



# Hellingproof

**De vernieuwing van het Museum Arnhem oogt vooral bijzonder vanwege de nieuwe vleugel die boven een stuwwal uitkraagt. Voor het museum is de interne routing van groot belang en een flexibele indeelbaarheid. Zo is een draagconstructie ontworpen met dragende vakwerken in de gevels, zodat er geen tussenkolommen nodig zijn, en de grote uitkraging aan de Rijnzijde gemaakt kon worden. De constructie is weggecijferd en onzichtbaar; ondergeschikt gemaakt aan de beleving en de architectuur. Evenwel, de symbolwerking van het gewenste beeld maakt de constructie des te belangrijker.**

ir. C.F. Bosveld

Chris Bosveld is constructief ontwerper bij Pieters Bouwtechniek in Delft.

In 2016 is een ontwerpteam samengesteld met Benthem Crouwel Architects, DGMR, Nelissen ingenieursbureau en Pieters Bouwtechniek. Met dit team is de uitbreiding voor het museum ontworpen. Pieters Bouwtechniek heeft het constructief ontwerp gemaakt en uitgewerkt tot en met de aanbesteding. In

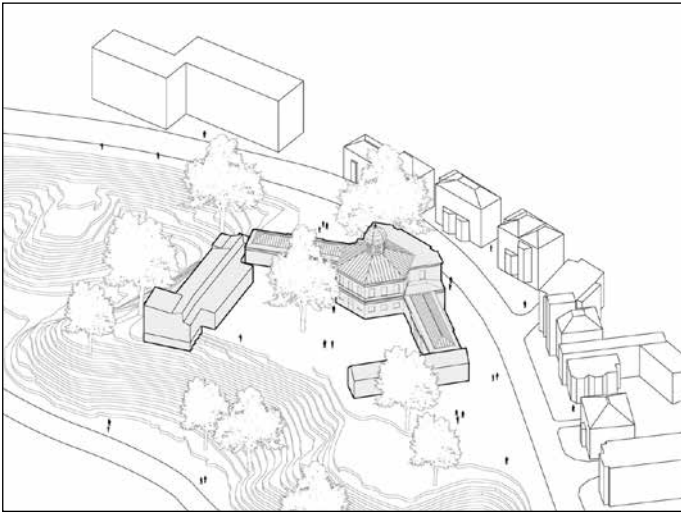
de uitvoeringsfase is het plan door aannemer Rots Bouw met coördinerend constructeur ABT verder uitgewerkt. Pieters had in de uitvoeringsfase de rol van ontwerpconstructeur.

Het oudste deel van het bestaande museum, gebouwd in 1873 en ontworpen als herenso-

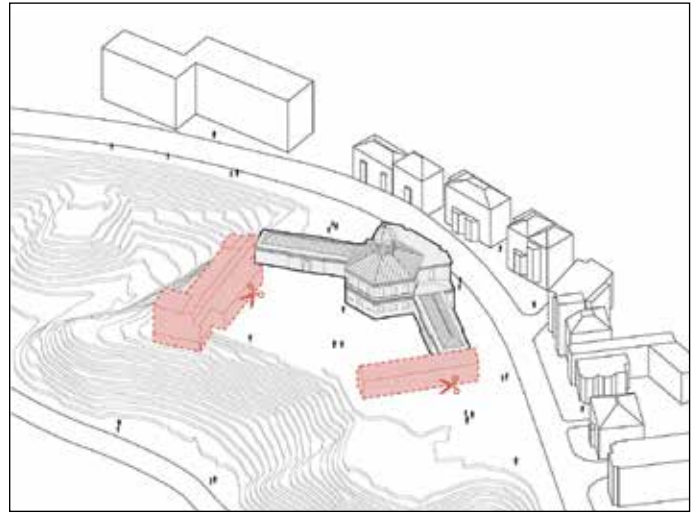
ciëteit door Cornelis Outshoorn, bestaat uit een centrale hal met koepel en twee vleugels. Oorspronkelijk was de koepel heel open en gericht op de tuin. In 1920 is het verbouwd tot museum. Om ruimte te maken voor de expositie van de kunstcollectie, zijn de gevels naar de tuin en de vide in de koepel dichtgezet. In 1956 is de westelijk gelegen vleugel, ontworpen door Frits Eschauzier, toegevoegd. In 2000 is een tijdelijke vleugel aan de oostzijde van Hubert-Jan Henket, waarin het museumcafé gevestigd was, toegevoegd.

## Ontwerp

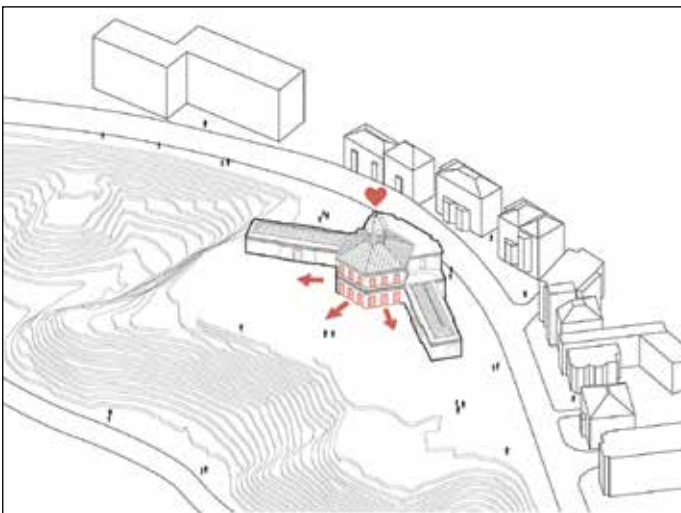
Met het ontwerpteam is een uitbreiding voor het museum ontworpen waarbij het bestaande monument behouden blijft en de koepel weer geopend wordt. De vleugels die in 1956 en 2000 zijn toegevoegd, zijn verwijderd. De



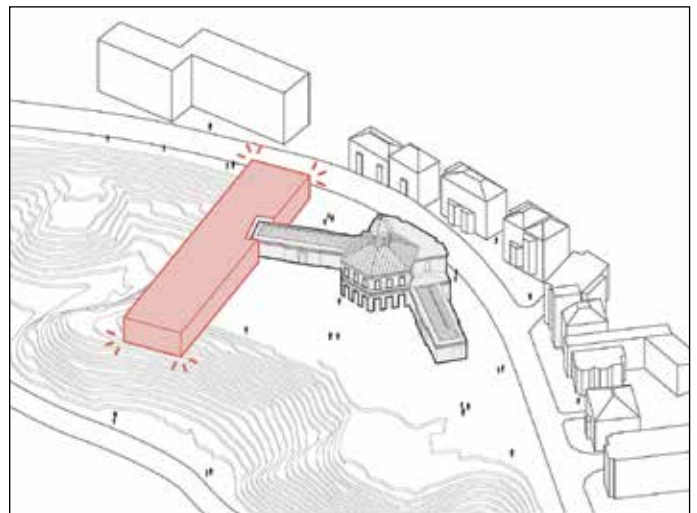
*Bestaand museum op de rand van de stuwwal.*



*Verwijderen oude aftakkingen.*



*Ontwerpfilosofie architect met de koepel als centraal punt.*



*Extra vleugel.*

nieuwe museumzalen zijn op maaiveldniveau gemaakt, zodat op een aantal locaties in het gebouw het omliggende landschap goed te aanschouwen is. Onder deze zalen, in de stuwwal, is ruimte voor ondersteunende functies voor het museum.

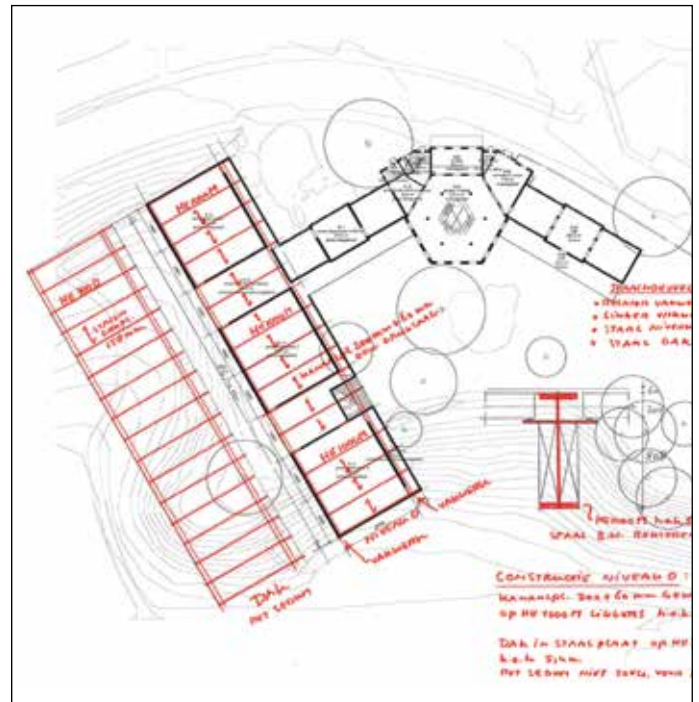
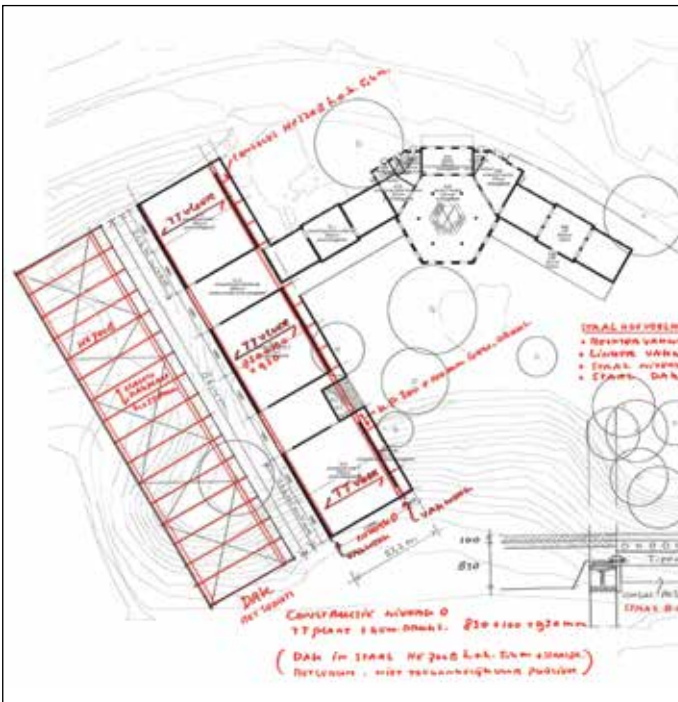
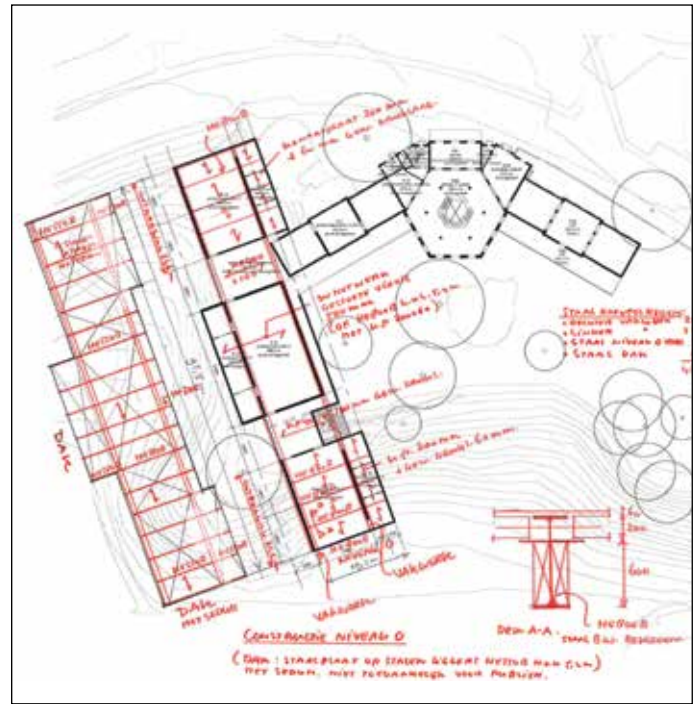
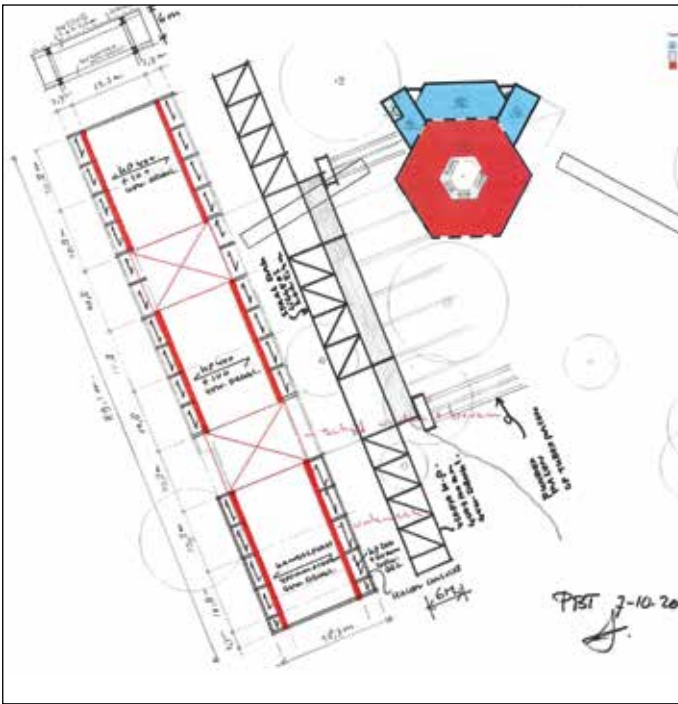
In het eerste ontwerp was een éénlaagse kelder onder de nieuwbouw aanwezig. De nieuwbouw had aan de Utrechtsewzijde een uitkraging van  $\pm 21,6$  m, aan de Rijnzijde een uitkraging van ongeveer 24,3 m. Al bij de eerste constructieve verkenningen werd duidelijk dat de grote uitkragingen met stalen vakwerken gemaakt moesten worden. Dit is de meest efficiënte constructie. Met dit als uitgangspunt zijn variantenstudies gedaan waarbij de invloed van verschillende vloersystemen onderzocht is. Hierbij is gekeken naar benodigde constructiehoogtes,

maximale vloeroverspanning en daarmee maximale hart-op-hart maat van de dragende vakwerken en het totaalgewicht van de staalconstructie aangezien dit een belangrijke graadmeter is voor de kosten van de constructie. Uiteindelijk bleken kanaalplaatvloeren die direct overspannen tussen de twee vakwerken de meest economische variant. Hiermee is het ontwerp verder uitgewerkt.

#### **Kelder**

Al in het VO is een extra kelderlaag onder het ontwerp van de nieuwbouw toegevoegd. Hierin wordt het depot van het museum gevestigd. Met de ligging van het depot in de stuwwal kan een duurzaam en energiezuinig klimaatconcept worden uitgewerkt. Door de constante temperatuur van de omringende bodem en aangrenzende ruimten kan de gewenste temperatuur

in de ruimte gerealiseerd worden met zo min mogelijk inzet van installaties. Externe invloeden worden gedempt door thermische massa. Het klimaatconcept voor het depot kenmerkt zich door een massieve constructie en een zodanige thermische isolatie dat sprake is van een warmtebalans waarbij het depot langzaam afkoelt. Hierbij wordt actief verwarmd en actief ontvochtigd. Om de benodigde thermische massa te halen, is de keldervloer uitgevoerd in 35 cm beton en de kelderwanden in 40 cm beton. De tussenvloeren zijn uitgevoerd als kanaalplaat 320 mm met druklaag. Om indringing van water te voorkomen zou de dikte van de betonconstructie gebruikt kunnen worden. Voor extra zekerheid zijn echter alle vloeren en wanden, die aan de bodem grenzen, aan de buitenzijde voorzien van een waterkering tussen beton en isolatie.

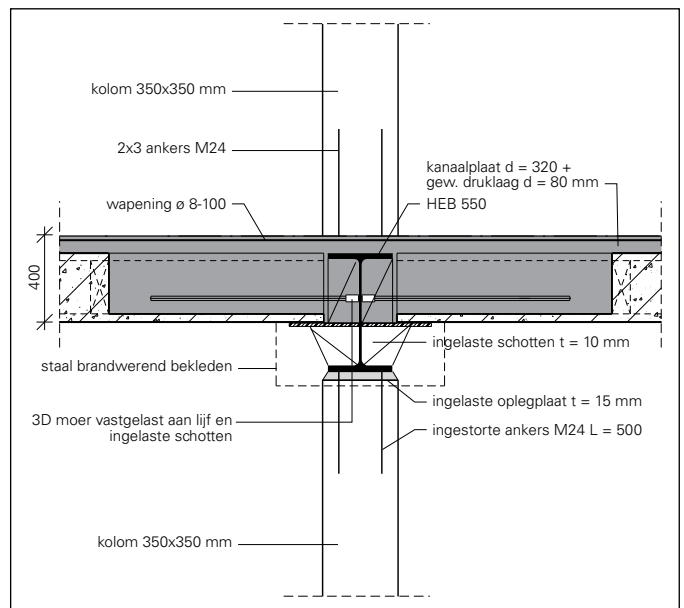
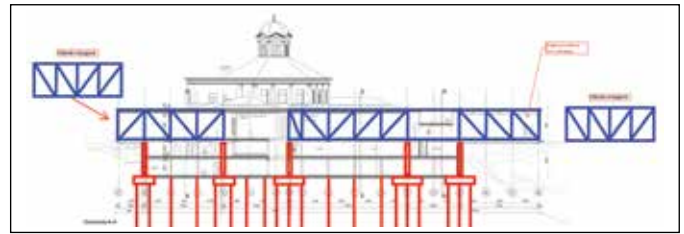
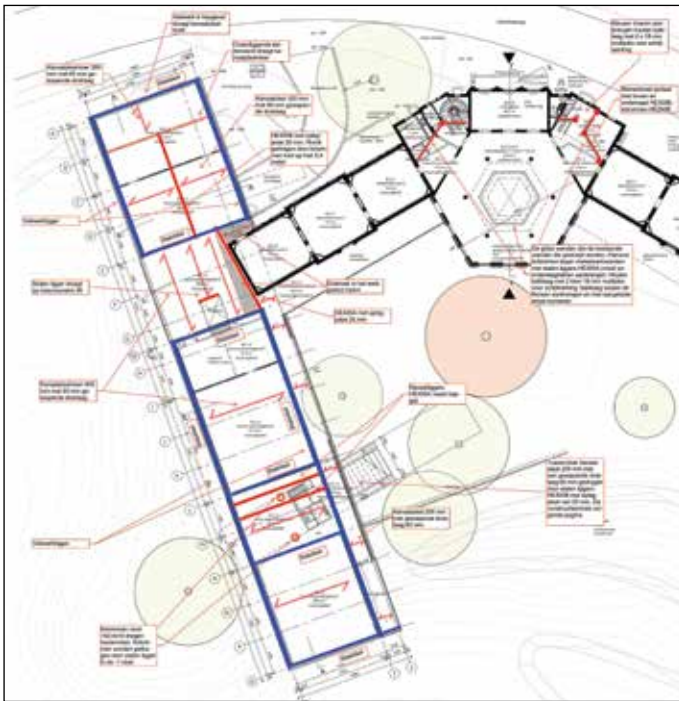


## Vloeren

De afwegingen uit de variantenstudies samen met de wensen van het museum en de architect hebben geleid tot een constructief ontwerp waarbij het volume iets smaller is geworden dan in de eerste studies. Hierdoor is geveloppervlak bespaard en kon de constructie op een voor de museumroute logische plek komen. Het nieuwe volume is ook iets gedraaid ten opzichte van het bestaande gebouw, hierdoor kwam de nieuwe vleugel gunstiger uit op de stuwwal. De vloeroverspanning van de -1 vloer is verdeeld in 2x8,4 m en uitgevoerd in een kanaalplaat van 320 mm dik met druklaag, op de middenas ondersteund door stalen liggers op kolommen.

In de eerste kelderlaag aan de Utrechtsewzijde zijn installatieruimten, de expeditie en ondersteunende functies aanwezig. Hier was het mogelijk om de dragende lijn in het midden van het gebouw door te zetten. Hierdoor kan de vloer van de expositieruimte 2x8,4 m overspannen. Deze vloer is ook uitgevoerd als kanaalplaatvloer eveneens 320 mm dik met druklaag. Voor de expositieruimte aan de Utrechtsewzijde was een kolomvrije ruimte gewenst. Het dak overspant hier wel de volle 16,8 m. Het dak is uitgevoerd als kanaalplaat van 400 mm met een druklaag en rust op de vakwerken in de gevels. Op het dak is rekening gehouden met de belasting uit geballaste pv-panelen en/of een lichte sedumlaag (1 kN/m<sup>2</sup>) en een veranderlijke belasting van

2 kN/m<sup>2</sup>. De expositieruimte aan de Utrechtsewzijde kraagt zo'n 5,4 m uit over de kelderwand. De overspanningsrichting van de vloer van de uitkraging is gedraaid zodat deze overspant van kelderwand naar het vakwerk in de kopgevel. Dit vakwerk hangt weer in de vakwerken in de zijgevels. Aan de Rijnszijde is in de eerste kelderlaag ook een kolomvrije ruimte gewenst vanwege de indeelbaarheid van het kantoor. Ook constructief was het handig om de begane-grondvloer uit te voeren zonder tussenteunpunt. Hierdoor ligt de vloer volledig op de vakwerken en werkt het gewicht van de vloer als contragewicht voor de uitkragingen. De dragende vakwerken zijn hier op as 1 en 3 geplaatst, in de zijgevel aan de westzijde van



Links: variantenstudie constructie.  
 Boven: definitieve constructieve opzet.  
 Rechtsboven: principe hoofdvakwerken.  
 Rechtsonder: detail geïntegreerde ligger, -1 vloer.

het gebouw en in de scheidingswand tussen de expositieruimte en de gang aan de tuinzijde. Hierdoor overspannen de vloeren  $\pm 14$  m. Met een gewenste veranderlijke belasting van  $7 \text{ kN/m}^2$  en de nodige bouwkundige en installatietechnische voorwaarden was dit praktisch de maximaal mogelijke overspanning voor de kanaalplaat 400 mm met druklaag. Het dak is hier identiek als kanaalplaat 400 mm met druklaag. De expositieruimte in de uitkraging is de zogenaamde daglichtzaal. Hier is een lichter staal-/glasdak toegepast. Zowel de vloer van de expositieruimten als het dak rust op de grote vakwerken.

### Vakwerken

Doordat het bestaande gebouw binnen het volume van de nieuwbouw steekt, en er aan de westzijde op deze positie een groot venster geïnstalleerd is, ontstaat een vakwerk met een kleine uitkraging van circa 5,4 m aan de Utrechtsewegzijde en een vakwerk met een grote uitkraging van  $\pm 16,2$  m aan de Rijnszijde. Direct achter de grote uitkraging steekt het openbaar toegankelijke balkon door het gebouwvolume.

In het DO bleek dat de nieuwbouw te duur zou worden. Met het ontwerpteam is gezocht naar mogelijke bezuinigingen. Hierbij zijn een aantal opties bekeken om de uitkraging kleiner te maken, maar de daglichtzaal gelijk te houden. Er is gekeken naar een verkorting van 1,8 m, 2,7 m (half stramien) en 5,4 m (heel stramien). Hierdoor wordt gevelopervlak bespaard, maar ook kan er bespaard

worden op de staalconstructie. Door de verkorting wordt de doorgang voor het publieke balkon dus verkleind. Uiteindelijk is de verkorting van 1,8 m doorgevoerd en is de uitkraging daar verkleind tot 14,4 m. Aangezien de kelder niet verkleind werd, levert dit een wat vreemd constructief schema op waarbij de stabiliteitswand, die in de scheiding tussen daglichtzaal en balkon zit, niet meer boven de kelderwand staat.

Hierdoor is in de hoofdvakwerken een extra diagonaal en kolom nodig om dit punt in het stabiliteitssysteem op te vangen. De stabiliteitskrachten worden verslept via de druklaag. Een bijkomend voordeel is dat de overspanning van de onder- en bovenregel bij de doorgang van het balkon verkleind is. De toegepaste HD-liggers hebben een gunstige doorsnede voor het opnemen van normaalkrachten, bij grote momenten zijn ze wat minder gunstig.

Op de begane grond zijn de expositieruimten gesitueerd. De indeling wordt hier volledig bepaald door de museumroute. In de indeling van de hoofdvakwerken is de indeling van de scheidingswanden tussen deze ruimten wordt de stabiliteit in dwarsrichting van de bovenbouw voorzien. De dakvloer en de begane-grondvloer zijn uitgevoerd als schijf waardoor de krachten uit de stabiliteitselementen in de bovenbouw worden overgedragen aan de stabiliteitswanden in de onderbouw. De vloer en het dak worden gedragen door de onder- en bovenregel van de vakwerken.

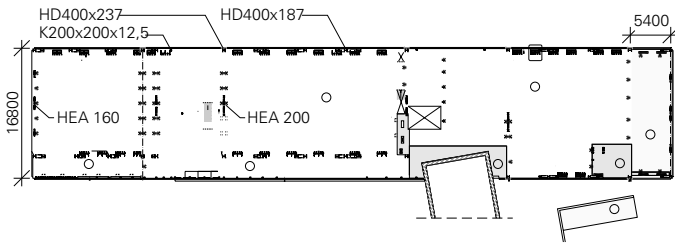
Aan de tuinzijde ligt het dragende vakwerk 2,7 m binnen het volume. De begane-grondvloer overspant hier tussen de onderregel van het vakwerk en de kelderwand op as 4 en is uitgevoerd als een kanaalplaat 200 mm met druklaag. Bij de uitkraging wordt deze vloer gedragen door liggers die loodrecht op de vakwerken uitkragen. Dit is opgelost met momentvaste knopen in het staal en extra wapening in de druklagen.

In de onder- en bovenregels van de vakwerken worden verschillende maten HD-liggers toegepast. Bij deze liggers is de binnenmaat tussen de flenzen gelijk. Bij aansluitingen van de verschillende liggers in elkaars verlengde moet het zwaartepunt van de liggers op dezelfde hoogte liggen. Hiermee varieert de buitenmaat van de onder- en bovenregel van de vakwerken.

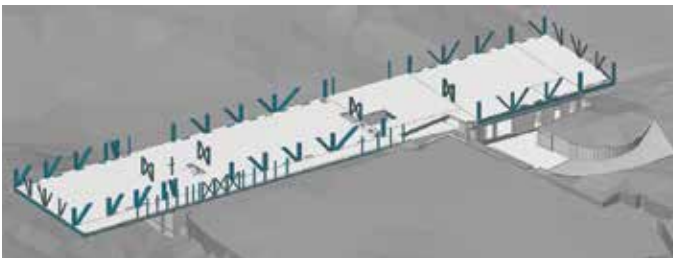
De vloeroplegging is met een plaat op de onderflens van de ligger gemaakt zodat deze altijd op dezelfde hoogte ligt.

### Sparingen

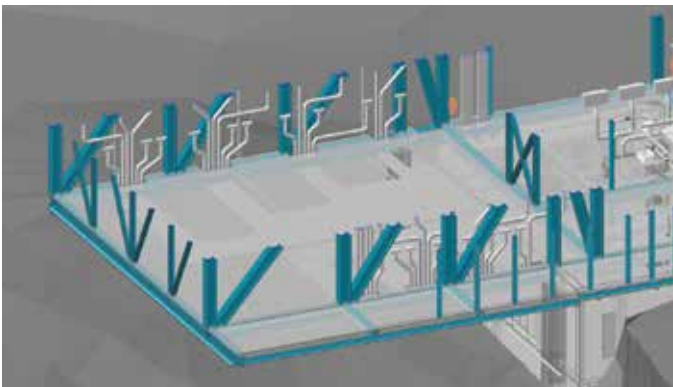
Voor de klimaatinstallaties in het museum zijn veel sparingen nodig door de vloeren vlak langs de opleggingen. Deze sparingen zijn in het ontwerp al afgestemd op de breedte van de kanaalplaten. De sparingen direct bij de oplegging van de kanaalplaten waren niet mogelijk met een standaardreling in de vloer. Hiervoor zijn stalen schoenen aan de onderregel gemaakt waarop de kanaalplaat opgelegd wordt. Met stekwapening wordt de excentriciteit opgenomen.



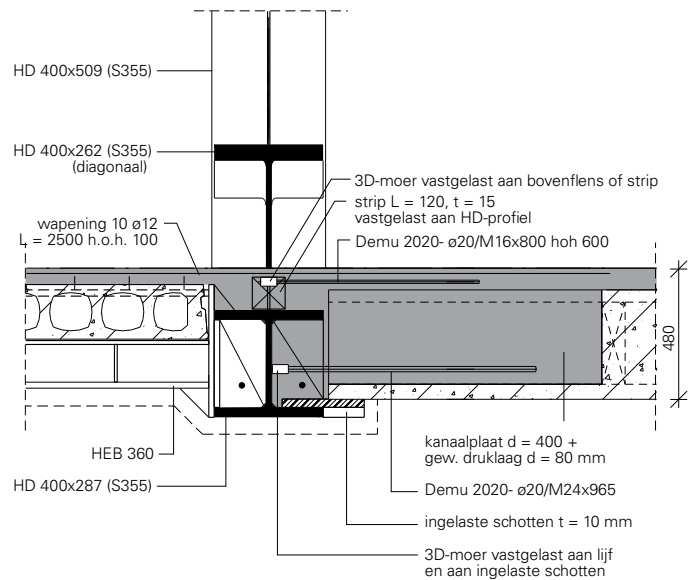
Constructie begane grond met enkele profielgegevens.



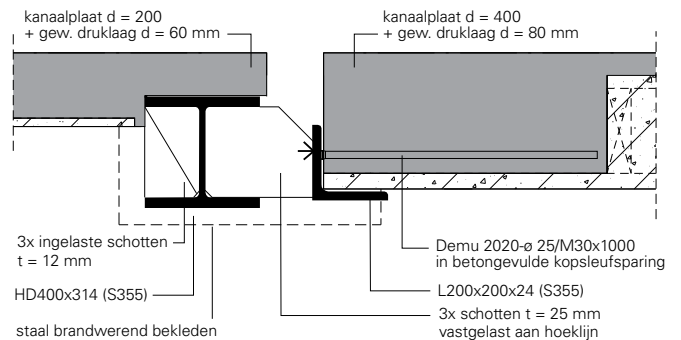
Constructie begane grond in 3D.



Vloerinstallaties in constructie (zie foto linksboven, doorsnede over vakwerk).



Detail vloeroplegging HD-profiel met extra oplegging.



Detail installatiedoorvoer bij oplegging kanaalplaat.

## Tussenvloer

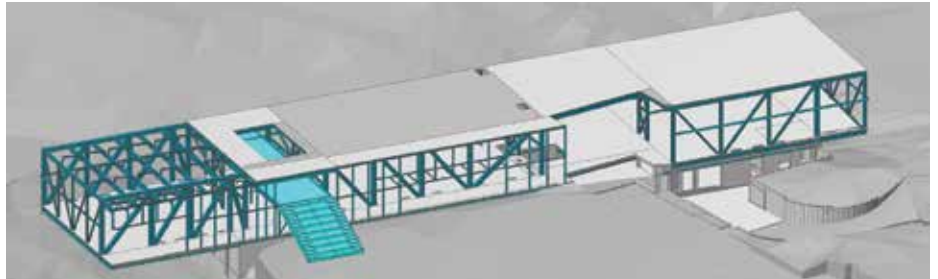
Direct achter de grote uitkraging steekt een tussenvloer door het volume. Deze vloer is een, vanuit de museumtuin, publiek toegankelijk balkon met uitzicht over de Rijn en de uiterwaarden. De vrije hoogte onder- en boven het balkon zijn bepalend voor de hoogte van het gehele volume. De constructie is hierdoor zo slank mogelijk, en zoveel mogelijk geïntegreerd in de vloerdikte. De constructie draagt af op het hoofdvakwerk op as 1, in het midden op kolommen die door de begane-grondvloer steken naar de stalen ligger in de -1 vloer en op de kelderwand op as 4, aan de kant van de museumtuin. De onder- en bovenregel van de hoofdvakwerken zijn op deze locatie, direct achter de uitkraging, maximaal belast op trek en druk.

Daarnaast maken de onder- en bovenregel op deze locatie de grootste overspanning tussen de vakwerk stijlen en diagonalen, waardoor deze, door de belasting uit de vloeren, ook op buiging worden belast. Hierdoor is op deze plek het maatgevende HD-profiel nodig en is deze plek maatgevend voor de hoogte van de nieuwe vleugel. De dwarsstabiliteit van de bovenbouw wordt verzorgd door de constructie in de dwarswanden. De ruimte voor stabiliteitsverbanden is beperkt doordat in deze wanden ook openingen aanwezig zijn en de dikte van de wanden beperkt is. In de beschikbare ruimte is een constructie met kruizen en schoren ontworpen die stabiliteit verzorgt en die ook, op de locaties waar er geen wand onder de constructie aanwezig is, zijn belastingen af-

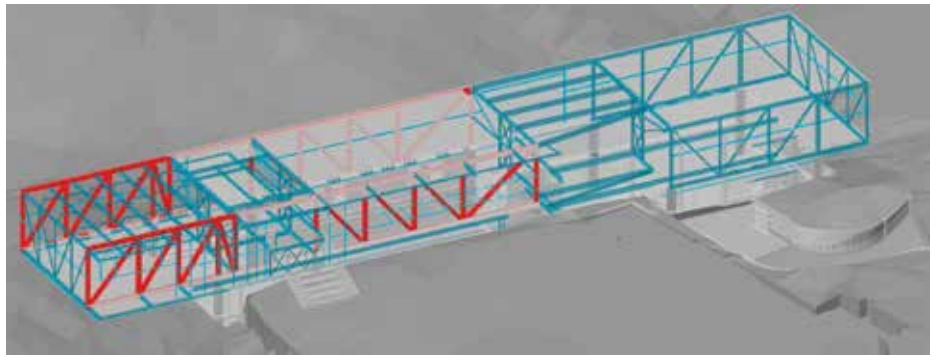
draagt aan de hoofdvakwerken. De vakwerken op as 1 en 3 zijn vergelijkbaar. Het vakwerk op as 3 is wat zwaarder uitgevoerd vanwege de grotere vloerbelasting die erop werkt. Op as 1 loopt de bovenregel van het vakwerk aan de Rijnzijde door naar het vakwerk aan de Utrechtseweg zijde. Voor de uiteindelijke krachswerking hierin is het van groot belang om de bouwvolgorde in de gaten te houden. Dit geldt ook voor de keuze van de vaste- en glijdende ondersteuning. De knopen van de vakwerken zijn voor robuustheid en tweede draagweg volledig doorgelast. Op de momenten nul-punten in de liggers en diagonalen zijn montageverbindingen aangegeven waarin goed te zien is welke taak het samenstellen van deze grote vakwerken met verschillende afmetingen HD-profielen met zich meebrengt.



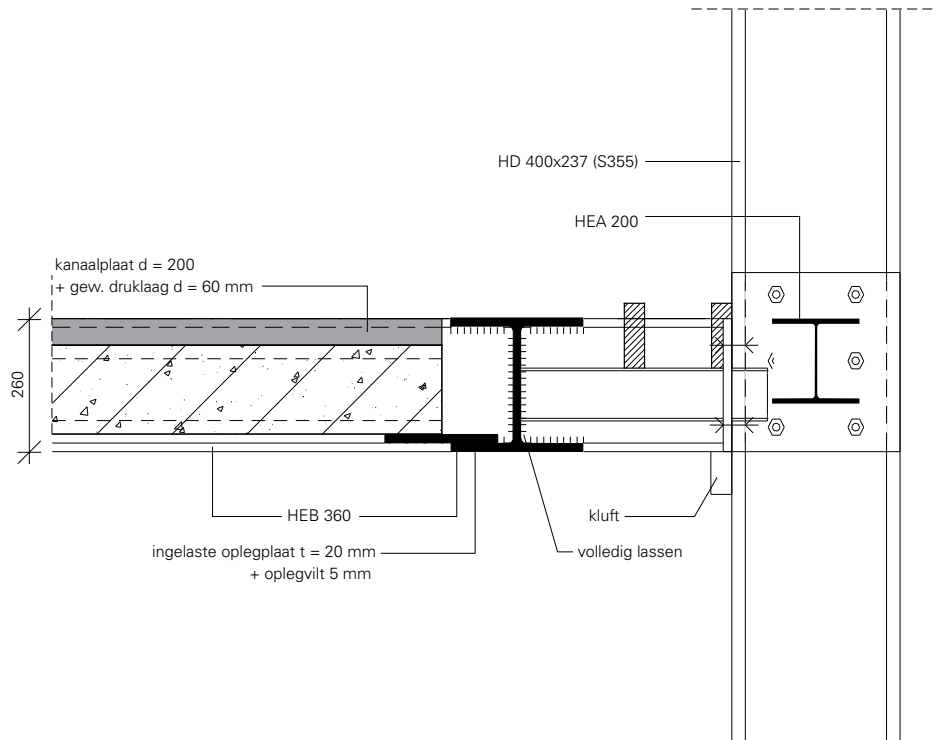
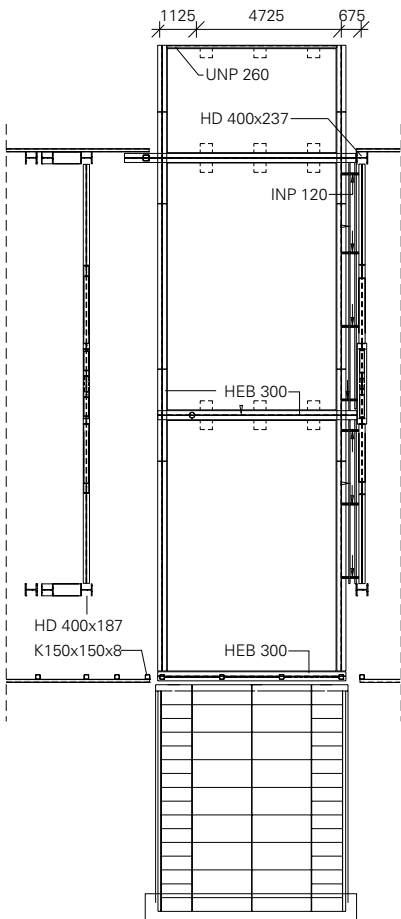
Installatiedoorvoer (zie details links).



Tussenvloer.

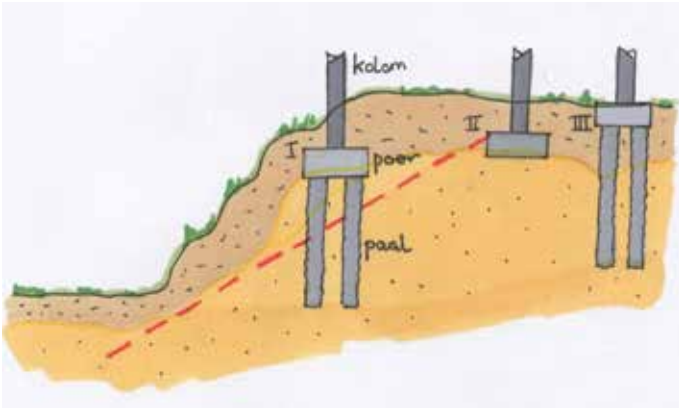


Vakwerken as 1-3 in 3D.



Links: tussenvloer met enkele profielgegevens.

Rechts: oplegdetail tussenvloer.



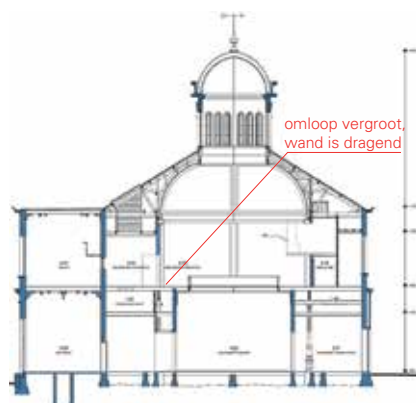
Fundering op palen en op staal naast een steil talud, uit quick-scan ABT.



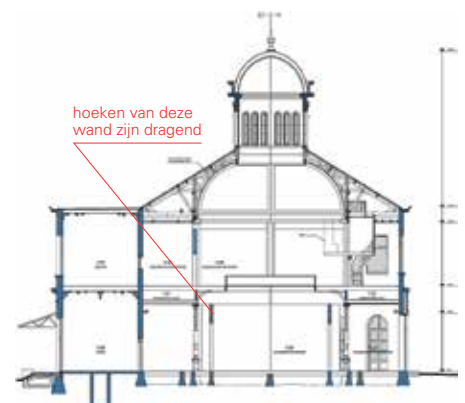
Bouwplaats met palenwand rondom de kop van de bestaande vleugel.



doorsnede ± 1870



bestaande situatie voor 2006



nieuwe situatie 2006

Diverse verbouwingen van de koepel door de jaren heen.

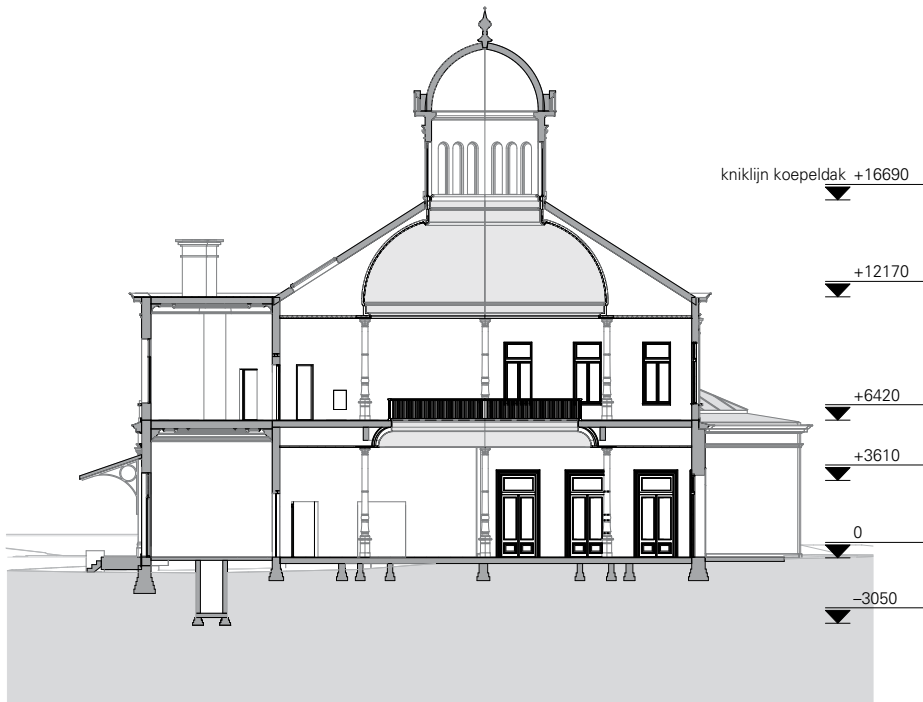
## Uitvoering

In het Besteksontwerp is gekeken naar de mogelijkheden voor de uitvoering en montage van de grote vakwerken. Hierbij was het uitgangspunt dat de knopen van de vakwerken zo veel mogelijk in de fabriek gelast zouden worden en de vakwerken in zo groot mogelijke elementen geplaatst worden. Dit om het aantal boutverbindingen die op hoogte gemaakt moet worden, te minimaliseren. Een belangrijk uitgangspunt voor de aanbesteding was dat het talud onder de vakwerken bij plaatsing is afgegraven tot het niveau van de -2 keldervloer, en dat verdere aanpassingen niet wenselijk zijn. Onderaan het talud kon een zware kraan geplaatst worden. Het ontwerpteam was zich zeer bewust van de moeilijkheid van deze bouwvolgorde. Bij de aanbesteding is dan ook nadrukkelijk aan de inschrijvers gevraagd dit aspect mee te nemen in de aanbidding. Aannemer Rots

Bouw heeft samen met CT deBoer en ABT een plan uitgewerkt waarbij de staalconstructie inclusief de vloeren boven de kelderbak is opgebouwd. De staalconstructie is na plaatsing van de vloeren, druklagen en een deel van de gevel uitgeschoven over een schuifbaan. De staalconstructie is hierbij zoveel mogelijk ondersteund op de plaatsen waar ook de uiteindelijke steunpunten zich bevinden, zodat het constructieve schema niet verandert en vervormingen onder controle blijven. Vanwege het bestaande gebouw, wat gedeeltelijk in het volume van de nieuwbouw steekt, moesten de vakwerken gefaseerd opgebouwd en uitgeschoven worden. De staalbouwer Rijnstaal heeft de vakwerken, de delingen, en de details verder uitgewerkt. In de hal van Rijnstaal zijn de vakwerken voorgemonteerd om de passing te controleren.

## Fundering en bouwplaats

De ondergrond in de stuwwal is een zeer harde, grindachtige ondergrond. In principe is deze ondergrond zeer geschikt voor een fundering op staal. Door de ligging op de rand van de stuwwal en de grote geconcentreerde belastingen uit de bovenbouw was langs de rand van de stuwwal geen fundering op staal mogelijk. In het Besteksontwerp is gekozen om de gehele nieuwbouw op fundex groutinjection palen te plaatsen. Hiermee is het constructief ontwerp eenduidig en eenvoudig. Op de krappe bouwplaats met hoogteverschillen, tussen het bestaande museum en de stuwwal levert het werken met een zware boorstelling echter de nodige uitdagingen op waarvoor in het Bestek een voorstel gedaan is. In de uitvoeringsfase heeft aannemer Rots Bouw, samen met de coördinerend constructeur ABT, die in de voorfase al een verkennende studie naar de mogelijkheden



Huidige koepel.



De koepel met teruggebrachte raampartijen.

van ondergronds bouwen op deze locatie had gedaan, de fundering uitgewerkt als een paal-plaat fundering waarbij de goede draagkracht van de ondergrond gebruikt wordt en enkel aan de rand van de stuwwal en onder de grote geconcentreerde belastingen uit de bovenbouw palen worden toegepast om te voorkomen dat het grondmassief afschuift. De nieuwe kelder ligt één laag dieper dan de kelder onder de bestaande westvleugel van het museum. Het bestaande museum is op staal gefundeerd. Om tijdens de uitvoering van de nieuwe kelder verzakkingen aan het bestaande gebouw te beperken, is in het ontwerp rekening gehouden met een waterglasinjectie onder het bestaande gebouw. Hierdoor kan praktisch verticaal worden afgegraven naast de bestaande funderingen. In de uitvoeringsfase is dit plan door de aannemer en de coördinerend constructeur vervangen door een palenwand rondom de bestaande vleugel. Dit was alleen mogelijk in combinatie met de andere doorgevoerde wijzigingen in het funderingsontwerp aangezien er in het oorspronkelijke ontwerp grote poeren dicht bij het bestaande gebouw geïnstalleerd waren die zouden botsen met de palenwand en gording. •

#### Koepel

Oorspronkelijk was de koepel een open ruimte met een grote vide. Grote vensters gaven zicht op de tuin waarvandaan je over de Rijn en de Betuwe uitkeek. Bij de verbouwing tot museum in 1920 zijn de vensters grotendeel dichtgezet en wanden in de koepel geplaatst waarmee expositieruimte voor de kunstcollectie gemaakt werd. De wand op de begane grond was direct ook dragend voor de omloop op de verdieping die vergroot was. Op de begane grond stond de wand binnen de monumentale gietijzeren kolommen. Op de verdieping is een metselwerkwand in de lijn van de kolommen geplaatst waarmee de kolommen niet meer zichtbaar waren. In 2006 is het museum flink verbouwd. Op dat moment is het bovenste deel van de dragende wand op de begane grond verwijderd en vervangen door een staalconstructie. Hiermee ontstond ruimte voor verlichting, en bleef de grote omloop op de verdieping behouden. De staalconstructie gebruikte nog altijd de metselwerk wand als ondersteuning. Bij de huidige verbouwing was de wens om alle metselwerk wanden in de koepel te verwijderen en de koepel weer te openen. Bij verwijdering van een stuk metselwerk op de verdieping bleken de oude kolommen er nog te staan. De in 2006 aangebrachte staalconstructie bleek echter niet verbonden aan de bestaande kolommen. De vernieuwde, open koepel is mogelijk gemaakt door de omloop op de verdieping weer iets te verkleinen en de staalconstructie uit 2006 op de bestaande kolommen op te leggen. Door het verkleinen van de omloop neemt de belasting op de bestaande kolommen slechts minimaal toe. De oplegging is gemaakt door de ruimte tussen de oorspronkelijk aangegoten krans en de liggers uit te vullen. De bestaande kolommen zijn getoetst op de nieuwe belastingen. Hierbij is de huidige toetsingsmethode vergeleken met de oude toetsingsmethode zoals omschreven in diverse literatuur. Deze literatuur geeft een goed inzicht in de oude rekenmethoden. In de oude methode wordt de veiligheid volledig aan de materiaalzijde genomen, in de huidige methode zit deze zowel aan de materiaal als aan de belastingzijde. Bij de toetsing zijn de belastingen in de oorspronkelijke situatie bepaald, daarmee is de kolom volgens de oude literatuur gedimensioneerd. Deze dimensionering kwam overeen met de metingen die aan de bestaande kolommen zijn gedaan. Volgens diezelfde oude toetsingsmethode, met de nieuwe belastingen zou de bestaande kolom niet voldoen. Daarom is met de huidige methode, belastingen inclusief de geldende partiële factoren, een lage druksterkte zoals vroeger aangehouden en met een lage E-modulus getoetst. Daarmee voldeed de kolom. Met deze toetsing zijn aan de belastingzijde de huidige partiële factoren aangehouden terwijl aan de materiaalzijde de oude '7-voudige zekerheid' zit, aangezien de oude, lage druksterkte is aangehouden. In 2006 is dus terecht geconcludeerd dat de belasting van de toen nog grotere omloop niet door de kolommen gedragen kon worden.