

**TNO-rapport**

**TM-03-C060**

**Praktijkproef geluidsbakens bij ontruiming  
tunnel in dichte rook**

Datum	3 december 2003
Auteur(s)	L.C. Boer
Exemplaarnummer	
Oplage	35
Aantal pagina's	22
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Steunpunt Tunnelveiligheid, Bouwdienst Rijkswaterstaat
Projectnaam	Geluidsbakens in tunnels
Projectnummer	013.73155

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

	Blz.
INHOUD	
SAMENVATTING	3
SUMMARY	4
1 INLEIDING	5
2 TUNNELPROEF	6
2.1 Methode	6
2.1.1 Proefpersonen en instructie	6
2.1.2 Proefgebied en bewaking	7
2.1.3 Geluid	9
2.1.4 Rook en rookmaskers	9
2.1.5 Procedure	10
2.2 Resultaten	11
2.2.1 Databestand	11
2.2.2 Lopen in rook	11
2.3 Discussie	14
3 TOETSING	16
3.1 Reproduceerbaarheid resultaten	16
3.2 Vergelijkbaarheid met de vorige tunnelproeven	17
3.3 Geschiktheid voor tunnels	17
4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	20
REFERENTIES	22

---

## Praktijkproef geluidsbakens bij ontruiming tunnel in dichte rook

L.C. Boer

### SAMENVATTING

**Vraagstelling:** Uit een brandende tunnel vluchten als er dichte rook is: Is dat mogelijk als geluidsbakens boven de vluchtdeuren de mensen de weg wijzen? Een in Engeland ontwikkeld en getest concept claimt 90% succes, maar toen we de bakens in een tunnel in Nederland testten zonder te vertellen over bakens boven de vluchtdeuren, was het succes een magere 20%—“onvoldoende” volgens het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat. Daarop ontwierp TNO een geluid dat zichzelf uitlegt: gongslagen en “exit here” en testte de nieuwe bakens in het laboratorium met 90% succes. Zullen de TNO-geluidsbakens het ook zo goed doen in een echte verkeerstunnel? Omdat enkele proefpersonen moeite met het Engels hadden was er dit keer een Engels-Nederlandse tekst.

**Werkwijze:** We herhaalden zoveel mogelijk de eerdere tunnelproef (rapport TM-03-C051). We brachten 75 proefpersonen per bus een wegverkeerstunnel in (de C-buis van de Beneluxtunnel) die met dichte rook gevuld was (zicht 1–2 m). De proefpersonen werden met vaste intervallen één voor één op straat gezet met de opdracht zich in veiligheid te brengen en uit de rook te komen. Ook nu weer kregen ze geen enkele instructie vooraf over vluchtdeuren of geluidsbakens.

**Resultaten:** Vijfentachtig procent liep regelrecht op de dichtstbijzijnde vluchtdeur af; één proefpersoon nam een deur verder; in totaal 87% succes. Om bij de vluchtdeuren te komen moesten de toch wel gespannen proefpersonen de “veilige” wand loslaten en de rijbaan oversteken. We zagen dat het geluid hen overtuigde om inderdaad over te steken.

**Conclusies:** Het nieuwe TNO-geluid is geschikt voor wegverkeerstunnels, ook als er nog zicht is. In dat geval kunnen de nieuwe geluidsbakens het startsignaal zijn om de ontruiming van de tunnel in gang te zetten.

---

**Sound beacons for evacuation tested in a tunnel in dense smoke**

L.C. Boer

**SUMMARY**

**Purpose:** Escape from a burning tunnel in dense smoke: Can that be done when sound beacons over the emergency exits assist people in escaping? A concept developed and tested in the UK claims 90% success but when we tested the beacons in a tunnel in The Netherlands without telling the participants about beacons over the exits, the success was a meagre 20%—“unacceptable” according to the Centre for Tunnel Safety of the Civil Engineering Division of the Directorate-General for Public Works and Water Management. Thereupon, TNO designed a self-explaining sound (dinner bell and the text “exit here”) and obtained a success rate of 90% in a laboratory test. Will the new beacons be a similar success in a real road tunnel? Because a few participants had difficulty with the English, we used this time an English-Dutch text.

**Methods:** Insofar as possible we replicated the earlier road tunnel tests (report TM-03-C051). 75 Participants were transported by bus right into the middle of a road tunnel (the C-tube of the Benelux tunnel near Rotterdam) that was filled with dense smoke (visibility down to 1–2 m). They stepped on the roadway one by one with fixed intervals with the instruction to find safety and to get out of the smoke. This time again no advance instructions whatsoever were given about the emergency exits or the sound beacons.

**Results:** Eighty-five percent went straight to nearest emergency exit; one participant to the next nearest exit, in all a success of 87%. In these tense conditions participants had to leave the “safe” wall and to cross the roadway to get to the emergency exits. We saw that the sound indeed persuaded them to cross the roadway.

**Conclusions:** The new TNO sound is suitable for road tunnels, also when visibility is not yet gone. In that situation, the new sound beacons will be the signal to set tunnel evacuation in motion.

## 1 INLEIDING

Rook en brand in een tunnel zijn levensgevaarlijk voor weggebruikers. Tunnels voor het wegverkeer hebben daarom vluchtwegen waarlangs automobilisten zich te voet in veiligheid kunnen brengen. Dichte rook is een probleem omdat het de mensen desoriënteert en hen van hun zelfredzaamheid berooft. Het probleem verdwijnt met ventilatoren die de rook kunnen wegblazen in de rijrichting. Rook aan de kop van de file wordt dan van de file afgevoerd. Er is echter kans dat er in de tunnel reeds een file staat en dat pas daarna brand uitbreekt. Deze kans stijgt door de toenemende intensiteit van het wegverkeer. Het deel van de file dat vóór de brand staat kan dus last van de rook krijgen. En los daarvan is het mogelijk dat de ventilatoren door welke oorzaak dan ook niet gebruikt worden. Zo werden de ventilatoren bij de tunnelbrand in Oslo in 1996 niet gebruikt (Skarra e.a., 1997) en weigerden in september 2002 de ventilatoren dienst tijdens de calamiteitenoefening in de spoortunnel van Best. Als de ventilatoren niet aanstaan en er nauwelijks luchtstroming is zal hete rook een weg naar boven zoeken, het principe van convectie. Dat kan tegen de rijrichting in zijn als de file zich in het dalende gedeelte van de tunnel bevindt. Op verschillende manieren kunnen automobilisten dus toch in de rook komen te staan. Forse rook, want bij brand kan 300–400 m<sup>3</sup> rook per s ontstaan.

Kunnen, bij dichte rook, geluidsbakens boven de vluchtdeuren de automobilisten toch een kans geven? De bakens moeten als lokdoosjes de mensen aantrekken.

In opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat, Steunpunt Tunnelveiligheid, werd in 2002 een in Engeland ontwikkeld concept met “sissende” bakens beproefd. De firma Sound Alert ontwikkelde deze bakens, en een delegatie van het United Kingdom stelde aan de International Maritime Organisation voor deze bakens op passagiersschepen in te voeren. Korthedshalve duiden we de bakens aan als “UK-bakens”. De UK-bakens hadden in onze tunnelproeven matig succes: slechts 20% van de proefpersonen liet zich naar de vluchtdeur lokken; de rest wilde over de rijbaan naar buiten (Boer, 2002, 2003; zie ook Boer & Withington, in voorbereiding). Ja, veel beter ging het als de proefpersonen van tevoren een korte uitleg kregen “er zijn geluidsbakens boven de vluchtdeuren”. In dat geval liet 69% zich naar vluchtdeur lokken. Nog beter gaat het volgens Withington als de proefpersonen van tevoren ook nog eens een geluidsdemonstratie te horen krijgen (Withington, 2002; zie ook *Directional sound evacuation*, 2001, 2002). Zo’n uitleg en zo’n demonstratie zijn prachtig maar niet reëel want de gemiddelde automobilist krijgt dergelijke informatie ook niet vlak voor een ontruiming. Beter en mooier zou een bakengeluid zijn dat zichzelf uitlegt.

In een vervolgoopdracht van het Steunpunt Tunnelveiligheid ontwierpen Boer en Van Wijngaarden (2003) een *self explaining* bakengeluid: de Engelse tekst “exit here” met gongslagen. Een digitale bewerking zorgde dat het menselijk oor de juiste signalen krijgt om de richting waar het geluid vandaan komt accuraat te bepalen (zie sectie 2.1.3). Dat werkte, want in een laboratoriumproef liepen negen van de tien proefpersonen de goede kant uit. Een tweede groep die ter vergelijking het UK geluid (“Sound Alert”) kreeg liep nauwelijks beter dan zomaar een kant uit (Boer & Van Wijngaarden, 2003). Wel bleken enkele proefpersonen moeite te hebben met het Engels. Een Engels-Nederlandse tekst zou beter zijn.

De laboratoriumproef maakte gebruik van een verwarmd interieur met gangen en tapijt op de vloer—heel wat anders dan een tochtige geasfalteerde wegverkeerstunnel met zijn galmende akoestiek waardoor geluidslokalisatie moeilijk is. Bovendien zijn tunnels wat grimmiger en bedreigender dan een binnenhuisomgeving en ook is het gaan door een vluchtdeur emotioneel zwaarder dan het kiezen tussen gang A en gang B. Mensen hebben een zekere deurvrees en prefereren de open gang (Boer, 1998, 2001). Het is dus niet duidelijk hoe goed het nieuwe geluid in de tunnelomgeving werkt. Het doel van de huidige proef was om dat vast te stellen.

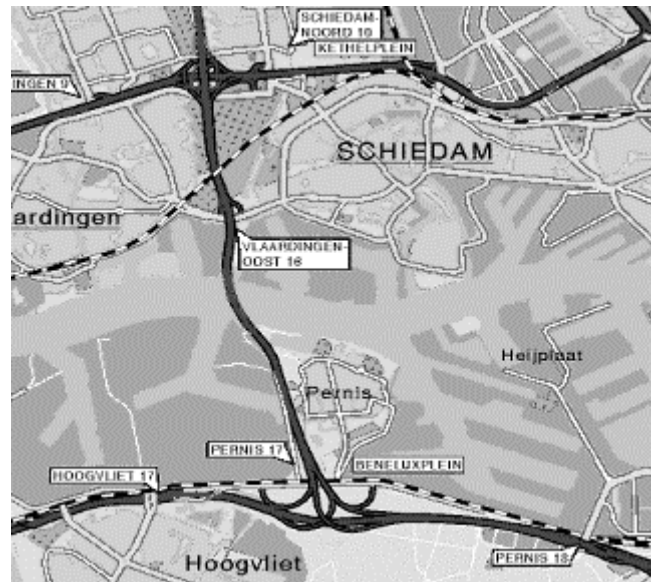


Fig. 1 De Beneluxtunnel, een Noord-Zuid verbinding in het rijkswegennet.

## 2 TUNNELPROEF

De tunnelproef moest vaststellen hoeveel procent van de mensen door de vluchtdeur gaat als ze de weg moeten zoeken in een met rook gevulde wegverkeerstunnel. De proef was een vervolg op in 2002 uitgevoerde proeven maar nu met *self explaining* geluidsbakens boven de vluchtdeuren. De proefpersonen wisten van tevoren dat ze door dichte rook gingen lopen, maar ze kregen niets te horen over vluchtdeuren of geluidsbakens.

### 2.1 Methode

#### 2.1.1 Proefpersonen en instructie

Achttenzeventig proefpersonen namen deel aan de proef op de avond van 29 oktober 2003. Ze waren geworven via een modellenbureau onder vermelding “tunnel ontvluchten in dichte rook”. Ze moesten in goede gezondheid en bezit van rijbewijs zijn, en niet meegedaan hebben aan de vorige proeven. Eisen aan het gehoor werden niet gesteld. De proefpersonen waren tussen de 18 en de 75

jaar oud, gemiddeld 36.4 jaar. Zes procent was 18 of 19 jaar oud. De meesten waren twintigers (42%), 17% waren dertigers, 14% veertigers, 10% vijftigers en 10% zestig jaar of ouder.

Op de avond van de proef was er een schriftelijke verklaring met als essentie: *“U stapt straks uit in de tunnel in dichte rook. Uw taak is: breng uzelf in veiligheid. Dat moet IN UW EENTJE. Let niet op anderen, wacht niet op anderen, loop niet met anderen mee, neem niemand op sleeptouw. Doe wat u het beste lijkt”*. Direct voor aanvang van de proef werd gezegd “zorg dat u uit de rook komt”.

Een bonnenboekje was beschikbaar om de proefpersonen een identificatienummer te geven.

### 2.1.2 Proefgebied en bewaking

De proef werd gedaan in de C-buis van de Beneluxtunnel te Rotterdam, een ruim 1 km lange tunnel onder de Nieuwe Maas (zie Fig. 1 en 2). Rijdend in Zuidelijke richting buigt de tunnel naar links met een boogstraal van ongeveer 1¼ km. De tunnel heeft een A- en een B-buis voor verkeer in Zuidelijke richting en een D- en een E-buis voor verkeer in Noordelijke richting. De C-buis of wisselbuis daartussen is geschikt voor verkeer in beide richtingen. Deze buis is 6.6 m breed met een rijstrook van 3.5 m breed, aan weerszijden een ononderbroken streep van 20 cm, een vluchtstrook van 105 cm en een barrière van 30 cm breed. De barrière is zo’n 80 cm hoog en bevindt zich tegen de wand. Hij is bedoeld als geleiding voor voertuigen die tegen de wand zouden botsen (o.a. op Fig. 6 is het profiel van de barrière te zien). De andere buizen van de Beneluxtunnel zijn breder en hebben dubbele rijstroken.

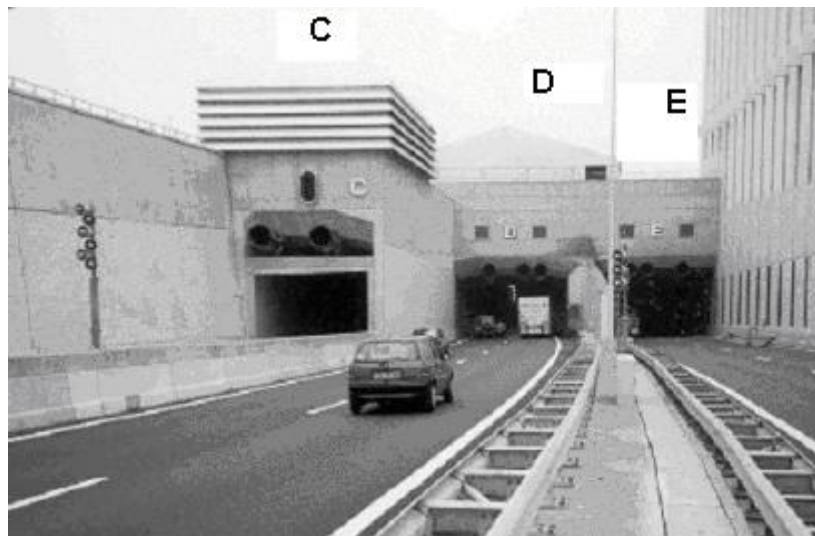


Fig. 2 Links de uitgang van de C-buis waar de proef plaatsvond (de naastliggende D-buis was op dat moment afgesloten; de E-buis was normaal opengesteld. Opname vanaf de Zuidoever).

Langs de linkerwand waren er om de 100 m vluchtdeuren genummerd 2 t/m 10 vanaf Zuid. Alleen de afstand tussen de deuren 6 en 7 was afwijkend, 50 m. De deuren gingen open met een standaarddeurkruk, draaiden met de vluchtrichting mee en sloten zichzelf met een veer. Vanaf de rijbaan moest men ongeveer 50 cm omhoog. Een trede van bijna 30 cm hoog en een horizontaal oppervlak van 25 cm hielp bij de opstap. Vluchtdeur, drempel en trede waren 108

cm breed; de deuropening was 2 m hoog en 0.9 m breed. Via de deuren kwam men in de D-buis. Figuur 3 laat een deur zien.



Fig. 3 Vluchtdeur 6 met geluidsbaken op de bovendorpel, de zwarte vierkante doos. (Testassistenten bereiden de proef voor; er is nog nauwelijks rook.)

Het proefgebied was op het diepste punt van de tunnel, rond de deuren 6 en 7 (zie Fig. 4). Vijfentwintig m voorbij deze deuren waren kettingen over de rijbaan gespannen om proefpersonen op te vangen die niet door de deuren gingen. Achter de kettingen en de deuren 6 en 7 stond TNO-personeel gereed om de proefpersonen op te vangen. Boven de deuren 5, 6, 7 en 8 waren geluidsbakens aangebracht (zie Fig. 3).

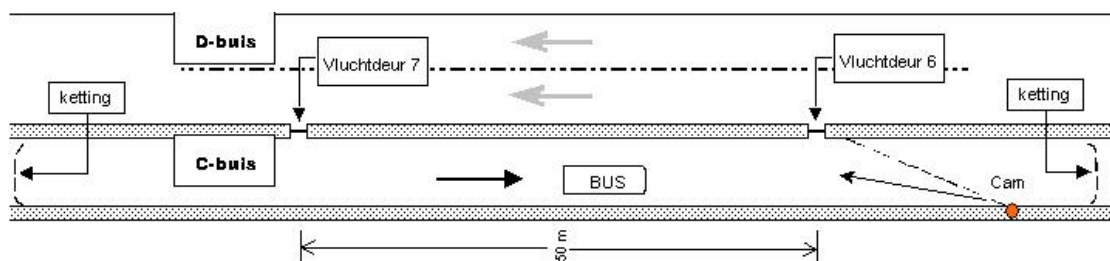


Fig. 4 Het met kettingen afgezet proefgebied. (De deuren 5–8 hadden geluidsbakens. Cam = de plaats van de camera.)

Alle bewakend personeel had een op de seconde afleesbaar horloge en een klembord om kloktijden en proefpersoonnummers te noteren. Zij droegen een rood veiligheidsvest. Een camera stond 16 m voorbij vluchtdeur 6 op ruim 2 m hoogte. Hij bestreek een gebied met links de wand zonder vluchtdeuren, in het midden de rijbaan en rechts de wand met deur 6. De camera was in staat door dichte rook heen te kijken (infrarood, *thermal imaging*). De bus onttrok deur 7 aan het gezicht. Figuur 7 geeft een indruk van het camerabeeld.

### 2.1.3 Geluid

Het geluid van de bakens bestond uit een opeenvolging van twee harmonische tooncomplexen met elk twee grondfrequenties: de drieklank C groot plus E (grondtoon 261 en 329 Hz), gevolgd door E plus G (grondtoon 329 en 392 Hz); informeel aangeduid als “ding-dong” of gongslag. De harmonischen van genoemde grondfrequenties waren in het signaal opgenomen tot een frequentie van 18 kHz, waarbij de amplitude van de harmonischen iets afnam met de frequentie (3% per octaaf). Daarna volgde de tekst “exit here” of “uitgang hier”. Figuur 5 laat het tijdpatroon zien.

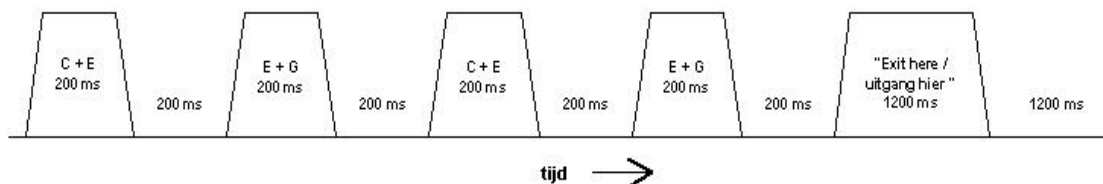


Fig. 5 Amplitude van het geluidssignaal schematisch over de tijd. Het patroon herhaalt zich elke 4 s: dubbele gongslag, “exit here” (of “uitgang hier”), stilte, dubbele gongslag, enz. (De letters C, E en G zijn de tonen van de toonladder).

Het geluidsniveau werd ingesteld op 75–80 dBA “stevig maar niet oncomfortabel”; de waarde afhankelijk van de afstand tot het bakken. Zoals beschreven door Boer en Van Wijngaarden (2003) is het geluid ontworpen met als criteria: (a) direct begrijpelijk, (b) goed lokaliseerbaar, (c) plezierig geluid, (d) passend voor een noodsituatie, en (e) nog hoorbaar boven het lawaai van de ventilatoren.

Het geluid in de tunnel was beperkt tot één autobus met stationair draaiende motor, één ventilator enkele honderden meters van het proefgebied die eens per minuut 30 s aansloeg, en wat omloopgeluid van de E-buis. De rook werkte sterk geluiddempend. Deze situatie is conform de eerdere tunnelproeven.

### 2.1.4 Rook en rookmaskers

Ter hoogte van deur 5 stonden langs de wand vier rookgeneratoren, merk Vesuvius. Ze produceerden witte rook (zie Fig. 6). De fabrikant typeert de rook als “in mindere mate schadelijk voor de gezondheid” waarbij de schadelijkheid afhangt van de dosis. De proefpersonen droegen daarom stofkapjes over neus en mond (zie Fig. 8). De luchtstroming transporteerde de rook naar het proefgebied met een snelheid van ongeveer 0.3 m/s.

De rook maakte de tunnel minder licht. De eerdere proeven maten direct onder de lampen eerst 90–110 lux en, na rook, 60–80 lux. De verlichting van de rijbaan vlak voor de deuren liep van 17–37 lux terug naar 13–28 lux. De verlichting van de wand rond deze deuren liep van 90–105 lux terug naar 70–80 lux. Voor het menselijk oog is deze verduistering gering.

Het zicht was eerst 1–2 m en daalde later tot ½ tot 1½ meter.



Fig. 6 Rookproductie in de tunnel.

### 2.1.5 Procedure

De proefpersonen meldden zich op een parkeerplaats op de Zuidoever in twee groepen van resp. 34 en 44 personen, de eerste groep tegen 20:00 uur, de tweede groep iets na 21:00 uur. Bij aankomst kregen ze de schriftelijke instructie die ze daarna ondertekenden. Ze werden per autobus naar het proefgebied gebracht. Tijdens de rit van ongeveer 15 minuten legde een proefleider de instructie nogmaals uit en beantwoordde eventuele vragen zonder vluchtdeuren of geluidsbakens te noemen. Ook werd de uitstapprocedure doorgenomen.

Op locatie aangekomen stopte de bus tussen deur 7 en deur 6. De bus bevond zich 32 m voorbij deur 7 en 18 m voor deur 6<sup>1</sup>. De motor bleef draaien. De proefpersonen werden vervolgens met intervallen van 40 s op straat gezet. Afgezien van de voorruit waren de ramen van de bus afgeplakt om visueel contact tussen proefpersonen binnen en buiten te beperken. Direct voor het

---

<sup>1</sup> In de vorige tunnelproef stopte de bus 3 m verderop (iets dichterbij deur 6 en iets verder van deur 7).

uitstappen zette de proefpersoon het stofkapje op en kreeg hij of zij een identificatienummer in de hand gedrukt. De proefleider noteerde de tijd van uitstappen. Proefpersonen werden opgevangen achter de vluchtdeuren of bij de kettingen na de deuren 6 en 7. TNO personeel noteerde de aankomsttijd en het identificatienummer. Vijf tot acht minuten na vertrek van de laatste proefpersoon eindigde de proef en werd iedereen teruggeleid naar de bus.

## 2.2 Resultaten

### 2.2.1 Databestand

Eén van de 78 proefpersoon bleek achteraf toch mee te hebben gedaan aan de eerdere Benelux-proeven<sup>2</sup>. Deze proefpersoon werd niet meegerekend. Vijf anderen bleken meegedaan te hebben aan de laboratoriumproef. Volgens zeggen hadden ze toen geen bakens gehoord; we concludeerden dat ze het oude UK-geluid hadden gekregen en dat sissgeluid niet als bakens hadden opgevat. Deze proefpersonen zijn wel meegerekend. Eén (jonge) proefpersoon vond lopen in dichte rook zo leuk dat hij, tegen de instructie in, besloot niet door de deur te gaan. Ook hij werd niet meegeteld. Dan waren er twee proefpersonen die, tegen de instructie in, een afspraak maakten. We rekenden dit paar als één proefpersoon. Aldus is de analyse gebaseerd op 75 personen. Bij de eerste 3 proefpersonen deden zich problemen voor met de vluchtdeur. De deurkruk leek vast te zitten met gevolg dat deze 3 proefpersonen doorliepen. Op grond van de camerabeelden rekenden we deze proefpersonen toch als “door de vluchtdeur gegaan” (zie ook voetnoot 5).

### 2.2.2 Lopen in rook

Tabel 1 laat de resultaten zien over de verschillende opvangpunten; de twee kettingen over de rijbaan en de twee deuren daartussen. Ter vergelijking zijn ook de resultaten van de oude, sissende, UK-bakens vermeld<sup>3</sup>.

Tabel 1 Resultaat oude en nieuwe geluidsbakens: plaats waar de proefpersonen uitkwamen. (UK resultaten “Sound Alert” bakens, Boer, 2002; TNO resultaten, huidige proef.)

soort bakens	Noord ↔ Zuid				
	ketting Noord	deur 7	Bus →	deur 6	ketting Zuid
UK (n=65)	29	7	(rijrichting)	5	24
%	45%	11%		8%	37%
<b>TNO (n=75)</b>	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>64</b>	<b>10</b>
%		<b>1%</b>		<b>85%</b>	<b>13%</b>

We sommeren de gegevens een keer voor vluchtrichting Noord/Zuid (ketting N + deur 7 = Noord; deur 6 + ketting Z = Zuid) en een tweede keer voor vluchtdeur/rijbaan (deur 7 + deur 6 versus ketting N + ketting Z). De trends zijn duidelijk: op één na liepen de proefpersonen naar het Zuiden (99%) en 87% vond de vluchtdeur. Op beide trends is er een groot verschil met de resultaten van de

<sup>2</sup> Volgens het wervingsbureau een geïsoleerde misser.

<sup>3</sup> Bij de oude bakens liep het proefgebied 100 m verder door tot na deur 8. Van deur 8 maakte slechts 1 proefpersoon gebruik. Deze ene proefpersoon is in Tabel 1 weergegeven alsof hij door deur 7 ging.

UK-bakens: 45% Zuid versus **99%** Zuid (test voor proporties  $p < 0.001$ ) en 18% vluchtdeur tegen 18% versus **87%** (*idem*). Tabel 2 vat dit samen.

Tabel 2 Resultaten oude en nieuwe geluidsbakens (samengevat uit de vorige tabel).

soort bakken	vluchtrichting		deur of rijbaan	
	richting Noord	richting Zuid	door vluchtdeur	over rijbaan
UK (n=65)	36	29	12	53
%	55%	45%	18%	82%
TNO (n=75)	1	74	65	10
%	1%	99%	87%	13%

In de laboratoriumproef liep 93% de kant van het geluidsbaken uit (63 van de 68 proefpersonen, Boer & Van Wijngaarden, 2003). Dat is wat beter dan de huidige 87% maar statistisch gezien niet significant anders ( $p=0.12$ , eenzijdig getoetst).

Op de camera zien we de proefpersonen uit de bus komen en op weg gaan, bijna iedereen naar de camera toe. Een enkeling aarzelde over de richting, de meesten leken daar geen moeite mee te hebben. 42 Personen (56%) gingen in een redelijk vloeiende lijn op deur 6 af. De rest zocht oriëntatie op de dichtstbijzijnde wand (voor hen rechts, voor de camera links), soms met de hand langs de muur, soms met alleen visueel contact (zie Fig. 7). Verderop zagen we vaak een oriëntatiereactie: het hoofd draaide wat naar links in de richting van het bakken, soms stopte men even. Soms werd de oversteek meteen gemaakt, soms liep men nog even door en maakte later een meer loodrechte oversteek. Enkelen leken vastbesloten het geluid te negeren; ze liepen door langs de wand, zelfs na een duidelijke oriëntatiereactie naar links.

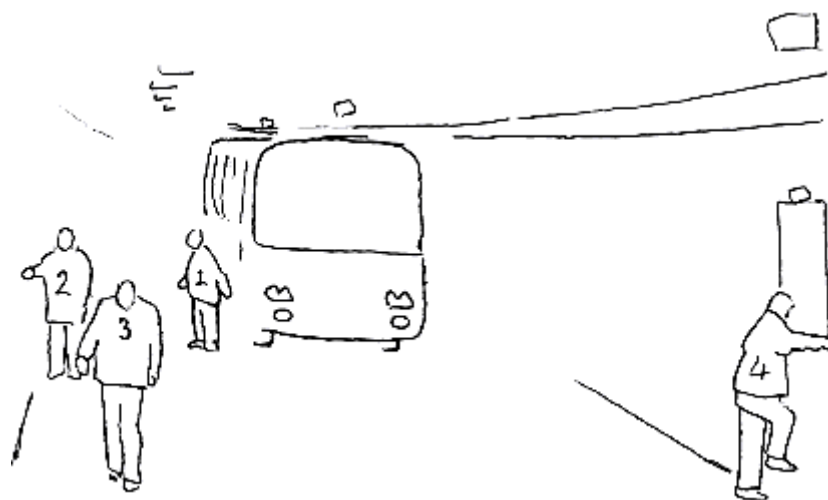


Fig. 7 Het camerabeeld: na uitstappen uit de bus (1) maakt men met de hand contact met de wand (2) of gaat men langs de wand lopen (3) en steekt dan over naar de deur (4). Anderen gaan direct op het geluid af, dus schuin voor de bus langs naar de deur (1 naar 4). In werkelijkheid liep altijd maar één proefpersoon tegelijk.

Proefpersonen kwamen elkaar niet tegen. Bijna steeds startte de volgende proefpersoon als de vorige reeds uit beeld was. Een uitzondering waren twee proefpersonen die vlak na elkaar naar het Noorden liepen, weg van de camera. Afsgesproken werk? Ja, volgens een statistische toets. De vraag van deze toets was “als slechts 2 van de 76 naar Noord lopen, hoe groot is de kans dat die

twee net opeenvolgende personen zijn”. Volgens een  $\chi^2$ -toets is die kans heel klein ( $\chi^2 \gg 1000$ ). Mogelijk hadden die twee in de bus een afspraak gemaakt. We zagen de achterste oversteken naar deur 7 en onverrichter zake terugkeren. Deze persoon zei later dat de deur niet open ging. Waarschijnlijk gaf hij zijn partner deze informatie door; ook zij zei later dat de deur niet open ging zonder dat ze er was geweest. Dit “echtpaar” werd als één persoon geteld.

De stijl van lopen verschilde sterk. Een ineengedoken loop kwam voor maar echt gebukt ging slechts een enkeling. De meesten liepen voorzichtig en aarzelend soms met de arm voor zich uit gestrekt. Anderen liepen onbekommerd en zelfs branieachtig met de handen in de zakken. Ongeveer vijf proefpersonen botsten met hun voeten tegen de barrière, wankelden en vonden steun aan de wand. Blijkbaar zagen ze de barrière niet (die 35 cm uitsteekt, zie Fig. 6).



Fig. 8 Veilig! Een proefpersoon komt uit de met rook gevulde tunnel.

Het lopen naar deur 6 duurde gemiddeld 23 seconden. Op een afstand van ongeveer 20 m is dat een snelheid van 0.9 m/s. We observeerden vertragingen zoals steun zoeken aan de wand, stilstaan, oriëntatie zoeken bij de deur en de opstap beklimmen.

De proefpersonen die bij deur 6 uit de rook stapten (Fig. 8) reageerden nogal eens in de trant van “was dat alles”, ze hadden een langer durende tocht door de rook verwacht. Incidenteel vroegen we hoe ze de deur hadden gevonden. De reactie was “gewoon op het geluid af” [welk geluid?], “uitgang hier”.

### 2.3 Discussie

In vergelijking met de vorige tunnelproeven met de UK-bakens ging het nu een stuk beter. Met de TNO-geluidsbakens “exit here / uitgang hier” bereikte 87% de vluchtdeur terwijl dat maar 18% was bij de sissende UK-geluidsbakens. Bovendien liep iedereen op één na naar het dichtstbijzijnde geluidsbaken (recht vooruit vanuit de bus gezien) terwijl bij de UK-bakens (“Sound Alert”) slechts de helft op het dichtstbijzijnde baken afgang. De nieuwe, sprekende TNO-bakens lokken de mensen dus aan terwijl de sissende bakens dat niet doen. Anders gezegd, de UK-bakens werken alleen met instructie vooraf “er zijn geluidsbakens boven de vluchtdeuren” (69% succes<sup>4</sup>, Boer, 2002) en nog beter met een korte demonstratie vooraf (90% succes, Directional sound evacuation, 2001, 2002; Withington, 2002). De nieuwe TNO-bakens daarentegen zijn *ook* effectief zonder instructie en demonstratie. En zijn daarom praktischer, omdat men in de praktijk ook geen instructie en demonstratie vooraf krijgt.

We zagen dat ongeveer de helft van de mensen steun zocht aan de dichtstbijzijnde wand—hier de wand zonder vluchtdeuren; men stapte immers aan de rechterzijde van de bus uit. In de praktijk stapt de bestuurder links van zijn voertuig uit. Stopt de auto op de rechterstrook dan staat de bestuurder ongeveer op de middenstreep; stopt de auto op de linkerstrook dan staat de bestuurder vlakbij de linkerwand. De praktijksituatie is dus gunstiger dan de proefsituatie waar men altijd aan de verkeerde wand staat. We zagen aarzeling bij de oversteek naar de vluchtdeuren. Het is dus echt nodig dat de bakens de mensen wegtrekken van de verkeerde kant. Anderzijds is de praktijksituatie weer wat minder gunstig omdat de mensen die aan de verkeerde wand lopen twee rijstroken moeten oversteken. Op die afstand klinken de bakens ook wat zachter.

Is het resultaat, 87% door de vluchtdeur, het maximale? We zagen op de camera sommige mensen die de indruk wekken dat ze, na eenmaal oriëntatie gevonden te hebben, die onder geen voorwaarde los willen laten. Ze blijven stug rechtdoor lopen en zijn niet te bewegen over te steken. Een pijl naar de overkant zou misschien helpen (zie Fig. 9 conform eerdere aanbevelingen; Boer, 1998, 2001) en dus tot een beter resultaat kunnen leiden. In de praktijk is ook een beter resultaat te verwachten omdat zeg maar de helft van de automobilisten naar de wand met de vluchtdeuren zal gaan en dan voor 99% de vluchtdeuren vindt. Stel nu dat slechts één op de drie automobilisten naar de wand met de vluchtdeuren gaat en de rest naar de andere wand, dan verwachten we als netto resultaat dat 91% de vluchtdeur vindt.

---

<sup>4</sup> Volgens de statistiek (*difference between proportions*) ligt 69% succes nog altijd beneden de 87% succes van de nieuwe bakens ( $p < 0.05$ , dubbelzijdig getoetst).



Fig. 9 Met een pijl op de grond nog meer evacués naar de overkant? (De pijl is reeds opgenomen in het concept “Veiligheidsrichtlijnen”, Rijkswaterstaat.)

Vergeleken met de laboratoriumproef had de huidige proef wat minder succes; in de huidige proef maakte 87% de juiste keuze; in het laboratorium 93%. We schrijven dit op rekening van de tunnelomgeving die grimmiger is dan het laboratorium met tapijt op de vloer; bovendien is het openen van een deur een psychologische barrière (Boer, 1998, 2001). Daarop sluit de observatie aan van deelnemers die het snel opgaven als de deur niet open wilde. Op dit moment wordt gewerkt aan een betere markering van de vluchtdeuren (Fig. 10). Zolang er nog enig zicht is zal een betere markering tot een beter vluchtresultaat leiden.

Het huidige lopen, 0.9 m/s, ging dubbel zo snel als bij de vorige tunnelproeven (met een snelheid van 0.44 m/s naar deur 6). Wie in de vorige proeven tot voorbij deur 8 liep (160 m) liep evenwel ook met 0.9 m/s. We interpretern dit als psychologisch vertrouwen dat groeit naarmate men langer loopt zonder tegen obstakels te botsen. In die lijn van denken zorgen de huidige bakens voor meer vertrouwen en dus vlotter lopen. In de praktijk loopt de evacuée in een met auto's gevulde tunnel. Deze kunnen slordig geparkeerd staan of een deur open hebben staan. Ook kan er rommel op de weg liggen. Botsing met obstakels is mogelijk en mensen zullen onmiddellijk voorzichtiger gaan lopen. We geven de voorkeur aan deze psychologische interpretatie boven een interpretatie op grond van louter zichtbaarheid (bijv. Jin, 1997).

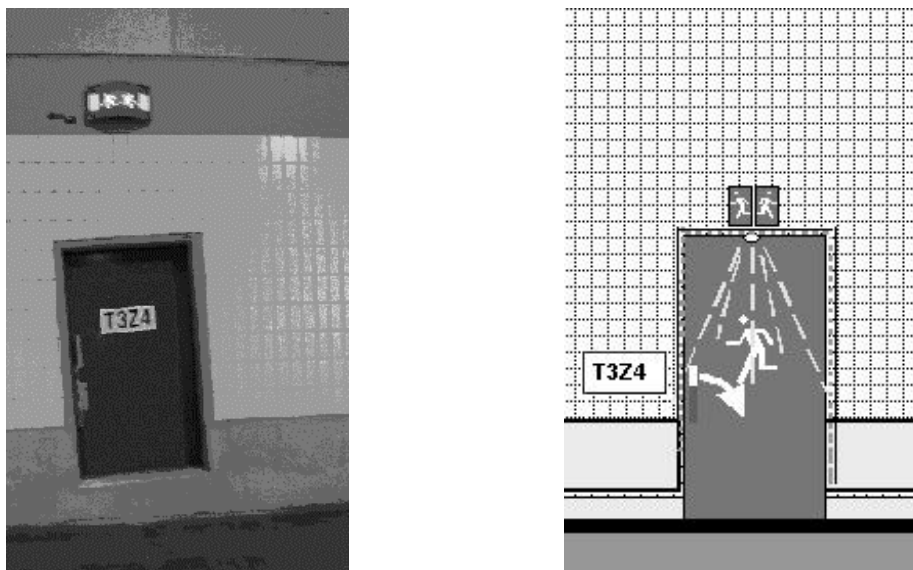


Fig. 10 Huidige en nieuwe uiterlijk van de vluchtdeur. (Verlichte pictogram niet te hoog maar direct op de bovendorpel, deurblad alleen nog gemarkeerd met het rennende mannetje; deurblad verlicht; en openingswijze duidelijk aangegeven met pijl. Schets rechts afkomstig uit conceptstuk “Veiligheidsrichtlijnen”, Rijkswaterstaat.)

Tegen de verwachting in speelde de galmende akoestiek van de tunnel geen rol. De rook haalde de echo's uit de tunnel en het bakengeluid was goed te lokaliseren. De rook dempte ook het lawaai van de motor van de autobus en het omlooplawaaai van het verkeer in de E-buis. Onduidelijk is of echte rook ook zo'n gunstig akoestisch effect zal hebben. Om daarover duidelijkheid te krijgen zijn geluidsmetingen nodig in een met hete rook gevulde tunnel. Ook is herhaling van de proef mogelijk in een lege tunnel (akoestisch ongunstig) met geblinddoekte proefpersonen. Net als bij de vorige tunnelproef was er ook nu geen (nauwelijks) ventilatie in de tunnel. De bakens hoefden het dus niet op te nemen tegen het lawaai van de ventilatoren. Interessant is de vraag of rook ook het lawaai van de ventilatoren zal dempen.

### 3 TOETSING

Op wens van het Steunpunt Tunnelveiligheid bespreken we de volgende punten in verband met toetsing van de door TNO verrichte werkzaamheden: (1) reproduceerbaarheid van de resultaten, (2) vergelijkbaarheid met de vorige tunnelproeven, (3) geschiktheid van de geluidsbakens voor tunnels.

#### 3.1 Reproduceerbaarheid resultaten

Hoe zullen de resultaten uitvallen bij een herhaling van de proef, uiteraard met proefpersonen die nog niet eerder aan dergelijke proeven hebben meegedaan. Op statistische gronden verwachten we een resultaat ergens tussen de 75 en 95% succes. Verder verwachten we geen wezenlijk ander resultaat, ook niet als we de proef zouden herhalen in een tunnelbuis met

dubbele rijstroken. Minder mensen zouden dan aan de verkeerde tunnelwand beginnen maar de oversteek naar de overkant zou wel eens vaker uitgesteld kunnen worden vanwege de toegenomen afstand tot het geluidsbaken. We verwachten een mogelijk iets beter resultaat wanneer we de proef zouden herhalen met mensen die links van hun auto uitstappen omdat de wand met de vluchtdeuren dan dichterbij is. Bij tunnels met de vluchtdeuren aan de rechterzijde (zoals bijv. de B- en de D-buis van de Beneluxtunnel) zou het resultaat misschien iets minder gunstig zijn. We verwachten echter geen grote verschillen; er zijn duidelijke aanwijzingen dat het TNO bakengeluid de mensen vertrouwen inboezemt, dat ze daardoor sneller lopen en eerder geneigd zijn op het geluid af te lopen ook als ze moeten oversteken. Dat is het grote positieve effect.

### 3.2 Vergelijkbaarheid met de vorige tunnelproeven

Vorige en huidige proeven vonden op vrijwel hetzelfde punt plaats (a) tussen de deuren 6 en 7, (b) met het uitstappunt op vrijwel dezelfde plaats tussen deur 6 en 7, (c) op het diepste punt van de tunnel, (d) met identieke geometrie van de tunnelbuizen (afgezien van de breedte), (e) met identiek geworven, geïnstrueerde en op straat gezette proefpersonen, en (f) met identieke bewakings- en meetprocedures.

De voornaamste verschillen zijn het type deuren en de breedte van de tunnel. De vorige proeven hadden schuifdeuren en de huidige proef scharnierdeuren. We verwachten geen wezenlijke invloed van het deurtype omdat niemand moeite had met de openingswijze van de deuren<sup>5</sup>. Het tweede verschil was een tunnelbuis van 10 m breed en twee rijstroken in de vorige proeven en een tunnelbuis van 6.6 m breed en één rijstrook in de huidige proef. Dat leidde in de vorige proeven tot uitstappen op de middenstreep; in de huidige proef tot uitstappen naast de wand zonder vluchtdeuren. In de vorige proeven volgden daardoor meer mensen de wand met de vluchtdeuren en hoefden minder mensen over te steken om bij de vluchtdeuren te komen. In de huidige proef hadden de mensen altijd de ongunstige uitgangspositie. Anderzijds was in de huidige proef de oversteek weer korter dan die van de vorige proeven en hadden de mensen het wat dat betreft weer gemakkelijker. Tunnelbreedte heeft dus twee effecten die elkaar tegenwerken. Bovendien verwachten we niet dat deze effecten qua omvang groot zullen zijn. Samenvattend menen we dat de vorige en de huidige proef goed vergelijkbaar zijn afgezien van waar het allemaal om ging: de nieuwe geluidsbakens.

### 3.3 Geschiktheid voor tunnels

Op basis van de huidige proef wordt het succes van de TNO-bakens op 90% geschat—zeer geschikt voor tunnels dus. De proef is natuurlijk in vele opzichten anders dan een echte ramp. We sommen op: in de proef wisten de deelnemers van tevoren dat ze door dichte rook moesten—blijven zitten was geen optie—, dat de rook onschadelijk was, en konden ze vermoeden dat ontsnapping mogelijk was. Een echte ramp geeft geen garanties: (a) Automobi-

---

<sup>5</sup> De openingswijze van de deuren was geen onderwerp van studie. Nochtans is het een mooi resultaat dat niemand moeite had met een scharnierdeur (huidige proef) of schuifdeur (vorige tunnelproef). Negatief voor de scharnierdeuren was dat ze, gedurende de hele tijdsduur van de huidige proef, haperden en bleven haperen.

listen zijn onvoorbereid op rook, (b) de rook is heet, zwart, giftig en irriteert ogen en luchtwegen, (c) de auto biedt, tijdelijk, een veilige schuilplaats en vertegenwoordigt een waardevol bezit, (d) onzeker is of er ontsnapping is, en (e) men kan menen dat blijven zitten het beste is. De neiging passief af te wachten (Boer, 2002) en de verleidelijke beschutting van de auto op korte termijn zullen er voor zorgen dat men blijft zitten en pas uitstapt bij een ver geëscaleerde situatie—bijvoorbeeld een zichtbaarheid van vrijwel nul. De tijd om te ontsnappen is dan maar kort.

De brandweer hanteert als norm dat mensen maximaal 30 seconden door rook mogen lopen (Binnenlandse Zaken, 1995). Dat heeft op gebouwen betrekking en niet noodzakelijk op tunnels. Met het huidige baken was de gemiddelde loopsnelheid bijna 1 m/s en werd de afstand tot de dichtstbijzijnde vluchtdeur overbrugd binnen de 30 s. Maximaal ongunstig is als men tussen twee vluchtdeuren in zou staan, afstand 50 m. Overbruggen van die afstand neemt dan twee maal de normtijd. Er zouden dan vluchtdeuren om de 60 m moeten zijn om iedereen een looptijd van maximaal 30 s door rook te geven. De *Draft directive of the European parliament and of the council* (2003) is op dit punt veel ruimhartiger: nooduitgangen elke 500 m is ook acceptabel. We mogen immers uitgaan van tunnels met (anders dan gebouwen) een apart systeem voor evacuatie en die daarom waarschijnlijk al lang ontruimd zijn voordat de rook het zicht wegneemt. Het Europese concept moedigt overigens de lidstaten aan een hoger niveau van veiligheid na streven. Het concept is in september 2003 aan COREPER aangeboden en zal naar verwachting omstreeks april 2004 kracht van wet hebben.

Het streven is om mensen helemaal niet door rook te laten lopen, zowel door snelle rookafvoer als door het signaal tot ontruiming snel te geven. Een omroepbericht is *sowieso* nodig om de automobilisten tot uitstappen te bewegen, luidde de conclusie van vorige tunnelproeven (Boer, 2002). Het is de moeite waard om eens te testen of het aanzetten van de bakens automobilisten ook beweegt tot uitstappen. “Uitgang hier” heeft een dwingend karakter zowel door de intonatie als door de continue herhaling.

Het bakengeluid bestaat voor een belangrijk deel uit spraak. Hetgeen q.q. het verstaan van andere spraak stoort. Wij zelf vonden, vlak onder een baken, het wel handig de stiltes tussen de herhalingen te gebruiken voor kort onderling overleg. Dus zal ook de onderlinge communicatie van evacués (“Piet, waar zit je”) veel hinder ondervinden van de bakens evenals de communicaties van de operator en, mogelijk, die van de hulpverleners. Dat de communicatie van evacués hinder zal ondervinden is niet zo erg omdat dergelijke communicatie weinig zin heeft. Beele Engineering BV in Aalten laat bezoekers in een ingewikkeld doolhof in het duister ronddwalen. Bij groepen is de communicatie vrijwel steeds zinloos; men is niet gewend te communiceren zonder zicht en realiseert zich niet hoe zinloos aanduidingen van plaats zijn (links/rechts, voor/achter, verderop, hier/daar). Daarnaast worden ook de eventuele omroepberichten van de operator gehinderd. Dit is technisch op te lossen met een omroep die de bakens tijdens het bericht wegdrukt. Ten derde zullen ook de hulpverleners gehinderd worden door de bakens, mogelijk alleen in hun onderlinge overleg omdat de automobilisten de tunnel inmiddels al ontruimd hebben. Een technische oplossing is een knop om het baken plaatselijk uit te zetten. Vanaf de drempel van de vluchtdeur moet de brandweer dan 2 m omhoog reiken om de knop in

te drukken. Uiteraard moet deze oplossing *fail safe* zijn; bijvoorbeeld gaan alle bakens aan als het startsignaal (opnieuw) gegeven wordt, of begint een lokaal uitgezet baken na 5 minuten weer opnieuw.

De geluiddempende werking van de hier gebruikte rook kwam onverwacht en maakte de bakens extra goed te lokaliseren. Of echte rook ook zo geluiddempend werkt is onbekend. Navraag bij een plaatselijke brandweer leverde niets op; wel is de brandweer gewend om in zeer dichte rook te lopen maar dan wordt perslucht gedragen en die apparatuur dempt zowel spraak als horen. Aanbevolen wordt om geluidsmetingen te doen in een met hete rook gevulde tunnel. Een alternatief is herhaling van de gedragsproef in een lege tunnel (akoestisch ongunstig) met proefpersonen geblinddoekt zoals in de laboratoriumproef. Schokkend andere resultaten verwachten we in een dergelijke proef overigens niet; wel langzamer lopen en meer op de tast.

Welk effect heeft tunnellawaai op de verstaanbaarheid van de geluidsbakens? Bij de ramp die we voor ogen hebben is weliswaar het verkeerslawaai gestopt maar de ventilatoren draaien op vol vermogen. En dat geeft veel lawaai, 80 tot 90 dB. “Exit here / uitgang hier” blijft hoorbaar als de bakens maar voldoende luid zijn. Als grenswaarde mag een luidheid aangenomen worden ongeveer 10 dB onder het lawaai, dus 80 dB. Verder opvoeren van de bakens is technisch mogelijk maar geeft het risico van een onplezierig hard en zelfs pijnlijk geluid en reduceert de verstaanbaarheid. De positie van de luisteraar ten opzichte van de geluidsbronnen is natuurlijk van groot belang. Dichtbij een baken zal de automobilist het baken horen. Op grote afstand van het baken zal de automobilist het baken waarschijnlijk niet horen, zeker niet als vlakbij een ventilator op volle kracht draait. Als de automobilist echter de auto verlaat en langs de wand gaat lopen komt hij na verloop van tijd toch weer binnen bereik van een baken. Auto verlaten is dus enorm belangrijk.

De ventilatie is o.m. bedoeld om de rookdichtheid terug te brengen en de rook af te voeren. Tegelijk daalt de concentratie koolmonoxide o.a. omdat de verbranding beter wordt. Bij goed zicht kan de automobilist die de bakens niet hoort de automobilisten zien die de bakens wèl horen. Als zij uitstappen zal hij dat voorbeeld volgen—het kudde-effect van de vorige proeven met “groepen” (Boer, 2002). Zoals in de inleiding gezegd kan niet altijd van goed zicht worden uitgegaan. Zo kan er filevorming in de tunnel zijn en pas daarna brand halverwege de file.

De geluidsbakens zijn voor dergelijke rampscenario's ontworpen. Snelheid van handelen is hierbij essentieel. De kans op een goede afloop is groot bij een snelle start van de evacuatie en, als de evacuatie begonnen is, bij een snelle en directe gang naar de vluchtdeur. De geluidsbakens bevorderen dat.

Qua tekst zijn de bakens direct en begrijpelijk. In de laboratoriumproef had een enkeling moeite met het Engels; in de huidige proef met Engels-Nederlandse tekst leek niemand moeite te hebben. We menen dat deze tweetalige tekst zeer geschikt is voor de populatie van tunnelgebruikers in Nederland.

Een laatste punt is de interactie tussen evacués. In de huidige proef liepen de mensen individueel zonder elkaar te ontmoeten. In werkelijkheid zullen mensen elkaar wèl ontmoeten. Daarvan verwachten we een positief effect omdat “twee meer weten dan één”. In onderzoek naar scheepsevacuatie vonden we dat de groep tweemaal slimmer was dan het individu (Boer, 1998, 2001). Een negatief effect is te verwachten omdat mensen tegen elkaar aan kunnen botsen. Een proef met mensen die van verschillende kanten tegelijk op de vluchtdeuren afkomen kan onthullen of het netto-effect positief zal uitvallen.

TNO heeft een concept ontwikkeld en gedemonstreerd waarmee de grote meerderheid de vluchtdeuren ook in dichte rook nog kan vinden. De technologische uitwerking is een zaak van een industriële partner waarbij TNO advies kan geven. Aandacht moet er zijn voor o.a. (a) levensduur en onderhoud, (b) periodieke tests, (c) methode van aansturing, centraal vanaf de controlekamer, eventueel in een “noodknop” samengepakt met andere op ontruiming gerichte maatregelen zoals in de Westerscheldetunnel, (d) bakens automatisch op *mute* als de operator een omroep doet en (e) de mogelijkheid bakens lokaal uit te zetten.

#### 4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Het idee van geluidsbakens die mensen de weg wijzen in dichte rook blijkt ook in de praktijk te werken. Belangrijk is dat het geluid zichzelf uitlegt, onafhankelijk van vooraf gegeven instructie en demonstratie.

Aanbeveling 1: Voorzie tunnels van bakens boven de vluchtdeuren die een geluid laten horen zoals in dit rapport staat beschreven. Dat helpt bij de onfortuinlijke situatie dat weggebruikers te voet vluchten bij dichte rook. Dat helpt ook bij minder dikke of geen rook.

Aanbeveling 2: Onderzoek of het aanzetten van de bakens automobilisten in een file vermag aan te zetten tot uitstappen en tunnel verlaten.

Aanbeveling 3: Operator zet de geluidsbakens aan. “Geluidsbakens” kan als een aparte knop op de bedientafel van de operator uitgevoerd worden dan wel (ook) onder een calamiteitenknop opgenomen kunnen zijn samen met acties zoals volle ventilatie. Als de operator de automobilisten per luidspreker oproept de tunnel te verlaten, dan is het—in verband met de verstaanbaarheid van de oproep—beter om eerst de oproep te doen, en pas daarna bakens (en ventilatie) aan te zetten. Automatische activering van de bakens op bijvoorbeeld rooksensoren wordt ontraden omdat de sensoren geen verschil zien tussen branden waarbij geen, en branden waarbij wèl ontruiming nodig is.

Aanbeveling 4: Locale “uit”-knop. Hulpverleners zal het continue bakengeluid snel vervelen. Op het baken kan een uit-knop worden aangebracht om het baken, lokaal, te deactiveren. Voor de veiligheid moet de “aan”-knop van de operator altijd voorrang hebben,

Aanbeveling 5: Omroep aan, bakens uit. Het bakengeluid hindert de omroepberichten. Om deze hinder weg te nemen worden de bakens weggedrukt (tot stilte gebracht) zolang de operator de spreek sleutel indrukt.

Aanbeveling 6: Plaats ventilatoren tussen de vluchtdeuren en in elk geval nooit pal naast een vluchtdeur. Het lawaai van de ventilatoren hindert automobilisten in het verstaan van het bakengeluid. Wie langs de wand gaat lopen komt op enig moment een vluchtdeur tegen. Het bakens zal beter te horen zijn naarmate de ventilatoren verder van de vluchtdeur verwijderd zijn.

Aanbeveling 7: Bakengeluid eenvoudig te vervangen. In verband met de toekomstvastheid heeft een systeem de voorkeur waarbij het gewenste geluid met één chip te vervangen is.

Aanbeveling 8. Laat TNO een adviserende rol spelen bij massaproductie van tunnelvaste geluidsbakens.

Aanbeveling 9. Om de realiteit nog een stap dichterbij te brengen zijn de volgende proeven mogelijk (a) herhaling van de proef maar nu met het lawaai van volle ventilatie en (b) ... met evacués die elkaar in dichte rook tegenkomen = groepseffecten.

Aanbeveling 10. Onderzoek of warme rook geluiddempend werkt. De hier gebruikte koude rook werkte sterk geluiddempend, hetgeen voordelig was voor het horen van de bakens. Dit effect is onbekend; de vraag is of het zich ook voordoet bij echte rook.

## REFERENTIES

- Boer, L.C. (1998). *Improved signposting for the evacuation of passenger ships* (Report TM-98-C081). Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors.
- Boer, L.C. (2001). *Way finding during emergencies*. Oslo: TIEMS 2001 Conference, June 19-22.
- Boer, L.C. (2002). *Gedrag van automobilisten bij evacuatie van een tunnel* (Rapport TM-02-C034). Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
- Boer, L.C. (2003). Behavior of drivers during tunnel evacuation. In J. Saveur (Ed.), *(Re)Claiming the Underground Space*, pp 213-217. Lisse (NL), Abingdon, Exton (PA), Tokyo: Balkema.
- Boer, L.C. & Wijngaarden, S.J. van (2003). *Ontwikkeling en laboratoriumtest van geluidsbakens voor ontruiming van tunnels* (Rapport TM-03-C051). Soesterberg: Technische Menskunde TNO.
- Boer, L.C. & Withington, D.J. (in voorbereiding). Auditory Guidance in a Smoke-filled Tunnel. Binnenlandse Zaken (1995). *Brandbeveiligingsconcept gebouwen met een publieksfunctie*. Den Haag: Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.
- Directional sound evacuation: Marine trials, data and analysis* (June and October 2001, updated 14 May 2002) [Compact Disk]. Southampton, UK: Maritime & Coast Guard Agency.
- Draft directive of the European parliament and of the council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Network* (2003). Brussels, B: Council of the EU.
- Jin, T. (1997). Studies on human behavior and tenability in fire smoke. Fire Safety Science—*Proceedings of the fifth international symposium*, pp 3-21.
- Skarra, N. et al. (1997). *Bussbrannen i Ekeberg tunnelen 21 august 1996*. Oslo: Statens Vegvesen.
- Withington, D.J. (2002). Life saving applications of directional sound. In M. Schreckenberg & S.D. Sharma (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (pp. 277-296). Berlin/New York: Springer.

Soesterberg, 3 december 2003



Dr. L.C. Boer  
(auteur, projectleider)