

TNO-rapport
BU4.98/026113-2/BB

Advies voegprofiel Coentunnel

TNO Industrie

Schoemakerstraat 97
Postbus 6031
2600 JA Delft

Telefoon 015 2696900
Fax 015 2696280

Datum
23 december 1998

Auteur(s)
B. van Baarle
J.S. Havinga

Opdrachtgever : Bouwdienst Rijkswaterstaat
: Postbus 2000
: 3502 LA UTRECHT

Referentie : BU4.97/019816-1/HS

Divisie : Productonderzoek

TNO projectnr. : 521833387

Projectleider : B. van Baarle LPRI

Aantal pagina's : 9

Aantal bijlagen : -

Inhoud : 1 Inleiding
2 Inspectie van de voegen van de tunnel
3 Onderzoek
4 Conclusies en aanbevelingen

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 Onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbende is toegestaan.

© 1998 TNO

TNO Industrie

1 Inleiding

Op verzoek van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat is door TNO Industrie een onderzoek uitgevoerd naar de staat van de voegprofielen van de Coentunnel. Het doel van het onderzoek is een advies te geven over de gevolgen van de geconstateerde continue toename van de voegbreedte. De opdracht werd verstrekt op 11 maart 1998, onder nummer RWS 97000742.

Vanaf 1990 is gestart met een serie metingen om de bewegingen van de Coentunnel als functie van tijd in kaart te brengen. Deze meetresultaten over deze periode zijn door de firma Mebumar Nederland samengevat en TNO ter hand gesteld. Doordat de voegen steeds wijder worden komen de rubberprofielen onder een steeds hogere spanning te staan.

De bouw van de Coentunnel werd uitgevoerd van 1961 tot 1966. Voor de berekeningen is 1962 (vermoedelijke inbouw eerste voegprofielen) een "worst case" aanname. Bij de uitgevoerde berekeningen voor het opstellen van het advies werd daarom uitgegaan van de bouw van de tunnel, medio 1962. Om zicht te krijgen op de totale verplaatsingen en de gevolgen daarvan werden de voegen van de Coentunnel op 3 september 1998 opnieuw gemeten en visueel geïnspecteerd.

2 Inspectie van de voegen van de Coentunnel

De inspectie werd uitgevoerd op 3 september 1998. Ter plekke van de overgang van de segmenten werd de voegbreedte opgemeten. In een aantal gevallen bleek de asfaltplank, dat mee werd ingestort, verdwenen (o.a. meetpunt 200). De meetpunten corresponderen met de RWS-tekeningen. De resultaten van de metingen zijn samengevat in tabel 1.

Het rubberprofiel in de voeg bij meetpunt nummer 137 (westbuis uitrit/noord) vertoonde scheurtjes evenwijdig aan de verdikking in het midden van het profiel, deze scheurtjes stonden 2 tot 3 mm open. Ook werd scheurvorming waargenomen bij meetpunt 100 (westbuis uitrit zuid). Het voegprofiel in de voeg bij meetpunt 200 (oostbuis inrit/zuid) was doorgescheurd (zie foto's blz. 4).

Tabel 1 Voegbreedte bij de verschillende meetpunten

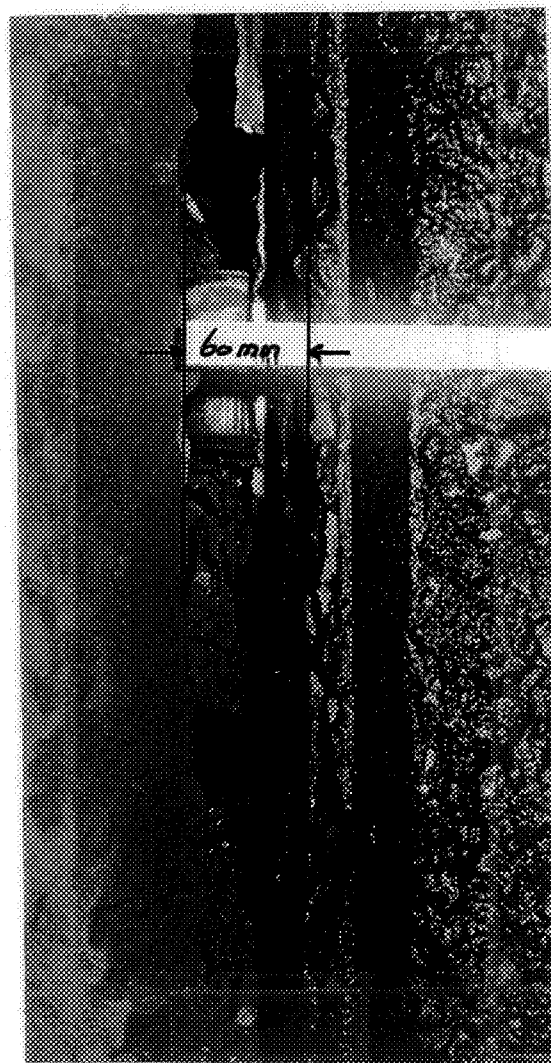
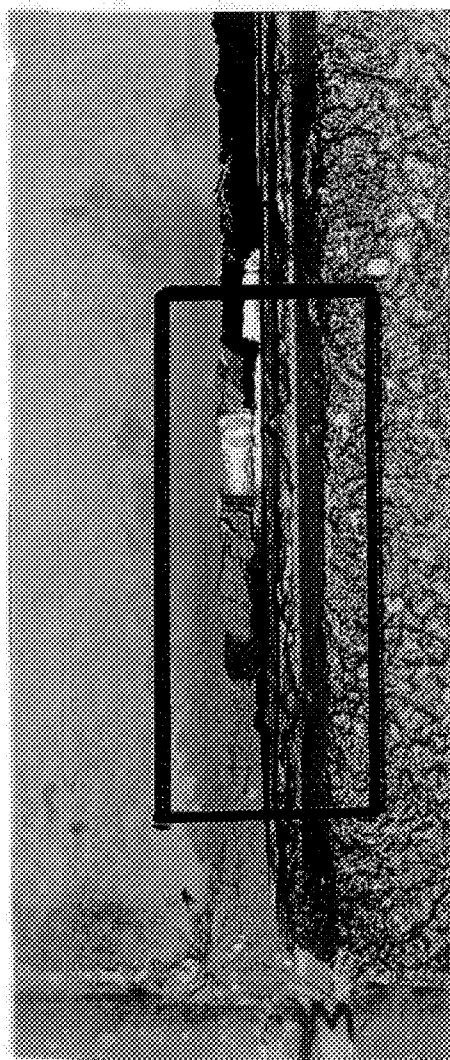
Westbuis inrit/noord		Westbuis uitrit/zuid		Oostbuis uitrit/noord		Oostbuis inrit/zuid	
meetpunt nummer	voeg mm	meetpunt nummer	voeg mm	meetpunt nummer	voeg mm	meetpunt nummer	voeg mm
137	27 *	100	35 *	237	20	200	60 *
136	21	101	17	236	30	201	14
135	13	102	19	235	9	202	18
134	10	103	10	234	8	203	8
133	20	104	7	233	20	204	17
132	18	105	7	232	18	205	6
131	5	106	6	231	2	206	2
130	5	107	4	230	5	207	5
129	9	108	4	229	10	208	5
-	-	109	3	-	-	209	3
-	-	110	6	-	-	210	11
-	-	111	7	-	-	211	9
-	-	112	13	-	-	212	n.t.m.

* profiel was (door)gescheurd.

De gemiddelde voegbreedte voor de meetpunten 137, 100, 237 en 200 bedroeg 38 mm.
De gemiddelde voegbreedte voor de eerstvolgende vijf voegen bedroeg maximaal ca. 20 mm.
De overige gemiddelde voegbreedten bedroegen maximaal ca. 10 mm.

TNO Industrie

Foto's van de voeg bij meetpunt 200



3. Onderzoek

Ondanks pogingen om de juiste gegevens van het profiel te achterhalen dat bij de bouw van de Coentunnel medio 1962 werd ingestort kon het type daarvan niet met zekerheid worden vastgesteld. In overleg is besloten de berekeningen uit te voeren voor de "worst case". Uitgaande van het voegprofiel van het type W9A of W9B gelden de afmetingen zoals gegeven in tabel 2.

Tabel 2 Profielafmetingen

Type	Bandstaal lengte (mm)	Rubberprofiel lengte (mm)	Centrale verdikking (mm)	Bewegings opname (mm)
W9 A	350	150	35	25
W9 B	400	255	44	35

De "worst case" treedt op indien wordt uitgegaan van het gebruik van profiel type W9 A.

Het profiel werd tussen betonnen elementen van 18 meter ingestort. Ten gevolge van de krimp van het beton tijdens het drogen worden de voegstroken gerekt. Door het rekken wordt de rubber tegen het beton getrokken waardoor de afdichting ontstaat. Bij verharden krimpt het beton maximaal 0,5 promille (bron: NEN 7620). De rek als gevolg van het drogen kan als volgt worden berekend (elementen zijn om en om gestort: dus de halve krimp van één element per voeg): voor een element van 18 meter is dit een rek van circa $0,5 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 20 \cdot 10^3 = 4,5$ mm. Berekend op de nominale lengte (150 mm) van het rubber van het W9 A voegprofiel bedraagt de rek ten gevolge van krimp van het beton ca. 3%.

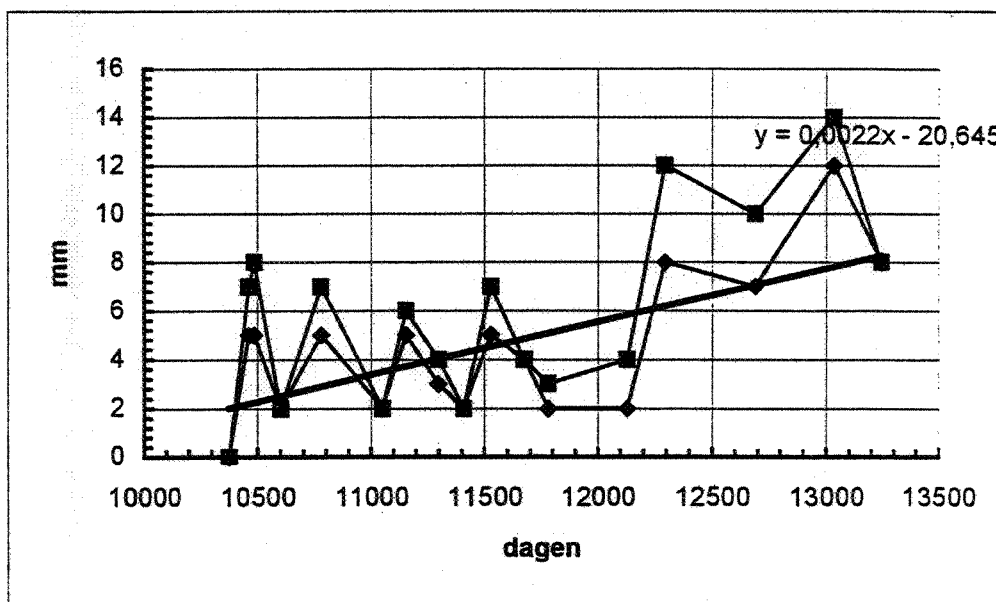
De door het rekken veroorzaakte spanning in de rubber zal door spanningsrelaxatie in de loop van de tijd afnemen. De spanning in de rubber onder constante deformatie (als gevolg van rekbelasting door krimp) neemt bij temperaturen zoals in dit geval gebruikelijk over zeer lange tijd (vele jaren) af met maximaal 5% per tijsdecade (logaritmische functie). Dit betekent dat de door het rekken veroorzaakte spanning na 36 jaar nog minimaal tweederde van de beginspanning zal zijn. De spanning in de rubber als gevolg van een toename van de deformatie (lineaire functie) neemt toe.

De mechanische eigenschappen van de rubber kunnen in dit stadium niet worden bepaald (geen materiaal beschikbaar). De eigenschappen van de rubber zoals deze werd ingestort kunnen voor het voegprofiel W9A worden ontleend uit de brochure van Vredestein, hierin staan de minimale eisen vermeld (NEN 7030: Waterkerende dilatatievoegstroken en al of niet waterkerende oplegstroken van rubber, 1975). De waarden voor profielen bedragen voor de treksterkte $20,4 \text{ N/mm}^2$ en voor de rek bij breuk 400%. Als gevolg van veroudering zullen deze waarden in de loop de tijd afnemen. Uit oude rapporten en gegevens kan worden gesteld dat een vermindering van de rekeigenschappen voor een goede kwaliteit rubber na 36 jaar kan worden gesteld op ca. 25%. Daarmee zou de rek bij breuk van het materiaal nu ca. 300% bedragen.

TNO Industrie

Bij de metingen kan worden opgemerkt dat deze veel variatie vertonen. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de metingen tussen januari 1996 en februari 1998 zijn uitgevoerd in de (koude) winterperiode en de andere metingen in de zomerperiode. Door thermische krimp van het beton ontstaat hierdoor een schijnbare versnelde toename van de voegbreedten. De extra meting no. 17 uitgevoerd door Mebumar op 3 september 1998 (zomerperiode) als controle hierop komt inderdaad redelijk overeen met de extrapolatie (zie figuur 1) van eerdere metingen. Hierdoor lijkt de eerdere aanname dat de toename van de voegbreedten lineair in de tijd zou verlopen juist te zijn.

Figuur 1 Metingen meetpunt 200 gecorrigeerd voor zomer/winter effecten



Uit de gegevens van Mebumar voor meetpunt 200 "worst case" blijkt dat over een periode van 1990 - 1993 een zomer/winter variatie aanwezig is van ca. 5 mm. Wordt over de totale meetperiode van 1990 - 1998 de voegbreedteverandering berekend, dan wordt de voeg per jaar ca. 1 mm groter. Over een periode van 1962 - 1998 zou dit, als dit lineair zou verlopen, ca. 38 mm zijn. Voor meetpunt 200 werd bij de inspectie 60 mm gemeten. Hetgeen veel meer is dan de geschatte waarde. Indien echter alle meetpunten van de eerste voeg worden genomen (137, 100, 237 en 200 zie tabel 1) is de voegbreedte gemiddeld 35 mm, hetgeen goed overeenkomt met de geschatte waarde. Dit duidt er op dat de betonelementen enigszins scheef uit elkaar verplaatsen.

Een voegbreedte van 38 mm betekent een rek voor de rubber van 43 mm hetgeen beduidend meer is dan de opgegeven maximaal toelaatbare verlenging van 25 mm voor een W9A profiel. Dat dit inderdaad ook teveel is blijkt uit de op drie plaatsen waargenomen scheuren bij deze voeg.

De eerste serie meetpunten betreft de eerste voeg van de tunnelingang. Enige schade aan de profielen op deze plaats kan waarschijnlijk zonder gevolgen voor het functioneren van de tunnel worden geaccepteerd. Het is dan zinvol de levensduurverwachting voor de overige voegen vast te stellen. De vervolgens zwaarst belaste voeg is de voorlaatste (meetpunten 136, 101, 236 en 201) die nu een gemiddelde breedte heeft van 20 mm en een toename van de breedte met ca. 0,5 mm per jaar. Gemiddeld is dit minder dan de toelaatbare rek van 25 mm echter lokaal (meetpunten 136 en 236) wordt de waarde wel overschreden (26 respectievelijk 35 mm). Dat hier nog geen scheurvorming is opgetreden is vermoedelijk het gevolg van het feit dat de rek niet vanaf het eerste begin zo hoog is geweest maar geleidelijk is toegenomen.

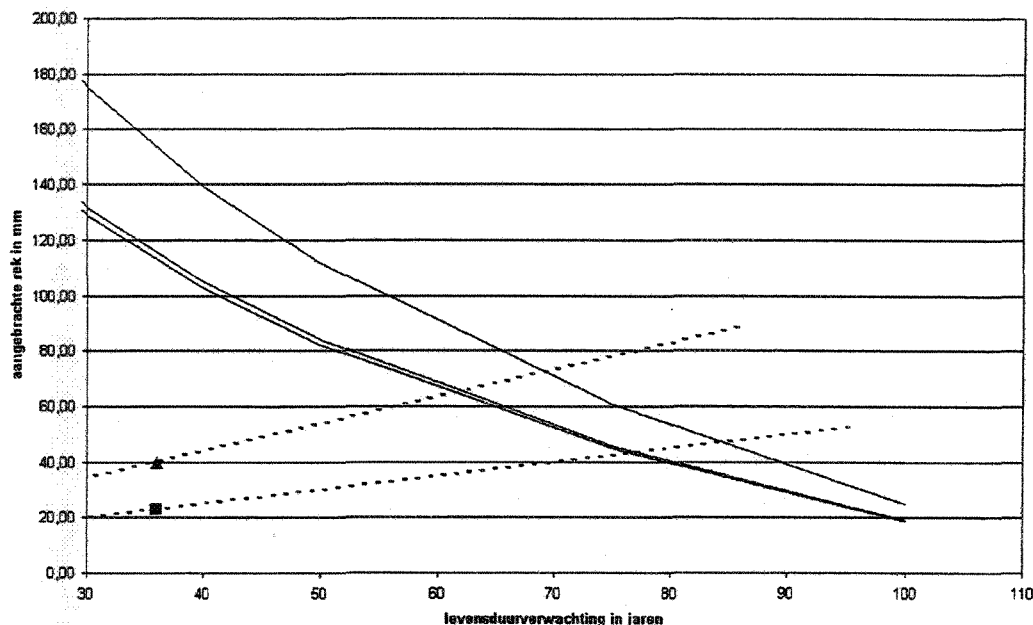
TNO Industrie

Bij nieuwe profielen bedroeg de maximaal toegestane rek 25 mm (W9A-profiel). In de loop van de jaren zijn de eigenschappen van de rubber afgenomen en daarmee neemt ook de maximaal toegestane rek af, tenminste indien "oude" profielen in hun verouderde toestand voor het eerst worden gerekt. In werkelijkheid zijn veroudering, toename van de rek en relaxatie van de spanning gelijktijdig opgetreden. De veroudering leidt tot een vermindering van de toelaatbare rek, de toename van de rek leidt op een gegeven moment tot het overschrijden van de toelaatbare rek en daarmee tot een versneld falen van de profielen. De relaxatie van de spanning heeft een tegenovergesteld effect. Doordat de spanning in de rubber afneemt neemt de belasting af en daarmee de kans op falen. De snelheid waarmee de verschillende effecten optreden is bepalend voor het tijdstip waarop uiteindelijk falen optreedt.

De afname van de eigenschappen van een rubber als gevolg van veroudering verloopt normaal lineair ten opzichte van de logaritme van de tijd. Zonder meetgegevens van de huidige profielen in zowel hun nieuwstaat als na enige jaren in het veld is het niet mogelijk de snelheid van de veroudering goed aan te geven. Op basis van het gegeven dat het profielen op basis van natuurrubber betreft die in nieuwstaat voldeden aan de gestelde eisen kan worden verondersteld dat de eigenschappen na 36 jaar ongeveer 25 % zijn veranderd. Met dit als gegeven en het logaritmische verloop ten opzichte van de tijd kan ook voor andere perioden de verandering worden geschat.

De relaxatie van de spanning verloopt eveneens lineair ten opzichte van de logaritme van de tijd. Voor een profiel op basis van natuurrubber zal de afname van de spanning ca. 3,5% bedragen. Deze snelheid heeft een grote invloed op de rek zoals die met een geleidelijke toename van de voegbreedte kan worden toegelaten. Er van uitgaande dat de toelaatbare voegbreedte bij een nieuw profiel $25 - 5 = 20$ mm heeft bedragen kan bij deze relaxatiesnelheid en de snelheid van de verwijding van de voegen worden berekend dat de toelaatbare voegbreedte steeds ongeveer 20 mm blijft bedragen. Het feit dat de toelaatbare voegbreedte wordt overschreden betekent echter niet dat het profiel direct zal falen. Duidelijk is wel dat bij een grotere overschrijding een kortere restlevensduur over zal blijven terwijl bij het bereiken van de toelaatbare voegbreedte in principe nog de volledige levensduur zal kunnen worden gehaald.

Voor de inschatting van de (rest)levensduur is de toelaatbare voegbreedte dan ook minder interessant. Onder enige aannamen is het mogelijk om op basis van een gemeten voegbreedte in te schatten hoelang het profiel nog zou kunnen functioneren. Naast de reeds eerder gedane aannamen: rek bij breuk van het nieuwe profiel 400 % (of te wel 600 mm), een relaxatie van circa 3,5 %, een afname van de eigenschappen met circa 5 % per tijsdecade en de gebleken lineaire toename van de voegbreedte wordt aangenomen dat de toelaatbare rek van het profiel (25 mm) betekent dat falen na 100 jaar op zal treden. Bij een rek van 600 mm is de levensduurverwachting dus enkele seconden en bij een rek van 25 mm bedraagt deze 100 jaar. Combinatie van deze gegevens leidt tot een grafiek als gegeven in figuur 2. Hierin is de rek in een profiel uitgezet tegen de te verwachten levensduur. De bovenste lijn geldt voor een nieuw profiel, de middelste lijn voor een profiel van 36 jaar oud en de onderste lijn voor een profiel van 100 jaar oud. Voor inschattingen vanuit de huidige situatie is de onderste lijn aan te houden.



Figuur 2: Rek versus levensduur van een profiel

Op basis van de gemeten voegbreedten is in de figuur af te lezen wat mag worden verwacht met betrekking tot de levensduur. Als voorbeeld zijn twee situaties aangegeven.

1. meetpunt 100 hier is een voegbreedte gemeten van 35 mm. In de figuur levert dit een punt bij 36 jaar en $35 + 5$ (beginrek door krimp van het beton) = 40 mm. Doordat de verbreding nagenoeg lineair ten opzichte van de tijd plaats vindt kan een lijn getrokken worden vanuit het punt 0 jaar en 5 mm en dit punt. Deze lijn snijdt de onderste kromme na 62 jaar bij 65 mm. Verwacht mag worden dat op dat moment het profiel defect raakt.
2. meetpunt 132 hier is een voegbreedte van 18 mm gemeten. Dit levert een punt bij 36 jaar en $18 + 5 = 23$ mm. De lijn door dit punt en het punt 0 jaar, 5 mm snijdt de kromme na 77 jaar bij 42 mm. Voor het profiel op deze plaats mag dus nog een restlevensduur van $77 - 36 = 41$ jaar worden verwacht.

Het is duidelijk dat op deze wijze slechts een schatting kan worden gemaakt en dat als gevolg van de onzekerheden in de aannamen grote variaties mogelijk kunnen zijn.

Op deze wijze zou het profiel bij meetpunt 100 nu nog 26 jaar mee moeten kunnen voordat falen optreedt. De werkelijkheid is echter dat het profiel bij meetpunt 100 nu reeds is gescheurd en daarmee defect is. Hierbij speelt vermoedelijk een ander aspect een rol, namelijk ozonaantasting. Een rubber onder rekspanning kan worden aangetast door ozon waardoor scheuren ontstaan. De mate waarin dit plaats vindt is afhankelijk van het rubbertype, de bescherming van de rubber en de hoogte van de rekspanning. Beneden een bepaalde kritische rek zal geen aantasting plaats vinden, bij toenemende rek zal de aantasting sneller optreden. De snelheid waarmee en daaraan gekoppeld de levensduur is niet aan te geven aangezien er geen verbanden bekend zijn. De scheuren zoals aangetroffen bij de meetpunten 100, 137 en 200 zijn zodanig van uiterlijk en vorm dat deze goed het gevolg zouden kunnen zijn van ozonaantasting.

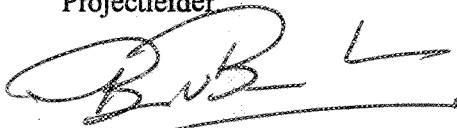
TNO Industrie

4. Conclusies en aanbevelingen

Op basis van het onderzoek kan de verwachting worden uitgesproken dat de meeste voegprofielen van de Coentunnel, ondanks de steeds toenemende rekbelasting, nog zeker 40 jaar moeten kunnen functioneren. Voor enkele voegprofielen zal de levensduur korter zijn en voor enige profielen is deze reeds voorbij. Met behulp van de gegeven grafiek is telkens op elk gewenst tijdstip voor een afzonderlijk voeg in te schatten wat van het profiel ter plaatse mag worden verwacht. Een doorgaande meting van de verplaatsingen die optreden wordt aanbevolen omdat veranderingen daarin een grote invloed hebben op het verwachtingspatroon. Bij voegen waarvan de breedte minder blijft dan 20 mm lopen de profielen geen extra risico en mag de volle levensduur worden verwacht. Aanname daarvoor is dat deze 100 jaar zal bedragen.

Opgemerkt wordt dat alle levensduurverwachtingen zijn gebaseerd op conservatieve aannamen en theoretische modellen. De kans dat voor een bepaald profiel één en ander gunstiger uitpakt is dan ook redelijk groot. De schade als gevolg van aantasting door ozon laat zich niet voorspellen en staat los van de berekeningen voor de levensduur. De kans dat profielen die nog niet zijn aangetast zonder extra verlenging ineens aantasting zouden gaan vertonen is zeer gering. Gezien het feit dat nu slechts enkele profielen aantasting vertonen wordt de kans dat anderen dit ook gaan doen gering geacht. De kans op aantasting kan nog worden verminderd door het directe contact met lucht te verminderen, bijvoorbeeld door te zorgen dat de lucht in de voeg stilstaat en nauwelijks door de wind wordt ververst.

Projectleider



B. van Baarle LPRI

Manager Productonderzoek Rubber:

Ing. J.S. Havinga