

# Levensduurberekeningen voor betonconstructies

TNO | Innovation for Life



J.H.M. Visser en A.J.M. Siemes



# **Levensduurberekeningen voor betonconstructies**

**Colofon**

***Auteurs***

J.H.M. Visser en A.J.M. Siemes

***Tekstadvies***

Vandelaar Tekstbewerking, Antwerpen

***Vormgeving en opmaak***

G.Th.C. Mathlener

Juli 2010

ISBN 978-90-5986-345-3

© TNO 2010

## Waarom dit boek?

Steeds vaker wordt geëist dat betonconstructies zodanig worden ontworpen dat ze een gegarandeerde levensduur hebben. Het komt voor dat een levensduur van 100 of zelfs 200 jaar wordt geëist. Maar hoe ontwerp je een constructie met voldoende levensduur? En hoe bewijs je dan dat je aan die levensduureis voldoet? En waar moet je allemaal op letten als je zo'n duurzame constructie gaat bouwen? Is het anders dan we tot nu toe gewend zijn te doen? En moet je dan toch nog rekening houden met onderhoud of hoeft dat dan niet meer?

We hebben gemerkt dat er in de bouw veel vragen leven op het gebied van levensduurberekeningen. Het lastige hierbij is dat de verschillende vakgebieden waartoe ontwerpers, bouwers, beheerders en reparateurs behoren, er soms een geheel andere werkwijze op na houden. Omdat beslissingen die bijvoorbeeld in het ontwerp zijn genomen, consequenties hebben voor de bouw, het beheer en/of het onderhoud, is afstemming tussen de verschillende vakgebieden belangrijk. Een uniforme werkwijze voor de gehele bouwketen zou de doorzichtigheid en de efficiëntie ten goede komen.

We hebben dit boek geschreven in een poging een antwoord te geven op de vele levensduurvragen uit de markt die de afgelopen jaren aan ons zijn voorgelegd. Met behulp van vereenvoudigde technieken hebben we bovendien geprobeerd om de gehele bouwketen op uniforme manier te analyseren: vanaf de eerste planning, het ontwerp, de bouw en het beheer tot het einde van de levensduur. We hopen hierdoor inzicht te geven in wat levensduurberekeningen nu eigenlijk zijn, hoe je ze moet maken, en wat de consequenties zijn van beslissingen in de ene fase voor de andere fasen. In het kort hopen we dus dat je na het lezen van dit boek aan de slag kunt en wilt gaan met levensduurberekeningen!

Voor je verder leest willen we graag René Braam, Quirijn van Zon, Rob Polder en Ton Vrouwenfelder bedanken voor de discussies en het proeflezen van het boek. Verder willen we graag John Wendrich en onze collega's bedanken voor het ter beschikking stellen van de mooie foto's. Voor het gebruik van de tekening op pagina 23 danken we Sirene Ontwerpers te Rotterdam.



# Inhoudsopgave

<b>Waarom dit boek</b>	<b>3</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
Wat is levensduur?	7
Waarom werken met levensduur?	7
Opbouw van het boek	8
<b>2 Prestaties</b>	<b>11</b>
Prestatie-eisen in een notendop	11
Van functie naar prestatie	11
Grenstoestand op basis van rekenwaarden	17
Prestaties in het beheer	19
<b>3 Planning</b>	<b>20</b>
Een probleem in de infrastructuur: hoe lossen we dat op?	20
Prestatie-eisen in de planfase	22
Strategie in de planfase	25
<b>4 Ontwerp</b>	<b>31</b>
Van plan naar ontwerp: wat gaan we precies bouwen?	31
Gedragsmodellen voor prestaties	31
Prestatie-eisen in de ontwerpfase	36
Strategie in de ontwerpfase	43
<b>5 Uitvoering</b>	<b>47</b>
Van ontwerp naar uitvoering: hoe gaan we bouwen?	47
Gedragsmodellen in de uitvoeringsfase: realisatie van de variabelen	47
Vertaling van prestatie-eisen naar eisen in de uitvoeringsfase	50
Strategie in de uitvoering	52
Kwaliteitsborging: keuren van de prestaties in het werk	54
Nulmeting of geboortecertificaat	56
<b>6 Exploitatie: monitoren</b>	<b>59</b>
Van uitvoering naar exploitatie: hoe staat de constructie erbij?	59
Prestaties monitoren	59
Keuze van de te monitoren prestatie-eisen	67
Monitorstrategie	69
Restlevensduur van de constructie	71
<b>7 Exploitatie: onderhoud</b>	<b>73</b>
Van monitoren naar onderhoud: hoe brengen we de constructie weer op peil?	73
Gedragsmodellen voor prestaties bij onderhoud	74
Keuze van onderhoudstechnieken ter verbetering van prestaties	77
Strategie om de noodzaak en wijze van onderhoud te bepalen	80
<b>Tot slot</b>	<b>85</b>
<b>Lijst met nuttige publicaties en vermelde normen</b>	<b>87</b>
<b>Termen en definities</b>	<b>89</b>



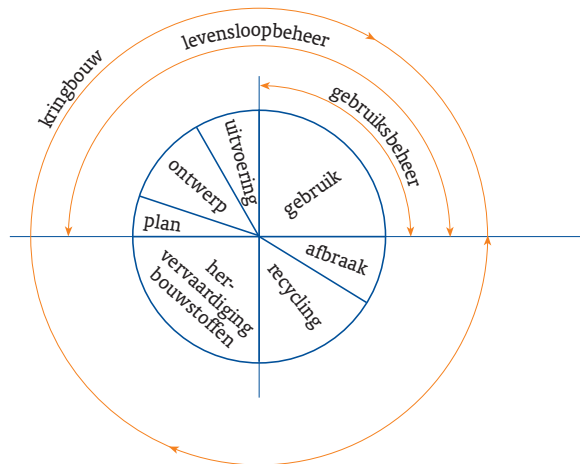


# 1 Inleiding

## Wat is levensduur?

Intuïtief wordt als levensduur van een constructie meestal de periode ná de bouw beschouwd waarin een constructie nog goed presteert en aan alle eisen voldoet. Maar constructies verouderen en de prestaties nemen in de tijd af. Op het moment dat een constructie niet meer aan de eisen voldoet is de levensduur ten einde.

Even intuïtief weten we dat robuuster ontwerpen, beter bouwen of beter onderhouden een constructie een langere levensduur zal geven. Voor de levensduur zijn dus álle fasen van de levensloop van de constructie (planning, ontwerp, uitvoering en exploitatie) van belang. Alleen ontwerpen op levensduur is onvoldoende: ook de bouw en de exploitatie moeten goed worden uitgevoerd omdat anders het risico bestaat dat de (ontwerp-) levensduur niet wordt gehaald. Dit integraal beschouwen van alle fasen van het bouwproces wordt ook wel levensloopbeheer genoemd (Life Cycle Management – LCM).



Figuur 1-1 Definities van beheer in dit boek

## Waarom werken met levensduur?

Het feit dat alle levensfasen van een constructie integraal bekeken moeten worden om de levensduur te kunnen garanderen, lijkt een hele klus. Dus waarom zouden we er mee willen werken? Zoals we nu werken is toch goed? In principe werken we al met levensduur. Het bouwbesluit eist namelijk dat de veiligheid van een constructie gedurende een bepaalde referentieperiode gewaarborgd is. In de constructieve normen is dit verder uitgewerkt op basis van prestatie-eisen die gedurende de levensduur niet onderschreden mogen worden. De constructieve ontwerpregels zijn vervolgens zo opgesteld dat de constructie een levensduur zal hebben van 50 of 80 jaar zonder dat hiervoor uitgebreide berekeningen hoeven worden gemaakt. Dit maakt dat het rekenen met een afwijkende levensduur niet goed mogelijk is. Dan moet terug worden gegaan naar de basisberekeningen.

Voor andere prestaties dan constructieve prestaties zijn in de normen nog helemaal geen prestatie-eisen opgenomen. En dat is lastig, omdat is gebleken dat constructies bijvoorbeeld ook sterk verouderen door aantasting van uit het milieu. Daarom is er tien jaar geleden een aanvulling gekomen voor waarmee duurzaamheideisen in een ontwerp meegenomen kunnen worden (de 'DuraCrete methode'). Later zijn er ook nog aanvullingen gekomen met betrekking tot brand, milieubelasting enzovoort.

Bij een levensduurontwerp op basis van prestaties is gedefinieerd hoe een prestatie in de loop van de tijd afneemt, en welke factoren daar invloed op uitoefenen. Dat brengt grote voordelen met zich mee. Tijdens de bouw weten we dan precies wat de kritische factoren zijn. Hier kunnen we dan extra aandacht aan geven. Evenzo weten we tijdens de exploitatie precies wat de restlevensduur zou moeten zijn na een bepaalde gebruikperiode. Deze kunnen we controleren (meten) en op basis daarvan onderhoud inplannen. In een goed uitgevoerd, prestatiegebaseerd ontwerp is zelfs al het bouwproces en het onderhoud meegenomen. Het is vooral deze afstemming tussen ontwerp, bouw en exploitatie waardoor een transparant en kosteneffectief levensloopbeheer kan worden opgezet.

### **Opbouw van het boek**

Omdat de levensduur is gedefinieerd als de periode waarin een constructie nog aan alle prestatie-eisen voldoet, wordt de basis van iedere levensduurberekening gevormd door het bepalen van deze prestaties. Hoe dat je dat doet, wordt uitgelegd in hoofdstuk 2. In principe geeft dit hoofdstuk een zeer beknopt overzicht van de fundamenten van het constructief ontwerpen. Ook de relatie met de constructieve normen wordt kort uitgelegd.

In hoofdstuk 3 tot en met 7 worden de verschillende levensloofasen van een constructies behandeld: planning, ontwerp, uitvoering en exploitatie, waarbij deze laatste is onderverdeeld in monitoren en onderhoud. De hoofdstukken zijn zoveel mogelijk uniform opgezet. Ieder hoofdstuk begint met een inleiding van het doel en het resultaat van de desbetreffende levensloofase. Vervolgens behandelen we de belangrijkste prestaties die we in de desbetreffende fase moeten definiëren realiseren, volgen en behouden of herstellen. Tot slot geven we nog globaal aan hoe alle prestatie-eisen geoptimaliseerd kunnen worden om tot een effectieve en efficiënte beheerstrategie te kunnen komen.

In de Annex is een lijst met termen en hun definitie opgenomen zoals we ze in dit boek hebben gebruikt.





A.Heemskerk B.V.  
FLOWEREXPORT

VAN RIPPEN TRANSPORT

## 2 Prestaties

### Prestatie-eisen in een notendop

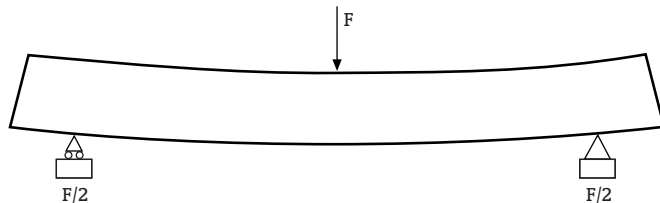
Een constructie(deel) vervult altijd één of meer functies. Een functie is bijvoorbeeld het ondersteunen van een brugdek. Functies kunnen in een constructie vaak op verschillende manieren worden vervuld. Zo kun je een brugdek ondersteunen met pijlers of met landhoofden. Als we willen aantonen dat de pijlers of de landhoofden de gevraagde functie inderdaad kunnen vervullen, dan moeten we aantonen dat het draagvermogen van deze constructiedelen groot genoeg is om weerstand te bieden tegen de belasting door het brugdek. Om dit objectief te kunnen doen moeten we het draagvermogen berekenen. In algemene termen moeten we bewijzen dat de prestatie (in dit geval: het draagvermogen) van de constructie voldoende is om de gevraagde functie (het ondersteunen van het brugdek) op een veilige wijze te vervullen.

De stap van functies naar prestaties is vaak niet eenvoudig. Immers, de functies worden over het algemeen gedefinieerd in kwalitatieve termen terwijl de prestaties in kwantitatieve termen worden uitgedrukt. In dit hoofdstuk bespreken we daarom eerst de principes van deze 'vertaling' van functies in prestaties aan de hand van het voorbeeld van de brug. Vervolgens breiden we de beoordeling uit naar andere aspecten. In de volgende hoofdstukken passen we de benadering toe op de verschillende levensfasen van een constructie.

### Van functie naar prestatie

#### *Stap 1: de grenstoestandsfunctie bepalen*

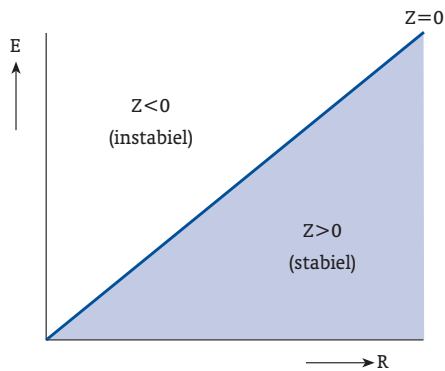
De vertaling van een functie in prestaties begint met de vraag: tegen welke acties moet een constructie bestand zijn om de functie te kunnen (blijven) uitoefenen? Een actie is een van buitenaf komende invloed. Deze invloeden kunnen onder meer mechanisch zijn (krachten veroorzaakt door het eigen gewicht, door de vloerbelasting of door vervormingen veroorzaakt door zetting) of klimatologisch (vervormingen door bijvoorbeeld temperatuurveranderingen of krimp ten gevolge van veranderingen in relatieve vochtigheid van de omgeving). We moeten de constructie zó ontwerpen dat zij tegen deze acties of invloeden voldoende weerstand kan bieden. Figuur 2-1 geeft een voorbeeld van een ligger die belast wordt door een puntlast. Onder invloed van deze puntlast zal de ligger buigen.



Figuur 2-1 Buiging van een ligger op twee steunpunten onder invloed van een puntlast

Het effect van de actie, in dit geval de puntlast  $F$ , duiden we in dit boek aan met  $E$  ('Effect'). In het voorbeeld in Figuur 2-1 ontstaan twee belangrijke effecten: een buigend moment en een dwarskracht. Om weerstand te kunnen bieden aan de invloed van de belasting moet de ligger voldoende draag-capaciteit hebben. In dit voorbeeld gaat het dan om momentcapaciteit en dwarskrachtcapaciteit. De capaciteit of weerstand wordt aangeduid met  $R$  ('Resistance'). Het effect van de actie  $E$  mag niet zo groot worden dat de ligger breekt. In wiskundige termen uitgedrukt: de capaciteit  $R$  moet groter zijn dan het effect van de actie  $E$ .

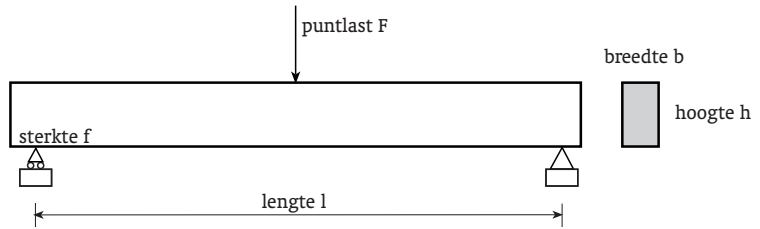
Het verschil tussen de capaciteit  $R$  en het effect  $E$  van de actie op de constructie wordt uitgedrukt als de grenstoestandsfunctie  $Z$ ; oftewel  $Z = R - E$ . In constructieve draagkrachtbeschouwingen geeft de grenstoestand  $Z = 0$  de grens aan tussen de ongewenste (en instabiele) toestand  $Z < 0$  en de gewenste (of stabiele) toestand  $Z > 0$ . Bij de waarde  $Z = 0$  heerst precies evenwicht tussen de capaciteit en de belasting (zie Figuur 2-2).



Figuur 2-2 Grenstoestandsdiagram

Bij het ontwerpen willen we er zeker van zijn dat  $Z$  groter is dan 0. We moeten  $Z$  dus kunnen uitrekenen. Hiervoor gebruiken we modellen die het gedrag van de constructie onder invloed van de desbetreffende actie(s) beschrijven. Deze modellen geven enerzijds het effect van de actie(s)  $E$  en anderzijds de capaciteit  $R$ , beide in termen van meetbare variabelen. In ons voorbeeld: voor de buiging van de ligger uit Figuur 2-1 is het effect van actie  $E$  een buigend moment, dat ter plaatse van de puntlast de grootste waarde heeft. Dit buigend moment is groter naarmate de puntlast op de ligger groter wordt of de ligger een grotere overspanning heeft. Het moment ten gevolge van de actie is dan  $E = Fl/4$ . De capaciteit  $R$  die de ligger kan bieden hangt af van zijn hoogte, breedte en zijn materiaalsterkte. Uitgaande van lineair-elastisch materiaalgedrag en een materiaalsterkte  $f$  is de momentcapaciteit van de ligger  $R = fbh^2/6$ . Het model voor de grenstoestand wordt dus  $Z = R - E = (fbh^2/6) - (Fl/4) = 0$ .

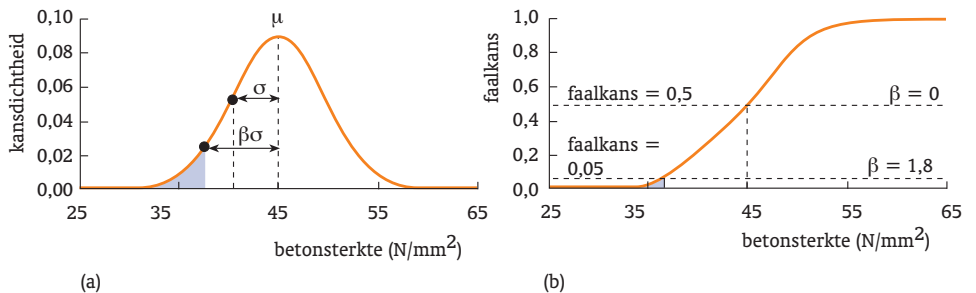
In dit verband noemen we  $Z$  ook wel het gedragsmodel, met  $Z = 0$  als grenstoestand. Als we de afmetingen en de materiaalsterkte van de ligger kennen, kunnen we de maximale puntlast bepalen die de ligger nog kan weerstaan. Figuur 2-3 geeft een rekenvoorbeeld.



Figuur 2-3 Grenstoestand van een ligger bij een puntlast

### Stap 2: Faalkans of betrouwbaarheidsindex

In werkelijkheid staan de waarden van de capaciteit  $R$  en van het effect van de actie  $E$  (en daarmee  $Z$ ) meestal niet vast, ze kunnen variëren. In andere woorden: het zijn stochastisch. Hier zijn verschillende redenen voor.  $R$  en  $E$  kunnen bijvoorbeeld variëren van tijd tot tijd (zoals de windbelasting) of van plaats tot plaats (zoals de betonsterkte). Maar sommige waarden van een variabele komen vaker voor dan andere. Als we maar voldoende metingen doen, kunnen we de kans bepalen dat een variabele een bepaalde waarde heeft. Wanneer we al deze kansen in een grafiek uitzetten, verkrijgen we de kansverdeling van deze variabele. Figuur 2-4a geeft een voorbeeld voor de betonsterkte. Deze is in dit voorbeeld normaal verdeeld met een gemiddelde betondruksterkte  $\mu = 45 \text{ N/mm}^2$  en een standaarddeviatie  $\sigma = 5 \text{ N/mm}^2$ .

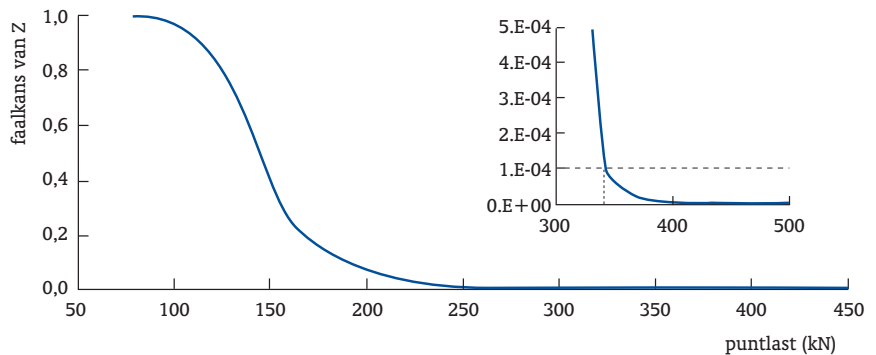


Figuur 2-4 Kansverdeling en faalkans van de betondruksterkte (normale verdeling)

Het oppervlak onder de kansdichtheidsgrafiek geeft de kans weer dat de constructie een bepaalde betondruksterkte heeft (Figuur 2-4a). Het totale oppervlak onder de kansdichtheidsgrafiek is uiteraard 1. De kans dat de betonsterkte namelijk ergens in het gebied van 25 tot 65 N/mm<sup>2</sup> valt, is (nagenoeg) gelijk aan 1. Om de kans op het onderschrijden van een bepaalde betondruksterkte te bepalen tellen we de oppervlakken cumulatief op vanaf de minimale betondruksterkte voor iedere mogelijke waarde van de druksterkte onder de kansdichtheidsgrafiek. Op deze wijze verkrijgen we de faalkans voor de betonsterkte (Figuur 2-4b). Uit Figuur 2-4b kunnen we bijvoorbeeld snel aflezen dat de kans dat de betondruksterkte kleiner is dan 37,5 N/mm<sup>2</sup>, gelijk is aan 0,05 (oftewel 5%).

Bij de berekening van de grenstoestand  $Z = 0$  mogen we niet uitgaan van de gemiddelde waarden van  $R$  en  $E$ , omdat de kans dat de constructie bezwijkt dan 50% is. Deze faalkans vinden we te hoog. In onze maatschappij accepteren we alleen zeer lage faalkansen. Behalve het gedragsmodel en de grenstoestand  $Z = 0$  moeten we dus ook een faalkans definiëren die we nog acceptabel vinden. In wiskundige termen eisen we dat de kans dat  $Z$  kleiner wordt dan 0, kleiner moet zijn dan de geaccepteerde faalkans:  $P\{Z < 0\} \leq P_{acc}$ . Een veel gebruikte, acceptabele faalkans bij constructieve veiligheidsbeschouwingen is  $10^{-4}$  (0,01 %).

Als rekenvoorbeeld berekenen we voor de ligger van Figuur 2-3 de puntlast die de ligger nog mag hebben bij de grenstoestand waarvoor de faalkans kleiner dan of gelijk aan  $10^{-4}$  is. Hierbij nemen we aan dat de betondruksterkte en de puntlast stochastische variabelen zijn (zie Figuur 2-5). De faalkans van  $10^{-4}$  wordt bereikt als we veronderstellen dat de puntlast 332 kN is en een standaarddeviatie van 15% ten opzichte van de gemiddelde waarde heeft. De gemiddelde waarde van de puntlast die daarbij hoort is 144 kN.



Figuur 2-5 Faalkans van  $Z = 0$  als functie van de puntlast  $F$  voor de ligger uit Figuur 2-3 (inzet: schaalvergroting)

Meestal spreken we echter niet over de faalkans maar over de betrouwbaarheid van een constructie. De betrouwbaarheid wordt gedefinieerd als '1- de faalkans' en geeft dus de waarschijnlijkheid dat de constructie goed functioneert. De mate van betrouwbaarheid wordt uitgedrukt in de betrouwbaarheidsindex  $\beta$ . Hoe groter de betrouwbaarheidsindex, des te kleiner de faalkans. Voor een normale verdeling geeft de betrouwbaarheidsindex  $\beta$  vermenigvuldigd met de standaarddeviatie  $\sigma$  precies gelijk aan 1- de faalkans.

### Stap 3: grenstostanden

Bij het construeren onderscheiden we twee typen grenstostanden: de uiterste grenstoestand en de bruikbaarheidsgrenstoestand. Een uiterste grenstoestand heeft betrekking op het statisch evenwicht. Een bruikbaarheidsgrenstoestand van een constructie heeft betrekking op het gebruik. Een bruikbaarheidsgrenstoestand is bijvoorbeeld de maximale trilling van een brug, waarboven gebruikers de trilling als oncomfortabel ervaren. Bij uiterste grenstostanden is het over het algemeen duidelijk wat de grens ten aan-



zien van de vereiste prestatie is, te weten de grens waarbij er nog juist een evenwicht is. Bij bruikbaarheidsgrenstoestanden zijn de grenzen minder eenduidig. Als de ligger bijvoorbeeld moet voldoen aan een doorbuigingseis van maximaal 25 mm, dan wil dat in de praktijk nog niet zeggen dat bij een doorbuiging van 26 mm de bruikbaarheid duidelijk tekortschiet. We hadden dan ook 26 mm als bruikbaarheidsgrens kunnen kiezen. De keuze van een bruikbaarheidsgrenstoestand is dus iets vrijer dan die van een uiterste grenstoestand.

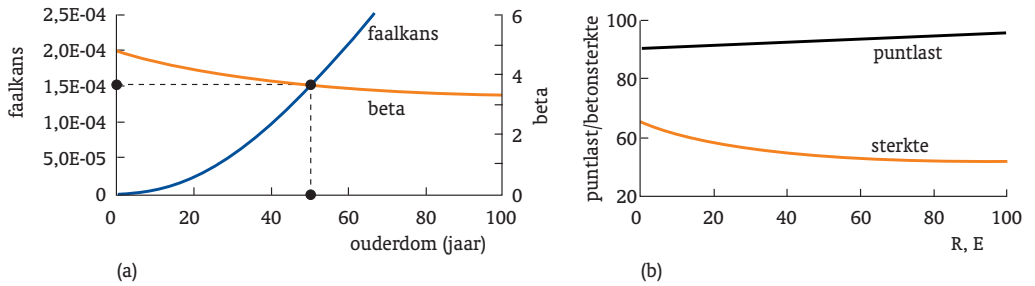
Over het algemeen accepteren we ook grotere faalkansen voor de bruikbaarheidsgrenstoestand dan voor de uiterste grenstoestand, omdat de consequenties van falen bij bruikbaarheidsgrenstoestanden kleiner zijn dan bij uiterste grenstoestanden. We komen hier in de latere hoofdstukken nog op terug.

Wanneer de grenstoestand eenmaal is vastgelegd, moet de constructie aan deze eis (blijven) voldoen. Als de grenstoestand wordt onderschreden, moeten we actie ondernemen: bijvoorbeeld door in de plan- of ontwerpfasen het ontwerp aan te passen, of door in de gebruiksfase onderhoud te plegen.

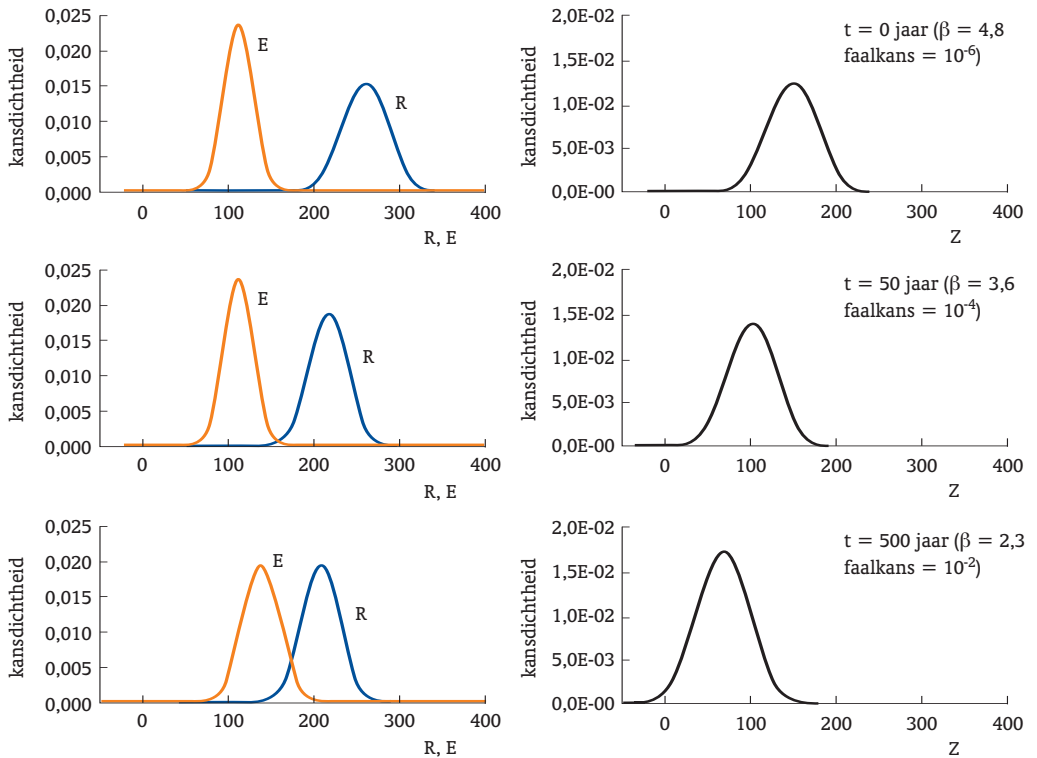
#### ***Stap 4: levensduur of referentieperiode***

$R$  en  $E$ , en dus  $Z$ , zijn vaak functies van verschillende variabelen die mogelijk veranderen in de tijd. Over het algemeen neemt  $Z$  af met de tijd, enerzijds doordat de capaciteit  $R$  afneemt als gevolg van aantastingsmechanismen (zoals vermoeiing of corrosie





Figuur 2-6 Toename in de faalkans en afname van de betrouwbaarheidsindex  $\beta$ , met de ouderdom (a) voor de ligger uit Figuur 2-3 met een afnemende betonsterkte  $f$  en toenemende puntlast (b)



Figuur 2-7 Tijdsafhankelijkheid van R, E (links) en Z (rechts) op een ouderdom van 0, 50 en 500 jaar

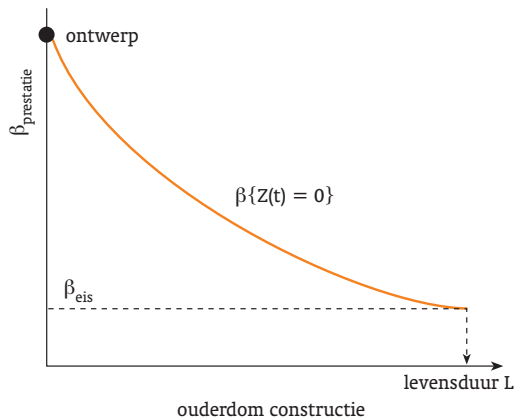
van de wapening) en anderzijds omdat het effect van de belasting  $E$  toeneemt (bijvoorbeeld door een toenemende verkeersbelasting). Niettemin kunnen zowel  $R$  als  $E$  in de tijd toe- of afnemen. De tijdsafhankelijkheid van  $Z$  wordt geïllustreerd in Figuur 2-6. Doordat  $Z$  afneemt in de tijd bij een afnemende  $R$  en een toenemende  $E$  (Figuur 2-6b),

stijgt ook de faalkans van  $Z = 0$  (Figuur 2-6a). Wanneer deze kans gelijk is geworden aan de vooraf gedefinieerde acceptabele faalkans, zeggen we dat de levensduur van de constructie ten einde is: ze voldoet dan niet meer aan de gestelde eisen. In Figuur 2-7 wordt de faalkans behoorde bij  $Z = 0$  uit Figuur 2-6 uitgezet voor een ouderdom van respectievelijk 0, 50 en 500 jaar. Indien de acceptabele faalkans  $10^{-4}$  is, is bij een ouderdom van 50 jaar de levensduur ten einde omdat de faalkans daarna boven zijn grenswaarde van  $10^{-4}$  uitkomt.

Samengevat bestaat een prestatie uit drie elementen:

1. een gedragsmodel  $Z(t)$ , waarvan  $Z(t) = 0$  de **grenstoestand** beschrijft.
2. een vastgelegde mate van **betrouwbaarheid** (of faalkans).
3. een **levensduur**  $L$  (of referentieperiode) van de constructie waarbinnen de grenstoestand niet overschreden mag worden bij de vooraf vastgelegde mate van betrouwbaarheid.

In een wiskundige notatie:  $P\{Z(t) < 0\}_L \leq P_{acc}$ . Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2-8.



Figuur 2-8 Schematische weergave van de variabelen in de prestatie-definitie

### Grenstoestand op basis van rekenwaarden

De berekening van de grenstoestanden is niet altijd eenvoudig. Daarom zijn de berekeningen voor de praktijk omgewerkt naar een beoordelingsmethode op basis van rekenwaarden (ook wel ontwerpwaarden genoemd, aangegeven met een kleine letter  $d$  van het Engelse woord design). Dit werkt als volgt. De eis is nu dat de rekenwaarden van de capaciteit,  $R_d$ , en het effect van de belasting,  $E_d$ , van een ontwerp voldoen aan  $Z_d > 0$ . De rekenwaarde voor de capaciteit is het quotiënt van de karakteristieke capaciteit  $R_k$  en de materiaalfactor  $\gamma_R$ . De karakteristieke waarde  $R_k$  is de waarde die  $R$  heeft bij een bepaalde kleine kans van overschrijden; gewoonlijk kiest men hiervoor de maat  $\mu_R \cdot 1,64\gamma_R$ . Deze karakteristieke waarden zijn bekend uit de praktijk. Zo wordt bijvoorbeeld de karakteristieke betondruksterkte gekozen op basis van de C-nummers zoals die in de normen staan of berekend zijn zoals in Figuur 2-4 is geïllustreerd. De materiaalfactor  $\gamma_R$  kunnen

we opzoeken in de normen. Onzekerheden zoals model- en materiaalonzekerheden die niet in de karakteristieke waarden zijn meegenomen, zijn ondergebracht in deze  $\gamma$ -factor. De rekenwaarde  $E_d$  wordt op vergelijkbare wijze gedefinieerd als het product van de karakteristieke belasting  $E_k$  en de belastingfactor  $\gamma_E$ . De grenstoestand op basis van de rekenwaarden wordt dan gegeven door:  $R_d - E_d = R_k/\gamma_R - E_k\gamma_E > 0$

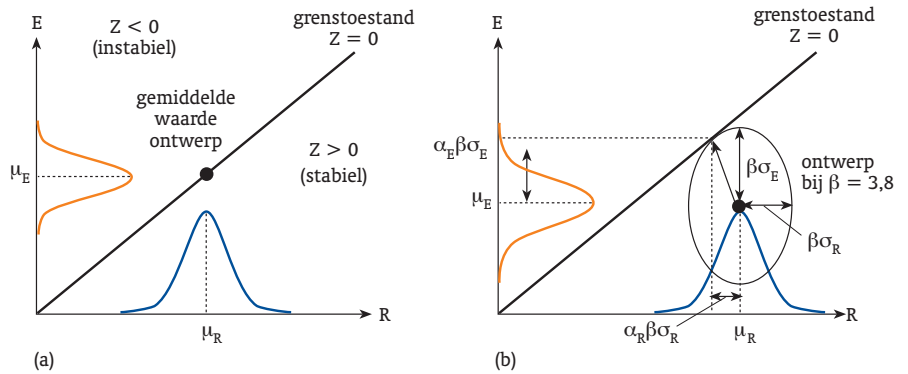
De gammafactoren in de normen zijn als volgt bepaald. Bij een berekening van de gemiddelde waarden, zoals gegeven in Figuur 2-9a, voldoet in principe ieder ontwerp op de lijn  $Z = R - E = 0$ . Uit randvoorwaarden aan het ontwerp (zoals de minimumlengte van een balk in verband met een vereiste overspanning), zal de voorkeur voor één bepaald ontwerp volgen. Bij een ontwerp op prestaties wordt het ontwerp punt echter niet gegeven door de gemiddelde waarden maar door de waarde behorende bij een bepaalde geaccepteerde faalkans. In Figuur 2-9b is dit gegeven voor één specifiek ontwerp door de ellips met als middelpunt de gemiddelde waarden van  $R$  en  $E$  en als assen  $-\beta\sigma_R$  en  $-\beta\sigma_E$ . Ieder punt op deze ellips heeft in principe dezelfde betrouwbaarheid, maar alleen het raakpunt van deze ellips met de lijn  $Z = 0$  geeft het punt waarin het ontwerp aan de prestatie-eis voldoet:  $Z = 0$  met een betrouwbaarheid gelijk aan  $\beta$ .

Het ontwerp punt is nu gedefinieerd als het raakpunt van de ellips met  $Z = 0$  en wordt gegeven door twee coördinaten, in geval van normale verdelingen van  $R$  en  $E$  door:

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R$$

$$E_d = \mu_E - \alpha_E \beta \sigma_E$$

De  $\alpha$ -factoren worden ook wel gevoeligheidsfactoren genoemd.



Figuur 2-9 Ontwerppunten bij gemiddelde waarde berekening (a) en probabilistische berekening (b) (geschematiseerd)

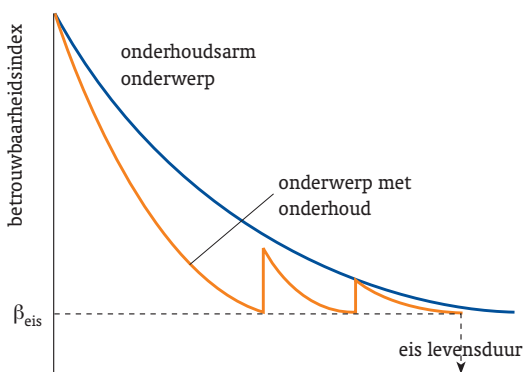
Omdat de gammafactor is gedefinieerd als het quotiënt van de karakteristieke waarde en de ontwerpwaarde, wordt de gammafactor in geval van een normale verdeling:  $\gamma_R = (1 - 1,64V_R)/(1 - \alpha_R \beta \sigma V_R)$  met  $V$  als de variatiecoëfficiënt. Voor andere verdelingen zijn de afleidingen iets ingewikkelder. De  $\gamma$ -factoren zijn afgeleid voor een groot aantal standaard situaties (standaardontwerpen). Vervolgens is een 'beste' waarde gekozen die

de ontwerpapunten oplevert die voor al deze standaardsituaties een goed resultaat opleveren. Deze waarden zijn vervolgens opgenomen in de normen.

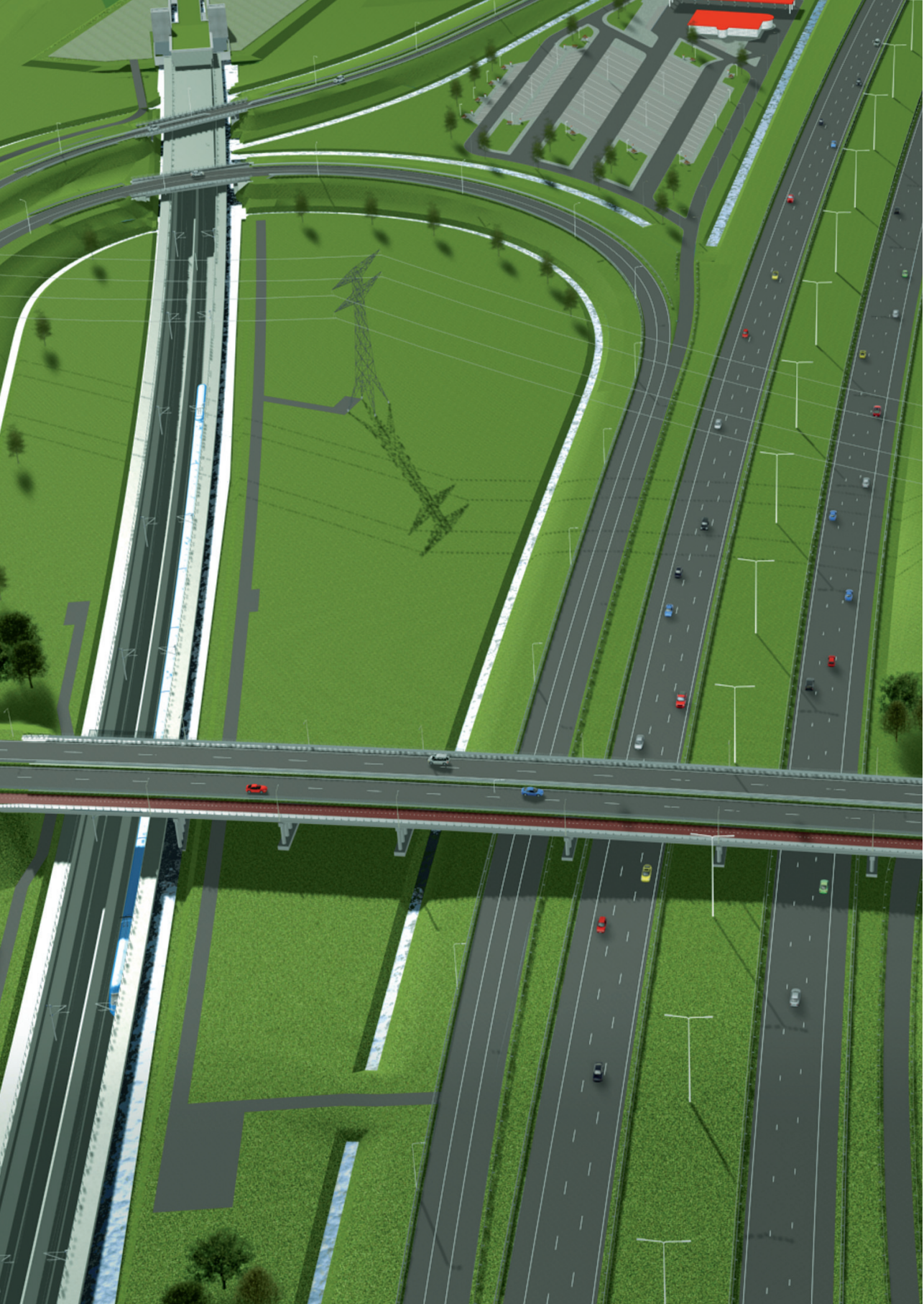
## Prestaties in het beheer

Door de prestaties te definiëren zoals we hiervoor hebben gedaan, kunnen we ze gedurende de gehele levensloop van een constructie volgen en aan de eisen toetsen. In de definitiefase en de ontwerpfase (zie Figuur 1-1) zullen we de prestaties en de daarbij behorende eisen voor de betrouwbaarheid en de levensduur moeten definiëren in kwalitatieve én kwantitatieve termen. Tijdens de uitvoering moeten we ervoor zorgen dat de prestaties ook daadwerkelijk worden gerealiseerd. Dit moet al tijdens de bouw worden getoetst, maar ook na de oplevering. Tijdens de exploitatie (het gebruik) moet men de prestaties blijven volgen om te controleren of ze hun eisen misschien onderschrijden, of dreigen te onderschrijden binnen de beoogde levensduur. Dan zal men zodanige onderhoudsmaatregelen moeten nemen dat de prestaties voor de resterende levensduur weer aan hun eisen voldoen.

Aan de hand van vooraf bepaalde prestaties en de bijbehorende eisen binnen een vooraf bepaalde levensduur kunnen we op elk moment in de levensduur vooruitkijken naar de gevolgen van elke willekeurige beslissing voor volgende fasen. Hierdoor kunnen we verschillende oplossingen tegen elkaar afwegen. In Figuur 2-10 bijvoorbeeld, voldoet alleen het eerste ontwerp gedurende de gehele levensduur aan de betrouwbaarheids-eis. Het tweede ontwerp voldoet niet zondermeer, maar als we het voorziene onderhoud al in het ontwerp meenemen, voldoet ook dit ontwerp aan de betrouwbaarheids-eis. Als het extra onderhoud goedkoper is dan de maatregelen die nodig zijn om het ontwerp betrouwbaarder te maken, is ook de keuze voor het tweede ontwerp principieel verantwoord.



Figuur 2-10 Schematische weergave van het effect van het meenemen van onderhoud in een ontwerp





### 3 Planning

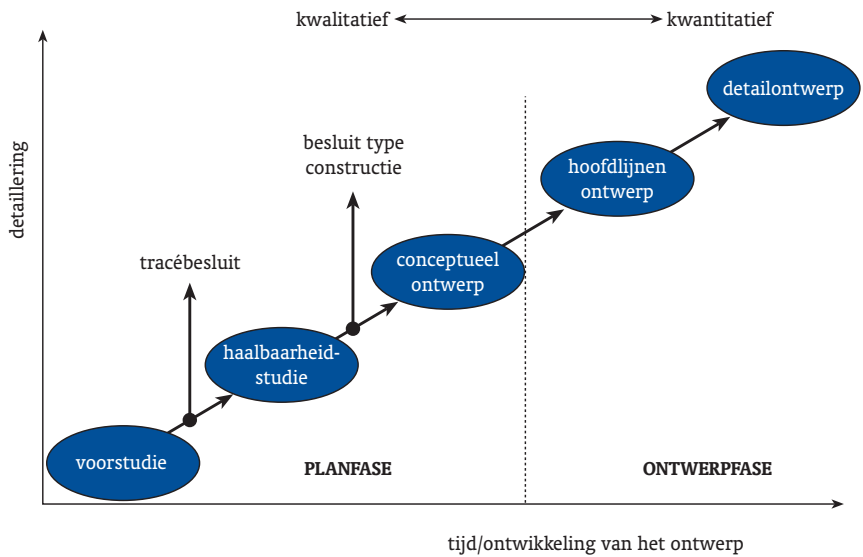
#### Een probleem in de infrastructuur: hoe lossen we dat op?

De redenen dat we een nieuwe constructie gaan bouwen kunnen voortkomen uit gesignaleerde knelpunten in de infrastructuur. Misschien is een bepaald kunstwerk er zo in kwaliteit op achteruit gegaan dat herstel te duur wordt; of is er een capaciteitsprobleem op een bepaalde route. De allereerste aanzet een knelpunt op te lossen geven we in de planfase.

De planfase en de ontwerpfasen (de volgende stap in het levensloopbeheer) omvatten samen globaal vijf stadia (Figuur 3-1):

- De voorstudie. Hierin bepalen we hoe we het gesignaleerde knelpunt op kunnen lossen. In dit stadium gaan we – in het geval van het capaciteitstekort - na of we de bestaande wegen, met al hun kunstwerken, kunnen uitbreiden of dat we een nieuwe weg moeten aanleggen. Het resultaat van deze studie is een tracébesluit met het definitieve routevoorstel. In het geval van het kunstwerk dat niet meer aan de eisen voldoet, kijken we in de voorstudie naar verschillende reparatie- en onderhoudsmethodieken. Dan kan de conclusie zijn dat er nieuwbouw moet komen.
- De haalbaarheidsstudie. Hierin wegen we typen constructies (brug, tunnel) tegen elkaar af en ontwikkelen we verschillende alternatieve ontwerpen met hun belangrijkste dimensies (aantal tunnelbuizen/banen e.d.).
- De conceptuele ontwerpfasen. Daarin leggen we de dimensies (afmetingen e.d.) gedetailleerder vast. Ook beschrijven we in dit stadium de kwalitatieve kanten van het bouwproces, zodat we weten onder welke voorwaarden het ontwerp realiseerbaar is, en of we misschien speciale maatregelen moeten nemen bij grote risico's. Idealiter nemen we in dit stadium ook de exploitatie (zoals het monitoren, het onderhoud) mee in de keuze tussen de verschillende alternatieven.
- Het hoofdlijnenontwerp. Hierin werken we het gekozen ontwerp nader uit op het niveau van de constructie en de constructiedelen. Ook werken we in dit stadium het bouwproces en de exploitatie nader uit.
- Het detailontwerp. In dit stadium specificeren we alle details van het ontwerp, het bouwproces en de exploitatie.

In dit boek bestaat de planfase uit de voorstudie, de haalbaarheidsstudie en de conceptuele ontwerpfasen. De ontwerpfasen omvat het hoofdlijnenontwerp en het detailontwerp. We kozen deze indeling omdat het initiatief van de planfase meestal bij de opdrachtgever ligt, en het initiatief van de ontwerpfasen bij de ontwerper. Bovendien is de planfase vooral kwalitatief van karakter en werken we daarin met kengetallen en een eenvoudige beoordelingsmethode, terwijl de ontwerpfasen dit allemaal kwantitatief en nauwkeurig uitwerkt.



Figuur 3-1 Stadia in de plan- en ontwerpfase

In de planfase moet de opdrachtgever bijvoorbeeld kiezen uit verschillende alternatieve routes of (typen) constructies. De basis van deze afweging ligt in de functionele eisen die hij of zij aan de route of de constructie stelt, en in de daaraan gekoppelde prestatie-eisen. Op basis van een globale kostenraming bepalen we welk alternatief de voorkeur verdient. Bij de kostenraming moeten we uitgaan van alle kosten over de gehele levensduur. We moeten dus ook een eerste opzet maken voor de beheerstrategie. In dit hoofdstuk kijken we hoe we de beheerstrategie in de planfase kunnen opzetten en welke consequenties de gekozen functionele eisen voor de latere fasen hebben.

### Prestatie-eisen in de planfase

De functionele eisen die de opdrachtgever aan een constructie stelt, moeten we vertalen in prestatie-eisen. In hoofdstuk 2 gaven we het voorbeeld van een brugdek dat rust op pijlers of landhoofden. De functie-eis (een brugdek dragen) werd hier vertaald in een prestatie-eis (draagvermogen). Deze prestatie-eis geldt natuurlijk voor de gehele beoogde levensduur, niet alleen op het ogenblik dat de constructie wordt opgeleverd. Bijvoorbeeld: de momentcapaciteit van een ligger mag nooit onder een bepaalde grenswaarde komen, ongeacht de levensfase van de constructie. Al tijdens het plaatsen van de ligger in de bouwphase mag het buigend moment in de ligger dus niet te hoog worden. Dit zal zich bijvoorbeeld vertalen in eisen m.b.t. de plaats van en het aantal hijsogen in een prefab ligger. Anderzijds kan de bouwwijze ertoe leiden dat we het ontwerp moeten aanpassen. Je zou misschien sneller kunnen bouwen als je de liggers met een grijper zou plaatsen. Dan zou de ligger misschien wel meer wapening nodig kunnen hebben dan ze eigenlijk voor het functioneren in de constructie nodig heeft.

De prestatie-eisen moeten voor iedere levensfase apart worden gedefinieerd. Omdat



vele prestatie-eisen voor een constructie gedefinieerd kunnen worden, verdelen we deze prestaties vaak onder in verschillende typen. Een veel voorkomende indeling in typen prestatie-eisen is:

- constructief gedrag: eisen die te maken hebben met de reactie van de constructie op mechanische belastingen en vervormingen, zoals bezwijkveiligheid, maximale doorbuiging of zetting van een brugdek;
- duurzaamheid: eisen die te maken hebben met de reactie van een constructie op agressieve inwerkingen vanuit het milieu, zoals wapeningsstaal dat gaat roesten als er chloride uit het zeewater of dooizouten bij komen;
- calamiteiten: eisen die te maken hebben met de reactie van de constructie op extreem hoge en bij uitzondering voorkomende belastingen zoals de hoge temperaturen die bij een brand voorkomen, of de krachten bij een aardbeving;
- comfort en esthetica: eisen die we aan objecten stellen omdat we willen dat ze er mooi uitzien (vormen en kleuren) en dat ze veilig en gemakkelijk zijn in het gebruik (zoals de stroefheid van vloeren of traptreden);
- milieu en gezondheid: eisen die te maken hebben met de belasting die de constructie op het milieu en mens en dier legt, zowel indirect door het gebruik van primaire grondstoffen als direct door de uitstoot of uitloging van gevaarlijke stoffen die de flora en fauna en de gezondheid van mensen zouden kunnen aantasten.

We kunnen alle prestatie-eisen per fase in de levensloop van de constructie systematisch vastleggen in een prestatiematrix. Tabel 3-1 geeft hiervan een voorbeeld. Voor iedere fase van de levensloop van een constructie moeten we deze matrix voor de relevante onderdelen invullen en aanvullen. Voor de planfase betekent dit dat we in de voorstudie de functie- en prestatie-eisen op een globaal niveau (in termen van een tracé) definiëren, dat we ze in de haalbaarheidsstudie op constructieniveau (in termen van het type constructie en de globale afmetingen) definiëren, en in het conceptuele ontwerp op een meer concreet niveau verder uitwerken (in termen van de gekozen afmetingen, mogelijkheden met betrekking tot bouw en exploitatiefase).



Voorbeeld prestatiematrix in de planfase: stel dat er, als onderdeel van een lange fietsroute, een fietsverbinding moet komen over of onder een snelweg. De beoogde kruising ligt in een natuurgebied waar strenge eisen gelden voor mogelijke verstoringen en vervuiling. Er kunnen bijvoorbeeld eisen en randvoorwaarden gelden als: een schoon en snel bouwproces, een onderhoudsarm ontwerp zodat onderhoud en inspecties geen verstoringen met zich meebrengen. Uitgewerkt in een tabel zouden de functies en prestaties er als volgt uit kunnen zien:

*Tabel 3-1 Voorbeeld van een prestatiematrix in de haalbaarheidsstudie (planfase)  
uitgangspunten: functie = fietsverbinding bij bestaande autosnelweg  
levensduur = 50 jaar*

	ontwerp	realisatie	exploitatie	
			monitoren	onderhoud
constructieve veiligheid	- zwaar verkeer op autoroute - grond- en waterdruk - geen landbouwverkeer - voldoen aan Bouwbesluit		inspecties in fietstraject	onderhoudsarm
duurzaamheid	- bestand tegen doozout/ brak grondwater		monitorsysteem levensloop in constructie	onderhoudsarm
brandwerendheid	- bestand tegen brand			onderhoudsarm
comfort en esthetiek	- landschap zo min mogelijk verstoren - tweerichting fietsverkeer	verkeer op snelweg niet hinderen		
milieu en gezondheid	- voldoen aan Bouwstoffenbesluit	snel en schoon		

In Tabel 3-1 hebben we voor de haalbaarheidsstudie kwalitatieve termen ingevuld, maar we zouden hier ook kengetallen in kunnen vullen. Het belangrijkste doel van deze invuloefening is dat we alle eisen voor de gehele levensloop vastleggen. Niet ieder vakje in de tabel hoeven we per se in te vullen. In sommige stadia worden misschien geen eisen gesteld; soms kunnen we een beslissing tot een latere fase uitstellen.

De eisen die we in de planfase vastleggen komen van verschillende kanten: natuurlijk van de toekomstige eigenaar, maar ook van de wet en de omwonenden. Wettelijke eisen hebben te maken met de bescherming van mensen (de constructieve veiligheid, de brandwerendheid, het gebruik van gevaarlijke stoffen en de ruimtelijke ordening) en met de bescherming van het milieu en de gezondheid van mensen (eveneens het gebruik van gevaarlijke stoffen, maar ook geluidshinder). Omwonenden kunnen eisen stellen rond overlast. Al deze eisen moeten we in de prestatiematrix invullen.

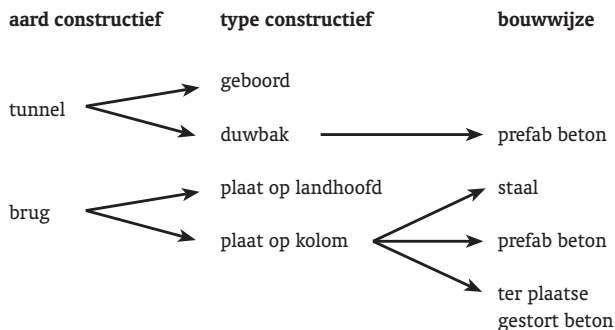
## Strategie in de planfase

### Beslissen

Het plan- en ontwerpproces is een geleidelijk proces. De soorten beslissingen die we moeten nemen hangen af van de fase van de levensloop van de constructie. In het voorbeeld uit Tabel 3-1 is in de voorstudie de beslissing genomen waar de fietsverbinding moet komen. In de haalbaarheidsstudie moeten we onder andere besluiten wat en hoe we precies gaan bouwen. We moeten dus keuzes maken over:

1. de aard van de doorgang,
2. het type constructie,
3. de bouwwijze.

Meestal is er al een groot aantal alternatieven voor één bepaalde beslissing. Een combinatie van verschillende beslissingen levert dus een nog veel groter aantal alternatieven. Om dit beslisproces beheersbaar te maken, gebruiken we een belangrijk hulpmiddel: de beslisboom. Uitgaande van de beslissingen die we voor de fietsverbinding moeten nemen, werkt de beslisboom als volgt (zie Figuur 3-2).



Figuur 3-2 Beslisboom t.a.v. aard, type en bouwwijze van de doorgang

Als eerste bekijken we de alternatieven voor de aard van de fietsverbinding, grofweg te verdelen in een tunnel of een brug. Voor beide alternatieven gelden eisen rond het ontwerp (belasting, duurzaamheid, brandwerendheid enz.), de realisatie (de omgeving tijdens het bouwproces zo min mogelijk verstoren) en de exploitatie (onderhoudsarme constructie). Als er op dit punt nog geen voorkeur blijkt voor één van beide alternatieven, kijken we vervolgens naar het type constructie. Bij een tunnel kunnen we bijvoorbeeld kiezen tussen een geboorde tunnel of een geduwde tunnelbak. Bij een brug hebben we de keus tussen een plaat op landhoofden of een plaat op pijlers. Nu hebben we dus vier alternatieven. Uit de kengetallen voor de bouwkosten van de vier alternatieven blijkt dat de geboorde tunnel veel te duur is en buiten het beschikbare budget valt. Van de twee mogelijke bruggen is de plaat op pijlers veel duurder dan de plaat op de landhoofden: hiervoor kunnen we de bestaande aarden geluidswallen naast de snelweg gebruiken. Op basis van de kengetallen van de bouwkosten zijn zowel de tunnelbak als de brug op landhoofden

goede en betaalbare oplossingen. De brug heeft iets lagere bouwkosten, maar het verschil met de tunnel is zo klein dat we op basis daarvan de keus nu nog niet maken. Dat doen we pas als we eerst de overige prestatie-eisen in een later stadium hebben getoetst.

Van de twee overgebleven alternatieven met betrekking tot de aard van de constructie en het type constructie kan een eerste schatting met betrekking tot de bouwwijze worden gemaakt. Voor de tunnelbak is er maar één oplossing, namelijk met een prefab betonnen bak. De brug kunnen we maken in staal, in prefab beton of door ter plaatse beton te storten. Staal blijkt te duur. De oplossingen met prefab beton of ter plaatse gestort beton zijn ongeveer even duur. Maar vanwege de eis dat de omgeving niet verstoord mag worden, vervalt het alternatief om ter plaatse beton te storten, omdat de nodige beschermingsmaatregelen te duur zouden worden. Op basis van 'good engineering judgement' schatten we vervolgens in dat de twee resterende alternatieven op alle overige prestatie-eisen ongeveer dezelfde totaalscore zullen hebben. Het resultaat van deze haalbaarheidsstudie is dan: we kunnen zowel de tunnelbak als de brug met landhoofden realiseren binnen het beoogde budget en binnen de gestelde eisen.

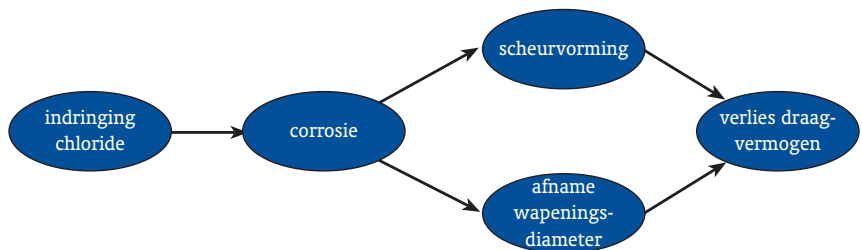
We kunnen dus in een planfase de nodige beslissingen nemen door alternatieven tegen elkaar af te wegen aan de hand van de eisen die we in de prestatiematrix hebben vastgelegd. Op die manier kunnen we een groot aantal alternatieven al snel afschrijven. Of we deze beslissingen mogen nemen op basis van 'good engineering judgement', op basis van kengetallen of van gedetailleerde berekeningen, hangt af van de fase waarin het ontwerp zich bevindt (zie ook Figuur 3-1). We houden een beslisboom over met de realiseerbare alternatieven, eventueel al voorzien van gegevens over de mate waarin ze - kwalitatief en/of kwantitatief - aan de gestelde eisen voldoen.

### ***Beslissen op basis van kosten, faalkansen en risico***

We kiezen het beste alternatief altijd op basis van een of meer verschillende criteria. Het meest gebruikte criterium is: hoeveel kost het? In het bovenstaande voorbeeld deden we dat eigenlijk ook al. Nu moeten we bij het nemen van een beslissing met méér kosten rekening houden dan alleen de directe bouwkosten (arbeidsloon, materiaal- en materieelkosten enz.). Ook de kosten als het object toch zou falen op de vereiste prestaties, moeten we in de berekening meenemen. Deze kosten berekenen we aan de hand van het risico, gedefinieerd als de kans op falen vermenigvuldigd met de gevolgen, waarbij we de gevolgen in geld uitdrukken.

Een handig hulpmiddel om de gevolgen van het falen op een vereiste prestatie in te schatten, is een gebeurtenissenboom waarop we de bedreigingen en de gevolgen met elkaar koppelen. Een gebeurtenissenboom legt op logische wijze verband tussen een begingebuurtenis en alle mogelijke gevolgen daarvan. Nemen we als voorbeeld de eventuele fietstunnel uit Tabel 3-1. Als we deze fietstunnel maken, komt die in brak grondwater te liggen. Het chloride in dit brakke grondwater zal het beton binnendringen, waardoor de wapening van de tunnelbak kan gaan roesten (corrosie). Bij corrosie

neemt de diameter van de wapeningsstaven af en zullen er scheuren ontstaan (Figuur 3-3). Het draagvermogen van de constructie wordt kleiner, en uiteindelijk zou de tunnel kunnen instorten. Het risico van dit scenario is gelijk aan de kans dat de tunnel instort ten gevolge van de wapeningscorrosie, vermenigvuldigd met alle kosten die dit met zich meebrengt. Die gevolggkosten kunnen op zich groot zijn, veel groter dan de bouwkosten: de kosten van de sloop en de nieuwbouw, de reparatie aan de bovengesloten snelweg, de kosten doordat de snelweg niet gebruikt kan worden en eventueel het verlies van mensenlevens. Dus ook als de kans dat de tunnel daadwerkelijk instort heel klein is, kan het risico toch nog (te) groot zijn.

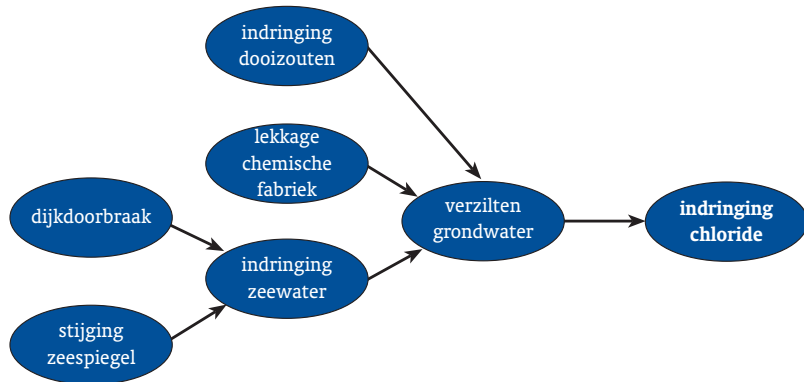


*Figuur 3-3 Gebeurtenissenboom voor chloride-indringing in de fietstunnel*

Soms zijn de verschillende oorzaken die tot een bepaalde ongewenste gebeurtenis kunnen leiden, moeilijk te overzien. In dat geval wordt een foutenboomanalyse gemaakt. In een foutenboomanalyse wordt een logische opeenvolging van basisgebeurtenissen gegeven die kunnen leiden tot die ene ongewenste cruciale ‘topgebeurtenis’ uit de gebeurtenissenboom. Als voorbeeld: stel dat de fietstunnel niet in brak, maar in zoet grondwater komt te liggen. In principe hoeven we dan geen rekening te houden met corrosie van de wapening van de fietstunnel door chloride-indringing vanuit het grondwater, tenzij er een gerede kans bestaat dat het grondwater later brak of zelfs zout wordt. Dat is helemaal niet zo’n onwaarschijnlijk scenario. Misschien ligt er in de buurt een chemisch bedrijf dat zout water ‘lekt’; of het gebied ligt dicht bij de zee en er komt zeewater op het land door een dijkdoorbraak of via het grondwater door een versterkte kwel, of de dooizouten op de snelweg komen in het grondwater terecht, enz. Figuur 3-4 toont voor deze situatie een foutenboom. Een foutenboom wordt meestal vertikaal getekend met de ‘topgebeurtenis’ als piek op de boom. Bovendien staan er allerlei zogenaamde poorten in om tot een duidelijk scenario te komen; een EN-poort geeft bijvoorbeeld aan dat twee gebeurtenissen gelijktijdig moeten plaatsvinden om tot een topgebeurtenis te leiden. In dit boek gebruiken we deze poorten niet.

Uit de kans dat de basisgebeurtenissen optreden, kunnen we de kans berekenen dat de topgebeurtenis optreedt. In het gegeven voorbeeld schatten we de kans dat alle basisgebeurtenissen zich voordoen, zó klein, dat we ook geen rekening hoeven te houden met het optreden van de topgebeurtenis.

De kans op mogelijke, ongewenste gebeurtenissen (al dan niet met behulp van de foutenboom) en de mogelijke gekwalificeerde gevolgen van die ongewenste gebeurtenissen (met behulp van bijvoorbeeld de gebeurtenissenboom) leveren samen de faalkans op – dat is het kansdeel van het risico. Vermenigvuldigd met de kosten van alle gevolgen en noodzakelijke maatregelen levert dit het (totale) risico. Dit risico moet voldoen aan vooraf vastgelegde criteria. Op basis van deze toetsing is een alternatief geschikt of niet geschikt.



Figuur 3-4 Foutenboom voor chloride-indringing in de fietstunnel

### Optimalisatie

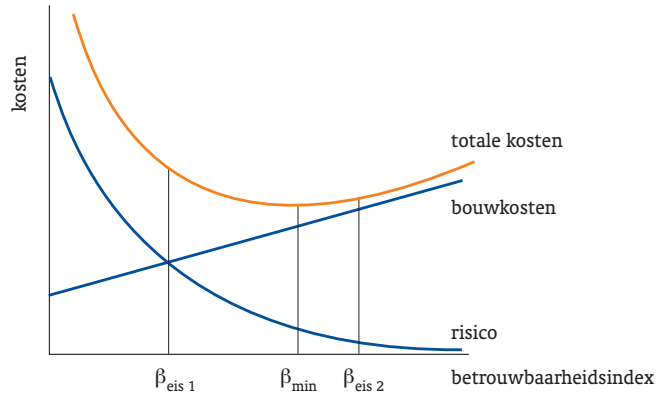
Een ontwerp kunnen we op twee manieren wegen, namelijk op basis van alleen de faalkans, of op basis van het risico. Uit het oogpunt van de kosten verdient de tweede afweging de voorkeur, maar de bouwvoorschriften, zoals bijvoorbeeld het Bouwbesluit, dwingen ons in eerste instantie om de eerste afweging te maken. Vervolgens kunnen we de ontwerpalternatieven die aan het criterium van de faalkans voldoen, optimaliseren aan de hand van de tweede afweging.

We kunnen een ontwerp op verschillende manieren optimaliseren. Bij de fietstunnel in zout grondwater kunnen we bijvoorbeeld de betondekking groter maken, waardoor het veel langer zal duren voor het chloride de wapening bereikt. Met een goed monitorsysteem of met extra inspecties kunnen we beginnende corrosie of scheurvorming sneller ontdekken. We kunnen in het onderhoud corrosie van de wapening met kathodische bescherming tegengaan. Zulke maatregelen verkleinen de faalkans en het risico, maar ze brengen ook weer kosten met zich mee. De optimale beslissing is het alternatief te kiezen waarbij alle maatregelen samen (de bouw- en instandhoudingskosten vermeerderd met het risico) de laagste totale kosten opleveren (zie Figuur 3-5).

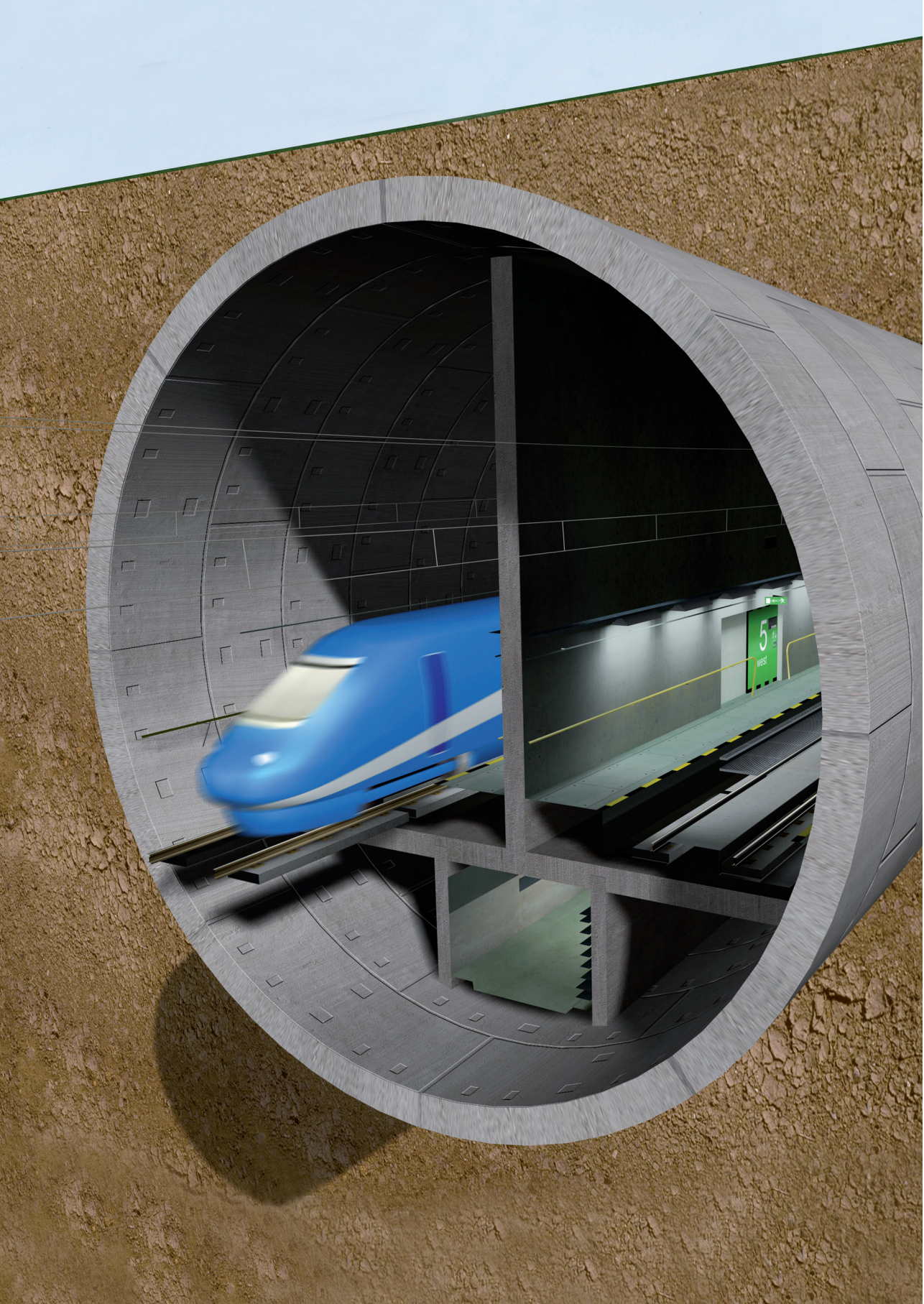
Het is niet altijd mogelijk om het alternatief met de laagste kosten te kiezen. Het alternatief moet ook nog voldoen aan de betrouwbaarheidseis. Indien de betrouwbaarheidseis aan het ontwerp groter is dan de betrouwbaarheid van het alternatief met minimale kosten ( $\beta_{\text{eis2}}$  versus  $\beta_{\text{min}}$  in Figuur 3-5), dan moeten we toch de iets duurdere oplossing kiezen. Indien de vereiste betrouwbaarheid lager ligt kunnen we altijd kiezen

voor de oplossing met minimale kosten bij de hogere betrouwbaarheid ( $\beta_{\text{eis1}}$  versus  $\beta_{\text{min}}$  in Figuur 3-5).

Uiteindelijk zullen we één alternatief ‘het beste’ kunnen noemen, in de zin dat het aan alle functionele eisen voldoet bij de laagste kosten en met inachtneming van de vereiste betrouwbaarheid. Daarmee leggen we tevens het raamwerk van de beheerstrategie vast. Immers, we weten van het gekozen alternatief precies hoe de constructie zal worden ontworpen, gebouwd, onderhouden en hoe de toestand in de gaten wordt gehouden (Design, Construct and Maintain).



*Figuur 3-5 Optimale maatregelen op basis van minimale kosten ( $\beta_{\text{min}} > \beta_{\text{eis1}}$ ) of op basis van minimale betrouwbaarheid ( $\beta_{\text{min}} < \beta_{\text{eis2}}$ )*







## 4 Ontwerp

### Van plan naar ontwerp: Wat gaan we precies bouwen?

In de planfase hebben we een eerste opzet gemaakt van het ontwerp en in principe ook van de beheerstrategie voor de toekomstige constructie, met als resultaat een conceptueel ontwerp. In de ontwerpfase moeten we dit conceptueel ontwerp verder uitwerken. Dit doen we grofweg in twee stappen. Eerst maken we een ontwerp op hoofdlijnen, en vervolgens een detailontwerp. Ook hier wegen we weer verschillende alternatieven tegen elkaar af. Het resultaat van deze fase is een projectspecificatie (of bestek) aan de hand waarvan de constructie gebouwd kan worden.

Het definitieve ontwerp moet voldoen aan de voorwaarden (functionele eisen en daarvan afgeleide prestatie-eisen) die we al in de planfase vastlegden. De ontwerper moet deze globale eisen verder 'vertalen' naar eisen voor zijn constructie als geheel en voor de constructiedelen en details afzonderlijk. De globale, vaak kwalitatieve eisen uit de planfase moeten we nu, in de ontwerpfase, kwantificeren. De ontwerper moet daarvoor over gedragsmodellen (en de bijbehorende data) beschikken waarmee hij de prestaties van zijn ontwerp kan berekenen en kan toetsen aan de eisen.

De toetsing van de prestatie-eisen vindt plaats op basis van betrouwbaarheid, volgens de ontwerpmethodiek voor de constructieve veiligheid, zoals die in het Bouwbesluit vastligt en verder is uitgewerkt in de Technische Grondslagen voor Bouwconstructies (TGB, ofwel de Nederlandse normen uit de NEN 6700-serie; in 2010 wordt dat de NEN-EN 1990 serie). Het Bouwbesluit eist dat de veiligheid van de constructie gedurende de referentieperiode is gewaarborgd. Volgens de TGB's moet de constructieve betrouwbaarheid als volgt worden beoordeeld: 'een constructie mag de gedefinieerde prestatie-eis gedurende de beoogde levensduur met de vastgelegde mate van betrouwbaarheid niet onderschrijden'. Dit komt overeen met wat we in hoofdstuk 2 over prestaties hebben geschreven. Hetzelfde principe kunnen we op de overige vier typen prestaties toepassen.

Let op: soms mogen de eisen niet worden overschreden, soms niet onderschreden. Dit hangt af van de formulering van het gedragsmodel. Zo kunnen we bij het indringen van chloride in beton uitgaan van de weerstand tegen indringen, of juist van de omgekeerde waarde, de geleiding. Bij de weerstand is de faalkans gekoppeld aan een kleine onderschrijdingskans, en bij geleiding aan dezelfde kleine overschrijdingskans. In dit boek beschrijven we de gedragsmodellen in principe altijd in termen van acties en weerstanden, waarbij de faalkans dus samenhangt met de overschrijdingskans van de actie en de onderschrijdingskans van de weerstand. Op basis daarvan willen we onderzoeken hoe we de prestaties op basis van betrouwbaarheid en voor de beoogde levensduur kunnen kwantificeren, en welke modellen hieraan ten grondslag liggen.

### Gedragsmodellen voor prestaties

Het gedragsmodel  $Z(t)$ , waarvan de waarde  $Z(t) = 0$  de grenstoestand bepaalt, bevat over het algemeen twee belangrijke componenten:

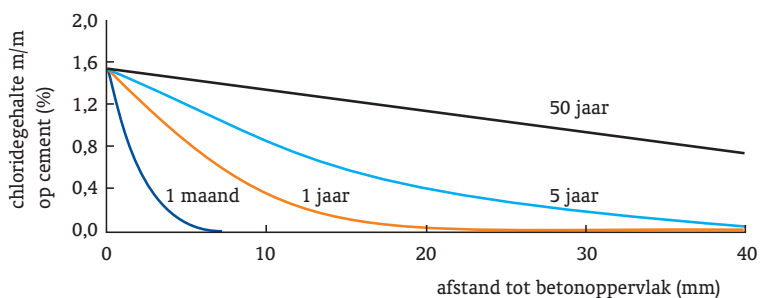
- (tijdafhankelijke) chemische, fysische of mechanische processen in reactie op een actie, zoals carbonatatie, chloride-indringing of kruip;
- modelfactoren die eventuele afwijkingen van het werkelijke gedrag en het beschreven (meestal vereenvoudigde) proces bevatten.

Overigens zijn niet alle gedragsmodellen per definitie tijdafhankelijk, maar voorlopig gaan we er vanuit dat dit wel zo is.

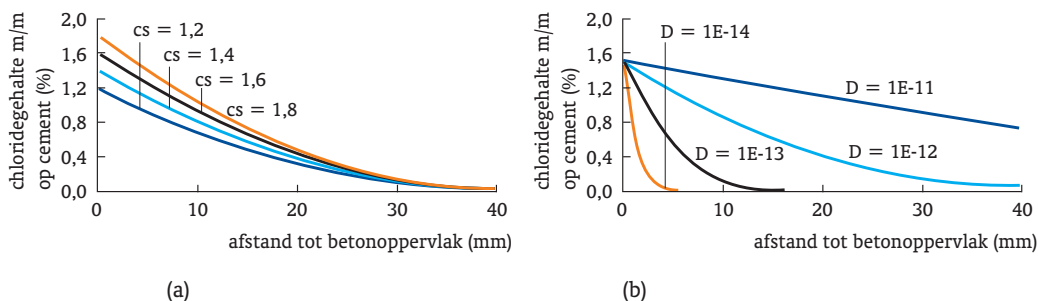
De intensiteit of de snelheid van een proces hangt af van enerzijds de belasting, en anderzijds de materiaaleigenschappen en de geometrie die de weerstand tegen de belasting bepalen. Een voorbeeld van zo'n tijdafhankelijk proces is de indringing van chloride in beton. Het model dat de chloride-indringing beschrijft (Tabel 4-1), is afgeleid uit het fysische transportproces van de chloride-ionen (diffusie). Het geeft het chloridegehalte op een bepaalde diepte in het beton weer als functie van de duur van de blootstelling aan chloride (de expositietijd) en de afstand tot het expositievlak (het betonoppervlak) (Figuur 4-1). De indringing is afhankelijk van onder andere de chlorideconcentratie (de belasting) aan de buitenzijde van het beton en de diffusiecoëfficiënt (1/weerstand van het beton tegen chloride-indringing) (Figuur 4-2).

Tabel 4-1 Tijdafhankelijk chloridediffusiemodel

model	variabelen
$c(x,t) = c_s(1 - \text{erf}(x/\sqrt{4Dt}))$	$c$ = chloridegehalte (concentratie) op diepte $x$ en tijd $t$
	$x$ = diepte vanaf het oppervlak
	$c_s$ = chloridegehalte (concentratie) aan het betonoppervlak
	$D$ = diffusiecoëfficiënt
	$t$ = expositietijd



Figuur 4-1 Indringing van chloride als functie van de afstand tot het betonoppervlak en expositietijd, gemiddelde waarden



Figuur 4-2 Invloed van het chloridegehalte aan het betonoppervlak (a) en de diffusiecoëfficiënt (b) op het chloridegehalte in het beton na 5 jaar expositie, gemiddelde waarden

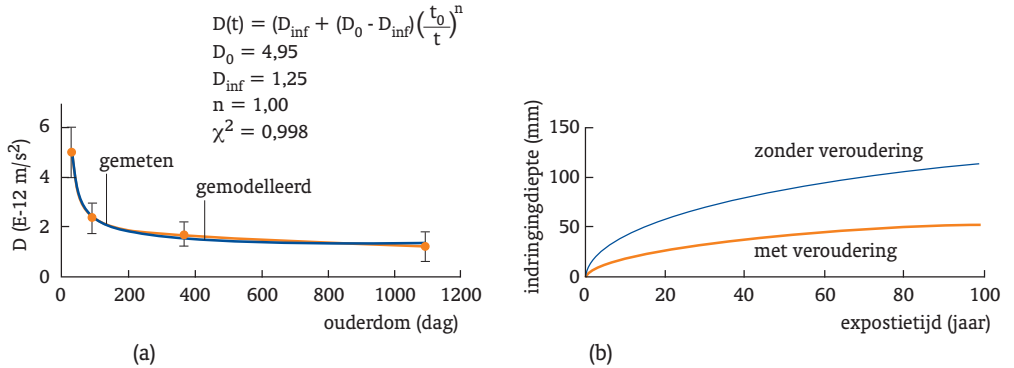
Gedragsmodellen die de werkelijkheid precies beschrijven zijn vaak nogal ingewikkeld. Als we bepaalde aannamen doen, krijgen we modellen die een stuk eenvoudiger zijn en die de werkelijkheid toch adequaat beschrijven. In het model voor chloride-indringing nemen we bijvoorbeeld aan dat er alleen transport door middel van concentratieverschillen optreedt; in het model voor de buiging van de ligger uit hoofdstuk 2 nemen we aan dat het materiaal zich lineair-elastisch gedraagt.

Een bijkomende complicatie is dat de materiaaleigenschappen (in deze voorbeelden de weerstand tegen chloride-indringing en de sterkte) kunnen veranderen in de tijd. Dit noemen we veroudering. Over het algemeen gaat het om een vermindering van de materiaaleigenschappen door het blootstaan aan belastingen. Door de permanente belasting op beton bijvoorbeeld kan kruip optreden, met als gevolg microscheurvorming. Dit tast de sterkte van het beton aan. Er zijn overigens ook voorbeelden waarbij veroudering de materiaaleigenschappen juist verbetert. Zo vertoont beton een steeds hogere weerstand tegen chloride-indringing door de verdergaande reactie (hydratatie) van het cement.

Als veranderingen in de materiaaleigenschappen in de loop van de tijd de kans op falen vergroten, moeten we deze in modellen opnemen. Als ze de kans juist verlagen, mogen we ze meenemen – dat kan belangrijke consequenties ten voordele van het materiaalgebruik en de constructie hebben. Een voorbeeld van een materiaaleigenschap die in de loop van de tijd verbetert, is weergegeven in Figuur 4-3. Uit experimentele meetgegevens blijkt dat de diffusiecoëfficiënt van chloride in beton in de loop van de tijd afneemt (Figuur 4-3a). Dit betekent dat chloride ionen steeds langzamer het beton binnendringen. Hierdoor blijkt dat de indringdiepte van het chloride na 100 jaar expositie veel lager is dan wanneer veroudering buiten beschouwing wordt gelaten (Figuur 4-3b). Als de eis aan het ontwerp zou zijn dat het chloride de wapening van de constructie na 100 jaar niet bereikt mag hebben, hoeft de dekking dus niet meer dan 100 mm te zijn, maar slechts ongeveer 50 mm!

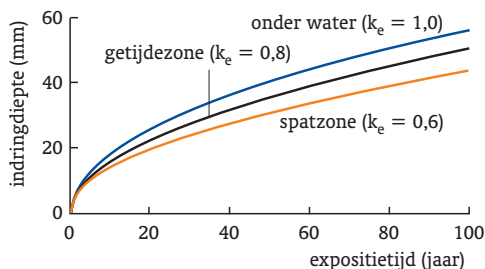
Behalve een mogelijke veroudering zijn er nog andere factoren die het gedrag beïnvloeden. Twee belangrijke invloeden zijn de uitvoering en het milieu. Deze invloeden kunnen we als modelfactor in het gedragsmodel opnemen; dat kan impliciet als een ‘overall

modelfactor' of expliciet als een apart genoemde uitvoeringsfactor en dito milieufactor. Met de uitvoeringsfactor kunnen we de effecten verrekenen van variabelen als de duur van de nabehandeling en de kwaliteit van de verdichting van de betonspecie. Op de variabelen bij de uitvoering komen we in het volgende hoofdstuk terug.



*Figuur 4-3 Verandering van de diffusiecoëfficiënt met de ouderdom van beton, zoals gemeten in het laboratorium (a) en het effect op de diepte waar het kritisch chloridegehalte wordt bereikt met de expositietijd (b).*

De milieufactor omvat effecten zoals variaties in expositietijd. In een marien milieu, bijvoorbeeld, hebben verschillende zones een verschillende expositieduur. Als een constructie in het water staat met een deel dat erbovenuit komt, kunnen de volgende expositiezones worden onderscheiden: een zone dat zich continu onder water bevindt en een permanente chloridebelasting heeft; een getijdzone die twee keer per dag droog valt en; een zone waarvan het oppervlak alleen nat wordt door opspattend water en eventueel een droge zone. Behalve de expositieduur kent de milieufactor nog meerdere variabelen, zoals de temperatuur. Omdat we het gezamenlijke effect van alle variabelen uit de milieufactor nog moeilijk kunnen modelleren, wordt dit bepaald op basis van praktijkgegevens. Een voorbeeld van het effect van verschillende mariene milieus op de chloride-indringing in beton is gegeven in Figuur 4-4. Het complete chloridediffusiemodel is weergegeven in Tabel 4-2.



*Figuur 4-4 Modelling van de diepte van het kritisch chloridegehalte in verschillende mariene milieus (bij  $\beta = 1,5$ ), de variabelen van de milieufactor zijn geschat*

Tabel 4-2 Tijdafhankelijk chloridediffusiemodel inclusief veroudering en invloedsfactoren

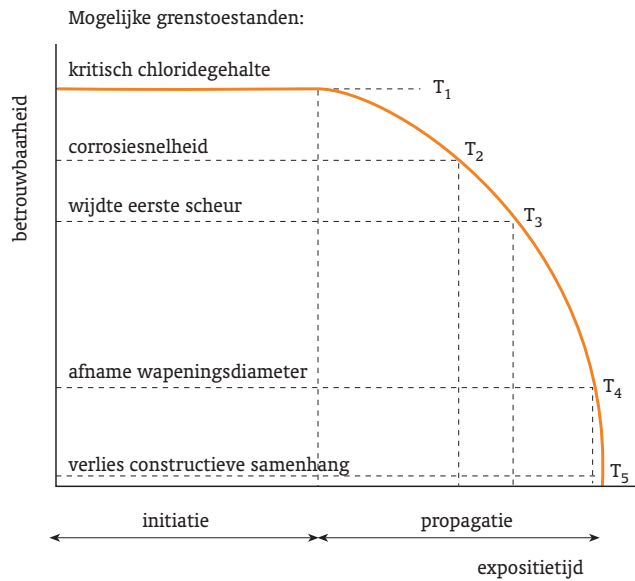
model	variabelen
$c(x,t) = c_s(1-\text{erf}(x/\sqrt{4Dt}))$	$c$ = chloridegehalte (concentratie) op diepte $x$ en tijd $t$
$D(t) = k_c k_e (D_{\text{inf}} + (D_0 - D_{\text{inf}})(t_0/t)^n)$	$x$ = diepte vanaf het oppervlak
	$t$ = expositietijd
	$c_s$ = chloridegehalte aan het betonoppervlak
	erf = errorfunctie
	$D_0$ = referentiediffusiecoëfficiënt (op $t=t_0$ )
	$D_{\text{inf}}$ = langeduur diffusiecoëfficiënt (op $t=\text{oneindig}$ )
	$t_0$ = referentietijd (meestal 28 dagen)
	$n$ = verouderingscoëfficiënt
	$k_c$ = uitvoeringsfactor
	$k_e$ = milieufactor

### Aantastingsprocessen: koppeling van gedragsmodellen

Aantastingsprocessen zijn zelden te modelleren met behulp van één (chemisch, fysisch of mechanisch) proces. Ze bestaan meestal uit een opeenvolging van gebeurtenissen met ieder hun eigen proces, waarbij de ernst van de schade of de gevolgen daarvan toenemen naarmate het aantastingsproces vordert. Figuur 3-3 laat zo'n aantastingsproces zien met een gebeurtenissenboom voor het aantastingsproces 'corrosie van de wapening'. Vanuit één begingebuurtenis, 'indringing van chloride' volgen ongewenste gebeurtenissen elkaar op tot de constructie haar constructieve samenhang verliest.

Omdat aantastingsprocessen opeenvolgende gebeurtenissen weergeven, waarbij de volgende gebeurtenis niet plaatsvindt voordat de vorige heeft plaatsgevonden, zijn die meestal wel goed te modelleren in de tijd. In Figuur 4-5 zien we een voorbeeld van corrosie van de wapening door chloride-indringing.





Figuur 4-5 Voortgang van corrosie van de wapening en gevolgen daarvan in de tijd

Voor corrosie wordt het verloop van de aantasting verdeeld in verschillende stadia:

- een initiatieperiode zonder enige zichtbare aantasting of merkbare achteruitgang van het constructieve gedrag;
- een propagatieperiode (de feitelijke corrosie) waarin de achteruitgang van de constructie daadwerkelijk optreedt, met gevolgen die in de loop van de tijd erger worden.

In de propagatiefase kunnen meerdere ongewenste gebeurtenissen optreden:

- de eerste scheurtjes in het beton;
- wijder wordende en samengroeiende scheuren, met als mogelijk gevolg dat er stukken betondekking afspringen;
- een afname van de dikte van de wapeningsdiameter, waardoor het wapeningsstaal kan gaan vloeien of breken;
- een vermindering van de constructieve samenhang.

Deze indeling hangt grotendeels samen met de onderliggende processen (diffusie, corrosie enz.) die in elke fase van de aantasting dominant zijn.

### Prestatie-eisen in de ontwerpfase

In de planfase werkten we met een prestatiematrix met daarin de prestatie-eisen waaraan de constructie moet gaan voldoen. In de ontwerpfase moeten we deze eisen nader specificeren op het niveau van de constructie, de constructiedelen en de detaillering; een en ander afhankelijk van de fase waarin het ontwerp zich bevindt. De snelste manier om te controleren of een ontwerp (in wat voor fase dan ook) aan zijn prestatie-eisen voldoet, is weer om de bedreigingen op de (toekomstige) constructie in kaart te brengen en hun effect op de constructie en gevolgen te bepalen.

### *Analyse van de bedreigingen, effecten en gevolgen*

Eén manier om een overzicht te verkrijgen van de bedreigingen is om te beginnen met een overzicht van alle mogelijke begingebourtenissen die tot schade of verlies van functionaliteit van de constructie kunnen leiden, en vervolgens te bekijken (uit te rekenen) hoe groot de kans op zo'n begingebourtenis is. In de planfase hebben we deze analyse al in eerste aanzet gemaakt. Als voorbeeld bespraken we in hoofdstuk 3 de mogelijke verontreiniging van grondwater met chloride (zie ook de foutenboomanalyse in figuur 3-4), waarbij we met name keken naar de kans dat veranderingen in de omgeving een bedreiging van de constructie kunnen betekenen. Op basis van de analyse van de bedreigingen in de planfase hebben we waarschijnlijk al een groot aantal mogelijke bedreigingen uitgesloten. In de ontwerpfase maken we waarschijnlijk de eerste kwantitatieve analyse van de kans dat één van de resterende bedreigingen optreedt. Hoe verder we de constructie uitwerken op het niveau van de constructiedelen en de details, hoe nauwkeuriger ons beeld van deze bedreigingen wordt.

Bij deze verdere specificatie op het niveau van de constructiedelen en details wordt duidelijk in welke mate de verschillende onderdelen door dezelfde gebeurtenissen worden bedreigd. Waar een brugdek de invloed van dooizouten ondervindt, hebben de pijlers daar rechtstreeks geen enkele last van. Ze kunnen door de aantasting van het brugdek wel extra belastingen of vervormingen opgelegd krijgen. Deze (indirecte) belasting moeten we dan voor de pijlers verder uitwerken.

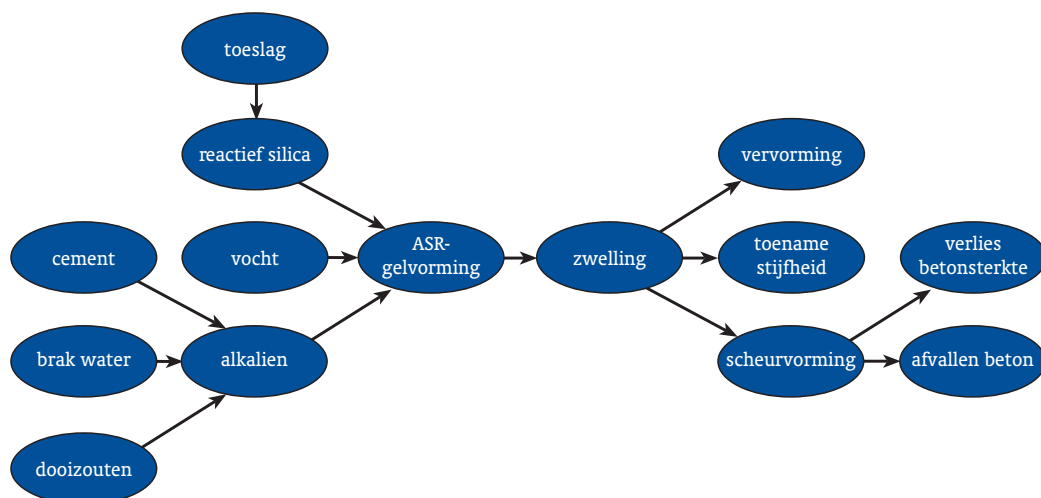
Een andere complicatie is het feit dat op detailniveau andere bedreigingen een rol kunnen spelen dan op het niveau van de constructiedelen of de constructie als geheel. Ook die bedreigingen moeten we vooraf in kaart brengen en analyseren. Een voorbeeld hiervan zijn voegovergangen in de vorm van rubberen profielen. Het rubber heeft een heel eigen aantastingsmechanisme, het wordt bros onder de invloed van UV-straling.

Het in kaart brengen van alle bedreigingen van een constructie is vaak een heel gepuzzel. Toch is het een cruciale stap in de analyse van de prestatie-eisen aan een constructie. Constructies falen vaker door vergeten bedreigingen dan door onvoldoende maatregelen tegen de meegenomen bedreigingen.

Wanneer we de mogelijke bedreigingen van de constructie in kaart hebben gebracht, en eventueel al de kans dat ze optreden hebben bepaald, kunnen we bekijken wat de gevolgen zijn als een bepaalde begingebourtenis optreedt. Een eerste analyse kunnen we weer uitwerken met behulp van een gebeurtenissenboom zoals in Figuur 3-3. Veel effectanalyses zijn standaard. We vinden modellen voor het berekenen van de kans op een ongewenst effect in bijvoorbeeld normen, aanbevelingen en andere literatuur. Voorbeelden hiervan zijn de buiging van de ligger in Figuur 2-3 en de corrosie van de wapening in Figuur 4-5.

We kunnen foutenbomen en gebeurtenissenbomen ook combineren in een zogeheten vlinderdasmodel. In Figuur 4-6 is een vereenvoudigde gebeurtenissen- en foutenboom gemaakt voor het optreden van de beruchte alkali-silicareactie (ASR). Bij deze chemische

reactie tussen silica (uit bijvoorbeeld het toeslag) en alkaliën ontstaat een expansief gel dat het beton van binnenuit uit elkaar drukt.



Figuur 4-6 Vereenvoudigde fouten- en gebeurtenissenboom (vlinderdas) voor ASR

Op basis van de analyses krijgen we een overzicht van de bedreigingen, effecten en gevolgen die voor de constructie (of voor elk ontwerp-alternatief) van belang zijn. Hiermee hebben we nog geen prestaties gedefinieerd, noch hebben we eisen gedefinieerd waaraan deze moeten voldoen. Daarvoor moeten we nog drie variabelen vastleggen, namelijk:

- de grenstoestand;
- de faalkans of de betrouwbaarheid van de grenstoestand;
- de levensduur.

#### **Keuze van de grenstoestand**

Behalve uiterste grenstoestanden worden er meestal ook bruikbaarheidsgrenstoestanden aan een constructie gesteld. In het geval van corrosie van de wapening (Figuur 4-5), is de uiterste grenstoestand het verlies van draagvermogen waardoor de constructie instort. Deze uiterste grenstoestand moeten we in het ontwerp meenemen. Maar is dit de enige grenstoestand die we in het ontwerp mee willen nemen? Lang vóórdat de constructie haar constructieve samenhang verliest, komen er mogelijk al stukken wapening bloot doordat de dekking er vanaf is gedrukt, en zit de constructie vol scheuren en roestplekken. Hoewel de constructieve veiligheid dan nog lang niet in het geding is, kan een gevoel van onveiligheid wel degelijk bij de gebruikers hebben postgevat. Bovendien zijn scheuren en losse stukken beton niet zonder gevaar voor gebruikers. Daarom worden er naast uiterste grenstoestanden ook vaak één of meerdere bruikbaarheidsgrenstoestanden gesteld. De belangrijkste komen voort uit de bruikbaarheid en functionaliteit van de constructie (bijv. de maximale scheurwijdte, trillingen) of de veiligheid van de gebruiker of de omgeving (bijv. loskomende stukken beton, oneffenheid van het oppervlak). Alle overige grenstoestanden die we zouden kunnen stellen, komen voort uit het oogpunt van het



beheer of ze zijn gebaseerd op subjectieve criteria, zoals het gevoel van onveiligheid bij het verschijnen van roestplekken. In het geval van de corrosie van de wapening (Figuur 4-5) zouden het bereiken van het kritisch chloridegehalte bij de wapening, een bepaalde corrosiesnelheid, de breedte van de eerste scheur of een bepaalde afname van de wapeningdiameter, allemaal kunnen dienen als (element van) een bruikbaarheidsgrenstoestand. De keuzes voor grenstoelstanden op basis van beheer komen in hoofdstuk 6 (monitoren) en hoofdstuk 7 (onderhoud) aan de orde.

#### **Keuze van de betrouwbaarheidsindex**

De keuze van de betrouwbaarheidsindex wordt mede bepaald door de omvang van de gevolgen van het onderschrijden van de grenstoelstand. Voor uiterste grenstoelstanden worden kleinere faalkansen (en dus een grotere betrouwbaarheid) geëist dan voor bruikbaarheidsgrenstoelstanden. De Eurocode onderscheidt drie betrouwbaarheidsklassen (Tabel 4-3), die overeenkomen met de consequentieklassen. De constructies worden ingedeeld naar de gevolgen van hun falen in termen van het verlies van mensenlevens en van economische, sociale of milieuschade. In de betrouwbaarheidsklasse 1 vallen bijvoorbeeld agrarische gebouwen (stallen e.d.) waar over het algemeen weinig of geen mensen aanwezig zijn, terwijl in de klasse 3 openbare gebouwen vallen, waar veel mensen samen kunnen zijn (scholen, theaters, stadions). Een vergelijkbare indeling komt voor in de NEN 6700-serie.

Tabel 4-3 Aanbevolen betrouwbaarheidswaarden voor nieuwbouw (NEN-EN 1990 Eurocode)

betrouwbaarheidsklasse	gevolgen van bezwijken		betrouwbaarheidsindex ( $\beta$ )	
	kans op levensgevaar	kans economische schade	uiterste grenstoelstand referentieperiode = 1 jaar	uiterste grenstoelstand referentieperiode = 50 jaar
1	klein	verwaarloosbaar	5,2	4,3
2	gemiddeld	klein	4,7	3,8
3	groot	groot	4,2	3,2

In de gevallen waar helemaal geen wettelijke eisen voor de betrouwbaarheid van een constructie gelden, kunnen de partijen in het bouwproces zelf een keuze doen. Het ligt voor de hand om dan te kiezen voor de optimale waarde, dus voor de optie waarbij de totale kosten over de gehele levensduur het geringst zijn. We moeten ons er hierbij wel van bewust zijn dat we daarmee tegelijk een bepaalde beheerstrategie kiezen. We komen hier in hoofdstuk 6 (monitoren) en hoofdstuk 7 (onderhoud) op terug.

#### **Keuze van de levensduur**

De keuze van de levensduur wordt door een groot aantal harde en zachte criteria bepaald, zoals de kosten voor de realisatie, het belang van de constructie in de infrastructuur (en de daaraan gekoppelde kosten als die niet beschikbaar is) en de kosten voor vervangende nieuwbouw bij het einde van de levensduur. Het is een elementaire regel voor het bepalen van de gewenste levensduur, dat hoe duurder het is om een constructie aan te leggen,

het des te meer loont om haar een langere levensduur te geven. Anderzijds wordt een constructie weer duurder naarmate de vereiste levensduur langer is. Door deze wisselwerking heeft elke constructie zowel een redelijke ondergrens als een redelijke bovengrens aan haar levensduur. Een vergelijking van de verschillende alternatieven kunnen we baseren op de kosten per jaar of op de kosten over de gehele levensloop, waarbij werkelijk alle mogelijke kostenposten in rekening worden gebracht. Tabel 4-4 toont de NEN-EN 1990 Eurocode indicatieve levensduren voor de verschillende soorten bouwwerken (in de Eurocode gaat het om het werkzame leven van een constructie, als er wel onderhoud wordt gepleegd maar er geen grootschalig onderhoud is).



Over het algemeen houden we bij het vertalen van de algemene prestatie-eisen naar eisen voor de constructie(-delen) en detailleringen de levensduur vast die we in de planfase vastlegden. Het is niet per se noodzakelijk om voor alle onderdelen van een constructie dezelfde levensduur te kiezen – als dat al zou kunnen. Zo hebben rubberen voegovergangen maar een levensduurverwachting van 10 jaar. Indien de levensduur(verwachting) van een onderdeel korter is dan die van de constructie als geheel, moeten we er in het beheer rekening mee houden dat we deze onderdelen tussentijds moeten repareren of vervangen (hoofdstuk 7).

Tabel 4-4 Overzicht van de indicatieve (ontwerp-)levensduur volgens NEN-EN 1990 Eurocode

categorie (zonder grote reparaties)	indicatieve levensduur (jaar)	voorbeeld
1	10	tijdelijke constructies
2	10-25	vervangbare constructiedelen
3	15-30	landbouwgebouwen
4	50	gebouwen en constructies zoals bruggen en sluisen
5	100	monumentale gebouwen en constructies (bruggen, waterkeringen)

#### **Toetsing van het ontwerp aan de prestatie-eisen**

Op basis van onze analyse van de bedreigingen en de gevolgen kunnen we een overzicht maken van de prestatie-eisen. Tabel 4-5 bevat het voorbeeld van het brugdek van de fietsbrug over de snelweg uit hoofdstuk 3. Vervolgens moeten we toetsen of het ontwerp aan de eisen uit dit overzicht voldoet.

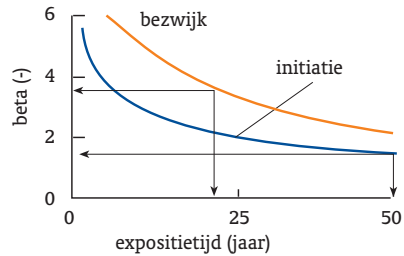
Tabel 4-5 Overzicht van de prestatie-eisen voor de duurzaamheid van de ligger van de fietsbrug voor een levensduur van 50 jaar

duurzaamheidsaspect	grenstoestand	$\beta$
ASR	uitsluiten	-
vorstdooizoutschade	uitsluiten	-
initiatie van corrosie door chloride	kritisch chloridegehalte bij wapening	1,5
initiatie van corrosie door carbonatatie	carbonatatiefront bij wapening	1,5
corrosie	bezwijken van de ligger	3,8

Als voorbeeld: in het overzicht geldt de eis dat er geen corrosie van de wapening door chloride mag optreden. Hoewel beginnende corrosie geen problemen zal geven (het draagvermogen wordt nauwelijks aangetast, er zijn nog geen scheuren te zien) is de tijd tussen beginnende corrosie en het optreden van scheuren kort. Daarom is gekozen voor de eis dat het kritisch chloridegehalte bij de wapening niet overschreden mag worden. Uit het oogpunt van de constructieve veiligheid eist men verder dat de ligger niet mag bezwijken. Het is mogelijk dat aan deze eis wordt voldaan indien de constructie aan de eis met betrekking tot het kritisch chloridegehalte voldoet maar dit hoeft niet per se het geval te zijn. Dit zal daarom eerst gecontroleerd moeten worden.

Voor het begin van corrosie door chloride-indringing eist men verder een betrouwbaarheid van 1,5 omdat de gevolgen van het begin van de corrosie ('corrosie-initiatie') niet groot zijn. Voor het bezwijken van de wapening eist men een betrouwbaarheid van 3,8. De betrouwbaarheid moet bovendien gelden tijdens de gehele levensduur van de brug, namelijk 50 jaar. In Figuur 4-7 is de afname van de betrouwbaarheidsindex als functie van de levensduur van het brugdek gegeven. Uit de toetsing blijkt dat het ontwerp voldoet

aan de prestatie-eisen voor chloride-initiatie maar niet met betrekking tot het bezwijken van de ligger.



Figuur 4-7 Afname van de betrouwbaarheidsindex voor het brugdek bij indringing van doozouten: initiatie van corrosie (bij kritisch chloridegehalte = 0,8) en bezwijken van de ligger

Overigens kan een ontwerp(-alternatief) ook op basis van andere criteria dan prestatie-eisen worden getoetst, zoals toetsing op risico. Het kansdeel van het risico berekenen we op basis van de kans op een ongewenste gebeurtenis, de kans op mogelijke effecten en de kans op gevolgen, gegeven een bepaald effect. Als voorbeeld: bij een dijkdoorbraak als ongewenste gebeurtenis, met als effect dat chloride het beton binnendringt en corrosie van de wapening plaatsvindt, is een mogelijk gevolg dat een tunnel instort. Vermenigvuldiging van het risicokansdeel met (de kosten van) de gevolgen levert dan het totale risico.

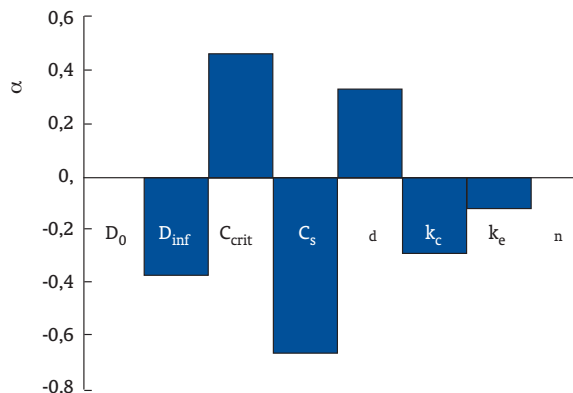


### De gevoeligheidsfactoren

Wanneer we een constructie hebben ontworpen, kunnen we de gevoeligheid van het ontwerp voor elk van zijn eigen variabelen bepalen. Dit zijn de zogenaamde  $\alpha$ -factoren (zie ook Figuur 2-9). Bij een begin van corrosie, zoals gegeven in Figuur 4-7 ( $\beta = 1,5$  bij een levensduur van 50 jaar) horen de  $\alpha$ -waarden in Figuur 4-8. Een hoge  $\alpha$ -waarde betekent dat het ontwerp zeer gevoelig is voor deze variabele. In het ontwerp van Figuur 4-8 zijn dit de chloridebelasting en het kritisch chloridegehalte. Mocht het ontwerp niet aan de levensduureis voldoen, dan kunnen we het op deze variabelen het gemakkelijkste bijsturen. In dit geval zouden we bijvoorbeeld voor een andere cement in de dekking kunnen kiezen waardoor het kritisch chloridegehalte kan stijgen.

Op basis van de  $\alpha$ -factoren zouden we eventueel ook de ontwerpwaarden kunnen bepalen. Dit is in dit geval niet noodzakelijk, omdat we voor het ontwerp volledig probabilistische berekeningen hebben gemaakt.

variabele	eenheid	gemiddelde waarde	standaard deviatie	ontwerppunt
$D_0$	mm <sup>2</sup> /yr	154.5	28.7	154.6
$D_{inf}$	mm <sup>2</sup> /yr	39.4	8.6	44.5
$c_{crit}$	% Cl-	0.8	0.1	0.7
$c_s$	% Cl-	1.54	0.30	1.50
$d$	mm	62	5	60
$k_c$	-	1.25	0.2	1.3
$k_e$	-	0.80	0.05	0.8
$n$	-	1.0	1.0	1.0



Figuur 4-8 Alfa-waarden en ontwerpwaarden voor corrosie-initiatie

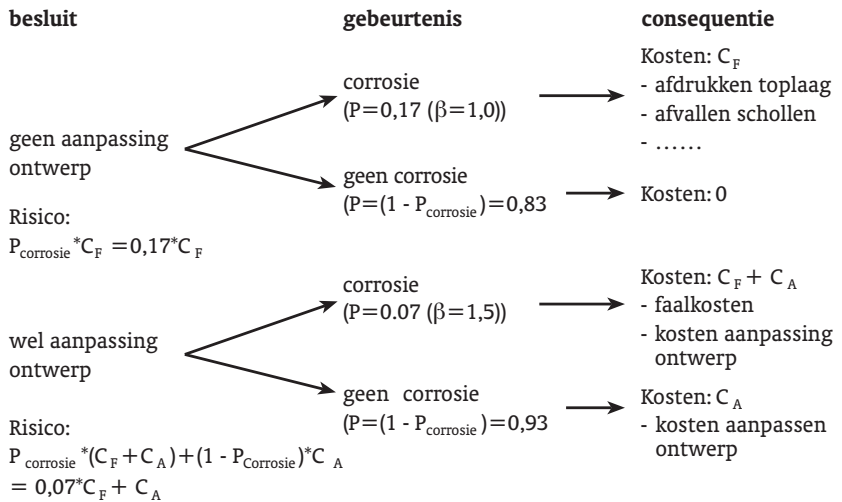
### Strategie in de ontwerpfase

Als we het ontwerp toetsen aan de prestatie-eisen of aan het geaccepteerde risico, weten we in hoeverre het ontwerp voldoet aan de gestelde eisen. Indien het aan alle eisen voldoet, hoeven we het ontwerp in principe niet meer aan te passen. Eventueel kunnen we dan nog wel een kostenoptimalisatie uitvoeren.

Indien het ontwerp niet voldoet, moeten we een alternatief ontwerp maken dat wél voldoet aan de gestelde eisen. Meestal is wel een aantal alternatieven te bedenken om een ontwerp te verbeteren. Voor het brugdek dat het kritisch chloridegehalte binnen de levensduur overschrijdt, kunnen we bijvoorbeeld de dekking verhogen, of we kunnen een ander betonmengsel kiezen met een hogere weerstand tegen chloride-indringing (dus met een lagere diffusiecoëfficiënt). Beide maatregelen brengen natuurlijk wel extra kosten met zich mee: voor de extra dekking is meer beton nodig en voor de hogere weerstand is een duurder cement nodig, of méér cement om een dichter beton te maken (cement is de duurste grondstof in het beton).

De alternatieven waaruit we kunnen kiezen, bestaan niet alleen uit oplossingen die de effecten van een begingebuurtenis verminderen, maar ook uit maatregelen die de kans op een begingebuurtenis of de gevolgen van de effecten verkleinen. Om chloride-indringing als begingebuurtenis voor corrosie tegen te gaan kunnen we bijvoorbeeld het betonoppervlak coaten, zodat het chloride het beton niet kan binnendringen.

Het aantal alternatieven waaruit we kunnen kiezen om een ontwerp te verbeteren, kan snel oplopen. Om een overzicht te houden op de maatregelen, de bijbehorende faalkansen en/of kosten, kunnen we weer een beslissingsboom opzetten. Figuur 4-9 geeft een voorbeeld van het keuzeproces om de gevolgen van corrosie van de wapening door chloride in het brugdek te verminderen. Uit de figuur volgt tevens dat indien de aanpassing niet meer dan 10% van de faalkosten bedraagt, het alternatieve ontwerp ook niet duurder wordt.



Figuur 4-9 Beslissingsboom voor een alternatief ontwerp om aan de prestatie-eis rond chloride-initiatie te voldoen

Wanneer we ook nog maatregelen rond de uitvoering en de exploitatie in het ontwerp meenemen, optimaliseren we ons ontwerp op basis van de levensduur en niet meer op basis van de stichtingskosten. Uitvoering en exploitatie komen in de volgende hoofdstuk-

ken aan de orde. Wanneer we uit de alternatieven kiezen op basis van kosten, moeten we de extra kosten van de maatregelen in het ontwerp zelf (bijvoorbeeld een grotere dekking van de wapening) of bij de uitvoering (langere nabehandeling bij alternatief cement), bij de stichtingskosten optellen. De extra kosten bij de exploitatie (het onderhoud, de monitorsystemen, enz.) voegen we meestal toe aan de begrote exploitatiekosten. De totale kosten van het ontwerp en de exploitatie samen bepalen welk alternatief het goedkoopste is. Dat alternatief zullen we meestal kiezen.

Door te werken met (tijdsafhankelijke) gedragsmodellen en met de daaraan gekoppelde prestatie-eisen, weten we in dit stadium precies welke eigenschappen van de constructie of het materiaal de prestatie beïnvloeden. Hierdoor kunnen we gekwantificeerde eisen hanteren rond het ontwerp én rond de uitvoering en de exploitatie. Voor de prestatie-eisen waar we geen gedragsmodellen hebben, is zo'n analyse veel moeilijker te maken; dan kunnen we het effect van de maatregelen minder nauwkeurig inschatten en vaak weten we niet eens welke eigenschappen we moeten beïnvloeden. Toch kunnen we dezelfde procedure volgen. Het uiteindelijke resultaat is dan een keuze voor één alternatief ontwerp, waarbij voor iedere detail staat vermeld wat de prestatie-eisen zijn, wat het achterliggende model is, hoe de prestaties moeten worden aangetoond en aan welke randvoorwaarden de uitvoering en de exploitatie moeten voldoen.

#### ***De status van de op prestaties gebaseerde ontwerpmethode voor de vijf typen prestatie-eisen***

In hoofdstuk 3 zijn vijf typen prestatie-eisen gedefinieerd, namelijk eisen met betrekking tot het constructieve gedrag, duurzaamheid, calamiteiten, comfort en esthetica en tot slot milieu en gezondheid. De manier waarop we prestatie-eisen formuleren is voor alle typen eisen 'generiek'. De ontwikkeling van de eisen en met name de onderliggende gedragsmodellen zoals deze in dit hoofdstuk met name voor de duurzaamheid zijn gepresenteerd, is voor de verschillende prestatietypen echter nogal onevenwichtig. In de huidige bouwregelgeving zijn alleen het constructief gedrag en de calamiteiten op het niveau van prestaties uitgewerkt. Voor de duurzaamheid heeft men onlangs ook een op prestaties gebaseerde ontwerpmethode ontwikkeld die naadloos aansluit bij de genoemde ontwerpmethoden. Deze zijn nog niet opgenomen in de normen, al heeft men in de NEN-EN 206-1 (Beton –Deel 1: Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit) wel een achterdeurtje opengelaten om ze te kunnen toepassen. Voor de prestatietypen 'esthetica en comfort' en 'milieu en gezondheid' zijn de ontwerpmethoden nog in ontwikkeling.







## 5 Uitvoering

### Van ontwerp naar uitvoering: hoe gaan we bouwen?

In de uitvoeringsfase wordt de constructie daadwerkelijk gebouwd. Hierbij moeten we beslissingen over verschillende uitvoeringsaspecten nemen. In de huidige bouwpraktijk worden veel uitvoeringsaspecten vastgelegd in de projectspecificatie. Behalve de te gebruiken materialen en vereiste afmetingen, gaat dat bijvoorbeeld ook over de vereiste bekisting (de sterkte en de stijfheid) bij ter plaatse gestort beton. Andere uitvoeringsaspecten mag de aannemer nog vrij kiezen, maar zijn vrijheid van handelen is bij de huidige bouwpraktijk min of meer beperkt tot de procesvoering.

Bij bouwen gebaseerd op prestatie-afspraken heeft hij in principe meer vrijheid. Het belangrijkste criterium van het bouwproces is natuurlijk het behalen van de prestaties. Hoe hij deze realiseert mag de uitvoerder zelf bepalen. De uitvoerder moet zelf wel weten welke effecten zijn uitvoeringsmethoden op de uiteindelijke prestaties van het bouwwerk hebben. In het ideale geval was de aannemer al betrokken bij het ontwerpproces (Design and Construct) en heeft hij samen met de ontwerper het uitvoeringsproces afgestemd op het ontwerp, en desnoods is, omgekeerd, het ontwerp aangepast aan de uitvoeringsmethode die de aannemer wil gaan gebruiken.

Na de oplevering moeten we alle prestaties van de constructie controleren en toetsen aan de eisen uit het ontwerp. Indien bepaalde prestaties niet of onvoldoende zijn gerealiseerd, moeten we besluiten hoe we de tekortkomingen zullen (kunnen) opheffen. Bovendien moeten we alle gerealiseerde prestaties documenteren. Het resultaat van de kwaliteitscontrole van de oplevering is dan een zogenaamd 'geboortedocument', dat dient als basis voor het beheer in de exploitatiefase.

In dit hoofdstuk beschrijven we de uitvoering zoveel mogelijk op basis van prestaties. We zijn ons ervan bewust dat er nog veel onduidelijkheden en onzekerheden in de methodiek van bouwen volgens prestatie-eisen zitten en dat er nog weinig praktijkervaring mee is opgedaan. Daarom schetst dit hoofdstuk de uitvoering zoals die op een zinvolle manier kán plaatsvinden – en niet per se zoals die nu vaak nog gaat. We kijken verder hoe we de eisen uit de projectspecificatie kunnen realiseren en controleren en hoe we dit kunnen vastleggen in een geboortedocument. We gaan uit van een projectspecificatie op globaal niveau, zodat we de principes van het vertalen van prestatie-eisen naar eisen in de uitvoeringsfase kunnen bespreken. Zo'n 'vertaling' kan ook al in de ontwerpfase worden gemaakt; dat verschilt van project tot project.

### Gedragsmodellen in de uitvoeringsfase: realisatie van de variabelen

De grenstoestanden en de gedragsmodellen die het verloop van een prestatie tijdens de levensduur van een constructie beschrijven, zijn vastgesteld tijdens het ontwerpproces (hoofdstuk 4). In dit hoofdstuk hebben we bijvoorbeeld voor de chloride-indringing de volgende grenstoestand en gedragsmodel vastgelegd (zie ook Tabel 4-4):

grenstoestand:  $P\{c(d,t = 50 \text{ jaar}) \geq c_{\text{crit}}\} \leq P_{\text{acc}}$

$$\text{gedragsmodel: } c(x,t) = c_s \left( 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4k_c k_e D(t)t}} \right) \right)$$

Op het tijdstip 0, bij oplevering van de constructie, moet de constructie dus een bepaalde betondekking,  $d$ , hebben, en het beton moet een (tijdsafhankelijke) diffusiecoëfficiënt  $D(t)$  hebben. De uitvoeringskwaliteit van het geheel is uitgedrukt in de uitvoeringsfactor  $k_c$ .

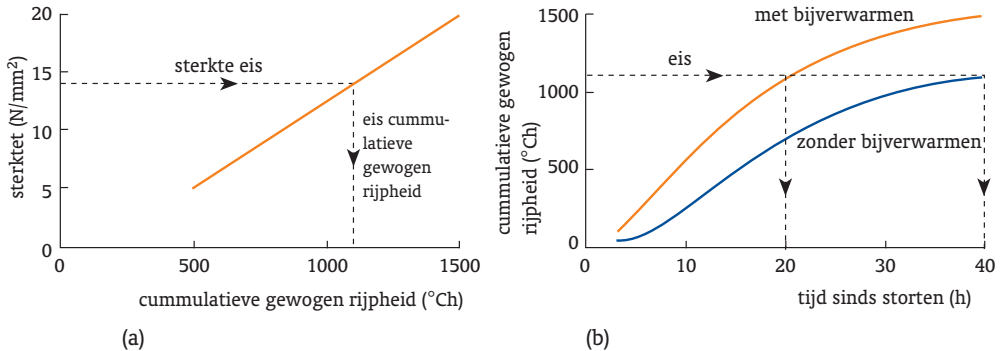
De uitvoering moet de variabelen in de gedragsmodellen realiseren. Voor tijdonafhankelijke variabelen (zoals de betondekking) is een zorgvuldige uitvoering in het algemeen voldoende. Dat geldt ook voor sommige tijdafhankelijke materiaaleigenschappen, namelijk als die ná de bouw niet meer veranderen: het is over het algemeen voldoende om alle materialen vooraf te controleren en ze zodanig zorgvuldig te behandelen dat er tijdens de opslag of de bouw geen aantasting ontstaat (bijvoorbeeld in de vorm van putcorrosie van wapenings- of voorspanstaal).

Voor tijdafhankelijke variabelen die na de bouw wel kunnen veranderen (zoals de diffusiecoëfficiënt van beton) is de realisatie van de vereiste eigenschappen veel lastiger. Hoewel de eisen meestal betrekking hebben op de waarde op één welbepaald tijdstip (het referentietijdstip, meestal 28 dagen na oplevering), wordt de ontwikkeling van de eigenschappen beïnvloed door factoren die we niet in de hand hebben, bijvoorbeeld de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid.

### ***Realisatie van tijdafhankelijke variabelen***

Toch is sturing van de tijdafhankelijke eigenschappen van beton, en van andere bouwmaterialen waarvan de eigenschappen zich nog verder ontwikkelen, cruciaal als we controle willen houden over de uiteindelijk gerealiseerde eigenschappen. Hiervoor hebben we dus uitvoeringsmodellen nodig die de ontwikkeling van de eigenschappen kunnen voorspellen, zodat we bij kunnen sturen als de ontwikkeling niet naar wens verloopt. Een voorbeeld van zo'n sturingsmodel is het 'gewogen rijpheidsmodel' voor de ontwikkeling van de betondruksterkte. Dit model is gebaseerd op het feit dat de belangrijkste invloedsfactoren op de ontwikkeling van de betonsterkte de tijd en de temperatuur zijn. Globaal neemt de betonsterkte toe bij een stijgende temperatuur, en naarmate het langer geleden gestort is. Deze relatie is eenduidig: bij een hogere temperatuur wordt het tijdstip waarop een bepaalde druksterkte wordt gehaald, eerder bereikt. De gewogen rijpheid wordt uitgedrukt als zijnde een functie van beide variabelen: gelijke rijpheid = gelijke sterkte (Figuur 5-1a). Deze relatie kunnen we handig gebruiken om na te gaan wanneer bij de verwachte omgevingstemperaturen de vereiste druksterkte is bereikt. Figuur 5-1 geeft een voorbeeld op basis van een vereiste (ontkistings-) druksterkte van 14 N/mm<sup>2</sup>. Aan de zogenaamde ijkgrafiek kunnen we aflezen dat daar een vereiste gewogen rijpheid van 1100 °Ch bij hoort. Op basis van de temperatuurverwachting zal deze druksterkte pas na 24 uur zijn bereikt. Als we de temperatuur in de bekisting kunnen beïnvloeden (door bijverwarming of koeling) kunnen we de gewogen rijpheid en daarmee dus ook de beton-

sterkte sturen. Als we verwarming toepassen, heeft het beton bij dezelfde ouderdom een hogere druksterkte. Men past dit principe toe als men bijvoorbeeld sneller wil kunnen ontkisten. Uit Figuur 5-1 lezen we af dat we de ontkistingstijd bij de eis van  $14 \text{ N/mm}^2$  door bijverwarming tot de helft kunnen reduceren. Dit soort technieken waarmee we het proces van de ontwikkeling van de sterkte kunnen beheersen, zijn vastgelegd in de Voorschriften Beton: Uitvoering (VBU 2002, NEN 6722).



Figuur 5-1 Sturing van de sterkte op basis van gewogen rijpheid: ijkgrafiek (a) en ontwikkeling van de gewogen rijpheid (b)

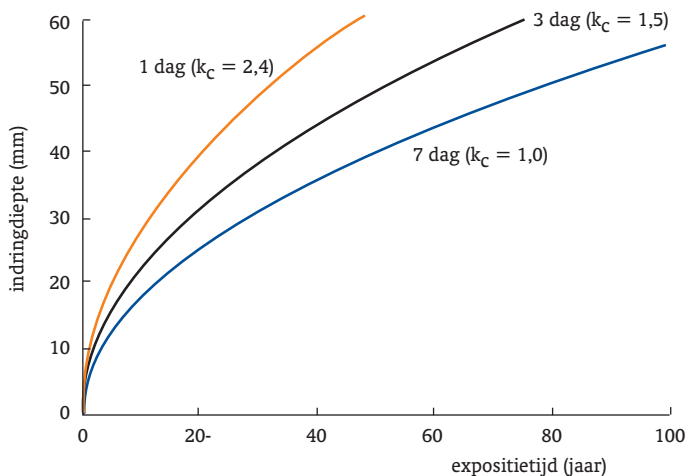
Controle op de verharding heeft overigens nog een ander belangrijk doel, namelijk scheuren vermijden. Hoe warmer het beton is, des te meer het uitzet. Als de temperatuur in het beton niet overal hetzelfde (homogeen) is, kunnen er scheuren ontstaan, met name als het beton tijdens het afkoelen weer krimpt. Er zijn verschillende programma's in omloop om de temperatuurontwikkeling te simuleren en te voorspellen of er scheuren zullen ontstaan. Als de simulatie scheuren voorspelt, kunnen we het betonmengsel aanpassen of moeten we ervoor zorgen dat we de temperatuur en de warmteverdeling in het materiaal beter in de hand kunnen houden. In het laatste geval kunnen we voor bijvoorbeeld koelen tijdens het verharden kiezen.

De druksterkte is vooral nog de enige tijdafhankelijke materiaalvariabele die we in de uitvoering echt kunnen sturen. Het is over het algemeen ook de enige materiaalvariabele waaraan eisen worden gesteld. Maar het principe van sturing zoals we hierboven hebben toegelicht voor de druksterkte, kunnen we ook toepassen op andere materiaaleigenschappen die zich nog doorontwikkelen, zoals de chloridediffusiecoëfficiënt. Hier hebben we inmiddels wel een begin gemaakt. We kunnen de ontwikkeling van de diffusiecoëfficiënt volgen aan de hand van de elektrische weerstand bij referentiekubussen die we onder vergelijkbare temperaturomstandigheden bewaren als die in de constructie aanwezig zijn. De weerstand gemeten aan deze referentiekubussen kan vervolgens worden vergeleken met ijkgrafieken tussen de diffusiecoëfficiënt en de elektrische weerstand. Bij de bouw van een aantal boortunnels is deze methode toegepast voor de dagelijkse controle van de kwaliteit van de wandsegmenten. De weerstandsmetingen werden daarbij gecombineerd met versnelde diffusiemetingen.

## Realisatie door middel van de uitvoeringsfactor

Voor alle tijdafhankelijke materiaalvariabelen, met uitzondering van de druksterkte, kunnen we de waarden na de realisatie (nog) niet voorspellen. Vandaar dat we deze waarden over het algemeen in het laboratorium bepalen. Omdat in het laboratorium constante condities heersen, kennen de materiaalvariabelen die we daar bepalen meestal een veel kleinere spreiding dan die we buiten het laboratorium vinden. Om dit verschil te discounteren, gebruiken we de uitvoeringsfactor. Op die manier kunnen we toch het risico verkleinen dat we de geëiste waarde voor een materiaalvariabele in het werk niet bereiken.

Met diezelfde uitvoeringsfactor kunnen we ook het effect van verschillende uitvoeringstechnieken meenemen, zoals het effect van een nabehandeling op de kwaliteit van het beton. Naarmate we bijvoorbeeld beton langer nabehandelen, neemt de weerstand daarvan tegen chloride-indringing ook toe, al wordt dit effect op den duur wel weer minder. De hogere weerstand impliceert een langere corrosie-initiatietijd. Figuur 5-2 geeft dit effect weer voor drie verschillende nabehandelingstijden.



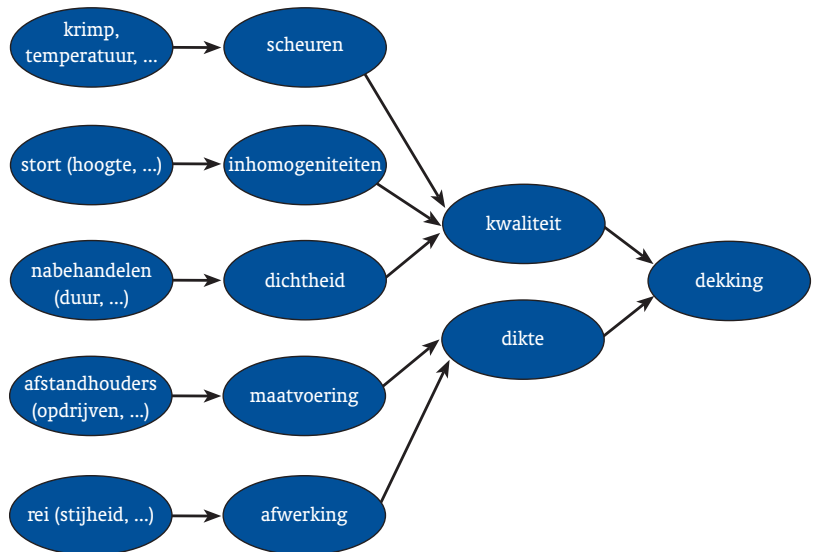
Figuur 5-2 Invloed van de nabehandeling op corrosie-initiatie: kritisch chloridegehalte bij  $\beta = 1,5$  en 1, 3 of 7 dagen nabehandelen

## Vertaling van prestatie-eisen naar eisen in de uitvoeringsfase

De geometrie- en materiaalvariabelen die in de gedragsmodellen en de grenstoestanden voorkomen, zal de aannemer tijdens de bouw tot stand moeten brengen, maar ze kunnen door allerlei processen en aspecten van het bouwproces worden bedreigd. Bijvoorbeeld: men laat nabehandeling achterwege op basis van de weersverwachting dat het bewolkt en regenachtig zal zijn, zodat het betonoppervlak niet kan uitdrogen. Maar als het weer lokaal opeens opklaart en het betonoppervlak wel degelijk veel te snel uitdroogt, wordt de weerstand van het beton tegen chlorideindringing aan het oppervlak zoveel minder, dat deze mogelijk niet meer voldoet aan de prestatie-eis. Dergelijke risico's hebben een grote impact, want afkeuring van het werk leidt in zo'n geval tot aanzienlijke kosten. Daarom loont het over het algemeen de moeite om vóór



de uitvoering voor de verschillende variabelen een foutenboom te maken, zodat we al deze bedreigingen kunnen overzien en er zo goed mogelijk rekening mee kunnen houden of maatregelen voor kunnen treffen. Figuur 5-3 geeft een voorbeeld voor de betondekking.



Figuur 5-3 Foutenboom voor de betondekking in de uitvoering

Op basis van deze bedreigingen kan de aannemer een uitvoeringsplan opstellen. Voor bijvoorbeeld scheuren in de dekking kan de aannemer een besluit nemen: in welke mate zijn scheuren acceptabel? In de praktijk zal hij meestal besluiten dat er helemaal geen scheuren mogen optreden. De kosten van de maatregelen die hij moet nemen om te zorgen dat er geen scheuren optreden, zijn immers over het algemeen veel lager dan de kosten die hij moet maken om een dekking te repareren waar niet te accepteren scheuren in voorkomen. Voorkomen is beter dan genezen.

In Tabel 5-1 geven we een voorbeeld van de maatregelen die de aannemer zou kunnen nemen rond de prestatie ‘wapeningscorrosie’.

Tabel 5-1 Prestatie-eisen vertaald in uitvoeringseisen voor initiatie van corrosie door chloride-indringing

parameter	eis	vooraf storten	tijdens het storten	na het storten
dekking d	35 mm	controle afstandhouders, binddraadjes		afwerken met stijve rei
diffusie-coëfficiënt $D_0$	$5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	proefmengsels, controle leveringsbon	ontmenging voorkomen, scheuren voorkomen	controle ontwikkeling duurzaamheid dmv controleproef, evt. langer nabehandelen
uitvoeringsfactor $k_c$	0,8			minimum nabehandeling 3 dagen

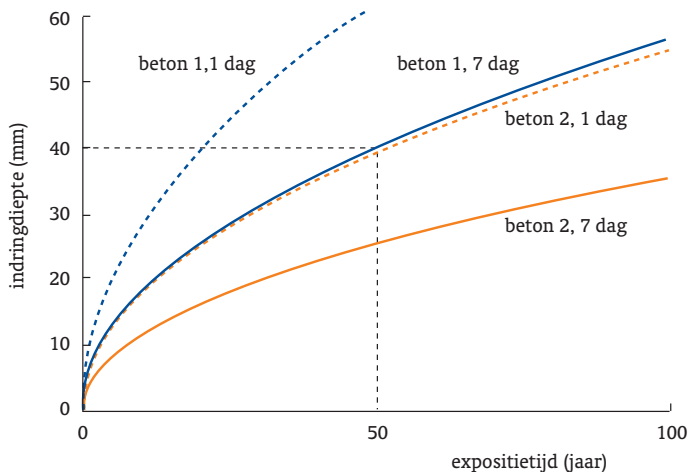
Tabel 5-1 is natuurlijk lang niet volledig. Veel aspecten die de kwaliteit van de constructie en daarmee de prestaties kunnen bedreigen en waar de aannemer rekening mee moet houden, staan in de VBU 2002 (NEN 6722 Voorschriften beton - uitvoering). Deze norm stelt eisen aan materialen, opslag, bewerking of verwerking, en toleranties. Hij geeft ook richtlijnen voor het ontwerp van bijvoorbeeld de bekisting, voor de bepaling van het tijdstip van ontkisten en voor de nabehandelingduur van beton. De VBU geeft niet aan welke invloed deze eisen precies op de prestatie hebben. De norm is wel uiterst nuttig om bedreigingen vast te leggen.

### Strategie in de uitvoering

Op basis van het overzicht van de bedreigingen en de gekozen uitvoeringsfactoren weet de aannemer dus welke aspecten in de uitvoering van belang zijn voor de te leveren prestaties. De strategie die de aannemer volgt als hij zijn werkplannen opstelt, zal vergelijkbaar zijn met de strategieën in de plan- en ontwerpfasen. Hiertoe zal hij, op vergelijkbare wijze als in Figuur 4-9, beslisbomen opzetten om onderbouwde keuzes te maken met betrekking tot de uitvoering. Het uiteindelijke doel van de aannemer is om de constructie tegen zo gering mogelijke kosten te realiseren, maar wel zo dat deze

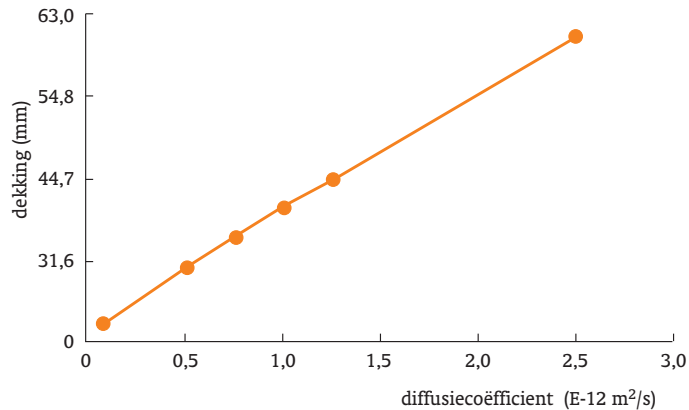
aan alle prestatie-eisen voldoet. Indien hij zijn beslissingen samen met de ontwerper kan maken, kunnen ontwerp en uitvoering geïntegreerd worden, en zal er nog kosten-effectiever gebouwd kunnen worden.

We illustreren deze wisselwerking tussen keuzes in het ontwerp met beslissingen die de uitvoerder zou kunnen nemen, aan de hand van het fietsbruggetje waarvoor we de prestatie-eisen weergaven in Tabel 4-5. De betonsamenstelling van de geprefabriceerde liggers van het fietsbruggetje wordt in eerste instantie bepaald door de vereiste sterkte en de eisen met betrekking tot het voorkomen van ASR en schade door dooizout. Stel dat er uiteindelijk twee betonsamenstellingen aan deze eisen voldoen (Figuur 5-4). Bij een betondekking van 40 mm en een levensduur van 50 jaar voldoet slechts één van deze twee betonsamenstellingen ook nog aan de eis met betrekking tot de corrosie-initiatie. Nemen we ook de nabehandeling in de beschouwing mee, dan voldoet - bij een langere nabehandeling - ook de andere betonsamenstelling. Indien de kosten van dit beton inclusief de nabehandeling lager zijn dan van het eerste beton (zonder nabehandeling), kunnen we dat alternatief zondermeer kiezen.



Figuur 5-4 Prestatie van twee betonsamenstellingen voor de grenstoestand kritisch chloridegehalte bij  $\beta=1,5$  bij 1 dag en 7 dagen nabehandelen

Op basis van de beschikbare modellen kan de uitvoerder een zodanig uitvoeringsproces kiezen dat alle individuele waarden apart gehaald worden (zoals een bepaalde dekking, diffusiecoëfficiënt etc.), maar hij kan er ook voor kiezen om al deze kwaliteiten onderling uit te wisselen. Nemen we als voorbeeld de chloride-indringing (Figuur 5-5): de corrosie-initiatieperiode hangt af van de diffusiecoëfficiënt  $D_0$  van chloride in de betondekking, én van de dikte van de dekking  $d$ , volgens  $d^2/D_0$ . Als de uitvoerder ziet aankomen dat hij een bepaalde zeer lage diffusiecoëfficiënt misschien niet of alleen met veel moeite gaat halen, kan hij met een hogere diffusiecoëfficiënt genoegen nemen, mits hij tegelijkertijd de dekking verhoogt. Door zulke compenserende keuzes kunnen we veel uitvoeringskritische variabelen iets minder kritisch te maken.



*Figuur 5-5 Uitwisseling diffusiecoëfficiënt en betondekking bij constante bèta*

De aannemer kan nog op een andere manier het risico van het niet-behalen van een prestatie verlagen, namelijk door het werk tijdens de uitvoering vaker te laten controleren, zodat eenmaal gemaakte 'bouwfouten' zich niet door het hele werk heen voortplanten. Een bekend voorbeeld is de controle op de oriëntatie van muren en vloeren bij het bouwen van hoge gebouwen: wanneer de muren niet vertikaal zijn op het onderste niveau en dit niet wordt geconstateerd, is het risico dat alle muren steef komen te staan erg groot. Hoe hoger het gebouw, hoe verder dit gebouw uit het lood komt te hangen. Hoeveel verschillende maatregelen een uitvoerder ook kan nemen, bepaalde uitvoeringselementen hebben toch een onaanvaardbaar hoog risico. Dit zijn vooral de elementen die hoge faalkosten hebben. In de uitvoeringsfase betekent dit vaak dat indien de kwaliteit van de uitvoering niet wordt gehaald, de kosten voor herstel aanzienlijk zijn. We kunnen het risico van deze elementen verkleinen door in het ontwerp een extra (veiligheids-)factor in te bouwen.

Het antwoord op de vraag waar de beslissingen met betrekking tot de uitvoering het best kunnen worden genomen is uit het bovenstaande voorbeeld evident: dit is in het ontwerpproces omdat dan het ontwerp zelf nog kan worden aangepast. Ligt het ontwerp (dekking e.d.) vast dan heeft de aannemer al veel minder keuzemogelijkheden. De integratie van het ontwerp en de uitvoering (Design – Construct) heeft hierbij dus de voorkeur.

### **Kwaliteitsborging: keuren van de prestaties in het werk**

Bij prestatiegericht bouwen moeten we het gehele bouwproces zo inrichten, dat we op voorhand zeker weten dat de beoogde prestaties tot stand komen. Dat doen we door kwaliteitsborging. Een belangrijk onderdeel daarvan zijn de keuringen, waarbij de controleurs aan de constructie vaststellen of de prestaties uit het ontwerp daadwerkelijk zijn gerealiseerd. Ze doen dat uiteraard aan de hand van de meetbare variabelen uit de gedragsmodellen. Ze zullen niet alle variabelen controleren, maar alleen die variabelen die dominant zijn en waarop de aannemer zijn uitvoering heeft afgestemd. De wijze waarop de deskundigen de prestaties keuren - de meetwijze, de meetfrequentie, de ruimtelijke verdeling en

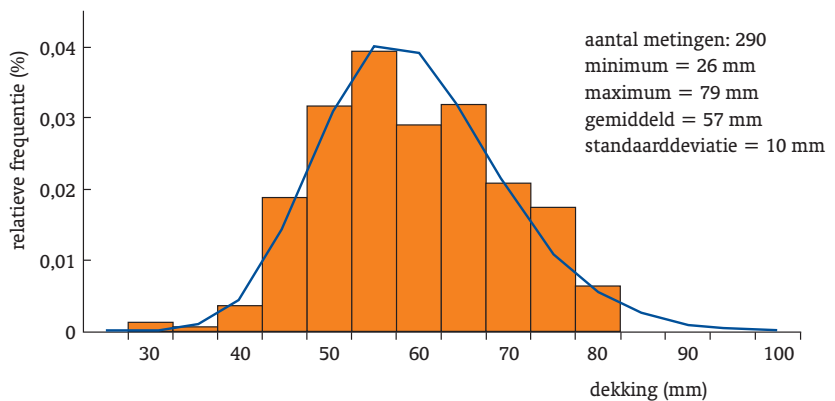


de afkeureisen -, ligt vast in de projectspecificatie, of anders in het werkplan van de aannemer dat de opdrachtgever heeft goedgekeurd. Eventueel liggen zelfs de herstelmaatregelen vast en de manier waarop die gekeurd worden. Dit is handig omdat, als zich een geval voordoet waarin een prestatie-eis bij een keuring niet voldoet, de tijdsdruk vaak groot is en er dan geen tijd meer verloren gaat aan het overleg over de aanpak en de keuring daarvan.

Als voorbeeld van een keuring geeft Figuur 5-6 de resultaten van de dekkingsmetingen die zijn uitgevoerd op de plaat van het fietsbruggetje. De afkeureis uit de projectspecificatie luidt dat de karakteristieke waarde van de metingen groter moet zijn dan de karakteristieke waarde van de dekking in het ontwerp (54 mm). Als extra eis was een minimum dekking vastgelegd van 48 mm. Volgens het ontwerp is de kans dat deze waarde overschreden mag worden kleiner dan 1‰.

Eisen aan de betondekking:

- karakteristieke waarde > 54 mm (5% kans op overschrijding)
- minimum dekking 48 mm (1‰ kans op overschrijding)



*Figuur 5-6 Controle van de dekking op basis van vooraf vastgestelde eisen*

Uit Figuur 5-6 blijkt dat de gerealiseerde dekking aan géén van beide eisen voldoet. Meer metingen verrichten heeft nu dus geen zin meer, omdat aan de tweede eis, met betrekking tot de minimum dekking niet wordt voldaan. Andersom zou dit nog wel zin kunnen hebben: als er wél aan de eis van de minimum dekking wordt voldaan maar niet aan de vereiste karakteristieke waarde, kunnen extra metingen de gevonden karakteristieke waarde misschien verhogen. Maar bij 290 metingen is die kans toch wel erg klein. De aannemer zal de te lage dekking dus moeten corrigeren.

De keuring van bouwwerken gebeurt momenteel vooral door technische kwaliteitscontroles die zich richten op de maattoleranties (de afmetingen, de vlakheid, enz.), op een keuring van de betonoppervlakte en op visueel waarneembare gebreken (zoals grindnesten, zandstrepen, schade aan detailleringen), enz.. Meestal gaat men pas tot een uitgebreidere

keuring over als er twijfel is over de gerealiseerde kwaliteit, of als de resultaten van de productie- of afnamekeuring daar aanleiding toe gaven.

### **Nulmeting en geboortecertificaat**

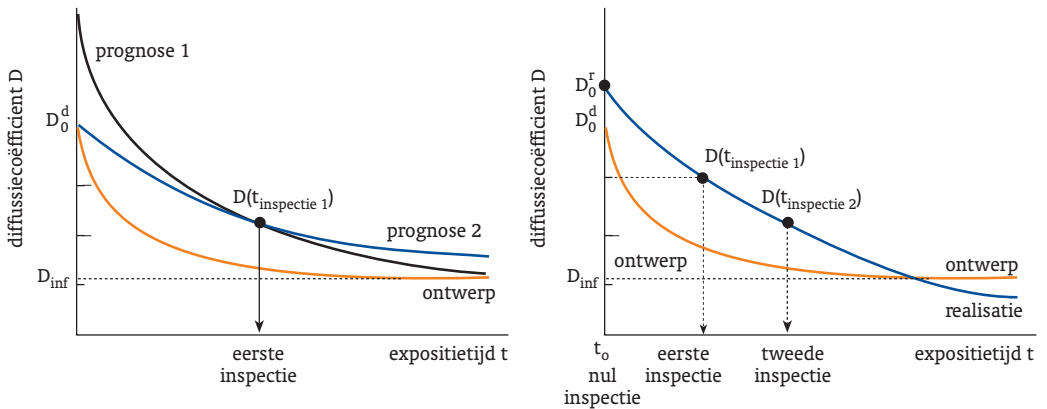
Bij de huidige bouwwijze richt de kwaliteitscontrole zich nog vooral op de procesmatige kant van de bouw. Hier zijn verschillende redenen voor. Ten eerste gaat men er vanuit dat indien iedereen volgens het kwaliteitshandboek te werk gaat, de gerealiseerde kwaliteit voldoende zal zijn. Ten tweede vinden er wel productiecontroles plaats tijdens de bouw, in het bijzonder gericht op de kwaliteit van de materialen. Snel ingrijpen is dus nu ook mogelijk indien er aan de kwaliteit wordt getwijfeld.

Een procesmatige kwaliteitscontrole is ook bij prestatiegericht bouwen onontbeerlijk. Toch zijn er belangrijke redenen om voortaan in ieder geval ook de prestaties van de constructie direct na de bouw te meten en vast te leggen, als het ware los van de vraag in hoeverre er aan de eisen in de projectspecificatie is voldaan:



- voor prestaties waarvan de waarde na de realisatie lager is uitgevallen dan het ontwerp voorschrijft, kan het bij de eerste onderhoudsinspectie, die pas veel later wordt gehouden, lijken alsof de toestand van de constructie heel snel achteruit is gegaan. In werkelijkheid was de begintoestand dan al veel minder gunstig ten opzichte van de ontwerpwaarde, maar is daarin tijdens de eerste periode niets meer veranderd (zie Figuur 5-7);
- indien een prestatie domweg niet is gerealiseerd, is het soms lonend om direct in te grijpen. Uiteraard kunnen we ook besluiten om niets te doen. Maar dan weten we dat tijdens de exploitatie waarschijnlijk eerder onderhoud zal moeten worden gepleegd en kunnen we daar een reservering voor doen.

Vooral als men in de exploitatiefase ook een prestatiegericht beheer gaat voeren, is zo'n nulmeting of 'geboortedocument' onontbeerlijk. De andere eigenschappen van de constructie die voor deze fase nuttig zijn (de cementsoort, de water/cementfactor) leggen we eveneens in dit document vast.



Figuur 5-7 Belang van het bepalen van de diffusiecoëfficiënt na oplevering voor de eerste prognoses van de levensduur in de exploitatiefase: links zonder nulmeting, rechts met nulmeting (en extra inspectie)



Handwritten markings on the wall include:  
- A yellow horizontal line near the top.  
- A red horizontal line below it.  
- A red horizontal line further down.  
- A red horizontal line near the bottom.  
- A red vertical line on the left side.  
- A red vertical line on the right side.  
- A red 'X' mark in the upper center.  
- A red '10°' marking near the top center.  
- A red '17°' marking on the left side.  
- A red '17°' marking on the bottom left.  
- A red '18°' marking on the bottom right.  
- A red '173' marking on the left side.  
- A red '57' marking on the left side.  
- A red '7' marking on the left side.

## 6 Exploitatie: monitoren

### Van uitvoering naar exploitatie: hoe staat de constructie erbij?

Nadat de constructie is opgeleverd en in gebruik is genomen, kunnen in de loop van de tijd de prestaties van de constructie achteruit gaan. Het is de taak van de beheerder om in de gaten te houden of de prestaties onderschreden (dreigen te) worden. De beheerder moet natuurlijk wel weten welke prestaties hij precies moet volgen en welke eigenschappen hij in de constructie moet meten om het niveau van die prestaties te kunnen beoordelen.

Bij eigentijds beheer mogen we ervan uit gaan dat de beheerder vanaf het begin bij het project betrokken is en dat hij ook een uitgewerkt exploitatieplan heeft, inclusief een plan om de constructie te monitoren. Het zou zelfs zo moeten zijn dat hij eventuele voorzieningen voor het monitoren in de constructie heeft laten inbouwen. In dat laatste geval hoeft hij alleen nog maar in de gaten te houden of de prestaties van de constructie blijven voldoen aan de eisen. Op basis van het geboortecertificaat en de gevonden afwijkingen ten opzichte van het ontwerp of de projectspecificatie kan hij zijn oorspronkelijke monitorplan nog aanpassen. Als de prestaties sneller afnemen dan volgens het ontwerp normaal zou zijn, dan moet de beheerder de oorzaak hiervan achterhalen en op basis daarvan besluiten of, en zo ja, welke maatregelen hij gaat nemen. Ook deze acties moet hij in principe al in het monitorplan hebben opgenomen.

Met monitoren bedoelen we in dit boek uitsluitend: het bewaken van de prestaties van een betonconstructie. Monitoren kent een tijdverloop van regelmatige, samenhangende waarnemingen. Bij een inspectie gaat het in principe om het eenmalig bepalen van de toestand van de constructie, maar een reeks van inspecties is eigenlijk hetzelfde als monitoren - de twee termen worden nogal eens door elkaar gebruikt.

In dit hoofdstuk zullen we voornamelijk kijken hoe we prestaties kunnen monitoren, aan welke eisen een monitorsysteem moet voldoen en hoe we het zo efficiënt mogelijk in kunnen zetten. In het volgende hoofdstuk bespreken we de mogelijke acties om een prestatie weer op niveau te krijgen.

### Prestaties monitoren

#### *Type meting*

Stel dat we hebben besloten om een bepaalde prestatie te monitoren - hoe doen we dat dan? Sommige prestaties kunnen we eenvoudig rechtstreeks meten, bijvoorbeeld de doorbuiging van een vloer. Voor andere prestaties ontbreken zulke rechtstreekse meetmethoden. Wat we wél kunnen doen, is een prestatie bepalen aan de hand van het onderliggende gedragsmodel. Dan zouden we de variabelen uit het gedragsmodel moeten meten. Als dit ook niet mogelijk is, kan een indirecte meetmethode of een indicator uitkomst bieden. Met een indirecte meetmethode meten we een variabele die een bekende relatie heeft met de variabele die wij willen weten. Een indicator geeft, zoals het woord zegt, niet meer

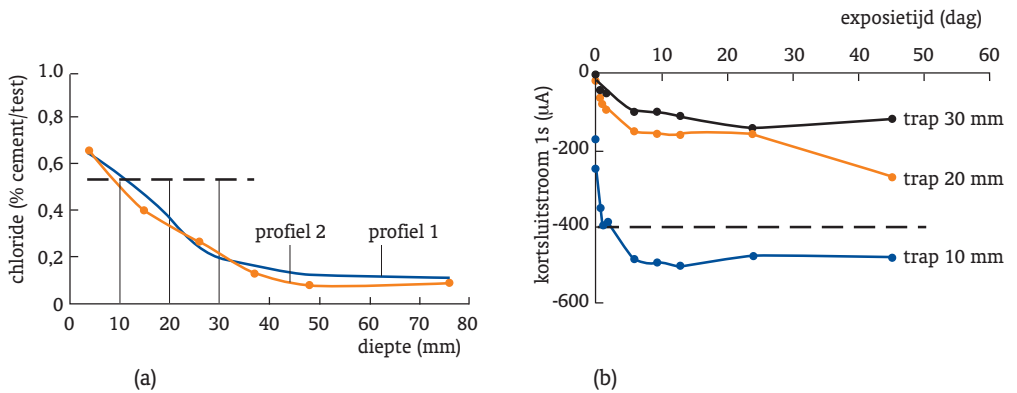
dan het globale gedrag weer. In het algemeen is de onzekerheid over de waarde van de te bepalen variabele het kleinst bij de directe methode, is die groter bij de indirecte methode en het grootst bij de indicatieve methode. Iedere ‘vertaalslag’ brengt een nieuwe mate van onzekerheid met zich mee.

De keuze voor het type meting (direct, indirect of indicatief) hangt mede af van de kosten. We nemen als voorbeeld de prestatie-eis dat het chloridegehalte bij de wapening het kritische chloridegehalte niet mag overschrijden.

- Directe methode: we bepalen het chloridegehalte bij de wapening door kernen te boren uit de constructie en op het deel bij de wapening het chloridegehalte in het beton chemisch te bepalen. Deze methode is eenvoudig en nauwkeurig. Het grote nadeel is dat we er de ontwikkeling van het chloridegehalte op die plek bij de wapening in de tijd niet uit af kunnen leiden. Op deze manier zullen we het chloridegehalte bij de wapening nog vaak opnieuw moeten bepalen door nieuwe kernen op andere plaatsen uit te boren. (Immers, we kunnen de plaats van uitgeboorde kern die we opnieuw gevuld hebben, niet voor een nieuwe meting gebruiken.)
- Directe methode via een onderliggend model: we bepalen het gehele chlorideprofiel. Op basis van het chloridediffusiemodel (Tabel 4-2) en dekkingsmetingen kunnen we voorspellen wanneer het chloridegehalte bij de wapening zijn kritische gehalte bereikt. Hoewel de extra chloride-analyses duur zijn, vallen de kosten van de gehele monitorcyclus waarschijnlijk lager uit omdat de noodzaak voor een tweede bepaling en het tijdstip daarvan beter kunnen worden bepaald.
- Indirecte methode: er wordt op dit moment door de technische wetenschap nog druk geëxperimenteerd met het bepalen van de weerstand van (verzadigd) beton als maat voor de hoeveelheid chloride, bijvoorbeeld door middel van zogenaamde MRE's (Multiple Ring Electrodes). Met MRE's kunnen we de weerstand als functie van de diepte bepalen. De initiële kosten van de aanschaf, het inbouwen en uittesten zullen hoog zijn, maar bij veel metingen zullen de kosten lager uitvallen dan bij de directe methodes.
- Indicatieve methode: anodeladders aflezen. Anodeladders zijn kleine wapeningsstaafjes die op regelmatige afstand vanaf het betonoppervlak tot de wapening mee worden ingestort. De treden van de anodeladder gaan corroderen als het chloride op die diepte zijn kritische gehalte heeft bereikt. Het nadeel van de anodeladders is dat we de interpretatie van de resultaten nog niet rechtstreeks aan het kritisch chloridegehalte kunnen koppelen.

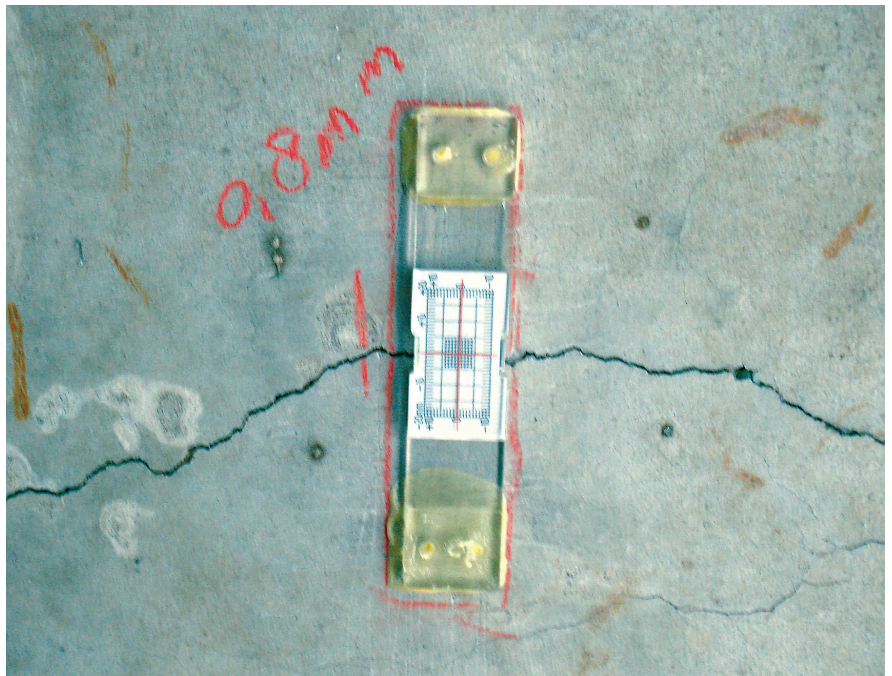
### ***Vereiste nauwkeurigheid en betrouwbaarheid***

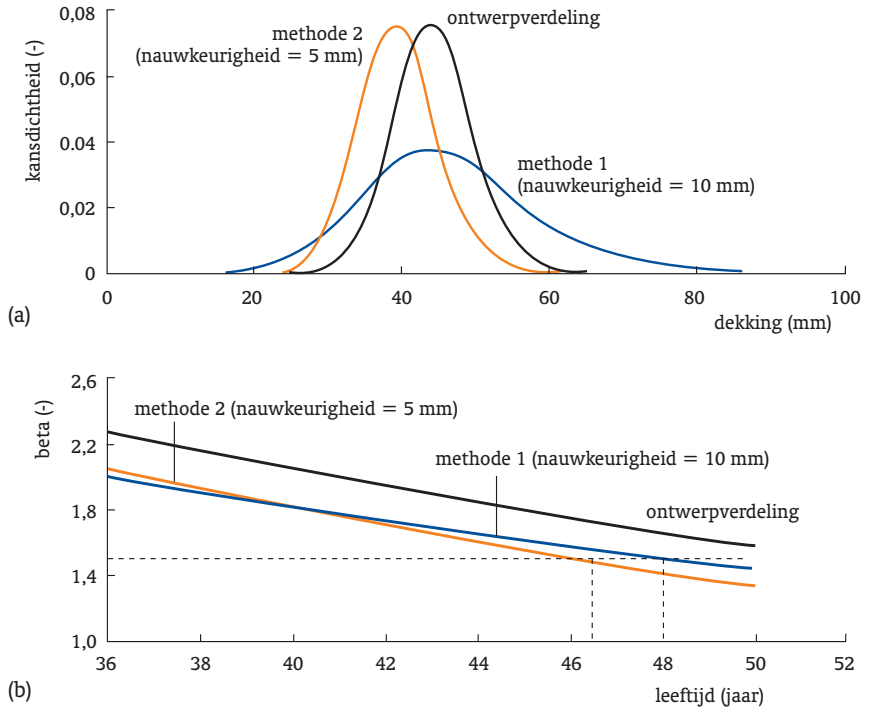
Idealiter willen wij met een meting bereiken dat onze onzekerheid over de grootte die we meten of willen weten, kleiner is dan vóór we gingen meten. Dit levert een verbetering op van de prognose (de betrouwbaarheid van het tijdstip van falen). We geven een voorbeeld. Stel dat we de dikte van de dekking meten met twee verschillende meetapparaten. Het ene apparaat werkt snel en goedkoop, maar het heeft slechts een nauwkeurigheid van 10 mm; het andere apparaat is nauwkeuriger (5 mm) maar het werkt langzamer en is dus duurder. Het resultaat van de dekkingsmetingen met beide meetinstrumenten staat in Figuur 6-2a. Ter vergelijking staat ook de ontwerpverdeling erbij. Uit Figuur 6-2b



Figuur 6-1 Kritisch chloridegehalte: directe meting door middel van (chemische) bepaling van het chloridegehalte in beton (a) en indirecte meting door middel van een anodeladder (b) (geschatte) grenzen weergegeven door de gestippelde lijn.

blijkt dat volgens de resultaten van de snelle, goedkopere meetmethode de levensduurverwachting afneemt. Door de geringe nauwkeurigheid van de meetmethode is de spreiding in de metingen hoog en valt de karakteristieke waarde lager uit dan bij de nauwkeurigere methode - ook al registreert die meting een lagere gemiddelde dekking! In het tweede geval neemt de levensduurverwachting ook af, omdat ook hier de (gemiddelde) dekking lager blijkt te zijn dan je op basis van het ontwerp zou mogen verwachten (bij een gelijkblijvende spreiding), maar het antwoord is wel betrouwbaarder.





Figuur 6-2 Invloed van de nauwkeurigheid van de meetmethode op de verdeling van de dekking (a) en de levensduur voorspelling (b)

De belangrijkste doelstelling van monitoren is het maken van een betrouwbare voorspelling maken van de toestand van de constructie, niet om een hogere levensduur te verkrijgen. Op deze laatste hebben we namelijk geen invloed. Voor de vereiste nauwkeurigheid van de meetmethode kunnen we als vuistregel aanhouden dat de meetmethode nauwkeuriger waarden moet kunnen geven dan de mate van spreiding van de waarden die in het ontwerp zijn gebruikt. We moeten immers voorkomen dat de spreiding van de meetwaarden groter zou kunnen worden door de onnauwkeurigheid van de meetmethode.

#### **Meetlocatie, aantal metingen en detectiekans**

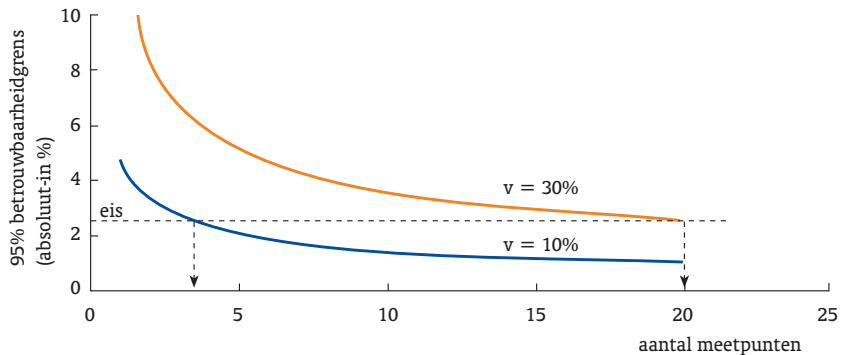
Wanneer er veranderingen in een constructie plaatsvinden, spreekt het nog niet vanzelf dat we deze ook opmerken of meten. Als er veranderingen optreden op plaatsen waar we ze niet ontdekken, kan het lijken alsof prestaties behouden blijven terwijl ze in werkelijkheid afnemen. Het is dus uitermate belangrijk dat we de meetlocaties zorgvuldig kiezen op plaatsen waar de kans op ontdekking (de detectiekans) hoog is.

De detectiekans is sterk afhankelijk van de manier waarop een variabele verandert. Voor een globale variabele (die overal ongeveer even groot is en overal op dezelfde wijze verandert) is de detectiekans vrijwel 100%. Lokale variabelen kunnen per definitie sterk van plaats tot plaats verschillen. Scheuren treden meestal maar op enkele plaatsen op (het is



dan een lokale variabele) maar we kennen situaties waarbij een constructie-element over zijn hele oppervlak een vrijwel homogeen verdeeld scheurenpatroon vertoont: de scheurvorming is dan globaal.

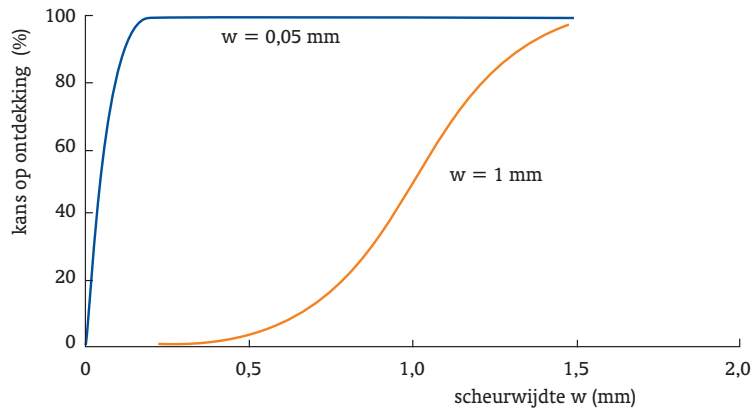
Globale variabelen kunnen we op zich evengoed met een globaal meetsysteem (bijvoorbeeld de vervorming van een ligger met behulp van een laser) meten, als met een lokaal meetsysteem (bijvoorbeeld een verplaatsingsopnemer). In beide gevallen kunnen we er vanuit gaan dat de kans op ontdekking van deze vervorming 100% is, en dat de nauwkeurigheid van het meetsysteem maatgevend is. Stel dat we een snaarrekopnemer met een bereik van 150 mm met een nauwkeurigheid van 1 mm willen gebruiken om vervormingen te meten. Deze heeft een detectiegrens van tenminste 3 x de nauwkeurigheid (3 mm/2%). Dit zal in vele gevallen niet nauwkeurig genoeg zijn om de vervorming te bepalen. Dan is nauwkeurigere meetapparatuur nodig, bijvoorbeeld verplaatsingsopnemers. Het aantal metingen dat je hiermee moet doen om bij een globale variabele een betrouwbaar antwoord te verkrijgen, hangt van de (lokale) variaties. Indien er helemaal geen variaties zouden zijn, zou één meting voldoende zijn om een betrouwbaar antwoord te krijgen. Maar bij toenemende variantie (standaarddeviatie/gemiddelde waarde) hebben we snel meer meetpunten nodig om een betrouwbaar antwoord te verkrijgen. Figuur 6-3 geeft een voorbeeld voor varianties van 10% en 30%. Als grens is gesteld dat er een kans van 99% moet zijn dat de meetwaarden binnen een range van +/- 5% van het werkelijke gemiddelde liggen. Bij een variantie van 10% volstaan drie metingen, voor een variantie van 30% zijn al 20 metingen nodig. Waar we de meetapparatuur precies neerzetten doet in principe niet ter zake: de meetwaarde is bij een globale variabele immers overal (ongeveer) even groot.



Figuur 6-3 Aantal meetpunten bij een globale variabele

Bij lokale variabelen moet het aantal meetpunten aan twee voorwaarden voldoen: het moeten er voldoende zijn om een betrouwbaar antwoord te garanderen, en de detectiekans moet ook voldoende groot zijn. Stel dat we het aantal scheuren groter dan 0,05 mm willen weten. Wanneer we deze scheuren met een scheurenkaartje gaan tellen, blijkt al snel (in vergelijking met tellen met een loupe), dat wij de helft van deze scheurtjes niet zien. Dit is weergegeven in Figuur 6-4. Voor de wat grotere scheurtjes neemt het waar-

nemingspercentage toe en vanaf 0,15 mm tellen we alle scheuren (100% kans op ontdekking). De grafieken voor de detectiekans zijn over het algemeen methode-specifiek, oftewel: elke werkwijze of meetmethode kent zijn eigen curve. Figuur 6-4 toont de kans op ontdekking voor scheurwijdten die met behulp van een lasersysteem zijn bepaald. Met deze methode kunnen we in principe wel heel kleine scheuren zien, maar alleen als het contrast van de scheur met de omgeving groot is: verstopte scheuren worden slecht opgemerkt.



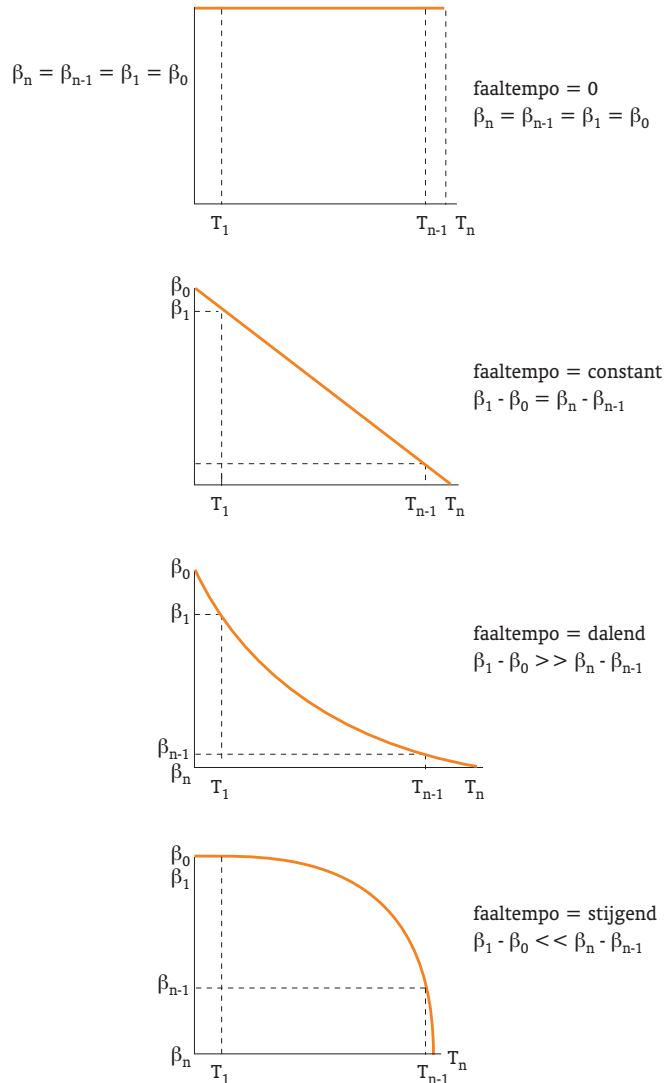
Figuur 6-4 Kans op ontdekking voor scheuren met wijdte  $w=0,05 \text{ mm}$  met methode A (scheurwijdtekaartje op schoon oppervlak), en met wijdte  $w=1 \text{ mm}$  met methode B (laser op niet-schoongemaakt oppervlak)

Helaas kunnen we geen algemene regels geven voor het aantal meetplaatsen en de locatie daarvan: iedere constructie en iedere actie op een constructie is weer anders. Er gebeurt momenteel op dit gebied wel veel onderzoek, met als doel om monitoren efficiënter te maken en om ervoor te zorgen dat het meten tot voldoende betrouwbare antwoorden leidt. Logisch nadenken over mogelijke variaties in een constructie is nu nog vaak de enige manier om het aantal meetplaatsen en hun locatie te bepalen. Hiermee lopen we uiteraard nog steeds een kans dat we het falen van een constructie niet ontdekken. Omdat we deze kans niet kennen schatten we die op basis van ervaring.

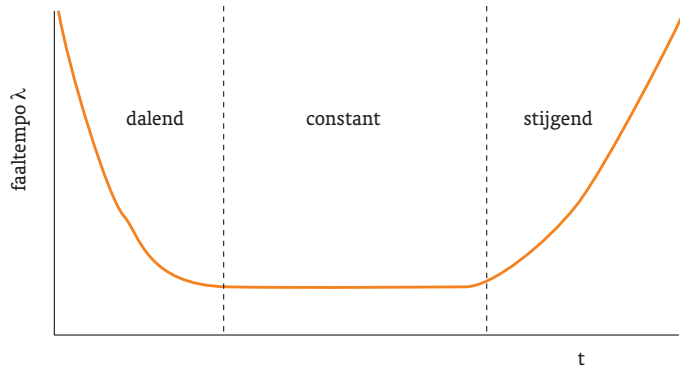
#### **Faaltempo en monitorfrequentie**

Een andere grootte die de detectiekans bepaalt is de tijd (de 'vierde dimensie'). Hoe vaak moeten we metingen doen voor een goede monitoring? Bij continu monitoren is de detectiekans 100% (mits we op de juiste plaats meten), terwijl de detectiekans 0% is als we nooit meer naar de constructie omkijken. We laten de frequentie van monitoren meestal samenhangen met het faaltempo van een prestatie. Het faaltempo definiëren we als het tempo waarin de betrouwbaarheid van een constructie afneemt in de tijd (zie Figuur 6-5). Bij een faaltempo van 0 neemt de betrouwbaarheid niet af: dit geldt voor een 'ideale' constructie die in de loop der tijd niet verandert. Bij een faaltempo dat langzamer wordt, spelen meestal 'kinderziekten' een rol. Prestaties die de grootste kans van falen vertonen in de eerste periode van het gebruik, falen meestal door (onvoorziene) ontwerp-

en/of bouwfouten die we niet tijdens of voor de oplevering hebben ontdekt. Bij een constant faaltempo is de kans op falen voor iedere tijdsperiode gelijk. Prestaties in deze categorie falen op een willekeurig tijdstip. Dit zijn over het algemeen calamiteiten. Bij prestaties waarvan het faaltempo sneller wordt, gaat het meestal om veroudering (zie ook Figuur 4-5). De combinatie van al deze faalkansen, dus de faalkans voor de constructie als geheel (waarbij de faalkansen op de verschillende prestaties op verschillende tijden dominant kunnen zijn) levert meestal een faaltempo op in de vorm van een badkuip Figuur 6-6.

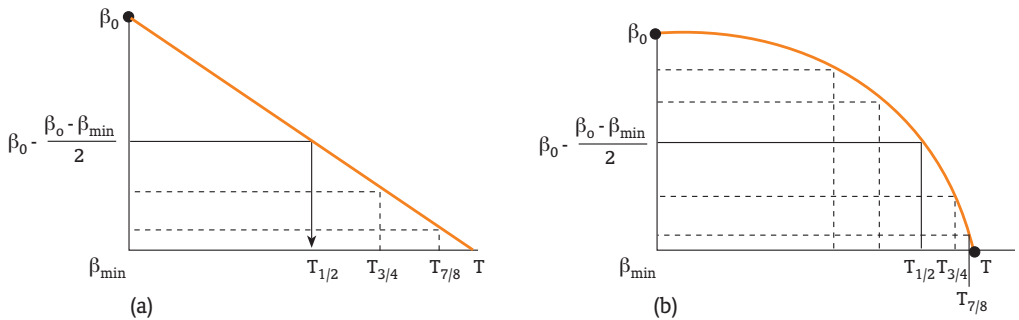


Figuur 6-5 Faaltempo: verandering van  $\beta$  per tijdseenheid



Figuur 6-6 Faaltempo voor de gehele constructie

De meetfrequentie moeten we afstemmen op het faaltempo: bij een stijgend faaltempo moeten we steeds vaker meten naarmate de betrouwbaarheid haar kritische grens bereikt. Ook bij een constant faaltempo neemt de faalkans steeds verder toe, maar we kunnen de tijdsintervallen tussen twee metingen over het algemeen wat groter nemen omdat de betrouwbaarheid niet zo drastisch afneemt als bij een stijgend faaltempo. Twee mogelijke meetfrequenties zijn gegeven in Figuur 6-7.



Figuur 6-7 Inspectiefrequenties bij constant faaltempo (a) en toenemend faaltempo (b)

Maar we kunnen de meetfrequentie door meer factoren laten bepalen. Afhankelijk van de eisen van de beheerder kunnen we de meetfrequentie bijvoorbeeld mede laten afhangen van de minimale kosten van onderhoud of van de maximale beschikbaarheid van de constructie. In het eerste geval maakt de beheerder een kostenoptimalisatie van de directe kosten bij falen, de inspectiekosten, de kosten van onderhoud, etc. In het tweede geval telt hij er ook de kosten van het niet-beschikbaar zijn van een constructie door inspectie en onderhoud bij op. We komen hier in het volgende hoofdstuk op terug.

### Ontwerp van het monitorsysteem

In principe hebben we met het bovenstaande ons monitorsysteem (voor één variabele) ontworpen. Samengevat komt het ontwerp van zo'n systeem dus neer op het beantwoorden van de volgende vragen:

- **wat?** stel vast welke variabelen in de prestatie-eisen we moeten meten om de prestatie te bepalen;
- **hoe?** bepaal hoe we de variabelen moeten meten (met welke meetapparatuur) en of de meetapparatuur voldoende nauwkeurig is;
- **waar?** stel de plaatsen vast waar we moeten monitoren, bepaal of de detectiekans hoog genoeg is, en stel zo nodig het aantal meetplaatsen of de locaties bij;
- **wanneer?** stel de frequentie van monitoren vast op basis van het voorspelde faaltempo.

Wanneer we de eerste opzet van het monitorsysteem gereed hebben moeten we dat nog evalueren:

- maak een kosten/baten-analyse van het monitoren en voer een kostenoptimalisatie uit;
- maak een schatting van de bijdrage van het monitorsysteem aan de betrouwbaarheid van de prestatie;
- bepaal de gevoeligheid van het gehele meetsysteem voor het waarnemen van de betreffende variabele én van de veranderingen in die variabele;
- evalueer de beschikbaarheid van het meetsysteem: welke gevolgen zijn er als het uitvalt? Als een bepaald meetsysteem niet meer gerepareerd zou kunnen worden, moeten we een ander meetsysteem of een andere installatieplek kiezen;
- leg de vorm en de frequentie vast waarin de gemeten gegevens beschikbaar worden gesteld (archief/databeheer);
- leg eenduidig vast hoe we de meetgegevens moeten interpreteren;
- leg vast wanneer we welke maatregelen moeten nemen op basis van een mogelijke uitslag van het monitoren.

### Keuze van de te monitoren prestatie-eisen

In het ontwerpproces hebben we, op basis van fouten- en gebeurtenissenbomen, bepaald aan welke bedreigingen de constructie blootstaat. Vervolgens hebben we een ontwerp gemaakt waarbij de faalkans van de constructie op een acceptabel niveau is gebracht. Daarna hebben we de constructie gebouwd en de beginprestaties gemeten en vastgelegd. Zelfs wanneer we de constructie zodanig hebben ontworpen en gerealiseerd dat het geheel en alle onderdelen de vereiste levensduur hebben, dan kunnen we er nog steeds niet blind op varen dat dit tijdens het gebruik ook zo blijft:

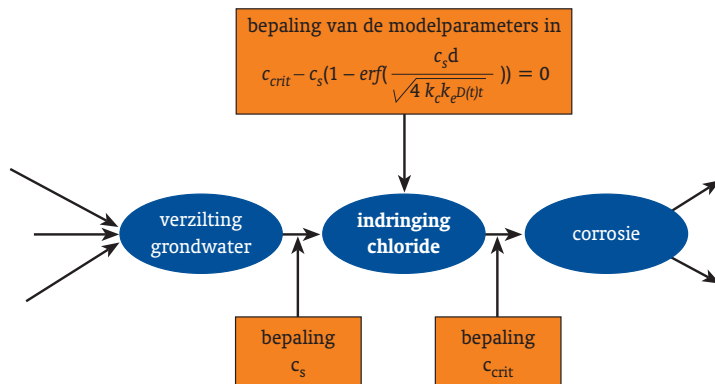
- we hebben tijdens het ontwerp vele aannamen gedaan, waarvan we tijdens het gebruik moeten nagaan of die wel kloppen (bijvoorbeeld: verloopt de chloride-indringing inderdaad volgens de prognose?);
- we kunnen bedreigingen over het hoofd hebben gezien of onderschat (bijvoorbeeld: ondervindt de constructie inderdaad geen schade door sulfaataantasting?).

Het is ondoenlijk om op allerlei variabelen te gaan monitoren terwijl die naar alle waarschijnlijkheid toch geen schadelijke gevolgen zullen hebben. Daarom draaien we in de praktijk voor het overgrote gedeelte van de prestatie-eisen de situatie om: we signaleren alle veranderingen van de nulsituatie die we in het geboortecertificaat hebben vastgelegd. Zolang we geen scheuren, roestplekken, verzakkingen of wat dan ook opmerken, mogen we er in principe vanuit gaan dat alle prestaties die theoretisch constant in de tijd

zouden moeten zijn (zie Figuur 6-5), ook constant zijn gebleven en dat er geen bedreigingen over het hoofd zijn gezien die al schade geven. Over het algemeen doen we dit door een constructie visueel te inspecteren, met een frequentie zoals in Figuur 6-6 is aangegeven.

Een heel ander verhaal gaat op voor de tijdafhankelijke prestaties: hiervan moeten we bewijzen dat de afname van de prestatie volgens de prognose verloopt. Maar net als bij de opleveringskeuring in hoofdstuk 5, hoeven we hierbij niet alle prestatie-eisen of variabelen in de onderliggende gedragsmodellen monitoren: we zullen pas in actie komen als we twijfelen aan sommige variabelen of prestaties. Dit hangt mede af van de consequenties van het falen. Maar zelfs als we concluderen dat we een prestatie moeten monitoren, hebben we nog veel alternatieven.

Om te illustreren welke variabelen we moeten monitoren geven we in Figuur 6-8 een stukje van een fouten- en gebeurtenissenboom van de chloride-indringing in een tunnel. In dit voorbeeld van de tunnel uit hoofdstuk 3 (Figuur 3-4), achtten we de kans dat het (nu nog) zoete grondwater zal verzilten verwaarloosbaar klein. Zolang het grondwater niet verzilt, is er ook geen chloride dat in kan dringen en vinden alle vervolgsituaties niet plaats. De meest logische keuze, als we onszelf door deze variabele niet willen laten verrassen, is om het chloridegehalte van het grondwater bij te houden.



Figuur 6-8 Deel van de vereenvoudigde fouten- en gebeurtenissenboom voor chloridebelasting van een tunnel

We hoeven ons dus lang niet altijd te beperken tot het monitoren van variabelen die in de aantastingsmodellen voorkomen. Bovendien ontbreken er nog veel aantastingsmodellen. Maar we kunnen dus wel eenvoudig monitoren of de noodzakelijke voorwaarden aanwezig zijn (zoals de aanwezigheid van chloride) of de eerste relatief onschuldige symptomen (zoals scheuren) optreden.

Het efficiëntste (en meest economische) monitoringsysteem is nog steeds de (reeks van) visuele inspecties. Binnen één visuele inspectie kunnen we heel snel veel prestaties tegelijk bekijken en registreren (en eventueel met elkaar in verband brengen). Visuele inspectie

komt altijd in aanmerking voor prestaties waarbij het falen gepaard gaat met (zichtbare) incidenten en voor alle prestaties die weliswaar achteruitgaan maar waarvan de gevolgen van het falen klein zijn, zoals een constructie die er vuil uit gaat zien (esthetica). De visuele inspectiefrequentie hangt dan vooral af van de noodzakelijke frequentie waarmee de prestaties met de grootste risico's moeten worden gemonitord. Het is ook een optie om niet bij elke visuele inspectie opnieuw alle prestaties te controleren.



Evenmin zal de keuze van de prestaties die we willen monitoren voor de hele levensduur van een constructie vastliggen. We kunnen nieuwe keuzes maken als bijvoorbeeld een volgende fase van een aantastingsmechanisme is ingezet, als een calamiteit is opgetreden, of als nieuwe technische of wetenschappelijke inzichten beschikbaar komen, waardoor gereede twijfels rijzen over de betrouwbaarheid van de constructie (of juist robuuster blijken te zijn dan gedacht, zodat die prestaties juist minder intensief gemonitord hoeven te worden). Als in het voorbeeld van de tunnel in zoet grondwater het chloridegehalte van het grondwater inderdaad is gestegen – waar we achter zijn gekomen door het zoutgehalte van het grondwater te monitoren – moeten we vanaf dat moment de chloride-indringing in de tunnelwand zelf gaan monitoren.

### Monitorstrategie

Hoe pakken we het monitoren strategisch aan? Deze vraag is voor betonconstructies best lastig te beantwoorden. Immers, we hebben op basis van een schatting van risico's een zodanige constructie ontworpen, dat die gedurende haar gehele levensloop aan de gestelde eisen voldoet, al dan niet met onderhoud. Als we geen enkele reden hebben om aan de uitgangspunten van het ontwerp te twijfelen, en als we hebben vastgesteld dat de constructie bij oplevering aan haar eisen voldoet, is er geen enkele praktische of economische reden om te gaan monitoren.

Nu hebben we hierboven al gesteld dat we er niet blindelings vanuit kunnen gaan dat constructies precies zo verouderen zoals dat bij het ontwerp is bedacht. Dezelfde uit-

gangspunten als bij de opleveringskeuring na het bouwen gelden ook hier: als de constructie op een andere manier verouderd dan we verwachten, kunnen de (economische) gevolgen groot zijn. Vandaar dat we vinden dat er behalve een verplichte opleveringskeuring, ook verplichte exploitatiekeuringen moeten komen, zoals die er ook voor auto's en verwarmingsinstallaties zijn. Deze zou, aansluitend bij de huidige exploitatiepraktijk, kunnen bestaan uit een regelmatige visuele inspectie, aangevuld met de verificatie van de tijdafhankelijke prestatie-eisen. Zelfs voor de tijdafhankelijke prestaties kan een visuele inspectie afdoende zijn, maar hier speelt wel een economische afweging een rol. Als we bijvoorbeeld corrosie visueel inspecteren, doen we dat door te kijken naar roestplekken aan het betonoppervlak, naar scheuren en naar het afdrucken van de dekking. Dergelijke waarnemingen zijn een duidelijke indicatie dat de wapening corrodeert, maar het tijdstip van de waarnemingen is rijkelijk laat en reparatiekosten zijn niet meer te vermijden. We kunnen bovendien niet zomaar gaan repareren, want we moeten de corrosie eerst nader onderzoeken. De economische afweging is of de kosten van het intensievere monitoren van de chloride-indringing en de kosten van preventief onderhoud samen hoger worden ingeschat dan de kosten van de visuele inspecties, van het nader onderzoek en van de noodzakelijke reparaties.

De voorgaande pragmatische wijze van monitoren door middel van visuele inspecties wordt eigenlijk al grotendeels gevolgd in de huidige praktijk - met dien verstande dat meestal alleen visuele inspecties plaatsvinden totdat men veranderingen in de constructies opmerkt (zoals scheuren, roestplekken, uitbloei, enz.). Pas daarna gaat men op zoek naar de mogelijke oorzaken van de schade. In principe moeten we dan toch nog een prestatiebeoordeling maken, alleen dan meteen vanuit de schade die is geconstateerd. Soms wijst één bepaalde indicator naar verschillende schademechanismen. Dan zal alsnog uitgebreid onderzoek nodig zijn om te bepalen welk schademechanisme de schade veroorzaakt en welke prestaties minder betrouwbaar zijn geworden.

Indien een prestatie sneller afneemt dan verwacht, kunnen we ervoor kiezen om toch niet meteen in te grijpen, maar met maatregelen te wachten tot de prestatie werkelijk is onderschreden. Omdat we de beslissing om al dan niet te monitoren dan afwegen in relatie met herstelmaatregelen om de betrouwbaarheid weer op het gewenste niveau te krijgen (zoals versterken, beschermen) bespreken we dit in het volgende hoofdstuk. Als een prestatie langzamer afneemt dan verwacht, kunnen we besluiten om eventueel ingepland onderhoud of vervanging uit te stellen.

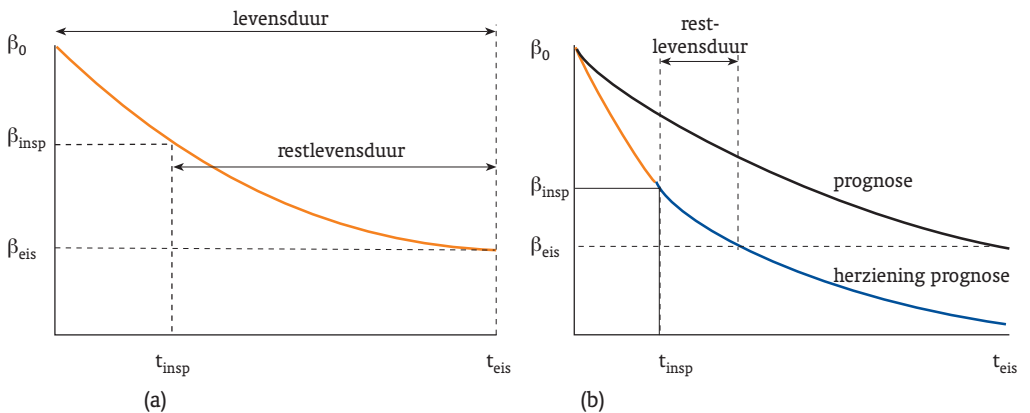
Met permanent geïnstalleerde meetapparatuur is overigens nog niet zo heel veel praktijkervaring opgedaan. Er zijn nog geen goede schattingen hoe duurzaam en betrouwbaar zulke systemen zijn. Er is nog veel onderzoek nodig voordat we een monitorstrategie op redelijk routinematige wijze kunnen opzetten. Voor het monitoren op prestaties loopt er momenteel ook nog veel onderzoek; dit moet leiden tot meetsystemen die op betrouwbare wijze de gewenste variabelen bepalen. We verwachten dat er de komende jaren op dit gebied veel vooruitgang zal worden geboekt.



## Restlevensduur van de constructie

De reden om te monitoren is uiteraard om te kijken of de constructie nog aan zijn eisen voldoet, niet alleen op het moment van de inspectie maar vooral ook voor de komende periode of, liever nog, gedurende de rest van zijn beoogde levensduur. Op basis van de metingen of (visuele) inspectie moeten we de levensduur van de constructie opnieuw berekenen. De vereiste restlevensduur is uiteraard gelijk aan de ontwerplevensduur (of liever: de gerealiseerde levensduur na oplevering) minus de tijd dat de constructie al in gebruik is (zie Figuur 6-9). Indien de constructie tijdens haar restlevensduur niet aan de eisen voldoet, moeten we mogelijk maatregelen nemen, die we in het volgende hoofdstuk bespreken.

Maar zijn er nog meer redenen waarom we de prestaties van een constructie, en daarmee de restlevensduur, nauwkeurig willen bepalen. Denk aan het uitbesteden van onderhoud op basis van contracten met een beperkte duur (10 tot 25 jaar). Bij de contractonderhandelingen moeten we afspreken aan welke eisen de constructie aan het einde van het contract moet voldoen, en hoe dit bewezen moet worden. Dit kan uiteraard gebeuren op basis van het uiterlijk van de constructie maar dat zegt niet noodzakelijkerwijs alles over haar restlevensduur. De wapening kan bijvoorbeeld aan het corroderen zijn zonder dat we dat al aan het oppervlak kunnen zien. De eigenaar kan dan na afloop van het onderhoudscontract ineens op korte termijn voor fikse onderhoudskosten komen te staan terwijl de onderhoudsaannemer geprofiteerd heeft van het feit dat de corrosie nog niet zichtbaar was. Indien daarentegen eisen zijn vastgelegd met betrekking tot de minimale betrouwbaarheid van de verschillende prestaties aan het einde van het onderhoudscontract zal er geen (of minder) onverwacht onderhoud zijn en is er duidelijkheid over de restlevensduur van de constructie bij het aflopen van het contract.



Figuur 6-9 Restlevensduur: verificatie door middel van inspectie (a) en herziening (b) bij afwijkende inspectieresultaten



  
**tijdelijke  
brug**

**opri  
t  
stops**



## 7 Exploitatie: onderhoud

### Van monitoren naar onderhoud: hoe brengen we de constructie weer op peil?

Als we een constructie ontwerpen, bouwen en beheren volgens de zogeheten levensloop-beheerstrategie, krijgt de beheerder in principe een goed inzicht in het onderhoud dat hij gedurende de exploitatie kan verwachten. Volgens de levensloopbeheerstrategie leggen we in de planfase namelijk een onderhoudsstrategie of basisonderhoudsplan vast met de uitgangspunten voor het onderhoud. Bij een onderhoudsarm ontwerp is het uitgangspunt dat er geen onderhoud aan hoeft te gebeuren, met uitzondering van onvoorzien onderhoud. Het gewone onderhoud kan ook al in het ontwerp zijn meegenomen; dan heeft de beheerder meteen al zijn eerste onderhoudsplan. Op basis van de inspecties of monitoringwaarnemingen tijdens de exploitatiefase, kan hij vroegtijdig eventuele voorziene en onvoorziene onderhoudsuitgaven incalculeren.

Ongeacht het feit of het onderhoud voorzien of onvoorzien was, is het doel van onderhoud dat we de prestaties van de constructie zodanig verbeteren dat deze weer gedurende een vooraf bepaalde periode meekan. Of die tijd gelijk is aan de restlevensduur van de constructie of korter (en dan meestal gelijk aan de levensduur van de onderhoudstechniek) of langer, hangt af van de optimalisatie die de beheerder uitvoert. Wanneer we een kostenoptimalisatie uitvoeren kan een dure techniek met een lange levensduur in de totale exploitatie soms goedkoper uitvallen dan een goedkope techniek met een korte levensduur. De beheerder moet de onderhoudstechniek kiezen.

Tijdens de exploitatiefase onderscheidt men vaak drie typen onderhoud, op basis van vooraf bepaalde acties of beslissingen:

- storingsafhankelijk onderhoud (SAO): er wordt actie ondernomen als er componenten uitvallen en dit automatisch wordt opgemerkt of door gebruikers wordt aangegeven;
- gebruiksaafhankelijk onderhoud (GAO): componenten van een constructie of constructie-deel worden na een bepaalde gebruiksperiode vervangen;
- toestandsafhankelijk onderhoud (TAO): er wordt actie ondernomen als de prestatie-eisen dreigen te worden onderschreden of al onderschreden zijn.

Er wordt vaak van uitgegaan dat we in de eerste twee gevallen niet hoeven te monitoren. Dit is een misverstand: bij storingsafhankelijk onderhoud gaan we uit van (visuele) inspectie van de nulsituatie (we inspecteren op niet-falen). Pas wanneer we afwijkingen constateren besluiten we over (eventueel) onderhoud. Ook bij gebruiksaafhankelijk onderhoud moeten we de constructie op niet-falen inspecteren, er bestaat immers altijd een kans van voortijdig falen; pas na een vaste periode, die verband houdt met het feitelijke gebruik, vervangen we onderdelen, ongeacht of ze de prestatie(s) nog leveren.

In principe zijn storingsafhankelijk onderhoud en gebruiksaafhankelijk onderhoud beide varianten van toestandsafhankelijk onderhoud. In het eerste geval is het besluit al gevallen om geen actie te ondernemen tenzij een prestatie faalt. In het andere geval is er al

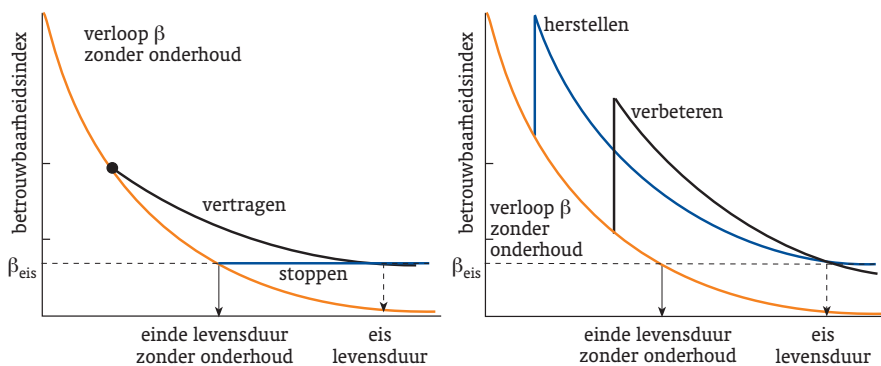
besloten welke onderhoudsmethode wordt toegepast op het moment dat een component zijn berekende levensduur heeft bereikt - namelijk vervangen. Vanwege het kunstmatige karakter van de bovenstaande indeling, zullen we die in dit boek verder niet gebruiken.

We maken in dit hoofdstuk wel een onderscheid in voorzien en onvoorzien onderhoud. Voorzien onderhoud is hier per definitie alleen het onderhoud dat we in het ontwerp hebben voorzien. Dit zijn per definitie prestaties waarvan we al weten dat ze hun vereiste waarde zullen onderschrijden vóór het einde van de vereiste levensduur van de constructie als geheel. Een voorbeeld hiervan zijn componenten van constructies, zoals rubberen voegprofielen die niet langer dan 20 jaar meegaan. Zo hadden we in het ontwerp ook kunnen kiezen voor een dekking met een kans op corrosie-initiatie door chloride vanaf 25 jaar, terwijl de gehele constructie een levensduur van 50 jaar behoort te hebben (zie Figuur 2-10). In dat geval zouden we maatregelen in het ontwerp hebben moeten opnemen die we tijdens het gebruik, bijvoorbeeld na de eerste 25 jaar, zouden moeten uitvoeren, zodat de constructie vervolgens haar resterende levensduureis van 25 jaar wel zal halen.

### **Gedragsmodellen voor prestaties bij onderhoud**

Voordat we onderhoud plegen moet het effect van de onderhoudsmaatregel op de prestatie duidelijk zijn. Daartoe moeten we de gedragsmodellen aanpassen die ten grondslag liggen aan de prestatie. Hoe we de modellen zullen aanpassen hangt af van het beoogde effect van de onderhoudsmaatregel op de verdere achteruitgang van een prestatie (Figuur 7-1):

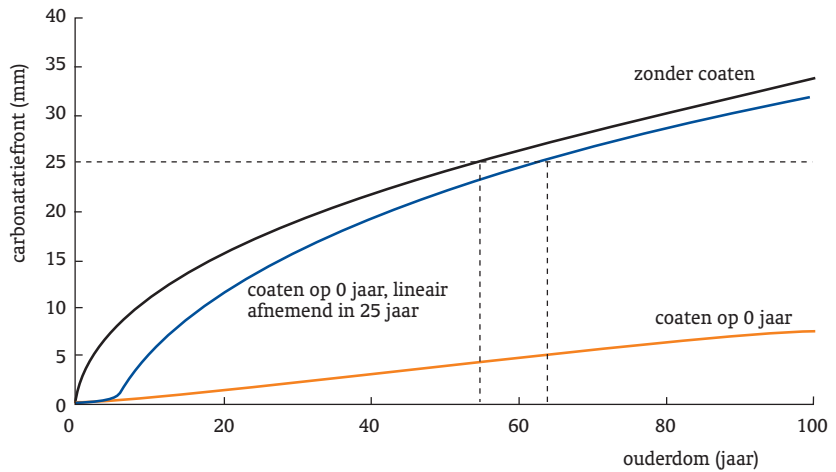
1. voorkomen (stoppen): hierbij nemen we meestal een noodzakelijke ingrediënt uit het proces weg: het vocht bij ASR of corrosie, de potentiaalverschillen bij kathodische bescherming tegen corrosie; in deze gevallen hoeven we de modellen niet aan te passen, want door deze maatregelen wordt één van de variabelen in de modellen gelijk aan nul. Wel moeten we controleren (monitoren) of tijdens de verdere levensduur blijvend aan deze voorwaarden wordt voldaan. De prestatie blijft zoals deze op het moment van het onderhoud was of vanaf het moment dat het onderhoud effectief is geworden (het duurt bijvoorbeeld wel even tot nat beton weer is uitgedroogd, in die tijd kan de schade door ASR doorgaan);
2. vertragen: hierbij leggen we meestal een barrière aan, bijvoorbeeld een coating. De achteruitgang van een prestatie stopt nu niet maar verloopt trager, zodat de limiet op de langere termijn mogelijk toch wordt onderschreden. De gedragsmodellen moeten we hierop aanpassen; in een tweelaagsmodel kunnen we het effect van de barrière meenemen;
3. verbeteren: bij het verbeteren van prestaties nemen we maatregelen waarbij een prestatie juist een hogere waarde krijgt dan ze eerst had, maar waarbij de uitgangssituatie niet per se wordt hersteld. We kunnen bijvoorbeeld constructies versterken, scheuren herstellen, enz. Verbeteren kan een grote impact hebben op de gedragsmodellen en de prestaties. Een geheel andere gedrag of prestatie kan dominant worden. Als we de wapening versterken, verandert dat wellicht het gehele gedrag van een constructie(deel). Dan moeten we nog een constructieve herberekening uitvoeren. Het is dan mogelijk dat andere prestatie-eisen dominant worden;



Figuur 7-1 Schematisch verloop van een prestatie na onderhoud

4. herstellen: met herstellen bedoelen we hier expliciet: teruggaan naar de uitgangssituatie. De extractie van voor beton schadelijke stoffen zoals chloride, het herstellen van de pH (re-alkalisatie) of het opruwen van oppervlakken zijn hiervan voorbeelden. Meestal lukt het bij deze methoden niet om helemaal terug te gaan naar de beginsituatie - er blijft bijvoorbeeld altijd een zekere hoeveelheid chloride achter en na het opruwen zal de dekking kleiner zijn. Indien de onderhoudsmethode tijdelijk is moet na beëindiging het nieuwe niveau worden vastgesteld. Dit niveau dient dan als een nieuw 'nulpunt'. De achteruitgang van de prestatie verloopt echter weer zoals voorheen, aangezien we noch de actie noch de capaciteit hebben veranderd. Indien de onderhoudsmethode permanent is blijft dit minimumniveau gedurende de resterende levensduur gehandhaafd;
5. vervangen: bij een aantal prestaties is al bij het ontwerp rekening gehouden met het feit dat ze niet tijdens de gehele levensduur aan de eisen zullen voldoen (bijvoorbeeld de voegen in een brugdek, die een levensduur hebben van ongeveer 20 jaar), en waarvan verwacht kan worden dat ze een constant faaltempo hebben. Maar het kan ook gaan om vervanging van de dekking bij een te grote carbonatatie diepte of een te hoog chloridegehalte dichtbij de wapening. Bij vervanging hoeven we de modellen niet aan te passen, maar kunnen we vanaf een nieuw nulpunt, het moment van vervanging, verder gaan. Indien we voor de vervanging een ander materiaal of een andere geometrie gebruiken moeten we wel de juiste materiaaleigenschappen en geometrische factoren in het gedragsmodel opnemen.

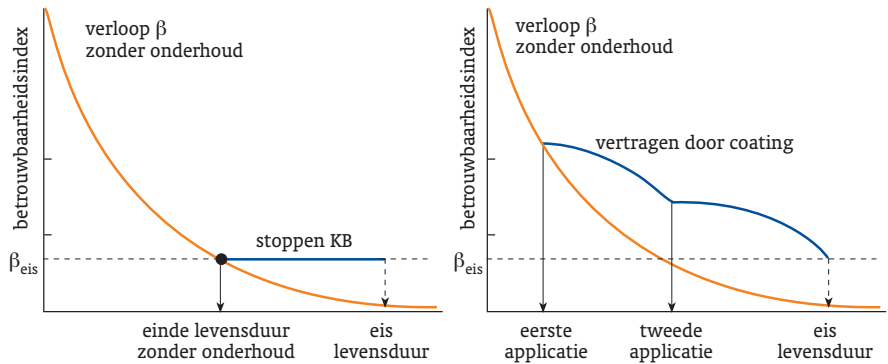
Het aanpassen van de modellen is met name voor de onderhoudstechnieken onder 1, 2 of 3, vaak minder gemakkelijk dan het lijkt. Behalve met het onderhoud zelf, moeten we ook rekening houden met de veroudering of het feit dat de toegepaste onderhoudstechniek met de tijd ook weer minder effectief kan worden. Een voorbeeld van de invloed van deze veroudering op de prestatie toont Figuur 7-2 voor een coating die de corrosie-initiatie door carbonatatie moet vertragen. Naarmate een onderhoudsmethode minder effectief wordt, neemt het prestatieverloop eerder de snelheid aan die het had voordat het onderhoud werd gepleegd. Uit het voorbeeld blijkt dat de coating de 'levensduur' van de constructie met slechts negen jaar verlengt.



Figuur 7-2 Invloed van coating op de carbonatatie diepte, uitgaande van een afname van de diffusiecoëfficiënt van  $CO_2$  door de coating

Zoals de modellen die we in het ontwerp gebruiken een uitvoeringscomponent en een milieucomponent bevatten, zouden ook de herziene modellen deze factoren kunnen omvatten. Dan kunnen we rekening houden met een slechtere kwaliteit (in vergelijking met het laboratorium) door bepaalde uitvoeringsfactoren en een sneller verlies van prestatie door het milieu (een coating wordt zelf weer aangetast door ultraviolette straling). Voor zover wij weten is hier overigens nog geen onderzoek naar gedaan.





Figuur 7-3 Toepassing KB en operatietijd van het systeem (links) en tweede applicatie van een (degraderende) coating

### Keuze van onderhoudstechnieken ter verbetering van prestaties

Het belangrijkste criterium bij het kiezen van de juiste onderhoudstechniek moet het effect van het onderhoud op de prestatie zijn. Onderhoud dat geen effect heeft, hoeven we ook niet toe te passen. Het effect van het onderhoud hangt van een groot aantal factoren af, waarvan we de belangrijkste hieronder kort bespreken.

#### *Keuze op basis van 'levensduur' van de onderhoudstechniek*

We moeten een bepaalde onderhoudstechniek kiezen in relatie tot de duur van zijn effectiviteit en niet op basis van de 'levensduur' van de onderhoudstechniek. Figuur 7-2 laat een coating zien waarvan het effect na 25 jaar is verdwenen. Is de 'levensduur' van deze onderhoudstechniek nu 25 jaar? Dat wel, maar de effectiviteit neemt al meteen vanaf het begin van de toepassing af. We kunnen dus beter in het gedragsmodel het effect opnemen dat de coating heeft op de restlevensduur van de constructie (zijnde 9 jaar). Als de constructie dankzij de coating haar beoogde restlevensduur zal halen, voldoet de coating. In het andere geval moeten we misschien na enkele jaren nogmaals een coatinglaag aanbrengen.

#### *Keuze van onderhoud op basis van uitvoering*

Of het onderhoud het beoogde effect op de prestatie zal hebben, is op zijn beurt weer afhankelijk van de kwaliteit van de uitvoering. Net als bij de oorspronkelijke bouw van de gehele constructie (hoofdstuk 5) kunnen tal van uitvoeringsaspecten de prestatieverbetering nadelig beïnvloeden. We kunnen dit weer met een fouten- en gebeurtenissenboom in beeld brengen zoals we dit in Figuur 5-3 deden voor de kwaliteit van de dekking. Zo is coaten misschien niet mogelijk zolang het betonoppervlak te vochtig is. Dan halen we de beoogde kwaliteit met een coating alleen op beschutte delen of op onbeschutte delen die winddroog zijn. Als we maar weinig tijd hebben om het onderhoud uit te voeren, kiezen we waarschijnlijk liever een andere onderhoudstechniek: het regent te vaak in Nederland om het risico te nemen dat het niet droog is op het moment dat we de coating zouden moeten aanbrengen. Willen we toch per se coaten, dan moeten we een mobiele overkapping gebruiken (en in de kosten meenemen!).

### ***Keuze van onderhoudstechnieken op basis van monitoren***

In het ontwerp kan rekening zijn gehouden met voorzien onderhoud voor componenten van de constructie (vervangen rubberen voegovergangen) en/of prestaties die een afwijkende tijd tot falen hebben dan de constructie als geheel (coaten van de betondekking ter voorkoming van verdere chloride-indringing). Bij voorzien onderhoud kan de keuze van de onderhoudstechniek worden afgestemd op de mogelijkheden tot monitoren.

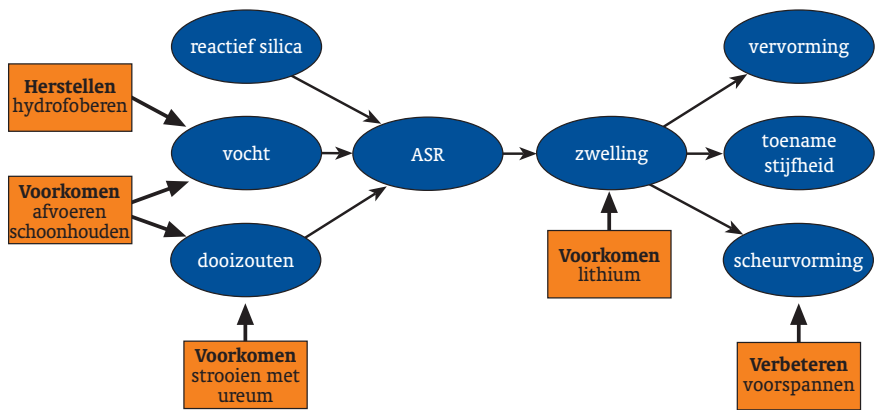
Het monitoren van prestaties met een afwijkende duur dan de levensduur van de constructie als geheel, verloopt precies op dezelfde manier als het monitoren van prestaties die een gelijke levensduur hebben. Maar ná het onderhoud verandert er wel wat: misschien voldoet het monitorsysteem niet meer om de prestatie te volgen. Dit hangt af van de gekozen reparatietechniek. Als we bijvoorbeeld de rubberen profielen vervangen, kunnen we op dezelfde voet (met het visuele systeem van niet-falen op basis van de eis dat de constructie niet lekt) voortgaan. Als we een coating aanbrengen op de dekking om nieuwe chloride-indringing te voorkomen, zouden we een ingebouwd monitorsysteem in gebruik kunnen houden. Waarschijnlijk zal dit oude systeem nu niet meer voldoen omdat we hiervoor te weinig meetinstrumenten hebben ingebouwd. Immers, de mogelijke indringing van chloride was eerst globaal van karakter en daardoor was het (relatief) onbelangrijk waar we meten. Maar na coaten krijgt de chloride-indringing een mogelijk lokaal karakter: daar waar de coating faalt. Met andere woorden: de detectiekans van het bestaande monitorsysteem wordt te klein. We zullen dus een ander monitorsysteem moeten opzetten (bijvoorbeeld door visuele inspectie van beschadigingen van de coating). Voor andere onderhoudstechnieken moeten we misschien geheel nieuwe monitorsystemen opzetten. De keuze van een bepaalde onderhoudstechniek hangt dus óók nog af van de kosten van de bijbehorende manier van monitoren.





### **Keuze van het ontwerp voor de gevoeligheid voor onderhoud**

Hoewel het onderhoud dat we plegen afhankelijk is van het prestatieverloop, is het omgekeerde ook nogal eens waar. Vooral bij de prestaties met betrekking tot de duurzaamheid is de (milieu-)belasting afhankelijk van het onderhoud (verstopte goten leiden tot een verhoogde vocht – en dooizoutbelasting). Indien we klein onderhoud niet goed of niet tijdig uitvoeren, verandert de snelheid of zelfs het type aantasting en daarmee het prestatieverloop. Als onderdeel van een prestatiebeoordeling moeten we daarom ook de randvoorwaarden waaronder de aantastingsmechanismen optreden en de consequenties wanneer daar niet aan wordt voldaan in het ontwerp vastleggen, inclusief de te nemen onderhoudsmaatregelen. Indien we dat tijdens de ontwerpfase nog niet hebben gedaan moeten we een nieuwe of anders een aangepaste fouten- en gebeurtenissenboom maken voor de exploitatiefase. Figuur 7-4 geeft een voorbeeld voor ASR.



*Figuur 7-4 Voorbeeld van een fouten- en gebeurtenissenboom in de onderhoudsfase*

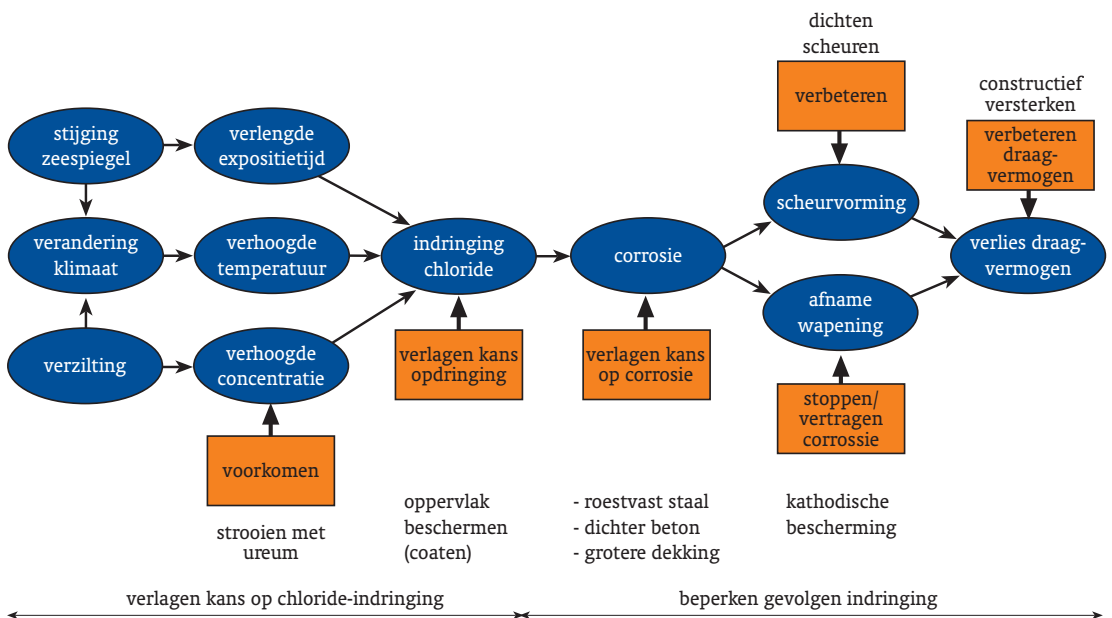
Op basis van een fouten- en gebeurtenissenboom, eventueel in aanvulling op die van het ontwerp, kunnen we kijken hoe we met onderhoud (of door dat na te laten) het prestatieverloop beïnvloeden. Indien er in het ontwerp heel onderhoudsgevoelige onderdelen zitten, kunnen we het ontwerp proberen aan te passen. Dan gaat het niet alleen om de onderhoudstechniek en frequentie van het onderhoud, maar ook om het monitoren daarvan. Als het, bijvoorbeeld, van cruciaal belang is dat de afvoeren goed blijven werken zou er kunnen worden geëist dat er géén verstoppingen mogen optreden en dat de afvoeren viermaal per jaar geheel schoongemaakt moeten worden. Dan zijn een (visuele) zichtbaarheid van de goten en een goede bereikbaarheid van belang. Indien de afvoeren in het zicht liggen, kunnen we afgaan op klachten van gebruikers ('storingsmeldingen'), in combinatie met een visuele inspectie door een kantonnier of beheerder om eventuele verstoppingen te verhelpen. Bij het ontwerp moeten we dus op dit aspect letten: het lijkt een onschuldig detail maar het kan grote gevolgen hebben.

### **Keuze voor het tijdstip en locatie van onderhoud**

De keuze voor een bepaald type onderhoud wordt in belangrijke mate bepaald door de

gevolgen van het uitstellen van onderhoud. In principe maken we deze keuze al in het ontwerp. In die levensfase beslissen we immers over de eis die we aan een bepaalde prestatie stellen (Figuur 4-5, Figuur 7-5):

- initiatiefase: nog geen schade of aantasting. De onderhoudstechnieken in deze fase zijn meestal beperkt tot voorkomen, vertragen of herstellen;
- propagatiefase met de eerste kleine schade. De bijbehorende onderhoudstechnieken moeten verdere schade of aantasting voorkomen of vertragen ;
- propagatiefase met gemiddelde tot ernstige schade. De onderhoudstechnieken moeten de schade verbeteren of herstellen hebben maar beperkt tijd om dit onderhoud te plannen en uit te voeren;
- propagatiefase met grote schade. De mogelijke onderhoudsmaatregelen zijn herstellen, verbeteren of vervangen. Ze moeten direct en in korte tijd gebeuren.



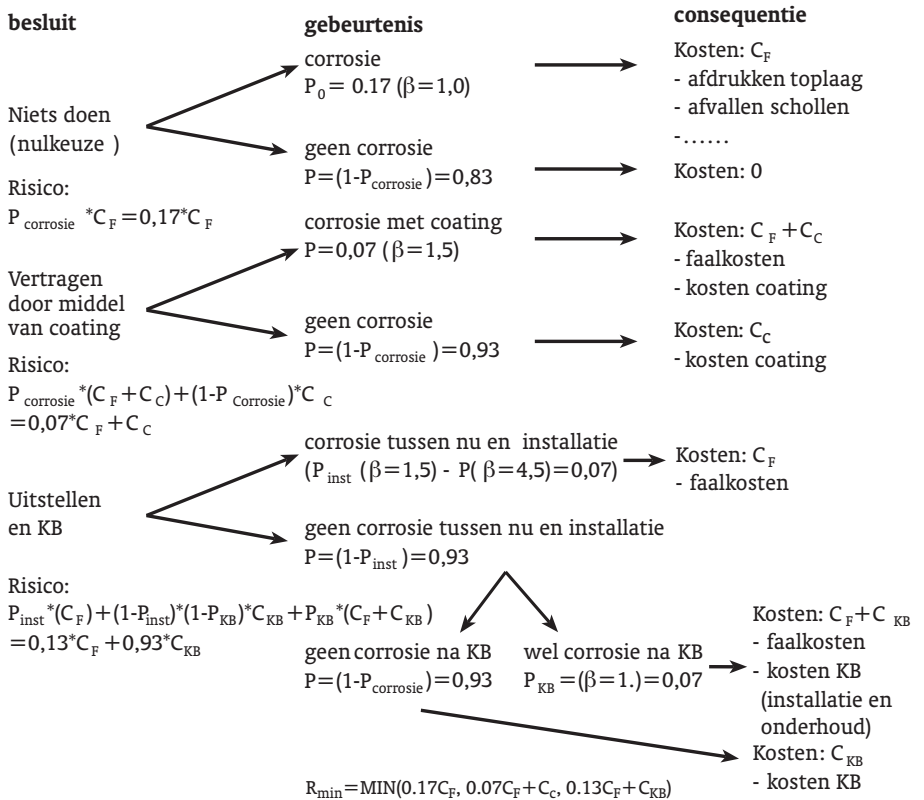
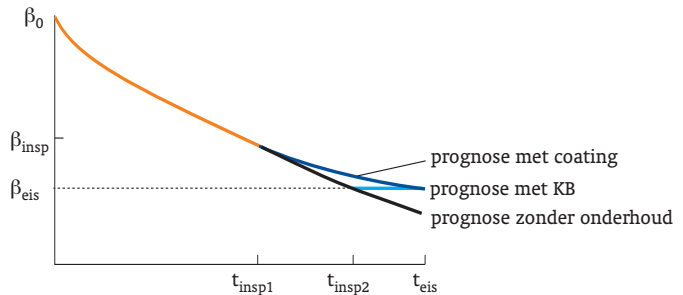
Figuur 7-5 Vereenvoudigde fouten- en gebeurtenissenboom voor corrosie door chloride- indringing

Behalve het precieze moment (wanneer gaan we het onderhoud plegen?), moeten we ook nog de juiste onderhoudstechniek kiezen op basis van de (ruimtelijke) omvang van de schade. Dit noemen we meestal het ‘interventieniveau’. Klein onderhoud wordt toegepast indien de omvang van de schade klein is, en het beperkt zich tot het ‘bijwerken van plekken’; bij groot onderhoud moeten we bijvoorbeeld aan het gehele oppervlak van een constructiedeel onderhoud moeten gepleegd.

### Strategie om de noodzaak en wijze van onderhoud te bepalen

Het belangrijkste criterium om een onderhoudsmethode te kiezen zijn natuurlijk de kosten. Hierbij kijken we niet alleen naar de kosten van uitvoering van het onderhoud, maar ook en met name naar de effectiviteit van de onderhoudstechniek op de prestatie per tijds-

eenheid of totale levensduurverlenging. Figuur 7-6 geeft een voorbeeld waarbij we de kosten van het onderhoud afzetten tegen de kosten als we geen onderhoud plegen of tegen de kosten van monitoren in combinatie met uitstel van onderhoud. De beslissing zal vallen op de keuze met het kleinste risico.



Figuur 7-6 Eenvoudige beslisboom voor geen, direct of uitgesteld onderhoud (onder) op basis van prestatie-afname (boven)

Een ander criterium dat we steeds vaker meenemen in de strategiekeuze voor onderhoud, is de beschikbaarheid van een constructie, oftewel het deel van de tijd dat de constructie haar functies vervult. Enerzijds heeft een goed onderhoud hierop een positieve invloed

(minder vaak onderhoud), anderzijds zorgt het uitvoeren van het onderhoud er vaak voor dat een constructie niet beschikbaar is. Eisen aan de beschikbaarheid bij onderhoud kunnen zeer streng zijn (met name voor kunstwerken op belangrijke trajecten of knooppunten in het wegennet). De kosten van het niet-beschikbaar zijn van een constructie worden vooral door de maatschappij bepaald. Deze kosten kunnen we verminderen door flankerende maatregelen zoals goede voorlichting over de onderhoudstrajecten, en alternatieve routes beschikbaar stellen. Vanwege de kosten van het niet-beschikbaar zijn, dat hoe dan ook als hinderlijk wordt ervaren, is de bij de kosten-optimalisatie ook de snelheid waarmee het onderhoud kan worden uitgevoerd nog van groot belang. Als we geen technieken hebben om het onderhoud uit te voeren zonder de doorlopende beschikbaarheid van de constructie te garanderen, zullen we meestal kiezen voor de onderhoudsmethodiek waarbij de periode dat de constructie niet beschikbaar is, zo kort mogelijk is.

We kunnen de kosten ook optimaliseren door verschillende vormen van onderhoud gelijktijdig uit te voeren. Daarvoor moeten we misschien sommige onderhoudswerkzaamheden vervroegen of andere juist uitstellen. Als de beschikbaarheid van de constructie een dominante beslisfactor is, kan gelijktijdig onderhoud een zeer lonende optie zijn.

Behalve de beperkingen rond het budget en de beschikbaarheid blijven ook de wettelijke eisen rond veiligheid en milieu van kracht. Deze eisen betekenen dat sommige onderhoudstechnieken duurder worden.

### ***Het onderhoudsplan***

Hierboven hebben we twee belangrijke klassen van voorzien onderhoud onderscheiden:

- onderhoud dat nodig is om de bedreigingen van prestaties op een aanvaardbaar niveau te houden (oftewel om de prestaties gedurende het gebruik op die waarde te houden waarop we ze hebben ontworpen)
- onderhoud dat moet worden gepleegd op het moment dat de levensduur van een onderdeel van een constructie ten einde is en eerder afloopt dan de levensduur van de constructie als geheel.

We kunnen ons bij het kiezen van de juiste onderhoudstechnieken beperken door te kijken naar het effect op de prestatie, op de uitvoering en op de mogelijkheid om te monitoren. Een tweede selectie kunnen we maken door te kijken naar het optimale moment van onderhoud en de ingrijpendheid ervan (interventieniveau). Met beslisbomen kunnen we de risico's van de verschillende onderhoudstechnieken overzichtelijk in kaart brengen.

Wanneer we een bepaalde onderhoudstechniek hebben gekozen, moeten we afspraken maken over de beoogde verbetering (het effect en de kwaliteit van het onderhoud en de levensduur ervan). Bovendien moeten we vastleggen hoe we het onderhoud zullen keuren, welke afkeurcriteria we zullen hanteren en wat de gevolgen van een eventuele afkeuring zullen zijn. Dit is altijd van belang – of we het onderhoud nu uitbesteden of als we een interne kwaliteitsbeoordeling doen.

Alle relevante informatie met betrekking tot het onderhoud (keuze-afwegingen, aangepaste gedragsmodellen en behaalde prestatieverbetering enz.) moeten we vervolgens in het onderhoudsdocument opnemen, in aanvulling op het geboortedocument en bij alle eerdere informatie over de prestatie van de constructie die tot dusver uit het monitoren naar voren is gekomen (hoofdstuk 6). Dit alles betekent dat we de hele procesvoering rond het onderhoud moeten registreren zodat de beheerder op ieder willekeurig tijdstip weet wat de toestand van zijn constructies is, wanneer hij die moet inspecteren, wanneer hij moet ingrijpen, en welke maatregelen hij moet nemen. Bovendien heeft hij met dit onderhoudsdocument een overzicht in handen van het voorziene onderhoud, met alle lastige aspecten daaraan en wellicht ook met een idee van de kosten. Het onderhoudsdocument stelt de beheerder in de gelegenheid om het onderhoud vroegtijdig in te plannen en de benodigde middelen te reserveren.



### ***Het einde***

Voor iedere constructie komt onvermijdelijk het moment waarop de kosten van onderhoud om aan alle prestatie-eisen te blijven voldoen, niet opwegen tegen de verlenging van de levensduur die we er nog mee kunnen bereiken, met name wanneer we dit afzetten tegenover nieuwbouw. Indien we het integrale beheer hebben gevolgd zoals we dat hierboven hebben geschetst en er niet te veel onverwachte dingen zijn gebeurd, zal dit moment precies komen op het einde van de ontwerplevensduur. De constructie heeft dan haar beoogde functie vervuld voor de duur en de kosten zoals begroot. Op dat moment kunnen we een constructie uit bedrijf nemen en slopen.



## Tot slot

We hopen dat we je hebben geïnspireerd om aan de slag te gaan met levensduurberekeningen, ondanks de haken en ogen die er nog aan zitten. We hopen ook dat we je hebben kunnen laten zien wat de kracht is van levensduurberekeningen op basis van prestaties: eenduidigheid, uniformiteit en een objectieve manier om beslissingen te nemen in alle levensloofasen van de constructie en voor alle typen eisen die je kunt bedenken.

Met behulp van vereenvoudigde technieken hebben we geprobeerd om de verschillende levensloofasen op een uniforme manier te analyseren. We kozen voor fouten- en gebeurtenissenbomen om oorzaak en gevolg van falen te analyseren, omdat we daarmee op overzichtelijke wijze ook de eventuele bedreigingen én oplossingen kunnen beoordelen. We gebruikten betrouwbaarheidsgrafieken om het verloop van prestaties in de tijd te volgen en beslisbomen om keuzemogelijkheden en beslissingen te kwantificeren. Er zijn zeker nog andere mogelijkheden om met levensduurberekeningen en levensloofbeheer om te gaan, maar op deze wijze is de methode compact en compleet gebleven.

We zijn ons ervan bewust dat de beschreven methode op sommige punten niet meer dan een raamwerk is waarbinnen nog modellen en/of gegevens vanuit de praktijk moeten worden toegevoegd om het compleet te maken. Maar anderzijds zullen deze gegevens er niet komen tenzij er in de praktijk mee gewerkt gaat worden. We hopen dat dit boek daaraan heeft bijgedragen.

Delft, juli 2010,

*Jeanette Visser en Ton Siemes*





## Lijst met nuttige publicaties en vermelde normen

CUR Publicatie 172: Duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies (2e herziene uitgave), Stichting CUR, Gouda, 1998

CUR Publicatie 190: Kansen in de civiele techniek. Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie. Stichting CUR, Gouda, 2002

CUR Publicatie 209: Kansen in de civiele techniek. Deel 2: Voorbeelden uit de praktijk. Stichting CUR, Gouda, 2002

CUR Rapport 109: Veiligheid van bouwconstructies. Een probabilistische benadering, Stichting CUR, Gouda, 1982

### Normen:

NEN-EN 1990 Eurocode - Grondslag van het constructief ontwerp

NEN-EN 1991 Eurocode 1: Belastingen op constructies

NEN-EN 1992 Eurocode 2: ontwerpen en berekening van betonconstructies

NEN 6720 Voorschriften Beton – TGB 1990 Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1995)

NEN 6723 Voorschriften beton Bruggen (VBB 1995) Constructieve eisen en rekenmethoden

NEN 6722 Voorschriften beton – Uitvoering (VBU 2002)

(zie [www.nen.nl](http://www.nen.nl) voor de laatste versies)



## Termen en definities

actie	van buitenaf komende invloed op de constructie of constructiedeel; deze kan mechanisch (m.n. krachten en versnellingen), klimatologisch (temperatuur, wind enz.) of voortkomend uit het milieu (zee- of dooizouten) zijn
beheer	het geheel van werkzaamheden en processen dat dient om een zodanige toestand van een constructie te bereiken dat de huidige en eventueel voorziene prestaties op een betrouwbare wijze vervuld worden
betrouwbaarheid	waarschijnlijkheid dat een constructie(deel) gedurende een zekere periode presteert boven een vereist niveau (grenstoestand (= 1- kans op falen)
bruikbaarheidsgrenstoestand	grenstoestand met betrekking tot de bruikbaarheid van de constructie of het constructiedeel
capaciteit	vermogen van een constructie of constructiedeel om weerstand te bieden tegen de invloed van er op inwerkende acties
degradatie	ook wel aantasting; vermindering in de loop van de tijd van de eigenschappen van een bouw materiaal
duurzaamheid	capaciteit van een constructie of constructiedeel om in de loop van de tijd weerstand te bieden tegen degradatie
faaltempo	de kans op falen per tijdseenheid
falen	ongewenste situatie waarin de constructie of constructieonderdeel een grenstoestand / prestatie-eis heeft over- of onderschreden
functie	taak die een constructiedeel of constructie moet vervullen als de vereiste bijdrage aan de behoefte van een groter geheel
gedrag	de wijze waarop een constructie(-deel) reageert op veranderende inwendige of uitwendige acties
grenstoestand	grens die het gewenste gedrag van een constructie scheidt van het ongewenste gedrag

inspectie	éénmalig onderzoek in de tijd naar de toestand van een constructie(deel) ; een reeks inspecties in de tijd is echter een vorm van monitoren
levensloop	alle levensfasen van een constructie, beginnende bij de planfase tot het einde van de exploitatiefase
levensduur	de periode na de bouw gedurende welke de betrouwbaarheid van de constructie voldoet aan de eisen
monitoren	een reeks van gedragsbepalingen van een constructie in de tijd
onderhoud	het geheel aan maatregelen en activiteiten dat plaatsvindt om te zorgen dat een constructie(-deel) aan zijn prestatie-eisen zal blijven voldoen (preventief onderhoud) of om prestaties te herstellen omdat ze beneden (of boven) de gestelde eisen vallen (correctief onderhoud)
prestatie	de mate waarin een functie wordt vervuld, uitgedrukt in termen van gedrag, betrouwbaarheid en levensduur
risico	de kans op prestatieverlies vermenigvuldigd met de omvang van de bijbehorende schade; uitgedrukt als kosten
toestand	waarde van een prestatie op een specifiek tijdstip
uiterste grenstoestand	grenstoestand met betrekking tot het verlies van statisch evenwicht, zoals bezwijken, breken, wegglijden of omvallen



Betonconstructies hebben een eindige levensduur: in de loop van de tijd neemt de kwaliteit af. Prestatiegebaseerde levensduurberekeningen geven antwoord op de vraag hoe deze kwaliteit achteruitgaat en geven aan wanneer de levensduur ten einde is. Dit boek geeft stap voor stap een overzicht wat er allemaal bij levensduurberekeningen komt kijken. Daartoe worden alle levensloophasen van de constructie integraal meegenomen: planning, ontwerp, bouw én beheer.