



Richtlijn Beoordeling Herhalingsdeformatiemetingen Kunstwerken

Advisering over herhalingsdeformatiemetingen



Versienummer: 20180213

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat
Uitgevoerd door	Coen van der Vliet Brad Jonkman
Opmaak	
Datum	13 februari 2018
Status	Definitief
Versienummer	20180213

Inhoud

1	Inleiding	5	
1.1	Deformatiemetingen en de beoordeling daarvan	5	
1.2	Doelstelling richtlijn	5	
1.3	Beperkingen	5	
1.4	Samenhang met 'omgeving'	5	
1.5	Definities	5	
1.6	Referenties	8	
2	Deformatiemetingen	9	
2.1	Algemeen	9	
2.1.1	Nulmeting en herhalingsmeting	9	
2.1.2	Meetnet	9	
2.1.3	Aantal en frequentie van herhalingsmetingen	9	
2.1.4	Vastlegging van metingen	10	
2.1.5	x, y en z-metingen	10	
2.1.6	Voegmetingen	10	
2.2	Meetcondities	10	
2.3	Meetnauwkeurigheid en deformatiedrempel	10	
2.4	Gemeten deformaties	11	
3	Beoordeling deformaties voor bruggen	13	
3.1	Brondocumenten en relevante data	13	
3.2	Type constructies en onderdelen	13	
4	Beoordeling deformaties voor beweegbare bruggen	20	
4.1	Brondocumenten en relevante data	20	
4.2	Type constructies en onderdelen	20	
4.2.1	Type constructies	20	
4.3	Beweegbare bruggen en deformaties	22	
4.4	Faalmechanismen, grenstoestanden en daaraan gerelateerde deformaties	27	
5	Beoordeling deformaties voor tunnels	32	
5.1	Brondocumenten en relevante data	32	
5.2	Type constructies en onderdelen	32	
5.3	Tunnels en deformaties	34	
5.4	Faalmechanismen, grenstoestanden en gerelateerde deformaties	38	
5.5	Ontwikkeling van deformaties in de tijd	42	
6	Beoordeling deformaties voor natte kunstwerken	44	
6.1	Brondocumenten en relevante data	44	
6.2	Type constructies en onderdelen	44	
6.3	Sluizen en deformaties	47	
6.4	Faalmechanismen, grenstoestanden en gerelateerde deformaties	48	
6.5	Ontwikkeling van deformaties in de tijd	52	
7	Beoordelingsproces	53	
7.1	Inventarisatie	53	

7.2	Evaluatie van de waargenomen deformaties	53
7.3	Analyse van de maatgevende deformaties	53
7.4	Advisering op basis van de analyse	55
7.5	Rapportage beoordeling herhalingsmetingen	57

1 Inleiding

1.1 Deformatiemetingen en de beoordeling daarvan

Door middel van periodieke deformatiemetingen aan Rijkswaterstaatkunstwerken wordt de ontwikkeling van vervormingen in de tijd in kaart gebracht. Deze deformatiemetingen zijn van belang om te kunnen beoordelen of het kunstwerk zich gedraagt zoals dat tijdens het ontwerp is berekend, en om verplaatsingen van (delen van) het kunstwerk, bijvoorbeeld ten gevolge van verticale of horizontale gronddeformaties, vast te kunnen stellen. Op grond van de meetresultaten kan Rijkswaterstaat tijdig maatregelen treffen om gevaarlijke situaties en schade te voorkomen. Deformatiemetingen ondersteunen de visuele inspecties en leveren Rijkswaterstaat basisinformatie voor een zorgvuldig beheer en onderhoud van kunstwerken.

Een deformatiemeting geeft een beeld van de vervorming die is opgetreden sinds de zogenaamde nulmeting. Of deze vervorming indicatief is voor onverwachte en onbedoelde effecten die mogelijk tot falen, schade of bezwijken kunnen leiden zal moeten worden beoordeeld door een deskundige. Bij de beoordeling van een deformatiemeting wordt het vervormingsbeeld vergeleken met het verwachte constructiegedrag, worden eventuele verschillen indien mogelijk verklaard en wordt een advies gegeven over maatregelen en toekomstige metingen.

1.2 Doelstelling richtlijn

Deze richtlijn is opgesteld om de beoordeling van deformatiemetingen van kunstwerken te standaardiseren, zodat deformatiemetingen eenduidig, efficiënt en objectief kunnen worden beoordeeld.

1.3 Beperkingen

De beoordeling van deformatiemetingen kan alleen uitsluitend geven over de waarschijnlijkheid van toekomstig falen en mogelijke schade als dit gepaard gaat met waarneembare deformaties.

Deze versie van de richtlijn beperkt zich verder tot betonnen bruggen, beweegbare bruggen, tunnels en natte kunstwerken. De beoordeling van deformatiemetingen beperkt zich tot een bureaustudie, wat inhoudt dat de deformaties moeten worden beoordeeld op basis van beschikbare informatie als meet- en inspectierapporten en tekeningen.

1.4 Samenhang met 'omgeving'

Deze richtlijn voor de beoordeling van deformatiemetingen is niet los te zien van de 'Productspecificaties Deformatiemeting Kunstwerken' (versie: 15 februari 2018), van de Centrale Informatie Voorziening (CIV) van Rijkswaterstaat.

Wat betreft de beoordeling van mogelijk falen wordt verwezen naar het 'Analysekader vaste kunstwerken' [2] en 'Analysekader beweegbare kunstwerken'[10], van Rijkswaterstaat.

1.5 Definities

Brug	Kunstwerk over een weg, spoorweg, terreinverdieping, waterweg, watergang of waterloop, bestaande uit een
------	--

Beweegbare brug	<p>brugdek gesteund door pijlers en/of landhoofden, inclusief de brugdelen die aansluiten op de hoofdoverspanning (aanbruggen).</p> <p>Civil-bouwkundige constructie die onderdeel is van een weg bij een kruising met een waterweg, waarbij een deel van de constructie kan worden opengesteld voor passage van scheepvaart. Het beweegbare deel met zijn mechanische uitrusting behoren tot deze categorie, de rest van het object behoort tot een andere categorie (zie hiervoor definities van ROK-categorieën: Bruggen of Natte Kunstwerken [5])</p>
Deformatie	Een met behulp van meetapparatuur bepaalde relatieve verplaatsing van een meetpunt, ten opzichte van de bij de nulmeting vastgestelde referentiepositie van datzelfde meetpunt.
Deformatiedrempel	Een afgesproken grenswaarde. Een gemeten deformatie onder de deformatiedrempel wordt verondersteld geen werkelijke deformatie te zijn.
Herhalingsmeting	Inmeting van de geometrie van een kunstwerk, waarbij de relatieve positie van meetpunten ten opzichte van de nulmeting wordt bepaald.
Liggingsplan	Overzichtstekening van het kunstwerk met daarop positie en aanduiding van meetpunten in het meetnet.
Logaritmisch toenemende deformatie	Een ontwikkeling van een deformatie in de tijd waarbij de deformatietoename in opeenvolgende gelijke tijdsintervallen afneemt, zodat een verdubbeling van de reeds opgetreden deformatie wordt bereikt in het kwadraat van de reeks verstreken tijd. Wanneer de tijd langs de tijd-as logaritmisch wordt uitgezet, wordt een logaritmische deformatie-ontwikkeling weergegeven als een rechte lijn.
Meetnet	De verzameling meetpunten op een kunstwerk.
Monotoon toenemende deformatie	Een ontwikkeling van een deformatie in de tijd waarbij de deformatietoename in opeenvolgende gelijke tijdsintervallen gelijk blijft. Wanneer de tijd langs de tijd-as lineair wordt uitgezet, wordt een monotone deformatie-ontwikkeling weergegeven als een rechte lijn.
Nat kunstwerk	<p>Civil-bouwkundige constructie die onderdeel is van een vaarweg of waterweg met als doel regulering van de waterstanden, passage van schepen, hoogwaterbescherming, kruising van waterwegen of afvoer van water.</p> <p>Schutsluis: Kunstwerk met een beweegbare waterkering, dat de verbinding vormt tussen twee waterwegen.</p>

	<p>Stuw: Vaste of beweegbare waterkering voor het stuwen van water tot een gewenst peil.</p> <p>Sifon: Duiker die een ander water kruist, waarbij de bovenkant van de duiker onder de kruisende waterbodem ligt.</p>
Nulmeting	Eerste inmeting conform [1] van de geometrie van een kunstwerk aan de hand van meetpunten in een meetnet, waarvan de positie ten opzichte van referentiecoördinaten wordt vastgelegd.
Progressief toenemende deformatie	Een ontwikkeling van deformatie in de tijd waarbij de deformatietoename in opeenvolgende gelijke tijdsintervallen steeds groter wordt.
Rupseffect	Een monotoon toenemende deformatie waarbij constructieonderdelen verplaatsen ten gevolge van een cyclisch effect (bijvoorbeeld zomer-winter-cyclus) in combinatie met een verhindering (bijvoorbeeld vervuilde voegen). In de winter kan zich vuil verzamelen in openstaande voegen. Bij stijging van temperatuur kunnen de voegen niet meer volledig sluiten, zodat de constructieonderdelen elkaar zijdelings wegduwen. In de volgende winter gaat de voeg verder openstaan etc.
SLS	Serviceability Limit State (bruikbaarheidsgrenstoestand): toestand die overeenstemt met voorwaarden waarboven aan de voorgeschreven bruikbaarheidseisen aan de constructie of constructief element niet langer wordt voldaan.
Tunnel	Civil-bouwkundige constructie die onderdeel is van een weg bij kruising met een andere weg, spoorweg, waterweg of een terreinverdieping, waarbij grond en/of (grond)water moet worden gekeerd en/of een overdekt gedeelte van meer dan 80 m ontstaat voor de onderdoorgaande weg. Waar in dit document over een 'tunnel' wordt gesproken, is dit ook van toepassing op aquaducten etc.
ULS	<p>Ultimate Limit State (uiterste-grenstoestand): toestand samengaand met instortingen of met andere soortgelijke vormen van constructief bezwijken (komt in het algemeen overeen met het uiterste draagvermogen van een constructie of een constructief element).</p> <p>In de Eurocodes wordt onderscheid gemaakt tussen (onder meer) uiterste-grenstoestanden EQU (statisch evenwicht van constructies), STR (sterkte van constructieve elementen) en GEO (sterkte van constructieve elementen waarbij geotechnische belastingen en de weerstand van grond betrokken zijn).</p>

Vervorming Een vormverandering van een constructie, element of bouwdeel die gepaard gaat met rekken en/of spanningen in het beschouwde onderdeel.

1.6

Referenties

- [1] Productspecificaties Deformatiemeting Kunstwerken, Rijkswaterstaat Centrale Informatie Voorziening (CIV), 15 februari 2018.
- [2] Analyse kader vaste kunstwerken, Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 11 mei 2012.
- [3] Basisspecificatie Vaste Brug (versie 3.7, concept), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 1 maart 2011.
- [4] NEN 2767-4-2:2010, Conditie meting van bouw- in installatiedelen - Deel 4-2 Infrastructuur - Web applicatie voor de decompositie en gebrekenlijst, Nederlands Normalisatie-instituut, 1 december 2010.
- [5] Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken (versie 1.3), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 2 april 2015.
- [6] Meerkeuzematrix Voegovergangen RTD 1007-3, Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 1 april 2013.
- [7] Referentiedocument Viaduct (versie 5.0), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 20 december 2012.
- [8] Richtlijn Beoordeling Kunstwerken (versie 1.1), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 27 mei 2013.
- [9] Basisspecificatie Tunnel (versie 3.6.3, in bewerking), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 11 maart 2013.
- [10] Analyse kader beweegbare kunstwerken (versie 1.0, concept), Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud, Afdeling Instandhouding Constructies en Onderhoud, 6 mei 2014.
- [11] Brug- en Sluisstandaard (versie 1.1, vrijgegeven), RWS WVL, 09-12-2013.
- [12] Basisspecificatie Beweegbare bruggen (versie 4.1, concept), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 31 december 2014.
- [13] NEN 6786:2001/A1:2002+wijzigingsblad, Voorschriften voor het Ontwerp van Beweegbare Bruggen (VOBB)
- [14] Basisspecificatie Weginfrasysteem (versie 3.7), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, 30 november 2010.
- [15] Basisspecificatie Schutsluis (versie 4.0), Ministerie van Infrastructuur en Milieu – Dienst Infrastructuur, 31 mei 2012.

2 Deformatiemetingen

Dit hoofdstuk gaat in op de deformatiemetingen van kunstwerken en beschrijft die zaken die voor het begrip van de richtlijn en voor de beoordeling van deformatiemetingen van belang zijn. Voor een uitgebreide beschrijving van deformatie- en herhalingsmetingen, specificaties voor het opzetten van meetnetten en het uitvoeren en rapporteren van de metingen wordt verwezen naar de Productspecificaties Deformatiemeting Kunstwerken [1].

2.1 Algemeen

2.1.1 *Nulmeting en herhalingsmeting*

Een deformatie-meetcyclus bestaat uit een nulmeting en één of meer herhalingsmetingen. De nulmeting is in principe een onderdeel van het opleverdossier van nieuwe kunstwerken, maar bij oudere kunstwerken heeft de nulmeting niet zelden pas decennia na aanleg plaatsgevonden, of zijn de meetgegevens verloren gegaan.

Met de nulmeting wordt de actuele geometrie op het tijdstip van de meting vastgelegd, om als referentie te dienen voor latere herhalingsmetingen. Met herhalingsmetingen wordt de opgetreden deformatie ten opzichte van de nulmeting bepaald.

Bij deze metingen wordt zowel in het horizontale vlak (x, y) als in verticale richting (z) gemeten.

Bij de nulmeting is de z-meting een absolute meting, wat inhoudt dat de geometrie wordt gerelateerd aan externe NAP-referentiepunten. De x- en y-nulmeting is een relatieve meting, net als de x-, y- en z-herhalingsmetingen, wat inhoudt dat de meting wordt gerelateerd aan binnen het kunstwerk gelegen referentiepunten die naar verwachting gedurende de gehele meetcyclus stabiel zijn.

2.1.2 *Meetnet*

In de Productspecificaties Deformatiemeting Kunstwerken [1] is een standaard-opzet voor het meetnet opgenomen. Het meetnet wordt in de meetrapportages opgenomen in de vorm van een liggingplan. Op basis van het liggingplan of van expliciete vermelding in het meetplan kan worden vastgesteld of er bijzondere meetpunten zijn. Dit kunnen extra meetpunten zijn op verzoek van de ontwerper of meetpunten die na verloop van tijd zijn bijgeplaatst naar aanleiding van meetresultaten of inspectieresultaten.

Bijzondere meetpunten verdienen bijzondere aandacht bij de beoordeling van herhalingsmetingen.

2.1.3 *Aantal en frequentie van herhalingsmetingen*

Standaard wordt na de nulmeting één herhalingsmeting uitgevoerd na ongeveer een jaar. Of de metingen daarna worden gecontinueerd hangt af van de beoordeling van de herhalingsmeting, ondersteund door eventuele inspectieresultaten.

Wanneer uit de beoordeling van een herhalingsmeting en uit inspecties geen noodzaak blijkt om de metingen te continueren kan besloten worden de herhalingsmetingen met een lagere frequentie uit te voeren of op te schorten.

Inspectieresultaten en (voorgenomen) werkzaamheden aan of in de nabijheid van kunstwerken kunnen aanleiding zijn om te besluiten de herhalingsmetingen te hervatten of te intensiveren.

In het geval van bijzondere of gevoelige kunstwerken wordt vaak standaard periodiek een herhalingsmeting uitgevoerd.

De frequentie van herhalingsmetingen is gekoppeld aan de aard en gevoeligheid van het kunstwerk (hooguit eens per drie jaar voor reguliere constructies, tot eens per jaar voor gevoelige constructies), en van de aard van de optredende deformaties (rekening houdend met bijvoorbeeld logaritmisch toenemende geotechnische deformaties).

Bij onverwacht snel toegenomen deformaties kan een op korte termijn uit te voeren herhalingsmeting nodig zijn om de beoordeling te valideren. Wanneer een periodiek ingemeten constructie al jaren zeer stabiel is kan worden geadviseerd de herhalingsmetingen met een lagere frequentie uit te voeren of op te schorten.

2.1.4 *Vastlegging van metingen*

Herhalingsmetingen worden vastgelegd in een voorgeschreven format, dat is vastgelegd in de Productspecificaties Deformatiemeting Kunstwerken [1].

2.1.5 *x, y en z-metingen*

Bij een herhalingsmeting is het mogelijk dat niet alle meetpunten in alle richtingen worden ingemeten.

x- en y-deformaties worden in de rapportage uitgedrukt in mm zonder decimaal, z-deformaties in mm met één decimaal.

2.1.6 *Voegmetingen*

Conform [1] dient de voegafstand (de afstand tussen 2 deformatiemeetpunten aan weerszijden van de voeg) rechtstreeks te worden bepaald met een schuifmaat of meetband. Indien het niet mogelijk is deze afstand rechtstreeks te meten, is na overleg met de opdrachtgever toegestaan de voegafstand af te leiden uit de xy-gegevens.

2.2 *Meetcondities*

Temperatuursverschillen hebben invloed op deformaties. Voegopeningen zijn direct gekoppeld aan de temperatuur van de constructie; verticale en horizontale vervormingen kunnen direct samenhangen met een temperatuurgradiënt over de dikte van een kunstwerk. De weersomstandigheden zijn opgenomen in de meetrapportage en dienen te worden meegenomen bij het verklaren van gevonden 'deformaties'.

2.3 *Meetnauwkeurigheid en deformatiedrempel*

De precisie van de ingemeten coördinaten, en dus van de gemeten deformaties, hangt voor een belangrijk deel af van de nauwkeurigheid van de meetinstrumenten en het ingerichte meetnet. De nauwkeurigheid van de instrumenten is opgenomen in het meetrapport. De minimale precisie van de ingemeten coördinaten is in de Productspecificaties Deformatiemeting Kunstwerken vastgelegd, en bedraagt

- $\sigma_z \leq 1,25 \text{ mm}$;

- σ_x en $\sigma_y \leq 2,5$ mm.

Daarnaast wordt voor de beoordeling van gemeten deformaties een zogeheten deformatiedrempel gehanteerd. Deze is gelijk aan 5 mm voor verticale vervormingen (z) en gelijk aan 10 mm voor vervormingen in het horizontale vlak (x, y). Wanneer vervormingen kleiner dan de deformatiedrempel zijn gemeten wordt aangenomen dat geen significante vervormingen zijn opgetreden. De deformatiedrempel heeft dus alleen een meettechnische betekenis en is geen constructieve grenswaarde.

De hier gegeven precisie-eisen en deformatiedrempels zijn de standaardwaarden conform de Productspecificaties Deformatiemeting Kunstwerken [1]. In overleg met de opdrachtgever van de metingen kunnen afwijkende waarden zijn bepaald. Zie hiervoor de meetrapportage.

2.4

Gemeten deformaties

De gerapporteerde deformatiewaarden resulteren niet altijd in vervormingen. En niet alle daadwerkelijke vervormingen leiden tot schade en mogelijk falen.

Van non-deformatie kan sprake zijn bij:

- Waarden onder deformatiedrempel
- Meetfouten

Van een meetfout kan bijvoorbeeld sprake zijn bij

- een verplaatsing die sterk afwijkt van de verplaatsingen van nabijgelegen punten. Met name wanneer de meetpunten op hetzelfde constructie-onderdeel liggen als het afwijkende punt en geen scheuren of andere schade wordt waargenomen is waarschijnlijk sprake van een onjuiste meting.
- een onjuiste nulmeting van een specifiek punt. Een onjuist gerapporteerde waarde in de nulmeting zal bij elke herhalingsmeting een afwijkende waarde geven voor het betreffende meetpunt.
- verplaatsing van een referentiepunt. Omdat herhalingsmetingen relatieve metingen zijn is dit lastig te detecteren. Wanneer een punt dat geacht wordt in de tijd neerwaarts te verplaatsen juist opwaarts verplaatst kan sprake zijn van een zakking van een referentiepunt. Dit kan worden achterhaald door voor de referentiepunten een absolute herhalingsmeting uit te laten voeren.

- Globale deformatie

Wanneer alle punten op een constructie-onderdeel evenveel verplaatsen is weliswaar sprake van deformatie, maar deze gaat niet gepaard met spanningen in de constructie. Hetzelfde geldt wanneer alle punten gezamenlijk verplaatsen en/of roteren als 'star lichaam'. Vanzelfsprekend moet voor deze globale deformatie wel worden nagegaan wat de oorzaak is, en of de constructie zijn functies zal kunnen blijven vervullen.

Met betrekking tot deformaties moet onderscheid gemaakt worden tussen

- Deformatie gekoppeld aan een bezwijkmechanisme
 - Buiging
 - Dwarskracht (bros mechanisme, wordt nauwelijks vooraf aangekondigd door vervormingen en zal dus slecht met deformatiemetingen kunnen worden voorspeld)
 - Geotechnisch falen

- Overige deformaties
 - Temperatuurvervormingen
 - Krimp en kruip
 - Voorspanverliezen
 - Tijdsafhankelijk grondgedrag
 - Vervormingen ten gevolge van omgevingsveranderingen (verandering van gebruik, terreinophoging, etc.)
 - Calamiteiten (aardbeving, aanrijding/aanvaring)

Niet altijd is het onderscheid goed te maken. Verplaatsingen in de grond kunnen het gevolg zijn van tijdsafhankelijk gedrag (ontwikkelen draagvermogen na aanleg, nazakken staalfundering), maar ook de opmaat vormen tot geotechnisch bezwijken. Een globale deformatie kan wijzen op een blijvende onbalans in gronddrukken (bijvoorbeeld bij een scheve kruising) of op het wandelen van een constructie-onderdeel ten gevolge van een vervuilde voeg of door opgespannen grond (rupseffect). Door de deformatiemetingen te combineren met de inspectiegegevens en de constructiegegevens (zie hoofdstuk 3) kan meestal het onderscheid tussen relevante en irrelevante deformaties worden gemaakt.

3 Beoordeling deformaties voor bruggen

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van herhalingsmetingen en de beoordeling van de staat van het kunstwerk op basis van de resultaten daarvan. In paragraaf 3.2 wordt eerst ingegaan op typen constructies en onderdelen. In paragraaf 3.3 wordt ingegaan op deformaties die samenhangen met falen en overige deformaties. Paragraaf 3.4 gaat in op de ontwikkeling van deformaties in de tijd.

3.1 Brondocumenten en relevante data

Bij de bureaustudie dient onderstaande informatie, indien beschikbaar, te worden geraadpleegd:

- Meetrapportages;
- Kunstwerkgegevens (DISK-paspoort);
- (Besteks)tekeningen;
- Historie (wijzigingen kunstwerk, gebruik of omgeving);
- Inspectierapporten;
- Onderzoeksrapporten;
- Geotechnisch advies;
- Logboek / Technisch Constructie Dossier (beheerder).

In de rapportage van de beoordeling van de herhalingsmeting dient vermeld te worden welke informatie ontbreekt.

3.2 Type constructies en onderdelen

3.2.1 *Type constructies*

Kunstwerken van Rijkswaterstaat hebben verschillende benamingen – soms zijn er verschillende benamingen voor eenzelfde type kunstwerk. In de Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken [5] is aangegeven in welke categorieën kunstwerken zijn ingedeeld.

De categorie bruggen heeft één ding gemeen: ze hebben alle een dek dat statisch bepaald of statisch onbepaald kan zijn uitgevoerd.

Per type kunnen bijzondere aandachtspunten van belang zijn met betrekking tot de beoordeling van deformaties. Zo kunnen betonnen bruggen naar hun dektype verder worden onderverdeeld in drie subtypen:

- Prefab voorgespannen dek;
- Ter plaatse gestort voorgespannen dek;
- Ter plaatse gestort gewapend dek.

3.2.2 *Elementen en bouwdelen*

Voor de decompositie van kunstwerken wordt aangesloten bij NEN 2767, waar sprake is van *elementen* en *bouwdelen*, zie NEN 2767-4-2:2010 [4].

Deze decompositie is van belang om op systematische wijze mogelijke oorzaken en gevolgen van waargenomen deformaties te kunnen inventariseren.

Een brug kan worden gedecomposeerd in onderstaande elementen en bouwdelen:

- Fundering

- Palen
- Vloer/balk
- Hoofddraagconstructie
 - Dwarsdrager
 - Langsligger
 - Plaatveld
 - Voegloze overgang
- Kerende constructie
 - Combiwand
 - Damwand
 - Keermuur
 - Sloof
 - Vleugelwand
- Oplegging¹
 - Stalen oplegging
 - Oplegblok
- Rijvloer
- Schampkant
 - Randelement
 - Schampstrook
- Steunpunt
 - Landhoofd
 - Pijler
- Talud
- Voegovergang
 - Afdichtingsprofiel
 - Rij-ijzer²

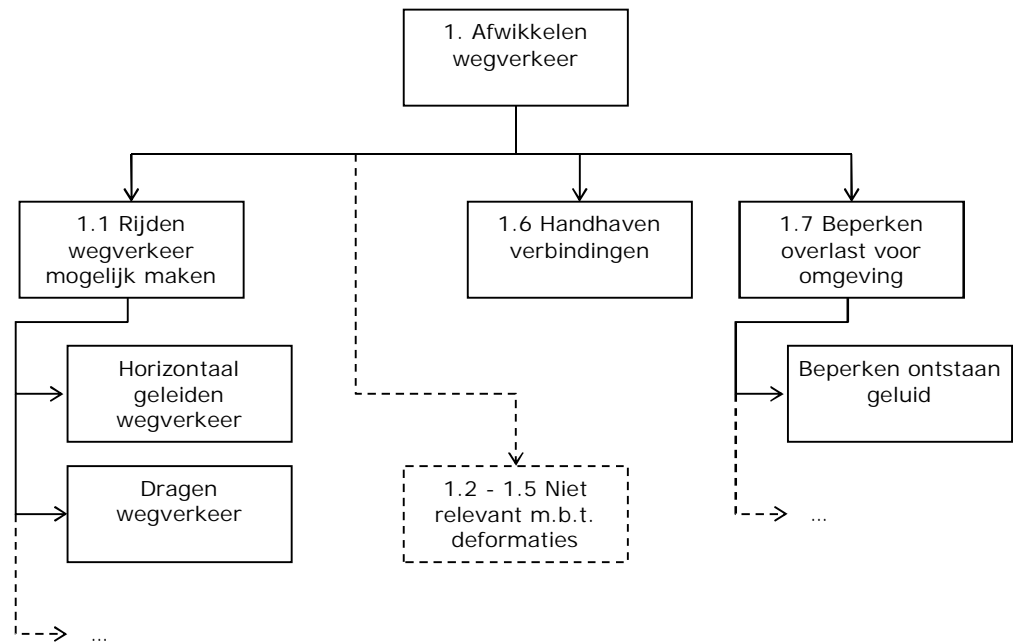
3.3 Faalmechanismen, grenstoestanden en gerelateerde deformaties

3.3.1 *Falen: definitie en faalmechanismen*

In de systematiek van het Analyse kader vaste kunstwerken [2] is sprake van falen wanneer het kunstwerk zijn functies niet meer (in voldoende mate) kan vervullen. De voor betonnen kunstwerken relevante functies zijn ontleend aan de netwerkfuncties van het hoofdwegenet (zie Basisspecificatie Vaste Brug [3]) en weergegeven in onderstaande figuur.

¹ NEN 2767 maakt hier melding van de bouwdelen oplegbalk, oplegblok, oplegtafel en oplegging. Oplegbalk en - tafel zijn hier weggelaten. Oplegging is vervangen door stalen oplegging, om onderscheid te maken met het (rubber) oplegblok.

² Met rij-ijzer wordt hier het stalen onderdeel van de voegconstructie bedoeld. Voor een volledig overzicht van voegovergangstypen wordt verwezen naar de Meerkeuzematrix Voegovergangen, [6].



figuur 1: Functies betonnen kunstwerken.

Functie 1.1: Rijden wegverkeer mogelijk maken

Een object faalt als de technische staat van het object er toe leidt dat

- de ontwerpcapaciteit van de rijksweg niet beschikbaar is;
- de ontwerpsnelheid van het verkeer op de rijksweg niet gerealiseerd kan worden;
- een lastbeperking ingesteld is.

Functie 1.6: Handhaven verbindingen

Een object faalt als de technische staat van het object er toe leidt dat

- kruisende verbinding niet beschikbaar is voor alle toegestaan verkeer (weg- en/of scheepvaartverkeer);
- de ontwerpcapaciteit van de kruisende verbinding niet beschikbaar is;
- de ontwerpsnelheid van het verkeer op de rijksweg niet gerealiseerd kan worden.

Functie 1.7: Beperken overlast voor omgeving

Een object faalt als de technische staat van het object er toe leidt dat

- de geluidsproductie te hoog is.

Deze definitie van falen sluit aan bij de kerntaken van Rijkswaterstaat. Met het oog op de analyse van deformatiemetingen kunnen de faalmechanismen richtinggevend zijn voor de beoordeling van de ernst van waargenomen deformaties.

Bovenstaande beschouwing van falen en faalmechanismen betreft het kunstwerk als geheel. Ook op een lager niveau kan falen worden gedefinieerd. Voor faalmechanismen van elementen en bouwdelen wordt verwezen naar het Referentiedocument Viaduct [7].

3.3.2 *Grenstoestanden*

Paragraaf 3.3.1 presenteert faalmechanismen gerelateerd aan functies van objecten en samenhangend met het gebruik ervan. Een andere benadering is een beoordeling in het kader van grenstoestanden. In de huidige praktijk van constructieve beoordeling van kunstwerken worden twee grenstoestanden onderscheiden:

- uiterste grenstoestand (ULS: *STR* en *GEO* in de Eurocodes), waarvan overschrijding inhoudt dat het kunstwerk rekentechnisch niet sterk genoeg is. Gerelateerde mechanismen zijn bijvoorbeeld buigbreuk, afschuifbreuk en geotechnisch falen;
- bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS), waarvan overschrijding inhoudt dat het gebruik van het kunstwerk belemmerd wordt (bijvoorbeeld door vervormingen), of dat de sterkte op termijn kan afnemen door aantasting van het materiaal (ten gevolge van bijvoorbeeld scheurvorming).

Het overschrijden van de SLS-criteria gaat meestal gepaard met falen in termen van functieverlies, maar niet altijd: een ernstig gescheurde constructie kan in principe onverminderd comfortabel zijn in gebruik, maar op termijn een gevaar betekenen voor de sterkte.

SLS en ULS zijn rekentechnische grenstoestanden. Doordat bij de toetsing aan deze grenstoestanden een zekere veiligheid wordt gehanteerd betekent overschrijding nog niet dat direct van functieverlies sprake is. Ook een constructie die reken-technisch bezwaken is kan voor het oog zijn functies prima vervullen.

Dit geeft aan dat herhalingsmetingen en inspecties maar tot op zekere hoogte voorspellend kunnen zijn ten aanzien van de mate waarin een kunstwerk in de toekomst zijn functies kan blijven vervullen.

3.3.3 *Deformaties*

Onderstaande tabel geeft een niet uitputtend overzicht van deformaties die indicatief kunnen zijn voor (aanstaand) functieverlies of overschrijden van grenstoestanden. Of deformaties ernstig zijn of niet hangt af van de grootte; het criterium verschilt van geval tot geval. Een steunpuntszetting van 10 mm zal weinig problemen opleveren in termen van vlakheid of afwatering, terwijl een even grote verticale verschilverplaatsing over een voeg het rijcomfort aanzienlijk zal verlagen, kan leiden tot meer geluid en zal leiden tot een kortere levensduur van de voegovergang. Voor achtergrondinformatie over onderdelen als voegovergangen en opleggingen wordt verwezen naar het Referentiedocument Viaduct [7].

tabel 1: Relatie tussen deformatie en falen.

Deformatie	Oorzaak	Gevolg	Functieverlies betreft	Grens-toestand
Doorbuiging dek	<ul style="list-style-type: none"> - Onvoldoende sterkte dek - Scheurvorming - Kruip - Afname van voorspanning (spanverliezen, aantasting voorspan-systeem) 	Onvlak oppervlak	Rijden wegverkeer mogelijk maken	SLS
		Slechte afwatering		
		Onvoldoende doorrijhoogte	Handhaven verbindingen	SLS
		Aantasting	Dragen wegverkeer	ULS (STR)
		Bezwijken		
Zakking steunpunten	<ul style="list-style-type: none"> - Onvoldoende geotechnisch draagvermogen - Schade aan landhoofd of steunpunten 	Onvlak oppervlak	Rijden wegverkeer mogelijk maken	SLS
		Slechte afwatering		
		Onvoldoende doorrijhoogte	Handhaven verbindingen	SLS
		Bezwijken	Dragen wegverkeer	ULS (GEO)
Horizontale verplaatsing dek	<ul style="list-style-type: none"> - Vervuiling voegen - Geen horizontaal evenwicht (bv scheef viaduct) 	Schade aan opleggingen	Rijden wegverkeer mogelijk maken	SLS
		Schade aan steunpunten	/ Handhaven verbindingen (ingrijpend onderhoud)	
Grote voegverplaatsing en (verticaal, loodrecht en evenwijdig)	<ul style="list-style-type: none"> - Vervuiling voegen - Geen horizontaal evenwicht (bv scheef viaduct) - Schade aan opleggingen 	Meer geluid	Beperken ontstaan geluid	SLS
		Schade aan afdichtings-profiel en aantasting beton	Rijden wegverkeer mogelijk maken / Handhaven verbindingen (ingrijpend onderhoud)	SLS

3.4 Ontwikkeling van deformaties in de tijd

3.4.1 Grafische weergave

Naast de grootte van waargenomen deformaties is ook de ontwikkeling van deformaties in de tijd essentieel voor een correcte beoordeling. Een grafische weergave van de ontwikkeling van deformaties is mogelijk na drie of meer herhalingsmetingen. In figuur 2 zijn als voorbeeld twee grafieken van de ontwikkeling van vervormingen opgenomen.

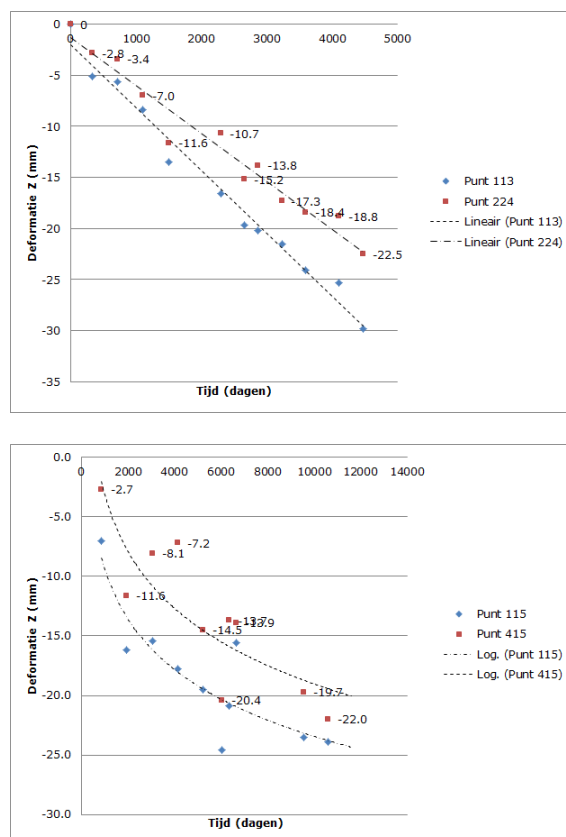
3.4.2 *Vergelijking met verwachte ontwikkeling*

Uit de ontwikkeling van deformaties blijkt of de deformaties stabiliseren, monotoon voortgaan of progressief ontwikkelen.

Gronddeformaties en kruip zijn voorbeelden van mechanismen waarvan de snelheid normaal gesproken afneemt met de tijd. Dit komt tot uitdrukking in een min of meer logaritmisch verloop van de zakkings in de tijd (zie figuur 2 onder). Monotoon toenemende (zie figuur 2 boven) of progressief ontwikkelende verticale verplaatsingen kunnen een indicatie zijn van onvoldoende draagkracht van de fundering.

Horizontale verplaatsingen kunnen gekoppeld zijn aan zettingen - in dat geval moet het verloop gelijkvormig zijn aan de ontwikkeling van de verticale verplaatsingen; dat hoeven niet noodzakelijk de verticale verplaatsingen van hetzelfde punt te zijn. Wanneer horizontale verplaatsingen monotoon toenemen kan dat een indicatie zijn van een horizontale onbalans in grondbelastingen (bijvoorbeeld gronddrukken tegen de landhoofden van een scheve kruising) of van een rups-effect ten gevolge van vervuilde voegen in combinatie met een zomer-winter-cyclus. Omdat deze mechanismen niet stabiliseren houdt dit een risico in voor bijvoorbeeld opleggingen, steunpunten, voegopeningen etc.

Meer dan monotoon toenemende verplaatsingen zijn over het algemeen een indicatie van onvoldoende sterkte.



figuur 2: Ontwikkeling van deformatie. Monotoon (boven) en logaritmisch (onder).

3.4.3

Aandachtspunten

Bij de beoordeling van de ontwikkeling van gemeten deformaties in de tijd gaat het niet om de individuele metingen, maar om de trend. De individuele metingen vormen een puntenwolk ten gevolge van meetruis, weers- en seizoensinvloeden. De trend zal zich duidelijker aftekenen bij een groter aantal herhalingsmetingen.

Bij de planning van vervolgmetingen dient rekening gehouden te worden met de logaritmische ontwikkeling van de meeste deformaties. Een deformatie die in n jaar is ontstaan zal algemeen gesproken pas verdubbeld zijn na n^2 jaar. Wanneer de resultaten van een serie herhalingsmetingen duidelijk wijzen op grondgedrag of kruip als oorzaak van de deformaties en inspecties geen aanleiding geven om op korte termijn te meten, kan ervoor gekozen worden de herhalingsmetingen op te schorten tot uit inspectieresultaten de noodzaak blijkt de metingen te hervatten.

4 Beoordeling deformaties voor beweegbare bruggen

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van herhalingsmetingen en de beoordeling van de staat van beweegbare bruggen op basis van de resultaten daarvan. In paragraaf 4.2 wordt eerst ingegaan op typen constructies en onderdelen. In paragraaf 4.3 worden enkele aandachtspunten voor beweegbare bruggendeformaties belicht. In paragraaf 4.4 wordt ingegaan op deformaties die samenhangen met falen en overige deformaties. Dit hoofdstuk betreft alleen het beweegbare deel; voor de vaste constructie wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

4.1 Brondocumenten en relevante data

Bij de bureaustudie dient onderstaande informatie, indien beschikbaar, te worden geraadpleegd:

- Meetrapportages;
- Kunstwerkgegevens (DISK-paspoort);
- (Besteks)tekeningen;
- Historie (wijzigingen kunstwerk, gebruik of omgeving);
- Inspectierapporten;
- Onderzoeksrapporten;
- Geotechnisch advies.

In de rapportage van de beoordeling van de herhalingsmeting dient vermeld te worden welke informatie ontbreekt.

4.2 Type constructies en onderdelen

4.2.1 *Type constructies*

Kunstwerken van Rijkswaterstaat hebben verschillende benamingen – soms zijn er verschillende benamingen voor eenzelfde type kunstwerk. In de Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken [5] is aangegeven in welke categorieën kunstwerken zijn ingedeeld. Zo is binnen deze richtlijn de ROK categorie Beweegbare bruggen opgenomen. De categorie beweegbare bruggen is onderverdeeld in de volgende kunstwerken

- Brug (beweegbaar);
- Aanleginrichting;
- Basculebrug;
- Draaibrug;
- Hefbrug;
- Ophaalbrug;
- Aanleg.

De categorie Beweegbare bruggen heeft één ding gemeen: ze hebben allen betrekking (met uitzondering van het kunstwerk Aanleginrichting) op het specifieke gedeelte van een brug dat voor het kruisende scheepvaartverkeer geopend kan worden inclusief het daarvoor benodigde aandrijf en bewegingswerk.

Beweegbare bruggen zijn meestal voorzien van een elektrohydraulisch of elektromechanisch aandrijf- en bewegingswerk. Een elektrohydraulische aandrijving vraagt weinig ruimte vanwege de grote krachtdichtheid. Echter deformaties van kelders waarbinnen deze aandrijving geplaatst is vraagt aandacht. Deformaties

leiden tot hoekverdraaiingen en zijn daardoor van invloed op het functioneren van de aandrijving en daarmee het functioneren van de beweegbare brug.

4.2.2

Elementen en bouwdelen

Voor de decompositie van kunstwerken wordt aangesloten bij NEN 2767, waar sprake is van *elementen* en *bouwdelen*, zie NEN 2767-4-2:2010 [4].

Deze decompositie is van belang om op systematische wijze mogelijke oorzaken en gevolgen van waargenomen deformaties te kunnen inventariseren.

Een beweegbare brug kan worden gedeclineerd in onderstaande elementen en bouwdelen (een specifieke selectie van elementen en bouwdelen i.r.t. de analyse van herhalingsmetingen):

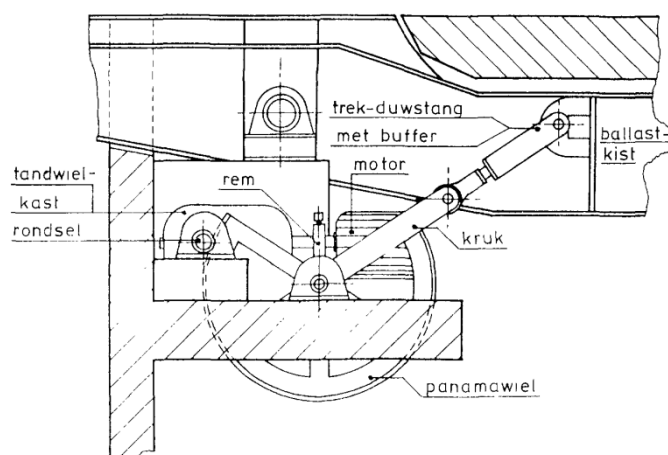
- Aandrijving en bewegingswerk, elektrohydraulisch
 - Cilinder
 - Constructie (bevestiging incl. lager)
 - Contragewicht
 - Draaipunt
 - Frame
 - Grendel
 - Meetsysteem
 - Spileindschakelaar
 - Wegmeetsysteem
- Aandrijving en bewegingswerk, elektromechanisch
 - Assenstelsel
 - Buffer
 - Constructie (bevestiging incl. lager)
 - Contragewicht
 - Draaipunt
 - Frame
 - Grendel
 - Heugelstang
 - Kabelspaninrichting
 - Kabelbrommel
 - Omloopwielen
 - Opzetinrichting
 - Panamawiel
 - Pennenbaan
 - Rolsleufmechanisme
 - Rondsel
 - Schamelstel
 - Spileindschakelaar
 - Staalkabel
 - Tandbaan
 - Tandwieloverbrenging
 - Trekduwstang
 - Wielstel
- Basculekelder
- Fundering
- Grendelinrichting
- Heftoren
- Hoofddraagconstructie

- Hoofddraaipunt
- Kerende constructie
 - Combiwand
 - Damwand
 - Keermuur
 - Sloof
 - Vleugelwand
- Oplegging³
 - Stalen oplegging
 - Oplegblok
- Rijvloer
- Schampkant
 - Randelement
 - Schampstrook
- Steunpunt
 - Landhoofd
 - Pijler
- Voegovergang
 - Afdichtingsprofiel
 - Rij-ijzer⁴

4.3 Beweegbare bruggen en deformaties

4.3.1 *Basculebruggen*

Bij een basculebrug is het val gebalanceerd door een ballastkist, die zich in de kelder bevindt en is aangebracht tussen, respectievelijk onder de hoofdliggers. De hoofdliggers zijn daartoe achter het draaipunt verlengd. In de kelder is meestal ook het aandrijfmechanisme van de basculebrug geplaatst. Op de, tegen de voorwand van de kelder aangebrachte, consoles bevinden zich de draaipunten van de brug; hieromheen draaien de hoofdliggers (en dus de brug) van gesloten tot open stand en omgekeerd.



figuur 3: Aandrijf- en bewegingswerk van een basculebrug via panamawiel-kruk-dijfstang-mechanisme

³ NEN 2767 maakt hier melding van de bouwdeelen oplegbalk, oplegblok, oplegtafel en oplegging. Oplegbalk en - tafel zijn hier weggelaten. Oplegging is vervangen door stalen oplegging, om onderscheid te maken met het (rubber) oplegblok.

⁴ Met rij-ijzer wordt hier het stalen onderdeel van de voegconstructie bedoeld. Voor een volledig overzicht van voegovergangstypen wordt verwezen naar de Meerkeuzematrix Voegovergangen, [6].

Wanneer sprake is van een deformatie vanuit bijvoorbeeld een aanvaring of een verzakking/verplaatsing van één van de landhoofden of de pijlers, dan heeft dit meteen consequenties voor het functioneren van het bewegingsmechanisme. Een basculebrug dient o.a. in staat te zijn om te allen tijde een vaste ligging te kunnen garanderen waardoor passerend wegverkeer geen hinder ondervindt of blootgesteld wordt aan gevaarlijke situaties (denk aan het los komen/omhoog schieten van de voorhar).



Foto 1: Aanvaring van een basculekelder door passerend scheepvaartverkeer

Onderstaande foto's geven enkele schadebeelden door een aanvaring.



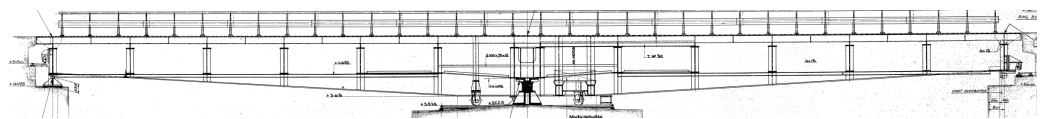
Foto 2: Rij-ijzers met onvoldoende onderlinge afstand. De basculebrug kan vast komen te zitten.



Foto 3: Aangetaste vooroplegging van de voorhar van de basculebrug door een aanvaring. De basculebrug komt met de voorhar onvoldoende terug op de vooroplegging waardoor de vaste ligging niet gewaarborgd is.

4.3.2 Draaibruggen

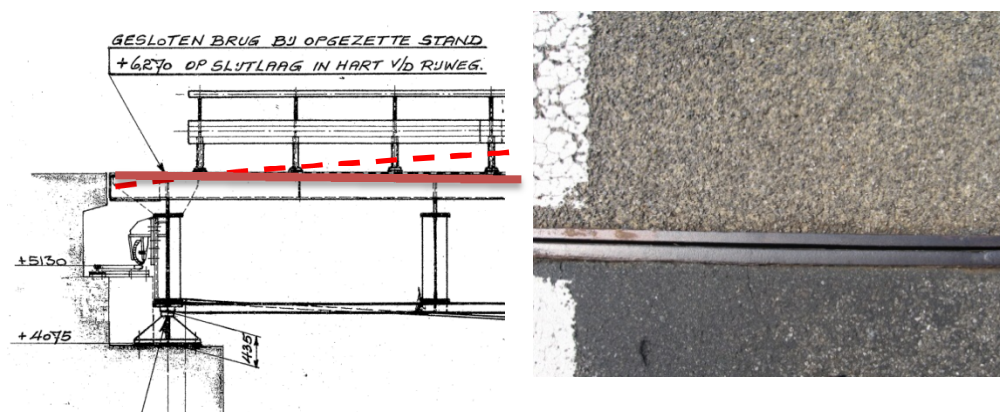
Bij een draaibrug draait het val om de verticale as op een axiaal lager, dat gesitueerd is op de draaijler. Voor kleine draaibruggen worden hoofdliggers als vollewandliggers uitgevoerd en voor grote draaibruggen als vakwerkliggers. Een draaibrug kan gelijk- of ongelijkarmig zijn; in dit laatste geval is in de korte arm een ballastruimte gecreëerd ter balancerings. Verder is op een of beide landhoofden een opzetinrichting aangebracht. Daarnaast is meestal een mechanisme aanwezig om de brug te vergrendelen in de openstand.



figuur 4: Typische doorsnede draaibrug.

Mocht blijken dat sprake is van een deformatie vanuit de onderbouw (één van de landhoofden of de pijler is onderhevig aan verzakkingen), dan heeft dit meteen consequenties voor het functioneren van het bewegingsmechanisme. De brug kan hierdoor vast komen te zitten. Een draaibrug heeft namelijk een draaicirkel met een relatief groot contactoppervlak tussen dek en landhoofd dat sterk gevoelig is voor deformaties.

Ook dient men zich te realiseren dat een draaibrug in staat dient te zijn om verschillende weersinvloeden op te kunnen nemen zonder hierbij vast komen te zitten. Neem als voorbeeld het beschikbaar zijn gedurende het voorjaarsseizoen (start vaarseizoen). Tijdens dit seizoen gebeurt het regelmatig dat een draaibrug onderhevig is aan grote temperatuurgradiënten waarbij uitzetting mogelijk moet zijn. Het dek (dekplaat met donkere toplaag) warmt sterk op door de eerste effectieve zonnestralen en wil uitzetten, terwijl de liggers onder het dek koud blijven door de lage watertemperatuur. De brug trekt krom ('kattenrug'). Deformaties van landhoofden kunnen hierdoor desastreuze gevolgen opleveren waardoor de brug tijdens het draaien vast kan komen te zitten of niet opgezet (middels opzetinrichting) kan worden. De brug staat dan in storting.



Figuur 5: Typische doorsnede aansluiting landhoofd-draaibrug.

Foto 4: Rij-ijzers met onvoldoende onderlinge afstand, de draaibrug loopt vast.

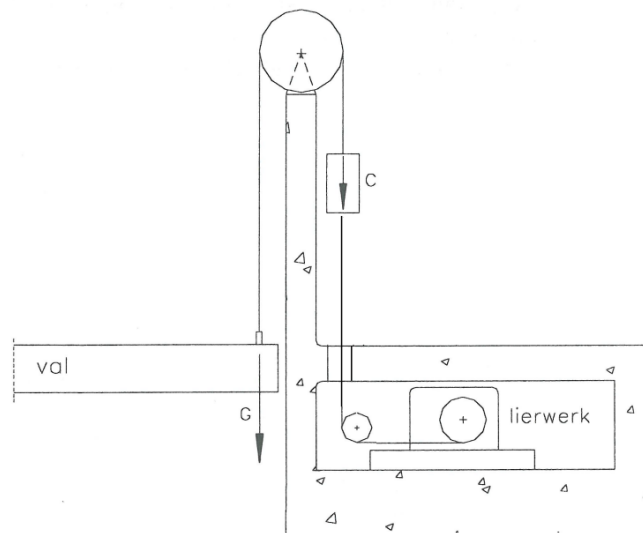
4.3.3

Hefbruggen

De bewegingsrichting van een hefbrug is translatie in verticale richting. De constructie van het val is in principe vergelijkbaar met de overige beweegbare bruggen; de twee einddwarsdragers zijn echter zwaarder uitgevoerd, aangezien zij fungeren als hijsliggers. Ter plaatse van de vier hoekpunten van het val bevinden zich de hefstijlen, ook wel heftorens genoemd, waarlangs het val geleid wordt. Deze hefstijlen kunnen in beton of in staal uitgevoerd zijn.

De hijsliggers zijn door middel van evenwichtskabels via kabelschijven (bovenop de hefstijlen) verbonden met contramassa's die ook langs of in de hefstijlen geleid worden. De contramassa's balanceren de brug geheel of gedeeltelijk uit. Bij grote hefbruggen zijn de hijsliggers in de regel geen onderdeel van het val maar is dit opgelegd op separate hijsliggers.

Qua aandrijving zijn diverse mogelijkheden voorhanden. Hieronder is een prinscheschets weergegeven van een aandrijving vanuit een lierwerk bij overwicht van het val.



Figuur 6: Prinscheschets werking aandrijving bij overwicht van het val.

De hefstijlen kunnen ten opzichte van elkaar verplaatsen, waardoor de onderlinge afstand tussen de hefstijlen kan variëren. Deze verplaatsingen worden voornamelijk veroorzaakt door invloeden van:

- Ongelijke zetting;
- Belastingen vanuit wegverkeer;
- Wind;
- Temperatuur.

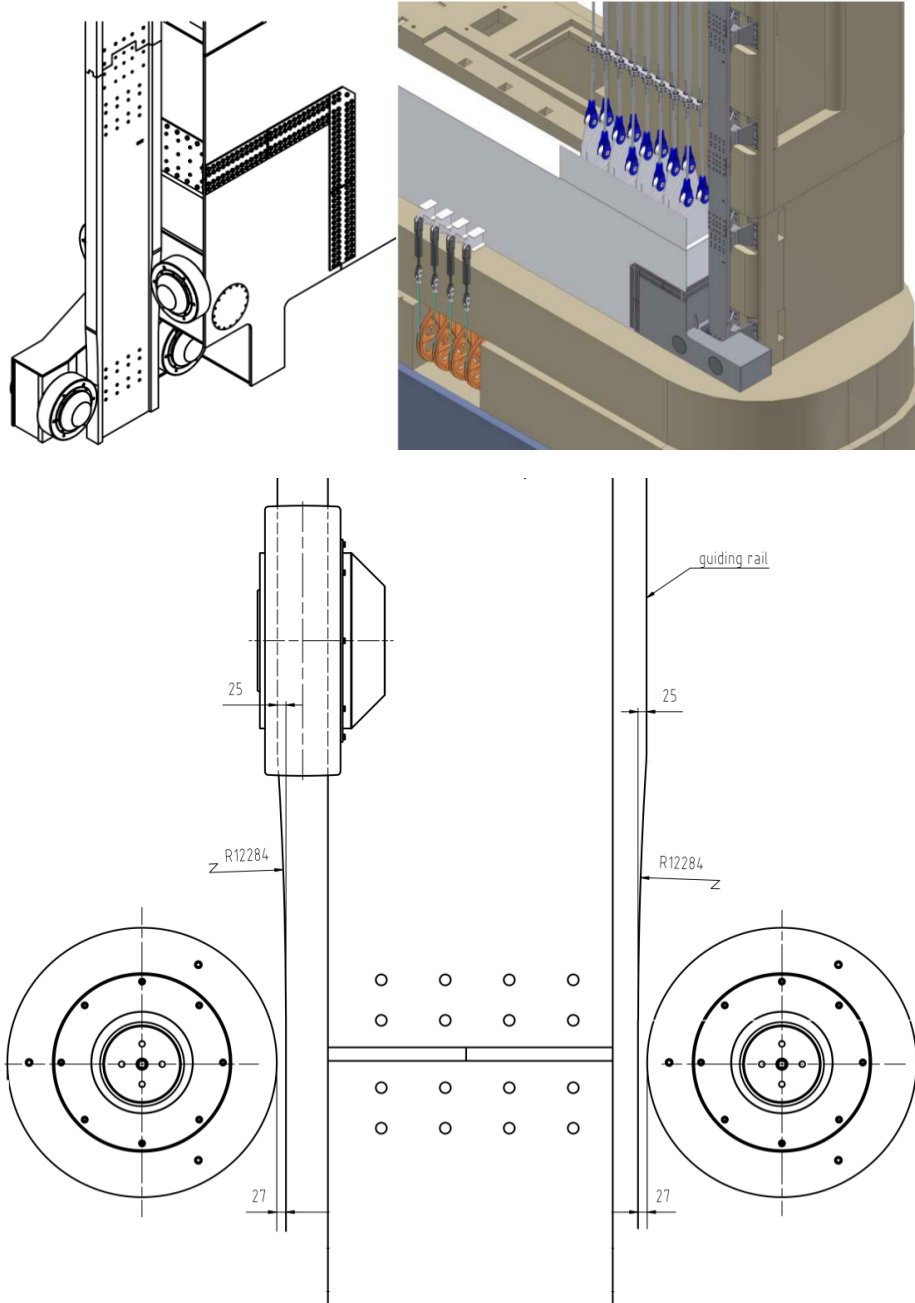
Om deze verplaatsingen passend op te kunnen vangen worden bij hefbruggen geleideconstructies toegepast. Deze dragen bij aan de nauwkeurigheid van de translatiebeweging en voorkomen dat het val door de zojuist genoemde invloeden vast komt te zitten tijdens een brugopening.

De geleideconstructie bestaat meestal uit een geleiderail (gemonteerd aan de hefstijl) met gelagerde geleidewielen (gemonteerd aan hijsligger). Door een verstandige keuze in de positionering van geleidewielen en geleiderail en het aanbrengen van ruimte voor dilatatie, kan het val toch opgesloten worden tussen de vier hefstijlen zonder dat het val vast komt te zitten als gevolg van de hierboven benoemde invloeden.

Hieronder is een voorbeeld van een geleideconstructie weergegeven. Het betreft hier een principeoplossing die toegepast is bij de Botlekbrug. Bij het ontwerp is

rekening gehouden met de verplaatsingen die in het horizontale vlak moeten kunnen optreden.

Daar waar bijvoorbeeld uitzetting mogelijk moet zijn bij een gesloten brug (i.v.m. temperatuur o.i.d.) is ruimte gecreëerd. De loopvlakken van de rail zijn hierop aangepast. Bij een brugopening blijkt deze dilatatie ruimte echter niet meer noodzakelijk te zijn en zo zien we dat de geleiderail op de loopvlakken aangepast is.



Figuur 7: Verzameling van principeschetsen over de werking van een geleideconstructie met ruimte voor dilatatie

4.4 Faalmechanismen, grenstoestanden en daaraan gerelateerde deformaties

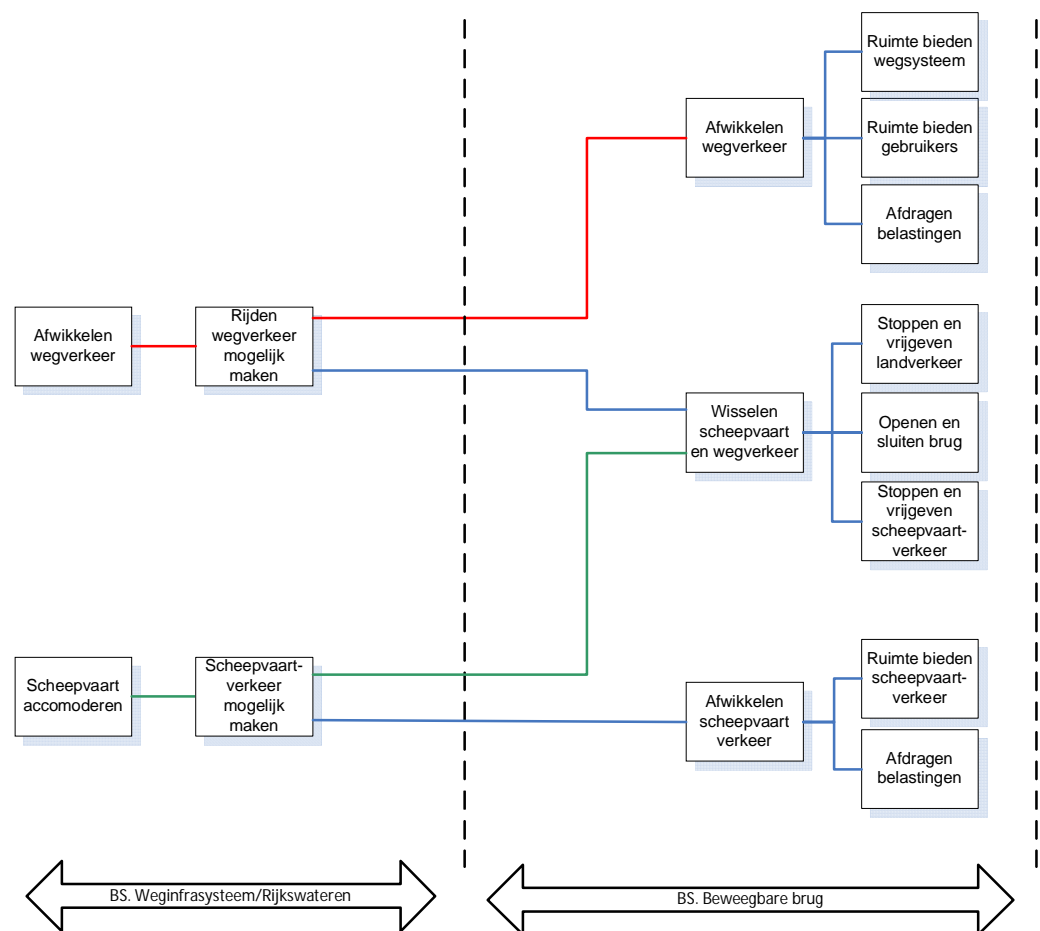
4.4.1 *Falen: definitie en faalmechanismen*

Er is sprake van falen wanneer het kunstwerk zijn functies niet meer (in voldoende mate) kan vervullen.

Het Analyse kader beweegbare kunstwerken [10] bevat de volgende twee functies voor beweegbare bruggen:

Objectfunctie	Een Beweegbare brug faalt als de technische staat van het object er toe leidt dat
Laten passeren scheepvaart	Het scheepvaartverkeer niet binnen de gestelde tijd de brug kan passeren
Laten passeren wegverkeer	Het wegverkeer niet binnen de gestelde tijd de brug kan passeren

De voor beweegbare bruggen relevante functies zijn ontleend aan de netwerkfuncties van het Weginfrasysteem (zie Basisspecificatie Weginfrasysteem [3]) en het systeem Beweegbare Brug (Basisspecificatie Beweegbare Brug [10]), en zijn weergegeven in onderstaande figuur.



figuur 8: Functies beweegbare bruggen.

Functie [Afwikkelen Wegverkeer]

Het object faalt als de technische staat van het object er toe leidt dat

- Het systeem beweegbare Brug geen mogelijkheid biedt om het wegverkeer en/of de weggebruikers, bij gesloten brug, vlot en comfortabel de waterweg te laten passeren.

Functie [Wisselen Scheepvaart en wegverkeer]

Het object faalt als de technische staat van het object er toe leidt dat

- Het systeem beweegbare Brug geen mogelijkheid beidt om het wegverkeer en/of de weggebruikers, bij gesloten brug, vlot en comfortabel de waterweg te laten passeren.

Functie [Afwikkelen scheepvaartverkeer]

Het object faalt als de technische staat van het object er toe leidt dat

- Het systeem beweegbare Brug geen mogelijkheid beidt om het scheepvaartverkeer vlot en comfortabel de autoverkeersweg te laten passeren.

Deze definitie van falen sluit aan bij de kerntaken van Rijkswaterstaat. Met het oog op de analyse van deformatiemetingen kunnen de faalmechanismen richtinggevend zijn voor de beoordeling van de ernst van waargenomen deformaties.

Bovenstaande beschouwing van falen en faalmechanismen betreft het kunstwerk als geheel. Ook op een lager niveau kan falen worden gedefinieerd. Dit dient echter per kunstwerk afzonderlijk bekeken te worden gezien de mate van variatie per kunstwerk. De faalmechanismen dienen vervolgens beschouwd te worden bij het uitvoeren van de Object Risico Analyse (ORA) van het betreffende kunstwerk. Deze exercitie wordt binnen deze richtlijn niet nader toegelicht.

4.4.2

Grenstoestanden

Paragraaf 3.3.1 presenteert faalmechanismen gerelateerd aan functies van objecten en samenhangend met het gebruik ervan. Een andere benadering is een beoordeling in het kader van grenstoestanden. In de huidige praktijk van constructieve beoordeling van kunstwerken worden twee grenstoestanden onderscheiden. Voor een uitgebreide toelichting zie paragraaf 3.3.2.

Naast de binnen paragraaf 3.3.2 beschreven beoordeling van kunstwerken via grenstoestanden wordt bij de beoordeling van beweegbare bruggen aanvullend rekening gehouden met een specifieke NEN-norm. In de praktijk komt dit neer op het hanteren van NEN 6786 [13] voor alle onderdelen rechtstreeks gerelateerd aan de aandrijving en het bewegingswerk.

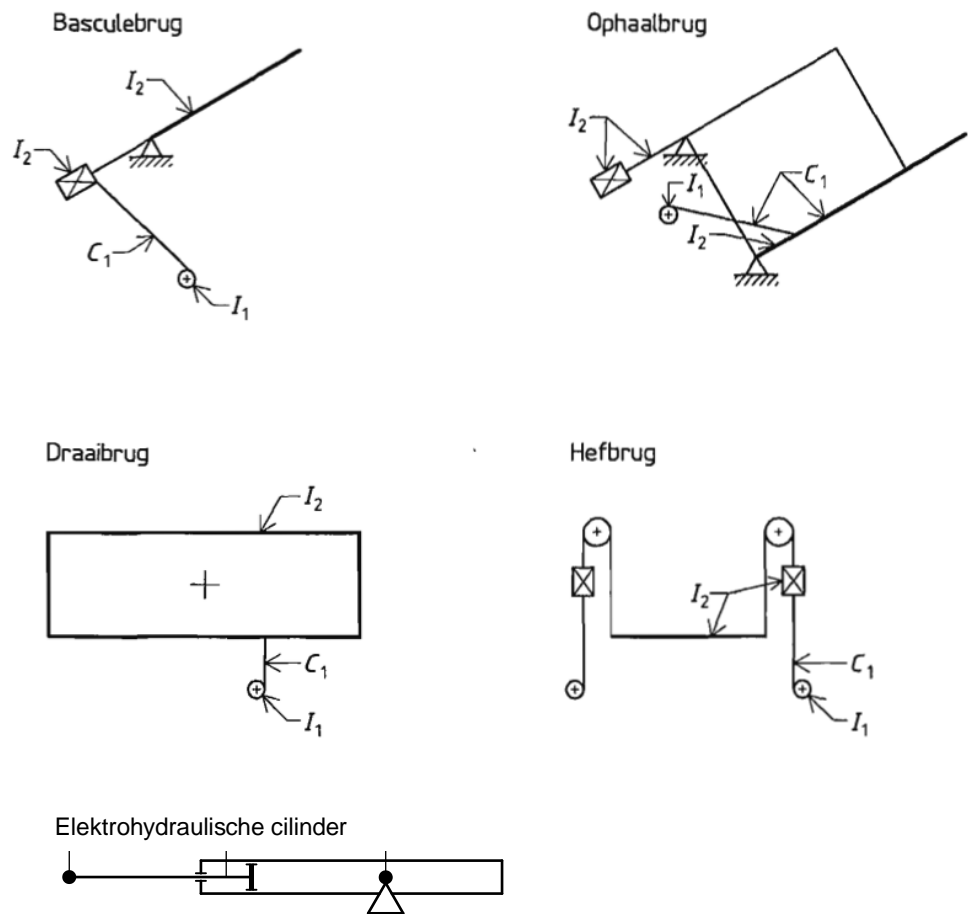
Ook stelt deze norm eisen aan het veilig functioneren van de brug. Met als voorbeeld; de eis van de vaste ligging van de brug bij gesloten stand. Deformaties kunnen er toe leiden dat deze vaste ligging niet gewaarborgd kan worden en de brug niet meer als veilig wordt beschouwd.

Mocht deze situatie daadwerkelijk voorkomen, dient ook gekeken te worden naar vermoeiingsproblematiek die mogelijk ontstaat door opgelegde vervormingen van het val.

4.4.3

Beweegbare bruggen en deformaties

De interpretatie van deformaties van beweegbare bruggen is niet los te zien van het type beweegbare brug. Ieder type brug heeft veelal een eigen/unique aandrijving en bewegingswerk. Hieronder worden enkele voorbeelden van schematiseringen van bruggen weergegeven. Het betreft de schematisering van het brugbewegingsmechanisme (geschematiseerd tot discreet model met twee vrijheidsgraden).

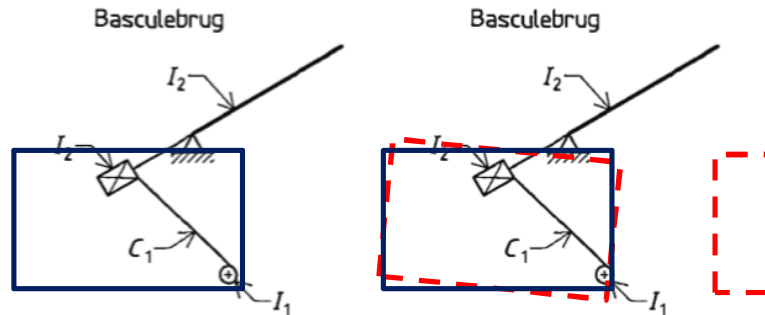


figuur 9: Schematisering van brugbewegingsmechanismen [13]

Bovenstaande modellen maken inzichtelijk waar het bewegingsmechanisme in contact komt met de "Onderbouw" of de "Bovenbouw". Dit is een belangrijk gegeven bij de analyse van deformaties.

Mocht nu blijken dat sprake is van een deformatie vanuit de "Onderbouw" of de "Bovenbouw", dan heeft dit meteen consequenties voor het functioneren van het bewegingsmechanisme.

We nemen als voorbeeld een basculebrug;



figuur 10: Schematisering hoekverdraaiing kelder a.g.v. deformatie

Blijkt dat er geen horizontaal evenwicht is (scheve kelder) en er een rotatie optreedt van de basculekelder, dan zien we dat het bewegingsmechanisme niet meer correct binnen haar "Onderbouw" of de "Bovenbouw" kan functioneren. De brug kan hierdoor niet meer goed sluiten en er zal vermoedelijk een storing ontstaan. De ingestelde eindstanden (denk hierbij aan bijvoorbeeld een spileindschakelaar) worden niet meer bereikt en/of de vaste ligging van het val op haar opleggingen is niet aanwezig waardoor de brug als onveilig beschouwd wordt.

4.4.4

Deformaties en falen

Onderstaande tabel geeft een niet uitputtend overzicht van deformaties die indicatief kunnen zijn voor (aanstaand) functieverlies of overschrijden van grenstoestanden. Of deformaties ernstig zijn of niet hangt af van de grootte; het criterium verschilt van geval tot geval. Een steunpuntszetting van 10 mm zal weinig problemen opleveren in termen van vlakheid of afwatering, terwijl een grote verticale verschilverplaatsing de vaste ligging (onvoldoende overgewicht op de specifieke oplegging) kan leiden tot een onveilige brug. Een val kan mogelijk loskomen en hierdoor direct een hindernis vormen voor het rijverkeer.

tabel 2: Relatie tussen deformatie en falen (beweegbare bruggen algemeen).

Deformatie	Oorzaak	Gevolg	Functie-verlies	Grens-toestand	Aandachtspunt
Verticale verplaatsing steunpunt (zakking vooroplegging)	- Onvoldoende geotechnisch draagvermogen - Schade aan landhoofd of steunpunten	Onvoldoende vaste ligging, vermoeiing	Dragen wegverkeer, levensduur	SLS	Eindstanden van het bewegingswerk bepalen mate van acceptatie hoekverdraaiingen
Verticale verplaatsing kelder (zakking kelder met bewegingswerk)	- Onvoldoende geotechnisch draagvermogen - Schade aan landhoofd of steunpunten	Onvoldoende vaste ligging, vermoeiing	Dragen wegverkeer, levensduur	SLS	Eindstanden van het bewegingswerk bepalen mate van acceptatie hoekverdraaiingen
Horizontale verplaatsing steunpunt	- Geen horizontaal evenwicht - Aanvaring	Onvoldoende vaste ligging	Dragen wegverkeer	ULS	Vrijheidsgraden binnen hoofddraaipunten en opleggingen bepalen mate van acceptatie
Horizontale verplaatsing kelder	- Geen horizontaal evenwicht - Aanvaring	Onvoldoende vaste ligging	Dragen wegverkeer	ULS	Vrijheidsgraden binnen hoofddraaipunten en opleggingen bepalen mate van acceptatie
Rotatie pijler	- Geen horizontaal evenwicht - Aanvaring	Onvoldoende vaste ligging	Dragen wegverkeer	ULS	Eindstanden van het bewegingswerk bepalen mate van acceptatie hoekverdraaiingen
Rotatie kelder	- Geen horizontaal evenwicht - Aanvaring	Onvoldoende vaste ligging	Dragen wegverkeer	ULS	Eindstanden van het bewegingswerk bepalen mate van acceptatie hoekverdraaiingen
Doorbuiging val	- Onvoldoende sterkte val - Scheurvorming - Kruip - Temperatuur	Onvlak oppervlak	Rijden wegverkeer mogelijk maken	SLS	-
		Slechte afwatering	Handhaven verbindingen	SLS	-
		Onvoldoende doorrijhoogte	Dragen wegverkeer	ULS (STR)	-
		Opbolling val (kattenrug)	Rijden wegverkeer mogelijk maken	SLS	Sluiten van de brug is niet mogelijk doordat rij-ijzers vast komen te zitten.

5 Beoordeling deformaties voor tunnels

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van herhalingsmetingen en de beoordeling van de staat van het kunstwerk op basis van de resultaten daarvan. In paragraaf 5.2 wordt eerst ingegaan op typen constructies en onderdelen. In paragraaf 5.3 worden enkele aandachtspunten voor tunneldeformaties belicht. In paragraaf 5.4 wordt ingegaan op deformaties die samenhangen met falen en overige deformaties. Paragraaf 5.5 gaat in op de ontwikkeling van deformaties in de tijd.

5.1 Brondocumenten en relevante data

Bij de bureaustudie dient onderstaande informatie, indien beschikbaar, te worden geraadpleegd:

- Meetrapportages;
- Kunstwerkgegevens (DISK-paspoort);
- (Besteks)tekeningen;
- Historie (wijzigingen kunstwerk, gebruik of omgeving; onderhouds- en bouwwerkzaamheden);
- Inspectierapporten;
- Onderzoeksrapporten;
- Geotechnisch advies.

In de rapportage van de beoordeling van de herhalingsmeting dient vermeld te worden welke informatie ontbreekt.

Met name bij tunnels is de historie essentieel voor een correcte interpretatie van waargenomen deformaties. Wanneer informatie over de kunstwerkhistorie ontbreekt verdient het aanbeveling de beheerder te raadplegen over de geschiedenis van de tunnel.

5.2 Type constructies en onderdelen

5.2.1 Constructiewijze en fundering

De categorie 'Tunnel' is op verschillende manieren onder te verdelen naar o.a. type, diepteligging, lengte en constructiewijze. Met betrekking tot deformaties is alleen een onderverdeling naar constructiewijze en fundering betekenisvol. De constructiewijze hangt samen met de ongedilateerde lengte. Onderstaand overzicht presenteert de in Nederland toegepaste constructiewijzen, met een ruwe indicatie van de ongedilateerde lengte

tabel 3: Onderverdeling naar constructiewijze, met een indicatie van de ongedilateerde lengte.

Constructiewijze	Ongedilateerde lengte (m)
Afzinktunnel	20-100 ¹⁾
Boortunnel	1-2
Caissons	20-50
Cut-and-covertunnel	15-25
Trektunnel	20-75
¹⁾ Tegenwoordig worden de zinkelementen onderverdeeld in moten van 20-25 m. Vroeger werden monoliete zinkelementen toegepast met een lengte van ca. 100 m (bv. Eerste Coentunnel, 1966).	

Wat betreft de fundering kan onderscheid gemaakt worden in:

- Staalfundering
Hieronder vallen:
 - de meeste afzinktunnels, die zijn gefundeerd op een slecht verdichte onderspoellaag of een geprepareerd grindbed
 - cut-and-covertunnels en tunneltoeritten
 - trektunnels
 - boortunnels
- Fundering met constructieve elementen (palen, dam- en diepwanden, trekankers)
 - enkele afzinktunnels (IJ-tunnel, Zeeburgertunnel⁵)
 - cut-and-covertunnels en tunneltoeritten
 - wanden-daktunnels

5.2.2

Elementen en bouwdelen

In onderstaande decompositie conform NEN 2767 zijn alleen die onderdelen opgenomen die van belang zijn met betrekking tot de beoordeling van herhalingsmetingen.

- Folieconstructie
- Fundering
 - Caisson
 - Grondverbetering
 - Palen (drukpalen, H-palen, in de grond vervaardigde palen, open buispalen, trekpalen)
 - Vloer
- Gebouw
- Geleideconstructie
 - Geleidebarrier
- Hoofddraagconstructie
 - Plaatveld
 - Wand
- Kelder
- Kerende constructie
 - Bodemverdediging
 - Caisson
 - Damwandkop
 - Draadstang
 - Gording
 - Sloof
 - Wand (combiwand, damwand, diepwand, keermuur, samengestelde damwand)
 - Waterkerende constructie
- Oplegging
 - Oplegbalk, -stoel, -tafel
- Tunnelbuis
 - Bekleding
 - Dak

⁵ Het afgezonken deel van de Zeeburgertunnel is op stalen druppelpalen gefundeerd. De verbinding met de tunnel kan geen enkele trek opnemen.

- Dilatievoeg (te onderscheiden in zink-, moot- en sluitvoeg)
- Hittewerende bekleding
- Rijdek
- Middenkanaal
- Verkeerskoker
- Vloer
- Wand
- Voegovergang
 - Afdichtingsprofiel
 - Rij-ijzer

In deze decompositie ontbreken enkele onderdelen die met name met het oog op deformaties van belang zijn:

- Krachtsoverdracht
 - Tand- / kraagconstructie (in toeritmoten, en bij oudere tunnels in zink- en mootvoegen)
 - Tandconstructie (in zink- en mootvoegen)
- Waterdichting
 - Bitumineus membraan (oudere tunnels)
 - Waterdichtende voegprofielen (Omega- en GINA-profiel in zinkvoegen, voegenband in mootvoegen, pneumatische profielen)

5.3 Tunnels en deformaties

De interpretatie van tunneldeformaties is niet los te zien van het type tunnel (zie 5.2.1), de lokale omstandigheden (belastingen, fundering, etc.) en de historie van het kunstwerk (baggerwerkzaamheden, aanbrengen bestorting, etc.). In onderstaande paragrafen worden enkele aandachtspunten belicht.

5.3.1 *Deformatiemetingen in tunnels en de deformatiedrempel*

In het algemeen geldt voor tunnels dat de verplaatsingen groot kunnen zijn, terwijl de toleranties soms zeer klein zijn, afhankelijk van het faalmechanisme. Lekkages zijn bijvoorbeeld vaak het gevolg van scheurvorming rond voegen, die al kan optreden bij enkele millimeters verschilverplaatsing.

Bij het toepassen van de deformatiedrempel als hulpmiddel om de gemeten deformaties te schiften dient onderscheid gemaakt te worden tussen deformaties (verplaatsingen t.o.v. een nulmeting) en deformatieverschillen (verschil tussen de verplaatsingen die twee punten vanaf de nulmeting hebben ondergaan). De deformatiedrempel heeft alleen betekenis voor deformaties, niet voor deformatieverschillen (zoals voegopeningen etc.).

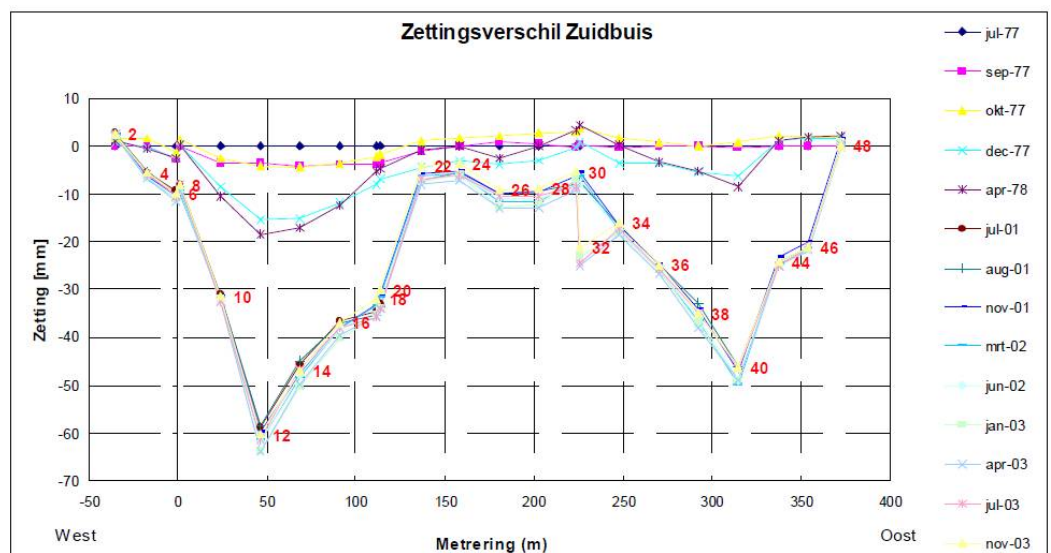
5.3.2 *Zinktunnels*

De meeste zinktunnels bestaan uit tunnelelementen, die weer zijn opgedeeld in onderling gedilateerde moten. Tussen de zinkelementen zijn zogenaamde zinkvoegen aanwezig, waar de krachtsoverdracht in langsrichting plaatsvindt via het relatief slappe GINA-profiel. De krachtsoverdracht in langsrichting in de mootvoegen vindt plaats via star beton-op-betoncontact. Niet alle tunnels zijn echter in deze mate gedilateerd - de eerste Coentunnel bijvoorbeeld bestaat uit zes ongedilateerde tunnelelementen van 90 m lang.

Specifiek voor zinktunnels geldt dat de netto neerwaartse belasting relatief gering is, wat vaak samengaat met een relatief slappe fundering. Een lokale variatie in belasting of funderingsstijfheid zal dan snel tot ongelijkmatige zakkingen leiden. De

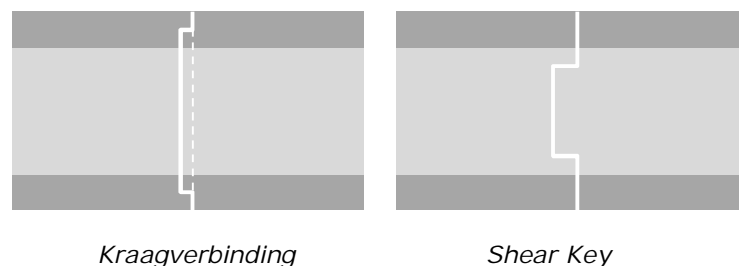
meeste zinktunnels zijn ontworpen om zich als ketting op de bodem te 'zetten': om 20 à 25 m is een dilatatievoeg aanwezig. De tunnelmoten zijn echter opgespannen tussen de overgangsconstructies en de achterliggende toeritmoten, waardoor de tunnelmoten niet onafhankelijk kunnen zetten. Elk tunnelelement gedraagt zich in eerste instantie als een buigligger van tegen elkaar gedrukte 'blokken', tot het buigend moment in een voeg zo groot wordt dat de voeg zich opent. Op voorhand is daardoor niet goed te voorspellen bij welke voeg de grootste zakkingen en voegopeningen zullen plaatsvinden. Dit kan ter plaatse van een (relatief slappe) zinkvoeg zijn, of bij één van de mootvoegen. De opspanning van de tunnelelementen kan ertoe leiden dat de vervormingen zich in één of enkele voegen concentreren.

Door grote belastingen nabij de oevers (dijken) treden daar vaak de grootste zakkingen op, wat leidt tot het karakteristieke zakkingsbeeld van figuur 11.



figuur 11: Karakteristiek zakkingsbeeld zinktunnels (in dit geval: Kiltunnel).

De krachtsoverdracht in moot- en zinkvoegen vindt plaats door middel van afschuifverbindingen. Traditioneel werden deze uitgevoerd als kraagverbinding, maar tegenwoordig met name met *shear keys* in de wanden, zie figuur 12. In de kraagverbinding is sprake van een rondlopende tandverbinding. De volledige dwarskracht wordt in deze verbinding overgedragen door een tand met een hoogte gelijk aan ongeveer de halve dak- of vloerdikte. De sterkte van deze details is doorgaans gering.



figuur 12: Kraagverbinding en Shear Key, schematisch aangegeven in een langsdoorsnede van een tunnelvoeg.

In de oplossing met shear keys is in alle wanden een tandverbinding aanwezig (in de middenwanden over de volledige dikte, in de buitenwanden verdekt over de halve wanddikte). Deze verbinding kan zeer sterk zijn uitgevoerd. Afhankelijk van het type tand zijn verschilverplaatsingen over de voeg mogelijk:

- kraagverbindingen staan vrijwel geen verschilverplaatsingen toe - hooguit enkele millimeters ten gevolge van de aanwezigheid van samendrukbaar materiaal in de voeg en lokale vervormingen van de tanden.
- shear keys zijn zelf zeer stijf. De krachtsoverdracht vindt plaats door middel van oplegblokken, die enige flexibiliteit bezitten. Daarnaast vindt de verticale krachtsoverdracht plaats in de wanden, waardoor in het dak een veel grotere verschilverplaatsing mogelijk is dan in de wanden. Een verschilverplaatsing in de orde grootte van een cm is daardoor niet uitgesloten.

Typisch voor zinktunnels zijn dus de relatief grote optredende verplaatsingen, terwijl de toelaatbare voegverschilverplaatsingen gering zijn - in de orde grootte van enkele millimeters (terwijl de deformatiedrempel voor zakkingen 5 mm bedraagt, en voor horizontale verplaatsingen 10 mm).

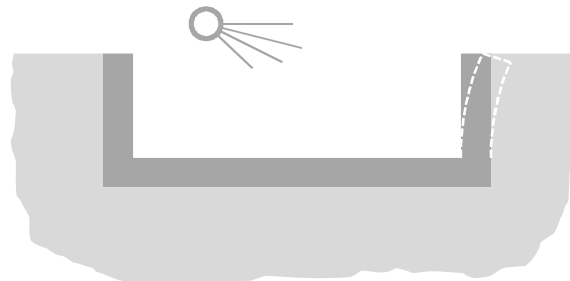
5.3.3 *Cut-and-covertunnels*

Voor cut-and-covertunnels geldt in het algemeen dat de kwaliteit van de fundering veel beter beheersbaar is dan bij zinktunnels, waardoor de optredende verticale belastingen doorgaans kleiner zijn.

5.3.4 *Toeritten*

Van toeritten is bekend dat deze door voegvervuiling kunnen gaan wandelen (rupseffect). Wanneer de toeritmoten op palen zijn gefundeerd bestaat het risico van paalbreuk en opdrijven.

Toeritwanden werden vroeger ontworpen op actieve of neutrale gronddruk. Door eenzijdige opwarming van een toeritwand kromt deze naar de grond toe, waardoor hogere gronddrukken zullen optreden, zie Figuur 13. Bij eenzijdige afkoeling kromt de wand van de grond af, waardoor de grond achter de wand ontspant (actief gedrag). Bij een volgende opwarming wordt meer (passieve) gronddruk gemobiliseerd (hysteresis). Dit fenomeen is ooit vastgesteld bij sluiskolken, maar geldt dus ook bij tunneltoeritten. Wanneer de inklemming van de wand onvoldoene sterkte heeft, bestaat het risico op ernstige scheurvorming en vloeien van de wapening.

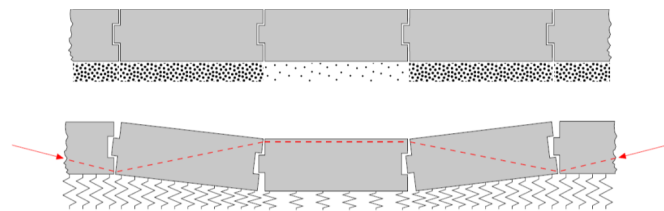


Figuur 13: Effect zonbestraling op toeritwanden.

5.3.5 *Temperatuur en verticale verplaatsingen*

Hoewel tunnels doorgaans minder onderhevig zijn aan temperatuurcycli kan de invloed van temperatuurveranderingen aanzienlijk zijn. Voor verplaatsingen in

lengterichting ligt dit voor de hand, maar ook in de verticale verplaatsingen kan een temperatuursinvloed merkbaar zijn, met name in geval van ongelijkmatige zakkingen. Wanneer een moot tussen zijn buurmoten wegzakt zullen ook de buurmoten deels meezakken, door de aanwezigheid van een tandverbinding. Het contact tussen de moten vindt dan plaats in het dak. Door de helling van de druklijn in de tunnel wordt de meestgezakke moot bij een toenemende normaalkracht (opwarmen tunnel) enigszins opgetild (figuur 14). Wanneer de normaalkracht weer afneemt (afkoelen tunnel) zakt de moot weer. Vergeleken met een benadering met zuivere scharnieren zijn de zettingen iets kleiner, maar de over te dragen krachten groter.



figuur 14: Relatie tussen normaalkracht en verticale verplaatsingen.

5.3.6 Getijdebeweging

De getijden op het kruisende water kunnen doorwerken in de verticale verplaatsingen van de tunnel; dit is bijvoorbeeld bij de Vlaketunnel het geval.

5.3.7 Voegverplaatsingen

Bij de interpretatie van voegopeningsmetingen is het van belang of deze samenhangen met axiale verplaatsingen of met horizontale of verticale verschilverplaatsingen.

- axiale verplaatsingen
In dit geval moeten de voegopeningen rond de omtrek ongeveer gelijke waarden hebben.
- horizontale en/of verticale verschilverplaatsingen
In dit geval verlopen de voegopeningen over de hoogte (bij ongelijkmatige verticale verplaatsingen) of over de breedte (bij ongelijkmatige horizontale verplaatsingen). De gemeten voegopening is te verifiëren aan de hand van de knik in het horizontale of verticale verplaatsingsverloop.

Bij de beoordeling van voegverplaatsingen dient ook de dwarsverplaatsing in het vlak en loodrecht op het vlak te worden beschouwd. Wanneer maar weinig voegbreedte in langsrichting aanwezig is kan een voegrubber loodrecht op het vlak weinig verschilverplaatsing hebben - het rubber wordt dan als het ware doorgeknipt. In dit kader is van belang om te weten hoe de voegen destijds zijn gemaakt: koud tegen elkaar gestort (vroeger gebruikelijk) of voorzien van zacht voegmateriaal (huidige praktijk voor toeritten).

Bij voegverplaatsingen is de deformatiedrempel niet van toepassing.

5.3.8 Meetnet en verplaatsingscomponenten

Deze paragraaf bevat enkele handreikingen met het oog op de beoordeling van het meetnet (zie 7.3).

Bij het gesloten deel van tunnels geldt dat meetpunten minimaal aanwezig dienen te zijn aan weerszijden van elke voeg, nabij beide buitenwanden.

In de toeritten dienen meetpunten aanwezig te zijn aan weerszijden van elke voeg, aan de bovenzijde van de wanden.

Deze meetpunten dienen in drie richtingen (x, y en z) ingemeten en gerapporteerd te worden.

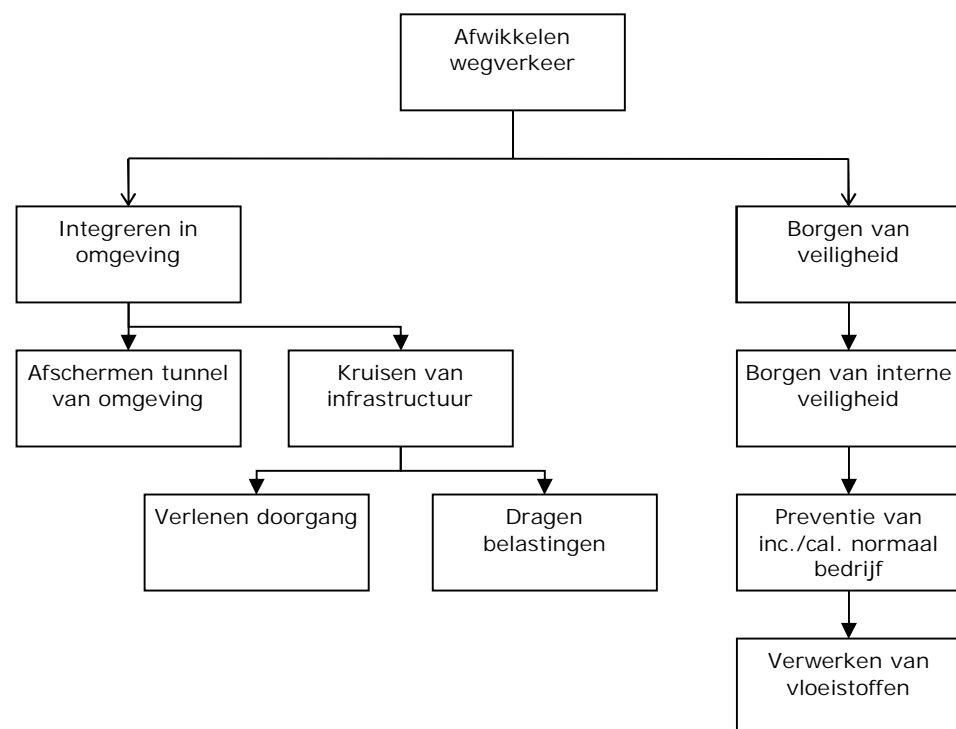
Om toeritwandverplaatsingen goed in beeld te krijgen wordt aanbevolen meetpunten aan boven- en onderzijde van de wanden te plaatsen.

Om voegopeningen goed in beeld te krijgen wordt aanbevolen de relatieve voegverplaatsing aan boven- en onderzijde te meten.

5.4 Faalmechanismen, grenstoestanden en gerelateerde deformaties

5.4.1 *Falen: definitie en faalmechanismen*

In de systematiek van het Analyse kader vaste kunstwerken [2] is sprake van falen wanneer een kunstwerk zijn functies niet meer in voldoende mate kan vervullen. De voor tunnels relevante functies zijn ontleend aan [9] en weergegeven in figuur 15.



figuur 15: Functies tunnels.

Functie Afschermen tunnel van omgeving

Het object faalt als

- de tunnel aangrenzende grond niet keert waardoor de weg en het wegverkeer in de tunnel niet vrij blijven van grond
Hiervan is sprake wanneer grondvoerende kieren ontstaan in de draagconstructie, of wanneer de afdichting in de dilatatievoegen bezwijkt.

- de tunnel aangrenzend (grond)water niet keert waardoor dit water in de tunnel kan komen.

Functie Kruisen van infrastructuur

Het object faalt als

- de tunnel de functionaliteit van kruisende locale wegen nadelig beïnvloedt, bijvoorbeeld door lokale zakkingen ten gevolge van uitgespoelde grond.

Functie Verlenen van doorgang

Het object faalt als

- de tunnel het wegverkeer niet veilig of comfortabel geleidt op een wijze passend binnen het Nederlandse (snel)wegennet, onderverwijzing naar de eisen en normen geldend voor het (snel)wegennet waar de tunnel een onderdeel van vormt;
- de tunnel niet in elke doorsnede plaats biedt aan het Profiel van Vrije Ruimte (PVR) voor het wegverkeer.

Functie Dragen belastingen

Het object faalt als

- de tunnel de relevante belastingen niet zodanig kan (af)dragen dat er geen belemmeringen of gevaren optreden voor het wegverkeer of de omgeving.

Functie Borgen van interne veiligheid

Het object faalt bij

- een hoger risico op calamiteiten in de tunnel, onder meer door onvoldoende vloeiende geleiding van het wegverkeer of waterbezwaar

Functie Verwerken van vloeistoffen

Het object faalt als

- hemelwater en andere vloeistoffen niet op een efficiënte wijze verzameld en afgevoerd kunnen worden, bijvoorbeeld doordat de vereiste afschotten ontbreken ten gevolge van deformaties

Deze definitie van falen sluit aan bij de kerntaken van Rijkswaterstaat. Met het oog op de analyse van deformatiemetingen kunnen de faalmechanismen richtinggevend zijn voor de beoordeling van de ernst van waargenomen deformaties.

Bovenstaande beschouwing van falen en faalmechanismen betreft het kunstwerk als geheel. Ook op een lager niveau kan falen worden gedefinieerd.

5.4.2

Grenstoestanden

Paragraaf 5.4.1 presenteert faalmechanismen gerelateerd aan functies van objecten en samenhangend met het gebruik ervan. Een andere benadering is een beoordeling in het kader van grenstoestanden. In de huidige praktijk van constructieve beoordeling van kunstwerken worden twee grenstoestanden onderscheiden:

- uiterste grenstoestand (ULS: *STR* en *GEO* in de Eurocodes), waarvan overschrijding inhoudt dat het kunstwerk rekentechnisch niet sterk genoeg is. Gerelateerde mechanismen zijn bijvoorbeeld buigbreuk, afschuifbreuk en geotechnisch falen;
- bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS), waarvan overschrijding inhoudt dat het gebruik van het kunstwerk belemmerd wordt (bijvoorbeeld door vervormingen)

of waterbezwaar), of dat de sterkte op termijn kan afnemen door aantasting van het materiaal (ten gevolge van bijvoorbeeld scheurvorming).

Het overschrijden van de SLS-criteria gaat meestal gepaard met falen in termen van functieverlies, maar niet altijd: een ernstig gescheurde constructie kan in principe onverminderd comfortabel zijn in gebruik, maar op termijn een gevaar betekenen voor de sterkte.

SLS en ULS zijn rekentechnische grenstoestanden. Doordat bij de toetsing aan deze grenstoestanden een zekere veiligheid wordt gehanteerd betekent overschrijding nog niet dat direct van functieverlies sprake is. Ook een constructie die reken-technisch bezwaken is kan voor het oog zijn functies prima vervullen.

Dit geeft aan dat herhalingsmetingen en inspecties maar tot op zekere hoogte voorspellend kunnen zijn ten aanzien van de mate waarin een kunstwerk in de toekomst zijn functies kan blijven vervullen.

5.4.3

Deformaties

tabel geeft een niet uitputtend overzicht van deformaties die indicatief kunnen zijn voor (aanstaand) functieverlies of overschrijden van grenstoestanden. Of deformaties ernstig zijn of niet hangt af van de grootte; het criterium verschilt van geval tot geval. Een zetting van 10 mm zal weinig problemen opleveren in termen van vlakheid of afwatering, terwijl een even grote verticale verschilverplaatsing over een voeg het rijcomfort aanzienlijk zal verlagen, zal leiden tot meer geluid en tot een kortere levensduur van de voegovergang. Wanneer deze verschilverplaatsing is opgetreden over een mootvoeg met kraagconstructie is dit in een onder water gelegen tunnel een indicatie voor de aanwezigheid van watervoerende scheuren.

tabel 4: Relatie tussen deformatie en falen.

Deformatie	Oorzaak	Gevolg	Functieverlies betreft	Grens-toestand
Uitbuiging toeritwanden	- Grond- en waterdruk (opspanning door temperatuur-cycli)	Scheurvorming buitenzijde, aantasting wapening, op termijn bezwijken wand, bij verplaatsingsverschillen mogelijk scheuren voegprofielen	Afschermen grond & water Dragen belastingen	SLS ULS
Horizontale verplaatsing (toerit)moten in lengterichting (X)	- Rupseffect (vervulde voegen i.c.m. temperatuur-cycli) - Normaalkracht in tunnel (GINA's) hoger dan balance-rende grond- en waterdrukken tegen toerit-moten	Scheuren voegprofielen, Breken funderingspalen Opdrijven (toerit)moten	Afschermen grond & water Dragen belastingen	SLS ULS
Horizontale verplaatsing (toerit)moten in dwarsrichting (Y)	- Onbalans in horizontale belastingen (ophoging of baggerwerkzaamheden)	Indien ongelijkmatig: scheuren voegprofielen, afbreken kraag/tand, lekkage	Afschermen grond & water Dragen belastingen, doorgang verlenen, borgen interne veiligheid	SLS
Verticale verplaatsing (toerit)moten (opwaarts, Z)	- Ontbreken verticaal evenwicht (ballast weggebaggerd, te hoge water- of slibdruk aan onderzijde) - Paalbreuk	Scheuren voegprofielen, Opdrijven (toerit)moten	Afschermen grond & water Dragen belastingen Doorgang verlenen Borgen interne veiligheid	SLS ULS
Ongelijkmatige verticale verplaatsingen	- Ongelijkmatige sterkte of stijfheid bedding - ongelijkmatige belasting	scheuren voegprofielen, afbreken kraag / tand, lekkage, problemen vloeistofafvoer	Afschermen grond & water, dragen belastingen, doorgang verlenen, borgen interne veiligheid, afvoeren vloeistoffen	SLS
Horizontale of verticale verplaatsingsverschillen over voegen	- Belastingafdracht over de voeg	afbreken kraag / tand, scheuren voegprofielen, lekkage schade aan voegovergang	Afschermen grond & water, dragen belastingen, doorgang verlenen, borgen interne veiligheid	SLS

5.5 Ontwikkeling van deformaties in de tijd

5.5.1 *Grafische weergave*

Naast de grootte van waargenomen deformaties is ook de ontwikkeling van deformaties in de tijd essentieel voor een correcte beoordeling. Een grafische weergave van de ontwikkeling van deformaties is mogelijk na drie of meer herhalingsmetingen. In figuur 2 zijn als voorbeeld twee grafieken van de ontwikkeling van vervormingen opgenomen.

5.5.2 *Vergelijking met verwachte ontwikkeling*

Uit de ontwikkeling van deformaties blijkt of de deformaties stabiliseren, monotoon voortgaan of progressief ontwikkelen.

Gronddeformaties en kruip zijn voorbeelden van mechanismen waarvan de snelheid normaal gesproken afneemt met de tijd. Dit komt tot uitdrukking in een min of meer logaritmisch verloop van de zakkingen in de tijd (zie figuur 2 onder). Monotoon toenemende (zie figuur 2 boven) of progressief ontwikkelende verticale verplaatsingen kunnen een indicatie zijn van onvoldoende draagkracht van de fundering.

Horizontale verplaatsingen kunnen gekoppeld zijn aan zettingen - in dat geval moet het verloop gelijkvormig zijn aan de ontwikkeling van de verticale verplaatsingen; dat hoeven niet noodzakelijk de verticale verplaatsingen van hetzelfde punt te zijn. Wanneer horizontale verplaatsingen monotoon toenemen kan dat een indicatie zijn van een horizontale onbalans in grondbelastingen (bijvoorbeeld gronddrukken tegen de toeritvloer ten opzichte van de normaalkracht in de tunnelbuis) of van een rups-effect ten gevolge van vervuilde voegen in combinatie met een zomer-winter-cyclus. Omdat deze mechanismen niet of pas na grotere verplaatsingen stabiliseren⁶ houdt dit een risico in voor bijvoorbeeld opleggingen, steunpunten, voegopeningen etc.

Meer dan monotoon toenemende verplaatsingen zijn over het algemeen een indicatie van onvoldoende sterkte.

5.5.3 *Aandachtspunten*

Bij de beoordeling van de ontwikkeling van gemeten deformaties in de tijd gaat het niet om de individuele metingen, maar om de trend. De individuele metingen vormen een puntenwolk ten gevolge van meetruis, getijden, weers- en seizoensinvloeden. De trend zal zich duidelijker aftekenen bij een groter aantal herhalingsmetingen.

Bij de planning van vervolgmetingen dient rekening gehouden te worden met de logaritmische ontwikkeling van de meeste deformaties. Een deformatie die in n jaar is ontstaan zal algemeen gesproken pas verdubbeld zijn na n^2 jaar. Wanneer de resultaten van een serie herhalingsmetingen duidelijk wijzen op grondgedrag of kruip als oorzaak van de deformaties en inspecties geen aanleiding geven om op korte termijn te meten, kan ervoor gekozen worden de herhalingsmetingen met een

⁶ Wanneer sprake is van onbalans zal de normaalkracht in de tunnelbuis afnemen door de verplaatsingen van de overgangsconstructies (in lengterichting van de tunnel). Omdat de rubberprofielen in de voegen een lage stijfheid hebben (GINA) is hier een relatief grote verplaatsing voor nodig.

lagere frequentie uit te voeren of op te schorten tot uit inspectieresultaten de noodzaak blijkt de metingen te hervatten⁷.

⁷ Vanwege het bijzondere karakter van tunnels dient hier voorzichtig mee omgegaan te worden.

6 Beoordeling deformaties voor natte kunstwerken

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van herhalingsmetingen en de beoordeling van de staat van het kunstwerk op basis van de resultaten daarvan. Paragraaf 6.2 beschrijft de typen constructies en onderdelen, waarna paragraaf 6.3 ingaat op deformaties die kenmerkend zijn voor sluizen. In paragraaf 6.4 wordt ingegaan op deformaties die samenhangen met falen en overige deformaties. Paragraaf 6.5 gaat in op de ontwikkeling van deformaties in de tijd.

Dit hoofdstuk is, in lijn met de ROK, vanuit het algemene kader van de categorie 'natte kunstwerken' beschreven. De oefenexercitie voorafgaand aan het opstellen van dit document omvatte enkele sluizen en een gemaal. Hoewel de toepasbaarheid daarmee niet automatisch beperkt is tot deze typen kunstwerken, kan het zijn dat niet alle deformatie-invloeden op de andere typen kunstwerken in kaart zijn gebracht.

Bij deformatiemetingen aan natte kunstwerken wordt alleen de niet-beweegbare constructie ingemeten, net als bij beweegbare bruggen. De niet-beweegbare constructie vormt de conditie voor het aanwezige aandrijf- en bewegingswerk. Bij het analyseren van deformatiemetingen dient daarom aandacht besteed te worden aan de mate waarin het aandrijf- en bewegingswerk zijn functies kan vervullen, gegeven de opgetreden deformaties van de omringende constructie.

6.1 Brondocumenten en relevante data

Bij de bureaustudie dient onderstaande informatie, indien beschikbaar, te worden geraadpleegd:

- Meetrapportages;
- Kunstwerkgegevens (DISK-paspoort);
- (Besteks)tekeningen;
- Historie (wijzigingen kunstwerk, gebruik of omgeving);
- Inspectierapporten;
- Onderzoeksrapporten;
- Geotechnisch advies.

In de rapportage van de beoordeling van de herhalingsmeting dient vermeld te worden welke informatie ontbreekt.

6.2 Type constructies en onderdelen

6.2.1 *Type constructies*

Kunstwerken van Rijkswaterstaat hebben verschillende benamingen – soms zijn er verschillende benamingen voor eenzelfde type kunstwerk. De categorie natte kunstwerken is zeer divers. Conform de Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken [5] is deze categorie onderverdeeld in de volgende kunstwerken:

- Schutsluis;
- Stuw;
- Sifon;
- Spuisluis;
- Stormvloedkering;

- Kade;
- Haven;
- Gemaal;
- Riolering;
- Waterreguleringswerk.

De categorie 'natte kunstwerken' is zeer divers; het betreft 'civiel-bouwkundige constructies die onderdeel zijn van een vaarweg of waterweg met als doel regulering van waterstanden, passage van schepen, hoogwaterbescherming, kruising van waterwegen of afvoer van water (ROK).

Per type kunnen bijzondere aandachtspunten van belang zijn met betrekking tot de beoordeling van deformaties. Zo kunnen deze constructies worden onderverdeeld naar de aanwezigheid van aandrijving en bewegingswerk. Is aandrijving en bewegingswerk aanwezig, dan dient aandacht besteed te worden aan de mate waarin deformaties een specifieke beweging belemmeren.

Gezien de grote variatie binnen de categorie natte kunstwerken, en de beschouwde constructies bij de totstandkoming van dit document, is het vervolg van dit hoofdstuk beperkt tot de subcategorie (schut- en spui-) sluizen. De overige subcategorieën kunnen worden gekoppeld aan categorieën die wel in deze richtlijn worden behandeld op basis van gelijkenis: stuw (spuisluis), sifon/riolering (tunnel), stormvloedkering/kade (schutsluis).

6.2.2

Elementen en bouwdelen

Voor de decompositie van kunstwerken wordt aangesloten bij NEN 2767, waar sprake is van *elementen* en *bouwdelen*, zie NEN 2767-4-2:2010 [4].

Deze decompositie is van belang om op systematische wijze mogelijke oorzaken en gevolgen van waargenomen deformaties te kunnen inventariseren.

Onderstaande opsomming bevat de elementen van het object Schutsluis, met daaraan toegevoegd de elementen van het object Spuisluis (gemarkeerd met *). De volledige lijst in NEN 2767-4-2 is zeer uitgebreid. In onderstaande opsomming zijn alleen de elementen opgenomen die min of meer direct door deformaties worden beïnvloed. Weggelaten zijn elementen gerelateerd aan voeding, communicatie, logging en ecologie. NB: bij deformatiemetingen conform [1] wordt alleen de betonconstructie gemeten; vervormingen kunnen van invloed zijn op onderstaande elementen.

Aandrijving en bewegingswerk (elektrohydraulisch, elektromechanisch, mechanisch)

Afmeervoorziening

Afsluitboominstallatie

Bedienings- en besturingssysteem

Bodembescherming

Brandblussysteem

Doorlaatkoker *

Fundering

Gebouw

Geleideconstructie

Grendelinrichting

Heftoren
Hemelwaterafvoer (HWA)
Hijs- en transportinstallatie
Hoofddraaipunt
Inspectiewagen
Kabel
Kabeldraagconstructie
Kelder
Kerende constructie
Klepconstructie *
Leiding
Leuning
Loopbrug
Oeverbescherming
Onderhoudsvoorziening
Pompgebouw *
Pompinstallatie
Remming- en/of geleidewerk
Schuifconstructie *
Slijtlaag
Sluisdeur (hef, punt, rol)
Sluishoofd
Sluiskolk
Steiger
Stuwhoofd *
Talud
Terrein
Toegangshek (elektro-mechanisch rolhek of draaihek)
Vangconstructie t.b.v. scheepvaart
Verankering
Verharding
Vluchtweginstallatie
Voegovergang
Zinker

Onderliggende bouwdelen evenals overige objecten binnen de categorie natte kunstwerken worden hier niet genoemd. Hiervoor wordt doorverwezen naar de NEN 2767-4-2:2010 [4].

De elementen sluisdeur, sluishoofd en sluiskolk zijn op te vatten als super-elementen, die op hun beurt verder kunnen worden opgedeeld. Onderstaande opsommingen bevatten eveneens alleen die elementen die relevant zijn met het oog op deformaties:

Sluisdeur
Aanslag
Deurgeleiding
Draaipunt
Har

Nivelleerschui
Rail

Sluishoofd
Achterloopheidscherm
Dekzerkprofiel
Deurgeleiding
Deurrails
Dilatatievoeg
Drempel
Halslager
Omloopriool
Onderloopsheidscherm
Taats
Vloer
Wand

Sluiskolk
Bodemprotectie
Damwand
Dekzerkprofiel
Dilatatievoeg
Vloer
Wand

- 6.3 Sluizen en deformaties
In deze paragraaf wordt ingegaan op deformaties die kenmerkend zijn voor sluizen. Algemeen geldt dat deformatiemetingen altijd betrekking hebben op de civiele constructie, meestal dus een betonconstructie, een metselwerkconstructie of een dam- of diepwand. Deze vervormingen kunnen gevolgen hebben voor het binnenliggende aandrijf- en bewegingswerk. Deformaties van het sluishoofd of de kolk worden soms gemeten aan de dekzerken; het spreekt vanzelf dat dit in de beoordeling van gemeten deformaties meegenomen dient te worden.
- 6.3.1 *Deformaties gerelateerd aan scheepsbelastingen*
Veel van de bij schutsluizen waargenomen deformaties zijn direct te relateren aan belastingen door scheepvaart. Een lokale horizontale deformatie haaks op de wand is met grote waarschijnlijkheid veroorzaakt door een scheepsstoot. Hetzelfde geldt voor deformaties van remming- of geleidewerken. Deze wanddeformaties leiden niet tot verminderde functionaliteit, tenzij de vervorming gepaard gaat met schade (scheurvorming, kieren tussen damwandplanken).
Een aanvaring van het sluishoofd kan leiden tot deformaties als
- scheluwte (waardoor deuren niet goed meer sluiten)
 - dilatatievoegopening (waardoor mogelijk grond uitspoelt).
- Deze deformaties hebben wel direct gevolgen voor de functionaliteit van de sluis.
- 6.3.2 *Grondtransport*
Een sluis is op te vatten als een geotechnische constructie, in zoverre de belastingen en de stabiliteit voor een belangrijk deel samenhangen met de omringende grond. Door te hoge stroomsnelheden, door openingen in de sluiswand (watervoerende scheuren of dilataties) of door onvoldoende functioneren van achter- en

onderloopsheidschermen kan grondtransport optreden. Het uitspoelen van grond in de sluiskolk door hoge stroomsnelheden in het water (bijvoorbeeld ten gevolge van schroefstralen) kan leiden tot verminderde stabiliteit van de kolkwand. Aan de andere kant leidt het uitspoelen van grond achter de wand tot verminderde grondbelasting, wat zichtbaar kan worden in een relatieve verplaatsing van de kolkwand tegen de grond in, of in lokale zettingen van het oppervlak buiten de kolkwand. Deformaties van het sluishoofd kunnen samenhangen met grondtransport door achter- en onderloopsheid.

Deze (vaak irreversibele) deformaties zijn een indicatie van fenomenen die zeer bedreigend kunnen zijn voor het functioneren van het kunstwerk en de stabiliteit van de constructie. Wanneer grondtransport leidt tot een ondermijnd maaiveld, is er tevens risico op persoonlijk letsel.

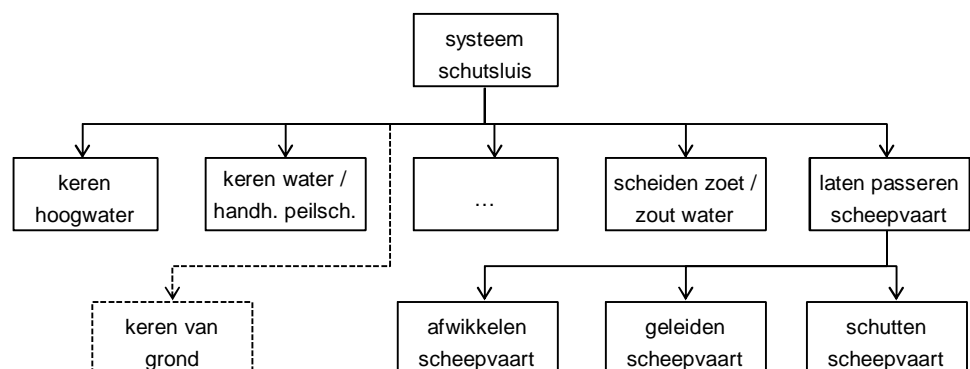
6.3.3 Effecten van schutten

Door het herhaald vullen en legen van de sluiskolk worden de wanden meer en minder tegen de grond ingedrukt, waardoor de grond zich afwisselend actief en passief gedraagt. Hoewel de belasting verschilt, is het fenomeen verder gelijk aan het effect van zonbestraling (zie bij tunnels, 5.3.4): bij het legen van de kolk wijkt de wand van de grond en zakt de grond wat na in de spleet. Bij het vullen van de kolk wordt niet meer de oorspronkelijke positie bereikt, en spant de grond meer op. Het resultaat kan zijn dat de wanden met elke schutcyclus verder naar binnen verplaatsen.

6.4 Faalmechanismen, grenstoestanden en gerelateerde deformaties

6.4.1 Falen: definitie en faalmechanismen

In de systematiek van het Analyse kader vaste kunstwerken [2] is sprake van falen wanneer het kunstwerk zijn functies niet meer (in voldoende mate) kan vervullen. De voor natte kunstwerken relevante functies zijn ontleend aan de netwerkfuncties van het hoofdwegennet en hoofdvaarwegennet (zie Basisspecificatie Schutsluis [3]). Voor een schutsluis zijn deze weergegeven in onderstaande figuur. Aan de functies uit de basisspecificatie is daarnaast de functie 'keren van grond' toegevoegd.



figuur 6 Functieboom Schutsluis, waarvan alleen de door deformaties beïnvloede basisfuncties zijn opgenomen (bron: Basisspecificatie Schutsluis [15]).

Functie Keren hoogwater

Het object faalt als

- het object niet in staat is hoogwater te keren conform de betreffende normfrequentie en de randvoorwaarden zoals deze zijn verwoord in het document Hydraulische Randvoorwaarden.
Voor objecten die geen onderdeel uitmaken van een primaire of regionale waterkering is deze eis niet van toepassing.

Functie Keren water / handhaven peilscheiding

Het object faalt als

- het object niet in staat is water te keren zonder ontoelaatbare lekkage.
Hiervan is bijvoorbeeld sprake als sluisdeuren niet goed sluiten als gevolg van deformaties.
Wanneer deuren niet goed sluiten, is dit een indicatie dat de deuren niet goed worden ondersteund, en dus een andere krachtswerking ondergaan dan ontworpen.

Functie Scheiden zoet/zout water

Het object faalt als

- het object niet in staat is zoet/zout water te scheiden gegeven de in het document Hydraulische Randvoorwaarden gedefinieerde waterstanden.
Hiervan is bijvoorbeeld sprake als sluisdeuren niet goed sluiten als gevolg van deformaties.

Functie Laten passeren scheepvaart

Het object faalt als

- het object niet in staat is het maatgevende schip te laten passeren
Hiervan is bijvoorbeeld sprake als de doorvaartopening is verminderd als gevolg van deformaties.
- het object niet in staat is een gespecificeerd schip een gespecificeerde gemiddelde passeertijd te bieden bij de maatgevende verkeersintensiteit.
Hiervan is bijvoorbeeld sprake als het schutten langer duurt doordat de deuren vanwege deformaties niet goed sluiten. Deze definitie van falen hangt samen met de maximale schuttijd bij maatgevende waterstanden.

Functie Grond keren

Het object faalt als

- het object niet in staat is grond te keren
Hiervan is bijvoorbeeld sprake als voegen open zijn gaan staan als gevolg van deformaties.

Deze definitie van falen sluit aan bij de kerntaken van Rijkswaterstaat. Met het oog op de analyse van deformatiemetingen kunnen de faalmechanismen richtinggevend zijn voor de beoordeling van de ernst van waargenomen deformaties.

6.4.2

Grenstoestanden

Paragraaf 6.4.1 presenteert faalmechanismen gerelateerd aan functies van objecten en samenhangend met het gebruik ervan. Een andere benadering is een beoordeling in het kader van grenstoestanden. In de huidige praktijk van constructieve beoordeling van kunstwerken worden twee grenstoestanden onderscheiden:

- uiterste grenstoestand (ULS: *STR* en *GEO* in de Eurocodes), waarvan overschrijding inhoudt dat het kunstwerk rekentechnisch niet sterk genoeg is. Gerelateerde mechanismen zijn bijvoorbeeld buigbreuk, afschuifbreuk en geotechnisch falen;
- bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS), waarvan overschrijding inhoudt dat het gebruik van het kunstwerk belemmerd wordt (bijvoorbeeld door vervormingen), of dat de sterkte op termijn kan afnemen door aantasting van het materiaal (ten gevolge van bijvoorbeeld scheurvorming).

Het overschrijden van de SLS-criteria gaat meestal gepaard met falen in termen van functieverlies, maar niet altijd: een ernstig gescheurde constructie kan in principe onverminderd comfortabel zijn in gebruik, maar op termijn een gevaar betekenen voor de sterkte.

SLS en ULS zijn rekentechnische grenstoestanden. Doordat bij de toetsing aan deze grenstoestanden een zekere veiligheid wordt gehanteerd betekent overschrijding nog niet dat direct van functieverlies sprake is. Ook een constructie die reken-technisch bezwaken is kan voor het oog zijn functies prima vervullen.

Dit geeft aan dat herhalingsmetingen en inspecties maar tot op zekere hoogte voorspellend kunnen zijn ten aanzien van de mate waarin een kunstwerk in de toekomst zijn functies kan blijven vervullen.

6.4.3

Deformaties

Onderstaande tabel geeft een niet uitputtend overzicht van deformaties die indicatief kunnen zijn voor (aanstaand) functieverlies of overschrijden van grenstoestanden. Of deformaties ernstig zijn of niet hangt af van de grootte; het criterium verschilt van geval tot geval. Een kolkwandverplaatsing van 50 mm zal weinig problemen opleveren, terwijl een even grote vervorming in het sluishoofd kan leiden tot slecht sluitende deuren, slecht functioneren van het bewegingswerk of functieverlies van sensoren.

tabel 4: Relatie tussen deformatie en falen.

Deformatie	Oorzaak	Gevolg	Functieverlies betreft	Grens-toestand
Horizontale verplaatsing kolkwand	<ul style="list-style-type: none"> - Onvoldoende sterkte wand - Scheurvorming - Kruip - Materiaalafname t.p.v. spatzone - Belasting vanuit scheepvaart - Toegenomen horizontale belasting t.g.v. ophoging of opgespannen grond 	Onvlak oppervlak	Geleiden scheepvaart	SLS
	<ul style="list-style-type: none"> - Uitspoelen grond 	Onvlak oppervlak, maaiveldzakking, stabiliteitsverlies	Geleiden scheepvaart, keren grond	SLS, ULS
Zakking van benedenhoofd / bovenhoofd / tussenhoofd	<ul style="list-style-type: none"> - Onvoldoende geotechnisch draagvermogen - Uitspoeling van grond 	Lagere kerende hoogte	Keren hoogwater	ULS
		Functieverlies spuikanalen	Spuien water, Schutten scheepvaart	SLS
		Functieverlies deuren (lekkage, ...)	Handhaven peilscheiding, scheiden zoet/zout water, schutten scheepvaart	SLS
Horizontale verplaatsing benedenhoofd / bovenhoofd / tussenhoofd	<ul style="list-style-type: none"> - Onvoldoende geotechnisch draagvermogen - Belasting vanuit de scheepvaart - Uitspoeling van grond 	Functieverlies spuikanalen	Spuien water, Schutten scheepvaart	SLS
		Functieverlies deuren (lekkage, ...)	Handhaven peilscheiding, scheiden zoet/zout water, schutten scheepvaart	SLS
		Verminderde doorvaartopening	Afwikkelen scheepvaart	SLS
Horizontale verplaatsing remming- en/of geleidewerk	<ul style="list-style-type: none"> - Onvoldoende sterkte constructie - Onvoldoende geotechnisch draagvermogen - Belastingen vanuit de scheepvaart 	Kortere levensduur remming- en/of geleidewerk	Geleiden scheepvaart	SLS

6.5 Ontwikkeling van deformaties in de tijd

Wanneer na de nulmeting minimaal twee metingen zijn uitgevoerd kan een grafiek worden gemaakt van de ontwikkeling in de tijd (zie bijvoorbeeld hoofdstuk 5.5).

Specifiek voor sluizen wordt daarbij het volgende opgemerkt:

- Deformaties die samenhangen met scheepvaartbelastingen leiden tot een sprong in de ontwikkeling van deformaties – na het optreden van de deformatie neemt deze niet noemenswaardig meer toe of af
- Deformaties die samenhangen met zettingen in de ondergrond hebben meestal een 'logaritmisch' verloop, waarbij de ontwikkeling na enkele tientallen jaren min of meer tot stilstand zou moeten komen
- Deformaties die samenhangen met gronduitspoeling of herhaalde belastingen kunnen een lineaire of zelfs versnellende trend laten zien.

7 Beoordelingsproces

Dit hoofdstuk beschrijft het proces van de beoordeling van herhalingsmetingen, van de inventarisatie van beschikbare gegevens tot de beoordeling van het risico en de advisering.

Met het oog op objectiviteit en reproduceerbaarheid dient de beoordeling te verlopen volgens een gestructureerd proces.

7.1 Inventarisatie

Bij de aanvang van de beoordeling worden naast de meetrapportage onderstaande gegevens verzameld.

- Kenmerken kunstwerk
 - Type
 - Bouwjaar en tijdstip nulmeting
 - Ligging (in/over rijksweg)
 - Renovaties
- Tekeningen
- Inspectieresultaten en overige informatie over de kunstwerkhistorie

Wanneer geen informatie over de kunstwerkhistorie aanwezig is, verdient het aanbeveling de beheerder te raadplegen.

7.2 Evaluatie van de waargenomen deformaties

Op basis van de meetrapportage worden de maatgevende deformaties geïnventariseerd en samengevat. Hulpmiddel hierbij is de grafische weergave van deformaties in de meetrapportage. Uit deze grafische weergave volgt het globale vervormingsbeeld en de mate waarin lokaal afwijkingen voorkomen op het globale beeld.

In het meetrapport wordt op basis van de deformatiedrempel vastgesteld of sprake is van daadwerkelijke deformaties. Wanneer uit het meetrapport blijkt dat er geen sprake is van deformaties kan de analyse sneller worden doorlopen.

Bij drie of meer herhalingsmetingen kan de ontwikkeling van maatgevende deformaties in de tijd worden uitgezet in een grafiek.

7.3 Analyse van de maatgevende deformaties

Bij deformaties groter dan de deformatiedrempel dienen deze te worden beoordeeld door middel van een analyse waarin onderstaande stappen worden doorlopen.

- Omvang
Zijn de significante deformaties alleen lokaal aanwezig of beslaan ze een groter gebied?
- Herleiden naar (faal)mechanisme
In deze stap wordt nagegaan of de deformaties groter dan de deformatiedrempel op consistente wijze samenhangen met deformaties van andere meetpunten of met bij inspecties waargenomen schade, rekening houdend met het gestelde in paragraaf 2.4. Wanneer uit de gemeten deformaties en inspectieresultaten geen consistent beeld kan worden gevormd,

is mogelijk sprake van een non-deformatie (meetfout, onjuiste nulmeting, ...). Bij deze stap wordt indien mogelijk en relevant ook de ontwikkeling van de deformaties in de tijd betrokken.

- **Verwachting ontwikkeling in de tijd**
Op basis van de vorige stap en de reeds opgetreden ontwikkeling wordt indien mogelijk een uitspraak gedaan over de verwachte nog resterende ontwikkeling van de deformaties.
- **Beoordeling deformaties ten aanzien van functieverlies, constructiegedrag, elementen en bouwdelen**
Op basis van de mechanismen en de ontwikkeling in de tijd dient de ernst van de deformaties te worden beoordeeld. Hierbij wordt aandacht besteed aan mogelijk functieverlies (zie paragraaf 5.4.1) en het overschrijden van grenstoestanden (paragraaf 5.4.2). Ook wordt nagegaan in hoeverre deformaties van een element of bouwdeel invloed hebben op andere elementen of bouwdelen of op het bouwdeel zelf (zie bijvoorbeeld paragraaf 5.4.3).
- **Beoordeling risico's**
De resultaten van de voorgaande stappen zijn de basis voor een beoordeling van risico's ten aanzien van functieverlies en veiligheid, voor zover deze door deformaties kunnen worden vastgesteld. Gezien het karakter van de beoordeling kunnen risico's slechts kwalitatief worden beoordeeld. In Tabel 5 is de risicotabel opgenomen waarmee op theoretische gronden een risico-inschatting kan worden gemaakt. Wanneer het risico op gevaarlijke situaties, aantasting van de constructieve veiligheid of functieverlies onacceptabel is, dient dit nader te worden gespecificeerd.

tabel 5: Risico-inschatting.

	<i>Risico inschatting</i>	<i>Toelichting</i>
X	Het risico is acceptabel.	De kans op gevaarlijke situaties / aantasting van de constructieve veiligheid / functieverlies is naar verwachting klein.
		De kans op gevaarlijke situaties / aantasting van de constructieve veiligheid / functieverlies is naar verwachting gemiddeld. Nader onderzoek is nodig om te komen tot een nadere onderbouwing van het risico.
	Het risico is onacceptabel.	De kans op gevaarlijke situaties / aantasting van de constructieve veiligheid / functieverlies is naar verwachting groot.
		Op basis van de beschikbare informatie kan het risico onvoldoende worden beoordeeld.

Tabel 6: Theoretische bepaling van kans × gevolg.

Kans	Gevolg			
	Verwaarloosbaar	Klein	Groot	Ernstig
Kans van falen is onacceptabel (calamiteit)	3 - verhoogd	4 - hoog	5 - onacceptabel	5 - onacceptabel
Geaccepteerde faalkans is ver gepasseerd	3 - verhoogd	3 - verhoogd	4 - hoog	5 - onacceptabel
Geaccepteerde faalkans is gepasseerd	2 - beperkt	3 - verhoogd	3 - verhoogd	4 - hoog

Hoger dan direct na oplevering; de geaccepteerde faalkans wordt benaderd	1 - verwaarloosbaar	2 - beperkt	3 - verhoogd	3 - verhoogd
Hoger dan direct na oplevering, maar binnen de geaccepteerde faalkans	1 - verwaarloosbaar	1 - verwaarloosbaar	2 - beperkt	2 - beperkt
Niet hoger dan direct na oplevering	1 - verwaarloosbaar	1 - verwaarloosbaar	1 - verwaarloosbaar	1 - verwaarloosbaar

- Beoordeling meetnet

Op basis van de voorgaande stappen wordt beoordeeld in hoeverre het huidige meetnet toereikend is voor de beoordeling van de conditie van het kunstwerk op basis van herhalingsmetingen. Bij deze beoordeling wordt aangegeven welke meetpunten mogelijk onbruikbaar zijn (onjuiste nulmeting, instabiel meetpunt). Ook kan worden aangegeven of extra meetpunten nodig zijn of dat specifieke meetpunten weinig relevante informatie geven en de volgende keer kunnen worden overgeslagen.

7.4

Advisering op basis van de analyse

Bij de advisering wordt op basis van de analyse aangegeven welke maatregelen nodig zijn en op welke termijn; zie onderstaand voorbeeld. Voorbeelden van mogelijke maatregelen zijn:

- Het voortzetten of opschorten van de herhalingsmetingen of het aanpassen van de meetfrequentie;
- Het vervangen van onbetrouwbare meetpunten, het toevoegen van nieuwe meetpunten of het uitsluiten van niet-relevante meetpunten;
- Het uitvoeren van een inspectie, eventueel met bijzondere aandacht voor specifieke onderdelen;
- Het uitvoeren van een constructieve beoordeling van het kunstwerk.

Tabel 7: Advisering.

	Vervolgacties	Onderbouwing/specificatie	Termijn
	Geen vervolgacties		
X	Uitvoeren aanvullende deformatiemeting	Plotseling toegenomen steunpuntszakking en voegverplaatsingen	1 jaar
X	Uitvoeren toestandsinspectie	Bijzondere aandacht voor fundering middenpijler en voegovergangen	3 mnd
	Nadere constructieve beschouwing		
	Aanpassen meetnet		

tabel 8: Advisering.

Advies <i>Overnemen in IORA</i>	Toelichting op wanneer gebruiken	Planjaar <i>Termijn van uitvoering van herhalingsmeting</i>
Geen actie ondernemen	Als een risico is geanalyseerd en niet beheerst hoeft te worden. Benoemen heeft als doel voorkomen dat dit risico bij elke inspectie c.q. herhalingsmeting opnieuw wordt onderzocht	Geen actie
Gericht Technische Inspectie	Als de ontwikkeling van het risiconiveau zo onzeker is dat deze: - Niet beheerst kan worden in de reguliere cyclus van programmerings- en toestandinspecties al dan niet gecombineerd met (preventief) onderhoud en/of het uitvoeren van (specifieke) herhalingsmetingen - En de gevolgen ten aanzien van een van de eisen aanzienlijk kunnen zijn.	Frequentie nader bepalen
Meenemen in vast onderhoud	Als risico's met een risiconiveau 3-verhoogd of 4-hoog geconstateerd worden die binnen het vast onderhoud verholpen kunnen worden	Frequentie nader bepalen
Monitoren	Als de ontwikkeling van het risiconiveau bij een geconstateerd risico zo onzeker is dat deze: - Niet beheerst kan worden in de reguliere cyclus van programmerings- en toestandinspecties al dan niet gecombineerd met (preventief) onderhoud. - En de gevolgen ten aanzien van een van de eisen aanzienlijk kunnen zijn. - Alleen beheerst kan worden door periodiek gericht een inspectie uit te voeren en/of het uitvoeren van herhalingsmetingen	Frequentie nader bepalen
Uitvoeren (aanvullende) herhalingsmeting	Als de ontwikkelingen van zettingen niet verlopen volgens de prognose waardoor functieverlies van het Object kan optreden. Uit het risicoprofiel van het Object volgt dat dit noodzakelijk is.	Frequentie nader bepalen
Nader onderzoek	Als bij een herhalingsmeting een risico wordt geconstateerd waarvan het risiconiveau niet bepaald kan worden binnen de scope van de opdracht, maar mogelijk 3-verhoogd of 4-hoog is.	Frequentie afhankelijk van nader onderzoek
Onderhouden	Als het bouwdeel onderhouden moet worden. Vervanging van een of enkele elementen of componenten wordt ook beschouwd als onderhoud.	Geen actie
Vervangen	Als het gehele bouwdeel vervangen moet worden	Actie voor en na uitvoering vervanging

- 7.5 Rapportage beoordeling herhalingsmetingen
Een voorblad en standaardinhoudsopgave van de laatste versie van het adviesrapport is in de vorm van een template opgenomen in de bijlage.

Bijlage: Template adviesrapport beoordeling herhalingsdeformatiemetingen



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

ADVIESRAPPORT

BEHOREND BIJ

DEFORMATIEMETING

<COMPLEXNAAM UIT DISK>

<COMPLEXCODE-OBJ.NR.>-<VOLGNR. METING>

<NAAM BEHEEROBJECT UIT DISK>

<Omschrijving beheerobject uit DISK>

OPNAMEDATUM: **<JJJJ-MM-DD>**

Versie: **<JJJJ-MM-DD>**

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat		
Beheerder	: <naam beheerder uit DISK>	
Complex	: <naam complex uit DISK>	Opdr.nr.: <TOPdesknummer>
Rijksweg	: <nr. rijksweg/vaarweg uit DISK>	Opgesteld door:
Hectometer:	: <hectometer uit DISK>	<naam opsteller, bedrijfsnaam>
Stichtingsjaar:	: <st.jaar beheerobject uit DISK>	
Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud		
Techniek en Technische management ICO		
Griffioenlaan 2, Postbus 20.000, 3502 LA Utrecht		

<COMPLEXCODE-OBJ.NR.>--<VOLGNR. METING>
<NAAM BEHEEROBJECT>

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	1
GECONSTATEERDE RISICO'S:	1
MAATREGELEN EN TERMIJN VAN UITVOERING:	1
AANDACHTSPUNTEN VOOR DE BEHEERDER:	1
PLANJAAR:	1
INHOUDSOPGAVE	2
1. INLEIDING	3
1.1 AANLEIDING VAN DE METING	3
1.2 OMSCHRIJVING VAN DE WERKZAAMHEDEN	3
2. BEHEEROBJECTGEGEVENS	4
2.1 BESCHRIJVING BEHEEROBJECT	4
2.1.1 Overzichtsfoto's	4
2.1.2 Kenmerken	4
2.1.3 Statische bepaling	4
2.1.4 Ontwerputgangspunten	4
2.1.5 Instandhoudingsonderdelen	4
2.1.6 Historie	4
2.2 BUREAUSTUDIE	4
2.2.1 Brongegevens	4
2.2.2 Liggingsplan	4
3. RISICOANALYSE	5
3.1 RISICOBEELD	5
3.2 KRITISCHE MEETPUNTEN	5
3.3 ZETTINGSVERLOOP - THEORETISCHE BESCHRIJVING	5
3.4 ZETTINGSVERLOOP - GRAFISCHE WEERGAVE A.D.H.V. DE THEORETISCHE BESCHRIJVING	5
3.5 ANALYSE VAN DE MEETGEGEVENS	5
3.6 INVLOED VAN DE ZETTING OP HET BEHEEROBJECT	6
4. ADVIES	7
4.1 GECONSTATEERDE RISICO'S	7
4.2 BEHEERSMAATREGELEN	7
4.3 URGENTIE EN PLANJAAR	7
BIJLAGE I - LIGGINGSPLAN MET GEMARKEERDE KRITISCHE MEETPUNTEN	8
BIJLAGE II - ZETTINGSGRAFIEKEN	9
BIJLAGE III - ORA TEMPLATE HERHALINGSMETINGEN	10