Rembrandt Tower, Amsterdam

Constructie

ir. E.T.J. Holla
Samenwerkende Adviesbureaus Amstelhoek
(Ingenieursgroep Van Rossum, Amsterdam en
D3BN Civiel Ingenieurs, Amsterdam)

Gezicht op de staalconstructie voor de onderste verdiepingen. Links en rechts zijn de bokken te zien die de hoger gelegen verdiepingen dragen. De hoekkolommen zijn van staal-beton. (foto: Roos Aldershoff, Amsterdam)

De toren bestaat uit een verbrede onderbouw van negen bouwlagen, een verticale schacht van twintig lagen en een verjongde bovenbouw van zeven lagen. Voor het constructief ontwerp waren het aantal verdiepingen en de globale indeling van de plattegronden, met een centrale kern, gegeven.
De constructie van de toren bestaat uit een betonnen kern, die de horizontale stabiliteit verzorgt, met rondom een staalskelet met staalplaat-betonvloeren.
Constructief is de toren te verdelen in de volgende onderdelen:
- kern op alle verdiepingen;
- standaardverdieping (verdieping 9-28);
- fundering en kelder;
- onderbouw (begane grond en verdieping 1-8);
- bovenbouw (verdieping 29-35).

Kern

De toren heeft een vierkante plattegrond met in het midden een kern van 14,4×14,4 m. De kern moet voldoende stijf zijn om te voldoen aan de eisen met betrekking tot horizontale verplaatsing en hoekverdraaiing. De kern is in de kelder verbreed om zo de stijfheid te vergroten. Bovendien werd daarmee de verticale belasting over een groter oppervlak gespreid.
De kern is uitgevoerd met een klimbekisting. Ten opzichte van een glijbekisting heeft klimmen het voordeel dat niet continu in ploegendienst moet worden gewerkt. Met een klimbekisting is ook een grotere maatnauwkeurigheid te bereiken: de horizontale afwijking bedroeg maximaal 20 mm op een lengte van 135 m.
Tijdens de uitvoering werd een tempo gehaald van één verdieping per week in de standaardverdiepingen met een klimbekisting. Bij de verjongingen van de kern in de bovenbouw gaat echter veel tijd verloren: het ombouwen van de kist kost namelijk enige dagen tot een week. In de bovenbouw lag het tempo dan ook niet hoger dan gemiddeld één verdieping per twee weken.
Bij de Rembrandt Tower is het verschil in elastische verkorting tussen betonnen kern en de stalen gevelkolommen beperkt. De stalen kolommen zijn alle iets langer gefabriceerd dan de theoretische lengte. Met vulplaten zijn de resterende maatverschillen opgevangen.

Standaardverdieping

De vloer voor de standaardverdieping overspant 9 m van gevel tot kern en moet worden berekend op een vloerbelasting van 3 kN/m^2.
Voor de keuze van het vloertype, inclusief gevelkolommen, zijn drie hoofdvarianten onderzocht, namelijk (*tabel 1*):
A in het werk gestorte betonconstructie;
B prefab betonconstructie, met kanaalplaten of met dubbel T-liggers;
C staalskelet, met staalplaat-betonvloeren, kanaalplaten of met breedplaten.

Tabel 1. Afweging van de constructieve varianten voor de vloeren (+ = beter dan gemiddeld; – = minder dan gemiddeld).

variant	A beton in situ	B beton prefab	C staal
eigen gewicht	–	0	+
constructiehoogte	0	–	+
materiaalkosten	+	–	–
vrijheid voor installaties	–	0	+
kraaninzet	0	–	+
bouwsnelheid	–	+	+
totale score	–	0	+

Keuze vloertype

Gelet op de hoge geconcentreerde belasting uit de toren en de slechte grondslag speelde in dit project het eigen gewicht van de constructie een belangrijke rol. Dit spreekt in het voordeel van staal (C), evenals de snelle bouwtijd. Een korte bouwtijd vermindert de investeringskosten door de lagere bouwrente. Dit betekent dat bij de afweging tussen de verschillende varianten ook de bouwsnelheid meeweegt. De varianten in prefabriceerde constructies (B en C) hebben bij dit aspect voordelen ten opzichte van een in het werk gestorte betonconstructie (A).
Uiteindelijk bleek een staalskelet (C) het beste alternatief, met kolommen in de gevel en liggers tussen de gevel en de kern, in combinatie met een staalplaat-betonvloer. Een belangrijk voordeel van de staalplaat-betonvloer ten opzichte van kanaalplaten of breedplaten is de veel lagere kraaninzet. Met één kraanbeweging wordt een pakket staalplaten naar de betreffende verdieping gehesen, waar de platen met de hand worden uitgelegd. Prefab vloerelementen in beton moeten, gezien hun gewicht en afmetingen, per stuk worden gehesen en weggelegd. Door de staalplaat-betonvloer en de stalen ligger constructief te verbinden, fungeert de vloer als drukflens van de liggers. De constructiehoogte bleef daardoor beperkt tot 0,48 m.

Vloeropbouw

Voor de staalplaat-betonvloer is vervolgens onderzocht wat de meest economische kolom- en liggerafstanden zijn. Uit het architectonisch ontwerp volgde voor de gevel een stramienmaat van 1,8 m. Kolomafstanden moesten dus een veelvoud hiervan zijn. Gekozen is voor 3,6 m, hetgeen tevens de afstand is tussen de vloerliggers. Een kleinere kolomafstand introduceert te veel elementen; bij

Montage van de bokken. In totaal staan er acht rondom de kern. (foto: Roos Aldershoff, Amsterdam)

Montage van de liggers HE 1000A die de vloeren van de vides dragen. (foto: H. Boomgaard, Nigtevecht)

De vloeren rond de vides zijn gestort. De bokken worden daarna brandwerend bekleed.

een grotere afstand moest de staalplaat-betonvloer worden onderstempeld. Dit laatste was niet gewenst. Een grotere kolomafstand bij een gelijke liggerafstand vraagt op elke verdieping een extra gevelligger voor de opvang van de vloerliggers. Dit alternatief bleek economisch niet aantrekkelijk.
Langs de gevel loopt rondom een dubbel UNP-profiel, namelijk twee boven elkaar in de vorm van een S. De hoogte van het bovenste profiel is gelijk aan de dikte van de staalplaat-betonvloer. De beide profielen beperken de doorbuiging van de vloer in de gevel en doen tevens dienst als randbekisting en als bevestiging voor de gevelelementen.
Door de opbouw van de vloeren is het mogelijk de leidingen tussen de stalen liggers van kern naar gevel te laten lopen. In de gangzone rond de kern ligt een ringleiding. Deze leiding loopt onder de liggers door boven een verlaagd plafond. De verdiepinghoogte bedraagt 3,4 m. De vrije hoogte in de kantoorzone bedraagt daardoor 2,7 m en in de gangzone 2,4 m.

Staalplaat-betonvloer
De dikte van de staalplaat-betonvloer is in eerste instantie bepaald door de akoestische eisen tussen de verdiepingen. Als eis gold I_{lu} = 0 dB en I_{co} = 0 dB volgens NEN 1070 (Besluit Geluidswering kantoorgebouwen). Na een akoestisch onderzoek door TNO bleek een dikte van 150 mm aan deze eisen te voldoen. Om tijdens het storten de vloerplaten niet te hoeven onderstempelen, is vervolgens gekozen voor een 60 mm hoge geprofileerde staalplaat met een dikte van 1,2 mm.
De platen, met een breedte van 0,9 m en een lengte van 10,8 m, zijn tijdens de uitvoeringsfase doorgaand over meerdere steunpunten uitgevoerd. In de eindfase is de vloer berekend als een ligger op twee steunpunten. Ter plaatse van de liggers is een bovenwapening gelegd om scheurvorming te voorkomen. Ook is bij de aansluiting rond de kern een lichte wapening opgenomen in verband met schijfwerking van de vloer. Met ankers (ingedraaide stekken) is de vloerwapening, en dus de gehele vloer, aan de kern verbonden. Om maatafwijkingen van de kern in de hoogte op te vangen, zijn de ankers aangebracht met een dekking van ten minste 30 mm.

Kolommen
De kolommen zijn H-profielen met een lengte gelijk aan de verdiepinghoogte. Om afmetingen in de onderste verdiepingen te beperken, zijn daar HD-profielen gebruikt met een hoge sterkte. Naar boven toe nemen zowel de profieldoorsnede als de sterkte af (*tabel 2*).

Tabel 2. Toegepaste profielen en staalkwaliteit per verdieping van de verticale schacht (StE is een Duitse aanduiding).

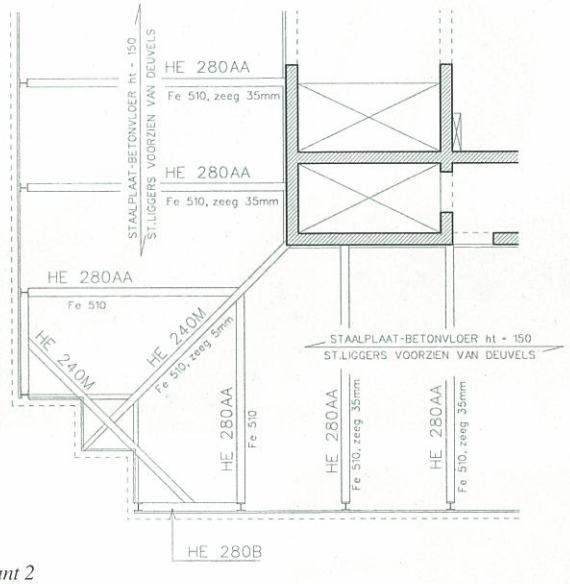
verdieping	profiel	staalkwaliteit	vloeigrens [N/mm²]
27-28	HE 260B	Fe 360	240
24-26	HE 280B	Fe 360	240
21-23	HE 280B	Fe 510 (StE 355)	355
18-20	HE 320B	Fe 510 (StE 355)	355
15-17	HE 320B	StE 460	460
12-14	HD 310×310×143	StE 460	460
9-11	HD 310×310×158	StE 460	460

Liggers
De liggers overspannen van gevel naar kern een afstand van 9 m. Beide opleggingen zijn tijdens de montage vrije opleggingen. Na het aanbrengen van de staalplaat-betonvloer en het verharden van het beton ontstaat aan de kernzijde een inklemming, omdat de wapening in de betonvloer aan de kern is verankerd. Na het leggen van de staalplaten worden deuvels op de liggers gelast. Het aantal deuvels is beperkt door de ligger niet-volledig schuifsterk uit te rekenen. Per ligger zijn 36 deuvels toegepast, of wel vier deuvels per meter.
Een HE 280AA in de staalkwaliteit Fe 510 bleek de meest economische keuze. Dit profiel heeft een een eigen gewicht van 61,2 kg/m en een dunner lijf en dunnere flenzen dan een HE 280A. Om te voldoen aan de doorbuigingseis is een zeeg van 35 mm aangebracht.
Voor de oplegging van de liggers in de betonnen kern is, in samenwerking met het staalconstructiebedrijf, een aansluitdetail ontwikkeld om maatafwijkingen in de kern op te vangen. Daartoe wordt tijdens het storten van de kern een stalen kast van 350×350 mm met stekken in het beton verankerd. De liggers zijn al in de werkplaats voorzien van een kopplaat en stel-

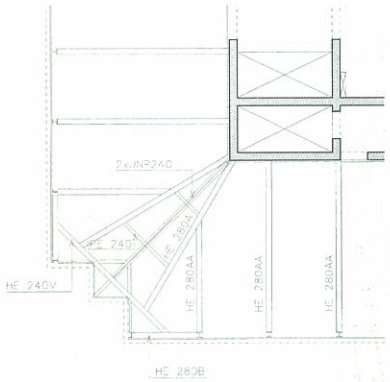
Tabel 3. Afweging van de constructieve varianten voor de hoekoplossing van de verticale schacht (+ = beter dan gemiddeld; – = minder dan gemiddeld).

variant	1	2	3	4
constructiehoogte	+	+	–	+
detaillering	–	0	+	+
staalverbruik	–	+	0	0
belastingafdracht	+	+	–	–
uitvoerbaarheid	0	+	–	–
totale score	0	+	–	0

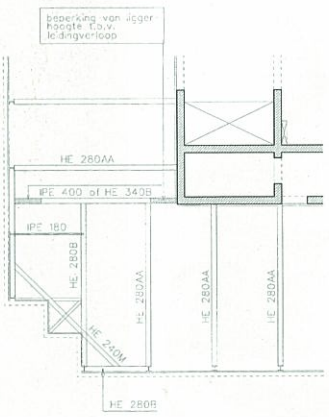
Vanwege het gunstige staalverbruik en de eenvoudige opbouw is gekozen voor variant 2.



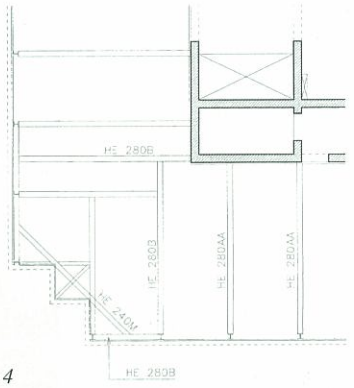
Variant 2



Variant 1



Variant 3



Variant 4

bouten. Vulplaten onder de ligger zorgen voor een verticale stelmogelijkheid. Met de stelbouten is de ligger horizontaal te positioneren.

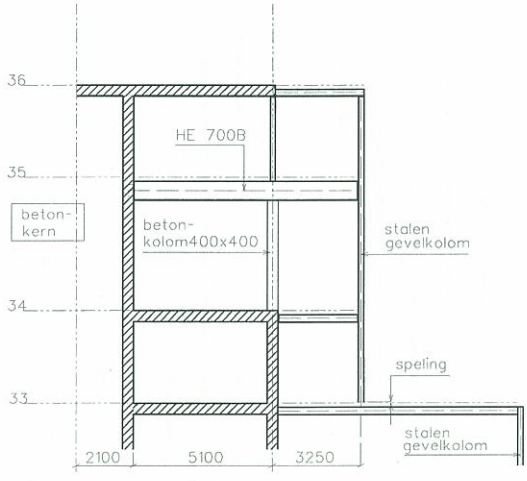
Hoekoplossing
Voor de hoekoplossing van de vloerconstructie, waar de overspanningsrichting van de liggers verandert, zijn vier varianten bekeken (*tabel 3*). Variant 1 is een symmetrische oplossing met diagonaal verlopende liggers. Variant 2 is ook symmetrisch, maar heeft slechts één diagonaal verlopende ligger. Deze oplossing heeft als voordeel dat de vormgeving en uitvoering minder ingewikkeld zijn en het staalverbruik wordt beperkt. In variant 3 ontbreken diagonalen en is daardoor eenvoudig uitvoerbaar voor wat betreft de detaillering. Het nadeel is een hoge ligger en de ongelijkmatige belastingafdracht. Om op de onderste verdiepingen gelijke kolombelastingen te krijgen, moet deze oplossing per bouwlaag wisselend worden uitgevoerd (zoals getekend én gespiegeld). Dit kan tijdens de montage leiden tot misverstanden. Het nadeel van de hoge ligger is opgelost in variant 4. In deze variant blijven de overige nadelen echter bestaan. Vanwege het staalverbruik en de eenduidige opbouw is gekozen voor variant 2.

Brandveiligheid
Op standaardverdieping wordt aan de vloer een brandwerendheidseis gesteld van 60 minuten. Daartoe is in de cannelures van de staalplaat-betonvloer een wapeningsstaaf van rond 10 mm gelegd om de 0,6 m. De stalen liggers zijn bekleed met 20 mm brandwerend materiaal. Voor de gevelkolommen geldt een eis van 120 minuten brandwerendheid. Hieraan is voldaan door te kolommen eveneens te bekleden met 20 mm brandwerend materiaal.

Fundering
In Amsterdam staan de meeste gebouwen op de tweede zandlaag. Deze laag begint op ongeveer 15 m onder NAP en is vaak voldoende draagkrachtig voor het funderen van middelhoge en hoge gebouwen. Op het terrein van De Omval varieerden de sondeerwaarden aanzienlijk. Bovendien was de tweede zandlaag op sommige plaatsen te dun of in het geheel niet aanwezig. Dit maakte het noodzakelijk te funderen op derde zandlaag op ongeveer 50 m onder NAP.
Gekozen is voor boorpalen met een diameter van 2 m. In totaal staan onder de toren 54 palen met elk een draagvermogen van ruim 16.500 kN. Om de belasting uit de bovenbouw te spreiden over de palen heeft de betonnen funderingsplaat een dikte van 2 m. Op deze funderingsplaat staat een betonnen kelder met hoofdzakelijk algemene ruimten.
Direct naast de hoogbouw ligt een ondergrondse parkeergarage. Vanwege de hoge grondwaterstand en de lage belastingen worden de funderingspalen van deze garage voornamelijk op trek belast. De prefab betonpalen zijn gefundeerd op ongeveer 20 m onder NAP. Tussen toren en parkeergarage wordt een zettingsverschil verwacht van 50 mm. Daarom is de garage met een dilatatie gescheiden van de hoogbouw.

De vloerliggers zijn bekleed met een brandwerend materiaal.

Bij de aansluiting van de staalplaat-betonvloer rond de kern een lichte wapening opgenomen in verband met schijfwerking van de vloer. (foto: Roos Aldershoff, Amsterdam)



Verticale doorsnede over de kern met de staalconstructie van de bovenste drie verdiepingen.

Onderbouw
De architect wilde vanaf de begane grond tot de vierde verdieping vides maken, waarin zo weinig mogelijk kolommen stonden. Dit is constructief opgelost door een vakwerkspant op te nemen in elk van de vier gevels van de achtste verdieping (de technische verdieping). Deze spanten dragen elk acht gevelkolommen en rusten op twee kolommen op de hoeken en twee bokken in het midden. De hoekkolommen zijn staal-beton kolommen en worden over de onderste drie verdiepingen horizontaal niet gesteund.
De bokken, opgebouwd uit HD-profielen, brengen de belasting over op betonnen wanden in de kelder. Om spatkrachten op deze wanden te beperken, zijn in de begane-grondvloer tussen de poten van de bokken trekstaven opgenomen in de vorm van strippen 400×120 mm. De spanning in deze trekstaven is laag gehouden, minder dan 100 N/mm^2. Daardoor blijft de onderlinge verplaatsing van de beide poten van elke bok zo klein mogelijk, terwijl zo ook scheurvorming in de betonvloer wordt voorkomen.

Bovenbouw
Voor de technische ruimten op de achtste en de vierendertigste verdieping gold een hogere vloerbelasting, namelijk van 8 kN/m^2. Daarom zijn hier de vloerliggers op een onderlinge afstand gelegd van 1,8 m. In verband met de hoge geluidproduktie van de technische ruimten krijgen de onder- en bovenliggende vloeren een dikte van 200 mm in plaats van de normale dikte van 150 mm.
Het opvangen van de bovenste drie bouwlagen op verdieping 29 bleek niet mogelijk vanwege de afwijkende kolomafstanden èn de te hoge belasting uit de zes bouwlagen voor de stalen vloerliggers. De bovenste drie verdiepingen dragen daarom hun belasting af op uitkragende stalen liggers HE 700B in verdieping 35. De liggers kragen uit de versmalde betonnen kern. De gevelkolommen van de verdiepingen 33 tot 35 zijn los gehouden van de vloer in verdieping 33, waardoor belastingafdracht ter plaatse wordt voorkomen.