



Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.



Hageman rapport: 10503-1-4

U-Gent rapport: p20-110-RVC-05

Brandwerendheid tunnels – Verkenning van mogelijke alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding in drie landtunnels

30 november 2020

Inclusief Addendum

2 juni 2021

VOORWOORD

Nadat duidelijk was geworden dat het in tunnels toegepaste beton door spatten minder brandwerend is dan waarvan was uitgegaan, concludeerde Rijkswaterstaat op basis van onderzoeken dat in vier, na 2008 gerealiseerde, tunnels alsnog hittewerende bekleding (HWB) aangebracht moet worden. Met het doel na te gaan of er voor het aanbrengen van HWB in drie landtunnels misschien toch nog alternatieven zijn, heeft van Rijkswaterstaat in 2020 ondergetekenden gevraagd om een verkennende studie uit te voeren. De bevindingen van die verkennende studie zijn vastgelegd in het onderhavige rapport van 30 november 2020.

De hoofdconclusie van de verkennende studie is dat het zinvol wordt geacht om het handhaven van de huidige situatie als mogelijk alternatief voor het aanbrengen van HWB, in welk geval het risico van schade aan de tunnelconstructie na een brand dan wel moet worden aanvaard, nader te onderzoeken. Voorgesteld is om daarbij rekening te houden met de tunnelspecifieke omstandigheden, die per landtunnel aanzienlijk kunnen verschillen.

Nadat de bevindingen in de onderhavige rapportage waren vastgelegd, is aanvullende informatie ontvangen. Hoewel die informatie de conclusies van de verkennende studie niet veranderen, werd het zinvol geacht om minimaal de belangrijkste onderdelen daarvan zodanig vast te leggen dat het in de toekomst ook direct met het rapport beschikbaar is. Er is voor gekozen om het originele rapport van 30 november 2020 intact te laten en de aanvullende informatie in een Addendum bij het rapport toch ook zo volledig mogelijk op te nemen.

Naast het toevoegen van relevante aanvullende informatie was er nog een andere reden om een Addendum bij het rapport te maken. Na de laatste conceptversie van de rapportage, d.d. 8 oktober 2020, heeft een aantal medewerkers van Rijkswaterstaat het rapport gereviewd en commentaar aangeleverd. Ondergetekenden hebben dat commentaar verwerkt daar waar nodig en mogelijk. Voor de commentaren die niet hebben geleid tot aanpassingen in het rapport, is de reden daarvoor onderbouwd en vastgelegd in een document dat aan de reviewers is toegezonden. Met de wijze waarop het commentaar is verwerkt, waren met name een aantal medewerkers van de afdeling TNK van GPO van Rijkswaterstaat niet tevreden. In een schrijven van 19 januari 2021, hetgeen als Bijlage E integraal in dit rapport is bijgevoegd, is gewezen op de verschillen van inzicht tussen de betreffende medewerkers van TNK en ondergetekenden. Maar ook in een bijlage bij een memo van dhr. Zeilmaker, d.d. 24 maart 2021, is de visie van TNK opgenomen. Het gaat daarbij in belangrijke mate over de aangehouden uitgangspunten, c.q. aannames. Voor een juiste beeldvorming is er voor gekozen om een discussie over uitgangspunten niet in het originele rapport te verwerken. Het lijkt ondergetekenden niet nodig om op basis van de nu beschikbare informatie in dit rapport een verdere discussie te voeren. Maar het wordt wel belangrijk geacht om in dit rapport de zienswijze van de afdeling TNK goed weer te geven, hetgeen in het uitgebreide Addendum bij dit rapport is verzorgd. Het Addendum is na hoofdstuk 18 in het onderhavige rapport opgenomen.

21



Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.



Universiteit Gent

SAMENVATTING

Brandwerendheid van tunnels is een bijna doorlopend aandachtspunt voor Rijkswaterstaat (*verder ook aangeduid met RWS*) en tunnelbeheerders. Echter, nadat in 2015-2016 duidelijk was geworden dat bij spatongevoelig verondersteld beton in toen recent gebouwde tunnels toch afsputten bleek op te treden, kreeg het een extra lading. Het betekende dat die tunnels niet de brandwerendheid hebben, waarvan was uitgegaan en stelde RWS voor de vraag welke maatregelen getroffen zouden moeten worden bij de bestaande tunnels en voor in aanbouw zijnde tunnels.

Er was een vermoeden dat een wijziging in de samenstelling van het beton de oorzaak was dat het beton dat als afsputongevoelig was gedefinieerd, vanaf een bepaald moment (*gedacht werd aan 2008*) afsputongevoelig is geworden. Daarmee lag de focus op een viertal, na 2008 gebouwde, bestaande tunnels, waarvan één onder open water (*2^e Coentunnel*) en drie landtunnels (*Salland-Twentetunnel, Ketheltunnel en Koning Willem-Alexandertunnel*). Al snel kon door RWS worden aangetoond dat de personenveiligheid bij de betreffende tunnels niet in het geding is. Dat maakte dat er tijd was om te onderzoeken welke maatregelen genomen zouden kunnen/moeten worden in verband met die andere belangrijke doelstelling, “*asset protection*”. Daar waar het Bouwbesluit 2012 [51] gericht is op veiligheid, hanteert RWS richtlijnen die tot doel hebben dat na een brand de tunnel “*repareerbaar*” is.

Voor zowel het aspect van “*veiligheid*” als “*asset protection*” zijn functionele eisen geformuleerd in respectievelijk het Bouwbesluit 2012 en de RWS Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken (ROK). In beide documenten zijn in aanvulling op de functionele eisen ook prestatie eisen geformuleerd. Voor een prestatie eis geldt dat als daaraan wordt voldaan automatisch ook aan de bovenliggende functionele eis is voldaan. In het Bouwbesluit 2012 is de functionele eis dat tunnel moet kunnen worden verlaten voordat deze bezwijkt en de prestatie eis is dat de tunnel niet mag bezwijken gedurende een bepaalde gedefinieerde tijd bij blootstelling aan een nominale brandkromme. Met betrekking tot “*asset protection*” eist RWS dat de tunnel repareerbaar moet zijn en de prestatie eis in de ROK is dat gedurende 120 minuten brand volgens de RWS brandkromme de temperatuur in de wapening en het beton voldoende laag blijft.

Na diverse studies en brandproeven kwam RWS tot de conclusie dat de vier genoemde tunnels alsnog voorzien dienen te worden van hittewerende bekleding (HWB). Dat is een ingrijpende operatie en twee gemeenten waar zich een landtunnel bevindt (*Schiedam en Maastricht*), hebben RWS naar mogelijke alternatieven gevraagd. RWS heeft aan ondergetekenden [REDACTED] van respectievelijk Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V. en de Universiteit Gent, gevraagd een studie naar mogelijke alternatieven voor het aanbrengen van HWB in de drie genoemde landtunnels uit te voeren. De bevindingen van die studie zijn in het onderhavige rapport vastgelegd.

Ondergetekenden zijn van mening dat een alternatief voor HWB, welke het ook is en als uiterste de huidige situatie zonder verdere maatregelen accepteren, altijd betekent dat een vorm van schade aan de tunnelconstructie¹ moet worden geaccepteerd. Meer specifiek moet voor elk mogelijke situatie het risicoprofiel van de tunnel aanvaard worden (*de relatie omvang schade en frequentie van optreden*). Hoewel dit qua interpretatie van het wettelijk kader waarschijnlijk nog wel de nodige

¹ Als in dit rapport wordt gesproken over schade na een brand, dan betreft dat constructieve schade. Na een brand is er daarnaast ook altijd (*ook bij toepassing van HWB*) schade aan tunnel technische installaties (TTI's). Die vallen buiten de scope van dit rapport en als wordt gesproken over “geen schade”, dan wordt bedoeld dat er geen constructieve schade (*aan de betonnen tunnelconstructie*) is.

communicatie vergt, is dat in principe acceptabel als wel aan de functionele eisen wordt voldaan. En in dat verband zou gesteld kunnen worden dat iedere schade aan de tunnelconstructie te repareren is, c.q. herstellen, maar de vraag is tegen welke prijs.

Ondergetekenden hebben het voor de onderhavige studie nodig geacht om in brede zin, zoveel als mogelijk binnen de geven korte periode van enkele maanden waarin de studie is uitgevoerd, kennis te nemen van literatuur, beleidsstukken, studies en onderzoeken met betrekking tot brandwerendheid van tunnels (*navolgend literatuuronderzoek genoemd*). Een selectie van die informatie, welke selectie is gebaseerd op informatie die ondergetekenden voor de studie relevant vonden, is in het onderhavige rapport in verschillende hoofdstukken weergegeven.

Enkele bevindingen van het literatuuronderzoek zijn dat:

- de basis waarop rond de eeuwwisseling een bepaalde samenstelling van beton (*vastgelegd met maximum cementgehalte en maximum druksterkte*) onder bepaalde omstandigheden (*maximum aan optredende drukspanning aan het oppervlak*) als afspatongevelig was gedefinieerd, niet goed was;
- het wettelijk kader zo kan worden uitgelegd dat na een brand schade aan de tunnelconstructie is toegestaan, mits wordt voldaan aan de functionele eis, waarbij met betrekking tot reparatiebaarheid alsnog zal moeten worden vastgesteld wat acceptabel is.

Om een keuze te kunnen maken tussen enerzijds aanbrengen van HWB en anderzijds de huidige situatie zo laten, of andere brandwerende maatregelen toepassen (*directe of indirecte maatregelen*), zal inzicht moeten worden verkregen in wat er aan branden kan optreden, wat de kans daarop is, wat de gepaard gaande schade is, enz. Oftewel, er moet inzicht worden verkregen in het risicoprofiel en bij voorkeur zou op basis van een MKBA (Maatschappelijke Kosten Baten Analyse) de verschillende opties moeten kunnen worden vergeleken. Dergelijke studies zijn, voor zover bekend, nog niet, of slechts in beperkte omvang, uitgevoerd. In de onderhavige studie is getracht een verkennende MKBA van begin tot eind te doorlopen om te bezien of een dergelijke studie gebruikt kan worden en daarnaast of de uitkomst al direct kan worden gebruikt. Kortgezegd zijn:

- kansen op branden met verschillende intensiteit bepaald (*brandgevaar*);
- klassen voor schade gedefinieerd, variërend van geen (*constructieve*) schade tot bezwijken van één of enkele tunnelmoten, en zijn die gekoppeld aan de verschillende brandintensiteiten (*schadeclassificatie*);
- aannamen gedaan voor kosten van alle onderdelen van de MKBA, zoals aanbrengen HWB, onderhoud, herstellen van de tunnel, economische schade door niet-beschikbaarheid;
- de totale kosten voor verschillende alternatieven met een MKBA bepaald.

Ondergetekenden realiseren zich dat een eenvoudig model is gebruikt, waar kritiek op mogelijk is, net zoals dat kan worden gegeven op de vele aannamen die moesten worden gedaan. Overigens is voor de meeste aannamen de ervoor gebruikte basis toegelicht. De resultaten van de verkennende MKBA zijn weergegeven in paragraaf 16.7 en de daaraan gekoppelde bespreking van mogelijke alternatieven is onderwerp van hoofdstuk 17. Overall bezien komt uit de studie dat:

- voor een bestaande landtunnel de totale kosten per kilometer tunnelbuis per jaar, afhankelijk van het aantal motorvoertuigkilometers (mvtkm), van het aanbrengen van HWB een factor 4 (*bij heel veel motorvoertuigen door de tunnelbuis*) tot 10 (*bij weinig motorvoertuigen door de*

tunnelbuis) hoger is dan wanneer de huidige situatie wordt gehandhaafd. De vaststelling dat het aanbrengen van HWB beduidend duurder uitvalt dan het behouden van de huidige situatie blijkt verder niet gevoelig voor aangenomen waarden voor kosten;

- een maatregel als het toepassen van filemanagement is effectief als maatregel om de kans op zeer grote schade te reduceren en vanwege de geringe aanlegkosten en beperkt benodigde tijd voor installatie, kan deze als maatregel altijd ingezet worden als risico-reducerende maatregel;
- de kosten van aanbrengen van HWB en van het handhaven van een situatie zoals die zich nu voordoet bij de drie landtunnels, dichter bij elkaar komen als maatschappelijke kosten van niet-beschikbaarheid van de tunnel door het aanbrengen van HWB niet worden meegenomen (*zoals bijvoorbeeld in het geval van nieuwe tunnels*), waarbij bij een toename van het aantal motorvoertuigen in de tunnelbuis het aanbrengen van HWB gunstiger wordt dan handhaven van de huidige situatie;
- alternatieve maatregelen, zoals sprinkler en watermistssystemen, voor de bestaande tunnels qua orde van grootte van kosten per jaar hetzelfde uitpakken als aanbrengen van HWB als installatiekosten worden meegenomen en dat die minder gunstig uitpakken als de installatiekosten door niet-beschikbaarheid niet worden meegenomen.

Voor de uitgevoerde MKBA is een standaard landtunnel, zoals de Ketheltunnel, als uitgangspunt gebruikt. In specifieke gevallen, zoals bijvoorbeeld bij de Koning Willem-Alexandertunnel (*verder ook KWA-tunnel*), waarbij tunnelbuizen naast en boven elkaar zijn toegepast en tegen de plafonds al HWB is toegepast, zal de MKBA mogelijk tot enigszins andere resultaten kunnen leiden.

Er wordt evenwel benadrukt dat de verkennende MKBA slechts een (belangrijke) factor is voor de te nemen beslissing. De keuze voor een optie impliceert immers het aanvaarden van het risicoprofiel. Voor de optie 'behoud van de huidige situatie' betekent dit een hogere kans op schade met een grotere omvang.

Met betrekking tot herstelmaatregelen en kosten van niet-beschikbaarheid tijdens herstelwerkzaamheden wijzen ondergetekenden erop dat de tijdsduur van herstel waarschijnlijk kan worden bekort als op voorhand scenario's van schade en mogelijk te nemen herstelmaatregelen worden uitgewerkt en dus beschikbaar zijn als een brand en schade zich voordoet. Er kan mogelijk zelfs voor worden gekozen om naast een noodplan, ook al materiaal beschikbaar te hebben. Verder zal onderscheid gemaakt kunnen worden in maatregelen die erop gericht zijn de tunnel zo snel mogelijk weer voor verkeer toegankelijk te maken en maatregelen voor het feitelijke herstel tijdens bijvoorbeeld nachtelijke uren.

Het was de opdracht, en de intentie van ondergetekenden, om met de onderhavige studie informatie aan te leveren die door RWS en andere stakeholders gebruikt zou kunnen worden bij het nemen van beslissingen ten aanzien van te nemen maatregelen voor de brandwerendheid bij de drie landtunnels. Mogelijk zullen de verkregen resultaten ook al in belangrijke mate als basis voor een beslissing kunnen worden gebruikt en zo niet, dan zal de studie naar verwachting minimaal richting kunnen geven aan vervolgonderzoek.

INHOUD

VOORWOORD	1
SAMENVATTING	2
1 Inleiding	10
1.1 Waaron drie landtunnels moeten worden bekleed met HWB.....	10
1.2 Vraagstelling.....	11
1.3 Opzet van het rapport.....	12
2 Wettelijk kader en aanvullende eisen RWS	13
2.1 Algemeen.....	13
2.2 Eisen volgens Bouwbesluit 2012 [51]	13
2.3 Aanvullende eisen volgens de WARVW [110] en RARVW [72].....	14
2.4 Aanvullende eisen RWS [63]	15
2.5 Nadere beschouwing eisen Bouwbesluit	16
2.6 Samenvatting eisen m.b.t. brandwerendheid	17
3 Beschouwingen m.b.t. bescherming van tunnels tegen brand	19
3.1 Algemeen.....	19
3.2 HWB als verzekering - Veiligheidsrichtlijn deel C 2009 [37]	19
3.3 Achtergronden wettelijk kader - Veiligheidsrichtlijnen deel C 2009 [37]	20
3.3.1 Schademechanismen volgens Veiligheidsrichtlijnen deel C.....	20
3.3.2 Economische afwegingen volgens Veiligheidsrichtlijnen deel C	21
3.3.3 Hittewerende bekleding.....	22
3.3.4 Eisen RWS zijn strenger dan de wettelijke eisen [37]	25
3.4 Studies en maatregelen na de ontdekking dat ROK-beton spatgevoelig is	26
4 Aanpak van de studie naar alternatieven voor HWB	32
5 Personenveiligheid	35
5.1 Algemeen.....	35
5.2 Basisanalyse door RWS.....	35
5.2.1 Uitgangspunten [82].....	35
5.2.2 Evaluatie uitgangspunten	35
5.2.3 Resultaten	36
5.3 Detailanalyse Koning Willem-Alexander tunnel.....	36
5.3.1 Detailanalyse [82]	36
5.3.2 Evaluatie.....	37
5.3.3 Mogelijke verdere analyse.....	38
6 Risicoprofiel tunnel	39
6.1 Concept risicoprofiel	39
6.2 Beoordeling op basis van het risicoprofiel	40
7 Achtergrond brandgevaar tunnel	42

7.1	Algemene inleiding.....	42
7.2	Strategie begroting brandgevaar	42
7.3	Fenomeen ‘brand in tunnels’	43
7.4	Standaard brandintensiteit en vrijgegeven energie voor types voertuigen	45
7.4.1	Personenwagens	45
7.4.2	Bussen	46
7.4.3	Vrachtwagens	47
7.4.4	Tankwagens.....	49
7.4.5	Relatie HRR, THR en oppervlak brandstof.....	49
7.5	Zeer grote branden: bespreking van enkele historische cases	49
7.5.1	Algemeen	49
7.5.2	Velsertunnel, 1978	50
7.5.3	Heinenoordtunnel, 2014.....	50
7.5.4	Tauern tunnel, 1999.....	50
7.5.5	Mont Blanc tunnel, 1999.....	50
7.5.6	Caldecott tunnel, 1982.....	51
7.5.7	Nihonzaka tunnel, 1979.....	51
7.5.8	Conclusie.....	51
8	Begroting brandgevaar tunnels	53
8.1	Brandfrequentie	53
8.2	Brandintensiteit.....	54
8.2.1	Introductie	54
8.2.2	Concept model brandverspreiding.....	56
8.2.3	Sterk vereenvoudigd model brandverspreiding.....	56
8.2.4	Andere basisparameters.....	59
8.3	Brandgevaar.....	60
8.3.1	Basisevaluatie.....	60
8.3.2	Referentie-evaluatie brandgevaar.....	62
9	Effect van maatregelen op brandgevaar.....	65
9.1	Algemeen.....	65
9.2	Filemanagement systeem (tunneldosering)	66
9.3	Minimumafstand vrachtverkeer	66
9.4	Vaste blussystemen.....	67
9.4.1	Sprinklersysteem	67
9.4.2	Watermiststelsysteem	67
9.5	Overzicht effect maatregelen, relatief t.o.v. de referentie-evaluatie.....	68
10	Begroting impact brand op tunnelconstructie	70
10.1	Algemeen.....	70
10.2	Ruimtelijke omvang.....	70
10.3	Temperatuur-tijd-kromme	71
10.4	Bemerkingen.....	75
11	Spatten van beton	76
11.1	Algemeen.....	76

11.2	Oorzaken van explosief spatten	76
11.3	Invloedsfactoren op spatten	77
11.4	Ervaringen met spatgedrag in brandproeven vóór 2001	78
11.5	De basis voor afspatongevoelig beton [18].....	81
11.5.1	Samenvatting van het onderzoek.....	81
11.5.2	Bemerkingen bij de onderbouwing van spatongevoelig beton volgens ROK.....	85
11.6	Onderzoek spatgedrag ná 2001.....	87
11.7	Resultaten van recente in-situ hitteproeven in bestaande tunnels.....	92
11.7.1	Algemeen	92
11.7.2	Opzet van de in-situ brandproeven.....	94
11.7.3	KWA tunnel [98,105].....	95
11.7.4	2de Coentunnel [109].....	95
11.7.5	Salland-Twentetunnel [108].....	95
11.7.6	Ketheltunnel [111].....	96
11.7.7	Sijtwendetunnel [114].....	96
11.7.8	2de Beneluxtunnel [115].....	97
11.8	Samenvatting en conclusies m.b.t. spatten van beton.....	97
12	Waargenomen schade bij tunnelbranden.....	100
12.1	Algemeen.....	100
12.2	Overzicht van tunnelbranden van voor 1985 [14]	100
12.3	Twee grote branden (Velsertunnel en Heinenoordtunnel) in Nederland	101
12.4	Schade opgetreden bij grote tunnelbranden [26]	102
13	Drie landtunnels: constructie, brandwerendheid en bezwijken	103
13.1	Algemeen.....	103
13.2	Ketheltunnel.....	103
13.2.1	Constructie	103
13.2.2	Brandwerendheid	104
13.3	Salland-Twentetunnel.....	108
13.3.1	Constructie	108
13.3.2	Brandwerendheid	108
13.4	Koning Willem-Alexandertunnel	111
13.4.1	Constructie	111
13.4.2	Brandwerendheid	111
13.5	Conclusies.....	117
14	Beschouwingen m.b.t. schade en bezwijken bij brand in tunnels	119
14.1	Algemeen.....	119
14.2	Bezwijkanalyses voor de Gaasperdammertunnel [92].....	119
14.2.1	Algemeen	119
14.2.2	Uitgangspunten.....	120
14.2.3	Bezwijkmechanismen.....	120
14.2.4	Aanvullende beschouwing bezwijken dakconstructie.....	122
14.2.5	Progressive collapse	124
14.3	Enkele algemene beschouwingen m.b.t. schade en bezwijken.....	124
15	Classificatie van schade aan de landtunnels door brand	126

16	Kosten-baten analyse.....	130
16.1	Algemeen.....	130
16.2	Kosten van niet-beschikbaarheid: algemene beschouwing.....	130
16.2.1	Uitgangspunten.....	130
16.2.2	Begroting, conceptueel.....	131
16.2.3	Begroting, vereenvoudigd	132
16.3	Installatie: directe kosten en duur niet-beschikbaarheid.....	132
16.3.1	Overzicht	132
16.3.2	Referentietoestand; verkeerstechnische maatregelen	133
16.3.3	Sprinklersysteem (deluge).....	133
16.3.4	Watermistsysteem	134
16.3.5	Mobiël blussysteem.....	134
16.3.6	Hittewerende bekleding.....	134
16.4	Onderhoud: kosten, duur niet-beschikbaarheid en levensduur	135
16.4.1	Overzicht	135
16.4.2	Referentietoestand; verkeerstechnische maatregelen	135
16.4.3	Sprinklersysteem (deluge).....	136
16.4.4	Watermistsysteem	136
16.4.5	Mobiël blussysteem.....	136
16.4.6	Hittewerende bekleding.....	136
16.5	Herstel schade na brand: kosten en duur niet-beschikbaarheid	137
16.5.1	Algemeen en overzicht.....	137
16.5.2	Schadebeeld referentietoestand	138
16.5.3	Mobiël blussysteem.....	139
16.5.4	Hittewerende bekleding.....	139
16.6	Herstel schade na brand: kans op optreden schadebeeld	139
16.7	Verkennde maatschappelijke kosten-baten analyse	142
16.7.1	Inleiding	142
16.7.2	Berekeningsconcept.....	142
16.7.3	Evaluatie.....	143
17	Alternatieven voor HWB in de drie landtunnels	147
17.1	Algemeen.....	147
17.2	Mogelijke alternatieven voor HWB.....	147
17.3	Vergelijking van alternatieven.....	148
18	Tot besluit.....	151
	Referenties	152
	Addendum bij de verkennende studie naar alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding in drie landtunnels.....	158
	Add. 0 Inleiding	158
	Add. 1 Vast blussysteem Fire Defender.....	158
	Add. 2 Risicoanalyses en tijdelijke maatregelen.....	159
	Add. 3 In 2018 uitgevoerde kostenanalyse	165
	Add. 4 Uitgangspunten voor schade en kosten [128,131].....	171
	Add. 5 Vereiste veiligheid en faalkansen volgens NEN-EN 1990 en NEN 8700.....	176

Add. 6 Overige opmerkingen en reacties op het rapport.....	178
Add. 7 Slotopmerkingen na bespreking aanvullende info en kritieken	181
Add. Referenties.....	185
Bijlage A Plan van aanpak.....	186
Bijlage B Bijlage 8 van Veiligheidsrichtlijn deel C, versie 1.1 (15 juni 2009) [37] “Bescherming tegen brand”.....	205
Bijlage C Analyse TNO rapport “De statistische kans op brand in tunnels” [64].....	214
C.1 Algemeen.....	214
C.2 Kanttekeningen voor toepassing in het huidig onderzoek.....	214
C.3 Te overwegen uitbreidingen.....	216
Bijlage D Analyse RWS Notitie d.d. 23 mei 2017 [82].....	217
Bijlage E RWS Discussiepunten n.a.v. rapportage [128].....	222
Bijlage F RWS Memo over vervolg met reactie van TNK [131].....	228

1 Inleiding

1.1 Waarom drie landtunnels moeten worden bekleed met HWB

Brandwerendheid van tunnels speelt een belangrijke rol voor de tunnelveiligheid en krijgt zolang tunnels al worden gebouwd, speciale aandacht. Diverse grote tunnelbranden in Europa hebben die aandacht rond de eeuwwisseling nog eens extra versterkt. Bij de beoordeling van de brandwerendheid van de tunnels wordt gekeken naar twee aspecten. Dat is in de eerste plaats de veiligheid van personen en in de tweede plaats de mate van beschadiging van de tunnel, c.q. het al dan niet herstelbaar zijn van de tunnel, na een brand.

Bij de beoordeling van de brandwerendheid van tunnels is de primaire functionele eis dat personen voldoende tijd moeten hebben om zich in veiligheid te kunnen brengen. Dit wordt courant ingevuld door middel van een performantiecriterium (*verder ook aangeduid met "prestatie eisen"*) waarbij de tunnel gedurende een in de regelgeving vastgelegde tijd (brandwerendheidsduur) niet bezwijkt. Met betrekking tot het beperken van de (constructieve) schade² aan de tunnel is het performantiecriterium dat gedurende een gedefinieerde tijdsduur en brandkromme de temperatuur van het beton en betonstaal voldoende laag moet blijven. Bekend is hoe de stijfheid en de sterkte van beton en betonstaal afneemt met temperatuurverhoging, bij welke temperatuur die sterkte helemaal weg is en in welke mate het beton en het betonstaal uitzetten bij verhoogde temperaturen. Dit betekent dat als de temperatuurontwikkeling in de betonconstructie door een brand bekend is, het in principe mogelijk is om de tijd tot bezwijken van de tunnel te berekenen. Dit is echter zeer complex en wordt in de praktijk feitelijk nooit gedaan. Met het oog op de herstelbaarheid van de tunnel eist RWS immers dat de temperatuur van de wapening in het beton, en het beton zelf, niet te hoog wordt (*betonstaal mag bijvoorbeeld binnen de brandwerendheidsduur niet warmer worden dan 250 °C*). Dat is een conservatieve benadering. Als gedurende de tijd dat de brandwerendheid is geëist, aan deze eis wordt voldaan, zal de tunnelconstructie binnen die tijd niet bezwijken, omdat de eigenschappen van het beton en het betonstaal nagenoeg niet afnemen.

De temperatuur van het beton en het betonstaal kan gedurende een brand voldoende laag gehouden worden door bijvoorbeeld het toepassen van hittewerende bekleding (*verder ook aangeduid met HWB*). De temperatuur van het betonstaal kan ook met extra betondekking op de wapening worden beperkt. Naast het beperken van de temperatuur van het betonstaal, mag er geen explosief spatten van het beton optreden. Explosief spatten bij brand is het wegspringen van stukken beton aan het oppervlak, wat wordt veroorzaakt door temperatuurgradiënten in de buitenste rand van het beton en hoge dampspanningen in de poriën van het beton. Spatten van het beton kan worden voorkomen door de temperatuur van het beton en de snelheid waarmee het toeneemt, te beperken. Ook voor het voorkomen van spatten kan HWB worden toegepast. Daarnaast is het mogelijk om beton toe te passen dat afspatongevoelig is. Beton kan minder spatongevoelig worden gemaakt door het toepassen polypropyleenvezels (*pp-vezels*) in het beton. Met name de opkomst van hogesterktebeton en zelfverdichtend beton rond de eeuwwisseling heeft, vanwege het door de dichte structuur van deze betonsoorten afspatongevoeliger zijn, geleid tot de ontwikkeling van beton met pp-vezels.

Rijkswaterstaat (*verder ook aangeduid met RWS*) is er jaren lang vanuit gegaan dat ook normale sterkte beton (*dus zonder pp-vezels*) afspatongevoelig kan zijn. De veronderstelling was dat als het

² Deze studie richt zich op schade aan de tunnelconstructie (constructieve schade). Bij brand zal er altijd sprake zijn van schade aan TTI's (tunnel technische installaties). Dat valt buiten de scope van deze studie.

beton voldeed aan de criteria, zoals die zijn vastgelegd in de ROK³, het beton afspatongevelig was. Dit was in belangrijk mate gebaseerd op de resultaten van een in 2001 uitgevoerd experimenteel brandonderzoek [18]. In 2015 [75] is voor het eerst gerapporteerd over brandproeven waarbij was waargenomen dat bij “spatongevelig beton” (ook wel aangeduid met “ROK-beton”) explosief afspatten toch was opgetreden. Met een zestal, in opdracht van RWS door Efectis uitgevoerde, brandproeven [81], werd bevestigd dat het ROK-beton “van dat moment” niet afspatongevelig was. Op basis van ervaringen van Efectis werd toen vermoed dat rond 2008 het spatgedrag van ROK-beton was veranderd door wijzigingen in beton-, c.q. cementsamenstelling⁴.

De nieuwe ervaringen met brandproeven op ROK-beton en het vermoeden dat er rond 2008 een omslag is geweest in de spatgevoeligheid van het beton, maakte dat tunnels gebouwd na 2008 met betrekking tot brandwerendheid opnieuw onder de loep zijn genomen. Dat betreft een viertal tunnels, waarvan drie landtunnels (*de Koning Willem-Alexandertunnel, ook aangeduid met KWA-tunnel, in Maastricht, de Ketheltunnel in Schiedam en de Salland-Twentetunnel in Nijverdal*) en één onder een waterweg (*de 2^e Coentunnel in Amsterdam*). Voor deze tunnels kon worden aangetoond dat nog steeds wordt voldaan aan de wettelijke eisen in het kader van personenveiligheid. Echter, de tunnels voldoen niet meer aan de eisen, die RWS stelt in verband met het beperken van schade (“*asset protection*”). Omdat aan de eisen m.b.t. veiligheid nog steeds wordt voldaan, werd het gebruik, met toepassing van een set operationele maatregelen per tunnel, verantwoord geacht [84,86]. Voor de lange termijn was vervolgonderzoek naar de effecten op de tunnelconstructie aanbevolen [84].

De ontdekking van het afspatgevoelig zijn van ROK-beton, was in de afgelopen jaren voor RWS aanleiding voor het uitvoeren van diverse studies en (in-situ) brandproeven. Voor nieuw te bouwen tunnels geldt nu dat met brandproeven moet zijn aangetoond dat het beton, al dan niet voorzien van HWB, niet afspat. Voor de vier, hiervoor genoemde na 2008 gebouwde, bestaande tunnels is RWS van mening dat die alsnog van HWB moeten worden voorzien. Dat is een ingrijpende, kostbare maatregel, die ook tot zeer veel (verkeers)overlast leidt. Voor twee tunnels (*KWA-tunnel en Ketheltunnel*) hebben de betreffende gemeenten (*resp. Maastricht en Schiedam*) gevraagd of er alternatieven zijn voor deze maatregel, zoals bijvoorbeeld uitstel van de maatregel tot het moment dat groot onderhoud aan de tunnel wordt gepleegd (ca. 2030).

1.2 Vraagstelling

Mede naar aanleiding van de vragen van de gemeenten, heeft RWS aan ondergetekenden, prof. ■■■ van de universiteit Gent en dr. ■■■ van Adviesbureau Hageman, gevraagd gezamenlijk een verkennende studie uit te voeren naar de mogelijkheden voor alternatieven voor het op korte termijn aanbrengen van HWB. Omdat voor tunnels onder vaarwegen mogelijk toch een andere benadering nodig is dan voor landtunnels, is gevraagd de studie met name uit te voeren voor de laatste categorie tunnels (*Salland-Twentetunnel, KWA-tunnel en Ketheltunnel*). Na diverse overleggen met vertegenwoordigers van RWS in de eerste helft van 2020 is voor de studie een plan van aanpak, gedateerd 22 juni 2020, opgesteld, dat integraal in Bijlage A bij dit rapport is opgenomen.

³ In diverse versies van de ROK zijn de criteria m.b.t. spatongevelig beton opgenomen. In hoofdstuk 3 wordt dit besproken. De eerste versie van de ROK (versie 1.0) [47] is van december 2011. Maar ook in een document met aanvullingen en wijzigingen voor tunnels op ROBK versie 6 [30] van februari 2006, waren deze criteria al opgenomen.

⁴ Zoals in het onderhavige rapport (hoofdstuk 11) is toegelicht, is naar de mening van ondergetekenden de aanname dat beton, dat voldoet aan de criteria in de ROK, spatongevelig is, onvoldoende onderbouwd en niet juist geweest.

1.3 Opzet van het rapport

In het onderhavige rapport zijn de bevindingen van de de verkennende studie naar alternatieven voor HWB in drie landtunnels opgenomen. In hoofdstuk 2 is het wettelijk kader voor de brandwerendheid van tunnels geschetst. Daarbij is ook aangegeven welke aanvullende eisen RWS stelt aan de brandwerendheid van tunnels. In hoofdstuk 3 zijn beschouwingen opgenomen, waarbij onder andere is ingegaan op de achtergronden bij het wettelijk kader en een terugblik is gegeven op een aantal ontwikkelingen in Nederland rond de brandwerendheid van tunnels, waarna in hoofdstuk 4 de aanpak voor de onderhavige studie is beschreven. Personenveiligheid was voor de betreffende vier tunnels al beoordeeld en akkoord bevonden door RWS. Ondergetekenden hebben dat bekeken en de bevindingen op dat punt zijn beschreven in hoofdstuk 5. Nadat in hoofdstuk 6 het risicoprofiel voor brandwerendheid van tunnels is besproken, wordt in de hoofdstukken 7 tot en met 9 ingegaan op respectievelijk de achtergronden, de begroting en de effecten van maatregelen op het brandgevaar (de relatie kans-intensiteit van tunnelbranden). In hoofdstuk 10 wordt aandacht besteed aan de impact van de brand op de tunnelconstructie. Ervaringen met, en kennis van, spatten van beton is het onderwerp van hoofdstuk 11, waarbij ook is ingegaan op het onderzoek dat is gebruikt voor de onderbouwing en definitie van spatongevoelig beton. In hoofdstuk 12 is op basis van geraadpleegde literatuur een beknopt overzicht gegeven van waargenomen schades bij verschillende tunnelbranden. Na een korte beschrijving van de constructie van de drie landtunnels en de wijze waarop bij het ontwerp met brandwerendheid is omgegaan in hoofdstuk 13, zijn in hoofdstuk 14 enkele beschouwingen met betrekking tot bezwijken opgenomen. Getracht is om voor deze verkennende studie te komen tot een classificatie van constructieve schades door brand, hetgeen is beschreven in hoofdstuk 15. In hoofdstuk 16 is aandacht besteed aan de maatschappelijk kosten-baten (MKBA) analyses. Uiteindelijk is op basis van alle verzamelde informatie en inzichten in hoofdstuk 17 geschetst welke alternatieven ondergetekenden na de onderhavige verkennende studie zien voor het aanbrengen van HWB in de drie landtunnels, dan wel welke alternatieven het verdienen om verder uitgewerkt te worden. Het rapport wordt afgesloten met enkele slotopmerkingen in hoofdstuk 18.

2 Wettelijk kader en aanvullende eisen RWS

2.1 Algemeen

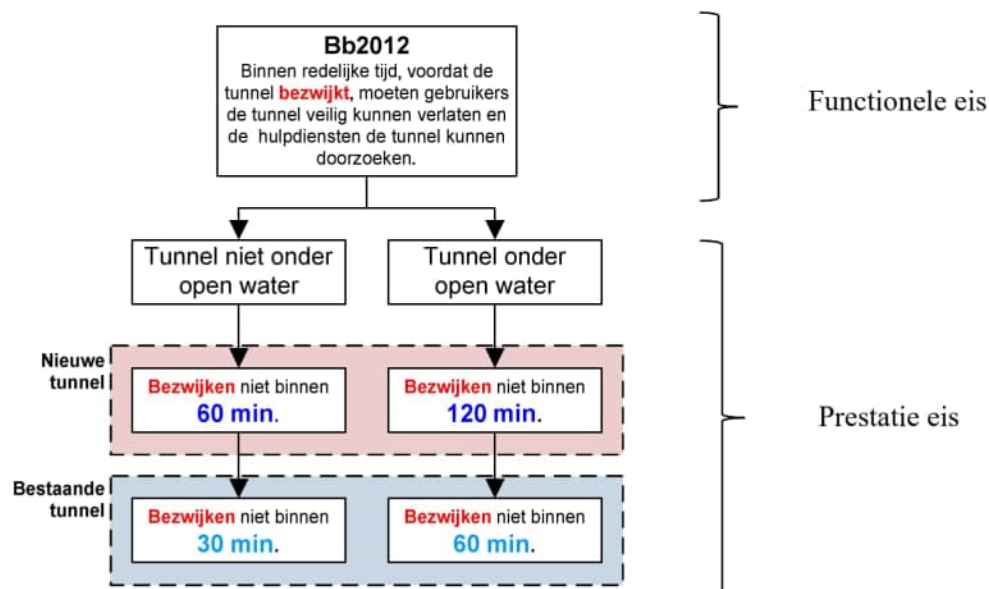
Het overzicht in dit hoofdstuk is voor een belangrijk deel ontleend aan “*Achtergronddocument brandwerendheid tunnels*” [83] en was ook opgenomen in het Plan van Aanpak voor de onderhavige studie (zie Bijlage A).

Relevante documenten zijn:

- Bb2012: Bouwbesluit 2012 [51]
- WARVW: Wet Aanvullende Regels Veiligheid Wegverkeerstunnels [110]
- RARVW: Regeling Aanvullende Regels Veiligheid Wegverkeerstunnels [72]
- ROK 1.2: RWS Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken [63]

2.2 Eisen volgens Bouwbesluit 2012 [51]

De eisen voor brandwerendheid van tunnels in het Bouwbesluit 2012 zijn in *figuur 1* weergegeven. Er geldt een algemene functionele eis dat de tunnel bij brand gedurende een redelijke/enige tijd kan worden verlaten en doorzocht zonder gevaar voor instorting. De eisen in het Bouwbesluit 2012 hebben duidelijk te maken met veiligheid.



figuur 1 Brandwerendheidseisen voor tunnels in Bouwbesluit 2012 [51].

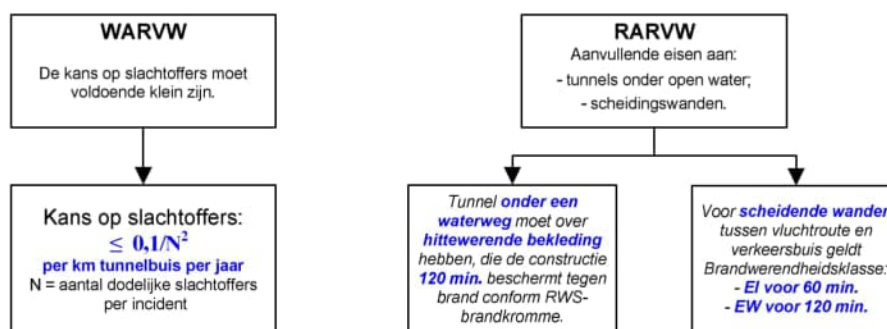
De functionele eis is in het Bouwbesluit verder uitgewerkt in prestatie-eisen. Indien aan de prestatie-eis wordt voldaan, dan wordt automatisch geacht dat aan de functionele eis voldaan is [88]. Het is eveneens mogelijk om via een alternatieve wijze rechtstreeks aan te tonen dat aan de functionele eis voldaan is. Het Bouwbesluit spreekt hier van een “gelijkwaardige oplossing” [88]. Het toepassen van een gelijkwaardige oplossing is echter niet eenvoudig, aangezien de functionele eis niet duidelijk stelt wat een “redelijke tijd” is, en hoe moet worden bepaald wanneer sprake is van bezwijken. En als via een gelijkwaardige oplossing wordt aangetoond dat aan de functionele eis wordt voldaan, zal het bevoegd gezag daar ook mee moeten instemmen.

Bij de prestatie-eisen wordt een onderscheid gemaakt in tunnels onder open water en niet onder open water en in nieuwe en bestaande tunnels. Volgens [83] moeten vrijwel alle tunnels gebouwd sinds 2006, voldoen aan de nieuwbouweisen. Dit heeft te maken met het rechtens verkregen niveau. Bij toepassing van de prestatie-eisen zijn de aangegeven tijdsperioden duidelijk. Ook de wijze waarop bezwijken moet worden bepaald is bij toepassing van de prestatie-eisen in grotere mate duidelijk. Het Bouwbesluit bepaalt immers welke normen toegepast moeten worden bij de berekening. Voor nieuwbouw betonconstructies zijn dit NEN-EN-1990 en NEN-EN-1992 (of NEN 6069) [88]. Voor betontunnels specificeert NEN-EN-1992 bijvoorbeeld toepassing van de RWS brandkromme. Desalniettemin kan worden gesteld dat binnen de prestatie-eisen er geen duidelijke omschrijving, c.q. definitie, is van wat onder bezwijken moet worden verstaan, anders dan het overschrijden van een grenstoestand.

Hoewel bij toepassing van de prestatie-eisen uitgegaan wordt van één enkele nominale brandkromme, is er een breed spectrum aan branden mogelijk in de tunnel. Enerzijds zal het merendeel van de branden relatief klein zijn [64], deze hebben bijvoorbeeld betrekking op een enkele personenwagen. Het uitbranden van een tankwagen (*aangehaald als het scenario dat aan de RWS kromme ten grondslag ligt*) heeft een lagere kans van optreden. De kans dat meerdere tankwagens in één enkele brand betrokken zijn heeft een nog lagere kans. Dit spectrum aan branden impliceert dat ook een ontwerp, dat voldoet aan de prestatie-eisen, overeenstemt met een risicoprofiel (*relatie kansgevolg*). Het risicoprofiel van de tunnel hangt onder meer af van de verkeersintensiteit en de aanwezige actieve brandveiligheidsmaatregelen. De prestatie-eis brengt deze tunnel-specifieke karakteristieken niet in rekening, wat redelijkerwijs impliceert dat twee tunnels die beide voldoen aan de prestatie-eis een verschillend risicoprofiel hebben. Bij het toepassen van een gelijkwaardige oplossing kan bijvoorbeeld (in hypothese) aangetoond worden dat het risicoprofiel van een tunnel die niet voldoet aan de prestatie-eis, maar waar andere maatregelen genomen zijn, gelijkaardig is aan het risicoprofiel van een tunnel ontworpen conform de prestatie-eisen.

2.3 Aanvullende eisen volgens de WARVV [110] en RARVV [72]

De aanvullende regels die in respectievelijk de WARVV en de RARVV worden gesteld, zijn in *figuur 2* schematisch weergegeven. Om invulling te geven aan de WARVV zal duidelijk moeten zijn onder welke omstandigheden er slachtoffers vallen. De RARVV stelt dat bij tunnels onder een waterweg hittewerende bekleding sowieso moet worden toegepast en stelt eisen aan doorslag ($E =$ vlamdichtheid-afdichting, $I =$ thermische isolatie - temperatuur en $W =$ thermische isolatie - warmtestraling) bij scheidingswanden.



figuur 2 Bepalingen in WARVV en RARVV in verband met brandwerendheidseisen voor tunnels. WARVV vereiste geldt voor $N \geq 10$.

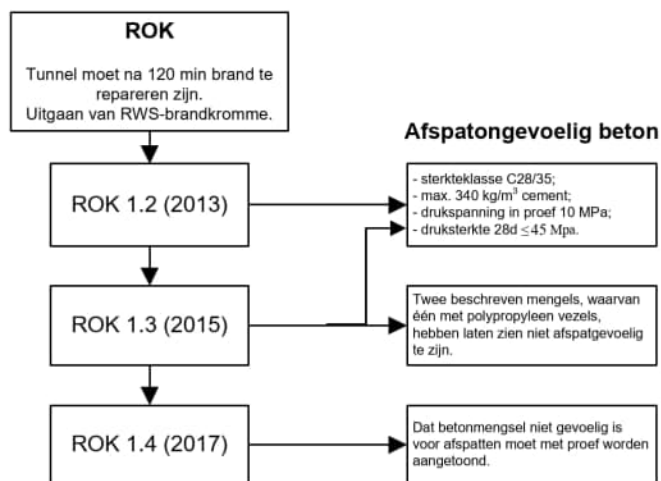
2.4 Aanvullende eisen RWS [63]

RWS stelt om economische redenen (“*asset protection*”) strengere eisen aan de bescherming van tunnels tegen brand [63]. Uitgangspunt is dat de tunnel na een grote brand gerepareerd moet kunnen worden [94]. Voor tunnels geldt als maatgevende brand gedurende 120 minuten de RWS brandkromme voor het gesloten deel en de waterstofkromme (Hydrocarbon) voor het niet-gesloten deel (*toeritten*). Door de tunnel voor 120 minuten tegen de RWS brandkromme te beschermen wordt de constructie geacht tegen verreweg de meeste voorkomende branden beschermd te zijn [94]. In de toelichting op het artikel (5.2) in de ROK is o.a. het volgende aangegeven:

“De opdrachtgever kan, op basis van een beschouwing van het aanwezige risico (kans x gevolg) in relatie tot de kosten, beslissen om andere brandkrommen te hanteren en/of de tijdsduur van de brandkrommen te beperken. De mate van repareerbaarheid is altijd een belangrijk aspect bij de keuze van de voor te schrijven brandkromme, omdat het uitgangspunt is dat tunnels na het optreden van een grote brand repareerbaar moeten zijn. In dit kader is ook de situering van de tunnel van belang (bijvoorbeeld wel of niet onder open water).”

De ROK specificeert bovendien aanvullingen op NEN-EN-1992. Specifiek gelden onder meer maximale temperaturen voor de wapening in de trekzone (250 °C) en voor het omliggende beton (380 °C). De toelichting in de ROK verduidelijkt dat door toepassing van deze eisen “*nog een ruime marge aanwezig blijft op het bezwijken van de constructie*”.

Wat met betrekking tot spatgevoeligheid van beton in de verschillende versies van de ROK is aangegeven, is weergegeven in *figuur 3*.



figuur 3 Afspatongevoelig beton volgens diverse versies van de ROK.

Opgemerkt kan worden dat ook al in een document met aanvullingen en wijzigingen voor tunnels op ROBK versie 6 [30] van februari 2006, de criteria m.b.t. spatongevoelig beton waren opgenomen⁵.

⁵ In de ROBK6 [30] was aangegeven dat in de proeven van TNO en Rijkswaterstaat, waarbij geen afspaten was opgetreden, maximaal 320 kg/m³ CEM III cement was toegepast. Echter, in de proef [18] was 340 kg/m³ CEM III cement toegepast, hetgeen in de ROK's ook als maximaal cementgehalte voor spatongevoelig beton is aangehouden.

2.5 Nadere beschouwing eisen Bouwbesluit

Sterkte bij brand komt aan de orde in Afdeling 2.2 van het Bouwbesluit 2012 [51]. Daar is algemeen het volgende aangegeven:

“In deze afdeling wordt geregeld dat er geen of slechts beperkte voortschrijdende instorting mag plaatsvinden als gevolg van brand. In het Bouwbesluit 2003 werd hierbij gewerkt met het begrip «hoofddraagconstructie bij brand» dat was gedefinieerd in NEN 6702. De Eurocodes die in de plaats van NEN 6702 zijn gekomen, kennen dit begrip echter niet meer. De eisen in deze paragraaf zijn zo geformuleerd dat zij inhoudelijk overeenstemmen met de eisen uit het Bouwbesluit 2003 zonder dat gebruik wordt gemaakt van begrip hoofddraagconstructie bij brand. Ook het begrip «overschrijden van de uiterste grenstoestand» is vervangen door: bezwijken.”

Ondergetekenden achten dit belangrijk, omdat het bij de uitwerking van de opdracht goed is te realiseren wat de achtergrond is van de regelgeving. Het gaat er dus voor het Bouwbesluit primair om dat er bij brand geen of slechts beperkte voortschrijdende instorting plaatsvindt. Hoe voortschrijdende instorting bij tunnels moet of kan worden geïnterpreteerd, is dan een aandachtspunt. Tevens is duidelijk dat bezwijken moet worden gelezen als het overschrijden van de uiterste grenstoestand.

De functionele eis is dat een bouwwerk bij brand gedurende redelijke tijd moet kunnen worden verlaten en doorzocht, zonder dat er gevaar voor instorting is. De prestatie-eis geeft hieraan invulling via een brandwerendheid (*tijdsduur tot bezwijken*) bij een nominale brandkromme. Met betrekking tot de tijdsduur tot bezwijken (Artikel 2.10) is het volgende aangegeven:

“Uitgangspunt hierbij is dat het sub- of brandcompartiment waarin een brand heerst mag bezwijken, zolang dit binnen een bepaalde tijdsduur maar niet leidt tot het bezwijken van bouwconstructies buiten dit sub- of brandcompartiment. Het gaat om het voorkomen van voortschrijdende instorting: er bezwijkt een bouwconstructie door brand en hierdoor bezwijken andere bouwconstructies, bijvoorbeeld omdat zij afhankelijk zijn van de draagkracht van deze bouwconstructie.”

Voor nieuw te bouwen tunnels is het volgende aangegeven:

“Het achtste lid geeft aan dat de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken van een wegtunnel met een tunnallengte van meer dan 250 m ten minste 60 minuten moet bedragen. Voor zover de tunnel onder open water ligt is deze periode 120 minuten. Indien bij brand een gedeelte van een tunnelbuis dat onder open water ligt bezwijkt, bestaat het gevaar dat de gehele tunnelbuis in korte tijd onder water komt te staan. Daardoor kunnen vluchtenden en hulpverleners, ook in gedeelten van de tunnel die niet direct door de brand worden bedreigd, in een levensbedreigende situatie komen. Om dit te voorkomen zal de bouwconstructie van het deel van de tunnel dat onder open water ligt gedurende langere tijd niet mogen bezwijken. Met «open water» wordt hier een rivier, waterbekken, zeearm, kanaal, meer of daarmee in verbinding staand water bedoeld, waardoor een vrijwel onbeperkte hoeveelheid water kan toestromen. Zou de tunnelwand bezwijken, dan is het noodzakelijk om de waterkerende functie te herstellen voordat de tunnel kan worden droog gepompt. Dit is in een tunnel die vol water staat een tijdrovende en kostbare aangelegenheid. Ook daarom is een langere periode van brandwerendheid met betrekking tot bezwijken hier zinvol.”

Voor de bepalingsmethode is aangegeven:

“Het eerste lid geeft aan welke buitengewone belastingscombinaties moeten worden aangehouden bij het bepalen of een bouwconstructie bezwijkt. Het tweede lid geeft aan welke normen worden toegepast bij de toetsing op de tijdsduur voor bezwijken. Ook hier zijn de zogenoemde TGB's (Technische grondslagen voor bouwconstructies) vervangen door de Eurocodes. De in de onderdelen a. tot en met f. genoemde Eurocodenormen bevatten berekeningsmethoden voor diverse materialen. Voor niet in deze Europese normen genoemde materialen en enkele bijzondere combinaties van materialen moet de tijdsduur met betrekking tot bezwijken nog steeds worden bepaald volgens NEN 6069.”

In paragraaf 2.2.2 “Bestaande bouw” is in Artikel 2.14 voor de tijdsduur tot bezwijken aangegeven:

“Een bouwconstructie van een tunnel bezwijkt niet binnen 30 minuten en voor zover deze onder open water ligt niet binnen 60 minuten bij brand in de tunnel.”

Nadat duidelijk was geworden dat bij het ROK-beton, zoals toegepast in de tunnels van ná 2008, wel afspatten optreedt, was het voor RWS belangrijk om te weten hoe het Bouwbesluit 2012 moet worden geïnterpreteerd. RWS vroeg zich af of het is toegestaan dat er ter plaatse van de brandhaard een gat in het dak valt, als er verder geen sprake is van voortschrijdende instorting. Gesteld zou kunnen worden dat het Bouwbesluit 2012 met betrekking tot brandwerendheid van tunnels niet helemaal duidelijk is. RWS heeft daartoe in 2018 aan de landsadvocaat een aantal vragen gesteld [96]. De landsadvocaat heeft na een uitgebreide analyse geconcludeerd dat er bij een brand in een tunnel volgens Bouwbesluit 2012 in het geheel geen bezwijken mag optreden. Dus het bij brand vallen van een gat in het dak is volgens de landsadvocaat niet toegestaan.

Ondergetekenden hebben het Bouwbesluit 2012 op het onderwerp van brand in tunnels, en de notitie van de landsadvocaat, bestudeerd. Heel kort samengevat kan worden gesteld dat ondergetekenden van mening zijn dat:

- de landsadvocaat terecht concludeert dat lid acht van artikel 2.10 aangeeft dat bij brand in een tunnel niets mag bezwijken;
- die bepaling een prestatie eis is, waarvoor geldt dat het voor het Bouwbesluit 2012 aanvaardbaar is als er niet aan wordt voldaan, mits aan de leidende functionele eis, in dit geval het hebben van voldoende tijd voor verlaten en onderzoeken, maar wel wordt voldaan;
- bijvoorbeeld het beginsel van gelijkwaardigheid kan worden toegepast om aan de functionele eis te voldoen.

2.6 Samenvatting eisen m.b.t. brandwerendheid

Kort samengevat kan worden gesteld dat:

- Bouwbesluit 2012 eist dat er voldoende tijd is om de tunnel te verlaten (veiligheid); Het voldoen hieraan kan aangetoond worden door te voldoen aan prestatie-eisen (*niet bezwijken voor specifieke duur RWS brandkromme*) of rechtstreeks via een gelijkwaardige oplossing.
- er een discrepantie lijkt te zijn tussen wat in het Bouwbesluit 2012 kan worden gezien als de “functionele eisen” met betrekking tot brand in een tunnel en wat kan worden gezien als de daarin geformuleerde “prestatie eisen” bij een brand in een tunnel;

- WARVW eist dat de kans op dodelijke slachtoffers voldoende klein is;
- RARVW voor tunnels onder waterwegen en scheidingswanden extra eisen geeft;
- ROK 1.2 eisen stelt m.b.t. beperken schade en daarmee de mogelijkheid voor repareren. Deze eisen worden ingevuld via een specifieke duur van de RWS brandkromme, en temperatuur limieten voor de beoordeling.

3 Beschouwingen m.b.t. bescherming van tunnels tegen brand

3.1 Algemeen

De vraag of tunnels moeten worden beschermd tegen brand of niet, en zo ja, hoe, is absoluut niet nieuw. Al decennia lang komt die vraag telkens opnieuw aan de orde en worden er afwegingen gemaakt. De kennis over branden en de gevolgen ervan, de omstandigheden waaronder die optreden en de maatschappelijke acceptatie van risico's, zullen in de loop der tijd niet altijd hetzelfde zijn geweest. Dit neemt niet weg dat argumenten en beschouwingen die bij eerdere beoordelingen van de brandwerendheid van tunnels een rol hebben gespeeld, ook nu van toepassing kunnen zijn, c.q. kunnen worden gebruikt. Om die reden hebben ondergetekenden kennis genomen van de geschiedenis met betrekking tot brandwerendheid van tunnels. Een aantal van de daarbij gedane bevindingen zijn in de navolgende paragrafen opgenomen en besproken in relatie tot de onderhavige opdracht. Een duidelijk overzicht van achtergronden, die bij het opstellen van het wettelijk kader een rol hebben gespeeld, is te vinden in de Veiligheidsrichtlijn deel C [37,38] uit 2009. In paragraaf 3.3 worden die besproken. In dat document is de analogie met een verzekering naar voren gebracht. In paragraaf 3.2 hebben ondergetekenden eerst een aantal beschouwingen opgenomen, waarbij in die lijn verder is gedacht over de onderhavige opdracht. In paragraaf 3.4 is geschetst welk traject RWS heeft gevolgd, nadat bekend was geworden dat bij het ROK-beton, anders dan wat was gedacht, toch afsputten optreedt.

3.2 HWB als verzekering - Veiligheidsrichtlijn deel C 2009 [37]

De Veiligheidsrichtlijnen deel C [37] zijn, voor zover bekend bij ondergetekenden, opgesteld door het Steunpunt Tunnelveiligheid van RWS⁶. De inleiding van hoofdstuk 8 in de Veiligheidsrichtlijnen deel C uit 2009 [37] geeft feitelijk de vraag die voor de drie landtunnels nu voorligt, goed weer. Er staat:

“Of tunnel(achtige) constructies moeten worden beschermd tegen mogelijke gevolgen van brand is vooral afhankelijk van de vraag wat de economische gevolgen zijn van het (gedeeltelijk) verloren gaan van de constructie. Het nemen van beschermende maatregelen kan worden gezien als een vorm van ‘verzekering’ tegen niet of moeilijk te dragen kosten.”

Naast de (ernstige) gevolgen van een brand, kan ook de kans dat een brand optreedt een rol spelen bij de vraag of een “verzekering” wordt genomen of niet. Als de gevolgen van een brand niet te dragen zijn, dan maakt het eigenlijk niet zoveel meer uit hoe groot de kans is op een brand. Dan is het te begrijpen dat er voor wordt gekozen om dergelijke gevolgen sowieso te voorkomen. In dit geval is dat dan het “afsluiten van de verzekering” door het aanbrengen HWB. Maar als de gevolgen bij een extreme brand misschien best zeer ernstig, maar te dragen zijn, en de kans op een dergelijke extreme brand is zeer klein, dan zal die kleine kans ook mee kunnen spelen om er uiteindelijk voor te kiezen om geen HWB aan te brengen.

De analogie met een verzekering gaat misschien toch niet helemaal op. De grondgedachte bij een verzekering is dat vele anderen, die ook zijn verzekerd en geen aanspraak maken op een uitkering, via de premie mee betalen aan de schade die jij in rekening brengt. Bij de tunnels is dat anders. Voor de premie (het aanbrengen van de HWB) draait de tunneleigenaar zelf op. Bij de keuze de

⁶ Voor het Steunpunt Tunnelveiligheid zie: www.rws.nl/tunnelsafety.

verzekering te nemen of niet, speelt dan een belangrijke rol wat de kosten zijn van de premie (aanbrengen van de HWB) ten opzichte van wat mogelijk de kosten zijn van herstel na een tunnelbrand. Ten slotte moet nog worden opgemerkt dat het bij de tunnels niet alleen om de directe kosten van herstel gaat, maar ook om economische schade en (verkeers-)hinder als gevolg van het niet (volledig) beschikbaar zijn van de tunnel gedurende enige, of langere, tijd⁷. Dit geldt zowel voor de premie als het herstel na een brand.

Voor het goed kunnen nemen van een beslissing over het al dan niet nemen van een verzekering (*aanbrengen van HWB*) zou inzicht moeten worden verkregen in:

- de constructieve schade die door een brand kan optreden;
- de kans dat een dergelijke schade optreedt;
- de mogelijkheden voor herstel;
- de gepaard gaande (economische) kosten en hinder bij herstel;
- de kosten en hinder bij het aanbrengen van HWB.

En dat alles zou dan bij voorkeur moeten kunnen worden uitgedrukt in één eenheid die vergelijking tussen wel en niet aanbrengen van HWB mogelijk maakt.

Bedacht dient te worden dat als HWB is aangebracht er na een brand nog altijd schade kan optreden en dat er dus ook in dit geval sprake van herstelkosten en verkeershinder zal zijn. Dat zal in de afwegingen ook meegenomen moeten worden. Schade aan de TTI's valt buiten de scope van deze verkennende studie, maar bedacht dient te worden dat die er bij iedere brand in meer of mindere mate altijd is.

Bij het voorgaande is nog slechts gedacht aan twee mogelijkheden, zijnde het aanbrengen van HWB in de landtunnels en het nemen van geen enkele maatregel. Er zijn naast het aanbrengen van HWB mogelijk nog andere maatregelen (verzekeringen), die wellicht minder "kosten" dan aanbrengen van HWB, maar ook de constructieve schade misschien minder zullen beperken dan HWB.

In de Veiligheidsrichtlijnen deel C (2009) [37] is gesteld dat op basis van het, in het begin van deze paragraaf aangehaalde citaat bij onder waterwegen gelegen constructies (vrijwel) altijd gekozen zal worden voor bescherming, waar dat bij viaducten slechts in bijzondere situaties het geval zal zijn.

3.3 Achtergronden wettelijk kader - Veiligheidsrichtlijnen deel C 2009 [37]

3.3.1 Schademechanismen volgens Veiligheidsrichtlijnen deel C

In bijlage 8 van de Veiligheidsrichtlijnen deel C [38] zijn de achtergronden voor het wettelijk kader, zoals dat in 2009 gold, beschreven. Ondergetekenden veronderstellen dat het huidige wettelijk kader en de achtergronden daarvoor grotendeels nog hetzelfde zijn. Om die reden is in deze paragraaf een bespreking opgenomen van de betreffende bijlage 8 [38].

De schademechanismen die bij betonconstructies door brand kunnen optreden, zijn:

- a. Afspatten van beton;
- b. Afnemen van de sterkte van beton en staal;
- c. Ontstaan van temperatuurgradiënten.

⁷ Met het Rijk als tunneleigenaar zijn de kosten van aanbrengen HWB voor het Rijk en dus de belastingbetaler, waarbij niet-beschikbaarheid van de tunnel na een brand voornamelijk maatschappelijke schade betreft. Dus zowel de kosten als de baten komen bij de maatschappij, maar wel via een andere weg.

Ad a) Afspatten wordt uitvoerig besproken in hoofdstuk 11 van dit rapport. In [38] is aangegeven dat bij brandproeven ten behoeve van de Westerscheldetunnel is gebleken dat afspatten van (schol- len) beton een doorgaand proces kan zijn.

Ad b) Staal en beton verliezen bij verwarming hun sterkte. Bij wapeningsstaal begint dat bij ca. 250 °C en bij beton bij ca. 350 °C. Boven deze temperaturen neemt de sterkte geleidelijk af naar nul.

Ad c) Bij brand ontstaat over de dikte van de constructie een tijdsafhankelijke temperatuurgradiënt. Bij opwarmen van het tunneldak aan de binnenzijde neemt de doorbuiging toe en nemen de inklem- mingsmomenten toe. In geval van vervorming bij brand is er sprake van plastisch gedrag van de constructie en daarom is er na afkoelen sprake van een blijvende vervorming. Dat zou eventueel een niet te accepteren schade kunnen zijn.

Gewezen is op het verschil tussen constructies die, nabij het vlak waar de brand kan optreden, voor de constructieve integriteit essentiële wapening bevatten (*bijvoorbeeld afgezonken tunnels*) en con- structies waarbij de aanwezige wapening in de eindtoestand niet zo essentieel is (*boortunnels*). Bij afgezonken tunnels mag de in het midden van het dak aanwezige zware wapening niet te veel in sterkte verliezen door temperatuurverhoging. Er is aangegeven dat dit al jaren wordt bereikt door de isolerende werking van de hittewerende bekleding, die bij een brand volgens de RWS-brandkromme de temperatuur op de interface HWB-beton tot maximaal 380 °C beperkt, terwijl op 25 mm diepte in het beton de temperatuur lager dan 250 °C blijft. Afspatten is onder deze omstandigheden ook niet toelaatbaar. Gesteld is dat voor het beton (B35) dat de laatste jaren bij afgezonken tunnels is gebruikt, zonder de aanwezigheid van drukspanningen (trekzone) bij toepassing van HWB geen afspatten op- treedt (ook niet bij droog beton⁸). Verder is gerapporteerd dat ‘progressive spalling’ niet alleen in het laboratorium is waargenomen, maar ook bij een aantal branden in tunnels in het buitenland in voor- gaande jaren (*Kanaaltunnel, Mont Blanc, Tauerntunnel, brand boormachine in Denemarken*) en dat er in Nederland geen omliggende rots is die voorkomt dat de tunnel instort.

3.3.2 Economische afwegingen volgens Veiligheidsrichtlijnen deel C

De paragraaf in bijlage 8 van [38] met betrekking tot “Economische afweging” is navolgend integraal overgenomen.

“Of tunnel(achtige) constructies moeten worden beschermd tegen de mogelijke ge- volgen van brand is vooral afhankelijk van de vraag wat de economische gevolgen zijn van het (gedeeltelijk) verloren gaan van de constructie. De kans op het (gedeel- telijk) verloren gaan is vooral afhankelijk van: verkeersintensiteit, lengte van de con- structie, beschermende maatregelen en repressieve mogelijkheden.

Er dient onderscheid te worden gemaakt tussen tunnels die onder waterwegen zijn gelegen en tunnels die niet onder waterwegen zijn gelegen (landtunnels, overkapte wegen, viaducten en dergelijke). Een onderwatertunnel zal na instorting hoogstens tegen zeer hoge kosten hersteld kunnen worden. De bijkomende economische ge- volgschade, door het gedurende lange tijd niet beschikbaar zijn van de oeververbin- ding, kan dan zeer groot zijn. Bij een niet onder waterwegen gelegen constructie ligt dit anders omdat herstel mogelijk is en de transportfunctie relatief korte tijd

⁸ De opmerking dat ook bij droog beton geen afspatten optreedt is vreemd, omdat juist bij droog beton min- der snel afspatten optreedt dan bij beton met een hoog vochtgehalte (zie hoofdstuk 11).

verstoord wordt. Bij de beslissing om wel of niet beschermende maatregelen te treffen dient dit in de overwegingen te worden meegenomen.

In 1980 werd besloten alle belangrijke verkeerstunnels in autosnelwegen, zowel bestaande als nieuwe tunnels, (met uitzondering van de Schipholtunnel waren dit allemaal oeververbindingen) te voorzien van een hittewerende bekleding; dit gold ook voor aquaducten. De dikte van de bekleding werd zodanig gekozen dat een 2 uur durende felle benzinebrand kan worden doorstaan (er was toentertijd alleen aandacht voor de temperatuurcriteria; aan het eventueel optreden van afsputten werd toen nog niet gedacht). Een risicostudie van TNO heeft aangetoond dat het economisch verantwoord is om hittewerende bekleding aan te brengen in onderwatertunnels (en aquaducten) in autosnelwegen ook al wordt het tanktransport van benzine door de betreffende tunnel niet toegestaan.

Het nemen van beschermende maatregelen kan worden gezien als een vorm van 'verzekering' tegen niet of moeilijk te dragen kosten. Daarbij rendeert natuurlijk een goedkope 'verzekering' (PP-vezels) eerder dan een dure 'verzekering' (sprinkler, hittewerende bekleding).

*Niet bij elke constructie behoeven per definitie beschermende maatregelen te worden aangebracht; als het risico (kans * gevolg) voldoende klein is, in relatie tot de investeringskosten van de maatregelen, kunnen deze maatregelen eventueel achterwege worden gelaten. Zo is het niet gebruikelijk bij viaducten hittewerende bekleding aan te brengen."*

3.3.3 Hittewerende bekleding

In [38] is de geschiedenis m.b.t. HWB besproken. Uit een in opdracht van RWS door TNO uitgevoerd oriënterend onderzoek naar het vervoer van gevaarlijke stoffen door tunnels, bleek dat het mogelijk is om tunnels tegen een (benzine)brand te beschermen door het aanbrengen van een hittewerende bekleding.

Hoewel bij de korte brand in de Velsertunnel in 1978 (30 min., max. 800 °C, 70 mm dekking) er slechts in beperkte mate beton is afgespat, werd, vooral voor de nieuwere tunnels, gevreesd voor grotere schade bij branden. Vooral bij een langere brandduur kan meer beton afsputten en is de wapening minder beschermd.

Uitgangspunt is de bescherming van de tunnel tegen de potentiële gevolgen van een koolwaterstof brand volgens de RWS-kromme. De temperaturen stijgen hierbij tot ca. 1350 °C en de brandduur is twee uur [153]:

- de inhoud van de grootste benzine tankauto bedraagt 50.000 liter;
- de beladingsgraad is 80% tot 90%, zodat een tankauto maximaal 45.000 liter bevat;
- de specifieke dichtheid van benzine is 0,72 kg/l, dus 45000 l = 32400 kg;
- de specifieke warmte van benzine is 43,5 MJ/kg, dus totaal: 32400 * 43,5 = 1409400 MJ;
- bij een brand van gemiddeld 200 MW is de brandduur dus: 1409400 : 200 = 7047 s = 118 minuten⁹.

⁹ Onder de voorwaarde dat voldoende zuurstof aanwezig is.

Met betrekking tot de temperatuurgrenzen van 380 °C en 250 °C voor respectievelijk beton en betonstaal is in [38] aangegeven:

- Uit onderzoek rond 1980 werd geconcludeerd dat sterkteverlies bij beton begint bij circa 200 °C en dat er bij staal weinig achteruitgang in sterkte is tot 250 °C;
- Rekening houdende met de afname van de sterkte en de volgens het ontwerp aanwezige veiligheid is gesteld dat de temperatuur van (wapenings)staal tot circa 450 °C mag stijgen voordat de veiligheidscoëfficiënt tot 1,0 is gedaald en dat dit voor beton minder gevoelig ligt;
- Voor de HWB moeten minimaal twee brandproeven zijn uitgevoerd, waarbij de temperatuur van het betonoppervlak nergens meer dan 380 °C mag zijn en de temperatuur van het staal (bij een dekking van 25 mm) nergens meer dan 250 °C;
- Voor een grenswaarde van 380 °C voor beton, in plaats van 450 °C¹⁰, is gekozen in verband met:
 - naijleffect, waarbij de temperatuur van het betonoppervlak nog kan stijgen;
 - de wens dat beton na de brand niet vervangen hoeft te worden;
 - voorkomen van grote dwarskrachten omdat, vooral in de oude tunnels geen dwarskrachtwapening aanwezig is.
- Voor een grenswaarde van 250 °C voor staal, in plaats van 450 °C, is gekozen omdat evenals bij beton er sprake is van een naijleffect en de sterkte van staal bij 250 °C weliswaar nog niet is afgenomen, maar er bij hogere temperaturen wel extra doorbuiging van de constructie optreedt, wat door de permanente belasting op het tunneldak blijvende doorbuiging kan zijn;
- Bij de, inmiddels vele, brandproeven is gebleken dat beide grenswaarden (380 °C voor beton en 250 °C voor het wapeningsstaal) ongeveer gelijktijdig worden bereikt.

Met betrekking tot afspatten is in [38] aangegeven:

- Bij de bepaling van de dikte van hittewerende bekleding bij betonconstructies met een hoge dichtheid (*in elk geval bij B55 en hoger, zoals toegepast bij boortunnels*) is afspatten het maatgevende criterium;
- Bij betonsterkten van B35 en lager (*zoals doorgaans toegepast bij zinktunnels*) is in het algemeen het afnemen van de sterkte van het wapeningsstaal maatgevend¹¹;
- Verwacht wordt dat bij betonsterkten boven B35 en bij B35 met dichtheid bevorderende toevoegingen (zoals vliegias) afspatten het maatgevende criterium is;
- Bij toepassing van beton B35 met dichtheid bevorderende toevoegingen (zoals vliegias) en bij beton met een hogere sterkteklasse dan B35 worden brandproeven gedaan met de betonsamenstelling zoals die in de praktijk zal worden toegepast en verwacht wordt dat afspatten in al deze gevallen het maatgevende criterium zal zijn.

Hittewerende bekleding dient te voldoen aan, en te zijn getest volgens, de procedure beschreven in het document '*Fire testing procedure for concrete tunnel linings*', document nummer 2008-Effectis-R0695, september 2008 [35].

In [38] is een overzicht opgenomen van voor HWB toegepaste materialen, zowel beplating als gespoten. Diverse onderzoeken naar HWB zijn in [38] ook beschreven. Ondergetekenden hebben ervoor gekozen daaruit het volgende hier op te nemen:

¹⁰ Zo staat het in [38], maar niet duidelijk is waar deze 450 °C voor beton vandaan komt. Er is voor gekozen om dit hier wel met deze kanttekening over te nemen om met name de redenen waarom 380 °C wordt aangehouden, zoals staat bij de drie bullets die eronder staan, te tonen.

¹¹ Wellicht ten overvloede wordt erop gewezen dat het hier inzichten betreft, die er waren ten tijde van het opstellen van [38] (2009). Dat dit nu niet meer geldt, zal duidelijk zijn uit het vervolg van dit rapport.

“c. Onderzoek beschadigde platen

Om het effect van beschadigde platen op de beschermende werking na te gaan werden 2 brandproeven uitgevoerd. De 1e proef betrof één plaat waarin een 7 mm diepe groef was aangebracht en één onbeschadigde plaat. Deze platen waren aangebracht op een 150 mm dikke betonplaat; deze betonplaat was 40 dagen oud en nog relatief vochtig. Tijdens de proef bleek dat de beschadigde plaat, ter plaatse van de beschadiging, reageerde als een plaat van 20mm (is 27 - 7). Na 110 minuten deed zich een incident voor; de betondekking kwam met een knal los ter plaatse van de wapening. Dit is vermoedelijk te wijten aan het relatief hoge vochtgehalte, in combinatie met de snelle temperatuur stijging.

De 2e proef betrof één plaat met een groef van 5 mm diep en een diagonale scheur en één plaat met een groef van 9 mm diep en een dwarsscheur; beide platen waren bevestigd met in totaal 6 bouten. Resultaat: de platen reageren zoals verwacht mag worden van een 5 respectievelijk 9 mm minder dikke plaat. Na circa 60 minuten ging de plaat met de dwarsscheur iets open staan waardoor de temperatuur ter plaatse iets sneller opliep. Na 105 minuten viel een deel van deze plaat in de oven. Kort daarna werd de proef beëindigd.

Conclusie: kleine beschadigingen reduceren de hittewerende werking in beperkte mate.”

en

“e. Vochtgehalte beton

Naar aanleiding van het resultaat van de brandproef van de beschadigde Promatect-plaat bevestigd op een betonplaat (zie c.), is een onderzoek ingesteld naar het afspat gedrag van 'nat' beton (beton waarvan uitdroging wordt voorkomen).

Gebleken is dat bij de gebruikte betonkwaliteit (B35) en een bekleding van 27mm Promatect tijdens de 3 uur durende proef geen afspatten optrad. Afspatten is bij de voor zinktunnels gebruikelijke betonkwaliteit (B35) voor deze omstandigheden dus niet maatgevend; volstaan kan worden met brandproeven gericht op de controle van de temperatuur aan het betonoppervlak.”

Met betrekking tot kosten is het volgende aangegeven in [38]:

“g. Kosten

Het achteraf aanbrengen van platen is duur vanwege de hoge arbeidskosten en de roestvaststalen bevestigingsmiddelen. Het vooraf in de bekisting aanbrengen van platen is veel minder arbeidsintensief en de bevestigingsmiddelen zijn een stuk goedkoper.

De kosten van het aanbrengen van spuitwerk worden voornamelijk bepaald door de arbeidskosten; het aantal aan te brengen lagen speelt hierbij ook een rol. Rekening moet worden gehouden met de extra kosten voor toezicht en controle.”

3.3.4 Eisen RWS zijn strenger dan de wettelijke eisen [37]

In Veiligheidsrichtlijnen deel C (2009) [37] van het Steunpunt Tunnelveiligheid van RWS zijn de toen geldende RWS eisen besproken. Dat was dus ten tijde dat Bouwbesluit 2003 nog van toepassing was.

Er is door RWS geadviseerd om bij onder waterwegen gelegen constructies beschermende maatregelen te nemen, waarbij het uitgangspunt is de tunnel te beschermen tegen de potentiële gevolgen van een koolwaterstofbrand volgens de RWS-kromme, waarbij de temperaturen stijgen tot ca. 1350 °C en de brandduur twee uur is. Er is in [37] op gewezen dat volgens de wettelijke eisen bij tunnels onder open water met een lengte van meer dan 250 m wettelijk is bepaald dat een uiterste grenstoestand van een hoofddraagconstructie niet mag worden overschreden bij de volgens NEN 6702 bepaalde bijzondere belastingcombinaties die kunnen optreden bij brand, gedurende 120 minuten bij nieuwbouwtunnels en 60 minuten bij bestaande tunnels. Daarmee zijn de RWS-eisen met betrekking tot brandbescherming strenger dan de wettelijke eisen. Niet alleen is de brandbelasting conform de RWS-kromme zwaarder dan die conform NEN 6702, maar er wordt, wat de bescherming tegen brand betreft, ook geen onderscheid gemaakt tussen nieuwe en bestaande tunnels [37]. Bovendien is opgemerkt dat de eisen met betrekking tot de hittewerende bekleding geen betrekking hebben op de uiterste grenstoestand.

Voor niet onder waterwegen gelegen constructies is geadviseerd om een afweging voor het wel of niet toepassen van beschermende maatregelen te maken. Er is wel ook aangegeven dat bij landtunnels (overkappingen) met een lengte van meer dan 250 m wettelijk is bepaald dat een uiterste grenstoestand van een hoofddraagconstructie niet mag worden overschreden bij de volgens NEN 6702 bepaalde bijzondere belastingcombinaties die kunnen optreden bij brand, gedurende 60 minuten bij nieuwbouwtunnels en 30 minuten bij bestaande tunnels (Regeling Bouwbesluit, art. 5.1 resp. 5.2).

In [37] is aangegeven dat in het algemeen bij viaducten, onderdoorgangen en dergelijke geen beschermende maatregelen worden getroffen omdat herstel van de (hoofd)verbinding relatief snel te realiseren is. Maar tevens is aangegeven dat het denkbaar is dat de economische belangen zo groot zijn dat bescherming gewenst is, waarbij als voorbeelden zijn genoemd de kruising van de weg met een taxibaan van Schiphol en over grote lengte overkapte wegen, zoals de overkapping A2 Leidsche Rijn bij Utrecht.

Bij rechthoekige tunnels dient volgens [37], bij toepassing van bescherming, in elk geval het plafond en het bovenste gedeelte van de wanden (drukzone) te worden beschermd. Daarbij gaat het om het beschermen van de buigzone (wapening) van het dak en de zone met hoge drukspanningen, omdat op die plaatsen de schade door brand kan resulteren in blijvende schade van de constructie of het verloren gaan van de constructie. Uit nader onderzoek is gebleken dat geen excessief afspatten op de resterende wandgedeelten (*enige schade is hier acceptabel*) plaatsvindt bij de tot dusver gebruikte betonkwaliteiten bij zinktunnels.

In [37] zijn ook brandbeschermende maatregelen besproken. Daarbij is voor het koelen door middel van een sprinklerinstallatie het volgende aangegeven:

Bij de Betuwelijn zijn de tunnels van een sprinklerinstallatie voorzien. Door middel van een proef is aangetoond dat een sprinklerinstallatie in staat is het beton zodanig te koelen dat de temperatuur op het verder onbeschermd betonoppervlak beduidend lager dan 100 °C blijft, waardoor de wapening koel blijft en geen afspatten optreedt.

Veel aandacht moet worden gegeven aan de betrouwbaarheid van het sprinklersysteem.

In principe kan met (automatische) blussystemen, die voorkomen dat een grote brand ontstaat, in feite hetzelfde worden bereikt. Bij toepassing dienen echter hoge eisen te worden gesteld aan de effectiviteit en betrouwbaarheid.

In [37] is in 2009 gesteld dat de RWS regels in grote lijnen neer komen op:

- het aantonen van de geschiktheid van het materiaal bij 1350 °C;
- het aantonen van voldoende hechting van het materiaal gedurende de brandproef (*aan de bevestiging worden tevens minimum eisen gesteld*);
- het, bij beton met hogere dichtheid dan het beton dat tot op heden bij Rijkswaterstaat gebruikt wordt voor de bouw van afgezonken verkeerstunnels, aantonen dat geen afsputten optreedt;
- het, bij beton met een dichtheid gelijk aan of lager dan de tot op heden gebruikte betonkwaliteit voor afgezonken verkeerstunnels, aantonen dat de temperatuur van het beton (en staal) niet boven de gestelde grens uitkomt.

De voorgaande opsomming is overgenomen uit [37]. Met betrekking tot de temperatuurgrenzen in het geval van spatongevoelig beton (*laatste bullet*) merken ondergetekenden op dat alleen de temperatuurgrens voor het betonstaal nog van toepassing kan zijn. Als spatongevoelig beton wordt toegepast en daarmee geen HWB, zal de betontemperatuur aan het betonoppervlak per definitie ver boven de 380 °C uitstijgen. Beter is om te spreken van de temperatuur in het beton op een afstand van bijvoorbeeld eenmaal de wapeningdiameter verwijderd van het betonstaal.

3.4 Studies en maatregelen na de ontdekking dat ROK-beton spatgevoelig is

Navolgend is een korte samenvatting gegeven van de wijze waarop, met het sinds 2015 nieuwe gegeven dat ROK-beton mogelijk wel afsput, binnen RWS is omgegaan. Dit is ontleend aan diverse RWS interne en beleidsdocumenten. Ondergetekenden realiseren zich dat dit niet volledig zal zijn, maar op basis van de ter beschikking gestelde documenten zal het naar verwachting wel een beeld geven van de aanpak die is gevolgd door RWS.

Nadat in 2015 was gepubliceerd over een onderzoek [75] waaruit naar voren kwam dat het ROK-beton mogelijk toch wel spatgevoelig is, zijn in opdracht van RWS brandproeven uitgevoerd. Toen nog niet alle proeven waren afgerond, maar al wel bleek dat de eerste resultaten ongunstig waren, zijn op 20 maart 2017 bij RWS intern de eerste bevindingen vastgelegd [78]. In het brandonderzoek onder de benaming BRAMEN [81], dat bij Efectis in 2016 was gestart en waarbij drie verschillende betonmengsels zijn onderzocht met proefstukken, die qua betonsamenstelling, afmetingen en krachterspel representatief waren voor het beton zoals dat in recente tunnels en tunnels in aanbouw was toegepast, trad bij alle twaalf onderzochte proefstukken spatten op.

De voorlopige conclusies waren onder andere dat er een risico is dat beton dat sinds ca. 2000 is toegepast in RWS objecten wel afsputgevoelig is, terwijl er bij het ontwerp van de brandbestendigheid van het object uitgegaan is van niet-afspatgevoelig beton en dat tunnels die nog moeten worden opengesteld mogelijk op basis van deze resultaten geen openstellingsvergunning zouden kunnen krijgen. In [78] is ingegaan op de benodigde communicatie over de nieuwe informatie, met name ook richting projecten die recent waren aanbesteed of waarbij die aanbesteding liep.

Volgens [78] waren de recente inzichten over het functioneren van HWB ook niet altijd gunstig. Verder was het vermoeden dat de oorzaak van de afspatgevoeligheid lag in een wijziging van de eigenschappen van het beton, hetgeen zou worden versterkt met bevindingen van Efectis, die 'ROK-beton' juist vanwege de afspatongevoeligheid vaak als drager van proefstukken van derden gebruikte bij onderzoek naar HWB. In [78] is gewezen op het feit dat ook op andere aspecten van beton, bijvoorbeeld autogene krimp, in de voorgaande 10-15 jaar een verandering in het gedrag was waargenomen zonder bekende oorzaak. Het vermoeden was dat de oorzaak van de gewijzigde afspatgevoeligheid in één van de componenten van het beton ligt, waarbij werd gedacht aan (kleine) veranderingen in samenstelling of maalfijnheid van het cement die nog steeds passen binnen de normen, de receptuur en de marges voor de constructieve eigenschappen, maar die het gedrag van het betonmengsel beïnvloeden. En verder was er een sterk vermoeden dat er tussen het jaar 2000 en 2016, wellicht rond 2008, een omslagpunt is in de afspatgevoeligheid van door RWS toegepast beton en daarmee tussen tunnels die afdoende beschermd zijn tegen brand en tunnels die niet afdoende beschermd zijn. Nader onderzoek, o.a. met in-situ brandproeven aan RWS objecten, werd geadviseerd.

Voor bestaande tunnels was de volgende denklijn naar voren gebracht. Gezien de lage frequentie van optreden van grote branden (brandlast ca. 200-300 MW) is acuut ingrijpen statistisch gezien niet aan de orde. Als het omslagpunt m.b.t. brandbescherming beter bekend is, kan worden besloten hoe daarmee moet worden omgegaan. Voor de tunnel in aanbouw (Gaasperdammerweg) zou op korte termijn met de opdrachtnemer moeten worden overlegd en zou de nieuwe informatie moeten worden gedeeld.

Op 8 augustus 2017 is de Tweede Kamer geïnformeerd door de Minister van Infrastructuur en Milieu [86] over de verminderde brandwerendheid van beton dat in een viertal tunnels is gebruikt. Aangegeven is dat de eerste bevindingen aanleiding geven tot het doen van nader onderzoek, het maken van operationele afspraken en het treffen van aanvullende maatregelen (*opgesomd in een bijlage bij [86]*) op korte termijn opdat de hulpdiensten (*onder andere de brandweer*) hun werk bij een brand veilig kunnen blijven doen. En dat de wegtunnels veilig zijn voor de weggebruikers. Op basis van de conclusies van Rijkswaterstaat en het gevraagde advies van de Veiligheidsbeambte Wegtunnels [84] is in gezamenlijkheid door Rijkswaterstaat, gemeente en hulpdiensten, per tunnel een set van operationele maatregelen uitgewerkt en overeengekomen. Ook geplande vervolgonderzoeken zijn toegelicht.

In een interne memo van RWS [88], d.d. 1 september 2017, is een juridische analyse opgenomen betreffende brandveiligheid van tunnels. Daartoe is onder andere het Bouwbesluit 2012 [51] op dat punt geanalyseerd, waarbij het onderscheid in enerzijds functionele eisen en anderzijds prestatie eisen is benoemd. De functionele eisen beogen dat gebruikers van een tunnel de tunnel uit kunnen komen voor deze instort als er brand is, terwijl daarnaast de brandweer de gelegenheid moet hebben mensen te helpen de tunnel te verlaten. Ook is aangegeven dat het Bouwbesluit de mogelijkheid biedt om in plaats van te voldoen aan de prestatie-eisen een andere gelijkwaardige oplossing toe te passen. Die gelijkwaardige oplossing moet dan invulling geven aan de functionele eis en het is aan het bevoegd gezag om akkoord te gaan met een gelijkwaardige oplossing.

In [88] is er op gewezen dat, voor zover bekend, bij de betreffende tunnels de tijd om te vluchten korter is dan de bezwijktijd, hetgeen betekent dat wel kan worden voldaan aan de eis dat personen op tijd de tunnel kunnen verlaten en waarvan gebruik kan worden gemaakt voor de tijdelijke oplossing, totdat maatregelen getroffen kunnen worden om de tunnels weer in overeenstemming te maken met de prestatie-eisen.

De consequenties van niet voldoen aan Bouwbesluit 2012 kan betekenen dat een bevoegd gezag (gemeente) voor een nieuwe tunnel de benodigde openstellingsvergunning niet verleent of voor een bestaande tunnel de openstellingsvergunning intrekt. In de praktijk is dit nog nooit voorgekomen, omdat de risico's van het sluiten van een tunnel over het algemeen groter zijn dan van het openhouden. Omléidingen veroorzaken meestal meer verkeersslachtoffers. Voor de betreffende vier tunnels heeft de Veiligheidsbeambte een advies uitgebracht [84]. Het werd van groot belang geacht om hierover in overleg te treden met de verschillende partijen en gewezen is op de mogelijkheid om te zoeken naar een gelijkwaardige oplossing.

Op 4 oktober 2017 informeert de directeur generaal RWS, drs. [REDACTED], de Minister over het lopende onderzoek naar mogelijke herstelmaatregelen bij de vier in beeld zijnde tunnels en het onderzoek naar gevolgen voor wegtunnels in aanbouw, en over de contacten met de bevoegde gezagen [92]. Op 30 november 2017 is de Minister nader geïnformeerd over het onderzoek, de planning en communicatie [93], waarbij met betrekking tot de vier bestaande tunnels gebouwd na 2008, is gesteld:

“De vier tunnels zijn nog steeds veilig te gebruiken door weggebruikers: mocht er een extreem grote brand ontstaan dan is er voldoende tijd voor weggebruikers om te vluchten naar een veilige locatie. Er zijn ook operationele afspraken gemaakt per tunnel opdat de hulpdiensten (o.a. brandweer) hun werk veilig kunnen blijven doen in geval van een extreem grote brand.”

In het kader van externe kwaliteitsborging is aangegeven dat de onafhankelijke Veiligheidsbeambte Rijkswegtunnels bij het plan van aanpak en de onderzoeken wordt betrokken en dat in een eerdere fase twee hoogleraren¹² van de TU Delft de analyse van de brandproeven en de uitgangspunten van de risicoanalyses van een second opinion hebben voorzien.

Op 22 februari 2018 is in een intern RWS document [94] de historie, achtergrond en bedoeling van de RWS aanpak voor het beschermen van constructies tegen brand beschreven met als doel om vanuit eenzelfde filosofie de verschillende situaties met betrekking tot brandwerendheid te kunnen benaderen. Uit dit document zijn navolgend twee grotere delen integraal overgenomen.

“Historie en ontwikkeling van eisen aan brandwerendheid

De oorsprong van het beschermen van constructies tegen brand gaat terug tot 1974. Dit kwam in een stroomversnelling door de vrachtwagenbrand in de Velsertunnel (1978). Daarmee werd duidelijk dat het risico van brandschade aan de tunnel niet alleen verbonden is aan het bulkvervoer van brandbare gevaarlijke stoffen (zoals benzine en diesel) maar dat ook branden van conventionele vrachtwagenladingen (die in iedere tunnel zijn toegestaan) grote schade kunnen veroorzaken. Onderzoek door TNO wees uit dat het aanbrengen van een bescherming tegen brand economisch ook kosteneffectief is in tunnels waar geen gevaarlijke stoffen zijn toegelaten. “Economisch” gaat zowel over de herstelkosten van het kunstwerk als over kosten van niet-beschikbaarheid van de verbinding (maatschappelijke kosten). Voor 1981 werden bulktransporten van (brandbare) gevaarlijke stoffen niet toegelaten in tunnels en was het beschermen van de constructie tegen brand ook minder nodig. In 1981 werd besloten om tunnels te voorzien van hittewerende bekleding. Bij tunnels

¹² Ondergetekende [REDACTED] was één van de twee Delftse hoogleraren.

die adequaat tegen brand werden beschermd was er vervolgens geen bezwaar meer bij RWS om bulktransporten van gevaarlijke brandbare vloeistoffen (benzine, diesel) toe te laten (bulktransporten van brandbare en toxische gassen met explosiegevaar, zoals LPG, bleven verboden, omdat het verloren gaan van de tunnel door een explosie niet als risico wordt geaccepteerd). Toen betrof dit slechts oeververbindingen (kruisingen van rivieren en kanalen). Rond 2000 kwamen daar geboorde tunnels en zogenaamde landtunnels bij. Deze nieuwe tunnels riepen ook nieuwe vragen rondom brandwerendheid op. Rond deze tijd kwam ook het nieuwe fenomeen “afspatten” bij RWS in beeld. In het BRAWAT onderzoeksprogramma is samen met de bouw van de 2e Beneluxtunnel een aantal jaar onderzoek gedaan naar de brandbestendigheid van gespoten hittewerende bekleding, hittewerende platen, afspatongevoelig beton en afspatongevoelig beton met PP-vezels. De kennis vanuit deze brandonderzoeken heeft samen met ontwikkeling om het ontwerp van tunnels uit te gaan besteden tot de huidige eisen van RWS over brandwerendheid geleid. Door de toenemende aandacht voor tunnelveiligheid na de grote tunnelbranden in de Mont-Blanc en Gothard tunnel is een deel van de bij RWS gangbare eisen ook vastgelegd in landelijke wet- en regelgeving.

Het uitgangspunt van de RWS regelgeving is tussen 1981 en 2017 gelijk gebleven. Dit is dat een verkeerstunnel na een calamiteit die logischerwijze voor kan komen in de tunnel moet kunnen worden hersteld om binnen redelijke tijd weer opengesteld te kunnen worden voor het verkeer. De concrete eisen die vanuit dit uitgangspunt gesteld zijn, zijn in de loop der tijd wel gewijzigd. In de praktijk kunnen er veel verschillende soorten branden optreden. Bij RWS maken we gebruik van de RWS-brandkromme voor gesloten constructiedelen en de hydrocarbon-curve voor delen van de constructie in de open lucht om een groot deel van deze branden af te dekken. Door een constructie voor 2 uur tegen deze brandkrommen te beschermen wordt de constructie geacht tegen verreweg de meeste voorkomende branden beschermd te zijn. Aanvullend hierop worden er in wet- en regelgeving diverse eisen gesteld aan de veiligheidsvoorzieningen van tunnels en tunnelvormige constructies. Voor tunnels langer dan 250 meter geldt naast het Bouwbesluit de Wet Aanvullende Regels Veiligheid Wegtunnels (Warvw) en de bijbehorende Rarvw, voor kortere tunnels en verdiepte liggingen gelden alleen de eisen van het Bouwbesluit. De wet- en regelgeving is door RWS doorvertaald in eigen kaders: De Landelijke Tunnelstandaard (LTS) voor wegtunnels langer dan 250m en het Kader Veiligheidsvoorzieningen Verdiepte Wegen, Korte Overkappingen en gedeeltelijk gesloten constructies voor kortere tunnels en andere tunnelachtige objecten buiten de scope van de Warvw.

Dat een constructie niet verloren mag gaan bij brand is een afwijking van de praktijk bij andere sectoren, bijvoorbeeld woning en utiliteitsbouw. In deze sectoren is het gebruikelijk dat een constructie door de brand zodanig beschadigd raakt dat deze na de brand alsnog gesloopt moet worden, ook als de constructie door de brand zelf niet ingestort is. Het slopen van een tunnelconstructie na een brand is echter niet altijd mogelijk. Als we kijken naar de locatie van de grote rivierkruisingen in Nederland wordt duidelijk dat ook het bouwen van een nieuwe tunnel naast een bestaande tunnel vaak niet mogelijk is, nog afgezien van de 10-15 jaar die voor de realisatie van zo'n project nodig is. Daarom hanteert RWS het principe dat een tunnel na een grote brand in relatief beperkte tijd hersteld moet kunnen worden. Dit kan voor

landtunnels resulteren in een andere bescherming dan bij onderwatertunnels, aangezien er hier meer mogelijkheden tot herstel zijn.”

“1 uur of 2 uur brandwerendheid bij landtunnels en verdiepte liggingen

Het uitgangspunt was vanaf het moment dat brandwerendheid een issue werd, dat bij tunnels in rivierkruisingen het dak en de bovenste meter van de wanden tegen hoge temperaturen moesten worden beschermd en dat in de wanden, (waar bij afgezonden tunnels een drukspanning aanwezig is) een bepaald deel van de beton en wapening verloren mag gaan zonder dat de constructie daardoor onherstelbaar beschadigd zou raken. Deze filosofie gaat echter alleen op voor rivierkruisingen, gezien de hoge waterdruk door de diepe ligging.

Met de komst van landtunnels heeft het principe van makkelijk kunnen herstellen andere invullingen gekregen. Als het dak van een boven het grondwater gelegen landtunnel lokaal instort is er niet de gevolgschade van het vollopen van de tunnel. Een dak van een landtunnelmoot kan in beperkte tijd weer gerepareerd worden. Daarom is het voor een landtunnel acceptabel als delen die makkelijk repareerbaar zijn slechts 1 uur tegen brand beschermd worden. In de praktijk betekent dit meestal dat de grond(water)kerende tunnelwanden van een landtunnel wel 2 uur tegen brand beschermd zijn en het boven grondwater gelegen tunneldak van een landtunnel op de plekken waar geen bijzondere bovenliggende functie is (kruisend spoor, metro, weg, dienstgebouw, etc.) slechts 1 uur.

Ook zijdelings, gedeeltelijk en korte gesloten constructies met een hoge economische waarde (bijvoorbeeld een verdiepte ligging of een aquaduct) moeten na een grote brand in relatief beperkte tijd hersteld kunnen worden. In de meeste gevallen zal de constructie daarvoor 2 uur tegen een brand beschermd moeten worden, zeker als het constructieonderdeel onder (grond) water ligt. Slechts in specifieke situaties zal voor snel herstel na een grote brand ook volstaan kunnen worden met een bescherming van 1 uur.

Er zijn ook diverse objecten waarbij specifiek andere keuzes gemaakt zijn dan hierboven beschreven. In de ROK is opgenomen dat tunnels 2 uur beschermd moeten worden tegen brand, tenzij daar project specifiek andere eisen voor zijn opgenomen.”

Op 13 december 2018 zijn in een intern document van RWS [104] de resultaten van een vergelijking van de eisen m.b.t. brandwerendheid in het Bouwbesluit 2012 en de RWS-richtlijnen beschreven. De minister had aan de Tweede Kamer aangegeven dat er met de herstelmaatregelen weer zal worden voldaan aan de wettelijke normen voor brandwerendheid en aan de openstellingsvergunning. Echter, bij het opstellen van het herstelplan voor de KWA was de vraag opgekomen wanneer er precies is voldaan aan de voorwaarden in de vergunning. Niet alle voorwaarden in de vergunning zijn scherp gedefinieerd en er was onzekerheid of deze voorwaarden in het licht van het Bouwbesluit 2012 anders gelezen kunnen worden dan in het licht van de interne RWS-richtlijnen. Achtereenvolgens is aangegeven welke eisen voortvloeien uit het Bouwbesluit 2012 en de openstellingsvergunning en welke eisen in de RWS-richtlijnen worden gesteld. Ook is aangegeven op grond van welke voorschriften het bevoegd gezag kan optreden.

Ondertussen was met betrekking tot de Gaasperdammertunnel en het begrip “instorten” in mei 2017 ook de mening van de landsadvocaat ingewonnen [96]. Die was van mening dat volgens het Bouwbesluit 2012 in de tunnel geen enkele vorm van bezwijken mag optreden (zie paragraaf 2.5).

In [104] is door RWS met betrekking tot het Bouwbesluit 2012 het volgende aangegeven:

“De strekking van de norm is dus dat het overschrijden van “een uiterste grenstoestand”, bepaald volgens een voorgeschreven methodiek, niet binnen een bepaalde tijd mag optreden (door GPO “rekenkundig bezwijken” genoemd). Daarbij is het niet zo dat het overschrijden van de uiterste grenstoestand ook direct betekent dat de tunnel fysiek instort. De tijdsduur van het bezwijken is dus niet de tijdsduur van het fysieke instorten. De norm strekt er daarnaast niet toe dat schade door brand zo veel mogelijk wordt voorkomen. Vanuit het Bouwbesluit 2012 is het dus toegestaan dat de tunnel beschadigd wordt, zolang de tunnel maar niet rekenkundig bezwijkt binnen de gestelde tijd.”

Er is in [104] op gewezen dat in de openstellingsvergunning voor de eisen omtrent brandwerendheid de formulering “waarborgen van de constructieve integriteit” wordt gebruikt. Met betrekking tot de openstellingsvergunning is gesteld dat de eisen in het Bouwbesluit 2012 en de RWS-richtlijnen in beginsel niet leiden tot een verschillende uitleg van de voorwaarden in de vergunning. Volgens de RWS-richtlijnen is een beperkte mate van afsputten binnen 120 minuten toegestaan (*afspatdiepte niet groter dan 20 mm en de maximale afspatdiepte op 4 meetpunten niet meer dan 35 mm bedraagt*). Bij die beperkte mate van afsputten is er nog geen sprake van rekenkundig bezwijken. Indien er binnen de tijdsduur opgenomen in de openstellingsvergunning verdergaand afsputgedrag optreedt, is er sprake van rekenkundig bezwijken.

Samengevat kan worden geconcludeerd dat RWS, nadat bekend was geworden dat ROK-beton kan afsputten, vele studies in gang heeft gezet met als doel inzicht te krijgen in het gedrag van het beton en de tunnels bij brand en de technische en juridische mogelijkheden voor oplossingen. Voor zover ondergetekenden hebben begrepen, was de enige oplossing die RWS tot voor kort in dat opzicht zag, het aanbrengen van HWB in de drie landtunnels. Een RWS document waarin dat is vastgelegd, is niet bij ondergetekenden bekend. Zoals in het onderhavige rapport is toegelicht, riep dat bij minimaal twee gemeente de vraag op of er wellicht alternatieven zijn. Dat heeft geleid tot de onderhavige studie.

4 Aanpak van de studie naar alternatieven voor HWB

Voor de onderhavige studie naar alternatieven voor het aanbrengen van HWB in de drie bestaande landtunnels hebben ondergetekenden gemeend dat het goed is om allereerst in een zo breed mogelijk perspectief zoveel mogelijk informatie te verzamelen en bestuderen over brandwerendheid van de constructie van tunnels. Dit betreft zaken zoals:

- Hoe is in het verleden omgegaan met brandwerendheid bij tunnels?
- Wat is bekend over het gedrag van tunnels bij brand?
- Wat is bekend over spatten van beton?
- Hoe bezwijkt een tunnel bij brand?
- Wat was de basis voor de definitie van spatongevoelig beton?
- Wat is gedaan, nadat bekend was geworden dat het ROK-beton toch niet spatongevoelig bleek te zijn?

Ondergetekenden realiseren zich dat er zeker meer informatie zal zijn dan wat is gebruikt voor de onderhavige verkennende studie, maar veronderstellen dat met de toch al grote hoeveelheid beschikbare informatie een voldoende beeld is verkregen over de stand van zaken rond brandwerendheid van tunnels. Er is voor gekozen om de, naar de mening van ondergetekenden relevante, informatie voor de onderhavige studie vast te leggen in dit rapport. Vanzelfsprekend was het daarbij nodig op velerlei vlak keuzes te maken over wat wel en wat niet opnemen.

Het is voor ondergetekenden duidelijk dat er feitelijk slechts één oplossing mogelijk is als, zoals tot op heden is gedaan, vast wordt gehouden aan de prestatie eisen, zoals die door het Bouwbesluit en in de RWS Richtlijnen zijn gedefinieerd. Die oplossing is het toepassen van passieve maatregelen, in het bijzonder het hittewerend bekleden van de tunnels. Voor mogelijke alternatieven moet worden gedacht aan oplossingen waarbij dus de huidige prestatie eisen in de genoemde documenten worden losgelaten en een andere invulling van de functionele eisen wordt gezocht. Hoe dan ook zal dat betekenen dat voor een brand wordt geaccepteerd dat de constructie constructieve schade kan oplopen. De vraag is echter welke constructieve schade dat kan zijn en wat dat betekent voor zowel de veiligheid als de reparerbaarheid van de tunnel.

RWS heeft al geconcludeerd dat de drie landtunnels in de huidige situatie met betrekking tot veiligheid voldoen (*zie ook hoofdstuk 5*). Het gaat dan dus alleen nog maar om de reparerbaarheid en de gepaard gaande overlast en maatschappelijke kosten. Met name het laatste is van belang, want theoretisch en technisch is iedere tunnel na een brand te repareren, ook al is in de ergste gevallen misschien zelfs sprake van een gedeeltelijk herbouwen.

Voorgaand in dit rapport is, in navolging van wat in de Veiligheidsrichtlijn deel C [37] was aangegeven, de vergelijking met een verzekering getrokken. Echter, om voor de brandwerendheid van tunnels een afweging te kunnen maken ten aanzien van het al dan niet nemen van een verzekering (*bekleden met HWB*) of het dragen van de schade, mocht zich een brand voordoen, is het wel wenselijk om enig inzicht te hebben in zaken zoals:

- Wat is de kans dat een brand in de tunnel optreedt?
- Welke constructieve schade kan dan optreden?
- Welke kosten en welke overlast is daarmee gemoeid?

- Maar ook, wat zijn de kosten van aanbrengen HWB?

Oftewel, kortgezegd, welke risico's aanvaard je als je geen HWB aanbrengt. Opgemerkt moet worden dat er naast de keuze aanbrengen HWB of de huidige situatie laten zoals die is, ook nog wel andere maatregelen te treffen zijn. In de onderhavige studie zijn die ook meegenomen. Echter, met geen van die maatregelen, of een combinatie daarvan (zonder HWB), kan worden bereikt wat met HWB kan worden bereikt en zullen de functionele eisen in de regelgevingsdocumenten anders moeten worden ingevuld dan via de huidige prestatie eisen in het Bouwbesluit en de RWS Richtlijnen.

Naast het bij elkaar brengen van alle relevante informatie over brandwerendheid van tunnels, is in de onderhavige studie een MKBA (Maatschappelijk Kosten Baten Analyse) opgesteld voor diverse alternatieven voor de aanpak van de brandwerendheid van de drie landtunnels. Dat is gedaan door achtereenvolgens de volgende stappen uit te voeren:

- Maken van een inschatting van het brandgevaar (de relatie kans-intensiteit van tunnelbranden) en het effect van maatregelen daarop (*hoofdstukken 7, 8 en 9*);

Een eenvoudig eendimensionaal model is opgesteld, waarmee is bepaald wat de kansen zijn op het overschrijden van een brand met een bepaalde intensiteit (HRR-klasse).

- Het leggen van een relatie tussen verschillende brandintensiteiten en de impact op de tunnelconstructie (*hoofdstuk 10*);

Doel daarbij is om te komen tot kansen van optreden van een bepaalde brandintensiteit, afhankelijk van eventueel genomen brandwerende maatregelen.

- Het definiëren van schade klassen en leggen relaties tussen brandintensiteit en schadeklassen;

Mede op basis van kennis over tunnelbranden maken van onderscheid tussen verschillende mate van constructieve schade en die koppelen aan de gedefinieerde brandintensiteiten.

- Maken van een MKBA voor brandwerendheid van tunnels;

Zo goed mogelijk (binnen het tijdschema van de onderhavige studie) alle parameters die de kosten van aanbrengen van maatregelen, onderhoud, hertel van schade, enz., kwantificeren (uitdrukken in euro's) en de verschillende opties qua kosten doorrekenen.

Ondergetekenden realiseren zich dat op vrijwel alle onderdelen keuzes gemaakt moesten worden, die anderen wellicht (net iets) anders gemaakt zouden hebben. Ook zullen bepaalde cijfers op basis van nieuwe informatie kunnen worden verbeterd of nader onderbouwd. Tevens kan het model complexer worden gemaakt. Dat realiserende hebben ondergetekenden gemeend er goed aan te doen deze exercitie met de genoemde kanttekeningen, c.q. beperkingen, een keer in zijn totaliteit te doorlopen en te bezien wat eruit komt. Vervolgens kan het zijn dat er al enig, of zelfs voldoende inzicht, voor de te nemen keuzes uit naar voren komt of dat moet worden geconstateerd dat een dergelijk exercitie vooralsnog onvoldoende oplevert. En natuurlijk kan het ook zo zijn dat de methodiek als geschikt wordt

gezien, maar dat het voor bepaalde onderdelen noodzakelijk wordt geacht de onderliggende informatie verder te preciseren of het model op onderdelen te verfijnen.

5 Personenveiligheid

5.1 Algemeen

De onderhavige studie is met name gericht op het aspect schade aan de tunnelconstructie na een brand (*“asset protection”*), omdat in eerdere analyses van RWS al is vastgesteld dat de vier tunnels, gebouwd na 2008, met betrekking tot personenveiligheid nog steeds voldoen. Echter, zoals in paragraaf 6.2 van het Plan van Aanpak is aangegeven, heeft RWS aan ondergetekenden gevraagd de door RWS uitgevoerde analyse [82] omtrent personenveiligheid ook te beoordelen. Daartoe is de basisanalyse van RWS beoordeeld (paragraaf 5.2). Ondergetekenden hebben voor KWA-tunnel een bemerking, welke in paragraaf 5.3 is besproken.

5.2 Basisanalyse door RWS

5.2.1 Uitgangspunten [82]

De veiligheid van de tunnels wordt in eerste instantie nagegaan door het tijdstip van bezwijken te vergelijken met de vereiste vluchtduur.

Het tijdstip van bezwijken van de tunnel wordt bepaald uitgaande van (zie bijlage 2 van [82]):

- De RWS nominale brandkromme
- Bezwijken gedefinieerd door:
 - *Op trek belaste constructiedelen falen als wapening warmer wordt dan 250 °C, oftewel als de dekkingsdikte is afgespat;*
 - *Op druk belaste constructiedelen falen als de helft van de betondoorsnede is afgespat.*
- Het effect (snelheid) van afsputten wordt bepaald conform proefresultaten

De vereiste vluchttijd wordt bepaald uitgaande van:

- 10 min tussen detectie en bereiken vluchtdeur
- Een maximale vluchtafstand (lengte van de tunnel)
- Een vluchtsnelheid van 50 m/min (3 km/u)

Het vluchten heeft enkel betrekking op zelfredzamen. Wie de tunnel niet zelfstandig kan verlaten wordt geacht te overlijden. Omdat in de QRA tunnels [59] dezelfde aanname gevolgd wordt [82], heeft afsputten in deze benadering geen invloed op het risico voor niet-zelfredzamen.

5.2.2 Evaluatie uitgangspunten

De uitgangspunten kunnen beschouwd worden als een ‘reasonable worst case’ benadering.

Het tijdstip van bezwijken kan beschouwd worden als algemeen conservatief:

- De RWS nominale brandkromme wordt beschouwd als een intense brandkromme, en de frequentie van branden met een grotere HRR wordt laag ingeschat (zie hoofdstuk 8);
- De criteria voor bezwijken verwaarlozen mogelijke reservecapaciteit van de constructie (zowel in de tunneldoorsnede zelf, als met betrekking tot eventuele herverdeling in de langsrichting);
- Afsputten treedt niet uniform op. De aangenomen afsputsnelheden en tijdstippen van falen (loskomen) van hittewerende bekleding zijn conservatief (hoofdstuk 11).

De bepaling van de vereiste vluchttijd kan als conservatief worden aangemerkt:

- De tijd tussen detectie en bereiken vluchtdeur is ruim, uitgaand van vluchtdeuren standaard op 100 m afstand hart-op-hart;
- De maximale vluchtafstand is niet steeds van toepassing;
- De vluchtsnelheid is vrij laag, uitgaand van een veilige (rookvrije) vluchtweg.

Uit bovenstaande wordt geconcludeerd dat er inderdaad geen belangrijk bijkomend risico voor de personenveiligheid van gebruikers is indien voor de tunnel de berekende vereiste vluchttijd kleiner is dan het berekend tijdstip van bezwijken.

Het niet in rekening brengen van het bijkomend risico van niet-zelfredzamen is een mogelijk punt van kritiek. Op basis van de analyse [82] zou men incorrect kunnen concluderen dat de afspatgevoeligheid geen bijkomend risico induceert voor niet-zelfredzamen. Dit is een gevolg van conservatieve uitgangspunten in de (standaard) QRA tunnels. Het is correct dat dit uitgangspunt geen invloed heeft op de algemene eis van de WARVW. Waar identificeerbare personen, zoals niet-zelfredzamen, potentieel een hoger risico dragen, is het evenwel aan te raden om de aanvaardbaarheid afzonderlijk te bevestigen.

5.2.3 Resultaten

De resultaten van de berekening worden weergegeven in *Figuur 4*. Op basis van *Figuur 4* kan enkel voor de Koning Willem-Alexander tunnel niet onmiddellijk besloten worden dat aan de vereisten voor personenveiligheid voldaan is. Deze tunnel wordt in [82] nader onderzocht met betrekking tot de aanvaardbaarheid van het personenrisico (*zie afzonderlijke bespreking hieronder*).

Naam [-]	$T_{norm,wet}$ [min]	l_{tunnel} [meter]	$t_{instort}$ [min]	$t_{bezwijkvlr}$ [min]	$t_{max,vluchter}$ [min]
Salland-Twente tunnel	60	493	22	22	20
Ketheltunnel	60	2000	22	>120	50
Koning Willem-Alexander tunnel boven	60	1700	27	27	44
Koning Willem-Alexander tunnel onder	60	2400	49	49	58
2e Coentunnel	120	750	43	43	25

Tabel 1: Per tunnel de norm uit de wet ($T_{norm,wet}$), de lengte (l_{tunnel}), de tijd van het eerste bezwijken van delen van de tunnel ($t_{instort}$), de tijd tot het bezwijken van de veilige vluchtroute ($t_{bezwijkvlr}$) en de tijd totdat de laatste vluchter de tunnel verlaten heeft ($t_{max,vluchter}$).

Figuur 4 Resultaten van veiligheidsbeschouwingen voor de vier tunnels (fragment uit [82]).

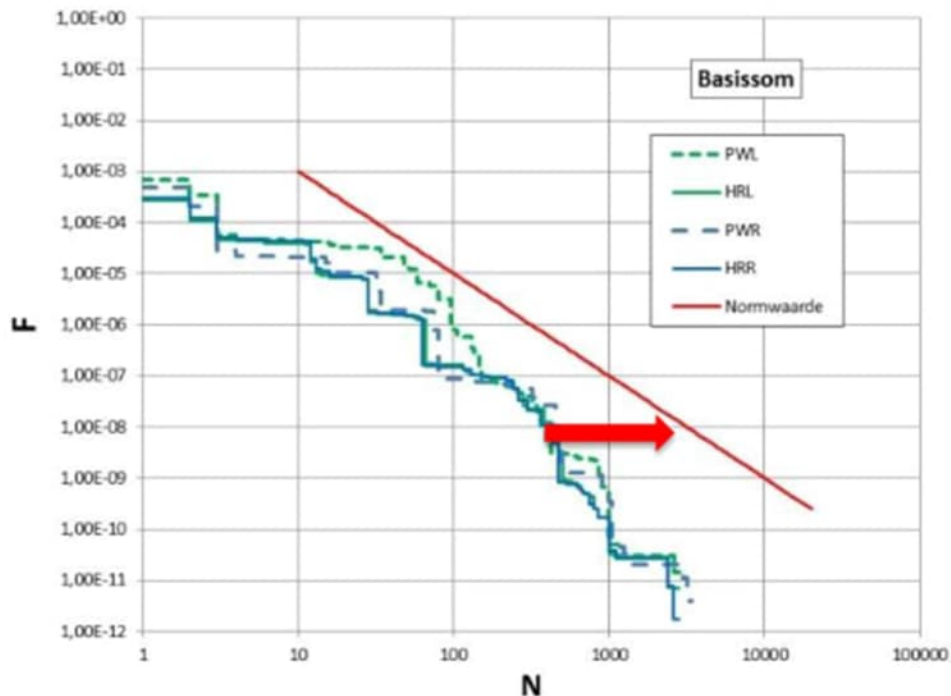
5.3 Detailanalyse Koning Willem-Alexander tunnel

5.3.1 Detailanalyse [82]

Voor de Koning Willem-Alexander tunnel wordt uitgegaan van een verhoogd risico voor weggebruikers omwille van de afspatgevoeligheid van beton. Er wordt nagegaan of dit verhoogd risico aanvaardbaar is met het oog op de limiet voor het groepsrisico zoals vervat in de WARVW.

Het effect op het groepsrisico wordt vereenvoudigend bepaald. Voor de bovenste tunnel is de berekende bezwijktijd 27 minuten, voor de onderste tunnel is dit 49 minuten. In deze tijd kunnen vluchters volgens de aannames in 5.2 een afstand afleggen van respectievelijk 850 m en 1950 m. Vluchters die zich bij de start van het vluchten verder van de uitgang bevinden worden geacht te overlijden.

Wanneer uitgegaan wordt van file in de tunnel, dan is het aantal slachtoffers (op basis van bovenstaande vereenvoudigingen) respectievelijk 383 en 162 personen [82]. Vergelijking van de bestaande FN curves (resultaat QRA tunnels) voor de Koning Willem-Alexandertunnel (Figuur 5) toont aan dat er een marge is om dit aantal slachtoffers te aanvaarden, indien dit aantal bijkomende slachtoffers optreedt voor scenario's waarbij N origineel groter was dan 100, respectievelijk 50, personen. Aangezien de situatie file+brand zeldzaam is, is hieraan voldaan [82].



Figuur 5 Resultaten van veiligheidsbeschouwingen voor de vier tunnels (fragment uit [82]).

5.3.2 Evaluatie

De initiële uitgangspunten van de detailanalyse Koning Willem-Alexander tunnel kunnen onderschreven worden. Door middel van algemeen conservatieve aannames (de aannames van 5.2 en het uitgaan van file in de tunnel) wordt redelijkerwijs een bovengrens van het bijkomend aantal slachtoffers bepaald.

Indien het optellen van deze bijkomende slachtoffers bij het bestaande FN diagram (voor alle scenario's) de limiet van de WARVW niet overschrijdt, dan is voldoende aangetoond dat de vooropgestelde grens niet is overschreden.

Dit is echter niet de werkwijze die in [82] gevolgd wordt. In [82] wordt gesteld dat het bijkomend aantal slachtoffers toelaatbaar is, gegeven de lage waarschijnlijkheid van de aanname 'filevorming'. Hiermee is bijgevolg voldoende aangetoond dat het scenario brand + filevorming aan de WARVW voldoet. Hiermee is echter niet aangetoond dat de WARVW limiet niet overschreden is voor andere situaties zonder filevorming (meer frequent voorkomende branden zonder filevorming).

Anders uitgedrukt: filevorming kan inderdaad als conservatieve en vereenvoudigende aanname meegenomen worden in de berekening, maar dan mag het feit van filevorming achteraf niet in rekening gebracht worden bij het bepalen van de aanvaardbaarheid.

5.3.3 Mogelijke verdere analyse

De beperking die hiervoor is geïdentificeerd, impliceert niet dat de tunnel niet aan de WARVW limiet voldoet. Bijkomende analyses kunnen uitgevoerd worden, zoals bijvoorbeeld:

- Meer gedetailleerde benadering van de beschikbare vluchttijd (de tijd tot “instorten”);
- Meer gedetailleerde benadering van de vereiste vluchttijd;
- Evaluatie van het effect van afsputten op de verschillende scenario's binnen de QRA tunnels. Deze herrekende scenario's kunnen dan uitgezet worden in *Figuur 5*. In eerste instantie kan dit gebeuren met dezelfde uitgangspunten als vermeld in 5.2. Het is goed mogelijk dat de Koning Willem-Alexandertunnel met deze conservatieve vereenvoudigde benaderingen toch zal voldoen.

De QRA tunnels zoals toegepast voor de Koning Willem-Alexandertunnel is niet beschikbaar binnen de huidige evaluatie. Het is daarom niet eenvoudig mogelijk om het effect van de “versnelde degradatie” voor ieder van de scenario's te bepalen.

Met betrekking tot de mogelijke analyse van een meer gedetailleerde benadering van de beschikbare vluchttijd en het conservatief zijn van het aangehouden tijdstip van bezwijken (zie paragraaf 5.2.2) kan worden gewezen op hetgeen navolgend in dit rapport is beschreven over het bezwijken van een tunnel. Het afsputten van de dekking bij een brandhaard zal niet direct leiden tot bezwijken van de tunnelconstructie ter plaatse van de brandhaard en als de tunnelconstructie ter plaatse van de brandhaard bezwijkt, zal dat nog niet direct leiden tot bezwijken van de tunnel op enige afstand van de brandhaard (in lengterichting gezien). Dit betekent dat het vergelijken van de tijd die de vluchter nodig heeft om de uitgang van de tunnel te bereiken met de aangehouden tijd van bezwijken van de tunnel zeer conservatief kan zijn. Ter illustratie, als de brandhaard zich op 800 m vanaf de tunnelingang bevindt, en op het moment dat ter plaatse van de brandhaard de dekking afsput en/of de tunnel bezwijkt de vluchter reeds op 100 m van de ingang is, dan is er geen reden om aan te nemen dat die persoon zal overlijden. In dit licht kan er ook nog op worden gewezen dat:

- de vluchters zich veelal bevinden in het middentunnelkanaal of de ondersteunende buis;
- bij aanwezigheid van een filemanagementsysteem de kans op een file, en daarmee de kans op zeer ver uitstreckende brand, beperkt is;
- er bij de vier tunnels van na 2008 beheersmaatregelen zijn getroffen om de veiligheid van gebruiker en hulpverlener te borgen [84].

6 Risicoprofiel tunnel

6.1 Concept risicoprofiel

Het optreden van brand in een tunnel is een onzeker gebeuren en kan aanleiding geven tot een groot aantal gevolgen met verschillende ernst. Welke scenario's zich tijdens de levensduur van de tunnel zullen voordoen is op voorhand niet met zekerheid te bepalen. Brand in een tunnel gaat immers gepaard met een groot aantal onzekerheden. Deze onzekerheden hebben onder meer betrekking op de intensiteit van de brand, de beschikbaarheid van actieve maatregelen zoals sprinklers, de verkeersintensiteit in de tunnel, en de mate van afspatgevoeligheid van het beton.

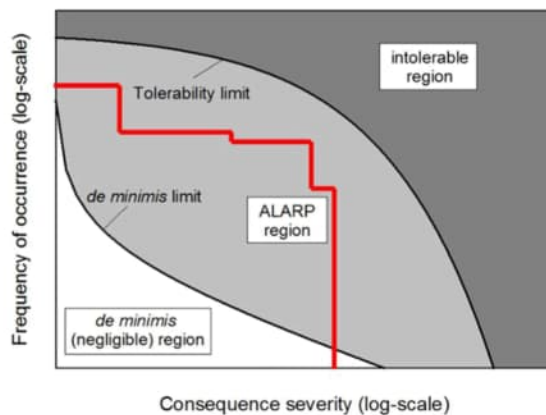
Het is duidelijk dat de brand van een kleine personenauto andere gevolgen heeft voor de veiligheid van mensen en de schade aan de tunnel dan de brand van een tankwagen vol met brandbare vloeistof.

Samengevat kan gesteld worden dat:

- in een tunnel verschillende soorten branden kunnen optreden (qua intensiteit);
- voor iedere potentiële brand er een (verschillende) kans van optreden is;
- de gevolgen voor veiligheid en schade onzeker zijn, en bovendien per brand verschillen.

De verschillende mogelijke branden in een tunnel kunnen beschouwd worden als brandscenario's. Door voor ieder brandscenario vast te stellen wat de kans van optreden is, en wat de (verdeling van de) gevolgen zijn, wordt een beeld gevormd van de combinaties kans x gevolg die de brandveiligheid van de tunnel karakteriseren. Deze combinaties bepalen met andere woorden het risicoprofiel van de tunnel. Dit risicoprofiel heeft meerdere dimensies, zoals bijvoorbeeld (i) slachtoffers, (ii) structurele schade, (iii) verkeershinder, (iv) economische schade.

Het risicoprofiel kan (voor één bepaalde dimensie) grafisch voorgesteld worden door de combinaties kans x gevolg samen te brengen in een Kans-Gevolg diagram ('FC diagram'), conceptueel voorgesteld door de rode lijn in *Figuur 6*. Dergelijke figuren worden courant toegepast met betrekking tot de dimensie personenveiligheid. Daarbij wordt verwezen naar een 'FN diagram' (*Kans op overschrijden op verticale as tegen het aantal slachtoffers op de horizontale as*). In het navolgende wordt de algemene term 'schade' gebruikt om in algemene bewoording de gevolgen van brand aan te duiden.



Figuur 6 Kans-Gevolg diagram; voor volledigheid: verticale as beter te lezen als 'Frequency of exceedance'

Het risicoprofiel bevat informatie omtrent de combinaties kans x gevolg en geeft rechtstreeks inzicht in (i) de frequentie van schade, (ii) de maximale mogelijke omvang van de schade, (iii) de volledige lijst combinaties kans x gevolg. Het risicoprofiel:

- verschilt van tunnel tot tunnel;
- kan worden beïnvloed door (bijvoorbeeld brandwerende) maatregelen.

Het risicoprofiel kan omgezet worden in een scalaire risicowaarde (verwachtingswaarde) via (1). Dit is praktisch aangezien dit de vergelijking van de veiligheid tussen tunnels vereenvoudigt. Deze omzetting gaat echter gepaard met een verlies aan informatie omtrent de verdeling van combinaties kans x gevolg van het risicoprofiel. Bij het vergelijken van het scalair risico is het bijvoorbeeld zeer goed mogelijk dat:

- Tunnels met eenzelfde scalair risico overeenstemmen met een verschillend risicoprofiel;
- Tunnels met een lager scalair risico een hogere kans hebben op scenario's met grote gevolgen.

$$\text{scalair risico} = \sum_{\text{alle scenario's}} \text{kans x gevolg} \quad (1)$$

6.2 Beoordeling op basis van het risicoprofiel

Het aanvaarden van een ontwerp impliceert het aanvaarden van het volledige risicoprofiel van de tunnel. In het domein van personenveiligheid wordt courant gewerkt met een maximaal toelaatbaar profiel ('tolerability limit') en een profiel waaronder verdere studie niet nodig is ('de minimis limit'). De zone tussen deze limieten wordt dan aangeduid als de ALARP zone (As Low As Reasonably Practicable), zie *Figuur 6*, waarbij bijkomende maatregelen genomen worden zolang deze kosteneffectief zijn¹³. Een dergelijke methodiek om tot een aanvaardbaar ontwerp te komen wordt gespecificeerd in bijvoorbeeld het document PD 7974-7:2019 [107] van de Britse code of practice voor fire safety engineering BS 7974:2019. In verschillende landen en domeinen worden verschillende terminologieën toegepast, maar het concept zelf is nagenoeg universeel. Hoewel de courante toepassing zich situeert bij de personenveiligheid kunnen dezelfde concepten toegepast worden om, bijvoorbeeld met het oog op asset protection en business continuity, andere dimensies van schade weer te geven.

In eerste instantie is het dus de vraag welke combinaties van maatregelen (inclusief de situatie "huidige toestand") voor een bepaalde tunnel resulteren in een risicoprofiel dat zich niet in de onaanvaardbare (intolerable) regio van *Figuur 6* bevindt. Deze eerste beoordeling gebeurt los van een kosten-batenanalyse. De eerste beoordeling resulteert in een gereduceerde set maatregelen die allen potentieel aanvaardbaar (tolerable) zijn. Uit deze set van ontwerpen kan vervolgens een keuze gemaakt worden voor het uiteindelijk ontwerp.

¹³ In Nederland is ervoor gekozen om dit niet in de wettelijke veiligheidsnorm (WARVV) op te nemen. Als aan de norm wordt voldaan zijn geen verdere maatregelen nodig, ook geen ALARP. Deze striktheid is gekozen om veiligheidsdiscussies uit te sluiten bij aanvraag van vergunningen.

Een levensduur kosten analyse (lifecycle cost; LCC), of maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA), kan hierbij een relevant element zijn. Deze LCC benadering maakt gebruik van het scalair risico van (1) en vormt bijkomende input om de verschillende opties maatregelen te vergelijken.

Naast de LCC kunnen ook steeds andere elementen meegenomen worden bij de keuze tussen verschillende ontwerpen, elk met een potentieel aanvaardbaar risicoprofiel. De verschillende ontwerpen zullen immers algemeen een verschillend risicoprofiel hebben. Bijvoorbeeld:

- Een ontwerp kan overeenstemmen met een risicoprofiel waarbij brandschade algemeen een lage frequentie heeft, maar er toch een relatief hoge kans op grotere schade is waarbij de tunnel voor lange periode dicht moet. Dit type profiel kan bijvoorbeeld overeenstemmen met een ontwerp waarbij uitgegaan wordt van een strategie om de brand in een vroege fase te blussen. Wanneer dit niet lukt is de tunnel echter slechts beperkt beschermd.
- Een alternatief ontwerp kan overeenstemmen met een risicoprofiel waarbij de brandschade een hogere frequentie heeft, maar de kans op grote schade zeer laag is. Dit type profiel kan bijvoorbeeld overeenstemmen met een ontwerp waarbij de strategie is om de constructie tegen brand te beschermen, zodat deze ook in geval van een uiterst zware brand na beperkt herstel terug bruikbaar is.

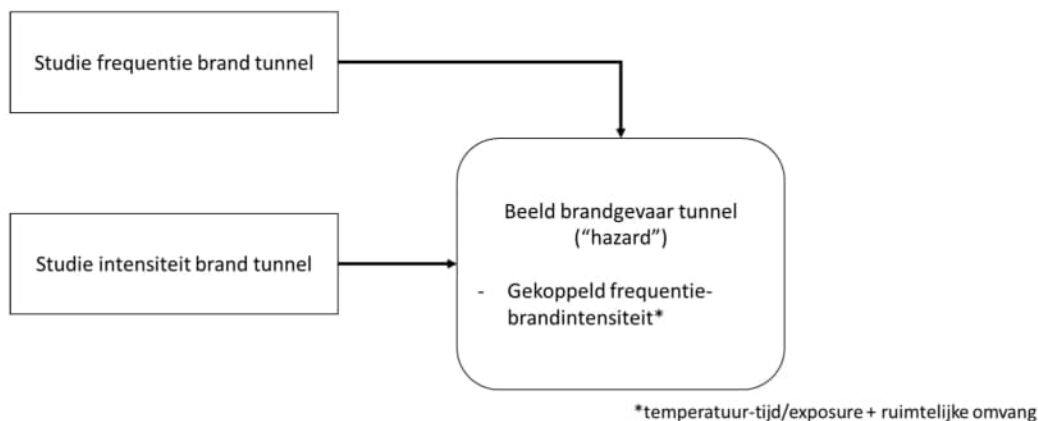
Een moeilijkheid bij de praktische toepassing van bovenstaande is het ontbreken van een duidelijke grens voor de aanvaardbaarheid ('tolerability limit'). Voor personenveiligheid is deze gedefinieerd in de WARVV. Voor doelstellingen omtrent asset protection is geen duidelijke limiet voorhanden. Als benchmark zou kunnen worden uitgegaan van een tunnel die aan alle vereisten (volgens de wet en die van RWS) voldoet. Het is immers redelijk aanneembaar dat het risicoprofiel van deze 'referentietunnel' aanvaardbaar is. Bovendien is het niet vereist dat uitgegaan wordt van een expliciete tolerability limit. De potentiële aanvaardbaarheid van het risicoprofiel van een tunnel kan ook ad-hoc worden beoordeeld. Toegepast kan het risicoprofiel van een tunnel bijvoorbeeld vergeleken worden met het risicoprofiel van de referentietunnel, waarbij de aanvaardbaarheid van de afwijkingen (in negatieve zin) per geval wordt beoordeeld.

7 Achtergrond brandgevaar tunnel

7.1 Algemene inleiding

Het optreden van brand in een tunnel is een onzeker gegeven. Het is mogelijk dat een tunnel jarenlang geen enkele brand registreert, en het is eveneens mogelijk dat in één enkele tunnel meerdere branden optreden in een korte periode. Deze onzekerheid omtrent het optreden van brand wordt beantwoord door het begroten van de frequentie (kans) van brand in de tunnel¹⁴. De frequentie kan uitgedrukt worden in branden per jaar, of bijvoorbeeld branden per (miljoen) motorvoertuigkilometers (mvtkm). Wanneer er in de tunnel brand optreedt, is er bovendien een breed spectrum aan branden mogelijk. Enerzijds zal het merendeel van de branden relatief klein zijn [64], deze hebben bijvoorbeeld betrekking op een enkele personenwagen. Het uitbranden van een tankwagen (*aangehaald als het scenario dat aan de RWS kromme ten grondslag ligt*) heeft een lagere kans van optreden. De kans dat een tankwagen en meerdere andere voertuigen in één enkele brand betrokken zijn heeft een nog lagere kans. Deze onzekerheid wordt beantwoord door het begroten van de kansdichtheid (*distributie*) van de intensiteit van de brand.

De combinatie van brandfrequentie en brandintensiteit geeft een beeld van het brandgevaar in de tunnel (*Figuur 7*).



Figuur 7 Componenten brandgevaar tunnel

7.2 Strategie begroting brandgevaar

Het brandgevaar kan ‘bottom-up’ begroot worden door uit te gaan van basisgebeurtenissen waarvoor statistische data beschikbaar is (of waarvoor een redelijke aanname kan gemaakt worden). De combinatie van de basisgebeurtenissen in een kansenboom (gebeurtenissenboom, foutenboom, of combinatie) laat dan toe om de kans op het optreden van een samengestelde gebeurtenis te begroten.

Een dergelijke werkwijze wordt toegepast in de ‘QRA-tunnels’ [59]. Het nadeel van die werkwijze is dat de verkregen combinaties frequentie-brandintensiteit significant kunnen afwijken van deze die in de realiteit waargenomen worden. Dit is een gevolg van een opeenstapeling van (kleine) afwijkingen en het (redelijkerwijs) niet in rekening brengen van alle effecten.

¹⁴ Een kans kan nooit groter zijn dan 1, frequenties wel. Voor kleine waarden (< 0.1) zijn kansen en de overeenstemmende frequenties vrijwel gelijk.

Een alternatieve benadering is een ‘top-down’ benadering waarbij combinaties frequentie-brandintensiteit begroot worden op basis van waargenomen gebeurtenissen. Wanneer een grote hoeveelheid data beschikbaar is, kan de begroting rechtstreeks gebeuren op basis van de waargenomen frequenties. Dit is echter niet mogelijk wanneer data beperkt is, zoals bijvoorbeeld het geval is met betrekking tot het optreden van grote branden. In dit laatste geval kan toepassing gemaakt worden van een (conservatieve) initiële schatting die bijgesteld wordt op basis van waarnemingen (Bayesiaans updaten). Deze werkwijze is toegepast in het TNO rapport ‘De statistische kans op brand in tunnels’ [64].

Dit TNO rapport is onmiddellijk relevant voor het onderhavig onderzoek (data voor Nederland, relatie frequentie-brandintensiteit). Dit rapport wordt in Bijlage C meer in detail geanalyseerd.

Voor de begroting van het risicoprofiel zal een combinatie van de bottom-up en top-down approach worden toegepast. Hierbij is het belangrijk dat de verkregen frequenties en brandintensiteiten in orde van grootte realistisch zijn. Daarom wordt hieronder het fenomeen ‘brand in tunnels’ eerst kort besproken, en wordt vervolgens een overzicht gegeven van brandlasten voor verschillende voertuigtypes, gevolgd door een beperkte bespreking van enkele historische branden. Deze achtergrond vormt de basis voor de begroting van het brandgevaar en de (thermische) impact op de tunnelconstructie.

7.3 Fenomeen ‘brand in tunnels’

Brand, zoals standaard begrepen met betrekking tot brandveiligheid, is een fenomeen van ongecontroleerde verbranding in de gasfase. Om tot brand te komen zijn volgende componenten nodig: brandstof, zuurstof en een ontstekingsbron. Een smeulende peuk in een vrachtwagen met houten pallets leidt niet gauw tot een brand omdat de brandstof (het hout) niet in gasfase aanwezig is. Een brandende lucifer die in een volle tank diesel valt, leidt niet tot een ongecontroleerde verbranding door gebrek aan zuurstof. Analooft leidt een lek in een brandstoftank bij een verkeersongeval niet tot brand indien er geen ontstekingsbron aanwezig is. Dat een brandstoflek niet noodzakelijk tot brand leidt, wordt bijvoorbeeld geïllustreerd door het ongeval van 4 januari 2012 in de Beneluxtunnel, vermeld in [64].

Bovenstaande laat toe te verklaren waarom branden in tunnels zo intens kunnen zijn. De geometrie van de tunnel zorgt ervoor dat de hitte gegenereerd door de brand niet zondermeer ontsnapt. Er is hierdoor een versterkte feedback naar de bron van de brand (de nog vaste of vloeibare brandstof). Dergelijke feedback van hitte zorgt voor een snellere overgang van de brandstof naar de gasfase, en dus een intensere brand.

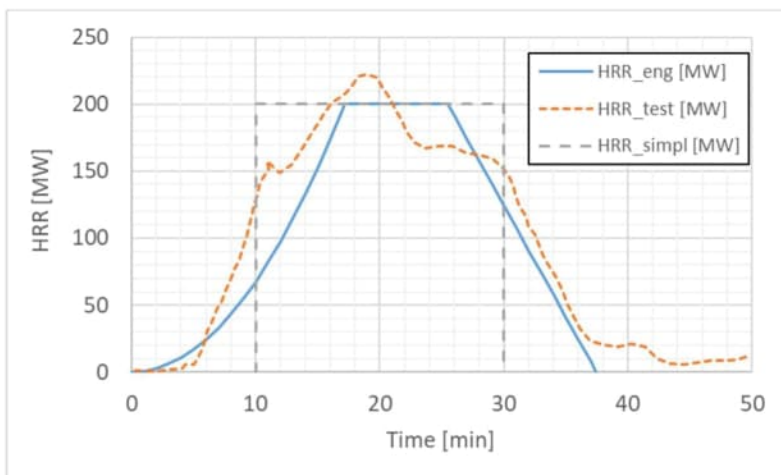
De luchtstroom in tunnels kan zowel een versterkend als een beperkend effect hebben [53]. Bij normaal gebruik is er in tunnels een toevoer van verse lucht door natuurlijke drukverschillen, verkeer, en mechanische ventilatie. In veel tunnels is mechanische ventilatie voorzien om evacuatie en brandweerinterventie mogelijk te maken. Deze toevoer aan verse lucht kan de brand aanwakkeren (hogere HRR). Anderzijds zorgt de verse lucht voor afkoeling (lagere temperaturen). Ook het afbuigen van de vlammen kan een positief of negatief effect hebben op de HRR. Algemeen kan gesteld worden dat de langsventilatie in de tunnel leidt tot een hoger maximaal brandvermogen (heat release rate, HRR) en een sneller bereiken van dit maximum door een snellere groei van de brand (growth rate) [53].

De toevoer aan verse lucht (zuurstof) houdt een fysische beperking in van het maximaal brandvermogen. Eén kg zuurstof heeft een verbrandingsenergie van ongeveer 13 MJ/kg (*er zijn beperkte verschillen in functie van de brandstof*) [48]. Bij normaal voorzienbare, maar conservatieve condities

(1 atm, 0°C) is er ongeveer 0,3 kg zuurstof per m³ lucht. Het maximaal vermogen dat in een tunnel kan worden gegenereerd is bij een tunneldoorsnede A [m²] en een instroom verse lucht aan v [m/s] bijgevolg bepaald door (2). Dit houdt een beperking in voor extreem grote branden waarbij een groot aantal voertuigen betrokken is. Uitgaande van een tunneldoorsnede van 50-75 m² en een ventilatiesnelheid van 2-3 m/s, kan worden uitgegaan van een maximale HRR van 500-600 MW. Op basis van het overzicht in [64] en [118] zijn nog geen tunnelbranden boven 400 MW waargenomen.

$$\max \{HRR [MW]\} = 3.9vA \quad (2)$$

De brandintensiteit kan voorgesteld worden door een HRR in functie van de tijd, zie *Figuur 8*. Voor ingenieurstoepassingen wordt het grillig verloop van de HRR vaak vereenvoudigd tot een groeifase, een plateau aan de maximale HRR (HRR_{max}) en een dalende tak. De groeifase is bijzonder belangrijk bij het bepalen van de evacuatiemogelijkheden. Wanneer de respons van de tunnelconstructie zelf van belang is, dan kan de HRR-tijds-curve voor een snelle analyse eventueel verder vereenvoudigd worden tot een rechthoekig diagram. De oppervlakte onder de curve is de totale vrijgegeven energie (total heat released, THR). Deze THR stemt overeen met een percentage van de caloriewaarde van de brandstof (totale brandlast). Bij perfecte verbranding is dit 100%. Samengevat zijn er dus drie parameters die voor de intensiteit van de brand van belang zijn: het maximaal vermogen (HRR_{max}), de duur van de brand, t_{fi} , en de totaal vrijgegeven energie (THR). Kennis van 2 parameters bepaalt (bij een vooropgestelde vorm van het HRR diagram) de derde. Standaardwaarden worden hieronder nagegaan. Waar relevant kan het ruimtebeslag van de brand in een volgende fase bepaald worden uit de HRR op basis van een gemiddeld vermogen per m² (HRR'').



Figuur 8 HRR in functie van de tijd. Experimenteel (conceptuele weergave) en ingenieursmodellen. De curven komen nominaal overeen met een maximale HRR van 200 MW en een THR van 240 GJ.

Brandkrommen voor structurele brandveiligheid van tunnels worden echter traditioneel uitgedrukt als een temperatuur-tijds-kromme. Dit heeft als voordeel dat de specificatie van testcondities in proefovens eenvoudiger is. Ook het numeriek berekenen van temperatuur in het beton vereenvoudigt hiermee. Het uitdrukken van brandintensiteit via brandvermogen staat echter nauwer bij een werkelijke brand. De relatie tussen beide benaderingen kan het eenvoudigst verklaard worden door uit te gaan van een HRR-tijd-kromme.

Het brandvermogen bestaat uit een component radiatie (q_{rad} , standaard 30% HRR) en een component convectie (q_{conv} , standaard 70% HRR). De radiatiecomponent is een rechtstreekse overdracht van warmte naar objecten, inclusief tunnelwand, die zich in het gezichtsveld van de brand bevinden. Hoe meer brand een object ziet, hoe meer het warmte ontvangt. Bovenstaande gaat ervan uit dat de lucht de radiatie doorlaat (transmissie). In functie van het roetgehalte (of watermist) kan de lucht ondoorzichtig worden en de radiatie zelf absorberen of reflecteren. De convectiecomponent gaat gepaard met hete rookgassen. Deze hete gassen verplaatsen zich op natuurlijke wijze door een verschil in dichtheid, of door de langsventilatie in de tunnel. Wanneer de hete gassen zich langs de tunnelwanden verplaatsen, warmen deze de tunnelwand op (convectie). De totale warmteoverdracht van de brand naar de tunnelwand is bijgevolg bepaald door (3), met ε de emissiviteit van de tunnelwand (gelijk aan de absorptie), ϕ de gezichtsfactor (view factor), σ de Stefan-Boltzmann coëfficiënt, T_s de oppervlaktetemperatuur van de tunnelwand in Kelvin, h_c de convectiecoëfficiënt en T_g de gastemperatuur in Kelvin. De gastemperatuur is afhankelijk van de instroom van koude lucht in de rook en h_c hangt af van de stromingskarakteristieken. De emissiviteit van de wand wordt benaderend als constant beschouwd. Radiatie van andere tunnelwanden is hier verwaarloosd ten opzichte van de HRR.

$$q_{tot} = q_{rad} + q_{conv} = \varepsilon(\phi 0.3HRR - \sigma T_s^4) + h_c(T_g - T_s) \quad (3)$$

Wanneer uitgegaan wordt van een nominale temperatuur-tijds-kromme, dan wordt de warmteoverdracht naar de tunnelwand bepaald door (4), waarbij T_k de temperatuur is volgens de brandkromme, uitgedrukt in Kelvin. Voor de convectiecoëfficiënt h wordt een constante nominale waarde aangehouden.

$$q_{tot} = \varepsilon\sigma(T_k^4 - T_s^4) + h(T_k - T_s) \quad (4)$$

Vergelijking van (3) en (4) maakt duidelijk dat het toepassen van een nominale brandkromme niet zondermeer gelijk kan gesteld worden aan de gastemperatuur bij brand. Om brandvermogen en nominale brandkromme wel aan elkaar te linken, wordt gebruik gemaakt van de adiabatische oppervlaktetemperatuur T_{AST} (adiabatic surface temperatuur), bepaald door (5). Een brand met een bepaald brandvermogen kan voor de tunnelwand (met temperatuur T_s) lokaal omgerekend worden naar een T_{AST} die rechtstreeks kan vergeleken worden met de nominale brandkromme.

$$\varepsilon(\phi 0.3HRR - \sigma T_s^4) + h_c(T_g - T_s) = \varepsilon\sigma(T_{AST}^4 - T_s^4) + h(T_{AST} - T_s) \quad (5)$$

7.4 Standaard brandintensiteit en vrijgegeven energie voor types voertuigen

7.4.1 Personenwagens

De QRA-tunnels [59] stelt voor een personenwagen een brandvermogen van 5 MW voorop, met referentie naar de *Veiligheidsrichtlijnen deel C* en richtlijnen van PIARC (World Road Association). Indien 2 personenwagens in een brand betrokken zijn, stelt de QRA tunnels het brandvermogen vast op 10 MW (zie *Figuur 9*). De grootteorde van deze cijfers wordt bevestigd door de review van experimentele data door [54]. [54] en [54] registreren voor de brand van een enkele personenwagen een maximale HRR tussen 1,5 en 9 MW, met het merendeel beneden 5 MW. Bij de brand van 2 voertuigen wordt een maximale HRR tussen 3,5 en 10 MW geregistreerd. Het achtergronddocument voor de QRA-tunnels verwijst voor branden met 2-3

personenwagens naar een intensiteit van 8 MW. Deze waarden zijn in overeenstemming met de internationale standaard, zoals weergegeven in het FIT project [118].

1 ^e voertuig	2 ^e voertuig				
	Pers (5)	Bus/Vageen (25)	Vabrb(50)	Vabrb(100)	Tank
Personenauto (5 MW)	10 MW	25 MW	50 MW	100 MW	-
Bus (25 MW)	25 MW	50 MW	50 MW	100 MW	200 MW
Vrachtauto met geen of geen brandbare lading (25 MW)	25 MW	50 MW	50 MW	100 MW	200 MW
Vrachtauto met brandbare lading (P ₅₀) (50 MW)	50 MW	50 MW	100 MW	100 MW	200 MW
Vrachtauto met brandbare lading (1- P ₅₀) (100 MW)	100 MW	100 MW	100 MW	100 MW	200 MW
Tankauto (aantal MW is afhankelijk van ventilatie)	tankbrand	tankbrand	tankbrand	tankbrand	tankbrand

Figuur 9 QRA-tunnels (Tabel 4-9): gemodelleerd maximaal vermogen bij brandoverslag. Brandvermogen bij enkel voertuig zoals vermeld in de rij-titels.

en geven eveneens een beeld van de totaal vrijgegeven energie (THR). Op basis van de experimentele data is deze voor een personenwagen tussen de 2 en de 8 GJ, met de meeste data rond 4 GJ [54]. In het FIT rapport wordt voor de brandlast van een personenwagen 3-7 GJ aangegeven. In de UPTUN rapporten [32] wordt voor grote familiewagens een totale energie van 12 GJ vermeld.

Uitgaand van een THR van 4 GJ en een HRR van 5 MW komt dit op een (equivalente) brandduur aan maximaal vermogen van 13,3 minuten. De experimenteel opgemeten HRR in functie van de tijd vertoont echter voor de meerdere experimenten een snelle stijging tot de piek HRR, zodat deze in 10-15 min bereikt wordt, waarna er een lange dovende fase is met afnemende HRR, zodat de totale brandduur in de experimenten vaak 60 minuten bedraagt [54].

Uit bovenstaande blijkt dat er een grote spreiding is van het brandverloop voor personenwagens. Een brandintensiteit van 5 MW voor een enkele wagen blijkt een relevante (hoge) waarde. Een intensiteit van 10 MW kan beschouwd worden als een realistische bovengrens, ook wanneer 2 voertuigen in de brand betrokken zijn. Ook de THR varieert sterk. Voor één enkel voertuig blijkt 8 GJ een redelijke bovengrens, als gemiddelde kan 4 GJ worden aangehouden.

7.4.2 Bussen

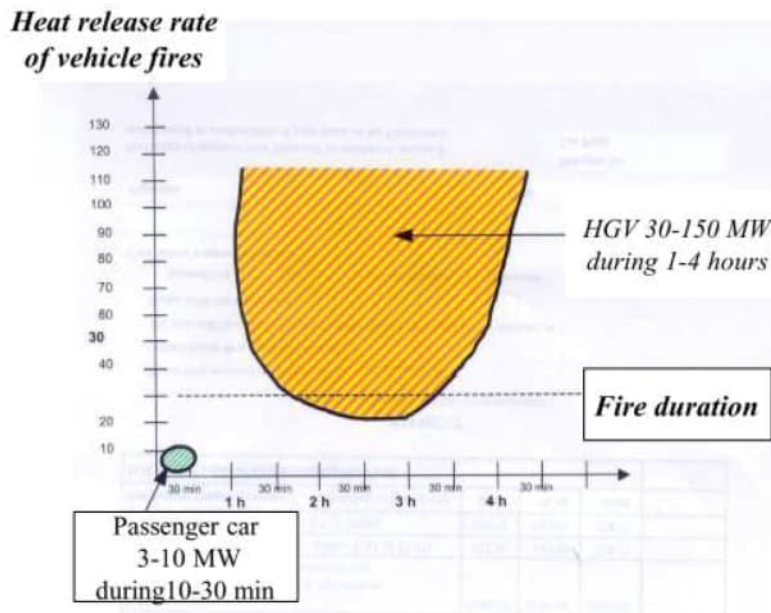
De QRA-tunnels [59] geeft voor bussen een brandintensiteit tussen 20 en 30 MW aan en past voor verdere analyse een nominale intensiteit van 25 MW toe. Ook vrachtwagens met niet-brandbare goederen worden in deze categorie ondergebracht. Internationaal wordt soms een bijkomende categorie voor bestelwagens beschouwd met een HRR van 15 MW [118]. Deze categorie kan conservatief bij de categorie bussen worden ondergebracht.

en [54] geven een overzicht van de beperkt beschikbare experimentele data. Hierbij zijn er afwijkende waarden gepubliceerd voor eenzelfde proef, wat de moeilijkheid van precieze resultaten verder duidt. Samengevat wordt een brandintensiteit tussen 25 MW en 35 MW gerapporteerd en een THR tot 45 GJ. Deze waarden zijn gebaseerd op slechts 3 testen. Internationaal wordt voor bussen en lege vrachtwagens een HRR van 20-36 MW aangehouden [118].

Uitgaande van 45 GJ THR en 35 MW HRR bedraagt de equivalente brandduur aan maximale intensiteit 21.4 minuten. Bij 25 MW is dit 30 min.

7.4.3 Vrachtwagens

In het UPTUN rapport [32] wordt de Zwitserse ervaring met tunnelbranden samengevat door *Figuur 10*. Deze figuur bevestigt een onderscheid tussen branden waarbij vrachtwagens (HGV, heavy goods vehicle) betrokken zijn, en branden met enkel personenwagens.



Figuur 10 Zwitserse ervaring met tunnelbranden, zoals gerapporteerd in [32].

De QRA-tunnels kent 60% van de vrachtwagenbranden een intensiteit van 50 MW toe, en de overige 40% een intensiteit van 100 MW [59]. Voor combinaties van voertuigen wordt de tabel van *Figuur 9* toegepast.

en rapporteren een zeer snelle brandgroei (growth rate) voor vrachtwagenbranden [54]. De experimentele data betreft zowel werkelijke vrachtwagens als dummy-voertuigen (*brandlast gestapeld zoals in vrachttransport*). Hierbij werden piek HRR waarden vastgesteld van 13 MW tot 202 MW. Zoals bij de andere types voertuigen volgt uit de experimentele data een lange fase van afnemende HRR. De meeste resultaten duiden op een afname van de brand binnen 45 minuten.

In het FIT rapport [118] worden in deze categorie tevens brandincidenten waarbij meerdere HGV betrokken waren, ondergebracht. De schatting van de waargenomen maximale intensiteit bedraagt in dat geval tot 400 MW.

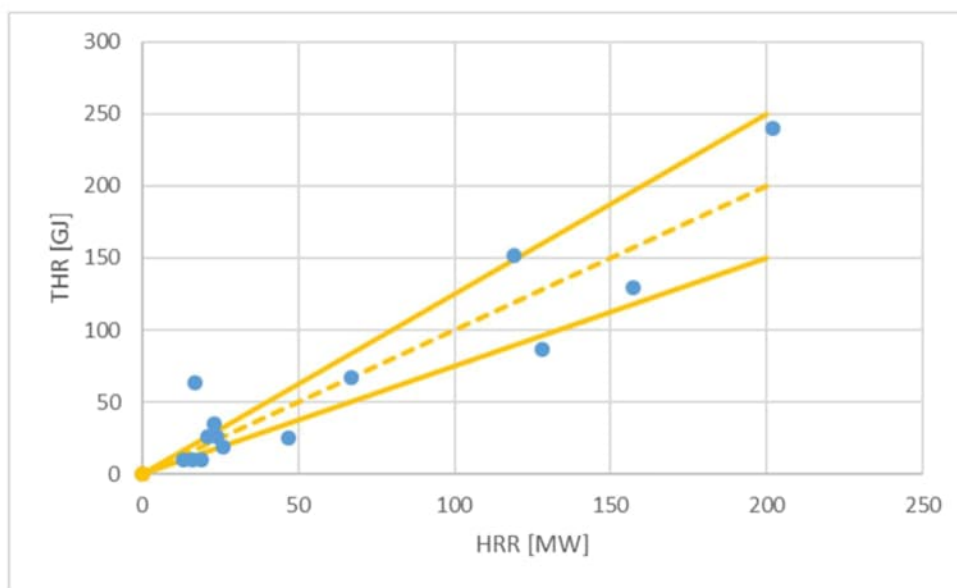
De THR en maximale HRR, zoals gerapporteerd door en [54], worden in *Tabel 1* weergegeven, samen met de theoretische duur van de brand bij een constante maximale intensiteit. De THR varieert van 10 GJ tot 240 GJ. De waargenomen relatie HRR-THR wordt weergegeven in *Figuur 11*. Verder blijkt uit het overzicht dat de meeste branden minder dan 30 minuten de maximale intensiteit kunnen aanhouden. De enige uitzondering is de Eureka 499 – Test 15, waarbij een grote

THR van 63 GJ gepaard ging met een maximale intensiteit van 17 MW. Het werkelijke brandverloop vertoont slechts een beperkte duur aan maximale intensiteit. *Figuur 12* geeft ter illustratie de opgemeten HRR voor de Runehamar testen.

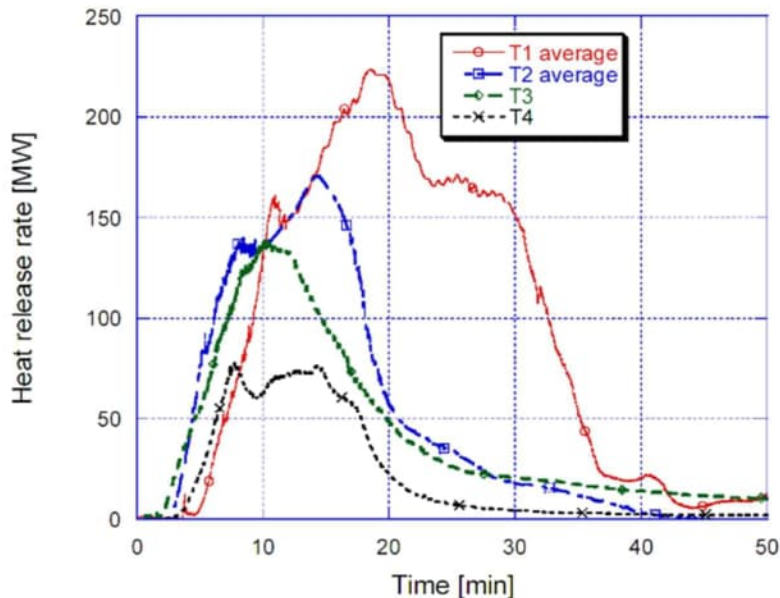
Voor de Heinenoordtunnel brand van 2014, waarbij een HGV en een personenwagen betrokken waren maar alleen de HGV was uitgebrand, worden de HRR en THR door Efectis ingeschat op 58 MW en 85.4 GJ respectievelijk.

Tabel 1 Experimenten vrachtwagenbranden: totale energie (THR), maximaal brandvermogen (HRR) en theoretische brandduur aan maximaal vermogen (t_{HRR}). Data zoals gerapporteerd in [54].

Test (referentiernaam)	THR [GJ]	HRR [MW]	t _{HRR} [min]
Runehamar Test 1	240	202	19.8
Runehamar Test 2	129	157	13.7
Eureka 499 Test 21	87	128	11.3
Runehamar Test 3	152	119	21.3
Runehamar Test 4	67	67	16.7
second Benelux Test 14	19	26	12.2
second Benelux Test 8	10	13	12.8
second Benelux Test 9	10	19	8.8
second Benelux Test 10	10	16	10.4
Eureka 499 Test 15	63	17	61.8
Mont Blanc 2001	35	23	25.4
Chuang et al. I	26	24	18.1
Chuang et al. II	26	21	20.6
Chuang et al. III	25	47	8.9



Figuur 11 THR [GJ] vs. HRR [MW] (Tabel 1). De stippellijn is de relatie THR = HRR. De volle lijnen zijn de begrenzing ± 25%.



Figuur 12 HRR in functie van de tijd, Runehamar test [118].

7.4.4 Tankwagens

In de QRA tunnels wordt voor een brand, waarbij (als secundair voertuig) een tankwagen betrokken is, uitgegaan van een intensiteit van 200 MW. Wanneer de tankwagen als primair voertuig betrokken is, worden de gevaren voor personenveiligheid berekend via een CFD analyse (Computational Fluid Dynamics, numerieke vloeistofmechanica) op basis van een plasbrand.

FIT [118] tabelleert een totale energie van 1000 GJ voor een medium tanker met 30 m³ benzine. Internationaal wordt voor tankwagens een brandvermogen 50-200 MW voorzien [118]. Op basis van ongevalanalyses door Ingason, vermeld in [118], zijn brandvermogens tot 300 MW waargenomen.

Op basis van het voorgaande wordt voorgesteld om voor tankwagens uit te gaan van een brandvermogen van 300 MW en een totale energie van 1000 GJ. Kleinere branden met tankwagens worden ondergebracht bij de HGV branden.

7.4.5 Relatie HRR, THR en oppervlak brandstof

De analyse van Ingason en Lönnemark resulteert in een HRR richtwaarde van 0,85 MW per GJ THR, en 0,3-0,5 MW per m² oppervlak brandstof [54]. Hoewel slechts richtwaarden laten deze vuistregels toe om voor gegeven HRR, THR of brandoppervlak een idee te krijgen van de overige parameters.

7.5 Zeer grote branden: bespreking van enkele historische cases

7.5.1 Algemeen

De bespreking van enkele historische grote branden in de volgende paragrafen heeft als doel een beeld te vormen van de samenloop van omstandigheden die tot grote branden aanleiding kan geven.

Daarnaast is voor een aantal branden ook de schade aangegeven in de vorm van de lengte van de tunnel welke ernstig beschadigd is en zijn de kosten en/of de duur van het herstel aangegeven.

7.5.2 Velsertunnel, 1978

Bij de brand in de Velsertunnel op 11 augustus 1978 waren 5 voertuigen betrokken [64]. De brand volgde op een ongeval met personenwagens, veroorzaakt door een reservewiel op de rijbaan [4]. In de brand waren 4 personenwagens en 1 HGV betrokken [4].

De brandomvang wordt geschat binnen het interval 40-50 MW [64].

7.5.3 Heinenoordtunnel, 2014

De brand in de Heinenoordtunnel van 21 mei 2014 werd veroorzaakt door een ongeval met een HGV waarbij de brandstoftank lek raakte [77]. Naast de HGV was bij het ongeval eveneens een personenwagen (deze was niet uitgebrand) betrokken. Op basis van camerabeelden is de totale brandduur op 31 minuten ingeschat. De THR is ingeschat als 85,4 GJ (gebaseerd op 90% verbranding van alle brandstoffen). De piek HRR wordt geschat op 58 MW (meer algemeen: binnen interval 50-65 MW) en er wordt uitgegaan van 18 minuten brand aan piekvermogen [77].

De tunnel was bekleed met PROMATECT-H hittewerende bekleding. Volgens het Efectis rapport [77] heeft deze bekleding naar behoren gefunctioneerd.

Ter hoogte van de brand was er lokaal afsputten van het beton. Vrijwel geen schade ten gevolge van hoge temperaturen werd waargenomen voorbij 40 m vanaf de brandhaard. Roetschade was aanwezig over een afstand van 200 m.

Ten gevolge van het ongeval met brand was er een 100 km lange file in de regio Rotterdam [77].

7.5.4 Tauern tunnel, 1999

De brand in de Tauern tunnel vond plaats 29 Mei 1999 tijdens wegwerkzaamheden [118]. Een HGV reed in op wachtende voertuigen voor een rood licht.

In totaal waren 16 HGV en 24 personenwagens betrokken in de brand. Brandweerploegen waren na enkele minuten ter plaatse, maar konden de brand niet bestrijden door de dikke rook en hoge temperaturen [118]. De brandduur bedroeg in totaal ongeveer 17 uur.

Op basis van ventilatiebeschuwingen wordt een piek HRR van 300-400 MW aangenomen [118].

De tunnelwand was beschadigd over een lengte van 350 meter en herstellingen waren nodig over een groter bereik [118]. De tunnel was drie maand buiten dienst en de herstellkosten bedroegen ongeveer 6 miljoen euro (referentiejaar niet vermeld). Bijkomend verlies aan tol bedroeg 19 miljoen euro.

7.5.5 Mont Blanc tunnel, 1999

Deze catastrofale brand vond plaats op 24 maart 1999 en startte in een HGV. Er was geen langsventilatie voorzien om de bovenstroomse rijbaan rookvrij te houden. De voertuigen die achter de

brandende vrachtwagen tot stilstand kwamen, raakten in latere fase allen betrokken bij de brand, alsook een HGV in de andere rijrichting en een brandweerwagen [55]. In totaal waren 23 HGV betrokken bij de brand en een 10-tal kleinere voertuigen. De 17 eerdere branden met HGV in de Mont Blanc tunnel hadden niet tot slachtoffers geleid.

De brand van de eerste HGV wordt geschat binnen het interval 75 – 110 MW [118]. De maximale intensiteit van de brand bedroeg volgens Carvel en Marlair 190 MW en werd pas na 53 uur geblust [55]. De TNO studie R11094 [64] tabelleert een HRR van 300 MW.

De intensiteit van de brand was het gevolg van een samenloop van omstandigheden [55]. In het bijzonder de brandbaarheid van de lading (inclusief isolatie) van de originele HGV heeft tot de grote intensiteit geleid. Het tunnelgewelf was beschadigd over een lengte van meer dan 900 meter. De herstellkosten beliepen een bedrag van 155 miljoen euro (referentiejaar niet vermeld) en de tunnel was 3 jaar buiten dienst [118].

7.5.6 Caldecott tunnel, 1982

De brand in de Caldecott tunnel betreft een tankerbrand. De aanleiding voor de brand was een ongeval veroorzaakt door een geïntoxiceerde bestuurder van een personenwagen [55]. Bij het ongeval en de daarop volgende brand waren eveneens een bus en enkele personenwagens betrokken [11].

De brandweer werd pas na 7 minuten geïnformeerd en kwam ter plaatse van beide uiteinden van de tunnel aan respectievelijk 11 en 19 minuten na de aanrijding [118]. De brand werd door middel van schuim onder controle gebracht ongeveer 165 minuten na de aanrijding.

De tunnel was beschadigd over een lengte van 580 meter. De herstellkosten bedroeg 3,3 miljoen dollar (referentiejaar niet vermeld) [118].

7.5.7 Nihonzaka tunnel, 1979

Deze brand startte na een aanrijding waarbij brandstof geëkt was. In deze brand waren 173 voertuigen betrokken, waaronder een HGV en personenwagens [24]. In de tunnel was een sprinklersysteem aanwezig. Dit sprinklersysteem hield de brand initieel onder controle en liet een evacuatie zonder bijkomende slachtoffers toe [118]. Bij het opgebruiken van het sprinklerreservoir vergrootte de brand opnieuw [55]. In de brand waren twee tankwagens met neopreen en solvent aanwezig [118]. Het duurde meerdere dagen om de brand onder controle te krijgen en uiteindelijk te blussen [55].

De tunnelwanden waren beschadigd over ongeveer 1100 meter [118]. Op basis van [118] wordt aangenomen dat de tunnel ongeveer 2 maanden buiten gebruik was.

7.5.8 Conclusie

Uit bovenstaande selectie van zware branden volgt dat bij de zwaarste branden doorgaans meerdere voertuigen betrokken zijn. De zwaarst waargenomen tunnelbranden kunnen zeker niet alleen gelinkt worden met brandstof (tankwagen) branden.

Het beschouwen van brandoverslag naar één enkel bijkomend voertuig is bijgevolg niet voldoende om de zwaarste branden af te dekken. Bovendien kunnen zware branden optreden bij het transport van goederen die als 'niet-gevaarlijk' beschouwd worden (vb. Mont Blanc).

8 Begroting brandgevaar tunnels

8.1 Brandfrequentie

Onder ‘brandfrequentie’ wordt verstaan: de kans van optreden van brand in een tunnel per mvtkm (motorvoertuigkilometer), in eerste instantie ongeacht de omvang van de brand, en het aantal of de types van voertuigen dat uiteindelijk bij de brand betrokken raakt.

De frequentie van brand in tunnels wordt geacht lager te zijn dan de algemene brandfrequentie op de weg [118]. Carvel en Marlair rapporteren Franse frequenties van 0,01-0,02 branden per miljoen mvtkm voor personenwagens in tunnels, en 0,08 branden per miljoen mvtkm voor vrachtverkeer [55]. Bij zware branden is doorgaans vrachtverkeer betrokken (zie 7.5). Carvel en Marlair rapporteren een frequentie van (i) 0,01 branden per miljoen mvtkm HGK met een intensiteit die structurele schade veroorzaakt en (ii) 0,001-0,003 branden per miljoen mvtkm HGK die als ernstig kunnen geklasseerd worden en waarbij meerdere voertuigen betrokken zijn.

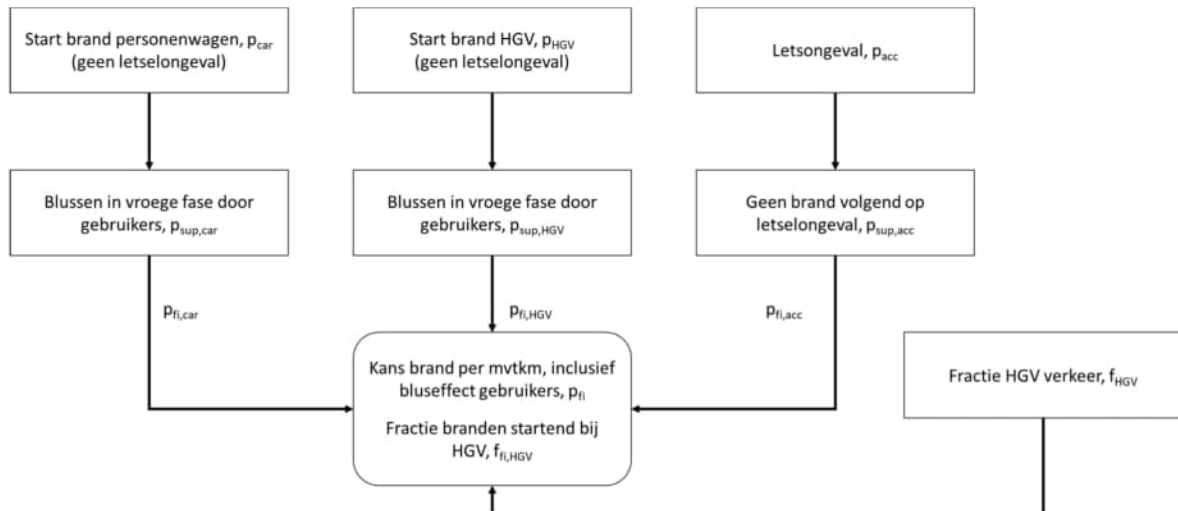
In de QRA-tunnels [59] wordt uitgegaan van 0,02 branden per miljoen mvtkm, ongeacht het type voertuig.

Het TNO rapport ‘De statistische kans op brand in tunnels’ [65] en de update na de Heinenoordbrand [85] vermelden een brandfrequentie van ongeveer $1,5\text{-}2\cdot 10^{-4}$ branden per miljoen mvtkm voor Nederlandse tunnels. Specifieke aspecten van de analyse worden besproken in Bijlage C bij dit rapport. Deze frequentie is beduidend lager dan de Franse referentiewaarde. De TNO studie verwijst naar het achtergronddocument van de QRA-tunnels [59] waar gesteld wordt dat een groot aandeel van de Franse branden te wijten is aan oververhitting van remmen op steile hellingen, iets wat in Nederland minder aan de orde is.

Op basis van het voorgaande, en de beschouwingen in Bijlage C wordt per miljoen mvtkm een kans op brand van $2\cdot 10^{-3}$ aangehouden. Indien een brand door de weggebruikers zelf geblust wordt (in aanname: vrijwel ogenblikkelijk), dan moet deze brand niet verder in rekening worden gebracht. In de QRA tunnels [59] wordt voor deze branden conservatief een bluskans van 0,1-0,25 aangenomen. Dit achtergronddocument vermeldt echter zelf reeds dat 2 op 3 HGK branden in de Mont Blanc tunnel door weggebruikers geblust worden. Hier wordt als startwaarde een bluskans van 0,70 aangehouden, zowel voor personenwagens als voor een HGK.

De QRA tunnels vermeldt verder branden die volgen op een ongeval (letselgevallen). Voor letsel-ongevallen wordt een frequentie van $5\cdot 10^{-8}$ ongevallen per mvtkm vooropgesteld [58]. Op basis van het overzicht in [49], in het bijzonder Duitse statistieken uit 1990, wordt voor ongevallen een brandfrequentie van 0,25% aangehouden voor brand volgend op ongeval. Er wordt aangenomen dat deze branden niet door de gebruikers geblust worden.

De globale kans op brand per mvtkm, inclusief effect blussen door gebruikers, wordt begroot conform *Figuur 13*, met defaultwaarden zoals opgegeven in *Tabel 2*. Dit resulteert in een startwaarde voor de kans op brand per mvtkm van $7,25\cdot 10^{-10}$. Tankwagens en bussen worden hierbij ondergebracht bij HGK. De fractie HGK in de branden bedraagt 0,15, op basis van (6).



Figuur 13 Berekening kans op brand per mvtkm, inclusief bluseffect gebruikers, en aandeel branden startend in HGV (inclusief bussen en tankwagens).

Tabel 2 Parameters en default waarden voor brandkans

Parameter	Dimensie	Default waarde
p_{car}	1/mvtkm	$2 \cdot 10^{-9}$
$p_{sup,car}$	-	0,70
p_{HGV}	1/mvtkm	$2 \cdot 10^{-9}$
$p_{sup,HGV}$	-	0,70
p_{acc}	1/mvtkm	$5 \cdot 10^{-8}$
$p_{sup,acc}$	-	0,9975
f_{HGV}	-	0,15

$$\begin{aligned}
 p_{fi} &= (1 - f_{HGV}) p_{fi,car} + f_{HGV} p_{fi,HGV} + p_{fi,acc} \\
 f_{fi,HGV} &= \frac{f_{HGV} p_{fi,HGV} + f_{HGV} p_{fi,acc}}{p_{fi}}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

8.2 Brandintensiteit

8.2.1 Introductie

Op basis van de besprekingen in paragraaf 7.4 en 7.5 kan geconcludeerd worden dat (i) de brandintensiteit voor een enkele of een beperkt aantal personenwagens goed bepaald is; (ii) een HGV een ruim bereik heeft met betrekking tot zowel HRR (maximaal vermogen) als THR (totaal vrijgegeven energie); (iii) de zwaarste branden betrekking hebben op een combinatie van meerdere voertuigen.

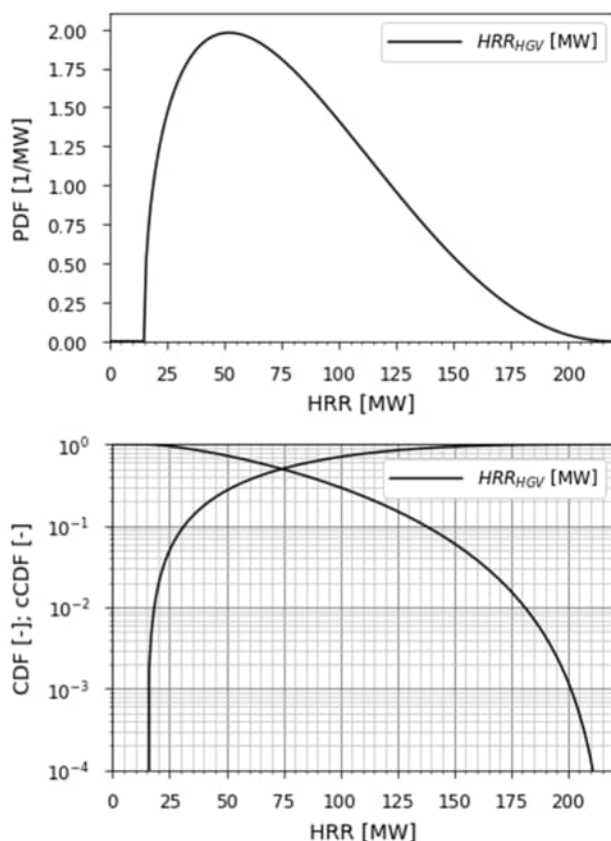
De onzekerheid met betrekking tot de brandintensiteit voor een enkele HGV kan via kansbeschouwingen in rekening gebracht worden. Toegepaste modellen voor de HRR en THR van personenwagens, HGV en tankwagens zijn weergegeven in *Tabel 3*. Bussen, kleine tankwagens en kleine transportvoertuigen worden bij de categorie HGV gerekend. Voor personenwagens en tankwagens wordt één enkele waarde aangehouden (deze parameters zijn met andere woorden ‘deterministisch’). Het

HRR model voor HGV wordt bepaald door een kansdichtheidsfunctie. Deze is visueel voorgesteld in *Figuur 14*. Dit model is opgesteld met inachtnaam van de proefresultaten uit *Tabel 1* en de vaststelling dat in de QRA tunnels 60% HGV als 50 MW aangemerkt wordt en 40% als 100 MW.

Tabel 3 Model voor HRR en THR bij brand van één voertuig, bij afwezigheid van verdere maatregelen; stdev is de standaardafwijking en is een maat voor de spreiding.

Voertuig	HRR [MJ]	THR [GJ]
personenwagen	5	6
HGV	Beta min: 15 max: 220 gemiddeld: 80 stdev: 40	$\eta \cdot hrr$, met η : Normal gemiddeld: 1.0 stdev: 0.2
tankwagen	300	1000

De fractie tankwagens in het verkeer wordt ingeschat op 0,001, zoals toegepast in de QRA tunnels vermeld in [64]. Tankwagens worden voor de modeltoepassingen geacht een subgroep te zijn van de ruimere categorie HGV (bv. het aandeel HGV is standaard 0,15, inclusief tankwagens).



Figuur 14 Kansdichtheid (PDF) en cumulatieve distributiefunctie (CDF, en complementair cCDF) voor de HRR van HGV, conform de aanname in *Tabel 3*

Het beschouwen van de belangrijke grote branden waarbij meerdere voertuigen betrokken zijn, en het begroten van het effect van veiligheidsmaatregelen, is echter niet eenvoudig mogelijk met de informatie die hiervoor is aangehaald. Om dergelijke effecten te begroten wordt een vereenvoudigd

model voor de brandverspreiding opgesteld. Dit model heeft als doel een eerste inschatting mogelijk te maken en kan niet beschouwd worden als een afgewerkt voorstel.

8.2.2 Concept model brandverspreiding

Het achtergronddocument QRA tunnels, Tabel 3-12 [59], vermeldt kansen op brandoverslag in functie van het initieel brandend voertuigtype: 0,1 voor personenwagens, 0,3 voor bussen, 0,5 voor vrachtwagens. Bij traag ontwikkelende branden (geen letselongeval) is de kans op overslag 0. Zoals aangegeven bij *Figuur 9* wordt in de QRA tunnels geen verdere brandverspreiding beschouwd.

In de literatuur omtrent brandverspreiding tussen voertuigen (in parkeergarages) wordt melding gemaakt van een vereenvoudigd fysisch model waarbij er warmteoverdracht is van het brandend voertuig naar een niet-brandend nabij aanwezig voertuig, zie bv. [27,101,76].

De convectie component van de HRR stijgt en wordt standaard door de langsventilatie verder afgekoeld en weggevoerd. Bijgevolg kan brandverspreiding ter vereenvoudiging toegeschreven worden aan de radiatie component.

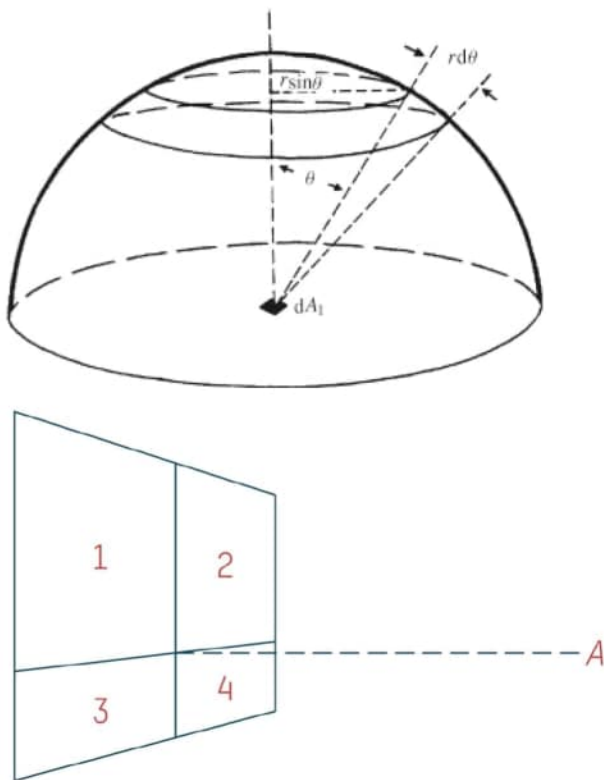
De ontbranding van het blootgesteld materiaal is opnieuw een complex gegeven met warmteverliezen, pyrolyse etc. [48]. Bij brandverspreiding tussen gebouwen wordt vaak uitgegaan van een kritische ontvangen radiatie-intensiteit, zie bv. BR 187 [73], waar uitgegaan wordt van 12,56 kW/m² (pilootontbranding van droog hout na zekere tijd), en [99]. Mohd Tohir [76] gaat uit van eenzelfde concept van kritische radiatie (critical incident radiation, I_{crit}) voor brandverspreiding tussen voertuigen. Specifieke elementen, zoals de bumper en banden, kunnen reeds bij lagere radiatie ontbranden. Voor overige voertuigcomponenten wordt een I_{crit} tussen 10 en 19 kW/m² vermeld.

8.2.3 Sterk vereenvoudigd model brandverspreiding

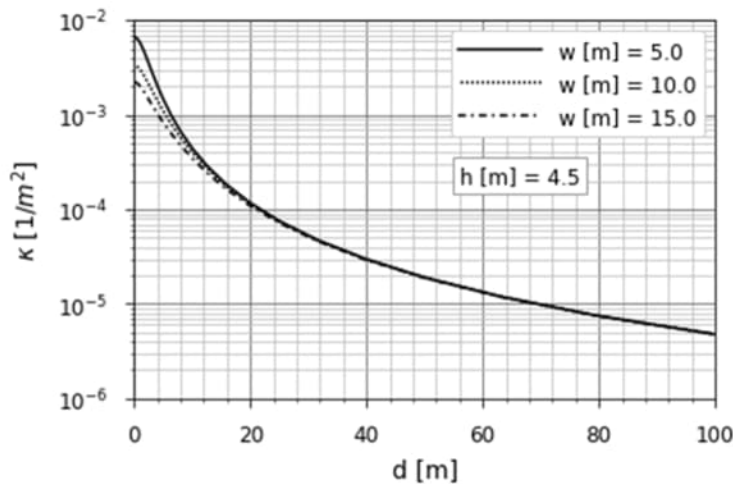
De brandverspreiding wordt toegeschreven aan de radiatie component van de HRR ($q_{rad} = 0,3 HRR$). Deze radiatie wordt in alle richtingen uitgestuurd bij de verbranding. Hier wordt als benadering gesteld dat deze verbranding een volledige tunneldoorsnede inneemt (deze doorsnede fungeert voor het model als een 2D radiatiepaneel), waarbij 50% van de radiatie bovenstreams en 50% benedenstreams gaat (0.15 HRR in beide richtingen).

De ontvangen radiatie op een afstand 'd' van de branddoorsnede wordt bepaald in het midden van de tunneldoorsnede (kritisch punt met hoogste intensiteit). De ontvangen intensiteit 'I' wordt gegeven door (7), met E de uitgezonden radiatie per m², h en w de tunnelhoogte en breedte, en ϕ de zichtfactor (viewfactor), een geometrische parameter (concept in *Figuur 15*, zie [48,99] voor toelichting). De factor κ is voor een gegeven afstand d en tunnelgeometrie volledig bepaald en komt overeen met de verhouding van de ontvangen intensiteit I ten opzichte van de HRR. In *Figuur 16* wordt κ gegeven als functie van de afstand 'd', voor tunnelbreedtes van 5, 10 en 15 m. De tunnelhoogte is hier vastgelegd op 4,5 m. Uit deze figuur blijkt dat de fractie ontvangen vermogen vrijwel onafhankelijk is van de tunnelbreedte w voor afstanden $d > 10$ m. Voor de verdere berekeningen wordt een tunnelbreedte van 10 m aangehouden.

$$I = \phi E = \phi \frac{0.15 HRR}{hw} = \kappa HRR \quad (7)$$



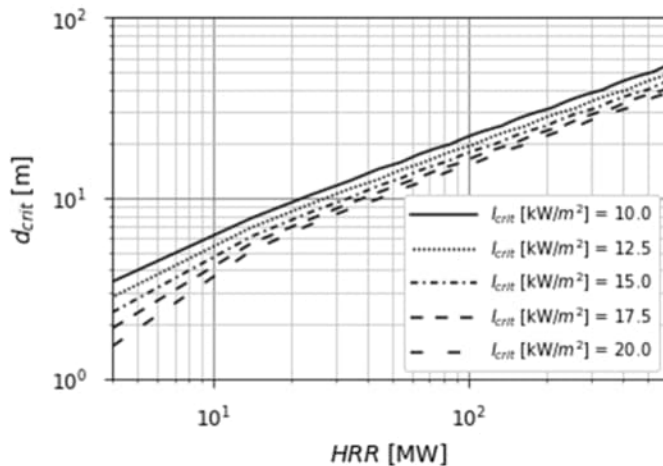
Figuur 15 Concept zichtfactor: (a) de radiatie uitgezonden in een punt verspreidt zich in 3D, zodanig dat de ontvangen radiatie afneemt met de afstand tot de bron [48]; (b) berekening van de zichtfactor voor een rechthoekige radiator naar een punt A op loodrechte afstand [99].



Figuur 16 Verhouding κ van de ontvangen radiatie intensiteit 'I' per m^2 tot de totale HRR van de brand, op een afstand 'd' van de tunnelsectie met de brand

Op basis van *Figuur 16* is de ontvangen radiatie I op een afstand d onmiddellijk te bepalen voor een gegeven HRR. Indien $I > I_{crit}$ treedt (in dit vereenvoudigd model) brandverspreiding op. Op basis van paragraaf 8.2.2 is I_{crit} niet éénduidig bepaald, maar is het interval 10-20 kW/m^2 aan te nemen voor

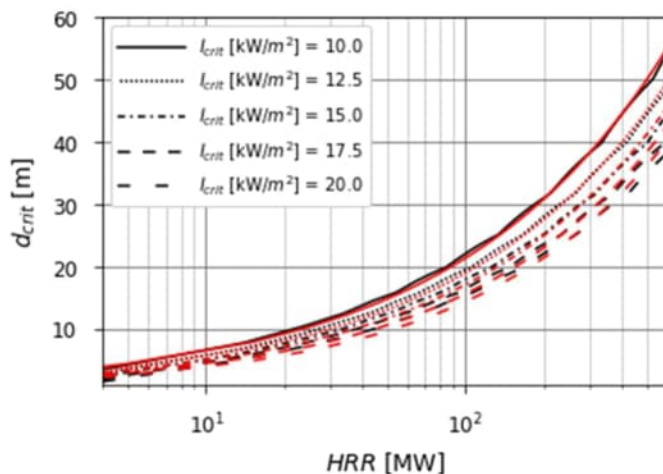
een volledig voertuig. Uitgaande van 5 discrete waarden voor I_{crit} (10/12,5/15/17,5/20) [kW/m²] en een tunnelbreedte $w = 10$ m, kan *Figuur 16* omgerekend worden tot *Figuur 17*. In *Figuur 17* wordt de kritische afstand d_{crit} gegeven in functie van de HRR (zie *Figuur 18* voor lineaire d_{crit} as). Deze figuur is zodanig dat brandverspreiding optreedt (i.e. $I > I_{crit}$) wanneer $d < d_{crit}$, en laat toe om op basis van voertuigafstanden brandverspreiding na te gaan. In *Figuur 17* valt bijvoorbeeld af te lezen dat een brand van 5 MW voor $I_{crit} = 10$ kW/m² niet tot brandverspreiding leidt indien het andere voertuig zich verder dan 4 m van de brand bevindt. Voor een brand van 200 MW is een afstand van meer dan 30 m vereist om brandverspreiding tegen te gaan.



Figuur 17 Kritische afstand voor brandverspreiding, d_{crit} [m], in functie van de HRR [MW], voor verschillende kritische radiatie intensiteiten I_{crit} [kW/m²]

De curves in *Figuur 17* zijn een aaneenschakeling van een reeks berekende punten. Om snelle en eenvoudige analyse mogelijk te maken zijn de curves in *Figuur 17* benaderd door een regressiemodel (8). Voor kleine HRR overschat (8) d_{crit} , maar bij de benadering wordt geacht dat de impact op de analyse beperkt is. *Figuur 18* illustreert de benadering.

$$\log(d_{crit} [m]) = a + b \log(HRR [MW]) \quad (8)$$



Figuur 18 Kritische afstand voor brandverspreiding, d_{crit} [m], in functie van de HRR [MW], voor verschillende kritische radiatie intensiteiten I_{crit} [kW/m²]. Berekende waarden: zwart; benadering: rood.

Samengevat is het stappenplan voor het model brandverspreiding als volgt:

1. Beschouw huidige HRR;
2. Beschouw afstand d tot meest nabijgelegen voertuig en kritische radiatie I_{crit} ;
3. Bepaal via *Figuur 18* of $d < d_{crit}$;
Indien niet: geen verdere brandverspreiding: HRR is finaal.
Indien wel: brandverspreiding: voeg HRR van nieuwe voertuig toe en start opnieuw bij stap 1.

Dit stappenplan wordt doorlopen tot wanneer geen verdere brandverspreiding optreedt, of tot er 100 bijkomende voertuigen bij de brand betrokken zijn (het precieze cijfer is arbitrair; het bereiken van het maximum aantal voertuigen duidt op een brand die volledig uit de hand gelopen is).

Bovenstaand model voor brandverspreiding is sterk vereenvoudigd. Bij de iteratie wordt geen rekening gehouden met de ruimtelijke verdeeldheid in de in de brand betrokken voertuigen (alle HRR wordt impliciet in één enkele sectie samengevoegd). Bij de iteratie wordt dus geen rekening gehouden met de toenemende afstand tussen het nu meest nabij gelegen voertuig (target voertuig) en de eerder bij de brand betrokken voertuigen. Verder wordt radiatie van de tunnelwand niet in rekening gebracht. Dit wordt geacht gecompenseerd te zijn door andere vereenvoudigende aannames. Het model is een 1-dimensionale beschrijving van een 3-dimensionale realiteit. Door de samenloop van (vaak eerder conservatieve) vereenvoudigende aannames wordt het model wel geacht toe te laten een beeld te vormen van de tendens tot brandverspreiding.

8.2.4 Andere basisparameters

Toepassing van het model vereist nog input met betrekking tot (i) voertuigafstanden 'd', en (ii) I_{crit} .

Voertuigafstand, d

De QRA tunnels [59] verwijst naar [28] voor praktijkmetingen en ervaringscijfers. Op basis van deze cijfers zijn er bij file 110-130 mvt per kilometer. Bij doorgaand verkeer (100 km/u) zijn er volgens [28] ongeveer 20 mvt per kilometer. Uitgaand van een HGV lengte tot 18 m [89], een personenwagen lengte van ongeveer 4,5 m, en een HGV fractie van 0,15 komt dit op een gemiddelde voertuigafstand van 1,5 m tot 2,6 m bij een file en 43 m bij doorgaand verkeer.

In het geval van brand zonder voorafgaande file kan aangenomen worden dat de benedenstroomse voertuigen de tunnel verlaten en (een deel van) de bovenstroomse voertuigen tot stilstand komen op een zekere afstand 'd' van het brandend voertuig. Het is redelijk aan te nemen dat de afstand bij een brandend voertuig algemeen groter zal zijn dan bij een file. Als startwaarde voor de afstand tussen voertuigen bij brand wordt een uniforme distributie aangenomen met minimumwaarde van 3 m en maximumwaarde van 50 m.

Kritische radiatie-intensiteit, I_{crit}

In *Figuur 18* werd d_{crit} bepaald voor 5 discrete waarden van I_{crit} . Deze waarden worden aangehouden als startwaarden voor I_{crit} , elk met een gelijke kans van optreden (een gelijk aandeel in de voertuigpopulatie).

8.3 Brandgevaar

8.3.1 Basisevaluatie

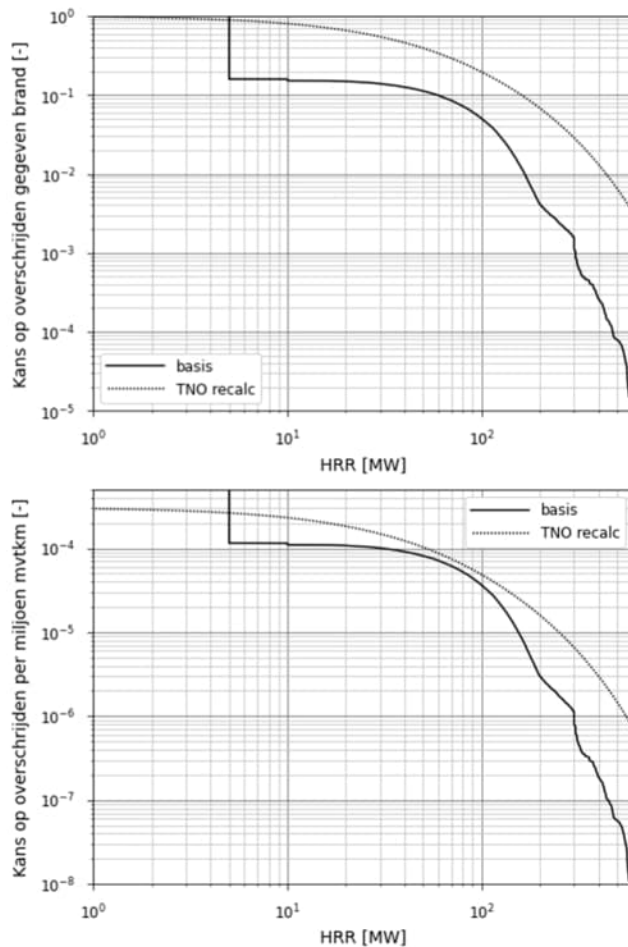
De basisevaluatie is een toepassing van bovenstaande (brandfrequentie paragraaf 8.1 en brandintensiteit paragraaf 8.2), zonder rekening te houden met bijkomende elementen (zoals: filevorming, regels minimumafstand vrachtverkeer, brandweerinterventie, sprinkler, watermist). Deze bijkomende elementen maken het model meer complex, daarom wordt als ankerpunt eerst het resultaat voor het basismodel weergegeven.

Op basis van paragraaf 7.3 wordt een maximale intensiteit van 600 MW aangehouden. Het model wordt toegepast zonder hiermee rekening te houden, maar bij de postprocessing worden hogere waarden tot 600 MW gereduceerd. De keuze om geen limiet op te leggen in het brandverspreidingsmodel zelf heeft als motivatie dat een uit de hand lopende brand wel een groot aantal voertuigen kan omvatten, die dan voor lange tijd met een gereduceerde maximale intensiteit zullen branden. Dit bleek ondermeer uit historische tunnelbranden zoals Mont Blanc tunnel en Tauern tunnel, zie paragraaf 7.5.

Resultaten voor de HRR, gegeven brand, worden weergegeven in *Figuur 19*: (a) conditionele kans, m.a.w. HRR gegeven brand; (b) kans per miljoen mvtkm. Deze waarden zijn het resultaat van 10^5 random simulaties. De resultaten worden weergegeven samen met de waarden die overeenstemmen met de TNO studies [64,85]. De TNO studies geven deze resultaten niet expliciet weer, en de waarden in *Figuur 19* zijn herberekend conform de methode in [85]. Kleine afwijkingen worden toegeschreven aan (ongekende) afwijkingen in de interpretatie. Verder moet opgemerkt worden dat het TNO model geen bovengrens stelt aan de HRR; enkel waarden tot 600 MW zijn weergegeven.

In *Figuur 19(a)* is te lezen dat het grootste deel van de branden (meer dan 84%) in de basisevaluatie betrekking hebben op één enkele personenwagen aan 5 MW: de kans op een grotere brand is slechts 0,16. De kans op een brand met $HRR \geq 100$ MW is ongeveer 0,05, en de kans op een brand groter dan 200 MW 0,004. Er worden in het model ook extreme branden waargenomen. In de 10^5 simulaties is er één simulatie waarbij de brand volledig uit de hand loopt en het maximum aantal (101) voertuigen bij de brand betrokken is. Deze éne realisatie geeft geen goede schatting van de kans op een dergelijke brand; dit zowel omwille van het aantal realisaties als omwille van de beperkingen van het model zelf. Indien de 10^5 simulaties opnieuw uitgevoerd worden, is het waarschijnlijk dat een ander aantal (meer, of geen) van dergelijke extreme branden wordt waargenomen. De observatie geeft wel duidelijk weer dat de mogelijkheid van extreme branden, die de maximale HRR in de tunnel bereiken, niet zondermeer kan worden uitgesloten. De TNO studie resulteert in beduidend hogere waarden voor de conditionele kansen, met ongeveer 7% branden boven 200 MW.

Wanneer ook de brandfrequentie in rekening wordt gebracht, stemmen beide berekeningen nauwer overeen, zie *Figuur 19(b)*.



Figuur 19 Kans op overschrijden HRR basisevaluatie: (a) gegeven brand; (b) per miljoen mvtkm. Resultaat 10⁵ evaluaties basismodel, en herberekening TNO model.

De overschrijdingskansen in *Figuur 19* kunnen meer compact weergegeven worden als optredingskansen voor een select aantal HRR klassen. Naar analogie met de standaardwaarden uit de QRA tunnels worden volgende categorieën bepaald: 5/10/25/50/100/200/400 [MW]. De nominale waarde per categorie is steeds de bovengrens van het interval. Waarden boven 400 MW worden ondergebracht in een bijkomende categorie 600 MW.

Tabel 4 en *Tabel 5* tonen de verkregen waarden. Uit een vergelijking van de waarden onderling volgt dat (i) de TNO studie de kans op kleine branden lager inschat t.o.v. het brandverspreidingsmodel en (ii) dat de TNO studie de kans op zeer grote branden (> 200 MW) groter inschat. Voor de 100 MW en 200 MW branden komen de ingeschatte kansen per mvtkm nauw overeen. De waarden voor de situatie “referentie” worden verder toegelicht.

Tabel 4 Kans per HRR klasse (nominale waarde als bovengrens interval) gegeven brand

HRR klasse [MW]	Basis [-]	TNO recalc [-]	Referentie [-]
5	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-1}$
10	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
25	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$
50	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$
100	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$
200	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$
400	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
maximum (600)	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$

Tabel 5 Kans per HRR klasse (nominale waarde als bovengrens interval) per mvtkm

HRR klasse [MW]	Basis [1/mvtkm]	TNO recalc [1/mvtkm]	Referentie [1/mvtkm]
5	$6,1 \cdot 10^{-10}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$6,1 \cdot 10^{-10}$
10	$5,4 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	$8,7 \cdot 10^{-12}$
25	$5,2 \cdot 10^{-12}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	$5,1 \cdot 10^{-12}$
50	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$6,2 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$
100	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$5,4 \cdot 10^{-11}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$
200	$3,3 \cdot 10^{-11}$	$3,3 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$
400	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \cdot 10^{-12}$
maximum (600)	$1,9 \cdot 10^{-13}$	$3,0 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$

8.3.2 Referentie-evaluatie brandgevaar

Het brandgevaar in een tunnel wordt – los van eventuele bijzondere veiligheidsmaatregelen – bijkomend beïnvloed door (i) filevorming, en (ii) brandweerinterventie.

Filevorming

Onder filevorming wordt verstaan: nagenoeg stilstaand verkeer in de tunnel reeds aanwezig bij de start van de brand, en dus niet de filevorming die mogelijk optreedt ten gevolge van de brand. File in de tunnel impliceert dat de afstand tussen voertuigen algemeen kleiner is en dus de ook afstand van voertuigen tot de brandsectie. Bovendien is de aanname dat het benedenstrooms verkeer de tunnel zonder problemen kan uitrijden bij file niet langer zondermeer geldig. De QRA-tunnels [59] vermeldt hieromtrent dat men benedenstrooms de brand vrijwel zeker kan voorblijven bij snelheden ≥ 20 km/u.

Bovenstaande effecten worden in rekening gebracht door (i) het in rekening brengen van een kans op filevorming en (ii) een aangepast default model voor de afstand tussen voertuigen bij file.

De default waarde voor de kans op file (*de fractie van het verkeer dat samengaat met file*) wordt begroot met referentie naar ‘*De kwantitatieve risicoanalyse Churchilltunnel en Zoeken naar Balans*’ [60]. In dat rapport worden voor een tunnel 17 miljoen mvt per jaar voorzien, waarbij dagelijks file optreedt (*hier begroot op 2 uur per dag, 365 dagen per jaar*). Tijdens de file is de capaciteit 3000 mvt per uur. Op basis van bovenstaande is het percentage voertuigen dat zich in fileomstandigheden

door de tunnel begeeft 12,9%. In het brandverspreidingsmodel wordt als default waarde een filekans van 0,10 aangenomen.

Bij file is de afstand tussen voertuigen geringer. Met referentie naar de bespreking in paragraaf 8.2.4 wordt een minimumafstand aangenomen van 2 m. Als default maximumafstand bij file wordt 20 m voorzien. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit de afstand is tijdens de calamiteit, waarbij bestuurders – hopelijk – algemeen een zekere afstand bewaren. Voor de afstand bij file wordt opnieuw een uniforme distributie toegepast.

Bovenstaande heeft betrekking op de afstanden bij stilstaand verkeer. Aangenomen is dat voertuigen tot stilstand komen bij brand in de tunnel. Indien de meest nabijgelegen voertuigen nog passeren dan is dit geacht te zijn verrekend via de mogelijk grotere afstand tot het meest nabijgelegen stilstaande voertuig.

Brandweerinterventie

Met betrekking tot ‘asset protection’ kan brandweerinterventie (i) de bestaande brand onder controle brengen (beperken HRR en THR); (ii) verdere brandverspreiding tegengaan en (iii) de constructie beschermen door koeling.

Voor gebouwen wordt bij toepassing van de ‘Natural Fire Safety Concept’ [60] uitgegaan van een vroeg blussen door de brandweer, waarna de brand als niet-belangrijk kan worden aangemerkt. Standaardkansen voor een succesvolle brandweerinterventie worden ingeschat op 0,8-0,95. Er wordt evenwel aangehaald dat deze kansen afnemen indien er een langere tijdsduur is tussen de start van de brand en de interventie.

In het brandverspreidingsmodel wordt uitgegaan van (i) een kans op succesvolle brandweerinterventie, $p_{sup,FRS} = 0,95$. Falen impliceert hier dat de brandweer niet in staat is om de brand te bestrijden, bijvoorbeeld omdat de brand zodanig intens is dat deze niet kan worden benaderd. Hierbij moet worden opgemerkt dat dit een conditionele kans is: de kans op succesvolle interventie, gegeven dat de gebruikers de brand niet reeds konden blussen. Deze kans heeft dus betrekking op reeds meer uitdagende branden.

In geval van een interventie wordt uitgegaan van (ii) een reductie van de verdere brandverspreiding door beperking van de ontvangen radiatie (effect rechtstreeks reductie HRR, verminderde ontvangen radiatie door waterscherm en koeling van target voertuigen). Dit wordt gemodelleerd via een reductie van de ontvangen radiatie conform (9). Dit komt overeen met toepassing van een effectieve HRR, HRR_{eff} , in de berekening van d_{crit} . Er is momenteel geen duidelijkheid over een goede inschatting van de reductiefactor τ_{FRS} . Daarom wordt een grote onzekerheid in rekening gebracht door een uniforme distributie in het interval 0,25-0,75. Om in rekening te brengen dat de brandweer niet onmiddellijk ter plaatse is, (iii) wordt de reductie pas toegepast vanaf verspreiding naar het derde voertuig.

$$I = \kappa \tau_{FRS} HRR = \kappa HRR_{eff} \quad (9)$$

De hier beschreven werkwijze voor het in rekening brengen van brandweerinterventie is een aanname

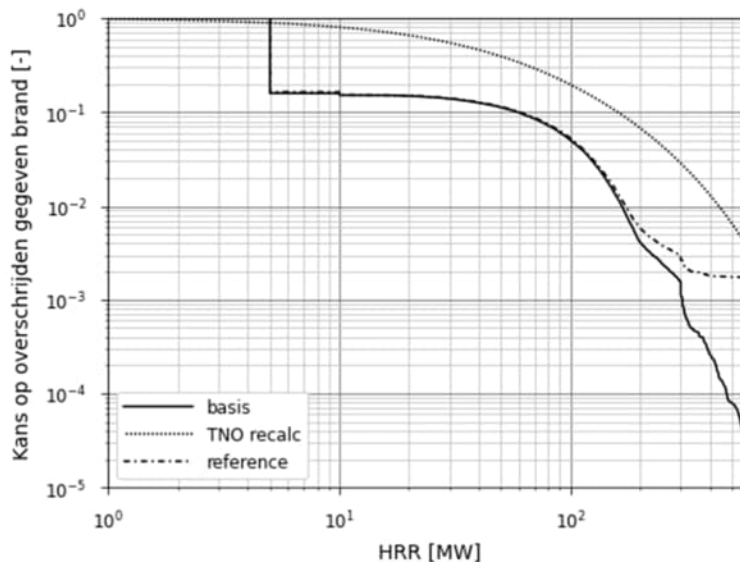
om een eerste inschatting mogelijk te maken. Een verdere analyse van brandweerinterventies kan toelaten om het effect beter in rekening te brengen¹⁵.

Resultaat referentie-evaluatie brandgevaar

Toepassing van bovenstaande in het model brandverspreiding resulteert in *Figuur 20* voor de HRR overschrijdingskans gegeven brand (met andere woorden: complementair cumulatieve distributiefunctie HRR gegeven brand).

In vergelijking met de basisevaluatie van *Figuur 19* is er een grote stijging in de kans op zeer grote branden (kans van 0,0018 op een brand met maximumintensiteit). Analyse van de simulaties duidt erop dat al deze extreme branden betrekking hebben op situaties met file. De extreme branden hebben zowel betrekking op situaties met en zonder brandweerinterventie (70% met interventie, 30% zonder).

Uit toepassing van het vereenvoudigd model wordt afgeleid dat filevorming inderdaad potentieel een cruciale rol spelen in het risicoprofiel van een tunnel.



Figuur 20 Kans op overschrijden HRR gegeven brand, referentie-evaluatie (10^5 simulaties)

Van de 182 simulaties met $HRR > 400$ MW startten er 156 met een HGV brand, 17 met een tankwagen en 9 met een personenwagen. Hier suggereert het model dat, met het oog op brandintensiteit, het onvoldoende is enkel en alleen te focussen op tankwagenbranden.

¹⁵ Bij tunnels met mechanische ventilatie is de brand onderstrooms (het deel van de tunnel achter de brandhaard) voor brandweerinterventie goed te bereiken als het gaat om rookontwikkeling. Echter, achter de brandhaard stilstaande voertuigen kunnen dat bemoeilijken. Voor zover ondergetekenden hebben begrepen, zijn grote tunnelbranden ook bovenstrooms goed te benaderen door getrainde brandweerlieden en wordt daarmee in Zwitserland op realistische schaal geoefend. Men zou daar ook leren om de constructie te koelen.

9 Effect van maatregelen op brandgevaar

9.1 Algemeen

Het model brandverspreiding laat toe om – op vereenvoudigde wijze – het effect van brandveiligheidsmaatregelen op het brandgevaar in rekening te brengen.

Tabel 6 geeft een overzicht van de beschouwde maatregelen en een kwalitatieve bespreking van hun effect op het brandgevaar (*noot: sommige maatregelen hebben enkel/ook een effect op de respons van de constructie*). De maatregelen met een effect op het brandgevaar worden vervolgens één voor één in meer detail besproken met betrekking tot hun invloed op het brandverspreidingsmodel.

Tabel 6 Beschouwde maatregelen en kwalitatief effect op brandgevaar

Maatregel	Effect
Actieve maatregelen	
sprinklersysteem	Succesvolle activatie van een sprinklersysteem resulteert in een reductie van de HRR. De waterdruppels dringen rechtstreeks door tot het brandoppervlak en resulteren in een reductie van de HRR [123].
watermiststelsel	Succesvolle activatie van een watermiststelsel vermindert de zuurstoftoevoer door de verdamping van de druppels en reduceert zo de HRR. Daarnaast vermindert watermist de ontvangen radiatie op nabijgelegen objecten doordat de mist fungeert als radiatieschild [56].
ventilatiesysteem	Langsventilatie in een tunnel kan de brand aanwakkeren [53]. Bij experimenten en (bepaalde) historische data is dit effect echter reeds in rekening gebracht, bijvoorbeeld in Runehamar test [118]. De HRR waarden worden daarom geacht reeds het effect van een standaard langsventilatie te verrekenen. De invloed op de <i>fire growth rate</i> wordt in het brandverspreidingsmodel niet in rekening gebracht. Er wordt dus vereenvoudigend gesteld dat er geen bijkomend effect is van de langsventilatie op het brandgevaar.
mobiel blussysteem	Het inzetten van een mobiel blussysteem (aangenomen als zijnde een extern mobiel toestel) vereist actie van opgeleid personeel, bv. brandweer. Er wordt aangenomen dat het mobiel blussysteem niet tijdig ingezet kan worden om brandverspreiding tegen te gaan. Het mobiel blussysteem reduceert wel de impact op de structuur.
Passieve maatregelen	
hittewerende bekleding	Het effect van passieve maatregelen op het brandgevaar wordt beschouwd als verwaarloosbaar. Passieve maatregelen beïnvloeden wel de hitte-feedback naar de brand door hun effect op de oppervlaktetemperatuur van de tunnelwand, maar bij volontwikkelde branden is dit effect klein. Passieve maatregelen hebben geen effect op de frequentie van brand.
vermiculiet spuitmortel	
mechanische maatregelen afvallen beton	
Andere maatregelen	
filemanagementsysteem (tunneldosering)	Een filemanagementsysteem of tunneldosering verlaagt de kans op filevorming. Zoals aangehaald in paragraaf 8.3.2 verhoogt file het brandgevaar door de kleinere afstand tussen voertuigen.
minimumafstand vrachtwagen- vrachtwagen	Een minimumafstand vrachtwagen- vrachtwagen verlaagt de kans op rechtstreekse brandoverslag tussen vrachtwagens.

Hieronder wordt de implementatie van de maatregelen met een effect op de brandverspreiding toegelicht. Het effect van de maatregelen op de HRR overschrijdingskans, relatief t.o.v. de referentie-evaluatie, is weergegeven in *Figuur 21* en *Tabel 7* in paragraaf 9.5.

De maatregelen (inclusief brandweerinterventie) worden geacht onafhankelijk van elkaar een effect uit te oefenen. Wanneer meerdere maatregelen actief zijn, betekent dit dat zij cumulatief effect hebben.

9.2 Filemanagement systeem (tunneldosering)

Een filemanagement systeem heeft tot doel filevorming in de tunnel te vermijden. Dit kan door bijvoorbeeld rijbanen in de tunnel af te sluiten. Een dergelijke tunneldosering wordt toegepast in de Koning Willem-Alexandertunnel [119], de Ketheltunnel en in de Beverentunnel (België) [120].

Bij een goed werkende tunneldosering kan ervan uitgegaan worden dat file in de tunnel niet langer systematisch is, maar zich enkel voordoet wanneer er in de tunnel zelf, of net benedenstrooms van de tunnel, een onverwachte gebeurtenis (ongeval) plaatsvindt¹⁶.

De kans op file, ondanks tunneldosering, wordt begroot op basis van de kans op voertuigpech. Met als referentie het achtergronddocument QRA tunnels [59] is de kans op pech¹⁷ $2,5 \cdot 10^{-6}$ per mvtkm. Voor richtwaarden leunend op de QRA-studie 'Zoeken naar Balans' [60], komt dit voor $17 \cdot 10^6$ mvt per jaar en een tunnel van 0.6 km lengte op 25,5 maal pech per jaar. Ook pech net benedenstrooms van de tunnel kan aanleiding geven tot file in de tunnel. Daarom wordt een totale 'invloeds lengte' van 1,2 km beschouwd, resulterend in 51 maal pech per jaar. Indien uitgegaan wordt van 1 uur file bij pech en een file capaciteit van 3000 mvt per uur, resulteert dit in een residuele kans op file van 0,009. Deze waarde wordt als indicatieve waarde geïmplementeerd in de berekeningen om het effect van tunneldosering in rekening te brengen.

9.3 Minimumafstand vrachtverkeer

Minimumafstanden bij doorgaand verkeer worden vaak bepaald via de 2-seconden-vuistregel (minimumafstand is gelijk aan de afstand afgelegd in 2 seconden) [121]. In België geldt een wettelijke minimumafstand voor vrachtverkeer van 50 m [122], dit komt overeen met de 2-secondenregel bij 90 km/u. Minimumafstanden bij doorgaand verkeer verzekeren niet dat voertuigen dit ook aanhouden bij het tot stilstand komen (*bijvoorbeeld ten gevolge van brand in een voorliggend voertuig*).

Bij analyse van de basis-evaluatie is een relatief groot aandeel van de grote branden gerelateerd aan brandverspreiding van HGV naar HGV (inclusief tankwagens). Er worden ter analyse simulaties uitgevoerd 'HGVdist' waarbij in normale verkeersomstandigheden de minimumafstand HGV-HGV 30 m bedraagt. Voor HGV naar HGV brandverspreiding wijzigt deze regel dus het

¹⁶ Opmerkingen op een conceptversie van dit rapport geven aan dat foutmeldingen of verkeerde meldingen niet ongewoon zijn bij een filemanagementsysteem. De vraag is hoe snel een operator acteert bij het ontvangen van een signaal en hoe snel dan een ingezette maatregel effectief is (dergelijke systemen werken zelden automatisch). De inschatting in de huidige studie is dat het tunnelsysteem gebruikt wordt om de tunnel vrij van file te hebben bij problemen met de doorstroming benedenstrooms van de tunnel. Pech in de tunnel, en juist benedenstrooms van de tunnel, worden in rekening gebracht via de residuele kans op file.

¹⁷ De hier vermelde waarde is de afgeleide waarde op basis van de basisletselongevalsfrequentie en is als zodanig een "gemiddelde" waarde.

voertuigafstandsmodel van paragraaf 8.2.4. De regel geldt niet bij tussenliggende personenwagens en evenmin bij filevorming.

9.4 Vaste blussystemen

Historisch is er een terughoudendheid tot de installatie van sprinkler- en watermistssystemen in tunnels [34]. Dit heeft ondermeer te maken met een vrees dat activatie van het blussysteem de evacuatie van de tunnel bemoeilijkt [56]. In navolging van onderzoeksprojecten in de jaren 2000 is hier verandering in gekomen, en internationale organisaties (NFPA, PIARC) raden nu in bepaalde situaties blussystemen aan [34].

Een vast blussysteem kan de brand onder controle houden totdat brandweerinterventie de brand blust. Het kan niet verwacht worden dat het blussysteem de brand dooft. Deze systemen hebben tot doel de gevolgen van de brand te beperken [123].

Er is steeds een kans dat het blussysteem niet beschikbaar is bij de brand (*het systeem activeert niet, of niet in de correcte zone*). Dit wordt gemodelleerd met een kans op succesvolle activatie, p_{sup} . De effecten van een succesvolle activatie worden inschat gebaseerd op de resultaten vermeld in [56, 123].

9.4.1 Sprinklersysteem

In paragraaf 7.5.7 werd de Nihonzaka tunnel reeds aangehaald. Een andere, meer succesvolle case is de 2007 Burnley tunnelbrand in Melbourne, Australië. In deze tunnel was een deluge systeem aanwezig (*manuele activatie van sprinklers in een tunnelsectie*). Dit systeem slaagde erin om een potentieel catastrofale brand onder controle te houden tot brandweerinterventie. Zie [52] voor een meer gedetailleerde bespreking van de Burnley tunnelbrand.

Sprinklersystemen gebruiken een grotere druppeldiameter. Hierdoor is de verdamping van de druppel meer beperkt, maar dringt deze beter door naar het brandend oppervlak.

Een belangrijk nadeel van sprinklers (t.o.v. watermist) is de vereiste hoeveelheid water. Voor een 90 m lange tunnelsectie met twee rijvakken is ongeveer 6000 – 10000 liter per minuut vereist [34]. Samengevat resulteert een activatie van het sprinklersysteem in een reductie van de HRR van de brand. In het brandverspreidingsmodel wordt dit als volgt meegenomen:

- Kans op succesvolle activatie, $p_{sup,sprinkler} = 0,95$
- De HRR van ieder brandend voertuig wordt gereduceerd door vermenigvuldiging met een factor $v_{sprinkler}$. Deze factor wordt gemodelleerd door een uniforme verdeling met minimum 0,2 en maximum 0,5 (HRR reductie van 50% tot 80%). Deze factor is bij elk brandend voertuig verschillend.

9.4.2 Watermiststelsysteem

Watermistssystemen gebruiken een kleine druppeldiameter. De mistdruppels koelen de hete rookgasen en beperken de radiatie van de brand (radiatieschild) [56]. De rechtstreekse koeling van het brandend oppervlak is voor deze systemen minder t.o.v. sprinklerinstallaties, doordat de druppels bij mistsystemen kleiner zijn en niet doordringen tot de bron van de brand [56]. Anderzijds wordt de

brand door de sterke volumetoename van het verdampende water verstikt (*de toevoer van zuurstof naar de brand wordt beperkt*) [52]. Hierdoor worden watermistssystemen soms geacht een betere performantie te hebben bij tankwagenbranden.

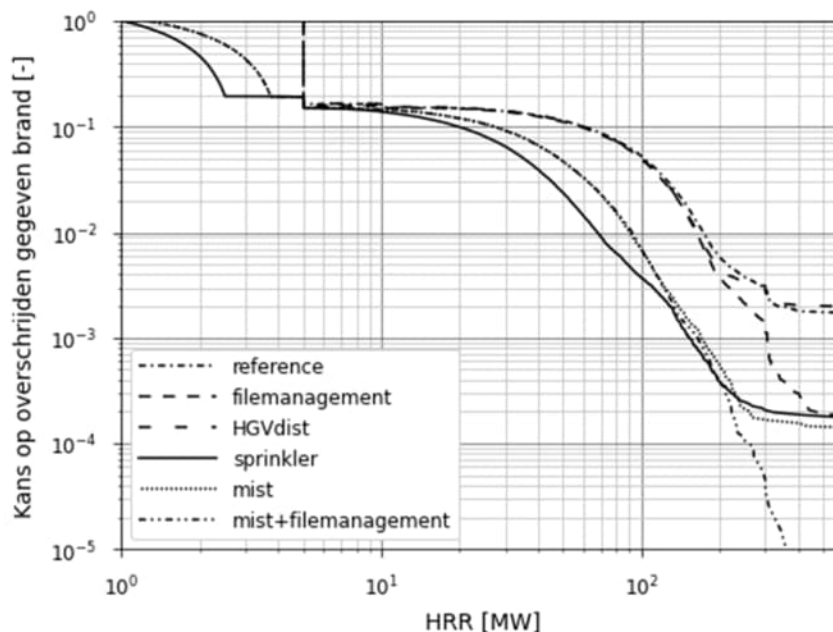
Wu en Carvel [56] vermelden studies waaruit blijkt dat de radiatievermindering 50-80% kan bedragen. De HRR vermindert met 40-80%. Er wordt evenwel opgemerkt dat mistsystemen niet effectief zijn tegen zeer kleine branden.

Samengevat resulteert een activatie van het watermiststelsel in een reductie van de HRR van de brand, en eveneens in een reductie van de radiatie. In het brandverspreidingsmodel wordt dit als volgt meegenomen:

- Kans op succesvolle activatie, $p_{sup,mist} = 0,95^{18}$
- De HRR van ieder brandend voertuig wordt gereduceerd door vermenigvuldiging met een factor v_{mist} . Deze factor wordt gemodelleerd door een uniforme verdeling met minimum 0,25 en maximum 0,75. Deze factor is bij elk brandend voertuig verschillend.
- De radiatie wordt gereduceerd analoog aan (9) met een factor τ_{mist} . Deze factor wordt gemodelleerd door een uniforme verdeling met minimum 0,2 en maximum 0,5 (50% tot 80% reductie).

9.5 Overzicht effect maatregelen, relatief t.o.v. de referentie-evaluatie

Het effect van de besproken maatregelen wordt hieronder in *Figuur 21* en *Tabel 7* weergegeven. Het effect van de maatregelen wordt bekeken relatief t.o.v. de referentie-evaluatie. Dit betekent dat de maatregel toegepast wordt op de referentie-situatie zoals toegelicht in 8.3.2.



Figuur 21 Kans op overschrijden HRR gegeven brand, effect maatregelen relatief t.o.v. referentie-evaluatie (10^5 simulaties).

¹⁸ Gebaseerd op [107], waarbij opgemerkt dat een hogere waarde voor tunnels waarschijnlijk ook verdedigbaar is.

Tabel 7 *Kans per HRR klasse (nominale waarde als bovengrens interval) gegeven brand, effect maatregelen relatief t.o.v. referentie-evaluatie*

HRR klasse [MW]	Referentie	Filemanagement	Minimumafstand vrachtverkeer (HGVDist)	Sprinkler	Watermist	Watermist + filemanagement
5	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$
10	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
25	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$40 \cdot 10^{-2}$
50	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$
100	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
200	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
400	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
maximum (600)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$

10 Begroting impact brand op tunnelconstructie

10.1 Algemeen

Om de impact van de brand op de volledige tunnelconstructie in te schatten is het nodig een beeld te hebben van de ruimtelijke omvang van de brand. Daarnaast moet het brandgevaar, zoals eerder begroot in termen van HRR en THR, vertaald worden in een impact op de constructie (inclusief spatgedrag). Dit is vrij direct mogelijk wanneer gekeken wordt naar het gedrag van constructies bij werkelijke branden. Deze branden, zoals de Heinenoord brand [77], worden immers standaard uitgedrukt in termen van HRR en THR. De meeste experimentele data omtrent spatgedrag, evenals de proefprogramma's die recent zijn uitgevoerd in de landtunnels (bijvoorbeeld [98]), hebben echter betrekking op nominale brandkrommen zoals de RWS-brandkromme, waarbij de brandintensiteit wordt voorgesteld door een temperatuur-tijds-kromme voor de AST (adiabatische oppervlaktetemperatuur, meer courant aangeduid als de temperatuur van de ondoorzichtige hete rookgassen).

10.2 Ruimtelijke omvang

Op basis van simulaties werd eerder een inschatting gemaakt van de HRR-overschrijdingskans bij brand, zie hoofdstuk 8 'Begroting brandgevaar in tunnels'. Hierbij werden nominale HRR klassen gedefinieerd. Om de ruimtelijke omvang van de brand voor deze HRR klassen na te gaan, werd voor iedere brandsimulatie in de referentie-evaluatie opgezocht welke voertuigen bij de brand betrokken waren. Zo hebben alle branden van 5 MW bijvoorbeeld betrekking op een personenwagen, branden van 10 MW hebben betrekking op 2 personenwagens, enz. Voor de grotere branden werden meerdere combinaties voertuigen waargenomen, maar bleek eveneens dat een bepaalde combinatie voertuigen (bijvoorbeeld 2 HGV) als maatgevend kan worden beschouwd (beoordeeld op basis van frequentie, met een bias voor een grotere omvang). Deze resultaten zijn weergegeven in *Tabel 8*.

Tabel 8 *Maatgevende voertuigcombinatie per HRR klasse ('car' is personenwagen en HGV is Heavy Good Vehicle).*

HRR klasse [MW]	Maatgevende voertuigcombinatie
5	1 car
10	2 car
25	1 HGV
50	1 HGV
100	1 HGV
200	2 HGV
400	2 HGV tankwagen
maximum (600)	ongecontroleerde brandverspreiding naar groot aantal voertuigen

Deze resultaten geven niet één-op-één een beeld van de ruimtelijke omvang van de tunnelsectie die de brand ervaart, maar laten wel toe eenvoudiger een inschatting te maken via een vergelijking met simulaties en observaties bij werkelijke branden (hoofdstuk 12).

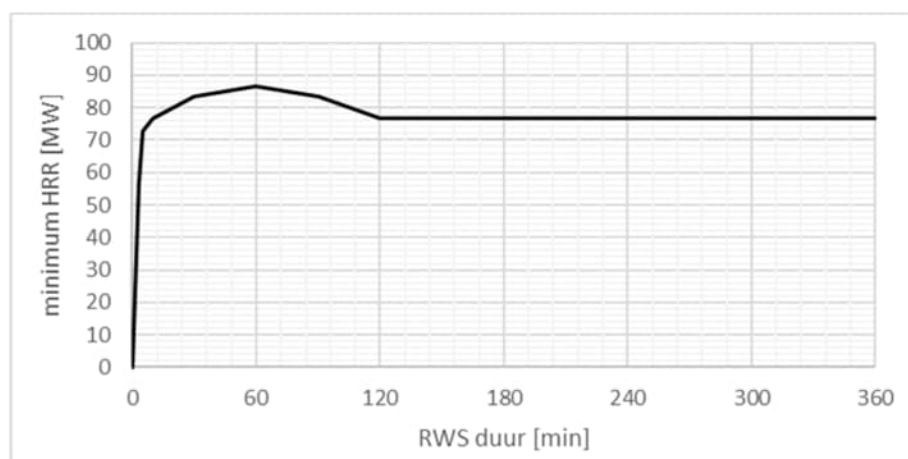
10.3 Temperatuur-tijd-kromme

Voor ieder van de HRR-klassen wordt de impact op de constructie nagegaan, in termen van een temperatuur-tijd-relatie.

De HRR klassen van 5 MW en 10 MW worden aangemerkt als voldoende beperkt in omvang om geen structureel gevaar voor de constructie op te leveren. Voor de brand van één (tot enkele) personenwagen(s) wordt de schade aan de constructie als oppervlakkig aangemerkt. Dit sluit aan bij hetgeen TNO in een studie naar kleinere branden [124], vanwege de verwachte lage brandduur en brandlast bij een personenwagen, heeft aangehouden.

Voor de hogere brandklassen wordt in eerste instantie een verband gezocht met de RWS kromme. Dit om eenvoudiger link te kunnen leggen met experimentele resultaten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de methodiek beschreven door [57], met achtergrond in [41,50]. Deze methodiek kan toegepast worden om van een gekend HRR verloop de gastemperatuur ter hoogte van het tunneldak in te schatten.

De methode van [57] en [50] kan ook omgekeerd toegepast worden om vanuit een nominale gastemperatuur (*bij ondoorzichtig rookgas, gelijk aan de AST*), een bijhorende minimale HRR vast te stellen. Toegepast op de RWS kromme wordt *Figuur 22* verkregen. Hiervoor werd uitgegaan van dezelfde aannames als in [41] (*tunnel 12 m breed en 6 m hoog*), en een omgevingstemperatuur van 20°C.

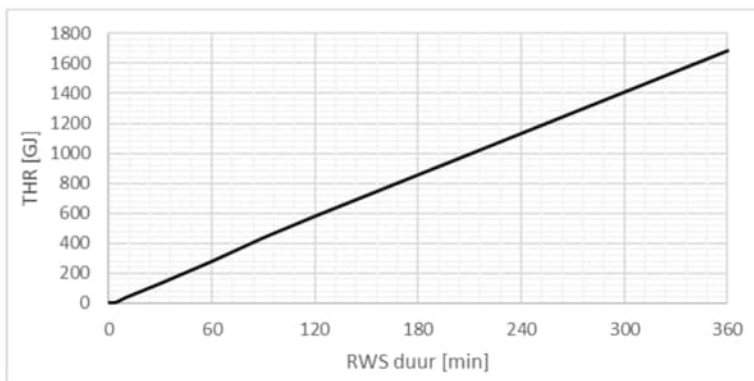


Figuur 22 Minimum HRR om RWS curve te volgen, conform methodiek [41].

Uit *Figuur 22* volgt dat alleen branden met een HRR boven 86,5 MW de RWS curve kunnen volgen. Voor de HRR klassen 25 MW en 50 MW kan de recente TNO evaluatie “*Brandkrommen kleinere branden in tunnels*” [124] als referentiepunt dienen. In [124] zijn de temperaturen ter hoogte van het betonoppervlak bepaald op basis van CFD (Computational Fluid Dynamics) simulaties. Op basis van de betreffende rapportage wordt aangenomen dat dit adiabatische oppervlaktetemperaturen zijn, die dus zowel het effect van radiatie en convectie in rekening brengen. In het rapport [124] worden simulaties uitgevoerd van een bestelbus met brandvermogen 20 MW (*deze valt in de HRR categorie 25 MW*), en een personenbus met een vermogen van 40 MW (*deze valt in de HRR categorie 50 MW*). De vrachtwagen met vermogen 70 MW valt reeds binnen de 100 MW categorie.

De simulaties suggereren dat de brandbelasting voor de constructie bij de HRR categorieën 25 MW en 50 MW beperkt blijft. Deze branden zijn bovendien te vergelijken met de Velsertunnel brand en de Heinenoordbrand, waarbij de tunnelconstructie slechts beperkt werd beschadigd. Deze branden worden hier niet verder bekeken.

Voor de grotere intensiteitsklassen (100/200/400 MW) kunnen de brandverspreidings-simulaties conservatief gekoppeld worden aan een RWS duur. Het oppervlak in *Figuur 22* onder de minimale HRR om de RWS-brandkromme te kunnen volgen, stemt immers overeen met de totaal vrijgegeven energie, i.e. de THR. Hierdoor wordt dus aan elke simulatie in deze categorieën via de THR een RWS duur gekoppeld. Deze koppeling wordt conservatief geacht omdat *Figuur 22* een minimaal vereiste HRR weergeeft. Bij een hogere HRR zal de brand sneller uitbranden, zonder dat de temperaturen ter hoogte van het tunneldak een fysisch maximum van ongeveer 1350°C temperatuurstijging zullen overstijgen [57]. *Figuur 23* geeft de relatie THR – RWS duur.



Figuur 23 THR bij toepassing minimum HRR (*Figuur 22*)

De resultaten worden opnieuw gegroepeerd in discrete klassen voor de RWS duur: 15/30/60/90/120/180/240 min. In *Tabel 9* worden de overeenstemmende THR waarden gegeven, evenals de relatieve frequenties waargenomen voor de ‘referentie’ simulatie-reeks voor het brandgevaar. In de HRR categorieën 100 MW en 200 MW werd geen enkele simulatie waargenomen waarbij de THR (m.a.w. de totale brandlast van alle in de brand betrokken voertuigen) voldoende hoog was om een RWS duur van 60 minuten te overschrijden (geen THR realisaties boven 284 GJ). Dit resultaat vloeit voort uit het vereenvoudigd model brandverspreiding. Indien een werkelijke brand in een tunnel dermate groot is dat een HRR van 100 MW gedurende 2u kan aangehouden worden, dan is de totaal vrijgezette energie (THR) reeds 720 GJ. In de simulaties werden dermate grote THR enkel waargenomen bij de meer intense branden in de categorie 400 MW. Bovenstaande suggereert dat (vrijwel) enkel branden in de categorie 400 MW overeenstemmen met een RWS duur die 60 min kan overschrijden. Dergelijke brand kan zich in werkelijkheid mogelijk manifesteren als een 2 uur durende brand aan 100 MW; in het model wordt de HRR van alle voertuigen echter onmiddellijk opgeteld, zonder spreiding in de tijd in rekening te brengen.

Tabel 9 Frequentie van RWS classificatie op basis van de THR, voor verschillende maximale brandintensiteiten, referentie-simulatie. Aantal realisaties per categorie aangeduid ter referentie; dit is op een totaal van 105 simulaties.

RWS [min]	THR [GJ]	100 MW (6138 sim)	200 MW (4670 sim)	400 MW (406 sim)
15	59	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0
30	131	$7,6 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$
60	284	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-1}$
90	437	0	0	$1,8 \cdot 10^{-1}$
120	581	0	0	$2,5 \cdot 10^{-3}$
180	857	0	0	0
240	1134	0	0	$2,1 \cdot 10^{-1}$

Alle branden in de categorie 240 min RWS zijn branden met tankwagens. Deze dragen 1000 GJ bij aan de THR, conform de conclusies in paragraaf 7.4.4, en vallen dus rechtstreeks in de categorie 240 min RWS. Gezien de vermelde aannames (zoals de toepassing van de minimum vereiste HRR, Figuur 22) is deze inschatting van RWS duur conservatief.

De branden die 400 MW overschrijden, zijn branden waarbij algemeen een groot aantal voertuigen in de brand betrokken raakt. Dit is in de berekeningen vaak gelinkt aan gelijktijdige file, zie paragraaf 8.3.2. Het model is te vereenvoudigd om een beeld te vormen voor dergelijke branden. Hier is het voldoende om aan te halen dat dergelijke extreme branden in principe niet kunnen worden uitgesloten.

Voor de simulaties met maatregelen kunnen de frequenties in Tabel 9 principieel verschillend zijn. Passieve maatregelen hebben geen effect. Dit is ook het geval voor de verkeerstechnische maatregelen aangezien deze de frequentie van brandverspreiding wijzigen, niet de vrijgezette energie bij een gegeven aantal betrokken voertuigen. De frequenties van Tabel 9 worden daarom ook bij deze maatregelen toegepast.

Sprinklersystemen en watermistssystemen anderzijds, reduceren de HRR, maar blussen de brand niet, zodat de totale THR dezelfde blijft en de brand (bij uitblijven van brandweerinterventie) langer brandt. Indien de watertoevoer eindigt vóór brandweerinterventie, dan flakkert de brand weer op, zoals gebeurd is in de Nihonzaka tunnel brand (paragraaf 7.5.7). Brandweerinterventie is in de huidige studie niet in detail gemodelleerd, zodat over deze aspecten geen uitspraak kan worden gedaan. Sprinkler- en watermistssystemen koelen evenwel de gassen ook direct. Dit komt duidelijk tot uiting in de proeven (op schaal) in het UPTUN project [123]. Bij deze schaalproeven slagen zowel de sprinklers als de watermist erin om de temperaturen ter hoogte van het tunneldak te beperken.

Uit vergelijking van deze proeven met de bevindingen omtrent de lagere HRR-klassen 5/10/25/50 MW wordt als eerste benadering afgeleid dat de branden bij sprinkler- en watermistssystemen als volgt kunnen worden geclassificeerd:

- HRR-klassen van 5 en 10 MW als ‘lokaal’
- Andere HRR-klassen: 50% ‘lokaal’ en 50% ‘kleiner’.

Situaties waarbij het sprinkler-/watermiststelsel er niet in slaagt om de rookgassen te koelen, worden geacht te zijn verrekend in de faalkans van het brandblussysteem, zoals geïntroduceerd in

paragraaf 9.4. In situaties waar het brandblussysteem niet effectief is, worden de frequenties van *Tabel 9* toegepast.

Door de frequenties in *Tabel 9* te koppelen aan de kansen voor de HRR-klassen wordt een rechtstreeks beeld op de kans op verschillende branden verkregen. *Tabel 10* geeft de resultaten voor de referentie-simulatie, hierbij worden de branden van 5 MW en 10 MW aangeduid als ‘lokaal’, en de branden van 25 MW en 50 MW als ‘kleiner’. De branden met ongecontroleerde branduitbreiding worden aangemerkt als ‘extreem’. Deze indeling kan aangemerkt worden als een indeling voor brandintensiteit, daar het zowel de HRR en THR verwerkt. *Tabel 11* geeft dezelfde resultaten per miljoen mvtkm.

Hierbij dient opnieuw benadrukt te worden dat dit inschattingen zijn op basis van vereenvoudigde berekeningen. Zo zal de kans op een 180 min RWS intensiteit niet exact nul zijn. De branden zijn steeds conservatief in een intensiteitsklasse ingedeeld. Voor de grotere intensiteitsklassen worden de getabelleerde waarden daarom als een ruime inschatting (i.e. overschatting) voor de kans aangemerkt.

Conform de bovenstaande bespreking heeft de brandintensiteitsklasse 240 min betrekking op tankwagen branden, en de klasse ‘extreem’ op ongecontroleerde brandverspreiding. De gerapporteerde beperktere werking van sprinklers (*zonder toevoeging aan het water*) om brandstofbranden te controleren is niet verrekend.

Tabel 10 Kans op verschillende brandintensiteitsklassen, gegeven brand (frequenties op basis van 10^5 simulaties).

Brand-intensiteit	Referentie	Filemanagement	Minimumafstand vracht (HGVdist)	Sprinkler	Watermist	Watermist + filemanagement
lokaal	$8,5 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$9,3 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-1}$
kleiner	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$
15 min RWS	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-2}$	$79 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$
30 min RWS	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
60 min RWS	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
90 min RWS	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
120 min RWS	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$
180 min RWS	0	0	0	0	0	0
240 min RWS	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
extreem	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$

Tabel 11 Kans op verschillende brandintensiteitsklassen, per miljoen mvtkm (frequenties op basis van 10^5 simulaties).

Brand-intensiteit	Referentie	Filemanagement	Minimumafstand vracht (HGVDist)	Sprinkler	Watermist	Watermist + filemanagement
lokaal	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$
kleiner	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$
15 min RWS	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$
30 min RWS	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
60 min RWS	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$
90 min RWS	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
120 min RWS	$7,3 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-9}$	$4,1 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$3,9 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$
180 min RWS	0	0	0	0	0	0
240 min RWS	$6,2 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$
extreem	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$

10.4 Bemerkingen

Er wordt geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat niet alle energie wordt vrijgegeven (*i.e. dat de THR beperkt wordt door bijvoorbeeld brandweerinterventie*). Dit effect is enkel indirect verrekend bij de brandblusinstallaties, waarbij de brand bij effectieve activatie aangemerkt wordt als ‘lokaal’ of ‘kleiner’.

11 Spatten van beton

11.1 Algemeen

Dat beton bij brand kan afspatten is al meer dan een eeuw bekend. Jansson [70] refereert aan een aan een publicatie uit 1854, als zijnde mogelijk de eerste over spatten. Volgens Lottman [78] was Emperger [1] in 1921 een van de eersten die over spatten van beton bij brand in gebouwen rapporteerde. Bij zowel een brand in een gebouw in Dresden (1911) als in Wenen (1913) was door het afspatten van de dekking de wapening direct blootgesteld aan de brand. Gedurende de eeuw die volgde, is spatten regelmatig onderwerp van studie geweest. Veelal is daarbij ook gerapporteerd over in de literatuur beschikbare informatie. Voorbeelden zijn [7,8] in 1979, [15] in 1996 en [25] in 2005. In dit hoofdstuk is op basis van deze en andere onderzoeken kort ingegaan op de oorzaak van spatten (paragraaf 11.2) en de factoren die van invloed zijn op spatten bij brand (11.3). De literatuur met betrekking tot spatten bij brand is besproken. Gegeven het feit dat er zoveel over spatten van beton is gerapporteerd, is slechts een selectie uit de beschikbare literatuur gebruikt, waarbij de aandacht met name is gericht op onderzoeken in Nederland. Omdat een proef uit 2001 [18] is gebruikt voor de definitie van spatongevoelig beton in de ROK [47] (onderwerp van paragraaf 11.5) is in paragraaf 11.4 de literatuur van vóór 2001 besproken en in paragraaf 11.6 van ná 2001. In paragraaf 11.7 zijn de resultaten van vele in-situ hitteproeven, die de afgelopen jaren zijn uitgevoerd, besproken.

11.2 Oorzaken van explosief spatten

Het is duidelijk dat het spatten van beton bij brand een gevolg is van de temperatuursverhoging van het beton. Doordat het beton vanaf de buitenzijde wordt verhit, ontstaat in het beton een temperatuursgradiënt en in combinatie met thermische uitzetting resulteert dat in inwendige spanningen [25]. De verhitte buitenzijde komt onder druk te staan en meer naar binnen treden trekspanningen op. De drukopbouw in het verhitte betonoppervlak kan leiden tot afspatten. Daarnaast resulteert de temperatuurverhoging in het uitzetten van het vocht in de poriën van het beton en daarmee een drukopbouw in de poriën. De drukopbouw kan zo hoog oplopen dat stukken beton exploderen en wegspringen [25]. Feitelijk zullen beide genoemde mechanismen tegelijk optreden en gecombineerd de oorzaak zijn van afspatten.

Verskillende verschijningsvormen van spatten worden gerapporteerd. Copier (*Rapporteur van CUR-VB rapport 98 [8]*) onderscheidt drie verschijningsvormen en Breunese e.a. [25] onderscheidt de volgende vijf vormen van spatten (*tussen haakjes de Engelse termen*):

- Explosief spatten (*explosive spalling*)
- Oppervlakte spatten (*violent surface spalling*)
- Afregenen (*sloughing off or progressive gradual spalling*)
- Spatten op de hoeken (*corner spalling*)
- Spatten tijdens of na koelen (*post cooling spalling*)

Volgens Breunese e.a. [25] is het oplopen van de dampdruk in de poriën de belangrijkste hoofdoorzaak van het spatten van beton. De thermische spanningen in de buitenlaag worden ook als een belangrijke oorzaak gezien naast nog enkele andere oorzaken, zijnde de volumeverandering van de toeslagmaterialen en fysische en chemische reacties.

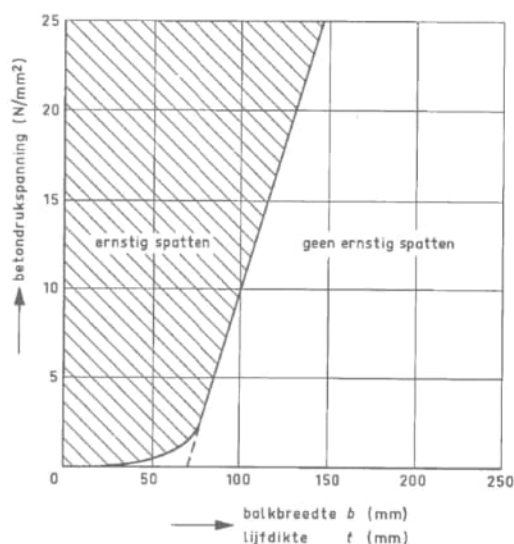
11.3 Invloedsfactoren op spatten

Breunese e.a. [25] rapporteert in 2005 dat er in de literatuur overeenstemming over bestaat dat de volgende factoren van invloed zijn op spatten:

- Het vochtgehalte, de poriegrootte en -verdeling en de permeabiliteit;
- De wijze van verhitting
- Drukspanningen;
- Afmetingen van de constructie;
- Aanwezigheid van wapening.

Een hoger vochtgehalte, een hogere opwarmingssnelheid en aanwezigheid van drukspanningen in het beton resulteren in een groter spatgevaar. In 1980 [8] waren de oorzaken van temperatuurspanningen, vochtgehalte en drukspanning ook al in beeld. Ook is de drukopbouw in de poriën ook al wel genoemd als mogelijke oorzaak, maar op dat moment betrof het nog slechts een beschouwing rond een theoretisch model, waarvan de consequenties nog niet proefondervindelijk waren onderzocht, zo werd gesteld.

Het vochtgehalte van het beton is altijd gezien als een belangrijke invloedsfactor op het spatten van beton. Als het vochtgehalte laag genoeg is, kan spatten van beton worden voorkomen. In het CUR VB rapport van 1980 [8] is gesteld dat proefondervindelijk was vastgesteld dat als veilige bovengrens kan worden aangehouden dat voor een vochtgehalte lager dan 5% (V/V) geen ernstige vormen van spatten optreden¹⁹. Voor beton met een vochtgehalte groter dan 5% (V/V) is grafisch weergegeven wanneer ernstig spatten wel of niet optreedt, afhankelijk van enerzijds de grootte van de drukspanning en anderzijds de afmetingen van het betonelement (figuur 24). De basis voor deze resultaten is afkomstig van werk van Meyer-Ottens [3].



figuur 24 Optreden van al of niet spatten in ongewapend of licht gewapend grindbeton bij vochtgehalten groter dan 5% (V/V) [8].

¹⁹ Hier is het vochtgehalte uitgedrukt in volumepercentage (V/V). Vaak wordt het vochtgehalte ook uitgedrukt in gewichtspercentage (M/M). Tussen de waarden voor het vochtgehalte in (V/V) en (M/M) zit een factor van ca. 2,3 (volumieke massa van beton t.o.v. volumieke massa van water). In de figuur in [3], die als basis is gebruikt voor de figuur 24, was de grens waarbij geen spatten optreedt de waarde van 2 gewichtsprocent aangegeven.

In 1980 werd met betrekking tot spatten het volgende geconcludeerd [8]:

“Ondanks de genoemde resultaten uit het uitgevoerde onderzoek zal moeten worden bedacht dat spatten een grillige gebeurtenis is. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het al dan niet optreden van spatten van vele factoren afhankelijk is. Deze factoren kunnen ieder voor zich, of in combinatie, tot het optreden van spatten aanleiding geven. In het algemeen geldt echter wel dat het vochtgehalte de belangrijkste rol speelt. Daar het vochtgehalte van betonconstructies op de lange duur beneden een zekere waarde zal zijn gedaald (5 tot 7% (V/V)) zal de kans op ernstige vormen van spatten in de praktijk gering zijn. Dit stemt overeen met de indruk dat spatten in de praktijk nogal meevalt en niet vaak aanleiding geeft tot een voortijdig bezwijken van een element.”

Direct moet worden opgemerkt dat het hier gaat over ervaringen tot 1980, dat de toegepaste brandkromme minder zwaar zal zijn geweest dan de RWS-brandkromme en dat in tunnels het vochtgehalte veelal hoger zal zijn dan algemeen in betonconstructies (*bijvoorbeeld gebouwen*), waar het onderzoek op was gebaseerd.

In NEN 6701 [20] voor de rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van betonconstructies is voor spatten een figuur overeenkomstig die in figuur 24 opgenomen met daarbij de volgende opmerking:

“Een vochtgehalte groter dan 7% (V/V) is eveneens ongunstig met betrekking tot de kans op spatten. Geacht wordt dat in gebouwen het evenwichtsvochtgehalte normaal aanwezig is en gelijk is aan 7% (V/V)”.

In deel 1.2 van Eurocode 2 [44] is aangegeven dat het onwaarschijnlijk is dat explosief spatten optreedt als het vochtgehalte van het beton lager is dan k in gewichtsprocenten. Voor k is aangegeven dat dit in de nationale bijlage gevonden kan worden, terwijl een waarde van 3 is aanbevolen. In de Nederlandse nationale bijlage is ook 3 aanbevolen.

11.4 Ervaringen met spatgedrag in brandproeven vóór 2001

Een uitgebreid experimenteel onderzoek van CUR VB commissie C 29 [7,8] in de jaren zeventig van de vorige eeuw was vooral gericht op het spatgedrag van lichtbeton bij brand. Resultaten van enkele eerder uitgevoerde bandproeven op grindbeton zijn ook gerapporteerd. Het betrof balken met een doorsnede van 0,3 m x 0,4 m. Van de tien proeven waren bij slechts één proef (vochtgehalte 7,5 % V/V) enkele kleine stukjes beton explosief afgesprongen tussen 8 en 25 minuten brand. Bij overige proeven was sprake van afspringen van enkele stukjes beton aan de randen.

In de negentiger jaren van de vorige eeuw heeft het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Bouwdienst R.W.S., een onderzoeksplan geformuleerd met als doel het verkrijgen van meer zicht op mogelijk spatten in tunnels. In de eerste fase is een literatuuronderzoek uitgevoerd, waarvan de bevindingen zijn gerapporteerd in [15]. Gesteld is dat het vochtgehalte een belangrijke parameter is met betrekking tot de kans op spatten en dat onderzoek naar spatten vooralsnog beperkt was gebleven tot direct aan verhitting blootgestelde betonconstructies. Anders gezegd, gegevens welke het spatgedrag van beschermde, c.q. geïsoleerde, betonconstructies goed beschrijven, waren schaars.

Met betrekking tot de wens om ook inzicht te krijgen in het mogelijke spatgedrag van betonconstructies die zijn beschermd met brandwerende²⁰ bekleding, kan erop worden gewezen dat het in die tijd al gebruikelijk was om tegen het plafond en op het bovenste gedeelte van de wand brandwerende bekleding aan te brengen. In een studie uit 1985 naar de brandveiligheid in autotunnels [14] is het volgende vermeld²¹:

“In verband met de voorgenomen versoepeling van de verplichting om sommige gevaarlijke stoffen via omleidingsroutes in plaats van door tunnels te vervoeren, heeft Rijkswaterstaat aan TNO-IBBC de opdracht verstrekt om drie typen isolatiemateriaal te onderzoeken op geschiktheid om te voorkomen dat het beton en wapeningstaal te hoog in temperatuur zouden stijgen. In 1979 heeft TNO een proeftunnel gebouwd en een proef genomen met een benzinebrand (duur: 90 min. En temperatuur 1200-1300 °C). Hieruit bleek dat ook bij calamiteiten met niet onder art. 15a WVR vallend verkeer de tunnelconstructie zou kunnen worden aangetast. Zie bijv. de brand in de Velsertunnel, hfdst. 6.3.2, blz. 47. Bij de opening van het Gouwe-aquaduct in de A12 op 6 oktober 1981 werd meegedeeld dat alle bestaande en nieuw te bouwen tunnels zullen worden voorzien van een hittewerende isolatielaag aan te brengen op het plafond en een deel van de zijwanden.

De hittewerende isolatielaag moet op eenvoudige wijze zijn aan te brengen en mag tijdens de brand niet van het beton vallen. Het materiaal moet dusdanig isoleren dat na een brand van 2 uur de temperatuur ter plaatse van de wapening niet hoger wordt dan 250 °C.”

In [15] was aangegeven dat experimentele gegevens met betrekking tot de temperatuurontwikkeling van beschermde betonconstructies (*bijvoorbeeld in tunnels*) wel voorhanden zijn, maar dat die geen zicht geven op het spatgevaar, omdat in de bedoelde experimenten dunne, relatief droge, betonplaten waren toegepast en dat het vochtgehalte in de betonconstructie van tunnels aanzienlijk hoger is dan die in de experimenten.

Both en Van der Haar [15] stellen dat het vochtgehalte de belangrijkste parameter is en refereren aan het hiervoor ook al aangehaalde onderzoek, waaruit zou blijken dat de kans op spatten gering is bij vochtgehalten lager dan 5% (V/V).

In [15] is ook gerefereerd aan een onderzoek [6] dat bij TNO in 1979 is uitgevoerd en waarbij spatten was opgetreden in brandproeven op beschermde betonplaten, die door buiten opslag meer representatief waren voor de omstandigheden in tunnels. Hoewel daarbij geen vochtgehalten waren gemeten, was het de verwachting dat dit wel aanzienlijk hoger was dan de gevaargrens van om en nabij 5% (V/V). Op de tekening van de betonplaat was in het kader aangegeven: “*Gouweaquadukt RW 12; Betonplaat t.b.v. beproeving brandwerende bekleding*”.

De inleiding in het TNO-rapport uit 1979 [6] begint als volgt:

“Bij het transport van gevaarlijke stoffen door tunnels kunnen calamiteiten optreden. Daarbij kan gedacht worden aan een tankauto geladen met benzine en waarbij

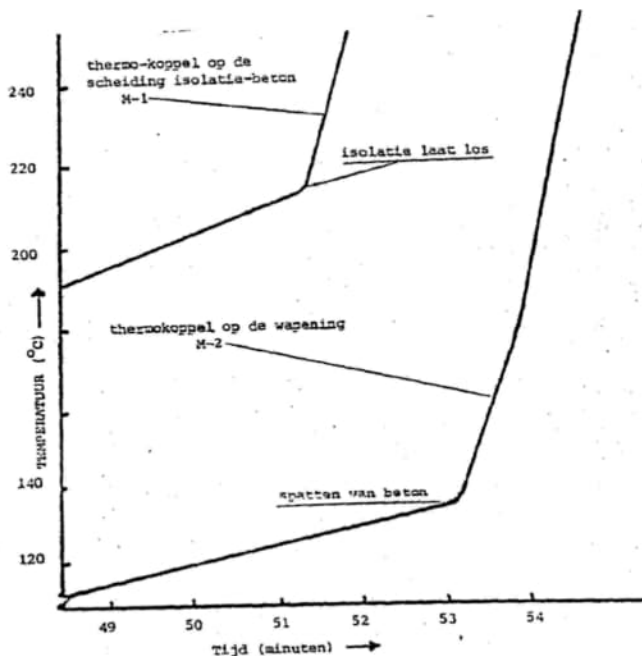
²⁰ In de literatuur wordt gesproken over brandwerende en hittewerende bekleding. In dit rapport zijn beide uitdrukkingen ook door elkaar gebruikt.

²¹ De tekst is een citaat met die kanttekening dat de referenties die in de originele tekst staan, hier niet zijn overgenomen.

de benzine uit de tank stroomt. Een langdurige en hevige brand kan daarvan het gevolg zijn. Om ernstige beschadigingen van een tunnel te voorkomen, dient het beton aan de binnenzijde van de tunnel te worden beschermd.

Uit eerder verrichte studies (1)²² is gebleken dat de schade aan de tunnel bij dergelijke brand slechts herstelbaar zal zijn wanneer de binnenzijde van de tunnel is voorzien van een daartoe geschikt isolatiemateriaal.”

In het TNO onderzoek [6] zijn twee soorten isolatiemateriaal beproefd, waarbij de dikte van het isolatiemateriaal is gevarieerd en het vochtgehalte van het isolatiemateriaal per proef sterk verschilde. Het vochtgehalte van de betonplaten is niet gemeten. Vermeld is dat, om te voorkomen dat de beton te droog zou worden, de platen waren afgedekt met plastic folie, dat voor verhitting was verwijderd. Bij de proef met één van beide isolatiematerialen (*aangeduid als plaat 1*) en de dunste dikte (24 mm) en het laagste vochtgehalte van het isolatiemateriaal (4 gew. %), nam de temperatuur van de wapening na ca. 53 minuten zeer sterk toe (figuur 25), hetgeen er op duidde dat afspatten optrad. Na beproeving bleek 70% van het betonoppervlak te zijn afgespat met een diepte van 20 tot 65 mm (*dekking op buitenste wapening was 25 mm*).



figuur 25 Temperatuur als functie van brandtijd voor plaat 1 in het onderzoek naar brandwerende bekleding voor het Gouweaquaduct [6].

In figuur 25 is heel goed te zien dat, zodra spatten optreedt, de temperatuur zeer snel oploopt tot waarden boven de 250° C. Opgemerkt moet wel worden dat in dit geval de dekking 25 mm was. Bij een veel grotere dekking zal er waarschijnlijk nog enige tijd zitten tussen begin van spatten en het oplopen van de temperatuur van de wapening tot boven de 250° C.

Door TNO is in 1997 [16] en 1999 [17] onderzoek uitgevoerd naar het spatgedrag van met Promatect-H® geïsoleerde betonplaten, die werden verhit volgens de RWS-kromme. Het doel van het onderzoek in 1997 was om te onderzoeken of onder extreem ongunstig geachte omstandigheden spatten van

²² (1) is een verwijzing naar TNO rapport BV 72-20 uit 1972. Ondergetekenden zijn niet in het bezit van dat rapport, maar hebben het wel in de referentielijst opgenomen [2].

beton optreedt in, volgens gangbare principes, beschermde tunnelconstructies. In de inleiding van het rapport [16] is het volgende aangegeven:

“Aangezien het vochtgehalte de belangrijkste parameter is, werd in eerste instantie voorgesteld een aantal in-situ metingen uit te voeren om informatie te verkrijgen omtrent de reële luchtvochtigheidscondities in tunnels alsmede reële vochtgehalten in betonconstructies in tunnels. Op grond van deze metingen zouden een aantal proefstukken kunnen worden gemaakt, waarbij de bekledingsdikte op de gebruikelijke manier wordt gedimensioneerd (temperatuurcriterium op het scheidingsvlak beschermingsmateriaal - beton en van het wapeningsstaal). Gezien het destructieve karakter van adequate bepalingmethoden voor het vochtgehalte, is besloten hier voorlopig van af te zien, en proefstukken te maken welke een zo hoog mogelijk vochtgehalte zouden hebben, ten einde de "worst-case" te onderzoeken.”

Ondergetekenden kennen ook nu nog geen onderzoeken, waarbij in de praktijk het vochtgehalte van het beton van tunnelconstructies is bepaald.

Er is één proef uitgevoerd, waarbij het vochtgehalte (M/M) van het beton 5,8-6,2%²³ was en het vochtgehalte van het 27 mm dikke isolatiemateriaal 33,0-34,0%. Het proefstuk is 50 minuten verhit, waarbij de temperatuur snel opliep naar 1200 °C, na 60 minuten 1300 °C was en vervolgens tot 150 minuten minimaal gelijk was aan 1200 °C. Er is geen spatten waargenomen en de temperatuur van de wapening bleef onder de 250 °C. Na afloop bleek dat de betonplaat met de afmetingen 1,5 m x 1,5 m x 0,35 m, aan de onderzijde en zijkanten was gescheurd. Bij de waarnemingen tijdens de brandproef is gerapporteerd dat langs de kanten stoom ontsnapte en dat vocht ontsnapte door de scheuren aan de zijkant.

Omdat in de proef in 1997 [16] wellicht toch niet representatief was voor een worst-case, omdat het isolatiemateriaal een zeer hoog vochtgehalte had, was besloten nog twee proeven te doen, maar dan met een zo nat mogelijk beton en een zo droog mogelijk isolatiemateriaal. In het rapport [17] werd opgemerkt dat het onderzoek voornamelijk in het teken stond van afgezonken (cat. I) tunnels en dat voor dat type tunnels in Nederland een defacto standaard betonmengsel bestond.

Het vochtgehalte van het beton was 5,9-6,4% (M/M) en het vochtgehalte van het 27 mm dikke isolatiemateriaal was 2,0-3,2% (M/M). De opgelegde brandkromme was vergelijkbaar met die in de proef in 1997. Buiten een klein stukje cementshuid in één van de twee proeven was verder geen spatten opgetreden. In [17] is ook nog verwezen naar een proef uit 1997 waarbij een “droge plaat” (vochtgehalte 1,4-1,7% M/M) is beproefd.

11.5 De basis voor afspatongevoelig beton [18]

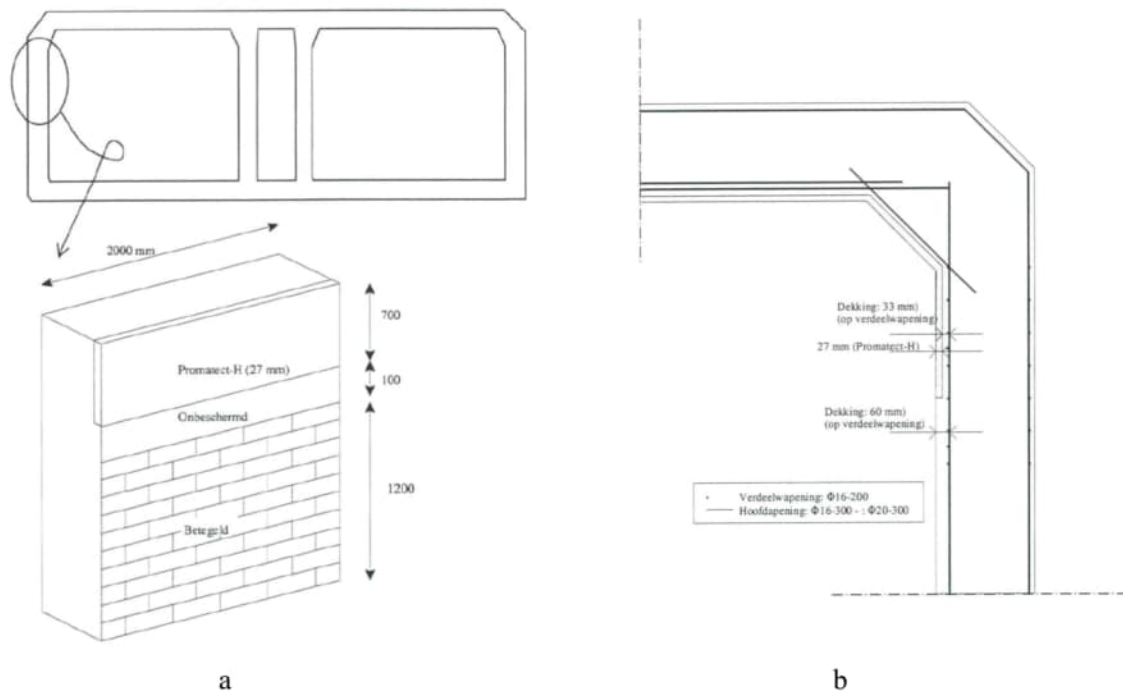
11.5.1 Samenvatting van het onderzoek

In paragraaf 11.4 zijn ervaringen met afspatgedrag van beton van vóór 2001 besproken. De reden om daarbij 2001 als grens aan te houden, is dat, voor zover bij ondergetekenden bekend is, het TNO onderzoek uit 2001 [18] in belangrijke mate de basis is geweest voor de gedurende vele jaren

²³ In de onderzoeken van TNO is het vochtgehalte veelal aangegeven in gewichtsprocenten (M/M). ter vergelijking, het in [8] aangegeven vochtpercentage van 5% (V/V), waaronder aangenomen mag worden dat geen spatten optreedt, komt overeen met ca. 2% (M/M).

aangehouden aanname dat beton met een samenstelling zoals gedefinieerd in de ROK [47]²⁴ spatongevoulig is. Hoewel in de diverse RWS documenten (ROBK en ROK) alleen is verwezen naar het Brawat III onderzoek [47], was het gehele Brawat onderzoek in de periode 1996 t/m 2001 met o.a. de rapporten [15,16,17,18] gebruikt als basis voor het definiëren van het spatongevoulig beton. In deze paragraaf is het Brawat III onderzoek toegelicht.

Omdat in afgezonken tunnels (categorie 1 en 2) het dak doorgaans met isolerende bekleding werd beschermd en de wanden onbeschermd waren, was er de vraag of de integriteit van die wanden kan worden aangetast door spatten van het beton. Dat was de reden om een brandproef uit te voeren op een representatief geacht proefstuk (voor een deel onbeschermd (c.q. geïsoleerde) op druk belaste betonnen wand) uit te voeren. Het proefstuk (figuur 26) met de afmetingen 2 m x 2 m x 0,8 m was voorzien van wapening overeenkomstig die in de Wijkertunnel en het betonmengsel (productomschrijving 340 kg CEMIII, CG4, 4-32) was hetzelfde als die bij de 2^{de} Beneluxtunnel. Met een voorspanstelsel was het proefstuk verticaal op druk belast tot een drukspanning van 10 N/mm².



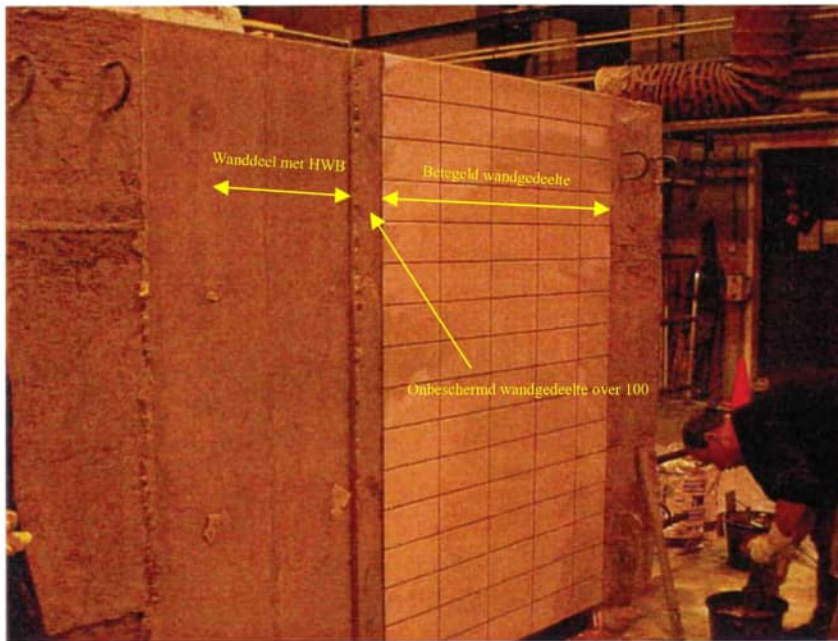
figuur 26 Schets van de doorsnede van een afgezonken tunnel en van het voor de tunnelwand representatief geachte proefstuk (a) en de wapening in de tunnel (b) [18].

Een foto van het proefstuk voor beproeven is opgenomen in figuur 27.

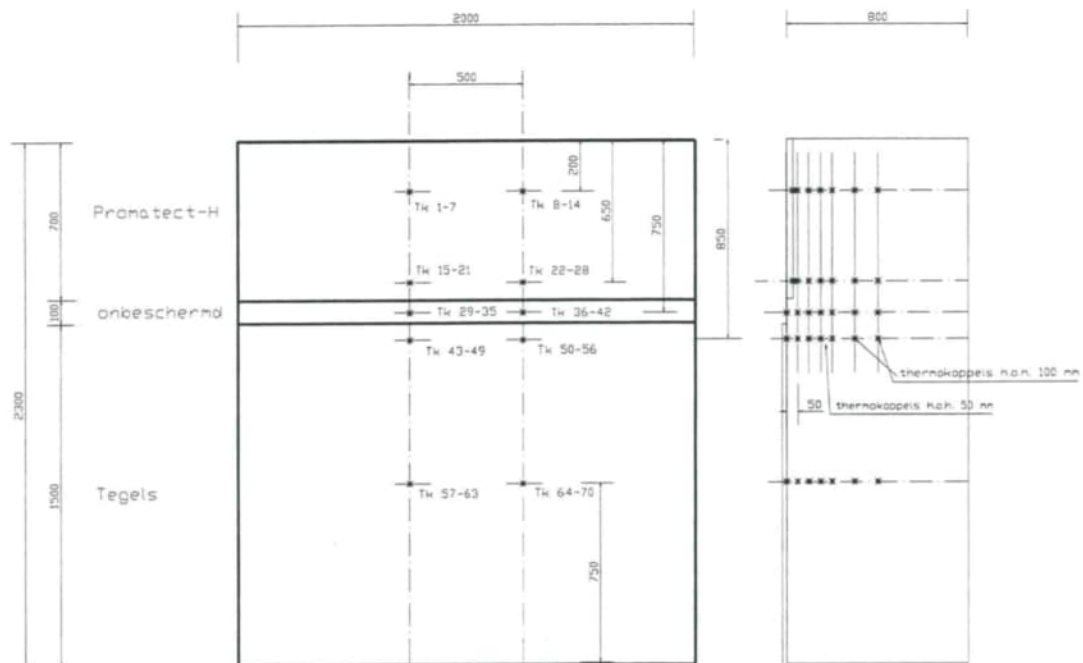
De druksterkte van het beton op de dag van beproeven was ca. 45 MPa. Voor het vochtgehalte, bepaald met 5 stukken beton die uit een extra kubus waren gehaald, was een waarde van 4,1% (M/M) gevonden.

Met een groot aantal thermokoppels is de temperatuurontwikkeling in het proefstuk tijdens de brand gemeten (figuur 28). De gemeten temperatuurontwikkeling ter plaatse van het over een hoogte van 100 mm onbeschermd beton is weergegeven in figuur 29.

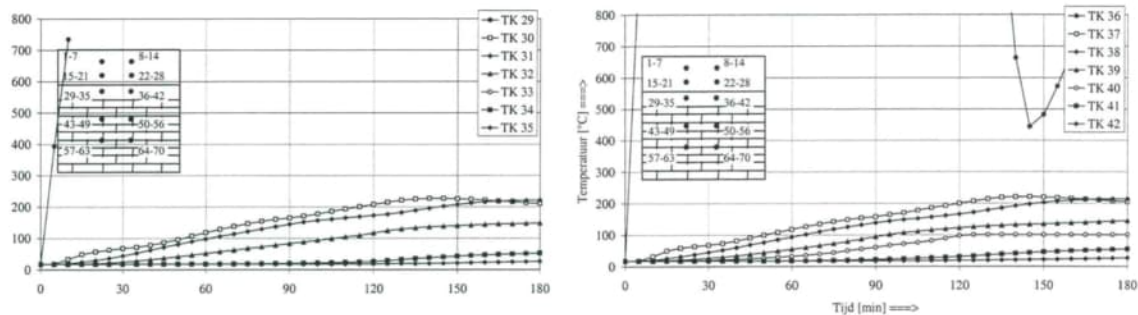
²⁴ Hier is ROK 1.0 aangegeven. Spatongevoulig beton is ook in diverse daarop volgende versie gedefinieerd.



figuur 27 Foto van het wandproefstuk voor beproeven (gele pijlen en teksten door ondergetekenden) [18].



figuur 28 Locatie thermokoppels in het proefstuk [153].



figuur 29 Temperatuurontwikkeling op twee plaatsen in het onbeschermd beton [18].

De twee thermokoppels aan het oppervlak van het onbeschermd beton (TK 29 en TK 36) waren respectievelijk na 10 en 36 minuten stuk. Op een diepte van 50 mm was de temperatuur na 120 minuten ca. 200 °C. Dat was ongeveer dezelfde temperatuur als die welke op een diepte van 50 mm (dikte Promatect-H plaat plus dekking) achter de Promatect-H platen bij drie thermokoppels was gemeten.

Gerapporteerd is dat nauwelijks spatgeluiden te horen waren geweest, afgezien van enig “knispere” en tikkend geluid in de eerste 15 minuten van de brandproef, wat duidde op kleine schilfertjes beton (cementhuid) die afspatten en de metalen omhullingsbuizen van de oventhermokoppels raken.

In [18] is m.b.t. spatten het volgende gerapporteerd:

“Gelet op de - geringe, nauwelijks meetbare - schade die na afloop van de brandproef kon worden geconstateerd, kan worden vastgesteld dat het spatten alleen in het onbeschermd gedeelte heeft plaatsgevonden.”

De belangrijkste conclusie is echter dat het schadeniveau zeer beperkt is gebleven en gelet op de thermokoppelresultaten en grove metingen na afkoelen hooguit, lokaal, een tiental mm bedraagt. Hiermee kan worden gesteld dat de constructieve integriteit gedurende de brandproef niet in gevaar is geweest. ”

en één van de conclusies was:

“Er is zeer geringe schade opgetreden in het deel van de wand dat onbeschermd was; het gedeelte dat betegeld was lijkt iets meer beschadigd dan het onbetegelde gedeelte.”

In figuur 30 is een foto weergegeven van het proefstuk na afkoelen.



figuur 30 Overzicht van schade na afkoelen (alle tegels weg) [18].

11.5.2 Bemerkingen bij de onderbouwing van spatongevoelig beton volgens ROK

In hoofdstuk 2 is ingegaan op de eisen die in regelgevingsdocumenten, inclusief de ROK, zijn opgenomen m.b.t. brand in tunnels. Hier wordt specifiek ingegaan op de eisen m.b.t. spatten. In ROK 1.0 [47] uit 2011 was bij de eisen aan tunnels in paragraaf 4.5 aangegeven dat afspatten van beton niet mag optreden. Daaraan zou kunnen worden voldaan door het beton te beschermen of een beton toe te passen dat ongevoelig is voor afspatten (evt. met polypropyleen vezels). De gevoeligheid van het beton voor afspatten dient met bandproeven te worden aangetoond. Bij het betreffende artikel is de volgende toelichting opgenomen:

“Toelichting:

Door TNO en Rijkswaterstaat zijn proeven m.b.t. afspatten gedaan op grindbeton met een sterkteklasse C28/35 gemaakt met maximaal 340 kg/m³ CEM III cement. Met de proeven is aangetoond dat voor het beschreven mengsel het afspatcriterium niet maatgevend is wanneer de hoofddrukspanning aan het oppervlak niet hoger is dan 10 N/mm². Zie voor verdere achtergronden TNO rapport “Brawat 3: Onderzoek naar het afspatgedrag van een op druk belaste wand in afgezonken tunnels”. Indien dit onderzoek wordt gebruikt, wordt erop gewezen dat de maximale waarde voor de 28 daagse kubusdruksterkte ≤ 45 N/mm² dient te zijn, omdat anders de dichtheid en daarmee de gevoeligheid voor afspatten te groot is en de genoemde proeven niet representatief zijn in relatie tot het voorkomen van afspatten bij brand. Voor afwijkende betonmengsels (de proefresultaten zijn beperkt tot grindbeton en geen bijvoegingen als vliegas, kalksteenmeel e.d.) en afwijkende opgelegde drukspanningen is niet bekend wat de gevoeligheid voor afspatten is. Wel is in kwalitatieve zin bekend dat bij een hogere betonsterkteklasse in het algemeen de gevoeligheid voor afspatten

toeneemt. Bij een lagere opgelegde drukspanning neemt de gevoeligheid tegen afsputten af.”

Voor zover ondergetekenden weten, en ook uit de voorgaande toelichting blijkt, is het TNO onderzoek BRAWAT 3 [18] een belangrijke basis geweest voor het door RWS gedefinieerde spatongevoelige beton. Dat blijkt mede uit het feit dat de criteria die zijn gesteld aan het cementgehalte (*maximaal 340 kg/m³ CEM III*), druksterkte van het beton ($\leq 45 \text{ N/mm}^2$) en de drukspanning (10 N/mm^2), overeenkomen met de omstandigheden in de betreffende, ene proef van het BRAWAT 3 onderzoek.

Ondergetekenden zijn van mening dat er met het Brawat onderzoek, met de ene proef van het BRAWAT 3 onderzoek in 2001 [18] als belangrijkste resultaat, onvoldoende basis was om in het algemeen te kunnen stellen dat beton, dat voldoet aan de genoemde criteria, spatongevoelig is. Van de redenen die ondergetekenden daarvoor hebben, zijn er navolgend een aantal gegeven:

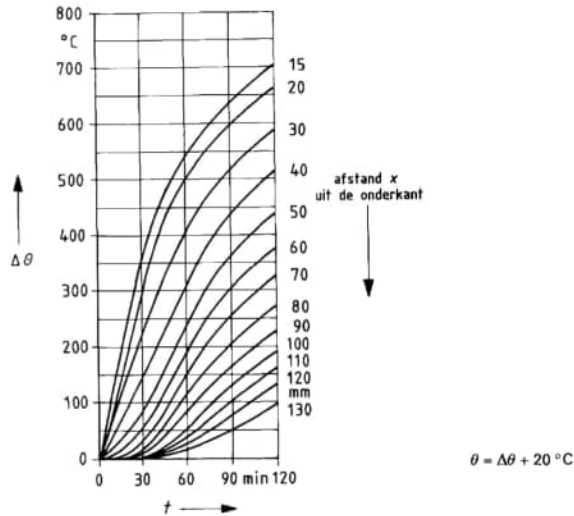
- De proef, met een strook van 100 mm onbeschermd (*het gedeelte met tegels, die nominaal ook geen enkele bescherming bieden even niet als onbeschermd meegerekend*), was wellicht representatief voor een tunnelwand, zoals die in de praktijk is toegepast, maar misschien niet voor het beoordelen van spatongevoeligheid van beton in het algemeen;
- Ondanks dat in vele studies voorafgaande aan de proef nadrukkelijk is gewezen op het belang van het vochtgehalte, komt dat in de eis niet terug en was de gerapporteerde 4,1% (M/M) mogelijk lager dan het vochtgehalte van beton in tunnels. Om die reden zou de proef wat vochtgehalte betreft mogelijk niet representatief geweest kunnen zijn voor beton in tunnels;
- Klaarblijkelijk is voor de drie criteria (cementgehalte, druksterkte en drukspanning) aangenomen dat lagere waarden gunstiger zijn, terwijl indirect ook is aangenomen dat andere onderdelen van de betonsamenstelling geen invloed hebben, waarvoor geen nadere onderbouwing is gegeven en hetgeen naar verwachting niet geheel juist is.

Naar de mening van ondergetekenden roepen enkele van de gepresenteerde resultaten ook een aantal vragen op:

- Is het te begrijpen dat de temperatuur op een diepte van 50 mm na 120 minuten RWS-brand in de doorsnede met de HWB gelijk is aan die op 50 mm diepte bij het onbeschermd beton?
- Is de temperatuur van 200 °C na 120 minuten op een diepte van 50 mm (onbeschermd beton) niet erg laag?

Met betrekking tot het vochtgehalte kan erop worden gewezen dat de 4% (M/M) meer is dan de 2% (M/M), waarvoor in eerder onderzoek is aangegeven dat veilig kan worden aangenomen dat bij een lager vochtgehalte geen spatten optreedt. Het is niet zo dat omgekeerd gesteld zou kunnen worden dat bij een vochtgehalte boven 2% (M/M) spatten zal optreden. In [20] is 7% (V/V), oftewel, 3% (M/M) als grens aangehouden. De voor de proef waargenomen 4,1 % (M/M) ligt daar niet zoveel boven.

Met betrekking tot de temperatuurontwikkeling in het beton kan worden gewezen op figuur 31, welke is ontleend aan NEN6071 [20]. Op basis van die figuur wordt na ca. 50 minuten een temperatuur van 200 °C bereikt op een diepte van 50 mm. Na 120 minuten is de temperatuur gelijk aan 200 °C op een diepte van 100 mm.



figuur 31 De temperatuurverdeling in een wand op een afstand x vanaf het verhitte oppervlak, die volgens NEN6071 [20] in berekeningen mag worden aangehouden.

11.6 Onderzoek spatgedrag ná 2001

Door een aantal grote tunnelbranden rond de eeuwwisseling (Kanaaltunnel 1996, Mont Blanc 1999, Tauern 1999, St. Gotthard 2001) [26] werd de aandacht nog eens extra gevestigd op het belang van de tunnelveiligheid en brandwerendheid van tunnels. Met betrekking tot tunnelveiligheid zijn diverse Europese projecten uitgevoerd, waarbij ook het verkrijgen van de onderliggende inzichten in de fenomenen van het spatten van beton onderwerp van onderzoek was. In Nederland is een grootschalig onderzoek uitgevoerd door diverse partijen in CUR-verband (CUR onderzoekscommissie C120) met als doel richtlijnen te geven teneinde spatten van beton te voorkomen [25].

Een van de doelen was om te komen tot een set van proeven waarmee de spatgevoeligheid van beton en betonconstructies kan worden gekwantificeerd. Met het literatuuronderzoek [25] is de state-of-the-art (2005) op het gebied van spatten van beton beschreven, alsmede de experimentele methoden die daarbij worden gehanteerd.

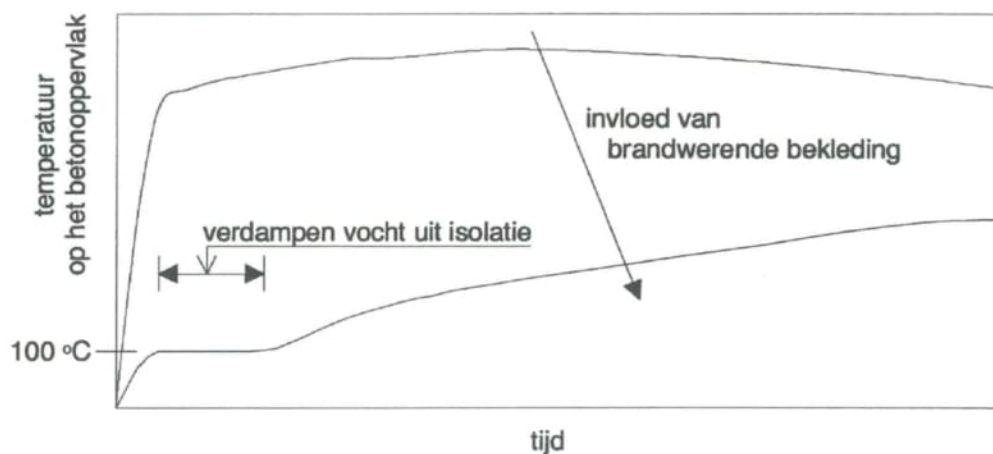
In [25] is onder andere ingegaan op de betoneigenschappen onder brandomstandigheden, de modelvorming voor spatten van beton en uitgevoerde full scale experimenten. Gerefereerd is aan de vele bij het Centrum voor brandveiligheid (CvB) van TNO Bouw (dit is later overgegaan in Efectis) in de tien jaar daarvoor uitgevoerde brandproeven. In het overzicht [25] is gesteld:

“Naarmate de spanningsgradiënt kleiner is (bijvoorbeeld door een gewijzigde opbouw van de brand, zoals bij de smeulbrandkromme volgens EuroCode) neemt de kans dat spatten optreedt onder invloed van thermische spanningen af. De kans dat spatten optreedt onder invloed van poriedruk neemt toe. Het grote verschil komt tot uitdrukking in het tijdstip wanneer spatten optreedt. Spatten door thermische spanning treedt meestal binnen 5-20 min op, terwijl het oplopen van de poriedruk aanzienlijk later kan optreden.”

Naast spatten door thermische spanningen en oplopen poriedruk, kan het beton ook bezwijken door dehydratie. In proeven treedt dat op als het beton voldoende langzaam

wordt opgewarmd en als de porositeit voldoende groot is. Onder invloed van de hoge temperaturen verliest het beton samenhang en sterkte en na verloop van tijd brokkelen kleine stukjes beton van het oppervlak af in de vorm van gruis (afregenen).

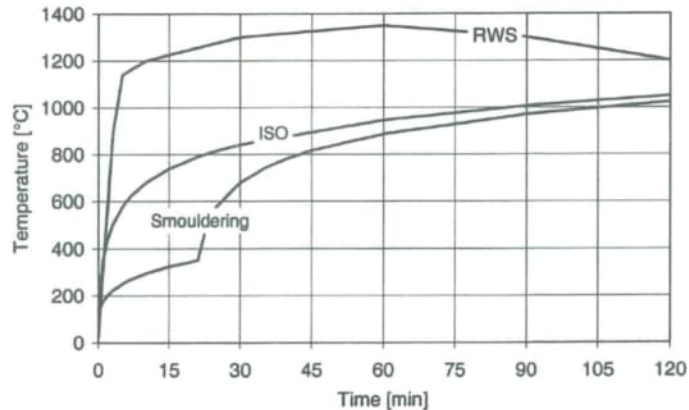
Met betrekking tot het effect van brandwerende bekleding is aangegeven dat dit vertraagd werkt op de temperatuursopbouw op het betonoppervlak en ter illustratie was de weergave van figuur 32 opgenomen.



figuur 32 Schematische weergave van de invloed van brandwerende bekleding op de temperatuursontwikkeling op het betonoppervlak [25].

Een uitgebreid overzicht is gegeven van bij TNO uitgevoerde onderzoeken en full scale experimenten naar spatten van beton. Echter, voor zover ondergetekenden dat goed hebben gezien, is er niet gerapporteerd over proeven waarbij voor normaal beton geen afspatten was opgetreden. Aangegeven is dat hogesterktebeton gevoeliger is voor spatten dan normaal beton, maar dat proeven in het verleden hadden aangetoond dat ook betonsoorten in de lage sterkteklassen mogelijk gevoelig zijn voor spatten. Voor het effect van polypropyleenvezels (pp-vezels) was aangegeven dat bij proeven met 2 á 3 kg/m³ pp-vezels spatten soms volledig achterwege bleef, terwijl in andere proeven nauwelijks enig effect werd behaald. Het TNO rapport 2001-CVB-R3264 [18], dat later is gebruikt als basis voor de definitie van afspatongevoelig beton, is niet apart besproken. De proeven, genoemd in het overzicht waren voor het merendeel gericht op het brandgedrag van beton met HWB of met pp-vezels. Proeven op kaal beton zaten er vrijwel niet tussen.

In [25] was de opzet voor een uitgebreid proevenprogramma voorgesteld. Daarin te onderscheiden brandkrommen zijn in figuur 33 weergegeven. De RWS-kromme is typisch voor een tunnelbrand, terwijl de andere twee brandkrommen betrekking hebben op branden in gebouwen.



figuur 33 Te onderscheiden brandkrommen voor het proevenprogramma [25].

Met betrekking tot rapportages van de proefresultaten van dit onderzoek hebben ondergetekenden twee artikelen in Cement gevonden [31,39]. In 2006 [31] zijn eerste resultaten gerapporteerd. Die hadden laten zien dat de proefopzet niet helemaal geschikt was. Bij 11 van de 12 proeven was hogesterktebeton toegepast. Bij de ene proef met sterkteklasse C50, waarbij geen spatten was opgetreden, was $2,0 \text{ kg/m}^3$ pp-vezels toegepast. Het vochtgehalte bij die proef was 4,6 % (M/M). In 2009 [39] is gerapporteerd over twee series proeven, die aanvullend op die, welke waren gerapporteerd in [31], waren uitgevoerd. In de proeven is de invloed van betonsterkte, type toeslagmateriaal, aanwezigheid voorspanning en gebruik van pp-vezels onderzocht. Over het sturen op vochtpercentage is aangegeven dat dit lastig was, doordat uitdroging van de proefstukken traag verloopt, niet-uniform is over de dikte van het proefstuk en sterk per betonmengsel varieert. De beoordeling van het spatten is voornamelijk gedaan op basis van videobeelden en visuele observatie van de proefstukken na afkoelen. Het spatten is beoordeeld na 30 minuten (op basis van de videobeelden) en na afloop van de proef na afkoelen van het proefstuk. Voor de belangrijkste bevindingen is het volgende gerapporteerd:

- pp-vezels hebben een positief effect, maar over de grootte kon geen uitspraak worden gedaan;
- Bij beton zonder pp-vezels is het spatgedrag sterk afhankelijk van het vochtgehalte;
- Er was geen significant verband tussen betondruksterkte en spatgedrag gevonden;
- Spatgedrag wordt ongunstig beïnvloed door aanwezige drukspanningen;
- Toepassing van graniet in plaats van riviergrind leidt tot een sterke afname in spatgedrag.

In een grote tabel zijn de resultaten van vele brandproeven (beoordeling na 30 minuten en na beproeven) weergegeven. In de meeste gevallen betrof het ofwel licht toeslagmateriaal (Lytag), ofwel beton met pp-vezels, ofwel hogesterktebeton. Voor de onderhavige studie zijn proeven op onbeschermd normaal grindbeton interessant. Alleen de proeven met nummer 9972 en 9973 zijn in dat kader relevant, ondanks dat de gerealiseerde betondruksterkte ook wel hoog was (63 N/mm^2). Voor de proef zonder drukspanning (9973) was gerapporteerd dat op basis van de videobeelden na 30 minuten er geen zichtbare spatschade was, terwijl voor het oppervlak na afloop van de proef is gerapporteerd dat er sprake was van ernstige spatschade over 63% van het oppervlak. Bij de andere proef (9972) was een voorspanning van $12,1 \text{ N/mm}^2$ aangebracht en was er na 30 minuten al sprake van ernstige spatschade.

In 2007 is door *fib* een state-of-the-art rapport over het ontwerp van brandwerendheid van betonconstructies uitgebracht [33]. Hoofdstuk 6 in [33] is gewijd aan spatten van beton. In belangrijke mate is gebruik gemaakt van onderzoeken van G.A. Khoury van het Imperial College of London, die ook de convener van de betreffende Task Group 4.3 van *fib* was.

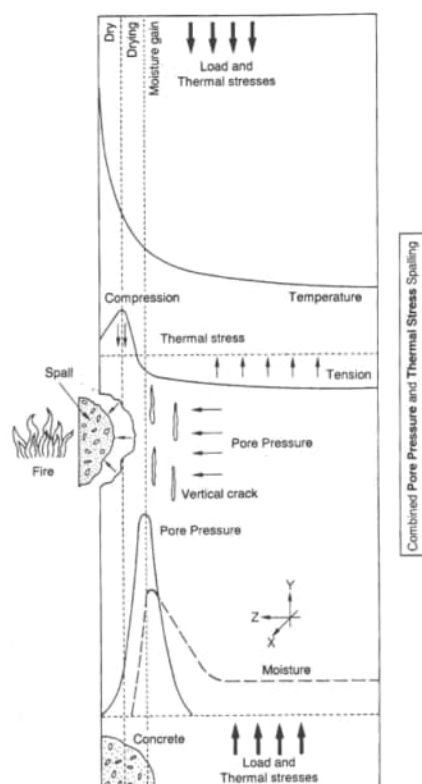
In [33] is gesteld dat op dat moment de meeste kennis over spatten van beton nog was gebaseerd op branden in gebouwen. In tunnels is de temperatuur-tijd-kromme zwaarder en het vochtgehalte hoger. Een typische temperatuurstijging van het betonoppervlak in gebouwen is 20-30°C/minuut, terwijl dat in tunnels wel 250°C/minuut kan zijn. Onverwachte schade door spatten kan maken dat de berekeningen van de brandwerendheid niet meer goed zijn en kan resulteren in een gereduceerde veiligheid van de betonconstructie in het geval van brand. Een overzicht van vormen van spatten en invloedsfactoren was gegeven in een tabel, die in *figuur 34* is overgenomen.

Spalling	Probabilistic Time of Occurrence	Nature	Sound	Influence	Main Influences
Aggregate	7-30 mins	Splitting	Popping	Superficial	H, A, S, D, W
Corner	30-90 mins	Non-violent	None	Can be serious	T, A, Ft, R
Surface	7-30 mins	Violent	Cracking	Can be serious	H, W, P, Ft
Explosive	7-30 mins	Violent	Loud bang	Serious	H, A, S, Fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
Sloughing-off	When concrete weakens	Non-violent	None	Can be serious	T, Fs, L, Q, R
Post-cooling	During & after cooling upon absorption of moisture	Non-Violent	None	Can be serious	As sloughing off but also W1, AT

A = Aggregate thermal expansion
 D = Aggregate thermal diffusivity
 Fs = Shear strength of concrete
 Ft = Tensile strength of concrete
 G = Age of concrete
 H = Heating Rate
 L = Loading/restraint
 O = Heating profile
 AT = Aggregate type
 P = Permeability
 Q = Section shape
 R = Reinforcement
 S = Aggregate size
 T = Max temperature
 W = Moisture content
 Z = Section size
 W1 = Moisture absorption

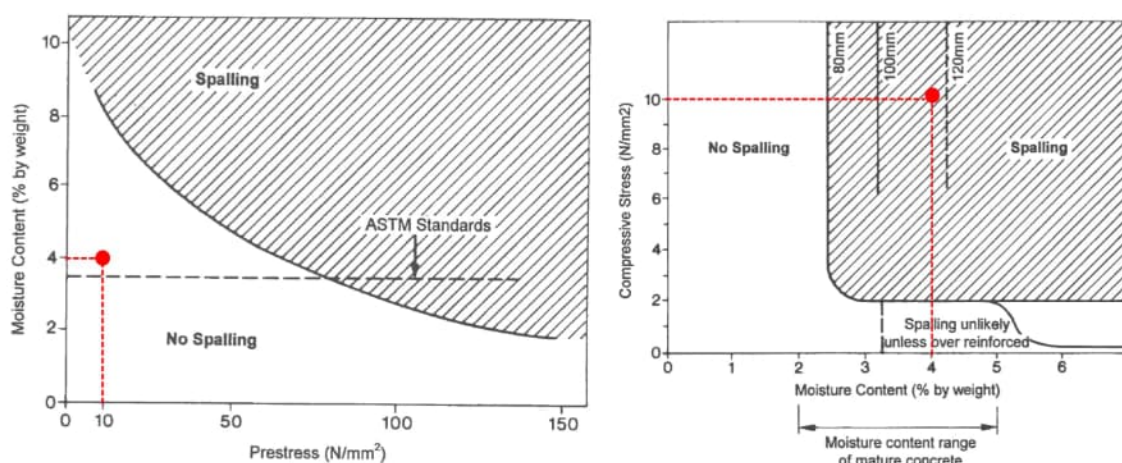
figuur 34 Invloedsfactoren voor de verschillende vormen van spatten van beton (Volgens Khoury, ontleend aan [33]).

De meest ernstige vorm van spatten is explosief spatten (explosive spalling). In [33] is met een figuur (*figuur 35*) geïllustreerd hoe poriedruk en thermische spanningen tot explosief spatten kunnen leiden.



figuur 35 Explosief spatten door poriedruk en thermische spanningen (Khoury, ontleend aan [33]).

Met betrekking tot de invloed van vochtgehalte en drukspanning op het spatten zijn uit [33] de diagrammen van figuur 36 overgenomen. Hoewel de relaties niet te letterlijk genomen moeten worden, omdat er geen duidelijke lijn is tussen spatten en niet-spatten (spatten is een stochastisch fenomeen), laat het wel de importantie van deze parameters zien. Het laat ook zien dat de brandproef, die als basis heeft gediend voor de definitie van spatongevoelig beton [18] (waarbij eerder al bemerkingen zijn gemaakt) met een vochtgehalte van 4,1% (M/M) en een drukspanning van 10 N/mm² volgens figuur 36a duidelijk in het gebied van niet-spatgevoelig beton zat en volgens figuur 36b (dikte was 800 mm) ook in het niet-spatten gebied uitkomt. Opgemerkt kan worden dat bij de proeven die na 2015 zijn uitgevoerd en waarbij spatten optrad, het beton een vochtgehalte van rond de 6% (M/M) had. Als dat in de figuren wordt geplot dan zou het punt zich ook in de zone bevinden van geen spatten. Dit toont eens te meer aan dat de grens voor vochtgehalte tussen spatten en niet spatten niet te strikt genomen moet worden. Bedacht moet daarbij ook worden bedacht dat de temperatuurkromme, die is gebruikt in de proeven die hebben geresulteerd in de relaties van figuur 36, significant anders geweest kunnen zijn dan de RWS brandkromme.



figuur 36 Relatie tussen vochtgehalte, drukspanning en spatten (a; volgens Christiaanse 1972) en vochtgehalte, drukspanning, dikte betonconstructie en spatten (b; volgens Meyer-Ottens 1972) (ontleend aan [33] en rode lijnen ingetekend door ondergetekenden).

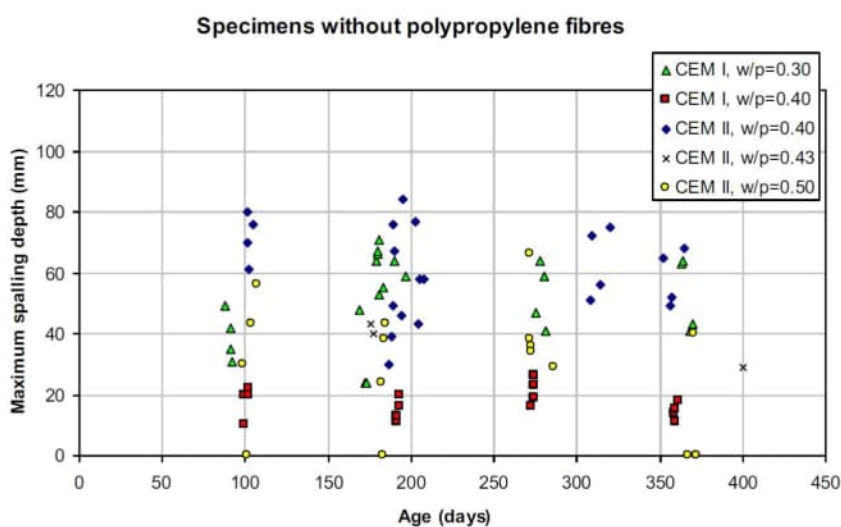
Met betrekking tot de kans dat explosief spatten optreedt, afhankelijk van het verkeer dat door de tunnel gaat, is in [33] een tabel opgenomen, die in figuur 37 is opgenomen²⁵.

Load Condition	Vehicle Mix	Likelihood of Explosive Spalling			
		Low	Low-Med	Med-High	High
		10-20%	20-40%	40-55%	55-65%
0% Load	Cars				
60% Load	Cars				
0% Load	Cars & HGV				
60% Load	Cars & HGV				
0% Load	HGVs				
60% Load	HGVs				

figuur 37 Voorlopige schatting van explosief spatten, ongeacht de frequentie van het verkeer (HGV = Heavy Good Vehicle; "Load" is percentage van betonsterkte onder normale temperatuur) (Khoury, ontleend aan [33]).

²⁵ Hoewel dit dateert uit de zeventiger jaren van de vorige eeuw is het in deze paragraaf over onderzoek na 2001 opgenomen, omdat het is ontleend aan een document uit 2007 [33].

Diverse promotieonderzoeken zijn verricht met betrekking tot branden in tunnels en spatten in het bijzonder. In het werk van Lönnermark (2005) [26], die brandproeven in de Runehamar tunnel heeft uitgevoerd, is spatten slechts summier behandeld. De aandacht voor spatten van beton kreeg met name extra aandacht na de introductie van hogesterktebeton en zelfverdichtend beton, vanwege de dichte structuur van die betonsoorten, waardoor ze ook spatgevoeliger zijn. Dat resulteerde ook in onderzoeken naar het effect van polypropyleen vezels op spatten van beton. In het proefschrift van Jansson [70] komen die zaken ook aan de orde. Hij geeft ook een uitgebreid historisch overzicht van spatten van beton en refereert aan een publicatie uit 1854, als zijnde mogelijk de eerste over spatten. Waarnemingen van spatten in proeven en praktijkbranden zijn uitgebreid besproken. Gesteld is dat bij beton met een lage sterkte en een laag vochtgehalte zelden spatten optreedt als er geen drukspanningen aanwezig zijn. Bij beton met een 28-daagse druksterkte van ca. 30 N/mm² treedt geen spatten op, ook niet bij een ernstige brand. Desalniettemin kwam uit een enquête in Engeland naar voren dat bij 80% van de ca. 100 gerapporteerde branden spatten was opgetreden (Malhotra, 1984 [13]). Overigens had dat in geen van de branden tot bezwijken van de constructie geleid. In een uitgebreide proevenserie (110 brandproeven) zijn vele parameters onderzocht. Het is echter niet goed mogelijk om uit [70] te halen wat de resultaten waren voor een specifieke proef. Zoals blijkt uit figuur 38, is in de meeste proeven spatten waargenomen. Alleen bij de betonmengsels met een w/p = 0.50 (water/poeder verhouding) was in een aantal proeven geen spatten opgetreden.



figuur 38 Effect van ouderdom op de maximale gemeten spatdiepte [66].

Lottman [78,80] heeft gewerkt aan modelvorming van spatten en een EEM-model afgeleid dat zowel poriedrukken als thermische spanningen beschrijft. Ook hij geeft een historisch overzicht van spatten bij betonconstructies.

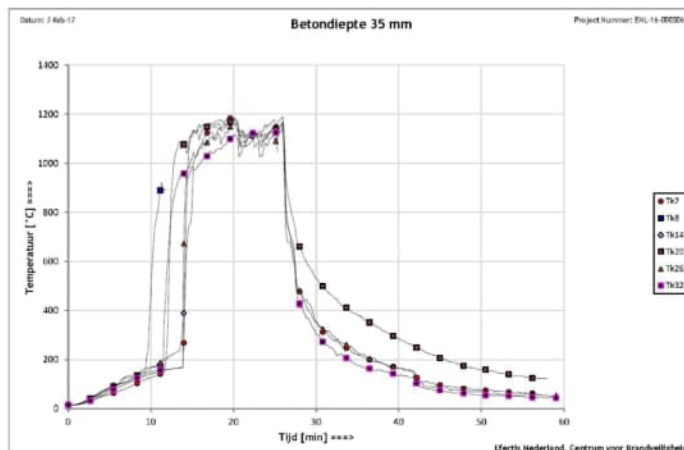
11.7 Resultaten van recente in-situ hitteproeven in bestaande tunnels

11.7.1 Algemeen

In oktober 2015 is op een RILEM-conferentie in Leipzig waarschijnlijk voor het eerst gepubliceerd [75] over onderzoek, waaruit bleek dat bij beton, dat voldoet aan de eisen volgens de ROK 1.2 [63], toch spatten op kan treden. Twee brandproeven zijn uitgevoerd op betonplaten 2,0 m x 2,0 m x 0,3 m, die waren omringd door een stalen frame. Het vochtgehalte (M/M) van de proefstukken was

respectievelijk 5,16% en 5,81%. In beide proeven was explosief spatten opgetreden, wat al na 1 minuut begon en gedurende de gehele proef (respectievelijk 15 en 32 minuten) doorging. De snelheid waarmee spatten optrad, was 3 tot 5 mm/min.

In februari-maart 2015 zijn in het kader van het project “RWS Bramen” een zestal proeven uitgevoerd [81]. Daarbij zijn betonmengsels gebruikt, die waren gebaseerd op de originele BRAWAT 3 [18] receptuur. Het vochtpercentage (M/M) van de platen varieerde tussen de 5,3% en de 6,3%. Spatten begon in alle proeven na ca. 1 minuut en bij een brandduur tussen de 10 en 15 minuten was bij alle proeven op een diepte van 35 mm een sprong in temperatuur van onder de 200 °C naar boven de 1000 °C waar te nemen (figuur 39), hetgeen erop duidt dat het afspatten een diepte van 35 mm had bereikt. De dekking was 70 mm en bij twee thermokoppels op 70 mm diepte nam de temperatuur sterk toe na ca. 23 minuten, wat er op duidt dat toen de wapening vrij is komen te liggen. Met deze gegevens zou een spatsnelheid van 3,2 (=35/11) mm/min afgeleid kunnen worden. Foto’s van het verhitte oppervlak na de brand zijn opgenomen in figuur 40.



figuur 39 *Betontemperaturen gemeten op een diepte van 35 mm (RWS Bramen brandproef 1 [81]).*



figuur 40 *Foto’s van het verhit oppervlak na de brand gedurende 26 minuten (RWS Bramen brandproef 1 [81]).*

Nadat in 2015 bekend was geworden dat, als aan de voorwaarden in ROK 1.2 wordt voldaan, nog steeds afsputten kan optreden, zijn in de periode tot op heden diverse onderzoeken uitgevoerd door en/of in opdracht van RWS. Dat betreft onder andere een onderzoek naar een mogelijke wijziging in toegepaste betonsamenstellingen ná 2008 ten opzichte van die in de periode van 2000 tot 2008 [112] en diverse in-situ brandproeven. De resultaten van de in-situ brandproeven waarover ondergetekenden beschikken, en voor zover relevant geacht voor de huidige studie, zijn in de volgende paragrafen besproken.

11.7.2 Opzet van de in-situ brandproeven

Brandproeven in bestaande tunnels zijn in de periode van april 2018 tot heden uitgevoerd door Efectis in samenspraak met Arcadis. De proeven zijn uitgevoerd met de Efectis mobiele oven MobiFire®-RWS, waarbij een oppervlak van ca. 1 m x 1 m werd verhit. De mobiele oven met een vermogen van ongeveer 400 kW, kan een tijd-temperatuur-tijdrelatie volgens RWS-brandcurve realiseren²⁶.

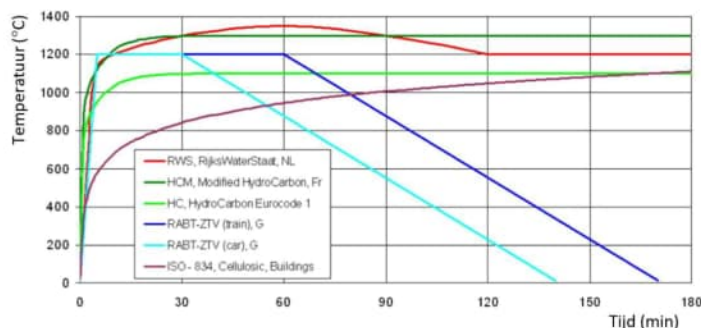
Proeven zijn uitgevoerd op kaal beton of op beton met brandwerende beplating. Bij de proeven op de brandwerende beplating is in een aantal gevallen voorafgaande aan de proeven het vochtgehalte van de beplating verhoogd.



figuur 41 Hitteproef op de wand met de MobiFire®-RWS mobiele oven.

Veelal is in de hitteproeven de RWS-brandkromme toegepast,. Maar ook andere brandkrommen, zoals de ISO-834 brandkromme of de RABT-ZTV (train) G brandkromme (figuur 42) zijn soms gebruikt.

²⁶ Opgemerkt kan worden dat brandomstandigheden in de in-situ brandproeven, maar ook de laboratorium-brandproeven, niet exact overeen zullen komen met de situatie bij een tunnelbrand. Genoemd kan bijvoorbeeld worden dat in de proeven de hitte niet weg kan en er geen koelende werking is door een luchtstroom, zoals dat bij een tunnelbrand veelal wel zo zal zijn. Maar ook het oppervlak dat met brand wordt belast, verschilt natuurlijk (klein bij in-situ proef, groter in lab-proef en veel groter bij tunnelbrand). Ondergetekenden zijn echter van mening dat eventuele verschillende de omstandigheden in brandproeven en bij tunnelbranden van ondergeschikt belang zijn in de onderhavige studie.



figuur 42 Temperatuur-tijdcurven.

11.7.3 KWA tunnel [98,105]

In april 2018 zijn hitteproeven in de KWA-tunnel uitgevoerd. De bevindingen zijn in [105] als volgt samengevat:

1. In de KWA-tunnel is beton toegepast dat (doorgaand) afspatgedrag vertoont (wanden en dak)
2. Het afspatgedrag is vergelijkbaar met, past in het beeld van, BRAMEN1 onderzoek (laboratorium)
3. In de KWA-tunnel is een brandwerend systeem (beton i.c.m. HWB zowel Aestuver T35 als Promatect H27,5) toegepast dat eerder dan de vereiste duur van 2 uur afspatgedrag van beton vertoont.

11.7.4 2de Coentunnel [109]

In de periode mei 2019 t/m juli 2019 zijn 14 hitteproeven uitgevoerd. Vijf proeven zijn uitgevoerd op het kale pp-vezelbeton van de wanden (AS-IS). Twee proeven zijn uitgevoerd op het dak met de bestaande HWB (AS-IS). Daarnaast zijn er proeven uitgevoerd waarbij herstelmaatregelen met betrekking tot brandwerendheid zijn onderzocht. De RWS-brandkromme is toegepast.

Bij de proeven op het kale pp-vezelbeton van de wanden trad geen spatten op. Bij vier proeven is wel na een bepaalde tijd (tussen de 38 en 86 minuten) gestopt omdat het temperatuurcriterium werd overschreden. Er was voor de thermokoppels een temperatuurcriterium gedefinieerd met als doel schade aan de wapening door excessieve verhitting te voorkomen. Bij de twee proeven op het dak met HWB (AS-IS) trad spatten op na respectievelijk 69 en 109 minuten.

11.7.5 Salland-Twentetunnel [108]

In juli 2019 zijn hitteproeven uitgevoerd op het kale beton van de wanden en het dak van de Salland-Twentetunnel. Deze proeven zijn aangeduid met AS-IS en op zowel een wand als het dak zijn twee proeven uitgevoerd. Daarnaast zijn hitteproeven uitgevoerd op de wand en het dak, waarbij op het kale beton een brandwerende plaat is aangebracht.

De tunnelconstructie is blootgesteld aan drie typen brandkrommen. Dat is de RWS-brandkromme voor een maximale tijdsduur van 60 of 120 minuten met mogelijk een velenging van 10% tot respectievelijk 66 en 132 minuten, de ISO-834 brandkromme voor een maximale tijdsduur van 120 minuten en de RABT-ZTV (train) G brandkromme voor een maximale duur van 120 minuten.

Bij de hitteproeven op het kale beton (ROK-beton) is zowel bij de twee proeven aan het dak als de twee proeven op de wand spatten begonnen na ca. 4 tot 6 minuten. Alle proeven zijn vrij snel gestopt, zodat de proeven maximaal 15 minuten hebben geduurd (enkelen korter). Bij zowel de wand als het dak is in één proef de RWS-brandkromme toegepast en in de andere de ISO-834 brandkromme. Bij de RWS-brandkromme trad spatten na 4 tot 5 minuten op en bij de ISO-834 brandkromme na 6 minuten (*figuur 43*). Oftewel, in de relatief kort durende proeven was er met betrekking tot de toegepaste brandkromme geen significante invloed waarneembaar.

Zonder verder in detail in te gaan op de proeven met HWB, kan worden opgemerkt dat bij de proeven met de RWS-brandkromme ook met HWB na 60 tot 70 minuten spatten optrad. Bij twee van de drie proeven met HWB en de RABT-ZTV (train) G brandkromme trad gedurende 120 minuten geen spatten op. Bij de derde proef trad spatten na 62 minuten op.



figuur 43 Foto's van gespat oppervlak na hitteproef op kaal beton in Salland-Twentetunnel [108].

11.7.6 Ketheltunnel [111]

In de periode juni - juli 2019 zijn 32 hitteproeven uitgevoerd, waarbij 8 proeven zijn uitgevoerd op de kale wanden (AS-IS) en 3 proeven op het kale beton van het dak. In de proeven is de RWS-brandkromme toegepast. In de tunnel is klaarblijkelijk zowel ROK beton als beton met pp-vezels toegepast. De proeven zijn korte tijd nadat spatten werd waargenomen gestopt, zodat er geen informatie aan is te ontleen over de diepte waarover spatten is opgetreden.

Bij de 3 proeven op het kale ROK-beton (2 wand en 1 dak) trad na 4 tot 7 minuten spatten op. Bij de proeven waarbij een dummy brandwerende plaat is toegepast, trad in een groot aantal gevallen spatten op vanaf ca. 60 minuten brand.

11.7.7 Sijtwendetunnel [114]

In mei 2020 zijn vier hitteproeven uitgevoerd op de bestaande brandwerende beplating (PROMATECT®-H) aan het dak van de Viet- en Spoortunnel, die was aangebracht tegelijk met het storten van het beton.

Het vochtgehalte van de brandwerende bekleding, gemeten aan de hand van monsters uit de brandwerende bekleding die in een droogstoof bij 105 °C zijn gedroogd, varieerde bij de vier proeven tussen 13,6% en 22,6 %.

In de proeven is de RWS-brandkromme gevolgd met een totale tijd van maximaal 132 minuten (120 minuten plus 10% overwaarde) en de proeven zijn voortijdig afgebroken als spatten van beton optrad.

Bij drie van de vier proeven trad spatten van beton op. Dat was respectievelijk na, 56, 87 en 105 minuten. Bij één proef kon de volledige duur van 132 minuten zonder spatten worden volbracht. Zonder daar verder conclusies aan te verbinden, kan worden vermeld dat dit de proef betrof waar het hoogste vochtgehalte in de brandwerende bekleding was gemeten.

11.7.8 2de Beneluxtunnel [115]

In juni 2020 zijn vier hitteproeven uitgevoerd op de bestaande brandwerende beplating (PROMATECT®-H) aan het dak van de Buis D van de 2^{de} Beneluxtunnel, die was aangebracht tegelijk met het storten van het beton.

Proeflocatie 1 was kort voor de proef bevochtigd en de andere proeflocatie 24 uur voor het uitvoeren van de hitteproeven. Het vochtgehalte van de brandwerende bekleding, gemeten aan de hand van monsters uit de brandwerende bekleding die in een droogstoof bij 105 °C zijn gedroogd, was bij proeflocatie 1 gelijk aan 11,0% en bij de andere proeflocatie varieerde die tussen 5,9% en 6,7%.

In de proeven is de RWS-brandkromme gevolgd met een totale tijd van maximaal 132 minuten (120 minuten plus 10% overwaarde) en de proeven zijn voortijdig afgebroken als spatten van beton optrad.

Bij proeflocatie 1, 2 en 4 trad spatten op na ca. 75 minuten, zodat het verschil in vochtgehalte van de brandwerende beplating geen invloed bleek te hebben. Bij proeflocatie 3 is de proef na ca. 33 minuten gestaakt, omdat de brandwerende beplating volledig los was gekomen.

11.8 Samenvatting en conclusies m.b.t. spatten van beton

Spatten van beton is geen nieuw fenomeen. Zolang al het gedrag van beton bij brand wordt onderzocht in proeven of bestudeerd aan de hand van praktijkbranden, is bekend dat beton kan afspatten. Spatten komt in verschillende vormen voor en explosief spatten is de meest ernstige vorm. De omstandigheden waaronder brandproeven in de loop der tijd zijn uitgevoerd, zoals de toegepaste brandkromme, zijn ongetwijfeld niet altijd vergelijkbaar geweest.

Thermische spanningen en poriedruk, of een combinatie van beiden, worden als belangrijkste oorzaken van het spatten gezien. Van de vele factoren die spatten kunnen beïnvloeden, is het vochtgehalte van het beton vrijwel altijd gezien als de belangrijkste, maar ook het al dan niet aanwezig zijn van drukspanningen speelt een belangrijke rol. Bij een laag vochtgehalte zal spatten niet optreden.

De aandacht voor spatten van beton is rond de eeuwwisseling zeer sterk toegenomen door enerzijds een groot aantal tunnelbranden, waarbij in zeer ernstige mate spatten is opgetreden en anderzijds door de opkomst van hogesterktebeton en zelfverdichtend beton dat een zeer dichte structuur heeft en daardoor spatgevoeliger is. Als oplossing voor de spatgevoeligheid van dergelijke betonsoorten is de toepassing van pp-vezels geïntroduceerd.

De aanleiding voor het onderhavige onderzoek is dat beton, dat lang werd geacht spatongevoelig te zijn (het zogenaamde ROK-beton), toch blijkt te spatten bij brand. Voor de drie landtunnels is met laboratoriumbrandproeven en brandproeven in-situ, vastgesteld dat spatten optreedt. Het spatten begint vrijwel altijd na ca. 5 tot 10 minuten brand volgens de RWS-brandkromme.

Er zijn zeer vele onderzoeken en promotieonderzoeken naar brandgedrag van tunnels en, in het bijzonder, spatgedrag van beton. Ondergetekenden hebben slechts een beperkte hoeveelheid van die literatuur kunnen raadplegen. Daarbij zijn er vrijwel geen experimentele resultaten gevonden, die erop duiden dat het onderzochte onbeschermd normale beton (dus zonder pp-vezels) spatongevoelig was. Hierbij moet dan direct worden opgemerkt dat eigenlijk helemaal niet kan worden gesproken van spatongevoelig beton als er niet direct ook een eis aan het vochtgehalte wordt gekoppeld. Ongetwijfeld zijn er in het verleden proeven uitgevoerd op beton met een laag vochtgehalte, waarbij spatten niet is opgetreden. Veelal is ook niet bekend welke brandkromme in die proeven is toegepast.

Met betrekking tot het onderzoek dat is gebruikt om spatongevoelig beton in de ROK te definiëren [18], hebben ondergetekenden opgemerkt dat:

- de brandproef niet representatief was voor beton in tunnels in het algemeen;
- een aantal opmerkelijke resultaten zijn gerapporteerd die vragen oproepen;
- het onjuist was om op basis van die proef spatongevoelig beton te definiëren.

Het eerste document dat ondergetekenden terug hebben kunnen vinden over spatongevoelig beton dateert van 2006 [30]. Vervolgens is het in de RWS richtlijn ROK 1.0 [47] opgenomen. Het is ongelukkig dat het uitgebreide onderzoek naar spatten van beton in de jaren 2006 tot en met 2009, met als doel richtlijnen te geven teneinde spatten van beton te voorkomen, en de vele Europese projecten die in die tijd op dit onderwerp werden uitgevoerd, niet hebben geleid tot inzicht dat de BRAWAT 3 proef uit 2001 onjuist, c.q. onvoldoende, was om op basis daarvan met de gekozen wijze spatongevoelig beton te definiëren.

Ondanks de vele onderzoeken, is het nog steeds niet goed mogelijk om voor een gekozen beton onder de omstandigheden waarin het verkeerd, aan te geven of spatten wel of niet optreedt. Op basis van de beschikbare literatuur moet worden geconstateerd dat onbeschermd beton (zonder pp-vezels) in tunnels zal afspatten. De in-situ hitteproeven hebben ook duidelijk gemaakt dat afspatten in de drie landtunnels optreedt. Maar ook met de aanwezige HWB wordt in veel gevallen spatten waargenomen binnen de 120 minuten. Veelal treedt spatten op na ca. 60 minuten of meer.

Dat bij ROK-beton spatten optreedt, is nu een gegeven en dat ooit op verkeerde gronden is gesteld dat ROK-beton spatongevoelig is, is nu niet meer van belang. Om de mogelijkheden van alternatieven voor het alsnog aanbrengen van voldoende HWB te onderzoeken, zou het voor de huidige studie interessant zijn om onder andere te weten:

- wat de snelheid is waarin spatten optreedt (mm/min);
- op welke wijze de ontwikkeling van de brand (brandkromme) het spatten beïnvloedt (begin van spatten, tijdsduur van spatten, enz.).

Wat dat betreft, moet worden geconstateerd dat daar relatief weinig over te vinden is. Verreweg de meeste aandacht is uitgegaan naar de vraag wanneer spatten wel of niet optreedt. Datzelfde geldt ook voor de in-situ brandproeven. Zodra spatten optrad is een proef doorgaans gestopt. Dat daarvoor is gekozen is ook wel te begrijpen.

Tot slot wordt nog opgemerkt dat, ondanks dat algemeen het vochtgehalte van het beton als belangrijke parameter wordt gezien, ondergetekenden geen rapportages hebben gevonden over het vochtgehalte dat veelal in tunnels aanwezig is, hetgeen te maken heeft met het feit dat dit niet goed te meten is.

12 Waargenomen schade bij tunnelbranden

12.1 Algemeen

In paragraaf 7.5 zijn een aantal historische, grote branden besproken met als doel een beeld te krijgen van de samenloop van omstandigheden die tot grote branden aanleiding kan geven. Ook voor wat betreft de opgetreden constructieve schade is het interessant om naar de tunnelbranden, en dan met name de gevolgen voor de constructie, te kijken. Tot op zekere hoogte is dat ook al in paragraaf 7.5 gedaan. De vraag is of uit de rapportages over de tunnelbranden ook informatie is te halen over de mate waarin afsputten is opgetreden bij de tunnelbranden en of, en hoe, bezwijken is opgetreden. Naast de vraag wat de brandomvang (HRR en brandduur) bij die tunnelbranden was, is het ook belangrijk te weten wat de specifieke omstandigheden (betonsterkteklasse, HWB aanwezig, ventilatiesysteem actief²⁷) waren. Ondergetekenden realiseren zich dat het moeilijk zal zijn wat dat betreft zinvolle informatie uit rapportages over de tunnelbranden te halen. In veel gevallen is de gewenste informatie niet bekend of niet gerapporteerd. Desalniettemin is in dit hoofdstuk kort ingegaan op wat voor diverse tunnelbranden is gerapporteerd over met name de schade. Daarbij is gebruik gemaakt van diverse overzichten, die onderzoekers hebben gemaakt.

Toen begin tachtiger jaren werd besloten om meer transport van explosieve stoffen door tunnels toe te staan, is in 1985 een overzicht van tunnelbranden tot op dat moment gemaakt. In paragraaf 12.2 zijn die besproken. De twee grootste tunnelbranden in Nederland, Velsertunnel en Heinenoordtunnel, zijn onderwerp van paragraaf 12.3. Tot slot is in paragraaf 12.4 een overzicht van door Lönnermark [26] beschreven constructieve schades bij een aantal grote tunnelbranden opgenomen.

12.2 Overzicht van tunnelbranden van voor 1985 [14]

Toen begin tachtiger jaren van de vorige eeuw in Nederland het besluit was genomen om het vervoer van bepaalde brand- en explosiegevaarlijke stoffen ook door tunnels toe te staan, werden met name de veiligheid van de tunnelgebruikers en de bescherming van de kunstwerken volop ter discussie gesteld. Dat was aanleiding voor een onderzoek naar de brandbeveiliging in autotunnels [14]. Vergelijkbaar met de onderhavige studie, is in die studie gekeken naar de frequentie van tunnelbranden. Verder kunnen volgens [14] details van oorzaken en gevolgen van ongevallen met gevaarlijke stoffen in spoor- en autotunnels, een beeld schetsen van de omvang van schades. In dat kader is de casuïstiek van tunnelbranden (tot 1985) in beeld gebracht. Onderscheid is gemaakt in branden in spoorwegtunnels, metrotunnels en autotunnels. Voor verreweg de meeste van de beschreven tunnelbranden was er geen informatie beschikbaar over de aangerichte schade aan de constructie. Voor die tunnelbranden waarbij wel is gerapporteerd over schade, is navolgend informatie uit [14] overgenomen.

Spoorwegtunnels:

- *De Bart, California, 1979*

Vijf spoorvoertuigen brandden geheel uit;

Het betonnen plafond van de tunnel was ernstig beschadigd. Over een lengte van 3 m was de wapening ontbloot.

²⁷ M.b.t. het effect van een ventilatiesysteem geldt dat het enerzijds de brand aanwakkert en anderzijds ook koelt door verdunning van de hete gassen. Die beide effecten zijn niet eenvoudig te scheiden, en bij de begroting van het brandgevaar (hoofdstuk 9) is geen onderscheid gemaakt voor situaties met/zonder langsventilatie.

- *Summit tunnel, Engeland, 1984*
Een van de langste spoorwegtunnels in Engeland;
Goederentrein met spoorketelwagens met benzine ontspoorde, waarvan er twee lek raakten;
Benzine vatte vlam en een derde ketelwagen ontplofte met een vuurbal tot gevolg.
Experts meenden dat de constructie van de tunnel en van de geologische omgeving niet dusdanig ontzet was dat de tunnel gesloten zou moeten worden.

Autotunnels:

- *Autotunnel Hamburg-Moorfleet, 1969*
243 m lang;
Een aanhanger met zakken ethyleen-korrels (14 ton) was in brand geraakt;
Na 40 minuten werd de brandweer gewaarschuwd;
De grootste schade is aangericht aan het betonnen tunneldak boven de brandende aanhanger in de vorm van een ellips. Het beton is daar tot op 40 cm diep afgebrokkeld. Over een lengte van 25 m is over de gehele breedte beton losgesprongen. Ook de zijwand ter hoogte van het wiel was erg beschadigd.
- *Caldicott tunnel, Oakland, 1982*
1030 m lang met twee tunnelbuizen, max. 8,53 m breed en min. 5,18 m hoog;
Ongeval met personenwagen en tankwagen met aanhanger met resp. 15.200 en 18.240 liter benzine;
Binnen 3 minuten had een kleine brand zich ontwikkeld tot een grote. Explosies waren hoorbaar en het geluid van vallende tegels van plafond en wanden;
Gedwongen door de grote hitte en vallende brokken materiaal moest de brandweer de aanhanger 3 uur laten branden, waarna met schuim is geblust;
De schade aan de tunnelwandbekleding strekte zich uit 80 m vanaf de aanhanger in Westelijke richting en geheel tot aan het tunnelportaal in Oostelijke richting. Geschatte temperaturen zijn 1050 °C aan het plafond en 900 °C op het wegdek en tot 300 m in Oostelijke richting aan het plafond meer dan 650 °C.
Zes voertuigen zijn volledig uitgebrand en de totale schade beliep 2,7 miljoen dollar.
- *Velsertunnel, Nederland, 1978*
Wordt navolgend besproken.

12.3 Twee grote branden (Velsertunnel en Heinenoordtunnel) in Nederland

De twee grootste tunnelbranden in Nederland zijn die in de Velsertunnel in 1978 en in de Heinenoordtunnel in 2014.

Brand in de Velsertunnel, 1978

Door TNO zijn de gevolgen van de brand beoordeeld [5]. De brand had plaatsgevonden in de oostelijke buis naast de middenwand van de tunnel. Bij de brand waren twee vrachtwagens en enkele personenwagens betrokken [4] en de brand duurde ca. 30 minuten [38].

Op een deel van de wand en op het plafond had roetafzetting plaatsgehad en waren plaatselijk schollen tot maximaal 15 mm diepte uit het oppervlak gespat [5]. Aan de hand van monsters, genomen in het gebied waar de brand heeft geheerst, is de betondruksterkte en zijn de trekeigenschappen (sterkte en rekapaciteit) van het betonstaal beoordeeld. Daaruit bleek dat de eigenschappen van het beton en de wapening door de brand niet significant waren beïnvloed. De toegepaste dekking was 70 à 80 mm. In [5] is opgemerkt dat in het beschouwde tunneldeel de betondekking op de wapening zeer hoog

was en dat de kwaliteit van de wapening laag was (QR 24), welke beide aspecten in hoge mate zouden hebben bijgedragen aan een grote brandwerendheid.

In [64] is gerapporteerd dat de geschatte brandomvang minimaal 40 MW en kleiner dan 50 MW was. Volgens [38] is uit onderzoek achteraf gebleken dat er temperaturen tot ca. 800 °C zijn opgetreden.

Brand in de Heinenoordtunnel, 2014 [77]

De brand in de Heinenoordtunnel van 21 mei 2014 werd veroorzaakt door een ongeval met een HGV waarbij de brandstoftank lek raakte [77]. De vrachtwagen is uitgebrand. De personenauto, die er ook bij betrokken was, was niet in brand geraakt. Op basis van camerabeelden is de totale brandduur op 31 minuten ingeschat. De THR is ingeschat als 85,4 GJ (gebaseerd op 90% verbranding van alle brandstoffen). De piek HRR is geschat op 58 MW (tussen 50-65 MW) en er is uitgegaan van 18 minuten brand aan piekvermogen.

De tunnel was tegen het plafond en de bovenzijde van de wanden bekleed met PROMATECT-H hittewerende bekleding, dat naar behoren heeft gefunctioneerd [77]. De wanden waren bekleed met tegels. Ter hoogte van de brand waren de tegels eraf en was lokaal afspatten van het beton opgetreden. De maximale afspatdiepte was 25 mm. Vrijwel geen schade ten gevolge van hoge temperaturen werd waargenomen voorbij 40 m van de brand. Roetschade was aanwezig over een afstand van 200 m.

12.4 Schade opgetreden bij grote tunnelbranden [26]

Een overzicht van de informatie die in paragraaf 7.5 al is weergegeven, is in *Tabel 12* samengevat. Lönnermark [26] heeft in 2005 ook een overzicht gegeven van tunnelbranden. Ook daar worden serieuze schades over enkele honderden meters gerapporteerd.

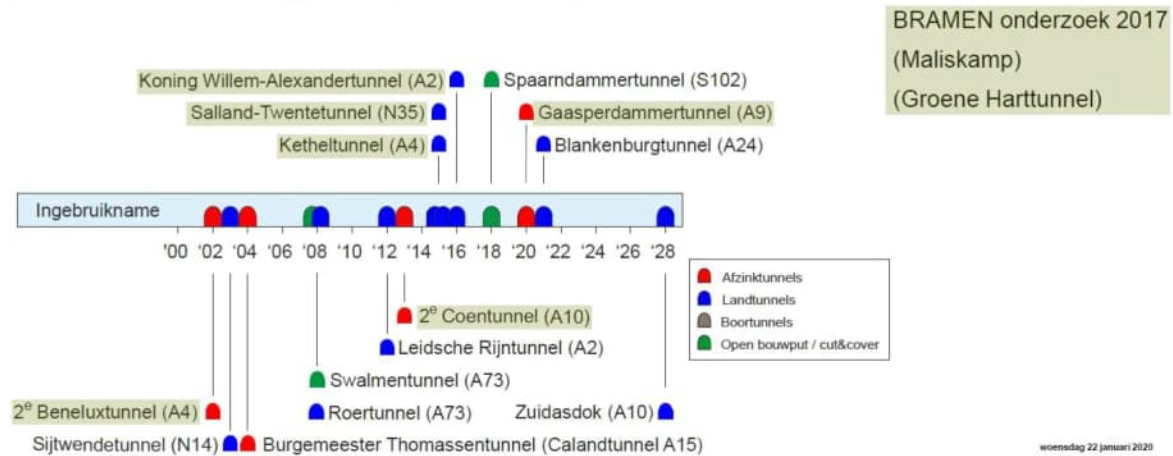
Tabel 12 Informatie over een aantal grote tunnelbranden [26].

Tunnel	jaar	Max. HRR	Brandduur	Lengte beschadiging	Herstelkosten	Buiten gebruik
Tauern	1999	300-400	Ca. 17 uur	Meer dan 350 m	€ 6 miljoen	3 maanden
Mont Blanc	1999	300	53 uur	900 m	€ 155 miljoen	3 jaar
Caldecott	1982	-	165 min	580 m	€ 3,3 miljoen	
Nihonzaka	1979		Meerdere dagen	1100	-	2 maanden

13 Drie landtunnels: constructie, brandwerendheid en bezwijken

13.1 Algemeen

In dit hoofdstuk is op hoofdlijnen de constructie van de drie landtunnels besproken en hoe bij het ontwerp de brandwerendheid van de tunnels is voorzien. Indien er bij het ontwerp ook beschouwingen met betrekking tot bezwijken zijn opgenomen, is daar in dit hoofdstuk ook aandacht aan besteed. De drie landtunnels (Ketheltunnel, Salland-Twentetunnel en Koning Willem-Alexandertunnel) zijn gebouwd na 2008 en in gebruik genomen in de periode tussen ca. 2014 en 2017 (figuur 44).

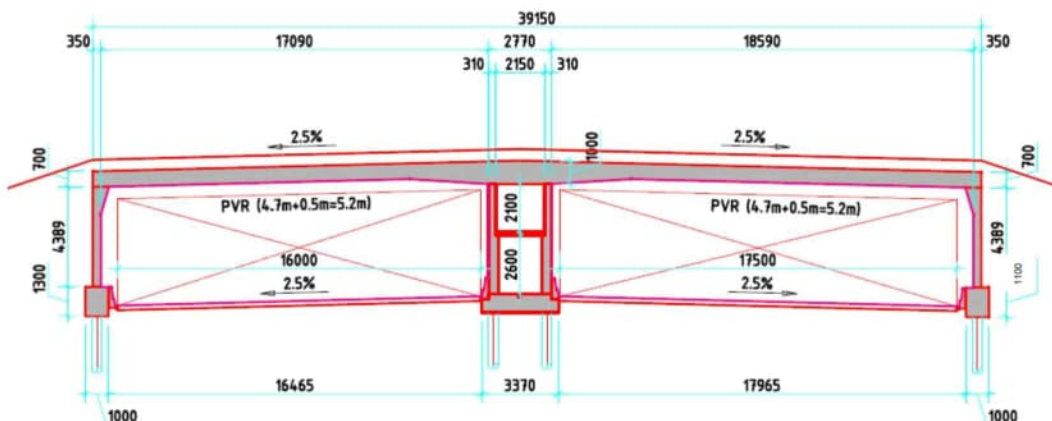


figuur 44 Overzicht van tunnels in Nederland (Ontleend aan presentatie van TNO [112]).

13.2 Ketheltunnel

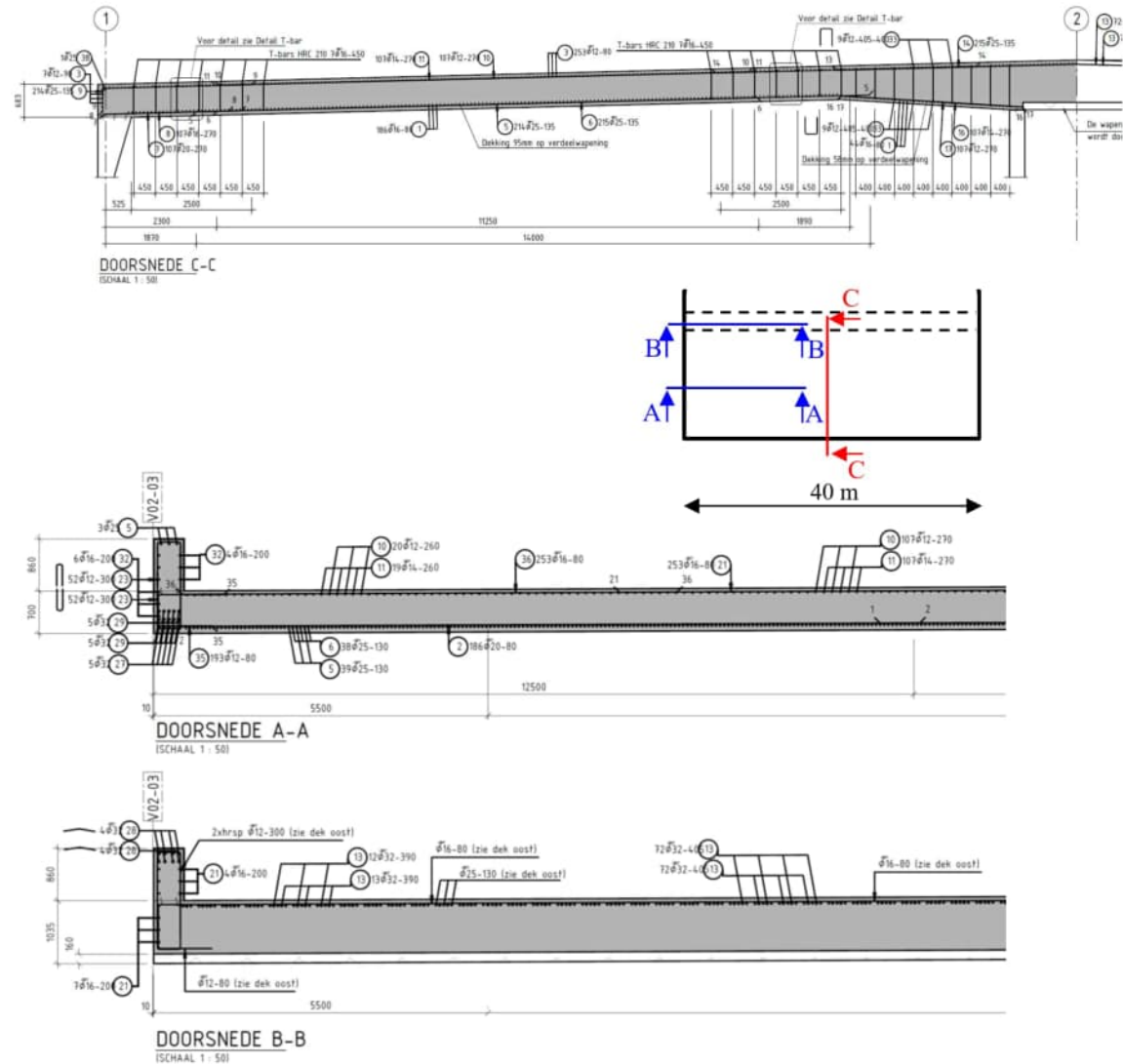
13.2.1 Constructie

De Landtunnel is opgebouwd uit twee tunnelbuizen die gescheiden zijn door een Middentunnelkanaal (MTK). De Landtunnel heeft een totale lengte van ca. 2,0 km. De landtunnel is samengesteld uit 50 moten, waarbij onderscheid is gemaakt tussen standaard moten en afwijkende moten. De standaard moten hebben een lengte van 40,0 m en de dekoverspanning (h.o.h wanden) van de westelijke en oostelijke tunnelbuis is respectievelijk 18,92 m en 17,42 m. De hoogte van de tunnel is 5,2 m.



figuur 45 Standaardmoot van Ketheltunnel, PVR+0,50m.

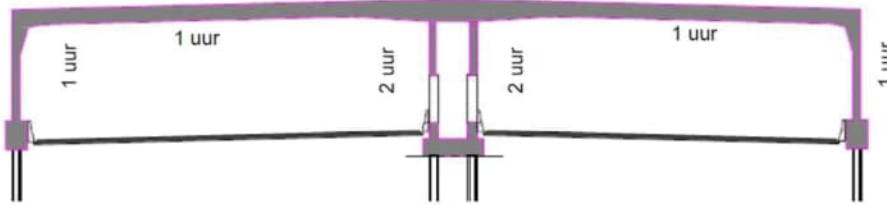
De dikte van het dak is 700 mm en loopt op naar iets meer dan 1 meter bij de MTK. In de MTK zijn breedplaten toegepast. Een indruk van de toegepaste wapening in het dak van een standaard tunnelmoot kan worden verkregen uit *figuur 46*. Duidelijk is te zien dat bij het MTK, waar zich een negatief inklemmingsmoment bevindt, heel veel wapening (staven $\varnothing 32$) in dwarsrichting boven in het dak ligt.



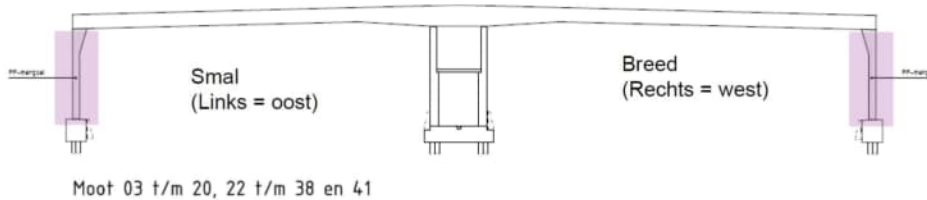
figuur 46 Wapening toegepast in een deel van het dak van een standaard moot van de Kethel-tunnel [66].

13.2.2 Brandwerendheid

De gevraagde brandwerendheid voor de tunnel is 1 uur voor het dak en de buitenwanden en 2 uur voor de binnenwanden (*figuur 47*). Dit is ontleend aan een van RWS ontvangen Factsheet van de Ketheltunnel [67] en komt overeen met hetgeen in het ontwerpdocument [68] voor de tunnel is aangegeven. Op de Factsheet is ook aangegeven dat de buitenwanden zijn voorzien van een betonmengsel met pp-vezels (*figuur 48*). In het ontwerpdocument is daarover niets gevonden en ondergetekenden weten niet of er inderdaad een pp-vezel is toegepast.



figuur 47 Brandwerendheid Ketheltunnel volgens de vraagspecificatie [67,68].



figuur 48 Volgens [67] is een pp-mengsel toegepast in de buitenwanden van een standaardmoot.

In paragraaf 3.10 van het ontwerpdocument [68] is de brandwerendheid beschouwd, waarbij de aspecten spatten en benodigde dekking zijn behandeld²⁸.

Voorkomen afspatten

Met betrekking tot afspatten is gewezen op de tekst in ROK 1.0 en gebruik gemaakt van het feit dat volgens die ROK 1.0 afspatten niet optreedt als het betonmengsel en de aanwezige drukspanning aan een aantal voorwaarden voldoet. Speciale aandacht is besteed aan het criterium betreffende het cementgehalte. In de ROBK [30] was aangegeven dat TNO en Rijkswaterstaat proeven hadden gedaan op beton met een sterkteklasse C28/35 gemaakt met maximaal 320 kg/m³ CEM III cement, waarbij geen spatten was opgetreden. Bij het tegelijkertijd lopende project Salland-Twentetunnel was dit ook aan de orde geweest. Daar was een mengsel met 320 kg/m³ cement CEM III voorgesteld, maar na overleg met een brandexpert van RWS bleek 340 kg/m³ cement CEM III ook mogelijk en ook daarvoor was een receptuur voorgesteld. Opgemerkt kan worden dat het “Brawat 3” onderzoek [18] was vermeld dat in de proeven 340 kg/m³ cement CEM III was toegepast en in de ROK 1.0 was de 320 kg/m³ cement CEM III ook al vervanging door 340 kg/m³ cement CEM III.

Benodigde betondekking

De benodigde dekking is bepaald op basis van de eisen ten aanzien van de maximale temperatuur die binnen de brandwerendheidsduur mag optreden in het betonstaal van de trekwapening en in het beton. Het temperatuur criterium voor het beton (380° C) geldt voor het beton in de buigtrekzone aan de binnenzijde op een afstand ter grootte van de diameter van het wapeningstaal, gemeten vanaf de buitenzijde van de wapening.

In het ontwerpdocument [68] is het volgende opgenomen:

In Dialoogverslag 3, d.d. 19 mei 2011 is het volgende vastgelegd m.b.t. de brandwerendheid van de tunnel:

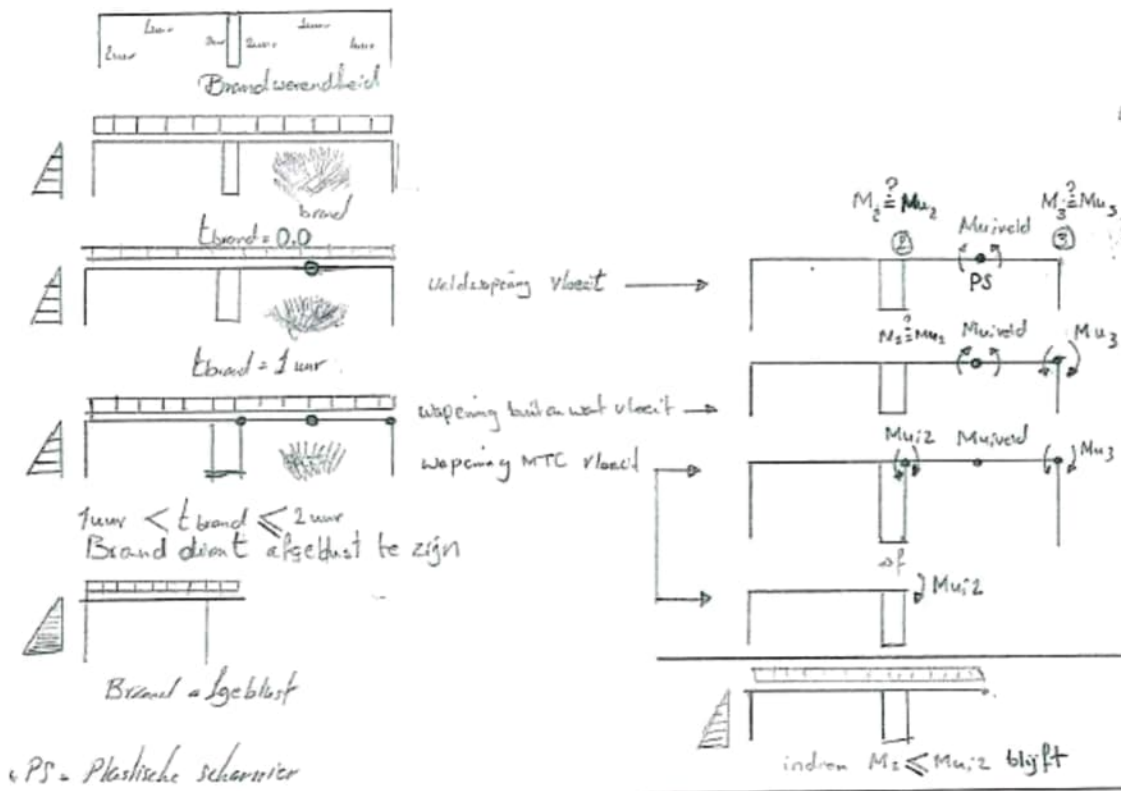
²⁸ In [68] is voor de onderbouwing van de brandwerendheid van de Landtunnel verwezen naar het document “Brandwerendheid Landtunnel”, waarover de ondergetekenden bij het opstellen van dit rapport niet beschikten.

- Ten aanzien van de brandwerendheid wil gegadigde een interpretatie vastleggen die luidt als volgt:
 “Op het moment dat de constructie voldoet aan de vereiste brandwerendheidsduur en deze calamiteit doet zich voor, is de constructie niet bezwiken en kan de constructie ingrijpend gerepareerd worden waarbij de A4 deels afgesloten wordt”.

RWS bevestigt deze stelling.

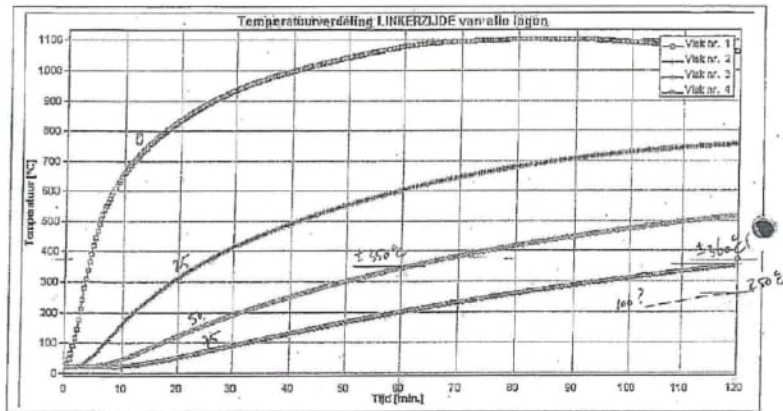
Dit leidt ertoe dat bovenstaande brandwerendheid (conform Figuur 9) in de Landtunnel dient gegarandeerd te worden, voordat een bepaalde lengte van de Landtunnel bezwijkt. In Figuur 11 zijn een aantal bezwijkmechanismen t.g.v. brand weergegeven.

Figuur 9 in [68] is de bovenstaande figuur 47. Figuur 11 uit [68] is navolgend als figuur 49 opgenomen. Opgemerkt kan worden dat wordt gesproken over een “lengte van de Landtunnel”. Beschouwingen over de lengte waarover een tunnel bezwijkt komen verder in [68] niet aan de orde. De bezwijkmechanismen in figuur 49 beschouwen de doorsnede (2D) en schetsen hoe een tunnelbuis kan bezwijken. Zoals voorgaand al is opgemerkt, bevindt zich ter plaatse van de aansluiting met het MTK een zeer grote hoeveelheid wapening boven in de dikkere doorsnede van het dak. Met de figuur rechtsonder is aangegeven dat dit mogelijk ertoe kan leiden dat het dak bij de aansluiting met de MTK niet bezwijkt.



figuur 49 Bezwijkmechanismen bij brand volgens [68].

Met het programma PC Tempflow is het temperatuurverloop in de diepte van het dek en de wanden bepaald (figuur 50). Met het berekende temperatuurverloop en de temperatuureisen is de benodigde betondekking op de wapening bepaald (Tabel 13).



Figuur 4: Temperatuurverloop op een bepaalde diepte als functie van de tijd (RWS kromme)
 Vlak nr. 1 = oppervlak; vlak nr. 2 = 25mm diepte; vlak nr. 3 = 50mm diepte; vlak nr. 4 = 75mm diepte.

figuur 50 Temperatuurverloop op een bepaalde diepte als functie van tijd (RWS kromme) (Figuur 10 in [68]).

Tabel 13 Nominale dekking i.v.m. brandwerendheid (Tabel 10 in [65]).

	$C_{nom;brand;1\text{uur}}$ (mm)	$C_{nom;brand;2\text{uur}}$ (mm)
Onderzijde dek	70	95
Buitenwanden buitenzijde (tunnelzijde)	60	91
Wanden MTK buitenzijde (tunnelzijde)		91

Aan het uiteinde van één tunnelbuis is over een lengte van negen moten een voorgespannen dek toegepast. Daar is voor de brandwerendheid HWB (Promatect) toegepast.

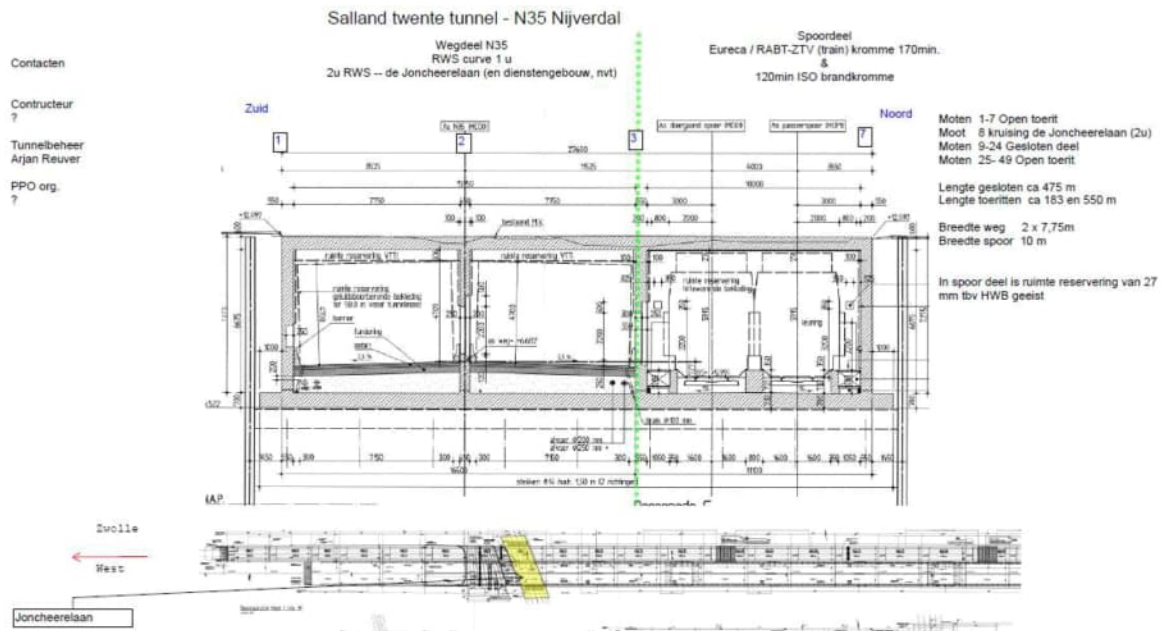
In [82] is voor bezwijken het volgende aangegeven:

“Dak ter plaatse van maatgevende brand bezwijkt na 22 minuten ($T_{staal} > 250C$).
 Door bezwijken van het dak kunnen de hitte en de rook door het gat ontsnappen.
 Bezwijken van de middenwand t.p.v. brand treedt niet op.”

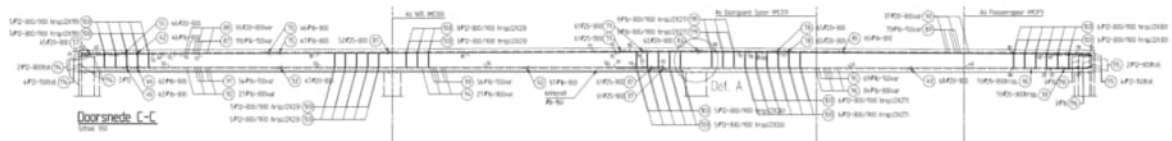
13.3 Salland-Twentetunnel

13.3.1 Constructie

De Salland-Twentetunnel is een combinatie van een wegtunnel en een spoortunnel (*figuur 51*) met een gesloten deel van 500 m en een open curve deel van 500 m en twee toeritten. Boven de tunnel kruist een weg, de Joncheerelaan. De dikte van het dak is 600 mm en de buitenwand en de wand tussen de spoortunnel en de wegtunnel is 550 mm dik. Standaard hebben de moten een lengte van 30 m en een breedte (buitenzijde wanden) van 27,6 m [44].



figuur 51 Doorsnede en bovenaanzicht Salland-Twentetunnel [69].



figuur 52 Wapening in het dak (moot 89) [61].

13.3.2 Brandwerendheid

Brand is besproken in hoofdstuk 8 van [45]. Waarschijnlijk was de start van het ontwerp van de Salland-Twentetunnel iets eerder dan de Ketheltunnel, want met betrekking tot brandwerendheid was de ROBK6 van toepassing.

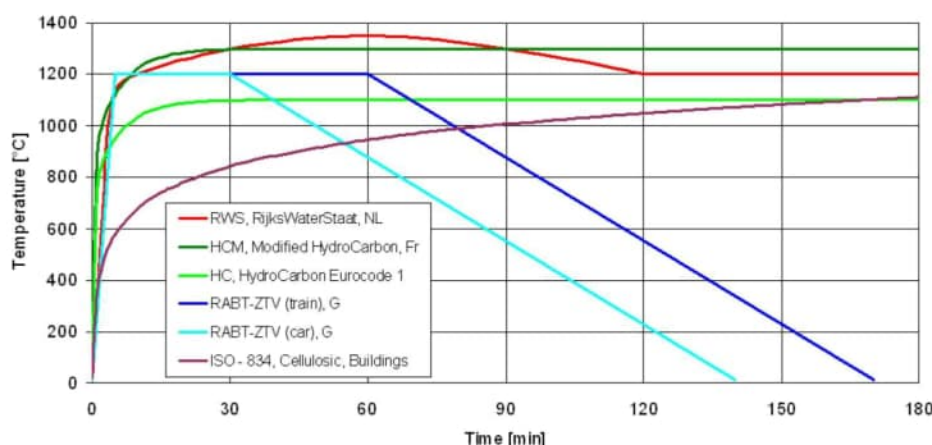
In de betontrekzone en de betondrukzone zijn de gebruikelijke eisen ten aanzien van maximum temperatuur (als bij de Ketheltunnel) van toepassing. Daarnaast dienden de volgende onderdelen te worden getoetst op de achtereenvolgende brandcurves en duur (“*geen verlies constructieve veiligheid*”):

- Voor de wegtunnel ter plaatse van de kruising met de Joncheerelaan en ter plaatse van eventueel boven de tunnel te realiseren dienstgebouwen geldt dat een RWS brandkromme gedurende 2 uur moet worden weerstaan;
- Voor de overige locaties van de wegtunnel, oftewel de standaard situatie, geldt een RWS brandkromme van 1 uur;
- Voor de standaard situatie bij de spoortunnel geldt dat de Eureka brandkromme gedurende 170 minuten moet kunnen worden weerstaan.

Daarnaast gold dat binnen de geëiste duur van brand er geen significant afspatten van de constructie is toegestaan.

Opgemerkt is in [45] dat als toevoeging op de ROBK versie 6 gold dat de maximaal toelaatbare temperaturen in het beton en wapeningsstaal niet direct gekoppeld dienden te worden aan het einde van de brandduur als daarna de temperatuur in de constructie nog blijft stijgen.

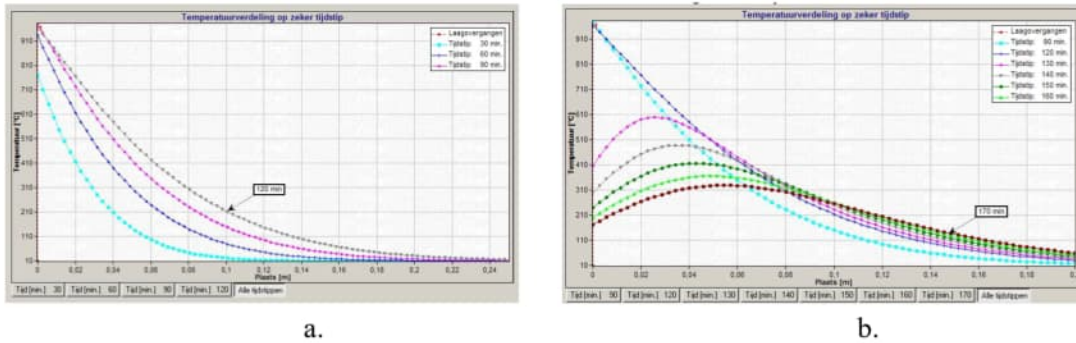
De brandcurves zijn weergegeven in *figuur 53*. De standaard brandkromme komt overeen met de ISO-834 en de Eureka brandkromme komt overeen met de RABT-ZTV (Train) G.



figuur 53 Brandcurves [45].

Rekening houdend met duurzaamheid en brandwerendheid was er gekozen voor een betonkwaliteit C28/35, waarbij ter voorkoming van afspatten maximaal 320 kg/m³ CEM III toegepast diende te worden. Voor de vloeren kon een hoger cementgehalte worden toegepast, omdat daar de kans op afspatten door brand zeer klein is door de afdekking van de vloer met ballast of (zand en) asfalt, waardoor de temperatuur in de vloer minder oploopt dan bij de wanden en het dak.

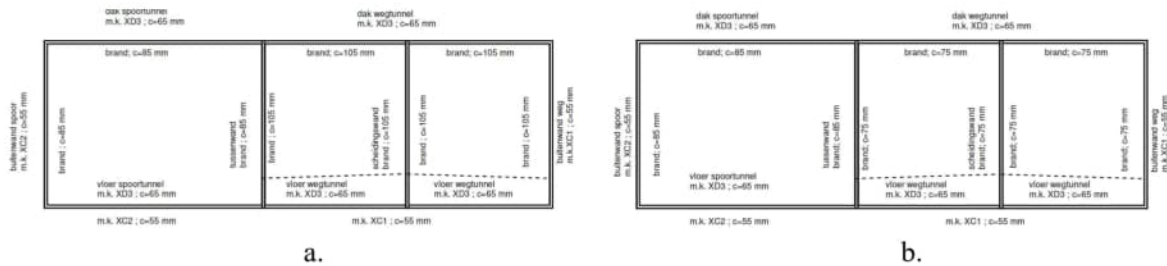
Op basis van temperatuurberekeningen, uitgaande van de Rijkswaterstaat brandcurve, zijn de temperatuurverlopen in de betondoorsneden bepaald, zoals die in *figuur 54* zijn weergegeven.



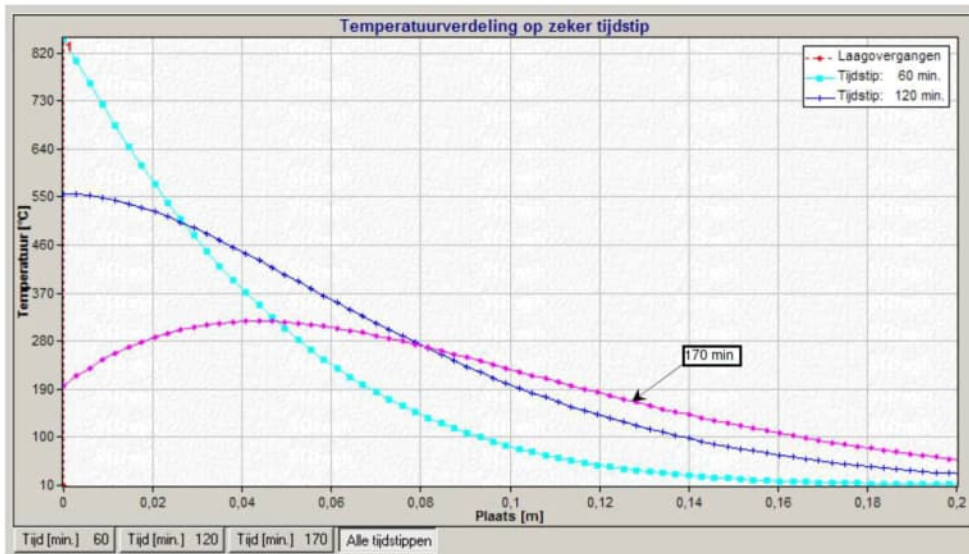
figuur 54 *Temperatuurverloop in betondoorsneden als gevolg van de RWS-curve 120 minuten zonder naijl effect (a) en met naijl effect [45].*

Op basis van het temperatuurverloop is de benodigde dekking bepaald. Voor de controle van de betondrukzone diende conform de aanvullingen op de ROBK6 [30] in de berekening de constructiehoogte te worden verminderd met het gedeelte van het beton dat een hogere temperatuur dan 380 °C heeft bereikt. Dit was 70 mm. Deze toets is uitgevoerd voor de dakconstructie en de buitenwand, waarbij de maximale capaciteit van het dak is bepaald met de gewone materiaalfactoren en vervolgens de capaciteit bij brand met de aangepaste materiaalfactoren. Hieruit volgde dat het dak voldeed, maar de basiswapening Ø25-150 aan de grondzijde van de buitenwand diende te worden verhoogd naar Ø32-150 in de hoek rechtsboven. De resulterende benodigde dekkingen zijn weergegeven in *figuur 55*.

Voor de Spoor tunnel is de standaard situatie bij de Eureka brandkromme gedurende 170 minuten beschouwd. De daarbij verkregen temperatuurverlopen in de betondoorsnede zijn weergegeven in *figuur 56*. De omhullende van de verschillende curves diende te worden gehanteerd om een beeld te krijgen van de verschillende temperaturen die bij verschillende tijdstippen optreden. De benodigde dekkingen voor de spoor tunnel met de Eureka brandkromme 170 minuten zijn weergegeven in *figuur 55*.



figuur 55 *Dekkingen gesloten deel RWS-brandkromme 2 uur bij Jonchheerelaan (a) en 1 uur “standaard situatie” (b) [45].*



figuur 56 Temperatuurverloop in betondoorsneden als gevolg van de Eureka curve 170 minuten [45].

In [82] is voor bezwijken het volgende aangegeven:

“Dak ter plaatse van maatgevende brand bezwijkt na 22 minuten ($T_{staal} > 250C$). Door bezwijken van het dak smooit de brand en de hitte kan door het gat ontsnappen. Wanneer het dak bezwijkt, zal de desbetreffende tunnelmoot bezwijken doordat het stempel wegvalt. De veilige buis is in dat geval niet meer veilig.”

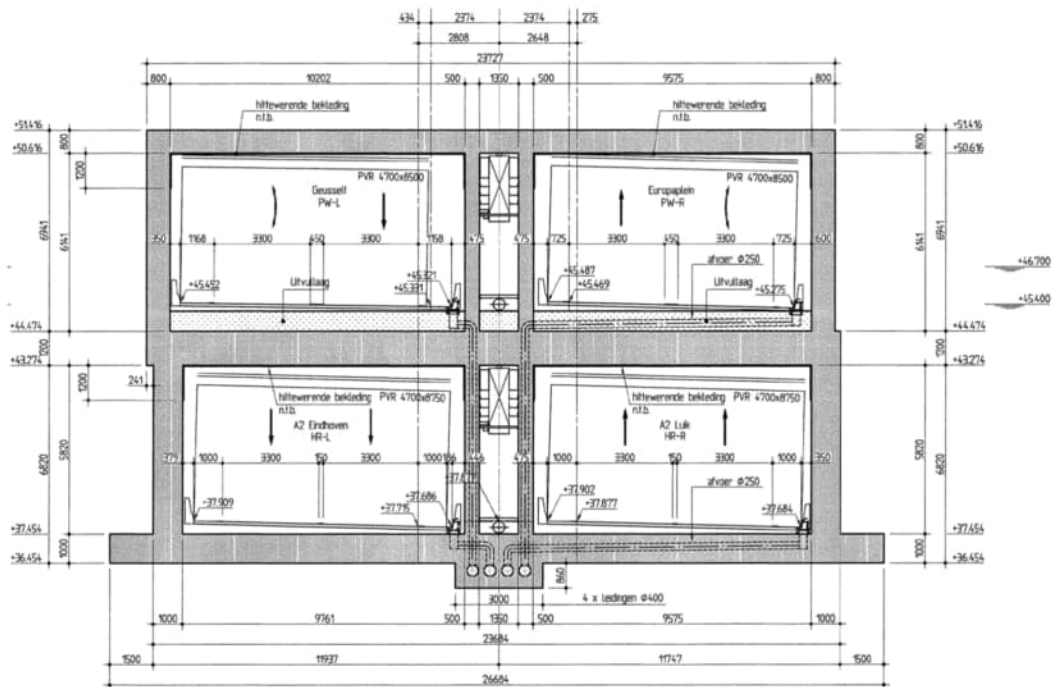
13.4 Koning Willem-Alexandertunnel

13.4.1 Constructie

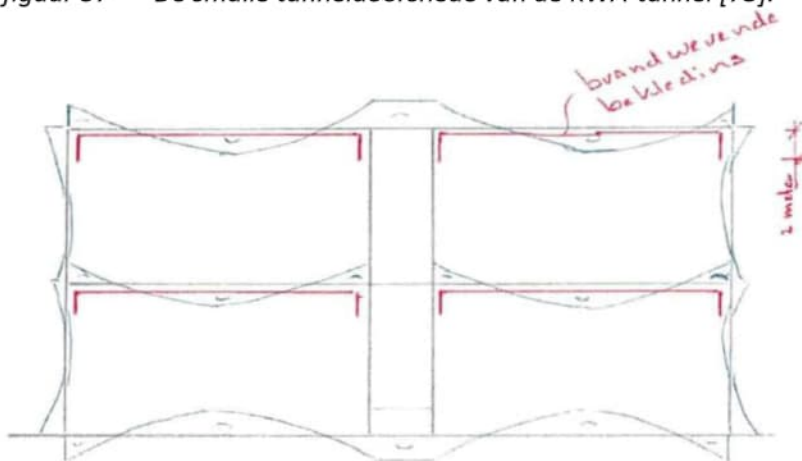
De Koning Willem-Alexandertunnel (KWA-tunnel) bestaat uit twee maal twee tunnelbuizen boven elkaar. Voor de standaard tunneldoorsnede is er een smalle (figuur 57) en brede doorsnede. De lengte van de gesloten tunnel is 1700 meter bij de bovenste buis en 2400 meter bij de onderste buis [82]. De tunnel is opgebouwd uit tunnelmooten met een lengte van circa 25 meter.

13.4.2 Brandwerendheid

Brand is beschouwd in Bijlage J van [73]. De tunnel moet een RWS-brandkromme gedurende twee uur kunnen weerstaan. Ook in dit geval is daar weer invulling aan gegeven door te voldoen aan de temperatuureisen voor de betontrekzone en de betondrukzone, zoals dat ook bij de andere twee land-tunnels is gedaan. In figuur 58 is het algemene momentenverloop weergegeven, dat is gebruikt voor de beoordeling van de temperatuureisen.



figuur 57 De smalle tunneldoorsnede van de KWA-tunnel [73].



figuur 58 Het algemene momentenverloop dat is gebruikt om op de kritische locaties te controleren of de constructie voldoet aan de brandbelasting [73].

Controles zijn uitgevoerd voor buiging en dwarskracht. Op de volgende wijze is voldaan aan de eisen m.b.t. brandwerendheid:

- **Brandwerende bekleding** aan de onderzijde van de dakhloer en de tussenvloer en de bovenste meter van de wanden;
- **“voldoende dekking / uitvullaag / asfalt”** op de bovenzijde van de tussenvloer en de tunnelvloer voor buigtrekzone op buiging en dwarskracht;
- **“Opofferingsbeton”** aan de bovenzijde tussenvloer en tunnelvloer voor buigdrukzone op buiging;
- **Reductie sterkte en dieper leggen wapening** voor buigtrekzones aan de binnenzijde van de buitenwanden;
- **Opofferingsbeton en brandwerende bekleding** voor buigdrukzones aan de binnenzijde van de buitenwanden;
- **Reductie sterkte doorsnede** voor dwarskracht aan de binnenzijde van de buitenwanden.

Ter plaatse van de bovenzijde van de vloeren in de tunnel bedraagt de dekking 70 mm. Naast deze dekking is er minimaal een asfaltpakket van 100 mm aanwezig. Over het grootste deel van de vloer ligt er tevens een uitvullaag.

De wanden zijn van ROK-beton met een verhoogde dekking (70 mm) om te beschermen tegen afspatten. Het dak is van ROK-beton en beschermd met Aestuerver platen of Promatect H en eveneens is een verhoogde dekking toegepast [82]. De buigtrekzone van de wanden van de bovenste buis ligt aan de verkeersbuiszijde i.v.m. de ondiepe ligging (geen groot inklemmingsmoment t.g.v. bovenbelasting). Bij de bovenste buizen is de buigtrekwapening dieper gelegd t.b.v. verhoogde dekking (100 mm). Bij de onderste buizen is dit niet nodig.

Voor de Aestuver HWB zijn in 2012 brandproeven uitgevoerd [64]. Die hebben laten zien dat aan de van toepassing zijnde eisen m.b.t. brandwerendheid (een RWS-brandkromme moet 120 minuten kunnen worden weerstaan) wordt voldaan. In 2018 zijn in-situ brandproeven uitgevoerd [98,105], waaruit bleek dat een brandwerend systeem eerder dan de vereiste duur van 2 uur afspatgedrag van beton was waar te nemen (paragraaf 11.7.3). In de in 2017 opgestelde rapportage van de veiligheidsrisico's bij de tunnels van na 2008 [82] is over de brandwerendheid van en bezwijken bij de KWA-tunnel het volgende vermeld:

“Bovenste buis met Promatect of Aestuver: Afspatten van de wanden start bij de maatgevende brand na 10 minuten, na 27 minuten (10 min + (100 mm/70 mm x 12 min) ligt de wapening van de buitenwand bloot en moet als verloren worden beschouwd. De buitenwand en vervolgens de gehele tunnelmoot bezwijken ten gevolge van het wegvallen van de stempelfunctie van het tunneldak.

***Onderste buis met Promatect:** De hittewerende bekleding aan de tussenvloer t.p.v. brand valt bij de maatgevende brand na 27 minuten naar beneden. Het beton in de tussenvloer is vanaf dit tijdstip onbeschermd. Tussenvloer bezwijkt na 49 minuten ($T_{staal} > 250\text{ C}$ na 27 min + 22 min). De tussenvloer is noodzakelijk voor de constructieve integriteit van de tunnel; wanneer de tussenvloer bezwijkt stort de hele tunnelmoot in vanwege het wegvallen van de stempelfunctie van de tussenvloer.*

***Onderste buis met Aestuver:** Afspatten van de wanden start bij de maatgevende brand na 10 minuten, na 95 minuten (10 min + (500 mm/70 mm x 12 min) is de volledige tussenwand van de veilige ruimte verloren gegaan. Vanaf dit tijdstip is er geen veilige ruimte meer. Na 100 minuten (10 min + (525 mm/70 mm x 12 min) is ruim de helft van de buitenwand afgespat. De ongewapende doorsnede kan nu de trekspanning niet meer aan en de buitenwand bezwijkt. Met het bezwijken van de buitenwand stort de hele tunnelmoot in vanwege het wegvallen van de stempelfunctie van de tussenvloer.”*

Dus daar waar de Aestuver HWB, dat voor voldoende brandwerendheid zorgt, tegen de onderzijde van het dak of de tussenvloer is aangebracht, is aangenomen dat de buitenwand als eerste bezwijkt, waarna de gehele tunnelmoot bezwijkt, omdat dan ook de stempelfunctie van het dak of de tussenvloer wegvalt. Omdat de Promatect HWB klaarblijkelijk loskomt van het beton²⁹, zal op die plaatsen in de onderste buis waar dat is aangebracht de tussenvloer als eerste bezwijken, gevolgd door bezwijken van de hele tunnelmoot door wegvallen van de stempelfunctie van de tussenvloer.

²⁹ Vooralsnog is ondergetekenden niet goed duidelijk waarop de aanname dat de Promatect HWB na 27 minuten brand loslaat. Uit [90] en [105], waarin is gerapporteerd over brandproeven bij de KWA-tunnel, is dat niet duidelijk geworden.

In [89] is aangegeven dat na de eerste grove benadering van bezwijktijden en de kwalitatieve risicoanalyses op basis van de in februari en maart 2017 uitgevoerde brandproeven (*hier is naar verwachting document [82] bedoeld*), vervolgens ook de wijze van bezwijken onderzocht. Dit is gedaan omdat, vanwege de complexe geometrie, bezwijken niet eenvoudig kan worden vastgesteld. Er is daarbij verfijnder gekeken, waarbij enerzijds de daadwerkelijke belastingen zijn gehanteerd en anderzijds de invloed van de temperatuur op de sterkteparameters in rekening is gebracht, zo is in [89] vermeld. Het betreft een conservatieve benadering [89]:

“Het moge duidelijk zijn dat de berekende bezwijktijden gebaseerd zijn op de aanname dat het afspatten in de tunnel lineair propageert t.o.v. hetgeen geconstateerd is tijdens de brandproeven. Aangezien de proeven een worst case zijn is dit dus een conservatieve benadering.”

Doorsnedetoetsen voor de buitenwanden zijn uitgevoerd [89]. Daarbij is naar een ongewapende doorsnede gekeken. Door de aanwezige normaaldrukkkracht is er momentcapaciteit aanwezig. Er is gerekend met een gereduceerde, ongewapende doorsnede. De opoffering kon daarbij worden gevarieerd totdat de treksterkte aan de getrokken zijde werd overschreden.

Uit de brandproeven was gebleken dat na 20 minuten brand de temperatuur ter hoogte van de wapening bij 35 mm resterende dekking niet hoger was dan 200 °C, terwijl de buitenzijde aan 1200 °C werd blootgesteld. Op basis hiervan is geconcludeerd dat 35 mm dekking het beton tijdelijk isoleert met 1000 °C. Omdat de buigtreksterkte boven de 200 °C met 80% is gereduceerd, is gerekend met een gereduceerde doorsnede, die 35 mm meer is dan de berekende opofferingsdikte.

Voor de faalmechanismen is het volgende gerapporteerd in [89]:

Bovenste buis:

Onderzijde dak: **Aestuver** hittewerende bekleding; bescherming tegen brand 120 min.
Promatect hittewerende bekleding: valt na 27 minuten naar beneden. Het beton in het dak is vanaf dit moment onbeschermd. Dak bezwijkt na $(27 + 22 =) 49$ minuten ($T_{\text{wapening}} \gg 250$ °C).

Buitenwanden: Afspatten start na 10 minuten, na $(10 + (100/70 \times 12) =) 27$ minuten ligt de wapening bloot en moet als verloren worden beschouwd. De wand bezwijkt en afhankelijk van de locatie in de tunnel (brede of smalle doorsnede) stort de tunnelmoot in.

[Maatgevende gebeurtenis]

Middenwanden: Afspatten start na 10 minuten, na $(10 + (500/70 \times 12) =) 95$ minuten is de hele doorsnede verdwenen. De tunnelconstructie bezwijkt hierdoor niet.

Onderste buis:

Onderzijde dak: **Aestuver** hittewerende bekleding; bescherming tegen brand 120 min.
Promatect hittewerende bekleding: valt na 27 minuten naar beneden. Het beton in het dak is vanaf dit moment onbeschermd. Dak bezwijkt na $(27 + 22 =) 49$ minuten ($T_{\text{wapening}} \gg 250$ °C).

[Maatgevende gebeurtenis]

Buitenwanden: Afspatten start na 10 minuten en na $(10 + (295/70 \times 12) =)$ 61 minuten bezwijkt de wand doordat de ongewapende doorsnede de trekspanning niet meer kan opnemen. De wand bezwijkt en de tunnelmoot stort in.

Middenwanden: Afspatten start na 10 minuten en na $(10 + (500/70 \times 12) =)$ 95 minuten is de hele doorsnede verdwenen. De tunnelconstructie bezwijkt hierdoor niet.

De bevindingen van de verfijnde berekeningen (reductie van de buigtreksterkte van beton boven de 100 °C) voor de tijd tot bezwijken zijn tezamen met de resultaten van de eerste grove schatting van de tijd tot bezwijken, weergegeven in een tabel (*hier opgenomen als Tabel 14*).

Tabel 14 Tijden tot bezwijken voor verschillende onderdelen van de KWA-tunnel volgens de eerste grove benadering en volgens de verfijnde berekening [89].

	Tijd tot bezwijken (oud, grove schatting)	Tijd tot bezwijken (verfijnd)	Deels of geheel bezwijken?
Bovenste buis (Promatect)			
Dak	49 min	49 min	Tunnelmoot / tunnelmoten
Buitenwanden	27 min	27 min	bezwijken geheel
Tussenwanden	95 min	95 min	(ongewijzigd)
Bovenste buis (Aestuver)			
Dak	>120 min	>120 min	Tunnelmoot / tunnelmoten
Buitenwanden	27 min	27 min	bezwijken geheel
Tussenwanden	95 min	95 min	(ongewijzigd)
Onderste buis (Promatect)			
Dak	49 min	49 min	Tunnelmoot / tunnelmoten
Buitenwanden	95 min	61 min	bezwijken geheel
Tussenwanden	95 min	95 min	(ongewijzigd)
Onderste buis (Aestuver)			
Dak	>120 min	>120 min	Tunnelmoot / tunnelmoten
Buitenwanden	95 min	61 min	bezwijken geheel
Tussenwanden	95 min	95 min	(ongewijzigd)

Tabel 1: (aangepaste) bezwijktijden en wijze van bezwijken. **Vet** gedrukt de maatgevende bezwijktijden en *cursief* de aanpassingen.

Volgens [89] was de wijze van bezwijken in eerste instantie generiek beschouwd en vervolgens meer in detail. Bezwijken van de tunneldelen waar deze uitwaaiëren aan de Noordzijde en de uitgang aan de Zuidzijde is niet nader beschouwd, omdat daar de wijze van bezwijken vergelijkbaar is met bezwijken van een standaard afgezonken tunnel, zo is gesteld. Dat bezwijken is dat bij bezwijken van één constructie-onderdeel betekent dat de hele doorsnede bezwijkt.

Met betrekking tot bezwijken is het volgende aangegeven in [89]:

Een tunnel in de grond is voor zijn sterkte en stabiliteit van het evenwicht afhankelijk van stempelwerking (tenzij er expliciet voor is gekozen om de draagconstructie van de tunnel los te koppelen van de grondkerende functie). Zo ook bij de KWA tunnel. De KWA tunnel is een tweelaagse tunnel en keert als zodanig 14 m grond. De buitenwanden worden gesteund door het tunneldak, de tussenvloer en de tunnelvloer. In de andere richting wordt het tunneldak en de tunnelvloer gesteund door de wanden.

Concreet is de tunnel als doosvormige constructie afhankelijk van alle constructieonderdelen; als er één wegvalt, bezwijkt een moot van de constructie - al dan niet in zijn geheel. Uitzondering hierop vormen de tussenwanden; hiervan mag er één wegvallen zonder dat de doorsnede van de tunnel bezwijkt. Ten behoeve van de onderstaande bezwijkanalyse zijn een aantal berekeningen uitgevoerd welke vergelijkbaar zijn met de oorspronkelijke

rekenmodellen. Aan de hand van de berekeningen worden conclusies getrokken over het te verwachten bezwijkgedrag van de tunnel onder verschillende condities.

Door ventilatie in de tunnel worden verbrandingsgassen door de tunnel gedrukt en zullen de temperaturen, die ter plaatse van de brand heersen, over grotere lengte in de tunnel ook heersen, zo is aangegeven. Er moet volgens [89] daarom rekening mee worden gehouden dat over een grotere lengte dan enkel ter plaatse van de brand, schade optreedt aan de tunnel.

Met betrekking tot de analyses is verder in [89] nog het volgende aangegeven:

De analyses zijn uitgevoerd op een tunneldoorsnede van 1 m lang. Met effecten als boogwerking in de grond en herverdeling in langsrichting is geen rekening gehouden, aangezien ervan uit wordt gegaan dat één moot (24 m) (of meerdere moten) van de tunnel in zijn geheel aan (lokaal) bezwijken onderhevig is/zijn. Dit is een conservatieve aanname, maar wel passend bij de grootte van de brand volgens de RWS brandcurve.

Wanneer door het optreden van meerdere vloeischarnieren een mechanisme ontstaat, zal de doorsnede instorten. Voordat het zover is, treedt er scheurvorming op in de constructie waarbij er door herverdeling tijdelijk een nieuw evenwicht zal ontstaan. De opgelegde momenten ten gevolge van de brand zelf zullen door herverdeling grotendeels uitdempen (uitgaande van voldoende rotatiecapaciteit).

Voor de smalle doorsnede van de tunnel is navolgend de wijze van bezwijken beschreven, zoals dat in [89] is weergegeven.

Smalle doorsnede - brand in de onderste tunnelbuis

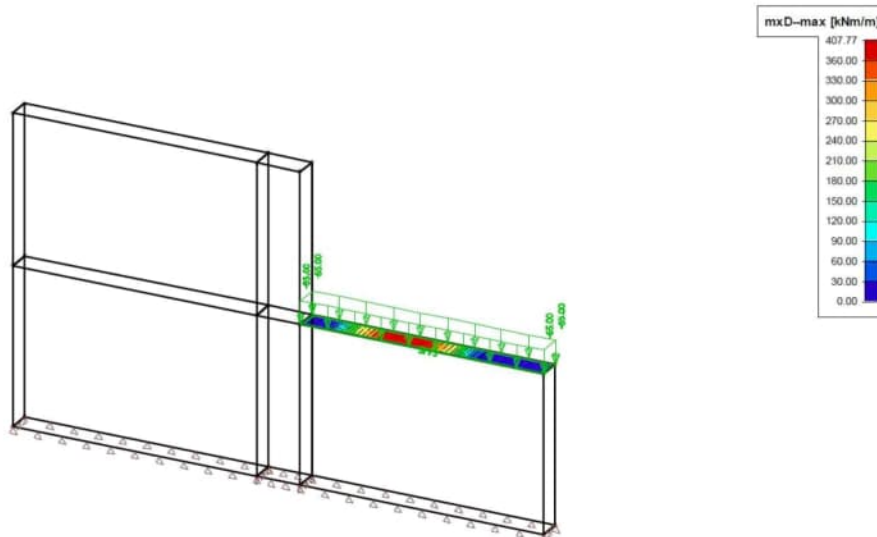
Scenario a: Door het bezwijken van de tussenvloer ontstaan grote buigende momenten in de wand, in de tunnelvloer en in de dakvloer. Aan de zijde waar de tussenvloer bezwijkt wordt onderin de buitenwand M_u overschreden en ook onderin de tunnelvloer wordt M_u overschreden. De buitenwand komt naar binnen en neemt de dakvloer boven de brand mee. Bij het dan ontstane mechanisme ('gedrag na bezwijken tussenvloer en bovenbuis bezwijken') is er onvoldoende capaciteit in de doorsnede aanwezig. In alle resterende doorsneden ontstaat er een vloeischarnier. Hierdoor bezwijkt de tunnelmoot

Scenario b: De buitenwand van de onderste buis bezwijkt. Er is geen verticale steun meer voor de tussenvloer en de buitenwand van de bovenste buis. Bovendien is er dan geen horizontaal stempel meer aanwezig, waardoor de hele doorsnede instort.

Smalle doorsnede - brand in de bovenste tunnelbuis

Bij de wanden zal afspatten optreden. Aan de buitenwand zal de wapening na 27 minuten zijn blootgesteld aan temperaturen tot 1200 °C. De wapening verliest zijn functie en de buitenwand zal uitknikken, waardoor deze bezwijkt en het tunneldak ter plaatse van de tunnelbuis bezwijkt. Uit de berekening volgt dat vervolgens alleen in de tussenvloer ter plaatse van de aansluiting aan de buitenwand een plastisch scharnier ontstaat. In de overige delen van de doorsnede ontstaan geen plastische scharnieren. De tunnelmoot zal dus niet instorten door het bezwijken van de buitenwand en het tunneldak van de bovenste tunnelbuis. In [89] is wel de kanttekening gemaakt dat er wel degelijk schade aan de tussenvloer kan ontstaan doordat het tunneldak op de tussenvloer valt na instorten (*dynamische belasting*). De tussenvloer kan de statische belasting van het puin en de gronddekking op het

tunneldak dragen. Het optredend buigend moment M_d is 408 kNm en het bezwijkmoment $M_{u,tussenvloer,veld}$ is 655 kNm (figuur 59).



figuur 59 Belasting op en optredend buigen moment M_d in de tussenvloer door puin en gronddekking [89].

Met betrekking tot bezwijken van de KWA-tunnel zijn de volgende conclusies getrokken [89]:

- Ten gevolge van het bezwijken van de tussenvloer of een buitenwand van de onderste tunnelbuis, zal de hele tunnelmoot instorten (*ongeacht een brede of smalle tunneldoorsnede*);
- Bij de smalle tunneldoorsnede is er een kans dat bezwijken van de bovenste buis (*tunneldak en/of buitenwand*) niet leidt tot bezwijken van de gehele tunnelmoot;
- Bij de brede tunneldoorsnede is bezwijken van de hele tunnelmoot in het geval van het bezwijken van de bovenste buis zeer waarschijnlijk.

Verder is in [89] gesteld dat, omdat een brand overal in de tunnel kan optreden, er rekening mee gehouden moet worden dat bezwijken van één of meerdere tunnelmooten kan optreden in het geval van een maatgevende brand.

13.5 Conclusies

Bij de drie landtunnels is voor het ontwerp gebruik gemaakt van de prestatie-eisen, zijnde dat:

- ROK-beton is toegepast om te voorkomen dat afsputten zou optreden;
- De temperatuurcriteria voor het betonstaal en het beton zijn toegepast voor de eis dat de constructie de aangegeven brandwerendheid (1 of 2 uur) moest hebben;

Voor het berekenen van de temperatuur is de constructie bij brand en een RWS-brandkromme, is het programma PC Tempflow gebruikt en om aan de temperatuurcriteria te voldoen, is één of zijn meerdere van de volgende maatregelen getroffen:

- HWB-toegepast;
- Extra dekking (opofferingsbeton) toegepast;
- De wapening iets dieper in de wand aangebracht;
- Ballast, uitvullaag en/of asfalt op de vloeren.

Bij een dergelijke aanpak is het niet nodig om bezwijken van de tunnel of een tunnelmoot te beschouwen. Nadat bekend was geworden dat het beton wel zal afspatten bij een RWS-brand, zijn door RWS beschouwen voor de wijze van bezwijken uitgevoerd. Daarbij is het twee-dimensionale gedrag van de tunnel beschouwd. RWS realiseerde zich dat dit een conservatieve aanname is, maar volgens haar wel passend bij de RWS brandcurve. Er is gesproken over het bezwijken van een tunnelmoot. In hoeverre meerdere tunnelmooten kunnen bezwijken komt in de beschouwde documenten niet aan de orde. In hoofdstuk 14 is verder ingegaan op bezwijken van tunnels bij brand.

14 Beschouwingen m.b.t. schade en bezwijken bij brand in tunnels

14.1 Algemeen

Zoals uit het voorgaande in dit rapport duidelijk zal zijn, was het in het verleden niet gebruikelijk, en ook niet nodig, om de wijze waarop een tunnel in het geval van een brand schade oploopt en zal kunnen bezwijken, te beschouwen. Door de constructie zodanig te construeren dat deze een gedefinieerde tijd (brandwerendheidsduur) de RWS-brandcurve kan weerstaan, werd ervoor gezorgd dat aan de functionele eisen met betrekking tot veiligheid en beperken van schade werd voldaan. Voor branden die minder intens uitvallen dan de RWS brandwerendheidsduur (*120 minuten voor nieuwe tunnels en 60 minuten voor bestaande tunnels*) zal bij brand dan hooguit slechts zeer beperkte schade optreden. De vraag of bij een zeer zware brand de constructie zwaar beschadigd kan raken, speelde niet, omdat de 120 minuten RWS brandcurve als de zwaarst mogelijke te beschouwen brand werd gezien.

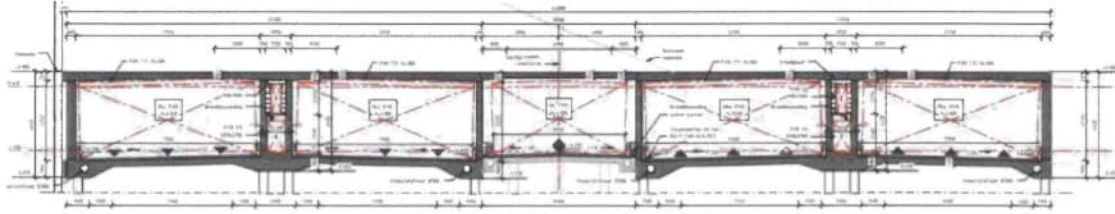
Nadat bekend was geworden dat bij recent gebouwde tunnels afspatten van het toegepaste ROK-beton optreedt, was de vraag hoe een tunnel beschadigd raakt en bezwijkt bij een brand opportuun geworden. Die vraag speelt met name voor landtunnels, omdat, anders dan bij tunnels onder open water, het de verwachting was dat de schade bij die tunnels mogelijk “repareerbaar” (*herstelbaar tegen acceptabele kosten*) zou kunnen zijn. Om die reden zijn in de afgelopen jaren in opdracht van RWS studies uitgevoerd naar het bezwijkgedrag van landtunnels. Voor de drie landtunnels van de onderhavige studie is dat in hoofdstuk 13 besproken. Voor die studies is de 120 RWS brandcurve als uitgangspunt gebruikt.

Voor de onderhavige verkennende studie is het de intentie inzicht te proberen krijgen in schades die verwacht kunnen worden bij branden met een verschillende intensiteit (brandomvang). Voor zover bekend bij ondergetekenden is daar in algemene zin nog weinig onderzoek naar uitgevoerd. Studies zijn inmiddels wel gestart, zoals bijvoorbeeld de recente TNO studie naar kleine branden [124]. In hoofdstuk 15 is ten behoeve van de MKBA op een hele grove wijze getracht te komen tot een classificatie van schades. In dit hoofdstuk zijn in paragraaf 14.3 een aantal algemene beschouwingen met betrekking schade aan en bezwijken van landtunnels bij brand opgenomen. In paragraaf 14.2 worden eerst nog de resultaten van een studie naar bezwijkmechanismen bij brand, zoals die zijn uitgevoerd voor de Gaasperdammertunnel, besproken.

14.2 Bezwijkanalyses voor de Gaasperdammertunnel [92]

14.2.1 Algemeen

Op verzoek van RWS is door IXAS het bezwijkgedrag geanalyseerd van de Gaasperdammertunnel [97] bij een brand conform de RWS-brandkromme, waarbij voor het gedrag van het toegepaste ROK betonmengsel de op dat moment laatste resultaten conform de uitgevoerde brandproeven zijn meegenomen (*Bramen onderzoek 2017*). Het gedrag bij brand van zowel de standaard "gesloten moot" (*figuur 60*) als de standaard "open moot" is op een kwalitatieve wijze beschouwd.



figuur 60 Doorsnede van de standaard "gesloten moot" [97].

14.2.2 Uitgangspunten

Voor de gehanteerde RWS-brandkromme is aangenomen dat in lengterichting van de tunnel het invloedsgebied ca. 50 m zal zijn. Gegeven dat de mootlengte ook 50 m is, is gesteld dat herverdeling in langsrichting niet reëel is en een beschouwing in dwarsrichting (2D) volstaat.

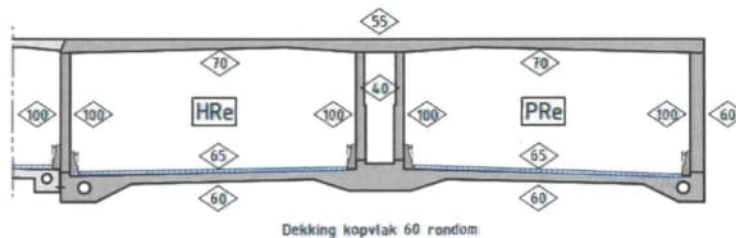
In dwarsrichting van de tunnel was het uitgangspunt dat het dak en de wanden aan weerszijden van de brand gelijkmatig door de brand worden belast vanwege de grootte van de energie van de brand conform de RWS-brandkromme. Verder is ervan uitgegaan [97] dat op het moment dat het dak bezwijkt de brand minder hevig zal worden vanwege de navolgende effecten, die op zouden kunnen treden:

- Koelende werking van de "open lucht";
- De vallende brokstukken van het dak op de brand;
- De vallende grond die aanwezig is op het dak op de brand.

Voor afspatten van het beton is aangehouden dat dit begint na 10 minuten als het beton een temperatuur heeft bereikt van 200 °C á 300 °C. Bij de toegepaste dekking van 70 mm ligt de wapening na ca. 22 minuten bloot en bij 100 mm na ca. 27 (afspatsnelheid ca. 6 mm/min.).

14.2.3 Bezwijkmechanismen

Bezwijkmechanismen zijn beschouwd voor brand in respectievelijk de tunnelbuis (figuur 61) van de Parallel Rijbaan (PRB), de Hoofd Rijbaan (HRB) en de Wissel baan (WI).

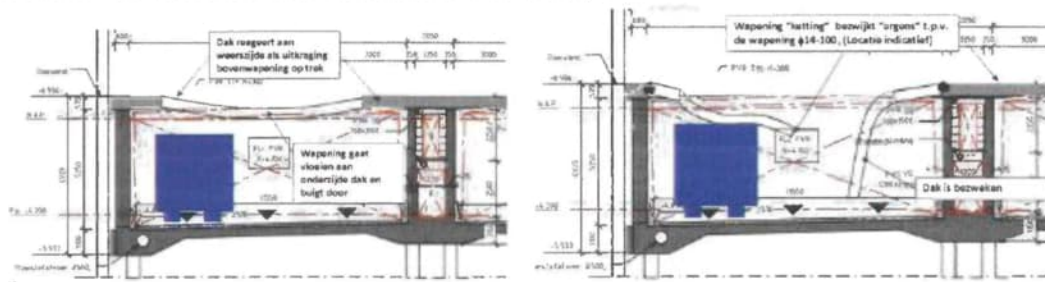


figuur 61 Doorsnede van de hoofdrijbaan en de parallelrijbaan en toegepaste dekkingen [97].

De volgorde van bezwijken van de verschillende onderdelen van tunnelbuisconstructie van de parallelrijbaan is volgens [97] als volgt:

1. Beton begint af te spatten (ca. 10 min.)
2. Wapening dak (c=70 mm) komt bloot te liggen (ca. 22 min.)
3. Wapening dak verliest zijn functie als trekwapening (ca. 22 min.)
4. Dak bezwijkt in het midden t.p.v. trekzone (ca. 25 min.)

Door de afname van sterkte en stijfheid van het betonstaal ontstaat in het midden van het dak een "vloeischarnier" met een zeer beperkte rotatiecapaciteit in het veld door de opwarming. Daardoor zal het dak aan weerszijden als uitkraging functioneren, waar de bovenwapening niet op is ontworpen. Ter plaatse van de wanden zal dan eveneens een vloeischarnier ontstaan door overbelasting. Op dat moment zal de bovenwapening als "ketting" functioneren, waaraan het dak "hangt". Door aanwezigheid van grond op het dak is de capaciteit hiervan nog steeds onvoldoende en zal tot gevolg hebben dat het dak uiteindelijk alsnog bezwijkt.



figuur 62 Dak bezwijkt ter plaatse van de trekzone [97].

5. Wapening wanden ($c=100\text{mm}$) komt bloot te liggen (ca. 27 min.)
6. Wapening brandzijde wanden verliest zijn functie als trekwapening (ca. 27 min.)

Voor de buitenwanden is er geen trekzone aanwezig aan de brandzijde, daarnaast is door het bezwijken van het dak de wand ontlast, en draagt enkel zijn eigen gewicht, met een beperkte uitkraging van het dak. Het blootliggen van wapening zorgt dan ook niet direct voor bezwijken van de wand. Inklemming vanuit de wandaansluiting van de MTK-wand (MTK is middentunnelkanaal) met het dak is niet noodzakelijk, de MTK wanden werken als een "trek-druk" systeem voor de inklemming van het aansluitende dak HRB, waarbij de door brand belaste wand op trek wordt belast. De capaciteit van enkel de wapening aan de binnenzijde van het MTK is voldoende om deze trekkracht op te nemen. Het verlies van wapening aan de brandzijde heeft daarom geen verdere directe gevolgen.

7. Wand MTK verliest trekverbinding (ca. 51min)

De op trek belaste wand van het MTK zal in de tijd steeds verder degraderen door het afspatproces met ca. 6mm/min . vanaf het moment van blootliggen van de wapening op 100mm dekking na ca. 27 min duurt het nog ca. 24 min totdat de doorsnedehoogte is afgenomen tot ca. 125mm . Op dat moment is er nog 55mm dekking aanwezig op de wapening aan de MTK-zijde. Tot dat moment wordt reëel geacht dat de wapening nog zijn functie als trekverbinding kan behouden. Door reeds benoemde opwarming van de blootliggende wapening, wordt aangenomen dat de trekverbinding wand-dak na dat moment verloren gaat, daarmee is tevens ook de inklemming (vanuit het juk MTK) verloren van het dak PRB. De niet door brand belaste MTK-wand, wordt vervolgens belast als zijnde een buitenwand, waar deze niet op is ontworpen. De inklemming voor het dak van de HRB kan niet worden gerealiseerd door de wand, maar kan in stand blijven zolang deze wordt gebalanceerd door de uitkraging.

8. Dak PRB functioneert als uitkraging (ca. 51 min.)

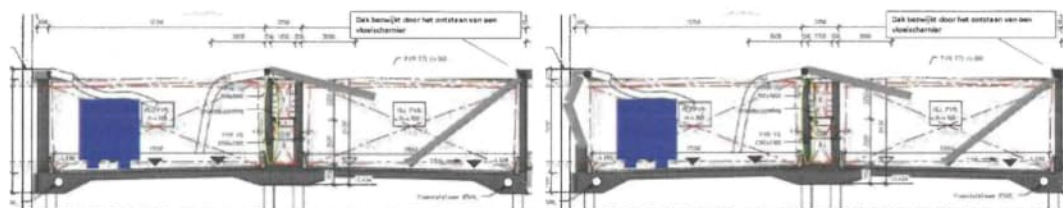
De functie als uitkraging vermindert met de tijd i.v.m. het steeds verder degraderen van beton aan de brandzijde. De degradatie zal ca. 6mm/min bedragen. Deze uitkraging houdt het aansluitende dak in de HRB intact, tot het moment dat de uitkraging dermate is afgenomen dat de inklemming niet meer gerealiseerd kan worden.

9. Toename veldmomenten dak HRB (ca. 51 min.)

Doordat de inklemming van het dak in de HRB ter plaatse van het MTK verdwenen is, zullen de veldmomenten fors toenemen, waarbij de verwachting is dat de doorsnede krachten niet opneembaar zullen zijn. (De overbelasting van de veldwapening is een aanname, dit zou moeten worden beschouwd door een aanvullende berekening)

10. Bezwijken dak HRB (ca. 51 min.)

De wapening zal gaan vloeien, waarbij het dak zal doorbuigen en uiteindelijk ook zal bezwijken door overbelasting. Hierbij is het risico aanwezig dat het dak van het MTK ook bezweken is.



figuur 63 Bezwijken dak hoofdrijbaan (links) en bezwijken buitenwand (rechts) [97].

11. Buitenwand bezwijkt ($<120\text{min}$.)

Door de degradatie van de doorsnedehoogte (ca. 6mm/min), zal de wand minder sterkte en stijfheid bezitten. Hierdoor zal de wand tijdens de brand steeds verder uitbuigen tot aan het moment van bezwijken, waarbij de verwachting is dat na een brand van ca. 60 min de afname ca. 300 mm zal bedragen. Door het degradatieproces zal naar verloop van tijd de afname van de doorsnede dermate groot zijn, dat de wand zal bezwijken. Hierbij zal de wand in de zone ter hoogte van de barrier intact blijven door zijn beschermende werking.

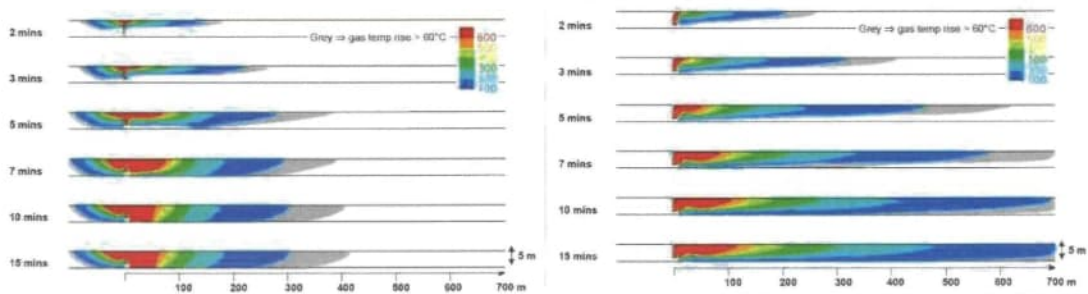
12. Einde RWS-brandkromme 120min (120 min.)
13. Na-ijl effect (> 120 min.)

14.2.4 Aanvullende beschouwing bezwijken dakconstructie

Met het doel om een betere inschatting te kunnen maken van de wijze van bezwijken van de dakconstructie, zijn in [97] een aantal alternatieve bezwijkmechanismes beschouwd, die navolgend kort zijn beschreven.

3D-plaatwerking

Het beschreven bezwijkmechanisme is gebaseerd op een 2D doorsnede van de tunnel, hetgeen vanwege de grote invloedslengte een terechte keuze werd geacht. Ter onderbouwing dat een hoge temperatuur zich vrij snel over een grote lengte van de tunnelbuis uitbreidt, zijn in [97] de plaatjes van *figuur 64* getoond.

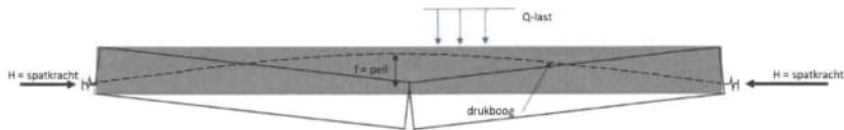


figuur 64 Ontwikkeling brand in lengterichting van de tunnel op basis van natuurlijke ventilatie (links) en mechanische ventilatie (rechts) (indicatief; bron UPTUN WP2 project en volgens [97] ontleend aan een presentatie van dhr. Lottman).

Het feit dat in een tijdsbestek van enkele minuten de gastemperatuur in lengterichting 50 m verder gelijk is aan de bron, maakt volgens [97] dat terecht voor het uiteindelijke bezwijkmechanisme is uitgegaan van een 2D-beschouwing. Echter, zo is gesteld, is het bezwijken van het dak niet een "bros" proces, maar zal dit door het herverdelende vermogen in lengterichting geleidelijk gaan door toename van doorbuiging van het dak vanaf de bron (brandhaard) verder de tunnel in.

Boogwerking (inwendig) in dakconstructie

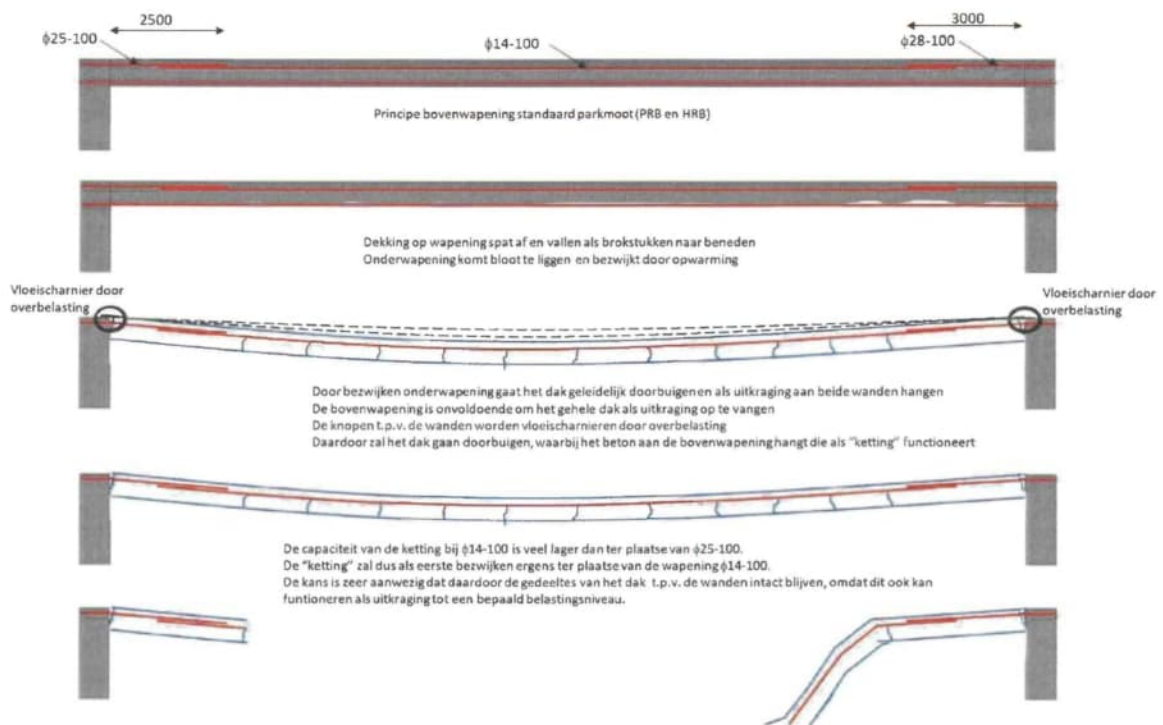
Gewezen is op het mechanisme van boogwerking in het dak (*figuur 65*). Daarbij ontstaat een drukboog tussen beide wanden. Afhankelijk van de horizontale stijfheid van de wanden kan hier capaciteit aan worden ontleend. In [97] is aangegeven dat in de onderhavige situatie, vanwege slankheid (*verhouding van dikte van het dak tot de overspanningslengte is 1:22*) in combinatie met de relatief lage horizontale veerstijfheid van de wanden, de hoogte van de capaciteit bij dit mechanisme naar verwachting zeer beperkt zal zijn.



figuur 65 Boogwerking in de dakconstructie [97].

Kettingwerking bovenwapening

Een alternatief mechanisme dat volgens [97] zou kunnen optreden in de dakconstructie is het functioneren van de bovenwapening als kettinglijn. Nadat de onderwapening bloot is komen te liggen en is bezweken, zal het beton als gewicht hangen aan de bovenwapening, die nog steeds intact is omdat deze op een grotere dekking ligt ten opzichte van de brandzijde. Het daarbij optredende mechanisme is met de schetsen in *figuur 66* geïllustreerd. Ook hiervoor geldt weer dat alleen een 2D-beschouwing is uitgevoerd en geen langseffecten zijn meegenomen. Volgens [97] zal vanwege de aanwezigheid van 1 m grond op het dak de capaciteit van dit mechanisme onvoldoende zijn om het volledige dak in stand te houden, maar is het mechanisme wel een reële verwachting van het daadwerkelijk op te treden bezwijkgedrag van het dak.



figuur 66 Bezwijkmechanisme dak [97].

De besproken mechanismen zijn naar de mening van ondergetekenden belangrijk voor het verkrijgen van inzicht in het werkelijke gedrag van de dakconstructie tijdens bezwijken. En hoewel het voor een brand volgens de 120 minuten RWS brandkromme onvoldoende is om bezwijken te voorkomen, bij kleine branden zijn dit mechanismen die ertoe bijdragen dat het dak, ook als wellicht de trekwapening over een klein deel van het dak zijn functie heeft verloren, niet bezwijkt. In paragraaf 14.3 wordt daar verder op ingegaan.

14.2.5 Progressive collapse

In [97] is ook voortschrijdende instorting (progressive collapse) besproken. Daarbij is met name beschouwd of door de brand in een verkeersbuis ook bezwijken van een aanliggende tunnelbuis kan veroorzaken. Dat kan het geval zijn, zoals uit het voorgaand besproken bezwijkmechanisme blijkt en daarom is gesteld dat er bij brand sprake kan zijn van voortschrijdend bezwijken.

14.3 Enkele algemene beschouwingen m.b.t. schade en bezwijken

De voorgaande beschouwingen met betrekking tot bezwijken van een tunnel bij brand hebben betrekking op het gedrag van een tunnelconstructie bij een brand volgens de RWS-brandkromme. Bij een dergelijk zware brand (200 á 330 MW) zal bezwijken van de tunnelconstructie (dak en/of wand), afhankelijk van de specifieke situatie in werkelijkheid ook op kunnen treden en is een 2D beschouwing, zoals voor de drie landtunnels en de Gaasperdammertunnel is uitgevoerd een goede aanpak. De kans op een dergelijk grote brand is klein en tot op heden was bij de zwaarste branden in Nederlandse tunnels (Velsertunnel en Heinenoordtunnel) de maximale HRR ca. 50 MW. De schade bij zowel de Velsertunnel als de Heinenoordtunnel was beperkt, waarbij wel moet worden opgemerkt dat in de Heinenoordtunnel HWB was toegepast tegen het dak en op de bovenste eerste meter van de wanden. Voor de onderhavige verkennende studie wordt getracht om een zo realistisch mogelijk beeld van schade voor branden van verschillende omvang te schetsen. Ondergetekenden realiseren zich dat dit vooralsnog niet goed mogelijk is, omdat daarvoor benodigde informatie ontbreekt. De bespiegelingen die op dat vlak in dit rapport worden gedaan zijn dan ook meer bedoeld om kwalitatief mogelijke omstandigheden na een brand te schetsen. Voor zover ondergetekenden hebben begrepen, zijn inmiddels door RWS onderzoeken gestart om kleinere branden en de effecten daarvan op de tunnelconstructie, waaronder afspatten, nader te onderzoeken [95,124].

In de onderhavige studie wordt qua omvang van de brand gekeken naar alle mogelijke intensiteiten. Voorgaand in dit rapport zijn daarvoor hoofdstuk 8 en 9 HRR klassen (5, 10, 25, 50, 100, 200, 400 en max. 600) gedefinieerd en in hoofdstuk 10 brandintensiteiten (lokaal, kleiner, 15, 30, 60, 90, 120, 180, en 240 minuten RWS brandkromme en extreem). Het zal duidelijk zijn dat bij een zeer kleine brand weinig of geen schade aan de constructie zal optreden en dat de omvang van de schade zal toenemen bij toenemende brandomvang, c.q. brandintensiteit. In hoofdstuk 15 is een eerste zeer grove classificatie van schade voorgesteld. De navolgende beschouwingen zijn daarbij meegewogen.

Brandomvang in dwarsrichting en in lengterichting

Bij een brand zal de temperatuur van het dak al snel over de gehele breedte nagenoeg gelijk zijn. Het TNO onderzoek naar kleinere branden heeft dat laten zien op basis van CFD (Computational Fluid Dynamics) berekeningen voor branden met een HRR_{max} van respectievelijk 20, 40 en 70 MW [124]. Dezelfde studie laat zien dat bij de wanden de temperatuur onder aan de wand minder hoog oploopt dan bovenaan de wand. Bij de Velsertunnel en de Heinenoordtunnel (beiden met een HRR_{max} van ca. 50 MW) was de schade aan de betonconstructie beperkt. Oftewel, bij kleinere branden zal afspatten op kunnen treden, maar zal dit zowel in dwars- als lengterichting relatief beperkt van omvang zijn en in veel gevallen zal bij de kleinere branden de wapening nog niet bloot komen te liggen. In dat verband moet ook worden gerealiseerd dat bij de kleinere branden de temperatuur niet zo hoog oploopt als bij de RWS-brandkromme. In de CFD-berekeningen, waarover TNO rapporteert, liep de temperatuur aan de onderzijde van het dak bij de bestelbus (20 MW) en de personenbus (40 MW) op tot maximaal ca. 800 °C. Bij de korte vrachtwagen (70 MW) werd wel een maximale temperatuur van ca. 1200 °C bereikt (zie ook paragraaf 10.3). Informatie over spatgedrag bij maximale temperaturen lager dan die volgens de RWS brandkromme en voor verschillende snelheden waarmee de

temperatuur oploopt, is helaas weinig of niet beschikbaar³⁰. Voor de brand in de Velsertunnel is gerapporteerd dat er 4 personenwagens en 1 vrachtwagen bij betrokken was, dat die 30 minuten heeft geduurd en dat naar verwachting de maximale temperatuur 800 °C is geweest.

Bij een lokale, kleine brand (bijvoorbeeld één personenauto; 5 MW) zal het afspringen van het beton op kunnen treden, maar dat zal beperkt in omvang en diepte zijn en de wapening zal niet bloot komt te liggen. Dit zal geen effect hebben op de constructieve integriteit van de tunnel. Herstel na de brand is wel nodig, maar zal ook eenvoudig zijn. Als de brand zodanig van omvang is dat plaatselijk (*bijvoorbeeld enkele vierkante meters*) de wapening bloot komt te liggen en daar niet meer functioneert, zal ook dat de structurele integriteit van de tunnelconstructie niet significant hoeven te beïnvloeden. Plaatselijk zal de capaciteit van de doorsnede, in zowel dwars- als lengterichting, wegvallen, maar die zal door naastgelegen delen, of het nu gaat om het dak of een wand, kunnen worden opgevangen. Mechanismen als plaatwerking en boogwerking, zoals besproken in paragraaf 14.2.4 spelen daarbij ook een belangrijke rol.

De vraag is bij welke omvang van de brand, c.q. brandduur, de gehele dwarsdoorsnede zodanig wordt belast door de brand dat in die doorsnede potentieel de, in de voorgaande hoofdstukken besproken, 2D bezwijkmechanismen op gaan treden. Ondergetekenden verwachten overigens dat ook bij een wat zwaardere 'lokale' brand (bijvoorbeeld 1 HGV en 100 MW en THR niet groter dan 100 GJ) de lengte waarover de schade (wegvallen van trekwapening en reductie van wanddoorsnede) optreedt nog zodanig beperkt zal kunnen zijn, dat de resterende lengte van de tunnelmoot ervoor zorgt dat nog steeds de belasting via o.a. de genoemde mechanismen wordt afgedragen naar naburige delen van de tunnelmoot. Als de lengte waarover de schade optreedt t.o.v. de mootlengte nog relatief beperkt is, dan zal bij het bezwijken van het dak en/of de wanden het resterende deel van de tunnelmoot nog niet bezwijken. De stempelfunctie van het dak en de dragende functie van de wanden zal daar namelijk nog steeds aanwezig zijn. Met andere woorden, in lengterichting zal het bezwijken van de doorsnede niet leiden tot voortschrijdende instorting van de tunnelbuis in de gedeelten van de tunnelbuis voor en na de brandhaard. Alleen als de lengte waarover het bezwijken van de doorsnede de lengte van een tunnelmoot benaderd, zal de gehele tunnelmoot kunnen bezwijken. Een lokale brand in een tunnel zal daarom niet resulteren in het bezwijken van een gehele tunnelbuis³¹.

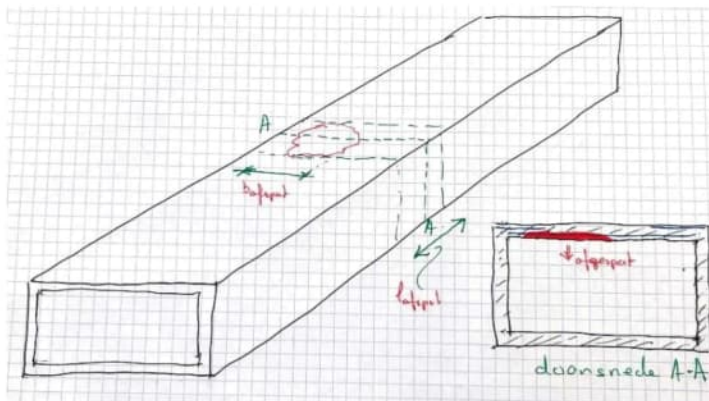
³⁰ Ongetwijfeld zal er uit de literatuur meer informatie te halen zijn, dan wat daarover in dit rapport staat vermeld, maar naar verwachting is dit niet altijd goed gedocumenteerd en ondergetekenden hebben binnen de onderhavige opdracht daar vooralsnog geen gedetailleerd onderzoek naar kunnen doen.

³¹ Dat bij een lokale brand (*dus niet een brand met vele voertuigen achter elkaar in brand*), ook bij een 120 minuten brand volgens de RWS kromme, bezwijken maximaal zal optreden bij één of hooguit twee tunnelmooten, zal mogelijk meegenomen kunnen worden bij de beoordeling van personenveiligheid (zie hoofdstuk 5), waar het tijdstip van bezwijken, gebaseerd op de plaats van de brand, wordt vergeleken met de tijd die nodig is om de tunnel te kunnen verlaten.

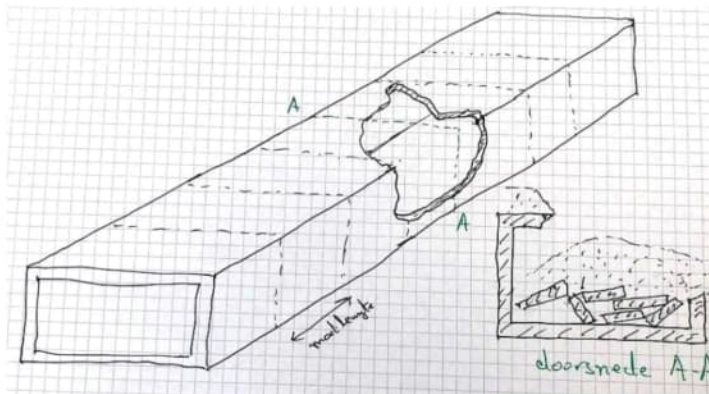
15 Classificatie van schade aan de landtunnels door brand

Voor een classificatie van constructieve schade, welke puur en alleen is bedoeld om de MKBA in deze verkennende studie mogelijk te maken, hebben ondergetekenden ervoor gekozen een aantal schadeklassen te onderscheiden. Omdat de omstandigheden per tunnel significant zullen kunnen verschillen, is daarbij een omstandigheid zoals bij de Ketheltunnel min of meer als referentie genomen. De te onderscheiden schadeklassen zijn:

- A) Geen constructieve schade;
- B) Alleen oppervlakkig afspatten van beton, waarbij de trekwapening volledig blijft functioneren en er geen significante reductie in wanddikte optreedt;
- C) Lokaal ernstig afspatten van het beton tot op de wapening (*over een oppervlak van enkele tientallen vierkante meters*) optredend in het dak en/of de wand, waarbij via herverdeling de belastingen op de dak en de wand nog kunnen worden opgenomen, waardoor er geen bezwijken van het dak of de wand optreedt (*figuur 67*);
- D) Zeer ernstige mate van afspatten over de gehele doorsnede, hetgeen resulteert in bezwijken van die doorsnede (dak en/of wand) over een gedeelte van een tunnelmoot of de gehele tunnelmoot (*figuur 68*);
- E) Zelfde schade als bij D, maar dan over een lengte van meerdere tunnelmoten.



figuur 67 Impressie van mogelijke schade conform schadeklasse C.



figuur 68 Impressie van mogelijke schade conform schadeklasse D.

Met betrekking tot de tijdsduur van het niet beschikbaar zijn van de tunnelbuis en het herstel van de tunnelconstructie bij de verschillende schadeklassen³² denken ondergetekenden aan het navolgende, waarbij opgemerkt dat ook kennis is genomen van hetgeen in een studie naar een grote vrachtwagenbrand in tunnel Leidsche Rijn [42] over schade en hersteltijd is aangegeven.

- A) Geen constructief herstel nodig en direct na brand weer beschikbaar³³;
- B) Na de brand is de tunnel direct weer beschikbaar voor gebruik en het herstel zal gedaan kunnen worden op tijdstippen dat dit nagenoeg geen overlast verzorg voor gebruikers (nachtelijke uren);
- C) Na de brand kan de tunnel niet direct worden gebruikt. Maatregelen zullen moeten worden getroffen om de tunnelbuis zo snel mogelijk weer te kunnen gebruiken (*gedacht kan worden aan bijvoorbeeld het verwijderen van de bovenbelasting en/of de grondbelasting tegen de wanden, maar ook aan tijdelijke versterkingsmaatregelen*). Het definitieve herstel zal minimaal waarschijnlijk 2 of 3 weken tijd kosten en kan worden ingepland in een periode dat dit het beste uitkomt;
- D) De tunnelbuis zal geruimere tijd niet beschikbaar zijn en het herstel zal betekenen dat alle grond op en naast de tunnelmoot, alsmede de wanden en het dak van de tunnelmoot eerst verwijderd zullen moeten worden, waarna die opnieuw aangebracht moeten worden. Dit zal betekenen dat de tunnelbuis (en wellicht twee) gedurende enkele maanden niet beschikbaar zal zijn;
- E) Bij deze schade zal het herstel op eenzelfde wijze kunnen plaatsvinden als voorgaand bij schadeklasse D besproken, maar het herstel zal vele maanden in beslag nemen.

Ondergetekenden realiseren zich terdege dat dit een zeer grove benadering is die op diverse punten benevens de waarheid kan of zal liggen. Echter, om de beoogde exercitie van het in kaart brengen van wat er bij verschillende branden kan optreden en wat het kan betekenen voor beschikbaarheid en herstel, moesten ondergetekenden een keuze maken. Mocht er voor worden gekozen om de aanpak, zoals die in dit rapport is uitgewerkt, verder te gebruiken, dan is het zeker aan te raden om betere en nauwkeurigere informatie op de diverse onderdelen te verzamelen via studie en onderzoek.

Minimaal moeten hier nog de volgende bemerkingen worden gemaakt. Zoals voorgaand al aangegeven, zal de situatie per tunnel ook zeker verschillend zijn. Bij de KWA-tunnel met Aestuver HWB aanwezig bij het dak en de tussenvloer en twee tunnelbuizen boven elkaar zal de situatie geheel anders zijn dan bij de Ketheltunnel. Dit zal bij een verdere uitwerking zeker tot verschillen leiden. Voor de voorgaande classificatie is dus gedacht aan een situatie zoals bij de Ketheltunnel.

³² Voor een aantal aannamen, zoals bijvoorbeeld de benodigde tijd voor herstel, is in een reactie op een conceptversie van het rapport vernomen dat deze als te optimistisch worden gezien. De auteurs realiseren zich dat dit mogelijk zo is, maar hebben het niet altijd aangepast en wijzen erop dat ervan uitgegaan is dat (snel) herstel van de tunnel na een brand topprioriteit is, waarbij alles (o.a. doorlopen van procedures) wordt gedaan om dit aanzienlijk sneller dan gebruikelijk te laten verlopen. Ook de indeling in schadeklassen is een inschatting om de vergelijking van alternatieven mogelijk te maken en kan in meer detail uitgewerkt worden.

³³ Het zal veelal nog wel zo zijn dat er na een brand schade is aan de TTI's, zodat er wellicht toch eerst nog herstel op dat terrein nodig is voordat de tunnel(buis) weer kan worden gebruikt. Dat valt buiten de scope van dit verkennende onderzoek.

In het geval er voor wordt gekozen om geen HWB aan te brengen en te accepteren dat, hoewel de kans klein, schades zoals voorgaand gedefinieerd, op kunnen treden, dan verdient het aanbeveling om voor de diverse schadeklassen studies uit te voeren naar hoe in het geval van een dergelijke schade zo snel mogelijk een tijdelijke veilige situatie kan worden gecreëerd, zodat het buiten gebruik zijn beperkt is en welke mogelijkheden er zijn voor herstel.

In *Tabel 15* is de in deze verkennende studie aangehouden relatie tussen brandintensiteit en schadeklasse weergegeven. Met “referentietoestand” in *Tabel 15* is de "hypothetische" toestand bedoeld van een tunnel, die spatgevoelig is en waarbij er geen bijkomende maatregelen genomen zijn bovenop standaard geldende maatregelen in alle tunnels (*blusmiddelen voorhanden, snelheidsbeperking etc.*).

Tabel 15 *Schadeklassen als functie van brandintensiteitsklassen voor de referentietoestand en brandwerende maatregelen*³⁴.

Brand-intensiteit	Referentie-toestand	Aanbrengen HWB	Mobiel-blussysteem
lokaal	A	A	A
kleiner	B	A	B
15 min RWS	B	A	B
30 min RWS	C	A	C
60 min RWS	C	A	C
90 min RWS	C	A	C
120 min RWS	D	B	D
180 min RWS	D	B	D
240 min RWS	E	C	D
extreem	E	C	D

In *Tabel 15* zijn sprinkler en watermistssystemen niet opgenomen, omdat het verschil in impact op de constructie al is verrekend bij de omzetting van HRR+THR naar RWS duur (*1D brandintensiteit*). Voor die systemen is daarom aangenomen dat dezelfde schade indeling geldt als voor de referentietoestand. Indien de brand in de tunnel, ondanks de aanwezigheid van de sprinklers, toch geklasseerd wordt als 120 min RWS, dan zal dus schadebeeld D toegepast worden. Dit stemt overeen met situaties waarbij de sprinklers niet correct functioneren (‘falen’). De kans op de schadebeelden per maatregel wordt verder verduidelijkt in *Tabel 22*.

Zoals in *Tabel 15* te zien is, is aangehouden dat HWB tot 90 minuten de betonconstructie beschermt tegen constructieve schade en dat bij een 180 minuten RWS brand de constructieve schade is beperkt tot oppervlakkig afspatten.

Voor een mobiel blussysteem is aangehouden dat het geen effect heeft op kleinere branden, omdat het te laat wordt ingezet. Voor een intense brand is aangehouden dat het effect op de lokale constructieve schade ter plaatse van de brandhaard ook beperkt is, omdat naar verwachting de hevige brand moeilijk tot dichtbij te benaderen is en effectief blussen moeilijk zal zijn. Verder is aangehouden dat

³⁴ Ondergetekenden benadrukken dat de mate van schade als functie van de brandintensiteit, zoals die in deze tabel is aangegeven, weliswaar is gebaseerd op het verkregen inzicht en na bestudering van veel beschikbare informatie, maar nog steeds slechts is bedoeld voor de MKBA studie in het onderhavige rapport. De informatie in de tabel mag niet zonder meer worden gebruikt voor andere doelen.

het de ruimtelijke impact van intense branden wel helpt verminderen, door op grotere afstand te koelen (*t.o.v. klasse E bij de referentietoestand naar klasse D*).

Aanbevelingen

Met de aanpak die RWS tot nu toe met betrekking tot brandveiligheid van tunnels heeft aangehouden, was het niet nodig om inzicht te hebben in hoe een tunnel bij een brand kan bezwijken. Als in de toekomst, mogelijk mede naar aanleiding van de onderhavige rapportage, constructieve schade aan de tunnel na een brand wordt geaccepteerd (*bijvoorbeeld bij bestaande landtunnels*), dan verdient het aanbeveling de wijze van bezwijken van een tunnel bij brand, en met name de uitgestrektheid daarvan, in relatie tot de brandintensiteit, nader te onderzoeken.

In de beschouwingen in dit rapport is geen onderscheid gemaakt tussen een landtunnel boven het grondwaterniveau en een landtunnel in het grondwater. Voor deze verkennende studie werd het niet opportuun geacht dat onderscheid al op te nemen en ondergetekenden verwachten ook niet dat het de conclusies zal veranderen. Als een aanpak waarbij schade wordt geaccepteerd, verdient het wel aanbeveling de consequenties van grondwater bij een landtunnel, als dat aan de orde is, nader te beschouwen.

16 Kosten-baten analyse

16.1 Algemeen

Beslissingen om te investeren in infrastructuurprojecten worden ondersteund door maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA), zie bijvoorbeeld [102]. In deze MKBA worden de kosten (*i.e. de middelen die nodig zijn om de maatregel te effectueren en in stand te houden*) tegenover de baten (*i.e. de in geld uitgedrukte effecten van de maatregel/investering, inclusief negatieve effecten*) gesteld om een beeld te krijgen van de wenselijkheid van de investering.

In dit hoofdstuk is een (aanzet tot) MKBA, *i.e. life cycle cost benadering*, gegeven³⁵. De begroting van de kosten wordt in deze nota toegelicht. Zoals uitgewerkt in het Plan van Aanpak behoren hier toe:

- Kosten van herstel na brand
- Kosten maatregelen (*installatie, onderhoud, levensduur*)
- Kosten van niet-beschikbaarheid, met betrekking tot:
 - Niet-beschikbaarheid na brand
 - Niet-beschikbaarheid door installatie maatregelen
 - Niet-beschikbaarheid door onderhoud maatregelen

De kosten worden hieronder begroot, startend met een algemene beschouwing van de kosten van niet-beschikbaarheid. Vervolgens wordt per maatregel ingegaan op de directe kosten en niet-beschikbaarheid ten gevolge van (i) installatie; (ii) onderhoud; en (iii) herstel na brand.

Het identificeren van dergelijke data bleek niet eenvoudig. De begrotingen hieronder zijn dan ook een eerste inschatting voor een (standaard-)selectie aan maatregelen.

16.2 Kosten van niet-beschikbaarheid: algemene beschouwing

16.2.1 Uitgangspunten

De (gedeeltelijke) niet-beschikbaarheid van een tunnelverbinding brengt maatschappelijke kosten met zich mee. Er wordt hier aangenomen dat deze kosten het resultaat zijn van langere reistijden en/of beperktere betrouwbaarheid van de reistijd, conform het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) [71]. Eventuele andere kosten van niet-beschikbaarheid (*bijvoorbeeld niet-beschikbaarheid van nutsleidingen in de tunnel*) worden niet beschouwd.

Het KiM publiceert kengetallen voor de waardering van reistijd en reistijd-betrouwbaarheid [71]. Deze waarden zijn het resultaat van een 'stated preference' benadering en worden onderschreven

³⁵ Voor een aantal aannamen, is in een reactie op een conceptversie van het rapport vernomen dat deze als te optimistisch, of juist als te conservatief, worden gezien. De auteurs realiseren zich dat dit mogelijk zo is, maar wijzen erop dat de waarden moeten geïnterpreteerd worden als een ruwe inschatting om een verkennende analyse mogelijk te maken. Indien geopteerd wordt om voor een specifieke tunnel alternatieven verder te onderzoeken, dan verdient het aanbeveling om meer nauwkeurige en tunnelspecifieke schattingen te maken. Uit een kwalitatieve parameterstudie blijkt dat wijzigingen in individuele aannames de eindconclusies niet beïnvloeden. Wanneer evenwel voor een specifieke tunnel meerdere parameters beduidend hoger of lager uitvallen wijzigt dit het beeld. Samengevat kan gesteld worden dat hogere schadekosten aanleiding geven tot een hogere kosteneffectiviteit van maatregelen, en dat hogere investerings- en onderhoudskosten aanleiding geven tot een lagere kosteneffectiviteit.

door het Steunpunt Economische Expertise [116] voor toepassing in MKBA. *Tabel 16* geeft als richtwaarde de KiM-kengetallen voor de Value of Time (VoT).

De waarden in *Tabel 16* kunnen worden toegepast voor een eerste economische evaluatie van de verkeershinder, door deze waarden te vermenigvuldigen met een vooropgesteld gemiddeld effect van niet-beschikbaarheid op de reistijd. Dit is een benadering. Niet-beschikbaarheid kan immers evenzeer leiden tot een wijziging in de vraag en wijzigende verkeersrisico's op andere wegen [19]. Kleine wijzigingen in de reistijd kunnen bovendien redelijkerwijs verwaarloosd worden, aangezien zij geen materieel effect op de reiziger hebben [29]. Het effect op betrouwbaarheid wordt niet in rekening gebracht. Verder wordt opgemerkt dat de 'stated preference' benaderingen niet steeds robuust blijken. Zo was er voor de KiM-kengetallen een tweede enquête nodig, omdat een eerste bevraging resultaten gaf die te sterk afweken van vroegere kengetallen [61]. Een begroting op basis van dergelijke kengetallen moet dan ook aangemerkt worden als een richtwaarde / benaderende begroting.

Tabel 16 Value of Time (personenwagen: EUR per persoon per uur; vrachtwagen: EUR per vrachtwagen per uur), prijspeil 2010 [71], prijspeil 2020 als factor 1,13 t.o.v. 2010 (op basis van de Eurostat Harmonised Index of Consumer Prices 2020/2010 [117]).

Categorie	Value of Time (2010)	Value of Time (2020)
Personenwagen, woon-werk	9,25	10,45
Personenwagen, zakelijk	26,25	29,66
Personenwagen, overig	7,50	8,48
Personenwagen, gemiddeld	9,00	10,17
Vrachtwagen, container	64,40	72,77
Vrachtwagen, geen container	40,50	45,77
Vrachtwagen, gemiddeld	42,20	47,69

16.2.2 Begroting, conceptueel

De kosten van niet-beschikbaarheid kunnen worden bepaald op basis van de VoT, door middel van bereikbaarheidsstudies. De werkwijzer MKBA [102] verwijst hiervoor naar het Nederlands Regionaal Model. Er zijn met andere woorden tools beschikbaar om het verkeerseffect van de niet-beschikbaarheid in detail en projectspecifiek te begroten. Deze tools worden niet nader onderzocht in deze verkennende studie.

Op basis van paragraaf 16.2.1 wordt de gemiddelde Value of Time voor verkeer voor een tunnel begroot via (10), met f_{HGV} de fractie HGV en n_{car} het gemiddeld aantal personen per personenwagen (1,5 op basis van de QRA tunnels [59]). Voor de standaardfractie $f_{HGV} = 0,15$ resulteert (10) in een VoT van 20 EUR per uur, per voertuig (prijspeil 2020). Het effect van bussen is hierbij niet expliciet in rekening gebracht. In functie van de fractie bussen en de bezettingsgraad wordt ingeschat dat de VoT kan toenemen tot grootteorde 24 EUR per uur, per voertuig. Dit geeft met andere woorden een beeld van de marge op deze algemeen toepasselijke VoT-waarde.

$$VoT = (1 - f_{HGV}) VoT_{car} n_{car} + f_{HGV} VoT_{HGV} \quad (10)$$

De totale kosten K_{onb} per (gedeeltelijke) niet-beschikbaarheid van de tunnel volgt dan uit (11), met Δt_{avg} de gemiddelde bijkomende reistijd per getroffen voertuig (in uren), N_{veh} het (gemiddeld) aantal

getroffen voertuigen per uur, en t_{onb} de duur van de niet-beschikbaarheid (in uren). Hierbij wordt opgemerkt dat het aantal getroffen voertuigen redelijkerwijs groter kan zijn dan de normale verkeersintensiteit in (het getroffen deel van) de tunnel, aangezien de niet-beschikbaarheid van de tunnel indirect ook het verkeer op andere wegen kan vertragen. De hinder wordt in het rechterlid van (11) gerelateerd aan de normale verkeersintensiteit in het getroffen deel van de tunnel, $N_{veh,tunnel}$, via de factor η_{veh} die de verhouding weergeeft van het totaal aantal getroffen voertuigen tot de normale verkeersintensiteit.

$$K_{onb} = VoT \cdot \Delta_{avg} \cdot N_{veh} \cdot t_{onb} = VoT \cdot N_{veh,tunnel} \left(\Delta_{avg} \cdot \eta_{veh} \cdot t_{onb} \right) \quad (11)$$

Concluderend kan worden gesteld dat op basis van voorgaande tunnelspecifieke parameters een begroting kan worden gemaakt van de kosten van de niet-beschikbaarheid. Dit door middel van een begroting van de duur van de niet-beschikbaarheid, de bijkomende reistijd per getroffen voertuig, en het aantal getroffen voertuigen. Indien dergelijke cijfers (in grootteorde) beschikbaar zijn, kunnen deze rechtstreeks meegenomen worden in de MKBA.

Er moet hierbij verder opgemerkt worden dat de besproken tunnels allen tunnelbuizen hebben met éénrichtingsverkeer. Wanneer de buizen volledig onafhankelijk zijn zal bij schade aan één buis, het verkeer met een beperktere capaciteit in 2 richtingen kunnen plaatsvinden in de andere tunnelbuis (of tunnelbuizen). Dit geldt ook wanneer de buizen niet constructief onafhankelijk zijn, behalve wanneer brand in één tunnelbuis dermate intens is dat de integriteit van de volledige tunnel (meerdere buizen) in het gedrang komt.

16.2.3 Begroting, vereenvoudigd

In de analyse ‘Grote vrachtwagenbrand in tunnel A2 Leidsche Rijn’ [42] worden de kosten van de niet-beschikbaarheid begroot op basis van een nominaal verschuldigd ‘huurbedrag’ bij afsluiting van rijstroken in de tunnel voor werkzaamheden. Voor deze tunnel is het bedrag begroot op 25.000 EUR per rijbaan per uur, met een maximum van 1 miljoen EUR per dag, per tunnelbuis.

16.3 Installatie: directe kosten en duur niet-beschikbaarheid

16.3.1 Overzicht

Tabel 17 geeft een overzicht van de installatiekosten en -duur per maatregel. De achtergrond van deze begroting wordt in de respectievelijke secties toegelicht. De waarden zijn begroot op basis van beperkte data om een eerste evaluatie mogelijk te maken. Het valt aan te raden om de robuustheid van de MKBA met betrekking tot deze aanname te toetsen via een parameterstudie.

Tabel 17 Begroting direct kosten en duur niet-beschikbaarheid: installatie; (n.v.t. = niet van toepassing)

Maatregel	Kosten installatie (EUR, 2020)	Duur niet-beschikbaarheid
Referentietoestand (“geen actie”)	n.v.t.	n.v.t.
Verkeerstechnische maatregelen - filemanagement - regeling afstand HGV	n.v.t.	n.v.t.
Sprinklersysteem (deluge)	1,5 M EUR per km tunnel	3 weken per km tunnel
Watermiststelsysteem	3,5 M EUR per km tunnel	3 weken per km tunnel
Mobiel blussysteem	1,15 M EUR per tunnel (2 toestellen)	1 dag
Hittewerende bekleding	9 M EUR per km tunnel	1,5 maanden per km tunnel

16.3.2 Referentietoestand; verkeerstechnische maatregelen

Het behoud van de referentietoestand gaat niet gepaard met bijkomende installatiekosten of niet-beschikbaarheid.

Er wordt aangenomen dat de kosten voor een filemanagementsysteem beperkt zijn en niet gepaard gaan met significante niet-beschikbaarheid. Hierbij is het tevens belangrijk op te merken dat bij de MKBA van een filemanagementsysteem principieel eveneens de baten van een verlaagde ongeval frequentie los van brand in rekening moeten worden gebracht. Hier wordt het verwaarlozen van de installatiekosten mede verantwoord door het verwaarlozen van de niet-brandgerelateerde baten.

De kosten van regels (verkeerssignalisatie) omtrent minimum afstanden tussen HGV's wordt als laag aangemerkt.

16.3.3 Sprinklersysteem (deluge)

De kosten van een deluge systeem wordt begroot op basis van de brief van de Verenigde Sprinkler Industrie (VSI), met datum 17 maart 2020, aan de gemeente Schiedam [113] en op basis van de kosten-baten analyse door [REDACTED] voor een (hypothetische) Australische tunnel [43]. De VSI gaat uit van investeringskosten van 750.000 tot 1.000.000 euro per kilometer, hetgeen resulteert in een totaal van 2,8 M euro tot 3,7 M euro voor de Ketheltunnel. Deze kosten zijn exclusief de kosten van civieltechnische werken voor bluswatervoorraad en afvoer vervuild water. [REDACTED]

[REDACTED] (ARUP) vermelden investeringskosten van 25 M (2009) Australian dollars voor een tunnel met 2 buizen van 6 km elk, inclusief watervoorraad (*aangenomen op basis van de tekst*) [43]. Omgerekend naar 2020 EUR per kilometer buis komen bovenstaande cijfers uit op 1 miljoen – 1,4 miljoen. Hier wordt 1,5 miljoen per km aangenomen. Deze iets hogere waarde houdt onder andere rekening met het gegeven dat de tunnels reeds bestaan, en minstens de civieltechnische werken daarom redelijkerwijs en grotere kosten impliceren.

Op basis van de begroting door VSI is de installatieduur voor de Ketheltunnel 12 weken [113], waarbij aangegeven wordt dat dit voornamelijk 's avonds en in de weekenden zou kunnen plaatsvinden. Hierbij kan evenwel aangemerkt worden dat dit (*aangenomen op basis van de brief*) exclusief civieltechnische werken is. Wanneer de huidige afvoer in de tunnel voldoende capaciteit heeft, dan kan redelijkerwijs aangenomen worden dat bijkomende hinder voor de bouw van de waterreservoirs

beperkt zal zijn. Wanneer de afvoer onvoldoende is, dan moet de begroting herzien worden. Dit wordt hier niet verder nagegaan.

De niet-beschikbaarheid kan redelijkerwijs gerelateerd worden aan een tunnellingte-onafhankelijke en een lengte-afhankelijke component. Hier wordt aangenomen dat de niet-beschikbaarheid betrekking heeft op werken in de tunnelbuis (*en dus afhankelijk van de lengte van de tunnel*). Rekening houdend met de lengte van de Ketheltunnel wordt de duur van niet-beschikbaarheid benaderd als 3 weken per km tunnel.

16.3.4 Watermiststelsysteem

VSI [113] stelt voor de Ketheltunnel voor om voor de installatiekosten van een watermiststelsysteem uit te gaan van 1,5 tot 1,6 miljoen euro per kilometer, exclusief blusvoorraad. De blusvoorraad, evenals de afvoer van bluswater, is voor een watermiststelsysteem evenwel kleiner dan voor een sprinklersstelsysteem. Anders uitgedrukt kan een watermiststelsysteem met eenzelfde voorraad water de brand langer onderdrukken. Ook de vereiste waterafvoer is hierdoor meer beperkt.

In de studie A2 Leidsche Rijn [42] wordt evenwel een investering van 20 M euro vermeld. Een gelijkaardige waarde wordt gevonden voor de meerkosten voor het watermiststelsysteem, zoals dat in 2009 tijdens parlementaire discussies omtrent de Roermond tunnel werd vermeld [40]. Voor de Roermond tunnel komt dit op ongeveer 4,6 miljoen euro (2020) per kilometer. Voor de A2 Leidsche Rijn komt dit op ongeveer 3,5 miljoen euro (2020) per kilometer tunnel. Op basis van bovenstaande ([113], [42], [40]) wordt voor de kosten van een watermiststelsysteem uitgegaan van 3,5 miljoen euro per kilometer tunnel.

De installatieduur wordt eveneens op 12 weken begroot voor de Ketheltunnel, conform [113]. Zoals aangehaald voor het sprinklersstelsysteem komt dit als eerste benadering op 3 weken per km tunnel.

16.3.5 Mobiel blussysteem

Op basis van [42] bedragen de aankoopkosten voor een mobiel blussysteem 500.000 EUR (2010). Omgerekend naar 2020 komt dit op ongeveer 575.000 EUR. Er moet nagegaan worden of meerdere toestellen vereist zijn om de operationaliteit in beide rijrichtingen (verschillen richting: 'stroomafwaarts brand') te garanderen. Er wordt hier uitgegaan van 2 toestellen.

De aankoop van een mobiel blussysteem gaat niet gepaard met grote niet-beschikbaarheid. Er wordt aangenomen dat de nodige trainingen kunnen worden ingepland om hinder te beperken. Dit wordt op 1 dag begroot.

16.3.6 Hittewerende bekleding

De kosten voor de installatie van hittewerende bekleding worden begroot conform de communicatie van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat aan de Tweede Kamer, i.e. de Kamerbrief over stand van zaken brandwerendheid enkele wegtunnels, d.d. 9 oktober 2018 [103]. In deze brief wordt gewag gemaakt van meerkosten voor de Gaasperdammertunnel van maximaal 100 miljoen euro en een kostenindicatie voor de 4 reeds afgewerkte tunnels (2^e Coentunnel, KWA tunnel, Salland-Twentetunnel en Ketheltunnel) van 100 tot 135 miljoen euro. Uitgaande van deze cijfers uit oktober 2018 komt dit op ongeveer 9 miljoen euro (2020) per km tunnelbuis.

Met betrekking tot de duur van niet-beschikbaarheid vermeldt de VSI brief een sluiting van 7 maanden voor de Ketheltunnel [113]. Dit komt neer op 2 maanden per km tunnelbuis. Deze waarde stemt in grootteorde overeen met een ruime inschatting van de tijdsduur die voor andere projecten worden aangehouden. Voor de A9 werd, op basis van communicatie binnen het RWS projectteam voor de huidige opdracht, 12 km tunnelbuis beplaat in 9 maand. Er kan aangenomen worden dat een deel van de tijdsduur afhankelijk is van de tunnallengte en een deel onafhankelijk. Hier wordt als inschatting een niet-beschikbaarheid van 1,5 maanden per km tunnelbuis aangenomen, rekening houdend met kleinere tunnallengtes dan voor de A9. Op basis van informatie beschikbaar binnen het projectteam, komt deze inschatting in grootte-orde overeen de tijdsduur die voorzien wordt voor het aanbrengen van HWB in de tweede Coentunnel.

De algemene bemerking in 16.3.1 dat een parameterstudie met betrekking tot de aangenomen waarden aan te raden is geldt uiteraard ook met betrekking tot bovenstaande waarden.

16.4 Onderhoud: kosten, duur niet-beschikbaarheid en levensduur

16.4.1 Overzicht

In *Tabel 18* is een overzicht gegeven van de onderhoudskosten en de duur van de niet-beschikbaarheid per maatregel, evenals de ingeschatte levensduur van de maatregel. Achtergrond van de inschatting volgen in de navolgende secties.

Tabel 18 Begroting onderhoudskosten en duur niet-beschikbaarheid bij onderhoud, evenals de levensduur van de maatregel (kosten waar toepasselijk per km tunnelbuis)

Maatregel	Kosten onderhoud (EUR, 2020)	Duur niet-beschikbaarheid	Levensduur
Referentietoestand (“geen actie”)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Verkeerstechnische maatregelen - filemanagement - regeling afstand HGV	n.v.t.	VoT begroting (0,05 M EUR/jaar per km)	n.v.t.
Sprinklersysteem (deluge)	0,12 M EUR/jaar per km	0,5 dagen/jaar per km	20 jaar
Watermistsysteem	0,12 M EUR/jaar per km	0,5 dagen/jaar per km	20 jaar
Mobiel blussysteem	23.000 EUR per jaar	n.v.t.	15 jaar
Hittewerende bekleding	n.v.t.	n.v.t.	40 jaar

16.4.2 Referentietoestand; verkeerstechnische maatregelen

Hierbij is geen onderhoud of levensduurbeperving van toepassing. De verkeerstechnische maatregelen kunnen gepaard gaan met een tijdverlies voor gebruikers (capaciteitsreductie van de tunnel). Indien dit significant is, kunnen deze kosten worden meegenomen conform de VoT begroting.

Andere verkeerstechnische maatregelen die enkel geactiveerd worden in geval van brand, kunnen geacht worden verwaarloosbare kosten te hebben. Zo zijn er momenteel operationele afspraken om

bij brand het dak van enkele betrokken tunnels te ontruimen. Dit wordt niet verder meegenomen in de huidige analyses. Voor het filemanagement systeem wordt een kost van 0,05 M EUR/jaar per km tunnel in rekening gebracht. Deze beperkte kost wordt hier toegekend om in de verdere analyse de verschillende maatregelen (visueel) beter te kunnen onderscheiden.

16.4.3 Sprinklersysteem (deluge)

De brief van VSI stelt dat het jaarlijks onderhoud “kan meegenomen worden bij ander regulier onderhoud” [113]. Er wordt geen melding gemaakt van de kosten van het onderhoud. In de analyse ‘A2 Leidsche Rijn’ [42] wordt voor een watermiststelsysteem uitgegaan van 5-10 dagen per jaar, op basis van ervaringen in Nederland. Japanse ervaring [21] duidt erop dat 2 km tunnel per dag kan worden geïnspecteerd en dat gelijktijdig verkeer niet is uitgesloten, mits de nodige voorzieningen zijn aangebracht. Op basis van deze beschouwingen wordt 0,5 dagen per jaar per km tunnel aangehouden als niet-beschikbaarheid van de tunnel, bovenop standaard onderhoud.

De ARUP studie [43] begroot het jaarlijks onderhoud op 3 M AUD (2009). Omgerekend komt dit op ongeveer 0,15 M EUR per km per jaar. In verhouding tot de installatiekosten is dit een hoog percentage (10%). Rekening houdend met de kosten voor watermistssystemen (zie navolgend) worden kosten van 0,12 M EUR per km per jaar aangehouden.

Een levensduur van 30 jaar wordt vooropgesteld in [43]. Na input van het RWS projectteam wordt een levensduur van 20 jaar aangenomen.

16.4.4 Watermiststelsysteem

Conform de studie A2 Leidsche Rijn [42] bedragen de onderhoudskosten 1-4% van de investeringskosten. Rekening houdend met *Tabel 17* komt dit op 0,03 – 0,12 M EUR per km tunnel per jaar.

De niet-beschikbaarheid voor onderhoud en de levensduur worden ingeschat conform een sprinklersysteem.

16.4.5 Mobiel blussysteem

De onderhoudskosten van het mobiel blussysteem worden in [59] begroot op 2%. Het onderhoud zelf wordt geacht geen hinder te weeg te brengen. Regelmatige (jaarlijkse?) trainingen van de brandweer worden geacht ingepland te worden zonder bijkomende niet-beschikbaarheid. Voor de levensduur wordt bij gebrek aan referentie 15 jaar aangenomen.

16.4.6 Hittewerende bekleding

PROMAT stelt dat hun hittewerende bekleding “weinig tot geen onderhoud” vergt. Alleen een visuele inspectie is vereist [36]. De onderhoudskosten en -hinder worden op basis hiervan als klein beschouwd.

De levensduur van de hittewerende bekleding is onduidelijk. Bespreking met het RWS projectteam duidt dat er tunnels in gebruik zijn met hittewerende bekleding uit de jaren 1980. Op basis hiervan wordt een 40 jarige levensduur aangenomen. Dat een ruime levensduur bereikt wordt, wordt ondersteund door de correcte werking van de hittewerende bekleding in de Heinenoordtunnel, waar de hittewerende bekleding reeds 24 jaar geïnstalleerd was [77]. Het is mogelijk dat een langere

levensduur kan worden bereikt. Op basis van de beschikbare informatie is hierover echter geen uitspraak mogelijk.

16.5 Herstel schade na brand: kosten en duur niet-beschikbaarheid

16.5.1 Algemeen en overzicht

De inschatting van de kosten van herstel na brand, en de bijhorende duur van niet-beschikbaarheid, zijn afhankelijk van de omvang van de schade.

In de analyse voor de Leidsche Rijn tunnel [42] worden inschattingen gegeven voor de schade-omvang, herstelkosten en duur van niet-beschikbaarheid na een 50 MW, 100 MW en een 200 MW brand. Deze inschattingen zijn, voor zover ondergetekenden konden nagaan, gebaseerd op inschattingen door RWS. Bij de inschattingen wordt uitgegaan van een realistisch brandverloop en schadebeeld, dat evenwel geen rekening houdt met eventuele hogere afspatgevoeligheid. De cijfers zijn ter illustratie samengevat in *Tabel 19*.

Tabel 19 Begroting omvang schade, kosten herstel en duur niet-beschikbaarheid voor vrachtwagenbranden met verschillende intensiteit, volgens [42].

HRR [MW]	Schade	Kosten herstel, inclusief installaties (2020)	Duur niet-beschikbaarheid
50 MW	Constructieve integriteit niet aangetast Schade over 100 m	0,8 M EUR	1 week (herstel kan uitgesteld worden tot gepland onderhoud)
100 MW	Constructieve integriteit niet aangetast Schade over 500 m	4,3 M EUR	9 weken (waarvan 4 weken herstel van de constructie)
200 MW	Constructieve integriteit niet aangetast Schade over 700 m	6,0 M EUR	10 weken (waarvan 4 weken herstel van de constructie)

In het PIARC-OECD rapport ‘*Safety in Tunnels: Transport of Dangerous Goods Through Road Tunnels*’ wordt de schade aan een tunnel na brand begroot op basis van de kosten voor een nieuwe tunnel [22]. Voor vooraf gedefinieerde schadecategorieën wordt zo een percentage van de nieuwbouwkosten als schade aangemerkt. De begroting van de constructieve schade is in het OECD rapport echter te grof (*binair wel/geen schade aan de tunnelstructuur*) om hier onmiddellijk toepassing te vinden.

Een overzicht van het effect van maatregelen op het herstel na brand wordt gegeven in *Tabel 20*. De referentiesituatie en situaties met verkeerstechnische maatregelen, wijzigen de respons van de constructie en het schadepatroon niet. De verkeerstechnische maatregelen hebben wel een invloed op de kans op optreden van een grote brand. Het effect van vaste brandblusinstallaties is reeds verrekend in het brandverspreidingsmodel en in de evaluatie van de brandintensiteit. Indien een brand ondanks de vaste brandblusinstallaties toch een hoge intensiteitsklasse behaalt, dan zijn (als model) dezelfde schadebeelden toepasselijk als voor de referentietoestand. Dit is niet het geval voor het mobiel brandblussysteem en de hittewerende bekleding. Voor het mobiel blussysteem wordt aangenomen dat deze voor de meest intense branden de ruimtelijke omvang van de schade helpt beperken, maar niet de

intensiteit van de brand zelf (*ter hoogte van het brandend voertuig*)³⁶. Dit omdat er een ruime tijd nodig is om het systeem in positie te brengen en het dan niet langer vanzelfsprekend is dat een grote brand dicht kan worden benaderd. De hittewerende bekleding is rechtstreeks ontworpen om schade aan de constructie te beperken, en wijzigt bijgevolg het schadebeeld en de implicaties voor herstel. Beide systemen (mobiel blussysteem en HWB) hebben tevens een faalkans. Deze aspecten worden hieronder in eerste analyse besproken.

Tabel 20 Schadebeeld en implicaties voor herstel en niet-beschikbaarheid

Maatregel	Schadebeeld en implicaties herstel
Referentietoestand (“geen actie”)	schadebeeld referentietoestand
Verkeerstechnische maatregelen - filemanagement - regeling afstand HGV	schadebeeld referentietoestand
Sprinklersysteem (deluge)	schadebeeld referentietoestand
Watermistsysteem	schadebeeld referentietoestand
Mobiel blussysteem	ruimtelijke beperking van het schadebeeld (<i>evenwel beperkte faalkans van de maatregel</i>)
Hittewerende bekleding	beperking van omvang (ernst) schade voor gegeven brandintensiteit (<i>evenwel beperkte faalkans van de maatregel</i>)

16.5.2 Schadebeeld referentietoestand

Het schadebeeld in de referentietoestand wordt geëvalueerd met referentie naar de schade classificatie in hoofdstuk 15.

Conform de classificatie van het schadebeeld in hoofdstuk 15 wordt de omvang van de schade in *Tabel 21* kwantitatief begroot. Deze begroting is een eerste inschatting om de verkennende MKBA mogelijk te maken. De inschatting houdt ondermeer rekening met [42] en gaan uit van een constructiekosten van 100 miljoen euro per km tunnelbuis, en 5 miljoen euro per tunnelmoot van 50 m. Om de bijkomende kosten van herstel in rekening te brengen wordt het herbouwen van een tunnelmoot ingeschat op 10 miljoen euro.

Dezelfde begroting van de schade is toepasselijk voor het mobiel blussysteem en de HWB, met wijziging in de relatieve kans van optreden, zoals in de volgende secties toegelicht.

³⁶ Ondergetekenden hebben vernomen dat het in het verleden bij proeven met een buitenopstelling wel mogelijk was om een koolwaterstofbrand effectief te blussen. Echter, omdat nadere informatie ontbreekt, is deze aanname hier gedaan. Wellicht dat bij verdere studies wel van deze resultaten en/of nieuw detailonderzoek op dit punt gebruik kan worden gemaakt.

Tabel 21 Relatie tussen brandintensiteitsklassen en schadeklassen.

Schadeklasse	Directe schade [M EUR 2020]	Niet-beschikbaarheid [dagen]	Verantwoording
A	0	0	(nagenoeg) geen schade
B	1	1	Directe schade beperkt Eén dag niet-beschikbaarheid voor inspectie
C	4	14	Structurele maatregelen nodig. Twee weken niet-beschikbaar
D	20	90	Structureel herstel 2 tunnelmoten. Drie maand niet-beschikbaar.
E	100	365	Herbouwen meerdere tunnelmoten Eén jaar niet-beschikbaar

16.5.3 Mobiel blussysteem

Het mobiel blussysteem wordt geacht de ruimtelijke impact van de brand te beperken. Het in actie stellen van het mobiel blussysteem vergt echter een zekere tijd, zodat deze wordt geacht slechts een beperkte invloed te hebben op kleinere branden, waardoor voor deze branden geen wijziging in schadeclassificatie wordt aangenomen. Voor intense branden wordt aangenomen dat het mobiel blussysteem de brand onvoldoende dicht kan benaderen om de schade ter hoogte van de brandende voertuigen zelf te beperken. Bij intense branden wordt het mobiel blussysteem wel geacht de schade verder van de brand te reduceren. Samengevat wordt als eerste benadering aangenomen dat het mobiel blussysteem toelaat de schadeclassificatie E voor de meest intense branden om te zetten in classificatie D.

Het mobiel blussysteem heeft eveneens een kans van niet-beschikbaarheid ('faalkans'). Conform [42] wordt de betrouwbaarheid van het systeem hoog ingeschat op 98%. Wanneer het mobiel blussysteem niet beschikbaar is geldt de schadeclassificatie voor de referentietoestand.

16.5.4 Hittewerende bekleding

Hittewerende bekleding is specifiek ontworpen om de schade aan de constructie in geval van brand te beperken. De schadeclassificaties uit hoofdstuk 15 zijn van toepassing.

Uit proeven in de tunnels blijkt dat de hittewerende bekleding een kans heeft om bij brand los te komen en de constructie lokaal bloot te stellen. De ondergetekenden hebben begrepen dat dit verband houdt met een niet volledig betrouwbare connectie tussen de bekleding en het beton, maar dat dit probleem door een adequate plaatsing van de HWB vermeden kan worden (bij bestaande HWB: nabouten). Hier wordt aangenomen dat er bij plaatsing van HWB bijzonder aandacht besteed wordt aan de hechting en de juiste dikte om spatten achter de HWB te voorkomen (desnoods door bijkomende studies), zodat voor de adequaat geplaatste HWB geen faalkans moet verrekend worden

16.6 Herstel schade na brand: kans op optreden schadebeeld

Gelet op bovenstaande, en door het combineren van *Tabel 10* (hoofdstuk 10) en *Tabel 15* (hoofdstuk 15), wordt een beeld gevormd van de frequentie van de verschillende schadeklassen. Dit overzicht

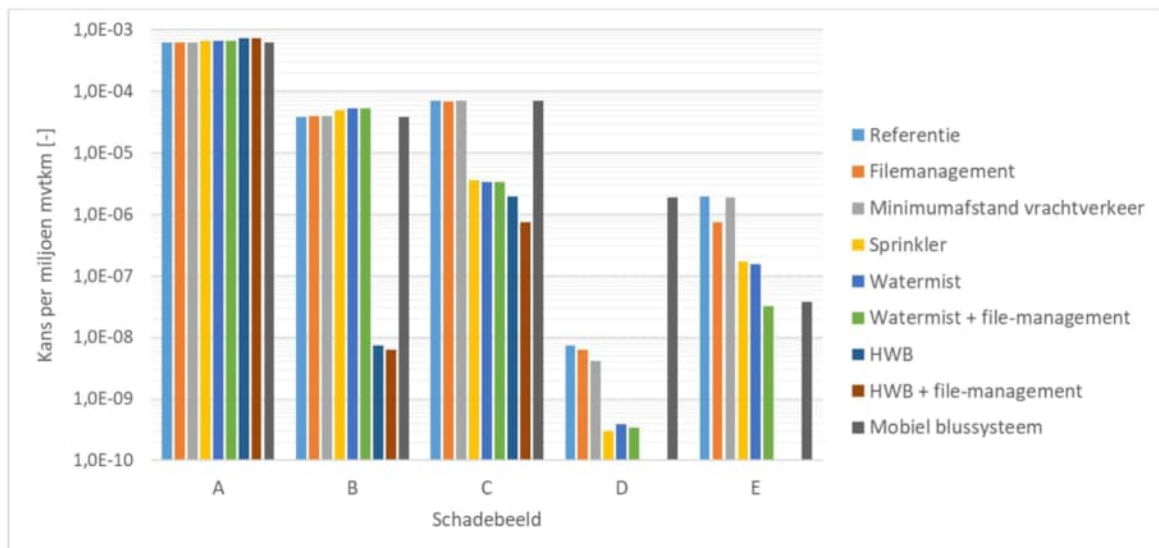
wordt weergegeven in *figuur 69*. Dezelfde informatie wordt weergegeven in *Tabel 22*^{37,38}. Voor de volledigheid geeft *Tabel 23* dezelfde informatie, maar weergegeven als kans gegeven brand. Gezien de hoge betrouwbaarheid is de kans op schadebeeld A voor HWB bij afronding effectief 1.0.

Met betrekking tot *figuur 69* kan het volgende worden toegelicht:

- Bedacht dient te worden dat de totale kans op schade per categorie (*referentietoestand, filemanagement, enz.*) hetzelfde is. De som van de kansen per schadebeeld is dus voor elke categorie dezelfde. Dit betekent dat als op de verticale as de kans niet logaritmisch was uitgezet, maar lineair, dat dan de totale hoogte van de kolommen per categorie gelijk zou zijn. De kans op het optreden van brand is voor alle situaties gelijk aan $7,25 \cdot 10^{-10}$ per mvtkm.
- Als een bepaalde maatregel de kans op branden met hoge intensiteit reduceert, dan vertaalt dit zich in een lagere kans op grote schadebeelden, conform de schade classificatie per brandintensiteit uit *Tabel 15*.
- Als door een bepaalde maatregel de constructieve schade bij een bepaalde brandintensiteit vermindert, dan verschuift in *figuur 69* een deel van de kolom voor de originele schadeklasse naar links (naar lagere schadeklassen). Zie bijvoorbeeld HWB. Door HWB is de schade in klassen B en C minder dan bij de referentietoestand en bij klasse D en E helemaal verdwenen. Het gevolg is dat de schade klasse A (geen constructieve schade) toeneemt. Het aantal branden is namelijk gelijk en als er dus minder vaak ernstige schade is, neemt het aantal niet ernstige schades toe. Om die reden is bij schade A te zien dat alle andere categorieën ofwel dezelfde kans hebben als de referentietoestand ofwel een hogere kans (hogere kolom). Analooeg is de kans op schadeklasse D groter bij een mobiel blussysteem omdat deze de kans op schadeklasse E reduceert. De kans op schadeklasse E wordt door het mobiel blussysteem als het ware (deels) overgeheveld naar schadeklasse D.
- Voor iedere maatregel kan *figuur 69* geïnterpreteerd worden als een risicoprofiel voor constructieve schade. Het opteren voor een maatregel impliceert het aanvaarden van het risicoprofiel. Concreet betekent dit, bijvoorbeeld, dat maatregelen waarvoor de kans op een hoge schadeklasse als te hoog wordt ervaren (niet maatschappelijk aanvaardbaar), niet als optie kunnen worden weerhouden. Hierbij evenwel de belangrijke kanttekening dat een meer gedetailleerd model of verdere studie kan toelaten om een beter beeld te vormen van de mogelijke schadebeelden. Dit bijvoorbeeld door via gedetailleerde berekeningen na te gaan onder welke omstandigheden schadeklassen D en E (bezwijken) optreden.

³⁷ Om afrondingen in de berekeningen te compenseren, en de som van de kansen per schadebeeld te normaliseren, is de kans op schadebeeld A, gegeven brand, bepaald als $(1 - \text{som}(\text{kans andere schadebeelden}))$.

³⁸ De resultaten maken eveneens melding van combinaties watermist+filemanagement en HWB+filemanagement. Dit gezien het belang van filevorming voor de kans op optreden van zeer grote branden. Er is uiteraard een veel groter aantal combinaties aan maatregelen mogelijk.



figuur 69 Kans op schadebeeld per miljoen mvtkm voor verschillende maatregelen.

Tabel 22 Kans op verschillende schadebeelden, per miljoen mvtkm.

Combinatie maatregelen	A	B	C	D	E
Referentie	6,1·10 ⁻⁴	3,8·10 ⁻⁵	7,0·10 ⁻⁵	7,3·10 ⁻⁹	1,9·10 ⁻⁶
Filemanagement	6,2·10 ⁻⁴	3,9·10 ⁻⁵	6,9·10 ⁻⁵	6,3·10 ⁻⁹	7,6·10 ⁻⁷
Minimumafstand vracht (HGVdist)	6,1·10 ⁻⁴	4,0·10 ⁻⁵	7,0·10 ⁻⁵	4,1·10 ⁻⁹	1,9·10 ⁻⁶
Sprinkler	6,7·10 ⁻⁴	4,9·10 ⁻⁵	3,6·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻¹⁰	1,7·10 ⁻⁷
Watermist	6,7·10 ⁻⁴	5,2·10 ⁻⁵	3,4·10 ⁻⁶	3,9·10 ⁻¹⁰	1,6·10 ⁻⁷
Watermist + file-management	6,7·10 ⁻⁴	5,2·10 ⁻⁵	3,4·10 ⁻⁶	3,4·10 ⁻¹⁰	3,2·10 ⁻⁸
HWB	7,2·10 ⁻⁴	7,3·10 ⁻⁹	1,9·10 ⁻⁶	0	0
HWB + file-management	7,2·10 ⁻⁴	6,3·10 ⁻⁹	7,6·10 ⁻⁷	0	0
Mobiel blussysteem	6,1·10 ⁻⁴	3,8·10 ⁻⁵	7,0·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻⁶	3,9·10 ⁻⁸

Tabel 23 Kans op verschillende schadebeelden, gegeven brand (in percent). Merk op dat door de weergave in percentage, zeer kleine getallen als 0,00% zijn weergegeven.

Combinatie maatregelen	A	B	C	D	E
Referentie	84,80%	5,28%	9,66%	0,00%	0,27%
Filemanagement	85,04%	5,37%	9,48%	0,00%	0,10%
Minimumafstand vracht (HGVdist)	84,62%	5,48%	9,64%	0,00%	0,26%
Sprinkler	92,71%	6,77%	0,50%	0,00%	0,02%
Watermist	92,33%	7,18%	0,47%	0,00%	0,02%
Watermist + file-management	92,35%	7,18%	0,47%	0,00%	0,00%
HWB	99,73%	0,00%	0,27%	0,00%	0,00%
HWB + file-management	99,89%	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%
Mobiel blussysteem	84,80%	5,28%	9,66%	0,26%	0,01%

16.7 Verkennende maatschappelijke kosten-baten analyse

16.7.1 Inleiding

In de verkennende MKBA worden de kostcomponenten samengebracht om een globaal beeld te geven van de kosten en baten van een maatregel. Zoals besproken in hoofdstuk 6 is de MKBA één component bij beslissingen omtrent de wenselijkheid van maatregelen. Het moet benadrukt worden dat de implementatie van een maatregel (inclusief de optie: behoud van de referentietoestand) het aanvaarden van het volledige risicoprofiel impliceert, zoals weergegeven per miljoen mvtkm in *figuur 69*.

16.7.2 Berekeningsconcept

De totale kosten (investering, onderhoud en schade bij brand, allen inclusief niet-beschikbaarheid) wordt weergegeven door (12), met C de investeringskost, M de onderhoudskost, en D de kosten bij brand; in het navolgende worden deze allen op jaarlijkse basis geëvalueerd. Wanneer een maatregel wordt genomen om de schade bij brand te reduceren, dan kan deze reductie in schade beschouwd worden als een baat van de investering. De formulering in (12) waarbij de totale kosten beschouwd wordt is equivalent – en geeft een direct beeld op de totale verwachte kosten voor elk scenario.

$$K = C + M + D \quad (12)$$

De kosten in (12) moeten allen op eenzelfde tijdsschaal geplaatst worden, bijvoorbeeld door alle kosten op jaarbasis te vergelijken, of daar alle toekomstige kosten naar éénzelfde beslissingsmoment om te rekenen.

Aangezien de onderhoudskosten per jaar bepaald worden, en ook de schadekosten eenvoudig op jaarbasis kunnen ingeschat worden, wordt de evaluatie op jaarbasis aangehouden. Hiertoe worden de investeringskosten c gemaakt bij installatie omgerekend naar de equivalente jaarlijkse investeringskosten C , via (13), waarbij L de levensduur is van de maatregel en γ de continue discontovoet. Conform ISO 2394:2015 wordt deze discontovoet voor maatschappelijke investeringen in veiligheid gelijk genomen aan de lange termijn groei. In het navolgende wordt 2% aangehouden.

$$c = \int_0^L C \exp(-\gamma t) dt = \frac{C}{\gamma} (1 - \exp(-\gamma L)) \quad (13)$$

De kosten van niet-beschikbaarheid worden begroot op 1 MEUR per dag, zoals aangehaald in 16.2.3.

De kosten t.g.v. brand worden begroot via (14), met $p_{fi,a}$ de jaarlijkse kans op brand in de tunnel, en μ_D de verwachtingswaarde van de schade in geval van brand. Wanneer de kans op brand laag is, kan als benadering gerekend worden met de kans op één enkele brand per jaar. De kans op brand $p_{fi,a}$ wordt verder begroot via (15), met p_{fi} de kans op brand per mvtkm zoals begroot in 8.1 en N_{mvt} het gemiddeld aantal mvt per buis in de tunnel per jaar en $lengte$ de totale lengte van de tunnel (desgevallend meerdere buizen)³⁹. De verwachte schade μ_D wordt begroot met (16), met p_{ifi} de kans op schadeklasse i bij brand en $D_{i,direct}$ en $D_{i,niet-beschikbaar}$ de met de schadeklasse overeenstemmende kosten.

³⁹ De benadering in (15) laat een eenvoudige vergelijking van de totale kosten per km tunnel toe; voor een totaal aantal mvtkm beneden 250 miljoen blijft de fout onder 10%.

$$D = p_{fi,a} \mu_D \quad (14)$$

$$p_{fi,a} = 1 - (1 - p_{fi})^{N_{mvt} \text{ lengte}} \approx p_{fi} N_{mvt} \text{ lengte} \quad (15)$$

$$\mu_D = \sum_{i=A,B,C,D,E} P_{i|fi} (D_{i,direct} + D_{i,niet-beschikbaar}) \quad (16)$$

De kosten per schadeklasse worden begroot op basis van *Tabel 21* en *Tabel 23*.

16.7.3 Evaluatie

De evaluatie van bovenstaande wordt samengevat in *Tabel 24* tot *Tabel 26*, met verwijzing naar de begrotingen in de voorgaande paragrafen. Hierbij is *lengte* de totale lengte van alle tunnelbuizen. Met toepassing van de benadering in (15) is de schadebegroting in *Tabel 26* lineair in het aantal motorvoertuigen. De getabelleerde waarde voor *D* (per km tunnel) is voor $N_{mvt} = 1$ miljoen per jaar. De totale kosten (investering, onderhoud, schade bij brand, allen inclusief kosten niet-beschikbaarheid) wordt weergegeven in

figuur 70 in functie van het gemiddeld aantal mvt in de tunnelbuis (*schadeberekening voor 1 km tunnelbuis*). Hierbij wordt de verkeersintensiteit tot aan een zeer hoge waarde weergegeven om het effect van de maatregelen beter te duiden. De dikkere (rode) volle lijn in *figuur 70* stelt de referentietoestand voor; niet efficiënte maatregelen worden in volle lijn weergegeven (totale kosten boven kosten referentietoestand); maatregelen die – bij voldoende hoog verkeer – wel efficiënt zijn worden in gebroken lijn weergegeven.

Tabel 24 Investeringskosten (M EUR 2020 per km tunnel)

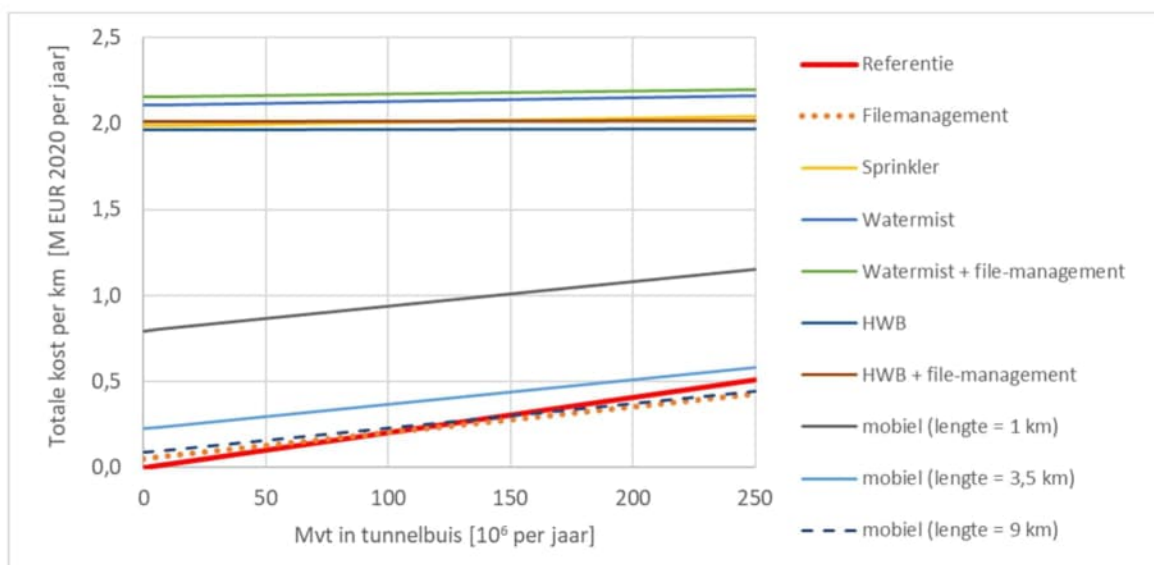
Combinatie maatregelen	Directe investeringskost	Kosten niet-beschikbaarheid	Levensduur <i>L</i> (jaar)	<i>C</i> (M EUR 2020 per jaar per km tunnel)
Referentie	0	0	-	0
Filemanagement	0	0	-	0
Minimumafstand vracht	0	0	-	0
Sprinkler	1,5	21	20	1,36
Watermist	3,5	21	20	1,49
Watermist + file-management	3,5	21	20	1,49
HWB	9	45	40	1,96
HWB + file-management	9	45	40	1,96
Mobiel blussysteem	9 / lengte	1 / lengte	15	0,77 / lengte

Tabel 25 Onderhoudskosten M (M EUR 2020 per jaar per km tunnel)

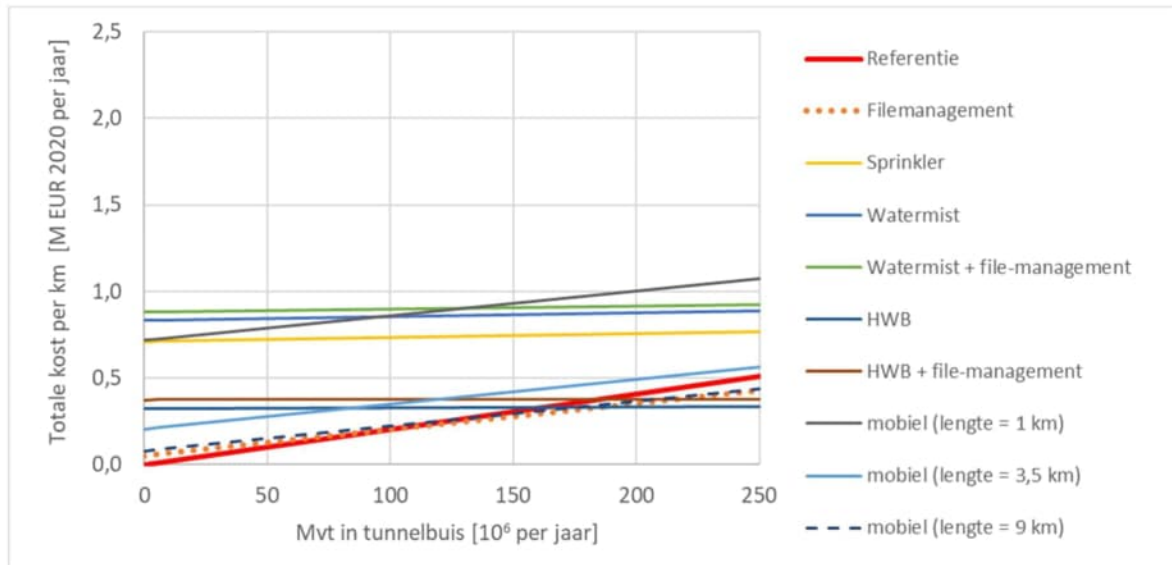
Combinatie maatregelen	Directe kost	Kosten niet-beschikbaarheid	M
Referentie	0	0	0
Filemanagement	0	0,05	0,05
Minimumafstand vracht	0	0	0
Sprinkler	0,12	0,5	0,62
Watermist	0,12	0,5	0,62
Watermist + file-management	0,12	0,55	0,67
HWB	0	0	0
HWB + file-management	0	0,05	0,05
Mobiel blussysteem	0.023 / lengte	0	0.023 / lengte

Tabel 26 Schadekosten D (M EUR 2020 per jaar per km tunnel)

Combinatie maatregelen	μ_D (M EUR per schadegeval)	D $N_{mvt} = 1 \text{ M mvt per jaar}$
Referentie	3,1	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Filemanagement	2,3	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Minimumafstand vracht	3,0	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Sprinkler	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Watermist	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Watermist + file-management	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
HWB	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
HWB + file-management	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Mobiel blussysteem	2,2	$1,6 \cdot 10^{-3}$



figuur 70 Totale kosten maatregel per km tunnel, in functie van het aantal mvtkm in de tunnelbuis (bestaande tunnel).



figuur 71 Totale kosten maatregel per km tunnel⁴⁰, in functie van het aantal mvtkm in de tunnelbuis; geen kosten niet-beschikbaarheid bij installatie (nieuwe tunnel).

Uit

figuur 70 wordt het volgende geconcludeerd:

- Een filemanagementsysteem wordt bij een hoger aantal mvt kostenefficiënt (er zijn nagenoeg geen kosten en het reduceert de verwachte schade).
- Verder is ook een mobiel blussysteem relevant bij tunnels met een hoog aantal mvtkm (langere tunnel, hoger aantal voertuigen).
- De vaste blussystemen en hittewerende bekleding worden als niet kostenefficiënt aangemerkt. De totale verwachte kosten per km is op basis van de begrotingen immers beduidend groter dan deze voor de referentietoestand. Deze maatregelen zijn wel zeer effectief in het beperken van schade (zie Tabel 26), maar de investerings- en onderhoudskosten zijn in verhouding hoog.

De kosten van de HWB en vaste blussystemen worden gedreven door niet-beschikbaarheid van de tunnel. Indien de installatie niet resulteert in niet-beschikbaarheid (zoals vereenvoudigend kan gesteld worden voor het aanbrengen van HWB in nieuwe tunnels), dan wordt HWB wel kostenefficiënt bevonden bij een groter aantal mvtkm. Dit wordt toegelicht met figuur 71, waarbij de kosten ten gevolge van niet-beschikbaarheid bij installatie niet in rekening gebracht zijn (dit stemt op vereenvoudigde wijze overeen met de situatie "nieuwe tunnel"). Omdat het in deze studie echter gaat om bestaande in gebruik zijnde tunnels heeft de niet-beschikbaarheid bij installatie een zeer negatieve impact.

Een beperkte parameterstudie voor de input waarden uitgevoerd in het kader van de studie (hier niet vermeld, daar deze parameterstudie kwalitatief was) duidt erop dat de hier vermelde conclusies, dat HWB en vaste brandblussystemen gezien de bestaande toestand niet efficiënt zijn (

⁴⁰ Dit zijn de geschatte kosten per km totale lengte van de tunnel, c.q. de kosten per km tunnelbuis.

figuur 70), robuust zijn. Concreet betekent dit dat significant hogere inschattingen voor de directe schade en duur van niet-beschikbaarheid, en lagere waarden voor de installatiekosten, algemeen niet leiden tot een wijziging in de conclusie. Verder resulteert een hogere aanname voor de kans op brand per mtvkm in een snellere beoordeling van de maatregelen als kostenefficiënt. Ook hier zijn de kwalitatieve conclusies evenwel robuust (5x hogere/lagere kans leidt niet tot een verschil in conclusie).

Bovenstaande evaluatie is het resultaat van een sterk vereenvoudigde analyse. Deze analyse laat zien dat (het gebrek aan) efficiëntie van een maatregel zeer sterk bepaald wordt door de onbeschikbaarheid bij installatie en onderhoud. Het verdient aanbeveling om deze waarden zo nodig te bevestigen en via een studie verder uit te klaren.

17 Alternatieven voor HWB in de drie landtunnels

17.1 Algemeen

De titel van het rapport “*Brandwerendheid tunnels - Verkenning van mogelijke alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding in drie landtunnels*” zou de verwachting kunnen wekken dat is gezocht naar alternatieven voor HWB, die hetzelfde effect hebben (*voldoen aan de prestatie eisen in Bouwbesluit 2012 en de RWS Richtlijnen*) als HWB. Dat is niet het geval. Het is voor ondergetekenden duidelijk dat er feitelijk slechts één oplossing mogelijk is als, zoals tot op heden is gedaan, vast wordt gehouden aan de prestatie eisen, zoals die door het Bouwbesluit en in de RWS Richtlijnen zijn gedefinieerd. Die oplossing is het toepassen van passieve maatregelen, in het bijzonder het hittewerend bekleden van de tunnels. Het is eventueel wel mogelijk om, bijvoorbeeld door toepassing van alternatieve maatregelen, rechtstreeks aan de onderliggende functionele eisen van het Bouwbesluit en de RWS Richtlijnen te voldoen. De studie was er dan ook meer op gericht te verkennen wat de consequenties zijn van mogelijke alternatieve keuzes, waarbij is gedacht aan andere brandbeschermende maatregelen, maar vooral ook het alternatief van niets doen en de huidige situatie handhaven. In paragraaf 17.2 zijn de mogelijk te onderscheiden alternatieven besproken.

Zoals voorgaand in dit rapport is aangegeven, is het de bedoeling van ondergetekenden om informatie te verzamelen en zodanig te presenteren dat het door stakeholders, c.q. beleidsmaker/beslissers, kan worden gebruikt bij het maken van keuzes. Feitelijk is die informatie in de voorgaande hoofdstukken van dit rapport te vinden. In paragraaf 17.3 is een en ander min of meer samengevat door een aantal belangrijke alternatieven op consequenties met elkaar te vergelijken.

17.2 Mogelijke alternatieven voor HWB

Met het op korte termijn aanbrengen van HWB als referentie, is misschien wel het belangrijkste alternatief:

Alternatief 1: Geen, of slechts in beperkte mate, nemen van brandbeschermende maatregelen en feitelijk de situatie handhaven, zoals die nu al een aantal jaren is.

Opgemerkt moet worden dat hiermee niet wordt bedoeld dat er helemaal niets gedaan hoeft te worden. Bij deze optie is het bijvoorbeeld zeker aan te bevelen om op voorhand plannen uit te werken voor mogelijke ingrepen om na een brand het verkeer weer zo snel mogelijk van de tunnel gebruik te kunnen laten maken. Er is voor gekozen om dat niet als apart alternatief te benoemen, maar om dat op te nemen als nadere uitwerking van dit alternatief. Waarbij opgemerkt dat dit in feite geldt voor meerdere alternatieven.

In lijn met wat ook gevraagd is door gemeenten, kan als tweede alternatief worden gezien:

Alternatief 2: HWB aanbrengen bij volgend groot onderhoud (rond 2030) en tot die tijd de huidige situatie handhaven.

Dan zijn er nog de brandbeschermende maatregelen, zoals het aanbrengen van een sprinklersysteem en watermiststelsel. Dat is navolgend als één alternatief beschouwd:

Alternatief 3: Aanbrengen van een sprinklersysteem of een watermiststelsysteem.

Tenslotte is het toepassen van een mobiel blussysteem als laatste alternatief opgenomen, waarbij gevarieerd kan worden met het aantal blussystemen, c.q. de lengte waarover het blussysteem ingezet wordt.

Alternatief 4: Inzetten van mobiel blussysteem.

Voor maatregelen, zoals file-management en minimum afstand vrachtwagens, geldt dat die additioneel ingezet kunnen worden bij andere maatregelen en daarom zijn die niet als apart alternatief opgenomen.

17.3 Vergelijking van alternatieven

Onder verwijzing naar alle informatie die voorgaand in dit rapport is weergegeven, zijn navolgend een aantal beschouwingen over de alternatieven, zoals die in de voorgaande paragraaf zijn gedefinieerd, opgenomen.

Aanbrengen HWB versus de huidige situatie laten zoals die is (alternatief 1)

Als deze, als twee uitersten te beschouwen, oplossingen worden vergeleken, dan kan als eerste worden gewezen op de twee belangrijkste verschillen:

- kans op aanzienlijke constructieve schade na een brand;
- totale kosten per km tunnel (inclusief investeringskosten).

Om met de kosten te beginnen, uit de verkennende MKBA kwam duidelijk naar voren dat de totale kosten per km tunnelbuis bij een bestaande landtunnel bijna een orde hoger zijn in het geval van aanbrengen HWB ten opzichte van “niets doen” (alternatief 1). Het verschil is zo groot dat het aantal motorvoertuigen (mvt) zelfs niet uitmaakt. Bij weinig mvt per jaar is het verschil ca. een factor 10 en bij heel veel mvt is het verschil nog steeds ca. een factor 4 (zie *figuur 70*). Er voor kiezen om de huidige situatie te handhaven betekent natuurlijk wel dat, als er een keer een ernstiger brand optreedt, er wel aanzienlijke herstelwerkzaamheden nodig zullen kunnen zijn en de niet-beschikbaarheid van de tunnel aanzienlijk langer zal zijn. Voor alle duidelijkheid, de daarmee gepaard gaande herstel en economische kosten zijn in de MKBA, die resulteerde in veel hogere kosten bij aanbrengen HWB, al meegenomen.

Met betrekking tot de consequenties van aanzienlijke constructieve schade merken ondergetekenden op dat er bij de landtunnels wel een heel groot verschil is qua consequenties in vergelijking met een tunnel onder open water. Als even de Ketheltunnel als voorbeeld wordt genomen (*bij de KWA tunnel is het wel weer wat complexer*), dan zou bij een extreme brand, waarbij een tunnelmoot geheel of gedeeltelijk is bezweken, wellicht in relatief korte tijd ter plaatse van de bezweken tunnelmoot en de directe omgeving daarvan, het grondpakket kunnen worden verwijderd. Datzelfde geldt voor de bezweken en/of zwaar beschadigde tunneldelen (wanden en/of plafond). Theoretisch zou het dan mogelijk zijn om met herstel van het wegdek en het gedeeltelijk open laten van een stuk van de tunnel het verkeer weer van de tunnelbuis gebruik te laten maken. Of dit wenselijk is een andere vraag. Naar verwachting is het technisch mogelijk. Natuurlijk moet dan op een later tijdstip de tunnelconstructie alsnog worden hersteld (wellicht lokaal herbouwd), maar dat kan dan worden gedaan in een periode dat dit het minst overlast biedt.

Mocht de voorgaand geschetste situatie met een open deel van de tunnelbuis niet aanvaardbaar zijn, dan zou ook nog gedacht kunnen worden aan een metalen hulpconstructie met wanden en dak, die het “gat” tijdelijk afdicht, waardoor het effect op de weggebruikers geminimaliseerd wordt.

Ondergetekenden realiseren zich dat beschouwingen, zoals die voorgaand zijn gegeven, een totale andere benadering van omgaan met brandwerendheid van tunnels is dan wat het decennia lang was en dat het een totaal andere mind-set vraagt. Echter, in deze verkennende studie naar alternatieven betreft het zeker in ogenschouw te nemen mogelijkheden. De kern van dit betoog is dat bij een keuze, anders dan aanbrengen van HWB, het aan te bevelen is om van te voren scenario's van constructieve schade en mogelijke herstelmaatregelen (korte en lange termijn) uit te werken en mogelijk zelfs al zowel materiaal als materiaal er voor klaar te hebben staan. Of dat verstandig is, zou in een vervolgstudie, als een dergelijk alternatief als mogelijk haalbaar wordt gezien, kunnen worden onderzocht.

Aanvullend op alternatief 1, zijn er nog een aantal opties waarvoor kan worden gekozen, zoals een file-management systeem, reguleren van afstand tussen vrachtwagens of gebruik maken van een mobiel blussysteem. Voor deze opties geldt in zijn algemeenheid dat het een positief effect heeft op de kans op schade (*het zorgt ervoor dat kansen op schades in hogere schadeklassen reduceren*), maar de kans op een grote constructieve schade nog altijd aanwezig blijft. Je zou kunnen stellen dat bijvoorbeeld een file-management systeem de situatie niet heel veel verbetert ten opzichte van niets doen, maar het kost niet veel en helpt wel om de kans op zeer grote branden te reduceren. Mocht er voor worden gekozen dit alternatief nader te bestuderen, dan kan een nadere analyse van voor- en nadelen van het toepassen van een of meerdere van deze aanvullende opties daarvan deel uit maken.

Alternatief 2: Uitstellen aanbrengen HWB

Ten opzichte van hetgeen voorgaand is besproken over aanbrengen HWB versus niets doen, is over dit alternatief technisch weinig aanvullend te melden. Het is misschien wel meer een politieke keuze die moet worden gemaakt. Op dit moment is het acceptabel gevonden om al bijna vijf jaar de huidige situatie, met de korte termijn operationele afspraken, te accepteren. Wordt het verantwoord geacht om die situatie nog bijvoorbeeld 10 jaar voort te laten duren? En zo ja, waarom zou die situatie dan ook niet langer geaccepteerd kunnen worden? Natuurlijk geldt voor die 10 jaar hetzelfde als wat voorgaand is besproken voor het permanent handhaven van de huidige situatie, als het gaat om klaar hebben liggen van herstelplannen.

Alternatief 3: Aanbrengen sprinklersysteem of watermiststelsysteem

Deze systemen kunnen min of meer worden gezien als tussenoplossingen tussen aanbrengen van HWB en de huidige situatie zo laten, in de zin dat de onmiddellijke investeringskosten en hinder geringer zijn dan voor HWB. Deze systemen hebben echter een uitgesproken (kleine) faalkans, waar dit bij een goed aangebracht HWB systeem wordt geacht niet het geval te zijn (*de HWB kan lokaal beschadigd raken, maar de kans op het verlies van HWB over grotere oppervlakken wordt in bij correcte plaatsing verwaarloosbaar geacht*). Wanneer de blussystemen correct functioneren wordt de brandintensiteit als beperkt aangemerkt. In die gevallen is de schade aan de tunnel nagenoeg vergelijkbaar aan deze bij aanbrengen HWB (*hoogstens lokaal oppervlakkig afspatten*). Wanneer het blussysteem niet correct functioneert (*dit omvat alle mogelijke redenen, en heeft niet enkel betrekking op het niet activeren van het blussysteem*), dan kan de brandintensiteit en de schade evenwel oplopen zoals in een onbeschermd tunnel. Daarenboven hebben de vastblussystemen een beperktere levensduur dan HWB en vereisen deze jaarlijks onderhoud. Qua kosten op jaarbasis (zie

figuur 70) zitten deze oplossingen voor de bestaande landtunnels daarom in dezelfde grootte-orde als die van aanbrengen van HWB.

Alternatief 4: Inzetten van mobiel blussysteem.

Voorgaand is dit als additionele optie genoemd bij alternatief 1. Zoals in *figuur 70* is te zien, zijn de kosten op jaarbasis gering als één systeem (2 toestellen) voor een voldoende lange tunnelbuislengte wordt aangehouden. De kosten stijgen substantieel als de lengte van de tunnel korter wordt. Een mobiel blussysteem heeft immers een vaste kast die niet vermindert bij kleinere tunnels, en valt daarom voor kleinere tunnels duurder uit.

18 Tot besluit

Met de informatie in het onderhavige rapport is getracht een basis neer te leggen voor stakeholders van de drie landstunnels (RWS en gemeenten) om te kunnen beslissen over een mogelijk alternatief voor het huidige plan, zijnde het op korte termijn aanbrengen van HWB. Ook als de basis, mede gezien de noodzakelijk gedane aannamen, misschien nog onvoldoende is om al een definitieve beslissing te nemen, is het wellicht wel voldoende om te beslissen of een bepaald alternatief verder uitgewerkt moet worden, en zo ja, wat daarvoor aan aanvullende informatie benodigd is. Verder is het, gezien het feit dat de omstandigheden bij de drie landtunnels niet gelijk zijn, aan te bevelen om, als voor een bepaalde tunnel wordt gekozen geen verdere maatregelen te nemen met betrekking tot de spatgevoeligheid van het beton, een vergelijkbare beoordeling als in dit rapport voor die tunnel nader uit te werken.

Naar de mening van ondergetekenden is kiezen voor een alternatief, waarbij niet meer wordt voldaan aan de prestatie eisen, zoals die in het Bouwbesluit 2012 en de RWS Richtlijnen staan, mogelijk en toegestaan. Mogelijks zullen echter niet alle partijen die op een of andere manier betrokken zijn er zo over denken, zodat nader overleg, c.q. communicatie daarover, belangrijk is, als ervoor wordt gekozen.

Sowieso zal kiezen voor een alternatief, waarbij het geaccepteerd wordt dat er aanzienlijke constructieve schade optreedt binnen 120 minuten bij een RWS brand of zelfs bij een minder hevige brand, een zeer grote verandering in de benadering van brandwerendheid van tunnel zijn. Dit impliceert dat communicatie en uitleg belangrijk zijn, als ervoor wordt gekozen.

Rijswijk en Gent, 30 november 2020



Dr. ir.
Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.
(oud-hoogleraar TU Delft en Eindhoven)



Prof.dr.ir.
Universiteit Gent

Referenties

1. [REDACTED], “Handbuch für Eisenbetonbau - zweite neuarbeitete Auflage, achter Band: Feuersicherheit, Bauunfälle”(in German). Berlin, Germany: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1921 (in German).
2. Centrum voor Brandveiligheid TNO, “Een mogelijke brand en zijn gevolgen in de ontworpen Botlektunnel,” TNO rapport BV 72-20, 1972.
3. [REDACTED] “Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus beton bei Brandbeanspruchungen”, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 248, 1975.
4. Leeuwarder courant, 12-08-1978. Ongeluk in Velser tunnel eiste vijf mensenlevens. <https://www.delpher.nl/>, 1978.
5. [REDACTED] “Beoordeling van de gevolgen van een brand op 11 augustus 1978 in de oostelijke buis van de Velser-tunnel”, TNO-IBBC rapport B-79-337/62.3.0901, d.d. 4 oktober 1978.
6. [REDACTED] “Beproeving van het gedrag bij verhitting van twee isolatiematerialen ter bescherming van tunnels bij brand.”, TNO-rapport B-79-391, augustus 1979.
7. [REDACTED], *The spalling of normalweight and lightweight concrete on exposure to fire*, Heron, Volume 24, 1979, No. 2.
8. CUR-VB rapport 98, “Spatten van grindbeton en lichtbeton bij brand”, CUR-VB, december 1980.
9. [REDACTED], “Deelrapport 1. “Beslissingsmodel voor het vervoer van gevaarlijke stoffen door tunnels; Beoordeling van de wenselijkheid van het aanbrengen van brandwerende bekleding in tunnels”, TNO-rapport 81-01464, maart 1981.
10. [REDACTED], “Deelrapport 2. “Beslissingsmodel voor het vervoer van gevaarlijke stoffen door tunnels; Omvang en frequentie van het optreden van schade als gevolg van effecten bij ongevallen in de huidige situatie en bij beperkte, dan wel algehele toelating”, TNO-rapport 81-01464, maart 1981.
11. NSTB. Highway Accident Report: Multiple Vehicle Collisions and Fire, Caldecott Tunnel Near Oakland, California, April 7, 1982. NTSB Report HAR-83/01, 1982.
12. [REDACTED] “Eindrapport van het project “Beslissingsmodel tunnels”, TNO-rapport 82-012195, juni 1983.
13. [REDACTED] “Spalling of concrete in fires”, Technical note 118, CIRA, London, UK, 1984
14. [REDACTED], “De brandbeveiliging in autotunnels; onderzoek van en maatregelen tegen de gevolgen van branden; casuïstiek van branden in spoor- en autotunnels; wettelijke bepalingen t.a.v. het vervoer van gevaarlijke stoffen; literatuurrapport”, Ministerie van Binnenlandse Zaken, 's-Gravenhage, februari 1985.
15. [REDACTED] “Rijkswaterstaat; BRAWAT-literatuurstudie spatten beton”, TNO-rapport 96-CVB-R0399, 4 juni 1996.
16. [REDACTED], “BRAWAT-II: spatgedrag van een met Promatect-H geïsoleerde vochtige grindbetonplaat bij verhitting volgens de RWS-kromme” TNO-rapport 97-CVB-R0775, 28 mei 1997.
17. [REDACTED] “BRAWAT II: Spatgedrag van een met droge Promatec-H® beschermde vochtige grindbetonplaat bij verhitting volgens RWS-kromme”, TNO-rapport 99-CVB-R2155, november 1999.

18. [REDACTED]¹, “Brawat 3: Onderzoek naar afspatgedrag van een op druk belaste wand in afgezonken tunnels”, TNO-rapport 2001-CVB-R03264, 10 mei 2001.
19. [REDACTED]. “Risk and impact of natural hazards on a road network”, *Journal of transportation engineering*, 127(2), 2001, 159-166.
20. NEN 6701, “Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen - Betonconstructies”, NEN, december 2001.
21. Chiyoda Engineering Consultants Co., Ltd. “*Sprinklers in Japanese Road Tunnels – Final Report*” Report prepared for RWS, 2001.
22. OECD, “*Safety in Tunnels – Transport of Dangerous Goods Through Road Tunnels.*” Joint OECD-PIARC report, 2001.
23. Sleich et al., Competitive steel buildings through natural fire safety concepts (Final report). EUR 20360. European Commission Directorate-General for Research, 2002
24. [REDACTED], Current state of road tunnel safety in Japan. In: The twenty-second PIARC World Road Congress, Durban, South Africa, 2003
25. [REDACTED] “*Beoordeling spatgedrag betonconstructies. Literatuuronderzoek en beproevingsopzet*”, TNO-rapport 2004-CVB-R0334, januari 2005.
26. [REDACTED], “*On the characteristics of fires in tunnels*”, Proefschrift, Lund University, 2005.
27. [REDACTED] Modelling of fire spread in car parks. *Heron*, 50(4), 2005, 209-218.
28. RWS, Aanbevelingen ventilatie van verkeerstunnels. RWS Steunpunt Tunnelveiligheid, 2005
29. [REDACTED] “*Utilities street works and the cost of traffic congestion.*” University of the West of England, 2005.
30. Bouwdienst Rijkswaterstaat, “Aanvullingen en wijzigingen voor tunnels en aquaducten op: Richtlijn voor het Ontwerpen van Betonnen Kunstwerken (ROBK versie 6), 6 februari 2006.”
31. [REDACTED], “*Spatgedrag van beton bij brand*”, *Cement* 2006-7.
32. [REDACTED] Draft Final report (1), task 2.1, PART 1: Scenarios and accidents in the past. UPTUN Deliverable, 2006
33. *fib*-Bulletin 38, “*Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling; State-of-art report*”, International Federation for Structural Concrete (*fib*), Lausanne, 2007.”
34. [REDACTED] Road Tunnel Protection by water mist systems – Implementation of full scale fire test results into a real project. *Proceedings of the Third International Symposium on Tunnel Safety and Security*. 12-14/03, Stockholm, Sweden, 2008.
35. [REDACTED] “*Fire testing procedure for concrete tunnel linings*”, TNO-rapport 2008-Efectis-R0695, September 2008.
36. PROMAT, “*Tunnel Fire Protection*” Promat International N.V., 2008.
37. RWS. Veiligheidsrichtlijnen deel C, hoofddocument, versie 15 juni 2009, <http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/96003/hoofddocument-veiligheidsrichtlijnen-deel-c-vrc.pdf>.
38. RWS. Veiligheidsrichtlijnen deel C, bijlage 8, versie 1.1, 15 juni 2009, <http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/96002/bijlagen-veiligheidsrichtlijnen-deel-c.pdf>.
39. [REDACTED] *Spatgedrag betonconstructies; Modellering vochttransport onder brandomstandigheden*”, *Cement* 2009-7.

⁴¹ Op het titelblad staat alleen C. Both als auteur vermeld, maar het rapport is ook ondertekend door P.H.E. van de Leur.

40. Tweede Kamer der Staten-Generaal, “31 700 A Vaststelling van de begrotingsstaat van het Infrastructuurfonds voor het jaar 2009. Nr. 91. Lijst van vragen en antwoorden.” KST130237. Sdu Uitgevers, 2009.
41. ██████████, “Maximum ceiling temperature in a tunnel fire” SP Rep, 51(2.1), 2010.
42. RWS, “Grote vrachtwagenbrand in tunnel A2 Leidsche Rijn” Document 4818-2010-0037 RWS Steunpunt Tunnelveiligheid, 2010.
43. ██████████ “Suppression systems—trade-offs & benefits.” Proceedings of the fourth international symposium on tunnel safety and security, Frankfurt am Main, Germany, 17–19 March, 2010, 2010, pp 271–282.
44. Combinatie ██████████ e, “Project Combi Nijverdal; Gesloten tunnel; Constructief ontwerp moot 10 t/m 22”, Document CN-4.1-DO-B-010, 12 mei 2010.
45. Combinatie ██████████, “Project Combi Nijverdal; Onderdeel: Toeritten en tunnel - Beschouwing calamiteiten”, Document CN-4.1-DO-B-008, 26 mei 2010.
46. NEN-EN 1992-1-2+C1, “Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1.2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand”, NEN, november 2011.
47. ROK 1.0, “Richtlijn Ontwerp Kunstwerken”, RWS RTD 1001:2011, versie 1.0, 16 december 2011.
48. ██████████ An introduction to fire dynamics (3rd edition). John Wiley & Sons, 2011.
49. ██████████ Post Collision Vehicle Fire Analysis. In 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration (No. 11-0315), 2011.
50. ██████████ “The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires” Fire Safety Journal, 46(4), 2011, pp. 204-210.
51. Bouwbesluit 2012, Geraadpleegd van <https://rijksoverheid.bouwbesluit.com/Inhoud/docs/wet/bb2012/hfd4>, 2012.
52. ██████████ (2012). Tunnel fire investigation III: the Burnley Tunnel fire, 23 March 2007. In: Handbook of Tunnel Fire Safety (2nd edition). ICE Publishing.
53. ██████████ The influence of tunnel ventilation on fire behaviour. In: Handbook of Tunnel Fire Safety (2nd edition). ICE Publishing, 2012
54. ██████████, Heat release rates in tunnel fires: a summary. In: Handbook of Tunnel Fire Safety (2nd edition). ICE Publishing, 2012
55. ██████████ A history of fire incidents in tunnels. In: Handbook of Tunnel Fire Safety (2nd edition). ICE Publishing, 2012
56. ██████████ Water-based fire-suppression systems for tunnels. In: Handbook of Tunnel Fire Safety (2nd edition). ICE Publishing, 2012
57. ██████████ “The maximum ceiling gas temperature in a large tunnel fire”. Fire safety journal, 48, 2012, pp. 38-48.
58. RWS, Gebruikershandleiding QRA-tunnels 2.0. RWS Steunpunt Tunnelveiligheid, 2 februari 2012.
59. RWS, QRA-tunnels 2.0 Achtergronddocument. RWS Steunpunt Tunnelveiligheid, 2 februari 2012
60. TNO, “Rijnlandroute: kwantitatieve risicoanalyses van Churchilltunnel en Zoeken naar Balans”, TNO-2012-R10298, d.d. 19 juli 2012.
61. Combiplan Nijverdal, “Tunnel en toeritten, Moot 8; Wapening dak spoor en weg”, Tekening CN-4.1-UO-T-08-104, 1 augustus 2012.

62. Significance, VU University Amsterdam, John Bates Services, “*Value of time and reliability in passenger and freight transport in The Netherlands*” Report for the Ministry of Infrastructure and the Environment. Project 08064, 2012.
63. ROK 1.2, “*Richtlijn Ontwerp Kunstwerk.en ROK 1.2*”, RWS RTD 1001:2013, versie 1.2, 1 januari 2013.
64. [REDACTED] “Fire testing on concrete slabs, for the Avenue A2 project, protected with Aestuvert boards”, Efectisrapport 2012-Efectis-R9348, januari 2013.
65. TNO, “*De statistische kans op brand in tunnels*”, TNO 2012 R11094, d.d. 22 januari 2013.
66. A4all, “Ketheltunnel, Moot 03, wapening dek west as 1-2” Tekening A4DS-K6-TEK-2500, 24 april 2013.
67. RWS, “*Factsheet - Ketheltunnel*”, (Ontvangen van RWS, datum onbekend).
68. A4all, “*Ontwerp Landtunnel; Definitief ontwerp - A4 Delft - Schiedam*”, Document A4DS-K6-OBA-0009, 1 mei 2013.
69. RWS, “*Factsheet - Salland-Twentetunnel*”, (Ontvangen van RWS, datum onbekend).
70. [REDACTED] “*Fire spalling of concrete; Theoretical and experimental studies*”, Proefschrift, KTH, Stockholm, 2013.
71. KiM, “*De maatschappelijke waarde van kortere en betrouwbaardere reistijden*” Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, 2013.
72. RARVW, Regeling aanvullende regels veiligheid wegtunnels (01-07-2013 t/m heden). Geraadpleegd van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0019806/2013-07-01>.
73. Avenue2, “*Berekeningsrapport; Tunnel - Gesloten Deel UO objectnummer I-13219*”, Documentnummer AV2-TP05-BRK-00093, 11 november 2013.
74. BRE, External fire spread: building separation and boundary distances (BR 187). Building Research Establishment, UK, 2014
75. [REDACTED] “*Spalling behaviour of a non-spalling qualified concrete.*”, 4th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, October 8-9, Leipzig, Duitsland, 2015.
76. [REDACTED] Multiple vehicle design fire scenarios in car parking buildings. Doctoral dissertation. University of Canterbury, New Zealand, 2015.
77. [REDACTED] Investigation into the fire in the Heineoordtunnel on 21 May 2014. Efectis Nederland Report 2015-Efectis-R000143, 2015.
78. [REDACTED] “Eerste resultaten aantoonbaarheid afspatongevogelijkheid betonmengsels voor tunnels en aquaducten”, Interne Memo RWS, 20 maart 2017.
79. [REDACTED] “*The spalling mechanism of fire exposed concrete*”, Proefschrift TU Delft, 1 mei 2017.
80. [REDACTED], [REDACTED] “*Spatmechanisme bepalend voor brandveiligheid tunnels; Ontwikkeling EEM-spatmodel voor spatgedrag beton in tunnels in kader van promotieonderzoek*”, Cement 2017-8.
81. [REDACTED], “*Testresultaten RWS Bramen brandproef 1 t/m 6*”, Zes Efectis memoranda, periode 9 februari tot en met 24 maart 2017.
82. RWS, “*Veiligheidsrisico’s van versnelde degradatie van beton bij brand in tunnels*”, Versie 1.33, d.d. 23 mei 2017.
83. RWS, “*Achtergronddocument brandwerendheid tunnels*”, 8 juni 2017.
84. [REDACTED] “*Advies VB inzake maatregelen brandwerendheid tunnels*”, RWS, Veiligheidsbeambte wegtunnels RWS, 27 juli 2017.
85. [REDACTED], Probability of a large fire in a road tunnel Bayesian inference. *Proceedings of the 14th International Probabilistic Workshop*, 05-07/12, Ghent, Belgium, 2017, pp. 123-134

86. ██████████ M.H., Brief van de minister van Infrastructuur en Milieu aan de Tweede Kamer der Staten-Generaal, Tweede kamer, Vergaderjaar 2016-2017, 29 296, nr. 31, 8 augustus 2017.
87. Bijlage bij [86], “*Overzicht van korte termijn operationele afspraken per tunnel*”, augustus 2017.
88. ██████████, “*Juridische analyse brandveiligheid tunnels*” Interne Memo RWS, d.d. 1 september 2017.
89. RWS memo aan Gemeente Maastricht, “*Brandwerendheid KWA tunnel - analyse tijd tot bezwijken en wijze van bezwijken*”, 14 september 2017.
90. ██████████ “*brandwerendheid tunnels - nieuwe inzichten*”, RWS memo, 22 september 2017.
91. Department for Transport. Guidance: Maximum length of vehicles used in Great Britain. <https://www.gov.uk/government/publications/maximum-length-of-vehicles-used-in-great-britain/maximum-length-of-vehicles-used-in-great-britain>, 12 oktober 2017.
92. ██████████ “*Brandwerendheid van beton in tunnels*”. Nota ter informatie aan de Minister, 4 oktober 2017.
93. ██████████ “*Brandwerendheid van beton in tunnels*”. Nota ter informatie aan de Minister, 30 november 2017.
94. ██████████, “*RWS filosofie bescherming constructies tegen brand*”, Interne memo RWS, d.d. 22 februari 2018.
95. ██████████ “*Brandcurven kleinere branden*”, RWS memo 28 maart 2018.
96. E-mailbericht van C.M. Schippers (namens de Landsadvocaat) aan RWS, “*Gaasperdammer-tunnel: begrip ‘instorting (Bouwbesluit 2012)’*”, 7 mei 2018.”
97. ██████████ “*Kwalitatieve beschouwing bezwijkmechanisme tunnel bij brand*”, IXAS memo A9GDW-DOC-12261, 22 mei 2018.
98. ██████████ “*Test results KWA-tunnel for third parties*”, Efectis Memorandum 2018-Efectis-M001919/BTJ/TNL, 16 oktober 2018.
99. Brandweeracademie, Brandoverslag. Handelingsperspectief en literatuuronderzoek. Instituut Fysieke Veiligheid, 2018
100. RWS. Files in tunnels: Wetgeving en beleid, “*facts and figures*” RWS. Kennisplatform tunnelveiligheid. <https://www.kennisplatformtunnelveiligheid.nl/wp-content/uploads/2018/03/files-in-tunnels-Tineke-Wiersma-RWS.pdf>, 2018.
101. ██████████ Prediction of time to ignition in multiple vehicle fire spread experiments. *Fire and Materials*, 42(1), 2018, 69-80.
102. RWS, “*Werkwijzer MKBA bij MIRT-verkenningen*” RWS afdeling Ruimte, Economie en MIRT. 2018.
103. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Kamerbrief over stand van zaken brandwerendheid enkele wegtunnels. RWS-2018/37438, 2018.
104. ██████████ “*Vergelijking eisen brandwerendheid in Bouwbesluit 2012 en RWS-richtlijnen*”, Interne RWS memo, 13 december 2018.
105. ██████████, “*Informatie uit hitteproeven KWA*”, RWS bedrijfsvertrouwelijke memo, datum onbekend.
106. NEN 6069, “*Beproeving en klassering van de brandwerendheid van bouw delen en bouwproducten*”, NEN 6069:2011+A1:2016 nl, 1 februari 2019.
107. BSI. PD 7974-7:2019, Application of fire safety engineering principles to the design of buildings – Part 7: Probabilistic risk assessment. British Standards Institution, UK, 2019.
108. ██████████ “*Hitteproeven Salland-Twentetunnel, 2019, week 30, 31*”. Efectis Rapportnummer 2019-Efectis-R001390, november 2019.

109. [REDACTED] “Hitteproeven 2^{de} Coentunnel 2019, week 20, 21, 27” Efectis Rapportnummer 2019-Efectis-R001436, december 2019.
110. WARVW, Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels (01-01-2020 t/m heden). Geraadpleegd van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0019516/2020-01-01>
111. [REDACTED] “Hitteproeven Ketheltunnel 2019, week 24, 25, 28, 29” Efectis Rapportnummer 2020-Efectis-R001419, januari 2020.
112. [REDACTED] “Evaluatie betononderzoek tunnels; Eindresultaten”, Presentatie van TNO Bouw, 22 januari 2020.
113. [REDACTED] “Voorstel brandveilig maken van Ketheltunnel Schiedam”, Brief aan de gemeente Schiedam, 17 maart 2020.
114. [REDACTED] “Hitteproeven Sijtwendetunnel 2020”, week 22. Efectis Rapportnummer 2020-Efectis-R00xxxx, juni 2020.
115. [REDACTED] “Hitteproeven 2^{de} Beneluxtunnel 2020”, week 26. Efectis Rapportnummer 2020-Efectis-R00xxxx, juli 2020.
116. RWS. Steunpunt Economische Expertise. rwseconomie.nl; 18/08/2020
117. Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat>; 18/08/2020
118. [REDACTED] – Fire In Tunnels: Technical Report – Part 1: Design Fire Scenarios. Thematic Network FIT ‘ Fire in Tunnels ’, 2001
119. RWS. Koning Willem-Alexandertunnel (A2/N2), <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegenoverzicht/a2/koning-willem-alexandertunnel-a2-n2>, geraadpleegd augustus 2020.
120. Agentschap Wegen & Verkeer. Tunneldoseren. <https://wegenverkeer.be/wegen/wegenet/tunneldoseren>, geraadpleegd augustus 2020.
121. CEDR. Safe distance between vehicles. Conference of European Directors of Roads, 2010. https://www.cedr.eu/download/Publications/2010/e_Distance_between_vehicles.pdf
122. Koninklijk besluit van 1 december 1975 houdende algemeen reglement op de politie van het wegverkeer en van het gebruik van de openbare weg. Belgisch Staatsblad 9 december 1975. https://wegcode.be/index.php?option=com_content&view=article&id=176:art18&catid=48:kb-01121975&Itemid=48
123. [REDACTED] report 752. Work Package 2Task 2.3: Evaluation of Current Mitigation Technologies in Existing Tunnels – Final Report. Project No.: GRD1-2001-40739.
124. [REDACTED] Vervuurt, “Brandkromme kleinere branden in tunnels”, Versie TNO-2020-Rxxxxx (v08 - kleinere branden) - conceptconcept 16 juli 2020.

Addendum bij de verkennende studie naar alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding in drie landtunnels

Add. 0 Inleiding

Er waren een aantal redenen om bij het onderhavige rapport van 30 november 2020 een Addendum bij te voegen. In het onderhavige Addendum zijn in de navolgende paragrafen een aantal onderwerpen besproken, waarvoor de volgende redenen kunnen worden genoemd:

- Add. 1 Bij het verwerken van de zeer grote hoeveelheid beschikbare informatie in 2020 bleek dat bij de opstellers van het rapport enige door RWS medewerker [REDACTED] ingebrachte informatie aan de aandacht was ontschoten.
- Add. 2 Hoewel het onderwerp “Personenveiligheid” niet tot het primaire doel van de onderhavige rapportage behoorde, moest wel worden geconstateerd dat daarover weinig informatie beschikbaar was (hoofdstuk 5). Naar aanleiding van onder andere een alsnog ontvangen document uit 2017 [129], wordt daaraan, en ook aan de per landtunnel in 2017 genomen tijdelijke maatregelen, in Add. 2 aandacht besteed.
- Add. 3 Het bleek dat naar aanleiding van de problematiek van de geringere brandwerendheid van tunnels door afspattend beton in 2018 ook al eens is gekeken naar kosten van verschillende scenario’s. In Add. 3 is een daarover indertijd opgestelde, en begin 2021 door ondergetekenden ontvangen, memo besproken.
- Add. 4 Door de afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken (TNK), hetgeen onderdeel is van GPO van RWS, is kritiek op de rapportage geuit [128, 131]. Daar waar het de door ondergetekenden aangehouden uitgangspunten (aannames) betreft, is dat toegelicht in paragraaf Add. 4.
- Add. 5 Een punt van kritiek dat ook is geuit, betreft het feit dat nu voor brand faalkansen worden aangehouden, die niet zouden voldoen aan de algemeen geformuleerde faalkansen, c.q. betrouwbaarheidsniveaus, volgens de constructieve normen (Eurocode 0 - NEN-EN 1990 - en/of NEN 8700). Dit is besproken in Add. 5.
- Add. 6 Naast opmerkingen vanuit de afdeling TNK van RWS is een aantal opmerkingen van andere RWS medewerkers ontvangen, die in Add. 6 zijn opgenomen.
- Add. 7 Dit Addendum wordt besloten met een aantal slotbeschouwingen van ondergetekenden naar aanleiding van de additioneel ontvangen informatie en de geleverde kritieken.

Add. 1 Vast blussysteem Fire Defender

Bij de start van de verkennende studie in juni 2020 heeft [REDACTED] van de Rijkswaterstaat Zuid-Nederland informatie aangeleverd, die bij de verdere uitwerking van de studie over het hoofd was gezien. Dit betrof respectievelijk een RWS document over middellange termijn maatregelen in verband met brandwerendheid bij de KWA-tunnel [129] en productinformatie over een semi stationaire bluswatervoorziening, het Fire Defender systeem. Op de tijdelijke maatregelen in verband met brandwerendheid wordt in Add. 2 teruggekomen. De Fire Defender is een blussysteem waarbij bij brand water via een dikke buis (*bijvoorbeeld* Ø 90 mm) met nozzles in de tunnel wordt gespoten. De buis

kan bijvoorbeeld over de lengte van de tunnel op een barrier aan één zijde van de tunnelbuis worden aangebracht.

In de verkennende studie zijn vaste blussystemen, zoals water mistsystemen en sprinklersystemen op een relatief hoog abstractieniveau beschouwd. De Fire Defender zou naar de mening van ondergetekenden ook als een vast blussysteem kunnen worden gezien. De informatie omtrent vaste blussystemen vervat in internationale wetenschappelijke literatuur kan evenwel niet zondermeer toegepast worden op het type systeem van de Fire Defender. Er is met andere woorden bijkomende data nodig om de betrouwbaarheid en effectiviteit van dit type systeem in te schatten. Het opstellen van dergelijke informatie vraagt een diepgaande studie die niet past binnen het kader van het huidige verkennende onderzoek naar alternatieven voor hittewerende bekleding. Om die reden wordt hier volstaan met het aangeven dat er ook zo'n blussysteem als de Fire Defender bestaat.

Add. 2 Risicoanalyses en tijdelijke maatregelen

Nadat duidelijk was geworden dat het in tunnels toegepaste beton, en daarmee ook de tunnels, een geringere brandwerendheid hebben dan waarvan altijd was uitgegaan, was de eerste primaire vraag of de tunnels in de huidige omstandigheid nog veilig konden worden gebruikt. Op basis van een studie van RWS is in 2017 geconcludeerd dat de vier, na 2008 gebouwde tunnels, al dan niet onder toepassing van tijdelijke maatregelen, veilig kunnen worden gebruikt. Aan ondergetekenden was gevraagd om daar ook een oordeel over te geven. Daarover is gerapporteerd in hoofdstuk 5 "*Personenveiligheid*". Ondergetekenden hadden echter slechts de beschikking over één intern RWS document [82] naast een advies van de Veiligheidsbeambte wegtunnels RWS [84]. Na het verschijnen van het rapport op 30 november 2020 zijn nog enkele documenten onder de aandacht gebracht, waaruit navolgend een aantal zaken met betrekking tot de uitgevoerde risicobeschouwingen en genomen tijdelijke maatregelen naar voren zijn gehaald. Ook hebben ondergetekenden de in 2017 door RWS uitgevoerde risicoanalyse [82] nog eens grondig geanalyseerd. De bevindingen daarbij zijn weergegeven in Bijlage D bij het onderhavige rapport. Samengevat constateerden ondergetekenden daarbij het volgende:

- Bij de Salland-Twente tunnel en de Ketheltunnel waren er geen mitigerende maatregelen nodig in verband met veiligheid van tunnelgebruikers, hulpverleners en mensen op het dak;
- Bij de KWA-tunnel is er een verhoogd risico op slachtoffers en zou ervoor gekozen kunnen worden om mitigerende maatregelen te nemen. Volgens [82] voldoet het risico voor de weggebruikers evenwel ook zonder bijkomende maatregelen aan de WARVW-eis. Opmerkingen hieromtrent zijn in Hoofdstuk 5 van onderhavig rapport weergegeven.

Uit deze notitie [82] was niet bekend of er mitigerende maatregelen zijn getroffen bij de betreffende tunnels en zo ja, welke dat precies waren.

In maart 2021 hebben ondergetekenden een tweetal RWS memo's uit 2017 betreffende risico analyses ontvangen. Document [125] betreft een toelichting op de kwalitatieve risicoanalyse met betrekking tot brandwerendheid van tunnels in algemene zin, waarbij de veiligheid bij de vier, na 2008 gerealiseerde tunnels, is besproken. Document [126] is vergelijkbaar, maar betreft specifiek de situatie bij de Koning Willem-Alexandertunnel. De tunnelveiligheidsbeambte, [REDACTED] heeft aangegeven dat zijn advies in 2017 [84] mede was gebaseerd op deze documenten en de, door de tunnelbeheerders opgestelde, Tunnelveiligheidsdossiers.

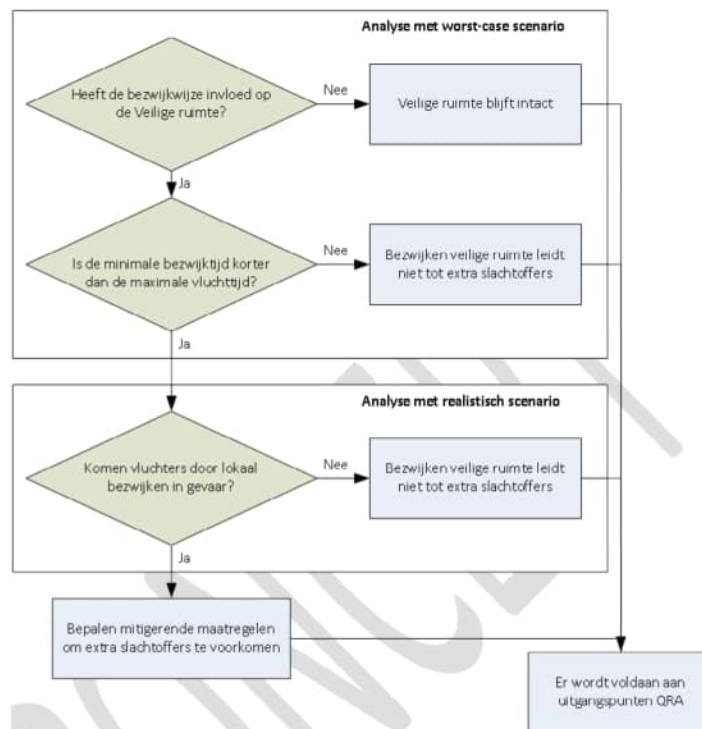
Gezien de inhoud van de genoemde documenten, beiden met als datum 1 september 2017, mag worden aangenomen dat de risicoanalyse, zoals die in [82] is weergegeven en als datum 27 mei 2017 heeft, als basis is gebruikt. Navolgend zijn nog een aantal zaken uit [125] naar voren gehaald.

In de inleiding van [125] is de conclusie weergegeven:

*“De memo is als volgt opgebouwd: eerst is de aanleiding beschreven, gevolgd door de opzet van de analyse (doel, redeneerlijn en aanpak). Daarna zijn de uitkomsten beschreven, met als hoofdconclusie: **in geen van de tunnels is sprake van een extra risico voor vluchters**. Om risico’s voor hulpverleners en mensen op het dak van de tunnel te mitigeren heeft Rijkswaterstaat afspraken gemaakt met hulpverleners en bevoegd gezag. Dit document gaat niet in op juridische gevolgen.”*

Voor de **redeneerlijn en gehanteerde scenario’s** is het volgende aangegeven (zie *figuur Add. 1*):

“Het ontwerp van wegverkeerstunnels is er op gericht dat vluchters in veiligheid zijn wanneer zij de tunnelbuis waarin zich het incident heeft voorgedaan hebben verlaten. Op dat moment bevinden de vluchters zich in het middentunnelkanaal of een andere tunnelbuis (de ‘veilige ruimte’). De veilige ruimte moet voldoende lang blijven functioneren. Een uitgangspunt voor de QRA is daarom dat men veilig is nadat men de vluchtdeur heeft gepasseerd. Met andere woorden: er vallen geen slachtoffers meer voorbij de vluchtdeur.”



figuur Add. 1 De voor de beoordeling van veiligheid gevolgde redeneerlijn met drie stappen [125].

“De gevolgde redeneerlijn kent drie stappen, de uitkomst per stap bepaald of de volgende stap nodig is:

- Stap 1. Als het (lokaal) bezwijken van de tunnelconstructie door de brand geen invloed heeft op het functioneren van de veilige ruimte is er geen invloed op de uitgangspunten van de QRA.*
- Stap 2. Als het (lokaal) bezwijken wel invloed heeft op de veilige ruimte, maar de minimale bezwijktijd is langer dan de maximale vluchttijd uit de tunnel, dan hebben alle vluchters de veilige ruimte kunnen verlaten op het moment van bezwijken van de veilige ruimte. Ook in dit geval wordt aan de uitgangspunten van de QRA voldaan. En er is daarmee geen sprake van extra slachtoffers.*
- Stap 3. Als de minimale bezwijktijd korter is dan de maximale vluchttijd uit de tunnel hebben niet alle vluchters de veilige ruimte kunnen verlaten op het moment van (lokaal) bezwijken. Een analyse wordt dan uitgevoerd om te bepalen of dit betekent dat de vluchters hierdoor in gevaar komen. Als de vluchters niet in gevaar komen vallen geen extra slachtoffers.*

Bij de uitwerking van stappen 1 en 2 wordt een worst-case scenario gehanteerd om snel tot een betrouwbare uitspraak te kunnen komen. Voor stap 3 wordt een meer gedetailleerde analyse uitgevoerd waarbij rekening is gehouden met de tunnelspecifieke situatie.”

De gevolgde **aanpak** is als volgt beschreven:

“Voor stap 1 is met een constructieve beschouwing en conservatieve aannames de bezwijkwijze en de minimale bezwijktijd van de tunnelconstructie bepaald. Hiermee is bepaald of de bezwijkwijze invloed heeft op de veilige ruimte. De resultaten van de constructieve beschouwing en de daarbij gehanteerde uitgangspunten zijn opgenomen in de bijlage. Omdat geen sprake is van een standaard analyse is getoetst of de gedane aannames daadwerkelijk conservatief zijn (TUDelft).

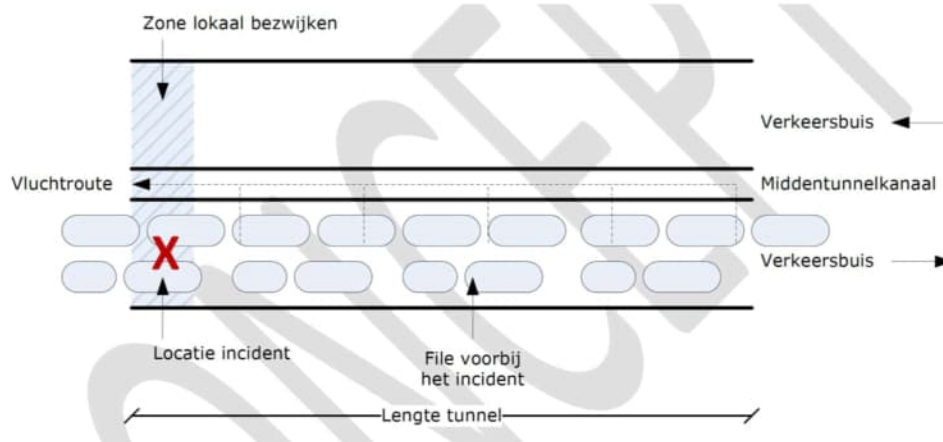
In stap 2 is bepaald wat de maximale vluchttijd van de weggebruikers is. Daarbij is in eerste instantie een te conservatieve aanname gedaan voor de loopsnelheid van de vluchters. De resultaten daarvan zijn gebruikt voor de conclusies die de Minister aan de kamer heeft toegestuurd (RWS-2017/29873). In een verfijningsslag zijn de loopsnelheden uit de QRA gehanteerd. Ook is er nog een correctie doorgevoerd op de lengte van de vluchtweg. Beide uitkomsten zijn opgenomen in deze memo. De invloed op de veiligheid van hulpverleners en mensen op het dak is middels een kwalitatieve redeneerlijn bepaald. De bepaalde vluchttijden en daarbij gehanteerde uitgangspunten zijn opgenomen in de bijlage.

Om te bepalen of de vluchters in gevaar komen door het lokaal bezwijken is in stap 3 bepaald hoe ver de vluchters zich van de locatie van lokaal bezwijken bevinden en wat de resterende vluchttijd is. Vervolgens is met een expert oordeel vastgesteld of

de vluchters na het lokaal bezwijken in rook terecht komen en of de verlichting blijft functioneren.”

Voor de uitwerking van de **stappen 1 en 2** is het volgende aangegeven (zie ook *figuur Add. 2*):

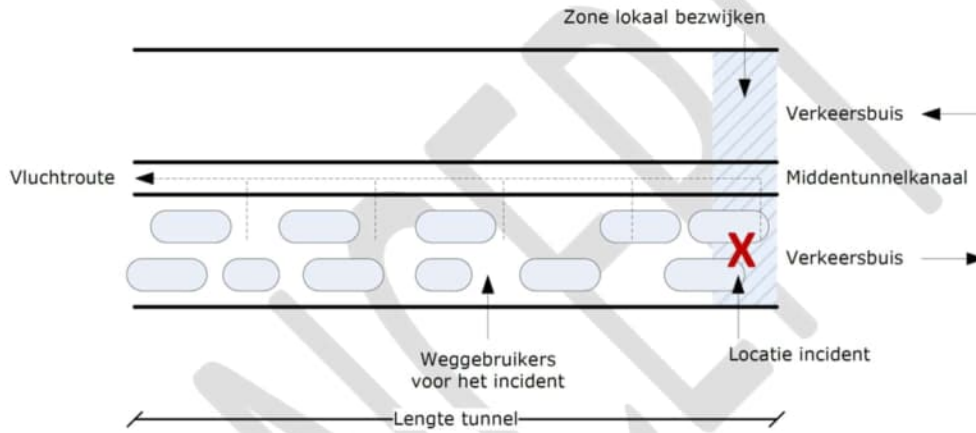
“In het worst-case scenario leidt een incident aan het begin van de tunnel tot een maatgevende brand terwijl er voorbij het incident in de tunnel een file staat. Omdat de vluchtrichting in de veilige ruimte altijd tegen de ventilatierichting in is (om te voorkomen dat de mensen buiten de tunnel opnieuw in de rook komen) passeren de vluchters de locatie van lokaal bezwijken en is langste vluchtroute maximaal (totale tunnallengte). Opgemerkt moet worden dat dit scenario in de praktijk niet kan optreden doordat het tunneldoseringssysteem operationeel is.”



figuur Add. 2 Langste vluchtroute (totale tunnallengte) in het worst-case scenario met brand aan begin van de tunnel en file in de tunnel voor de brandhaard [125].

Voor scenario **stap 3** is het volgende aangegeven (zie ook *figuur Add. 3*):

“Met het instellen van tunneldosering is een mitigerende maatregel getroffen waarmee het optreden van het worst-case scenario wordt voorkomen. Daarom is in stap 3 een scenario geanalyseerd waarbij het tunneldoseringssysteem operationeel is. Hierdoor staat er geen file in de tunnel. De weggebruikers voorbij het incident rijden weg van het incident de tunnel uit (en zijn daarmee in veiligheid) en de weggebruikers voor het incident vluchten de tunnel uit zonder de locatie van de brand te hoeven passeren. De tunnel zal niet geheel volstaan met verkeer doordat deze snel na het incident gesloten wordt. De maximale vluchtlengte wordt hier gevonden als het incident aan het einde van de tunnel plaatsvindt waarbij de vluchtlengte maximaal is.”



figuur Add. 3 In het scenario met tunneldosering is de langste vluchtroute als brand aan het einde van de tunnel optreedt [125].

In Tabel Add. 1 zijn de resultaten voor de drie landtunnels, zoals die in [125] zijn beschreven, door ondergetekenden samengevat weergegeven. Ter toelichting, voor de beoordeling van de **veiligheid van weggebruikers** is het resultaat van stap 1 en 2 in de tabel weergegeven, waarbij het volgende geldt:

- 1+ : Veilige ruimte blijft na lokaal bezwijken als gevolg van incident intact;
- 1- : Veilige ruimte blijft na lokaal bezwijken als gevolg van incident niet intact
- 2+ : de minimale bezwijktijd is langer dan de maximale vluchttijd;
- 2- : de minimale bezwijktijd korter dan de maximale vluchttijd;

Als in de tabel bij **veiligheid hulpverleners** een **A** is aangegeven, dan representeert dat de volgende tekst:

“Door het voortijdig (lokaal) bezwijken hebben hulpverleners minder tijd voor het doen van hun werk. Om risico’s te mitigeren heeft Rijkswaterstaat afspraken gemaakt met hulpverleners en bevoegd gezag zodat het handelen van hulpverleners rekening gehouden kan worden met het bezwijkscenario.”

Als in de tabel bij **veiligheid mensen op dak tunnel** een **B** is aangegeven, dan representeert dat de volgende tekst:

“Het voortijdig (lokaal) bezwijken heeft gevolgen voor de mensen die zich boven de tunnel bevinden. Dit geldt specifiek voor het deel dat lokaal bezwijkt als gevolg van het incident. Het lokaal bezwijken kondigt zich niet vooraf, buiten de tunnel, aan. Om risico’s te mitigeren heeft Rijkswaterstaat afspraken gemaakt met hulpverleners en bevoegd gezag zodat voor het ontruimen van het dak rekening gehouden kan worden met het bezwijkscenario.”

Tabel Add. 1 Resultaten van de veiligheidsbeschouwingen in 2017 [125] voor de drie landtunnels gebouwd na 2008.

	weggebruikers		hulpverleners	mensen op tunneldak
	Resultaat stap 1 en 2	Extra risico?		
Salland-Twentetunnel	1- en 2+	NEE	A	B
Ketheltunnel	1+	NEE	A	B
KWA-tunnel onder buis	1- en 2+	NEE	A*	B
KWA-tunnel boven buis	1- en 2-	Stap 3		
*) Door het voortijdig (lokaal) bezwijken hebben hulpverleners minder tijd voor het doen van hun werk. Op het moment van lokaal bezwijken zijn alle vluchters op een afstand van ruim 1.100 meter van de locatie van lokaal bezwijken.				

Voor de **KWA-tunnelbuis boven** is een nadere analyse uitgevoerd (**stap 3**) om te bepalen of de vluchters in gevaar komen. Daarover is het volgende gerapporteerd:

Bepalende factoren bij de vraag of de vluchters die zich in tunnel bevinden op het moment van lokaal bezwijken gevaar lopen zijn:

- Afstand tot lokaal bezwijken en resterende vluchttijd
- Komen de vluchters terecht in de rook?
- Blijft de verlichting in de vluchtweg functioneren?

In deze analyse kijken we gedetailleerder naar de af te leggen vluchtweg. De maximale vluchtlengte door het middentunnelkanaal is gelegen tussen de eerste vluchteur aan de ene zijde en de kopdeur aan de andere zijde.

Voor de N2 Westbuis is dat 1.960 meter en voor de N2 Oostbuis is dat 1.770 meter. Op het moment van bezwijken hebben de vluchters tenminste ruim 1.100 meter afgelegd in het middentunnelkanaal. Dat wil zeggen dat een deel van de vluchters de tunnel heeft verlaten en dat ook de laatste vluchter zich op het moment van bezwijken zeker voorbij het midden van de tunnel bevindt. De laatste vluchter moet dan nog bijna 800 meter (Westbuis) afleggen en heeft hiervoor circa 13 minuten nodig.

Wat betreft de verlichting is het ontwerp en de uitvoering van de KWA-tunnel zodanig dat bij lokaal bezwijken, in de helft van de tunnel waar geen bezwijken plaatsvindt de verlichting zowel in het MTK als in de verkeersbuis daarna nog tenminste 30 minuten blijft functioneren. Dit is tevens de helft waarheen de vluchters zich begeven en daarmee blijven zij in een verlichte vluchtruimte.

Het oordeel van onze experts is dat de rook na lokaal bezwijken (en uitval van de ventilatie) in eerste instantie door de massastraagheid van de lucht nog zal worden afgevoerd in de ventilatierichting (rijrichting) en daarna grotendeels zal worden afgevoerd via de door het bezwijken ontstane opening in het dak. Het eventuele indringen van rook in het middentunnelkanaal zal niet leiden tot een gevaar voor de vluchters, die in het middentunnelkanaal immers al geruime afstand verwijderd zijn van de incidentlocatie.

Op basis van deze gegevens is het oordeel dat de vluchters in de bovenbuis niet in gevaar komen en er dus geen extra slachtoffers vallen. Hiermee is vastgesteld dat er in de bovenbuis van de Koning Willem-Alexandertunnel geen extra risico is voor weggebruikers.”

Tot slot hebben ondergetekenden in *figuur Add. 4* een in kaders geplaatste tekst uit [125] met betrekking tot respectievelijk de maatgevende brand en file in de tunnel overgenomen.

Maatgevende brand

Een maatgevende brand zou kunnen ontstaan bij een incident met een vrachtwagen geladen met zeer brandbare materialen. De kans op een grote vrachtwagenbrand is zeer klein. Er is sinds 1942 tweemaal een relatief grote brand voorgekomen in tunnels in Nederland. In de Velsertunnel in 1978 en in de Heinenoordtunnel in 2014, beide met een intensiteit van orde grootte 50 megawatt (MW).

De laboratoriumtest die in februari dit jaar is uitgevoerd betrof een simulatie van een brand volgens de RWS-brandkromme, die overeen komt met een brand met een vermogen van 200MW, dus een intensiteit die 4 keer groter is dan bovengenoemde branden. Zelfs de brand in de Mont Blanc tunnel (1999) die mede aanleiding gaf tot nieuwe Europese regelgeving in 2004 kende niet een dergelijke intensiteit (150 MW).

File in de tunnel

QRA-technisch is er sprake van een file als het verkeer langzamer rijdt dan 25 km/u. Als het verkeer 25 km/u rijdt of harder, dan kan men voorbij een brand de tunnel rookvrij verlaten, omdat men sneller is dan de in de rijrichting geventileerde rook; kort gezegd wordt men dan niet ingehaald door de rook.

figuur Add. 4 Fragment uit [125].

Samengevat kan worden gesteld dat met de aanvullende, in deze paragraaf besproken, informatie een goed beeld is verkregen over hoe in 2017 de veiligheid bij de drie onderhavige landtunnels is beoordeeld. Daar waar dat bij het opstellen van hoofdstuk 5 nog relatief beperkt was. Op basis van de analyses is in 2017 geconcludeerd dat bij de drie landtunnels er geen extra risico is voor de weggebruikers en aangenomen mag worden dat dat nog steeds zo is. Met betrekking tot risico's voor hulpverleners en voor mensen boven op de tunnel heeft Rijkswaterstaat afspraken gemaakt met hulpverleners en bevoegd gezag, zodat bij zowel het handelen van hulpverleners als het ontruimen van het dak, rekening gehouden kan worden met het bezwijkscenario.

Add. 3 In 2018 uitgevoerde kostenanalyse

Begin 2021 hebben ondergetekenden een intern RWS document uit 2018 ontvangen, waarin is gerapporteerd over kosten van verschillende maatregelen in verband met brandwerendheid bij recentere tunnels [127]. Van de opsteller van het document, dhr. ████████, die in 2018 onder andere als kostenadviseur brandwerendheidsproblematiek bestaande tunnels werkzaam was bij RWS, is begrepen dat het document indertijd is besproken in het team dat zich bezig hield met de brandwerendheid van 'verdachte' bestaande tunnels, maar dat het niet formeel is vastgesteld of geaccepteerd.

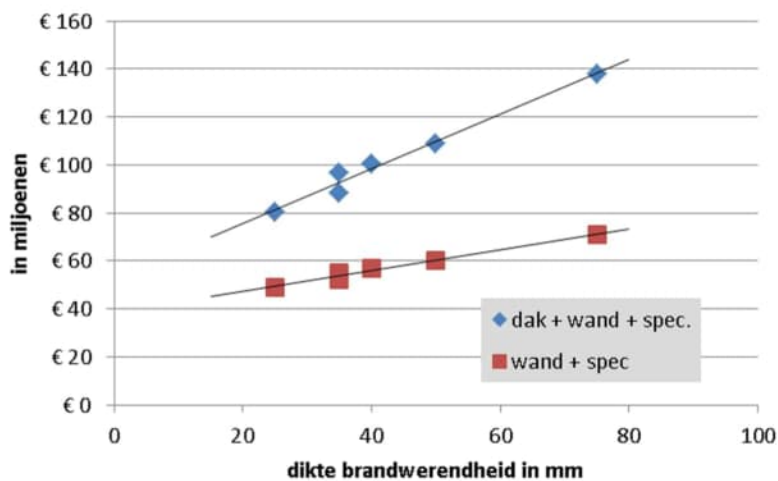
Hoewel de betreffende studie qua opzet en diepgang niet direct te vergelijken is met de onderhavige verkennende studie, is er wel sprake van een vergelijkbare achterliggende doelstelling. Omdat er in de gepresenteerde resultaten een aantal interessante zaken zijn waar te nemen, is een aantal van die

resultaten navolgend opgenomen. De aanleiding voor de in 2018 uitgevoerde studie betrof ook de aantoonbaarheid van voldoende brandwerendheid van de tunnels, gegeven het nieuwe inzicht over het spatgedrag van het toegepaste beton. Ten tijde van het uitvoeren van de betreffende studie was snelle besluitvorming over wat gedaan moest worden, belangrijk omdat de Gaasperdammertunnel, waar dezelfde problematiek speelde, op dat moment bijna klaar was. In de inleiding van [127] is het volgende aangegeven:

“De problematiek van aantoonbaarheid brandwerendheid recente RWS tunnels heeft mogelijk consequenties voor tijd en geld. Omdat er snelheid gewenst is met name irt de Gaasperdammertunnel is tijdige (richtinggevende) besluitvorming gewenst. Vanuit eerste analyses zijn verschillende maatregelen benoemd welke financiële effecten hebben en een impact op de niet beschikbaarheid van een tunnelbuis of tunnel. Vooruitlopend op de werkelijke al dan niet noodzakelijke maatregelen is inzicht wenselijk en een doorkijk naar de effecten naar de andere tunnels noodzakelijk.”

In de studie [127] heeft dhr. [REDACTED] voor vijf tunnels gekeken naar de kosten voor vier verschillende scenario's. Dit betreft naast de drie landtunnels, die ook in het onderhavige rapport zijn beschouwd, de 2^e Coentunnel en de Gaasperdammertunnel. Alvorens op de vier onderscheiden scenario's in te gaan, wordt erop gewezen dat, anders dan in het onderhavige rapport, ook is gekeken naar tunnel technische installaties (TTI's). Daarvoor is gebruik gemaakt van informatie van IXAS, die op basis van een uitgebreide inventarisatie voor de Gaasperdammertunnel had vastgesteld dat er ca. 10.000 items aan/op plafond en wand aanwezig zijn, waarvan overigens 2/3 deel klein is en verlichting betreft.

Voor de Gaasperdammertunnel zijn de investeringskosten, die gemoeid zijn met het aanbrengen van hittewerende bekleding, beschouwd. Daarbij bleek dat als alle wanden en plafonds (*respectievelijk 50 mm en 25 mm HWB*) worden aangepakt, 15% tot 25% van de kosten zitten in maatregelen rond specials en voegen. Met specials worden in [127] de TTI onderdelen bedoeld. Onder verwijzing naar de grafiek, zoals die in *figuur Add. 5* is opgenomen, is gesteld dat de investeringskosten voor de brandbeschermende maatregelen tussen de 50 miljoen en een bedrag boven de 100 miljoen euro zijn.



figuur Add. 5 Investeringskosten (begroot) aanbrengen HWB in de Gaasperdammertunnel als functie van dikte [127].

De Gaasperdammertunnel bestaat uit vijf naast elkaar gelegen verkeersbuizen met in totaal elf verkeersstroken (*totale breedte is 73 m*) en een lengte van 3 kilometer [132]. Op basis van deze informatie betekent dit dat een totale investering van respectievelijk M€ 100 (*dak plus wanden*) overeenkomt met kosten van ca. M€ 7 per km tunnelbuis.

De investeringsgegevens voor de Gaasperdammertunnel zijn gebruikt voor de kostenberekeningen voor de vier bestaande tunnels, rekening houdende met de afmetingen van het dak en de wanden en al genomen maatregelen per tunnel (*figuur Add. 6*).

	Oppervlak dak	Maatregelen brandwerendheid dak	Oppervlak wanden	Maatregelen brandwerendheid wanden
Gaasperdammertunnel	180.000 m ²	nihil	120.000 m ²	nihil
Koning Willem Alexander	88.000 m ²	35 mm	74.000 m ²	Bovenste meter 35 mm
Sallantunnel	9.000 m ²	Niks	8.000 m ²	niks
2 ^e Coentunnel (water)	21.000 m ²	35 mm	12.000 m ²	PP- vezels + bovenste meter 35 mm.
Ketheltunnel	65.000 m ²	nihil	32.000 m ²	PP -vezels

figuur Add. 6 Investeringskosten (begroot) aanbrengen HWB in de Gaasperdammertunnel als functie van dikte [127].

Voor vier scenario's van maatregelen, welke een (aanvullende) mate van brandwerendheid hebben, zijn de kostenconsequenties bepaald. De vier scenario's zijn als volgt beschreven:

Scenario 1: Volledige doorsnede krijgt 50 mm bekleding op wanden en dak. Specials (*TTI onderdelen*) worden aangepakt door demontage/montage, inpakken o.i.d. (*ook wel 99,9% scenario genoemd*);

Scenario 2: Als scenario 1, maar grote en middelgrote specials (*ventilatoren, hulpposten etc.*) worden niet aangeroerd (*ook wel 95% scenario genoemd; grote specials <5% van oppervlak*);

Scenario 3: Alleen de meest risicovolle onderdelen worden voorzien van aanvullende bekleding c.q. diktes geoptimaliseerd naar locatie en risico/doel. Specials niet aanraken, (*inschatting 50% van oppervlak*);

Scenario 4: Geen aanvullende maatregelen.

De scenario's 1 en 4 kunnen worden gezien als overeenkomend met respectievelijk HWB aanbrengen en "de huidige situatie zo laten" in het onderhavige rapport. Scenario's 3 en 4 zitten daar tussenin.

Voor de schade bij extreme brand is een inschatting gemaakt van de kosten van een verwachte schade bij de 200MW brand. Daarbij is voor de landtunnels als uitgangspunt aangehouden dat het dak over een deel van de lengte van de tunnelbuis instort en moet worden hersteld, waarbij andere tunnelbuizen constructief intact blijven. Voor de TTI is gerekend met volledige vervanging van 2 km buis. Alleen bij de Gaasperdammertunnel betekent dit dat de TTI niet in de gehele tunnelbuis vervangen hoeft te worden. Als een belangrijk verschil tussen de schade bij de watertunnel (2^e Coentunnel) en de landtunnels is er op gewezen dat bij een dergelijke calamiteit (200 MW brand) een gat in het dak betekent dat niet alleen 1 tunnelbuis zwaar wordt beschadigd, maar dat de gehele tunnel verloren is.

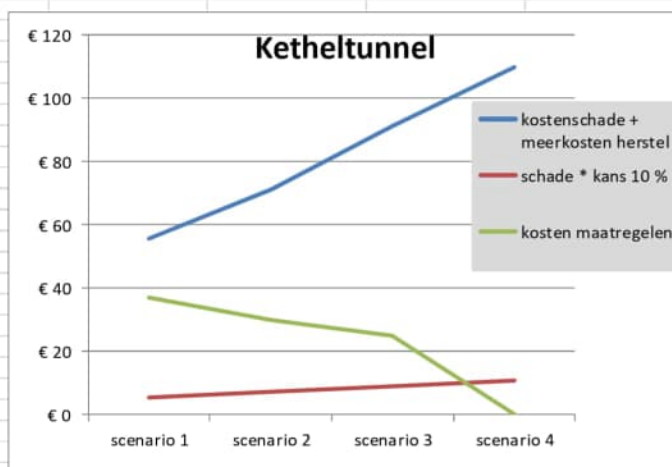
Naar de mening van ondergetekenden is de door dhr. [redacted] aangehouden schade voor een zware brand, zijnde het instorten van het dak over een deel van de lengte van de tunnelbuis, bij benadering

in lijn met hetgeen in het onderhavige rapport is aangehouden. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat naar de mening van ondergetekenden een heat release rate (HRR) van 200 MW onvoldoende informatie bevat om de brandintensiteit te bepalen. In het onderhavige rapport is daarom gebruik gemaakt van de HRR in combinatie met de total heat released THR, waarbij die samen zijn omgevoerd naar equivalente RWS-brandduur.

Voor de vijf beschouwde tunnels is een overzicht gemaakt van de kosten. Ter illustratie is navolgend het resultaat voor de Ketheltunnel in *figuur Add. 7* getoond en navolgend besproken:

- Uitgegaan is van een 200 MW brandintensiteit;
- In de vier kolommen is de situatie voor de vier scenario's beschouwd;
- De bovenste rijen hebben te maken met veiligheid, waar hier verder niet op ingegaan wordt;

globale impact overzicht scenario's	26-1-2018			
Ketheltunnel	scenario 1	scenario 2	scenario 3 meest risicovolle onderdelen bekleed 50%	scenario 4 niks aanvullend 0%
200 MW veilig vluchten ten allen tijde	max bekleed 100%	max bekleed 95%		
weggebruikers	+	+	+, ? MTK wand	+, ? MTK wand
omwonenden	+	+	+ versneld ontruimen	+ versneld ontruimen
hulpdiensten	nvt	nvt	nvt	nvt
constructieverlies (1 buis)	0%	10%	25%	35%
TTI verlies (1 buis)	100%	100%	100%	100%
tunnelbuis niet beschikbaar [mnd] 2 mio/mnd	12	14	16	20
opruimen, schoonmaken, slopen en herstel extra kosten	€ 8	€ 10	€ 12	€ 13
kostenschade + meerkosten herstel	€ 56	€ 71	€ 92	€ 110
schade * kans 10 %	€ 5,6	€ 7,1	€ 9,2	€ 11,0
kosten maatregelen	€ 37	€ 30	€ 25	€ -
realisatietijd maatregelen [mnd]	18	14	10	0
beschikbare tijd [mnd]	0	0	0	0
extra Instandhouding omleiding [0,5/ mnd]	€ 9	€ 7	€ 5	€ -
maatschappelijke investering / schade kosten/baten constructie	83% 117%	52% 73%	33% 45%	0% 0%



figuur Add. 7 Kosten van brandbeschermende maatregel en kosten van herstel na 200 MW brand voor de vier onderscheiden scenario's [127].

- De kosten van verlies van de constructie (*schade aan één tunnelbuis*) na de brand is nul bij HWB (*scenario 1*) en M€ 34 bij niets doen (*scenario 4*);
- De kosten voor herstel van TTI is geraamd op M€ 32, ongeacht welk scenario;
- Voor niet-beschikbaarheid van de tunnel na de brand is uitgegaan van 12 maanden bij HWB (*scenario 1*) en 20 maanden bij niets doen (*scenario 4*), hetgeen, uitgaande van M€ 2 per maand, overeenkomt met respectievelijk M€ 24 en M€ 40;
- Met nog enige kosten voor opruimen en schoonmaken, komen de totale kosten na een 200 MW brand op M€ 56 in het geval de tunnel alsnog wordt voorzien van HWB en op M€ 110 als de huidige situatie wordt gehandhaafd;
- Kosten van het realiseren van de brandbeschermende maatregelen is vanzelfsprekend nul bij scenario 4 en is voor HWB geraamd op M€ 37;
- Voor realisatie van de maatregelen is bij HWB 18 maanden begroot, waarvoor geldt dat niet bekend is of daar ook nog kosten van niet-beschikbaarheid bij zouden moeten komen, dan wel dat dit al in de geraamde M€ 37 zit;
- Voor omleidingen is voor het aanbrengen van HWB nog wel een bedrag van M€ 9 aangegeven.

In de in *figuur Add. 8* opgenomen grafiek is te zien dat voor de optie van aanbrengen HWB (*scenario 1*) geldt dat de realisatiekosten M€ 37 zijn en dat er na een 200 MW brand een schade is begroot van M€ 56. Voor het scenario 4, “geen maatregelen en de huidige situatie zo laten”, zijn de kosten van maatregelen vanzelfsprekend gelijk aan nul en is voor schade na een 200 MW brand M€ 110 begroot. Dat is opgebouwd uit M€ 34 voor herstel van de tunnelconstructie, M€ 32 voor herstel TTI, zoals dat voor alle scenario’s geldt, en M€ 40 niet-beschikbaarheid.

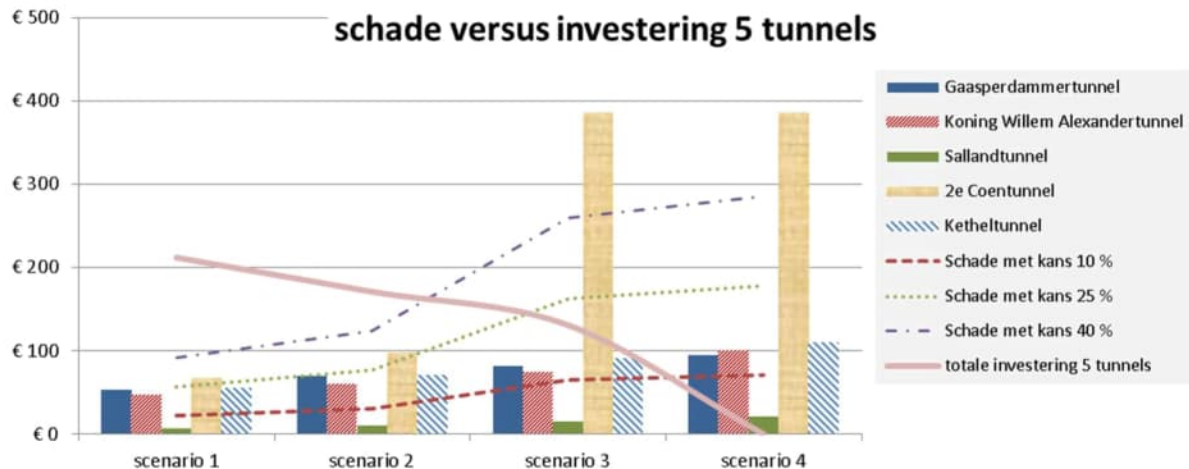
Met betrekking tot kansen op branden is in [127] het volgende aangegeven:

“De kans op de 200MW is echter aanzienlijk kleiner dan de 100MW en 50MW. (zie QRA). Vanuit kosten is maatgevender om de financiële afweging te maken bij een hogere kans dan de 200MW (bv. 100 MW) en hierbij de schade beperkt te houden.”

Om in de berekening ook de kans op het optreden van een 200 MW brand te verwerken (*en naar interpretatie van ondergetekenden, om mogelijk ook rekening te houden met de noodzakelijke verrekening in de tijd*), is voor de schade na een tunnelbrand 10% van de voor een 200 MW tunnelbrand begrote schade aangehouden. Als voor die cijfers wordt gekeken naar het verschil tussen aanbrengen HWB en niets doen, dan volgt daaruit het volgende. Aanbrengen HWB kost M€ 37 en de schade na een brand is dan M€ 5,6. Niets doen kost niets aan maatregelen en de schade na een brand is M€ 11.

Het voorgaande geldt voor alleen de Ketheltunnel. Als de vijf tunnels bij elkaar worden beschouwd, dan is daarvoor in [127] een figuur opgenomen, die navolgend is weergegeven in *figuur Add. 8*. Per scenario is met de vijf kolommen de schade in miljoen euro na een 200 MW brand weergegeven.

Als in alle vijf de tunnels HWB wordt aangebracht, is de totale investering iets boven de M€ 200. Als voor de schade door brand dan wordt gerekend met een 200 MW brand en een kans van 40 %, dan is in het geval dat HWB is aangebracht, de schade nog steeds bijna M€ 100. Bij het scenario 3 en 4 neemt de schade na brand significant toe omdat voor die scenario’s voor de 2^e Coentunnel (*tunnel onder open water*) is gerekend met verlies van de gehele tunnelbuis.



figuur Add. 8 Berekende schade en investeringskosten voor de vijf beschouwde tunnels en de vier onderscheiden scenario's voor te nemen maatregelen [127].

Met betrekking tot maatschappelijke kosten is in [127] het volgende aangegeven:

“Naast de schade en herstelkosten van de tunnel(buis) kan ook gerekend worden met maatschappelijke kosten dmv. Voertuigverliesuren.

Op basis van financiële effecten versnelling A1A6 Muiderberg is een inschatting gemaakt per tunnel.

Identiek zijn de maatschappelijke kosten ingeschat van afsluitingen voor het nemen van aanvullende maatregelen. Met name als ‘specials’ aangeraakt worden (scenario 1 & 2) zijn de maatschappelijke effecten groot (langdurige afsluiting van een gehele tunnelbuis; demontage TTI, opnieuw integraal testen).

Als om de TTI heen gegaan kan worden hoeft er geen lange afsluiting van een buis te zijn, maar zijn ook meerdere kortere periodes. Waarbij het totaal aanzienlijk korter is.”

Ondergetekenden meenden er om de volgende redenen goed aan te doen het RWS document uit 2018 [127] relatief uitvoerig te bespreken:

- Over uitgangspunten m.b.t. te verwachten schade na een brand en te maken kosten in verband met herstel (zowel qua constructie als kosten door niet-beschikbaarheid van de tunnel) kunnen meningen sterk verschillen (zie ook Add. 4) en harde gegevens zijn niet voor handen. Met [127] is ook de mening van een RWS medewerker in 2018 beschikbaar. Qua orde van grootte kan worden gezien in hoeverre de uitgangspunten in [127] verschillen met die welke in het onderhavige rapport zijn aangehouden.
- De studie in [127] heeft ook kosten met betrekking tot TTI's beschouwd, hetgeen niet onbelangrijk blijkt te zijn in de beoordeling van de voorliggende vragen over kosten van alternatieven.

De in [127] beschikbare info betreft screenshots van een excelberekening. Het is daarom niet steeds mogelijk om met zekerheid de onderlinge relatie van cijfers vast te stellen (bijvoorbeeld om na te gaan of de kosten van opruimen al dan niet vervat zijn in de kosten van schade en herstel). Met dit

als gegeven merken ondergetekenden met betrekking tot overeenkomsten en verschillen tussen de onderhavige studie en die in [127] het volgende op:

- Zoals voorgaand ook al is opgemerkt, is de aangehouden schade door een zware brand, gegeven ook de globale vorm van beschrijving die hiervoor in beide studies is aangehouden, niet veel verschillend van elkaar. In het RWS document wordt hierbij gewag gemaakt van een 200 MW brand. In het onderhavige rapport wordt verder rekening gehouden met de totaal aanwezige brandlast (dat wil zeggen de RWS-duur van de brand).
- In de onderhavige studie is het tijdsaspect in de kosten-batenanalyse expliciet meegenomen. In de studie [127] lijkt dit via een “kans” verrekend te zijn.
- Uitgaande van een lengte van 2 km van de Ketheltunnel en 2 buizen, is in de onderhavige studie een bedrag van M€ 36 aangehouden voor het aanbrengen van HWB en een niet-beschikbaarheid van 6 maanden (*Tabel 17*), daar waar dat M€ 37 was in de studie van [127], terwijl daarin voor niet-beschikbaarheid 12 maand is aangegeven. Voor instandhouden omleiding is tevens M€ 9 aangegeven, uitgaande van 0,5 M€ maand, hetgeen duidt op een tijdsduur van 18 maanden voor de omleiding.
- In de onderhavige studie is voor schadeklasse D M€ 20 aangehouden voor directe schade (*2 tunnelmoten*) en M€ 90 in verband met niet-beschikbaarheid (*drie maanden*) (*Tabel 21*). In de studie van [127] wordt voor de kosten van schade en de meerkosten van herstel en opruimen M€ 110-123 voorzien.

Ondergetekenden realiseren zich dat het mogelijk is dat dhr. [REDACTED] en ondergetekenden dezelfde bronnen kunnen hebben gebruikt, maar vooralsnog kan worden gesteld dat, gegeven de het ontbreken van gedetailleerde informatie de orde van grootte van kosten, zoals aangehouden door dhr. [REDACTED] [127] en ondergetekenden in de onderhavige studie niet enorm verschillen.

Samengevat menen ondergetekenden dat in het, na afronding van de onderhavige verkennende studie ontvangen, document van [REDACTED] [127] bevindingen zijn gerapporteerd die op hoofdlijnen in dezelfde richting wijzen als de bevindingen in het onderhavige rapport van ondergetekenden. Aanvullend geeft de studie van [REDACTED] aan dat de kosten van herstel van TTI's, die er ook zijn als de tunnels worden bekleed met HWB, significant kunnen zijn en zelfs in dezelfde orde van grootte kunnen zijn als de kosten van herstel van de tunnelconstructie.

Add. 4 Uitgangspunten voor schade en kosten [128,131]

Het uitvoeren van de verkennende studie en het opstellen van het onderhavige rapport is begeleid door een project team met vertegenwoordigers van RWS:

- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

Op de laatste conceptversie van het rapport, d.d. 8 oktober 2020, zijn opmerkingen en vragen van een aantal RWS medewerkers ontvangen. Ondergetekenden hebben deze opmerkingen en vragen gebundeld en per item aangegeven wat de reactie erop is [130]. Daarbij is aangegeven of het in het definitieve rapport is verwerkt, hoe dat is gedaan, en zo niet, waarom niet.

De wijze waarop het ontvangen commentaar is verwerkt, was voor een aantal RWS medewerkers niet bevredigend. Daarop heeft dhr. [REDACTED] een memo, d.d. 19 januari 2021 [128], geschreven, waarin diverse discussiepunten met betrekking tot de onderhavige rapportage zijn benoemd en toegelicht. De betreffende memo is integraal als bijlage E bij dit rapport opgenomen.

In maart 2021 heeft dhr. [REDACTED] in een interne RWS memo [131] binnen RWS voorgesteld om als vervolg op de onderhavige verkennende studie een aanvullend landtunnel specifiek onderzoek uit te laten voeren. De afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken (TNK) heeft aangegeven het met de, in de betreffende memo voorgestelde richting, niet eens te zijn. Dat is verwoord in een bijlage welke bij de memo van dhr. [REDACTED] is bijgevoegd. In Bijlage F bij dit rapport is de memo met bijlage [131] integraal opgenomen.

Met het onderhavige rapport hebben ondergetekenden getracht om zo volledig mogelijk beschikbare relevante informatie met betrekking tot brand en tunnels bij elkaar te brengen. Voor wat betreft de uitgevoerde kostenberekeningen is ervoor gekozen om op basis van de, voor de onderzoekers beschikbare informatie, keuzes te maken voor de vele invoerparameters. En zoals is aangegeven, is er voor de meeste invoerparameters geen harde informatie beschikbaar. Vanzelfsprekend kan er discussie zijn over de gedane aannames. Na een conceptrapportage in oktober 2020 is een veelheid aan parameter-wijzigingen voorgesteld. Het was niet wenselijk om een veelheid aan situaties na te rekenen en in het rapport te verwerken. In het rapport wordt reeds aangegeven dat de resultaten robuust zijn met betrekking tot wijzigingen in de aangenomen waarde voor individuele parameters. In het navolgende (*Addendum 7*) is nog wel het resultaat van de berekening van één enkele, nader omschreven case, weergegeven.

Bij een vervolgstudie, waarbij de situatie voor een specifieke tunnel nader wordt onderzocht, kan van nieuwe informatie gebruik worden gemaakt. Medewerkers van de afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken (TNK) zijn van mening dat het niet gaat om één of enkele parameters die niet goed zijn ingeschat, maar om vele parameters, terwijl naar hun mening al die parameters vrijwel allemaal in één richting te gunstig zijn aangenomen, waardoor de hoofdconclusie van het rapport niet juist is. Met dat gegeven menen de onderzoekers dat het voor de inzichtelijkheid van de verschillen van mening het beste is om beide meningen zo volledig mogelijk in dit rapport te laten zien. Dat is gedaan door het originele eindrapport van november 2020 intact te laten en door in het Addendum met bijlagen zo volledig mogelijk het standpunt van TNK te laten zien. Om die reden zijn de documenten [128] en [131] integraal in respectievelijk de bijlagen E en F opgenomen. Navolgend zijn de belangrijkste zaken daaruit ook nog nader besproken.

Memo van [REDACTED], d.d. 19 januari 2021 [128]

Gesteld is dat in het onderhavige rapport met de verkennende studie voor de drie landtunnels in de conclusies een andere weergave van de effectiviteit van de beschouwde varianten is weergegeven dan wat het zou moeten zijn. In de memo is toegelicht waardoor dat met name wordt veroorzaakt. Daarmee wordt duidelijk gemaakt waar de verschillen in inzichten zitten tussen ondergetekenden en de reviewers van het rapport.

Een door ondergetekenden opgestelde korte samenvatting van de in de memo [128] is hieronder weergegeven. Hierbij moet opgemerkt worden dat factoren in bijvoorbeeld de onbeschikbaarheidsduur of omvang van de schade na brand binnen de MKBA verrekend worden, en dat dergelijke factoren niet rechtstreeks schalen in het eindresultaat. Zie in verband met de schaling sectie 16.7.2 van het rapport.

Bepalen van de effectiviteit van maatregelen

- Een berekening van de kosteneffectiviteit van alternatieven voor HWB is simpel.
- Het ingewikkelde zit in de data die je daar voor nodig hebt:
“In werkelijkheid heb je te maken met een groot aantal kleine branden die weinig schade veroorzaken en een klein aantal branden die een grote schade veroorzaken. Hoe groot die schade dan precies is, daarover is weinig bekend. De tijd die het kost om een tunnel weer te herstellen? Ook daarover is weinig bekend. Voor al deze zaken moeten aannames gedaan worden.”

De kans op schade bij brand.

- Uit brandproeven en constructieve analyses blijkt dat een tunnelmoot 25-30 minuten na het begin van de brand instort en dit is veel slechter dan wat in het rapport is aangehouden en dit verschil heeft een hele grote impact op de uitgevoerde kosten baten analyse.
- Alleen al door het verschil in de aanname voor de kans op schade bij een brand ontstaat een fout van een factor 25 in de berekening.
- Als aangenomen wordt dat branden vanaf 50 MW tot het instorten van een tunnelmoot kunnen leiden, wat volgens recentere onderzoeken gerechtvaardigd lijkt te zijn, is de kans dat een tunnelmoot bezwijkt bij brand ongeveer 50 keer zo groot als de kans die in het rapport is aangehouden.

De kosten van het nemen van maatregelen

- Er is weinig informatie bekend over de kosten van aanbrengen van HWB in een bestaande tunnel bekend.
- Er zijn slechts de conservatieve schattingen die gemaakt zijn voor een budgetreservering aan de minister en bekende kosten voor het bekleden van de Gaasperdammertunnel zijn niet bruikbaar.
- De directe kosten voor het aanbrengen van HWB zijn ongeveer € 150,- per m², wat neerkomt op ongeveer M€ 3 per km tunnelbuis, daar waar in het rapport is gerekend met M€ 9 per km tunnelbuis.
- Kosten van niet beschikbaarheid in verband met aanbrengen HWB kunnen aanzienlijk minder zijn dan de aangehouden M€ 1 per dag per km tunnelbuis, door de niet beschikbaarheid in dal uren, weekenden of verkeersluwe vakantieperioden te plannen, aangevuld met bereikbaarheidsmaatregelen en informatiecampagnes.

Herstel van de tunnel na brand:

- Ook voor herstel van de tunnel na brand wordt uitgegaan van optimistische herstelkosten en hersteltijd, gebaseerd op een ideale situatie die je alleen op een bouwplaats en met jaren voorbereidingstijd kunt bereiken.
- Als onder grote tijdsdruk en onder niet ideale omstandigheden, zonder enige voorbereiding, plotseling 1 of 2 tunnelmooten moeten worden herbouwd en alle installaties in het betreffende deel opnieuw moet worden aangelegd en getest gaat dat minder efficiënt dan bij een nieuwbouwproject.
- Alles bij elkaar zorgt de positieve inschatting ervoor dat de initiële grote fout van een factor 25, dan wel 50 nog een factor 2 tot 4 keer zo groot wordt. Dus oploopt tot een factor 50 - 100 of een factor 100 - 200, afhankelijk van welk uitgangspunt aangehouden wordt.

De juiste cijfers voor de juiste berekening

- Gesteld is dat de MKBA bedoeld was om vanuit een asset management gedachte te beoordelen of andere maatregelen dan hittewerende bekleding een vergelijkbare of betere bescherming konden bieden tegen lagere kosten.
- Verder is gesteld dat de onderzoekers een nieuwe variant in hun onderzoek hebben geïntroduceerd, namelijk geen brandwerende maatregelen treffen.
- Er is kritiek op wat is gesteld m.b.t. de veiligheidsbeschouwingen en aangegeven dat de tunnelwet voorschrijft welke methode gebruikt moet worden, waarbij de kans op brand ongeveer een factor 10 hoger ligt dan wat in het onderzoeksrapport is gebruikt.

Bijlage bij memo van [REDACTED] [131] met visie van afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken

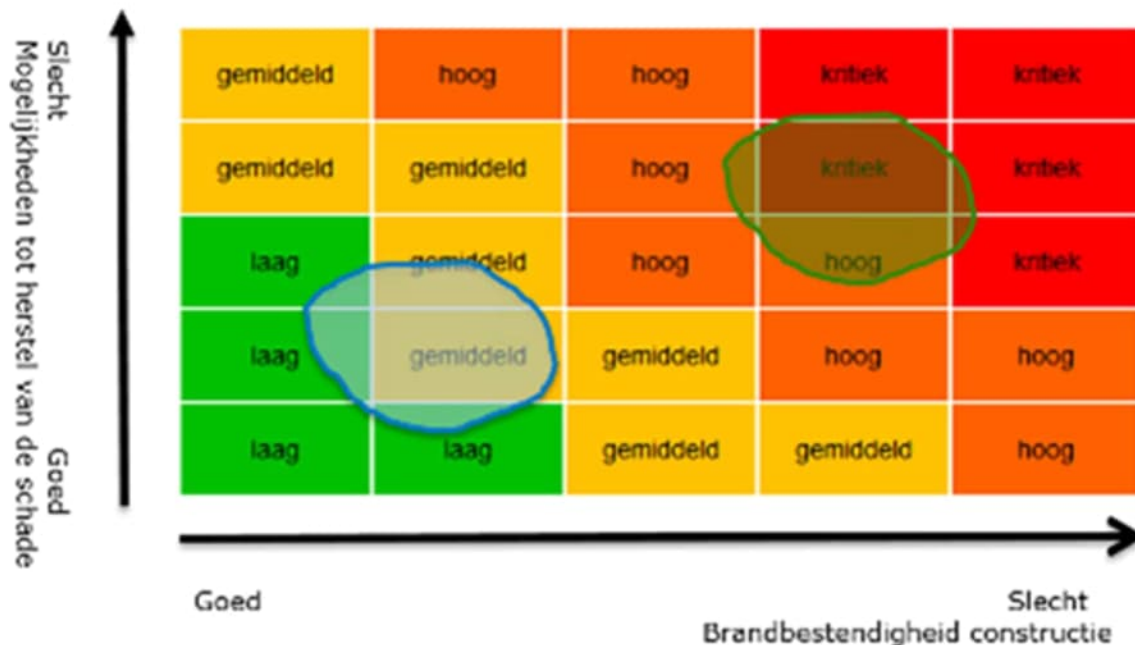
In de memo is door dhr. [REDACTED] aangegeven dat op één punt de auteurs van het rapport en de RWS collega's van de afdeling TNK een duidelijk afwijkende mening/zienswijze hebben. Daarmee is bedoeld op het punt van alsnog moeten voldoen aan faalkansen volgens Eurocode 0 en dat punt is in Add. 5 nader toegelicht. In de bijlage bij de memo wijst de afdeling TNK erop dat het niet om één punt gaat, maar dat de afdeling TNK van GPO (*de beheerder van het dossier brandwerendheid voor tunnels*) belangrijke kanttekeningen heeft gemaakt betreffende de juistheid van het rapport. Het geleverde commentaar zou door ondergetekenden niet zijn gebruikt om het rapport te verbeteren, noch is het weerlegd. Het verschil van inzicht is toegelicht met een plaatje van een risicomatrix (*figuur Add. 9*). In blauw zijn de uitgangspunten van de onderzoekers weergegeven en in groen de uitgangspunten die volgen uit de onderzoeken en analyses die RWS heeft uitgevoerd. De volgende toelichting is daarbij gegeven:

“Blauw: Je gaat ervan uit dat tunnels, zoals ze nu zijn, al heel goed tegen brand kunnen. Met andere woorden, bij brand duurt het lang voordat ze enige schade oplopen en instorten van de tunnel komt alleen bij uitzonderlijk langdurige en grote branden voor. Daarbij neem je aan dat een tunnel, wanneer hij toch beschadigd is door brand, snel en tegen geringe kosten gerepareerd kan worden.”

“Groen: Je gaat ervan uit dat tunnels, zoals ze nu zijn, minder goed tegen brand kunnen dan altijd aangenomen. Met andere woorden accepteert dat uitgevoerde brandproeven aantonen dat bij een grote brand de beton al snel kan afspatten en de wapening bloot komt te liggen. Aanvullende analyses tonen aan dat de constructie kort nadat de wapening zijn sterkte verliest instort. Daarbij neem je aan dat het herstellen van een door brand beschadigde constructie nog best ingewikkeld en kostbaar is. In het geval van een of meer ingestorte tunnelmoten kan dat betekenen dat een verbinding meer dan een half jaar niet beschikbaar is.”

Het verschil tussen de zienswijze van enerzijds ondergetekenden (*situatie blauw gebied en navolgend situatie 1 genoemd*) en anderzijds TNK (*situatie groen gebied en navolgend situatie 2 genoemd*) wordt in de memo verder als volgt toegelicht:

“Het nemen van maatregelen tegen brand bij bestaande tunnels veroorzaakt overlast en kost geld. In het geval van situatie 1 geef je veel geld uit om een klein risico op te lossen. De conclusie is dan al snel dat de voordelen van het nemen van maatregelen niet opwegen tegen de nadelen. In het geval van situatie 2 geef je veel geld uit om een groot risico op te lossen. De conclusie kan in dit geval heel anders zijn. Het kan best rendabel zijn om veel geld uit te geven om een groot risico op te lossen.”



figuur Add. 9 Risicomatrix, zoals in de bijlage bij [131] is gebruikt over het verschil van inzicht tussen de opstellers van het onderhavige rapport (blauwe gebied) en de reviewers van TNK van RWS (groene gebied) te duiden.

In de bijlage bij [131] is aangegeven dat het punt met betrekking tot faalkansen (betrouwbaarheidsindex) en het moeten voldoen aan de Eurocodes hier haakt aan de horizontale as van de risicofiguur. In Add. 5 navolgend is hier verder op ingegaan.

In de bijlage bij de memo van [131] is door TNK ook ingegaan op de veiligheid van weggebruikers, hulpverleners en recreanten, die gebruik maken van het tunneldak. Ondergetekenden volstaan hier op dit punt met het verwijzen naar Bijlage F, waar de memo met bijlage integraal zijn opgenomen en naar hetgeen voorgaand bij Add. 2 is aangegeven.

Verder is gewezen op omissies in de memo van dhr. [131], waarbij het volgende is aangegeven:

*“Kiezen voor het nemen van **geen** maatregelen betekent dat we als RWS, of als Minister, bewust het risico willen lopen dat een deel van ons hoofdwegennet voor langere tijd (6-12 maanden) niet beschikbaar is. Afgezien van of dit economisch slim is om te doen, is dit primair een principiële keuze. Al het beleid van RWS is erop gericht om grote risico's op niet beschikbaarheid te voorkomen. Deze keuze staat hier haaks op. Als je hier voor kiest, is dat dan voor een beperkt aantal objecten, of willen we in bepaalde gevallen best grote risico's lopen?”*

Daarnaast heeft dit ook politieke consequenties. Gaat een minister na een grote brand inderdaad vertellen aan Nederland, dat het wel is waar vervelend is dat mensen een deel van het hoofdwegennet langere tijd niet kunnen gebruiken, maar dat het toch slim was om dit risico bewust te nemen?”

Naar de mening van ondergetekenden zijn deze punten in het onderhavige rapport benoemd.

Aan het eind van het bericht van de afdeling Tunnels en Natte kunstwerken is aangegeven dat de directie techniek van GPO van mening is dat:

- er voldoende redenen zijn, zoals aangevoerd, om een t.o.v. de conclusies in het rapport “*Verkenning van mogelijke alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding in drie landtunnels*” ander standpunt in te nemen;
- de kans groot is dat na het uitvoeren van een aanvullend landtunnel specifiek onderzoek, zoals door dhr. ██████ voorgesteld, uiteindelijk de conclusie getrokken moet worden dat het niet nemen van maatregelen geen haalbare weg is;
- na een aanvullende studie doorgaan met het huidige beleid, economisch en geredeneerd vanuit de beschikbaarheid van onze netwerken, de meest haalbare optie kan blijken te zijn.

Voor een korte reactie van ondergetekenden op de naar voren gebrachte zienswijze van TNK zie Add. 6.

Samenvattend kan worden gesteld dat het feit dat er op veel onderdelen van de MKBA geen harde gegevens beschikbaar zijn, kan resulteren in significant andere uitkomsten als diverse aanames anders worden gekozen. Ondergetekenden kwamen in het onderhavige rapport op basis van beschikbare gegevens en eigen inschattingen tot resultaten die laten zien dat de huidige situatie zo laten economisch effectiever is dan bekleden met HWB. En dat dit resultaat robuust is, waarmee is bedoeld te zeggen dat aanpassingen in aannames weliswaar de kosten voor elk alternatief beïnvloeden, maar de uitkomst dat de situatie zo laten economisch aantrekkelijker is, niet verandert. Echter, de afdeling TNK van GPO is een andere mening toegedaan.

Add. 5 Vereiste veiligheid en faalkansen volgens NEN-EN 1990 en NEN 8700

De onderhavige verkennende studie was primair gericht op “asset protection” en in het bijzonder de maatschappelijke-kosten-baten-analyse voor alternatieven. Daarbij zijn met name het bekleden met HWB en handhaven van de huidige situatie als twee uitersten met betrekking tot asset protection naar boven gekomen. Zoals is aangegeven, moet veiligheid ook worden, of zijn, beschouwd. Voor de vier tunnels gebouwd na 2008 was dat door RWS in 2017 al gedaan (*zie hoofdstuk 5 van het rapport en Add. 2*). Als het gaat om de vraag of bepaalde alternatieven volgens de wet zijn toegestaan, kan er op worden gewezen dat het Bouwbesluit 2012, wat daarvoor de vigerende regelgeving is, primair ziet op veiligheid. Door RWS is recent daarnaar een studie verricht [133], waarbij antwoord is gegeven op de volgende vraag: “*Kan het wettelijke kader zo worden uitgelegd dat aan de eisen voor brandwerendheid wordt voldaan zonder aanvullende technische maatregelen te treffen?*” Er is onder andere geconcludeerd dat het Bouwbesluit 2012 en de Nota van Toelichting aanknopingspunten bieden om met een gelijkwaardige oplossing te voldoen aan de functionele eis voor brandwerendheid van tunnels, terwijl er geen aanvullende technische maatregelen worden getroffen. Ondergetekenden hebben het Bouwbesluit 2012 er ook op nagelezen en zich er een mening over gevormd. Het gaat daarbij naar de mening van ondergetekenden voor de 3 landtunnels (*bestaande bouw*) primair om de eis in Artikel 2.13. Aansturingsartikel:

“1. Een bestaand bouwwerk kan bij brand gedurende enige tijd worden verlaten en doorzocht zonder dat er gevaar is voor instorting.”

Dit is de functionele eis waaraan moet worden voldaan en als dat niet wordt bereikt door te voldoen aan de geformuleerde prestatie eisen, maar wel op een andere wijze, dan is dat op basis van het gelijkwaardigheidsbeginsel ook goed. In dat geval wordt ook aan de wet voldaan.

Ondergetekenden lezen het aansturingsartikel zo dat als er, voordat er gevaar is voor instorting, voldoende tijd is om de tunnel te verlaten en doorzoeken, het goed is en aan de eis met betrekking tot veiligheid is voldaan. Wat niet geadresseerd is in het artikel is de relatie tussen enerzijds de locatie waar er gevaar is voor instorting en anderzijds het effect van dat gevaar op de veiligheid van personen die zich misschien nog net in de tunnel bevinden, maar zo ver van de locatie met instortingsgevaar dat hun veiligheid niet in het geding is. Voor die situatie veronderstellen ondergetekenden dat wordt voldaan aan de naar verwachting hogere overheidsdoelstelling, zijnde dat personen door de brand geen gevaar mogen lopen, zodat ook die situatie akkoord is. Hoewel ondergetekenden menen er goed aan te doen deze visie in dit Addendum weer te geven, wordt volledig onderkend dat het aan juristen is om de wet (Bouwbesluit 2012) op deze punten te analyseren en beoordelen.

De basis voor de voorgaande beschouwingen is het gelijkwaardigheidsbeginsel, wat erop neerkomt dat het volgens de wet akkoord is als aan bepaalde prestatie-eisen niet wordt voldaan als wel aan de boven gelegen functionele eis wordt voldaan. Naar de mening van ondergetekenden geldt hetzelfde principe bij het door de afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken naar voren gebrachte discussiepunt, dat navolgend wordt besproken.

In het juridische document van RWS [133] is met betrekking tot de gelijkwaardige oplossing het volgende naar voren gebracht: *“De gelijkwaardige oplossing mag ook niet leiden tot strijd met andere eisen voor wegtunnels die gelden op grond van het Bouwbesluit.”* In [133] is niet uitgewerkt of dit bij de landtunnels aan de orde is of niet, in het geval dat er geen aanvullende technische maatregelen worden getroffen, zoals genoemd in de adviesaanvraag. In dat kader is door de afdeling TNK naar voren gebracht dat, via het Bouwbesluit, ook de constructieve Eurocodes, en voor bestaande constructies NEN 8700, altijd van toepassing zijn. Dit zou betekenen dat een toetsing aan de vereiste veiligheid tegen falen volgens NEN-EN 1990, of als het valt onder een bestaande constructie, volgens NEN 8700, uitgevoerd moet worden. Iets wat door ondergetekenden niet is gedaan en als een omissie in het rapport wordt beschouwd. In de bijlage van TNK bij de memo van dhr. [131] is dit als volgt omschreven:

“Het punt van [131] haakt hier aan de horizontale as van de risicofiguur. Hij onderbouwt dat het risico een relatief grote kans van optreden heeft. De betrouwbaarheidsindex van de constructie wordt hierdoor zo laag dat het volgens de Eurocodes noodzakelijk is om maatregelen tegen het belastinggeval brand te treffen. De eurocodes geven geen mogelijkheid om bij eenvoudig herstel een lagere betrouwbaarheidsindex te kiezen. Iets dat je bij een puur economische afweging nog wel zou kunnen overwegen.”

Ondergetekenden zijn van mening dat de laatste zin in dit citaat precies weergeeft wat bij de onderhavige beschouwingen aan de orde is. Veiligheid bij brand in de landtunnels is beschouwd en in orde bevonden, zodat het alleen nog de economische afweging overblijft en dat was onderwerp van de verkennende studie. In de memo van dhr. [131] is dat ook als volgt verwoord:

“Doordat we weten dat er geen mensenlevens in gevaar zijn (veiligheid is niet in het geding, zie hiervoor ook de brief 27 juli 2017 met kenmerk VB-2017-041 versie 3 van de veiligheidsbeambte aan de coördineert tunnelbeheerder) en we voor de economische schade weten waar je rekening mee moet houden (gedeeltelijk/lokaal

bezwijken) is het mogelijk om met een gelijkwaardige oplossing ook op dit punt direct te voldoen aan de bovenliggende functionele eisen c.q. de overheidsdoelstelling van de wetgever. Om die reden is het, voor de beschouwde optie van het weglaten van hittewerende bekleding bij de drie landtunnels niet noodzakelijk om voor bezwijken ten gevolge van een brand ook nog te voldoen aan de faalkansen c.q. betrouwbaarheidsindexen, zoals die in Eurocode 0 algemeen zijn vastgesteld voor bezwijkvormen waarbij de gevolgen van bezwijken niet bekend zijn.”

Samenvattend zijn ondergetekenden van mening dat de optie van geen maatregelen nemen bij de drie landtunnels volgens het Bouwbesluit 2012 is toegestaan, omdat met betrekking tot sterkte bij brand direct wordt voldaan aan de functionele eis, c.q. de overheidsdoelstelling, waardoor het niet meer nodig is om ook nog aan de geformuleerde prestatie-eisen te voldoen. Er is sprake van een gelijkwaardige oplossing. Dit geldt voor het aansturingsartikel 2.13, maar evenzeer voor algemene eisen in Eurocode 0, zoals daar zijn de eisen aan faalkansen en betrouwbaarheidsindexen, waarbij aangekend dat de afdeling TNK van GPO het met deze zienswijze niet eens is.

Add. 6 Overige opmerkingen en reacties op het rapport

Nadat de definitieve versie van het rapport, d.d. 30 november 2020, was verschenen, is het verstrekt aan een groot aantal medewerkers van RWS. Van een aantal van die medewerkers zijn opmerkingen en vragen ontvangen. Voor zover ondergetekenden het voor de volledigheid van het onderhavige rapport van belang achten, is dat navolgend weergegeven, c.q. is daar op gereageerd. Dit betreft aanvullende vragen op hetgeen door de afdeling TNK naar voren is gebracht en voorgaand in dit Addendum is besproken.

Opmerking/vraag 1

Gevraagd was om de navolgende tekst van de samenvatting (*laatste bullit pagina 4*) concreter te formuleren.

“alternatieve maatregelen, zoals sprinkler en watermistssystemen, voor de bestaande tunnels qua orde van grootte van kosten per jaar hetzelfde uitpakken als aanbrengen van HWB als installatiekosten worden meegenomen en dat die minder gunstig uitpakken als de installatiekosten door niet-beschikbaarheid niet worden meegenomen.”

In andere bewoordingen is hier bedoeld aan te geven:

“Bij de bestaande landtunnels zijn de kosten per jaar voor het toepassen van een brandbeschermende maatregel qua orde van grootte gelijk voor zowel het toepassen van HWB als het toepassen van sprinkler en watermistssystemen. Daarbij spelen de kosten van installatie een belangrijke rol. Als die kosten van installatie, en met name de kosten door niet-beschikbaarheid, niet worden beschouwd (dat zou bijvoorbeeld aan de orde zijn bij nieuwbouw), dan zijn de kosten per jaar in het geval van sprinkler en watermistssystemen hoger dan die van het aanbrengen van HWB.”

Opmerking/vraag 2

Aangegeven is dat de laatste alinea van de samenvatting de indruk wekt dat de opstellers zelf twijfelen of de opdracht en intentie van het onderzoek wel zijn gehaald, omdat de formulering vragen oproept. Het gaat daarbij om de volgende alinea:

Het was de opdracht, en de intentie van ondergetekenden, om met de onderhavige studie informatie aan te leveren die door RWS en andere stakeholders gebruikt zou kunnen worden bij het nemen van beslissingen ten aanzien van te nemen maatregelen voor de brandwerendheid bij de drie landtunnels. Mogelijk zullen de verkregen resultaten ook al in belangrijke mate als basis voor een beslissing kunnen worden gebruikt en zo niet, dan zal de studie naar verwachting minimaal richting kunnen geven aan vervolgonderzoek.

Ondergetekenden begrijpen de opmerking en willen benadrukken van mening te zijn dat de doelstelling van het verkennende onderzoek is bereikt. Met deze alinea was beoogd aan te geven dat het mooi geweest zou zijn geweest als de verkennende studie al een zodanig duidelijk resultaat opleverde, dat op basis daarvan direct al beslissingen over al dan niet te nemen brandwerende maatregelen genomen zouden kunnen worden. Ondergetekenden zouden zich in kunnen denken dat de verzamelde resultaten en uitgevoerde MKBA-analyses voor een bepaalde tunnel ook al voldoende zijn om inderdaad die beslissing te nemen. Echter, indien dat niet het geval is, zal de studie toch zeker een gedegen basis kunnen zijn voor een eventueel benodigde vervolgstap, die er dan toe moet leiden dat een dergelijke beslissing wel genomen kan worden. In het bijzonder tunnelspecifiek onderzoek lijkt op zijn plaats te zijn, evenals een verder uitgewerkte beoordeling van de constructieve gevolgen van extreme branden (faalgedrag).

Opmerking/vraag 3

Er is op gewezen dat de navolgende teksten in paragraaf 7.4.4 waarschijnlijk vragen oproepen met betrekking tot de tot nu toe gehanteerde uitgangspunten in de QRA-tunnels.

“In de QRA tunnels wordt voor een brand, waarbij (als secundair voertuig) een tankwagen betrokken is, uitgegaan van een intensiteit van 200 MW.”

“Op basis van het vorengaande wordt voorgesteld om voor tankwagens uit te gaan van een brandvermogen van 300 MW en een totale energie van 1000 GJ.”

Ondergetekenden menen er goed aan te doen deze opmerking in dit Addendum op te nemen. Bijkomend moet benadrukt worden dat de referentie naar het brandvermogen alleen onvoldoende is om de impact op de structuur te begroten. De duur waarin een dergelijk vermogen vrijgegeven wordt, is immers bijzonder belangrijk voor de temperatuursevolutie in de wanden en de constructieve schade. Met andere woorden, het brandvermogen moet gekoppeld worden aan een totaal vrijgegeven energie.

Opmerking/vraag 4

Naar aanleiding van de teksten in paragraaf 14.1 en 14.3 is de verwachting uitgesproken dat door ondergetekenden de resultaten van het onderzoek ‘kleine branden’ nog niet zijn meegenomen in de

rapportage. Als dat zo is, zou dat een risico zijn, omdat de aangever van de opmerking zich meende te herinneren dat eerder is aangegeven dat uit het ‘kleine branden onderzoek’ blijkt dat kleine branden toch meer impact hebben c.q. schade veroorzaken dan aanvankelijk gedacht.

Een rapportage over ‘kleine branden’, waarover ondergetekenden konden beschikken is [124]. Daar is kennis van genomen en dat is gebruikt. Ondergetekenden zijn niet bekend met eventueel nog andere rapportages van het ‘kleine branden onderzoek’.

Opmerking/vraag 5

Een belangrijke overzicht is naar de mening van de aangever tabel 15, waarin de invloed van maatregelen op schadeklassen wordt weergegeven. Aangegeven is dat de onderstaande tekst nadere toelichting verdient, omdat het juist in deze tabel goed is om alle alternatieven weer te geven.

“In Tabel 15 zijn sprinkler en watermistssystemen niet opgenomen, omdat het verschil in impact op de constructie al is verrekend bij de omzetting van HRR+THR naar RWS duur (1D brandintensiteit). Voor die systemen is daarom aangenomen dat dezelfde schade indeling geldt als voor de referentietoestand.”

Er is voor gekozen om enerzijds het effect van een brandbeschermende maatregel op de brandintensiteit te beschouwen en anderzijds de relatie tussen een bepaalde brandintensiteit en de schade aan de tunnelconstructie. Tabel 15 is gebruikt om de aannames voor de relatie tussen een brandintensiteit en de optredende schade aan de tunnelconstructie te laten zien. Aanbrengen van HWB heeft effect op de relatie tussen de brandintensiteit en de tunnelschade en is dientengevolge opgenomen in Tabel 15 terwijl sprinkler en watermistssystemen een effect hebben op de brandintensiteit en daardoor niet in Tabel 15 tot uitdrukking komen. Sprinkler en watermistssystemen hebben met andere woorden een grote kans om de brandintensiteit laag te houden, maar indien deze actieve systemen hier niet in slagen (ongeacht de reden) en de brandintensiteit groot is, dan geldt dezelfde impact als voor een verder onbeschermd constructie. Het gevolg van bovenstaande is dat de uitwerking van de verschillende brandbeschermende maatregelen niet allemaal in één tabel, c.q. in deze tabel, zijn te zien.

Opmerking/vraag 6

M.b.t. kosten van aanleg en onderhoud van brandbeschermende maatregelen is het volgende aangegeven:

“De onderbouwingen van de kosten voor aanleg en onderhoud van de diverse oplossingen zoals benoemd in o.a. de paragrafen 16.3. en 16.4. zijn mijn inziens summier. De kosten voor een sprinklersysteem en een watermiststelsysteem zijn voornamelijk gebaseerd op informatie van de Verenigde Sprinkler Industrie (VSI) maar hoe realistisch zijn die kosten?”

Om kosten voor verschillende alternatieven met elkaar te kunnen vergelijken dient de wijze waarop die kosten zijn bepaald (uitgangspunten, aannames, (risico)toeslagen, etc.) wel op elkaar te zijn afgestemd en dat is mijn inzien nu onvoldoende het geval.

Ook de onderbouwing voor de benodigde tijdsduur en de kosten voor het aanbrengen van HWB lijkt mij gedateerd. Kan daarvoor geen gebruik worden gemaakt van recentere ervaringen?"

"Niet beschikbaarheid kan gesplitst worden in gepland en ongepland, zoals ook bij DBFM geldt. Tijdige omleidingen zijn dan minder duur dan abrupte stagnatie.

De niet beschikbaarheid tijdens realisatie is extreem omdat je voor dat bedrag prima een alternatieve route kan opzetten, die aanzienlijk goedkoper is. Deze 1:1 meenemen in de berekening is extreem en uiteindelijk maatgevend, ongeacht de maatregel c.q. effect op de schade."

Zoals ondergetekenden hebben aangegeven, moesten in deze verkennende studie op vele fronten aannames worden gedaan op basis van soms zeer summier beschikbare informatie, om uiteindelijk toch in staat te zijn een MKBA te kunnen uitvoeren. Het zal ongetwijfeld mogelijk zijn om op diverse van die aannames nadere, c.q. meer betrouwbare informatie te vinden. Het advies is om bij een eventueel vervolg op deze verkennende studie, bijvoorbeeld als voor een specifieke tunnel een MKBA wordt uitgevoerd, te streven naar meer actuele, gedetailleerde informatie te verzamelen, c.q. daar onderzoek naar te doen. Hierbij kan ook een onderscheid gemaakt worden in de kosten ten gevolge van geplande en niet-geplande onbeschikbaarheid

Opmerking/vraag 7

M.b.t. de optie aanbrengen HWB is het volgende aangegeven:

"HWB heeft nu als uitgangspunt de 99,9% oplossing. Gezien de aangehouden schadeklassen lijkt dit overbodig. De investeringskosten halveren en doorlooptijd 1/3 als TTI ongemoeid blijft.(grove inschatting)."

In het onderhavige rapport wordt inderdaad slechts één enkel scenario beschouwd voor het aanbrengen van HWB. Dit scenario resulteert in een optimale bescherming, zoals bij een nieuwe constructie, waarbij de HWB is aangebracht volgens de regels van de kunst. Gedeeltelijke bescherming van de constructie, bijvoorbeeld door geen HWB te voorzien omheen bestaande TTI of een beperktere HWB dikte toe te passen, zijn niet beschouwd. Ondergetekenden zijn akkoord dat dergelijke tussenoplossingen de kosten van installatie en hinder kunnen reduceren, en dat de gedeeltelijke bescherming de schade bij brand kan reduceren.

Ondergetekenden vertrouwen erop met de voorgaande beantwoording van de ontvangen opheldervragen mogelijke onduidelijkheden in het rapport te hebben weggenomen, c.q. standpunten verder te hebben verduidelijkt.

Add. 7 Slotopmerkingen na bespreking aanvullende info en kritieken

Ondergetekenden menen er goed aan te hebben gedaan in het onderhavige Addendum de ontvangen opmerkingen, en in het bijzonder de kritieken van de afdeling TNK van RWS, zo volledig mogelijk weer te geven.

Ondergetekenden achten het niet opportuun om in dit Addendum in detail te reageren op ieder van de kritieken die naar voren zijn gebracht. Navolgend is voor enkele aspecten nog wel een korte reactie opgenomen en in de voorgaande paragrafen is ook al op diverse onderdelen kort gereageerd. Belangrijker vinden ondergetekenden het om de visie op een hoger abstractieniveau te schetsen.

Ondergetekenden veronderstellen dat voldoende is duidelijk gemaakt dat voor een gedegen MKBA voor alternatieven voor het aanbrengen van HWB in de drie landtunnels heel veel harde informatie ontbreekt. En zoals is aangegeven, hebben ondergetekenden op onderdelen waar aannames moesten worden gedaan, op basis van wel beschikbare informatie en ook eigen inschattingen (*bijvoorbeeld als het gaat om shades*), getracht dat zo realistisch mogelijk te doen en dat is dan gebaseerd op verwachtingen van ondergetekenden. Met dit gegeven leverde de MKBA op dat er geen zeer grote verschillen zitten tussen aanbrengen van HWB en toepassen van andere maatregelen, zoals aanbrengen van sprinkler en watermistssystemen. De optie om de huidige situatie zo te laten (*dus geen brandbeschermende maatregelen nemen*) liet wel een significant ander resultaat zien. Dat was economisch aantrekkelijker. Zoals is besproken in dit Addendum, is de afdeling TNK van mening dat ondergetekenden systematisch parameters te gunstig hebben ingeschat, waardoor de conclusie dat geen maatregelen nemen economischer is, mogelijk niet juist is.

Naar de mening van ondergetekenden is voor RWS nu de eerst voorliggende vraag of het zinvol is de huidige verkennende studie een vervolg te geven in de vorm van bijvoorbeeld een tunnelspecifiek onderzoek, waarbij dan tevens voor een aantal parameters, zoals relatie tussen brandintensiteit en schade en kosten van herstel en niet-beschikbaarheid, getracht kan worden om via onderzoek betere informatie te verkrijgen. Als mogelijke argumenten om een dergelijk vervolgonderzoek eventueel niet uit te voeren zou gedacht kunnen worden aan de volgende redenen:

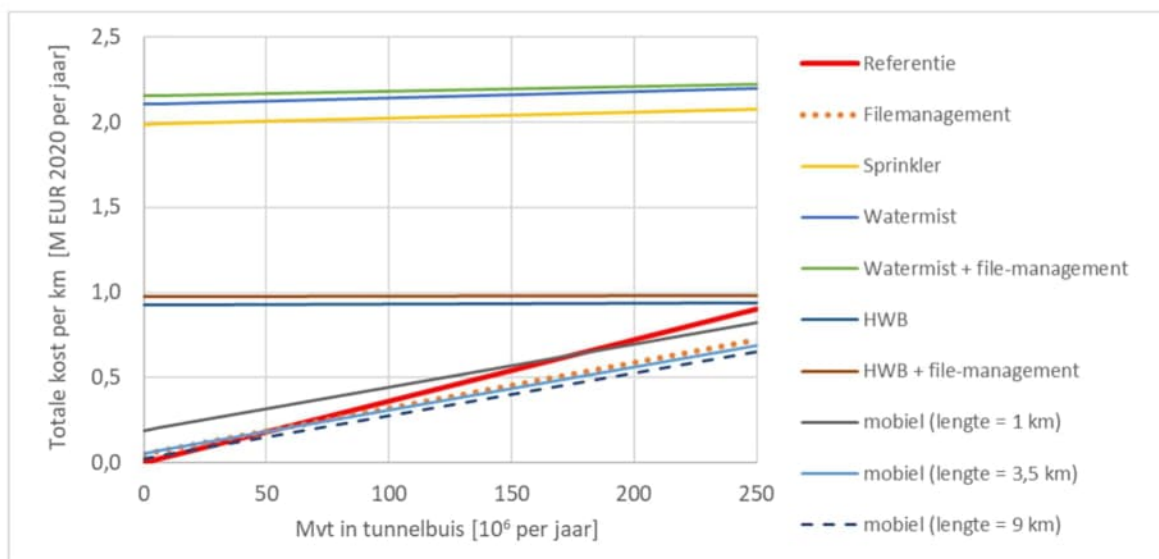
- het wordt niet acceptabel geacht dat een tunnel er vanwege een hevige brand langer niet beschikbaar is, ongeacht het economisch voordeel dat gemiddeld genomen kan worden bereikt met het achterwege laten van brandbeschermende maatregelen;
- op basis van de door de afdeling TNK naar voren gebrachte argumenten verwacht RWS dat een economisch voordeel er niet zal zijn ofwel, beduidend minder groot zal zijn dan wat uit de verkennende studie naar voren is gekomen.

Het is vanzelfsprekend aan RWS om te beslissen of een vervolgstudie, zoals geschetst, wenselijk is of niet. Ondergetekenden volstaan in dat kader met de opmerking het sowieso zinvol te achten om via nadere studie beter inzicht te verkrijgen in vele van de genoemde aspecten rond brand in tunnels en kosten en effecten van te nemen maatregelen. Waarbij de kosten van studies in dat kader ten opzichte van de kosten van het aanbrengen van HWB bij de drie landtunnels (*en naar verwachting later ook bij landtunnels gebouwd voor 2008*) relatief beperkt zullen zijn.

Navolgend zijn nog een aantal bemerkingen opgenomen naar aanleiding van de ontvangen commentaren.

Individuele voorgestelde aanpassingen in aannames veranderen de conclusies van het rapport niet en datzelfde geldt als enkele aannames in één en dezelfde richting worden aangepast. Als bijvoorbeeld, ten opzichte van de waarden vermeld in het rapport, de kosten van onbeschikbaarheid bij het aanbrengen van HWB worden gehalveerd, de kosten van niet-beschikbaarheid na brand worden verdubbeld, en tevens de kosten van installatie van HWB van M€ 9 naar M€ 3 per km worden gereduceerd, dan nog resulteert de MKBA voor het aanbrengen van HWB in hogere kosten dan die voor de optie van de huidige situatie zo laten (*figuur Add. 10*). In vergelijking met *figuur 70* in het basisrapport is

de helling van de curves in functie van het aantal mvt steiler. Dit omdat de schade bij brand duurder uitvalt (*grotere onbeschikbaarheid*). De helling van de HWB curve is evenwel zeer vlak, omdat HWB als zeer effectief wordt beschouwd in het vermijden van schade (*zie bijvoorbeeld Tabel 22 in het basisrapport*). Het is pas als bovenop de aanpassingen in onderstaande figuur ook nog eens grote schade, en gepaard gaande kosten, worden toegekend aan de huidige klasse C, zoals in [128] (*bij benadering*) indirect is voorgesteld, dat de conclusies ook effectief anders uitvallen.



figuur Add. 10 Totale kosten maatregel per km tunnel, in functie van het aantal mvtkm in de tunnelbuis (bestaande tunnel). Situatie zoals in het rapport (figuur 70), met aanpassingen: installatiekosten HWB M€ 3 per km, duur (kosten) onbeschikbaarheid bij installatie HWB gehalveerd, duur (kosten) onbeschikbaarheid bij schade verdubbeld.

Met betrekking tot enkele van de ontvangen kritieken wordt navolgend nog een korte reactie geplaatst:

- In [128] zijn beschouwingen gegeven die resulteren in de uitspraak dat bij ongeveer 13,5% van de optredende branden één of meer moten van de tunnel instort, hetgeen beduidend hoger is dan wat internationaal is waargenomen. Ondergetekenden zijn bekend met een aantal zware schades aan tunnelconstructies door brand, maar situaties waarbij een tunnel of tunnelmoot door brand feitelijk volledig is ingestort, kennen ondergetekenden niet.
- Ondergetekenden zien in de beschouwingen van dhr. [127] tot op zekere hoogte ondersteuning voor aannames zoals die door ondergetekenden zijn gedaan.
- Minimaal heeft de studie van [125] duidelijk gemaakt dat voor een goede kostenafweging het belangrijk is om ook de kosten in verband met TTI's mee te nemen, waarbij er ook in het geval van HWB na een hevige brand sprake zal zijn van niet-beschikbaarheid en herstelkosten.
- Voor de beeldvorming over kansen op brand kan worden gewezen op hetgeen in een kader in [125] naar voren is gebracht over de maatgevende brand. Dat is dat er sinds 1942 in Nederland twee grote branden zijn geweest met een intensiteit in de orde van grootte van 50 MW en een duur beneden 1 uur, hetgeen beduidend minder zwaar is dan de brandintensiteit die ten

grondslag ligt aan de RWS-brandkromme en ook minder is dan de grote brand in de Mont Blanctunnel.

- Ondergetekenden wijzen erop dat, in het geval er zou worden gekozen om de huidige situatie zo te laten, het verstandig is om voor verschillende scenario's voor schade na brand, per tunnel een plan voor herstel al uit te werken, zodat kosten van niet-beschikbaarheid zoveel mogelijk kunnen worden beperkt.
- In de verkennende studie is met een MKBA gekeken naar de kostenverschillen tussen alternatieven voor een kilometer tunnelbuis per jaar (prijspeil 2020). Bedacht dient te worden dat hierbij niet het totale aantal kilometers tunnelbuis in Nederland (landtunnels) dat in aanmerking komt om te worden bekleed met HWB, in beschouwing is genomen. Als wordt gekozen om tunnels te bekleden met HWB, zullen alle vergelijkbare landtunnels bekleed moeten worden. En naar verwachting gaat het om meer tunnels dan alleen de na 2008 gebouwde landtunnels.

Ongeacht wat verder wordt gedaan met de onderhavige verkennende studie, spreken ondergetekenden de hoop uit dat met deze rapportage, en het daarbij gevoegde Addendum, een grote hoeveelheid relevante informatie op een geordende wijze bij elkaar gebracht te hebben voor een goede, weldoordachte aanpak van de problematiek van de brandwerendheid in bestaande landtunnels.

Rijswijk en Gent, 2 juni 2021



Dr. J.G. Hageman
Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.
(oud-hoogleraar TU Delft en Eindhoven)



Prof.dr.ir. [Name]
Universiteit Gent

Add. Referenties

125. RWS, “*Toelichting kwalitatieve risicoanalyse brandwerendheid tunnels - versie 1.0*”, Memo, 1 september 2017.
126. RWS, “*Toelichting kwalitatieve risicoanalyse brandwerendheid Koning Willem-Alexandertunnel - versie 1.0*”, Memo, 1 september 2017.
127. ██████████ “*Kostenrapport impact maatregelen brandwerendheid recente RWS tunnels*”, RWS Memo, document HB 3503184-v1A. 26 januari 2018.
128. ██████████, “*Discussiepunten rapportage alternatieven HWB*”, RWS Memo, 19 januari 2021.
129. ██████████ “*Advies Middellange Termijn Maatregelen Brandwerendheid Koning Willem-Alexandertunnel*”, RWS Memo, 2 juni 2020.
130. ██████████ “*Overzicht van bemerkingen van leden van het Project Team op de conceptversie van 8 oktober 2020 van het rapport over de alternatieven voor HWB in drie landtunnels en de reactie van de auteurs daarop*”, 30 november 2020.
131. ██████████, “Keuzes bij “*verkennend onderzoek brandwerendheid drie landtunnels*” hb 3997670, inclusief Bijlage 1 “*Visie van de afdeling Tunnels en Natte kunstwerken*”. RWS Memo, 24 maart 2021.
132. <https://www.wegenwiki.nl/Gaasperdammertunnel>
133. ██████████ “*Gelijkwaardige oplossing brandwerendheid*”, RWS Memo, 31 maart 2021.

Bijlage A Plan van aanpak



Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.



Notitie 22-6-2020

Dossier 10503

Brandwerendheid tunnels – Plan van Aanpak voor de verkenning van mogelijke alternatieven voor hittewerende bekleding in landtunnels met afspatgevoelig beton

1 Inleiding

Met betrekking tot de brandwerendheid van een aantal bestaande tunnels heeft RWS, contactpersoon ir. [REDACTED] aan ondergetekenden, respectievelijk dr.ir. [REDACTED] van Adviesbureau Hageman en prof.dr.ir. [REDACTED] van Universiteit Gent, gevraagd om in een samenwerkingsverband advies uit te brengen [1]. Specifiek is gevraagd om onderzoek uit te voeren naar alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding (HWB) in drie landtunnels¹. Een globale omschrijving van de beoogde werkzaamheden is gegeven in de RWS Memo “*Opdracht omschrijving maatregelen brandwerendheid tunnels*” [2], dat als bijlage A is opgenomen in deze notitie. Gevraagd is om vooruitlopend op de opdrachtverlening een Plan van Aanpak, c.q. offerte op te stellen. De onderhavige notitie bevat het Plan van Aanpak.

Vanwege spatgevoeligheid van het toegepaste beton in de betreffende tunnels is RWS van mening dat deze voorzien dienen te worden van hittewerende bekleding. Omdat dit veel overlast voor het verkeer geeft, hebben twee betrokken gemeenten RWS gevraagd naar alternatieven met veel minder hinder, bijvoorbeeld een alternatief voor HWB, of het (op een later tijdstip) aanbrengen van HWB tijdens een periode van onderhoud.

Nadat in hoofdstuk 3 de achtergrond voor de vraagstelling van RWS nader is toegelicht en in hoofdstuk 4 de concrete vragen van RWS zijn weergegeven, is in hoofdstuk 5 een aantal beschouwingen opgenomen. Met dat als achtergrond, is in hoofdstuk 6 het Plan van Aanpak van ondergetekenden opgenomen. In hoofdstuk 7 zijn een aantal administratieve zaken rond de opdracht opgenomen, waaronder de tijdsplanning.

2 Documenten

In deze notitie is verwezen naar de volgende documenten:

1. RWS, [REDACTED] “*Offerte aanvraag onderzoek alternatieven hitte werende bekleding*”. Concept brief, d.d. 30 april 2020.
2. RWS, “*Opdracht omschrijving maatregelen brandwerendheid tunnels*”. Memo, d.d. 25 maart 2020.

¹ In de opdrachtoomschrijving [2] zijn drie landtunnels genoemd en de 2^e Coentunnel, welke zich onder open water bevindt. Ondergetekenden hebben begrepen dat de 2^e Coentunnel zal worden bekleed met HWB. In overleg met RWS wordt dan ook in eerste instantie primair onderzoek verricht naar de (drie) landtunnels. Bij de uitwerking van onderdelen zullen eventuele verschillen tussen landtunnels en tunnels onder open water wel worden benoemd.

3. RWS, [REDACTED] “Achtergronddocument brandwerendheid tunnels”, 8 juni 2017.
4. ROK 1.2, “Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken ROK 1.2”, Rijkswaterstaat Doc. Nr.: RTD 1001:2013, 1 januari 2013.
5. RWS, “Veiligheidsrisico’s van versnelde degradatie van beton bij brand in tunnels”, Versie 1.33, d.d. 23 mei 2017.
6. TNO, “De statistische kans op brand in tunnels”, TNO 2012 R11094, d.d. 22 januari 2013.
7. TNO, “Beoordeling spatgedrag betonconstructies. Literatuuronderzoek en beproevingsis”, TNO rapport 2004-CVB-R0334, d.d. januari 2005.
8. IXAS, “Kwalitatieve beschouwing bezwijkmechanisme tunnel bij brand” Memo A9GDW-DOC-12261, d.d. 22 mei 2018.
9. RWS, “RWS filosofie bescherming constructies tegen brand” Memo, d.d. 22 februari 2018.
10. RWS, “Juridische analyse brandveiligheid tunnels” Memo, d.d. 1 september 2017

3 Achtergrond van de vraagstelling van RWS

Om te voldoen aan de eisen met betrekking tot personenveiligheid en herstelbaarheid van tunnels in geval van brand, is het in Nederland gebruikelijk om voor tunnels een vereiste (nominale) brandwerendheid ten opzichte van de RWS brandkromme te voorzien. Om deze brandwerendheid te behalen kan gebruik gemaakt worden van hittewerende bekleding (standaard voor het dak en het bovenste deel van de wand van tunnels onder waterlopen), of kan via berekening of proeven aangetoond worden dat de onbeschermd betonconstructie voldoet. Voor het onbeschermd beton moet dan wel spatongevoelig beton worden toegepast.

In de ROK 1.2 [4] was vastgelegd aan welke eisen het beton diende te voldoen om als spatongevoelig te worden beschouwd. Eind 2015 kreeg Rijkswaterstaat de eerste signalen dat bij beton volgens ROK 1.2 toch spatten optrad. Er is een vermoeden dat er rond 2008 een wijziging in de samenstellende delen van beton heeft plaatsgevonden, waardoor een betonsamenstelling, zoals omschreven in de ROK 1.2 [4], eerst niet, en na 2008 wel, afspatgevoelig was.

De ontdekking met betrekking tot het afspatgedrag van beton, zoals dat in diverse tunnels is toegepast, maakte dat de brandwerendheid van de tunnels, gebouwd na 2008, opnieuw is beschouwd. In Nederland gaat het dan om de volgende tunnels:

1. Tweede Coentunnel (tunnel onder het Noordzeekanaal) te Amsterdam;
2. Koning Willem–Alexandertunnel (landtunnel door het centrum van Maastricht);
3. Ketheltunnel (landtunnel in de A4 te Schiedam);
4. Salland – Twentetunnel (landtunnel gecombineerde weg/ spoortunnel te Nijverdal).

Na uitvoerig onderzoek is RWS tot de conclusie gekomen dat de genoemde tunnels voorzien dienen te worden van hittewerende bekleding.

Het aanbrengen van de hittewerende bekleding is een zeer ingrijpende operatie met relatief veel verkeersoverlast. De gemeentebesturen van de plaatsen Maastricht en Schiedam, waar zich respectievelijk de Koning Willem–Alexandertunnel en de Ketheltunnel bevindt, hebben RWS gevraagd of het mogelijk is om maatregelen te nemen die, voor wat betreft de verkeersoverlast, minder ingrijpend zijn (*minder overlast veroorzaken*). Om de verkeersoverlast van het aanbrengen van HWB

te beperken, wordt overwogen om deze werkzaamheden voor de genoemde landtunnels te combineren met grootschalige onderhoudswerkzaamheden, die voor de Ketheltunnel en de koning Willem Alexandertunnel omstreeks 2030 zijn gepland.

4 Vragen van RWS

Zoals in de opdrachtschrijving [2] (*opgenomen in bijlage A bij deze notitie*) is aangegeven, is door RWS aan het onderzoeksteam gevraagd om te onderzoeken:

1. welke mogelijke scenario's er zijn met betrekking tot het (*snel of op termijn*) verkrijgen van voldoende brandwerendheid van de betreffende tunnels, gegeven de recent verkregen kennis over het brandgedrag van het toegepaste beton (*hierbij dienen ook actieve brandwerende systemen zoals sprinklers en watermist systemen betrokken te worden*);
2. hoe bij de diverse scenario's de veiligheid van gebruikers voldoende is gewaarborgd en welke rol schade aan de constructie (*asset protection*) daarbij speelt, met daarbij ook aandacht voor de proportionaliteit van de maatregelen voor wat betreft o.a. hinder en kosten (*LCC*);
3. welke risico's RWS als tunneleigenaar loopt t.a.v. veiligheid van gebruikers en in het kader van asset protection als zou worden gekozen voor het scenario van uitstellen tot 2030 voor het uitvoeren van de beplatingswerkzaamheden;
4. welke onderzoeksvragen m.b.t. brandwerendheid van tunnels in de komende jaren prioriteit zouden moeten krijgen. Het gaat hierbij om een duiding van de gewenste richting van het onderzoek.

Het onderzoek is gericht op het beantwoorden van vermelde onderzoeksvragen vanuit een technisch oogpunt. De juridisch-politieke kant maakt geen deel uit van het onderzoek en speelt alleen een rol waar nodig om het onderzoek te kaderen.

Het onderzoek beperkt zich tot landtunnels. Voor tunnels onder een waterweg kan de schade groter uitvallen en wordt HWB standaard voorzien (*zie voetnoot 1 op Blz. 1*). Dit betekent dat het onderzoek zich specifiek richt op de drie genoemde landtunnels.

5 Enkele beschouwingen vooraf

5.1 Algemeen

Het ministeriële besluit om de drie tunnels te voorzien van hittewerende bekleding is niet over een nacht ijs tot stand gekomen. Veel studies zijn verricht en experimenten zijn uitgevoerd. Voor de Second Opinion zullen ondergetekenden daar kennis van moeten nemen. Voor het Plan van Aanpak is het belangrijk te weten wat is gedaan en daartoe hebben ondergetekenden een eerste keer kennis genomen (*nog niet in detail*) van een grote hoeveelheid aangeleverde documenten. Op basis daarvan is in dit hoofdstuk een schets gegeven van de huidige situatie m.b.t. de brandwerendheid van de tunnels en de aspecten die in het Plan van Aanpak aan bod zullen moeten komen.

Zoals in de opdracht omschrijving is aangegeven, wordt met betrekking tot brandwerendheid van tunnels onderscheid gemaakt in:

- A) Veiligheid van weggebruikers, hulpverleners en omwonenden;
- B) Schade aan de tunnel (*Asset protection*).

Navolgend zal veelal ook kortweg worden gesproken over eisen met betrekking tot veiligheid (A) en eisen met betrekking tot schade (B).

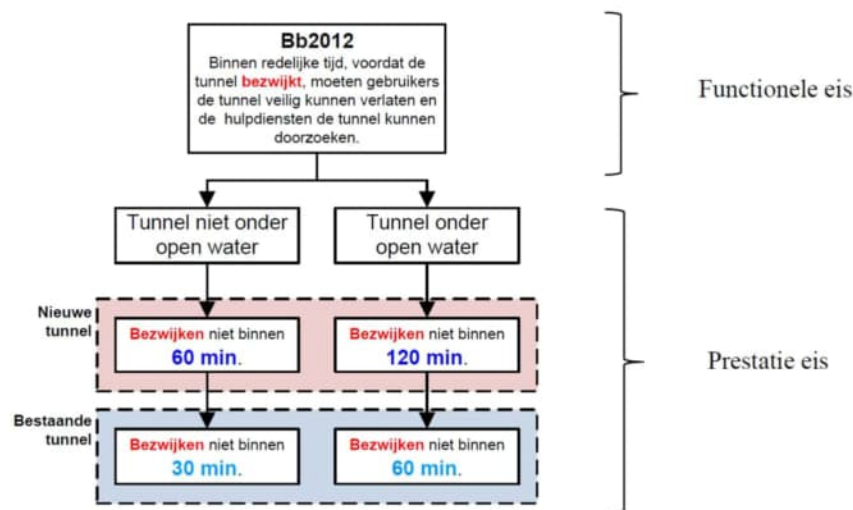
Op dit moment zijn de tunnels in gebruik. Het zal duidelijk zijn dat dit alleen verantwoord is als de veiligheid van personen in voldoende mate is gewaarborgd. In paragraaf 5.3 wordt daar op ingegaan. In paragraaf 5.2 wordt eerst kort het wettelijk kader geschetst. De beschouwingen van RWS voor de brandwerendheid van tunnels met het oog op asset protection worden kort besproken in paragraaf 5.4. In de daarop volgende paragrafen wordt ingegaan op respectievelijk te beschouwen scenario's, de doelstelling van het onderzoek en relevante te beschouwen aspecten.

5.2 Wettelijk kader en aanvullende eisen RWS

Het navolgende overzicht is ontleend aan “*Achtergronddocument brandwerendheid tunnels*” [3]. Relevante documenten zijn:

- Bb2012: Bouwbesluit 2012
- WARVW: Wet Aanvullende Regels Veiligheid Wegverkeerstunnels
- RARVW: Regeling Aanvullende Regels Veiligheid Wegverkeerstunnels
- ROK 1.2: RWS Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken

De eisen voor brandwerendheid van tunnels in het Bouwbesluit 2012 zijn in *figuur 1* weergegeven. Er geldt een algemene functionele eis dat de tunnel bij brand gedurende een redelijke/enige tijd kan worden verlaten en doorzocht zonder gevaar voor instorting. De eisen in het Bouwbesluit 2012 hebben duidelijk te maken met veiligheid.



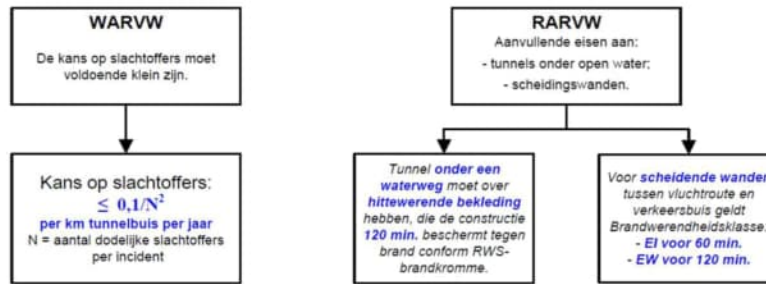
figuur 1 Brandwerendheidseisen voor tunnels in Bouwbesluit 2012.

De functionele eis wordt in het Bouwbesluit verder uitgewerkt in prestatie-eisen. Indien aan de prestatie-eis wordt voldaan, dan wordt automatisch geacht dat aan de functionele eis voldaan is [10]. Het is eveneens mogelijk om via een alternatieve wijze rechtstreeks aan te tonen dat aan de functionele eis voldaan is. Het Bouwbesluit spreekt hier van een “gelijkwaardige oplossing” [10]. Het toepassen van een gelijkwaardige oplossing is echter niet eenvoudig, aangezien de functionele eis niet duidelijk stelt wat een “redelijke tijd” is, en hoe moet worden bepaald wanneer sprake is van bezwijken.

Bij de prestatie-eisen wordt een onderscheid gemaakt in tunnels onder open water en niet onder open water en in nieuwe en bestaande tunnels. Volgens [3] moeten vrijwel alle tunnels gebouwd sinds 2006, voldoen aan de nieuwbouweisen. Dit heeft te maken met het reeds verkregen niveau. Bij toepassing van de prestatie-eisen zijn de aangegeven tijdsperioden duidelijk. Ook de wijze waarop bezwijken moet worden bepaald is bij toepassing van de prestatie-eisen in grotere mate duidelijk. Het Bouwbesluit bepaalt immers welke normen moeten toegepast worden bij de berekening. Voor nieuwbouw betonconstructies zijn dit NEN-EN-1990 en NEN-EN-1992 (of NEN 6069) [10]. Voor betontunnels specificeert NEN-EN-1992 bijvoorbeeld toepassing van de RWS brandkromme. Desalniettemin kan worden gesteld dat binnen de prestatie-eisen er geen duidelijke omschrijving, c.q. definitie, is van wat onder bezwijken moet worden verstaan, anders dan het overschrijden van een grenstoestand.

Hoewel bij toepassing van de prestatie-eisen uitgegaan wordt van één enkele nominale brandkromme, is er een breed spectrum aan branden mogelijk in de tunnel. Enerzijds zal het merendeel van de branden relatief klein zijn [6], deze hebben bijvoorbeeld betrekking op een enkele personenwagen. Het uitbranden van een tankwagen (aangehaald als het scenario dat aan de RWS kromme ten grondslag ligt) heeft een lagere kans van optreden. De kans dat meerdere tankwagens in één enkele brand betrokken zijn heeft een nog lagere kans. Dit spectrum aan branden impliceert dat ook een ontwerp, dat voldoet aan de prestatie-eisen, overeenstemt met een risico-profiel (relatie kansgevolg). Het risicoprofiel van de tunnel hangt ondermeer af van de verkeersintensiteit en de aanwezige actieve brandveiligheidsmaatregelen. De prestatie-eis brengt deze tunnel-specifieke karakteristieken niet in rekening, wat redelijkerwijs impliceert dat twee tunnels die beide voldoen aan de prestatie-eis een verschillend risicoprofiel hebben. Bij het toepassen van een gelijkwaardige oplossing kan bijvoorbeeld (in hypothese) aangetoond worden dat het risicoprofiel van een tunnel die niet voldoet aan de prestatie-eis, maar waar andere maatregelen genomen zijn, gelijkaardig is aan het risicoprofiel van een tunnel ontworpen conform de prestatie-eisen.

De aanvullende regels die in respectievelijk de WARVW en de RARVW worden gesteld, zijn in *figuur 2* schematisch weergegeven. Om invulling te geven aan de WARVW zal duidelijk moeten zijn onder welke omstandigheden er slachtoffers vallen. De RARVW stelt dat bij tunnels onder een waterweg hittewerende bekleding sowieso moet worden toegepast en stelt eisen aan doorslag ($E =$ vlamdichtheid-afdichting, $I =$ thermische isolatie - temperatuur en $W =$ thermische isolatie - warmtestraling) bij scheidingswanden.



figuur 2 Bepalingen in WARVW en RARVW in verband met brandwerendheidseisen voor tunnels.

RWS stelt om economische redenen (asset protection) strengere eisen aan de bescherming van tunnels tegen brand [4]. Uitgangspunt is dat de tunnel na een grote brand gerepareerd moet kunnen worden [9]. Voor tunnels geldt als maatgevende brand gedurende 120 minuten de RWS-brandkromme voor het gesloten deel en de waterstofkromme (Hydrocarbon) voor het niet-gesloten deel (*toeritten*). Door de tunnel voor 120 minuten tegen de RWS brandkromme te beschermen wordt de constructie geacht tegen verreweg de meeste voorkomende branden beschermd te zijn [9]. In de toelichting op het artikel (5.2) in de ROK is o.a. het volgende aangegeven:

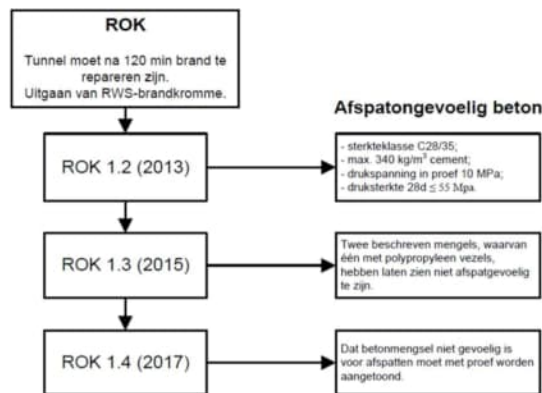
“De opdrachtgever kan, op basis van een beschouwing van het aanwezige risico (kans x gevolg) in relatie tot de kosten, beslissen om andere brandkrommen te hanteren en/of de tijdsduur van de brandkrommen te beperken. De mate van repareerbaarheid is altijd een belangrijk aspect bij de keuze van de voor te schrijven brandkromme, omdat het uitgangspunt is dat tunnels na het optreden van een grote brand repareerbaar moeten zijn. In dit kader is ook de situering van de tunnel van belang (bijvoorbeeld wel of niet onder open water).”

De ROK specificeert bovendien aanvullingen op NEN-EN-1992. Specifiek gelden ondermeer maximale temperaturen voor de wapening in de trekzone (250°C) en voor het omliggende beton (380°C). De toelichting in de ROK verduidelijkt dat door toepassing van deze eisen “nog een ruime marge aanwezig blijft op het bezwijken van de constructie”.

Wat met betrekking tot spatgevoeligheid van beton in de verschillende versies van de ROK is aangegeven, is weergegeven in *figuur 3*.

Kort samengevat kan worden gesteld dat:

- Bouwbesluit 2012 eist dat er voldoende tijd is om de tunnel te verlaten (veiligheid); Het voldoen hieraan kan aangetoond worden door te voldoen aan prestatie-eisen (niet bezwijken voor specifieke duur RWS brandkromme) of rechtstreeks via een gelijkwaardige oplossing.
- WARVW eist dat de kans op dodelijke slachtoffers voldoende klein is;
- RARVW voor tunnels onder waterwegen en scheidingswanden extra eisen geeft;
- ROK 1.2 eisen stelt m.b.t. beperken schade en daarmee de mogelijkheid voor repareren. Deze eisen worden ingevuld via een specifieke duur van de RWS brandkromme, en temperatuur limieten voor de beoordeling.



figuur 3 Afspatongevoelig beton volgens diverse versies van de ROK.

5.3 Huidig gebruik tunnels - veiligheid

Nadat in 2015 duidelijk was geworden dat, anders dan waarvan bij het ontwerp was uitgegaan, het toegepaste beton wel kan afspaten bij brand, was het nodig de consequenties ervan te beoordelen. Als eerste diende de met dit gegeven gepaard gaande veiligheidsrisico's te worden bepaald. In een document van RWS uit 2017 [5] zijn de bevindingen voor de vier, in de in hoofdstuk 3 genoemde tunnels beschouwd. Dat is gedaan door invulling te geven aan de eis dat het aantal slachtoffers niet groter mag zijn dan $0,1/N^2$ per kilometer tunnelbuis per jaar, waarbij conservatieve uitgangspunten (*worst-case situations*) zijn aangehouden:

- Sterk vereenvoudigde analyses;
- RWS brandkromme;
- Hittewerende bekleding (*aangebracht bij de bouw*) valt na 27 minuten van het dak;
- Beton is 10 minuten bestand tegen afspaten;
- Spatten treedt op met een constante snelheid van 70 millimeter in 12 minuten;
- Op trek belaste constructiedelen falen bij $T_{\text{wapening}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, c.q. afspaten dekking;
- Op druk belaste constructiedelen falen als de helft van de betondoorsnede is afgespat.

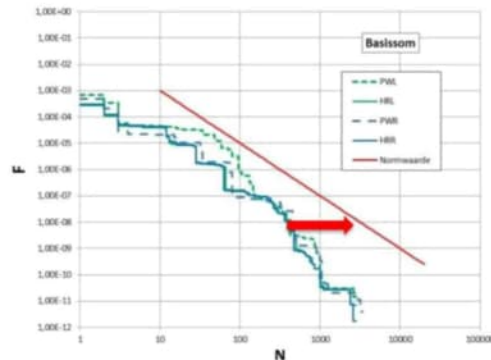
Het resultaat van de analyses is weergegeven in *figuur 4*. Met de conservatieve aannamen is een tijd tot bezwijken van de tunnel en bezwijken van de vluchtroute berekend, welke is afgezet tegen de tijd die een vluchter nodig heeft om de tunnel te verlaten.

Naam [-]	$T_{\text{norm,wet}}$ [min]	l_{tunnel} [meter]	t_{instort} [min]	$t_{\text{bezwijkvlr}}$ [min]	$t_{\text{max,vluchter}}$ [min]
Salland-Twente tunnel	60	493	22	22	20
Ketheltunnel	60	2000	22	> 120	50
Koning Willem-Alexander tunnel boven	60	1700	27	27	44
Koning Willem-Alexander tunnel onder	60	2400	49	49	58
2e Coentunnel	120	750	43	43	25

Tabel 1: Per tunnel de norm uit de wet ($T_{\text{norm,wet}}$), de lengte (l_{tunnel}), de tijd van het eerste bezwijken van delen van de tunnel (t_{instort}), de tijd tot het bezwijken van de veilige vluchtroute ($t_{\text{bezwijkvlr}}$) en de tijd totdat de laatste vluchter de tunnel verlaten heeft ($t_{\text{max,vluchter}}$).

figuur 4 Resultaten van veiligheidsbeschouwingen voor de vier tunnels (Fragment uit [5]).

Voor de Salland-Twente tunnel, de Ketheltunnel, en de 2^e Coentunnel wordt uit de conservatieve berekening geconcludeerd dat de afspatgevoeligheid van het beton niet resulteert in een groter risico voor de evacuerende weggebruikers. Voor de Koning Willem-Alexander tunnel kan de conservatieve berekening niet uitsluiten dat het personenrisico door de afspatgevoeligheid toeneemt. Nader studie van het f-N-diagram (*kans van optreden als functie van het aantal slachtoffers N*), zoals opgenomen in het Veiligheidsbeheersplan van Koning Willem-Alexander tunnel en weergegeven in *figuur 5*, duidt echter dat het origineel ontwerp (niet afspatgevoelig beton) een voldoende marge heeft tot de WARVV f-N-limiet om dit potentieel bijkomend risico te accepteren [5].



figuur 5 f-N curves basisberekeningen Koning Willem-Alexander tunnel [5].

Met de beschouwingen, zoals vastgelegd in [5], was voor RWS en de onafhankelijk veiligheidsbeambte wegtunnels Rijkswaterstaat, dhr. [REDACTED] voldoende aangetoond dat bij de vier tunnels aan de eisen met betrekking tot veiligheid voor de korte termijn is voldaan². Bij ondergetekenden is er geen tijdlimiet bekend voor de termijn waarvoor dit geldt.

Opgemerkt wordt dat los van de beschouwingen, zoals die voorgaand zijn samengevat, en/of als onderdeel daarvan, er ook maatregelen zijn genomen. In dat verband kan de verkeersdosering (*file-managementsysteem*) worden genoemd, waarmee wordt voorkomen dat er in de tunnel een file ontstaat. Een dergelijke tunneldosering wordt bijvoorbeeld bij de Ketheltunnel toegepast.

5.4 Huidige analyse brandwerendheid m.b.t. asset protection

Een beschouwing van de aanpak die RWS tot nu toe heeft toegepast om de brandwerendheid van tunnels met betrekking tot schade (*asset protection*) te beoordelen zal onderdeel zijn van de opdracht. Uit de beschikbaar gestelde documenten wordt opgemaakt dat daarbij in ieder geval de volgende onderdelen zijn betrokken:

- Wat is de kans op brand in een tunnel [6];
- Beoordeling van het afspatgedrag: algemeen [7] en bij de vier tunnels (*diverse documenten*);
- Hoe bezwijkt een tunnel: algemeen en bij de vier tunnels [8];
- Wat is bekend over branden in tunnels;
- Hoe functioneert hittewerende bekleding.

² Zoals voorgaand in deze notitie is aangegeven, kon voor het opstellen van het onderhavige Plan van Aanpak, nog niet alles in detail worden bestudeerd. Met de beschrijvingen in dit hoofdstuk is bedoeld de hoofdlijnen weer te geven.

Als wordt uitgegaan van een zeer hevige brand over een groot gebied (ingevuld in ROK 1.2 als een RWS brandkromme gedurende 120 minuten), met snel afsputten van de betondekking en wegvallen van de wapening, dan wordt gevonden dat de tunnel vroegtijdig bezwijkt en niet te repareren is. Met dat gegeven, en de wens dat de tunnel (*relatief*) eenvoudig te herstellen is na een dergelijke brand, resteert slechts één optie. Dat is de tunnel voorzien van hittewerende bekleding.

In de kwalitatieve beschouwingen van IXAS [8] van het bezwijkmechanisme van tunnels is uitgegaan van:

- het uitbranden van een grote tankwagen (200 á 300 MW). De brandintensiteit die hiermee overeenstemt wordt gemodelleerd overeenkomstig de RWS-brandkromme;
- een invloedsgebied van ca. 50 m;
- afsputten na 10 min;
- blootliggende wapening na 22 min of 27 min, bij een betondekking van respectievelijk 70 mm en 100 mm;
- verdere doorsnede afname met een snelheid van 6 mm/min.

De gevolgde aanpak kan inderdaad worden betiteld als een reasonable worst-case benadering. Of er ook een kans van optreden aan is gekoppeld, is ondergetekenden vooralsnog niet bekend. Meer algemeen is het risicoprofiel van de betrokken tunnels momenteel op basis van de beschikbare documentatie niet gekend. Hierdoor is niet duidelijk met welke frequentie verschillende gradaties van brandschade moeten worden verwacht.

5.5 Uitersten voor de te beschouwen scenario's

Op dit moment zijn de tunnels in gebruik, al dan niet met verkeerstechnische maatregelen. Een mogelijk scenario is dat de huidige situatie wordt gehandhaafd. Daarbij zou dan nog onderscheid kunnen worden gemaakt in handhaving voor de komende periode tot het moment van groot onderhoud (*stel 10 jaar*) of zelfs nog langer (*onbepaalde tijd*). En theoretisch zou ook nog bekeken kunnen worden of de nu ingestelde verkeerstechnische maatregelen, zoals tunneldosering, eventueel ook achterwege gelaten kunnen worden.

Handhaving van de huidige situatie voor een periode van 10 jaar zou eenvoudigweg als een uiterste scenario kunnen worden gezien. Het uiterste scenario aan de andere kant van het spectrum is dan de tunnel zo snel mogelijk volledig voorzien van hittewerende bekleding, zodanig dat bij de maatgevende "zwaarst mogelijke brand" (*RWS-brandkromme over grote lengte van de tunnel*) de tunnel 120 minuten kan weerstaan en met relatief beperkte maatregelen te repareren is.

Tussen deze twee uiterste scenario's zijn diverse andere scenario's mogelijk. Anders gezegd, er zijn maatregelen mogelijk die effect hebben op het risicoprofiel van de tunnels voor zover het de twee onderdelen, veiligheid en schade, betreft. Ondergetekenden zullen de mogelijke maatregelen in beeld brengen. Het verkregen, c.q. vastgestelde, risicoprofiel wordt dan vergeleken met het (referentie-)risicoprofiel voor de tunnel waarbij het beton niet afsputgevoelig is.

Onderscheid kan worden gemaakt tussen passieve en actieve brandwerende maatregelen. De volgende voorbeelden zijn indicatief. Welke opties relevant zijn, zal bekeken worden als onderdeel van de studie.

Voorbeelden van actieve brandwerende maatregelen zijn:

- Aanleggen van sprinklers of een watermiststelsel (vast automatisch blussysteem);
- Mobiel blussysteem
- Ventilatie systeem

Voorbeelden van passieve maatregelen zijn:

- Hittewerende bekleding
- Vermiculiet spuitmortel
- Mechanische maatregelen om het afvallen van los beton te voorkomen
- Horizontale beschermende membranen
(eventueel in combinatie met actieve systemen in de holte)

Voorbeelden van andere maatregelen zijn:

- Toepassen van file-managementsysteem;
- Regeling vrachtverkeer (Bijvoorbeeld: minimum afstanden, inhaalverbod)

5.6 Doelstelling

Zoals voorgaand is geschetst, resulteert het aanhouden van een nominale brandkromme, en (conservatieve) vereenvoudigingen in de analyse van bezwijken, erin dat de tunnels volledig voorzien dienen te worden van hittewerende bekleding om te voldoen aan de prestatie-eisen van het Bouwbesluit en de bijkomende eisen van RWS voor brandwerendheid van tunnels. Uitgangspunten die tot dit resultaat leiden zijn, gechargeerd weergegeven, het uitgaan van de redelijk voorzienbare zwaarst mogelijke brand over een groot gebied, het snel afspatten en wegvallen van de wapening, een snelle doorsnedevermindering en weinig incasseringsvermogen van de tunnel.

Zoals vermeld in hoofdstuk 5.2 is het volledig risicoprofiel van de tunnel echter niet gekend, dit zowel voor de ontwerpsituatie (beton niet afspatgevoelig), de huidige situatie (beton afspatgevoelig, geen HWB), als voor de situatie met hittewerende bekleding (beton afspatgevoelig, wel HWB). Het is dus vanzelfsprekend de vraag wat de kans is dat een dergelijk reasonable worst case scenario zich kan voordoen. En als die werkelijk zou optreden, wat is dan de kans dat bezwijken ook zo snel en volledig optreedt? Hoewel dit realistische vragen zijn, is de geschetste aanpak wel de manier (*nominale brandkromme, en veilige, conservatieve aanpak*) waarop normaliter tot ontwerp wordt gekomen (bv. met toepassing van de prestatie-eisen in het Bouwbesluit). De functionele eis van het Bouwbesluit laat echter toe om verder te kijken dan de standaardinvulling via de prestatie-eisen. Een beeld van het risicoprofiel zal bovendien met betrekking tot de asset protection toelaten om gefundeerde alternatieven voor HWB te beoordelen.

Het is daarom in eerste instantie de doelstelling van ondergetekenden om te proberen een completer beeld te schetsen van wat kan optreden bij brand in de genoemde tunnels. Daarbij wordt een integrale aanpak nagestreefd, waarbij het de intentie is om te kijken naar onder andere:

- verschillende branden, qua intensiteit, en kansen van optreden;
- de respons van het beton bij blootstelling aan de verschillende branden (afspatgevoeligheid)
- het structureel gedrag bij blootstelling aan de verschillende branden (gevaar instorting)
- de reparatiebaarheid van de tunnel na de brand

Deze aspecten worden in eerste instantie in algemene zin onderzocht voor een tunnel zonder bijkomende veiligheidsmaatregelen. Vervolgens zullen mogelijke maatregelen en hun effecten worden besproken (met name: effect op de frequenties en intensiteit van branden, op het afspatten, op het

gevaar voor instorting, en op de repareerbaarheid). Hierbij wordt eveneens rekening gehouden met de betrouwbaarheid (beschikbaarheid) van de maatregel bij brand.

De analyse wordt in tweede instantie uitgebreid met een beoordeling van met de maatregelen gepaard gaande aspecten als kosten en hinder, hierbij rekening houdend met de levensduur van de maatregelen. Meer specifiek is het de intentie om te kijken naar onder andere:

- kosten, benodigde tijd, en niet-beschikbaarheid tunnel bij installatie/aanleg
- exploitatiekosten van de maatregel (periodiek onderhoud en levensduur)
- kosten van, en onbeschikbaarheid door, herstel na brand (beoordeling kosten gepaard met schade-analyse voorgaand deel)

Ondergetekenden zien het als hoofddoel om de mogelijke scenario's met betrekking tot omgaan met brandwerendheid te schetsen, in algemene zin en toegepast op de betrokken tunnels, en om vooreerst los van het bestaande wettelijk kader en de richtlijnen van RWS, een zo realistisch mogelijk beeld te schetsen van wat kan gebeuren bij een brand in een van de tunnels en de kans van optreden ervan. Het streven is om RWS, en de bij de drie tunnels betrokken gemeenten, de mogelijkheid te geven, meer dan nu mogelijk is, op basis van realistische technische beschouwingen, keuzes te maken over hoe om te gaan met de brandwerendheid van de tunnels.

5.7 Overzicht van relevante aspecten

Onderwerpen die ondergetekenden in een integrale aanpak de revue zullen laten passeren, zijn, zoals hiervoor in algemene bewoording weergegeven:

- frequentie en intensiteit van branden in tunnels;
- relatie intensiteit brand en afspatgedrag van het beton;
- relatie lokaal bezwijken (afspatten en verlies van wapening) en instorten van de tunnel;
- mate van te verwachten schade en repareerbaarheid van schade, bij optreden van een brand met een zekere intensiteit;
- effect van maatregelen op optreden brand (frequentie, intensiteit), en/of de constructie (afspatgedrag, gevaar instorting, schade);
- kosten en benodigde tijd voor installatie maatregelen
- levensduur maatregelen en vereiste van periodiek onderhoud (life cycle cost benadering)
- hinder (bij installatie en onderhoud maatregelen, en na brand)

6 Plan van Aanpak

6.1 Algemeen

De vraagstelling is relatief ruim en de invulling van de opdracht kan op verschillende abstractieniveaus worden uitgevoerd. Ondergetekenden stellen voor om de diepgang van de studie af te stemmen op het beoogde resultaat, maar ook op het beoogde moment van opleveren van een rapportage. Het beoogde resultaat is zo goed mogelijk invulling geven aan de doelstelling, zoals beschreven in paragraaf 5.6. Voor wat betreft het opleveren van een conceptrapportage is medio augustus het streven. Binnen die randvoorwaarden zal zo goed mogelijk invulling worden gegeven aan de opdracht.

Ondergetekenden zullen in eerste instantie zoveel mogelijk gebruik maken van al uitgevoerde onderzoeken en studies bij het definiëren van een zo realistisch mogelijk beeld van kans op, en gevolgen van, branden in tunnels in het algemeen en de drie specifieke landtunnels in het bijzonder. Daar waar opportuun zullen ondergetekenden ook een mening geven over de betreffende informatie uit de beschikbaar gestelde literatuur.

6.2 Opzet van het onderzoek

Een voorstel voor de opzet van het onderzoek is als volgt (zie *Tabel 1*). In eerste instantie zal in algemene zin het structureel gedrag van tunnels bij brand worden beschouwd, rekening houdend met het volledige spectrum aan mogelijke branden. Dit zal naar verwachting de meest omvangrijke activiteit zijn. In paragraaf 6.3 is de opzet van dit onderdeel van het onderzoek nader toegelicht. De resultaten ervan zullen worden gebruikt als basis en referentie voor de daaropvolgende werkzaamheden, waarbij respectievelijk:

- de effecten van brandwerende maatregelen (*actief en passief*) worden geanalyseerd, zowel met betrekking tot structureel gedrag bij brand, als met betrekking tot kosten en hinder;
- voor zowel zonder als met brandwerende maatregelen wordt onderzocht, voor zover relevant, hoe de beschouwingen en analyses uitpakken voor de drie tunnels.

Tabel 1 Hoofdonderdelen in het onderzoek naar brandwerendheid van vier tunnels.

	Algemeen	Tunnelafhankelijk
Algemene beschouwingen – geen brandwerende maatregelen	Veiligheid Schade (<i>asset protection</i>)	Veiligheid Schade (<i>asset protection</i>)
Analyse effecten van (<i>actieve en passieve</i>) brandwerende maatregelen	Veiligheid Schade (<i>asset protection</i>)	Veiligheid Schade (<i>asset protection</i>)

In het gehele onderzoek zullen in het beschouwen van het risicoprofiel de volgende twee componenten terugkomen:

- veiligheid
- Schade (*asset protection*).

Opgemerkt kan worden dat de huidige situatie door RWS al is beoordeeld voor wat betreft veiligheid, zoals in paragraaf 5.3 is toegelicht. Ondergetekenden zullen deze beschouwingen/analyses beoordelen. Mocht de conclusie ervan zijn dat de eerdere analyses door ondergetekenden in hoofdzaak kunnen worden onderschreven, en dat dus de veiligheid bij het huidig gebruik met toepassing van de bestaande beoordeling door RWS voldoende gewaarborgd is voor onbepaalde tijd, dan zal het bij het beoordelen van aanvullende brandwerende maatregelen niet meer nodig zijn de veiligheid direct te beoordelen en zal de aandacht primair gericht zijn op het beoordelen van (het beperken van) schade (*asset protection*). Dit neemt niet weg dat mogelijk toch positieve effecten van maatregelen op de veiligheid zullen worden geadresseerd.

6.3 Algemene beschouwingen brandwerendheid tunnels

In dit basisdeel van het onderzoek zullen ondergetekenden de relevante onderdelen bij brandwerendheid van tunnels successievelijk beschouwen om vervolgens de bevindingen op de diverse onderdelen te gebruiken bij een integrale beschouwing van de brandwerendheid van tunnels. Zoals is

toegelicht in paragraaf 5.6 is het de intentie te komen tot een zo realistisch mogelijk beeld van kansen op, en gevolgen van, een brand in de tunnels. Deze analyse staat vrij van regelgeving en beschouwt het fysisch (werkelijk) gedrag om het risicoprofiel te bepalen. Beoogde resultaten, c.q. de presentaties van bevindingen, zijn:

- Frequentie-gevolg diagrammen
- Foutenboom: uitgaand van een schadeniveau nagaan welke combinaties van omstandigheden daartoe aanleiding kunnen geven;
- Gebeurtenissenboom: uitgaan van frequentie brand en conditionele kansen brandomvang een beoordeling maken van de te verwachten schadeniveaus en hun frequenties.

Ondergetekenden zullen kennis nemen van beschikbare informatie, die informatie, voor zover relevant, kort rapporteren en aanvullen met eigen inzichten op de volgende onderwerpen:

- Kans op brand in tunnels;
- Mogelijkheden van evacuatie;
- Afspatgedrag van beton;
- Bezwijken van tunnelconstructie bij brand;

Zoals voorgaand aangegeven, zullen de bevindingen op de afzonderlijke onderwerpen worden gecombineerd in een integrale beschouwing van het risicoprofiel voor het werkelijke fysische gedrag.

Ondergetekenden zullen bij de invulling van de opdracht gebruik maken van alle mogelijke, beschikbare informatie om tot een goed beeld te komen, alsmede een goede onderbouwing van dat beeld. Onderdeel daarvan zal zijn een inventarisatie van tunnel-(en wellicht andere)branden. Ook hierbij geldt weer dat in eerste instantie gebruik zal worden gemaakt van al eerder, door anderen gemaakte, inventarisaties.

6.4 Analyse van brandwerende maatregelen

Met de resultaten van de algemene beschouwingen, zoals besproken in paragraaf 6.3, als referentie, zullen mogelijke brandwerende maatregelen worden geanalyseerd, c.q. beoordeeld. De maatregelen zullen worden beoordeeld met betrekking tot:

- Veiligheid
- Schade (*asset protection*)

Voor zover relevant zullen de maatregelen ook worden beoordeeld op de navolgende criteria.

Beoordelingscriteria betreffende aanleg, levensduur en betrouwbaarheid van de brandwerende maatregel:

- Kosten van aanleg/installatie;
- Exploitatiekosten;
- Levensduur;
- Betrouwbaarheid;
- (Verkeers)overlast van aanbrengen.

Beoordelingscriteria betreffende effectiviteit van de brandwerende maatregel voor veiligheid:

- Vermindering van de kans op brand;
- Reductie van de intensiteit van de brand;

- Gevolgen voor verkeersdeelnemers (*is er een reductie van het aantal slachtoffers?*);
- Gevolgen voor hulpdiensten;
- Gevolgen voor omwonenden.

Beoordelingscriteria betreffende effectiviteit van de brandwerende maatregel voor de schade:

- Effect op schade aan de tunnel;
- Effect op tijdsduur tot (partieel) bezwijken van de tunnel;
- Effect op de kosten van herstel na een brand;
- Effect op de duur van het herstel van de tunnel.

Beoordelingscriteria betreffende effectiviteit van de brandwerende maatregel voor voldoen aan wettelijk kader, c.q. RWS richtlijnen:

- Mate waarin wordt voldaan aan wettelijke eisen en, wanneer niet voldaan is aan de wettelijke eisen, mate waarin het risicoprofiel vergelijkbaar is met het risicoprofiel wanneer voldaan wordt aan de wettelijke eisen;
- Mate waarin wordt voldaan aan richtlijnen van RWS en, wanneer niet voldaan is aan de richtlijnen van RWS, mate waarin het risicoprofiel vergelijkbaar is met het risicoprofiel wanneer voldaan wordt aan deze richtlijnen;

6.5 Tunnelspecifieke beschouwingen

Nadat de algemene beschouwingen en analyses voor de brandwerendheid van tunnels zijn uitgevoerd, zullen voor zover relevant de uitwerkingen voor de landtunnels per tunnel worden beschouwd.

7 Projectorganisatie en administratieve zaken

De werkzaamheden zullen worden uitgevoerd in een nauwe samenwerking tussen ondergetekenden, waarbij vertrouwelijk wordt omgegaan met de beschikbaar gestelde informatie en, zonder toestemming van RWS (*contactpersoon* [REDACTED]), niet met derden wordt gecommuniceerd over de inhoud van onderhavige opdracht en aangeleverde documenten (*een geheimhoudingsverklaring is getekend*). Als een collega van een van beiden wordt betrokken bij een onderdeel van de opdracht, geldt voor die persoon dezelfde geheimhoudingsverklaring.

Voor het project is ir. [REDACTED] van RWS contactpersoon voor ondergetekenden. Daarnaast zal tijdens uitvoering van de opdracht in overleg met dhr. [REDACTED] enkele malen overleg worden gevoerd met het navolgende projectteam van RWS:

- ir. [REDACTED]
- ir. [REDACTED]
- ir. [REDACTED]



In de voorbereiding van de onderhavige opdracht heeft inmiddels ook al tweemaal overleg met het projectteam plaatsgevonden.

De werkzaamheden worden uitgevoerd op basis van nacalculatie. Uurtarieven, begroting van kosten en facturatie wordt separaat afgestemd met de contactpersoon, waarbij Adviesbureau Hageman en Universiteit Gent ieder afzonderlijk communiceren met RWS.

Het streven is om medio augustus 2020 een conceptrapportage aan te leveren aan RWS. Naar verwachting zal in de periode tot medio augustus drie tot vier maal overleg met het projectteam plaatsvinden om de koers van werkzaamheden af te stemmen, de voortgang te bespreken en, zo nodig, informatie op te vragen.

Rijswijk en Gent, 22 juni 2020

Dr.ir. 
Adviesbureau Hageman
(oud-hoogleraar TU Delft en Eindhoven)


Prof.dr.ir. 
Universiteit Gent

Bijlage A Opdrachtomschrijving [2]



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

[redacted] en Universiteit Gent (prof [redacted])

memo

Opdracht omschrijving maatregelen brandwerendheid tunnels

T
F
www.rijkswaterstaat.nl

Contactpersoon

[redacted]
projectdirecteur

T + [redacted]
[redacted]@rws.nl

Datum
25 maart 2020

Bijlage

Lijst van reeds uitgevoerde onderzoeken
Lijst beoordelingscriteria maatregelen

LS

Met dit memo wil ik de opdrachtomschrijving voor het noodzakelijke onderzoek naar de maatregelen voor de brandwerendheid van tunnels vastleggen.

Probleemstelling.

Uit onderzoek is gebleken dat, in ieder geval, bij een 4-tal tunnels, die gebouwd zijn na 2008, het gedrag bij brand zeer waarschijnlijk anders is dan bij tunnels uit het verleden. Het betreft hier met name het afspatgedrag van beton. Ten opzichte van het verleden is, als gevolg van veranderingen in het beton, zonder dat er een substantieel andere betonsamenstelling wordt gebruikt, het spatgedrag toegenomen hetgeen bij brand nadelig is voor het draagvermogen van de constructie.

Indien nader wordt ingezoomd op het brandgedrag van tunnels is het goed om onderscheid te maken in tweetal criteria namelijk:

1. De veiligheid voor de gebruikers van de tunnel bij brand en
2. De bescherming van het object (tunnel) bij brand (asset protection).

Sub1. De veiligheid van de gebruikers van de infrastructuur/Tunnel is verankerd in het bouwbesluit en de tunnelwet en wordt bewaakt door het lokaal bevoegd gezag.

Sub 2. De bescherming van de (tunnel)constructie bij brand (asset protection) is gewaarborgd middels de regels uit het bouwbesluit en de aanvullende eigen regelgeving van RWS (ROK). De verantwoordelijkheid hiervoor ligt bij de eigenaar van de constructie i.c. het Rijk.

Bij de analyse van de gevolgschade ten gevolge van brand in tunnels, is het goed om onderscheid te maken tussen "landtunnels" en tunnels onder een waterloop. Vanwege de veel grotere impact van schade bij brand voor tunnels onder een waterloop worden hierbij voorgesteld geen onderscheid te maken tussen eisen t.a.v. de veiligheid voor gebruikers en asset protection.

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

Pagina 1 van 4

Door een omissie bij de totstandkoming van het bouwbesluit is er geen onderscheid gemaakt tussen de veiligheid voor de gebruikers en de asset protection. Vanuit het ministerie van I&W wordt onderzocht of deze omissie in de regelgeving voor nieuw te bouwen tunnels in de Wet en Regelgeving hersteld dient te worden. De resultaten van dit onderzoek kunnen als onderbouwing voor dit besluit gebruikt worden

Datum
19 maart 2020

Om, voor wat de brandbestendigheid van de tunnels betreft, deze aantoonbaar te laten voldoen aan de vigerende regelgeving w.o. bouwbesluit, is door de minister van I&W besloten om de volgende 4 tunnels:

1. Tweede Coentunnel (tunnel onder het Noordzeekanaal) te Amsterdam
2. Koning Willem-Alexandertunnel (landtunnel door centrum van Maastricht)
3. Ketheltunnel (landtunnel in de A4 te Schiedam) &
4. Salland - Twentetunnel (landtunnel gecombineerde weg/ spoortunnel te Nijverdal),

aan de binnen zijde (te weten het plafond en de wanden) te bekleden met hitte werende bekleding (HWB).

Uit recente onderzoeken is gebleken dat het aanbrengen van hitte werende bekleding een robuuste maatregel is. Ook bij een 200 MW-brand volgens de RWS-brandkromme zal er geen afspringen van beton van de constructie optreden. Het in een tunnel aanbrengen van hitte werende bekleding is een omvangrijke klus. Alhoewel de tijd benodigd om deze hitte werende bekleding aan te brengen per project verschilt, zal de tunnel hiervoor gedurende een lange periode (de tijd varieert afhankelijk van de lengte van de tunnel en het aantal werkbare uren per etmaal) buiten gebruik gesteld moeten worden. Dit leidt veelal tot grote (verkeers)overlast. Dit wordt door een aantal gemeenten niet voetstoots geaccepteerd. Met name door de gemeentebesturen van Schiedam (Ketheltunnel) en Maastricht (KWA) is aan RWS gevraagd om preventieve maatregelen te nemen die, voor wat betreft de verkeersoverlast, minder ingrijpend zijn.

Dit onderzoek moet inzage geven in de vraag welke (tijdelijke) alternatieven er zijn voor het aanbrengen van hitte werende bekleding, wat de levensduur hiervan is, wat het effect op de verkeersshinder is van het aanbrengen van het betreffende alternatief en wat hiervan de kosten zijn (LCC). In bijlage 1 is een lijst van uitgevoerde onderzoeken opgenomen die, in opdracht van RWS, direct of indirect aan dit onderwerp gerelateerd zijn.

Onderzoekvraag.

Om de verkeersoverlast van het aanbrengen van hitte werende bekleding te beperken wordt overwogen om deze werkzaamheden voor de genoemde landtunnels te combineren met grootschalige onderhoudswerkzaamheden. Voor de Ketheltunnel en de koning Willem Alexandertunnel zijn deze werkzaamheden gepland omstreeks 2030.

De vraag aan het onderzoeksteam is te onderzoeken:

1. welke mogelijke scenario's er zijn met betrekking tot het (snel of op termijn) verkrijgen van voldoende brandwerendheid van de betreffende tunnels, gegeven de recent verkregen kennis over het brandgedrag van het toegepaste beton (hierbij dienen ook actieve brandwerende systemen zoals sprinklers en watermist systemen betrokken te worden). In bijlage 2

Is een lijst van parameters opgenomen die in de beschouwing betrokken dient te worden;

Datum
19 maart 2020

2. hoe bij de diverse scenario's de veiligheid van gebruikers voldoende is gewaarborgd en welke rol schade aan de constructie (asset protection) daarbij speelt, met daarbij ook aandacht voor de proportionaliteit van de maatregelen voor wat betreft o.a. hinder en kosten(LCC);
3. welke risico's RWS als tunneleigenaar loopt t.a.v. veiligheid van gebruikers en in het kader van asset protection als zou worden gekozen voor het scenario van uitstellen tot 2030 voor het uitvoeren van de beplatingswerkzaamheden;
4. welke onderzoeksvragen m.b.t. brandwerendheid van tunnels in de komende jaren prioriteit zouden moeten krijgen. Het gaat hierbij om een duiding van de gewenste richting van het onderzoek.

Begrenzing Onderzoek.

Dit onderwerp kent naast een technische ook een juridisch politiek component. Deze laatste component (juridisch politiek) is nadrukkelijk geen onderdeel van de onderzoeksvraag.

Rapportage

Ik verwacht in de rapportage een algemene beschouwing met betrekking tot de onderwerpen:

- Een beschrijving van de alternatieven voor het aanbrengen van de hitte werende bekleding. Hierbij dient aandacht besteed te worden aan de volgende aspecten:
 - Verkeers hinder bij aanbrengen
 - Kosten maatregel
 - Levensduur maatregel (LCC)
- Veiligheid voor de gebruikers,
- De bescherming van het object bij brand (asset protecten),
- Een nadere beschouwing voor elk van de drie genoemde landtunnels &
- Een duiding (zie hiervoor ook punt 4 uit de onderzoeksvraag) over vervolgonderzoek om meer grip te krijgen op het gedrag van betonconstructies bij brand en wat hierbij bepalende factoren zijn.

Met vriendelijke groet,


projectdirecteur

Bijlage 1

Datum
19 maart 2020

Bramen onderzoek – Efectis
Onderzoek brandwerendheid Gaasperdammertunnel – Efectis
Onderzoek brandwerendheid 2^e Coentunnel – Efectis
Onderzoek brandwerendheid Koning Willem-Alexandertunnel -tunnel – Efectis
Onderzoek brandwerendheid Salland Twente tunnel – Efectis
Onderzoek brandwerendheid Ketheltunnel – Efectis
Second Opinion aantoonbaarheid brandwerendheid RWS tunnels – TU Delft
Second Opinion aanpak brandwerendheid nieuwbouwprojecten – TU Delft
Onderzoek afspatgevoelig beton – TNO
Kleine Branden onderzoek – TNO
Onderzoek warmte indringing PP-vezel beton

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

Pagina 4 van 4

Bijlage B Bijlage 8 van Veiligheidsrichtlijn deel C, versie 1.1 (15 juni 2009) [37] “Bescherming tegen brand”.

8.1 Schademechanismen

Brand bij betonconstructies kan leiden tot de volgende schade mechanismen:

- het afspatten van beton;
- het afnemen van de sterkte van beton en staal;
- het ontstaan van temperatuurgradiënten.

Ad a. het afspatten van beton.

Door opwarming van beton gaat het, in het beton aanwezige, water over in damp; de opgesloten damp geeft (hoge) inwendige spanningen hetgeen kan leiden tot het afspatten van (schollen) beton. Zoals gebleken is bij brandproeven ten behoeve van de Westerscheldetunnel kan dit een doorgaand proces zijn.

Factoren die een belangrijke rol spelen zijn:

- het vochtgehalte; naarmate er meer water in het beton aanwezig is neemt de kans op afspatten toe;
- de dichtheid van het beton; naarmate het beton dichter is neemt de kans op afspatten toe; in het algemeen is de dichtheid gekoppeld aan de sterkte(klasse): hogere sterkte betekent hogere dichtheid;
- de thermische belasting en de temperatuurgradiënt over de doorsnede;
- de mechanische belasting; door drukspanningen wordt de kans op afspatten verhoogd;
- de snelheid van opwarmen; naarmate de snelheid van opwarmen hoger is neemt de kans op afspatten toe.

Ad b. het afnemen van de sterkte van beton en staal

Beton en staal verliezen bij verwarming hun sterkte. Dit sterkteverlies begint bij wapeningsstaal bij circa 250 °C; boven deze temperatuur neemt de sterkte geleidelijk af naar 0. Bij beton neemt de sterkte tot circa 350 °C nauwelijks af; boven deze temperatuur neemt de sterkte geleidelijk af naar 0.

Ad c. het ontstaan van temperatuurgradiënten

Als gevolg van de warmtestroom ontstaat er over de dikte van de constructie een tijdsafhankelijke temperatuurgradiënt. Als het tunneldak aan de binnenzijde warm wordt heeft dit tot gevolg dat er een zekere extra doorbuiging optreedt en de inklemmingsmomenten toenemen. Mits er voldoende herverdelend vermogen beschikbaar is (vloeigebieden als gevolg van het taai gedrag van gescheurd gewapend beton) wordt de veiligheidsfactor door de aanwezigheid van temperatuurgradiënten niet nadelig beïnvloed. De extra optredende doorbuiging is echter, als gevolg van het plastisch gedrag van de constructie, bij afkoelen niet volledig omkeerbaar (blijvende vervorming) en kan daarmee eventueel een niet te accepteren schade vormen.

Een onderscheid moet worden gemaakt tussen constructies die, nabij het vlak waar de brand kan optreden, voor de constructieve integriteit essentiële wapening bevatten (bijvoorbeeld afgezonken tunnels) en constructies waarbij de aanwezige wapening in de eindtoestand niet zo essentieel is (boortunnels).

Voor afgezonken tunnels geldt dat, bijvoorbeeld aan de binnenzijde in het midden van het dak, de zware aanwezige wapening goed gehecht moet blijven aan gezond beton en niet te veel sterkte verloren mag gaan als gevolg van verhoging van de temperatuur in de wapening. Dit wordt al jaren bereikt door het aanbrengen van hittewerende bekleding. Bij een brand volgens de RWS-brandkromme wordt door de isolerende werking van de hittewerende bekleding de temperatuur op de interface hittewerende bekleding/beton beperkt tot maximaal circa 380 °C, terwijl op 2,5cm diepte in het beton de maximaal bereikte temperatuur lager dan circa 250 °C blijft. Gezien de beperkte dekking op de wapening is afspatten onder deze omstandigheden feitelijk niet toelaatbaar. Voor het beton dat de laatste jaren bij afgezonken tunnels wordt toegepast (B35) en zonder de aanwezigheid van drukspanningen als gevolg van de belasting (trekzone aan binnenzijde en in het midden van de overspanning van het dak) is uit onderzoek gebleken dat bij toepassing van hittewerende bekleding onder deze omstandigheid geen afspatten optreedt (ook bij niet droog beton).

Bij boortunnels wordt echter dichter beton (hogere sterkte) gebruikt terwijl het beton door de aard van de constructie onder druk staat. Hierdoor is de afsplatgevoeligheid veel hoger dan bij afgezonken tunnels.

Het mechanisme van afspatten is een complex geheel. Hierdoor is vooralsnog niemand in staat om door middel van berekeningen met enige nauwkeurigheid het verschijnsel afspatten te kunnen voorspellen. Het bestaande inzicht is op dit moment daarom hoofdzakelijk kwalitatief. Zo is bekend dat een dichtere beton (hetgeen enigszins correleert met de betondruksterkte) gevoeliger is voor afspatten. Verder versterkt de aanwezigheid van een normaal drukspanning het afspatten. Natuurlijk heeft de aard van de gehanteerde brandkromme ook invloed; vooral de snelheid waarmee de temperatuur in het begin stijgt is van belang.

Een belangrijk aspect bij het afspatten is de snelle verdamping van in het beton aanwezige water (stoomvorming). Afhankelijk van de mate van doorlatendheid voor waterdamp van het beton bouwen zich door stoomvorming hoge drukspanningen in de poriën op en daardoor trekspanningen in het beton. De aard van het poriënsysteem verandert ook aanzienlijk bij toenemende temperatuur; vooral dit aspect maakt het moeilijk voor berekening toegankelijk. Verder veroorzaken de optredende temperatuurgradiënten, het geringe verschil in uitzettingscoëfficiënten tussen de samenstellende bestanddelen bij hoge temperaturen enzovoort ook trekspanningen.

Als op een bepaalde plaats in het betreffende beton de stijging van de temperatuur als functie van de tijd beneden een zekere waarde blijft zal er voldoende tijd zijn voor de gevormde waterdamp om te ontsnappen zonder dat te grote trekspanningen ontstaan. Dit is echter kwalitatief, het is heden ten dage echter niet mogelijk hierover kwantitatieve uitspraken in een voorspellende sfeer te doen.

Het afspatten kan in een relatief hoog tempo doorgaan (progressive spalling) waardoor de overall veiligheid snel de kritische waarde kan bereiken. Progressive spalling wordt niet alleen in het laboratorium geconstateerd maar ook bij een aantal branden in tunnels in het buitenland de laatste jaren (Kanaaltunnel, Mont Blanc, Tauerntunnel, brand boormachine in Denemarken). In Nederland is er geen omliggende rots die voorkomt dat de tunnel instort.

Het mechanisme van afspatten heeft een enigszins alles of niets karakter: of het treedt (net) niet op, of het kan al snel destructief zijn.

Aan de binnenzijde van het dak van afgezonken tunnels is geen afspatten toegestaan (theoretisch is zeer beperkt afspatten toelaatbaar) teneinde de werking van de essentiële wapening niet in gevaar te brengen. Bij geboorde tunnels kan daarentegen op zich relatief veel schade worden toegelaten. Dit komt omdat bij geboorde tunnels in de gebruiksfase de aanwezige wapening betrekkelijk weinig functie heeft in de krachtswerking. De aanwezige wapening is immers primair benodigd voor het transport en vooral bij het inbouwen van de liningelementen. De schade mag echter ook bij een boortunnel niet zo groot zijn dat de constructieve integriteit in gevaar komt, met andere woorden enig afspatten is toegestaan maar het proces van afspatten moet wel stoppen (geen progressive spalling). Verder moet de ontstane schade te repareren zijn. Over de diepte waar de temperatuur van het beton hoger is geweest dan circa 400 °C (bij lagere temperaturen is het beton 'gezonder' gebleven) moet het beton worden verwijderd en door nieuw (bijvoorbeeld spuitbeton) vervangen worden; het gaat hierbij om enige centimeters bij een brand volgens de RWS-brandkromme.

Een bijzonder aandachtspunt is het optreden van warmtelekken via verbindingmiddelen van tegen het beton gemonteerde voorzieningen. Enkele brandproeven ten behoeve van de Westerscheldetunnel zijn uitgevoerd met plaatmaterialen die met bouten op het beton zijn aangebracht. Bij de gebruikte korte bouten, M8 op relatief grote onderlinge afstand en nauwelijks belast, is niet gebleken dat warmtelekken via deze bouten de inleiding vormen voor afspatten. Wel is bij een andere proef gebleken dat bij een groep, dicht bij elkaar aangebrachte, bouten wel afspatten werd ingeleid. Bij toepassing van lange, zwaar belaste bouten of een groep van, dicht bij elkaar aangebrachte, bouten dient daarom het inleiden van afspatten te worden onderzocht.

8.2 Economische afweging

Of tunnel(achtige) constructies moeten worden beschermd tegen de mogelijke gevolgen van brand is vooral afhankelijk van de vraag wat de economische gevolgen zijn van het (gedeeltelijk) verloren gaan van de constructie. De kans op het (gedeeltelijk) verloren gaan is vooral afhankelijk van: verkeersintensiteit, lengte van de constructie, beschermende maatregelen en repressieve mogelijkheden.

Er dient onderscheid te worden gemaakt tussen tunnels die onder waterwegen zijn gelegen en tunnels die niet onder waterwegen zijn gelegen (landtunnels, overkapte wegen, viaducten en dergelijke). Een onderwatertunnel zal na instorting hoogstens tegen zeer hoge kosten hersteld kunnen worden. De bijkomende economische gevolgschade, door het gedurende lange tijd niet beschikbaar zijn van de oeververbinding, kan dan zeer groot zijn.

Bij een niet onder waterwegen gelegen constructie ligt dit anders omdat herstel mogelijk is en de transportfunctie relatief korte tijd verstoord wordt.

Bij de beslissing om wel of niet beschermende maatregelen te treffen dient dit in de overwegingen te worden meegenomen.

In 1980 werd besloten alle belangrijke verkeerstunnels in autosnelwegen, zowel bestaande als nieuwe tunnels, (met uitzondering van de Schipholtunnel waren dit allemaal oeververbindingen) te voorzien van een hittewerende bekleding; dit gold ook voor aquaducten.

De dikte van de bekleding werd zodanig gekozen dat een 2 uur durende felle benzinebrand kan worden doorstaan (er was toentertijd alleen aandacht voor de temperatuurcriteria; aan het eventueel optreden van afsputten werd toen nog niet gedacht).

Een risicostudie van TNO heeft aangetoond dat het economisch verantwoord is om hittewerende bekleding aan te brengen in onderwatertunnels (en aquaducten) in autosnelwegen ook al wordt het tanktransport van benzine door de betreffende tunnel niet toegestaan.

Het nemen van beschermende maatregelen kan worden gezien als een vorm van 'verzekering' tegen niet of moeilijk te dragen kosten. Daarbij rendeert natuurlijk een goedkope 'verzekering' (PP-vezels) eerder dan een dure 'verzekering' (sprinkler, hittewerende bekleding).

Niet bij elke constructie behoeven per definitie beschermende maatregelen te worden aangebracht; als het risico (kans * gevolg) voldoende klein is, in relatie tot de investeringskosten van de maatregelen, kunnen deze maatregelen eventueel achterwege worden gelaten. Zo is het niet gebruikelijk bij viaducten hittewerende bekleding aan te brengen.

8.3 Hittewerende bekleding

Geschiedenis

De aanleidingen tot het toepassen van hittewerende bekleding zijn:

1^e Op verzoek van de toenmalige minister van Verkeer en Waterstaat werd in 1974 door de hoofddirectie van Rijkswaterstaat aan TNO opgedragen een oriënterend onderzoek te doen naar het vervoer van gevaarlijke stoffen door tunnels. Doel van dit onderzoek was te bekijken of meer gevaarlijke stoffen dan voorheen tot de Rijksverkeerstunnels konden worden toegelaten. Uit dit onderzoek bleek dat het mogelijk is om tunnels tegen een (benzine)brand te beschermen door het aanbrengen van een hittewerende bekleding.

2^e Bij een ernstig ongeval in de Velsertunnel in 1978, waarbij 5 doden vielen en waarbij 2 vrachtwagens en enkele personenwagens waren betrokken, ontstond er een brand die circa 30 minuten duurde. Uit onderzoek achteraf bleek dat er temperaturen tot circa 800 °C waren opgetreden. De tunnelconstructie, bestaande uit gewapend beton met een dekking van 70mm op de wapening (met een lage treksterkte), heeft hierbij geen aantoonbare blijvende schade ondervonden. Tegenwoordig wordt vrijwel uitsluitend hoogwaardig wapeningsstaal met een dekking van minimaal 35mm toegepast. Beide facetten (kleinere dekking en hoogwaardiger staal) werken nadelig bij het optreden van brand.

Hoewel bij de korte brand in de Velsertunnel er slechts in beperkte mate beton is afgespat werd, vooral voor de nieuwere tunnels, gevreesd voor grotere schade bij branden. Vooral bij een langere brandduur kan meer beton afsputten en is de wapening minder beschermd.

Na overleg met het Brandweerwezen (later genoemd: de directie Brandweer en Rampenbestrijding) van het ministerie van Binnenlandse Zaken en het Directoraat-Generaal voor het Vervoer (DGV), besloot de hoofddirectie van Rijkswaterstaat in 1980 om alle belangrijke Rijksverkeerstunnels in autosnelwegen, zowel bestaande als nieuwe tunnels, (met uitzondering van de Schipholtunnel waren dit allemaal oeververbindingen) te voorzien van hittewerende bekleding; dit gold tevens voor aquaducten.

Tevens werd besloten om een aantal veiligheidsvoorzieningen aan te passen en uit te breiden.

Later is door TNO met een kosten/baten analyse aangetoond dat het economisch verantwoord is om alle onderwatertunnels van een hittewerende isolatielaag te voorzien, ongeacht het wel of niet toelaten van benzine transport.

Maatgevende temperatuur en brandduur

Uitgangspunt is de bescherming van de tunnel tegen de potentiële gevolgen van een koolwaterstof brand volgens de RWS-kromme. De temperaturen stijgen hierbij tot ca.1350 °C en de brandduur is twee uur.

Temperatuur:

Ten behoeve van de eerste proeven op hittewerende bekleding werd door TNO een tunnel gemaakt van 2 x 2m² met een lengte van 8m. Het dak van deze tunnel bestond uit betonplaten met een dikte van 150mm. Aan de tunnelzijde waren deze platen voorzien van de te beproeven hittewerende materialen. In de tunnel werden 4 bakken opgesteld die vanuit een tank werden gevuld met benzine. Bij de proeven werden in de tunnel temperaturen gemeten tot circa 1350 °C.

Reeds bij de brandproeven in de Ofenegg-tunnel (1965) en de Zwenbergtunnel (1975) werden temperaturen tot ruim boven de 1300 °C gemeten. Deze hoge temperaturen werden later bevestigd door onderzoeken in de Memorialtunnel (1993 tot 1995) in de Verenigde Staten van Amerika en de brandproeven in het kader van het Eureka-project, uitgevoerd in een tunnel in Noorwegen.

Brandduur (twee uur):

- De inhoud van de grootste benzine tankauto bedraagt 50.000 liter;
- de beladingsgraad is 80% tot 90%, dat betekent dat in een tankauto maximaal 45.000 liter aanwezig is;
- de specifieke dichtheid van benzine is 0,72 kg/l, dus 45000l = 32400kg;
- de specifieke warmte van benzine is 43,5 MJ/kg, dus totaal: 32400 * 43,5 = 1409400 MJ;
- bij een brand van gemiddeld 200 MW is de brandduur dus: 1409400 : 200 = 7047 s = 118 minuten.

De invloed van temperatuur op beton en staal

Bij toepassing van hittewerende bekleding is primair van belang dat geen afsputten optreedt. Voor constructies die, nabij het vlak waar brand kan optreden, voor de constructieve integriteit essentiële wapening bevatten (zoals afgezonken tunnels) geldt bovendien dat de wapening gehecht moet blijven aan gezond beton en niet te warm mag worden.

Bij temperatuurverhoging neemt de sterkte van beton en staal af. Uit onderzoek rond 1980 werd geconcludeerd dat bij beton dit sterkteverlies begint bij circa 200 °C; bij circa 800 °C is de sterkte gereduceerd tot nul; ander onderzoek geeft aan dat de sterkte tot circa 350 °C nauwelijks afneemt. Bij staal gaat tot circa 250 °C de sterkte weinig achteruit maar daarna daalt de sterkte, sneller dan bij beton, naar nul bij een temperatuur van circa 750 °C. Deze waarden zijn conservatief, in de Eurocodes ENV-1993-1-2 en ENV-1994-1-2 worden minder conservatieve waarden voor de treksterkte gegeven. Bij brandproeven met achteraf gemonteerde platen is bovendien gebleken dat aan het eind van de proef de bevestigingsmiddelen hun functie nog niet hebben verloren. Gebleken is dat naar mate de staalkwaliteit hoger is de afname van de sterkte bij een lagere temperatuur begint en de sterkte sneller terugloopt.

Vanaf de invoering van de nieuwe voorschriften worden voor de berekening van betonconstructies partiële veiligheidsfactoren gebruikt. Vóór 1992 was er sprake van één veiligheidscoëfficiënt van 1,7 wat betekent dat wanneer de sterkte van beton en staal teruggaat tot 100%/1,7 = 59%, de veiligheid 1,0 is, ofwel geen veiligheid meer op de maatgevende belasting. In de praktijk is er vaak sprake van een nog hogere veiligheidscoëfficiënt door het toepassen van extra wapening in verband met scheurrijdte beheersing.

Uit het verloop van de afname van de sterkte valt af te leiden dat de temperatuur van (wapenings)staal tot circa 450 °C mag stijgen voordat de veiligheidscoëfficiënt tot 1,0 is gedaald; voor beton ligt dit minder gevoelig.

Bij de bepaling van de dikte van hittewerende bekleding bij betonconstructies met een hoge dichtheid (in elk geval bij B55 en hoger, zoals toegepast bij boortunnels) is afsputten het maatgevende criterium. Bij betonsterkten van B35 en lager (zoals doorgaans toegepast bij

zinktunnels) is in het algemeen het afnemen van de sterkte van het wapeningsstaal maatgevend. Verwacht wordt dat bij betonsterkten boven B35 en bij B35 met dichtheid bevorderende toevoegingen (zoals vliegas) afspatten het maatgevende criterium is.

Eisen

Na de eerste brandproeven werden aan hittewerende bekleding voor toepassing in zinktunnels de volgende eisen gesteld:

- Er moeten minimaal 2 brandproeven worden uitgevoerd volgens de RWS-kromme (2 uur).
- Gedurende deze brandproeven mag:
 - de temperatuur van het betonoppervlak nergens meer dan 380 °C zijn;
 - de temperatuur van het staal (bij een dekking van 25mm) nergens meer dan 250 °C zijn.

Voor een grenswaarde van 380 °C voor beton, in plaats van 450 °C, is gekozen omdat:

- een najieffect op zal treden; dit najieffect treedt op enerzijds doordat de tunnel na de brand niet meteen is afgekoeld en anderzijds doordat zowel isolatiemateriaal als beton een grote warmtecapaciteit hebben; zij houden de warmte vast; door het najieffect kan de temperatuur van het betonoppervlak nog enigermate verder stijgen na afloop van de brand;
- het gewenst is te voorkomen dat na de brand het beton zodanig is aangetast dat het gedeeltelijk moet worden vervangen;
- er bij de opleggingen sprake is van grote dwarskrachten op plaatsen waar, vooral in de oude tunnels, geen dwarskrachtwapening aanwezig is.

Voor een grenswaarde van 250 °C voor staal, in plaats van 450 °C, is gekozen omdat:

- evenals bij beton er sprake is van een najieffect;
- de sterkte van staal bij 250 °C weliswaar nog niet is afgenomen maar wel treedt bij hogere temperaturen extra doorbuiging van de constructie op; door de permanente belasting op het tunneldak is de kans groot dat deze extra doorbuiging blijvend is.

Bij de, inmiddels vele, brandproeven is gebleken dat beide grenswaarden (380 °C voor beton en 250 °C voor het wapeningsstaal) ongeveer gelijktijdig worden bereikt. Bovendien wordt in de praktijk bij tunnels altijd een dekking op de wapening toegepast die aanmerkelijk groter is dan de bij de brandproeven aangehouden 25mm. Daarom is besloten voortaan bij brandproeven alleen het temperatuur criterium aan het betonoppervlak te controleren. Hierdoor wordt tevens bereikt dat de voorbereidingstijd voor het uitvoeren van brandproeven wordt bekort. Gevolg hiervan is echter wel dat een denkbare goede oplossing zoals het vergroten van de betondekking met toepassing van een relatief dunne hittewerende bekleding op de oude manier zal moeten worden getest. Het kan in dat geval toelaatbaar zijn dat de temperatuur aan het betonoppervlak hoger dan 380 °C wordt, mits het wapeningsstaal gehecht blijft in gezond beton en de temperatuur van het staal niet hoger wordt dan 250 °C (herstel van aangetast beton kan dan na een brand eventueel nodig zijn).

Bij toepassing van beton B35 met dichtheid bevorderende toevoegingen (zoals vliegas) en bij beton met een hogere sterkteklasse dan B35 worden brandproeven gedaan met de betonsamenstelling zoals die in de praktijk zal worden toegepast. Verwacht wordt dat afspatten in al deze gevallen het maatgevende criterium zal zijn.

Hittewerende bekleding dient te voldoen aan, en te zijn getest volgens de procedure beschreven in het document 'Fire testing procedure fore concrete tunnel linings', document nummer 2008-Effectis-R0695, september 2008.

Toegepaste materialen

Begin jaren tachtig werd begonnen met het beschermen van de Rijksverkeerstunnels. Als eerste werd Pyrok toegepast bij het Gouwe aquaduct. Pyrok is een product dat gebaseerd is op Vermiculiet. Eerst werd het betonoppervlak gegritstraald; daarna werd de isolatielaag in lagen van 4 à 5mm aangebracht. Voor de benodigde dikte van 30mm moest men dus vaak terugkomen, een tijdrovende bezigheid.

Enkele jaren later, toen begonnen werd met de uitvoering van het renovatieprogramma voor tunnels, waren er meerdere goedgekeurde materialen beschikbaar. Al deze materialen waren gebaseerd op Vermiculiet.

Behalve de materialen op basis van Vermiculiet werden ook enkele materialen op basis van minerale wollen getest. Deze materialen konden slechts minder dan één uur bescherming bieden omdat desintegratie optrad.

Bij de renovatie van de bestaande tunnels was het niet mogelijk om de isolatielaag aan te brengen zoals bij het Gouwe aquaduct. Deze tunnels mochten normaal overdag niet worden afgesloten en het hele werk moest daarom worden uitgevoerd binnen de vakantieperiode van 3 à 4 weken. Daarom werd overgegaan tot het aanbrengen van dikkere lagen (15mm) waardoor men maar één keer terug hoefde te komen.

De controle op het gemaakte werk bestond uit het afkloppen van het gehele oppervlak en het steekproefsgewijs meten van de dikte en het uitvoeren van afschuifproeven. Bovendien werden ter plaatse proefplaten voorzien van een hittewerende laag (net als in de tunnel boven het hoofd gespoten). Enkele van deze platen werden daarna getest volgens de RWS-kromme.

In de praktijk deden zich problemen voor; bij de Coentunnel kwamen delen van de isolatielaag naar beneden. Uit de daarna uitgevoerde uitgebreide inspectie bleek dat op vele plaatsen het materiaal los hing. Op sommige plaatsen was het loshangende oppervlak zo groot dat reparatie nodig werd geacht. Later werd als norm vastgesteld dat loshangende delen groter dan 0,25m² moeten worden afgestoken en van een nieuwe isolatielaag moeten worden voorzien.

Achteraf is het te verklaren hoe de isolatielaag los kon komen van het plafond. Het materiaal werd weliswaar met kracht tegen het plafond gespoten, maar in de eerste minuten, voordat het cement gaat binden, hangt de isolatielaag aan de adhesie van water. Als een te dikke eerste laag wordt aangebracht kan het materiaal door zijn eigen gewicht los komen te hangen van het plafond. Het ruw gritstralen van het betonoppervlak geeft nog geen garantie voor een goede hechting van de isolatielaag aan de ondergrond.

Toen de renovatie op gang kwam, werden de Promatect H-platen op de markt gebracht. Door middel van proeven werd aangetoond dat met deze platen, met een dikte van 27mm kon worden voldaan aan de gestelde eisen.

In 1988 werd een proef met het aanbrengen van platen uitgevoerd in de, toen nog niet geopende, Zeeburgertunnel.

Vanaf 1989 zijn zowel bij de renovatie van de tunnels als bij nieuw gebouwde tunnels Promatect H-platen toegepast. Bij de bestaande tunnels werden de platen bevestigd met M8 bouten; dit is kostbaar vanwege de hoge arbeidskosten en de kosten van de roestvaststalen bevestigingsmiddelen. Bij nieuw te bouwen tunnels werd gekozen voor het in de bekisting leggen van de platen waarbij in de platen schroeven werden aangebracht; dit geeft ten opzichte van bevestiging met bouten een flinke kostenbesparing.

Toegepaste gespoten materialen:

Pyrok: Gouwe aquaduct, Botlektunnel

Igniver: Coentunnel, Margrietunnel, Drechttunnel

Pyrocoat: Beneluxtunnel

Strongseal: Schipholtunnel, Zeeburgertunnel

Fendolite: een strook in de Schipholtunnel, Westerscheldetunnel

Toepassing van plaatmateriaal (Promatect H-platen):

Proefstuk Zeeburgertunnel, Velsertunnel, Heinenoordtunnel, Vlaketunnel en alle nieuwe zinktunnels en aquaducten vanaf de Noordtunnel.

Aanvullend onderzoek

a. Beton gestort op Promatect-platen

Er is onderzoek gedaan naar de invloed op de kwaliteit van de betondekking bij beton dat wordt gestort op Promatect-platen. Deze proeven werden opgezet omdat werd gevreesd dat door vochtopname door de Promatect-platen een slechte kwaliteit van de betondekking zou ontstaan.

Er werd beton gestort op één droge plaat, één met water verzadigde plaat en één gehydrofobeerde plaat. Na 4 weken verharding werd de waterindringingsdiepte in het beton bepaald (als maat voor de waterdichtheid en de duurzaamheid). Gemeten werd: gemiddeld 2,3mm (vochtige plaat) en 6,7mm (droge en gehydrofobeerde plaat); dit zijn allemaal lage waarden, dus een goede betonkwaliteit.

Tevens werden trekproeven op gemaakte boorkernen gedaan om de hechting van de platen aan het beton vast te stellen. Het breukvlak trad op in de plaat behalve bij de gehydrofobeerde plaat. Conclusie: liever niet hydrofoberen in verband met de mindere extra hechting (er is sprake van extra hechting omdat wordt verlangd dat ook zonder deze hechting er voldoende schroeven worden aangebracht om de zuigbelasting te kunnen weerstaan, zie onder b.).

b. Zuigbelasting

Naar aanleiding van het loskomen van de isolatielaag in de Coentunnel werd onderzoek gedaan naar de optredende zuigkrachten ten gevolge van voorbijrijdende vrachtauto's. Uit metingen in de Beneluxtunnel bleek dat zuigkrachten van meer dan 200N/m² kunnen optreden. Een maximale waarde kon op basis van deze, onnauwkeurige, metingen echter niet worden vastgesteld. Uit Duitse gegevens bleek dat in (spoor)tunnels zuigkrachten tot circa 1000N/m² kunnen voorkomen. Deze waarde werd als uitgangspunt aangehouden. Met het eigengewicht van het hittewerend materiaal komt dit neer op een belasting van maximaal 1500N/m². Omdat het hier een dynamische belasting betreft, wordt met een opslingeringsfactor van 2 gerekend, waardoor de equivalente statische belasting op 3000N/m² werd vastgesteld.

Er werden duurproeven uitgevoerd op Promatect-platen, waarbij de belasting stapsgewijs werd opgevoerd tot 6000N/m². Deze proeven werden opgezet om te controleren ofponseffecten op zouden treden.

Beproefd werden achteraf aangebrachte platen, bevestigd met bouten en in de bekisting aangebrachte platen met schroeven. Bij de in de bekisting gelegde platen werd voor het storten tussen plaat en beton een folie aangebracht om de extra hechting te beletten.

Bij geen van deze proeven werd schade geconstateerd.

c. Onderzoek beschadigde platen

Om het effect van beschadigde platen op de beschermende werking na te gaan werden 2 brandproeven uitgevoerd.

De 1^e proef betrof één plaat waarin een 7mm diepe groef was aangebracht en één onbeschadigde plaat. Deze platen waren aangebracht op een 150mm dikke betonplaat; deze betonplaat was 40 dagen oud en nog relatief vochtig. Tijdens de proef bleek dat de beschadigde plaat, ter plaatse van de beschadiging, reageerde als een plaat van 20mm (is 27 - 7). Na 110 minuten deed zich een incident voor; de betondekking kwam met een knal los ter plaatse van de wapening. Dit is vermoedelijk te wijten aan het relatief hoge vochtgehalte, in combinatie met de snelle temperatuur stijging.

De 2^e proef betrof één plaat met een groef van 5mm diep en een diagonale scheur en één plaat met een groef van 9mm diep en een dwarsscheur; beide platen waren bevestigd met in totaal 6 bouten. Resultaat: de platen reageren zoals verwacht mag worden van een 5 respectievelijk 9mm minder dikke plaat. Na circa 60 minuten ging de plaat met de dwarsscheur iets open staan waardoor de temperatuur ter plaatse iets sneller opliep. Na 105 minuten viel een deel van deze plaat in de oven. Kort daarna werd de proef beëindigd.

Conclusie: kleine beschadigingen reduceren de hittewerende werking in beperkte mate.

d. Brandwerende deur en voegen tussen platen.

In verband met de eisen ten aanzien van een veilige vluchtweg zijn deuren, voorzien van Promatect-platen, ontwikkeld. Deze deuren werden getest in een proefopstelling waarbij naast de deur nog 8 kleine Promatect-platen waren aangebracht zodanig dat de voegen tussen deze platen alle een andere breedte hadden. Getest werd 180 minuten volgens de NPD hydrocarbon-curve (maximaal 1150 °C); in verband met de maximale capaciteit van de oven kon niet volgens de RWS-kromme worden getest.

Resultaten:

De deur is na 180 minuten nog niet bezweken, de vlamdichtheid is 148 minuten. Bij de voegen ontstond het volgende beeld: de voegen tot en met 4mm waren gedeeltelijk gevuld met beton; de gemeten temperatuur in de voeg ter plaatse van de achterzijde van de Promatect-plaat was hoger naar mate de voeg breder was; bij de voeg van 1mm was de temperatuur gelijk aan de temperatuur bij de situatie zonder voeg. De voeg van 5mm was geheel gevuld met beton; bij deze voeg was de gemeten temperatuur ongeveer gelijk aan de temperatuur bij een voeg van 1mm. De voeg van 6mm was geheel open omdat deze was aangebracht naast een achteraf aangebrachte Promatect-plaat; de hoogst gemeten temperatuur bij deze voeg was vrijwel gelijk aan de hoogst gemeten temperatuur van de volgestorte 5mm voeg; een verklaring van dit verrassende resultaat is niet gevonden.

e. Vochtgehalte beton

Naar aanleiding van het resultaat van de brandproef van de beschadigde Promatect-plaat bevestigd op een betonplaat (zie c.), is een onderzoek ingesteld naar het afspat gedrag van 'nat' beton (beton waarvan uitdroging wordt voorkomen).

Gebleken is dat bij de gebruikte betonkwaliteit (B35) en een bekleding van 27mm Promatect tijdens de 3 uur durende proef geen afsputten optrad. Afsputten is bij de voor zinktunnels gebruikelijke betonkwaliteit (B35) voor deze omstandigheden dus niet maatgevend; volstaan kan worden met brandproeven gericht op de controle van de temperatuur aan het betonoppervlak.

f. Vochtgehalte bekledingsmateriaal en vorstschade

Uit proeven is gebleken dat naarmate het vochtgehalte in het bekledingsmateriaal hoger is de gemeten temperaturen aan het betonoppervlak lager zijn; hieruit blijkt dat de slechtere isolerende werking van nat materiaal ruimschoots wordt gecompenseerd door de verdampingswarmte van het aanwezige water.

In de Drechtunnel is geconstateerd dat, ter plaatse van een lekkende voeg tussen diepwandpanelen, vorstschade is opgetreden. Deze constatering was verrassend omdat werd verwacht dat bij gespoten bekleding geen vorstschade op zou kunnen treden.

In 1980 zijn in Duitsland vorstproeven volgens DIN 52104 uitgevoerd op Promatect platen; er trad geen schade op. Bij later uitgevoerde proeven bij TNO volgens dezelfde norm trad wel vorstschade op. Het is niet duidelijk waardoor het verschil in resultaat tussen deze proeven is ontstaan; mogelijk speelt de uitvoering van het ontdooien tijdens de proef een rol.

In de praktijk is in de Heinenoordtunnel gebleken dat platen gedeeltelijk los kwamen door vochtopname en/of vorstschade ter plaatse van een lekkende voeg. Ook bij de Noordtunnel kwamen platen gedeeltelijk los ter plaatse van een lekkende voeg. Bij later uitgevoerde doortrekproeven van bouten bij natte Promatect platen werden geen lage waarden gevonden. Dit lijkt er op te wijzen dat het loskomen van de platen is ontstaan door vorst.

Afweging spuitmortels/platen

Bij de afweging tussen het toepassen van spuitmortel en het toepassen van platen spelen de volgende aspecten een rol:

a. Kwaliteit hittewerende laag

Bij platen is sprake van een constante kwaliteit die wordt bewaakt tijdens het productieproces. Bij spuitwerk is de kwaliteit vooral sterk afhankelijk van het vakmanschap van de spuitser. Slechts door middel van het houden van extra toezicht, diktemetingen en brandproeven (op tijdens het werk bespoten proefstukken) kan een indruk worden verkregen van het gehaalde kwaliteitsniveau, waarbij een grote spreiding in kwaliteit op kan treden.

b. Hechting aan de ondergrond

Een goede controle op de hechting is vereist.

Gezien de geconstateerde problemen met hechting wordt bij toepassing van spuitwerk voortaan geëist dat in de hittewerende bekleding een wapeningsnet aanwezig is dat aan het beton is verankerd.

c. Gritstralen

Aangezien bij spuitwerk (bij de vroegere toepassing zonder verankerd wapeningsnet) vooraf het beton moet worden gegritstaald is het gevolg:

- nat gritstralen (bij droog gritstralen zijn extra maatregelen nodig om het stof te doen neerslaan);
- geluidsoverlast; gevolg hiervan is het scheiden van deze werkzaamheden van de overige werkzaamheden;
- het afkomende materiaal en het grit moeten worden aangemerkt als chemisch afval wat hoge stortkosten met zich meebrengt.

Aangezien voortaan uitsluitend toepassingen met een verankerd wapeningsnet door ons zullen worden geaccepteerd wordt het gritstralen van de ondergrond niet meer nodig geacht (wel reiniging van het oppervlak).

d. Onderhoud en controle

Gezien de niet constante kwaliteit en de aard van het materiaal moet bij spuitwerk vaker en tijdrovender worden geïnspecteerd.

Ook moet worden gecontroleerd of het spuitmateriaal met de tijd niet dunner wordt als gevolg van de zuigende werking van het verkeer (erosie).

Bij plaatmaterialen zal gecontroleerd moeten worden of (bij voegen) lekkage optreedt omdat lekkage (bij vorst) kan leiden tot het loskomen van platen. Bij spuitmateriaal zullen kleine lekkages niet gauw tot problemen leiden; grote lekkages zullen zonder gerichte inspectie eenvoudig te constateren zijn.

e. Duurzaamheid

Het mag duidelijk zijn dat het niet toelaatbaar is dat regelmatig delen van de hittewerende bekleding naar beneden vallen. In hoeverre spuitmaterialen (en platen) aan deze eis langdurig kunnen voldoen is niet duidelijk omdat over de duurzaamheid onvoldoende bekend is. Vooralsnog bestaat de indruk dat spuitmaterialen eerder (gedeeltelijk) zullen moeten worden vervangen dan plaatmaterialen.

f. Uitvoering

Het aanbrengen van platen in de bekisting (voor de toepassing bij zinktunnels) is een relatief eenvoudige handeling. Voldoende aandacht moet worden besteed om te voorkomen dat de schroeven worden plat getrap.

Het achteraf aanbrengen van platen is tijdrovend. Dit kan vooral een rol spelen bij al in gebruik genomen tunnels en te bouwen boortunnels.

Voor het aanbrengen van spuitwerk moet vervuiling tussen de verschillende lagen worden voorkomen. Bij reeds in gebruik genomen tunnels betekent dit dat het niet aanvaardbaar is tussen het aanbrengen van de verschillende lagen verkeer toe te laten. Consequentie hiervan is dat of gewerkt moet worden in een aaneengesloten periode of dat beperkte stukken per periode worden voorzien van de totaal benodigde dikte.

g. Kosten

Het achteraf aanbrengen van platen is duur vanwege de hoge arbeidskosten en de roestvaststalen bevestigingsmiddelen. Het vooraf in de bekisting aanbrengen van platen is veel minder arbeidsintensief en de bevestigingsmiddelen zijn een stuk goedkoper.

De kosten van het aanbrengen van spuitwerk worden voornamelijk bepaald door de arbeidskosten; het aantal aan te brengen lagen speelt hierbij ook een rol. Rekening moet worden gehouden met de extra kosten voor toezicht en controle.

h. Aanrijdschade

Bij aanrijdschade van gespoten materialen is tot dusver voornamelijk sprake van krassen en afgebroken stukken. Direct te nemen maatregelen zijn beperkt tot het eventueel weghalen van los zittende stukken. Herstel is eenvoudig te realiseren en kan tijdens onderhoud plaatsvinden.

Bij aanrijdschade van platen blijkt het al snel nodig te zijn om beschadigde platen direct weg te halen. De schade zal al snel omvangrijker zijn dan bij een vergelijkbare aanrijding van gespoten bekleding.

Bijlage C Analyse TNO rapport “De statistische kans op brand in tunnels” [64]

C.1 Algemeen

Het TNO rapport gaat pragmatisch uit van een eenvoudig model (17) voor het optreden van een brand met een bepaald brandvermogen (heat release rate, HRR). Hierin is p de kans op optreden van brand per miljoen mvtkm, en b zowel het gemiddelde als de standaardafwijking voor de HRR in geval van brand. De parameters p en b worden als onafhankelijk beschouwd en worden begroot met inachtnaam van data omtrent branden waargenomen in Nederlandse tunnels. De parameters p en b beantwoorden vragen naar respectievelijk de frequentie van brand en de brandintensiteit, conform Figuur 7 in sectie 7.1.

$$P(HRR > X) = p \exp\left(-\frac{X}{b}\right) \quad (17)$$

De data omtrent branden in Nederlandse tunnels heeft betrekking op twee types data. Het eerste type is data aangaande een aaneengesloten periode met registratie van branden. Bij dit type data komt de niet-registratie van een brand overeen met een expliciete bevestiging dat er geen brand is opgetreden. Het tweede type data heeft betrekking op een incidentele registratie van branden. Deze branden waren voldoende memorabel om bij bevraging spontaan aangeleverd te worden. Bij dit type data is het mogelijk dat kleine branden niet worden opgegeven. Niet-registratie komt hier dus niet ipso facto overeen met niet-optreden van brand.

Ten tijde van het origineel rapport [64] was er slechts één ‘grote’ brand geregistreerd met een vermogen groter dan 25 MW. Dit was de brand uit 1978 in de Velsertunnel. Na aflevering van het rapport is in 2014 een grote brand opgetreden in de Heinenoordtunnel. De auteurs van het origineel TNO rapport hebben in 2016 een update gepubliceerd voor hun analyses [85]. Door in de update rekening te houden met de brand in de Heinenoordtunnel komen de auteurs uit op een beperkt hogere kans op grote branden, maar de werkwijze en algemene conclusies van het origineel rapport blijven behouden. Als onderdeel van de huidige studie werd het TNO model herberekend door ondergetekenden, ter vergelijking met het vereenvoudigd model brandverspreiding.

C.2 Kanttekeningen voor toepassing in het huidig onderzoek

In de TNO studies wordt het brandgevaar begroot conform één enkel model (17) waaronder alle voertuigen ondergebracht worden (personenauto’s, bussen, vrachtauto’s, en zelfs situaties met meerdere voertuigen). De auteurs van de studie stellen zelf dat het beter zou zijn om branden in personenauto’s afzonderlijk te beschouwen van branden in vrachtwagens [85]. Een dergelijke opsplitsing voor de kans op brand per mvtkm per voertuigcategorie wordt wel gemaakt in de QRA-tunnels [59] (noot: de kansen in de QRA-tunnels zijn evenwel meer dan een grootteorde hoger dan op basis van de TNO studies). Er is echter weinig data voorhanden om de opsplitsing te maken. In totaal werden 9 branden geregistreerd [85], met bijkomende informatie in [64]: 2 grotere branden waarbij vrachtverkeer betrokken was, 6 autobranden, en één brand met een bestelwagen). Geen enkele brand > 65 MW werd geregistreerd. Het ontbreken van een onderscheiden model voor verschillende types voertuigen, en de top-down benadering, maken het niet eenvoudig om gedetailleerd de effecten van veiligheidsmaatregelen maatregelen op het risicoprofiel in rekening te brengen.

In de TNO studies worden de kansen op nominale grotere branden (25 MW, 50 MW, 100 MW en 200 MW) bepaald als de kans voor een HRR binnen een interval omheen deze nominale waarde. De kans op een 100 MW brand wordt bijvoorbeeld begroot als de kans op een brand in het interval 75 MW – 150 MW. Het lijkt aangewezen om conservatief de nominale brand als bovengrens van het interval te stellen. Op basis van de resultaten in de TNO studies is het verwachte effect van dergelijke aanpassing echter beperkt.

De TNO studie geeft een beperkt aantal mogelijke waarden voor de gemiddelde brandintensiteit b , van 10 MW tot 190 MW, met intervallen van 20 MW. Bij het updaten heeft het model geen mogelijkheid om een grotere waarschijnlijkheid voor een lagere (of hogere) gemiddelde brandintensiteit naar voren te brengen. Het belang van deze aanname valt te onderzoeken.

Het brandgevaar zoals bepaald in de TNO studie brengt de aanwezige brandveiligheidsmaatregelen reeds (indirect) in rekening. De waargenomen branden hebben bijvoorbeeld betrekking op de in de tunnels eventueel aanwezige verkeersbeperkingen (inhaalverbod, transport gevaarlijke goederen, filemanagement), actieve brandbestrijdingsmaatregelen (langsventilatie, blussystemen, getraind interventiepersoneel), en passieve maatregelen (hittewerende bekleding, afspatongevoelig beton). Er bestaat dus een gevaar om effecten dubbel te rekenen wanneer in een latere fase het effect van bijkomende brandveiligheidsmaatregelen op het risicoprofiel wordt bepaald. De mate waarin er een gevaar op dubbel rekenen bestaat hangt af van het type maatregel en wordt kwalitatief besproken in Tabel 27.

Tabel 27: Kwalitatieve evaluatie van het reeds verrekend zijn van brandveiligheidsmaatregelen in de TNO studies [64, 85]

Maatregel	Potentieel dubbel rekenen	Toepassing
Verkeerstechnische maatregelen		
Beperkingen vrachtverkeer (intensiteit, type goederen)	Maatregelen verlagen het brandgevaar (intensiteit en frequentie)	(i) Voor tunnels met bijzondere beperkingen geval per geval nagaan of deze buiten beschouwing moeten (ii) Standaardmaatregelen zijn algemeen toepasselijk en vereisen geen correctie
Filemanagement systeem	Maatregel verlaagt kans op brandoverslag en ongevallen (intensiteit en frequentie)	Voor tunnels met bijzondere beperkingen geval per geval nagaan of deze buiten beschouwing moeten
Actieve maatregelen, inclusief interventie		
Vaste blussystemen	Maatregelen verlagen de brandintensiteit, niet de brandfrequentie	(i) Voor tunnels met een vast blussysteem te bevestigen of deze al bij brand geactiveerd is (noot: er kan uitgegaan worden dat dergelijke brand geregistreerd zou zijn) (ii) Bij de geregistreerde branden wordt geen melding gemaakt van een blussysteem. In het bijzonder was er geen vast blussysteem aanwezig in de 2 tunnels met geregistreerde grote brand. Geen actie vereist voor deze branden.
Mobiel blussysteem (boven standaard installatie tunnel)	Idem	Idem

Langsventilatie	Maatregel verlaagt het brandgevaar (frequentie, en bij benadering intensiteit) niet. Wel impact op gevolgen.	Geen actie vereist
Controlekamer met operator	De operator kan acties ondernemen.. Bepaalde acties verlagen mogelijks de intensiteit (vb vroegere interventie brandweer).	Referentietoestand nagaan. Effect op brandgevaar eventueel verwaarloosd worden.
Branddetectie	Idem	Idem
Interventie gebruikers	Verlaagt de brandintensiteit, niet de brandfrequentie	Blussen door gebruikers is reeds verrekend in het model
Interventie brandweer	Verlaagt de brandintensiteit, niet de brandfrequentie	(i) Standaard interventie brandweer is reeds verrekend in het model (ii) Voor de geregistreerde branden wordt geen melding gemaakt van bijzondere voorzieningen brandweer; deze worden geacht niet verrekend in het model
Passieve maatregelen		
Hittewerende bekleding	Effect op het risicoprofiel, niet op het brandgevaar.	Geen actie vereist
Maatregelen tegengaan afspatten	Idem	Idem

C.3 Te overwegen uitbreidingen

Op basis van de discussie hierboven komen volgende mogelijke aanpassingen aan het TNO model naar voor:

- Herkalibratie van het TNO model met inachtnaam van (i) de maatgevende brand als bovengrens van het intensiteitsinterval, en (ii) een hogere resolutie van mogelijke gemiddelde brandintensiteit. Indien voorgaande aanpassing een significant effect heeft, dan kan het opsplitsen personenwagens – vrachtwagens heroverwogen worden.
- De data voor tunnels met bijzondere verkeerstechnische maatregelen moeten nader bekeken worden. Er kan gekeken worden naar bijzondere maatregelen. Deze worden geval per geval bekeken.
 - o Tunnels met maatregelen tegen filevorming [100]: A2 Leidsche rij; A4DS; Coentunnel; Velsertunnel
- De data voor tunnels met een vast of mobiel blussysteem dat reeds effectief werd toegepast moeten nader bekeken worden. Er kan gekeken worden naar tunnels met vaste en mobiele blussystemen, en hun effectieve activatie. Deze worden dan geval per geval bekeken.

Gezien de conservatieve benadering in de TNO studies kan een beperkte onderschatting van het brandgevaar (dubbel rekenen van positieve effecten) eventueel aanvaard worden.

Verder wordt opgemerkt dat volgende maatregelen reeds in het TNO model verrekend zijn:

- Standaard veiligheidsmaatregelen (verkeerstechnisch)
- Standaard bluspogingen door gebruikers en brandweer

Verder valt het aan te raden om het model uit te breiden met een groter aantal parameters (vrijheidsgraden) voor de kansdichtheid van de HRR. Dit resulteert echter al gauw in een grote aanpassing.

Bijlage D Analyse RWS Notitie d.d. 23 mei 2017 [82]

Uit de notitie is niet af te leiden wie de auteurs ervan zijn. De titel van de (*bedrijfsvertrouwelijke*) notitie is: **Veiligheidsrisico's van versnelde degradatie van beton bij brand in tunnels.**

De navolgende analyse van deze notitie is erop gericht om te achterhalen in hoeverre organisatorische of andere maatregelen mee hebben gespeeld bij, c.q. cruciaal waren voor, het als veilig kunnen beoordelen van de vier betreffende (*na 2008 gebouwde*) tunnels.

Een vraag die, na het opstellen van het rapport bij ondergetekenden nog leefde, was of bij de beoordeling van veiligheid in 2017 ook het kunnen doorzoeken van de tunnel door hulpverleners is meegenomen. Bij de omschrijving van het doel van de studie [82] is het volgende aangegeven:

“Doel van dit document is om te analyseren wat een eventuele versnelde degradatie zou kunnen betekenen voor de veiligheid van verkeersdeelnemers, hulpverleners en omwonenden die gebruik maken van de tunnel of zich in de omgeving van de tunnel bevinden.”

Dit wijst erop dat niet alleen is gekeken of gebruikers van de tunnel veilig zijn. In de notitie is inderdaad ook de veiligheid van verkeersdeelnemers, hulpverleners en mensen op het dak afzonderlijk beschouwd. Over de toegepaste methodiek is het volgende aangegeven:

“Deze scenarioanalyse is uitgevoerd door op basis van worst-case uitgangspunten te beredeneren welke veranderingen er in het veiligheidsconcept optreden ten opzichte van het huidige veiligheidsconcept dat volgt uit de QRA-tunnels. Als er veranderingen in het veiligheidsconcept optreden wordt geanalyseerd wat de gevolgen daarvan in het slechtste geval zouden kunnen zijn. Voorbeelden hiervan zijn het in laboratorium proeven waargenomen afvallen van hittewerende bekleding of het afspringen van beton. De in de laboratorium proeven gevonden tijden tot falen van een onderdeel van de tunnel worden hierbij 1 op 1 doorvertaald naar wijzigingen in het veiligheidsconcept of extra risico's voor mensen. Bij eventuele extra risico's wordt gezocht naar mitigerende maatregelen om deze extra risico's weg te nemen.”

Dit riep bij ondergetekenden de volgende vragen op:

- Hoe was de 1 op 1 vertaling van tijd tot falen in een proef naar extra risico's?
- Welke extra risico's zijn vastgesteld?
- Was het nodig mitigerende maatregelen te treffen?

Het “Veiligheidsconcept wegverkeerstunnels” is toegelicht. Er staat dat het uitgangspunt in de scenario's, die in QRA-tunnels worden doorgerekend, is dat vluchters in veiligheid zijn wanneer zij de incidentbuis via een vluchtdeur verlaten hebben. Anders geformuleerd, na de vluchtdeur vallen er geen doden meer. De volgende drie situaties zijn onderscheiden:

1. Middentunnelkanaal. De vluchtroute loopt vanuit de calamiteitenbuis via een vluchtdeur door het middentunnelkanaal (MTK) door een kopdeur de tunnel uit.
2. Scheidingswand. De vluchtroute loopt vanuit de calamiteitenbuis door een vluchtdeur in de scheidingswand naar de ondersteunende buis de tunnel uit.
3. Een combinatie. De vluchtroute loopt vanuit de calamiteitenbuis, door het MTK via een einddeur naar de ondersteunende buis de tunnel uit.

De navolgende tekst is een citaat:

“Wanneer het middentunnelkanaal (MTK) of de ondersteunende buis bezwijkt op het moment dat er nog vluchters aanwezig zijn dan klopt de aanname in QRA-tunnel niet meer dat personen na het passeren van de vluchtdeur in veiligheid zijn. Immers, bij het bezwijken van de constructie kunnen vluchters verwond raken door vallend puin of vergiftigd worden door rook die vanuit de calamiteitenbuis het MTK of de ondersteunende buis binnendringt.

Wanneer alle vluchters de tunnel hebben verlaten voordat de constructie bezwijkt dan is het veiligheidsniveau geborgd. Wanneer er nog wel vluchters aanwezig zijn in de tunnel op het moment dat delen van de constructie zodanig bezwijken dat ook de integriteit van de vluchtruimte niet meer geborgd is, dan kan het aantal slachtoffers groter worden en het veiligheidsniveau zakken.”

Ondergetekenden interpreteren dit als volgt. Het basisuitgangspunt, zijnde dat je veilig bent als je een vluchtdeur hebt bereikt, gaat niet meer op als de constructie achter die vluchtdeur (*de vluchtroute*) door de brand kan bezwijken. Als dat optreedt, zal het aantal slachtoffers groter worden. Dit is in concept eveneens het geval wanneer door een (lokale) instorting de scheiding tussen de vluchtroute en de calamiteitenbuis doorbroken is. Zodra beide buizen met elkaar in contact staan kan er – in principe – rookverspreiding zijn binnen de vluchtroute. De meest conservatieve aanname is dan ook om de vluchtroute als onveilig te beschouwen zodra de scheiding met de calamiteitenbuis niet langer gewaarborgd is.

Hoofdstuk 4 in de notitie gaat over het **“Borgen van veiligheid van verkeersdeelnemers”**. Er staat dat per tunnel met een kwalitatieve risicoanalyse is bekeken of er extra risico's voor personen zijn. Over de analyse is het volgende aangegeven:

“QRA-tunnels biedt niet mogelijkheid om de effecten van het versneld bezwijken van de constructie één op één door te rekenen. Wel kan globaal aangegeven worden, afhankelijk van het bezwijkmechanisme van de tunnelconstructie, welke takken in de gebeurtenissenboom van QRA-tunnels meer slachtoffers zullen opleveren dan het programma berekent.

Om een inschatting te maken van het effect op het groepsrisico van het lokaal bezwijken van de constructie is het nodig te bekijken hoeveel vluchters er nog in de tunnel aanwezig zijn op het moment van het bezwijken van de vluchtweg. Een conservatieve aanname is dat alle personen die nog aanwezig zijn op moment van bezwijken van de vluchtweg komen te overlijden. Een overzicht van alle aannames en uitgangspunten is opgenomen in bijlage 2.

Of er nog vluchters in de tunnel aanwezig zijn op het tijdstip van bezwijken kan als volgt worden bepaald. Wanneer de tijd die de vluchter die de grootste afstand moet afleggen korter is dan de tijd waarin de constructie bezwijkt, dan kan gesteld worden dat er geen extra slachtoffers zullen vallen ten opzicht van de met QRA-tunnel berekende aantallen.”

Het vetgedrukt zijn van een deel van de tekst, hebben ondergetekenden gedaan en daarin wordt het volgende gelezen. Uitgangspunt van de QRA was dat men achter de vluchtdeur veilig is. Oftewel, weggebruikers moeten de vluchtdeur op tijd kunnen bereiken. Dat uitgangspunt houdt geen stand als het achter de vluchtdeur ook fout kan gaan. Maar als het nu zo is dat de weggebruikers in de tijd

vanaf het begin van de brand tot aan het bezwijken van de tunnelconstructie allemaal de tunnel kunnen verlaten, is de veiligheid geborgd, ondanks dat het gedrag van het beton anders is dan wat werd aangenomen.

Bij deze aanpak is onder andere de vraag aan de orde hoe wordt bepaald wat de tijdsduur tot bezwijken is. De daarvoor gebruikte aannames en uitgangspunten zijn in Bijlage 2 bij de notitie weergegeven:

- *“Sterk vereenvoudigde analyse van wat er zou kunnen gebeuren bij een brand en welke risico’s personen daar bij lopen.*
- *Daar waar mogelijk zijn de parameters van QRA-tunnels aangehouden. Daar waar dat niet mogelijk is zijn conservatieve aannames gebruikt.*
- *Tijd die vluchtters nodig hebben om de tunnel te verlaten wordt bepaald door de langste vluchtweg die een vluchter kan nemen. De lengte van de vluchtweg is gelijk aan de lengte van het gesloten deel van de tunnel. Uitgangspunt is dat alle vluchtters deze langste afstand nemen.*
- *Alle gebruikers die niet zelf kunnen vluchten naar de veilige ruimte komen te overlijden (conform QRA).*
- *Alle vluchtters die nog in de tunnel aanwezig zijn op het moment van het bezwijken van de vluchtweg komen te overlijden.*
- *Alle vluchtters die de tunnel verlaten hebben op het moment van het bezwijken van de vluchtweg zijn veilig.*
- *Het falen van brandwerende voorzieningen vind plaats zoals waargenomen in de laboratorium opstellingen. Hittewerende bekleding (meegestort met de bouw) valt na 27 minuten van het dak. Beton is 10 minuten bestand tegen afspatten, vervolgens spat het met een constante snelheid van 70 millimeter in 12 minuten.*
- *Op trek belaste constructiedelen falen als wapening warmer wordt dan 250 graden, oftewel als de dekkingsdikte is afgespat.*
- *Op druk belaste constructiedelen falen als de helft van de betondoorsnede is afgespat*
- *Het falen van meerdere lagen brandwerende voorzieningen vind na elkaar plaats niet gelijktijdig.”*

Voor de betreffende vier tunnels is de tijd bepaald, die het na aanvang van een brand met een intensiteit van de RWS-brandkromme, duurt voordat er constructieonderdelen bezwijken ($t_{instort}$) en de tijd waarna de veilige vluchtroute bezwijkt ($t_{bezwijkvlr}$). De resultaten zijn in een tabel samengevat weergegeven:

Naam [-]	$T_{norm,wet}$ [min]	l_{tunnel} [meter]	$t_{instort}$ [min]	$t_{bezwijkvlr}$ [min]	$t_{max,vluchter}$ [min]
Salland-Twente tunnel	60	493	22	22	20
Ketheltunnel	60	2000	22	>120	50
Koning Willem-Alexander tunnel boven	60	1700	27	27	44
Koning Willem-Alexander tunnel onder	60	2400	49	49	58
2e Coentunnel	120	750	43	43	25

Tabel 1: Per tunnel de norm uit de wet ($T_{norm,wet}$), de lengte (l_{tunnel}), de tijd van het eerste bezwijken van delen van de tunnel ($t_{instort}$), de tijd tot het bezwijken van de veilige vluchtroute ($t_{bezwijkvlr}$) en de tijd totdat de laatste vluchter de tunnel verlaten heeft ($t_{max,vluchter}$).

Bij de Salland-Twente tunnel en de 2^e Coentunnel kan iedereen de tunnel verlaten hebben, voordat er bezwijken optreedt. Er is gesteld dat er daar geen sprake is van een extra risico. Ondergetekenden verwachten dat daar dan ook geen mitigerende maatregelen, c.q. organisatorische maatregelen, nodig waren voor de veiligheid van de tunnelgebruikers. Of ze wel getroffen zijn, is bij ondergetekenden niet bekend. Voor de Ketheltunnel is het volgende aangegeven:

“In de Ketheltunnel bezwijkt wel het dak van de tunnel door afspattend beton, maar de wand tussen ondersteunende buis/MTK en de calamiteitenbuis blijft intact. De veilige ruimte blijft de volledige twee uur functioneren. Op het moment dat het dak van de tunnel bezwijkt zijn alle vluchtters veilig in de veilige vluchtroute. Er is geen extra risico voor vluchtters uit de tunnel.”

Hier kon dus niet worden gesteld dat iedereen sowieso de tunnel kon verlaten voordat er bezwijken op zou treden. Daarom is hier een tweetraps benadering gevolgd. Er is gekeken wanneer bezwijken van de tunnelbuis optreedt en wanneer bezwijken van de vluchtroute optreedt. Omdat bezwijken van de vluchtroute pas veel later optreedt, als iedereen de tunnel al heeft kunnen verlaten, kon worden vastgehouden aan het uitgangspunt in de QRA, zijnde dat men veilig is als de vluchtdeur op tijd kan worden bereikt. En dat is zo, zodat er ook hier geen sprake is van een extra risico.

Voor de Koning Willem-Alexander tunnel moest worden geconstateerd dat er wel een extra risico voor vluchtters uit de tunnel is door het feit dat beton afspatgevoelig is. Daarom is nader geanalyseerd wat dit voor de veiligheid van de tunnel betekent. In de nadere analyse is gekeken naar het extra aantal slachtoffers dat kan vallen en of dat nog valt binnen de nog aanwezige ruimte in de f-N relatie, die is gebaseerd op de eis in de WARVV dat de kans op slachtoffers in de tunnelbuis niet groter dan $0,1/N^2$ per kilometer tunnelbuis per jaar mag bedragen. Die ruimte zou er volgens de RWS notitie nog zijn. Opmerkingen hieromtrent worden in het Hoofdstuk 5 van het onderhavige rapport weergegeven. Met betrekking tot mitigerende maatregelen is het volgende aangegeven:

“Wanneer het hogere groepsrisico bij de Koning Willem-Alexandertunnel niet acceptabel is, dan zijn er een aantal mogelijkheden om het groepsrisico te vermindere: Hierbij zijn vooral maatregelen beschikbaar die de generieke kans op een brand, de kans op een grote brand of de kans op optreden van de meest risicovolle scenario's verminderd.

- *Maatregelen die zorgen voor een verlaging van het risico op een grote brand.*
- *Maatregelen die bij specifieke scenario's zorgen voor minder slachtoffers.”*

Met betrekking tot het **“borgen van veiligheid van hulpverleners”** is het volgende aangegeven:

“Het versnelde (lokaal) bezwijken van tunnels geeft een kleine verhoging van het risico voor hulpverleners in de 2e Coentunnel, de Salland-Twente tunnel en de Koning Willem-Alexander tunnel. In de zone waar het primaire instortingsgevaar is, zijn de temperaturen zodanig hoog dat daar geen mensen aanwezig kunnen zijn. Maar door het instorten van constructiedelen die blootgesteld zijn aan brand kunnen ook naastgelegen constructieonderdelen in dezelfde tunnelmoot bezwijken. Voorbeelden hiervan zijn de veilige ruimte, de naastgelegen verkeersbuis of in het geval van de Koning Willem-Alexander tunnel, de bovenliggende of onderliggende verkeersbuizen. M.a.w. de hulpverleners werken in principe buiten de zone waar het instortingsgevaar is, maar kunnen wel aanwezig zijn in de veilige ruimte of verkeersbuis naast de brand. Ook bestaat het gevaar dat hulpverleners na een lokale instorting in de rook van de brand terecht komen.

Bij het bezwijken van de 2e Coentunnel speelt een ander gevolg. Na lokaal bezwijken zal deze tunnel vollopen. Hulpverleners die zich dan nog in de tunnel bevinden zullen overlijden.

Bij de Ketheltunnel blijven de veilige ruimte en naastgelegen verkeersbuis ook na lokaal bezwijken heel. In deze tunnel is er geen extra risico voor hulpverleners.”

Met betrekking tot mitigerende maatregelen in verband met veiligheid van hulpverleners is het volgende aangegeven:

“Wanneer het hogere risico voor hulpverleners bij de 2e Coentunnel niet acceptabel is, dan kan dit risico verminderd worden door afspraken te maken met de hulpdiensten over de maximale tijdsduur na een grote brand die zij hanteren om in de tunnel hulp te verlenen.”

Met betrekking tot borgen van **“veiligheid van mensen op het dak”** is het volgende aangegeven:

“Bij landtunnels heeft het bezwijken van de tunnel ook gevolgen voor de mensen die zich boven op de tunnel bevinden. Deze risico's zijn niet extra ten opzichte van de situatie waar tot nu toe van werd uitgegaan. In QRA-tunnels worden de slachtoffers die boven op het tunneldak vallen niet meegenomen.”

Met betrekking tot mitigerende maatregelen is het volgende aangegeven:

“De mitigatie van deze risico's is onderdeel van de calamiteitenbestrijding door de hulpdiensten. Door de hulpdiensten te informeren over het sneller bezwijken van de tunnel bij brand kan het gebied boven de landtunnels sneller ontruimd worden.”

Samengevat constateren ondergetekenden het volgende:

- Bij de Salland-Twente tunnel en de Ketheltunnel waren er geen mitigerende maatregelen nodig in verband met veiligheid van tunnelgebruikers, hulpverleners en mensen op het dak;
- Bij de KWA-tunnel is er een verhoogd risico op slachtoffers en zou ervoor gekozen kunnen worden om mitigerende maatregelen te nemen, met name om de veiligheid van de hulpverleners en mensen op het dak te borgen. De veiligheid voor de gebruikers werd geacht te voldoen aan de eis van de WARVW (zie Hoofdstuk 5 onderhavig rapport).

Uit deze notitie is niet bekend of er ook mitigerende maatregelen zijn getroffen bij de betreffende tunnels en zo ja, welke dat waren.

Bijlage E RWS Discussiepunten n.a.v. rapportage [128]



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK -

Rijkswaterstaat
Grote Projecten en
Onderhoud

Griffioenlaan 2
3526 LA Utrecht
Postbus 2232
3500 GE Utrecht
T 088-797 2111
www.rijkswaterstaat.nl

Contactpersoon

Datum
19 januari 2021

Bijlage(n)
kans op brand en schade

memo

Discussiepunten rapportage alternatieven HWB

Aanleiding

Deze memo is geschreven als een reactie op het opleveren van het definitief rapport alternatieven HWB. Doordat de opstellers onvoldoende tijd hadden om op basis van het geleverde commentaar een nieuwe kosten-baten berekening uit te voeren geven de conclusies in het rapport een andere weergave van de effectiviteit van de beschouwde varianten dan zou moeten. In deze memo wordt toegelicht waar dat met name door wordt veroorzaakt, zodat hierover met de onderzoekers de discussie aangegaan kan worden en voor de mensen die op basis van het rapport keuzes moeten maken duidelijk is waar de verschillen in inzichten zitten tussen de opstellers en de reviewers van het rapport.

Totstandkoming rapport

Het rapport is opgesteld door [redacted] en [redacted] en aan RWS zijde zijn diverse mensen betrokken als reviewers van het rapport.

Op 8 oktober 2020 is een concept eindrapport door de opstellers ter review rondgestuurd. Op 13 en 22 oktober 2020 is er door de reviewers in totaal 10 A4-tjes aan commentaar op het concept eindrapport geleverd. Op 30 november 2020 is vervolgens het definitieve rapport opgeleverd.

Gedurende begin december werd de reviewers duidelijk dat de aangeleverde commentaarpunten niet hebben geleid tot wezenlijke wijzigingen van het rapport. Door de kerstvakantie en een vakantie van [redacted] was het niet meteen mogelijk om na te vragen waarom het commentaar niet tot wezenlijke wijziging van het rapport heeft geleid. Daarom is door RWS als eerste een analyse gedaan om te achterhalen hoe verstrekkend het niet overnemen van de commentaarpunten zou kunnen zijn.

In de eerste week van januari 2021 is vervolgens de vraag gesteld waarom het aangeleverde commentaar niet tot wezenlijke wijzigingen in het rapport hebben geleid. De opstellers gaven aan dat zij zo goed als mogelijk het commentaar hebben verwerkt, danwel hebben proberen uit te leggen waarom op een bepaalde manier omgegaan is met gegevens.

Ze geven ook aan dat het qua tijdsbesteding niet mogelijk was om berekeningen overnieuw te doen. Commentaar op de uitgangspunten van de analyse kon daarom

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK -

Pagina 1 van 6

3) De juiste cijfers voor de juiste berekening

Tot slot is het van belang om te beseffen dat de kosten baten analyse in het rapport bedoeld was om de effectiviteit van verschillende maatregelen met elkaar te vergelijken. Dit was dus met name bedoeld om vanuit asset management gedachte te beoordelen of andere maatregelen dan hittewerende bekleding een vergelijkbare of betere bescherming konden bieden tegen lagere kosten.

De onderzoekers hebben een nieuwe variant in hun onderzoek geïntroduceerd, waarvan ze ook beweren dat deze een kosten effectiever is en aan de wet voldoet, namelijk geen brandwerende maatregelen treffen. Ze gebruiken de uitgevoerde risico-analyse om te onderbouwen dat weggebruikers en hulpverleners veilig en binnen de functionele eis van de wet van de tunnel gebruik kunnen maken en bij een brand hun werk kunnen uitvoeren.

In de tunnelwet (WARVW) is echter voorgeschreven welke methode gebruikt moet worden voor veiligheidsbeschouwingen in tunnels, de QRA. De QRA gebruikt andere cijfers voor de kans op brand. Deze liggen ongeveer een factor 10 hoger dan die gebruikt in het onderzoeksrapport. Op deze manier wordt gegarandeerd dat er altijd een conservatieve benadering gekozen wordt.

De QRA is niet geschikt om de veiligheid van hulpverleners te beschouwen. Het is echter wel logisch om bij een beschouwing van de veiligheid van hulpverleners gebruik te maken van dezelfde conservatieve cijfers voor de initiële kans op brand. Anders ben je appels met peren aan het vergelijken en wordt het lastig om aan te tonen dat je een gelijkwaardige oplossing hebt. Als je al kunt onderbouwen dat je een gelijkwaardige oplossing hebt, moet je uitsluiten dat dat mogelijk het gevolg is van het gebruik van andere cijfers als input in de berekening.

Samenvatting

Om diverse redenen waren de onderzoekers niet in staat om al het review commentaar op hun rapport te verwerken. Zij geven aan dat dat niet problematisch was, omdat zij inschatten dat het verwerken van het gegeven reviewcommentaar in een nieuwe berekening niet tot wezenlijk andere inzichten zou leiden.

Hierover verschillen de onderzoekers en RWS van mening. In de punten 1 t/m 3 is onderbouwd waarom het consequent gebruik van te positieve uitgangspunten in een kosten baten analyse kan leiden tot een grote fout in de uitkomsten van deze berekening. Een fout die zo groot is dat de conclusies van het rapport mogelijk niet juist zijn.

2) De kosten van het nemen van maatregelen

Hittewerende bekleding:

Er is weinig informatie van de kosten van aanbrengen van hittewerende bekleding in een bestaande tunnel bekend. Slechts de conservatieve schattingen die gemaakt zijn voor een budgetreservering aan de minister zijn bekend. Ook de bekende kosten voor het bekleden van de Gaasperdammertunnel zijn niet bruikbaar. De bekend gemaakte kosten voor deze tunnel waren onderdeel van grotere contractmutatie met andere meerkosten van dat project. De kosten die direct gemaakt zijn voor het bekleden van deze tunnel zijn niet bekend.

De directe kosten voor hittewerende bekleding zijn echter wel bekend. Het aanbrengen van hittewerende bekleding kost ongeveer €150,- per m². Per km tunnelbuis komt dit uit op ongeveer 3 miljoen euro.

De onderzoekers rekenen met 9 miljoen euro per km tunnelbuis.

Niet beschikbaarheid:

De kosten die gerekend worden voor niet beschikbaarheid tellen echter nog harder aan. De onderzoekers rekenen met 1 miljoen euro per dag per km tunnelbuis. De onderzoekers maken echter geen onderscheid tussen het scenario dat de tunnel morgen door brand opeens niet meer beschikbaar is en de files die daar door ontstaan. En het scenario dat de niet beschikbaarheid gepland is, plaats vind in dal uren, weekenden of verkeersluwe vakantieperiodes, aangevuld met bereikbaarheidsmaatregelen en informatiecampagnes. In het tweede scenario is de overlast veel minder dan in het eerste scenario, maar in de berekening worden beiden gelijk behandeld.

Herstel van de tunnel na brand:

Een vergelijkbaar scenario vindt plaats bij de kosten en tijd waar mee gerekend wordt als de tunnel is ingestort door brand. Ook hier wordt uitgegaan van optimistische herstelkosten en -tijd, gebaseerd op een ideale situatie die je alleen op een bouwplaats en met jaren voorbereidingstijd kunt bereiken. Als je onder grote tijdsdruk en onder niet ideale omstandigheden, zonder enige voorbereiding, plotseling 1 of 2 tunnelmots moet herbouwen en alle installaties in het betreffende deel van de tunnel opnieuw moet aanleggen en testen gaat dat nu eenmaal niet zo efficiënt als we gewend zijn in een nieuwbouwproject.

Alles bij elkaar zorgt de positieve inschatting zoals beschreven onder punt 2 ervoor dat de initiële grote fout van een factor 25, danwel 50 nog een 2 tot 4 keer zo groot wordt. Dus oploopt tot een factor 50 - 100 of een factor 100 - 200, afhankelijk van welk uitgangspunt je uit wilt gaan.

1) De kans op schade bij brand.

De nemen in hun rapportage op dat alleen een heel grote brand tot grote schade aan een tunnel kan leiden. De onderzoekers gaan er van uit dat er na een RWS brand met een duur van 90 minuten nog slechts lokale schade aan een tunnel is, zonder bezwijken van een tunnelmoot (tabel 15, schade klasse C). De eis uit het bouwbesluit is dat een landtunnel 60 minuten bestand is tegen een RWS brand. Met andere woorden, de onderzoekers hanteren in hun berekening het uitgangspunt dat een tunnel zonder maatregelen al voldoet aan het bouwbesluit. Pas bij een RWS brand die 120 minuten duurt koppelen de onderzoekers een schadeklasse die behoort bij bezwijken van 1 of 2 tunnelmooten (D of E).

Uit de laboratorium proeven uit 2017 blijkt dat bij een RWS brand, het beton in de dekkingszone in een tijdsperiode van 20-25 minuten tot de wapening afspat. Uit verschillende constructieve analyses, welke ook zijn toegevoegd in het rapport, blijkt dat de eerste tunnelmoot instort 25-30 minuten na het begin van de brand.

Het grootste deel van de vrachtwagenbranden is na 30-60 minuten uitgebrand. Ook de bekende grote vrachtwagenbranden in de Velsertunnel en de Heinenoordtunnel waren na 30 minuten weer uitgebrand. Of de tunnel al bij 30 minuten instort of pas na 120 minuten, heeft een hele grote impact op de uitgevoerde kosten baten analyse.

Wanneer we als conservatief uitgangspunt hanteren dat RWS branden vanaf 45 minuten tot instorten van de tunnel leiden is er in slechts 6,44 % van de optredende branden spraken van instorten van de tunnel. Wanneer we echter als uitgangspunt hanteren dat alleen RWS branden vanaf 120 minuten tot instorten van de tunnel leiden is er in slechts 0,27% van de optredende branden spraken van instorten van de tunnel. Zie bijlage 1 voor een overzicht van de kans op brand.

Alleen door dit verschil in aannamen ontstaat een fout van een factor 25 in de berekening

Als we een minder conservatief uitgangspunt nemen, wat volgens recentere onderzoeken¹ gerechtvaardigd lijkt, moeten we ervan uitgaan dat branden vanaf 50 MW tot het instorten van een tunnelmoot kunnen leiden.

In dat geval leidt ongeveer 13,5% van de optredende branden tot het instorten van 1 of meer mooten van de tunnel. Deze kans is ongeveer 50 keer zo groot als de kans waar de onderzoekers mee rekenen.

¹ Bij brandproeven in de Salland-Twente tunnel trad afspatten op bij de standaard brandkromme. Het onderzoek naar kleine branden toont aan dat ook bij kleinere branden met een HRR van 70MW al hoge temperaturen bereikt worden. Zelfs bij branden met een HRR van 20-40 MW treed mogelijk al afspatten op.

per definitie niet meegenomen worden. De opstellers zijn het niet per definitie oneens met het geleverde commentaar, ook al hebben zij soms ook een andere mening. Gezien de beschikbare data waarop de analyse gemaakt is, is het deels mogelijk dat verschillende personen verschillend naar de uitgangspunten kijken. Maar dat zij qua tijd en gemaakte afspraken voor oplevering van het rapport niet in staat waren hier nog wijzigingen in aan te brengen. Als alternatief is er hier en daar een voetnoot opgenomen waar in is weergegeven dat er nog discussie bestaat over de gebruikte uitgangspunten en dat daar voor een beter beeld nog nader onderzoek naar zou moeten plaatsvinden. De onderzoekers geven aan dat het wel verwerken van het commentaar niet tot wezenlijke wijzigingen in de conclusies zouden hebben geleid.

Bepalen van de effectiviteit van maatregelen

Hoe wordt de effectiviteit van alternatieve voor hittewerende bekleding bepaald? Dit is in wezen een simpele berekening. Je start met bepalen hoe vaak er een brand ontstaat. Vervolgens bepaal je hoe groot die brand is. Als je weet hoe groot een brand is, schat je in welke schade daar door kan ontstaan, wat het kost om die schade te herstellen en hoe lang het duurt om die schade te herstellen. Het aantal keer dat een, met name grote, brand ontstaat, vermenigvuldigd met de kosten (inclusief niet-beschikbaarheid van het netwerk) van het herstel van een brand bepaalt of het slimmer is om af en toe de schade van een brand te herstellen, of dat het slimmer is om maatregelen te nemen die voorkomen dat de schade bij een brand ontstaat.

Het ingewikkelde van bovenstaande berekening is daarom niet de berekening zelf, maar de data die je daar voor nodig hebt. In werkelijkheid heb je te maken met een groot aantal kleine branden die weinig schade veroorzaken en een klein aantal branden die een grote schade veroorzaken. Hoe groot die schade dan precies is, daarover is weinig bekend. De tijd die het kost om een tunnel weer te herstellen? Ook daarover is weinig bekend. Voor al deze zaken moeten aannames gedaan worden.

Berekening volgens reviewcommentaar RWS

Zoals bij de aanleiding al geconstateerd blijkt uit de analyse van RWS dat het consequent te positief inschatten van de gegevens waarmee de berekening is uitgevoerd kan leiden tot een grote afwijking in de resultaten. Een afwijking dit zo groot is dat de conclusies van het rapport mogelijk niet juist zijn. In de onderstaande paragrafen wordt per onderdeel van de berekening aangegeven welke benadering de reviewers van RWS in hun commentaar hebben voorgesteld en hoe groot de afwijking tussen de benadering van RWS en de benadering van de onderzoekers kan zijn.

Bijlage 1: kans op brand en schade

Datum
19 januari 2021

Brandkansen + Schade Tabel 7, 10, 15 referentiesituatie

HRR Klasse [MW] Tabel 7	TNO rapport 2012 HRR - Kans	Referentie Tabel 7	Brand-intensiteit Tabel 10	Referentie Tabel 10	Schadeklasse Tabel 15	Cumulatieve kans Tabel 15	Schadeklassen Commentaar	Cumulatieve kans Commentaar
5	85,000%	84,000%	lokaal	85,000%	A	85,000%	A	85,000%
		1,200%						
25	6,750%	0,710%	kleiner	3,800%	B	5,300%	B	2,000%
50	4,350%	3,100%						
100	2,625%	6,100%						
200	1,275%	4,700%	15 min RWS	1,500%	C	9,676%	C	5,000%
			30 min RWS	7,100%				
			60 min RWS	2,500%				
400	0,000%	0,410%	90 min RWS	0,076%	D	0,001%	D	6,177%
			120 min RWS	0,001%				
			180 min RWS	0,000%				
			240 min RWS	0,086%				
maximum (600)	0,000%	0,180%	extreem	0,180%	E	0,266%	E	0,266%

Bijlage F RWS Memo over vervolg met reactie van TNK [131]



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

Aan [redacted]
c.c. [redacted]
[redacted]

memo

keuzes bij "verkennd onderzoek brandwerendheid drie landtunnels"
hb 3997670

Beste [redacted]

Eind november vorig jaar hebben [redacted] van Adviesbureau Hageman en [redacted] van de Universiteit Gent hun rapportage getiteld "Brandwerendheid tunnels – Verkenning van mogelijke alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding in drie landtunnels" afgerond. Aan het rapport wordt thans, vanwege ontvangen aanvullende informatie o.a. van de Gaasperdammertunnel, een addendum, dat de conclusies ongewijzigd laat, toegevoegd. De opstellers benadrukken in hun rapportage dat het vooral een verkennende studie is. In hun eindrapportage trekken de onderzoekers de volgende conclusies:

- Beton is bij brandbelasting in principe altijd spat gevoelig &
- Het aanbrengen van hittewerende bekleding in tunnels is een effectieve maatregel om schade aan tunnels t.g.v. een brandbelasting te voorkomen.
- Het achterwege laten van hittewerende bekleding in (de drie benoemde) landtunnels is (in potentie) een reële optie. Alvorens tot deze optie te kunnen besluiten dient specifiek per tunnel aanvullende onderzoek te worden uitgevoerd.

De verkennende studie betrof niet de veiligheid van de weggebruikers, die is geborgd. Deze studie appelleert hoofdzakelijk aan de asset management aspecten (beschikbaarheid tunnel). Daarenboven geldt dat de studie nadrukkelijk niet tunnels onder open water betreft.

In aanvulling op de bovengenoemde technische rapportage heeft [redacted] (CD/BJV-Expertise) een notitie opgesteld waarin hij de juridische aspecten beschouwt. Daarin concludeert hij dat, indien de veiligheid van de gebruikers niet in het geding is, het achterwege laten van hittewerende bekleding een mogelijke optie is. Ook [redacted] geeft aan dat alvorens voor de optie te kiezen, per tunnel aanvullend onderzoek nodig is. De juridische notitie wordt momenteel door de landsadvocaat op juridische volledigheid en juistheid getoetst.

Recent zijn de resultaten van het onderzoek van [redacted] ook gedeeld met de betreffende bevoegde gezagen en Veiligheids Regio's. De resultaten worden binnenkort ook gedeeld met ProRail en beheerders van niet-rijkstunnels.

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

T
F
www.rijkswaterstaat.nl

Contactpersoon

[redacted]

T
[redacted]@rws.nl

Datum
24 maart 2021

Bijlage(n)
- Rapportage
"Brandwerendheid tunnels -
Verkenning naar mogelijke
alternatieven voor het
aanbrengen van hittewerende
bekleding in drie Landtunnels
-juridische advies bij
rapportage [redacted]
[redacted]

Pagina 1 van 8

De weg is nu vrij om, na instemming van de stuurgroep en door tussenkomst van de coördinerend HID i.c. [REDACTED], voor de minister een notitie op te stellen. De minister kan daarbij voor de betreffende drie landtunnels drie keuzes, op basis van de technisch inhoudelijke en juridische analyse, worden voorgelegd, namelijk:

Datum
24 maart 2021

1. Doorgaan met het huidige beleid.
Met in achtname van de gebruikelijke interpretatie van het kader rondom brandwerendheid, in de drie landtunnels gebouwd na 2008 hittewerende bekleding aanbrengen. Hierbij dient bedacht te worden dat dit dan naar verwachting ook zal gelden voor een tunnels welke voor 2008 gebouwd zijn.
2. Het laten uitvoeren van aanvullend landtunnel specifiek onderzoek zoals verwoord in de rapportage van [REDACTED] alsmede een controle op de juridische aspecten zoals verwoord door de Corporate Dienst, met als doel te komen tot een besluit door de minister en het bevoegd gezag m.b.t. het achterwege laten van hittewerende bekleding en
3. Het combineren van het aanbrengen van hittewerende bekleding met toekomstig grootschalig onderhoud (verwacht rond 2030). Dat betekent dat de huidige situatie (het niet aanwezig zijn van hittewerende bekleding) van de betreffende tunnels nog gedurende een aantal jaren gecontinueerd zal worden.

Op grond van het onderzoek van [REDACTED] en het door Corporate Dienst opgestelde, en door de landsadvocaat te toetsten, kader zal mijn advies aan de stuurgroep en [REDACTED] (als coördinerend HID) zijn om de minister te adviseren voor optie twee te kiezen.

Het voordeel van dit besluit is dat hiermee:

- Met hoge mate van betrouwbaarheid per tunnel het juiste advies gegeven kan worden over het bezwijkmechanisme bij brand, wat vervolgens kan leiden tot:
 - Het voorkomen van verkeersoverlast en
 - Een forse financiële besparing (zeker als ook de landtunnels van voor 2008 met hittewerende bekleding dient te worden voorzien).

In de oplegmemorandum voor de minister zal nadrukkelijk moeten worden ingegaan op het feit dat optie twee een benadering is, waarbij de kans van optreden van een grote tunnelbrand zeer klein is, maar dat, indien deze zich voordoet, de tunnel voor langere tijd dan indien bijvoorbeeld hittewerende bekleding is aangebracht, gesloten zal zijn voor het verkeer. In de aanvullende studie, die voorwaarde is voor dit scenario, zal ook in beeld worden gebracht hoeveel langer deze sluiting voor het verkeer dan ongeveer zal zijn.

Op 16 februari is door de minister van I&W een brief de Tweede Kamer uitgegaan over aanvullende onderzoek over de mogelijke verminderd brandveiligheid van tunnels gebouwd in de periode 2000 – 2008. De uitkomsten het uit boven benoemde aanvullende onderzoek (bij een keuze voor optie 2) zal ook informatie opleveren en deels ook richtinggevend zijn voor het te voeren beleid voor de tunnels uit de 2000 - 2008.

Tot zover de algemene lijn.

Datum
24 maart 2021

Het onderzoek van [redacted] is tijdens de uitvoering tweemaal besproken waarbij [redacted] aanwezig waren. Het conceptrapport is voor commentaar ook aan hen aangeboden en, in de persoon van [redacted], ook aan de afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken (TNK) van de directie Techniek van GPO. Het commentaar van alle betrokkenen op de concept rapportage is door de [redacted] schriftelijk beoordeeld en óf van een weerwoord voorzien óf overgenomen in het rapport.(indien gewenst kan deze rapportage worden aangeleverd). De [redacted] zijn van oordeel dat het ontvangen commentaar geen gevolgen heeft voor de hoofdlijn van hun rapportage. Een aantal opmerkingen, waaronder de prijs voor het aanbrengen van hittewerende bekleding, was niet correct en zal in een addendum aan de rapportage worden toegevoegd. Op één punt hebben de auteurs en de collega's van de afdeling TNK een duidelijk afwijkende mening/zienswijze. Ook na overleg tussen de [redacted] en de collega's van de afdeling TNK blijft dit verschil van inzicht, dat zowel de technische als juridische kan van de zaak raakt, bestaan.

Het verschil van inzicht is gelegen in de vraag of voor de optie dat hittewerende bekleding achterwege gelaten wordt, er nog moet worden voldaan aan de faalkansen, zoals die in Eurocode 0 voor bezwijken in het algemeen zijn geformuleerd.

De visie van de collega's van TNK, hetgeen het duidelijkst is verwoord in de mail van [redacted] van 10 december jl. en in de bijlage aan dit schrijven, is dat via het bouwbesluit, ook altijd nog voldaan dient te worden aan de constructieve Eurocodes en voor bestaande constructies aan de NEN 8700 en NEN 8701 (Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren).

De onderzoekers stellen dat de geformuleerde faalkansen, waaraan automatisch wordt voldaan als aan de prestatie-eisen in de normen van het Bouwbesluit wordt voldaan, zijn geformuleerd in verband met het beperken van kansen op slachtoffers en beperken van economische schade. Voor de betreffende optie van achterwege laten van hittewerende bekleding geldt dat:

- RWS zelf al heeft onderbouwd dat er geen gevaar is voor mensenlevens. Als dit in het geding zou zijn zou door de Veiligheidsbeambte RWS verkeerstunnels direct ingegrepen zijn en zouden de betreffende tunnels acuut door het bevoegd gezag worden gesloten.
- De economische schade juist het onderwerp was van de verkennende studie, waaruit naar voren komt dat het aanbrengen van hittewerende bekleding tot een grotere economische schade leidt dan het achterwege laten ervan.

De onderzoekers wijzen er wel op dat bij een grote brand er meer schade zal zijn dan in het geval van aanwezigheid van hittewerende bekleding. De mogelijke sociale en psychologische effecten hiervan dienen ook nog goed in beeld gebracht te worden, net als de communicatie over deze optie, maar dat staat los van het benoemde verschil van inzicht.

Doordat we weten dat er geen mensenlevens in gevaar zijn (veiligheid is niet in het geding, zie hiervoor ook de brief 27 juli 2017 met kenmerk VB-2017-041 versie 3 van de veiligheidsbeambte aan de coördineert tunnelbeheerder) en we

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

Pagina 3 van 8

voor de economische schade weten waar je rekening mee moet houden (gedeeltelijk/lokaal bezwijken) is het mogelijk om met een gelijkwaardige oplossing ook op dit punt direct te voldoen aan de bovenliggende functionele eisen c.q. de overheidsdoelstelling van de wetgever. Om die reden is het, voor de beschouwde optie van het weglaten van hittewerende bekleding bij de drie landtunnels niet noodzakelijk om voor bezwijken ten gevolge van een brand ook nog te voldoen aan de faalkansen c.q. betrouwbaarheidsindexen, zoals die in Eurocode 0 algemeen zijn vastgesteld voor bezwijkvormen waarbij de gevolgen van bezwijken niet bekend zijn. De uitkomsten van het aanvullende specifieke onderzoek per tunnel zal met de bevoegde gezagen besproken worden.

Datum
24 maart 2021

Mocht het bovenstaande nog aanleiding geven tot vragen of opmerkingen dan hoor ik die gaarne.

Met vriendelijke groet,


projectdirecteur

Bijlage 1 visie van de afdeling Tunnels en Natte kunstwerken.

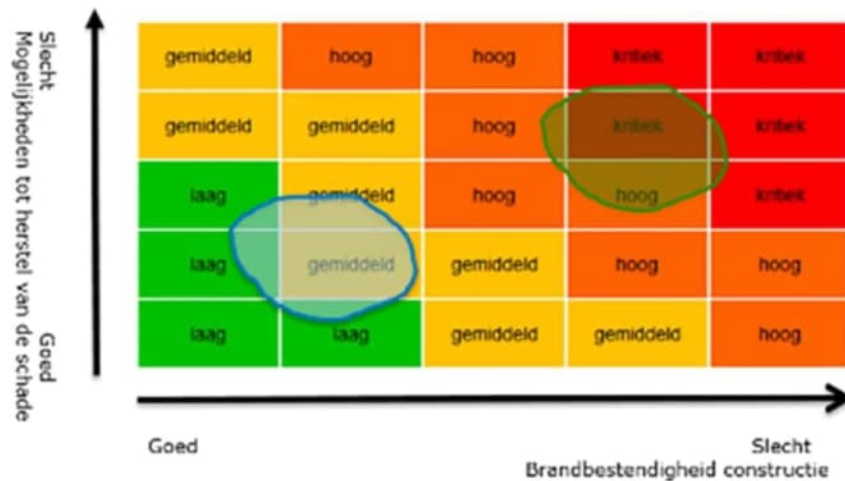
In deze bijlage wordt verwoord waarin de afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken (TNK) van mening verschilt met de richting in deze memo, verwoord door [REDACTED]

A) Na de algemene lijn staat:

Het onderzoek van [REDACTED] is tijdens de uitvoering tweemaal besproken waarbij [REDACTED] aanwezig waren. Het conceptrapport is voor commentaar ook aan hen aangeboden en, in de persoon van [REDACTED] ook aan de afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken (TNK) van de directie Techniek van GPO. Het commentaar van alle betrokkenen op de concept rapportage is door de [REDACTED] schriftelijk beoordeeld en óf van een weerwoord voorzien óf overgenomen in het rapport. (indien gewenst kan deze rapportage worden aangeleverd). De [REDACTED] zijn van oordeel dat het ontvangen commentaar geen gevolgen heeft voor de hoofdlijn van hun rapportage. Een aantal opmerkingen, waaronder de prijs voor het aanbrengen van hittewerende bekleding, was niet correct en zal in een addendum aan de rapportage worden toegevoegd. Op één punt hebben de auteurs en de collega's van de afdeling TNK een duidelijk afwijkende mening/zienswijze. Ook na overleg tussen de [REDACTED] en de collega's van de afdeling TNK blijft dit verschil van inzicht, dat zowel de technische als juridische kan van de zaak raakt, bestaan.

Het is belangrijk dat het niet om 1 punt gaat. Het gaat er hier om dat de afdeling TNK van GPO (de beheerder van het dossier brandwerendheid voor tunnels) belangrijke kanttekeningen gemaakt heeft betreffende de juistheid van het rapport. Deskundigen van de afdeling TNK waren betrokken om de concept rapportage te reviewen. Het commentaar is naar mening van de reviewers niet gebruikt om het rapport te verbeteren, noch weerlegd. De risico-analyse en de conclusies hieruit zijn vervolgens naar inzicht van de opstellers van het verwoord.

Het oneens zijn tussen de afdeling NKT en de opstellers van het rapport kan worden weergegeven in de onderstaande plaat (risicomatrix). In blauw zijn de uitgangspunten van de onderzoekers weergegeven, in groen de uitgangspunten die volgen uit de onderzoeken en analyses die RWS heeft uitgevoerd:



1. Blauw: Je gaat ervan uit dat tunnels, zoals ze nu zijn, al heel goed tegen brand kunnen. Met andere woorden, bij brand duurt het lang voordat ze enige schade oplopen en instorten van de tunnel komt alleen bij uitzonderlijk langdurige en grote branden voor. Daarbij neem je aan dat een tunnel, wanneer hij toch beschadigd is door brand, snel en tegen geringe kosten gerepareerd kan worden.
2. Groen: Je gaat ervan uit dat tunnels, zoals ze nu zijn, minder goed tegen brand kunnen dan altijd aangenomen. Met andere woorden accepteert dat uitgevoerde brandproeven aantonen dat bij een grote brand de al snel kan afspringen en de wapening bloot komt te liggen. Aanvullende analyses tonen aan dat de constructie kort nadat de wapening zijn sterkte verliest instort. Daarbij neem je aan dat het herstellen van een door brand beschadigde constructie nog best ingewikkeld en kostbaar is. In het geval van een of meer ingestorte tunnelmotten kan dat betekenen dat een verbinding meer dan een half jaar niet beschikbaar is.

Het nemen van maatregelen tegen brand bij bestaande tunnels veroorzaakt overlast en kost geld. In het geval van situatie 1 geef je veel geld uit om een klein risico op te lossen. De conclusie is dan al snel dat de voordelen van het nemen van maatregelen niet opwegen tegen de nadelen. In het geval van situatie 2 geef je veel geld uit om een groot risico op te lossen. De conclusie kan in dit geval heel anders zijn. Het kan best rendabel zijn om veel geld uit te geven om een groot risico op te lossen.

Het punt van haakt hier aan de horizontale as van de risicofiguur. Hij onderbouwt dat het risico een relatief grote kans van optreden heeft. De betrouwbaarheidsindex van de constructie wordt hierdoor zo laag dat het volgens de Eurocodes noodzakelijk is om maatregelen tegen het belastinggeval brand te treffen. De eurocodes geven geen mogelijkheid om bij eenvoudig herstel een lagere betrouwbaarheidsindex te kiezen. Iets dat je bij een puur economische afweging nog wel zou kunnen overwegen.

B) Op pagina 3, laatste alinea staat:

Datum
24 maart 2021

Doordat we weten dat er geen mensenlevens in gevaar zijn (veiligheid is niet in het geding, zie hiervoor ook de brief 27 juli 2017 met kenmerk VB-2017-041 versie 3 van de veiligheidsbeambte aan de coördineert tunnelbeheerder) en we voor de economische schade weten waar je rekening mee moet houden (gedeeltelijk/lokaal bezwijken) is het mogelijk om met een gelijkwaardige oplossing ook op dit punt direct te voldoen aan de bovenliggende functionele eisen c.q. de overheidsdoelstelling van de wetgever.

De functionele eis uit het bouwbesluit zegt dat er redelijke tijd moet zijn om de tunnel te verlaten en te doorzoeken. Het verlaten slaat op weggebruikers die de tunnel zelfstandig verlaten, het doorzoeken slaat op hulpverleners die mensen proberen te redden die de tunnel niet zelfstandig konden verlaten. In het geval van brand zijn er zeker wel mensenlevens in gevaar. Dit zijn de levens van weggebruikers, hulpverleners, en recreanten die gebruik maken van het tunneldak. Wat een geaccepteerd risico is voor al deze groepen verschilt van groep tot groep. Deze groep in namelijk onvoldoende onderbelicht.

Weggebruikers:

Wat RWS tot nu toe onderbouwd heeft is dat het risico voor weggebruikers niet boven de risico norm komt. Dit betekent dus niet dat er in de huidige situatie niet meer slachtoffers vallen dan in de situatie waarbij de tunnel wel aan de eisen voldoet, maar dat het eventuele aantal extra slachtoffers zo klein is dat deze onder de norm blijven. Toelichting: Dit komt omdat in de QRA ervan uitgegaan wordt dat alle mensen die niet zelf kunnen vluchten komen te overlijden. Door ingrijpen van hulpverleners kan mogelijk een deel van de niet zelfredzame weggebruikers toch nog gered worden.

Hulpverleners:

Voor hulpverleners is onderbouwd dat deze wel een extra risico lopen. Dit komt omdat hulpverlening plaatsvindt in dezelfde tijdsperiode als dat het risico op instorten van de tunnel bestaat. Het extra risico is nu tijdelijk gemitigeerd door afspraken te maken over de hulpverlening. In essentie komt dit erop neer dat hulpverleners bij een grote brand geadviseerd is de tunnel niet in te gaan, en dus geen hulp te verlenen. Het is nog de vraag hoe dit zich verhoudt tot de eis in het bouwbesluit dat er redelijke tijd moet zijn om de tunnel te doorzoeken.

Recreanten:

Voor recreanten op het tunneldak is onderbouwd dat deze een extra risico lopen. Dit komt omdat recreanten zich nog op het tunneldak bevinden in dezelfde tijdsperiode dat het risico op instorten van de tunnel bestaat. Het extra risico is nu tijdelijk gemitigeerd door afspraken te maken over snelle evacuatie van het tunneldak.

C) Omissies in de memo:

Kiezen voor het nemen van **geen** maatregelen betekent dat we als RWS, of als Minister, bewust het risico willen lopen dat een deel van ons hoofdwegennet voor langere tijd (6-12 maanden) niet beschikbaar is. Afgezien van of dit economisch slim is om te doen, is dit primair een principiële keuze. Al het beleid van RWS is erop gericht om grote risico's op niet beschikbaarheid te voorkomen. Deze keuze staat hier haaks op. Als je hier voor kiest, is dat dan voor een beperkt aantal objecten, of willen we in bepaalde gevallen best grote risico's lopen?

Daarnaast heeft dit ook politieke consequenties. Gaat een minister na een grote brand inderdaad vertellen aan Nederland, dat het wel is waar vervelend is dat

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

Pagina 7 van 8

mensen een deel van het hoofdwegennet langere tijd niet kunnen gebruiken, maar dat het toch slim was om dit risico bewust te nemen?

Datum
24 maart 2021

D) Tot slot.

De directie techniek van GPO is van mening dat er gezien de hiervoor benoemde punten voldoende reden is om een andere standpunt te nemen t.o.v. de conclusies in het rapport "Verkenning van mogelijke alternatieven voor het aanbrengen van hittewerende bekleding in drie landtunnels".

Indien optie 2 de voorkeur krijgt is het van belang deze te kiezen in de wetenschap dat de kans groot is dat uiteindelijk de conclusie getrokken moet worden dat het niet nemen van maatregelen geen haalbare weg blijkt te zijn.

In dit geval betekent dat optie 1, doorgaan met het huidige beleid, economisch en geredeneerd vanuit de beschikbaarheid van onze netwerken de meest haalbare optie kan blijken.