ONDERZOEK BRANDWERENDHEID METROTUNNEL OOSTLIJN RAPPORTAGE

GEMEENTE AMSTERDAM
DIENST INFRASTRUCTUUR VERKEER EN VERVOER

16 januari 2012
075839540:D - Definitief
D04021.000262.0100

ARCADIS

Inhoud

Samenvatting 3

1 Inleiding 4
1.1 Algemeen 4
1.2 Aanleiding 4
1.3 Doelstelling rapportage 5

2 Aanpak 6
2.1 Algemene aanpak 6
2.2 Aanpak met betrekking tot het beoordelen van de afspatgevoeligheid van het beton 6

3 Normatief kader 7
3.1 Inleiding 7
3.2 Wettelijke regelingen 7
3.2.1 Bouwbesluit 7
3.2.2 Eurocode 9
3.3 Richtlijnen en aanbevelingen 9
3.3.1 De VeiligheidsEisen voor tram- en MetroTunnels (VEMT) 10
3.3.2 Amsterdamse Leidraad Integrale Veiligheid ondergrondse tram- en metrosystemen (ALIVe) 11
3.4 Achtergrondinformatie 12
3.4.1 OVS 000030 – 3.0 DEEL 3 SPOORTUNNELS 12
3.4.2 OVS 00201-V001 Spoortunnels > 250 m 13
3.4.3 BrandOnderzoek Metro (BOM) 13
3.5 Interpretatie 14

4 Beschrijving situatie 16
4.1 Inleiding 16
4.2 Constructie stations 17
4.3 Constructie tunnelbuizen 17
4.4 Voegprofielen 18

5 Beoordeling van de brandbestendigheid 19
5.1 Kwantitatieve beoordeling brandbestendigheid 19
5.1.1 Materiaalgedrag voor warmtestroming 19
5.2 Berekeningsresultaten 20
5.2.1 Temperatuursindringing ISO-brandkromme 20
5.2.2 Sterkte constructie bij brand 21
5.3 Reststerkte na brand 24
5.4 Kwalitatieve beoordeling afspatgevoeligheid 25
5.5 Beoordeling voegprofielen 27

6 Conclusie toetsing en aanbevelingen 28

6.1 Conclusie 28
6.2 Aanbevelingen 28

7 Referenties 29

Colofon 30

Samenvatting

Door ARCADIS is onderzoek gedaan naar de brandwerendheid van de tunnel en ondergrondse stations van de Oostlijn van de metro van Amsterdam.
Aan de hand van vigerende regelgeving is de in rekening te brengen brandcurve vastgesteld. In dit geval is dat de ISO-brandcurve. Op grond van het Bouwbesluit dient met betrekking tot bezwijken te worden voldaan aan brandwerendheid gedurende 30 minuten brand. Deze eis heeft betrekking op evacuatie en brandbestrijding. In het onderzoek is ook gekeken naar 60 minuten brandwerendheid in verband met de integriteit van de tunnel tijdens en na de brand.

De tunnel is grotendeels gebouwd met de caissontechniek. Van de caissons van de stations en de tunnelbuizen is nagegaan welke soort wapeningstaal is toegepast, koud vervormd of warmgewalst. Dit is van belang voor het gedrag bij brand, waarbij koud vervormd staal sterker in sterkte terugloopt bij brand dan warm gewalst staal. Tevens is de betondekking op de wapening onderzocht aan de hand van archieftekeningen. Verschillende situaties komen voor:
Caisson 11/01/03 van het Centraal Station heeft 2 cm wapeningsdekking bij toepassing van warm gewalst staal. De overige stations hebben 3 cm wapeningsdekking bij toepassing van koudvervormd staal.
De tunnelbuizen zijn alle uitgevoerd met tenminste 3 cm wapeningsdekking en koudvervormd staal, behalve het traject tussen Centraal Station en Nieuwmarkt waar warmgewalst staal is toegepast.

Aan de hand van het temperatuurverloop bij brand is met de materiaalkarakteristieken volgens NEN-EN 1992-1-2 de sterkteafname van de wapening bepaald.

In alle gevallen is de constructie voldoende sterk tijdens en na de brand zodat geen additionele maatregelen benodigd zijn om aan de bouwregelgeving te voldoen.

HOOFDSTUK 1

Inleiding

1.1 ALGEMEEN

Het ondergrondse deel van de Oostlijn van de Amsterdamse metro is in gebruik sinds 1980, en daarmee bijna 30 jaar oud. Inmiddels zijn de reizigersaantallen gegroeid en verwerkt het drukste station CS nu op werkdagen gemiddeld 65.000 reizigers.
In juli 1999 een brand geweest op station Weesperplein. Sinds 11 mei 2006 is een nieuwe wet- en regelgeving voor wegtunnels (WARVW), waarin bepaalde procesafspraken ook geldig zijn voor spoor-, tram, en metrotunnels.

Al deze punten zijn aanleiding geweest te starten met het project MetroMorfose, dat in 2004 is overgegaan in het project Renovatie Oostlijn (ROL). ROL omvat de renovatie van de stations, de renovatie van de ondergrondse railinfrastructuur en de verbetering van de tunnelveiligheid (de trias Infrastructuur, Materieel en Organisatie).

1.2 AANLEIDING

In 2004 is besloten af te zien van sprinklers op de perrons en is gekozen voor toepassing van brandwerende bekleding van tunnelwanden en –daken langs en boven de sporen op de stations. Die bekleding zou dan later, bij de bouwkundige stationsrenovaties worden aangebracht.

Onlangs is aan ARCADIS Nederland BV (hierna te noemen ARCADIS) gevraagd een onderzoek te doen naar de brandwerendheid van de ondergrondse stations en de tunnel van de metro Oostlijn. De hoofdvraag is of de huidige constructie voldoet aan de bouwregelgeving. Indien de huidige constructie niet aan de bouwregelgeving voldoet, is de vraag welke maatregelen genomen moeten worden om deze wel te laten voldoen. DMB wil aangetoond hebben of er wel of geen brandwerende bekleding benodigd is.

De bouwregelgeving stelt eisen aan de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie bij brand. Deze eisen gelden zowel voor de tunneldelen als ook voor de stations.
Naast prestatie-eisen wordt in het bouwbesluit 2003 gesteld: '*Een uiterste grenstoestand van een hoofddraagconstructie wordt, afhankelijk van de bestemming en de inrichting van een bouwwerk, bij de volgens NEN 6702 bepaalde bijzondere belastingscombinaties die kunnen optreden bij brand, gedurende zodanige tijd niet overschreden, dat het bouwwerk bij brand binnen redelijke tijd kan worden verlaten en kan worden doorzocht, zonder dat gevaar bestaat voor instorting van de hoofddraagconstructie*'.

1.3 DOELSTELLING RAPPORTAGE

Deze rapportage geeft een handvat voor de opdrachtgever om vast te stellen of er maatregelen benodigd zijn om de huidige constructie van de stations en de tunnel te laten voldoen aan de vigerende bouwregelgeving.

HOOFDSTUK 2 Aanpak

2.1 ALGEMENE AANPAK

Het volgende stappenplan voor de beoordeling van de brandwerendheid van de metrostations en tunneldelen op basis van een quickscan is gevolgd:

- Vaststellen van de toetscriteria in het kader van de vigerende bouwregelgeving.
- Beoordeling van de constructie en het ontwerp van de maatregelen met betrekking tot degeneratie van het beton en de wapening ten gevolge van hoge temperaturen op basis van de brandcurve. Er zijn doorsneden beschouwd van elk station en de tunnelbuizen tussen de stations. De beoordeling is als volgt:
  - Verzamelen van informatie ten aanzien van de constructies;
  - Bepalen van de temperaturen in het beton en de wapening;
  - Beoordelen van de sterkte van de constructie aan de hand van constructieve beschouwing van enkele doorsneden. De sterkte is op globaal niveau beoordeeld. Details zoals trappartijen et cetera worden niet separaat beoordeeld;
  - Beoordelen van de afspatgevoeligheid van het beton.
- Beoordeling van de gevoeligheid van de voegdetails voor degradatie van het waterafsluitende rubber.
- Advies over eventueel benodigde brandwerende voorzieningen.
- Rapportage.

2.2 AANPAK MET BETREKKING TOT HET BEOORDELEN VAN DE AFSPATGEVOELIGHEID VAN HET BETON

Uit de beschikbare informatie, die bestaat uit tekeningen, berekeningen en het bestek, is de betonsterkteklasse en het cementgehalte bepaald en vergeleken met het ROBK-criterium met betrekking tot de afspatgevoeligheid. Daarnaast zijn op basis van indicatieve berekeningen maatgevende drukspanningen onder gebruikstoestand bepaald en vergeleken met de gebruikelijke drukspanningen in tunnels, waarop het ROBK-criterium van toepassing is. Deze beoordeling resulteert in een kwalitatieve beoordeling van de afspatgevoeligheid.

HOOFDSTUK 3 Normatief kader

3.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk beschrijft het normatieve kader voor de beoordeling van de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie van tunnel en stations van de Oostlijn. Onderscheid wordt gemaakt tussen wettelijke regelingen, richtlijnen (en aanbevelingen) en aanvullende informatie. Strikt gezien dient alleen voldaan te worden aan de wettelijke regelingen en de eventueel door de bevoegde instanties aangewezen richtlijnen.

3.2 WETTELIJKE REGELINGEN

Specifiek voor de veiligheid in tunnels zijn de volgende wettelijke regelingen van toepassing. Niet alle documenten zijn van toepassing voor metrotunnels- en stations:

- De wet, het besluit en de regeling aanvullende regels wegtunnels (WARVW, BARVW en RARVW).
  De trits WARVW, BARVW en RARVW bevat geen bepalingen voor spoortunnels met betrekking tot constructieve brandveiligheid en wordt hier daarom niet verder behandeld.
- De Woningwet, het Bouwbesluit en het Besluit brandveilig gebruik bouwwerken (zie 3.2.1).
- De Technische specificatie voor interoperabiliteit – Veiligheid in spoorwegtunnels (TSI – VIS).
  De TSI – VIS is, evenals de andere TSI's, uitvoeringsregelgeving in het kader van de beide Europese richtlijnen voor interoperabiliteit (voor conventioneel spoor en hoge snelheidsspoor). Deze richtlijnen beogen de eenwording van de Europese markten voor spoorwegdiensten en spoorwegproducten en bevordering van het grensoverschrijdende treinverkeer. Omdat de Amsterdamse metro geen onderdeel uitmaakt van grensoverschrijdend treinverkeer wordt de TSI-VIS verder buiten beschouwing gelaten.
- De EuroCode , die met ingang van 1 januari 2012 door het Bouwbesluit wordt aangewezen (zie 3.2.2).

3.2.1 BOUWBESLUIT

Voor de tunnel en de stations is het Bouwbesluit 2003 van toepassing, samen met de bijbehorende Regeling Bouwbesluit. Hoofdstuk 2 van het Bouwbesluit bevat voorschriften uit het oogpunt van veiligheid. De eisen die aan een bouwwerk (of een deel daarvan) worden gesteld, zijn afhankelijk van de gebruiksfunctie waartoe dat bouwwerk (of een deel daarvan) behoort. Met gebruiksfunctie wordt bedoeld: de gedeelten van één of meer bouwwerken op een perceel of standplaats, die eenzelfde gebruiksbestemming hebben en

die tezamen een gebruikseenheid vormen. Het Bouwbesluit onderscheidt 12 hoofdgebruiksfuncties. Stations behoren tot '11. Overige gebruiksfunctie voor het personenvervoer' en spoortunnels tot '12. Bouwwerk geen gebouw zijnde'.

De regels zijn verdeeld in afdelingen, die elk één beoordelingsaspect (veiligheidsthema) behandelen, bijvoorbeeld 'beperking van verspreiding van rook'. Per aspect is een functionele eis opgenomen, die meestal geldt voor alle of het merendeel van de bouwwerken. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwbouw en bestaande bouw. Door middel van een tabel wordt verwezen naar nadere eisen (prestatie-eisen), afhankelijk van de gebruiksfunctie.

Het Bouwbesluit maakt onderscheid in bestaande en nieuwe constructies. De tunnel en stations van de Oostlijn zijn te beschouwen als bestaande bouw. Voor wat betreft constructieve brandwerendheid gelden de volgende artikelen:

§ 2.2.2. Bestaande bouw

Artikel 2.11 Stuurartikel
Lid 1 stelt dat een bestaand bouwwerk een bouwconstructie heeft die zodanig is dat het bouwwerk bij brand gedurende enige tijd kan worden verlaten en doorzocht zonder dat er gevaar voor instorting is.
Lid 2 geeft aan welke tijdsduurbepalingen van artikel 2.12 van toepassing zijn.

Artikel 2.12 Tijdsduur bezwijken
Dit artikel geeft aan hoe lang een constructie minimaal weerstand moet bieden aan een brand.
Voor 'overige gebruiksfuncties' (lees: stations) geldt "*dat een uiterste grenstoestand van een bouwconstructie waarvan het bezwijken leidt tot het onbruikbaar worden van een rookvrije vluchtroute, gedurende 20 minuten niet wordt overschreden bij de volgens NEN 6702 bepaalde bijzondere belastingscombinaties die kunnen optreden bij brand.*" Daarnaast geldt "*dat een uiterste grenstoestand van de hoofddraagconstructie van een gebruiksfunctie waarvan een vloer van een verblijfsruimte hoger ligt dan 5 m boven het meetniveau, gedurende 30 minuten niet wordt overschreden bij de volgens NEN 6702 bepaalde bijzondere belastingscombinaties die kunnen optreden bij brand.*" Het meetniveau is de hoogte van het aansluitende terrein, gemeten ter plaatse van de toegang van het gebouw. Strikt gezien is dit artikel niet van toepassing, omdat het station onder het meetniveau ligt. In de geest van het artikel wordt ook voor deze ondergrondse situatie een termijn van 30 minuten gehanteerd.
Voor de tunnel geldt "*dat een uiterste grenstoestand van een hoofddraagconstructie, afhankelijk van de bestemming en de inrichting van een bouwwerk, bij de volgens NEN 6702 bepaalde bijzondere belastingscombinaties die kunnen optreden bij brand, gedurende zodanige tijd niet wordt overschreden, dat het bouwwerk bij brand gedurende enige tijd kan worden verlaten en kan worden doorzocht, zonder dat gevaar bestaat voor instorting van de hoofddraagconstructie.*"
De termijn wordt niet gespecificeerd. In de VEMT wordt een ontruimingstijd van 15 minuten genoemd (zie hieronder, paragraaf 3.3.1). Geadviseerd wordt voor de tunnel dezelfde tijdsduur aan te houden als voor de stations: 30 minuten.

Artikel 2.13 Bepalingsmethode
Wat betreft de bepalingsmethode wordt verwezen naar NEN 6069. NEN 6069 regelt de experimentele bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen en bouwproducten en het classificeren daarvan, en is in die zin niet van toepassing op de betonnen hoofddraagconstructie, waarvan de tijdsduur tot bezwijken door middel van berekeningen wordt aangetoond. Voor deze berekeningen verklaart het Bouwbesluit de NEN6700-serie van toepassing. De nieuwe Eurocode 2 geeft meer informatie over de sterktebeoordeling van betonnen constructies. In lijn met het gelijkwaardigheidsbeginsel in artikel 1.3 van het Bouwbesluit zal daarom de Eurocode worden gehanteerd voor de constructieve berekeningen.

Het Bouwbesluit bevat geen specifieke bepalingen voor spoor- of metrotunnels. In de Regeling Bouwbesluit wordt wel ingegaan op wegtunnels. In hoofdstuk 5, Veiligheidseisen voor wegtunnels, wordt met betrekking tot bestaande bouw opgemerkt (artikel 5.2):
"*Voor een bestaande wegtunnel met een tunnellengte van meer dan 250 m is aan artikel 2.12, vijfde lid, van het besluit voldaan, indien een uiterste grenstoestand van een hoofddraagconstructie van een wegtunnelbuis gedurende 30 minuten, en voor zover deze onder open water ligt 60 minuten, niet wordt overschreden bij de volgens NEN 6702 bepaalde bijzondere belastingscombinaties die kunnen optreden bij brand.*"
Strikt gezien is dit artikel dus niet van toepassing op de metrotunnel, en geldt voor de tunnel het gestelde in artikel 2.12 van het Bouwbesluit (zie boven).

3.2.2 EUROCODE

NEN-EN 1992-1-2, Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-2: Algemene regels – Ontwerp en berekening van constructies bij brand.
Deze richtlijn geeft berekeningsmethoden en materiaalkenmerken van beton onderworpen aan brandbelasting. De Eurocode geeft meer handvatten voor de bepaling van sterkte bij verhoogde temperaturen dan de TGB (NEN 6700-serie) en zal daarom worden toegepast.

3.3 RICHTLIJNEN EN AANBEVELINGEN

Naast de wettelijke regeling is er een document dat geen wettelijke status heeft, maar niettemin van belang is voor de veiligheid in spoortunnels:

- De Veiligheidseisen voor tram- en metrotunnels (VEMT), een product van een werkgroep van ministeries (destijds V&W en BZK) en de gemeentebesturen, vervoerders en veiligheidsorganisaties van Amsterdam, Den Haag en Rotterdam. Toen deze eisen werden opgesteld (2005-2007) was het de intentie ze te zijner tijd op te nemen in wet- en regelgeving. Dit is (nog) niet gebeurd. Wellicht wordt VEMT een brancherichtlijn.
- Amsterdamse Leidraad Integrale Veiligheid ondergrondse tram- en metrosystemen (ALIVe)
  Ondergrondse tram- en metrosystemen vallen onder het Bouwbesluit, dat hiervoor echter onvoldoende specifiek is. Met ALIVe wordt invulling gegeven aan het gelijkwaardigheidsbeginsel van het Bouwbesluit. ALIVe is bestuurlijk vastgesteld door B&W van Amsterdam.

3.3.1 DE VEILIGHEIDSEISEN VOOR TRAM- EN METROTUNNELS (VEMT)

Dit betreft nationale aanvullende eisen op de TSI die technisch en functioneel van aard zijn.

Brandwerendheid: brandbelasting

Van belang voor de brandwerendheid is artikel 4.2.2.3, Brandveiligheidseisen voor constructies:

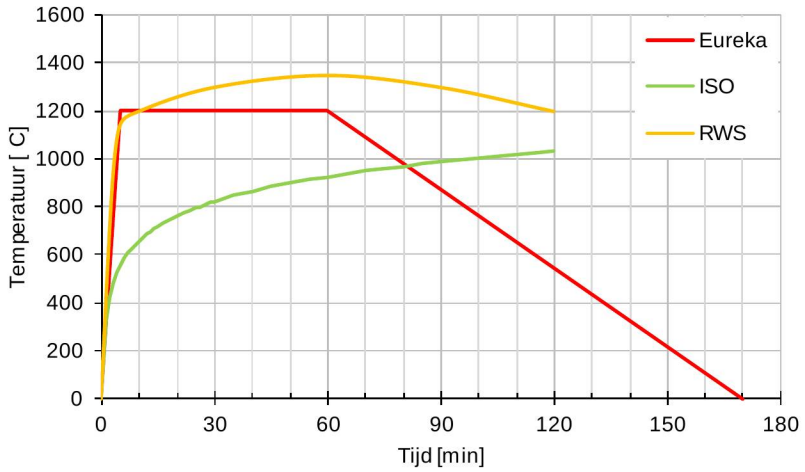
"In het geval van een brand, dient de integriteit van de tunnelconstructie zodanig lang intact te blijven, dat zelfredzaamheid en evacuatie van reizigers en (trein)personeel alsmede uitvoering van werkzaamheden door de hulpverlening een voldoende lange tijd is gegarandeerd zonder gevaar voor instorting.

Om deze reden geldt er een eis aan de minimale periode dat de integriteit van een tunnel intact moet blijven bij een gegeven temperatuur van de brand. De op deze wijze gespecificeerde temperatuur-tijd-curve (EUREKA-curve) is weergegeven in de volgende figuur.

N.B. Het is alleen van toepassing op het ontwerp van constructies."

Afbeelding 1

Eureka-, ISO- en RWS-brandkromme.



Deze curve is identiek aan de curve die wordt gebruikt bij tunnels voor *heavy rail*. In de motivering van het VEMT-artikel wordt gesteld:

"Het tram- en metromaterieel is echter lichter en van andere materialen vervaardigd dan het heavy rail materieel, en brandt daardoor anders. Omdat er sprake is van een gesloten systeem kunnen er in het geval van tram- en metro ook eenvoudiger eisen gesteld worden aan het materieel, waardoor er bespaard kan worden op de constructie. De inschatting is echter dat de kostenbesparing gering is."

Brandwerendheid: weerstand

In artikel 4.2.2.6 wordt ingegaan op de minimaal benodigde tijd dat constructies weerstand moeten bieden aan brand, om vluchten mogelijk te maken. Van belang is hierbij het principe van de *safe haven*, wat inhoudt dat een calamiteit wordt afgehandeld op een veilige plek, in dit geval de ondergrondse stations.

In artikel 4.2.2.6 wordt gesteld dat de condities in het bouwdeel waarin zich de brandende trein bevindt na alarmering gedurende 15 minuten begaanbaar dienen te blijven. In het artikel wordt dit specifiek uitgewerkt in termen van zicht, stralingsintensiteit en

temperatuur. Vanzelfsprekend dient de constructie gedurende deze periode weerstand te bieden aan de brand.

Bestaande systemen
In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op bestaande systemen. Gezien de hoge kosten van aanpassingen aan de constructie worden eisen, waarvoor de bouwkundige (hoofd)constructie dient te worden aangepast niet van toepassing verklaard op bestaande tunnels. Met betrekking tot eisen ten aanzien van installatietechnische voorzieningen en 'tunnelmeubilair' geldt dat bepaalde eisen *wel* van toepassing zijn in geval van *renewal* en *upgrading*[1]. Onderdelen buiten de scope van de *renewal* of *upgrading* vallen buiten beschouwing. Met betrekking tot de brandwerendheid van de constructie is hier alleen het gestelde in paragraaf 4.2.2.6 van belang (15 minuten begaanbaarheid van *safe havens*). Strikt gezien adviseert de VEMT voor bestaande systemen niet de EUREKA-curve te hanteren. Conform het Bouwbesluit moet dan worden uitgegaan van de ISO-curve (zoals onder meer gespecificeerd in NEN 6071: Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen – Betonconstructies, zie Afbeelding 1).

3.3.2 AMSTERDAMSE LEIDRAAD INTEGRALE VEILIGHEID ONDERGRONDSE TRAM- EN METROSYSTEMEN (ALIVE)

Voor de problematiek van de interne veiligheid in ondergrondse tram- en metrosystemen heeft de werkgroep Vetema (een acronym voor Veilige exploitatie van tram- en metrotunnels Amsterdam) onder regie van de dienst IVV vier oplossingen uitgewerkt. Dit zijn:

- Een Stappenplan voor de integrale ontwikkeling van de veiligheid;
- Een Basispakket Veiligheidsvoorzieningen om de uniformiteit van tunnels zeker te stellen;
- Een Fn-curve als norm voor het "Maatschappelijk Aanvaardbaar Risiconiveau" voor groepen reizigers en personeel in een tram- of metrosysteem;
- Een ontruimingseis van 15 minuten voor ondergrondse stations, als uitwerking van de eisen van het Bouwbesluit.

De integrale aanpak van Vetema is gebaseerd op de Trias van constructie, materieel en organisatie. De oplossingen zijn bedoeld voor nieuwe ondergrondse tram- en metrosystemen, al dan niet gecombineerd met ondergrondse stations, waarvan de afstand tussen de tunnelmonden groter is dan 250 m.

Het proces in de Leidraad is een vertaling van het ontwikkelde rijksbeleid. Met de vaststelling van de ALIVe in juni 2005 voldoet de gemeente aan het verzoek van de Minister van Verkeer en Waterstaat om het rijksbeleid te implementeren. Aanvullend op het rijksbeleid koppelt ALIVe op basis van een kwantitatieve risicoanalyse de bouw- en de

[1] Renewal: grote werkzaamheden waarbij een subsysteem of een deel van een subsysteem vervangen wordt, waardoor de prestaties van het subsysteem wijzigen. Upgrading: grote werkzaamheden die de modificatie van een subsysteem of een deel van een subsysteem omvatten, waarbij de prestaties van het subsysteem niet wijzigen.

gebruiksvergunning aan elkaar, opdat bij nieuwe tunnels de voorwaarden voor een veilig gebruik integraal worden meegenomen in de bouwvergunning. De gebruiksvergunning stelt vervolgens voorwaarden aan de instandhouding van het veiligheidsniveau in de beheerfase. Ten slotte wordt voorgesteld de Centrale stad als bevoegd gezag aan te merken voor alle ondergrondse tram- metrosystemen.

Ten aanzien van de veiligheidsnormering voor ondergrondse stations wordt in ALIVe opgemerkt: "*In het licht van het Bouwbesluit is een station een normaal gebouw. (…) Met de Ministeriële Regeling Bouwbesluit 2003 heeft het Rijk de regeling aangepast aan de Europese regelgeving. In de toelichting hierop is op basis van gedegen onderzoek verondersteld dat een gebouw voldoet aan het Bouwbesluit mits het binnen 15 minuten kan worden ontruimd.*" Voor de draagconstructie van de stations geldt daarom een minimum brandwerendheid van 15 minuten.

Voor de veiligheidsnormering voor de tunnels is in ALIVe een F-n-curve opgenomen voor het groepsrisico. Deze benadering biedt echter weinig handvatten voor een beoordeling van de brandwerendheid van de tunnelconstructie, bovenop wat het Bouwbesluit zelf hierover opmerkt (30 minuten brandwerendheid).

Met het oog op de brandweerstand van de draagconstructie bevat ALIVe verder de volgende relevante bepaling (basispakket veiligheidsvoorzieningen): Alle constructies doorstaan een brand van tenminste 15 MW, aangezien het materieel een maximale brandlast heeft van 15 MW.

3.4 ACHTERGRONDINFORMATIE

- Strikt gezien niet van toepassing op metrotunnels, maar wel bruikbaar als achtergrondinformatie, zijn de Ontwerpvoorschriften voor Spoortunnels van ProRail (OVS, zie 3.4.1 en 3.4.2).
- De eindrapportage van het door Peutz in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat uitgevoerde BrandOnderzoek Metro (BOM) bevat informatie over de mate waarin Nederlandse metrostations voldoen aan criteria met betrekking tot veilig vluchten (zie 3.4.3).

3.4.1 OVS 000030 – 3.0 DEEL 3 SPOORTUNNELS

4.4.1 Brandwerendheid

a. De brandwerendheid met betrekking tot bezwijken moet 120 minuten bedragen op basis van de standaardbrandkromme (NEN 6071, zie ISO-curve in Afbeelding 1).
b. In bijzondere gevallen kan een isolerende, niet brandbare laag aan het plafond en de bovenste delen van de wanden nodig zijn.

Toelichting:
Het aanbrengen van een isolerende laag introduceert een ander risico: scheurvorming van de constructie is tijdens inspectie niet of nauwelijks waarneembaar. Dit risico is voor nieuwe constructies niet acceptabel. Hiervoor betontechnologische en constructieve maatregelen treffen. Voor bestaande constructies, waar zettingen nauwelijks meer voorkomen is het een acceptabel alternatief.

4.4.2 Bescherming voegen

De dilatatievoegen van wanden en dak tenminste 120 minuten brandwerend beschermen. Voegmateriaal van dilatatievoegen in de vloer beschermen tegen schadelijke vloeistoffen op de tunnelvloer.

3.4.2 OVS 00201-V001 SPOORTUNNELS > 250 M

Dit voorschrift is van kracht sinds 1 april 2010 en is primair gericht op de bouw van nieuwe spoortunnels. Delen van dit ontwerpvoorschrift kunnen gebruikt worden voor de renovatie van bestaande tunnels. Uiteindelijk dient zowel voor nieuwe als ook voor bestaande tunnels een zelfde prestatieniveau te worden gerealiseerd. Dit betekent dat, indien voor bestaande tunnels specifieke eisen niet haalbaar blijken, gezocht moet worden naar een functioneel gelijkwaardige oplossing. Daar waar eisen voortkomen uit specifieke wetgeving zal ProRail, al dan niet in overleg met het Bevoegd Gezag, akkoord moeten gaan met de wijze waarop gelijkwaardigheid is aangetoond.
Dit OVS geeft de volgende eisen met betrekking tot brandwerendheid:

Artikel 3.1.1.12

De brandwerendheid van alle constructies - met uitzondering van de tussendeuren - met betrekking tot bezwijken moet tenminste 60 minuten bedragen op basis van de standaard temperatuur op basis van de RWS-curve (zie Afbeelding 1).

Artikel 3.1.1.19

De integriteit van de volgende constructies/constructieonderdelen dient ten gevolge van een brand ten minste de temperatuursbelasting conform onderstaande RWS-curve te kunnen weerstaan gedurende 120 minuten:

a. De vloer-, wand- en dakconstructie van de tunnel;
b. Eventuele dilatatievoegen;
c. Deuren in compartimentscheidingen tussen twee tunnelbuizen;
d. deuren in compartimentscheidingen tussen een tunnelbuis en een nooduitgang;
e. Deuren in compartimentscheidingen tussen een tunnelbuis en een technische ruimte met een functie voor zelfredzaamheid en/of de hulpverlening.

Het toepassen van de RWS-brandcurve is een aanzienlijke verzwaring ten opzichte van de eisen die voor april 2010 golden. Niet duidelijk is waarom de OVS00201-V001 deze zware eis stelt aangezien het optreden van dergelijke temperaturen en snelle temperatuurstoename samenhangt met het optreden van een benzineplasbrand. Gezien het gestelde in de richtlijn behoeft voor de toetsing van de bestaande tunnel er geen rekening te worden gehouden met de RWS-brandcurve.

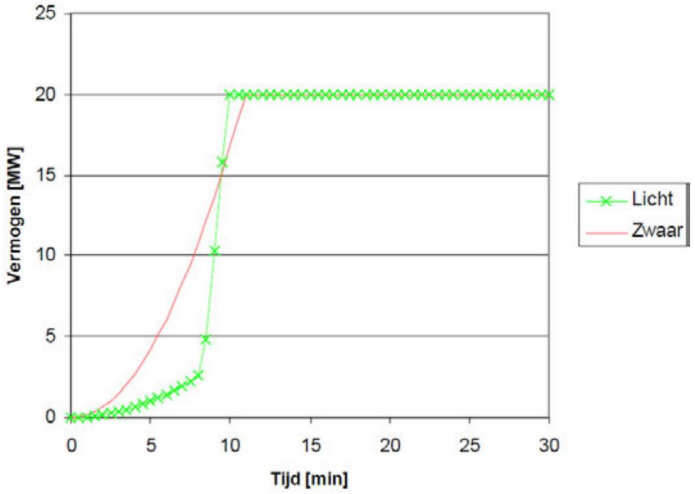
3.4.3 BRANDONDERZOEK METRO (BOM)

In opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat heeft Peutz BV het Brandonderzoek Metro uitgevoerd. Dit onderzoek had als doel op basis van brandscenario's en uit oogpunt van kosteneffectiviteit af te leiden welke eisen voor bestaande metrostations gesteld kunnen worden met betrekking tot onder meer veilig vluchten. In dit rapport worden twee brandscenario's gehanteerd (zie Afbeelding 2):

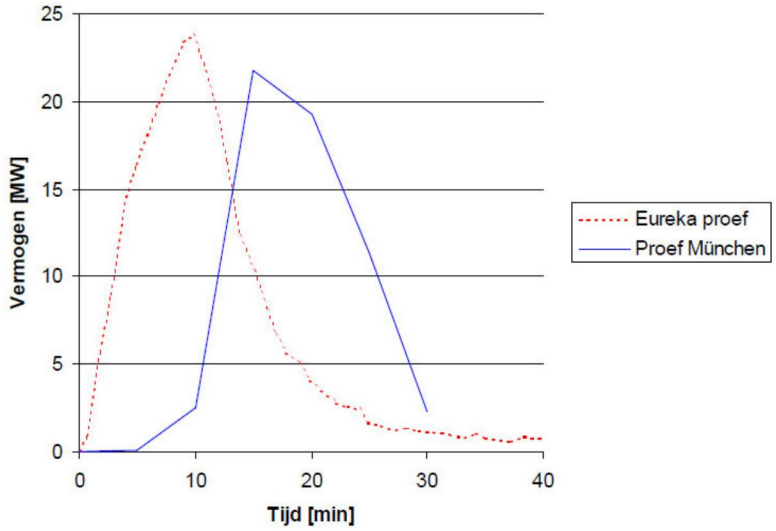
- Snelle brand (16 MW na 10 min);
- Langzame brand (3MW na 8 min) met aansluitend *flash over*.

In de repressieve fase (10-15 min) is gerekend met een brandvermogen van 20 MW.
De scenario's zijn onder meer gebaseerd op de resultaten van full-scale brandproeven (zie Afbeelding 3). Uit deze resultaten kan de indruk ontstaan dat de brand hooguit 30 minuten duurt. Ten gevolge van brandoverslag kunnen de verschillende metrowagons na elkaar uitbranden, waardoor de brandcurve langer aan zou houden.

Afbeelding 2
Brandscenario's uit het BOM-rapport.



Afbeelding 3
Resultaten full-scale brandproeven.



3.5 INTERPRETATIE

De beoordeling van de brandwerendheid van de betonconstructies in de Oostlijntunnel wordt op twee niveaus uitgevoerd:

- Op grond van het Bouwbesluit dient met betrekking tot bezwijken te worden voldaan aan brandwerendheid gedurende 30 minuten brand volgens de ISO-curve. Deze 30-minuten eis heeft betrekking op evacuatie en brandbestrijding. De veel strengere eisen (60 minuten brandwerendheid) uit de OVS zijn voor de metrotunnel en -stations in principe niet van toepassing. In het onderzoek is wel gekeken naar het verloop bij 60 minuten brand in verband met de integriteit van de constructie tijdens en na de brand.

- Met betrekking tot het bepalen van de bruikbaarheid en repareerbaarheid van de constructie na een brand kan gebruik worden gemaakt van het gegeven dat de temperatuur tijdens een werkelijke brand in een metrostel oploopt tot circa 800 °C, waardoor de thermische belasting op de constructie lager is en de bijbehorende degeneratie van het materiaal in veel mindere mate zal optreden dan bij een brand volgens de ISO-curve. Op basis van deze realistische degeneratie van het materiaal kan een globaal en kwalitatief advies worden uitgebracht over de repareerbaarheid van de tunnel.

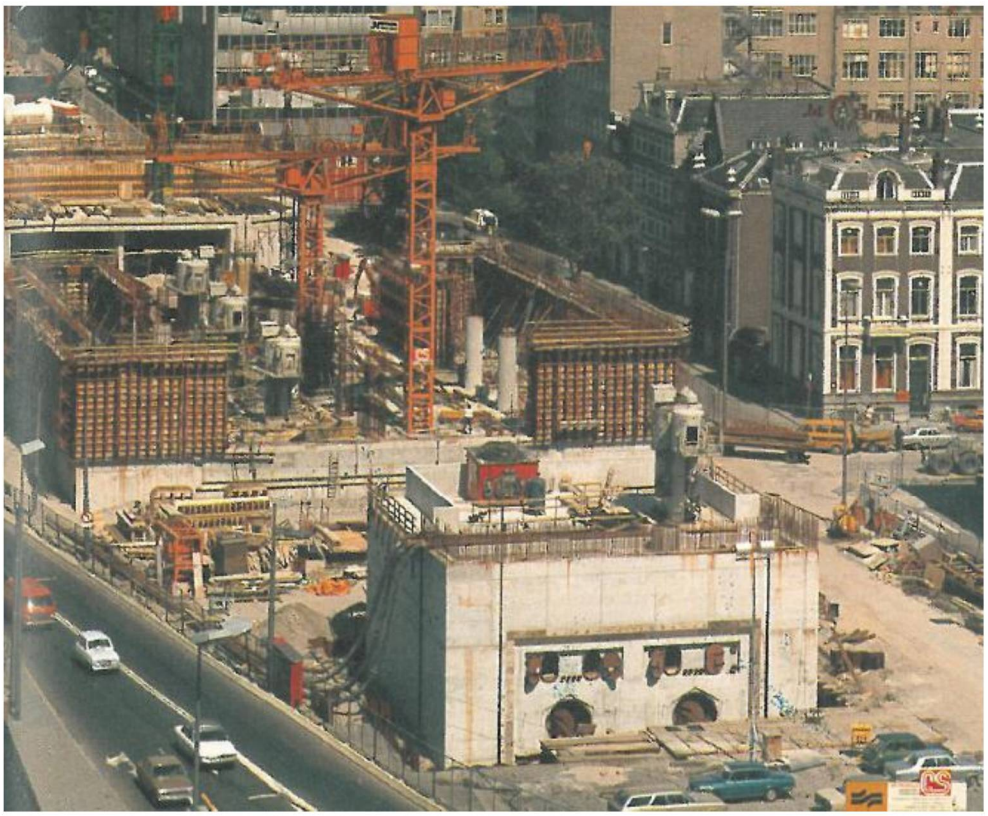
HOOFDSTUK 4

Beschrijving situatie

4.1 INLEIDING

Het grootste deel van de tunnel en de stations zijn met de caisson-methode gebouwd, inclusief de stations Centraal Station, Nieuwmarkt, Waterlooplein, Weesperplein en Wibautstraat. De meeste caissons zijn circa 15 m breed en 40 m lang. De caissons zijn op maaiveld gebouwd en afgezonken tot een diepte tussen NAP -13.5 en -20,5 m.

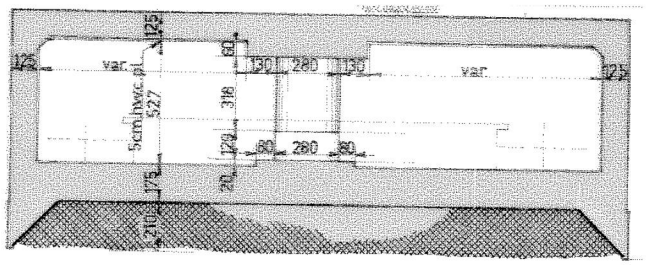
Afbeelding 4
Caissons van station Weesperplein.



De caissons van de stations bestaan uit een betonnen koker met één of twee rijen tussenkolommen. Aan de uiteinden van de stations bevinden zich trapopgangen en tussenvloeren van het verdeelniveau.

Afbeelding 5

Caissondoorsnede van de perrons van Centraal Station.



Het traject in de Wibautstraat is gebouwd met de wanden-dakmethode, waarbij vanaf straatniveau diepwanden zijn gebouwd met een betonnen dak erop, waaronder de tunnel is uitgegraven.

4.2 CONSTRUCTIE STATIONS

Aan de hand van archiefgegevens is nagegaan hoe de hoofddraagconstructie is opgebouwd, met name betonkwaliteit, wapening en wapeningsdekking. Een overzicht is gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 1

Gegevens hoofddraagconstructie metrostations

Metrostation	Centraal Station 11/01/03	Centraal Station overig	Nieuwmarkt	Waterloo-plein	Weesper-plein	Wibaut-straat
Betonkwaliteit	B22,5	B22,5	B22,5	K300	K300	K300
Cementgehalte	HOA 275 kg/m^3	HOA 275 kg/m^3	CEMIJ 275 kg/m^3	CEMIJ 275 kg/m^3	CEMIJ 275 kg/m^3	HOA 275 kg/m^3
Staalkwaliteit	FeB 400 HW	FeB 400 HK NR	FeB 400 HK NR	FeB 400 HK NR	FeB 400 HK NR	FeB 400 HK NR
Wapeningsdekking	2 cm	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm

In het algemeen is voor de hoofddraagconstructie 3 cm dekking toegepast op de wapening. Alleen voor caisson 11/01/03 is dit niet het geval en is 2 cm dekking toegepast. Verder is in de regel koudvervormd wapeningsstaal toegepast, weer met uitzondering van caisson 11/01/03 waar warmgewalst staal is toegepast. Perrons hebben een geringere wapeningsdekking van 15 mm. Dit is echter een secundaire constructie.

4.3 CONSTRUCTIE TUNNELBUIZEN

Voor de tunnelbuizen tussen de stations zijn de karakteristieken opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 2

Gegevens hoofddraagconstructie tunnelbuizen

Tunnelbuis	tussen CS en Nieuwmarkt 11/51/01 en 11/51/08	tussen Nieuwmarkt en Waterlooplein 11/52/04	tussen Waterlooplein en Wibautstraat 11/53/05	tussen Wibautstraat en Amstel 11/55/06 en 11/55/08
Betonkwaliteit	B22,5	K300	K300	K300
Cementgehalte	HOA 275 kg/m^3	CEMIJ 275 kg/m^3	CEMIJ 275 kg/m^3	CEMIJ 275 kg/m^3
Staalkwaliteit	FeB 400 HW NR	FeB 400 HK NR	FeB 400 HK NR	FeB 400 HK NR
Wapeningsdekking	3 cm	3 cm	3 cm	3,5 cm

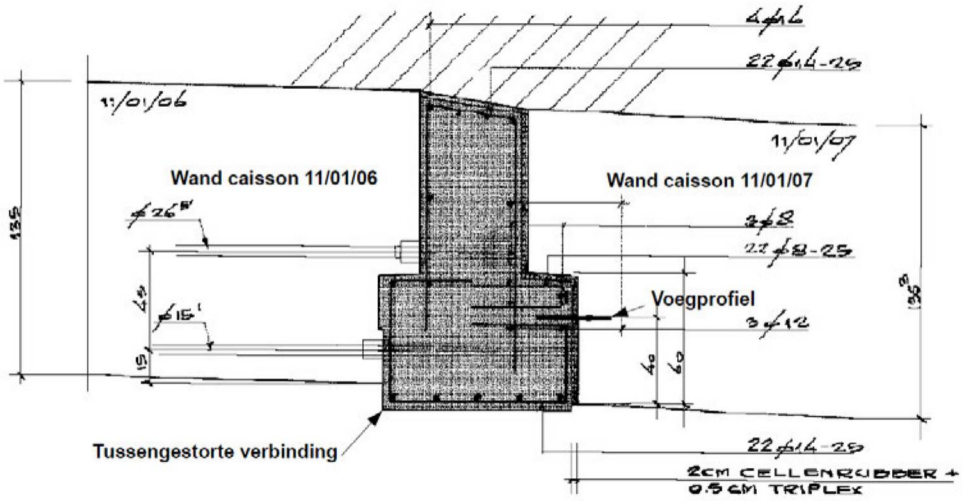
In het algemeen is voor de hoofddraagconstructie 3 cm dekking toegepast op de wapening. Alleen voor het traject tussen Wibautstraat en Amstel is dit niet het geval en is 3,5 cm dekking toegepast. Hier is een afwijkende constructiewijze toegepast, namelijk diepwanden met een ter plaatse gestort dak. In de regel is koudvervormd wapeningsstaal toegepast, met uitzondering van het traject tussen CS en Nieuwmarkt, waar warmgewalst staal is toegepast.

4.4 VOEGPROFIELEN

De caissons zijn met een tussenafstand van circa 0,5 m geplaatst. Deze openingen zijn ter plaatse opgevuld met een betonnen element dat aan één zijde aangestort is aan een caisson en met het naastgelegen caisson is verbonden door middel van een rubber voegprofiel. Om temperatuurbewegingen mogelijk te maken is het voegvlak voorzien van 0,5 cm triplex en 2 cm cellenrubber, zie Afbeelding 6. Hierin is een horizontale doorsnede weergegeven van een tunnelwand, met daarin het ter plaatse tussengestorte betonnen voegelement.

Afbeelding 6

Voeg tussen twee caissons



HOOFDSTUK 5

Beoordeling van de brandbestendigheid

5.1 KWANTITATIEVE BEOORDELING BRANDBESTENDIGHEID

Als een betonconstructie wordt belast door brand zullen de eigenschappen van de materialen, beton en staal, veranderen. De stijfheid en sterkte zullen bij opwarming afnemen. Ook de eigenschappen voor warmtestroming zijn afhankelijk van de specifieke temperatuur. Om het gedrag van de constructie bij brand te bepalen zijn warmtestromingsberekeningen gemaakt die rekenen met de temperatuursafhankelijke eigenschappen van het beton. Aan de hand van de berekende temperatuursontwikkeling van het beton en de wapening kan een uitspraak worden gedaan over de sterkte van de constructie bij brand. De berekeningen zijn uitgevoerd met het rekenmodel PCTempFlow.

5.1.1 MATERIAALGEDRAG VOOR WARMTESTROMING

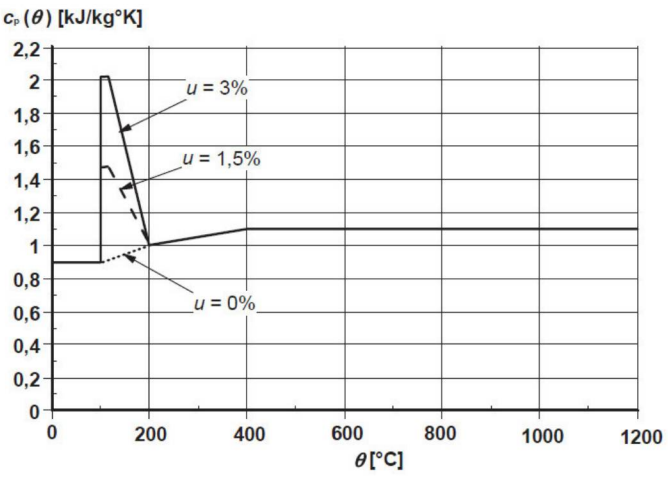
Voor een warmtestromingberekening zijn van de materiaaleigenschappen alleen de warmtegeleidingcoëfficiënt k en de warmtecapaciteit c van belang. Voor de randen van het model is ook de warmteoverdrachtcoëfficiënt h benodigd. Algemeen gesproken zijn thermische eigenschappen afhankelijk van onder meer de temperatuur. Niet voor alle materialen is informatie beschikbaar over de temperatuursafhankelijkheid. In dat geval zijn de waarden constant gehouden.

Aan de hand van de materiaalkarakteristieken volgens NEN-EN 1992-1-2 zijn de parameters van het beton bepaald.

Specifieke warmte

Afbeelding 7

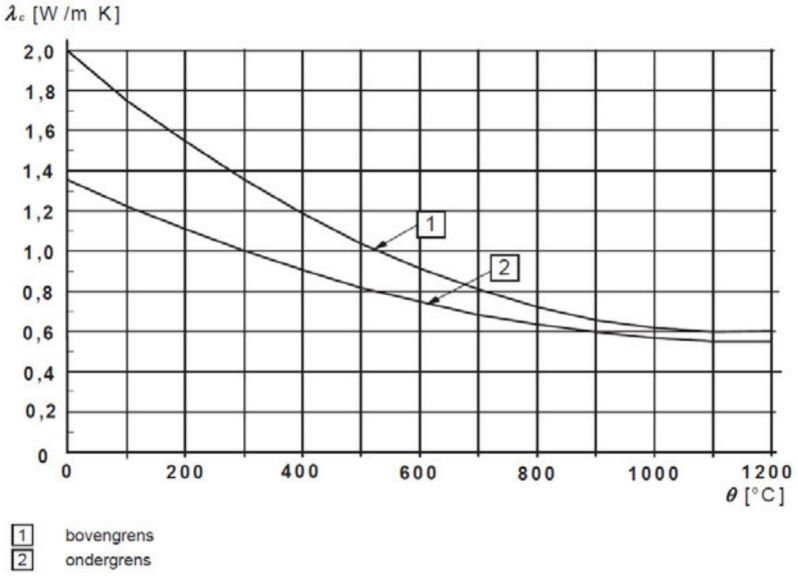
Specifieke warmte van grindbeton (c_p) als functie van de temperatuur θ en afhankelijk van het vochtgehalte u.



De stijging van de specifieke warmte tussen 100 en 200 °C wordt veroorzaakt door de verdamping van het in het beton aanwezige vocht. Dit beperkt de temperatuurtoename in de constructie. Het evenwichtsvochtgehalte is het vochtgehalte dat zich uiteindelijk 'instelt' bij een bepaalde gemiddelde relatieve vochtigheid van de omgeving. De gemiddelde relatieve vochtigheid in de buitenlucht ligt in Nederland tussen 70 en 90%. Het evenwichtsvochtgehalte dat dan in de constructie te verwachten is ligt dan boven de 3%. De specifieke warmte is dan ook bepaald op grond van 3% vochtgehalte.

Warmtegeleidingscoëfficiënt

Afbeelding 8
Warmtegeleidingscoëfficiënt



Volgens de Nederlandse nationale bijlage van de Eurocode dient voor grindbeton de bovengrens, kromme [1], te worden aangehouden.

Warmteoverdrachtscoëfficiënt

Voor de warmteoverdracht aan de brandzijde van de constructie wordt een warmteoverdrachtscoëfficiënt α van 75 W/m²K aangehouden. In [1] wordt voor beton onder brandcondities een bandbreedte van 50-100 W/m²K genoemd. In [3] wordt een waarde van 50 W/m²K voorgeschreven. De aangehouden waarde is daarom conservatief. Aan de niet-belaste zijde zal gedurende de berekening gezien de snelheid van temperatuurindringing geen warmte-uitwisseling met de omgeving plaatsvinden.

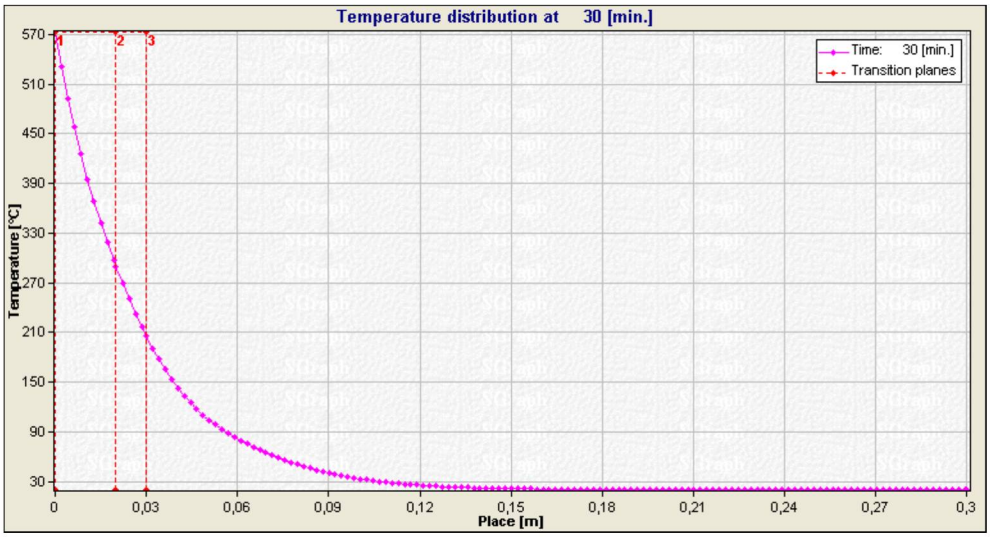
5.2 BEREKENINGSRESULTATEN

5.2.1 TEMPERATUURSINDRINGING ISO-BRANDKROMME

Met de materiaaleigenschappen volgens de Eurocode en de ISO-brandkromme is de temperatuurverdeling in de constructie bepaald en weergegeven in Afbeelding 9.

Afbeelding 9

Temperatuursindringing na 30 minuten in beton bij blootstelling aan de ISO-brandkromme

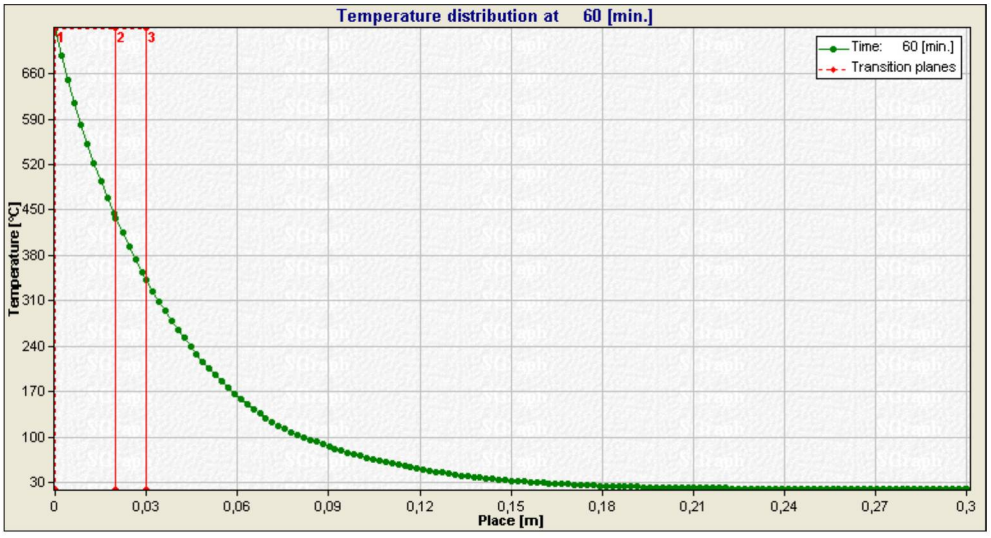


Ter plaatse van verticale lijn 2 ligt het wapeningsoppervlak bij 20 mm dekking. Lijn 3 geeft het wapeningsoppervlak bij 30 mm dekking. Af te lezen is dat bij het meest noordelijke caisson , nr. 11/01/03 van de Oostlijn op het Centraal Station, waarbij 20 mm betondekking is toegepast de wapening na 30 minuten een temperatuur bereikt van 289 °C en de wapening van de overige caissons, met een toegepaste betondekking van 30 mm een temperatuur van 205 °C.

In onderstaande figuur is de temperatuursverdeling weergegeven na 60 minuten.

Afbeelding 10

Temperatuursindringing na 60 minuten in beton bij blootstelling aan de ISO-brandkromme



Na 60 minuten is de temperatuur op een afstand van 20 mm tot het oppervlak opgelopen tot 437 °C. Op een afstand van 30 mm is de temperatuur opgelopen tot 342°C.

5.2.2 STERKTE CONSTRUCTIE BIJ BRAND

Het gedrag van het beton en staal verandert bij toenemende temperatuur. Met name de afname van de treksterkte van het wapeningsstaal heeft een grote invloed op de draagkracht

van de constructie. Volgens NEN-EN 1992-1-2 wordt de treksterkte van betonstaal, afhankelijk van de temperatuur gereduceerd volgens onderstaande tabel.

Tabel 3

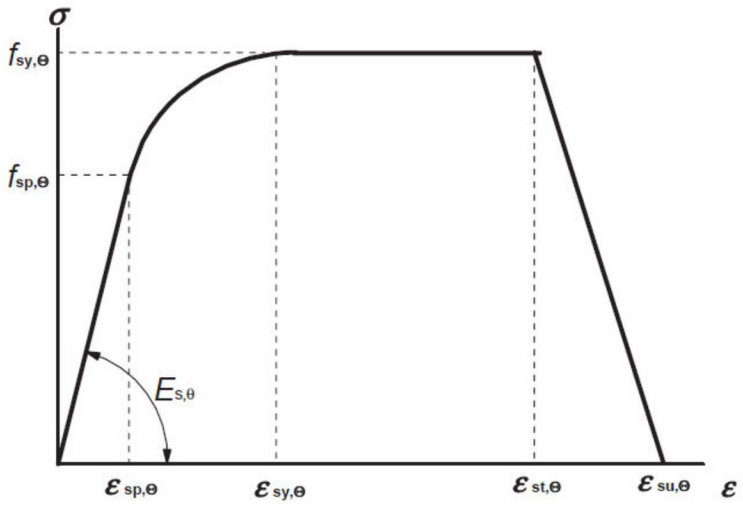
Waarden voor klasse N van de parameters van de spanning/rek-relatie van warmgewalst en koudvervormd betonstaal b j verhoogde temperaturen

Staaltemperatuur	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
θ [°C]	warm-gewalst	koud-vervormd	warm-gewalst	koud-vervormd	warm-gewalst	koud-vervormd
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Hierin is $f_{sp,\theta}$ de proportionaliteitsgrens; de grens waaronder het staal zich nog elastisch gedraagt en $f_{sy,\theta}$ het maximale spanningsniveau. Deze laatste waarde komt overeen met de vloeispanning van het niet opgewarmde staal; bijvoorbeeld 435 N/mm^2 voor FEB 500, als gekeken wordt naar de rekenwaarde. Te zien is dat de treksterkte van het staal pas bij een grote temperatuurstijging flink begint terug te lopen, maar dat de proportionaliteitsgrens al veel eerder terug loopt. Dit betekent dat een betonconstructie weliswaar een brand kan overleven, maar dat dit gepaard gaat met grote vervormingen van de constructie.

Afbeelding 11

Model voor de spanning/rek relaties van betonstaal en van voorspanstaal bij verhoogde temperaturen



De druksterkte van beton neemt eveneens af bij opwarming. NEN-EN 1992-1-2 geeft onderstaande tabel om de reductie van de eigenschappen bij verhoogde temperatuur weer te geven.

Tabel 4

Waarden van de belangrijkste parameters van de spanning-rek-relaties voor normaal beton met kiezelhoudende of ka ksteenhoudende toeslagmaterialen bij verhoogde temperaturen

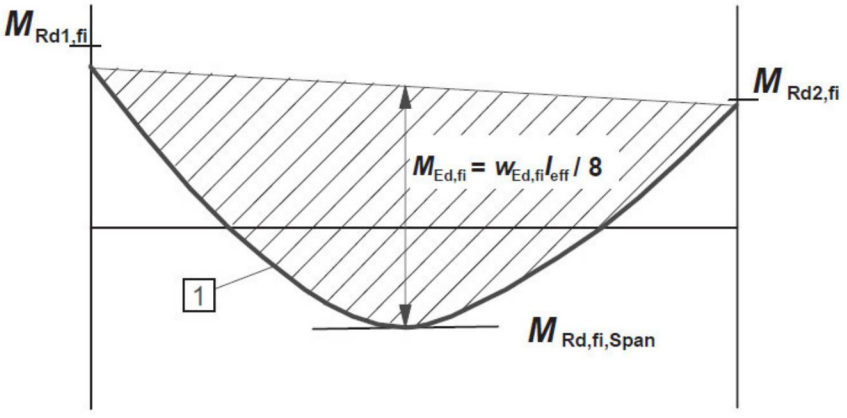
Beton-temperatuur	Kiezelhoudende toeslagmaterialen			Kalksteenhoudende toeslagmaterialen		
θ	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[–]	[–]	[–]	[–]	[–]	[–]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	–	–	0,00	–	–

In deze tabel is te zien dat de druksterkte van het beton belangrijk begint af te nemen vanaf ongeveer 500 °C. Deze temperatuur wordt bereikt over een diepte van circa 2 cm vanaf het betonoppervlak. Voor de constructie betekent dit dat de constructiehoogte, of inwendige hefboomsarm met enkele centimeters afneemt. Op een totale constructiehoogte van tenminste 600 mm is dit een relatief geringe reductie van de totale sterkte.

De controle van de draagkracht van de tunnelconstructie kan worden uitgevoerd conform NEN-EN 1992-1-2 Bijlage E3 *Doorgaande balken en platen*. De krachtswerking in een kokerprofiel is zodanig dat in het midden van het dak er trek aan de onderzijde aanwezig is en bij de buitenwanden en tussensteunpunten trek aan de buitenzijde. De momentenverdeling komt dan overeen met die in een doorgaande plaat over een steunpunt, waarbij de buitenwanden de steunpunten vormen. In NEN-EN 1992-1-2 wordt de krachtsverdeling als volgt weergegeven:

Afbeelding 12

Momentenlijn met het statisch bepaald moment voor een gelijkmatig verdeelde belasting onder brandomstandigheden



De krachtswerking in de tunnel is niet bekend, echter op grond van de aanwezige hoeveelheid wapening kan toch een uitspraak worden gedaan over de draagkracht van de tunnel bij brand. Voor de Oostlijn is FeB 400 toegepast. We gaan ervan uit dat de constructie niet is overgedimensioneerd. Bij een belastingfactor van 1,7, zoals indertijd toegepast volgens de VB1974, is de staalspanning in de gebruiksfase dan maximaal 400/1,7 = 235 N/mm^2. Bij de vigerende richtlijnen (met partiële veiligheidsfactoren: een materiaalfactor van 1,15 en een belastingfactor van 1,35) mag dit ongeveer 10% hoger zijn (400/1,15/1,35 = 258 N/mm^2).

Tabel 5

Overzicht vloeispanning wapening bij brand

	Betondekking 20 mm Staal warmgewalst HW 11/01/03		**Betondekking 30 mm Staal koudvervormd HK Overige caissons**		**Betondekking 30 mm Staal warmgewalst HW Tussen CS en Nieuwmarkt**	
	Temp.	Vloei-spanning	Temp.	Vloei-spanning	Temp.	Vloei-spanning
Temperatuur na 30 minuten	289 °C	400 N/mm^2	205 °C	400 N/mm^2	205 °C	400 N/mm^2
Temperatuur na 60 minuten	437 °C	368 N/mm^2	342 °C	390 N/mm^2	342 °C	400 N/mm^2

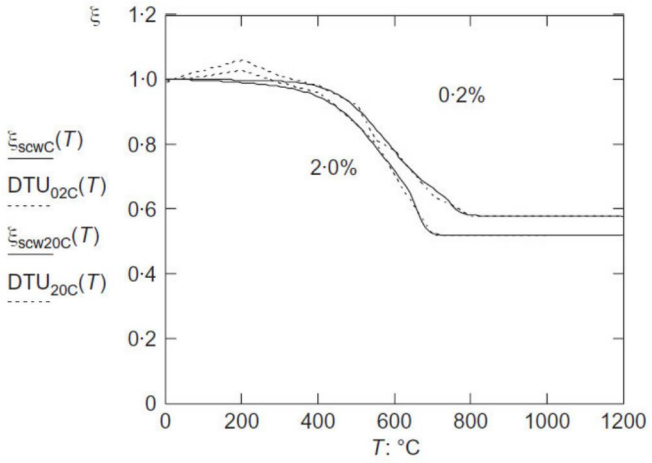
Voor caisson 11/01/03 is na 60 minuten de vloeispanning van het staal afgenomen tot 92% van de oorspronkelijke vloeispanning, afgeleid uit Tabel 3 waarbij een wapeningstemperatuur van 437°C in rekening is gebracht. E.e.a. is voor alle caissons weergegeven in Tabel 5. Onder de huidige normen mag met een 10% hogere staalspanning worden gerekend. Deze hogere normatieve sterkte compenseert de sterkte-afname door brand, zodat de constructie ook na 60 minuten brand voldoet. Voor de overige caissons is de vloeispanning na 60 minuten afgenomen tot 97% van de oorspronkelijke waarde. Ook hier is de sterkte van de constructie nog voldoende. In beide gevallen is het nog niet nodig te rekenen op herverdeling van momenten zoals toegestaan volgens NEN-EN 1992-1-2. De werkelijke reserve tot bezwijken is daarmee nog aanzienlijk groter.

5.3 RESTSTERKTE NA BRAND

Na de brand zal de sterkte van de wapening mogelijk afgenomen zijn, waardoor de veiligheid van de constructie zal zijn afgenomen. Verder kan de duurzaamheid in het geding komen doordat scheurwijdtes groter zijn dan toelaatbaar.
De afname van de sterkte van wapeningsstaal is deels afhankelijk van de staalsoort: warm gewalst staal, of koudvervormd staal. Ervaring met brandproeven laat zien dat warmgewalst staal na afkoeling zijn oorspronkelijke sterkte terugkrijgt [9]. Voor koudvervormd staal geldt dit niet en zal de sterkte blijvend afgenomen zijn. In onderstaande figuur is te zien dat de sterkte van het staal afgenomen zal zijn als een temperatuur van boven 400 °C is bereikt. Bij temperaturen boven 600 °C heeft het staal weer de eigenschappen gekregen die het materiaal had voor het koud vervormen en neemt de reststerkte verder niet meer af.

Figuur 1

Reststerkte van koudvervormd wapeningsstaal na afkoeling. [9]



De wapening heeft na een brand van 30 minuten bij de ISO-brandkromme een temperatuur bereikt van 289 °C bij een wapeningsdekking van 2 cm, zoals voorkomt in caisson 11/01/03 van Centraal Station en 437 °C na 60 minuten. Voor dit caisson is warmgewalst staal toegepast dus is geen reductie van de reststerkte te verwachten. Per saldo is dan geen blijvende reductie van de sterkte van de wapening te verwachten.
Bij blootstelling aan de ISO-brandkromme is voor de situatie met 3 cm wapeningsdekking, zoals geldt voor de overige caissons, de temperatuur opgelopen tot
342 °C. De reststerkte is dan nog niet afgenomen, ondanks dat er koudvervormd wapeningsstaal is toegepast.
Tijdens de brand is wel sprake van een afname van de proportionaliteitsgrens, de grens waaronder het staal zich nog elastisch gedraagt. Doordat het beton aan de onderzijde opwarmt en uitzet zullen de veldmomenten tijdens de brand afnemen, waardoor de overschrijding van de proportionaliteitsgrens, en dus de te verwachten scheurvorming, mee kan vallen. Zolang dit in een meer kwantitatieve beschouwing niet is geverifieerd dient uitgegaan te worden van toegenomen scheurvorming aan de onderzijde van het dak of de tussenvloeren. Deze scheuren zijn echter goed inspecteerbaar en behandelbaar.
Ook aan de buitenzijde van de constructie zouden grotere scheuren kunnen ontstaan door de verhinderde temperatuurspanningen. Deze scheuren zijn veel lastiger te inspecteren en te behandelen dan de scheuren aan de onderzijde, zodat hier uitgegaan moet worden van een duurzaamheidsrisico. Zoals reeds opgemerkt heeft dit echter geen gevolgen voor de sterkte van de constructie tijdens de brand.

5.4 KWALITATIEVE BEOORDELING AFSPATGEVOELIGHEID

Bij snelle verhitting van beton in geval van brand ontstaat een interne druk in het materiaal doordat het aanwezige vocht in korte tijd wordt omgezet in stoom. Door deze sterke én heel snelle volumetoename kan de buitenlaag worden afgedrukt. Dit fenomeen wordt aangeduid als “spatten’’. Het is een doorgaand proces waarbij de telkens schollen beton worden afgedrukt. De wapening zal dan zeer snel opwarmen en aan sterkte verliezen, zodat de constructie kan bezwijken.

Afbeelding 13

Afgespatte betondekking na brand



Er moet gelden dat afspatten van het beton binnen de geëiste duur van de brandbelasting niet optreedt. Dit kan gerealiseerd worden door het beton te beschermen of door het toepassen van een afspatongevoelig betonmengsel.
Door het uitvoeren van brandproeven dient normaalgesproken de afspatgevoeligheid onder gebruiksomstandigheden te worden aangetoond.
Echter, door TNO en Rijkswaterstaat zijn proeven gedaan op beton met een sterkteklasse C28/35 gemaakt met maximaal 320 kg/m^3 CEM III cement. Met de proeven is aangetoond dat voor deze mengsels het afspatcriterium niet maatgevend is. Een en ander is vermeld in de ROBK [5].

Op basis van een analyse van de beschikbare gegevens en de krachtswerking van de constructie kan de volgende beoordeling worden gegeven:

Het beton van de hoofddraagconstructie heeft de volgende eigenschappen:
- Cementsoort: Hoogoven Klasse A, 275 kg/m^3
- Betonsterkteklasse B22,5 of K300.

De betonsterkteklasse van de caissons is lager dan C28/35 en de hoeveelheid cement is kleiner dan 320 kg/m^3. De betondimensies van de caissons zijn groter dan van de gemiddelde zinktunnel, waarop de ROBK-richtlijn is gebaseerd. De belastingen op het tunneldak zijn tegelijkertijd geringer. De betondrukspanningen zijn daarmee naar verwachting geringer dan als uitgangspunt voor de ROBK-richtlijn heeft gegolden. Hiermee is te verwachten dat het betonmengsel ongevoelig is voor afspatten.

Bovendien is de tunnel al minstens 15 jaar oud, waardoor het vochtgehalte in het beton laag zal zijn. Dit maakt het onwaarschijnlijk dat de constructie afspatgevoelig is.

5.5 BEOORDELING VOEGPROFIELEN

De voegprofielen zijn ingestort in de betonconstructie en liggen 40 cm vanaf de binnenzijde van de tunnel. De voegspleet is gevuld met triplex en cellenrubber. Er is geen brandwering voorzien en de voegprofielen zullen mee opwarmen met de luchttemperatuur in de tunnel, zij het afgeremd door de warmtecapaciteit van het omliggende beton.
Van Trelleborg Ridderkerk (leverancier rubberen voegprofielen en oplegblokken) is de volgende informatie gekregen over de temperatuurbestendigheid van rubberen voegprofielen:

> *"Gedurende een calamiteit zijn incidentele temperaturen tot 80 °C geen probleem. Tot 150 °C zijn enkele uren dragelijk zonder significante schade aan het profiel. Tussen de 150 en 200 °C zal het profiel in alle waarschijnlijkheid het wel houden maar is de integriteit van het profiel wel aangetast (± 2 à 3 uur). Tussen 200 en 300 °C zal het profiel significant zijn aangetast en boven de 300 zal het profiel in korte tijd falen."*

Het temperatuurverloop tijdens de brandsituatie is zodanig dat niet uit te sluiten is dat de voegprofielen die blootgesteld worden aan brand binnen korte tijd zullen falen. Op zich is dit voor de constructieve veiligheid geen probleem, echter voor het gebruik van de tunnel na de brand is het functioneren van de voegprofielen essentieel. Om deze reden wordt aanbevolen om de dilatatievoegen altijd af te dekken met een vorm van hittewerende bekleding. Dit kan gerealiseerd worden door een plaatje van hittewerend materiaal over de voeg aan te brengen, of door hittewerend koord of zwelband in de voeg aan te brengen.

HOOFDSTUK 6

Conclusie toetsing en aanbevelingen

6.1 CONCLUSIE

Op basis van de beoordeling in het voorgaande hoofdstuk mag aangenomen worden dat constructie van de metro Oostlijn zodanig is dat deze niet zal falen binnen 60 minuten, als deze blootgesteld wordt aan de ISO-brandkromme. Hiermee wordt voldaan aan de vigerende regelgeving namelijk het Bouwbesluit (minimaal 30 minuten tijdsduur tot bezwijken).
De reststerkte van de tunnel na 60 minuten brand, na afkoelen, is zodanig dat de constructieve veiligheid van de tunnel nog steeds voldoende is.

6.2 AANBEVELINGEN

Aanbevolen wordt de dilatatievoegen te beschermen tegen te hoge temperaturen.

HOOFDSTUK 7

Referenties

1. Wolsink, G.M. (2009). Users Manual PCTempFlow.
2. Tunnel Fire Protection, for Tunnel Structures and Services, http://www.promat-tunnel.com/en/ … … Tunnelbrochure.pdf.
3. Nederlandse norm NEN-EN 1991-1-2:2002 + NB:2007 nl. Eurocode 1 Belastingen op constructies - Deel 1-2 Algemene belastingen – Belasting bij brand.
4. Nederlandse norm NEN-EN 1992-1-2 Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-2: Algemene regels – Ontwerp en berekening van constructies bij brand.
5. Aanvullingen en wijzigingen voor tunnels en aquaducten op: Richtlijnen voor het Ontwerpen van Betonnen Kunstwerken (ROBK versie 6).
6. OVS000030-3.0 Deel 3 Spoortunnels.
7. OVS00201-V001 Ontwerpvoorschrift Spoortunnels >250 m.
8. Werkgroep Veiligheidseisen Spoortunnels. Veiligheidseisen voor treintunnels - Matchen van Europese TSI en nationale praktijk (VEST). versie 12, januari 2008. X312802001.
9. Hertz K. D., Reinforcement data for fire safety design Magazine of Concrete Research, 2004, 56, No. 8, October, 453–459.

Colofon

ONDERZOEK BRANDWERENDHEID METROTUNNEL OOSTLIJN
Rapportage

OPDRACHTGEVER:

Gemeente Amsterdam
Dienst Infrastructuur Verkeer en Vervoer

STATUS:

Definitief

AUTEUR:

[redacted]

GECONTROLEERD DOOR:

[redacted]

VRIJGEGEVEN DOOR:

[redacted]

16 januari 2012
075839540:D

ARCADIS NEDERLAND BV
Piet Mondriaanlaan 26
Postbus 220
3800 AE Amersfoort
Tel 033 4771 000
Fax 033 4772 000
www.arcadis.nl
Handelsregister 9036504

©ARCADIS. Alle rechten voorbehouden. Behoudens uitzonderingen door de wet gesteld, mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbenden niets uit dit document worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, digitale reproductie of anderszins.