



Gemaal Parksluizen, Willem Buytewechstraat 33-35 te Rotterdam

Het betonwerk van de buitengevels is op 15 en 16 augustus 2018 geïnspecteerd op de aanwezigheid van betonschade. De resultaten van het betononderzoek zijn vastgelegd in deze beknopte verslaglegging

Gemaal Parksluizen, Willem Buytewechstraat 33-35 te Rotterdam

OPDRACHTGEVER: Hoogheemraadschap Delfland
POSTBUS 3061
2601 DB Delft

Contactpersoon: De heer P. Brands
pbrands@hhdelfland.nl

Rapportage: Vogel B.V.
Fruiteniersstraat 13
3334 KA Zwijndrecht

Contactpersoon: H. Nooren

Project: a180307 / w409.0085

Datum: 30-08-2018

Versie: 1

Status: Definitief

INHOUD

1	INLEIDING.....	4
2	WIJZE VAN ONDERZOEK.....	5
3	RESULTATEN VAN DE VISUELE INSPECTIE	6
4	OVERIGE ONDERZOEKSRESULTATEN	7
4.1	Dekking.....	7
4.2	Carbonatatatie.....	7
4.3	Chloride.....	7
5	Proeven	9
5.1	Saneren	9
5.2	Herstel betonschade	9
6	Interpretatie van de onderzoeksresultaten	10
7	Conclusies	11
	BIJLAGE 1: SCHADE-OORZAKEN.....	13
	Carbonatatatie.....	13
	Indringen van chloride	15
	Wapeningscorrosie	18
	BIJLAGE 2: WAARGENOMEN BETONSCHADES IN TABELVORM	19
	BIJLAGE 3: WEERGAVE BETONSCHADE OP TEKENING	24

1 INLEIDING

Het betonwerk van de buitengevels is uitgevoerd in een plankenstructuur waarbij, op veel niet aan regen blootgestelde geveldelen, de plankennerf zichtbaar is aan het betonoppervlak.

De planken zijn destijds in reliëf aangebracht waardoor niveauverschillen tussen de delen onderling van 15 mm zijn ontstaan.

Ook de breedte van de bekistingsplanken varieert.

Op diverse plaatsen is de cementshuid aangetast waardoor grindbiggels zichtbaar worden aan het oppervlak. Op meerdere plaatsen zijn stortnaden en grindnesten ten gevolge van een onvoldoende gesloten bekisting ontstaan. Het betonoppervlak heeft een karakteristieke uitstraling en heeft een monumenten status.

In het verleden uitgevoerde reparaties zijn zichtbaar. De meest recent uitgevoerde betonreparaties tekenen zich qua kleur en structuur duidelijk, in te grote mate, af in het bestaande oppervlak.

Als gevolg van het reliëf in het betonoppervlak varieert de betondekking. Op meerdere plaatsen is de wapening zichtbaar aan het betonoppervlak en / of zijn schollen beton afgedrukt. Verwacht wordt dat de carbonatatiediepte ook sterk zal variëren. Maatregelen teneinde bijvoorbeeld de betondekking te vergroten en / of het beton te laten uitdrogen zijn om esthetische redenen en gezien het monumentale karakter niet gewenst.

Het betonwerk is visueel en door middel van afkloppen gecontroleerd op beschadigingen als gevolg van corroderende wapening.

De waargenomen schadeplaatsen zijn op de door u ter beschikking gestelde kopieën van tekeningen geregistreerd. Steekproefsgewijs zijn enkele metingen ten aanzien van carbonatatiediepte, betondekking en chloridepercentage uitgevoerd.

Bij wijze van proef zijn verschillende betonreparaties uitgevoerd teneinde de herstellingen op grond van bijvoorbeeld kleur, structuur en uitstraling te kunnen beoordelen.

Op grond van deze rapportage kan in overleg met opdrachtgever een definitief plan van aanpak en eventueel een prioriteitenlijst worden opgesteld.

Constructief onderzoek inclusief het uitvoeren van constructieve berekeningen aan de constructiedelen maken geen deel uit van het onderzoek.

2 WIJZE VAN ONDERZOEK

Om inzicht te krijgen in de werkelijke hoeveelheid schade zijn de volgende werkzaamheden verricht:

- algemene visuele inspectie van de bereikbare betonnen delen en vastlegging van de waargenomen betonschades;
- indicatieve bepaling van de dekking;
- indicatieve bepaling van de carbonatatiediepte;
- indicatieve bepaling chloride middels boorstof monster.

Voor het uitvoeren van het onderzoek is een hoogwerker ingezet. Door opdrachtgever is aangegeven dat ten tijde van het onderzoek de draagkracht van de aanwezige steigerdelen aan de waterzijde beperkt is. Om die reden is ter plaatse geen hoogwerker gebruikt is het op niet bereikbare geveldelen de hoeveelheid schade vanaf maaiveld ingeschat. Het onderzoek is uitgevoerd op 15 en 16 augustus 2018 door Vogel B.V.

3 RESULTATEN VAN DE VISUELE INSPECTIE

Vanuit een hoogwerker is, voor zover dat mogelijk was, het betonwerk visueel en door middel van steekproefsgewijs afkloppen gecontroleerd op de aanwezigheid van zichtbare schades en holklinkende betondelen welke als gevolg van corroderende wapening zijn ontstaan.

Gezien de beperkte belastbaarheid van de steigerdelen aan de waterzijde is op deze plaatsen de visuele beoordeling vanaf maaiveld niveau uitgevoerd. De resultaten zijn in de bijlage opgenomen. In totaal zijn 162 schadeplaatsen met een totale omvang van ca. 5,65 m² geregistreerd.

Ter illustratie zijn onderstaand enkele foto's opgenomen van de aangetroffen situatie. Tevens is een inventarisatie van de ingemeten betonschades opgenomen in de bijlage.



4 OVERIGE ONDERZOEKSRESULTATEN

In bijlage 1 zijn de toegepaste meetmethoden nader toegelicht, waarbij kort wordt ingegaan op de wijze waarop de desbetreffende metingen uitgevoerd worden en de manier waarop de resultaten geïnterpreteerd dienen te worden.

4.1 Dekking

De dekking is gemeten door het betonoppervlak af te tasten met een elektromagnetische veldsterktemeter. De meetwaarden worden op enkele plaatsen geverifieerd ter plaatse van blootliggende wapening.

De meetsensor van de betondekkingsmeter past qua afmeting niet in de verdiepte delen van de reliëf structuur. Waarschijnlijk is destijds in het ontwerp de betondekking afgestemd op de meest diep gelegen delen. In de praktijk is mede gezien de bouwperiode de betondekking niet volgens de huidige daarvoor geldende eisen gerealiseerd. De betondekking ter plaatse van schadeplaatsen is ter plaatse van de meest laag gelegen deel in het geprofileerde oppervlak vastgesteld tussen de 8 en 13 mm.

4.2 Carbonatatie

De carbonatatiediepte is bepaald door een vers breukvlak te besproeien met fenolftaleïne. De carbonatatiediepte varieert ter plaatse van het meest laag gelegen deel van 6 – 14 mm.

4.3 Chloride

Voor de bemonstering van het beton ten behoeve van de chloridebepalingen, is gebruik gemaakt van boorstof dat, tot op een diepte van maximaal 50 mm, met een massieve boor is verzameld.

Tabel: Gemiddelde percentages chloride op cementgewicht

Project:	<i>Parksluizen (Hoogheemraadschap Delfland)</i>		
Uitvoerder:	<i>HN</i>	<i>AR</i>	Rapportnummer: <i>4090085</i>
Datum:	<i>vrijdag 24 augustus 2018</i>		

RAPID CHLORIDE TEST

Ijkwaarden:			Voor	Na
Cementgehalte	mV	Chloridegehalte	Indicator	mV
	98,7	0,005%	Helder	99,8
	73	0,020%	Paars	73,6
	54,05	0,050%	Groen	55,7
	2,95	0,500%	Roze	3

RESULTATEN						
Meetlocatie	Diepte (mm)	Meetwaarden				Opmerkingen
		mV	Bet. Cl-%	Cem. Cl-%		
1	50mm	87,6 mV	0,0091%	0,0591%		
2	50mm	83,1 mV	0,0116%	0,0754%		
3	50mm	78,3 mV	0,0150%	0,0977%		

Kleurcodering:



Weinig chloride

Veel chloride

Er is sprake van een aanmerkelijk verhoogd chloridegehalte indien de meetwaardes de 0,3% op het cementgewicht overschrijden. Hierboven neemt de kans op het optreden van corrosie door de aanwezigheid van chloriden steeds verder toe.

5 Proeven

5.1 Saneren

Bij wijze van proef zijn een tweetal vormen van saneren toegepast. Immers ten behoeve van het uitvoeren van betonherstel dient het beton ter plaatse van de schadeplaats in voldoende mate te worden gesaneerd. Proefstuk 1 en 2 zijn door middel van HD water 2500 bar tot achter de wapening ontdaan van slechte betondelen.

Voordelen van HD water 2500 bar ten opzichte van uithakken schadeplaatsen.

- Geringe kans op gevolgschade waarbij ook ter plaatse van aangrenzende delen stukken beton afspringen.
- Prima tot achter en rondom de wapening betondelen te verwijderen.
- Grindbiggels ter plaatse van randen reparatieplaats blijven in tact.
- Geen verdere voorbehandeling zoals bijvoorbeeld stralen, boucharderen etc. nodig.
- Wapening wordt niet beschadigd en is ontdaan van losse roestdelen.

Nadelen van HD water 2500 bar ten opzichte van uithakken schadeplaatsen.

- Opvang en afvoer rest water (met name ten aanzien van WVO).
- Weg spattend restmateriaal (zone ca. 6 m1 mag niet betreden worden gedurende applicatie)
- Intensieve maatregelen nodig in relatie tot opvang restmateriaal nabij het water en openbare weg, beglazing etc.
- Bereikbaarheidsvoorziening eist speciale maatregelen/voorzieningen.

5.2 Herstel betonschade

In het verleden zijn herstellingen verricht waarbij in de nog niet uitgeharde reparatiemortels (standaard kleur) grindkorrels zijn ingedrukt, teneinde de uitgewassen grind structuur na te bootsen.

Er zijn een 6-tal proeven uitgevoerd waarbij, afhankelijk van het uiterlijk van de directe omgeving van de reparatieplaatsen, kleurstoffen en toeslag materiaal aan de reparatiemortel zijn toegevoegd. De reparatieplaatsen zijn na voldoende uitharding uitgewassen.

Let op: deze wijze van betonherstel voldoet niet aan de regelgeving volgens de CUR 118: 2015 "specialistische instandhoudtechnieken – repareren beton".

6 Interpretatie van de onderzoeksresultaten

Het totale betonoppervlak bedraagt ca. 1200 m². In relatie tot het totale betonoppervlak is de werkelijke hoeveelheid schade procentueel gezien beperkt. Volgens uw informatie is rond 1990 intensief betonherstelwerk verricht.

Aanwezige schade (inclusief de tussentijdse uitgevoerde reparaties zonder toepassing van toeslagmateriaal in de toplaag) zijn in ongeveer 25-30 jaar ontstaan. Monumentenzorg eist dat de uitstraling van de gevel minimaal gewijzigd wordt. Toepassing van extra dekkingslagen of verflagen etc. is derhalve onbespreekbaar.

Mede door de toepassing van een houten bekisting en mogelijk niet volledige afsluitende bekistingsnaden is cement water tijdens het beton storten ontweken. De grunderige structuur die hierdoor is ontstaan, mag visueel niet worden aangewerkt. Dergelijke tekortkomingen hebben een ongunstig effect op de werkelijke betondekking en bescherming van de wapening. Carbonatatie is een voortschrijdend proces in de tijd. Het ontstaan van nieuwe betonschades is derhalve aannemelijk. Bovendien dient bij herstel van monumentaal beton worden nagestreefd dat zoveel mogelijk van het bestaande materiaal (beton) wordt gespaard. Het volledig vrijmaken van wapening tot ongecorrodeerd staal is daardoor vaak beperkt.

7 Conclusies

Ten aanzien van het behoud van het monumentale pand stellen wij u voor de zichtbare betonschades plaatselijk te repareren en in uw onderhoudsbegroting rekening te houden met reserveringen voor de toekomst.

De mogelijkheid bestaat om voorafgaande aan het betonherstel het beton te reinigen. De uit te voeren reparaties kunnen worden aangepast aan de kleur van het gereinigde betonwerk. Wanneer in een later stadium wordt gekozen voor het reinigen van het betonwerk zullen de uitgevoerde reparaties qua kleur afwijken.

BIJLAGEN

BIJLAGE 1: SCHADE-OORZAKEN

Carbonatatatie

- *Inleiding*

Het wapeningsstaal in gezond beton is omhuld door een passiveringslaag dat het staal voor verdere corrosie behoedt. De passiveringslaag heeft een complexe opbouw en variabele samenstelling. Ter vereenvoudiging stellen we de passiveringslaag voor als van hematiet [α -Fe₂O₃; 'roest']. Hematiet is stabiel ('onoplosbaar') bij pH $\geq$ 10.5; bij een pH $\leq$ 10 wordt bij voldoende vocht- en zuurstofaanbod door corrosie de wapening aangetast, en uiteindelijk kan de bouwkundige stabiliteit van de constructie in gevaar komen.

- *De carbonatatiereactie*

Een belangrijk hoofdbestanddeel van de betonsteen is het mineraal portlandiet [Ca(OH)₂] dat een weinig wateroplosbaar is. Het buffert de hoge alkaliteit (pH $\geq$ 13.5) van het beton, samen met ondergeschikt aanwezig NaOH en KOH. Door de porositeit en permeabiliteit van het beton kan koolzuur [CO₂] uit de lucht indringen, en een trage reactie aangaan met de in het poriewater opgeloste portlandiet:



portlandiet + koolzuur $\rightarrow$ calciet/aragoniet (Ca-carbonaat) + water.

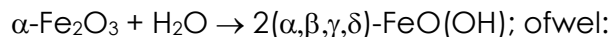
Het proces bestaat echter feitelijk uit een aantal deelreacties. Door reactie (1) wordt opgeloste portlandiet weggevangen uit de oplossing, zodat nieuw materiaal uit de cementsteen kan oplossen. Uiteindelijk zal dus de alle portlandiet volgens (1) omgezet worden. Ook andere mineralen in de cementsteen worden omgezet door carbonatatatie; zij het dat dit veel langzamer gebeurt dan portlandiet door hun veel lagere concentratie in het poriewater.

Het in reactie (1) gevormde Ca-carbonaat is slecht oplosbaar in water en pH-neutraal. Netto daalt de alkaliteit van het beton tot pH $\leq$ 10, of zelfs lager. Het neerslaan van carbonaat in de poriën heeft als neveneffect dat de poriedoorsnede afneemt. Daarmee nemen de porositeit en permeabiliteit geleidelijk af, zodat er een theoretische limiet bestaat aan de voortgang van de carbonatatatie.

De carbonatatiediepte is lokaal bepaald door laterale variaties in porositeit, permeabiliteit, en betonkwaliteit in de breedste zin van het woord. De gemiddelde carbonatatiediepte als functie van de tijd is te benaderen met de empirische wortel-t-formule: $d = a \cdot \sqrt{t}$, met d =carbonatatiediepte [mm], a ='betonkwaliteitsconstante' [mm·j⁻¹], en t =tijd in jaren [j]. Het rekenmodel is wat aan de pessimistische kant; dit komt echter de veiligheid ten goede.

- *Wapeningscorrosie*

Als de carbonatatatie voortschrijdt tot aan of achter de wapening wordt het hoog-alkalische milieu in de omgeving van de wapening zuurder. Hierdoor kunnen corrosieproblemen optreden. De hematietlaag om de wapening wordt door de lagere pH instabiel, en zet om volgens de reactievergelijking:



hematiet + water $\rightarrow$ 2 limoniet.

Het wapeningsstaal is niet meer beschermd door een passiveringslaag en kan corroderen. Het ware corrosieproces is door de complexe samenstelling van de passiveringslaag meer gecompliceerd, en bestaat uit een groot aantal deelreacties waarin water en zuurstof [O_2] eveneens een rol spelen. Het gevormde limoniet is een poreus (dus niet afsluitend en passiverend!) mengsel van een aantal ijzeroxyhydroxiden met verschillende kristalstructuren ($\alpha,\beta,\gamma,\delta$), met een zeker gehalte aan geadsorbeerd water. De gevormde corrosieproducten hebben op molaire basis een tot viervoudig volume ten opzichte van het oorspronkelijke ongecorrodeerde staal. Doordat de reactieproducten niet goed kristallijn zijn en een hoge porositeit bezitten, kan het volume wel tienvoudig zijn. Daardoor neemt het volume van corroderende wapening sterk toe. De dekking scheurt en maakt de wapening nog beter voor water en zuurstof uit de lucht toegankelijk.

- *Uiteindelijke schade*

Voor het uiteindelijk optreden van door carbonatatatie-geïnitieerde corrosie dient aan twee voorwaarden te worden voldaan: 1) $\text{pH} \leq 10$ om de passiveringslaag instabiel te maken, en 2) voldoende vocht- en zuurstofaanbod. Zonder deze laatste twee stoffen kan limoniet zich niet vormen.

Waar de carbonatatiediepte groter is dan de dekking ligt het wapeningsstaal in gecarbonateerd beton, en wordt het door water en zuurstof gecorrodeerd. Door de optredende scheurvorming wordt het staal nog beter toegankelijk gemaakt, en kan het corrosieproces nog vlotter verlopen. De roest is typisch licht van kleur en treedt soms uit aan het betonoppervlak; de kenmerkende roestsporen zijn in dat geval lichtbruin. Scheuren die het wapeningspatroon volgen zijn typerend voor carbonatatieschade. Bij verdere ontwikkeling van de corrosie wordt de dekking afgedrukt, en komen betonschollen los te liggen. Deze losgedrukte betonschollen kunnen worden opgespoord door afkloppen met een hamer; losliggende gedeelten klinken hol.

De constructie verliest uiteindelijk haar vermogen om trekspanningen op te kunnen nemen door reductie van de doorsnede van de wapeningsstaven, waardoor de veiligheid in het geding kan komen. Het is tevens niet ondenkbaar dat van consoles, gevels, of uitkragende platen losgedrukte betonschollen afvallen, en zodoende secundaire schade veroorzaken.

Indringen van chloride

- *Inleiding*

In gezond beton is wapeningsstaal omhuld door de zogenaamde passiveringslaag (ter vereenvoudiging voorgesteld als een laag van hematiet [$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$]) die het staal voor verdere corrosie behoedt. Hematiet is onoplosbaar in waterige oplossingen van $\text{pH} \geq 10.5$. De stabiliteit van hematiet wordt echter beïnvloed door opgelost chloride [Cl_{aq}]. In gecarbonateerd, chloride-vrij beton kan bij $\text{pH} \leq 10$ de wapening door corrosie worden aangetast; deze pH-grens ligt in chloride-houdend beton beduidend hoger. Experimenteel is gevonden dat de verhouding $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ kleiner moet zijn dan 0,6 voor instandhouding van de passiveringslaag. De concentratie OH^- -ionen is eenvoudig te meten (pH gerelateerd); echter de chloride-ionenconcentratie is niet eenvoudig meetbaar.

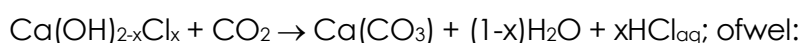
- *Chloride in beton*

Beton kan in mindere of meerdere mate chloridehoudend zijn door verontreinigingen in het cement en/of de toeslagstoffen (zeezand, zeegrind), of indringen van dooizouten, zeewater in de spatzone, danwel rookgasen afkomstig van PVC-verbranding (brandschade!). Vroeger werd ook wel calciumchloride aan beton toegevoegd ter versnelling van de verharding. Het chloride in verontreinigde grondstoffen heeft hetzelfde effect. Chloride dat bij de verharding reeds in het mengsel aanwezig is, wordt in de gehydrateerde cementmineralen ingebouwd, en is dus niet 'vrij'.

Het chloride is aanwezig in het poriewater, dat in dynamisch (bindings-) evenwicht verkeert met de betonsteen in het algemeen, en portlandiet [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] in het bijzonder. Portlandiet is een weinig oplosbaar in water (relatief goed), en verleent beton zijn alkaliteit (rond pH 13). De oplosbaarheid van portlandiet wordt door chloride positief beïnvloed.

De hydroxide [OH^-] in portlandiet kan deels door chloride worden vervangen; het Cl^- wordt met name in het portlandiet en in hydrocalumiet [$\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH},\text{Cl})_{12} | (\text{CO}_3)$] vastgelegd. Samenvattend: als versneller bijgemengd chloride wordt gedurende de verharding gebonden in hydraatmineralen; ingedrongen chloride wordt achteraf gebonden door rekristallisatie via het dynamisch evenwicht met het poriewater.

Doordat beton altijd een zekere porositeit en permeabiliteit bezit, kan koolzuur [CO_2] uit de lucht indringen. Er vindt een langzame reactie plaats:



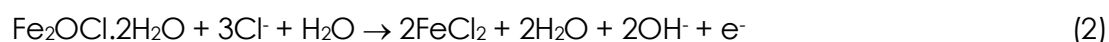
Dit is in wezen een gemodificeerde carbonatatiereactie. Voor hydrocalumiet kan een soortgelijke reactie opgeschreven worden. De reacties kunnen gebonden, niet 'vrij', chloride beschikbaar maken voor corrosie; het mechanisme is in staat gebleken een initieel ongevaarlijk chloridegehalte tot boven een zekere 'corrosiedrempel' te kunnen tillen.

Met nadruk wordt gesteld dat carbonatatie geen randvoorwaarde is voor het optreden van chloride-schade, al kan carbonatatie wél een versterkend effect hebben.

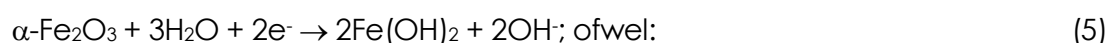
- *Wapeningscorrosie*

De sterke plaatsgebondenheid van chloride-geïnitieerde corrosie is met name te wijten aan de intrinsieke heterogeniteit van beton, en eventueel aan het ongelijkmatig indringen van chloride. Lokale variaties in het chloride-aanbod aan de passiveringslaag zijn aanleiding tot het ontstaan van domeinen met verschillende elektrochemische eigenschappen (anodes en kathodes).

Het chloride-houdende poriewater verbindt als elektrolyt deze domeinen, en dwingt de wapening plaatselijk als kathode, en elders als anode te reageren. Er ontstaan dus elektrochemische macrocellen in het beton. Op de anodeplaatsen treedt onder voldoende vochtanbod zeer snelle aantasting van de passiveringslaag op volgens de reacties:



De situatie weergegeven door vergelijking (1) geeft het omslagpunt aan waarbij de passieve film instabiel wordt. De film wordt omgezet in ijzerchloride volgens (2), waarna het ijzerchloride in oplossing gaat (3). De ijzerionen worden omgezet in (mobiel) ijzerhydroxide (4). De totaal reactie wordt hiermee:



De chloride heeft hierin een katalytische werking en wordt dus niet verbruikt. Het onderliggende wapeningsstaal komt nu snel bloot te liggen. Dit staal wordt nu niet meer door een passieve film beschermt. Het dan optredende corrosieproces verloopt via een aantal deelreacties:



IJzerionen gaan bij dit corrosieproces in oplossing (6) en (7), waarbij chloride weer als katalysator dienst doet. De ijzerionen worden elders, maar meestal dichtbij de anodeplaats, omgezet in ijzerhydroxide (8). Hierbij daalt de pH plaatselijk zeer sterk. Bij de hoge pH gaat het ijzerhydroxide in oplossing en diffundeert het ijzerion weg om elders bij hogere pH weer ijzerhydroxide te vormen (bijvoorbeeld aan het betonoppervlak). Het ijzerhydroxide reageert met zuurstof tot roest.

Aangezien de hoge pH die ontstaat in reactie (8) zeer plaatsgebonden is, ontstaat er een lokaal zeer corrosief milieu (hoge pH en chloride-ionen). Voor het bewaren van elektroneutraliteit bij de vorming van de H^+ -ionen worden negatief geladen ionen (zoals chloride-ionen) selectief aangetrokken. Hierdoor wordt het corrosieproces versneld. Er ontstaat een putvormige aantasting van het wapeningsstaal door het plaatselijk zeer snel oplossen van het staal.

Anders dan bij carbonatatie is chloride-geïnitieerde corrosie niet per sé inherent aan een beton- $pH \leq 10$, al kan de pH lokaal (op de corrosieplaats) wel degelijk zeer laag zijn (tot $pH \leq 5$!). IJzerhydroxide lost gemakkelijk op in dit zure poriewater. Door afvoer van de corrosieprodukten blijft volumetoename van de wapening beperkt. Opeenhoping van corrosieprodukten met uiteindelijk scheurvorming en afdrukken van de dekking is dus veel geringer dan bij carbonatatie-geïnitieerde corrosie (bij gelijk blijvende hoeveelheid omgezet staal). De ernst van de corrosie voor de constructieve integriteit is echter bij chloride-geïnitieerde corrosie veel groter dan bij carbonatatie-geïnitieerde corrosie (bij gelijk blijvende hoeveelheid omgezet staal).

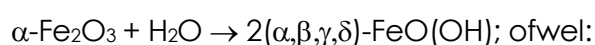
- *Uiteindelijke schade*

Anodeplaatsen zijn typisch veel kleiner dan de kathodeplaatsen. De karakteristieke corrosievorm is daarom zeer lokaal en diep (zogenaamde putcorrosie). De doorsnede van de wapening wordt daarbij door de corrosieputten plaatselijk sterk gereduceerd, waardoor een kerfwerking ontstaat. Als de corrosie ongehinderd voortschrijdt, kan de veiligheid van een constructie in gevaar komen, met name indien het een voorspansysteem betreft.

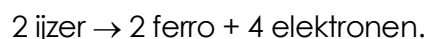
De ijzerrijke oplossing, gevormd in de corrosieput, kan aan het oppervlak uittreden via scheuren. Daarbij ontstaan voor chloride-schade kenmerkende donkerbruine tot zwarte roestsporen en -vlekken. Ook de roest zelf, wanneer zichtbaar gemaakt door weghakken van de dekking, is donker van kleur. De waarschuwendende werking die bij carbonatatie-geïnitieerde wapeningscorrosie ontstaat door afdrukken van betonschollen blijft bij chloride-geïnitieerde wapeningscorrosie vaak achterwege.

Wapeningscorrosie

Normaliter is wapeningsstaal in gezond beton voorzien van een zeer dun ($\approx 10^{-9}\text{m}$) oxyde-hydroxide-huidje met een zeer complexe opbouw. De samenstelling verloopt geleidelijk op nanometer-schaal van 'gedegen ijzer' tot ferrihydroxide $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ (ter vereenvoudiging wordt dit in onderstaande toelichting voorgesteld als zeer fijnkorrelig hematiet $[\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3]$). Dit huidje vormt de zogenaamde 'passiveringslaag', dat het wapeningsstaal behoedt voor verdere corrosie. De stabiliteit van hematiet is afhankelijk van de pH alsmede van de in het poriewater opgeloste stoffen. Een door carbonatatie en/of chloride instabiel geworden passiveringslaag zet om naar een mengsel van oplosbare ijzeroxyden en -hydroxyden volgens de reactie:



Deze reactie is een tussenreactie die optreedt vóór de eigenlijke corrosiereactie van het staal met zuurstof en water. Afhankelijk van de samenstelling van het aanwezige (porie-) water precipiteren de reactieproducten al dan niet ter plaatse. Het staal corrodeert volgens een elektrochemische reductiereactie waarbij tussen de reactanten elektronen uitgewisseld worden. Het betonstaal lost op volgens de reactie:



Deze reactie waarbij elektronen vrijkomen, vindt plaats aan een anodeplaats. Elders aan de wapening vindt een complementaire oxydatie-reactie plaats, welke kan worden weergegeven door:



Deze reactie vindt plaats aan kathodeplaatsen van het wapeningsstaal en verbruikt elektronen. Netto worden door reactie (1) evenveel elektronen geproduceerd als er door reactie (2) geconsumeerd worden. De deelpotentialen van deze reacties kunnen gemeten worden. Corrosie van de wapening kan dan ook worden opgespoord door de activiteit van de reacties te bepalen met behulp van elektrische potentiaalmetingen.

De aanwezigheid van water is een bindende randvoorwaarde voor het optreden van corrosie. Eventueel aanwezig chloride fungeert bij corrosie als katalysator: het versnelt de reactie aanzienlijk, maar wordt zelf niet verbruikt. Ook andere elementen kunnen een katalytische danwel inhibiterende invloed op de corrosiereacties hebben.

BIJLAGE 2: WAARGENOMEN BETONSCHADES IN TABELVORM

Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	1	0,3	0,15	0,05	0,045	0,00225	2,25
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	1	0,2	0,15	0,05	0,03	0,0015	1,5
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	1	0,1	0,1	0,05	0,01	0,0005	0,5
1	Noord	Hoofdgebouw	Erker	1	0,05	0,05	0,05	0,0025	0,000125	0,125
1	Noord	Hoofdgebouw	Erker	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
1	Noord	Hoofdgebouw	Erker	1	0,2	0,15	0,05	0,03	0,0015	1,5
1	Noord	Hoofdgebouw	Kozijn	1	0,25	0,1	0,05	0,025	0,00125	1,25
1	Noord	Hoofdgebouw	Kozijn	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
1	Noord	Hoofdgebouw	Kozijn	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	1	0,25	0,1	0,05	0,025	0,00125	1,25
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	1	0,3	0,2	0,05	0,06	0,003	3
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	1	0,4	0,3	0,05	0,12	0,006	6
1	Noord	Hoofdgebouw	Wand	2	0,15	0,1	0,05	0,015	0,0015	1,5
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		15				0,44	0,02	22,63

Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,1	0,05	0,05	0,005	0,00025	0,25
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,1	0,05	0,05	0,005	0,00025	0,25
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,25	0,35	0,05	0,0875	0,004375	4,375
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Hoofdgebouw	Kozijn	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Hoofdgebouw	Wand	1	0,3	0,15	0,05	0,045	0,00225	2,25
2	West	Hoofdgebouw	Kozijn	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Hoofdgebouw	Borstwering trap	4	0,15	0,1	0,05	0,015	0,003	3
2	West	Hoofdgebouw	Borstwering trap	1	0,2	0,2	0,05	0,04	0,002	2
2	West	Hoofdgebouw	Borstwering trap	2	0,1	0,05	0,05	0,005	0,0005	0,5
2	West	Hoofdgebouw	Borstwering trap	2	0,15	0,1	0,05	0,015	0,0015	1,5
2	West	Hoofdgebouw	Borstwering trap	1	0,55	0,1	0,05	0,055	0,00275	2,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	2,65	0,15	0,05	0,3975	0,019875	19,875
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,1	0,1	0,05	0,01	0,0005	0,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,6	0,1	0,05	0,06	0,003	3
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,7	0,1	0,05	0,07	0,0035	3,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,1	0,1	0,05	0,01	0,0005	0,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,5	0,1	0,05	0,05	0,0025	2,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,2	0,15	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,7	0,1	0,05	0,07	0,0035	3,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,2	0,15	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,2	0,15	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,9	0,15	0,05	0,135	0,00675	6,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,35	0,1	0,05	0,035	0,00175	1,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,05	0,05	0,05	0,0025	0,000125	0,125
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,3	0,25	0,05	0,075	0,00375	3,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,6	0,1	0,05	0,06	0,003	3
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,35	0,1	0,05	0,035	0,00175	1,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,6	0,1	0,05	0,06	0,003	3
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,6	0,1	0,05	0,06	0,003	3
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,6	0,1	0,05	0,06	0,003	3
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,7	0,1	0,05	0,07	0,0035	3,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,1	0,1	0,05	0,01	0,0005	0,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	1,1	0,1	0,05	0,11	0,0055	5,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,5	0,1	0,05	0,05	0,0025	2,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,2	0,1	0,05	0,02	0,001	1
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,6	0,1	0,05	0,06	0,003	3
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
2	West	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		61				2,42	0,12	124,13

Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,3	0,05	0,05	0,015	0,00075	0,75
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,2	0,1	0,05	0,02	0,001	1
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,05	0,05	0,05	0,0025	0,000125	0,125
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,1	0,1	0,05	0,01	0,0005	0,5
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,3	0,05	0,05	0,015	0,00075	0,75
3	Zuid	Hoofdgebouw	Wand	1	0,1	0,05	0,05	0,005	0,00025	0,25
3	Zuid	Bordes	Borstwering	1	0,2	0,15	0,05	0,03	0,0015	1,5
3	Zuid	Trap	Trap	1	0,2	0,1	0,05	0,02	0,001	1
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		10				0,15	0,01	7,38

Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
4	Oost	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,15	0,05	0,0225	0,001125	1,125
4	Oost	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
4	Oost	Hoofdgebouw	Wand	1	0,2	0,1	0,05	0,02	0,001	1
4	Oost	Hoofdgebouw	Wand	1	0,4	0,2	0,05	0,08	0,004	4
4	Oost	Hoofdgebouw	Wand	1	0,25	0,1	0,05	0,025	0,00125	1,25
4	Oost	Hoofdgebouw	Wand	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
4	Oost	Hoofdgebouw	Wand	1	0,1	0,1	0,05	0,01	0,0005	0,5
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,1	0,05	0,05	0,005	0,00025	0,25
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,05	0,05	0,05	0,0025	0,000125	0,125
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,5	0,1	0,1	0,05	0,005	5
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,1	0,05	0,05	0,005	0,00025	0,25
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	2	0,2	0,05	0,05	0,01	0,001	1
4	Oost	Trap	Borstwering	1	0,5	0,1	0,05	0,05	0,0025	2,5
4	Oost	Trap	Borstwering	1	0,35	0,1	0,05	0,035	0,00175	1,75
4	Oost	Trap	Borstwering	1	0,2	0,1	0,05	0,02	0,001	1
4	Oost	Trap	Trap	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,25	0,1	0,05	0,025	0,00125	1,25
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,6	0,2	0,05	0,12	0,006	6
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,3	0,2	0,05	0,06	0,003	3
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,9	0,2	0,05	0,18	0,009	9
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,35	0,2	0,05	0,07	0,0035	3,5
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,25	0,2	0,05	0,05	0,0025	2,5
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,25	0,2	0,05	0,05	0,0025	2,5
4	Oost	Bijgebouw	Wand, prefab	1	0,15	0,2	0,05	0,03	0,0015	1,5
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		25				0,98	0,052	52

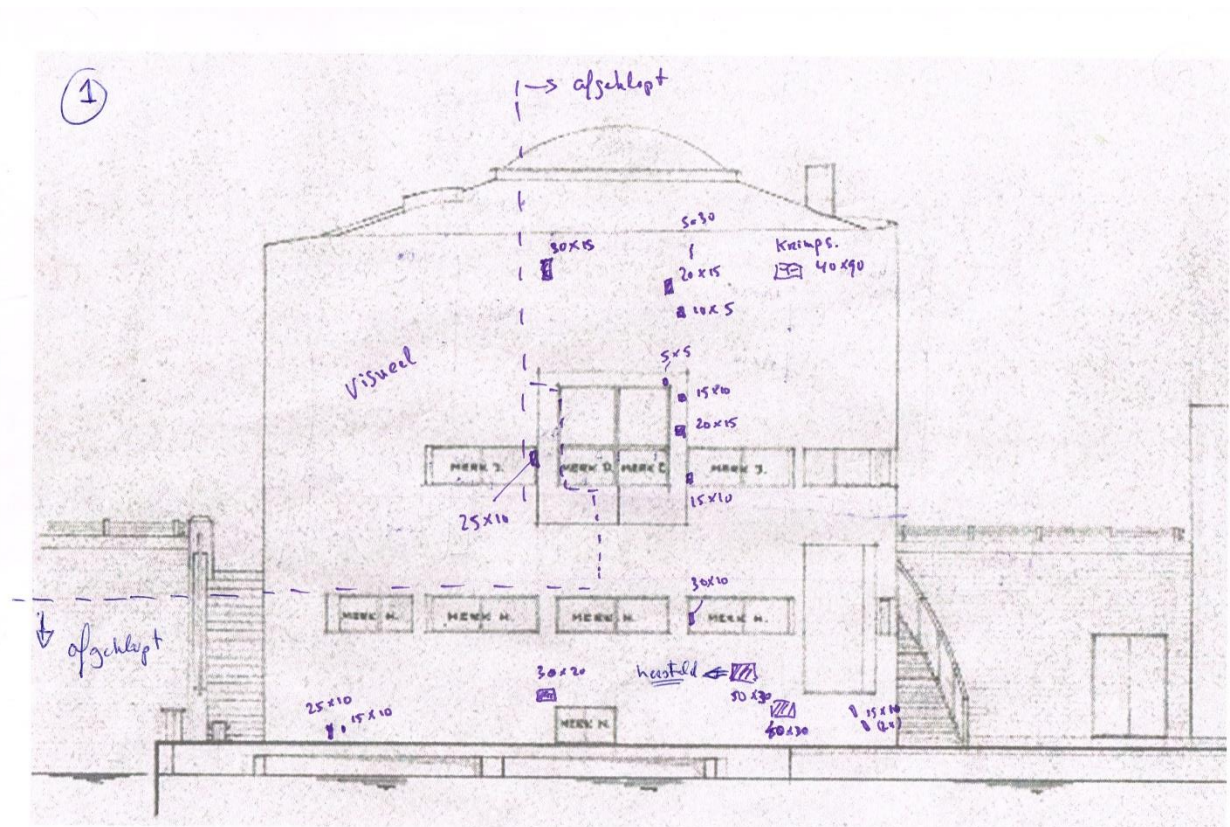
Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,2	0,1	0,05	0,02	0,001	1
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,5	0,1	0,05	0,05	0,0025	2,5
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,6	0,1	0,05	0,06	0,003	3
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,5	0,1	0,05	0,05	0,0025	2,5
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	2	0,1	0,1	0,05	0,01	0,001	1
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,15	0,15	0,05	0,0225	0,001125	1,125
5	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,15	0,15	0,05	0,0225	0,001125	1,125
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		11				0,31	0,02	15,75

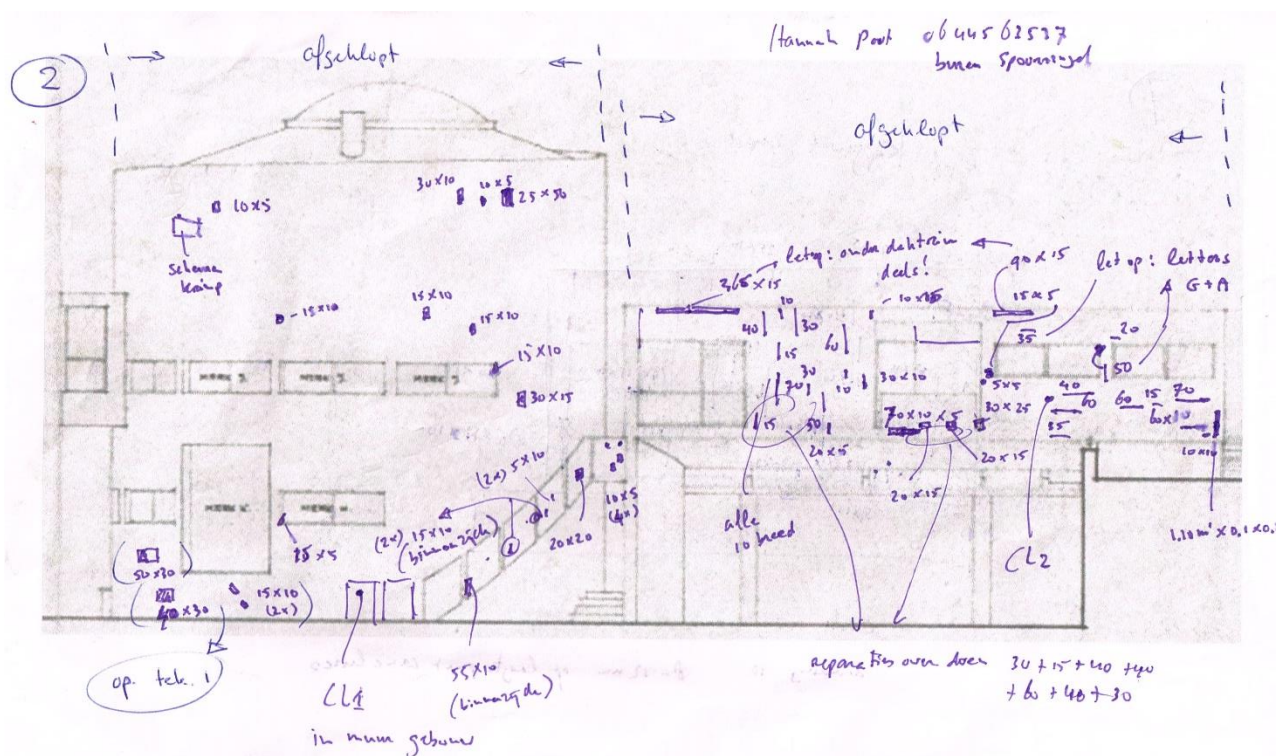
Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,4	0,1	0,05	0,04	0,002	2
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,5	0,1	0,05	0,05	0,0025	2,5
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	1,7	0,1	0,05	0,17	0,0085	8,5
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,8	0,1	0,05	0,08	0,004	4
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	4	0,15	0,1	0,05	0,015	0,003	3
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,05	0,1	0,05	0,005	0,00025	0,25
6	Noord	Bijgebouw	Wand kopgevel	1	0,3	0,05	0,05	0,015	0,00075	0,75
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		12				0,43	0,02	23,75

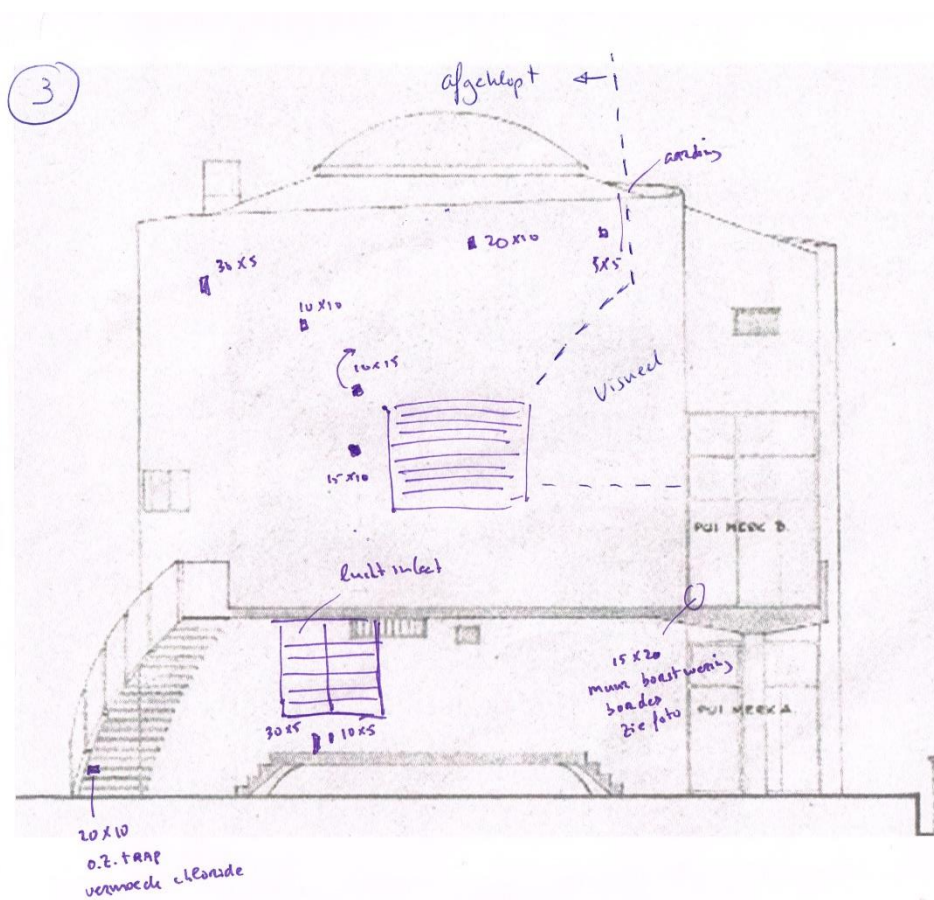
Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,05	0,05	0,05	0,0025	0,000125	0,125
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,2	0,05	0,05	0,01	0,0005	0,5
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,25	0,1	0,05	0,025	0,00125	1,25
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,2	0,1	0,05	0,02	0,001	1
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	3	0,4	0,1	0,05	0,04	0,006	6
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	2	0,5	0,1	0,05	0,05	0,005	5
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,8	0,1	0,05	0,08	0,004	4
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,05	0,1	0,05	0,005	0,00025	0,25
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,3	0,1	0,05	0,03	0,0015	1,5
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,15	0,2	0,05	0,03	0,0015	1,5
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	1,8	0,1	0,05	0,18	0,009	9
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	1	0,1	0,05	0,1	0,005	5
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	1,1	0,1	0,05	0,11	0,0055	5,5
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,05	0,05	0,05	0,0025	0,000125	0,125
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	4	0,15	0,1	0,05	0,015	0,003	3
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,4	0,15	0,05	0,06	0,003	3
7	Zuid	Bijgebouw	Wand kopgevel prefab	1	0,8	0,1	0,08	0,08	0,0064	6,4
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		25				0,89	0,06	55,4

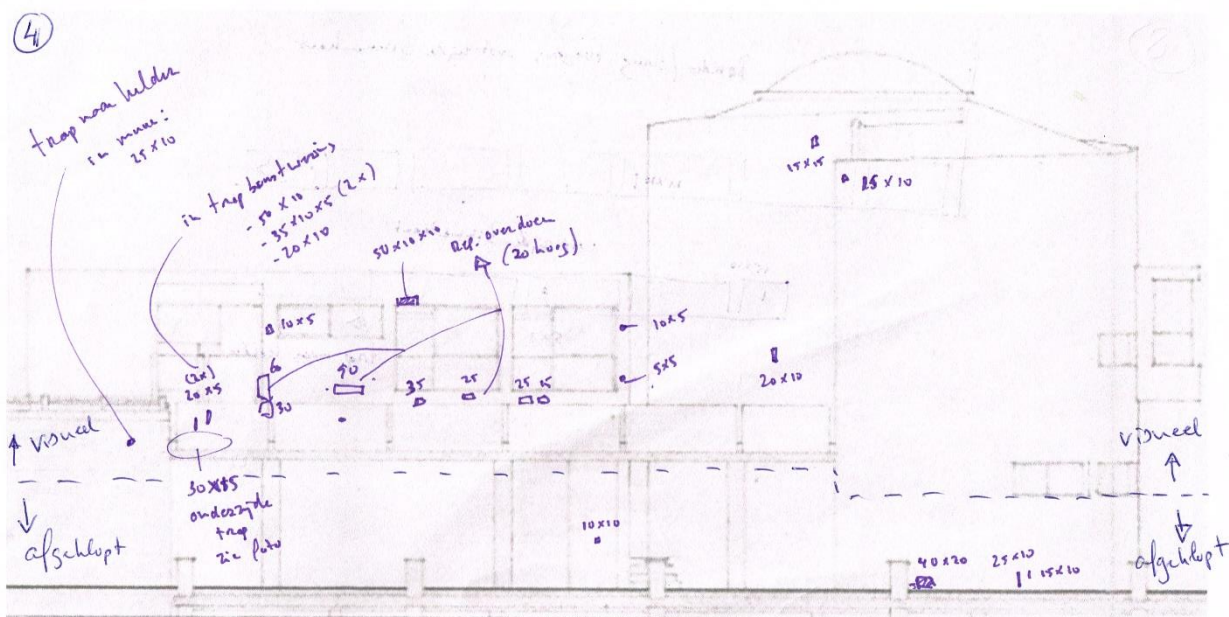
Tekening	Situering	Element	Bouwdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	m2	m3	lit
8	Oost	Verbindingsbrug	Borstwering	1	0,25	0,1	0,05	0,025	0,00125	1,25
8	Oost	Verbindingsbrug	Borstwering	1	0,15	0,1	0,05	0,015	0,00075	0,75
8	Oost	Verbindingsbrug	Borstwering	1	0,05	0,05	0,05	0,0025	0,000125	0,125
				stuks				m2	m3	liter
		Subtotaal betonschade		3				0,04	0,00	2,13
		Totalen betonschade		162				5,65	0,30	303,15

BIJLAGE 3: WEERGAVE BETONSCHADE OP TEKENING



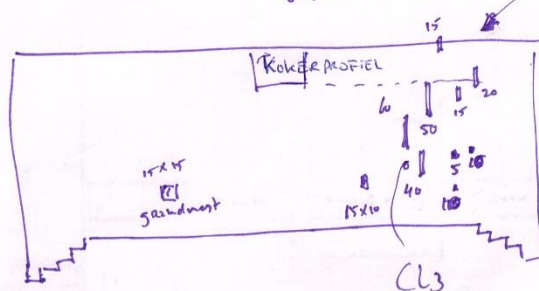






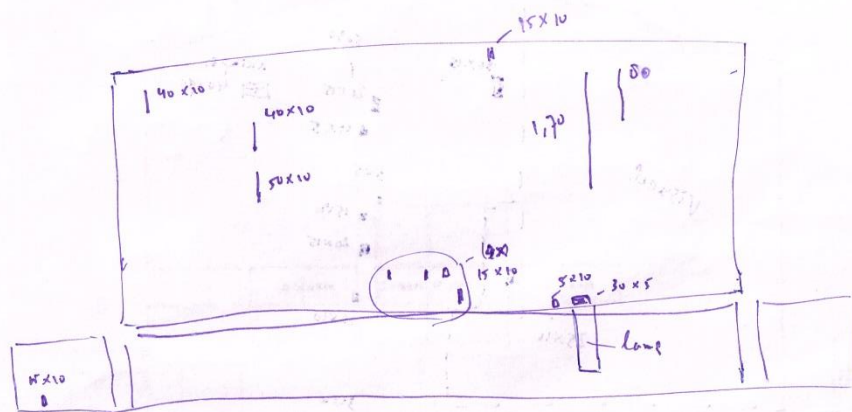
5

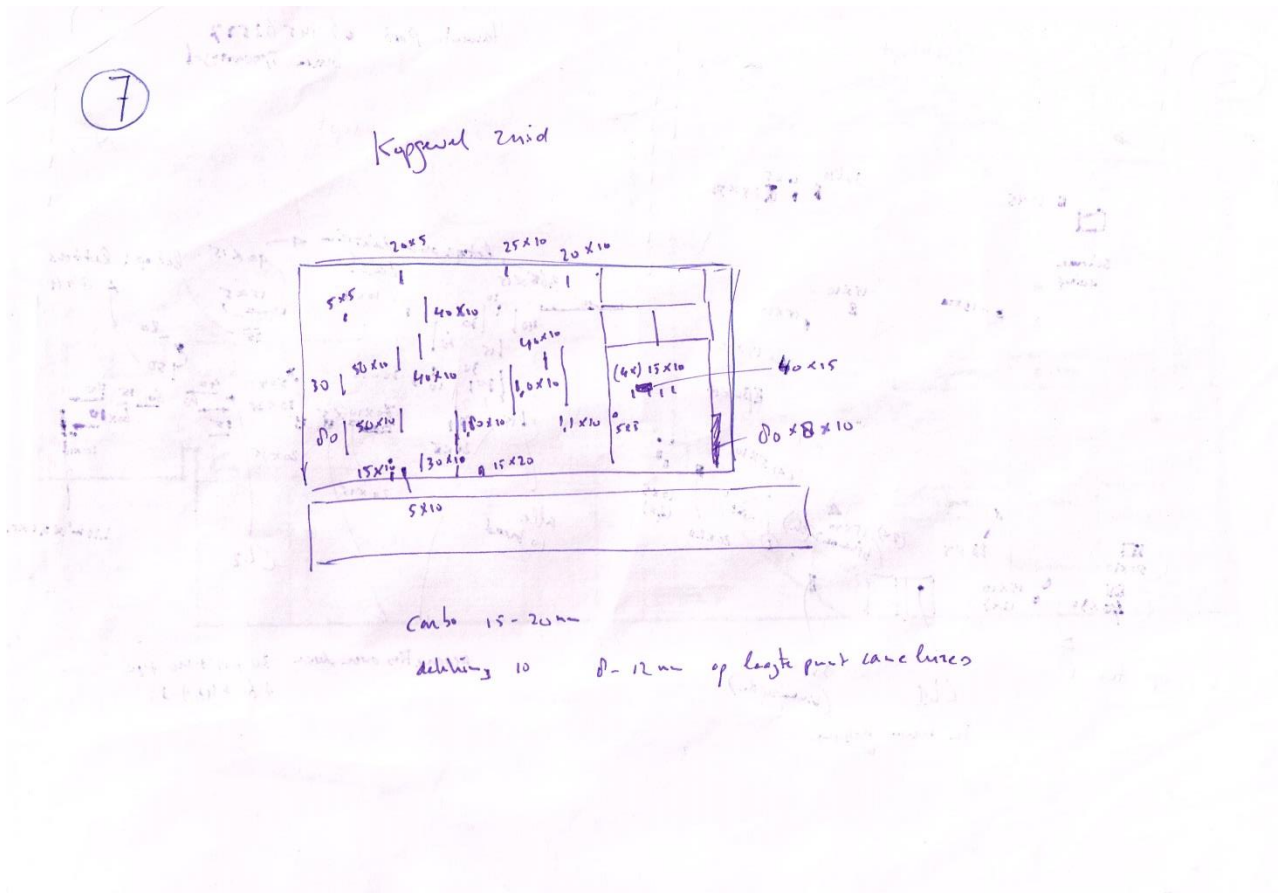
kopgerel noord
Binnenrijde muren bijgebouw
aanduiding

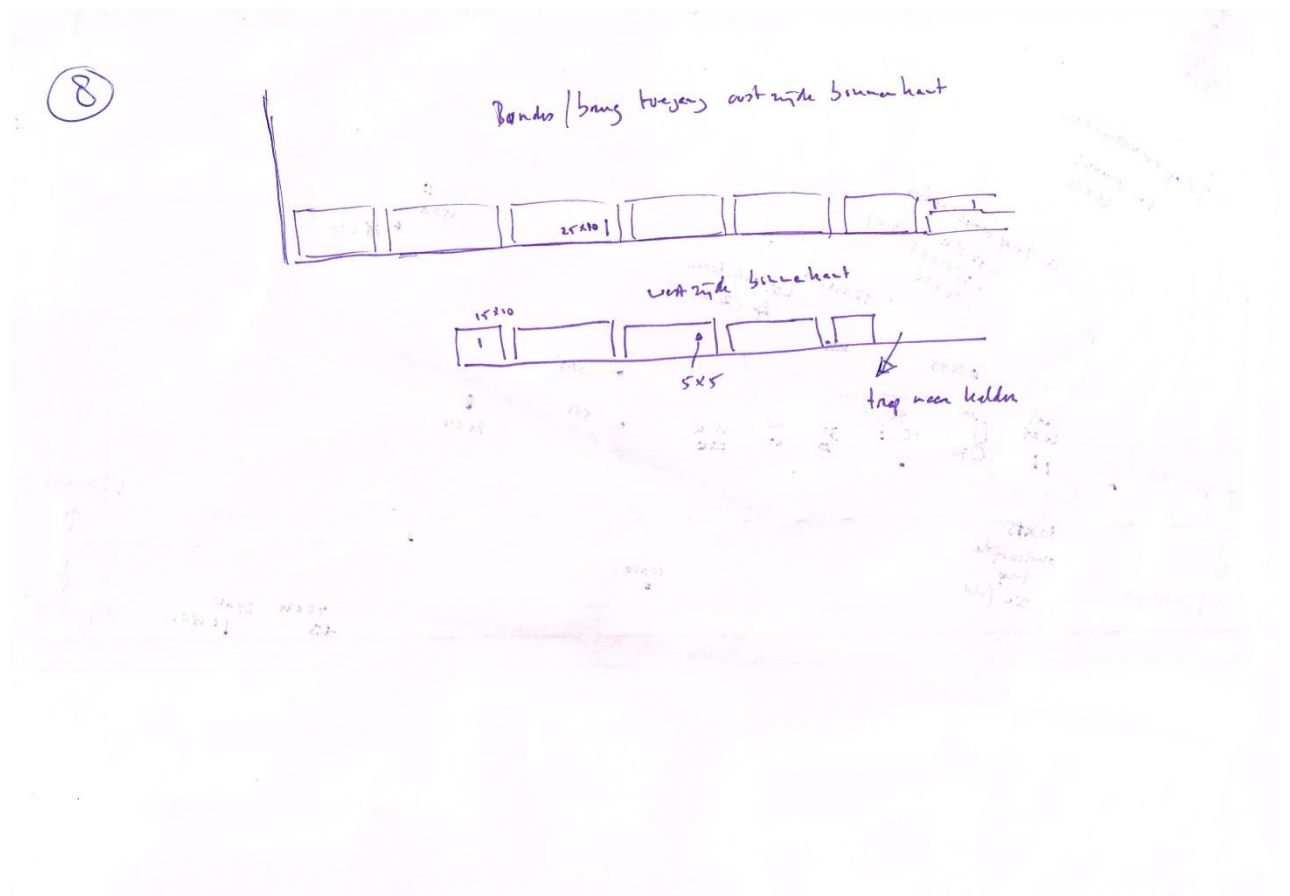


⑥

Kopgerd noord bijgebouw
binnen bordes







BIJLAGE 4: FOTO'S VAN UITGEVOERDE PROEFREPARATIES

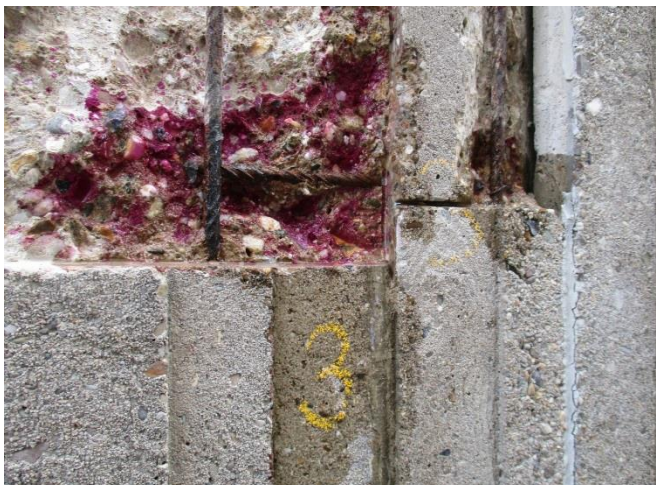
Proefstuk 1



Proefstuk 2



Proefstuk 3



Proefstuk 4



Proefstuk 5



Proefstuk 6

