

6. ONTWERP

Om Bergenmeersen om te vormen van een gecontroleerd overstromingsgebied (GOG) naar een gecontroleerd overstromingsgebied met gecontroleerd gereduceerd getij (GOG-GGG) werden de bestaande dijken aangepast en bouwde men een nieuwe in- en uitwateringsconstructie. Dit hoofdstuk schetst het hydraulische en geotechnische ontwerp. Dat omvat de verhoging van de bestaande ringdijk rond het gebied, de nieuwe stabiliteitsberekeningen en de aangepaste bekleding langs de water- en landzijde. Ook de in- en uitwateringsconstructie wordt beschreven. In het ontwerp zijn de hydraulische randvoorwaarden van groot belang.

Auteurs: Ronny Van Looveren en Stoffel Moeskops (International Marine & Dredging Consultants - IMDC), Cathy Boone (Technum - Tractebel Engineering) en Patrik Peeters (Waterbouwkundig Laboratorium)

6.1 Hydraulische randvoorwaarden

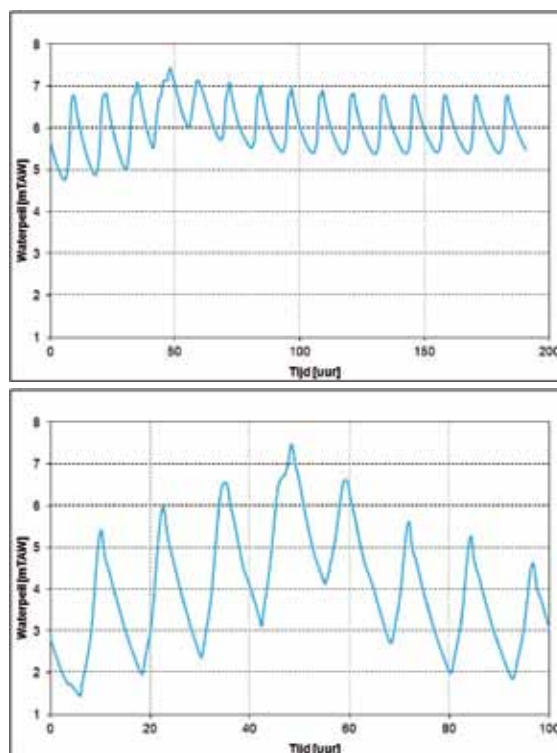
Deze hydraulische randvoorwaarden zijn belangrijk voor het ontwerp: waterpeilen, stroomsnelheden, windgolven en sloopgolven.

6.1.1 De waterpeilen

Voor het geactualiseerde Sigmaplan liggen de (dijk)kruinhoogtes vast. Ze werden voor het hele Sigmagebied bepaald op basis van een studie van de maatschappelijke kosten en baten. Uit de aannames van de actualisatiestudie voor het Sigmaplan volgt dat dijken langs de Zeeschelde en zijrivieren waterkerend moeten zijn tot waterstanden gelijk aan 0,5 m onder de dijkkruin. Ook niet-waterkerende infrastructuur zoals overlopdijken en in- en uitwateringsconstructies mogen bij die waterstanden niet constructief falen. Concreet betekent dat voor Bergenmeersen dat de constructies ontworpen worden voor een hoogwaterpeil van +7,5 m TAW.

Aan de te keren (of maatgevende) waterstand werd geen unieke herhalingsperiode toegekend. Door de gefaseerde realisatie van het geactualiseerde Sigmaplan zal in de periode 2010-2030 de veiligheid geleidelijk toenemen (of de kans op de maatgevende waterstand afnemen). Vervolgens zal het samenspel van klimaatverandering, economische en ecologische ontwikkelingen en bijkomende maatregelen de overstromingsrisico's op maatschappelijk aanvaardbare niveaus houden.

Naast het maximale waterpeil van +7,5 m TAW is ook het peilverloop van groot belang. Een snelle daling of stijging van het waterpeil zorgt bijvoorbeeld voor grote stroomsnelheden door de uitstroombouw heen. Als het



Afbeelding 6.1. Twee voorbeelden van peilvariaties gebruikt voor het ontwerp: kleine peilvariatie (boven) en grote peilvariatie (onder)

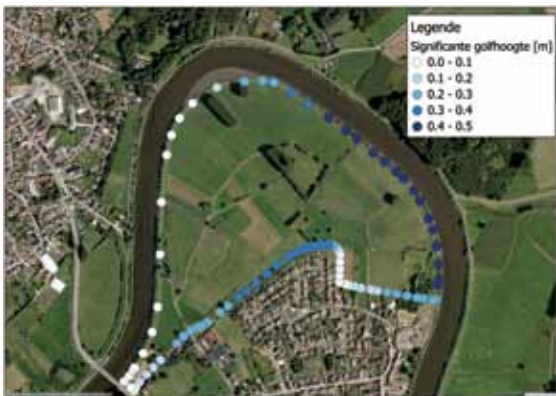
waterpeil lange tijd min of meer constant blijft, wordt een grasbekleding op de dijk zwaarder belast. Daarom werd met verschillende peilvariaties gerekend. In totaal hield men telkens met 15 verschillende hydrogrammen rekening. Die hydrogrammen werden bepaald op basis van een doorgedreven statistische analyse van de waterpeilen op de Schelde. Afbeelding 6.1 toont twee uitersten. Beide worden gekenmerkt door eenzelfde maximaal waterpeil van +7,5 m TAW, maar het peilverloop verschilt sterk.

6.1.2 Stroomsnelheden en golven

Naast de maatgevende waterstand wordt de belasting op de waterbouwkundige constructies ook veroorzaakt door stroomsnelheden, scheepsgolven en windgolven. De stroomsnelheden werden bepaald op basis van eendimensionale hydrodynamische simulaties van de Schelde; de scheepsgolven zijn berekend met de methode van DIPRO. Aan de maatgevende scheepsgolven en stroomsnelheden werd, net als bij de waterpeilen, geen herhalingstijd toegekend.

Windgolven zijn daarentegen wel ingeschat voor verschillende herhalingstijden. Ze werden berekend met de empirische formule van Wilson, gegeven de windrichting, windsnelheid en strijklengte, en vervolgens gecombineerd met de maatgevende waterstanden.

Afbeelding 6.2 toont een voorbeeld van de windgolfbelasting op de zijde van de overlooptdijk en de ringdijk van het overstromingsgebied. De oostelijke dijksegmenten worden duidelijk zwaarder belast dan de westelijke segmenten.



Afbeelding 6.2. Windgolfbelasting op de dijken van Bergenmeersen

6.2 Dijken: berekeningsmethode en veiligheid

6.2.1 Algemeen

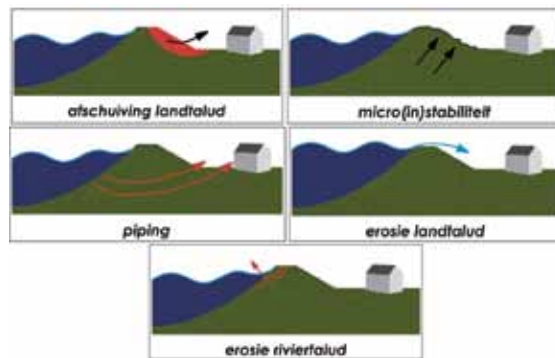
Bergenmeersen wordt omringd door dijken met een totale lengte van 3,2 km, waarvan 2 km overlooptdijk en 1,2 km ringdijk. De kruin van de overlooptdijk bevindt zich op +6,4 m TAW, de kruin van de ringdijk op +8 m TAW. De taluds zijn relatief flauw en hebben een helling van 12/4 aan de Scheldezijde en 16/4 aan de landzijde.

De dijken werden gecontroleerd op hun algemene stabiliteit (afschuiving van het landtalud dan wel riviertalud),

op opbarsten van de waterkerende laag (microstabiliteit) en op sijperosie (*piping* en *heave*) onder en langs de dijk.

De landzijde van de overlooptdijk wordt belast door de hoge stroomsnelheden van het overtoppende water bij vulling van het overstromingsgebied. De landzijde van de ringdijken kan worden belast door overslaand water als gevolg van windgolven. Een gepaste bekleding moet verhinderen dat er door die fenomenen erosie van het landtalud optreedt. Er werd zoveel mogelijk gestreefd naar een natuurlijke oplossing.

De waterzijde van de ringdijk wordt belast door golfklap van windgolven. Opnieuw beschermt een gepaste maar liefst zo natuurlijk mogelijke bekleding de dijk tegen de eventuele erosie van het riviertalud.



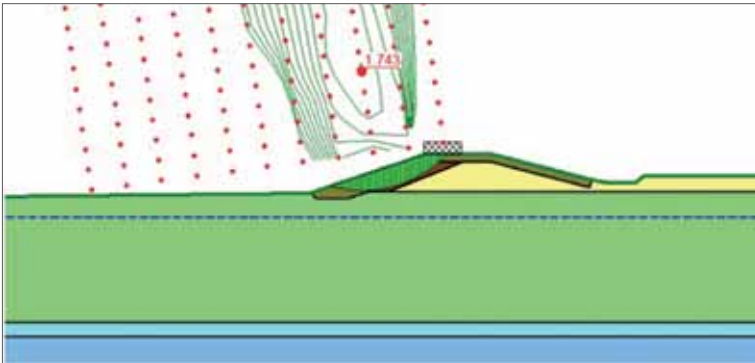
Afbeelding 6.3. Onderzochte faalmechanismen

Zettingen zijn strikt genomen geen faalmechanisme. Er werden evenwel zettingsberekeningen uitgevoerd om de initiële verhoogte van de dijken te kunnen bepalen.

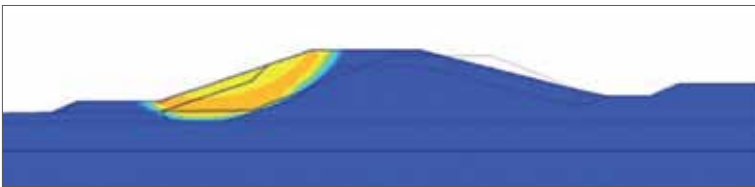
6.2.2 Algemene stabiliteit

Voor de controle van de algemene stabiliteit werden zowel stationaire (met constante waarden voor de waterpeilen) als niet-stationaire berekeningen (met variabele waterpeilen) gemaakt. De berekeningen werden uitgevoerd met het eindige-elementenpakket Plaxis en in Geostudio.

In Plaxis werd ook een ongedraineerde berekening uitgevoerd. Daardoor kan men rekening houden met de uitvoeringstermijn van de verschillende bouwfases. De stabiliteit in Plaxis werd bepaald aan de hand van de ϕ - c -reductie. Binnen die berekening wordt de $\tan \phi$ en cohesie c van de grond geleidelijk aan gereduceerd tot dat een falen van (een deel van) de structuur optreedt.



Afbeelding 6.4. Voorbeeld van een afschuiving ter hoogte van de sondering GEO-08/228-S7 (buitenwaarts LW linear, Geostudio)

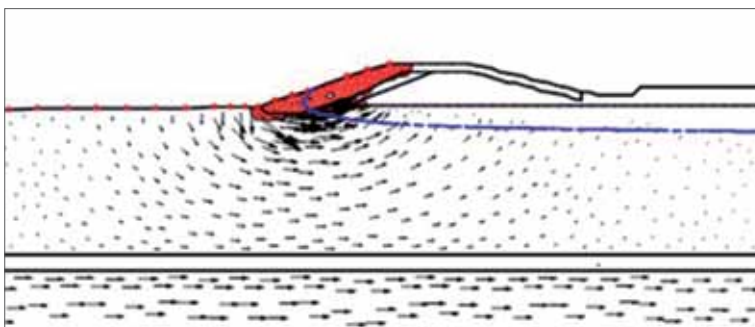


Afbeelding 6.5. Voorbeeld van een afschuiving ter hoogte van de sondering GEO-08/228-S7 (geconsolideerd LW Plaxis)

Voor de tussentijdse fasen (zoals de opbouw van de zandkern) werd een minimale veiligheid van 1.1 vereist; voor de finale fase (opbouw finaal dijkprofiel, al dan niet volledig geconsolideerd) een minimale veiligheid van 1.3. Voor alle dijksegmenten werd die waarde bereikt. Afbeelding 6.4 en Afbeelding 6.5 geven twee typische resultaten van die modellering weer.

6.2.3 Opbarsten

Om opbarsten te vermijden werd gecontroleerd of de opwaartse waterdruk onder de waterdichte laag aan landzijde groter is dan het eigengewicht van het grondpakket. Als dat het geval is, zal er grond worden opgedrukt en een lek ontstaan aan landzijde. Als dat fenomeen optrad, werd verder gecontroleerd of de



Afbeelding 6.6. Strooming ter hoogte van sondering GEO-08/228-S7. Er is strooming onder de dijk, maar het uitstroomverhang overschrijdt de kritieke waarde niet.

resulterende strooming door de dijk beperkt blijft. Voor de dijken van Bergenmeersen werden geen problemen van opbarsten vastgesteld.

6.2.4 Sijperosie

Twee types van sijperosie spelen een rol: *pipng* (onderloopsheid) en *heave* (opdrijven). Piping ontwikkelt zich langs de onderkant van de constructie, min of meer in horizontale richting. Hierbij wordt een erosiekanaal gevormd. Heave is verticaal gericht en wordt geassocieerd met het verdwijnen van de effectieve korrelspanningen. De zandkorrels worden als het ware door het water opgetild en weggespoeld. Het kritieke (uitstroom)verhang wordt beperkt tot 0,5.

Voor dijken op een goed doorlatende en cohesieloze ondergrond is piping niet relevant. Als materiaal uitspoelt bij de binnentee van de dijk, kan er geen piping ontstaan. Dat komt omdat het gat direct weer instort, omdat zand cohesieloos is. Voor dijken op een slecht doorlatende en cohesiehoudende ondergrond (klei en veen) zal piping pas ontstaan als de grond buitenwaarts de dijk is kunnen opbarsten.

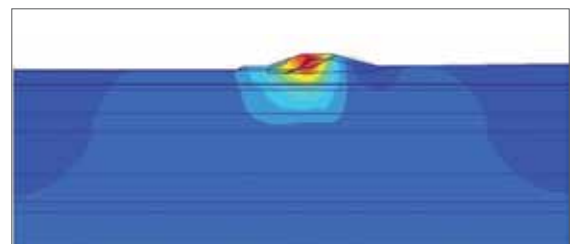
Als de afmetingen aan een van onderstaande criteria voldoen, is er geen gevaar voor piping:

- opdrukveiligheid: $\Delta g / \Delta w > 1$
- $L / 18 > \Delta H - 0,3 d$

Voor Bergenmeersen werden er geen problemen van sijperosie vastgesteld.

6.2.5 Zettingen

Ook als de dijken zijn aangelegd, treden nog verdere zettingen op. De zettingen werden gecontroleerd met behulp van Plaxis en geverifieerd via handberekeningen (volgens Terzaghi). Vooraf werd op basis van de grondkarakteristieken en lagenopbouw een keuze gemaakt van waar de minimale en maximale zettingen verwacht worden (op basis van de sonderingsnummers).



Afbeelding 6.7. Verticale verplaatsingen ter hoogte van de sondering S5, geconsolideerde toestand (Plaxis, maximaal 13 cm)

De zettingen werden gecontroleerd in gedraineerde en ongedraineerde toestand. Voor de ongedraineerde toestand werd een realistische inschatting gemaakt van de minimale uitvoeringsperiodes voor de verschillende fasen. Op die manier hield men rekening met de verwachte consolidatie van de materialen.

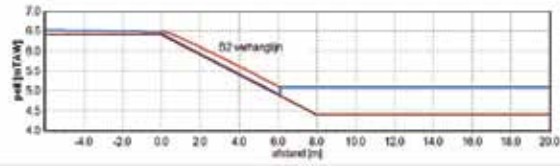
De zetting van de ringdijk bedraagt 3 à 13 cm. Er werd voorgesteld die dijk ter plaatse van de kruin met een overhoogte van 15 cm aan te leggen en de overhoogte te laten afnemen naar 0 cm naar de teen van de dijk toe.

6.2.6 Erosie van het landtalud

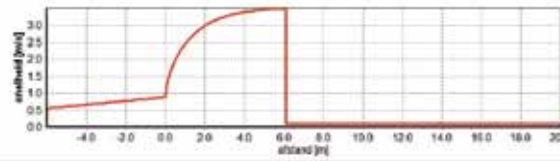
Het water dat over de overlooptdijk stroomt, kent grote snelheden en kan erosie veroorzaken aan het talud en de teen van de dijk aan de kant het overstromingsgebied. Om dijkinstabiliteiten te voorkomen voorziet men in een taludbescherming en een bodembescherming aan de teen.

Afwaarts van de teen van de dijk gaat de superkritische stroming over het talud over in een subkritische stroming. Dat gebeurt met een watersprong. Om de watersprong te lokaliseren boven de bodembescherming plaatst men aan de voet van de overlooptdijk een energiedissipator. Die wordt uitgevoerd onder de vorm van een beklede gracht die niet alleen water afvoert, maar ook als dissipator werkt.

Voor de dimensionering van de energiedissipatiegracht werd een softwareprogramma ontwikkeld dat de waterstanden en stroomsnelheden berekent vanaf de kruin van de overlooptdijk, over het talud en in de gracht, tot in het overstromingsgebied. Bij de berekeningen hield men rekening met de vulling van het achterliggende gebied. Het resultaat: een gracht met een diepte van 0,5 m, een bodembreedte van 2 m en 8/4 taludhellingen volstaat om de watersprong te fixeren.



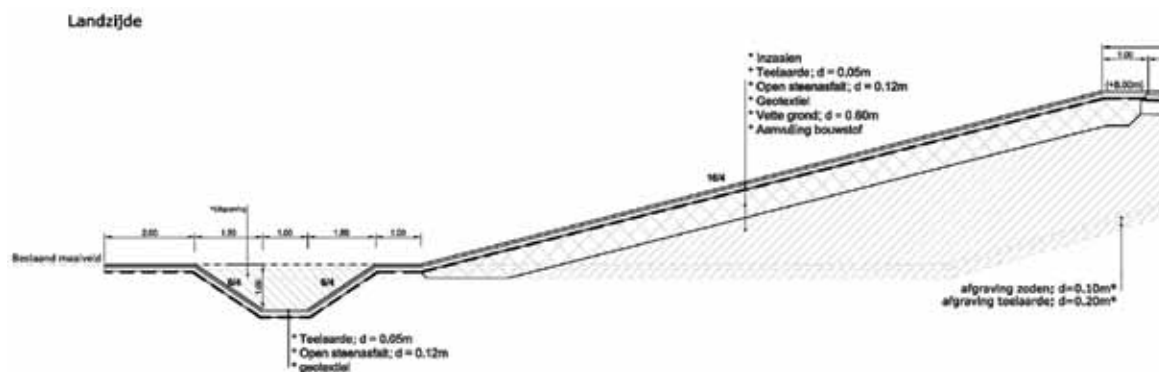
Afbeelding 6.8. Berekening van de verhanglijn over de overlooptdijk



Afbeelding 6.9. Snelheden van het stromende water over de overlooptdijk

De maximale watersnelheid op de overlooptdijk wordt bereikt tussen het begin van de overloop en het maximale peil in het overstromingsgebied. Voor Bergenmeersen bedraagt de maximale stroomsnelheid 6,3 m/s. De meest geschikte taludbescherming op de dijk is in dat geval open steenasfalt (OSA). De open structuur vermijdt dat er wateroverdrukken vanuit de dijk inwerken op de bekleding. Om erosie te vermijden moet ook de gracht bekleed worden met OSA. Die bekleding zal in de richting van de polder worden doorgetrokken over een afstand van 2 m.

Ook de landzijde van de ringdijk kan door de stroming van het water belast worden. De ringdijk is hoger dan de overlooptdijk en kan dus niet rechtstreeks overstromen. Wel kunnen bij heel uitzonderlijke situaties windgolven over de dijk slaan. Dat golfoverslagdebiet werd berekend. Een goede grasbekleding bleek te volstaan om erosie door overslag te voorkomen.

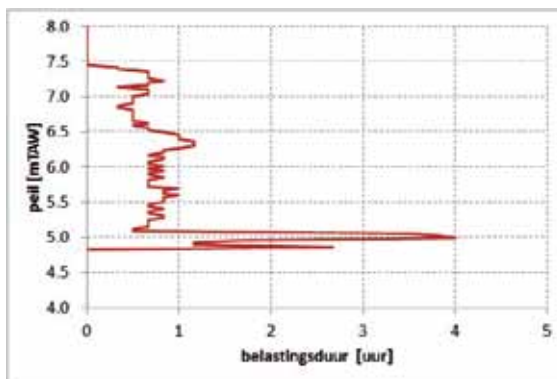


Afbeelding 6.10. Algemene opbouw van de bekleding van de overlooptdijk

6.2.7 Erosie van de waterzijde van de ringdijk

Dat is in principe het faalmechanisme van erosie van het riviertalud. Voor het talud van de ringdijk aan de kant van het overstromingsgebied wordt de maatgevende belasting veroorzaakt door windgolven. Die windgolven werden berekend met de empirische formule van Wilson. De uiteindelijke golfhoogte kan oplopen tot 0,32 m voor een terugkeerperiode van 100 jaar en tot 0,39 m voor een terugkeerperiode van 4000 jaar.

In eerste instantie werd onderzocht of gras met daaronder een goede kleilaag volstaat als bekleding van de dijk. Voor gras is naast de golfhoogte ook de duur van de belasting zeer belangrijk. Vooral het onderste deel van de dijk wordt langdurig door windgolven belast. Afbeelding 6.11 toont dat voor een van de doorgerekende hydrogrammen.



Afbeelding 6.11. De totale belastingduur van windgolven op verschillende hoogtes op het talud van de ringdijk

Voor de lagere delen van de dijk bleek een grasbekleding op zich niet voldoende. Daarom wordt gezocht naar een combinatie van breuksteen en gras als bekleding. Uit de berekeningen blijkt dat er voldoende sterkte wordt geleverd als de onderste 1,5 m van de dijk bekleed is met breuksteen (laagdikte 45 cm met standaardsoortering van 5 tot 40 kg) en de bovenste 3 m met goed erosiebestendig gras.

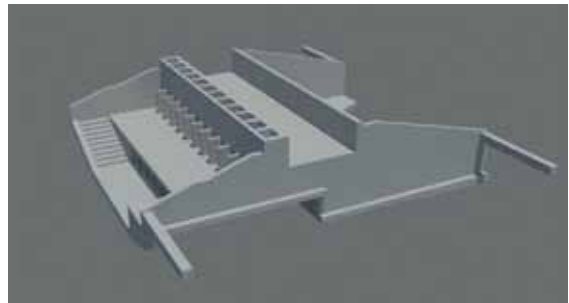
6.3 In- en uitwateringssluis

6.3.1 Algemeen

Er werd gekozen voor een structuur waarbij de inwateringskokers zich boven de uitwateringskokers bevinden. De voordelen van die configuratie werden hierboven al besproken. Voor de inwatering werden 6 kokers geplaatst, elk met een breedte van 3 m en een hoogte van 2,2 m. Via schotbalken kan het gewenste drempelpeil per koker nog aangepast worden. Voor de uitwatering zijn 3 kokers nodig. Die zijn ook 3 m breed, maar slechts 1,1 m hoog.



Afbeelding 6.12. De Scheldezijde van de in- en uitwateringsstructuur. Onderaan zijn de 3 uitwateringskokers zichtbaar (elke koker bestaat uit 2 delen), bovenaan de 6 inwateringskokers (die ook uit 2 delen bestaan).



Afbeelding 6.13. Zijzicht van de in- en uitwateringsstructuur



Afbeelding 6.14. De polderzijde van de in- en uitwateringsstructuur. Een aantal van die kokers dient enkel voor inwatering. De middelste kokers worden zowel voor inwatering als uitwatering gebruikt.

6.3.2 Dimensionering

De dimensionering van de uitwateringsstructuur is gebaseerd op de Europese normen en richtlijnen.

Volgende belastingen grijpen in op de constructie:

- Eigengewicht van de structuur en haar onderdelen.
- Gronddrukken.
- Waterstand Schelde: de waterdruk op de constructie wordt berekend volgens het ontwerppeil (7,5 m TAW). Om er zeker van te zijn dat de situatie met de meest nadelige impact in rekening wordt gebracht, werden verschillende scenario's bestudeerd. Er zijn vier soorten belastingen: waterdruk op de even kokers, op de oneven kokers, waterdruk aan de Scheldezijde en aan de zijde van het overstromingsgebied. Alle belastinggevallen zijn onderling gecombineerd.

- Waterdruk bij opdrijven: het meest nadelige scenario voor het opdrijven werd bestudeerd. Dat vindt plaats net voor een vulling van het overstromingsgebied. De Schelde staat dan even hoog als de overlooptdijk, het overstromingsgebied staat droog en de wandafsluiters en terugslagkleppen zijn gesloten. De waterdrukken zijn onderzocht volgens het ontwerppeil.
- Verkeerslasten op de kruin van de dijk: de verkeerslast op de dijkbaan is bepaald volgens de norm ENV 1991-3 (2002). Hoewel op de rijbaan van Bergenmeersen slechts één theoretische rijstrook nodig is, werd de keuze gemaakt om twee theoretische rijstroken te bestuderen. Dat scenario kan zich voordoen bij eventuele plaatsing van aanhorigheden of onderhoudswerken waarbij twee voertuigen naast elkaar boven de constructie staan. Er werden twee scenario's beschouwd die elkaars spiegelbeeld zijn. In elk van de scenario's worden de rijstroken belast met een UDL (*uniformly distributed load*) en een konvooi. Het konvooi is op verschillende plaatsen op de rijstrook gezet om de meest negatieve belastingen te verkrijgen. De UDL 1 is ook op de zijwanden van de constructie geplaatst om eventuele belastingen naast de constructie te kunnen weerstaan.
- Overlasten: de looproosters en toegankelijke zones zijn berekend met een overlast van 300 kg/m².

De verschillende belastingsgevallen werden samengesteld tot combinaties. Er werden drie belangrijke situaties bekeken. De eerste situatie omvat de gronddruk en de overlast op de rijbaan. In die combinaties hield men rekening met de verschillende plaatsen van de konvooiën. De tweede situatie omvat de grond- en waterdrukken. In die combinaties hield men rekening met de verschillende scenario's van de waterstanden. De derde situatie omvat de grond- en waterdrukken gecombineerd met de eenparig verdeelde overlast op de dijkbaan.

De funderingskarakteristieken zijn gebaseerd op de studie van de dijklichamen. De constructie is berekend op een verende bedding. Er wordt uitgegaan van karakteristieken voor grond die herbelast wordt.

De milieuklasse en de omgevingsklasse zijn vastgelegd op respectievelijk XC4 en EE3.

De constructie (betonnen structuur en stalen liggers) is berekend met het eindige-elementenpakket SCIA Engineer. De resultaten van het rekenmodel werden gebruikt om de wapening te berekenen. Die berekening gebeurde op basis van EN 1992-1-1 (2005) en afzonderlijk voor elk element in de constructie. De maximumcapaciteit voor de elementen werd bepaald met een standaard-

net. Waar overschrijdingen zijn vastgesteld, werd er bijlegwapening of een aangepast net bepaald.

Bij een controle van het opdrijven, de zettingen en de contactspanningen werden er bij het meest nadelige scenario voor het opdrijven nog steeds zettingen gevonden tussen 1 en 10 mm. Uiteindelijk bleven de relatieve zettingen beperkt tot 5 mm, wat binnen de aanvaardbare grenzen ligt.

6.3.3 Aanpassingen van het ontwerp

Het oorspronkelijke ontwerp werd aan verschillende diensten binnen de Vlaamse overheid voorgesteld. Ook de bevolking kreeg die plannen te zien. Het doel: een draagvlak creëren voor de plannen en ze waar nodig aanpassen.

Op aangeven van de dienst die het beheer en het onderhoud zal uitvoeren, zijn er bijkomende aanpassingen om de veiligheid en toegankelijkheid van de structuur te verbeteren. Zo kwam er een extra toegang, zoals een trap. Er werd ook voor gezorgd dat men de vuilroosters eenvoudig kan verwijderen. Een antidiefstalsysteem moet dan weer voorkomen dat het rooster wordt meegenomen.

De achterliggende woonwijk en het daar opgerichte actiecomité waren bezorgd over het effect van zwerfvuil. Dat zou bij de dagelijkse werking via de sluis in het gebied kunnen stromen. Daarom werd het vuilrooster extra vernauwd (van een tussenafstand van 10 cm naar 5 cm), maar zonder de passeerbaarheid van de constructie voor vissen in het gedrang te brengen.

6.4 Referenties

- **Handleiding DIPRO** (1997), Waterloopkundig Laboratorium Delft
 - **Studie ten behoeve van aanleg van overstroomingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigma-plan - Ondersteunende studies: Kalkense Meersen.** L. Coen et al. (2008), WL Rapporten, 713/15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
 - **Onderzoek naar de maximale waterstanden van de Schelde te Doel. Deelrapport 2: Statistische analyse.** I/RA/14098/06.152/JBL. Studie uitgevoerd in opdracht van Tractebel Engineering. IMDC, 2006
 - **Onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse winterdijken. Windgolfbelasting in het bekken van de Zeeschelde.** I/RA/11279/10.126/MOE. Studie uitgevoerd in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium van Borgerhout. IMDC, 2010
 - **Studie ten behoeve van aanleg van overstroomingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigma-plan - Hydraulische randvoorwaarden voor toetsen op en ontwerpen naar veiligheid.** P. Peeters et al. (2009), WL Rapporten, 713/15a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
 - **Technisch rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken.** TAW, 2002
 - **Actualisatie van het Sigma-plan. Integrale verkenning Scheldebekken. Deelopdracht 3. Hydrologische en hydrodynamische modellen. Volume 2a: Hydrodynamisch model Scheldebekken.** I/RA/11199/03.003/SME. Studie uitgevoerd in opdracht van W&Z afdeling Zeeschelde. THV Sigma, 2003
 - **Actualisatie van het Sigma-plan. Integrale verkenning Scheldebekken. Deelopdracht 3. Hydrologische en hydrodynamische modellen. Volume 1a: Statistiek Scheldebekken.** I/RA/11199/03.027/JBL. Studie uitgevoerd in opdracht van W&Z afdeling Zeeschelde. THV Sigma, 2003
 - **Sigma-plan. Maatschappelijke Kosten-Baten-Analyse. Deelopdracht 1. Faserapport 1. Composittrandvoorwaarden.** I/RA/14082/03.055/JBL. Studie uitgevoerd in opdracht van W&Z afdeling Zeeschelde. THV Sigma, 2005
-