

# REALKALISATIE VAN GECARBONATEERD BETON

## RESULTATEN VAN TWEE TESTPROJECTEN MET ELEKTROCHEMISCHE REALKALISATIE

ir.A.J. van den Hondel en ir.H.Borsje, Nebest betononderhoudsadviseurs BV, Groot-Ammers  
ir.C.J.J. Rijnen en ing.J.P.Winkelman, Aronsohn raadgevende ingenieurs BV, Rotterdam

Eind 1988 verscheen als primeur in *Cement* een publikatie over realkalisatie via elektro-osmose, een nieuwe, veelbelovende reparatiemethode voor gecarbonateerd beton [1]. In dat artikel zijn de principes van de methode uitvoerig besproken. Tevens werd aangekondigd dat naderhand de resultaten van de eerste testprojecten in *Cement* zouden worden gepubliceerd. Nu is het zover. Opnieuw een informatief artikel over een boeiende ontwikkeling op het gebied van reparatie van beton.

De betonconstructie van het eerste testproject, een complex woningen gebouwd in 1978-1980, vertoonde gebreken. De woningen zijn in carrévorm in twee of drie woonlagen gesitueerd op een hooggelegen betonvloer, ondersteund door balken en kolommen, rondom een iets lager gelegen terras (fig.1).

De ruimte onder de woningen wordt gebruikt als parkeerruimte, de ruimte onder het middenterras als berging voor de woningen. De woningen op de eerste laag beschikken aan de achterzijde over een terras, gescheiden van het middenterras door een op betonnen borstweringen geplaatste lichtstraat.

De hooggelegen betonvloer is ter plaatse van de woningen geïsoleerd, terwijl het terras zonder isolatie is uitgevoerd. Het gehele complex bestaat uit negen ongeveer gelijke en twee afwijkende clusters.

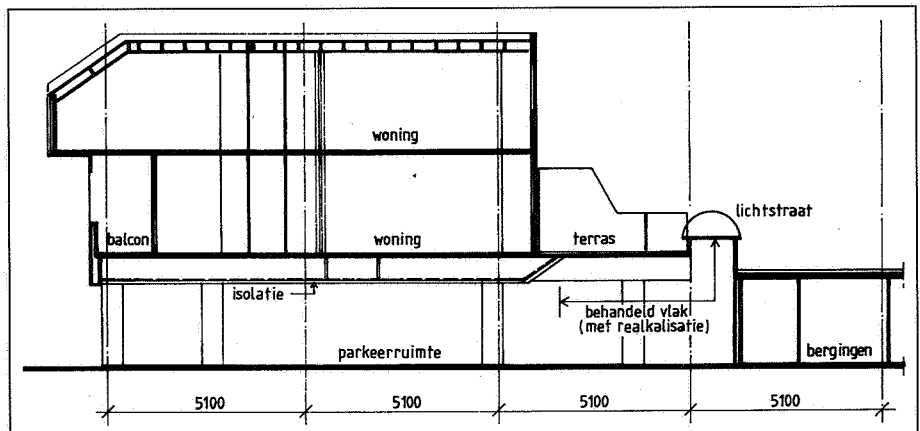
Uit de schaarse nog beschikbare gegevens van de bouw is gebleken dat de woningen zijn gebouwd met behulp van tunnelbekisting met verwarming van het gestorte beton.

De sterkteklasse zou B 17,5 zijn geweest, klasse 1 volgens de VB 1974 met hoogovencement klasse A.

Voor de borstweringen van de terrassen is betonspecie met een grootste korrelafmeting van 16 mm toegepast.

De gebreken bestonden in hoofdzaak uit:

- plaatselijk in het zicht komende roes-



1 Dwarsdoorsnede over testproject

tende wapening van borstweringen;  
- slechte oppervlaktekwaliteit van de borstweringen;  
- weer loskomen van gerepareerde gedeelten van de borstweringen;  
- scheurtjes in de onderzijde van de terrasvloeren, waarbij zeer plaatselijk in het zicht komende onderwapening.

De opdrachtgever wenste een reparatie van de betonschade, die uitzicht bood op duurzaamheid op lange termijn.

### Globaal onderzoek

In de loop van 1987 werd een zeer globaal steekproefsgewijs onderzoek ingesteld naar de toestand waarin de betonconstructie zich bevond.

Gekeken werd naar:

- carbonatatie diepte;
- porositeit;

- druksterkte;
- oppervlaktestructuur;
- betondekking;
- roestvorming op de onderwapening van de terrasvloer ter plaatse van scheurtjes;
- chloridegehalte.

Uit dit onderzoek bleek dat vooral het beton van de borstweringen van de terrassen van slechte kwaliteit was. Op een aantal plaatsen bevond de wapening zich aan of dichtbij het oppervlak.

Door roestende wapening was het beton gescheurd en was de betondekking als schilfers of schollen afgedrukt.

De oppervlaktestructuur was zeer verschillend; grote gedeelten waren na het storten met een reparatiemortel afgewerkt en vele reparaties waren weer beschadigd.

De carbonatatie diepte bleek aanzienlijk te zijn en de porositeit hoog. De sterkteklasse kwam ongeveer overeen met B 17,5. Zowel in borstweringen als terrasvloeren bleek de chlorideconcentratie zeer laag te zijn.

De onderzijden van de terrasvloeren vertoonden een veel gunstiger beeld dan de borstweringen. Ter plaatse van enkele scheuren werd de onderwapening van de vloer blootgehakt. Ernstige roestvorming werd niet geconstateerd.

De betondekking bleek bij deze steekproefsgewijze controle plaatselijk aan de lage kant, dan wel te laag te zijn, doch niet in zijn geheel verontrustend laag. Zowel porositeit als carbonatatie diepte waren redelijk. De sterkteklasse bleek ongeveer overeen te komen met B 30.

Al met al leverden deze spaarzame onderzoeksresultaten niet voldoende betrouwbare gegevens op voor een doelmatig en verantwoord reparatieplan, omdat er geen totaal beeld kon worden gevormd van de totale schadeomvang

op het moment van onderzoek en nog minder van de schadeverwachting op lange termijn.

Een te lichte inschatting zou kunnen leiden tot een niet afdoende reparatie met alle gevolgen van dien, terwijl een te zware inschatting een reparatie zou opleveren die, gelet op de kosten, voor een belangrijk deel overbodig zou kunnen blijken te zijn.

### Nader onderzoek

Op grond van deze overweging gaf de opdrachtgever in februari 1988 opdracht een doelgericht onderzoek in te stellen naar de kwaliteit van de betonconstructie, in hoofdzaak terrasvloeren en borstweringen, onderwerp van dit artikel, om vervolgens aan de hand van de aldus verkregen gegevens een reparatieplan op te stellen.

In korte tijd werden twee clusters fijnmazig en de overige grofmazig onderzocht. Het onderzoek richtte zich in hoofdzaak op:

- betondekking;
- carbonatatie diepte;
- scheurvorming;
- oppervlaktestructuur van de borstweringen.

De betondekking werd gemeten met een wapeningsdetector Mark VI-S en de carbonatatie diepte werd steekproefsgewijs bepaald door middel van het gefaseerd weghakken van het beton en het bespuiten met phenolphthaleïne.

Per vloerveld van circa 17 m<sup>2</sup> werd de betondekking op 45 plaatsen gemeten, waardoor een betrouwbaar beeld van de ligging van de wapening werd verkregen.

In veel gevallen kon de plaats van de dekkingsblokjes worden vastgesteld (betondekking 15 mm), waaruit weer kon worden afgeleid dat tussen de dekkingsblokjes, tijdens het storten van de vloer, de wapening veelvuldig omlaag was getrapt.

De onderzoeksresultaten werden op plattegronden - formaat A3 - systematisch, voorzien van letter-, cijfer- en kleurcode gebundeld, zodat een duidelijk, direct toegankelijk overzicht van de geconstateerde gebreken werd verkregen.

### Onderzoekresultaten

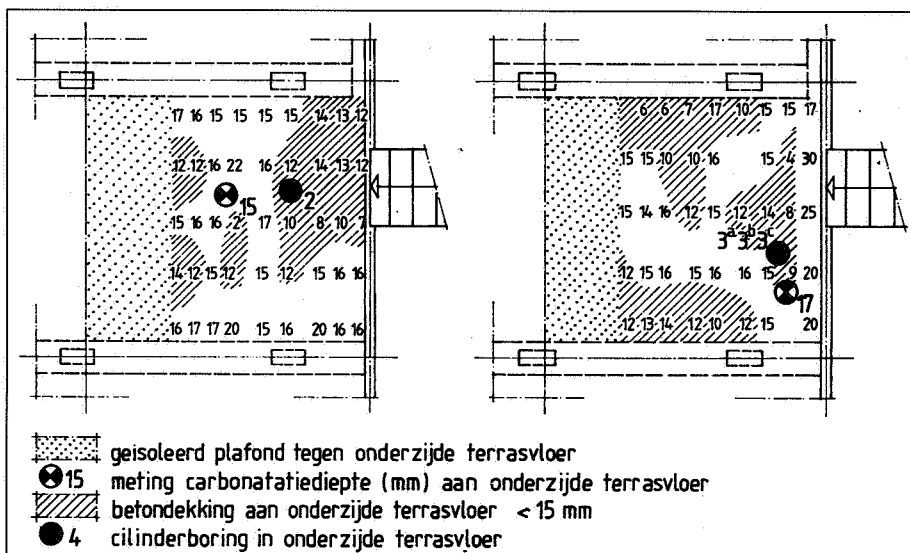
Reeds tijdens het onderzoek rees het vermoeden dat veel gebreken systematisch voorkwamen. De beoordeling van de gerangschikte reeks resultaten bevestigde dit vermoeden ten volle.

De tijdens de bouw voorgeschreven betondekking van 20 mm voor wanden en 15 mm voor vloeren werd veelvuldig ernstig onderschreden (fig. 2). Het grillige carbonatatiefront was het vlak van de wapening genaderd en zelfs op legio plaatsen ruimschoots gepasseerd (zie ook tabel 1).

Statistische verwerking van de onderzoeksresultaten betreffende betondekking en carbonatatie diepte van de onderzijde van de terrasvloeren van één cluster leverde het beeld op volgens figuur 3. De hoeveelheid wapening in de gecarbonateerde zone bedraagt hier circa 40% [2].

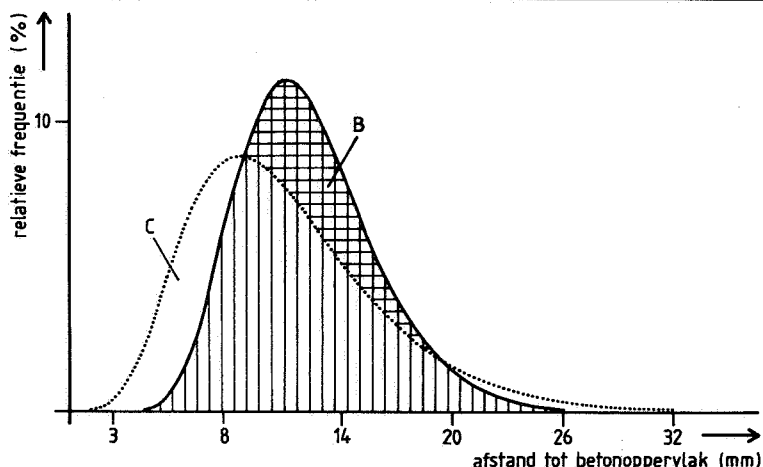
De kromme die de verdeling van de betondekking aangeeft is symmetrisch, derhalve is de afwijking van de gemiddelde betondekking (ca. 11 mm) naar boven en beneden vrijwel gelijk. De kromme van de carbonatatie diepte loopt aan de 'boven'zijde echter flauwer af, hetgeen inhoudt dat op redelijk veel plaatsen de carbonatatie diepte ver boven het gemiddelde ligt.

Een en ander betekent dat op veel plaatsen waar de betondekking 15 mm of



**2** Gemeten betondekking en carbonatatie diepte aan de onderzijde van twee terrasvloeren in één cluster

**3** Relatie tussen gemeten betondekking (B) en carbonatatie diepte (C) aan de onderzijde van de terrasvloeren in één cluster



zelfs meer bedraagt, de wapening toch reeds in de gecarbonateerde zone ligt, zodat op langere termijn aanzienlijke betonschade te verwachten is. Bij de borstweringen (afwisselend nat-droog milieu) was deze schade reeds geconstateerd.

Het uiterlijk van de onderzijde van de terrasvloeren (beschut milieu) was goed, dat wil zeggen het vertoonde geen betonschade zoals afgedrukte betondekking, zelfs niet op enkele plaatsen waar de onderwapening van de vloer aan het oppervlak lag.

Teneinde een indruk te verkrijgen van de toestand waarin de onderwapening verkeerde, zijn op een aantal plaatsen bij de wapening cilinders geboord.

De uitgeboorde wapening is visueel geïnspecteerd, terwijl de betondekking is gemeten en na splijten van de cilinders en het bespuiten met phenolphthaleïne de carbonatatie diepte is bepaald. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1.

De onderwapening bleek in de gecarbonateerde zones al behoorlijk te zijn geroest, terwijl in de niet-gecarbonateerde zones het staal gaaf of nagenoeg gaaf was.

De uit dit onderzoek verkregen resultaten - te weten carbonatatie diepte en betondekking - kwamen overeen met de eerder gevonden waarden, zodat de verkregen gegevens betrouwbaar werden geacht.

#### Keuze reparatiemethode

Hoewel de overeenkomst in de onderzoekresultaten het nauwkeurig werken van de onderzoekers onderstreepte en hen het gevoel gaf op de goede weg te zijn, vervloog hiermee de hoop op een eenvoudige reparatiemethode, zoals het toepassen van een coating na plaatselijke reparaties.

Een doelmatige, kwalitatief hoogwaardige reparatie zou het verwijderen van het gecarbonateerd beton vereisen, het ontroesten van de wapening, het stemmen van de afgehakte vloer en het aanbrengen van een nieuwe, voldoende dikke betondekking met behulp van spuitbeton.

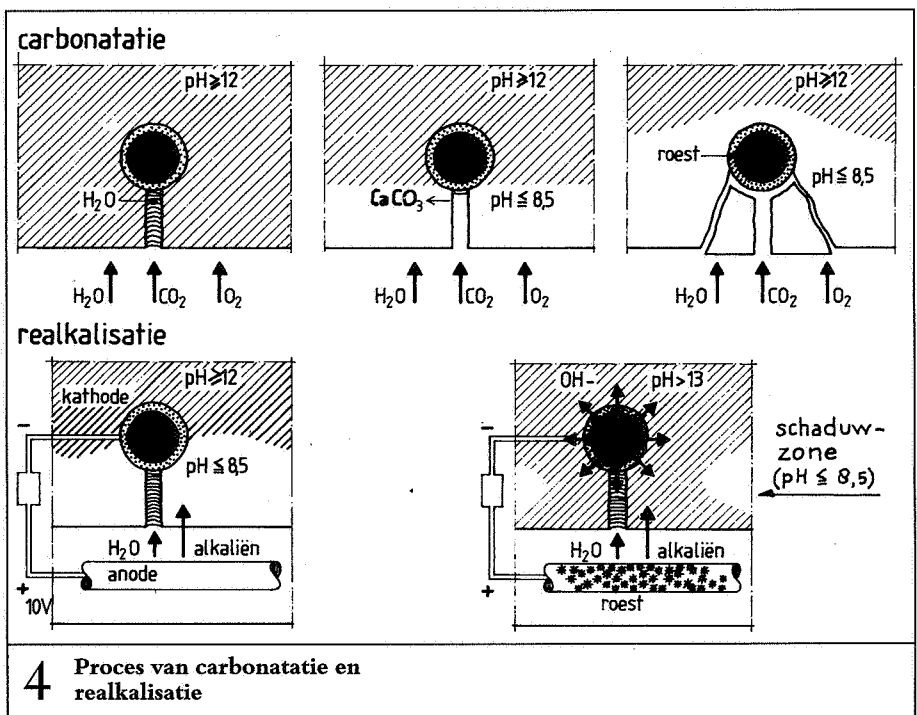
Vanwege geluidsoverlast kwam pneumatisch hakken niet in aanmerking, derhalve zou het slopen door middel van hydrodemolition (hoge-druk waterstralen) plaats dienen te hebben.

Ook deze methode is bij bewoonde woningen in verband met wateroverlast verre van ideaal. Natuurlijk spelen de kosten van beide methoden ook een belangrijke rol in het geheel.

Vergelijking van de resultaten van het grofmazige onderzoek met het fijnmazige toonde aan, dat in principe voor het

Tabel 1  
Resultaten gemeten aan uitgeboorde kernen voor realkalisatie

boring	betondekking (mm)	carbonatatie diepte (mm)	wapening
1	4	15	geroest
2	13	16	licht geroest
3a	10	20	geroest
3b	5 (±)	15	licht geroest
3c	8	18	behoorlijk geroest
4a	zeer weinig	20	behoorlijk geroest
4b	2	25	behoorlijk geroest
5	7	16	sterk geroest
6	17	15	niet geroest
gemiddeld	7,5	17,7	



#### 4 Proces van carbonatatie en realkalisatie

geheel één reparatiemethode kon worden toegepast.

In deze fase van het onderzoek werd de aandacht gericht op een nog niet in Nederland toegepast systeem van realkaliseren van gecarbonateerd gewapend beton, welk systeem in Scandinavië door Noteby Consulting Engineers is ontwikkeld.

#### Realkalisatie

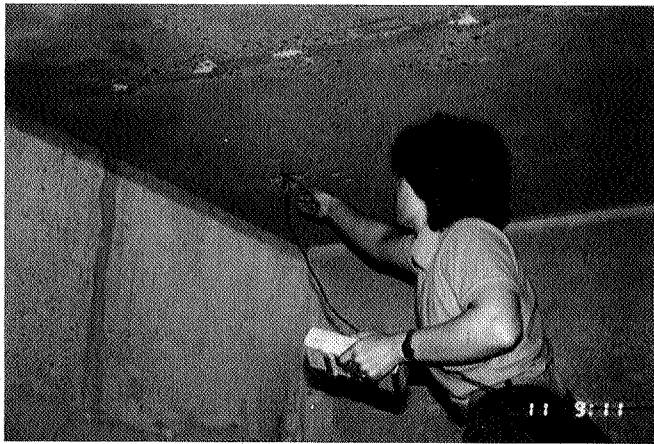
Realkalisatie berust op het principe dat langs elektro-chemische weg de alkaliteit van de betondekking wordt hersteld en wel zodanig, dat de hiervoor benodigde tijdsduur beperkt is en de methode praktisch uitvoerbaar is.

Met betrekking tot de theoretische achtergronden van realkalisatie wordt verwezen naar [5, 6, 7 en 8]. Inmiddels wordt in CUR-verband nader onderzoek hiernaar verricht. Eenvoudigweg komt het erop neer, dat de wapening in het beton en een extern aan te brengen geleider op een gelijkstroombron wor-

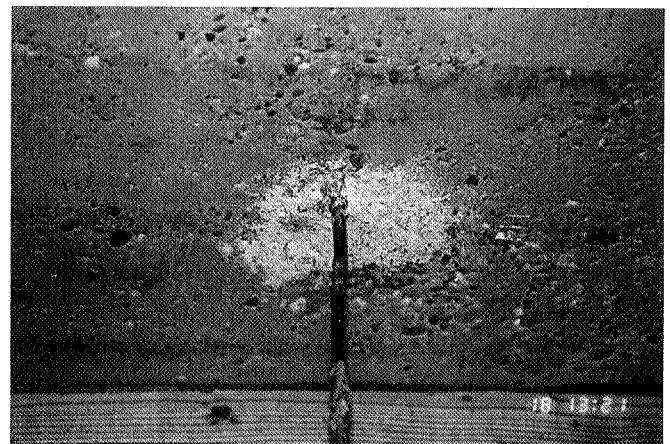
den aangesloten. Een alkalische oplossing die op het buitenoppervlak is aangebracht, wordt ten gevolge van het optredende proces (deels) naar binnen getrokken, terwijl tegelijkertijd alkaliën aan de negatieve pool (de kathode, zijnde de staalwapening) worden gevormd en zich in het beton verspreiden. Een ander resultaat is het 'herstellen' van de pH, die ook in het eerder gecarbonateerde beton kan oplopen tot meer dan 13,5 (fig. 4). De eerste praktijkresultaten op vrij beperkte schaal waren hoopvol en na een bezoek aan een in uitvoering zijnd werk in Stavanger werd besloten in het onderhavige project een test uit te voeren, om te kunnen beoordelen of deze methode technisch en financieel gezien toepasbaar zou zijn. Het testproject is uitgevoerd in juli 1988.

#### Uitvoering van het testproject

Bij de uitvoering van het testproject in twee vloervelden waren de volgende stappen te onderscheiden:



**5** Uitvoeren van continuïteitsmetingen



**6** Aansluiting minpool aan wapening



**7** Aanbrengen externe geleider, nadat de eerste gellaag is gespoten

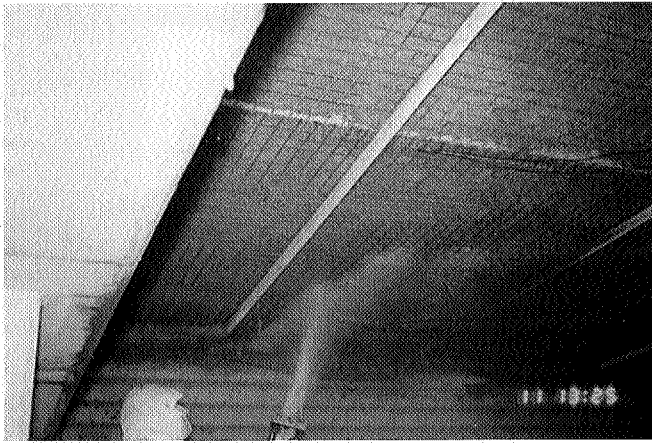


**8** Eerste gellaag, externe geleider en aansluiting pluspool hieraan

- aanbrengen van het benodigde afschermwerk;
- gritstralen van het betonoppervlak. Dit werd noodzakelijk geacht in verband met eventuele verontreinigingen op het oppervlak, die het proces en/of de hechting van de gel zouden kunnen beïnvloeden. Tevens is hiermee de cementshuid van het oppervlak verwijderd;
- uitvoeren van continuïteitsmetingen (foto 5).  
Voor een goede werking van het realisatieproces is de continuïteit van het wapeningsstelsel noodzakelijk, hetgeen is gecontroleerd door de weerstand tussen twee blootgehakte wapeningsstaven in een veld te meten. Uit de metingen, in combinatie met het feit dat er als wapening een gepuntlast wapeningsnet was gebruikt, bleek dat in beide velden de wapening continu was;
- aanbrengen van de elektrische contacten aan de wapening.  
Op één van de twee opgehaakte plaatsen ten behoeve van de continuïteitsmetingen is een stroomdraad op de wapening aangesloten en op de minpool van de stroombron (gelijk-

- richter);
- afdichten van scheuren, schadeplaatzen en opgehaakte delen.  
Om te voorkomen dat er kortsluiting in het systeem zou kunnen ontstaan, zijn een aantal grote aan het oppervlak zichtbare scheuren dichtgesmeerd met cementpasta. Om dezelfde reden zijn de opgehaakte plaatsen gedicht met een epoxymortel (foto 6), dit met het oog op een snelle uitharding;
- aanbrengen van houten regels voor de aan te brengen externe geleider.  
Het externe geleidingsnet is bevestigd aan houten regels, 20 x 40 mm<sup>2</sup>, h.o.h. 2 m, aan het oppervlak bevestigd met behulp van hamerslagpluggen. De regels zijn bevestigd met kunststofpluggen, opdat geen elektrisch contact met de wapening kon worden gemaakt.  
Om na het aanbrengen van de gel de vooraf gemarkeerde plaatsen voor de te verrichten kernboringen te kunnen terugvinden, zijn op deze plaatsen speciale pluggen aangebracht, voorzien van een stuk ijzerdraad;
- opspuiten van de eerste laag gel (circa 20 mm).  
De gel is in twee lagen aangebracht

- om, met het oog op een goede omhulling, het externe net in de eerste laag gel te kunnen drukken;
- bevestigen van de externe geleider (foto 7).  
Het externe geleidingsnet, een gepuntlast wapeningsnet met een kenmerkend middellijn van 8 mm en een maaswijdte van 100 mm, is met draadnagels aan de houten regels bevestigd. Om te grote doorzakkingen in het net te voorkomen, zijn plaatselijk extra pluggen met volgelingen aangebracht;
- aansluiten van de geleider.  
Aan het geleidingsnet zijn per veld op zes plaatsen elektriciteitsdraden bevestigd (foto 8), die vervolgens gezamenlijk aan de pluspool van de stroombron zijn aangesloten. Zes bevestigingsplaatsen werden noodzakelijk geacht om zekerheid te hebben dat de stroom egaal over het oppervlak zou worden verdeeld;
- opspuiten van de tweede laag gel (foto 9).  
De tweede laag gel is aangebracht om het geleidingsnet volledig te omhullen met gel. De totale laagdikte van de gel kwam hiermee op circa 40 mm;
- inschakelen van de elektriciteit op cir-



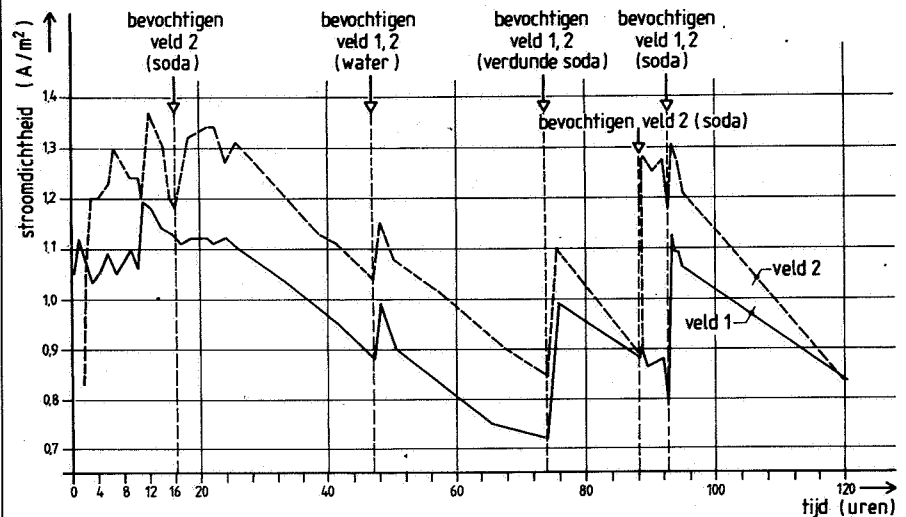
## 9 Aanbrengen tweede gellaag

- ca 10 V;
- doorlopend meten van het verloop van de stroomsterkte (foto 10), alsmede boren van proefkernen;
- dagelijks besproeien van de gel. Dit is noodzakelijk omdat uitdroging van de gel een verhoging van de systeemweerstand tot gevolg heeft en daarmee een afname van de stroomsterkte;
- uitschakelen van de stroom na het beëindigen van het realkalisatieproces en verwijderen van het aangebrachte materiaal;
- reinigen van het oppervlak met water onder hoge druk;
- gritstralen van het betonoppervlak. Om zekerheid te verkrijgen ten aanzien van een goede hechting van het spuitbeton, is het oppervlak nog eenmaal gegritstraald. Om de invloed van dit gritstralen te onderzoeken is circa 1 m<sup>2</sup> van het te bespuiten oppervlak niet gestraald;
- aanbrengen van spuitbeton. Om de duurzaamheid van het gerealkaliseerde beton met voldoende zekerheid te kunnen waarborgen, was gekozen voor spuitbeton op het oppervlak, aan te brengen in twee lagen. Een coating was in dit geval niet wenselijk in verband met het benodigde onderhoud.
- Nadat de eerste laag was opgestijfd is deze gedeeltelijk onder profiel afgewerkt, waarna er na enkele uren de tweede laag is opgespoten. Deze laag is niet afgewerkt en vertoont een zogenaamde spuitstructuur.
- Om uitdroging van het spuitbeton tegen te gaan is een curing compound op het oppervlak aangebracht;
- opruimen van de bouwplaats.

### Metingen en resultaten

Om de voortschrijding van het realkalisatieproces te kunnen kwantificeren, is het verloop van de stroomsterkte

## 10 Meten van het verloop van de stroomsterkte



## 11 Verloop van de stroomdichtheid in de tijd voor veld 1 en 2 van testproject 1

te gemeten in de tijd. Gedurende de eerste 24 uur is ieder uur de stroomdichtheid (stroomsterkte per m<sup>2</sup> betonoppervlak) in beide velden bepaald, teneinde de eerste fase, waarin het vocht- c.q. realkalisatiefront tot aan de wapening naar binnentrekt, te kunnen afbakenen. Hierna is het verloop van de stroomsterkte minder frequent gemeten.

De resultaten van de metingen zijn samengevat in figuur 11. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

- indien het verloop van de stroomdichtheid wordt geschematiseerd tot een vloeiende kromme, dan blijkt dat deze kromme voor veld 1 na circa 7 uur en voor veld 2 na circa 8 uur de maximale waarde bereikt. Hieruit volgt dat de tijd die nodig is om het realkalisatiefront het gehele wapeningsnet te laten bereiken, voor veld 1 circa 7 uur en voor veld 2 circa 8 uur bedraagt. Na deze tijd zal het kathodische wapeningsstaal nog hydroxide blijven produceren, zoals blijkt uit de proeven aan de geboorde kernen. Dit

is de zogenaamde tweede fase [1];

- na circa 12 uur blijkt in beide velden de stroomdichtheid af te nemen, hetgeen duidt op een toename van de systeemweerstand. De oorzaak hiervan is het uitdrogen van de gel, enerzijds doordat de vloeistof in het beton trekt, anderzijds doordat de vloeistof verdamppt. Indien de gel opnieuw wordt bevochtigd blijkt de stroomdichtheid weer toe te nemen;
- na het bevochtigen van de gel na circa 47 en 74 uur blijkt de stroomdichtheid slechts in geringe mate op te lopen. Dit is te wijten aan het feit dat er na circa 47 uur is bevochtigd met leidingwater in plaats van met een verzadigde natriumcarbonaat oplossing en dat er na 74 uur een te geringe hoeveelheid van de genoemde alkalische vloeistof is opgebracht.
- Na het bevochtigen na 88, respectievelijk circa 93 uur met voldoende alkalische vloeistof, blijkt de stroomdichtheid op te lopen tot ongeveer het oorspronkelijke, hoge niveau.

Om het effect van het realkalisatieproces visueel te kunnen aanschouwen en het resultaat meetbaar te maken, is een aantal kernen, met een lengte van circa 60 mm en een diameter van 28 mm, uit de gerealkaliseerde betonconstructie geboord, na 1, 2, 3 en 7 dagen.

Hierbij is op de volgende punten gelet:

- de betondekking op de eventueel aanwezige wapening;
- de oorspronkelijke carbonatatie diepte;
- de ligging van het realkalisatiefront en het verloop van de tweede fase.

Met betrekking tot de realkalisatie is in eerste instantie de buitenzijde van de kern met een indicatorvloeistof bespoten en in tweede instantie de gespleten kern.

De resultaten van bovengenoemde metingen zijn samengevat in tabel 2. Tevens is een aantal waarnemingen weergegeven aan de hand van foto's 12 t.m. 16. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

- na 1 dag blijkt dat het realkalisatiefront het oude carbonatatiefront reeds heeft bereikt, in ieder geval ter plaatse van de geboorde kernen. Op die plaatsen is dus reeds sprake van volledige realkalisatie;
- een aantal kernen (vanaf dag 2) vertoont na besproeiing met fenolthaleïne in eerste instantie een paarskleuring. Echter, na het drogen van het oppervlak wordt een deel weer kleurloos. De oorzaak hiervan is dat de pH in die gebieden groter is dan 13,5 ten gevolge van produktie van alkaliën nabij de wapening;
- bij een aantal kernen blijkt slechts in beperkte mate sprake te zijn van realkalisatie. Dit is te wijten aan het feit dat deze kernen in het 'schaduwgebied' [1] tussen de wapeningsstaven zijn geboord. Op die plaatsen verloopt de realkalisatie aanzienlijk langzamer.

Om de invloed te kunnen nagaan van gritstralen op de hechting van spuitbeton aan 'oud' beton na realkalisatie, is een klein deel van het oppervlak (circa 1 m<sup>2</sup>) na realkalisatie niet gestraald, doch direct van een spuitbetonlaag voorzien. Uit metingen van de hechtsterkte van het spuitbeton aan het oorspronkelijke betonoppervlak, uitgevoerd op boorkernen in een trekbank, is gebleken dat de hechtsterkte ter plaatse van het niet gestraalde betonoppervlak aanzienlijk groter was dan ter plaatse van het wel gestraalde oppervlak, namelijk respectievelijk 1,9 N/mm<sup>2</sup> en 1,0 N/mm<sup>2</sup>.

Naar alle waarschijnlijkheid heeft dit te maken met het feit dat na realkalisatie het betonoppervlak als het ware ideaal is

**Tabel 2**  
Resultaten gemeten aan uitgeboorde kernen na realkalisatie

kern	tijdstip van boren (*)	dekking (mm)	oorspronkelijke carbonatatie (mm)	realkalisatie
1W	1	16	15-18	geheel
5	1		10-15	geheel
9W	1	9	15-18	geheel
16	1	20	18-20	geheel
2W	2	15	11-18	geheel, nabij wapening
8	2	21	15-21	geheel, nabij wapening
9WB	2	10	10-20	geheel, nabij wapening
16B	2		11-22	geheel, nabij wapening
3W	3		19-24	geheel, nabij wapening
4W	3	12	15-22	geheel, nabij wapening
4WB	3		15-25	geheel, nabij wapening
6	3		11-20	geheel, nabij wapening
7	3		14-20	geheel, nabij wapening
10W	7	10	13-19	geheel, nabij wapening
12W	7	13	15-22	geheel, nabij wapening
13	7		13-19	geheel, nabij wapening
14	7		13-17	geheel, nabij wapening
15	7		12-15	geheel, nabij wapening
30W	7	14	16-20	geheel, nabij wapening

(\*) in dagen nadat het systeem in werking is gezet

voorbehandeld (door en door nat), welke voorbehandeling deels teniet wordt gedaan door het gritstralen, waarbij lucht langs het oppervlak wordt geblazen. Een en ander betekent dat het niet noodzakelijk is het betonoppervlak na realkalisatie te gritstralen. Volstaan kan worden met het reinigen met water.

Uit de metingen die verricht zijn gedurende de uitvoering van het testproject, is gebleken dat de realkalisatie naar behoren is verlopen. De zogenaamde eerste fase is beëindigd na 6 à 8 uur, terwijl tevens is aangetoond dat er tijdens het proces veel hydroxideproduktie rondom de kathodische wapening heeft plaatsgemaakt.

Dit alles heeft tot gevolg dat de wapening weer in 'gezond' alkalisch beton ligt, waardoor de passivering zich heeft hersteld en het staal weer tegen corrosie is beschermd.

Tot slot zijn er 15 maanden na het beëindigen van de proef vier kernen uit de gerealkaliseerde betonconstructie geboord, om het effect van de renovatiewerkzaamheden op langere termijn te kunnen beoordelen.

De vier kernen, twee geboord ter plaatse van de wapening en twee ter plaatse van het hart tussen vier staven (het zogenaamde schaduwgebied), bleken voor het grootste deel na bespuiten met fenolthaleïne paars te kleuren. Dit duidt op een pH die groter is dan 10. Na bespuiten met een regenboogindicatorvloeistof bleek dat de pH zelfs groter was dan 11,5.

Bij de twee kernen zonder wapening bleek er een zone te bestaan waar de pH kleiner was dan 10, aangezien daar geen paarskleuring optrad. Dit schaduwgebied varieerde over de kernen in grootte van 4 tot 12 mm.

Eén kern met wapening vertoonde na verloop van enige tijd ontkleuring rondom de wapening, hetgeen duidt op een pH die groter is dan circa 13,5.

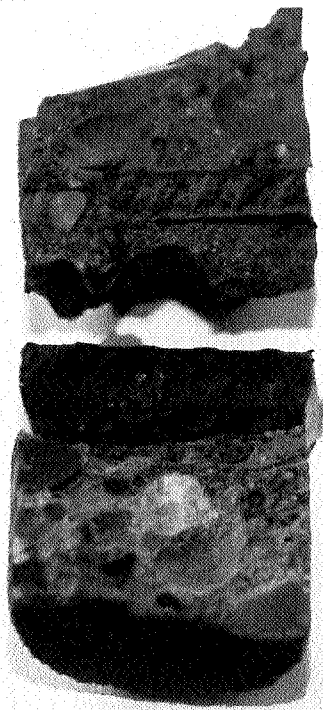
De andere kern met wapening vertoonde deze ontkleuring niet, hetgeen erop duidt dat de alkaliteit in het gebied van de wapening zich heeft ingesteld op een lager niveau, waarschijnlijk ten gevolge van diffusie naar het omliggende beton.

Uit deze metingen kan worden geconcludeerd dat het oorspronkelijke beton bij de kernen met wapening een voldoende hoge alkaliteit bezit om de wapening tegen corrosie te beschermen, mits er geen te hoge concentratie aan chloride aanwezig is [3]. De kernen zonder wapening vertonen duidelijk de aanwezigheid van schaduwgebieden over een beperkte zone (4 tot 12 mm).

#### Tweede testproject

De constructie betrof in dit geval een circa 20 jaar oude wand, opgetrokken met glijbekisting.

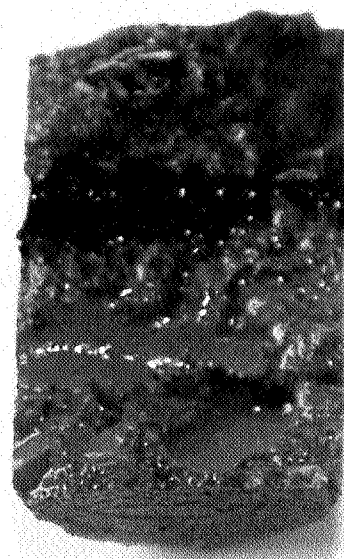
Uit een visuele inspectie bleek dat er reeds een aanzienlijke schade was, in de vorm van afgedrukte betondekking ten gevolge van een door carbonatatie geïnitieerde corrosie. Tevens bleek uit me-



**12** Kern 2W, gerealkaliseerd



**13** Kern 2W na 9 minuten, ontkleuring nabij de wapening duidt op productie van een overmaat aan alkaliën



**14** Kern 8, gerealkaliseerd



**15** Kern 8 na 7 minuten, ontkleuring nabij de wapening duidt op productie van een overmaat aan alkaliën



**16** Kern 7, gedeeltelijk gerealkaliseerd

#### Metingen en resultaten

Om inzicht te verkrijgen in de voortschrijding van het realkalisatieproces, is het verloop van de stroomdichtheid in de tijd gemeten (fig. 17). Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

- de tijd die nodig was om met het realkalisatiefront het gehele wapeningsnet te bereiken, de zogenaamde eerste fase, bedroeg circa 5 uur;
- na circa 1,5 uur bleek de stroomdichtheid af te nemen. Dit is mogelijk te verklaren uit het feit dat er een hoeveelheid vocht in het beton getrokken was (eerste fase), waardoor de gel gedeeltelijk uitdroogde en de systeemweerstand dus toenam. Na herbevochtigen nam de stroomdichtheid weer toe.

Na afloop van het proces na 2,5 dag zijn op het betonoppervlak enkele metingen uitgevoerd naar de carbonatatie diepte, teneinde te controleren of er voldoende realkalisatie had plaatsgehad. Uit dit onderzoek is gebleken dat meer dan de helft van het totale oppervlak van het gecarbonateerde beton, zowel met als zonder spuitbeton, was gerealkaliseerd. Vooral tussen de wapeningsstaven in bleek niet al het beton gerealkaliseerd te zijn.

Dat er nog een redelijk aantal schaduwgebieden zijn waargenomen is mede het gevolg van het feit dat het systeem vrij snel is uitgeschakeld (na 2,5 dag). Deze schaduwgebieden hebben geen rechtstreekse invloed op de bescher-

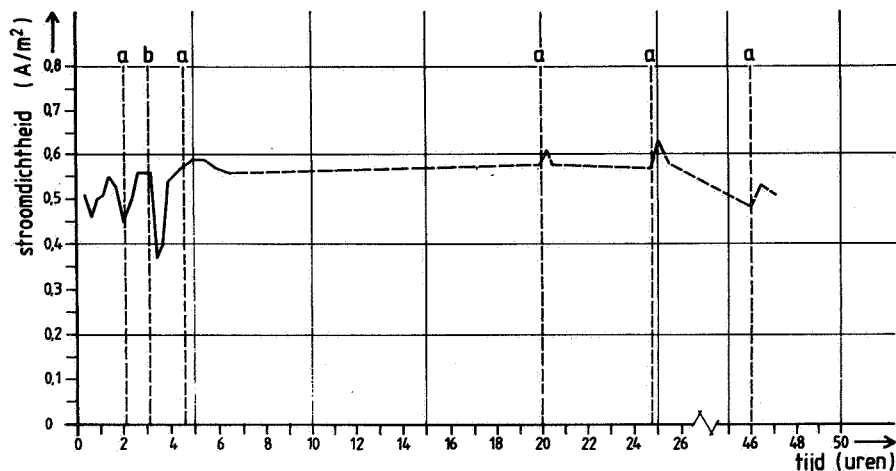
tingen, dat van de overige wapening reeds een aanzienlijk deel in gecarbonateerd beton was gelegen, dus in potentieel schadegebied.

Voor de gehele wand varieerde de betondekking globaal van 5 tot 15 mm en de carbonatatie diepte globaal van 5 tot 10 mm.

Het testproject betrof een oppervlak van circa 3 m hoog en 6 m breed aan de onderzijde van de wand en werd op overeenkomstige wijze uitgevoerd als bij het eerste testproject.

Voorafgaande aan de realkalisatie is de helft van het te behandelen oppervlak voorzien van een 15 mm dikke laag spuitbeton.

**17** Verloop van de stroomdichtheid in de tijd bij testproject 2  
 a. bevochtigen  
 b. herstel gellaag (stroom uit)



ming van de wapening, omdat zij juist in de mazen van het net optreden en niet ter plaatse van de wapening. Alleen op lange termijn zou het mogelijk kunnen zijn dat er door diffusie een vereffening van de pH optreedt, zodat deze ter plaatse van de wapening nog kan dalen. Om deze schaduwgebieden te voorkomen is het noodzakelijk dat het systeem langer (minimaal 5 dagen) in werking blijft, waardoor er meer alkaliën in het beton worden getrokken en er meer alkaliën worden geproduceerd.

Tot slot is het betonoppervlak voorzien van een extra beschermingslaag in de vorm van een kristal-cement bespuiting. Om de invloed te kunnen bepalen van het realkaliseren op de hechtsterkte van het reeds van tevoren aangebrachte spuitbeton met het oorspronkelijke betonoppervlak, is vooraf een deel van het te realkaliseren betonoppervlak voorzien van een laag spuitbeton als extra dekking.

Zeven maanden na het uitvoeren van het testproject is de hechtsterkte van het spuitbeton bepaald aan de hand van een drietal geboorde kernen, met een diameter van circa 55 mm.

Deze kernen zijn in een trekbank beproefd en gaven een gemiddelde hechtsterkte van 3,1 N/mm<sup>2</sup> te zien, waaruit blijkt dat de realkalisatie zeker geen negatieve invloed heeft gehad op de ontwikkeling van de hechtsterkte.

Door de alkaliteit van het beton, voor zover gecarbonateerd, aldus terug te brengen tot waarden waarbij de passiveringslaag weer kan worden gevormd en stabiel is, is er bewerkstelligd dat het optredende schademechanisme (door carbonatatie geïnitieerde corrosie) is gestopt, de passiveringslaag is hersteld en er een situatie is gecreëerd waarbij het beton in een vergelijkbare toestand zou moeten verkeren als direct na het ont-kisten.

Dit laatste is nader onderzocht door de alkaliteit van de betondekking na 7, respectievelijk 14 maanden opnieuw te bepalen.

Hiertoe zijn kernen uit de betonconstructie geboord, die vervolgens zijn gespleten en beproefd met behulp van een indicatorvloeistof. Uit dit onderzoek is gebleken dat er in de geboorde kernen geen beton aanwezig was met een pH lager dan 10, hetgeen erop duidt dat het realkalisatieproces naar behoren heeft gewerkt. Het voorheen tot op een diepte van maximaal 10 mm gecarbonateerde beton blijkt na 14 maanden nog steeds voldoende gerealkaliseerd te zijn. Dit laatste komt overeen met hetgeen verwacht zou kunnen worden, aangezien de ingebrachte en geproduceerde alkaliën onder normale condities een evenwichts-pH bereiken bij circa 11 [4]. Een pH van 11 is normaliter in chloridevrij beton voldoende om de wapening tegen corrosie te beschermen.

**Conclusies**

De controlemetingen die tijdens de twee testprojecten zijn uitgevoerd, hebben het volgende uitgewezen:

- er is gedurende de realkalisatieproef duidelijk sprake van het inbrengen van alkaliën in het beton en van een productie van alkaliën nabij de wapening, hetgeen is gebleken uit de geboorde proefkernen;
- de eerste fase van het proces, het inbrengen van de alkalische oplossing tot de wapening, heeft circa 5 tot 10 uur geduurd, hetgeen zowel uit het verloop van de stroomdichtheid als uit de boorkernen is gebleken;
- het bevochtigen van de gel blijkt veel invloed te hebben op het verloop van de stroomdichtheid, waaruit dus blijkt dat de transportprocessen die het beton realkaliseren mede afhankelijk zijn van de mate van bevochtigen van de gel;
- de hechtsterkte van zowel vooraf als achteraf aangebrachte spuitbeton

blijkt niet negatief te worden beïnvloed door het realkalisatieproces; - na circa anderhalf jaar blijkt het beton van beide projecten nog steeds voldoende gerealkaliseerd te zijn.

Derhalve kan worden gesteld dat beide testprojecten zijn geslaagd en de resultaten van de metingen uitermate bevredigend zijn.

Beide testprojecten hebben tevens uitgewezen dat het realkaliseren van gecarbonateerd beton met een door carbonatatie geïnitieerde corrosie van de wapening, mits in een niet te vergevorderd stadium, ten opzichte van de tot nu toe toegepaste methoden mede overwogen dient te worden.

Zeker als prijs en geluidshinder in de bebouwde en bewoonde omgeving als zwaarwegende aspecten mede worden betrokken in de keuze van de reparatiemethode, zal realkalisatie wegens het minimaal saneren van de betonconstructie gunstig afsteken tegen de traditionele reparatiemethoden.

De bereikbaarheid van de te repareren betonconstructie is, evenals bij iedere andere reparatiemethode, wel van invloed op de prijs.

Indien als extra dekking een laag spuitbeton wordt aangebracht, staat deze renovatiemethodiek garant voor een verlenging van de levensduur, die ten minste gelijk is aan de levensduur van een goed vervaardigde betonconstructie met eenzelfde betondekking.

Ten aanzien van de praktische uitvoering geldt dat deze geen noemenswaardige problemen oplevert. De methodiek van werken is goed uitvoerbaar en redelijk eenvoudig.

Zonder in te gaan op de details van de diverse reparatiemethoden, de randvoorwaarden waaronder een reparatie moet plaatshebben, alsmede het stadium waarin het schademechanisme ver-

*vervolg op pagina 34*



(vervolg van pagina 33)

keert, zullen de kosten van realkalisatie in veel gevallen lager uitkomen dan bij andere reparatiemethoden, mede doordat de benodigde tijd voor de gehele reparatie relatief kort is.

Resumerend kan worden gesteld, dat realkalisatie van gecarbonateerd beton met door carbonatatie geïnitieerde corrosie van de wapening een betrekkelijk eenvoudige reparatiemethode is met weinig overlast, een maximale doelmatigheid en naar verwachting tegen redelijke kosten.

In de toekomst zal deze methode vanwege de lage kosten in veel gevallen uit-

komst bieden, vooral in gebieden waar 'stille zwaarder weegt dan geluid'.

#### Literatuur

1. Hondel, A.J. van den, C.J.J. Rijnen en J.P. Winkelman, Realkalisatie van gecarbonateerd beton via elektro-osmose. *Cement* 1988, nr. 11.
2. Hondel, A.J. van den en H.A.W. Cornelissen, Carbonatatie diepte en betondekking, gemeten in de praktijk. *Cement* 1986, nr. 6.
3. Reinhardt, H.W., Beton als constructiemateriaal, eigenschappen en duurzaamheid. Delftse universitaire pers, 1985.
4. Nustad, G.E., Durability of realkali-

nised concrete. NOT, 1989.

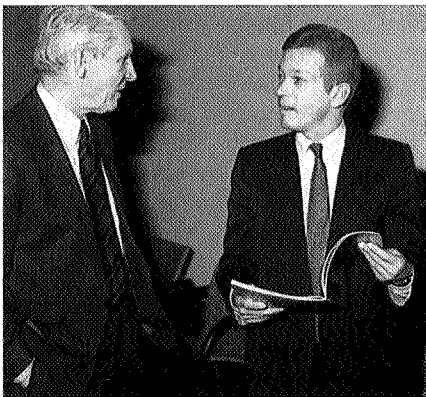
5. Odden, L., Realkalisering, samendrag av innledende laboratorieforsok utfort av Noteby, 1987-1988.
6. Miller, J.B., Electro-osmose: Teori og anvendelse. Noteby, 1966.
7. Wiederherstellung der Alkalireserve in der Betonüberdeckung des Armierungsstahls. Institut für Baustoff-Forschung, Baugewerbe 4/78 en 5/78.
8. Swinkels, M.R.J., Dechloreren en realkalisieren van beton. Literatuuronderzoek, TU Delft, faculteit der Civiele Techniek, 1989.

## Aanbieding themanummer *Cement* aan wethouder Rotterdam

Het april-nummer van *Cement* was geheel gewijd aan 'Het Nieuwe Rotterdam'. Vanwege dit speciale karakter heeft hoofdredacteur prof.dr.ir.G.Scherpbier het eerste

exemplaar van dit nummer op vrijdagmiddag 6 april aangeboden aan wethouder mr.G.F.H.Müller (Openbare Werken) van Rotterdam. Vrijwel alle auteurs die aan deze

special hebben meegewerkt waren bij deze gelegenheid aanwezig. Na de wethouder ontvingen de overige aanwezigen een exemplaar, wat een aardig plaatje opleverde.



Hoofdredacteur prof.dr.ir.G.Scherpbier (links) in gesprek met de wethouder van Openbare Werken Rotterdam, mr.G.F.H.Müller



Auteurs lezen cement

## Strupré organiseert excursies en thema-avond 'Hoogbouw', 14 juni 1990

De studievereniging Strupré organiseert voor donderdag 14 juni 1990 een excursie en een thema-avond 'Hoogbouw' in Den Haag.

### Excursie nieuwbouw Ministerie VROM

De excursie is gericht op de nieuwbouw van het Ministerie van VROM, waar boeiende oplossingen zijn gevonden voor indeling, bouwmethode, geluidsisolatie en trambaanoverkluizing.

Het project omvat een laagbouwgedeelte en een toren van 60 m hoogte. De excursie start om 13.30 uur, in de bouwkeet.

### Thema-avond

De thema-avond is gewijd aan 'hoogbouw' en wordt gehouden bij Ingenieursbureau Grabowsky & Poort, Gevers Deynootweg 61 in Den Haag. Van de volgende projecten zal worden toegelicht welke argumenten hebben geleid tot het al dan niet toepassen van prefab beton:

- woon/kantoorgebouw aan het Weena, Rotterdam;
- Delftse Poort, hoofdkantoor Nationale Nederlanden, aan het Weena, Rotterdam;
- uitbreiding Nederlandse Bank, Amsterdam;
- kantoorgebouw Robeco, Rotterdam.

### Deelname

De deelname aan zowel de excursie als de thema-avond staat open voor iedere geïnteresseerde, dus niet alleen voor Strupré-leden. In verband met de organisatie wordt het echter op prijs gesteld dat men zich vooraf aanmeldt bij het secretariaat van de Strupré: tel. 03402-78312 (mevr. Els Kracht).