



Snood ontwerp bij inpassing sluisdeuren



Het contract van Rijkswaterstaat vereist een sluiscomplex uitgevoerd met roldeuren. Het ontwerp en de uitvoering worden gedicteerd door de ligging van de sluis tussen de bestaande operationele sluisen. Vanwege het beperkte ruimtebeslag van de naastgelegen Noordersluis, heeft de nieuwe sluis geen omloopriolen maar is het nivelleersysteem geïntegreerd in de roldeuren. Ook is een traditioneel bewegingswerk niet inpasbaar. De vereiste prestaties aan sluisdeuren en bewegingswerk waren zeer bepalend voor het ontwerp. Dat heeft geleid tot een ontwerp dat niet als standaard kan worden omschreven.

ir. P.J.C. van Lierop en ing. D.W. Alsemgeest PMSE

Pieter van Lierop is Adjunct-Directeur Iv-Infra in Haarlem en Ontwerpleider Deuren en Bewegingswerk OpenIJ. Dennis Alsemgeest is Hoofdconstructeur Stalen en Beweegbare Kunstwerken Iv-Infra in Sliedrecht, en Hoofdconstructeur Deuren OpenIJ.

Foto: Rijkswaterstaat



1. Overzicht sluiscomplex..

Na bijna 100 jaar is de bestaande Noordersluis in IJmuiden vervangen door een nieuwe, grotere sluis om de bereikbaarheid van de haven van Amsterdam te garanderen en te vergroten. Wat betreft de afmetingen van de sluiscolk van 500 m lang, 70 m breed en 18 m diep is de Zeesluis IJmuiden de grootste ter wereld. De haven van Amsterdam is hiermee toegankelijk voor de nieuwste generatie zeeschepen. Met een kerende hoogte van 8,85 m +NAP is de nieuwe sluis, die tevens dient als primaire watering, klaar voor de toekomst.

Vanwege het naderende einde van de technische en economische levensduur van de Noordersluis is de nieuwe sluis nodig. Omdat de toekomstige zeeschepen steeds groter worden, is het bovendien wenselijk om een nieuwe sluis te bouwen die breder en langer is dan de bestaande sluisen. Hierdoor wordt tegelijkertijd de capaciteit van het sluisencomplex vergroot. Als onderdeel van het Sluisenprogramma van Rijkswaterstaat is de nieuwe IJmond-zeetoegang als DBFM-contract op de markt gezet en na een tenderfase van een jaar gegund aan consortium OPENIJ. Dit consortium van BAM-PGGM, VolkerWessels en DIF is verantwoordelijk voor het

ontwerpen, bouwen, financieren en 26 jaar onderhouden van de nieuwe zeesluis.

Vereiste prestaties

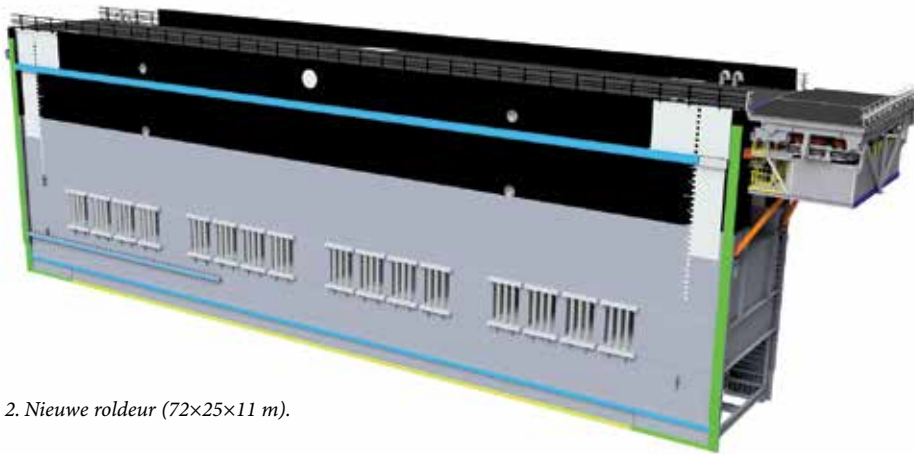
De goede werking van een schutsluis wordt in belangrijke mate bepaald door de sluisdeuren en de bewegingswerken. Omdat de prestatie-eisen, ruimtelijke randvoorwaarden en omgevingscondities per sluis verschillen, vraagt elke sluis om een specifiek ontwerp van de deuren en is geen standaardoplossing voorradig. Zo ook bij de nieuwe zeesluis van IJmuiden, waar het ontwerp van de roldeuren (afb. 2), met een lengte van 72 m, een breedte van 11 m en een hoogte van 25 m, in belangrijke mate wordt gedictieerd door de vereiste betrouwbaarheid en robuustheid, en het beperkte ruimtebeslag.

De nieuwe sluis bevindt zich tussen de bestaande Middensluis en Noordersluis, die tijdens de bouw grotendeels openblijven voor scheepvaart en wegverkeer (afb. 4). De beperkte beschikbare breedte waarbinnen de nieuwe sluishoofden en de roldeuren moeten worden ingepast, zorgt voor een ontwerp-opgave waarbij alles uit de kast moeten worden gehaald. Roldeuren met een conventionele kabelaanrijving, zoals zoals toegepast bij

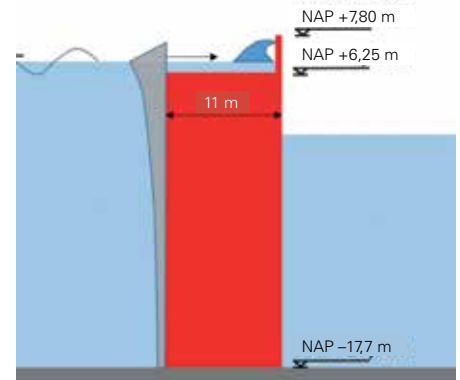
vrijwel alle grote roldeuren, vallen hierdoor af. Er moeten innovatieve oplossingen worden bedacht, die tegelijkertijd voldoende betrouwbaar zijn met een minimale onderhoudsinspanning.

Betrouwbaarheid

Het waterpeil op het Noordzeekanaal bedraagt 0,40 m -NAP. Om te voldoen aan de vereiste betrouwbaarheid van de hoogwaterkeringsfunctie worden zowel het buiten- als het binnenhoofd uitgelegd op de maatgevende waterkerende hoogte. Omdat tijdens het schutproces altijd een van beide hoofden gesloten is, volstaat een ontwerp met twee operationele deuren. Bovenop beide deuren is een verkeersweg voorzien om het wegverkeer het sluisencomplex te laten passeren. Ten behoeve van het wegverkeer is de hoogte van de deur vastgesteld op 6,25 m +NAP, waarbij een extra keerwand op dekniveau als hoogwaterkering dient (afb. 3). In verband met het creëren van een goede aansluiting met de kerende wand op het omringende sluishoofd is de kering op de deur aan de laagwaterzijde gepositioneerd. Consequentie hiervan is, dat de wand tijdens hoogwatercondities zwaarder belast kan worden door over-



2. Nieuwe roldeur (72×25×11 m).



3. Hoogwaterkering.

lopende golven over de breedte van het dek. Vanwege het ontwerpbesluit om de volledige sluis op de maatgevende waterkerende hoogte uit te leggen, zijn drie identieke en onderling uitwisselbare sluisdeuren gebouwd: twee operationele deuren en één reservedeur die zich in een onderhoudsdok naast het binnenhoofd bevindt (afb. 5).

Beschikbaarheid en onderhoudsbaarheid

Naast het maken van een betrouwbare hoogwaterkering, moet tegelijkertijd ook een veilige en snelle doorvaart van schepen mogelijk worden gemaakt. De vereiste beschikbaarheid van deze schutfunctie houdt in, dat er niet meer dan 70 uur per jaar beschikbaar is voor gepland onderhoud en dat er maximaal 18 uur per jaar beschikbaar is voor het oplossen van onverwachte storingen. Een sluis met dubbele deuren per sluishoofd is een voor de hand liggende keuze. Echter zou dit een nog langere sluis tot gevolg hebben door de extra deuren en de inpassing daarom nog complexer maken.

Aan de hand van faalkansanalyses is aangetoond dat de vereiste beschikbaarheid ook te halen is met twee operationele deuren en één reservedeur, waarbij een geplande deurenwissel niet meer tijd in beslag gaat nemen dan 24 uur. Om aan de beschikbaarheidseisen te voldoen, worden de deuren eenmaal in de 15 jaar uitgewisseld. Dit gegeven vormt een belangrijke randvoorwaarde voor het ontwerp van de roldeuren, die daarom zijn ontworpen volgens het 'kruiwagenprincipe'.

Net als bij een kruiwagen rust de roldeur aan de voorzijde op een onderrolwagen en aan de achterzijde op een bovenrolwagen (afb. 6). Dit heeft als voordeel dat de lengte van de railbaanconstructies en het aantal bewegende onderdelen onder water beperkt is. De bovenrolwagen en railbaanconstructie in de deuren zijn goed inspecteerbaar en



4. Bouwplaats middenin bestaand sluiscomplex (februari 2018).

bereikbaar voor onderhoud. De bovenrolwagen doet eveneens dienst als wegplateau waarop het wegverkeer de sluisdeur op en af kan rijden.

Om het aantal onderhoudsgevoelige bewegende delen te minimaliseren, wordt voor de horizontale geleiding van de deur – in plaats van geleidewielen – gebruik gemaakt van glijblokken en UHWMPE-geleidingsstroken. De glijblokken zijn, vanwege de zware omgevingscondities, vervaardigd uit superduplex roestvast staal. In geval van een kritieke schade aan de rails of aan de horizontale geleidingen, die zich onder water bevinden, kan de railbaanconstructie waar deze onderdelen op zijn gemonteerd in zijn geheel uit de betonnen drempel worden getild en vervolgens worden vervangen.

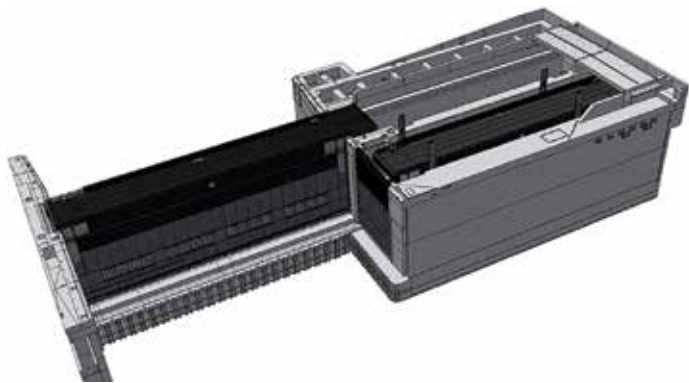
Deurconstructie

Staalconstructie

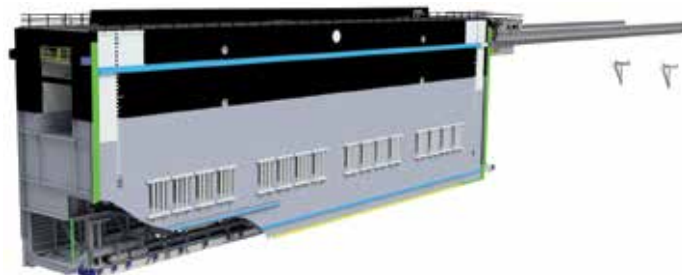
Door de getijdengang van de zee zal de waterstand dagelijks afwisselend positief en

negatief schommelen ten opzichte van het kanaalpeil, met een resulterend maximaal positief verval over de deur van $\pm 8,50$ m of negatief verval van $\pm 3,25$ m. De sluisdeuren zijn daarom dubbelzijdig kerend uitgevoerd. De staalconstructie, volledig vervaardigd uit S355N en S355J2+N, is opgebouwd uit twee waterkerende huidplaten aan beide zijde van de deur, met daartussen vier horizontale plaatvloeren. De plaatvloeren gedragen zich met meewerkende huidplaat samen als horizontale liggers op twee steunpunten die de waterbelasting in globale zin afdragen naar de wanden van het sluishoofd. De integriteit van de constructie wordt gewaarborgd door verticale verbandframes.

De horizontale plaatvloeren worden benut om verschillende functionaliteiten in de deur te voorzien. De bovenplaat wordt gebruikt als wegdek. Met de drie lagere niveaus wordt een drijfkist gevormd, die door verticale wanden wordt gecompartmenteerd tot verschillende drijf- en ballasttanks. Onder deze drijfkist



5. Binnensluishoofd met onderhoudsdok.



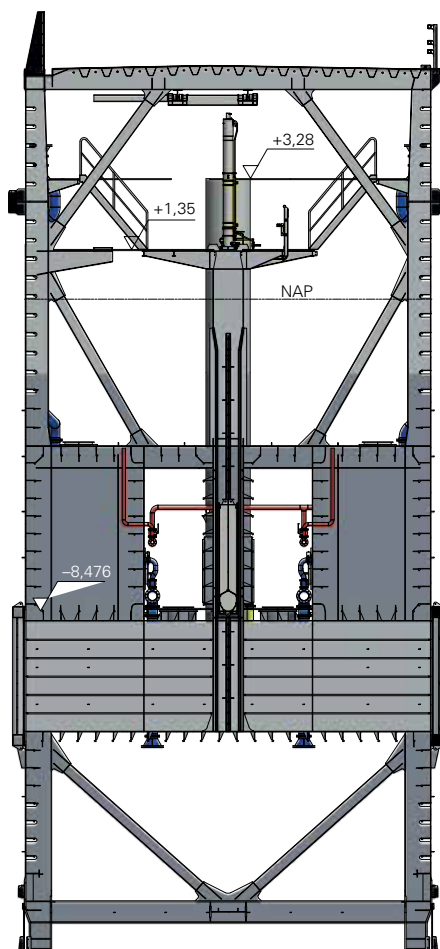
6. Roldeur type 'kruiwagen' met horizontale geleidingen.

bevinden zich zestien nivelleerkokers (afb. 7). De ruimtelijke structuur boven en onder de drijfkist is verder zo open mogelijk gehouden om het zogenaamde 'piston'-effect te minimaliseren. De openende en sluitende beweging van de deur in de deurkas, kan gezien worden als een zuiger die beweegt in haar behuizing. Dit levert weerstand op dat moet overwonnen door het bewegingswerk van de deur.

De deur werkt bij dagelijks schutpeil als een tweezijdig opgelegde buigligger. Bij extremere waterstanden, golven of aanvaringen wordt de belasting op de wanden van het sluishoofd ontlast door een deel van deze belasting af te dragen via de kolommen in het onderste deel van de deur naar de betonnen drempelconstructie. Onderin zijn de frames gekoppeld door een zware ligger in het midden van de deur. Deze ligger zorgt in geval van aanvaring dat de lokaal hoge impactbelasting wordt gespreid over meerdere frames.

De aanslaglijst rondom (zowel langs de wanden als de drempel) bestaat uit aaneensluitende UHMWPE-blokken op de deur die de belasting afdragen aan granieten blokken aan de zijde van het sluishoofd. Hiermee wordt tevens de waterafdichting verzorgd. Het verschil in doorbuiging van de onderzijde van de deur langs de rechte drempelaanslag wordt ondervangen door de UHMWPE-blokken te plaatsen op een flexibele stalen plaat. Tussen de kolommen en deze verende plaat bevindt zich een speling, die naar het midden van de deur steeds groter wordt. Dit is gedaan om de drukverdeling bij een doorgebogen deur over de lengte van de dorpel zo gelijk mogelijk te houden.

De waterkerende huid van de deur is verstijfd met zogenaamde 'Holland'-profielen. Dit zijn bulbvormige verstijvers, veelvuldig toegepast in de scheepsbouw. Deze profielen hebben in vergelijking met T-verstijvers een smalle, ronde kop. Dit heeft voordelen voor wat betreft de beperking van vuilophoping, water- of luchtinsluiting en is eenvoudiger te conserveren. Nadeel is dat wanneer het



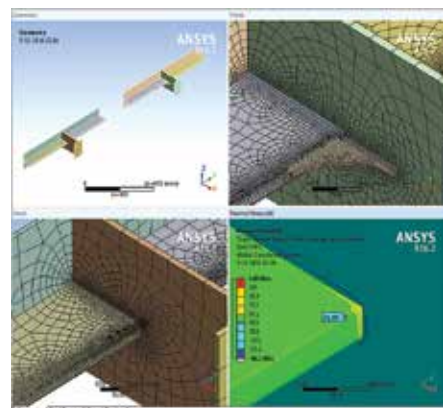
7b. Dwarsdoorsnede.

bulbprofiel volledig moet worden aangesloten, er een arbeidsintensieve en kostbare las moet worden gemaakt, mede ingegeven door de hoeveelheid niet-destructief onderzoek en herstelwerk.

In het ontwerp is dit laswerk vereenvoudigd door de aansluitingen te voorzien van spanningsverlagende schotjes (afb. 8), waardoor de spanningen zodanig laag konden blijven in het Holland-profiel dat het aantal noodzakelijke



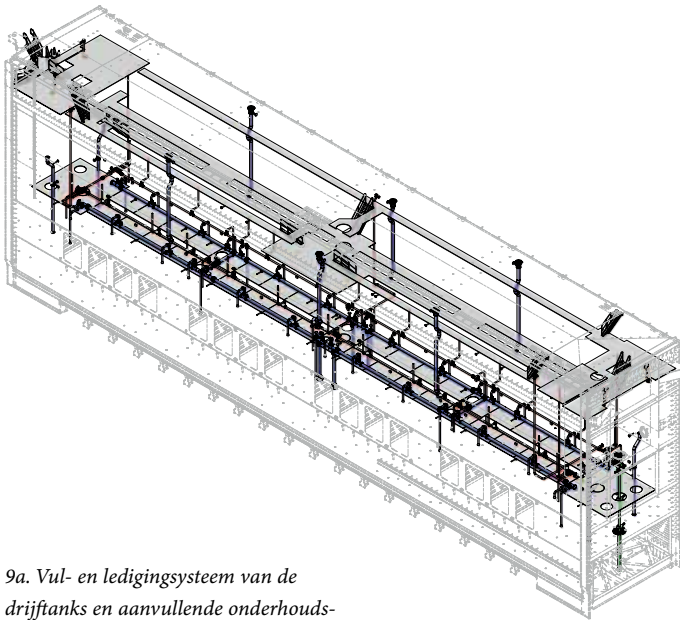
7a. Staalconstructie deur (zonder buitenbeplating).



8a. EEM-modellen vermoeiingsdetail.

8b. Detail aansluiting bulbprofiel.

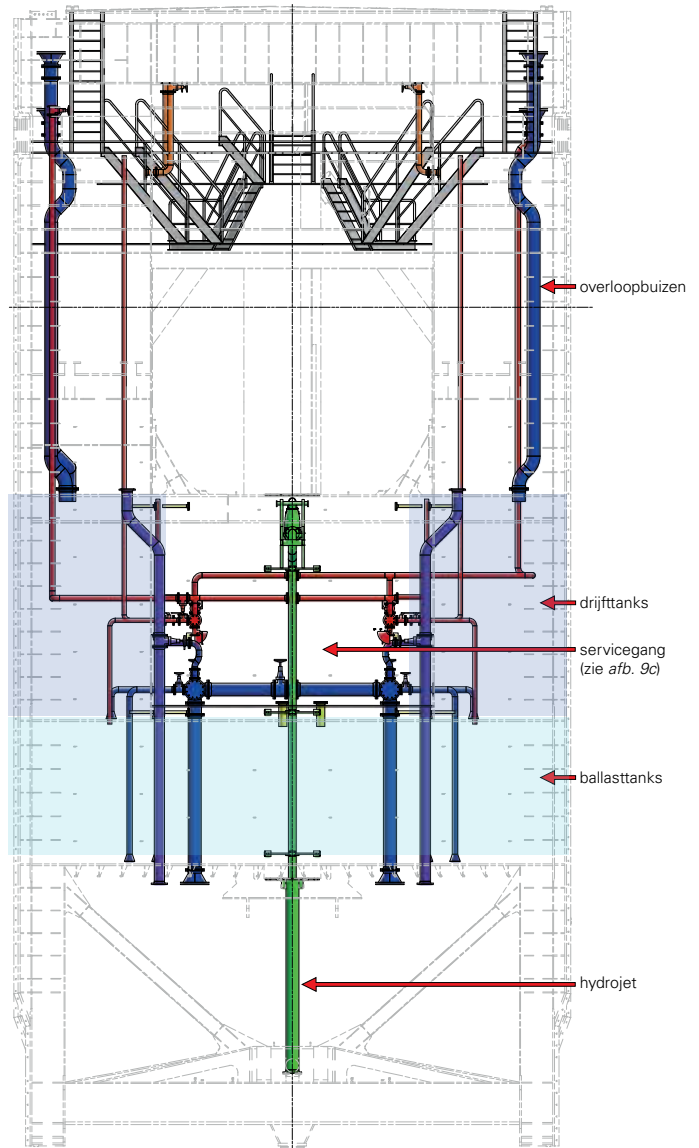
full pen-lassen kon worden teruggebracht en er zelfs met hoeklassen kon worden volstaan. Om ophoping van sediment boven op de drijfkist te voorkomen, zijn alle verstijvers in de drijfkist geplaatst. Buiten de drijfkist zijn de bulbprofielen zoveel mogelijk doorgevoerd door de kolommen om het aantal delingen te beperken. De gehele staalconstructie weegt, exclusief de hydraulische en elektrische installaties, ongeveer 2850 ton.



9a. Vul- en ledigingsysteem van de drijftanks en aanvullende onderhoudsbordessen.



9c. Servicegang drijftanks.



9b. Dwarsdoorsnede.

Drijf- en ballaststelsel

Om de belasting op de rolwagens en railconstructies te beperken, is de deur voorzien van een drijfkist over de gehele lengte en breedte van de deur. Dit reduceert het eigengewicht van de deur van ongeveer 3000 ton tot een gemiddeld dienstgewicht van 400 ton. Het volume van de drijfkist is groter gemaakt dan hiertoe strikt noodzakelijk zou zijn. Dit is gedaan om de deur te kunnen laten opdrijven en als schip stabiel drijvend uitgewisseld te kunnen worden met de reservedeur. De deuren zijn namelijk te groot en te zwaar om tijdens montage en demontage, uit het water te worden gehesen. Deze overcapaciteit aan drijfvermogen wordt in de operationele situatie gecompenseerd door deze tot het gewenste dienstgewicht te ballasten met omgevingswater. In geval van een aanvaring waarbij een lek ontstaat in de drijfkist, moet de deur nog steeds op te drijven zijn. De drijfkist is daarom gecompartmenteerd in

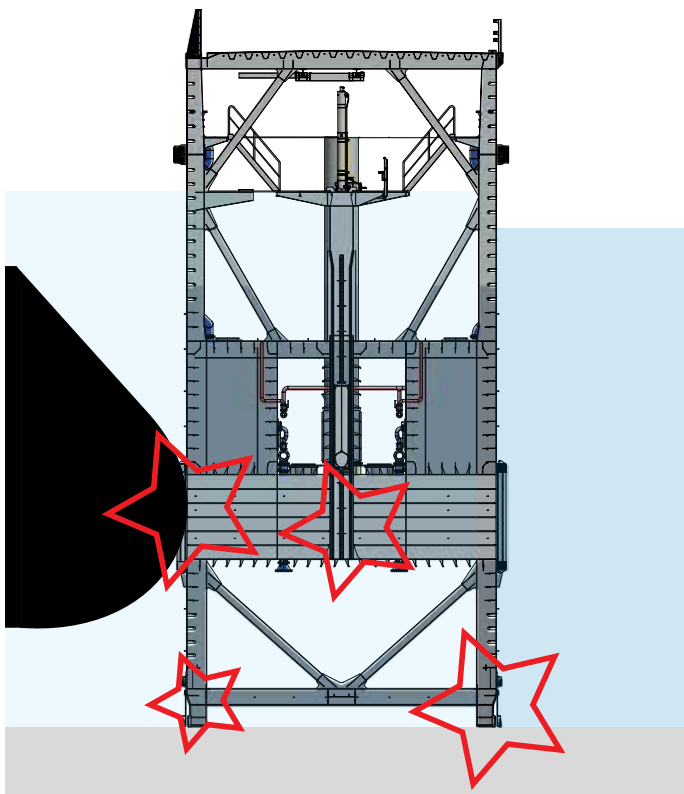
een hoeveelheid kleinere tanks, die voor een deurwissel kunnen worden leeg geperst. Dit gebeurt met behulp van perslucht (afb. 9). Bij extreem hoge waterstanden ontstaat door de waterdichte installatieruimtes boven in de deur te veel drijfvermogen. Om te garanderen dat de sluisdeur dan niet gaat opdrijven, wordt automatisch water ingelaten in de zogenaamde *overlooptanks* en neemt het dienstgewicht toe. Speciale zogenaamde *compensatietanks* zijn bedoeld voor het bijregelen van het dienstgewicht als gevolg van mariene aangroei en sedimentatie. Om er zeker van te zijn dat de onderrolwagen in de loop van de tijd niet wordt overbelast, is deze voorzien van een belastingsensor (loadcel) die continu wordt uitgelezen. In geval van een verhoging van het dienstgewicht kan adequaat worden gereageerd door ballastwater uit de compensatietanks te persen. Daarnaast bevinden zich op de vier hoekpunten van deur, tussen drijfkist en rijdek, de zogenaamde waterdoor-

snijdende *zaktanks*. Deze zorgen voor het gecontroleerd en veilig opdrijven van de deur en extra stabiliteit tijdens transport. Alle tanks zijn bereikbaar via een inwendig gecompartmenteerd gangenstelsel voorzien van waterdichte deuren en een drietal toegangsschachten. In deze gangen bevinden zich ook de water- en (pers)luchtleidingenstelsels en meetinstrumenten, die goed en veilig bereikbaar zijn gemaakt voor bediening en onderhoud.

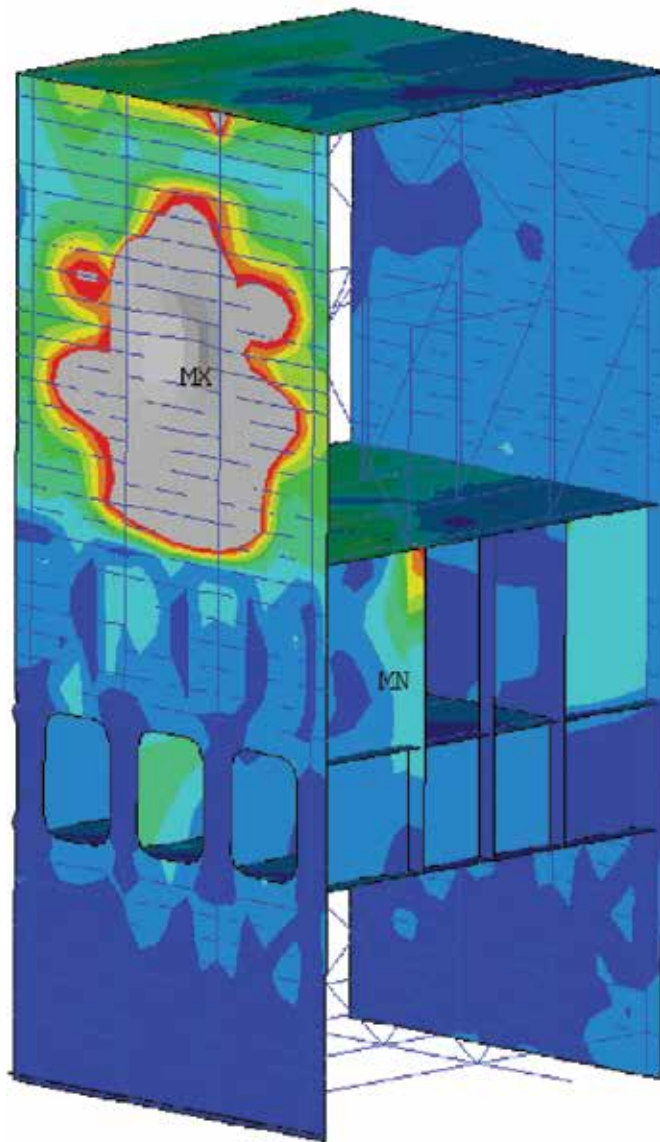
Robuustheid

Aanvaring

De sluisdeur moet zijn waterkerende functie behouden in geval van een aanvaring met een totale aanvaarenergie van 34 MJ. Tegelijkertijd moet de deur na een aanvaring tot een maximale aanvaarenergie van 12 MJ nog steeds normaal kunnen bewegen en nivelleren, zonder inperking van de beschikbaarheid. Bij dit soort aanvaringen zal de deurconstructie



10a. Aanvaringsscenario's vastgesteld via risico-inventarisatie van kritieke onderdelen in het functioneren, zoals de deurgeleiding, aanslagen en nivelleerschuiven.



10b. Dynamische FEM-analyses van een aanvaring met de bulbsteven boven de drijfkist.

lokaal plastische vervormen. De indringdiepte van de bulbsteven of boegen van de beschouwde schepen zit in de orde van 0,6 tot 1,0 m. Deze resultaten van de verschillende aanvaringsscenario's volgen uit bots-simulaties, door middel van expliciet dynamische FEM-analyses in ANSYS LS-DYNA. In samenspraak met Rijkswaterstaat zijn alle maatgevende aanvaarscenario's vastgesteld, volgend uit een analyse van een grote verscheidenheid aan scheepstypen en de daarbinnen mogelijke combinaties van verschillende variabelen zoals de waterverplaatsing (DWT), breedte, diepgang, boegvorm, maximale snelheid, en de waterstanden voor en achter de sluisdeur. Omdat de scheepsboeg als onvervormbaar moet worden beschouwd, moet de volledige bewegingsenergie enkel door de sluisdeur worden opgenomen. Voor elk scenario is een boegvorm met een vastgestelde massa en initiële snelheid op het model van de deur losgelaten. De analyse stopt op het moment dat de boegvorm tot stilstand is gekomen en alle energie is overge-

dragen. Naast de evaluatie van de plastische vervorming en bijbehorende rekken is het verloop van de botskracht over de duur van de aanvaring geanalyseerd. Daarmee is aangetoond dat de kritische rekken van onderdelen van de sluisdeur binnen de toelaatbare toetscriteria blijven, genoemde functionele eisen niet worden ondermijnd en de deuren daarmee voldoende robuust zijn (afb. 10). Gebleken is dat de belasting op de granieten aanslagen ten gevolge van het keren van hoog water hoger is dan ten gevolge van de beschouwde aanvaringen. Alle hydraulische en elektrotechnische installaties in de deur zijn buiten de aanvaargevoelige zone gepositioneerd. Om dezelfde reden zijn de 16 nivelleerschuiven met elk hun hydraulische cilinder in het midden van deurbreedte geplaatst, waardoor de schuifgeleidingen geen blijvende vervormingen ondervinden in geval van een aanvaring. De luchtkisten zijn gecompartmenteerd uitgevoerd, waarbij in geval van een eventuele lekkage een verlies in drijfvermogen van maximaal 10% kan

optreden. In die situatie kan de sluisdeur nog steeds functioneren en wordt het schutproces niet belemmerd.

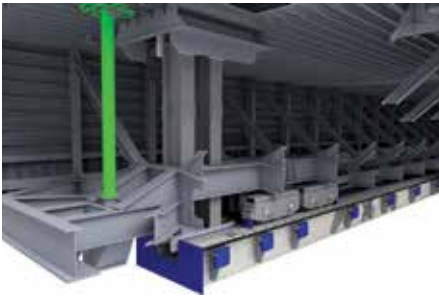
Golfbelasting

Om overbelasting van de UHWMPE-glijvlakken en railbaanconstructie door hoge golfbelastingen tijdens het openen en sluiten van de deur te voorkomen, is het superduplex geleideblok aan de voorzijde van de sluisdeur bevestigd aan een flexibele ophangconstructie, gemonteerd op rubberen fenders (afb. 11). Tijdens het bewegen van de deur kan de deur door hoge golven vanuit zee opzij worden gedrukt en worden de horizontale krachten afgedragen aan de drempelconstructie. Door de verhoogde wrijvingsweerstand zal in die situatie het hydraulisch bewegingswerk automatisch de snelheid van de deur verlagen.

Nivelleersysteem

Algemeen

Het nivelleersysteem is geïntegreerd in de constructie van de sluisdeur en bestaat uit



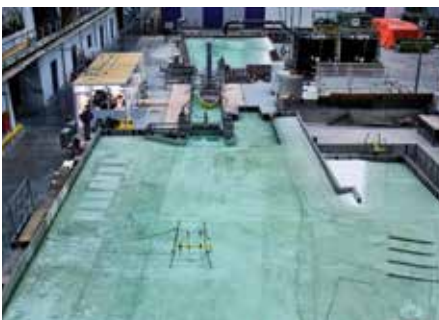
11. Horizontale geleidingsconstructie en railbaanconstructie.

zestien nivelleerkokers (2,2 m breed en 3 m hoog), ongeveer 10 m onder water. Ze kunnen worden gesloten door middel van hydraulisch aangedreven stalen schuiven (afb. 12), die zich in het midden van de deurconstructie bevinden. De keuze voor nivellering van de sluiscolk via de deur in plaats van door middel van omloopriolen in de betonnen sluishoofden (zoals bij de Noordersluis) was het gevolg van de beperkte bouwruimte in combinatie met de kwetsbaarheid van de funderingen van de bestaande aangrenzende constructies van de Noordersluis.

Gezien de hoge beschikbaarheidseisen waaraan het nivelleersysteem moet voldoen, kunnen in vrijwel alle schutscenario's zelfs met slechts veertien schuiven de vereiste prestaties worden geleverd. Dat betekent dat als er één of twee van de nivelleerschuiven in storing vallen er voldoende tijd beschikbaar is voor onderhoud aan of vervanging van de schuiven. Om dit te faciliteren zijn inwendig in de deur voorzieningen getroffen als bordessen, hijsvoorzieningen en goede verlichting.

Onderzoek en testen

De mate waarin het ontwerp van het nivelleersysteem voldoet aan de vereiste nivelleertijden wordt met name bepaald door de afmetingen en de vorm van de 11 m lange nivelleerkokers, samen met de stroombrekbalen. Tegelijkertijd mogen de hydraulische krachten op de schepen – en daarmee samenhangend de trekkrachten in de trossen – door



13a. Laboratoriumtest nivelleerstudie (foto: Deltares).



12a. Isometrische dwarsdoorsnede met zestien nivelleerschouwen.



12b. Hydraulische aandrijving nivelleerschouwen.

de inlaat van zout of zoet water een kritische waarde niet overschrijden.

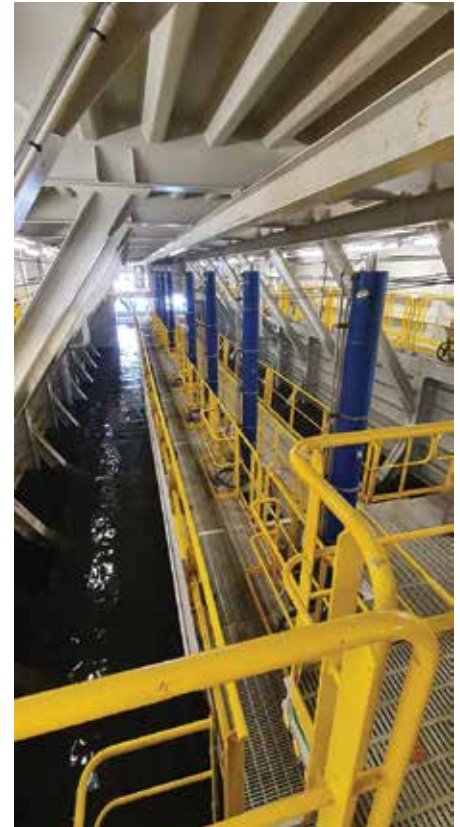
Voor de dimensionering van het nivelleersysteem en het bepalen en verifiëren van alle hefprogramma's van de nivelleerschouwen, is een gedetailleerd schaalmodel (1:40) gemaakt van de complete sluiscolk, inclusief de sluisdeuren met gedetailleerde nivelleerkokers, nivelleerschouwen en stroombrekbalen. Het volledige schaalmodel, inclusief de sluiscolk en de voorhavens, was in totaal ongeveer 56 m lang en 20 m breed (afb.13).

Vortex-opgewekte trillingen

Om ongewenste trillingen van het nivelleersysteem te voorkomen, zijn dynamische analyses uitgevoerd waarbij is bewerkstelligd dat de horizontale en verticale eigenfrequenties van de nivelleerschouwen inclusief het aandrijfsysteem ver genoeg buiten het bereik van de excitatiefrequenties van de waterstroom



13b. Test (l) en schaalmodel (r) (foto's: Deltares).



onder de schouwen blijven. Een specifiek ontwerp van de schouwen (afb. 14), met een druppelvormige onderbalk en een puntvormige rubberen afdichting, vermindert daarbij het risico op trillingen door vortex-excitatie van de waterstroom.

Onder- en bovenrolwagens

Algemeen

Ter plaatse van beide rolwagens wordt de sluisdeur centraal ondersteund door een gewapend rubberen oplegblok. Hierdoor kan de deur als gevolg van de hydrostatische waterdruk horizontaal opzij bewegen en tegen de granieten aanslagen op de sluishoofden worden gedrukt. Op deze manier worden ongewenste horizontale belastingen op de rolwagens voorkomen, en worden de loopwielen en rails behoeft van overmatige slijtage. Dit oplegsysteem van roldeuren wordt in Nederland vaak toegepast.





14. Nivelleerschuiif met druppelvormige onderbalk.

Onderrolwagen

Omdat de onderrolwagen hoofdzakelijk verticaal belast wordt, resulteert dit in een relatief kleine constructie (afb. 15) met een totale lengte van 4,5 m en een wielbasis van 1,8 m. Verhoudingsgewijs is dit vergelijkbaar met de onderrolwagens van de nieuwe Panama-sluizen.

Omwillen van het beperken van de hoeveelheid onderhoudsgevoelige componenten bevat de onderrolwagen geen wielbogies. De belasting wordt gelijkmatig verdeeld over de acht wielen (met een diameter van 800 mm) door de torsieslapheid van de staalconstructie, die daardoor wel vermoeiingsgevoeliger is. Om dit te beheersen zijn de bouwtoeranties van de betonnen drempel en de daarop gemonteerde railbaanconstructie zeer streng. Het gebruik van de juiste combinatie van veredelde staalsoorten (42CrMo5-04 voor de wielen en 110CrV voor de rails) en een extra hardingsbehandeling van de wielen tot 450-500 HB, zorgen ervoor dat de te verwachte slijtage beperkt is.

Bovenrolwagen

De belangrijkste functie van de bovenrolwagen (afb. 16 en 17) is het overdragen van de verticale belasting van de sluisdeur naar de betonconstructie van de deurkas. De sluisdeur steunt via een uitkragende constructie op de bovenrolwagen. Via een

centrisch geplaatst rubberen oplegblok wordt de belasting via de draagconstructie van de bovenrolwagen verdeeld over zes wielen die op twee rails lopen, één aan elke kant van de deurkas. Door toepassing van een bogiestel wordt alle verticale belasting gelijkmatig over de wielen verdeeld (afb. 18).

Om ervoor te zorgen dat de wielen goed op de rails lopen gedurende de gehele beweging van de deur, worden horizontale geleidewielen toegepast aan één zijde van de bovenrolwagen. Het schranken van de bovenrolwagen wordt daarmee voorkomen. De bovenrolwagen is in staat om tijdens alle belasting-situaties de horizontale uitbuiging van de deurkaswanden te volgen. Deze vervormingen kunnen bij het binnenhoofd oplopen tot 140 mm, afhankelijk van het gegeven of het naastgelegen droogdok leeg is of vol staat met water.

Bewegingswerk

Voor het ontwerp van de aandrijving van de sluisdeuren zijn meerdere systemen onderzocht en tegen elkaar afgewogen. Hierbij zijn alle alternatieven beoordeeld op inpasbaarheid, onderhoudbaarheid, levensduurkosten en betrouwbaarheid. Vanwege het zeer beperkte ruimtebeslag in de deurkas, was inpasbaarheid het doorslaggevend criterium en is de keuze gevallen op de toepassing van een dubbele pennenbaan met hydraulisch



15. Onderwagen en railbaanconstructie.

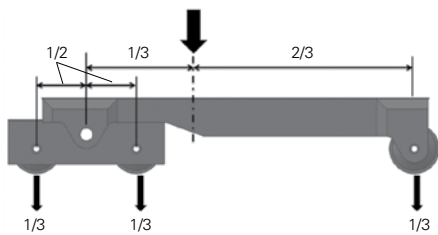
aangedreven bonkelaars (afb. 19). Dit systeem is vergelijkbaar met de aandrijving van de Maeslantkering. Om schade als gevolg van een aanvaring te voorkomen, zijn de pennenbanen (met pennen met een diameter van 110 mm) niet op de deurconstructie, maar op de betonnen deurkaswanden gemonteerd. De bonkelaars, met een steekcirkel van 735 mm bevinden zich in de bovenrolwagen. De aandrijving bestaat uit zes bonkelaars, verdeeld over twee aandrijftreinen. Omdat de deurkaswanden horizontale vervormingen ondergaan van enkele centimeters, worden beide aandrijftreinen door een koppelbalk met veerbuffers tegen de pennenbanen gedrukt (afb. 20). De aandrijftreinen zijn met twee trek-duwstangen met de deur verbonden en met pendels aan het hoofdframe van de bovenrolwagen opgehangen. Elke bonkelaar wordt aangedreven door een hydromotor (radiale plunjerpomp) die direct op de as van de bonkelaar is bevestigd. Twee hydraulische aggregaten zijn in een waterdichte machinekamer in de bovenrolwagen geplaatst. Daarin drijven zes 110 kW elektromotoren de zes hydraulische aandrijflijnen aan, waarmee een totale trekkracht van



16. Montage van de bovenrolwagen (foto: Ko van Leeuwen).



17. Bovenrolwagen op de deurkas geplaatst (foto: Ko van Leeuwen).

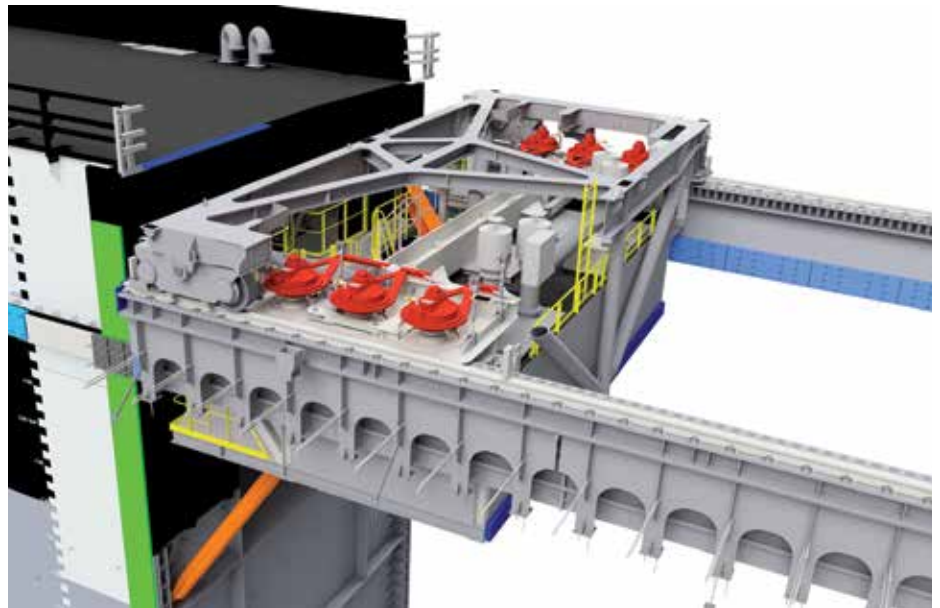


18. Lastverdeling bovenrolwagen.

1500 kN kan worden gegenereerd. Het hydraulisch aandrijfsysteem gedraagt zich als een differentieel met zes uitgaande assen. Op het moment dat de kops kant van de gesloten deur een hoekverdraaiing ondergaat als gevolg van hoog water of een aanvaring, kunnen beide aandrijftrains ten opzichte van elkaar naar voren en naar achteren bewegen. Met het oog op de vereiste beschikbaarheid van de sluis is het bewegingswerk redundant uitgevoerd. Om de vereiste deursnelheid te kunnen bereiken tijdens alle mogelijke omgevingscondities (waterstanden en golfhoogtes) zijn slechts vier van de zes bonkelaars nodig. Als er een elektrische of hydraulische storing optreedt in een van de aandrijflijnen, zal deze zich automatisch isoleren zodat de beweging van de sluisdeur niet stopt.

Fabricage, transport en installatie

Terwijl de fabricage van de bewegingswerken (rolwagens, railbaanconstructies) door



19. Bonkelaar-pennenbaanaandrijving.

Hollandia en de hydraulische installaties door Bosch Rexroth worden uitgevoerd, vindt de fabricage van het staalwerk van de sluisdeuren plaats in Zuid-Korea (afb. 21). Omdat de sluisdeuren onderdeel uitmaken van de hoogwaterkering en bovendien onderhevig zijn aan wisselende belastingen, is voor de constructie de hoogste uitvoeringsklasse EXC4 volgens Eurocode NEN-EN-1090 vereist. Dit vraagt een grotere inspanning om te voldoen aan de vereiste kwaliteit van

de lassen, de maatvoeringtoleranties en de traceerbaarheid van alle staalplaten. Het daartoe ingezette certificeringstraject van de Koreaanse staalbouwer neemt ruim een jaar in beslag, tot het moment dat alle interne processen volledig op orde zijn. Daarbovenop stelt Rijkswaterstaat aanvullende kwaliteitseisen. Om de staalfabrikant duidelijk en correct te informeren over deze specifieke eisen, is hij vanaf het begin van het ontwerpproces betrokken. Tegelijkertijd is



20. Montage aandrijftrein in bovenrolwagen.

ervoor gekozen om voor de detaillering van het ontwerp zo veel mogelijk aan te laten sluiten bij hun praktische scheepsbouwervaring. Na een intensieve periode van overdracht van het Definitief Ontwerp, het beoordelen van de werkplaatstekeningen en fabricageplannen, het testen van lassen en keuren van lasprocedures, heeft de fabricage van de drie roldeuren ongeveer twee jaar in beslag genomen. Conform de gebruikelijke werkwijze in de scheepsbouw, wordt de staalconstructie van elke sluisdeur geassembleerd uit kleinere blokvormige secties, twaalf in totaal, die buiten de fabriek worden samengesteld tot zes grotere blokken. Deze blokken worden volledig geconserveerd, waarna de zogenaamde outfitting wordt opgestart. Daarbij worden de blokken voorzien van alle installatiedelen, leidingwerk, bordessen en leuningwerk. Vervolgens worden ze naar buiten gereden en op de transportkade en op hun kant samengesteld tot de definitieve sluisdeur. De aansluitende plaatdelen ter plaatse van de assemblagelassen worden geconserveerd en alle gebouwe onderdelen, zoals de hoogwaterkerende wanden op het rijdek en de UHMWPE-geleide- en aanslagblokken worden gemonteerd. Normaliter is het bij sluisdeuren gebruikelijk om de granieten aanslagen in de deurspon-



21. Staalproductie in Zuid-Korea.



22. Zeetransport vanuit Zuid-Korea (foto: Boskalis).



23. Transport vanaf de Noordzee door de Noordersluis (foto: Ko van Leeuwen).

ning nauwkeurig in te meten en de dikte van de UHMWPE-aanslagblokken op de sluisdeur daarop aan te passen. Bij het ontwerp van de nieuwe zeesluis is door OpenIJ echter besloten om drie identieke sluisdeuren te maken die in geval van calamiteiten binnen 48 uur direct onderling uitgewisseld moeten kunnen worden. Met als gevolg de noodzaak dat de maatvoering van zowel de granieten aanslagen van de sluishoofden als van de aanslagconstructies van de sluisdeuren zeer nauw getolereerd is. Dit is een enorme en succesvolle opgave gebleken voor zowel de uitvoerders op de bouwplaats als voor de staalbouwer.

Om te bewaken dat aan alle kwaliteits- en maatvoeringseisen wordt voldaan, is er gedurende het gehele fabricageproces fulltime een team vanuit OpenIJ aanwezig op de werf in Zuid-Korea. Vanwege het repetitieve karakter van het werk – er worden immers drie identieke deuren gefabriceerd – wordt in de technische afstemmingsoverleggen met de staalbouwer veel aandacht besteed aan *lessons learned*. Voorbeelden daarvan zijn: praktische oplossingen voor moeilijk bereikbare lassen,

aandacht voor de juiste lasvolgorde en het voorkomen van vervormingen ten gevolge van een te hoge warmte-inbreng, veiligheidsprocedures voor luchtdichtheidstesten, en het in de hand houden van de maatvoeringstoleranties. Voor de overdracht van deze lessons learned naar de uitvoerende mensen werden ze in sommige gevallen afgedrukt op grote banners en in de fabriek opgehangen (afb. 21, rechtsbovenin). Nadat de sluisdeuren op de kade zijn afgebouwd, zijn ze in liggende positie met SPMT's op het half-afzinkbare transportschip de Talisman naar Nederland getransporteerd (afb. 22). In het ontwerp is rekening gehouden met extra zware belastingen en krachtsinleiding ten gevolge van golfbewegingen op zee (golven tot ca. 9 m hoog). Omdat het type schip, de vaarroute en het tijdstip van transport pas laat in het proces bekend was, zijn daarom later extra versterkingen aan het Definitief Ontwerp toegevoegd.

Invaren

In Nederland aangekomen zijn de deuren in de Tweede Maasvlakte gelost. Alleen op

die locatie is voldoende diepgang voor het schip om af te kunnen zinken, waarna de deuren drijvend kunnen worden weggesleept. Eenmaal aangemeerd langs de kade van een van de naburige havens zijn de sluisdeuren een voor een gekanteld met twee mobiele landkranen en een drijvende bok. Om de deuren stabiel verticaal te laten drijven, zijn enkele ballasttanks gelijktijdig met het kantelen gevuld met water. Via de Noordzee zijn de deuren vervolgens naar de Alaskahaven in Amsterdam gesleept. Het was een bijzonder moment toen de nieuwe sluisdeuren de bestaande Noordersluis passeerden (afb. 23). Ondertussen zijn op de bouwplaats in IJmuiden de railbaanconstructies en de rolwagens gemonteerd. De pennenbanen aan weerszijden van de deuren zijn gemonteerd en in de bovenrolwagens zijn de hydraulische aandrijvingen geïnstalleerd. In de haven van Amsterdam zijn de sluisdeuren voorzien van alle hydraulische en elektrische installaties en is de epoxy slijtlaag op het wegdek aangebracht. Na een testperiode van alle installaties zijn ze weer terug naar IJmuiden gesleept om te wachten op het juiste moment om te worden ingevaren in de deuren. Om schade aan de deuren en het betonwerk te voorkomen, moest het manoeuvreren van de sluisdeuren tijdens deze indraaioperatie zeer nauwgezet worden uitgevoerd (afb. 24). Tussen de granieten sponningen en de aanslagen van deur is maar 5 cm ruimte beschikbaar. Op de vier hoekpunten van de sluisdeur zijn meerdere lieren gekoppeld die vanaf het sluishoofd de sluisdeur gecontroleerd in positie konden brengen. Eenmaal gepositioneerd tussen de aanslagen van het sluishoofd werd de deur stabiel worden afgezonken en op de rolwagens gezet. Het inlaten van het water in de ballasttanks is daarbij continu gemonitord door het uitlezen van de waterniveaus. De loadcell in de onderrolwagen gaf uiteindelijk de finale check dat het juiste dienstgewicht is bereikt en dat de afzinkoperatie is geslaagd. Na het koppelen van beide aandrijftreinen in bovenrolwagens aan de sluisdeur en het aansluiten van alle bekabeling is de deur gereed om de eerste keer te worden bewogen. Een mooie test en oefening voor de uitwisseloperatie die vanaf dat moment elke 15 jaar moet gaan plaatsvinden. •

Projectgegevens

Opdracht Rijkswaterstaat, Utrecht • Architectuur ZUS [Zones Urbaines Sensibles], Rotterdam • Constructief ontwerp sluisdeuren, afzinkbare dokdeur en bewegingswerken Iv-Infra, Haarlem • Uitvoering OpenIJ (combinatie BAM-PGM, VolkerWessels en DIF) • Staalconstructie sluisdeuren Geosung Tech Co. LTD, Republic of Korea • Staalconstructie bewegingswerken Hollandia Infra, Krimpen aan den IJssel • Hydraulische aandrijvingen Bosch Rexroth, Boxtel



24. Invaren sluisdeuren in binnensluishoofd (foto's: Drone Addicts).



25. Eindsituatie binnensluishoofd.