

**TNO-rapport****TNO 2018 R10889****Analyse beschikbare onderzoeksgegevens  
inzake betonaantasting TRN****Building, Infrastructures &  
Maritime**Stieltjesweg 1  
2628 CK Delft  
Postbus 155  
2600 AD Delft[www.tno.nl](http://www.tno.nl)T +31 88 866 20 00  
F +31 88 866 06 30

Datum 10 augustus 2018

Auteur(s) Ir. H.Borsje

Exemplaarnummer 100316148

Oplage

Aantal pagina's 82 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever ProRail Assetmanagement  
De heer R.A. den Boer  
Postbus 2038  
3500 GA Utrecht

Projectnaam HSL Mosbeton

Projectnummer 060.26309/01.01

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Opzet van het onderzoek</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Overzicht van de constructie</b> .....	<b>7</b>
3.1	Opbouw en coderingen .....	7
3.2	Informatie over het betonwerk .....	9
<b>4</b>	<b>Definitie afkeurcriterium</b> .....	<b>11</b>
4.1	Aanleiding .....	11
4.2	Invulling levensduur door aannemer .....	11
4.3	Aanpak .....	12
4.4	Afbakening .....	12
4.5	Uitwerking geïdentificeerde domeinen .....	13
4.6	Te hanteren criteria .....	15
<b>5</b>	<b>Beschrijving van de betonaantasting</b> .....	<b>16</b>
5.1	Historisch overzicht .....	16
5.2	Visuele inspectie in 2011 .....	16
5.3	Inventarisatie april 2016 .....	21
5.4	Inventarisatie februari 2017 .....	21
5.5	Inventarisatie maart 2017 .....	22
5.6	Inventarisatie september 2017 .....	24
<b>6</b>	<b>Resultaten van reeds uitgevoerde onderzoeken</b> .....	<b>25</b>
6.1	Monstername .....	25
6.2	Betondekking .....	25
6.3	Carbonatatie diepte .....	26
6.4	Vorstdooibestandheid .....	28
6.5	Druksterkte .....	29
6.6	Microscopisch onderzoek .....	29
<b>7</b>	<b>Analyse van de reeds uitgevoerde onderzoeken</b> .....	<b>32</b>
7.1	Algemeen .....	32
7.2	Mosgroei .....	33
7.3	Carbonatatie diepte .....	37
7.4	Vorstdooibestandheid .....	39
<b>8</b>	<b>Consequenties voor de levensduur</b> .....	<b>41</b>
8.1	Algemeen .....	41
8.2	Materiaalverlies door vorstschade .....	42
8.3	Carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie .....	43
<b>9</b>	<b>Conclusies</b> .....	<b>47</b>
<b>10</b>	<b>Opzet voor vervolgonderzoek</b> .....	<b>49</b>
<b>11</b>	<b>Ondertekening</b> .....	<b>51</b>

**Bijlage(n)**

- A Overzicht betonmengsels, stortdata, mosgroei en classificering betonoppervlakken
- B Overzicht boorkernen
- C Betondekking
- D Carbonatatie diepte per boorkernonderzoek
- E Carbonatatie diepte per onderdeel van de constructie
- F Vorstdooibestandheid

# 1 Inleiding

In het betonwerk van de Tunnel Rotterdam Noord (TRN) is sprake van schade aan het betonwerk. Sinds 2012 zijn door BAM, Rail Infra Solutions (RIS) en Pelcon onderzoeken uitgevoerd aan TRN, waaruit naar voren is gekomen dat het beton van TRN sneller degradeert, dan op grond van haar leeftijd mag worden verwacht. Echter, de achterliggende oorzaak van de snelle degradatie is nog niet vastgesteld. Ook is het onduidelijk op welke termijn dit een probleem kan geven en wat de omvang van het probleem kan worden.

In opdracht van Prorail is TNO een onderzoek gestart om inzicht te krijgen in de degradatieprocessen, de levensduurverwachting en de eventueel benodigde maatregelen bij TRN. Dit onderzoek is opgesplitst in de volgende drie fasen:

1. Inventarisatie: In deze fase worden de reeds uitgevoerde onderzoeken in samenhang geanalyseerd, omdat TNO van oordeel is dat hiermee meer inzicht is te verkrijgen in de optredende aantastingsmechanismen. Tevens wordt in deze fase ingegaan op het afkeurcriterium dat geldt voor het einde van de levensduur van het betonwerk.
2. Vervolgonderzoek: Uit de eerste fase van het onderzoek zal blijken of vervolgonderzoek noodzakelijk is en zo ja hoe dat het beste opgezet dient te worden.
3. Beoordeling potentiële maatregelen: Indien uit de voorgaande fasen volgt dat maatregelen nodig geacht worden voor het behalen van de vereiste levensduur van 100 jaar, zal in deze fase onderzoek gedaan worden naar potentiële maatregelen.

De onderhavige rapportage heeft betrekking op fase 1 van het hierboven beschreven onderzoek. In dit rapport wordt eerst, in hoofdstuk 2, ingegaan op de opzet van dit onderzoek, waarna hoofdstuk 3 een beschrijving geeft van de constructie en een overzicht van de plaatsaanduiding die in dit onderzoek wordt gebruikt. Hoofdstuk 4 geeft een definitie van het afkeurcriterium in relatie tot de vereiste technische levensduur van de constructie van 100 jaar. Hoofdstuk 5 geeft een beschrijving van de optredende aantasting, zoals die uit de diverse inspecties naar voren is gekomen, waarna hoofdstuk 6 een samenvattend overzicht geeft van de reeds uitgevoerde metingen aan het beton. Vervolgens geeft hoofdstuk 7 een inhoudelijke analyse van de reeds beschikbare onderzoeksresultaten en hoofdstuk 8 de consequenties daarvan voor de levensduurverwachting. Daarna geeft hoofdstuk 9 aan welk vervolgonderzoek noodzakelijk geacht wordt om een definitieve uitspraak te kunnen doen over de levensduurverwachting van de constructie. Tot slot geeft hoofdstuk 10 de conclusies en hoofdstuk 11 de ondertekening van het rapport.

## 2 Opzet van het onderzoek

Ten behoeve van het onderzoek zijn de rapportages van de reeds uitgevoerde onderzoeken aan TRN beschikbaar gesteld. Tevens is gebruik gemaakt van de rapportages die in het verleden reeds door TNO zijn opgesteld. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de betreffende rapportages.

Tabel 2.1: Overzicht beschikbaar gestelde rapportages en rapportages TNO

Code	Opsteller	Datum	Document	
<b>Beschikbaar gestelde rapportages</b>				
1	TU Delft	1-4-2012	No. C1201	Materials characterization of concrete cores from HSL construction - Draft
2	BAM	20-9-2012	130030-rap-u-0008	Duurzaamheidsstudie van de stempels en gordingen van TRN
3	BAM	12-10-2012	130030-rap-u-0009	Betonherstel HSL-3
4	BAM	17-6-2014	130030-rap-u-0010	Vervolgonderzoek carbonatatie
5	RIS	22-5-2015	RIS430-4/pouc/016	HSL-TRN Rapportage inspectie/onderzoek betonkwaliteit en advies herstel
6	RIS	10-7-2015	RIS430-4/pouc/018	Vervolgonderzoek HSL/TRN
12	RIS	13-6-2016	RIS430-13/esss2/005	Aanvullend petrografisch betononderzoek HSL/TRN door Pelcon
13	RIS	13-5-2016	RIS430-8_017, rap inspectie gordingen en stempels HSL TRN def 1.0 dd 13 mei 16	HSL-Tunnel Rotterdam Noordrand; Rapportage inspectie betonkwaliteit stempels
14a	Haskoning/DHV	21-2-2017	T&PBE9885-106-100N001D01	Rapportage inspectie gordingen en stempels HSL TRN def. en RIS430-8_018, notitie inmeting bovenzijde beton van 6 stempels HSL TRN def 1.0 dd. 13mei 2016
14b	Haskoning/DHV	21-2-2017	Bijlage A HSL-TRN monitoring en metingen febr 2017	Bijlage bij hiervoor genoemde rapport
11	BAM	Maart 2017	Inventarisatie stempels BEWERKT TRN maart 2017 v170529	Inventarisatie van de actuele toestand van de stempels door BAM
15	Haskoning/DHV	11-9-2017	T&PBE9885-109-100-M01	Overzichtstekeningen met moot-stempelindeling KMZ bestand met mootnummering; Excellijst met moot-stempelnummering en categorie indeling
<b>Rapportages TNO</b>				
7	TNO	8-5-2012	060-DTM-2012-01428	Betonschade TRN
8	TNO	9-10-2013	TNO2013 R11311	Beoordeling herstelmethodiek HSL3/TRN - definitief concept
9	TNO	23-11-2015	2015.0100291595	Second opinion onderzoek HSL-TRN
10	TNO	11-10-2016	TNO2016 R11133	Second opinion op de levensduurverwachting van het HSL-beton op basis van het onderzoek door RIS en Pelcon aan TRN

Om tot een heldere definitie van een afkeurcriterium te komen, dat geldt voor het einde van de levensduur van het betonwerk, is er een gezamenlijk overleg geweest tussen ProRail en TNO. Doel van het gesprek was om tot criteria te komen die binnen het huidige onderzoek gebruikt kunnen worden als toetsinstrument bij voorspellingen over het te verwachten functioneren van de constructie in de toekomst. Met andere woorden, deze criteria geven de grens aan waarmee de technische levensduur van de constructie kan worden beoordeeld. Meer hierover is beschreven in hoofdstuk 4.

Ten behoeve van het onderzoek naar de optredende aantastingsmechanismen heeft TNO een samenvattend overzicht opgesteld van de van belang geachte onderzoeksresultaten, inclusief een eerste interpretatie van die onderzoeksresultaten. De resultaten hiervan zijn besproken en verder geanalyseerd in een expertmeeting, met afgevaardigden van ProRail, Movares, SGS Intron en TNO. De resultaten van die expertmeeting zijn verwerkt in de uiteindelijke analyses en voorstellen zoals weergegeven in de onderhavige rapportage.

### 3 Overzicht van de constructie

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van algemene informatie over de TRN zoals die beschikbaar is gekomen via de rapportages van BAM [02] en RIS [05]. Dit betreft informatie over de (op)bouw, over de gebruikte coderingen voor de plaatsbepaling en over het betonwerk.

#### 3.1 Opbouw en coderingen

De TRN bevindt zich aan de noordrand van Rotterdam, ten oosten van de luchthaven, en is van zuid naar noord georiënteerd (figuur 3.1).



Figuur 3.1: Locatie TRN

TRN is gebouwd in de periode van 2002 – 2005. De tunnel is over de lengte verdeeld in 162 moten, die van zuid naar noord zijn genummerd van 1 tot en met 162. De tunnel kent in hoofdzaak drie doorsneden (zie tabel 3.1):

- Een open bak constructie ter plaatse van de beide toeritten.
- Een half open bak constructie met aan de bovenzijde stempels.
- Een gesloten tunneldeel.

De half open bak constructie heeft aan de bovenzijde, tussen de beide wanden, stempels (figuur 3.2), veelal vijf stempels per moot. Deze stempels zijn aangebracht tussen gordingen die in lengterichting van de tunnel op de tunnelwanden zijn gestort (figuur 3.2). De stempels zijn gecodeerd met het mootnummer, gevolgd door een volgnummer, van zuid naar noord, 1 tot en met 5, Op enkele locaties zijn toegangen naar de tunnel aanwezig (figuur 3.3). Ter plaatse van die toegangen zijn de beide tunnelwanden naar buiten verplaatst en is een tussenwand aangebracht tussen de toegangen en de tunnel.





### 3.2 Informatie over het betonwerk

In het werk zijn meerdere verschillende betonmengsels toegepast. Die mengsels zijn voorzien van een code. De tabellen 3.2 en 3.3 geven een overzicht van de informatie die via de rapporten [02] en [05] beschikbaar is gekomen over deze betonmengsels. In rapport [02] is bij deze tabel met de betonsamenstellingen het volgende aangegeven: “Overzicht van de gebruikte mengsels in de stempels, gordingen, en wanden”.

In tabel 3.1 is een globaal overzicht gegeven van de locaties waar de verschillende betonmengsels zijn toegepast. In rapport [02] is voor een deel van de individuele stempels, gordingen en wanden aangegeven welk betonmengsel daarvoor is toegepast. Die informatie is overgenomen in de tabellen in bijlage A. In die tabellen is tevens, voor zover beschikbaar, ook de stortdatum van de betreffende onderdelen weergegeven.

Tabel 3.2: Beschikbare informatie over toegepaste betonmengsels – deel 1 [02]

Mengselcode	Van Der Velden - Mebin							
	A	A1	A3	C	D	D1	J	T
<b>Betonkwaliteit</b>								
Sterkteklasse	B25	B25	B25	B35	B25	B25	B45	B35
Sterkte t.b.v. uitvoering [N/mm <sup>2</sup> ]	20 na 1 wk	20 na 1 wk	20 na 1 wk	35 na 4 wkn	-	-	-	-
F'ck na 91 dagen [N/mm <sup>2</sup> ]	35	35	35	35	35	35	45	35
100 jaar levensduur	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Consistentiegebied	2	3	2	2	2	4	3	2
<b>Bindmiddel</b>								
CEM III/B 42,5 LH HS [Enci Rotterdam] ca.	280-320	300-340	230-270	300-340	280-320	300-340	280-320	350-390
CEM I 52,5 R [Enci Maastricht] ca.	-	-	50	-	-	-	80	-
Vliegas	30	30	30	0-40	30	30	-	-
Kalksteenmeel								
Slakgehalte [min. %]	65	65	53	65	65	65	51	65
<b>Hulpstoffen [in %]</b>								
Plastificeerder						0,3-0,5	0,3-0,5	0,3-0,5
Superplastificeerder						0,3-0,5	0,3-0,5	0,3-0,5
Vertrager						-	-	-
Verwerkingstijd						-	-	-
<b>Water</b>								
Zetmaat	50-90	100-150	50-90	50-90	50-90	160-200	100-150	50-90
Vloeimaat								
Schudmaat								
Maximale wbf [Duracrete]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Berekende wbf [Duracrete]	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Berekende wcf [VBT]	0,54	0,54	0,54	0,53	0,55	0,55	0,45	0,45

Tabel 3.3: Beschikbare informatie over toegepaste betonmengsels – deel 2 [02]

Mengselcode	Van Der Velden - Mebin							
	A	A1	A3	C	D	D1	J	T
<b>Korrelverdeling toeslagmat.</b>								
Zand [0-4]	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Grind [4-16 / 4-32]	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
D <sub>max</sub> 31.5 mm	100%		100%	100%	100%		100%	100%
D <sub>max</sub> 16 mm		100%				100%		
D <sub>max</sub> 4 mm								
<b>Fijn materiaal &lt; 0,250 mm [l/m<sup>3</sup>]</b>								
Minimale hoeveelheid	130	145	130	130	130	140	140	-
<b>100 jaar levensduur [voorwaarden]</b>								
Levensduur	100	100	100	100	100	100	100	100
Dekking [nominaal]	50	50	50	50/38	50	50	50	50
Verhardingsduur bij ontkisten/voorspanne n/etc	-/1 wk	-/1 wk	-/1 wk	4 weken	-	-	-	-
Min. sterkte bij ontkisten/voorspanne n/etc [N/mm <sup>2</sup> ].	3,5/20	3,5/20	3,5/20	35	3,5/14,0	3,5/14,0	3,5	3,5
<b>Periode van nabehandeling</b>	<b>≥ 3 dgn</b>	<b>≥ 3 dgn</b>	<b>≥ 3 dgn</b>	<b>≥ 3 dgn</b>	<b>≥ 7 dgn</b>	<b>≥ 7 dgn</b>	<b>≥ 1 dgn</b>	<b>≥ 3 dgn</b>
<b>Min. sterkte voor nabehandeling [N/mm<sup>2</sup>].</b>	<b>17,5</b>	<b>17,5</b>	<b>17,5</b>	<b>17,5</b>	<b>24,5</b>	<b>24,5</b>	<b>14</b>	<b>17,5</b>
Max. diffusiecoëfficiënt Chloriden [m <sup>2</sup> /s]	7,5 * 10 <sup>-12</sup>	7,5 * 10 <sup>-12</sup>	7,5 * 10 <sup>-12</sup>	7,5 * 10 <sup>-12</sup>	11,3 * 10 <sup>-12</sup>	11,3 * 10 <sup>-12</sup>	6,9 * 10 <sup>-12</sup>	4,45 * 10 <sup>-12</sup>
Max. diffusiecoëff. Carbonatie [m <sup>2</sup> mm <sup>2</sup> /(kg*jaar )]	36000	36000	36000	36000	75000	75000	n.v.t.	2,3*E06

Ten aanzien van de nabehandeling van het beton is in rapport [02] de volgende informatie weergegeven:

Stempels:

- De zijkanten van de stempels zijn 2-3 dagen na het storten ontkist.
- De bovenkant is met een curing compound nabehandeld (Cugla H).
- Aan de onderkant van het stempel blijft de bekisting staan tot het beton voldoende sterkte heeft (14 MPa) en dat is na ongeveer 1 week.

Gordingen:

- De gordingen zijn 2-3 dagen na het storten ontkist en het boven betonoppervlak is op vergelijkbare wijze nabehandeld, met dezelfde curing compound, als de stempels.

Wanden:

- Het boven betonoppervlak is op vergelijkbare wijze nabehandeld, met dezelfde curing compound, zoals de stempels en de gordingen.
- De wanden zijn 21 dagen na het storten ontkist.

## 4 Definitie afkeur criterium

### 4.1 Aanleiding

De HSL is een prestigie project. Imagoschade is daarbij een serieus onderwerp. De HSL is de enige spoorlijn in Nederland die actief vrijgehouden wordt van graffiti, om de spoorlijn er strak en vlekkeloos uit te laten zien. De bovenmatige mosgroei die op beton van de HSL is aangetroffen past niet in het imagobeeld.

Mos als zodanig is echter niet gedefinieerd als parameter voor de technische levensduur van de constructie. Contractueel is als constructieve eis vastgelegd, dat de TRN constructie een technische levensduur van tenminste 100 jaar moet hebben. Er is verder niet gedefinieerd met welke prestatieparameters bepaald wordt of de technische levensduur gehaald wordt. Dergelijke zogenaamde afkeurcriteria zijn wel nodig om bij voorspellingen te kunnen toetsen of de constructie de gevraagde periode zou kunnen functioneren.

In dit hoofdstuk wordt uiteengezet hoe invulling is gegeven aan de definitie van afkeur criterium.

### 4.2 Invulling levensduur door aannemer

In rapport [02] is aangegeven op welke wijze de aannemer destijds invulling heeft gegeven aan de eis ten aanzien van de technische levensduur van 100 jaar. Dat is gedefinieerd in het rapport "Beton op maat – met een levensduur van 100 jaar (HSL3-00001-A-R-10050)". Daarin is aangegeven dat voor een aantal schademechanismen wordt voldaan aan de gevraagde levensduur door uitsluiting van de veroorzakende factoren of door aanvullende maatregelen in de betonsamenstelling en/of de betonconstructie:

- **Alkali Silica Reactie [ASR]**  
*Een alkali silica reactie wordt voorkomen door de keuze van materialen voor beton overeenkomstig CUR-Aanbeveling 38. Dit uitsluiten van een mogelijke reactie kent geen tijdsafhankelijkheid.*
- **Agressieve stoffen**  
*Ten aanzien van biologische of chemische processen geldt dat het gebruik van de van toepassing zijnde duurzaamheidseisen volgens NEN 6720 en NEN 5950 voldoende zekerheid biedt om de beoogde duurzaamheid te behalen.*
- **Vorst**  
*Zoals beschreven in de 'Ontwerpbasis Algemeen' is de Nederlandse ervaring met betrekking tot vorstschade dusdanig dat de tegenwoordig toegepaste betonsamenstellingen getoond hebben vorstbestendig te zijn. De bestandheid van het beton tegen vorst in combinatie met dooizouten wordt afgedekt door toepassing van een watercementfactor < 0,45 [NEN 5950]. Voor constructies waar 100 jaar levensduur gevraagd wordt, geldt tevens de berekende levensduur volgens het Duracrete model.*
- **Zwerfstromen**  
*Bij het ontwerp van de verschillende constructieonderdelen voor HSL zullen [indien van toepassing] voorzieningen of maatregelen ter voorkoming van zwerfstromen meegenomen worden conform richtlijn HSL 603 F.*
- **Chloride indringing en carbonatatie**  
*In grondwater en daar waar een veilig en stabiel vochtfront optreedt in beton wordt ervan uitgegaan dat een zuurstofarme omgeving aanwezig is en er geen corrosie zal optreden volgens chloride geïnitieerde corrosie.*

*Voor bovengronds geldt in principe alleen carbonatatie als aantastingsmechanisme. In uitzonderlijke gevallen kunnen bepaalde onderdelen van de primaire HSL constructie belast worden door vorst-dooizouten. Hierbij valt te denken aan de 'spray' van het wegverkeer bij de kruisende infrastructuur. In deze gevallen zal ook rekening gehouden moeten worden met de hier uit volgende chloride belasting.*

Op basis van deze uitgangspunten en het Duracrete model zijn de betonsamenstellingen gecontroleerd voor 100 jaar levensduur.

#### **4.3 Aanpak**

Om tot een heldere definitie van een afkeurcriterium te komen is er op 27 juni 2017 een gezamenlijk overleg geweest tussen ProRail en TNO. Doel van het gesprek was om tot criteria te komen die binnen het huidige onderzoek gebruikt kunnen worden als toetsinstrument bij voorspellingen over het te verwachten functioneren van de constructie in de toekomst. Met andere woorden, deze criteria geven de grens aan waarmee de technische levensduur van de constructie kan worden beoordeeld.

Bij dit overleg waren aanwezig dhr. R. den Boer (ProRail), bijgestaan door dhr. W. de Moor (Movares), mevr. M. Nelisse (TNO) en dhr. M. de Rooij (TNO).

#### **4.4 Afbakening**

TRN heeft momenteel ook problemen met lekkages. Deze lekkages zitten niet binnen het afkeurcriterium zoals hier besproken, en worden hier verder buiten de discussie gehouden.

Uitgangspunt is de contractuele eis van een technische levensduur van 100 jaar. ProRail interpreteert deze eis als het geschikt moeten zijn om de constructie te kunnen gebruiken waarvoor hij bedoeld is.

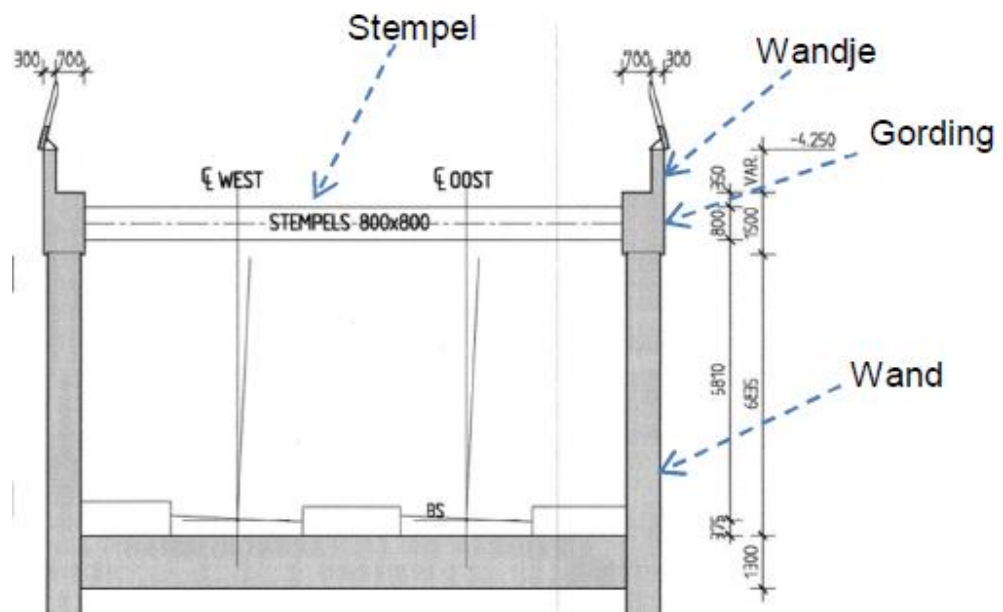
Observaties van de afgelopen periode laten een sterkere betondegradatie zien dan redelijkerwijs van een beton op deze leeftijd mag worden verwacht. De degradatie uit zich onder andere in gruisvorming en een enkele keer een afgedrukte betonschol (tot ca. 20 cm diameter). Het eerste onderwerp in de bespreking is daarom wat er allemaal onder het afkeurcriterium zou moeten worden meegenomen.

Gedurende het gesprek wordt duidelijk dat het veilig kunnen gebruiken van de constructie de bovenliggende eis is, waarvan onderliggende eisen kunnen worden afgeleid. Deze onderliggende eisen worden geïdentificeerd op drie domeinen:

1. *Constructief veilig gebruik*: hieronder vallen criteria die te maken hebben met bouwkundige/constructieve eisen van de constructie.
2. *Veiligheid voor de gebruikers*: hieronder vallen criteria die te maken hebben met mensen die binnen de constructie aanwezig kunnen zijn.
3. *Het goed functioneren van de trein/installaties voor een veilig functioneel gebruik*: hierbij moet gedacht worden aan effecten van betondegradatie en stof die van invloed kunnen zijn op de trein of de tunnel technische installaties (TTI).

In de volgende paragraaf worden deze drie gebieden verder uitgewerkt. Aangezien de eisen ook nog specifiek zijn voor de verschillende onderdelen van de constructie, dan wel verschillende uitwerking op de onderdelen kunnen hebben,

worden de onderdelen, zoals die in hoofdstuk 3 reeds benoemd zijn, hier in figuur 4.1 nog eens teruggehaald.



Figuur 4.1: Voornaamste onderdelen in de constructie TRN.

#### 4.5 Uitwerking geïdentificeerde domeinen

##### Constructief veilig

Op het domein van constructieve veiligheid zijn gedurende het gesprek 3 aspecten benoemd in relatie tot de technische levensduur van de constructie. Dit zijn: constructieve sterkte, weerstand tegen brand en corrosie van de wapening. In de volgende alinea's worden deze punten nagelopen.

Eén van de geconstateerde gevolgen van de degradatieprocessen is het loskomen van stukjes beton van de bovenzijde van de stempels, de gordingen en de wandjes. Er wordt hier niet ingegaan op de oorzaak van deze processen, maar een extreem gevolg van het verdwijnen van beton specifiek voor de stempels zou een dusdanige afname van de doorsnede van een stempel kunnen zijn, dat de stempel de benodigde druksterkte niet meer kan leveren en zou kunnen uitknikken. Er is hierbij in het bijzonder naar de stempels gekeken, omdat deze het meest kritisch zijn voor een dergelijke afname van betonhoeveelheid.

Hoewel er tijdens het gesprek geen zorgen waren dat dit punt ooit bereikt zou worden, is het wel een duidelijk afkeurcriterium voor de technische levensduur van de constructie. Voor de vervolgfase wordt dan ook aanbevolen om berekeningen te maken bij welke dwarsdoorsnedeafname een stempel niet meer veilig wordt. Daarmee wordt de minimaal benodigde dwarsdoorsnede een eis voor de technische levensduur van de constructie.

Afname van de hoeveelheid beton in de dekkingszone kan gevolgen hebben voor de weerstand tegen brand. Bij een brand wordt het wapeningsstaal tegen de hitte van de brand beschermd door de isolerende werking van het beton. Daarvoor heeft de betondekking een minimale dikte nodig. Deze dikte hangt onder andere af van de te hanteren brandkromme voor de constructie. Tijdens het gesprek kon hier geen uitsluitel over gegeven worden.

Voor de vervolgfase wordt daarom aanbevolen om uit te zoeken aan welke brandkromme TRN moet voldoen, en wat dit vervolgens betekent voor de minimaal

vereiste betondekking. Hiermee wordt de minimale betondekking een duidelijk herleidbare eis voor de technische levensduur van de constructie.

Wel wordt opgemerkt dat de minimale dekking nog een oriëntatie component zou kunnen hebben, afhankelijk van waar de brand vandaan komt. Zeer waarschijnlijk betekent dit bijvoorbeeld voor een stempel dat de dekking aan de onderzijde van de stempels op dit punt maatgevend gaat zijn ten opzichte van de dekking aan de bovenzijde. In een vervolgfase zou dit nader moeten worden uitgewerkt. Vooral nog is alleen aan de bovenzijde van de stempels, gordingen en wandjes sprake van aantasting waarbij de dikte van de betondekking in de loop van de tijd afneemt. Voor deze drie situaties geldt dat zeer waarschijnlijk alleen de afname van de betondekking aan de bovenzijde van de stempels zal resulteren in constructieve consequenties bij brand.

Corrosie van de wapening is een bekende parameter in de levensduurbeschouwing van constructies. Daarbij worden vaak twee typen corrosie onderscheiden: chloride geïnitieerde wapeningscorrosie en carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie. Bij TRN is niet uitgegaan van chloride aantasting in de ontwerpfase. Wel is rekening gehouden met carbonatatie als mechanisme. Voor carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie wordt in de praktijk een helder gedefinieerd ontwerpcriterium voor de technische levensduur van een constructie gehanteerd, namelijk het moment dat het carbonatatiefront de wapening bereikt. Voor de vervolgfase wordt op dit punt aanbevolen om uit te zoeken of er afspraken zijn gemaakt over de berekeningsmethode voor het bereiken van de wapening door het carbonatatiefront (eerste moment dat carbonatatiefront wapening bereikt? 5% van het carbonatatiefront heeft de wapening bereikt? 50% van het carbonatatiefront? Welke dekking gebruiken we daarbij (gemiddelde dekking?)?). Aanvullend hieraan is het zinvol om uit te zoeken of ook de propagatiefase van het corrosieproces in de bepaling van de levensduur betrokken kan worden. Dit betreft de periode die het corrosieproces nodig heeft om daadwerkelijk schade te geven. Door carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie is een levensduur aspect dat een rol speelt bij alle constructieve betonnen onderdelen van TRN.

#### Veiligheid voor gebruikers

Mensen die aanwezig kunnen zijn binnen de constructie kunnen worden onderscheiden in twee groepen:

- Mensen die gepland aanwezig zijn (inspecteurs/onderhoudsmedewerkers); deze mensen komen met een zekere regelmaat binnen de constructie en zijn er als zodanig mee bekend. Bovendien zijn ze er op gekleed (werkkleding/werkschoenen).
- Mensen die ongepland aanwezig zijn; wanneer er sprake is van een situatie waarbij treinpersoneel en/of treinpassagiers een trein moeten verlaten, dienen ze veilig langs het spoor te kunnen lopen. Het pad dient hiertoe bezemschoon en niet glad te zijn.

De inschatting tijdens het gesprek is dat de eventuele gladheid of veel gruis op het pad naast het spoor het grootste gevaar zal opleveren.

Infraspeed is contractueel verplicht om de constructie bezemschoon te houden. Gruis op het pad is hiermee afgevangen.

Gladheid kan ontstaan door ijzel of bijvoorbeeld nat mos. Deze laatste heeft een andere oorzaak dan de eerste, maar beide hebben eenzelfde gevolg: gladheid op het pad. Beide soorten kunnen met adequaat onderhoud bestreden worden. Indien veel vaker onderhoud nodig is dan op voorhand werd aangenomen, om de veiligheid op niveau te houden, dan zou dit financiële consequenties kunnen hebben.

Op basis van hetgeen in het gesprek is beargumenteerd, wordt extra onderhoud dan vooraf voorzien had kunnen worden vooral nog buiten de afkeurcriteria gehouden voor de technische levensduur, zoals in dit onderzoek bedoeld is.

### Veilig functioneel gebruik

Bij dit onderdeel is de analyse gesplitst in stof enerzijds en afvallen van brokstukken beton anderzijds.

Stof is vervelend voor de trein of tunnel technische installaties, omdat het voor meer onderhoud aan of snellere vervanging van de trein of de tunnel technische installaties kan zorgen. Dergelijk extra onderhoud zou wel als extra kosten in het onderhoudsregime moeten worden meegenomen, maar levert slechts meer hinder en niet direct constructief gevaar.

Hetzelfde geldt voor afvallend gruis, of (kleine) delen van beton. In algemene zin is de trein berekend en ontworpen op impact (bijvoorbeeld de voorruit). Schade zou wel kunnen optreden aan de pantograaf, wanneer deze geraakt wordt door afvallend beton. Hier is de inschatting tijdens het gesprek dat dit hinder op kan leveren, maar geen direct veiligheidsgevaar.

De onderwerpen onder dit domein kunnen dus vervelende hinder opleveren, maar de conclusie is dat deze elementen niet behoeven te worden meegenomen in de definitie van afkeurcriteria dat tijdens dit onderzoek gehanteerd zal worden.

## **4.6 Te hanteren criteria**

Op basis van bovenstaande weergave van het gesprek tussen ProRail en TNO over de te hanteren afkeurcriteria, zijn de volgende criteria geïdentificeerd voor het toetsen van de technische levensduur:

- A. Het bereiken van een minimale dwarsdoorsnede van de stempels, die vanuit constructief oogpunt nodig is voor de stempelwerking.
- B. Het bereiken van een minimale dekking op de wapening aan de bovenzijde van de stempels, die benodigd is voor de brandveiligheid van de stempels.
- C. Het bereiken van de wapening door het carbonatatiefront. Dit aspect speelt een rol bij alle constructieve betonnen onderdelen van TRN.

Uitzoeken van de getalswaarden van deze criteria moet in de volgende fase nog gebeuren.

Zoals bovenstaand is aangegeven is extra onderhoud om degradatie te beperken of op te ruimen, anders dan vooraf voorzien had kunnen worden, niet meegenomen in de afkeurcriteria voor de technische levensduur. Het gaat hier namelijk om afkeurcriteria en niet om investeringsgeld om het bereiken van deze criteria uit te stellen.

## 5 Beschrijving van de betonaantasting

### 5.1 Historisch overzicht

Rapport [02] geeft de resultaten van een visuele inspectie weer, zoals die is uitgevoerd in 2011. Een samenvattend overzicht hiervan is weergegeven in paragraaf 5.2.

In de periode van oktober 2012 tot en met maart 2013 zijn herstelwerkzaamheden uitgevoerd aan het beton (zie [03] en [08]). Daarbij zijn de met mos begroeide delen van de stempels, gordingen en wandjes gereinigd door middel van 300/350 bar waterstralen. Vervolgens is op de bovenzijde van de stempels en gordingen een niet-hydrofoob impregneermiddel aangebracht (InTelliSeal (Li)). Vooral nog is niet bekend of dit middel ook op andere delen van de constructie is aangebracht. In rapport [08] is vermeld dat bij de moten 112 en 143 de gordingen aan beide zijden wel zijn gereinigd, maar niet zijn geïmpregneerd. Daarbij is tevens aangegeven dat er, voorafgaand aan de reiniging, op de gordingen van moot 112 sprake was duidelijke mosgroei. Op de gordingen van moot 143 was weinig mosgroei.

Recent zijn de volgende inspecties/inventarisaties uitgevoerd van de toestand van het betonwerk:

- In april 2016 heeft RIS een visuele inspectie uitgevoerd van de stempels van de noordelijke toerit van TRN [13]. Tevens zijn bij 6 stempels meetbouts aangebracht. De resultaten van de inspectie zijn samengevat in paragraaf 5.3.
- In februari 2017 heeft Haskoning/DHV een nieuwe inspectie uitgevoerd aan de stempels van de noordelijke toerit van TRN [14]. De resultaten van deze inspectie zijn samengevat in paragraaf 5.4.
- In maart 2017 is door BAM een inventarisatie uitgevoerd van de toestand van de bovenzijde van de stempels [11]. De resultaten van die inventarisatie zijn weergegeven in paragraaf 5.5.
- In september 2017 is gezamenlijk door Haskoning/DHV en BAM een inspectie uitgevoerd, waarbij de schade aan de bovenzijde van de stempels is gecategoriseerd. De resultaten van die inventarisatie zijn weergegeven in paragraaf 5.6.

### 5.2 Visuele inspectie in 2011

Onderstaand volgt een samenvattend overzicht van de resultaten van de visuele inspectie, zoals die in 2011 is uitgevoerd door BAM en is gerapporteerd in [02].

#### 5.2.1 *Stempels*

Ten aanzien van de stempels is het volgende waargenomen:

- Op de bovenzijde en zijkanten van de stempels is sprake van mosgroei (figuur 5.1). De mate van mosgroei varieert van mosgroei over vrijwel het gehele oppervlak tot vrijwel geen mosgroei (figuur 5.2).
- Enkele stempels zijn (deels) onder een viaduct gepositioneerd. Op de delen van die stempels die zich onder de viaducten bevinden is geen sprake van mosgroei (figuur 5.3).



- In sommige gevallen is sprake van enigszins lijnvormige mosgroei, vermoedelijk ter plaatse van scheurvorming in het betonoppervlak van de stempel (figuur 5.4).
- Plaatselijk is sprake van zichtbare betonschade (afschilfering oppervlak) op een locatie waar geen mos aanwezig is (figuur 5.5). Vermoedelijk is daar het mos, inclusief de schilfering, van het betonoppervlak afgevallen.
- Voor een groot deel van de stempels is door BAM een inschatting gemaakt van het percentage van de bovenzijde dat bedekt was met mos. De resultaten van die opname zijn weergegeven in tabel A.1 in bijlage A.



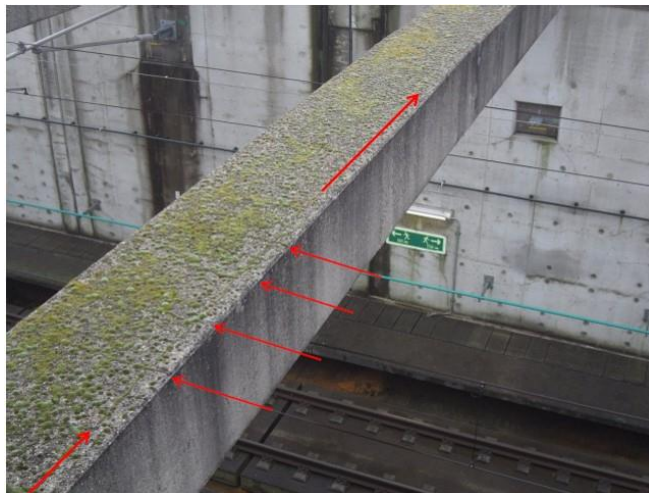
Figuur 5.1: Mosgroei op stempels (foto B.1 in [02])



Figuur 5.2: Variatie in hoeveelheid mosgroei op bovenzijde stempels (foto B.2-B.4 in [02])



*Figuur 5.3: Geen mosgroei op delen van stempel onder viaduct (foto B.16 in [02])*



*Figuur 5.4: Enigszins lijnvormige mosgroei, vermoedelijk ter plaatse van scheurvorming (foto B.24 in [02])*



*Figuur 5.5: Plaatselijke schade aan het betonoppervlak van een stempel (foto B.20 in [02])*

### 5.2.2 Gordingen

Ten aanzien van de gordingen is het volgende waargenomen:

- Op de bovenzijde van de gordingen is sprake van mosgroei, vergelijkbaar met de mosgroei op de stempels. De mate van mosgroei varieert van mosgroei over vrijwel het gehele oppervlak tot vrijwel geen mosgroei.
- In sommige gevallen is sprake van enigszins lijnvormige mosgroei, vermoedelijk ter plaatse van scheurvorming in het betonoppervlak van de gordingen (figuur 5.6).
- Op een locatie ter plaatse van een toegang tot de tunnel, waar de gording overgaat in de wand tussen de toegang en de tunnel, is sprake van een scherpe overgang tussen duidelijke mosgroei en geen mosgroei (figuur 5.7).
- Voor een groot deel van de gordingen is door BAM een inschatting gemaakt van het percentage van de bovenzijde dat bedekt was met mos. De resultaten van die opname zijn weergegeven in tabel A.3 in bijlage A.



*Figuur 5.6: Enigszins lijnvormige mosgroei, vermoedelijk ter plaatse van scheurvorming (foto B.25 in [02])*





*Figuur 5.7: Overgang van gording (met duidelijke mosgroei) naar de wand tussen de toegang en de tunnel (geen mosgroei) (foto B.31 in [02])*

### 5.2.3 Wandjes op de gordingen

Ten aanzien van de wandjes op de gordingen is het volgende waargenomen:

- Op de bovenzijde en de zijkant van de wandjes is sprake van mosgroei, vergelijkbaar met de mosgroei op de stempels (figuur 5.8). De mate van mosgroei varieert van mosgroei over vrijwel het gehele oppervlak tot vrijwel geen mosgroei.
- Plaatselijk is het betonoppervlak onder het mos ernstig beschadigd (afschilfering betonoppervlak). Die schade komt zichtbaar als het mos wordt verwijderd (figuur 5.9).



*Figuur 5.8: Mosgroei op wandje op gording; geen mosgroei rondom staanders van hekwerk (foto B.7 in [02]).*



*Figuur 5.9: Plaatselijke schade aan het betonoppervlak van een wandje (foto B.12 in [02])*

### 5.3 Inventarisatie april 2016

Tijdens de inventarisatie in april 2016, door RIS, is de bovenzijde van een deel van de stempels visueel beoordeeld [13]. Hierbij is het volgende waargenomen:

- Bij vrijwel alle stempels is sprake van een “verweerd” oppervlak, dat vrijwel zeker is veroorzaakt door het reinigen van het beton in 2012/2013.
- Er is wel weer sprake van mosgroei, maar de mosgroei is sinds het schoonmaken van het beton 2012/2013 niet in dezelfde mate teruggekomen.
- Er zijn grote verschillen waargenomen van mosgroei tussen de stempels (zie tabel A.1 in bijlage A). Het percentage van het bovenoppervlak dat is begroeid met mos varieert van vrijwel niets tot circa 80%.
- Bij een deel van de stempels is sprake van peeling en afgebrokkelde vellingkanten.
- Bij 4 van de 26 geïnspecteerde stempels was de mate van peeling en afgebrokkelde vellingkanten dusdanig ernstig dat van deze stempels is aangegeven dat ze in een (zeer) slechte conditie verkeren. Dit waren de stempels 101-1, 101-2, 113-1 en 116-1.
- De stempels 136-5 en 141-1 t/m 143-5, die zijn gestort met betonmengsel J, verkeren ogenschijnlijk in een goede conditie.

Tijdens deze inventarisatie zijn bij 6 stempels meetbouten op de bovenzijde aangebracht, om de mate van aantasting van het betonoppervlak in de tijd te kunnen monitoren. Dit zijn de stempels 101-2, 109-3, 113-1, 122-3, 133-4 en 141-3.

### 5.4 Inventarisatie februari 2017

Tijdens de inventarisatie in februari 2017, door Haskoning/DHV, is de bovenzijde van een deel van de stempels visueel beoordeeld [14]. Hierbij is het volgende waargenomen:

- In aanvulling op de inventarisatie in april 2016 wordt vermeld dat het bovenoppervlak van de stempels plaatselijk is geërodeerd tot 10 mm diepte en dat gedeelten losse kiezelsteentjes hebben.

- Er zijn kleine afwijkingen waargenomen in de hoeveelheid mosgroei ten opzichte van de inventarisatie in april 2016 (zie tabel A.1 in bijlage A).
- Bij de geïnventariseerde stempels is een inschatting gemaakt van het percentage van het bovenoppervlak dat peeling vertoont (zie tabel A.2 in bijlage A). Dit percentage varieert van vrijwel niets tot circa 60%.

Bij twee stempels met meetbouten zijn metingen uitgevoerd naar het verloop van de aantastingsdiepte [14]. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in tabel 5.1.

Tabel 5.1: Metingen naar verloop aantastingsdiepte bovenzijde stempels in de tijd [14]

	Stempel 101-2; meetwaarden (mm)							Gemiddeld
April 2016 [13]	17,9	16,5	16,0	14,3	13,2	13,0	13,2	--
Februari 2017 [14]	18,1	17,2	17,3	16,3	14,2	13,3	14,2	--
Toename aantasting (mm)	0,2	0,7	1,3	2,0	1,0	0,3	1,0	0,9
	Stempel 109-3; meetwaarden (mm)							Gemiddeld
April 2016 [13]	20,5	16,2	16,3	16,0	16,8	17,2	17,0	--
Februari 2017 [14]	16,5	18,0	17,0	11,5	18,0	17,5	15,8	--
Toename aantasting (mm)	-4,0	1,8	0,7	-4,5	1,2	0,3	-1,2	-0,8

## 5.5 Inventarisatie maart 2017

Tijdens de inventarisatie in maart 2017 door BAM is de bovenzijde van de stempels visueel beoordeeld [11]. Op basis van die visuele beoordeling is het oppervlak van de bovenzijde van de stempels ingedeeld in zogenaamde staalkaartklassen. Deze staalkaartklassen zijn als volgt gedefinieerd (figuur 5.10-5.12):

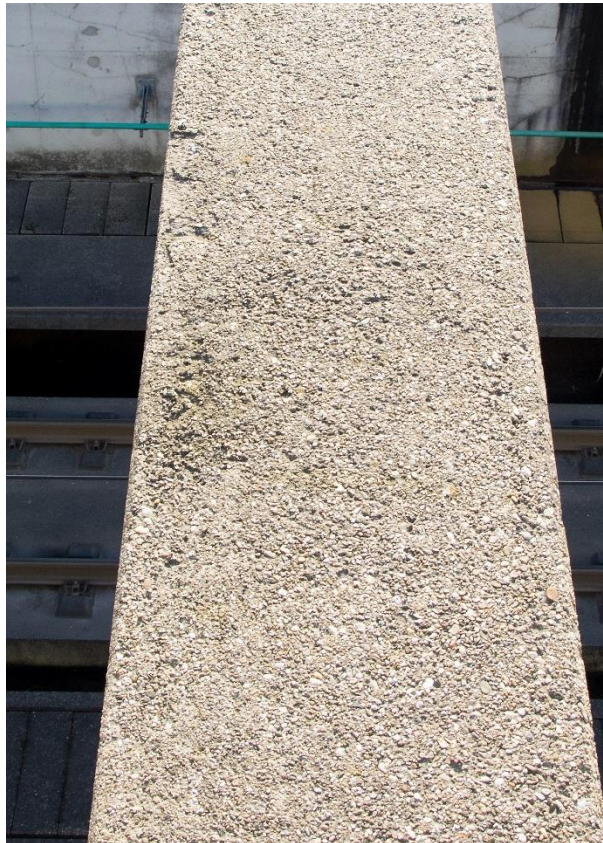
- Klasse 1: Samenhangend oppervlak, vrijwel overal cementhuid tussen grind aanwezig.
- Klasse 2: Redelijk samenhangend oppervlak, enkele plekken minder cementhuid tussen grind.
- Klasse 2\*: Oppervlak samenhangend, bijzondere toplaag op plekken verdwenen
- Klasse 3: Redelijk samenhangend oppervlak, meerdere plekken minder cementhuid tussen grind
- Klasse 4: Deels grof grinderig oppervlak
- Klasse 5: Grof grinderig oppervlak.

In tabel A.2 van bijlage A zijn de resultaten van deze inventarisatie weergegeven.

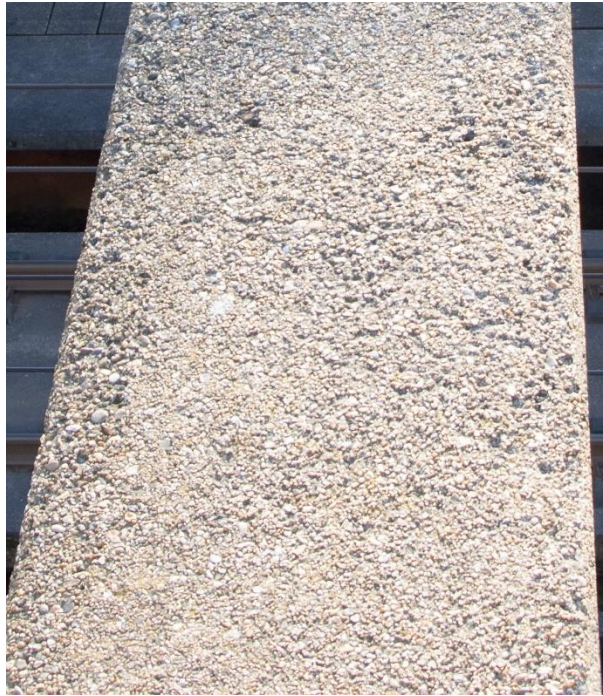




*Figuur 5.10: Voorbeeld staalkaartklasse 1 (stempel 113-2 [11])*



*Figuur 5.11: Voorbeeld staalkaartklasse 3 (stempel 116-1 [11])*



*Figuur 5.12: Voorbeeld staalkaartklasse 5 (stempel 110-4 [11])*

## 5.6 Inventarisatie september 2017

In september 2017 is een nieuwe inventarisatie van de stempels uitgevoerd, gezamenlijk door Haskoning/DHV en BAM [15]. Bij deze inventarisatie zijn de stempels ingedeeld in de volgende categorieën:

- Categorie 1 en 2: Goede conditie; geen actie benodigd.
- Categorie 3: Geringe onvolkomenheden aangetroffen; periodiek monitoren.
- Categorie 4 en 5: Gebreken aangetroffen, zoals losse/hol klinkende toplaag, reparatievlak los van ondergrond,

In tabel A.2 van bijlage A zijn de resultaten van deze inventarisatie weergegeven.

In rapport [15] is aangegeven dat het totaal aantal van 143 stempels als volgt verdeeld was over de bovengenoemde categorieën:

- Categorie 1: 32 stuks
- Categorie 2: 73 stuks
- Categorie 3: 15 stuks
- Categorie 4: 10 stuks
- Categorie 5: 13 stuks



## 6 Resultaten van reeds uitgevoerde onderzoeken

Dit hoofdstuk geeft een samenvattend overzicht van de in het verleden uitgevoerde onderzoeken aan het beton van de TRN. Eerst wordt een overzicht gegeven van de monsters die ten behoeve van deze onderzoeken zijn genomen. Vervolgens worden de resultaten van de uitgevoerde onderzoeken weergegeven, opgesplitst naar de volgende eigenschappen van het beton:

- Betondekking
- Carbonatatie diepte
- Vorstdooibestandheid
- Druksterkte

Aanvullend is ook een samenvattend overzicht gegeven van microscopisch onderzoek dat is uitgevoerd op het beton.

### 6.1 Monstername

In het verleden zijn, ten behoeve van de destijds uitgevoerde onderzoeken, de volgende monsters uit de constructie geboord:

- November 2011: 9 kernen met een diameter van 100 mm ([02] en tabel B.1 in bijlage B). Zes kernen zijn genomen uit de bovenzijde van stempels en gordingen met mosgroei; drie kernen uit de zijkant van de wanden, zonder mosgroei. Tabel B.1 in bijlage B geeft een overzicht van deze kernen, inclusief de locatie waar ze zijn geboord.
- December 2011: 4 kernen met een diameter van 50 mm ([02] en tabel B.1 in bijlage B). Deze kernen zijn geboord uit een stempel en een wand.
- Mei 2012: 35 kernen met een diameter van 25 mm ([02] en tabel B.2 in bijlage B). Deze kernen zijn geboord uit diverse onderdelen van het open deel van de tunnel.
- Voorjaar 2013: 36 kernen met een diameter van 25 mm ([04] en tabel B.3 in bijlage B). Deze kernen zijn geboord uit diverse onderdelen van zowel het dichte als het open deel van de tunnel.
- November 2014: 56 kernen met een diameter van 94 mm ([05] en tabel B.4 in bijlage B). Deze kernen zijn geboord uit diverse onderdelen van zowel het dichte als het open deel van de tunnel.
- Week 15 van 2016: 5 kernen ([12] en tabel B.5 in bijlage B). Deze kernen zijn geboord uit de wandjes op de gordingen en uit de zijkant van stempels.

### 6.2 Betondekking

De betondekking is gemeten op de wapening in de kernen die zijn geboord in november 2014 [05]. De resultaten van die metingen zijn weergegeven in bijlage C en samengevat in tabel 6.1.

Ten aanzien van de gemeten betondekkingen geldt dat in een deel van de boorkernen een relatief hoge betondekking is gemeten. Dat is zeer waarschijnlijk de tweede laag wapening geweest. Die meetwaarden zijn niet meegenomen in de bepaling van de gemiddelden.

Tabel 6.1: Resultaten metingen betondekking [05]

Onderdeel	Zijde	Betondekking (mm)		
		Aantal metingen	Gemiddeld	Minimaal
Dak	Onderzijde	5	61	59
Stempel	Boven	3	53*	45*
Stempel	Onderzijde	5	59	52
Stempel	Zijkant	3	64	62
Wand	--	5	59	52

\* Deze metingen zijn uitgevoerd na het verwijderen van de beschadigde toplaag van de bovenzijde van de stempels (zie paragraaf 5.1).

### 6.3 Carbonatatie diepte

De diverse onderzoeken naar de carbonatatie diepte in het beton hebben als volgt plaatsgevonden:

- De kernen die eind 2011 zijn geboord [02] zijn beproefd in het laboratorium van de TU Delft [01]. De carbonatatie diepte in die kernen is bepaald aan de hand van slijpplaatjes van het beton. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel D.1 in bijlage D.
- Bij de kernen die in mei 2012 zijn geboord [02] is de carbonatatie diepte in-situ, op de buitenomtrek van de kernen bepaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel D.2 in bijlage D.
- Bij de kernen die in het voorjaar van 2013 zijn geboord [04] is de carbonatatie diepte op de buitenomtrek van de kernen bepaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel D.3 in bijlage D.
- Bij de kernen die in november 2014 zijn geboord [05] is de carbonatatie diepte op de binnenomtrek van de boorgaten van de kernen bepaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel D.4 in bijlage D.

In de tabellen E.1 tot en met E.8 in bijlage E zijn de resultaten van de metingen naar de carbonatatie diepte samengevoegd per onderdeel van de constructie. Dit is gedaan voor de volgende onderdelen van de constructie:

- De onderzijde van het dak van de tunnel (tabel E.1). Aan dit onderdeel zijn metingen uitgevoerd in het voorjaar 2013 en in november 2014. Voor beide tijdstippen is de gemiddelde waarde van alle metingen berekend en weergegeven in de tabel.
- De gordingen (tabel E.2). Aan dit onderdeel zijn alleen metingen uitgevoerd eind 2011. Voor zowel de bovenzijde als de zijkant van de gordingen is de gemiddelde waarde van alle metingen berekend en weergegeven in de tabel.
- De stempels (tabel E.3-E.5). Aan dit onderdeel zijn metingen uitgevoerd eind 2011 en in november 2014. Voor beide tijdstippen is de gemiddelde waarde van alle metingen berekend en weergegeven in de tabellen, separaat voor de bovenzijde, de onderzijde en de zijkanten van de stempels.
- De tussenwanden (tabel E.6). Aan dit onderdeel zijn alleen metingen uitgevoerd in het voorjaar van 2013.
- De vloer (tabel E.7). Aan dit onderdeel zijn alleen metingen uitgevoerd in het voorjaar van 2013.

- De wanden (tabel E.8). Aan dit onderdeel zijn metingen uitgevoerd eind 2011, in het voorjaar van 2013 en in november 2014. Voor deze tijdstippen is de gemiddelde waarde van alle metingen berekend en weergegeven in de tabellen, separaat voor de wanden in het gesloten en in het open deel van de tunnel.

De resultaten van de metingen naar de carbonatatie diepte in het beton zijn samengevat in tabel 6.2 (per constructieonderdeel) en in tabel 6.3 (per betonmengsel). In tabel 6.3 zijn alleen de betonmengsels benoemd waarop metingen zijn uitgevoerd bij meerdere constructieonderdelen.

Tabel 6.2: Samenvattend overzicht resultaten carbonatatie dieptemetingen; per constructieonderdeel

Onderdeel	Zijde	Carbonatatie diepte (mm)	Meting
		Gemiddeld	
Dak		12,0	Voorjaar 2013
		6,8	November 2014
Gording	Bovenzijde	6,2	Eind 2011
	Zijkant	11,4	Eind 2011
Stempel	Bovenzijde	8,1	Eind 2011
		6,1 *)	November 2014
Stempel	Onderzijde	11,8	Eind 2011
		6,7	November 2014
Stempel	Zijkant	9,1	Eind 2011
		7,7	November 2014
Tussenwand		19,0	Voorjaar 2013
Vloer		5,0	Voorjaar 2013
Wand	Zijkant - gesloten	8,9	Eind 2011
		9,9	November 2014
Wand	Zijkant - open	9,8	Eind 2011
		22,0	Voorjaar 2013
		8,0	November 2014

\*) Deze metingen zijn uitgevoerd na het verwijderen van de beschadigde toplaag van de bovenzijde van de stempels (zie paragraaf 5.1)

Tabel 6.3: Samenvattend overzicht resultaten carbonatatie dieptemetingen; per betonmengsel

Mengsel	Carbonatatie diepte (mm)			
	Aantal metingen	Gemiddeld	Minimum	Maximum
A	38	9,7	1,0	23,0
C	19	15,7	3,0	30,0
D	13	8,5	3,0	16,0
J	8	2,8	1,0	5,0
M	16	11,0	0,0	24,7

#### 6.4 Vorstdooibestandheid

Het onderzoek naar de vorstdooibestandheid van het beton heeft plaatsgevonden op de kernen die zijn geboord in november 2014 [05]. Deze kernen zijn beproefd volgens de richtlijn NPR-CEN/TS 12390-9 (met demi-water). De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in tabel F.1 in bijlage F en samengevat in tabel 6.4 (per constructieonderdeel) en in tabel 6.5 (per betonmengsel).

Tabel 6.4: Samenvattend overzicht van de bepaling van de vorstdooibestandheid van het beton; per constructieonderdeel

Onderdeel	Zijde	Gemiddeld massaverlies (kg/m <sup>2</sup> ) na .. cycli					
		0	7	14	28	42	56
Dak	Onderzijde	0	0,0	0,0	0,4	1,2	3,6
Stempel	Boven*	0	0,3	0,7	1,7	2,9	4,4
Stempel	Onderzijde	0	0,3	0,7	3,4	5,7	7,1
Stempel	Zijkant	0	0,4	1,3	3,3	6,0	8,6
Wand	West	0	0,5	1,7	3,8	5,5	7,5

\* Deze metingen zijn uitgevoerd na het verwijderen van de beschadigde toplaag van de bovenzijde van de stempels (zie paragraaf 5.1)

Tabel 6.5: Samenvattend overzicht van de bepaling van de vorstdooibestandheid van het beton van de stempels; per betonmengsel

Mengsel	Aantal metingen	Gemiddeld massaverlies (kg/m <sup>2</sup> ) na .. cycli					
		0	7	14	28	42	56
A	17	0	0,4	1,0	3,4	6,2	8,8
A3	9	0	0,4	1,2	2,5	4,0	5,0
J	4	0	0,1	0,2	1,1	2,1	2,9

## 6.5 Druksterkte

Er zijn twee onderzoeken uitgevoerd naar de druksterkte van het beton:

- Van de kernen die eind 2011 zijn geboord [02] zijn er acht, in het laboratorium van de TU Delft [01], beproefd op druksterkte. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 6.6.
- Van de kernen die in november 2014 zijn geboord [05] zijn er drie beproefd op druksterkte. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 6.7.

Tabel 6.6: Druksterkte van de kernen die zijn geboord eind 2011 [01]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel code	Druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )
115 oost	M115.G.O	Gording	A	43,9
117-oost	M117.G.O	Gording	A	55,9
115-2	M115.st.2	Stempel	A	47,9
117-1	M117.st.1	Stempel	A	48,0
109-west	Control 2	Wand	D/D1	60,7
109-west	Control 3	Wand	D/D1	65,0
110-west	Control 1	Wand	D1	59,8
118-oost	M118.HORZ.O	Wandje		37,4

Tabel 6.7: Druksterkte van de kernen die zijn geboord in november 2014 [05]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel code	Druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )
133-5	50	Stempel	A3	69,4
9	37	Wand		70,5
74	9	Wand		64,8

## 6.6 Microscopisch onderzoek

Er zijn twee series microscopisch onderzoek uitgevoerd aan het beton:

- Op een deel van de kernen die eind 2011 zijn geboord [02] is in het laboratorium van de TU Delft microscopisch onderzoek uitgevoerd [01].
- Op vijf van de kernen die in november 2014 zijn geboord [05] is in het laboratorium van Pelcon microscopisch onderzoek uitgevoerd [12].

De belangrijkste waarnemingen uit het onderzoek door de TU Delft [01] zijn:

- Het beton in alle onderzochte kernen is vervaardigd met CEM III (met een slakgehalte groter dan 50%) en vliegias.
- De carbonatatie diepte in het beton varieert van 5 – 22 mm (zie ook paragraaf 6.3). In het gecarbonateerde beton is sprake van een relatief hoge capillaire porositeit.
- In het niet-gecarbonateerde beton is sprake van een relatief hoge capillaire porositeit in de zone direct rondom de toeslagkorrels (de aanhechtingszone tussen toeslag en cementsteen) en een relatief lage capillaire porositeit in het

midden van de cementsteen (het cementsteen verder weg van de toeslagkorrels).

De belangrijkste waarnemingen uit het onderzoek door Pelcon [12] zijn (zie ook TNO rapport [10]):

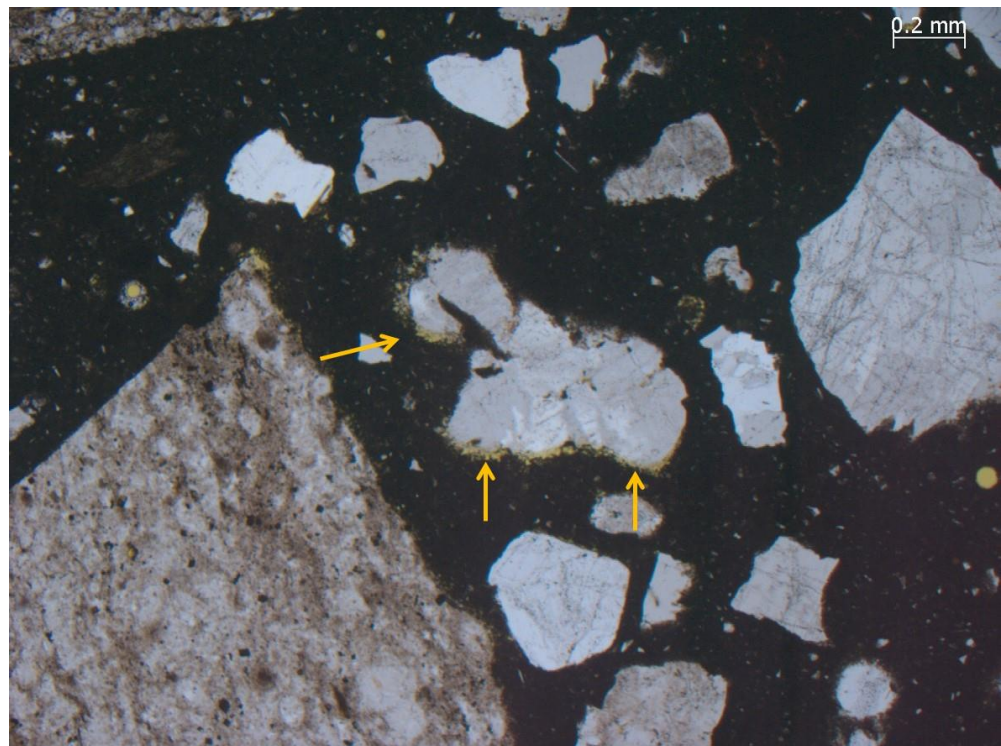
1. Cementtype
  - a. Er is sprake van beton op basis van een bindmiddel met hoogovenslak en Portland klinker, vergelijkbaar met een CEM III/B dan wel mengsel met een lager slakgehalte vergelijkbaar met een CEM III/A.
  - b. In alle monsters is een geringe hoeveelheid (< 5%) poederkoolvliegias aangetroffen.
2. Water/cementfactor
  - a. Pelcon constateert dat de capillaire porositeit, opgegeven als een equivalente water-cement factor, varieert van ongeveer 0,35 tot 0,60. In drie monsters is de capillaire porositeit van het oppervlakte beton hoger dan het dieper gelegen beton. In kern 38 is de capillaire porositeit van het dieper gelegen beton hoger dan van het oppervlakte beton.
3. Cementgehalte
  - a. Op basis van point counting berekent Pelcon de samenstelling van het beton. Voor het bepalen van het watergehalte is gebruik gemaakt van een berekening op basis van het gemiddelde van de w/c factor van de boven- en de onderkant van de kern, zoals die is bepaald door Pelcon. De door Pelcon berekende samenstelling in kg/m<sup>3</sup> is weergegeven in tabel 6.8.
4. Porositeit, microstructuur en aantasting
  - a. Er wordt geconstateerd dat het beton direct onder (het in alle gevallen reeds verdwenen) oorspronkelijke oppervlak gecarbonateerd is en in de gecarbonateerde zone bijzonder poreus is, met veel krimpscheuren in kern 38 en onthechting van toeslag in kernen 36 en 39. Tevens wordt geconcludeerd dat dit deel van het beton is aangetast ten gevolge van een combinatie van vorst, biologische groei en erosie. Over de oorspronkelijke oorzaak van de kennelijk verminderde betonkwaliteit direct onder het oppervlak wordt geen uitspraak gedaan.
  - b. Pelcon meldt dat de buitenste 45 mm van het beton in alle kernen gebreken ('flaws') vertoont die het gevoelig maken voor aantasting (zie figuur 6.1 en 6.2).

Tabel 6.8: Betonsamenstelling (per m<sup>3</sup> beton) gebaseerd op point counting, zoals gerapporteerd door Pelcon [12]

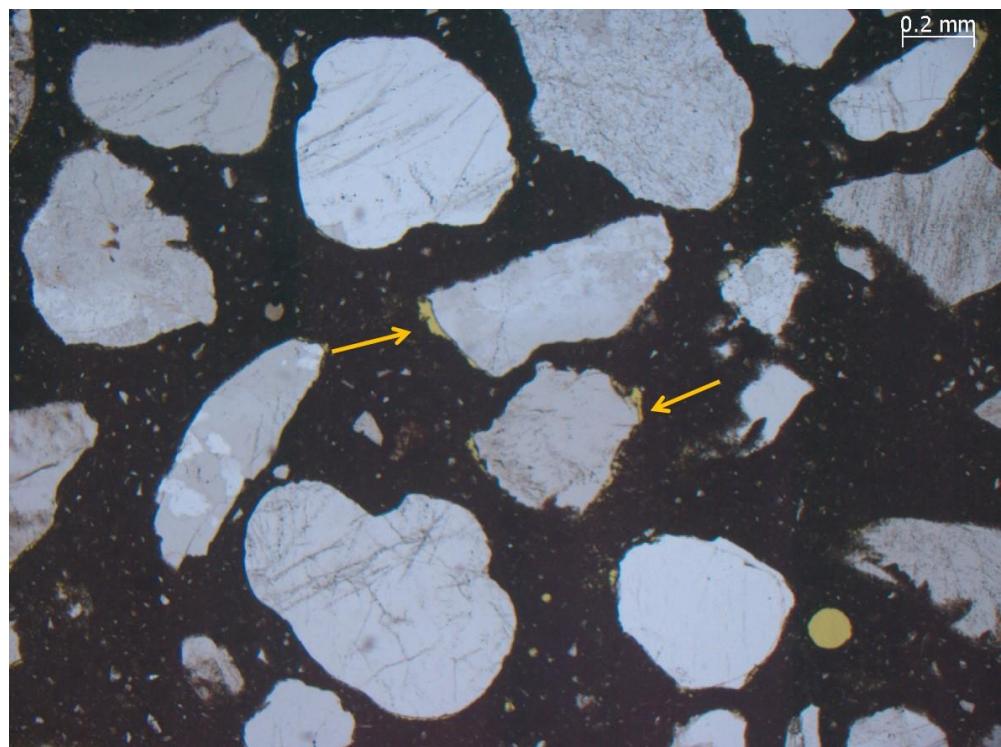
<i>Kern</i>	36	37	38	39	40
Grove toeslag (kg)	1055	1091	1073	1068	1053
Fijne toeslag (kg)	886	804	821	822	842
Cement (kg)	354	345	350	335	335
Water (kg)	138	159	157	164	142
Gemiddelde wcf <sup>2</sup>	0,39	0,46	0,45	0,49	0,43

<sup>1</sup> De door Pelcon aangenomen dichtheden zijn: 2670 kg/m<sup>3</sup> voor grof toeslagmateriaal, 2630 kg/m<sup>3</sup> voor fijn toeslagmateriaal en 2950 kg/m<sup>3</sup> voor cement.

<sup>2</sup> Gemiddelde water/cementfactor van boven en onderkant van de kern.



*Figuur 6.1: Microscopische opname van onvolkomenheden in de aansluiting cementsteen – grof toeslagmateriaal (kern 36; circa 20 mm onder oppervlak)*



*Figuur 6.2: Microscopische opname van onvolkomenheden in de aansluiting cementsteen – grof toeslagmateriaal (kern 36; circa 40 mm onder oppervlak)*

## 7 Analyse van de reeds uitgevoerde onderzoeken

Ten behoeve van het onderzoek naar de optredende aantastingsmechanismen heeft TNO een samenvattend overzicht opgesteld van de van belang geachte onderzoeksresultaten, inclusief een eerste interpretatie van die onderzoeksresultaten. De resultaten hiervan zijn besproken en verder geanalyseerd in twee expertmeetings, op 3 augustus en 28 september 2017, met afgevaardigden van:

- ProRail (de heer Den Boer)
- Movares (de heer De Moor)
- SGS Intron (de heer Swinkels)
- TNO (de heren Borsje, Kruihof en De Rooij).

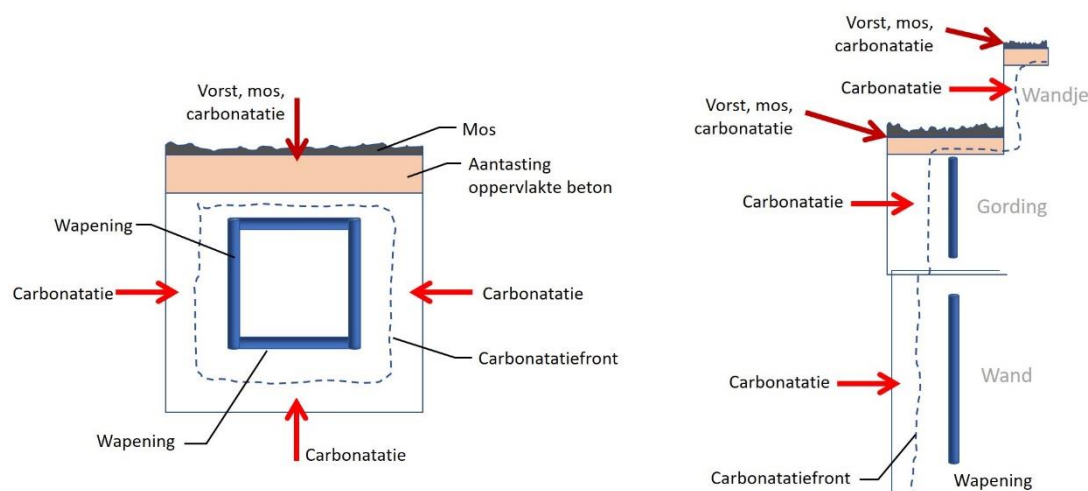
De resultaten van deze expertmeeting zijn verwerkt in het onderhavige hoofdstuk en in de volgende twee hoofdstukken.

### 7.1 Algemeen

In een eerder door TNO opgestelde rapportage is reeds een algemeen beeld geschetst van de optredende (schade)processen in het beton van TRN (rapport [10]). In dat rapport is aangegeven dat er sprake is van twee aantastingsituaties:

1. Op horizontale vlakken een proces waarbij vorst, carbonatatie en mosgroei een rol spelen.
2. Op zij- en ondervlakken een mechanisme waarbij carbonatatie een hoofdrol speelt.

In figuur 7.1 zijn deze mechanismen schematisch aangegeven voor de meest voorkomende constructie onderdelen van de TRN.



Figuur 7.1: Voornaamste geconstateerde aantastingsituaties geschematiseerd voor een dwarsdoorsnede van een stempel, wand, gording en wandje.

Om deze processen nader te analyseren geeft het onderhavige hoofdstuk een analyse van de volgende aspecten:

- Mosgroei (paragraaf 7.2). Nagegaan wordt welke informatie over de mosgroei beschikbaar is gekomen uit de waarnemingen en tot welke bevindingen dit leidt.
- Carbonatatie diepte (paragraaf 7.3). Nagegaan wordt welke informatie uit de metingen aan de verschillende onderdelen van de constructie en aan de



verschillende betonsoorten beschikbaar is gekomen en tot welke bevindingen dit leidt.

- Vorstdooibestandheid (paragraaf 7.4). Nagegaan wordt welke informatie uit de metingen naar de vorstdooibestandheid van het beton beschikbaar is gekomen en tot welke bevindingen dit leidt.

## 7.2 Mosgroei

Tijdens de visuele inspectie zijn enkele waarnemingen gedaan die belangrijke informatie verschaffen ten aanzien van de mosgroei:

- Op de stempels die onder een viaduct zijn gepositioneerd is geen sprake van mosgroei en bij de stempels die deels onder een viaduct zijn gepositioneerd vertonen alleen de delen naast het viaduct mosgroei (figuur 5.3). Hieruit wordt geconcludeerd dat de mosgroei alleen kan optreden als sprake is van directe zonbestraling en/of directe benatting door regen.
- De mosgroei is alleen aanwezig op horizontale vlakken en op de bovenrand van zijkanten, die als gevolg van weglappend regenwater relatief lang nat blijven. Hieruit wordt geconcludeerd dat van de bij het vorige punt genoemde invloedsfactoren de directe benatting hoogstwaarschijnlijk maatgevend is.
- Op één locatie is ter plaatse van een overgang van een gording naar een wand sprake van een scherpe begrenzing in mosgroei (figuur 5.7). Hieruit wordt geconcludeerd dat als het beton is gepositioneerd in een omgeving waar mosgroei kan ontstaan, dat dan de kwaliteit van het betonoppervlak bepalend is voor het al dan niet ontstaan van mosgroei.

De kwaliteit van het betonoppervlak wordt bepaald door de samenstelling van het beton en door de uitvoering (nabehandeling en weersomstandigheden ten tijde van de verharding). Om meer inzicht te verkrijgen in deze aspecten zijn de resultaten van de opname van de mate van mosgroei op de bovenzijde van de stempels en de gordingen nader beoordeeld, op de volgende wijzen:

- Om inzicht te krijgen in de effecten van de betonsamenstelling is voor zowel de stempels als de gordingen *per toegepaste betonsamenstelling* het gemiddelde bepaald van het percentage van het oppervlak waarover sprake was van mosgroei (zie bijlage A). De resultaten daarvan zijn weergegeven in tabel 7.1. Op basis van deze tabel wordt geconcludeerd dat de betonsamenstelling hoogstwaarschijnlijk invloed heeft op de mate van mosgroei. Bij de mengsels J en T is vrijwel geen sprake van mosgroei en bij de mengsels A, A3 en C is wel sprake van duidelijke mosgroei. Uit tabel 3.2 volgt dat de mengsels J en T een berekende water-cementfactor hebben van 0,45 en de mengsels A, A3 en C van 0,53-0,54. Verder is bij de mengsels J en T geen vliegias toegepast en is bij de mengsels A, A3 en C een deel van het cement vervangen door vliegias. De betonmengsels die het meest vatbaar lijken voor mosgroei zijn de mengsels met een hogere water-cementfactor én met een deel van het cement vervangen door vliegias.
- Ten aanzien van de nabehandeling geldt dat in rapport [02] is aangegeven dat alle horizontale betonoppervlakken op eenzelfde wijze zijn nabehandeld, namelijk met een curing compound. Dat betekent dat er geen variatie is geweest in de wijze van nabehandelen, die bepalend geweest zou kunnen zijn voor de verschillen in de mate van mosgroei. Dit zegt echter nog niets over de effectiviteit van de gekozen wijze van nabehandelen (zie volgende bullet).

- Voor de nabehandeling van beton geldt dat de wijze en de duur daarvan afgestemd moet worden op het betonmengsel in combinatie met de weersomstandigheden ten tijde van de verharding van het beton. Een lage temperatuur zorgt voor een langzame hydratatie (microstructuurontwikkeling) van het beton, waardoor langere nabehandeling nodig zou zijn voor de ontwikkeling van een goede oppervlaktezone van het beton. Een hoge temperatuur zorgt voor een snellere ontwikkeling van het beton, maar is daarbij ook gevoelig voor het tijdstip van nabehandeling, omdat verdamping vanuit het oppervlak dan vaak ook snel gaat (zie de gewasverdampingsgrafieken). In de onderhavige situatie is sprake geweest van een uniforme wijze van nabehandelen voor alle horizontale betonoppervlakken (zie vorige bullet), die niet is afgestemd op het betonmengsel, noch op de weersomstandigheden ten tijde van de uitvoering. Dit betekent dat de effectiviteit van de nabehandeling van invloed kan zijn geweest op de kwaliteit van de oppervlaktezone van het beton.
- Om inzicht te krijgen in de effecten van de weersomstandigheden ten tijde van de verharding van het beton is, voor zowel de stempels als de gordingen, voor zover bekend, *per stortdatum* het percentage van het oppervlak waarover sprake was van mosgroei vastgesteld (zie bijlage A). Vervolgens is die informatie uitgezet in een grafiek (figuur 7.2). In figuur 7.2 is voor de betreffende stortdagen tevens de gemiddelde dagtemperatuur en de gemiddelde gewasverdamping weergegeven, zoals gemeten op weerstation Rotterdam van het KNMI. Uit een vergelijking van deze drie grafieken lijkt het dat de hoogste percentages mosgroei zijn ontstaan op onderdelen die zijn gestort in een periode met relatief lage temperaturen en/of hoge gewasverdamping. Beide aspecten wijzen op een relatie met de effectiviteit van de nabehandeling.

In rapport [01] is een notitie opgenomen met de resultaten van een beknopte literatuurstudie naar mosgroei op beton. Daarin is aangegeven dat mosgroei voornamelijk voorkomt op betonoppervlakken die relatief lang nat zijn (horizontale bovenvlakken) en die matig alkalisch zijn (gecarbonateerd beton). Bij een onvoldoende effectieve nabehandeling van het beton blijft het betonoppervlak poreuzer en zal het beton oppervlakkig carbonateren. Dit zorgt voor een betonoppervlak dat, na regenval, relatief lang nat blijft en dat matig alkalisch is. Daarmee ontstaat een situatie die gunstig is voor mosgroei.

In 2012 is de bovenzijde van de stempels gereinigd, waarna een impregneermiddel is aangebracht. Tijdens de inventarisatie in 2017, circa 5 jaar later, bleek dat bij het merendeel van de stempels in geringe mate sprake was van nieuwe mosgroei, maar dat deze mosgroei duidelijk minder omvangrijk was dan de mosgroei die in de periode na aanleg werd aangetroffen. Dit is mogelijk veroorzaakt doordat het impregneermiddel van de herstelactie in 2012 het betonoppervlak dichter heeft gemaakt, waardoor het, na regenval, minder lang nat blijft. Het is echter ook mogelijk dat oorspronkelijk sprake was van een poreuze toplaag, die bij het reinigen, voorafgaand aan het impregneren, is verwijderd. Een andere verklaringsrichting zou kunnen liggen in de gekozen curing compound. Het zou kunnen zijn dat de oorspronkelijk aanwezige curing compound gebruikt tijdens de aanleg een goede voedingsbodem was voor de mossen.

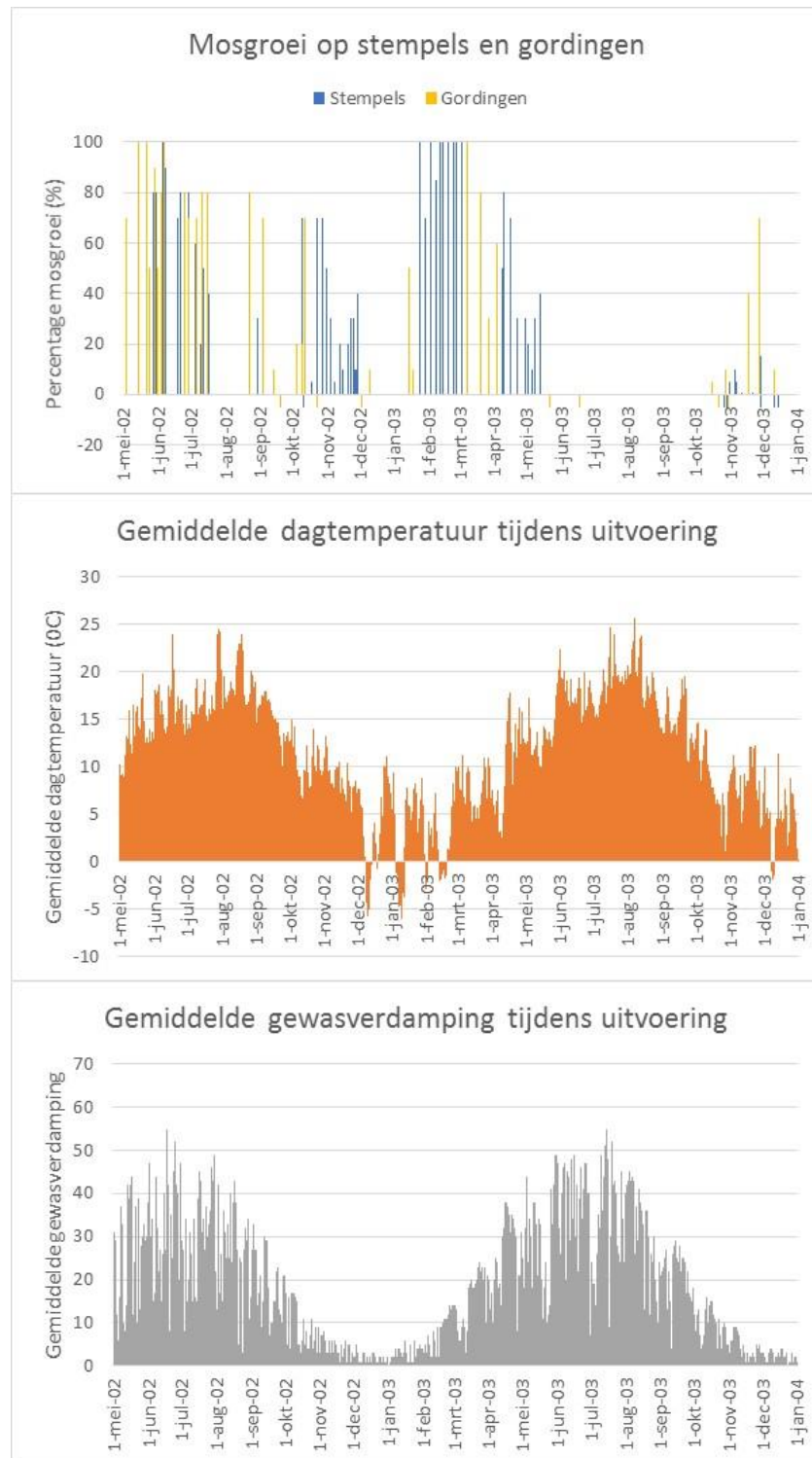
Tijdens de inventarisatie in 2017, circa 5 jaar na het reinigen en impregneren van de stempels, zijn de stempels ook opnieuw ingedeeld in klassen. In maart 2017 is een deel van de stempels ingedeeld in staalkaartklassen (klasse 1 tot en met 5; zie paragraaf 5.5 [11]) en in september 2017 is een deel van de stempels ingedeeld in categorieën (categorie 1 tot en met 5; zie paragraaf 5.6 [15]). Voor de stempels waarbij dat mogelijk is, is het oorspronkelijk opgenomen percentage mosgroei

(2012 [01]) vergeleken met de klasse-indelingen in 2017 ([11] en [15]); zie de figuren 7.3 en 7.4. Uit deze figuren blijkt het volgende:

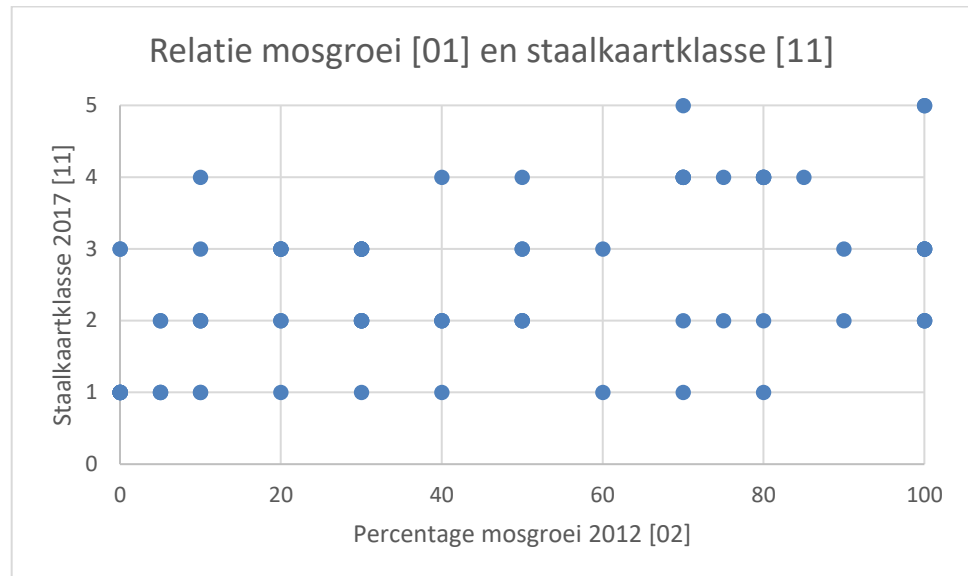
- De stempels die in 2017 zijn ingedeeld in de hoogste klassen (klasse 4 en 5), hadden in 2012 veelal een relatief hoog percentage mosgroei.
- Andersom geldt dit echter niet. De stempels die in 2012 een relatief hoog percentage mosgroei hadden, zijn in 2017 verdeeld over vrijwel alle klassen.

Tabel 7.1: Percentage van mosgroei op het bovenoppervlak van de stempels en gordingen in 2012 – per toegepast betonmengsel

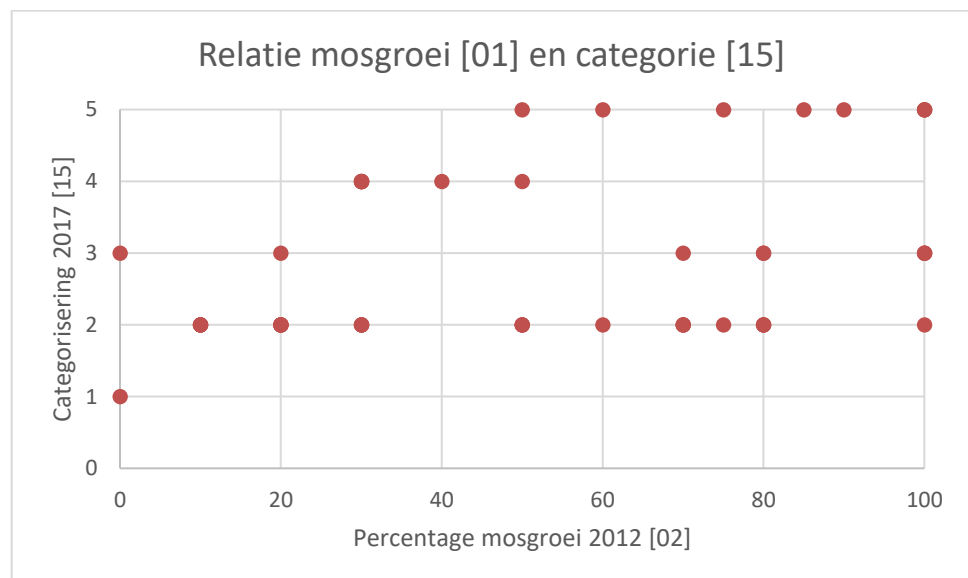
Mengsel	Aantal	Mosgroei (%) op het oppervlak (gemiddeld)
Stempels		
A	62	48
A3	7	80
J	11	3
Gordingen		
A	48	42
C	1	80
T	5	3



Figuur 7.2: Percentage mosgroei op stempels en gordingen per stortdatum (geen mosgroei in weergegeven als "-5%"); gemiddelde dagtemperatuur en gewasverdamping gemeten op weerstation Rotterdam van het KNMI over dezelfde periode.



Figuur 7.3: Relatie tussen percentage mosgroei zoals vastgesteld in 2012 [01] en staalkaartklasse zoals vastgesteld in maart 2017 [11]



Figuur 7.4: Relatie tussen percentage mosgroei zoals vastgesteld in 2012 [01] en categorisering zoals vastgesteld in september 2017 [15]

### 7.3 Carbonatatie diepte

In het algemeen geldt ten aanzien van de uitgevoerde metingen dat voor het betrouwbaar meten van de carbonatatie diepte in beton de meting moet worden uitgevoerd aan een vers breukvlak (NEN EN 14630 (2006)) of op een slijpplaatje (zoals uitgevoerd de TU Delft [01]). Voor het overgrote deel van de metingen geldt dat deze ofwel op de buitenomtrek van een boorkern of op de binnenomtrek van een boorgat zijn uitgevoerd. Dit betekent dat de precisie van het merendeel van de meetwaarden beperkt is. Ze kunnen echter wel voor algemene trendanalyses gebruikt worden.

Ten aanzien van het carbonateren van beton geldt dat de samenstelling van het beton een belangrijke invloed daarop heeft. Om inzicht te krijgen in het effect van de betonsamenstelling is, *per toegepaste betonsamenstelling*, het gemiddelde bepaald van de carbonatatie diepte. De resultaten daarvan zijn weergegeven in tabel 6.3 (voor alle constructieonderdelen gezamenlijk) en in tabel 7.2 (opgesplitst naar constructieonderdeel). Op basis van deze tabellen wordt geconcludeerd dat de betonsamenstelling (tabel 7.3) de volgende invloed heeft op de carbonatatie diepte:

- Mengsel J heeft een gemiddelde carbonatatie diepte van 2,8 mm en dat is een beduidend geringere carbonatatie diepte dan die in de overige mengsels. Mengsel J heeft de laagste berekende water-cementfactor (0,45) en het hoogste aandeel CEM I in het cement. Deze twee factoren zijn vermoedelijk bepalend geweest voor de relatief lage carbonatatie diepte.
- De mengsels A en D hebben een vergelijkbare samenstelling en de gemiddelde carbonatatie diepte in deze mengsels is ook enigszins vergelijkbaar; mengsel A gemiddeld circa 10 mm en mengsel D gemiddeld 8,5 mm.
- Mengsel M heeft een gemiddelde carbonatatie diepte van 11,0 mm en is daarmee iets hoger dan bij de mengsels A en D. Omdat mengsel M een lagere water-cementfactor heeft dan de mengsels A en D en ook een hoger cementgehalte, werd verwacht dat de carbonatatie diepte in dit mengsel juist lager zou zijn. Dat de carbonatatie diepte toch hoger is, is zeer waarschijnlijk veroorzaakt doordat de metingen op mengsel M zijn uitgevoerd op onderdelen in het gesloten deel van de tunnel, in een semi binnenmilieu. Dit milieu is typisch droger dan beton in weer en wind, waardoor verwacht mag worden dat de carbonatatie in het drogere milieu sneller gaat. Tevens blijkt hieruit dat de expositie omstandigheid ook een invloed heeft op de carbonatatie diepte.
- Mengsel C heeft de hoogste gemiddelde carbonatatie diepte 15,7 mm. Op basis van de betonsamenstelling kan niet direct een verklaring worden gevonden voor deze relatief hoge carbonatatie diepte, daar de samenstelling overeenkomsten vertoont met de mengsels A en D.
- Samenvattend volgt uit het voorgaande dat de water-cementfactor van het beton en de expositieomstandigheden (binnen/buiten) waarschijnlijk bepalende factoren zijn geweest voor de carbonatatie van het beton. Dit is in lijn met hetgeen op basis van algemene wetmatigheden verwacht wordt.

Tabel 7.2: Gemiddelde carbonatatie diepte per betonmengsel en per constructieonderdeel

Mengsel	Onderdeel	Carbonatatie diepte (mm)			
		Gemiddeld	Minimum	Maximum	Aantal metingen
A	Gordingen	10,3	4,2	19,8	9
A	Stempel	9,6	1,0	23,0	29
C	Dak en wand, deels in gesloten en deels in open deel	15,7	3,0	30,0	19
D	Dak en wand, deels in gesloten en deels in open deel	8,5	3,0	16,0	13
J	Stempel	2,8	1,0	5,0	8
M	Dak en wand in gesloten deel	11,0	0,0	24,7	16

Tabel 7.3: Informatie over de toegepaste betonmengsels

Mengsel	Betonsamenstelling			
	CEM III/B 42,5 (kg/m <sup>3</sup> )	CEM I 52,5R (kg/m <sup>3</sup> )	Vliegas (kg/m <sup>3</sup> )	Berekende water- cementfactor
A	280-320	0	30	0,54
C	300-340	0	0-40	0,53
D	280-320	0	30	0,55
J	280-320	80	0	0,45
M	320-360	0	10	0,50

In tabel 6.2 is de gemiddelde carbonatatie diepte weergegeven voor de verschillende onderdelen van de constructie en bij enkele onderdelen ook voor de verschillende zijden van de onderdelen. Uit deze tabel blijkt het volgende:

- Bij een aanzienlijk deel van de constructieonderdelen is de gemiddelde carbonatatie diepte circa 10 mm of meer. Voor een constructie van bijna 10 jaar is dat een relatief hoge carbonatatie diepte.
- Op enkele locaties is op twee momenten in de tijd een meting uitgevoerd naar de carbonatatie diepte. Het aantal metingen is echter te beperkt om dit te gebruiken voor een bepaling van de snelheid van de carbonatatie in de tijd.
- Er zijn weliswaar verschillen waar te nemen tussen de constructieonderdelen en de zijden, maar het aantal metingen per onderdeel en per betonmengsel is te gering om hieruit duidelijke conclusies te trekken.
- In figuur 7.1 is aangegeven dat aan de horizontale vlakken, zoals de bovenzijde van de stempels, sprake is van een combinatie van mosgroei en carbonatatie van het beton. Deze mosgroei kan zowel een versterkend effect hebben op de carbonatatie diepte (aantasting van het betonoppervlak resulteert in materiaalverlies en daardoor in een mindere weerstand voor toetreding van kooldioxide) als een vertragend effect (als het beton nat blijft gaat carbonatatie niet door). Zowel voor de gordingen als voor de stempels geldt dat de gemiddelde carbonatatie diepte in de bovenzijde minder is dan in de overige zijden. Op basis hiervan wordt verwacht dat de mosgroei geen versterkende invloed heeft gehad op de carbonatatie van het beton.

Tot slot dient vermeld te worden dat alle mengsels zijn vervaardigd met Hoogovencement (CEM III) en bij een deel in combinatie met vliegas. Deze mengsels zijn relatief gevoelig voor nabehandeling. Onvoldoende effectieve nabehandeling resulteert in een poreuze zone aan het buitenoppervlak van het beton. Dit heeft mogelijk een rol gespeeld bij de hoge carbonatatie van het beton.

#### 7.4 Vorstdooibestandheid

In het algemeen geldt ten aanzien van de uitgevoerde metingen naar de vorstdooibestandheid van het beton het volgende:

- De metingen op de bovenzijde van de stempels zijn uitgevoerd nadat er herstelmaatregelen waren uitgevoerd, in de vorm van het verwijderen van het aangetaste beton en het aanbrengen van een impregneermiddel.

- De meetresultaten geven een relatief grote spreiding in meetwaarden. Zo is bijvoorbeeld in de zijkanten van de stempels, na 56 cycli, een gemiddeld massaverlies gemeten van  $8,6 \text{ kg/m}^2$ , met een variatie in de meetwaarden van  $3 - 18 \text{ kg/m}^2$ . Om deze reden zijn geen individuele meetresultaten beoordeeld, maar alleen gemiddelden.
- Ter indicatie van de aantastingsdiepte bij deze proeven geldt dat een massaverlies van  $7 \text{ kg/m}^2$  overeenkomt met een laagdikte van het beton van circa 3 mm.

Analoog aan de analyse van de mosgroei en de carbonatatie diepte, zoals weergegeven in de vorige paragrafen, is per toegepaste betonsamenstelling het gemiddelde bepaald van alle gemeten waarden voor de vorstdooibestandheid. De resultaten daarvan zijn weergegeven in tabel 6.5. Op basis van deze tabel wordt geconcludeerd dat de betonsamenstelling (tabel 3.2) zeer waarschijnlijk invloed heeft op de vorstdooibestandheid van het beton:

- Mengsel J heeft bij de proeven het minste materiaalverlies gegeven. Dit is zeer waarschijnlijk te verklaren met het feit dat dit het mengsel is met de laagste water-cementfactor (0,45)
- Mengsel A3 heeft bij de proeven minder materiaalverlies dan mengsel A. Dit is zeer waarschijnlijk te verklaren met het feit dat mengsel A is vervaardigd met alleen CEM III en dat bij mengsel A3 een deel van het CEM III is vervangen door CEM I. De berekende water-cementfactoren van beide mengsels is 0,54.

In tabel 6.4 is de gemiddelde vorstdooibestandheid weergegeven voor de verschillende zijden van de stempels. Na 56 cycli had de bovenzijde minder materiaalverlies dan de onderzijde en de zijkanten. Dit zou veroorzaakt kunnen zijn door de effectiviteit van de nabehandeling van het beton van de stempels. Het zou echter ook verklaard kunnen worden met het feit dat de proeven op de bovenzijde zijn uitgevoerd nadat deze waren gereinigd, waarbij mogelijk een zwakke buitenhuid is verwijderd.

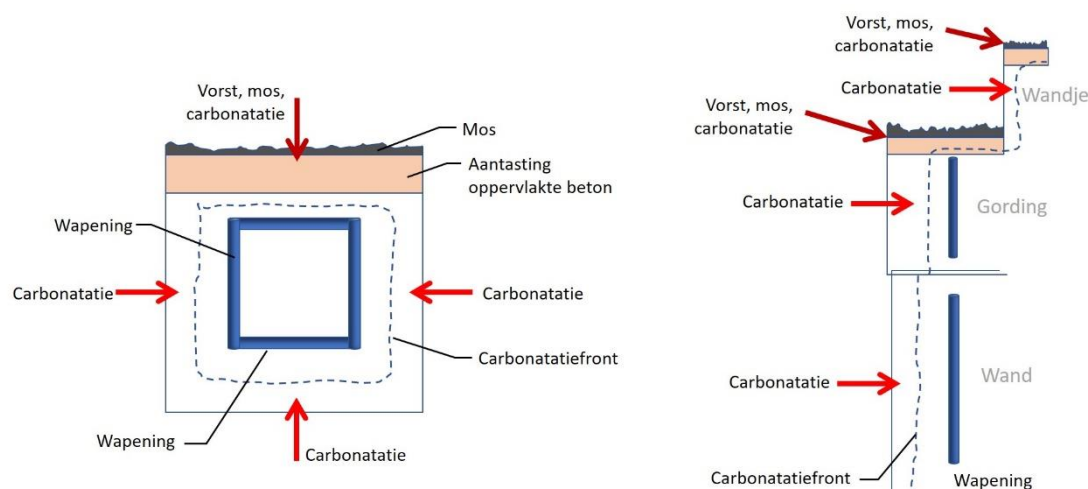


## 8 Consequenties voor de levensduur

### 8.1 Algemeen

Zoals aangegeven in het vorige hoofdstuk is er sprake van twee aantastingssituaties (figuur 8.1):

1. Op horizontale vlakken een proces waarbij vorst, carbonatatie en mosgroei een rol spelen.
2. Op zij- en ondervlakken een mechanisme waarbij carbonatatie een hoofdrol speelt.



Figuur 8.1: Voornaamste geconstateerde aantastingssituaties geschematiseerd voor een dwarsdoorsnede van een stempel, wand, gording en wandje.

Verder zijn in hoofdstuk 4 de volgende criteria geïdentificeerd voor het toetsen van de technische levensduur:

- A. Het bereiken van een minimale dwarsdoorsnede van de stempels, die vanuit constructief oogpunt nodig is voor de stempelwerking.
- B. Het bereiken van een minimale dekking op de wapening aan de bovenzijde van de stempels, die benodigd is voor de brandveiligheid van de stempels.
- C. Het bereiken van de wapening door het carbonatatiefront. Dit aspect speelt een rol bij alle constructieve betonnen onderdelen van TRN.

Als deze twee zaken worden gecombineerd volgt ten aanzien van de levensduur van het beton van TRN het volgende:

1. Op de horizontale vlakken (bovenzijde) is sprake van materiaalverlies door vorstschade en van carbonatatie van het beton. Bij de stempels resulteert het materiaalverlies in een reductie van de dwarsdoorsnede (*criterium A*) en een afname van de betondekking op de wapening (*criterium B en C*). Op de gordingen en de wandjes is met name sprake van een afname van de betondekking (*criterium C*).
2. Op de zij- en ondervlakken is geen sprake van materiaalverlies van het beton. Daar is echter wel sprake van carbonatatie van het beton. Indien het carbonatatiefront de wapening bereikt, kan wapeningscorrosie ontstaan (*criterium C*).

Deze twee levensduuraspecten worden in dit hoofdstuk in separate paragrafen verder uitgewerkt.

## 8.2 Materiaalverlies door vorstschade

Ten aanzien van de horizontale oppervlakken (bovenzijde) van de stempels, gordingen en wandjes is uit het onderzoek het volgende naar voren gekomen:

- In het verleden is vorstschade ontstaan.
- Er is sprake van mosgroei op het oppervlak.
- Het horizontale betonoppervlak is gecarbonateerd tot een gemiddelde diepte van circa 3 – 10 mm, met een relatief grote variatie ten opzichte van het gemiddelde. In de gecarbonateerde zone is het beton bijzonder poreus.
- In de buitenste 45 mm van het beton is sprake van gebreken die het beton gevoelig maken voor aantasting.

Startpunt voor het ontstaan van de bovengenoemde combinatie van factoren is vrijwel zeker een poreuze oppervlaktezone van het beton geweest. Factoren die een rol spelen bij een dergelijk poreuze oppervlaktezone zijn:

- De betonsamenstelling, en dan met name de water-cementfactor. Een hogere water-cementfactor leidt tot een initieel hogere poreuze startsituatie.
- De effectiviteit van de nabehandeling. Het beton in de oppervlaktezone kan zich goed ontwikkelen en dichtgroeien bij een effectieve nabehandeling, waarbij de methode en duur van de nabehandeling is afgestemd op het betonmengsel en de weersomstandigheden. Er kunnen vraagtekens worden gezet bij de effectiviteit van de gekozen nabehandeling, met name voor de betonmengsels met een hogere water-cementfactor en voor de mengsels met Hoogovencement (CEM III) in combinatie met vliegas.
- De carbonatatie van het beton. Omdat het beton is vervaardigd met Hoogovencement (CEM III), heeft de carbonatatie het beton poreuzer gemaakt.

Door deze verhoogde porositeit van het oppervlak van het beton is het beton gevoelig voor vorstschade, die dan ook daadwerkelijk is ontstaan.

De verhoogde porositeit van het betonoppervlak zorgt er ook voor dat het beton na benatting relatief lang nat blijft, waardoor mosgroei kan ontstaan. Eenmaal aanwezige mosgroei zorgt ervoor dat het beton na benatting langer nat blijft dan beton zonder mos, waardoor het nog gevoeliger wordt voor vorstschade.

Een ander startpunt voor de porositeit van het betonoppervlak zou de mosgroei kunnen zijn. Deze mosgroei zou dan het beton hebben aangetast, waardoor de verhoogde porositeit van het betonoppervlak is ontstaan. Deze volgorde wordt echter minder waarschijnlijk geacht, omdat het mos alleen maar oppervlakkig aanwezig is en dus alleen oppervlakkige aantasting zou kunnen geven.

Uit de in het vorige hoofdstuk weergegeven analyse volgt dat het al dan niet optreden van de bovengenoemde processen afhankelijk is van de toegepaste betonsamenstelling. Daarbij zijn de toegepaste betonsamenstellingen voor de gordingen, stempels en wandjes globaal te verdelen in twee groepen:

1. De mengsels J en T met een berekende water-cementfactor van 0,45 en zonder vliegas.

2. De mengsels A, A3, C, D en D1 met een berekende water-cementfactor van circa 0,55 en met vlieg-as.

#### Groep 1 - Mengsels J en T:

Bij de mengsels J en T is vrijwel geen sprake van mosgroei. Verder geldt dat bij mengsel J de carbonatatie diepte beduidend minder is dan bij de mengsels van groep 2 en dat mengsel J ook beduidend betere resultaten heeft gegeven in de vorstbestandheidsproeven. Tot slot geldt dat bij de inventarisatie in maart 2017 de stempels die zijn vervaardigd met mengsel J waren ingedeeld in staalkaartklasse 1, de klasse met vrijwel geen schade.

#### Groep 2 - Mengsels A, A3, C, D en D1:

Bij de mengsels A, A3, C, D en D1 is sprake van ernstige mosgroei, een hogere carbonatatie diepte en van mindere resultaten bij de vorstbestandheidsproeven, ten opzichte van de mengsels in groep 1. Tot slot geldt dat bij de inventarisatie in maart 2017 de stempels die zijn vervaardigd met mengsels uit groep 2 deels waren ingedeeld in hogere staalkaartklassen, de klassen met schade.

Op basis van het voorgaande wordt, voor de onderdelen die zijn vervaardigd met een mengsel uit groep 2, verwacht dat de vorstschade in de toekomst verder zal toenemen. Het beton is namelijk tot een grotere diepte gecarbonateerd en heeft daardoor een relatief poreuze buitenhuid, die gevoelig is voor vorstschade. Er zijn geen voorspellingsmodellen beschikbaar voor de ontwikkeling van vorstschade in de tijd en er is ook niet bekend in welke mate de reeds aangebrachte impregnering een remmend effect heeft op het ontstaan van vorstschade. Daardoor kan ook niet worden vastgesteld of de vorstschade, binnen de technische levensduur, zal resulteren in een ontoelaatbare hoeveelheid materiaalverlies.

Voor de onderdelen die zijn vervaardigd met een mengsel uit groep 1, die nog geen vorstschade vertonen, wordt de kans klein geacht dat daar in de toekomst alsnog vorstschade zal ontstaan.

### **8.3 Carbonatatie geïnitieerde wapeningscorrosie**

Uit een beperkt aantal metingen naar de betondekking op de wapening in de stempels, het dak en de wanden blijkt dat de gemiddelde betondekking varieert van 53 tot 64 mm.

Ten aanzien van de carbonatatie diepte in het beton geldt dat er sprake is van een relatief grote spreiding in meetwaarden. In het vorige hoofdstuk is aangegeven dat door de methode van bepaling de precisie van de metingen beperkt is, maar dat is waarschijnlijk niet de oorzaak van de relatief grote spreiding.

Voor de stempels, gordingen en wandjes geldt dat deze allemaal in een buitenmilieu zijn gesitueerd en dus onder vergelijkbare omgevingsomstandigheden verkeren. Dat betekent dat de betonsamenstelling, zoals is aangegeven in het vorige hoofdstuk, waarschijnlijk een belangrijke parameter is geweest voor de snelheid waarmee het beton is gecarbonateerd. Daarom wordt onderstaand een nadere analyse uitgevoerd op basis van de toegepaste betonmengsels.

Ook voor de carbonatatie geldt dat er een duidelijk onderscheid is aangetroffen tussen de mengsels in groep 1 en in groep 2 (zie vorige paragraaf). Voor mengsel J (groep 1) is een gemiddelde carbonatatie diepte gemeten van 3 mm, met een

spreiding van 1 tot 5 mm. Voor de mengsels A, C en D (groep 2) is een gemiddelde carbonatatie diepte gemeten van 9 tot 16 mm, met een spreiding van 1 tot 30 mm.

De ontwikkeling van de carbonatatie diepte in de tijd kan worden benaderd met de formule:  $CD = A * \sqrt{t}$

Met

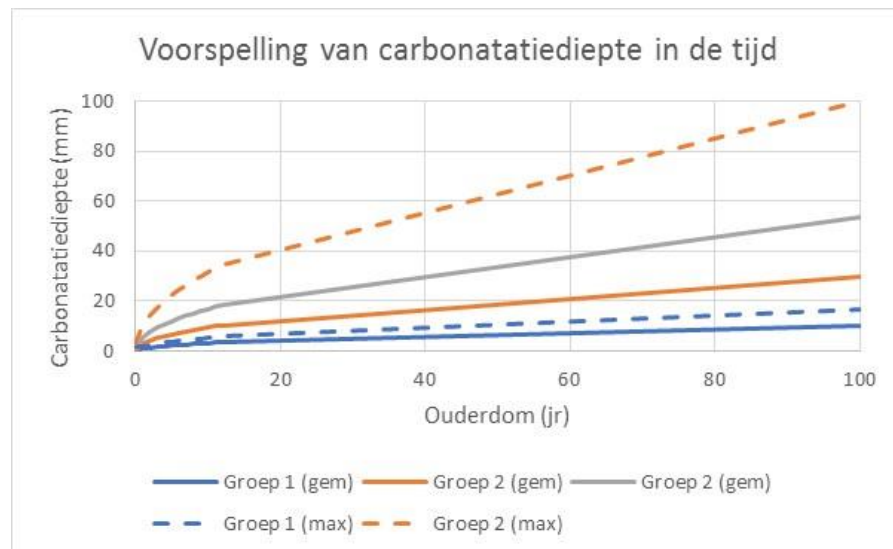
$CD$  = carbonatatie diepte (mm)

$A$  = constante, die onder andere afhankelijk is van de betonkwaliteit

$t$  = tijd in jaar

Uitgaande van een ouderdom van de constructie van circa 9 jaar ten tijde van de metingen, kan met deze formule het volgende worden berekend ten aanzien van de verwachte carbonatatie diepte op een ouderdom van 100 jaar (figuur 8.2):

- Voor mengsel J (groep 1) neemt de gemiddelde carbonatatie diepte (3 mm) toe tot 10 mm en neemt de maximale waarde (5 mm) toe tot 17 mm.
- Voor de mengsels A, C en D (groep 2) neemt de gemiddelde carbonatatie diepte (9-16 mm) toe tot 30-53 mm en neemt de maximale waarde (30 mm) toe tot 100 mm.



Figuur 8.2: Voorspelling van het verloop van de carbonatatie diepte in de tijd

Voor de onderhavige situatie is het echter ook mogelijk dat er, als gevolg van onvoldoende effectieve nabehandeling, sprake is geweest van vroegtijdige uitdroging van het beton. Dit kan hebben geresulteerd in een "initiële" carbonatie van het beton, waardoor de bovengenoemde formule moet worden aangepast tot:

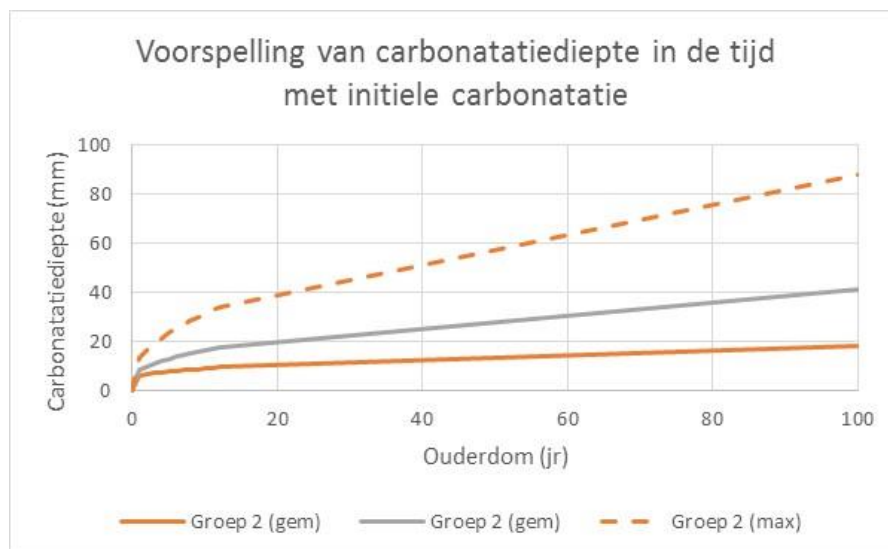
$$CD = CD_i + A * \sqrt{t}$$

met

$CD_i$  = initiële carbonatatie diepte

Uitgaande van een arbitrair gekozen waarde voor de initiële carbonatatie diepte van 5 mm wordt met deze formule voor de mengsels in groep 2 het volgende berekend (figuur 8.3):

- de gemiddelde carbonatatie diepte (9-16 mm) neemt toe tot 18-42 mm en de maximale waarde (30 mm) neemt toe tot 88 mm.



*Figuur 8.3: Voorspelling van het verloop van de carbonatatie diepte in de tijd indien sprake is van een arbitrair gekozen waarde voor de initiële carbonatatie diepte van 5 mm*

Uitgaande van een minimale betondekking van 50 mm wordt voor de mengersels in groep 1 verwacht dat op een ouderdom van 100 jaar het carbonatatiefront de wapening nog niet bereikt heeft. Dat betekent dat het optreden van wapeningscorrosie binnen de technische levensduur van 100 jaar onwaarschijnlijk is.

Voor de mengersels in groep 2 wordt verwacht dat een deel van de wapening, binnen de technische levensduur van 100 jaar, in gecarbonateerd beton komt te liggen. De hoeveelheid wapening die op een ouderdom van 100 jaar in gecarbonateerd beton zal liggen is afhankelijk van de daadwerkelijke betondekking, het daadwerkelijke verloop van de carbonatatie diepte in de tijd en een al dan niet meenemen van vroegtijdige uitdroging van het beton (initiële carbonatatie diepte).

Uitgaande van maximale carbonatatie dieptes zal het carbonatatiefront al na circa 35 jaar op plaatsen de wapening kunnen bereiken (zie figuur 8.2), dan wel na zo'n 40 jaar (zie figuur 8.3). Welk percentage van de wapening daadwerkelijk bereikt zal worden is op dit moment moeilijk te zeggen.

Indien het carbonatatiefront de wapening bereikt (initiatiefase), zal er nog niet direct sprake zijn van schade aan de constructie. Doordat het carbonatatiefront de wapening bereikt, valt de natuurlijke bescherming van de wapening weg en kan de wapening gaan corroderen (propagatiefase). Hierbij neemt de wapening diameter af en ontstaan corrosieproducten. Als er vervolgens voldoende corrosieproducten zijn gevormd, ontstaat uiterlijk zichtbare schade in de vorm van scheurvorming in het beton en tot slot afdrucken van betonschollen.

Dit betekent dat de corrosiesnelheid van de wapening die in gecarbonateerd beton komt te liggen, mede bepalend is voor het al dan niet ontstaan van schade binnen de technische levensduur van 100 jaar. Ten aanzien van die corrosiesnelheid geldt dat die in hoge mate afhankelijk is van de grootte van de betondekking en de kwaliteit van de betondekking. In CUR rapport 90-3 "Carbonatatie, corrosie en

vocht" is aangegeven dat onder normale omstandigheden, bij een betondekking van meer dan 15 mm, geen schade door wapeningscorrosie wordt verwacht voor de standaard levensduur van 50 jaar. Echter, in de onderhavige situatie is sprake van een relatief slechte kwaliteit van de betondekking en van een technische levensduur van 100 jaar. Dat betekent dat over de daadwerkelijk te verwachten corrosiesnelheid vooralsnog geen uitspraken gedaan kunnen worden.

## 9 Conclusies

In dit huidige onderzoek is gekeken naar de beschikbare informatie over Tunnel Rotterdam Noord, zonder dat daar door TNO zelf onderzoek naar is gedaan. Doel van het onderzoek was om daarbij inzicht te krijgen in de optredende degradatieprocessen, eerste ideeën over achterliggende oorzaken (indien mogelijk) en een indicatie op welke termijn dit tot het eind van de technische levensduur zou kunnen leiden.

Daartoe is in deze rapportage eerst nader ingegaan op de definitie van afkeurcriteria omtrent de technische levensduur. Zoals in hoofdstuk 4 uiteen is gezet, heeft dit geleid tot drie afkeurcriteria voor het einde van de technische levensduur:

- A. Het bereiken van een minimale dwarsdoorsnede van de stempels, die vanuit constructief oogpunt nodig is voor de stempelwerking.
- B. Het bereiken van een minimale dekking op de wapening aan de bovenzijde van de stempels, die benodigd is voor de brandveiligheid van de stempels.
- C. Het bereiken van de wapening door het carbonatatiefront. Dit aspect speelt een rol bij alle constructieve betonnen onderdelen van TRN.

Uit een analyse van de resultaten van de reeds uitgevoerde onderzoeken is gebleken dat de verschillende, toegepaste betonsamenstellingen globaal zijn te verdelen in twee groepen:

1. De mengsels J en T met een berekende water-cementfactor van 0,45 en zonder vliegias.
2. De mengsels A, A3, C, D en D1 met een berekende water-cementfactor van circa 0,55 en met vliegias.

Ten aanzien van elk van de drie afkeurcriteria is vanuit het huidige onderzoek, voor de beide groepen mengsels, het volgende naar voren gekomen:

- A. Het bereiken van een minimale dwarsdoorsnede van de stempels, die vanuit constructief oogpunt nodig is voor de stempelwerking.

Hoewel er in een vervolgonderzoek nog getalsmatig moet worden uitgewerkt bij welke hoeveelheid materiaalverlies de dwarsdoorsnede kritisch wordt, volgt als conclusie uit paragraaf 8.2 dat voor stempels gemaakt met mengsels uit groep 1 de kans klein geacht wordt dat het afkeurcriterium bereikt wordt voor het bereiken van de technische levensduur van 100 jaar.

Voor stempels gemaakt met mengsels uit groep 2 is de situatie onzekerder. Voor deze mengsels wordt in de restlevensduur wel verdere vorstschade verwacht. Of dit voor het bereiken van de technische levensduur van 100 jaar zal gaan leiden tot het bereiken van het afkeurcriterium is op dit moment niet te zeggen.

- B. Het bereiken van een minimale dekking op de wapening aan de bovenzijde van de stempels, die benodigd is voor de brandveiligheid van de stempels.

Voor dit criterium wordt gekeken naar de hoeveelheid beton op de wapening als isolator in geval van brandschade. Uit het onderzoek volgt dat materiaalverlies

dan vooral valt te verwachten op plaatsen van de horizontale vlakken. Daarbij volgen de conclusies de redenering die ook onder A gegeven is: materiaalverlies voor de mengsels uit groep 1 valt niet verder te verwachten. Materiaalverlies voor de mengsels uit groep 2 is door vorstschade wel aannemelijk. Of dat voor het bereiken van de technische levensduur van 100 jaar tot afkeuring zal leiden is op dit moment niet te zeggen, ook omdat nog uitgezocht moet worden welke minimale dekking voor welke brandcurve nodig is.

- C. Het bereiken van de wapening door het carbonatatiefront. Dit aspect speelt een rol bij alle constructieve betonnen onderdelen van TRN.

Dit afkeurcriterium voor de technische levensduur is op zich helder. Op het moment dat het carbonatatiefront de wapening bereikt is het einde technische levensduur. Het is echter niet duidelijk of dit geldt voor het eerste moment dat het carbonatatiefront een wapeningsstaaf bereikt of dat een bepaald percentage van de wapening in gecarbonateerd beton mag liggen. Uit de berekeningen van paragraaf 8.3 blijkt opnieuw de eerder genoemde tweedeling. Voor mengsels uit groep 1 zal het carbonatatiefront met zeer grote waarschijnlijkheid niet binnen de technische levensduur van 100 jaar bij de wapening komen.

Anders is het voor de mengsels uit groep 2. Daar is het met de huidige gegevens en gebruikte prognose waarschijnlijk dat het afkeurcriterium bereikt gaat worden binnen de technische levensduur van 100 jaar.

Minder zeker is wat vervolgens de consequenties zijn van het bereiken van de wapening door het carbonatatiefront. Zowel in de gebruikte meetdata als in het prognosemodel zitten nog veel aannames die nader onderzoek vereisen.



## 10 Opzet voor vervolgonderzoek

Uit het vorige hoofdstuk volgt dat er op basis van de nu beschikbare informatie geen betrouwbare uitspraak gedaan kan worden over het al dan niet bereiken van de technische levensduur van 100 jaar voor het beton van TRN. Om een dergelijke uitspraak wel te kunnen doen, wordt vervolgonderzoek noodzakelijk geacht. Dat vervolgonderzoek dient dan de volgende onderdelen te bevatten:

1. Nadere uitwerking van de afkeurcriteria.
2. Nader onderzoek van de hoeveelheid materiaalverlies in de tijd als gevolg van vorstdooschade.
3. Betere prognose van de snelheid van carbonatatie en het bereiken van de wapening.
4. Nader onderzoek naar de corrosiesnelheid van diepliggende wapening in gecarbonateerd beton.

### Ad 1: Nadere uitwerking van de afkeurcriteria

Er zijn drie afkeurcriteria gedefinieerd voor de stempels, gordingen en wandjes, maar die zijn echter nog niet gekwantificeerd. Ten behoeve van het kwantificeren van die afkeurcriteria zou het volgende onderzoek uitgevoerd moeten worden:

- Dwarsdoorsnede stempels. Op basis van het oorspronkelijke constructief ontwerp moet worden vastgesteld op welke ontwerpbelasting de stempels zijn berekend. Vervolgens moet dan constructief worden berekend hoeveel materiaal aan de bovenzijde van de stempels verloren mag gaan
- Minimaal benodigde betondekking bij brand. Vanuit het oorspronkelijke ontwerp van de tunnel moet worden nagegaan welke brandcurve maatgevend is voor het vaststellen van de brandveiligheid van de tunnel en op welke wijze destijds is aangetoond dat het beton van de tunnel de betreffende brand kan weerstaan. Vervolgens moet dan worden onderzocht in welke mate de betondekking aan de bovenzijde van de stempels gereduceerd mag worden.
- Toelaatbare hoeveelheid wapening in gecarbonateerd beton. Geadviseerd wordt om te achterhalen welk criterium bij het ontwerp van de tunnel is aangehouden.

### Ad 2: Nader onderzoek van de hoeveelheid materiaalverlies in de tijd als gevolg van vorstdooschade

Zoals aangegeven in paragraaf 8.2 wordt voor de onderdelen die zijn vervaardigd met een mengsel uit groep 2 verwacht dat de vorstschade in de toekomst verder zal toenemen. Echter, er zijn vooralsnog geen voorspellingsmodellen beschikbaar voor de ontwikkeling van vorstschade in de tijd, zodat op dit moment niet aangegeven kan worden welk nader onderzoek in dit kader uitgevoerd zou kunnen worden. Wat in dit kader wel onderzocht kan worden is de eventuele invloed van mosgroei op de kwaliteit van het betonoppervlak. Er zijn namelijk stempels die zich gedeeltelijk onder een viaduct bevinden, met onder het viaduct geen mosgroei en erbuiten wel. Indien uit het bovenoppervlak van die stempels twee series van drie kernen geboord worden, één serie uit het beton onder het viaduct (zonder mos) en één serie uit het beton naast het viaduct (met mosgroei), kan via microscopisch onderzoek het effect van de mosgroei onderzocht worden.

### Ad 3: Betere prognose van de snelheid van carbonatatie en het bereiken van de wapening

Zoals aangegeven in paragraaf 8.3 is er nog onvoldoende informatie beschikbaar voor het opstellen van een betrouwbare voorspelling van het verloop van de carbonatatie in de tijd. Tevens is er nog onvoldoende informatie beschikbaar over de daadwerkelijk aanwezige betondekking. Pas als er voldoende informatie over deze twee aspecten beschikbaar is, kan een betrouwbare voorspelling gegeven van het moment waarop het carbonatatiefront de wapening bereikt. Om die informatie beschikbaar te krijgen, zou het volgende onderzoek uitgevoerd moeten worden:

- Bepalen carbonatatiesnelheid - metingen andere constructies. De betonmengsels die zijn toegepast bij TRN zijn ook toegepast in andere constructies van de HSL. Door het meten van de carbonatatediepte in die andere constructies (steeds gekoppeld aan de betonsamenstelling) wordt een grotere set data aangelegd, met metingen op verschillende ouderdommen van het beton. Daarmee kan een betere voorspelling worden gegeven van de carbonatatiesnelheid.
- Bepalen carbonatatiesnelheid - versnelde carbonatatieproeven. In het laboratorium kunnen versnelde carbonatatieproeven uitgevoerd worden, op basis waarvan betere voorspellingen gedaan kunnen worden van de carbonatatiesnelheid. Voor de onderhavige situatie moeten dergelijke proeven uitgevoerd worden op boorkernen uit het werk en dan met name op het kernbeton dat nog niet is gecarbonateerd dan wel uitgedroogd. Indien deze proeven uitwijzen dat bepaalde mengsels beduidend minder weerstand tegen carbonatatie hebben dan op basis van praktijkervaring verwacht zou worden, is het zinvol om aanvullend te onderzoeken wat de oorzaak daarvan is.
- Invloed initiële carbonatatediepte. Zoals aangegeven in paragraaf 8.3 kan er sprake zijn geweest van een onvoldoende effectieve nabehandeling, waardoor het beton vroegtijdig is uitgedroogd en initieel, al vrijwel direct, tot een bepaalde diepte is gecarbonateerd. Die initiële carbonatatediepte is mede bepalend voor het vaststellen van het verloop van de carbonatatie in de tijd. Vooralsnog is echter nog niet bekend op welke wijze dit aspect nader onderzocht kan worden.
- Vaststellen daadwerkelijk aanwezige betondekking. De daadwerkelijk aanwezige betondekking dient in het werk gemeten te worden met een betondekkingsmeter. Door het uitvoeren van meerdere metingen wordt niet alleen inzicht verkregen in de minimaal aanwezige betondekking maar ook in het gemiddelde en de spreiding, zodat meer nauwkeurigere levensduurberekeningen uitgevoerd kunnen worden.

### Ad 4: Nader onderzoek naar de corrosiesnelheid van diepliggende wapening in gecarbonateerd beton

Zoals aangegeven in paragraaf 8.3 is het ontstaan van schade binnen de technische levensduur niet alleen afhankelijk van het tijdstip waarop het carbonatatiefront de wapening bereikt (initiatiefase), maar ook van de snelheid waarmee de wapening dan daadwerkelijk begint te corroderen (propagatiefase). Over de corrosiesnelheid van diepliggende wapening is echter onvoldoende informatie beschikbaar en vooralsnog is nog niet bekend op welke wijze dit aspect nader onderzocht kan worden.

## 11 Ondertekening

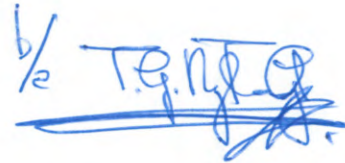
Naam en adres opdrachtgever:

Prorail Assetmanagement  
De heer R.A. den Boer  
Postbus 2038  
3500 GA Utrecht

Handtekening:



Ir. H. Borsje  
Auteur



Dr. B. Savija  
Review



Dr. P.C. Rasker  
Research Manager  
Structural Reliability

## A Overzicht betonmengsels, stortdata, mosgroei en classificering betonoppervlakken

Tabel A.1: Overzicht beschikbare informatie stempels en resultaten visuele inspectie ([02], [11], [13] en [14])

Stempel	Stort-datum	Beton-mengsel	Hoeveelheid mos (% van oppervlak)				Opmerkingen
			2012 [02]	april 2016 [13]	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	
97-1				2		5	
97-2						5	
97-3				2		5	
97-4						5	
98-1				5		5	
98-2						5	
98-3				20		5	
98-4						5	
98-5				40		5	
99-1						10	
99-2				55		25	
99-3						15	
99-4				45		15	
99-5						25	
100-1				55		35	
100-2						35	
100-3				50		35	
100-4						35	
100-5						35	
101-1				45		35	
101-2				35		35	
101-3				10		25	
101-4						25	
101-5				50		35	Deels onder viaduct Teugeweg
102-4						80	Deels onder viaduct Teugeweg
102-5				80		80	Deels onder viaduct Teugeweg
103-1						60	

Stempel	Stort-datum	Beton- mengsel	Hoeveelheid mos (% van oppervlak)				Opmerkingen
			2012 [02]	april 2016 [13]	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	
103-2						50	
103-3						5	
103-4						5	
103-5						5	
104-1					5	5	
104-2				25		5	
104-3						10	
104-4					10	5	
104-5					10	5	
105-1						5	
105-2						5	
105-3				5	5	5	
105-4						5	
105-5					5	5	
106-1						5	
106-2						10	
106-3					5	10	
106-4						15	
106-5					5	10	
107-1						5	
107-2					5	5	
107-3						5	
107-4				2		5	Beschermd tegen regen
108-1					5	0	Onder viaduct Bovendijk
109-1					2	5	Onder viaduct Bovendijk
109-2	22-1-2003	A	0			5	
109-3	24-1-2003	A	100	30	30	5	
109-4	26-2-2003	A3	100			5	
109-5	3-3-2003	A3	100			5	
110-1	24-2-2003	A3	100			5	
110-2	18-2-2003	A	100		2	5	
110-3	14-2-2003	A3	100			5	
110-4	11-2-2003	A	100			5	
110-5	7-2-2003	A	85		2	5	
111-1	7-2-2003	A	75			5	

Stempel	Stort-datum	Beton-mengsel	Hoeveelheid mos (% van oppervlak)				Opmerkingen
			2012 [02]	april 2016 [13]	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	
111-2	3-2-2003	A	50			5	
111-3	3-2-2003	A	100		2	5	
111-4	29-1-2003	A	70			5	
111-5	29-1-2003	A	30			5	
112-1	7-6-2002	A	75		2	5	
112-2	7-6-2002	A	90			5	
112-3	5-6-2002	A	90			5	
112-4	5-6-2002	A	100		2	5	
113-1	30-5-2002	A	80	2	2	5	
113-2	30-5-2002	A	60		2	5	
113-3	28-5-2002	A	80			5	
113-4	24-5-2002	A	30		2	5	
114-1	--	A	40			5	
114-2	--	A	10		2	5	
114-3	19-6-2002	A	70			5	
114-4	19-6-2002	A	50		2	5	
115-1	21-6-2002	A	80		2	5	
115-2	21-6-2002	A	80			5	
115-3	28-6-2002	A	80			5	
115-4	28-6-2002	A	70		2	5	
116-1	5-7-2002	A	60	5	2	5	
116-2	5-7-2002	A	40			5	
116-3	10-7-2002	A	20			5	
116-4	10-7-2002	A	20		2	5	
117-1	12-7-2002	A	50			5	
117-2	12-7-2002	A	50			5	
117-3	17-7-2002	A	30			5	
117-4	17-7-2002	A	40		2	5	
118-1	30-8-2002	A	20			5	
118-2	30-8-2002	A	30			5	
118-3	22-11-2002	A	20			5	
118-4	22-11-2002	A	30		2	5	
119-1	25-11-2002	A	30			5	
119-2	26-11-2002	A	10			5	
119-3	27-11-2002	A	10		2	5	
119-4	29-11-2002	A	40			5	
119-5	29-11-2002	A	20		2	5	

Stempel	Stort-datum	Beton-mengsel	Hoeveelheid mos (% van oppervlak)				Opmerkingen
			2012 [02]	april 2016 [13]	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	
120-1	20-11-2002	A	20			5	
120-2	15-11-2002	A	10			5	
120-3	13-11-2002	A	20		2	5	
120-4	8-11-2002	A	5			5	
120-5	3-11-2002	A	30		2	5	
122-1	31-10-2002	A	50			5	
122-2	28-10-2002	A	70			5	
122-3	23-10-2002	A	70	5	2	5	
122-4	18-10-2002	A	5			5	
122-5	11-10-2002	A	0		2	5	
123-1	9-10-2002	A	70		2	5	
133-1					5	5	
133-2	13-5-2003	A	40			5	
133-3	8-5-2003	A	30		5	5	
133-4	6-5-2003	A	10	5	10	5	
133-5	2-5-2003	A	20				
135-1	29-4-2003	A	30			5	
135-2	22-4-2003	A	30		5	5	
135-3	16-4-2003	A	70		2	5	
135-4	10-4-2003	A3	80		2	5	
135-5	8-4-2003	A3	50		2	5	
136-1	4-4-2003	A3	30		5	5	
136-2	13-1-2004	--	0			5	
136-3	13-1-2004	--	0		10	5	
136-4	15-12-2003	--	0	1	5	5	
136-5	11-12-2003	J	0		5	5	
137-1	15-12-2003	A	5			5	
137-2			10		5	5	
139-1			0	1	5	0	
141-1	29-10-2003	J	0		2	5	
141-2	29-10-2003	J	0		5	5	
141-3	31-10-2003	J	5	1	2	5	
141-4	5-11-2003	J	10		2	5	
141-5	7-11-2003	J	5			5	
143-1					2	5	
143-2	29-10-2003	J	0			5	
143-3					2	5	

Stempel	Stort-datum	Beton-mengsel	Hoeveelheid mos (% van oppervlak)				Opmerkingen
			2012 [02]	april 2016 [13]	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	
143-4						5	
143-5					5	5	
143-6	12-11-2003	J	0				
143-8	21-11-2003	J	0				
143-9	28-11-2003	J	15				
143-10	28-11-2003	J	0				

Tabel A.2: Resultaten visuele inspectie stempels vervolg ([11], [14] en [15])

Stempel	Hoeveelheid peeling (% van oppervlak)	Staalkaartklasse	Categorie
	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	september 2017 [15]
97-1		2	3
97-2		2	
97-3		2	4
97-4		2	
98-1		1	
98-2		1	
98-3		2	
98-4		1	
98-5		2	
99-1		2	
99-2		2	
99-3		2	
99-4		2	
99-5		2	
100-1		1	
100-2		1	
100-3		2	
100-4		2	
100-5		2	
101-1		2	5
101-2		2	5
101-3		2	5
101-4		2	5
101-5		2	5



Stempel	Hoeveelheid peeling (% van oppervlak)	Staalkaartklasse	Categorie
	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	september 2017 [15]
102-4		1	
102-5		2	3
103-1		2	
103-2		3	3
103-3		3	3
103-4		2	
103-5		2	
104-1		1	
104-2		2	
104-3		2	
104-4	15	2	3
104-5	10	2	2
105-1		2	
105-2		1	
105-3		1	
105-4		2	
105-5		2	
106-1		3	2
106-2		3	2
106-3	10	3	2
106-4		2	
106-5	10	3	2
107-1		2	
107-2		3	3
107-3		3	4
107-4		2	
108-1			
109-1			1
109-2		3	1
109-3	20	3	3
109-4		3	5
109-5		2	3
110-1		2	
110-2	10	5	3
110-3		2	
110-4		5	5
110-5	15	4	5
111-1		4	5

Stempel	Hoeveelheid peeling (% van oppervlak)	Staalkaartklasse	Categorie
	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	september 2017 [15]
111-2		3	2
111-3		3	2
111-4		2	
111-5		3	2
112-1		2	2
112-2		2	
112-3		3	5
112-4	10	3	5
113-1	30	4	2
113-2	10	1	2
113-3		1	
113-4	25	2	4
114-1		2	
114-2	40	2	2
114-3		1	
114-4	15	2	2
115-1	40	4	3
115-2		4	3
115-3		4	2
115-4	40	4	2
116-1	60	3	5
116-2		2	
116-3		3	2
116-4	60	3	3
117-1		3	4
117-2		4	5
117-3		3	4
117-4	60	4	4
118-1		3	2
118-2		2	
118-3		2	
118-4	60	3	2
119-1		3	4
119-2		4	2
119-3	60	3	2
119-4		2	
119-5	40	1	2
120-1		3	2

Stempel	Hoeveelheid peeling (% van oppervlak)	Staalkaartklasse	Categorie
	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	september 2017 [15]
120-2		2	
120-3	40	2	2
120-4		2	
120-5	40	2	2
122-1		2	
122-2		4	2
122-3	40	4	2
122-4		2	
122-5	20	3	3
123-1	30	4	3
133-1		3	3
133-2		1	
133-3	10	2	2
133-4	5	2	2
133-5			
135-1		1	
135-2	5	3	4
135-3	5	5	
135-4	5	2	2
135-5	10	2	2
136-1	0	2	4
136-2		1	
136-3	5	1	
136-4	10	1	
136-5	10	1	
137-1		1	
137-2	5	1	
139-1	5	1	
141-1	5	1	
141-2	5	1	
141-3	5	1	
141-4	5	1	
141-5		1	
143-1	5	1	
143-2		1	
143-3	5	2	
143-4		1	
143-5	5	2	

Stempel	Hoeveelheid peeling (% van oppervlak)	Staalkaartklasse	Categorie
	februari 2017 [14]	maart 2017 [11]	september 2017 [15]
143-6			
143-8			
143-9			
143-10			

Tabel A.3: Overzicht beschikbare informatie gordingen [02]

Moot	Zijde	Stortdatum	Betonmengsel	Hoeveelheid mos (% van oppervlak) [02]
108	oost	2-12-2002	A	0
108	west	9-12-2002	A	10
109	oost	2-12-2002	A	--
109	west	9-12-2002	A	--
110	oost	3-2-2002	A	65
110	west	27-2-2002	A	30
111	oost	17-1-2003	A	10
111	west	14-1-2003	A	50
112	oost	28-5-2002	A	90
112	west	31-5-2002	A	50
113	oost	3-5-2002	A	70
113	west	14-5-2002	A	100
114	west	4-6-2002	A	80
114	oost	24-5-2002	A	50
115	west	21-5-2002	A	100
115	oost	6-6-2002	A	100
116	west	28-6-2002	A	70
116	oost	25-6-2002	A	80
117	west	10-7-2002	A	80
117	oost	5-7-2002	A	70
118	oost	15-7-2002	A	80
118	west	22-8-2002	A	80
119	west	11-10-2002	A	70
119	oost	4-9-2002	A	70
120	oost	22-10-2002	A	0
120	west	9-2-2004	A	0
122	oost	4-10-2002	A	20
122	west	9-10-2002	A	20

Moot	Zijde	Stortdatum	Betonmengsel	Hoeveelheid mos (% van oppervlak) [02]
123	oost	19-9-2002	A	0
123	west	13-9-2002	A	10
133	oost	27-3-2003	A	30
133	west	20-3-2003	A	80
135	oost	4-4-2003	A	60
135	west	7-3-2003	A	100
136	oost	27-3-2003	A	10
136	west	27-3-2003	A	5
137	oost	21-5-2003	A	0
137	west	17-6-2003	A	0
141	oost	21-10-2003	A	0
141	west	15-10-2003	A	5
143	oost	30-10-2003	A	0
143	west	28-10-2003	A	10
144	west	17-11-2003	A	40
144	oost	27-11-2003	A	70
145	oost	26-5-2004	A	15
145	west	12-5-2004	A	20
146	west	10-12-2003	A	10
146	oost	19-5-2004	C	80
147	west	27-1-2004	T	5
148	oost	4-3-2004	T	0
148	west	17-2-2004	T	0
149	oost	20-2-2004	T	0
149	west	21-1-2004	--	10
150	oost	24-9-2004	T	0
150	west	6-1-2004	A	5

Tabel A.4: Overzicht beschikbare informatie wanden [02]

Wand	Zijde	Stortdatum	Betonmengsel
109	oost	10-9-2003	D/D1
109	west	28-10-2003	D/D1
110	oost	6-10-2003	D1
110	west	18-11-2003	D/D1
120	oost	22-7-2003	D/D1
120	west	15-5-2003	D/D1
122	oost	2-7-2003	D/D1
122	west	11-6-2003	D/D1

133	oost	12-3-2004	D/D1
133	west	18-2-2004	D/D1
135	oost	29-3-2004	D/D1
135	west	28-1-2004	D/D1
141	west	17-5-2004	D1
143	oost	29-6-2004	D/D1

## B Overzicht boorkernen

Tabel B.1: Kernen die zijn geboord eind 2011 [02]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Toelichting	Zijde
115 oost	M115.G.O	Gording	Gording op wand; bovenzijde	bovenzijde
115-2	M115.st.2	Stempel	Stempel bovenzijde	bovenzijde
117-1	M117.st.1	Stempel	Stempel bovenzijde	bovenzijde
117-oost	M117.G.O	Gording	Gording op wand; bovenzijde	bovenzijde
118-oost	M118.HORZ.O	Wandje	Wandje op gording; bovenzijde	bovenzijde
118-oost	M118.OPV.O	Wandje	Wandje op gording; bovenzijde	bovenzijde
110-west	Control 1	Wand	Binnenzijde van buitenwand in trappenhuis	zijkant
109-west	Control 2	Wand	Binnenzijde van buitenwand in trappenhuis	zijkant
109-west	Control 3	Wand	Binnenzijde van buitenwand in trappenhuis	zijkant
109-5 noord	Second series 1	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant (lg)	zijkant(lg)
109-5 zuid	Second series 2	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant (hg)	zijkant(hg)
109-5 beneden	Second series 3	Stempel	Stempel in trappenhuis; onderzijde	onderzijde
109 west	Second series 4	Wand	Wand van trappenhuis; bovenzijde	bovenzijde

Tabel B.2: Kernen die zijn geboord in mei 2012 [02]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Toelichting	Zijde
122-1	122-1	Stempel	Stempel in trappenhuis; bovenzijde	bovenzijde
122-1	122-1	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant(lg)	zijkant(lg)
122-1	122-1	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant(hg)	zijkant(hg)
122-1	122-1	Stempel	Stempel in trappenhuis; onderzijde	onderzijde
133-5	133-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; bovenzijde	bovenzijde
133-5	133-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant(lg)	zijkant(lg)
133-5	133-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant(hg)	zijkant(hg)
133-5	133-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; onderzijde	onderzijde
141-5	141-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; bovenzijde	bovenzijde
141-5	141-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant(lg)	zijkant(lg)
141-5	141-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; zijkant(hg)	zijkant(hg)
141-5	141-5	Stempel	Stempel in trappenhuis; onderzijde	onderzijde
122-west	122-west	Gording	Gording in trappenhuis; bovenzijde	bovenzijde
122-west	122-west	Gording	Gording in trappenhuis; zijkant	zijkant

122-west	122-west	Gording	Gording in trappenhuis; zijkant (beschut)	zijkant (beschut)
133-west	133-west	Gording	Gording in trappenhuis; bovenzijde	bovenzijde
133-west	133-west	Wand	Wand in trappenhuis; zijkant	zijkant
141-west	141-west	Gording	Gording in trappenhuis; bovenzijde	bovenzijde
141-west	141-west	Gording	Gording in trappenhuis; zijkant	zijkant
141-west	141-west	Gording	Gording in trappenhuis; zijkant	zijkant
141-west	141-west	Gording	Gording in trappenhuis; zijkant (beschut)	zijkant (beschut)
104-west	104-west	Gording	bovenzijde	bovenzijde
104-west	104-west	Gording	bovenzijde	bovenzijde
104-west	104-west	Gording	zijkant	zijkant
104-west	104-west	Gording	zijkant	zijkant
122-west	122-west	Wandje	bovenzijde	bovenzijde
122-west	122-west	Wandje	bovenzijde	bovenzijde
148-west	148-west	Wand	Wand onder viaduct; zijkant	zijkant
148-west	148-west	Wand	Wand onder viaduct; zijkant	zijkant
148-west	148-west	Wand	Wand naast viaduct; zijkant	zijkant
148-west	148-west	Wand	Wand naast viaduct; zijkant	zijkant
151-west	151-west	Wand	bovenzijde	bovenzijde
151-west	151-west	Wand	bovenzijde	bovenzijde
151-west	151-west	Wand	zijkant	zijkant
151-west	151-west	Wand	zijkant	zijkant

Tabel B.3: Kernen die zijn geboord in het voorjaar 2013 [04]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Toelichting	Zijde
9	1	Balk	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	Oost
9	1	Balk	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	Oost
9	1	Balk	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	Oost
9	2	Vloer	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	
9	2	Vloer	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	
9	2	Vloer	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	
9	3	Wand	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	Oost
9	3	Wand	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	Oost
9	3	Wand	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	Oost
9	4	Wand	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	West
9	4	Wand	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	West
9	4	Wand	Toerit Z; onderhavig aan weersinvloeden	West
15	5	Dak	Overgangszone open naar gesloten tunnel	
15	5	Dak	Overgangszone open naar gesloten tunnel	
15	5	Dak	Overgangszone open naar gesloten tunnel	
15	6	Tussenwand	Overgangszone open naar gesloten tunnel	West



15	6	Tussenwand	Overgangszone open naar gesloten tunnel	West
15	6	Tussenwand	Overgangszone open naar gesloten tunnel	Oost
15	7	Vloer	Overgangszone open naar gesloten tunnel	
15	7	Vloer	Overgangszone open naar gesloten tunnel	
15	7	Vloer	Overgangszone open naar gesloten tunnel	
26	8	Dak	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	8	Dak	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	8	Dak	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	9	Tussenwand	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	9	Tussenwand	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	9	Tussenwand	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	10	Vloer	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	10	Vloer	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
26	10	Vloer	265 m in tunnel; geen weersinvloeden	
129	11	Dak	gesloten Eresa zone, geen weersinvloeden	
129	11	Dak	gesloten Eresa zone, geen weersinvloeden	
129	11	Dak	gesloten Eresa zone, geen weersinvloeden	
129	12	Vloer	gesloten Eresa zone, geen weersinvloeden	
129	12	Vloer	gesloten Eresa zone, geen weersinvloeden	
129	12	Vloer	gesloten Eresa zone, geen weersinvloeden	

Tabel B.4: Kernen die zijn geboord in november 2014 [05]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Toelichting	Zijde
9	36	Wand	Gesloten deel	West
9	37	Wand	Open deel; maaiveld	West
15	38	Wand	Gesloten deel	West
17	1	Dak	Gesloten deel	Onderzijde
17	2	Wand	Gesloten deel	West
26	3	Dak	Gesloten deel	Onderzijde
26	4	Wand	Gesloten deel	West
50	5	Dak	Gesloten deel	Onderzijde
50	6	Wand	Gesloten deel	West
74	7	Dak	Gesloten deel	Onderzijde
74	9	Wand	Gesloten deel	West
96	10	Dak	Gesloten deel	Onderzijde
96	11	Wand	Gesloten deel	West
104	12	Wand	Open deel	West
104	13	Stempel	Open deel	Boven
104	14	Stempel		Bovenzijde
129	25	Dak	Gesloten deel	Onderzijde

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Toelichting	Zijde
129	26	Dak	Gesloten deel	Onderzijde
129	26	Dak	Gesloten deel	Onderzijde
151	56	Wand	Open deel; maaiveld	West
156	57	Wand	Open deel; maaiveld	West
109-5	15	Stempel	Open deel	Boven
109-5	16	Stempel	Open deel	Zijkant
109-5	17	Stempel	Open deel	Zijkant
109-5	18	Stempel	Open deel	Onderzijde
109-5	39	Stempel	Trapgat	Boven
109-5	40	Stempel	Trapgat	Zijkant
109-5	41	Stempel	Trapgat	Zijkant
109-5	41	Stempel	Trapgat	Zijkant
109-5	42	Stempel	Trapgat	Onderzijde
109-5	43	Stempel	Trapgat	Boven
115-1	19	Stempel	Open deel	Boven
117-2	20	Stempel	Open deel	Boven
122-1	21	Stempel	Open deel	Boven
122-1	22	Stempel	Open deel	Zijkant
122-1	23	Stempel	Open deel	Zijkant
122-1	24	Stempel	Open deel	Onderzijde
122-1	44	Stempel	Trapgat	Boven
122-1	45	Stempel	Trapgat	Zijkant
122-1	46	Stempel	Trapgat	Zijkant
133-5	27	Stempel	Open deel	Boven
133-5	28	Stempel	Open deel	Zijkant
133-5	29	Stempel	Open deel	Zijkant
133-5	30	Stempel	Open deel	Onderzijde
133-5	48	Stempel	Trapgat	Boven
133-5	49	Stempel	Trapgat	Zijkant
133-5	50	Stempel	Trapgat	Zijkant
133-5	51	Stempel	Trapgat	Onderzijde
136-3	31	Stempel	Open deel	Boven
141-5	32	Stempel	Open deel	Boven
141-5	33	Stempel	Open deel	Zijkant
141-5	34	Stempel	Open deel	Zijkant
141-5	35	Stempel	Open deel	Onderzijde

Tabel B.5: Kernen die zijn geboord in week 15 2016 [12]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Toelichting
104	36	Wandje	Bovenzijde

109	37	Wandje	Bovenzijde
122	38	Wandje	Bovenzijde
133	39	Stempel	Zijkant
144	40	Stempel	Zijkant

## C Betondekking

Tabel C.1: Gemeten betondekking [05]

Moot	Onderdeel	Zijde	Toelichting	Code	Betondekking (mm)	
					Buitenste laag	Tweede laag
26	Dak	Onderzijde	Gesloten deel	3		81
50	Dak	Onderzijde	Gesloten deel	5	59	
74	Dak	Onderzijde	Gesloten deel	7	60	
96	Dak	Onderzijde	Gesloten deel	10	63	
129	Dak	Onderzijde	Gesloten deel	26	63	
129	Dak	Onderzijde	Gesloten deel	25	62	
104	Stempel	Boven		13	54	
104	Stempel	Boven		14	61	
109	Stempel	Boven		15		82
109	Stempel	Boven	Trapgat	39		74
109	Stempel	Boven	Trapgat	43		95
115	Stempel	Boven		19	45	
117	Stempel	Boven		20		87
122	Stempel	Boven		21		90
122	Stempel	Boven	Trapgat	44		82
133	Stempel	Boven	Trapgat	48		70
109	Stempel	Onderzijde		18	65	
109	Stempel	Onderzijde	Trapgat	42	57	
122	Stempel	Onderzijde		24	52	
122	Stempel	Onderzijde	Trapgat	47	62	
133	Stempel	Onderzijde		30		87
133	Stempel	Onderzijde	Trapgat	51	60	
141	Stempel	Onderzijde		35		67
109	Stempel	Zijkant		17	64	
133	Stempel	Zijkant		29	65	
141	Stempel	Zijkant		33		67
141	Stempel	Zijkant		34	62	
15	Wand	West	Gesloten deel	38	65	
17	Wand	West	Gesloten deel	2	56	
50	Wand	West	Gesloten deel	6	52	
74	Wand	West	Buitenzijde	9	60	
96	Wand	West	Gesloten deel	11	60	
104	Wand	West	Open deel	12		91
151	Wand	West	Open deel; maaiveld	56		69

## D Carbonatatie diepte per boorkernonderzoek

Tabel D.1: Carbonatatie diepte in de kernen die zijn geboord eind 2011 [01]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Zijde	Mengsel	Carbonatatie diepte (mm)			Ouderdom (jr)
					Min	Max	Gemiddeld	
115 oost	M115.G.O	Gording	bovenzijde	A	5	10	7,5	9,5
115-2	M115.st.2	Stempel	bovenzijde	A				9,4
117-1	M117.st.1	Stempel	bovenzijde	A			15	9,4
117-oost	M117.G.O	Gording	bovenzijde	A				9,4
118-oost	M118.HORZ.O	Wandje	bovenzijde		20	22	21	9,4
118-oost	M118.OPV.O	Wandje	bovenzijde				12	9,4
110-west	Control 1	Wand	zijkant	D/D1	10	16	13	8,0
109-west	Control 2	Wand	zijkant	D/D1	8	15	11,5	8,1
109-west	Control 3	Wand	zijkant	D/D1				8,1
109-5 noord	Second series 1	Stempel	zijkant(lg)	A3			8	8,8
109-5 zuid	Second series 2	Stempel	zijkant(hg)	A3			12	8,8
109-5 beneden	Second series 3	Stempel	onderzijde	A3			15	8,8
109 west	Second series 4	Wand	bovenzijde	D/D1			12	8,1

Tabel D.2: Carbonatatie diepte in de kernen die zijn geboord in mei 2012 [02]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Zijde	Mengsel	Carbonatatie diepte (mm)	Ouderdom (jr)
					Gemiddeld	
122-1	122-1	Stempel	bovenzijde	A	7,5	9,5
122-1	122-1	Stempel	zijkant(lg)	A	9,8	9,5
122-1	122-1	Stempel	zijkant(hg)	A	9,5	9,5
122-1	122-1	Stempel	onderzijde	A	9,5	9,5
133-5	133-5	Stempel	bovenzijde	A	9,0	9,0
133-5	133-5	Stempel	zijkant(lg)	A	12,5	9,0
133-5	133-5	Stempel	zijkant(hg)	A	14,2	9,0
133-5	133-5	Stempel	onderzijde	A	17,5	9,0
141-5	141-5	Stempel	bovenzijde	J	1,0	8,5
141-5	141-5	Stempel	zijkant(lg)	J	3,8	8,5
141-5	141-5	Stempel	zijkant(hg)	J	3,0	8,5
141-5	141-5	Stempel	onderzijde	J	5,0	8,5
122-west	122-west	Gording	bovenzijde	A	4,5	9,6
122-west	122-west	Gording	zijkant	A	11,2	9,6
122-west	122-west	Gording	zijkant (beschut)	A	16,5	9,6
133-west	133-west	Gording	bovenzijde	A	9,5	9,1
133-west	133-west	Wand	zijkant	D/D1	13,5	8,2
141-west	141-west	Gording	bovenzijde	A	4,2	8,6
141-west	141-west	Gording	zijkant	A	7,8	8,6
141-west	141-west	Gording	zijkant	A	11,5	8,6
141-west	141-west	Gording	zijkant (beschut)	A	19,8	8,6
104-west	104-west	Gording	bovenzijde		6,2	
104-west	104-west	Gording	bovenzijde		5,5	
104-west	104-west	Gording	zijkant		6,2	
104-west	104-west	Gording	zijkant		6,5	
122-west	122-west	Wandje	bovenzijde		5,8	9,6
122-west	122-west	Wandje	bovenzijde		4,5	9,6
148-west	148-west	Wand	zijkant		9,5	
148-west	148-west	Wand	zijkant		8,2	
148-west	148-west	Wand	zijkant		8,2	
148-west	148-west	Wand	zijkant		7,0	
151-west	151-west	Wand	bovenzijde		5,0	7,6
151-west	151-west	Wand	bovenzijde		6,5	7,6
151-west	151-west	Wand	zijkant		8,8	7,6

151-west	151-west	Wand	zijkant		6,5	7,6
----------	----------	------	---------	--	-----	-----

Tabel D.3: Carbonatatie diepte in de kernen die zijn geboord in voorjaar 2013 [04]

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Zijde	Carbonatatie diepte (mm)
				Gemiddeld
9	1	Balk	Oost	7
9	1	Balk	Oost	12
9	1	Balk	Oost	9,6
9	2	Vloer		15
9	2	Vloer		9,5
9	2	Vloer		9
9	3	Wand	Oost	18,5
9	3	Wand	Oost	14,4
9	3	Wand	Oost	18
9	4	Wand	West	22
9	4	Wand	West	30
9	4	Wand	West	29
15	5	Dak		26
15	5	Dak		21
15	5	Dak		14
15	6	Tussenwand	West	17
15	6	Tussenwand	West	18
15	6	Tussenwand	Oost	18
15	7	Vloer		0
15	7	Vloer		0
15	7	Vloer		0
26	8	Dak		11
26	8	Dak		0
26	8	Dak		11
26	9	Tussenwand		18,5
26	9	Tussenwand		24,7
26	9	Tussenwand		18
26	10	Vloer		0
26	10	Vloer		0
26	10	Vloer		8
129	11	Dak		10,5
129	11	Dak		8
129	11	Dak		6,3
129	12	Vloer		7

129	12	Vloer		5
129	12	Vloer		6,3

Tabel D.4: Carbonatatie diepte in de kernen die zijn geboord in november 2014 [05]

Moot	Code/ volgnr.	Onderdeel	Zijde	Mengsel	Carbonatatie diepte (mm)			Ouderdom (jr)
					Min	Max	Gemiddeld	
17	1	Dak	Onderzijde		3	4	3,5	
17	2	Wand	West		4	6	5	
26	3	Dak	Onderzijde		5	7	6	
26	4	Wand	West		10	12	11	
50	5	Dak	Onderzijde		9	12	10,5	
50	6	Wand	West		8	12	10	
74	7	Dak	Onderzijde		9	11	10	
74	9	Wand	West			18	14,6	
96	10	Dak	Onderzijde		9	9	9	
96	11	Wand	West		12	13	12,5	
104	12	Wand	West		9	12	10,5	
104	13	Stempel	Boven		3	5	4	
104	14	Stempel	Bovenzijde			10	5	
109-5	15	Stempel	Boven	A3	3	4	3,5	
109-5	16	Stempel	Zijkant	A3	3	4	3,5	
109-5	17	Stempel	Zijkant	A3	2	5	3,5	
109-5	18	Stempel	Onderzijde	A3	5	8	6,5	
115-1	19	Stempel	Boven	A	9	11	10	12,4
117-2	20	Stempel	Boven	A	6	9	7,5	12,3
122-1	21	Stempel	Boven	A	3	5	4	12,0
122-1	22	Stempel	Zijkant	A	9	9	9	12,0
122-1	23	Stempel	Zijkant	A	3	5	4	12,0
122-1	24	Stempel	Onderzijde	A	4	6	5	12,0
129	25	Dak	Onderzijde		3	4	3,5	
129	26	Dak	Onderzijde		4	5	4,5	
129	26	Dak	Onderzijde			12	7,4	
133-5	27	Stempel	Boven	A	7	9	8	11,5
133-5	28	Stempel	Zijkant	A	9	10	9,5	11,5
133-5	29	Stempel	Zijkant	A	11	11	11	11,5
133-5	30	Stempel	Onderzijde	A	7	11	9	11,5
136-3	31	Stempel	Boven	A3	1	3	2	10,8
141-5	32	Stempel	Boven	J	2	3	2,5	11,0
141-5	33	Stempel	Zijkant	J	2	3	2,5	11,0
141-5	34	Stempel	Zijkant	J	2	2	2	11,0



Moot	Code/ volgnr.	Onderdeel	Zijde	Mengsel	Carbonatatie diepte (mm)			Ouderdom (jr)
					2	3	2,5	
141-5	35	Stempel	Onderzijde	J	2	3	2,5	11,0
9	36	Wand	West		10	10	10	
9	37	Wand	West			15	8,6	
15	38	Wand	West		5	7	6	
109-5	39	Stempel	Boven	A3	3	3	3	
109-5	40	Stempel	Zijkant	A3	5	10	7,5	
109-5	41	Stempel	Zijkant	A3	5	10	7,5	
109-5	41	Stempel	Zijkant	A3		15	8,2	
109-5	42	Stempel	Onderzijde	A3	5	7	6	
109-5	43	Stempel	Boven	A3	3	3	3	
122-1	44	Stempel	Boven	A	10	20	15	12,0
122-1	45	Stempel	Zijkant	A	10	20	15	12,0
122-1	46	Stempel	Zijkant	A	10	20	15	12,0
133-5	48	Stempel	Boven	A	10	13	11,5	11,5
133-5	49	Stempel	Zijkant	A	5	9	7	11,5
133-5	50	Stempel	Zijkant	A		23	10,8	11,5
133-5	51	Stempel	Onderzijde	A	10	12	11	11,5
151	56	Wand	West		3	3	3	
156	57	Wand	West		5	15	10	

## E Carbonatatie diepte per onderdeel van de constructie

Tabel E.1: Carbonatatie diepte in de onderzijde van het dak van de tunnel

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel	Carbonatatie- diepte (mm)	Meting
				Gemiddeld	
15	5	Dak	C	26	Voorjaar 2013
15	5	Dak	C	21	Voorjaar 2013
15	5	Dak	C	14	Voorjaar 2013
26	8	Dak	M	11	Voorjaar 2013
26	8	Dak	M	0	Voorjaar 2013
26	8	Dak	M	11	Voorjaar 2013
129	11	Dak	D	10,5	Voorjaar 2013
129	11	Dak	D	8	Voorjaar 2013
129	11	Dak	D	6,3	Voorjaar 2013
17	1	Dak	M	3,5	November 2014
26	3	Dak	M	6	November 2014
50	5	Dak	M	10,5	November 2014
74	7	Dak	M	10	November 2014
96	10	Dak	M	9	November 2014
129	25	Dak	D	3,5	November 2014
129	26	Dak	D	4,5	November 2014
129	26	Dak	D	7,4	November 2014
Gemiddeld		Dak		12,0	Voorjaar 2013
Gemiddeld		Dak		6,8	November 2014

Tabel E.2: Carbonatatie diepte in de gordingen

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel	Zijde	Carbonatatie- diepte (mm)	Meting
					Gemiddeld	
104-west	104-west	Gording		bovenzijde	6,2	Eind 2011
104-west	104-west	Gording		bovenzijde	5,5	Eind 2011
115 oost	M115.G.O	Gording	A	bovenzijde	7,5	Eind 2011
117-oost	M117.G.O	Gording	A	bovenzijde		Eind 2011
122-west	122-west	Gording	A	bovenzijde	4,5	Eind 2011
133-west	133-west	Gording	A	bovenzijde	9,5	Eind 2011
141-west	141-west	Gording	A	bovenzijde	4,2	Eind 2011
104-west	104-west	Gording		zijkant	6,2	Eind 2011
104-west	104-west	Gording		zijkant	6,5	Eind 2011
141-west	141-west	Gording	A	zijkant	7,8	Eind 2011
141-west	141-west	Gording	A	zijkant	11,5	Eind 2011
122-west	122-west	Gording	A	zijkant	11,2	Eind 2011
122-west	122-west	Gording	A	zijkant (beschut)	16,5	Eind 2011
141-west	141-west	Gording	A	zijkant (beschut)	19,8	Eind 2011
Gemiddeld		Gording		bovenzijde	6,2	Eind 2011
Gemiddeld		Gording		zijkant	11,4	Eind 2011

Tabel E.3: Carbonatatie diepte in de bovenzijde van de stempels

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel	Zijde	Carbonatatie- diepte (mm)	Meting
					Gemiddeld	
117-1	M117.st.1	Stempel	A	bovenzijde	15	Eind 2011
122-1	122-1	Stempel	A	bovenzijde	7,5	Eind 2011
133-5	133-5	Stempel	A	bovenzijde	9,0	Eind 2011
141-5	141-5	Stempel	J	bovenzijde	1,0	Eind 2011
104	13	Stempel	A	Boven	4	November 2014
104	14	Stempel	A	Bovenzijde	5	November 2014
109-5	15	Stempel	A	Boven	3,5	November 2014
109-5	39	Stempel	A	Boven	3	November 2014
109-5	43	Stempel	A	Boven	3	November 2014
115-1	19	Stempel	A	Boven	10	November 2014
117-2	20	Stempel	A	Boven	7,5	November 2014
122-1	21	Stempel	A	Boven	4	November 2014
122-1	44	Stempel	A	Boven	15	November 2014
133-5	27	Stempel	A	Boven	8	November 2014
133-5	48	Stempel	A	Boven	11,5	November 2014
136-3	31	Stempel	A	Boven	2	November 2014
141-5	32	Stempel	J	Boven	2,5	November 2014
Gemiddeld		Stempel		Boven	8,1	Eind 2011
Gemiddeld		Stempel		Boven	6,1	November 2014

Tabel E.4: Carbonatatie diepte in de onderzijde van de stempels

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel	Zijde	Carbonatatie- diepte (mm)	Meting
					Gemiddeld	
109-5 beneden	Second series 3	Stempel	A	onderzijde	15	Eind 2011
122-1	122-1	Stempel	A	onderzijde	9,5	Eind 2011
133-5	133-5	Stempel	A	onderzijde	17,5	Eind 2011
141-5	141-5	Stempel	J	onderzijde	5,0	Eind 2011
109-5	18	Stempel	A	Onderzijde	6,5	November 2014
109-5	42	Stempel	A	Onderzijde	6	November 2014
122-1	24	Stempel	A	Onderzijde	5	November 2014
133-5	30	Stempel	A	Onderzijde	9	November 2014
133-5	51	Stempel	A	Onderzijde	11	November 2014
141-5	35	Stempel	J	Onderzijde	2,5	November 2014
Gemiddeld		Stempel		onderzijde	11,8	Eind 2011
Gemiddeld		Stempel		onderzijde	6,7	November 2014

Tabel E.5: Carbonatatie diepte in de zijkant van de stempels

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel	Zijde	Carbonatatie- diepte (mm)	Meting
					Gemiddeld	
109-5 noord	Second series 1	Stempel	A	zijkant(lg)	8	Eind 2011
109-5 zuid	Second series 2	Stempel	A	zijkant(hg)	12	Eind 2011
122-1	122-1	Stempel	A	zijkant(hg)	9,5	Eind 2011
122-1	122-1	Stempel	A	zijkant(lg)	9,8	Eind 2011
133-5	133-5	Stempel	A	zijkant(hg)	14,2	Eind 2011
133-5	133-5	Stempel	A	zijkant(lg)	12,5	Eind 2011
141-5	141-5	Stempel	J	zijkant(hg)	3,0	Eind 2011
141-5	141-5	Stempel	J	zijkant(lg)	3,8	Eind 2011
109-5	16	Stempel	A	Zijkant	3,5	November 2014
109-5	17	Stempel	A	Zijkant	3,5	November 2014
109-5	40	Stempel	A	Zijkant	7,5	November 2014
109-5	41	Stempel	A	Zijkant	7,5	November 2014
109-5	41	Stempel	A	Zijkant	8,2	November 2014
122-1	22	Stempel	A	Zijkant	9	November 2014
122-1	23	Stempel	A	Zijkant	4	November 2014
122-1	45	Stempel	A	Zijkant	15	November 2014
122-1	46	Stempel	A	Zijkant	15	November 2014
133-5	28	Stempel	A	Zijkant	9,5	November 2014
133-5	29	Stempel	A	Zijkant	11	November 2014
133-5	49	Stempel	A	Zijkant	7	November 2014
133-5	50	Stempel	A	Zijkant	10,8	November 2014
141-5	33	Stempel	J	Zijkant	2,5	November 2014
141-5	34	Stempel	J	Zijkant	2	November 2014
Gemiddeld		Stempel		Zijkant	9,1	Eind 2011
Gemiddeld		Stempel		Zijkant	7,7	November 2014

Tabel E.6: Carbonatatie diepte in de tussenwanden

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel	Zijde	Carbonatatie diepte (mm)	Meting
					Gemiddeld	
15	6	Tussenwand	C	West	17	Voorjaar 2013
15	6	Tussenwand	C	West	18	Voorjaar 2013
15	6	Tussenwand	C	Oost	18	Voorjaar 2013
26	9	Tussenwand	M		18,5	Voorjaar 2013
26	9	Tussenwand	M		24,7	Voorjaar 2013
26	9	Tussenwand	M		18	Voorjaar 2013
Gemiddeld		Tussenwand			19,0	Voorjaar 2013

Tabel E.7: Carbonatatie diepte in de vloer

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Carbonatatie diepte (mm)	Meting
			Gemiddeld	
9	2	Vloer	15	Voorjaar 2013
9	2	Vloer	9,5	Voorjaar 2013
9	2	Vloer	9	Voorjaar 2013
15	7	Vloer	0	Voorjaar 2013
15	7	Vloer	0	Voorjaar 2013
15	7	Vloer	0	Voorjaar 2013
26	10	Vloer	0	Voorjaar 2013
26	10	Vloer	0	Voorjaar 2013
26	10	Vloer	8	Voorjaar 2013
129	12	Vloer	7	Voorjaar 2013
129	12	Vloer	5	Voorjaar 2013
129	12	Vloer	6,3	Voorjaar 2013
Gemiddeld			5,0	Voorjaar 2013

Tabel E.8: Carbonatatie diepte in de wanden van het gesloten en het open deel van de tunnel

Moot	Code/volgnr.	Onderdeel	Mengsel	Zijde	Carbonatatie- diepte (mm)	Meting
					Gemiddeld	
148-west	148-west	Wand	D	Zijkant - gesloten	9,5	Eind 2011
148-west	148-west	Wand	D	Zijkant - gesloten	8,2	Eind 2011
9	36	Wand	C	Zijkant - gesloten	10	November 2014
15	38	Wand	C	Zijkant - gesloten	6	November 2014
17	2	Wand	M	Zijkant - gesloten	5	November 2014
26	4	Wand	M	Zijkant - gesloten	11	November 2014
50	6	Wand	M	Zijkant - gesloten	10	November 2014
74	9	Wand	M	Zijkant - gesloten	14,6	November 2014
96	11	Wand	M	Zijkant - gesloten	12,5	November 2014
109-west	Control 2	Wand	D	Zijkant - open	11,5	Eind 2011
110-west	Control 1	Wand	D	Zijkant - open	13	Eind 2011
133-west	133-west	Wand	D	Zijkant - open	13,5	Eind 2011
148-west	148-west	Wand	D	Zijkant - open	8,2	Eind 2011
148-west	148-west	Wand	D	Zijkant - open	7,0	Eind 2011
151-west	151-west	Wand	C	Zijkant - open	8,8	Eind 2011
151-west	151-west	Wand	C	Zijkant - open	6,5	Eind 2011
9	3	Wand	C	Zijkant - open	18,5	Voorjaar 2013
9	3	Wand	C	Zijkant - open	14,4	Voorjaar 2013
9	3	Wand	C	Zijkant - open	18	Voorjaar 2013
9	4	Wand	C	Zijkant - open	22	Voorjaar 2013
9	4	Wand	C	Zijkant - open	30	Voorjaar 2013
9	4	Wand	C	Zijkant - open	29	Voorjaar 2013
9	37	Wand	C	Zijkant - open	8,6	November 2014
104	12	Wand		Zijkant - open	10,5	November 2014
151	56	Wand	C	Zijkant - open	3	November 2014
156	57	Wand	C	Zijkant - open	10	November 2014
Gemiddeld		Wand		Zijkant - gesloten	8,9	Eind 2011
Gemiddeld		Wand		Zijkant - gesloten	9,9	November 2014
Gemiddeld		Wand		Zijkant - gesloten	9,6	Totaal
Gemiddeld		Wand		Zijkant - open	9,8	Eind 2011
Gemiddeld		Wand		Zijkant - open	22,0	Voorjaar 2013
Gemiddeld		Wand		Zijkant - open	8,0	November 2014
Gemiddeld		Wand		Zijkant - open	13,7	Totaal



## F Vorstdooibestandheid

Tabel F.1: Vorstdooibestandheid van de kernen die zijn geboord in november 2014  
[05]

Moot	Volgnr.	Onderdeel	Zijde	Mengsel	Massaverlies (kg/m <sup>2</sup> ) na .. cycli					
					0	7	14	28	42	56
17	1	Dak	Onderzijde		0	0	0	0	0,18	5,92
26	3	Dak	Onderzijde		0	0	0	0	0	0
50	5	Dak	Onderzijde		0	0,04	0,06	2,3	5,32	10,46
74	7	Dak	Onderzijde		0	0	0	0	0	0,02
96	10	Dak	Onderzijde		0	0	0	0	0,04	0,06
129	25	Dak	Onderzijde		0	0	0	0	1,46	4,88
104	13	Stempel	Boven		0	0,28	1,16	2,2	2,78	6,82
109	15	Stempel	Boven	A3	0	0,26	0,62	1,3	2,28	3,06
109	39	Stempel	Boven	A3	0	0,2	0,3	0,62	0,9	1,4
109	43	Stempel	Boven	A3	0	0,18	0,32	0,44	0,62	1,14
115	19	Stempel	Boven	A	0	0,54	0,76	4,48	5,78	7,2
117	20	Stempel	Boven	A	0	0,96	1,36	2,92	6,02	9,06
122	21	Stempel	Boven	A	0	0,52	1,62	2,2	4,96	6,32
122	44	Stempel	Boven	A	0	0,22	0,28	0,54	2,64	4,86
133	27	Stempel	Boven	A	0	0,24	0,36	3,78	5,08	6,62
133	48	Stempel	Boven	A	0	0,18	0,36	0,54	2,8	4,84
136	31	Stempel	Boven		0	0,22	0,32	0,44	0,72	0,86
141	32	Stempel	Boven	J	0	0,2	0,34	0,54	0,7	0,98
109	18	Stempel	Onderzijde	A3	0	1,3	2,04	3,7	5,6	6,1
109	42	Stempel	Onderzijde	A3	0	0,04	0,66	3,6	7,1	9,5
122	24	Stempel	Onderzijde	A	0	0,1	0,16	0,56	2,82	4,74
122	47	Stempel	Onderzijde	A	0	0,02	1,04	6,34	6,94	7,02
133	30	Stempel	Onderzijde	A	0	0,22	0,44	3,86	7,54	9,22
133	51	Stempel	Onderzijde	A	0	0,08	0,16	3,48	6,38	8,44
141	35	Stempel	Onderzijde	J	0	0,28	0,42	2,14	3,72	4,6
109	16	Stempel	Zijkant	A3	0	0,18	1,06	2,8	5,32	5,54
109	17	Stempel	Zijkant	A3	0	0,2	0,4	1	2,18	3,36
109	40	Stempel	Zijkant	A3	0	0,4	2,9	4,12	6,6	8,12
109	41	Stempel	Zijkant	A3	0	0,92	2,52	4,64	5,58	7,18
122	22	Stempel	Zijkant	A	0	0,52	1,06	4,84	7,36	10,54
122	23	Stempel	Zijkant	A	0	0,02	0,02	0,06	5,68	10,5
122	45	Stempel	Zijkant	A	0	0,16	0,24	2,18	4,08	5,6
122	46	Stempel	Zijkant	A	0	0	1,02	2,16	4,66	10,76
133	28	Stempel	Zijkant	A	0	2,14	4,02	7,24	14,92	17,62

133	29	Stempel	Zijkant	A	0	0,32	1,18	5,72	10,92	16,8
133	49	Stempel	Zijkant	A	0	0,02	2,68	6,1	7,04	9,62
141	33	Stempel	Zijkant	J	0	0,02	0,16	1,7	2,98	3,18
141	34	Stempel	Zijkant	J	0	0,02	0,02	0,04	1,08	2,94
9	36	Wand	West		0	0,86	2,7	5,58	7,94	10,6
15	38	Wand	West		0	0,06	0,86	2,56	3,24	3,92
17	2	Wand	West		0	0,02	0,08	0,3	3,58	4,7
26	4	Wand	West		0	0,62	1,94	5,38	7,58	9,94
50	6	Wand	West		0	1,64	2,76	5,42	8,64	12,96
96	11	Wand	West		0	0,06	0,74	1,54	1,8	1,98
104	12	Wand	West		0	0,32	4,28	9,82	12,8	17,94
151	56	Wand	West		0	0,08	0,7	1,58	2,12	2,76
156	57	Wand	West		0	0,5	0,8	1,7	2,02	3,14