



Nieuw object

Aanvaarrisico

Een introductie in de recente ontwerpnormen

ir. R.M.L. Nelisse - TNO
ir. J.W. Vreugdenhil - Rijkswaterstaat
dr. M. Zagonjoli - Deltares
ir. W.H. van Iperen - MARIN
Ir. D. ten Hove - MARIN

Kenmerk : KPNK 2020-SO-2.3.6
Versie :
Datum publicatie : 13-11-2020



In het **Kennisprogramma Natte Kunstwerken** (KpNK) werken Deltares, MARIN, Rijkswaterstaat en TNO samen aan de kennisontwikkeling om de vervangings- en renovatieopgave bij natte kunstwerken (stuwen, sluizen, gemalen en stormvloedkeringen) efficiënt en kostenbesparend aan te pakken.

Deltares

MARIN



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

TNO

Voor het kennisprogramma wordt er jaarlijks een inhoudelijk **Kennisplan** inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld. Andere partijen (zoals waterschappen en marktpartijen) worden nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen.

Meer informatie over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt op www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl waar ook de onderzoeksresultaten ter beschikking worden gesteld.

NKWK

De samenwerking binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vormt de uitwerking van de onderzoekslijn "Toekomstbestendige Natte Kunstwerken" binnen het **Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat** (NKWK). Dit kennisplatform brengt Nederlandse overheden, kennisinstellingen en bedrijven bij elkaar om samen te werken aan pilots, actuele vraagstukken en lange termijn-ontwikkelingen op gebied van water- en klimaatvraagstukken.

Voor vragen met betrekking tot het rapport kunt u terecht bij:

ir. R.M.L. Nelisse - mirjam.nelisse@tno.nl
ir. J.W. Vreugdenhil - janwillem.vreugdenhil@rws.nl

Voor vragen met betrekking tot het Kennisplan Natte Kunstwerken 2020 kunt u terecht bij:

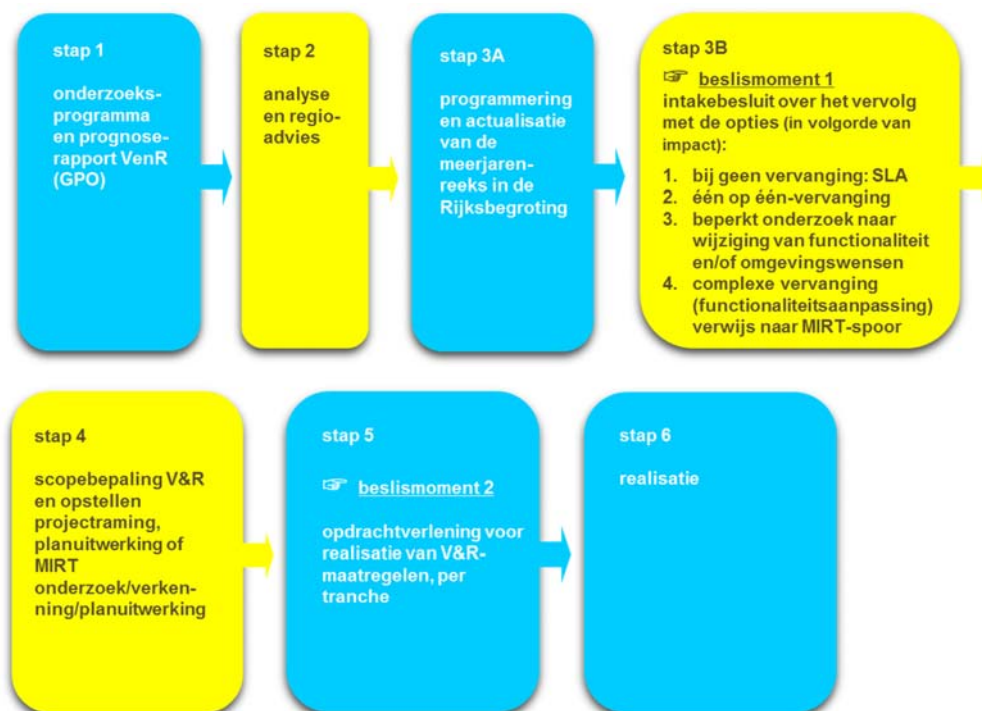
Daan Dunsbergen - daan.dunsbergen@rws.nl



Voorwoord

Bruggen, sluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen zijn belangrijke assets van beheerders zoals Rijkswaterstaat, provincies en waterschappen. Een groot deel van deze natte kunstwerken bereikt komende decennia het einde van de (technische) levensduur waarvoor ze zijn ontworpen. Er dient zich dan ook een aanzienlijke vervangings- en renovatieopgave van deze kunstwerken aan.

De laatste jaren wordt steeds meer gezocht naar mogelijkheden om de levensduur van kunstwerken te verlengen, en om bij einde levensduur (noodzakelijke) ingrepen te koppelen aan gebiedsontwikkelingen en/of functionele-/netwerk ontwikkelingen. RWS heeft daartoe als assetmanager een vernieuwde werkwijze voor het proces van Vervanging en Renovatie (VenR) opgesteld, dat de basis vormt voor de inrichting van het kennisprogramma Natte Kunstwerken (zie onderstaande figuur).



Figuur 1. Vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie.

In het kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt kennis ontwikkeld die bijdraagt aan de verschillende stappen binnen deze vernieuwde VenR-werkwijze, met als focuspunten stap 1 prognoserapport en stap 2 regioanalyse en -advies. Het prognoserapport richt zich op de (einde) technische levensduur, het regio-advies brengt met name in kaart de relatie object-netwerk-gebied.

Het onderzoek in het kennisprogramma vindt plaats langs de onderstaande 3 onderzoekssporen en heeft tot doel om een effectieve en efficiënte aanpak van de vervangings- en renovatieopgave en nieuwbouw van natte kunstwerken mogelijk te maken:

- bestaand object
- inzicht in (einde) technische levensduur
- levensduurverlenging



Kennisplan Natte Kunstwerken 2020

- object-systeem
- inzicht in (einde) functionele levensduur en object-systeemrelaties
- nieuw(e) object/objectonderdelen
- toepassen innovaties
- inspelen op toekomstige ontwikkelingen.

Sinds enkele jaren is er het Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat (NKWK). Hieronder lopen diverse onderzoekslijnen. Eén van de onderzoekslijnen is Toekomstbestendige Natte Kunstwerken. Voor het praktisch laten functioneren van deze onderzoekslijn is er een Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en een Kennisprogramma Natte Kunstwerken opgesteld:

- Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken. De partijen die momenteel binnen deze overeenkomst samenwerken aan onderwerpen op het gebied van natte kunstwerken (bruggen, stuwen, sluizen, gemalen en stormvloedkeringen) zijn Deltares, TNO, MARIN en RWS.
- In het kader van de bovengenoemde Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en de 3 onderzoekssporen van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt er jaarlijks een inhoudelijk Kennisplan Natte Kunstwerken inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld.

Naast de genoemde partijen zijn en worden andere partijen nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen aan de Samenwerkingsovereenkomst en/of Kennisplan Natte Kunstwerken. Inzet kan zowel in kind en/of financieel zijn.

Resultaten uit het Kennisplan Natte Kunstwerken worden gedeeld met de gehele sector via onder andere de site www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl.

Het na dit voorwoord beschreven onderzoek en rapportage op het gebied van aanvaarrisico's is uitgevoerd in het kader van het Kennisplan Natte Kunstwerken 2020.

Samenvatting

Aanvaarrisico

Aanleiding

Aldus RWS schrijft de ROK een eenvoudige, deterministische aanpak voor aanvaringen voor. Deze aanpak voldoet niet meer aan de wensen van RWS. Schepen en snelheden zijn groter geworden en het vermoeden bestaat dat belastingen zo hoog zijn dat constructies daarop bijna niet meer te ontwerpen zijn. Constructies worden dan onbetaalbaar.

RWS focust op aanvaringen met bruggen, in het bijzonder met de pijlers van bruggen. (Beweegbare) brugdekken zijn, voor nu, expliciet uitgesloten van dit onderzoek. Het gaat RWS met name om het ontwerp, en dus nieuwbouw, van bruggen. Aanpassingen, bijvoorbeeld van de vaarwegklasse, en daardoor een wijziging in het aanvaarrisico zijn wel interessant, maar worden vooralsnog niet meegenomen in dit onderzoek.

Onderzoeksvraag en -opzet (WAT)

RWS vraagt een (semi-) probabilistische aanpak voor het ontwerpen van brugpijlers op het risico van aanvaringen.

Onderzoek zelf (aanpak, methode; het HOE)

Een kwantitatieve risicoanalyse wordt voorgesteld, waarbij we verschillende fasen beschouwen:

Stap 1: Bestaat uit het nader beschrijven van de scope en de huidige werkwijze (ROK/Eurocode). Vervolgens het bestuderen van (internationale) literatuur over aanvaarrisico, met name t.a.v. welke aanvaarscenario's kunnen optreden, wat de kansen van optreden zijn en wat de gevolgen zijn in termen van aanvaarenergie. Ook de normen die eventueel internationaal reeds bestaan t.a.v. aanvaardbare risico's zijn van belang, evenals de probabilistische methoden en technieken die worden gebruikt. De literatuur bestaat tenminste uit de ROK, Eurocode on accidental actions, ISO10252, PIANC, reeds uitgevoerde studies door TNO, MARIN en Deltares. Ook de uitkomsten van de JCSS workshop worden betrokken.

Stap 2: Inventarisaties van aanvaarscenario's; welke gebeurtenissen kunnen leiden tot een aanvaring van een brugpijler? Dit kunnen technische, menselijke of externe oorzaken zijn, bijvoorbeeld het falen van het roer van een schip, de schipper die afgeleid is of blikseminslag in het schip. De scenario's kunnen worden gemodelleerd in een foutenboom. Ook de scenario's die leiden tot de verschillende gevolgen worden geïnventariseerd en, indien nodig, gemodelleerd in een gebeurtenissenboom.

Stap 3: Het kwantificeren van de kansen op de gebeurtenissen die kunnen leiden tot een aanvaring van een brugpijler. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van (internationale) literatuur, de SOS database en zo nodig kunnen andere methoden worden gebruikt, zoals expert judgement.

Stap 4: Het identificeren van de gevolgen in termen van aanvaarenergie en de kwantificering daarvan. Hierbij wordt rekening gehouden met de verdeling van het type en de snelheid van schepen. Van



belang hierbij is om actuele data beschikbaar te hebben voor (een) berekening(en). Deze dient door RWS beschikbaar te worden gesteld.

Stap 5: Onderdeel van deze stap is ook om de impact van een aanvaring op de constructie mee te nemen: een deel van de energie wordt geabsorbeerd door de “kreukelzone” van het schip. Het is de verwachting dat de netto energie overdracht niet lineair toeneemt met de toename van de omvang van schepen. Hier zit ook een verschil tussen zeevaart (denk aan de bulb) en binnenvaart.

Stap 6: Op basis van de Eurocode wordt een economische analyse en afweging gemaakt van het economisch acceptabele risico. Hierbij wordt de methode voorgesteld die door TNO in het onderzoek naar explosies in tunnels is ontwikkeld. Deze stap resulteert in een voorstel voor een norm, c.q. doelfaalkans. Onderdeel van deze analyse is het, zo nodig, variëren van de gevolgklasse (standaard CC3), wellicht verschillend naar het type constructie en naar het belang van de constructie.

Stap 7: Er wordt een voorstel gedaan voor een tekst voor in (een nieuwe versie van) de ROK, waarbij de nieuwe tekst ingaat op zowel de norm als de methode.

Fase 1 beslaat het jaar 2020. In fase 1 wordt stap 1 volledig doorlopen en wordt, op basis van het literatuuronderzoek, een aanvang gemaakt met de stappen 2 t/m 4. De planning voor 2021 e.v. wordt in de tweede helft van 2020 gemaakt

Onderzoeksresultaten en synthese

Resultaten fase 1: In de huidige ontwerppraktijk wordt gebruik gemaakt van een aantal normen voor het bepalen van de aanvaarrisico's en de aanvaarbelaastingen op starre constructies. Op Europees niveau is dat de Eurocode over bijzondere belastingen [1], op nationaal niveau is dat de Richtlijn Ontwerp Kunstwerken [2,3,4]. De ROK is van toepassing op werken van Rijkswaterstaat.

De wereldwijd toepasbare norm ISO10252 [6] en de Amerikaanse AASHTO [12, 13, 14 en 15] behoren niet tot de Nederlandse ontwerppraktijk, maar zijn wel meegenomen in het uitgevoerde literatuuronderzoek [Bijlage 1].

De Handreiking Kwantificering Aanvaarrisico [9] beschrijft een methode om een kwantitatieve risicoanalyse voor het aanvaarrisico van de beweegbare delen van bruggen en sluizen uit te voeren. Er worden hierin echter nog geen specifieke normen voorgeschreven. Wel worden de uitkomsten van een voorbeeld-analyse in de handreiking gerelateerd aan de Eurocode, waarbij wordt beargumenteerd dat deze norm voor het geval van aanvaringen door scheepvaart wellicht versoepeld zou mogen worden. De in de handreiking beschreven methode geldt ook niet als verplichte norm, maar is een norm waarvoor het comply-or-explain principe geldt.

Evaluatie en vooruitblik

In 2020 is stap 1 volledig doorlopen en afgerond met een rapportage van de literatuurstudie. Op basis van het literatuuronderzoek, is een aanvang gemaakt met de stappen 2 t/m 4. Nadere evaluatie zal in de loop van november 2020 plaatsvinden.



Kennisplan Natte Kunstwerken 2020

Voor 2021 is de ambitie om invulling te geven aan de stappen 2 tot en met 5. Per stap wordt beschreven hoe de theoretische modellen kunnen worden toegepast bij het bepalen van het aanvaarrisico en de aanvaarbelaasting.

Betrokkenheid per stap

- Stap 2 – Scenario's: TNO, MARIN, Deltares en Rijkswaterstaat
- Stap 3 – Kans per scenario: TNO
- Stap 4 – Verdeling aanvaarenergie op de constructie: Deltares en TNO
- Stap 5 – Verdeling aanvaarbelaasting op de constructie: Rijkswaterstaat en TNO

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 00 00

TNO-rapport

Aanvaarrisico – Een introductie in de recente ontwerpnormen

Datum 30 oktober 2020

Auteur(s) ir. R.M.L. Nelisse
ir. J.W. Vreugdenhil
dr. M. Zagonjoli
ir. W.H. van Iperen
Ir. D. ten Hove

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 34 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever

Projectnaam

Projectnummer

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Trends en ontwikkelingen	3
1.2	Aanleiding	3
1.3	Doel	3
1.4	Aanpak	4
1.5	Scope	5
1.6	Planning	5
1.7	Leeswijzer	5
2	Huidige ontwerppraktijk	6
2.1	Aanvaarscenario's en kansen van optreden	6
2.2	Identificeren en kwantificeren gevolgen	7
2.3	Doelfaalkans	8
2.4	Wat zijn de ontbrekende aspecten voor een probabilistische normering	9
3	Gewenste ontwerppraktijk	11
3.1	Aanvaarscenario's en kansen	11
3.2	Identificeren en kwantificeren gevolgen	12
3.3	Doelfaalkans op basis van economische afweging	12
4	Conclusies en aanbevelingen	13
5	Literatuur	14
Bijlage 1 – Literatuuronderzoek		15
5.1	ISO 10252	15
5.2	ISO 2394: 2015	18
5.3	Eurocode “Accidental Actions”	18
5.4	Achtergronddocument Eurocode	19
5.5	ROK	19
5.6	AASHTO	22
5.7	PIANC Ship Collisions due to the Presence of Bridges	27
5.8	PIANC Design of Lock gates for ship collision	28
5.9	Coentunnel en Suurhoffbrug	29
5.10	Handreikingen ‘Prestatiegestuurde risicoanalyses’ en ‘Kwantificering Aanvaarrisico’	29

1 Inleiding

Rijkswaterstaat heeft 333 bruggen en 101¹ natte kunstwerken in vaarwegen in beheer, die nu en in de toekomst de waterveiligheid garanderen en/of zorgen voor een vlotte en veilige doorvaart. De levensduur van deze “natte kunstwerken²” is beperkt en een groot aantal kunstwerken moet in de komende periode vervangen of gerenoveerd worden.

1.1 Trends en ontwikkelingen

Bij het vervangen en renoveren van een dergelijk groot aantal kunstwerken met een grote levensduur, spelen een aantal trends en ontwikkelingen een belangrijke rol. Een aantal van die trends en ontwikkelingen wordt hier genoemd:

- (Bijzondere) belastingen: in hoeverre veranderen deze belastingen in de toekomst, bijvoorbeeld door grotere schepen?
- Klimaatverandering: wat is het effect van bijvoorbeeld hogere waterafvoeren op de constructie en de risico's waaraan deze wordt blootgesteld?
- Technische ontwikkelingen: wat zijn de effecten van smart mobility, autonoom varen en nieuwe brandstoffen op het ontwerp?

In dit onderzoek wordt de bijzondere belasting “aanvaringen” beschouwd als één van de aspecten die bij een toekomstvast ontwerp dient te worden meegenomen.

1.2 Aanleiding

Schepen en snelheden zijn groter geworden, belastingen worden hoger en mogelijk zelfs zo hoog dat constructies daarop haast niet meer te ontwerpen zijn. Constructies worden dan onbetaalbaar. In dat licht voldoet de huidige Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken [2] niet meer aan de wensen en eisen van Rijkswaterstaat, omdat deze alleen een eenvoudige, deterministische aanpak voor aanvaringen bevat.

Daarnaast ligt er ook een aanbeveling in het rapport *Stuwaanvaring door Benzeentanker bij Grave* van de Onderzoeksraad voor de Veiligheid van mei 2018 aan de Minister van Infrastructuur en Waterstaat:

“Maak voor bruggen, sluizen en stuwen een analyse van het aanvaarrisico, inclusief een expliciete en integrale afweging tussen beschikbare maatregelen om de kans op aanvaringen te beperken. Betrek hierbij niet alleen het bestaande kader aanvaarrisico maar ook de mogelijke gevolgen van een aanvaring voor de scheepvaart en de omgeving”

1.3 Doel

Met het oog op de hogere belastingen en de huidige, deterministische, aanpak voor het ontwerp van brugpijlers in de ROK, is het doel van dit onderzoek om te komen tot een (semi-) probabilistische aanpak voor het ontwerpen van brugpijlers op het

¹ 91 sluiscomplexen en 10 stuwcomplexen (7 in de Maas, 3 in de Neder-Rijn-Lek)

² Onder natte kunstwerken worden bruggen, tunnels, sluzem, stuwen en stormvloedkeringen verstaan

risico van aanvaringen en deze aanpak te vervatten in een nieuwe versie van de ROK.

1.4 Aanpak

Om te komen tot een (semi-) probabilistische aanpak voor het ontwerpen van brugpijlers op het risico van aanvaringen en deze aanpak te vervatten in een nieuwe versie van de ROK, wordt een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) voorgesteld. De aanpak bestaat uit de volgende stappen:

1. Het nader beschrijven van de scope en de huidige werkwijze (ROK/Eurocode). Vervolgens het bestuderen van (internationale) literatuur over aanvaarrisico, met name t.a.v. welke aanvaarscenario's kunnen optreden, wat de kansen van optreden zijn en wat de gevolgen zijn in termen van aanvaarenergie. Ook de normen die eventueel internationaal reeds bestaan t.a.v. aanvaardbare risico's zijn van belang, evenals de probabilistische methoden en technieken die worden gebruikt. De literatuur bestaat tenminste uit de ROK, Eurocode EN1991-1-7, ISO10252, PIANC en reeds uitgevoerde studies door TNO, MARIN en Deltares. Ook de uitkomsten van de JCSS workshop [19] worden erbij betrokken.
2. Inventarisaties van aanvaarscenario's; welke gebeurtenissen kunnen leiden tot een aanvaring van een brugpijler? Dit kunnen technische, menselijke of externe oorzaken zijn. Bijvoorbeeld het falen van het roer van een schip, de schipper die afgeleid is of blikseminslag in het schip. Ook beheersmaatregelen zoals beschermingsconstructies kunnen invloed hebben. De scenario's (oorzaken en vervolgebeurtenissen) kunnen worden gemodelleerd in een foutenboom. Ook de scenario's die leiden tot de verschillende gevolgen worden geïnventariseerd en, indien nodig, gemodelleerd in een gebeurtenissenboom.
3. Het kwantificeren van de kansen op de gebeurtenissen die kunnen leiden tot een aanvaring van een brugpijler. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van (internationale) literatuur, de SOS database en zo nodig kunnen andere methoden worden gebruikt, zoals expert judgement en simulaties.
4. Het identificeren van de gevolgen in termen van aanvaarenergie en de kwantificering daarvan. Hierbij wordt rekening gehouden met de verdeling van het type en de snelheid van schepen. Van belang hierbij is om actuele data beschikbaar te hebben voor (een) berekening(en). Deze data dient door RWS beschikbaar te worden gesteld.
5. De volledige interactie en uiteindelijke schade bij een gegeven aanvaring wordt bepaald door de mechanische eigenschappen (massa, stijfheid, sterkte) van zowel schip als constructie. Onderdeel van deze stap is ook om de impact van een aanvaring op de constructie mee te nemen: een deel van de energie wordt geabsorbeerd door de "kreukelzone" van het schip. Het is de verwachting dat de netto energie overdracht niet lineair toeneemt met de toename van de omvang van schepen. Hier zit ook een verschil tussen zeevaart (denk aan de bulb) en binnenvaart.
6. Op basis van de Eurocode wordt een economische analyse en afweging gemaakt van het economisch acceptabele risico. Hierbij wordt de methode voorgesteld die door TNO in het onderzoek naar explosies in tunnels is ontwikkeld [20]. Deze stap resulteert in een voorstel voor een norm, c.q. doelfaalkans. Onderdeel van deze analyse is het, zo nodig, variëren van de gevolgklasse (standaard CC3³). Wellicht verschillend naar het type constructie en naar het belang van de constructie.
7. Er wordt een voorstel gedaan voor een tekst voor in (een nieuwe versie van) de ROK, waarbij de nieuwe tekst ingaat op zowel de norm als de methode.

³ CC3 staat voor consequence class 3 en is de hoogste gevolgklasse in de huidige Eurocode. Deze klasse wordt gehanteerd bij constructies van grote waarde of met veel slachtoffers als gevolg in geval van falen.

Aandachtspunten bij de uitvoering zijn

- Extreme weerscondities: hoge of juist lage waterafvoeren (verschil rivieren en kanalen).
- Omstandigheden die verrassen: een windhoos in de zomer bijvoorbeeld
- Afstemming inhoudelijk met PIANC werkgroep
- Verschillende methodes en eventuele keuzes
- Disseminatie van kennis

1.5 Scope

De focus van dit onderzoek ligt op aanvaringen met bruggen, in het bijzonder met de pijlers van bruggen. Voor andere objecten in de vaarweg, zoals sluizen en stuwen en ook andere onderdelen van bruggen, zoals (beweegbare) brugdekken, spelen vergelijkbare uitdagingen. Deze object(del)en zijn voor dit moment expliciet uitgesloten van dit onderzoek. De resultaten kunnen wellicht te zijner tijd met aanpassingen ook worden gebruikt voor deze object(del)en.

Daarnaast heeft het onderzoek betrekking op het ontwerp, en dus nieuwbouw, van bruggen. Aanpassingen, bijvoorbeeld van de vaarwegklasse, en daardoor een wijziging in het aanvaarrisico zijn wel interessant, maar worden vooralsnog niet meegenomen in dit onderzoek.

Tot slot ligt de focus van het onderzoek bij enerzijds de kans op een aanvaring en anderzijds de gevolgen in termen van schade aan de brugpijler. De schade aan het schip of de slachtoffers die (kunnen) vallen als gevolg van schade en/of instorting van de brug, vallen buiten de scope van dit onderzoek. Bij een volledige QRA dienen deze aspecten wel meegenomen te worden, om een onderschatting van het risico te voorkomen.

1.6 Planning

In 2020 is een literatuuronderzoek gedaan om de state-of-the-art op het gebied van normen en regelgeving in kaart te brengen. Op basis van het literatuuronderzoek wordt voorzien dat stappen 2 en 3 in 2021 worden uitgevoerd, stappen 4 en 5 in 2022 en het onderzoek met stappen 6 en 7 wordt afgesloten in 2023. Een en ander afhankelijk van beschikbare budgetten en capaciteit.

1.7 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een samenvatting beschreven van de huidige ontwerppraktijk langs de lijnen van een kwantitatieve risicoanalyse. Er is afgesloten met een overzicht van de “ontbrekende puzzelstukjes”, die onderdelen die nader dienen te worden ingevuld om te komen tot een kwantitatieve risicoanalyse. In hoofdstuk 3 is ingegaan op de gewenste ontwerppraktijk: hoe zouden we in de toekomst minder deterministisch en meer probabilistisch willen ontwerpen? Daarbij is al enige invulling gegeven van de methoden waarmee die gewenste ontwerppraktijk kan worden bereikt. In de bijlage is een uitgebreide samenvatting opgenomen van de bestudeerde literatuur.

2 Huidige ontwerppraktijk

In dit hoofdstuk is de huidige ontwerppraktijk geschetst langs de lijnen van een kwantitatieve risicoanalyse. Een kwantitatieve risicoanalyse bestaat in hoofdlijnen uit:

1. het bepalen van de scenario's die kunnen leiden tot het ongeval (hier de aanvaring);
2. het bepalen of berekenen van de kans van optreden van die scenario's;
3. het bepalen van de gevolgen van die scenario's;
4. het bepalen of berekenen van de omvang van die gevolgen
5. het berekenen van het risico (kans x gevolg) en toetsen aan de norm indien aanwezig;
6. zo nodig het afwegen van risico reducerende maatregelen.

Sommige stappen zullen in paragrafen worden samen genomen, omdat ze een logische eenheid vormen.

2.1 Aanvaarscenario's en kansen van optreden

“Met het publiceren van de Eurocode-delen met bijbehorende Nationale Bijlagen van het Eurocode cluster Bruggen zijn Europese normen beschikbaar gekomen voor het beoordelen van Rijkswaterstaat Kunstwerken. Met ingang van 1 april 2012 wijst het Bouwbesluit 2012 de Eurocodes aan als normen waarmee de constructieve veiligheid en duurzaamheid van bouwwerken moet worden aangetoond [2]”.

Wanneer de huidige normen voor het ontwerp van brugpijlers op aanvaringen [1,2,**Error! Reference source not found.**] worden beschouwd, valt op dat in (het achtergronddocument bij) de Eurocode slechts zeer beperkt wordt ingegaan op aanvaarscenario's. In paragraaf 4.4 wordt de volgende formule voor de kans op een aanvaring⁴ gehanteerd:

$$P_{\text{col}}(T_{\text{ref}}) = n \lambda T_{\text{ref}} (1 - P_a) \int \int P(\text{collision} | v, x, y) f(y) dy dx \quad (1)$$

Waarin:

- P_{col} is de kans dat de constructie tenminste één keer wordt aangevaren in een periode T_{ref}
- n is het aantal schepen per tijdseenheid (verkeersintensiteit);
- λ is de kans op mechanisch falen of een menselijke fout per afgelegde afstand;
- T_{ref} is de referentieperiode (bijv. 1 jaar);
- P_a is de kans dat een aanvaring wordt voorkomen door positieve menselijke interventie;
- v is de snelheid op punt (x, y) ;
- x, y zijn de coördinaten op het punt van de fatale fout of mechanisch falen;
- $f(y)$ is de kansdichtheidsfunctie van de positieverdeling in y -richting op het punt van de fatale fout.

⁴ Deze formule is ook bruikbaar voor schade en daarmee voor het berekenen van risico. Een QRA wordt in EN1991-1-7 wel in overweging gegeven voor CC3.

Opvallend is dat in de ROK [2] zowel de aanvaarscenario's als de kans op een aanvaring niet zijn opgenomen. Daar is beperkt tot de omvang en gevolgen van een aanvaring.

In de Handreiking kwantificering aanvaarrisico [9] valt op dat op geen enkele wijze verwezen wordt naar de aanvaarformule (1) zoals hierboven beschreven. Wel beschrijft de Handreiking een drietal technieken om de kans op de gebeurtenissen die leiden tot ieder aanvaarscenario te bepalen:

- Opstellen van fouten- en gebeurtenissenbomen
- Expert judgement
- Statistiek

Ook voor het opstellen van de foutenbomen, en voor het schatten van de kansen op de elementaire gebeurtenissen in de foutenbomen is kennis van experts nodig. Daarnaast kunnen wel ongevallenstatistieken en simulaties gebruikt worden om de kansen op elementaire gebeurtenissen te berekenen, zoals voor de studie voor Limmel [17], waar in de Handreiking aan gerefereerd wordt, is gedaan. De simulaties met verschillende scheepstypen en vaarsnelheden leiden dan tot een kans per aanvaarscenario. De herstelactie P_a uit (1) komt in dit geval terug in de foutenboom.

Volgens Rijkswaterstaat wordt deze formule (1) in de huidige ontwerppraktijk niet toegepast. Er wordt gebruik gemaakt van de "standaard" ongevalskans van $1 \cdot 10^{-6}$ per scheepvaartkilometer, ongeacht tot welke schade de aanvaring leidt (veel of weinig). Dit getal wordt genoemd in de Leidraad Kunstwerken en is gebaseerd op een aantal aanvaringen tegen de wal in de Nieuwe Waterweg. Voor brugpijlers die op de wal staan, kan dit nog aannemelijk zijn. Voor brugpijlers die in het water staan, is deze kans vermoedelijk niet passend. Er zijn geen cijfers voor deze situatie voorhanden.

Op basis van bovenstaande wordt geconcludeerd dat de huidige, vigerende normering, niet ingaat op aanvaarscenario's en slechts zeer beperkt ingaat op de kansen van optreden van een aanvaring, waarbij de normen (Eurocode en ROK) niet met elkaar in lijn zijn op het gebied van de aanpak. De Handreiking kwantificering aanvaarrisico [9] valt niet onder de van toepassing zijnde normen voor het ontwerp van brugpijlers, omdat deze is opgesteld voor beweegbare delen van bruggen en sluizen. De aanpak die is gehanteerd om te komen tot aanvaarscenario's is echter wel te gebruiken voor brugpijlers. In dat geval moeten er fouten- en gebeurtenissenbomen voor brugpijlers worden opgesteld. Deze zijn dan eenvoudiger van aard dan die in de Handreiking zijn gebruikt.

2.2 Identificeren en kwantificeren gevolgen

De belasting op een brugpijler tijdens een aanvaring is complex en hangt af van vele factoren, waaronder de vaartuigkarakteristieken (grootte en snelheid van het vaartuig, vorm van de boeg, mechanische eigenschappen van brug en vaartuig), botsingskarakteristieken (frontale of zijdelingse aanvaring) en geometrie en sterkte van de pijler. In de literatuur zijn verschillende methoden te vinden voor het bepalen van de aanvaringskracht zoals de Amerikaanse methode (AASHTO), de CEN methode (NEN-EN) en de methode volgens de Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken (ROK) die bij RWS in gebruik is. De AASHTO methode is de Amerikaanse norm,

maar is ook toepasbaar op de Europese CEMT-klassen. Het is wel meer specifiek op het berekenen van de botsingskracht van zeeschepen en beperkt zicht voor de binnenvaart vooral tot duwbakken. De NEN-EN methode is de norm voor de waterbouw constructies in Nederland⁵. De NEN-EN methode is iets duidelijker over hoe de kracht op het aan te varen object aangenomen moet worden, de andere 2 methoden zijn hier iets minder duidelijk over.

Bij alle methoden wordt de kinetische energie van het schip omgezet in vervorming van het schip. Bij een botsing tussen een schip en een starre brugpijler bepalen de kinetische energie van het schip en de mate van vervorming van het schip de optredende aanvaarkracht op de brugpijler. Interactie wordt dus niet beschouwd. Dat geeft een bovengrens en daarmee conservatieve waarde voor de belasting. De kinetische energie is in zijn eenvoudigste vorm een functie van de massa en de vaarsnelheid van het schip, met bepaalde afwijkingen tussen de methoden waarin verschillende factoren worden meegenomen (zie bijlage 1). De parameters die gehanteerd worden in verschillende methoden leidt tot een verschil in de berekende aanvaarkrachten. AASHTO methode houdt meer rekening met de lokale situatie van de waterweg dan de NEN-EN norm.

Alle methoden nemen de reductiefactor voor energieverliezen door vervorming van het schip op een andere manier mee. De ROK berekent de representatieve maximale statische kracht op starre constructies en houdt rekening met een maximale beladingsgraad. De ROK geeft enkele richtlijnen hoe om te gaan met een niet-frontale botsing, door de parameterwaardes aan te passen op basis van de aanvaarhoek, maar toepasbaarheid van deze parameters blijft vooralsnog moeilijk.

De aanvaringsbelasting wordt in de NEN-EN code aangebracht op een hoogte boven het maximale bevaarbare waterniveau, die afhankelijk is van de diepgang van het schip (geladen). Bij gebrek aan gedetailleerde informatie mag bij de NEN-EN code de kracht op een hoogte van 1,5 m boven het waterpeil genomen worden. In AASHTO wordt de aanvaarkracht van het vaartuig als een geconcentreerde kracht aangenomen op het gemiddelde hoogwaterniveau van de waterweg.

Gebruikt maken van de hierboven genoemde methoden, wordt de aanvaarbelasting gekwantificeerd met een kansverdeling of met een één enkele (conservatieve) waarde, maximale aanvaarbelasting. De enkel waarde methode kan leiden tot de over bescherming van de kunstwerk. De kansverdeling methode geeft een beter inzicht van de spreiding van de belasting voor verschillende scheepstypen en verschillende aanvaringen en geeft zin als de aanvaringsrisico (kans x gevolg) ook met een kansverdeling wordt aangegeven.

2.3 Doelfaalkans

In [8] staat *"An area that typically is left to the member states is the issue of the risk acceptance criteria. Even Annex B gives only limited guidance. Basically the*

⁵ De Woningwet stelt dat constructies dienen te voldoen aan de door het Bouwbesluit aangewezen normen en voorschriften; dit betreft de Eurocode (NEN-EN 1990) serie voor nieuwbouw en de NEN 8700 serie voor bestaande bouw. Ten behoeve van het ontwerp van waterbouwkundige kunstwerken worden de wettelijke normen uit de Waterwet en/of Bouwbesluit aangevuld met door Rijkswaterstaat geformuleerde eisen. Deze aanvullende eisen voor het ontwerp zijn vastgelegd in de Richtlijn Ontwerp Kunstwerken (ROK1.2, RTD 1001:2013, d.d. 1/1/2013).

ALARP is mentioned, which stands for as low as reasonably practicable. This means that, apart from some lower and upper limits, an economical optimisation is recommended”.

According to ISO2394 [16] the maximum acceptable annual failure probability following from the individual risk constraint can be formulated as:

$$Pf < 10^{-6}/p(d|f) \quad (2)$$

Here $p(d|f)$ is the probability of a person being killed, given the collapse of the structure. Among other things this probability depends on the time a person spends in or around a certain building.

Also according to [16] the maximum annual failure probability following from a societal risk constraint can be formulated as:

$$Pf < AN^{-k} \quad (3)$$

Here N is the expected number of fatalities per year. As practical values for the numbers

$$A = 0.01 \text{ to } 0.1 \text{ and } k = 1 \text{ to } 2$$

can be suggested. If the number of fatalities N given failure is highly uncertain, the requirement can be replaced by:

$$P(N > n) < A n^{-k} \quad (4)$$

This relation should hold for all n ”.

In de Nationale Bijlage bij de Eurocode [11] staat: “*Het algemene streefniveau van de aanvaardbare bezwijkkans bij buitengewone ontwerpsituaties is 10^{-5} per jaar. Onderscheid op grond van de gevolgen van bezwijken wordt aanbevolen”. Dit streefniveau geldt voor elke bijzondere belasting afzonderlijk*”.

Uit bovenstaande wordt geconcludeerd dat de Eurocode zowel richtlijnen geeft voor het individueel en groepsrisico, als voor de economische optimalisatie van het ontwerp. Hierbij geeft de nationale bijlage richting aan de bezwijkkans als gevolg van de buitengewone belasting “aanvaring” met een streefniveau van 10^{-5} per jaar. In dit onderzoek is beperkt tot de constructieve schade en daarmee de economische optimalisatie. Het individueel en groepsrisico is in het vervolg buiten beschouwing gelaten

2.4 Wat zijn de ontbrekende aspecten voor een probabilistische normering

Op basis van bovenstaande is geconcludeerd dat de in Nederland op bruggen van toepassing zijnde normen [1-**Error! Reference source not found.**] geen inhoud geven aan aanvaarscenario's van brugpijlers en de kwantificering van de kans van optreden van aanvaringen niet eenduidig is tussen normen onderling. In het bijzonder gaat het hierbij om de wijze waarop de kans op een aanvaring berekend kan worden (formule (1) versus de in de gangbare praktijk gebruikte kans van $1 \cdot$

10^{-6} per scheepvaartkilometer). Het niet eenduidig zijn van de normen werd herkend en bevestigd in de bijeenkomst op 25 mei 2020 waar de state-of-the-art op het gebied van projecten op het gebied van aanvaarrisico werd gepresenteerd.

Verskillende methoden die gebruikt kunnen worden om de aanvaarbelasting te berekenen leiden ook tot een verwarring. De methodes en de te hanteren parameters zijn niet altijd duidelijk of eenduidig gedefinieerd. Dat leidt tot niet uniforme benadering van het berekenen van de belasting, met als gevolg dat de brugpijlers worden overgedimensioneerd/beschermde of de analyse van aanvaringsbelasting wordt uit de ontwerp fase gelaten. Het is van belang om een duidelijke protocol te ontwikkelen voor het berekenen van de aanvaarbelasting met een duidelijke beschrijving van te hanteren parameters/coëfficiënten. De kant en klare methode moet eerst getoetst worden via een case studie.

Het streefniveau voor de bezwijkkans als gevolg van een aanvaring is, in tegenstelling tot de aanvaarkans, wel eenduidig. Er wordt echter geen norm voor het acceptabele risico gegeven (kans x gevolg).

Aanbevolen wordt om generieke aanvaarscenario's van brugpijlers te identificeren en te kwantificeren, zodat een basis voor het ontwerp gereed ligt. Voor specifieke brugpijlers kan zo nodig een aangepaste analyse worden gedaan waarbij aanvaarscenario's worden toegevoegd of juist weggelaten. Deze kunnen ook als opties in de generieke analyse worden meegenomen. Ook de kansen op bepaalde gebeurtenissen kunnen, afhankelijk van de specifieke omstandigheden, gemotiveerd worden aangepast. Deze specifieke omstandigheden kunnen bijvoorbeeld de plaatsing van de pijlers zijn in de vaarweg, maar ook het type vaarweg, eventuele bochten, een lastige manoeuvre vlak voor de brug, etc. De specifieke kansen kunnen deels betrokken worden bij dit onderzoek en bijvoorbeeld in een casus tot uiting komen. De generieke kansenanalyse kan als uitgangspunt dienen voor de herziening van de ROK.

3 Gewenste ontwerppraktijk

In dit hoofdstuk wordt, ook weer langs de lijnen van een kwantitatieve risicoanalyse, de gewenste ontwerppraktijk beschreven. Hierbij is het doel om te komen tot een ontwerpnorm voor brugpijlers, waarbij een bepaald restrisico acceptabel is in plaats van ontwerpen op het zwaarst mogelijk scenario (het zogenaamde “kleine kans, grote gevolgen” scenario).

3.1 Aanvaarscenario's en kansen

Op dit moment wordt de kans op een aanvaring vaak pas laat in het ontwerpproces meegenomen in het ontwerp, aldus Rijkswaterstaat. Regelmatig is er discussie over de uitwerking van het aanvaarrisico. Die wordt vaak als conservatief ervaren. Als voorbeeld is de Waal gegeven: bij sommige bruggen staan de pijlers in de uiterwaarden. Alleen bij hoog water, wanneer de uiterwaarden onderlopen, kan een uit koers geraakt schip een aanvaring met die desbetreffende pijlers veroorzaken. De kans daarop is veel kleiner dan bij pijlers in de vaarweg, die bij wijze van spreken 365 dagen per jaar kunnen worden aangevaren. Desondanks is het nu de praktijk dat de pijlers in de uiterwaarden op dezelfde aanvaarbelaasting worden ontworpen als die in de vaarweg. Het risico van een aanvaring is, vanwege de lagere kans, echter veel lager.

In de gewenste ontwerppraktijk is er duidelijkheid over de te hanteren normen en zijn die normen ook dusdanig goed bekend dat het aanvaarrisico tijdig en juist in het ontwerpproces wordt meegenomen. Hiervoor is het in eerste instantie van belang dat voor een individuele brug een analyse kan worden gedaan van de relevante aanvaarscenario's en de voor die locatie van toepassing zijnde kansen van optreden van die scenario's. In tweede instantie en buiten de scope van dit onderzoek, is een grotere bekendheid van de vigerende normen van belang voor een goede incorporatie van aanvaarrisico bij het ontwerp.

De aanpak die wordt voorgesteld is om in eerste instantie generieke aanvaarscenario's op te stellen aan de hand van fouten- en gebeurtenissenbomen, zoals ook is gedaan voor de beweegbare delen van bruggen en sluizen in [9]. Vervolgens kunnen meerdere cases worden uitgevoerd, waarbij wordt onderzocht wat de beste manier is om de generieke aanvaarscenario's aan te passen voor de specifieke case studies. Deze aanpak kan indien gewenst, worden opgenomen in de nieuwe tekst voor de ROK.

Vervolgens dienen de kansen van optreden van de aanvaarscenario's te worden bepaald of berekend. Omdat op basis van onderzoek [18] is gebleken dat er weinig statistiek en casuïstiek voorhanden is, is er een noodzaak deze informatie aan te vullen met expert judgement. Hierbij is het van belang dat met name mensen uit de praktijk (schippers en brugwachters bijvoorbeeld) worden betrokken bij de kwantificering. Ook hier geldt dat de slag van generiek naar specifiek het beste kan worden gemaakt op basis van enkele case studies.

3.2 Identificeren en kwantificeren gevolgen

Het is van belang om een duidelijk en makkelijk te toepassen protocol te ontwikkelen voor het berekenen van de aanvaarbelaasting bij de brugpijlers in Nederland. Het protocol moet duidelijk de te volgen procedure beschrijven voor het ontwerpen van de nieuwe bruggen en ook voor het beoordelen van bestaande bruggen.

Belangrijke aspecten die in het protocol aandacht verdienen:

- Methode voor het berekenen van de aanvaringskracht met duidelijk beschrijving van de parameters en hun waarden. Hier wordt aangegeven welke aannames van toepassing zijn bij de te gebruiken methode. Hoe wordt de kinetische energie van het vaartuig geconverteerd naar een aanvaringskracht op het object? Hoe past de belastingmethode in de overall risicoanalyse: Kansverdelingsanalyse in plaats van het meest conservatieve aanvaringskans? Waar wordt de aanvaarbelaasting uitgeoefend bij het object?
- De bruggen zijn ontworpen voor een lange leeftijd van meer dan 50 jaar. Tijdens de leeftijd van de brug verandert niet alleen de scheepvaart, maar ook de sterkte van de pijlers kan veranderen als gevolg van de eerdere aanvaringen. Als de vaartuigen groter worden in de loop der jaren dan wordt de belasting bij een aanvaring ook groter. Hoe worden de ontwikkeling in de scheepvaart juist meegenomen (lading, snelheid, frequentie van (aan)varen, etc.) voor de nieuwe bruggen?

3.3 Doelfaalkans op basis van economische afweging

Idealiter zou een afweging niet gebaseerd worden op een faalkans (alleen), maar op een afweging van het risico, kans x gevolg dus. Dat betekent dat, bij gelijkblijvend risico, de faalkans bij een “dure” brug, lager moet zijn dan bij een “goedkope” brug. Waarbij duur en goedkoop betrekking hebben op de schade bij instorten. De kosten van de maatregelen en de indirecte schade, zoals het afgesloten zijn van een belangrijke (of minder belangrijke) verbinding, wordt daarbij (nog) niet meegenomen.

Daarnaast is het van belang om het streefniveau van 10^{-5} per jaar te onderbouwen of, indien mogelijk, die onderbouwing te achterhalen. Op dit moment lijkt die niet bekend. Tevens is het van belang om dat streefniveau in de context te plaatsen van de faalkansen van andere bijzondere gebeurtenissen, zoals brand en explosie. Wanneer gebruik wordt gemaakt van verschillende kansen, passend bij verschillende gevolgen, zoals in de eerste alinea benoemd, kan bijvoorbeeld aansluiting gevonden worden bij de methode van de “consequence classes” uit de Eurocode. Daarin wordt gewerkt met faalkansen die gerelateerd zijn aan 3 gevolgen niveaus: CC1 (kleine gevolgen), CC2 (gemiddelde gevolgen) en CC3 (grote gevolgen). Zo wordt recht gedaan aan de verschillen tussen een gefaalde brug in bijvoorbeeld de A16 of die op een polderweg. De keuze voor de gevolgklasse bepaalt dan de (maximale) hoogte van de faalkans.

4 Conclusies en aanbevelingen

In de huidige ontwerppraktijk wordt gebruik gemaakt van een aantal normen voor het bepalen van de aanvaarrisico's en de aanvaarbelaastingen op starre constructies. Op Europees niveau is dat de Eurocode over bijzondere belastingen [1], op nationaal niveau is dat de Richtlijn Ontwerp Kunstwerken [2,3,4]. De ROK is van toepassing op werken van Rijkswaterstaat.

De wereldwijd toepasbare norm ISO10252 [6] en de Amerikaanse AASHTO [12, 13, 14 en 15] behoren niet tot de Nederlandse ontwerppraktijk, maar zijn wel meegenomen in het uitgevoerde literatuuronderzoek [Bijlage 1].

De Handreiking Kwantificering Aanvaarrisico [9] beschrijft een methode om een kwantitatieve risicoanalyse voor het aanvaarrisico van de beweegbare delen van bruggen en sluizen uit te voeren. Er worden hierin echter nog geen specifieke normen voorgeschreven. Wel worden de uitkomsten van een voorbeeld-analyse in de handreiking gerelateerd aan de Eurocode, waarbij wordt beargumenteerd dat deze norm voor het geval van aanvaringen door scheepvaart wellicht versoepeld zou mogen worden. De in de handreiking beschreven methode geldt ook niet als verplichte norm, maar is een norm waarvoor het comply-or-explain principe geldt.

Om nadere invulling te geven aan de wijze waarop het aanvaarrisico en de aanvaarbelaasting op starre constructies kan worden bepaald wordt aanbevolen wordt om:

- Nader onderzoek te doen naar de aanvaarscenario's.
- De kans per scenario te bepalen op basis van een generiek aanvaarscenario's. Voor specifieke brugpijlers kan daarmee een aangepaste analyse worden gedaan waarbij aanvaarscenario's worden toegevoegd of juist weggelaten.
- Nader onderzoek te doen naar de verdeling van de aanvaarenergie op de constructie als gevolg van aanvaringen door passerende schepen.
- Nader onderzoek te doen naar de verdeling van de aanvaarbelaasting op de constructie. Het is de verwachting dat de netto energie overdracht niet lineair toeneemt met de toename van de omvang van schepen.
- Het evalueren van de norm, c.q. doelfaalkans voor het falen van een constructie. Hoe worden de ontwikkeling in de scheepvaart juist meegenomen (lading, snelheid, frequentie van (aan)varen, etc.) voor bestaande en nieuwe bruggen?
- Het opstellen van een handreiking voor het bepalen van de aanvaarbelaasting op een starre constructie.

5 Literatuur

1. Eurocode
2. ROK
3. ROK bijlage 1
4. ROK bijlage 2
5. Rijkswaterstaat, Handreiking prestatiegestuurde risicoanalyses (PRA) - Sturen op prestaties van systemen, versie 1.0.1, 8 maart 2018
6. ISO10252
7. Nelisse, R.M.L. e.a., Aanvaarkans Nieuwe Zeesluis IJmuiden, TNO-rapport TNO 2014 R10870, juni 2014
8. Eurocode 1, PART 1.7 Accidental Actions Background Document, 4th draft, January 2012 by A. Vrouwenvelder, contributions by U. Stiefel
9. Rijkswaterstaat, Handreiking kwantificering aanvaarrisico, versie 1.0.1, November 2017
10. Rijkswaterstaat, SOS-Formulier: versie 4.1.0, Handleiding en Toelichting, 14 februari 2013, definitief
11. NEN-EN 1991-1-7+C1+A1/NB (nl), Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-7+C1+A1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen - Buitengewone belastingen, november 2019
12. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition, 2014, U.S. Customary Units
13. AASHTO Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, Second Edition 2009 with 2010 Interim Revisions
14. Knott, Michael, Mikele Winters, Ship and Barge Collisions with Bridges over Navigable Waterways, paper, PIANC World Congress Panama City, Panama 2018
15. Knott, Michael, Mikele Winters, Ship and Barge Collisions with Bridges over Navigable Waterways, presentation, PIANC World Congress Panama City, Panama 2018
16. ISO2394
17. MARIN, Inschatting risico op aanvaring nieuwe keersluis Limmel, rapportnummer 27551-1-MSCN-REV.6, oktober 2014
18. Nelisse, R.M.L., Aanzet tot kwantitatieve risicoanalyse van aanvaringen van bruggen en sluizen in binnenvaartwegen, TNO 2015 R10815, 2015
19. JCSS Workshop on ship collision risk assessment, <https://www.jcss-lc.org/workshop-ship-collision-risk-assessment/>, Denemarken, januari 2020
20. Nelisse, R.M.L., et al, Explosies in tunnels, Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken (ROK): discussiedocument voor de ontwerpbelasting voor explosies in tunnels, TNO-2015-R11728, IQ-2015-06, 24 februari 2016,

Bijlage 1 – Literatuuronderzoek

In deze bijlage zijn de samenvattingen van de bestudeerde literatuur opgenomen.

5.1 ISO 10252

De ISO10252 geeft eisen en richtlijnen voor het ontwerp en de beoordeling van gebouwen en civiele constructies in relatie tot de kans van optreden van buitengewone gebeurtenissen veroorzaakt door menselijke activiteiten. Brand en door de mens veroorzaakte aardbevingen vallen buiten de scope. De norm beschrijft hoe de principes van risico en betrouwbaarheid kunnen worden gebruikt om beslissingen te ondersteunen die gerelateerd zijn aan het ontwerp en de beoordeling van constructies die worden blootgesteld aan buitengewone belastingen in alle fasen van hun leven.

In hoofdstuk 5 worden de generieke principes en conceptuele aanpak besproken, in hoofdstuk 6 de impact acties, waaronder aanvaringen. De overige hoofdstukken bevatten o.a. Explosies en ongeïdentificeerde acties. Van de bijlage zijn de volgende relevant voor aanvaarrisico: A3 (impact door schepen), C (ontwerpen voor buitengewone acties).

5.1.1 Hoofdstuk 5 – Generieke principes en conceptuele aanpak

Deze norm geeft, voor een beperkt aantal relevante acties, toegespitste informatie over incidentscenario's, belastings- en sterktemodellen, beschermende maatregelen en rekenprocedures. Er wordt een doelfaalkans (target reliability level) gekozen die past bij de mogelijke consequenties, de kosten en het niveau van inspanningen en procedures om het risico op schade en falen te verminderen. Er kunnen verschillen zijn tussen de doelfaalkans van bestaande en van nieuwe constructies. De ontwerpaanpak richt zich op een combinatie van constructieve en niet-constructieve maatregelen om te voorkomen of te beperken:

- Het optreden van de actie
- De ernst van de actie
- Het effect van de actie in termen van belasting op de constructie
- De verschillende directe en indirecte gevolgen

De constructie dient een bepaalde mate van robuustheid te bezitten. De ratio tussen directe en indirecte gevolgen wordt gezien als een maat voor de robuustheid (zie ook ISO2394). Robuustheid betekent dat de kans op een disproportionele instorting moet worden beperkt, gegeven dat lokale schade of degradatie optreedt door een willekeurige buitengewone belasting.

Het type analyse hangt af van de functie van de constructie en de mogelijke gevolgen in geval van falen en kan voor risico en betrouwbaarheidsaspecten bestaan uit:

- Volledige risicoanalyse
- Probabilistische analyse o.b.v. Vooraf gedefinieerde doelfaalkansen
- Semi probabilistische specifieke acties of schadekarakteristieken

En kan voor fysieke modellering bestaan uit:

- Niet-lineaire dynamische analyse
- Niet-lineaire constructieve dynamische analyse
- Statische constructieve analyse

Er worden 5 zogenaamde “consequence classes”, gevolgklassen, gedefinieerd, waarbij wordt aangesloten bij de indeling uit ISO2394. De omvang en diepte van de analyse is in overeenstemming met de gevolgklasse.

De wijze waarop ongewenste gebeurtenissen moeten worden gemodelleerd wordt omschreven, waarbij een formule wordt gegeven voor de kans op constructief falen:

$$P_f(T_{ref}) \approx \lambda T_{ref} \int_0^{\infty} P(f|U = u) f_u(u) du \quad (5)$$

Waarin:

- λ = het aantal potentiële trigger gebeurtenissen per tijdseenheid
- T_{ref} = de referentieperiode
- F = de faalgebeurtenis
- $f_u(u)$ = de kansdichtheidsfunctie van de ernst (energie) van het gevaar, gegeven de startgebeurtenis
- U = de ernst van het gevaar (hoeveelheid energie)
- u = een specifieke waarde van U

De uitkomst van de formule dient kleiner te zijn dan een specifieke jaarlijkse doelfaalkans, afhankelijk van de gevolgen. Doelfaalkansen worden doorgaans gesteld tussen 10^{-6} en 10^{-4} per jaar.

De constructieve analyse (par 5.4) moet, in omvang passend bij de opgave, rekening houden met:

- Ernstige geometrische non-lineaire effecten;
- Non-lineair materiaalgedrag;
- Mogelijk totaal falen of zwaar blootgestelde of kleine constructieve elementen;
- Dynamische effecten;
- De interactie tussen actie en constructie;
- Effecten van beschermingssystemen.

5.1.2 Hoofdstuk 6 - Impact

Hoofdstuk 6 gaat over impact, waaronder ook aanvaringen vallen. Impact van aanvaringen dient in beschouwing te worden genomen in het ontwerp en de beoordeling van constructies als schepen in de nabijheid van de constructie kan komen en significante krachten kunnen optreden. Bij impact moet de vervorming door kinetische energie worden meegenomen van het object (hier: schip) zelf, de constructie en eventueel de beschermingsconstructie. Hiervoor zijn nodig:

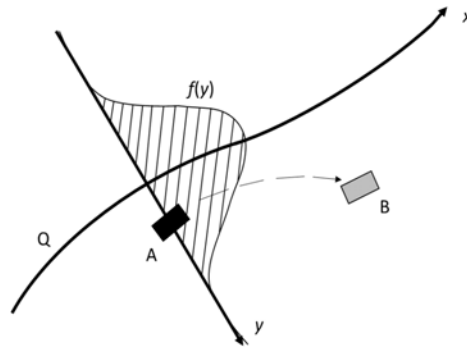
- constructieve eigenschappen
- massa
- snelheid
- aanvaarhoek
- mechanische eigenschappen van het object

In par. 6.1.3. wordt uitgebreid stil gestaan bij de constructieve analyse en worden 4 methoden beschreven (zie voor details de norm). Par 6.2.3 gaat over de impact door schepen. Hierbij dienen o.a. het type en de afmetingen van vaarwegen, de overstromingen, het type en de diepgang van schepen en hun impact gedrag, en

het type constructies en hun energie verspreidingsgebied karakteristieken te worden betrokken.

5.1.3 Annex A3 – Impact door schepen (informatief)

Het volgende scenario wordt beschouwd: een schip (A) volgt met enige afwijking de centrumlijn van een vaarweg, waarbij op de positie (x,y) een faalmechanisme optreedt, wat resulteert in een aanvaring met constructie B.



Het optreden van een mechanische of navigatiefout kan gemodelleerd worden als een (inhomogeen) Poisson proces. Dat resulteert in de volgende formule:

$$P_{col} (T_{ref}) = n \lambda T_{ref} (1-P_a) \iint P(\text{collision} | v, x, y) f(y) dy dx \quad (2)$$

Waarin:

- n is het aantal schepen per tijdseenheid (verkeersintensiteit);
- λ is de kans op mechanisch falen of menselijke fout (navigatiefout) per eenheid van reisafstand;
- T_{ref} is de referentie periode (bijv. 1 jaar);
- P_a is de kans dat een aanvaring wordt voorkomen door een positieve menselijke ingreep;
- x, y zijn de coördinaten van het punt waarbij een fatale menselijke fout of een mechanische fout optreden;
- v is de snelheid op punt (x, y);
- $f(y)$ is de dichtheidsfunctie van de plaatsverdeling in y-richting op het punt waar een faalmechanisme optreedt.

Voor de scheepsmassa kan de CEMT classificatie worden gehanteerd (tabel A.10). Voor de snelheden van schepen wordt geadviseerd om, zo mogelijk, gebruik te maken van specifieke lokale data en anders de in de norm voorgestelde snelheden te hanteren. Voor het berekenen van de aanvaarenergie zijn formules gegeven voor de elastische en plastische vervorming.

5.1.4 Annex C – ontwerp voor buitengewone gebeurtenissen (informatief)

In Annex C worden handvaten gegeven over hoe om te gaan met het wegvallen van één (of meer) constructie(de)(e)(n).

5.1.5 Conclusie

Conclusie voor aanvaarrisico: Vooropgesteld dat het wenselijk is om aan te sluiten bij internationale normering, zullen de gevolgklassen als uitgangspunt moeten worden genomen voor de omvang en diepte van de risicoanalyse. Het ligt in de lijn

der verwachting dat de meeste Rijksbruggen minimaal in klasse 3 zullen vallen, maar dat er wellicht ook bruggen van de zwaarste categorie (gevolgklasse 5) zijn.

5.2 ISO 2394: 2015

De methodische basis voor deze editie van ISO 2394 wordt beschreven in de Probabilistic Model Code [8] en Risk Assessment in engineering — Principles, System Representation and Risk Criteria [9] door de Joint Committee on Structural Safety (JCSS) en EN 1990 (2007), waar de lezer aanvullende informatie zal vinden die relevant is voor het gebruik ervan.

Drie verschillende, maar verwante niveaus worden gefaciliteerd, namelijk een risico-geïnformeerde, een op betrouwbaarheid gebaseerde en een semi-probabilistische benadering. Een van deze niveaus dient te worden gekozen.

De informatie uit deze norm is met name methodisch en kan wellicht op een later moment van waarde zijn.

5.3 Eurocode “Accidental Actions”

In de Eurocode NEN-EN 1991-1-7 staat een tabel met waardes die gelden voor de aanvaarbelasting op CC2-constructies, zie bijlage. Voor verschillende vaarwegen gelden hierbij andere belastingen. Voor constructies met CC1 hoeft geen rekening te worden gehouden met buitengewone belastingen. Voor constructies met CC3 (merendeel RWS constructies) wordt aanbevolen om nader onderzoek uit te voeren o.a. m.b.v. een risicoanalyse. Hierbij kan voor het bepalen van de kracht op de constructie de (Meier-Dornberg) formule worden gebruikt die is opgenomen in de bijlage van de Eurocode.

(3) Bij elastische vervormingen (wanneer $E_{def} \leq 0,21 \text{ MNm}$) kan de rekenwaarde van de dynamische botskracht zijn berekend met uitdrukking (C.8):

$$F_{dyn,el} = 10,95 \times \sqrt{E_{def}} \text{ [MN]} \quad (\text{C.8})$$

(4) Bij plastische vervormingen (wanneer $E_{def} > 0,21 \text{ MNm}$), kan de rekenwaarde van de dynamische botskracht zijn berekend met uitdrukking (C.9):

$$F_{dyn,pl} = 5,0 \times \sqrt{1 + 0,128 \times E_{def}} \text{ [MN]} \quad (\text{C.9})$$

Voor de risicoanalyse voor buitengewone belastingen wordt in de NL-nationale bijlage de norm van 10^{-5} per jaar gegeven (zie bijlage).

In de Eurocode staat ook een kansberekening beschreven. Vergelijkbaar met hetgeen in de ISO 10252 staat, echter in de formule is ook de botskracht opgenomen.

$$P_f(T) = N \int P\{F_{dyn}(x) > R\} dx \quad (\text{B.6})$$

Het optreden van een incident kan worden gemodelleerd als gebeurtenissen in een Poisson-proces. Hierbij wordt de botskracht op de constructie meegenomen door middel van een kansverdeling. Als de botskracht F_{dyn} groter is dan de weerstand (R) dan is de constructie bezwaken. Hiermee is de kans te bepalen dat als gevolg van een scheepsincident een constructie bezwijkt.

5.4 Achtergronddocument Eurocode

De van toepassing zijnde en relevante paragrafen zijn 3.1, 3.3, 4.1 en 4.4. Hoofdstuk 4.4 gaat over aanvaringen [8].

5.5 ROK

Bij een botsing tussen een schip en een brugpijler (of een eventueel aanwezige beschermingsconstructie) moet de kinetische energie van het schip worden omgezet in vervormingsenergie. De kinetische energie is in zijn eenvoudigste vorm een functie van de **massa** en de **vaarsnelheid** van het schip, maar ook de aanvaarhoek kan een rol spelen. De botsing van het schip met de constructie resulteert in een zekere vervorming van het schip, gepaard gaande ook met een zekere verplaatsing (c.q. inverting) δ van een eventueel aanwezige beschermingsconstructie ter plaatse van het botspunt. De overgedragen energie wordt volledig bepaald door de kenmerken van het schip en de vaarbeweging van het schip t.o.v. de constructie.

De botskracht die bij deze energie overdracht optreedt bij niet-starre constructies, zoals beschermingsconstructies wordt mede bepaald door de stijfheid van het geheel van constructie en grondlichaam. Bij grote stijfheid is de inverting klein en de botskracht groot, terwijl bij geringe stijfheid de inverting groot is en de botskracht klein. De **botskracht** wordt bepaald door:

- de op te nemen kinetische energie E van het schip,
- de stijfheid (EI) van de constructie,
- de eigenschappen van de ondergrond,
- de verticale lengte van de constructie (lengte van paal),
- de inheidiepte van de constructie,
- het niveau van het botspunt t.o.v. de bodem.

De enige bepalende factoren die samenhangen met het schip zijn de kinetische energie van het schip (met aanhangend water) en het niveau van het botspunt t.o.v. de bodem.

5.5.1 Rekenmodel voor aanvaarbelasting

Als er voor de brug geen beschermingsconstructie aanwezig is, moet dan alle kinetische energie worden opgenomen door vervorming van het schip. In de literatuur zijn verschillende methoden te vinden voor het bepalen van de kracht door een dergelijke aanvaring: een Amerikaanse methode (AASHTO, 2007), de CEN methode (NEN-EN, 2006) en de methode volgens de Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken (ROK) die bij RWS in gebruik is (ROK, 2015). In het navolgende zal de ROK methode worden toegelicht.

Het falen van een systeem wordt gekwantificeerd met een grenstoestandsfunctie Z , waarbij een negatieve waarde van Z duidt op 'falen' van het systeem en een positieve waarde op 'niet falen'. De grenstoestandsfunctie $Z=0$ geeft dus de grens aan tussen falen en niet falen. Om een grenstoestandsfunctie te kunnen bepalen is een faaldefinitie nodig. In het geval van de brug kan dat variëren van "schade aan de pijler" tot "instorten van de brug". Er zijn verschillende manieren om een Z -functie te construeren. Een veelgebruikte methode is om de Z -functie te definiëren als het verschil tussen de sterkte, R , en belasting, S , van het systeem:

$$Z = R - S$$

0.1

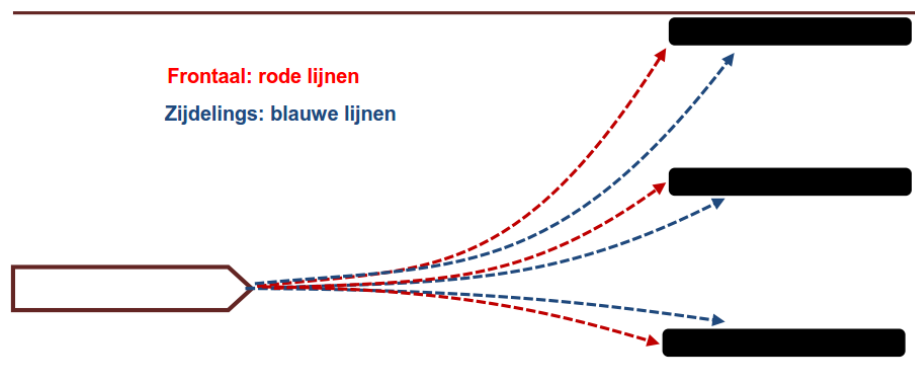
Als de belasting, S , hoger is dan de sterkte, R , dan wordt Z negatief en is er sprake van falen van het systeem. Voor de brugpijler beschrijven we de sterkte als de maximale kracht, F_{crit} , die een pijler kan hebben zonder dat er sprake is van falen. De Z -functie kan daarmee als volgt beschreven worden:

$$Z = F_{crit} - F$$

0.2

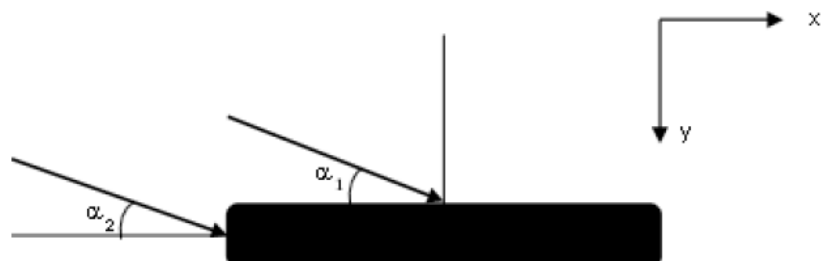
Waarin F de optredende aanvaarkracht is, dus de belasting.

Voor het bepalen van de aanvaarkracht wordt een basispositie van het schip verondersteld en wordt vervolgens uitgerekend met welke hoek het schip botst met de constructie. Een botsing met de kop van de pijler wordt gedefinieerd als een frontale aanvaring; een botsing met de zijkant van de pijler wordt gedefinieerd als een zijdelingse aanvaring. Dit is weergegeven in Figuur 0-1.



Figuur 0-1 Mogelijke botsingen met de brugpijlers.

Relevant is verder de botsinghoek.



Figuur 0-2 Definities aanvaarhoeken.

De belasting (kracht) op een pijler (F_{max}) is maximaal in geval van een frontale botsing bij $\alpha_2 = 0$ graden. Indien een schip de kop van de pijler raakt onder een kleine hoek dan is de kracht kleiner. In dat geval is de belasting (kracht) op de kop van de pijler aangegeven met de kracht F_x evenwijdig aan de brugpijler:

$$F_{\text{frontaal}} = F_x = F_{\text{max}} \cos \alpha_2$$

0.3

waarin,

α_2 is de hoek waaronder het schip de pijler raakt (voorwaarde: $-27 < \alpha_2 < 27$ graden),

en

F_{max} [MN] wordt berekend volgens ROK (2017):

$$F_{\text{max}} = 3.3\sqrt{E} + 5.6 \text{ [MN]}$$

0.4

Waarin, E is de kinetische energie(niveau) van het schip [MNm]. De kinetische energie van een schip op het moment van botsing kan als volgt uitgeschreven worden, met $C_m=1.1$ als constante factor voor het meebewegende water:

0.5

$$E = \frac{1}{2} C_m \cdot 10^{-3} m_s v_s^2 = 0.55 \cdot 10^{-3} m_s v_s^2 \text{ [MN]}$$

De massa m_s [ton] van een schip die moet worden aangehouden is bekend, zie bijvoorbeeld waterverplaatsingstonnagewaardes in ROK (2017). De vaarsnelheid van het schip v_s wordt gegeven in m/s.

Een schip kan ook botsen met de zijkant van de brugpijler. De zijdelingse kracht $F_{\text{zijdelings}}$ die dan optreedt wordt als volgt gedefinieerd:

$$F_{\text{zijdelings}} = \sqrt{F_y^2 + F_{\text{wrijving}}^2} \text{ [MN]}$$

0.6

Met:

$$F_{\text{wrijving}} = \mu \cdot F_y \text{ [MN]}$$

0.7

$$F_y = c_f \cdot \sin(\alpha_1) \cdot F_{\text{max}} = c_f \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \{3.3\sqrt{E} + 5.6\} \text{ [MN]}$$

0.8

met $\mu = 0.5$ (ROK, 2017; voorwaarde: $0 < \alpha_1 < 63$ graden) en waarin c_f een reductiefactor is voor energieverliezen door vervorming van het schip. Voor c_f is in de ROK (2017) een tabel gegeven als functie van α_1 (Tabel 5-5 in ROK, 2017).

Op basis van vergelijkingen (0.1) t/m (0.9) kan berekend worden of de totale kracht op de brugpijler F_{frontaal} of $F_{\text{zijdelings}}$ groter is dan de maximale kracht F_{crit} die de pijler kan weerstaan. Als de kracht door een aanvaring groter is dan F_{crit} dan is Z in vergelijking (0.1) kleiner dan 0 en zal de brugpijler bezwijken

5.5.2 Berekening faalkans

Enkele parameters uit de vergelijkingen (0.1) t/m (0.9) zijn variabel. Zo verschilt bijvoorbeeld de vaarsnelheid per schip, dus het is niet op voorhand vast te stellen wat de vaarsnelheid is van een schip bij een aanvaring. Voor dergelijke variabele

parameters zou in principe geen vaste waarde gekozen moeten worden maar een kansverdeling. Het gevolg is dat voor de waarde van Z ook een kansverdeling wordt berekend. Daaruit kan een kans worden afgeleid dat Z kleiner is dan 0 (falen). De betekenis van deze kans, aangeduid met $P[Z < 0]$, is als volgt:

$P[Z < 0] =$ de kans dat de brugpijler onvoldoende bestand is tegen de belasting van één aanvaring.

Deze kans is dus uitgedrukt “per aanvaring”. Het is echter functioneel om de faalkans uit te drukken in “faalfrequentie per jaar” (f_{jaar}). Deze frequentie staat voor het gemiddeld aantal keren per jaar dat de brugpijler faalt. De vertaalslag van kans per aanvaring naar frequentie per jaar is eenvoudig te maken door vermenigvuldiging met het gemiddeld aantal aanvaringen per jaar λ :

$$f_{\text{jaar}} = \lambda P[Z < 0]$$

0.9

In de ROK methode om de kans op falen te berekenen, wordt uitgegaan van maatgevende (maximale) dimensies en vaarsnelheden van schepen. Voor iedere klasse wordt vervolgens bepaald wat de maximale frontale en zijdelingse aanvaarbelasting is. Door dit te vermenigvuldigen met de opbouw van het scheepvaartbestand en een gegeven frequentie van aanvaringen, wordt de faalfrequentie per jaar berekend.

Door gebruik te maken van formule 0.4 en 0.5 wordt berekend wat de maximale aanvaarkracht F_{max} is. De maximale aanvaarkracht wordt gebruikt voor de bepaling van de maximale zijdelingse kracht en de maximale frontale kracht volgens de formules 0.3 tot 0.9. Een belangrijke invoerparameter is de hoek α waarop de aanvaring plaats vindt.

Conclusie

In de ROK wordt de kans op een aanvaring wel genoemd, maar er worden geen handvatten gegeven om deze te bepalen. Er wordt uitgegaan van maximale waarden voor massa, snelheid en aanvaarhoek, waardoor een conservatieve belasting wordt verkregen. De wens is om deze te nuanceren met behulp van een probabilistische aanpak.

Van toepassing zijnde eisen:

4.6.1 (5), 4.6.1 (6), 4.6.2 (1), P50

5.6 AASHTO

AASHTO biedt drie alternatieve ontwerpmethodologieën (Methoden I, II en III) om de brugontwerper flexibiliteit te bieden bij het vaststellen van criteria voor aanvaringen van zeeschepen en/of binnenvaartschepen. Hierbij moet wel aangetekend worden dat het voor de binnenvaart beperkt is tot duweenheden, als meest representatief voor de Noord Amerikaanse binnenwateren. Methode II is de voorkeursmethode voor kritische constructies en de methode wordt in de volgende paragrafen op hoofdlijnen besproken. Er zijn echter situaties waarin methoden I en III beter zouden kunnen worden toegepast.

Methode I is een relatief eenvoudige, semi-deterministische procedure om een maatgevend schip te selecteren en vervolgens de maximale aanvaringsbelastingen door te rekenen (worst case scenario). Het is met name nuttig op vaarwegen waarbij er weinig variatie is in de samenstelling van het verkeer en de omgevingscondities waarbij het verkeer vooral bestaat uit (binnenvaart)schepen van ongeveer dezelfde grootte. De procedure is minder nauwkeurig (en meestal conservatiever) dan de methode II-analyse en wordt daarom niet aanbevolen voor het definitieve ontwerp van kritische bruggen. Methode I-procedures zijn echter nuttig bij het definiëren van de grenzen (maatgevende schepen, maatgevende vaarsnelheden, maatgevende omgevingscondities) die worden gebruikt in de risicoanalyse van methode II. Methode I-procedures zijn ook nuttig om een eerste beoordeling te geven van de omvang van de aanvaringskrachten, terwijl invoergegevens voor de aanzienlijk meer gecompliceerde en bewerkelijke risicoanalyseprocedures van Methode II worden verzameld en geanalyseerd.

Methode III is een procedure gericht op kosteneffectiviteit waarbij als vervolg op Methode II een kosten/baten-analyse wordt gekoppeld aan het risico van een mogelijke grote schade aan de brug. Deze procedure wordt doorgaans gebruikt in gevallen waarin het (economisch of technisch) niet haalbaar is om een nieuwe brug te ontwerpen of een bestaande brug achteraf aan te passen om te voldoen aan de risicoaanvaardingscriteria van Methode II. Systematisch wordt onderzocht wat de consequenties zijn in kosten en baten van het accepteren van een hoger risico op een grote schade.

Methode II is een op probalistiek gebaseerde risicoanalyseprocedure die zowel kan worden gebruikt voor het direct beoordelen van het schaderisico als gevolg van een aanvaring als voor het ontwikkelen van criteria voor evaluatie van het schaderisico voor het ontwerp. Met behulp van Methode II-procedures wordt op systematische wijze een model opgezet om de jaarlijkse frequentie van het instorten van een brug te schatten op basis van de geometrie van de brugpijler, dan wel overspanning, de uiteindelijke sterkte van de pier, de kenmerken van de waterweg en de kenmerken van de scheepsvloot die door de vaarweg vaart. Het geschatte instortingsrisico kan dan worden vergeleken met vooraf bepaalde acceptatiecriteria. Gebruik van methode II heeft de voorkeur boven methode I en III. Het Vessel Collision Design document bevat een stroomschema voor de uitvoering van de methodiek (zowel I, II en III) met een duidelijke verwijzing naar de stappen in de methodiek.

De AASHTO-bepalingen specificeren als criterium voor de inventarisatie volgens methode II een jaarlijkse bezwijkfrequentie van 0,0001 voor kritieke bruggen en een jaarlijkse bezwijkfrequentie van 0,001 voor reguliere bruggen (bruggen waarbij een kortdurende stremming wel acceptabel is). Deze criteria zijn gebaseerd op risicovergelijkingen met natuurlijke extreme gebeurtenissen en acceptatie van risico in engineering. Deze jaarlijkse frequenties komen overeen met terugkeerperioden van bezwijken van de brug gelijk aan respectievelijk 1 keer per 10.000 jaar en 1 keer per 1.000 jaar. Kritieke bruggen worden gedefinieerd als die bruggen waarvan wordt verwacht dat ze moeten blijven functioneren na een grote impact, terwijl van reguliere bruggen verwacht wordt dat ze enige tijd buiten gebruik mogen zijn na een grote impact. Dit betekent niet dat de constructie naar verwachting 10.000 of 1.000 jaar meegaat, maar dat tijdens de normale levensduur van de brug (zeg 100 jaar) het risico van instorting door aanvaring door een schip zeer klein zal zijn.

Centraal in de methodiek staat de AASHTO-risicovergelijking die gebaseerd is op het optreden van een aanvaring wanneer een schip de brug passeert. Het optreden van een aanvaring wordt onderverdeeld in 4 gebeurtenissen:

1. een vaartuig dat de brug nadert wijkt van zijn koers door de brug af,
2. het koers afwijkende vaartuig botst op een brugelement (pijler of brugdek),
3. het getroffen brugelement bezwijkt,
4. een beschermingsfactor (kans) op basis van bruglocatie en nabijgelegen waterwegkenmerken, zoals landmassa's, ondiepten, beschermingsconstructies, die een aanvaring alsnog kunnen voorkomen.

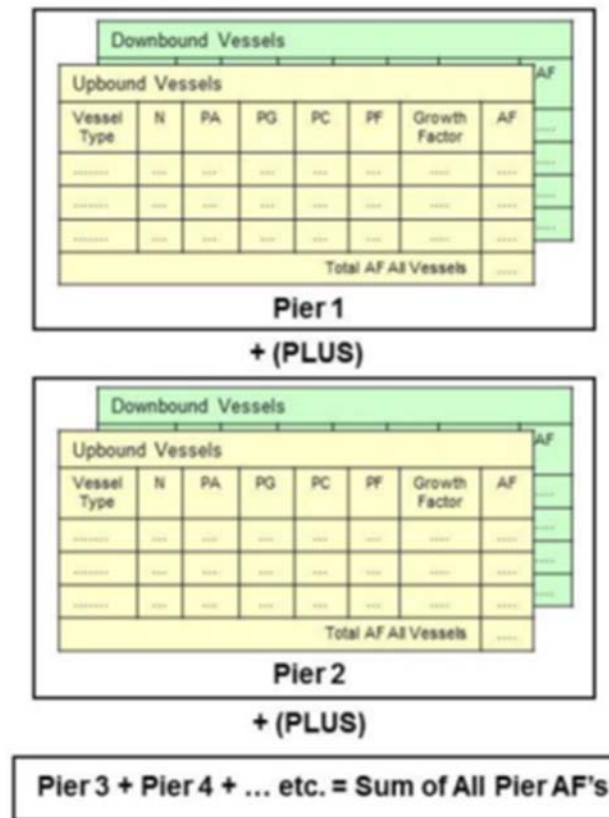
Dit wordt vermenigvuldigt met het aantal passages, rekening houdend met een groeifactor voor het verkeer, in vergelijking:

$$AF = (N) (PA) (PG) (PC) (PF) (GF)$$

Met:

AF	jaarlijkse frequentie van bezwijken van een brugelement als gevolg van aanvaring met een schip;
N	jaarlijks aantal passages van vaartuigen, ingedeeld naar type, grootte en beladingstoestand, die het brugelement kunnen raken,
PA	waarschijnlijkheid van koers afwijking (een maat voor hoe vaak een schip uit koers kan raken),
PG	geometrische waarschijnlijkheid (als het uit koers gaat, raakt het dan een deel van de brug?),
PC	kans op bezwijken (als een brugonderdeel wordt geraakt, zal de brug dan instorten?),
PF	beschermingsfactor (zijn er landmassa's of nabijgelegen constructies om de brug te beschermen?)
GF	Groeifactor om rekening te houden met toekomstige toename (of afname) van het jaarlijkse aantal passages (projectie van het scheepvaartverkeer tot halverwege de levensduur van de brug).

De analyse wordt doorgaans uitgevoerd in een matrix of tabel. In de eerste kolom zijn verschillende soorten en maten zeeschepen / binnenvaartschepen in rijen gerangschikt op afnemende grootte. Voor elk specifiek vaartuigtype worden vervolgens waarden voor de verschillende risicocomponenten berekend en voor elke rij een AF berekend. Deze analyse wordt uitgevoerd voor elke brugpijler en/of bovenbouwoverspanning (zie Figuur 0-3), voor zowel opvarend als afvarend verkeer, omdat die verschillende vaarsnelheden en stroomcondities kan hebben. Nadat de AF voor elke brugpijler of overspanningscomponent is berekend, wordt de jaarlijkse frequentie van de totale brug verkregen door de AF's van elke brugcomponent, vaartuig en vaarrichting in de analyse opgeteld. Het totaal kan afgezet worden tegen het criterium.



Figuur 0-3 Schematische weergave voor berekening van de jaarlijkse frequentie van instorten brug t.g.v. een aanvaring (AF)

De methodiek beschrijft verder op welke wijze de verschillende factoren in de vergelijking bepaald kunnen worden. Dit gebeurt enerzijds door de werkwijze te beschrijven en aan te geven welke middelen beschikbaar zijn om de betreffende factor te bepalen, b.v. AIS analyse of analyse van ongevallenstatistiek. Anderzijds wordt opgemerkt dat data vaak ontbreekt en als het wel beschikbaar is, tijdrovend om te verzamelen en analyseren. Als alternatief worden voor alle factoren daarom ook standaard waarden of formules gegeven. Bijvoorbeeld voor de maat hoe vaak een schip uit de koers kan raken:

$$PA = (BR) (R_B) (R_C) (R_{XC}) (R_D) (R_M)$$

Met:

BR standaard waarde voor de kans dat een vaartuig uit de koers raakt, vastgesteld op basis van historische ongevalsgegevens op vaarwegen wereldwijd ($0,6 \cdot 10^{-4}$ voor zeeschepen en $1,2 \cdot 10^{-4}$ voor binnenvaartschepen),

R_B correctiefactor voor bruglocatie,

R_C correctiefactor voor langsstroom,

R_{XC} correctiefactor voor dwarsstroom,

R_D correctiefactor voor verkeersdichtheid van schepen,

R_M correctiefactor voor effect van maatregelen.

De correctiefactor voor bruglocatie (R_B) wordt berekend op basis van de relatieve locatie van de brug ten opzichte van een van vaarwegdelen (rechtstand, overgang van rechtstand naar bocht en in de bocht). De correctiefactoren voor stroom zijn gebaseerd op vergelijkingen die in de AASHTO Vessel Collision Design Guide zijn opgenomen. De correctiefactor voor verkeersdichtheid (R_D) in de directe omgeving van de brug wordt bepaald door of de brug zich in een gebied met een lage $R_D = 1.0$), gemiddelde ($R_D = 1.3$) of hoge dichtheid ($R_D = 1.6$) bevindt.

Aanbevolen wordt om in de berekening van BR rekening te houden met het effect van maatregelen. In afwijking van de beschrijving van de methodiek is dit hierboven opgenomen als extra correctiefactor (R_M). Kott en Winters geven een aantal voorbeelden (zie onderstaande tabel).

Item/Description	Adjustment Factor	Discussion
Vessel Traffic Service (VTS)	0.80	20% reduction in risk attributed to VTS and mandatory vessel participation (Trans Mountain 2013)
Electronic Chart Display and Information System (ECDIS)	0.81	Compliance with international ECDIS requirements are mandatory for all ships by July 2018. The adjustment is based on 1/2 of the 38% reduction attributed to ECDIS because of the overlap with the reduction due to pilots onboard the vessel (Trans Mountain 2013).
Other Navigation Aids	1.00	Additional potential risk reductions include (Trans Mountain 2013): AIS (2-5%); ENC (0-13%); Conventional ATNs (0-13%); DGPS (0-8%); and PPU (0-10%). For purposes of vessel collision risk analysis, these potential reduction factors are sometimes not included to be conservative.
Port State Control (PSC)	0.94	PSC includes the inspection of foreign ships to verify compliance with international regulations on the condition of the ship, equipment, crew manning and operations (including rest periods). Studies have demonstrated that PSC activities reduce the rate of vessel accidents in waterways. The adjustment is based on 1/2 of the 12% reduction attributed to PSC because of the overlap with the reduction due to pilots onboard the vessel (Trans Mountain 2013).
Pilotage - 1 Pilot	1.00	The code base rate assumes a single pilot; therefore, a further reduction is not applicable.
Pilotage - 2 Pilots	0.54	46% reduction in risk attributed whenever a second pilot is required onboard a vessel (Trans Mountain 2013).
Daytime Only Transit Restriction	0.50	Value based on Larsen 1993 which states that the rate of collision/grounding accidents at night are 4 times the probability of such accidents in daytime (which implies a 75% reduction in risk or a reduction factor of 0.25). For purposes of the vessel collision risk assessment, a conservative value of 0.5 was used.
Visibility Restrictions	0.50	Value based on Larsen 1993 which states that the rate of collision/grounding accidents in fog when the visual range is less than 200m has been found to be 100 times the risk in clear weather. Visibility studies in Dover Strait, United Kingdom by Wheatley (Larsen 1993) found that reduced visibility increased the accident rate by 4.4 times as compared to clear visibility conditions (which implies a 77% reduction in risk or a reduction factor of 0.23). For purposes of the vessel collision risk analysis, a conservative value of 0.5 was used.
Passenger / Cruise Ships	0.17	Value based on Larsen 1993 which states that vessel accident studies in Japanese waters indicate that passenger vessels are 6 times safer than cargo ships and tankers (which implies an 83% reduction in risk or a reduction factor of 0.17).

Tabel 0-1 Correctiefactoren (R_M) voor het effect van maatregelen

In de standaard formules voor het berekenen van de geometrische waarschijnlijkheid PG (gegeven dat een schip van koers raakt) en ook in de beschermingsfactor (PF) wordt o.a. gebruik gemaakt van normale verdelingen.

De AASHTO methodiek II is bewerkelijk, maar met gebruik van de standaard waarden en standaard formules eenvoudig toe te passen. Voor gebruik op binnenvaarwegen met grote variatie in de scheepsklassen op de vaarweg is wel aanvulling en/of validatie van de standaard formules noodzakelijk.

5.7 PIANC Ship Collisions due to the Presence of Bridges

Het PIANC-rapport WG19 behandelt de aanvaarbelasting op bruggen op basis van het maatgevende schip te bepalen. En gaat in op de meest toegepaste beheersmaatregelen, deze zijn: Kunstmatige eilanden (zand/steen) voor de brugpijler, geleidewerken (fenders), palen, beloodsing en verkeersmanagement. De in Nederland toegepaste caissons worden niet benoemt.

In hoofdstuk 3 is een analyse gemaakt van de verschillende database en in hoofdstuk 5 zijn de basis ongevalskansen benoemd. Het rapport besteedt veel aandacht aan de basiskans voor aanvaring van een brugpijler. Voor de Moezel is dit $2 \cdot 10^{-5}$ en voor de Nieuwe Waterweg $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar. Het gaat hierbij waarschijnlijk om alle type ongevallen (zowel significant als niet significant). Vanwege betere scheepvaarttekens en technische verbeteringen aan boord van het schip is de kans van aanvaren tussen 1980 en 1995 ondanks de grotere schepen en de toename van het aantal bruggen niet toegenomen.

In hoofdstuk 4 zijn verschillende in toepassing zijnde methodes beschreven om op basis van de basis ongevalskans de kans op aanvaring met een object te bepalen. In hoofdstuk 6 zijn de geaccepteerde faalkansen beschreven. In hoofdstuk 7 is een generiek methode beschreven om de economische analyse uit te voeren.

In hoofdstuk 2 is de toenmalige bestaande kennis beschreven. Net als in de AASHTO worden hier 3 methodes beschreven. Methode 1 is een semi-deterministische aanpak, methode 2 is een probabilistische methode en methode 3 is een kostenbatenanalyse. Geadviseerd wordt om methode 2 te gebruiken tenzij het om een specifieke situatie gaat. Voor binnenwateren met homogeen verkeer kan methode 1 worden toegepast en voor bestaande bruggen wordt methode 3 geadviseerd.

In dit rapport wordt het onderzoek van Woisin (Duitsland) aangehaald. Daarin is de impact van het schip beschreven met de formule:

$$P_s = 0.98 \cdot (DWT)^{1/2} \cdot \left[\frac{v}{16} \right] \quad (2.1)$$

where

P_s = ship impact force (MN)
 DWT = vessel dead-weight tonnage
 v = impact speed (knots).

Dit is gebaseerd op 70% van de maximale impact.

Ook wordt de Meier-Dornberg formule beschreven:

$$F_{dyn} = 5 \cdot \sqrt{1 + 0.128 \cdot E_{def}} MN \quad (2.4)$$

Voor de Rijn wordt echter de semi-deterministische methode gebruikt. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in een frontale aanvaring en een haakse aanvaring. Ook wordt onderscheid gemaakt tussen de pijlers in de oever en in de vaarweg. Waar de grens tussen deze twee ligt is in het midden gelaten. Voor de krachten op het brugdek wordt 1% van de frontale aanvaarkracht als uitgangspunt genomen.

- Pier within the navigation channel:
frontal impact 30 MN lateral impact 15 MN
- Pier outside the navigational channel:
frontal impact 6 MN lateral impact 3 MN

Ook wordt verwezen naar de Eurocode waar een uitgebreidere tabel staat.

In het rapport wordt nog de opmerking genoemd dat de geaccepteerde bezwijkkans als gevolg van een aanvaring zoals genoemd in de AASHTO en ISO significant lager ligt dan de algemeen geaccepteerde bezwijkkans van een brug.

5.8 PIANC Design of Lock gates for ship collision

Het PIANC-rapport 151 Design of Lock gates for ship collision beschrijft het risico van de aanvaring van schepen met sluisdeuren. Een aantal voorbeelden zijn beschreven met de bestaande standaarden en best practises. Daarnaast is ingegaan op diverse methodes om de belasting als gevolg van calamiteuze stootbelastingen van schepen te bepalen.

In het rapport worden 4 scenario's beschreven die vallen onder een aanvaring met een sluisdeur:

- Varend stroomafwaarts en aanvaring met benedenhoofd
- Varend stroomopwaarts en aanvaring met bovenhoofd
- Varend stroomafwaarts en aanvaring met bovenhoofd (Kans zeer laag)
- Varend stroomopwaarts en aanvaring met benedenhoofd (Kans zeer laag)

Scenario 1 is de meest risicovolle aanvaring aangezien het aangrijpingspunt van de aanvaring hoog ligt, de hydrostatische druk nadelig is en de kans van optreden is hoog.

Voor het bepalen van de energie van het schip geldt de formule.

$$E=0,6mv^2$$

Deze formule heeft een hogere factor dan formules die elders (o.a. ROK) zijn beschreven. Voor de snelheid wordt geadviseerd om een waarde te nemen met een overschrijdskans van 10^{-3} of 10^{-4} op basis van AIS of gemeten waarden te nemen.

Voor het bepalen van de kracht op de sluisdeur is de Meier-Dornberg formule genoemd. Deze formule is ook opgenomen in de Eurocode. Hierbij wordt wel de kanttekening geplaatst dat deze formule geldt voor aanvaringen met starre objecten en een sluisdeur niet volledig star is. Verder worden diverse analysemethodes beschreven (analytisch, numeriek en praktijkproeven) waarmee in meer detail het

effect van de aanvaring kan worden bepaald in relatie tot het falen van de functie van de sluisdeur.

5.9 Coentunnel en Suurhoffbrug

Om de aanvaarbelasting op de dienstgebouwen van de Coentunnel en de brugpijlers van de Suurhoffbrug te bepalen is een Monte Carlo simulatie toegepast. Als uitgangspunt is een aanvaardbare bezwijkkans van $1 \cdot 10^{-5}$ / jaar gehanteerd, conform NEN-EN1991-1-7, en een kans op aanvaring van $1 \cdot 10^{-6}$ /scheepvaartkilometer /jaar. De toegepast variabelen voor de simulatie zijn gebaseerd op o.a.:

- Vlootverdeling
- Massa
- Koers
- Snelheid van het schip;
- Correctie door schippers.

1 miljoen aanvaringen zijn gesimuleerd met verschillende startcondities voor elk van deze variabelen. Hierbij geldt dus ook het uitgangspunt dat er een aanvaring plaatsvindt. De invoerwaarden zijn gebaseerd op data, literatuur en experts. De simulaties samen met de intensiteit en de eerder vermelde kans op aanvaring geven een kansverdeling van optredende energie. Op basis aanvaardbare bezwijkkans kan een gedeelte van de meest ongunstige aanvaringen worden geaccepteerd. De aanvaringen met de hoogste energiewaarde tot en met een kans van $1 \cdot 10^{-5}$ / jaar kunnen worden geaccepteerd. De eerstvolgende aanvaring is daarmee niet geaccepteerd en bepaald de te hanteren energiewaarde. Met deze energiewaarde is op basis van ROK de maatgevende belasting bepaald.

5.10 Handreikingen 'Prestatiegestuurde risicoanalyses' en 'Kwantificering Aanvaarrisico'

Voor het aanleggen, beheren en onderhouden van infrastructuur worden door Rijkswaterstaat risico analyses uitgevoerd om afwegingen te kunnen maken tussen kosten, prestaties en risico's. Er worden hiervoor, afhankelijk van het object, drie typen risico analyses gebruikt:

- kwalitatieve risico analyses volgens de FMEA methodologie (Failure Mode and Effect Analysis),
- kwantitatieve risico analyses volgens de RCM methodologie (Reliability-Centered Maintenance), en
- uitgebreidere kwantitatieve risico analyses volgens de ProBO methodologie (Probabilistisch Beheer en Onderhoud).

In de drie typen risico analyses worden de kansen en gevolgen op falen van het object op verschillende manieren bepaald. Het document 'Handreiking prestatiegestuurde risicoanalyses (PRA)' [5] beschrijft welke stappen en methoden hiervoor door Rijkswaterstaat genomen worden. Het document 'Handreiking kwantificering aanvaarrisico' [9] is hierop een aanvulling om specifiek het risico op aanvaringen met een object te berekenen. Hoewel in dat document voor aanvaringen van vaste bruggen wordt verwezen naar de ROK ("Voor starre

objecten en starre constructiedelen van beweegbare objecten voldoet het opvolgen van de ROK”), bieden de handreikingen en de afwegingen die erin beschreven worden, goede handvatten om het risico op aanvaring van natte kunstwerken op een meer probabilistische manier aan te pakken. Bovendien zijn de afwegingen uit de handreikingen (wanneer kan er met een kwalitatieve methode worden volstaan, en wanneer en voor welke objecten moet een gedetailleerde modellering via foutenbomen worden toegepast?) ook voor het risico op aanvaring van natte kunstwerken van belang. Deze paragraaf zet daarom de in de handreikingen beschreven methoden en afwegingen kort uiteen.

5.10.1 Handreiking prestatiegestuurde risicoanalyses

In de eerste hoofdstukken van [5] wordt uiteengezet waarom er voor een prestatiegestuurde aanpak is gekozen, en hoe risico hieraan gerelateerd is. Kort samengevat: RWS beheert en onderhoudt in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat drie netwerken: het hoofdwegennetwerk, hoofdvaarwegennetwerk en het hoofdwatersysteem. De netwerken bestaan uit systemen (bijvoorbeeld een snelweg of een vaarwegvak) en deelsystemen (bijvoorbeeld een brug of een sluis).

Over het beheer en onderhoud van de netwerken zijn afspraken gemaakt met het ministerie in een service level agreement (de SLA). Deze afspraken zijn onder andere gerelateerd aan beschikbaarheid van functies van het infrasysteem, en betrouwbaarheid waarmee die functies worden vervuld. De combinatie van beschikbaarheid en betrouwbaarheid wordt de prestatie van het infrasysteem genoemd.

Het verhogen van de prestaties brengt kosten met zich mee, maar zorgt ook voor lagere risico's; een afname van de prestaties leidt tot hogere risico's. Bij beperkte budgetten moet dus een afweging worden gemaakt tussen prestatie- en risiconiveaus. Om die reden worden bij zowel bij aanleg als bij onderhoud van objecten prestatiegestuurde risicoanalyses uitgevoerd. Risicoanalyses worden bij aanleg van objecten gebruikt om aan te tonen dat bepaalde ontwerpen (viaducten, bruggen, vaarwegen, dijken, wegen, dammen, duinen) aan de gewenste prestatienormen voldoen. Bij onderhoud helpen de risicoanalyses om met de beschikbare budgetten een optimale onderhoudsstrategie te kiezen waarmee aan prestatienormen kan worden voldaan.

Naast betrouwbaarheid (Reliability) en beschikbaarheid (Availability), zijn er nog zeven aspecten waar naar gekeken wordt. De zeven extra aspecten bepalen randvoorwaarden voor aanleg en onderhoud van objecten. Twee daarvan (Maintainability en Safety) vormen samen met betrouwbaarheid en beschikbaarheid de aspecten van de wereldwijd gebruikte RAMS assessment methodologie. In de handreiking is dit uitgebreid met nog vijf aspecten (SHEEP: Security, Health, Environment, Economics en Politics). De aspecten betrouwbaarheid en beschikbaarheid zijn echter de belangrijkste aspecten die de prestatie bepalen. De risicoanalyses richten zich specifiek op deze twee aspecten.

Er worden, zoals al vermeld in de inleidende alinea, drie typen risicoanalyses onderscheiden. Deze zijn verbonden aan drie typen InstandhoudingsPlannen (IHP's):

- De kwalitatieve risicoanalyse volgens de FMEA methodologie hoort bij een kwalitatief IHP,
- De kwantitatieve risicoanalyse volgens de RCM methodologie hoort bij een prestatiegestuurd IHP,
- De kwantitatieve risicoanalyse volgens de ProBO methodologie hoort bij een IHP op basis van ProBO.

Voor aanleg van objecten wordt altijd een kwantitatieve risicoanalyse uitgevoerd. Dit heeft namelijk als voordeel dat het een manier biedt om eisen te stellen aan de kwaliteit van de onderdelen die opdrachtnemer ontwerpt, zonder dat de ontwerpvrijheid wordt aangetast.

De handreiking PRA beschrijft de werkwijze voor de drie typen risicoanalyses. In de volgende subparagrafen wordt dit kort beschreven.

5.10.1.1 Kwalitatief FMEA

De kwalitatieve risicoanalyse wordt uitgevoerd volgens de FMEA methodologie (Failure Mode and Effect Analysis). Hierbij worden kansen en gevolgen door experts geclassificeerd, bijvoorbeeld in klassen 'verwaarloosbaar - klein - gemiddeld - groot - zeker' voor kansen, en klassen 'verwaarloosbaar - beperkt - groot - ernstig' voor gevolgen. De methode resulteert in de bekende groen-oranje-rode risicomatrix waarin de groene cellen voor acceptabel risico staan, de oranje cellen voor ongewenst, en de rode voor onacceptabel.

Deze risicoanalyse wordt toegepast op het grootste deel van de Rijkswaterstaat infrastructuur (meer dan 6000 objecten). Het betreft hier dus onderhoud van objecten, en geen aanleg.

De analyse resulteert in een set van risico reducerende maatregelen waarmee de kans op falen van het object acceptabel klein kan worden gemaakt. De maatregelen worden vervolgens vastgelegd in het IHP.

5.10.1.2 Kwantitatief RCM

Voor de meeste objecten waarvoor een kwantitatieve risicoanalyse wordt uitgevoerd, wordt de RCM methodologie toegepast (Reliability-Centered Maintenance). Ook hier worden per object de failure modes en failure effects bepaald, maar daarbij worden de kansen en gevolgen per failure mode via foutenbomen en verdelingsfuncties gemodelleerd en berekend. De kans en consequenties van falen van het gehele object kan daaruit via uitgesplitste gebeurtenissenbomen berekend worden.

Deze kwantitatieve risicoanalyse wordt wat betreft onderhoud toegepast op 119 objecten (complexen), vastgesteld in 2016. Dit zijn bijvoorbeeld objecten waarvoor kwantitatieve eisen zijn opgesteld, zoals kwantitatieve eisen die volgen uit de Waterwet in het geval van waterkeringen. Het kan ook gaan om objecten zonder wettelijke kwantitatieve eisen, maar die wel kritisch bijdragen aan het functioneren van de hoofdnetwerken. Concreet gaat het om beweegbare bruggen, sluizen, aanleginrichtingen en tunnels.

De RCM analyse resulteert ook in een set van maatregelen, maar nu een set waarvoor aangetoond is dat daarmee aan gestelde kwantitatieve prestatie-eisen wordt voldaan. Het geeft daarnaast ook een verband tussen kosten van

onderhoudsstrategieën en de prestatie van een object. Dit is dus geschikt om onderhoudskosten te optimaliseren.

5.10.1.3 Kwantitatief ProBO

De ProBO methodologie (Probabilistisch Beheer en Onderhoud) is ontwikkeld binnen Rijkswaterstaat, en wordt in detail beschreven in [9]. Het verschil met de RCM methodologie wordt niet in [5] beschreven, maar heeft vermoedelijk te maken met het specifiek meenemen van het risico op aanvaring in de berekening; er wordt namelijk in [5] voor de berekening van het risico op de externe gebeurtenis 'aanvaring' verwezen naar de handreiking kwantificering aanvaarrisico ([9]). Deze uitgebreide risicoanalyse wordt alleen voor de zes stormvloedkeringen uitgevoerd.

5.10.2 Handreiking kwantificering aanvaarrisico

Het document 'Handreiking kwantificering aanvaarrisico ([9])' richt zich specifiek op het modelleren en berekenen van de kans op aanvaring en op de aanvaarenergie. Het beperkt zich tot het risico van functieverlies van het object, oftewel, verlies van betrouwbaarheid en beschikbaarheid, net als de prestatiegestuurde risicoanalyses uit [5]. De methode richt zich echter specifiek op beweegbare objecten in de vaarweg (keringen, sluizen, keersluizen, stuwen en beweegbare bruggen). Het richt zich niet op niet-beweegbare objecten. Daarvoor wordt expliciet naar de ROK [2] verwezen ("Voor starre objecten en starre constructiedelen van beweegbare objecten voldoet het opvolgen van de ROK.") Er wordt hier echter geen verdere toelichting op gegeven.

Hoofdstuk 3 uit de handreiking beschrijft de stappen waarmee de kans op aanvaring kan worden berekend. De eerste stap hiervan is het onderscheiden van de verschillende scenario's die kunnen leiden tot een aanvaring. Ieder scenario is een samenloop van gebeurtenissen. De scenario's worden vervolgens gemodelleerd in een gebeurtenissenboom. Na inschatting van de kans op de individuele gebeurtenissen, kan vanuit de boomstructuur de kans op aanvaring worden berekend.

Er wordt ook hier benadrukt dat het niet alleen gaat om een scenario van alleen technisch falen van een schip. Bij beweegbare objecten is er vaak een samenspel van gebeurtenissen nodig, gebeurtenissen die individueel niet direct tot een aanvaring leiden, zoals het niet werken van een sein.

In Hoofdstuk 4 wordt vervolgens beschreven hoe de verdeling van aanvaarenergieën bepaald kan worden. Hierbij worden scheepskarakteristieken (scheepsmassa's), vaarsnelheden en zoneringen gebruikt.

Daarna wordt in Hoofdstuk 5 beschreven hoe een schatting kan worden gemaakt van het schade niveau. Daarin wordt ook vermeld dat hierbij de Eurocode wellicht te streng is, en dat voor bezwijken door scheepsaanvaringen vanwege het relatief kleine aantal verwachte slachtoffers lagere eisen mogelijk gerechtvaardigd zijn:

"De Eurocode normeert streng, omdat het in de bouw relatief goedkoop is om schade en slachtoffers te beperken. Maar in het geval van scheepsaanvaring kan het erg duur zijn om een constructie te maken die tegen de grote scheepskrachten

kan en is de kans dat er slachtoffers vallen erg klein. Dus is het zeer verstandig aan bepaalde constructiedelen veel lagere eisen te stellen.

Indien de geëiste faalkans, of beschikbaarheid, niet wordt bereikt, moet het ontwerp worden versterkt. Daarmee neemt het aantal schepen dat bezwijken kan veroorzaken af, waardoor de kans per jaar afneemt. Dit proces wordt herhaald tot aan de eis is voldaan.

Het is zelfs denkbaar dat niet van een vaststaande eis wordt uitgegaan, maar dat naar een economisch optimale situatie wordt gestreefd. De investeringskosten van een zwaarder ontwerp worden dan afgewogen tegen het rendement daarvan: minder schade en grotere beschikbaarheid. Uit dit proces volgt ten slotte een optimaal ontwerp, met een (te accepteren) aanvaarkans.

De specifieke eisen vanuit de Eurocode gelden echter alleen als er geen gerichte risicoanalyse aanwezig is. Het volgen van de hier beschreven methode aanvaarrisico levert een gerichte risicoanalyse op, waarmee de zeer zware specifieke eis voor aanvaarrisico uit de Eurocode terzijde gelegd kan worden. En hoewel de methode haar eigen conservatismen kent, zoals het niet plastisch vervormen van het schip, kan deze door een expert in de analysefase wel in de ontwerpberoeeningen toegevoegd worden aan de resultaten van de methode."

5.10.3 Aanvaring van vaste bruggen

In [9] wordt nadrukkelijk aangegeven dat de risicoanalyses op beweegbare bruggen gericht zijn, en niet op vaste bruggen. Daarvoor wordt verwezen naar de ROK [2]. Als aan de eisen aan de brug vanuit de ROK is voldaan, dan zou de kans op schade of zelfs instorten van de brug inderdaad te verwaarlozen moeten zijn.

In [5] wordt daarnaast aangegeven dat voor vaste bruggen kwalitatieve risicoanalyse volstaat, omdat dit soort objecten slechts een klein risico op ongeplande niet-beschikbaarheid van het netwerk heeft. Dit wordt dus echter vooral gezien vanuit de functie van het netwerk.

Er lijkt echter geen reden te zijn waarom de risicoanalyse methode niet op vaste bruggen zou kunnen worden toegepast. Er is, ten opzichte van beweegbare objecten, een versimpelde foutenboom te maken die leidt tot aanvaring van de brug. Er zijn bij een vaste brug bijvoorbeeld geen mechanische mankementen van de brug nodig om een directe aanvaring te veroorzaken. Het aantal individuele gebeurtenissen waarvoor een kans schatting moet worden gedaan, zal dus ook kleiner zijn.

Met een gegeven verkeersaanbod van verschillende scheepstypen en vaarsnelheden is een kansverdeling van aanvaarenergieën te berekenen, mogelijk nog in combinatie met stroomsnelheden en windrichtingen.

Het resultaat hiervan zou dus kunnen zijn dat de kans op het worst-case scenario wat betreft aanvaringen waarmee in de ROK wordt gerekend, aanvaardbaar klein is in termen van risicoanalyse. Of beter gezegd, met een risico norm en de energieverdeling van mogelijk aanvaringen, kan de energie uit de verdeling worden afgeleid die het natte kunstwerk moet kunnen verdragen. Deze waarde zal in ieder geval lager zijn dan het worst-case geval.

5.10.4 Kanttekeningen bij de handreikingen

De handreikingen stammen uit 2017 [9] en 2018 [5] en gelden voor objecten die expliciet zijn benoemd. Dit zijn 119 beweegbare bruggen, sluizen, aanleginrichtingen en tunnels, waaronder de nieuwe zeesluis bij IJmuiden. Weliswaar combineert en vervangt [5] de leidraden 'Leidraad RAMS' en 'Leidraad risicogestuurd beheer en onderhoud', maar het is niet bekend in hoeverre de beschreven stappen in de handreikingen ook de daadwerkelijke praktijk beschrijven.

Daarnaast is niet uit de documenten op te maken op welke punten de twee kwantitatieve methoden (RCM methode en de ProBO methode) van elkaar verschillen.