

BIBLIOTHEEK
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Postbus 20.000
3502 LA UtrechtCentrum voor Brandveiligheid
Lange Kleiweg 5, Rijswijk
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T 015 284 20 00

F 015 284 39 90

TNO-rapport**2002-CVB-R05184****Opwarming Westerscheldetunnel ten gevolge van
hoge verkeersdichtheid.**

Datum	7 maart 2002
Auteur(s)	F. Paap A. Lemaire
Aantal pagina's	14
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Bouwdienst Rijkswaterstaat Postbus 20.000 2502 LA Utrecht
Projectnaam	Opwarming Westerscheldetunnel
Projectnummer	006.10293/01.07

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, 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 belang-hebbenden is toegestaan.

© 2002 TNO

Inhoudsopgave

- 1 Inleiding — 3**
- 2 Verkeersdichtheid en eigenschappen. — 4**
- 3 Geleiding en warmteoverdracht naar de tunnelbuis. — 6**
- 4 Berekening temperatuurstijging. — 8**
 - 4.1 Basisvergelijking voor de temperatuurstijging. — 8
 - 4.2 Berekeningen bij constante temperatuur en verkeersaanbod. — 8
 - 4.3 Scenario 1: 59.000 voertuigen per dag. — 10
 - 4.4 Scenario 2; 20.000 voertuigen per dag. — 11
 - 4.5 Scenario 4; 12.000 voertuigen per dag. — 11

- 5 Conclusie. — 13**

Bijlage(n)

A Vergelijking warmteoverdracht coëfficiënt bij sprongfunctie en geleidelijke temperatuurstijging.

1 Inleiding

In de Westerscheldetunnel wordt gebruik gemaakt van een 45 mm dikke Fendolite bescherm laag op het beton om dit in geval van brand te beschermen tegen beschadiging door de hitte van het vuur. Een mogelijk nadeel van deze bescherming zou zijn dat door de isolerende werking de door het verkeer geproduceerde warmte niet voldoende snel afgevoerd kan worden, met als gevolg onacceptabel hoge temperaturen in de tunnel. Om te onderzoeken hoe groot de opwarming zou kunnen worden is TNO Centrum voor Brandveiligheid gevraagd om met behulp van berekeningen de temperatuurstijging bij enkele verkeersscenario's te schatten.

Oorspronkelijk was in het ontwerp een bescherming met 12 mm Promatect H opgenomen. Als onderdeel van de vraagstelling wordt ook gekeken naar het effect van deze afwerking op de temperatuurstijging in de tunnel.

Hiervoor is de volgende aanpak gekozen:

- Bepalen van verschillende scenario's wat betreft verkeersdichtheid, enkele extreme, en een scenario wat redelijkerwijs verwacht kan worden over een periode van 10 jaar. Aan de hand van de verkeersdichtheid kan het ontwikkeld vermogen geschat worden, en kunnen de ventilatiecondities bepaald worden.
- Bepalen van de belangrijkste processen die de warmteafvoer beschrijven, in dit geval gedwongen convector door de ventilatie en geleiding door de tunnelwand naar de omgeving. Door combinatie van deze effecten kan een beschrijving gemaakt worden van het proces.
- Door het proces van warmteafvoer toe te passen op verschillende verkeersscenario's kan een schatting gemaakt worden van de te verwachten temperatuurstijging in de tunnelbuis.

Aan de hand van de uitkomsten kan bepaald worden hoe groot het probleem van opwarming door hoge verkeersdichtheid mogelijk kan gaan worden.

2 Verkeersdichtheid en eigenschappen.

Berekeningen over de verkeersdichtheid en de ventilatie zijn gedaan met behulp van een door de Bouwdienst ontwikkeld spreadsheet. De berekeningen met betrekking tot de verkeersdichtheid zijn gebaseerd op gegevens die in de praktijk verzameld zijn (op de van Brienoordbrug). De spreadsheet is ter beschikking gesteld door de heer P. Fournier van de Bouwdienst.

Verder is uitgegaan van een verdeling van de verkeersdichtheid over de dag waarbij tijdens de spits (van 8.00 tot 10.00 en van 17.00 tot 19.00) de dichtheid maximaal is, en de dichtheid 's-nachts (van 21.00 tot 7.00) minimaal, en voor de berekeningen 0 wordt genomen. De maximum snelheid in de tunnel is 80 km/u, de minimum snelheid is 30 km/u; wanneer de snelheid lager is wordt de tunnelbuis afgesloten ter voorkoming van opstoppingen in de tunnel.

Bij de genoemde snelheden is het gemiddelde verbruik van een moderne personenauto gesteld op 8 l/100 km. Het verbruik van een vrachtauto is gesteld op 24 l/100 km. Het aandeel vrachtauto's is gesteld op 15%. Door de verbrandingswarmte van benzine op 33 MJ/l te stellen kan het vermogen van de voertuigen (per km, tijdseenheid) uitgerekend worden. Bij 80 km/u is dat 58.7 kW(per auto), bij 30 km/u is dat 22 kW.

De ventilatie wordt uitgerekend met het bovengenoemde spreadsheet. De ventilatoren kunnen per 10 ingeschakeld worden. Er is van uitgegaan dat om te koelen maximaal geventileerd kan worden. Ter vergelijking is bij een lage verkeersdichtheid ook aangegeven wat de luchtsnelheid is zonder extra ventilatie. In deze situatie voegt de ventilatie een relatief grote hoeveelheid vermogen toe aan het totaal.

De verschillende scenario's zijn samengevat in Tabel 2.1 en 2.2.

Tabel 2.1 Ontwikkeld vermogen en ventilatie

Verkeersgegevens				Ventilatie			Totaal vermogen/ m
snelheid	capaciteit	voertuigen	vermogen	lucht-snelheid	ventilatoren	vermogen	
km/u	%	aantal in tunnel	MW in tunnel	m/s	aantal	kW	kW/m _{tunnel}
80	100	354	27.0	10.3	10	850	4.15
30	100	685	19.6	10.9	40	3400	3.43
80	14.4	51	3.89	4.3	0	0	0.58
80	14.4	51	3.89	10.3	30	2550	0.96
80	27.5	97	7.43	5.8	0	0	1.11
80	27.5	97	7.43	10.6	30	2550	1.49
80	35	124	9.45	6.4	0	0	1.41
80	35	124	9.45	10.8	30	2550	1.79
80	50	177	13.5	10.0	20	1700	2.27
80	70	248	18.9	10.6	20	1700	3.07

Tabel 2.2 Verkeerscapaciteit.

Tijdens de spits			tijdens de rest van de dag			totaal
snellheid	bezetting	aantal voertuigen	snellheid	bezetting	aantal voertuigen	aantal voertuigen
km/uur	%	per uur	km/uur	%	per uur	per dag
80	100	4224	80	100	4224	59.000
30	100	3066	80	100	4224	54.500
80	100	4224	80	35	1478	31.500
80	70	2957	80	35	1478	26.600
80	50	2112	80	27.5	1161	20.000
80	35	1478	80	14.4	608	12.000

Uit de berekeningen blijkt dat een luchtsnellheid van 10 m/s in alle scenario's haalbaar is. In het geval van volledige benutting van de capaciteit (bij 80 km/u) kan de luchtsnellheid bij inschakelen van 40 ventilatoren verhoogd worden tot 13,8 m/s. Zonder inzet van de ventilatoren veroorzaakt het verkeer (bij 80 km/u) nog altijd een luchtsnellheid van zo'n 5 m/s.

Bij volledige benutting gedurende 14 uur per dag wordt een verkeersintensiteit van bijna 60.000 voertuigen per dag bereikt. Bij vertragingen tijdens de spits zakt deze hoeveelheid met ca. 5000 voertuigen per dag.

Een optimistisch scenario gaat uit van 20.000 voertuigen per dag over 10 jaar. De laatste scenario's geven een mogelijke verdeling van de verkeersdichtheid over de dag waarbij een dergelijke intensiteit mogelijk is. In het laatste geval is bij redelijk intensief spitsverkeer de verkeersdrukke over de rest van de dag aangepast om aan de (maximaal) verwachte 20.000 voertuigen per etmaal te komen. Tot slot is ook een scenario uitgewerkt waarbij de verkeersintensiteit uitkomt op een totaal van 12.000 voertuigen per dag, wat de verwachting is voor de eerstkomende jaren.

3 Geleiding en warmteoverdracht naar de tunnelbuis.

De thermische eigenschappen van het beton, Promatect H en Fendolite staan in tabel 3.1. De opwarming van de materialen wordt bepaald door de a , de thermische vereffeningscoëfficiënt. Bij het aanbrengen van een temperatuursprong op een zijde van het materiaal kan de warmtestroom het materiaal beschreven worden door de volgende formule:

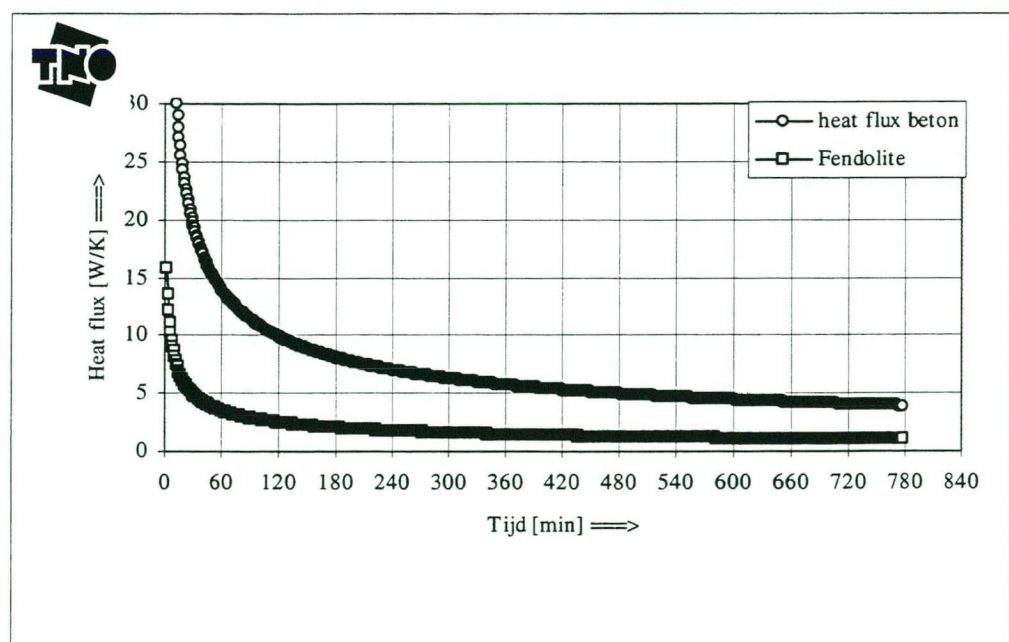
$$Q = \lambda / \sqrt{\pi \cdot a \cdot t}$$

Het verloop van de warmtestroom in de tijd, na een temperatuursprong van 10 °C, voor beton en Fendolite is weergegeven in figuur 3.1. De curve voor Promatect wijkt niet zichtbaar af van die van Fendolite; wel is de toegepaste dikte minder. Hieruit blijkt dat de Fendolite (en Promatect) zijn werk als isolatie goed doet; de warmtestroom door de Fendolite is aanzienlijk kleiner dan de warmtestroom door beton.

Tabel 3.1. Thermische eigenschappen beton, Promatect H en Fendolite.

	Fendolite	Promatect H	Beton	
λ	0,19	0,17	1,2	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
ρ	750	900	2100	kg.m^{-3}
C_p	980	920	880	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
a	$2,59.10^{-7}$	$2,05.10^{-7}$	$6,5.10^{-7}$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

Figuur 3.1. Warmtetransport naar beton en Fendolite.



Om het warmtetransport naar de tunnel uit te rekenen is gebruik gemaakt van de volgende benadering, waarvan al eerder gebruik is gemaakt [TNO rapport 2000-CvB-R00705]:

- de omgeving van de tunnelbuis heeft een temperatuur van 10 °C, de over het jaar gemiddelde temperatuur
- de warmteoverdrachtscoëfficiënt α bestaat uit een $\alpha_{\text{convectief}}$ en een $\alpha_{\text{gedwongen}}$; de $\alpha_c = 2,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, de α_g wordt bepaald uit de relatie $Nu=0,023Re^{0.8}Pr^{0.4}$. Bij een lichtsnelheid van 10 m.s^{-1} wordt de α $17,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- de warmteweerstand R_w van tunnel naar tunnelbuis wordt bepaald door een 1-dimensionale berekening uit te voeren voor de warmtestroom van de lucht naar het beton, via de Fendolite, na een sprongsgewijze verandering van $T = 10 \text{ °C}$ naar $T = 20 \text{ °C}$.

De op deze wijze gevonden waarden voor de R_w op verschillende tijdstippen staan in tabel 3.2. Het warmtetransport van de tunnel naar de tunnelbuis laat zich nu beschrijven als:

$$Q = (T_{\text{tunnel}} - 10) \cdot A / R_w$$

Het oppervlak A van de tunnelbuis is de omtrek $\times$ de lengte. Voor de omtrek is 25 m genomen, de totale omtrek (30 m) gecorrigeerd voor het deel van het wegdek waar elektrische bekabeling loopt. Dit deel is thermisch neutraal verondersteld.

Tabel 3.2 Warmtestroom en weerstand naar de tunnelwand als functie van de tijd na een temperatuursprong van 10 °C

tijd			warmtestroom		R_w	
			W.m^{-2}		K/W.m^{-2}	
s	min	uur	Fendolite	Promatect	Fendolite	Promatect
600	10		68,9	76,7	0,145	0,130
1200	20		53,3	70,9	0,188	0,141
1800	30		45,4	66,1	0,220	0,147
3600	60	1	35,6	63,1	0,281	0,158
7200	120	2	31,1	57,3	0,322	0,175
14.400		4	28,6	50,9	0,350	0,196
28.800		8	26,6	45,9	0,376	0,218
50.400		14	25,7	44,3	0,389	0,226

De warmtestroom (warmteafvoer) naar de tunnelbuis kan nu berekend worden. Uit de tabel is af te leiden dat bij toepassing van Fendolite (bij 25 m omtrek) een vermogen van ca. 0,75 kW/m nog door de tunnelbuis wordt opgenomen. In het geval van bescherming met 12 mm Promatect H is dit vermogen ca. 1,25 kW/m. Het meerdere zal in combinatie met het warmtetransport door de stromende lucht opgenomen moeten worden. Het warmtetransport door de stromende lucht (per lengtedeel van de tunnel) is als volgt te beschrijven:

$$Q = \varphi \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

ρ = dichtheid van lucht, $1,29 \text{ kg/m}^3$, φ = luchtstroom, $v \cdot A$, bij $A = 58 \text{ m}^2$. $\varphi \cdot \rho$ = massaflow, die constant aangenomen is door de tunnel. ΔT is de temperatuurstijging (van de lucht) over het stukje tunnel.

4 Berekening temperatuurstijging.

4.1 Basisvergelijking voor de temperatuurstijging.

Door combinatie van de eerder beschreven relaties komen we tot de volgende vergelijking voor de temperatuurstijging in een stukje (segment) van de tunnelbuis:

$$Q_{in} = Q_{uit}, \text{ ofwel } Q_{verkeer} = \phi \cdot \rho \cdot C_p \cdot dT + (T - 10) \cdot A / R_w$$

In het geval dat er geen warmteoverdracht is naar de tunnelbuis ($R_w = \infty$) geeft dit een lineaire stijging van de temperatuur met de lengte in de tunnelbuis. In het geval er geen verkeer is ($Q_{verkeer} = 0$) beschrijft deze vergelijking de opwarming of afkoeling van de langsstromende lucht door de tunnelbuis. De temperatuur is dan als volgt te beschrijven:

$$T = T_0 + (T_{in} - T_0) \exp(-x / (\phi \rho C_p \cdot R_w / A))$$

waarbij $T_0 = 10^\circ\text{C}$ (temperatuur omgeving tunnelbuis) en $x = 6700 \text{ m}$ (lengte tunnelbuis). Wanneer $Q \neq 0$ wordt de oplossing als volgt:

$$T = T_0 + (T_{in} - T_0) \exp(-x / (\phi \rho C_p \cdot R_w / A)) + x \cdot Q / \phi \rho C_p$$

Deze vergelijking is als basis genomen voor de berekening van de temperatuurstijging in de tunnelbuis.

4.2 Berekeningen bij constante temperatuur en verkeersaanbod.

Met bovenstaande formule is het temperatuurverloop tijdens de dag uit te rekenen. In Tabel 4.1 staan de resultaten voor de extreme situatie uit Tabel 2.1, en de drie situaties die gebruikt zijn om tot een reëel verkeersaanbod over de dag te komen, bij temperaturen van 15°C tot 30°C . De minder intensieve situaties leveren altijd nog een verkeerscapaciteit van 34.000, 23.500 respectievelijk 18.500 voertuigen gedurende de 'actieve' dag van 7.00 tot 21.00, wanneer dit verkeersaanbod gedurende de dag constant zou zijn. Ook is de temperatuurstijging bij een lagere dichtheid van 600 voertuigen per uur berekend. Ter verdere illustratie zijn tevens twee grafieken bijgevoegd die het temperatuurverloop in de tunnelbuis weergeven.

Uit de berekeningen lijkt de verkeersintensiteit een grotere invloed te hebben dan de buitentemperatuur. Verder lijkt de temperatuurstijging vooral in het begin van de verkeersperiode plaats te vinden, waarna verder het door het verkeer ontwikkelde vermogen ervoor zorgt dat de temperatuurstijging zich langzaam door blijft zetten.

Door de geringere dikte in het geval 'Promatect' vlak de temperatuurstijging eerder af en zet minder sterk door. In alle gevallen leidt dit tot een 'eind'situatie' (temperatuurstijging na een dag verkeer) tot iets lagere temperaturen. Alleen in het scenario 'volle bezetting' treden dan nog onacceptabel hoge temperaturen op.

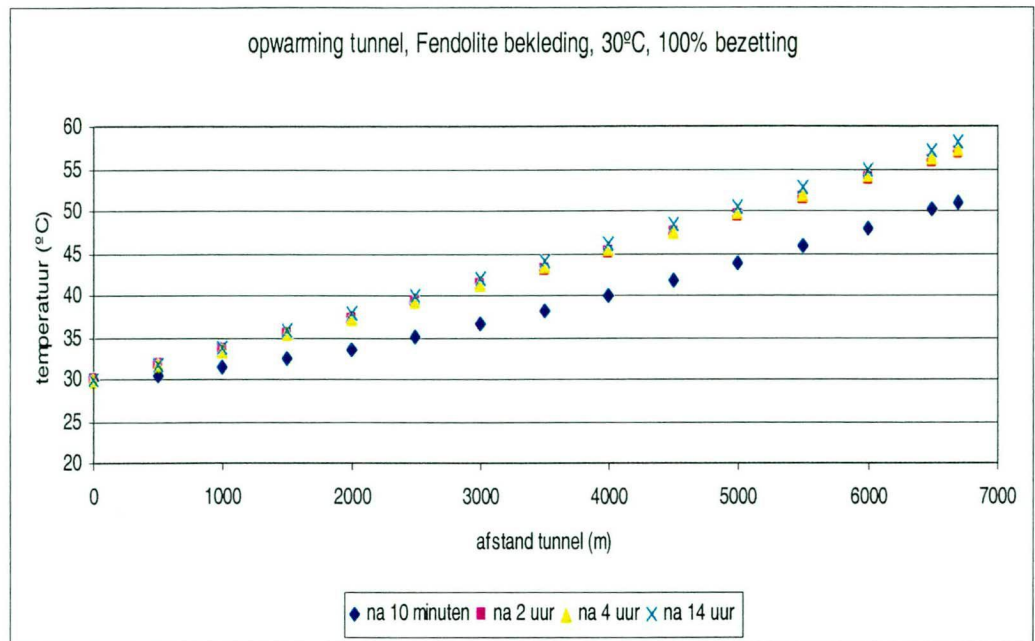
In een praktijksituatie doet deze ideale (voor een berekening) situatie zich niet voor. Ten eerste varieert de verkeersintensiteit over de dag, met pieken in de spits. Ten tweede varieert ook de temperatuur over de dag, waarbij het normaal gesproken 's-

nachts zo'n 5 à 10 °C koeler is dan overdag. De maximale temperatuur wordt normaal gesproken pas na de ochtend bereikt.

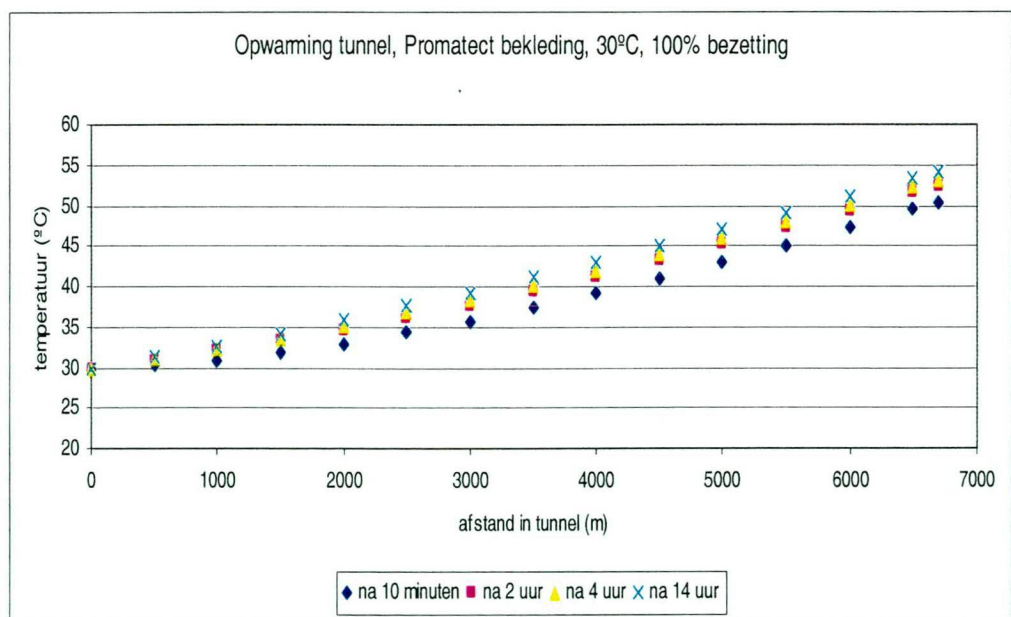
Om ook het effect bij de overige scenario's te bepalen zullen de verschillende delen van de bijbehorende curven aan elkaar gepast, gesuperponeerd, kunnen worden.

Tabel 4.1

Vermogen (verkeersintensiteit)	Tijd	Buitentemperatuur							
		15 °C		20 °C		25 °C		30 °C	
		Fendolite	Promatec	Fendolite	Promatec	Fendolite	Promatec	Fendolite	Promatec
4,15 kW/m (100%)	7.10	48	48	49	49	50	50	51	50
	8.00	49	48	51	49	54	51	56	52
	9.00	49	48	52	50	54	51	57	52
	11.00	49	48	52	50	55	52	57	53
	15.00	50	49	52	50	55	52	58	54
	21.00	50	49	53	51	55	52	58	54
2,27 kW/m (50%)	7.10	31	31	32	24	33	33	35	34
	8.00	32	31	35	32	37	34	39	35
	9.00	33	32	35	33	38	34	40	36
	11.00	33	32	35	33	38	35	41	37
	15.00	33	32	36	34	38	36	41	37
	21.00	33	32	36	34	39	36	41	38
1,79 kW/m (35%)	7.10	27	27	28	28	29	29	30	30
	8.00	28	27	30	28	33	30	35	31
	9.00	28	27	31	29	33	30	36	32
	11.00	29	28	31	29	34	31	37	32
	15.00	29	28	31	30	34	31	37	33
	21.00	29	28	32	30	34	32	37	33
1,49 kW/m (27.5%)	7.10	24	24	25	25	27	26	28	27
	8.00	26	24	28	26	30	27	32	28
	9.00	26	25	28	26	31	27	33	29
	11.00	26	25	29	26	31	28	34	30
	15.00	26	25	29	27	32	29	34	30
	21.00	26	25	29	27	32	29	35	31
0,96 kW/m (14.4%)	21.00	21	20	24	22	27	24	30	26



Figuur 4.1. Opwarming tunnelbuis met Fendolite.



Figuur 4.2. Opwarming tunnelbuis met Promatect.

4.3 Scenario 1: 59.000 voertuigen per dag.

Bij het scenario van maximale benutting is er gedurende de dag verkeer met 80 km/u over twee volledig bezette rijstroken. De temperatuur aan het eind van de tunnelbuis is uitgerekend bij verschillende tijden en verschillende middagtemperaturen. Er is uitgegaan van een ochtendtemperatuur (tot ca. 11.00) die 5 °C lager is dan de middagtemperatuur. De resultaten staan in Tabel 4.2 De uiteindelijke temperaturen zijn enkele °C lager dan in het basisscenario in tabel 4.1 Eenzelfde redenering zal gelden voor de situatie waarbij Promatect H (12 mm) gebruikt wordt.

Tabel 4.2. Temperaturen aan het eind van de tunnelbuis.

temperatuur om	Bij middagtemperatuur			
	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
7.10	47	48	49	50
8.00	47	49	51	54
9.00	48	49	52	54
11.00	49	49	52	55
15.00	49	50	52	55
21.00	50	51	53	56

4.4 Scenario 2; 20.000 voertuigen per dag.

De rekenresultaten met dit scenario staan in Tabel 4.3, met tussen haakjes de resultaten met de dunnere (Promatect) bescherming. In het eerste deel van de dag vindt er minder temperatuurstijging plaats, door een iets lager vermogen. Hierdoor is de totale temperatuurstijging dus iets lager dan in het rekenscenario waarbij de temperatuur en verkeersintensiteit constant over de dag gehouden zijn. Bij de dunnere Promatect bescherming blijft buiten de spits de temperatuurstijging beperkt, omdat de warmtestroom naar het beton en de omgeving in staat is de geproduceerde warmte grotendeels te absorberen.

Tabel 4.3

temperatuur om	Bij middagtemperatuur			
	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
7.10	23 (23)	24 (24)	25 (25)	27 (26)
8.00	23 (23)	26 (26)	28 (26)	30 (27)
9.00	30 (30)	31 (31)	34 (32)	35 (33)
11.00	30 (30)	31 (31)	35 (33)	37 (33)
15.00	30 (30)	32 (31)	35 (33)	37 (34)
21.00	30 (30)	32 (31)	35 (33)	37 (34)

4.5 Scenario 4; 12.000 voertuigen per dag.

Door het aanzienlijk geringere vermogen is de temperatuurstijging in het eerste deel van de dag veel minder dan in de vorige scenario's. De spits geeft aanleiding tot een iets sterkere temperatuurstijging, maar die blijft de rest van de dag weer beperkt.

Bij gebruik van een dunnere laag isolatie zal de opwarming verder beperkt worden. Het vermogen buiten de spits is zelfs dermate laag dat met afkoeling van de lucht rekening

moet worden gehouden. Geforceerde ventilatie (en verdere berekeningen) heeft dan weinig zin.

In dit scenario lijkt de tunneltemperatuur binnen acceptabele grenzen te blijven.

Tabel 4.4

temperatuur om	Bij middagtemperatuur			
	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
7.10	18	20	21	22
8.00	19	21	23	25
9.00	20	22	24	26
11.00	21	23	25	27
15.00	21	23	25	27
21.00	22	23	26	30

5 Conclusie.

Op grond van de beschikbare gegevens is een vergelijking afgeleid die een voorspelling doet over de temperatuur in tunnelbuis als gevolg van de verkeersintensiteit. Hiermee is rekening gehouden met de warmteafvoer door ventilatie en de warmteafvoer door warmteoverdracht naar de tunnelwand. Dit laatste is tijdsafhankelijk door de thermische traagheid van de gebruikte materialen.

Met behulp van deze vergelijking is van een aantal verkeersscenario's de opwarming berekend. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

- Volledige benutting van de tunnel geeft een (waarschijnlijk onacceptabel) grote temperatuurstijging.
- Bij een continu verkeersaanbod tot 600 voertuigen per uur blijft de temperatuurstijging waarschijnlijk nog binnen acceptabele waarden.
- Bij een bescherming met (een dunnere laag) Promatect is dit (maximaal continue) verkeersaanbod groter, ca. 1200 voertuigen per uur, dit vanwege de hogere warmtestroom die de geringere isolatie toelaat.
- Een realistisch scenario van ca. 20.000 voertuigen per dag geeft waarschijnlijk een temperatuurstijging die in de meeste omstandigheden nog acceptabel is.

Voor de komende jaren wordt een, gelijkmatig over de dag verspreide, verkeersdichtheid van ca. 12.000 voertuigen per dag verwacht. Bij deze verwachte verkeersdichtheid zijn geen problemen met de opwarming van de tunnel te verwachten.

In al deze gevallen is uitgegaan van een geforceerde ventilatie die een luchtstroom van minimaal 10 m/s veroorzaakt.



Dr.ir. F. Paap



Ir. A.D. Lemaire

A Vergelijking warmteoverdracht coëfficiënt bij sprongfunctie en geleidelijke temperatuurstijging.

In tabel 3.2 staat de warmtestroom als functie van de tijd ten gevolge van een eenmalige sprong in de temperatuur van 10 °C tot 20 °C. Met behulp van de responsfunctie is vervolgens de warmteoverdrachtcoëfficiënt bepaald waarmee de temperatuur berekend is. Om te controleren in hoeverre deze berekende temperatuur een afwijkende warmtestroom zou geven is met de uitkomst opnieuw de respons van de warmtestroom berekend. Hiervoor zijn de temperaturen van de extreme situatie in tabel 4.1 als uitgangspunt genomen. De resultaten van de berekeningen staan in de tabel.

Bij het berekende temperatuurverloop wijkt vooral in het begin de warmteweerstand af van dat wat bij de sprongfunctie gevonden wordt. Doordat de temperatuur in het begin oploopt, wordt als het ware steeds opnieuw een deel van de opslagcapaciteit van de tunnelwand aangesproken. De uiteindelijke temperatuurstijging blijft vrijwel gelijk.

In de praktijk betekent dit dat bij een continu hoge verkeersdichtheid de conclusies niet zullen veranderen. In scenario's waarbij de verkeersdichtheid slechts een kortdurende piek vertoont zijn de effecten op de temperatuur overschat, en zal de temperatuur mogelijk enkele °C minder gestegen zijn. Scenario 3 (zie 4.5) lijkt dan nog steeds een acceptabel scenario te zijn.

Tabel Bijlage

tijd	R_w bij sprongfunctie	ΔT	R_w bij nieuw temperatuur-verloop	ΔT bij nieuw temperatuur-verloop
s		°C		°C
600	0.145	51	0.147	51
1200	0.188	53	0.145	51
1800	0.220	54	0.173	52
3600	0.281	56	0.226	54
7200	0.322	57	0.289	56
14.400	0.350	57	0.331	57
28.800	0.376	58	0.364	58
50.400	0.389	58	0.385	58