

ing. E.J.L.A. van Caulil RO en ir. M.G.M. Schamp RC

Eddy van Caulil is raadgevend ingenieur/directeur bij Aronsohn raadgevende ingenieurs in Rotterdam. Michel Schamp is projectleider/constructeur bij de vestiging in Eindhoven.

Gevelbuis binnenstebuiten

Foto: Erik Stekelenburg



Het 'tweede stadhuis' van Den Haag aan de Leyweg combineert verschillende gemeentelijke functies met woonfuncties op de hoger gelegen verdiepingen. In het constructief ontwerp van de hoogbouw – met onmiskenbaar 'patatzak'-silhouet – wordt samengewerkt tussen de buitengevel en een driehoekige gevelbuis die binnenshuis een atrium vormt, maar vanaf de tweede verdieping buiten de thermische schil staat. Daarnaast concentreert de belasting zich aan de hoge zijde.

Gietknopen om de drie verdiepingen worden voorverwarmd tot 150 °C voor goed laswerk, maar de brandwerende verf mag niet voortijdig opschuimen. De wording van een prijsvraagontwerp.

Als onderdeel van een grootscheepse vernieuwing van het Haagse stadsdeel Escamp schrijft de gemeente een prijsvraag uit voor een tweede stadhuis. Architect Rudy Uytenhaak vraagt in deze fase om mee te denken over de constructieve haalbaarheid en maakbaarheid van het in te zenden prijsvraagontwerp.

Het ontwerp kenmerkt zich door de driehoekige hoofdvorm, is 50 m hoog en heeft een driehoekig atrium in het midden. De punten van de drie hoeken zijn ingekeept.

Door het inkepen ontstaat een gevelvlak dat in het ontwerp 'vissenbek' wordt genoemd. Omdat de plattegrond elke verdieping groter wordt, ontstaat de naar boven toe uitlopende vorm.



De gevelbuis, kern en atrium tegelijk.



Oorspronkelijk ontwerp.



Uiteindelijk ontwerp, na planwijziging.

Constructieve voordelen

Vanwege daglichttoetreding en ter beperking van constructieve obstakels is aan de atriumzijde bewust gekozen voor een stalen draagconstructie. Om het gebouw maakbaar en betaalbaar te houden, is gezocht naar een constructie waarbij het gebouw zoveel mogelijk met standaard constructieve elementen kan worden gerealiseerd. Zo ontstaat de gedachte de draagstructuur over de bissectrices van de driehoek te leggen en deze rechtstreeks te koppelen aan een draagconstructie aan de atriumzijde in de vorm van een 'megastructure', hierna atriumbuis genoemd. Deze levert twee belangrijke constructieve voordelen op.

1. Door de directe koppeling van de hoofd-draagconstructie per verdieping worden de horizontale krachten uit de schuine kolommen in de punten van de driehoek direct gekoppeld en nagenoeg op verdiepingniveau vereffend, zodat nauwelijks extra momenten op de stabiliteitselementen ontstaan (uitsluitend door nuttige belastingen).
2. Door de directe koppeling van de vloerbalken aan de atriumbuis worden de vloeren niet aanvullend horizontaal belast, waardoor deze eenvoudig met standaard voorgespannen vloersystemen voor kantoren zijn te realiseren.

Invloed 70 m gebouwhoogte

Bij de begin van het VO krijgt het ontwerp-team de opdracht om het gebouw op te hogen naar minstens 70 m om het tevens als oriëntatiepunt van het stadsdeel te laten functioneren. Uiteindelijk bevindt het hoogste punt van de gevel zich op 76 m boven

maaiveld. Het volume van de woningen is eenzijdig toegevoegd, waarmee de voordelen van de constructieve opzet van het oorspronkelijk ontwerp gedeeltelijk teniet werden gedaan. Door het optrekken ontstaan substantiële aanvullende momenten op de stabiliteitselementen door asymmetrische, permanente belastingen. Om de momenten zonder grote trekkrachten op de fundering en zonder te grote vervormingen te kunnen realiseren, is aan de atriumbuis een jukconstructie aan de voorzijde toegevoegd om de voetprint van de atriumbuis te vergroten. De planwijziging heeft met name gevolgen voor het staalverbruik in de atriumbuis en is inzichtelijk gemaakt voor de opdrachtgever, zodat deze de consequenties van de ingebrachte wens overziet.

Bouwkundige ontwerp

De hoogbouw wordt rondom ingesloten door een vanaf maaiveld terrasvormig oplopende laagbouw. Dat geldt niet voor de punt van de driehoek aan de voet waar zich de entree bevindt. Niet direct zichtbaar aan de buitenzijde is de driehoekige atriumbuis in de hoogbouw. Het atrium, dat wordt gevormd door een buis van zware stalen profielen, bevindt zich grotendeels in een buitenklimaat omdat het bij de 2^e verdiepingvloer wordt afgesloten door een piramidevormige kap. Is in de atriumgevel zoveel mogelijk transparantie nagestreefd, de betonnen huid van de hoogbouw is relatief gesloten en bestaat uit sandwichelementen met een facetrijke buitenschil van Noors marmer. De gevel van de laagbouw heeft geen dragende functie en is voor een groot deel ingevuld

met glazen panelen en houtskeletbouw. In de ondergrondse parkeergarage zijn aparte ruimtes gemaakt voor bewoners en van het stadskantoor. De bergingen van de woningen en een technische ruimte voor de kantoorinstallaties (NSA, sprinklertank) zijn hier ook ondergebracht. Op de begane grond van de hoog- en laagbouw zijn de publiek toegankelijke gemeentelijke functies gehuisvest. Drie liftkernen en trappenhuizen verschaffen toegang tot de hoger gelegen verdiepingen. In een vide in de 1^e verdiepingvloer bevindt zich de ovale trouwzaal in de achterste vleugel van de hoogbouw. Een vleugel van de 1^e verdieping wordt ingenomen door ICT-ruimtes, in de andere vleugel is de kantine ondergebracht. De kantoren op de 2^e t/m de 9^e verdieping zijn voor het stadskantoor, op de 10^e verdieping beginnen de woningen tot en met de 18^e verdieping.

Constructieve opzet hoogbouw

De drager van de hoogbouw wordt gevormd door de betonnen buitengevels en de stalen atriumbuis. De buitengevels bestaan over de onderste bouwlagen uit in situ wanden met een dikte van 300 mm en daarboven prefab sandwichelementen met een binnenblad van 300 en 250 mm.

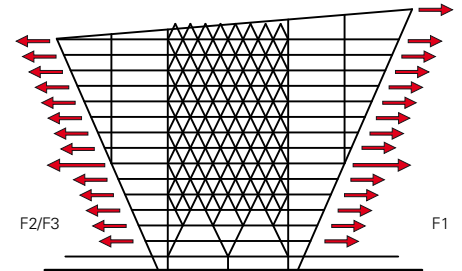
De staalconstructie aan de atriumzijde is opgebouwd uit HD-profielen als diagonalen en ronde buizen als horizontalen. De diagonalen snijden elkaar om de drie verdiepingen bij de 2^e, 5^e, 8^e, 11^e en 14^e verdieping. Op deze snijpunten zijn de diagonalen en horizontalen in het werk gelast aan een gietknoop waaraan ook een console is meegegoten. De consoles steken het gebouw in zodat hier



De atriumconstructie heeft twee extra schoren.



Atriumbuis en gevel werken constructief samen.



Krachtenpel met pieken op de atriumconstructie.

kolommen op kunnen worden bevestigd. Aan deze kolommen, waarvan een groot deel op trek wordt belast, zijn weer THQ-liggers bevestigd, die de vloeren dragen.

De atriumconstructie wordt aan de hoge zijde extra ondersteund door twee schoren van de 2^e verdiepingvloer naar de fundering van de buitengevels. De afstand tussen buitengevel en atriumconstructie is 14,4 m en wordt in één keer overspannen door VBI-klimaatvloeren (2^e t/m 10^e verdieping) en kanaalplaatvloeren (11^e verdieping en hoger) voorzien van een druklaag. De druklaag is noodzakelijk om de benodigde 120 minuten brandwerendheid van de hoofdconstructie te halen en brengt de horizontale krachten tussen atrium en buitengevels over. In de drie hoeken zijn de vloeren opgevangen door een staalconstructie bestaande uit THQ-liggers en schuine en verticale kolommen op de bissectrices van de driehoek. Aan de hoge zijde van het gebouw sluit de constructie van de bissectrice aan op de atriumbuis bij de 2^e verdiepingvloer, aan de lage zijde sluiten de bissectriceliggers aan op de atriumbuis op funderingsniveau. Vooral ter hoogte van de 2^e en 8^e verdiepingvloer ontstaan door het samenspel van schuine kolommen en liggers op de bissectrices grote horizontale krachten op de atriumconstructie. Hoewel de krachten uit de bissectrices uit de voor- en achterzijde elkaar deels opheffen blijft een horizontale kracht op de atriumconstructie over.

Voor de fundering is gebruik gemaakt van trillingsvrije grondverdringende palen met groutinjectie met puntdiameters van 560 en 650 mm. In het terrein waren de palen van

een vorig gebouw nog aanwezig. Deze palen waren ongeschikt voor hergebruik en verwijderen bleek nagenoeg onmogelijk. Het nieuwe palenplan is afgestemd op de oude. Palen, die tussen de 500 en 1000 mm van een bestaande paal af staan, zijn uitgevoerd met een vaste casing (stalen buis) om beschadiging van de geboorde paal te voorkomen.

Constructieve opzet laagbouw

De constructie van de laagbouw is opgebouwd uit een staalconstructie en kanaalplaten met een druklaag. Het plaatsen van kolommen werd beperkt door de parkeergarage in de kelder. Het gevolg is een complexe staalconstructie met grote overspanningen, waarbij grote delen van de vloeren zijn opgehangen aan een vakwerkligger in het dak van de laagbouw. Voor de stabiliteit is de laagbouw grotendeels afhankelijk van de hoogbouw.

Stabiliteit

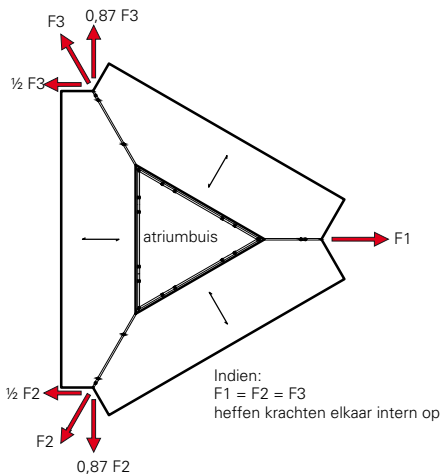
Behalve dat het gebouw voorover helt, dient natuurlijk ook nog rekening te worden gehouden met de windbelasting. De oriëntatie van het gebouw is zodanig dat de heersende windrichting samenvalt met de excentriciteit van het gebouw. Vanwege de specifieke driehoekige vorm met de ingesneden hoeken is in een vroeg stadium besloten de windbelastingen te bepalen met windtunnelonderzoek volgens *CUR aanbeveling 103*. Het onderzoek wijst uit dat de respons van het gebouw op de windbelasting gunstiger is dan in eerste instantie op basis van NEN 6702 wordt aangenomen. Voor de heersende windrichting is uiteindelijk een windvormfactor $C_f = 1,4$ aangehouden. Beduidend

lager dan de in de literatuur en NEN 6702 opgenomen $C_f = 2,2$ voor zuiver driehoekvormige doorsneden.

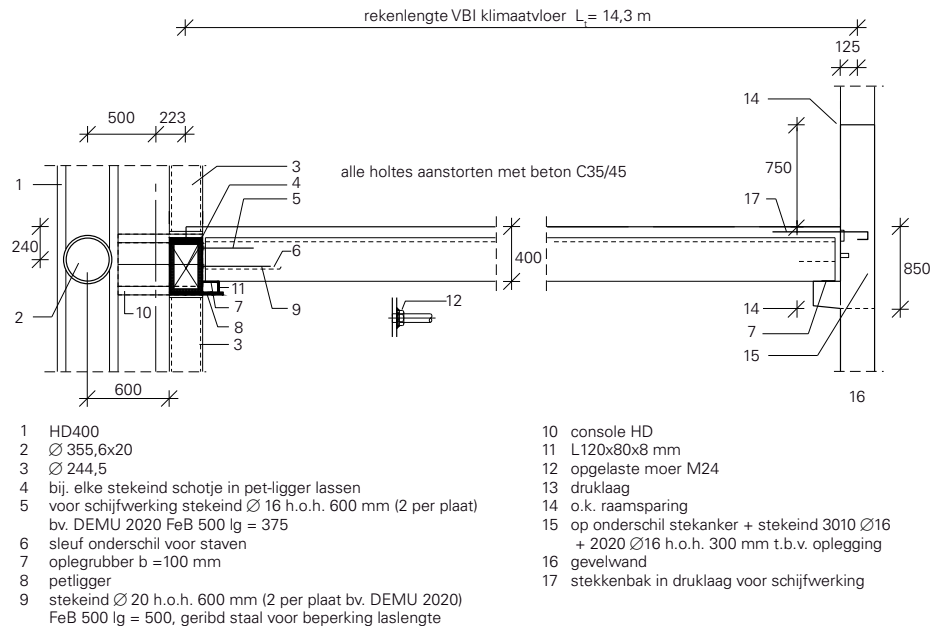
Brandwerendheid constructie

Door de woningen bovenin moet de hoofdconstructie 120 minuten brandwerend worden uitgevoerd. Er is een voorkeur voor het hoofdzakelijk toepassen van brandwerende coatings voor de expressiviteit van het gebouw. Voor de woningen en de aan het zicht onttrokken delen is gekozen voor een bouwkundige aftimmering. Voor koopwoningen is de toepassing van brandwerende coatings complex. Om de werking en levensduur ervan te kunnen garanderen, is inspectie en mogelijk onderhoud noodzakelijk. Afspraken hierover dienen met elke individuele (potentiële) koper te worden afgestemd. In het voortraject is al een overleg met Bouwen Woningtoezicht begonnen, zodat op voorhand overeenstemming over de toepassing bestaat. Hierbij is aangegeven dat aan dit onderwerp extra aandacht zou worden geschonken in de bouwvergunning en de toetsing van de in te dienen documenten. De garantie voor het toe te passen systeem voor 50 jaar moest gedegen worden onderbouwd via gedetailleerde inspectie- en onderhoudsplannen. Voor de toetsing liet de gemeente zich bijstaan door Efectis. Als basis voor de kwaliteitsborging is de *Kwaliteitsrichtlijn Applicatie Brandwerende Coating* gebruikt. Voor de hoofdconstructie zijn vier brandwerende systemen toegepast, toegepast op de locatie van de constructie.

- Brandwerende coating Akzo Nobel Interchar 212.



Hoewel de krachten uit de bissectrices uit de voor- en achterzijde elkaar deels opheffen blijft een horizontale kracht op de atriumconstructie over.



Een systeem op epoxy-basis met oorsprong in de offshore, geschikt voor toepassing in de buitenlucht, zeer stootvast en bekend om een lage onderhoudsfrequentie. Het systeem is fabrieksmatig aangebracht en toegepast op alle staalconstructies in de buitenlucht.

- Brandwerend coating Multifire S605 WB. Een watergedragen systeem dat volledig tijdens de afbouw wordt aangebracht. Toegepast op in het zicht blijvende staalconstructies in het kantoor met een esthetische uitstraling.

- Plaatmateriaal Promatect-H.

Stootvast en waterbestendig. Daarom toegepast op in het zicht blijvend staal van de woningen, in het zicht blijvend staal van het kantoor zonder esthetische uitstraling en op het deel van de atriumbuis dat zich in het binnenmilieu bevindt.

- Plaatmateriaal Promapyr-350.

Niet stootvast. Toegepast op alle aan het zicht onttrokken staal van kantoor en woningen.

Lange-termijninvloeden

De verdeling van de horizontale belastingen uit wind en de excentriciteit over de atriumconstructie en de gevels wordt door een aantal variabelen bepaald, die niet eenduidig zijn te vast te leggen en die ook in de tijd kunnen variëren. De belangrijkste variabelen die zijn beschouwd, zijn de stijfheid van de betonnen gevels en de stijfheid van de fundering. De stijfheid van de betonnen gevel, omdat de stijfheid niet constant is over het gevelvlak en omdat de gevel zich anders zal gedragen voor de kortdurende windbelasting (stijver) en de permanent aanwezige excentriciteit (slapper door kruipinvloeden).

Hetzelfde geldt in mindere mate ook voor de stijfheid van de paalfundering, waarbij ook nog het effect van groepswerking van de grote poeren een rol speelde. Van beide variabelen is een boven- en ondergrens vastgesteld en is voor elke combinatie van de waardes het 3D-computermodel doorgerekend. Dat betekende dus vier rekenmodellen die ook door de aannemer zijn gebruikt voor de verdere detailengineering. Voor de bepaling van de verdeling van de horizontale belastingen was een 3D-computerprogramma onontbeerlijk.

Temperatuursinvloed atriumbuis

De atriumconstructie bevindt zich grotendeels in de buitenlucht en is onderhevig aan temperatuurswisselingen. De kolommen en THQ-liggers staan binnen. Met een bezonningsstudie is een temperatuursbelasting op de atriumbuis bepaald en ingevoerd in het 3D-rekenmodel. Al snel bleek dat uitzetting of krimp van de atriumconstructie tot grote spanningen in vooral de kolommen zou leiden. Op een aantal plaatsen zijn de kolommen dan ook gedilateerd. De THQ-liggers zijn ontworpen op de krachten die kunnen ontstaan door de temperatuursvervormingen van de atriumconstructie. De dilataties bij de kolommen zijn ook voor de bouwkundige detaillering leidend omdat de te monteren bouwkundige vliesgevels dezelfde vervormingen moeten kunnen volgen.

Verbindingen atriumbuis

Op de knopen van de atriumbuis ontmoeten de diagonalen de horizontale regels van de atriumbuis en worden grote verticale belas-

tingen uit de kolommen via consoles ingeleid. De in te leiden kracht uit de kolom bedraagt maximaal 5740 kN wat leidt tot een moment van 4300 kNm in de gietknoop. In de ontwerpfase is voor de verbindingen een afweging gemaakt tussen bouten en lassen. Uit kosten oogpunt en uitvoerbaarheid leek een geboute verbinding intuïtief het meest voor de hand liggen, maar bij een nadere uitwerking en analyse bleek het tegendeel. Omdat de inwendige ruimte in de HD profielen te beperkt is om tot een goede boutverbinding te komen, is het noodzakelijk verbindingen te maken met vergrootte kopplaten of met flensplaten. In beide gevallen geldt dat de knoop verder naar buiten moet worden geplaatst ten opzichte van de lastgevendende kolom. Dit om de minimale ruimte tussen de knoop en de glazen atriumgevel te bewaren voor reiniging en onderhoud. Dat leidt op zijn beurt weer tot vergroting van momenten en spanningen in de atriumbuis die een deel van de lagere uitvoeringskosten teniet doen. Dit in combinatie met hogere kosten voor het brandwerend maken van de verbinding en de de hogere exploitatiekosten voor geboute verbindingen gedurende de levensduur leidt tot een technische, maar ook een esthetische voorkeur voor gelaste verbindingen. Door vervolgens de knoop van de atriumbuis als integraal onderdeel van een van de diagonalen van de atriumbuis te ontwerpen, moeten slechts drie kolommen in het werk aan de knopen worden gelast. Tijdens een optimalisatieronde zijn voorstellen besproken om de knopen in gietstaal uit te voeren voor een beperkte hoeveelheid laswerk. Van belang is hierbij



De gietsknoop is integraal onderdeel van de diagonalen.

dat het aantal verschillen in vorm werd geminimaliseerd. Hierbij zijn de knopen onderin de atriumbuis met de grootste aansluitende profielen als uitgangspunt aangehouden. Om het vormwerk te vereenvoudigen werd het originele I-profiel voor de armen van het knooppunt omgezet naar een dubbel T-profiel (boven en onder), waardoor de holle ruimten binnenin het knooppunt in verbinding komen. Aanleiding is stollingsmechanisme van gietstaal. Door de aanpassing kon het hele binnenwerk worden gevormd met een zandkern in plaats van vier zandkernen.

De materiaalkeuze werd bepaald door drie factoren: de gewenste mechanische eigenschappen, de wanddikte en de lasbaarheid. De mechanische eigenschappen van staal worden verkregen door de chemische samenstelling, graad van vervorming door walsen of smeden en de thermische behandeling. Bij gietstaal ontbreekt uiteraard deze tussenstap. Dit moet worden gecompenseerd door een laaggelegeerde gietstaalsoort. Het gevolg is echter een stijging van het koolstof-equivalent en dus een afname van de lasbaarheid. Door de keuze van SEW 520: G20 MnMoNi5-5 als gietlegering werd aan alle criteria voldaan. Een 0,2%-rekgrens van minimaal 355 N/mm², een treksterkte van minimaal 550 N/mm² en een kerfslagwaarde KV ≥ 42 J bij -20°C op een sectie tot 300 mm. De lasbaarheid is gegarandeerd door de samenstelling sturen binnen de randvoorwaarden van de norm. Met trekproeven is een minimale sterkte bij een 0,2%-rekgrens bereikt van 430 N/mm² en een minimale treksterkte van 594 N/mm². Voor een knies-



Er zijn 20 gietsknoepen toegepast van 3 verschillende typen.

oor: door het aantal vormvarianten van de knopen te beperken, ontstaan boven in de atriumbuis sprongen in de overgang van de knoop naar de aansluitende profielen, omdat deze hier kleiner zijn.

Lassen

Om de lassers te faciliteren zijn plateaus met tenten om de knopen gebouwd. Voor kwalitatief goede lassen zijn de knopen voorverwarmd tot 150 °C. Ter voorkoming van het opschuimen van de brandwerende verf is de coating op de aansluitende HD profielen 150 mm teruggehouden. Deze maat is bepaald met voorverwarmingsproeven op zowel het lichtste als zwaarste HD-profiel. Na het lassen is de knoop in het werk brandwerend gecoat. In de uitvoering leverde de beoogde controle van de lassen discussie op omdat de geometrie van de aansluiting van de staven op de gietsknoepen ongeschikt is voor ultrasone metingen. Met eenzijdig ultrasoon onderzoek – via een hoektaster – kan slechts 55% tot 60% van de las worden gecontroleerd.

De lassen zijn ontworpen op een minimaal moment van 25% van de maximale momentcapaciteit van de aansluitende staaf conform artikel 11.4 van NEN 6772.

Met aanvullende berekeningen is aangetoond dat voor de aanwezige normaalkrachten, momenten en initiële vooruitbuiging van de staaf volgens artikel 12.3.1.2.1 van NEN 6772 verhoogd met een 2^e-orde effectmomenten kleiner zijn dan de op basis van de controlemetingen te garanderen 0,55x25%= 13,75% momentcapaciteit van de aansluitende staaf. •



Hoofdvorm met 'patatzak'-silhouet.

Projectgegevens

Locatie Leyweg, Den Haag • *Architectuur* Rudy Uytenhaak Architectenbureau, Amsterdam • *Constructief ontwerp* Aronsohn Constructies raadgevende ingenieurs, Rotterdam • *Installatie-ontwerp* Halmos adviseurs, Den Haag • *Bouwfysisch advies* ZRi, Den Haag • *Uitvoering* BAM Utiliteitsbouw, Rotterdam • *Staalconstructie* Iemants, Arendonk (B) • *Gietsknoepen* Allard Europe, Turnhout (B) • *Fotografie* Aronsohn, Erik Stelkenburg

Technische gegevens gietsknoepen

(G20 MnMoNi5-5 volgens SEW 520)

Type 1: knooppunt in X-vorm zware uitvoering (12 stuks) *Afmetingen* 1343x1075x973 mm

• *Gewicht* 3400 kg, gietgewicht 5700 kg

Type 2: knooppunt in X-vorm medium uitvoering (5 stuks) *Afmetingen* 1324x1055x918 mm

• *Gewicht* 2615 kg, gietgewicht 4400 kg

Type 3a en 3 b: knooppunt in halve X-vorm zware uitvoering *Afmetingen* 912x1045x918 mm

• *Gewicht* 2170 kg, gietgewicht 4200 kg

Literatuur

1. CUR Aanbeveling 103, *Windtunnelonderzoek voor de bepaling van ontwerp-windbelastingen op (hoge) gebouwen en onderdelen ervan*, 2005.
2. NEN 6702 (TGB 1990. Belastingen en vervormingen), 2007 + C1, 2007 + A1, 2008.
3. A.F. Hamerlinck, *Kwaliteitsrichtlijn applicatie brandwerende coating*, Bouwen met Staal, Zoetermeer 2010 (2e druk), formaat A4, 16 p.
4. SEW 520. (Hochfester Stahlguß mit guter Schweißseignung. Technische Lieferbedingungen), 1996.
5. NEN 6772 (TGB 1990. Staalconstructies. Verbindingen), 2000 + A1, 2001.