zijn functies als een stal, een keuken en een school te vinden. Op het tweede niveau zijn een parlementszaal en een bruidssuite gesitueerd. Deze twee niveaus liggen relatief dicht bij elkaar (ongeveer 10 meter hoogteverschil). Het derde niveau is veel dieper gelegen (op ongeveer 35 meter onder maaiveld). Op dit niveau is een kerk en een trouwkapel te vinden. Ook bevinden zich hier een mortuarium en een grafombe. Daarnaast

heeft dit niveau toegang tot een waterput die tot 80 meter onder maaiveld reikt.

Deze studie is uitgevoerd om de werking van het van oudsher aanwezige ventilatiesysteem te onderzoeken en om te kijken of het systeem in de huidige situatie een goede luchtkwaliteit kan waarborgen.

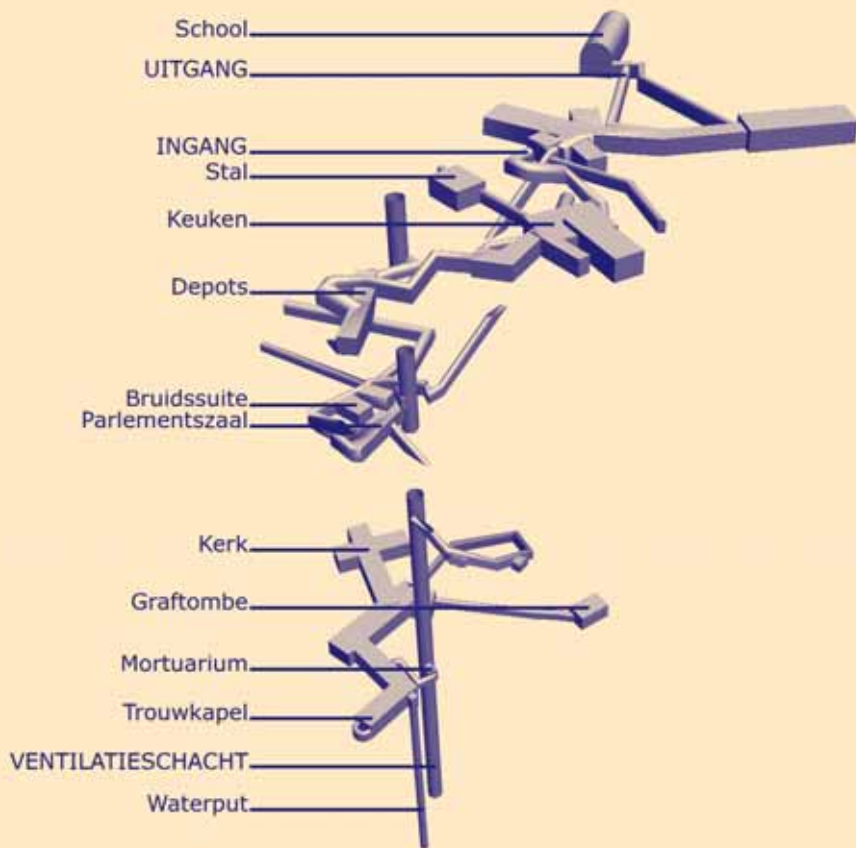
ONDERZOEKSMETHODE

In de stad zijn verschillende soorten metingen verricht. Met behulp van CO₂-meters van het merk Vaisala, type GMW22, is gedurende langere tijd de CO₂-concentratie op een aantal plaatsen in de stad vastgelegd. Deze metingen zijn op de drie verschillende niveaus uitgevoerd. Op niveau -1 is de meting uitgevoerd bij de depots, op niveau -2 in de parlementszaal en op niveau -3 is de meting uitgevoerd in de brede gang die de trouwkapel met de kerk verbindt. Ook is gedurende een nacht op dezelfde wijze op drie verschillende dieptes in de ventilatieschacht de CO₂-concentratie vastgelegd. De eerste meting is hierbij uitgevoerd op vijf meter onder maaiveld (ongeveer 0,5 meter boven de ontmoeting met het eerste niveau). De tweede en derde meting zijn respectievelijk op 20 en 35 meter onder maaiveld uitgevoerd.

Op basis van de metingen is uit het verval dat gedurende de nacht optreedt, het ventilatievoud bepaald. De wiskun-

* Student Physics of the Built Environment, Unit Building Physics and Systems, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven

**Hoogleraar Bouwfysica, Unit Building Physics and Systems, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven



Schematische voorstelling van het te bezoeken deel van de ondergrondse stad Derinkuyu.

- FIGUUR 1 -

dige representatie waarmee het ventilatievoud kan worden bepaald is weergegeven in formule 1. Bij toepassing van de formule wordt een exponentiële kromme gezocht die het beste bij het geregistreerde verval past.

$$C = C_{\infty} + (C_0 - C_{\infty})e^{(-nt)} \quad (1)$$

In deze formule staat C voor de concentratie op een bepaald tijdstip. C_0 staat voor de concentratie aan het begin van het verval en C_{∞} voor de concentratie aan het einde van het verval. Het karakter n staat voor het ventilatievoud en afhankelijk van t wordt deze gegeven in uren of een andere tijdseenheid. Voor de bepaling van het ventilatievoud wordt in dit onderzoek gebruik gemaakt van het verval van de CO_2 -concentratie in de ondergrondse stad. Doordat tijdens de metingen de stad bezocht werd door veel toeristen, werd in de gehele stad CO_2 geproduceerd. Overal in de stad was een verhoogde concentratie aanwezig. Wanneer 's avonds de stad gesloten werd, verdwenen de bezoekers en daarmee de CO_2 -bronnen. De concentratieafname die optreedt, wordt veroorzaakt door ventilatie.

Naast de duurmetingen zijn er gedurende korte tijd ook metingen verricht op een aantal plaatsen in de stad. Met behulp van een klimaatmeter van het merk Testo, type 445 in combinatie met een infrarood CO_2 -voeler en een driefunctie-sonde zijn de CO_2 -concentratie, luchtsnelheid, luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid op de verschillende locaties vastgelegd. Op basis van deze metingen is het mogelijk een uitspraak te doen over de luchtkwaliteit op meer locaties in de stad. Om een beeld te krijgen hoe de lucht door de ondergrondse stad beweegt, zijn rooksporen gevolgd.

RESULTATEN

Duurmetingen op verdiepingen

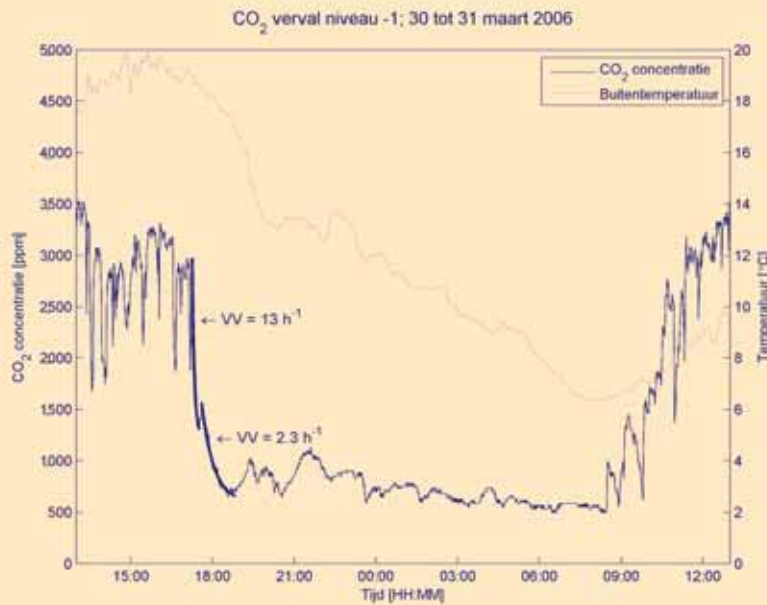
In figuur 2 zijn de resultaten van de duurmetingen op de verdiepingen weergegeven. In figuur 2a en 2b zijn de gemeten CO_2 -concentraties op niveau -1 en -2 gedurende achttien uur te zien. Deze metingen zijn uitgevoerd op 30 en 31 maart 2006. Figuur 2c laat de gemeten CO_2 -concentraties op niveau -3 zien. Deze meting heeft 40 uur geduurd en is verricht van 28 tot 30 maart 2006. Uit de meetresultaten

kan worden geconcludeerd dat de CO_2 -concentratie in de stad overdag overall erg hoog is. Op niveau -1 en -2 is de concentratie gedurende de dag ongeveer 3.000 ppm. Op niveau -3 schommelt het niveau bij aanvang van de meting tussen 3.500 en 5.000 ppm. Dit duidt op een slechtere ventilatie lager in de stad. De tweede dag is de concentratie aanzienlijk lager (maximaal 2.500 ppm) en is er een aantal schommelingen aanwezig. Dit wordt veroorzaakt doordat die dag een volledige zonsverduistering waarneembaar was in het gebied. Hierdoor waren er aanzienlijk minder bezoekers in de ondergrondse stad en varieerde hun aantal. Uit het concentratieverval op niveau -3 blijkt dat rond middernacht de laagste waarde is bereikt. Op niveau -2 neemt de CO_2 -concentratie langzamer af. De CO_2 -concentratie bereikt geen constant niveau gedurende de tijd dat er niemand aanwezig is in de stad. Op niveau -1 daalt de CO_2 -concentratie zeer snel na sluiting van de stad. Hierna neemt de CO_2 -concentratie langzaam af, maar zijn er ook nog veel schommelingen zichtbaar. Dit proces duidt erop dat lucht van buiten mengt met lucht in de grot.

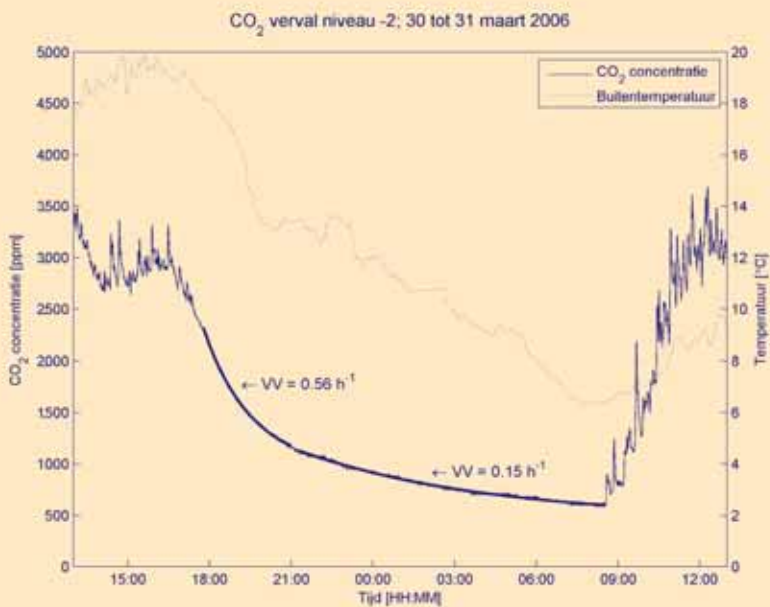
In de grafieken in figuur 2 zijn eveneens dikkere lijndelen weergegeven. Deze lijnen representeren de exponentiële functies zoals ze zijn gefit in verschillende delen van het concentratieverval. Met behulp van de exponentiële benadering van formule (1) is het ventilatievoud bepaald. In het eerste deel van het verval op niveau -1 is een zeer hoog ventilatievoud geconstateerd, later daalt het ventilatievoud. Op niveau -2 is het ventilatievoud laag en neemt deze gedurende de nacht verder af. Op niveau -3 gebeurt het tegenovergestelde. Hier neemt het ventilatievoud toe gedurende de nacht.

De metingen op niveau -3 en niveau -1 en -2 hebben plaatsgevonden op verschillende dagen. De buitentemperatuur was tijdens de eerste nacht van de meting op niveau -3 aanzienlijk lager dan tijdens de nacht waarop de metingen zijn verricht op niveau -1 en -2. Mogelijk zorgt de hogere buitentemperatuur ervoor dat de CO_2 -concentratie op niveau -2 minder snel afneemt. Daarnaast kunnen ook andere weersinvloeden als de windsnelheid en windrichting de werking van het ventilatiesysteem beïnvloeden.

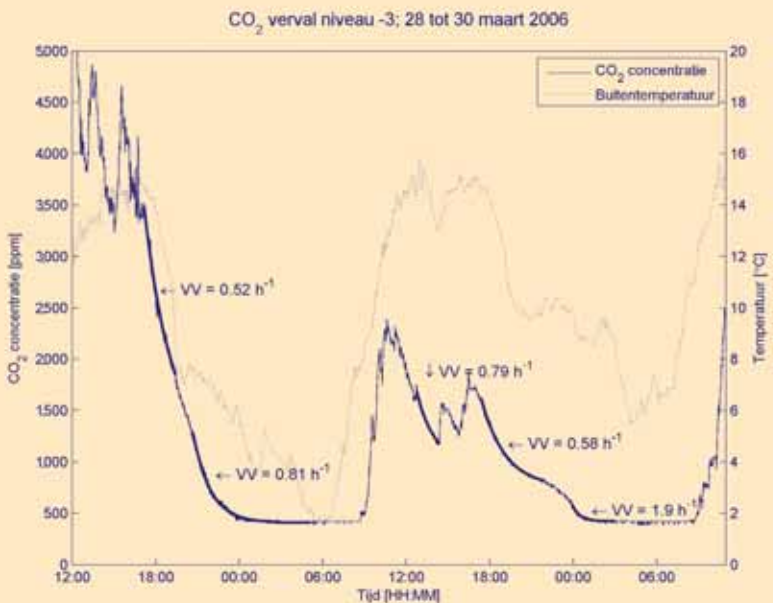
Figuur 2a



Figuur 2b



Figuur 2c



CO₂-concentratie gedurende langere tijd op niveau -1, -2 en -3. In het concentratieverval is een exponentiële functie gefit, waarmee het ventilatievoud (VV) is bepaald. Ook de buitentemperatuur is weergegeven in de grafieken.

- FIGUUR 2-

Duurmeting in de schacht

In figuur 3 zijn de resultaten van de metingen die in de schacht hebben plaatsgevonden weergegeven. In de figuur zijn tevens de luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid buiten uitgezet. In de grafieken is te zien dat de CO₂-concentraties dieper in de grot hoger zijn. Het verloop op -20 en -35 meter diepte is vrijwel hetzelfde. De concentraties op -5 meter wijken overdag sterk af. Er zijn meer schommelingen zichtbaar en de concentratie wordt niet zo hoog als op de dieper in de schacht gelegen plaatsen. In de figuur is ook te zien dat in de schacht iets na middernacht een evenwichtsconcentratie wordt bereikt. Ook is zichtbaar dat de CO₂-concentratie op alle dieptes snel stijgt nadat de stad is opengesteld voor bezoekers. Op -5 meter blijft de concentratie echter schommelen tussen 1.000 en 2.500 ppm. Ook bij de metingen op niveau -1 (figuur 2) is dit zichtbaar. Hieruit kan worden geconcludeerd dat op deze diepte overdag menging plaatsvindt tussen binnenlucht en buitenlucht.

In figuur 3 is ook te zien dat de luchttemperatuur op -5 meter dezelfde trend volgt als de buitenluchttemperatuur. Echter de luchttemperatuur blijft overdag steken bij 6 °C. Als 's nachts de luchttemperatuur daalt, gebeurt dit met enige vertraging ook op -5 meter in de schacht. Dieper in de schacht is de invloed van de buitentemperatuur pas waarneembaar wanneer deze lager is dan 6 °C. Hieruit blijkt dat de schacht dan functioneert als aanvoerkanal van buitenlucht.

In de weergave van de relatieve luchtvochtigheid is te zien dat deze op -5 meter in de schacht redelijk constant is gedurende de meetperiode. Op -20 en -35 meter is de concentratie erg hoog. Zichtbaar is dat op -20 meter de relatieve luchtvochtigheid geruime tijd lager is dan 100 %. Ook op -35 meter is dit korte tijd zichtbaar. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er nog net droging optreedt op de dieper gelegen niveaus in de stad en deze niet steeds vochtiger wordt.

Kortdurende indicatiemetingen

Uit de korte duurmetingen blijkt dat de CO₂-concentratie in de ondergrondse stad overdag behoorlijk hoog is. In figuur 4 is per meetlocatie de maximaal gemeten concentratie weergegeven.

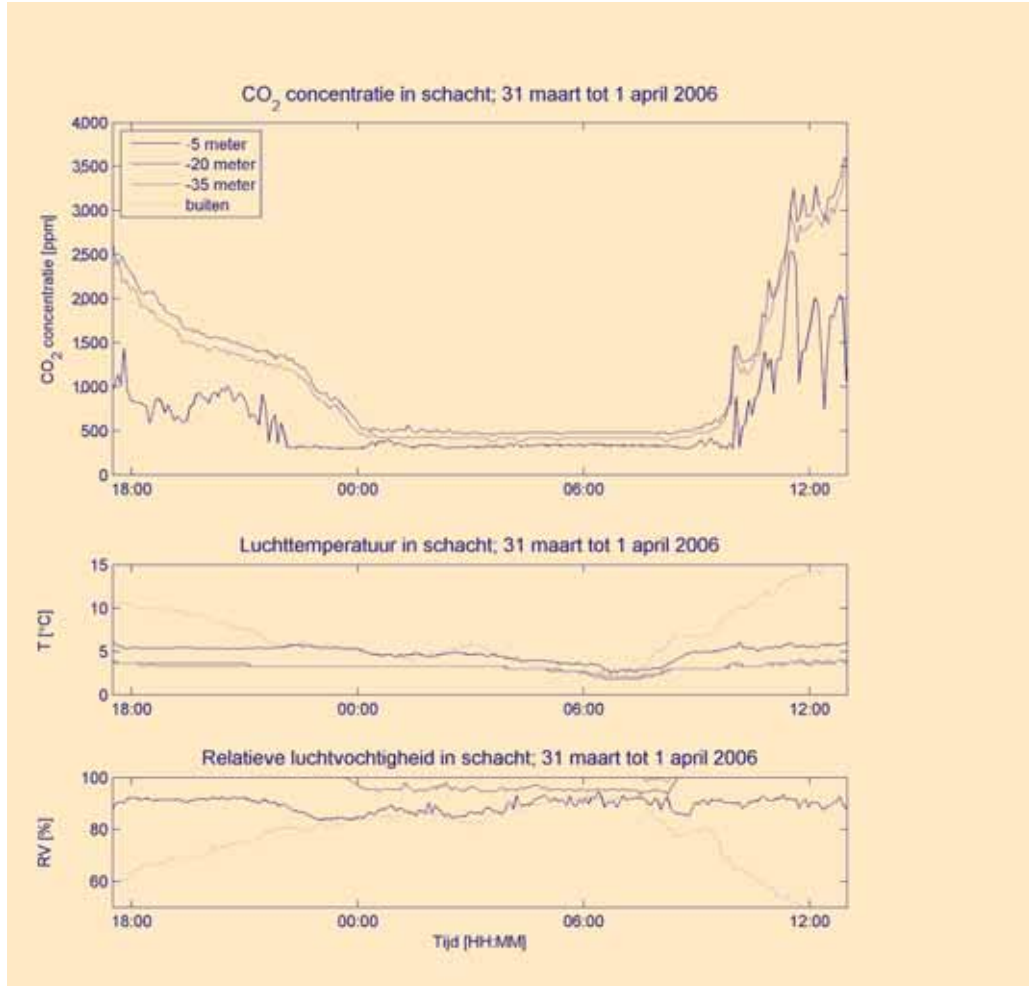
Hieruit blijkt dat vooral op de dieper gelegen niveaus de CO₂-concentraties hoog kunnen oplopen: op sommige locaties zijn zelfs concentraties hoger dan 5.000 ppm gemeten. Dit betekent dat in de ondergrondse stad de maximaal aanvaarde concentratie (MAC-waarde), zoals deze door verschillende organisaties wordt gesteld, wordt overschreden [2]. De MAC-waarde geeft de over de tijd gewogen gemiddelde aanvaarde concentratie aan, gebaseerd op een achturige werkdag in een veertigjarige werkweek. Bezoekers die slechts voor een korte periode worden blootgesteld aan een CO₂-concentratie hoger dan 5.000 ppm zullen hiervan geen gezondheidsklachten ondervinden [3].

Bij de korte duurmetingen is daarnaast geconstateerd dat de relatieve luchtvochtigheid in de ondergrondse stad varieert tussen de 75 en 95 %, waarbij de hoogste waarden zijn aangetroffen in de diepst gelegen ruimtes. De gemeten luchttemperatuur in de stad ligt tussen de 4 en 8 °C en de gemeten luchtsnelheid ligt op vrijwel alle posities onder de 0,1 m/s. De lage luchtsnelheden duiden erop dat er weinig luchtcirculatie in de stad plaatsvindt.

Rooksporen

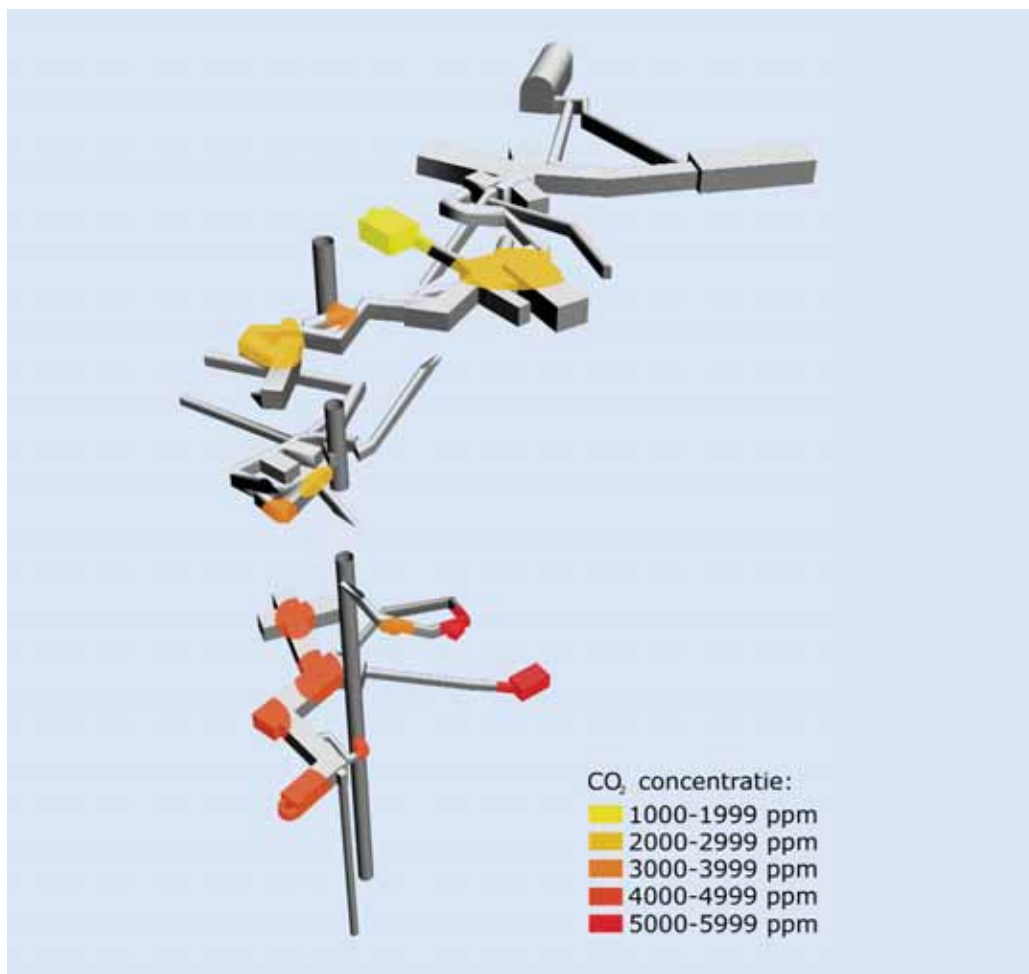
Uit de studies met rooksporen is gebleken dat in alle ruimten en gangen luchtbewegingen aanwezig zijn. Het betreft hier echter geen luchtverversende luchtstromen, maar thermisch gedreven luchtcirculaties. Deze circulaties ontstaan doordat bezoekers de lucht in de grot opwarmen, waardoor de lucht opstijgt. Langs het plafond en de wanden koelt de lucht vervolgens weer af door de koude oppervlakten. In gangen die verschillende niveaus met elkaar verbinden was duidelijk zichtbaar dat rook langs het plafond naar boven stroomde en langs de trap terug keerde. In figuur 5 is een schematische voorstelling gegeven van de luchtbewegingen in de stad.

Ter plaatse van aansluitingen met de centrale ventilatieschacht waren ook luchtstromen zichtbaar. Lucht uit de schacht stroomde langs de onderzijde van de aansluiting de ruimte in. Langs het plafond stroomde lucht terug de schacht in. Uit deze waarnemingen kan worden geconcludeerd dat het ventilatiekanaal zowel fungeert als aanvoer- en afvoerkanalen. Dit betekent dat de verse lucht in de schacht sterk is



CO₂-concentratie- en luchttemperatuurverloop op verschillende dieptes in de schacht.

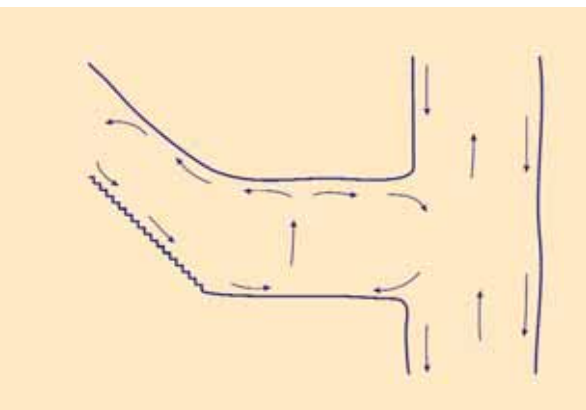
- FIGUUR 3-



Hoogst gemeten CO₂-concentratie op verschillende plaatsen in de ondergrondse stad.

- FIGUUR 4-

vermengd met de lucht uit de grot en dat er in de ruimten nauwelijks aanvoer van verse lucht is.



Schematische voorstelling van de luchtbewegingen in de stad.

- FIGUUR 5 -

CONCLUSIES

In dit onderzoek is het ventilatiesysteem onderzocht in de ondergrondse stad. Uit de metingen en waarnemingen blijkt dat het ventilatiesysteem slecht werkt. Wanneer grote aantallen bezoekers in de stad aanwezig zijn, kan de CO₂-concentratie erg hoog worden. Direct na de dagelijkse opening van de ondergrondse stad loopt de CO₂-concentratie in de hele stad snel op. Concentraties boven de MAC-waarde (5.000 ppm) komen op veel plaatsen voor. Dieper in de grot is de luchtkwaliteit slechter.

De CO₂-concentratie in het centrale ventilatiekanaal stijgt overdag mee met de concentraties in de stad. Het kanaal functioneert dan dus niet als aanvoerkanaal van verse lucht. Uit de metingen in de schacht blijkt dat laag in de schacht de CO₂-concentraties gelijk zijn aan de concentraties in de stad. Hoog in de schacht is de CO₂-concentratie in de schacht lager dan in de ruimten. De concentratie ligt echter hoger dan de buitenconcentratie. Dit betekent dat lucht van buiten de stad mengt met lucht in de stad. Door deze menging wordt er weinig lucht in de stad verversd.

Gedurende de nacht herstelt de luchtkwaliteit in de gehele stad. Doordat de metingen op de verdiepingen niet op hetzelfde moment hebben plaatsgevonden, kunnen de resultaten moeilijk met elkaar worden vergeleken. Wel is zichtbaar dat het herstel gedurende de metingen op niveau -1 en -2 trager verloopt dan tijdens de metingen op niveau -3. Het is aannemelijk dat dit

wordt veroorzaakt door het verschil in buitentemperatuur. Tijdens de metingen op niveau -1 en -2 was de laagste buitentemperatuur 6 °C. Tijdens de metingen op niveau -3 was de laagste buitentemperatuur 2 °C. Wanneer de buitentemperatuur hoger is, blijkt de ventilatie-effectiviteit lager te zijn. Wanneer tijdens de zomerperiode de buitentemperatuur gedurende het gehele etmaal hoger is dan de luchttemperatuur in de schacht, zal het ventilatiesysteem nog slechter werken. Het herstellend vermogen gedurende de nacht zal hierdoor afnemen. Het is mogelijk dat de luchtkwaliteit in de stad steeds slechter wordt, doordat de luchtkwaliteit in een etmaal niet voldoende herstelt.

Het te bezoeken deel van de stad is rond één verticale ventilatieschacht gesitueerd. De ingang en uitgang zijn gescheiden en liggen op dezelfde hoogte respectievelijk 15 en 30 meter van de centrale schacht. Door deze korte afstanden ontstaan nauwelijks drukverschillen over de verschillende openingen. In het gebied waar de ondergrondse stad is aangetroffen, zijn 52 ventilatieschachten gevonden. In de oorspronkelijke situatie, waarbij meerdere ventilatieschachten ondergronds met elkaar verbonden waren, kan het ventilatiesysteem beter gefunctioneerd hebben. Wanneer schachten met elkaar verbonden worden en op verschillende hoogtes uitmonden, kunnen drukverschillen ontstaan over verschillende delen in de stad. Hierdoor kan een drijvende kracht ontstaan om effectieve luchtstromen in de stad tot stand te brengen. Echter doordat het landschap in de omgeving van Derinkuyu zeer vlak is, zal dit effect beperkt zijn gebleven. Ook zijn er in het gebied een aantal schachten aangetroffen die naar verbindingsgangen leiden tussen verschillende ondergrondse steden. Wanneer verbindingen over enkele tientallen kilometers worden gelegd, is het aannemelijk dat luchtstromen ontstaan die zorgen voor een verversing van de lucht in de ondergrondse stad.

De wanden van de ondergrondse stad bestaan uit kalkrijke aarde. Onder invloed van CO₂ verhardt kalk, waardoor de wanden hard worden. Diep in de grot is de luchtvochtigheid erg hoog en krijgt de kalk niet de mogelijkheid te verharden. Op deze plaatsen zal door de wanden CO₂ worden geabsorbeerd. Dit proces heeft invloed op de

hoogte van de CO₂-concentratie. Doordat het een continu proces is, heeft het echter geen invloed op de CO₂-vervalcurve. Hierdoor heeft het ook geen invloed op het vastgestelde ventilatievoud.

De metingen in de ondergrondse stad zijn verricht in het vroege voorjaar. Het toeristenseizoen is in deze periode nog niet in volle gang. Tijdens het hoogseizoen mag worden verwacht dat meer toeristen de stad bezoeken, waardoor de CO₂-concentratie in de stad aanzienlijk hoger zal zijn. Daarnaast zijn in de zomerperiode hogere nachtemperaturen te verwachten, waardoor het herstellend vermogen van het ventilatiesysteem afneemt. De combinatie van beide aspecten kan zorgwekkende situaties opleveren. Door de gidsen wordt ook aangegeven dat de luchtkwaliteit niet optimaal is [3].

Om extreem ongezonde situaties in de ondergrondse stad te voorkomen, is het belangrijk maatregelen te nemen. Enerzijds kan het aantal bezoekers worden beperkt, waardoor de luchtkwaliteit minder snel verslechtert. Een andere mogelijkheid om de situatie te verbeteren, is het stimuleren van de aanvoer van verse lucht in de stad. Een mogelijkheid om dit te doen is het aanbrennen van een mechanisch gestuurd ventilatiesysteem. Voor de toe- of afvoer kan mogelijk gebruik worden gemaakt van een bestaande schacht die het te bezoeken deel van de stad doorkruist. 

REFERENTIES

1. Demir, Ö., *Cappadocië, Wieg van de beschaving*, vertaling door Westerhoven, T. van, T'lof plaka matbaacilik a. fl., Ankara, 12^e herziene uitgave.
2. ASHRAE, 2005 ASHRAE Handbook - Fundamentals, hoofdstuk 9, tabel 3, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*, Atlanta, SI Edition, 2005.
3. Jansen, D.W.L., Oeffelen, E.C.M. van, *Luchtkwaliteit in ondergrondse stad Derinkuyu, Turkije*, Bouwfysica, TVVL Magazine 1-2007.