

# Geprefabriceerde Hoogbouw

ir. D.C van Keulen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft*

<sup>2</sup> *Ingenieursstudio DCK, Pesetastraat 48, 2991 XT Barendrecht, post@studio-DCK.nl*

## 1. Inleiding

Het geprefabriceerde hoogbouw concept sluit aan bij de principes van het nieuwe bouwen. De trend is immers dat bouwen steeds vaker bestaat uit het monteren van vooraf vervaardigde producten. Diverse hoogbouw projecten in prefab beton zijn reeds met een goed georganiseerd bouwproces in een relatief korte bouwtijd gerealiseerd. Ook zaken als de risicospreiding voor de hoofdaannemer, de betere kwaliteit van industrieel vervaardigde producten en de gunstige bouwplaatsomstandigheden sluiten aan bij de principes van het nieuwe bouwen. Constructief ontwerpers van hoge gebouwen kiezen veelal voor monoliete betonconstructies. De reden is dat de buigstijfheid van een geprefabriceerde betonconstructie lager ligt dan die van de monoliete variant. De keuze van ontwerpers voor monoliete betonconstructies bij hoogbouw is daarmee een verdedigbare. Hoewel de trend van het nieuwe bouwen conflicteert met de keuze van constructief ontwerpers is het de moeite waard te onderzoeken hoe de prefab skeletbouwmethode voor een hoogbouwopgave presteert. In deze bijdrage komt een gerealiseerde hoogbouw aan de orde. Daarnaast wordt aandacht besteed aan het ontwerp en het gedrag van geprefabriceerde betonconstructies. Vervolgens wordt het gedrag van monoliete en geprefabriceerde wanden met open voegen berekend en onderling vergeleken.

## 2. Gerealiseerde geprefabriceerde hoogbouw

In 's-Gravenhage staat het hoogste gebouw – 131 meter – dat volledig is uitgevoerd met de prefab skeletbouw methode. Het is een woontoren en draagt de naam “Het Strijkijzer”. Een aantal van de bij de realisatie betrokken partijen zijn architect AAArchitecten, hoofdconstructeur Corsmit Raadgevend Ingenieursbureau, prefab constructeur overall Aveco de Bondt en prefab constructeur vloeren Hurks Delphi Engineering. De hoofdaannemer was Boele & van Eesteren.

### A. Realisatie

De aannemer heeft de opdrachtgever twee alternatieve bouwmethoden voorgelegd. Het zijn de in het werk gestorte methode en de prefab skeletbouwmethode. De prefab skeletbouwmethode bleek niet de meest economische, maar leverde een tijdsbesparing op van 1 jaar bouwen. In dit laatste wilde de opdrachtgever investeren. Hij kon daarmee enerzijds eerder rendementen uit verkoop en verhuur genereren en anderzijds besparen op de rentekosten. De torenkraan had voldoende capaciteit voor het

transporteren van prefab beton elementen. De maximale hijscapaciteit is vastgesteld op 20 ton. Deze hoge capaciteit was vooral te danken aan de korte vlucht van de prefab elementen. De weersinvloeden bij het hijsen van de betonelementen hebben niet tot grote problemen geleid. Het was slechts op één dag niet mogelijk de kraan te gebruiken. Dit kwam door het jaargetijde waarin gewerkt werd en door de beschutting van de toren zelf.

### B. Constructieve analyse

De constructieve opbouw van de woontoren bestaat uit een in het werk gestort deel ter hoogte van de eerste 4 bouwlagen. Daarop zijn prefab wandelementen gestapeld. De wanden zijn 250 mm dik en hebben een betonkwaliteit C53/65. De wanden zijn met vertandingen onderling gekoppeld. De samengestelde wanden vormen een gevelbuis constructiesysteem. De vloeren zijn massief uitgevoerd met daarin opgenomen de meeste installatie voorzieningen. De vloeren liggen met een ingestort stalen “handje” op de dragende wanden. Tijdens de voorbereiding heeft men onderzocht wat het verschil in stijfheid is tussen de monoliet gestorte uitvoering en de geprefabriceerde uitvoering. Volgens [1] “bedraagt de uiteindelijke afname van de horizontale stijfheid 5 á 10%. De horizontale vervormingen liggen daarmee nog steeds binnen de daarvoor gehanteerde uitgangspunten en normen.” Voor meer informatie over dit project wordt verwezen naar diverse publicaties, onder ander in het vakblad Cement [1].

## 3. Ontwerpen van geprefabriceerde betonconstructies

### A. Hoogbouw ontwerpen

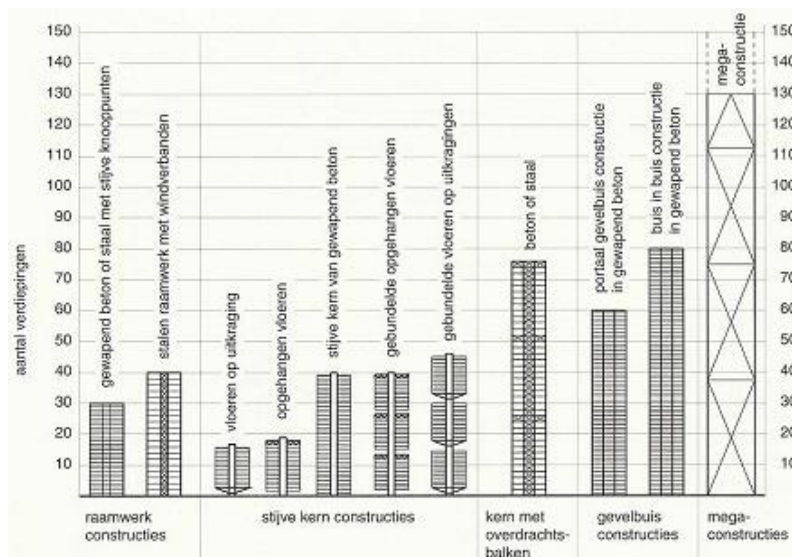
Het ontwerpen van hoogbouw is geen reguliere opgave. Er spelen specifieke hoogbouw onderwerpen en het ontwerpproces verschilt ook enigszins van laagbouw. Een aantal van deze zaken zijn beschreven in een artikel naar aanleiding van een interview met architect Diederik Dam. [2]. Het laat zich als volgt samenvatten. Elke bouwopgave heeft een contextuele relatie, met stedenbouwkundige en architectonische aspecten. Dat geldt ook voor hoogbouw. De inpassing in de bebouwde omgeving moet met zorg plaatsvinden. Ook moeten de kenmerkende begrippen “hoog” en “verticaal” in je architectuur benadrukt worden. Hoogbouw is bij uitstek een opgave waarbij veel bij de bouw betrokken disciplines betrokken zijn. De keuze van een constructiesysteem wordt dan ook niet alleen bepaald door de constructie. Architectuur, bouwkunde, constructie, installatie, kosten deskundig-

heid en uitvoering spelen alle een belangrijke rol. Alleen een goede integratie van deze disciplines levert in het ontwerpproces een bevredigend resultaat op. De kosten per m<sup>2</sup> nemen toe naarmate het ontwerp hoger wordt. Compact ontwerpen is dan de opgave en op die compacte plattegrond gebeurt heel veel op het gebied van techniek en logistiek. "Het is dus belangrijk om geïntegreerd te ontwerpen, samen met andere adviseurs en de opdrachtgever. Als je bijvoorbeeld in een hoogbouwontwerp de liftcapaciteit wijzigt, dan wijzigt het complete ontwerp, want er is nergens een verloren hoekje waar je dat alsnog in kunt stoppen. De plattegrond bij hoogbouw is meestal alzijdig. Lift en trappen bevinden zich centraal in het gebouw. De woningen en kantoren worden daaromheen verdeeld, met een maximaal uitzicht en aanzicht. Het is de kunst om een vaste structuur van woningscheidende

wanden te maken waartussen een aantrekkelijk oppervlakte ontstaat.

### B. Geprefabriceerd constructief ontwerpen

Door de constructief ontwerper wordt een constructief ontwerp voorgesteld. In het ontwerp komen verschillende constructieve onderdelen aan bod. Er moet een stabiliteitssysteem worden gekozen. Ook worden keuzes gemaakt ten aanzien van type vloerconstructies en verbindingen. Indien een geprefabriceerde betonconstructie wordt overwogen dient daarvoor een specifiek geprefabriceerd ontwerp gemaakt te worden. De gedachte dat een monoliete betonconstructie opgedeeld kan worden in prefab elementen is te eenvoudig en levert geen goede hoogbouw constructie op.



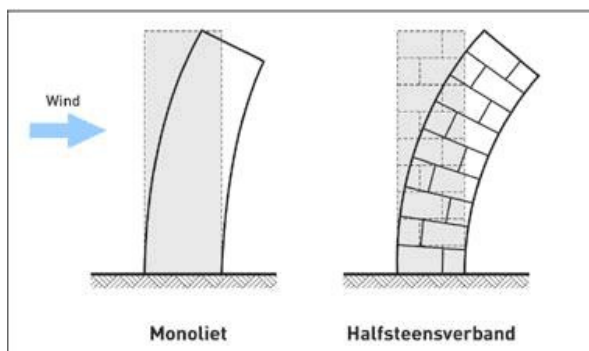
Figuur 1: Overzicht constructiesystemen. Bron: opgenomen in diverse publicaties.

### C. Stabiliteitssystemen

Inmiddels zijn gebouwtypologieën voor hoogbouw ontwikkeld die worden voorzien van beproefde constructiesystemen. De constructieve maatregelen om vervormingen te beperken en de krachten op te nemen zijn zo kenmerkend voor deze constructies dat deze criteria gebruikt worden voor een indeling in constructiesystemen. Een overzicht is gegeven in figuur 1. Wanneer in dit overzicht sprake is van wanden of kernen is daar meestal ook een geprefabriceerde oplossing voor mogelijk.

### D. Elementconfiguratie

In het geprefabriceerde ontwerp moet de constructieve werking van het stabiliteitssysteem worden vastgelegd. Het opdelen van wanden en kernen gebeurt niet willekeurig. Het wordt zodanig samengesteld dat de totale constructie zo goed mogelijk presteert. In figuur 2 wordt deze gedachte verduidelijkt. In figuur 4 en 5 zijn een aantal voorbeelden van elementconfiguraties voor wanden getekend. Naast deze bestaan, afhankelijk van het ontwerp nog vele andere mogelijkheden voor wanden en kernen.



Figuur 2: voorbeeld geprefabriceerde elementconfiguratie; bron: bouwwereld nr. 20

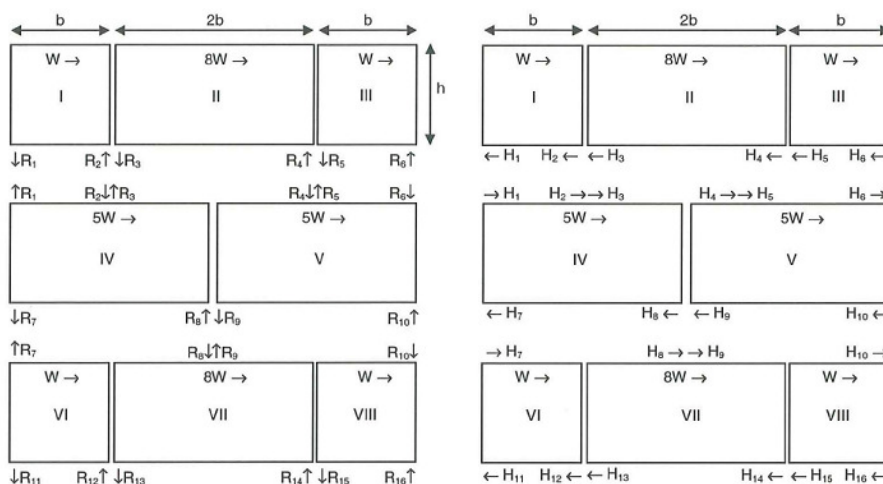
### E. Verbindingen

De betonelementen worden aan elkaar gekoppeld zodat uiteindelijk één samenhangend geheel ontstaat. Voor de hoofddragconstructie zijn de verbindingen op te delen in drie categorieën. Het zijn de wand-op-wand verbindingen, de vloer-aan-wand verbindingen en de wand-aan-wand verbindingen. Wand-op-wand verbindingen worden doorgaans uitgevoerd met stekken in gains in combinatie met voegen van krimparme cementgebonden mortels. Deze verbinding heeft diverse functies. "Een voegmortel bezit hoogwaardige eigenschappen om tezamen met hoogwaardige aansluitmaterialen grote

druk- en afschuifkrachten over te brengen en is tevens in staat maatafwijkingen te compenseren" [3]. Daarnaast is stekwapening in staat eventuele trekkrachten op te nemen indien in de verbinding trekspanningen ontstaan. Vanwege de samenwerking tussen verschillende wandelenten zijn *wand-aan-wand* verbindingen nodig. Er zijn verschillende soorten verbindingen voor deze toepassing in gebruik. Bekende verbindingen zijn open voegen, lasplaat verbindingen, lusverbindingen in natte knopen en vertandingen. Van lasplaten is bekend dat het gedrag slapper is dan bijvoorbeeld van natte knopen of vertandingen. Bij lasplaten is de brandwerendheid ook een belangrijk nadeel. Vanwege het sterkte en vervormingsgedrag zijn vertandingen in combinatie met in verband geplaatste wanden met verticale open voegen het meest effectief. Natte verbindingen presteren ook zeer goed maar zijn relatief bewerkelijk en dus kostbaar.

#### 4. Gedrag van geprefabriceerde betonconstructies

Een geprefabriceerde betonconstructie gedraagt zich anders dan de monoliete variant. Bij de monoliete betonconstructie werkt het stabiliteitssysteem als één geheel. De geprefabriceerde uitvoering is veel meer te beschouwen als een systeem van in verband geplaatste elementen die samengesteld het stabiliteitssysteem vormen. De krachtsverdeling wordt bepaald door de wijze waarop elementen elkaar onderling belasten. De totale vervorming bestaat uit een sommatie van de vervormingen van de individuele elementen.



Figuur 3: blokken model volgens Snelders [5]

2. *Raamwerk analogie*; een computerberekening waarbij het element met sparingen wordt opgevat als raamwerk. De stijfheden van de kolommen (penanten) en liggers (regels) verschillen en worden afzonderlijk opgegeven in een raamwerkprogramma.
3. *Schijfwerking met een gedetailleerd computermodel*; het element wordt beschouwd als schijf met daarin een aantal openingen. Middels een EEM berekening wordt de krachtswerking in het gevelement bepaald.
4. *Schijfwerking met een equivalent computermodel*; deze methode is afgeleid van de bovenstaande

#### A. Berekening krachtsverdeling

Verschillende onderzoekers hebben zich gebogen over de vraag hoe de krachtsverdeling van een geprefabriceerde constructie eenvoudig bepaald zou kunnen worden. Voor een aantal geselecteerde constructies heeft dit eenvoudige rekenmethoden opgeleverd. Voor de anderen ontbreken deze. Over de exacte bepaling van de krachtswerking is men het eens. Alleen met een EEM berekening kan het eenduidig worden vastgesteld. Het nadeel is wel dat het uitvoeren van deze berekeningen arbeidsintensief en dus kostbaar is.

Van Dorst [4] heeft een onderzoek uitgevoerd naar de schijfwerking van geprefabriceerde dragende gevelementen waarbij de verticale voegen verspringend worden aangebracht. De onderzoeker heeft gezocht naar eenvoudige rekenmethoden voor het bepalen van de krachtswerking. In dit onderzoek komen een aantal methoden ter sprake:

1. *Blokkenmethode*; dit is een handberekeningsmethode waarbij de schijven in de gevel als niet vervormbare blokken worden beschouwd. De blokken zijn alleen met stekken in de horizontale voegen met elkaar verbonden. De krachten tussen de elementen worden bepaald uit de drie beschikbare evenwichtsvergelijkingen die per blok worden opgesteld. In het onderzoek van Snelders [5] komen gelijksoortige modellen aan de orde. Een daarvan is opgenomen in figuur 3.

methode. Het is bedoeld als sterk vereenvoudigde methode van een uitgebreide EEM berekening. De vervormingseigenschappen worden zo goed mogelijk benaderd in één element. Na de berekening van de krachtswerking in en tussen de equivalente schijven, wordt met interpolatie de krachtsverdeling in het oorspronkelijke element berekend.

Onderzoeker Falger [6] heeft een literatuuronderzoek uitgevoerd. In deze studie zijn de bovenstaande modellen geanalyseerd. De literatuurstudie resulteert voor de krachtswerking in een aantal conclusies:

1. De krachtswerking tussen de elementen in een constructie met open verticale voegen kan relatief eenvoudig worden bepaald met de blokkenmethode.
2. De schematisering van de gevel met de raamwerkmethode geeft goede resultaten voor het bepalen van krachten en momenten in kolommen en regels, in ieder geval voor de standaard constructies. De methode is voor de ingenieurspraktijk omslachtig.
3. Berekeningen met een EEM-programma geven goede resultaten ten aanzien van de krachtsverdeling, ook voor constructies met open voegen. De invoer blijft tijdrovend en weinig inzichtelijk. De schematisering van de voegen vraagt de nodige aandacht en heeft grote invloed op de resultaten.
4. De aangepaste schematisering met equivalente schijven blijkt ook niet nauwkeurig. Een belangrijk probleem is dat het bijna onmogelijk is om vanuit de resultaten voor de equivalente schijf krachten en momenten in afzonderlijke kolommen en regels te bepalen.

### B. Berekening vervormingsgedrag

Naast het bepalen van de krachtsverdeling moeten ook vervormingen worden bepaald. De literatuurstudie van Falger [6] komt ook met conclusies die betrekking hebben op het vervormingsgedrag van stabiliteitssystemen:

1. Een eenvoudige manier voor het bepalen van de vervormingen bestaat (nog) niet.
2. Het blokkenmodel geeft op een eenvoudige manier inzicht in de krachtswerking maar geeft niet aan hoe de vervormingen kunnen worden bepaald.

3. Het schematiseren van de gevelementen tot raamwerken is een goede maar zeer bewerkelijke manier om de vervormingen van de gevel te bepalen.
4. Een EEM berekening is een vrij omslachtige berekeningsmethode. De modellering van de voegen verdient speciale aandacht. Een EEM berekening kan de vervormingen echter wel nauwkeurig voorspellen.

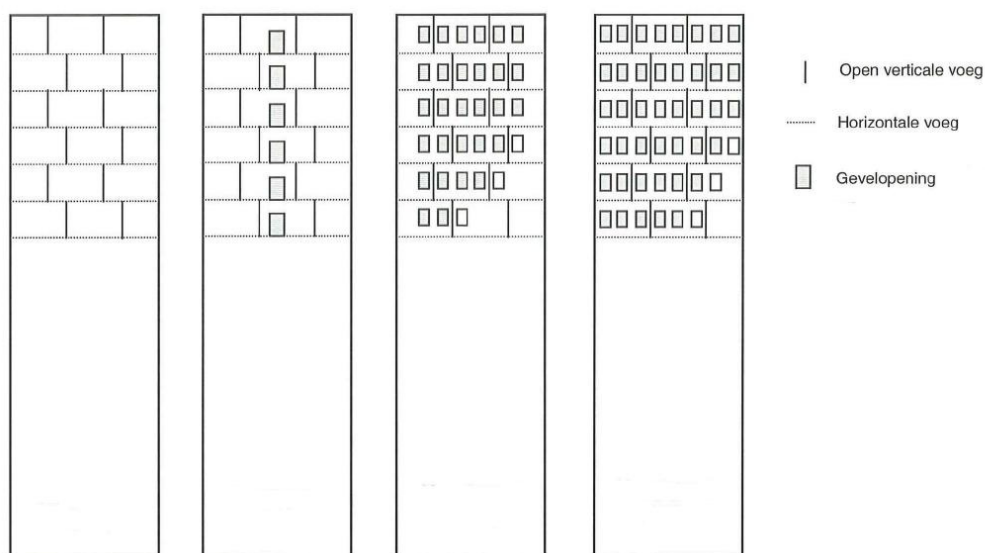
### 5. Geprefabriceerd en monoliet vergeleken (1)

#### A. Vergelijkend onderzoek

Om inzicht te krijgen in het gedrag van geprefabriceerde betonconstructies ten opzichte van de monoliete variant hebben verschillende onderzoekers vergelijkende berekeningen gemaakt. In het navolgende worden de vervormingen van een wand bepaald en vergeleken. De reden dat vervormingen worden vergeleken is dat bij hoogbouw de stijfheid en dus de vervormingen bepalend zijn.

#### B. Onderzoeksmodel van Falger

In het onderzoek van Falger [7] zijn voornamelijk verticale voegen onderzocht. Bekeken is hoe verschillende verbindingen zich gedragen in een samengestelde wandconstructie. De wandelementen werden in een metselwerkverband gestapeld zoals getekend in figuur 4. Voor een viertal constructietypen is onderzocht welke invloed open verticale voegen hebben op de respons van de geprefabriceerde betonnen stabiliteitsconstructies. De beschouwde constructietypen variëren van een volledig gesloten stabiliteitswand tot een dragende gevel met gevelopeningen.



Figuur 4: Constructietype A t/m D van Falger [7]

De wandconstructie is door Falger overgenomen uit het referentieproject "De Prinsenhof" in Den Haag. De wanden zijn 14,4x86,4 meter (bxh) en hebben een slankheid van 6:1. Ook de gebruikte belastingen zijn gerelateerd aan dit gebouw. Voor de stijfheden van de voegen zijn aannames gedaan op basis van realistische verbindingen. Voor de betonkwaliteit heeft men C53/65 aangehouden met een elasticiteitsmodulus van  $E_b = 38.500 \text{ N/mm}^2$ . De

wandconstructies zijn berekend met het EEM-programma ATENA. De in dit onderzoek gehanteerde rekenmethode is een Geometrisch (1<sup>e</sup> orde) en Fysisch Lineaire berekening.

#### C. Onderzoekresultaten

Uit dit onderzoek blijkt dat bij geprefabriceerde constructies met open voegen de momenten, de dwarskrachten en de spanningen in de prefab

elementen lokaal tot 45% groter kunnen zijn ten opzicht van een monoliete constructie. Dat de krachtsverdeling lokaal in de betonconstructie tot grotere waarden leidt is normaal gesproken oplosbaar. Soms kan eenvoudig in een bepaald element de betonkwaliteit worden verhoogd. Ook kan waar nodig lokaal extra wapening worden toegepast.

metselwerkverband opgebouwd is, zal altijd een lagere overall wandstijfheid hebben. De stijfheidsafname blijkt, onafhankelijk van het toegepaste constructietype, maximaal 8% te zijn. Verder is gebleken dat lage afschuifstijfheden van voegen een groot effect op de toename van de vervormingen hebben. Is de afschuifstijfheid groter, dan blijkt de vervormingstoename minder invloed te hebben. Het onderzoek geeft aan dat een hoogbouwproject met prefab elementen in metselwerkverband het gedrag van een monoliet gestorte constructie binnen een aanvaardbare bandbreedte benadert.

Vervorming Constructie type	Monoliet [mm]	Open voegen [mm]	Open voegen [%]
A	51,5	54,2	105,2
B	63,4	68,5	108,0
C	63,7	67,6	106,1
D	84,4	89,5	106,0

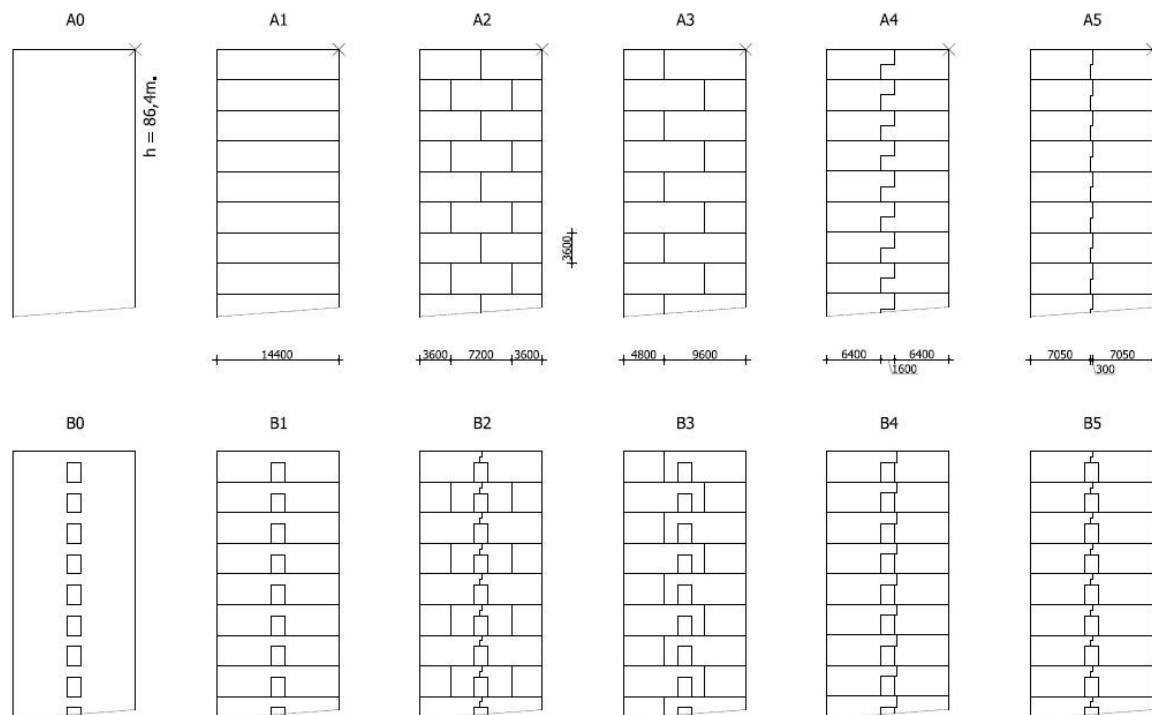
Tabel 1 Vervormingen [7]

In stabiliteitsconstructies voor hoogbouw zijn de vervormingen aan de top van een gebouw bepalend. In het onderzoek is onderzocht hoe de vervormingen ( $U_{x,top}$ ) van de geprefabriceerde wandconstructies zijn in vergelijking met dezelfde monoliete betonconstructie. De waarden hiervan zijn opgenomen in tabel 1. De volgende hoofdconclusies werden door de onderzoeker getrokken. Een stabiliteitswand die met open voegen in

## 6. Geprefabriceerd en monoliet vergeleken (2)

### A. Open verticale voegen en monoliet vergeleken

In figuur 5 zijn wanden met open verticale voegen verder gevarieerd door de auteur van dit artikel. Door de stijfheid van de horizontale voegen monoliet te modelleren is het stijfheidsverlies ten gevolge van alleen de open verticale voegen onderzocht. Daarnaast is onderzocht hoe groot de invloed van het 2<sup>e</sup> orde effect is op de vervormingen van de wandconstructies. Voor dit onderzoek zijn de gegevens van het referentieproject van Falger [7] overgenomen.



Figuur 5 Elementconfiguraties met open voegen

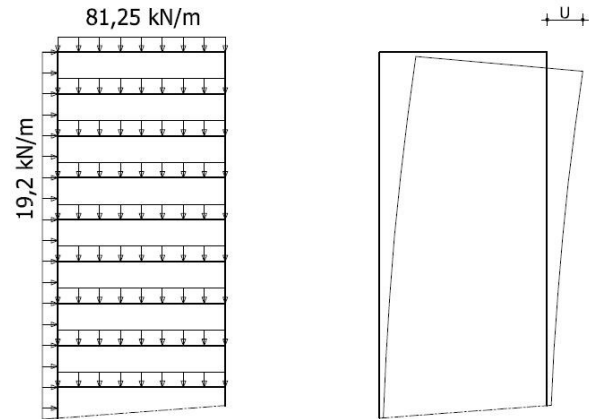
### B. Onderzoeksmodel

De berekeningen zijn uitgevoerd met het EEM programma AxisVM. Voor zowel de horizontale als de verticale voegen zijn interface elementen gebruikt. De interface elementen van de verticale voegen hebben een stijfheid 0, terwijl voor de horizontale voegen een gekozen stijfheid is toegepast. In de EEM berekening is voor sterkteklasse C53/65 met een E-modulus van  $38.000 \text{ N/mm}^2$  gekozen. Bij de keuze van de

belasting is ervan uitgegaan dat in de wanden geen trekspanningen optreden. Dit uitgangspunt wordt ook in de praktijk veel toegepast. De belastingen zijn per verdieping aangebracht zoals in figuur 6 aangegeven.

### C. Variaties met open verticale voegen

Wand A0 in figuur 5 is een monoliete constructie. Wand A1 heeft een horizontale voeg met een equivalente stijfheid van de monoliete variant A0. De vervormingen van wanden A0 en A1 zijn om die reden gelijk. Voor wanden A2 t/m A5 hebben de horizontale voegen dezelfde stijfheid. De verticale voegen zijn open. Op deze wijze is alleen de invloed van de verticale open voeg gevarieerd. Dezelfde principes zijn ook toegepast voor de wanden van de B-serie. Van deze wandconstructies zijn zowel 1<sup>e</sup> orde (GL) als 2<sup>e</sup> orde (GNL) berekeningen gemaakt. In de berekeningen gedraagt het materiaal zich lineair elastisch. De resultaten zijn opgenomen in tabel 2/3.



Figuur 6 Belastingen en vervormingen

Vervorming Wandtype	1 <sup>e</sup> orde (GL) [mm]	1 <sup>e</sup> orde (GL) [%]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [mm]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [%]	n/n-1*
A0	50,93	100,0	51,46	100,0	1,010
A1	50,94	100,0	51,47	100,0	1,010
A2	51,28	100,7	51,82	100,7	1,011
A3	51,59	101,3	52,13	101,3	1,010
A4	51,44	101,0	53,02	103,0	1,031
A5	52,86	103,8	53,43	103,8	1,011

\* vergrotingsfactor zonder vergroting t.g.v. het stijfheidsverlies horizontale voegen

Tabel 2 Vervormingen, t.g.v. open verticale voegen, A-serie

Vervorming Wandtype	1 <sup>e</sup> orde (GL) [mm]	1 <sup>e</sup> orde (GL) [%]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [mm]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [%]	n/n-1*
B0	52,31	100,0	52,87	100,0	1,011
B1	52,32	100,0	52,88	100,0	1,011
B2	54,48	104,1	54,62	103,3	1,003
B3	53,22	101,7	53,80	101,8	1,011
B4	53,02	101,4	53,59	101,4	1,011
B5	53,53	102,3	54,11	102,3	1,011

\* vergrotingsfactor zonder vergroting t.g.v. het stijfheidsverlies horizontale voegen

Tabel 3 Vervormingen, t.g.v. open verticale voegen, B-serie

Uit de berekeningen blijkt voor de A-serie dat de wandconstructies met open verticale voegen maximaal 3,8% meer vervormen dan de monoliete betonconstructie. Voor de wandtype van de B-serie is de maximale toename in vervorming berekend op 4,1%. Dit betekent dat enerzijds de geprefabriceerde oplossing minder stijfheid heeft maar dat anderzijds de vervormingstoename gering is. De vergrotingsfactor voor 2<sup>e</sup> orde effecten heeft voor beide series een grootte van 1,011. De conclusie die daaruit getrokken kan worden is dat stijfheidsverlies door open voegen in deze gevallen niet direct tot substantieel grotere 2<sup>e</sup> orde effecten leiden.

### D. Variaties met open verticale voegen en horizontale mortelvoegen

In de vorige paragraaf is onderzocht hoe groot de stijfheidsverliezen zijn ten gevolge van de open

verticale voegen. In deze paragraaf worden gelijksoortige berekeningen gemaakt. Nu worden de horizontale voegen gemodelleerd als horizontale mortelvoegen met verticale stekwapening. De verticale voegen blijven open voegen. De horizontale voegstijfheid is ondermeer afhankelijk van de stekwapening en bovenbelasting. Omdat de bovenbelasting per element, afhankelijk van de plaats in de wand varieert is de wand in 2 secties verdeeld. Voor de voegstijfheid is een gemiddelde waarde gebruikt. De horizontale voegen van de 11 verdiepingen bovenin hebben een afschuifstijfheid van  $3,0 \times 10^5$  kN/m/m. De afschuifstijfheid van de 12 verdiepingen onderin de wand bedraagt  $9,3 \times 10^5$  kN/m/m. Deze waarden representeren realistische voegen. De berekende vervormingen komen overeen met de waarden die in onderzoek [7] zijn gevonden.

Vervorming Wandtype	1 <sup>e</sup> orde (GL) [mm]	1 <sup>e</sup> orde (GL) [%]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [mm]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [%]	n/n-1
A0	50,93	100,0	51,46	100,0	1,010
A1	54,46	106,9	55,02	106,9	1,010
A2	54,54	107,1	55,12	107,1	1,012
A3	54,10	106,2	54,68	106,3	1,012
A4	53,77	105,6	54,34	105,6	1,012
A5	55,14	108,3	55,74	108,3	1,012

Tabel 4 Vervormingen, t.g.v. open verticale voegen en horizontale mortelvoegen, A-serie

Vervorming Wandtype	1 <sup>e</sup> orde (GL) [mm]	1 <sup>e</sup> orde (GL) [%]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [mm]	2 <sup>e</sup> orde (GNL) [%]	n/n-1
B0	52,31	100,0	52,87	100,0	1,011
B1	55,30	105,7	55,90	105,7	1,011
B2	57,63	110,2	57,78	109,3	1,003
B3	56,39	107,8	57,01	107,8	1,011
B4	54,81	104,8	55,41	104,8	1,011
B5	56,55	108,1	57,17	108,1	1,011

Tabel 5 Vervormingen, t.g.v. open verticale voegen en horizontale mortelvoegen, B-serie

In tabel 4 en 5 is gerapporteerd hoe groot de 1<sup>e</sup> orde en 2<sup>e</sup> orde vervormingen zijn. Uit de berekeningen blijkt voor de A-serie dat de wandconstructies maximaal 8,3% meer vervormen dan de monoliete betonconstructie. Voor de wandtype van de B-serie is de maximale toename in vervorming berekend op 10,2%. Bij deze waarden moet de kanttekening worden geplaatst dat de afschuifstijfheid van de horizontale voegen nauwkeuriger berekend zou kunnen worden. Er is hier namelijk gerekend met een conservatieve inschatting op basis van eerdere berekeningen. Ook hier kan de conclusie worden getrokken dat enerzijds de geprefabriceerde oplossing minder stijfheid heeft maar dat anderzijds de vervormingstoename gering is. De vergrotingsfactor voor 2<sup>e</sup> orde effecten heeft ook hier een maximale waarde van 1,012. De conclusie die daaruit getrokken kan worden is dat stijfheidsverlies door open voegen in deze gevallen niet direct tot grotere 2<sup>e</sup> orde effecten leiden.

#### E. Bijdrage van verschillende voegen

Zowel de verticale als de horizontale voegen leveren beide een bijdrage aan het stijfheidsverlies ten opzichte van de monoliete betonconstructie. In tabel 6 zijn deze waarden opgesplitst. Hieruit is af te lezen wat het aandeel stijfheidsverlies door de verticale open voegen en de horizontale mortelvoegen is. Uit deze opsomming kan de conclusie worden getrokken dat de toename van de vervormingen voor het grootste deel komt door de horizontale voegen. Het aandeel in het stijfheidsverlies door de open voegen is in deze wandconstructies minder.

## 6. Referenties

- Font Freide, J.J.M., Prumpeler, M.W.H.J., Woudenberg, I.A.R., Het Strijkijzer; nieuw landmark voor Den Haag, Cement 2006, nr. 1
- Wapperom, H., Architect Diederik Dam: Verticaliteit moet je benadrukken, Cement 2006, nr. 4
- Huijben, R.N.J., De voegmortel als maatwerk, Cement 2004, nr. 6
- Dorst, J.W. van, Schijfwerking in een dragende gevel, afstudeeronderzoek, Technische Universiteit Delft, juni 2000
- Snelders, J.G.A., Dragende betonnen gevelelementen met verticaal verspringende voegen, afstudeeronderzoek, Technische Universiteit Eindhoven, april 1994
- Falger, M.M.J., Geprefabriceerde betonnen stabiliteitsconstructies met open verticale voegen in metselwerkverband, literatuurstudie afstudeeronderzoek, Technische Universiteit Delft, oktober 2003
- Falger, M.M.J., Geprefabriceerde betonnen stabiliteitsconstructies met open verticale voegen in metselwerkverband, afstudeeronderzoek, Technische Universiteit Delft, oktober 20

Wand	1 <sup>e</sup> orde t.g.v. verticale voegen [%]	1 <sup>e</sup> orde t.g.v. horizontale voegen [%]	1 <sup>e</sup> orde toename totaal [%]
A1	0,0	6,9	106,9
A2	0,7	6,4	107,1
A3	1,3	4,9	106,2
A4	1,0	4,6	105,6
A5	3,8	4,5	108,3
B1	0,0	5,7	105,7
B2	4,1	6,1	110,2
B3	1,7	6,1	107,8
B4	1,4	3,4	104,8
B5	2,3	5,8	108,1

Tabel 6 Vervormingen, opsplitsing aandeel verticale open voegen en horizontale mortelvoegen