



Constructief ontwerp beschouwd in afstudeerstudie

# Drie varianten voor Onderwijscentrum

*Universiteit Utrecht is bezig met herontwikkeling van het Noordwestcluster. Een van de onderdelen van deze herontwikkeling is de bouw van het Onderwijscentrum, een gebouw met collegezalen, studiecentra en laboratorium-onderwijsruimten. In een afstudeerstudie voor de MSEng-opleiding van de Betonvereniging is het constructief ontwerp van het gebouw beschouwd, met nadruk op de stabiliteit. Uiteenlopende stabiliteitsvoorzieningen zijn ontworpen en rekenkundig onderzocht op geschiktheid voor de gegeven situatie. De varianten zijn beoordeeld op milieu, kosten en uitvoerbaarheid.*

Het Onderwijscentrum Noordwestcluster (OWC), naar een ontwerp van Ector Hoogstad Architecten, bestaat onder andere uit een nieuwe achtlagse onderwijstoren (de 'hoektoren') en een verbindend gebouwdeel (de 'loop') dat de hoektoren en de overige bouwdelen aan elkaar koppelt. Bij het ontwerp werden hoge eisen gesteld op het gebied van duurzaam bouwen. Ook bouwsnelheid en flexibiliteit waren belangrijke voorwaarden waaraan de constructie moest voldoen.

### Doelstelling

In het kader van een afstudeeropdracht is voor de toren een aantal alternatieve stabiliteitsvoorzieningen ontworpen en vergeleken. Doel hierbij was om vanuit verschillende criteria een optimaal constructief ontwerp te maken.

Vanuit de krachtswerking zit het optimaliseren in het bereiken van de gewenste sterkte, stijfheid en stabiliteit met zo min mogelijk materiaal. Op het gebied van duurzaamheid is geprobeerd de milieubelasting te beperken. Daarnaast is een kostenraming van de varianten gemaakt en onderling vergeleken. Uitvoeringstechnisch was het doel een minimale bouwtijd. De varianten zijn gewogen op basis van een multicriteria-analyse.

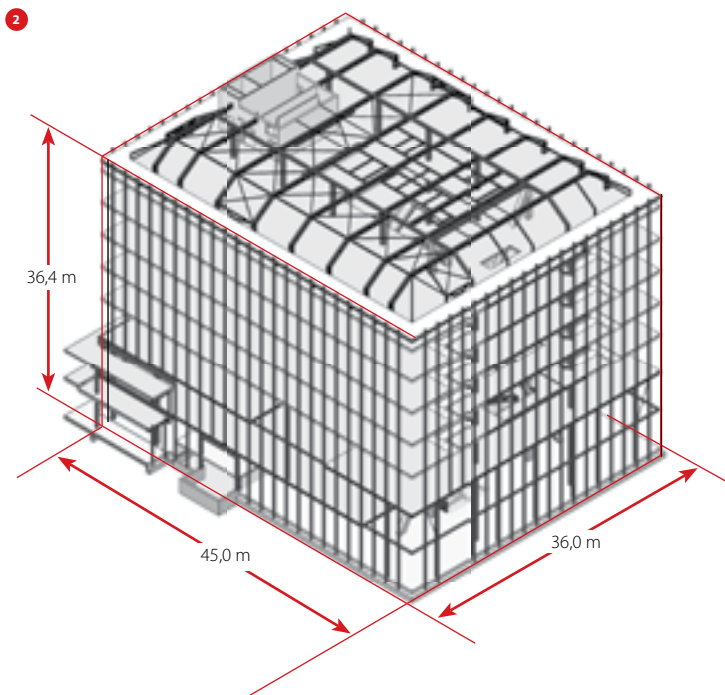
### Variantenstudie

Voor het ontwerp van de hoektoren zijn drie stabiliteitsprincipes onderzocht. Eén variant met een asymmetrisch gelegen

<sup>1)</sup> Youness Lyousoufi is met zijn studie 'Het Onderwijscentrum Noordwestcluster te Utrecht' afgestudeerd voor de MSEng-opleiding van de Betonvereniging. Hij werd daarbij begeleid door ir. E. Holla van Royal HaskoningDHV.

### ENCI Studieprijs 2014

Dit is het vijfde artikel in een serie met bijdragen van prijswinnaars van de ENCI Studieprijs 2014. De studie die in dit artikel wordt beschreven, ontving een eervolle vermelding in de categorie Professional Masteropleidingen. De jury over deze studie: "[...]De variant die op basis van een multicriteria-analyse is gekozen, is uitdagend en niet-alledaags. De constructieve vragen die dit oproept zijn goed geformuleerd en zorgvuldig opgelost. De student geeft blijk van een goed constructief inzicht. De jury was benieuwd geweest naar een verdieping op één van de onderdelen, maar heeft begrip voor het feit dat dit achterwege is gebleven gezien de omvang en veelzijdigheid van deze studie, met naast de gebruikelijk aandacht voor de krachtswerking, ook aandacht en oog voor duurzaamheid, bouwkosten en uitvoeringsaspecten. Bovendien zijn, naast handberekeningen, ook 3D EEM-analyses uitgevoerd en zijn de resultaten onderling op een globaal niveau vergeleken. Er is waardering voor het feit dat dit model ook is gebruikt om een variant die verder niet is uitgewerkt toch even nader te onderzoeken. Meer informatie op [www.cementonline.nl/encistudieprijs](http://www.cementonline.nl/encistudieprijs). Daar is ook het volledige afstudeerrapport beschikbaar.



- 3 Stabiliteit door excentrische gelegen kern; de windbelasting veroorzaakt door wringing een verplaatsing van de top
- 4 Stabiliteit gebouw door kern en stabiliteitsverband
- 5 Gevelbuis
- 6 Verplaatsing van de kern per verdieping, de verplaatsing door wringing heeft hierbij het grootste aandeel; puntlast  $F_n$  werkt op de bovenkant van laag  $n$
- 7 Dwarskracht in wanden naar aanleiding van wringing en buiging



kern, één met een kern en gebouwhoog vakwerk, en één met een gevelbuisconstructie. Als eerste is de stabiliteit van de drie varianten onderzocht.

Variant 1: kern

In variant 1 ontleent de toren zijn stabiliteit aan een excentrisch gelegen kern. De windbelasting veroorzaakt een wringend moment in deze kern (fig. 3). Samen met de buiging in de kern mag dit geen ontoelaatbare vervorming van het gebouw veroorzaken. Uit de handberekeningen volgde dat de totale horizontale verplaatsing kleiner is dan de toelaatbare verplaatsing. De wringing heeft het grootste aandeel in de verplaatsing van de top (fig. 6).

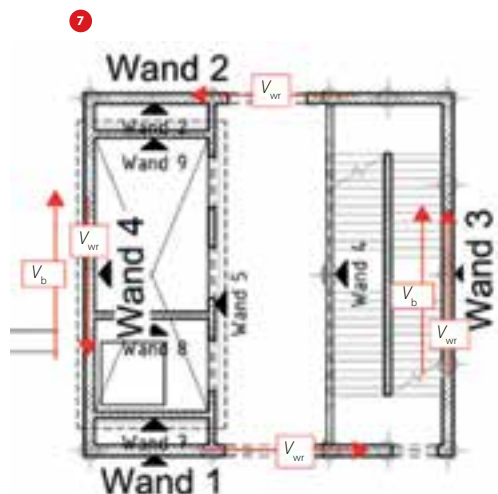
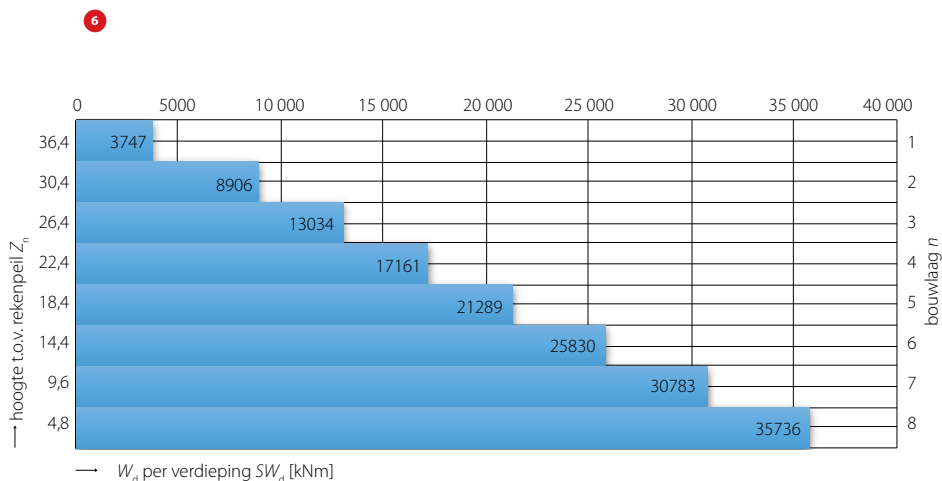
De wringing en dwarskracht moeten ook in de uiterste grenstoestand opneembaar zijn. Om dat na te gaan is de wringing ontbonden in een dwarskracht ten gevolge van wringing ( $V_{wr}$ ). Voor de wanden komt daar nog de dwarskracht bij ten gevolge van het buigend moment ( $V_b$ ) (fig. 7). De snedekrachten zijn voor deze variant opneembaar, echter moet de kern in hoge

betonsterkteklasse worden gestort en is er een hoog wapeningspercentage benodigd.

Variant 2: kern en stabiliteitsvakwerk

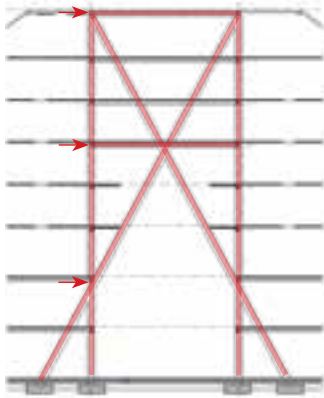
Voor variant 2 is ervoor gekozen om naast een kern over de volledige hoogte van het gebouw, een betonnen stabiliteitsvakwerk te plaatsen. Deze wordt geplaatst in het atrium van het gebouw (fig. 4). Het stabiliteitsvakwerk wordt op enkele verdiepingen constructief gekoppeld aan de vloeren. Hier wordt de windbelasting gelijkmatig over kern en vakwerk verdeeld. Op de overige verdiepingen moet de kern de windbelasting als wringing opnemen, omdat de vloer ter plaatse van het vakwerk niet wordt ondersteund (fig. 8).

Op de verdiepingen waar de vloeren zijn verbonden met het vakwerk, wordt de verplaatsing van de vloer ter plaatse van het vakwerk ( $\delta_w$ ) verhinderd. Het wringend moment in de kern wordt als koppel door de kern en het vakwerk opgenomen ( $M_w = F_w \cdot L_e$ ). Dit zorgt voor een extra belasting op het vakwerk ( $F_w$ ) en een lagere belasting op de kern (fig. 9).

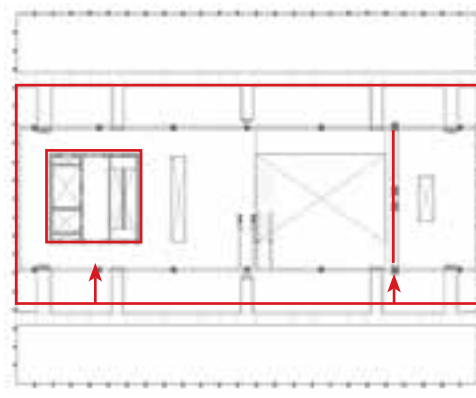




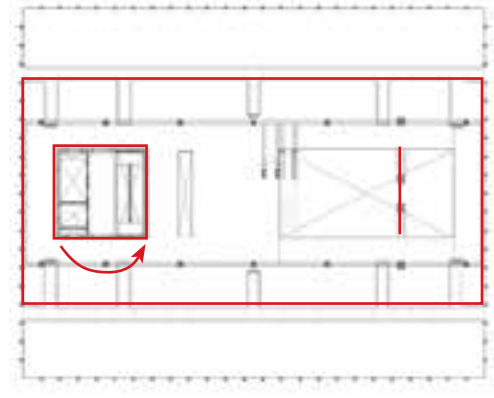
- 8 Gelijmatige verdeling en wringing in de kern door de windbelasting
- 9 Wringing moment in de kern zorgt voor extra belasting op het vakwerk en lagere belasting op de kern



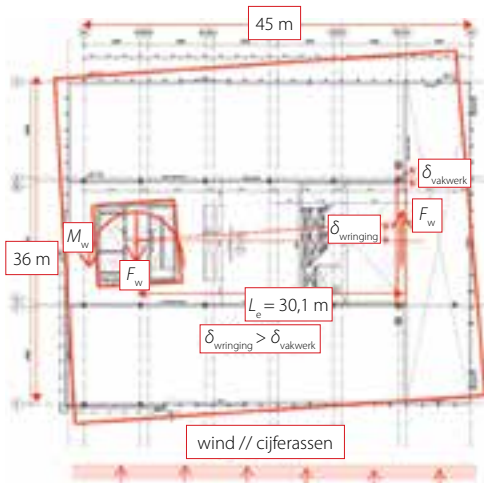
8a



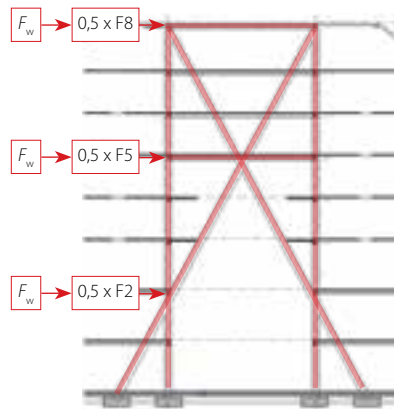
8b



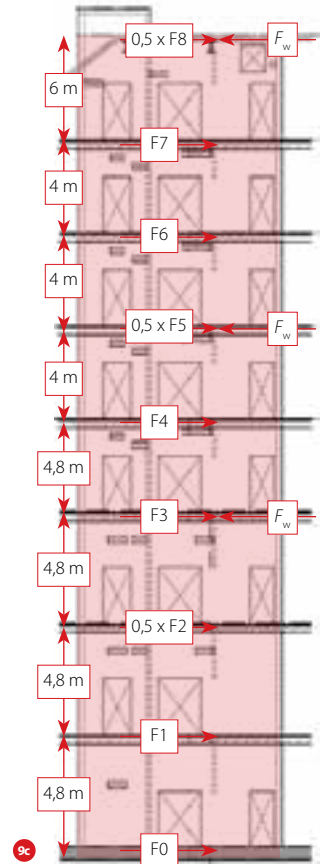
8c



9a



9b



9c

De constructie is getoetst met een 2D-balkenroostermodel. Hieruit volgde een belastingverdeling van 52% op de kern en 48% op het stabiliteitsverband. Bij deze verdeling voldoen de sterkte en stijfheid aan de gestelde eisen.

### Variante 3: gevelbuis

Bij de variante met een gevelbuis wordt de stabiliteit verzorgd door momentvaste knopen in de gevel. De gevelbuisconstructie werkt als stijve koker, waarbij de gevels loodrecht op de windrichting als flenzen werken en de gevels evenwijdig aan de windrichting als lijven. De horizontale verplaatsing van de constructie ontstaat door vervorming, het buigende moment en dwarskracht.

Er is een handberekening gemaakt van de horizontale verplaatsing gebaseerd op de Ac2-methode [1]. Deze methode berekent de vervorming naar aanleiding van het buigende moment en de dwarskracht. Hieruit volgt dat de vervorming ten gevolge van dwarskracht groot is en dat er zware kolommen en lateien

nodig zijn om aan de vervormingseisen te voldoen. Deze methode is gecontroleerd met 2D-raamwerk.

### Milieubelasting

Voor het bepalen van de milieubelasting van de drie varianten is een rekentool gebruikt, ontwikkeld door IMd in opdracht van de Technische Commissie Duurzaamheid van Bouwen met Staal. Hiermee kan in een voorlopige ontwerpfase de schaduw-

**Tabel 1** Overzicht milieubelasting in de vorm van een schaduwprijs

variant	omschrijving	Σ schaduw-prijs fun-dering	Σ schaduw-prijs kelder	Σ schaduw-prijs begane-grondvloer	Σ schaduw-prijs stan-daard ver-diepings-vloeren	Σ schaduw-prijs afwij-kende ver-diepings-vloeren	Σ schaduw-prijs dak-vloer	Σ schaduw-prijs totaal	levens-duur gebouw	Σ schaduw-prijs per jaar gebouw-gebonden	Σ schaduw-prijs per m² BVO per jaar
1A	kern vloer // cijferassen	€ 4763,61	€ -	€ 7244,62	€ 632 712,72	€ -	€ 11 824,47	€ 656 545,42	50 jaar	€ 13 130,91	€ 0,90
1B	kern vloer // letterassen	€ 5890,52	€ -	€ 5725,65	€ 647 986,02	€ -	€ 11 305,29	€ 670 907,47	50 jaar	€ 13.418,15	€ 0,92
2A	kern met stabiliteitsverband	€ 4870,56	€ -	€ 7223,03	€ 632 828,06	€ -	€ 11 824,47	€ 656 746,13	50 jaar	€ 13 134,92	€ 0,90
3A	gevelbuis	€ 5637,33	€ -	€ 7680,90	€ 696 603,74	€ -	€ 11 824,47	€ 721 746,44	50 jaar	€ 14 434,93	€ 0,99

**Tabel 2** Kostenraming varianten

varianten	omschrijving	Σ prijs fun-dering	Σ prijs begane-grondvloer	Σ prijs standaard verdiepingvloeren	Σ prijs dakvloer	Σ prijs totaal
1A	kern vloer // cijferassen	€ 216 700,00	€ 150 750,00	€ 1 999 305,00	€ 229 500,00	€ 2 596 255,00
1B	kern vloer // letterassen	€ 236 500,00	€ 139 550,00	€ 2 160 305,00	€ 252 500,00	€ 2 788 855,00
2A	kern met stabiliteitsverband	€ 231 212,50	€ 157 300,00	€ 2 049 355,00	€ 229 500,00	€ 2 667 367,50
3A	gevelbuis	€ 144 718,75	€ 153 700,00	€ 2 372 293,00	€ 286 524,00	€ 2 957 235,75

**Tabel 3** Multicriteria-analyse van de ontwerpvarianten

	variant 1A	variant 1B	variant 2A	variant 3A
constructie (meest efficiënt)	4	3	3	2
duurzaamheid (laagste milieubelasting)	4	3	4	2
kosten	4	3	4	2
uitvoering	4	4	4	3
totaal gewogen	16	13	15	11

### Kosten

Voor het bepalen van de kosten is gebruikgemaakt van een zelf ontwikkelde spreadsheet, die is opgezet voor kostenramingen in de VO-fase. Hierbij zijn kengetallen aangehouden, afkomstig van diverse leveranciers (tabel 2). Ontwerpvariant 1A geeft de laagste kosten. Variant 2A verschilt hierin minimaal.

**Tabel 4** Varianten elasticiteitsmodulus en paalstijfheden

variant	elasticiteitsmodulus	paalstijfheid
1	lage E-modulus; kern, fundering, vakwerk	stijve palen
2	hoge E-modulus; kern, fundering, vakwerk	stijve palen
3	lage E-modulus; kern, fundering, vakwerk	slappe palen
4	hoge E-modulus; kern, fundering, vakwerk	slappe palen

### Uitvoering

Voor een korte bouwtijd is het van belang de werkzaamheden van tevoren voor te bereiden. Dit kan door zo veel mogelijk in prefab beton te werken. Een optimale bouwtijd wordt verkregen door de prefab-betonelementen ter plaatse (just in time) op de bouw te plaatsen.

prijs van een hoofdconstructie worden bepaald. Deze rekentool is een middel voor constructief ontwerpers om op eenvoudige wijze de materiaalgebonden milieubelasting van de hoofdconstructie in kaart te brengen. De tool maakt gebruik van de schaduwprijsmethodiek. Een schaduwprijs geeft per milieueffect de preventiekosten weer en is eigenlijk een weegfactor. Deze weegfactor (euro/kg-equivalent) geeft van een milieueffect de door de overheid te maken preventiekosten weer per eenheid emissiebestrijding.

Tabel 1 geeft een overzicht van de drie ontwerpvarianten op het gebied van het beperken van de milieubelasting. Hierbij is ontwerpvariant 1 opgedeeld in een overspanning van de vloer evenwijdig aan de cijferassen (1A) en aan de letterassen (1B). Uit de analyse van de milieubelasting kwamen varianten 1A en 2A het best naar voren. Ontwerpvariant 1A geeft de laagste kosten, variant 2A verschilt hierin minimaal.

### Multicriteria-analyse

Naar aanleiding van bovenstaande ontwerpstudies op het gebied van krachtswerking, duurzaamheid, kosten en uitvoering, is een multi-criteriatabel opgesteld (tabel 3).

Op basis van deze analyse bleek variant 1 (met alleen een kern) de optimale variant. Deze heeft echter een kritische horizontale verplaatsing van de top. De kans is reëel dat de doorbuigingseis wordt overschreden. Dit door invloed imperfecties, tweede-orde-effecten en nauwkeurige invloed van de sparingen in de kern. Daarom is variant 2, met kern én vakwerk verder uitgewerkt (fig. 10). Naast de kern en het vakwerk bestaat deze variant uit prefab-betonvloeren met een gewapende druklaag, ondersteund door een kolom-balken-structuur, bestaande uit stalen THQ-liggers en prefab-betonkolommen. De keuze voor deze stalen liggers is

- 10 Uit te werken ontwerp, ontwerp met kern en vakwerk
- 11 3D-model van het ontwerp inclusief modellering
- 12 Wapeningsberekening kernplaat en snedekrachten kern/vakwerk

mede ingegeven door het leidingwerk dat in deze variant onder de balken kan doorlopen.

### Gewichts- en stabiliteitsberekening

Van de stabiliteits-elementen van de gekozen variant zijn een gewichts- en stabiliteitsberekening gemaakt. De kern is gefundeerd op een betonnen plaat. Onder het vakwerk worden de poeren onderling gekoppeld om de horizontaalkracht te verdelen over de palen. Uit de stabiliteitsberekening blijkt dat de imperfecties zorgen voor een verhoging van de horizontale belasting. Uit de berekening op basis van een toets uit de Eurocode blijkt er geen tweede-orde-berekening nodig te zijn.

### 3D-berekening gebouwmodel

De constructie is in een 3D-eindige-elementenpakket (Axis VM) geplaatst (fig. 11). Hierbij is de invloed van de sparingen in de kern op de wringing getoetst. Ook de invloed van de fundering en onderlinge krachtswerking tussen de stabiliteits-elementen, zijn inzichtelijk gemaakt. Het model is tevens gebruikt om de snedekrachten te bepalen in kern, funderingsplaat en stabiliteitsvakwerk. De krachten zijn gebruikt voor de wapeningsberekening en detaillering van de constructie.

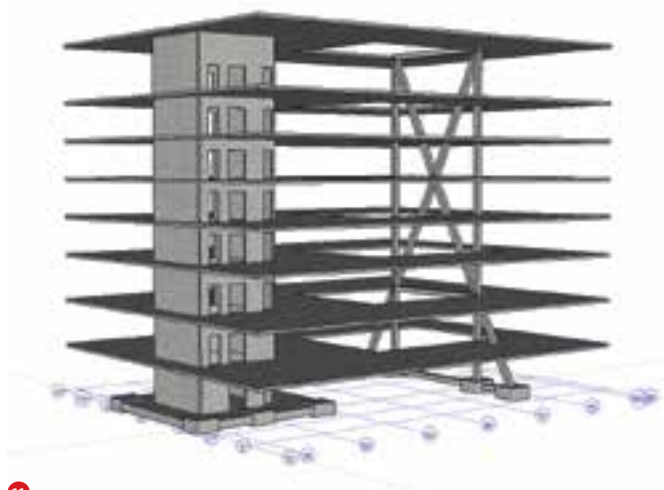


10

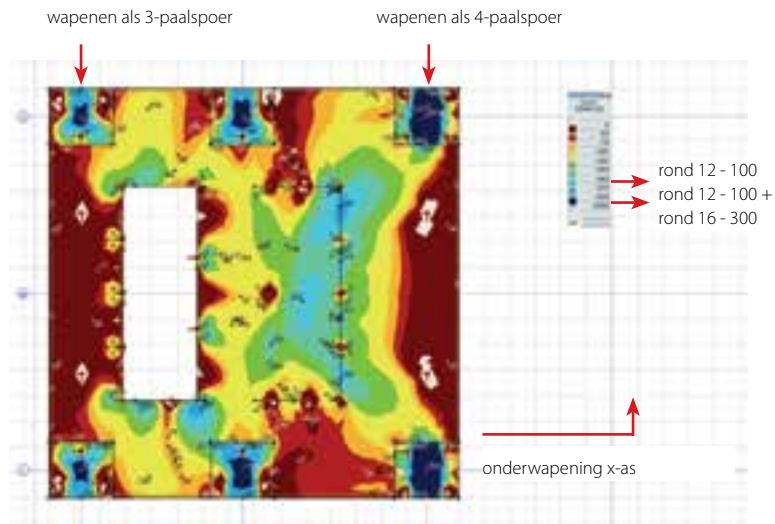
Uit de 3D-berekening volgt dat de totale windbelasting voor 55% door de kern en 45% door het vakwerk wordt opgenomen. Dit komt goed overeen met de verdeling die volgde uit het eerder genoemde 2D-balkenroostermodel.

Er is een gevoeligheidsstudie verricht of een lage of hoge elasticiteitsmodulus van de kern en vakwerk en verschillende paalstijfheden invloed hebben op de uitvoer van het 3D-model. Hierbij zijn vier varianten onderzocht (tabel 4).

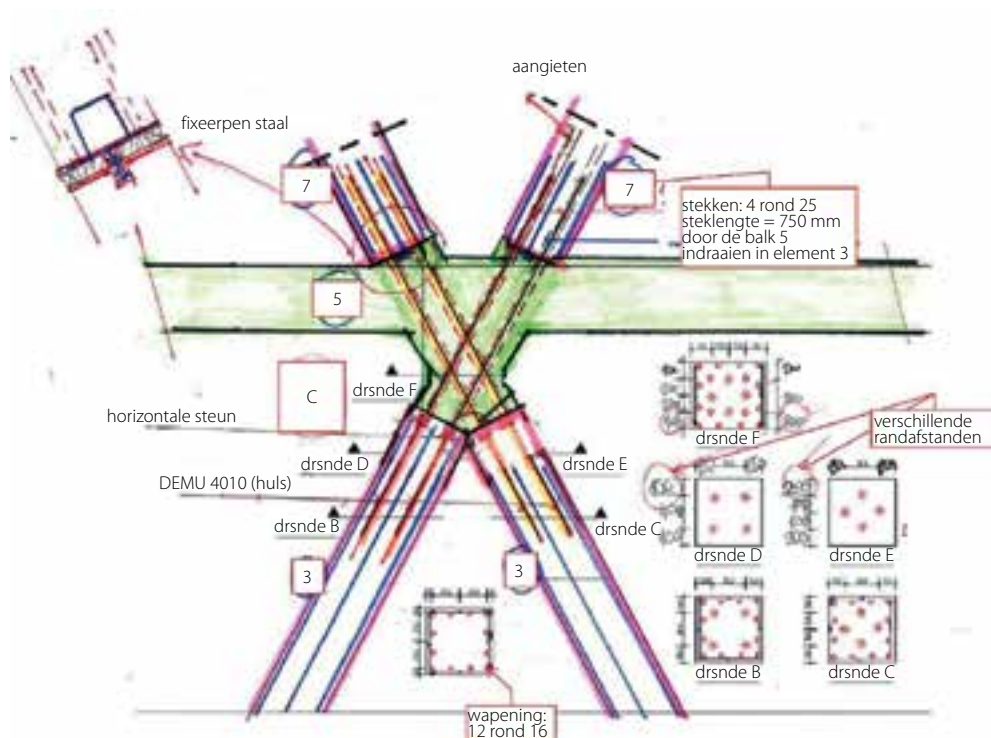
Hieruit bleek dat er tussen de varianten een groot verschil is in de horizontale verplaatsing van de top. De verplaatsing overschrijdt echter in geen gevallen de maximale toelaatbare verplaatsing. Er is een gering verschil tussen de paalreacties en snedekrachten in de constructie. Hieruit volgt dat het 3D-model relatief ongevoelig is voor verschillende invoerparameters.



11



12



#### ● LITERATUUR

- 1 Hoenderkamp, J.C.D., High-Rise Structures. Technische Universiteit Eindhoven, 2007.

Van de kernpoer, kern met sparingen en het gebouwhoog vakwerk is een wapeningsberekening gemaakt en zijn de snedekrachten bepaald (fig. 12).

### Beschouwing tweede draagweg toren

Op grond van NEN-EN 1991-1-7 geldt dat voor elke constructie die is ingedeeld in gevolklasse 2b of 3, een nadere beschouwing voor de tweede draagweg nodig is. Uit deze beschouwing volgde dat wapening in de druklaag en horizontale trekbanden nodig waren. Deze functie kon worden vervuld door de stalen liggers.

Voor de verticale trekbanden moesten de kolommen vanaf fundering tot dak zijn doorgekoppeld met stekken. Deze eisen voor de tweede draagweg hebben geen invloed op de toe te passen stalen liggers, wel op de toegepaste wapening voor de stekken.

### Werkplan stabiliteitsvakwerk

In verband met de bouwsnelheid is het vakwerk uitgewerkt in prefab elementen. Dit vergt weliswaar een langere voorbereidingstijd, maar eenmaal op de bouw heeft prefab beton een relatief korte montageduur. De prefab elementen worden op de bouw gemonteerd met behulp van stekken en gains. Door middel van het injecteren van krimprijke mortel wordt een monoliet geheel gevormd.

De prefab elementen (schoren) zijn allemaal van dezelfde kopaansluiting voorzien. Hierdoor kan in de fabriek met dezelfde mal worden gestort. De lengte van de schoor kan hierbij variëren.

### Conclusies

Er is geprobeerd een optimaal constructief ontwerp te zoeken voor het te bouwen onderwijscentrum. De variant met een prefab betonnen stabiliteitskern en gebouwhoog stabiliteitsvakwerk bleek de beste keuze.

Voor het constructief ontwerp is zowel een 2D- als een 3D-berekening gemaakt. Tevens is een gevoeligheidsanalyse verricht om te controleren in hoeverre de verschillende invoerparameters invloed hebben op de uitkomsten van de 3D-berekening. Omdat het ontwerp hoge standaarden heeft op het gebied van duurzaamheid, is voor de constructie met behulp van een duurzaam-construeren-tool geprobeerd de milieubelasting te beperken. Het globaal beschouwen van de kosten en maakbaarheid van de constructie zijn onderdelen waarmee rekening gehouden moet worden.

Kortom: voor het constructief ontwerp van het Onderwijscentrum zijn weloverwogen keuzen gemaakt. Het is een voorbeeld zoals het tijdens een ontwerpproces zou moeten gaan. Het Onderwijscentrum te Utrecht is inmiddels opgeleverd en sinds kort in gebruik. Het gebouw is voorgedragen voor de Betonprijs 2015. ☒