



## Natte Kunstwerken van de Toekomst

Verlichten vervangingsopgave natte kunstwerken door monitoring



# Natte Kunstwerken van de Toekomst

Verlichten vervangingsopgave natte kunstwerken door monitoring

## Auteurs

Thomas Bles – Deltares  
Joost Bredeveld – Deltares  
Willy Peelen - TNO

December 2015

## Voorwoord

Het project 'Natte Kunstwerken van de Toekomst' is geïnitieerd vanuit het Ministerie van Economische Zaken in het kader van de TO2 regeling. Binnen het project wordt samengewerkt door drie kennisinstituten, te weten Deltares, TNO en MARIN.

Er is bij beheerders van natte kunstwerken een kennisbehoefte gericht op het optimaal functioneren van natte kunstwerken onder veranderende maatschappelijke en klimatologische omstandigheden. Het doel van het project is daarom kennis te ontwikkelen die leidt tot prioritering van, kostenbesparing bij en spreiding van investeringen in de vervangingsopgave en levenscycluskosten, zodat de vervangingsopgave van het natte kunstwerken areaal een zo groot mogelijke maatschappelijke waarde oplevert.

Voorliggende handreiking is een product van de samenwerking in 2015. Doel van de handreiking is om te laten zien hoe met monitoring een beter inzicht verkregen kan worden wanneer het einde van de technische levensduur van bestaande natte kunstwerken is bereikt. Zo draagt deze handreiking bij aan het uiteindelijke doel van het project Natte Kunstwerken van de Toekomst: een goede, maatschappelijk waardevolle, vervangingsopgave.

## Inhoudsopgave

1	INTRODUCTIE .....	5
1.1	PROBLEEMBESCHRIJVING .....	5
1.2	LEESWIJZER .....	6
2	MONITORING VAN NATTE KUNSTWERKEN .....	7
2.1	WAT WORDT ER VERSTAAN ONDER MONITORING .....	7
2.2	WAT MAG ER VERWACHT WORDEN VAN MONITORING VAN NATTE KUNSTWERKEN .....	8
2.3	INPASSING IN HET ASSET MANAGEMENT PROCES (RWS) .....	9
3	FAAL-, SCHADE- EN DEGRADATIEMECHANISMEN .....	10
3.1	EINDE TECHNISCHE LEVENSDUUR .....	10
3.2	STRUCTURERING VAN MECHANISMEN .....	11
3.3	INVLOED MECHANISMEN OP BELASTING EN STERKTE .....	11
3.4	ANALYSE FAALMECHANISME .....	12
4	VOORBEELDEN VAN MONITORINGSSYSTEMEN .....	15
4.1	MONITORSYSTEEM VOOR ALKALI-SILICA-REACTIE (ASR) IN EEN SLUIS .....	15
4.2	MONITORINGSSYSTEEM SLUISKOLK MET TOEGENOMEN BELASTING .....	16
4.2.1	<i>Probleembeschrijving</i> .....	16
4.2.2	<i>Vaststelling van opspaneffect achter kolkwanden</i> .....	17
4.2.3	<i>Model voor monitoring als levensduur-verlengende maatregel</i> .....	17
5	MONITORING ALS VERLICHTING VAN DE VERVANGINGSOPGAVE? .....	19
	BIJLAGEN .....	22
	BIJLAGE 1 SCHADE- EN DEGRADATIEMECHANISMEN NATTE KUNSTWERKEN .....	23
	BIJLAGE 2 STRUCTURERING FAALMECHANISMEN NATTE KUNSTWERKEN .....	24
	BIJLAGE 3 KOPPELING MEETGROOTHEDEN AAN MECHANISMEN .....	25
	BIJLAGE 4 VERSLAG WORKSHOP MONITORING .....	27

# 1

## Introductie

Voor u ligt de handreiking 'Verlichten vervangingsopgave natte kunstwerken door monitoring'. Dit document is vooral bedoeld voor beheerders en eigenaren van natte kunstwerken, maar bevat ook interessante informatie voor andere stakeholders op dit gebied.

Zoals de titel al weergeeft verknoopt deze handreiking een toepassingsgebied, natte kunstwerken, en een technologie, monitoren. Daarin wordt de toepassing nader gekaderd tot de vervangingsopgave van deze kunstwerken. Beslissingen in het kader van deze vervangingsproblematiek zijn bij uitstek gebaat bij kennis die de onzekerheid over de conditie en belastingen verkleint en het conditieverloop in de toekomst kan voorspellen. Monitoring kan deze informatie geven. Deze handreiking wil duidelijk maken dat monitoring nu al van meerwaarde is bij deze toepassing als hulpmiddel om de levensduur te verlengen en wil enthousiasmeren tot het verder ontwikkelen ervan. Dat laatste door voorzetten te geven tot het doen van proefprojecten, waarin de meerwaarde van monitoring gedemonstreerd en benut kan worden.

### 1.1 *Problembeschrijving*

In Nederland zijn natte kunstwerken (zoals schutsluizen, stuwen en gemalen) gebouwd met een verwachte levensduur voor de civiele delen van 100 jaar. Het uitgangspunt was om zo een voldoende robuust civiel 'chassis' te hebben dat gedurende de levensduur geen grote problemen te verwachten waren. Hierin onderscheidt de problematiek zich van het repareren of vervangen van onderdelen waarvan geaccepteerd is dat ze in de loop der jaren niet meer functioneren en daarmee aan het einde van hun levensduur zijn.

Uitgaande van een levensduurverwachting van 60-100 jaar staat de komende decennia de vervanging of grootschalige renovatie van ruim 250 natte kunstwerken op de agenda. Een opgave waarmee een miljardeninvestering gemoeid is en die enorme gevolgen gaat hebben voor het dagelijks verkeer en gebruik van de Nederlandse waterwegen.

## Handreiking monitoring

---

Het is van belang om deze enorme opgave hanteerbaar te maken en om ervoor te zorgen dat het areaal aan natte kunstwerken na vervanging en renovatie voldoet aan de veranderende criteria die de maatschappij en klimaatverandering aan ons stellen.

Specifieke informatie over de daadwerkelijke conditie van en belastingen op de civiele delen van de bestaande kunstwerken vormt een belangrijke grondslag voor prioritering in de vervangingsopgave. Hoe groot is de reserve in de constructie om ook de komende decennia de belastingen te weerstaan en een voldoende constructieve veiligheid te borgen? Echter veel informatie over de conditie van de civiele delen is niet bekend, er was immers zeer robuust gebouwd en dientengevolge was informatie daarover niet nuttig. Daardoor is er nu een gebrek aan concepten en middelen om deze conditie te bepalen en tot nut te maken voor de vervangingsbeslissingen. Ervaringen en kennis en kunde van monitoring - ook uit andere toepassingsgebieden - kunnen daarom helpen om de levensduur van kunstwerken te verlengen.

### 1.2 Leeswijzer

In deze handreiking wordt allereerst beschreven wat onder monitoring wordt verstaan en wat van deze technologie in het kader van de beschreven vervangingsproblematiek van natte kunstwerken verwacht mag worden. De interesse van een beheerder in monitoring komt voort uit een bestaand probleem of vraag. Het resultaat van een inventarisatie van de meest complexe mechanismen die spelen bij de vervangingsproblematiek zal worden gegeven, in de vorm van een lijst van schade- en degradatiemechanismen (al dan niet in combinatie met een belastingtoename, leidend tot een faalmechanisme). Daarop volgt een analyse van deze mechanismen met betrekking tot hun ernst (aard en omvang) en in hoeverre het al mogelijk is om zinnig aan deze mechanismen te meten. Om de haalbaarheid van monitoringssystemen te demonstreren worden enkele voorbeeldsystemen uitgewerkt. Tot slot wordt de vraag gesteld: wat nu?

# 2 Monitoring van natte kunstwerken

## 2.1 Wat wordt er verstaan onder monitoring

Er zijn diverse definities van monitoring in de praktijk beschikbaar (zie bijvoorbeeld NEN 6740:2006, Hermes en SBRCURnet richtlijnen 223 en 241). Gemene deler in deze definities is dat het gaat om periodieke waarnemingen waarmee gedrag en conditie van een constructie kunnen worden bepaald om gebruikt te worden voor beheer en onderhoud.

Voor de voorliggende handreiking, die ingaat op natte kunstwerken aan het einde van hun levensduur, wordt de volgende brede definitie van monitoring gehanteerd:

“Monitoren van natte kunstwerken is het beantwoorden van beheer- en onderhoudsvragen inclusief het voorspellen van einde levensduur van het kunstwerk door middel van:

- waarnemen en meten van zowel de constructie en onderdelen daarvan, als van de grond, grondwater en eventuele objecten of waterstanden in de omgeving en
- het op basis van de waarnemingsresultaten en/of meetresultaten vaststellen van de noodzaak van (constructieve) maatregelen of vervanging en van eventuele veranderingen in het gebruik van het kunstwerk.

Deze metingen kunnen een eenmalig karakter hebben, maar vaak zijn ook herhaalde metingen nodig om inzicht te krijgen in de staat van of belastingen op het kunstwerk. Daarnaast zijn voor goede interpretatie en toepassing van de metingen vaak ook modelberekeningen nodig.”

Concreet betekent dit, dat met metingen specifiek voor een nat kunstwerk inzicht wordt verkregen in de werkelijke (actuele) sterkte en belastingen, en dus het inzicht in de sterktegradatie in de tijd wordt vergroot. Beiden zijn van belang als nader wordt geanalyseerd voor welke onderdelen van natte kunstwerken monitoring wordt voorgesteld als een effectief en efficiënt middel om meer inzicht te verkrijgen in de staat van het kunstwerk. Dit inzicht is nodig om voorspellingen te kunnen

## Handreiking monitoring

---

doen over de restlevensduur van kunstwerken, alsmede om inzicht te geven in de belastingen die veilig toelaatbaar zijn als de functionele eisen voor het kunstwerk zijn gewijzigd in de tijd (toename belastingen).

Deze handreiking geeft geen aanbevelingen ten aanzien van het daadwerkelijk ontwerpen van monitoringsystemen. Daarvoor wordt verwezen naar de bestaande CUR richtlijnen [CUR 223 en 241], waarin als centraal uitgangspunt een risicobenadering wordt gehanteerd. Samengevat komt deze aanpak neer op het volgende:

- van onacceptabele risico's wordt vastgesteld wat de bijbehorende faalmechanismen zijn;
- van deze faalmechanismen wordt vastgesteld welke meetgrootheden nodig zijn om een interpretatie te maken;
- vervolgens worden eisen aan de metingen gesteld om inzicht te krijgen in deze meetgrootheden;
- op basis van deze eisen worden geschikte meetinstrumenten gekozen;
- en het monitoringsysteem kan worden ontworpen.

### 2.2 *Wat mag er verwacht worden van monitoring van natte kunstwerken*

Uit de gevoeligheidsanalyse van VONK [Nicolai, 2014] blijkt dat het tot vlak voor einde levensduur van het gehele kunstwerk economisch rendabel is om onderdelen als sluisdeuren of bewegingswerken nog te vervangen, ten opzichte van het vervroegd vervangen van het gehele kunstwerk. Daarom betreft toepassing van monitoring in het kader van deze handreiking, toepassing op de onderdelen zoals betonmuren, fundering en bodembescherming. Dit zullen wij verder 'het chassis' van het kunstwerk noemen. Binnen deze handreiking blijft met deze zelfde argumentatie monitoring ten behoeve van (regulier) onderhoud buiten beschouwing.

Samengevat mag er van monitoring in de geest van deze handreiking worden verwacht dat er inzicht wordt verkregen in einde technische levensduur van bestaande natte kunstwerken. Dit betekent concreet dat het volgende mogelijk wordt:

- Van papieren probleem naar realistische beschouwing: als een nat kunstwerk op basis van de norm wordt afgekeurd kan monitoring een uitkomst bieden om beter te beoordelen of afkeuring daadwerkelijk nodig is.
- Betere programmering van de vervanging: door monitoring wordt inzicht verkregen in de actuele sterkte en belastingen, en kunnen betere voorspellingen worden gedaan over degradatie in de toekomst. Omdat zo in de tijd kan worden voorspeld wanneer een nat kunstwerk niet meer voldoet, wordt het beter mogelijk om de vervanging te programmeren.
- Veilige benutting van het kunstwerk tot vervanging: Op het moment dat een nat kunstwerk is afgekeurd en er plannen worden gemaakt voor vervanging, dan brengt het blijven gebruiken van het object risico's met zich mee. Gezien het feit, dat natte kunstwerken als knooppunt fungeren in verschillende watersystemen, kan dat verantwoord zijn als deze risico's voldoende beperkt zijn of worden. Monitoring levert inzicht in de condities waaronder het kunstwerk alsnog veilig is te gebruiken tot het moment van vervanging.

Het staat voor de auteurs van deze handreiking buiten discussie dat monitoring niet alleen een technische aangelegenheid is. Om de bovenstaande doelen te behalen zullen de juiste personen in de beheerorganisaties voor de ontwikkelfase, implementatiefase en operationele fase moeten



## Handreiking monitoring

---

worden aangesproken en overtuigd. Deze vraag is ook voorgelegd aan de stakeholders aan de beheerkant in workshops en interviews. Ook zij gaven aan dat dit belangrijk was. Het is op moment van schrijven van deze handreiking nog niet duidelijk hoe een doelmatige toepassing van monitoring als levensduur-verlengende maatregel het beste kan worden georganiseerd. Wel worden de volgende algemene aanbevelingen gedaan:

- Een heldere taakverdeling betreffende de werkzaamheden is essentieel. [CUR 223] Het gaat hierbij om het ontwerp van het monitoringsysteem, uitvoeren en visualisatie van de metingen, interpretatie van de metingen en het schrijven van een vertaalslag van de technische analyse naar een praktisch bruikbaar advies op asset management niveau in de organisaties.
- Technisch adviseurs (geotechnici en constructeurs) in beheerorganisaties zijn in staat om een vertaalslag naar het management te maken m.b.t. de aansturing van de monitoring en het gebruik van de monitoringsresultaten. Maak hen daarom bewust van de mogelijkheden die monitoring biedt.
- Kosten en baten van de monitoring moeten duidelijk zijn (en de baten groter dan de kosten) wil monitoring worden toegepast. Houd daarnaast rekening met de asset management processen zoals die bij de beheerorganisaties bestaan bij het ontwerpen en inpassen van monitoring.

### **2.3 Inpassing in het asset management proces (RWS)**

De vervangingsopgave is een relatief nieuw onderwerp bij beheerorganisaties. Zij zijn doende dit een plek in hun organisatie en processen te geven. Zo is bij Rijkswaterstaat sinds enkele jaren het Programma Vervanging en Renovatie (V&R) ingericht dat zich richt op het in kaart brengen van aard, omvang en de consequenties van de vervangingsproblematiek en het organiseren van de noodzakelijke maatregelen. Daarmee wordt de problematiek enigszins apart gezet van het beheer en onderhoud van natte kunstwerken in de robuuste fase van hun leven. De situatie bij andere beheerders is bij de auteurs niet bekend. Monitoren wordt binnen dit V&R-programma gepromoot voor het veilig beschikbaar houden van een nat kunstwerk als knooppunt in verschillende watersystemen. De aanpak van ontwikkelen en implementeren van monitoren zoals in deze handreiking voorgestaan sluit goed aan bij deze toepassing.

# 3

## Faal-, schade- en degradatiemechanismen

### 3.1 *Einde technische levensduur*

Voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van (nieuwe of bestaande) kunstwerken worden de belastingen op en de sterkte van de constructie met elkaar vergeleken. Het criterium hierbij is dat de faalkans (dus de kans dat sterkte kleiner is dan de belasting) voldoende klein is gedurende de resterende levensduur van de constructie. Hierbij is de toelaatbare faalkans direct gerelateerd aan een betrouwbaarheidsindex ( $\beta$ ), die correspondeert met het minimale veiligheidsniveau dat wettelijk (in het Bouwbesluit en de Waterwet) wordt voorgeschreven. In de rekenkundige bepaling van de constructieve veiligheid worden onzekerheden in de sterkte en de belasting expliciet meegenomen door middel van het gebruik van rekenwaarden of met een probabilistische benadering.

Als het begrip 'einde technische levensduur' gelijk wordt gesteld aan het (rekenkundig) niet meer voldoen aan de vereiste veiligheid, dan kunnen op basis van deze werkwijze de uitdagingen rondom de einde levensduurproblematiek bij natte kunstwerken helder worden geduid.

Uit de definitie van de faalkans blijkt dat het einde van de technische levensduur kan worden bereikt

- doordat de sterkte in de tijd lager wordt dan waar in het ontwerp rekening mee is gehouden;
- doordat de belasting gedurende de ontwerplevensduur van de constructie groter wordt dan waar in het ontwerp rekening is gehouden.

In een robuust ontwerp wordt het einde van de technische levensduur ná het verstrijken van de ontwerplevensduur bereikt. Einde technische levensduur kan echter ook eerder worden bereikt. Doordat de belasting sneller toeneemt of de sterkte sneller afneemt dan in het ontwerp voorzien.

De constatering, dat een constructie rekenkundig niet aan de (in algemene zin) gestelde eisen voldoet, betekent niet per definitie dat deze constructie daadwerkelijk onveilig is, omdat vaak conservatieve (veilige) aannames worden gemaakt. In bepaalde gevallen kan het op papier plausibel worden gemaakt, dat een grotere rekenwaarde van de sterkte of een kleinere rekenwaarde van de



## Handreiking monitoring

---

belasting kan worden aangenomen. Zodoende kan mogelijk zonder verdere maatregelen toch rekenkundig worden aangetoond dat de veiligheid hoger is, en mogelijk wel voldoet.

*Stel dat de grondmechanische draagkracht van de fundering van het buitenhoofd van een sluis op basis van de grondsterkten ontleend aan een regionale proevenverzameling onvoldoende is. Door het uitvoeren van aanvullend laboratoriumonderzoek kan een lokale proevenverzameling worden opgebouwd, op basis waarvan de draagkracht van de fundering wel voldoende kan zijn.*

### 3.2 Structurering van mechanismen

Het voorspellen van het tijdstip waarop niet meer wordt voldaan aan de eisen met betrekking tot de constructieve veiligheid vormt een belangrijke uitdaging in de einde levensduurproblematiek. De (theoretische) kennisbasis over het ontstaan en het verloop van een faalmechanisme als gevolg van een schade- en/of degradatiemechanismen, al dan niet in combinatie met belastingtoenamen, schiet hierbij momenteel nog tekort. Waar een schademechanisme een direct nadelig gevolg is voor de sterkte, impliceert een degradatiemechanisme een tijdsafhankelijk (indirecte) afname van de sterkte. Een lijst van schade- en degradatiemechanismen is als bijlage 1 opgenomen.

*Een voorbeeld van een schademechanisme dat tot falen leidt is het instabiel worden van een talud, bij een bovenbelasting groter dan de (langs het maatgevende afschuifvlak te mobiliseren) schuifsterkte van de grond. Dit kan leiden tot het niet beschikbaar zijn van de vaargeul.*

*Een degradatiemechanisme dat tot falen kan leiden is het optreden van wapeningscorrosie bij de betonnen kolkwand van een schutsluis. Als de kolkwand vervolgens na verloop van tijd bezwijkt (door het overschrijden van het maximaal keerbare verval over de wand tussen grondwaterpeil en kolkpeil), dan kan de schutsluis zowel haar transportfunctie als waterkerende functie verliezen.*

Een nat kunstwerk bestaat uit verschillende componenten die onder maatgevende omstandigheden als gevolg van belastingtoenamen (door verandering in de omgeving, in het gebruik of van het watersysteem) en/of sterkte-afnamen (door schade- en degradatiemechanismen) kunnen falen. Nader ingedeeld naar de materialen waartussen het falen plaatsvindt, kunnen we spreken van:

- constructief falen<sup>1</sup> van civiele delen;
- geotechnisch falen van grond-constructie interactie<sup>2</sup> tussen civiele delen en ondergrond;
- grondmechanisch falen<sup>3</sup> van civiele delen;
- falen van aansluitconstructies tussen civiele delen en de omgeving.

Daarnaast kan een verdere structurering plaatsvinden op basis van de dominante faaloorzaak, dus de grootte van de belasting op en/of een de sterkte van civiele delen. Een gestructureerde lijst van belastingtoenamen en schade- en degradatiemechanismen staat in bijlage 2.

### 3.3 Invloed mechanismen op belasting en sterkte

De onderdelen van een nat kunstwerk staan dus onder invloed van verschillende belasting en sterkte componenten. Ten behoeve van een rekenkundige beoordeling worden voor de maatgevende omstandigheden grootten van belastingen en sterkten met een bepaalde mate van (on)zekerheid

---

<sup>1</sup> tekort aan moment-, dwarskracht- en/of normaalkrachtcapaciteit;

<sup>2</sup> tekort aan draagkracht funderingselementen (paalfundering, vloer, grond(water)kering);

<sup>3</sup> tekort aan grondmechanische sterkte (instabiliteit object, instabiliteit taluds);



## Handreiking monitoring

---

afgeleid. De toelaatbare mate van (on)zekerheid hangt samen met de vereiste betrouwbaarheid van de te beoordelen onderdelen. Desondanks kunnen de onderdelen, en daarmee belasting en sterkte componenten, gedurende de levensduur aan onvoorziene veranderingen worden blootgesteld.

---

*Door veranderingen aan het natte kunstwerk en/of het watersysteem waarvan het deel uitmaakt, of door een afwijkend gebruik van een nat kunstwerk (zoals de afvoer van water met een schutsluis), kunnen belastingen op onderdelen van het kunstwerk groter worden dan voorzien. Verder kan een ander verloop van schade- en/of degradatiemechanismen optreden, mede door grotere belastingen, waardoor de sterkte van onderdelen kleiner kan worden dan in het ontwerp voorzien.*

---

Feitelijk gezien zullen onvoorziene veranderingen van de belasting en sterkte componenten kunnen leiden tot een toename van de mate van (on)zekerheid, die vervolgens een verandering van de betrouwbaarheid van de rekenkundige beoordeling tot gevolg kan hebben.

Met monitoring kan inzicht worden verkregen in de veranderingen van belastingen en de snelheid van degradatie, waardoor de mate van onzekerheid van belasting en sterkte wordt verkleind. Dit kan leiden tot een verbeterde voorspelling van het moment waarop de verhouding tussen belasting op en sterkte van een onderdeel te klein is geworden om een voldoende veilige constructie te hebben.

Het feit, dat maatgevende omstandigheden zelden zullen optreden, maakt het lastig om het einde van de technische levensduur van een nat kunstwerk betrouwbaar te voorspellen. Er komen echter steeds geavanceerdere rekentechnieken voorhanden om hier passend mee om te gaan.

---

*Zo worden er in het beschouwen van de veiligheid tegen overstromen van waterkeringen rekentechnieken doorontwikkeld die het mogelijk maken om de faalkans van een dijk bij te stellen op basis van in het verleden geobserveerde belastingen waarbij deze niet is bezwaken (c.q. waarbij er een faalmechanisme niet is opgetreden). Op basis van het principe van "bewezen sterkte" kan de kans op lage dijksterktes worden verlaagd of zelfs uitgesloten, waardoor de faalkans kleiner wordt. Daarbij is het niet noodzakelijk dat een dijk zich heeft bewezen onder ontwerpcondities; elke geobserveerde overleefde belasting die de dijksterkte aanspreekt en relevant is voor faalmechanismen van de dijk kan in principe worden verwerkt. Een soortgelijke redenering is ook voor natte kunstwerken mogelijk.*

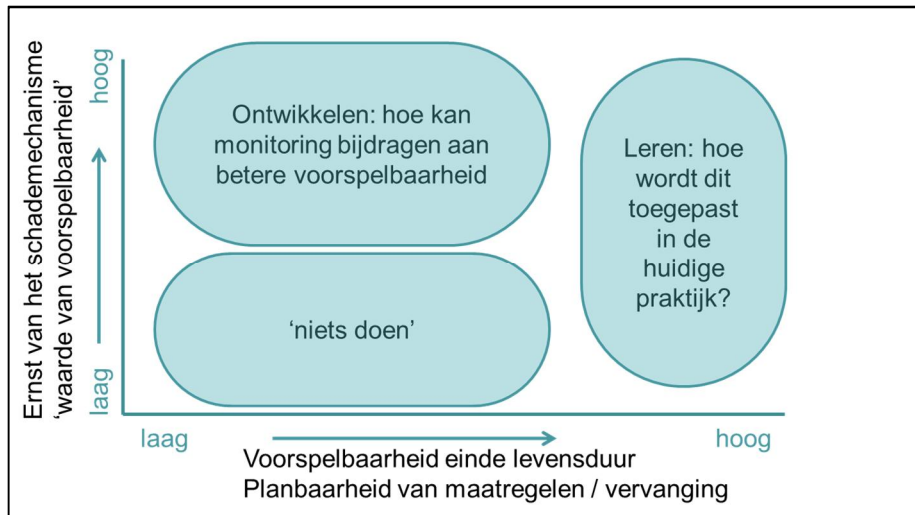
---

Uit de lijst van meest relevante schade- en degradatiemechanismen in bijlage 1, die gezamenlijk met een aantal experts is opgesteld, wordt duidelijk dat het aantal mechanismen omvangrijk is. Prioritering voor ontwikkeling en toepassing van monitoring is daarom gewenst.

Vervolgens is er een koppeling gemaakt tussen de lijst van schade- en degradatiemechanismen enerzijds en een lijst van meetbare (veranderingen van) belasting en sterkte componenten anderzijds. Deze koppeling is te zien in bijlage 3. Hieruit komt naar voren dat monitoring voor alle schade- en degradatiemechanismen in principe nuttige aanvullende informatie kan leveren.

### 3.4 Analyse faalmechanisme

In de vorige paragraaf is een inventarisatie gepresenteerd van een groot aantal schade- en degradatiemechanismen leidend tot falen van natte kunstwerken. Maar welke mechanismen zijn voor ontwikkelen en toepassen van monitoring in het kader van restlevensduur nu het meest belangrijk? Deze vraag is voorgelegd aan een aantal specialisten van RWS, Deltares en TNO gedurende een workshop met als doel nut en noodzaak van monitoring voor deze schade- en degradatiemechanismen te bepalen.



Figuur 3.1 Schematische weergave nut en noodzaak ontwikkeling monitoring

Daartoe werd aan de hand van een aantal vragen het volgende in kaart gebracht (zie figuur 3.1)

- ernst van het schade- of degradatiemechanisme;
- de mate waarin met huidige rekenmodellen, meet- en inspectiemiddelen informatie over het schade- of degradatiemechanisme kan worden verkregen.

Laaghangend fruit voor het ontwikkelen van monitoring is geïdentificeerd voor mechanismen die relatief ernstig zijn maar waarvoor al veel inspectiemiddelen beschikbaar zijn. Verder onderzoek en ontwikkeling is vooral zinvol voor mechanismen die ernstig zijn maar waar nog geen middelen voor beschikbaar zijn. Deze aanpak en de resultaten van de workshop zijn samengevat in bijlage 4.

Uit de workshop kwam naar voren dat in de voorspelbaarheid van de schade- en degradatiemechanismen een grotere spreiding is te zien dan in de ernst van de mechanismen. Dit kan worden verklaard doordat uiteindelijk elk mechanisme bij een kunstwerk kan leiden tot afkeuren. De voorspelbaarheid varieert echter wel sterk. Als meest ernstige schade- en degradatiemechanismen kwamen tijdens de workshop naar voren:

- betondegradatie (alkali-silica-reactie ASR)
- wapeningscorrosie beton onder waterstand
- corrosie van kwelschermen
- constructief falen door veranderde belastingen
- transport grondmateriaal door interne erosie (onderloopsheid)
- opdrijven van de constructie
- corrosie grond(water)kerende damwanden
- transport grondmateriaal door interne erosie (achterloopsheid)

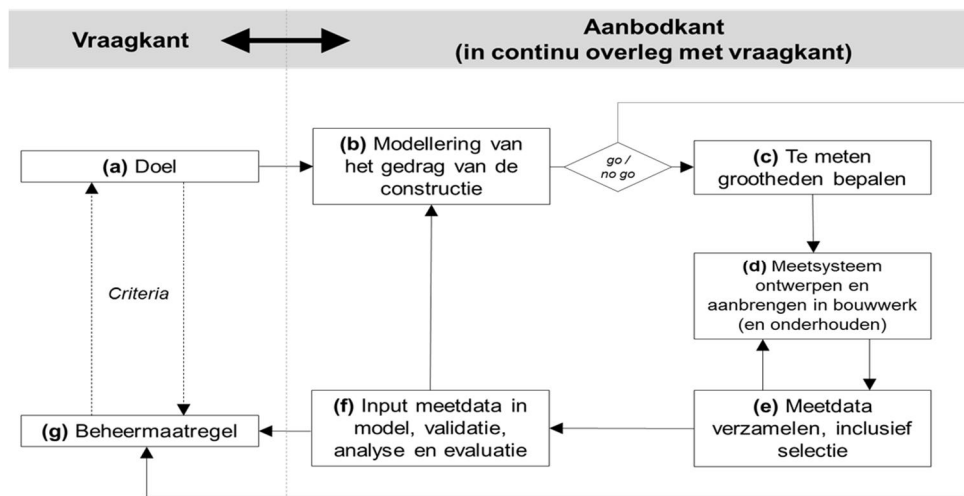
Van deze schade- en degradatiemechanismen zijn voor ASR en corrosie boven water al relatief veel inspectiemiddelen voorhanden, die voor monitoringssystemen ingezet kunnen worden. Dit zijn de mechanismen die als laaghangend fruit worden beschouwd. Corrosie van kwelschermen, onder- en

## Handreiking monitoring

achterloopsheid en (hydraulische) belastingen zijn geïdentificeerd als nog niet standaard meetbare mechanismen. Hier liggen dus kansen voor het gebruik van monitoring, omdat verwacht wordt dat met monitoring de voorspelbaarheid vergroot kan worden.

Uit de workshop bleek ook een behoefte aan het verkrijgen van meer informatie over hydraulische belastingen. Dit vooral in het kader van normbeoordelingen waarin er grote spreidingen in deze belastingen worden meegenomen. Door het introduceren van gemeten informatie in deze beoordelingen zal de spreiding naar verwachting worden verminderd. Monitoringsystemen die de belasting meten zijn meer generiek inzetbaar en hoeven niet alleen ingezet te worden bij kunstwerken met degradatieproblemen.

Nu bekend is waar kansen liggen voor gebruik van monitoring kan de ontwikkeling van de monitoringsystemen ter hand genomen worden. Raamwerken om dit te doen zijn beschikbaar. Zo is er bijvoorbeeld in SBRCURnet verband een zogenoemd 7 stappenplan ontwikkeld in CUR 241, waarbij de aansluiting tussen beheerdoelen en mogelijke beheermaatregelen centraal staat. Deze vormen de vraagkant in Figuur 3.2. Het (monitor) aanbod moet zo ontwikkeld of ingericht worden dat het het antwoord geeft op de vraagkant. In het algemeen behelst dit een modellering van het gedrag van de constructie, ook in termen van te meten grootheden, een meet- en dataacquisitie systeem en een validatie en analyse van de metingen.



Figuur 3.2 Stappenplan uit CUR 241

## 4 Voorbeelden van monitoringsystemen

Het waarom en waaraan van monitoren is nu beschreven. Maar kan het ook? Wat is de technische haalbaarheid en hoe groot is de effort die gemoeid is met het uitvoeren van monitoren. Dat wordt in dit hoofdstuk met twee voorbeelden duidelijk gemaakt.

### 4.1 *Monitorsysteem voor Alkali-Silica-Reactie (ASR) in een sluis*

In een ca. 80 jaar oude sluis in Nederland is ca. 10 jaar geleden onderzoek gestart naar de constructieve veiligheid naar aanleiding van zichtbare scheuren. De scheuren blijken door het degradatiemechanisme ASR (Alkali Silica Reactie) te zijn veroorzaakt. De mate waarin schade is geconstateerd was zodanig, dat op basis van een heel summiere constructieve beschouwing is geconcludeerd dat vervanging van de sluis nodig is.

Een aantal jaar is met dit gegeven niet veel gedaan. Vervolgens werd na een summiere beoordeling van een groot aantal kunstwerken voor deze sluis (op basis van de eerder getrokken conclusies) wederom geconstateerd dat de sluis moest worden vervangen, omdat de constructie door ASR is aangetast. De beheerder is daarop aan de slag gegaan met een nadere analyse van het probleem en de oplossingsrichtingen.

Er werd allereerst nagegaan of de aantasting door ASR zodanige constructieve consequenties heeft dat vervanging nodig is. Niet vervangen is in dit geval financieel en voor de scheepvaart een gunstige uitkomst, omdat de sluis goed functioneert. Het onderzoek is als volgt opgebouwd.

- Allereerst is het gedrag van de sluis berekend. Hiervoor is een rekenmodel van de sluis opgesteld. De berekeningen voorspelden een verplaatsing van de sluiswanden, die ook meetbaar zou moeten zijn tijdens schutten.
- Vervolgens zijn de verplaatsingen van de wanden gemeten die optreden bij het schutten. Het bleek dat de gemeten verplaatsingen veel kleiner waren dan de berekende waarden.
- Met behulp van de gemeten waarden zijn de onzekerheden in de aannamen van het rekenmodel beter begrepen en konden vooral de onzekerheden in het gedrag van de grond en in mindere

mate de vloer worden vermindert. Hiervoor is ook het gedrag van de grond berekend met een daarvoor geschikt model.

- Op deze manier zijn de aannamen in het oorspronkelijke rekenmodel verbeterd en is het mogelijk gebleken de verplaatsingen van de wand vrij goed te voorspellen met het rekenmodel.
- Met het rekenmodel is vervolgens een faalanalyse uitgevoerd, daarbij bleek dwarskracht in de wanden nabij de vloer maatgevend.
- Wel of niet falen van de constructie hangt daarom van de betonsterkte op die locatie af.
- De volgende stap in het onderzoek is de check of de betonsterkte daadwerkelijk voldoet aan de aanname die is gedaan en of in maatgevende doorsneden de aantasting van het beton door ASR voldoende beperkt is gebleven.

Uit deze case blijkt dat nadere gedetailleerde beschouwing van de schade, de constructieve consequenties, gedetailleerde modellering, relevante meetgegevens en een stapsgewijze aanpak daarin kan leiden tot de conclusie dat een technisch afgekeurde sluis toch aantoonbaar voldoet.

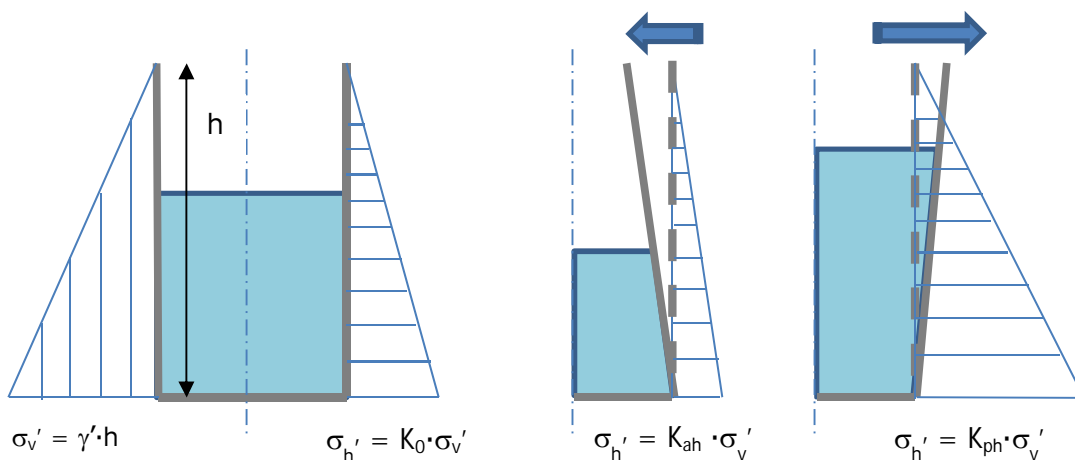
## 4.2 Monitoringssysteem sluiscolk met toegenomen belasting

### 4.2.1 Probleembeschrijving

In het ontwerp van grondkerende constructies speelt de belasting van de grond die tegen de wand rust een significante rol. Deze druk kan worden ingeschat door de verticale korrelspanning ( $\sigma_v'$ ) als gevolg van het effectieve gewicht ( $\gamma'$ ) van de grond naar een horizontale gronddruk te vertalen. In lijn met [NEN9997-1 2012] hangt deze 'gronddruk' onder meer af van de grootte en richting van de relatieve wandverplaatsing (zie [Figuur 4.1](#)):

- Als de wand ten opzichte van de grond niet verplaatst, dan wordt er over de neutrale gronddruk ( $K_0$ ) gesproken.
- Wandverplaatsingen van de grond af dan wel naar de grond toe leiden uiteindelijk tot de actieve gronddruk ( $K_{ah}$ ) respectievelijk de passieve gronddruk ( $K_{ph}$ ) op de wand.

Gronddrukken tussen de volledig actieve en passieve waarde treden op indien de wandverplaatsingen ten opzichte van de grond onvoldoende zijn om de grenswaarden te mobiliseren.



Figuur 4.1: Toelichting op neutrale ( $K_0$ ), actieve ( $K_{ah}$ ) en passieve ( $K_{ph}$ ) gronddruk op kolkwand door beweging wand



Ten gevolge van het schutten (en door temperatuurvariaties) zullen de kolkwanden afwisselend van de grond af (lege sluiscolk) en naar de grond toe (volle sluiscolk) bewegen. In het ontwerp dient er dan voor de resulterende gronddruk over de levensduur een passende (conservatieve maar realistische) inschatting te worden gemaakt. Uit praktijkcases<sup>4</sup> blijkt dat het 'klapperen' van de kolkwanden in de tijd kan leiden tot het oplopen van de gronddruk (het opspaneffect).

#### 4.2.2 Vaststelling van opspaneffect achter kolkwanden

Voor het analyseren van de sterkte van de betonnen sluiscolkwanden van de sluiscomplexen in de Maas bij Maasbracht en Born werd besloten om het opspaneffect te gaan monitoren. Voor het goed kunnen interpreteren van de monitoringsresultaten was het noodzakelijk om de actuele sterkte van de betonnen kolkwand (middels kernboringen en inspecties naar schade en eventuele beton-degradatie) vast te kunnen stellen. En in theorie zouden voor het monitoren van deze faaloorzaak bij een kolkwand de volgende grootheden moeten worden gemonitord:

- absolute vervormingen van de kolkwand;
- waterdrukken vanuit de sluiscolk op de kolkwand;
- grondwaterdrukken op de kolkwand;
- gronddrukken op de kolkwand.

Voor het direct meten van de laatstgenoemde driver is nog geen monitoringwijze voorhanden om dat zonder het (lokaal) verstoren van de grond te doen. Met deze constatering is in de echte case dan ook gekozen voor de volgende meetsensoren:

- absolute vervormingen van de kolkwand:
  - hellingmeetbuizen in de sluiscolkwanden;
  - theodolietmeting van de sluiswanden;
- waterdrukken vanuit de sluiscolk op de kolkwand:
  - waterpeilmetingen in de sluiscolk
- grondwaterdrukken op de kolkwand:
  - peilbuismetingen achter de kolkwand.

Daarbij zijn ook temperatuurmetingen (in de hellingmeetbuizen) verricht, om de invloeden van de temperatuur op de vervorming van de kolkwanden eruit te kunnen filteren.

#### 4.2.3 Model voor monitoring als levensduur-verlengende maatregel

Met monitoring kan ook een stap verder worden gezet door richting de toekomst voorspellingen te gaan doen over de restlevensduur van de kolkwanden. Om deze stap te zetten is het nodig om de betrouwbaarheid van de wand eenduidig en continu vast te kunnen blijven stellen. Hierbij is het van belang om een aantal drivers te blijven monitoren:

- constructieve sterkte en stijfheid van de kolkwand (met beproefde kernboringen);
- vervormingsbeeld van de kolkwand;
- verval over de kolkwand (verschil grondwaterstand en kolkpeil).

---

<sup>4</sup> "Sluiscolkwanden in Maasbracht en Born – Advies horizontale druk tegen sluiscolkwanden", Geodelft, kenmerk 425990-0010, versie 2 definitief, mei 2007;

## Handreiking monitoring

---

Op basis van deze uitgangspunten kan regelmatig de belasting vanuit de gronddrukken op de kolkwand worden bepaald en kan worden vastgesteld of de constructie voldoende veilig is. Zo wordt een continu beeld verkregen van de invloed van het schutten op het constructief bezwijken van de kolkwanden onder invloed van (veranderende) grond(water)drukken inclusief opspaneffect op de wand.

N.B. Om een voorspelling te kunnen doen over tot wanneer de toename van de horizontale gronddruk op de kolkwand acceptabel is, is een (tijdsafhankelijk) model nodig. Dit kan worden opgesteld op basis van het extrapoleren van de monitoringresultaten. Met dit voorspellingssysteem op basis van monitoring is het ook mogelijk geworden om andere invloeden op de belasting van de kolkwand te volgen. Door bijvoorbeeld klimaatverandering of veranderd peilbeheer kunnen grondwaterstanden toenemen of kolkpeilen lager worden. Of deze veranderde belastingen toelaatbaar zijn kan dan beter worden voorspeld.

## 5 Monitoring als verlichting van de vervangingsopgave?

Vervangingsbeslissingen van natte kunstwerken worden beter van het betrekken van de daadwerkelijke technische conditie van het kunstwerk en de daadwerkelijke belastingen op het kunstwerk. Vaak zijn deze gegevens maar beperkt aanwezig en moeten conservatieve aannames worden gemaakt. Ervaring met het verkrijgen en benutten van deze gegevens door middel van monitoring is beperkt.

Deze handreiking laat zien dat monitoren een haalbare technologie is om deze informatie in te winnen en dat deze methode geschikt is voor beheervragen in het kader van vervangingsbeslissingen. Samengevat betekent dit dat met monitoring:

- de veiligheid van kunstwerken, die in beoordelingen volgens de norm nu worden afgekeurd, alsnog kan worden aangetoond;
- ook voorspellingen kunnen worden gedaan over veiligheid in de toekomst, zodat de programmering van de vervangingsopgave kan worden onderbouwd
- en onderbouwing kan worden geleverd voor het veilig gebruik van een kunstwerk nadat tot vervanging is besloten tot het moment van vervanging

Vastgesteld is bij welke schade- en degradatiemechanismen (al dan niet in combinatie met een belastingtoename, leidend tot falen) monitoring geschikt is om te worden toegepast. Het object-specifieke beheerdoel en beschikbare maatregelen bepalen hoe de monitoring in een specifiek geval ingericht dient te worden. Dit betekent daarom nog niet dat monitoring een standaard aanpak is. Er zijn nog vragen die beantwoord moeten worden alvorens monitoring breed toegepast kan worden in de praktijk. Ontwikkelingen zijn nodig op de volgende vlakken:

- Om een monitoringstrategie effectief en efficiënt te ontwikkelen bij een kunstwerk dat (volgens de norm) is/wordt afgekeurd is nauw overleg tussen beheerders en monitor experts en uitvoerders nodig. Daartoe is een bereidheid nodig aan de kant van de beheerder om buiten de gebaande paden van beheer en onderhoud te treden.

## Handreiking monitoring

---

- Voor veel faal-/schade-/degradatiemechanismen is wel ongeveer bekend wat gemeten moet worden, maar een invulling hiervan bij een concrete case is nog nooit gedaan. Bij bijvoorbeeld achter- of onderloopsheid lijken onder andere peilbuismetingen een voor de hand liggende meettechniek. Maar algemene richtlijnen of best practices die aangeven waar de peilbuizen moeten worden geplaatst bestaan nog niet.
- Voor sommige degradatiemechanismen moeten nog modellen en sensoren worden ontwikkeld. Zo ontbreekt voor ASR op dit moment praktisch toepasbare modellen van de ontwikkeling van ASR in de tijd. Ook ontbreekt het aan sensoren waarmee non-destructief ASR of betoncorrosie (net) onderwater gemeten kan worden.
- De kosten en baten van monitoring moeten nog helder worden gemaakt. Als geen algemene conclusies te trekken zijn dan betekent dit dat per kunstwerk afgewogen moet worden of monitoring zinvol is. Het is echter redelijk te verwachten dat de winst van het uitstellen van de hinder en de investeringen, gemoeid met het vervangen van nat kunstwerk, snel opweegt tegen de kosten van het monitoren.
- Er is ervaring nodig hoe omgegaan moet worden met de resultaten van monitoring. Welke 'taal' moet er worden gesproken om richting het asset management van de beheerder met overtuigende argumenten te komen?
- Het voorspellen van het tijdstip dat niet meer wordt voldaan aan de eisen met betrekking tot de constructieve veiligheid vormt een belangrijke uitdaging in de einde levensduurproblematiek. Met name de (theoretische) kennisbasis over het ontstaan en verloop van schade en degradatiemechanismen, en daarmee de afname van de sterkte in de tijd, schiet hierbij tekort. Monitoring kan weliswaar gebruikt worden voor betere voorspellingen in de tijd, maar dan moet in bovenstaande eerst meer inzicht worden verkregen.

De weg vooruit ligt daarom in de samenwerking tussen beheerders en ontwikkelaars. Zo kunnen object-specifieke beheervragen worden uitgewerkt in termen van de conditie-informatiebehoefte en kan vervolgens worden vastgesteld hoe met monitorsystemen antwoord gegeven kan worden op deze vragen.

TNO en Deltares nemen het initiatief voor deze samenwerking en activeren, daarbij geholpen door de landelijke Rijkswaterstaatdienst GPO, in 2016 het netwerk van beheerders en andere direct betrokkenen. Samen met hen wordt rond objecten waarin de besproken problematiek (ASR, toegenomen belastingen) speelt, toegepast onderzoek vormgegeven gericht op het verkrijgen van inzicht in de huidige en toekomstige conditie van de objecten en de inzet van monitoring daarbij.

## Referenties

1. HerMes: Het rationele monitoring evaluatie systeem – eindrapport, Delft Cluster, Delft, 2003
2. CUR-rapport 223 'Richtlijn, Meten en monitoren van bouwputten–Instrument voor kwaliteits- en risicomanagement', Stichting CURNET, Gouda, 2010
3. CUR preadvies 241 'Intelligente constructies met ICT', Stichting CURNET, Gouda, 2012
4. SBRCURnet kennispaper 'Slimme constructies voor slim beheer en onderhoud – praktijkcases' <http://www.sbrcurnet.nl/producten/kennispapers/kennispaper-slimme-constructies-voor-slim-beheer-en-onderhoud-praktijkcases>
5. Nicolai, R.P., Rapportage "methodiek gevoeligheidstest natte kunstwerken", VONK, Rijkswaterstaat, juli 2014



## Bijlagen

### ***Bijlage 1 Schade- en degradatiemechanismen natte kunstwerken***

Op 27 augustus 2015 heeft een workshop plaatsgevonden met een vijftal experts waarin is gesproken over de mogelijkheden van monitoring in het kader van de vervangingsopgave van natte kunstwerken. Een verslag van deze workshop is als bijlage 4 opgenomen. Bij deze workshop is gebruik gemaakt van de volgende (mogelijk incomplete) lijst van schade- en degradatiemechanismen leidend tot een faalmechanisme bij natte kunstwerken:

- 1 transport grondmateriaal door interne erosie (achterloopsheid)
- 2 transport grondmateriaal door interne erosie (onderloopsheid)
- 3 erosie bodembescherming voor-/achterland
- 4 erosie bodembescherming in het kunstwerk
- 5 vervormingsverschil tussen civiele delen en omgeving onder water
- 6 vervormingsverschil tussen civiele delen en omgeving boven water
- 7 instabiliteit van taluds
- 8 aantasting funderingspalen door schimmels en bacteriën
- 9 aantasting funderingspalen door 'beestjes'
- 10 wapeningscorrosie beton onder waterstand
- 11 wapeningscorrosie beton boven waterstand
- 12 corrosie van ankerstaven/verankering
- 13 vermoeiing van staal
- 14 betondegradatie (alkali-silica-reactie, asr)
- 15 degradatie/verbrossing van de voegen bij metselwerk
- 16 degradatie/verbrossing van de stenen bij metselwerk
- 17 corrosie grond(water)kerende damwanden
- 18 transport grondmateriaal door grondkerende wanden
- 19 corrosie van kwelschermen
- 20 verborgen gebreken in wanden die zich pas later openbaren
- 21 verzakking van paalfundering (hoogteverlies kunstwerk)
- 22 horizontale vervormingen van paalfundering (plaatsvastheid kunstwerk)
- 23 vervormingsverschillen fundering (horizontaal/verticaal/rotatie, leidend tot scheurvorming kunstwerk)
- 24 vervormingen van wanden
- 25 opdrijven van de constructie
- 26 constructief falen door veranderde regelgeving
- 27 constructief falen door veranderde belastingen (bijvoorbeeld stootbelastingen)
- 28 verstopping van drainagesystemen die constructie beïnvloedt

## Bijlage 2 Structurering faalmechanismen natte kunstwerken

Het 'chassis' van een nat kunstwerk bestaat uit meerdere componenten die onder maatgevende omstandigheden als gevolg van ontoelaatbaar hoge belastingen (S) dan wel ontoelaatbaar lage sterkten (R), als gevolg van de schade- en degradatiemechanismen in bijlage 1, kunnen falen. Nader ingedeeld naar de materialen waartussen een faalmechanisme plaatsvindt, kunnen we spreken van:

- constructief falen<sup>5</sup> van civiele delen;
- geotechnisch falen van grond-constructie interactie<sup>6</sup> tussen civiele delen en ondergrond;
- grondmechanisch falen<sup>7</sup> van civiele delen;
- falen van aansluitconstructies tussen civiele delen en de omgeving.

Een verdere structurering van faalmechanismen kan plaatsvinden op basis van de faaloorzaken:

- constructief falen van civiele delen:
  - door veranderende grond(water)belastingen<sup>8</sup> (S) (25/27)
  - door veranderende hydraulische belastingen (S) (27)
  - door veranderde mechanische belastingen<sup>9</sup> (S) (27)
  - door veranderde regelgeving (S,R) (26)
  - door vervormingen van en vervormingsverschillen tussen onderdelen (S, R) (23/24)
  - door biologische aantasting<sup>10</sup> van funderingselementen (R) (8/9)
  - door corrosie van betonwapening (R) (10/11)
  - door corrosie van ankerstaven/verankering (R) (12)
  - door vermoeiing van staal (R) (13)
  - door betondegradatie, oftewel alkali-silica-reactie ASR (R) (14)
  - door degradatie/verbrossing van voegen metselwerk (R) (15)
  - door degradatie/verbrossing van stenen metselwerk (R) (16)
  - door corrosie van grond(water)kerende (dam)wanden (R) (17)
  - door verborgen constructieve gebreken (R) (18/20)
  - door corrosie van kwelschermen (R) (19)
- geotechnisch falen van grond-constructie interactie tussen civiele delen en ondergrond:
  - door verlies aan plaatsvastheid van funderingselementen<sup>11</sup> (S,R) (21/22)
- grondmechanisch falen van civiele delen:
  - door instabiliteit object als gevolg van achter- en/of onderloopsheid<sup>12</sup> (R) (1/2)
  - door erosie bodembescherming voor-/achterland (R) (3)
  - door erosie bodembescherming in het kunstwerk (R) (4)
  - door instabiliteit taluds (R) (7)
  - door materiaaltransport door grond(water)kerende wanden (R) (18)
  - door uitval van drainage (R) (28)
- falen van aansluitconstructies tussen civiele delen en de omgeving:
  - door vervormingsverschil tussen object(onderdeel) en omgeving (S) (5/6)

<sup>5</sup> tekort aan moment-, dwarskracht- en/of normaalkrachtcapaciteit;

<sup>6</sup> tekort aan draagkracht funderingselementen (paalfundering, vloer, grond(water)kering);

<sup>7</sup> tekort aan (on)gedraineerde grondsterkte (instabiliteit object, instabiliteit taluds);

<sup>8</sup> als gevolg van instabiliteit van grondlichamen, opdrijven, verstopping drainage;

<sup>9</sup> als gevolg van stootbelastingen, vervormingsverschillen;

<sup>10</sup> als gevolg van schimmels, bacteriën, fauna;

<sup>11</sup> als gevolg van verandering in wand- of schachtwrijving (toename negatieve kleef en/of afname positieve kleef);

<sup>12</sup> transport grondmateriaal langs (achterloopsheid) of onder (onderloopsheid) het object door interne erosie;



### ***Bijlage 3 Koppeling meetgrootheden aan mechanismen***

De haalbaarheid van het toepassen van monitoring als een levensduur-verlengende maatregel hangt af van de mate waarin het mogelijk is de faaloorzaken (dat wil zeggen: schade- en/of degradatiemechanismen, al dan niet in combinatie met een belastingtoename) tijdig met sensoren te kunnen signaleren. Daarbij wordt opgemerkt dat sterkte over het algemeen lastiger is te meten, omdat hiervoor indirecte metingen moeten worden uitgevoerd, terwijl vervormingen en belastingen makkelijker zijn te meten met directe metingen.

De volgende inventarisatie van meetbare grootheden is gemaakt:

- mechanische drivers:
  - (variatie in) waterdruk
  - (variatie in) grondwaterdruk
  - (variatie) in gronddruk
  - stromingsdruk water (laminair/turbulent)
  - stromingsdruk grondwater (laminair)
  - golfklappen water
  - dynamische belastingen (verkeer, aanvaar)
  - vervormingen (horizontale verplaatsing, verticale zakking)
  - vervormingsverschillen (hoekverdraaiingen)
- chemische drivers
  - aanwezige grondwater
  - aanwezige water
  - aanwezige zuurstof (concentratie)
  - aanwezige zout/chloride (concentratie)
  - aanwezige zuurgraad (pH-waarde)
  - temperatuur

Vervolgens is een koppeling gemaakt tussen de lijst van schade- en degradatiemechanismen enerzijds (zie bijlage 1) en de lijst van meetbare grootheden anderzijds, zie Figuur B3.1:



Handreiking monitoring

	grondwaterdruk (variatie)	(laminaire) stromingsdruk grondwater (materiaaltransport)	(laminaire) stromingsdruk water	turbulente stromingsdruk water	golflappen	aanwezigheid grondwater	aanwezigheid water	aanwezigheid zuurstof	temperatuur	vervormingsverschillen (grond-constructie)	statische belasting (bv effectief grondgewicht)	dynamische belasting (bv verkeer)	mechanische belasting	chemische belasting (zout, zuurgraad)
1 Transport grondmateriaal door interne erosie (achterloopsheid)	■													
2 Transport grondmateriaal door interne erosie (onderloopsheid)	■													
3 Erosie bodembescherming voor-/achterland			■	■										
4 Erosie bodembescherming in het kunstwerk			■	■										
5 Vervormingsverschil tussen civiele delen en omgeving onder water			■	■										
6 Vervormingsverschil tussen civiele delen en omgeving boven water			■	■	■									■
7 Instabiliteit van taluds	■	■									■			
8 Aantasting funderingspalen door schimmels en bacterien						■	■	■	■					
9 Aantasting funderingspalen door 'beestjes'						■	■	■	■					
10 wapeningscorrosie beton onder waterstand						■	■	■	■					■
11 wapeningscorrosie beton boven waterstand						■	■	■	■					■
12 corrosie van ankerstaven/verankering						■	■	■	■					■
13 vermoeiing van staal				■	■									
14 betondegradatie (alkali-silica-reactie ASR)						■	■							
15 degradatie/verbrossing van de voegen bij metselwerk						■	■			■				■
16 degradatie/verbrossing van de stenen bij metselwerk						■	■			■				■
17 corrosie grond(water)kerende damwanden						■	■	■	■					■
18 transport grondmateriaal door grondkerende wanden		■	■	■	■									
19 corrosie van kwelschermen						■	■	■	■					■
20 verborgen gebreken in wanden die zich pas later openbaren	■				■						■	■	■	
21 verzakking van paalfundering (hoogteverlies kunstwerk)	■	■									■	■	■	
22 horizontale vervormingen van paalfundering (plaatsvastheid kunstwerk)										■		■		
23 vervormingsverschillen fundering (horizontaal/verticaal/rotatie, leidend tot scheurvorming kunstwerk)										■		■		
24 vervormingen van wanden	■				■						■	■		
25 opdrijven van de constructie	■										■			
26 constructief falen door veranderde regelgeving														
27 constructief falen door veranderde belastingen (bijv. stootbelastingen)													■	
28 verstopping van drainagesystemen die constructie beïnvloedt	■					■		■	■					

Figuur B3.1: Meetbare drivers voor de verschillende schade- en degradatiemechanismen

### Bijlage 4 Verslag workshop monitoring

Op 27 augustus 2015 heeft een workshop plaatsgevonden met een vijftal experts waarin is gesproken over de mogelijkheden van monitoring in het kader van de vervangingsopgave van natte kunstwerken. Doel van de workshop was een prioritering te verkrijgen van schade- en/of degradatiemechanismen die, al dan niet in combinatie met een belastingtoename, tot een faalmechanismen leiden waarbij monitoring kansrijk lijkt, en om vast te stellen voor welke belasting en sterke componenten monitoring relatief eenvoudig kan worden gebruikt.

De volgende experts waren aanwezig bij de workshop:

- Ron Karelse, Rijkswaterstaat Zeeland
- Leo Klatter, Rijkswaterstaat GPO
- Dirk Jan Kiljan, Rijkswaterstaat GPO
- Wouter van der Wiel, IV-Infra
- Jos Wessels, TNO
- Frits van Tol, Deltares

### Aanpak

De workshop werd geïntroduceerd met behulp van Figuur B4.1. In deze figuur staat weergegeven wanneer monitoring nuttig kan zijn door gebruik te maken van de volgende twee assen:

- *Ernst van het mechanisme*: Hoe ernstiger een schade- of degradatiemechanisme is, hoe meer aandacht er aan het mechanisme gegeven moet worden.
- *Voorspelbaarheid van einde levensduur mechanisme*: Dit is de mate waarin er met huidige rekenmodellen, meet- en inspectiemiddelen informatie kan worden verkregen. Hoe groter de voorspelkracht van het schade-/degradatiemechanisme, hoe minder ontwikkeld hoeft te worden.

Als de voorspelbaarheid laag is en de ernst van de schade- en degradatiemechanismen is over het algemeen ook laag, dan loont het waarschijnlijk niet om hier monitoring voor te gaan ontwikkelen. Als de voorspelbaarheid echter laag is en de ernst over het algemeen hoog, dan is een betere voorspelbaarheid gewenst en kan monitoring mogelijk van meerwaarde. Ten slotte kan er geleerd worden hoe, bij goed voorspelbare mechanismen, dit wordt toegepast in de praktijk.



Figuur B4.1: Schematische weergave nut en noodzaak ontwikkeling monitoring



## Handreiking monitoring

---

Om de workshop verder te structureren zijn de voorspelbaarheid en ernst van schade<sup>13</sup> en degradatiemechanismen<sup>14</sup> verder gespecificeerd in deelvragen. Deze deelvragen zijn:

- Voorspelbaarheid schade- of degradatiemechanisme:
  - Zijn schade- en/of degradatiemechanismen aan de civiele constructies (leidend tot een faalmechanisme) met huidige methoden tijdig zichtbaar/aantoonbaar?
  - Is monitoring van belasting en sterkte componenten relevant voor het faalmechanisme op dit moment geschikt om inzicht te krijgen in einde technische levensduur?
  - Is het falen bros of ductiel?
  
- Ernst schade- of degradatiemechanisme:
  - Zijn er maatregelen mogelijk?
  - Bij hoeveel kunstwerken kan dit mechanisme spelen?
  - Wat is het belang van kunstwerken waar dit mechanisme kan spelen?
  - Hoe groot is de kans dat dit mechanisme leidt tot einde technische levensduur van het kunstwerk?

Deze vragen zijn beantwoord voor alle mechanismen die genoemd zijn in Bijlage 1, door een score te geven van 1 tot en met 4, conform de classificatie die in Tabel B4.1 staat genoemd. Ook is een onderlinge weging tussen de vragen vastgesteld, om op die manier uiting te geven aan het feit dat sommige deelvragen belangrijker zijn dan andere. De resultaten van deze weging staan eveneens in Tabel B4.1 weergegeven, tussen haakjes achter de gestelde vraag. Ook zijn de vragen in volgorde van belangrijkheid weergegeven (belangrijkste bovenaan).

Voordat begonnen is met het beantwoorden van de vragen zijn alle faal-, schade en degradatiemechanismen en vragen doorgesproken (en aangepast) met de deelnemers om een zo uniform mogelijk beeld bij de deelnemers te verkrijgen (en er op die manier voor te zorgen dat de antwoorden van de deelnemers met elkaar vergeleken konden worden).

### Resultaten

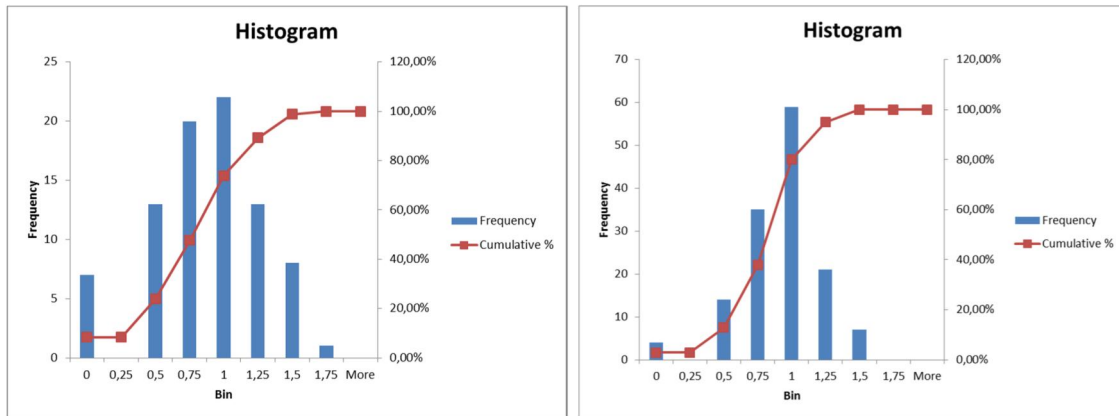
Hoewel de deelnemers tijdens de workshop aangaven dat het beantwoorden van de vragen lastig was, bleek na afloop toch een voldoende consistent beeld naar voren te komen. Daartoe is de standaardafwijking van de scores gebruikt. Deze staan in een histogram in Figuur B4.2 weergegeven. Hieruit kan worden afgelezen dat in ongeveer 80% van de gevallen de standaarddeviatie over de antwoorden kleiner is dan 1, waar scores van 1 t/m 5 gegeven konden worden.

---

<sup>13</sup> schademechanismen zijn een direct (tijdsafhankelijk) nadelig gevolg voor de sterkte;

<sup>14</sup> degradatiemechanismen impliceren een tijdsafhankelijke (indirecte) afname van de sterkte;

Handreiking monitoring



Figuur B4.2: Standaardafwijkingen antwoorden deelnemers workshop (links voorspelbaarheid, rechts ernst)



Handreiking monitoring

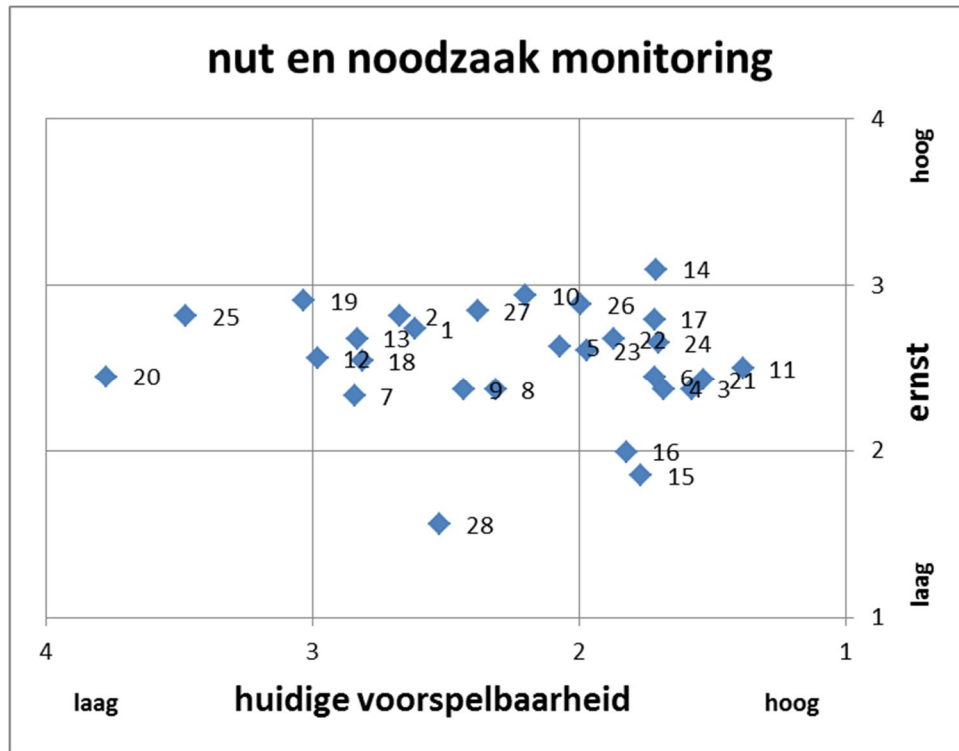
	score			
	1 'klein/onbelangrijk'	2	3	4 'belangrijk/grote gevolgen'
Voorspelbaarheid:				
Is het falen bros of ductiel? (relatieve gewing: 43%)	ductiel			bros
Is schade en/of degradatie aan de civiele constructies met huidige methoden tijdig zichtbaar/aantoonbaar? (relatieve gewing: 36%)	Altijd, maatregelen kunnen op tijd worden genomen of vervanging kan tijdig worden gepland	Meestal is schade/degradatie tijdig geconstateerd, maar er ontstaat grote druk op de planning	Vaak wordt schade/degradatie zo laat geconstateerd, dat noodmaatregelen nodig zijn, buiten de normale planning om	Nooit, schade/degradatie doet zich compleet onverwacht voor, maatregelen zijn dan niet meer te treffen
Is monitoring op dit moment geschikt om inzicht te krijgen in einde technische levensduur? (relatieve gewing: 28%)	monitoring is het belangrijkste middel om faalmechanisme en einde levensduur vast te stellen	monitoring draagt voor een belangrijk deel bij aan het inzicht in einde technische levensduur	monitoring wordt vrijwel niet gebruikt om inzicht te krijgen in einde technische levensduur	monitoring is op dit moment ongeschikt om faalmechanisme en einde levensduur vast te stellen
Ernst:				
Hoe groot is de kans dat dit mechanisme leidt tot einde technische levensduur van het kunstwerk? (relatieve gewing: 42%)	Het mechanisme leidt op zichzelf nooit tot einde technische levensduur van het kunstwerk	Het mechanisme kan tot einde technische levensduur leiden	Het mechanisme leidt vaak tot einde technische levensduur	Dit mechanisme is vrijwel altijd het maatgevende mechanisme; het veroorzaakt einde technische levensduur
Bij hoeveel kunstwerken kan dit mechanisme spelen? (relatieve gewing: 27%)	Het mechanisme is bij minder dan 10% van het kunstwerken areaal relevant	Het mechanisme is bij 10-50% van het kunstwerken areaal relevant	Het mechanisme is bij 50-90% van het kunstwerken areaal relevant	Het mechanisme is bij meer dan 90% van het kunstwerken areaal relevant
Zijn er maatregelen mogelijk? (niet vervangen) (relatieve gewing: 26%)	Maatregelen zijn eenvoudig te nemen zonder hinder voor gebruik van het kunstwerk en tegen lage kosten (tov vervanging)	Maatregelen zijn mogelijk, maar er ontstaat gebruikshinder en er zijn enige kosten mee gemoeid (tov vervanging)	Maatregelen zijn mogelijk, maar er ontstaat aanzienlijke gebruikshinder en er zijn grote kosten mee gemoeid (tov vervanging)	Er zijn geen maatregelen mogelijk; het faalmechanisme leidt tot einde technische levensduur
Wat is het belang van kunstwerken waar dit mechanisme kan spelen? (relatieve gewing: 15%)	Het systeem blijft vrijwel volledig functioneren bij uitval van het kunstwerk	Het systeem blijft na kleine aanpassingen nog functioneren	Het systeem blijft na grote aanpassingen nog functioneren	Uitval van het kunstwerk leidt tot disruptie van het gehele systeem

Tabel B4.1: Overzicht van gestelde vragen om inzicht te krijgen in voorspelbaarheid en ernst van mechanismen



## Handreiking monitoring

Alle schade-/degradatiemechanismen zijn vervolgens in de matrix geplot die te zien is in Figuur B4.3.



Figuur B4.3: nut en noodzaak monitoring (nummers komen overeen met mechanismen uit bijlage 1)

## Conclusies

De volgende conclusies worden getrokken. In de voorspelbaarheid van de schade- en degradatiemechanismen (al dan niet in combinatie met een belastingtoename, leidend tot falen) is een grotere spreiding te zien dan in de ernst van de schade- en degradatiemechanismen. Dit kan worden verklaard doordat uiteindelijk elk mechanisme bij een kunstwerk kan leiden tot afkeuren. De voorspelbaarheid varieert echter wel sterk.

Als meest ernstige schade- en degradatiemechanismen kwamen tijdens de workshop naar voren:

- betondegradatie (alkali-silica-reactie ASR) (14)
- wapeningscorrosie beton onder waterstand (10)
- corrosie van kwelschermen (19)
- constructief falen door veranderde belastingen (27)
- transport grondmateriaal door interne erosie (onderloopsheid) (2)
- opdrijven van de constructie (25)
- corrosie grond(water)kerende damwanden (17)
- transport grondmateriaal door interne erosie (achterloopsheid) (1)

Van deze mechanismen zijn voor ASR en corrosie boven water al relatief veel inspectiemiddelen voorhanden, die voor monitoringsystemen ingezet kunnen worden. Dit zijn de mechanismen die als laaghangend fruit worden beschouwd. Corrosie van kwelschermen, onder- en achterloopsheid en

## Handreiking monitoring

---

(hydraulische) belastingen zijn als nog niet standaard meetbare mechanismen geïdentificeerd, waarvan de voorspelbaarheid wel vergroot kan worden door de inzet van monitoring.

Tijdens de workshop bleek ook een behoefte aan het verkrijgen van meer informatie over hydraulische belastingen. Dit vooral in het kader van normbeoordelingen waarin er grote spreidingen in deze belastingen worden meegenomen. Het introduceren van gemeten informatie in deze beoordelingen zal de spreiding naar verwachting worden verminderd. Zulke systemen zijn minder objectspecifiek, kunnen worden ingezet voor kunstwerken met of zonder degradatieproblemen en ongeacht welk schade- of faalmechanisme.