



Reservoir met reserve

De watertoren aan de Amsterdamsestraatweg in Utrecht is onlangs getransformeerd naar woongebouw. In het stalen waterreservoir is een luxe appartement gemaakt met vijf verdiepingen. Een lift, die ook de drie studio's onder het reservoir ontsluit, brengt de bewoners naar de entree op de betonnen lekvloer onder het reservoir. Vervolgens kan worden overstapt op een privé-lift die tot het hoogste woonvertrek naar 34 m hoogte leidt, met uitzicht over de stad. De wens naar dit uitzicht, via een loggia en in combinatie met het benodigde daglicht, zorgde voor een belangrijke verzwakking van dit voorheen waterdichte reservoir en gaf aanleiding tot een constructieve zoektocht.

ir. M. Feijen en ir. M.A. Niens RC

Mark Feijen is constructief ontwerper bij en eigenaar van I-Saac in Delft. Michiel Niens is projectleider bij IMD Raadgevende Ingenieurs in Rotterdam.

Het stalen reservoir van de watertoren bevindt zich tussen 22 en 36 m hoogte en heeft een diameter van ongeveer 10 m. Het reservoir rust op een betonnen ring, die wordt ondersteund door het dragende gevelmetselwerk met een dikte verlopend van 55 tot

100 cm. Het betreft een hangbodemreservoir, waarvan er maar enkele in Nederland zijn. De watertoren is gebouwd in 1917 en is in de jaren '80 buiten bedrijf gesteld. Het reservoir is bekleed met metselwerk dat via stalen stijlen en zogenaamde windringen

afsteunt tegen het reservoir. De ruimte tussen het reservoir en het metselwerk is maar liefst 60 cm breed en bereikbaar via een trappensysteem. In het metselwerk zijn smalle, verticale raamsparingen opgenomen, die deels zijn dicht gemaakt. Boven op het reservoir rust een cirkelvormig vakwerk ter ondersteuning van de houten dakkap, die is bekleed met leisteen.

Het reservoir bestaat uit stalen platen met verlopende diktes die onderling zijn verbonden met klinknagels. De dikte van de bovenste platen, waar de waterdruk het laagst is, bedraagt slechts 4 mm. Deze dikte neemt naar beneden toe tot 15 mm. Uit het staal zijn enkele monsters genomen die in een trekbank zijn beproefd op een vloeisterkte van 300 N/mm².

Onder het reservoir, op ongeveer 20 m hoogte, bevindt zich de betonnen 'lekvloer',



'Leonardosticks.'



Balken met takels.



De oude watertoren, voor verbouw.



Complexe opgave met speciale daglichttoetreding.



Reservoir verzorgt stabiliteit.



In het reservoir zijn vijf vloervelden aangebracht.



Vatwand opgevoeven naar bestaande ramen, metselwerk

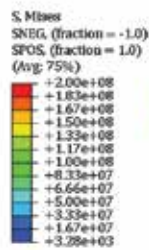
gedragen door betonbalken. Tussen lekvloer en begane grond zijn drie houten tussenvloeren gemaakt, die door een combinatie van metselwerk binnenwanden en stalen liggers werden ondersteund. De toren is op staal gefundeerd.

Metselwerk gevel

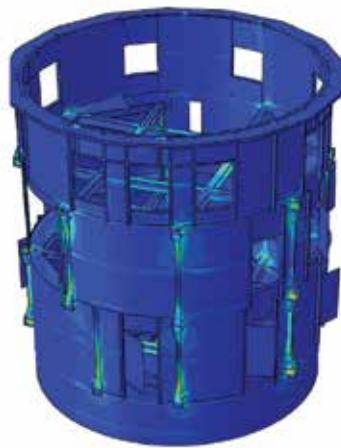
De metselwerk gevelbekleding van het reservoir was in een slechte staat. Vrijwel over de volledige omtrek waren verticale scheuren aanwezig, veroorzaakt door ernstige roestvorming van de staalprofielen die destijds in het metselwerk zijn opgenomen om de gevel te steunen. In de loop der jaren heeft de roestvorming de dikte van de flenzen doen verdubbelen, waardoor het metselwerk kapot is gedrukt. Besloten is om deze staalprofielen volledig te verwijderen en te vervangen door betonribben die met nieuwe thermisch verzonken stalen kokertjes op strategische plaatsen afsteunen tegen het reservoir. De betonribben zijn groter dan de oude UNP-profielen, maar konden dankzij de brede spouw zonder problemen worden ingepast.

Studio's

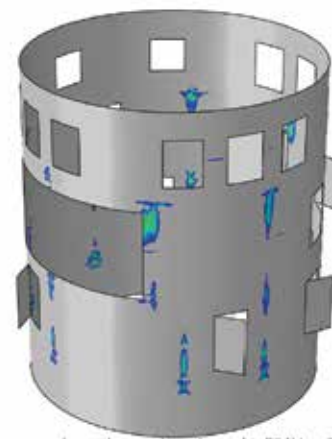
Het constructief ontwerp van de studio's onder het reservoir is eenvoudig. De bestaande houten vloeren zijn hergebruikt, maar de ondersteuning ervan is vernieuwd met stalen liggers. Daarmee konden de dragende metselwerk wanden worden gesloopt. De stalen liggers zijn tussen de houten balken gelegd en de dragende houten moerbalk is vervolgens aan deze stalen liggers opgehangen. Hiermee is de totale constructiehoogte beperkt en



eenheid in N/m²



Reservoir met kleurenplot spanningen.



reservoir wand: spanningen hoger dan 50 N/mm²

kwam alleen de houten moerbalk in het zicht onder het gestucte plafond. Voor het daglicht is gebruik gemaakt van de bestaande, smalle raamsparingen. Hier is per studio één grote raamsparing aan toegevoegd, waarbij een dubbele stalen balk is ingebracht als latei.

Nieuwe vloeren

Bij de keuze voor de nieuwe vloeren in het reservoir was maakbaarheid op deze bijzondere locatie de belangrijkste randvoorwaarde. Staalbeton-vloeren zijn licht en makkelijk transporteerbaar. Ook kan er eenvoudig vloerverwarming in worden opgenomen. Deze vloeren worden gedragen door een houten balklaag met stalen liggers in twee richtingen, om zo te zorgen voor een evenwichtige verdeling van het gewicht over de vatwand.

Het gewicht van de vijf nieuwe (lichte) vloeren staat in geen verhouding tot de ± 1 miljoen liter water die ooit aanwezig was. Voor de dragende metselwerk constructie en de fundering op staal is dit geen enkel probleem.

Maar omdat de vatwand (zeker boven) erg dun is, zouden de piekspanningen bij de balkopleggingen te hoog worden. Om deze oplegkrachten over een groter oppervlak uit te kunnen smeren, is er in de spouw tussen reservoir een metselwerk en stalen 'exoskelet' aangebracht.

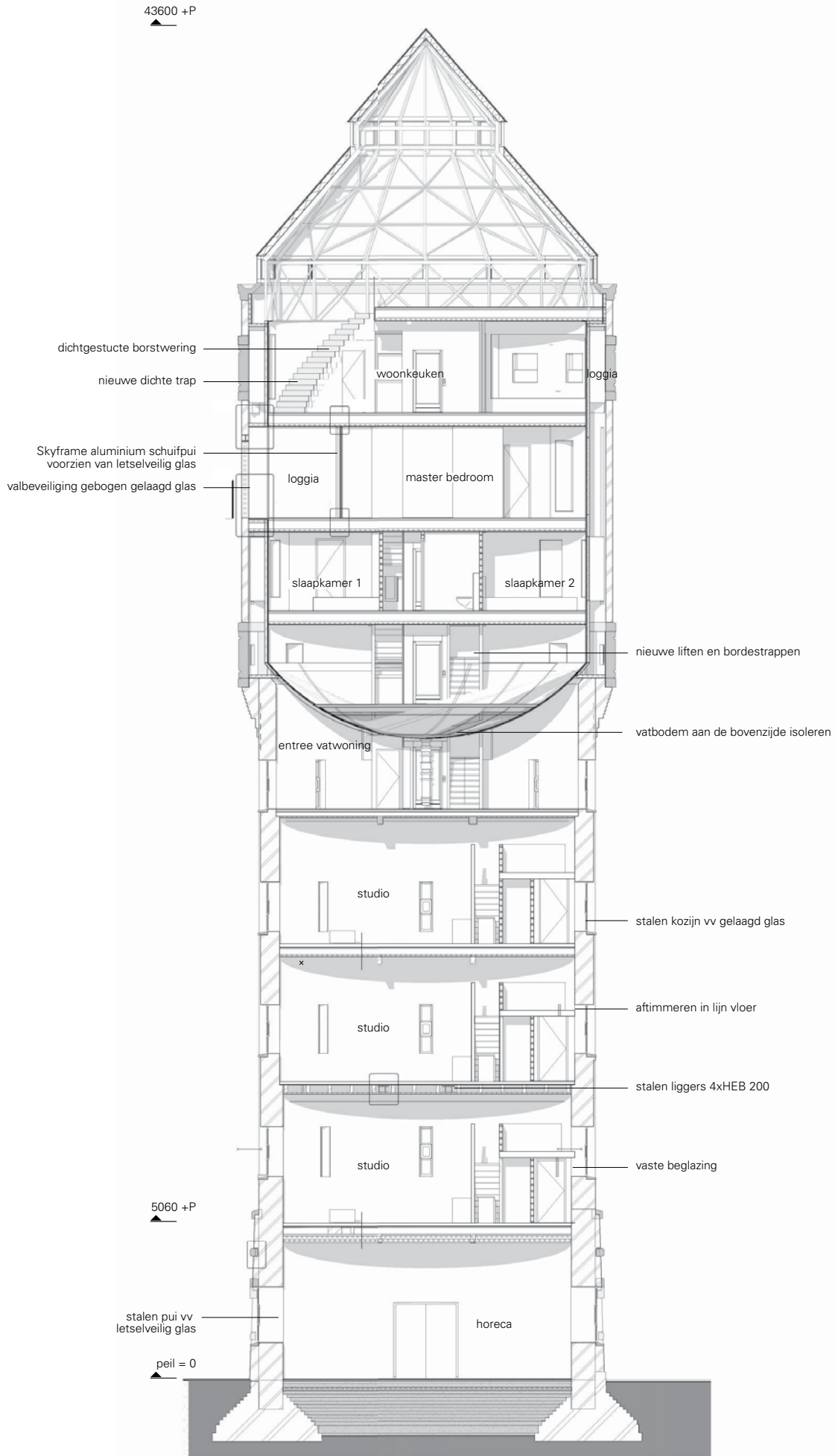
Zoektocht gevelopeningen in reservoir

Het verbouwen van het oude waterreservoir naar een woning was een complexe ontwerp

opgave. Een zoektocht naar de balans tussen de constructieve mogelijkheden van een oude geklonken dunne plaatconstructie en de wens van de opdrachtgever en de architect om een bruikbare woning te creëren met voldoende daglicht.

Anders dan bij sommige andere watertorens verzorgt het reservoir de stabiliteit van de toren. Het metselwerk is ter hoogte van het reservoir niet meer dan 'bekleding'. Het eerste architectonische ontwerp toonde dermate veel openingen dat de constructieve veiligheid niet kon worden gegarandeerd zonder grote aanpassingen aan de omvang en afmetingen van deze openingen in het reservoir. Met een eenvoudig eerste constructief model van het waterreservoir is de invloed van verschillende sparingsconfiguraties onderzocht, zowel door het eigengewicht, de vloerbelastingen en de wind. De loggia op de zevende verdieping, een belangrijk onderdeel van het bouwkundig ontwerp, had hierbij een grote invloed. De opening is verdiepinghoog en biedt met een breedte van zes meter een prachtig uitzicht naar het centrum van Utrecht.

Bij deze verkenning is de invloed van de gatverzwakkingen telkens vergeleken met het oorspronkelijke gesloten waterreservoir. Hierbij is gekeken naar de invloed op de verticale en de horizontale stijfheid. Verticaal om de gevolgen voor de bestaande dakconstructie die op het reservoir rust te analyseren. En horizontaal om geen problemen te veroorzaken in het bestaande metselwerk door een afname in horizontale stijfheid van het reservoir.





Gebouwd in 1917 en rond 1980 buiten bedrijf gesteld.

Ook is rekening gehouden met een zo gelijkmatig mogelijke verdeling van de reactiekrachten op de onderliggende constructie. Gevelopeningen onder in de reservoirwand verstoren deze verdeling enorm. Daarom is er in de wand onder de zesde verdieping geen opening gemaakt.

Exoskelet

In het reservoir zijn vijf vloervelden aangebracht, waarvan drie vloeren over de volledige doorsnede van het reservoir. Eén vloer ligt op de bodem van het reservoir en één vloerveld is een entresolvloer boven op het reservoir, met een fraai zicht tegen de onderzijde van het dak. De volledige vloervelden zijn opgebouwd uit vier HEA 300-balken die elkaar kruisen en daardoor de vloerbelasting op acht posities invoeren op de reservoir wand. De profielen steken door de wand heen. Om de vloerlasten zo gelijkmatig mogelijk in de reservoirwand in te voeren, is een 'exoskelet, bestaande uit T profielen, tegen de buitenzijde van de wand gelast. De T-profielen zijn verdiepinghoog aangebracht en vormen met de HEA-balken een momentvast raamwerk. De belastingen worden op deze wijze gelijkmatig op schuif in de wand gebracht. Momenten door excentriciteiten van de inleiding van de oplegkrachten blijven in het raamwerk.



Vatwand blijft in zicht.

De entresolvloer bestaat uit twee HEA 360-liggers die boven op de reservoirwand zijn gelegd. Ook hier zijn de krachten ingeleid met het exoskelet.

Rondom alle ramen zijn verstijvers aangebracht om het verwijderde materiaal te compenseren en de wand uit het vlak in vorm te houden. Met de aangebrachte verstijvingen en het exoskelet ontstond een verstijfde schaalconstructie waarbij de geconcentreerde vloerbelastingen via lange schuifverbindingen in de reservoirwand zijn ingeleid.

Analyse

Met het FEM-programma Simulia Abaqus is een gedetailleerd model gemaakt van de verstijfde reservoirwand en de vloerliggers. De wanddikten in het model zijn gebaseerd op een groot aantal diktemetingen die per plaat zijn uitgevoerd. Bij iedere horizontale overgang tussen de platen is de excentriciteit van de aansluitende platen meegenomen, omdat deze invloed hebben op de verticale afdracht van de belastingen. In het rekenmodel is bij de plaatovergangen uitgegaan van een continue verbinding. De capaciteit van de verbinding is op basis van de gevonden spanningen in een aparte analyse beschouwd. Van het dak is het verticale vakwerk, dat direct op de reservoirwand ligt, meegenomen als gekoppelde staafelementen in het model.



Exoskelet.

Dit om op een accurate manier de belasting in te leiden in de reservoirwand. Het conische deel van het dak is niet mee gemodelleerd, maar vervangen door een knoop in het aangrijpingspunt van de windbelasting. De windbelasting is aangebracht op de dakknop en de drie windringen in het verstijfde reservoir. De vloerbelastingen zijn aangebracht op de vloerbalken in het model. De wind is beschouwd voor zestien verschillende richtingen omdat er geen duidelijke dominante richting was aan te wijzen door de variatie in sparingen.

Uit de FEM-analyse volgt dat de spanningen in de reservoirwand laag zijn ($< 20 \text{ N/mm}^2$). Alleen bij de doorvoer van de HEA-vloerbalken naar het exoskelet loopt de spanning lokaal op naar 130 N/mm^2 . Voor wat betreft de stabiliteit zijn er met het exoskelet, de verstijvingen rondom de ramen en de geometrische stijfheid van de gekromde wand, voldoende voorzieningen aanwezig om plooi te voorkomen.

Constructieve veiligheid bij brand

Omdat het stalen reservoir mede de stabiliteit van de vatwoning verzorgt, wordt deze aangemerkt als hoofd draagconstructie onder brandomstandigheden. Conform het niveau bestaande bouw dient deze bij brand gedurende 60 minuten standzeker te blijven. Het

Projectgegevens

Oprichting particulier • Architectuur Zecc Architecten, Utrecht • Constructief ontwerp IMd Raadgevende Ingenieurs, Rotterdam • Detailberekeningen reservoir I-Saac, Delft • Uitvoering R&R Bouw, Veenendaal • Staalconstructie Neveships, Rotterdam • Fotografie IMd, Stijn Poelstra • Impressies Zecc

aanbrengen van een brandwerende coating was onwenselijk. Niet alleen vanwege de kosten, maar vooral omdat de opdrachtgever graag tegen het ruwe, onbehandelde staal aan wil kijken.

De dunne staalplaat van het reservoir verliest bij opwarming echter snel zijn stijfheid en sterkte. Een eenvoudige analyse, waarbij het reservoir voor het bepalen van de profielfactor wordt beschouwd als strip, leert dat de toelaatbare staalspanning na 60 minuten reduceert naar 5% van de spanning bij kamertemperatuur. Daar staat tegenover dat de spanningen in het reservoir, in de belastingcombinatie brand, overwegend erg laag zijn. Lager zelfs dan $0,05 \times 300 = 15 \text{ N/mm}^2$. Juist bij de opleggingen van de vloerliggers en de hoeken van sommige gevelsparingen zijn de spanningen hoger. Op deze positie is een nadere analyse uitgevoerd, waarbij de warmte-ontwikkeling in het exoskelet is onderzocht.

Hiervoor is, ook met Simulia Abaqus een simulatie gemaakt van de staalplaat met exoskelet, aan de spouwzijde ingepakt met thermische isolatie. Voor de belasting is gebruik gemaakt van de standaardbrandkromme. Na 60 minuten brand zijn de T-profielen van het exoskelet in staat om, zonder knik, 512 kN op te nemen. Veel meer dan de optredende belasting van 117 kN. Indien knik in rekening wordt gebracht, waarbij de lagere E-modulus bij brand wordt verdisconteerd, bedraagt de unity check nog altijd 0,72.

Als gevolg van de brandanalyse zijn op enkele posities de verstijvingen naast de raamsparingen verzwakt.

Omdat de vloeren een stabiliserende functie hebben voor het reservoir, maken ook deze deel uit van de draagconstructie onder brandomstandigheden. De houten balken zijn voldoende zwaar gedimensioneerd (door inbranding ontstaat een toelaatbare doorsnede-reductie). De stalen balken zijn van een brandwerende beplating voorzien. De staalplaat-betonvloeren ten slotte, zijn op de brandwerendheidseis gewapend.

Uitvoering

De aard van de constructie, een dunwandige schaalconstructie met gelaste verstijvingen en een exoskelet, heeft een typische scheepsbouwsignatuur. Om deze reden heeft de



De bovenste verdieping.

opdrachtgever scheepsbouwer Dirk Neve bij het plan betrokken. Samen met hem is in een vroeg stadium de verbouwing ontworpen en gedetailleerd, met veel aandacht voor de maakbaarheid en bouwtoelanties.

Tijdens het ontwerp was het reservoir slecht toegankelijkheid, waardoor de exacte vorm niet kon worden behaald met bijvoorbeeld een 3D-scan. Een beperkt aantal metingen van het reservoir vormde de basis voor het produceren van de 1200 gesneden onderdelen en de 500 profielen.

Gezien de binnenstedelijke locatie van de watertoren is ervoor gekozen om alle materialen door het noodtrappenhuis naar boven te takelen. Om het hijsen door de trapschacht mogelijk te maken, zijn eerst de twee HEA 360-liggers van de entresolvloer via een raamopening vlak onder het dak naar binnen gebracht en op de reservoir wand gelegd, op een tijdelijke positie voor de uitvoering. Aan elke ligger hingen twee loopkatten met een elektrische kettingtakel, één van de vier kettingtakels had een hijshoogte van 40 m om zo vanaf de begane grond te kunnen hijsen. Om in het reservoir voldoende hijshoogte te houden en geen belemmering te hebben van steigers, is ervan beneden naar boven gewerkt. De basis van elke verdieping waren de vier kruisende HEA 300-balken, die gezamenlijk als 'leonardosticks' werden opgelegd.

Zodra de staalconstructie van een verdieping gereed was, werd de houten balklaag en een dekvloer gelegd om weer als werkvloer voor de volgende verdieping te dienen. De nieuwe 'windringen', die voorheen in de 600 mm brede spouw zaten, zijn vanwege de toegankelijkheid verplaatst naar de binnenzijde van het reservoir, als onderdeel van de vloer. Een bijkomend voordeel van de ringen aan de binnenzijde is dat de bestaande windringen zo lang mogelijk intact konden blijven om de stabiliteit tijdens de bouw te garanderen. De verstijvers en het exoskelet aan de buitenzijde van het reservoir, zijn via een aantal initiële raamopeningen en de spouw tussen het metselwerk en de reservoirwand naar alle posities gebracht. Pas toen alle vloeren en het exoskelet waren aangebracht, zijn de openingen gemaakt. De vatwand is bij de ramen opgevouwen om op deze wijze zo veel mogelijk van het bestaande te behouden en toch genoeg lichtinval te krijgen.

Circulariteit

Dankzij de grondige analyse van de bestaande constructie en de integrale benadering van ontwerp en maakbaarheid, zijn er opvallende woningen gerealiseerd in de oude watertoren. Het hergebruik, maar zeker de bijzondere vorm, maken de toren een 'toonbeeld van circulariteit'.