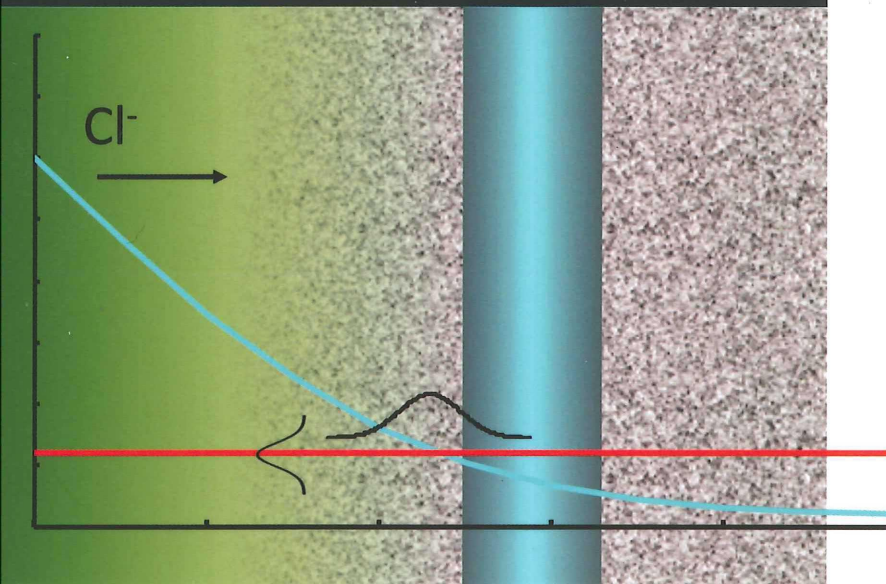


Prof.dr. Rob B. Polder

Beton, levenslang duurzaam, maar niet vanzelf.

Intreerede

13 mei 2011



Beton, levenslang duurzaam, maar niet vanzelf.

Intreerede

Uitgesproken op 13 mei 2011 ter gelegenheid van het aanvaarden van het ambt van hoogleraar Materials & Durability aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft.

door

prof. dr. Rob B. Polder

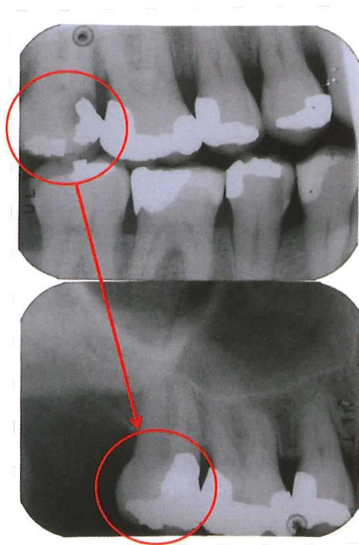
Mijnheer de Rector Magnificus,
Leden van het College van Bestuur,
Collega hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap
Zeer gewaardeerde toehoorders,
Dames en heren,

Ik zal u vanmiddag in kort bestek vertellen wat ik vind van beton dat levenslang duurzaam is, en waarom dat niet vanzelf gaat. Ik zal kort iets zeggen over duurzaamheid en dan vrij uitgebreid ingaan op wat naar mijn idee levensduur is, bepaalt of zelfs te kort kan doen. Daarna ga ik in op een aantal maatschappelijke ontwikkelingen die daar op in werken. Ik stel mezelf en ons allemaal een aantal doelen en opgaven; ik wil het hebben over oplossingen en tenslotte over organisaties en mensen.

Duurzaam, duurzaamheid, wat is dat? Wel, in 2011 weet iedereen dat: dat is groen, minder CO₂, vóór het klimaat, biologisch! Maar, dat is nog niet heel erg lang zo. In de jaren 1980 betekende duurzaam: een lange levensduur; bijvoorbeeld: beton is goed bestand tegen het milieu. Echter, in de jaren 1990 kwam er iets bij of zelfs voor in de plaats: namelijk wat we nalaten voor toekomstige generaties, en in het geval van beton was dat het effect ervan op het milieu. In het Engels zijn dat twee verschillende woorden: durability, levensduur; en sustainability, milieu en toekomstige generaties. In het Nederlands is dat allebei duurzaam of duurzaamheid. Echter, ook in de wetenschap maken we dat onderscheid: en zoals de rector al heeft opgemerkt, is collega Michiel Haas verantwoordelijk voor Materials & Sustainability, en ik ben verantwoordelijk voor Materials & Durability. Dit even ter opheldering.

Verder over levensduur. De levensduur van een constructie is de periode waarin die veilig en betrouwbaar functioneert. Daarbij heb ik het hier over infrastructuur, wat wij technneuten kunstwerken noemen. Dan bedoel ik niet schilderijen en beelden maar bruggen en viaducten, tunnels, sluizen, kademuren, parkeer garages. Wat verstaan we dan onder veilig en betrouwbaar? Wel, één ding is zeker: dat is niet van het moment van bouwen totdat de constructie instort! Dat functioneren heeft betrekking op het gebruik dat we van een kunstwerk maken, het milieu dat er op inwerkt en het materiaal waar het uit gemaakt is. En dat we over een periode, een tijd spreken, heeft er mee te maken dat veroudering kan optreden, ofwel degradatie. Wat is veroudering?

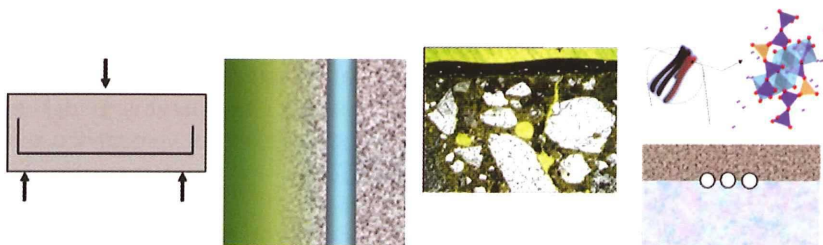
Wat u hier ziet (figuur 1) is een foto, zo'n ouderwetse, op film; eigenlijk nog een beetje ouderwetser, een fotogram. Het is een foto van mijn rechterkaak, gemaakt door mijn tandarts en haar assistente. Wat ik u wil meegeven is dat



Figuur 1 Foto van mijn rechterkaak, 18 januari 2011 (boven), 16 februari 2011 (onder), foto D. Wooning, R. de Leeuw

we allemaal veroudering meemaken, dat werkt overal op in. Dat hebben we met onze tanden en kiezen; als we suiker eten dan zijn er bacteriën die daar zuur van maken, dat inwerkt op het glazuur en de tandsteen; we krijgen gaatjes. Dan moet er worden geboord en gevuld, want anders zou dat je hele gebit opeten. Maar die vullingen staan bloot aan (wisselende) belastingen, temperatuur, mechanisch, een beetje slijtage. En wat u links boven in de rode cirkel ziet is een vulling die eerst is gescheurd, toen gebroken en toen is daar weer een gaatje ontstaan. Na enige tijd kwam ik bij mijn tandarts en die zei: OK, boren en vullen! En wat u daaronder ziet is de nieuwe vulling: aanzienlijk dieper dan de oude, want daar moest echt flink iets gerepareerd worden! Zo'n vulling, vertelde zij, heeft een levensduur van zeven tot tien jaar; ik denk dat hij er al langer zat, dus misschien was hij wel

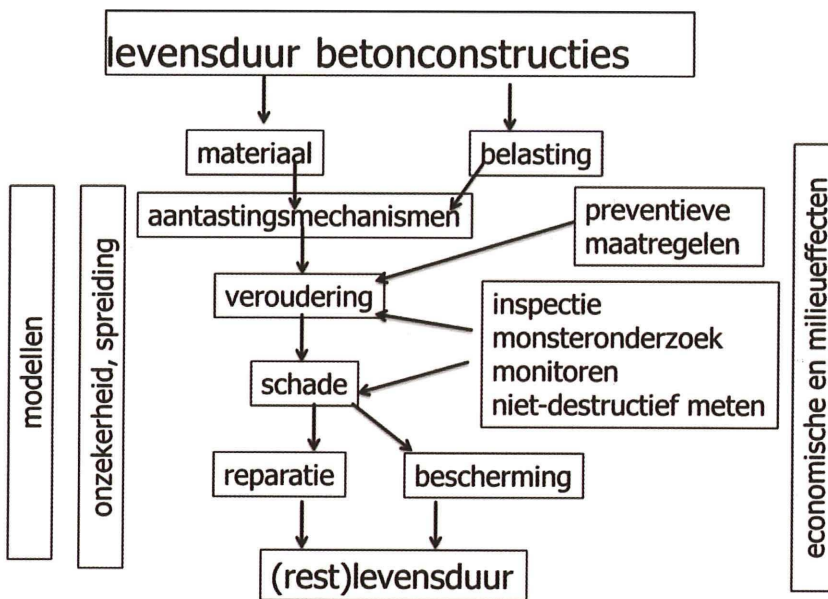
macro	meso	micro	nano
constructie	betondekking	poriestructuur	cementgel, passivering
mechanica.....fysisch transport.....binding.....chemische reacties			



Figuur 2 Lengteschalen en processen in beton

aan zijn eind.. En wat doe je dan om die nieuwe vulling een zo lang mogelijke levensduur te geven: veel poetsen, zo vaak mogelijk flossen, en af en toe op controle. Gaan we nu ook zoiets met betonconstructies doen? Ik heb het er zo nog over.

Wat is beton? Beton is een composiet van cementsteen, toeslagmateriaal (zand en grind), en wapening (figuur 2). Bij het bestuderen en begrijpen van beton erkennen we een reeks lengteschalen. Die gaan van macro, op constructieniveau waar mechanica en fysica het gedrag bepalen, via meso, de betondekking, een afstand van paar centimeters (de transportweg), naar micro, waar kleine korreltjes en poriën samen de structuur vormen en de weerstand tegen transport. Het is echter nodig nog een niveau kleiner te gaan, naar de nanometerschaal, want daar zien we pas hoe de cementgel, dat is de lijm van het beton, in elkaar zit, en hoe de passivering van wapeningsstaal er uitziet, de chemie. Daarvan zullen we nog zien hoe belangrijk die is.

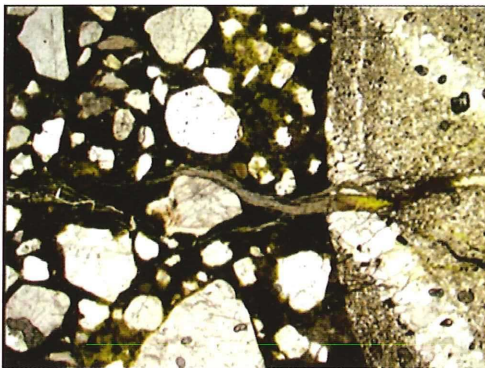


Figuur 3 Schematische voorstelling van processen en aspecten bij levensduur van betonconstructies

In het schema in figuur 3 staan alle elementen van de levensduur van betonconstructies. Ik ga ze met u bespreken.. Op het materiaal werken belastingen in, er treden aantastingsmechanismen op waardoor veroudering ontstaat. Daarop zijn

preventieve maatregelen van effect. Als die niet helemaal goed werken treedt schade op; daar kun je inspecties naar uitvoeren, monsteronderzoek naar verrichten, je kunt het monitoren en niet-destructief meten. Op zeker moment zul je moeten repareren en beschermen en dan heb je een nieuwe levensduur voor de rest van het leven van de constructie. Haaks op dit schema staan modellen; al deze zaken spelen zich af over lange tijdsschalen dus we moeten modelleren, waarbij onzekerheid en spreiding een zeer belangrijke rol spelen. En tenslotte, en niet onbelangrijk, hebben we ook nog economische en milieueffecten om rekening mee te houden. Kortom een heel bouwwerk aan kwesties. Ik wil er een paar uitlichten.

Aantastingsmechanismen worden bepaald door fysisch transport en chemische reacties. Dingen die transporteren en reageren zijn water, daarin opgeloste ionen en gassen. Van buiten komen kooldioxide, chloride-ionen, zuurstof en water; en van binnen hebben we natrium-, kalium- en hydroxylionen en ook water. Ik wil het hebben over wapeningscorrosie en alkali-silicareactie als aantastingsmechanismen. Verder heb je aantasting door vorst-dooiwisselingen, eventueel in combinatie met dooizouten en door chemicaliën als zuren en zouten; daar zal ik vandaag niet over spreken.



Figuur 4 Door ASR aangetaste toeslagkorrel waar de gel uitstroomt, foto J. Larbi

Alkali-silica reactie, ASR. Dat is een reactie van natrium-, kalium- en hydroxylionen in de porievloeistof (het water) in beton met reactief of amorfe silica in het toeslagmateriaal; soms is dat het zand, zoals in bepaalde streken in Engeland, soms het grind, zoals dat in Nederland wel voorkomt. Dit is een wereldwijd voorkomend probleem, echter vanwege de lokale aard van toeslagmaterialen, lokaal een beetje verschillend. De reactie vormt silicagel,

dat water opneemt en uitzet, waardoor de constructie van binnen uit opzwelt en uiteindelijk gaat scheuren. Figuur 4 toont een microscopiebeeld van een aangetaste korrel waar de gel uitstroomt; figuur 5 een constructie die flink is aangetast door ASR die zwelt en zich als het ware opdeelt in losse blokjes, als waren het bakstenen. Gelukkig is het aantal constructies dat hier echt last van heeft in Nederland vrij klein; maar de gevolgen zijn vrij ernstig en er zijn diverse flinke

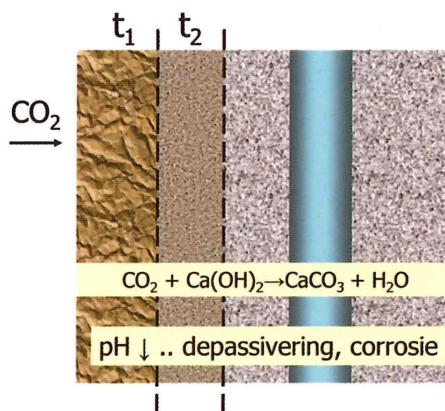
bruggen en viaducten gesloopt vanwege sterke ASR; een kostbaar probleem.



Figuur 5 Een door ASR aangetaste constructie, foto J. Larbi

Het andere aantastingsmechanisme waar ik wat uitgebreider over wil praten is corrosie van wapening. Wapening zit in beton om trekspanningen op te nemen; dat is staal, betonstaal of voorspanstaal. Chemisch gedraagt zich dat allemaal ongeveer hetzelfde, als ijzer, een onedel metaal dat de neiging heeft tot corroderen, ofwel roesten. Het goede nieuws is dat de porievloeistof sterk alkalisch is door de hydroxylionen, met een pH van meer dan 13 en dat daardoor, automatisch en spontaan, passivering optreedt. Er ontstaat een atoomdunne oxidehuid op het staal, dus op nanoschaal, die corrosie verhindert. Dit is de toestand van de wapening in de grote meerderheid van de betonconstructies, en dat duurt heel erg lang. Maar er zijn drie oorzaken waardoor die passivering verloren kan gaan.

De eerste is wat wij noemen carbonatatie, reactie van het beton met kooldioxide uit de lucht. Dat reageren gaat zo dat een min of meer scherp front het beton indringt (figuur 6), waarbij het beton links van het front heeft gereageerd volgens $\text{CO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ en rechts nog niet. Bij deze reactie daalt de pH van meer dan 13 naar ongeveer 9, en bij die pH is de passiveringslaag niet langer stabiel. Je krijgt depassivering en daardoor corrosie van wapening, waarbij van andere omstandigheden afhangt hoe hard dat gaat.



Figuur 6 Carbonatatie van beton

De tweede oorzaak is het indringen van chloride-ionen; die komen voor in zee-water en in doozouten, die we in sommige winters enthousiast gebruiken. Die

chloride-ionen dringen van buitenaf het beton binnen, echter niet als een scherp front maar als een diffuus proces (figuur 7). Wanneer het chloridegehalte bij de wapening een bepaalde kritische waarde overschrijdt, treedt depassivering op en kan weer corrosie ontstaan.



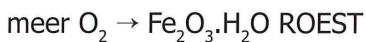
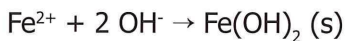
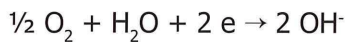
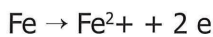
Figuur 7 Indringen van chloride in beton

De derde oorzaak van depassivering is zwerfstroom uit bijvoorbeeld spoortractie; daar zal ik vandaag verder niet over spreken.

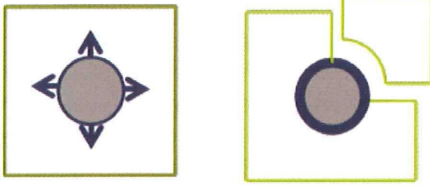


Figuur 8 Roest op wapeningsstaaf

Na depassivering treden elektrochemische reacties op: ijzer lost op in de porievloeistof in de vorm van ijzerionen, waarbij elektronen achterblijven in het staal. Die reageren vervolgens met zuurstof en water tot hydroxylionen. Ijzer- en hydroxylionen gaan elkaar ontmoeten en er ontstaat een neerslag van ijzer(II)hydroxide, en wanneer er nog wat zuurstof beschikbaar is reageert dat door tot ijzer(III)hydroxide, een poreuze en volumineuze massa die we kennen als roest (figuur 8).



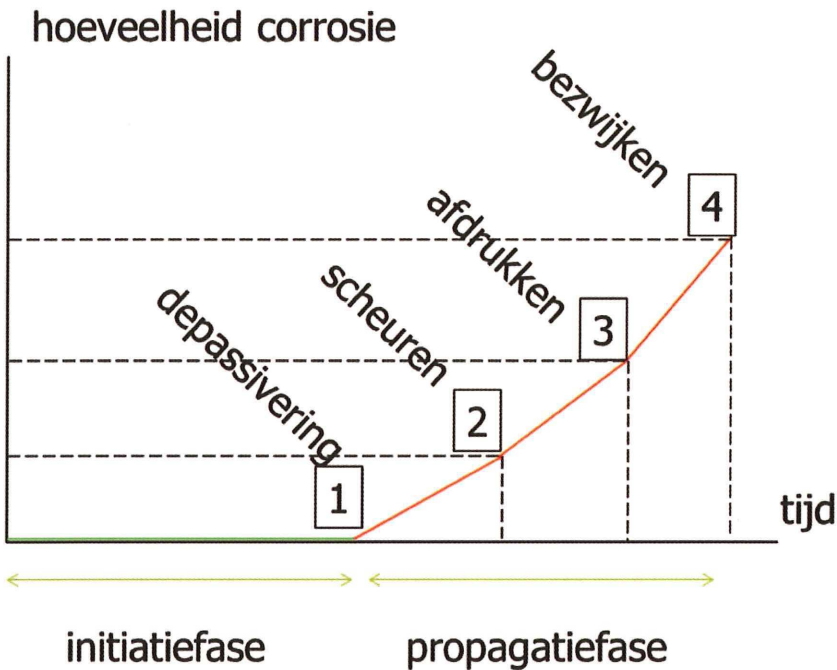
Het volume van de roestproducten is groter dan dat van het staal waar ze uit voorkomen en je krijgt dus rondom zo'n wapeningsstaaf expansie die leidt tot scheuren van beton en afdrukken van de dekking (figuur 9).



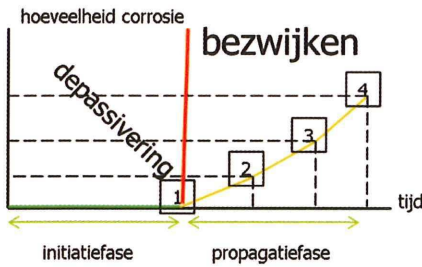
Figuur 9 Roestvorming rondom wapeningsstaaf veroorzaakt expansie, scheuren van beton en afdrukken van de dekking, naar [1]

De verschillende stappen en fasen zijn schematisch weergegeven in figuur 10, waar we links beginnen bij $t=0$. Vanaf dat moment treedt er een hele tijd geen corrosie op. Tegelijk is dit de fase waarin carbonatatie optreedt of chloriden indringen; we noemen dat de initiatiefase. In die fase is er nog niets fysieks aan de hand, maar het proces bouwt (overdrachtelijk) zijn spanning op. Op het

tijdstip gemarkeerd met 1, depassivering, begint het corrosieproces daadwerkelijk te lopen. Daarna zien we op zeker moment dat de druk door de hoeveelheid corrosieproducten zo groot is dat het beton gaat scheuren, markering 2. En na nog een tijdje, bij punt 3, wordt de dekking afgedrukt; als we het laten doorgaan dan ontstaat de situatie waarin bezwijken mogelijk wordt. Die tweede fase, de propagatiefase, begrijpen we veel minder goed en daardoor kunnen



Figuur 10 Verschillende fasen in en gevolgen van het corrosieproces, naar [2]



Figuur 11 Propagatielijijn voor voorspanstaal met snelle breuk na corrosie-initiatie (deplassivering)

we die minder goed modelleren dan de eerste fase. We zien dus door het corrosieproces een bepaalde diameterafname optreden, waardoor je sterkteverlies van de constructie kunt krijgen. Bij betonstaal ("gewone wapening") is de tijd tot afdrukken een jaar of tien. Je kunt zeggen dat scheuren en afdrukken van beton waarschuwen dat er iets aan de hand is. Echter, bij voorspanstaal, dat is staal dat is uitgerekt waardoor het beton onder druk staat, en dat een ander type staal is, met een hoge treksterkte en een andere microstructuur, kan corrosie leiden tot vrijwel onmiddellijke breuk; de propagatietijd is ongeveer nul. In figuur 11 zie je dat de lijn voor voorspanstaal heel steil omhoog loopt en bezwijken heel kort na de initiatie optreedt. Figuur 12 toont een brug in de Verenigde Staten die is ingestort door breuk door corrosie van voorspanstaal. Dat is een proces dat niet van tevoren waarschuwt en waarbij grote ongelukken kunnen gebeuren. Ook in Europa komt dat wel eens voor. Is de VS nu een slecht voorbeeld voor ons of is het ons voorland? De toestand is daar niet best; zo'n 25.000 bruggen zijn in "constructief onvoldoende" staat, schrijft men. In 2003 hebben ze geschat dat het 5 miljard dollar per jaar zou kosten om de zaak weer op peil te brengen, in totaal 30 miljard. Op de IABMAS conferentie vorig jaar in Amerika vertelde iemand van de staat Pennsylvania dat zij ook de kosten hadden geschat: ettelijke miljarden voor Pennsylvania alleen. Echter, zij waren er achter gekomen dat ze twee keer zoveel nodig hadden dan ze eerder geschat hadden. Kortom een fors probleem. Hebben we zo'n fors probleem in Nederland? Ik denk het niet, maar helemaal alles OK is het ook niet. De VROM-inspectie van het ministerie van Infra en Milieu heeft vorig jaar in een kleine, niet-representatieve steekproef onderzoek aan vijf kleine bruggen uitgevoerd [3]. Bij twee ervan vonden ze dat de veiligheid onder het gewenste niveau zat. Eén vertoonde schadelijke alkali-silica reactie en één



Figuur 12 Brug in de Verenigde Staten die is ingestort door breuk door corrosie van voorspanstaal (bron: internet)

vertoonde zo ernstige corrosie dat die is afgesloten, omdat het niet veilig was er verkeer overheen te laten gaan. Kleine steekproef, toch een waarschuwing!

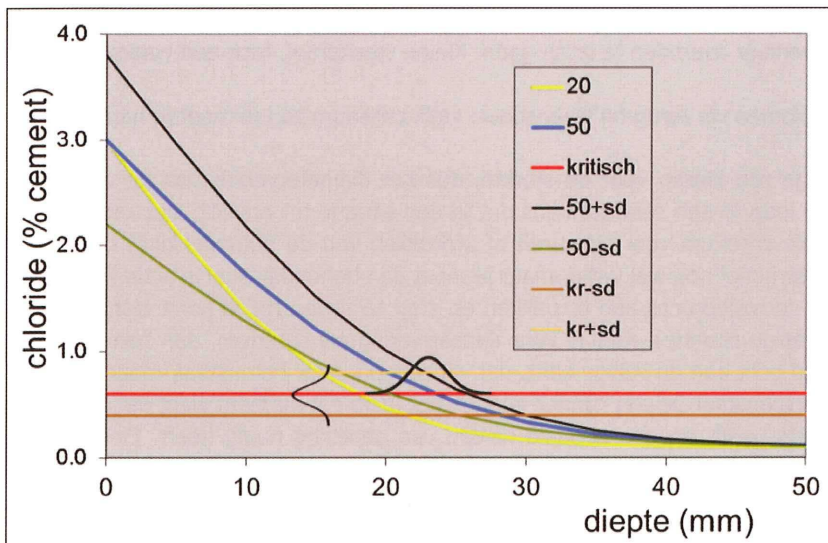
Nu komen we terug bij levensduur: welk criterium zou je moeten hanteren?

Als je zou kiezen voor de sterkte, dus het diameterverlies van de wapening, dan loop je een serieuze kans dat je een situatie tot onveilig laat komen. Kies je als criterium voor scheuren of afdrucken van de betondekking, dan is dat constructief nog wel veilig, maar je moet dan behoorlijk snel in actie komen om het corrosieproces aan te pakken en stop te zetten (of je komt alsnog in een onveilige situatie). Kies je voor depassivering als criterium, dan ben je vrijwel altijd echt aan de veilige kant, dat wil zeggen, voor betonstaal, maar niet voor voorspanstaal. Je zou kunnen zeggen dat je op dat moment weet dat de patiënt koorts heeft, en een bepaald niveau van genezing nodig heeft. Er is tijd om reparatie en bescherming uit te gaan voeren.

Daarom hebben we collectief gekozen voor depassivering als criterium bij het ontwerpen op levensduur. We hebben modellen die het optreden van depassivering kunnen voorspellen. Bijvoorbeeld voor het depassiveren door indringen van chloride is een functie ontwikkeld:

$$C(x,t) = f(C_s, \text{erf}[x/\sqrt{D \cdot t}]) < C_{\text{kritisch}}$$

die het gehalte chloride op diepte x na tijd t voorspelt als functie van C_s , het gehalte in het oppervlak en D , de diffusiecoëfficiënt voor chloride in het beton. Wanneer we er maar voor zorgen dat het chloridegehalte bij het staal $C(x,t)$ onder het kritische gehalte voor initiatie van corrosie C_{kritisch} blijft, is er niks aan de hand. Hoe dat in zijn werk gaat en hoe ingewikkeld dat kan zijn, zien we in figuur 13. Onder bepaalde aannamen (met bepaalde invoerparameters) is na 20 jaar het chloride ingedrongen volgens het gele profiel. Na 50 jaar krijg je het blauwe profiel. Waar zit nu het kritisch chloridegehalte? Dat is de rode lijn. Waar geel of blauw rood kruisen, zit het punt waarop wapening zal gaan corroderen, het depassiveringsfront. Na 50 jaar zit dat op zo'n 25 mm diepte. Echter, het kan ook zijn dat de chloridebelasting groter is dan aangenomen. Dan ligt dat punt op het oppervlak hoger en het punt waar het profiel de kritische lijn snijdt ligt wat dieper. Maar het kan ook zijn dat de belasting geringer is, en het kritische punt schuift naar links. Het plaatje wordt al iets ingewikkelder. Maar ook de waarde van het kritisch gehalte kan door omstandigheden lager (minder gunstig) of hoger (gunstiger) liggen. Nu wordt het toch wel echt rommelig; de onzekerheid die hiermee gepaard gaat drukken we uit in een kansverdeling met een bepaalde vorm, bijvoorbeeld rondom dat eerste punt op 50 jaar! Ook de onzekerheid in het kritische gehalte krijgt zo'n verdeling. We moeten

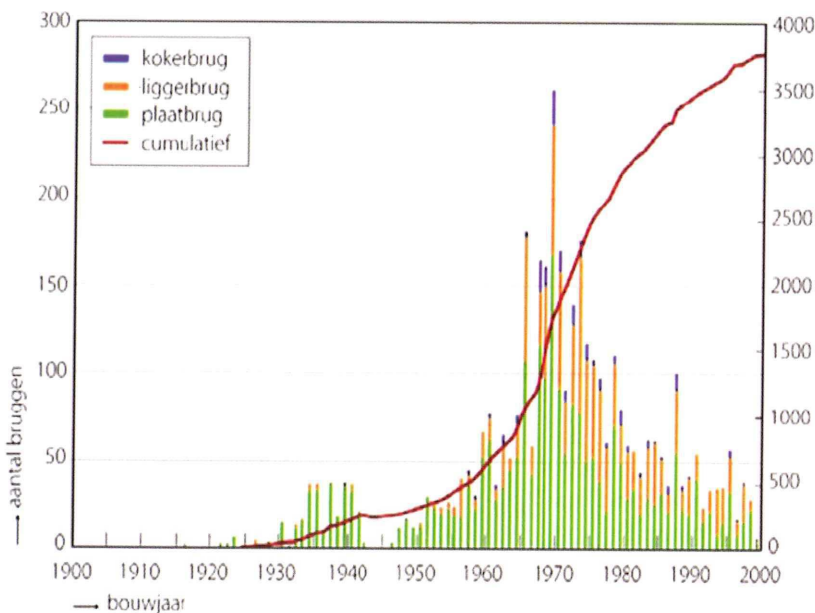


Figuur 13 Indringen van chloride in beton berekend met een diffusiemodel na 20 en 50 jaar (dalende curven) en kritisch chloridegehalte (horizontale lijn), met (normale) verdelingen rondom gemiddelden

dus statistiek, ofwel kansrekening gaan gebruiken bij dit soort modellering met gemiddelden, spreiding en kansverdelingen. Dat is een beperking, maar met goed analyseren van waarnemingen aan constructies komen we een heel eind. Echter, onze modellen zijn empirisch; ze gelden en werken dus voor bekende materialen en omstandigheden. Echter, die gaan veranderen want het klimaat verandert. We hebben bijvoorbeeld langere droge perioden zoals de afgelopen periode. We hebben ook bij vlagen heftiger neerslag; dit is anders dan waar we gewend aan waren in Nederland, namelijk dat het iedere week wel een beetje regent. En soms, zoals de afgelopen twee keer, hebben we ook nog een lange en strenge winter. Kortom, de belastingsomstandigheden gaan veranderen. Daardoor zal bijvoorbeeld carbonatatie van beton sneller gaan en dus dieper worden over een bepaalde periode; ik denk dat de combinatie van carbonatatie en chloride, die agressiever is dan elk van beide op zich, belangrijker gaat worden. Maar er gebeurt nog veel meer: we willen minder cement gaan gebruiken, en we willen andere bindmiddelen gaan gebruiken omdat die beter zijn voor het milieu. Ik heb al gezegd dat we niet zo heel goed weten hoe snel het corrosieproces gaat. We weten dat er vaak scheuren zitten in beton, wat misschien wel leidt tot snelle depassivering, waardoor de rode lijn een stuk naar links schuift; het moment waarop je had willen ontwerpen is al heel snel bereikt. Kortom, de onzekerheid in allerlei (deel)processen neemt toe.

Hoe zit dat dan in de praktijk? Daar is wel wat over bekend. Gerard Gaal, gepromoveerd aan de TU Delft in 2004, heeft het bruggenbestand van Rijkswaterstaat onderzocht [4]. Hij heeft gevonden dat op 40 jaar ouderdom 5% van het areaal afdrukken van betondekking had door corrosie. Na 70 jaar zou ongeveer 50% datzelfde stadium bereikt hebben, dus ergens in de buurt van punt 2 en 3 in mijn diagram. Als je aanneemt dat tussen initiatie van corrosie en afdrukken van dekking tien jaar zit, dan kun je die populatie voorstellen door een (normale) verdeling met een gemiddelde ouderdom bij corrosie-initiatie van 60 jaar. Dat betekent dat op 40 jaar ouderdom 10% van de constructies initiatie van corrosie ondergaan, het ontwerpcriterium zoals we dat in bijvoorbeeld CUR Leidraad 1 maar ook internationaal hanteren.

In figuur 14 staat uitgezet wanneer bruggen en viaducten in Nederland zijn gebouwd. De piek ligt in 1970 en de grote meerderheid is tussen 1960 en 1980 gebouwd. Als we daar 40 jaar bij optellen zitten we in anno nu, of beter in de jaren tussen 2010 en 2020! Ik denk daarom dat corrosie-initiatie in een wezenlijk deel van de populatie aan het optreden is en dat we toename van corrosie en schade zullen zien. Zijn we daar wel op voorbereid? Ik heb zo mijn twijfels.



Figuur 14 *Bouw van bruggen en viaducten in Nederlandse rijkswegen, naar [4]*

Tegelijkertijd zijn er belangrijke maatschappelijke ontwikkelingen. We willen bijvoorbeeld minder grondstoffen gaan gebruiken, minder energie consumeren en minder CO₂ uitstoten. Tegelijk vinden we mobiliteit belangrijker, we willen minder hinder op snel- en spoorwegen en we willen ons cultureel erfgoed beter gaan beheren. In 2010 heeft het vorige kabinet laten uitzoeken of het mogelijk is 20% op de begroting te bezuinigen, onder de titel Brede Heroverwegingen. Ik heb een van die rapporten nagelezen en daarin staat dat op dit moment ongeveer 2 miljard euro per jaar wordt uitgegeven voor aanleg van Rijksinfrastructuur in brede zin als wegen en spoorwegen enzovoort [5]. En dat beheer en onderhoud ongeveer 1 miljard per jaar kost. Dat zijn geen geringe getallen. Het extreme scenario om aan die 20% bezuinigingen te komen gaat er van uit dat men stopt met nieuw bouwen, nadat overigens alle lopende contracten netjes zijn afgerond. Over een paar jaar gaan we dus geen nieuwe bruggen, viaducten en tunnels meer bijbouwen. Dat verhoogt dan de druk op de bestaande infrastructuur aanzienlijk! Er wordt dan ook terecht op gewezen dat beheer en onderhoud moeten worden gehandhaafd; ik denk zelfs dat je nog wat meer moet reserveren dan het huidige niveau. En in dat verband wil ik de stelling pomen dat het verlengen van de levensduur een enorme bijdrage kan leveren aan het verbeteren van de duurzaamheid van onze hele maatschappij. Als je namelijk gaat verlengen, repareren en beschermen, dan laat je massa en volume op zijn plaats. Dan heb je het over kubieke meters. Een vierkante meter brugdek van ongeveer een halve meter dik weegt 1000 kilo, een ton. Een typische middelgrote brug van 25 bij 40 m is 1000 vierkante meter, dus weegt 1000 ton. Dat zou je niet moeten willen vervangen; als dat al kon zou het nog onzinnig gesleep met materiaal en grondstoffen zijn. Als je er op tijd bij bent kun je de schil herstellen en plaatselijk repareren, of alleen de randen. Dan heb je het over vierkante meters of strekkende meters. Figuur 15 toont een typische betonschade door roest bloeit uit, een eerdere reparatie komt er af en de wapening lost op; behoorlijk ernstig! In plaats van dat slepen met beton bij nieuwbouw en vervanging zijn er allerlei methoden om bestaande constructies te verduurzamen. Je kunt bijvoorbeeld preventief, dat wil zeggen voordat corro-



Figuur 15 Typische betonschade door chloride: roest bloeit uit, een eerdere reparatie komt er af en de wapening corrodeert weg

sie optreedt, het beton hydrofoberen; met ongeveer 250 gram hydrofobeermiddel per vierkante meter beton, waarvan ook nog eens de helft water is. Of je kunt met behulp van kathodische bescherming het corrosieproces stoppen; met een fractie van een millimeter dikke geleidende coating. Ga je voor zwaar en degelijk dan spuit je er bijvoorbeeld 25 mm spuitbeton op; dat weegt nog maar 50 kilo per vierkante meter, in plaats van 1000. En je kunt versterken, met bijvoorbeeld 5 mm staalplaat of koolstofvezel-versterkte kunststof. Allemaal lichter, minder materiaal, sneller aan te brengen dan vervangen van zo 'n hele constructie. En daarmee spaar je grondstoffen, CO₂-emissie, energie, hinder en geld!

Kortom, welke doelen denk ik dat wij ons moeten stellen? Ik zou zeggen: laten we de levensduur van de bestaande infrastructuur verdubbelen! We hebben gezien dat de kans op corrosie-initiatie 10% is na 40 jaar - laten we daar 80 jaar van maken als standaard; dan is dat probleem een hele tijd in de toekomst opgeschoven. Daarvoor moeten we beoordelen, monitoren, beschermen, repareren en bewaken: allemaal technieken waar we al een hoop van weten, die we vooral beter moeten inzetten, maar waar ook nog wel wat vernieuwing zou kunnen plaatsvinden. Vooral bij dat repareren hebben we wel een probleem: Europees onderzoek, bevestigd door recent Nederlands onderzoek, heeft laten zien dat 50% van alle betonreparaties faalt in 10 jaar. Ik vind dat we daar 25 jaar van zouden moeten maken als doel om te bereiken. Ik denk dat dat mogelijk is en ik heb ook nog wel wat ideeën om dat voor elkaar te krijgen. Voor nieuwbouw mikken we intussen al op 100 jaar levensduur met een kans van 10% kans op corrosie-initiatie. Dat lijkt me een redelijk getal. We hebben ontwerpmodellen en laboratoriumproeven die heel behoorlijk functioneren, maar waar uiteraard verbetering en ontwikkeling op hun plaats zijn. Wat we nog helemaal niet voor elkaar hebben zijn methoden voor het toetsen van de duurzaamheid in het werk, het omgaan met nieuwe materialen bij het modelleren van levensduur, en het daarin inpassen van preventieve maatregelen die er zijn of die wellicht aangeboden zullen worden. Werk aan de winkel!

Er zijn ook oplossingen. De eerste is triviaal: gebruik bestaande kennis! En dan noem ik hydrofoberen en kathodische bescherming; beide worden gebruikt in Nederland, maar op te kleine schaal. We hebben er goede kennis van en ruim voldoende ervaring mee om de toepassing aanzienlijk te laten toenemen. Dat ligt een beetje anders met roestvaststaal wapening en kunststof omhulling van voorspanning; beide met een veel betere levensduur en controleerbaarheid, of lichtbeton. Alle drie worden in Nederland niet of nauwelijks gebruikt terwijl er in omliggende landen, zeg Europa, ruime ervaring mee is, kennis aanwezig is, en positieve voorbeelden voorhanden zijn. Waarom doen we dat niet? Laten we er serieus over nadenken!

We zijn natuurlijk ook met onderzoek bezig hier aan de TU Delft, we hebben vragen, zoals ik die al heb gesteld, we hebben goede ideeën om die vragen te beantwoorden en we brengen nieuwe kennis voort. Ik kom daar zo op terug. Maar het is uiteindelijk de toepassing die uitmaakt of je als universiteit of kennisinstelling iets toevoegt en verbetert aan de maatschappij. Daar heb je partners voor nodig, want een universiteit gaat niet zelf bouwen of repareren. Daarvoor hebben we contacten nodig met de beheerders, de bouwers, reparatie- en adviesbedrijven en een vehikel daarvoor zou kunnen zijn het pas opgerichte InfraQuest, samenwerkingsverband van Rijkswaterstaat, TU Delft en TNO. Ik voorzie vooral een goede rol voor InfraQuest bij proefprojecten waarbij je nieuwe ideeën toepast in projecten die zo van aard en schaal zijn dat ook mensen uit de praktijk zien hoe het werkt en erin kunnen gaan geloven.

Iets over kennis uit onderzoek dat we gedaan hebben of aan het doen zijn. Eerste voorbeeld is het gedrag van chloride in jong beton. Dat is het afstudeerwerk van Pepe Caballero, M.Sc., uit 2009. Pepe vroeg zich af wat er gebeurt als je chloride loslaat op beton dat één dag oud is, in plaats van op 28 dagen ouderdom, het standaard geval in onze modellering en proeven. Hij heeft experimenten gedaan en een vrij eenvoudig model gebruikt om de consequenties door te rekenen. Interessant is dat die resultaten uniek zijn; hier is nog niet eerder over gepubliceerd, volgens mij heeft nog niemand dat eerder gedaan. En wat blijkt? Jong beton is voor chloride zeer permeabel, geheel volgens verwachting, die chlorides dringen daarin heel snel in. Echter, doordat die microstructuur snel minder permeabel wordt door hydratatie van het cement, is het effect op een ouderdom van bijvoorbeeld 50 jaar maar een paar millimeter! We begrijpen het proces en het effect voldoende om vast te kunnen stellen dat het geen echt probleem is. Dit soort kennis hebben we bij TNO al een keer toegepast in onze advisering.

Het tweede afstudeerproject dat ik wil noemen is dat van Jose Pacheco in 2010. Jose had tot taak onder andere het identificeren van oude betonproefstukken: we hadden er nog zo'n honderd liggen van meer dan tien jaar oud. Echter, de labels waren onleesbaar geworden. Hij heeft onder andere de elektrische weerstand van dat beton gemeten en op basis van statistische analyse was hij in staat onderscheid te maken tussen betonsamenstellingen gemaakt met vier verschillende cementsoorten in de proefstukken. Ook dit is een bijzonder stuk werk waarover bij mijn weten niet eerder is gepubliceerd. Ik denk ook dat het inzicht in de verdeling van de elektrische weerstand van beton ons zou kunnen helpen een methode te ontwikkelen voor het toetsen van de duurzaamheid in het werk. Goed nieuws is verder dat Jose inmiddels bij mij aan een promotie-onderzoek begonnen is.

Dan nu een promotieproject, over hydrotalciet in beton, gefinancierd door het Materials Innovation Institute, M2i, met steun van TNO en het Ministerie van Economische Zaken. De promovendus is Zhengxian Yang, ik ben heel blij dat ik hem gevonden heb; dat valt niet mee, om goede promovendi te vinden! Het onderzoek gaat over hydrotalcieten, vaste stoffen met een laagstructuur, opgebouwd uit twee- en driewaardige metaalionen met zuurstof en hydroxylionen in de lagen; tussen die lagen kun je anionen inbouwen die gevoelig zijn voor uitwisseling met ionen in de omgeving. We gaan een idee onderzoeken van TNO-collega's Hartmut Fischer en Olaf Adan, die er samen met buitenlandse partners een octrooi op hebben. Het idee is dat wanneer chloride-ionen die het beton indringen zo'n laagstructuur tegenkomen, zij gebonden worden door het hydrotalciet en dat andere anionen vrijkomen, bijvoorbeeld ionen die als inhibitor corrosie zouden kunnen bestrijden. We denken dat we door hydrotalciet aan beton toe te voegen de levensduur van nieuwbouw kunnen verlengen, maar ook van reparaties.

Een groep promotieprojecten die ik wil noemen is gericht op scheuren in beton en het kritische chloridegehalte. Dit is een onderdeel van het STW-perspectief programma IS2C, Integral Solutions for Sustainable Concrete Construction. Hierin werken drie promovendi, twee in Delft en één aan de TU Eindhoven; overigens staat in Eindhoven nog een vacature hiervoor open. Het onderwerp is de rol van scheuren bij het indringen van chloride en het ontstaan en zich ontwikkelen van corrosie. We bestuderen processen als het afdichten door corrosieproducten en vanzelf dichtgroeien (self healing) van scheuren. Verder gaan we een testmethode ontwikkelen voor het kritisch chloridegehalte, waar zoals gezegd de onzekerheid nog te groot is, in samenwerking met een internationale commissie van RILEM.

Nog een groep promotieprojecten gefinancierd via STW IS2C is gericht op alkali-silica reactie en lithium. We hebben drie promotieplaatsen bij TU Delft en TU Eindhoven, alle drie nog vacant, maar gelukkig zijn er interessante kandidaten in zicht en is bij Leo Pel in Eindhoven recent een afstudeerder begonnen. ASR is, zoals al gezegd, een reactie van natrium en kalium met reactief silica in het toeslagmateriaal waarbij silicagel wordt gevormd, wat kan leiden tot schadelijke expansie. Reparatie van ASR is vaak niet duurzaam, het zwellen gaat door en in gevallen leidt dit tot slopen en vervangen van een getroffen constructie. We weten dat het toevoegen van lithium aan beton met reactief toeslagmateriaal preventief werkt en de schadelijke reactie voorkomt. We willen het mechanisme achter het effect van lithium beter begrijpen en mede daaruit een reparatiemethode voor bestaande constructies ontwikkelen met behulp van lithium.

Ik kom nu aan de afsluiting van mijn betoog. Ik wil het met u hebben over organisaties en mensen. Ik loop nu een paar jaar rond bij de TU Delft en al behoorlijk lang bij TNO; ik heb contacten met Rijkswaterstaat en allerlei bedrijven en andere organisaties. Wat ik vooral zie is veroudering, van mensen en daarmee van kennis; pensionering en zelfs afvloeiing. Ik denk dat we hier krachtig op moeten reageren met verjonging van het personeelsbestand. Dat is een probleem, want mensen die geïnteresseerd zijn in materials & durability en die in bredere zin kijken hebben op materialen zijn behoorlijk schaars. Tegelijk



Figuur 16 Drie-tiende aanstelling, een mini-statiefje?

zie ik dat het aannamebeleid van onze organisaties uiterst terughoudend is. Universiteiten aarzelen om goede mensen een serieus perspectief aan te bieden en blijven ze tijdelijk aanstellen. TNO en andere organisaties zijn terughoudend met het aannemen van mensen als het niet tenminste om een schaap met zes of zeven poten gaat; er wordt veel te vaak gekozen voor detacheringconstructies. Als er schaarste is, moeten we ook meer mensen opleiden. Daar wil ik zeker graag aan bijdragen; we moeten daarbij meer studenten werven voor onze colleges en afstudeerprojecten in de materiaalkunde. Uiteindelijk hoop ik ook dat ze dan geïnteresseerd raken in promoveren. Promoveren is lastig werk dat grote concentratie vereist, een serieuze baan dus. Ik vind het dan ook een slechte zaak dat er voorstellen zijn, deels afkomstig uit de universitaire wereld en opgepakt door de staatssecretaris, om promovendi niet langer een salaris te geven maar een beurs. Ik denk dat dat de kwaliteit van het werk en zeker het aanbod van Europese en Nederlandse promovendi drastisch zal beperken – een slechte zaak!

Tsja, en daar sta je dan als hoogleraar met drie-tiende aanstelling; is dat mooi, is dat goed? Is dat veel of is het weinig? Mijn voorganger op materials & durability, Jan Bijen, die al weer een paar jaar weg is, die had twee-tiende, en die heeft toch heel veel bereikt, goede mensen opgeleid, waaronder onderzoekers

maar ook praktijkmensen. Michiel Haas, mijn materials & sustainability collega sprak anderhalf jaar geleden zijn intreedende uit, die heeft een vier-tiende aanstelling. Hij vond dat geen volledige (leer)stoel, maar een krukje. Ik vraag mij dus af wat is drie-tiende? Ik zie het als een mini-statiefje (figuur 16), waarmee je een behoorlijke stabiliteit en stevigheid kunt bereiken, maar je moet een beetje oppassen met zware belastingen. Ik zal mijn best doen, ik ben enthousiast, ik wil de belangstelling voor ons vak laten groeien. Ik wil jonge mensen onze nieuwe kennis meegeven en daarmee de invoering van nieuwe methoden en technieken bevorderen – dat is hard nodig!

Ik rond af: ik heb met u gesproken over beton, duurzaamheid en levensduur, en dat dat niet vanzelf gaat hoop ik ook aangetoond te hebben. Dan wil ik nu mijn dank uitspreken aan mijn collega's hier binnen de TU waarmee het goed samenwerken is en die mij al veel geleerd hebben, bij TNO waar ik vele, vele jaren met veel plezier heb samengewerkt en die mij heel veel geleerd hebben; en mijn andere technische, inhoudelijke en zakelijke relaties in dit veld in Nederland en in de rest van de wereld: dank u zeer!

Maar, last but not least, wil ik mijn diepe dank overbrengen aan mijn vrouw Lise, voor vijfendertig jaar liefde, steun en wijsheid.

Dames en heren, ik dank u voor uw aandacht en ik heb daarmee gezegd!

Referenties

- 1 Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R.B., 2004, Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 3-527-30800-8, 392 pp.
- 2 Tuutti, K., Corrosion of steel in concrete, CBI Stockholm, 1982, 468 pp.
- 3 Handreiking constructieve veiligheid bestaande bruggen en viaducten, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, VROM-inspectie, publicatienummer VI-2011-47, januari 2011
- 4 Gaal, G.C.M., 2004, Prediction of Deterioration of concrete bridges, proefschrift, Delft University Press
- 5 Rapport brede heroverwegingen, deel 3. Mobiliteit en water, Inspectie der Rijksfinanciën, april 2010

Foto's van de auteur, tenzij anders aangegeven

Muziek: John Coltrane: Olé, Naima, Impressions