

Maatpak van Deltaribben

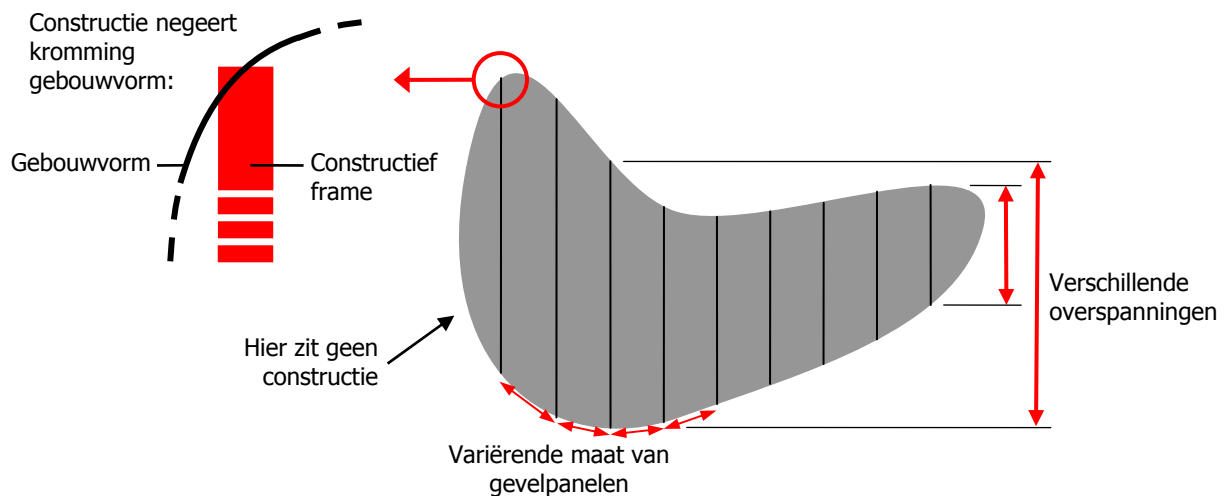
Nieuw constructief systeem voor vrijgevormde gebouwen¹

dr.ir. Martijn Veltkamp

Technische Universiteit Delft / Adams Kara Taylor, e-mail: info@morethanstructures.eu

Staalconstructies voor vrijgevormde gebouwen, zogenoemde Blobs, waren tot nu toe vaak conventionele vlakke spantconstructies opgebouwd uit standaardprofielen, een totale tegenspraak met de gebouwworm die allesbehalve standaard is, en daarom ook niet als zodanig behandeld zou moeten worden. Onderzoek aan de TU Delft toont aan dat het ook anders kan: met Deltaribben, een netwerkconstructie van maatwerk-ribben die naar behoefte kunnen krommen en torderen, dit alles gewoon met bestaande productietechnieken.

Tallose onregelmatig gevormde gebouwen zagen de afgelopen jaren het licht. De draagconstructie van dergelijke gebouwen blijkt veelal te zijn opgebouwd uit standaard stalen I-profielen, soms gebogen, vaak slechts een polygonale benadering van een vrije vorm. De spanten zijn altijd vlak, en komen in allerlei configuraties voor: met evenwijdige vlakken, alsof het gebouw door een eiersnijder is gehaald, en een radiale indeling met vlakken min of meer haaks op een deel van het geveleppervlak. Constructief gezien wordt het gebouwvolume gereduceerd tot een aaneenschakeling van tweedimensionale constructies, allemaal werkend in buiging. Door deze opbouw uit vlakke spanten is de constructie weliswaar makkelijk te tekenen en te maken, maar dit heeft als bijeffect dat de overspanningen per spant sterk variëren, net als de door de gevelbekleding te overbruggen afstand tussen de spanten (Figuur 1). Verder is de aansluithoek tussen spant en gevel niet constant, waarvoor een speciaal – bijvoorbeeld instelbaar – detail ontworpen moet worden. Een andere plaatsing van de spanten (bijvoorbeeld als een waaier) lost deze problemen maar ten dele op. Al voldoen de spanten aan alle constructieve eisen en lijken ze een eenvoudige oplossing, het is geen oplossing die geëigend is voor de situatie.



Figuur 1. Problemen met een spanten-structuur over een vrijgevormd gebouw.

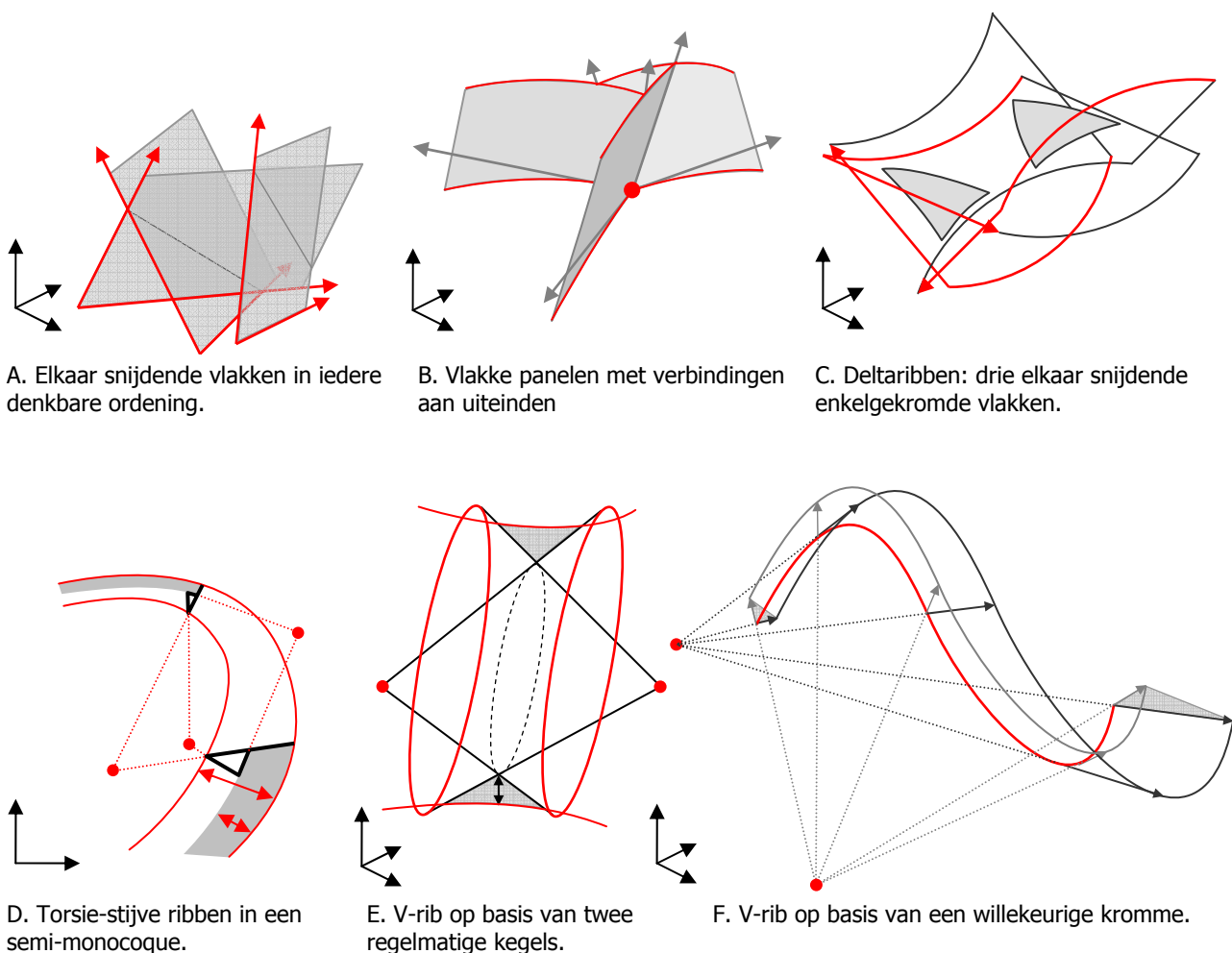
Wat nodig is om onregelmatig gevormde gebouwen te realiseren zijn constructiesystemen die wel geëigend zijn voor deze vormen. Dergelijke constructies moeten in de eerste plaats de gebouwworm kunnen volgen, en dus minstens één gekromde rand hebben. Waar vlakke constructies alleen in hun eigen vlak werken, met buigende momenten en normaalkrachten tot gevolg, is de krachtswerking in niet-vlakke spanten driedimensionaal, en zal hier ook torsie in optreden. De elementen moeten hier dus weerstand tegen bezitten. Verder moeten ze, om arbeidsintensieve berekeningen, detailleringen en aanpassingen te voorkomen, systematisch en als samenspel van constructieve capaciteit en geometrie zijn opgezet. Ze zijn dan repliceerbaar over de hele gebouwworm en arbeidsintensieve ad-hoc oplossingen zijn niet meer nodig.

¹ Dit artikel is de uitgebreide versie van het in augustus 2008 onder dezelfde titel in *Bouwen met Staal* gepubliceerde artikel.

Uit onderzoek aan de TU Delft naar mogelijke draagsystemen voor Blob-gebouwen² is een – inmiddels gepatenteerd – alternatief voor de vlakke spanten voortgekomen: Deltaribben. Het is een van de in totaal 23 oplossingsrichtingen, waarvan er in Figuur 2 een aantal staan die in staal uitgevoerd zouden kunnen worden. Deze alternatieven zijn gebaseerd op het bestuderen van eerdere vrije-vorm constructies (in gebouwen en andere disciplines), en de productietechnieken die zich hiervoor lenen.

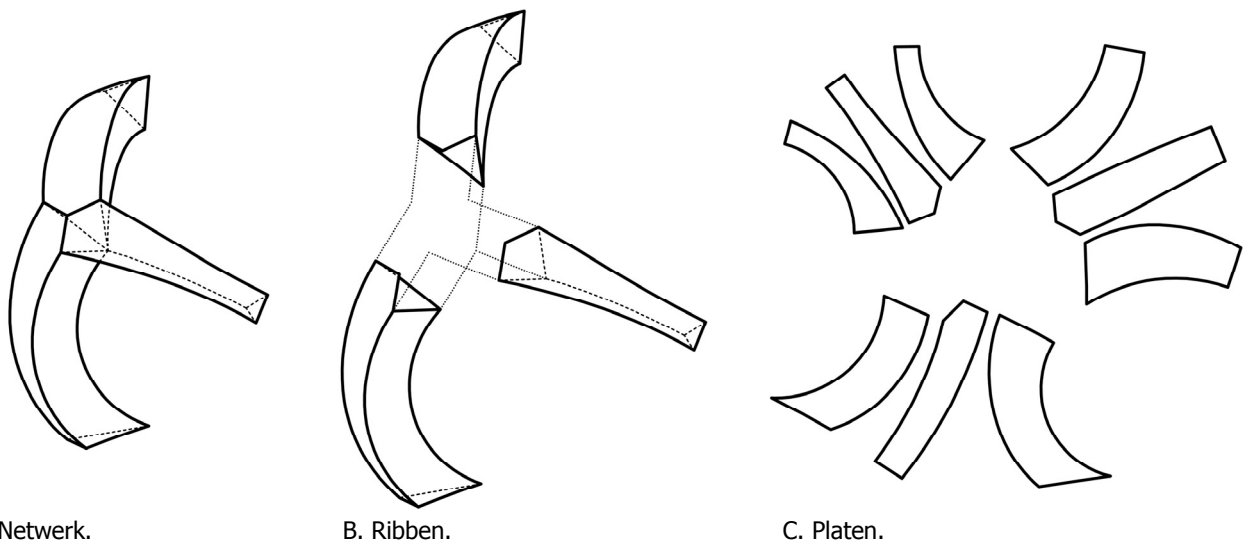
Het Deltaribben-systeem is een netwerkconstructie van ribben met een driehoekige doorsnede, opgebouwd uit drie gekromde dunne staalplaten. Door de vorm van de platen en de mate van kromming aan te passen, veranderen de vorm en afmetingen van de rib. Zo kunnen ribben naar behoefte krommen en torderen, en kan de constructieve capaciteit binnen één rib verlopen. Bovendien hebben de ribben zo een vrijwel constante oriëntatie ten opzichte van de omhulling, wat het aanbrengen van gevelbekleding vergemakkelijkt. Figuur 3 toont hoe per knooppunt drie rib-einden met gelijke hoogten direct – zonder tussenkomst van een aparte knoop – op elkaar aansluiten.

De vormvrijheid van de netwerkconstructie kan bestaan dankzij de vormvrijheid van de ribben, die op hun beurt geleverd wordt door de vormvrijheid van plaat-uitslagen. De gehele vormvrijheid van de constructie valt dus te herleiden tot de contouren van vlakke platen. Deze vormvariëteit is eenvoudig te beheersen omdat ze computergestuurd uitgesneden kunnen worden.



Figuur 2. Een greep uit de oplossingsrichtingen die in het onderzoek *Free Form Structural Design* naar voren zijn gekomen. Dit artikel gaat over een ervan: Deltaribben.

² M. Veltkamp, *Free Form Structural Design*, proefschrift Technische Universiteit Delft, september 2007. IOS press, Amsterdam.



A. Netwerk.

B. Ribben.

C. Platen.

Figuur 3. Opzet van het Deltaribben systeem: het netwerk (A) bestaat uit ribben (B), en elk van de ribben bestaat uit drie gekromde, op maat gesneden platen (C).

Ontwerpen met Deltaribben

Deltaribben zijn ontstaan uit het bestuderen van achtbanen, constructies die wat betreft eisen aan onregelmatigheid en constructieve werking gelijkenis vertonen met Blob-constructies. Op bezoek bij achtbanenbouwer Vekoma om te zien hoe achtbanen worden gemaakt, suggereerde het hoofd van de productie-afdeling of er niet iets aan spiraal-gewalste buizen viel te manipuleren door de plaatvorm te veranderen. Dit bleek niet zinvol omdat bij een verandering van de plaatbreedte onmiddellijk ook de te walsen kromming aangepast moet worden, hetgeen de productie compliceert. Wel ontstond het idee om ribben uit gekromde platen samen te stellen tot een rib met unieke eigenschappen. De driehoekige doorsnede komt voort uit het gegeven dat drie platen het minimale aantal is om een gesloten doorsnede te vormen. De systematiek van Deltaribben laat ook vier (en meer)-hoekige doorsneden toe. Door de ribben volgens bepaalde geometrische regels te genereren, kan de kromming constant zijn (de wenselijkheid hiervan kwam in het ontwikkelingstraject naar voren tijdens overleg met buigbedrijf Kersten Europe), terwijl de plaatvorm alle vormvariëaties voor zijn rekening neemt. De Deltarib was geboren.

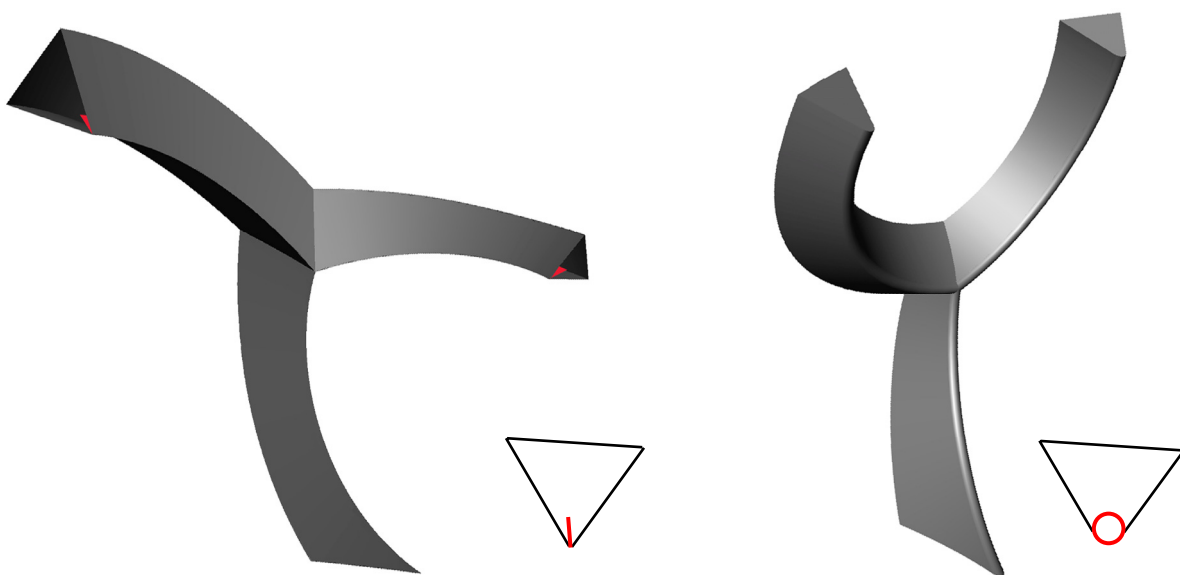
Het systeem voldoet aan alle gestelde vereisten voor een Blob-geëigend systeem: het kan krommingen volgen, het kan gevormd worden naar de benodigde constructieve capaciteit, en zoals verderop zal blijken, kan het op een systematische manier voor maatwerk-toepassingen gegenereerd worden.

Onderzoek naar de nieuwheid van het principe van het systeem toonde aan dat een uit drie platen opgebouwde gekromde rib al wel als losstaand, symmetrisch element bekend is uit onder andere de luifel van de Beurspassage in Rotterdam (zie Figuur 4). Echter, het vormen van een netwerk waarin drie ribben in een punt bij elkaar komen, was nog niet bekend. Omdat de ribben stuk voor stuk worden gegenereerd, legt het systeem zelf geen beperking op de toepassing in een netwerkstructuur: hoeveel netwerkpunten er zijn, waar deze liggen en welke ervan door ribben verbonden zijn (bijvoorbeeld als vijf- en zeshoeken), kan vrij worden bepaald. Het genereren van de ribben moet in een ontwerpprogramma geautomatiseerd worden, met daarbij de mogelijkheid om het model aan te passen op basis van de constructieve analyse. Dit ontwerpprogramma kan een uitbreiding zijn van een bestaand driedimensionaal ontwerpprogramma.



Figuur 4. Deltarib avant la lettre: een gekromde rib met driehoekige doorsnede in de luifel boven de Beurspassage in Rotterdam, maar symmetrisch en niet in een netwerkconstructie.

Zodra van een netwerkconstructie is bepaald waar de knooppunten liggen en tussen welke knooppunten ribben lopen, kan het op twee manieren verder worden uitgebouwd tot ribben: door uit te gaan van de hoekpunten waarin driemaal twee rib-zijden op elkaar aansluiten, danwel door uit te gaan van een randkromme die ook daadwerkelijk een rand van een rib wordt (zie kadertekst *Van netwerk naar constructie*). Beide methoden genereren ribben waarvan de gekromde zijden afwikkelaar zijn (zie kadertekst *Afwikkelbare vlakken*), en waarvan de kromming bovendien om productietechnische redenen constant is (zie kadertekst *Computergestuurd rondwalsen*). De twee methoden kunnen ook in één rib worden gebruikt: de twee zijanten opgebouwd vanuit een randkromme, en de bovenkant vanuit punten. Hoewel beide methoden in Deltaribben resulteren, bieden ze verschillende mogelijkheden waarop de rib-geometrie beheerst en gemanipuleerd kan worden. Dit is met name van belang als een extra strip of buis de stijfheid en sterkte van de ribben moet vergroten (zie Figuur 5). In het eerste geval (hoekpunten) is het vereist dat de aansluiting tussen twee ribzijden een vlakke kromme is, in het tweede geval (randkromme) is het wenselijk dat de randkromme niet alleen vlak is, maar ook dat de kromming constant is. Deltaribben kunnen met deze randvoorwaarden worden gerealiseerd.



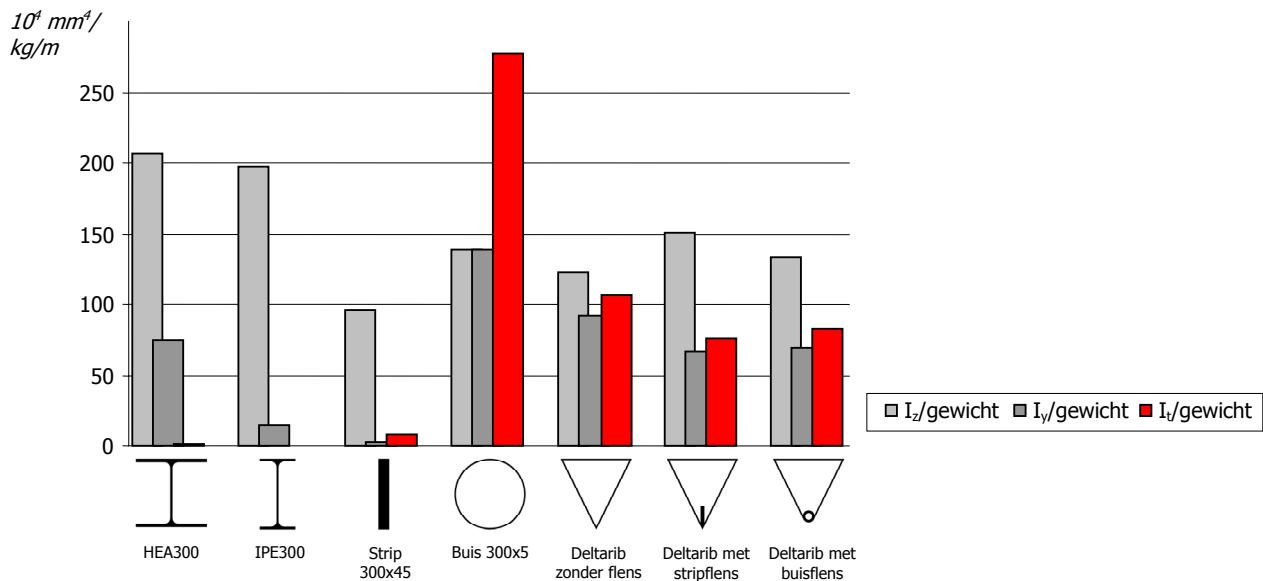
A. Scherpe onderrand met daarin een strip.

B. Afgeronde rand door een buis.

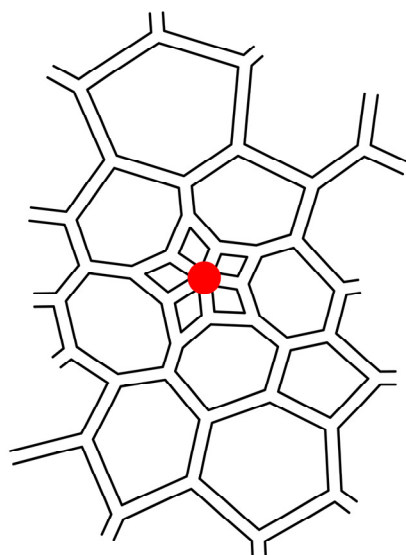
Figuur 5. Deltaribben met een extra inwendig element als flens.

Doordat van iedere rib de ribzijden apart gegenereerd worden, biedt het systeem volop mogelijkheden om te anticiperen op de krachtswerking: allereerst kan op macro-schaalniveau de dichtheid van het netwerk (zie Figuur 7) inspelen op de krachtswerking. Ten tweede kan in zones met veel buiging de buigcapaciteit worden vergroot door het toepassen van hogere ribben. Tot slot kunnen dikkere platen krachtsconcentraties opvangen. Op deze manier kan buiging in iedere richting, inclusief torsie, worden geanticipeerd.

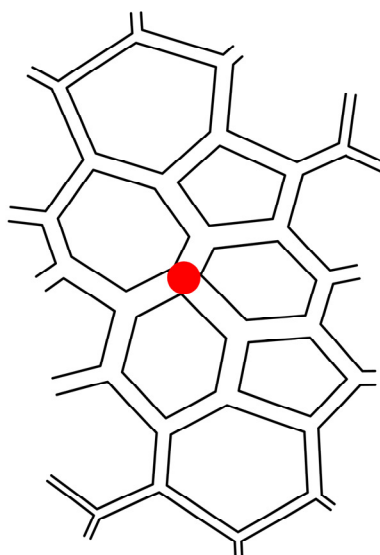
Voor buiging in één vlak heeft een Deltarib door de afwezigheid van een onderflens een weinig efficiënte doorsnedeform. Echter, als de buigstijfheden per massa van Deltaribben worden vergeleken met die van HEA-, IPE- en buisprofielen (zie Figuur 6), blijkt dat Deltaribben met name efficiënt zijn in situaties waarin behalve buiging ook torsie voorkomt. Met toevoeging van een buis- of stripvormige onderflens, is de buigstijfheid van Deltaribben vergelijkbaar met die van buizen van gelijke hoogte. Hierbij moet worden aangetekend dat de ribben door hun gesloten doorsnede weliswaar relatief licht zijn in gewicht, maar niet in verschijning.



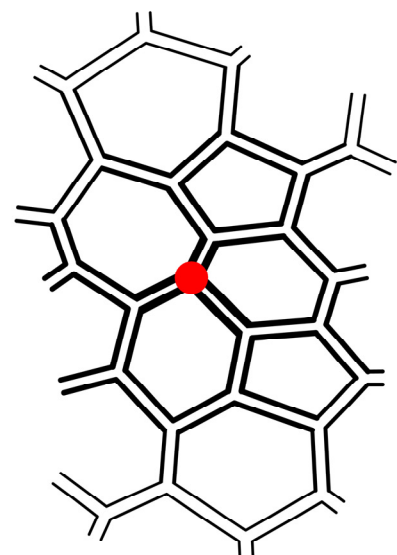
Figuur 6. Vergelijking tussen de oppervlaktetraagheidsmomenten I_z en I_y en het traagheidsmoment I_t gedeeld door het gewicht per lengte van de balk, van profielen met een hoogte van 300mm.



A. Hogere netwerk-dichtheid nabij oplegging.



B. Gelijkmatige netwerk-dichtheid, met verloop in de rib-hoogtes.



C. Gelijkmatige netwerk-dichtheid, met variatie in de toegepaste plaatdiktes.

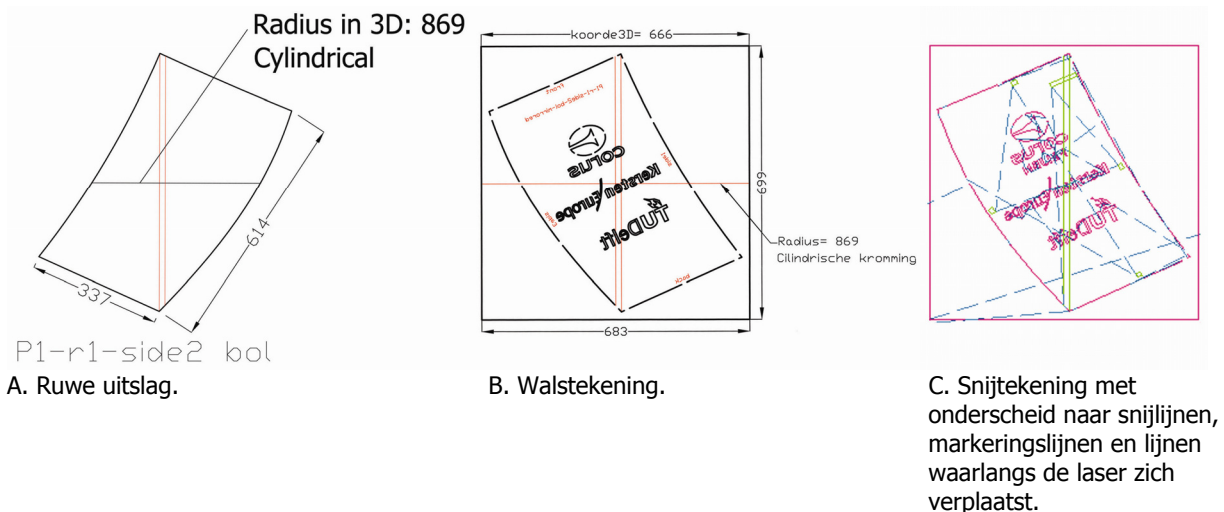
Figuur 7. Schematische weergave van verschillende wijzen om de constructieve capaciteit van een netwerk te vergroten in de buurt van een oplegging (aangeduid met een rode stip).

Prototypen

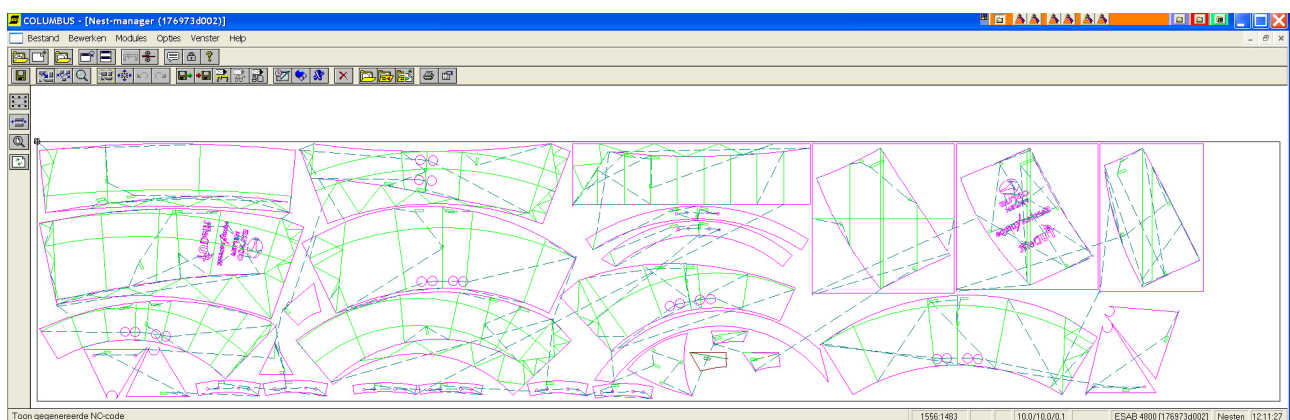
Om te testen of de theorie van de afwikkelbare vlakken ook bouwbare constructies oplevert, zijn met hulp en sponsoring van Corus en Kersten Europe drie prototypen van de Deltaribben gebouwd: een eenvoudige balk om het principe te demonstreren, een knooppunt van drie ribben met buis-flenzen en een knooppunt van drie ribben met strip-flenzen (Figuur 11). De laatste twee prototypen hebben bovendien montagedelingen in de ribben, zodat ook de uitvoerbaarheid hiervan wordt beproefd. Voor het bouwen van de prototypen zijn alle stappen van ontwerp tot realisatie doorlopen, en is hun samenhang getest.

Na het ontwerp van de prototypen in de driedimensionale modelleringsprogramma's Maya en Rhinoceros met gebruikmaking van zowel de hoekpunten-methode als de gekromde randmethode, zijn de gekromde ribzijden digitaal afgewikkeld. De nog kale uitslagen (Figuur 8A) zijn vervolgens verder ge-engineerd ten behoeve van walsen (Figuur 8B) en snijden (Figuur 8C). Voor het walsen zijn twee rechte referentielijnen en een cirkelvormige onderrand nodig, welke als overmaat aan de eigenlijke ribzijden getekend worden. Deze overlengtes zijn met bruggen aan de ribzijde gekoppeld, zodat ze na het walsen snel verwijderd kunnen worden. Alhoewel handwerk, zijn alle stappen systematisch van aard en daarom in principe ook automatisch reliceerbaar.

Omdat de platen laser-gesneden zijn, konden ook allerlei markeringen op de platen aangebracht worden, welke het rondwalsen vergemakkelijkten. Na aanlevering van de te snijden contour en markeringslijnen, genereert de operator van de snijmachine een plaatindeling, en optimaliseert het pad dat de laser gaat volgen. Uit Figuur 9 blijkt dat dankzij geautomatiseerd nesten ondanks onregelmatige vormen de staalplaat toch nog efficiënt benut kon worden. Dankzij de aangebrachte markeringen, verliepen het snijden en rondwalsen zonder problemen.



Figuur 8. Opwerking van ruwe uitslag tot gereed voor productie.



Figuur 9. Indeling plaat voor het lasersnijden (Corus).



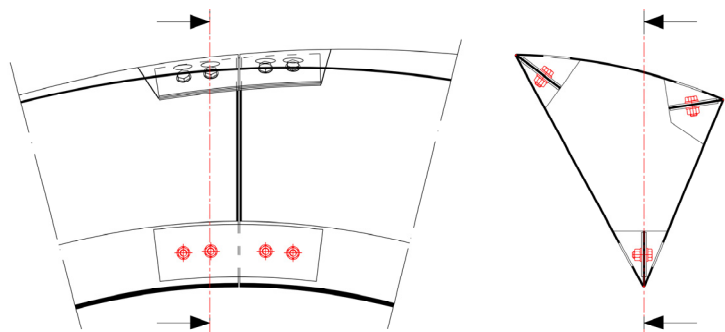
Figuur 10. Positioneren van de platen.

In het Laboratorium voor Bouwtechnologie van de TU Delft zijn de wals-overlengtes verwijderd, waarna per rib de gekromde zijden handmatig zijn gepositioneerd (Figuur 10) en daarna met hechtlassen vastgezet. Dit positioneren ging vlekkeloos en exact bij de ribben zonder extra element in de rand (drie platen vormen bij correcte passing vanzelf een stabiele doorsnede), het ging lastiger met de strip-onderrand (bij een doorsnede bestaande uit drie platen plus een strip ontstaat een mechanisme) en het ging ronduit moeilijk bij de ribben met een buisvormige onderrand, omdat de theoretisch rakende aansluiting van plaat op buis in het werk niet door een intern controleprincipe tot op de millimeter nauwkeurig te plaatsen was. De interne schotten konden wel als referentie worden gebruikt. De ribben zijn daarna eerst afgelast, en pas daarna langs een vooraf aangebrachte lasmarkering in tweeën gedeeld. De twee delen worden vervolgens met bouten verbonden (Figuur 12).

Alle randen van de rib bij elkaar leveren een grote te lassen lengte op. Bij bouw van werkelijke constructie met Deltaribben zou dit computergestuurd gedaan kunnen worden. De lasrobot krijgt de informatie over waar deze moet lassen niet alleen uit een digitaal model, maar heeft zelf ook een voelkop die de te lassen rib-rand volgt.



Figuur 11. Twee van drie gerealiseerde prototypen.

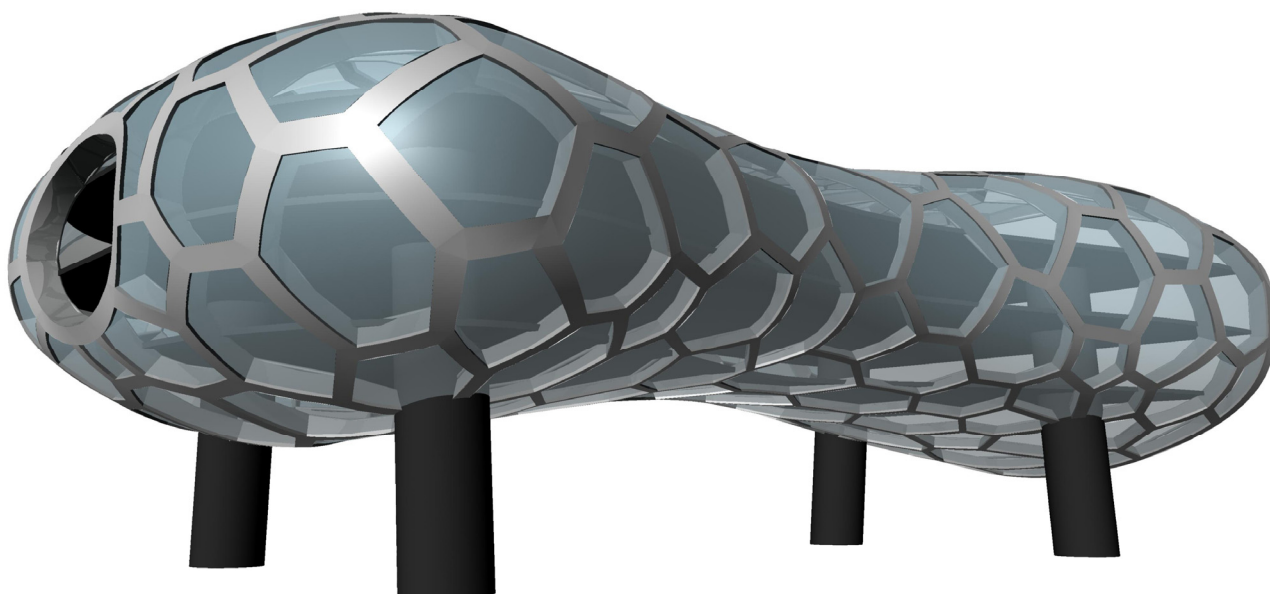


Figuur 12. Geboute verbinding in een rib met inwendige strip-flens.

Uit de inmeting van de voltooide prototypen bleek dat de maatafwijking per rib enkele millimeters bedraagt, en dat de grootste afwijkingen van 20mm ontstaan door het verbinden van de ribben onderling. Dit stemt overeen met de ervaringen tijdens de bouw. Om de ribben nauwkeurig te positioneren moet de maatvoering per stap gecontroleerd kunnen worden met het digitale model, waarvoor de hoekpunten zich het best lenen. Om de ribben met een strip- of buisflens zelf maatvast te houden, moet de materiaaldikte al in het bepalen van de snijvormen van de verdisconteerd worden.

Toepassingsgebied

Met het Deltaribben-systeem zouden constructies zoals die in Figuur 13 gebouwd kunnen worden. Echter, ook voor kleinere objecten zoals luifels en portalen kunnen de troeven van het systeem tot hun recht komen. Ook zou het systeem als constructie voor achtbanen kunnen dienen. Wie zelf een idee heeft waarvoor het systeem toegepast kan worden, wordt uitgenodigd contact op te nemen met de auteur.



Figuur 13. Voorbeeld van een constructie met Deltaribben.

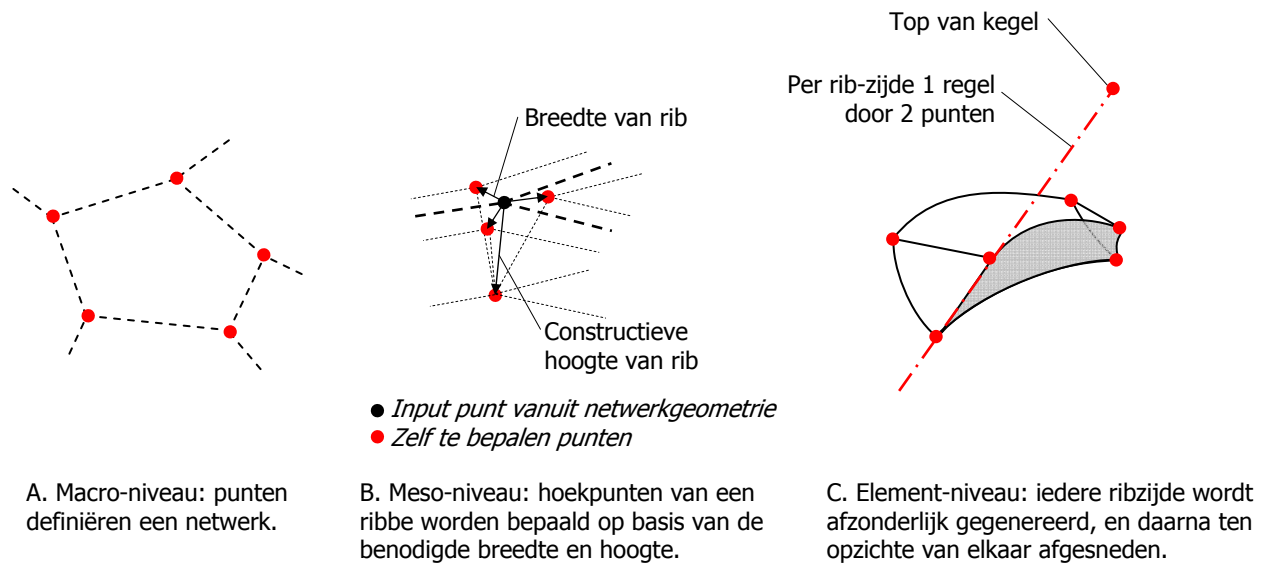
Slot

Alhoewel met het Deltaribben-systeem in de eerste plaats het constructief ontwerp van Blobgebouwen een stap verder is gebracht, is het systeem ook een demonstratie van het uitnuttigen van de nu beschikbare technologie. In plaats van een technologie bij een ontwerp te zoeken, is het van een meer generieke waarde de productie-technische randvoorwaarden van aanwezige productietechnologiën te vertalen naar regels voor het genereren van geometrische objecten. Door deze regels te implementeren in modelleerprogramma's met scripting-faciliteiten, kan vervolgens een oneindige variëteit aan objecten worden gegenereerd, die per definitie allemaal bouwbaar zijn. •

Van netwerk naar constructie

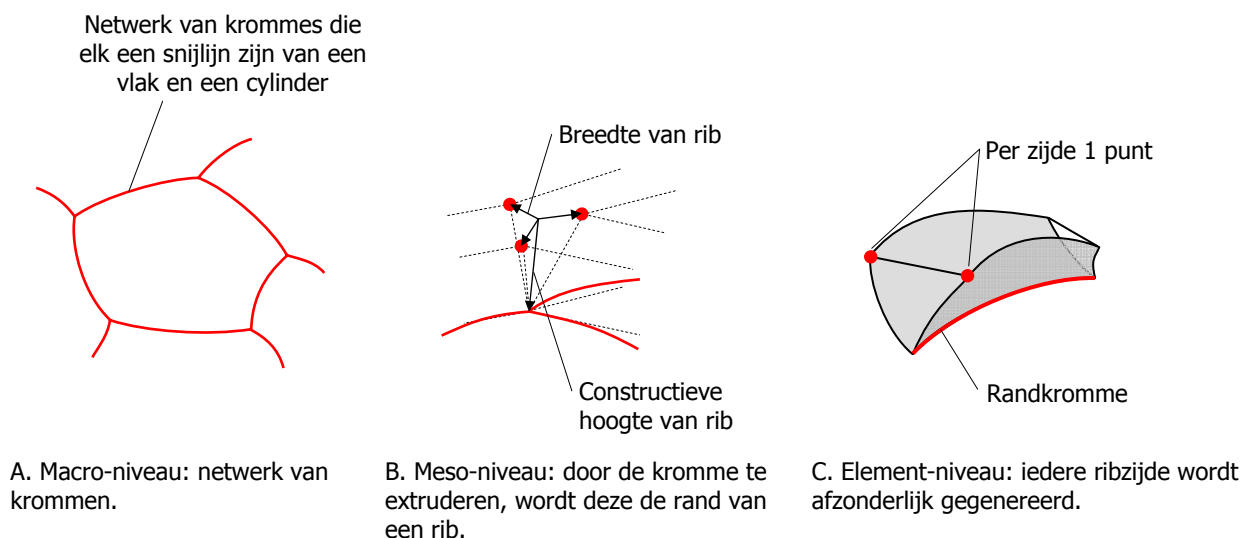
Een netwerkschema kan op twee manieren worden uitgebouwd tot ribben:

1. Door per knooppunt van het schematische netwerk een constructieve hoogte, en per rib een breedte toe te kennen. Samen bepalen deze per knooppunt de vier hoekpunten waarin de randen van drie ribben op elkaar aansluiten. De constructieve capaciteit wordt eenvoudig vergroot door ribben met een grotere hoogte of breedte te nemen.



Figuur 14. Het opbouwen van Deltaribben vanuit hoekpunten.

2. Door uit te gaan van een randkromme, en deze te extruderen – al dan niet gelijktijdig met een verschaling. De uitgangskromme wordt uiteindelijk een rand van een rib. Als deze rand versterkt moet worden met een buis, moet de rand een cirkeldeel zijn. De buis heeft dan een constante buigstraal, met de productietechnische voordelen van dien.



Figuur 15. Het opbouwen van Deltaribben vanuit een rand.

Computergestuurd rondwalsen

Stalen platen kunnen worden gekromd door ze tussen drie evenwijdige rollen door te bewegen: twee aan de ene kant van de plaat, en tussen deze twee aan de andere kant van de plaat, de derde. Door de druk van de derde rol zo ver te vergroten dat de spanningen in de plaat de vloeigrens overschrijden, en tegelijkertijd de plaat heen en weer te bewegen, wordt de plaat in een cilindervorm gebogen. Door een verschillende druk aan de twee uiteinden van de instelbare rol, wordt een zijde van de plaat sterker gekromd dan de andere, waardoor een kegelvorm ontstaat. De plaat zal aan de zijde met de grootste buigstraal versneld tussen de

rollen door moeten slippen omdat de te walsen lengte daar groter is dan aan de andere zijde. Voor niet-constante krommingen moeten de instellingen tijdens het walsen variëren, wat een delicaat proces is.

Alhoewel het regelen van de druk en het heen en weer rollen van de plaat voorgeprogrammeerd kunnen worden (dat zou dan computergestuurd walsen zijn), zorgen variaties in materiaaleigenschappen ervoor dat de resulterende vormen toch verschillend zijn. Computergestuurd walsen werkt in de praktijk dan ook alleen bij grote series, waarbij de vakman die de wals bedient de eerste exemplaren gebruikt om het walsprogramma in te stellen. Bij een seriegrootte van 1 is er pas sprake van computergestuurd walsen als het walsapparaat zelf het gewalste object op kan meten en hieruit de benodigde aanpassingen terug kan rekenen en uitvoeren. Totdat het zover is, hangt het resultaat af van het vakmanschap van de walser. Een constante kromming per element vereenvoudigt hierbij het nameten en het bepalen de benodigde correcties.

Afwikkelbare vlakken

Afwikkelbare vlakken (synoniem voor enkelgekromde vlakken) kunnen zonder scheuren of plooiën tot een plat vlak uitgerold worden. Deze vlakken zijn op basis van uitsluitend buiging (en geen extensie) van plaatmateriaal te maken. Voor het maken van een dubbele kromming daarentegen moet het materiaal uitgerekt worden, bijvoorbeeld met een explosie.

Dankwoord

Corus, Kersten Europe en de afdeling Bouwtechnologie van de faculteit Bouwkunde van de TU Delft worden hartelijk bedankt voor hun bijdragen aan de prototypen in de vorm van kennis, materieel, arbeid en financiële steun, zonder welke ze niet gebouwd hadden kunnen worden.

Over de auteur

Martijn Veltkamp is civiel ingenieur en in september 2007 gepromoveerd aan de faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft. Hij werkt nu als constructief ontwerper bij het Britse ingenieursbureau Adams Kara Taylor verder aan het realiseren van Blob-gebouwen. Dit artikel beschrijft een onderdeel van zijn promotie-onderzoek Free Form Structural Design. Het gelijknamige proefschrift is uitgegeven bij uitgeverij IOS Press in Amsterdam, maar is ook te downloaden van de website van de bibliotheek van de TU Delft. Over Deltaribben en andere innovatieve constructies is meer te lezen op de website van de auteur: www.morethanstructures.eu