

Het Inspectie-Validatie-Model¹

J.D. Bakker en J.M. van Noortwijk

1.	Inleiding	2
2.	Noodzaak van een goede levenscyclusanalyse	3
3.	Beheer- en onderhoudssystematiek voor kunstwerken	3
4.	Voorspellen van het conditieverloop in de tijd	4
4.1.	Impliciete voorspellingen	5
4.2.	Expliciete voorspellingen	5
4.3.	Expliciet bepaalde instandhoudingstrategieën op basis van levenscycluskostenoptimalisatie	5
5.	Actualiseren instandhoudingplan op basis van inspecties	6
6.	Het Inspectie-Validatie-Model (IV-model)	7
7.	Voorbeelden van het gebruik van het IV-model	9
7.1	Voorbeeld 1: Inspectievalidatie van een op impliciete voorspellingen gebaseerd beheerplan	9
7.2	Voorbeeld 2: Inspectievalidatie van een op expliciete voorspellingen gebaseerd	11
8.	Conclusies	13
9.	Literatuur	13
	Bijlage A. Chloride-indringing volgens tweede diffusiewet van Fick	15
	Bijlage B. Wiskunde achter Inspectie-Validatie-Model	19

¹ Dit artikel is verschenen in het *Handboek Onderhoudsmanagement*, Hoofdstuk G6040, blz. 1-23, Deventer: Kluwer, 2005.

1. Inleiding

Beslissingen in de ontwerpfase van een constructie bepalen voor een groot deel de toekomstige onderhoudsbehoefte. In het verleden werd hier niet expliciet bij stilgestaan. De afgelopen tien jaar echter is de behoefte aan een expliciete kosten-baten-afweging gegroeid en worden de gevolgen voor beheer en onderhoud van een ontwerp vaker expliciet meegenomen. Men maakt daarbij gebruik van verouderingsprognoses in de tijd, soms gecombineerd met levenscycluskostenanalyses.

Rijkswaterstaat ontwikkelt en gebruikt diverse hulpmiddelen voor het optimaliseren van het toekomstige onderhoud, reeds in het ontwerpstadium, op basis van een begroting van de levenscycluskosten (Life Cycle Cost: LCC). Deze hulpmiddelen optimaliseren de initiële investeringskosten in het bouwjaar ten opzichte van de toekomstige kosten van preventieve of correctieve vervangingen, al dan niet in combinatie met levensduurverlengend onderhoud. Op basis van deze optimalisaties worden in de ontwerpfase al generieke of specifieke onderhoudsstrategieën bepaald of worden alternatieve ontwerp oplossingen tegen elkaar afgewogen. Belangrijke invoer informatie bij deze optimalisatiemodellen is de *verwachte* veroudering in de tijd en de daarbij behorende onzekerheid.

Recentelijk is het zogenoemde Inspectie-Validatie-Model (IV-model) ontwikkeld, bedoeld om in de gebruiksfase middels inspecties te toetsen of de bij het ontwerp aangenomen instandhoudingstrategie overeenkomt met het *feitelijke*, gemeten verouderings-verloop. Hiermee wordt de brug geslagen tussen het ontwerpproces en het inspectieproces; immers: als verouderingsprognoses tijdens het ontwerp worden vastgelegd, dan kunnen deze tijdens inspecties als referentie dienen. Omdat een onderhoudsadviseur zowel de ontwerpaanname als het werkelijk verouderingsgedrag kent, kan hij tot betere advisering komen.

Het IV-model is een probabilistisch programma. De onzekerheid in het verouderingsproces in de tijd is gemodelleerd met behulp van een gammakansverdeling, waarbij de parameters zijn bepaald op basis van meningen van experts en/of van inspectiedata. Voor het laten aansluiten van het verouderingsverloop in de tijd (en de bijbehorende onzekerheidsbanden) op de inspectiegegevens is gebruik gemaakt van een combinatie van de methode van de kleinste kwadraten en de methode van de maximale aannemelijkheid. Enkele toepassingen hiervan komen in dit artikel aan de orde. Daarmee wordt duidelijk hoe feitelijke waarnemingen samen met beschikbare expertkennis in één voorspellingsmodel kunnen worden gebundeld. Kapitaalintensieve onderhoudsinspanningen zijn zo kosteneffectief te plannen.

Dit artikel behandelt de wijze waarop het IV-model voor verschillende toepassingen in de civiele techniek kan worden gebruikt. De

voorbeelden zijn vooralsnog hypothetisch, aangezien het model (vooralsnog een prototype in Excel) nog in de pilotfase verkeert en nog niet in de praktijk is ingezet.

2. Noodzaak van een goede levenscyclusanalyse

In het afgelopen decennium is bij Rijkswaterstaat de ontwikkeling van levenscyclusanalyses meer prominent in de aandacht gekomen. Het besef is doorgedrongen dat elke nieuw gebouwde constructie kosten met zich meebrengt om deze constructie gedurende zijn levensduur in stand te houden. Met het verouderen van de infrastructuur blijken de kosten van instandhouding aanzienlijk toe te nemen. In de afgelopen jaren is bovendien een achterstand in het onderhoud ontstaan, welke niet eenvoudig weg te werken is. Men is ervan doordrongen geraakt dat het om zowel technische als economische redenen noodzakelijk is beheer en onderhoud, van ontwerp tot en met sloop, te optimaliseren. Daar waar onderhoud in de civiele techniek (anders dan bijvoorbeeld in de procesindustrie) lange tijd een ambacht was, vindt momenteel een inhaalslag plaats en ontwikkelt het rationeel onderhoud zich langzaam maar zeker ook in de civiele hoek tot een vakgebied.

3. Beheer- en onderhoudssystematiek voor kunstwerken

In de jaren negentig heeft Rijkswaterstaat om tot een betere procesbeheersing te komen, de zogenaamde ‘beheer- en onderhoudssystematiek voor kunstwerken’ opgezet. Een onderdeel van deze systematiek is dat voor elk kunstwerk, in beheer bij Rijkswaterstaat, een onderhoudsprognose, het zogenaamde instandhoudingplan, beschikbaar moet zijn (Bakker en Volwerk 2003). Dit instandhoudingplan wordt door de ontwerpende instantie al bij de oplevering van een nieuwe constructie aan de beheerder meegeleverd.

Voor het opstellen van deze instandhoudingplannen wordt bij het gebruik van ‘standaard onderdelen’ gewerkt met ‘standaard kengetallen’ voor kosten en intervallen van toekomstig onderhoud. Deze kengetallen worden aan speciaal voor dit doel ontwikkelde ‘referentiedocumenten’ ontleend. Deze documenten beschrijven de doorgaans optimale instandhoudingstrategieën voor het in stand houden van het areaal op een landelijk afgesproken kwaliteit (Basis Onderhouds Niveau; BON; zie Klatter 2004). Momenteel worden deze referentiedocumenten nog ingevuld op basis van meningen van experts. In de toekomst zullen deze strategieën echter worden doorontwikkeld naar strategieën die op basis van levensduurcyclus kostenanalyses zijn onderbouwd.

Momenteel maakt men ondermeer gebruik van het binnen Rijkswaterstaat ontwikkelde LVO-model (Bakker en van Noortwijk, 1999; van Noortwijk en Frangopol, 2004). Dit model berekent de econo-

misch optimale combinatie van het interval van levensduurverlengend onderhoud en het interval van vervangen van (elementen van) constructies. Ook bepaalt het model een verwacht verouderingsverloop in de tijd². De instandhoudingstrategieën zijn uitgangspunten voor het onderhoud.

De verouderingsprognoses kloppen gemiddeld maar hebben wel een grote bandbreedte. Daarom is het altijd noodzakelijk om de instandhoudingstrategie voor elke individuele constructie periodiek, aan de hand van inspectieresultaten, bij te stellen. De verouderingsprognose dient hierbij als referentie.

Voor unieke of zeer kritische situaties wordt een instandhoudingstrategie op maat bepaald. Ook hier is het van belang de verouderingsprognose vast te leggen zodat inspectie resultaten hieraan kunnen worden getoetst.

4. Voorspellingen van het conditieverloop in de tijd

‘Conditie’ is een verzamelnaam voor kwalitatieve en/of kwantitatieve toestandgegevens. Wordt een conditie periodiek gemeten en het meetresultaat in de tijd uitgezet, dan kan deze informatie voor het voorspellen van de conditie in de toekomst worden gebruikt. Het verschil tussen de conditie ‘nieuw’ en een gemeten conditie op een tijdstip t wordt ‘veroudering’ genoemd. Het begrip conditie van een constructie is niet gelijk aan het begrip veiligheid of betrouwbaarheid van een constructie. Laatstgenoemde begrippen hebben immers betrekking op zowel de conditie (sterkte) als op de belasting (druk). Toch wordt aan een conditieparameter, die in de tijd wordt gevolgd, doorgaans een afkeurwaarde toegekend, die betrekking heeft op een veelal aan veiligheid gerelateerde acceptatiegrens. Het monitoren van de conditie is eenvoudiger dan het monitoren van de betrouwbaarheid van een constructie. Om de conditie in de tijd te kunnen volgen is het noodzakelijk om eenduidige inspectieparameters te benoemen. De conditie van een conservering kan bijvoorbeeld op basis van inspectieparameters als hechting, corroderend oppervlak, bladderend oppervlak en de laagdikte, worden bepaald. Een conditieparameter wordt bij voorkeur in procenten uitgedrukt.

Tijdens het ontwerp maakt men keuzes die gevolgen hebben voor het conditieverloop in de tijd. In sommige, maar lang niet alle gevallen, worden deze keuzen expliciet gemaakt. Aannames uit het ontwerp voor een verwachte veroudering van constructies kunnen tijdens inspecties als referentie dienen.

² Dit model wordt kosteloos aan derden ter beschikking gesteld, op voorwaarde dat alle resultaten met Rijkswaterstaat gedeeld worden. Het model is op te vragen via de internetsite van de Bouwdienst Rijkswaterstaat, of via een e-mail aan de eerste auteur van dit artikel.

4.1. *Impliciete voorspellingen*

Tijdens het ontwerp van constructies worden voorspellingen van toekomstig onderhoud en van vervangingen impliciet gedaan. Zo wordt vaak, op basis van ervaring, op een graad van detaillering gewerkt die naar verwachting zo min mogelijk schade oplevert. Ook normen en richtlijnen bevatten vaak impliciete voorspellingen van toekomstig onderhoud. Te denken valt hier aan eisen voor betondekking, betonkwaliteit, afwatering enzovoort. Bij impliciete voorspellingen heeft men wel een idee dat de constructie in de gebruiksfase geen grote problemen voor beheer en onderhoud zal vertonen. Het probleem is echter dat er vaak geen verwacht, op basis van inspecties toetsbaar, verouderingsgedrag aan ten grondslag ligt. Dat betekent: het is in het gebruik niet vast te stellen of de constructie zich in de praktijk ook gedraagt zoals bij het ontwerp werd aangenomen.

4.2. *Expliciete voorspellingen*

Soms worden in het ontwerp voorspellingen voor het toekomstig onderhoud expliciet gemaakt; hier enkele voorbeelden.

- Een stalen damwand wordt met een overdikte (corrosietoeslag) van 2 mm uitgevoerd. Hierdoor gaat de damwand 50 jaar mee zonder (variabel) onderhoud.
- Voor een specifieke betonconstructie – onder vooraf vastgestelde expositieomstandigheden met een vooraf gedefinieerde betrouwbaarheid – wordt, op basis van een berekening met het DuraCretemodel (Dura Crete, 2000), voorspeld dat binnen 80 jaar geen schade ten gevolge van de gespecificeerde verouderingsmechanismen zal optreden.
- Bij het toepassen van types standaardonderdelen zijn meestal de onderhoudsprognose en de verwachte veroudering in referentiedocumenten vastgelegd (bijvoorbeeld voor asfalt op kunstwerken).

Aan voorspellingen die expliciet zijn gedaan ligt een verwacht verouderingsgedrag in de tijd ten grondslag, dat doorgaans ook expliciet is vastgelegd. Dit verouderingsgedrag kan bij inspecties als toetsingscriterium worden gebruikt en ook als criterium voor het plannen van inspecties.

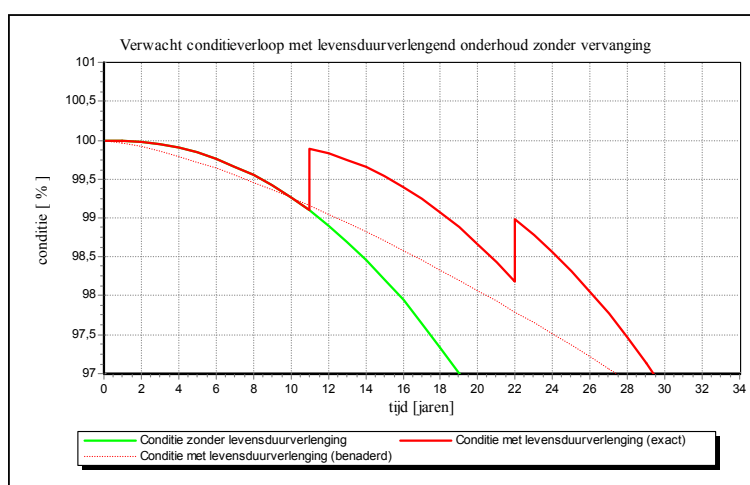
4.3. *Expliciet bepaalde instandhoudingstrategieën op basis van levenscycluskostenoptimalisatie*

Incidenteel wordt voor constructies dan wel onderdelen daarbinnen een economisch optimaal onderhoudscenario berekend. Een voorbeeld is de optimalisatie van het conserveringscenario van de Haringvlietkering. Hierbij is het LVO-model gebruikt (Heutink et al., 2004).

Een economisch optimale combinatie van het interval van bijplekken en het interval van vervangen voor de gehele conservering wordt bepaald op basis van:

- het verwachte conditieverloop van de conservering (zonder levensduurverlengend onderhoud);
- de onzekerheid in het conditieverloop (in de tijd);
- kosten van preventieve vervanging;
- kosten van correctieve vervanging;
- kosten van levensduurverlengend onderhoud (bijplekken);
- parameters voor het effect van levensduurverlengend onderhoud op de conditie.

Hierbij wordt het scenario met de laagste (contant gemaakte) kosten van levensduurverlengend onderhoud en vervangen bepaald. Het resultaat van een dergelijke simulatie (figuur 1) kan in de gebruiksfase worden toegepast als referentie bij inspecties.



Figuur 1: Voorbeeld van LVO-optimalisatie. In de grafiek wordt het berekende economisch optimale onderhoudscenario getoond. Deze dient als referentie voor toekomstige inspecties.

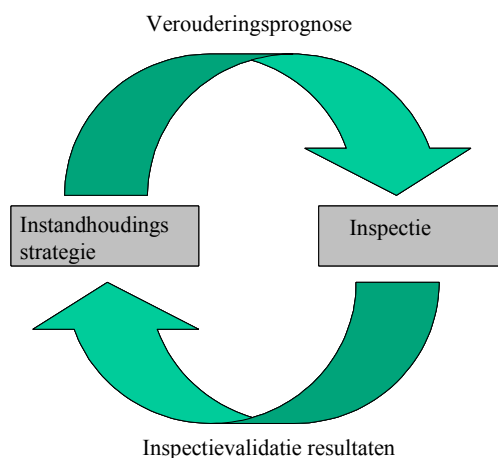
5. Actualiseren instandhoudingplan op basis van inspecties

De bij het ontwerp opgestelde verouderingsprognoses en instandhoudingplannen zijn voor civiele constructies over het algemeen onzeker. Vaak is daarvoor onvoldoende bruikbare statistische informatie beschikbaar. Een belangrijke oorzaak hiervan is dat de meeste civiele constructies pas op de lange termijn schade vertonen. De ervaringen hiermee kunnen vervolgens niet zonder meer op nieuwe constructies van toepassing worden verklaard omdat de toegepaste materialen niet direct vergelijkbaar zijn. Bovendien is de kwaliteit van de uitvoering tijdens de bouw ook een kritieke factor voor het toekomstig onderhoud. Deze uitvoeringskwaliteit wordt onder meer bepaald door de mate van procesbeheersing bij de uitvoerende partij, de opleiding en de motivatie van de werknemers en de mate van toezicht en controle. Deze kwaliteit wordt dus

niet alleen bepaald door de techniek maar ook door maatschappelijke ontwikkelingen en bouwcultuur; deze elementen zijn in sterke mate tijdsbeeldafhankelijk.

Ook lokale omstandigheden kunnen zodanig zijn dat het verouderingsgedrag sneller of langzamer verloopt dan werd verwacht. Een mooi voorbeeld is het verouderen van asfalt. In één snelweg kan het onderhoudsinterval van delen van het wegdek variëren tussen de zeven en de zeventien jaar.

Men moet accepteren dat voorspellingen die in de ontwerpfase worden gedaan, onzeker zijn. Het is dus niet gezegd dat een op basis van gemiddelden bepaalde instandhoudingstrategie ook werkelijk optimaal is voor de individuele constructie. Inspecties zijn noodzakelijk om de in het instandhoudingplan bepaalde strategieën te evalueren en te actualiseren. Figuur 2 geeft schematisch weer hoe voorspellingen op basis van inspecties kunnen worden gevalideerd.



Figuur 2.: Inspectievalidatiecyclus.

6. Het Inspectie-Validatie-Model

Het Inspectie-Validatie-model (IV-model) is een beslissing-ondersteunend model. Het presenteert grafisch een vereenvoudigde weergave van het, in het ontwerp (a priori) aangenomen, conditieverloop in de tijd. In dezelfde figuur worden de resultaten van één of meerdere uitgevoerde inspecties in de tijd getoond. Op basis van deze inspectieresultaten wordt een geactualiseerde verouderingsprognose getoond.

Gebaseerd op deze prognose kunnen één of meerdere van de onderstaande beslissingen genomen worden:

- niets doen en wachten tot de volgende inspectie;
- aanpassen van de inspectiestrategie;
- aanpassen van de onderhoudstrategie;

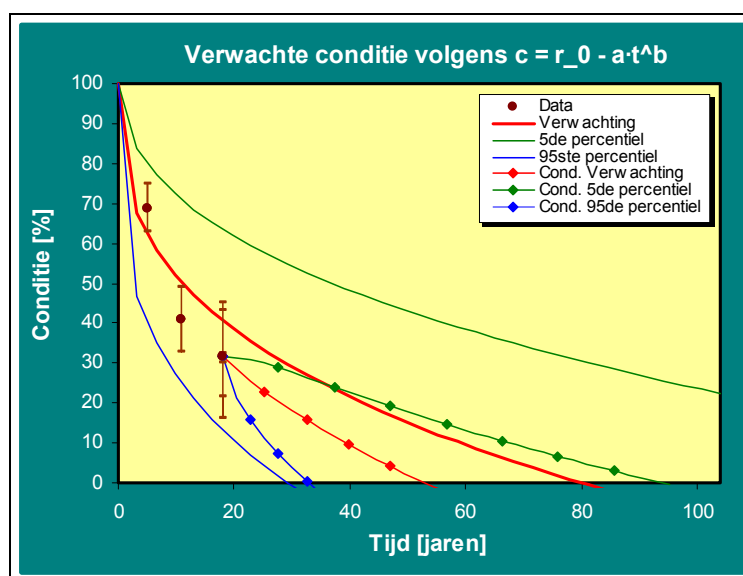
- maken van een (vernieuwde) levenscycluskostenanalyse op basis van de actuele verouderingsprognose.

Figuur 3 geeft een voorbeeld van de grafische output van het IV-model. De getrokken lijnen representeren de a priori schatting van het conditieverloop met het 90%-betrouwbaarheidsinterval. De geblokte lijnen representeren de op basis van inspecties geactualiseerde verwachte veroudering met het 90%-betrouwbaarheids-interval. Beide onzekerheden zijn gemodelleerd met behulp van een gammakansverdeling (zie bijlage B). De individuele inspectieresultaten zijn aangegeven middels horizontale streepjes. Voor elke inspectie zijn de individuele metingen met een verticale lijn verbonden. In deze ene figuur kan men dus een indruk krijgen van:

- de ruimtelijke variatie plus de meeton nauwkeurigheden; en
- de variatie voortkomend uit tijdsafhankelijke onzekerheden.

De 90%-betrouwbaarheidsband houdt alleen rekening met de laatstgenoemde onzekerheden. Om bij benadering toch rekening te kunnen houden met de eerstgenoemde onzekerheden wordt een inspectievalidatie op twee niveaus uitgevoerd:

- een inspectievalidatie van het verloop van de gemiddelde conditie in de tijd; en
- een inspectievalidatie van de ‘slechtste gebieden’ op basis van ‘representatieve waarden’.



Figuur 3.: Uitvoervoorbeeld van het Inspectie-Validatie-model met verwacht conditieverloop.

De representatieve waarde voor de ‘slechtste gebieden’ voor elke afzonderlijke inspectie in de tijd, is vooralsnog gesteld op de gemiddelde conditie minus 1,8 maal de standaardafwijking van de individuele metingen; dat wil zeggen met een overschrijdingskans van 3,6%. Deze benadering is wiskundig niet waterdicht en moet in de toekomst nog beter worden uitgewerkt.

7. Voorbeelden van het gebruik van het IV-model

In deze paragraaf worden twee voorbeelden behandeld waarin het IV-model kan worden toegepast, te weten chloride-aantasting van een betonnen rijdek en corrosie van een stalen damwand.

7.1. *Voorbeeld 1: Inspectievalidatie van een op impliciete voorspellingen gebaseerd beheerplan*

Een betonnen rijdek van een viaduct is ontworpen voor 80 jaar. Uit de praktijk is bekend dat, indien ontworpen wordt volgens de Nederlandse bouwvoorschriften in Nederlandse omstandigheden, gemiddeld ongeveer 1% van het aan de buitenlucht blootgestelde betonoppervlak elke 30 jaar moet worden hersteld ten gevolge van diverse aantastingen. Verder is het bekend dat het meest voorkomende schadebeeld chloride-aantasting is. Deze kennis heeft niet geleid tot aanpassing van het ontwerp. Met andere woorden: kennelijk wordt enige schade ten gevolge van chloride-indringing over de levensduur geaccepteerd. Zonder enige kennis van de constructie of van lokale omstandigheden wordt deze kennis vertaald in de impliciet gehanteerde ontwerpaannamen (vooralsnog enigszins op gevoel):

- aan het einde van de ontwerplevensduur mag het gemiddeld chloridegehalte ter plaatse van de wapening niet groter zijn dan 0,4% (referentiewaarde 1);
- aan het einde van de ontwerplevensduur mag de representatieve waarde voor het lokale chloridegehalte niet hoger zijn dan 1% (referentiewaarde 2).

Voor het schatten van de chloride-indringing worden per inspectie op zes plaatsen (in qua expositie-omstandigheden min of meer homogene gebieden) a-select kernen geboord. Elke kern bestaat uit vier schijfjes afkomstig van het beton tussen het betonoppervlak en de wapening. Per kern wordt met behulp van de tweede diffusiewet van Fick het chloridegehalte uitgedrukt als functie van de diepte (chlorideprofiel). Gegeven dit chlorideprofiel en de leeftijd van het beton wordt vervolgens de diepte bepaald waarvoor het chloridegehalte gelijk is aan de referentiewaarde. Zulke indringingsdieptes zijn er voor elke inspectie (een meer gedetailleerde beschrijving is opgenomen in bijlage A).

De voorspelling van de chloride-indringing (als functie van de tijd) zal dan worden gedaan door middel van het statistisch fitten van een verouderingsproces op de gemeten verouderingen. Hiertoe wordt elk gemeten chlorideprofiel als volgt omgezet naar een gemeten veroudering:

$$V_i(t) = \frac{d_{\text{cl.ref}}(t)}{d} \times 100\%$$

met:

- $V_i(t)$ de veroudering van het beton op locatie i op tijdstip t in procenten [%];
- $d_{cl,ref}(t)$ de diepte waarop het chloridegehalte van het beton op tijdstip t gelijk is aan de referentiewaarde [m];
- d de betondekking [m].

Bijvoorbeeld: Als de betondekking 4 cm is, en uit een chlorideprofiel wordt afgeleid dat het chloridegehalte op 1 cm diepte gelijk is aan 1% (m/m) en op 2 cm gelijk is aan 0,4% (m/m), dan is de gemeten veroudering ten opzichte van referentiewaarde 1 (gelijk aan 0,4%) gelijk aan 50% en de gemeten veroudering ten opzichte van referentiewaarde 2 (gelijk aan 1%) gelijk aan 25%.

De conditie op tijdstip t is:

$$C_i(t) = 100\% - V_i(t)$$

De a priori schatting van het verwachte conditieverloop in de tijd is (zeer vereenvoudigd) weergegeven met de formule:

$$E(C(t)) = 100 - E(V(t)) = 100 - 21.6 \times t^{0.35}, \quad t \geq 0.$$

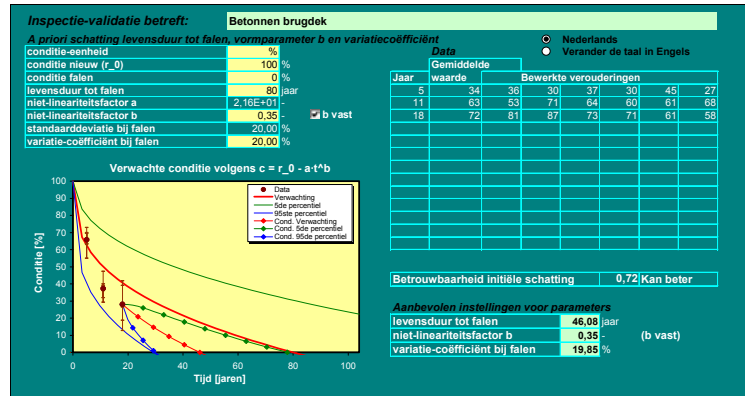
Deze formule is een grove benadering, welke qua vorm enigszins lijkt op de verouderingslijn in de tijd die op basis van de tweede diffusiewet van Fick kan worden bepaald³ (zie vergelijking (4) in bijlage A), waarbij de verwachtingswaarde $E(C(t))$ de tijd-as kruist bij de ontwerplevensduur van 80 jaar. Hierbij is de tijdsafhankelijke onzekerheid in het verouderings-proces $V(t)$ gespecificeerd door middel van de variatiecoëfficiënt (zijnde de standaardafwijking gedeeld door het gemiddelde) van de veroudering op het moment dat de conditie gelijk is aan 0%. Voor de a priori schatting van de variatiecoëfficiënt wordt 0,2 aangehouden.

In onderstaand voorbeeld worden chloridemetingen in jaar 5, 11 en 18 van een constructie gebruikt voor een inspectievalidatie. De toets aan referentiewaarde 1 voor het gemiddelde conditieverloop is aangegeven in figuur 4. De toets aan referentiewaarde 2 voor de slechtste gebieden is weergegeven in figuur 5.

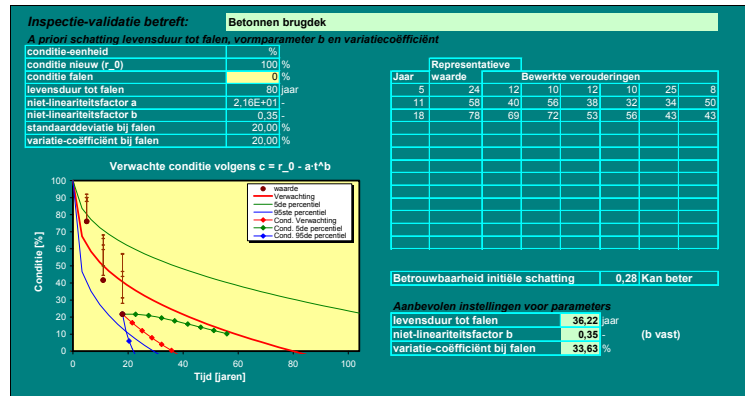
Uit de beide grafieken blijkt, dat zowel het afkeurcriterium voor het gemiddeld chloridegehalte als het afkeurcriterium voor de slechtste gebieden veel sneller dan aangenomen in het ontwerp zal worden bereikt. De ontwerplevensduur van 80 jaar zal naar verwachting niet zonder aanzienlijke reparaties worden gehaald. Een aanpassing van de instandhoudingstrategie is noodzakelijk. Men kan bijvoorbeeld kiezen voor het preventief conserveren van het

³ In het IV-model kan alleen gewerkt worden met verouderingslijnen welke weergegeven kunnen worden als een machtsrelatie in de tijd. Hiermee kunnen de meeste verouderingslijnen benaderd worden.

beton om verdere chloride-indringing te voorkomen. Alternatief zou men kunnen wachten tot een bepaalde hoeveelheid corrosie is opgetreden en dan alsnog een duurdere herstelmethode toepassen. Op deze manier zou men mogelijk de eerste onderhoudsactie vijftien tot dertig jaar kunnen uitstellen. Welke optie optimaal is kan op basis van een levenscycluskostenberekening worden bepaald.



Figuur 4.: Validatie van een inspectie van gemiddelde waarden, referentiewaarde chloridegehalte = 0,4% m/m.



Figuur 5.: Inspectievalidatie van representatieve waarden, referentiewaarde chloridegehalte = 1,0 % m/m.

7.2. Voorbeeld 2: Inspectievalidatie van op expliciete voorspellingen gebaseerde inspectieparameters

Een stalen damwand is ontworpen voor 50 jaar. Uit constructief oogpunt moet de damwand 6 mm dik zijn. Een surplus aan staaldikte van 2 mm wordt toegepast als opofferingslaag voor de verwachte staalcorrosie over die 50 jaar. Ten behoeve van de inspectie wordt dit vertaald in de volgende inspectieparameters:

- aan het eind van de ontwerp levensduur mag de gemiddelde staaldikte niet minder zijn dan 6 mm (referentiewaarde 1);
- aan het eind van de ontwerp levensduur mag de staaldikte lokaal niet minder zijn dan 4 mm (referentiewaarde 2).

Deze staaldikten worden bepaald door middel van het doen van minimaal zes metingen, genomen in de door water beïnvloede zo-

ne. Elke gemeten staaldikte wordt omgezet naar een gemeten veroudering:

$$V_i(t) = \frac{d(0) - d(t)}{d(0) - d_{ref}} \times 100\%$$

met:

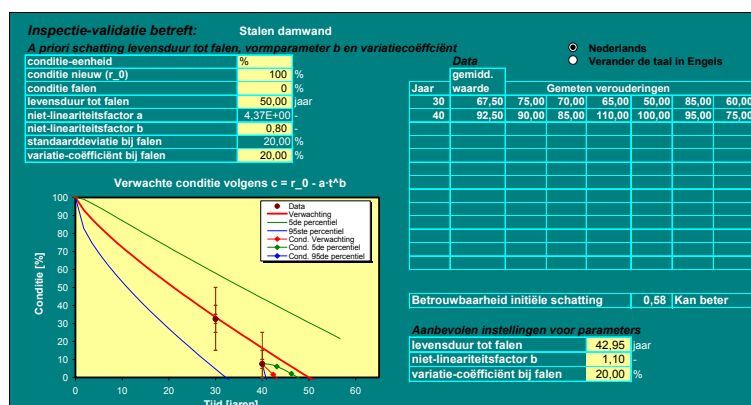
- $V_i(t)$ de veroudering van het staal op locatie i op tijdstip t in procenten [%];
- $d(t)$ de gemeten staaldikte [mm];
- $d(0)$ de oorspronkelijke nominale staaldikte (minimum acceptabel bij nieuwbouw; 8 mm);
- d_{ref} de staaldikte waarbij het afkeurcriterium gehaald is volgens de geldende referentiewaarde (4 of 6 mm).

In mathematische termen, wordt de a priori voorspelling van de conditie (%) in de tijd (vooralnog niet verder wetenschappelijk onderbouwd) gegeven als:

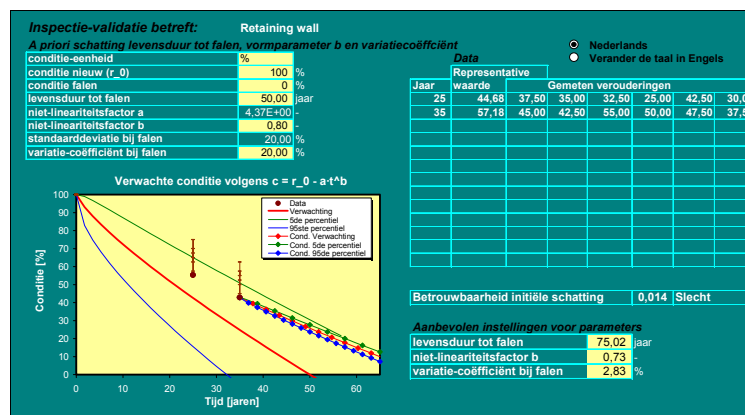
$$E(R(t)) = 100 - E(X(t)) = 100 - 4.37 \times t^{0.8}, \quad t \geq 0.$$

De bijbehorende variatiecoëfficiënt is gesteld op 0,2. Het afkeurcriterium is bereikt als de conditie gelijk is aan 0%. Dit leidt tot de hypothetische inspectievalidatie op basis van gemiddelden als weergegeven in figuur 6. De inspectievalidatie op basis van het criterium voor de meest gecorrodeerde gebieden is weergegeven in figuur 7.

Op basis van de gemeten verouderingen zou kunnen worden geconcludeerd dat de corrosie gemiddeld iets sneller verloopt dan aangenomen tijdens het ontwerp. Om de gevolgen in te kunnen schatten is tevens geadviseerd de damwand constructief te beoordelen op de consequenties, rekening houdend met een kortere restlevensduur.



Figuur 6.: Inspectievalidatie van gemiddelde waarden, referentiewaarde staaldikte: 6 mm.



Figuur 7.: Inspectievalidatie van representatieve waarden, referentiewaarde staaldikte : 4 mm.

8. Conclusies

Het Inspectie-Validatie-model kan voor een breed scala aan toepassingen worden gebruikt. Hierbij is een goede definitie van de conditieparameters en de faalcriteria vereist. Evenzo dienen verwachtingen ten aanzien van de prestatie van het ontwerp expliciet te worden aangegeven. Het IV-model is geen geautomatiseerd adviesprogramma. Het is bedoeld als een grafisch georiënteerd programma ter ondersteuning van een goede advisering naar aanleiding van uitgevoerde inspecties.

Het IV-model biedt de mogelijkheid om bij het ontwerp gebruik te maken van gevalideerde degradatiegegevens. Dit leidt tot betrouwbaarheid van de voorspelling van het onderhoud en daarmee tot zekerheid en beheersing voor de in de toekomst benodigde budgetten voor beheer en onderhoud.

9. Literatuur

Abdel-Hameed, M., A gamma wear process. *IEEE Transactions on Reliability*, 24(2):152-153, 1975.

Bakker, J.D., van der Graaf, H.J., and van Noortwijk, J.M., Model of Lifetime-Extending Maintenance. In M.C. Forde, editor, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Faults and Repair, London, United Kingdom*, Edinburgh: Engineering Technics Press, 1999.

Bakker, J.D., and Volwerk, J.J. TISBO Infrastructure Maintenance Management System: Integrating inspection registration and maintenance management, *Proceedings of the 9th International Bridge Management Conference*, April 28-30, 2003, Orlando, Florida, U.S.A., pages 61-69. Transportation Research Circular E-C049, Washington, D.C.: Transportation Research Board (TRB), 2003.

- Çinlar, E., Bažant, Z.P., Osman, E., Stochastic process for extrapolating concrete creep. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103(EM6) 1069-1088, 1977.
- Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*; Second Edition. Oxford: Clarendon Press, 1975.
- Dura Crete, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, *Final Technical Report, Document BE95-1347/R17*, The European Union - Brite EuRam III, 2000.
- Dura Crete, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, *General Guidelines for Durability Design and Redesign, Document BE95-1347/R15*, The European Union - Brite EuRam III, 2000.
- Heutink, A., Beek, A van, Noortwijk, J.M. van, Klatter, H.E., Barendregt, A., Environment-friendly maintenance of protective paint systems at lowest costs. *XXVII FATIPEC Congress, April 19-21, Aix-en-Provence, France, 2004*.
- Klatter, H.E., Vusse, J.J. van der, Bridge Maintenance, Safety and Management, *Second International Conference (IABMAS)*, Kyoto, Japan, oktober 18-22 2004, CD-ROM edited by Watanabe, E., Frangopol, D.M., Utsunomiya, T., Taylor & Francis group, ISBN 04 1536 336 Xplc, London, UK, 2004.
- Klatter, H.E., Noortwijk, J.M. van, Vrisou van Eck, N., Bridge management in the Netherlands; Prioritisation based on network performance, Casas, J.R., Frangopol, D.M.A., Nowak, S., editors, *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, Barcelona, Spain, 14-17 July 2002. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2002.
- Noortwijk, J.M. van, Frangopol, D.M., Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(4):345-359, 2004.
- Noortwijk, J.M. van, Pandey, M.D., A stochastic deterioration process for time-dependent reliability analysis, Maes, M.A., Huys, L. editors, *Proceedings of the Eleventh IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems*, 2-5 November 2003, Banff, Canada, pages 259-265. London: Taylor & Francis Group, 2004.

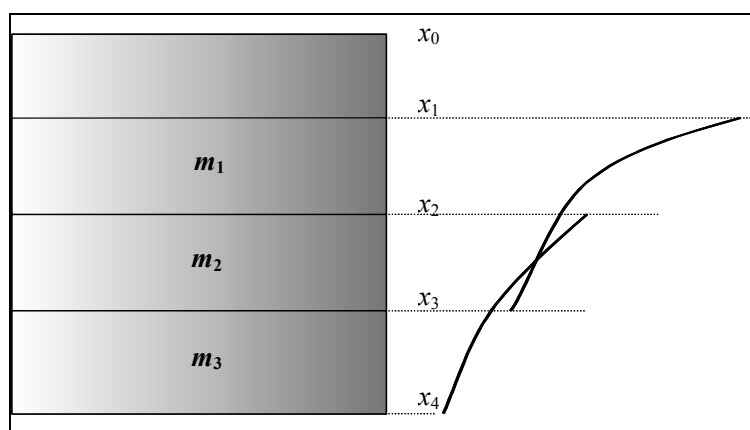
Bijlage A. Nadere uitwerking van het gebruik van het IV-model voor betonconstructies

Deze bijlage behandelt de vraag hoe het IV-model kan worden toegepast ten behoeve van het modelleren van chloride-indringing in betonconstructies. Achtereenvolgens komen aan de orde: (i) het bepalen van de diepte waarop het chloridegehalte gelijk is aan de referentiewaarde, (ii) het bepalen van het tijdsafhankelijk verloop van chloride-indringing en (iii) het wiskundig modelleren van chloride-indringing volgens de tweede diffusiewet van Fick.

1. Bepalen van de diepte waarop het chloridegehalte gelijk is aan een gestelde referentiewaarde

Een bij een inspectie vergaarde set van betonkernen worden elk verdeeld in vier schijfjes beton volgens figuur 1. Van elke boorkern worden de gemeten chloridegehalten als volgt gebruikt om het chlorideprofiel te bepalen. Het eerste schijfje beton ($x_0 - x_1$) grenst aan het betonoppervlak en is meestal ongeveer een centimeter dik. Dit schijfje wordt in de validatie niet meegenomen, omdat vlak onder het betonoppervlak effecten optreden waardoor Fick's tweede diffusiewet niet geldt. Voor de overige drie schijfjes worden de chloridegehalten wel in de validatie meegenomen. Met behulp van Fick's tweede diffusiewet worden in totaal twee chlorideprofielen per kern geschat⁴: één op basis van de chloridegehalten van het tweede en derde schijfje (m_1 en m_2) en één op basis van die van het derde en vierde schijfje (m_2 en m_3). Doordat de wiskundige formulering van Fick's tweede diffusiewet twee onbekende parameters bevat (voor de wiskundige details zie paragraaf 3 van deze bijlage), is aan de hand van het chloridegehalte van twee opeenvolgende betonschijfjes een berekend chlorideprofiel te bepalen. Voor beide chlorideprofielen wordt vervolgens met Fick's tweede diffusiewet uiterekend voor welke diepte het chloridegehalte precies gelijk is aan de referentiewaarde. Als de indringingsdiepte bij de referentiewaarde in het tweede schijfje valt dan wordt het bijbehorende chlorideprofiel gebruikt. Ligt de indringingsdiepte bij de referentiewaarde in het derde of vierde schijfje of op het snijvlak van het tweede en derde schijfje dan wordt het chlorideprofiel volgend uit het derde en vierde schijfje toegepast. Met behulp van het gekozen chlorideprofiel wordt vervolgens bepaald op welke diepte het chloridegehalte gelijk is aan de referentiewaarde.

⁴ Het schatten van twee chlorideprofielen is een pragmatische keuze. Voor 'jonge' constructies zal namelijk geen meetbaar profiel te bepalen zijn voor het derde en vierde schijfje. Voor oudere constructies, waar het chloride al diep is ingedrongen, geven de waarden voor het derde en vierde schijfje daarentegen juist de beste fit met Fick's tweede diffusiewet.



Figuur A.1.: Betonkern in schijfjes met de berekende chlorideprofielen (chloridegehalte in massaprocenten als functie van de diepte) voor x_1 tot x_3 en x_2 tot x_4 .

2. Bepalen van chloride-indringing als functie van de tijd

Met het IV-model kan op basis van (a)periodieke metingen een schatting gemaakt worden van het verloop van het chloridegehalte in de tijd. Dit kan door een stochastisch verouderingsproces te fitten op de gemeten condities in de tijd met een verwachte veroudering in de vorm van een machtsrelatie in de tijd (zie bijlage B). Dit is echter niet altijd mogelijk en geeft niet altijd een goed resultaat. Vaak zijn de conditiemetingen in de eerste jaren van een constructie niet erg nauwkeurig, omdat de meetfout groot is ten opzichte van de beperkte hoeveelheid ingedrongen chloriden. Deze meting heeft een sterke invloed op de fit, ook als er meerdere metingen in de tijd zijn. In een situatie waarin er maar één set van metingen in de tijd beschikbaar is, is het niet mogelijk een fit te maken, omdat de vorm van de kromme (veroudering gelijk aan tijd tot de macht b) niet te bepalen is. Daarom kan a priori informatie over het verouderingsproces in de vorm van de macht b bij het statistisch fitten gebruikt worden.

Met de tweede diffusiewet van Fick is het chloridegehalte als functie van zowel de diepte als de tijd te beschrijven (zie vergelijking (1) in paragraaf 3 van deze bijlage). De diepte waarop het chloridegehalte gelijk is aan de referentiewaarde is verloopt dan evenredig met de wortel van de tijd. Dit resultaat is echter erg conservatief voor betonconstructies. Nauwkeuriger zijn de modellen welke ondermeer ontwikkeld zijn in het kader van Duracrete (2000). Deze modellen hebben echter weer als nadeel dat er coëfficiënten in voorkomen welke niet exact bekend zijn, maar wel sterke invloed hebben op het resultaat. Rekening houdend met verschillende modellen is voor het IV-model een vereenvoudigde aanname gedaan, dat het verloop van chlorideindringing evenredig verloopt met de tijd tot de macht 0,35.

3. Formuleren van chloride-indringing met behulp van tweede diffusiewet van Fick

Met Fick's tweede diffusiewet (Crank, 1975) kan het chloridegehalte worden gemodelleerd als functie van zowel de indringdiepte x als de tijd t en wel als volgt:

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] = C_s \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{y=0}^{\frac{x}{\sqrt{4Dt}}} e^{-y^2} dy \right] \quad (1)$$

met

- C_s het oppervlakte-chloridegehalte,
- D de diffusiecoëfficiënt,
- $\operatorname{Erf}(y)$ de foutenfunctie.

De complementaire foutenfunctie is gedefinieerd als

$$\operatorname{Erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{t=y}^{\infty} e^{-t^2} dt = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{t=0}^y e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{Erf}(y).$$

Met behulp van partiële integratie is het totale chloride-gehalte over een indringdiepte van 0 tot x_j dan gelijk aan:

$$\int_{x=0}^{x_j} C(x,t) dx = C_s \sqrt{4Dt} \left\{ \frac{x_j}{\sqrt{4Dt}} \operatorname{Erfc} \left(\frac{x_j}{\sqrt{4Dt}} \right) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[1 - e^{-\frac{x_j^2}{4Dt}} \right] \right\}.$$

Stel er zijn op tijd t voor een bepaalde locatie twee metingen beschikbaar waarvoor geldt dat

$$\int_{x=x_1}^{x_2} C(x,t) dx = m_2 (x_2 - x_1), \quad 0 \leq x_1 < x_2, \quad (2)$$

en

$$\int_{x=x_2}^{x_3} C(x,t) dx = m_3 (x_3 - x_2), \quad x_2 \leq x_3 \quad (3)$$

met m_2 en m_3 het gemeten gemiddelde chloride-gehalte voor respectievelijk het tweede en derde schijfje (schijfje 1, genomen aan het betonoppervlak wordt niet gebruikt in het chloride profiel). Het oppervlakte-chloridegehalte C_s en de diffusiecoëfficiënt D kunnen nu worden uitgerekend door vergelijkingen (2) en (3) numeriek op te lossen (er zijn immers twee vergelijkingen met twee onbekenden).

Vervolgens kan bepaald worden op welke diepte vanaf het betonoppervlak het chloridegehalte gelijk is aan de referentiewaarde (R_i) waaraan getoetst wordt (bijvoorbeeld: 0,4% voor de toetsing aan

het gemiddelde criterium) aan de hand van de uit vergelijking (1) afgeleide vergelijking (4):

$$d_{\text{cl.ref}}(t) = \text{Erfc}^{-1}\left(\frac{R_i}{C_s}\right) \cdot \sqrt{4Dt} . \quad (4)$$

Hierbij is Erfc^{-1} gedefinieerd als de inverse van de complementaire foutenfunctie, dat wil zeggen

$$y = \text{Erfc}(x) \Leftrightarrow x = \text{Erfc}^{-1}(y) .$$

Bijlage B. Wiskunde achter Inspectie-Validatie-model

De variabiliteit van de veroudering in de tijd is in het IV-model gemodelleerd door middel van een zogenoemd gammaproces (van Noortwijk en Pandey, 2004). Een gammaproces is een monotoon stijgend stochastisch proces waarvan de verouderingstoename onafhankelijk zijn en een gammakansverdeling met identieke schaalparameter hebben. Voor zover bekend was Abdel-Hameed (1975) waarschijnlijk de eerste die voorstelde om het gammaproces als model te gebruiken voor het modelleren van een veroudering die random varieert in de tijd. Een voordeel van het modelleren van verouderingsprocessen door middel van gammaprocessen is dat de vereiste wiskundige berekeningen relatief eenvoudig zijn. Het gammaproces is geschikt voor het modelleren van een geleidelijke veroudering die monotoon toeneemt in de tijd, zoals slijtage, vermoeiing, corrosie, scheurgroei, erosie, kruip, enzovoort.

De wiskundige definiëring van het gammaproces is als volgt. Een stochastische grootte X heeft een gammaverdeling met vormparameter $\nu > 0$ en schaalparameter $u > 0$ als de kansdichtheidsfunctie gegeven is door:

$$\text{Ga}(x | \nu, u) = \frac{u^\nu}{\Gamma(\nu)} x^{\nu-1} \exp\{-ux\}, \quad x > 0,$$

met

$$\Gamma(\nu) = \int_{z=0}^{\infty} z^{\nu-1} e^{-z} dz \quad \text{de gammafunctie voor } \nu > 0.$$

Neem nu aan dat de verwachte veroudering kan worden beschreven met een machtsrelatie tussen de cumulatieve veroudering en de tijd. Het gammaproces met vormparameter ct^b , $t > 0$ en schaalparameter $u > 0$ is dan een stochastisch proces $\{X(t), t \geq 0\}$. Zij $X(t)$ de cumulatieve veroudering op tijdstip t , $t \geq 0$, en neem nu aan dat de kansdichtheidsfunctie van $X(t)$, conform de definitie van het gammaproces, gegeven is door

$$f_{X(t)}(x) = \text{Ga}(x | ct^b, u)$$

met verwachting en variantie

$$E(X(t)) = \frac{ct^b}{u} = at^b, \quad \text{Var}(X(t)) = \frac{ct^b}{u^2} = \frac{at^b}{u}.$$

Om het gammaproces ten behoeve van inspectievalidatie toe te kunnen passen is een statistische methode nodig voor het schatten van de parameters van gammaprocessen. Hierbij bestaat een kenmerkende dataset uit inspectietijden t_i , $i=1, \dots, n$, waarbij $0=t_1 < t_2 < \dots < t_n$, en bijbehorende waarnemingen van cumulatieve verouderingen x_i , $i=1, \dots, n$, waarbij $0=x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$. De parameters van het gammaproces worden, op basis van inspectiedata, geschat

door het combineren van de methode van kleinste kwadraten met de methode van maximale aannemelijkheid.

Eerst wordt de macht b geschat op basis van een kleinste-kwadraten-fit van de logaritme van de machtsrelatie op de logaritme van de inspectiedata. De kleinste-kwadraten-fit van b is:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \log\left(\frac{t_i}{t_n}\right) \log\left(\frac{x_i}{x_n}\right)}{\sum_{i=1}^n \left[\log\left(\frac{t_i}{t_n}\right) \right]^2}.$$

Vervolgens worden de parameters c en u van het gammaproces geschat op basis van de methode van de maximale aannemelijkheid. De maximale aannemelijkheidschatters van c and u kunnen worden verkregen door het numeriek maximaliseren van de logaritme van de aannemelijkheidsfunctie van de onafhankelijke verouderingstoename bij een gegeven macht b (zie Çinlar et al., 1977). Çinlar et al. (1977) heeft deze methode in een statistische analyse van gegevens van veroudering van beton ten gevolge van kruip succesvol toegepast.

Opgemerkt moet worden dat de voorgestelde schattingsmethode alleen werkt als tenminste drie inspectiegegevens beschikbaar zijn. Dit komt doordat drie parameters (c , b en u) moeten worden geschat. In situaties waarin minder dan drie inspectiegegevens beschikbaar zijn, is de statistische schattingsmethode zodanig aangepast dat zij gedeeltelijk gebruik maakt van de parameters van een a priori (door experts) geschat verouderingsproces. In deze situaties wordt aangenomen dat de variatiecoëfficiënt van de veroudering op het tijdstip waarop de verwachte veroudering gelijk is aan de faalgrens, a priori bekend is. In geval van een enkele inspectie wordt de macht b ook a priori bekend verondersteld.