

2014•2015
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Methodiek ter remediëring van betonpathologieën toegepast op de Deschaneltunnel in Schaarbeek

Promotor :
Prof. ir. Pieter BAEKELAND

Promotor :
ir. KOEN WILLEMS

Axel Lowier

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015
Faculteit Industriële
ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Methodiek ter remediëring van betonpathologieën
toegepast op de Deschaneltunnel in Schaarbeek

Promotor :
Prof. ir. Pieter BAEKELAND

Promotor :
ir. KOEN WILLEMS

Axel Lowier

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Woord vooraf

Het schrijven van een thesis is een proces dat met veel “ups” en “downs” verloopt. De grootste uitdaging is de correcte benadering van het onderwerp te vinden en het nuttige van het onnuttige te onderscheiden. Ik zou hiervoor graag mijn interne promotor prof. ir. Baekeland willen bedanken die mij deze uitdaging heeft helpen overwinnen. Niet enkel tijdens de individuele begeleidingsmomenten, maar tevens tijdens zijn lessen in het kader van het vak beton- en steenconstructies, heeft hij een heldere visie op de benadering van het materiaal beton op mij overgebracht.

Een even grote dank zou ik willen uitspreken ten opzichte van mijn externe promotor: ir. Willems van Infrabel en het gehele team van Infrabel dat mij tijdens mijn masterproef de mogelijkheid gaf om praktijkervaring op te doen door mij een onderwerp aan te reiken en mij gebruik te laten maken van hun infrastructuur. Hierbij zou ik tevens graag mevr. Aelbrecht willen bedanken voor haar vakkundige begeleiding tijdens het plaatsbezoek.

Het hervatten van mijn studie was niet mogelijk geweest zonder de hulp van BVBA Vandebroek en Co uit Heusden-Zolder. De directie die het mogelijk maakte om met glijdende uren te werken, gecombineerd met de fijne collega's, zorgde ervoor dat ik aan al mijn verplichtingen die buiten de studie vielen, kon voldoen. Ik dank hen hiervoor van harte.

Tot slot zou mijn dankwoord niet volledig zijn zonder mijn ouders en mijn vriendin te bedanken. Zij hebben mij gemotiveerd om de vele “downs” te overwinnen en mij met mijn voeten op de grond te houden tijdens de “ups”.

Inhoudsopgave

WOORD VOORAF	1
LIJST VAN TABELLEN	7
LIJST VAN FIGUREN.....	9
ABSTRACT	11
ABSTRACT IN ENGLISH.....	13
1 INLEIDING.....	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling.....	15
1.3 Doelstellingen.....	16
2 PATHOLOGIEËN	17
2.1 Chemische pathologieën.....	17
2.1.1 Alkali-silicareactie (ASR)	17
2.1.2 IJzer(II)sulfide en Mangaan(II)sulfide (Blauwkleuring)	20
2.1.3 Carbonatatie	21
2.1.4 Chlooraantasting	23
2.1.5 Sulfaataantasting.....	25
2.1.6 Zuuraantasting	27
2.1.7 Biogene zwavelzuuraantasting	29
2.1.8 Microbiologische salpeterzuuraantasting.....	30
2.1.9 Aantasting door koolzuurhoudend water	30
2.2 Fysische pathologieën	31
2.2.1 Drogingskrimp (hydraulische of uitdrogingskrimp)	31
2.2.2 Autogene krimp (auto-uitdrogingskrimp of chemische krimp).....	31
2.2.3 Plastische krimp	32
2.2.4 Thermische krimp.....	32
2.2.5 Afspatten of spalling	33
2.2.6 Bekistingsproblemen.....	34
2.2.7 Ontmenging	34
2.2.8 Differentiële verdichting.....	35
2.2.9 Vorst-dooi cycli	39
2.2.10 Zwerfstromen	40
2.3 Mechanische pathologieën	41

2.3.1	Belastingen.....	41
3	PREVENTIEVE REMEDIËRING.....	45
3.1	Oorzaken analyse.....	45
3.2	Schade en gevaar analyse.....	46
3.2.1	Resultaten.....	49
3.3	Herkenning pathologieën.....	51
3.4	Milieu- en omgevingsklassen.....	53
3.5	Constructieve schikking.....	58
3.6	Uitvoering betonconstructies.....	59
3.7	Conclusie.....	59
4	CURATIEVE REMEDIËRING.....	61
4.1	Normering.....	61
4.2	Stappenplan voor een reparatie- of beschermingsproces.....	61
4.3	Principes.....	64
4.3.1	Principe 1: Bescherming tegen indringing.....	64
4.3.2	Principe 2: Vochtbeheersing.....	67
4.3.3	Principe 3: Betonrenovatie.....	68
4.3.4	Principe 4: Structurele versterking.....	70
4.3.5	Principe 5: Verhoging fysische resistentie.....	71
4.3.6	Principe 6: Weerstandsverhoging tegen chemicaliën.....	72
4.3.7	Principe 7: Behoud en herstelling van passiviteit.....	72
4.3.8	Principe 8: Weerstandsverhoging.....	73
4.3.9	Principe 9: Kathodische controle.....	73
4.3.10	Principe 10: Kathodische weerstand.....	74
4.3.11	Principe 11: Beheersing van anodische gebieden.....	74
4.4	Reparatiemethodes per pathologie.....	75
4.5	Zelf herstellend beton.....	76
5	TOEPASSING OP TUNNELBOUW.....	79
5.1	Algemeen.....	79
5.2	Documenteren constructie.....	79
5.3	Beoordeling.....	79

5.4	Bepalen strategie	80
5.5	Ontwerp van de reparatie.....	81
5.6	De werkzaamheden.....	81
5.7	Aanvaarding en beoordeling van de werkzaamheden.....	81
6	DESCHANELTUNNEL.....	83
6.1	Stap 1: Documenteren tunnel.....	83
6.1.1	Ligging.....	83
6.1.2	Tunnelopbouw en geschiedenis	84
6.1.3	Huidige toestand.....	86
6.2	Beoordeling.....	87
6.2.1	Omgevings- en milieuklassen	87
6.2.2	Optredende pathologieën.....	88
6.2.3	Inwerkend schademechanisme	93
6.3	Bepalen strategie	93
6.3.1	Beperking indringing van buitenaf	93
6.3.2	Carbonatatie	95
6.3.3	Zwerfstromen	98
6.3.4	Aanvullende beschermings- en reparatiemogelijkheden	98
7	BESLUIT	101
7.1	Besluiten studie	101
8	BIBLIOGRAFIE	105
9	BIJLAGEN.....	109
	Bijlage A: Inspectieverslag	110
	Bijlage B: Omgevingsklassen.....	139
	Bijlage C: Oorspronkelijke technische tekeningen	143

Lijst van tabellen

TABEL 1: COURANTE STERKE EN ZWAKKE ZUREN.....	27
TABEL 2: RELATIES TUSSEN PATHOLOGIEËN EN HUN OORZAKEN	45
TABEL 3: RELATIES TUSSEN PATHOLOGIEËN EN HUN SCHADE.....	46
TABEL 4: BEOORDELINGSTABEL VOOR DE SCHADELIJKHEID EN DE GEVAARLIJKHEID	49
TABEL 5: RESULTATEN GEVAAR- EN SCHADELIJKHEIDSANALYSE.....	50
TABEL 6: OMGEVINGSKLASSEN MET BIJBEHORENDE MILIEUKLASSEN (11).....	55
TABEL 7: GRENSWAARDEN VOOR DE SAMENSTELLING VAN BETON IN FUNCTIE VAN DE MILIEUKLASSEN (10)	56
TABEL 8: GRENSWAARDEN VOOR DE MILIEUKLASSEN MET CHEMISCHE AANTASTING DOOR NATUURLIJKE GROND EN GRONDWATER (10)	57
TABEL 9: AANBEVOLEN WAARDEN VAN w_{MAX} (MM) (25)	58
TABEL 10: LIJST MET HERSTELPRINCIPES (27).....	63
TABEL 11: EISEN VOOR STRUCTURELE EN NIET STRUCTURELE HERSTELMORTELS (32)	68
TABEL 12: VOORBEELD HERSTEMETHODES PER PATHOLOGIE	75
TABEL 13: HERSTELLINGSMOGELIJKHEDEN MITS ONBEREIKBARE INDRINGING	80
TABEL 14: DEDUCTIE VAN DE PATHOLOGIEËN IN DE DESCHANELTUNNEL	91
TABEL 15: UITGEBREIDE DEDUCTIE VAN DE PATHOLOGIEËN IN DE DESCHANELTUNNEL	92
TABEL 16: DIAGNOSE	93

Lijst van figuren

FIGUUR 1: SCHEURPATROON ASR (3).....	19
FIGUUR 2: KEGELVORMING ASR (3).....	20
FIGUUR 3: REACTIEMECHANISME VAN CARBONATATIE	22
FIGUUR 4: CARBONATATIE WAARGENOMEN IN DE DESCHANELTUNNEL	22
FIGUUR 5: CHLOORAANTASTING WAARGENOMEN IN ZEEOMGEVING	24
FIGUUR 6: DETAIL CHLOORAANTASTING	24
FIGUUR 7: BETON IN ZURE OMGEVING: LINKS PH1 EN RECHTS PH0 (14).....	29
FIGUUR 8: GEDRAG BETON BIJ BRAND (20).....	33
FIGUUR 9: CONFIGURATIES TRILMOTOREN	36
FIGUUR 10: THEORETISCHE GOLVEN.....	36
FIGUUR 11: MOGELIJK INTERFERENTIEPATROON – CONSTRUCTIEF.....	37
FIGUUR 12: MOGELIJK INTERFERENTIEPATROON – GEDEELTELIJK DESTRUCTIEF	37
FIGUUR 13: CONFIGURATIES TRILMOTOREN MET UITDOVENDE GOLVEN	38
FIGUUR 14: REACTIEMECHANISME VAN ZWERFSTROMEN.....	41
FIGUUR 15: INDELING CONSTRUCTIEVE ELEMENTEN – BALK/LIGGER/PLAAT	42
FIGUUR 16: INDELING CONSTRUCTIEVE ELEMENTEN – KOLOM/WAND.....	42
FIGUUR 17: RELATIES TUSSEN EN 206-1 EN DE NORMEN VOOR ONTWERP BEREKENING EN UITVOERING. (10)	53
FIGUUR 18: CITAAT UIT ANNEX F VAN NBN EN 13670.....	59
FIGUUR 19: SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN HYDROFOBE IMPREGNERING (28)	64
FIGUUR 20: SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN EEN IMPREGNERING (28).....	65
FIGUUR 21: SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN EEN BEKLEDING (28)	65
FIGUUR 22: WERKINGSMECHANISME ZELFHELEND BETON (37)	77
FIGUUR 23: LIGGING DESCHANELTUNNEL (34)	83
FIGUUR 24: ASLIJN DESCHANELTUNNEL (35).....	83
FIGUUR 25: SATELLIETFOTO TOESTAND IN 1990 (36).....	84
FIGUUR 26: SATELLIETFOTO HUIDIGE TOESTAND (36).....	84
FIGUUR 27: SNEDE VOLGENS ASLIJN TUNNEL (37)	85
FIGUUR 28: SNEDE DWARS OP ASLIJN TUNNEL (37).....	85
FIGUUR 29: SATELLIETBEELDEN BOVENBOUW (38)	85
FIGUUR 30: VOORBEELD UIT INSPECTIERAPPORT (39)	86
FIGUUR 31: PROJECTIEPRINCIPE VAN HET INSPECTIERAPPORT	86
FIGUUR 32: OMGEVINGSKLASSEN DESCHANELTUNNEL.....	87
FIGUUR 33: ONGEWENSTE METALEN IN HET BETON.....	89
FIGUUR 34: VERWEERD MATERIAAL IN VOEG.....	89
FIGUUR 35: BLOOTLIGGENDE WAPENINGEN.....	89
FIGUUR 36: VERBINDINGSSTRUCTUUR TUSSEN STROOMLEIDING EN BETON.....	89
FIGUUR 37: GRINDNEST MET BLOOTLIGGENDE WAPENING.....	90
FIGUUR 38: BLOOTLIGGENDE WAPENING MET WEINIG BETONDEKKING	90
FIGUUR 39: GRINDNEST EN VERVUILING VAN BEKISTING.....	90
FIGUUR 40: BETONAFBROKKELING TER HOOGTE VAN DE AANSLUITING VAN DE STROOMLEIDING	90
FIGUUR 41: THEORETISCHE DICHTING TER HOOGTE VAN DE VOEG (37)	94
FIGUUR 42: HUIDIGE TOESTAND VAN DE VOEG	94
FIGUUR 43: PRINCIPESCHETS REPARATIE	94
FIGUUR 44: STAPPENPLAN VOOR DE REPARATIE VAN PRINCIPE 7.2 MITS VOLDOENDE BETONDEKKING	96
FIGUUR 45: STAPPENPLAN REPARATIEPRINCIPE 11.1 ZONDER VASTSTELLING VAN CARBONATATIE	96
FIGUUR 46: STAPPENPLAN REPARATIEPRINCIPE 11.1 MITS CARBONATATIE.....	97
FIGUUR 47: VASTGESTELDE PATHOLOGIE IN HET VERLEDEN VERKEERD GEREpareerd	99

Abstract

De Deschaneltunnel in Schaarbeek is een spoorwegtunnel waarvan de betonnen draagstructuur pathologieën vertoont. Het doel van deze masterproef is om in de eerste plaats te onderzoeken welke pathologieën kunnen optreden, wat hun gevolgen zijn en hoe ze te remediëren indien nodig.

Om deze masterproef toepasbaar te maken op alle betonstructuren, vertrekt deze studie vanuit een veralgemening. De meest voorkomende pathologieën, hun werkingsmechanisme en schade zullen gedocumenteerd en beschreven worden. Omdat een remediëring niet altijd nodig is, zal er tevens een inschatting van de schadelijkheid gebeuren.

Aangezien de studie vertrekt vanuit een breed scala aan pathologieën, is de logische volgende stap dat voor elke pathologie in elke situatie oplossingsmethodes worden aangereikt en dit zowel preventief als curatief.

Naderhand wordt onderzocht of deze methodes kunnen toegepast worden op een tunnel en in de laatste plaats op de Deschaneltunnel. Het resultaat van deze studie zal dus bestaan uit een naslagwerk waarin de meest voorkomende schademechanismen en hun oplossingen worden beschreven en dit specifiek toegepast op tunnels en de Deschaneltunnel in het bijzonder.

Dit werk zal iedereen die betrokken is bij het ontwerpen van betonstructuren of betonherstellingen helpen optredende betonschade te begrijpen en te vermijden. Daarenboven worden de geldende normen toegelicht en dit zowel voor de preventieve als de curatieve remediëring. Hierdoor zal het correct aanpakken van een betonreparatie vereenvoudigd worden.

Abstract in English

The Deschanel tunnel in Schaarbeek is a railroad tunnel of which the concrete supporting structure shows defects. The goal of this paper is to research which defects can occur, what their consequences are and how they can be dealt with.

To widen the research to all concrete structures this paper will begin with a generalization. The most common defects will be documented. This includes the way they work and the damage they can cause. Since a condition does not necessarily have to be regarded as a defect, an estimation will be made about the harmfulness and danger every defect causes.

After this first part, the studied defects, prevention and reparation techniques will be applied to tunnels and the Deschanel tunnel in specific. This paper will result in a reference work on the one side, and a solution for the Deschanel tunnel on the other.

The paper will help everyone involved with concrete design or repair to understand and prevent defects. In addition, all applying laws will be explained and referred to. By doing so, the correct way of dealing with defects will be simplified.

1 Inleiding

1.1 Situering

De afgelopen eeuw zijn er verschillende vooruitgangen geboekt op betontechnologisch vlak. Beton is duurzamer geworden en de mogelijkheden om een constructie aan te passen aan de optredende belastingen zijn toegenomen. Het materiaal is uitgegroeid van ruw, moeilijk verwerkbaar en lelijk tot een multifunctioneel materiaal dat op verschillende manieren kan aangewend worden. Niet enkel is het structurele gebruik van beton geëvolueerd, ook het uitzicht kent een vooruitgang. Architecten en ontwerpers gebruiken beton al lang niet meer enkel om structurele redenen maar ook omwille van zijn esthetiek.

Gedurende lange tijd was de grootste drijfveer voor het continu innoveren het besparen van geld. De afgelopen jaren is er aan de evolutie van betontechnieken buiten een economisch ook een ecologisch aspect toegevoegd. Constructies moeten zo milieuvriendelijk mogelijk gebouwd worden en moeten een zo lang mogelijke levensduur hebben. Dit houdt voor de ontwerper in dat er buiten de ontwerprichtlijnen eigen aan een constructie ook een goed begrip moet zijn van de mogelijke problemen die tijdens de gebruiksperiode van het bouwwerk kunnen optreden. Gebaseerd op dit begrip zal de ontwerper in staat zijn om eventueel optredende pathologieën te kunnen inschatten, voorkomen of genezen.

Het onderzoek gebeurt in samenwerking met Infrabel. Dit is de infrastructuurbeheerder van het gehele Belgische spoorwegennetwerk. Alle bouwwerken met betrekking tot het spoorverkeer zitten in hun beheer. Dit omvat grote structuren zoals stationsgebouwen, bruggen en tunnels, maar ook kleinere constructies zoals keerwanden en afwateringskanalen. Deze masterproef richt zich op een van deze bouwwerken.

1.2 Probleemstelling

De draagstructuur van de Deschaneltunnel vertoont pathologieën. De bedoeling van het onderzoek is om de pathologieën in deze structuur te bestuderen en naderhand te remediëren. De tunnel is 546 m lang en gelegen in Schaarbeek op spoorlijn 161. Aanvankelijk was van een tunnel geen sprake. Tot 1930 lag de spoorweg in een open gleuf doorheen de stad, die op sommige plaatsen overbrugd werd. Deze bruggen dateren van 1911 en maken nog steeds deel uit van de tunnel. De feitelijke betonnen draagstructuur waarop het onderzoek wordt toegepast, dateert van 1931.

1.3 Doelstellingen

In het eerste deel van het onderzoek wordt nagegaan welke soorten pathologieën er kunnen optreden, hoe ze werken en hoe ze schade veroorzaken. Dit deel is toepasbaar op alle types beton en allerlei soorten structuren. De beperkingen eigen aan tunnelbouw worden voorlopig buiten beschouwing gelaten.

De remediëring is het logische vervolg op het eerste deel. Er wordt onderzocht hoe gevaarlijk pathologieën kunnen zijn en hoe ze vermeden kunnen worden. Naderhand wordt bekeken welke stappen ondernomen kunnen worden als een pathologie zich heeft gemanifesteerd. Na het lezen van het eerste deel is het de bedoeling dat de lezer buiten een verworven inzicht, ook beschikt over samenvattende tabellen en figuren. Zowel de oorzaken als de gevolgen zullen per pathologie worden getabelleerd zodat het diagnosticeren van een optredende pathologie vereenvoudigd zal worden. De daarna te volgen stappen zullen tevens overzichtelijk worden weergegeven.

Na het beschrijven en remediëren van de pathologieën zal onderzocht worden welke factoren eigen aan een tunnel een invloed hebben op het constateren, beoordelen en aanpakken van een pathologie. Voorgaand onderzoek wordt in de laatste stap toegepast op de Deschaneltunnel.

Deze scriptie zal dus langs de ene kant een leidraad vormen voor het preventief en curatief remediëren van optredende betonpathologieën en een oplossing aanreiken voor het specifiek geval van de Deschaneltunnel in Schaarbeek.

2 Pathologieën

Een pathologie is een onaanvaardbare toestand die het gevolg kan zijn van de constructiewijze, slijtage of schade. De classificatie gebeurt op basis van het reactiemechanisme dat ze veroorzaakt en niet op het gevolg. Zo kan bijvoorbeeld een ongewenste barst het gevolg zijn van een accidentele belasting evenals van een alkali-silicareactie. Deze logica vloeit voort uit het inzicht dat de preventieve remediëring steeds zal voortvloeien uit een grondige kennis van het reactiemechanisme en de mogelijkheid tot het blokkeren van dit mechanisme. Zelfs wanneer een optredende pathologie curatief behandeld dient te worden, is het blokkeren en het eventueel omkeren van het mechanisme de eerste logische stap. Wanneer dit niet mogelijk is, zullen enkel de gevolgen behandeld worden.

Men deelt de pathologieën op in 4 groepen:

- chemische pathologieën zijn het gevolg van een chemische reactie in of op het betonmengsel of op de constructie;
- fysische pathologieën zijn het gevolg van fysische verschijnselen die inwerken op het betonmengsel of op de constructie met uitzondering van gevolgen van belastingen (vorst-dooi cycli zijn een voorbeeld van fysische pathologieën);
- mechanische pathologieën leunen kort aan met de fysische pathologieën, met dat verschil dat ze het gevolg zijn van al dan niet ongewenste belastingen met een vervorming of verplaatsing tot gevolg;
- biologische pathologieën worden veroorzaakt door de aanwezigheid van organismen. Omdat hun schade eigenlijk veroorzaakt wordt door de chemische reacties verbonden aan de aanwezigheid van een organisme, worden ze ingedeeld bij de chemische pathologieën.

2.1 Chemische pathologieën

2.1.1 Alkali-silicareactie (ASR)

2.1.1.1 Reactiemechanisme

De alkali-silicareactie (ASR) is een chemische reactie die ontstaat wanneer voldaan is aan 4 criteria:

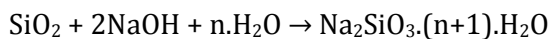
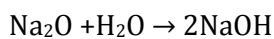
- aanwezigheid van water,
- aanwezigheid van een minimumgehalte aan niet-gebonden alkaliën;
- aanwezigheid van reactieve granulaten (met reactief siliciumdioxide);
- voldoende permeabiliteit.

Alkaliën zijn chemische verbindingen die in staat zijn om een hydroxidegroep af te splitsen. Ze zijn per definitie basisch. Ze kunnen voorkomen in de cementsamenstelling, evenals in de gebruikte granulaten of hulpstoffen van de betonsamenstelling.

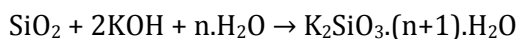
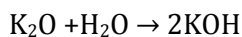
Naast de hoofdbestanddelen van cement, kunnen er in kleinere mate nog verscheidene andere chemische verbindingen aanwezig zijn zoals MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O en Na₂O. In het verder verloop van de tekst zal naar natrium- en kaliumoxide verwezen worden als de alkaliën. Hoewel er nog andere alkaliën in de samenstelling aanwezig zijn, zijn zij de enige die een rol van betekenis zullen spelen in de ASR. Het alkaligehalte van een betonsamenstelling wordt dan ook uitgedrukt in Na₂O-equivalent. (1) (2)

Reactief siliciumdioxide SiO₂ is siliciumdioxide in amorfe toestand. Deze variant kan in verschillende soorten van granulaten voorkomen, en is in tegenstelling tot zijn kristallijne variant reactief.

De alkali-silicareactie voor Na₂O ziet er als volgt uit:



Voor K₂O wordt dit:



Zowel Na₂SiO₃ als K₂SiO₃ zijn gelachtige verbindingen met het vermogen veel water aan zich te binden. Door deze binding gaan de gels zwellen met een verhoging van de inwendige spanning tot gevolg. (2)

Dit mechanisme is enkel mogelijk wanneer voldoende permeabiliteit voor de alkali-ionen in de betonstructuur aanwezig is. De diffusieweerstand staat echter omgekeerd evenredig tot de permeabiliteit. Het onvermogen van de ionen om zich te verplaatsen kan de ASR sterk vertragen zodat deze te traag verloopt om tijdens de verwachte levensduur van de constructie op te treden. (2)

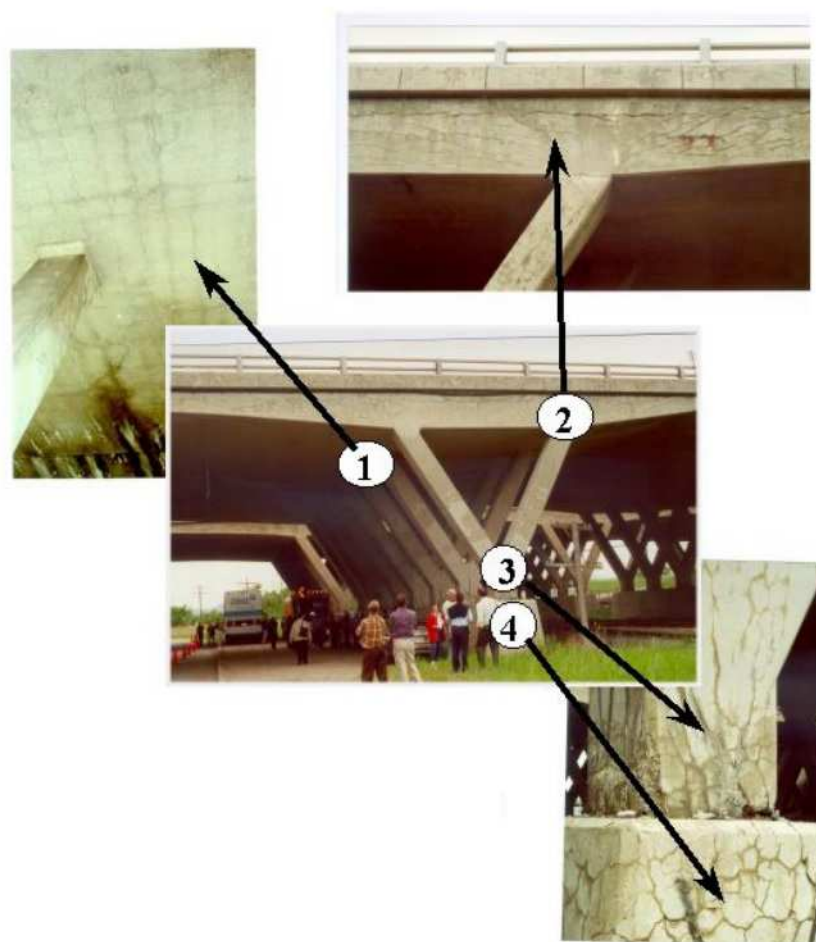
2.1.1.2 Schade

Er bestaan twee types van schade ten gevolge van een alkali-silicareactie. De primaire schade is schade die volledig te wijten is aan de ASR. De secundaire schade is schade die optreedt doordat er een ASR heeft plaatsgevonden ten gevolge van een andere pathologie.

De schade uit zich op twee verschillende manieren: een scheurpatroon dat bestaat uit één of een combinatie van 4 mogelijkheden:

- scheurvorming in de richting van de hoofdwapening (nr. 1);
- scheurvorming met voorkeursrichting in het vlak met de minste wapening (nr.2);
- scheuren ten gevolge van druk (nr. 3);
- craquelé scheuren (meestal in beton met weinig wapening) (nr.4).

De scheurpatronen zijn voorgesteld in Figuur 1.



Figuur 1: Scheurpatroon ASR (3)

De eerste drie schadepatronen zijn eerder het gevolg van overgedragen spanningen ten gevolge van de belasting in het beton dan van de ASR. De ASR verhoogt gewoon de spanning in het beton zodat het beton het scheurpatroon overneemt dat gepaard zou gaan met een overbelasting. Craquelé scheuren zijn de enige scheuren die zuiver te wijten zijn aan de ASR (mits afwezigheid van andere pathologieën). (4)

Een tweede symptoom is het ontstaan van witte kegels of vlekken aan de oppervlaktes van de structuur. Deze kegels bestaan uit de eerder besproken silicagel. Ten gevolge van roest kunnen deze kegels ook geel of zelfs bruin zijn. Figuur 2 illustreert de kegelvorming. (4)

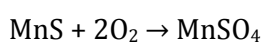
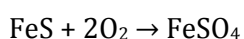


Figuur 2: Kegelvorming ASR (3)

2.1.2 IJzer(II)sulfide en Mangaan(II)sulfide (Blauwkleuring)

2.1.2.1 Reactiemechanisme

Onder blauwkleuring verstaat men de aanwezigheid van FeS (ijzer(II)sulfide) en MnS (mangaan(II)sulfide) in een betonsamenstelling. Deze stoffen komen enkel voor wanneer er hoogovenslakken aan de betonsamenstelling zijn toegevoegd en zuurstof afwezig is. Eens ze in aanraking komen met zuurstof, reageren ze weg volgens het volgende simplistisch voorgestelde reactiemodel:



Zowel ijzer(II)sulfaat als mangaan(II)sulfaat veroorzaken geen verkleuring van het beton. Deze reactie verloopt echter zeer traag in uitgehard beton. (5)

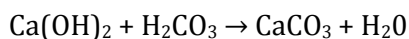
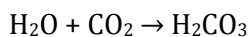
2.1.2.2 Schade

De schade is louter visueel. De aanwezigheid van beide componenten zorgt voor een blauwe kleur maar zorgt niet voor een vermindering van de chemische weerstand of van de sterkte eigenschappen van het beton. Doorgaans vindt het fenomeen enkel plaats wanneer het beton lange tijd in een bekisting heeft gestaan en de vers uitgeharde beton dus weinig in contact met zuurstof is gekomen. De enige mogelijke remediëring is er voor zorgen dat er voldoende zuurstof aan het beton kan.

2.1.3 Carbonatatie

2.1.3.1 Reactiemechanisme

Carbonatatie gebeurt telkens in twee stappen. CO₂ uit de lucht lost op in het poriënwater in de betonstructuur. Door deze reactie kan calciumhydroxide oplossen in het water en reageren met de CO₂. Hierdoor vormt zich een neerslag van calciumcarbonaat (CaCO₃). Onderstaande reacties geven dit weer:



Jong beton heeft een pH-waarde die schommelt tussen 12 en 13. Wanneer Ca(OH)₂ is omgezet in CaCO₃, zal de pH dalen tot 7,3. Dit proces wordt soms ook omschreven als het verouderingsproces van beton of het rottingsproces. (5) (6)

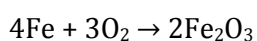
Aangezien er zich een neerslag vormt in de poriën, zullen deze poriën verkleinen. Dit zorgt voor een verhinderde doorgang van poriënwater en CO₂. De carbonatatiesnelheid is daarom omgekeerd evenredig met de afstand tot het betonoppervlak. (5)

Het carbonatatiefront is de grens tussen het gecarbonateerde beton en het onaangetaste beton. (7)

Door het besprenkelen van een oppervlak met fenolfaleïne kan men aantonen of de pH aan het oppervlak gedaald is. Fenolftaleïne verkleurd namelijk paars als de pH lager is dan 9.

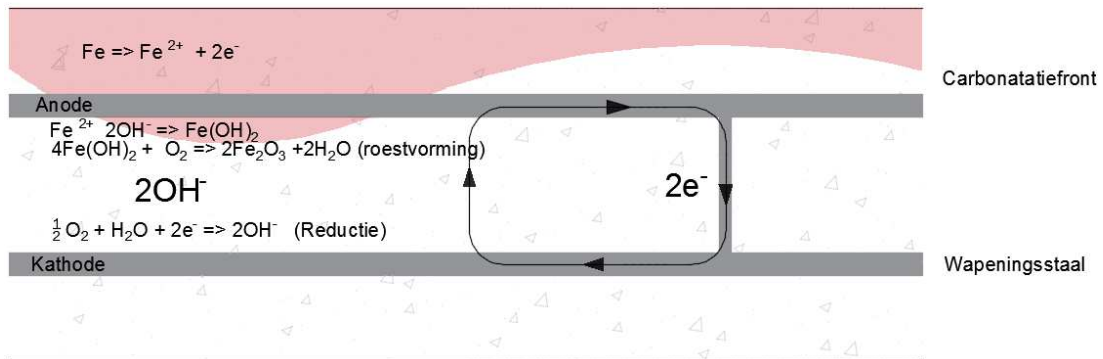
2.1.3.2 Schade

Carbonatatie wordt eigenlijk pas schadelijk op het moment dat het carbonatatiefront de wapening bereikt. In normale omstandigheden vormt er zich een passiveringslaag rond het wapeningsstaal. Deze passiveringslaag ontstaat door de reactie van zuurstof en ijzer:



Het basisch milieu van het beton zorgt ervoor dat deze reactie stopt eens de wapening is gebetonneerd.

Als het carbonatatiefront de wapening bereikt, zal de basische omgeving wegvallen en zal het ijzer in het staal wel verder reageren. Hierdoor komt er in de wapening een stroom van elektronen op gang, zoals weergegeven in Figuur 3. (8)



Figuur 3: Reactiemechanisme van carbonatatie

Ten gevolge van de carbonatatie zal het ijzer oxideren en 2 elektronen afgeven. Hierdoor wordt het wapeningsstaal ingedeeld in anodische en kathodische delen. In aanwezigheid van zuurstof en water reageren deze elektronen tot OH-ionen. Deze ionen reageren met het Fe²⁺ tot ijzerhydroxide. Dit ijzerhydroxide reageert verder samen met zuurstof tot ijzeroxide oftewel roest. De roestvorming gebeurt dus aan de anodische kant. (9)

Het roesten van het wapeningsstaal zorgt voor een volumetoename. Dit levert inwendige spanningen op die tot scheurvorming leiden en zelfs tot het afvallen van stukken beton, zoals Figuur 4 duidelijk maakt.



Figuur 4: Carbonatatie waargenomen in de Deschaneltunnel

2.1.4 Chlooraantasting

2.1.4.1 Reactiemechanisme

Chloriden kunnen op twee mogelijke manieren in het betonmengsel geraken. Ze zijn ofwel aanwezig in het betonmengsel d.m.v. de gebruikte granulaten of cementsoorten (bvb. zeezand is hier zeer gevoelig aan). Ofwel komen de chloride-ionen als vloeistof in aanraking met het beton en dringen ze via poriën binnen in het betonoppervlak. Omwille van deze reden schrijven de normen voor een betonmengsel een maximaal percentage van 0,4 % van de cementmassa voor. Daarenboven wordt beton ingedeeld in milieuklassen naargelang het risico om in aanraking te komen met een overmaat aan chloriden. (10) (11)

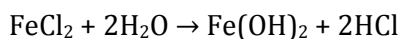
Zolang chloriden niet in aanraking komen met wapeningsstaal, zijn ze onschadelijk voor het beton. Wanneer ze echter in aanraking komen met het wapeningsstaal en hun concentratie hoog genoeg is, kunnen ze aanleiding geven tot zeer plaatselijke corrosie van het wapeningsstaal. (12) (5) (9)

In basische milieus zoals beton bestaat de gevormde passiveringslaag rond het wapeningsstaal uit stabiel Fe_2O_3 en Fe_3O_4 . Wanneer er echter ionen zoals Cl^- in aanraking komen met deze passiveringslaag in combinatie met zuurstof en water, dan zullen er ijzerionen afsplitsen volgens de volgende reactie:

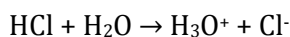


Merk hierbij op dat eerst het ijzer uit de passiveringslaag reageert en naderhand het ijzer uit het wapeningsstaal.

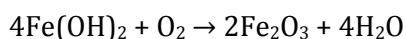
Ijzerchloride (FeCl_2) is zeer oplosbaar in water en vormt volgens volgend mechanisme ijzerhydroxide en zoutzuur (HCl):



Zoutzuur splitst in de aanwezigheid van water volgens de volgende reactie opnieuw op:



Het gevormde zoutzuur zorgt voor een verdere pH-verlaging in de buurt van de reactie, hetgeen opnieuw de reactie versnelt. De feitelijke vorming van ijzeroxide gebeurt dan analoog met de oxidevorming bij carbonatatie:



Merk op dat chloor in deze reacties niet weg reageert. Het chloor rond de wapening kan dus deze cyclus blijven doorlopen. (9) (5) (12)

De aanwezigheid van chloriden kan bepaald worden door na elkaar zilvernitraat (AgNO_3) en kaliumchromaat (K_2CrO_4) op het oppervlak aan te brengen. Als er geen chloriden aanwezig zijn, wordt zilverchromaat (Ag_2CrO_4) gevormd. In aanwezigheid van chloriden wordt er zilverchloride gevormd. In dat geval blijft er enkel de gele kleur van kaliumchromaat over. (9) (5) (6)

2.1.4.2 Schade

In tegenstelling tot carbonatatie is de schade bij chlooraantasting veel plaatselijker. Men spreekt dan ook van putcorrosie. Er ontstaan in de wapeningsstaven kleine putjes die voor een zeer sterke doorsnedeafname zorgen.

Door de geleidelijkheid van een carbonatatiereactie, is er een vrij grote volumetoename van de wapening ten opzichte van de doorsnedeafname, met als gevolg dat er relatief grote visuele schade optreedt aan het betonoppervlak, zonder dat hierbij de structurele integriteit van het bouwwerk in het gedrang komt.

Bij een chloridereactie is er een vrij kleine volumetoename t.o.v. de doorsnedeafname met als gevolg dat de structurele schade vrij ver gevorderd kan zijn alvorens er zich visuele schade voordoet. Roestplekken aan de betonoppervlakte kunnen een voorbode van chlorideaantasting zijn.

Figuur 5 en Figuur 6 illustreren duidelijk de roestuitbloeiing die wijst op een aanzienlijke afname van de wapeningsdoorsnede zonder dat er grote betonschade is. (5) (9) (12)



Figuur 5: Chlooraantasting waargenomen in zeeomgeving

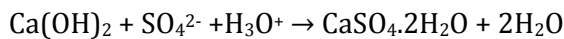


Figuur 6: Detail chlooraantasting

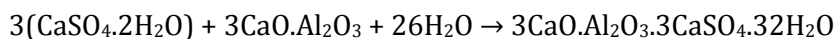
2.1.5 Sulfaataantasting

2.1.5.1 Reactiemechanisme

Sulfaten kunnen net als chloriden op verschillende manieren in beton voorkomen. Ze zijn van nature aanwezig in de grondstoffen of in het aanmaakwater. Zo wordt calciumsulfaat in kleine hoeveelheden als bindingsregelaar toegevoegd tijdens het fabricageproces van cement. Tevens kunnen sulfaten ook voorkomen in het oppervlaktewater of in de lucht. Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en anhydriet (CaSO_4) komen vrij voor in de natuur. Sulfaationen komen voor in combinatie met verschillende kationen, zoals natrium, calcium, ammonium en magnesium. Deze verontreinigingen dringen via diffusie of capillaire opzuiging het beton binnen. De aantasting door sulfaten start bij de reactie tussen de sulfaationen met portlandiet uit de cementklinker ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tot gips (of het gipsanhydriet) zoals onderstaande reactie verduidelijkt:



Dit gips zal op zijn beurt verder reageren tot ettringiet via onderstaande reactie:

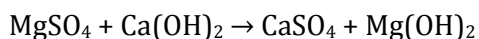


Deze reacties zijn expansief, en treden onmiddellijk op bij het aanmaken van een betonsamenstelling. In de beginfase is dit geen probleem (primaire reactie). Het beton is nog plastisch en kan de expansie verwerken. Maar deze reactie kan ook optreden als het beton reeds is uitgehard (secundaire reactie). Dan zorgt deze reactie wel voor een spanningstoename en zelfs scheuren. Naast de vorming van ettringiet kan sulfaataantasting leiden tot de vorming van thaumasiet ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). Beide mineralen zijn gelijkaardig opgebouwd, maar zijn toch verschillend. Waar ettringiet $\text{Al}(\text{OH})_6$ -groepen heeft, heeft thaumasiet $\text{Si}(\text{OH})_6$ -groepen. (12) (6) (7)

Sulfaataantasting leidt maar effectief tot schade als er voldoende sulfaationen, gehydrateerde calciumaluminaten, portlandiet (afhankelijk van de sulfaatsoort) en water aanwezig zijn. Bovendien leiden niet alle sulfaatverbindingen tot hetzelfde resultaat.

Magnesium- en ammoniumsulfaat zullen meer schade veroorzaken dan bijvoorbeeld natriumsulfaat. Hier reageert niet enkel het sulfaation, maar ook de magnesium- en ammoniumionen tasten het calciumsilicaathydraat aan en breken uiteindelijk de cementsteenstructuur af. Beide aantastingreacties treden tegelijkertijd op. (12) (6) (7) (5)

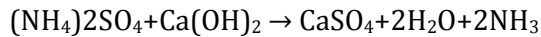
Het eerste agressief zout is magnesiumsulfaat (MgSO_4). Dit reageert met calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tot de reactieproducten calciumsulfaat (CaSO_4) en magnesiumhydroxide ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).



Deze laatste stof zal neerslaan zodat de reactie blijft doorgaan zolang de uitgangproducten aanwezig zijn. Daar $\text{Mg}(\text{OH})_2$ weinig oplosbaar is, zal het neerslaan in

de poriën. Op deze manier worden de poriën geleidelijk gesloten waardoor een beschermende film ontstaat die de verdere reactie vertraagt. Door het verbruik van het calciumhydroxide verlaagt de pH-waarde, waardoor de calciumsilicaathydraten instabiel worden. Zo kunnen magnesiumsilicaathydraten gevormd worden die geen bindende kracht hebben. (12) (6) (7) (5)

Een tweede agressief zout, ammoniumsulfaat ((NH₄)₂SO₄) reageert met calciumhydroxide (Ca(OH)₂) en vormt de reactieproducten calciumsulfaat (CaSO₄), water en ammoniak (NH₃).



Ammoniak is een gas en verlaat het beton waardoor geen evenwicht kan ontstaan. De reactie blijft doorgaan. Ammoniumsulfaat reageert eerst met de kalk van het portlandiet, daarna met de kalk van de andere calciumverbindingen. (12) (6) (7) (5)

2.1.5.2 Schade

Bij de sulfaataantasting van beton moet onderscheid worden gemaakt tussen externe en interne sulfaataantasting.

Voor externe sulfaataantasting moet voldaan worden aan de volgende 3 criteria:

- een hoge permeabiliteit van het beton,
- een sulfaatrijk milieu,
- de aanwezigheid van water.

De concentraties waarin de sulfaten voorkomen en de temperatuur spelen een belangrijke rol. Sulfaataantasting komt vaker voor in koude gebieden. In warme gebieden worden oplosbare sulfaat-zouten gevormd die worden afgevoerd naar het betonoppervlak waar ze uitkristalliseren. (5) (6) (7)

De volgende schadegevallen zijn mogelijk:

- scheurvorming veroorzaakt door secundaire ettringietvorming;
- afzettingen aan het oppervlak;
- cementsteen kleurt wit en verpulvert, waardoor de grindkorrels los komen;
- sterkteverlies veroorzaakt door de vorming van:
 - secundair gips,
 - thaumasiet bij lage temperatuur (< 5°C),
 - silicaathydraten door de sulfaten uit zeewater.

2.1.6 Zuuraantasting

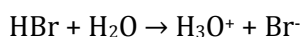
2.1.6.1 Reactiemechanisme

Zoals eerder aangehaald, kunnen zuren worden opgesplitst in zwakke en sterke zuren. De volgende tabel geeft een overzicht van veel voorkomende zwakke en sterke zuren. De zwakke zuren staan in Tabel 1 gesorteerd van sterk naar zwak. (13) (14)

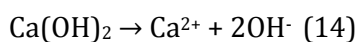
Tabel 1: Courante sterke en zwakke zuren

Sterke zuren				
Naam	Formule			
Zoutzuur	HCl			
Waterstofbromide	HBr			
Waterstofjodide	HI			
Perchloorzuur	HClO ₄			
Salpeterzuur	HNO ₃			
Zwavelzuur	H ₂ SO ₄			
Zwakke zuren				
Naam	Ionisatie evenwicht		Ionisatie-constante Ka = pKa =	
Joodzuur	HIO ₃ + H ₂ O ↔ IO ₃ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,6.10 ⁻¹	0,80
Chlorigzuur	HClO ₂ + H ₂ O ↔ ClO ₂ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,1.10 ⁻²	1,96
Chloorazijnzuur	HC ₂ H ₂ ClO ₂ + H ₂ O ↔ C ₂ H ₂ ClO ₂ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,4.10 ⁻³	2,85
Salpeterigzuur	HNO ₂ + H ₂ O ↔ NO ₂ ⁻ + H ₃ O ⁺		7,2.10 ⁻⁴	3,14
Fluorwaterstofzuur	HF + H ₂ O ↔ F ⁻ + H ₃ O ⁺		6,6.10 ⁻⁴	3,18
Mierenzuur	HCHO ₂ + H ₂ O ↔ CHO ₂ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,8.10 ⁻⁴	3,74
Benzoëzuur	HC ₇ H ₅ O ₂ + H ₂ O ↔ C ₇ H ₅ O ₂ ⁻ + H ₃ O ⁺		6,3.10 ⁻⁵	4,20
Waterstofazide	HN ₃ + H ₂ O ↔ N ₃ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,9.10 ⁻⁵	4,72
Azijnzuur	HC ₂ H ₃ O ₂ + H ₂ O ↔ C ₂ H ₃ O ₂ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,8.10 ⁻⁵	4,74
Waterstofhypochloriet	HOCl + H ₂ O ↔ OCl ⁻ + H ₃ O ⁺		2,9.10 ⁻⁸	7,54
Blauwzuur	HCN + H ₂ O ↔ CN ⁻ + H ₃ O ⁺		6,2.10 ⁻¹⁰	9,21
Fenol	HOC ₆ H ₅ + H ₂ O ↔ OC ₆ H ₅ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,0.10 ⁻¹⁰	10,00
Waterstofperoxide	H ₂ O ₂ + H ₂ O ↔ HO ₂ ⁻ + H ₃ O ⁺		1,8.10 ⁻¹²	11,74

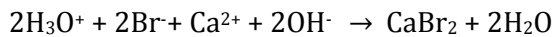
Een zuur zal in een aquatisch milieu steeds voorkomen als ionen. Voor bijvoorbeeld waterstofbromide wordt dit:



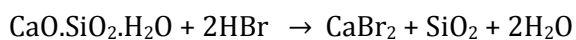
Wanneer een zuur in aanraking komt met beton zal het portlandiet ioniseren.



Deze ionen zullen op hun beurt reageren met de ionen die het zuur heeft afgesplitst. In dit voorbeeld wordt dit:



Zoals reeds eerder aangehaald bestaat cementsteen uit verbindingen van calciumoxide (CaO), siliciumoxide SiO₂ en H₂O die samen reageren tot calciumsilicaathydraat CaO.SiO₂.H₂O. In de poriën van de cementsteen zit het portlandiet. Zolang er portlandiet aanwezig is, zal dit eerst reageren met het zuur. Deze reactie zal blijven doorgaan totdat er geen portlandiet meer aanwezig is of tot er een chemisch evenwicht bereikt is. In het tweede geval stopt de reactie vooraleer het calciumsilicaathydraat wordt aangetast. In het eerste geval wordt ook dit aangetast. In het voorbeeld met HBr, gebeurt dat volgens de volgende reactie. (15)



Dit reactiepatroon is voor elk zuur hetzelfde. Merk hierbij op dat de reactie pas stopt wanneer er een chemisch evenwicht bereikt is. (15) (14)

De volgende drie factoren hebben een invloed op de reactiesnelheid van de zuuraantasting:

- pH-waarde van de oplossing: hoe lager deze waarde ligt, hoe meer protonen er aanwezig zijn die aan de reactie kunnen deelnemen;
- hoeveelheid zure oplossing: tijdens de reactie reageert het zuur weg. Het is dus cruciaal voor het verdere verloop van de reactie, dat er nieuw zuur wordt aangevoerd;
- betonweerstand: het type beton speelt een rol tijdens de aantasting, hoe compacter de samenstelling is, des te trager zal er schade optreden.

Als het zuur de wapening bereikt, dan zal dit tevens schadelijk zijn voor de wapening. Er vindt dan een schademechanisme plaats analoog aan het eerder uitgelegde corrosiemechanisme. (1) (14) (15)

2.1.6.2 Schade

Aangezien het reactiemechanisme in twee stappen gebeurt door eerst het portlandiet op te lossen en naderhand het calciumsilicaathydraat, zullen er ook twee schademechanismen zijn voor het beton.

Wanneer het calciumsilicaathydraat en het portlandiet in oplossing zitten (samen met andere stoffen), zullen deze ten gevolge van diffusie zich gelijkmatig willen verdelen binnen de oplossing. Aangezien de oplossing bestaat uit poriënwater, verschijnt er een afzetting op het beton. Dit fenomeen noemt men uitloging. Hierbij is het belangrijk op te merken dat dit fenomeen niet enkel optreedt bij zuuraantasting. Het vormen van een

afzetting vertraagt de reactie want de poriën aan de oppervlakte worden namelijk kleiner, waardoor er minder materiaal binnendringt. (14) (13)

Aangezien zuuraantasting per definitie materiaal oplost, zal de cementsteen uit de structuur verdwijnen en zullen de poriën vergroten waardoor de reactie kan versnellen. (15) (15)

Eens het zuur de wapeningen bereikt, zal dit zoals bij eerder besproken corrosie inducerende processen voor roestvorming zorgen. Merk hierbij op dat de pathologie dan al vrij ver gevorderd is.

Figuur 7 geeft de resultaten weer van 2 proeven van “Cement & Betoncentrum”, waarbij kubussen 30 weken zijn blootgesteld aan een milieu met pH 1 (links) en aan een milieu met pH 0 (rechts).

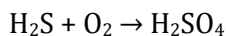


Figuur 7: Beton in zure omgeving: links pH1 en rechts pH0 (14)

2.1.7 Biogene zwavelzuuraantasting

2.1.7.1 Reactiemechanisme

In specifieke milieus, zoals riolering, kunnen bacteriën verantwoordelijk zijn voor de aanmaak van H₂S. Dit gas zal, wanneer het in aanraking komt met zuurstof, reageren tot zwavelzuur via onderstaande reactie: (14)



Dit zwavelzuur zal reageren met beton conform 2.1.5 Sulfaataantasting (15) (14)

2.1.7.2 Schade

Zie schade sulfaataantasting (2.1.5).

2.1.8 Microbiologische salpeterzuuraantasting

2.1.8.1 Reactiemechanisme

Microbiologische salpeterzuuraantasting is het gevolg van salpeterzuur (HNO₃) dat aangemaakt wordt door bacteriën. Zo zullen Azotobacter-bacteriën stikstofgas omzetten in het nitraation (NO₃⁻). Dit ion reageert dan verder tot het salpeterzuur waarna het zal reageren zoals elk ander zuur. (14) (5) (14)

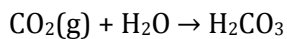
2.1.8.2 Schade

Deze vorm van zuuraantasting is herkenbaar door het afzanden en het ontstaan van losse schollen aan het betonoppervlak door salpeterzuurvormende bacteriën. Dit komt onder meer voor bij binnenwanden van koeltorens. (14) (14)

2.1.9 Aantasting door koolzuurhoudend water

2.1.9.1 Reactiemechanisme

CO₂ uit de lucht kan oplossen in water tot diwaterstofcarbonaat (koolzuur) en dit volgens de volgende reactie:



Dit koolzuur zal in aquatische milieus verder reageren tot het waterstofcarbonaat en een proton:



Het verdere aantastingsmechanisme is gelijkaardig aan het algemene aantastingspatroon van zuren. Regenwater zal dus vaak zuur zijn. (14) (13)

2.1.9.2 Schade

Het schadepatroon is gelijk aan dat van de aantasting ten gevolge van zwakke zuren. (14) (5) (14)

2.2 Fysische pathologieën

2.2.1 Drogingskrimp (hydraulische of uitdrogingskrimp)

2.2.1.1 Reactiemechanisme

Tijdens de uitharding van beton, reageert cement met water. Voor deze hydratatiereactie is er ongeveer 23% van de cementmassa aan watermassa noodzakelijk. Aangezien de W/C-factor van de meeste betonmengsels om verscheidene redenen hoger ligt dan dit percentage, is er in het betonmengsel een overschot aan water aanwezig. Dit water bevindt zich in de poriën van de betonsamenstelling. Met de tijd zal dit water verdampen en dit fenomeen brengt een volumeverandering met zich mee en zorgt voor inwendige spanningen ter hoogte van de raakvlakken van de gehydrateerde cementkorrels. De drogingskrimp bedraagt tussen 0.1 en 0.8 mm/m en zal verhogen onder invloed van de volgende factoren: (16) (5)

- de hoeveelheid cementpasta: de krimp treedt op in de cementsteen in het beton, hoe meer cement, hoe meer krimp;
- de W/C-factor: hoe meer poriënwater hoe meer krimp;
- lage relatieve vochtigheid: hierdoor versnelt het verdampingsproces;
- de verhouding tussen het betonvolume en oppervlak: hoe groter deze verhouding hoe kleiner de krimp;
- het cementtype: hoe sneller het cementtype hydrateert (bv: cementtypes R) des te sneller treedt de krimp op. (17)

2.2.1.2 Schade

Het proces verloopt zeer traag en geeft voornamelijk schade wanneer de krimp verhinderd wordt. Er kunnen dan barsten waargenomen worden haaks op de krimprichting.

2.2.2 Autogene krimp (auto-uitdrogingskrimp of chemische krimp)

2.2.2.1 Reactiemechanisme

De som van het volume water en cement voor de hydratatiereactie is groter dan het volume van het hydraat. Er is dus een krimp zonder dat er uitwisseling van water met de omgeving is. Deze krimp zal toenemen naarmate de W/C-factor daalt. (17)

Afhankelijk van het betontype varieert deze krimp tussen 0.025 en 0.200 mm/m. (17)

2.2.2.2 Schade

Autogene krimp veroorzaakt over het algemeen geen grote uitwendige schade. Er kunnen zich echter wel microscheurtjes in het beton ontwikkelen. In geval van overbelasting zullen deze scheurtjes het begin zijn van grotere scheuren. (16) (18)

2.2.3 Plastische krimp

2.2.3.1 Reactiemechanisme

Plastische krimp treedt op wanneer de betonoppervlakte te snel uitdroogt. Het reactiemechanisme is hetzelfde als dat van drogingskrimp, met dat verschil dat het beton nog zeer jong is. (18) (17)

2.2.3.2 Schade

Als de inwendige toevoer van water de verdampingsnelheid niet kan volgen, dan kunnen er scheuren ontstaan. De optredende krimpspanningen overstijgen namelijk de maximale trekweerstand van het beton op dat moment. Het schadepatroon is afhankelijk van de vorm van de betonconstructie, maar zal meestal bestaan uit een craquelé achtig patroon of scheuren die haaks liggen op de lengterichting van het betonnen element. Hoewel plastische scheuren aan de oppervlakte ontstaan, kunnen ze soms vrij diep gaan. (6) (18) (5)

2.2.4 Thermische krimp

2.2.4.1 Reactiemechanisme

De hydratatiereactie tussen cement en water is exotherm. Deze opwarming van het betonmengsel brengt een volumeverhoging met zich mee. Wanneer dit volume na verloop van tijd terug afkoelt, zal het afnemen en dus krimpen. (18) (17) (5)

2.2.4.2 Schade

De schade van thermische krimp komt overeen met deze van plastische krimp en drogingskrimp. (5)

2.2.5 Afspatten of spalling

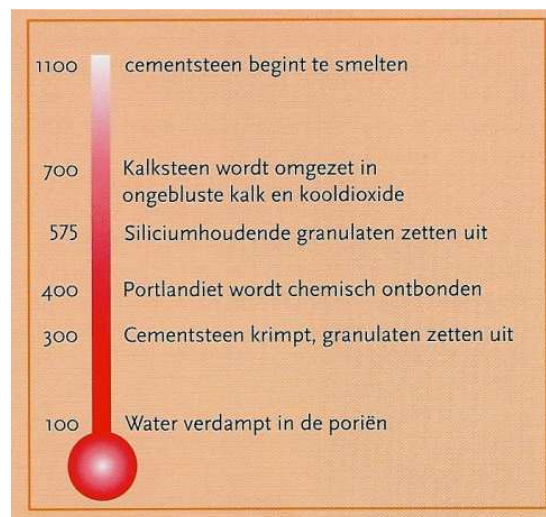
2.2.5.1 Werkingsmechanisme

Het afspatten van beton ofwel *spalling* is de reactie van beton op extreme hitte. Men onderscheidt twee mechanismen die schade kunnen veroorzaken.

Een snelle verhitting van een betonoppervlak zorgt voor een volumetoename en structuurverandering van de aggregaten in het beton. Deze volumeveranderingen zorgen voor inwendige spanningen.

De verhitting van een betonnen structuur zorgt ervoor dat het aanwezige vocht in het beton gaat verdampen en dat de aanwezige gassen in het beton zullen uitzetten. Dit levert inwendige drukken op. (19)

Figuur 8 geeft de reactie van beton ten gevolge van een temperatuursverhoging weer.



Figuur 8: Gedrag beton bij brand (20)

2.2.5.2 Schade

De schade veroorzaakt door verhitting zorgt voor inwendige scheuren, maar ook voor het afspringen van stukken beton. Dit kan gaan van kleine stukken beton aan de oppervlakte die afspringen (*aggregate spalling*), tot grote stukken die de structurele integriteit van de het bouwwerk in het gedrang kunnen brengen (*explosive spalling*). In het laatste geval is er sprake geweest van een zeer intense verhitting. Merk hierbij op dat het toevoegen van warmte aan wapeningsstaal een grote invloed heeft op zijn mechanische eigenschappen en dit zelfs na afkoeling. (19)

2.2.6 Bekistingsproblemen

2.2.6.1 Werkingsmechanisme

Hoe vloeibaarder de betonsamenstelling, des te dichter dient de bekisting te zijn. Als een bekisting niet waterdicht is, bestaat er een mogelijkheid dat er cementpasta lekt.

Bij het maken van een bekisting is het heel belangrijk dat deze volledig kan verwijderd worden na het storten of dat de gebetonneerde bekistingspanelen geen schadelijk effect hebben op de structuur. Ongewenste hout spaanders en dergelijke kunnen immers water absorberen en vormen dus een transportkanaal voor allerlei ongewenste chemische aantastingen. Het is daarom ook belangrijk dat een bekisting zuiver is voor gebruik en dat binddraad voor de wapeningen, niet gebruikte afstandhouders of werfafval in het algemeen verwijderd worden alvorens men overgaat tot het storten. (21) (5) (22)

2.2.6.2 Schade

De lekkage van cementpasta zorgt voor de vorming van grindnesten. Op deze plaatsen is er een afname van mechanische eigenschappen zoals druk- en treksterkte. De porositeit gekoppeld aan de grindnesten maakt het beton zeer gevoelig voor verdere chemische aantasting.

Achtergebleven elementen in een betonnen structuur kunnen verschillende soorten schade veroorzaken afhankelijk van het materiaaltype. Zo zullen poreuze materialen zoals hout water opnemen en een kanaal vormen voor chemische aantasting. Achtergebleven metalen onderdelen kunnen dan weer roestuitbloeiing veroorzaken aan het betonoppervlak.

2.2.7 Ontmenging

2.2.7.1 Werkingsmechanisme

Ontmenging is een fenomeen dat optreedt tijdens de plastische fase van beton. Het treedt enkel op bij vloeibare betonsoorten en dan voornamelijk bij zelfverdichtend beton.

Normaal is beton homogeen van structuur en zitten de granulaten uniform verdeeld doorheen het mengsel. Bij ontmenging is deze verdeling niet meer uniform en vormt er zich een laag waarin de grote granulaten zitten en een laag waarin enkel de kleinste korrels zich bevinden.

Er zijn verschillende oorzaken van ontmenging:

- instabiele betonsamenstelling: het verschil tussen het cementskelet, de kleine korrelmaten en de grote korrelmaten is te groot;
- te sterke machinale verdichting: er wordt te veel energie op de betonspecie uitgeoefend met als gevolg dat de zwaarste granulaten gaan zakken terwijl de lichtere granulaten bovenkomen;
- verkeerde stort- of gietwijze: er wordt van te hoog of met te veel druk gestort of gegoten met als gevolg dat de zwaardere granulaten een andere weg afleggen dan de lichtere granulaten.

Bleeding is een lichte vorm van ontmenging, waarbij er zich na verdichting een waterlaag vormt op het beton. Wanneer dit beperkt blijft, is dit niet schadelijk en beschermt het de structuur tegen uitdroging. (5) (23)

2.2.7.2 Schade

De schade ten gevolge van ontmenging kan vrij groot zijn. Het beton is niet meer homogeen met als gevolg dat de mechanische eigenschappen doorheen de structuur veranderen. Daarenboven kan het gebrek aan cementpasta tussen de grove granulaten zorgen voor een groter aantal poriën, hetgeen een secundaire aantasting vergemakkelijkt. De zones met een overtollige hoeveelheid cementpasta zijn dan weer gevoeliger voor krimp.

2.2.8 Differentiële verdichting

2.2.8.1 Werkingsmechanisme

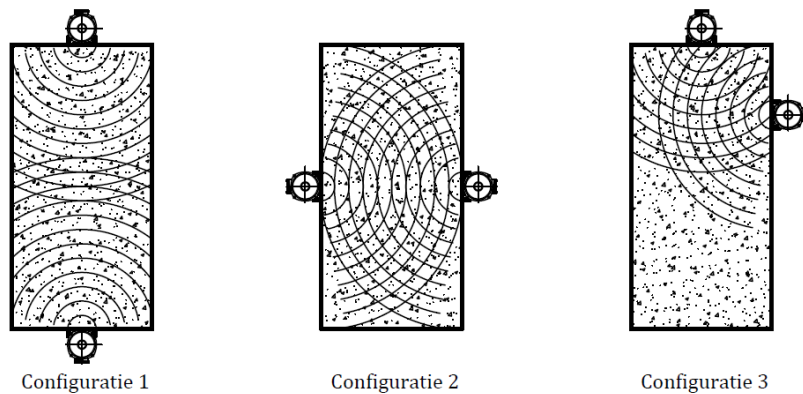
Ter plaatse gestort beton of niet zelfverdichtend prefabbeton wordt normaal gezien machinaal verdicht. Dit kan op verschillende manieren. Meestal wordt geopteerd om te verdichten d.m.v. trillingen. Men kan dit op verschillende manieren doen. Onderstaande lijst geeft een overzicht van de verschillende technieken: (5) (7)

- trilnaalden: deze worden in het betonmengsel aangebracht. Men maakt een onderscheid tussen pneumatische naalden en elektrische naalden;
- triltafels: de mal waarin het betonnen element zich bevindt, wordt op dergelijke tafel gezet;
- inwendige trillers: trilmotoren aangebracht op de binnenmal of binnenbekisting;
- uitwendige trillers: trilmotoren aangebracht op de buitenmal of buitenbekisting;
- trilbalken: langwerpige reien voorzien van een trilmotor die als afreibalk gebruikt worden.

Ter verduidelijking van de problematiek, wordt als voorbeeld een betonnen plaat genomen met een lengte van 2 m en een breedte van 1 m. Deze plaat wordt gestort in niet zelfverdichtend beton en wordt machinaal getrild gebruik makend van twee uitwendige trillers gemonteerd op de buitenmal.

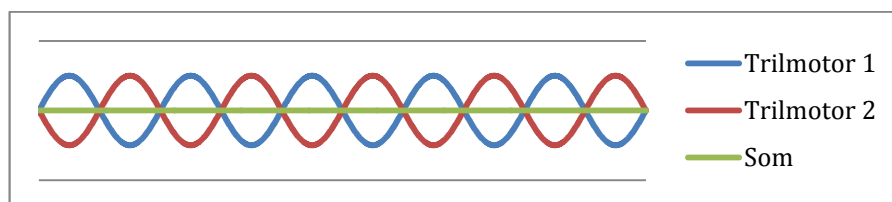
De trilmotoren zullen nu door een excentrisch draaiende as een trilling overbrengen op de bekistingspanelen. Deze trilling zal zich nu als een golf doorheen het vers gestorte beton verplaatsen.

Wanneer de trilmotoren kort bij elkaar staan en het vermogen voldoende is, zoals in configuratie 2 en 3 van Figuur 9, zullen de golven interfereren. Merk hierbij op dat dit ook mogelijk is bij een trilmotor waarbij de uitgaande golf terugkaatst tegen een bekistingspaneel. Er kan dan een staande golf ontstaan. De weerkaatsing van golven tegen de bekistingspanelen wordt buiten beschouwing gelaten.



Figuur 9: Configuraties trilmotoren

Bij een staande golf spreekt men van buiken en knopen. In een knoop is er geen massaverplaatsing maar enkel energieoverdracht. Voor diezelfde energieoverdracht is er in een buik een maximale massaverplaatsing. Figuur 10 illustreert de theoretisch bekomen staande golf.

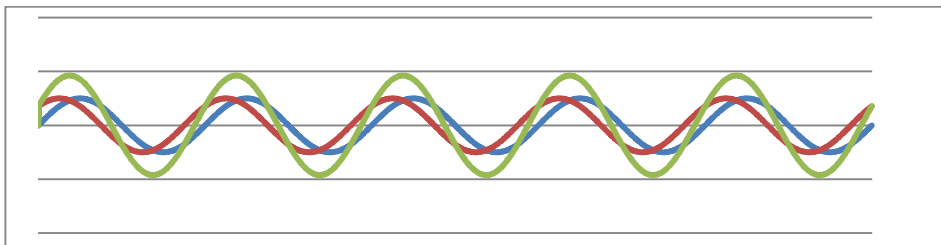


Figuur 10: Theoretische golven

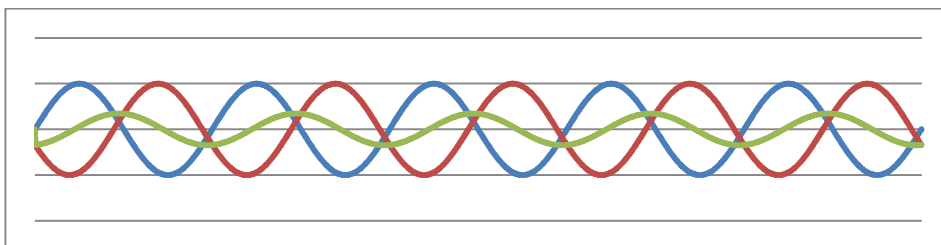
De massaverplaatsing in het beton van de longitudinale golf ten gevolge van trilmotor 1 staat in Figuur 10 van links naar rechts in het blauw aangegeven. De golf ten gevolge van trilmotor 2 staat in het rood van rechts naar links getekend. De som van beide wordt door de groene lijn aangegeven. (22)

In theorie zouden deze golven volledig destructief kunnen interfereren. Dit wil dus zeggen dat beide golven elkaar teniet doen. In praktijk worden twee trilmotoren op eenzelfde bekisting echter nooit tegelijk ingeschakeld. De hoofdreden hiervoor is niet het interferentiepatroon, maar het vermijden van een te grote piekspanning die het inschakelen van twee elektromotoren met zich meebrengt.

In praktijk zullen de interferentiepatronen er als volgt uitzien. Figuur 11 geeft constructieve interferentie weer, Figuur 12 geeft een gedeeltelijke destructieve interferentie weer. (22)



Figuur 11: Mogelijk interferentiepatroon - constructief

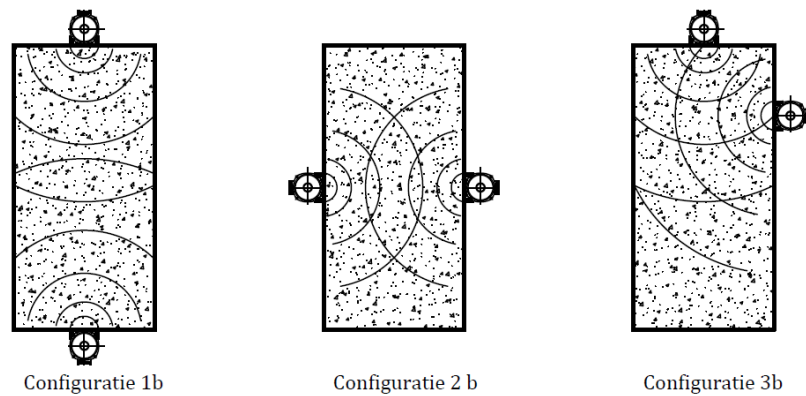


Figuur 12: Mogelijk interferentiepatroon - gedeeltelijk destructief

Als deze benadering wordt doorgetrokken, zou ook configuratie 1 interferentie ondervinden. Er is tot nu toe echter verondersteld, dat de golf zich probleemloos doorheen het beton kan gaan met dezelfde amplitude en golflengte. Dit is echter niet het geval. (22)

Beton is geen ideaal medium en twee trilmotoren leveren nooit exact dezelfde amplitude en golflengte. Het probleem van interferentie waarbij een staande golf ontstaat, doet zich dan ook zelden voor, maar toont wel aan dat de verdichtingsenergie overgebracht op het beton niet zomaar de som is van de energie geleverd door de trilmotoren.

De aanpassing van de configuraties in Figuur 13 verduidelijkt dit principe. (7) (22)



Figuur 13: Configuraties trilmotoren met uitdovende golven

De golven zullen dus een uitdovend karakter hebben naarmate ze zich van de trilmotor verwijderen. In configuratie 1 zal er dus weinig of geen interferentie zijn. In configuratie 2 en 3 is dit wel nog het geval.

Zoals eerder gesteld is het probleem van interferentie op zich niet zo groot omdat de golven uitdoven. Als nu configuratie 3 beschouwd wordt, dan merkt men dat om een bepaalde verdichting in de rechterbovenhoek te bekomen, er een bepaalde hoeveelheid energie nodig is. Deze hoeveelheid energie zal in de linkeronderhoek ook nodig zijn, maar zal daar niet geraken zolang beide trilmotoren maar net genoeg energie leveren om de rechterbovenhoek te verdichten. Er treedt hier dus een differentiële verdichting op. Als men de energie geleverd door de motoren verhoogt, zodat de linkeronderhoek voldoende verdicht, dan zal er in de rechterbovenhoek te veel energie zijn vrijgekomen waardoor er het risico van ontmengingen optreedt. Dit is in configuratie 1 geen probleem. (5) (22) (7)

2.2.8.2 Schade

Differentiële verdichting kan op twee manieren schade veroorzaken.

Als er te weinig verdichtingsenergie op een bepaalde plaats is, dan kunnen zich hier grindnesten vormen en is het beton zeer poreus. Daarenboven is de structuur van het beton niet optimaal verdicht met als gevolg dat er een afname van zijn mechanische eigenschappen zoals druk- en treksterkte optreedt. Deze porositeit maakt het beton gevoelig voor verdere chemische aantasting.

Als er te veel verdichtingsenergie op eenzelfde plaats is, dan is er het verhoogde risico op ontmenging. Er vormt zich dan aan de bovenkant een veel fijnere samenstelling dan aan de onderkant. De granulaten zitten dus niet meer uniform verdeeld doorheen de samenstelling. De mechanische eigenschappen van het beton veranderen dus doorheen de structuur. (5) (7)

2.2.9 Vorst-dooi cycli

2.2.9.1 Werkingsmechanisme

Betonoppervlaktes die in contact staan met water, nemen dit via hun poriën op. Als het water dan bevroert zal het uitzetten, en inwendige spanningen leveren. Deze spanningen kunnen tot scheuren leiden. (18) (24)

Dit fenomeen is echter niet het enige schademechanisme dat optreedt bij een vorst-dooi cyclus. Als water aan het betonoppervlak bevroert, ontstaat er een thermisch onevenwicht in de vochtinhouding van het beton. Het dieper gelegen water is warmer dan het water aan het oppervlak. De wetten van de thermodynamica schrijven nu voor dat er dus een stroming optreedt van de warmere naar de koudere zone, om zo een thermisch evenwicht te creëren. Eens het warme water in aanraking komt met de ijskristallen, zal het stollen en zelf veranderen in ijs. Deze stroming levert krachten op die voldoende kunnen zijn om tot scheurvorming te leiden. (18) (24)

Tijdens de vorst-dooi cyclus is er nog een derde schademechanisme. Bij vorst stolt enkel zuiver water, maar zuiver water komt in de natuur slechts zelden voor. In de praktijk is het steeds een oplossing met een samenstelling afhankelijk van de omgeving. Bijvoorbeeld bij gebruik van dooizouten op een betonnen verharding, is het water dat in contact staat met de betonnen structuur een zoutoplossing. Bij bevroering treedt er dus in het beton een scheiding op tussen enerzijds ijs en anderzijds een zoutoplossing. Hoe kouder het wordt, des te meer ijs zal er gevormd worden en des te hoger zal de concentratie zout in het poriënwater zijn. (18) (24)

In een cementporie is het vriespunt in bepaalde maten afhankelijk van de poriegrootte. Hoe kleiner de porie, hoe lager het vriespunt. In een calciumsilicaathydraatporie kan het stollingspunt dalen tot -78 °C. Als een kleine porie en een grote porie zich naast elkaar bevinden, dan zal het stollingsproces in de grote porie eerder intreden dan in de kleine porie. De concentratie zouten in de kleine porie blijft dan constant, terwijl deze in de grote porie stijgt omdat er steeds meer water uit de oplossing kristalliseert. Ten gevolge van osmose zal er dan een stroming van de kleine naar de grote porie plaatsvinden om de zoutconcentraties gelijk te krijgen. Hierdoor ontstaat er een osmotische druk. Als deze groter is dan de treksterkte van het beton, zullen er scheuren optreden. (18) (24)

2.2.9.2 Schade

Een vorst-dooi cyclus kan op drie manieren schade veroorzaken:

- door de uitzetting van het water,
- door het thermisch onevenwicht in de vochtinhouding,
- door de osmotische druk.

Het schadepatroon bestaat uit scheuren, en het afschilferen van het betonoppervlak. Scheuren van een vorst-dooi cyclus zorgen er tevens voor dat het vocht in een volgende cyclus steeds dieper en gemakkelijker in het beton zal geraken. Daarenboven maakt het de structuur steeds vatbaarder voor aantasting ten gevolge van een secundair schademechanisme.

2.2.10 Zwerfstromen

2.2.10.1 Werkingsmechanisme

Zwerfstromen zijn per definitie ongewenste stromen van elektronen doorheen een constructie. Beton is zelf niet geleidend maar het wapeningsstaal dat er inzit wel. De stroom in het wapeningsstaal zal de wapening opdelen in kathodische en anodische zones. Elektronen komen uit de anodische zone, en migreren naar de kathodische zone. Als er rondom het staal water en zuurstof aanwezig zijn, kan dit leiden tot corrosie en dit in het anodische gebied.

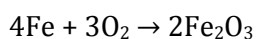
De reactie kan vergeleken worden met de reactie die optreedt ten gevolge van carbonatatie. Het enige verschil hier is dat de stroom van elektronen niet gegenereerd wordt door een pH-verlaging rondom het wapeningsstaal, maar door een externe bron.

Stromen doorheen het wapeningsstaal kunnen andere schademechanismen versnellen. Wanneer een gecarbonateerd deel beton in het anodische gebied ligt, opgewekt door een externe stroombron, dan zal de afvoer van elektronen versneld worden.

Anderzijds kan het de reactie ook tegenwerken. Het roesten van wapeningsstaal in beton omwille van welke reden dan ook, gaat altijd gepaard met een potentiaalverschil tussen de anode en de kathode. Een tegengesteld potentiaal kan de elektronenstroom doen stilvallen. Dit principe zal toegepast worden in de actieve kathodische bescherming van beton.

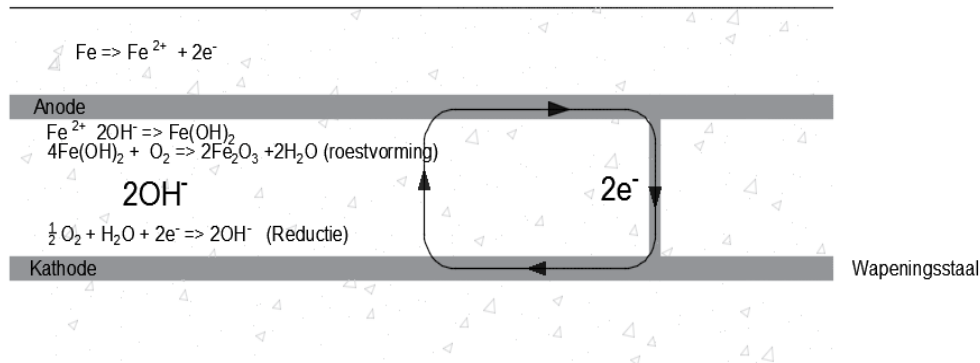
2.2.10.2 Schade

In normale omstandigheden vormt er zich een passiveringslaag rond het wapeningsstaal. Deze passiveringslaag ontstaat door de reactie van zuurstof en ijzer.



Het basisch milieu van het beton zorgt ervoor dat deze reactie stopt eens de wapening is gebetonneerd.

Zoals weergegeven in Figuur 14, zorgt een stroom van elektronen dat het ijzer uit het staal 2 elektronen moet afgeven. Deze elektronen migreren naar de kathodische zijde van het beton. In aanwezigheid van zuurstof en water reageren deze elektronen tot OH⁻-ionen. Deze ionen reageren met het Fe²⁺ tot ijzerhydroxide. Dit ijzerhydroxide reageert verder samen met zuurstof tot ijzeroxide oftewel roest.



Figuur 14: Reactiemechanisme van zwerfstromen

Het roesten van het wapeningsstaal zorgt voor een volumetoename. Dit levert inwendige spanningen op die tot scheurvorming leiden en zelfs tot het afvallen van stukken beton.

2.3 Mechanische pathologieën

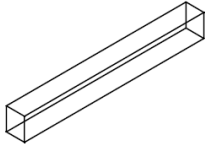

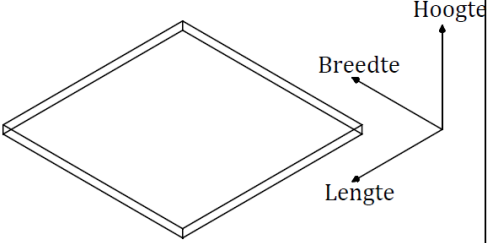
2.3.1 Belastingen

2.3.1.1 Werkingsmechanisme

Mechanische pathologieën zijn het gevolg van een al dan niet gewenste belasting of combinatie van belastingen. Afhankelijk van de functie dewelke een betonnen element in een structuur vervult, zijn er verschillende belastingsmechanismen die mits correcte dimensionering van de structuur worden opgevangen dankzij de mechanische eigenschappen van het materiaal beton, de dimensies van het element en zijn schikking in de structuur.


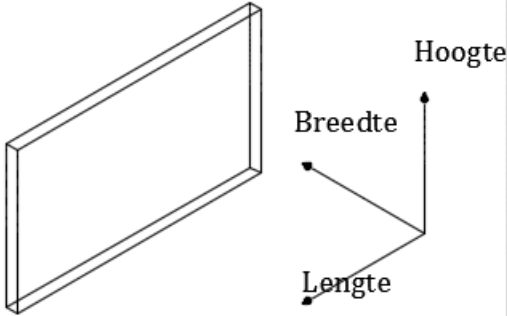
Afhankelijk van zijn dimensies en oriëntering binnen een structuur kunnen betonnen structurele elementen worden opgedeeld in vijf grote groepen. Deze vijf groepen worden opgedeeld in twee groepen afhankelijk van het hoofdbelastingsvlak. (25)

Als het hoofdbelastingsvlak bestaat uit het vlak gelegen volgens de lengte- en breedte as conform Figuur 15, dan onderscheiden we drie verschillende elementen, die gedefinieerd worden naargelang hun afmetingen.

		
Balk	Ligger	Plaat
$L > 3xH$	$L < 3xH$	$L > 5xH$ en $B > 5xH$

Figuur 15: Indeling constructieve elementen - balk/ligger/plaat

Wanneer het hoofdbelastingsvlak bestaat uit het verticaal gelegen vlak gedefinieerd volgens de hoogte- en de breedte as, dan onderscheiden we nog 2 andere elementen. Figuur 16 illustreert dit. (25)

	
Kolom	Wand
$B < 4xH$	$B > 4xH$

Figuur 16: Indeling constructieve elementen - kolom/wand

Merk hierbij op dat het voor bijvoorbeeld een wand en een plaat perfect mogelijk is dezelfde maten te hebben, maar dat ze enkel verschillen in de manier waarop ze belast worden. (25)

In een structurelement zijn er drie parameters waaraan het materiaal beton weerstand dient te bieden:

- normaalkrachten zijn krachten evenwijdig met de hoofdas van het element;
- dwarskrachten zijn krachten loodrecht op de hoofdas van een element;
- momenten houden rekening met de plaats waarop een kracht aangrijpt binnen het element.

Bij een overschrijding van de weerstand die het element kan bieden tegen de inwerkende krachten en momenten, zal er steeds een scheurvorming plaatsvinden totdat het element opnieuw in evenwicht is of totdat het faalt.

Een overschrijding van de materiaaleigenschappen van beton is niet de enige manier waarop een element kan falen. De dimensionering van het element speelt ook een rol. Zo zal een te slank uitgevoerde kolom kunnen uitknikken en een te smal uitgevoerde balk kunnen kippen. (25)

2.3.1.2 Schade

Scheurvorming in beton is onvermijdelijk. De normen (Eurocode 2) laten dan ook maximale scheurwijdtes toe. Een constructie zal onder invloed van belasting scheuren totdat er een evenwicht bereikt is of totdat de constructie faalt.

Als er een evenwicht bereikt is, dan is de scheur op zich niet schadelijk. Zoals eerder aangehaald, maakt een scheur het echter wel gemakkelijker voor secundaire pathologieën om het beton aan te tasten.

3 Preventieve remediëring

3.1 Oorzaken analyse

De preventieve remediëring steunt op een grondige kennis van de oorzaken van de pathologieën en hun eventuele gevolgen. Tabel 2 geeft per pathologie deze oorzaken weer. Als er voor een pathologie meerdere elementen staan aangeduid, dan houdt dit in dat al deze oorzaken aanwezig moeten zijn alvorens een pathologie zal optreden. Zo zal bijvoorbeeld carbonatatie enkel optreden als er zuurstof, water en koolstofdioxide aanwezig zijn. Daarenboven wordt er van uitgegaan dat de pathologieën zich zullen voordoen als het betonnen element is uitgehard. Zo zal water natuurlijk een rol spelen bij bijvoorbeeld ontmenging of plastische krimp maar wordt het niet als oorzaak aangeduid.

Tabel 2: Relaties tussen pathologieën en hun oorzaken

		Oorzaken																									
		Chemisch												Fysisch													
		Aanwezigheid O ₂	Afwezigheid O ₂	Aanwezigheid H ₂ O	Overtoollige Aanwezigheid H ₂ O	Aanwezigheid CO ₂	Aanwezigheid Alkaliën	Aanwezigheid SiO ₂	Aanwezigheid FeS	Aanwezigheid MnS	Aanwezigheid Chloriden	Aanwezigheid Sulfaten	Aanwezigheid Zuren	Aanwezigheid H ₂ S	Aanwezigheid HNO ₃	Aanwezigheid zouten	Snelle temperatuursverandering	Hydratiewarmte	Volumeverandering Hydratatie	Verschil in relatieve vochtigheid	Vriestemperaturen	Verkeerde manipulatie plastisch beton	Aanwezigheid spanningsbron	Externe Belastingen			
Aantastingsmechanismen	Chemisch	Alkali Silicareactie		✓																							
		FeS en MnS aantasting		✓						✓	✓																
		Carbonatatie					✓																				
		Chlooraantasting	✓		✓							✓															
		Sulfaataantasting			✓								✓														
		Zuuraantasting			✓									✓													
		Biogene H ₂ SO ₄ -aantasting	✓		✓										✓												
		Microbio. HNO ₃ -aantasting			✓											✓											
		Koolzuurhoudend water			✓		✓																				
		Aantastingsmechanismen	Fysisch	Drogingskrimp				✓																			
Autogene krimp																				✓							
Plastische krimp																					✓						
Thermische krimp																			✓								
Afspatten (spalling)																		✓									
Bekistingsproblemen																							✓				
Ontmengingen																							✓				
Differentiële verdichting																							✓				
Vorst-Dooicyclus					✓																	✓					
Zwerfstromen																								✓			
Mechanische pathologieën																								✓			

Bij het analyseren van deze tabel valt onmiddellijk de rol van water op. Bijna alle chemische pathologieën hebben water nodig om zich te manifesteren. Water is echter per definitie aanwezig in het beton.

Ten tweede kunnen we concluderen dat zuurstof, water en CO₂, chemische verbindingen die zeer frequent voorkomen in onze atmosfeer en onze omgeving, verantwoordelijk zijn voor 2 schademechanismen. Namelijk carbonatatie en de aantasting ten gevolge van koolzuurhoudend water.

Een eerste stap richting preventieve remediëring is dus het beperken van de hoeveelheid water in het beton. Water kan aanwezig zijn op twee verschillende manieren. Enerzijds is er het toegevoegde water tijdens het maken van de mengsel. Dit heeft op verschillende manieren afhankelijk van de samenstelling gereageerd en zit al dan niet vrij of als hydraat in de betonsamenstelling. Anderzijds kan er water van buitenaf al dan niet als damp via de poriën en de scheuren in het beton binnendringen.

Het voorkomen van pathologieën zal dus beginnen met het beperken van het benodigde water in de samenstelling en het beschermen van het beton voor indringen van water via de poriën en scheuren.

3.2 Schade en gevaar analyse

Tabel 2 toont de oorzaken van chemische en fysische pathologieën. Een andere parameter die in beschouwing wordt genomen bij het bestrijden van pathologieën is hun schade en hun gevaarlijkheid. Tabel 3 geeft de waar te nemen schadepatronen.

Tabel 3: Relaties tussen pathologieën en hun schade

		Schadepatronen																
		Blauwe verkleuring	Witte afzetting aan het oppervlak	Witte verkleuring van de cementsteen	Verschraling cementsteen	Roestuitbloeiing	blootliggende wapening	Loszittend beton	Afgesprongen stukken beton	Afschilferend betonoppervlak	Grindnesten	Scheurvorming	Microscheurvorming	Craquelé scheurpatroon	Karakteristiek scheurpatroon			
Aantastingsmechanismen	Chemisch	Alkali Silicareactie		✓										✓	✓	✓		
		FeS en MnS aantasting	✓															
		Carbonatatie					✓	✓	✓	✓			✓	✓				
		Chlooraantasting					✓	✓										
		Sulfaataantasting		✓	✓	✓						✓	✓					
		Zuuraantasting				✓												
		Biogene H ₂ SO ₄ -aantasting				✓												
		Microbio. HNO ₃ -aantasting				✓												
		Koolzuurhoudend water				✓												
		Fysisch	Drogingskrimp										✓	✓			✓	
	Autogene krimp												✓					
	Plastische krimp														✓	✓		
	Thermische krimp														✓	✓		
	Spalling							✓	✓	✓	✓		✓	✓				
	Bekistingsproblemen											✓						
	Ontmengingen											✓						
	Differentiële verdichting											✓						
	Vorst-Dooicyclus										✓		✓					
	Zwerfstromen					✓	✓	✓	✓									
Mechanische pathologieën					✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓			

Een ongevaarlijke pathologie moet structureel gezien niet vermeden worden. Het verschil tussen schadelijkheid en gevaarlijkheid is genuanceerd. Schade is de invloed die een pathologie heeft op beton, als ze de enige optredende pathologie is. Gevaar is hier een uitbereiding van, dat tevens rekening houdt met het gemak van opsporing en de mogelijkheid dat een pathologie, een secundaire pathologie in de hand werkt. Zo zal een chemische chlooraantasting minder schadelijk zijn dan carbonatatie, maar zal het moeilijker op te sporen zijn, waardoor het gevaarlijker wordt. Om een objectieve inschatting te maken, worden vier parameters beoordeeld:

- verandering van betoneigenschappen,
- verandering van wapeningseigenschappen,
- opspoorbaarheid,
- mogelijkheid tot secundaire pathologie.

Merk bij deze parameters op dat de eerste en de tweede een maat voor schadelijkheid zijn en dat parameters 3 en 4 een uitbereiding zijn naar de inschatting van het gevaar van een pathologie.

Pathologieën vergelijken is echter zeer moeilijk. Er worden verschillende reactiemechanismen vergeleken die zich dan nog eens voordoen in verschillende omstandigheden. Om deze parameters te kwantificeren worden dan ook de volgende veronderstellingen gemaakt:

- de pathologie doet zich voor in een voor haar ideale omstandigheid;
- de pathologie is op het punt dat ze schadelijk is voor de betonstructuur maar niet onherstelbaar;
- de werkingssnelheid als absolute waarde wordt buiten beschouwing gelaten, wel wordt de verandering van snelheid naarmate de pathologie vordert beoordeeld.

De verandering van betoneigenschappen kan op vier manieren bekomen worden. Elk van deze vier elementen wordt beoordeeld, en kunnen simultaan voorkomen. Aangezien deze vier criteria elkaar niet uitsluiten, wordt er bij het voldoen per criteria 1 punt toegekend. De maximale score voor de verandering van betoneigenschappen is dus 4:

- verandering van de eigenschappen van de granulaten (1pt),
- verandering van de cementsteen (1pt),
- verandering van de verhouding tussen de granulaten en de cementsteen (1pt),
- verhoging van de inwendige spanning in de betonstructuur (1pt).

De verandering van wapeningseigenschappen gebeurt maar op één manier en dat is door het verdwijnen van de passiveringslaag en het verder roesten van het staal. Het plastisch vervormen van de wapening wordt als onherstelbaar beschouwd.

Er wordt dan ook het onderscheid gemaakt tussen de volgende drie mogelijkheden, waarbij er maar één keuze mogelijk is:

- geen aantasting (0pt),
- lokale aantasting (2pt),
- aantasting verspreid over een groot oppervlak (4pt).

Voor de inschatting van de opspoorbaarheid wordt gekeken naar de uitwendige symptomen op het betonoppervlak in vergelijking met de eerder aangehaalde schade.

Er wordt hier het onderscheid gemaakt tussen:

- geen zichtbare symptomen (3pt),
- zichtbare symptomen die ook toegeschreven kunnen worden aan een andere pathologie (2pt),
- duidelijke symptomen (1pt).

De mogelijkheid tot secundaire pathologieën wordt aan de hand van de volgende vijf parameters beoordeeld:

- verlaging permeabiliteit (-1pt),
- geen effect (0pt),
- verlaging permeabiliteit met scheurvorming (1pt),
- vergroting permeabiliteit (2pt),
- scheurvorming (2pt),
- vergroting permeabiliteit met scheurvorming (3pt).

Met deze vastgestelde criteria kan aan de hand van de volgende formules een score worden toegekend per pathologie. De schade wordt berekend via de volgende som:

$$\text{Schade} = \text{betonschade} + \text{wapeningsschade}$$

Om een getalwaarde aan het gevaar toe te kennen, vermenigvuldigen we eerst de schade met de opspoorbaarheid. Deze keuze is gebaseerd op het gegeven dat er getracht wordt pathologieën met elkaar te vergelijken. Schade en opspoorbaarheid zijn eigenschappen eigen aan elke pathologie. De grootte en onderlinge verhouding zullen dus het grootste deel van de uiteindelijke score bepalen. Daar waar de vergemakkelijking van het inwerken van een secundaire pathologie niets zegt over de schade van deze secundaire pathologie en dus op zich geen eigenschap is van de primaire pathologie.

Het beoordelen van de mogelijkheid tot aantasting door een secundaire pathologie gebeurt aan de hand van parameters die becijferen of water al dan niet gemakkelijk kan indringen. Om deze reden wordt geopteerd om de score in dezelfde grootteorde te leggen als andere schadecriteria voor het beoordelen van een pathologie. Op deze manier is het gevaar van de primaire pathologie de doorslaggevende factor in de uiteindelijke score, zonder dat het risico op een secundaire pathologie gemarginaliseerd wordt. Dit geeft dan uiteindelijk de volgende formule:

$$\text{Gevaar} = (\text{Schade} \times \text{opspoorbaarheid}) + \text{score secundaire pathologie}$$

3.2.1 Resultaten

Tabel 4 geeft de scores per pathologie en per criteria weer.

Tabel 4: Beoordelingstabel voor de schadelijkheid en de gevaarlijkheid

		Kwantificatie schadelijkheid en gevaarlijkheid																	
		Beton				Wapening			zichtbaarheid			secundaire pathologie			GEVAAR				
		Verandering granulaten	Verandering cementsteen	Verandering verhouding granulaten	Verhoging inwendige spanning	Geen invloed	Lokale invloed	Invloed op grote stukken wapening	SCHADE	Geen symptomen	Soms symptomen	Duidelijke symptomen	Verlaging permeabiliteit	Geen effect		verlaging permeabiliteit met scheurvorming	Scheurvorming	Vergroting permeabiliteit	Vergroting permeabiliteit met scheurvorming
Aantastingsmechanismen	Chemisch	Alkali Silicareactie			1	0		1			1			1					2
		FeS en MnS aantasting				0		0			1		0					0	
		Carbonataie		1				4	5			1			1			6	
		Chlooraantasting					2		2		2			0				4	
		Sulfaataantasting		1		1	0		2			1					3	5	
		Zuuraantasting		1			0*		1			1					2	3	
		Biogene H ₂ SO ₄ -aantasting		1		1	0		2			1					3	5	
		Microbio. HNO ₃ -aantasting		1			0		1			1					2	3	
	Koolzuurhoudend water		1			0		1			1					2	3		
	Fysisch	Drogingskrimp				1	0		1			1				2		3	
		Autogene krimp				1	0		1			1				2		3	
		Plastische krimp				1	0		1			1				2		3	
		Thermische krimp				1	0		1			1				2		3	
		Afspatten				1	0		1			1				2		3	
		Bekistingsproblemen	1				0		1			1					2	3	
		Ontmengingen			1		0		1			1		0				1	
		Differentiële verdichting			1		0		1			2					2	4	
Vorst-Dooicyclus					1	0		1			1					3	4		
Zwerfstromen						4	4			1				2		6			
Mechanische pathologieën				1	0		1			1				2		3			

* Zuuraantasting kan wel degelijk voor wapeningsaantasting zorgen door het verlagen van de pH maar we gaan uit van een gemiddeld gevorderde pathologie, waarbij eerst voornamelijk het beton zwaar is aangetast

Gerangschikt geeft Tabel 5 de volgende classificatie:

Tabel 5: Resultaten gevaar- en schadelijkheidsanalyse

Gevaar		
nr.	naam	score
1	Carbonatatie	6
	Zwerfstromen	6
3	Sulfaataantasting	5
	Biogene H ₂ SO ₄ -aantasting	5
5	Chlooraantasting	4
	Differentiële verdichting	4
	Vorst-Dooicyclus	4
8	Zuuraantasting	3
	Microbio. HNO ₃ -aantasting	3
	Koolzuurhoudend water	3
	Drogingskrimp	3
	Autogene krimp	3
	Plastische krimp	3
	Thermische krimp	3
	Afspatten	3
	Bekistingsproblemen	3
	Mechanische pathologieën	3
	Alkali Silicareactie	2
19	Ontmengingen	1
20	FeS en MnS aantasting	0

Schade		
nr.	naam	score
1	Carbonatatie	5
2	Zwerfstromen	4
3	Chlooraantasting	2
	Sulfaataantasting	2
	Biogene H ₂ SO ₄ -aantasting	2
6	Alkali Silicareactie	1
	Zuuraantasting	1
	Microbio. HNO ₃ -aantasting	1
	Koolzuurhoudend water	1
	Drogingskrimp	1
	Autogene krimp	1
	Plastische krimp	1
	Thermische krimp	1
	Afspatten	1
	Bekistingsproblemen	1
	Ontmengingen	1
	Differentiële verdichting	1
	Vorst-Dooicyclus	1
	Mechanische pathologieën	1
20	FeS en MnS aantasting	0

Deze rangschikking moet natuurlijk wel genuanceerd worden. Er is uitgegaan van een gemiddeld gevorderde pathologie bij het opstellen van de randvoorwaarden. Zo lijkt het bijvoorbeeld dat differentiële verdichting en ASR even schadelijk zijn. Maar aangezien ASR zich meestal voordoet over de gehele betonstructuur en een differentiële verdichting een lokaal probleem kan zijn, is de kans groot dat een door een ASR aangetaste structuur problematischer is dan een structuur met hier en daar een grindnest. Daarenboven is er enkel rekening gehouden met het aantal aantastingmechanismen maar niet met de snelheid waarop ze een structuur aantasten.

Een tweede nuance is dat deze rangschikkingen een goede indicatie geven over het aantal aantastingsmechanismen per pathologie en hun mogelijkheid tot het kwetsbaarder maken voor een secundaire pathologie. Maar ze mogen zeker geen aanleiding geven tot het minimaliseren van de schade die een pathologie kan aanrichten. Elke pathologie kan in de voor haar ideale omstandigheid leiden tot het falen van een structuur. De enige uitzondering op de regel hier is blauwkleuring ten gevolge van FeS en MnS aantasting, dit is een louter visueel gebrek.

Merk in de bovenstaande tabellen ook op dat chloriden een rol spelen in zowel vorst-dooicycli, als in de zuiver chemische chloride aantasting.

Uit de bovenstaande tabellen en rangschikkingen kan er dus geconcludeerd worden dat de omgeving waarin een betonnen element zich bevindt en zijn samenstelling de doorslaggevende factoren zullen zijn voor het al dan niet optreden van een pathologie. Hierbij is water een gemeenschappelijke factor die vele pathologieën gemeenschappelijk hebben. Uit de bovenstaande studie kan er afgeleid worden dat het beperken van chloriden, zuren, sulfaten en de kans op carbonatatie en vorst-dooi cycli de ontwerper al een hele stap verder helpen in het vermijden van de gevaarlijkste pathologieën.

3.3 Herkenning pathologieën

In de beschreven pathologieën staan mogelijke schadebeelden. Zoals eerder aangehaald, verhogen sommige pathologieën de kans op een secundaire pathologie waardoor het risico bestaat dat ze na analyse zelf niet meer herkend worden.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van vragen die kunnen leiden tot de diagnose van een van de bovenstaande pathologieën. Merk hierbij op dat de vragen zeer letterlijk genomen moeten worden. Om sommige vragen te beantwoorden is ook een grondige kennis van de structuur en de werking van het element nodig waar de pathologie zich voordoet.

De tabel is zo opgevat dat roestvormende pathologieën pas in een late fase worden gedetermineerd. Dit laat de gebruiker toe om eerst een primaire pathologie in te schatten. Zo kan roestvorming voorkomen bij bijvoorbeeld zuuraantasting, maar kan zuuraantasting wel gedetermineerd worden zonder dat er zich roest voordoet. Het afleiden van de ene pathologie elimineert daarom geen tweede inwerkend schademechanisme.

Tabel 6 geeft de determineertabel weer voor het bepalen van een pathologie.

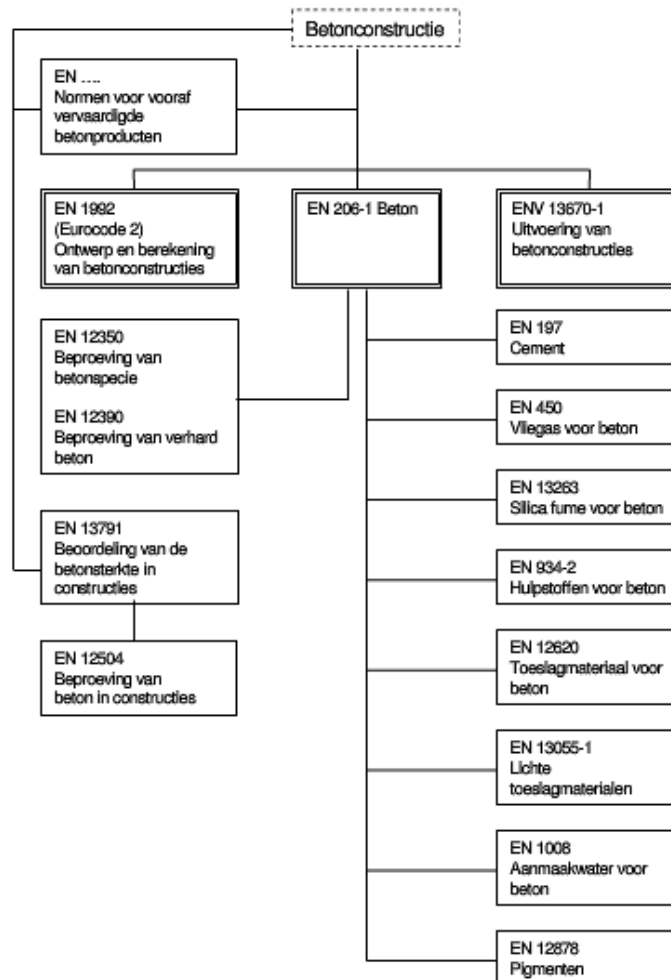
Tabel 6: Determineertabel

Determineertabel voor het bepalen van een pathologie.				
nummer	vraag	antwoord	ga naar vraag:	Pathologie
1	Verschraling cementsteen?	Ja	1a	
		Nee	1b	
1a	Witte afzetting?	Ja	2a	Sulfaataantasting
		Nee	2b	Zuuraantasting ten gevolge van:
2b	Aanwezigheid regenwater?	Ja	3a	Microbio. HNO₃-aantasting
				Koolzuurhoudend water
		Nee	3b	Biogene H₂SO₄-aantasting
				Andere zuren
1b	Scheurvorming zonder roest?	Ja	4a	
		Nee	4b	
4a	Eerst vastgesteld vlak na of tijdens fabricage?	Ja	5a	Drogingskrimp
				Autogene krimp
				Plastische krimp
		Nee	5b	
5b	Kent de structuur een overbelasting?	Ja	6a	
		Nee	6b	
6a	Gelachtige kegelvormige afzetting	Ja	7a	ASR
		Nee	7b	Mechanische overbelasting
6b	Structuur blootgesteld aan vorst en zouten?	Ja	8a	Vorst-Dooicyclus
		Nee	8b	
8b	Is de structuur in aanraking gekomen met brand	Ja	9a	Spalling
		Nee	9b	Thermische krimp
4b	grindnesten of heteregone structuur?	Ja	10a	
		Nee	10b	
10a	enkel grindnesten?	Ja	11a	Bekistingsproblemen
		Nee	11b	
11b	Duidelijke laagvorming?	Ja	12a	Ontmengingen
		Nee	12b	Differentiële verdichting
10b	Blauwe verkleuring?	Ja	13a	FeS en MnS aantasting
		Nee	13b	
13b	Aanwezigheid roest of roestplekken?	Ja	14a	
		Nee	14b	Geen beschreven pathologie
14a	enkel roestuitbloeiing zonder afvallende stukken beton of aanwezigheid putcorrosie in de wapening?	Ja	15a	Chlooraantasting
		Nee	15b	
15b	Spanning aanwezig?	Ja	16a	Zwerfstromen
		Nee	16b	Carbonatatie

Merk bij bovenstaande tabel ook op dat deze indicatief is. Er moet steeds getest worden of de afgeleide pathologieën aanwezig zijn, alvorens er effectief wordt overgeschakeld op een remediëring.

3.4 Milieu- en omgevingsklassen

In België zijn de Europese normen en hun bijgevoegde Nationale Bijlagen van toepassing. Figuur 17 geeft een beknopt overzicht van de te volgen normen.



Figuur 17: Relaties tussen EN 206-1 en de normen voor ontwerp berekening en uitvoering. (10)

Bij het al dan niet prefab construeren van betonnen constructies, worden de normen ingedeeld in drie grote groepen. Merk hierbij op dat het gaat om Europese normen, dewelke nationale aanvullingen hebben. (10)

- EN 1992 (Eurocode 2): deze norm beschrijft de manier waarop elke betonconstructie moet gedimensioneerd worden voor elk mogelijke belasting. Mechanische pathologieën zullen dankzij deze normenreeks tot een aanvaardbaar minimum herleid worden;
- EN 206-1: deze norm beschrijft het materiaal beton. Zowel de toepassingsomgeving als de samenstelling wordt door deze norm gereguleerd. Zoals uit Figuur 17 kan afgeleid worden, schept deze norm een kader voor specifieke normen;

- in de voornoemde tabel is er sprake van ENV 13670-1: Dit is een Voornorm die richtlijnen geeft in verband met de verwerking van het beton. Een voornorm is nog niet gevalideerd en bezit dus niet dezelfde status als norm. Het kan beschouwd worden als een lijst met voorlopige afspraken waarin sommige elementen nog ontbreken of onder voorbehoud zijn opgenomen. Ondertussen is deze voornorm gevalideerd in 2010, zodat deze de status van norm verkregen heeft en dit in de norm NBN EN 13670. Deze norm zal trachten pathologieën die het gevolg zijn van een verkeerde manipulatie van het verse beton te beperken.

Voor chemische en fysische pathologieën gaat de preventieve remediëring dus beschreven worden aan de hand van EN 206-1 en zijn Nationale Bijlagen. (10)

NBN B 15-001 met als titel: *“Beton-Specificatie: eigenschappen, vervaardiging en conformiteit – Nationale aanvulling bij NBN EN 206-1:2001”* beschrijft de geldende omgevings- en milieuklassen zoals omschreven in Tabel 7. (11)

Een omgevingsklasse wordt steeds benoemd beginnende met een “E” afkomstig van het Engelse woord voor milieu, *“environment”* gevolgd door één van de volgende tekens.

- “O”: wijst op een gebrek aan schadelijke omgeving,
- “I”: binnenomgeving,
- “E”: buitenomgeving,
- “S”: zee omgeving,
- “A”: agressieve omgeving.

Deze code wordt dan nog verder uitgebreid met een getalwaarde afhankelijk van de specifieke omstandigheden binnen deze omgeving.

Tabel 6 beschrijft de omgevingsklassen en vormt de link met de milieuklassen. Merk op dat deze link afhankelijk is van de aanwezigheid van wapeningsstaal. Milieuklassen zijn ingedeeld naargelang het inwerkende schademechanisme. Ze worden aangeduid met de letter X gevolgd door een van de volgende tekens die overeenstemmen met een inwerkend schademechanisme. (11)

- “O”: geen inwerkend schademechanisme,
- “C”: carbonatatie,
- “S”: chloriden afkomstig uit zeewater,
- “D”: chloriden afkomstig uit andere bronnen (bv. strooizouten),
- “F”: vorst-dooi cycli,
- “A”: agressieve omgeving.

Tabel 6: Omgevingsklassen met bijbehorende milieuklassen (11)

Omgevingsklassen			Milieuklassen	
Klasse	Omschrijving	Voorbeelden	OB ⁽¹⁾	GB ⁽²⁾ of VB ⁽³⁾
E0	Niet schadelijk		X0	Niet van toepassing
E1	Binnenomgeving	Binnenkant van woningen en kantoren	X0	XC1
EE	Buitenomgeving			
EE1	Geen vorst	Fundering onder vorstgrens	X0	XC2
EE2	Vorst, geen contact met regen	Overdekte open parkeergarage, kruipkelder, open doorgang in gebouw	XF1	XC3, XF1
EE3	Vorst, contact met regen	Buitenmuur, in contact met regen	XF1	XC4, XF1
EE4	Vorst en doolzoulen (aanwezigheid van ter plaatse ontdooit of opspattend of aflopend doolzouhoudend water)	Delen van weginfrastructuur	XF4	XC4, XD3, XF4
ES	Zeeomgeving			
	Geen contact met zeewater; wel contact met zeelucht (tot 3 km van de kust) en/of brak water ⁽⁴⁾			
ES1	Geen vorst	Fundering onder vorstgrens in contact met brak water	XA1	XC2, XS2, XA1
ES2	Vorst	Buitenmuur van gebouw aan kust in contact met regen	XF1	XC4, XS1, XF1
	Contact met zeewater			
ES3	Ondergedompeld		XA1	XC1, XS2, XA1
ES4	Getijden- en spatzone	Kaaimuren	XF4, XA1	XC4, XS3, XF4, XA1
EA	Agressieve omgeving			
EA1	Zwak agressieve chemische omgeving volgens label 2 van NBN EN 206-1		XA1	XA1
EA2	Middelmatig agressieve chemische omgeving volgens label 2 van NBN EN 206-1		XA2	XA2
EA3	Sterk agressieve chemische omgeving volgens label 2 van NBN EN 206-1		XA3	XA3
(1)	OB = ongewapend beton			
(2)	GB = gewapend beton			
(3)	VB = voorgespannen beton			
(4)	Ondiep brak water komt voornamelijk voor in de kustvlakte, het poldergebied in de omgeving van Diksmuide, sommige Oost-Vlaamse polders en rond de haven van Antwerpen. De hoogtelijn van 6 m wordt vastgesteld als de grens tot waar deze gebieden zich uitstrekken.			

Tabel 7 geeft het gevolg van deze klassen weer op de voorgeschreven betonsamenstelling.

Tabel 7: Grenswaarden voor de samenstelling van beton in functie van de milieuklassen (10)

	Exposure classes																	
	No risk of corrosion or attack	Carbonation-induced corrosion				Chloride-induced corrosion						Freeze/thaw attack				Aggressive chemical environments		
						Sea water			Chloride other than from sea water									
		X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2
Maximum w/c^a	–	0,65	0,80	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Minimum strength class	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Minimum cement content ^c (kg/m ³)	–	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Minimum air content (%)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a	–	–	–
Other requirements	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Aggregate in accordance with EN 12620 with sufficient freeze/thaw resistance				–	Sulfate-resisting cement ^b	

^a Where the concrete is not air entrained, the performance of concrete should be tested according to an appropriate test method in comparison with a concrete for which freeze/thaw resistance for the relevant exposure class is proven.

^b Where sulfate in the environment leads to exposure classes XA2 and XA3, it is essential to use sulfate-resisting cement conforming to EN 197-1 or complementary national standards.

^c Where the *k*-value concept is applied the maximum *w/c* ratio and the minimum cement content are modified in accordance with 5.2.5.2.

Een eerste conclusie is dat de normen minimale vereisten opleggen aan de hand van de voorspelde gevaarlijke schademechanismen uit punt 3.2. Er zijn echter vier schademechanismen die bovenstaande tabel ogenschijnlijk niet vermeldt.

- zwerfstromen,
- sulfaataantasting,
- zuuraantasting,
- differentiële verdichting.

Zwerfstromen en differentiële verdichting worden in andere normen behandeld.

Het risico op sulfaat- en zuuraantasting wordt voor beide ondergebracht in de milieuklasse XA volgens Tabel 8. Hierin zijn SO_4^{2-} -gehalte voor zowel grond als grondwater een bepalende factor voor de indeling naargelang het risico op sulfaataantasting. Voor de indeling afhankelijk van het risico op zuuraantasting, is de pH voor het grondwater een bepalende factor. Voor grond is dit het zuurgehalte uitgedrukt in ml/kg.

Tabel 8: Grenswaarden voor de milieuklassen met chemische aantasting door natuurlijke grond en grondwater (10)

Het agressieve chemische milieu, zoals hieronder ingedeeld, is gebaseerd op natuurlijke grond en grondwater met een water-/grondtemperatuur tussen 5 °C en 25 °C en een zo lage watersnelheid dat een statische situatie wordt benaderd.				
Chemische bestanddelen	Referentie beproevingsmethode	XA1	XA2	XA3
Grondwater				
SO_4^{2-} mg/l	EN 196-2	≥ 200 en ≤ 600	> 600 en ≤ 3000	> 3000 en ≤ 6000
pH	ISO 4316	$\leq 6,5$ en $\geq 5,5$	$< 5,5$ en $\geq 4,5$	$< 4,5$ en $\geq 4,0$
CO_2 mg/l agressief	prEN 13577:1999	≥ 15 en ≤ 40	> 40 en ≤ 100	> 100 tot verzadiging
NH_4^+ mg/l	ISO 7150-1 of ISO 7150-2	≥ 15 en ≤ 30	> 30 en ≤ 60	> 60 en ≤ 100
Mg^{2+} mg/l	ISO 7980	≥ 300 en ≤ 1000	> 1000 en ≤ 3000	> 3000 tot verzadiging
Grond				
SO_4^{2-} mg/kg ^{al} totaal	EN 196-2 ³⁰⁾	≥ 2000 en ≤ 3000 ^{al}	> 3000 ^{al} en ≤ 12000	> 12000 en ≤ 24000
Zuurgehalte ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Niet aangetroffen in praktijk	
a) Kleigrond met een doorlaatbaarheid kleiner dan 10^{-5} m/s mag in een lagere klasse worden geplaatst. b) De beproevingsmethode schrijft de extractie voor van SO_4^{2-} door middel van zoutzuur; als alternatief mag de extractie met behulp van water worden toegepast, indien op de plaats van het gebruik van het beton ervaring beschikbaar is. c) Indien gevaar bestaat voor opeenhoping van sulfataionen in het beton, ten gevolge van nat/droogwisselingen of capillaire opzuiging, moet de grenswaarde van 3000 mg/kg worden verlaagd tot 2000 mg/kg.				

De logica die de normen hanteren komt dus overeen met de resultaten bekomen bij voorgaande analyse.

Voor elk schademechanisme zijn er gelijke trends waarneembaar. In geval van stijgend risico zijn dit de volgende:

- een dalende maximale W/C factor: dit duidt op een verlaging van de hoeveelheid overtollig water;
- een stijgende cementshoeveelheid: hiermee wordt een verlaging van de permeabiliteit bekomen en een verhoging van de sterkte van het beton, met een hieraan gekoppelde verhoging van de weerstand tegen inwendige spanningen;
- een stijgende sterkteklasse: dit duidt opnieuw op een verhoging van de weerstand tegen inwendige spanningen.

Voor vorstgevoelige omgevingen wordt er tevens een minimale luchthoeveelheid in het mengsel voorgeschreven.

Structuren met een verhoogd risico op chemische aantasting worden verplicht gebruik te maken van HSR-cement.

3.5 Constructieve schikking

De reeds besproken norm NBN EN 206-1 en zijn Belgische Bijlage NBN B 15-001 geeft richtlijnen voor het samenstellen van een beton afhankelijk van de omgeving. Eurocode 2 oftewel NBN EN 1992-1-1 beschrijft de manier waarop elk betonnen element afhankelijk van zijn belasting en zijn omgeving gedimensioneerd moet worden. (25)

Voor het rechtstreeks vermijden van pathologieën en het beperken van hun schade zijn er twee voorname parameters die in deze normreeks worden besproken, nl.:

- minimale betondekking,
- maximale scheurwijdte.

Betondekking is de afstand tussen het wapeningsoppervlak en het dichtstbijzijnde betonoppervlak. Zoals reeds eerder gezegd, zal de periode dewelke een pathologie nodig heeft om het wapeningsstaal aan te tasten, groter worden naargelang de betondekking toeneemt.

De correcte berekening van de voorgeschreven betondekking wordt beschreven in punt 4.4.1.2 van NBN EN 1992-1-1:2005. (25)

De maximale toegestane scheurwijdte zal afnemen naarmate het aantastingsrisico toeneemt. Tabel 9 illustreert dit.

Tabel 9: Aanbevolen waarden van w_{max} (mm) (25)

Milieuklasse	Gewapende en voorgespannen elementen met voorspanning zonder aanhechting	Voorgespannen elementen met voorspanning met aanhechting
	quasi-blijvende belastingscombinatie	vaak voorkomende belastingscombinatie
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		decompressie
<p>OPMERKING 1 Voor de milieuklassen X0 en XC1 heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid; deze grens is gesteld om een acceptabel uiterlijk te verzekeren. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking zijn afgezwakt.</p> <p>OPMERKING 2 Voor deze milieuklassen behoort, aanvullend, decompressie onder de quasi-blijvende belastingscombinatie te zijn gecontroleerd.</p>		

De berekeningsmethode voor de scheurwijdte wordt beschreven in punt 7.3.2 van de voornoemde norm NBN EN 1992-1-1:2005. (25)

3.6 Uitvoering betonconstructies

De uitvoering van betonconstructies wordt gereguleerd aan de hand van norm NBN EN 13670 uit 2010. Deze norm geeft richtlijnen over verschillende aspecten die betrekking hebben met het construeren van een betonnen element. Algemene productie- en verdichtingsprincipes worden aangehaald in hoofdstuk 8 van deze norm en annex F. Figuur 18 geeft een voorbeeld met de volgende citaten uit annex F: (23)

- (3) Self-compacting concrete should, as much as possible, be placed in one continuous pour so delivery rates should be matched to placing rate. The maximum allowed period of time between successive concrete layers should be known and not exceeded.
- (4) Free-fall and horizontal flow of SCC should be limited in order to avoid any adverse effect on concrete quality and homogeneity.
- (5) Vibration of SCC should generally be avoided as it is likely to result in significant segregation of the coarse aggregate. A carefully controlled and light vibration can be used if it is demonstrated that there is no adverse effect on concrete quality and homogeneity.

Figuur 18: Citaat uit annex F van NBN EN 13670

Hieruit kan worden afgeleid dat het probleem van ontmenging en differentiële verdichting erkend wordt, maar dat het moeilijk is om te kwantificeren.

3.7 Conclusie

Het resistenter maken van een betonmengsel of een constructie tegen een pathologie of het beperken van de aangerichte schade ten gevolge van deze pathologie steunt op de volgende pijlers:

- verlagen W/C-factor,
- verhogen cementshoeveelheid,
- verhogen sterkteklasse,
- verhogen wapeningsdekking,
- verlagen maximale scheurwijdte.

Over pathologieën die het gevolg zijn van zwerfstromen en verkeerde manipulatie wordt enkel vermeld dat ze vermeden dienen te worden.

4 Curatieve remediëring

4.1 Normering

NBN EN 1504 is de normreeks die het repareren en het beschermen van betonnen constructies reguleert. Ze bestaat uit 10 delen. Onderstaande lijst geeft deze opgesomd weer, samen met een beknopte beschrijving van de inhoud: (26)

- NBN EN 1504-1: Termen en definities;
- NBN EN 1504-2: Oppervlaktebeschermingsproducten en –systemen;
- NBN EN 1504-3: Structurele en niet structurele reparatie;
- NBN EN 1504-4: Structurele hechting;
- NBN EN 1504-5: Betoninjectie;
- NBN EN 1504-6: Verankering van wapeningsstaal;
- NBN EN 1504-7: Corrosiebescherming van betonstaal;
- NBN EN 1504-8: Kwaliteitsbeheersing en conformiteitsbeoordeling voor fabrikanten;
- NBN EN 1504-9: Algemene principes voor het gebruik van producten en systemen;
- NBN EN 1504-10: Toepassing van producten en kwaliteitsbeheersing op de bouwplaats.

4.2 Stappenplan voor een reparatie- of beschermingsproces

NBN EN 1504-9 beschrijft in detail welke stappen er moeten doorlopen worden om een optredende pathologie te repareren en om de structuur naderhand te beschermen. Dit laat zich vertalen in de zes volgende stappen. (27)

- documenteren constructie,
- beoordeling,
- bepalen strategie,
- ontwerp van de reparatie,
- de werkzaamheden,
- aanvaarding en beoordeling van de werkzaamheden.

Het documenteren en het verzamelen van informatie is de eerste stap in het reparatieproces. De bedoeling is om een duidelijk beeld te krijgen van hoe de structuur tot zijn huidige toestand gekomen is. Tot deze informatie behoren de volgende elementen:

- de geschiedenis van de structuur;
- het nut van de structuur en eventuele nutswijzigingen;
- technische specificaties zoals wapeningsplannen, vroegere berekeningen, betonsterktes;
- documentatie over eerdere reparaties enz.

Buiten informatie over de structuur zelf is het ook natuurlijk aangewezen om de omgeving waarin de structuur zich bevindt te documenteren. Zo zal de aanwezigheid van bepaalde industrieën een invloed hebben op de mogelijke aantasting net zoals een eventuele verandering van aanpalende structuren die ongewenste effecten kunnen hebben.

Na het documenteren van de constructie is er een diepgaand onderzoek nodig over de optredende zichtbare schade en de eventuele onzichtbare maar nog te verwachten pathologieën. Bij dit laatste zal de studie omtrent de structuur en de omgeving zeker kunnen helpen.

Na de eerste twee stappen is de probleemstelling voor een constructie gedefinieerd. In de derde stap zal nu beslist worden welke acties ondernomen zullen worden. Dit gebeurt op basis van verschillende criteria waaronder de volgende:

- levensduur na reparatie;
- vereiste prestaties die de structuur moet leveren;
- de gevolgen en de waarschijnlijkheid van een geheel of gedeeltelijk falen van de structuur;
- de gevolgen en de waarschijnlijkheid van een constructieve fout;
- mogelijkheid voor verdere reparatiewerkzaamheden in de toekomst;
- toegankelijkheid;
- onderhoud.

De opties waaruit dan gekozen kan worden gebaseerd op voorgaande criteria zijn de volgende:

- niets doen;
- niets doen maar het doel van de constructie aanpassen;
- voorkomen verdere schade zonder reparatie;
- repareren van delen van de constructie;
- repareren van de gehele constructie;
- slopen van delen van de constructie;
- slopen van de gehele constructie;
- herbouwen van delen van de constructie;
- herbouwen van de gehele constructie.

Gebaseerd op de bovenstaande criteria en opties zal men nu een bepaalde strategie bekomen. De uitvoering van deze strategie en de strategie zelf zal tevens aangepast worden aan de volgende randvoorwaarden afhankelijk van de omgeving.

- mogelijkheid tot het indringen van schadelijke stoffen of het inwerken van schadelijke aantastingsmechanismen tijdens de werken;
- hinder voor de omgeving;
- benodigde tijd;
- de beperkingen die de omgeving oplegt aan de werkzaamheden;
- onderhoud van de constructie.

De eerste drie stappen in de reparatie en het beschermingsproces zijn nu doorlopen. Er is geweten wat de oorzaken zijn van de optredende pathologieën, wat de schade is en tot welk niveau de constructie moet worden gerepareerd.

De volgende stap is nu een selectie maken van de herstellingsmethode die het beste past bij de eerder voorgestelde randvoorwaarden. NBN EN 1504-9 beschrijft een hele reeks principes die inwerken op de oorzaken, de aantastingsnelheid of de schade ten gevolge van een pathologie. De norm splitst de herstel- en beschermingsprincipes op in twee grote groepen. Enerzijds principe 1 t.e.m. 6 die handelen over zuivere betonherstelling. Anderzijds principe 7 t.e.m. 11 die handelen over het herstellen en beschermen van wapeningsstaal. Tabel 10 geeft een overzicht.

Tabel 10: Lijst met herstelprincipes (27)

Principle	Examples of methods based on the principles	Relevant part of EN 1504 (where applicable)
Principles and methods related to defects in concrete		
1. Protection against ingress	1.1 Hydrophobic impregnation	2
	1.2 Impregnation	2
	1.3 Coating	2
	1.4 Surface bandaging of cracks	
	1.5 Filling of cracks	5
	1.6 Transferring cracks into joints	
	1.7 Erecting external panels ^a	
	1.8 Applying membranes ^a	
2. Moisture control	2.1 Hydrophobic impregnation	2
	2.2 Impregnation	2
	2.3 Coating	2
	2.4 Erecting external panels	
	2.5 Electrochemical treatment	
3. Concrete restoration	3.1 Hand-applied mortar	3
	3.2 Recasting with concrete or mortar	3
	3.3 Spraying concrete or mortar	3
	3.4 Replacing elements	
4. Structural strengthening	4.1 Adding or replacing embedded or external reinforcing bars	
	4.2 Adding reinforcement anchored in pre-formed or drilled holes	6
	4.3 Bonding plate reinforcement	4
	4.4 Adding mortar or concrete	3, 4
	4.5 Injecting cracks, voids or interstices	5
	4.6 Filling cracks, voids or interstices	5
	4.7 Prestressing - (post tensioning)	
5. Increasing physical resistance	5.1 Coating	2
	5.2 Impregnation	2
	5.3 Adding mortar or concrete	3
6. Resistance to chemicals	6.1 Coating	2
	6.2 Impregnation	2
	6.3 Adding mortar or concrete	3
Principles and methods related to reinforcement corrosion		
7. Preserving or restoring passivity	7.1 Increasing cover with additional mortar or concrete	3
	7.2 Replacing contaminated or carbonated concrete	3
	7.3 Electrochemical realkalisation of carbonated concrete	
	7.4 Realkalisation of carbonated concrete by diffusion	
	7.5 Electrochemical chloride extraction	
8. Increasing resistivity	8.1 Hydrophobic impregnation	2
	8.2 Impregnation	2
	8.3 Coating	2
9. Cathodic control	9.1 Limiting oxygen content (at the cathode) by saturation or surface coating	
10. Cathodic protection	10.1 Applying an electrical potential	
11. Control of anodic areas	11.1 Active coating of the reinforcement	7
	11.2 Barrier coating of the reinforcement	7
	11.3 Applying corrosion inhibitors in or to the concrete	
^a These methods may also be applicable to other principles.		

Na het maken van de selectie van de reparatiemethode, moet deze worden uitgevoerd. Zoals eerder gezegd verschaft NBN 1504-10 informatie over de uitvoering, en de toepassing van bepaalde producten. Ook de kwaliteitsbeoordelingscriteria staan hierin vermeld. (28)

In principe is de herstelling bij correct doorlopen van bovenstaande stappen af. Het laatste dat nu nog rest is de aanvaarding van de werken, en het opstellen van een rapport dat de werkzaamheden omschrijft. De bedoeling van dit rapport is om de eerste stap die doorlopen dient te worden bij een eventuele latere herstelling te vergemakkelijken.

Dit rapport kan onder meer de volgende elementen bevatten:

- gebruikte materialen en technieken;
- de motivatie voor het gebruik van deze materialen en technieken;
- mogelijke herstellingsmethodes in geval van verslechtering;
- de mogelijke oorzaken van nieuwe pathologieën;
- inspectie interval;
- eventuele beperkingen voor de structuur ten gevolge van de reparatie.

4.3 Principes

4.3.1 Principe 1: Bescherming tegen indringing

4.3.1.1 Hydrofobe impregnatie

Hydrofobe impregnatie is een oppervlaktebehandeling, die de poriën niet opvult of afdekt, maar bekleedt met een waterafstotende laag. Hierdoor wordt de doorgang door de poriën voor vloeibaar water belemmerd, maar zal dampdiffusie in beide richtingen mogelijk zijn.

Figuur 19 geeft de werking duidelijk weer. Er wordt hierbij geen film aan het betonoppervlak gevormd en het uitzicht blijft min of meer gelijk.



Figuur 19: Schematische voorstelling van hydrofobe impregnering (29)

Siloxaan en Silaanverbindingen kunnen hiervoor gebruikt worden. (29) (30)

4.3.1.2 Impregnatie

Impregnatie heeft als doelstelling de porositeit van de oppervlakte te verminderen en de oppervlakte te versterken. De poriën worden dan gedeeltelijk of geheel gevuld. Het poriënsysteem wordt aldus afgedicht tegen agressieve stoffen. Figuur 20 geeft een voorstelling van een typische impregnatie.



Figuur 20: Schematische voorstelling van een impregnering (29)

Deze behandeling creëert een doorbroken dunne film op het beton. Organische polymeren worden hiervoor gebruikt. (30) (29)

4.3.1.3 Coatings

Coatings of bekledingen creëren een continue laag op het betonoppervlak. Hierdoor worden de poriën volledig afgesloten en wordt de oppervlakte versterkt. Figuur 21 geeft een voorstelling van een bekleding.



Figuur 21: Schematische voorstelling van een bekleding (29)

Bekledingen kunnen een dikte hebben variërend tussen 0,1 en 5 mm. Sommige toepassingen vereisen zelfs een grotere dikte.

De volgende drie methodes zijn mogelijk:

- organische polymeren,
- organische polymeren met cement als vulmiddel,
- hydraulisch cement gemodificeerd met een polymeerdispersie. (29) (30)

4.3.1.4 Bedekken van scheuren met strips

Dit is het plaatselijk aanbrengen van materiaal ter bescherming van het betonoppervlak tegen het indringen van schadelijk agentia. Hoewel Norm NBN EN 1504-2 deze vermeldt, wordt er in het verder verloop van deze normreeks niet over uitgeweid. (30) (29)

4.3.1.5 Vullen van scheuren

Scheuren kunnen worden opgevuld ten einde het indringen van schadelijke stoffen te voorkomen.

Men maakt een onderscheid tussen drie types van vulstof:

- type F: producten die de mogelijkheid hebben om te binden met het beton en om krachten over te dragen;
- type D: bewegelijke ductiele producten die bepaalde beweging toelaten;
- type S: producten die herhaaldelijk kunnen zwellen wanneer ze in aanraking komen met water en waarbij de watermoleculen verbindingen aangaan met de moleculen van het product.

NBN 1504-5 specificeert verscheidene selectiecriteria voor het selecteren van een vulstof. (31)

4.3.1.6 Converteren van scheuren in voegen

Een beweegbare voeg kan zorgen voor een stabiliteitsverhoging en een risicoverlaging voor verdere mechanische pathologieën. De voeg moet dan gecreëerd worden over de gehele diepte van het gerepareerde gebied. Optredende scheuren die geleid hebben tot het converteren naar een voeg moeten dan worden opgevuld met een product dat de vooropgestelde bewegingen toelaat. (26)

4.3.1.7 Aanbrengen van externe panelen

Het aanbrengen van externe panelen beschermt de betonnen structuur. In feite wordt hier de omgevingsklasse van de structuur aangepast. Hoewel Norm NBN EN 1504-2 deze methode vermeldt, wordt er in het verder verloop van deze normreeks niet over uitgeweid.

4.3.1.8 Aanbrengen van membranen

Door een folie aan te brengen rond een betonnen constructie kan deze volledig beschermd worden. Hierbij past men de omgevingsklasse van het beton aan. Hoewel Norm NBN EN 1504-2 deze methode vermeldt, wordt er in het verder verloop van deze normreeks niet over uitgeweid.

4.3.2 Principe 2: Vochtbeheersing

4.3.2.1 Hydrofobe impregnatie

Zie principe omschreven in 4.3.1.1.

4.3.2.2 Impregnatie

Zie principe omschreven in 4.3.1.2.

4.3.2.3 Coatings

Zie principe omschreven in 4.3.1.3.

4.3.2.4 Aanbrengen van externe panelen

Zie principe omschreven in 4.3.1.7.

4.3.2.5 Elektrochemische behandeling

Vocht kan door het aanbrengen van een elektrisch potentiaal verplaatst worden naar de kathodische gebieden. Hoewel Norm NBN EN 1504-2 deze methode vermeldt, wordt er in het verder verloop van deze normreeks niet over uitgeweid. (32) (29)

4.3.3 Principe 3: Betonrenovatie

4.3.3.1 Handmatig aanbrengen van mortel

Het handmatig aanbrengen van beton of mortel is één van de simpelste herstellmethoden van beton. Wanneer men gebruik maakt van herstellmortels is NBN EN 1504-3 van toepassing. Tabel 11 geeft de opdeling en de eigenschappen van herstellmortels weer. (33) (32)

Tabel 11: Eisen voor structurele en niet structurele herstellmortels (33)

Item No.	Performance characteristic	Reference substrate (EN 1766)	Test method	Requirement			
				Structural		Non-Structural	
				Class R4	Class R3	Class R2	Class R1
1	Compressive strength	None	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
2	Chloride ion Content	None	EN 1015-17	≤ 0,05 %		≤ 0,05 %	
3	Adhesive bond	MC(0,40)	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
4	Restrained shrinkage / expansion ^{b,c}	MC(0,40)	EN 12617-4	Bond strength after test ^{d,e}			No requirement
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
5	Carbonation ^f Resistance	None	EN 13295	$d_k \leq$ control concrete (MC(0,45))		No requirement ^g	
6	Elastic modulus	None	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	No requirement	
7	Thermal compatibility ^{1h} Part 1, Freeze-thaw	MC(0,40)	EN 13687-1	Bond strength after 50 cycles ^{d,e}			Visual inspection after 50 cycles ^e
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
8	Thermal compatibility ^{1h} Part 2, Thunder shower	MC(0,40)	EN 13687-2	Bond strength after 30 cycles ^{d,e}			Visual inspection after 30 cycles ^e
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
9	Thermal compatibility ^{1h} Part 4, Dry cycling	MC(0,40)	EN 13687-4	Bond strength after 30 cycles ^{d,e}			Visual inspection after 30 cycles ^e
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
10	Skid resistance	None	EN 13096-4	Class I : > 40 units wet tested Class II : > 40 units dry tested Class III : > 55 units wet tested		Class I : > 40 units wet tested Class II : > 40 units dry tested Class III : > 55 units wet tested	
11	Coefficient of thermal expansion ^c	None	EN 1770	Not required if tests 7, 8 or 9 are carried out, otherwise declared value		Not required if tests 7, 8 or 9 are carried out, otherwise declared value	
12	Capillary Absorption	None	EN 13057	≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{0,5}		≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{0,5}	No requirement
Requirements for Repair Principles 3, 4 and 7: Method 3.1 - Concrete restoration by applying mortar by hand. Method 3.2 - Concrete restoration by recasting with concrete. Method 3.3 - Concrete restoration by spraying mortar or concrete. Method 4.4 - Structural strengthening by adding mortar or concrete. Method 7.1 - Increasing cover to reinforcement with additional cementitious mortar or concrete. Method 7.2 - Replacing contaminated or carbonated concrete.							
^a The value of 0,8 MPa is not required where cohesive failure occurs in the repair material. If cohesive failure occurs a minimum tensile strength of 0,5 MPa is required. ^b Not required for Repair Method 3.3. ^c Not required if thermal cycling is undertaken. ^d Mean value with no single value less than 75 % of the minimum requirement. ^e Maximum permissible average crack width ≤ 0,05 mm with no crack ≥ 0,1 mm and no delamination. ^f For durability. ^g Not suitable for protection against carbonation unless the repair system includes a surface protection system with proven protection against carbonation (see EN 1504-2). ^h Choice of method depends on the exposure conditions. When a product satisfies Part 1 it is deemed to satisfy Part 2 and Part 4.							

Herstelmortels worden ingedeeld in structurele herstelmortels (R3 en R4) en herstelmortels voor niet structurele herstellingen (R1 en R2). Hoewel de aangegeven toepassingswijze van fabrikant tot fabrikant licht kunnen verschillen, zullen reparaties met herstelmortels die gebruikt worden om beton te vervangen die ten gevolge van roestvorming is losgekomen via de volgende stappen worden uitgevoerd. (33)

- detecteren van aangetaste oppervlaktes (voor carbonatatie kan dit door middel van het aanbrengen van fenolftaleïne, hetgeen paars verkleurd bij een pH lager dan 9);
- verwijderen van geïnfecteerd beton;
- verwijderen van de roestlaag op de wapening;
- eventueel aanbrengen hechtingslaag;
- aanbrengen herstelmortel;
- volg bij het doorlopen van deze stappen steeds de aanwijzingen van de fabrikant.

Merk hierbij op dat dit procedé de pathologie enkel remedieert indien alle geïnfecteerde beton verwijderd wordt. Is dit niet het geval, dan zal na verloop van tijd de pathologie opnieuw zichtbaar worden. Daarenboven dienen de wapeningsstaven na reparatie nog een voldoende doorsnede te hebben om te voldoen aan de structurele eisen van het bouwwerk.

4.3.3.2 Aanstorten van beton of mortel

Het opnieuw aanstorten van beton of mortel is vergelijkbaar met het herstelprincipe 3.1. alleen is ze grootschaliger. De geldende norm voor het toepassen van deze herstelmethode is NBN EN 1504-3. (32)

4.3.3.3 Spuiten van beton of mortel

In zones die slecht bereikbaar zijn voor het gieten of het handmatig aanbrengen van beton of zones waarbij de voorgaande procedés technisch moeilijk zijn, kan er geopteerd worden om beton tegen de oppervlakte te spuiten. Er zijn 2 types, enerzijds de droge en anderzijds de natte spuitmethode.

Bij de natte spuitmethode wordt betonspecie via een pompsysteem doorheen een slang naar de beoogde oppervlakte verpompt. Door op het einde van deze slang onder druk lucht te injecteren in de betonspecie, wordt het beton tegen de oppervlakte gespoten. Deze methode produceert minder volume, maar ook minder stof.

Bij de droge methode wordt er droge mortel doorheen een slang gepompt en pas op het einde onder druk vermengd met water. Door deze watertoevoeging wordt het beton tegen de gewenste oppervlakte gespoten. (32)

4.3.3.4 Vervangen van elementen

Het vervangen van elementen is de meest drastische ingreep. In de normreeks NBN EN 1504 worden hiervoor geen extra bepalingen opgelegd. De structurele integriteit van het gebouw dient verzekerd te worden tijdens de werkzaamheden. Er moet worden op toegezien dat de structuur voldoet aan de bepalingen en vereisten uit normreeks NBN EN 1990 (eurocodes) tijdens en na de werkzaamheden.

4.3.4 Principe 4: Structurele versterking

4.3.4.1 Toevoegen of vervangen van ingebedde of externe wapening

Het toevoegen of vervangen van wapening gebeurt steeds om conform te zijn met normreeks NBN EN 1990 (eurocodes). Er dient steeds op te worden toegezien dat de aangebrachte wapening de krachten kan opnemen en overbrengen waarvoor ze ontworpen is. De oppervlaktes, eventuele sleuven en verankeringspunten in het beton moeten voldoen aan NBN EN 1504-10 (paragraaf 7.2.2 en 7.2.3). (28)

4.3.4.2 Toevoegen van wapening in voorgevormde of geboorde gaten

Voor deze methode gelden dezelfde bepalingen als voor principe 4.1. Daarenboven dient de verankering te voldoen aan de bepalingen uit de norm NBN EN 1504-6. De oppervlaktes, eventuele sleuven en verankeringspunten in het beton moeten tevens voldoen aan NBN EN 1504-10 (paragraaf 7.2.2 en 7.2.3). (34)

4.3.4.3 Plaatwapening

Het toevoegen van plaatwapening aan een betonoppervlak is een eenvoudige manier om een structuur te verstevigen. Het dimensioneren en uitvoeren van de plaatwapening dient te voldoen aan de eerder vermelde eurocodes en aan NBN EN 1504-4. (6) (35)

Vooraleer de wapeningen verlijmd kunnen worden, moet het oppervlak behandeld worden conform EN 1504-10 (paragraaf 7.2.4 en 8). Deze methode vereist een zeer zorgvuldige uitvoering. Als de wapening wordt aangebracht op loszittend of verzwakt beton, kan de werking niet gegarandeerd worden. (28)

4.3.4.4 Beton of mortel toevoegen

Zie principes beschreven in 4.3.3.1; 4.3.3.2; 4.3.3.3.

4.3.4.5 Injecteren van barsten, holtes en spleten

Bij het injecteren van barsten en holtes geldt norm NBN EN 1504-5. Volgens dit principe worden barsten en dergelijke onder druk gevuld met een vulstof. De oppervlaktes en scheuren dienen conform NBN EN 1504-10 paragraaf 7.2.2 gereinigd en voorbereid te worden. Zie ook 4.3.1.5. (6) (31)

4.3.4.6 Vullen van barsten, holtes en spleten

Wanneer holtes of scheuren breed genoeg zijn, en juist georiënteerd zijn, kunnen ze simpelweg gevuld worden door het ingieten van vulstof. De geldende normreeks hiervoor is NBN EN 1504-5. Zie ook 4.3.1.5. (6) (31)

4.3.4.7 Naspannen

Naspannen is een manier van voorspannen waarbij er een externe kracht wordt aangebracht op een reeds bestaand betonnen element zodat dit betonnen element meer weerstand kan bieden tegen inwerkende belastingen. Normreeks 1504 legt geen bijkomende bepalingen vast voor naspanning. De berekeningswijzen van naspanning worden gedefinieerd in de eurocodes. (6)

4.3.5 Principe 5: Verhoging fysische resistentie

4.3.5.1 Coatings

Zie principe omschreven in 4.3.1.3.

4.3.5.2 Impregnatie

Zie principe omschreven in 4.3.1.2.

4.3.5.3 Beton of mortel toevoegen

Zie principes beschreven in 4.3.3.1; 4.3.3.2; 4.3.3.3.

4.3.6 Principe 6: Weerstandshoging tegen chemicaliën

4.3.6.1 Coaten

Zie principe omschreven in 4.3.1.3.

4.3.6.2 Impregnatie

Zie principe omschreven in 4.3.1.2.

4.3.6.3 Beton of mortel toevoegen

Zie principes beschreven in 4.3.3.1; 4.3.3.2; 4.3.3.3.

4.3.7 Principe 7: Behoud en herstelling van passiviteit

4.3.7.1 Verhoging betondekking door toevoeging van mortel of beton

Zie principes beschreven in 4.3.3.1; 4.3.3.2; 4.3.3.3.

4.3.7.2 Vervangen van aangetast of gecarbonateerd beton

Zie principes beschreven in 4.3.3.1; 4.3.3.2; 4.3.3.3; 4.3.3.4.

4.3.7.3 Elektrochemische realkalisatie van gecarbonateerd beton

Realkalisatie van gecarbonateerd beton is een behandeling die wordt uitgevoerd door het aanbrengen van een elektrische stroom tussen de wapening aanwezig in de structuur, en een extern systeem bestaande uit een geleidingsnet dat als anode zal fungeren en is ingebed in een tijdelijk elektrolytisch reservoir. Merk hierbij op dat deze werkwijze het carbonatatieproces omkeert maar dat na verwijderen van het systeem het betonoppervlak nog even vatbaar is voor aantasting. Best is dus om deze behandeling te combineren met een andere methode. (6)

4.3.7.4 Realkalisatie van gecarbonateerd beton ten gevolge van diffusie

Deze methode bestaat er uit een zeer alkalische bescherming aan te brengen op het betonoppervlak. Door diffusie zullen deze alkaliën in het gecarbonateerd beton dringen en een realkalisatie veroorzaken. Dit is een zeer traag proces. (6)

4.3.7.5 Elektrochemische chloridenextractie

De elektrochemische chloride-extractie lijkt op de in punt 4.3.7.3 besproken methode. Opnieuw wordt er een stroom voorzien tussen de aangetaste wapening en een anode geleidingsnet dat aan de buitenkant van de constructie is voorzien. Hierdoor worden de chloriden uitgedreven en naar de oppervlakte gebracht. Naderhand moet het oppervlak gereinigd worden en er een bescherming geplaatst worden om verdere aantasting te voorkomen. (6)

4.3.8 Principe 8: Weerstandshoging

4.3.8.1 Hydrofobe impregnatie

Zie principe omschreven in 4.3.1.1.

4.3.8.2 Impregnatie

Zie principe omschreven in 4.3.1.2.

4.3.8.3 Coaten

Zie principe omschreven in 4.3.1.3.

4.3.9 Principe 9: Kathodische controle

4.3.9.1 Beperking van het zuurstofgehalte aan de kathode

Alle methodes die zuurstof verhinderen tot aan de wapening komen te vallen onder deze methode. Dit kan gaan van impregnatie en coaten, tot het toevoegen van inhibitoren. (6)

4.3.10 Principe 10: Kathodische weerstand

4.3.10.1 Aanbrengen elektrisch potentiaal

Het aanbrengen van een elektrisch potentiaal oftewel een geïnduceerde kathodische bescherming aanbrengen, houdt in dat een externe stroombron een stroom levert aan het aangetaste wapeningsnet. Deze elektrische stroom is tegengesteld maar ongeveer even groot als de stroom die loopt tussen de anode en de kathode van het aangetaste wapeningsnet. Deze stroom wordt overgedragen aan het aangetaste net via hulpanodes. Deze anodes worden ingebed in een mortel om ze te beschermen. (6)

4.3.11 Principe 11: Beheersing van anodische gebieden

4.3.11.1 Actieve coating

Deze coatings zijn alkalisch en kunnen fungeren als inhibitor of een passieve omgeving creëren. Het gebruik van actieve coatings moet voldoen aan de norm NBN EN 1504-7. Ze worden aangebracht op blootliggende wapening. Deze coatings zullen met zorg moeten worden aangebracht. Als ze de wapening niet volledig afdekken, zal deze remediëring niet werken. Daarenboven remediëren ze de pathologie enkel als het omgevende beton niet geïnfecteerd is. Is dit wel geïnfecteerd, dan hebben ze een vertragend effect. (36)

4.3.11.2 Afsluitende coating

Deze coatings worden evenals de actieve coatings uit 4.3.11.1 rechtstreeks aangebracht op de wapening om op deze manier de wapening af te schermen van zuurstof en/of water. Hun gebruik moet voldoen aan de norm NBN EN 1504-7. Deze coatings dienen met veel zorg te worden aangebracht. Als ze de wapening niet volledig afdekken, zal deze remediëring niet werken. Daarenboven remediëren ze de pathologie enkel als het omgevende beton niet geïnfecteerd is. Is deze wel geïnfecteerd, dan hebben ze een vertragend effect. (36)

4.3.11.3 Corrosie inhibitoren

Corrosie inhibitoren kunnen op 2 manieren werken. Ze kunnen worden aangebracht op het betonoppervlak waarna ze door diffusie een beschermende laag rond de wapening vormen. Ofwel worden ze vermengd met een herstellmortel of beton die tijdens de herstelwerkzaamheden gebruikt zal worden. (6)

4.4 Reparatiemethodes per pathologie

Tabel 12 geeft een voorbeeld voor eventuele beschermings- en reparatiemethodes die per pathologie kunnen worden toegepast. Om duidelijk te maken dat het gebruikte principe naast andere factoren afhankelijk is van de ernst van de optredende schade, werden er drie niveaus gedefinieerd.

- laag: lichte schade aan het beton;
- gemiddeld: duidelijke schade met een beperkte invloed op de stabiliteit;
- hoog: duidelijke schade met grote invloed op de stabiliteit.

De indeling van de beschermingsmethodes gebeurt aan de hand van de grootte van de gebreken die kunnen leiden tot een secundaire pathologie of op basis van de verwachte duur van een bepaald schademechanisme.

Tabel 12: Voorbeeld herstellmethoden per pathologie

	Hoofdzakelijk betonaantasting					
	Bescherming			Reparatie		
	laag	gemiddeld	hoog	laag	gemiddeld	hoog
Alkali Silicareactie	2.1 of 2.3	2.1 of 2.3	(2.1 en 2.3 of 1.8)			
FeS en MnS aantasting						
Sulfaataantasting	6.2	6.3	6.1	6.1	6.1 of 6.3	3.2 of 3.3 of 6.3
Zuuraantasting	6.2	6.3	6.1			
Biogene H ₂ SO ₄ -aantasting	6.2	6.3	6.1			
Microbio. HNO ₃ -aantasting	6.2	6.3	6.1			
Koolzuurhoudend water	6.2	6.3	6.1			
Drogingskrimp	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Autogene krimp	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Plastische krimp	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Thermische krimp	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Afspatten	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Bekistingsproblemen	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Ontmengingen	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Differentiële verdichting	1.1 of 1.3	1.1 of 1.3	1.1 en 1.3 of 1.8	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Vorst-Dooicyclus	2.1 of 2.2	5.2 of 2.3	1.1 en 5.1 of 5.3	1.5	1.5 of 1.6	4.5 of 4.6
Mechanische pathologieën	5.2	5.1	5.3	3 en 4	3 en 4	3 en 4
	Hoofdzakelijk wapeningsaantasting					
	Bescherming			Reparatie		
	laag	gemiddeld	hoog	laag	gemiddeld	hoog
Carbonatatie	11.3	1.3 of 7.3 of 7.4	11.3 en 1.3 of 7.3 en 1.3	3.1 of 11.1 of 11.3	3.1 of 3.2 of 3.3 of 11.1 of 11.2	3 en 4 en 7.2
Chlooraantasting	1.1 of 1.2	11.3 en 1.1 of 11.3 en 1.3	7.5 en 1.3 of 7.5 en 11.2 of 10.1	3.1 of 11.1 of 11.3	3.1 of 3.2 of 3.3 of 11.1 of 11.2	3 en 4 en 7.2
Zwerfstromen	2.2	2.5 en 2.3	10.1	3.1	3.2 of 3.3	3 en 4

Merk in deze tabel op dat sommige beschermings- of reparatieprincipes soms voorkomen onder een verschillend nummer. Dit wijst er echter op dat hoewel de methode gelijk is, er een ander resultaat verwacht wordt. Zo zal een coating uit 1.3 de bedoeling hebben om inwerkende stoffen te weren en een coating uit 5.1 dienen om de fysische weerstand van het betonoppervlak te vergroten. Tabel 12 heeft een louter indicatief karakter. Elke pathologie dient conform punt 5.2 beoordeeld en geëvalueerd te worden.

4.5 Zelf herstellend beton

De huidige visie op betonpathologieën is dat betonsamenstellingen en de constructieve schikkingen steeds op de omgeving moeten worden afgesteld. Wanneer er iets misloopt of de omgeving veranderd, wordt de structuur van buitenaf beschermd of gerepareerd.

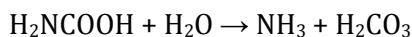
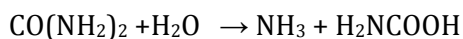
Zelf herstellend beton stelt het beton in staat om ongewenste scheurvorming en porositeitsverhoging te repareren. Zoals eerder besproken zullen hierdoor veel schademechanismes vermeden of vertraagd worden. Dit bekomt men door het toevoegen van bacteriën aan het betonmengsel alvorens het is uitgehard.

“*Microbiële calcië precipitatie*” zoals het proces wordt genoemd, is het afzetten van calcië (CaCO_3) door micro-organismen. Dit calcië zal de poriën en de scheuren opvullen. Het proces is afhankelijk van vier elementen. (37)

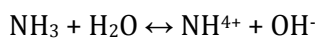
- concentratie calciumionen (Ca^{2+}),
- concentratie opgeloste anorganische koolstof,
- pH,
- aanwezigheid van nucleatiekernen.

Aangezien de celwand negatief geladen is en de calciumionen positief zijn, zullen de micro-organismen als nucleatiekern dienen. Rondom deze cel bevindt zich steeds een dun waterig laagje.

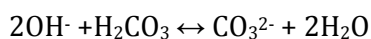
Er zijn verscheidene cycli waarin anorganische koolstof wordt geproduceerd. Aangezien er in deze toepassing voornamelijk gewerkt wordt met ureolytische bacteriën (en dit om verschillende redenen), is de hydrolyse van ureum ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) de eerste reactie die aanleiding geeft tot de vorming van calcië. De reactie begint met de urease van het ureum:



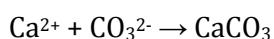
Het ureum uit de cel is nu door het aanwezige water omgezet in koolzuur en ammoniak. De verdere reactie van ammoniak met water geeft:



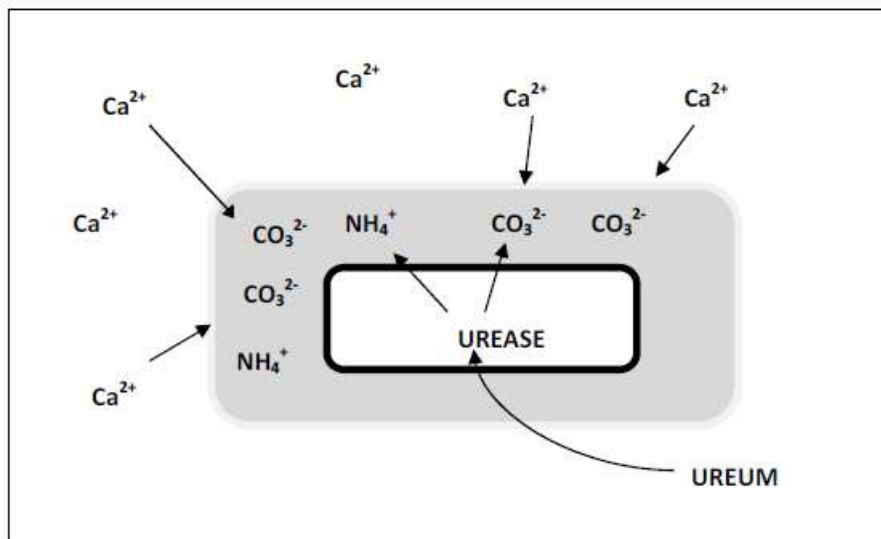
Als deze OH^- -ionen verder reageren met het koolzuur vormt zich het CO_3^{2-} -ion (carbonaat) volgens volgende reactie:



Dit CO_3^{2-} ion zal nu met de door het micro-organisme aangetrokken calciumion reageren tot calcië volgens de volgende reactie.



Het gevormde calciëet zal neerslaan en zal de poriën of de scheuren dichten. Figuur 22 geeft een overzicht van de werking rond het micro-organisme. (37)



Figuur 22: Werkingsmechanisme zelfhelend beton (37)

De mogelijkheid om bacteriën calciëet te doen produceren in een betonsamenstelling is revolutionair. De evolutie zorgt immers voor een wijziging in de manier waarop betonpathologieën benaderd worden. De curatieve remediëring van een pathologie zal dus gebeuren door een aan het mengsel toegevoegd bestanddeel. Deze methode staat echter nog niet op punt. Zo dient er onderzocht te worden welke micro-organismen optimaal zullen functioneren afhankelijk van welke omstandigheden. Aangezien de meeste pathologieën optreden na een onbepaald aantal jaren dient er ook onderzocht te worden hoe de populatie bacteriën in stand te houden gedurende deze periode en in een latere fase, hoe deze populatiegrootte te optimaliseren in de periode dat de meeste pathologieën verwacht worden. Een derde onderzoeksterrein voor deze techniek is het toevoegen van bacteriën aan een bestaande structuur.

Het helen van beton met behulp van micro-organismen staat dus nog niet op punt, maar het is een revolutionaire stap die de kijk op betonreparaties in het algemeen verruimt.

5 Toepassing op tunnelbouw

5.1 Algemeen

5.2 Documenteren constructie

Tunnels zijn bouwkundige constructies die een onderdeel vormen van een weg bij kruising met een andere weg, spoorweg, waterweg of een terreinverdieping waarbij grond en/of (grond)water moet worden gekeerd. Ze kunnen ingedeeld worden volgens gebruik, bouwwijze en doel. (38)

In de eerste fase is het belangrijk dat deze drie criteria worden onderzocht. Deze zullen namelijk de omgevings- en milieuklasse bepalen voor zowel de binnen- als buitenkant van de tunnel.

Zoals reeds eerder aangetoond, zal de aanwezigheid van water rondom en eventueel in een tunnel een belangrijke parameter zijn voor het diagnosticeren van een pathologie. Dit verdient dus extra aandacht. Zo dient er rekening gehouden te worden met de grondwaterstand, maar eveneens met de mogelijkheid tot indringing van water uit de bovenliggende structuren zoals dat eventueel ten gevolge van de constructie niet correct afgevoerd kan worden. (38)

Buiten de analyse van de constructie en de optredende schademechanismen, is het tevens belangrijk de geschiedenis van de tunnel te kennen. Belangrijk hier is eventuele brandschade. Tunnels zijn door hun opbouw zeer gevoelig aan brand. De hitte gegenereerd door een brand wordt in grote mate door de structuur opgenomen en wordt maar zeer gering naar de uitgangen afgeleid. Hierdoor kunnen grote stukken van de constructie worden aangetast.

5.3 Beoordeling

De beoordeling van een pathologie voor een tunnel loopt gelijk met de eerder beschreven stap 2 in punt 4.2.

Het grote probleem bij een optredende pathologie in een tunnel, is dat de reagentia voor bepaalde pathologieën langs buiten binnendringen en een schade aan de binnenkant van de tunnel veroorzaken (en eventueel langs de buitenkant). Hierdoor worden de mogelijkheden voor de selectie van een goede oplossingsmethode beperkt.

5.4 Bepalen strategie

Het bepalen van de strategie voor een tunnel loopt gelijk met de eerder beschreven stap 3 in punt 4.2. Zoals in de beoordelingsfase besproken is, zijn de reparatiemethodes beperkt als de inwerkende stoffen langs buiten het beton via scheuren binnendringt en aan de binnenkant schade aanricht. Tabel 13 geeft een overzicht van de reparatiemogelijkheden als de indringing van bijvoorbeeld vocht of chemicaliën langs buiten gebeurt en de aantastingen enkel langs binnen kunnen worden hersteld.

Tabel 13: Herstellingsmogelijkheden mits onbereikbare indringing

	Type herstelling			Type schade
	plaatselijk	Element	Betonstructuur	Indringing langs buiten Pathologie langs binnen
Principe 1: Bescherming tegen indringing				
Hydrofobe impregnatie		✓		☒
Impregnatie		✓		☒
Coatings		✓		☒
Bedekken van scheuren met strips	✓			☒
Vullen van scheuren	✓			☒
Converteren van scheuren in voegen	✓			☒
Aanbrengen van externe panelen		✓		☒
Aanbrengen van membranen		✓		☒
Principe 2: Vochtbeheersing				
Hydrofobe impregnatie		✓		☒
Impregnatie		✓		☒
Coatings		✓		☒
Aanbrengen van externe panelen		✓		☒
Elektrochemische behandeling		✓		☒
Principe 3: Betonrenovatie				
Handmatig aanbrengen van mortel	✓			✓
Aanstorten van beton of mortel	✓	✓		✓
Spuiten van beton of mortel		✓		✓
Vervangen van elementen		✓		✓
Principe 4: Structurele versterking				
Toevoegen of vervangen van ingebedde of externe wapening		✓	✓	✓
Toevoegen van wapening in voorgevormde of geboorde gaten		✓	✓	✓
Plaatwapening		✓		✓
Beton of mortel toevoegen	✓	✓		✓
Injecteren van barsten, holtes en spleten	✓	✓		✓
Vullen van barsten, holtes en spleten	✓	✓		✓
Naspannen		✓	✓	✓
Principe 5: Verhoging fysische resistentie				
Coatings		✓		✓
Impregnatie		✓		✓
Beton of mortel toevoegen		✓		✓
Principe 6: Weerstandsverhoging tegen chemicaliën				
Coatings		✓		☒
Impregnatie		✓		☒
Beton of mortel toevoegen	✓	✓		☒
Principe 7: Behoud en herstelling van passiviteit				
Verhoging betondekking door toevoeging van mortel of beton	✓	✓		☒
Vervangen van aangetaste of gecarbonateerde beton	✓	✓		☒
Elektrochemische realkalisatie van gecarbonateerd beton		✓	✓	✓
Realkalisatie van gecarbonateerde beton ten gevolge van diffusie		✓	✓	✓
Elektrochemische chloridenextractie		✓	✓	✓
Principe 8: Weerstandsverhoging				
Hydrofobe impregnatie		✓		☒
Impregnatie		✓		☒
Coatings		✓		☒
Principe 9: Kathodische controle				
Beperking van de zuurstofgehalte aan de kathode	✓	✓		☒
Principe 10: Kathodische weerstand				
Aanbrengen elektrisch potentiaal		✓	✓	✓
Principe 11: Beheersing van anodische gebieden				
Actieve coating	✓	✓		✓
Afsluitende coating	✓	✓		✓
Corrosieinhibitoren	✓	✓		✓

Daarenboven wordt er voor elke reparatiemogelijkheid de grootte van de toepassing weergegeven en dit op drie niveaus:

- plaatselijk: deze herstelmethodes kunnen zeer plaatselijk worden toegepast;
- element: deze herstelmethodes moeten op het gehele betonelement worden toegepast;
- structuur: deze herstelmethodes dienen op de gehele betonstructuur of op een groep elementen te worden toegepast.

5.5 Ontwerp van de reparatie

Het ontwerp van de reparatie bij een tunnel is onderhevig aan enkele randvoorwaarden. De karakteristieke opbouw van een tunnel maakt bepaalde handelingen niet mogelijk. De belangrijkste beperkingen worden hier opgesomd:

- enkel pathologieën aan de binnenkant van de tunnel zijn makkelijk bereikbaar;
- de bereikbaarheid van deze pathologieën is door de tunnelopbouw beperkt;
- een tunnel kan slechts zelden gebruikt worden tijdens herstelwerkzaamheden;
- tunnelinrichting kan het verloop en de bestrijding van pathologieën beïnvloeden.

In de meeste gevallen kunnen grote ingrijpende werkzaamheden niet plaatsvinden in een tunnel. Reparatiemethodes zoals het vervangen van elementen zijn vaak technisch gezien niet haalbaar.

Tabel 13 toont aan dat enkele reparatiemogelijkheden niet meer mogelijk zijn als er aantasting bevorderende bestanddelen van buiten naar binnen migreren. Afhankelijk van de ernst van de optredende pathologieën zal in de eerste plaats getracht moeten worden om deze indringing te voorkomen. Daarna dient dan de structuur hersteld te worden.

5.6 De werkzaamheden

De uitvoer van de werkzaamheden verloopt conform de procedure omschreven in 4.2 en de uitgewerkte methodes in 4.3.

5.7 Aanvaarding en beoordeling van de werkzaamheden

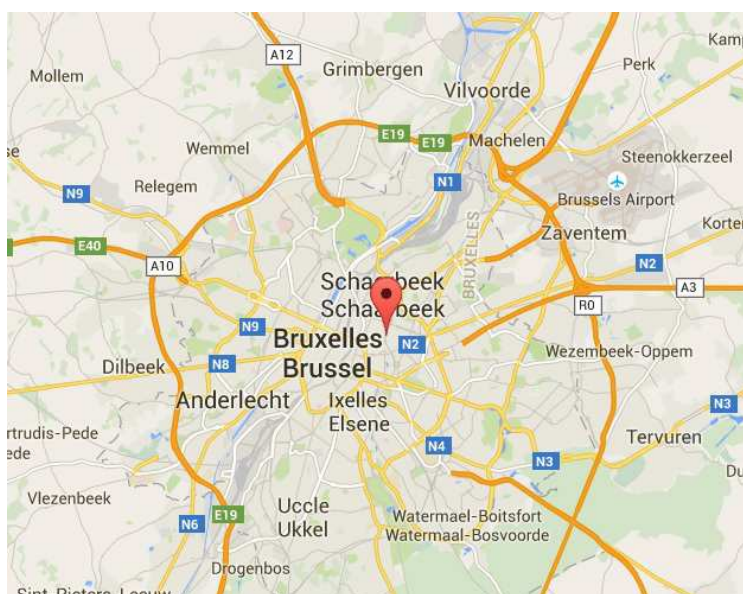
De aanvaarding en beoordeling van de werkzaamheden verloopt conform de procedure omschreven in 4.2.

6 Deschaneltunnel

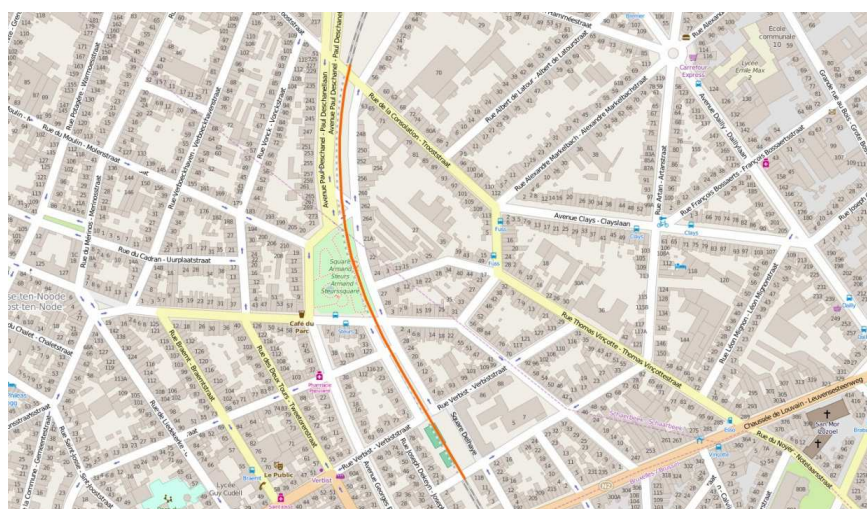
6.1 Stap 1: Documenteren tunnel

6.1.1 Ligging

De Deschaneltunnel is een spoorwegtunnel gelegen op Lijn 161. De tunnel is 546 m lang en gelegen in Schaarbeek. De oudste structuuronderdelen zijn gebouwd in 1911 en zijn in de loop der tijd aangepast. De betonnen draagstructuur dateert uit 1930 en is dus ongeveer 85 jaar oud. De tunnel begint ter hoogte van de Trooststraat en eindigt aan *La rue la cible*. Figuur 23 en Figuur 24 tonen de locatie en de aslijn.



Figuur 23: Ligging Deschaneltunnel (39)



Figuur 24: Aslijn Deschaneltunnel (40)

6.1.2 Tunnelopbouw en geschiedenis

Aanvankelijk was er van een tunnel geen sprake. De kruisende wegen bestonden uit bruggen die een spoorweggleuf doorheen het landschap overbrugden. Naderhand is van deze gleuf een tunnel gemaakt. Dit resulteert in een tunnel die bestaat uit verschillende draagstructuren, gaande van metselwerkbogen, tot betonnen balken. De technische tekeningen zijn in bijlage toegevoegd. Deze plannen zijn voor de opbouw van de tunnel nog steeds correct. Het enige element dat niet meer met zekerheid bepaald kan worden, is de hoogte van bovenliggende grond. Figuur 25 en Figuur 26 zijn satellietbeelden genomen ter hoogte van de *Rue de la Cible* en tonen duidelijk dat er tussen 1990 en 2014 verfraaiingswerken met grondverzet zijn uitgevoerd.



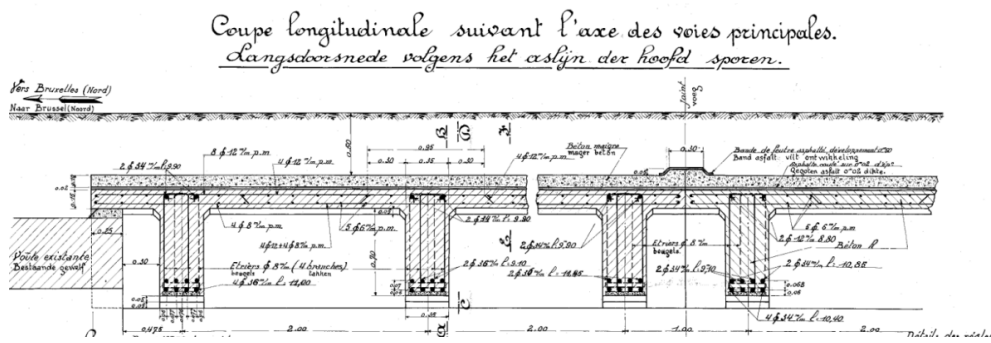
Figuur 25: Satellietfoto toestand in 1990 (41)



Figuur 26: Satellietfoto huidige toestand (41)

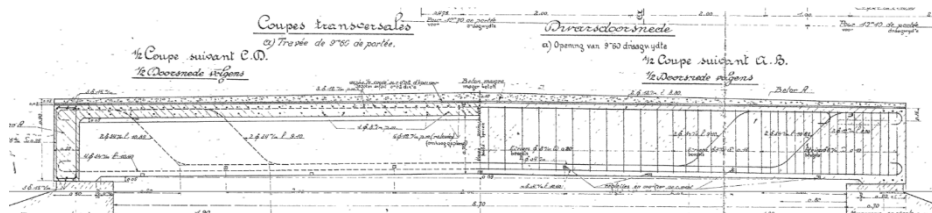
Wel kan er met zekerheid gezegd worden dat aan de hoogte van de verluchtungskokers niet gewijzigd is en dat de uit- en ingangen van de tunnels nog steeds zijn zoals op het plan staat aangegeven. Hieruit volgt dus dat hoewel er hier en daar verschillen zullen zijn ten opzichte van de oorspronkelijke plannen, de gronddekking op de tunnel nog steeds rond de aangegeven waarde van 50 cm zal liggen.

Figuur 27 bestaat uit een detailtekening en toont deze waarde van 50 cm.



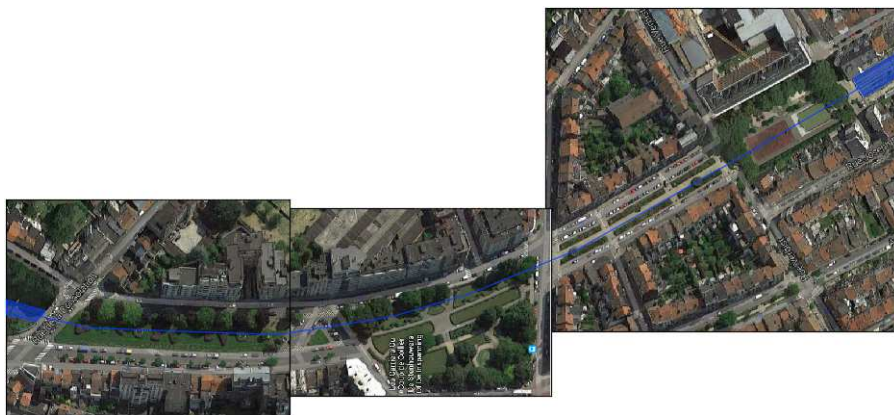
Figuur 27: Snede volgens aslijn tunnel (42)

Buiten de snede volgens het lengteprofiel van de tunnel is er tevens de snede loodrecht op deze as getekend. Figuur 28 toont de gehele balk.



Figuur 28: Snede dwars op aslijn tunnel (42)

Merk op dat de zone boven de tunnel onbebouwd is. Zoals de aaneenschakeling van satellietbeelden in Figuur 29 duidelijk maakt.

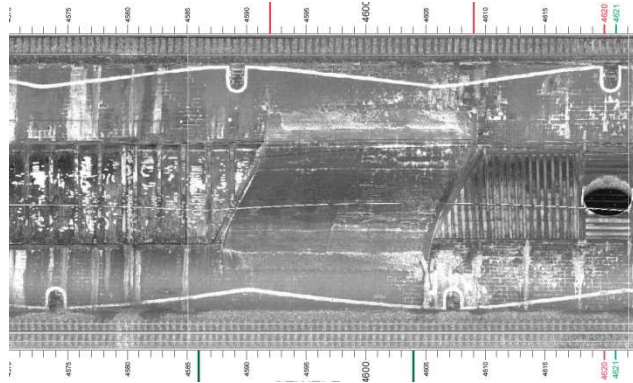


Figuur 29: Satellietbeelden bovenbouw (43)

De blauw gearceerde zones bevatten de niet overdekte spoorlijn. De blauw lijn is een benadering van de aslijn van de tunnel.

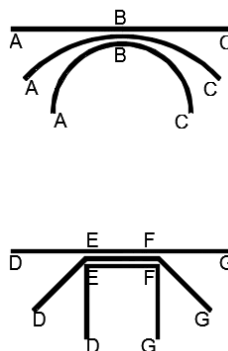
6.1.3 Huidige toestand

Van de gehele tunnel is conform Figuur 30 een schouwingsplan opgesteld. Dit bestaat uit een foto die over de hele lengte van de tunnel getrokken is over een hoek van 180°. Deze foto werd dan vlak geprojecteerd. In bijlage zitten deze foto's voor de gehele tunnel.



Figuur 30: Voorbeeld uit inspectierapport (44)

Merk op dat door het verschil in doorsneden doorheen de volledige tunnel afstanden en schaal niet van toepassing zijn op deze projectie. Figuur 31 verduidelijkt dit



Figuur 31: Projectieprincipe van het inspectierapport

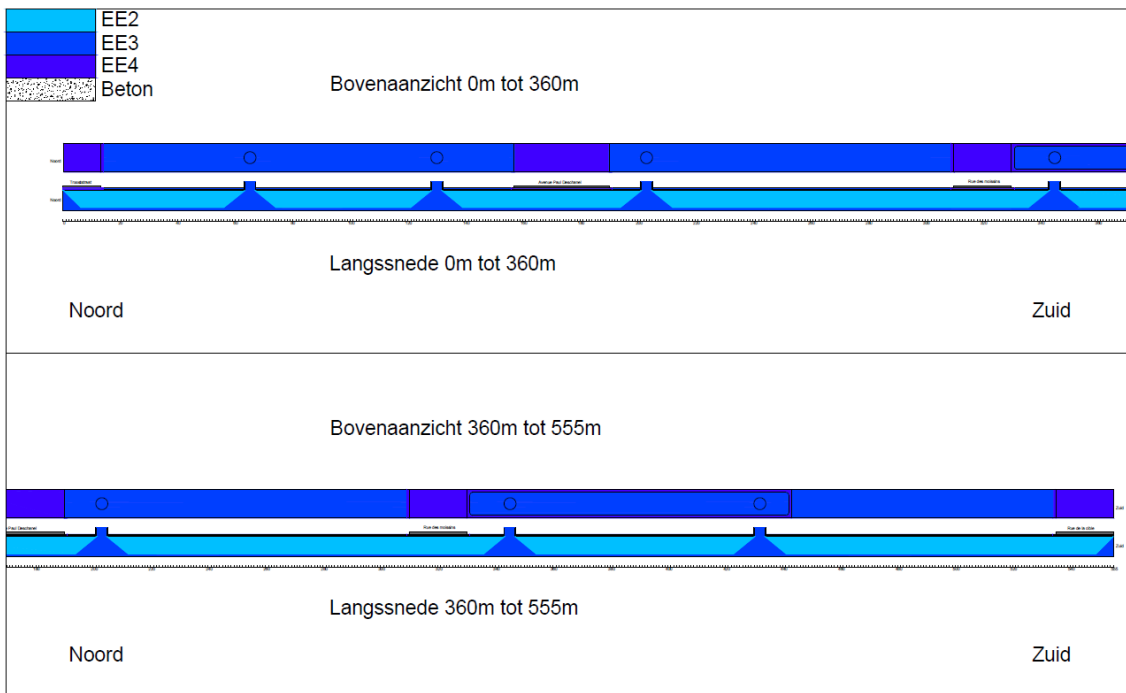
De witte gedeeltes op de foto duiden op vocht. Hoewel op Figuur 30 vrij veel vocht te zien is, kan er uit het volledige schouwingsplan worden afgeleid dat het meeste vocht binnendringt ter hoogte van de voegen tussen 2 platen. Deze kunnen herkend worden doordat op deze plaatsen de steunbalken zich slechts op 1 m afstand van elkaar bevinden, in vergelijking met de normale 2 m. Pagina 13/28 van het in bijlage toegevoegde schouwingsplan toont dit duidelijk.

6.2 Beoordeling

6.2.1 Omgevings- en milieuklassen

Voor het bepalen van de omgevingsklassen wordt de tunnel ingedeeld in verschillende zones. Aangezien er verluchtigingsgaten zijn, worden sommige onderdelen meer blootgesteld aan de weersinvloeden dan anderen. Daarenboven zijn er zones van de tunnel die onder een weg doorlopen en andere die onder een park doorlopen.

Figuur 32 duidt de drie optredende omgevingsklassen aan voor deze tunnel. Ter verduidelijking zijn de detailtekeningen in bijlage toegevoegd.



Figuur 32: Omgevingsklassen Deschaneltunnel

In en rond de tunnel zijn er drie omgevingsklassen waar te nemen. Deze worden als volgt bepaald. (10) (45)

- EE2: vorst, geen contact met regen,
- EE3: vorst, contact met regen,
- EE4: vorst en dooizouten (de aanwezigheid van ter plaatse ontdooit, opspattend en of aflopend dooizouthoudend water).

Voor de Deschaneltunnel laat zich dit al volgt vertalen:

- EE2: De binnenkant van de tunnel buiten de zones rondom de schachten en de in- en uitgang, 1 meter boven de grond behoren tot omgevingsklasse EE2. De reden waarom de onderste meter een klasse hoger wordt ingeschat, is omdat er rekening wordt gehouden met het regenwater dat het drukke treinverkeer met zich meebrengt in geval van regen;
- EE3: Aan de binnenkant van de tunnels en rondom de in- en uitgang en de verluchtingskokers wordt EE3 toegekend. Aan de buitenkant zijn dit de zones die met grond bedekt zijn, maar niet onder, of in de buurt van een weg liggen. Aangezien de gronddekking slechts 50 cm bedraagt, zijn ze vatbaar voor regen en vorst;
- EE4: De zones die onder of in de buurt van een weg liggen. Deze zijn vatbaar voor regen, vorst en de gevolgen van strooizouten.

Aan de omgevingsklassen zijn zoals eerder besproken bepaalde milieuklassen gekoppeld:

- EE2: XF1, XC3
- EE3: XF1, XC4
- EE4: XF4, XC4, XD3

Aan de hand van bovenstaande analyse kan er geconcludeerd worden dat de meest waarschijnlijke aantastingen op de structuur het gevolg zullen zijn van carbonatatie, zoutaantasting en vorst-dooi cycli.

6.2.2 Optredende pathologieën

Buiten een omgevingsanalyse, levert een plaatsbezoek onder andere onderstaande resultaten op. Dit zijn foto's van de zichtbare schade getrokken in de Deschaneltunnel. Buiten het fotograferen, werd met een hamer op het betonoppervlak getokkeld, om eventuele loszittende stukken beton te verwijderen. Hierbij viel op dat er enkel stukken beton loskwamen op plaatsen waar wapening zat. Tevens werden er weinig scheuren of barsten vastgesteld.



Figuur 33: Ongewenste metalen in het beton



Figuur 34: Verweerd materiaal in voeg



Figuur 35: Blootliggende wapeningen



Figuur 36: Verbindingsstructuur tussen stroomleiding en beton



Figuur 37: Grindnest met blootliggende wapening



Figuur 38: Blootliggende wapening met weinig betondekking



Figuur 39: Grindnest en vervuiling van bekisting



Figuur 40: Betonafbrokkeling ter hoogte van de aansluiting van de stroomleiding

Gebaseerd op de voorgaande geïllustreerde waarnemingen en de omgevingsanalyse kunnen enkele pathologieën uitgesloten worden. Tabel 14 illustreert dit voor de Deschaneltunnel.

Tabel 14: Deductie van de pathologieën in de Deschaneltunnel

		Oorzaken																									
		Chemisch							Fysisch																		
		Aanwezigheid O ₂	Afwezigheid O ₂	Aanwezigheid H ₂ O	Overvloedige Aanwezigheid H ₂ O	Aanwezigheid CO ₂	Aanwezigheid Alkaliën	Aanwezigheid SiO ₂	Aanwezigheid FeS	Aanwezigheid MnS	Aanwezigheid Chloriden	Aanwezigheid Sulfaten	Aanwezigheid Zuren	Aanwezigheid H ₂ S	Aanwezigheid HNO ₃	Aanwezigheid zouten	Snelle temperatuurverandering	Hydratiewarmte	Volumeverandering Hydratatie	Verschuif in relatieve vochtigheid	Vriestemperaturen	Verkeerde manipulatie plastisch beton	Aanwezigheid spanningsbron	Externe Belastingen			
Aantastingsmechanismen Deschaneltunnel	Chemisch	Alkali Silicareactie					✓	✓																			
		FeS en MnS aantasting		✓						✓	✓																
		Carbonataat	✓		✓		✓																				
		Chlooraantasting	✓		✓							✓															
		Sulfaataantasting			✓								✓														
		Zuuraantasting			✓									✓													
		Biogene H ₂ SO ₄ aantasting	✓		✓									✓													
		Microbio. HNO ₃ aantasting			✓											✓											
	Koolzuurhoudend water			✓		✓																					
	Fysisch	Drogingskrimp				✓																					
		Autogene krimp																		✓							
		Plastische krimp																			✓						
		Thermische krimp																		✓							
		Afspatten (spalling)																✓									
		Bekistingsproblemen																						✓			
		Ontmengingen																						✓			
		Differentiële verdichting																						✓			
Vorst-Dooicyclus				✓																	✓						
Zwerfstromen															✓									✓			
Mechanische pathologieën																								✓			

De in het rood aangeduide pathologieën zijn uitgesloten omwille van het gebrek aan een van de benodigde voorwaarden. Voor de in het groen aangeduide pathologieën wordt aan alle voorwaarden voldaan. De in het geel aangeduide pathologieën zijn noch bevestigd, noch geëlimineerd.

Hoewel de ASR reactie in deze situatie niet onmogelijk is, zijn er toch indicaties dat deze zich niet voordoet als primaire pathologie. Een ASR tast namelijk meestal een gehele structuur aan, en vertoont her en der craquelé scheurpatronen. Deze werden niet vastgesteld. ASR zal in ieder geval niet de hoofreden van de vastgestelde schade zijn en wordt daarom niet verder besproken.

Er is niet getest op de aanwezigheid van sulfaten in het grondwater. Een witte afzetting werd wel opgemerkt op verschillende plaatsen. Dit zou dus kunnen wijzen op sulfaataantasting. Toch werd er nergens een verpulvering van de cementsteen

waargenomen. Moest er dus zich dus een sulfaataantasting voordoen, dan is deze nog niet de hoofdreden van de huidige schade.

Zuuraantasting kan niet worden uitgesloten, maar er werd geen schadepatroon vastgesteld dat zou kunnen wijzen op een zware zuuraantasting. Aangezien er insijpeling van water is vastgesteld en dus van koolzuurhoudend water, dienen er hoe dan ook maatregelen genomen te worden ter voorkoming van eventuele zuuraantasting.

Zolang er blootliggende roestende wapeningen aanwezig zijn, is het voorlopig niet mogelijk om via metingen op de betonstructuur vast te stellen of de structuur al dan niet last heeft van zwerfstromen. Het roesten van de wapening levert per definitie stroom. Het is dus aangewezen om zwerfstromen voorlopig buiten beschouwing te laten en het beton te repareren. Naderhand dient er gemeten te worden of er een elektrische stroom aanwezig is in het beton.

Tabel 15 kan dus worden herleid tot Tabel 16:

Tabel 15: Uitgebreide deductie van de pathologieën in de Deschaneltunnel

		Oorzaken																			
		Chemisch							Fysisch												
Aantastingsmechanismen Deschaneltunnel	Chemisch	Alkali Silicareactie																			
		FeS en MnS aantasting		✓																	
		Carbonatie	✓	✓																	
		Chlooraantasting	✓	✓																	
		Sulfaataantasting		✓																	
		Zuuraantasting		✓																	
		Biogene H ₂ SO ₄ aantasting	✓	✓																	
		Microbio. HNO ₃ aantasting		✓																	
		Koolzuurhoudend water		✓		✓															
	Fysisch	Drogingskrimp			✓																
		Autogene krimp																			
		Plastische krimp																			
		Thermische krimp																			
		Afspatten (spalling)																			
		Bekistingsproblemen																			
		Ontmengingen																			
		Differentiële verdichting																			
		Vorst-Dooicyclus			✓																
		Zwerfstromen																			✓
Mechanische pathologieën																			✓		

De oranje gekleurde vakken wijzen nu op onwaarschijnlijke pathologieën.

6.2.3 Inwerkend schademechanisme

Er kan dus geconcludeerd worden dat de structuur te lijden heeft onder de gevolgen van de pathologieën beschreven in Tabel 16.

Tabel 16: Diagnose

		Oorzaken													
		Chemisch													
		Aanwezigheid O ₂	Aanwezigheid H ₂ O	Overvloedige Aanwezigheid H ₂ O	Aanwezigheid CO ₂	Aanwezigheid Alkaliën	Aanwezigheid SiO ₂	Aanwezigheid Chloriden	Aanwezigheid Sulfaten	Aanwezigheid Zuren	Aanwezigheid zouten	Vriestemperaturen	Verkeerde manipulatie plastisch beton	Aanwezigheid spanningsbron	
Aantasting	Chemisch	Alkali Silicareactie		✓			✓	✓							
		Carbonatatie	✓	✓		✓									
		Chlooraantasting	✓	✓					✓						
		Sulfaataantasting		✓						✓					
		Zuuraantasting		✓							✓				
		Koolzuurhoudend water		✓		✓									
	Fysisch	Bekistingsproblemen												✓	
		Ontmengingen												✓	
		Differentiële verdichting												✓	
		Vorst-Dooicyclus		✓								✓	✓		
		Zwerfstromen													✓

Merk hierbij op dat de vernoemde bekistingsproblemen, ontmengingen en differentiële verdichting, als voornaamste schade hebben dat ze het beton kwetsbaar maken voor secundaire pathologieën.

6.3 Bepalen strategie

6.3.1 Beperking indringing van buitenaf

De vorige tabel illustreert dat alle pathologieën zich voordoen in de aanwezigheid van water, of dat ze enkel schade veroorzaken ten gevolge van een secundaire pathologie die ditzelfde water nodig heeft. Aan de hand van de voorgaande studie kan er tevens afgeleid worden dat de voegen tussen twee platen verantwoordelijk zijn voor veel indringingen.

Een membraan heeft als voordeel dat het eenvoudig te plaatsen is en dat het goed bestand is tegen beschadiging. Tevens is er een mogelijkheid om te werken met gecompartmenteerde membranen. Dit houdt in dat een beschadiging aan het membraan enkel tot indringing zal leiden op de plaats van het compartiment. Een ander groot voordeel is dat indien het betonoppervlak nog andere barsten en scheuren vertoont, kan geopteerd worden om de gehele grondmassa boven een plaat te verwijderen en te bedekken met hetzelfde type membraan. Deze membranen kunnen dan eenvoudig op elkaar worden aangesloten.

Op de plaats van de voeg wordt een extra zwelband voorzien. Dit geldt als laatste beschermingsmiddel en bestaat uit een materiaal dat water opneemt en dus zal zwellen wanneer het in contact komt met water. Door deze zwelling zal er een extra dichting bekomen worden.

Deze herstelling zal echter enkel optimaal werken als het water dat in contact komt met de plaat zal kunnen worden afgevoerd. Uit de dwarsdoorsnede van de tunnel blijkt dat deze platen onder een helling liggen. Teven blijkt ook dat er vrij veel vocht insijpelt langs de wanden van de tunnel. Een optie om dit te vermijden is het aanleggen van een drainage systeem.

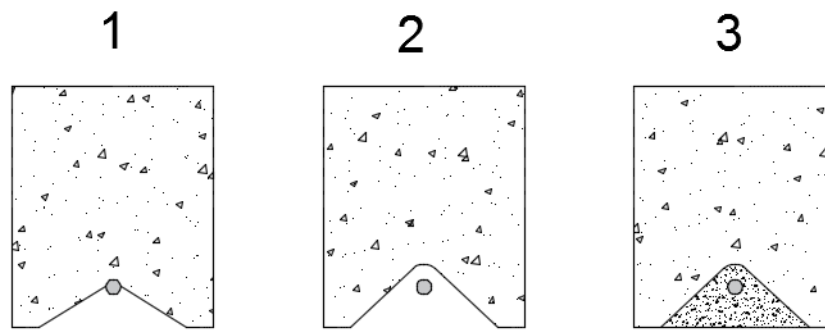
6.3.2 Carbonatatie

De in het vorig punt beschreven herstelmethode zal veel van het indringende vocht weren. Vocht kan echter ook via damp in de lucht het betonoppervlak bereiken. Daarom zijn er nog stappen nodig om verdere aantasting te vermijden en te repareren. In de eerste plaats dient principe 7.2 toegepast te worden: vervangen van aangetast beton.

Er zijn 2 types problemen die optreden. Enerzijds blootliggende wapeningen waar er oorspronkelijk voldoende betondekking was, anderzijds blootliggende wapening waar niet voldoende betondekking is. Aangezien de vrije hoogte onder de balk behouden dient te blijven, mag er geen reparatiemethode ontworpen worden die de ontworpen hoogte van de balken vergroot.

Rond deze zones dient in de eerste plaats loszittende beton verwijderd te worden. Naderhand geldt voor de zones met voldoende betondekking de volgende procedure.

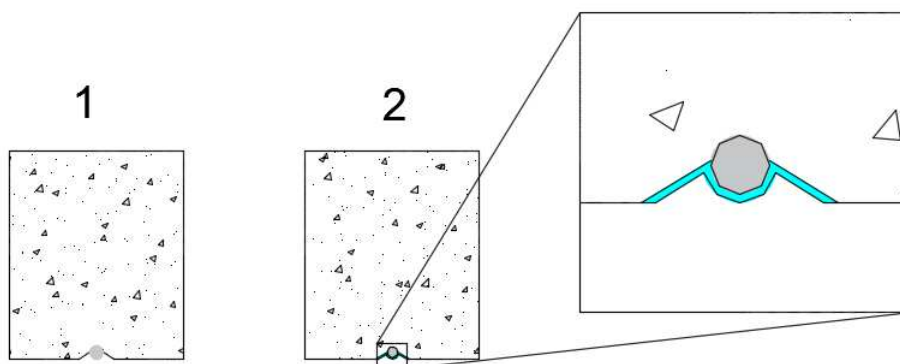
Figuur 44 verduidelijkt het stappenplan.



Figuur 44: Stappenplan voor de reparatie van principe 7.2 mits voldoende betondekking

Stap1: het loszittend beton rond de wapening wordt verwijderd. Hierna volgt een fenolftaleïneproef om te bepalen of het beton gecarbonateerd is. Indien dit het geval is, dient het gecarbonateerde beton verwijderd te worden rondom de wapening. Dit is stap 2. De vrije zone rond de wapening moet gelijk zijn aan de benodigde betondekking. Hierna dient het roest van de wapeningen verwijderd te worden. Als laatste stap dient het oppervlak stofvrij gemaakt te worden en dient er een herstelmortel type R4 aangebracht te worden. Merk hierbij op dat de voorschriften van de fabrikant gevolgd worden, zodat het oppervlak optimaal is voorbereid en de mortel correct wordt aangemaakt.

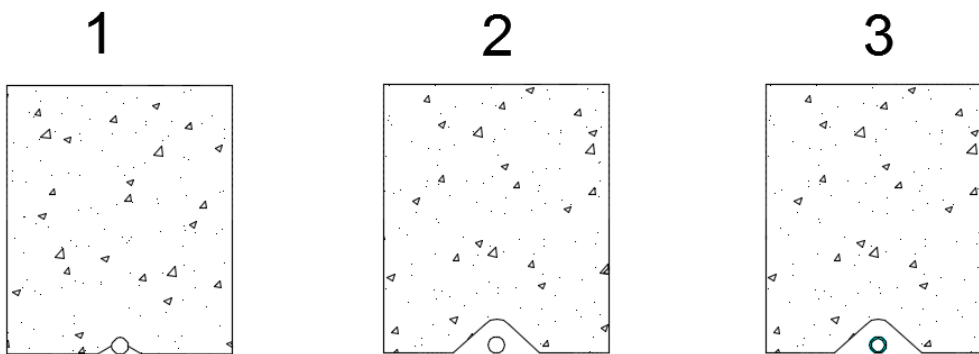
In de tweede situatie beschikt de wapening niet over de voorgeschreven dekking. Er bestaat nu de mogelijkheid dat er zich slechts zeer weinig of geen carbonatatie heeft voorgedaan. Indien dit het geval is, volstaat het om de volgende twee stappen te volgen die getoond zijn in Figuur 45.



Figuur 45: Stappenplan reparatieprincipe 11.1 zonder vaststelling van carbonatatie

In de eerste stap wordt de gevormde roest verwijderd en het oppervlak gerepareerd. Aangezien er geen carbonatatie is, is het niet nodig om het beton rondom te verwijderen. Om het gebrek aan betondekking te compenseren wordt er nu gewerkt met een coating volgens principe 11.1. Dit is een actieve coating die het anodische gebied zal beschermen. De wapening wordt gedeeltelijk geïsoleerd van zuurstof en vocht en dankzij de inhibitoren in deze coating en de alkaliteit van het product zal het een beschermende omgeving creëren rond de wapening. Buiten de wapening zelf zal ook het beton behandeld worden rondom de wapening. De zone dient zo groot te zijn dat de afstand van de wapening tot een niet behandeld betonoppervlak minstens even groot is als de voorgeschreven betondekking. Wederom wordt er rekening gehouden met de aanbevelingen van de fabrikant.

In het geval dat er wel carbonatatie is vastgesteld, dient er met hetzelfde type coating gewerkt te worden volgens principe 11.1. Onderstaande stappen in Figuur 46 dienen doorlopen te worden.



Figuur 46: Stappenplan reparatieprincipe 11.1 mits carbonatatie

Merk op dat het gecarbonateerde beton nu wel verwijderd moet worden. Aangezien er geen mortel moet aangebracht worden, moet er maar zoveel aangetast beton verwijderd worden als nodig voor de werkbaarheid.

De gehele wapening moet namelijk rondom behandeld worden.

Deze beschreven herstelmethodes zijn enkel toepasbaar indien de afname van de wapeningsdiameter niet zorgwekkend is. Afgaande op het inspectierapport van de stabiliteitsingenieur verantwoordelijk voor de Deschanel tunnel, was dit hier niet het geval.

6.3.3 Zwerfstromen

Indien de fenolftaleïne test negatief is, houdt dit in dat er roestvorming heeft plaatsgevonden zonder dat het beton is gecarbonateerd. Dit kan in deze situatie 2 oorzaken hebben.

- Chlorideaantasting,
- Zwerfstromen.

Chlorideaantasting kan zoals eerder beschreven aangetoond worden door zilvernitraat en kaliumchromaat aan te brengen. Bij gebrek aan de vaststelling van putcorrosie, is het echter waarschijnlijker dat er zich zwerfstromen doorheen de wapening zouden verplaatsen.

In het vorige punt werden reparatiemethodes omschreven, zelfs al was carbonatatie niet de oorzaak. De reden hiervoor is tweeslachtig. Ondanks dat carbonatatie het roesten niet heeft geïnduceerd, zal de huidige toestand de structuur toch gevoelig maken aan schademechanismen van buitenaf. Dit wordt door de bovenstaande beschreven technieken vermeden.

De tweede reden is dat er voor het vaststellen van zwerfstromen er maar één methode bestaat en dat is het meten van een stroom. Zolang de wapening is aangetast door corrosie zal er doorheen het staal een elektrische stroom lopen. De metingen om te bepalen of er al dan niet zwerfstromen aanwezig zijn, worden hierdoor dan verstoord.

6.3.4 Aanvullende beschermings- en reparatiemogelijkheden

Aan de hand van de in het vorig punt beschreven opmerkingen zijn nu alle optredende pathologieën opgelost. Momenteel zijn er enkele herstellingen gebeurd, maar dit zonder het uitvoeren van proeven op het beton. Daarenboven zijn nog niet alle pathologieën aangepakt.

Aangezien er dus een mogelijkheid bestaat dat de huidige situatie verslechtert, worden er enkele methodes en principes omschreven die eventueel een extra bescherming kunnen geven of die in de toekomst zullen moeten aangewend worden in het geval van herstelling.

Figuur 47 geeft blootliggende wapening weer.



Figuur 47: Vastgestelde pathologie in het verleden verkeerd gerepareerd

Hier is een groot stuk beton verwijderd en ligt er meer bloot dan een enkele wapeningsstaaf zoals beschreven in vorige stappenplannen. Dit kan nog steeds gerepareerd worden door het aanbrengen van een herstmortel. Let hierbij wel op dat de herstmortel niet in 1 keer kan worden aangebracht. Dit dient in stappen te gebeuren in overeenstemming met de normen en de aanbevelingen van de fabrikant. Het herstelprincipe toegepast in bovenstaande figuur is in deze situatie verkeerd. Als bovenstaande toestand verslechtert, kan het aangewezen zijn om deze balk opnieuw te bekisten. Hierbij dient rekening gehouden te worden met het feit dat de vrije hoogte onder de balk behouden dient te blijven. Dit is herstelprincipe 3.2. Gezien de moeilijke bereikbaarheid van het element voor bekistingsconstructie en machinerie is het aangewezen om dit te vermijden.

Moest er geconstateerd worden dat er zich zwerfstromen in het beton bevinden, dan is de enige juiste manier van reparatie het verwijderen van de spanningsbron. Moest dit onmogelijk zijn, kan er geopteerd worden voor principe 10.1 waarbij een elektrisch tegenpotentiaal wordt aangebracht. Dit kan op 2 manieren. Enerzijds actief door het aanbrengen van een externe spanningsbron. Anderzijds kan dit passief door het aanbrengen van een minder edelmetaal zoals zink. Hierdoor wordt een galvanische stroom gecreëerd. Gezien de eenvoud wordt voor dit systeem geopteerd. Merk wel dat eens het zink is gecorrodeerd het staal verder zal roesten. Daarenboven kan dit afhankelijk van de grootte van de zwerfstromen vrij snel gebeuren.

In geval van chlooraantasting kunnen de herstellingen nog steeds gebeuren door het aanbrengen van een herstmortel. Aanwezige chloriden hebben echter de neiging om in het beton te blijven na de reactie en hebben dus de mogelijkheid om verder te reageren. Deze mortel kan dan versterkt worden met corrosie-inhibitoren die een extra beschermende laag vormen rondom de wapeningsstaven. Deze inhibitoren kunnen tevens op het betonoppervlak verneveld worden. Door diffusie zullen ze migreren naar de wapeningsstaven en daar een beschermlaag vormen.

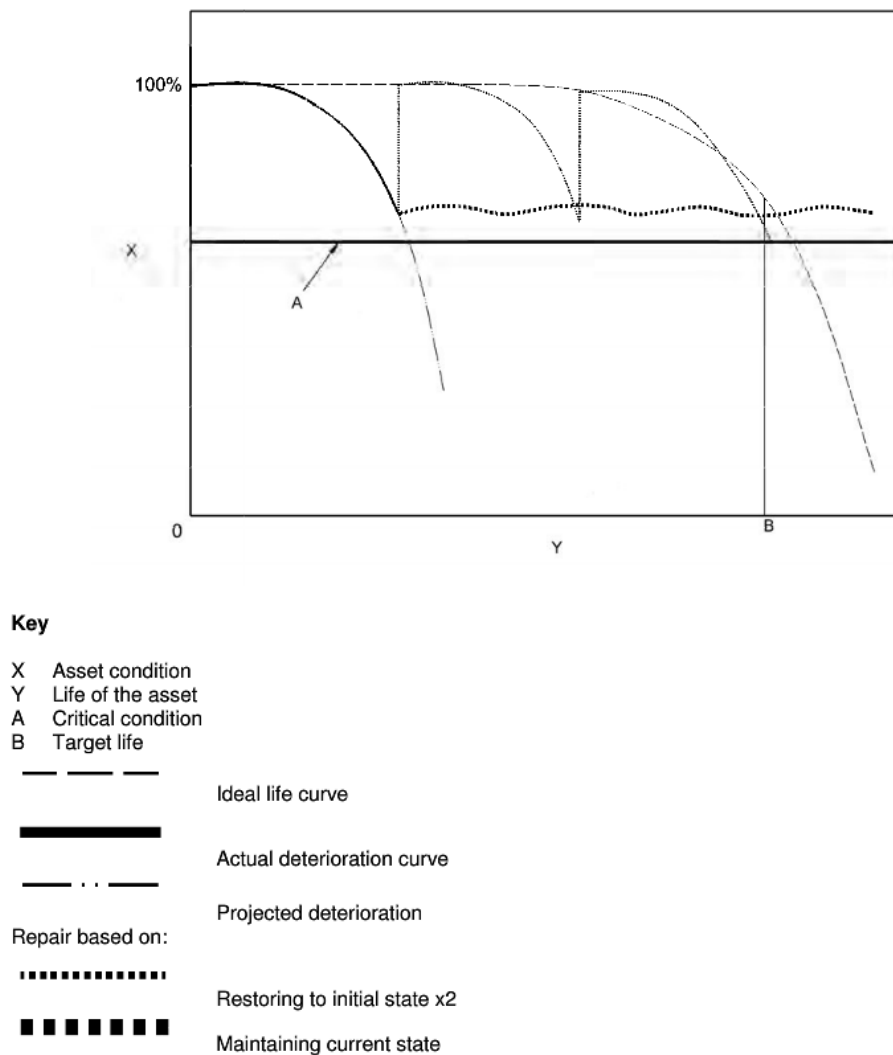
7 Besluit

7.1 Besluiten studie

De herkenning van een pathologie kan op twee manieren. Enerzijds rationalistisch, anderzijds empirisch. De rationele methode is gebaseerd op het begrip van de mogelijke schademechanismes en schadepatronen van een pathologie. Dit begrip in combinatie met de kennis van de omgeving leidt tot een diagnose. Via empirische weg kan deze diagnose dan bevestigd of verworpen worden.

De aanpak van pathologieën in een betonnen structuur kan op verschillende manieren gebeuren. Enerzijds het terugbrengen van de structuur naar zijn ontworpen toestand, anderzijds het aanpassen van de structuur aan zijn nieuwe omgeving of nut waardoor het inwerken van schademechanismen wordt gestopt. Dit kan zowel preventief als curatief.

Figuur 48 geeft deze benaderingsmethodes visueel weer.



Figuur 48: Reparatiecycli (27)

Deze methodes passen in een algemeen plan van aanpak dat voor elke remediëring moet doorlopen worden. Dit plan bestaat uit zes stappen.

- documenteren constructie,
- beoordeling,
- bepalen strategie,
- ontwerp van de reparatie,
- de werkzaamheden,
- aanvaarding en beoordeling van de werkzaamheden.

Veel pathologieën hebben de aanwezigheid van water nodig om zich te manifesteren. Het meest courante probleem voor tunnelbouw is dat dit water van buiten naar binnen de structuur indringt. Onderstaande lijst geeft een overzicht van de herstelprincipes die in dit geval nog kunnen worden toegepast. Hiervoor is nu een aangepaste lijst met herstelprincipes bekend.

De buitenkant van de Deschaneltunnel is makkelijk bereikbaar met als gevolg dat alle principes toegepast kunnen worden. De herstelling van de optredende pathologieën gebeurt met behulp van de volgende principes:

- 1.5: Aanbrengen van membranen,
- 7.2: Vervangen van aangetast of gecarbonateerd beton,
- 11.1: Aanbrengen actieve coating.

Na deze herstelwerkzaamheden dient gecontroleerd te worden op zwerfstromen. Indien deze controle positief is, dient de spanningsbron te worden ontkoppeld. Indien deze niet gevonden wordt, dient het volgende principe te worden toegepast.

- 10.1 : Aanbrengen van elektrisch potentiaal (met behulp van een galvanische stroom).

Aangezien de werken nog niet dadelijk aangevat zullen worden, bestaat er de mogelijkheid dat de volgende twee principes tevens zullen gebruikt moeten worden ten gevolge van verdere aantasting.

- 3.2: Aanstorten van beton en mortel (m.b.h.v.. een bekisting),
- 11.3: aanbrengen van corrosie-inhibitoren (in geval van de aanwezigheid van chloriden).

Deze masterproef levert een naslagwerk waarin de meest courante pathologieën beschreven staan, samen met de mogelijke herstelprincipes. Daarenboven wordt er van begin tot einde uitgelegd hoe een herstelling dient aangepakt te worden. Dit werd toegepast op de tunnelbouw en specifiek op de Deschaneltunnel in Schaarbeek. Dit resulteerde in het opstellen van een herstelplan dat mogelijk kan aangepast worden naargelang de verandering van de huidige toestand. Daarenboven werd duidelijk dat de geldende normen nog in volle evolutie zijn en dat er stappen gezet worden richting zelfhelend beton. Op het gebied van betonherstelling is in de afgelopen jaren een hele weg

afgelegd, maar er is nog veel werk dat gedaan moet worden. Zo zijn er verscheidene herstelmethodes die geoptimaliseerd kunnen worden en dient er op het gebied van normering nog werk verricht te worden.

8 Bibliografie

1. **A., Neville.** Propriétés des bétons. Parijs : Eyrolles, 2000.
2. *The Effect of Alkalis on The Properties of Portland Cement.* **Ali, Dr. Mohammed M. Selman & Asmaa M.** Anbar Journal for Engineering Sciences, Anbar : sn.
3. **Rademaker, Edward.** *HANDBOEK VOOR ORIËNTERENDE INSPECTIE ASR.* Rotterdam, Nederland : Bouwdienst Rijkswaterstaat.
4. **Cement&betoncentrum.** *Alkali-silicareactie(ASR).* 's Hertogenbosch : Cement&betoncentrum.
5. **Belgische Betongroepering.** *Betontechnologie.* Brussel : Belgische Betongroepering, 2006.
6. **Prof. dr. ir. Dionys van Gemert, Kris Brosens, Sven Ignoul.** Hoofdstuk VI: Beton. *Renovatie en restauratie (cursustekst).* Leuven : UHasselt, 2014.
7. **Ritzen, J.** *Betonbouw materiaalstudie technologie duurzaamheid renovatie.* Gent : Academia press, 2004.
8. **V.Pollet, B. Doods, G. Mosselmans.** Wapeningscorrosie door de carbonatatie van beton voorkomen. *WTCB-Dossiers.* nr3/2007 katern nr.2, 2007.
9. **B.Doods, V.Pollet.** Vermijden van wapeningscorrosie ingeleid door de aanwezigheid van chloriden in het beton. *WTCB Dossiers.* sl : WTCB, 2008. Vol. nr4/2008 katern nr12.
10. **normalistaie, Bureau voor.** NBN EN 206. *Beton deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit.* brussel : Bureau voor normalisatie, 2014.
11. **normalisatie, Bureau voor.** NBN B 15-001 . *Beton-specificatie, eigenschappen vervaardiging en conformiteit: Nationale aanvulling bij NBN 206-1.* Brussel : sn, 2012.
12. **Maes, Mathias.** *Weerstand van beton met hoogovenslak tegen sulfaten, chloride en alkali-silicareactie.* Gent : Ugent, 2010.
13. **Ralph H. Petrucci, William S. Harwood, F. Geoffrey Herring, Jeffrey D. Madura.** *General Chemistry Principles and Modern Applications.* New Jersey : Pearson Prentice Hall, 2007.
14. **Cement&Betoncentrum.** Aantasting door zuren. 's Hertogenbosch : Cement&Betoncentrum, 2014.
15. **WTCB.** De chemische aantasting van beton . *WTCB-dossiers katern nr. 9.* Brussel : WTCB, 2004.

16. **B. Parmentier, V. Pollet, G. Zarmati.** WTCB Dossiers. *De verhinderde betonkrimp*. sl : WTCB, 2009. nr2/2009 katern nr. 3.
17. **Verhoeven, Ir K.** Dossier Cement . *KRIMP IN JONG VERHARDEND BETON*. Brussel : JR Jacobs, Febelcem, 1998.
18. **Ritzen, J.** *Betonbouw Scheurgedrag vervorming bijzondere gevallen*. Gent : Academia Press, 2002.
19. **Connolly, Raymond John.** *The spalling of concrete in fires*. Birmingham : The University of Aston , 1995.
20. *Brandwerendheid. Jef marinus.* Hasselt : Febe, 2015.
21. **P. Van Itterbeeck, V. Dieryck.** Zelfverdichtend beton: aandachtspunten voor uitvoering . *TC Ruwbouw*. sl : WTCB, 2012 .
22. **Hugh D.Young, Roger A. Freedman.** *University physics 11th edition*. sl : Pearson Addison Wesley, 2004.
23. **Bureau voor normalisatie** . NBN EN 13670 . *Uitvoering van beton*. Brussel : Bureau voor normalisatie , 2010.
24. **Ir. C. Ployaert.** *Ontwerp van betonconstructies bestand tegen voorst-dooicycli en dooizouten*. Brussel : Febelcem , 2012.
25. **Bureau voor normalisatie** . Eurocode 2: Ontwerp en berekeningen van betonconstructies-Deel 1-1: ALgemene regels en regels voor gebouwen. Brussel : Bureau voor normalisatie, 2005.
26. **Standardization, European Committee for.** *NBN-EN 1504-1: Products and systems for the repair of concrete structures-Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - part1: definitions* . Rue de stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2005.
27. —. *NBN ENV 1504-9:Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 9: General principles for the use of products and systems*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 1997.
28. —. *NBN EN 1504-10: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions - Requirements - Quality control and evaluation of conformity - Part 10: Site application of products and systems and quality control of the works (+AC)*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2004.
29. —. *NBN EN 1504-2:Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 2:*

Surface protection systems for concrete. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2005.

30. **normalisatie, Bureau voor**. NBN-EN 1504-2 NL. *Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies- Definities, eisen kwaliteitsborging en conformiteitsbeoordeling - Deel 2: oppervlaktebeschermingssystemen voor beton*. Brussel : Bureau voor normalisatie, 2015.

31. **Standardization, European Committee for**. *NBN EN 1504-5:Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 5: Concrete injection*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2013.

32. **Huybrechts, Karen, Maes, B. en Frausen, R.** *Herstelmethode bij betonschade door wapeningscorrosie*. Diepenbeek : Xios hogeschool Limburg, 2007.

33. **Standardization, European Committee for**. *NBN EN 1504-3: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3 : Structural and non-structural repair*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2006.

34. —. *NBN EN 1504-6:Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 6: Anchoring of reinforcing steel bar*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2006.

35. —. *NBN EN 1504-4:Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 4: Structural bonding*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2005.

36. —. *NBN EN 1504-7:Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 7: Reinforcement corrosion protection*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2007.

37. **Wannes Van Wettere, Nele de Belie**. *Zelfhelend beton met behulp van micro-organismen*. Gent : Ugent, 2009 .

38. <http://www.handboektunnelbouw.nl/>. [Online] 2014.

39. **Google maps**. www.google.be/maps/place/Trooststraat,+1030+Schaarbeek. www.google.be. [Online] google, 4 2015.

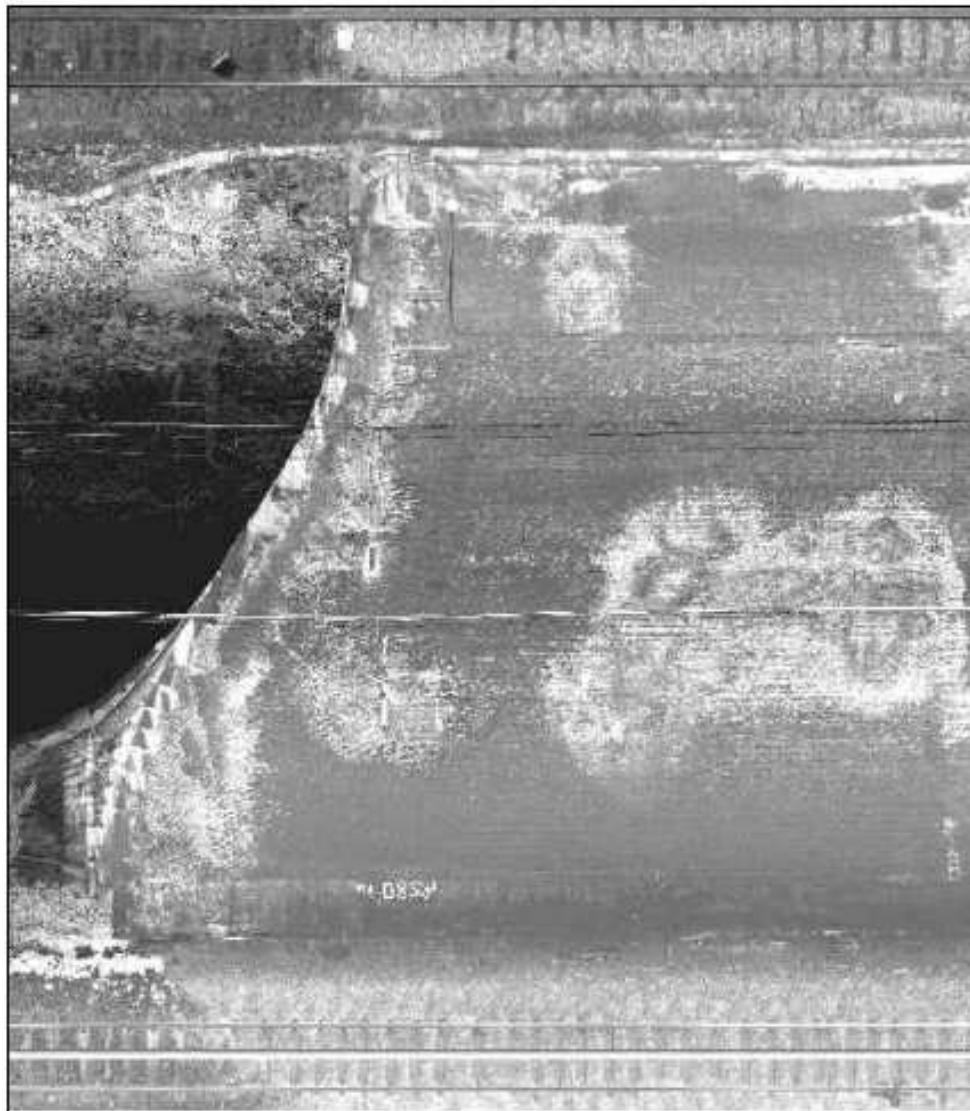
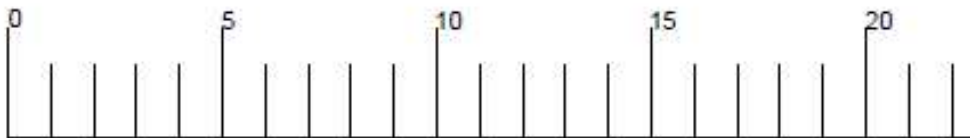
40. www.openstreetmap.org/way/. www.openstreetmap.org. [Online] OpenStreetMap Foundation. [Citaat van: 3 april 2015.] <http://www.openstreetmap.org/way/283141149#map=17/50.85334/4.37940>.

41. www.geopunt.be/kaart/reisdoortijd. *www.geopunt.be*. [Online] Geopunt Vlaanderen . [Citaat van: 15 april 2015.] <http://www.geopunt.be/>.
42. **Marquis, J.** *Technische plannen Deschaneltunnel*. Infrabel , Brussel : 1930.
43. **Google** . <https://www.google.be/maps/place/Trooststraat,+1030+Schaarbeek>. *www.google.be*. [Online] Google. [Citaat van: 3 April 2015.]
<https://www.google.be/maps/place/Trooststraat,+1030+Schaarbeek/@50.8492944,4.3832079,650m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x47c3c365d97c8a65:0x65577ed5c6315b3e>.
44. **De Mot André.** *Schouwingsverslag Deschaneltunnel*. Brussel : Infrabel, 2011.
45. **Wtcb.** Nieuwe normen voor beton. *Katern nr 4, 3de trimester 2004*. Brussel : Wtcb, 2004.
46. **Bureau voor Normalisatie** . *NBN EN 1990: Eurocode 0: gronddslagen voor constructief ontwerp* . Brussel : NBN , 2002.
47. **Bureau voor normalisatie** . *products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirement, quality control and evaluation of conformity part 1: definitions*. Brussel : Bureau voor normalisatie, 2005.
48. **Standardization, European Committee for.** *NBN EN 1504-8: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 8: Quality control and evaluation of conformity*. rue de Stassart 36, B-1050 Brussel : European Committee for Standardization , 2005.
49. **Standardization, European Committee for.** *CR 12793, Measurement of carbonation depth of hardened concrete*. Rue de stassart 36, B-1050 Brussels : CEN, 1997.
50. **Google.** www.google.be/maps/place/Trooststraat,+1030+Schaarbeek. *www.google.be*. [Online] Google. [Citaat van: 2 April 2015.]
<https://www.google.be/maps/place/Trooststraat,+1030+Schaarbeek/@50.8521813,4.3865426,13z/data=!4m2!3m1!1s0x47c3c365d97c8a65:0x65577ed5c6315b3e>.

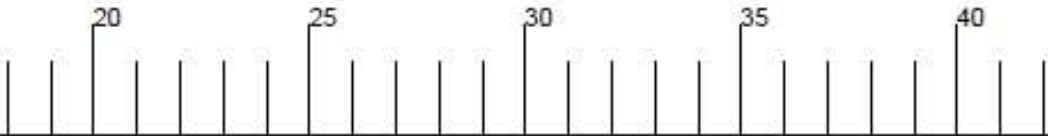
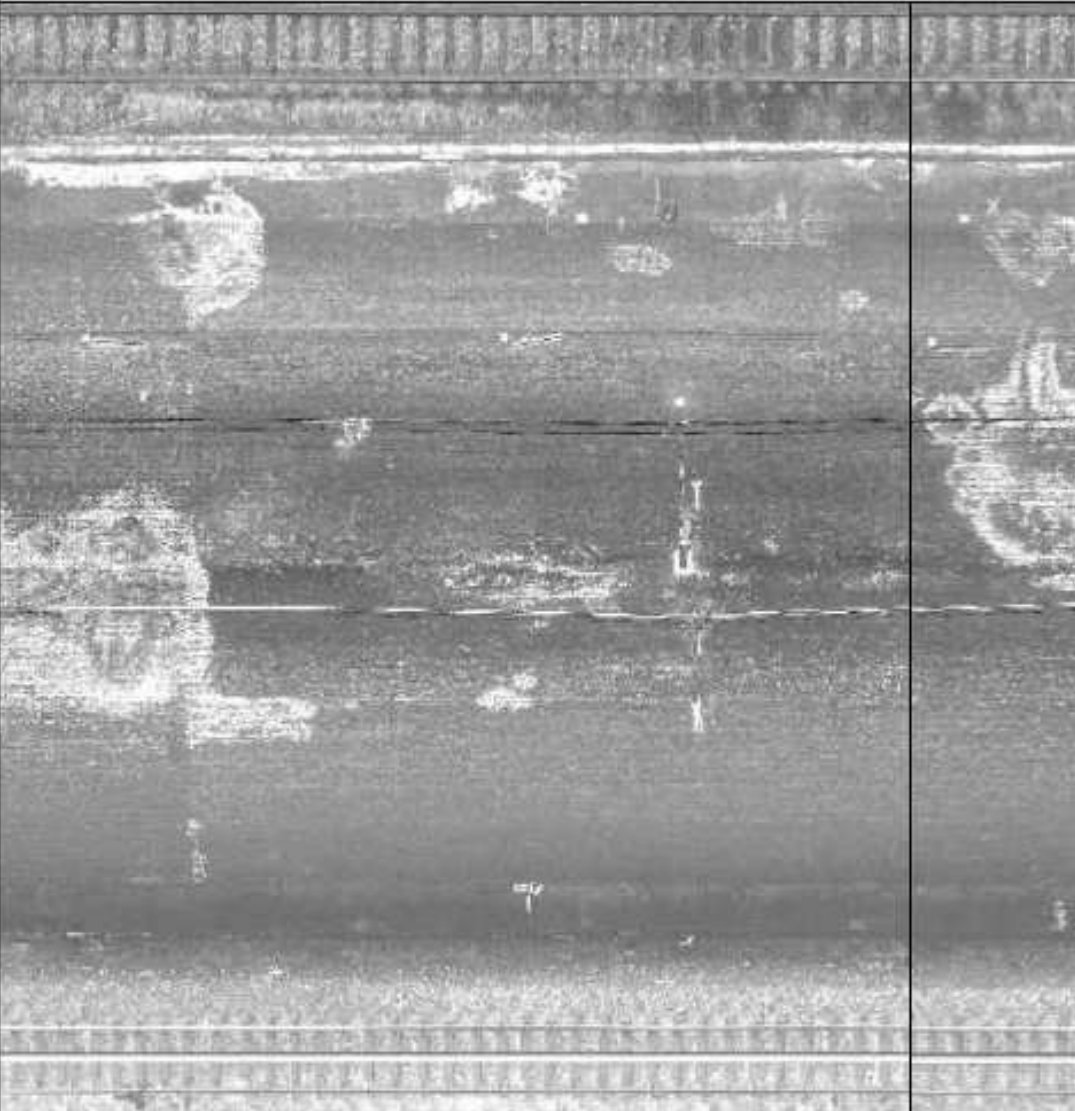


9 Bijlagen

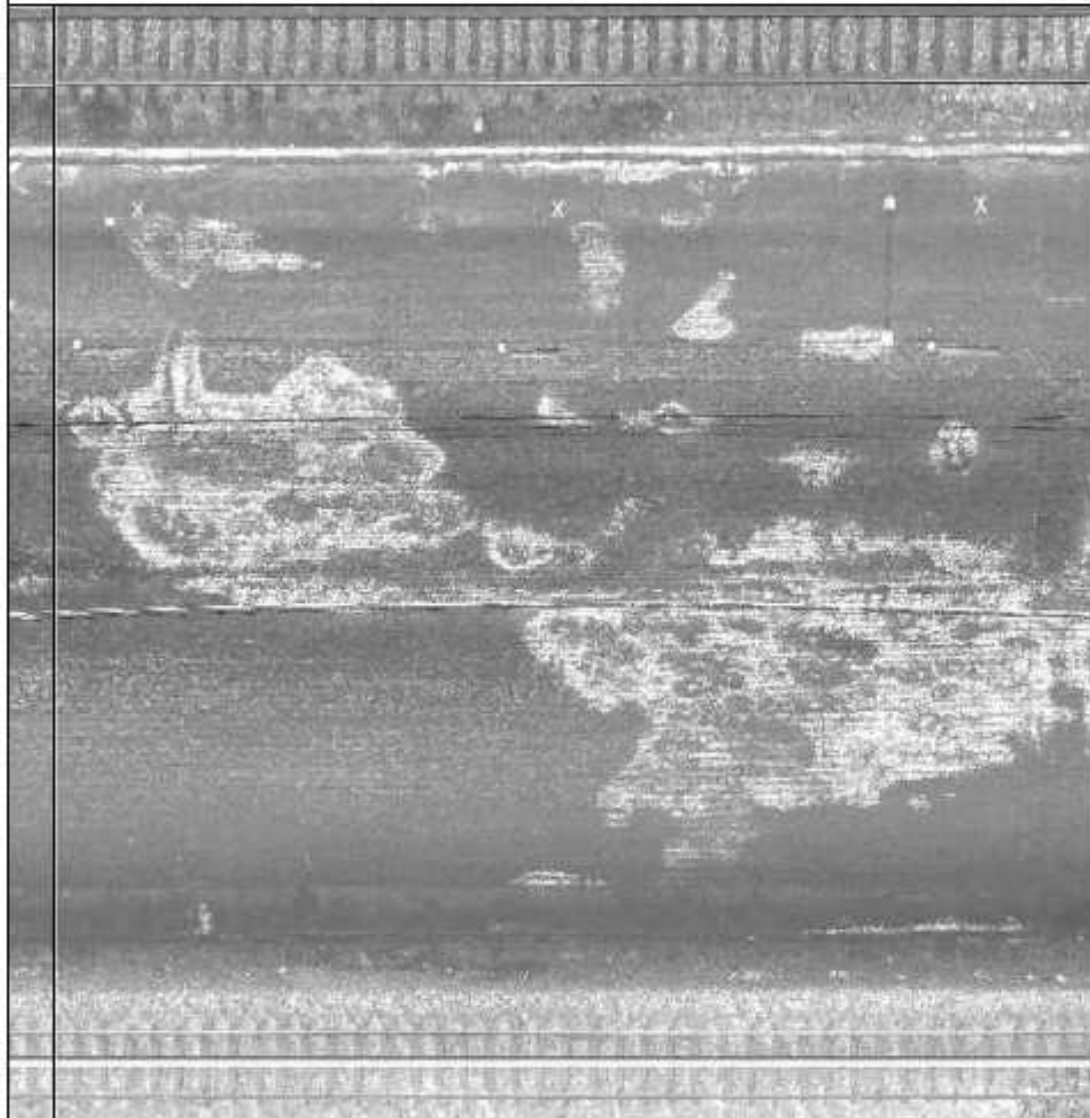
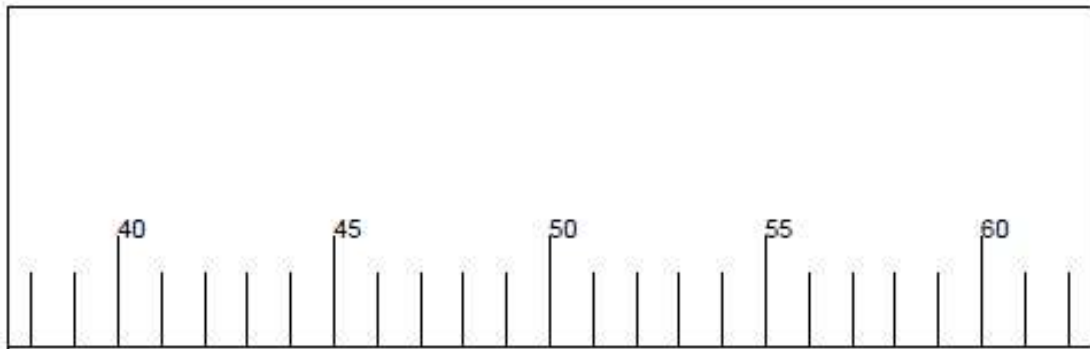
BIJLAGE A: INSPECTIEVERSLAG	110
BIJLAGE B: OMGEVINGSKLASSEN.....	139
BIJLAGE C: OORSPRONKELIJKE TECHNISCHE TEKENINGEN.....	143

Bijlage A: Inspectieverslag

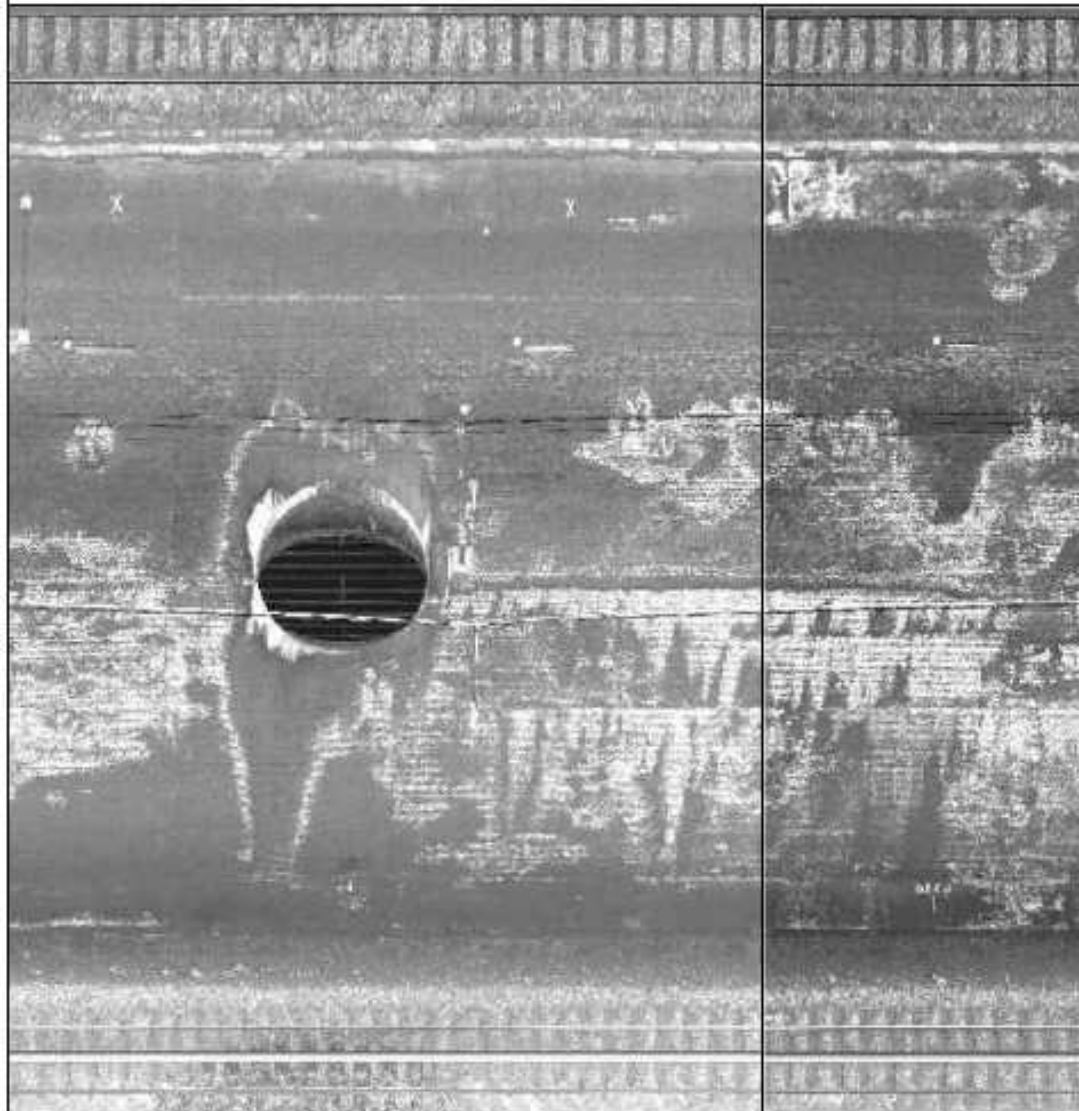
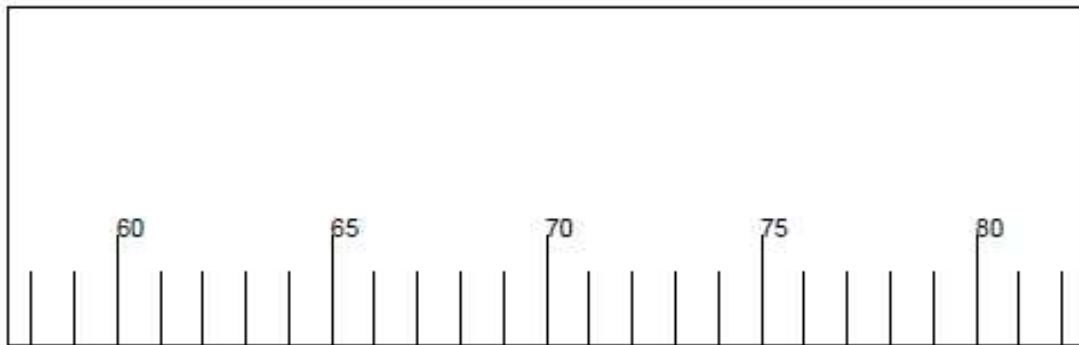


Schaal: NVT	Inspectieverslag: 0m - 20m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
		Pagina	1/28
Master Bouwkunde: Masterproef			A4

			
			
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 20m - 40m	
 		Master Bouwkunde: Masterproef	
		Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
		Pagina	2/28
			A4

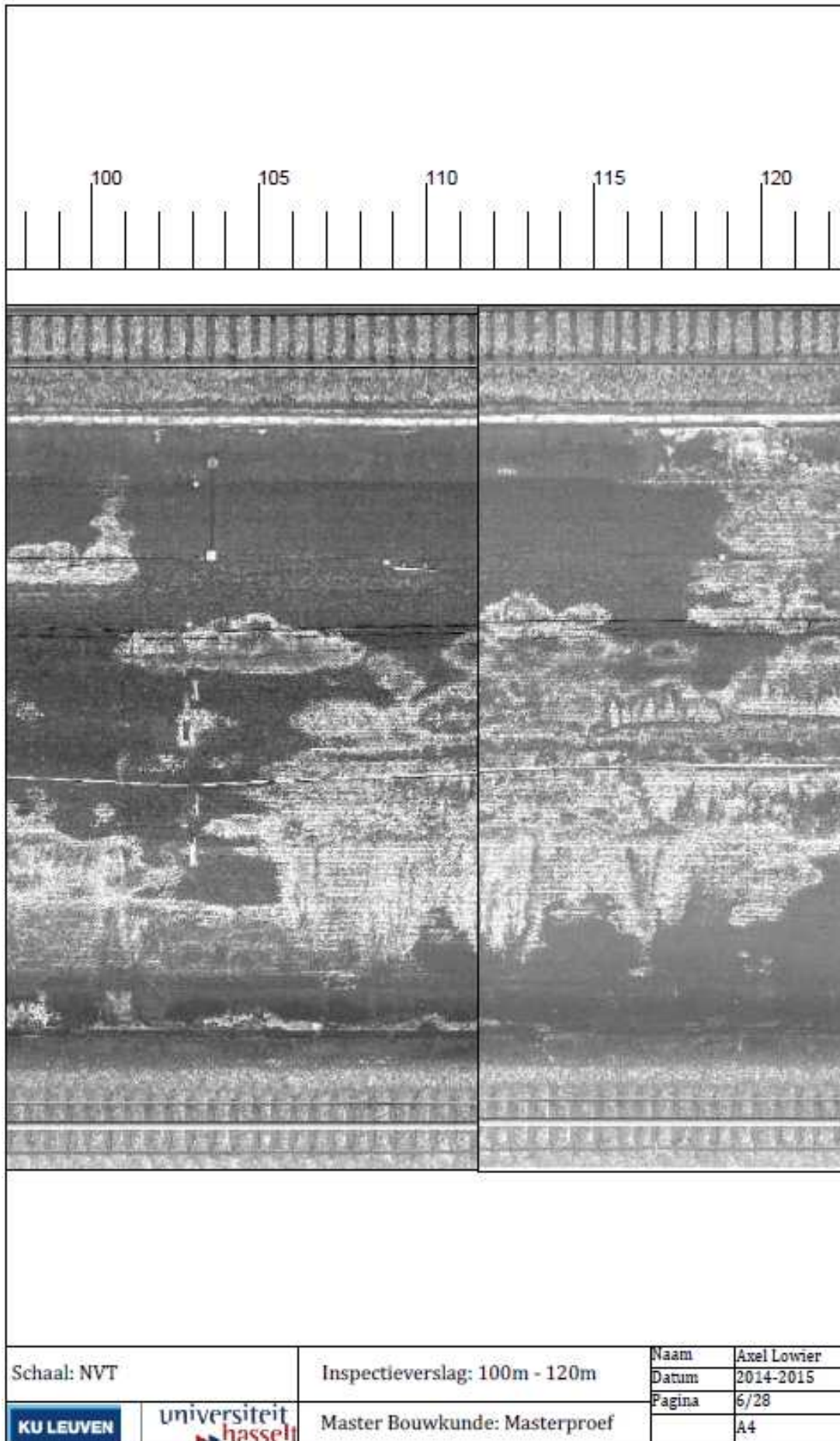


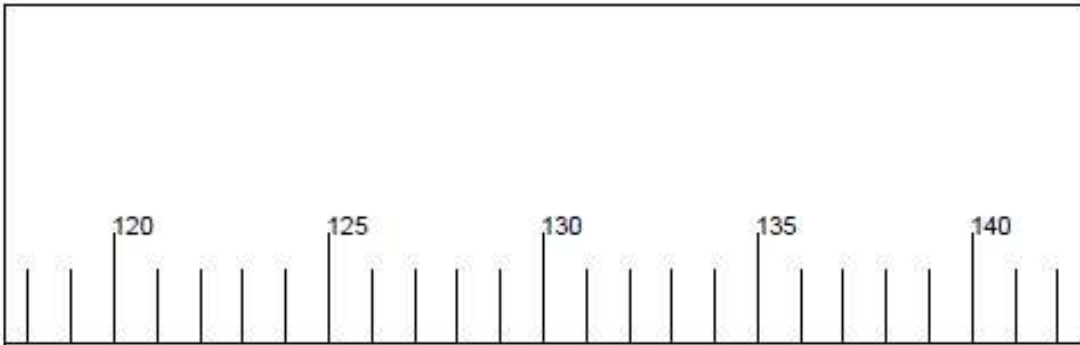
Schaal: NVT	Inspectieverslag: 40m - 60m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	3/28
			A4



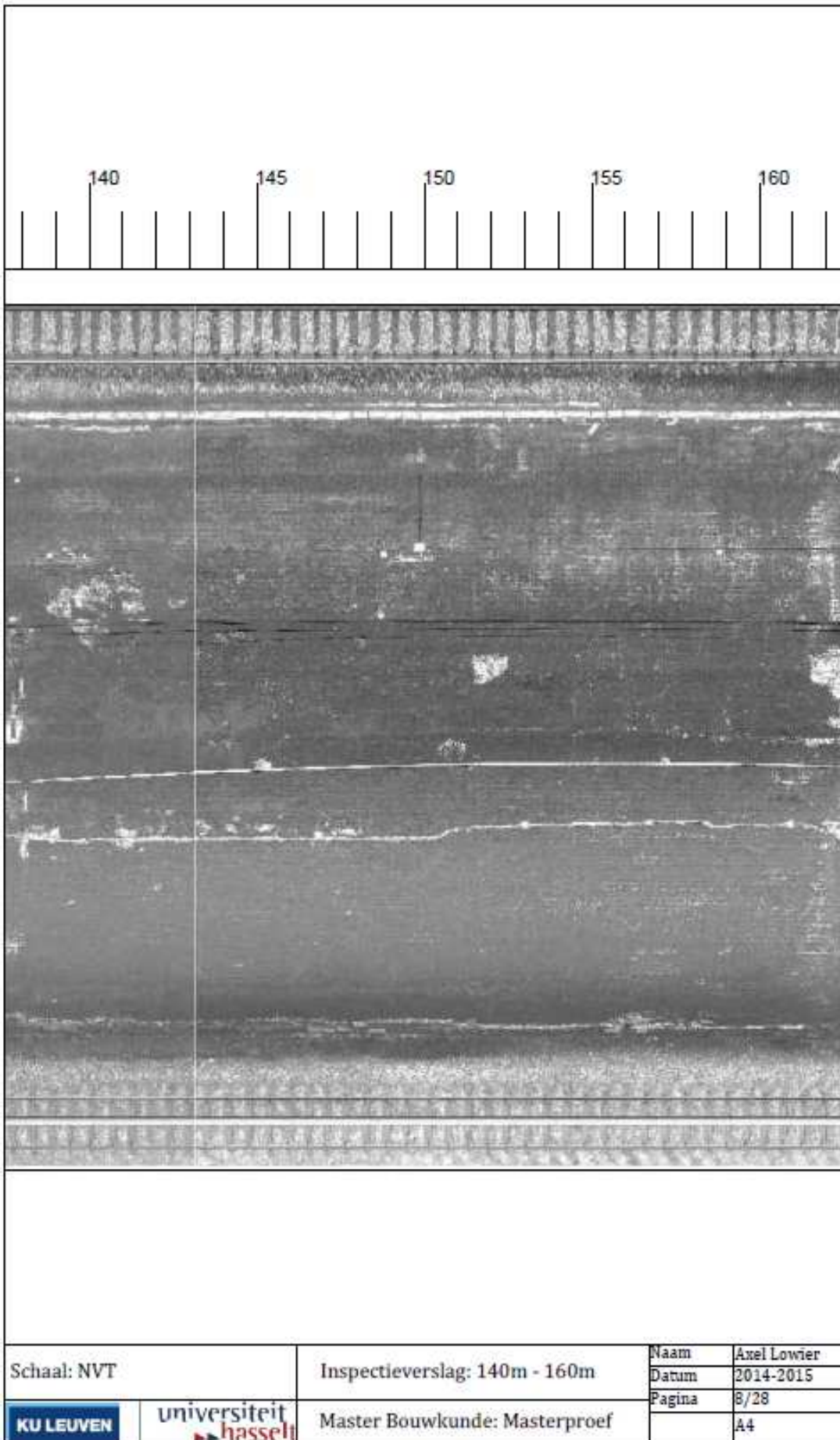
Schaal: NVT	Inspectieverslag: 60m - 80m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
		Pagina	4/28
KU LEUVEN	universiteit hasselt	Master Bouwkunde: Masterproef	A4

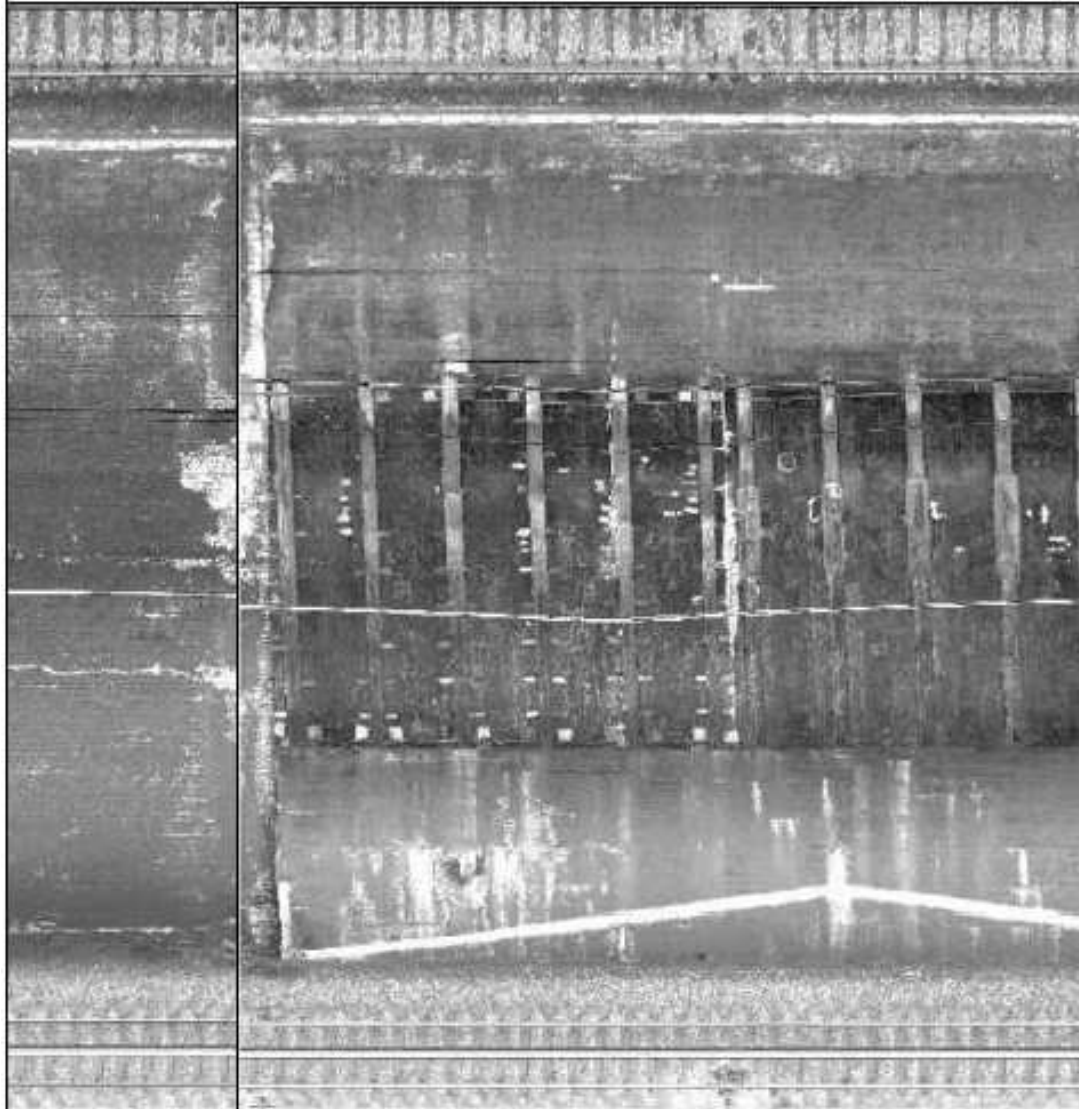
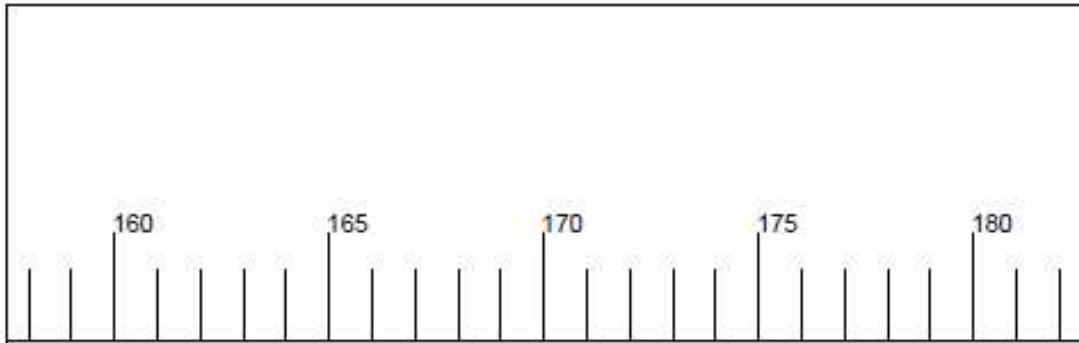






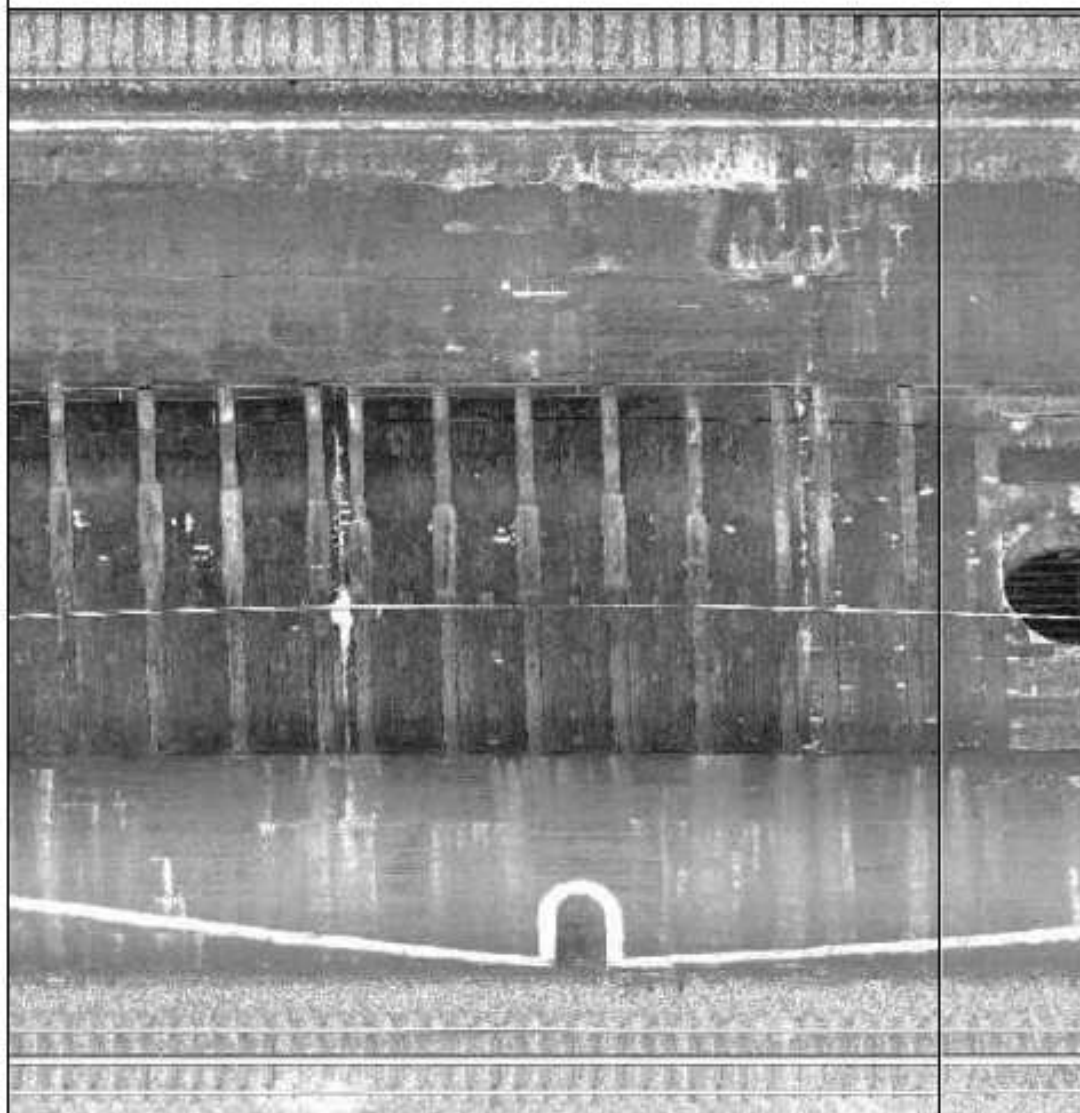
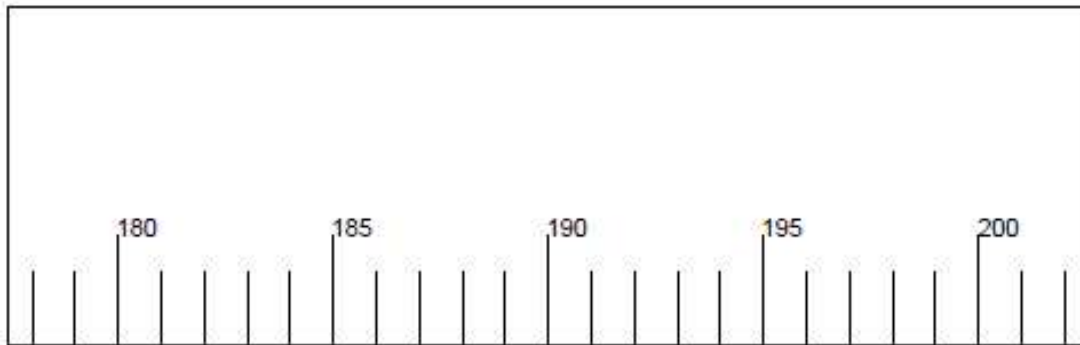
Schaal: NVT	Inspectieverslag: 120m - 140m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	7/28
			A4



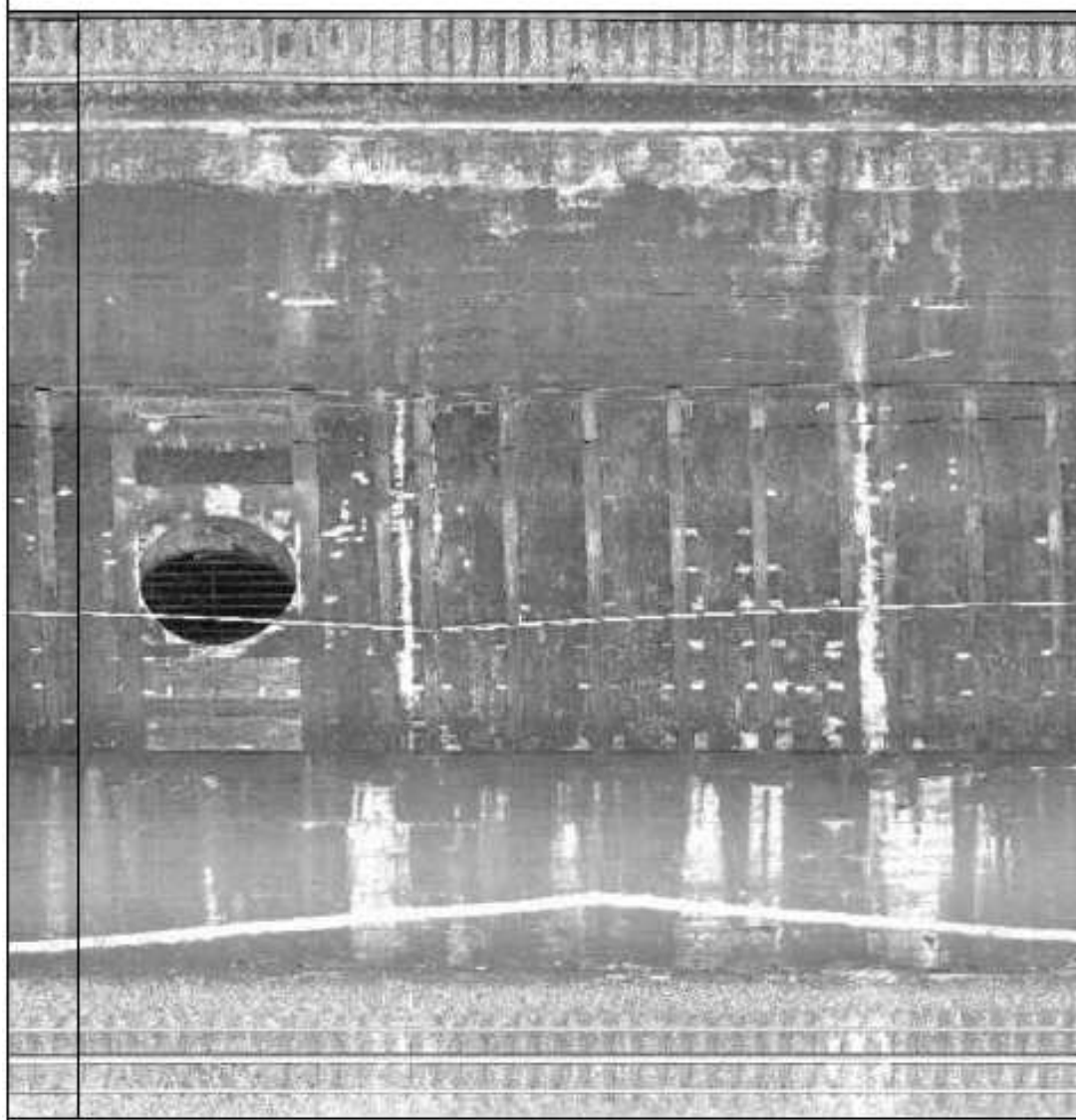
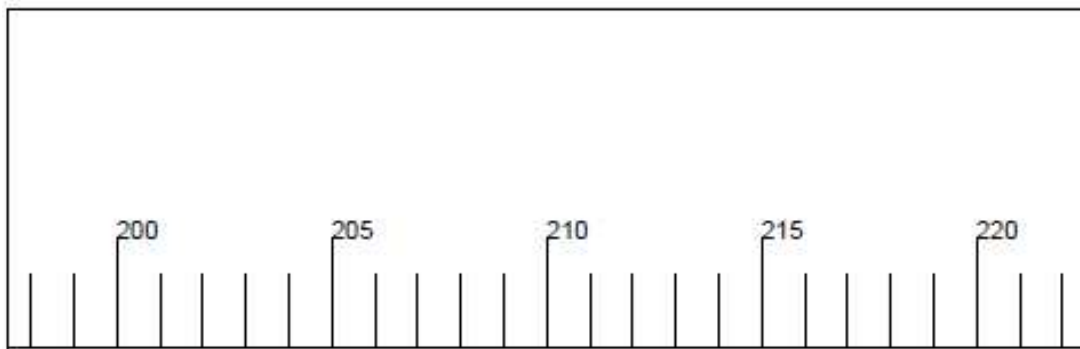


Blank area for notes or additional information.

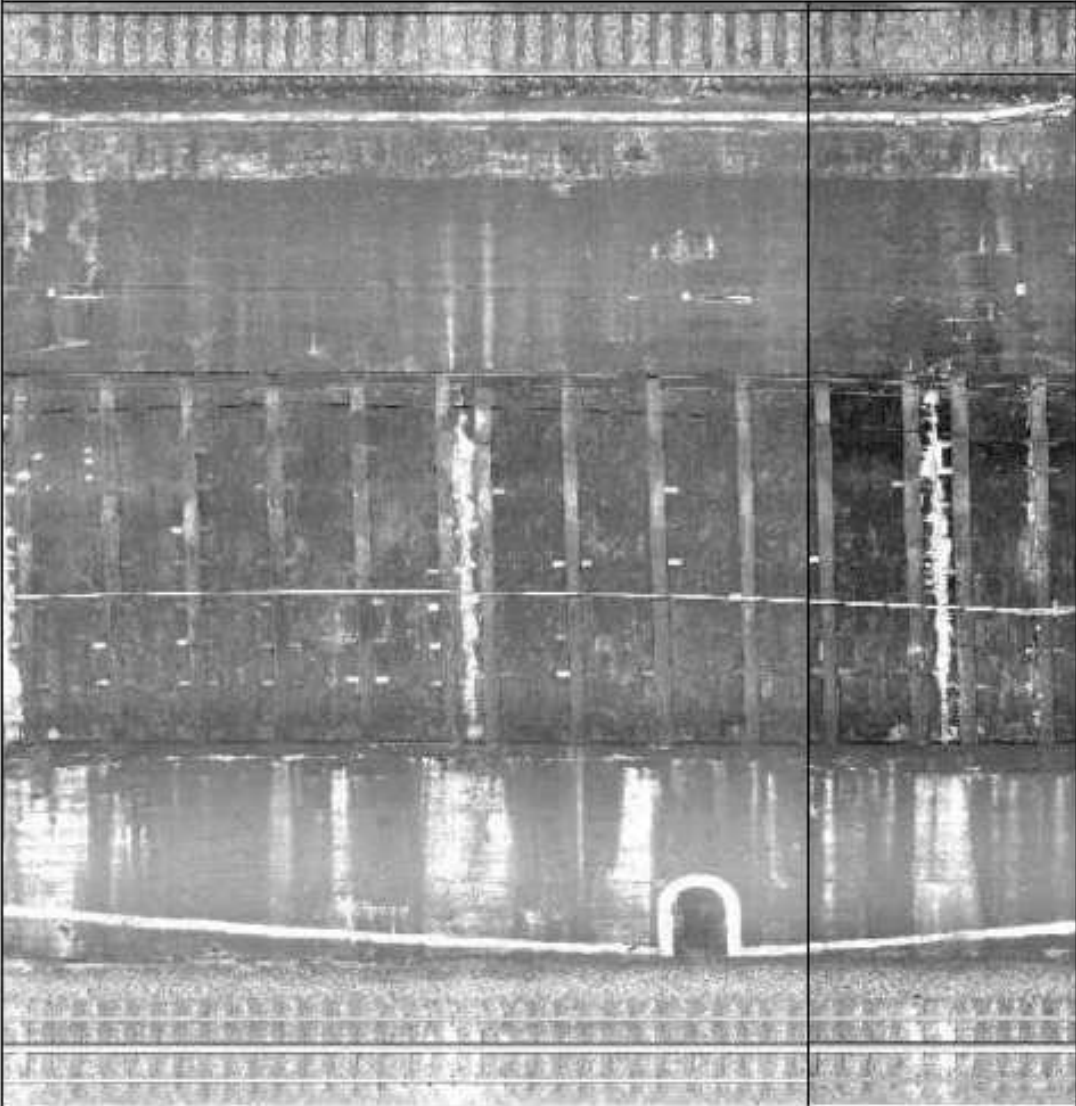


Schaal: NVT	Inspectieverslag: 160m - 180m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	9/28
			A4

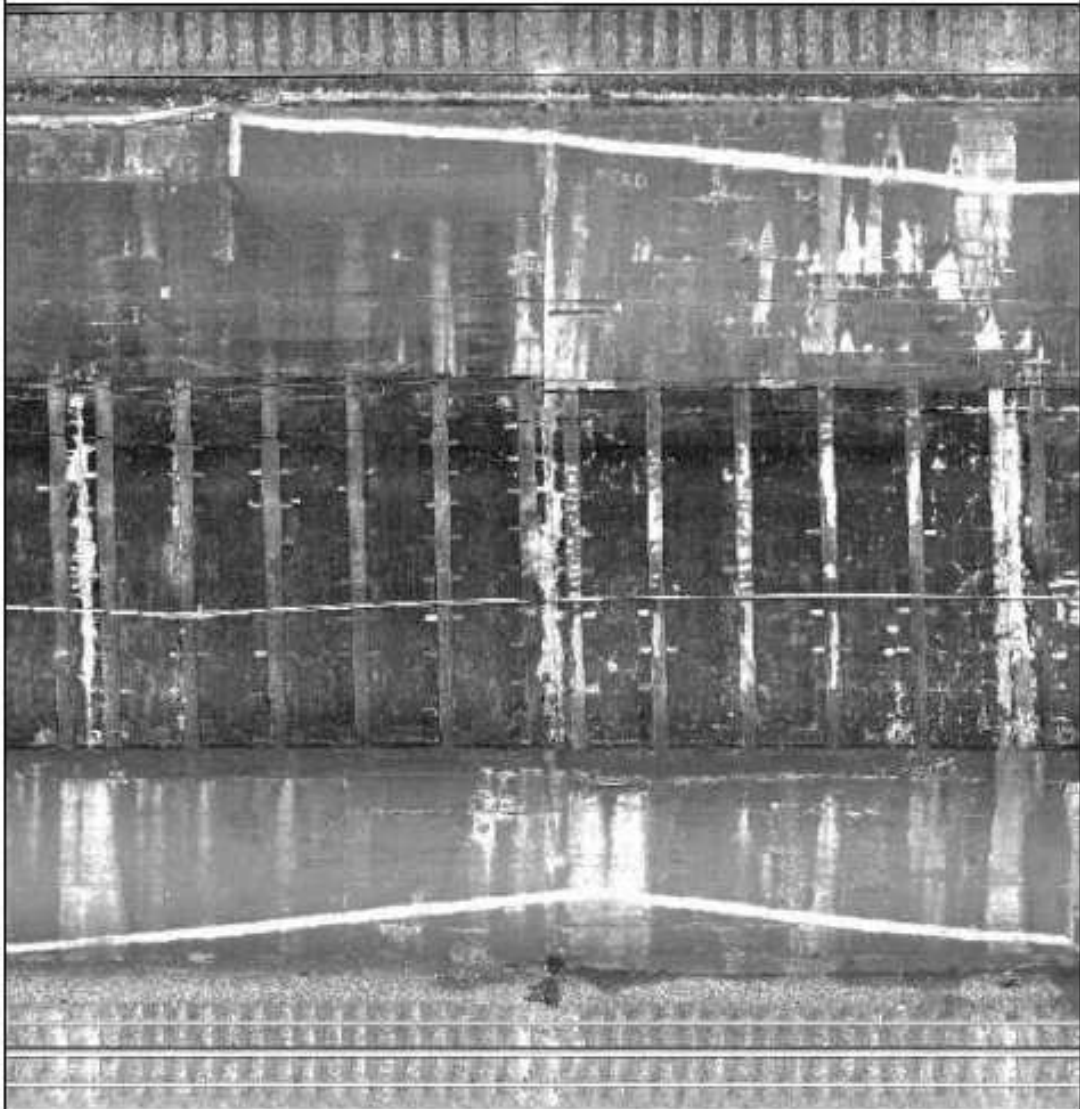
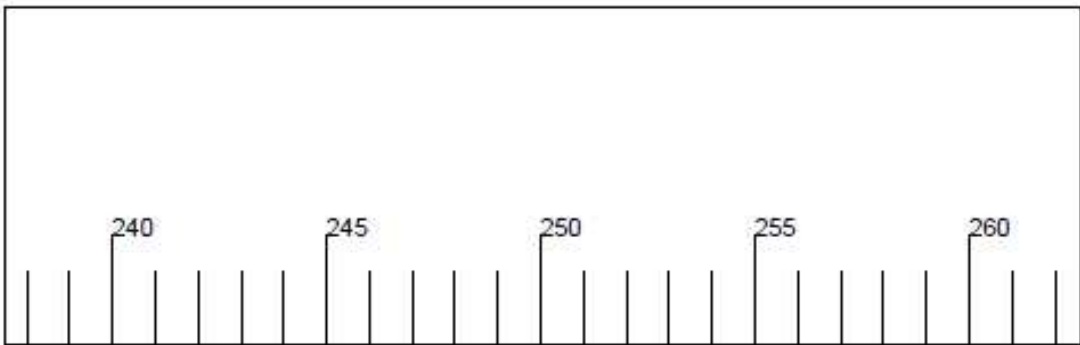


Schaal: NVT		Inspectieverslag: 180m - 200m		Naam	Axel Lowier
 		Master Bouwkunde: Masterproef		Datum	2014-2015
				Pagina	10/28
					A4

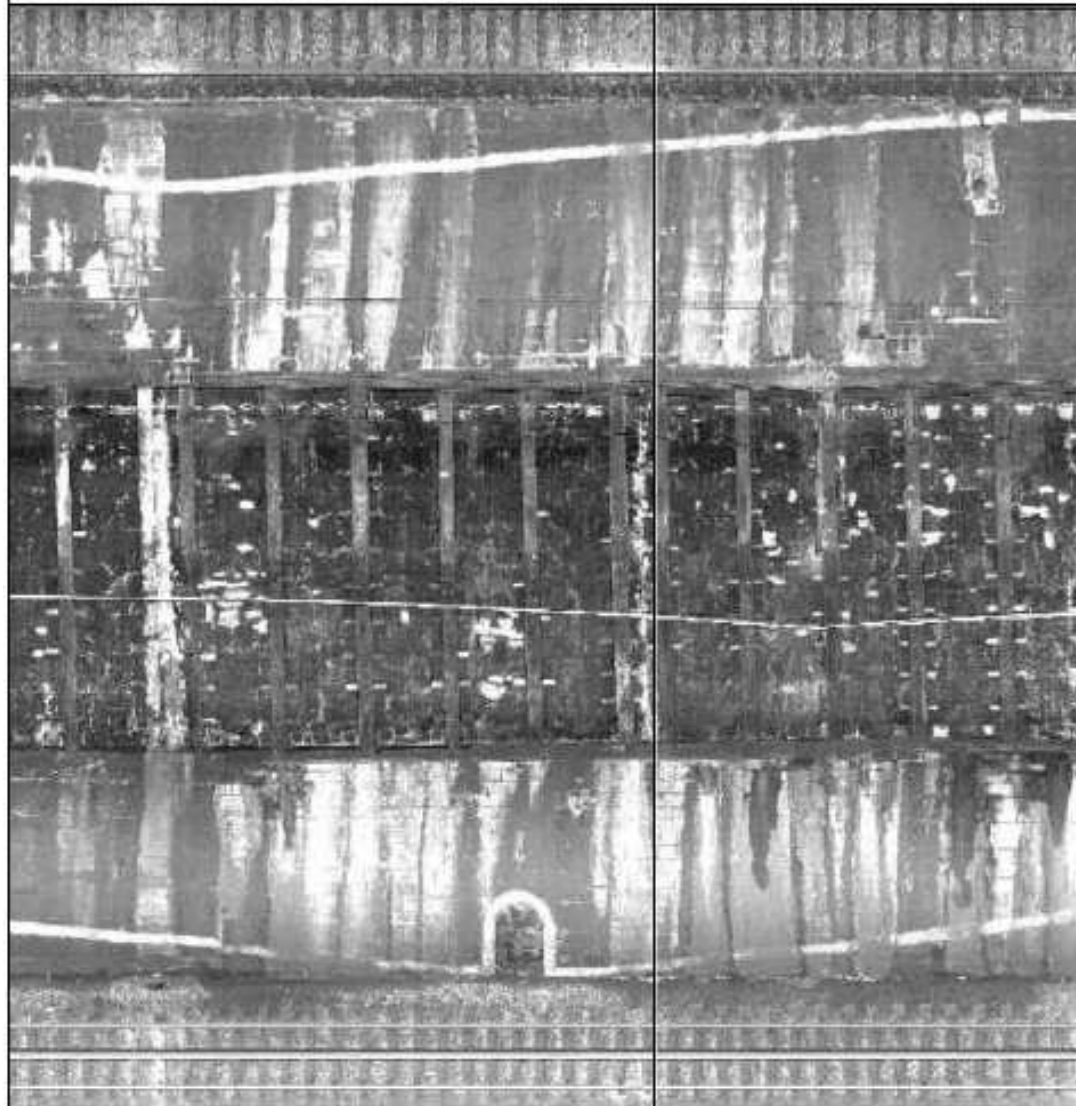
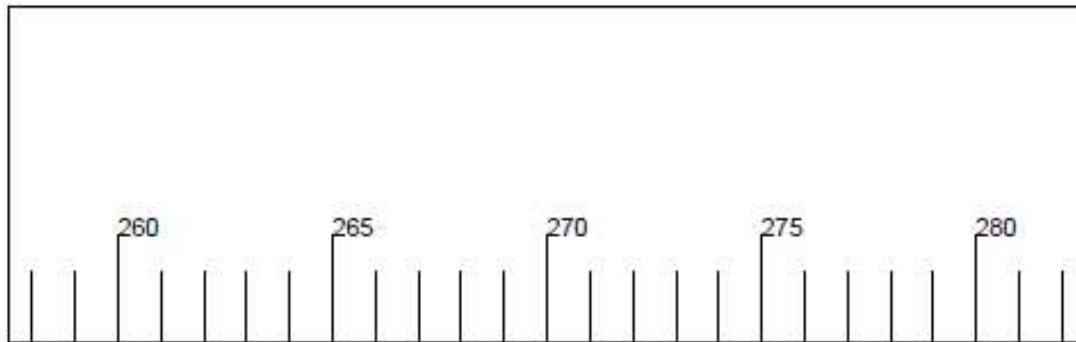


Schaal: NVT	Inspectieverslag: 200m - 220m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	11/28
			A4

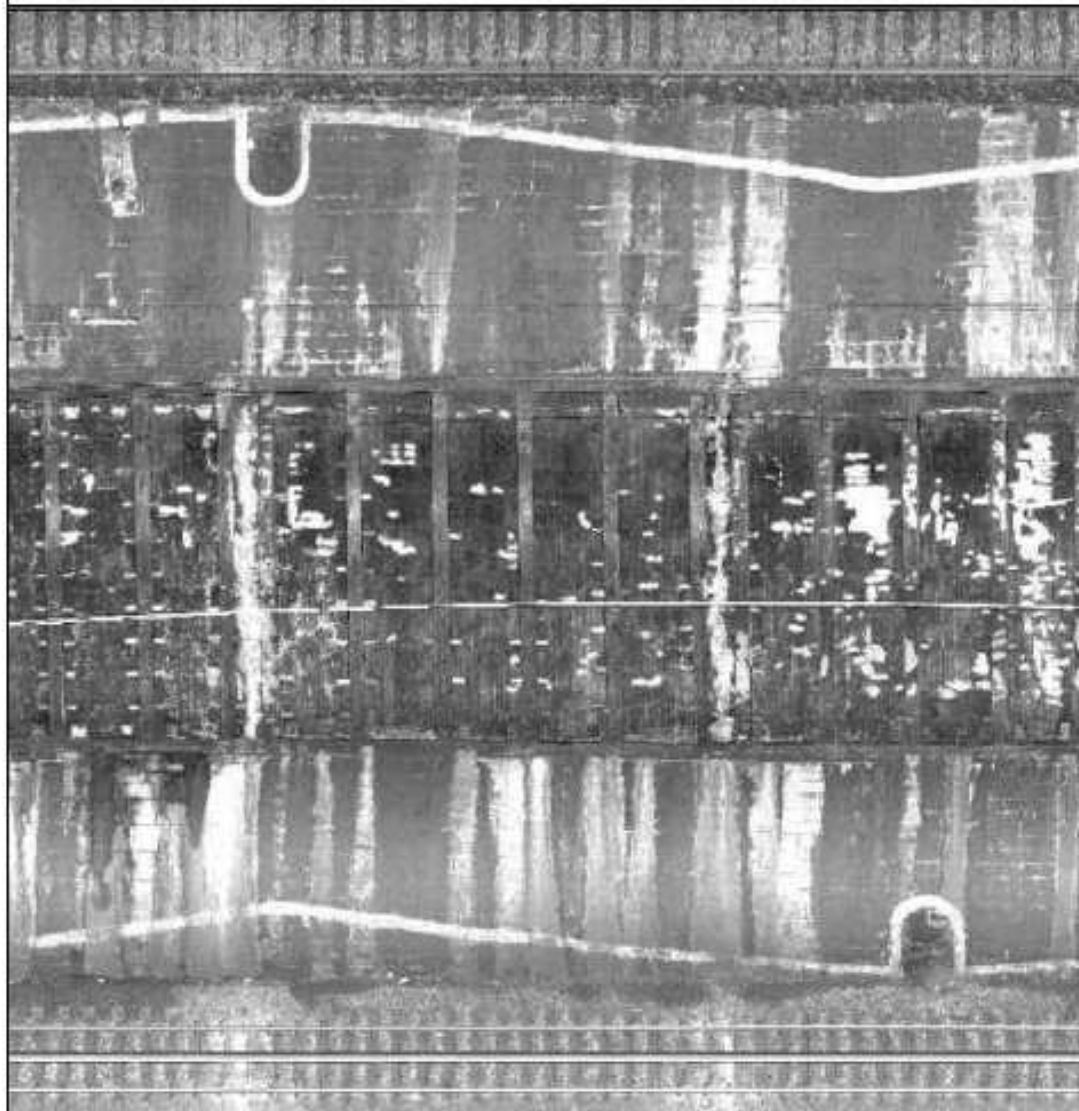
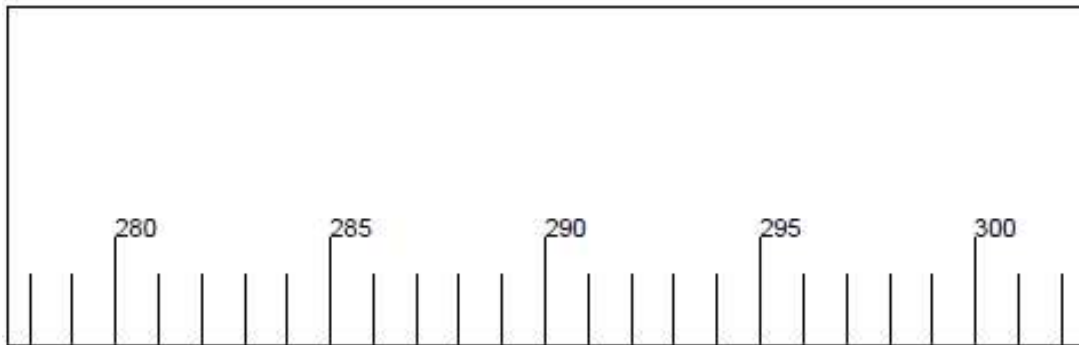
		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> 220 225 230 235 240 </div> 								
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 220m - 240m								
 		Master Bouwkunde: Masterproef								
		<table border="1"> <tr> <td>Naam</td> <td>Axel Lowier</td> </tr> <tr> <td>Datum</td> <td>2014-2015</td> </tr> <tr> <td>Pagina</td> <td>12/28</td> </tr> <tr> <td></td> <td>A4</td> </tr> </table>	Naam	Axel Lowier	Datum	2014-2015	Pagina	12/28		A4
Naam	Axel Lowier									
Datum	2014-2015									
Pagina	12/28									
	A4									



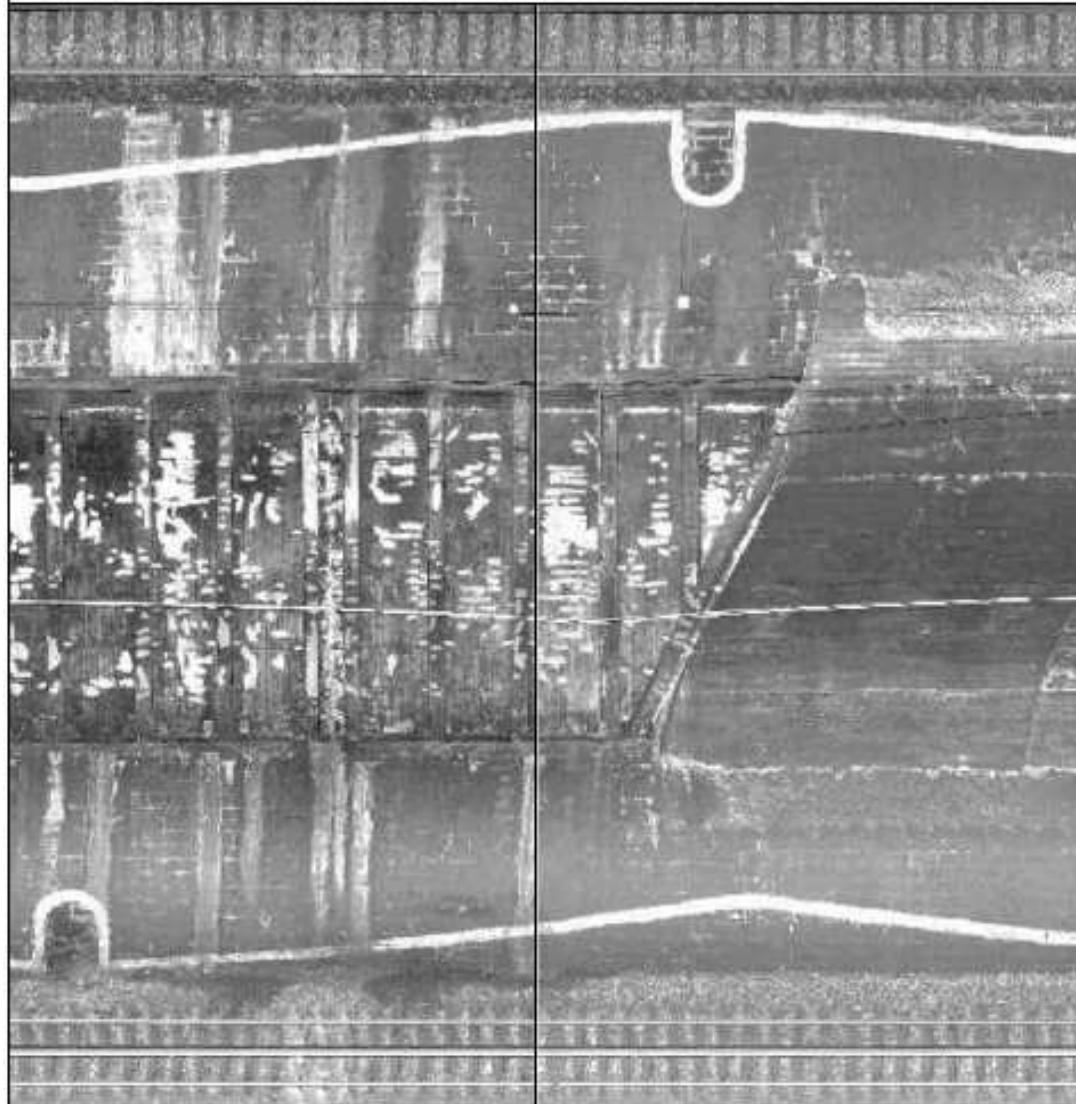
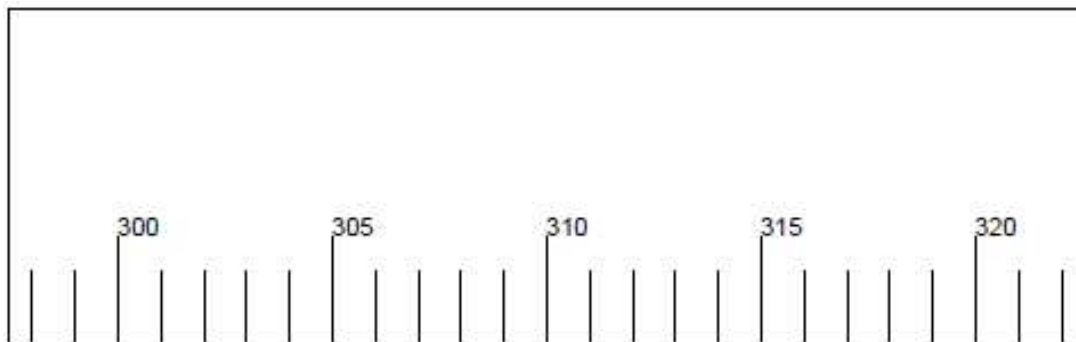
Schaal: NVT	Inspectieverslag: 240m - 260m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	13/28
			A4



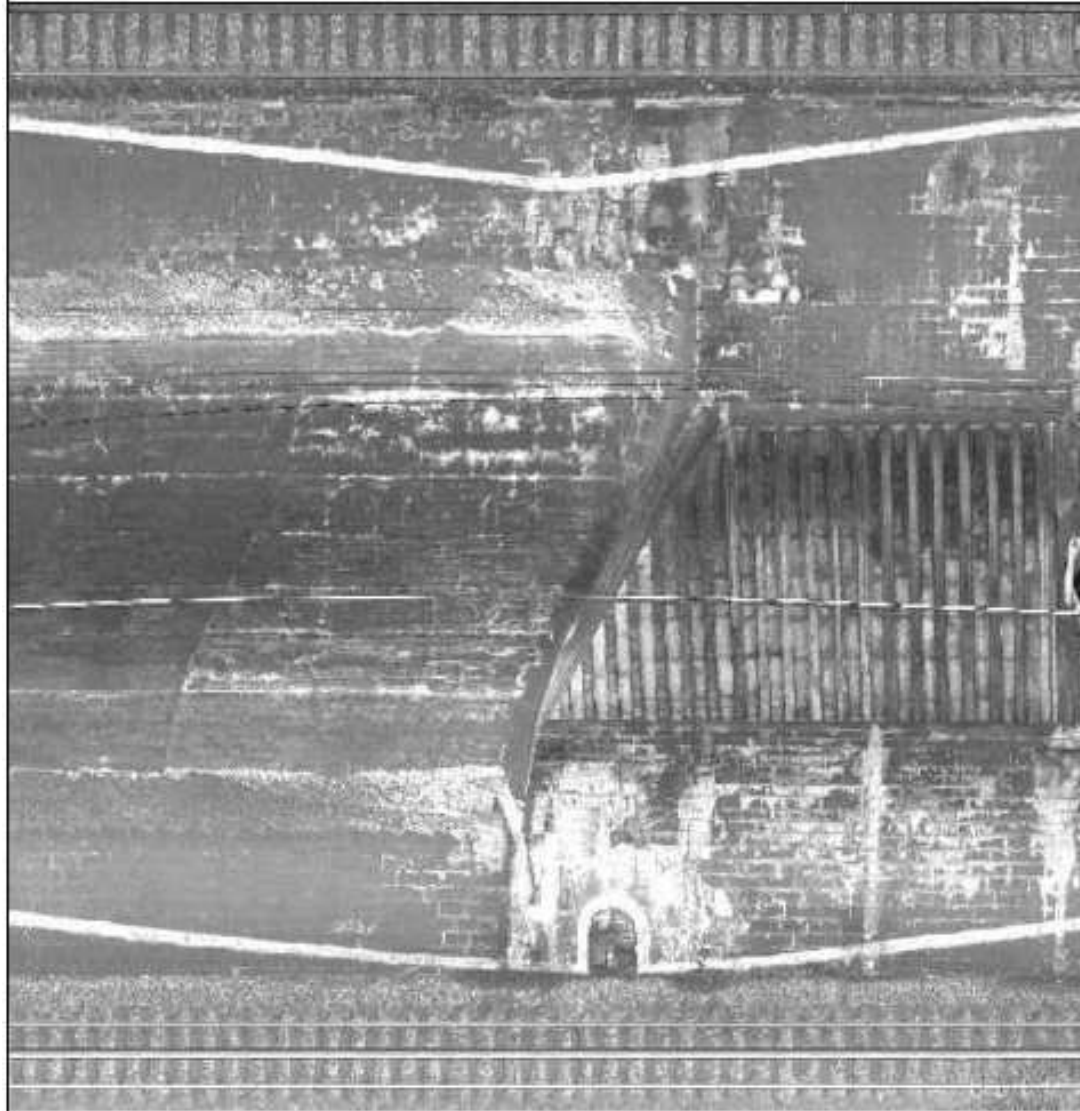
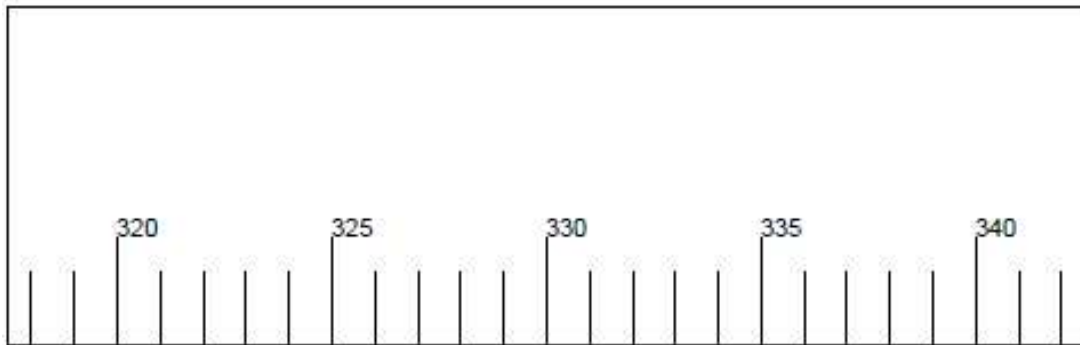
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 260m - 280m		Naam	Axel Lowier
		Master Bouwkunde: Masterproef		Datum	2014-2015
				Pagina	14/28
					A4



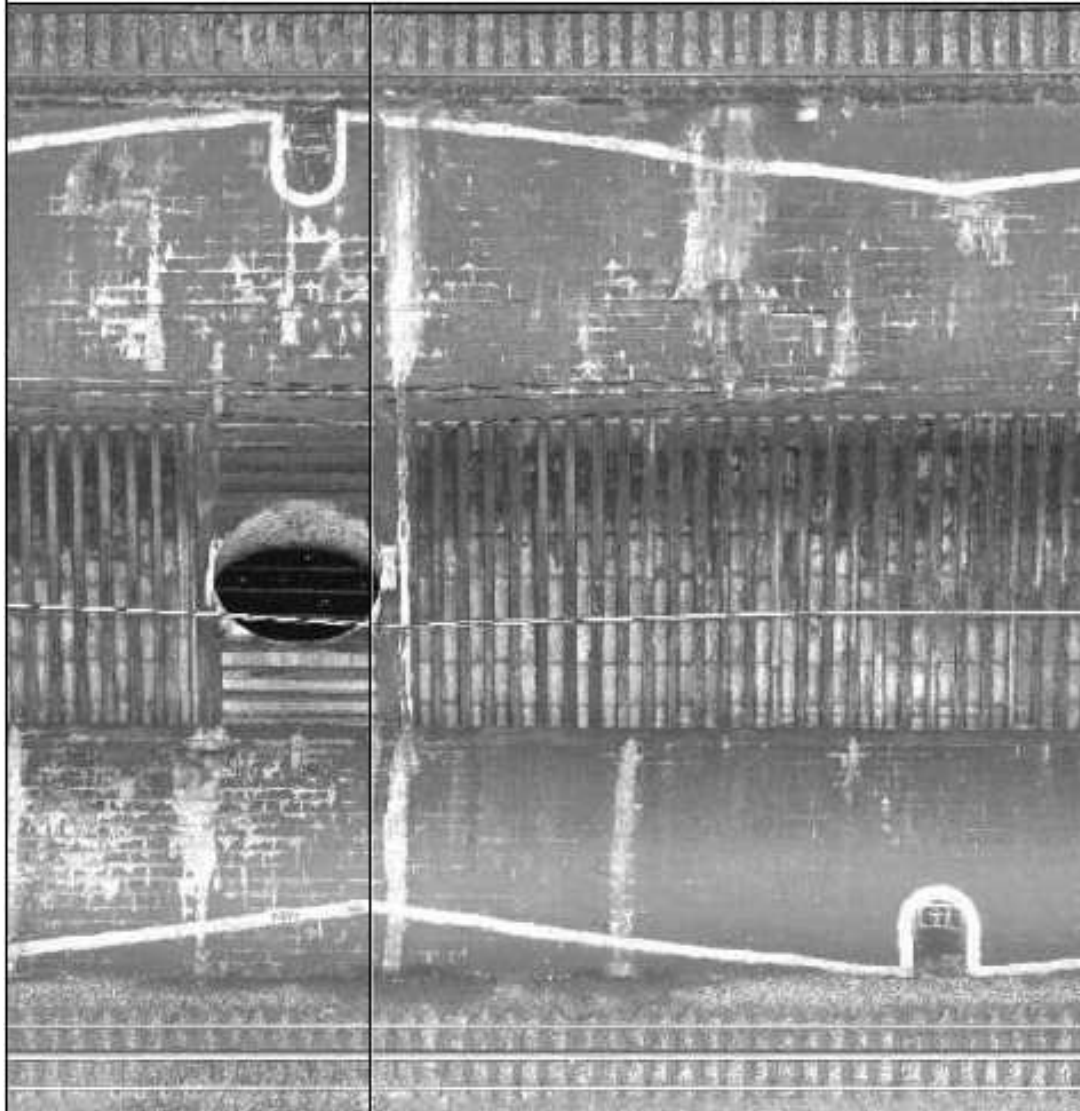
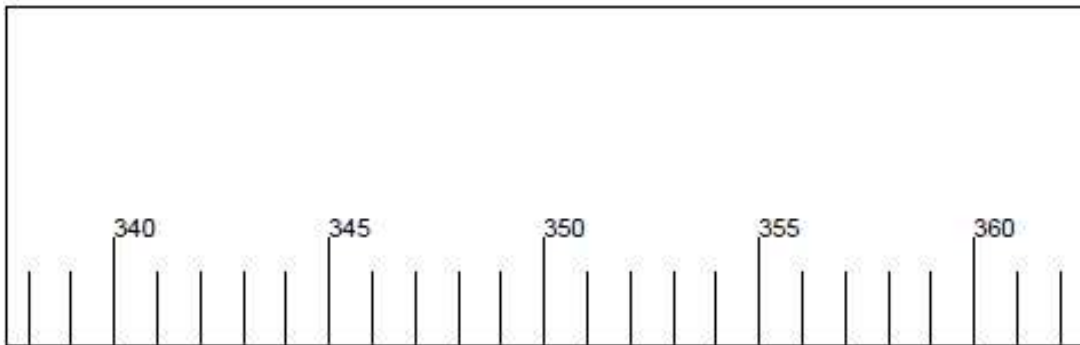
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 280m - 300m	Naam	Axel Lowier
			Datum	2014-2015
		Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	15/28
				A4



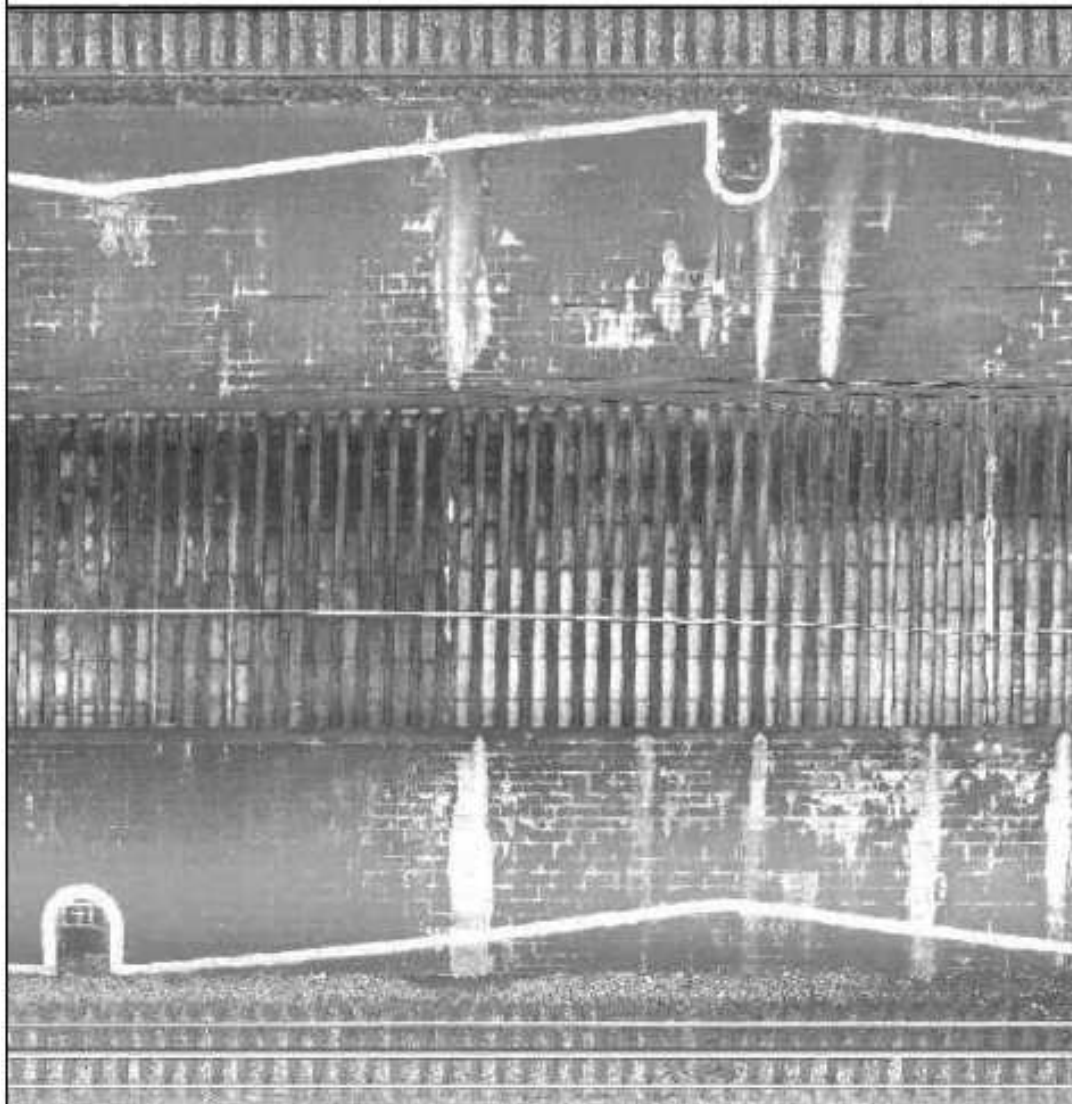
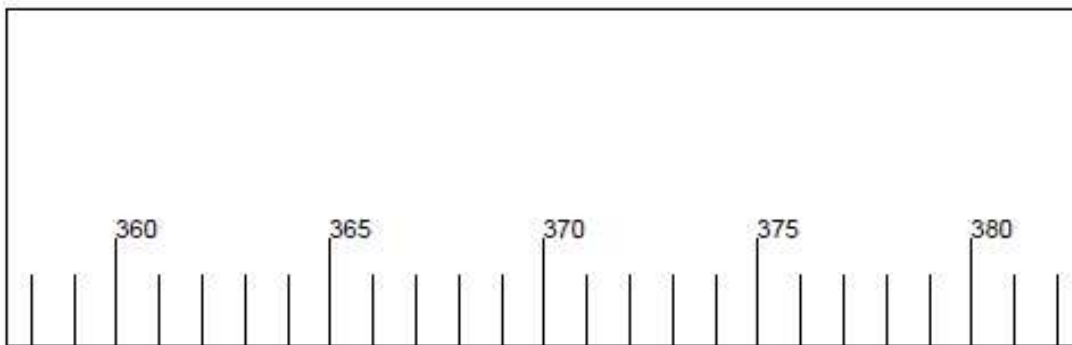
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 300m - 320m		Naam	Axel Lowier
				Datum	2014-2015
				Pagina	16/28
KU LEUVEN	universiteit hasselt	Master Bouwkunde: Masterproef			A4



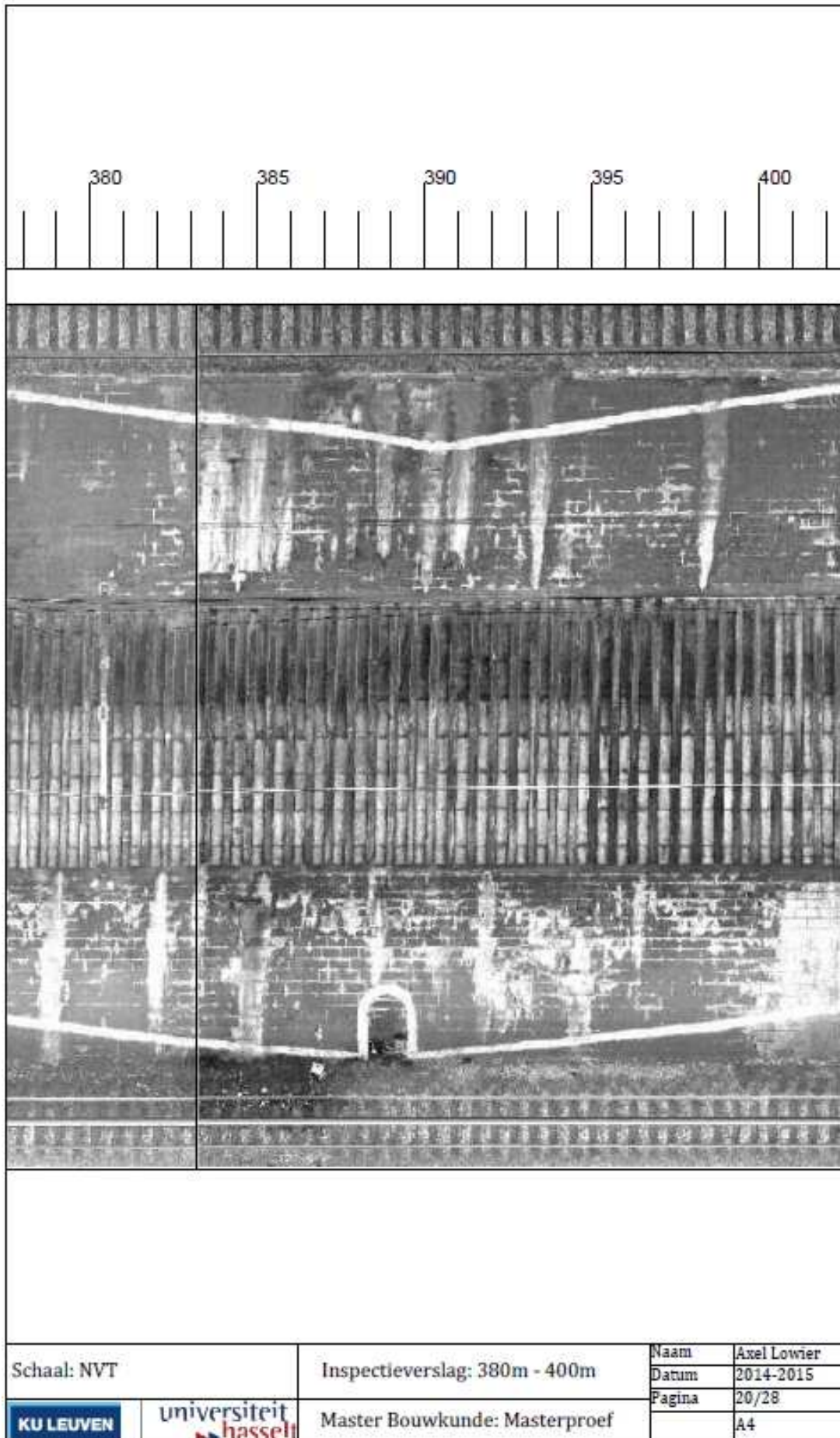
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 320m - 340m	Naam	Axel Lowier
			Datum	2014-2015
		Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	17/28
				A4

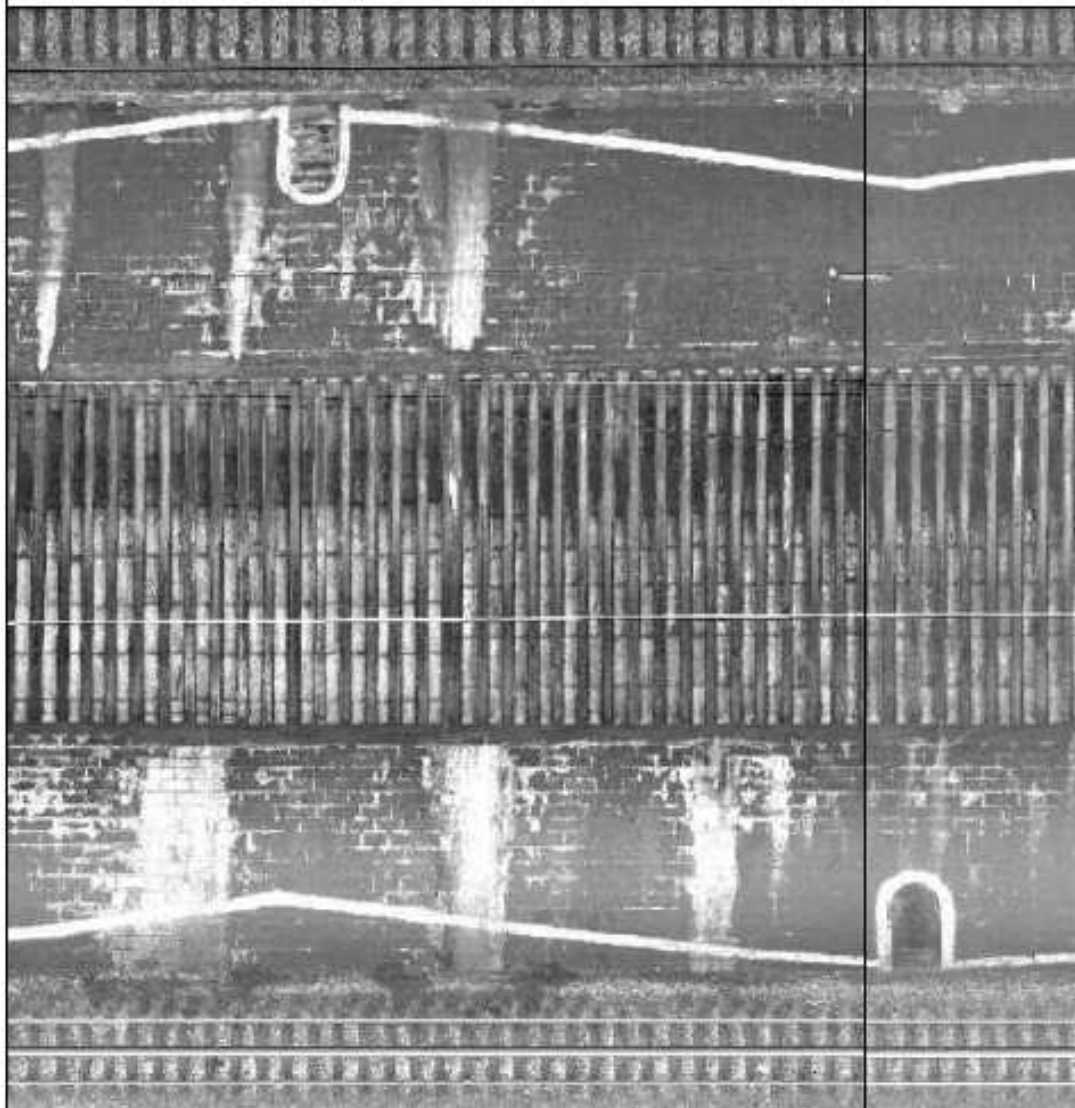
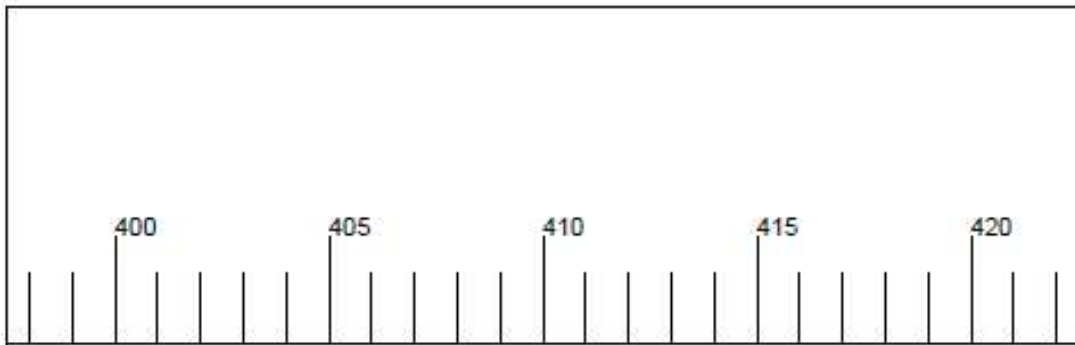


Schaal: NVT	Inspectieverslag: 340m - 360m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	18/28
			A4

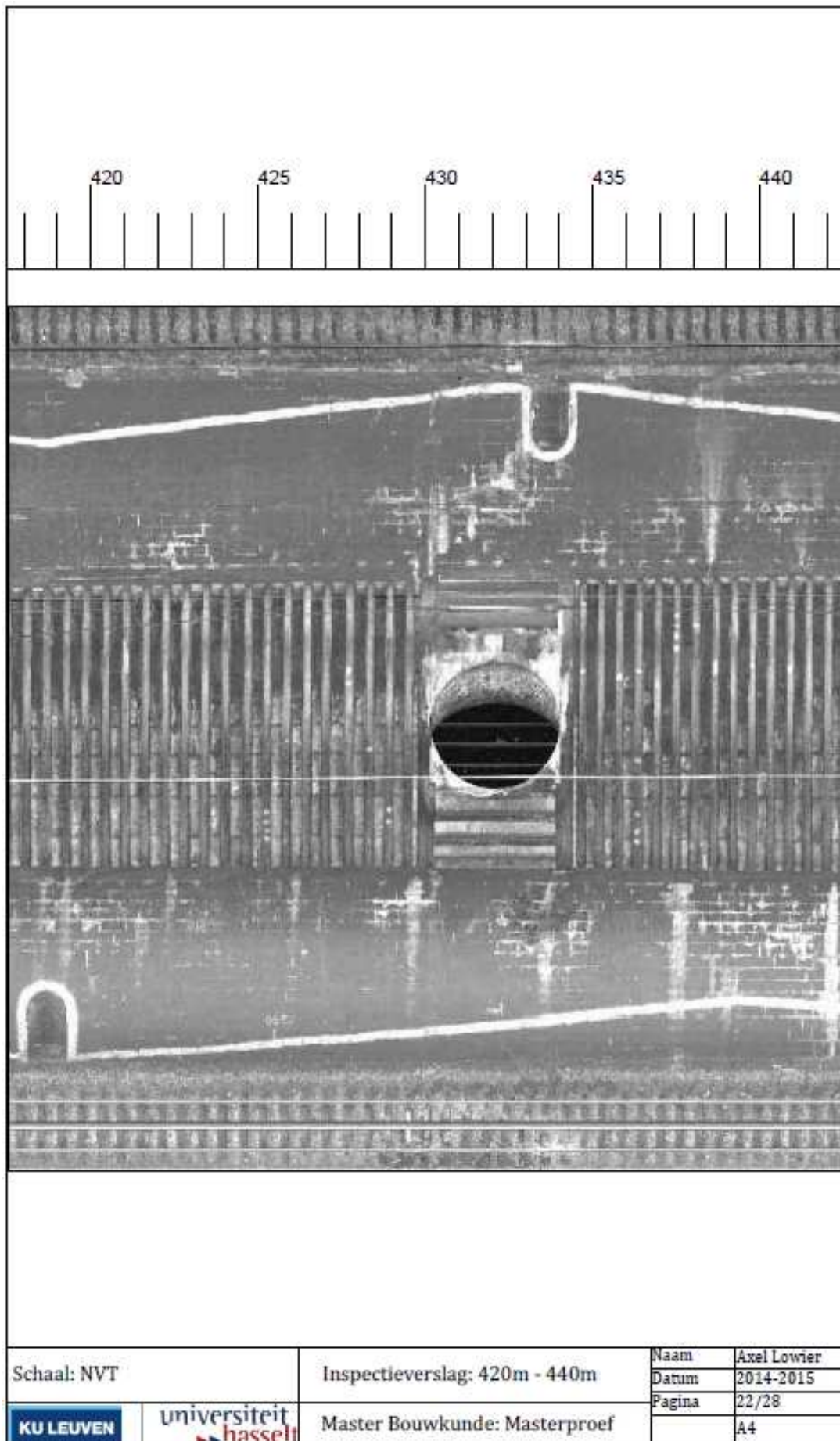


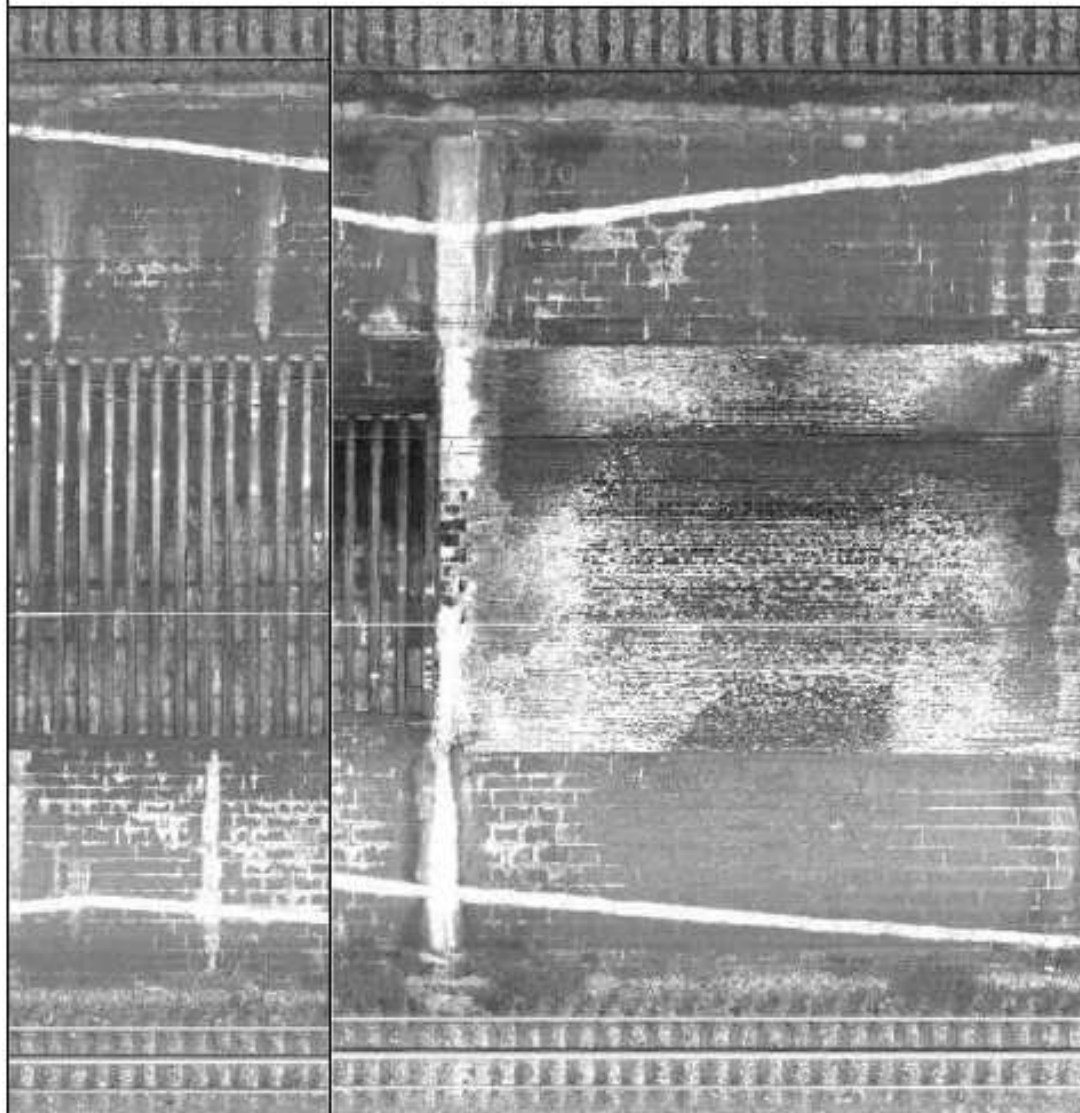
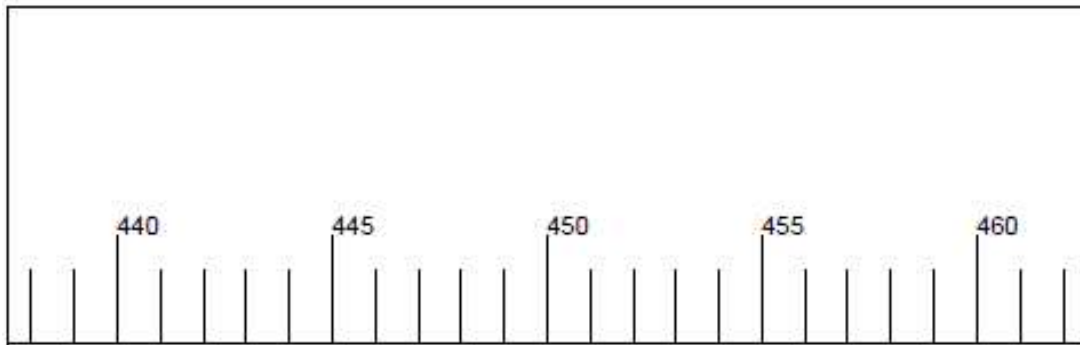
Schaal: NVT	Inspectieverslag: 360m - 380m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	19/28
			A4



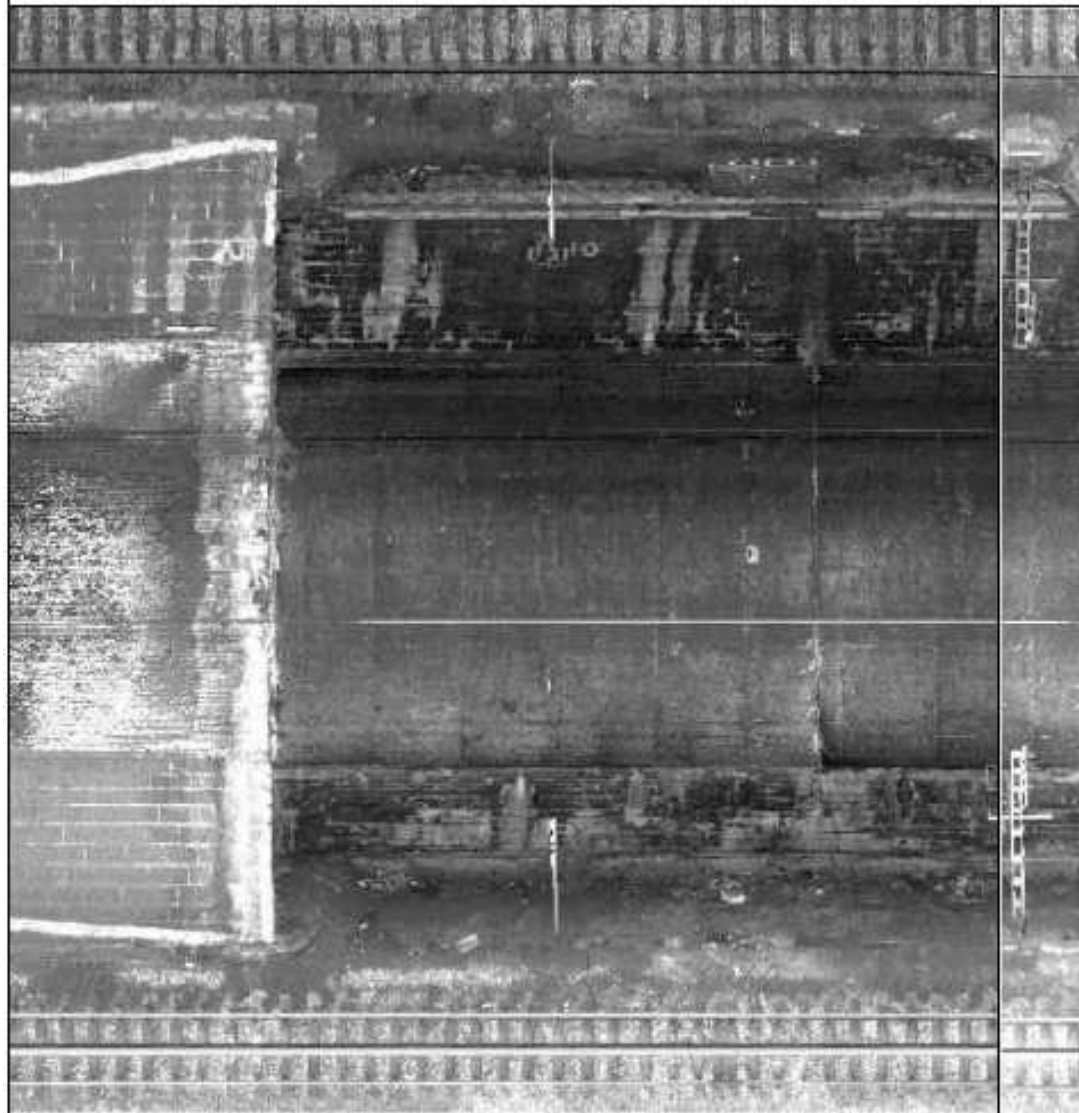
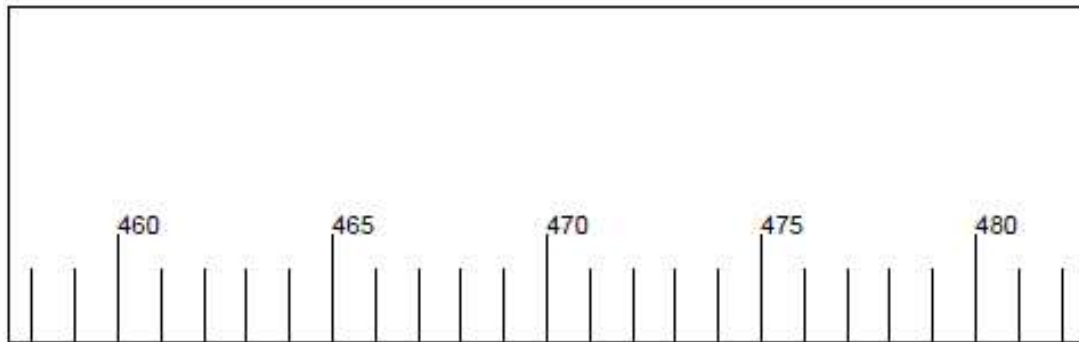


Schaal: NVT	Inspectieverslag: 400m - 420m	Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
 	Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	21/28
			A4

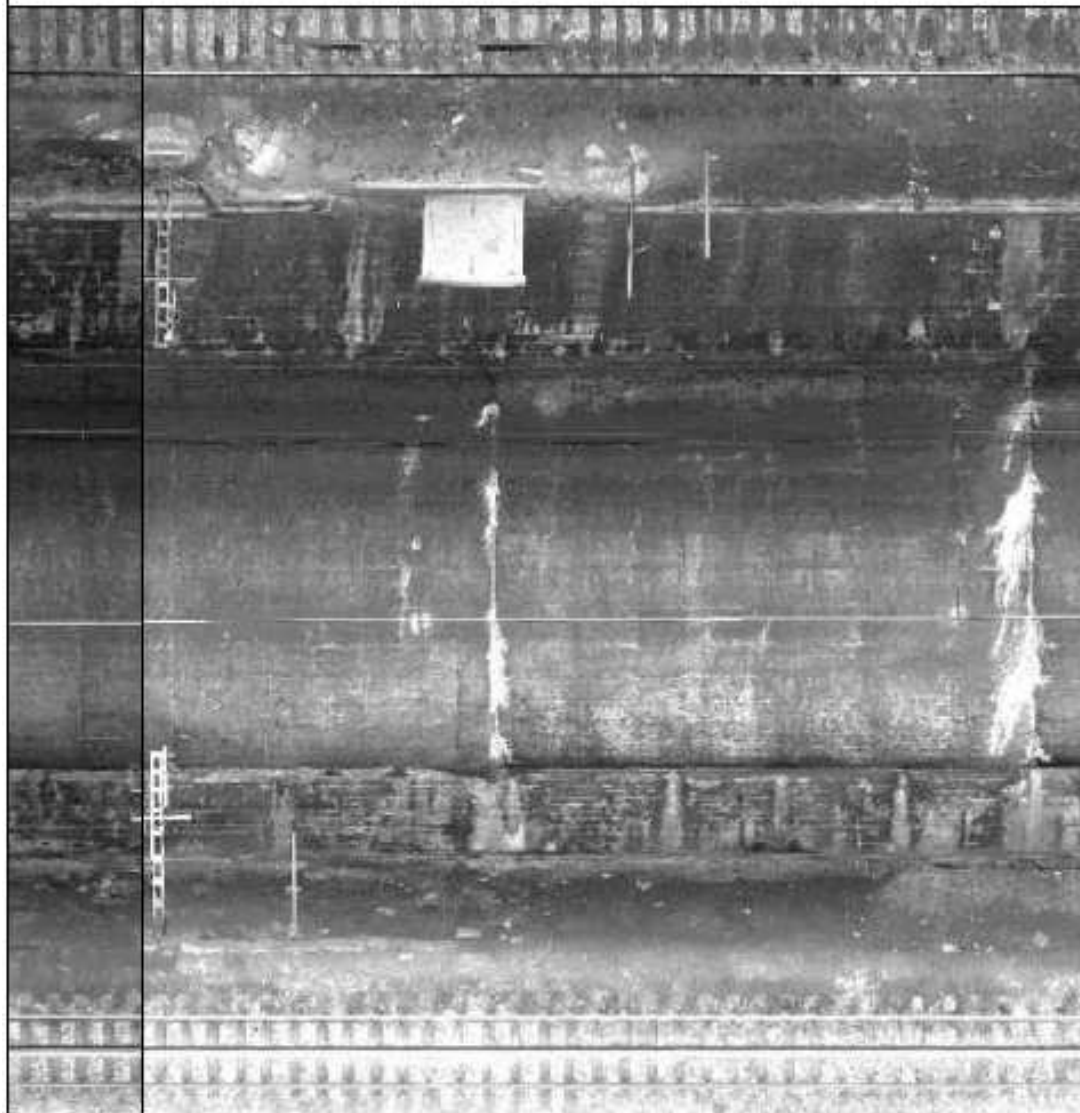
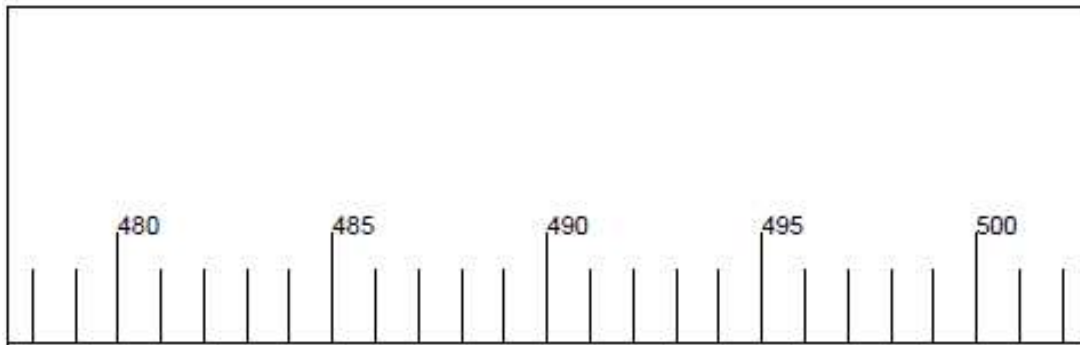




Schaal: NVT		Inspectieverslag: 440m - 460m		Naam	Axel Lowier
		Master Bouwkunde: Masterproef		Datum	2014-2015
				Pagina	23/28
					A4



Schaal: NVT		Inspectieverslag: 460m - 480m		Naam	Axel Lowier
 		Master Bouwkunde: Masterproef		Datum	2014-2015
				Pagina	24/28
					A4

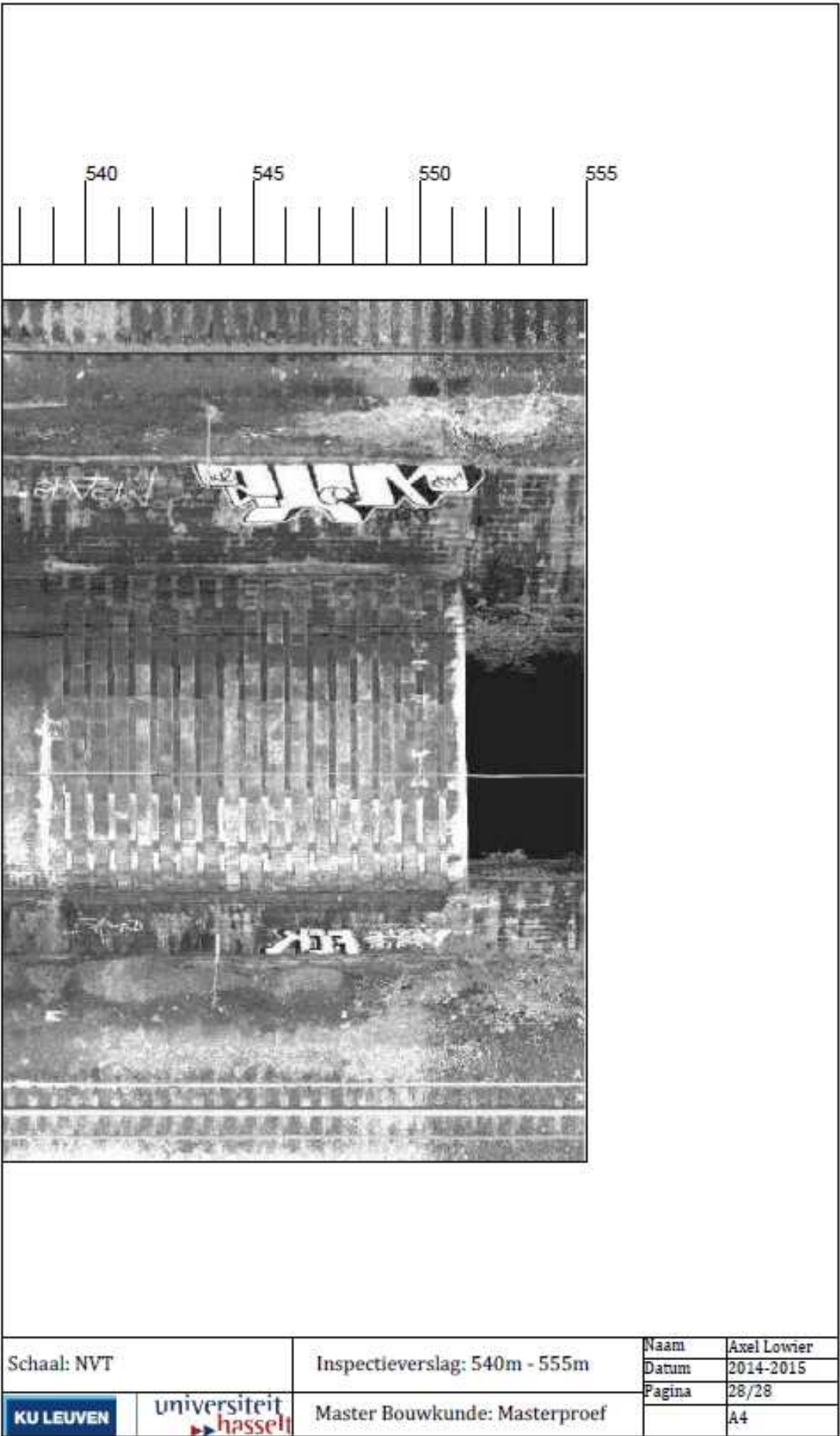


Blank space for notes or additional information.

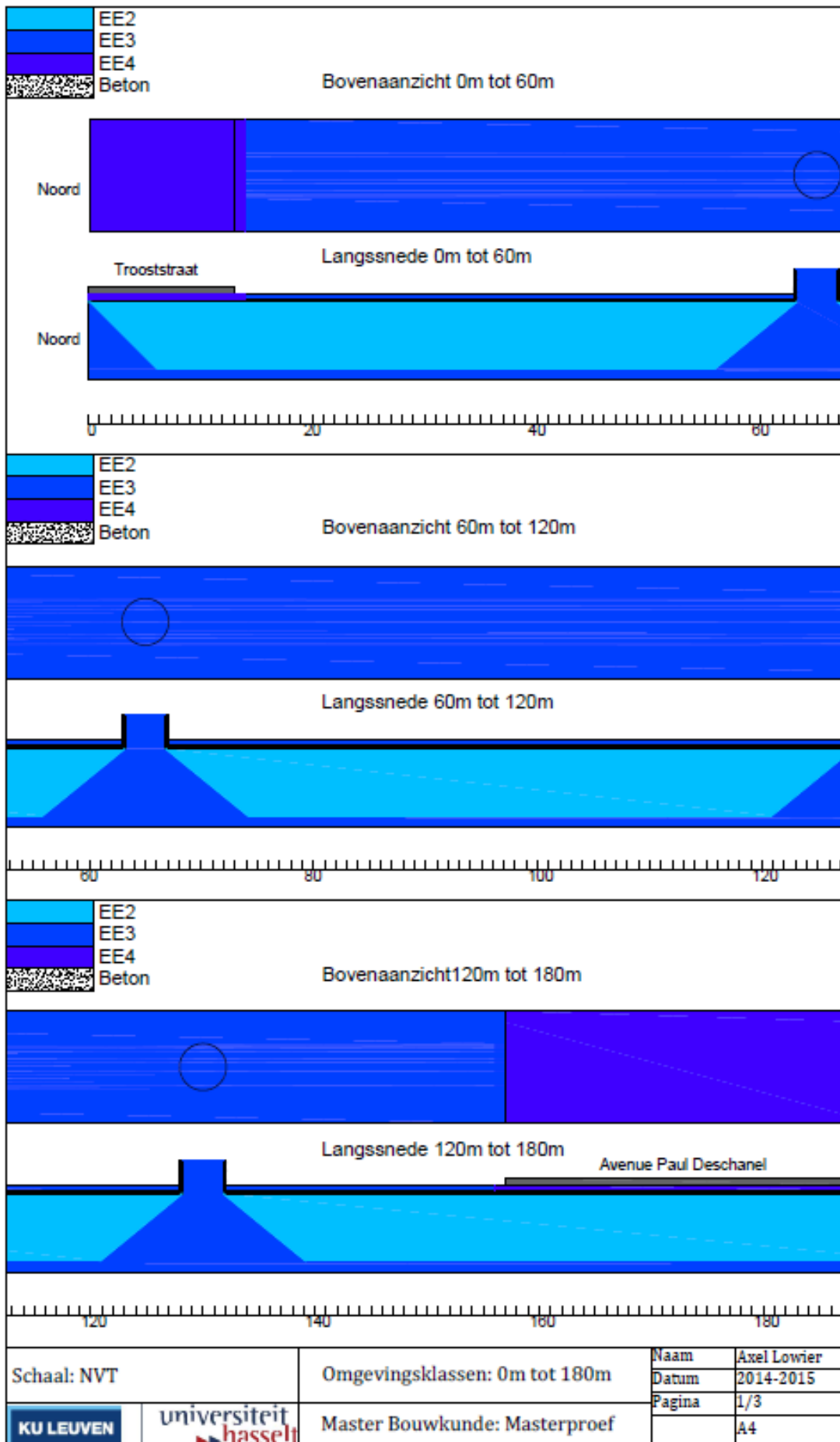
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 480m - 500m	Naam	Axel Lowier
			Datum	2014-2015
		Master Bouwkunde: Masterproef	Pagina	25/28

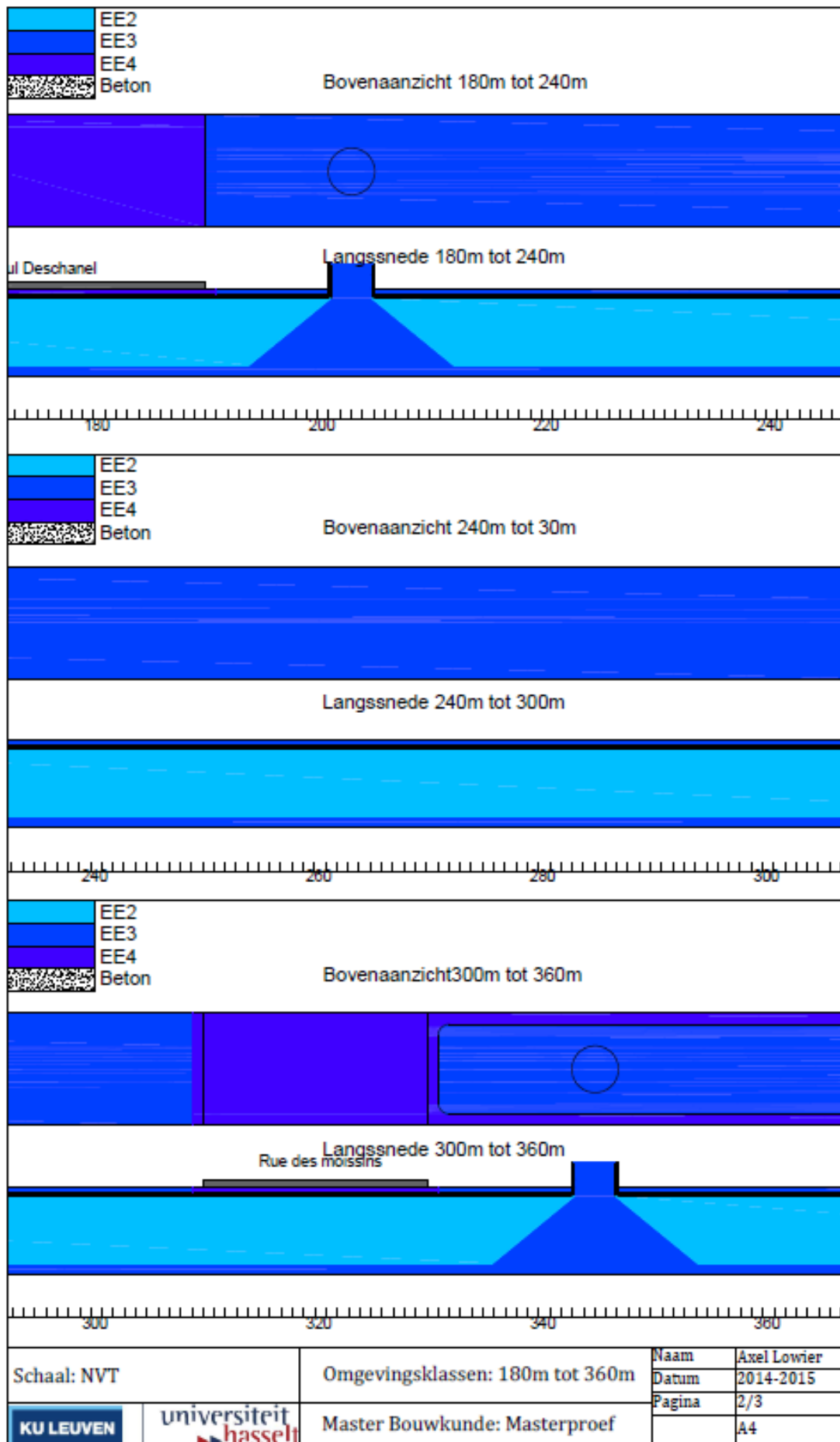
		500		505		510		515		520		
Schaal: NVT				Inspectieverslag: 500m - 520m				Naam	Axel Lowier			
								Datum	2014-2015			
								Pagina	26/28			
				Master Bouwkunde: Masterproef				A4				

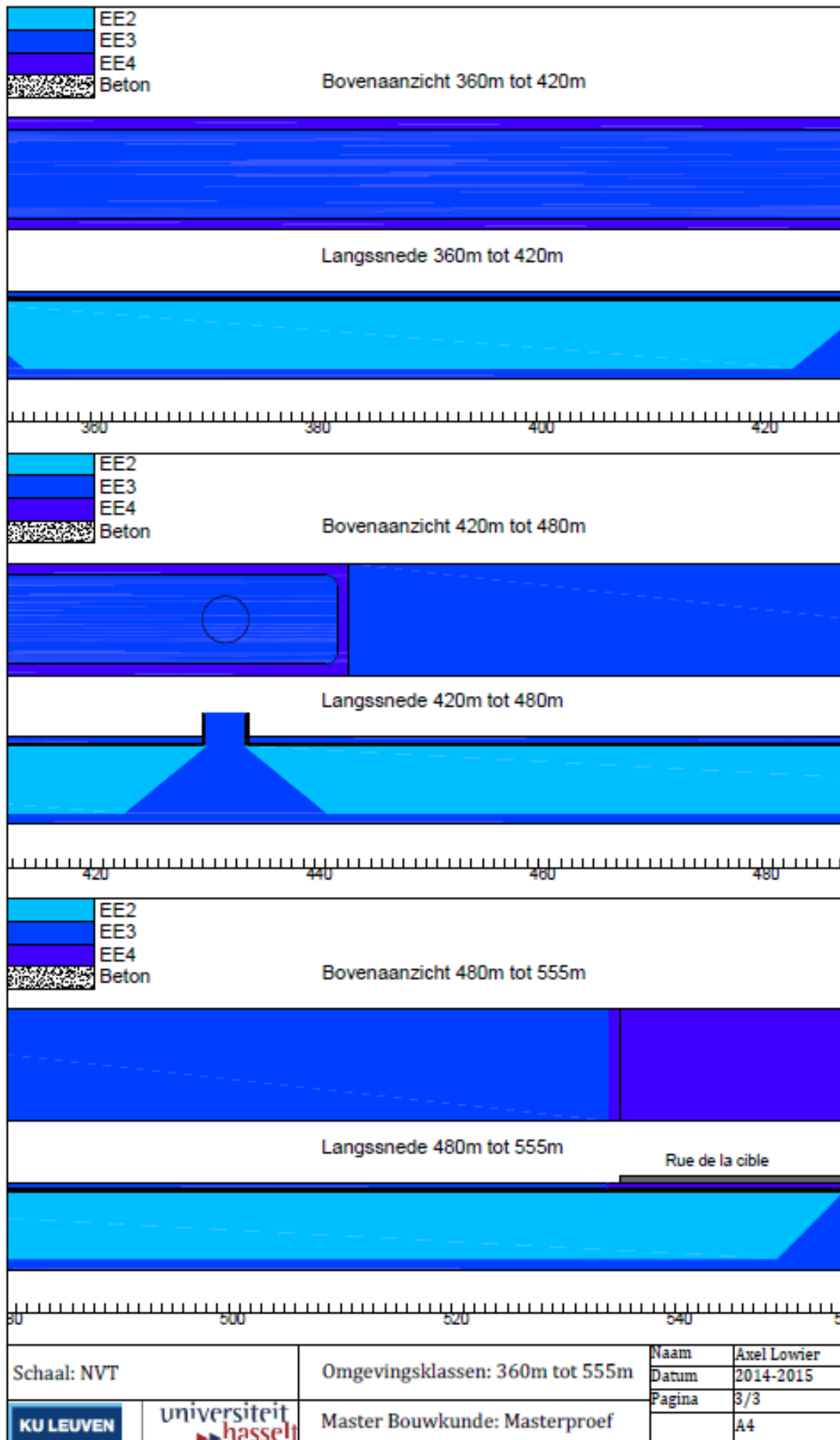
Schaal: NVT		Inspectieverslag: 520m - 540m	
		Master Bouwkunde: Masterproef	
		Naam	Axel Lowier
		Datum	2014-2015
		Pagina	27/28
			A4



Bijlage B: Omgevingsklassen







Bijlage C: Oorspronkelijke technische tekeningen

$2,10 \times 0,65 = 1,365$

Surface: m² 1,20
Prix: Frs. 8,40.

Plan n° 1.

Société Nationale des Chemins de Fer Belges.
Service de la voie.

Service spécial d'études et de construction de lignes nouvelles.

Ligne de Bruxelles (Nord) à Namur.

Communes de Schaerbeek et de S^t Josse-ten-Noode.

Établissement d'une couverture en béton armé au droit
de la place Remand Steurs entre l'extrémité du tunnel
existant et le passage supérieur de la rue des Moissons → 30

Vue en plan, élévations, coupes.

Échelles diverses.

Dessiné par l'Ingénieur soussigné,
Bruxelles, le 7 Mars 1930

Bruxelles, le 7 Mars 1930
Joint à mon n° 137 B
L'Ingénieur Principal.

Charombault

Alb. Bronn

57 6/1
17449
7/3

Approuvé,
Goldschneider,
Bruxelles, le 17 Mars 1930.
En nom de la Société,
Ingénieur des Ponts et Chaussées,
et Directeur de la Voie,
De Boelewinder des Baux.

Marquin

Accepté par le Contrepoussier soussigné.

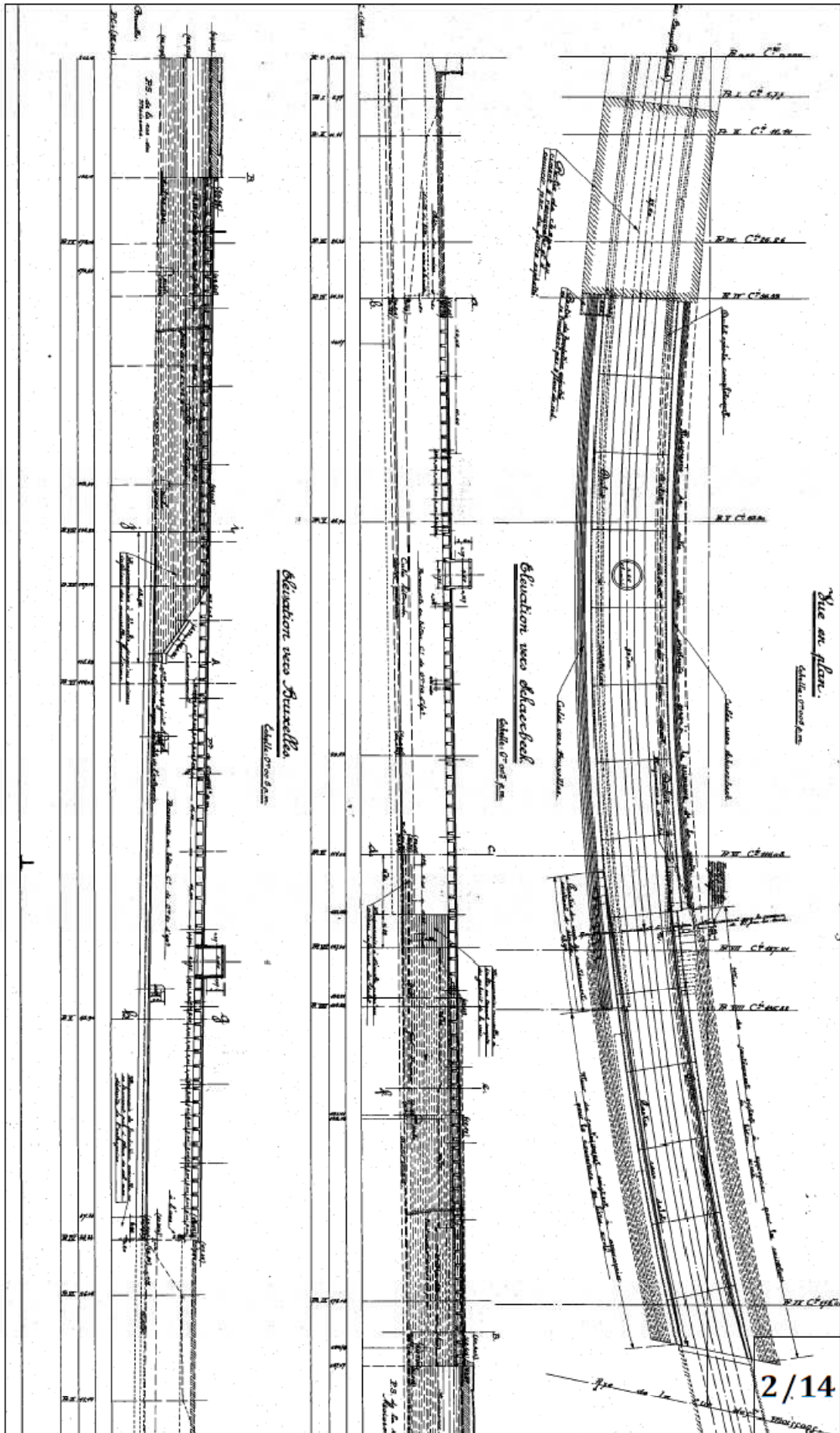
J. J. J. J.

EC



1/14

Coupe transversale normale au point B.



Vue en perspective.
Côté vers droite.

Elevation verso Schaeffelfeld.
Côté vers gauche.

Elevation verso Strasselle.
Côté vers droite.

2/14

Plan N° 3

Société Nationale des chemins de fer belges.
Nationale Maatschappij van Belgische spoorwegen

Directorat de la Rue - Bureau 414
Bestuur van de Rijn - Bureau 414

Signe de Bruxelles (Nord) à Namur
Rijn - Brussel (Noord) - Namen

Continuatie van Schiedamschedijk en de 3 Jone den Goode Gemeentegedachten en 3 Jone den Goode

Etablissement d'une couverture en béton armé au droit de
la place Armand Steuvenotte l'extrémité du tunnel
existant et le passage supérieur de la rue des Maisons.
Ligger een van beton in gewapend beton castron de plaats
Armand Steuvenotte het einde van de bestaande tunnel en de
boven begging van de Oogst Alcaat.

Plan d'ensemble, coupes transversales et longitudinales.
Samenvoeging van doorsneden en langsdoorsneden.

Scale 1:1000
Schalen 1:1000

35.11.1927

Directorat de la Rue - Bureau 414
Bestuur van de Rijn - Bureau 414

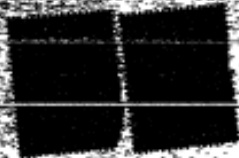
Approuvé par
L'ingénieur principal responsable
Voorgesteld door
den ondergetekende, staatscommissaris ingénieur
Bruxelles le 30.11.1927
Namur, den

C. J. F. Verpeere

R. Lesfres

Gegevens
Auteurs van de tekening
Auteurs van de tekening
Auteurs van de tekening
Auteurs van de tekening
Auteurs van de tekening

Lesfres
Verpeere



Surface: m² 0.50.
Prix: Frs 3.50.

Plan n° 2.

Société Nationale des Chemins de Fer Belges.

Service de la voie.

Service spécial d'études et de construction de lignes nouvelles.

Ligne de Bruxelles (Nord) à Namur.

Communes de Schaerbeek et de S^t Josse-ten-Noode.

Établissement d'une couverture en béton armé au droit
de la place Remand Steurs entre l'extrémité du tunnel
existant et le passage supérieur de la rue des Moissons.

Profils en travers.

K. 3659

Échelle: 0^m005 p.m.

Dessiné par l'ingénieur soussigné,
Bruxelles, le 7 Mars 1930

Bruxelles, le 7 Mars 1930
joint à mon n° 137-B
l'ingénieur Principal,

e. Hb. Pronon

Clarambaux

33-1
7

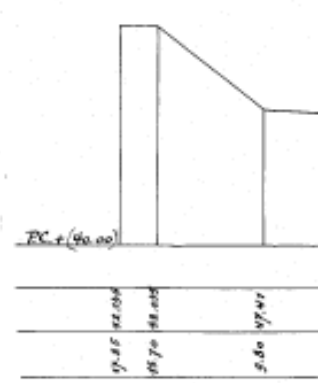
Approuvé:
Bruxelles, le 10 Mars 1930.
Des nom de la Société,
Membre de l'Administration,
et Directeur de la Soc.
De Représentation des Chemins.

Paris 33-1

17450

accepté par les contreparties homologues.

J. Janssens



2500
10^m
10^m

C. H. H. H.

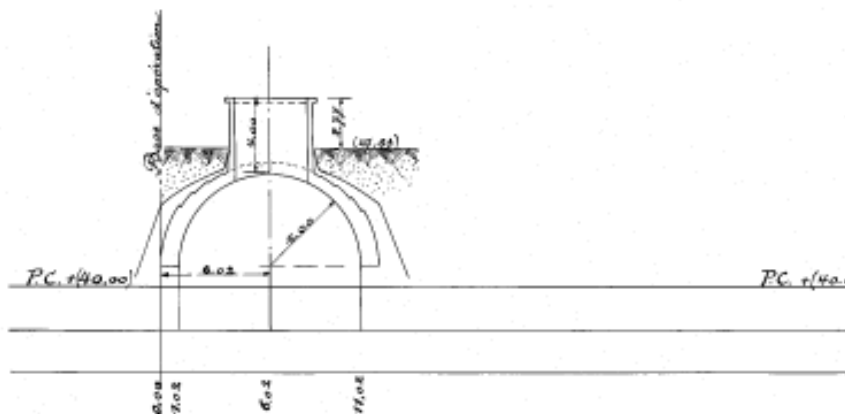
6/14

ies.

ouvelles
amut.

Code.

u droit
tunnel
Moissons



R. O. C^e 0.00

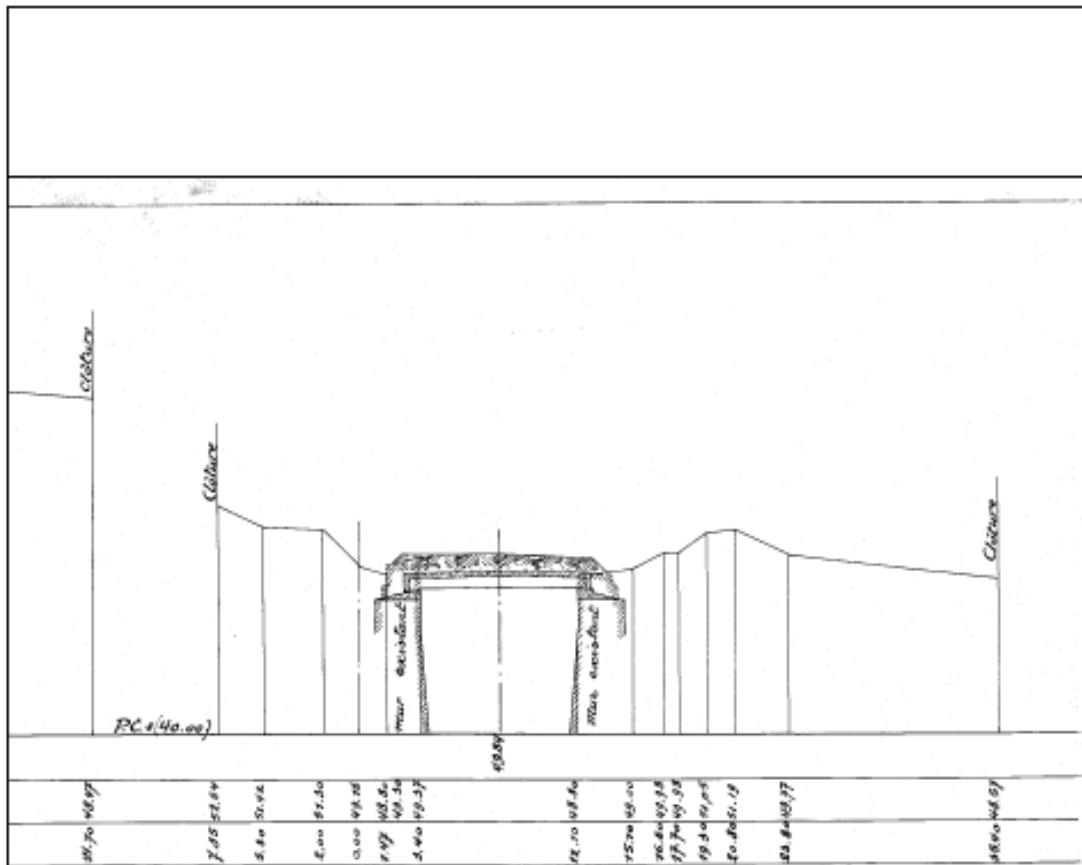
930

8

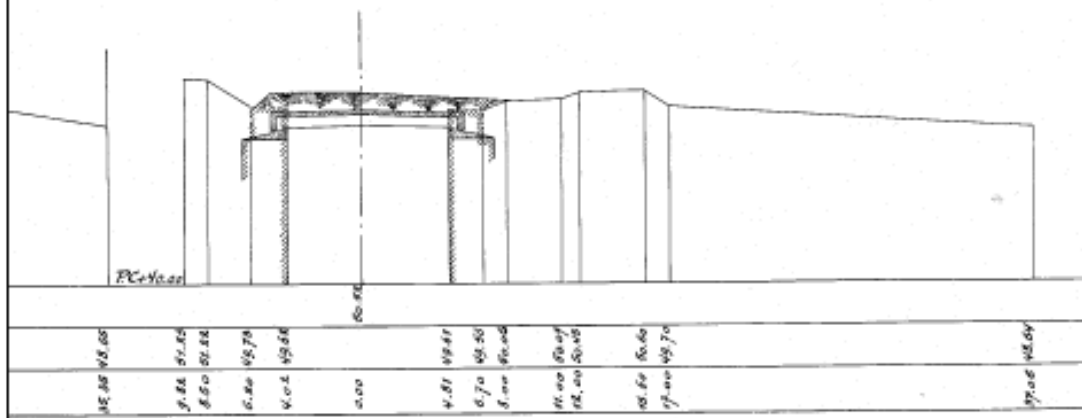


R. 1. C^e 5-77.

7/14



R. 8. C^o 135^o 82.



R. 9. C^o 178^o 08.

11/14

Surfaas: grootte: 0°30
Rijs: 6°30.

Plan N° 4

Société Nationale des chemins de fer belges
Nationale Maatschappij van de Belgische spoorwegen
Direction de la Voie - Bureau 33/1.
Bestuur van de Baan - Bureau 33/1.

Ligne de Bruxelles (Nord) à Namur. Baan Brussel (Noord) - Namen.

Communes de Schaerbeek et de St-Josse - Den-Boode - Gemeenten Schaerbeek en St-Josse-Ben-Boode

Etablissement d'une couverture en béton armé au droit de la place Armand Steurs entre l'extrémité du tunnel existant et le passage supérieur de la rue des Noëts.
Leggen van een dekvel in gewapend beton recht over de plaats Armand Steurs tusschen het einde van de bestaande tunnel en de boven brugging van de Oogst straat.

Détails des cheminées d'aérage.

Deelen van de luchtpijpen.

Vue en plan et coupes diverses.

Bovenaanzicht en verschillende doorsneden

Echelles: 0°05 et 0°10 p.m

Schalen:

Approuvé par:
l'ingénieur principal
Opgeleefd door:
den hoofdingenieur
Brussel, le 25-10-1922

Approuvé par:
l'ingénieur principal principal
Opgeleefd door:
den hoofdingenieur
Brussel, le 30-10-1922

E. J. F. Verijckere

Approuvé:
Goedgekeurd:
Brussel, le 27-11-1922
Brussel, den
Du nom de la Société
de Direction de la Voie
Nationale de Belgique
et des Chemins de Fer

R. Des Trets

B⁷ 6/1

J. Verrijckere

1/2 17452

Accepté pour les Entrepreneurs soumissionnaires, 1912

K:3657

J. Verrijckere



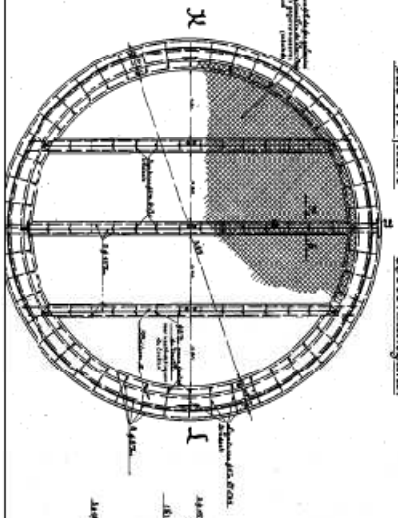
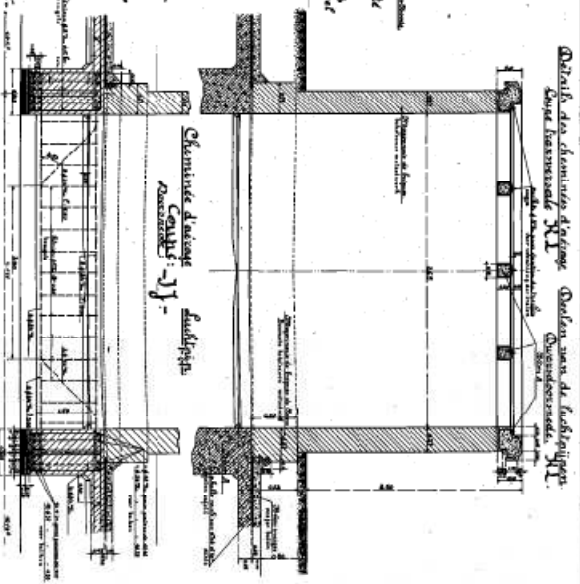
Échelle en francs
de 4 francs
Tracer in gulden
geldertraad

Plan 2614

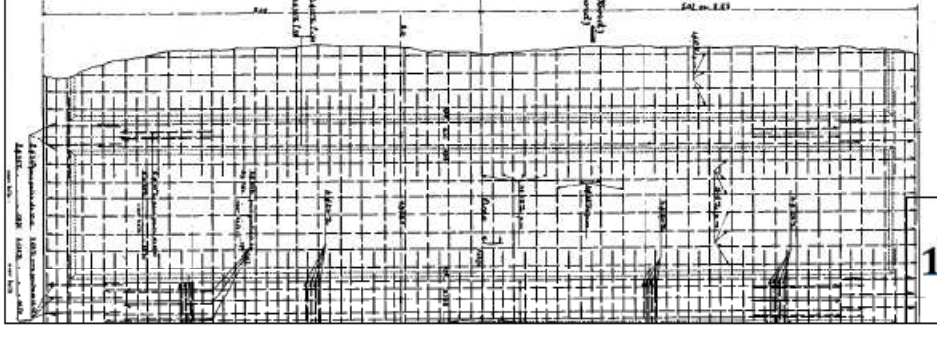
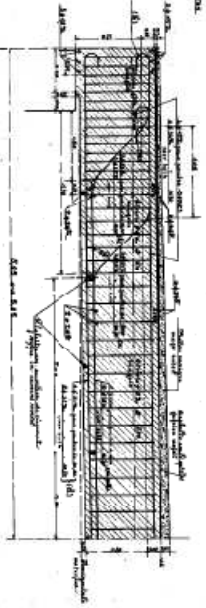
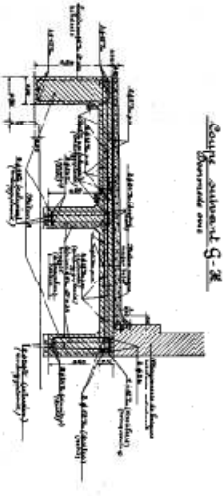
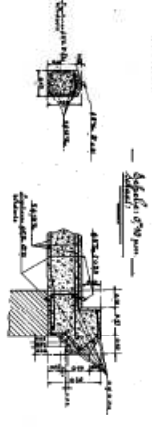
Les charnières des charnières de la charnière...
Dessiné par le Génie - Bureau 1/2
Revisé par le Génie - Bureau 1/2

Le Charnières (Charnière) Charnière.

Les charnières des charnières de la charnière...
Dessiné par le Génie - Bureau 1/2
Revisé par le Génie - Bureau 1/2



Section transversale B-A



1876/4 - 2/17452

13/14

1876/4 - 2/2 17452

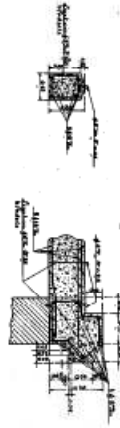
Coupe antérieur D. & B.
Dessiné par M. S.

Musée impérial
N° 1000

Reproduction de la coupe
Dessinée par M. S.

Musée impérial
N° 1000

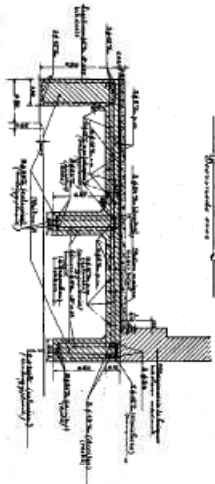
Échelle 1/100



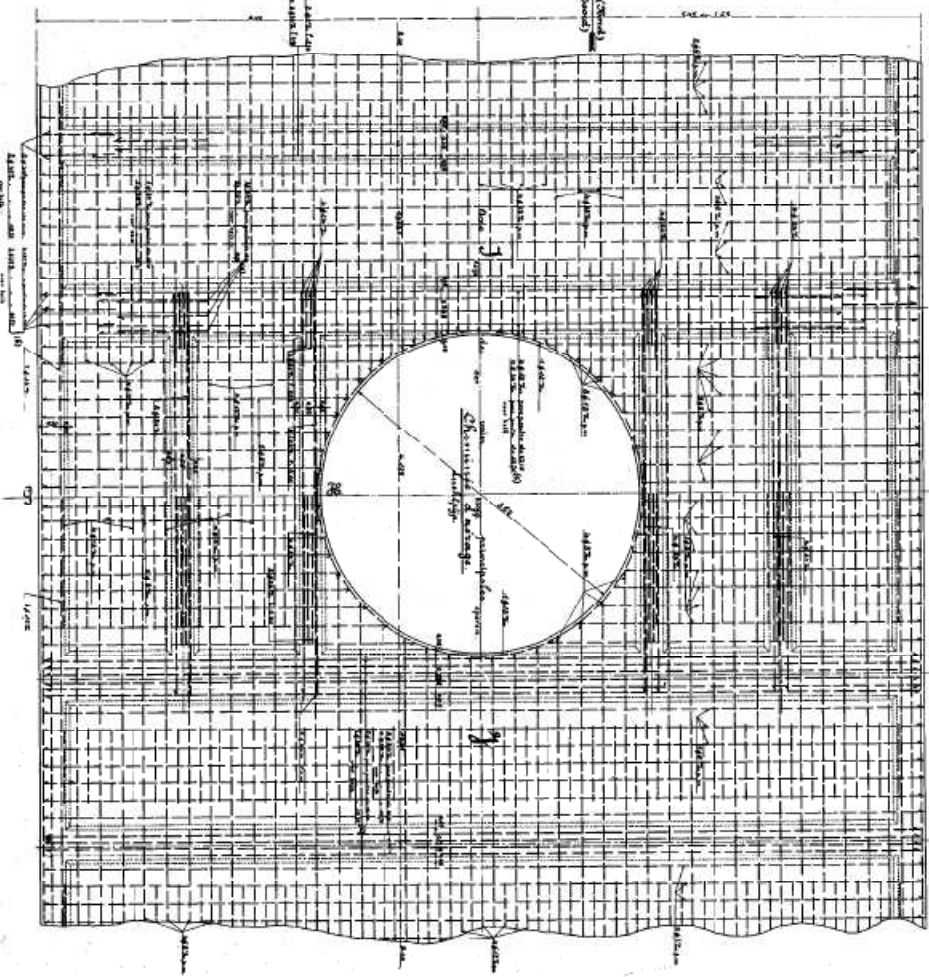
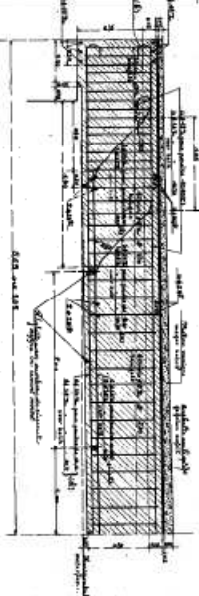
Coupe longitudinale de l'organe
Dessiné par M. S.



Coupe antérieure G. & B.
Dessiné par M. S.



1/2 Coupe longitudinale d'une partie renforcée
(Reproduction de la coupe antérieure de l'organe)
Dessiné par M. S.



Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Methodiek ter remediëring van betonpathologieën toegepast op de Deschaneltunnel in Schaarbeek

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**

Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Lowier, Axel

Datum: **1/06/2015**