

# Casestudy Burj Khalifa



Door: M.J.A.M. Bruurs 0745410  
G.Y.G. van der Meijde 0770487

Datum: 02-06-2015

Docent: Prof. Dr.-Ing. P.M. Teuffel

## Voorwoord

De Buitenlandse Studiereis (BSR) van Studievereniging KOers ging dit jaar naar Dubai en Abu Dhabi. Voor en tijdens deze reis is onderzoek gedaan naar hoe men is omgegaan met maatafwijkingen en toleranties bij de bouw van het hoogste gebouw ter wereld, de Burj Khalifa.

Deze casestudy is gemaakt voor de hoofdsponsor van de BSR 2015, Rijndijk Construction BV. Wij willen Rijndijk Construction BV bedanken voor het mede mogelijk maken van de studiereis.

Voor deze casestudy is online gezocht naar publicaties over het ontwerp en de bouw van de Burj Khalifa. Daarnaast is geprobeerd om in contact te komen met de bouwbedrijven en de adviesbureaus die het constructief ontwerp hebben gemaakt. Helaas bleek het verkrijgen van informatie van de bedrijven erg lastig door afspraken over geheimhouding of omdat de personen betrokken bij de bouw momenteel verspreid over de wereld werken en daardoor lastig te bereiken. Gelukkig hebben we tijdens bezoeken aan bedrijven in Dubai en het bezoek aan de Burj Khalifa zelf nog wel extra informatie verkregen om de onderzoeksvragen te beantwoorden.

De casestudy wordt beoordeeld door Prof.Dr.-ing. Patrick Teuffel, Hoogleraar aan de unit Structural Design van de faculteit bouwkunde van de TU/e.

We vonden het erg leuk en leerzaam om onderzoek te doen naar de Burj Khalifa en natuurlijk om het gebouw ook zelf te bezoeken.

## Inhoudsopgave

Voorwoord.....	2
1 Samenvatting .....	4
2 Inleiding.....	5
3 Constructief Ontwerp.....	6
4 Gevelsysteem .....	9
5 Natuurlijke scheefstand .....	11
6 Monitoringssysteem .....	13
7 Beheersen maatafwijkingen .....	15
8 Conclusie .....	16
Lijst van afbeeldingen.....	17
Bronnen .....	18

# 1 Samenvatting

De Burj Khalifa is met een totale hoogte van 828 meter al 5 jaar officieel het hoogste gebouw ter wereld. Bij constructies van dergelijke hoogte en eigen gewicht zijn maatafwijkingen erg belangrijk. Een scheefstand ten gevolge van maatafwijkingen zorgt voor een groter tweede orde effect. Zonder hier extra maatregelen voor te treffen zou de constructie zo groot worden dat deze niet meer functioneel is. Daarnaast leiden scheefstand en te grote maatafwijking tot problemen tijdens de uitvoerings- en gebruiksfase van het gebouw. Sommige bouwdelen passen bijvoorbeeld niet of sluiten niet goed op elkaar aan. Het beperken en beheersen van maatafwijkingen en -toleranties is dus erg belangrijk bij een gebouw als de Burj Khalifa.

De onderzoeksvraag van deze casestudy luidt: "Hoe is de uitvoerder gedurende de bouw van de Burj Khalifa omgegaan met maatafwijkingen en -toleranties?"

De constructie van de Burj Khalifa bestaat tot een hoogte van 575 uit een betonconstructie met dragende wanden en kolommen. Het bovenste deel van de toren bestaat uit een geschoorde staalconstructie. Voor de stabiliteit is het 'butressed-core' principe gebruikt waarbij de kern in de drie richtingen van Y-vorm gesteund wordt door wanden en kolommen. Onder het gebouw bevindt zich een zware fundering die er samen met het stabiliteitssysteem voor zorgt dat de maximale verplaatsing ten gevolge van veranderlijke belastingen in de top beperkt is tot 125cm in alle richtingen.

Ook bij de keuze voor het gevelsysteem is rekening gehouden met maatafwijkingen en de enorme hoogte van het gebouw. De gevel bestaat uit volledig geprefabriceerde elementen die bevestigd zijn met behulp van speciale ingestorte bevestigingsbeugels die in drie richtingen verstelbaar zijn om het verschil tussen gevelement en ruwbouw te overbruggen.

Om de natuurlijke scheefstand van de toren te beperken liggen het geometrische middelpunt en het fysieke zwaartepunt van de toren in de plattegrond in hetzelfde punt en wordt de plattegrond naar boven toe kleiner. Ook is er een herverdelingsplaat in de fundering toegepast om scheefstand van de fundering te voorkomen. Om het effect van elastische verkorting, krimp en kruip mee te nemen is een volledig 3D model van het gebouw gemaakt voor verschillende bouwfasen. Tijdens de uitvoering is vervolgens gecorrigeerd voor deze verkortingen.

Tijdens de bouw is gebruik gemaakt van een zeer geavanceerd GPS systeem om afwijkingen te monitoren. Op de klimbekisting zijn drie antennes bevestigd en op de grond een referentiepunt gemaakt. De realtime locatie van de bekisting werd vergeleken met een 3D model van de constructie gedurende alle bouwfasen. Hiermee werden de verwachte verplaatsingen berekend op basis van de werkelijk gemeten materiaaleigenschappen, windbelasting, funderingszetting en eventuele asymmetrische belastingen.

Bij iedere verdieping is de bekisting opnieuw uitgelijnd op het geometrische middelpunt met een nauwkeurigheid van 15mm. Om de 20 verdiepingen werden nieuwe hellingshoekmeters met zeer hoge precisie geplaatst om de scheefstand nog nauwkeuriger te kunnen monitoren.

De combinatie van een ontwerp waarbij rekening is gehouden met maatafwijkingen en gebruik van geavanceerde modellen en meetmethoden tijdens de uitvoering heeft ervoor gezorgd dat de maatafwijking bij de top beperkt is gebleven tot 25mm en er tijdens uitvoering en gebruik geen grote problemen zijn ontstaan.

## 2 Inleiding

De Burj Khalifa staat bekend als het hoogste gebouw ter wereld. Met zijn 828 meter torent hij boven alle omliggende wolkenkrabbers uit. Iedereen die voor de toren staat raakt zijn gevoel voor schaal volledig kwijt. Op een heldere dag is de toren vanaf 95 kilometer afstand te zien. De schaal gecombineerd met het iconische ontwerp garanderen een functie als landmark voor Dubai. Het gebouw moet dienen als catalysator voor het ontwikkelen van meer projecten van hetzelfde kaliber.

De extreme weersomstandigheden in Dubai eisen veel van het gebouw. Zowel tijdens de bouw als in gebruik. Het gevelsysteem moet kunnen omgaan met extreme temperatuurschommelingen, hoge windsnelheden en zandstormen. Daarnaast moet hij zodanig bevestigd zijn dat maatafwijkingen opgevangen kunnen worden.

Door de enorme hoogte is het monitoren van de maatafwijkingen en natuurlijke scheefstand een grote uitdaging. Het voorspellen en real-time monitoren van scheefstand en maatafwijkingen heeft gezorgd voor de ontwikkeling van unieke systemen.

Het corrigeren van maatafwijkingen tijdens de bouw is uitzonderlijk goed gelukt. De toren staat bijna volledig verticaal; er is een afwijking van slechts 25 millimeter aan de top. Deze prestatie illustreert de aandacht die is besteed aan het implementeren van de nieuwste real-time monitoringssystemen en digitale rekenmodellen.

In deze casestudy zal zo goed mogelijk een antwoord worden gezocht op de volgende vragen:

Algemene onderzoeksvraag:

“Hoe is de uitvoerder gedurende de bouw van de Burj Khalifa omgegaan met maatafwijkingen en toleranties?”

Deelvragen:

- Hoe is voldoende tolerantie gerealiseerd zonder het verlies van de functie van de gevel?
- Welke ontwerpoplossingen zijn toegepast om de natuurlijke scheefstand binnen de perken te houden?
- Hoe heeft de uitvoerder de scheefstand tijdens de bouw gemonitord?
- Op wat voor manier zijn maatafwijkingen van de hoofdconstructie tijdens de bouw gecorrigeerd in zowel de beton- als de staalconstructie?



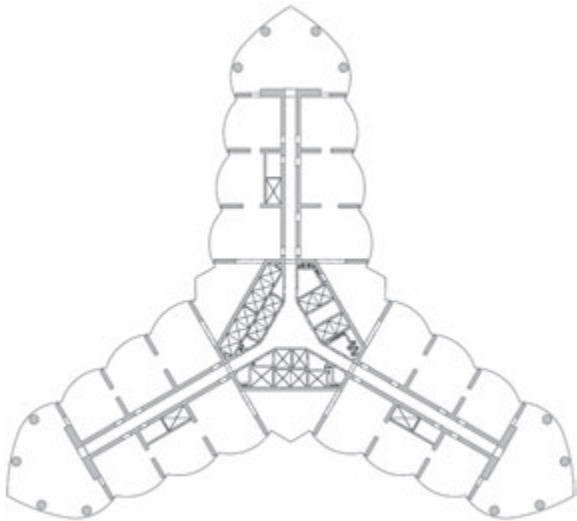
### 3 Constructief Ontwerp

Het constructieve ontwerp van de Burj Khalifa is gemaakt door het Amerikaanse bureau Skidmore, Owings & Merrill LLP en later uitgewerkt door Hyder Consulting Ltd.



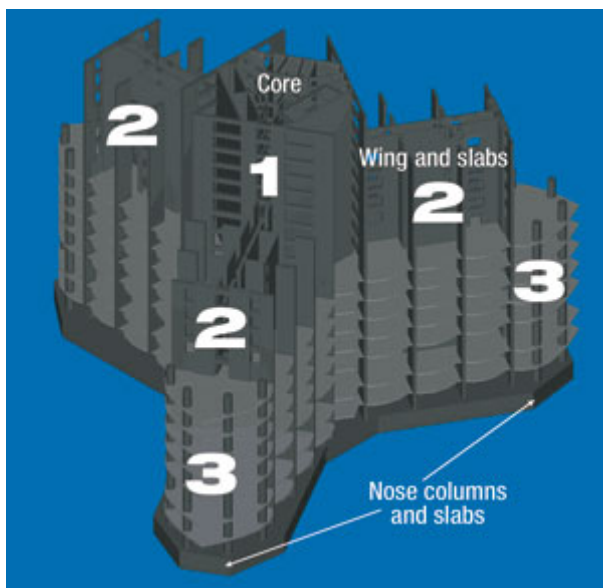
Afbeelding 1 - Overgang beton-staal Burj Khalifa [1]

De hoofdconstructie van de Burj Khalifa bestaat uit betonnen wanden en vloeren tot een hoogte van 575 meter. De constructie erboven bestaat uit een stalen skelet en een mast tot een hoogte van 828 meter. Er is gekozen voor het toepassen van staal voor het bovenste deel van de toren omdat het technisch niet mogelijk was om beton met een juiste consistentie hoger dan 575 meter te pompen. Het beton wat gebruikt is voor de wanden en vloeren is onderaan de toren C80/95 en neemt met de hoogte geleidelijk af tot C60/70 bij de overgang van beton naar staal.



Afbeelding 2 - Plattegrond Burj Khalifa [2]

De stabiliteit van de toren komt voort uit de Y-vormige doorsnede van de toren die te zien is in Afbeelding 2. De doorsnede bestaat uit een zeshoekige kern in het midden. Deze kern wordt extra gesteund door drie gangen met aan beide zijde dikke betonnen wanden en op het uiteinde een dikke betonnen wand. De buitenste kolommen van de Y-vorm werken ook mee als outrigger. Zie Afbeelding 3. Het geheel is erg buig- en torsiestijf. Dit principe heet het 'buttressed core'. Het stalen gedeelte bestaat uit een geschoorde constructie om de stabiliteit te waarborgen.



Afbeelding 3 - Stabiliteitssysteem Burj Khalifa [3]

De Y-vorm is niet alleen gunstig voor de stabiliteit maar reduceert ook de windbelasting omdat de wind door de vorm om de toren heen wordt geleid. Daarnaast zorgt de steeds kleiner wordende doorsnede ervoor dat er veel minder windzuiging ontstaat aan de luwe zijde waardoor de belasting ten gevolge van wind nog verder gereduceerd wordt.

Om te voldoen aan de eisen met betrekking tot de maximale horizontale verplaatsing per verdieping en bij de top is de stijfheid van de constructie alleen niet voldoende. Om aan die eisen te voldoen is de doorsnede van de toren naar de top toe ook gereduceerd. Hierdoor

wordt de (wind)belasting op de meest ongunstige plaats, in dit geval bij de top, gereduceerd ten opzichte van een toren zonder verlopende doorsnede. Door de verlopende doorsnede en de stijfheid van de toren is de horizontale verplaatsing bij de top beperkt tot 125cm in alle richtingen.

De verticale krachtsafdracht vindt plaats door dragende wanden en kolommen. De gevel heeft geen constructieve functie bij de Burj Khalifa.

De fundering van de toren bestaat uit 194 betonnen boorpalen met een diameter van 1,5 meter en een betonkwaliteit C60. De palen hebben een lengte van 45 meter en staan op een diepte van 55 meter onder maaiveld. Iedere paal is ontworpen op een capaciteit van 3000kN.



Afbeelding 4 - Fundering Burj Khalifa [4]

De funderingspalen zijn afgedekt met een betonnen plaat van 3,7 meter dik. Deze plaat moet zorgen voor een gelijkmatige verdeling van de belasting over de palen, zie Afbeelding 4. De uitvoering van een dergelijke massieve betonconstructie vergt natuurlijk de nodige aandacht, zeker het beheersen van de temperatuur als gevolg van de exotherme reactie van het cement is belangrijk. Bij de Burj Khalifa heeft men een speciale betonsamenstelling gebruikt waarbij relatief weinig warmte vrijkomt en daarnaast heeft men de plaat in vier sessies van 24 uur gestort.

Bij het bepalen van de samenstelling van het betonmengsel van de palen en de plaat moest rekening gehouden worden met de bijzondere samenstelling van het grondwater. De chloride en sulfietconcentraties in het grondwater onder de Burj Khalifa zijn hoger dan in zeewater. Het mengsel moest dus extra dicht zijn om te voorkomen dat dit grondwater de wapening in de palen en de plaat aan zou tasten. Ook is de dekking verhoogd en is onder de plaat een kathodische laag met een titanium net aangebracht om corrosie van de wapening te voorkomen.

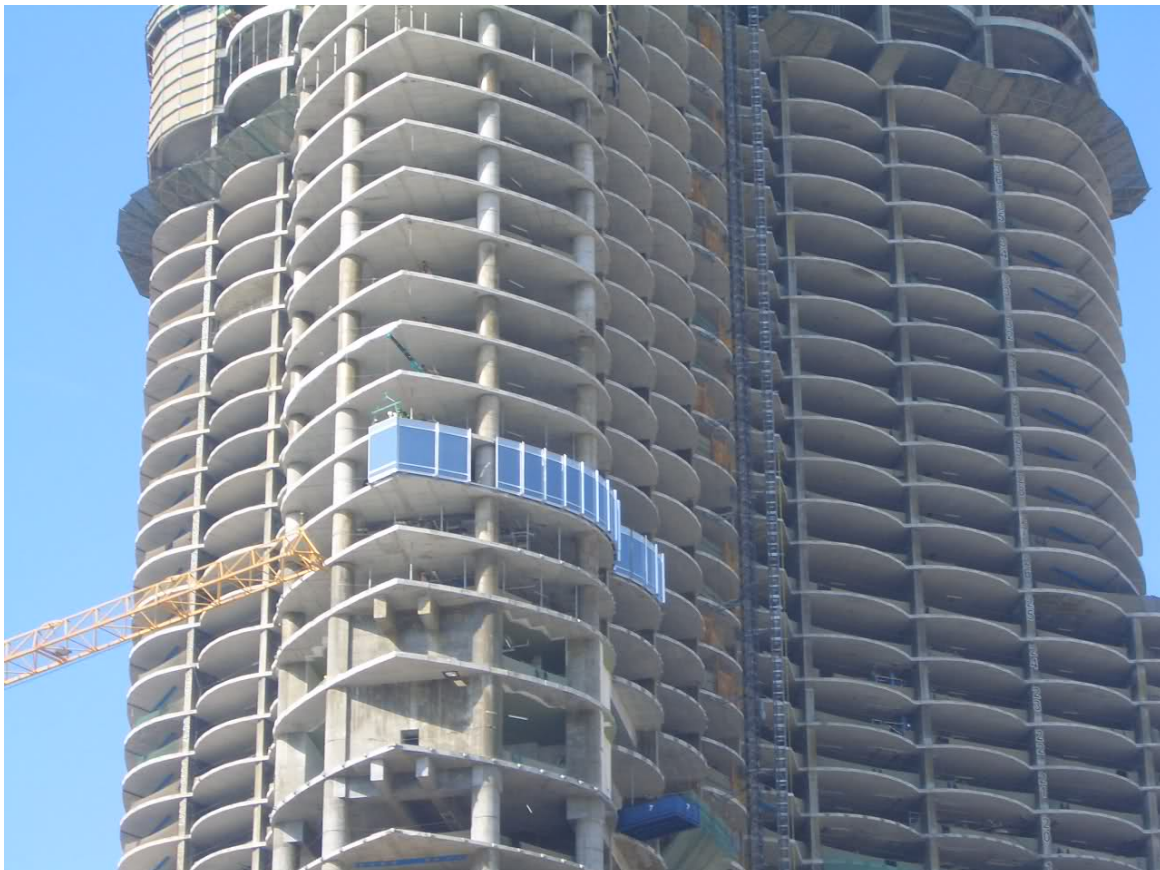
Men verwachtte dat de fundering 80mm zou zakken gedurende de uitvoering ten gevolge van de toename van de last op de fundering. Bij het bereiken van de 135<sup>e</sup> verdieping bleek de zetting echter beperkt te zijn gebleven tot 30mm.



## 4 Gevelsysteem

De gevel van de Burj Khalifa moet het gebouw wind- en waterdicht maken. Daarnaast geeft de gevel het gebouw de gewenste uitstraling. Doordat de gevel bij de Burj Khalifa geen constructieve functie heeft was er veel vrijheid voor de ontwerpers om de gevel vorm te geven. Er is uiteindelijk gekozen voor een (voornamelijk) glazen gevel om het zicht vanuit de toren te benutten en het gebouw de iconische uitstraling te geven die het nu heeft.

Er zijn meerdere systemen beschikbaar om een glazen gevel te maken waarbij in dit geval de uitvoering bepalend is geweest voor de systeemkeuze. Er is uiteindelijk gekozen voor een systeem bestaande uit prefab gevelelementen en niet voor systeem bestaande uit stijl- en regelwerk in verband met de uitvoering op grote hoogte. Door de record brekende hoogte van het gebouw is het praktisch ondoenlijk om een steiger constructie om het gebouw heen te maken die nodig is voor het veilig bevestigen van het stijl en regelwerk. Bij een elementengevel is geen steigerconstructie nodig. Vanaf de vloeren kunnen bevestigingsbeugels gemonteerd worden op de ruwbouw waarna een gevelement met behulp van een kleine kraan in plaats gehesen kan worden, zie Afbeelding 5 en Afbeelding 6. Door gebruik te maken van een kleine mobiele kraan die op een hogere verdieping staat wordt de extra benodigde inzet van de bouwkransen op de top van de toren ook beperkt.



Afbeelding 5 - Plaatsen gevelelementen Burj Khalifa met kleine mobiele kraan [5]

Bij het plaatsen van een elementgevel zijn maatafwijkingen erg belangrijk. De betonnen ruwbouw en zeker de ankers en sparringen die worden gemaakt hebben namelijk een bepaalde maatafwijking, meestal enkele millimeters. De gevelelementen worden echter geprefabriceerd en hebben een maatafwijking die vaak beperkt is tot minder dan een millimeter. Om ervoor te zorgen dat de gevel wind- en waterdicht is moeten de panelen echter wel goed op elkaar aansluiten. Omdat de panelen een vast formaat hebben kan de

maatafwijking van de ruwbouw niet worden opgevangen door de panelen de afwijkingen te laten volgen. Het is tot in zekere mate niet mogelijk om de maatafwijking van de ruwbouw volledig te elimineren, al dient deze natuurlijk wel zover mogelijk beperkt te worden.



Afbeelding 6 - Plaatsen gevelsysteem Burj Khalifa [6]

De enige locatie waar de maatafwijking opgevangen kan worden is in de bevestigingsbeugels van de elementen op de ruwbouw. Door deze in drie richtingen verstelbaar te maken kunnen maatafwijkingen opgevangen worden en zo lang er geen structurele afwijking zit tussen ruwbouw en gevel is dit voldoende om te zorgen dat de gevel wind- en waterdicht is.



Afbeelding 7 - Halfen HCW curtain wall systeem toegepast bij Burj Khalifa [7]

Deze oplossing is toegepast bij de Burj Khalifa waarbij het HCW curtain wall systeem van de firma Halfen is gebruikt, zie Afbeelding 7. Het systeem bestaat uit een rails die ingestort is in de betonnen vloer. De geveldrager kan voor het fixeren verschoven worden over de rails en zo wordt de horizontale maatafwijking evenwijdig aan de gevel opgevangen. De geveldrager die in deze rails bevestigd wordt kan door middel van een sleufgat dicht tegen de ruwbouw aan of verder van de ruwbouw af worden gesteld om de afwijking in de richting loodrecht op het vlak van de gevel op te vangen. Door verticale sleufgaten kan ook de verticale afwijking evenwijdig aan het vlak van de gevel gecorrigeerd worden. De beugels worden voor het plaatsen van de gevelelementen gesteld en daardoor kunnen de gevelelementen daarna snel worden geïnstalleerd zonder dat er panelen zijn die niet passen.

## 5 Natuurlijke scheefstand

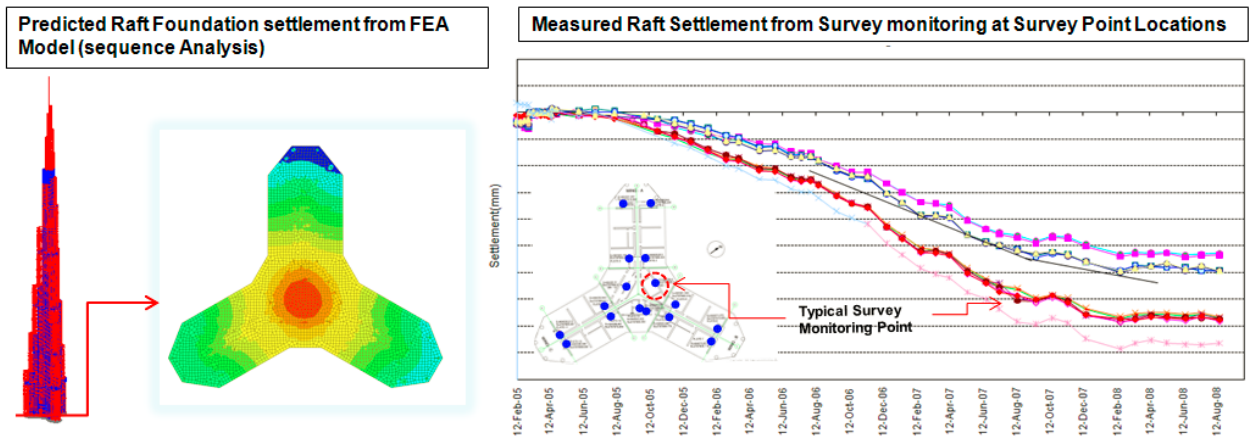
Bij een gebouw van deze hoogte spelen natuurlijke scheefstand en verkorting een grote rol. Onder de natuurlijke scheefstand verstaan we scheefstand die opgewekt wordt door de zwaartekracht. De verkorting ontstaat door krimp, kruip en elastische verkorting van de kolommen en wanden in de hoofdconstructie. In het ontwerpproces kunnen deze factoren zo veel mogelijk beperkt worden. Een aantal in het oog springende aspecten van het ontwerp helpen hierbij mee. Zo liggen het geometrische middelpunt en het fysieke zwaartepunt van de constructie in één punt. Ook het steeds slanker maken van de toren naarmate de hoogte toeneemt draagt bij aan verminderde scheefstand.

De scheefstand door zwaartekracht is gecompliceerd proces waarin verschillende aspecten een rol spelen. Verschillen in de funderingszettingen bepalen een groot deel van de natuurlijke scheefstand. In het ontwerp zijn maatregelen genomen om deze verschillen zo veel mogelijk te verminderen. De betonnen plaat die op de palen ligt verdeelt de belasting van de toren zo goed mogelijk over de individuele palen. De plattegrond is symmetrisch en de toren loopt spits toe waardoor het fysieke zwaartepunt boven het geometrische middelpunt ligt. Hierdoor wordt de fundering zo symmetrisch mogelijk belast.



Afbeelding 8 - Verschillende fases van modelleren [2]

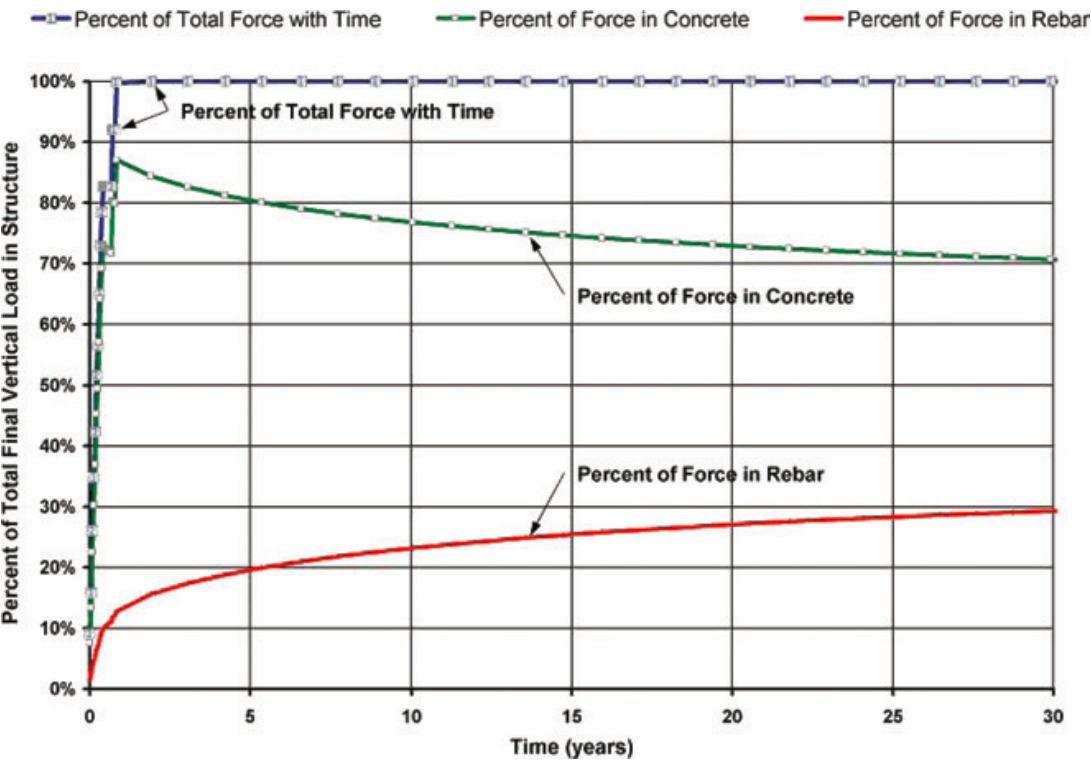
Het is niet mogelijk om de zettingen volledig uniform te ontwerpen. Daarom zijn alle zettingen van tevoren gemodelleerd, en later ook gemeten als onderdeel van het Structural Health Monitoring systeem. Het zwaartepunt van de toren verschuift tijdens de bouw door de inspringende vleugels van de plattegrond. Dit zorgt voor ongelijke opbouw van funderingszettingen. In het model zijn vijftien verschillende fases tijdens de constructie berekend, zie Afbeelding 8. De resultaten van de analyse zijn tijdens de bouw getoetst aan de gemeten zettingen, en waar nodig is de toren gecorrigeerd, zie Afbeelding 9.



Afbeelding 9 - Voorspelde en gemeten funderingszettingen [8]

De verkorting van de hoofddraagconstructie door krimp en kruip is ook volledig gemodelleerd. Deze is van toepassing op het betonnen deel van de constructie. Hierbij is per verdieping gekeken naar de verkorting van de kolommen en wanden. Deze verkorting is daarna gecorrigeerd door de verdiepingshoogte tijdens de bouw aan te passen.

De wapening neemt een deel van de kolomlast op zich. Door de grote verkorting door kruip zal de wapening, die minder kruipt, meer belasting op zich gaan nemen. Dit loopt van 15% bij oplevering tot 30% na 30 jaar belasten, zie Afbeelding 10. Om dit op te vangen is extra wapening geplaatst.

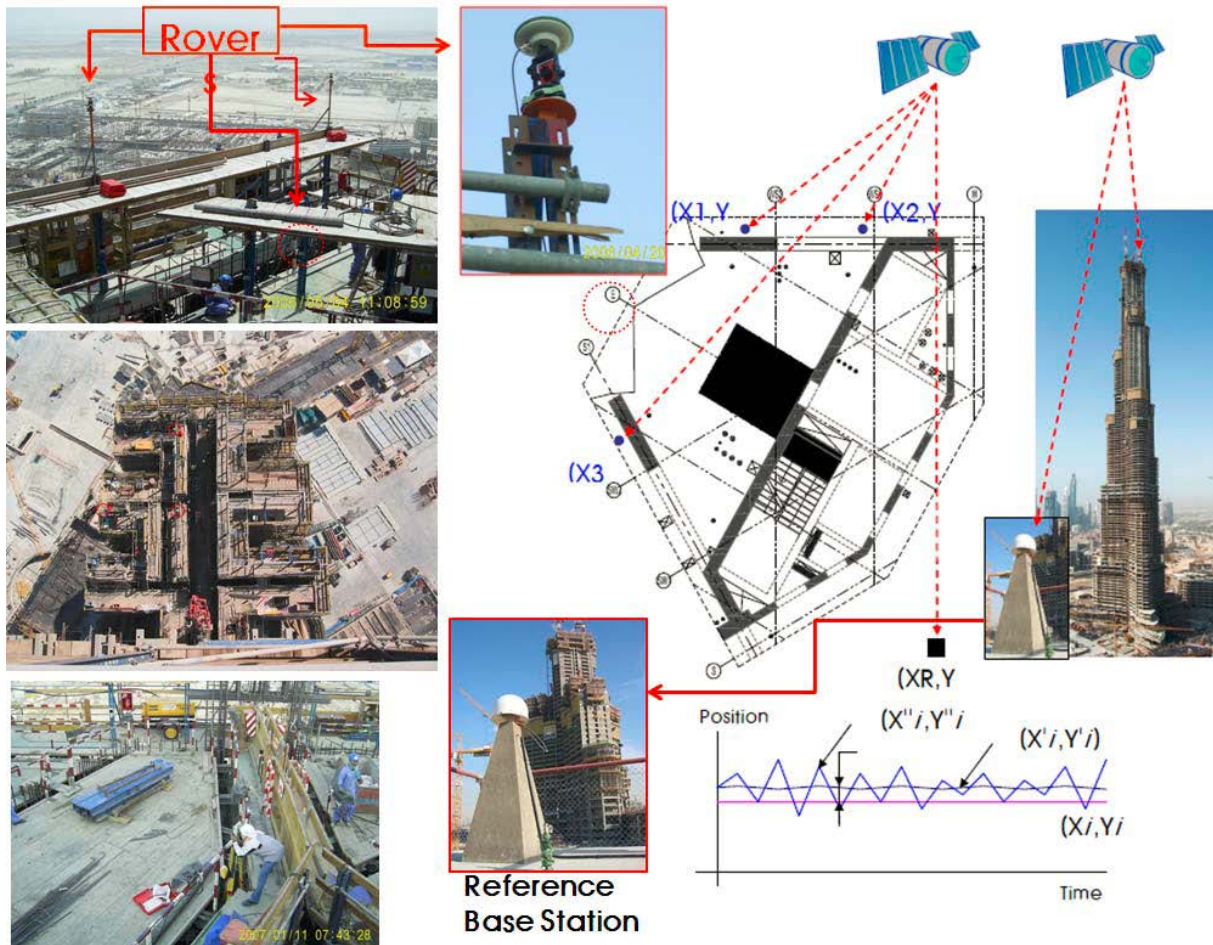


Afbeelding 10 - Belastingsverdeling beton vs wapening [2]



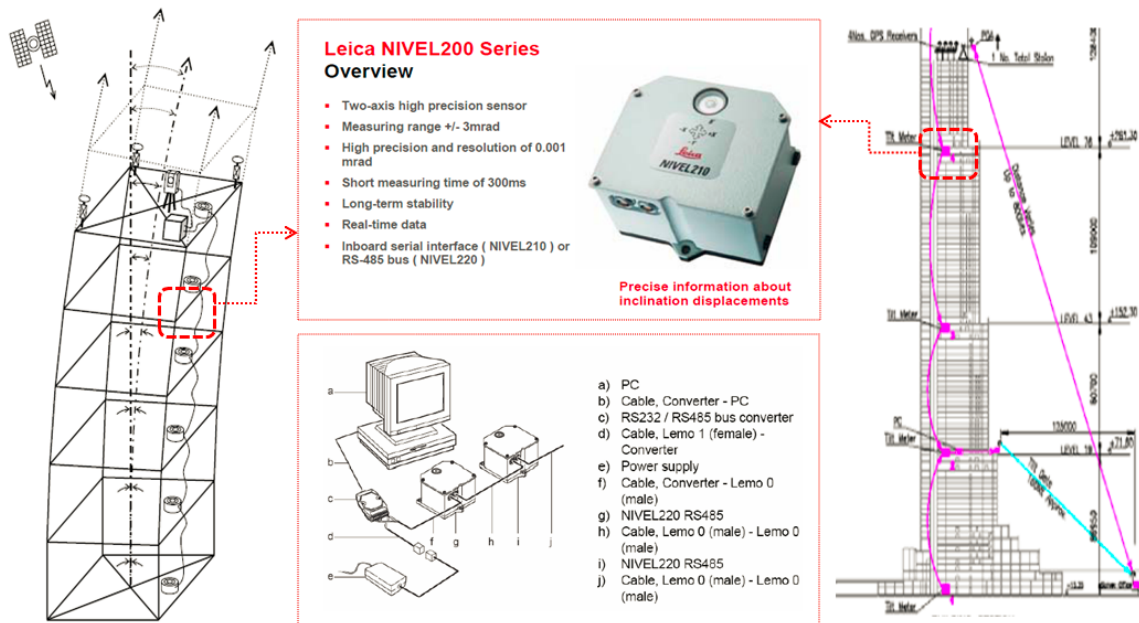
## 6 Monitoringssysteem

Op de klimbekisting is een drietal GPS antennes gefixeerd. Deze steken ver boven de ACS(auto climbing formwork system) uit. Op het maaiveld staat een referentiestation waaraan de positie van de drie GPS antennes getoetst wordt. Hiervoor is GNSS gebruikt, wat een combinatie van GPS en GLONASS(Russisch positioneringssysteem) satellieten gebruikt. De positie van de antennes wordt gecontroleerd met een Total Station op de ACS. Op grondniveau staat een referentiestation, waaraan de positie van de ACS, en dus de nieuwe verdieping, getoetst wordt. De opzet van het systeem is te zien in Afbeelding 11. Het is op deze manier mogelijk om de ACS iedere verdieping opnieuw binnen 15 mm nauwkeurigheid te kunnen stellen, een topprestatie op deze hoogte.



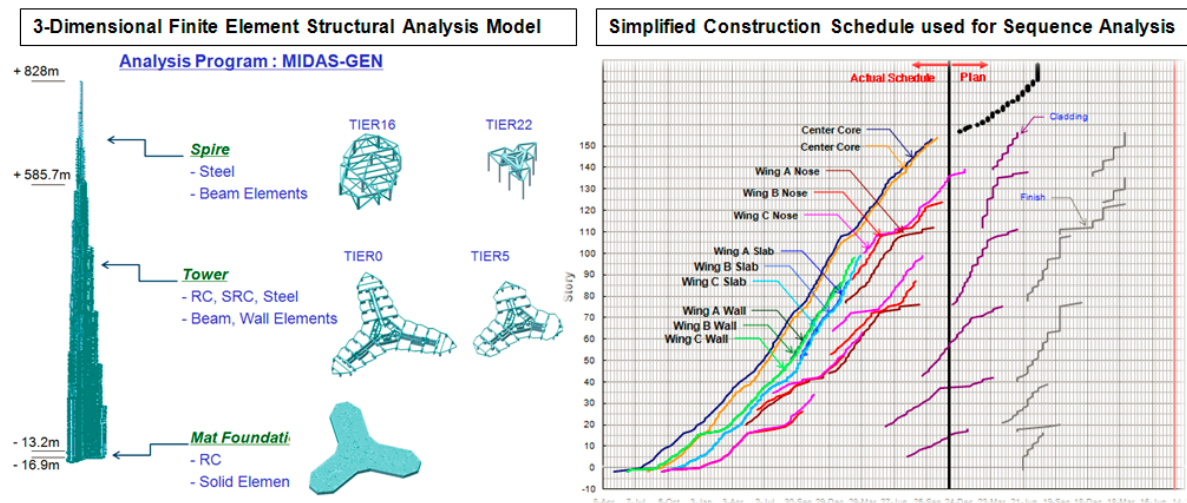
Afbeelding 11 - Opzet GPS sensoren en total station op de ACS [8]

Ongeveer iedere twintig verdiepingen zijn acht clinometers, hellingshoekmeters met een zeer hoge precisie, geplaatst. De sensoren zijn geplaatst op plekken waar weinig stoorfactoren zijn, zie Afbeelding 12. Deze sensoren bepalen de rotatie en de verplaatsing ten opzichte van de fundering. De data wordt via een bekabeld netwerk naar de computercentrale gestuurd. Naast het gebruik van de sensoren is ook nog gebruik gemaakt van een visuele check, met behulp van meetpunten in de vloeren.



Afbeelding 12 - Plaatsing van de Leica clinometers [8]

Alle data van de GPS sensoren en clinometers wordt op een centrale plaats verzameld. Er is speciale software ontwikkeld die de positie van het gebouw toetst tegen de positie die hij op dat moment zou moeten hebben. Windbelastingen, gemeten funderingszettingen, de data uit het computermodel en asymmetrische belastingen door bijvoorbeeld kranen worden hierbij meegenomen. Dit computermodel bestaat uit een 3D FEM analyse model waarin de echte materiaaleigenschappen zijn meegenomen. Met dit model zijn de verschillende bouwfasen doorlopen, zie Afbeelding 13. Voor iedere fase zijn de funderingszettingen, verplaatsingen, verkortingen van wanden en kolommen, kruip en vervormingen ten gevolge van dynamische belastingen meegenomen. Door de metingen uitgevoerd door de sensoren te toetsen aan dit model kan de theoretische positie van het gebouw nauwkeurig getoetst worden.



Afbeelding 13 - 3D FEM analyse model met bouwfasen [8]

## 7 Beheersen maatafwijkingen

Ten gevolge van de bouwvolgorde en belastingen zijn scheefstanden en verkortingen te verwachten. Voorafgaand aan de uitvoering is een model gemaakt waar alle scheefstanden en verkortingen mee zijn bepaald. Tijdens de bouw werd het gebouw constant gemonitord en daardoor was het goed mogelijk om de maatafwijkingen die optraden tijdens de uitvoering te bepalen en te corrigeren. Het verschil tussen de gemeten waarde en de waarde die uit het model volgt is immers de afwijking die tijdens de bouw is ontstaan.

Bij hoogbouw met een grootte van de Burj Khalifa is het beheersen van de maatafwijkingen die leiden tot scheefstand en verschil in hoogte cruciaal. Als er namelijk een structurele fout wordt gemaakt bij de uitvoering van iedere verdieping ontstaan grote verschillen bij de top. Gevolgen van te grote maatafwijking zijn een andere krachtswerking en andere bouwdelen die niet meer passen. De scheefstand kan zorgen voor een groter buigend moment in de constructie en extra verlengingen en verkortingen als gevolg daarvan waardoor het ook kan gebeuren dat bijvoorbeeld gevelementen aan een zijde allemaal te kort zijn. Ook als iedere verdieping net te hoog of te laag is past alles wat geprefabriceerd is niet goed.

De afwijking per verdieping moest beperkt blijven tot 15mm. Door iedere verdieping weer op het geometrische middelpunt van het gebouw te beginnen werd voorkomen dat de afwijking steeds verder toenam. Door om de 20 verdiepingen een nieuwe clinometer te installeren werden eventuele structurele fouten bij het uitlijnen weer gecorrigeerd en was het mogelijk eventuele afwijkingen te compenseren.

De overgang van de betonconstructie naar de staalconstructie is lastig omdat beide materialen een andere gebruikelijke maatafwijking hebben. Bij betonconstructies gaat het eerder om centimeters en bij staalconstructies gaat het om millimeters. Daarnaast is de staalconstructie geprefabriceerd waardoor aanpassingen aan het element om het goed aan te laten sluiten op de onderliggende constructie lastig zijn, in tegenstelling tot betonconstructies waarbij men de bekisting nog wat kan stellen. Dit in combinatie met het feit dat overgang op grote hoogte was waarbij kleine structurele fouten grote afwijkingen kunnen betekenen maakte de overgang een erg kritiek punt. Enerzijds is de afwijking beperkt door te zorgen dat de betonconstructie een erg kleine afwijking had zoals eerder beschreven. Anderzijds zal de staalconstructie onderaan gesteld zijn waarbij, bijvoorbeeld door het toepassen van tussenplaten, de afwijking overbrugd zal zijn. Er is echter geen goede informatie te vinden hoe dit bij de Burj Khalifa is gedaan en contractuele afspraken tussen opdrachtgever en engineers maken het lastig om hier inzicht in te krijgen.

Hetzelfde geldt voor de maatafwijkingen in de staalconstructie. De uitvoering op grote hoogte zal ertoe hebben geleid dat er enige speling in de verbindingen zat om snelle montage mogelijk te maken. De afwijkingen zijn hier met hetzelfde systeem gemonitord en zullen, waarschijnlijk door plaatsen in de constructie te creëren waar gesteld kan worden, gecorrigeerd zijn. Bijvoorbeeld door de toepassing van platen en stelbouten. Daarnaast is het beperken van de structurele afwijking van de staalconstructie ook wat minder belangrijk. Het eigen gewicht is relatief laag waardoor scheefstand niet tot grote toename van de momenten in de constructie zal leiden en daarnaast is de afwijking die ontstaat door een structurele fout relatief kleiner dan onderaan. Ook zijn er bovenaan minder elementen die aan de constructie bevestigd worden en is het niet meer in zicht, waardoor de voornaamste reden voor het beheersen van de maatafwijking ervoor zorgen dat de staalconstructie nog wel in elkaar gezet kan worden is.



## 8 Conclusie

Met de bouw van de Burj Khalifa zijn vele records verbroken. Het bouwwerk moest ook een platform bieden om nieuwe ontwikkelingen in de bouwwereld te stimuleren. In deze casestudy, verbonden aan de buitenlandse studiereis van studievereniging KOers is onderzocht hoe de uitvoerder is omgegaan met maatafwijkingen en toleranties. Dit begint bij het ontwerp, en wordt verder uitgewerkt tijdens de bouw. Er is uitgezocht wat er is gedaan om te kunnen garanderen dat het gebouw aan de gestelde prestatie-eisen voldoet. Het monitoren van de toren tijdens de bouw, het modelleren van zijn gedrag, verbindingen van de gevel waarmee maatafwijkingen opgevangen kunnen worden. Het zijn oplossingen die bekend zijn. Echter, de extreme hoogte van de toren eist innovaties op al deze vlakken.

Met name de koppeling van het real-time monitoringssysteem aan de meetinstrumenten voor het positioneren van de ACS en de stalen constructie elementen is cruciaal voor een gebouw van deze hoogte. Het bevestigingssysteem van de gevelementen zorgt voor behoud van de prestaties, ook onder extreme omstandigheden. Deze innovaties banen een weg voor andere hoogbouw van eenzelfde kaliber als de Burj Khalifa.



Afbeelding 14 - Burj Khalifa [4]



## Lijst van afbeeldingen

Afbeelding 1 - Overgang beton-staal Burj Khalifa [1] .....	6
Afbeelding 2 - Plattegrond Burj Khalifa [2] .....	7
Afbeelding 3 - Stabiliteitssysteem Burj Khalifa [3] .....	7
Afbeelding 4 - Fundering Burj Khalifa [4] .....	8
Afbeelding 5 - Plaatsen gevelementen Burj Khalifa met kleine mobiele kraan [5] .....	9
Afbeelding 6 - Plaatsen gevelsysteem Burj Khalifa [6] .....	10
Afbeelding 7 - Halfen HCW curtain wall systeem toegepast bij Burj Khalifa [7] .....	10
Afbeelding 8 - Verschillende fases van modelleren [2] .....	11
Afbeelding 9 - Voorspelde en gemeten funderingszettingen [8] .....	12
Afbeelding 10 - Belastingverdeling beton vs wapening [2] .....	12
Afbeelding 11 - Opzet GPS sensoren en total station op de ACS [8] .....	13
Afbeelding 12 - Plaatsing van de Leica clinometers [8] .....	14
Afbeelding 13 - 3D FEM analyse model met bouwfasen [8] .....	14
Afbeelding 14 - Burj Khalifa [1] .....	16
Cover foto: [1]	

## Bronnen

- [1] „Anotherpartofme.com | Burj Khalifa Dubai skyscraper from a helicopter,” [Online]. Available: [http://i1.wp.com/anotherpartofme.com/wp-content/uploads/2013/03/burj\\_dubai\\_plane.jpg](http://i1.wp.com/anotherpartofme.com/wp-content/uploads/2013/03/burj_dubai_plane.jpg). [Geopend 6 2015].
- [2] D. Kwon, T. Kijewski-Correa en A. Kareem, „SmartSync: an integrated real-time monitoring and system identification platform for tall buildings.,” in *5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, 2010.
- [3] G. Hope, „Top of the World,” *Construction Week*, nr. Week July 7-13, pp. 22-29, 2012.
- [4] W. Baker, D. Korista en L. Novak, „Burj Dubai: Engineering the worlds talles building,” *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, nr. 16.4, pp. 361-375, 2007.
- [5] A. Abdelrazaq, „Validating the Structural Behavior and Response of Burj Khalifa,” Samsung C&T, 2012.
- [6] I. Solt, „File:Burj Dubai Under Construction on 26 March 2008 Pict 2.jpg,” [Online]. Available: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Burj\\_Dubai\\_Under\\_Construction\\_on\\_26\\_March\\_2008\\_Pict\\_2.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Burj_Dubai_Under_Construction_on_26_March_2008_Pict_2.jpg). [Geopend 5 2015].
- [7] „Halfen HCW Curtain Wall Systeem,” [Online]. Available: <http://www.halfen.com/nl/778/producten/verankeringsystemen/hcw-curtain-wall-systeem/introductie/>. [Geopend 5 2015].
- [8] „Dubai’s Burj Khalifa – Touch The Sky!,” [Online]. Available: <http://shiningstarauto.net/blog/dubais-burj-khalifa-touch-the-sky/>. [Geopend 5 2015].
- [9] „DUBAI: Burj Dubai (700m/850m) Part 21,” [Online]. Available: <http://enr.construction.com/images2/2006/11/061106-30A.jpg>. [Geopend 5 2015].
- [10] [Online]. Available: [http://www.eikongraphia.com/images/Burj%20Dubai%20Copyright%20Imre%20Solt%202007%20\(6\)%20S.jpg](http://www.eikongraphia.com/images/Burj%20Dubai%20Copyright%20Imre%20Solt%202007%20(6)%20S.jpg). [Geopend 5 2015].
- [11] „DUBAI | Burj Khalifah (Burj Dubai) | 828 M / 2,716.5 FT - Pinnacle | 162 FLOORS,” [Online]. Available: <http://i4.tinypic.com/4hrpan5.jpg>. [Geopend 5 2015].
- [12] „Burj Khalifa,” [Online]. Available: <http://www.halfen.com/nl/652/referenties/?search%5Bproduct-category%5D=1&reference=6>. [Geopend 5 2015].
- [13] „Burj Dubai Skyscraper Page 7,” [Online]. Available: <http://www.burjdubaiskyscraper.com/2007/burjdubai-foundation-slab-piling.jpg>. [Geopend 5 2015].