

Het Phaeno Science Center

Een plaats in de architectuurgeschiedenis.

AR2A010

Hans van Dijk

Michelle Zwiers (Dyslectie)

Studentennummer: 1268376

Datum: 20 september 2011

Voorwoord

Als onderdeel van de architectuur master die ik volg bij de studie bouwkunde aan de Technische Universiteit van Delft heb ik de opdracht een scriptie te schrijven over een architectonisch onderwerp. Ik heb de keuze gemaakt om deze architectonische scriptie te schrijven over het Phaeno Science Center, welk gebouw model zal staan voor Zaha Hadid haar werk en dat tevens een innoverende plek in de architectuurgeschiedenis zal innemen.

De keuze voor dit onderwerp komt voort uit mijn interesse voor de op het moment veelbesproken, voor mij inspirerende architect Zaha Hadid. Zaha Hadid, partner van het architecten bureau *Zaha Hadid architects* welke al verscheiden veelzeggende prijzen in de wacht heeft gesleept, is tot op de dag van vandaag internationaal bekend vanwege haar bouw-, theoretische- en academische werk. Het in de afgelopen dertig jaar realiseren van al Zaha Hadid haar dynamische en innovatieve projecten zijn meestal ontstaan door revolutionair en experimenteel onderzoek naar overlappende gebieden in ontwerp en processen van zowel architectuur als stedenbouw. Het 'innovatieve' en 'experimentele' waar Zaha Hadid bekend om staat treft het deel wat mijn interesse en tevens passie prikkelt.

Mijn interesse en passie wordt vooral gevoed door de bouwtechnologische fase, ofwel verstand van de bouwtechniek en daarmee direct in verband staande uitvoering. Om 'spraakmakende' architectuur te verkrijgen is naar mijn mening

naast een goede conceptuele- en functionele uitwerking een goede realisatie minstens net zo belangrijk.

De conceptuele- en functionele uitwerking kan nog zo compleet zijn, maar een goede of slechte realisatie zal het uiteindelijke ontwerp maken of breken. Deze laatste stap, bestaande uit realisatie en de daarbij horende bouwtechnologische fase, is de stap welke het mogelijk zal moeten maken een ontwerp na uitvoering zo dicht mogelijk te laten corresponderend met het gewenste beeld.

Het Phaeno Science Center in Wolfsburg, Duitsland, gerealiseerd in 2005, is een gebouw welke bekend staat als ontwerp welke model staat voor Zaha Hadid haar werk.

*"Best known for her seminal built works (Vitra Fire Station, Rosenthal Centre for Contemporary Art, BMW Central Building, Phaeno Science Center, and MAXXI: Italian National Museum of XXI Arts) her central concerns involve a simultaneous engagement in practice, teaching and research."*¹

Daarnaast staat het gebouw bekend om zijn extreme vormgeving, waarbij gebruik is gemaakt van baanbrekende bouwtechnologische oplossingen.

*"Zaha Hadid's Wolfsburg Science Centre is probably the most complicated structure humanity has ever tried to build. To get it right has required the harnessing of some great engineering minds and multiple software upgrades."*²

Het Phaeno Science Center is een doordacht ontwerp waarbij niets aan het toeval is overgelaten. Afgelopen zomer 2011 heb ik een bezoek gebracht aan het Phaeno Science Center in Wolfsburg en heb een afspraak weten te regelen met Jonathan Schrempf, de bedrijfsleider van de dag. Meneer Schrempf heeft details over het ontwerp weten te vertellen welke in literatuurstudie niet te vinden of op z'n best onduidelijk beschreven waren. Daarnaast heeft hij opheldering weten te geven over zaken waar verschillende bronnen tegenstrijdige uitspraken doen.

Middels deze scriptie wil ik mijn kennis uitbreiden met betrekking tot architect Zaha Hadid en de daarmee direct in verband staande bouwtechnologische ontwikkelingen welke het revolutionaire, experimentele maar bovenal complexe ontwerp van het Phaeno Science Center tot gevolg heeft gehad. Ik hoop hierdoor meer inzicht te krijgen in specifieke bouwtechnologische oplossingen welke ik wellicht in mijn afstudeerproject zal kunnen integreren.

Vooralsnog wil ik u graag veel leesplezier toewensen.

Inhoudsopgave			
Inleiding	6	Hoofdstuk 8: Het Phaeno Science Center opgedeeld in constructieve elementen	24
<u>Deel I: Achtergrond informatie</u>	9	<u>Deel III: Materialisatie</u>	29
Hoofdstuk 1: De geschiedenis van de stad Wolfsburg.	10	Hoofdstuk 9: Zelfverdichtend beton	30
Hoofdstuk 2: Het Phaeno Science Center als internationale prijsvraag	12	Hoofdstuk 10: Kegels van zelfverdichtend beton	36
Hoofdstuk 3: Een reactie op de Moderne Beweging	13	Hoofdstuk 11: Vloerplaten van zelfverdichtend beton	39
Hoofdstuk 4: Van ontwerp tot oplevering	16	Hoofdstuk 12: Façaden van traditioneel beton	43
Hoofdstuk 5: Het functioneren van het Phaeno Science Center	17	Hoofdstuk 13: Dak van staal	46
Hoofdstuk 6: Projectinformatie	20	Samenvatting en conclusie	48
<u>Deel II: Constructieve stabiliteit en sterkte</u>	21	Bijlage I	52
Hoofdstuk 7: Het Phaeno Science Center beschouwt als een constructief samenwerkend geheel	22	Noten	53
		Literatuurlijst	56
		Internetbronnen	57
		Illustraties	58

Inleiding

Deze scriptie zal verhalen over het Phaeno Science Center. Doormiddel van uitgebreid onderzoek zal worden aangetoond dat dit gebouw een plaats in de architectuurgeschiedenis verdient.

Het Phaeno Science Center heeft als aanvulling op het culturele en vrije tijd programma van de stad Wolfsburg, de primaire functie van 'een interactief Sciences Center' voor bezoekers. Voor deze opdracht werd een internationale prijsvraag opgesteld welke is gewonnen door architect Zaha Hadid. Door het Phaeno Science Center te beschouwen als een experiment op zich, is Zaha Hadid in staat geweest om een raadselachtig gebouw te ontwerpen welke nieuwsgierigheid en ontdekkingslust in de mens prikkelt. Dit heeft als gevolg dat de realisatie van het gebouw te maken krijgt met enorme constructieve complexiteiten. Naast recent ontwikkelde computer software programma's heeft de voortgang van bouwconstructieve technologische ontwikkelingen minstens net zo een belangrijke rol gespeeld bij de ontwikkeling en realisatie van dit extreem ontwerp.

Deze scriptie bestaat uit 3 delen. Het eerste deel van deze scriptie zal ingaan op de geschiedenis en achtergrondinformatie betreffende het Phaeno Science Center. Omdat het Phaeno Science Center zo'n complex project is, is er een opdeling gemaakt tussen de in het tweede deel besproken constructieve stabiliteit en sterkte en het in het derde deel besproken materialisatie van het gebouw.

Deze twee zaken zijn echter onlosmakelijk met elkaar verbonden. Tot slot zal er een samenvatting en conclusie volgen waarin wordt opgesomd waarom het Phaeno Science Center een plaats in de architectuurgeschiedenis verdient.

Deze scriptie zal beginnen met een hoofdstuk waarin de geschiedenis van de stad Wolfsburg wordt behandeld. Het Phaeno Science Center wordt geplaatst in de ontwikkeling van de stad. Tevens wordt er ingegaan op de rol van het Phaeno Science Center in stedenbouwkundige context.

In het tweede hoofdstuk wordt er aandacht besteed aan het feit dat het Phaeno Science Center een resultaat is van een internationale architectuur wedstrijd waarin het ontwerp van Zaha Hadid unaniem tot winnend ontwerp werd uitgeroepen.

In het derde hoofdstuk zal er dieper ingegaan worden hoe het Phaeno Science Center opgevat kan worden als kritiek op de Moderne beweging. De uitspraak 'room for the city', afkomstig uit de Moderne beweging, wordt door Zaha Hadid toegepast in het Phaeno Science Center door het bekritisieren en vervolgens anticiperen van de Unité d'habitation van Le Corbusier. Daarnaast bekritiseert Zaha Hadid de uitspraak 'limitations of mass-production', afkomstig uit de Moderne beweging.

In het vierde hoofdstuk wordt in het kort het totale proces van ontwerp tot oplevering behandeld.

In het vijfde hoofdstuk zal er ingegaan worden op het gebruik van het gebouw in combinatie met de architectonische

beleving. Omdat het Phaeno Science Center een ingewikkeld gebouw is om te begrijpen, wordt het gebouw opgedeeld in drie verschillende delen, een plein, betonnen kegelvormige poten en een asymmetrische betonnen doos die vervolgens individueel worden besproken.

Het eerset deel van de scriptie wordt voor de volledigheid afgesloten met aanvullende projectinformatie.

Deel twee, Dit deel "constructieve stabiliteit en sterkte", beschrijft hoe vier verschillend constructief in elkaar stekende elementen, waar het Phaeno Science Center uit bestaat, door optimale samenwerking een constructief stabiel en sterk gebouw waarborgen. Ook wordt er in dit hoofdstuk aandacht besteed aan de up to date computer softwareprogramma's waar destijds gebruik van gemaakt is om de totale constructie zo minimaal mogelijk te kunnen dimensioneren.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de vier elementen bestaande uit betonnen kegels, vloerplaten, façaden en een dakconstructie. In het achtste hoofdstuk wordt de bijdrage per element in het constructieve stabiliteitsverhaal van het Phaeno Science Center beschreven.

Het derde deel van de scriptie zal ingaan op de materialisering van de vier verschillend constructief in elkaar stekende elementen welke eerder zijn beschreven in deel twee. In het negende hoofdstuk wordt allereerst ingegaan op het innovatieve materiaal

zelfverdichtend beton waar in het ontwerp van het Phaeno Science Center dankbaar gebruik van is gemaakt. De oorsprong van zelfverdichtend beton wordt behandeld en tevens zullen de precieze eigenschappen in kaart worden gebracht. Aan de hand daarvan wordt er een vergelijking gemaakt met traditionele betonmengsels.

In het tiende hoofdstuk wordt beschreven en bekritiseerd waarom er bij de realisatie van de betonnen kegels gekozen is om gebruik te maken van een zelfverdichtend betonmengsel in plaats van het een traditioneel betonmengsel. Daarnaast wordt er beschreven waar rekening mee gehouden moest worden gedurende de verwerking en uitvoering door de keus voor het toepassen van een zelfverdichtend betonmengsel.

Ook de vloerplaten zijn uitgevoerd in zelfverdichtend beton. In het elfde hoofdstuk zal worden beschreven en bekritiseerd waarom er in dit geval het gebruik van zelfverdichtend beton is verkozen boven gebruik van een traditioneel betonmengsel. Tevens worden aandachtspunten bij verwerking en uitvoering in het kort beschreven.

Bij de realisatie van de façaden is er niet voor gekozen om met zelfverdichtend beton te werk te gaan. Sterker nog, bij de realisatie van de façaden wordt er gebruik gemaakt van twee verschillende gevelsystemen, elk met een eigen materialisatie. De zuid façade bestaat uit geprefabriceerde betonnen raamelementen en de overige façaden zijn gerealiseerd door in het werk gestort beton. In het twaalfde hoofdstuk zal beschreven worden waarom

bij deze gevelsystemen voor traditionele betonmengsels is gekozen en of het te rechtvaardigen is dat er geen gebruik is gemaakt van een zelfverdichtend betonmengsel.

Het dertiende hoofdstuk zal ingaan op het enige constructieve element waar geen gebruik is gemaakt van beton maar van staal, dit omvat de dakconstructie. De keus om gebruik te maken van een stalen dak in plaats van een betonnen dak is voortgekomen uit de beperkingen welke het materiaal beton in dit geval met zich mee zal brengen.

Deel I

Achtergrond informatie

1. De geschiedenis van de stad Wolfsburg

In relatie tot het Phaeno Science Center.

Het Phaeno Science Center is een in Wolfsburg gelegen interactief Science Center welke in opdracht van Neuland Wohnbaugesellschaft mbH is ontworpen en gerealiseerd. Wolfsburg is een stad in de Duitse deelstaat Nedersaksen en wordt door het Mittellandkanaal opgedeeld in een industrieel noordelijk deel en een cultureel zuidelijk deel. De stad telt ruim 121.000 inwoners.³ Het Phaeno Science Center komt voort uit een reactie op het bizarre verleden van de betreffende stad.

De geschiedenis met het oog op de stadontwikkeling en architectuur wordt interessant vanaf het jaar 1938. Dit is het jaar waarin de Nazi's de stad hebben gesticht middels het besluiten om arbeiders van de Volkswagen fabriek te huisvesten. De Volkswagen fabriek ligt gelegen in het noordelijke deel van de stad, de arbeiders werden gehuisvest in het zuidelijke deel van de stad. De stad staat bekend door de Volkswagen fabriek en bijbehorende massaproductie, destijds bekends als Kdf-Stadt, en werd Stadt des Kdf-Wagens genoemd. Kdf staat voor "Kraft durch Freude" ook wel "kracht door plezier."⁴ Het oorspronkelijke stedenbouwkundige ontwerp voorzag onder meer in een residentie voor Adolf Hitler waarbij de Volkswagen fabriek een hobby project voor deze man moest voorstellen. Verder was het plan dat er een brede boulevard zou komen waar Hitler na de overwinning van Duitsland op de rest van Europa de overwinningssparade zou kunnen afnemen. Door het

uitbreken van de Tweede Wereldoorlog werden de meeste plannen niet gerealiseerd.



Figuur 1: Ligging
Wolfsburg in Duitsland.

De Volkswagen fabriek wordt tijdens de WOII ingeschakeld voor de oorlogsindustrie. In plaats van de Kdf-Wagens rolden er militaire uitrustingen en zelfs vliegtuigen van de band.⁵ Op 11 april 1945 werd er bij een bombardement driekwart van het complex vernield.

Als gevolg van de Tweede Wereldoorlog, werd de stad op 25 mei 1945 door Amerikaanse bezettingsautoriteiten vernoemd tot Wolfsburg, naar het gelijknamige kasteel dat omstreeks 1300 op de oever van de Aller rivier aan het Mittellandkanaal was gesticht. Sinds 1 oktober 1951, de datum vanaf het moment dat Wolfsburg een eigen stadsdistrict heeft, neemt de omvang van het industriële noorden en culturele zuiden aanzienlijk toe.⁶ Kostbare aanvullingen

op het culturele zuiden zijn het in 1962 gerealiseerde Culturele Centrum door Alvar Aalto en het in 1976 gerealiseerde Theater door Hans Scharoun. Deze uitbreidingen zijn voortgekomen uit de gedachten dat een stad meer zal moeten zijn dan alleen commerciële bouw of 'Lebensbau'. Door het realiseren van bovenstaande gebouwen werd behalve vrijetijdsbesteding unieke architectuur gecreëerd en tevens de identiteit van Wolfsburg naar een hoger niveau getild.⁷

Naast de culturele ontwikkelingen blijft de autofabriek te allen tijde een belangrijke rol spelen in de stad. In vroeg stadia in de vorm van instromen van gastarbeiders, noodzakelijk om de Volkswagen fabriek draaiende te houden. En vanaf 1998, door het aangaan van de Volkswagen fabriek met de stad van een publiekprivaat partnerschap, om meer culturele en vrije tijd voorzieningen te ontwikkelen. Bezienswaardigheden welke het Volkswagen-concern heeft ontwikkeld zijn onder andere het in 1994 gerealiseerde Kunstmuseum Wolfsburg, het in 2000 gerealiseerde themapark 'Autostadt' alsmede ook het Phaeno Science Center.⁸ Het Phaeno Science Center heeft als aanvulling op het culturele en vrije tijd programma van de stad, de primaire functie 'een interactief Sciences Center'. Door zijn specifieke locatie in Wolfsburg, aan de zuidkant van het Mittelland Kanal direct langs het spoor, functioneert het gebouw als beëindiging van een keten indrukwekkende culturele gebouwen. Daarnaast wordt het ingezet als middel om een connectie tot stand te brengen tussen de tweedeling in de stad ontstaan gedurende de

geschiedenis. De directe connectie naar de andere zijde van het kanaal wordt gemaakt door een half betonnen- en half stalen brug.⁹



Figuur 2: Plattegrond van Wolfsburg welke de relatie tussen het Phaeno Science Center, het industriële Noorden en het culturele Zuiden laat zien.

2. Het Phaeno Science Center als internationale prijsvraag.

In 1998 is het jaartal waarin de volkswagen fabriek een publiek privaat partnerschap aangaat met de stad om meer culturele en vrije tijdsvoorzieningen te ontwikkelen. Het idee om een Science Center voor Wolfsburg te realiseren werd in 1998 door het culturele afdelingshoofd Dr. Wolfgang Guthardt aangekondigd. Het idee werd vrij snel opgepakt en concreet gemaakt door het opstellen van een programma van eisen voor een gewenst Science Center in Juli 1999. Voortbouwend op de culturele gebouwen van de architect Alvar Aalto en Hans Scharoun werd in 1999 een internationale architectuur wedstrijd aan deze opdracht toegekend. Deelnemers als Enric Miralles / Benedetta Tagliabue (Barcelona), COOP Himmelb(l)au (Wenen), Scogin Elam & Bray (Atlanta) en Chris Wilkinson (Londen) kwamen hierop af. Uiteindelijk werden uit acht landen drieëntwintig ontwerpen ingestuurd. De ontwerpen varieerde van simpele expositiegebouwen tot spectaculaire architectuur. De komst van een Science Center werd door Wolfsburg als kans gezien om hun grenzen te verleggen door hun interesse, stedenbouwkundige- en culturele identiteit uit te drukken in sprekende architectuur. Dit met het gevolg dat Zaha Hadid in Januari 2000 unaniem wordt gekozen met het winnend ontwerp. Dit ontwerp werd omschreven als een raadselachtig ontwerp welke de nieuwsgierigheid en ontdekkingslust in de mens prikkelt.¹⁰



Figuur 3: Render van Zaha Hadid haar eerste impressie.

3. Een reactie op de Moderne beweging.

Het gebouw bestaat uit een asymmetrisch betonnen doos welke zeven meter wordt opgetild en gedragen door tien betonnen onregelmatige kegelvormige poten. De betonnen doos samen met de kegelvormige poten beslaan een oppervlak van 12000m². Onder deze doos is een plein te vinden welke is ontworpen met het idee; creëren van “room for the city”.¹¹ Tot slot is er onder het plein een ondergrondse parkeergarage te vinden, welke 15000m² beslaat.¹²

Het Phaeno Science Center kan in twee opzichten opgevat worden als kritiek op de Moderne Beweging. Onderstaand zullen beide behandeld worden.

“Room for the city”

‘Room for the city’ is een opvatting welke voortkomt uit de Moderne beweging, waarin wordt nagestreefd de grondplaat van een plot opnieuw bruikbaar te maken door het optillen van een gebouw middels kolommen. Door deze ingreep kan er worden gesproken van ‘het creëren van openbare publieke ruimten en hierdoor het teruggeven van grond aan de stad’, ofwel ‘room for the city’.¹³

Terugkijkend in de architectuurgeschiedenis is deze zelfde opvatting te herkennen in Le Corbusier zijn Unité d’habitation Marseille, gerealiseerd in 1952.

“Zoals de Cité radieuse geen naam en geen plaats heeft, heeft de Unité l’habitation geen bodem: ze ontkend de grond, verwijdt zich ervan, verheft zich op kolommen, zondert zich af.”¹⁴



Figuur 4: Unité d’habitation, Marseille.



Figuur 5: De open doorgang onder de Unité d’habitation.

De ruimten onder de Unité d’habitation pakt echter uit als een onaangename verblijfsruimte, welke alsnog niet als bruikbaar wordt beleefd.

Volgens Zaha Hadid haar opinie slaagt de Moderne beweging er niet in de grond van een plot bruikbaar te maken door het enkel optillen van een gebouw doormiddel het plaatsen van kolommen. Er is meer nodig om een bovenstaande ruimte daadwerkelijk weer wat te laten betekenen voor de stad.

Belangrijk zal de mate zijn waarmee de ruimte aangenaam bevonden wordt. Een aangename ruimte wordt gecreëerd door voldoende lichttoetreding overdag en verlichting in de nacht. Daarnaast zal voldoende beweging, activiteit ofwel levendigheid in de ruimten een belangrijk goed zijn.¹⁵

Deze twee minstens net zo belangrijke zaken, heeft Zaha Hadid slim in haar ontwerp weten te integreren. Voldoende lichttoetreding overdag wordt verkregen door het gebouw zeven meter op te tillen en op plekken waar nodig bij te verlichten door lichtbronnen. De lichtbronnen zijn te vinden in de onderkant van de eerste verdiepingvloer. In de nacht wordt de ruimte ruimschoots verlicht door dezelfde lichtbronnen aangevuld met speciale blauwe lichteffecten welke een buitenaardse, raadselachtige en intrigerende uitstraling geeft.¹⁶

Om levendigheid in de ruimte onder het gebouw te creëren heeft Zaha Hadid ervoor gekozen de ruimten als een plein te laten functioneren. Door het gebouw op een slimme locatie in Wolfsburg te plaatsen wordt ervoor gezorgd dat er een continue stroom van mensen langs of over het plein van het Phaeno Science Center loopt. Het gebouw ligt naast het treinstation, waarvan veel bezoekers voor zowel het culturele zuidelijke deel alsmede het industriële noordelijke deel gebruik maken. Wanneer bezoekers naar hun bestemming voortbewegen zullen deze het plein passeren. Een laatste belangrijke ingreep betreffende levendigheid op het plein treft het situeren van functies in de betonnen kegelvormige poten. Zaha Hadid heeft gekozen voor functies als café, auditorium,

hoofdentree, bistro, een cadeauwinkel en een evenementen ruimte.¹⁷



Figuur 6: Verlichting van het Phaeno Science Center plein overdag.



Figuur 7: Verlichting van het Phaeno Science Center plein in de nacht.

"Limitations of mass-production"

Massaproductie is een term welke voorkomt uit de Moderne beweging. Massaproductie werd na de tweede wereldoorlog hét middel voor een snelle wederopbouw.

Volgens Zaha Hadid haar opinie brengt massaproductie beperkingen met zich mee. In het geval voor Wolfsburg zijn massaproductie beperkingen treffend voor zowel het industriële erfgoed van Wolfsburg als voor Hadid haar interesse voor het ontwerpen van openbare gebouwen welke volgens haar voortvloeit uit uniekheid; ontstaan uit een eenmalige reactie op de locatie en situaties die van toepassing zijn.¹⁸

Met het door Zaha Hadid uitgevoerde 30-jarig durend architectonische onderzoek curriculum, word beroep gedaan op oplossingen welke door enkel massaproductie niet mogelijk geweest zouden zijn. Door het sublieme ontwerp van het Phaeno Science Center te realiseren en het niet te beperken door enkel gebruik te maken van massaproductie, maar door gebruik te maken van unieke, innovatieve technieken, heeft Zaha Hadid het ontwerp tot een hoger niveau weten te brengen.¹⁹



Figuur 8: Zuid façade Phaeno Science Center.



Figuur 9: Zuid façade Phaeno Science Center.

4. Van ontwerp tot oplevering

Nadat in januari 2000 het ontwerp van Zaha Hadid verkozen was tot winnend ontwerp heeft het proces van ontwerp tot oplevering binnen een relatief korte periode van vijf jaar plaatsgevonden. Dit is mede mogelijk gemaakt door intensieve samenwerking van veel verschillende partijen zoals de architect met haar ontwerpteam, constructie ingenieur, betonaannemer en de staalaannemer. In maart 2001 is er begonnen met het afgraven van de locatie om een ruimte te creëren voor de parkeergarage van het Phaeno Science Center. Ondertussen is opdrachtgever Neuland Wohnbaugesellschaft mbH bezig met de bouwvergunning welke in december 2001 rond is gekomen. In maart 2002 werd de spreekwoordelijke 'eerste steen' gelegd en ving hiermee de bouw van het Phaeno Science Center aan. De vlotfundering werd als eerst gerealiseerd en vanuit daar kon de rest van de ruwbouw gerealiseerd worden. Van september tot december 2003 werd er tegenover de bouwplaats een Phaeno Box neergezet om informatie te kunnen verschaffen aan de omgeving. De ruwbouw werd voltooid in december 2003 waarna de steigers afgebroken werden. In februari 2004 begonnen de werkzaamheden voor de realisatie van het stalen dak. Er werd een tent opgezet met het idee om een laswerkplaats te creëren zodat delen van het dak aan elkaar vast gelast konden worden om vervolgens direct vanaf de werkplaats in het gebouw te plaatsen. Na het realiseren van het stalen dak werd in juli 2004 begonnen met het storten van het heuvellandschap op

de Phaeno locatie. In september 2004 werd er begonnen met de montage van de geprefabriceerde betonnen gevelpanelen op de zuid façaden waarna de afbouw werd voltooid. Vervolgens kon in november 2004 begonnen worden met de binnen afbouw. In juni 2005 is het gebouw voltooid en kon de expositie welke bestaat uit een tal van experimenten worden opgebouwd. Op 25 november 2005 werd het Phaeno Science Center geopend. In de eerste vier maanden kwamen er 100.000 bezoekers op af. Per jaar bezoeken gemiddeld 180.000 mensen het Science Center.²⁰

5. Het functioneren van het Phaeno Science Center

Het Phaeno Science Center is, wanneer er gekeken wordt naar het functioneren, grofweg op te delen in een plein, betonnen kegelvormige poten en een asymmetrische betonnen doos. In het hoofdstuk 'een reactie op de Moderne beweging' wordt het functioneren van het plein uitgebreid toegelicht. Onderstaand is informatie te vinden over het functioneren van de betonnen kegelvormige poten en de betonnen doos. Door dit in beeld te brengen zal duidelijk worden hoe het Phaeno Science Center als gebouw functioneert.

Betonnen kegelvormige poten

Het publieke plein, welke optimaal met de omgeving is geïntegreerd, wordt vrij gemaakt door de betonnen doos op te tillen door tien betonnen kegelvormige poten. De betonnen kegelvormige poten zijn in het ontwerp op een zodanige manier gepositioneerd dat deze de mensen onder het gebouw door leiden naar de entree. Door activiteiten onder het plein te organiseren blijft het een levendige plek met een publieke betekenis.²¹

De betonnen kegelvormige poten, welke in de rest van de thesis 'betonnen kegels' genoemd zullen worden, zorgen ervoor dat het publieke plein en de asymmetrische betonnen doos met elkaar versmelten tot een samenwerkend geheel. Er ontstaat een bijna onwaarneembare overgang van buiten naar binnen. Slechts

vijf van de tien betonnen kegels ponsen door de verdiepingvloer van de betonnen doos heen om het dak te dragen (Figuur 10). Bij de ander vijf kegels wordt gebruik gemaakt van een omkering waardoor er kraters ontstaan die elk een functie bergen (Figuur 11). Er ontstaat een uitzonderlijk nauwe koppeling tussen stad en gebouw, expressionistische ruimte op het buitenplein en het mysterieuze organisch landschap aan de binnenkant van de betonnen doos (Figuur 12).²²

Behalve dat de betonnen kegels een architectonische versmelting waarborgen, huizen in de kegels verblijfsfuncties. Het gaat om publieke functies zoals winkels, workshopruimten, entree tot hoofdfoyer, bistro, auditorium, laboratoriumbevoorrading, evenementen ruimten, koffiobar en de entree tot de half betonnen- en half stalen brug.²³ In bijlage 1 zijn plattegronden en een doorsnede te vinden, waarop de precieze indeling van verblijfsfuncties zijn aangegeven.



Figuur 10. Betonnen kegel pons door de eerste verdieping svloer om het dak te dragen.



Figuur 12. Bijna onwaarneembare overgang tussen binnen naar buiten.



Figuur 11: Omkering van een betonnen kegel, waardoor een krater met daarin een functie ontstaat.



Figuur 13: Organisch landschap welke actief gebruikt wordt voor interactieve experimenten.

Betonnen doos

De asymmetrische betonnen doos, ook wel 'experimentele hal', huisvest de kernfuncties van het Phaeno Science Center, bestaande uit een hoofdentree met hoofdfoyer, expositieruimten, winkels, restaurant en een laboratorium. Daarnaast is er vanuit deze ruimte de entree naar de half betonnen- en half stalen brug te vinden, welke een connectie met de volkswagen fabriek gelegen aan de andere zijde van het kanaal tot stand brengt.²⁴

De meeste ruimte in de betonnen doos wordt ingenomen door expositieruimten waar je doorheen wordt geleid door een golfvormig uitgevoerde verdieping vloer. Door deze golfvorm, ontstaan door de verschillende hoogten in ruimten, lijkt zich gedurende de route door het gebouw een organisch landschap te ontwikkelen welke actief wordt gebruikt voor de interactieve exposities (Figuur 13). Tevens zijn er in de organisch gevormde verdieping vloer holtes opgenomen welke men toestaat om een glimp van de ruimten onder het gebouw op te vangen. Op deze manier communiceert de experimentele hal met het publieke plein.²⁵

Opvallend is dat er gedurende de gehele expositie gebruik kan worden gemaakt van een vrije plattegrond. In plaats van een interne kolommenstructuur wordt er gebruik gemaakt van stabiliteit en sterkte die de constructie verkrijgt door het versmelten van de betonnen golvende vloer met de geconstrueerde betonnen kegels.²⁶

6. Projectinformatie

In dit hoofdstuk zal voor de volledigheid nog aantal belangrijke projectgegevens opgesomd worden.²⁷

Opdrachtgever:

Neuland Wohnbaugesellschaft mbH

Architect:

Zaha Hadid Architects

Architectonische partner in Duitsland:

Mayer Bahrle Freie Architekten BDA

Verantwoordelijk project architect:

Christos Passas

Ontwerpteam:

Ara Klomps, Gernot Finselbach, Helmut Kinzler, David Salazar, Silvia Forlati, Guenter Barczik, Lida Charsouli, Marcus Liermann, Kenneth Bostock, Enrico Kleinke, Constanze Stinnes, Liam Young, Chris Dopheide, Barbara Kuit, Niki Neerpasch, Markus Dochantschi.

Constructie ingenieur:

Adams KaraTaylor (AKT)

Constructie partner in Duitsland:

Takarz Frerichs Leipold

Buiding services concept design: Buro Happold (moet goed samenwerken met AKT, want services zijn verdeeld binnen de ondergrondse parkeergarage en gaan door de muren van de kegelvormige poten heen omhoog naar het gebouw te vinden binnen de ruimte in de poten.)

Building services detail design in Germany:

Buro Happold/NEK

Kostenadviseur:

Hanscomb

Staalwerk aannemer:

Queck

Betonnen aannemer:

Heitkamp

Budget:

€ 79,000,000

Deel II:

Constructieve stabiliteit en sterkte

7. Het Phaeno Science Center beschouwt als een constructief samenwerkend geheel

Wanneer er gekeken wordt naar het constructieve geheel van het Phaeno Science Center is deze grofweg op te delen in vier verschillend constructief in elkaar stekende elementen, bestaande uit: betonnen kegels, vloerplaten, façaden en een dakconstructie. Door de constructief verschillend in elkaar stekende elementen optimale te laten samenwerken en elkaar hierdoor zelfs te laten versterken, wordt een constructief stabiel en sterk gebouw gewaarborgd.

Grenzen verleggende computer software

Het gebouw wordt gevormd door 17.000 afzonderlijke elementen, elke met een individueel krachtenverloop met bijbehorende spanningen. De stabiliteit en sterkte van het gebouw is verkregen door het gebouw te beschouwen als één geheel. Doormiddel van een elementenontleding zijn de krachten en spanningen berekend welke, en op welke plaats in het geheel, deze zullen optreden. De elementenontleding wordt uitgevoerd doormiddel van verschillende elkaar aanvullende computer softwareprogramma's. Door gebruik te maken van voordurend door ontwikkelde software, wordt er veel gesleuteld, gerekend en gedimensioneerd aan elementen welke deel uitmaken van de totale constructie.²⁸

Het grootste deel van de tijd is het gebouw met behulp van 3D computer programma's ontworpen. Communicatie tussen het architectenbureau Zaha Hadid en constructiebureau Adams Kara Taylor (AKT), vindt plaats doormiddel van informatie in de vorm van 3D computerbestanden. Communicatie met andere partijen, zoals de klant en betonaannemer Heitkamp, waren echter niet gewend aan deze vorm van informatie. Hierdoor heeft AKT de 3D bestanden op een zeker moment moeten omzetten naar 2D bestanden om het ook voor deze partijen begrijpelijk en bruikbaar te maken.²⁹

Er wordt verondersteld door constructie ingenieur Paul Scott (AKT) dat de stand van de technologie betreffende de software van dat moment, de beperkende factor is geweest in de ontwikkeling van de totale constructie.

*"So, with AKT's finite element analysis software, a modelling process was developed that enabled the complex forces within a single element to be resolved, thereby reducing the volume of concrete to its absolute minimum. Five years ago this would have been virtually impossible, and as Scott admits, without advances in computer modelling, this building would have been engineered with walls that were twice as thick."*³⁰

*"It was groundbreaking; five years ago I don't think we could have done it – the software had not been developed."*³¹

Controleren van computer berekeningen

De structurele complexiteit welke het ontwerp met zich meebrengt is doormiddel van computer programma's volledig doorgerekend, verfijnd en geminimaliseerd in constructieve afmetingen. Het enkel uitgaan van computer berekeningen op een gebouw geeft nooit een volledige garantie dat een ontwerp constructief helemaal klopt. Na computercalculaties is het belangrijk dat een ervaren constructie ingenieur er nog een keer kritisch naar kijkt. Deze ingenieur zal voor de zekerheid controleren of een bepaald materiaal de capaciteit heeft om weerstand te bieden tegen de krachten en spanningen welke door de software zijn berekend.³²

Sterker nog, in Duitsland is het een vereist dat de lokale overheid gebruik maakt van een controle ingenieur. Deze controleur heeft de plicht om zelfstandig een ontwerp te analyseren en controleren op berekeningen en wapeningdetails welke in eerste instantie zijn uitgevoerd door de eerste constructie ingenieur (AKT). Pas wanneer de door de lokale overheid aangestelde controleur met de tekeningen van deze eerst ingenieur heeft ingestemd, mogen deze door de aannemer in gebruik worden genomen voor aanvang van de bouw. Een stelregel in dit hele proces is; de controleur mag zo lang de tijd nemen voor analyse en controle als deze nodig heeft om het ontwerp te begrijpen en vervolgens te accorderen. Dit maakt dat een controleur grote invloed kan hebben op het tijdsverloop van een ontwerpproces. Door de hoge complexiteit en ongebruikelijke informatie bestanden

van het Phaeno Science Center had deze manier van onafhankelijk controleren enorme vertragingen binnen het proces kunnen opleveren. Na enige tijd heeft de controleur aangegeven dat het ontwerp en de informatie bestanden van het Phaeno Science Center zo complex waren, dat hij niet in staat was een volledige onafhankelijke controle uit te voeren. In plaats daarvan heeft hij in overleg met de lokale overheid beroep gedaan op data van constructiebureau AKT om de analyse en controle te kunnen voltooien. AKT heeft de controleur moeten meenemen in het ontwerp.³³

8. Het Phaeno Science Center opgedeeld in constructieve elementen

De constructieve stabiliteit en sterkte van het Phaeno Science Center is verkregen door vier constructief verschillend in elkaar zittende elementen optimaal met elkaar te laten samenwerken. Het Phaeno Science Center is op te delen in de elementen; betonnen kegels, vloerplaten, façaden en een dak. Elk element zit anders in elkaar met tevens een eigen materialisering. Ook heeft ieder element een eigen taak in het constructieve geheel. In dit hoofdstuk zal toegelicht worden hoe deze systemen door optimale samenwerking tot een stabiel en sterke constructief geheel leiden.

Betonnen kegels

Het Phaeno Science Center maakt gebruik van tien betonnen kegels, welke rusten op de vlotfundering hetgeen de vloer vormt van de ondergrondse parkeergarage. Van de tien verschillende kegels, welke het gebouw zeven meter boven het plein optillen, ponsen er slechts vijf door de eerste verdiepingvloer heen om het dak te dragen.³⁴

Alle tien de betonnen kegels zijn uniek en maken in sommige gevallen hoeken van meer dan 45 graden ten opzichte van de verticalen. Deze factoren zorgen ervoor dat de kegels individueel onstabiel zijn. Er ontstaat pas een stabiel geheel

wanneer al deze individueel uitgevoerde kegels worden gefixeerd door het storten van een betonnen vloerplaat. Door het versmelten van de betonnen vloerplaat met de betonnen kegels ontstaat er een stabiele en sterke constructie. Tot die tijd is het van groot belang dat tijdens het realiseren van de totale constructie het gewicht van de individuele kegels wordt ondersteund door grote stempels (Figuur 14 en 15).³⁵

Door de betonnen kegels dragend te maken is gebruik van een interne kolommenstructuur in de expositieruimten niet meer nodig. Dit zorgt ervoor dat er gebruik gemaakt kan worden van een vrije plattegrond.³⁶



Figuur 14: Onderstempeling van de bekisting van een kegel voor de stort.



Figuur 15: Onderstempeling van een individueel onstabile kegel.

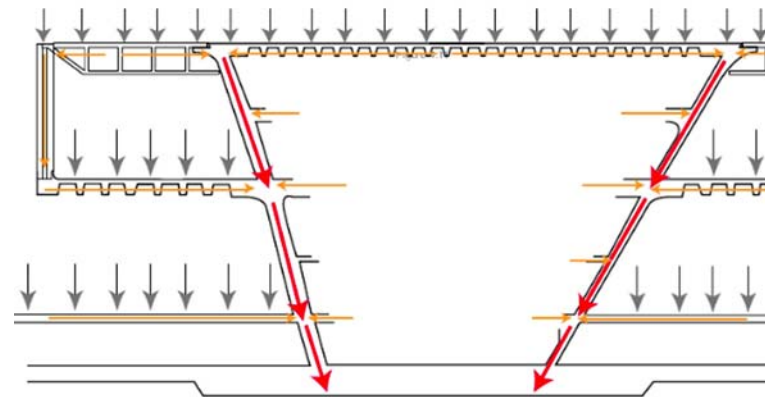
Vloerplaten

De begane grond vloerplaat en de eerste verdieping vloerplaat zijn van minstens net zo groot belang in het stabiliteit en sterkte verhaal van het Phaeno Science Center als de betonnen kegels. Na het storten van het eerste deel de individueel instabiele kegels, van vlotfundering tot de onderzijde van het betonnen plein (de begane grond vloerplaat), worden deze gefixeerd door het storten van de begane grond vloerplaat. Derhalve wordt door de versmelting van de betonnen kegels in de ondergrondse parkeergarage met de begane grond vloerplaat een constructief stabiel en sterk geheel verkregen. De betonnen kegels worden doorgezet vanaf de begane grond tot de onderzijde van de eerste verdieping vloer. Ook voor deze stort geldt dat de kegels tijdens de stort individueel instabiel zijn en worden gefixeerd door het storten van de eerste verdieping vloerplaat.³⁷

Het zover geproduceerde stabiele en sterke constructieve geheel, wat verkregen is door het versmelten van de betonnen kegels met de twee vloerplaten, zorgt ervoor dat zonder het optreden van stabiliteitsproblemen vijf van de tien betonnen kegels tot het dak kunnen worden voortgezet om daarmee de dakconstructie te ondersteunen.³⁸

Façaden

In tegenstelling tot de betonnen kegels en versmolten vloerplaten, levert de façaden slechts een kleine bijdragen aan het constructieve geheel. De krachten welke worden uitgeoefend op het dak, door bijvoorbeeld neerslag of werkzaamheden en het gewicht van het dak zelf, welke niet direct op de betonnen kegels worden afgedragen, zullen via de façaden worden getransporteerd naar de vloerplaat, vervolgens naar de betonnen kegels welke de krachten op hun beurt naar de vlotfundering zullen afdragen (Figuur 16).³⁹



Figuur 16: Schema van de krachtenafdracht.

In de façaden van het Science Center kan onderscheid gemaakt worden tussen twee gevelsystemen en een daarbij horen krachtenverloop. In de façaden is onderscheid tussen deze twee gevelsystemen ook waar te nemen.

Het eerste gevelsysteem waarmee in het Phaeno Science Center wordt gewerkt, bevindt zich op de zuid façade, waar te nemen als trapeziumvormige betonnen raamelementen. Deze façade staat ook wel bekend als het gezicht van het gebouw naar de stad. Het krachtenverloop van het dak naar de verdiepingsvloer door de zuid façade van het gebouw, wordt gewaarborgd door een structuur van stalen kolommen. Deze stalen kolommen worden doormiddel van onregelmatige diagonale elementen met elkaar verbonden tot een stabiel geheel. De hoeken en hellingen die het constructieve skelet maken, komen overeen met de trapeziumvormige betonnen raamelementen, zodat deze elementen eveneens gemakkelijk aan het skelet gemonteerd kunnen worden. Het stalen frame wordt op deze manier verstopt achter een representatieve façade (Figuur 17 en 18).⁴⁰

De overige façaden zijn geconstrueerd door het ter plaatse in het werk gestort beton. Door beton te wapenen en zo nodig te schoren op de plaats waar extra stabiliteit of stijfheid gewenst is, wordt de mogelijkheid gecreëerd om deze elementen krachtenafdracht van het dak naar de vloerplaat te garanderen.⁴¹



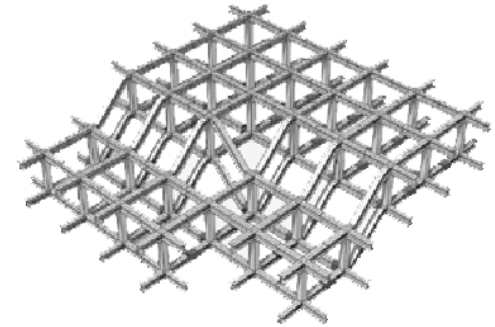
Figuur 17: Constructieve structuur van stalen kolommen in de zuid façade.



Figuur 18: Montage van de trapeziumvormige betonnen raamelementen aan de stalen constructie.

Dak

Opvallend is dat het geheel in beton gerealiseerde Phaeno Science Center wordt overspannen door een enorm in staal geconstrueerd dak. De keus om gebruik te maken van een stalen dak in plaats van een betonnen dak is voortgekomen uit de beperkingen welke het materiaal beton in dit geval met zich mee brengt. Het stalen dak van het Phaeno Science Center wordt enkel ondersteund door de vijf constructieve betonnen kegels. Aan de rand van het dak wordt het ondersteund door de eerder beschreven verschillende gevelsystemen. De dak constructie bestaat uit een in twee richtingen afdragend vakwerk en bestaat grotendeels uit vierkante vormen. Door de vreemde vorm van het gebouw veranderen deze vierkante vormen geleidelijk over de lengte in trapeziumvormen. Ook hier weer wordt door de complexe geometrie stabiliteit, stijfheid en sterkte gewaarborgd.⁴²



Figuur 19: Stalen dak constructie.



Figuur 20: Stalen dakconstructie in het gebouw.

Deel III:

Materialisatie

9. Zelfverdichtend beton

Zelfverdichtend beton is het materiaal waaruit de betonnen kegels en de vloerplaten zijn gerealiseerd. Op het eerste gezicht lijkt dit een interessante en verrassende keuze, omdat dit soort beton in Europa voorheen vooral op civieltechnische toepassingsgebieden werd ingezet. Denk hierbij aan vormgeving in bruggen, viaducten, wanden bij spoorwegonderdoorgangen en bij ondergrondse bouwprojecten (Haagse tramtunnel en Noord-Zuidlijn Amsterdam).⁴³

Een meer voor de hand liggende keuze zal gebruik van een traditioneel betonmengsel zijn. In de architectuur wordt al vele eeuwen gewerkt met deze traditionele betonmengsels. Dit maakt dat men meer kennis heeft aangaande de voor- en nadelen en daarmee de mogelijkheden die dit materiaal met zich meebrengt.

In komend hoofdstuk zullen de precieze eigenschappen van zelfverdichtend beton in kaart worden gebracht. Aan de hand daarvan wordt er een vergelijking gemaakt met meer traditionele betonmengsels en hun eigenschappen. Vervolgens zal er worden beargumenteerd waarom er gebruik is gemaakt van zelfverdichtend beton.

De oorsprong van beton

Hoewel beton werd toegepast door de Egyptenaren, de Babyloniërs en de Grieken, nam de ontwikkeling pas een hoge vlucht bij de Romeinen. De Romeinen maakten gebruik van het bindmiddel kalk met toevoeging van hydraulische toeslagen, zoals santorin- en puzzolaanaarde. Hierdoor kon hun mengsels ook zonder toetreding van lucht, dus zelfs onder water, verharderen. Overblijfselen uit de Romeinse tijd, waaronder het Pantheon en het Colosseum in Rome, alsmede ook bruggen en aquaducten, geven een goed beeld van de duurzaamheid van het toegepaste materiaal. Uiteraard was er in die tijd sprake van een combinatie met natuursteen. De toepassing van beton is in de 19de en 20ste eeuw tot grote ontwikkeling gekomen. Belangrijke stimulansen waren de grotere wiskundige kennis, de mogelijkheden van de toegepaste mechanica, de uitvinding van portlandcement rond 1850 en de ontdekking door de Fransen van het gewapende en daarna het voorgespannen beton.⁴⁴

De ontwikkeling van het op voorspanning brengen van beton maakt het mogelijk om relatief grote overspanningen en toch slanke constructies te waarborgen. Beton wordt een veel gebruikt constructief bouw materiaal binnen de architectuur.⁴⁵

De oorsprong van Zelfverdichtend beton

In Japan, waar de oorsprong van zelfverdichtend beton ligt, wordt er al sinds de jaren tachtig langere tijd actief onderzoek verricht naar betere betonkwaliteiten. Het gebrek aan uniformiteit, gevolg van onvolledige verdichting, bleek de hoofdoorzaak te zijn van de zwakkere prestaties van betonnen structuren. Dit inzicht heeft ervoor gezorgd dat werd gezocht naar methoden om verdichten door middel van een trilnaald niet langer noodzakelijk te maken. De eerste methoden voor het samenstellen van een goed zelfverdichtend beton wordt ontwikkeld door de Japanse professor Okamura in 1986. Wereldwijd wordt deze Japanse methoden aangepast en verbeterd, meestal door bedrijven welke grotere civiel technische constructies moesten realiseren.⁴⁶

In Europa krijgt men oprechte interesse voor zelfverdichtend beton rond de jaren negentig. Het eerste land welke zelfverdichtend beton gebruikt voor realisatie van eenvoudige bruggen treft Zweden. Al snel volgen er meer landen in Europa, waaronder Nederland en België, welke zelfverdichtend beton gebruikten voor civieltechnische toepassingen. Sinds 1996 is zelfverdichtend beton niet alleen meer in Japan maar ook in Europese landen verkrijgbaar. Door jaren ervaring, onderzoek en groei van kennis over de samenstelling en werking van het nieuwe geoptimaliseerde beton, wordt het toepassingsgebied breder. Deze ontwikkeling zorgt ervoor dat het materiaal niet alleen voor civieltechnische toepassingen geschikt lijkt, maar ook in

architectonische toepassingen een dienst kan bewijzen. Wanneer een architect, constructeur of projectteam overweegt om gebruik te maken van zelfverdichtend beton is het van groot belang dat de voor en nadelen van zelfverdichtend beton goed tegen elkaar worden afgewogen. Met deze overweging wordt getoetst of dit materiaal technologisch en economisch bij zal dragen aan desbetreffend architectonisch project.⁴⁷

Eigenschappen Zelfverdichtend beton

Specifieke eigenschappen van zelfverdichtend beton zijn vooral in de verwerkingsfase van een project van groot belang. Er dient in deze fase afgestemd te worden op de vorm van de te storten constructie en de specifieke omstandigheden waaronder gewerkt wordt.⁴⁸

Het grootste verschil, wanneer we kijken naar de eigenschappen van zelfverdichtend beton in contrast met traditionele betonmengsels, is de mate waarin het materiaal het klaar speelt om te verdichten zonder mechanische hulpmiddelen als bijvoorbeeld een trilnaald. Onderstaand zal een pakket van samenwerkende eigenschappen worden aangehaald welke maken dat zelfverdichtend beton ook daadwerkelijk zelfverdichtend is.

Vloeimaat en trechtertijd

De eigenschappen van zelfverdichtend beton worden bepaald door de vloeimaat en de trechtertijd. De vloeimaat (in millimeter) is een maat voor de consistentie, de trechtertijd (in seconden) is een maat voor de viscositeit. De maat voor de consistentie, ook wel vervormbaarheid of verwerkbaarheid van een betonspecie, is onder meer afhankelijk van de hoeveelheid water in een specie, de korrelgrootte van de toeslagstoffen en van de hulpstoffen en wordt aangegeven doormiddel van zogenaamde consistentieklassen. Een consistentieklasse omvat aanduidingen met C, (ook wel verdichtingmaat), met S, (ook wel zetmaat), en met F, (ook wel vloeimaat). Zelf verdichtend beton onderscheidt zich van traditioneel beton door zijn hoge vloeibaarheid wat maakt dat de consistentieklasse met de aanduiding F van belang is. Vanaf consistentieklasse F6 heeft de betonspecie een vloeimaat welke overeenkomt met de vloeieigenschappen van zelfverdichtend beton. De viscositeit, waarmee de stroperigheid van de betonspecie wordt bedoeld, staat onlosmakelijk verbonden met de trechtertijd. Hoe hoger de viscositeit, des te hoger de trechtertijd. ⁴⁹

In een schema, gemaakt door het gietbouw centrum zijn beide zaken tegen elkaar uitgezet (Figuur 21). Uit dit schema valt af te lezen dat voor hoge en slanke constructies een zelfverdichtend betonmengsel toegepast moet worden welke een hoge vloeimaat en hoge trechtertijd heeft.

Daar in de praktijk in verschillende termen over vloeibare species gesproken wordt, zonder dat het onderscheid daarbij altijd duidelijk is, is het belangrijk dat deze gespecificeerd worden op basis van vloeimaat en trechtertijd. Er kan alleen sprake van zelfverdichtend beton zijn indien toetsing van verwerkingseigenschappen direct gekoppeld aan vloeibaar, verdichtingarm en zelf verdichtende species gemaakt kunnen worden. ⁵⁰

Viscositeit	Trechtertijd			
hoog	15 sec			
laag	5 sec			
Vloeimaat		500 mm	650 mm	800 mm
Consistentieklasse		F6		F7

Figuur 21: Schema waarin de vloeimaat wordt uitgezet tegenover de trechtertijd.

Stabiliteit

Onder stabiliteit van een betonspecie wordt de weerstand tegen ontmenging verstaan. De stabiliteit van een betonspecie is van groot belang voor de homogeniteit en daarmee kwaliteit van het betonmengsel. Een betontechnoloog kan met de juiste keuze van grondstoffen een zelfverdichtend betonsamenstelling ontwerpen welke leidt tot een stabiel mengsel. Een belangrijke eigenschap van zelfverdichtend beton is naast de vloeimaat van de specie ook de mate waarin de specie rondom obstakels als wapening blijft vloeien zonder dat er ontmenging of blokkeringen door bijvoorbeeld grindnesten optreedt.⁵¹

Zelfverdichtend beton in architectonische toepassingen

Besluit om gebruik te maken van zelfverdichtend beton in architectuur kan voortkomen uit eisen vanuit het architectonisch ontwerp en de onlosmakelijk verbonden wensen vanuit bouwtechnisch standpunt. Onder architectonische eisen worden vooral de esthetische beleving en wensen bedoeld. Deze esthetische wensen zullen meer en meer een gevolg zijn van een gekozen bouwtechnische uitvoering. Onder bouwtechnische eisen, welke een correcte bouwtechnische uitvoering moeten waarborgen, worden verwerkingseigenschappen en kwaliteitgarantie verstaan.

Onderstaand worden zaken genoemd welke pleiten voor gebruik van zelfverdichtend beton in architectonische toepassingen. Allereerst worden zaken vanuit bouwtechnische wensen bekeken en zal er in worden gegaan op verwerking en kwaliteitseigenschappen. Vervolgens worden zaken benoemd welke voortkomen uit correcte bouwtechnische uitvoering, die tevens de esthetische wensen tegemoet zullen komen. Na het behandelen van een eigenschap van een zelfverdichtend betonmengsel zal er een vergelijking met eigenschappen van traditionele betonmengsels gemaakt worden.

Vanuit de verwerking gezien biedt zelfverdichtend beton allereerst de mogelijkheid om zonder het gebruik van verdichting apparatuur te storten bij hoge wapeningsdichtheid. Daarnaast is het mogelijk om wanden, sparingen en moeilijk bereikbare plaatsen zonder luchtinsluiting te storten. Doordat zelfverdichtend beton een hoge vloeimaat heeft en tevens een stabiel mengsel is, zal volledige verdichting rondom de wapening moeiteloos optreden. Vorming van grindnesten, luchtinsluitingen en eventuele ontmenging zullen bij het gebruik van een zelfverdichtend betonmengsel uitblijven. Het feit dat er voor verdichting van zelfverdichtend beton geen trilapparatuur nodig is zorgt ervoor dat het werken met zelfverdichtend beton minder arbeidsintensief is. Daarbij zullen de arbeiders geen geluidsoverlast en fysieke belasting ervaren. Bovendien zal slijtage aan bekisting minimaal zijn waardoor deze vaker gebruikt kan worden.⁵²

In tegenstelling tot zelfverdichtend beton heeft een traditioneel betonmengsel een lagere vloeimaat en zal tevens minder stabiel zijn. Dit is in principe geen probleem, echter moet er bij de stort wel gebruik gemaakt worden van verdichting apparatuur. Bij deze materiaalkeuze is bijvoorbeeld een trilnaald een onmisbaar hulpmiddel. Het verwerkingsproces is erg arbeidsintensief, brengt geluidsoverlast met zich mee, geeft fysieke belasting bij werknemers en veroorzaakt beschadiging van bekisting. Daarnaast kan in het proces verplaatsing van wapening optreden. Wanneer er geen gebruik gemaakt zal worden van dergelijke verdichting apparatuur zullen er grindnesten, luchtinsluitingen en ontmengingen optreden. Dit heeft nadelige consequenties voor de sterkte van de betonconstructie.⁵³

Vanuit kwaliteit oogpunt levert zelfverdichtend beton duurzame betonconstructies door de hoogwaardige kwaliteit van het mengsel. Noodzakelijke reparatiekosten zullen hierdoor worden beperkt. Een hoge dichtheid van een in het zicht gestort oppervlak kan worden verkregen doordat er in zelfverdichtend beton geen grindnesten of zandlopers voorkomen.⁵⁴

Traditioneel beton kan minder duurzame betonconstructies realiseren door een minder hoogwaardige kwaliteit van het mengsel. Hoogwaardige oppervlakten zijn lastiger te verkrijgen door het sneller optreden van grindnesten en zandlopers, dit wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld onvolledige verdichting of ontmenging van het mengsel.

Een indirect gevolg van de verwerking-, en kwaliteit eigenschappen zijn de esthetische resultaten. Esthetische wensen worden veelal gewaarborgd door correcte bouwtechnische uitvoering. In tegenstelling tot een traditioneel betonmengsel zijn er met behulp van zelfverdichtend beton relatief gemakkelijk complexe en scherpe betonvormen te realiseren. Hierbij wordt geen hinder ondervonden van een hoge wapeningsdichtheid en hoeft er geen gebruik gemaakt te worden van mechanische verdichting apparatuur. Daarnaast is er in tegenstelling tot traditioneel het betonmengsel met de hoge dichtheid van het zelfverdichtend betonmengsel een mooie gladde afwerking te realiseren. Dit is uitermate geschikt voor in het zichtliggend beton.⁵⁵

In de keuze van een architect om eventueel zelfverdichtend beton te gebruiken moet ernstig rekening gehouden worden met het feit dat de specie van zelfverdichtend beton een relatief hoge kostprijs heeft in vergelijking tot traditioneel beton.⁵⁶

Aandachtspunten bij verwerking

Bij het toepassen van zelfverdichtend beton is, net als bij gebruik van andere materialen, specialistische kennis nodig. Om een optimaal resultaat te behalen bij het toepassen van zelfverdichtend beton, moet er direct een kritische houding worden aangenomen bij de basis van de uitvoering, namelijk bij de vervaardigen van de bekisting. Alleen door een kritische houding gedurende het hele uitvoeringsproces te behouden, zal

er een optimale bouwtechnische uitvoering alsmede de daaruit volgende architectonische wensen behaald worden.

De aandacht die aan de voorbereiding van de bekisting van zelfverdichtend beton gevraagd wordt is groter dan bij een traditioneel betonmengsel. Dat heeft direct te maken met het feit dat de oppervlakte van het beton bij toepassing van zelfverdichtend beton een kwalitatief hoogwaardige afdruk geeft van de bekisting. Structuur van bekistingsmateriaal moet derhalve zorgvuldig gekozen worden. Afdrukken kunnen worden gebruikt als een architectonische wenselijke element, echter het kan ook juist een afbreuk doen aan het geheel indien dit niet is meegenomen in de keuze overweging. Daarnaast is extra aandacht voor naden in een bekisting belangrijk. Lekkage van specie kan ter plaatse van naden in de bekisting ernstig de oppervlakte kwaliteit beïnvloeden.⁵⁷

Niet alleen moet er bij bekisting rekening gehouden worden met de structuur van het bekistingsmateriaal en naden, maar ook zal er extra aandacht gegeven moeten worden aan de keuze van het ontkistingsmiddel. Met name bij weinig absorberende bekistingsoppervlakken kan een overmaat aan bekistingsolie resulteren in vlekken, kleven van luchtbellen en andere onvolkomenheden. Goede afstemming tussen bekisting en ontkistingsmiddel is noodzakelijk om een goed resultaat te behalen. Vaak is opzetten van een proef bij gebruik van zelfverdichtend beton gewenst.⁵⁸

Behalve extra aandacht voor de bekisting is er extra aandacht nodig voor het verdichtings- en verhardingsproces van zelfverdichtend beton als materiaal. Belangrijk is bijvoorbeeld dat bij het storten de toevoerafstand of valhoogte van de specie zoveel mogelijk moet worden beperkt. Dit omdat door deze afstand te minimaliseren er zo min mogelijk lucht wordt ingebracht. Lucht zal het verdichtingsproces kunnen bemoeilijken en een eventueel verhardingsproces activeren. Gedurende het verhardingsproces moet er grote zorg gedragen worden voor de constructie. Dit is noodzakelijk met het oog op risico voor chemische-, plastische- en uitdrogingskrimp.⁵⁹

Zelfverdichtend beton gedraagt zich niet als water maar als een stroperige specie, die afhankelijk van de viscositeit langzamer of sneller door de bekisting vloeit. Ter voorkoming van ontmenging moet men een verdeling van de stortpunten kiezen die afhankelijk van het vloeigedrag niet verder dan 10 meter uit elkaar liggen.⁶⁰

Tot slot is het belangrijk om bij toepassing van zelfverdichtend beton het gebruik van trilapparatuur te vermijden om uitzakken van de grove toeslagmateriaal te voorkomen. Daarnaast is zelfverdichtend beton gevoelig voor uitdroging aan het stortoppervlak en om dit te voorkomen dient nabehandeling direct na het storten plaats te vinden.⁶¹

10. Kegels van zelfverdichtend beton

Bij de realisatie van de kegels als constructief element is gekozen om gebruik te maken van het innovatieve materiaal zelfverdichtend beton. De keuze voor dit materiaal is gemaakt vanwege esthetische eigenschappen. De doelstelling was om met de specifieke eigenschappen van zelfverdichtend beton een bepaald gewenst beeld te verkrijgen zoals gesteld door de architect en constructie ingenieur. In het geval van de constructieve kegels zullen de specifieke eigenschappen tegemoet komen aan de verwerkingseisen en misschien nog belangrijker de esthetische wensen.

Verwerkingseisen

De kegelvormige poten, welke het Phaeno Science Center dragen, bestaan allemaal uit een verschillende, onregelmatige vorm. Dit met het gevolg dat voor de realisatie per kegel een individuele handgetimmerde bekistingsmal gefabriceerd moet worden. Door de complexe handgetimmerde bekisting te combineren met een enorme hoeveelheden stalen wapening in de 300 millimeter dunne muur van de kegels, zal het storten en verdichten van beton op traditionele wijze enorme problemen met zich meebrengen.⁶² Voor de geconstrueerde wapening zijn 1.400 meestal individuele schakelelementen gebruikt.⁶³ Om er een hoeveelheidsbeeld bij te vormen, kan gesteld worden dat dit genoeg materiaal is om 9 voetbalvelden te overkappen. Binnen de betontoepassingen zal dit

genoeg wapening zijn om een beton kubus van 30m^3 te vullen. De ijzeren wapening is zo zwaar als 5000 kevers uit de Volkswagenfabriek (Figuur 22).⁶⁴ Bij toepassen van een traditioneel betonmengsel zal er bij zo een hoge wapeningsdichtheid gebruik van mechanische verdichtingsapparatuur zoals een trilnaald een noodzaak zijn. Door het gebruik van de trilnaald zouden de handgetimmerde bekistingen beschadigd kunnen raken en de daarin bevindende wapening zou kunnen verschuiven. Dit kan enorme gevolgen hebben voor de stabiliteit en sterkte van een individuele kegel. Onlosmakelijk verbonden met de stabiliteit en sterkte van een individuele kegel staat de stabiliteit en sterkte van de constructie van het gehele gebouw. Het voorkomen van het gebruik van mechanische verdichtingsapparatuur is in dit geval een belangrijke verwerkingseis. Zelfverdichtend beton, is in tegenstelling tot een traditioneel betonmengsel, het aangewezen materiaal hetgeen zonder mechanische verdichtingsapparatuur kan worden gebruikt en niet ten koste gaat van de kwaliteit door het optreden van grintkogels of luchtinstortingen.⁶⁵

Figuur 22: Eerste volkswagen kever uit 1938.



Esthetische eisen

Een belangrijke eis vanuit esthetisch oogpunt, is het voorschrijven dat er in de 300 millimeter dikke muren van de kegels geen stornaden te zien mochten zijn. Een enorme uitdaging als je bedenkt dat er uit de muren sculpturaal gevormde klonten beton worden weggesneden om openingen te creëren voor deuren en ramen. Als gevolg hiervan zit de rest van de muur afgeladen vol met stalen wapening.⁶⁶

Stornaden ontstaan door een (tijdelijke) onderbreking van een betonstort (Figuur 23). Om stornaden te voorkomen zal het betreffende oppervlak in één stort gestort moeten worden zonder enige vorm van onderbrekingen. In het geval van het Phaeno Science Center kan dus gesteld worden dat de muur van een kegel, welke tussen het plein en de eerste verdiepingvloer zeven meter hoogte zal bereiken, in één keer gestort moet worden om geen stornaad in het zicht te krijgen. De grote valhoogte in combinatie met de hoge wapeningsdichtheid zal problemen veroorzaken wanneer er gebruik gemaakt wordt van een traditioneel betonmengsel. Er ontstaat kans op ontmenging, ontstaan van grindhopen en luchtinsluiting. Dit zou allemaal veroorzaakt worden door het vroegtijdige activeren van het verhardingsproces vanwege de aanraking met lucht. Zelfverdichtend beton daarentegen is door zijn specifieke eigenschappen uitermate geschikt voor het storten van hoge slanken muren met een hoge wapeningsdichtheid.⁶⁷

Naast de wens dat er geen stornaden te zien mochten zijn, werden scherpe hoeken en een egaal oppervlak van het beton gewenst. Ook dit is een wens welke enkel door gebruik van Zelfverdichtend beton gerealiseerd kan worden.⁶⁸



Figuur 23: Stornaden in het geveloppervlak van de Zollverein school of management and design door SANAA.

Aandachtspunten bij verwerking

Ondanks de kennis aangaande de eigenschappen en het werken met zelfverdichtend beton was het toch een grote uitdaging. Het materiaal was naar hun weten nog nooit eerder op deze schaal in de architectuur toegepast.

Doordat bij gebruik van zelfverdichtend beton een kwalitatief hoogwaardige afspiegeling van de bekisting achtergelaten wordt, was het belangrijk dat de bekisting zo werd vervaardigd dat het beeld kon worden verkregen welke Zaha Hadid het team min of meer had opgelegd. In Groot Brittannië, waar het architectenbureau gevestigd is, zal de bekisting hoogstwaarschijnlijk geconstrueerd worden met eigen gemaakte polystyrene mallen. Deze techniek was echter op dat moment in Duitsland nog geen goedgekeurde constructietechniek. Dit is ook gelijk de reden waarom de bekisting voor de kegels van het Phaeno Science Center met de hand zijn getimmerd. De technologie van de houten bekisting voor de kegelvormige poten van het gebouw is afgeleid van de technologie die bij de bouw van boten gebruikt wordt. De bekisting werd zo netjes vervaardigd dat de oppervlakte van de kegels volledig vlak en gelijkmatig uitgevoerd konden worden. Te zien in het betonnen oppervlak zijn de perfect gedetailleerde afdrukken van nerven en knoesten, typerend voor de houtstructuur waarmee de handgetimmerde bekisting zijn geconstrueerd.⁶⁹

Het feit dat alle kegels in sommige gevallen hoeken van meer dan 45 graden ten opzichte van de verticalen maken was een volgende uitdaging in relatie tot het gebruik van zelfverdichtend beton als materiaal. De stort zal hierdoor in sommige gevallen onder een flinke helling uitgevoerd moeten worden, waar proefstorten voor nodig zullen zijn.⁷⁰

Uitvoering

Alle tien de betonnen kegels rusten op een vlotfundering welke de vloer vormt van de ondergrondse parkeergarage. Door de onbekendheid over het werken met zelfverdichtend beton in architectuur had de aannemer besloten om met de wanden van de kegelvormige poten in de kelder te experimenteren. Er is hierbij gekozen om de zichtbare schaderisico's zo nodig voor het oog van publiek te kunnen verbergen. De muren van deze kegels, tussen de vlotfundering en het plein oppervalk, welke een hoogte zullen bereiken van drie meter worden in één stort gerealiseerd. Het resultaat was tot ieders opluchting boven verwachting. Met succes worden ook de kegels vanaf de begane grond tot de onderzijde van de eerste vloer, een hoogte van zeven meter, in een keer gestort. Als laatste worden er op vijf van de tien kegels nog verdiepingshoge muren gestort opdat betreffende kegels het dak constructief kunnen ondersteunen.⁷¹

11. Vloerplaten van zelfverdichtend beton

Bij de realisatie van de vloerplaten als constructieve elementen is gekozen om gebruik te maken van het innovatieve materiaal zelfverdichtend beton. De keuze voor dit materiaal is gemaakt omdat deze door zijn specifieke eigenschappen de capaciteit heeft om een gewenst beeld te kunnen verkrijgen, gesteld door de architect en constructie ingenieur. In het geval van de vloerplaten zullen deze specifieke eigenschappen voornamelijk tegemoet komen aan de constructieve eisen welke moeten worden behaald, terwijl men tegelijkertijd ook aan een bepaald esthetisch gewenst beeld zal moeten voldoen.

Constructieve eisen in samenwerking met esthetische gewenst beeld.

Beide vloerplaten beslaan een enorm oppervlak welke beiden volledig worden gebruikt om een golvend landschap te creëren. Enorme afstanden tussen de dragende betonnen kegels moeten worden overspannen door zowel de begane grond vloerplaat als de eerste verdieping vloerplaat. Door de wens van een vrije plattegrond is het gebruik van een aanvullende ondersteunende kolommenstructuur niet gewenst. De wens dat de vloer enorme overspanningen zal moeten maken had in principe met traditioneel beton geconstrueerd kunnen worden.

De vloer moet echter niet alleen de capaciteit hebben om de gigantische overspanning te maken maar moet tevens ook nog voldoen aan een gewenst visueel plaatje. De esthetische eisen die door de architect aan de verschillende vloerplaten gesteld worden,

maakt dat men gebruik zal moeten maken van zelfverdichtend beton.⁷²

Opvallend is dat de vloerplaten in het ontwerp een duidelijk onderzijde en bovenzijde bezitten, beiden met verschillende esthetische eisen. De onder en bovenzijde van de begane grond vloerplaat, maar ook de bovenzijde van de eerste verdieping vloerplaat hebben de eis om zo te worden uitgevoerd dat men het ervaart als een golvend glad uniform landschap. De oppervlaktedichtheid van het beton welke hiervoor gebruikt zal moeten worden, zal hoog moeten zijn om de optimale kwaliteit alsmede ook een optimale esthetische gewenste beleving te bereiken. Zelfverdichtende betonmengsels hebben een hoge dichtheid en zijn zeer geschikt voor het realiseren van esthetisch hoogwaardige in het zicht liggende oppervlakken.⁷³

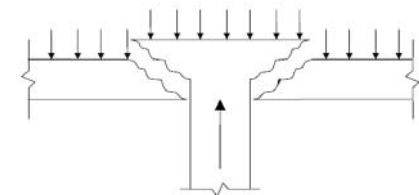
De onderzijde van de eerste verdieping vloer, te beleven wanneer men op het plein staat, zal moeten worden beleefd als een massieve stoere betonnen plaat met hier en daar enkele trapeziumvormige inkepingen. Dit alles moet passend zijn bij de gebruikte vormtaal van het geheel.⁷⁴ De wens om gebruik te maken van een in het zicht liggend betonnen oppervlak waarin scherpe inkepingen zijn geïntegreerd, zodanig dat men het beleefd als één geheel, maakt dat men gekozen heeft voor zelfverdichtend beton. Zelfverdichtend beton is in tegenstelling tot traditionele betonmengsels uitermate geschikt voor realisatie van hoogwaardige in het zicht liggend betonnen oppervlakken en scherpe vormen.⁷⁵

Bijkomend voordeel is dat er ook bij het storten van deze vloeren door gebruik van zelfverdichtend beton geen gebruik gemaakt hoeft te worden van mechanische verdichtingsapparatuur zoals een trilnaald. Van groot belang is dat de vloeren in goede positie worden gestort om de individueel instabiele kegels correct te fixeren. Trillingen zouden in dit geval het risico met zich meebrengen dat er zich kleine verplaatsingen in de vloerplaten of kegels voordoen met als resultaat negatieve gevolgen voor de stabiliteit van het gebouw.

Een tweede punt waarbij niet alleen constructieve eisen worden gesteld, maar ook tegemoet gekomen moet worden aan door de architect gestelde esthetische wensen, treft de overgang van kegels naar de eerste verdieping vloer. Deze overgang is door de bezoeker te ervaren vanaf het plein. Hierbij is de wens dat deze overgang zo harmonieus en gelijkmatig wordt uitgevoerd dat men de kegels en vloerplaten ervaart als een samenhangend geheel.⁷⁶

Door de enorme overspanningen en de gewaagde dimensies welke de eerste verdieping vloer ondergaat is er een hoge kans aanwezig op ponsschaden in en rond de plaats waar de kegels de vloerplaat ontmoeten. Onder ponsschade worden scheuren of zelfs bezwijken verstaan van een gewapende betonnen constructie op plaatsen waar krachten betreffende ondersteuning te hoog oplopen (Figuur 24 en 25). Bij constructieve vloeren welke worden ondersteund door kolommen, in dit geval kegels, zal ponsschade optreden op de punten waar vloer en kolom samen komen alsmede

de punten waar deze kolommen ondersteuning bieden. Om ponsschade te voorkomen, of de kans erop te minimaliseren, is de keus voor een juist betonmengsel in combinatie met voldoende wapening om de optredende krachten op die plek te kunnen incasseren. In combinatie met de esthetische wens is er in het ontwerp van het Phaeno Science Center voor gekozen om de naadloze overgang tussen constructieve kegel naar de constructieve verdiepingvloer uit te voeren in zelfverdichtend beton en wordt er gebruik gemaakt van een verdikking in dit ponsgevoelige gebied. Zelfverdichtend beton vloeit goed tussen de hoge wapening in deze gebieden en bij de verdikking verzorgt deze een vlak glad oppervlak met een hoge dichtheid, ideaal voor zichtbeton.⁷⁷



Figuur 24: Schema van ponsschade.



Figuur 25: Ponsschaden in praktijk.

Aandachtspunten bij verwerking

Net als de grote aandacht voor vervaardiging van de bekisting voor de kegels is grote aandacht voor bekisting van de vloerplaten noodzakelijk. Dit door de eigenschappen dat bij gebruik van zelfverdichtend beton een gedetailleerde afspiegeling van de bekisting op het betonnen oppervlak achtergelaten wordt. Door de eis dat de overgang van de kegels naar de vloer als een geheel ervaren moet worden, is het van belang dat er gebruik gemaakt wordt van een bekisting welke een zelfde bekisting structuur in het betonnen oppervlak zal afspiegelen. Aan het resultaat is te zien dat dit niet het geval is geweest. Er is een onsubtiele overgang waar te nemen van de betonnen kegels, waar het nadenpatroon van houten bekisting haarfijn op afgespiegeld staat, naar een totaal gladde uniform uitgevoerde eerste verdieping vloer (Figuur 26).⁷⁸

Uitvoering

De reden waarom in de eerste verdieping vloer het betonoppervlak zonder structuur is afgedrukt is simpelweg te verklaren doordat er geen gebruik is gemaakt van een handgetimmerde bekisting. De complexe esthetische wensen aan de onderkant van de eerste verdieping vloer, bestaande uit trapeziumvormige inkepingen, vroeg om een andere manier van vervaardiging dan doormiddel van een handgetimmerde bekisting. De trapeziumvormige

inkepingen wordt mogelijk gemaakt doordat er gebruik is gemaakt van techniek welke normaliter wordt gebruikt bij het realiseren van een cassettevloer. Een standaard cassettevloer bestaat uit een betonnen vloer welke aan de onderzijde van de plaat uitsparingen bezit. Deze uitsparingen worden gerealiseerd door het gebruik van bijzondere bekistingselementen aan de onderzijde van de plaat. Dit heeft als gevolg dat de ribben meestal in twee richtingen lopen volgens een orthogonaal rasterpatroon met bijbehorende vierkanten cassetten. Rondom steunpunten welke de vloer dragen dienen een aantal cassettes te vervallen in verband met het opnemen van negatieve buigende momenten en dwarskrachten. Overspanningen tot ruim tien meter zijn mogelijk (Figuur 27).⁷⁹

In de eerste verdiepingvloer van het Phaeno Science Center wordt geen gebruik gemaakt van de standaard vierkanten cassettes, maar van trapeziumvormige cassettes, met als gevolg een trapeziumvormig rasterpatroon (Figuur 28). De lange zijden van de cassettes zijn zo georiënteerd ten opzichte van het gebouw dat deze parallel liggen aan de lange zijde van het Phaeno Science Center (Figuur 29).⁸⁰



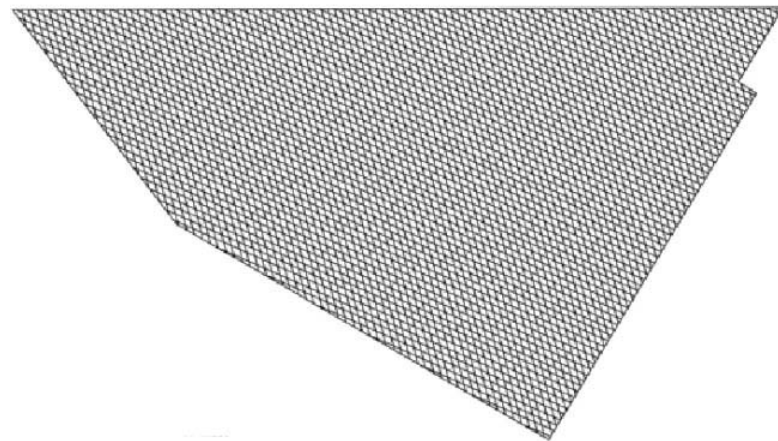
Figuur 26: Onsubtiële overgang van kegel in verdieping vloer.



Figuur 27: Standaard geprefabriceerde cassettes.



Figuur 28: Trapeziumvormige cassettes.



Figuur 29: Oriëntatie trapeziumvormig rasterpatroon ten opzichte van het gebouw.

12. Façaden van traditioneel beton

Bij de realisatie van façaden als constructieve elementen is gekozen om gebruik te maken van twee verschillende gevelsystemen. Hierbij is niet alleen spraken van een ander krachtenverloop, te vinden in deel twee, maar elk gevelsysteem heeft tevens te maken met een andere materialisatie. Het eerste gevelsysteem, waarmee in het Phaeno Science Center wordt gewerkt, bevindt zich op de zuid façaden en wordt gematerialiseerd doormiddel van betonnen geprefabriceerde trapeziumvormige raamelementen. In het tweede gevelsysteem, te vinden in de overige delen van het gebouw, is gekozen om gebruik te maken van in het werk gestort beton met een traditioneel betonmengsel.⁸¹ In beide systemen is ervoor gekozen geen gebruik te maken van zelfverdichtend beton. Keuze voor de verschillende materialisering komt voort uit het esthetisch gewenst beeld welke op verschillende plaatsen in de gevel anders dient te zijn. In dit hoofdstuk zal besproken worden waarom er gebruik gemaakt is van andere materialisering dan zelfverdichtend beton.

Esthetische eisen

De trapezium vormen een voortdurend terugkerend thema in het ontwerp, is net als in de plattegrond van de expositieruimten, alsmede in de plattegronden van de kegels, alsmede aan de onderzijde van de eerste verdieping vloerplaat, ook terug te vinden in de vormtaal van de gevel van de op de eerste verdieping

gelegen expositieruimten. Deze gevel welke de zuid façade beslaat is ontworpen met het idee dat deze een gezicht naar de stad vormt, een beëindiging van een culturele gebouwen promenade die te beschouwen is als de representatieve façade. Zorgvuldige materialisering van de in het zicht gelegen betonnen geveloppervlak is een vereisten.⁸²

De gewenste doorgetrokken vormtaal zorgt voor een complex gevelontwerp bestaande uit een in een geroteerde richting liggend geveloppervlak waarin trapeziumvormige bedrukkingen en ramen te vinden zijn. De eis voor een hoge oppervlakte kwaliteit, om aan de esthetische wensen tegemoet te komen in combinatie met de complexiteit van de te vervaardigen gevel, zorgt ervoor dat er gebruik gemaakt wordt van geprefabriceerde betonnen (gevel)panelen. Dit houdt in dat de gebruikte gevelpanelen in de fabriek vervaardigd worden. Vervolgens worden deze naar de bouwplaats getransporteerd om in het gebouw te worden verwerkt. In de fabriek kan met een traditioneel betonmengsel gewerkt worden doordat daar met het gebruik van een trilnaald een hoge betonkwaliteit vervaardigd kan worden. Dit maakt dat gebruik van het kostbare zelfverdichtend beton in dit geval niet de voorkeur heeft. Naast het feit dat geprefabriceerde elementen met grote zorgvuldigheid tot een hoge kwaliteitsniveau geproduceerd kunnen worden, hebben de elementen het bijkomende voordeel dat deze gemakkelijk te monteren en dus ook te vervangen zijn. Ze zijn hierdoor goed te combineren met het achterliggende stalen constructieve skelet, welke in deel twee besproken is.⁸³

De overige façaden zijn gerealiseerd door het ter plaatse in het werk gestort beton met een traditioneel betonmengsel. Deze delen van de façaden waren gemakkelijk te storten doordat er alleen rechte muren met af en toe een uitsparing gerealiseerd moest worden.⁸⁴ Een hoge betonkwaliteit kan worden behaald doordat de wapening in deze muren slechts beperkt is en er tevens gebruik gemaakt kan worden van een trilnaald. Op plaatsen waar extra stijfheid of stabiliteit gewenst is, is een hogere wapendichtheid te vinden waarbij in dit geval gebruik gemaakt kon worden van een trilnaald. Hierdoor is met een traditioneel betonmengsel alsnog een erg hoge betonkwaliteit behaald. Daar zelfverdichtend beton kostbaarder is dan traditioneel beton en in dit geval geen toegevoegde waarde levert, heeft zelfverdichtend beton in dit geval niet de voorkeur gekregen.⁸⁵

Aandachtspunten bij verwerking

Door het complexe ontwerp van het Phaeno Science Center met de minstens net zo complexe realisatie was het lastig om mallen voor de trapeziumvormige beton elementen van de zuid façaden vooraf te vervaardigen. Na het realiseren van de betonnen kegels, vloerplaten, de in het werkgestorte geveldelen en het opzetten van het stalen constructieve skelet van de zuid façade, is het team de precieze afmetingen van het gerealiseerde geheel tot zo ver in het werk gaan opmeten. Al snel bleek dat er sprake was van grote maatafwijkingen, veroorzaakt door onnauwkeurige uitvoering en

krimp, wat betekende dat de trapeziumvormige elementen ook andere afmetingen zouden hebben dan vooraf gecalculeerd. Om op de maatafwijkingen in te spelen is elk trapeziumvormig element ter plaatsen in het werk opgemeten waarna er vervolgens pas per trapeziumvormig element een unieke mal kon worden vervaardigd. Deze manier van trapeziumvormige gevelelementen produceren heeft meer tijd gekost dan van te voren was ingecalculeerd. Wel heeft deze manier als voordeel dat de (te) grote maatafwijkingen op deze manier zijn verholpen.⁸⁶

De esthetische wens om de façade als een geheel te ervaren heeft ervoor gezorgd dat er extra aandacht nodig was om de twee verschillende façade systemen met elk een eigen vervaardigingstechniek te realiseren. Ondanks de twee verschillende vervaardigingstechnieken moest eenzelfde betonoppervlak verkregen worden om het te kunnen beleven als een geheel. Het voordeel in dit geval is dat er gebruik gemaakt is van een traditioneel betonmengsel in plaats van zelfverdichtend beton. Een betonoppervlak verkregen doormiddel van een traditioneel betonmengsel zal in significant mindere maten een gedetailleerde afspiegeling van de bekisting laten zien dan wanneer er gebruik gemaakt zal worden van zelfverdichtend beton. Dit maakt dat er substantieel minder aandacht nodig is voor de vervaardiging van de bekisting om toch een zelfde betonoppervlak te verkrijgen. Dit is te zien aan het resultaat van de gerealiseerde façaden. Wanneer er enkel naar het betonoppervlak van de

verschillende systemen gekeken wordt zijn ze te ervaren als een geheel. Gevolgen van de verschillende vervaardigingstechnieken, zoals het ontstaan van stortnaden bij in het werk gestort beton, zorgen echter voor opvallende verschillen tussen de verschillende façaden systemen. Deze gevolgen doen afbreuk aan het geheel (Figuur 30). Het ontstaan van de stortnaden was van te voren al bedacht, maar was volgens de architect in dit geval niet bezwaarlijk.⁸⁷



Figuur 30: Stortnaden doen afbreuk aan de façade als geheel.

13. Dak van staal

Bij de realisatie van het dak als constructief element is gekozen om gebruik te maken van het materiaal staal. De keus om gebruik te maken van een stalen dak in plaats van een betonnen dak, is geboren uit de beperkingen welke het materiaal beton in dit geval met zich mee zoual brengen. Hierbij zijn de beperkingen terug te voeren naar de Dit vooral met de nadruk op constructieve eisen welke behaald zouden moeten worden.

Constructieve eisen

Het dak wordt zoals te lezen is in deel twee ondersteund door de vijf betonnen kegels aangevuld met de randondersteuning, verzorgt geleverd door de verschillende gevelsystemen. Om een vrije plattegrond te kunnen waarborgen, moet het dak extreem grote afstanden overbruggen wil deze geen gebruik hoeven te maken van een interne kolommenstructuur. Wanneer deze overspanning in beton gerealiseerd zoual worden, zal deze constructie extreem zwaar gedimensioneerd moeten worden zijn om de juiste sterkte te halen. Het betonnen constructieve dak zoual door de grotezware dimensies met bijbehorend enorme eigen gewicht als gevolg hebben dat de constructieve betonnen kegels, welke het dak zullen moeten dragen, op zijn hun beurt ook flink groter gedimensioneerd uitgevoerd zullen zouden moeten worden. Dit is noodzakelijk omdat er anders kans op bezwijken zal ontstaatn.⁸⁸

Door gebruik te maken van een stalen dak constructie in plaats van een betonnen dak constructie doormiddel van zowel traditionele betonmengsel of ZVB, ontstaat er een dak met beperkte dimensies en het hierbij horende relatief lichte gewicht. De betonnen dragende kegels , maaralsmede ook façaden zullen minimaal gedimensioneerd kunnen blijven. De stalen constructie is zo dermate sterk, dat het naast de enorme overspanning niet alleen enorme afstand kan overspannen, maar daarnaast ook het gewicht van op te hangen expositiestukken, zoals bijvoorbeeld vliegtuigen,, kan dragen.⁸⁹

Aandachtpunten bij verwerking

De golvende vorm van de stalen constructie is een spiegelling van de eerste verdieping vloer. DeHet stalen dak constructie, bestaat uit een in twee richtingen afdragend vakwerk. Dit vakwerk bestaat grotendeels uit vierkante vormen. Door de vreemde vorm van het gebouw veranderen deze vierkante vormen geleidelijk over de lengterichting, in trapeziumvormen (Figuur 18.) Deze trapeziumvorm is te vergelijken met de trapeziumvormige cassettesn, maar dan bestaande uit een vele male complexere geometrie. Om de golvende vorm van de onderliggende verdieping vloer te spiegelen, zal niet alleen de vakwerkvorm veranderen., ook zal er door verlengen van vakwerkarmen, veranderingen in de hoogte optreden. Op sommige plaatsen kan het vakwerk onder een hoek van 45 graden, bijna twee meter naar benden komen zetten. Op de plaatsen waar vakwerken worden vastgemaakt gemonteerd

aan de dragende betonnen kegels, lijkt het doormiddel van een slimme bevestiging alsof het stalen vakwerk zweeft (Figuur 31). Het vakwerk steunt enkel met de bovenste vakwerkarm op de rand van de constructieve betonnen kegel. De onderste vakwerkarm komt door het gedeeltelijk afsnijden van het element los te staan van de betonnen kegel. Door de complexe geometrie van het vakwerk heen lopen de installaties welke het gehele gebouw voorzien van nutstoepassingen.⁹⁰

Uitvoering

Doordat alle constructieve elementen in dit vakwerk samenwerken, betekent ook voor dit deel, dat de ingenieur de constructie zal kunnen verfijnen tot minimale dimensies. Net als in de betonnen constructie, welke als een geheel behandeld is, wordt er voor elk afzonderlijk element een individueel krachtenverloop met bijbehorende spanningen verkregen door het gebruik van verschillende elkaar aanvullende computer programma's. Wanneer alles juist is gedimensioneerd en meerdere malen is gecontroleerd wordt er een werkplaats gebouwd op een plaats naast de locatie waar het Phaeno Science Center wordt gerealiseerd. In deze werkplaats, welke uit niet meer dan een gespannen zeil bestaat, worden de stalen elementen voor gemonteerd in grotere eenheden. Vervolgens zijn de voorgemonteerde stalen eenheden in de juiste positie gebracht door deze op te tillen en te laten rusten op een constructie van steigerwerk welke opgebouwd zijn op de plek waar

het dak geplaatst zal moeten worden (Figuur 32). Wanneer alle stalen eenheden in de juiste positie staan, wordt het voor de laatste maal gecontroleerd en tot slot als een geheel aan elkaar bevestigd. Het dak kan vanaf dit moment constructief samen gaan werken en het steigerwerk kan worden verwijderd.⁹¹



Figuur 31: Zwevend Vakwerk van de stalen dakconstructie.



Figuur 32: Het in positie brengen van het voorgemonteerde stalen dak.

Samenvatting en conclusie

Deze scriptie heeft een onderzoek verhaald over verschillende interessante feiten betreffende het Phaeno Science Center. Ik heb geprobeerd doormiddel van het onderzoeken aangaande dit bijzondere gebouw te bepalen of het Phaeno Science Center zodanig geschiedenis schrijft of innovatief is, waarmee dit gebouw een plaats in de architectuurgeschiedenis zal verwerven.

In de geschiedenis van de stad, maar ook in de stedenbouwkundige context, neemt het Phaeno Science Center een belangrijke plaats binnen Wolfsburg in. Het Phaeno Science Center functioneert als beëindiging van een keten indrukwekkende culturele gebouwen welke zijn voortgekomen uit de gedachten dat een stad meer zal moeten zijn dan alleen commerciële bouw of 'Lebensbouw'. Daarnaast dient dit gebouw als connectie tussen het culturele zuiden en het industriële noorden welke voorheen als overheersend was door de dominante aanwezigheid van de Volkswagenfabriek.

De verschijningsvorm van het Phaeno Science Center komt voort uit een reactie op de Moderne beweging. Het gebouw kan worden opgevat als door Zaha Hadid geleverde kritiek op de Moderne beweging. Ze levert kritiek op grootheden uit de architectuurgeschiedenis als Le Corbusier, door te stellen dat de in de Unité d'habitation gecreëerde 'room for te city' niet werkt en als reactie daarop een 'wel werkende' room for te city te

ontwerpen met middelen welke volgens haar nodig zijn om dit te verkrijgen.

Daarnaast geeft ze kritiek op de uitspraak uit de Moderne beweging 'limitations of mass-production', dit door een extreem gebouw te ontwerpen welke niet gerealiseerd zou kunnen worden als er enkel gebruik gemaakt zou worden van massaproductie. Deze reactie heeft ze geleverd om duidelijk te maken dat volgens haar ontwerpen van openbare gebouwen voortvloeit uit uniekheid; ontstaan uit een eenmalige reactie op de locatie en situaties die van toepassing zijn. Wanneer men zich enkel zal beperken tot massaproductie zal dit ten koste gaan van de uniciteit en daarmee de kwaliteit.

Het Phaeno Science Center is in deze scriptie opgedeeld in vier verschillend constructief in elkaar stekende elementen, bestaande uit betonnen kegels, vloerplaten, façaden en een dakconstructie. Elk element heeft een eigen rol in het stabiliteit- en sterkte van het Phaeno Science Center. Door de constructief verschillend in elkaar stekende elementen optimaal te laten samenwerken en elkaar hierdoor te laten versterken wordt een constructief stabiel en sterk gebouw gewaarborgd met minimale constructieve dimensionering.

Hetgeen waarmee het Phaeno Science Center geschiedenis schrijft heeft betrekking op de recent ontwikkelde computer softwareprogramma's welke nodig zijn geweest om het gebouw als een constructief geheel te kunnen ontwerpen. Doormiddel van een

elementenontleding zijn de krachten en spanningen berekend op welke plaats in het constructieve geheel deze zullen optreden. Deze elementenontleding wordt uitgevoerd doormiddel van verschillende elkaar aanvullende computer softwareprogramma's. Door gebruik te maken van voordurend doorontwikkelde software welke nooit eerder voor handen was geweest kon er veel worden gesleuteld, gerekend en gedimensioneerd aan de verschillende constructieve elementen, welke in het grotere plaatje deel uitmaken van de totale constructieve stabiliteit en sterkte.

Daar waar de vier verschillende elementen een andere constructieve stabiliteit en sterkte bijdragen leveren wordt er in alle individuele elementen ook anders met de materialisering omgegaan. De keuze van materialisering zorgt ervoor dat het gebouw minimaal kon worden gedimensioneerd.

Het gebruik van zelfverdichtend beton bij de realisatie van de betonnen kegels en de vloerplaten is erg innovatief. Nog nooit eerder in de geschiedenis is er op deze schaal gebruik gemaakt van zelfverdichtend beton in de architectuur. De oorsprong van zelfverdichtend beton ligt in Japan, waar al sinds de jaren tachtig langere tijd actief onderzoek wordt verricht naar betere betonkwaliteiten. Het gebrek aan uniformiteit, gevolg van onvolledige verdichting, bleek de hoofdoorzaak te zijn van de zwakkere prestaties van betonnen structuren. Dit inzicht heeft ervoor gezorgd dat werd gezocht naar methoden om verdichten door middel van een trilnaald niet langer noodzakelijk te maken. Hieruit volgt de ontwikkeling van de eerste methoden voor het

samenstellen van een goed zelfverdichtend beton. Rond de jaren negentig krijgt men in Europa interesse voor dit nieuwe zelfdichtende beton. Zelfverdichtend beton lijkt in eerste instantie interessant voor civieltechnische toepassingen. Door jaren ervaring, onderzoek en groei van kennis over de samenstelling en werking van zelfverdichtend beton wordt het toepassingsgebied breder. Deze ontwikkeling zorgt ervoor dat het materiaal niet alleen voor civieltechnische toepassingen geschikt lijkt maar ook in architectonische toepassingen een dienst kan bewijzen. Het Phaeno Science Center is het eerste architectuur project waar op zulke grote schaal met zelfverdichtend beton wordt gewerkt. Ondanks dat er inmiddels veel bekendheid is over de eigenschappen van zelfverdichtend beton, en hiermee over de verwerkingseisen, kwaliteitseisen en esthetische eisen is er in het Phaeno Science Center te zien dat men, waarschijnlijk door onervarenheid, wat steken heeft laten vallen. Te zien is bijvoorbeeld dat bij de ontmoeting van de betonnen kegels met de onderkant van de eerste verdieping vloerplaat een onsubtiele overgang van verschillend structuren in het beton oppervlak is waar te nemen. De eis dat deze ontmoeting naadloos en onopvallend zal moeten zijn, zodat de bezoeker dit als een geheel zou ervaren, wordt hierdoor niet gerealiseerd. Ondanks dat er in zowel de realisatie van de betonnen kegels als bij de realisatie van de vloerplaten gebruik wordt gemaakt van zelfverdichtend beton heeft men door een andere vervaardigingstechniek het niet voor elkaar gekregen eenzelfde structuur in het betonoppervlak te verkrijgen. Doordat

zelfverdichtend beton de eigenschap heeft dat deze gedetailleerde afdruk van de bekisting op het betonnen oppervlak afgespiegeld wordt, zal hoge aandacht voor de structuur van de bekisting van de te realiseren elementen een vereisten zijn. Doordat er bij de realisatie van de betonnen kegels en de vloerplaten andere bekistingsmaterialen zijn gebruikt, met daarbij andere oppervlak structuren, heeft dit als gevolg gehad dat deze verschillende structuren in de verkregen beton oppervlakken worden afgespiegeld. Derhalve is er een onsubtiele overgang waar te nemen van de betonnen kegels met de eerste verdieping vloer.

Bij de realisatie van de façaden, welke bestaat uit twee gevelsystemen, wordt in beide systemen gebruik gemaakt van traditionele betonmengsels. De zuid façade wordt gematerialiseerd in geprefabriceerde betonnen trapeziumvormige raamelementen. De overige façaden worden in het werk gestort. Opvallend is dat er hier gebruik gemaakt wordt van twee verschillende vervaardigingstechnieken waar wel een overeenkomstige structuur van het beton oppervlak verkregen wordt. Deze winst kan gewaarborgd worden door meer bekendheid uit verwerkingservaring over de eigenschappen van traditioneel beton. Stortnaden, welke enkel te vinden zijn in de geveldelen welke in het werk gestort zijn, kunnen afbreuk doen aan de façade als geheel. Dit gevolg van verschillende vervaardigingstechnieken wordt in dit geval niet als nadelig beschouwd.

In het dak is in tegenstelling tot de rest van het gebouw gebruik gemaakt van het materiaal staal. De keus om gebruik te

maken van een stalen dak is voort gekomen uit de beperkingen welke het materiaal beton in dit geval met zich mee zou brengen. Wanneer het dak in beton gerealiseerd zou worden, zou deze constructie extreem zwaar gedimensioneerd moeten zijn, dit om de juiste sterkte te behalen. Het betonnen constructieve dak zal door de grote dimensies met bijbehorend enorme eigen gewicht als gevolg hebben dat de constructieve betonnen kegels, welke het dak zullen dragen, op zijn beurt ook flink groter gedimensioneerd moeten worden. Anders zou er kans op bezwijken ontstaan. Bijzonder zijn niet alleen de grote overspanningen die met het dak gehaald worden, maar ook de complexe geometrie waaruit de stalen dak constructie is opgebouwd.

Na uitgebreid onderzoek naar het tot stand komen van het Phaeno Science Center valt er te concluderen dat dit bijzondere gebouw wel degelijk een plaats zal verwerven in de architectuurgeschiedenis.

Allereerst heeft de komst van het Phaeno Science Center tot op de dag van vandaag een belangrijke rol gespeeld in de geschiedenis van de stad Wolfsburg.

Daarnaast plaatst Zaha Hadid het ontwerp in de geschiedenis door het Phaeno Science Center neer te zetten als kritiek op de Moderne beweging. Ze wil doormiddel van het ontwerpen van het Phaeno Science Center overbrengen wat naar haar inzicht nodig is om goede architectuur te verkrijgen. Dit enerzijds door het verbeteren van de 'room for the city' door Le

Corbusier, maar anderzijds door zich niet te laten beperken door de veel gebruikte massaproductie.

Het gebruik van up to date computer softwareprogramma's waarvan gedurende het hele ontwerpproces gebruik is gemaakt om de totale constructie zo minimaal mogelijk te dimensioneren is geschiedenis schrijvend. Er wordt verondersteld dat de stand van de technologie betreffende de computer softwareprogramma's van dat moment de beperkende factor is geweest in de ontwikkeling van de totale constructie. Een vergelijkbare constructie had door beperkt ontwikkelde computer software onmogelijk eerder in de geschiedenis geconstrueerd kunnen worden.

Een andere toepassing waarin het Phaeno Science Center het voortouw in de geschiedenis neemt is het gebruik van het innovatieve materiaal zelfverdichtend beton. Gebruik van dit materiaal in architectonische toepassingen was nog nooit op deze schaal gehanteerd. Het verschil in oppervlak structuur van het zelfverdichtend beton komt hoogstwaarschijnlijk door de onervarenheid met het materiaal binnen architectuurtoepassingen. Naar mijn mening moet echter niet worden vergeten dat wanneer de betonnen kegels bijvoorbeeld met een traditioneel betonmengsel uitgevoerd zouden worden, dit nog vele malen minder netjes gerealiseerd zal worden vanwege de technische beperkingen. De betonnen kegels zouden veel dikker gedimensioneerd moeten worden en zouden een minder vrije vorm kunnen aannemen. Eenheid tussen betonnen kegels en de eerste verdieping vloer zal op zijn beurt veel minder homogeen uitgevoerd kunnen worden. Daarnaast moet ik meegeven dat

tijdens mijn bezoek aan het Phaeno Science Center het gebouw heb ervaren als een indrukwekkend geheel. De oneffenheden waar ik tijdens mijn scriptie op heb ingezoomd zijn mij pas gaan opvallen naar aanleiding van mijn onderzoek naar het gebouw en bestudering van de bouwconstructieve innovatieve ontwikkelingen. Uit eigen ervaring kan ik zeggen dat een bezoeker het gebouw zal ervaren als een indrukwekkend en raadselachtig gebouw welke de nieuwsgierigheid en ontdekkingslust van de mens prikkelt. Het baanbrekende ontwerp van Zaha Hadid verwezenlijkt door een correcte uitvoering met de juiste materialisering hebben geleid tot een fantastisch gebouw.

Door de rol welke het gebouw speelt in de stad, de kritiek welke het levert op de Moderne beweging en het gebruik van vooruitstrevende computer programma's en innovatieve materialen maken dat het gebouw een voorbeeld of een inspiratiebron kan zijn voor architecten vandaag en in de toekomst.

Een eerste vervolg ontwerp waarbij het materiaalgebruik is geïnspireerd op het Phaeno Science Center, is het door Zaha Hadid ontworpen BMW Centrale in Leipzig. Dit ontwerp is een jaar na de aanvang van de uitvoering van het Phaeno Science Center ontwikkeld. Dit ontwerp zal zeker niet het laatste gebouw in de reeks zijn.

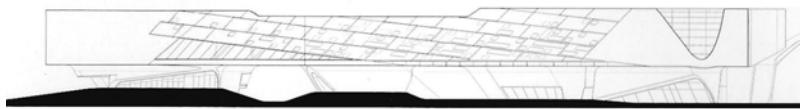
Bijlage I

In deze bijlage zijn plattegronden en een doorsneden te vinden, waarop de precieze indeling van verblijfsfuncties zijn aangegeven.

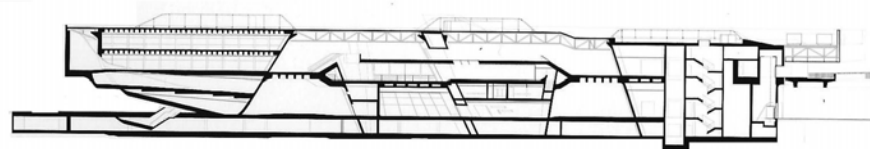
92

Index verblijfsfuncties

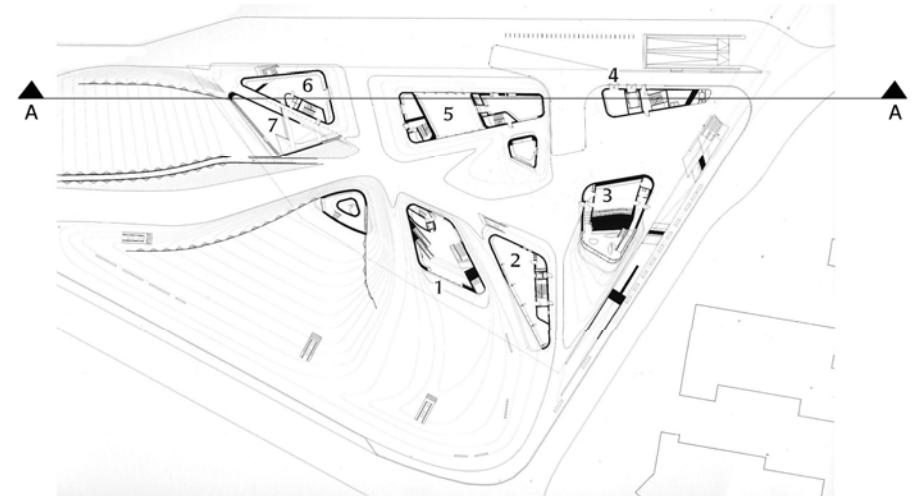
1. Hoofdentree
2. Bistro
3. Auditorium
4. Laden en lossen / laboratorium
5. Evenementenruimte
6. Workshop ruimte
7. Phaeno winkel
8. Expositie ruimten
9. Laboratorium



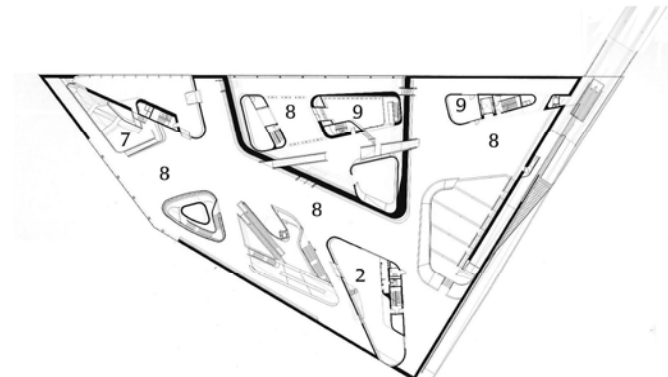
Figuur 33: Aanzicht zuid façade.



Figuur 34: Doorsneden A.



Figuur 35: Plattegrond begane grond.



Figuur 36: Plattegrond eerste verdieping vloer.

Noten

- ¹ Internetbron: Zaha Hadid Architects (2011) People Zaha Hadid.
² Andy Pearson, As hard as it gets. **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, p.58

Hoofdstuk 1

- ³ Internetbron: Wikipedia de vrije encyclopedie (2011) Wolfsburg
⁴ Andy Pearson, The impossible achieved. **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.69
⁵ Albin, H. en Joe, J. en Young, J. *Case Study: Phaeno Science Center* (New York 2006), p.25
⁶ Internetbron: Wikipedia de vrije encyclopedie (2011) Wolfsburg
⁷ Nicolai Ouroussoff, Science Center celebrates an Industrial cityscape. **New York Times**, 2005, 28 november.
⁸ Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.69
⁹ - Rob Gregory, Destination Wolfsburg. **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl. 1310, p.42
- Eleanor Young, Natural Phenomen. **RIBA journal**, 2006, vol. 113. afl. 1, p.46

Hoofdstuk 2

- ¹⁰ Borgelte, C. en Jost, R. en Froberg, N. en Nägeli, W. *Architecture in Wolfsburg* (Berlin, 2008), p.2

Hoofdstuk 3

- ¹¹ Rob Gregory, **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl. 1310, Idem, p.42
¹² Rob Gregory, **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl. 1310, Idem, p.52
¹³ Rob Gregory, **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl. 1310, p.42
¹⁴ Castex, J. *De rationele stad* (Nijmegen, 1997), p.178
¹⁵ Rob Gregory, **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl.

1310, p.42-52

- ¹⁶ Eleanor Young, **RIBA journal**, Idem, p. 46
¹⁷ - Eleanor Young, **RIBA journal**, Idem, pp. 38-47
- Andy Pearson, **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, pp.58-61
¹⁸ Rob Gregory, **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl. 1310, p.42
¹⁹ Rob Gregory, **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl. 1310, p.42

Hoofdstuk 4

- ²⁰ Jaspers, M.F. *Phaeno: Zahlen und Fakten* (Wolfsburg 2010), pp.4-5

Hoofdstuk 5

- ²¹ Eleanor Young, **RIBA journal**, Idem, pp.38-47
²² Borgelte, C. en Jost, R. en Froberg, N. en Nägeli, W. Idem, pp.10-11
²³ Eleanor Young, **RIBA journal**, Idem, pp.46
²⁴ Eleanor Young, **RIBA journal**, Idem, pp.38-47
²⁵ Eleanor Young, **RIBA journal**, Idem, pp.38-47
²⁶ Interview met Jonathan Schrempf.

Hoofdstuk 6

- ²⁷ Jaspers, M.F, Idem, pp.1-5.

Hoofdstuk 7

- ²⁸ Andy Pearson, **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, p.60
²⁹ Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.69
³⁰ Rob Gregory, **Architectural review**, 2004, vol 215. afl. 1283, p. 54-56
³¹ Andy Pearson, **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, p.60
³² Andy Pearson, **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, p.60
³³ Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.71

Hoofdstuk 8

- Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.38
- Interview met Jonathan Schrempf.
Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.70
Interview met Jonathan Schrempf.
Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, pp.68-69
Interview met Jonathan Schrempf.
Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.41
- Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.40
- Phaeno gGmbH, *Phaeno-Science Center Wolfsburg*
(Wolfsburg, 2011), p.24
- Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.40
- Phaeno gGmbH, Idem, p.24
Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, pp.40-41

Hoofdstuk 9

- Gietbouwcentrum, *Informatieblad over ZVB: zelfverdichtend beton* (Veenendaal, 2006), p.3
Internetbron: Architectenweb (2011) Beton.
Internetbron: Worldwidebase (2011) Beton.
Okamura, H. en Ouchi, M. Self-compacting concrete.
Journal of Advanced Concrete Technology, 2003. vol 1, No. 1, p.5
Pieter Embrechts, *Cement deels vervangen door hoogovenslakken in zelfverdichtend beton + zelfreinigend zelfverdichtend architectonisch beton* (Xios hogeschool Limburg 2007), pp.2-3
Gietbouwcentrum, Idem, p.3
- Internetbron: Bouwencyclopedie (2006)
Consistentiegebieden consistentieklasse.
- Internetbron: Bouwencyclopedie (2011) Trechtertijd.
- Gietbouwcentrum, Idem, p.2
Gietbouwcentrum, Idem, p.2
Gietbouwcentrum, Idem, p.2
Gietbouwcentrum, Idem, p.1
Gietbouwcentrum, Idem, p.1

- Gietbouwcentrum, Idem, p.1
Gietbouwcentrum, Idem, p.1
Gietbouwcentrum, Idem, p.4
Gietbouwcentrum, Idem, p.3
Gietbouwcentrum, Idem, p.3
Gietbouwcentrum, Idem, p.4
Gietbouwcentrum, Idem, p.4
Gietbouwcentrum, Idem, p.4

Hoofdstuk 10

- Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.69.
Stölzl, C. *Phaeno die experimentierlandschaft* (Wolfsbrug 2005), p.23
Borgelte, C. en Jost, R. en Froberg, N. en Nägeli, W. Idem, pp.14-15
Gietbouwcentrum, Idem, pp.1-4
Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.69
Informatie verkregen door alle opgedane informatie en kennis te combineren.
Informatie verkregen door alle opgedane informatie en kennis te combineren.
Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, pp.68-69
Andy Pearson, The impossible achieved. **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.68
Andy Pearson, The impossible achieved. **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.69

Hoofdstuk 11

- Andy Pearson, **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, p.59
Informatie verkregen door alle opgedane informatie en kennis te combineren.
Andy Pearson, **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, p.59
Informatie verkregen door alle opgedane informatie en kennis te combineren.
Interview met Jonathan Schrempf.
Internetbron: 3rd Architecture (2011) Punch shearing.

78 Informatie verkregen door alle opgedane informatie en
kennis te combineren.
79 Gerrits, J.M. *Draagconstructies-Basis* (Delft 2007), p.143
80 Andy Pearson, **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, p.59

Hoofdstuk 12

81 - Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.40
- Phaeno gGmbH, Idem, p.24
82 Phaeno gGmbH, Idem, p.24
83 Informatie verkregen door alle opgedane informatie en
kennis te combineren.
84 Phaeno gGmbH, Idem, p.24
85 Informatie verkregen door alle opgedane informatie en
kennis te combineren.
86 Interview met Jonathan Schrempf.
87 Interview met Jonathan Schrempf.

Hoofdstuk 13

88 Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.69
89 Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.72
90 Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.41
91 Andy Pearson, **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.72

Bijlage I

92 Phaeno gGmbH, Idem, pp. 29-30

Literatuurlijst

Artikelen

Alice Rawsthorn, Architectural adventure, **The Guardian**, 2007, 17 oktober.

Andy Pearson, As hard as it gets. **Building**, 2002, vol. 267. afl. 6, pp. 58-61.

Andy Pearson, The impossible achieved. **Building**, 2004, vol. 269. afl. 12, p.66-73

Eleanor Young, Natural Phenomen. **RIBA journal**, 2006, vol. 113. afl. 1, pp. 38-47

Nicolai Ouroussoff, Science Center celebrates an Industrial cityscape. **New York Times**, 2005, 28 november.

Okamura, H. en Ouchi, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, 2003. vol 1, No. 1, pp. 5-15

Rob Gregory, Destination Wolfsburg. **Architectural Review**, 2006, vol 219. afl. 1310, pp. 42-55

Rob Gregory, Ancient and Modern, **Architectural review**, 2004, vol 215. afl. 1283, p. 54-56

Boeken

Borgelte, C. en Jost, R. en Froberg, N. en Nägeli, W. *Architecture in Wolfsburg* (Berlin, 2008)

Castex, J. *De rationele stad* (Nijmegen, 1997)

Gerrits, J.M. *Draagconstructies-Basis* (Delft, 2007)

Phaeno gGmbH, *Phaeno-Science Center Wolfsburg*

(Wolfsburg, 2011)

Stölzl, C. *Phaeno die experimentierlandschaft* (Wolfsbrug 2005)

Informatielijsten

Exclusieve interne informatie betreffende het Phaeno Science Center, gekregen van Jonathan Schrempf: Jaspers, M.F. *Phaeno: Zahlen und Fakten* (Wolfsburg 2010)

Gietbouwcentrum, *Informatieblad over ZVB: zelfverdichtend beton* (Veenendaal, 2006)

Interview

Interview met Jonathan Schrempf, Wolfsburg (16-07-2011)

Rapport

Albin, H. en Joe, J. en Young, J. *Case Study: Phaeno Science Center* (New York, 2006)

Pieter Embrechts, *Cement deels vervangen door hoogovenslakken in zelfverdichtend beton + zelfreinigend zelfverdichtend architectonisch beton* (Xios hogeschool Limburg 2007)

Internetbronnen

Architectenweb, Roel Griffioen (2011), Beton.
<http://www.architectenweb.nl/aweb/archipedia/archipedia.asp?ID=647> (31-08-2011)

Arcspace, Zaha Hadid architects (2005), Zaha Hadid Architects Phaeno Science Center.
<http://www.arcspace.com/architects/hadid/phaeno/phaeno.html> (25-05-2011)

Bouwencyclopedie, Gietbouwcentrum (2006), Consistentiegebied en consistentieklasse
<http://www.joostdevree.nl/shtmls/consistentiegebied.shtml> (15-08-2011)

Bouwencyclopedie (2011), Trechtertijd.
<http://www.joostdevree.nl/shtmls/trechtertijd.shtml> (15-08-2011)

Open buildings (2011) Phaeno Science Center
<http://openbuildings.com/buildings/phaeno-science-center-profile-1586> (27-05-2011)

RIBA (2011) Phaeno Science Center, Wolfsburg, Germany
<http://www.architecture.com/Awards/RIBAEuropeanAwards/2006/PhaenoScienceCenterGermany/PhaenoScienceCenterGermany.aspx> (25-05-2011)

Wikipedia de vrije encyclopedie (2011) Wolfsburg
http://nl.wikipedia.org/wiki/Wolfsburg#cite_ref-NS_Stat_0-0 (03-03-2011)

Wikipedia de vrije encyclopedie (2011) Phaeno Science Center
http://en.wikipedia.org/wiki/Phaeno_Science_Center (03-03-2011)

Worldwidebase (2011) Beton
<http://www.worldwidebase.com/peoplesociety/beton.shtml> (31-08-2011)

Zaha Hadid Architects (2011) People Zaha Hadid
<http://www.zaha-hadid.com/people> (05-01-2011)

3rd Architecture, Caprani,C. (2011) Punch shearing
<http://www.colincaprani.com/files/notes/Punching%20shear.pdf> (25-05-2011)

Illustraties

- Figuur 1: Ligging wolfsburg in Duitsland.
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/81/Lower_Saxony_location_map_G.svg
Bewerkt in Adobe Photoshop Cs3 (03-03-2011)
- Figuur 2: Plattegrond van Wolfsburg welke de relatie tussen het Phaeno Science Center, het industriële Noorden en het Culturele Zuiden laat zien.
Albin, H. en Joe, J. en Young, J. *Case Study: Phaeno Science Center* (New York 2006), p.31
Bewerkt in Adobe Photoshop Cs3 (03-03-2011)
- Figuur 3: Render van Zaha Hadid haar eerste impressie.
Render gemaakt door: Zaha hadid Architects
<http://www.zaha-hadid.com/architecture/phaeno-science-centre/> (25-08-2011)
- Figuur 4: Unité d'habitation Marseille.
Foto gemaakt door Pieter Raat.
<http://www.pieterraat.nl/archives/2007/06/06/afrondingen/> (03-03-2011)
- Figuur 5: De open doorgang onder de Unité d'habitation.
Foto gemaakt door Pieter Raat.
<http://www.pieterraat.nl/archives/2007/06/06/afrondingen/> (05-03-2011)
- Figuur 6: Verlichting van het Phaeno Science Center plein overdag
http://www.flickr.com/photos/asli_aydin/4568038546/in/photostream/#/photos/asli_aydin/4568038546/in/photostream/lightbox/ (18-03-2011)
- Figuur 7: Verlichting van het Phaeno Science Center plein in de nacht.

- <http://www.flickr.com/photos/alvinhuang/69809323/in/photostream/#/photos/alvinhuang/69809323/in/photostream/lightbox/> (18-03-2011)
- Figuur 8: Zuid façade Phaeno Science Center.
Foto gemaakt door: Wemer Huthmacher
<http://www.zaha-hadid.com/cultural/phaeno-science-center> (18-03-2011)
- Figuur 9: Zuid façade Phaeno Science Center.
Foto gemaakt door: Wemer Huthmacher
<http://www.zaha-hadid.com/cultural/phaeno-science-center> (18-03-2011)
- Figuur 10: Betonnen kegel pons door de verdieping vloer om het dak te dragen.
Foto gemaakt door Thomas Mayer.
http://thomasmayerarchive.de/details.php?image_id=88769&sessionid=4924bb34dd6b979c38e2489a51c097ad&l=english (03-09-2011)
- Figuur 11: Omkering van een betonnen kegel, waardoor een krater met daarin een functie ontstaat.
Foto gemaakt door Thomas Mayer.
http://thomasmayerarchive.de/details.php?image_id=88717&sessionid=4924bb34dd6b979c38e2489a51c097ad&l=english (03-09-2011)
- Figuur 12: Bijna onwaarneembare overgang tussen binnen naar buiten.
Foto gemaakt door Thomas Mayer.
http://thomasmayerarchive.de/details.php?image_id=88769&sessionid=4924bb34dd6b979c38e2489a51c097ad&l=english (03-09-2011)
- Figuur 13: Organisch landschap welke actief gebruikt wordt voor interactieve experimenten.
Foto gemaakt door Thomas Mayer.

	http://thomasmayerarchive.de/details.php?image_id=88716&sessionid=4924bb34dd6b979c38e2489a51c097ad&l=english (03-09-2011)		
Figuur 14:	Onderstempeling van de bekisting van een kegel voor de stort. Foto gemaakt door Clemens Ortmeyer. Phaeno gGmbH, <i>Phaeno-Science Center Wolfsburg</i> (Wolfsburg, 2011), p.16	Figuur 21:	Schema waarin de vloeimaat wordt uitgezet tegenover de trechtertijd. Schema gemaakt door gietbouwcentrum Gietbouwcentrum, <i>Informatieblad over ZVB: zelfverdichtend beton</i> (Veenendaal, 2006), p.2
Figuur 15:	Onderstempeling van een individueel onstabiele kegel. Foto gemaakt door Clemens Ortmeyer. Phaeno gGmbH, Idem, p.17	Figuur 22:	Volkswagen kever 1938 http://www.autowereld.com/promemorie/detail.asp?artikel=9288 (30-08-2011)
Figuur 16:	Schema van de krachtenafdracht. Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.41	Figuur 23:	Stortnaden in het geveleppervlak van de Zollverein school of management and design door SANAA. Foto gemaakt door Michelle Zwiers (21-08-2011)
Figuur 17:	Constructieve structuur van stalen kolommen in de zuid façade. http://www.theplan.it/J/images/stories/Riviste/The%20Plan%20009/009-3.jpg (03-09-2011)	Figuur 24:	Schema van ponsschade. Schema gemaakt door C. Caprani http://www.colincaprani.com/files/notes/Punching%20shear.pdf (25-08-2011)
Figuur 18:	Montage trapeziumvormige betonnen raamelementen aan de stalen constructie. Foto gemaakt door Mayer Bährle Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.40	Figuur 25:	Ponsschaden in praktijk. http://www.colincaprani.com/files/notes/Punching%20shear.pdf (25-08-2011)
Figuur 19:	Stalen dak constructie. Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.41	Figuur 26:	Onsubtiele overgang van kegel in verdieping vloer. Foto gemaakt door Michelle Zwiers (16-07-2011)
Figuur 20:	Stalen dakconstructie in het gebouw. Foto gemaakt door Robert Uhde http://architecture.mapolismagazin.com/zaha-hadid-architects-phaeno-science-center-wolfsburg (05-09-2011)	Figuur 27:	Standaard geprefabriceerde cassettes. http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/verloren_bekisting_voorbeelden.htm (31-08-2011)
		Figuur 28:	Trapeziumvormige cassettes. Gemaakt door Michelle Zwiers (16-07-2011)
		Figuur 29:	Oriëntatie trapeziumvormig rasterpatroon ten opzichte van het gebouw. Albin, H. en Joe, J. en Young, J. Idem, p.39

-
- Figuur 30: Stortnaden doen afbreuk aan het de façade als geheel.
Gemaakt door Michelle Zwiers (16-07-2011)
- Figuur 31: Zwevend vakwerk van de stalen dakconstructie.
Gemaakt door Michelle Zwiers (16-07-2011)
- Figuur 32: Het in positie brengen van het voorgemonteerde stalen dak.
Foto gemaakt door Heinrich Hecht.
Phaeno gGmbH, Idem, p.19
- Figuur 33: Aanzicht zuid façade.
Phaeno gGmbH, Idem, p.30
- Figuur 34: Doorsnede A
Phaeno gGmbH, Idem, p.29
- Figuur 35: Plattegrond begane grond.
Phaeno gGmbH, Idem, p.29
- Figuur 36: Plattegrond begane grond.
Phaeno gGmbH, Idem, p.30