

ERFGOED BRUSSEL



Een publicatie van het Brussels
Hoofdstedelijk Gewest



DOSSIER
DE KUNST VAN HET BOUWEN

N°003 - 004

SEPTEMBER 2012



SPECIAAL NUMMER
OPEN MONUMENTENDAGEN
BRUSSELS HOOFDSTEDELIJK GEWEST



Vóór de tijd van de ingenieurs

DE GESCHIEDENIS VAN ENKELE KOPELDAKEN

BERNARD ESPION

Ingenieur en bouwhistoricus, professor aan
de Université libre de Bruxelles

Grote koepeldaken - van de antieke Romeinse koepels tot de reusachtige lichte structuren die in 1988 de olympische stadia in Seoul overwelfden - hebben voor architecten en ingenieurs altijd de grootste uitdaging gevormd op het vlak van constructie en stabiliteit, behalve wellicht in de gotiek. De evolutie van deze koepeldaken, van de renaissance tot de opkomst van de ingenieursscholen in de 19de eeuw, werpt ook een licht op de toenemende differentiatie tussen het beroep van architect en dat van ingenieur.

Sinds het Romeinse Pantheon waren grote koepeldaken - het ontwerp, de bouw of analyse a posteriori van hun stabiliteit (in het geval van een mislukking) - altijd opmerkelijke etappes in de bouwkunst. Deze grote structuren leverden architecturale modellen die op kleinere schaal in eindeloze variaties werden gereproduceerd. Vanaf het einde van de 17de eeuw zijn hiervan in Brussel talrijke voorbeelden te vinden.

DE TIJD VAN DE INGENIEURS

Klassiek situeert men het begin van wat we hier aanduiden met 'de tijd van de ingenieurs' rond de overgang tussen de 18de en de 19de eeuw. De ingenieur zou een belangrijke en duidelijk omliggende rol spelen tijdens de industriële revolutie. Vanaf 1800 was zijn vorming almaar meer gebaseerd op wetenschappen in volle ontwikkeling, zoals wiskunde, mechanica, scheikunde en thermodynamica. De eerste ingenieursschool waarvan

het curriculum op deze disciplines was gebaseerd, was de in 1794 in Parijs opgerichte *Ecole Polytechnique*. De eerste Belgische ingenieurs met een academische vorming waren daar opgeleid, bijvoorbeeld Jean-Baptiste Vifquain, die er in 1814 afstudeerde. In België werd de eerste ingenieursschool in 1838 ingehuldigd aan de universiteit van Gent. Ze was geïnspireerd op het model van de *Ecole Centrale des Arts et Manufactures* die in 1829 in Parijs was opgericht.

Op het vlak van bouwen, ruimtelijke ordening en openbare werken waren het de ingenieurs die de nieuwe materialen van de industriële revolutie introduceerden. In België werd gewalst staal echter pas tijdens het Nederlandse bewind geproduceerd. De eerste Belgische fabriek voor cementklinker opende pas in 1872 in Cronfestu (Morlanwelz). Zonder cement geen beton, in de moderne betekenis van het woord, en nog minder gewapend beton. De periode waarin de eerste moderne ingenieurs in België actief werden, was *mutatis mutandis* min of meer dezelfde als in de rest van Europa. De enige opmerkelijke uitzonderingen waren Engeland (1818) en Frankrijk (1823), waar een nieuw type brug werd ontwikkeld dat in de plaats kwam van de traditionele gemetselde bruggen: de hangbrug.

Het onderscheid tussen het beroep van architect en dat van ingenieur kwam geleidelijk aan tot stand vanaf de renaissance tot het einde van de 18de eeuw.

Deze nieuwe structuur was van staal en werd op een wetenschappelijke manier ontworpen door ingenieurs. In België werd de eerste hangbrug in 1824 geconstrueerd door Vifquain. Hij ontwierp een hangende loopbrug van 23 m spanwijdte voor het kasteel Wissekerke in Bazel, het landgoed van de burggraven Vilain XIII.

Bestonden er dan vóór de 19de eeuw geen ingenieurs? Was de ontwerper van de *Pont du Gard* dan geen ingenieur? En de bouwmeesters van de gotische kathedralen, waren die niet zowel ingenieurs als architecten? Natuurlijk wel. Maar het onderscheid tussen het beroep van

architect en dat van ingenieur kwam geleidelijk aan tot stand vanaf de renaissance tot het einde van de 18de eeuw. Deze evolutie volgde drie grote lijnen: specialisatie op het vlak van de bouw, specialisatie van de professionele kennis en literatuur en, in de 18de eeuw, specialisatie van de opleiding.

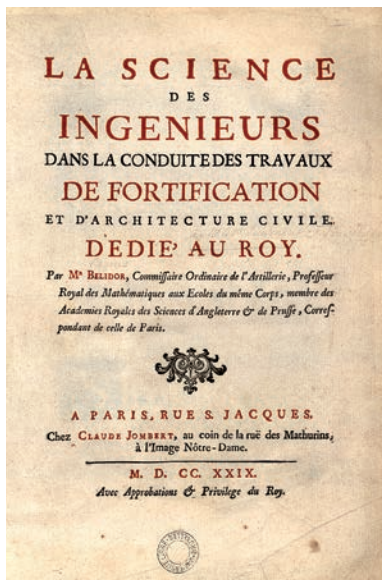
Tijdens de renaissance in Italië schakelden ingenieurs en architecten vaak over van de ene rol naar de andere. Ze waren ingenieurs als ze vestingwerken en machines bouwden en architecten als ze paleizen of kerken bouwden. De basisopleiding - een opleiding in een atelier - was vaak dezelfde. Later werd de term ingenieur meer en meer voorbehouden voor iemand die belast was met militaire geniewerken, en in de 18de eeuw voor iemand die hydraulische constructies ontwierp. De architect was iemand die gespecialiseerd was in de bouw van burgerlijke en religieuze gebouwen.

Het eerste technische instituut gewijd aan de bouw in Frankrijk was de *Académie Royale d'Architecture*, in 1671 opgericht op initiatief van Colbert door François Blondel, militair ingenieur en architect van Lodewijk XIV. Het korps van militaire ingenieurs werd in 1675 opgericht en de *Ecole Royale du Génie de Mézières* in 1748. Het *Corps ingénieurs des Ponts et Chaussées* werd in 1716 opgericht en in 1747 de *Ecole des Ponts et Chaussées*, waar ingenieurs belast met ruimte-

lijke ordening werden opgeleid. In de tweede helft van de 18de eeuw verschenen in Engeland de eerste 'burgerlijk' ingenieurs. In de moderne betekenis van het woord is de burgerlijk ingenieur een onafhankelijk raadgevend ingenieur die plannen ontwerpt voor de aanleg van kanalen, het droogleggen van moerassen en de bouw van dijken en havens, en die de rentabiliteit daarvan berekent. Hij is tevens verantwoordelijk voor de uitvoering van deze projecten en ontwerpt ook alle technische uitrustingen zoals pompen en de eerste stoommachines. In tegenstelling tot Frankrijk was er in België geen specifieke opleiding voor ingenieurs. Het

beroep werd geleerd tijdens een opleiding bij vaklui of bij ingenieurs. In de eeuw van de verlichting ontstonden in heel Europa openbare of privétekenshoolen of kunstacademies. In 1720 waren er in totaal negentien dergelijke scholen en in 1790 meer dan honderd, waarvan een tiental in de Oostenrijkse Nederlanden. Deze academies waren uiteraard de geprivilegieerde opleidingsinstellingen voor architecten. De *Académie de Bruxelles*, in 1763 opgericht op initiatief van Karel van Lotharingen, kreeg in 1766 een architectuurfdeling.

Op het einde van de middeleeuwen, aan de vooravond van de uitvinding van de boekdrukunst, was de enige bekende architectuurhandleiding *De Architectura*, die Vitruvius, die waarschijnlijk meer ingenieur was dan architect, in de 1ste eeuw v.Chr. schreef. Het werk kende een grote verspreiding. Er zijn vandaag nog meer dan 55 handgeschreven - allemaal niet-geïllustreerde - kopieën van bekend. Het ligt aan de basis van alle architectuurboeken en alle compendia over de technologie van de bouw. De eerste gedrukte editie verscheen in 1486, de eerste geïllustreerde versie in 1550. Hoewel het boek een unieke getuigenis is van de kennis van de bouwers uit de oudheid, is het ook nog altijd een boek met praktische regels en empirische methodes. De hierin vervatte kennis vormde in elk geval de basis van de praktijk van ingenieurs en architecten in de 15de eeuw. In 1739 werden de prewetenschappelijke kennis en ervaringen van ingenieurs samengebracht in *La Science des Ingénieurs* van Bernard Forest de Bélidor (afb. 1) en later in zijn *Architecture Hydraulique* (1737-1753), dat bijna een eeuw als norm zouden gelden voor ingenieurs. Voor architecten was het de *Cours d'Architecture* (1771-1777) in negen delen, gepubliceerd door Jean-François Blondel, kleinzoon van François Blondel, die in zijn tijd het standaard referentiewerk werd. Hoewel er stilaan een differentiatie kwam tussen architect en ingenieur, neemt dat niet weg dat op het einde van de 18de eeuw de beroepen nauw bij elkaar aanleunden. Tijdens het ancien régime waren aan de *Ecole des Ponts et Chaussées* en aan de *Polytechnique* zelfs nog in het begin van de 19de eeuw het vak architectuur en de praktijk



Afb. 1

FOREST DE BELIDOR, B.,
*La science des ingénieurs dans
 la conduite des travaux de
 fortification et d'architecture
 civile*, Parijs, 1729 (© ULB,
 Réserve précieuse).

INGENIEUR

Het woord ingenieur komt van het Latijnse *ingenium*, dat mogelijk afkomstig is van *geno*, wat een 'aangeboren, natuurlijk karakter' of 'genie, natuurlijke neiging van de geest' betekent. In de 12de eeuw verscheen de term *ingeniator* en in de 13de eeuw *ingeniosus*. Deze termen hadden allebei betrekking op een vakman gespecialiseerd in oorlog. In dezelfde periode werd de middeleeuwse betekenis van het woord *ingenium* in het Frans 'engin' (toestel, machine) en werd de ingenieur dus iemand die machines ontwerpt.

van architectuurontwerpen een belangrijk onderdeel van de vorming van de toekomstige ingenieurs. De ingenieurswetenschap maakte net als architectuur deel uit van de grensdisciplines tussen de mechanische en de vrije kunsten.

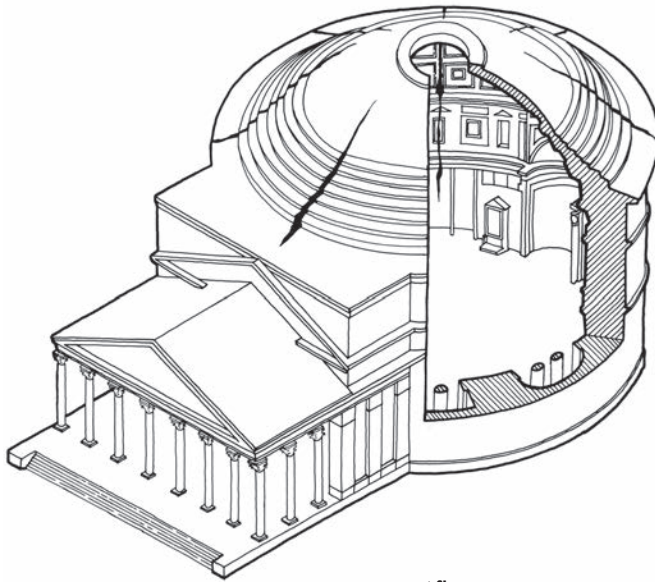
DE KUNST VAN HET BOUWEN... KOEPELDAKEN

We willen hier geen algemeen overzicht van de bouwkunst voor 1830 brengen. Daarvoor bestaan encyclopedieën over de geschiedenis van de techniek of de bouwkunst. Wij zullen ons beperken tot de notie 'Grote Kunst'. Dat wil zeggen dat wij het vooral zullen hebben over opmerkelijke constructies die, elk in hun tijd, een uitdaging waren voor de mensen die ze bedachten en bouwden en die opmerkelijke verwezenlijkingen waren in de evolutie van de kennis van de bouwkunde. Met deze rode draad als uitgangspunt is het duidelijk dat Brussel, dat in de 19de eeuw op Europees vlak slechts een kleine stad was, vóór de 20ste eeuw geen rol van betekenis speelt waar het experimenten betreft die hebben bijgedragen aan de verrijking van de kunst van het bouwen. Niettemin zal blijken dat in het Brusselse erfgoed vanaf de 18de eeuw constructies te vinden zijn die in sommige - vooral symbolische - opzichten aansluiten bij de traditie van deze grote bouwwerken.

Het is verleidelijk om in de 'megastructuren' van elke periode constructies te zien die aan deze definitie van de kunst van het bouwen beantwoorden. Als we de gotiek - toen de bouwkunst haar bravoure toonde door middel van de gewelven op spitsbogen en steunbogen van kathedralen - buiten beschouwing laten, is het veelzeggend dat sinds de Romeinse tijd tot zelfs in het begin van de 20ste eeuw deze buitengewone constructies altijd koepeldaken of koepelgewelven hadden. De rationele verklaring die de moderne ingenieur daarvoor geeft, is dat de koepel een structuur is die toelaat om met metselwerk of hout grote ruimten te overspannen zonder tussensteunen, dankzij zijn driedimensionale werking, in tegenstelling tot het tweedimensionale van bogen en balken.

Antieke koepels

Het Pantheon van Agrippa staat bekend als de eerste grote koepel en het eerste meesterwerk van de Romeinse bouwkunst. Het werd in het jaar 123 voltooid tijdens het bewind van Hadrianus. Het is een koepel van 43 m binnendiameter in een soort 'beton', waarvan het bindmiddel geen kunstmatige cement was maar kalk. Het duurde veertien eeuwen voor dit uitzonderlijke bouwwerk zou overtroffen worden door een grotere koepel, en pas in het begin van de 20ste eeuw zou een nog grotere koepel



Afb. 2

Perspectiefzicht en doorsnede van het Romeinse Pantheon, met aanduiding van de natuurlijke scheurvorming, fel overdreven, van de gemetselde koepels (MARK, R. (red.), *Architectural Technology up to the Scientific Revolution. The Art and Structure of Large-Scale Buildings*, The MIT Press, 1995, p. 143).

in gewapend beton worden gebouwd. Zoals vaak het geval is met gebouwen uit de oudheid, zijn we voor deze koepel aangewezen op gissingen wat betreft de gebruikte bouwmethode. De resultaten van het petrografisch onderzoek lijken er niettemin op te wijzen dat het soortgelijk gewicht van het gebruikte materiaal vermindert naarmate het zich hoger boven de muren en dichter bij de

Het Pantheon van Agrippa staat bekend als de eerste grote koepel en het eerste meesterwerk van de Romeinse bouwkunst. Het werd in het jaar 123 voltooid tijdens het bewind van Hadrianus.

oculus aan de top bevindt, wat zou wijzen op een intuïtief inzicht in de structurele werking bij de ontwerper. De dikte van de muren van de tamboer en van de aanzetten van de koepel en ook de aanwezigheid van straalsgewijze

scheuren in de koepel lijken er duidelijk op te wijzen dat dit metselwerk, in tegenstelling tot alle koepels die vanaf de renaissance werden gebouwd, niet door wapeningen is versterkt. In een koepel doet de natuurlijke belasting onder eigen gewicht in de lagere gedeelten van het gewelf namelijk trekkrachten ontstaan die volgens parallelle cirkels of niveaulijnen verlopen, en die de neiging hebben om in het metselwerk scheuren te doen ontstaan die vertrekken van de basis van de koepel en zich straalsgewijs, loodrecht op de meridiaanlijnen, naar de top uitspreiden (afb. 2).

Deze scheuren wijzigen de verdeling van de interne krachten in vergelijking met de niet gescheurde toestand. Als de koepel onderaan niet is omgord met een horizontale omringende verankering*, oefent de basis van de koepel een

grote druk uit op de muren van de tamboer die de koepel dragen en die ofwel heel dik moeten zijn, ofwel gesteund moeten worden door schoormuren.

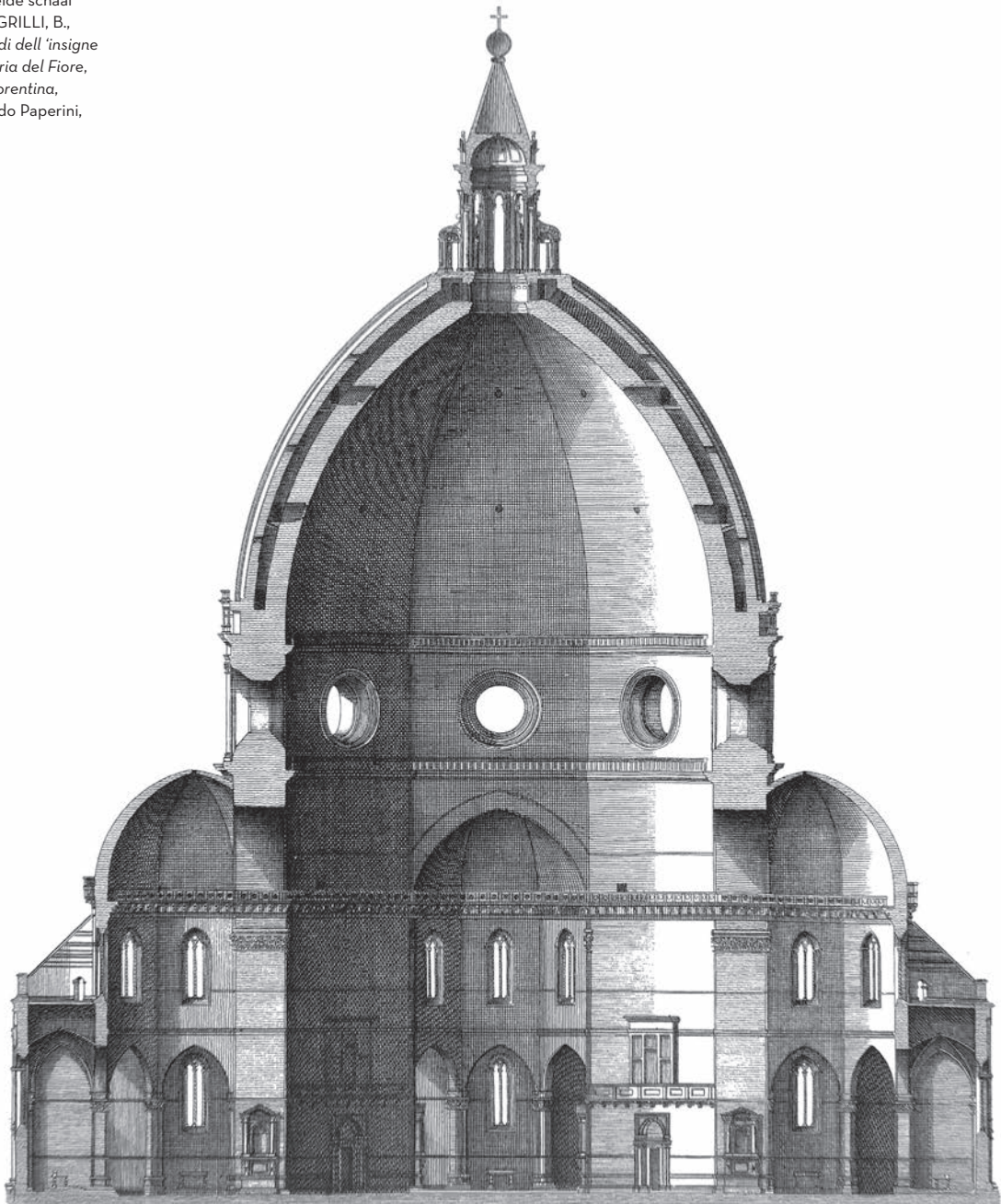
Ook het koepeldak van de *Aya Sofia* in Istanbul is een van de indrukwekkende exemplaren uit de oudheid. In zijn huidige structuur dateert het van de 6de eeuw. Met een diameter van slechts 31 m aan de basis is zijn spanwijdte duidelijk kleiner dan die van het Pantheon, hoewel het uiteindelijk boven een veel grotere vrije ruimte staat. Het betreft hier een koepeldak in ongewapend metselwerk van bakstenen en we kunnen er vrijwel zeker van zijn dat voor de bouw ervan, net als voor het Romeinse Pantheon, een houten boogbekisting* is gebruikt. Gezien de *Aya Sofia* tot aan de val van het Byzantijnse rijk in 1453 een van de belangrijkste kerken van het christendom was, is haar koepeldak bepalend geweest voor de architecturale typologie van christelijke en ook orthodoxe kerken in het Oosten, en trouwens ook voor moskeeën.

Het koepeldak van de kathedraal van Florence

Na de romaanse en daarna de gotische bouwstijl van de middeleeuwen verscheen tijdens de Italiaanse renaissance plots de indrukwekkende structuur van de koepel van de kathedraal *Santa Maria del Fiore* in Florence (afb. 3). Toen Filippo Brunelleschi na een wedstrijd in 1420 de opdracht kreeg voor de uitvoering van deze koepel, moest hij rekening houden met de beperkingen die zijn voorgangers op de werf hem hadden nagelaten: de muren van de tamboer op de kruising van het transept waren al gebouwd en determineerden het octagonale grondplan van de koepel en ook de afmetingen van zijn basis. Ze hadden dus waarschijnlijk de uit de 12de eeuw daterende koepel van het vlakbij gelegen *battistero* voor ogen als model voor het te bouwen koepeldak van de kathedraal. De schaal van de koepel van de kathedraal was echter veel groter en zonder precedent. De uitdaging was dus enorm. Van Brunelleschi weten we dat hij werd opgeleid in een atelier van een zilversmid en dat hij, voor hij in 1420 de opdracht kreeg om de koepel van de kathedraal te bouwen, werkzaam was geweest als 'ingenieur'

Afb. 3

Doorsnede van de kathedraal van Florence met de dubbele gemetselde schaal (in: SANSONE SGRILLI, B., *Descrizione e studi dell'insigne fabbrica di S. Maria del Fiore, metropolitana Fiorentina*, Florence, Bernardo Paperini, 1733).



60 100
Scala di p. 100. Romani

10 20 30 40 50
Scala di braccia Fiorentina

Taglio del medesimo Tempio fatto Sulla Linea IK della Figura II.

KOEPELDAK OF KOEPEL?

Het koepeldak en de koepel zijn aanverwant, zowel qua vorm als qua structurele werking. Daarom worden 'koepeldak' en 'koepel' vaak als synoniemen gebruikt, hoewel met de term koepel meestal wordt verwezen naar het binnenwelfvlak van het gewelf en met de term koepeldak naar het buitenwelfvlak. In beide gevallen gaat het om een doorlopend, concaaf gewelfd oppervlak dat op een cirkelvormige, elliptische of soms veelhoekige basis rust. Sommige koepels hebben een grote centrale opening, de oculus, die echter hun structurele werking niet beïnvloedt.

voor militaire constructies en als 'architect' voor burgerlijke bouwwerken. Tijdens de werken aan de koepel van de kathedraal was hij tegelijk bezig met de bouw van vestingwerken en van kerken in de streek van Florence.

Brunelleschi werd ingenieur-architect van de koepel omdat hij zijn opdrachtgevers ervan kon overtuigen dat hij hem zou bouwen zonder gebruik te maken van een boogbekisting noch van een stelling die op de vloer van de kathedraal zou rusten. Hij wilde obsessief het geheim van zijn kunst bewaren en verspreidde dan ook geen enkel detail over de middelen en technieken die hij wilde inzetten. Moderne archeologische analyse van de structurele en bouwkundige kenmerken van het koepeldak heeft aangetoond dat hij in zijn opzet kon slagen dankzij de toepassing van vernieuwde methodes. Eerst en vooral bestaat de koepel, waarvan de diameter binnen de achthoek 42 m is (45,5 m tussen de punten van de achthoek) uit een dubbele schaal van gemetselde bakstenen. De dikte van de binnenkoepel is 2,2 m en de totale dikte van de twee koepels is 4,2 m. De twee koepels zijn versterkt door radiale nerven en de buitenkoepel rust op de binnenkoepel. Een tweede belangrijk punt is het speciale 'visgraat'-metsel-

De bouw van de koepel van de kathedraal van Florence kon meer dan waarschijnlijk tot een goed einde worden gebracht dankzij de ingenieuze hijswerktuigen die Brunelleschi ontworpen had.

verband van de bakstenen, die van een bijzonder formaat zijn. Dit verband laat toe horizontale lagen te metselen die met *ad hoc*-mortel in evenwicht kunnen worden gehouden zonder de steun van een boogbekisting. Ten derde versterken horizontale stenen, eiken en waarschijnlijk ook ijzeren muurankers het metselwerk en beschermen het tegen scheuren, die in deze grote koepel erg beperkt zijn. De bouw was voltooid in 1436. De koepel moest alleen nog worden bekroond met de indrukwekkende lantaarn, die een aanzienlijke belasting vertegenwoordigt. Brunelleschi tekende hiervoor de plannen, maar overleed voor de bouw ervan was voltooid.

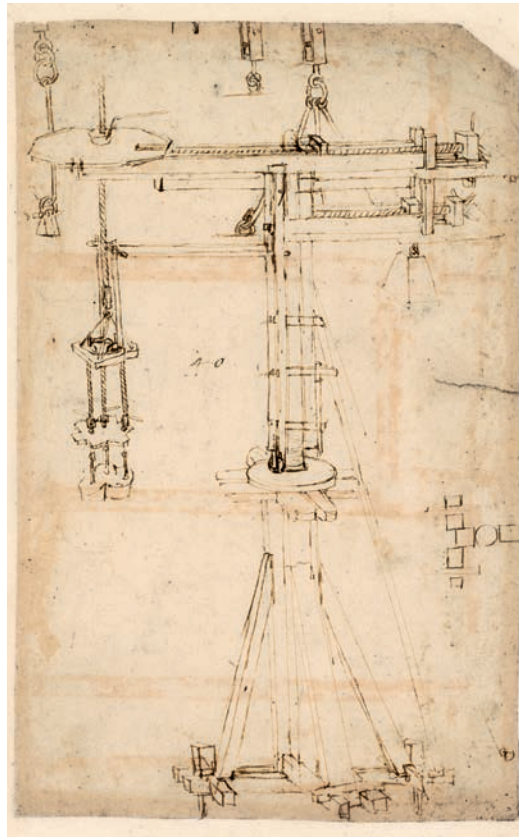
De bouw van de koepel van de kathedraal van Florence kon meer dan waarschijnlijk tot een goed einde worden gebracht dankzij de ingenieuze hijswerktuigen die Brunelleschi ontworpen had. Ondanks de geheimhouding en discretie waarmee hij zijn plannen omringde, is het waarschijnlijk dat deze nieuwe machines de aandacht trokken van de ingenieurs van het *quattrocento* en dat er schetsen van werden gemaakt. In elk geval maakte de jonge Leonardo da Vinci vóór 1480 enkele tekeningen van de in de kathedraal gebruikte hijswerktuigen (afb. 4). Hij heeft ze mogelijk in 1469 met eigen ogen kunnen zien toen hij in de leer was in het atelier van de zilversmid Andrea del Verrochio, bij wie de koperen bol werd besteld die de lantaarn moest bekronen. Leonardo da Vinci was een van de opmerkelijkste universele geesten van de renaissance, die interesse had voor wetenschappen, kunsten en techniek. Hij verdiende voornamelijk de kost met militaire en burgerlijke technische bouwkunde, maar deed ook experimenten voor de ontwikkeling van nieuwe technieken. Zijn erg moderne benadering, waarin wetenschappelijk inzicht centraal stond, betekende een grote stap voorwaarts in vergelijking met de middeleeuwse opvattingen over ontwerptechnieken, die alleen gebaseerd waren op duistere geometrische regels. Hij was de eerste die een aantal bevindingen over de werking van materialen en structuren naliet en die de krachten

op een geometrische manier voorstelde om inzicht te krijgen in hoe een koepel functioneert. Met zijn ideeën en praktijk was hij voor op zijn tijd en in tegenstelling tot Brunelleschi liet hij ongeveer 5300 geannoteerde tekeningen na.

Het koepeldak van de Sint-Pietersbasiliek in Rome

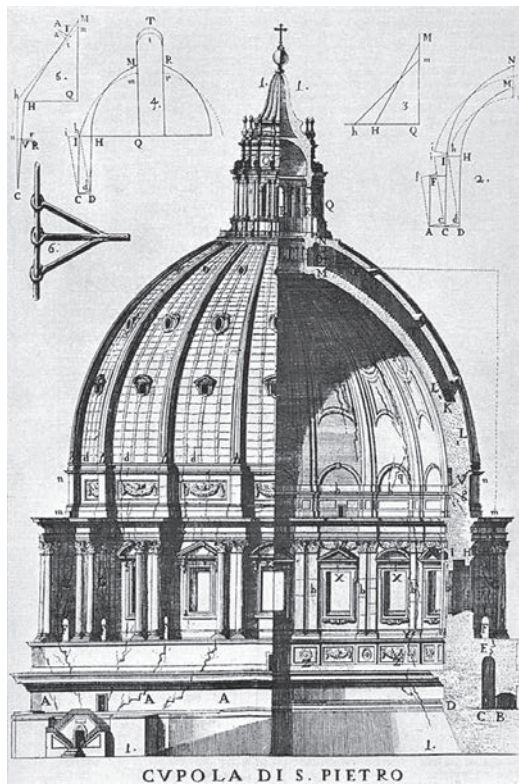
In de renaissance waren de beroepen van architect en ingenieur nog erg verwant en vaak met elkaar verweven. Léon Battista Alberti wordt weliswaar architect genoemd, zij het een met weinig naam, maar is vooral bekend voor zijn *De Re Aedificatoria*, dat hij rond 1452 voltooide. Dit is de eerste verhandeling

over bouwkunst sinds Vitruvius, op wiens werk hij zich trouwens sterk inspireerde. Ze verscheen postuum in 1485. Michelangelo Buonarroti, beter bekend onder de naam Michelangelo, is daarentegen veel meer een van die ingenieurs-architecten-kunstenaars die hun professionele vorming kregen door in de leer te gaan bij anderen. Het zou inderdaad moeilijk te begrijpen zijn dat Michelangelo in 1547, toen hij 72 jaar oud was, de opdracht kreeg voor de bouw van het koepeldak van de Sint-Pietersbasiliek in Rome, louter op basis van zijn kwaliteiten als schilder en beeldhouwer, als we niet wisten dat hij eveneens een carrière van architect en militair ingenieur achter de rug had, en onder meer ontwerpen gemaakt had voor vestingwerken in Rome en Florence. Lang voor Michelangelo deze opdracht kreeg, al toen architect Bramante in 1506 de plannen voor de nieuwe basiliek tekende, bestond het idee om de kruising te overwelden met een koepel. Bramantes ontwerp voor het koepeldak was een kopie van het Romeinse Pantheon, dat wil zeggen een relatief massieve alveolaire koepel in 'beton'. Toen hij overleed, waren de vier grote pijlers en de bogen die het koepeldak moesten dragen al gebouwd. Tussen 1514 en 1547 volgden meerdere architecten elkaar op, zonder dat de bouw van de koepel vooruitgang boekte. Het ontwerp van Michelangelo was totaal verschillend. Hij nam als model het koepeldak van de kathedraal van Florence, dat wil zeggen een constructie met dubbele schaal in gemetselde bakstenen, waarvan de binnendiameter, opgelegd door de reeds gebouwde pijlers, 41,5 m bedraagt. Het grote verschil tussen beide koepels is dat die van Sint-Pieter half-rond is, en dus gebaseerd op een cirkelvormig grondplan en niet op een achthoekig zoals in Florence. Bij de dood van de meester werd zijn ontwerp in lichtjes gewijzigde vorm hernomen door de architecten Giacomo della Porta en Domenico Fontana (afb. 5). Onder leiding van deze laatste werd het koepeldak snel opgetrokken tussen 1588 en 1590. Zijn structuur werd verstevigd door twee cirkelvormige ijzeren verankeringen, een aan de basis van de koepel en een ter hoogte van de scheiding tussen de twee schalen. De schalen zijn



Afb. 4

Grote kraan met contragewicht, ontworpen door Brunelleschi en getekend door Leonardo da Vinci (Codex Atlanticus, Biblioteca ambrosiana, Milaan).



Afb. 5

Doorsnede van de koepel van de Sint-Pietersbasiliek, met aanduiding van de scheurvorming in de koepel en de tamboer (in POLENI, G., *Memorie istoriche della gran cupola del tempio Vaticano, e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque. Alla santità di nostro signore papa Benedetto XIV*, Stamperia del Seminario, Padua, 1748 (© Bibliothèque Nationale de France).

CVPOLA DI S. PIETRO

met elkaar verbonden door middel van nerven. Hoewel de koepel gebouwd had kunnen worden zonder boogbekisting en er geen enkele directe getuigenis is die het gebruik ervan aantoonde, wijzen een aantal elementen erop dat de bouw wel degelijk met een boogbekisting is gebeurd. We kunnen hier ook nog vermelden dat Fontana de leiding had over een van de opmerkelijkste technologische uitdagingen van de renaissance: de oprichting in 1586 van de obelisk, 927 ton zwaar, in het midden van het Sint-Pietersplein, die een grote kennis van statica vergde voor het ontwerpen van de windassen en waarvoor een trekkracht van 900 man en 75 paarden nodig was. Het koepeldak van de Sint-Pietersbasiliek zou als esthetische en symbolische referentie dienen voor alle koepeldaken van de barokke kerken die vanaf de 17de eeuw werden gebouwd.

Palladio

Een andere figuur die een stempel drukte op de architecturale typologie van het koepeldak is Andrea Palladio. In 1570 publiceerde hij zijn *Quattro libri dell'architettura*, wellicht de meest invloedrijke architectuurverhandeling van de renaissance, die al gauw in heel Europa bekendheid verwierf. Hoewel Palladio ook bruggen bouwde, die trouwens in het derde boek worden geïllustreerd en die traditioneel een domein van de ingenieur zijn, markeert deze verhandeling vrij duidelijk het begin van de scheiding tussen de architect en de ingenieur, aangezien Palladio zich concentreert op stijlen en decoratie en weinig aandacht schenkt aan materialen en bouwtechnieken. In het vierde boek beschrijft Palladio talrijke antieke koepels. Vanaf 1566 bouwde hij zelf enkele gemetselde koepeldaken van fraaie afmetingen voor kerken of villa's. We kunnen dus met grote waarschijnlijkheid stellen dat Palladio, gevoed door de antieke Romeinse architectuur, de stijl van het koepeldak in de neoclassicistische en burgerlijke architectuur sterk heeft beïnvloed.

RATIONALISERING VAN DE KENNIS

Met de ontwikkeling van de handel ontstond in het midden van de 16de eeuw

de behoefte om kanalen te graven of rivieren bevaarbaar te maken. Ook hier waren de Italiaanse ingenieurs van de renaissance, die de kanalen in Lombardije aanlegden, de meesters. Niettemin was ook het kanaal van Brussel naar de Rupel, dat vanaf 1550 werd aangelegd, met zijn vier sluizen een van de belangrijkste kanalen van die tijd. Uit de periode van het *quattrocento* en het *cinquecento* zijn alleen de namen overgeleverd van architecten of ingenieurs die geschriften nalieten of die de grote werken van hun tijd leidden. Ze vormen het topje van de ijsberg, want in die tijd waren er in Europa duizenden mensen op dit domein actief. Ze reisden vaak, correspondeerden met elkaar en wisselden hun praktische ervaringen uit. Op het einde van de 16de eeuw groeide de belangstelling voor de toepassing van de wiskunde in de technologie en de bouwkunst, maar er was toen nog geen sprake van enig wetenschappelijk kader of theoretisch model dat kon worden toegepast voor de dimensionering van structuren of voor de uitvoering van hydraulische werken. Het zou nog

Op het einde van de 16de eeuw groeide de belangstelling voor de toepassing van de wiskunde in de technologie en de bouwkunst, maar er was toen nog geen sprake van enig wetenschappelijk kader of theoretisch model dat kon worden toegepast voor de dimensionering van structuren.

tweehonderd jaar duren, een periode waarin tal van opmerkelijke uitvindingen werden gedaan, eer er rationele dimensioneringsmodellen op wetenschappelijke basis ten behoeve van ingenieurs werden ontwikkeld.

De eerste stap om een juist inzicht te krijgen in het evenwicht van de bouwelementen was ongetwijfeld het gebruik van de meetkunde om krachten en de notitie van het 'krachtenparallellogram' voor te stellen. Vaak wordt de in Brugge geboren ingenieur en mathematicus Simon Stevin beschouwd als de bedenker hiervan en als de 'vader van de statica', met zijn verhandeling *De beghinselen der weeghconst*, die handelt over hydrostatica en statica en

in 1586 werd gepubliceerd. Zijn hele leven bouwde Stevin als ingenieur in de Nederlanden molens, sluizen en havens. Hij was raadgever van stadhouder Maurits van Nassau voor de bouw van vestingwerken tijdens de oorlog tegen Spanje en bedacht middelen om de polders onder water te zetten door middel van het selectief openen van sluizen in de dijken.

In zijn in 1638 in Leiden gepubliceerde *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze attenanti alla meccanica & i movimenti locali*, maakte Galileo Galilei als eerste het onderscheid tussen de weerstand van materialen - een intrinsieke eigenschap - en de weerstand van uit deze materialen opgebouwde structuren. Sommige van zijn bevindingen zijn correct, maar andere niet. Zijn voorstelling van het probleem om het dragend vermogen van een in een gemetselde muur ingewerkte houten balk te berekenen is erg befaamd (afb. 6). Het is zeker dat Galilei veeleer op een theoretische manier tot deze berekening kwam dan via praktische experimenten, want het is overduidelijk dat bij een dergelijk experiment de muur zou instorten lang voor de balk zou breken. De mathematische oplossing van Galilei is in dit geval trouwens verkeerd, want ze schendt een van de fundamentele wetten

van het evenwicht van krachten. Niettemin zorgde deze verhandeling van 1638, die een breuk met de middeleeuwen betekende, voor de premissen van de wetenschappelijke dimensionering van structuren. De werken van Galilei werden in heel Europa gelezen en door de wetenschappelijke elite van zijn tijd besproken.

Een andere belangrijke gebeurtenis die bijdroeg aan de vooruitgang van de wetenschappelijke kennis, ook deze die wordt toegepast in de bouwkunde, was de oprichting van de grote academiën: in 1662 de *Royal Society* in Londen en in 1666 de *Académie des Sciences* de Paris. Christopher Wren en Robert Hooke, twee actieve leden van de jonge *Royal*



Afb. 6

GALILEI, G., *Discorsi, e dimostrazioni matematiche: intorno à due nuove scienze, attenenti alla meccanica, & i movimenti locali / del Signor Galileo Galilei ...*; con un'appendice del centro di gravità d'alcuni solidi, Bologna, Per gli HH. del Dozza, 1655 (©ULB, Réserve précieuse).

Society, zouden een grote invloed hebben op de wetenschappelijke benadering van de bouw. Ze begonnen allebei hun carrière met een grondige wetenschappelijke vorming in Oxford, waarna ze aanvankelijk astronomie, wiskunde en fysica doceerden. Daarna waren ze werkzaam als architecten voor de wederopbouw van Londen na de grote brand van 1666. Het waren architecten van een nieuw type: noch metselaars gevormd op de werf, noch militaire ingenieurs, noch *gentlemen*-architecten gevormd door de studie van Alberti en Palladio en de klassieke monumenten. Ze waren de eerste bouwers die het beroep benaderden vanuit hun wiskundige en mechanische kennis, die ze hadden verworven aan de universiteit en door hun nauwe contacten met de *Royal Society*.

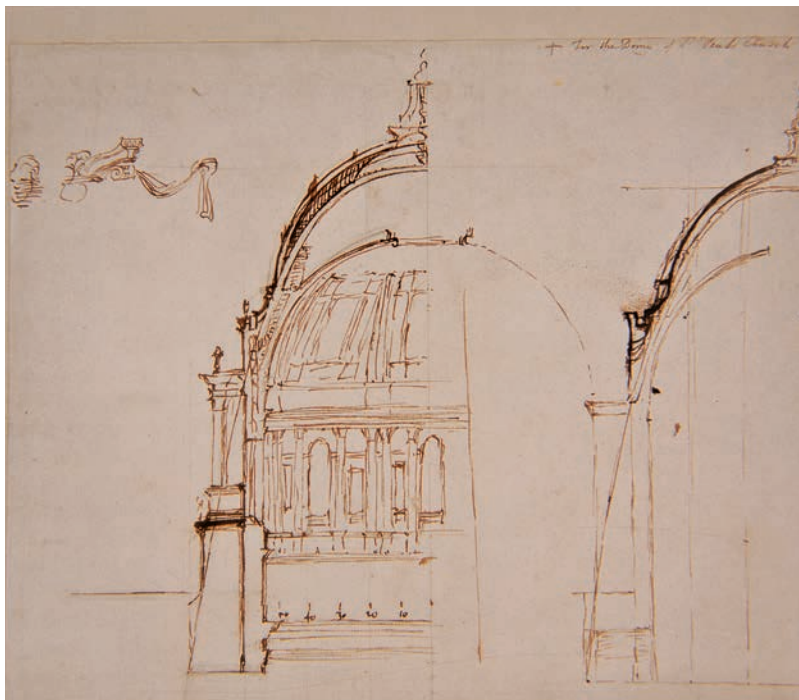
Het koepeldak van St Paul's Cathedral in Londen

Christopher Wren was vanaf 1668 betrokken bij de heropbouw van de Anglicaanse *St Paul's Cathedral* in Londen, die was verwoest tijdens de grote brand van 1666. In 1678 werd hij benoemd tot hoofdverantwoordelijke van de bouw. Voor het koepeldak wilde men een structuur die zou kunnen rivaliseren met de Sint-Pietersbasiliek van Rome, maar er waren beperkingen. Vanwege de terechte vrees voor differentiële verzakkingen van de funderingen moest de koepel licht zijn en moest hij trouwens ook snel worden voltooid, want het Londense klimaat liet niet toe houten stellingen en houten boogbekisting al te lang aan weer en wind bloot te stellen.

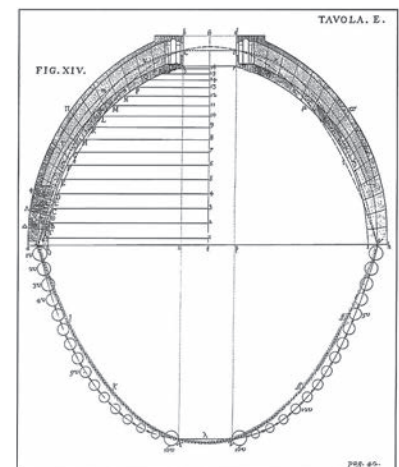
Het door Wren ontworpen en tussen 1705 tot 1708 gebouwde koepeldak van *St Paul's* bestaat uit drie in elkaar passende koepels (afb. 7). De binnenkoepel van gemetselde bakstenen is halfronde en heeft een binnendiameter van 30,8 m. Hij eindigt bovenaan in een oculus. De tweede koepel heeft de vorm van een afgeknotte kegel en is eveneens uitgevoerd in bakstenen. Hij is 46 cm dik en vormt een indrukwekkende lantaarn van 700 ton. Deze twee koepels, vooral de afgeknotte kegel, zijn gewapend met ijzeren ankers die op een speciale manier in de steenlagen gevat zijn om corrosie te voorkomen. De buitenkoepel is een houten structuur bedekt met bladlood. Een werktekening afkomstig van het bureau van Wren, en naar verluidt van zijn hand (afb. 8), doet veronderstellen

**Afb. 7**

Doorsnede van *St Paul's Cathedral* die de drievoudige structuur van de koepel toont. Gravure van Samuel Swayle en John Gwynn, 1755 (© Guildhall Library).

**Afb. 8**

Schets toegeschreven aan Wren voor een ontwerp van de koepel van *St Paul's* (© The Trustees of the British Museum).

**Afb. 9**

Analyse van de stabiliteit van de koepel van de Sint-Pietersbasiliek door middel van de analogie van de hangende ketting (POLENI, G., *Memorie istoriche della gran cupola del tempio Vaticano, e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque. Alla santità di nostro signore papa Benedetto XIV, Stamperia del Seminario, Padua, 1748* © Bibliothèque Nationale de France).

dat de vorm van de bakstenen koepels werd bepaald door gebruik te maken van een belangrijk principe betreffende koepelbouw dat voor het eerst in december 1670 werd geformuleerd door Robert Hooke in de *Royal Society*. Hoewel hij dit principe publiek maakte, heeft hij er nooit een demonstratie van geleverd en heeft hij het in 1675 slechts gepubliceerd onder de vorm van een Latijns gezegde: “*Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum.*” Dit zou kunnen worden vertaald als: ‘Zoals een flexibele lijn doorhangt,

Wren had een gevulde architecturale carrière, want in dezelfde periode dat hij aan St Paul’s Cathedral werkte, zou hij onder meer 53 andere kerken hebben gebouwd.

zo zal een boog rechtstaan, maar dan in omgekeerde richting.’ Meer precies betekent dit dat de geometrische vorm die toelaat dat een gemetselde boog in evenwicht blijft, dezelfde is als die van een kettingophanging die aan dezelfde belasting wordt onderworpen, maar dan in spiegelbeeld (afb. 9). De werktekening in kwestie lijkt een schets te geven van het tracé van een ‘druklijn’, wat een eerste toepassing van een wetenschappelijk gefundeerd principe zou zijn op de dimensionering van een koepel en zijn versterkingen. We dienen er wel op te wijzen dat dit principe, dat kan worden toegepast voor bogen waarvan de werking tweedimensionaal is, niet meteen kan worden getransponeerd op koepels die ruimtelijk of driedimensionaal functioneren.

Wren had een gevulde architecturale carrière, want in dezelfde periode dat hij aan *St Paul’s Cathedral* werkte, zou hij onder meer 53 andere kerken hebben gebouwd. Hoewel Hooke samen met Wren een van de drie commissarissen was voor de heropbouw van Londen, is over zijn carrière minder geweten, maar hij was ongetwijfeld meer ingenieur dan zijn vriend. Hij formuleerde in 1678 nog een ander fundamenteel principe over de weerstand van materialen: “*ut tensio, sic vis*”. In hedendaagse termen wil dit zeggen dat de vervorming van een structuur proportioneel

is aan de toegepaste belasting. Als man van veel talenten was Hooke tevens fabrikant van wetenschappelijke instrumenten. Het structurele element waarvoor hij dit principe formuleerde, was de veer. Deze hypothese ligt aan de basis van de theorie van de elasticiteit van vaste lichamen die in de 19de eeuw werd ontwikkeld en die een van de huidige fundamentele principes is van de dimensionering van gebouwen. Is het omdat *St Paul’s* gebouwd werd op basis van enkele wetenschappelijke principes dat haar koepeldak beter de tijd heeft doorstaan dan dat van Rome? Het zou een verklaring zijn die de moderne ingenieur zeker zou bevallen, maar er is niets wat ons toelaat dit te bevestigen.

Twee befaamde pathologische analyses

De grootte van de scheuren in het koepeldak van de Sint-Pietersbasiliek in Rome deed al in 1680 twijfels ontstaan over zijn stabiliteit. Deze vrees werd nog groter na de aardbeving van 1730. Na een gedetailleerde inventarisatie van de scheuren (zie afb. 5) beval ingenieur-architect Luigi Vanvitelli in 1742 een aantal beschermende maatregelen aan, waaronder de toevoeging van drie tot vier nieuwe ijzeren verankeringen als aanvulling op de twee bestaande, om de druk van de gescheurde koepel op de tamboermuren te verminderen. Dit soort maatregelen was al eerder toegepast op andere gescheurde koepels, maar wel van kleiner formaat. Paus Benedictus XIV, die op de hoogte was van de evolutie van de ideeën over de mechanica van structuren, gaf de opdracht om een expertise uit te voeren aan een commissie van drie van de beste wiskundigen: Thomas Le Seur, François Jacquier en Ruggiero Boscovich. Hun rapport *Parere di tre matematici sopra i danni, che si sono trovati nella cupola di S. Pietro*, dat in 1743 werd gepubliceerd, vormde een erg belangrijke stap in de analyse van het gedrag van structuren. Op basis van de observatie van het schema van de scheuren werkten ze modellen uit, gebaseerd op de notie van het mechanisme waarmee delen van de koepel ten opzichte van

STABILITEITSBEREKENING

Op het einde van de 18de eeuw hadden bouwkundigen of wetenschappelijke academici interesse voor vier types van stabiliteitsproblemen: het dragende vermogen van balken, het dragende vermogen van zuilen, het evenwicht van gemetselde bogen en de stabiliteit van steunmuren. Er werd een grote praktische kennis vergaard en er werden enkele fundamentele geschriften gepubliceerd, maar aan het begin van de 19de eeuw was er geen enkele wetenschappelijk correcte of bevredigende oplossing voor deze problemen beschikbaar.

elkaar draaien langs articulatielijnen gevormd door de scheuren (zie afb. 5). Op basis van deze modellen konden ze de druk van de koepel op de muren bepalen en daaruit concluderen dat een versterking door middel van ijzeren hoepels, waarvan ze de doorsnede berekenden, noodzakelijk was. Zonder het te weten pasten zij een wiskundige methode toe om de stabiliteit te analyseren die pas in de tweede helft van de 20ste eeuw in een eenvormig wetenschappelijk kader zou worden bekrachtigd en die wordt omschreven als ‘schatting van de draagkracht door toepassing van de kinematische methode van de limietanalyse’. Meteen na de voltooiing en de publicatie van *Parere* vroeg de paus een tweede mening aan de natuurkundige, wiskundige en natuurkenner Giovanni Poleni, die ook op de hoogte was van hydraulica en architectuur. Ook hij zou een opmerkelijke en originele studie doen, waarvan de conclusies in 1743 werden bekendgemaakt en die in 1748 werd gepubliceerd onder de titel *Memorie istoriche della gran cupola del Tempio Vaticano*. Hij verwierp de benadering van zijn voorgangers en nam zijn toevlucht tot een modelvorming die zeker was geïnspireerd door het principe van Hooke. Hij verdeelde de door scheuren doorsneden koepel in vijftig parten, waarbij elk part fungeerde als een vlakke boog. Hij zocht naar een geometrie van de druklijnen in de bogen naar analogie met het experimentele principe van de hangende ketting (zie afb. 9). Dit principe zou meer dan honderdvijftig jaar later nog worden toegepast door Antoni Gaudí om de betonnen

gewelven van zijn *Sagrada Familia* in Barcelona te tekenen. Toen Poleni vaststelde dat de druklijn zich binnen de geometrie van de koepel bevond, concludeerde hij dat deze laatste zelfs met scheuren nog een stabiel evenwicht kon behouden. Ook hij voerde zonder het te weten een mathematische stabiliteitsanalyse uit die 'raming van de draagkracht door toepassing van de statische methode' wordt genoemd, en die pas op het einde van de 20ste eeuw zou worden bevestigd in hetzelfde eenge maakte wetenschappelijke kader van de limietanalyse. Ondanks zijn conclusie dat er geen versterking nodig was, adviseerde Poleni op niet-overtuigende wijze om toch de versterking aan te brengen die was voorzien in het rapport van de drie wiskundigen. Dit gebeurde tussen 1743 en 1744 door Vanvitelli.

We kunnen dus stellen dat de in 1742-1743 gebruikte methodes voor de expertise van de stabiliteit van de Sint-Pietersbasiliek een radicale vernieuwing betekenden voor het inzicht in de structurele werking van gemetselde constructies. Dit wil echter niet zeggen dat ze vanaf die tijd courant werden gebruikt voor de berekening van gewelven, integendeel. Overigens,

Het koepeldak van de *Sainte-Geneviève* bestaat trouwens, zoals dat van *St Paul's*, uit drie in elkaar passende koepels, maar de binnendiameter is hier slechts 20 m. Het koepeldak is erg zwaar en op elk van de vier pijlers van 38 m hoog die de tamboer van de koepel ondersteunen, rust niet minder dan drieduizend ton.

hoewel er zoals we al zeiden een structurele gelijkheid is tussen het koepelgewelf van de Sint-Pieter in Rome en de *Santa Maria del Fiore* in Florence, moeten we veel meer de vraag stellen naar de oorzaken van de beschadigingen in Rome dan van die in Florence. Mainstone⁴ stelt vast dat er in Florence continuïteit was in de controle en dat tijdens de bouw van de koepel een en dezelfde architect verantwoordelijk was en er geen veranderingen in de plannen zijn geweest. In Rome daarentegen verliep de

bouw afwisselend in fasen van grote activiteit en fasen waarin de werf langdurig stillag door gebrek aan financiële middelen of verandering van paus of architect. Dit leidde tot grondige wijzigingen in het ontwerp van het koepeldak en lange periodes waarin het niet-voltooid metselwerk aan weer en wind blootstond.

Het tweede befaamde en leerzame geval is de *église Sainte-Geneviève*, het late *Panthéon* in Parijs, waarvan de bouw talrijke tegenslagen kende. Het was Lodewijk XV die besloot om op de *Montagne Sainte-Geneviève* een prestigieus monument te bouwen. De commissie vertrouwde in 1755 het ontwerp ervan toe aan een gunsteling van het hof, Jacques Germain Soufflot, en de eerste steen werd in 1764 gelegd door de koning. Soufflot was naar Italië gereisd en had het Romeinse Pantheon en de Sint-Pietersbasiliek in Rome grondig bestudeerd. Maar de referentie waarmee hij moest rivaliseren was *St Paul's Cathedral* in Londen. Het koepeldak van de *Sainte-Geneviève* bestaat trouwens, zoals dat van *St Paul's*, uit drie in elkaar passende koepels, maar de binnendiameter is hier slechts 20 m. Het koepeldak is erg zwaar en op elk van de vier pijlers van 38 m hoog die de tamboer van de koepel ondersteunen, rust niet minder dan drieduizend ton. Het waren deze pijlers waarrond in de 18de eeuw problemen zouden rijzen en ruzies tussen experts zouden ontstaan, en niet de koepel zelf die gewapend is met niet minder dan 23 metalen hoepels.

Het eerste salvo van kritiek werd in 1770 gelanceerd door Pierre Patte, die meewerkte aan de redactie van de *Cours d'Architecture* van Blondel en die beweerde dat - op basis van de regels van Bélidor voor gewelven - de dikte van de vier pijlers onvoldoende was om de geplande koepel te kunnen dragen. Om de bewerkingen van Patte te weerleggen vroeg Soufflot de mening van Emiland Gauthey, een eminent ingenieur van bruggen en wegen, die hem in zijn *Mémoire*

sur l'application des principes de la mécanique à la construction des voûtes et des dômes, gepubliceerd in 1771, gelijk geeft en vindt dat de dikte van de pijlers meer dan voldoende is. Hoewel de analyse van Gauthey vanuit modern wetenschappelijk gezichtspunt niet adequaat was, werd hiermee de kritiek van Patte echter ontkracht. Maar in 1776, toen het formeel werd weggenomen onder de gewelfribben die de basis van de tamboer moesten ondersteunen, waren er al grote scheuren te zien in het stenen parement van de vier pijlers. De werken werden voortgezet. Bij de dood van Soufflot in 1780 werd de leiding overgenomen door Jean-Baptiste Rondelet, die hem al sinds 1769 op de werf assisteerde. Van 1785 tot 1790 werd het koepeldak gebouwd onder leiding van Rondelet. In 1796 werd de *église Sainte-Geneviève* door een beslissing van de *Assemblée Nationale* omgedoopt tot *Panthéon française*. Maar opnieuw werd gevreesd voor instortingsgevaar en de minister benoemde een gemengde commissie bestaande uit experts, ingenieurs van bruggen en wegen en architecten. De gewelfribben werden opnieuw geschoord. In de jaren 1797-1798 werd in de commissie aldoor geruzied tussen ingenieurs en architecten - met Gauthey en Rondelet als bemiddelaars - over de oorzaken van de beschadigingen en de toe te passen remedies.

De identificatie van de oorzaken vormde geen echt groot probleem: de bedenkelijke kwaliteit van het vulmateriaal van de pijlers, dat geen enkele last kan opvangen, en een slechte keuze van het steenverband van het parement van de pijlers, van een overigens al even bedenkelijke kwaliteit, maken dat het parement overdadig wordt belast en scheurt. Achteraf bekeken is het duidelijk dat Soufflot, die ongetwijfeld onder druk stond door financiële beperkingen, de verkeerde technische beslissingen nam wat betreft de keuze van de parementstenen en het steenverband van het metselwerk, en niet genoeg toezicht hield op de werf en de aannemer van het metselwerk. Rondelet erfde dus een precarie situatie, maar had te veel respect voor zijn meester om hem te bekritisieren. In 1800 werd een nieuwe commissie aangesteld, bestaande uit leden van de afdeling architectuur van

**Afb. 10**

Parijs, Halle au Blé tijdens de verbouwingen van 1887 (© Photothèque des musées de la ville de Paris).

de *Classe des Beaux-Arts de l'Institut de France*. Van 1806 tot 1811 leidde Rondelet restauratie- en verfraaiingswerken. Maar op lange termijn kwamen nieuwe problemen aan het licht, die maken dat tot op heden het *Panthéon* een gevaarlijk gebouw is en zijn onderhoud heel duur. Vanwege de vele vallende stenen werd het gebouw in 1989 voor het publiek gesloten en uit een grondig wetenschappelijk onderzoek van zijn structuur bleek dat er een onverwacht grote hoeveelheid ijzer in de constructie aanwezig was. Het *Panthéon* bestaat dus echt uit gewapend metselwerk, dat sommigen hebben vergeleken met gewapend beton *avant la lettre*. Het is waar dat in het laatste kwart van de 18de eeuw ijzer meer beschikbaar werd als materiaal, maar de hoeveelheden die Soufflot gebruikte, wekken verbazing. Het is in elk geval veel minder goed beschermd tegen corrosie dan het metselwerk in *St Paul's*, waar Wren zich een veel beter architect toonde dan Soufflot in *Sainte-Genève*. Het is de corrosie van het overvloedig aanwezige ijzer in het metselwerk die de stenen doet scheuren.

Het is veelzeggend dat de overgangperiode tussen de 18de en de 19de eeuw, dus vóór 'het tijdperk van de ingenieurs', symbolisch wordt afgesloten met

deze koepel in gewapend metselwerk van het *Panthéon* van Parijs. Daarna brak de tijd aan van koepeldaken met een metalen structuur, waarbij ingenieurs een doorslaggevende rol zouden spelen in de bouw ervan.

Het eerste metalen koepeldak

Het allereerste metalen koepeldak, dat van de *Halle au Blé*, bevindt zich eveneens in Parijs. Het koepeldak werd opgetrokken tussen 1809 en 1813 en was de laatste grote verwezenlijking van François-Joseph Bélanger, een architect die in de tijd van de verlichting elegante ontwerpen maakte. De afmetingen van dit koepeldak, met een structuur van gietijzeren bogen en ijzeren hoepels, konden meteen concurreren met die van de grote koepeldaken in metselwerk. De diameter van de koepel was 36 m (afb.10). De kwestie van de overwelling van de binnenplaats van de *Halle au Blé*, die in 1767 was gebouwd, was al in 1782 te berde gebracht. Bélanger was naar Engeland geweest en had daar gezien hoe gietijzer een belangrijk materiaal werd voor de bouw van bruggen en in de architectuur. In 1782 kwam hij met het revolutionaire voorstel om een groot koepeldak met metalen geraamte te maken. Uiteindelijk werd geopteerd voor een goedkopere

beglaasde koepel met houten structuur, waarvan de constructie was gebaseerd op de techniek van korte planken die in de 16de eeuw door Philibert de l'Orme was ontwikkeld. Het ontwerp was van de hand van Jacques-Guillaume Legrand en Jacques Molinos. Maar in 1803 brandde deze structuur af. Met de steun van Louis Becquey, hoofdingenieur van bruggen en wegen, die zopas (1802-1806) de *Pont d'Austerlitz* in gietijzer had gebouwd, kon Bélanger revanche nemen. Voor het ontwerp van de metalen constructie van de *Halle au Blé* werkte hij samen met ingenieur François Brunet, die de dimensionering van de metalen elementen zou hebben bepaald. Architectuurhistoricus Sigfried Giedion stelde dat dit koepeldak een van de eerste constructies was waarvan architect en ingenieur niet langer dezelfde persoon waren. Hoewel er weinig bekend is over de exacte rol van Brunet, is er toch reden om te onderstrepen dat men in die periode nog niet beschikte over een structureel functioneringsmodel van bogen - en *a fortiori* van koepels - waarmee de krachten in de ijzeren en gietijzeren elementen van de *Halle* konden worden ingeschat, en dat hun dimensionering dus ongetwijfeld niet op basis van rationele regels is gebaseerd.

BRUSSELSE KOEPELDAKEN EN KOEPELS

In het Brusselse – en ook het Belgische – architecturale erfgoed zijn er vóór 1800 geen gemetselde koepeldaken te vinden die zich qua omvang kunnen meten aan de grote structuren die we hoger hebben besproken. Deze konden alleen worden opgetrokken in steden waar de wereldlijke of geestelijke macht zich moest manifesteren door middel van prestigieuze en indrukwekkende bouwwerken. Niettemin bepaalden deze buitengewone constructies de stijl waaraan architecten die meer bescheiden gebouwen moesten ontwerpen, zich moesten spiegelen. De vieringen van meerdere barokkerken in Brussel zijn bekroond met een koepel die een schaalmodel lijkt te zijn van die van Florence of Rome. Dat geldt voor de koepel van de kerken Onze-Lieve-Vrouw der Rijke Klaren² (1665-1670, in 1989 door een brand verwoest en in 1992 heropgebouwd), Onze-Lieve-Vrouw van Goede Bijstand³ (1664-1694) en Sint-Jan en Stefaan ter Miniemen (1700-1715). Hun bescheiden afmetingen doen echter vermoeden dat het hier geen echte koepels in structurele zin zijn, maar veeleer koepels in stucwerk, steunend op een houten skelet.

Het op Palladio en *St Paul's Cathedral* geïnspireerde neoclassicistische koepeldak is in Brussel wellicht het beste vertegenwoordigd door twee exemplaren: de koepel boven de kruising (afb. 13) van de Sint-Jacob-op-de-Koudebergkerk⁴ (1776-1787) (afb. 11a en 11b) en de koepel van de 'Italiaanse salon' van het kasteel Schoonenberg,⁵ nu het koninklijk paleis van Laken, (1782-1784), het enige deel van het kasteel dat tijdens de brand van 1890 gevrijwaard bleef (afb. 12). Op basis van oude gravures en de respectabele afmetingen van deze koepels – 16 m diameter voor de rotonde van het kasteel – kunnen we veronderstellen dat deze koepels in metselwerk zijn en dat het dus op structureel vlak om echte koepeldaken gaat.

Het bouwmaterial bij uitstek van de 19de eeuw was ijzer en daarna staal, en we zagen dat wat koepeldaken betreft de eeuw begon met de *Halle au Blé* in Parijs. De belangrijkste en tevens bekendste

koepels die in deze eeuw in Brussel werden gebouwd, hebben eveneens een metalen structuur. Eerst en vooral is er het koepeldak met 22,5 m diameter van de neobyzantijnse Koninklijke Sint-Mariakerk⁶, die stilistisch een imitatie is van die van de kathedraal van Florence (afb. 13). Al bij het eerste ontwerp van 1844 was er een metalen structuur voorzien voor deze koepel, maar deze werd pas geplaatst in 1884, toen de kerk werd voltooid.⁶ Een ander voorbeeld, deze keer op een burgerlijk gebouw, is de koepel van het indrukwekkende justitiepaleis⁷ (1866-1883) (afb. 14). Terwijl het gebouw zelf een monumentale constructie in stenen metselwerk is, waarvan gedeelten net zoals in het *Panthéon* van Parijs aanzienlijk versterkt zijn door bewapening, bestaat de koepel van 17,2 m uit een skelet van x-vormige radiale traliespannen. De huidige structuur, die werd gereconstrueerd na de brand van 1944, verschilt niet van de oorspronkelijke. Deze twee bekende koepeldaken zijn op structureel vlak nep: ze geven de indruk een koepeldak te zijn, in de lijn van een zekere neotraditie, maar zijn dat niet. De metalen, met bladlood of -koper bedekte boogstructuren die de eigenlijke dragers zijn van deze koepels, zijn listig verborgen voor het oog. Dat is maar goed ook, want ze zijn niet alleen anachronistisch, maar ze vertegenwoordigen ook geen enkele constructieve krachttoer, ook niet in de tijd dat ze werden gebouwd. Dat geldt echter niet voor de koepel van de wintertuin van de koninklijke serres van Laken⁸, die in 1876 werden voltooid. Deze koepel, met een diameter op de grond van 60 m, ligt volledig in de lijn van die van de *Halle au Blé*. De structuur van deze reusachtige, vrij complexe, elegante en gewaagde glazen constructie bestaat uit 36 ijzeren bogen die op 36 dunne zuiltjes rusten.

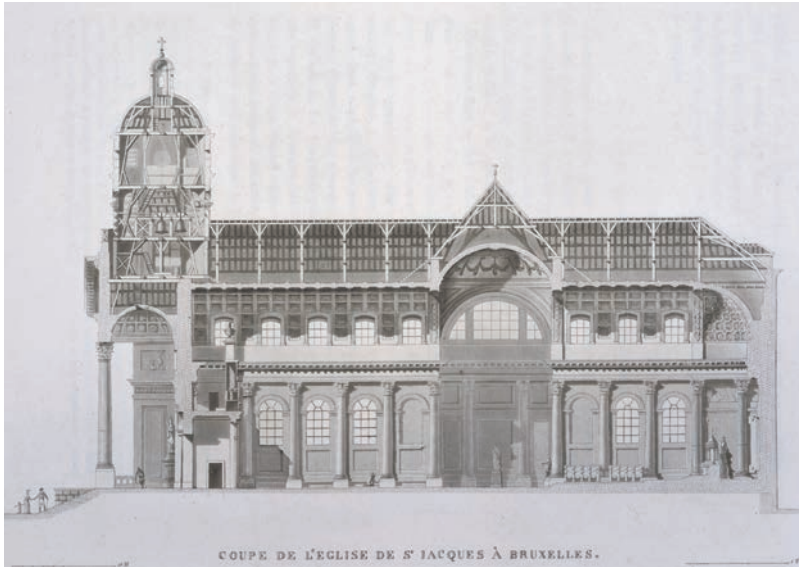
In het begin van de 20ste eeuw werd gewapend beton geïntroduceerd. Brussel speelde om twee redenen een belangrijke rol in de internationale verspreiding van dit nieuwe materiaal. Eerst en vooral had de Fransman François Hennebique, een van de pioniers van de nieuwe techniek, van 1886 tot 1896 zijn bureau in Brussel, waar projecten in gewapend beton werden voorgesteld en berekend. Tot aan de Eerste Wereldoorlog

bekleedde Hennebique op dit vlak een dominante positie. De tweede reden was dat Paul Christophe, Belgisch ingenieur van bruggen en wegen en een van de eerste theoretici van het gewapend beton, in 1902 de doorwrochte studie *Le béton armé et ses applications* publiceerde en gedurende een vijftiental jaar tot in het buitenland de autoriteit op dit gebied zou worden. Het is dus niet verwonderlijk dat in het boek van Paul Christophe een van de eerste koepeldaken in gewapend beton, berekend door het bureau van Hennebique, werd gepubliceerd. Het betreft een kleine koepel van 7,5 m diameter, een dun gewelf rustend op dunne bogen, boven de lokettenzaal van de rond 1900 voltooide voormalige Bank Brunner.⁹

Maar een van de grote momenten van de bouw in gewapend beton was de introductie van het schaaldak, dat op een spectaculaire manier de technische en plastische mogelijkheden van het materiaal zou exploiteren. De eerste constructies met schaaldak verschenen in de jaren twintig. Dit type structuur kende een hoogtepunt in de jaren vijftig. In ons bestek is het interessant te weten dat de geschiedenis van het schaaldak begon met de bouw van koepels. De allereerste koepel in dit materiaal werd in 1925 opgetrokken als projectiescherm voor het hemelgewelf – erg symbolisch voor het koepeldak – voor het planetarium van Zeiss in Jena in Thüringen. Dit ronde gewelf had een diameter van 25 m en was slechts 6 cm dik. De volgende jaren werden in meerdere steden gelijkaardige planetaria opgetrokken. Ook Brussel volgde in 1935 met het Albertenum¹⁰ (afb. 15), met een koepel van 23,5 m diameter en 5 cm dik. In een iets ander genre kunnen we nog de mooie gedrukte koepel vermelden die de rotonde van de galerij Ravenstein¹¹ bedekt (afb. 16). Deze koepel in glasstenen heeft een diameter van 23 m en werd in 1958 voltooid. Hij is voorlopig de laatste koepel in Brussel die aansluit bij de eeuwenoude traditie van de kunst van het bouwen van dakkoepels.

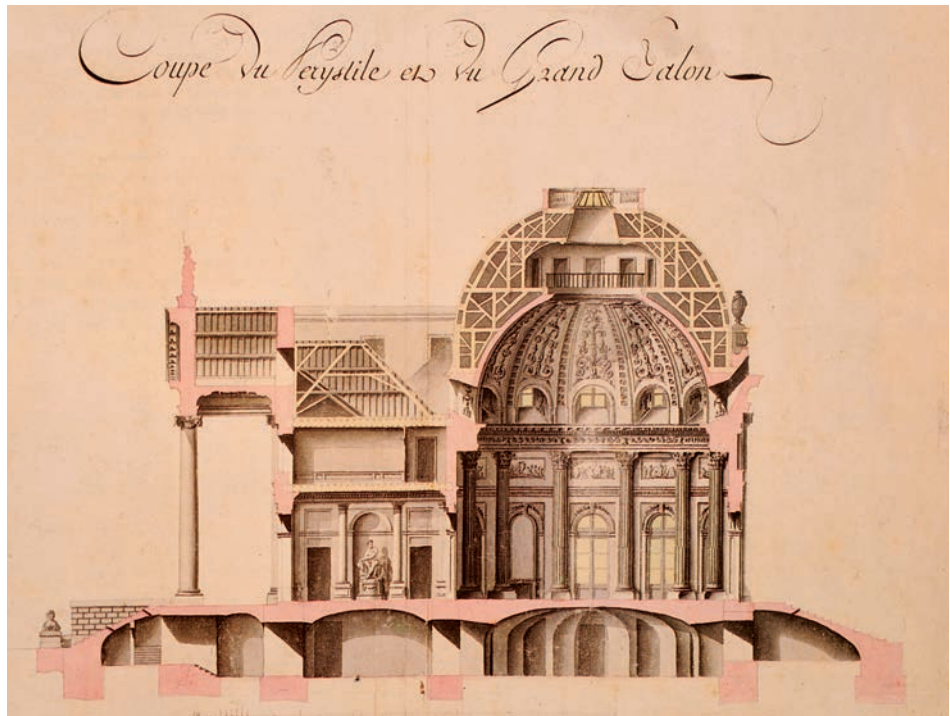
Afb. 11a

Lengtedoorsnede van de Sint-Jacob-op-de-Koudenbergkerk
(in: GOETGHEBUER, P.J.,
*Choix des monuments,
édifices et maisons les plus
remarquables du Royaume des
Pays-Bas*, Gent, 1827 ©KBR).



Afb. 11b

Binnenzicht van de koepel
van de Sint-Jacob-op-de-
Koudenbergkerk (A. de Ville de
Goyet, 2007 ©MBHG).



Afb. 12

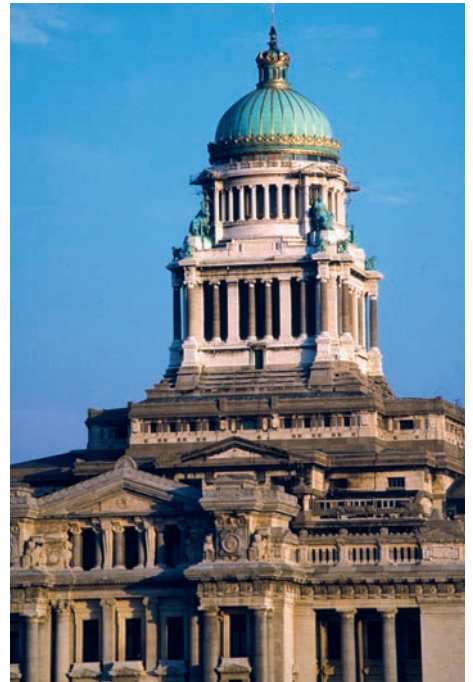
Dwarsdoorsnede ter hoogte
van de rotonde van het
kasteel van Laken (© Albertina,
Wenen).

Afb. 13

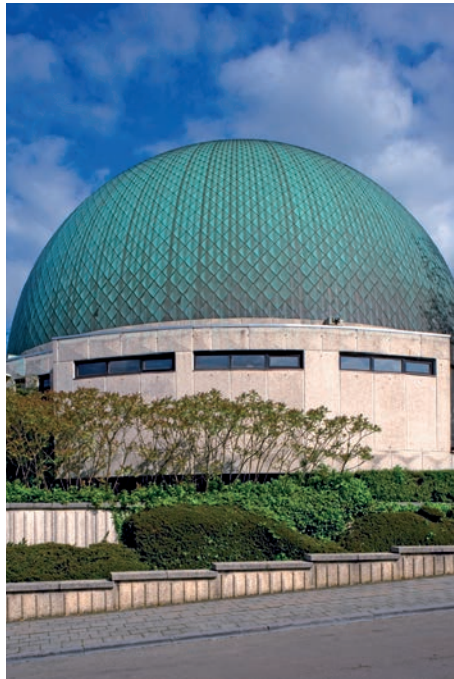
De Koninklijke Heilige
Mariakerk (A. de Ville de
Goyet, 2007 ©MBHG).

**Afb. 14**

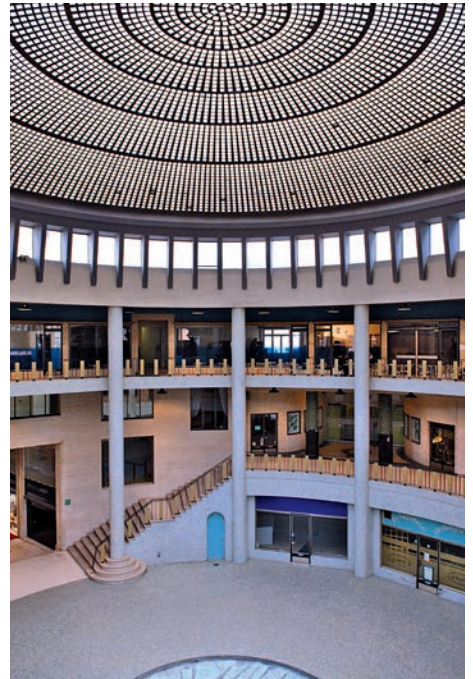
De koepel van het justitiepaleis
(Chr. Bastin & J. Evrard
©MBHG).

**Afb. 15**

De schaal van het Alberteum,
gebouwd in 1935, had een
diameter van 23,5 m en een
dikte van 5 cm. De koepel van
het Planetarium is een kopie
hiervan (A. de Ville de Goyet,
2012 ©MBHG).

**Afb. 16**

Koepel van 23 m diameter,
gemaakt van gewapend beton
en glastegels, die de rotonde
van de Ravensteingalerij
overdekt (A. de Ville de Goyet,
2007 ©MBHG).



GLOSSARIUM

Bouw met boogbekisting: een boogbekisting is een provisoerische houten constructie die een gewelf, een boog of koepel moet ondersteunen zolang de constructie haar eigen gewicht nog niet kan dragen. Voor een boog in metselwerk is de boogbekisting nodig zolang de sluitsteen nog niet is geplaatst; voor een gewelf in beton moet de boogbekisting op haar plaats blijven tot het beton voldoende weerstand heeft gekregen. De boogbekisting bepaalt ook de definitieve vorm van de constructie.

Omringende verankering: de verticale scheuren in de onderste delen van een gemetselde koepel doen trekkrachten ontstaan die men vaak heeft getracht in evenwicht te houden door ze te laten opvangen door horizontale versterkingsringen. Deze kunnen verschillende vormen aannemen, maar vanaf de renaissance bestaan ze meestal uit metalen elementen. Ze zijn niet zichtbaar want ze zijn geïntegreerd in de schelp van de koepel, maar om het plastisch uit te drukken: ze werken als de hoepels van een ton.

BIBLIOGRAFIE

ADDIS, B., *Building: 3000 years of design, engineering and construction*, Phaidon, Londen, 2007.

CAMPBELL, J.W.P., *Building St Paul's*, Thames & Hudson, Londen, 2007.

FANELLI, G., FANELLI, M., *La coupole de Brunelleschi. Histoire et avenir d'une grande construction*, Mandragora, Florence, 2004.

GALLUZZI, P., *Les ingénieurs de la Renaissance de Brunelleschi à Léonard de Vinci*, Giunti, Florence, 1995.

HEINLE, E., SCHLAICH, J., *Kuppeln aller Zeiten - aller Kulturen*, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1996.

PICON, A., *Architectes et ingénieurs au siècle des Lumières*, Parenthèses, Marseille, 1988.

NOTEN

1. De meest fundamentele analyses betreffende de stabiliteit van gemetselde koepeldaken die in dit artikel worden aangehaald, zijn afkomstig van Roland Mainstone, die er talrijke archeologische en structurele studies aan heeft gewijd (o.a. MAINSTONE, R.J., *Structure in architecture. History, design and innovation*, Ashgate, Aldershot, 1999), en van Jacques Heyman, die op een schitterend geïllustreerde manier de toepassing van de limietanalyse op gemetselde constructies heeft geformaliseerd (HEYMAN, J., *Arches, vaults and buttresses*, Ashgate, Aldershot, 1996).

2. Toegeschreven aan beeldhouwer-architect Luc Fayd'herbe van Mechelen.

3. Toegeschreven aan meubelmaker-architect Jean Cortvrindt.

4. De neoclassicistische gevels op het Koningsplein werden ontworpen door de Franse architecten Jean-Benoît-Vincent Barré en Gilles Barnabé Guimard, maar het interieur van Sint-Jacob werd in 1785-1786 uitgevoerd onder leiding van Louis Montoyer.

5. De architect was de Fransman Charles de Wailly, maar de werken werden uitgevoerd onder leiding van Louis Montoyer.

6. De Koninklijke Sint-Mariakerk werd ontworpen door architect Henri Van Overstraelen; na zijn dood werden de werken overgenomen door architect Gustave Hansotte.

7. Dat Joseph Poelaert de architect van het justitiepaleis was, is welbekend. Hij zou de voltooiing trouwens zelf niet meer meemaken. De koepel en de metalen versterking ervan werden bestudeerd door François Wellens, hoofdingenieur van bruggen en wegen en voorzitter van de Koninklijke Commissie voor Monumenten en Landschappen.

8. Architect Alphonse Balat.

9. Wetstraat 78, architect Léon Govaerts.

10. De oorspronkelijke koepel van de architecten Charles Van Nueten en Maurice Keym werd in 1968 gesloopt. De huidige koepel van 25 m diameter en 7 cm dik dateert van 1976.

11. Architecten Alexis en Philippe Dumont.

 The Art of Building before the age of the engineers. History of some domes

From antiquity until the late eighteenth century, large masonry domes have always presented challenges to their builders. On account of their large span, the construction of these exceptional structures brings to the fore the problems of the use of materials, stability and site operations. The history of the construction and an analysis of the performance of these large domes provide an interesting interpretation of the Art of Building at the highest level before the emergence of the modern engineer in the early nineteenth century. The milestones of this history are the construction of the domes of the Roman Pantheon, the cathedral of Florence, St. Peter's Basilica in Rome, St. Paul's Cathedral in London and the French Panthéon in Paris. These churches are landmark buildings not only from the builders' standpoint, but also in terms of architectural history, as they gave rise to infinite variations on a smaller or even symbolic scale. Many traces of them are to be found in the heritage of Brussels. Finally, it was once again the shape of the dome or cupola, at the Halle au Blé in Paris, that heralded the era of large spans of architectural metal and glass in the nineteenth century, such as in the greenhouses of the winter garden at the Royal Residence of Laeken.

REDACTIECOMITÉ

Jean-Marc Basy, Stéphane Demeter, Paula Dumont, Cecilia Paredes en Brigitte Vander Bruggen, met de medewerking van Anne-Sophie Walazyc voor het kabinet van de minister-president belast met Monumenten en Landschappen

COÖRDINATIE PRODUCTIE

Koen de Visscher

REDACTIE

Dossier: Patrick Burniat, Bernard Espion, Odile De Bruyn, Rika Devos, Benoît Fondu, Pierre Halleux, Leen Lauriks, Géry Leloutre, Piet Lombaerde, Michel Provost, Véronique Samuel-Gohin, Joris Snaet, Elisabeth Van Besien, Ine Wouters

Plus: David Attas, Paula Dumont, Michel Provost, Brigitte Vander Bruggen

VERTALING

Hilde Pauwels, Eric Tack, Gitracom

NALEZING

Mia Verstraete, Harry Lelièvre en de leden van het redactiecomité

VORMGEVING

supersimple.be

DRUK

Dereume Printing

VERANTWOORDELIJKE UITGEVER

Philippe Piéreuse, Directie Monumenten en Landschappen van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest, CCN - Vooruitgangstraat 80, 1035 Brussel

De artikelen zijn gepubliceerd onder de verantwoordelijkheid van de auteurs. Alle rechten voor het reproducieren, vertalen of herwerken zijn voorbehouden.

HERKOMST VAN DE FOTO'S

De meeste iconografische documenten werden ter beschikking gesteld door de auteurs en zijn afkomstig van verschillende verzamelingen (referentie vermeld bij elke illustratie).

Mochten er ondanks onze inspanningen om alle reproductierechten te betalen toch nog gerechtigden zijn die niet gecontacteerd werden, dan worden zij verzocht zich kenbaar te maken bij de Directie Monumenten en Landschappen van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.

FOTO OMSLAG

Paleis 5, Brussels Expo
(Chr. Bastin & J. Evrard © MBHG)

LIJST MET AFKORTINGEN

AAM - Archives d'Architecture Moderne
ARB - Académie royale de Belgique
ASB - Archief van de Stad Brussel
KBR - Koninklijke Bibliotheek van België
KIK - Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium
KMGK - Koninklijke Musea voor Kunst en Geschiedenis
KMSKB - Koninklijke Musea voor Schone Kunsten van België
MBHG - Ministerie van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest - Documentatiecentrum van het Bestuur Ruimtelijke Ordening en Huisvesting
MSB - Museum van de Stad Brussel
SPW - Service public de Wallonie
ULB - Université libre de Bruxelles

ISSN

2034-578X

WETTELIJK DEPOT

D/2012/6860/013

Cette revue paraît également en Français sous le titre *Bruxelles Patrimoines*.