



Constructie van het Pantheon

Beschrijving

Hoe is het mogelijk dat het Pantheon al 2000 jaar oorlogen, branden, revoluties en aardbevingen, nagenoeg ongeschonden heeft kunnen doorstaan? De enige schade die is geconstateerd zijn *meridiane scheuren in het onderste deel van de koepelschaal*.

Constructieve maatregelen

Van Herwijnen, in zijn intreerede in 1999 aan de Technische Universiteit Eindhoven getiteld: *Constructief ontwerpen : van Pantheon tot Millennium Dome*, geeft de volgende mogelijke antwoorden:

â??Door vier constructieve maatregelen is het draagvermogen van de koepel in gunstige zin beïnvloed:

1. Door toepassing van toeslagstoffen met een lagere soortelijke massa neemt de permanente belasting van de koepelschaal in de richting van de oculus sterk af. In de rotonde werd **travertin** gebruikt met een soortelijke massa van 2000 kg/m^3 ; in de bovenste helft van de koepel **tufsteen** van 1350 kg/m^3 . De spanningen in de koepel zouden tweemaal zo groot zijn als voor de koepel hetzelfde zware beton was toegepast als gebruikt is voor de rotonde.
2. Door het aanbrengen van cassette-vormige uitsparingen werd een gewichts-reductie bereikt, terwijl de meridiaan- en ringkrachten door de ribben kunnen worden overgebracht. De stijfheid van de koepelwand neemt hierdoor echter af, waardoor het gunstige effect gedeeltelijk wordt tenietgedaan. Het is niet duidelijk of deze cassettes bewust om constructieve redenen zijn aangebracht of louter uit esthetische overwegingen.



Cassettes nagenoeg in lijn

3. De oculus heeft als voordeel dat geen verticale belasting aanwezig is in dat gedeelte van de koepel, waar deze het meest ongunstig is, namelijk werkend laadrecht op het schaalvlak. Maar er is nog een andere reden waarom deze grote opening voor de Romeinen gunstig was.

Bij de uitvoering van de koepel werd het **opus caementicium** laagsgewijs aangebracht. Iedere laag vormde een horizontale ring die zichzelf kon dragen en voordat de laag volledig uitgehard was, al belast kon worden door de volgende laag. Daarom wordt verondersteld dat er geen volledig ondersteunende bekisting nodig was voor het dragen van het totale koepelgewicht, maar louter een stelsel van houten formelen die als sjabloon voor de koepelvorm dienden.

Deze bouwwijze kon moeilijk toegepast worden voor de bovenzijde van de koepel; daarom werd de schaal maar weggelaten en ontstond de grote opening. Het feit dat alle bewaarde Romeinse koepels in de top voorzien zijn van een oculus, wijst er mijns inziens op dat deze bouwwijze succesvol was.

4. Bij de aanzet van de koepel is een trapvormige verdikking aangebracht die de koepelschaal versterkt, maar ook een extra boven belasting geeft ter vergroting van de opnamecapaciteit voor horizontale schuifspanningen bij de oplegging.

Computerberekeningen van de koepel op basis van een eindig elementenmodel waarin de meridianen scheuren in het onderste deel van de koepelschaal zijn meegenomen, tonen duidelijk aan dat de trapvormige verdikking een belangrijke rol speelt in het reduceren van ring-trekspanningen.

De kwaliteit van het constructief ontwerp wordt mede bepaald door de vormgeving van details; in die zin spreken we ten onrechte over details. Ook bij het Pantheon is aandacht besteed aan details. Zo is de randprofielering van de cassettes zodanig vormgegeven, dat deze van onderen gezien voor alle posities van de cassettes in het bol vlak dezelfde breedte geeft.



Cassettes in het Pantheon

In het klassieke bouwproces werd geen onderscheid gemaakt tussen het ontwerpen en maken van gebouwen. Vormgeving, materiaalkeuze en constructiewijze werden bepaald door lokale omstandigheden, traditie en voorschriften. Architectuur en techniek waren harmonieus verbonden.â??

In vorige berichten hebben we gezien dat we enige vraagtekens kunnen zetten bij de achterliggende gedachtes voor de constructie van de cassettes en de oculus. Maar ook tegen die achtergrond gaan het ontwerp (architectuur) en techniek samen.

Materiaal

In de master scriptie *â??De kracht van het Pantheonâ??* van Steffie Oostendorp uit 2015 (begeleider Professor Moormann), lees ik het volgende:

â??Een internationaal team van onderzoekers, verbonden aan onder andere de *Universiteit van Berkeley*, het *Lawrence Berkeley National Laboratory* en de *Cornell Universiteit*, heeft het op zich genomen om de exacte samenstelling van het in het Pantheon gebruikte beton te ontdekken. Deze groep wetenschappers, voornamelijk civiele en milieukundige technici, stond onder leiding van een vulkanoloog.

De uitkomsten van het onderzoek waren groot nieuws. *“Ancient Roman builders may be responsible for making a truly revolutionary impact on modern architecture, one massive concrete structure at a time.”*

Recept van Vitruvius

Zij hebben het Romeinse materiaal gereproduceerd naar het recept van *Vitruvius*. Dit betonmengsel, zo fijn dat het mortel genoemd kan worden, bestaat uit een mix van vulkanisch as en kalksteen. Het vulkanische as was voldoende aanwezig: Rome had immers genoeg gedoofde vulkanen in de buurt en goede verbindingswegen (alle wegen leidden immers naar Rome) om het benodigde materiaal te vervoeren. Daarnaast was kalksteen ook voorradig, al was niet elke soort kalksteen geschikt voor het maken van beton. Vitruvius meldt namelijk met nadruk dat de ideale steen om in het beton te verwerken het harde witte kalksteen was: de zachte, donkere variant was meer geschikt voor pleisterwerk.

Romeins beton

Na het betonmengsel een half jaar te hebben laten drogen, hebben de onderzoekers het nauwkeurig bestudeerd onder een microscoop. Zij ontdekten dat er tijdens het uitharden dichte clusters van mineralen waren ontstaan. Deze mineralen waren het gevolg van de binding tussen de kalksteen en het vulkanisch as. Deze mineralen worden *stralingiete kristallen* genoemd. Deze kristallen konden het optreden van barsten in het materiaal voorkomen door de zwakste schakels binnen het beton te versterken: de zogeheten grensvlakzones. Dit zijn de dunne laagjes tussen twee lagen beton die doorgaans minder beton en meer water bevatten. Door de zwakke schakels te elimineren, hebben de Romeinen een zeer duurzame soort beton uitgevonden!

Modern beton

Met het moderne beton gebeurt iets vergelijkbaars, al is dit geen natuurlijk maar een chemisch proces. Aan ons huidige beton worden namelijk microvezels toegevoegd die net als de *stralingiete kristallen* de grensvlakzones van het materiaal moeten versterken. Deze microvezels halen het echter niet bij de kristallen. Deze mineralen geven niet alleen een veel betere versteviging van het materiaal, ze zorgen er ook voor dat het beton resistent is voor corrosie. De moderne microvezels doen het laatstgenoemde niet.

Maar ook de functie die het Pantheon door de eeuwen heen heeft gehad, heeft bijgedragen aan haar goede conservering. Daarover meer in de volgende berichten.

Datum aangemaakt

2021/02/04