



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2024

*Vervangings- en renovatieopgave
natte kunstwerken in Nederland*

Kennisbijdrage:

Einde levensduur damwanden

Praktische handreiking proefbelasten -
Verkenning naar verbeterde beoordeling
van bestaande damwanden
met behulp van proefbelasten

Auteurs

Hans Landwehr (Deltares)
Hans Brinkman (Deltares)
Renger van de Kamp (Rijkswaterstaat)
Diego Allaix (TNO)

kenmerk : KpNK-2023-KV1.2-damwand-a007
versie : 1.0
datum publicatie : 31 december 2024



Voorwoord

Kennisprogramma Natte Kunstwerken

Sluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen zijn belangrijke assets waarvoor beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen verantwoordelijk zijn. Veel van deze natte kunstwerken in de waterinfrastructuur bereiken de komende decennia het einde van hun (technische en/of functionele) levensduur. Zij kunnen daardoor hun functies naar verwachting niet meer adequaat blijven uitoefenen. Dit zal ten koste gaan van de mate waarin de waterinfrastructuur voldoet aan betrouwbaarheidseisen. In het kader van goed assetmanagement staan we dan ook voor de enorme opgave om deze kunstwerken te vervangen of te renoveren. Welke kennis hebben we nodig om dat efficiënt, kostenbesparend en toekomst-bestendig aan te pakken?

Deltares

MARIN

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

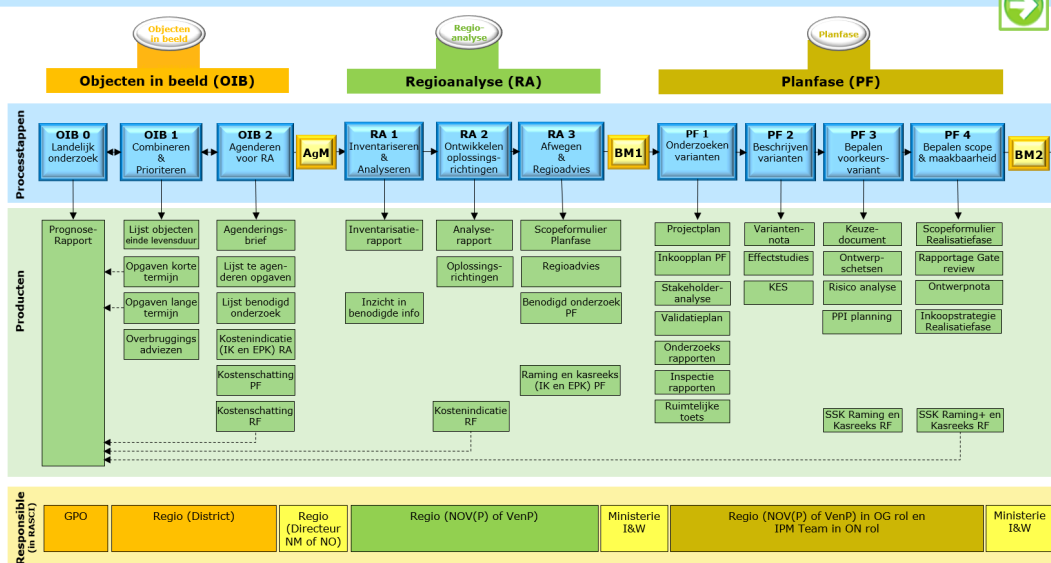
TNO

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) ontwikkelen en bundelen Deltares, MARIN, TNO en Rijkswaterstaat deze kennis op basis van de Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken.

Werkwijze vervangings- en renovatieproces

De laatste jaren richten we ons niet meer uitsluitend op een-op-een vervanging van kunstwerken. We zoeken steeds meer naar mogelijkheden om hun levensduur te verlengen en (noodzakelijke) ingrepen te koppelen aan gebieds- en netwerkontwikkelingen en aan functionele ontwikkelingen. Rijkswaterstaat heeft als assetmanager een vernieuwde werkwijze voor dit vervangings- en renovatieproces (VenR) opgesteld om een uniform en systematisch proces te hebben waarmee een VenR-maatregel transparant onderbouwd kan worden (zie Figuur 1).

Procesketen VenR (tot aan Realisatie)



Figuur 1: Procesketen VenR binnen Rijkswaterstaat

Deze procesketen vormt de basis waar de kennisontwikkeling van het kennisprogramma aan bijdraagt.



Twee-stappen-benadering en drie kernvragen

De kennis die we ontwikkelen binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken draagt bij aan de stapsgewijze-benadering binnen deze Procesketen VenR:

- stap 1 (*Objecten in Beeld*): richt zicht op (het einde van) de technische levensduur van een kunstwerk en het agenderen van de VenR-opgave in het *Prognose rapport*;
- stap 2 (*Regioanalyse*): brengt vooral de relatie in kaart tussen het kunstwerk en de netwerken waar het (samen met andere kunstwerken) deel van uitmaakt. In het resulterende *Regioadvies* gaat het ook over (het einde van) de functionele levensduur.

Inhoudelijk vindt het onderzoek plaats aan de hand drie *kernvragen*:

1. Hoe lang gaat mijn kunstwerk nog mee, zowel technisch als functioneel?
2. Welke alternatieven heb ik, behalve een-op-een vervanging?
3. Hoe weeg ik de alternatieven tegen elkaar af?

Programmaplan, jaarlijkse kennisplannen en samenwerking

Het programmaplan omvat de achtergronden en ambities voor de gehele looptijd van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken. Jaarlijks worden deze ambities uitgewerkt in een kennisplan en een bijbehorend financieringsplan. Andere partijen zoals waterschappen, adviesbureaus en andere (commerciële) organisaties, nodigen we uitdrukkelijk uit om deel te nemen aan het gezamenlijk uitvoeren van een kennisplan, bijvoorbeeld met kennisbijdragen in voor hen relevante onderzoeksprojecten, met praktijkervaringen of financiële bijdragen.

Resultaten delen

Bijdragen en onderzoeksresultaten uit ons Kennisprogramma Natte Kunstwerken delen we met de hele sector via onze website (www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl) en op andere manieren.

Hieronder vindt u een kennisbijdrage binnen werkpakket 1.2 'Einde levensduur damwanden' uit het kennisplan 2024. Het omvat eerst de samenvatting van het onderzoek 'Praktische handreiking proefbelasten - Verkenning naar verbeterde beoordeling van bestaande damwanden met behulp van proefbelasten'. Deze activiteit is namens het Kennisprogramma Natte Kunstwerken geleid door Deltares, waarbij ook een bijdrage door TNO is geleverd. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksverslag in de vorm van een onderzoeksrapport.

N.B. Het volledige onderzoeksrapport is gelijk aan het originele document van Deltares, met uitzondering van het titelblad. Bij publicatie van dit onderzoeksverslag op de KpNK-website, is deze om privacyredenen verwijderd.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken *Kennisplan 2024*

Meer informatie

- Het Kennisprogramma Natte Kunstwerken is de uitwerking van de onderzoeklijn 'Toekomstbestendige Natte Kunstwerken' binnen het Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat (NKWK). Zie www.waterenklimaat.nl

NKWK

- Voor meer informatie over het programma Kennisprogramma Natte Kunstwerken, zie www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl.



- Voor vragen over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken en het kennisplan 2023 kunt u terecht bij Martine Brinkhuis, email martine.brinkhuis@rws.nl
- Voor vragen over de voorliggende kennisbijdrage kunt u terecht bij de auteurs:

Hans Landwehr hans.landwehr@deltares.nl

Hans Brinkman hans.brinkman@deltares.nl



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2024



Samenvatting

Einde levensduur damwanden

Praktische handreiking proefbelasten - Verkenning naar verbeterde beoordeling van bestaande damwanden met behulp van proefbelasten

Hieronder vindt u een kennisbijdrage van het werkpakket 1.2 'Einde levensduur damwanden' uit het kennisplan 2023. De bijdrage – geleid door Deltares - omvat de samenvatting van het onderzoek 'Verkenning naar verbeterde beoordeling van bestaande damwanden met behulp van proefbelasten'. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksrapport.

Aanleiding en probleemstelling

Het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) ontwikkelt kennis waarmee beheerders kunnen inschatten op welk moment een nat kunstwerk (of een onderdeel daarvan) het einde van de technische en/of functionele levensduur bereikt. Ook grondkeringen zoals stalen damwandconstructies vallen onder de KpNK-scope.

De damwandconstructies die geplaatst zijn in de jaren 50, 60 en 70 van de vorige eeuw zijn door de jaren heen aangetast door corrosie. Deze corrosie heeft de effectieve wanddikte van de stalen damwandplanken en diameter van ankerstangen doen afnemen. Hoeveel deze afname bedraagt, is onzeker. Hoe langer deze onzekerheid duurt, des te negatiever de impact is op de geschatte restlevensduur van de constructie. Een extra complicerende factor hierbij is het ontbreken van gevalideerde modellen voor het bepalen van het effect van corrosie op de reststerkte van ankerstangen.

Om in de praktijk een beoordeling van de restlevensduur van een damwandconstructie te kunnen maken wordt doorgaans een procedure doorlopen die verloopt van eenvoudig tot geavanceerd.

- Ontwerpberekeningen – controle van actuele en te verwachten omstandigheden ten opzichte van de oorspronkelijke (ontwerp of liever as-built) gegevens.
- Herberekening – controle van constructieve veiligheid – restlevensduur op basis van een herberekening met gebruik van de actuele en te verwachten omstandigheden.
- Vervolgaanpak.

Indien een eenvoudige beoordeling op basis van de ontwerpdocumenten of een herberekening niet tot een adequaat resultaat heeft geleid, dan is het proefbelasten van de constructie een manier die past in een vervolgaanpak. Op dit moment is daar echter nog weinig ervaring mee.

Onderzoeksvraag (WAT)

Hoe kan een proefbelasting worden ingezet om een betere beoordeling, dat wil zeggen met minder onzekerheden, te kunnen maken van de restlevensduur van een bestaande damwandconstructie?



Onderzoeksaanpak en - methode

In deze fase van dit onderzoek is de inzet van de proefbelasting bij damwandconstructies verkend en wordt een eerste invulling gegeven voor de kennisvragen:

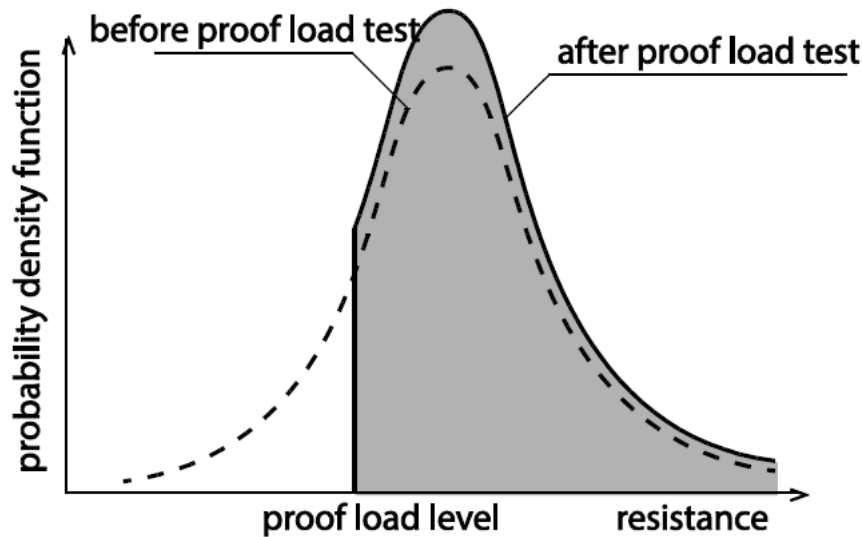
- Hoe zou het proefbelasten van damwandconstructies moeten worden aangepakt?
- Hoe zou het uitvoeringsplan en het meetplan voor het proefbelasten van damwandconstructies moeten worden opgesteld?
- Hoe kunnen de ingenieursbureaus de resultaten van proefbelasting gebruiken bij de beoordeling van bestaande damwandconstructies?

Onderzoeksresultaten en synthese

Het basisprincipe van proefbelasten is dat een belasting op een kunstwerk geplaatst wordt die een snedekracht of snedemoment veroorzaakt die vergelijkbaar is met de belasting als gevolg van de belastingcombinatie zoals die in de ontwerpberekening is aangenomen, dan wel van de verkeersbelasting (inclusief belastingfactoren) die is voorgeschreven door de norm. Indien bij het belasten geen blijvende schade optreedt, is proefondervindelijk aangetoond dat het bestudeerde kunstwerk de voorgeschreven belasting kan weerstaan en dus aantoonbaar veilig is zoals gedefinieerd in de geldende norm.

Om een proefbelasting goed te kunnen inrichten en te analyseren moet er een goed inzicht zijn in de relatie tussen een belasting en de sterkte. Bij belasten kunnen meerdere sneden of bezwijkmechanismen maatgevend zijn, en die mechanismen kunnen elkaar beïnvloeden. Bij de opzet van de proefbelasting moet goed nagedacht worden welke onzekerheid men ermee wil (en kan!) wegnemen; mogelijk zijn daarvoor verschillende belastingen noodzakelijk. Om dit goed vooraf te kunnen analyseren is dus een (semi-)probabilistisch model nodig dat de bezwijkmechanismes beschrijft.

De sterkte van een constructie of constructieonderdeel wordt doorgaans in een probabilistische analyse beschreven in een kansdichtheidsfunctieverdeling, zoals gegeven in onderstaande figuur. De proefbelasting zorgt ervoor dat in de kansverdeling van de sterkte, in het linkerdeel een deel van de kansverdeling wordt afgekapt. Immers de proefbelasting toont aan dat de sterkte minimaal die waarde heeft. Dit principe is eveneens in onderstaande figuur geïllustreerd. De rekenwaarde van de sterkte (in de figuur aangeduid als 'resistance') neemt daarmee toe.



Figuur Begrenzen van de kansverdeling van de sterkte (weerstand) door het uitvoeren van een proefbelasting [Lantsoght, E., van der Veen, C. de Boer, A. Hordijk, D.A. Proof load testing of reinforced concrete slab bridges in the Netherlands. Structural Concrete, volume 18(4), 2017].

Er is voor damwandconstructies nog slechts beperkte ervaring met proefbelasten of soortgelijke analyses. In het rapport wordt, in het verlengde van de aanpak van een proefbelasting op ankerpalen, een voorbeeld gegeven van de manier waarop een proefbelasting op een damwandconstructie in de praktijk aangepakt kan worden.

Evaluatie en vooruitblik

De inzet van een proefbelasting in de beoordeling van een constructie is in dit onderzoek verkend. De resultaten van de verkenning kunnen in de volgende stap gebruikt worden om proefbelasten in praktijkcase(s) toe te passen met een case-specifieke nadere uitwerking. De bij de praktijkcases opgedane ervaringen kunnen worden gebruikt bij het opstellen van een praktische generieke richtlijn voor proefbelasten van bestaande constructies.



Verkenning naar verbeterde beoordeling van bestaande damwanden met behulp van proefbelasten



Verkenning naar verbeterde beoordeling van bestaande damwanden met behulp van proefbelasten

Auteur(s)

Hans Landwehr

Verkenning naar verbeterde beoordeling van bestaande damwanden met behulp van proefbelasten

Opdrachtgever	
Contactpersoon	
Referenties	Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Trefwoorden	Proefbelasting, anker, damwand, degradatie, NEN6766

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	07-11-2024
Projectnummer	11207401-036
Document ID	11207401-036-HYE-0002
Pagina's	51
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Hans Landwehr	

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Context Kennisprogramma Natte Kunstwerken	8
1.2	Probleem/ambitie	8
1.3	Algemene kennisvragen	10
2	Doel van proefbelasten bij bestaande constructies	11
2.1	Algemeen kader	11
2.2	Wanneer is een beoordeling nodig	11
2.3	Rol van proefbelasten	12
3	Aanpak proefbelasting	15
3.1	Inleiding	15
3.2	Principe proefbelasten en bijdrage aan betrouwbaarheid	15
3.2.1	Algemeen	15
3.2.2	Niet destructief of tot bezwijken	16
3.2.3	Bijdrage aan betrouwbaarheid	16
3.2.4	Afweging nut proefbelasting	17
3.3	Constructies en onderdelen	17
3.4	Bezwijkmechanisme	19
3.5	Inzicht in mechanisme	19
3.6	Belasting	20
3.6.1	Proces van proefbelasting	20
3.6.2	Belasting grootte	21
3.6.3	Stopcriteria	21
3.6.4	Het aanbrengen van de belasting	22
3.7	Aandachtspunten en aannames	22
3.8	Welke informatie is nodig	23
3.8.1	Informatie vooraf	23
3.8.2	Informatie uit proef	24
3.9	Analyse proef	24
3.10	Advies en vervolgmaatregelen	25
4	Voorbeelden proefbelasting	27
4.1	Voorbeeld proefbelasting anker	27
4.1.1	Voorbeeld case ankerpalen	27
4.1.2	Aanpak aantonen van de betrouwbaarheid	27
4.1.3	Voorbeeldcase proefbelastingen	30
4.2	Voorbeeld proefbelasting damwandconstructie	32

4.2.1	Bewezen sterkte richtlijn damwanden en kademuren	32
4.2.2	Kademuur bewezen sterkte en proefbelasting	35
5	Conclusies en aanbevelingen	37
6	Referenties	39
A	Bezwijkmechanismen damwandconstructies	41

1 Inleiding

1.1 Context Kennisprogramma Natte Kunstwerken

Binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) is en wordt kennis ontwikkeld waarmee het maken van een onderbouwde en onafhankelijke Vervanging en Renovatie (VenR) beslissing door de waterbeheerders wordt versterkt. In KpNK werken kennisinstellingen Deltares, TNO en Marin samen met het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (Rijkswaterstaat).

In KpNK zijn drie kernvragen gedefinieerd:

1. Einde levensduur.
2. Systematiek ontwikkelen opties.
3. Afwegingsopties.

Onder kernvraag 1 is het onderwerp 'Einde levensduur damwanden' opgenomen. Met damwanden wordt de gehele damwandconstructie (inclusief verankering en andere onderdelen) bedoeld.

Met het ouder worden van de stalen damwanden ziet de beheerder zich geconfronteerd met de onzekerheid over de restlevensduur van deze constructies. Het totale areaal aan stalen damwanden in Nederland vertegenwoordigt een waarde van ongeveer 5 miljard euro. Een betere inschatting van de restlevensduur van de damwanden is voor de beheerder dan ook zeer belangrijk zodat op het juiste moment een VenR beslissing genomen kan worden.

Vragen die helpen om het moment van de VenR beslissing vast te stellen zijn onder andere:

- Hoe, waar en hoe vaak moet een damwand geïnspecteerd worden?
- Hoe bepalen we uit metingen of de damwand nog voldoende veilig is?
- Hoe lang kan de damwand nog (veilig) mee?
- Welke opties bestaan voor de vervanging van damwandconstructies?

1.2 Probleem/ambitie

In het plan van aanpak 2024, maart 2024, is voor werkpakket 1.2 "Einde Levensduur damwanden" een invulling gegeven van de vraagstelling rondom "verbeterde beoordeling van bestaande damwanden (proefbelasten)". Dit is hieronder in het kader weergegeven. Het beschreven doel is het uitvoeren van een bureaustudie gericht op het opstellen van een praktische handreiking voor proefbelasten.

Probleem: De huidige programmering van de Vervanging en Renovatie (VenR) opgave is gebaseerd op een theoretische leeftijd voor het bereiken van einde levensduur, die voor damwanden gemiddeld 75 jaar is. Om een kosten efficiënte beslissing te nemen over VenR van specifieke objecten (bijv. damwanden bij een sluis) en trajecten (bijv. damwanden langs een kanaal) moeten de beheerders weten wanneer einde technische levensduur aan de orde is.

Het nauwkeurig bepalen van einde technische levensduur is een complexe taak. Op dit moment is er geen richtlijn met een duidelijke omschrijving van de criteria en aanpak voor einde technische levensduur, die de ingenieurs rechtstreek kunnen gebruiken voor bestaande damwanden. Bovendien, het verloop van het verlies in de tijd van de wanddikte van stalen damwanden en van de diameter van ankerstangen door corrosie is een grote onzekerheid die impact heeft op de geschatte restlevensduur van de damwand. Een extra complicerende factor is dat voor de ankerstangen betrouwbare modellen voor het bepalen van het effect van corrosie op de reststerkte van de ankerstang ontbreken. Verder, om een scherpe beoordeling van de veiligheid van bestaande damwanden uit te voeren, zijn verbeteringen van de modellen van het gedrag van damwandconstructies, die in de berekeningen worden gebruikt, en het gebruik van informatie uit inspecties en proefbelasten heel belangrijk.

De ambitie van dit werkpakket is om kennis en middelen te ontwikkelen waarmee de volgende doelen kunnen worden bereikt:

- Het zoveel mogelijk vermijden van te vroeg of onnodig vervangen of versterken van damwandconstructies (niveau traject-/ object-analyse).
- Een nauwkeurige en betrouwbare schatting van de verwachte levensduur (niveau Prognose Rapport).
- De economische afweging van de technische opties voor vervanging of versterking als einde technische of functionele levensduur is bereikt (niveau regio-analyse).

Het is de bedoeling dat de verdere ontwikkeling van de aanpak voor de beoordeling van bestaande damwandconstructies, door verbeterde modellen van het gedrag van de damwanden en het gebruik van de resultaten van inspecties en proefbelasten, de benodigde middelen aan de beheerders geeft om het einde technische levensduur op object en areaal niveau accurater te voorspellen. Dit nauwkeuriger inzicht in de constructieve veiligheid kan worden gebruikt door Rijkswaterstaat om de gemiddelde einde technische levensduur en de verwachten budgetbehoefte voor VenR in het Prognose Rapport te updaten. Op basis van de verbeterde kennis van het einde levensduur is het mogelijk om de meest geschikte technische opties voor vervanging of versterking van damwandconstructies af te wegen.

De verwezenlijking van deze ambitie hangt af van de ontwikkelingen op de volgende gebieden:

- Degradatie van damwanden (meettechnieken).
- Verbeterde beoordeling van bestaande damwanden (proefbelasten).
- Hergebruik van bestaande damwanden en ankers.
- Handelingsperspectief wanneer einde levensduur wordt bereikt.

Kennisbijdrage(n): Rapportage over het uitvoeren van proefbelasten van damwanden en het gebruik van de resultaten ervan voor de beoordeling van de constructieve veiligheid.

1.3 Algemene kennisvragen

Bij de start van het onderzoek zijn een aantal kennisvragen opgesteld:

- Hoe zou het proefbelasten van damwanden moeten worden uitgevoerd?
- Hoe zou het uitvoeringsplan en het meetplan voor het proefbelasten van damwanden moeten worden opgesteld?
- Hoe kunnen de ingenieursbureaus de resultaten van proefbelasting gebruiken bij de beoordeling van bestaande damwanden?

2 Doel van proefbelasten bij bestaande constructies

2.1 Algemeen kader

Een bestaand kunstwerk moet dusdanig functioneren dat te allen tijde voldaan wordt aan de constructieve veiligheid zoals wordt voorgeschreven vanuit het wettelijk kader. Het wettelijk kader rondom de toetsing in het kader van de omgevingswet van bouwwerken is gekoppeld aan de functies van het (onderdelen van de) bouwwerk. Voor damwanden en overige constructieve elementen, die een waterveiligheidsfunctie in een primaire waterkering vervullen ('langsconstructies'), geldt dat deze constructieve elementen voor de waterveiligheidsfunctie beoordeeld dienen te worden volgens de waterveiligheidsnormering, zoals vastgelegd in de Omgevingsregeling bijlage XXIV en XXX Veiligheid primaire waterkeringen.

Afbakening onderzoek

De beoordeling functie waterveiligheid van het damwanden valt buiten het kader van het voorliggende onderzoek. Het onderzoek gaat in op de constructieve veiligheid voor de overige functies van damwanden welke onder het besluit bouwwerken leefomgeving BBL vallen.

Om aan te tonen dat bouwwerken (constructiedeel/element) op het gebied van constructieve veiligheid voldoen aan de eisen van de Nederlandse bouwregelgeving zijn 2 series van normen in Nederland beschikbaar. De NEN-EN 1990-serie doet dat voor de toetsing van nieuwbouw en de NEN 8700-serie doet dat voor de beoordeling van bestaande bouw.

Normen uit de NEN-EN 1990 [2] en NEN 8700-serie [3] zijn wettelijk niet "verplicht", maar zijn een door de wetgever geaccepteerd middel¹ om aan te tonen dat, aan de wettelijke vereisten, die vanuit Omgevingswet aan bouwwerken middels de prestatie-eisen in Besluit bouwwerken leefomgeving BBL gesteld, wordt voldaan.

Door Rijkswaterstaat worden in de RBK (Richtlijnen beoordeling kunstwerken) [4] op de norm aanvullende eisen (kaders), handreikingen en informatie voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van bestaande kunstwerken van Rijkswaterstaat gegeven. Dit om aanvullende inzichten uit onderzoek, beheer of beleid te verwerken in aanvullende eisen of methoden. Voor nieuwbouw is voor deze aanvullende eisen of methode de ROK (Richtlijn Ontwerp Kunstwerken) beschikbaar.

2.2 Wanneer is een beoordeling nodig

Er moet een aanleiding zijn waarom een beoordeling volgens de NEN 8700-serie uitgevoerd moet worden om, voor een bestaand kunstwerk, daarmee aan te tonen dat wordt voldaan aan de constructieve veiligheid zoals wordt voorgeschreven vanuit het wettelijk kader. Ervan uitgaande dat alle bouwwerken volgens de toenmalige regels/normen zijn ontworpen voor een bepaald gebruik gedurende ontwerplevensduur is er over het algemeen bij een ongewijzigd gebruik en de afwezigheid van optredende schade die gekoppeld kan worden aan mechanismes rondom constructieve veiligheid, geen aanleiding tot een beoordeling. Aangezien de beheerder van een 'kunstwerk' aansprakelijk is voor de veiligheid maar ook voor de schade als gevolg een gebrek aan het kunstwerk, ook al was de beheerder daarvan niet op de hoogte, zal deze regelmatig onderhoud en inspecties plannen om informatie te

¹ Opgemerkt dient te worden dat, krachtens de richtlijn aanbestedingen van publieke werken, EU-lidstaten verplicht zijn ontwerpen volgens de EN Eurocodes te aanvaarden

verkrijgen over de staat en het functioneren van het kunstwerk. Hieruit volgt doorgaans de informatie die nodig is om vast te stellen of er onderhoud of een beoordeling nodig is.

In de NEN 8700-serie wordt niet aangegeven wanneer een beoordeling dient te worden uitgevoerd, maar alleen hoe deze moet worden uitgevoerd.

In het voorwoord van de NEN 8707 is aangegeven:

“De aanleiding van een beoordeling van een bestaande fundering kan privaatrechtelijk, publiekrechtelijk of vanwege een herbestemming zijn. Als wordt verwacht dat een gebouw niet veilig is, behoort er te worden beoordeeld op afkeurniveau. Als een gebouw wordt verbouwd, behoort er te worden beoordeeld op het niveau op het nieuwbouwniveau of op het niveau verbouw afhankelijk van de beoogde restlevensduur.”

De formulering met “behoort” in het voorwoord van de NEN 8707 is zorgvuldig gekozen aangezien op de letter wettelijk gezien delen die niet fysiek worden veranderd altijd een beoordeling op afkeurniveau en voor de verbouwen delen het verbouwniveau geldt.

In het voorwoord van de NEN 8707 is verder aangegeven:

“De reden voor het toetsen van een bestaande fundering van een gebouw zit in de wens tot handhaving van de ‘bovenbouw’. Voor bruggen speelt de vraag of de fundering nog voldoet wanneer bijvoorbeeld het brugdek wordt vervangen.

Onderzoek naar bestaande geotechnische constructies kan kostbaar zijn. Voor het uitvoeren van het in de norm beschreven onderzoek moet daarom een concrete aanleiding zijn.”

Dit voorbeeld voor een brug met een duidelijk onderscheid in bovenbouw, onderbouw en fundering kan ook worden vertaald naar andere typen constructies zoals damwandconstructies langs kanalen enzovoort.

Duidelijk is dat voor (verankerde) damwandconstructies typische aanleidingen zoals bereiken einde levensduur en zorgwekkende observaties aan of in de directe omgeving een beoordeling noodzakelijk maken.

Maar ook veranderingen in bodemligging (kanaalverdieping, erosie uit inspecties) of belastingen door water of belasting op maaiveld (functieveranderingen met betrekking tot gebruik) moeten aanleiding zijn om een beoordeling uit te voeren.

2.3 Rol van proefbelasten

De NEN-EN 1990- en NEN 8700-serie stellen eisen aan de betrouwbaarheid van onderdelen/elementen van een constructie. Om aan te tonen dat een onderdeel van een constructie voldoet aan de eisen voor constructieve veiligheid wordt normaal gesproken het volgende stappenschema doorlopen:

1. Ontwerpberekeningen – controle van actuele en te verwachten omstandigheden in de restlevensduur ten opzichte van de oorspronkelijke ontwerp of liever as-built gegevens.
2. Herberekening – controle van constructieve veiligheid over de restlevensduur op basis van een herberekening met gebruik van de actuele en te verwachten omstandigheden.
3. Vervolg aanpak.

Een vervolgaanpak is nodig als stappen 1 en 2 niet tot het gewenste resultaat leiden (te lage restlevensduur). In dat geval kan worden besloten tot:

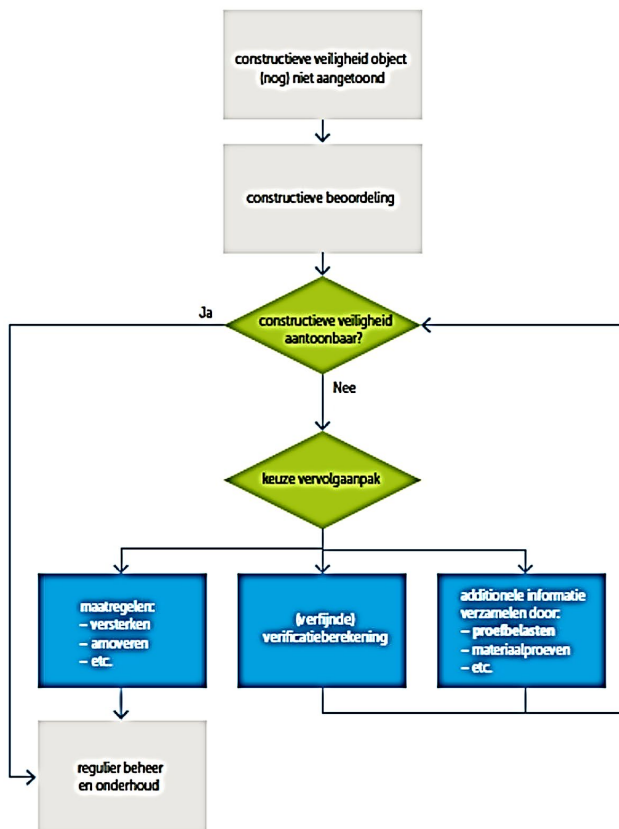
- Renoveren of herbouwen.
- Een verfijning van de herberekening, door andere aspecten in de berekening te stoppen of meer informatie te kunnen verzamelen.

- Een beperking in het gebruik.

Ook kan het zijn dat er een verwachting is van een potentiële langere restlevensduur. Die verwachting kan zijn gebaseerd op het feit dat door het ontbreken van ontwerpberekeningen (of as-built gegevens) of het ontbreken van essentiële gegevens overgestapt moest worden naar conservatieve aannames. Bijvoorbeeld omdat het alsnog inwinnen van deze gegevens technisch niet haalbaar waren of de kosten moet efficiënt zijn. Een verfijning van de herberekening is dan niet mogelijk.

In de vervolgaanpak zou de verfijning van de herberekening kunnen bestaan uit het uitvoeren van een **proefbelasting**. De kosten van een proefbelasting en berekening zijn vaak lager dan de vervangingskosten van een object.

Het basisprincipe van proefbelasten is dat een belasting op een (onderdeel van een) constructie geplaatst wordt die een equivalente snedekracht of snedemoment veroorzaakt in het te beoordelen onderdeel van de constructie vergelijkbaar met de maatgevende belastingcombinatie (inclusief belastingfactoren) voorgeschreven door de norm. Indien bij het belasten geen blijvende schade optreedt, is proefondervindelijk aangetoond dat het onderdeel van de constructie daarin de voorgeschreven sterkte heeft om de belasting te weerstaan en dus aantoonbaar veilig is zoals gedefinieerd in de geldende norm.



Figuur 2.1 Rol proefbelasten in aantonen constructieve veiligheid [10].

In Nederland worden proefbelastingen regelmatig toegepast voor relatief eenvoudige toepassingen zoals voor het aantonen van de verticale draagkracht van een funderingspaal of de te leveren ankerkracht bij ankers (horizontaal of verticaal). Dit geldt dan vooral voor de beoordeling van nieuwe constructies (beoordelingsniveau nieuwbouw) voor het aantonen van

ontwerpparameters. Voor deze situaties zijn richtlijnen beschikbaar, namelijk [5] voor verticaal belaste palen, [6] voor damwandverankeringen en [7] voor ankerpalen.

Voor andere situaties, andere constructies of bestaande constructies, is slechts beperkt ervaring. Een generieke richtlijn voor het uitvoeren van een proefbelasting ontbreekt. In Nederland zijn diverse ervaringen met pilots van proefbelastingen op het gebied van brugdekken. Een overzicht van state-of-the art publicaties voor brugdekken is gegeven in [11].

Er zijn afgelopen 4 jaar twee CROW-aanbevelingen rondom de inspectie en gebruik van proefbelastingen bij de beoordeling van bestaande constructies [8] en [9] beschikbaar gekomen.

Een proefbelasting lijkt op een bewezen sterkte analyse met dit verschil dat een overleefde belasting nu niet in het verleden is opgetreden maar tijdens de proefbelasting op de constructie wordt gezet.

3 Aanpak proefbelasting

3.1 Inleiding

Een bijzondere wijze voor het aantonen van het vereiste betrouwbaarheidsniveau is de in proefbelasten. Door proeven ondersteund ontwerp maakt onderdeel uit van de Eurocode, zie NEN-EN 1990 bijlage D [2], deze bijlage heeft in Nederland de status normatief. Bij het aanbrengen van een proefbelasting kan de sterkte van de feitelijke constructie worden getoetst waardoor geen onzekerheden met betrekking tot de aangetoonde actuele sterkte in rekening behoeven te worden gebracht. Alle onzekerheden horen derhalve toe aan de belastingconfiguratie en het mechanisme waarvoor de proefbelasting wordt uitgevoerd. Belastingen zoals remkrachten en windbelastingen vallen hier dus doorgaans buiten, maar ook degradatie van constructiematerialen over de restlevensduur.

Voor bestaande kunstwerken is proefbelasten vooral interessant indien het aantonen van de constructieve veiligheid rekenkundig niet mogelijk is, bijvoorbeeld door het ontbreken van constructieve ontwerpgegevens of vanwege aanwezige schades waarvan het effect moeilijk te kwantificeren is. Proefbelasten wordt in de regel gebruikt voor het verifiëren of verfijnen van een rekenmodel van een kunstwerk. Tevens biedt proefbelasten de mogelijkheid om een eventueel hogere belastbaarheid van de constructie vast te stellen dan rekenkundig wordt bepaald als de normen worden gevolgd.

In de CROW-CUR Aanbeveling 124:2019 Constructieve veiligheid bestaande bruggen en viaducten van decentrale overheden [9] en bijbehorende digitale kennismodule [11] is ervaring uit de praktijk samengebracht omtrent proefbelastingen, waarbij de focus ligt op betonnen brugdekken. De uiteenzetting in stappen geeft echter wel duidelijk beeld van wat te doen en zal in de komende paragrafen als leidraad worden gebruikt.

3.2 Principe proefbelasten en bijdrage aan betrouwbaarheid

3.2.1 Algemeen

Het basisprincipe van proefbelasten is dat een belasting op een kunstwerk geplaatst wordt die een equivalente snedekracht of snedemoment veroorzaakt vergelijkbaar met de belastingcombinatie zoals die in de ontwerpberekening is aangenomen of voorgeschreven door de norm. Indien bij het belasten geen blijvende schade optreedt, is proefondervindelijk aangetoond dat het bestudeerde kunstwerk de voorgeschreven belasting kan weerstaan en dus aantoonbaar veilig is zoals gedefinieerd in de geldende norm. Hierbij kunnen meerdere sneden of bezwijkmechanismen maatgevend zijn, waarbij bij de opzet van de proefbelasting rekening gehouden moet worden. De exacte belasting die op het kunstwerk geplaatst moet worden is nader beschreven in paragraaf 3.6.2 “Belasting grootte”.

Bij het aanbrengen van een proefbelasting kan de minimale weerstand of vervorming van de feitelijke constructie worden getoetst waardoor tot dat belastingniveau er geen onzekerheden met betrekking tot de actuele sterkte in rekening behoeven te worden gebracht. Alle onzekerheden horen derhalve toe aan de belastingconfiguratie en het mechanisme waarvoor de proefbelasting wordt uitgevoerd.

Bij proefbelasten wordt het werkelijke gedrag van een constructie beschouwd. Dit in tegenstelling tot de theoretische analyses die altijd gebaseerd zijn op een model (vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid). Met proefbelasten wordt er omgegaan met het werkelijk gedrag van de constructie en zijn er geen aannames meer van toepassing voor

de constructie, bijvoorbeeld materiaaleigenschappen. Wel blijven er aannames van toepassing met betrekking tot consistentie van het ontwerp en de krachtsafdracht binnen de constructie, er wordt immers maar een deel van de constructie beproefd en de vraag is of de proefbelasting resulteert in de voor de beoordeling relevante snedekracht.

3.2.2 Niet destructief of tot bezwijken

Proefbelasten kan met diverse lastvormen worden uitgevoerd, waarbij de constructie stapsgewijs wordt belast en ontlast. Het basisprincipe bij het proefbelasten is dat de minimale sterkte van de constructie wordt herleid uit de belasting die maximaal wordt aangebracht op het desbetreffende kunstwerk. Uitgangspunt hierbij is dat de maximale aan te brengen belasting de constructie niet ontoelaatbaar beschadigt.

Met proefbelasten tot bezwijken wordt alle reserve van een object aangetoond. Dit is echter alleen zinvol voor een groep van kunstwerken of 1 onderdeel van een groep van soortgelijke objecten/delen, aangezien het object dat wordt proefbelast daarna niet meer gebruikt kan worden. Denk bij deze vorm van proefbelasten aan het proefbelasten van een anker (of enkele ankers) tot bezwijken om voor een grotere groep van ankers meer capaciteit aan te tonen.

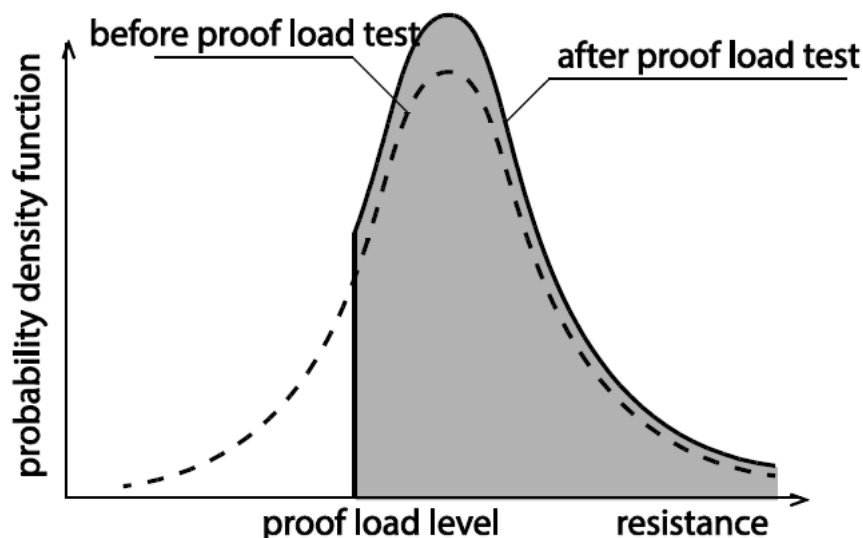
3.2.3 Bijdrage aan betrouwbaarheid

Bij proefbelasten wordt het werkelijk gedrag bekeken en is er na afloop van een succesvolle proefbelasting nog weinig onzekerheid over de actuele betrouwbaarheid van het beproefde onderdeel tot dat belastingniveau.

Hierbij is het belangrijk te constateren dat mogelijk een deel van de constructie wordt beproefd en van dat onderdeel wordt de actuele belastbaarheid bepaald. Voor de overige delen van de constructie blijven er wel onzekerheden over, hetzelfde geldt voor toekomstige belastingen en degradatie. Dit is een belangrijke constatering en kan betrekking hebben op de beproefde ten opzichte van niet beproefde bezwijkmechanismes, of op een lokaal beproefde constructie in een project of traject.

Om puur op basis van een proefbelasting aan te tonen dat de constructie voldoet aan de gestelde eisen dient de toe te passen proefbelasting dus hoog genoeg te zijn (hoger te zijn dan de rekenwaarde van de belasting) en/of op meerdere locaties te worden uitgevoerd. Het kan ook zijn dat een proefbelasting wordt toegepast om het "tekort" aan een reeds in een herberekening aangetoonde betrouwbaarheid verder aan te vullen, in dergelijke situatie zijn veelal minder zware proefbelastingen nodig.

De sterkte van een onderdeel van een constructie wordt doorgaans in een probabilistische analyse beschreven in een kansdichtheidsfunctie verdeling zoals gegeven in *Figuur 3.1*. In een semi-probabilistische beoordelingsmethodiek wordt een karakteristieke waarde van de sterkte afgeleid die een bepaalde mate van onderschrijding behelst. Middels partiele factoren wordt dan een rekenwaarde bepaald zodanig dat er een bepaalde betrouwbaarheid kan worden behaald.



Figuur 3.1 Begrenzen van de kansverdeling van de sterkte (weerstand) door het uitvoeren van een proefbelasting [11].

De proefbelasting zorgt ervoor dat in de kansverdeling van de sterkte in het linker deel een deel van de verdeling wordt begrensd (afgekapt). Immers de proefbelasting toont aan dat de sterkte minimaal die waarde is (bewezen sterkte). Dit principe is eveneens in *Figuur 3.1* geïllustreerd. De rekenwaarde van de weerstand neemt daarmee toe.

3.2.4 Afweging nut proefbelasting

De kosten van een proefbelasting dienen afgewogen te worden ten opzichte van de te verwachten winst uit het resultaat. Waarbij niet alleen aan de winst voor het specifieke object dient te worden gedacht maar voor beheerders van een groot areaal ook de winst in kennis die herbruikbaar is.

Daarnaast kan er ook een negatieve impact op de omgeving zijn. Mogelijk moet een verkeersweg of vaarweg tijdelijk worden afgesloten om een proefbelasting uit te voeren of zijn kostbare hulpconstructies (zoals een bouwput) nodig. Opgemerkt wordt dat het vervangen van een object in de regel een grote impact op de omgeving kan hebben.

3.3 Constructies en onderdelen

Een proefbelasting dient ingericht te zijn voor het te beoordelen type constructie en het te onderzoeken constructieonderdeel.

De constructie kan worden onderscheiden op basis van de beschrijvingen in de van toepassing zijnde normen of richtlijnen.

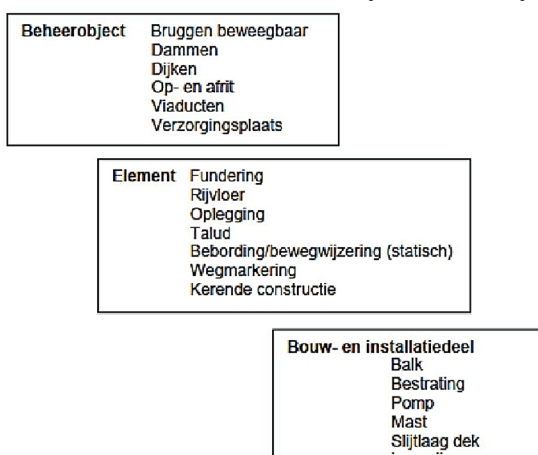
Figuur 3.2 Constructietypen en plaats damwanden en ankers.

Norm/ richtlijn	Type constructie	Constructie elementen
Eurocode	Bruggen	
	Gebouwen	
	Overige constructies	Grond, damwanden en ankers
ROK/RBK	Bruggen	
	Tunnels	

Norm/ richtlijn	Type constructie	Constructie elementen
	Natte kunstwerken	Damwanden en ankers
	Beweegbare bruggen	
	Geluidschermen	
	Verkeerskundige draagconstructies	
CROW/CUR	Damwandconstructies	Grond, damwanden en ankers

Via de constructietypen kun je in de genoemde normen en richtlijnen artikelen vinden die iets zeggen over het toetsen van de constructieve veiligheid (GEO en STR) en de eventuele uitvoering van proefbelastingen.

De constructie bestaat uit diverse onderdelen. Hiervoor zijn methoden beschikbaar om tot een gewenste onderverdeling te komen. In [10] wordt verwezen naar de NEN2767 [15]. De NEN 2767 is een methodiek om de conditie van objecten binnen de gebouwde omgeving te bepalen. In de NEN 2767-reeks wordt uitgegaan van een decompositie in drie niveaus. De drie niveaus uit de NEN 2767 zijn: Beheerobject – Element – Bouwdeel.



Figuur 3.3 Constructies en constructie onderdelen [15].

Elk van de onderdelen bestaat uit een materiaal. De meest voorkomende materialen zijn (constructief) beton, staal, hout, metselwerk en grond. Maar ook andere materialen kunnen voorkomen.

Niet alle constructies of onderdelen daarvan zijn even geschikt voor uitvoeren van een proefbelasting. In [10] wordt vooral ingegaan op brugdekken. Aangegeven wordt dat brugdekken van gewapend beton en staalbeton dekken met overspanningen tot circa 12 meter zich goed lenen voor een proefbelasting. Het proefbelasten van overspanningen langer dan 15 meter is complex omdat er met een hulpconstructie voorkomen moet worden dat bij bezwijken van het dek (tijdens de proefbelasting) de ballast valt of opgevangen kan worden. Ook kunnen er speciale aandachtspunten zijn. Voorgespannen (prefab) beton dekken kunnen geschikt zijn voor proefbelasten maar hebben een grotere kans om maatgevend te zijn op dwarskrachtcapaciteit (en zijn in dat geval dus niet geschikt). De detaillering nabij de koppen is in verband met dwarskracht vaak kritisch.

In de praktijk wordt geadviseerd om een proefbelasting alleen uit te voeren bij (onderdelen van een) constructie zonder onbeheersbare risico's. Een proefbelasting is minder effectief als er al (significante) schadebeelden zoals scheuren en (ongelijkmatige) zettingen en/of forse duurzaamheidschades aanwezig zijn bij het object.

Het is overigens ook mogelijk dat vooraf op basis van verkennende berekeningen en/of ervaring wordt vastgesteld dat de gewenste beheerste belastbaarheid niet realistisch is. Het resultaat en dus ook de maximale belasting zullen in dat geval lager zijn dan beoogd.

De actuele toestand van de constructie of onderdeel daarvan moet vooraf op locatie worden gecontroleerd en daarnaast beoordeeld door de constructeur op haalbaarheid van de proefbelasting. Daarnaast is een beheerste proefbelasting niet realistisch als het object niet aantoonbaar voldoet op basis van een overheersend mechanisme zoals dwarskracht (met brosse breuk) bij brugdekken of als er bijvoorbeeld problemen met de fundering zijn.

3.4 Bezwijkmechanisme

Een proefbelasting dient informatie te leveren over de sterkte van een constructie (- onderdeel). Om de proefbelasting goed te kunnen inrichten en te analyseren geldt dat er een goed inzicht moet zijn in de relatie tussen een belasting en de sterkte.

Voor elke constructie of onderdeel daarvan geldt dat er 1 of meerdere mogelijke bezwijkmechanismen kunnen zijn die een rol spelen in de te mobiliseren sterkte. Een bezwijkmechanisme beschrijft een mogelijk wijze waarop de constructie of onderdeel onder invloed van een belasting kan bezwijken.

In een ontwerp stadium worden veelal beoordelingen per bezwijkmechanisme uitgevoerd om aan te kunnen tonen dat met de gemaakte keuzes bezwijken niet zal optreden. Of meer specifiek gezegd de kans op bezwijken voldoende klein is (bepaalde betrouwbaarheid).

Bij een proefbelasting dient dit dus op eenzelfde wijze aangepakt te worden. Voor damwandconstructies zijn een aantal bezwijkmechanismen mogelijk. In bijlage A is een overzicht gegeven van 17 bezwijkmechanismen zoals deze worden beschreven in [6].

In de richtlijn bewezen sterkte damwanden en kademuren [13], waarbij naar bewezen sterkte wordt gekeken worden 2 cases met een bestaande damwandconstructie beoordeeld waarbij de focus ligt op de bij de cases maatgevende mechanismen:

- Bezwijken voorwand (stalen damwand en de buispalen van een combiwand).
- Bezwijken ankers (ankers).
- Bezwijken passieve wig (grond).

3.5 Inzicht in mechanisme

Wanneer meerdere mechanismen relevant zijn kunnen deze elkaar beïnvloeden. Het is onwenselijk dat de proefbelasting onvoldoende informatie oplevert over de sterkte (betrouwbaarheid) of dat mogelijk zelfs bezwijken optreedt door een overheersend mechanisme. Dit is bijvoorbeeld mogelijk bij ankerschotten waarbij de passieve zone voor het ankerschot de actieve zone van een damwand overlapt, ter compensatie zijn dan potentieel verzwaarde proefbelastingen nodig om hiervoor te compenseren maar het kan ook zijn dat proefbelastingen niet mogelijk is/ toegevoegde waarde heeft. Een ander voorbeeld is dat bij een proef voor het geotechnisch draagvermogen door degradatie van de damwand er een plastisch scharnier ontstaat en de sterkte van grond onvoldoende meedoet in de opname van krachten om een uitspraak te doen over de aanwezige passieve weerstand.

Om een bezwijkmechanisme te beoordelen kunnen verschillende belastingen noodzakelijk zijn. Voor het beoordelen van een anker is een ankerkracht benodigd die rechtstreeks aangebracht kan worden. Voor het beoordelen van een damwand werken maaiveldbelasting, ankerkracht, kerende hoogte en waterdrukverschil en inbedding in de grond normaal gesproken allemaal samen. Dus de onzekerheid kan zitten in de sterkte van het anker of in

de overdracht van belastingen naar het anker toe, bij een proefbelasting dient goed nagedacht worden welke (deel van de) onzekerheid er mee wordt weggenomen.

Om dit goed vooraf te kunnen analyseren is het nodig een probabilistisch of semi-probabilistisch (partiele factoren) model (of modellen) te hebben die het bezwijkmechanisme (of meerdere mechanismes) beschrijft. Voor alle onderdelen hierin dienen de invloeden op de betrouwbaarheid te worden vastgesteld. In [13], [16] en [17] zijn gedetailleerde resultaten van probabilistische analyses op een groot aantal damwandconstructies cases gepresenteerd. Met daarin de invloeden van de verschillende onzekerheden op de faalkans van passief bezwijken en constructief bezwijken van de wand en de ankerstang. Deze resultaten kunnen worden gebruikt voor een eerste inzicht van de te verwachten verdeling van de invloeden/ effectiviteit van een proefbelasting. Een project specifieke probabilistische analyse kan daarna indien nodig worden uitgevoerd om nader inzicht te verschaffen. Opgemerkt wordt dat voor probabilistische analyses de ProbabilisticToolkit (freeware) van Deltares kan worden gebruikt [18].

De onzekerheden betreffen onder andere:

- Ankerafmetingen.
- Stijfheid van de verankering.
- Positie van een eventuele belasting.
- Eigenschappen damwandprofiel.
- Degradatie effecten damwand en ankers.
- Grondparameters.
- Laagopbouw (verticaal maar ook horizontaal, bijvoorbeeld aanwezigheid van een grondaanvulling).
- (Grond)waterstand.
- Schijncohesie door capillaire werking.
- Waterbodemniveau.

Daarnaast zijn er onzekerheden in ruimtelijke zin over het gehele project of traject.

Met dit model kan nu worden vastgesteld welke belasting relevante invloed heeft op het te beoordelen element en op welke wijze een maatgevende snedekracht wordt bepaald vanuit een aangebrachte belasting. Tevens kan door het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse worden vastgesteld welke onzekerheden de grootste invloed hebben. Op deze wijze kan worden vastgesteld of het nut heeft een proefbelasting uit te voeren en waar een belasting moet worden aangebracht om een beoordeling te kunnen uitvoeren.

3.6 Belasting

3.6.1 Proces van proefbelasting

Bij het proefbelasten van bruggen wordt met behulp van materieel en/of hulpconstructies een (geconcentreerde) belasting stapsgewijs aangebracht en weer verwijderd. Bij elke stap wordt op markante posities het vervormingsgedrag (verplaatsingen en soms ook rekken) van de constructie gemeten.

De grootte van de startbelasting, de grootte van de toename per belastingstap, de duur van een belastingstap, het aantal keer herhalen van een belastingstap en de gewenste eindbelasting worden door de constructeur vooraf bepaald. Hiervoor wordt een probabilistische of semi-probabilistische (partiele factoren) modelberekening als basis gebruikt.

Als de beproefde constructie of onderdeel daarvan de eindbelasting kan opnemen en weer terugkomt in haar oorspronkelijke positie, zonder ontstaan of groei van schades, dan kan het object deze belasting opnemen. Aan de hand van de eindbelasting kan aangetoond worden of het object voldoet aan de eisen met betrekking tot de constructieve veiligheid.

3.6.2 Belasting grootte

In overeenstemming met NEN 8700 bijlage E8 [3] dient voor het aantonen van voldoende betrouwbaarheid van een kunstwerk op basis van een proefbelasting iedere (redelijkerwijs verwachte) kritieke doorsnede van dat kunstwerk te worden getoetst. De snedekracht ten gevolge van de proefbelasting dient hierbij gelijk te zijn aan de rekenwaarde van de maatgevende belasting. De belasting behorende bij het geldende betrouwbaarheidsniveau is gegeven in [2] en [3].

De onzekerheid met betrekking tot de plaats van de kritieke doorsnede, en wellicht de plaats waar de proefbelasting wordt aangebracht, kan worden verdisconteerd in een verhoging van de proefbelasting. Echter, het verdient aanbeveling om de proefbelasting op iedere (redelijkerwijs verwachte) kritieke doorsnede aan te brengen omdat dit de bron van de onzekerheid is. Is dit niet voldoende of kan dat niet dan vereist het verdisconteren van de onzekerheid in de grootte van de proefbelasting een probabilistisch onderbouwde redenering en is dan constructietype afhankelijk.

De belastinggrootte dient om onzekerheden rondom de proefbelasting zelf af te dekken, maar ook om onzekerheden binnen een projectgebied of onzekerheden langs een traject af te kunnen dekken. Er kan gekozen worden voor een verhoogde belasting bij één proef om alles af te dekken, of voor meerdere proeven op nagenoeg dezelfde locatie of meerdere proeven op diverse locaties.

Doorgaans zal het zo zijn dat bij minder proeven de belastinggrootte hoger zal worden om eenzelfde betrouwbaarheid aan te tonen.

Het afdekken van een ruimtelijke variatie, bijvoorbeeld door grondopbouw op een locatie versus grondopbouw op andere locaties (in projectgebied of traject), vergt veelal dus een vergroting van het aantal proeven of hoogte van de belasting.

3.6.3 Stopcriteria

Wanneer het object, voordat de eindstap bereikt is, tekenen vertoont die aanleiding geven de proefbelasting te staken (kruip snelheid, schade, scheuren, niet terugkomen in oorspronkelijke stand, verticale zetting), dan zal door een constructeur op basis van de aangebrachte belasting worden berekend wat de belastbaarheid is geweest tot het moment waar geen sprake was van bezwijken.

Het is belangrijk vooraf goed inzicht te hebben in de stopcriteria om te voorkomen dat een de constructie beschadigd wordt of dat de veiligheid voor de omgeving in het geding komt.

Voorbeelden van stopcriteria zijn onder andere:

- De gewenste vooraf vastgestelde belastbaarheid is bereikt.
- Ontstaan lokale schade (bijvoorbeeld afgedrukte beton in een sloof, waarbij de wapening bloot komt te liggen/holle plekken, waarbij het beton ogenschijnlijk nog intact is).
- Ontstaan of groei van plastische vervorming of eventueel scheurwijdte in beton (kortom rek van wapening) en het optreden van een te hoge reksnelheid bij een constante belasting. Ook kleinere scheuren op andere onderdelen van een damwanconstructie moeten gevolgd worden.
- Horizontale vervormingen in de damwand aan de kop, in het veld of bij de inbedding. Ongewenste vervormingen/of schades ten gevolge van andere bezwijkmechanismes

kunnen betekenen dat buiging van het dek niet het maatgevende bezwijkmechanisme binnen de totale constructie is.

- Verzakking van het maaiveld, waar mogelijk ballast voor de belasting is aangebracht. Vervorming bij belendende panden of bouwwerken.
- Niet lineair gedrag van de constructie bij herhalingen met eenzelfde belastinggrootte.

Indien de proef bij een lagere belasting dan de maximaal vooraf vastgestelde belastbaarheid afgebroken moet worden, is de conclusie dat de constructie niet aantoonbaar voldoet aan het beoogde veiligheidsniveau. Het is nog wel mogelijk dat de constructie voldoet aan een lager veiligheidsniveau, afhankelijk van de hoogste belasting die in de proef behaald is. In het geval de proefbelasting dient voor bijvoorbeeld de betrouwbaarheid van een damwandtraject kan men dan nagaan of kiezen voor het uitvoeren van meerdere (lichtere) proefbelastingen die gezamenlijk de beoogde betrouwbaarheid wel kunnen aantonen een haalbare optie is.

3.6.4 Het aanbrengen van de belasting

Het aanbrengen van de belasting dient zorgvuldig te gebeuren om een succesvolle proefbelasting te kunnen uitvoeren. In [11], waarbij de focus ligt op bruggen (dekken), wordt aangegeven dat het gekozen belastingsysteem dient te voldoen aan de volgende vereisten:

- Het systeem moet geschikt zijn om de benodigde proefbelasting te kunnen aanbrengen op een veilige wijze.
- De kans op bezwijken van de constructie bij grote vervormingen moet vermeden kunnen worden.
- Het systeem moet geschikt zijn om de belasting op een gecontroleerde manier aan te brengen met de voorgeschreven snelheid.
- Het systeem moet geschikt zijn om de belasting constant te houden.
- Het systeem moet geschikt zijn om de belastingen stapsgewijs aan te brengen en weer te verwijderen. Waarbij tussen de belastingstappen de belasting naar 0 wordt gebracht.
- Het systeem moet geschikt zijn om de vereiste geometrie van het proeflaststelsel aan te brengen.
- Het systeem moet bij bezwijken van de constructie de ballast niet laten 'vallen' maar opvangen.

Om daaraan te voldoen dient een lastprotocol en meetsheet te worden opgesteld ten behoeve van de proefbelasting. In het lastprotocol worden de beoogde belastingstappen voorbereid door middel van de bijbehorende te verwachten vervormingen op basis van de theoretische analyse. In de meetsheet worden de meetwaarden ingevuld en vergeleken met de theoretische waarden, waarna een besluit wordt genomen of de volgende belastingstap kan worden toegepast. Het lastprotocol en de meetsheet zijn een stuurmiddel om de proefbelasting te doorlopen.

Vooraf dienen de risico's in kaart te zijn gebracht zodat tijdens de proef maatregelen genomen kunnen worden en stilstand kan worden voorkomen. Denk hierbij aan alternatieve uitvoeringswijzen in het geval de constructie zich anders gedraagt dan verwacht. Als een bepaalde fase van de proef meer tijd kost zal in sommige gevallen de proefbelasting ingekort moeten worden. Tot slot kan het nodig zijn vanuit veiligheidsoogpunt een proef te stoppen.

3.7 Aandachtspunten en aannames

Een proefbelasting wordt doorgaans op een beperkt deel van de constructie uitgevoerd. Daarbij wordt verondersteld dat de constructie consistent ontworpen en uitgevoerd is. Bijvoorbeeld als een damwandconstructie wordt proefbelast, wordt ervan uitgegaan dat de damwand met verankering over een bepaald traject gelijk is.

Dit houdt in dat er altijd aandachtspunten en aannames zijn. Enkele voorbeelden van aandachtspunten zijn:

- Grondopbouw zorgt voor een belasting maar ook voor sterkte van het systeem en heeft dus impact op de krachtsverdeling en modellering.
- Erosie van waterbodem.
- Belastingen worden ook beïnvloed door de (grond-)waterstanden.

Enkele voorbeelden van aannames bij het proefbelasten:

- Een proefbelasting op een anker zegt iets over het anker (ankerstang en weerstand anker/grond).
- Een proefbelasting op een damwand moet rekening houden met meerdere mogelijke bezwijkmechanismen.

In [10] wordt specifiek ingegaan op brugdekken en daarvan wordt bijvoorbeeld het volgende aangenomen, door symmetrie of gelijkheid van overspanningen resultaten:

- Een proefbelasting in het midden van de overspanning is maatgevend (voor buiging) t.o.v. een proefbelasting op bijvoorbeeld 1/3e van de overspanning.
- Een proefbelasting aan 1 zijde van een dek geeft dezelfde resultaten aan de andere zijde van hetzelfde dek.
- Een proefbelasting op 1 van 2 gelijke overspanningen geeft dezelfde resultaten op de andere overspanning.

3.8 Welke informatie is nodig

Het is belangrijk alles uit de proef te kunnen halen voor het aantonen van een bepaalde betrouwbaarheid. Daarbij is het noodzakelijk informatie vooraf en informatie uit de proef goed te kunnen vaststellen.

3.8.1 Informatie vooraf

Als eerste dienen de gegevens die de gemaakte constructie beschrijven te worden achterhaald uit archieven. Het gaat dan om tekeningen en rapportages (liefst as-built). Op basis hiervan kan worden vastgesteld hoe de constructie er uit ziet en welke constructieonderdelen belangrijk zijn voor een constructieve beoordeling. Denk aan damwandtypes, inheidiepte, gordingen, ankertype, ankerdiameters en lengtes, corrosiebeschermingen, uitgevoerde grondverbeteringen of andere aanpassingen. Tevens kan worden vastgesteld op welke belastingen en met welke betrouwbaarheid destijds is ontworpen. De kans is groot dat de informatie niet volledig is en essentiële zaken ontbreken.

Belangrijk is verder dat er inzicht is in variaties in de gemaakte constructie over een te beoordelen traject. Het is niet ongebruikelijk dat damwandtypen, damwandlengtes en ankers variëren over een traject. Niet alleen vanwege ontwerp noodzaak, maar bijvoorbeeld vanwege bij de uitvoering beschikbare typen, lengtes en kwaliteit (as-built aanpassingen).

Uit inspecties dient een oordeel te komen over de staat van de constructie. Zijn er schadebeelden of is er sprake van degradatieprocessen. Denk aan corrosie bij stalen onderdelen, of erosie van waterbodem.

Tot slot is het noodzakelijk inzicht te hebben in de grondeigenschappen, grondopbouw en de variaties daarin bij de te beoordelen constructie. Het gaat dan om aanwezige grondtypen, relevante grondparameters en (grond-)waterstanden. Indien het archief onvoldoende gegevens bevat kan gebruik gemaakt worden van gegevens uit de BRO (Basisregistratie Ondergrond) of kan aanvullend grondonderzoek voor het verkrijgen van de grond en (grond)water gegevens worden uitgevoerd.

3.8.2 Informatie uit proef

De proef zal bestaan uit het aanbrengen van een belasting en een reactie van de constructie daarop. Het gaat er dus om die te meten. De meeste reacties bij een damwandconstructie volgen uit vervormingsmetingen. Het gaat dan met name om het meten van verplaatsingen, direct of indirect via bijvoorbeeld hellingsmetingen.

De verplaatsingen dienen gemeten te worden ten opzichte van de oorspronkelijke nul-positie, zodat ook eventueel blijvende restverplaatsingen uit voorgaande stappen worden meegenomen. Daarom moeten meetresultaten (en het eventueel niet volledig terugkomen in startpositie) van de vorige stap meegenomen worden in de volgende meetstap. Voorafgaand aan de proefbelasting moet er zorgvuldig afgestemd worden over de posities van de meetpunten, meetprocedure, meetnauwkeurigheid, wijze van overdracht resultaten, et cetera met de meetspecialist.

Naast het type sensoren dat gebruikt wordt tijdens de proefbelasting, moet ook de wijze van bevestiging worden bepaald. Dit in verband met de nauwkeurigheid van meten, de gevoeligheid voor omstandigheden en het eventueel weer kunnen verwijderen na afloop van de proef.

Ruim voorafgaand (> maand) aan de proefbelasting dient de constructie (of onderdelen daarvan) en de omgeving geïnspecteerd te worden. Deze inspectie is afhankelijk van de informatie die reeds aanwezig is en op welk punt in het traject de inspectie uitgevoerd wordt.

Buiten de informatie die nodig is voor het maken van de verificatieberekening, is het voor de proefbelasting van belang om de schades inzichtelijk te hebben. Zo dienen bijvoorbeeld posities en groottes van reeds aanwezige schades zoals scheuren, de relatie met bezwijkmechanismes en mogelijk andere van belang zijnde factoren zoals temperatuur afhankelijkheid vastgelegd te worden. In de CROW publicatie [8] wordt ingegaan om mogelijke inspecties.

Een tweede element waar aandacht aan besteed wordt tijdens de inspectie, is mogelijke beperkingen en bereikbaarheid van de locatie voor de uitvoering van de proefbelasting. Tijdens de inspectie zal een omgevingsscan worden gemaakt. Daarbij zal bijvoorbeeld worden vastgelegd of de locatie bereikbaar is, of er gebouwen/objecten/kabels & leidingen dichtbij aanwezig zijn, of er stakeholders zijn in omgeving die invloed kunnen hebben op de proefbelasting (bijvoorbeeld afsluiten van een verkeersweg of vaarweg).

3.9 Analyse proef

Na uitvoering van de proefbelasting worden de resultaten geanalyseerd om een vertaling te kunnen maken naar een advies voor de constructie.

Daarbij moet worden gerealiseerd dat een proefbelasting een toets is van de weerstand op een tijdstip $t = x$, ofwel het werkelijke gedrag van de constructie op het desbetreffende moment van testen met een bijbehorende onderhoudsstaat. Een proefbelasting zegt (net als een verificatieberekening) niets over de toekomstige reductie van de belastbaarheid als gevolg van degradatie wapening en/of beton.

De meetgegevens zijn mogelijk beïnvloed door vervormingen vanuit de totale constructie, die wel optreden maar niet de beoogde te meten parameter betreffen. Denk bijvoorbeeld aan waterstandsveranderingen die niet door de gebruiker zijn opgelegd, maar zijn ontstaan door onverwachte peilaanpassingen of neerslag/droogte.

De analyse moet inzicht geven in de aangebrachte belasting, de opgetreden 'snedekrachten' en de geleverde weerstand (sterkte) van de constructie. Bij het beoordelen van de resultaten wordt eerst gecontroleerd of de belasting is aangebracht, zoals bepaald in het lastprotocol. Soms wordt het vooraf bepaalde (gewenste) belastingniveau niet behaald doordat er voor het

bereiken van dat belastingniveau al een stopcriterium bereikt was. De grafieken en analyses worden gebruikt om te beoordelen of het object zich gedroeg zoals beoogd of dat er afwijkend gedrag was.

Op basis van de (gecorrigeerde) meetgegevens worden meetresultaten vastgelegd als onderbouwing van het advies. Het kan dan gaan over:

- Gemeten belastingschema.
- Kracht-verplaatsingsdiagram.
- Vervormingsprofielen.
- Scheuropeningen.
- Rekken.

De grafieken worden meestal gepresenteerd als functie van de tijd (op lineaire en op logaritmische schaal ten behoeve van de kruipsnelheid) en als functie van de aangebrachte belasting.

De uitwerking van de meetgegevens is gericht om te ondersteunen bij de conclusie van de proefbelasting. Bepaalde stopcriteria zullen tijdens de proef gemonitord zijn, maar dit is vaak op basis van de ruwe meetgegevens.

Bij onverwachte verschillen tussen berekende (voorspelde) en gemeten waarden zal de reden voor deze verschillen verklaard moeten worden. In sommige gevallen kan dat vervolgens leiden tot een verbetering van het gebruikte eindige elementen model.

Als alle (mogelijk) kritische doorsneden getest zijn, dan kan de totaal aangebrachte belasting (of bijbehorende snedekracht) het eindresultaat van de proefbelasting zijn. De controles betreffen dan of het bij de belasting behorende vervormingsgedrag, of het wel of niet optreden van scheurvorming, in lijn was met de verwachtingen en geen onomkeerbare schade heeft veroorzaakt.

In andere gevallen kan een proefbelasting ook gebruikt worden ter verificatie van een herberekening. De proefbelasting wordt gebruikt als controlemiddel voor aannames in het model (zoals geometrie, randvoorwaarden van oplettingen, materiaalgedrag, et cetera). Als resultaat kan het model bevestigd dan wel geoptimaliseerd worden en vervolgens op basis van het model een conclusie getrokken worden voor de constructie. Dit geldt eveneens voor de vertaling van een 'steekproef' locatie naar de 'gehele' constructie.

3.10 Advies en vervolmaatregelen

Na het analyseren van de resultaten wordt door de constructeur een advies opgesteld voor de beheerder van het object. De feitelijke belastbaarheid wordt vergeleken met de doelstelling van de proefbelasting, waarna advies gegeven wordt voor het object.

Voorbeelden van het advies zijn:

- Vrijgave compleet (voor beoogde belasting en de restlevensduur).
- Vrijgave voor beoogde gebruik (met limiet aan belasting en/of restlevensduur).
- Lastbeperking instellen.
- Versterking uitvoeren.
- Vervanging.

Bij het beschouwen van de veiligheidsniveaus en referentieperiode, dienen de belastingcombinatie en belastingfactoren gebruikt te worden die gebruikt zijn bij de voorbereiding van de proefbelasting.

De beheersmaatregelen die na het proefbelasten genomen worden zijn de volledige verantwoordelijkheid van de beheerder.

4 Voorbeelden proefbelasting

Er is voor damwandconstructies nog beperkte ervaring met proefbelasten of soortgelijke analyses. Voor bruggen is meer ervaring opgedaan [11]. In de CROW publicatie over proefbelasten [10] zijn ervaringen met brugdekken en de gehanteerde werkwijze samengevat. Hieronder wordt ingegaan op enkele toepassingen die een relatie hebben met proefbelasten van ankerpalen (belastinggrootte en onzekerheden) en de haalbaarheid van een proefbelasting bij een damwandconstructie beoordelingsproject.

4.1 Voorbeeld proefbelasting anker

4.1.1 Voorbeeld case ankerpalen

In [12] is nagegaan of met behulp van proefbelastingen aan te tonen is dat aan een vereiste betrouwbaarheid kan worden voldaan.

Het voorbeeld gaat in tegenstelling tot horizontale ankers zoals bij damwandconstructie over verticale trekankers (ook wel ankerpalen) maar met een vergelijkbare uitvoeringstechniek.

Bij horizontale ankers [6] en in dit geval ankerpalen [7] kunnen proefbelastingen zoals geschiktheidsproeven worden uitgevoerd om aan te tonen dat een ankersysteem geschikt is om te passen (en daarmee een bepaalde betrouwbaarheid kan worden behaald). Geschiktheidsproeven worden uitgevoerd op productieankers en worden niet tot bezwijken proefbelast.

In de normen [2] en specifiek de ontwerprichtlijn [7] wordt aangegeven dat het mogelijk is om de ankers te dimensioneren op uitkomsten van bezwijkproeven vooraf op verloren testpalen. Deze zijn doorgaans gunstiger dan de ondergrenswaarden van de paalklasse factoren volgens [7]. Echter om de betrouwbaarheid van het ontwerp te halen zijn er dan aanvullende randvoorwaarden waaraan moet voldoen. Deze bestaan uit additionele “proefbelastingen” en uitvoeringscontroles, nl:

- Op minimaal 3% van de productiepalen, met een minimum van 3 stuks, een geschiktheidsproef uit te voeren.
- Op minimaal 3 % van de overige productiepalen, met een minimum van 3 stuks, een controleproef uit te voeren.
- Alle productiepalen te onderwerpen aan een uitvoeringscontrole.

Het aantal additionele proefbelastingen (en benodigde belasting) is gebaseerd op probabilistische analyses en dienen om de onzekerheden rondom de uitvoering en aanwezige grondslag in het project te reduceren.

Onderdeel van de studie was om te zien of en hoe een verhoging van de proefbelasting (belasting bij een geschiktheidsproef) kan leiden tot een reductie in aantallen benodigde proeven in relatie tot de benodigde betrouwbaarheid.

4.1.2 Aanpak aantonen van de betrouwbaarheid

De in [12] beschreven methode is gebaseerd op het bezwijkmechanisme van het geotechnisch bezwijken van het anker. De sterkte wordt bepaald door een paalklassefactor α_t en de lokaal aanwezige sterkte van de grond uit sonderingen. Op basis van de resultaten van de bezwijkproeven op hetzelfde type ankerpalen op andere projecten in Nederland wordt

voor de paalklassefactor voor de schachtwrijving bij een op trek belaste ankerpaal, α_t een a-priori kansdichtheidsverdeling bepaald.

Met de probabilistische methode van Bayesian-updating is het mogelijk de a-priori (voorkennis) kansdichtheidsverdeling van de weerstand (ankerpaaltrekkracht) R_{priori} met het resultaat van een geslaagde geschiktheidsproef, $i = 1$, met een belasting, $F_{pr;i}^2$ te updaten.

De a-priori kansdichtheidsverdeling voor ankerpalen kan worden gebaseerd op een combinatie van de verwachte lokale variatie en de verwachte variatie van projectgemiddelden in Nederland:

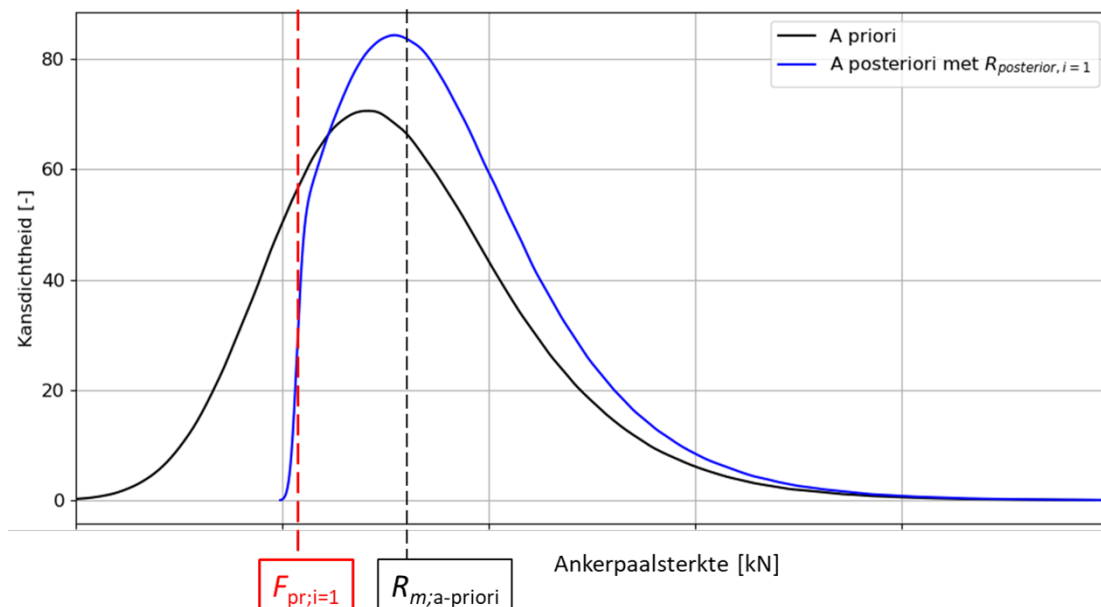
- De lokale variatie is gebaseerd op de uitgangspunten van de CUR236:2017. Dat een combinatie van twee normaal verdeelde parameters:
 - (Maximaal toegestane) variatie van $V_{\alpha_t,lokaal} = 12\%$ in bezwijkproeven.
 - (Maximaal toegestane) variatie van $V_{q_c,lokaal} = 12\%$ in de resultaten in de ontwerpberoeeningen op basis van de sonderingen binnen een gebied.
- Het gemiddelde en de variatie van de Nederlandse projectgemiddelden van proefbelastingresultaten is gebaseerd op alle proefresultaten in bijlage A van de CUR236:2017. Bij aanwezigheid van bezwijkproeven kan de a-priori verdeling op die proefresultaten worden gebaseerd.

De a-priori faalkans is dan de kans dat de trekpaal de rekenwaarde van de sterkte niet haalt op basis van landelijke statistieken met zowel spreiding in projecten als spreiding tussen projecten, en dus een grote onzekerheid. Deze onzekerheid wordt vervolgens gereduceerd met Bayesian updating op basis van geschiktheidsproeven.

Bij de update van de a-priori kansverdeling wordt in de kansdichtheidsverdeling de kansdichtheid, met name beneden het belastingniveau $F_{p;i}$ met de ervaring van het “niet falen” verlaagd, en neemt het totaal van de kansdichtheid boven het belastingniveau toe om de gehele inhoud van het kansdichtheidsvolume gelijk aan 1 te houden. Op deze wijze is de “a-posteriori” (geüpdatete) kansdichtheidsverdeling $R_{posterior,i}$ verkregen. In Figuur 4.1 is voor de voorbeeldcase te zien hoe een a-priori kansdichtheidsverdeling door het uitvoeren van de eerste geschiktheidsproef kon worden geüpdate tot de eerste a-posteriori kansdichtheidsverdeling. Op basis van iedere geüpdate kansdichtheidsverdeling kan de geüpdate faalkans worden bepaald van de rekenwaarde van de ontwerpweerstand, R_d dus de $P_f(R < R_d | succesvolle\ proeven)$ of uitgedrukt als betrouwbaarheidsindex $\beta_{posterior}$.

Deze waarde $\beta_{posterior}$ heeft betrekking op een nog niet beproefde paal en is dus onafhankelijk van het aantal palen in een project. Het geeft de betrouwbaarheid weer op basis van de informatie tot op dat moment: de a-priori voorkennis + de ervaringen door succesvolle geschiktheidsproeven. Door successief de informatie van succesvolle (of gefaalde) geschiktheidsproeven te verwerken totdat aan de betrouwbaarheidseis wordt voldaan, kan worden bepaald hoeveel geschiktheidsproeven nodig zijn.

² $F_{pr;i} = F_d$ bij een geschiktheidsproef volgens de CUR236:2017. F_d is de rekenwaarde van de trekkracht op de te testen ankerpaal volgens onderliggend uitvoeringsontwerp in de formule op blz. 108 “ $F_p = n \cdot F_d + R_{s;wr}$ ”. De uiteindelijke uit te oefenen belasting, F_p van een geschiktheidsproef ligt hoger dan de $F_{pr;i}$ omdat rekening dient te worden gehouden met: $R_{s;wr}$ de bijdrage van wrijving van de paalschacht en/of oplanger van de te testen ankerpaal met aanliggende grondlagen die in later stadium nog ontgraven dienen te worden en de factor n , voor de invloed van groepseffect, wisselbelasting, nog te ontgraven grondlagen en/of bemaling tijdens testen.



Figuur 4.1 Voorbeeld case kansdichtheidsverdelingen ankersterkte: a-priori en a-posterior na de eerste geschiktheidsproef. Op de horizontale-as staat de ankersterkte uitgezet. De verwachtingswaarde van de a-priori ankersterkte $R_{m;a-priori}$ is met de zwart gestippelde lijn aangegeven en de eerste proefbelasting $F_{pr;i=1}$ met de rode gestippelde lijn.

Voor een ankerpaal onder een niet-stijf bouwwerk komt β overeen met de Eurocode/NEN-EN 1990 eis aan de weerstand $\beta = \beta_{R,EC} = 3,04$ (gebaseerd op een vereiste betrouwbaarheidsindex van $\beta = 3,8^3$ en een invloedcoëfficiënt van $\alpha_R = 0,8$). Voor een stijf bouwwerk kan worden afgeleid dat een ontwerp gebaseerd op bijvoorbeeld 1 sondering een $\beta = 2,68$ ($\Rightarrow \beta_{R,EC} = 3,04$)⁴ benodigd is.

De in [12] beschreven voorbeeld methodiek geeft aan dat de betrouwbaarheid van in dit geval een trekpaalgroep met ankerpalen kan worden aangetoond met geschiktheidsproeven.

Deze Bayesian-updating methode werkt effectief omdat de kansdichtheid van de linker staart van de kansdichtheidsverdeling wordt verlaagd. En juist de hoogte van de kansdichtheid van deze staart is bepalend voor de hoogte van de faalkans. Het systeem “leert” meer als de belasting van de geschiktheidsproeven groter is. Een groter deel van de staart van de kansdichtheidsverdeling wordt dan verlaagd. In deze methodiek mag iedere geschiktheidsproef een ander belastingniveau hebben. Verder biedt deze methode in principe ook de mogelijkheid de herverdelingscapaciteit van het bouwwerk over een m -aantal palen expliciet mee te nemen door rekening te houden met uitmiddeling over een aantal palen. Dit is een correctere aanpak dan het hierboven beschreven verlagen van de eis aan de geschiktheidsproef β op basis de factor $\sim 1,1$ lagere ξ -waarde in de NEN9997-1. Verwacht wordt dat met deze op m -palen gebaseerde aanpak voor constructies met een grotere herverdelingscapaciteit en met minder geschiktheidsproeven de in de NEN-EN 1990 vereiste betrouwbaarheid kan worden aangetoond.

³ Deze waarde is CC-klasse onafhankelijk voor de weerstand van funderingen

⁴ Deze eis is gebaseerd op de ξ -waarde voor een stijf bouwwerk uit de NEN9997-1:2017. De eis voor een stijf bouwwerk is lager dan die voor een niet-stijf bouwwerk ter compensatie voor het feit dat er geen herverdeling optreedt bij het uitvoeren van geschiktheidsproeven.

4.1.3 Voorbeeldcase proefbelastingen

Om inzicht te geven in de hoeveelheid benodigde geschiktheidsproeven bij een project is een praktisch voorbeeld “de voorbeeldcase” uitgewerkt. De voorbeeldcase bestaat uit een project met CUR236:2017 ankerpaaltype A. De ontwerpbelasting is 25% hoger dan de a-priori verwachtingswaarde en verder is het ontwerp gebaseerd op 1 sondering. Om vervolgens inzicht te verkrijgen in de effectiviteit van eventuele verzwaring van de geschiktheidsproef zijn 4 berekeningen uitgevoerd met verhoogde belastingen tot maximaal $F_p = 1,2F_d$ (= een factor 1,2 boven de rekenwaarde van de trekkracht op de te testen ankerpaal volgens onderliggend uitvoeringsontwerp). In deze serie probabilistische berekeningen is de hoogte van de belasting van de opvolgende geschiktheidsproeven constant gehouden.

Aangezien bij de bezwijkbelastingen de α_t voor het ontwerp wordt bepaald is ervoor gekozen in de uitwerking van de voorbeeldcase de kansdichtheidsverdeling voor α_t te gebruiken. Met als rekenwaarde van het ontwerp $\alpha_{t,d} = \frac{\alpha_{t,ontwerp}}{\xi \times \gamma_{st}}$. In de Bayesian-updating berekening van de voorbeeldcase is expliciete herverdeling over m -palen niet geïmplementeerd dus in het geval van een stijf bouwwerk ligt de betrouwbaarheidsindex-eis van de geschiktheidsproef op $\beta = 2,68$ (1 sondering).

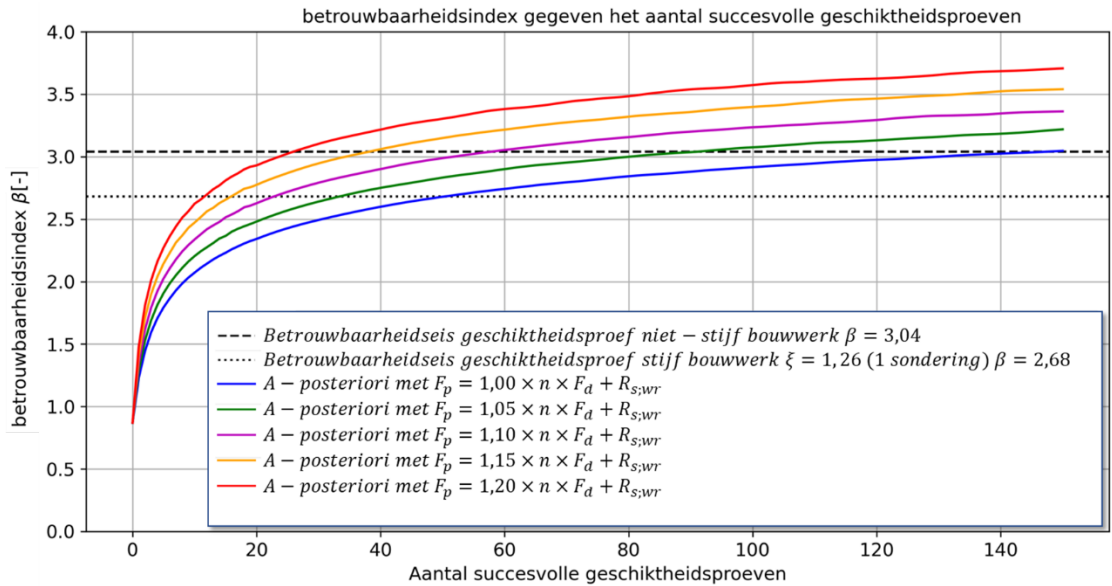
De voor de voorbeeldcase opgestelde a-priori kansdichtheidsverdeling is gebaseerd op een combinatie van de verwachte lokale variatie en de verwachte variatie van projectgemiddelden in Nederland:

- De lokale variatie is gebaseerd op de uitgangspunten van de CUR236:2017. Dat een combinatie van twee normaal verdeelde parameters:
 - (Maximaal toegestane) variatie van $V_{\alpha_{t,lokaal}} = 12\%$ in bezwijkproeven.
 - (Maximaal toegestane) variatie van $V_{\alpha_{t,lokaal}} = 12\%$ in de resultaten in de ontwerpberoeeningen op basis van de sondering binnen een gebied.
- Het gemiddelde en de variatie van de Nederlandse projectgemiddelden van proefbelastingresultaten is gebaseerd op bijlage A van de CUR236:2017. Voor ankerpaaltype A zijn er 4 projecten en het gemiddelde van de projectgemiddelden is $\alpha_{t,NL,gem} = 0,016$ met een variatie $V_{\alpha,NL} = 0,35$. Vanwege de grootte van de variatie is een lognormale verdeling toegepast.

In de voorbeeldcase is $\alpha_{t,ontwerp} = 1,25 \times \alpha_{t,NL,gem} = 1,25 \times 0,016 = 0,02$. Als invoer van de berekening dient te worden uitgegaan van de ξ -waarde van een niet-stijf bouwwerk en die is $\xi = 1,39$ bij 1 sondering en verder is de $\gamma_{st} = 1,35$ dus $\alpha_{t,d} = \frac{0,02}{1,39 \times 1,35} = 0,0107$ (dat betekent feitelijk dat de ontwerprekenwaarde van de weerstand overeenkomt met

$$R_d = \frac{0,0107}{0,016} \times R_{m,a-priori} = 0,669 \times R_{m,a-priori}.$$

De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd tot 150 opeenvolgende niet-gefaalde geschiktheidsproeven. Deze 150 bleek voldoende om zelfs met een gewone, niet verzwaaarde, geschiktheidsproef een $\beta = 3,04$ aan te tonen. In Figuur 4.2 is de aangetoonde β als functie van het aantal opeenvolgende niet-gefaalde geschiktheidsproeven uitgevoerd.



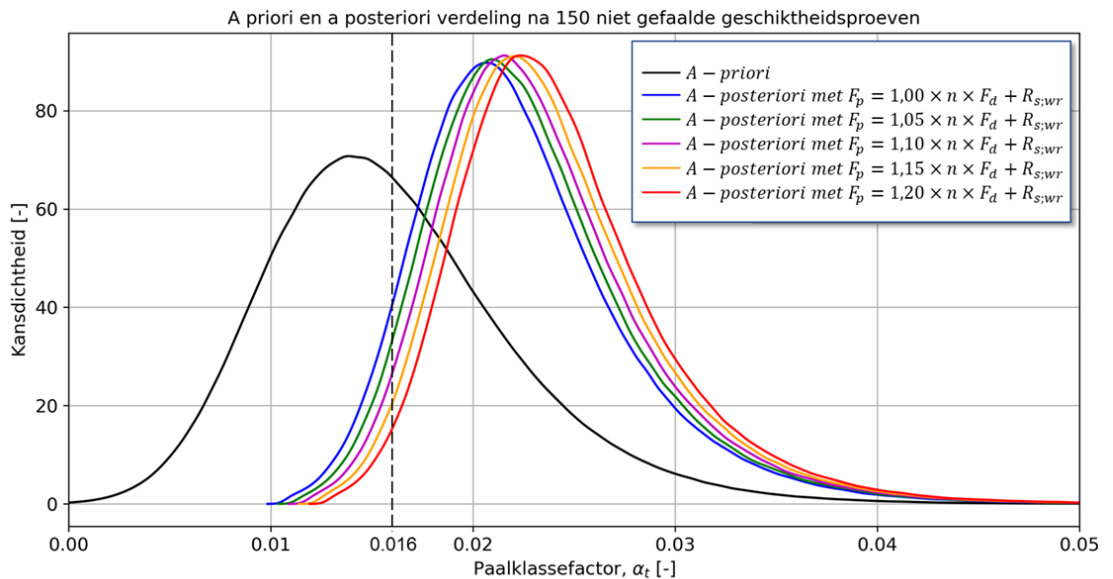
Figuur 4.2 Resultaat van Bayesian-updating met resultaat opeenvolgende succesvolle geschiktheidsproeven in voorbeeldcase met $R_d = 0,669 \times R_{m,a-priori}$

In Tabel 4.1 is het minimaal aantal geschiktheidsproeven voor ankertrekpaalgroep onder een niet-stijf en onder een stijf bouwwerk gegeven als functie van de verhogingsfactor van de geschiktheidsproefbelasting waarbij 1,00 overeenkomt met die van een standaard geschiktheidsproef (afgestemd op de rekenwaarde van het ontwerp). De minimaal benodigde aantallen voor een niet-stijf bouwwerk komen overeen met de aantallen bij de snijpunten van de 5 lijnen in Figuur 4.2 met de horizontale lijn op $\beta = 3,04$. De benodigde aantallen voor een stijf bouwwerk komen overeen met de aantallen bij de snijpunten met de horizontale lijn op $\beta = 2,68$.

Tabel 4.1 Aantal opvolgende geslaagde geschiktheidsproeven in de voorbeeldcase om aan te tonen dat aan de NEN1990 eis ten aanzien van de weerstand van de funderingspalen wordt voldaan.

Verhogingsfactor geschiktheidsproefbelasting [-]	Minimaal aantal opvolgende niet- falende geschiktheidsproeven [#]	
	Niet-stijf	Stijf
1,00	148	51
1,05	94	33
1,10	58	23
1,15	39	16
1,20	26	12

In Figuur 4.3, is de “a-priori” en de “a-posteriori” kansdichtheidsverdeling na 150 opeenvolgende niet-gefaalde geschiktheidsproeven weergegeven voor 5 verschillende belastingniveaus van de geschiktheidsproeven.



Figuur 4.3 Resultaat van Bayesian-updating met resultaat na 150 opeenvolgende succesvolle geschiktheidsproeven in voorbeeldcase met $R_d = 0,669 \times R_{m,a-priori}$. Deze kansdichtheidsverdelingen zijn opgesteld met als doel de betrouwbaarheid van een in het ontwerp aangehouden rekenwaarde op basis van geschiktheidsproeven te updaten. De gepresenteerde verdelingen kunnen niet worden gehanteerd voor een andere toepassing, zoals bijvoorbeeld het afleiden van een gemiddelde waarde, waarschijnlijk zijn daarvoor andere uitgangspunten maatgevend, dit is niet nader onderzocht.

De benodigde aantallen in Tabel 4.1 laten zien dat er voor de voorbeeldcase in geval van een niet-stijf bouwwerk met 148 achtereenvolgende niet-gefaalde gewone (niet verhoogde) geschiktheidsproeven de in de NEN-EN 1990 aan een funderingspaal vereiste betrouwbaarheid kan worden aangetoond. Voor een stijf bouwwerk is dat na 55 geschiktheidsproeven reeds aangetoond.

Het verloop van de benodigde aantallen in Tabel 4.1 laat zien dat het aantal benodigde proeven significant afneemt bij verhoging van de geschiktheidsproefbelasting. Bij een verhogingsfactor van 1,2 is het benodigde aantal bij een niet-stijf bouwwerk 26 en bij een stijf bouwwerk 12.

Zelfs een beperkte verhoging met een factor van 1,05 resulteert in een verlaging van 51 naar 33 benodigde achtereenvolgende niet-falende geschiktheidsproeven. Uitgaande van het in de CUR236:2017 minimaal vereiste aantal geschiktheidsproeven van 3% is het aantal geschiktheidsproeven van 33 reeds standaard aanwezig bij een project met 1100 ankerpalen.

In Figuur 4.3 is goed te zien hoe de staart aan de linkerkzijde van de kansdichtheidsverdeling enorm is verkleind na 150 opeenvolgende geschiktheidsproeven, dit is de situatie aan de uiterste rechterzijde in Figuur 4.2 waar de aangetoonde betrouwbaarheid van alle berekeningen net ($F_p=1.00 \cdot F_d$) tot ruim boven de $\beta = 3,04$ liggen.

4.2 Voorbeeld proefbelasting damwandconstructie

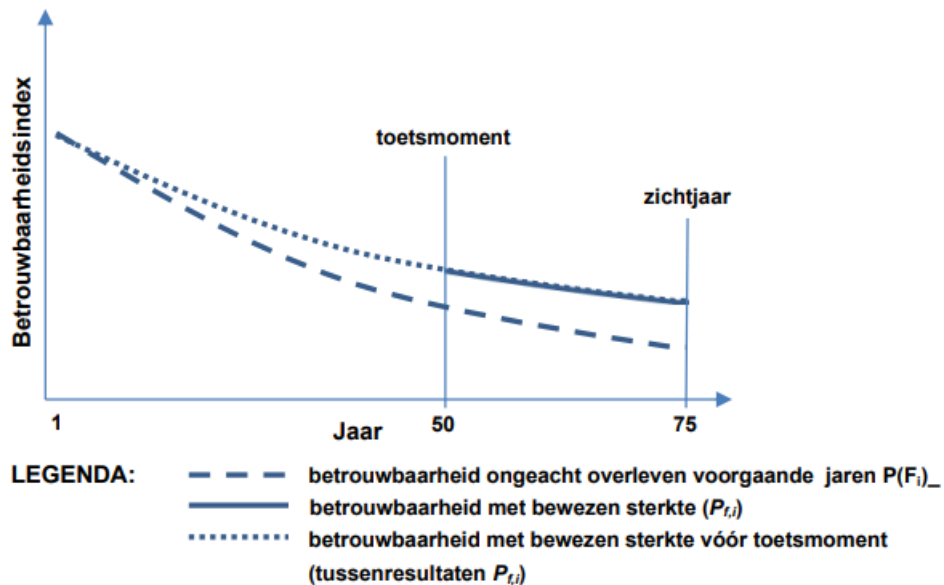
4.2.1 Bewezen sterkte richtlijn damwanden en kademuren

In [13] is beschreven hoe rekening kan worden gehouden met tijdens de levensduur opgebouwde bewezen sterkte in de beoordeling van bestaande kademuren en damwanden.

In deze richtlijn betekent “bewezen sterkte” dat de beoordeling van de constructieve veiligheid van bestaande constructies rekening houdt met het feit dat de constructie tot het moment van de beoordeling niet is bezweken. Het effect van bewezen sterkte zal dan ook tot uitdrukking komen in de probabilistische beoordeling en daaraan te kalibreren nieuwe -verlaagde- partiële factoren of rekenwaarden. Niet geheel hetzelfde maar er zijn overeenkomsten met een proefbelasting aangezien bij bewezen sterkte in jaren die zijn overgegaan een bepaalde weerstand is geleverd.

De ontwikkelde beoordelingsmethode is gebaseerd op de evaluatie van de constructieve veiligheid op jaarbasis (kans per jaar, in plaats van de kans tijdens de levensduur). Dit stelt de eigenaars in staat om de restlevensduur van bestaande constructies nauwkeurig in te schatten. De ontwikkelde beoordelingsmethode is een grote stap ten opzichte van de huidige aanpak conform de norm NEN 8707, omdat de betrouwbaarheidseisen onafhankelijk zijn van de huidige leeftijd en restlevensduur, en omdat de voorgestelde partiële factoren rekening houden met de effecten van bewezen sterkte en corrosie.

Het principe van een bewezen sterkte analyse zou moeten leiden tot een resultaat zoals gegeven in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Schematische weergave van de betrouwbaarheid in de tijd zonder en met 'bewezen sterkte'.

Te zien is dat bij een standaard analyse de betrouwbaarheid per jaar i in de tijd langzaam zal teruglopen (door degradatie effecten). Door te kunnen vaststellen dat in een jaar voor het toetsmoment de constructie de belasting heeft overleefd (er was voldoende sterkte) neemt de faalkans dus af en wordt de betrouwbaarheid hoger. Uiteindelijk leidt tot in de figuur met een voorbeeld van 50 jaar overleven van de constructie tot een hogere betrouwbaarheid die kan worden geëxtrapoleerd naar een bepaald zichtjaar. De bewezen sterkte analyse leidt dus tot minder onzekerheid in toekomst. Door een vergelijking met een benodigde betrouwbaarheid/levensduur kan de restlevensduur of de hogere betrouwbaarheid aan het einde van een gewenste verlengde levensduur worden aangetoond.

In het systeem is het belangrijk om te weten welke grenstoestand functies (mechanismes) moeten worden meegenomen en welke onzekerheden er zijn voor de diverse parameters en model.

In de richtlijn is een case van een damwand langs een kanaal met zoet water uitgewerkt. De volgende drie grenstoestandsfuncties zijn beschouwd voor deze case:

- Bezwijken voorwand.
- Bezwijken ankers.
- Bezwijken van de grond (passieve wig).

Dit zijn maatgevende mechanismes die ook in geval van een proefbelasting relevant zijn. Relevante mechanismes zijn vermeld in bijlage B. Voor de beschouwde cases niet maatgevende mechanismen zijn voor de studie niet meegenomen. In deze studie is bijvoorbeeld de interactie van Kranz-stabiliteit met de beschouwde faalmechanismen niet meegenomen. Deze veiligheid moet dus apart worden geverifieerd en de resultaten zijn alleen van toepassing voor situaties waarbij Kranz niet kritiek is.

De beschouwde grenstoestandsfuncties zijn uitgewerkt in formules en hier gegeven in *Tabel 4.2*.

Tabel 4.2 Beschouwde grenstoestanden.

#	Grenstoestandsfunctie
1	$Z_{STR;yield} = f_y - \theta_{m;MN} \cdot \left(\frac{\text{abs}(M'_{max})}{W'_{wall;corr}} + \frac{N'_{max}}{A'_{wall;corr}} \right)$
3	$Z_{STR;anchor} = f_{y;a} - \theta_{m;F} \cdot F_{anchor} / A'_{anchor;corr}$
4	$Z_{GEO;passive} = 99 - \theta_{m;MobP} \cdot MobPassive$

Met de uitgevoerde analyse wordt bewezen dat 'bewezen sterkte' leidt tot een in de tijd hogere betrouwbaarheidsindex dan wanneer overleven in voorgaande jaren niet wordt meegenomen. De aanpak voor probabilistische analyses met bewezen sterkte is generiek toepasbaar.

De bewezen sterkte analyse maakt, vanwege het beschikbare probabilistische model, gevoeligheidsanalyses mogelijk waarmee kan worden vastgesteld welke parameters de meest invloed hebben en welke minder invloed hebben. Dit kan dan aangeven waar het meeste loont om de onzekerheid van te verlagen.

De geanalyseerde case studies zijn beschouwd over een levensduur van 75 jaar, met een veiligheidsbeoordeling in jaar 50, waarbij gewerkt wordt met betrouwbaarheidseisen per jaar. Hierbij is het effect van bewezen sterkte tot het moment van beoordelen meegenomen, dat wil zeggen: 'het naar behoren functioneren onder de op basis van statistiek te verwachte belastingen'.

In de beschouwde case studies is uitgegaan dat de constructie over de levensduur van 75 jaar qua constructief gedrag niet wezenlijk veranderd is, behalve door degradatie. Er is ook als uitgangspunt genomen dat de kansverdelingen van de bovenbelasting, (grond)waterstanden, etc., sinds de aanleg niet gewijzigd zijn, en ook over de toetsperiode niet zullen wijzigen. Om deze reden zijn de resultaten van de twee casestudies (invloedsfactoren en rekenwaarden) alleen toepasbaar voor beoordelingen op 'afkeur', en niet voor 'verbouw'.

Bij verbouw worden echter aanpassingen aan de constructie gedaan en kunnen kansverdelingen veranderen, waardoor het effect van de bewezen sterkte en de invloedsfactoren anders worden. Op voorhand is niet te zeggen of het effect van bewezen sterkte hierdoor groter of kleiner zal zijn, noch hoe de invloedsfactoren en rekenwaarden van belasting en sterkte zullen veranderen. De in dit project ontwikkelde probabilistische methode is echter wel geschikt om verbouwsituaties met veranderde kansverdelingen en/of nieuwe constructie-elementen door te rekenen

Concreet betekent de bewezen sterkte dat grenstoestanden niet overschreden mogen zijn. Bijvoorbeeld voor vloeien of knik van de wand, vloeien van een anker en instabiliteit (bezijken passieve grondwig), zoals beschouwd op elementniveau conform NEN8700. Voor toepassing van de resultaten van deze studie, is het noodzakelijk om aan te tonen dat er geen signalen zijn voor het mogelijk overschrijden van een grenstoestand op elementniveau. Voorbeelden zijn het aantonen dat er geen scheuren aanwezig zijn, en dat geen buitenproportionele vervorming is opgetreden welke zou kunnen duiden op een herverdeling van krachten.

In de 'bewezen-sterkte'- analyses is uitgegaan van onzekerheden behorend bij de situatie waarin inspecties en metingen zijn gedaan, waardoor bijvoorbeeld niet meer met de landelijke onzekerheid van corrosie maar alleen met de lokale onzekerheid hoeft te worden rekening te houden. Door de combinatie van bewezen sterkte en de aanvullende informatie is het mogelijk de restlevensduur te maximaliseren. Hetzelfde geldt bij het uitvoeren van proefbelastingen.

4.2.2 Kademuur bewezen sterkte en proefbelasting

Zonder op de details van het project in te gaan wordt dit voorbeeld toegelicht om aan te geven dat het uitvoeren van een proefbelasting een gunstig effect kan hebben bij de beoordeling een damwandconstructie. Dit wordt hier visueel aangegeven in een update van de kansverdelingsfunctie. Door TNO is in [14] de invloed van proefbelastingen op kademuren onderzocht in combinatie met een bewezen sterkte analyse.

Het effect van een proefbelasting is als volgt meegenomen. Allereerst is vastgesteld wat de invloed is van een succesvolle proefbelasting op de jaarlijkse kans op falen:

$$P_{F,year\ i | proof\ load\ test} = P(S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_{i-1} \cap F_i | g_{PLT}(x) > 0)$$

De kansverdelingsfunctie van een middels een proefbelasting onderzochte parameter wordt beschreven als:

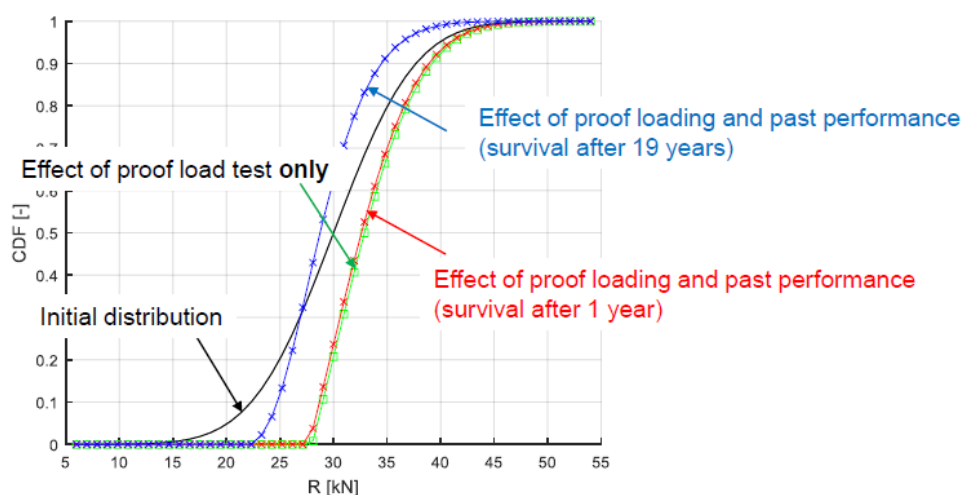
$$F_{X|proof\ load\ test} = P(X \leq x | g(x)_{PLT} > 0)$$

Met:

- F Falen.
- S Overleven.
- $g(x)_{PLT}$ Succesvolle proefbelasting (proof load test).

Een voorbeeld van een resultaat van een analyse is gegeven in Figuur 4.5.

Update of the CDF of R based on the proof load test and past performance



Figuur 4.5 Updaten van de cumulatieve kansverdelingsfunctie van de sterkte na uitvoeren van een proefbelasting.

In Figuur 4.5 is te zien dat een proefbelasting een groot deel van de originele kansverdeling van de sterkte heeft afgekapt (zoals weergegeven in H3.2), in dit geval door een proefbelasting met aangetoonde sterkte van 28 kN, waardoor de cumulatieve kansverdelingsfunctie opschuift na rechts. Bewezen sterkte kan dan afhankelijk van degradatie effecten en moment van toetsen nog een additioneel effect hebben wat voor het huidige document niet van belang is.

5 Conclusies en aanbevelingen

In het rapport is een verkenning uitgevoerd naar de inzet van proefbelastingen bij de beoordeling van bestaande damwandconstructies. Voor dit onderwerp zijn de volgende kennisvragen verkennend beantwoord.

- Hoe zou het proefbelasten van damwanden moeten worden uitgevoerd?
- Hoe zou het uitvoeringsplan en het meetplan voor het proefbelasten van damwanden moeten worden opgesteld?
- Hoe kunnen de ingenieursbureaus de resultaten van proefbelasting gebruiken bij de beoordeling van bestaande damwanden?

Hierbij is de ervaring rondom proefbelastingen zoals vastgelegd in literatuur verzameld en gebruikt om belangrijke aspecten en aandachtspunten naar voren te brengen.

Onderzoeksresultaten en synthese

Om aan te tonen dat een (onderdeel) van een constructie voldoet aan de eisen voor constructieve veiligheid wordt het volgende stappenschema doorlopen:

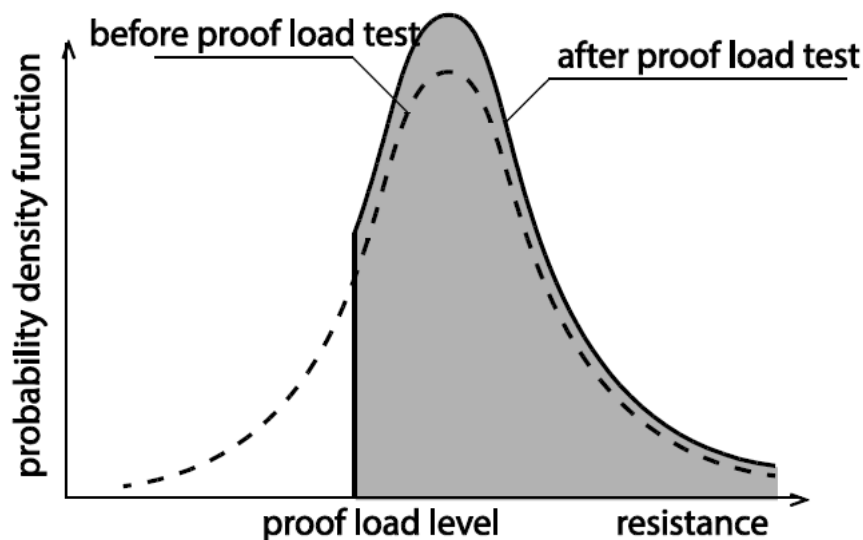
1. Ontwerpberekeningen – controle van actuele en te verwachten omstandigheden ten opzichte van de oorspronkelijke (ontwerp of liever as-built) gegevens.
2. Herberekening – controle van constructieve veiligheid – restlevensduur op basis van een herberekening met gebruik van de actuele en te verwachten omstandigheden.
3. Vervolg aanpak.

In de vervolgaanpak zou voor een verfijning van de herberekening kunnen worden besloten door middel van het uitvoeren van een proefbelasting.

Het basisprincipe van proefbelasten is dat een belasting op een kunstwerk geplaatst wordt die een equivalente snedekracht of snedemoment veroorzaakt vergelijkbaar met de belastingcombinatie zoals die in de ontwerpberekening is aangenomen of met de verkeersbelasting (inclusief belastingfactoren) voorgeschreven door de norm. Indien bij het belasten geen blijvende schade optreedt, is proefondervindelijk aangetoond dat het bestudeerde kunstwerk de voorgeschreven belasting kan weerstaan en dus aantoonbaar veilig is zoals gedefinieerd in de geldende norm. Hierbij kunnen meerdere sneden of bezwijkmechanismen maatgevend zijn, waarmee bij de opzet van de proefbelasting rekening gehouden moet worden.

De sterkte van een (onderdeel van een) constructie wordt doorgaans in een probabilistische analyse beschreven in een kansdichtheidsfunctie verdeling zoals gegeven in onderstaande figuur.

De proefbelasting zorgt ervoor dat in de kansverdeling van de sterkte in het linker deel een deel van de verdeling wordt afgekapt. Immers de proefbelasting toont aan dat de sterkte minimaal die waarde is. Dit principe is eveneens in onderstaande figuur geïllustreerd. De rekenwaarde van de weerstand neemt daarmee toe.



Figuur 5.1 Begrenzen van de kansverdeling van de sterkte (weerstand) door het uitvoeren van een proefbelasting [Lantsoght, E., van der Veen, C. de Boer, A. Hordijk, D.A. Proof load testing of reinforced concrete slab bridges in the Netherlands. *Structural Concrete*, volume 18(4), 2017].

Het rapport geeft aan welke aspecten met betrekking tot de algemene kennisvragen beoordeeld dienen te worden om succesvol proefbelastingen in te zetten om onzekerheden te kunnen afdekken. Hiervoor is het nodig een (semi-) probabilistisch model van de te beoordelen constructie (onderdeel) met relevante bezwijkmechanismes beschikbaar te hebben. Een voorbeeld wordt gegeven van hoe dit in de praktijk kan uitwerken.

Aanbevelingen

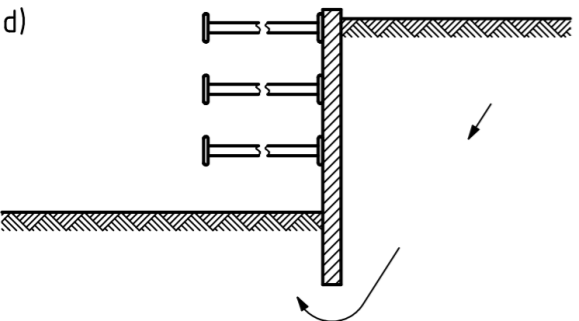
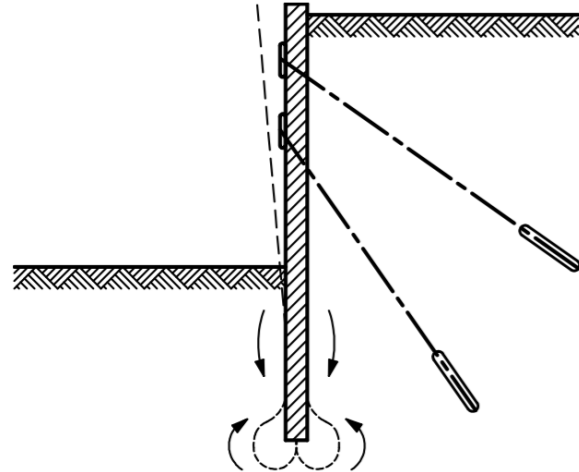
De inzet van een proefbelasting in de beoordeling van een constructie is in dit onderzoek verkend. De resultaten van de verkenning kunnen in de volgende stap gebruikt worden om proefbelastingen in praktijkcase(s) toe te passen met case specifieke nadere uitwerking. De bij de praktijkcases opgedane ervaringen kunnen worden gebruikt bij het opstellen van een praktische generieke richtlijn voor proefbelastingen van bestaande constructies.

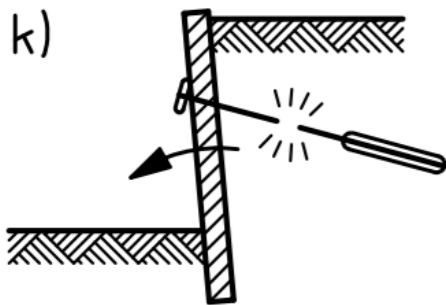
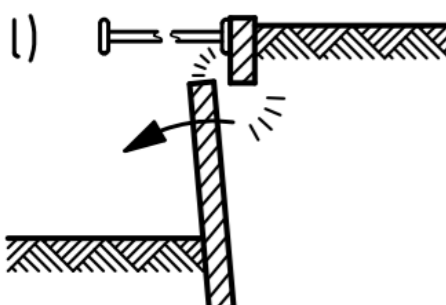
6 Referenties

- [1] Bouwbesluit en regeling bouwbesluit, Nederlandse staat, 1 januari 2021
- [2] NEN-EN 1990 serie
 - a. NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2019Eurocode - Grondslagen van het constructief ontwerp, inclusief nationale bijlage NB:2019, Nederland Normalisatie instituut, Delft, 2019
 - b. NEN-EN 1997-1+C1+A1:2016 +NB:2019 Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp - Deel 1: Algemene regels, inclusief nationale bijlage NB:2019, Nederland Normalisatie instituut, Delft, 2019
 - c. NEN 9997-1:2016 Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, juni 2016
 - d. NEN 9997-1+C1:2017 Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, november 2017
- [3] NEN8700 serie
 - a. NEN 8700:2011 + A1:2020, Beoordeling constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren - Grondslagen (bestaande bouw en verbouw), Nederland Normalisatie instituut, Delft, 2020
 - b. NEN 8701:2011 + A1:2020, Beoordeling constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren - Belastingen (bestaande bouw en verbouw), Nederland Normalisatie instituut, Delft, 2020
 - c. NEN 8707:2018 +C1:2020, Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeur - Geotechnische constructies, Nederland Normalisatie instituut, Delft, 2020
- [4] Rijkswaterstaat document RTD 1006; Richtlijnen beoordeling kunstwerken, november 2022; <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/kunstwerken>
- [5] NPR 7201:2017+A1:2020 nl, Geotechniek - Bepaling van het axiaal draagvermogen van funderingspalen door middel van proefbelastingen, Nederland Normalisatie instituut, Delft, 2020
- [6] CUR 166, Handboek damwanden CURSBRnet, Gouda, 2012
- [7] CROW-CUR Rapport 236:2023 - Richtlijn ankerpalen, 2023
- [8] Inspectie, advies, vervanging en renovatie civiele kunstwerken\ CROW-CUR Aanbeveling 117:2020 - Inspectie en advies civiele kunstwerken
- [9] CROW-CUR Aanbeveling 124:2019 Constructieve veiligheid bestaande bruggen en viaducten van decentrale overheden

- [10] CROW Inspectie, advies, vervanging en renovatie civiele kunstwerken\Proefbelasten, CROW, 2023
- [11] Proefbelasting betonnen bruggen
- a. Lantsoght, E., van der Veen, C. de Boer, A. Hordijk, D.A. Proof load testing of reinforced concrete slab bridges in the Netherlands. Structural Concrete, volume 18(4), 2017.
 - b. Lantsoght, E.O.L. van der Veen, C. de Boer, A. en Hordijk, D.A. State-of-the-art on load testing of concrete bridges. Engineering Structures, 150, pp. 231-241, 2017.
 - c. Lantsoght, E.O.L., van der Veen, C. Hordijk, D.A. en de Boer, A. Development of recommendations for proof load testing of reinforced concrete slab bridges. Engineering Structures, volume 152, pp. 202-210, 2017.
- [12] Ankerpalen zonder bezwijkproeven, Deltares, maart 2021
- [13] Richtlijn bewezen sterkte damwanden en kademuuren – eindrapport, TNO/Deltares, november 2022
- [14] Proof load testing of quay walls, , TNO, pptx van voorbeeld
- [15] NEN 2767-1+C1:2019 nl. Condiëmeting gebouwde omgeving – Deel 1: Methodiek
- [16] Veiligheidsfilosofie damwandconstructies - Resultaat probabilistische analyses van enkel- en meervoudig ondersteunde damwanden 11207130-008-GEO-0003 versie 1.0, Deltares september 2024
- [17] KKP HV02 2022 - Versterking Onderzoek Waterveiligheid - Damwanden Verkenning naar het meenemen van bewezen sterkte bij de beoordeling van bestaande damwanden in regionale waterkeringen - Probabilistische analyses, 11208034-004-ZWS-0001_v2.0-KKP HV02 Deltares, 2022
- [18] Probabilistic Toolkit software, <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/probabilistic-toolkit-ptk>, Deltares, 2024

A Bezwijkmechanismen damwandconstructies

Mechanismen		Uiting																		opmerkingen											
#	Beschrijving	Het maaiveld/bodem												De damwand																	
		Zones naast damwand						Zones bij verankering						verplaatsing			schade														
		actief			passief			actief			passief			horizontaal		verticaal	gaten	uit het slot	scheur		plooi										
		globaal	lokaal		globaal	lokaal		globaal	lokaal		globaal	lokaal		kop	veld	onder						omhoog	omlaag								
hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	kop	veld	onder	omhoog	omlaag	gaten	uit het slot	scheur	plooi			
3	d)  Heave		+	+	?	?	+																								Als de verankering in de zone van de stabiliteitscirkel ligt kan daar ook verplaatsing op het maaiveld zichtbaar zijn
4	 Constructief, Verticaal evenwicht		+		?	?	+																							Damwand kan horizontaal verplaatsen als gevolg van verlies verticaal evenwicht	

Mechanismen		Uiting																				opmerkingen								
#	Beschrijving	Het maaiveld/bodem														De damwand														
		Zones naast damwand							Zones bij verankering							verplaatsing			schade											
		actief				passief			actief				passief			horizontaal		verticaal	gaten	uit het slot	scheur		plooi							
		globaal		lokaal		globaal	lokaal		globaal	lokaal		globaal	lokaal		kop	veld	onder	omhoog						omlaag						
hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	hoger	lager	scheuren (trekscheuren)	maaiveldrotaties (bomen/lantarenpalen scheef)	gaten/lokale depressies	kop	veld	onder	omhoog	omlaag	gaten	uit het slot	scheur	plooi		
7	 <p>Constructief, gestempeld, falen ankerstang</p>		+	+	+			+	+	+																				Ankerstang breekt of vloeit; wand blijft heel
8	 <p>Constructief, falen op veldmoment, stijf anker</p>		+	+	+			+	+	+			+	?													?	+	+	Uit het slot breken is wellicht mogelijk bij grote vervormingen

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl