

Ontwikkeling van houten gridshells via schaalmodellen

Martha Gorecki

Studentennummer: 01302149

Lisa Maes

Studentennummer: 01408348

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. dr. ir.-arch. Jan Belis

Begeleiders: David De Wolf, Dries Mouton, Arthur De Roover

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2019-2020

De auteurs geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

The authors give permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In all cases of other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state explicitly the source when quoting results from this master dissertation.

Martha Gorecki en Lisa Maes, juni 2020

Ontwikkeling van houten gridshells via schaalmodellen

Lisa Maes

Studentennummer: 01408348

Promotoren: prof. Jan Moens, prof. dr. ir.-arch. Jan Belis

Begeleiders: David De Wolf, Dries Mouton, Arthur De Roover

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2019-2020

Woord vooraf

Deze scriptie vormt het sluitstuk van onze architectuuropleiding aan de Universiteit Gent. Voordat we dieper ingaan op ons onderzoek naar houten gridshells willen we graag via deze weg mensen bedanken. Zonder deze personen was onze scriptie niet tot stand gekomen.

Om te beginnen willen wij onze promotoren prof. Jan Moens en prof. Jan Belis bedanken om deze masterscriptie naar een hoger niveau te tillen. Ook bedankt aan David De Wolf, Arthur De Roover en Dries Mouton voor het begeleiden van ons onderzoek. We zijn ook dankbaar voor Raf De Preter zijn blijvende interesse en enthousiasme in ons onderzoek.

Martha – Bedankt aan mijn familie voor de steun en de goede zorgen tijdens de laatste weken in aanloop naar de deadline. Bedankt om boodschappen te doen, voor mij te koken, mijn was te doen en mij te verwennen met bananen, kersen, aardbeien en meloenen. Zonder jullie zouden de laatste maquette-tests niet gelukt zijn. Dikke merci aan mijn vader die mij door de laatste helse maanden heeft gesleurd met de nodige dosis humor en nuchterheid.

Bedankt aan onze buurvrouw om haar tuin ter beschikking te stellen om planken te verzagen voor het maquette-onderzoek. Bedankt Julie om mijn dagelijkse steun te zijn. Bedankt Velika voor de wandelingen en de babbels tijdens de lockdown. Bedankt aan de Nationale Veiligheidsraad voor de snelcursus presentatietechnieken. Bedankt aan de universiteitsbibliotheken voor de digitale ondersteuning en de eindeloze scanaanvragen uit te voeren.

En last but not least. Bedankt aan COVID-19 om van dit thesisjaar een onvergetelijke ervaring te maken, mij tot het uiterste te drijven en mijn creativiteit op de proef te stellen. Bedankt voor de migraine, de slapeloosheid en de eenzaamheid.

Lisa – Ik zou graag mijn ouders willen bedanken die me de mogelijkheid gaven om te studeren. Hun onvoorwaardelijke steun zorgde er voor dat ik deze opleiding kon afronden. Ook bedankt aan mijn broer, zussen en schoonzus om me altijd te motiveren en te helpen waar nodig. Aan mijn vrienden, bedankt om mijn studententijd onvergetelijk te maken. Tot slot wil ik ook mijn vriend Robbe bedanken om er altijd te zijn voor mij.

Graag wijzen wij de lezer op het feit dat deze masterscriptie geschreven is in uitzonderlijke omstandigheden. Door de uitbraak van COVID-19 in maart 2020 en de opgelegde veiligheidsmaatregelen, werd het onderzoek sterk bemoeilijkt. Het nodige materiaal en de juiste infrastructuur waren destijds niet meer beschikbaar, bovendien was een fysieke samenwerking uitgesloten. Desalniettemin werd getracht het onderzoek tot een goed einde te brengen. We zouden de UGent dan ook willen bedanken voor de mogelijkheid tot uitstel.

Martha & Lisa

Abstract

Het doel van deze scriptie is om een kleinschalige gridshell uit massief hout te ontwikkelen aan de hand van schaalmodellen. Ondanks dat er reeds heel wat onderzoek is uitgevoerd naar gridshells, is het aanbod aan gebouwde gridshells met een zuiver anticlastische vorm in massief hout beperkt.

Aan de hand van verschillende casestudies wordt een overzicht gemaakt van de meest voorkomende constructiemethodes van houten gridshells. Hierbij worden twee hoofdcategorieën vastgesteld; stijve gridshells en elastische gridshells. Stijve gridshells worden opgebouwd uit geprefabriceerde en voorgevormde elementen. De tweede groep, elastische gridshells, is de categorie waar we in dit onderzoek verder op ingaan. Bij elastische gridshells wordt altijd gestart van een vlak raster of vlakke elementen waarna deze worden vervormd naar hun structurele vorm door middel van het actief buigsysteem (*active bending*). *Mannheim Multihalle*, *Japan Pavilion* op Expo 2000 in Hannover en *Downland Gridshell* zijn drie elastische gridshells op grote schaal. Om inzicht te krijgen in het structureel principe van elastische gridshells, worden deze drie casestudies uitgebreid onderzocht. Hieruit worden enkele algemeen geldende principes vastgesteld die gebruikt zullen worden bij de ontwikkeling van een kleinschalige houten gridshell met een anticlastische vorm. Dit wordt vervolgens vergeleken met twee andere constructiemethodes, namelijk het regeloppervlak en de asymptotische gridshell. Op deze manier wordt een houten hyparschaal ontwikkeld met lowtech verbindingen die eenvoudig op te bouwen valt.

Extended abstract

This master dissertation aims to develop a small-scale gridshell from solid wood using scale models. Despite the fact that a great deal of research about gridshells has already been carried out, the range of built gridshells with a pure anticlastic shape in solid wood is limited.

After an introductory text, the chapter 'Gridshells' gives a general definition and classification of gridshells. Gridshells are shell structures made of individual elements. This master dissertation focuses mainly on wooden gridshells, but the structure can also consist of a composite material or steel bars. Gridshell can be very material efficient, due to their three-dimensional shape. With a good design, a light structure can be used over large spans. Gridshells can be divided into two main groups: rigid and elastic gridshells. Rigid gridshells are constructed from prefabricated and preformed elements. The construction of elastic gridshells always starts from a flat grid or flat elements. These are deformed to their structural shape by means of active bending. Further research of this master dissertation focusses on the construction method of elastic gridshells.

To understand these structural methods of elastic gridshells, three case studies were thoroughly investigated in the following chapter. Mannheim Multihalle, Japan Pavilion Expo 2000 and Downland Gridshell are three well-known and large-scale gridshells. Specific aspects of these case studies are being investigated, such as the design process, the joints and the erection process.

The first case study discusses the largest wooden gridshell in the world, the Mannheim Multihalle in Germany. This is the first double layer gridshell ever, built in 1975 by the team of architects Frei Otto and Carlfried Mutschler and the engineers at Ove Arup & Partners. A first test structure was built for development, the Essen gridshell.

The second case study concerns the design process and material use of the Japan Pavilion at Expo 2000 in Hanover, designed by the Japanese architect Shigeru Ban, the engineers of Buro Happold and Frei Otto as consultant. The result is a single layer gridshell made of cardboard tubes. It is remarkable how, through interference from the authorities, an initially low-tech, structurally pure principle had evolved into a complex and over-dimensioned structure. Although the pavilion is mainly built of cardboard tubes, this structure had a major influence on the further development of gridshells in general.

The last case study, the Downland Gridshell, is the first double layer gridshell in the UK, built in 2002 by Edward Cullinan Architects and Buro Happold. The knowledge gained during the construction of the Japan Pavilion was used to refine the erection process and safety during construction.

Chapter 5 clarifies the aim of this master dissertation. Research has shown that a whole series of gridshells have been built and analysed. From the classification discussed in chapter 2, we can say that gridshells can be constructed in different shapes and according to different construction methods. The range of gridshells with a synclastic or hybrid shape is endless. However, research of anticlastic gridshells is limited. For the further course of this research, the focus is on developing a wooden, small-scale gridshell in an anticlastic form. Additional criteria are that the gridshell can be built with limited resources, limited manpower, limited budget and within a limited time span. Three construction methods are tested for this;

- an elastic, regularly curved gridshell within a bi-directional grid pattern (traditional elastic gridshell)

- a rigid gridshell with straight ribs and a bi-directional grid pattern (ruled surface)
- an elastic, regularly curved gridshell with an asymptotic grid pattern (asymptotic gridshell).

The development of this gridshell is investigated on the basis of wooden scale models. To achieve correct results, testing is done with one single form, namely the hypar.

In the three chapters that follow, the three construction methods are tested and explained.

First, the construction principle of the traditional elastic gridshells is tested for the design of a hypar. This is the method discussed in the three case

studies. The research includes weaving and lashing wood.

Second, the elastic bending was briefly removed and straight ribs in a ruled surface were used. This with the aim to make the erection process easier. Again, we strive for an open structure that can stand without additional supports, such as columns.

Last, elastic bending is again used in this chapter. In this method, the ribs are already elastic bent in the flat grid. The search for a relatively simple erection process continues and efforts are still being made to secure this structure with as few external aids as possible.

Inhoud

1	Introductie.....	1
2	Gridshell.....	3
2.1	Definitie	3
2.2	Classificatie	4
2.2.1	Stijve gridshell	7
2.2.2	Elastische gridshell	8
3	Casestudies.....	11
3.1	Mannheim Multihalle.....	12
3.1.1	Ontwerpproces.....	13
3.1.2	Opbouw latwerk	14
3.1.3	Erectieproces	16
3.1.4	Ringbalk	17
3.1.5	Afwerking.....	19
3.2	Japan Pavilion Expo 2000	20
3.2.1	Ontwerpproces.....	21
3.2.2	Opbouw latwerk	21
3.2.3	Erectieproces	23
3.2.4	Obstakels	25
3.3	Downland Gridshell	26
3.3.1	Opbouw latwerk	27
3.3.2	Erectieproces	29
3.3.2.1	Oorspronkelijke methode.....	29
3.3.2.2	Uitgevoerde methode	30
3.3.3	Trial-and-error	33
4	Algemene constructieprincipes.....	34
4.1	Vorm.....	34
4.2	Opbouw latwerk.....	34
4.2.1	Houtsoort	34
4.2.2	Dimensies latten.....	36
4.2.2.1	Doorsnede van de latten	36
4.2.2.2	Lengte van de latten.....	37
4.2.3	Raster.....	38
4.2.4	Knooppuntverbindingen.....	39
4.3	Erectieproces.....	42

4.4	Ringbalk	42
4.5	Afwerking	43
5	Doel	44
5.1	Hyperbolische paraboloid	44
5.2	Architecturaal ontwerp	45
5.3	Plan van aanpak.....	47
5.3.1	Houtsoort	47
5.3.2	Dimensies latten.....	47
5.3.3	Verbindingen	47
5.3.4	Ringbalk	47
6	Traditionele elastische gridshell.....	48
6.1	Weven.....	48
6.1.1	Referenties	48
6.1.1.1	Traditioneel weven.....	48
6.1.1.2	Weven van gridshells.....	49
6.1.2	Maquette-onderzoek	51
6.1.2.1	Weven van wit karton	51
6.1.2.2	Weven van pitriet.....	51
6.1.2.3	Weven van roerstokken	52
6.1.2.4	Weven van raster met mazen 50 x 50 mm.....	53
6.1.2.5	Weven van raster met mazen 100 x 100 mm	54
6.1.2.6	Vergroten van de stijfheid.....	56
6.1.3	Conclusie	57
6.2	Sjorren	59
6.2.1	Theorie.....	59
6.2.1.1	Touw	59
6.2.1.2	Verbindingen	59
6.2.2	Maquette-onderzoek	62
6.2.2.1	Grenenhout 4 x 9 mm.....	62
6.2.2.2	Grenenhout 7 x 10 mm met ringbalk Ø 19 mm	68
6.2.2.3	Grenenhout 7 x 10 mm met ringbalk Ø 60 mm	71
6.2.3	Structurele analyse.....	76
6.2.4	Conclusie	83
7	Regeloppervlak.....	84
7.1	Referenties	84
7.1.1	Vigilante del Maule, Carlos Jarpa	84

7.1.2	Gerechtsgebouw Antwerpen, Richard Rogers	86
7.2	Theorie.....	87
7.3	Maquette-onderzoek	89
7.3.1	Bamboe stokken (diameter 2 mm), raster met mazen van 20 x 20 mm.....	89
7.3.2	Grenenhout (doorsnede 4 x 9 mm), raster met mazen van 50 x 50 mm.....	90
7.3.3	Vurenhout (doorsnede 18 x 18 mm), met behulp van een hefboomsarm	92
7.4	Structurele analyse.....	94
7.5	Conclusie	96
8	Asymptotische Gridshell.....	97
8.1	Referenties	97
8.1.1	The Asymptotic Gridshell, TU München, Eike Schling.....	97
8.1.2	The Asymptotic Gridshell, TU Göteborg, Emil Adiels	100
8.2	Theorie.....	102
8.3	Maquette-onderzoek	105
8.3.1	Karton (doorsnede 1,5 x 15 mm).....	105
8.3.2	Multiplex (doorsnede 3,6 x 36 mm)	107
8.3.3	Vurenhout (doorsnede 7 x 27 mm)	108
8.3.4	Noors dennenhout (doorsnede 22 x 45 mm)	111
8.4	Structurele analyse.....	116
8.5	Conclusie	118
9	Eindconclusie.....	120
10	Bibliografie.....	123

Lijst van figuren

Figuur 1-1: Hangmodel Sagrada Familia, Antoni Gaudí	1
Figuur 1-2: Hangmodel, Frei Otto [2]	1
Figuur 1-3: Methode kettingmodellen	1
Figuur 1-4: Duits Paviljoen Expo 1967, Montreal, Frei Otto (bron: Atelier Frei Otto)	2
Figuur 1-5: Mannheim Multihalle, Frei Otto (bron: Daniel Lukac)	2
Figuur 2-1: Definitie gridshell	3
Figuur 2-2: Krachtenverloop in schaalstructuren (links) en gridshells (rechts).....	3
Figuur 2-3: Monoclastische vorm.....	5
Figuur 2-4: Synclastische vorm.....	5
Figuur 2-5: Anticlastische vorm	5
Figuur 2-6: Hybride vorm	5
Figuur 2-7: Vigilante del Maule (bron: Carlos Jarpa).....	7
Figuur 2-8: Boathouse (bron: Shigeru Ban Architects).....	8
Figuur 2-9: Studentenproject, ETH Hönggerberg campus Zürich. (bron: ETH Zürich)	8
Figuur 2-10: Opbouw Centre Pompidou-Metz (bron: PERI Group).....	8
Figuur 2-11: Opbouw Centre Pompidou-Metz (bron: Ville de Metz/Christian Legay).....	8
Figuur 2-12: Mannheim Multihalle (bron: Daniel Lukac)	9
Figuur 2-13: Opbouw Mannheim Multihalle (bron: Atelier Frei Otto + Partner).....	9
Figuur 2-14: Studentenproject, SA Ahmedabad, India [6]	9
Figuur 2-15: The Asymptotic Gridshell (bron: Felix Noe)	9
Figuur 2-16: Soma City HOME-FOR-ALL (bron: Koichi Torimura).....	10
Figuur 2-17: Geodesic Gridshell (bron: Emil Adiels).....	10
Figuur 2-18: Sawmill Shelter (bron: Valerie Bennett)	10
Figuur 2-19: Sawmill Shelter (bron: Valerie Bennett)	10
Figuur 3-1: Mannheim Multihalle (bron: saai)	11
Figuur 3-2: Japan Pavilion (bron: Hiroyuki Hirai).....	11
Figuur 3-3: Downland Gridshell (bron: Edward Cullinan Architects)	11
Figuur 3-4: Interieurbeeld Bundesgartenschau Mannheim (bron: Frei Otto, saai)	12
Figuur 3-5: Dakplan Mannheim Multihalle [7]	12
Figuur 3-6: Hangende kettinglijn maquette (bron: saai).....	13
Figuur 3-7: Essen Gridshell (bron: Frei Otto).....	13
Figuur 3-8: Omhoog hijsen van de gridshell (bron: Frei Otto)	13
Figuur 3-9: PMMA maquette Essen gridshell (bron: saai).....	14
Figuur 3-10: PMMA maquette Multihalle onder belasting (bron: saai).....	14
Figuur 3-11: Bout door tweede en derde laag latten [8]	15
Figuur 3-12: Montage van het latwerk [9]	15
Figuur 3-13: Verbinding latten met 50 x 25 mm latten[7]	15
Figuur 3-14: Boutsleuf in uiterste lat [7]	15
Figuur 3-15: Detail knooppuntverbinding met veerring [7]	15
Figuur 3-16: Erectieproces Mannheim Multihalle [8]	16
Figuur 3-17: Steigertorens bevestigd aan H-vormige spreidbalken (bron: Atelier Frei Otto + Partner)16	
Figuur 3-18: Plan Mannheim Multihalle met ringbalkontwerp [7]	17
Figuur 3-19: Detail aansluiting ringbalk beton [7].....	18
Figuur 3-20: Detail ringbalk kilgoot [7].....	18
Figuur 3-21: Aansluiting ringbalk staalkabels [7]	18

Figuur 3-22: Detail aansluiting ringbalk staalkabels [7]	18
Figuur 3-23: Aansluiting gelamineerde ringbalk kolom[7]	18
Figuur 3-24:Aansluiting gelamineerde randboog [7]	18
Figuur 3-25: Detail van schuifspanningsblokken [7]	19
Figuur 3-26: Windverband van stalen kabels	19
Figuur 3-27: Japan Pavilion Expo 2000 (bron: Hiroyuki Hirai)	20
Figuur 3-28: Snede langs, snede dwars, plan [10]	20
Figuur 3-29: Prototypes van de verbindingen [12]	21
Figuur 3-30: Testmaquette gridshell (bron: Shigeru Ban Architects)	21
Figuur 3-31: Mock-up gridshell [13]	21
Figuur 3-32: Verbinding kartonnen kokers [10]	22
Figuur 3-33: Verbinding kartonnen gridshell, houten spanten en stalen trekkabels [13]	22
Figuur 3-34: Afwisselend wikkelpatroon van de knooppunten, met enkelvoudige (a) en gecombineerde sjoerverbinding (b) (bron: Hiroyuki Hirai)	22
Figuur 3-35: Axonometrie opbouw; (a) papieren membraan, (b) secundaire structuur, (c) gridshell, (d) fundering [9]	22
Figuur 3-38: Erectieproces Japan Pavilion [11]	23
Figuur 3-39: Boven: snede door houten ladderspant; onder: onderzijde gridshell: structureel systeem + snede [10]2F	24
Figuur 3-40: Aansluiting latwerk aan ringbalk zijgevel (bron: Hiroyuki Hirai)	24
Figuur 3-41: Weald and Downland Museum (bron: Buro Happold)	26
Figuur 3-42: Langsdoorsnede (bron: Edward Cullinan Architects)	26
Figuur 3-43: Mock-up gridshell (bron: Edward Cullinan Architects)	27
Figuur 3-44: Stalen klemverbinding [17]	28
Figuur 3-45: Boutverbinding [19]	28
Figuur 3-46: Knooppunt op lengteas [17]	28
Figuur 3-47: Verbinding raster met mazen van 0,50 x 0,50 m	28
Figuur 3-48: Axonometrie prototype klemverbinding (bron: Edward Cullinan Architects)4F	28
Figuur 3-49: Raster Downland Gridshell	28
Figuur 3-50: Erectieproces Downland Gridshell (bron: Edward Cullinan Architects)	29
Figuur 3-51: Oorspronkelijk concept erectieproces Downland Gridshell [17]	30
Figuur 3-52: Uitgevoerd erectieproces Downland Gridshell	30
Figuur 3-53: Latwerk fase 1	31
Figuur 3-54: Latwerk 25% gezakt: aanbrengen van spanbanden om insnoeringen te realiseren (bron: Buro Happold, eigen herwerking)	32
Figuur 3-55: Latwerk 50% gezakt: omhoog hijsen van koepels [17]	32
Figuur 3-56: Schoren aan de rand van het latwerk [19]	32
Figuur 3-57: Bevestiging van gridshell aan onderste ringbalk met opvulling van de latten [19]	33
Figuur 3-58: Bevestiging van gridshell ter hoogte van de ringbalk aan de uiteinden [19]	33
Figuur 4-1: Vorm elastische gridshell	34
Figuur 4-2: Vormen van mechanische spanning	36
Figuur 4-3: Enkellaags latwerk	37
Figuur 4-4: Ontdubbeld latwerk	37
Figuur 4-5: Aanbrengen schuifspanningsblokken	37
Figuur 4-6: Verlengen van de latten	38
Figuur 4-7: Behouden van de afmetingen van de mazen tijdens het vervormen van latwerk tot gridshell	38
Figuur 4-8: Vervorming orthogonaal raster	39

Figuur 4-9: Vervorming diagonaal raster	39
Figuur 4-10: Rotatie enkellaagse gridshell	39
Figuur 4-11: Rotatie en verschuiving ontdeubelde gridshell	39
Figuur 4-12: Methodes erectieproces	42
Figuur 4-13: Toevoegen van windverband vergroot de stijfheid	43
Figuur 5-1: Hyperbolische paraboloid [24].....	44
Figuur 5-2: Twee verschillende sets van parabolen [24].....	44
Figuur 5-3: Gelijkzijdige hypar	44
Figuur 5-4: Zwaartepunt kubus	44
Figuur 5-5: Ontwerpvoorstel hyparschaal.....	45
Figuur 6-1: Wilgen manden (bron: De Ratelaar)	48
Figuur 6-2: Bamboe hoeden (bron: Sukunya Sairaya).....	48
Figuur 6-3: Rotan meubilair (bron: Erin Lane Estate).....	48
Figuur 6-4: Detail vakwerkhuis (bron: Paradijsvogels Zuid-Limburg).....	49
Figuur 6-5: Bamboe Dorze hut (bron: Gordon Clarke)	49
Figuur 6-6: Bamboe Pavilion (bron: Yang Shih-Hong)	49
Figuur 6-7: Naiju Community Center and nursery school [25].....	49
Figuur 6-8: Weven van bamboe raster [25]	50
Figuur 6-9: Erectieproces [25]	50
Figuur 6-10: Tijdelijke kolom [25].....	50
Figuur 6-11: Vervormen van een geweven vlak uit karton tot een hyparschaal	51
Figuur 6-12: Vervormen van een geweven raster uit pitriet tot een hyparschaal.....	52
Figuur 6-13: Vervorming van latwerk met vaste hoekpunten	52
Figuur 6-14: Breuk van randlatten ten gevolge van vaste knooppunten aan de randen	53
Figuur 6-15: Breuk van latten bij het weven van een fijnmazig raster	53
Figuur 6-16: Breuk van latwerk bij het vervormen van fijnmazig raster tot hyparschaal.....	54
Figuur 6-17: Weven en vervormen van raster met mazen 10 x 10 mm	54
Figuur 6-18: Breuk van randlat na aanbrengen van windverband.....	55
Figuur 6-19: Breuk van latwerk (a) en verschoven lat (b)	55
Figuur 6-20: Torsie van de randlat	55
Figuur 6-21: Geweven gridshell zonder spanbanden.....	56
Figuur 6-22: Stervormig weefpatroon5.....	57
Figuur 6-23: Mislukte poging tot stervormig weefpatroon met pitriet	57
Figuur 6-24: Sjoerconstructie (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen)	59
Figuur 6-25: Sjoerverbinding Japan Pavilion (bron: Hiroyuki Hirai)	59
Figuur 6-26: Killicksteek (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen).....	60
Figuur 6-27: Magnussteek (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen).....	60
Figuur 6-28: Kruissjorring, met d-e-f het woelen van de verbinding (bron: Graaf Ottogroep Doetinchem).....	60
Figuur 6-29: Vorksjorring (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen).....	60
Figuur 6-30: Diagonaalsjorring (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen)	60
Figuur 6-31: Japanse kruissjorring [27]	61
Figuur 6-32: Japanse gecombineerde kruissjorring [27]	61
Figuur 6-33: Hyparschaal met diagonaal raster	62
Figuur 6-34: Hyparschaal met orthogonaal raster	62
Figuur 6-35: Latwerk bevestigd aan ringbalk	63
Figuur 6-36: Kruissjorring latwerk	63
Figuur 6-37: Kruissjorring en enkelvoudige sjorring van ringbalk	63

Figuur 6-38: Hyparschaal met twee steunpunten.....	63
Figuur 6-39: Hyparschaal met vier steunpunten.....	63
Figuur 6-40: Monoclastisch	64
Figuur 6-41: Anticlastisch	64
Figuur 6-42: Te losse verbindingen aan de ringbalk met monoclastisch latwerk	64
Figuur 6-43: Vaste verbindingen aan ringbalk met anticlastisch latwerk	64
Figuur 6-44: Bolle latten boven met monoclastisch latwerk	65
Figuur 6-45: Bolle latten onder met monoclastisch latwerk.....	65
Figuur 6-46: Holle latten boven met anticlastisch latwerk	65
Figuur 6-47: Erectieproces vanop het maaiveld.....	65
Figuur 6-48: Erectieproces vanop het laagste punt van de vallei	65
Figuur 6-49: Theoretische (zwart) en effectieve (rood) afmetingen van de maquette	67
Figuur 6-50: Hyparschaal.....	67
Figuur 6-51: Weken van de latten in folie	68
Figuur 6-52: Aansluiting touw vierkante doorsnede.....	69
Figuur 6-53: Aansluiting touw ronde doorsnede	69
Figuur 6-54: Aansluiting touw achthoekige doorsnede	69
Figuur 6-55: Montage van het latwerk.....	69
Figuur 6-56: Enkelvoudige sjorring van de ringbalk met rechts Japanse kruissjorring	69
Figuur 6-57: Geknikte hyparschaal.....	70
Figuur 6-58: Knik van het latwerk met rechts de gebogen randlat.....	70
Figuur 6-59: Breuk van lat ter hoogte van een kwast	70
Figuur 6-60: Bevochtigen van het latwerk	71
Figuur 6-61: Sjorren.....	72
Figuur 6-62: Woelen van bolscharnier	72
Figuur 6-63: Ringbalk.....	72
Figuur 6-64: Rotatie van de ringbalk	72
Figuur 6-65: Versterking vorksjorring.....	72
Figuur 6-66: Aanbrengen van trekkers.....	72
Figuur 6-67: Bevochtigen van het latwerk	73
Figuur 6-68: Laten zakken van de onderste hoekpunten.....	73
Figuur 6-69: Omhoogtrekken van de bovenste hoekpunten	73
Figuur 6-70: Aanduwen van het centraal punt	73
Figuur 6-71: Holle kromming aan de randen van het latwerk	73
Figuur 6-72: Golfbeweging van de holle latten (kleur) en bolle latten (kleur).....	73
Figuur 6-73: Breuk van de latten ter hoogte van vezelonderbreking	74
Figuur 6-74: Uiteenspatten van de ringbalk.....	74
Figuur 6-75: Terugdraaien van de ringbalk leidt tot sterkere vervorming van het latwerk.....	74
Figuur 6-76: Eindresultaat	75
Figuur 6-77: Vervormde raster van hyparschaal	76
Figuur 6-78: Vervormde hyparschaal	77
Figuur 6-79: Rotatiebeweging latwerk	77
Figuur 6-80: Knik in latwerk door vaste knooppunten.....	77
Figuur 6-81: Translatiebeweging latwerk.....	77
Figuur 6-82: Vervorming PMMA maquette met vaste verbindingen	78
Figuur 6-83: Vervorming PMMA maquette met lossere verbindingen.....	79
Figuur 6-84: Rotatiebeweging latwerk	79
Figuur 6-85: Vervorming van PMMA maquette met stijve ringbalk leidt tot knik.....	80

Figuur 6-86: Vervormen van vlak latwerk (blauw) met ringbalk (rood).....	80
Figuur 6-87: Rotatie latwerk.....	81
Figuur 6-88: Derde PMMA maquette met afvlakking van het latwerk	81
Figuur 6-89: Lostrekken van latwerk	82
Figuur 6-90: Samenduwen latwerk	82
Figuur 6-91: Bolle latten boven	82
Figuur 6-92: Holle latten boven.....	82
Figuur 7-1: Vigilante del Maule (bron: Carlos Jarpa).....	84
Figuur 7-2: Opbouw Vigilante del Maule (bron: Carlos Jarpa)	85
Figuur 7-3: Stalen beugels (bron: Carlos Jarpa).....	85
Figuur 7-4: Uitkijkplatform (bron: Carlos Jarpa).....	85
Figuur 7-5: Gerechtsgebouw Antwerpen (bron: Regie der Gebouwen)	86
Figuur 7-6: Interieur gerechtsgebouw Antwerpen (bron: Regie der Gebouwen).....	86
Figuur 7-7: Constructie schaaldaken (bron: Regie der Gebouwen)	86
Figuur 7-8: Raster daken gerechtsgebouw Antwerpen.....	86
Figuur 7-9: Hyperbolische paraboloïde, opgebouwd uit twee sets rechten (a) of twee sets parabolen (b) (bron: Liliane Van Maldeghem)	87
Figuur 7-10: Genereren van de eerste set rechten van een gelijkzijdige hypar.....	88
Figuur 7-11: Genereren van de tweede set rechten van een gelijkzijdige hypar.....	88
Figuur 7-12: Bamboe raster verbonden met elastiek	89
Figuur 7-13: Bamboe raster verbonden met naaigaren.....	89
Figuur 7-14: De hyparschalen.....	89
Figuur 7-15: Markeringen op de knooppunten.....	89
Figuur 7-16: Maquette met grenenhout en kabelbinders	90
Figuur 7-17: Door het verlengen van de randlatten komt de hyparschaal hoger te staan.....	90
Figuur 7-18: Maquette met kruissjorverbindingen	91
Figuur 7-19: Maquette met enkelvoudige sjorverbindingen	91
Figuur 7-20: Theoretische (zwart) en effectieve (rood) afmetingen van de maquette	91
Figuur 7-21: Het aanspannen van sjorverbindingen met behulp van een hefboomsarm [6]	92
Figuur 7-22: Latwerk met enkelvoudige sjorverbinding en aangeknoopte hefboomsarm.....	93
Figuur 7-23: Detailfoto van de sjorverbindingen met aangeknoopte hefboomsarm	93
Figuur 7-24: Vervormde raster van hyparschaal	94
Figuur 7-25: Vervorming vlak raster met vierkante mazen naar raster met willekeurige vierhoeken .	94
Figuur 7-26: Vervormde hyparschaal	95
Figuur 7-27: Rotatiebeweging latwerk	95
Figuur 7-28: Translatiebeweging latwerk.....	95
Figuur 8-1: The Asymptotic Gridshell (bron: Felix Noe)	97
Figuur 8-2: Inplantingsplan (bron: Eike Schling).....	98
Figuur 8-3: Bovenaanzicht paviljoen (bron: Felix Noe)	98
Figuur 8-4: De vorm is afgeleid van een catenoïde die is aangepast aan de vereisten van de locatie. De rode lijnen zijn de grenscurven en de zwarte lijnen zijn de kettinglijnkrommen van de catanoïde. (bron: Eike Schling)	98
Figuur 8-5: Opbouw van de verbindingen (bron: Eike Schling)	99
Figuur 8-6: Opbouw van de verbindingen (bron: Felix Noe).....	99
Figuur 8-7: Een van de negen segmenten tijdens de opbouw (bron: Felix Noe)	100
Figuur 8-8: Asymptotic Gridshell (bron: Emil Adiels)	100
Figuur 8-9: Enneper-oppervlak (bron: Robert Ferréol)	101
Figuur 8-10: Driedelig Enneper-oppervlak (bron: Robert Ferréol).....	101

Figuur 8-11: Osculerende cirkels langs een vlakke kromme (bron: SARC).....	102
Figuur 8-12: Definities van de kromming (bron: Eike Schling)	102
Figuur 8-13: Schaalmodel uit zeepmembraan (bron: Frei Otto)	102
Figuur 8-14: Geodetische krommen (a), hoofdkrommingen (b) en asymptotische krommen (c) (bron: Eike Schling).....	103
Figuur 8-15: Erectieproces asymptotische gridshell (bron: Emil Adiels).....	104
Figuur 8-16: Hyperbool met de schuine asymptoten (bron: h.hofstede)	105
Figuur 8-17: Ontwerp van het raster in Rhino met aanduiding van het focuspunt (1),centrum (2) en eindpunt (3).....	105
Figuur 8-18: Breuk ter hoogte van de sleuf in het karton	106
Figuur 8-19: Het raster van de kartonnen testmaquette	106
Figuur 8-20: De transformatie van het vlakke raster naar de hyparschaal.....	106
Figuur 8-21: Het raster van de multiplex testmaquette	107
Figuur 8-22: De transformatie van het vlakke raster naar de hyparschaal.....	107
Figuur 8-23: Raster testmaquette met L=2,70 m	108
Figuur 8-24: Nagels op de knooppunten.....	109
Figuur 8-25: Montage van het latwerk.....	109
Figuur 8-26: Toevoeging van een enkelvoudige sjoerverbinding	109
Figuur 8-27: Vlak latwerk voor het erectieproces.....	109
Figuur 8-28: Erectieproces van vlak latwerk naar hyparschaal.....	110
Figuur 8-29: Raster testmaquette	111
Figuur 8-30: Uitbeitelen van de sleuven	113
Figuur 8-31: Sleuven.....	113
Figuur 8-32: Montage van het latwerk.....	113
Figuur 8-33: Kruisjorring	113
Figuur 8-34: Vlak latwerk voor het erectieproces.....	114
Figuur 8-35: Houten piketpalen met spanvijzen	114
Figuur 8-36: Erectieproces van vlak latwerk naar hyparschaal.....	114
Figuur 8-37: Theoretische (zwart) en effectieve (rood) afmetingen van de maquette	115
Figuur 8-38: Vervormde raster van hyparschaal	116
Figuur 8-39: Vervorming vlak asymptotisch raster	116
Figuur 8-40: Vervormde hyparschaal	117
Figuur 8-41: Rotatiebeweging latwerk	117
Figuur 8-42: Zakken van hyparschaal door eigengewicht	118
Figuur 8-43: Resultaat	119

Lijst van tabellen

Schema 2-1: Classificatie van gridshells	6
Schema 5-1: Drie gekozen constructiemethodes.....	46
Tabel 4-1: Eigenschappen van hout [21]	35
Tabel 4-2: Overzicht knooppuntverbindingen enkellaagse gridshell [23].....	40
Tabel 4-3: Overzicht knooppuntverbindingen ontdubbelde gridshell [23].....	41
Tabel 6-1: Erectieproces hyparschaal.....	66
Tabel 8-1: Gegevens asymptotisch raster	112

1 Introductie

How to achieve more with less – to construct greater spans with less material and energy.[1]

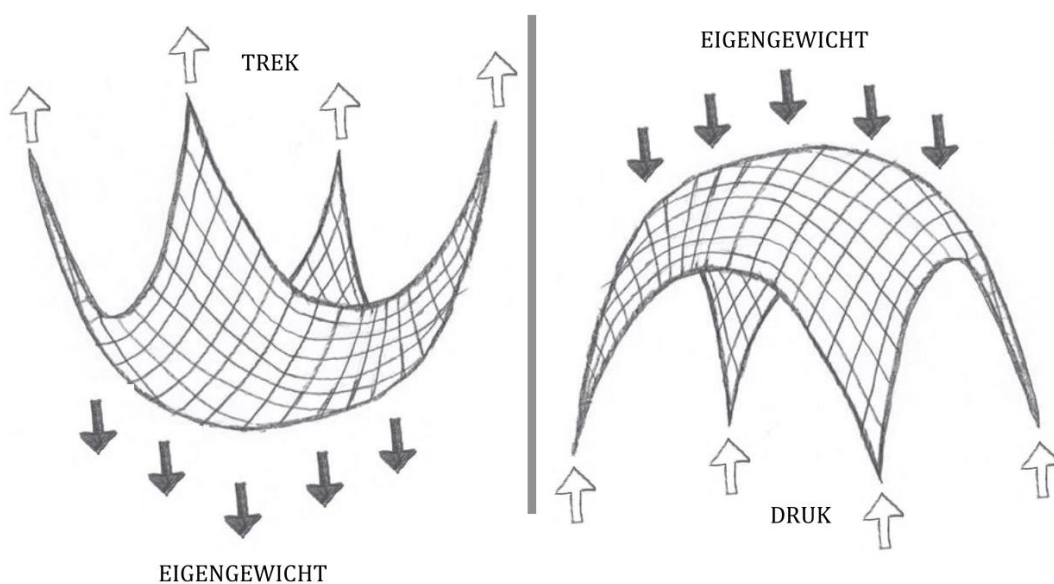
Deze fundamentele vraag proberen veel architecten en ingenieurs tot op heden te beantwoorden. Bij het ontwerp van de *Sagrada Familia* in Barcelona, eind 19e eeuw, ging de architect Antoni Gaudí te werk met kettinglijn-krommen. Deze wiskundige kromme beschrijft de vorm van een, onder invloed van zijn eigengewicht, in evenwicht hangende draad. De kettingmodellen van Gaudí zijn puur op trek belast (Figuur 1-1). Eens het model omgedraaid wordt, is de constructie op druk belast en moeten de kettingen vervangen worden door een drukvast materiaal (Figuur 1-3). Het doel van dit ontwerp was om organische vormen te creëren maar ook om een structurele optimalisatie te kunnen verkrijgen. Deze methode van *form-finding* werd later door vele architecten en ingenieurs gebruikt voor de ontwikkeling van lichte structuren.



Figuur 1-1: Hangmodel Sagrada Familia, Antoni Gaudí



Figuur 1-2: Hangmodel, Frei Otto [2]



Figuur 1-3: Methode kettingmodellen

Ook in de 20e eeuw ging men op zoek naar meer efficiënte structuren. De Duitse architect Frei Otto stond bekend voor zijn baanbrekende innovaties in lichtgewicht constructies. Op basis van Gaudi's ontwerpen met kettingmodellen, voerde Otto verder onderzoek naar *form-finding* technieken. Dit deed hij eveneens aan de hand van kettingmodellen (Figuur 1-2). Naast tentstructuren (Figuur 1-4) onderzocht hij onder andere ook gridshells (Figuur 1-5). De definitie van gridshell wordt weergegeven in paragraaf 2.1.



Figuur 1-4: Duits Paviljoen Expo 1967, Montreal, Frei Otto
(bron: Atelier Frei Otto)



Figuur 1-5: Mannheim Multihalle, Frei Otto (bron: Daniel Lukac)

De geboorte van houten gridshells vond plaats in de jaren 1970 in Duitsland. Frei Otto ontwikkelde voor het eerst het structureel concept elastische gridshell (*elastic gridshell*). Na jaren onderzoek kwam in 1975 de *Mannheim Multihalle* tot stand. Dit project was een revolutie binnen de dakstructuren. Dankzij een efficiënt materiaalgebruik kon een grote overspanning verkregen worden. Dit zorgde voor een nieuwe ervaring van ruimte en een grotere ontwerpvrijheid. Het paviljoen won dan ook meerdere prijzen en kreeg in 1998 de status van 'cultureel monument van bijzonder belang'. [3]

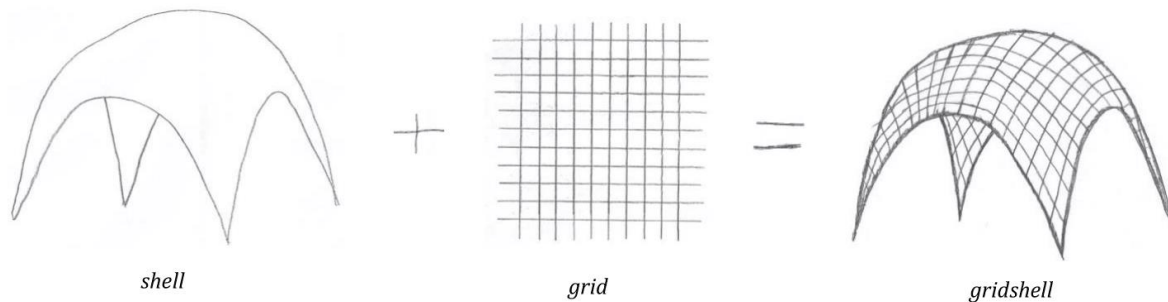
Hoewel dit nieuw concept al in de jaren 1970 tot stand kwam, zijn er tot op heden weinig grootschalige projecten gebouwd met behulp van gridshells. Veel inmiddels uitgevoerde onderzoeken hebben betrekking op het optimaliseren van het ontwerp en/of het erectieproces. De structurele analyse van gridshells is zeer complex waardoor weinigen in de praktijk aan de slag gaan met deze structuren.

Met deze thesis is er op een experimentele manier onderzoek gebeurd naar de verschillende mogelijkheden van gridshells. Met als overkoepelende vraag: 'Hoe kan een vlak raster vervormd worden naar een anticlastische schaalstructuur?'

2 Gridshell

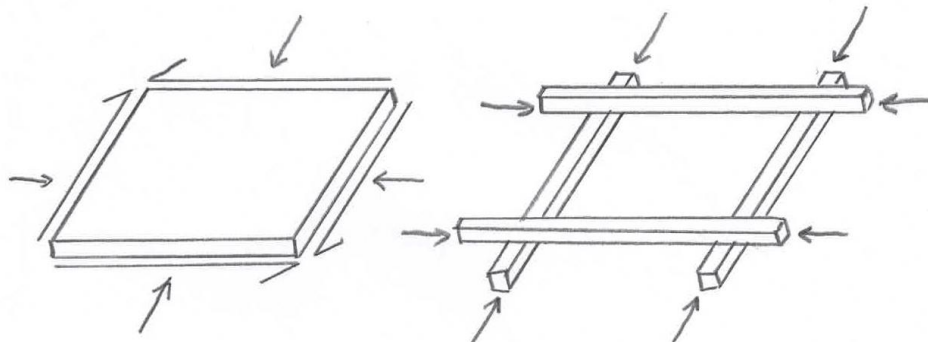
2.1 Definitie

A gridshell is a shell with large openings in it in a manner that allows the remaining strips or grids to behave structurally, as a shell. (Harris, Romer, Kelly, Johnson, 2003)



Figuur 2-1: Definitie gridshell

De Nederlandse vertaling van 'gridshells' is 'vakwerkschalen'. Deze schaalstructuren kunnen uit verschillende materialen worden opgebouwd, maar staal, composiet en hout zijn de meest voorkomende. De individuele elementen worden volgens een raster gemonteerd waarmee een driedimensionale vorm wordt verkregen. Het verschil met massieve schaalstructuren is dat het materiaal tussen de elementen van het raster wordt weggehaald en dat een geraamte overblijft (Figuur 2-1). Hierdoor verlopen de krachten geconcentreerd in de elementen en zijn deze structuren zeer efficiënt (Figuur 2-2). Wanneer ze goed ontworpen zijn, kunnen lichte vakwerkschalen gebruikt worden om grote afstanden te overspannen met een minimum aan materiaal. [4]



Figuur 2-2: Krachtenverloop in schaalstructuren (links) en gridshells (rechts)

In deze masterproef wordt voornamelijk de term 'gridshell' gebruikt. In de praktijk zijn er meerdere termen mogelijk. Naast *grid-shells* en *grid shells* wordt in het Engels ook gebruik gemaakt van *lattice shell*. In het Nederlands wordt naast 'vakwerkschalen' ook 'eenlagige netwerkschalen' of 'membranaire stavennetwerken' gebruikt. De ene term is accurater dan de andere. Voor het onderzoek ging de voorkeur uit naar de Engelse term 'gridshell' aangezien deze in de praktijk het meest gebruikt wordt en over het algemeen het meest correcte beeld schetst.

2.2 Classificatie

Gridshells kunnen in twee groepen worden opgedeeld op basis van hun constructietechniek. Stijve (*rigid*) gridshell en elastische (*elastic*) gridshell (Schema 2-1). Deze twee hoofdgroepen kunnen op basis van soort ribben, rasterpatroon en vorm nog verder opgedeeld worden.

Het rasterpatroon kan bi-directioneel (in twee richtingen), tri-directioneel (in drie richtingen), of onregelmatig zijn. Een onregelmatig rasterpatroon kan willekeurig zijn maar kan ook bestaan uit asymptotische krommen, geodetische krommen of hoofdkrommingen. Deze termen worden verder uitgelegd in hoofdstuk 8 Asymptotische Gridshell, paragraaf 8.2.

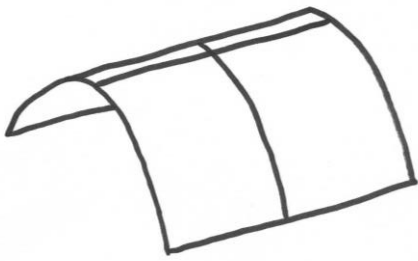
Voor de vorm kan er een onderscheid gemaakt worden tussen monoclastisch, synclastisch, anticlastisch en hybride. Monoclastische vormen zijn enkel gekromde oppervlakken (Figuur 2-3). Bij dubbel gekromde oppervlakken kunnen we een onderscheid maken tussen synclastisch (Figuur 2-4) en anticlastisch (Figuur 2-5). Dit onderscheid kan gemaakt worden volgens de Gaussiaanse kromming. De Gauss-kromming van een punt op een oppervlak is het product van de hoofdkrommingen van dit gegeven punt.

$$K = \kappa_1 \kappa_2$$

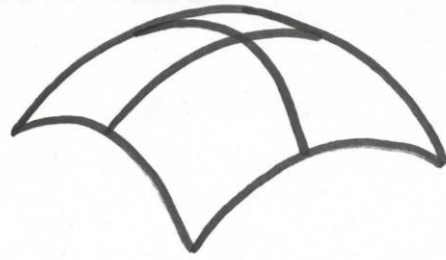
Met K = Gauss-kromming en κ_1 en κ_2 als hoofdkrommingen.

Bij een synclastisch oppervlak zijn beide hoofdkrommingen in dezelfde richting gebogen. De brandpunten van de krommen liggen beiden aan dezelfde kant van het oppervlak. Daardoor hebben κ_1 en κ_2 hetzelfde teken en is het product dus positief (Gauss-kromming is positief). Bij een anticlastisch oppervlak ligt het ene brandpunt aan de andere kant van het oppervlak. Hierdoor zijn de hoofdkrommingen verschillend van teken en is het product negatief (Gauss-kromming negatief). Bij monoclastische oppervlakken is een van de hoofdkrommingen nul (Gauss-kromming is nul).

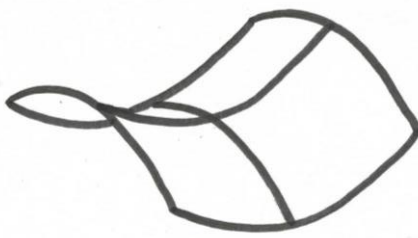
Naast monoclastisch, synclastisch en anticlastisch kan een gridshell ook een hybride vorm aannemen (Figuur 2-6). Deze term wordt gebruikt voor vormen die niet zuiver synclastisch, anticlastisch of monoclastisch zijn.



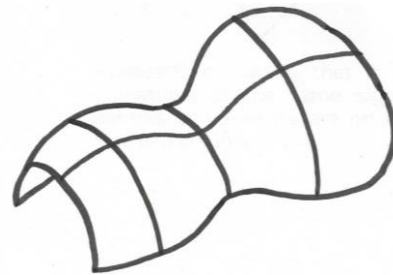
Figuur 2-3: Monoclastische vorm



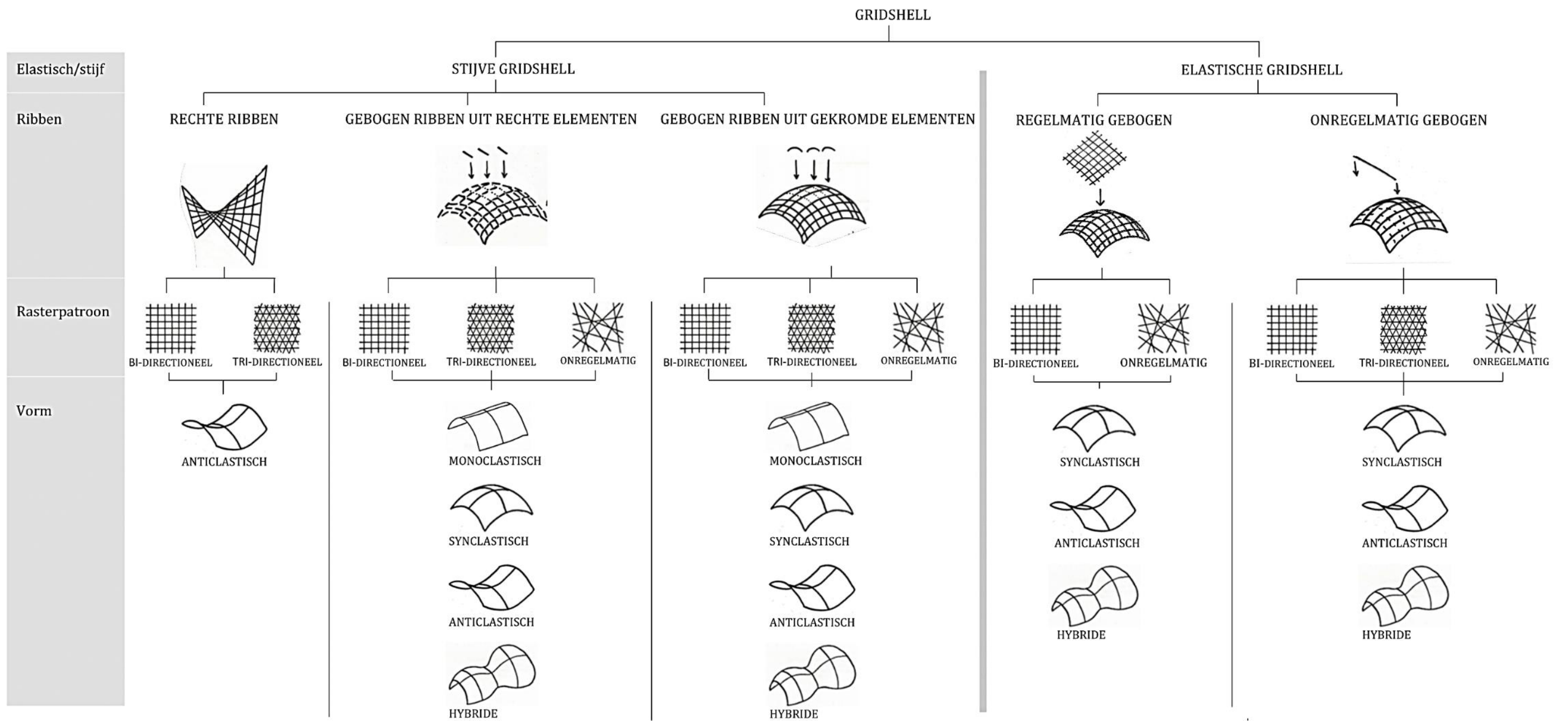
Figuur 2-4: Synclastische vorm



Figuur 2-5: Anticlastische vorm



Figuur 2-6: Hybride vorm



Schema 2-1: Classificatie van gridshells

2.2.1 Stijve gridshell

Stijve gridshells worden opgebouwd uit geprefabriceerde en voorgevormde elementen. Eens deze unieke stukken op de site aankomen, worden ze gemonteerd als een gigantische puzzel. Deze methode zorgt voor een grotere ontwerpvrijheid met meer complexe vormen die geoptimaliseerd kunnen worden op basis van de belastingverdeling. De uitdaging van deze methode is om de verbindingen eenvoudig te houden.[5]



Figuur 2-7: Vigilante del Maule (bron: Carlos Jarpa)

Deze groep van stijve gridshells kan in drie subcategorieën onderverdeeld worden op basis van de soort ribben, namelijk rechte ribben, gebogen ribben uit rechte elementen en gebogen ribben uit gekromde elementen (Schema 2-1).

Bij rechte ribben bestaat de gridshell uit lange rechte elementen die een anticlastisch oppervlak vormen. Dit raster kan bi- of tri-directioneel zijn (Schema 2-1). Een voorbeeld van een bi-directioneel raster is de *Vigilante del Maule* van Carlos Jarpa (Figuur 2-7).

Daarnaast kan een stijve gridshell opgebouwd worden uit gebogen ribben met rechte elementen. Het raster kan bi- of tri-directioneel maar ook onregelmatig zijn. Deze methode geeft een extra ontwerpvrijheid en kan ook in een monoclastische, synclastische, anticlastische en hybride vorm voorkomen (Schema 2-1). *Boathouse* van Shigeru Ban is een voorbeeld van een stijve gridshell met gebogen ribben uit rechte elementen. Het raster is tri-directioneel en de vorm is monoclastisch (Figuur 2-8). Een voorbeeld van een synclastische vorm met onregelmatig raster is het studentenproject aan de ETH Hnggerberg campus te Zürich (Figuur 2-9).



Figuur 2-8: Boathouse (bron: Shigeru Ban Architects)



Figuur 2-9: Studentenproject, ETH H nggerberg campus Zürich. (bron: ETH Zürich)

Ten slotte kan een stijve gridshell opgebouwd worden uit gebogen ribben met gekromde elementen. Bij deze methode zijn dezelfde rasterpatronen en vormen mogelijk als bij gebogen ribben uit rechte elementen (Schema 2-1). De elementen worden plastisch gebogen naar stijve elementen met permanente vervormingen. Een van de bekendste voorbeelden van deze categorie is *Centre Pompidou-Metz* van de Japanse architect Shigeru Ban. Bij deze anticlastische vorm met tri-directioneel raster werden alle elementen geprefabriceerd. De voorgevormde glulam-elementen werden dan op de site laag per laag gemonteerd (Figuur 2-10, Figuur 2-11).



Figuur 2-10: Opbouw Centre Pompidou-Metz (bron: PERI Group)



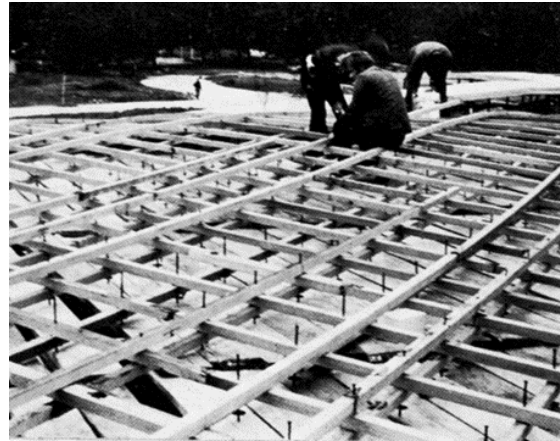
Figuur 2-11: Opbouw Centre Pompidou-Metz (bron: Ville de Metz/Christian Legay)

2.2.2 Elastische gridshell

De tweede groep, elastische gridshells, is de categorie waar verder op ingegaan zal worden tijdens dit onderzoek. Bij elastische gridshells wordt altijd gestart van een vlak raster of vlakke elementen en worden deze door middel van het actief buigstelsel (*active bending*) vervormd naar een structurele vorm. [5] Zoals het begrip doet vermoeden, wordt elke staaf elastisch vervormd. Dit wil zeggen dat na het erectieproces de vervorming omkeerbaar is. De gelijke elementen met eenvoudige knopen zorgen voor een eenvoudige productie en transport. Onderzoek toont aan dat actieve buigsystemen het erectieproces vergemakkelijken en dat elastische gridshells opgebouwd kunnen worden in weinig tijd. [5]



Figuur 2-12: Mannheim Multihalle (bron: Daniel Lukac)



Figuur 2-13: Opbouw Mannheim Multihalle (bron: Atelier Frei Otto + Partner)

De categorie van elastische gridshells kan verder opgedeeld worden in twee subcategorieën namelijk regelmatig (*regular*) en onregelmatig (*irregular*) gebogen gridshells (Schema 2-1).

Bij de regelmatig gebogen gridshells kan er worden vastgesteld dat een initieel vlak en regelmatig raster wordt opgetrokken naar de structurele vorm. Dit brengt als voordeel dat de elementen makkelijk te produceren zijn en dat de montage eenvoudig blijft. Dit soort gridshells kunnen worden opgebouwd uit een bi-directioneel en onregelmatig rasterpatroon (Schema 2-1). Bij een bi-directioneel raster kan een synclastische, anticlastische en hybride vorm bekomen worden. De bekendste referentie van een elastisch en regelmatig gebogen gridshell met bi-directioneel raster is de *Mannheim Multihalle* (Figuur 2-12, Figuur 2-13). De vorm van deze referentie is hybride. Een voorbeeld van een anticlastische vorm met een bi-directioneel raster is een studentenproject aan de SA Ahmedabad in India (Figuur 2-14). *The Asymptotic Gridshell* van Eike Schling is een voorbeeld van een elastisch en regelmatig gebogen gridshell met een onregelmatig rasterpatroon (Figuur 2-15). Het raster bestaat uit asymptotische curven. Verder onderzoek hierover wordt besproken in hoofdstuk 8 Asymptotische Gridshell.



Figuur 2-14: Studentenproject, SA Ahmedabad, India [6]

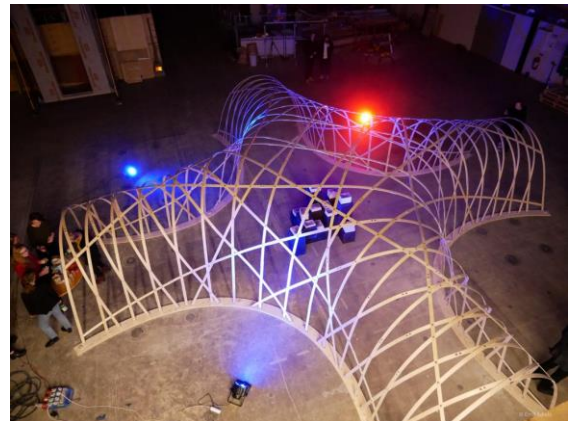


Figuur 2-15: *The Asymptotic Gridshell* (bron: Felix Noe)

De opbouw van een onregelmatig gebogen gridshell verloopt anders. Tijdens de montage wordt elk element individueel en elastisch gebogen. Hier is een synclastische, anticlastische en hybride vorm mogelijk. Het rasterpatroon kan bi- en tri-directioneel maar ook onregelmatig zijn (Schema 2-1). Het project van *Toyō Ito, Soma City HOME-FOR-ALL* (Figuur 2-16) is een voorbeeld van een elastisch en onregelmatig gebogen gridshell volgens een tri-directioneel raster in een synclastisch vorm. Hier werden de latten elk apart gekromd en vastgenageld aan de structuur. Een voorbeeld van een onregelmatig raster is de *Geodesic Gridshell* aan de Technische Universiteit van Chalmers dat werd opgebouwd volgens een geodetisch raster (Figuur 2-17). In hoofdstuk 8 wordt een geodetisch raster verder verduidelijkt. Een andere referentie van een elastisch en onregelmatig gebogen gridshell is de *Sawmill Shelter* in Hooke Park (Figuur 2-18, Figuur 2-19). Dit is een voorbeeld van een anticlastische vorm. Hier werden de houten latten elk individueel geplaatst. Omwille van de dunne secties van de latten was buiging mogelijk en werd de anticlastische vorm bereikt.



Figuur 2-16: Soma City HOME-FOR-ALL (bron: Koichi Torimura)



Figuur 2-17: Geodesic Gridshell (bron: Emil Adiels)



Figuur 2-18: Sawmill Shelter (bron: Valerie Bennett)



Figuur 2-19: Sawmill Shelter (bron: Valerie Bennett)

3 Casestudies

Uit de classificatie besproken in hoofdstuk 2 kunnen we stellen dat houten gridshells in verschillende vormen en volgens verschillende constructiemethodes op te bouwen zijn. Voor het verdere verloop van het onderzoek wordt de focus gelegd op elastisch en regelmatig gebogen gridshells. Door gebrek aan gebouwde referenties met een onregelmatig rasterpatroon, worden in dit hoofdstuk enkel gridshells met een bi-directioneel raster besproken. Voor de eenvoud noemen we deze gridshells traditionele elastische gridshells.

In dit hoofdstuk wordt er ingezoomd op enkele specifieke aspecten van drie casestudies, waaronder het ontwerpproces, de gekozen knooppuntverbindingen en het erectieproces. Deze casestudies hebben de samenwerking tussen de Britse ingenieur Ted Happold en het studiebureau Buro Happold gemeen. De ervaring die is opgedaan tijdens de constructie van talrijke innovatieve projecten, maakt dat Buro Happold een sleutelfiguur is binnen de ontwikkeling van (houten) gridshells. Het Britse ingenieursbureau werkte vaak samen met de Duitse architect Frei Otto.

De eerste casestudie bespreekt de grootste houten gridshell ter wereld, de *Mannheim Multihalle* in Duitsland, die bovendien de eerste ontdubbelde gridshell (*double layer gridshell*) ooit was (Figuur 3-1). De *Mannheim Multihalle* werd gebouwd in 1975 door het team van architecten Frei Otto en Carlfried Mutschler en de ingenieurs van Ove Arup & Partners (Edward 'Ted' Happold en Ian Lidell).

De tweede casestudie heeft betrekking op het ontwerpproces en het materiaalgebruik van het *Japan Pavilion* op Expo 2000 in Hannover, ontworpen door de Japanse architect Shigeru Ban, de ingenieurs van Buro Happold en Frei Otto als consultant (Figuur 3-2). Het resultaat is een enkellaagse gridshell (*single layer gridshell*) uit karton met een lowtech polyesterstripverbinding. Hierbij is opvallend hoe door inmenging van de autoriteiten, een initieel lowtech, structureel zuiver principe is geëvolueerd tot een complexe en overgedimensioneerde structuur. Ondanks dat het paviljoen hoofdzakelijk opgebouwd is uit kartonnen kokers, had dit een grote invloed op de verdere ontwikkeling van gridshells.

De derde casestudie, *Downland Gridshell*, is de eerste ontdubbelde gridshell in het Verenigd Koninkrijk, gebouwd in 2002 door Edward Cullinan Architects en Buro Happold (Figuur 3-3). De kennis die is opgedaan tijdens de constructie van het *Japan Pavilion* werd hier ingezet om het erectieproces en de veiligheid tijdens de constructie verder te verfijnen.



Figuur 3-1: Mannheim Multihalle (bron: saai)



Figuur 3-2: Japan Pavilion (bron: Hiroyuki Hirai)



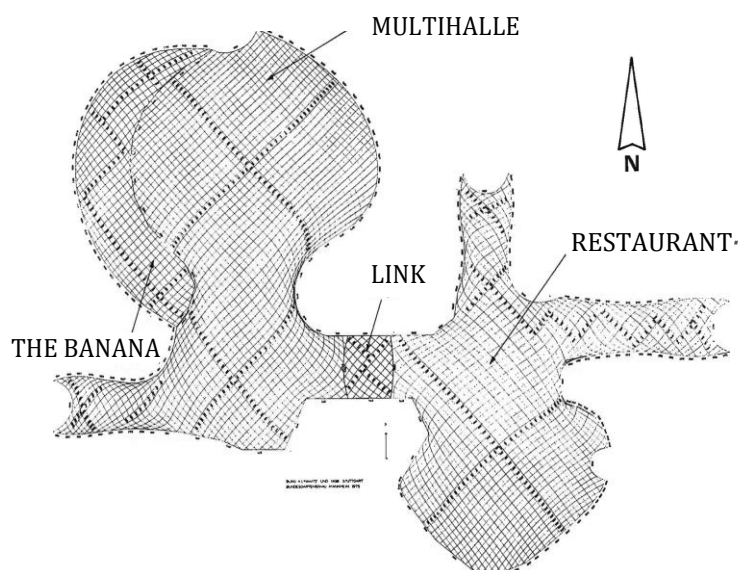
Figuur 3-3: Downland Gridshell (bron: Edward Cullinan Architects)

3.1 Mannheim Multihalle

In 1975 werd Mannheim geselecteerd als een van de gaststeden voor de tweejaarlijkse *Bundesgartenschau* in West-Duitsland. Mutschler & Partners, een architectenbureau gevestigd te Mannheim, werd aangesteld voor het ontwerp van een polyvalente zaal en restaurant. Samen met Frei Otto ontwierp het team van architecten een houten gridshell, bestaande uit twee aansluitende koepels met overspanningen van 40 en 60 m en hoogtes tot 20 m. Hier werden de expositiezaal en het restaurant ondergebracht (Figuur 3-5). De houten gridshell is bekleed met een translucient PVC membraan.



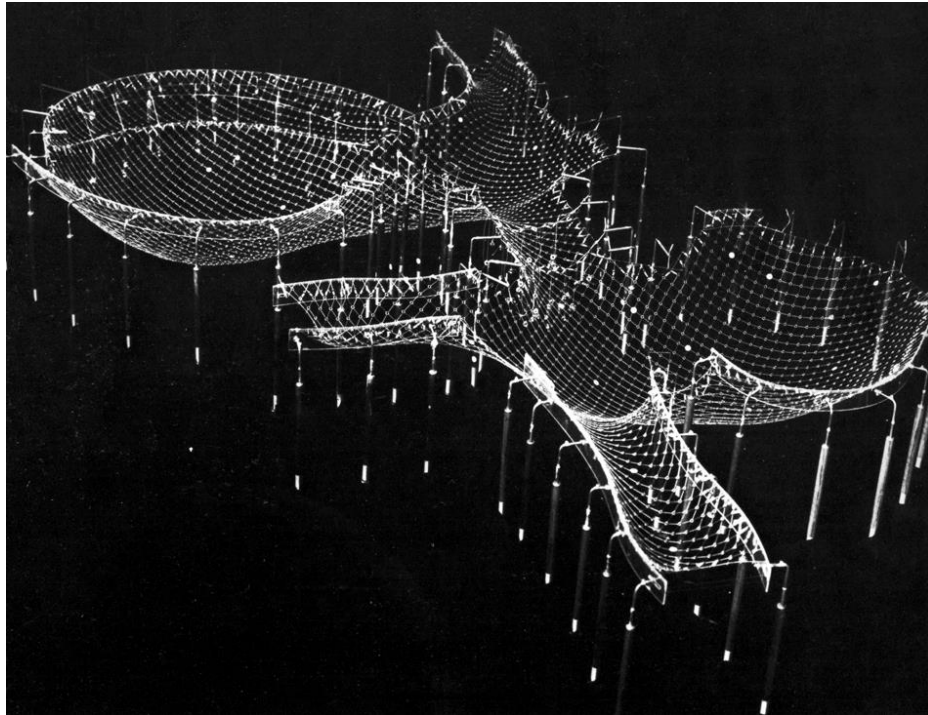
Figuur 3-4: Interieurbeeld Bundesgartenschau Mannheim (bron: Frei Otto, saai)



Figuur 3-5: Dakplan Mannheim Multihalle [7]

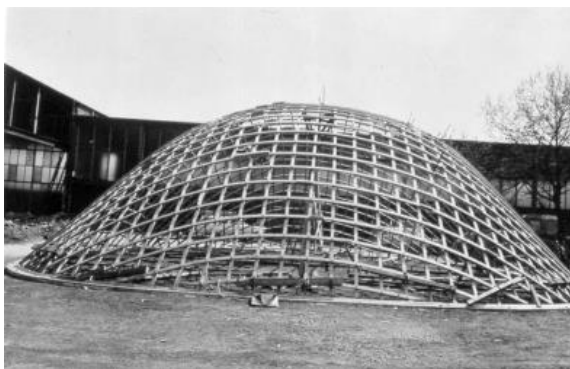
3.1.1 Ontwerpproces

De *Mannheim Multihalle* is de eerste ontdubbelde houten gridshell uit de geschiedenis. Door de beperkte voorkennis van dergelijke structuren en gebrek aan aangepaste computersoftware werd er uitgebreid gebruik gemaakt van schaalmodellen. De vorm van het paviljoen werd bepaald door middel van *form-finding* technieken als een hangende kettinglijn maquette (Figuur 3-6). De hybride vorm is het resultaat van de aaneenschakeling van vier afzonderlijke gridshells, *The Banana*, *Multihalle*, *Link* en *Restaurant* (Figuur 3-5).



Figuur 3-6: Hangende kettinglijn maquette (bron: saai)

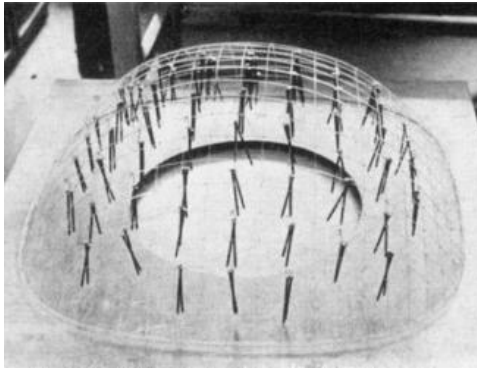
Parallel aan dit *form-finding* proces werden plannen opgestart voor de bouw van een kleinschalige gridshell ontworpen door Frei Otto; de *Essen Gridshell* (Figuur 3-7, Figuur 3-8). De bouw van deze gridshell had als doel de werking van dergelijke structuren te doorgronden. De *Essen Gridshell* is een enkellaagse gridshell met een overspanning van 15 m en staafsecties van 40 x 60 mm. Het initieel ontwerp van de *Mannheim Multihalle* betrof tevens een enkellaagse gridshell met staafsecties van 50 x 50 mm. [7]



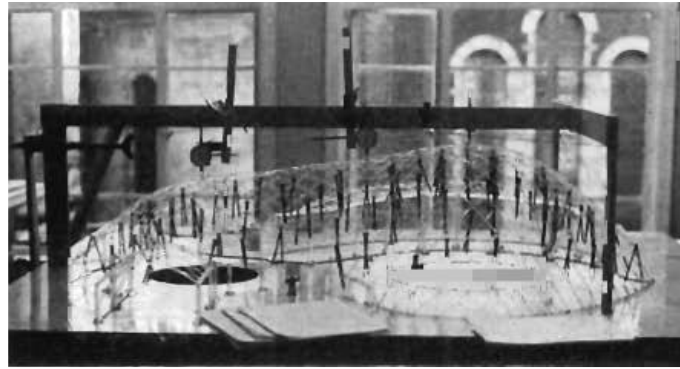
Figuur 3-7: Essen Gridshell (bron: Frei Otto)



Figuur 3-8: Omhoog hijsen van de gridshell (bron: Frei Otto)



Figuur 3-9: PMMA maquette Essen gridshell
(bron: saai)



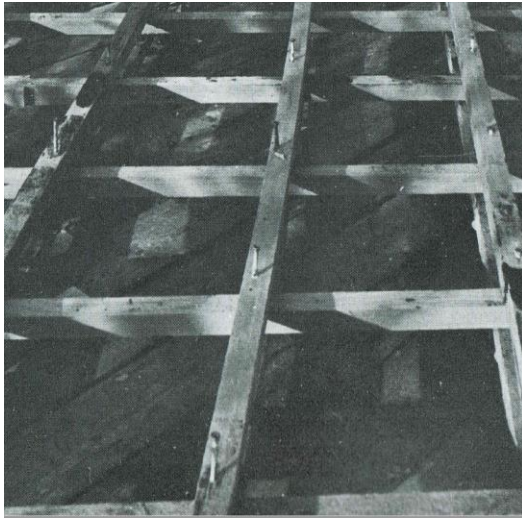
Figuur 3-10: PMMA maquette Multihalle onder belasting (bron: saai)

Een PMMA maquette (Polymethylmethacrylaat, plexi in de volksmond) werd gemaakt om het structureel gedrag van de gridshell, en vooral de bezwijkbelasting, te bestuderen (Figuur 3-9). Een gelijkmatig verdeelde belasting werd aangebracht op de maquette door middel van spijkers. De PMMA strips hebben een elasticiteitsmodulus $\frac{1}{4}$ van hout, waardoor ze zeer buigzaam zijn. Deze maquette schetst een goed beeld van het optreden van knik en de kritieke zones in de structuur. Dezelfde methode werd toegepast op een maquette van de *Multihalle* gridshell (Figuur 3-10). Uit deze maquettes en eerste berekeningen bleek dat een enkellaagse gridshell voor de *Mannheim Multihalle*, met staafsecties van 50 x 50 mm, te zwak was. De bezwijkbelasting van de structuur was slechts iets groter dan het eigengewicht. Bij externe belasting zou de structuur bezwijken onder invloed van knik. De doorsnede van de latten zou minimaal 100 x 100 mm moeten bedragen. Dit was echter een te grote doorsnede opdat de latten de gewenste kromming zouden aannemen zonder te grote buigspanningen te creëren. Het latwerk verdubbelen leek de enige oplossing te zijn. De eerste ontdubbelde gridshell was geboren. [7]

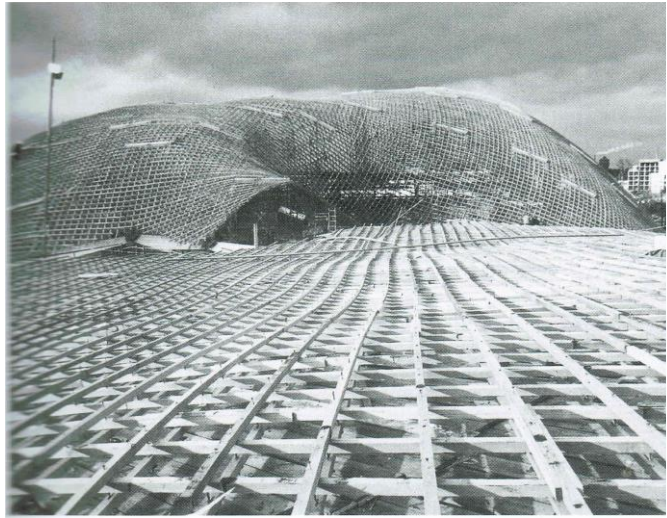
3.1.2 Opbouw latwerk

Voor de houten latten werd gekozen voor Western Hemlock met een doorsnede van 50 x 50 mm. De latten werden op de site met vingerlassen verlengd tot lengtes variërend van 30 tot 40 m. Vervolgens werden de latten verlengd tot hun finale lengte met behulp van overlappende stroken met een doorsnede van 50 x 25 mm die aan weerszijden van de latten werden vastgenageld (Figuur 3-13). De lange latten werden op het maaiveld gemonteerd volgens een raster met mazen van 0,50 x 0,50 m (Figuur 3-12). Tijdens het erectieproces bezweken tal van vingerlassen en werden ze hersteld volgens dezelfde methode als weergegeven in Figuur 3-13. [7]

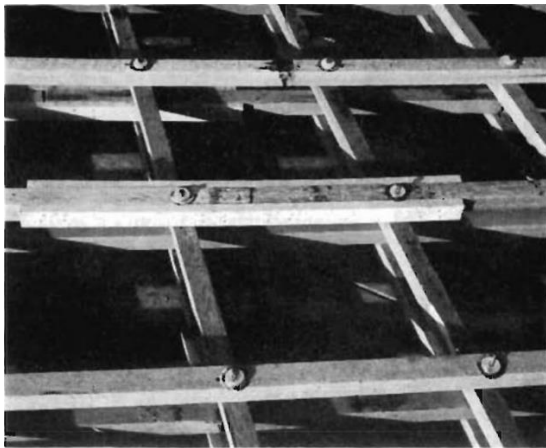
De knooppuntverbindingen werden uitgevoerd als een boutverbinding doorheen de vier lagen. De tweede en derde laag latten werden voorzien van een boutgat om een rotatiebeweging toe te staan (Figuur 3-11); de uiterste latten in de eerste en vierde laag werden voorzien van boutsleuven zodat deze latten konden verschuiven tijdens het erectieproces (Figuur 3-14). Aan de uiteinden van de bout werden schotelveerringen aangebracht om een constante wrijvingsspanning op de verbinding te verkrijgen wanneer het hout zou krimpen of uitzetten (Figuur 3-15). [7]



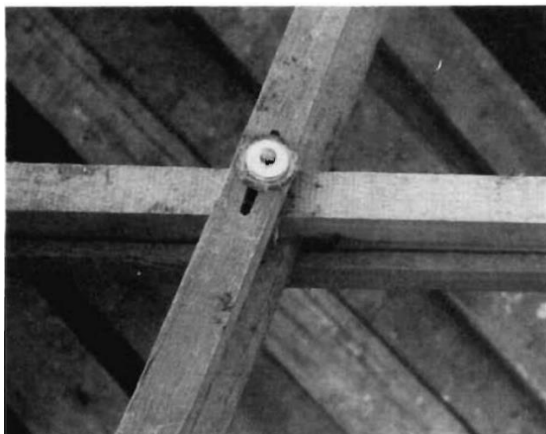
Figuur 3-11: Bout door tweede en derde laag latten [8]



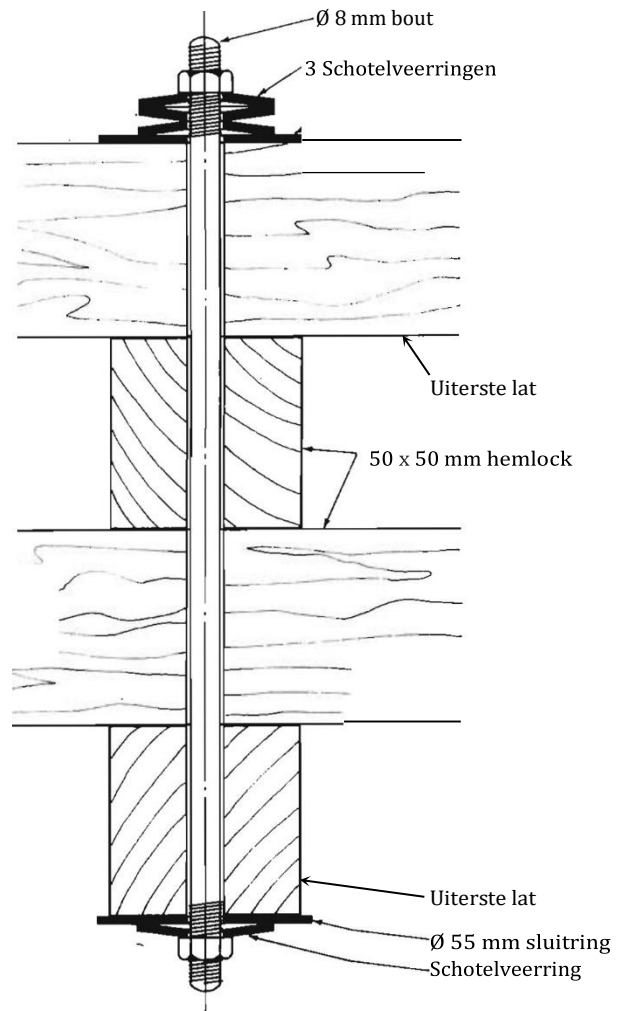
Figuur 3-12: Montage van het latwerk [9]



Figuur 3-13: Verbinding latten met 50 x 25 mm latten [7]

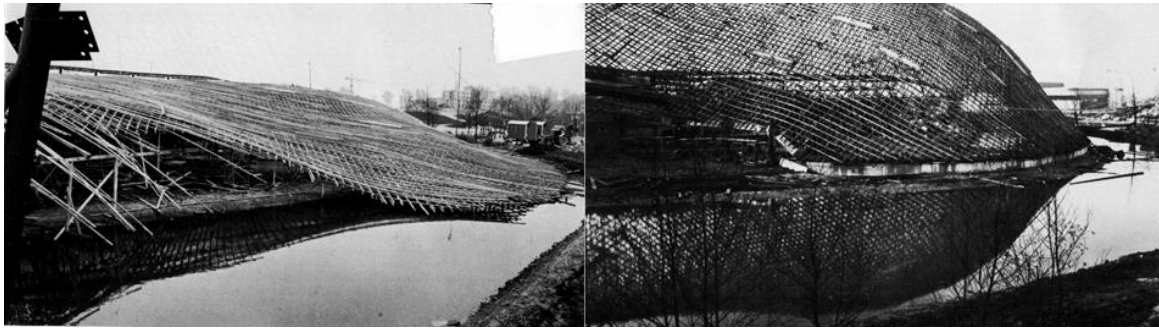


Figuur 3-14: Boutsleuf in uiterste lat [7]



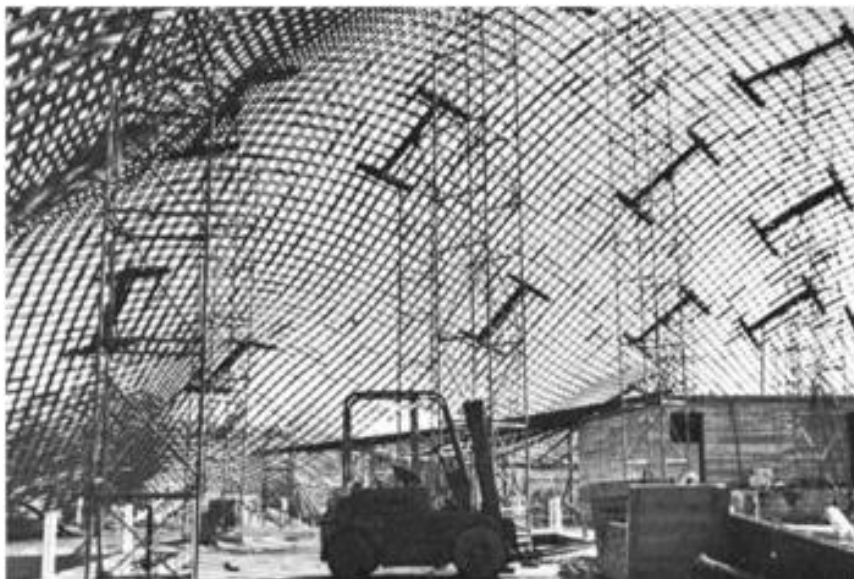
Figuur 3-15: Detail knooppuntverbinding met veerring [7]

3.1.3 Erectieproces



Figuur 3-16: Erectieproces Mannheim Multihalle [8]

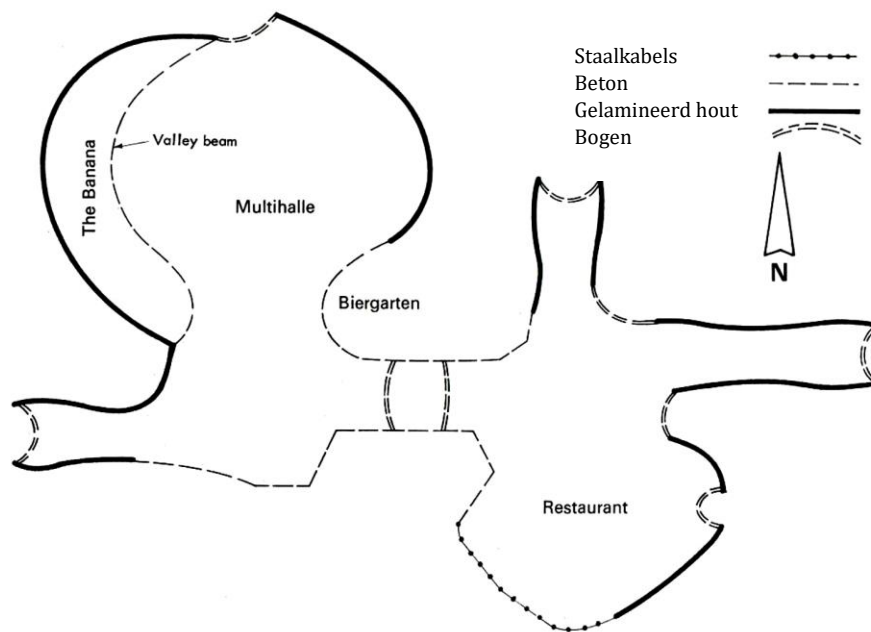
Het initieel voorstel voor het erectieproces was om het latwerk omhoog te trekken door middel van hijskranen, naar voorbeeld van de teststructuur van de *Essen Gridshell* (Figuur 3-8). De infrastructuur die hiervoor nodig zou zijn, bleek echter te kostelijk. Hierdoor werd besloten de gridshell omhoog te duwen vanop het maaiveld. H-vormige spreidbalken werden in het midden verbonden aan steigertorens door middel van een kogelgewricht. Deze spreidbalken zorgen voor een gelijkmatige verdeling van de uitgeoefende krachten op het latwerk tijdens het erectieproces. De steigertorens werden verplaatst door middel van vorkheftrucks (Figuur 3-17). De vorkheftrucks boden voldoende tegengewicht om de voet van de torens stabiel te houden en om snel het geheel zowel verticaal als horizontaal te verplaatsen. [7]



Figuur 3-17: Steigertorens bevestigd aan H-vormige spreidbalken (bron: Atelier Frei Otto + Partner)

3.1.4 Ringbalk

Wanneer de gridshell zijn gewenste vorm had bereikt, werd het latwerk bevestigd aan de ringbalk. Initieel zou de gehele rand van de gridshell bevestigd worden aan staalkabels, ondersteund door stalen kolommen. Door de grote momenten aan de randen, de sterk variërende overspanningen tussen de kolommen en de grote hellingshoek tussen de aansluiting van latwerk en kolom, werd de ringbalk uiteindelijk op vijf verschillende manieren uitgevoerd (Figuur 3-18). [7]



Figuur 3-18: Plan Mannheim Multihalle met ringbalkontwerp [7]

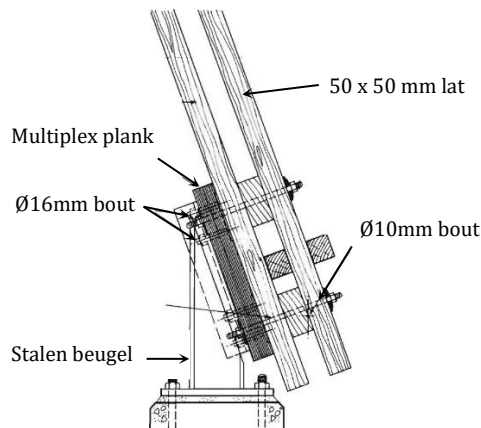
Aan de randen waar er grote momenten optreden ten gevolge van het ontdebellen van het latwerk, wordt het latwerk gemonteerd aan een multiplex plaat die vervolgens wordt verankerd aan een betonnen muur door middel van stalen beugels (Figuur 3-19). De stalen beugels worden individueel gefabriceerd met een variërende hellingshoek. Een roterende beugel die de grote momenten zou kunnen opvangen was een te kostelijke zaak. [7]

De ringbalk ter hoogte van de kilgoot wordt in Figuur 3-18 aangeduid als *valley beam*. Deze ringbalk vormt de aansluiting tussen de enkellaagse gridshell van *The Banana* met de ontdebeldde gridshell van de *Multihalle*. Het latwerk wordt ook hier bevestigd aan een multiplex plaat die verankerd wordt aan de kilkeper (Figuur 3-20). Deze ringbalk wordt ondersteund door kolommen. [7]

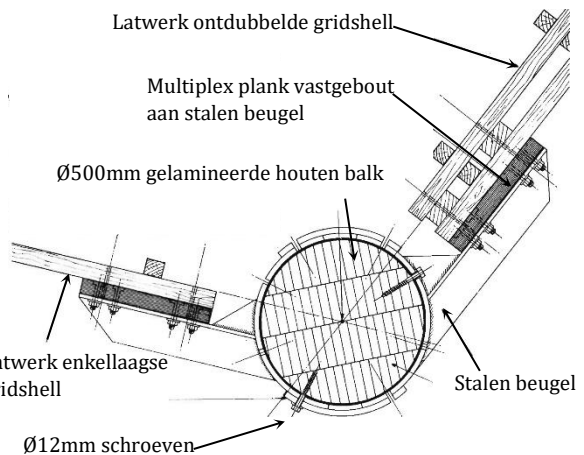
De detailtekening van de ringbalk ontworpen met staalkabels is weergegeven in Figuur 3-22. Aan weerszijden van het latwerk wordt een multiplex plaat aangebracht die op zijn beurt wordt bevestigd aan stalen kabels, ondersteund door kolommen (Figuur 3-21). Indien er een te grote hellingshoek zou zijn tussen de aansluiting latwerk-kolom zouden er te grote reactiekrachten optreden ter hoogte van deze aansluiting. De variërende overspanning tussen de kolommen zou dan weer resulteren in variërende staalkabelsecties. Hierdoor was deze staalkabelringbalk slechts op een plaats uitgevoerd. [7]

Daar waar de overspanning tussen de kolommen te groot is, wordt de staalkabelringbalk vervangen door een gelamineerde ringbalk. Aan weerszijden van het latwerk wordt een multiplex plaat bevestigd, die verbonden wordt aan de kolommen. (Figuur 3-23). Elke verbinding is uniek door de variërende aansluitingshoek tussen de ringbalk en de kolommen. [7]

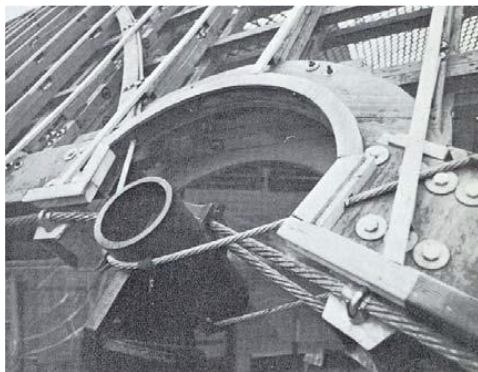
Tenslotte worden boogvormige ringbalken voorzien ter hoogte van de toegangspoorten en de verbinding tussen de gridshells van de *Multihalle* en het restaurant. Gelamineerd hout wordt aan weerszijden van het latwerk bevestigd en vervolgens verankerd in betonnen steunpunten door middel van op maat gemaakte, stalen beugels (Figuur 3-24). [7]



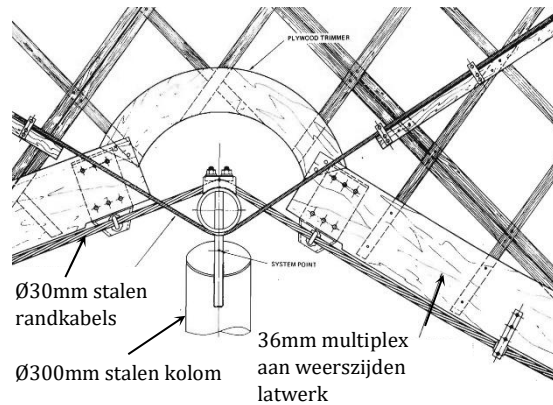
Figuur 3-19: Detail aansluiting ringbalk beton [7]



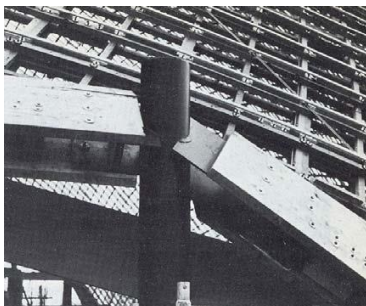
Figuur 3-20: Detail ringbalk kilgoot [7]



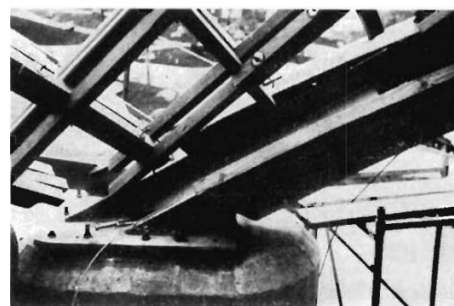
Figuur 3-21: Aansluiting ringbalk staalkabels [7]



Figuur 3-22: Detail aansluiting ringbalk staalkabels [7]



Figuur 3-23: Aansluiting gelamineerde ringbalk kolom[7]

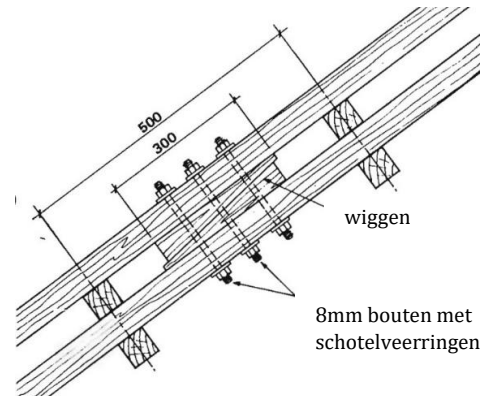
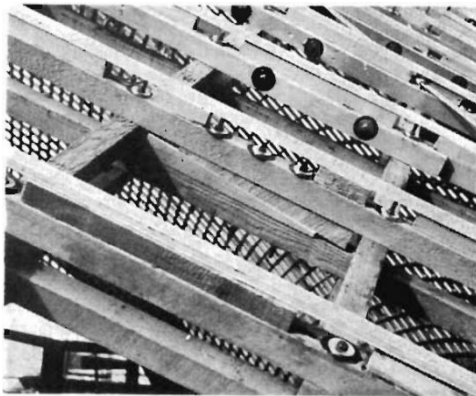


Figuur 3-24: Aansluiting gelamineerde randboog [7]

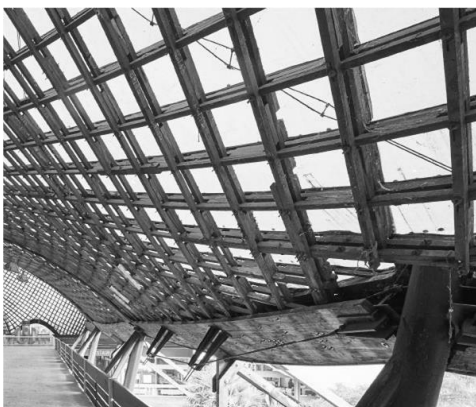
3.1.5 Afwerking

Eenmaal het latwerk was bevestigd aan de ringbalk, werd de vorm gecontroleerd en werd de gridshell bijgesteld waar nodig. Wanneer de finale vorm was bereikt, werden de knooppuntverbindingen aangespannen. In principe is het voldoende om de positie van de knooppunten in de hoogte te controleren. De steigertorens tussen twee latten op de NO-ZW as werden vervolgens verlaagd om de oneffenheden in het oppervlak ten gevolge van het omhoogduwen glad te strijken. Vervolgens werden de bouten op deze latten aangespannen. De steigertorens werden steeds dieper verlaagd naarmate het proces vorderde. Op deze manier werd voorkomen dat de latten waarvan de knooppuntverbindingen reeds aangespannen waren, zich zouden verplaatsen. Eenmaal de bouten aangespannen waren, werd het latwerk weer omhooggeduwd. Vervolgens werd dezelfde methode angewend op de NW-ZO as, waarna de rest van de structuur volgde.[7]

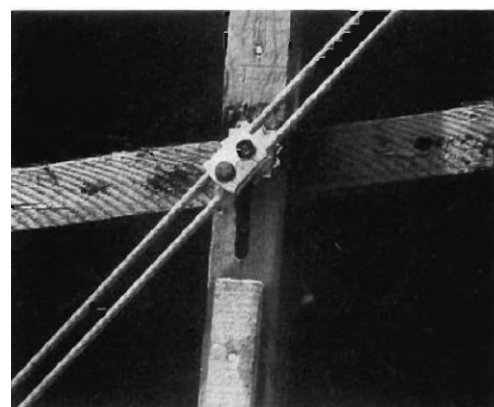
Wiggen werden aangebracht in de openingen tussen twee parallelle lagen latten om de schuifkrachten over te dragen en het voordeel van een ont dubbelde gridshell volledig te benutten (Figuur 3-25). Om de stijfheid van de structuur te vergroten, werd een windverband van dubbele stalen kabels aangebracht (Figuur 3-26). Om het geheel af te werken, werd op de structuur een translucent PVC membraan voorzien. [7]



Figuur 3-25: Detail van schuifspanningsblokken [7]



Bron: Daniel Lukac



Bron: saai

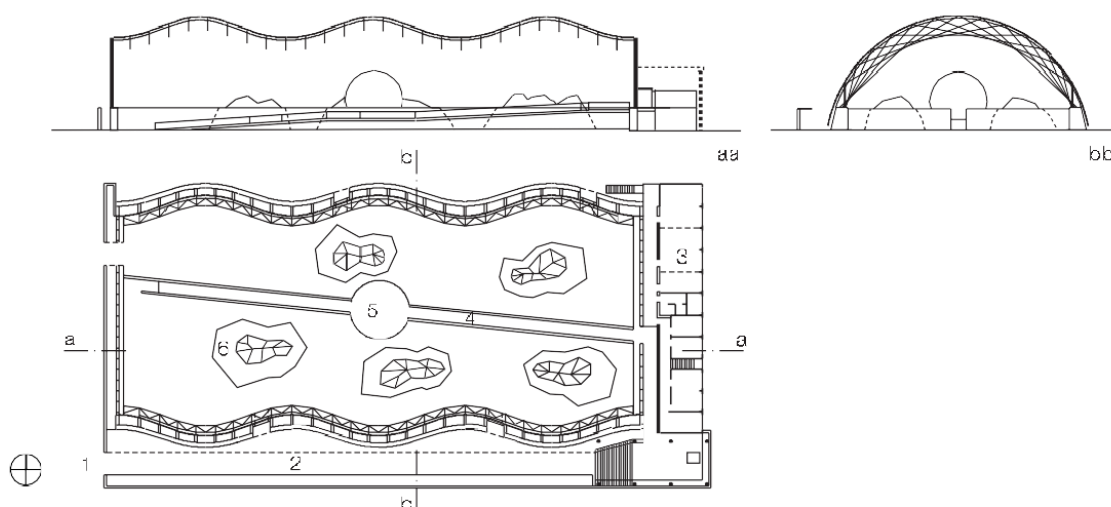
Figuur 3-26: Windverband van stalen kabels

3.2 Japan Pavilion Expo 2000

Het centrale thema van de wereldexpo 2000 in Hannover was *sustainable architecture*. Het *Japan Pavilion* van Shigeru Ban speelt hierop in door een lichte structuur te ontwerpen die volledig opgebouwd is uit recycleerbare en herbruikbare materialen (Figuur 3-27). Het paviljoen bestaat uit een kartonnen gridshell met een overspanning van 74 x 35 m en hoogtes tot 16 m. Bovendien is de fundering van het gebouw op een dergelijke wijze ontworpen dat het gebruik van beton overbodig is. Op deze manier wordt de impact van het paviljoen op de site beperkt tot een minimum.



Figuur 3-27: Japan Pavilion Expo 2000 (bron: Hiroyuki Hirai)



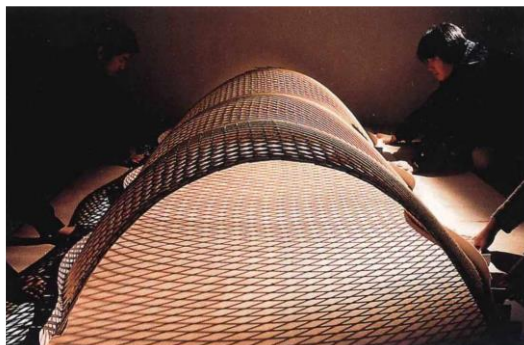
Figuur 3-28: Snede langs, snede dwars, plan [10]

3.2.1 Ontwerpproces

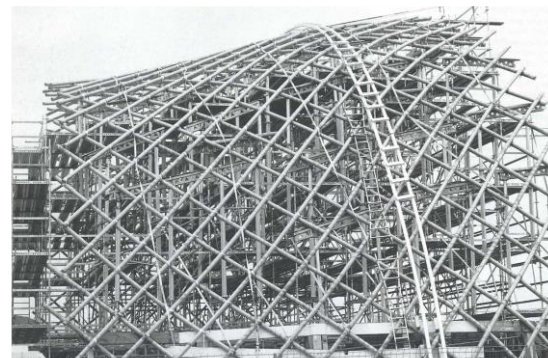
Voor het Japans paviljoen ontwierp Shigeru Ban oorspronkelijk een monoclastische structuur zonder verbindingen. Na consultatie met Frei Otto en Buro Happold werd er gekozen voor een golvend oppervlak met een dubbele insnoering (Figuur 3-28). Deze hybride vorm met dubbele kromming had een positieve invloed op de stijfheid van de structuur. Daarnaast stelde Frei Otto een eenvoudige verbinding van polyester- of metaalstrips voor, wat nog nooit eerder was toegepast bij grootschalige gridshells (Figuur 3-29). Frei Otto introduceerde ook een lichte secundaire structuur van gekromde glulam ladderspanten waaraan een papieren dakmembraan werd bevestigd. Deze secundaire structuur werd tegelijkertijd gebruikt tijdens de constructie- en onderhoudswerken. Aan de hand van maquette-onderzoek (Figuur 3-30) en een mock-up op ware grootte (Figuur 3-31), werd de finale vorm van het paviljoen, de verbindingen en het erectieproces uitgebreid getest. [11]



Figuur 3-29: Prototypes van de verbindingen [12]



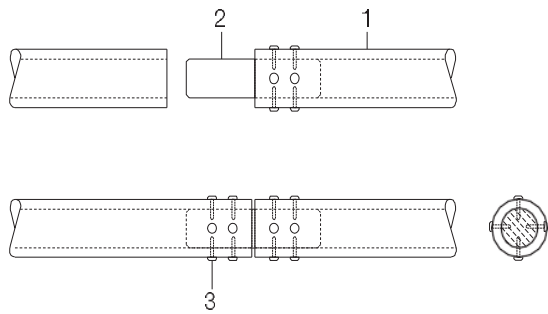
Figuur 3-30: Testmaquette gridshell (bron: Shigeru Ban Architects)



Figuur 3-31: Mock-up gridshell [13]

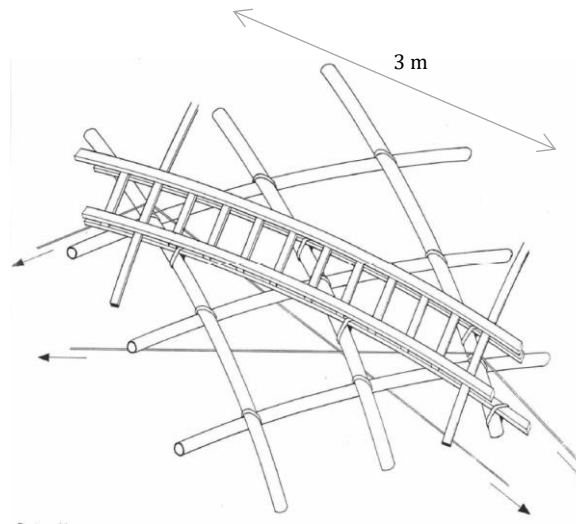
3.2.2 Opbouw latwerk

De gridshell was opgebouwd uit kartonnen kokers met een afwerkingslaag van acrylvernis. De kokers hadden een diameter van 120 mm, een wanddikte van 22 mm en een lengte van 40 m. Voor efficiënt transport werden deze kokers opgedeeld in elementen van 20 m lang, die vervolgens werden verbonden door middel van cilindrische houten inzetstukken (Figuur 3-32). Op de site werden de kokers gemonteerd volgens een vierkant raster met mazen van 1 x 1 m. [11] In de mock-up werden de knooppunten verbonden met een polyesterstrip door middel van een enkelvoudige sjorring. Bij de finale uitvoering werd deze verbinding afgewisseld met een gecombineerde sjorring met kruisvormig wikkelpatroon (Figuur 3-34).

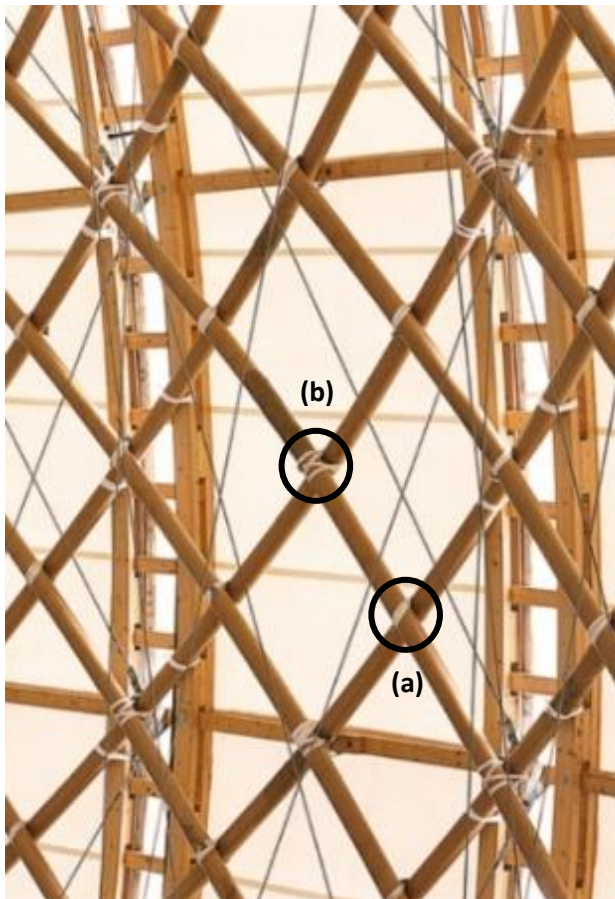


- 1 Ø 120/22 mm kartonnen koker; acrylvernis afwerking
- 2 Ø 76 mm houten inzetstuk
- 3 Ø 12 mm schroeven

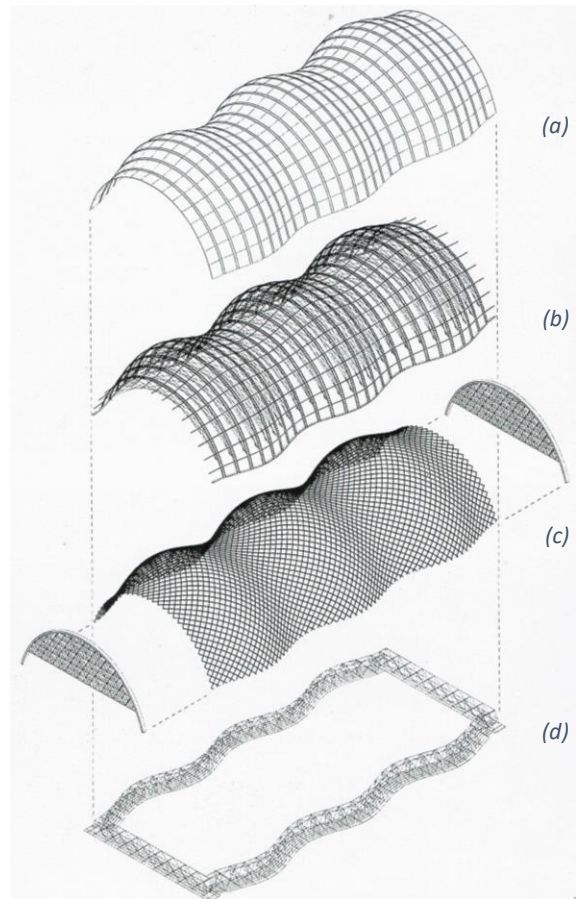
Figuur 3-32: Verbinding kartonnen kokers [10]



Figuur 3-33: Verbinding kartonnen gridshell, houten spanten en stalen trekkabels [13]



Figuur 3-34: Afwisselend wikkelpatroon van de knooppunten, met eenvoudige (a) en gecombineerde sjoerverbinding (b) (bron: Hiroyuki Hirai)



Figuur 3-35: Axonometrie opbouw; (a) papieren membraan, (b) secundaire structuur, (c) gridshell, (d) fundering [9]

3.2.3 Erectieproces

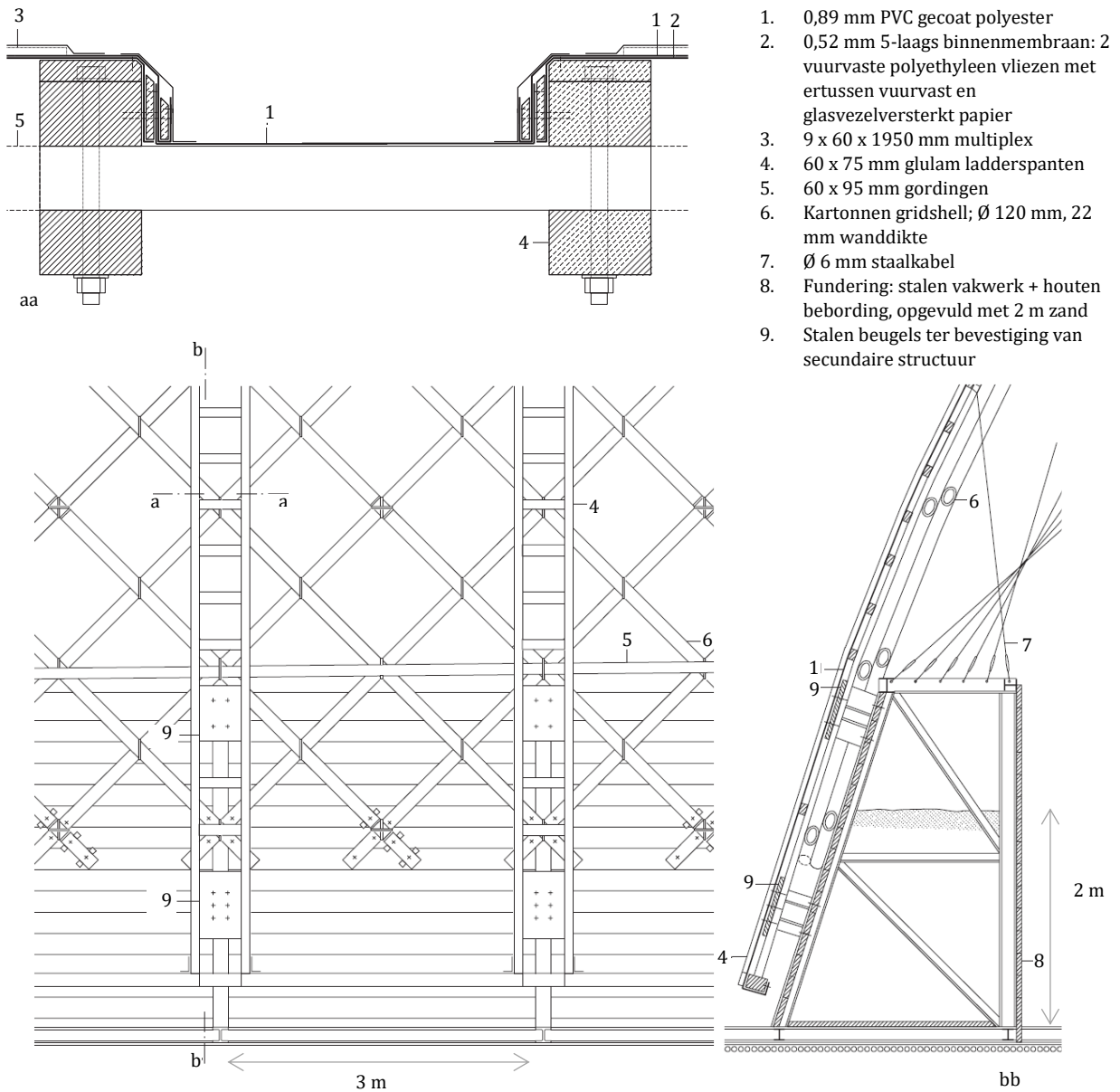


Figuur 3-36: Erectieproces Japan Pavilion [11]

Aan de hand van een steigersysteem werd de gridshell omhooggeduwd tot de golvende vorm met dubbele insnoering werd bereikt (Figuur 3-36). In theorie kon de structuur dagelijks 20 cm omhooggeduwd worden, maar door verstrengde veiligheidseisen werd dit proces vertraagd naar slechts 2 cm per dag. [11]

Wanneer de gridshell was gevormd, werd deze bevestigd aan de ringbalk. De ringbalk onderaan diende eveneens als fundering en was opgebouwd uit een stalen vakwerkconstructie afgewerkt met een houten bebording en opgevuld met zand tot een hoogte van 2 m (Figuur 3-37). Op deze manier was het gebruik van beton voor de fundering overbodig. De uiteinden van de gridshell werden tussen boogvormige houten ringbalken ingeklemd (Figuur 3-38). De zijgevels werden verstevigd door stalen kabels te trekken vanaf de fundering onder een hoek van 60 graden, waarna de zijwanden werden opgevuld met een kartonnen honinggraatstructuur. [10]

De secundaire structuur van gebogen ladderspanten werd over de kartonnen gridshell gebouwd om de stijfheid van de structuur te verhogen (Figuur 3-33). Tussen deze spanten werden gordingen aangebracht op een tussenafstand van 3 m en trekkabels bevestigd (Figuur 3-37). Hierop werd een watervaste papiermembraan bevestigd. [13]



Figuur 3-37: Boven: snede door houten ladderspant; onder: onderzijde gridshell: structureel systeem + snede [10]



Figuur 3-38: Aansluiting latwerk aan ringbalk zijgevel (bron: Hiroyuki Hirai)

3.2.4 Obstakels

De keuze om met karton als bouw materiaal te werken is heel innovatief; in Japan werd dit indertijd reeds erkend als een volwaardig bouw materiaal. In Duitsland was het bouwen met karton echter een nieuw gegeven, waardoor de ontwikkeling van het paviljoen tegen heel wat obstakels botste. Het doel van de architecten om met lowtech technieken aan de slag te gaan, zorgde vanaf het begin voor grote discussies tussen de architecten Shigeru Ban en Frei Otto enerzijds, en de ingenieurs van Buro Happold anderzijds. De verbindingen van de kartonnen kokers en de overdracht van interne en externe krachten zorgden voor grote onenigheid. [14]

Ondanks de vele voordelen van karton als bouw materiaal, was er één groot nadeel verbonden aan het gebruik van kartonnen kokers voor dit soort structuren. Tijdens het testen van de kartonnen kokers voor het bepalen van de sterkte, de waterdichtheid en de duurzaamheid, werd het fenomeen van extreme kruip vastgesteld. De veiligheid kon niet meer gegarandeerd worden en bijkomende maatregelen waren dan ook noodzakelijk. De vormgeving van het paviljoen kon niet meer drastisch veranderd worden, net als andere wijzigingen aan het ontwerp die te kostelijk zouden zijn. De kokers werden reeds getest in het labo, waardoor hun afmetingen ook niet meer gewijzigd konden worden. Bijgevolg werden de dimensies van de secundaire structuur vergroot en bevestigd aan de onderliggende gridshell, ondanks dat het de zuiverheid van het ontwerp aantastte. De verbindingen en het windverband die Buro Happold reeds had ontworpen, werden de vuilbak ingegooid en het hele proces werd herstart. [11]

Bovendien legden de bevoegde instanties strengere veiligheidseisen op waaraan het paviljoen moest voldoen en waar zelfs Frei Otto als gerenommeerd architect en expert in gridshells geen invloed op had. Het stadsbestuur was van mening dat de extern aangestelde ingenieur Stefan Polonyi te sterk betrokken raakte bij het project; halverwege het proces moest er van ingenieur veranderd worden. Het stadsbestuur stelde een lokale ingenieur aan die het verdere verloop van het project onpartijdig zou opvolgen. Er waren echter opvallende verschillen tussen het oorspronkelijk ontwerp en het ontwerp dat voortvloeide uit de samenwerking met de nieuwe ingenieur. Plots moest het paviljoen voldoen aan de eisen van een permanent gebouw, in plaats van een tijdelijke structuur. De kartonnen gridshell en secundaire houten structuur, die eerst ontworpen waren met losse verbindingen om mobiel te zijn, moesten nu volledig stijf zijn. Bijkomende testresultaten en berekeningen konden het oorspronkelijk ontwerp niet meer redden. Verder was het ontwerpteam genoodzaakt om de dimensies van de secundaire structuur te vergroten en onnodige extra staalwapening toe te voegen. Daarbovenop diende het paviljoen te voldoen aan verstrengde brandveiligheidseisen. Het Japans paviljoen werd reeds lang voor de opening van Expo 2000 wereldnieuws vanwege het innovatief materiaalgebruik. Er ontstond dan ook een zekere vrees voor een mogelijke terroristische aanslag. Een secundair membraan van transparante PVC werd aangebracht over het papieren membraan. Als gevolg van een nieuw type structuur, gebruikmakend van nieuwe methodes en materialen en dit alles binnen een beperkt tijds kader en budget, was het een hele uitdaging om de zuiverheid van de architectuur te behouden.[11]

3.3 Downland Gridshell

Het *Weald and Downland Museum* in Singleton, UK, is een openluchtmuseum dat regionale vernaculaire architectuur in haar oude glorie herstelt. De nieuwe workshop en het bezoekerscentrum vereisten *a structure that caught the essence of timber construction and threw it forward into the third millenium*.^[15]

Het winnend ontwerp van Edward Cullinan en Buro Happold omvat een houten gridshell met een overspanning van 50 x 15 m en hoogtes tot 9 m die de polyvalente ruimte overdekt (Figuur 3-39). In de kelderverdieping zijn de archieven en de museumshop ondergebracht. Voor de ontwikkeling van de gridshell werd er verder gebouwd op de kennis die is opgedaan bij het Japans paviljoen op Expo 2000 in Hannover. De golvende vorm met dubbele insnoering blijft behouden, de kartonnen kokers zijn vervangen door houten latten, het latwerk is ontdebeld en de lowtech polyesterstrip verbindingen worden vervangen door een gepatenteerde staalverbinding.



Figuur 3-39: Weald and Downland Museum (bron: Buro Happold)



Figuur 3-40: Langsdoorsnede (bron: Edward Cullinan Architects)

3.3.1 Opbouw latwerk

De ontdubbelde gridshell is opgebouwd uit eiken latten met een doorsnede van 30 x 50 mm. De latten worden gemonteerd op een raster met vierkante mazen die variëren van 0,50 m tot 1 m. Ter hoogte van de insnoeringen is de spanning in de latten het hoogst, waardoor een raster met mazen van 0,50 x 0,50 m is vereist. Naar de uitstulpingen toe wordt de structuur geopend tot een raster met mazen van 1 x 1 m (Figuur 3-47). [16]

De knooppunten worden verbonden door middel van een stalen klemverbinding. Oorspronkelijk werd deze verbinding opgebouwd uit vier stalen platen (Figuur 3-46). De uitgevoerde versie bestaande uit drie stalen platen en vier bouten (Figuur 3-42). Een pin is bevestigd aan weerszijden van de centrale plaat. Op deze manier worden de knooppunten van de twee middelste latten gefixeerd op een constante tussenafstand van 1 m. Tijdens het erectieproces zijn de verbindingen niet aangespannen zodat de rotatiebeweging van het latwerk niet belemmerd wordt. Bovendien biedt deze verbinding voldoende bewegingsvrijheid aan het latwerk opdat de uiterste latten onderling kunnen verschuiven.[17] De knooppunten in het raster met mazen van 0,50 x 0,50 m worden verbonden door middel van een boutverbinding met boutsleuven in de bovenste twee latten (Figuur 3-43). De afwisseling van beide verbindingen in het fijnmazig raster van 0,50 x 0,50 m wordt weergegeven in Figuur 3-45.

De enige plaats waar de schuifbeweging van de uiterste latten niet voorkomt, is ter hoogte van de lengteas. Tijdens het erectieproces bewegen deze knooppunten enkel in de verticale richting. Bijgevolg werden op deze knooppunten de gepatenteerde klemverbindingen vervangen door boutverbindingen (Figuur 3-44). Rotatie van het latwerk is nog steeds mogelijk, maar verschuiving van de uiterste latten wordt belemmerd.[18]

Aan de hand van een mock-up op ware grootte werd het gedrag van het latwerk en de verbindingen tijdens de vervorming van de gridshell getest (Figuur 3-41). De aangebrachte spanningen waren groter dan de spanningen die zich effectief zouden voordoen in de volledige structuur, waardoor potentiële problemen die zouden optreden tijdens de constructie werden blootgelegd. Het schaalmodel bewijst dat de verbindingen de rotatiebeweging en verschuiving van de latten niet blokkeren, zolang de bouten niet zijn aangespannen tijdens het erectieproces. Daarnaast toonde het ook aan dat een sterke kromming van het latwerk mogelijk was.[18]



Figuur 3-41: Mock-up gridshell (bron: Edward Cullinan Architects)



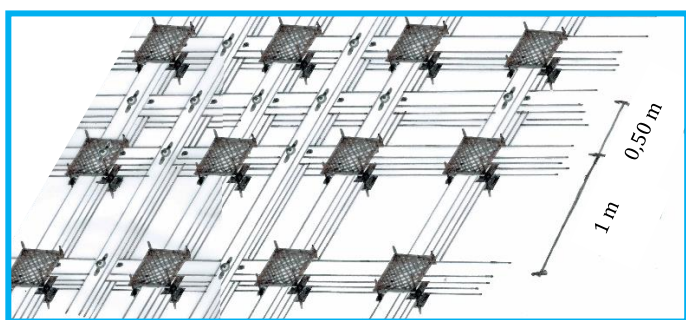
Figuur 3-42: Stalen klemverbinding [17]



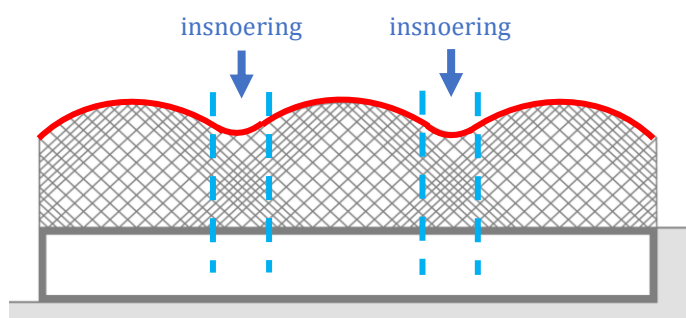
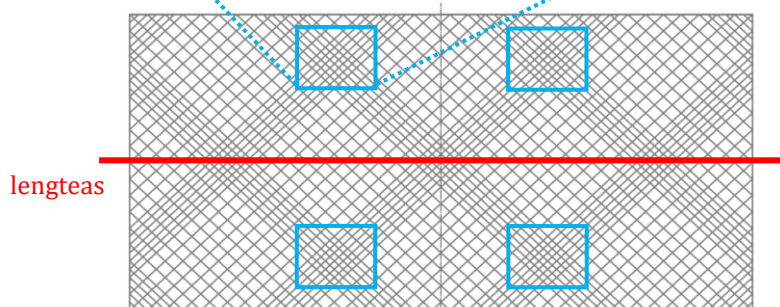
Figuur 3-43: Boutverbinding [19]



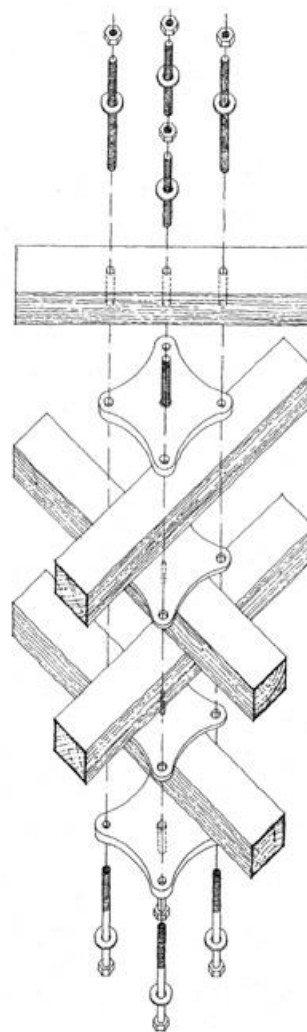
Figuur 3-44: Knooppunt op lengteas [17]



Figuur 3-45: Verbinding raster met mazen van 0,50 x 0,50 m

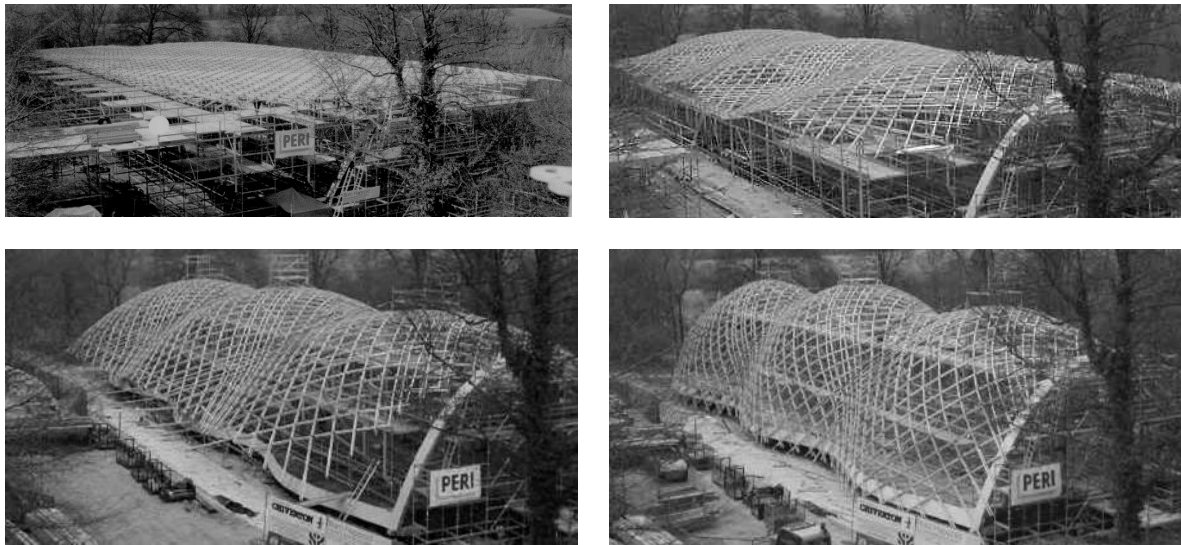


Figuur 3-47: Raster Downland Gridshell



Figuur 3-46: Axonometrie prototype klemverbinding (bron: Edward Cullinan Architects)

3.3.2 Erectieproces



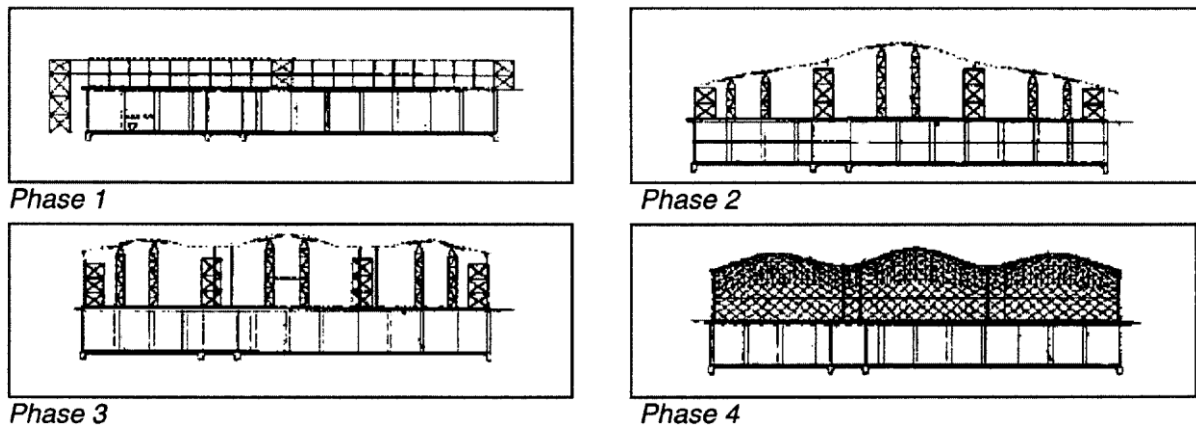
Figuur 3-48: Erectieproces Downland Gridshell (bron: Edward Cullinan Architects)

In tegenstelling tot vergelijkbare structuren van Frei Otto en Shigeru Ban, waarbij het latwerk op het maaiveld werd gemonteerd en vervolgens omhooggeduwd of getrokken werd, werd bij de *Downland Gridshell* gebruik gemaakt van de zwaartekracht om het latwerk te vervormen (Figuur 3-48). [20] Daarnaast zorgt de methode van de zwaartekracht voor een meer gecontroleerde vervorming van het latwerk, waarbij de koepels en valleien gelijktijdig worden gevormd. Dit zorgde voor een kleinere kans op breuk van de eiken latten. [15] Dit was echter niet het oorspronkelijk concept voor het vervormen van het latwerk.

3.3.2.1 Oorspronkelijke methode

Het oorspronkelijk erectieproces van de *Downland Gridshell* is geïllustreerd in Figuur 3-49. Tijdens fase 1 werd een steigerplatform over de site gebouwd waarop het latwerk werd gemonteerd. Vervolgens werden tijdens fase 2 steigertorens geïntroduceerd die het latwerk omhoogduwden en het onderliggende steigerplatform afgebroken kon worden. Hierbij werd de centrale koepel als eerste gevormd en aan de ringbalk vastgezet. Tijdens fase 3 duwen de steigertorens het latwerk verder omhoog om de twee uiterste koepels te vormen. Hierna werden de valleien ingesnoerd door middel van spanbanden. In fase 4 werd de vorm van de uiterste koepels bijgesteld, de gridshell werd bevestigd aan de ringbalk en het raster werd getrianguleerd. [17]

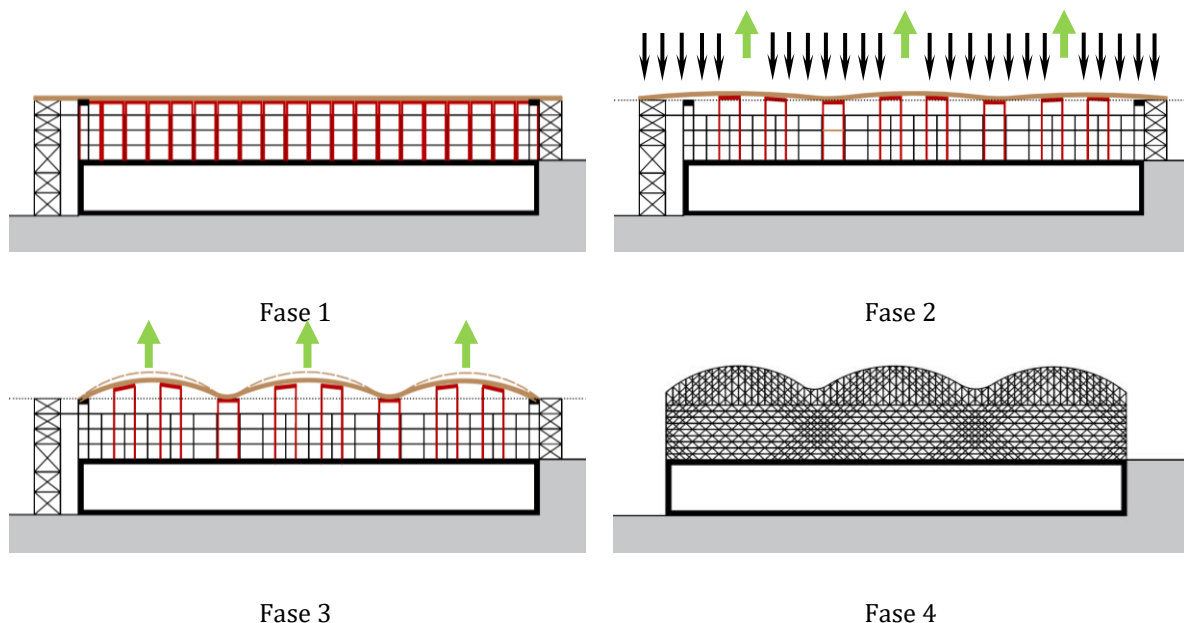
Tijdens het testen van maquettes op kleine schaal werd vastgesteld dat er aanzienlijke krachten nodig zijn om op deze manier de insnoeringen te realiseren. Deze methode zou moeilijk toe te passen zijn op grote schaal en zou een groot aantal breuken tot gevolg hebben; een herziening van het erectieproces was aangewezen. [17]



Figuur 3-49: Oorspronkelijk concept erectieproces Downland Gridshell [17]

3.3.2.2 Uitgevoerde methode

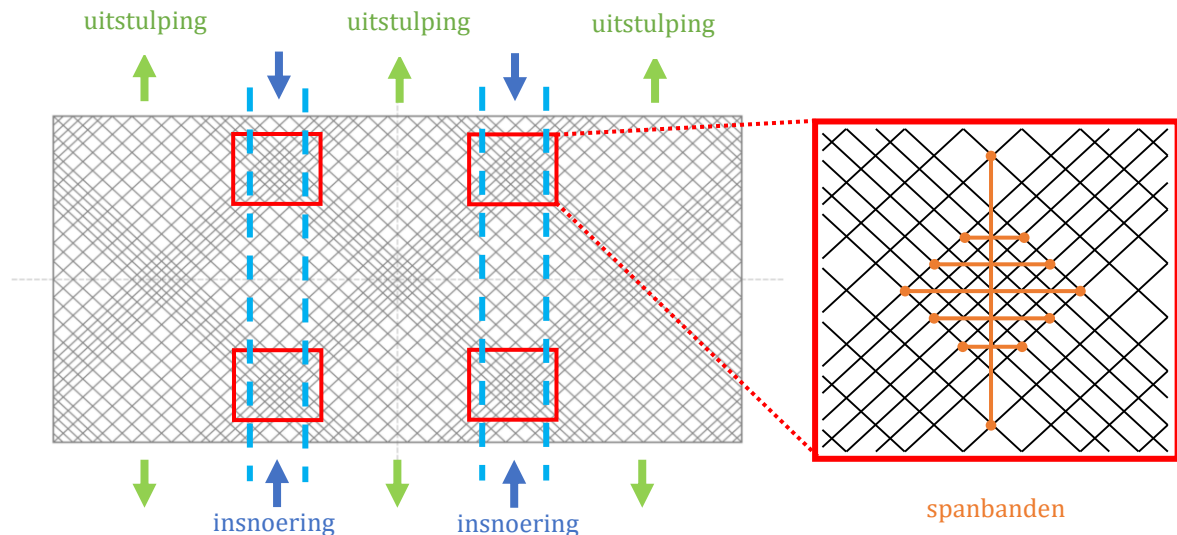
Het oorspronkelijk concept werd geoptimaliseerd door middel van de ervaring opgedaan tijdens de constructie van het Japans paviljoen op Expo 2000. Het proces wordt weergegeven in Figuur 3-50.



Figuur 3-50: Uitgevoerd erectieproces Downland Gridshell

Fase 1

Het latwerk van de *Downland Gridshell* werd gemonteerd op een hoogte van 7 m; dit is het laagste punt van de valleien. Door de geometrie van de gridshell moest het latwerk tijdens het erectieproces samengedrukt worden in de dwarsrichting ter hoogte van de insnoeringen. Daarentegen werd het latwerk ter hoogte van de uitstulpingen juist uitgerokken in de dwarsrichting (Figuur 3-51). Om deze vervorming te realiseren werd een voorspanning aangebracht in het latwerk ter hoogte van de insnoeringen door middel van spanbanden. De koepels ter hoogte van de uitstulpingen werden gevormd door het latwerk plaatselijk omhoog te duwen. Op deze manier werd de gridshell grotendeels gevormd onder invloed van de zwaartekracht, in plaats van het volledig omhoog te duwen tegen de zwaartekracht in. [17]

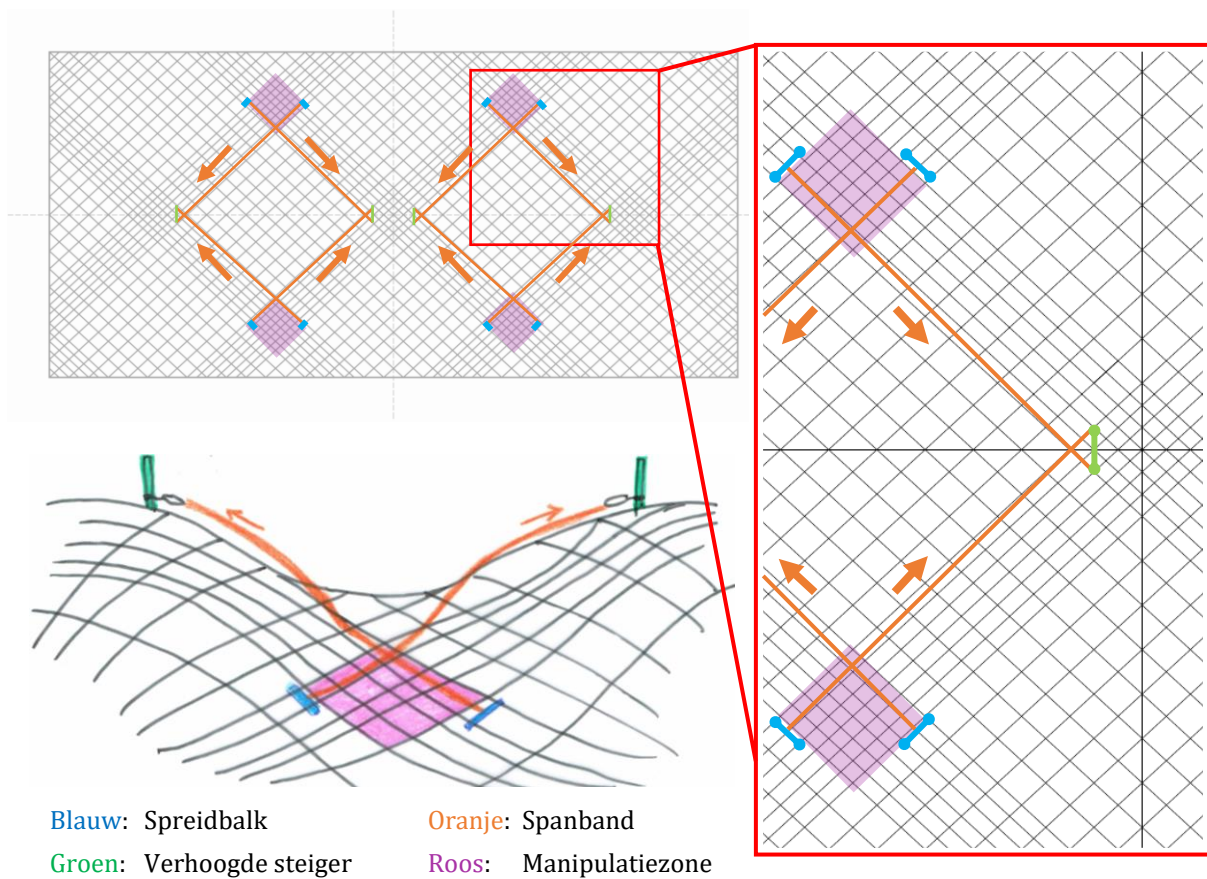


Figuur 3-51: Latwerk fase 1

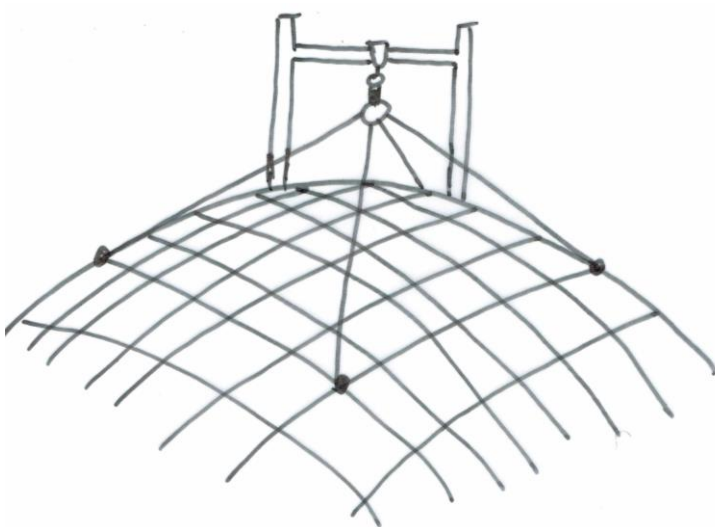
Fase 2

Eenmaal het latwerk was gemonteerd, kon het erectieproces beginnen. Wanneer het raster 25% was gezakt, werd er opgemerkt dat de rotatiebeweging van het latwerk ter hoogte van de insnoeringen werd geblokkeerd waardoor de latten in deze zones nagenoeg recht waren gebleven. Op verschillende plaatsen werden manipulatiezones voorzien waar spreidbalken bevestigd werden aan de knooppunten van twee latten en met spanbanden verbonden werden aan de centrale steigertorens (Figuur 3-52). Op deze manier werd de rotatiebeweging van het latwerk ter hoogte van de insnoeringen alsnog gerealiseerd naarmate het erectieproces vorderde. [17]

Wanneer het raster 50% was gezakt, werd het alsnog moeilijker om de koepels ter hoogte van de uitstulpingen met spreidbalken omhoog te duwen. Met behulp van een takelsysteem, bevestigd aan de centrale steigertorens, werden de koepels alsnog omhoog getrokken (Figuur 3-53). Daarnaast belemmerden de steigers aan de randen van de gridshell de verdere vervorming van het latwerk. Bijgevolg werden deze steigers vervangen door schoren (Figuur 3-54). [17]



Figuur 3-52: Latwerk 25% gezakt: aanbrengen van spanbanden om insnoeringen te realiseren (bron: Buro Happold, eigen herwerking)



Figuur 3-53: Latwerk 50% gezakt: omhoog hijsen van koepels [17]



Figuur 3-54: Schoren aan de rand van het latwerk [19]

Fase 3

Wanneer het latwerk volledig was gezakt, werd de vorm gecontroleerd en bijgesteld waar nodig. Na opmeting werd er vastgesteld dat de valleien ter hoogte van de insnoeringen de gewenste hoogte en breedte hadden bereikt. De koepels ter hoogte van de uitstulpingen waren echter een dertigtal centimeter te laag en kenden een groot volumetekort. Een finale bijstelling van de gridshell was dan ook noodzakelijk. [17]

Fase 4

Eenmaal de gridshell zijn finale vorm had bereikt, werd het latwerk bevestigd aan de ringbalk. Bij de montage van het latwerk werd er rekening gehouden met een mogelijke foutenmarge die zou ontstaan tijdens het erectieproces. Door deze speling stak het latwerk uit en werd dit aan de ringbalk op maat bijgesneden. Ter hoogte van de ringbalk werden de openingen tussen de lagen van het latwerk opgevuld (Figuur 3-55) en het geheel werd afgewerkt met een multiplex plaat (Figuur 3-56). Eenmaal de gridshell verankerd was, werden de knooppunten aangespannen en het raster getrianguleerd door middel van houten latten die rechtstreeks op de gepatenteerde stalen klemverbindingen werden bevestigd. Deze triangulatie zorgt voor de nodige stijfheid van de structuur. In het onderste gedeelte van de gridshell werden deze latten in de lengte aangebracht. In het bovenste gedeelte werden deze latten transversaal op de gridshell bevestigd. Op deze triangulatielatten werden vervolgens cederhouten dakspanen bevestigd. Op de transversale triangulatielatten werden polycarbonaatplaten aangebracht. [17]



Figuur 3-55: Bevestiging van gridshell aan onderste ringbalk met opvulling van de latten [19]



Figuur 3-56: Bevestiging van gridshell ter hoogte van de ringbalk aan de uiteinden [19]

3.3.3 Trial-and-error

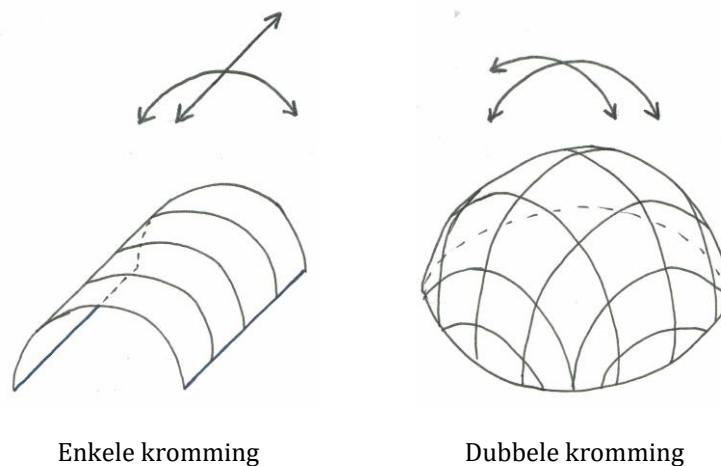
Ondanks de uitgebreide voorafgaande studie aan de hand van talloze maquettes, digitale simulaties en berekeningen, was de opbouw, en in het bijzonder het erectieproces, in realiteit een groot experiment. *Trial-and-error* bleek de enige mogelijke werkmethode te zijn. De vervorming van de gridshell werd continu gemonitord en daar waar nodig bijgesteld. Bovendien vond er dagelijks een briefing plaats om de gebeurtenissen van de vorige dag te bespreken. Het hele constructieteam werd opgeleid over de werking van de structuur en de manier van opbouw, opdat iedereen begreep wat er die dag ging gebeuren. Dit gaf het hele team de mogelijkheid om constant feedback te geven en om samen oplossingen te vinden voor een veilige werkmethode. Op deze manier ontstond er een sterke teamspirit met wederzijds respect, waardoor ook vaak innovatieve oplossingen werden bedacht voor een betere constructiemethode. [18]

4 Algemene constructieprincipes

Uit de casestudies besproken in hoofdstuk 3 worden in wat volgt enkele algemene principes vastgesteld die gelden voor het ontwerpen van een traditionele elastische gridshell.

4.1 Vorm

Een elastisch en regelmatig gebogen gridshell kan zeer uiteenlopende organische vormen aannemen die worden bepaald door middel van *form-finding* technieken, zoals een hangende kettinglijnmaquette. Tegenwoordig kan de vorm ook bepaald worden via computersoftware die de *form-finding* technieken digitaal simuleren. Een dubbele kromming van bijvoorbeeld synclastische of anticlastische structuren geeft een zekere stijfheid aan de gridshell en wordt verkozen boven een enkele kromming van een monoclastische structuur (Figuur 4-1). Sterke krommingsstralen (uitleg zie paragraaf 8.2) verhogen de buigstijfheid, maar verhogen gelijktijdig de buigspanningen in het latwerk waardoor de kans op breuk tijdens het erectieproces toeneemt.



Figuur 4-1: Vorm elastische gridshell

4.2 Opbouw latwerk

4.2.1 Houtsoort

Verschillende houtsoorten zijn geschikt voor de opbouw van het latwerk. Tabel 4-1 is een weergave van een reeks houtsoorten met hun gemiddelde waarden voor het volumegewicht, de buigsterkte en de elasticiteitsmodulus.

Houtsoort	Volumegewicht (kg/m ³)	Buigsterkte (N/mm ²)	Elasticiteitsmodulus (N/mm ²)
Balsa	150	22	3420
Western Hemlock	450	80	12300
Eik	650	95	12500
Lorkenhout	600	94	12550
Oregon Pine	550	89	13500
Vuren	450	71	10000
Grenen	500	79	11000
Den	460	72	10800

Tabel 4-1: Eigenschappen van hout [21]

Het volumegewicht is een indicatie voor de kwaliteit van het hout. Hoe groter het volumegewicht, hoe groter de dichtheid van het hout en dat heeft dan weer een positief effect op de sterkte. Het volumegewicht wordt beïnvloed door het vochtgehalte. In het algemeen neemt de sterkte van het hout toe wanneer het vochtpercentage daalt. [22]

De vochtigheidsgraad van hout is de verhouding van de massa vocht in het hout tot de massa van droog hout. Hoe groter de vochtigheidsgraad, hoe buigzamer het hout. Daarom wordt voor de opbouw van het latwerk veelal groenhout gebruikt. Dit is niet-gedroogd, vers gevelde hout waarvan het vochtpercentage afhankelijk is van de houtsoort en varieert tussen 50% en 300%. Het vochtpercentage van natuurlijk gedroogd hout varieert doorgaans tussen 12 en 20%. [22]

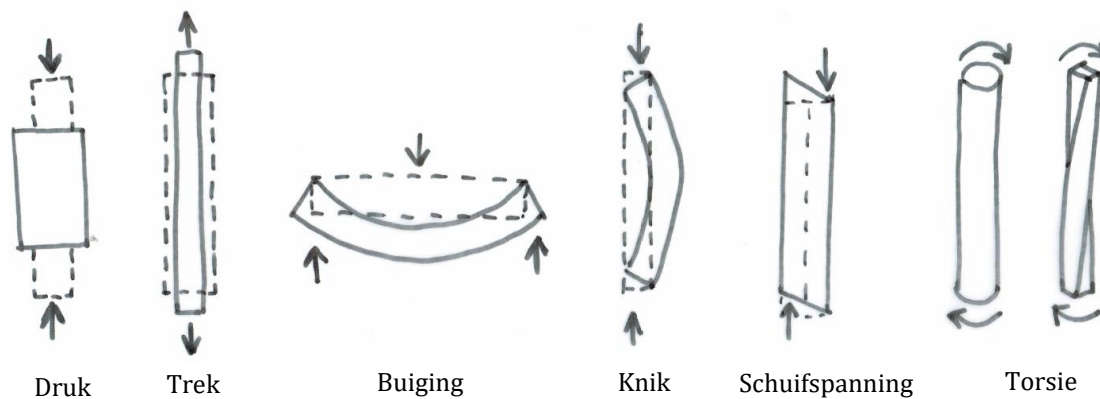
De buigsterkte is de verhouding van het maximaal buigend moment tot het weerstandsmoment. Dit is een indicatie van de mate waarin het hout spanningen kan weerstaan wanneer het onderworpen wordt aan buiging. Dit betekent hoe groter de buigsterkte, des te meer buigspanningen het hout kan opnemen. [22]

Hoe groter de elasticiteitsmodulus, hoe minder het hout vervormt onder invloed van een belasting. De elasticiteitsmodulus kan gemeten worden in verschillende richtingen. De elasticiteitsmodulus in de longitudinale richting heeft de grootste waarde. Dit wil zeggen dat het hout makkelijker vervormt wanneer het loodrecht op de vezels wordt belast. De elasticiteitsmodulus wordt bovendien beïnvloed door het vochtpercentage. Wanneer het vochtpercentage toeneemt, zal de elasticiteitsmodulus dalen. Hoe groter de vochtigheidsgraad, hoe groter de plastische vervormingen van het hout. [22]

4.2.2 Dimensies latten

4.2.2.1 Doorsnede van de latten

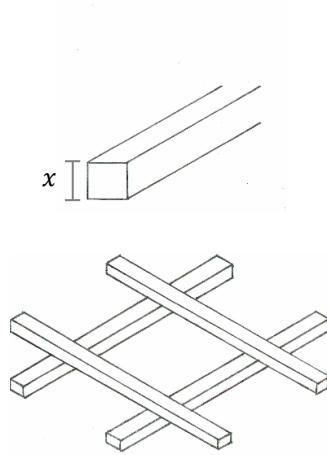
De structuur kan theoretisch gezien zeer dun zijn, maar de doorsnede wordt bepaald door de stijfheid die nodig is om de knik van de latten en de asymmetrische belasting te weerstaan. In de besproken casestudies worden ronde, vierkante of rechthoekige doorsnedes gebruikt. Ronde doorsnedes hebben slechts een contactpunt, waardoor er geen torsie zal optreden in de lat. Bij vierkante of rechthoekige doorsnedes daarentegen, kan de lat vervormen onder invloed van torsie (Figuur 4-2). Daarnaast zullen de latten, afhankelijk van de vorm van de gridshell, zowel om hun zwakke als hun sterke as buigen. In de besproken casestudies worden rechthoekige doorsnedes gebruikt waarvan de afmetingen variëren tussen $b = d$ en $b = \frac{1}{2}d$, met b de breedte en d de dikte van de doorsnede. Wanneer $b < \frac{1}{2}d$, dreigt de lat niet meer om zijn sterke as te kunnen buigen, wat zal leiden tot breuk. Hoe groter de verhouding tussen de sectiedoorsnede en de lengte van de latten, hoe buigzamer de latten zullen zijn. Dit wil dan ook zeggen dat hoe groter de doorsnede, hoe groter de buigspanningen zullen zijn die optreden tijdens het vervormen van het latwerk. Met een doorsnede van 50 x 50 mm, is de dubieuze titel van grootste sectiedoorsnede in een houten gridshell weggelegd voor de *Mannheim Multihalle*.



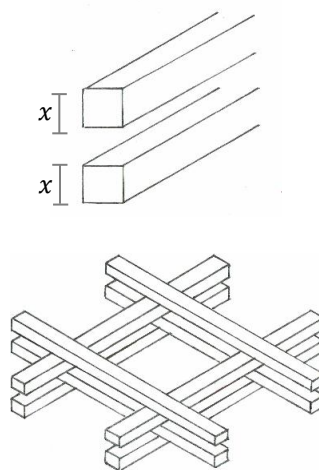
Figuur 4-2: Vormen van mechanische spanning

Bij buiging wordt de doorsnede loodrecht op de lengteas belast. Bij knik wordt de doorsnede parallel met de lengteas belast. Wanneer de doorsnede van een enkellaagse gridshell te zwak is en de structuur dreigt te bezwijken onder invloed van knik (Figuur 4-3), wordt er overgestapt op een ont dubbelde gridshell (Figuur 4-4). Hierbij wordt het latwerk ont dubbel, waardoor de structuur uit vier lagen bestaat. Door toevoeging van schuifspanningsblokken tussen twee parallelle lagen latten, worden de schuifspanningen overgedragen tussen de verschillende lagen en geniet het latwerk van de voordelen van een grotere sectiedoorsnede (Figuur 4-5).

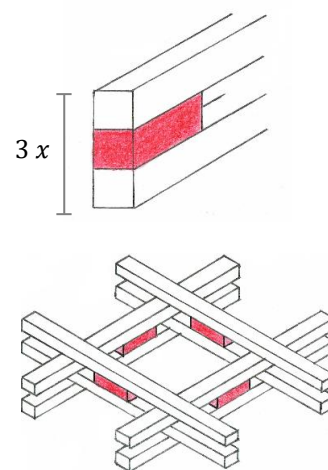
De frequentie van deze schuifspanningsblokken is afhankelijk van de spanningsverdeling in het latwerk. Aan de randen van de gridshell zullen er grotere spanningen optreden waardoor hier meer schuifspanningsblokken worden aangebracht. Deze schuifspanningsblokken worden aangebracht eenmaal het erectieproces is voltooid en de knooppuntverbindingen zijn aangespannen. [18]



Figuur 4-3: Enkellaags latwerk



Figuur 4-4: Ontdubbeld latwerk



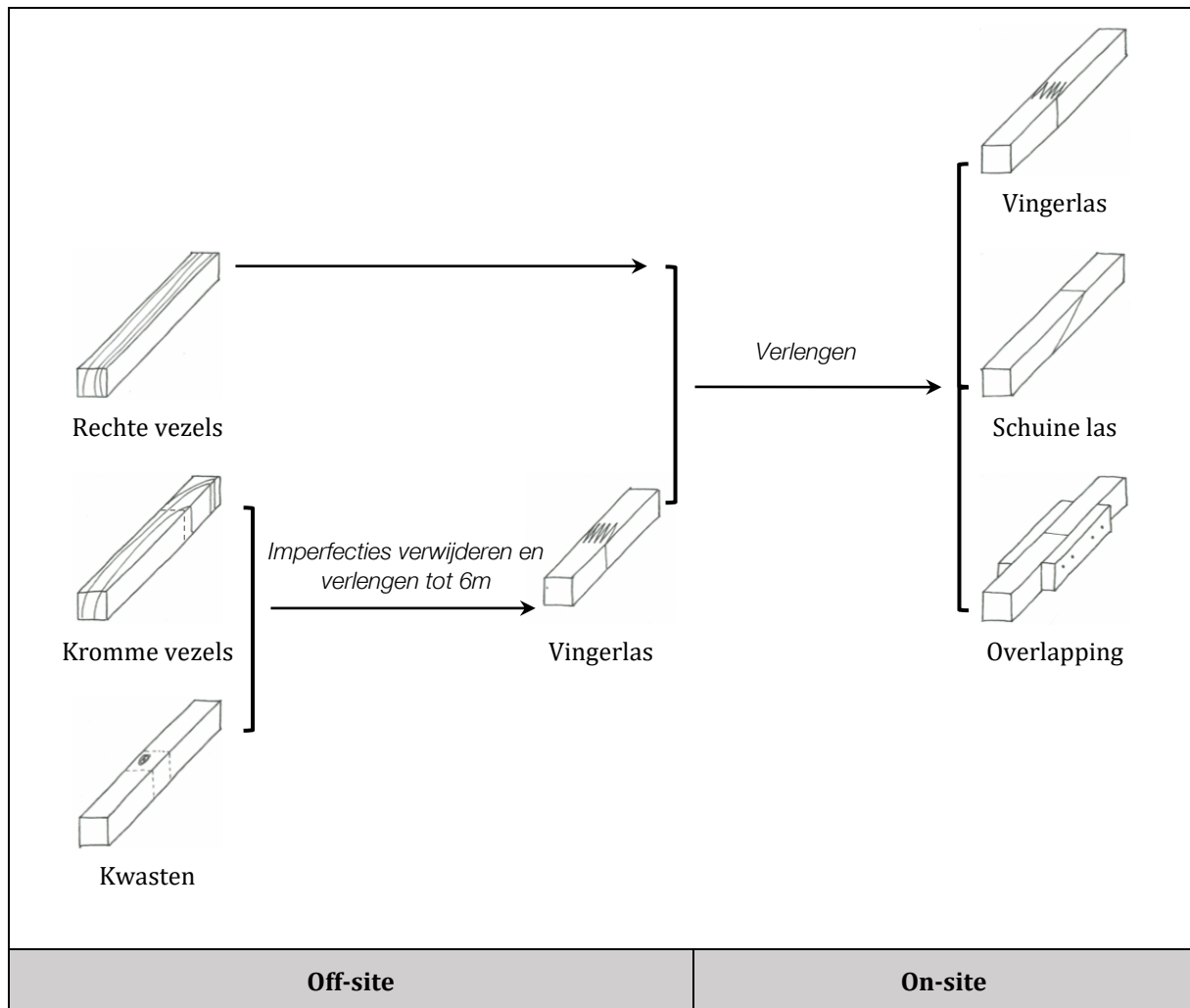
Figuur 4-5: Aanbrengen schuifspanningsblokken

4.2.2.2 Lengte van de latten

Houten elastische gridshells worden vaak opgebouwd met latten die langer zijn dan de beschikbare handelsmaten. Figuur 4-6 illustreert op welke manier de latten alsnog de vereiste lengte verkrijgen. Door de beperkte doorsnede, hebben imperfecties als kwasten een grotere impact op de sterkte van de latten. Daarnaast kan ook de draad van het hout (*grain lines*) de sterkte van de latten beïnvloeden. De draad van het hout is de richting van het verloop van de vezels en is afhankelijk van de groeirichting van het hout [22]. Idealiter kennen de vezels een recht verloop. Indien het hout niet rechtdradig is, ontstaat het risico dat de vezels in de lat onderbroken worden. In de *Downland Gridshell* worden deze imperfecties weggesneden en de latten worden opnieuw verbonden door middel van een vingerlas. Hierbij zijn een voldoende groot verlijmingsoppervlak en type lijm belangrijk. Deze handeling vindt doorgaans plaats in een gecontroleerde omgeving buiten de site. [18]

Voor een vlot transport worden deze latten doorgaans verlengd tot maximaal 6 meter. De verbeterde latten en latten met rechte vezels en zonder kwasten, worden vervolgens op de site verlengd tot de gewenste lengte door middel van vingerlassen, schuine lassen of een overlapping met een mechanische verbinding. Het is belangrijk dat deze verbindingen correct worden uitgevoerd om breuk van de latten zoveel mogelijk te vermijden.

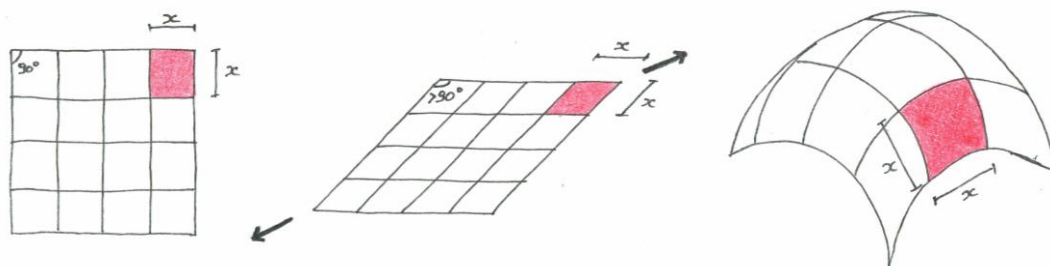
Wanneer enkele verbindingen zouden bezwijken, ontstaat het risico op een domino-effect. De spanningen die in het latwerk ontstaan tijdens het erectieproces zullen namelijk verdeeld worden over de resterende latten waardoor de spanning in deze latten aanzienlijk zal stijgen [7].



Figuur 4-6: Verlengen van de latten

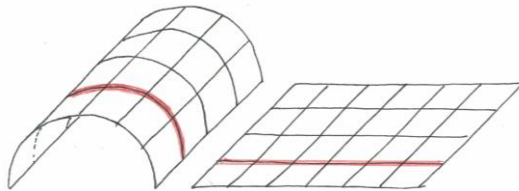
4.2.3 Raster

De latten worden op een vlakke ondergrond gemonteerd volgens een raster met vierkante mazen. In de besproken casestudies varieert de grootte van de mazen tussen 0,50 x 0,50 m en 1 x 1 m. Deze afmetingen worden bepaald door de spanningen in de gridshell; naarmate de spanningen toenemen wordt het raster fijnmaziger. De mazen hebben een vaste lengte x die behouden blijft tijdens het vervormen van het latwerk tot gridshell (Figuur 4-7). [23]

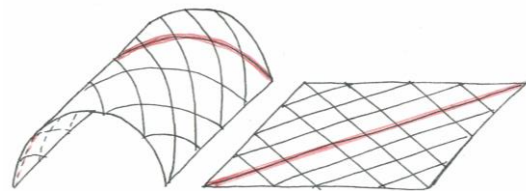


Figuur 4-7: Behouden van de afmetingen van de mazen tijdens het vervormen van latwerk tot gridshell

Daarnaast kan het latwerk zowel orthogonaal als diagonaal gelegd worden. Wanneer het diagonaal gemonteerd wordt, worden de latten tijdens het erectieproces verbogen onder een kleinere krommingsstraal dan bij een orthogonaal raster (Figuur 4-8, Figuur 4-9). Op deze manier ontstaan er kleinere buigspanningen in het latwerk. In alle besproken casestudies wordt een diagonaal raster toegepast.



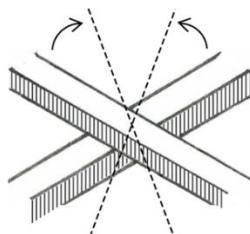
Figuur 4-8: Vervorming orthogonaal raster



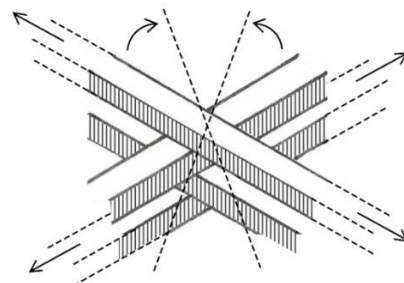
Figuur 4-9: Vervorming diagonaal raster

4.2.4 Knooppuntverbindingen

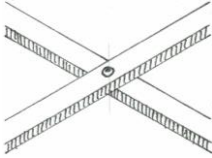
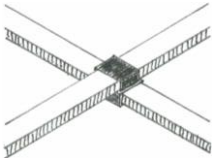
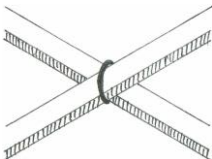
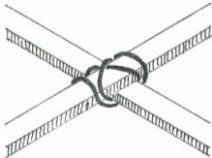
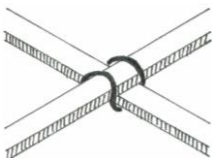
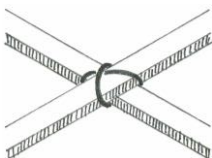
De knooppuntverbindingen van een enkellaagse elastische gridshell dienen in principe enkel een rotatiebeweging toe te staan tijdens het erectieproces (Figuur 4-10).[23] De verbindingen dienen tijdens het erectieproces dan ook voldoende los te zijn om deze beweging niet te hinderen. Een overzicht van de meest voorkomende verbindingen van een enkellaagse gridshell zijn weergegeven in Tabel 4-2. In het geval van een ont dubbelde gridshell hebben de twee uiterste latten, die loodrecht op elkaar liggen, een andere lengte en krommingsstraal. Hierdoor dienen deze twee uiterste latten in hun lengteas ten opzichte van elkaar te verschuiven (Figuur 4-11). Indien deze schuifbeweging verhinderd wordt, zal het latwerk geblokkeerd worden en breuk veroorzaken.[18] Een overzicht van de meest voorkomende knooppuntverbindingen bij ont dubbelde gridshells wordt weergegeven in Tabel 4-3. Het is belangrijk op te merken dat de knooppuntverbindingen pas aangespannen worden eenmaal het erectieproces is voltooid en het latwerk is verankerd aan de ringbalk. Door de knooppuntverbindingen aan te spannen, vergroot de buigstijfheid van de structuur.



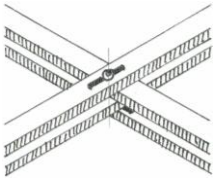
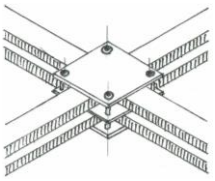
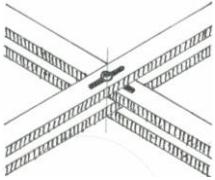
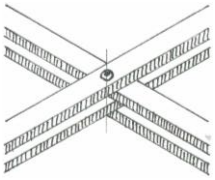
Figuur 4-10: Rotatie enkellaagse gridshell



Figuur 4-11: Rotatie en verschuiving ont dubbelde gridshell

Type gridshell	Verbinding	Eigenschappen
Enkellaagse gridshell	 Enkele boutverbinding	Rotatiebeweging van latten is toegestaan. Latten worden verzwakt door een boutgat. Meest voorkomende verbinding.
	 Dubbele draaikoppeling	Rotatiebeweging van latten is toegestaan. Latten worden niet verzwakt door een boutgat.
	 Enkelvoudige sjoerverbinding	Rotatiebeweging van latten is toegestaan. Latten worden niet verzwakt door een boutgat.
	 Gecombineerde sjoerverbinding	Rotatiebeweging van latten is toegestaan. Latten worden niet verzwakt door een boutgat. Combinatie van diagonaal- en kruissjoerverbinding.
	 Kruissjoerverbinding	Rotatiebeweging van latten is toegestaan. Latten worden niet verzwakt door een boutgat
	 Diagonale sjoerverbinding	Rotatiebeweging van latten is toegestaan. Latten worden niet verzwakt door een boutgat.

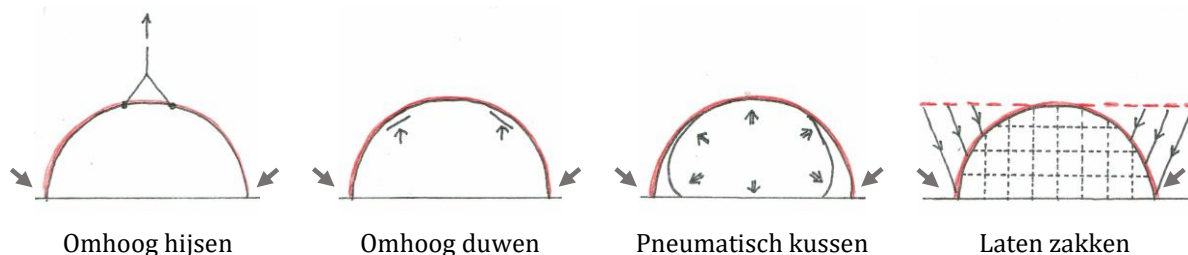
Tabel 4-2: Overzicht knooppuntverbindingen enkellaagse gridshell [23]

Type gridshell	Verbinding	Eigenschappen
Ontdubbelde gridshell	 Boutverbinding met boutsleuf in uiterste latten	Rotatiebeweging van latten en verschuiving van uiterste latten is toegestaan. De twee binnenste lagen latten worden verzwakt door een boutgat. De twee uiterste latten worden verzwakt door een boutsleuf.
	 Stalen klemverbinding	Rotatiebeweging van latten en verschuiving van uiterste latten is toegestaan. De twee binnenste lagen latten worden verzwakt door een boutgat. De twee uiterste latten worden niet verzwakt.
	 Boutverbinding met boutsleuf in bovenste latten	Rotatiebeweging van latten en verschuiving van bovenste latten is toegestaan. De twee onderste lagen latten worden verzwakt door een boutgat. De twee bovenste lagen latten worden verzwakt door een boutsleuf.
	 Enkele Boutverbinding	Rotatiebeweging van latten is toegestaan. Latten worden verzwakt door een boutgat.

Tabel 4-3: Overzicht knooppuntverbindingen ontdubbelde gridshell [23]

4.3 Erectieproces

Nadat het vlak latwerk op de site is gemonteerd met losse verbindingen, wordt dit latwerk elastisch vervormd tot een gridshell. De gridshell vervormd slecht minimaal onder invloed van het eigengewicht. Om de juiste vorm van de structuur te bekomen, dient het latwerk vervormd te worden onder invloed van een verspreide belasting. Spanningsconcentraties dienen ten stelligste vermeden te worden. Hiervoor worden bijvoorbeeld spreidbalken gebruikt die meerdere steunpunten hebben op het latwerk. Er zijn vier hoofdprincipes om het vlakke latwerk te vervormen tot een gridshell (Figuur 4-12). Ten eerste kan het latwerk omhoog gehesen worden door een hijskraan waarbij de steunpunten zich aan de bovenzijde van het latwerk bevinden. Meestal worden deze steunpunten nabij het toppunt aangebracht. Een tweede methode is het omhoog duwen van het latwerk, waarbij de steunpunten zich aan de onderzijde van het latwerk bevinden. Hiervoor dient er rekening gehouden te worden met de stabiliteit van deze steunpunten. De spreidbalken worden ondersteund door een steigersysteem. Deze methode werd onder andere toegepast bij de *Mannheim Multihalle* (zie paragraaf 3.1.3). Een derde vervormingsmethode duwt de gridshell omhoog door middel van een pneumatisch kussen. Het voordeel van deze methode is een grote gelijkmatig verspreide belasting die op het latwerk aangrijpt tijdens het erectieproces. Bij de vierde methode wordt het latwerk op een zekere hoogte gemonteerd op een steigerplatform om vervolgens onder invloed van de zwaartekracht in de gewenste vorm te zakken. Deze methode werd toegepast bij de *Downland Gridshell* en wordt uitgebreid besproken in paragraaf 3.3.2. Bij alle vier de methodes is het aangewezen om de randen van de gridshell aan te duwen naarmate het erectieproces vordert. [23]



Figuur 4-12: Methodes erectieproces

Zelfs met zeer gedetailleerde berekeningen en met de nieuwste software is het onmogelijk om het gedrag van het latwerk tijdens het erectieproces volledig te voorspellen. Bijgevolg is het raadzaam om de beweging van een vaste reeks aan knooppunten te monitoren tijdens het erectieproces. Deze knooppunten zijn meestal de extrema, knooppunten die op een as gelegen zijn en knooppunten die enkel een verticale verplaatsing ondergaan. Op deze manier is het mogelijk snel in te grijpen wanneer er afwijkingen optreden tijdens de vervorming van het latwerk, zoals latten die niet krommen of knooppunten die een te grote afwijking vertonen op hun voorspelde traject.

4.4 Ringbalk

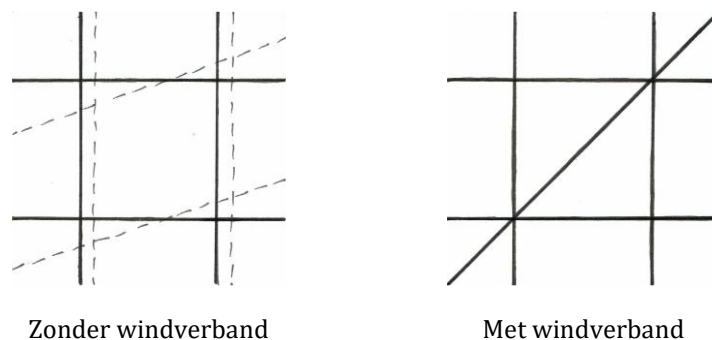
De krachten die inwerken op de gridshell zijn bepalend voor het ontwerp van de ringbalk. De ringbalk vangt de spatkrachten op en verhoogt de stijfheid van de structuur; een correct ontwerp is dan ook cruciaal. Het ontwerp van de ringbalk is daarnaast ook afhankelijk van het architecturaal ontwerp. Bij elastische gridshells is het bovendien onmogelijk om de eindvorm van de structuur volledig te voorspellen. In het beste geval is de eindvorm van de gridshell een zeer dichte benadering van de ontworpen vorm en sluit het latwerk haast naadloos aan op

de ringbalk. In realiteit is elke ringbalk een *pièce unique* die pas zijn finale vorm aangemeten krijgt wanneer de gridshell de gewenste vorm heeft bereikt.

4.5 Afwerking

Wanneer het erectieproces is voltooid en het latwerk bevestigd is aan de ringbalk, wordt de vorm van de gridshell gecontroleerd en bijgesteld waar nodig. Het hoofdcriterium is de verticale positie van de knooppunten; dit is onlosmakelijk verbonden met voldoende kromming van elk element in het latwerk. Bijkomende controles zijn afhankelijk van het ontwerp en kunnen het volgende inhouden: de horizontale positie van enkele centraal gelegen punten, lengtes langsheen de rand van de gridshell, het volume van de gridshell, hoeken van de mazen... [19] Deze finale bijstelling is een stelselmatig proces waarbij ook de knooppuntverbindingen worden aangespannen. Het is belangrijk dat dit proces van het bijstellen van de gridshell en het aanspannen van de knooppunten, van het centrum uitwaarts gerealiseerd wordt.

Door de ringbalk en het aanspannen van de knooppuntverbindingen, verkrijgt de gridshell reeds een zekere stijfheid. In veel gevallen is dit echter onvoldoende en dient de stijfheid verder vergroot te worden door middel van een windverband (Figuur 4-13).



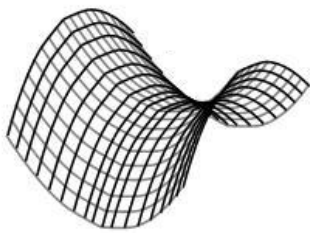
Figuur 4-13: Toevoegen van windverband vergroot de stijfheid

5 Doel

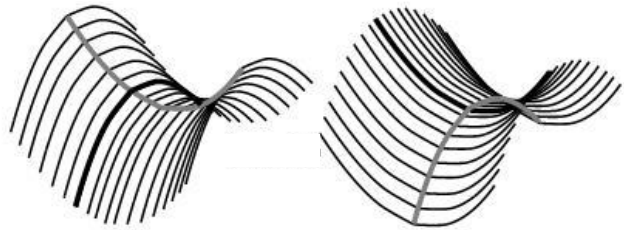
Uit onderzoek is gebleken dat er een hele reeks gridshells is gebouwd en onderzocht. Uit de classificatie besproken in hoofdstuk 2 kunnen we stellen dat gridshells in verschillende vormen en volgens verschillende constructiemethodes opgebouwd kunnen worden. Het aanbod aan gridshells met een synclastische of hybride vorm is oneindig. Het onderzoek naar zuiver anticlastische gridshells is echter beperkt. Voor het verdere verloop van dit onderzoek wordt de focus gelegd op het ontwikkelen van een houten, kleinschalige gridshell in een anticlastische vorm. Om tot vergelijkbare resultaten te komen wordt er getest met een enkele vorm, de hypar.

5.1 Hyperbolische parabolode

De hypar is een deel van een hyperbolische parabolode, ook wel zadeloppervlak genoemd (Figuur 5-1). De hyperbolische parabolode is een oneindig groot oppervlak met een dubbele kromming, opgebouwd uit twee sets van elk evenwijdige en identieke parabolen. De twee sets van parabolen staan loodrecht op elkaar, hebben een tegengestelde zin (Gauss-kromming negatief) en zijn niet noodzakelijk identiek (Figuur 5-2). Hierdoor is de hyperbolische parabolode een anticlastisch oppervlak. [24]

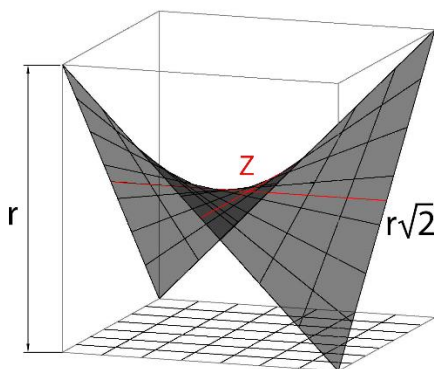


Figuur 5-1: Hyperbolische parabolode [24]

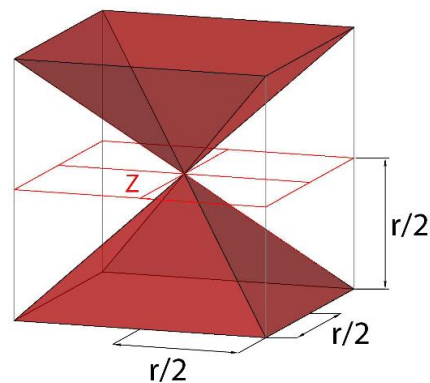


Figuur 5-2: Twee verschillende sets van parabolen [24]

De hypar kan ontwikkeld worden volgens een vierkant raster. Wanneer de hypar wordt gegenereerd in een kubus, wordt dit een gelijkzijdige hypar genoemd. [24] De hoogte van de twee toppunten van de hypar komt overeen met de ribbe r van de kubus (Figuur 5-3). Het centrale punt van de hypar, het laagste punt van de vallei, komt overeen met het zwaartepunt Z van de kubus (Figuur 5-4).



Figuur 5-3: Gelijkzijdige hypar

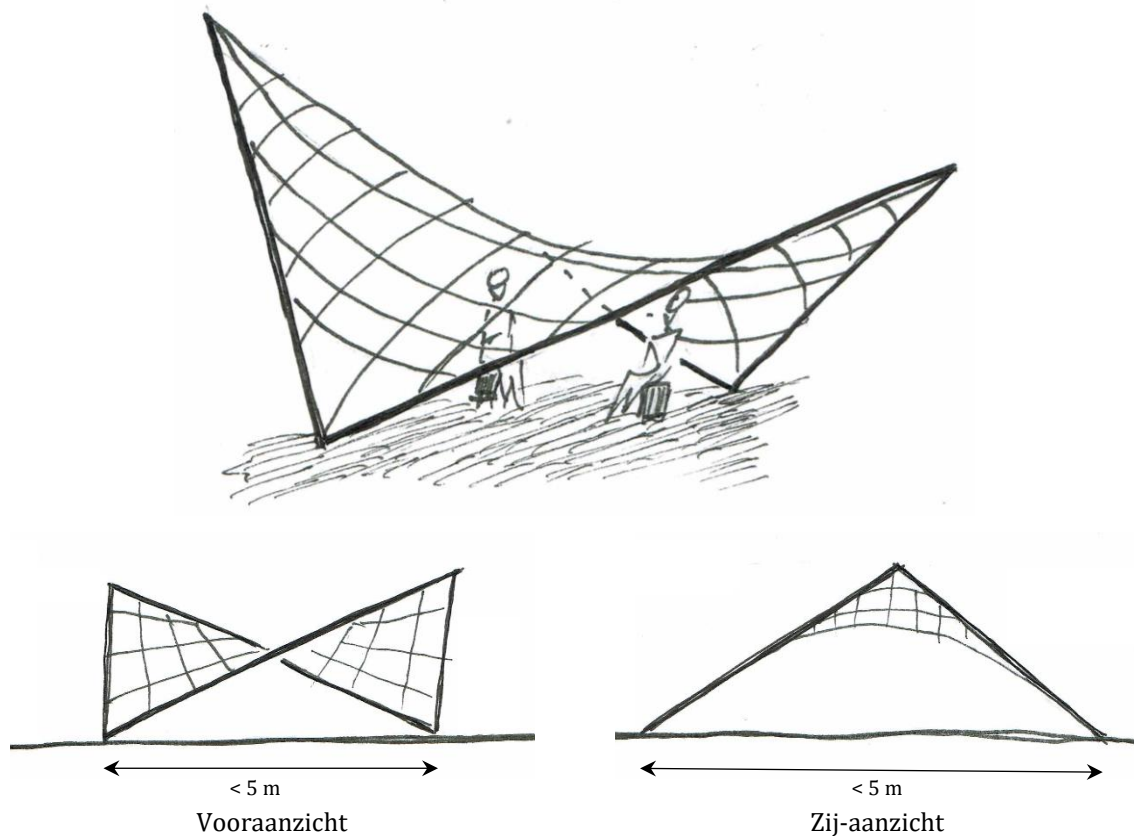


Figuur 5-4: Zwaartepunt kubus

5.2 Architecturaal ontwerp

De ontwikkeling van een houten gridshell wordt onderzocht aan de hand van schaalmodellen. Naast het gebruik van massief hout, dient de gridshell opgebouwd te worden met beperkte middelen. Hieronder wordt beperkte mankracht, budget, infrastructuur en tijdspanne verstaan.

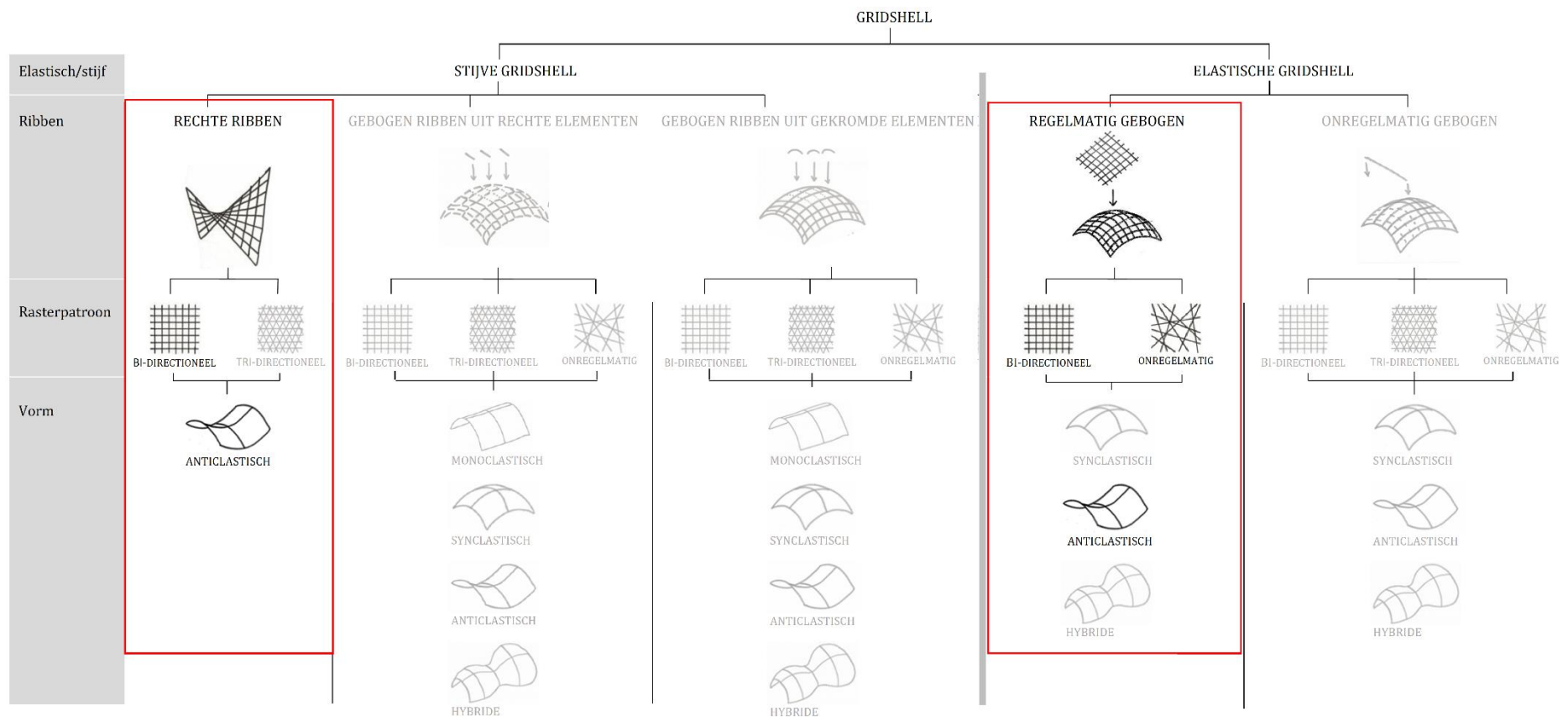
Het centrale punt van de hyparschaal dient hoog genoeg te zijn om al zittend te kunnen vertoeven onder de structuur. Met een maximale overspanning van 5 m op schaal 1:1 (Figuur 5-5). Het streefdoel is een open structuur die kan blijven staan zonder bijkomende steunelementen zoals kolommen.



Figuur 5-5: Ontwerpvoorstel hyparschaal

Voor de ontwikkeling van deze hyparschaal worden drie constructiemethodes getest (Schema 5-1)

- een elastisch en regelmatig gebogen gridshell met een bi-directioneel rasterpatroon (traditionele elastische gridshell)
- een stijve gridshell met rechte ribben en een bi-directioneel rasterpatroon (regeloppervlak)
- een elastisch en regelmatig gebogen gridshell met een onregelmatig rasterpatroon (asymptotische gridshell)



Schema 5-1: Drie gekozen constructiemethodes

5.3 Plan van aanpak

5.3.1 Houtsoort

Voor de ontwikkeling van de hyparschaal wordt er gewerkt met massief hout die vrij verkrijgbaar is in de handel. Hierbij worden drie houtsoorten getest. De testmaquettes van de traditionele elastische gridshells en het regeloppervlak worden getest met grenen- en vurenhout. De asymptotische gridshell wordt getest met Noors dennenhout. Deze houtsoorten werden gekozen omwille van de beschikbaarheid in kleine doorsnedes die voldoende plooibaar zijn. Daarnaast hebben deze houtsoorten een gelijkaardige elasticiteitsmodulus en buigsterkte als de gebruikte houtsoorten in de casestudies besproken in hoofdstuk 3.

5.3.2 Dimensies latten

Doordat er getest wordt met een kleinschalige hyparschaal die opgebouwd kan worden met beperkte middelen, wordt een enkellaagse gridshell getest. Verder is het overbodig om te werken met latten die langer zijn dan in de handel beschikbaar. Het verlengen van de latten door middel van bijvoorbeeld vingerlassen zal enkel nodig zijn indien de latten imperfecties vertonen die onvermijdelijk het falen van de structuur impliceren en dus weggesneden dienen te worden. De doorsnede van de latten wordt bepaald door middel van maquette-onderzoek en is afhankelijk van de maten beschikbaar in de handel. De maximale doorsnede is 50 x 50 mm op schaal 1:1 en is gebaseerd op de kennis verworven uit de besproken casestudies. Voor het latwerk wordt er getest met rechthoekige doorsnedes; voor de ringbalk wordt er zowel met vierkante als ronde doorsnedes getest.

De dimensies van het raster zijn gebaseerd op de meest courante rasterdimensies bij elastische gridshells. Bijgevolg variëren de mazen van het raster tussen 0,50 x 0,50 m en 1 x 1 m op schaal 1:1.

5.3.3 Verbindingen

Zoals reeds vermeld, wordt een lowtech hyparschaal ontwikkeld. Hierbij worden stalen verbindingen zoveel mogelijk geëlimineerd. In een eerste reeks van testmaquettes worden twee lowtech verbindingstechnieken getest; het weven en het sjoeren.

5.3.4 Ringbalk

Het doel is om de gridshell met beperkte middelen op te bouwen en net als de knooppuntverbindingen, een lowtech systeem uit te werken voor de ringbalk. Een ringbalk uit massief hout is het streefdoel en wordt gaandeweg ontwikkeld.

6 Traditionele elastische gridshell

Als eerste wordt het constructieprincipe van de traditionele elastische gridshells - uitgebreid besproken in hoofdstukken 3 en 4 - uitgetest voor het ontwerpen van een hyparschaal. Uit voorgaand onderzoek kan besloten worden dat gridshell-structuren een economisch interessante manier zijn om grote overspanningen te realiseren met een minimum aan materiaal. De stalen verbindingen die gebruikelijk zijn voor elastische gridshells, doen deze economische voordelen echter teniet. Voor de ontwikkeling van de kleinschalige gridshell, krijgt het lowtech concept van het *Japan Pavilion* op Expo 2000 in Hannover - besproken in paragraaf 3.2 - een tweede kans. Dit paviljoen is door inmenging van de autoriteiten (onnodig) complex geworden. De eerste reeks van testmaquettes zal voornamelijk focussen op de ontwikkeling van een lowtech verbinding. Hierbij worden weef- en sjortechneken onderzocht.

6.1 Weven

Voor de ontwikkeling van een houten gridshell zonder verbindingen worden traditionele weeftechnieken onderzocht. Door het weven ontstaan er spanningen in het latwerk, die de latten samendrukken en op hun plaats houden waardoor bijkomende verbindingen ter hoogte van de knooppunten overbodig zijn. In de volgende paragraaf worden traditionele weeftechnieken besproken, evenals de toepassing van het weven in de architectuur. Vervolgens wordt het weven van houten gridshells onderzocht door middel van schaalmodellen.

6.1.1 Referenties

6.1.1.1 Traditioneel weven

Omwillen van zijn eenvoud, wordt de eeuwenoude techniek van het weven door verschillende culturen aanzien als de ideale manier om gebruiksvoorwerpen te vervaardigen. Het weven van hoeden is een van de bekendste toepassingen van deze techniek (Figuur 6-2). Geweven manden (Figuur 6-1) of meubilair (Figuur 6-3) zijn andere voorbeelden van dergelijke gebruiksvoorwerpen. Vaak worden materialen gebruikt die lokaal beschikbaar zijn, zoals wilgenhout, maar ook meer exotische materialen als bamboe en rotan zijn uitermate geschikt om te weven.



Figuur 6-1: Wilgen manden (bron: De Ratelaar)



Figuur 6-2: Bamboe hoeden (bron: Sukunya Sairaya)



Figuur 6-3: Rotan meubilair (bron: Erin Lane Estate)

Daarnaast wordt het weven ook toegepast in de architectuur. In onze contreien is het vakwerkhuis ogenschijnlijk het bekendste voorbeeld van dergelijke geweven structuren. Hierbij worden de uitsparingen van het houten skelet opgevuld met geweven snoeihout en vervolgens bekleed met een mengsel van stro en leem (Figuur 6-4).

De Dorze hut, vernaculaire architectuur uit Ethiopië, is een geweven hut uit bamboe (Figuur 6-5). Weven is ook mogelijk bij meer experimentele structuren, zoals het *Bamboo Pavilion* van Zuo Studio (Figuur 6-6). Hierbij worden de gekromde dwarsribben als eerste geplaatst, waartussen er geweven wordt. Bij al deze referenties van het traditioneel weven, wordt er steeds gebruik gemaakt van een mal of een hoofdstructuur waartussen geweven wordt.



Figuur 6-4: Detail vakwerkhuis (bron: Paradijsvogels Zuid-Limburg)



Figuur 6-5: Bamboe Dorze hut (bron: Gordon Clarke)



Figuur 6-6: Bamboo Pavilion (bron: Yang Shih-Hong)

6.1.1.2 Weven van gridshells



Figuur 6-7: Naiju Community Center and nursery school [25]

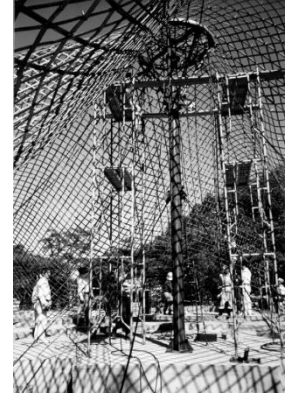
Voor het *Naiju Community Center and nursery school*, een buurthuis en kleuterschool in Fukuoka, heeft de Japanse architect Shoei Yoh in 1994 een bamboe doek gedrapeerd over het landschap en deze bekleed met gewapend beton (Figuur 6-7). De bamboe structuur is een elastische gridshell met regelmatig gebogen ribben. Naast het feit dat de architect wou werken met lokale materialen, hoopte hij op de medewerking van de lokale gemeenschap bij de opbouw van de structuur (Figuur 6-8). Hierdoor was het noodzakelijk om het constructieproces zo eenvoudig mogelijk te houden. Met behulp van lokale ambachtslieden werd een gigantisch bamboe net geweven op een vlakke ondergrond dat vervolgens omhoog gehesen werd (Figuur 6-9). Dankzij de eigenschappen van bamboe was het mogelijk om een fijnmazig raster te weven, dat bovendien buigzaam genoeg was om de gewenste organische vorm te realiseren. De centrale kolom die de structuur tijdelijk ondersteunde (Figuur 6-10), werd verwijderd eenmaal de betonnen buitenschaal volledig was uitgehard. [25]



Figuur 6-8: Weven van bamboe raster [25]



Figuur 6-9: Erectieproces [25]



Figuur 6-10: Tijdelijke kolom [25]

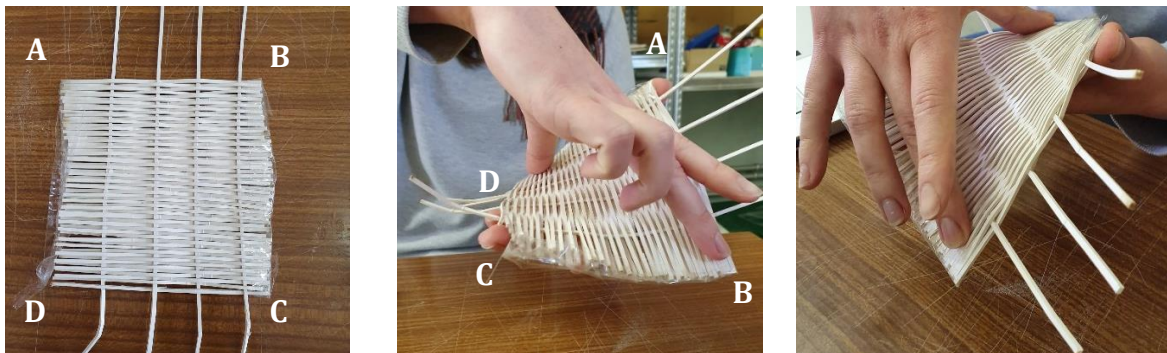
6.1.2 Maquette-onderzoek

Het initieel idee van Shigeru Ban om een gridshell te ontwerpen zonder verbindingen wordt uitgetest aan de hand van geweven latten, naar voorbeeld van Shoei Yoh. Omdat de knooppunten van het latwerk enkel een rotatiebeweging dienen toe te laten, is de methode van het weven een goed alternatief voor de typische boutverbinding van een enkellaagse gridshell.

Voor de eerste reeks van tests worden materialen gebruikt waarmee snel en eenvoudig het principe van een elastische gridshell kan worden getest. De eerste testmaquettes zijn vervaardigd uit karton, pitriet en houten roerstokken. Voor een tweede reeks van maquettes wordt er getest met grenenhout

6.1.2.1 Weven van wit karton

Het principe van het weven van een hyparschaal werd getest aan de hand van een maquette vervaardigd uit stroken wit karton met een doorsnede van 1,5 x 1,5 mm (Figuur 6-11). De randen van het dens geweven vlak werden vastgezet met plakband om verschuiving van de kartonnen stroken tegen te gaan. Vervolgens werd de maquette vervormd tot een hyparschaal door gelijktijdig de 2 overstaande hoeken B en D naar beneden te duwen, terwijl de overstaande hoeken A en C omhoog werden geduwd. Wanneer de uitgeoefende krachten op de hoekpunten wegviel, keerde het geweven vlak terug tot zijn oorspronkelijke vlakke situatie. Deze eerste test toont aan dat een geweven vlak weldegelijk te vervormen valt tot een hyparschaal.



Figuur 6-11: Vervormen van een geweven vlak uit karton tot een hyparschaal

6.1.2.2 Weven van pitriet

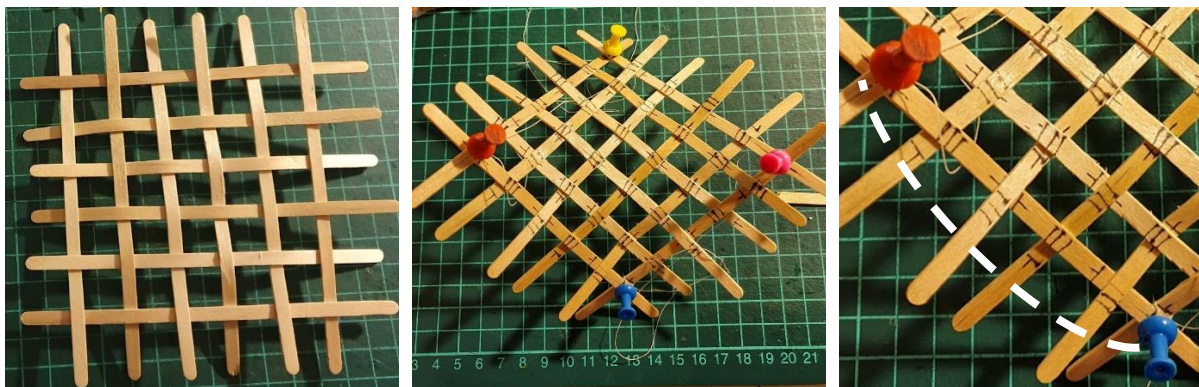
Om het principe van het weven van een gridshell te testen, werd het dens geweven vlak 'geopend' tot een raster met vierkante mazen van 10 x 10 mm. Hiervoor werd pitriet verweven met een doorsnede van 1 x 4,5 mm (Figuur 6-12). De randen werden niet afgeplakt, waardoor bij het vervormen van het raster tot een hyparschaal, de pitriet stroken konden verschuiven. Hierdoor bleef de vervormde hyparschaal staan wanneer de krachten uitgeoefend op de hoekpunten wegvielen. Doordat het pitriet in rollen verkrijgbaar is, stond het geweven raster reeds bol in zijn vlakke toestand. Eenmaal de hyparschaal gevormd was, kon een grote kromming aan de randen waargenomen worden. Door de lage stijfheid van pitriet was de spanning in het raster laag waardoor de buitenste elementen verschoven. Deze test toont aan dat het mogelijk is om een geweven raster te vervormen tot een hyparschaal mits het materiaal voldoende stijf is.



Figuur 6-12: Vervormen van een geweven raster uit pitriet tot een hyparschaal

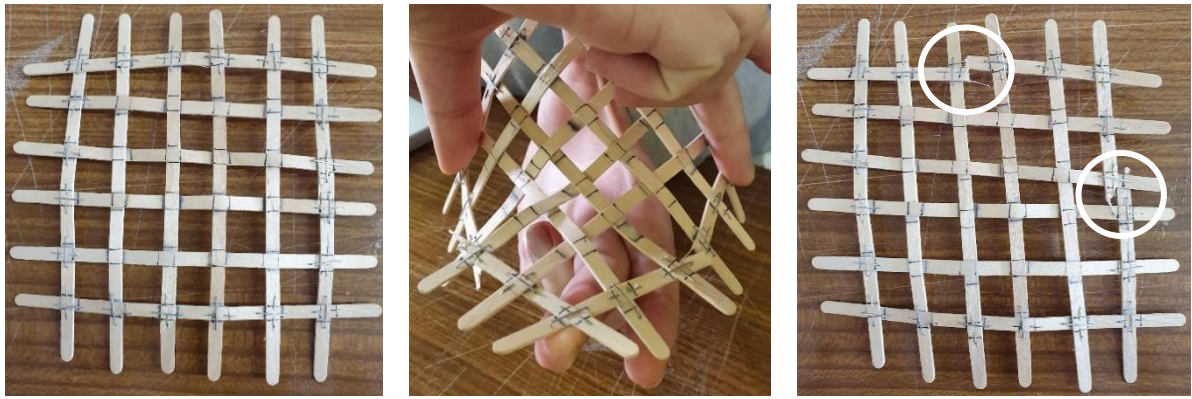
6.1.2.3 Weven van roerstokken

De twee voorgaande testmaquettes tonen aan dat het mogelijk is om een geweven raster te vervormen tot een hyparschaal. Voor het verdere verloop van het maquette-onderzoek werd er getest met massief hout. Om het gedrag van een elastisch vervormde hypar-gridshell te begrijpen, werd een raster met vierkante mazen van 20 x 20 mm geweven (Figuur 6-13). Hiervoor werden houten roerstokken (houtsoort onbekend) met een doorsnede van 1 x 5 mm en een lengte van 140 mm gebruikt. De knooppunten werden gemarkeerd en de vier hoekpunten werden vastgezet met duimspijkers. Door de hoekpunten op deze manier vast te zetten, werd verschuiving van de randlatten tegengegaan terwijl de nodige rotatiebeweging mogelijk bleef. Na het vervormen tot een hyparschaal bleef de vorm van het latwerk behouden. Dankzij de markeringen kon er vastgesteld worden dat dit het gevolg was van latten die verschoven en recht bleven waardoor een regeloppervlak ontstond.



Figuur 6-13: Vervorming van latwerk met vaste hoekpunten

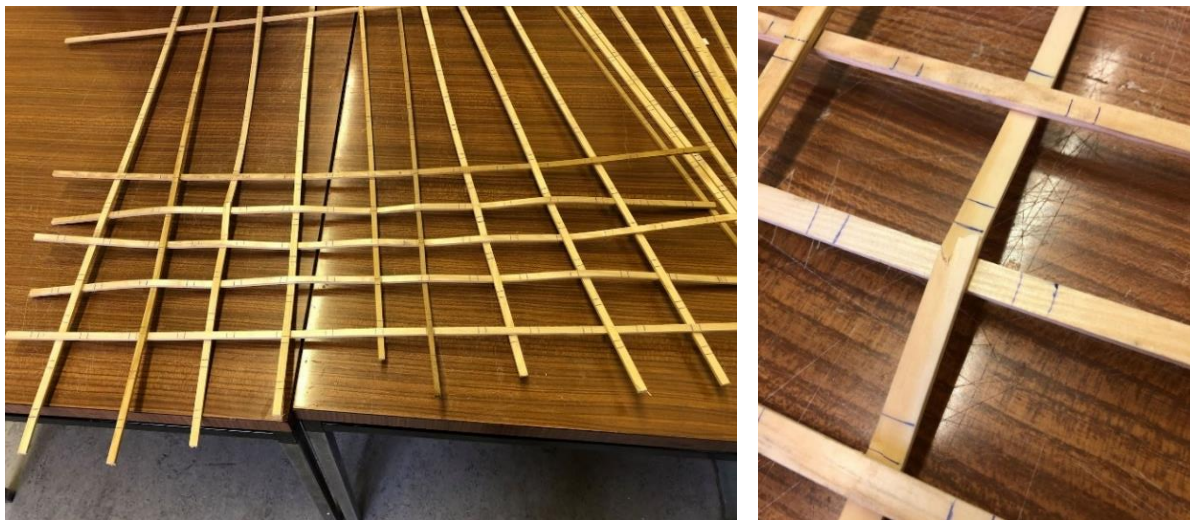
De randen werden vastgeniet om het effect van een vaste rand op de vervorming van het latwerk te onderzoeken (Figuur 6-14). Door de knooppunten aan de vier randen vast te nieten werd de verschuiving van de latten geblokkeerd, zonder rotatiebeweging tegen te werken. Bij het vervormen van het latwerk hadden de latten de neiging om te buigen, maar door te grote spanningen trad er breuk op in het midden van de randlatten. De verhouding van de doorsnede $b = \frac{1}{5} * d$ is niet optimaal. Uit de casussen is gebleken dat deze verhouding doorgaans $b = \frac{1}{2} * d$ bedraagt.



Figuur 6-14: Breuk van randlatten ten gevolge van vaste knooppunten aan de randen

6.1.2.4 Weven van raster met mazen 50 x 50 mm

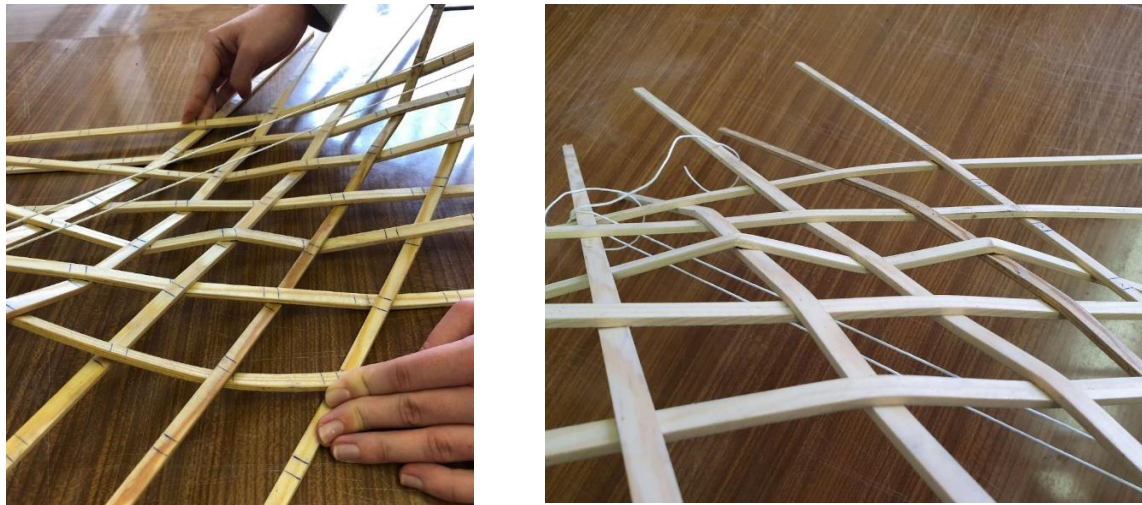
Om de juiste verhouding van de doorsnede en de grootte van de rasteropeningen te kennen, werd een maquette gemaakt op schaal 1:10. De dimensies van het raster werden gebaseerd op de meest courante rasterdimensies bij elastische gridshells met regelmatig gebogen ribben. Grenenhouten latten met een doorsnede van 4 x 9 mm werden geweven tot een raster met mazen van 50 x 50 mm. Hierbij was het echter onmogelijk om het fijnmazig raster te weven. De spanningen in het latwerk ten gevolge van het weven, waren te groot; met breuk van de latten tot gevolg (Figuur 6-15).



Figuur 6-15: Breuk van latten bij het weven van een fijnmazig raster

Na het weken van de latten gedurende een nacht in de regen, was het mogelijk om het raster met mazen van 50 x 50 mm te weven zonder het optreden van breuk. Bij het vervormen van het latwerk tot een hyparschaal werd echter breuk ter hoogte van de knooppunten vastgesteld (Figuur 6-16). Het weven bracht reeds een zekere spanning in het latwerk. Door dit vervolgens te vervormen, werden de spanningen te groot waardoor het latwerk bezweek. Uit deze tests kunnen we stellen dat een kleinere latdoorsnede aan de orde is voor een raster met gelijkblijvende mazen. Hierdoor zal de initiële spanning in het latwerk ten gevolge van het weven kleiner zijn, waardoor de kans op breuk tijdens het vervormen tot een hyparschaal zal dalen. Een andere manier om de

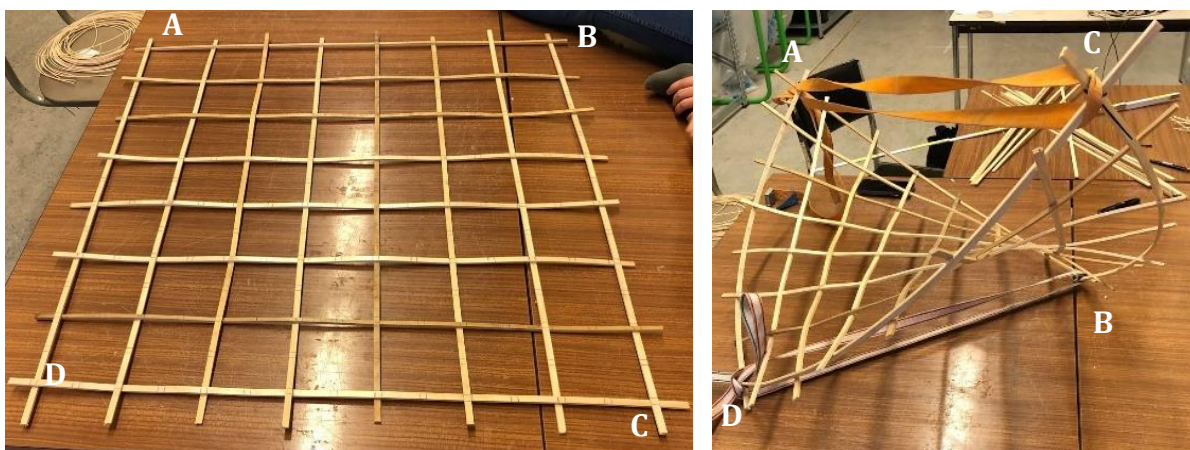
spanning in het latwerk te verminderen is om de mazen van het raster te vergroten, bij een gelijkblijvende latdoorsnede.



Figuur 6-16: Breuk van latwerk bij het vervormen van fijnmazig raster tot hyparschaal

6.1.2.5 Weven van raster met mazen 100 x 100 mm

Op schaal 1:10 werd een raster met mazen van 100 x 100 mm geweven met dezelfde grenenhouten latten met doorsnede 4 x 9 mm. De knooppunten van de vier hoekpunten worden vastgebonden met kabelbinders om het verschuiven van de randlatten tegen te gaan; de rotatiebeweging is nog steeds mogelijk. In droge toestand was het mogelijk de latten te weven, maar het vervormen tot hyparschaal verliep moeizaam. De overstaande hoeken A-C en B-D werden naar elkaar toe getrokken door middel van spanbanden. De spanningen in het latwerk ten gevolge van het weven waren reeds zeer groot, waardoor het latwerk veel weerstand bood tijdens het vervormen. De randlatten verbogen het sterkst, terwijl enkele latten verschoven en bijgevolg recht bleven (Figuur 6-17).



Figuur 6-17: Weven en vervormen van raster met mazen 10 x 10 mm

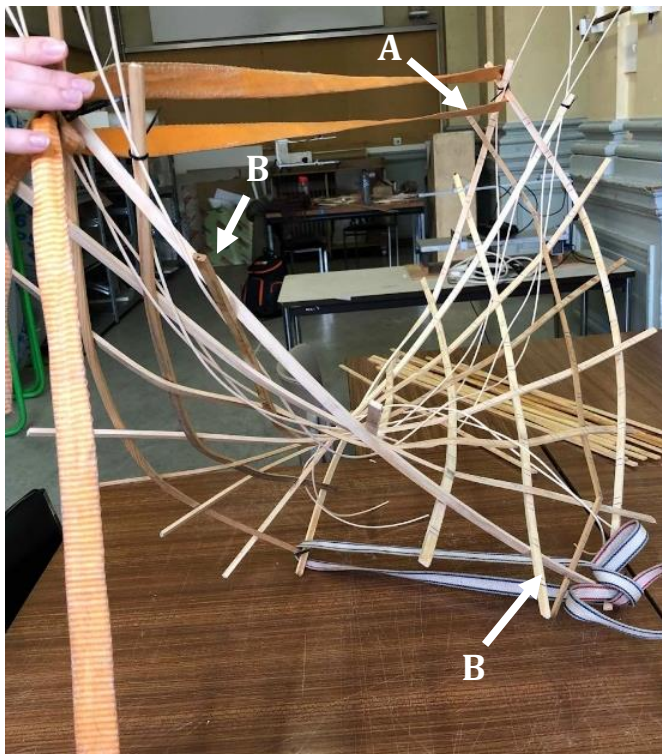
Om de stijfheid van de gridshell te vergroten, werd een windverband aangebracht door pitriet te weven tussen de twee laagste punten B-D; geïnspireerd op weeftechnieken in meubilair (Figuur 6-3). Bij een poging tot het

aanspannen van het pitriet werden er spanningen uitgeoefend op het latwerk, waardoor een randlat bezweek (Figuur 6-18).



Figuur 6-18: Breuk van randlat na aanbrengen van windverband

De gebroken randlat werd vervangen en het latwerk werd gedurende een nacht geweekt in de regen. Het geweekte latwerk beschikte over een grotere plooibaarheid en de hyparschaal kon gemakkelijker vervormd worden. Alle latten van het raster verbogen, op twee latten na. Op een gegeven moment werd echter weer breuk vastgesteld; deze keer op meerdere plaatsen in het latwerk (Figuur 6-19). Omwille van grote spanningen aan de randen van de gridshell en de rechthoekige doorsede, waren de randlatten vervormd onder invloed van torsie (Figuur 6-20).

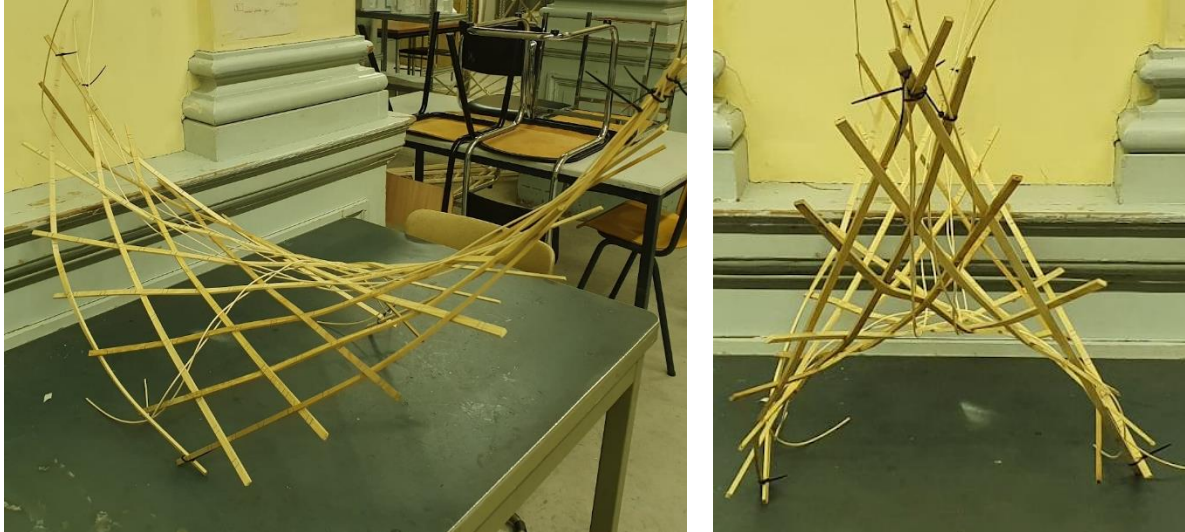


Figuur 6-19: Breuk van latwerk (a) en verschoven lat (b)



Figuur 6-20: Torsie van de randlat

Na een week werden de spanbanden gelost en kon de gridshell op zichzelf blijven staan. We zien echter dat de kromming van de latten is afgenomen (Figuur 6-21). De verbinding aan de randen was echter niet stijf genoeg, waardoor de gridshell bij een zachte aanraking in elkaar viel. Dit benadrukt nogmaals het belang van stijve verbindingen en randen van de gridshell.

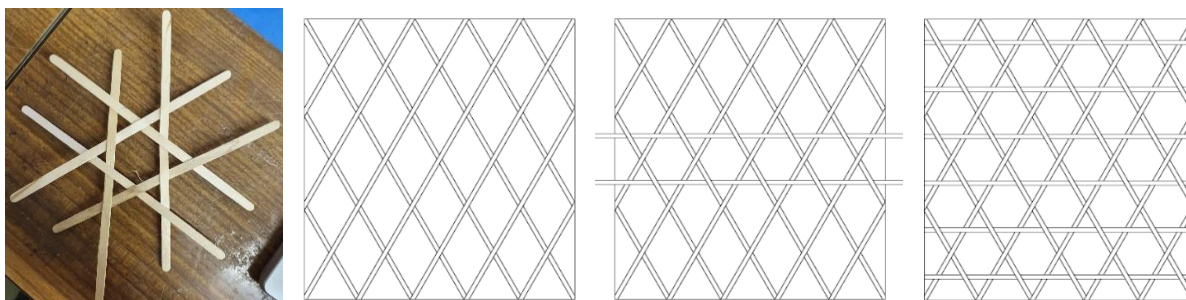


Figuur 6-21: Geweven gridshell zonder spanbanden

Het is belangrijk op te merken dat tijdens het erectieproces, de kromming van de twee hoogste punten A-C en de kromming van de twee laagste punten B-D niet altijd gelijktijdig of even sterk werd vervormd. Dit leidde tot een grotere kromming in de dwarsrichting B-D. Wanneer de kromming in de langsrichting A-C werd bijgesteld om de kromming in de dwarsrichting te evenaren, werd er vastgesteld dat er grote krachten uitgeoefend dienen te worden om de gewenste vervorming alsnog te realiseren (Figuur 6-17). Deze slordige methode van vervorming heeft onvermijdelijk bijgedragen tot de talrijke breuken in het latwerk. Deze vaststelling kan bovendien vergeleken worden met het erectieproces van de *Downland Gridshell* (paragraaf 3.3.2). Hierbij werd er afgestapt van het initieel concept om de organische vorm met dubbele insnoering te verkrijgen door eerst de drie koepels te vormen, waarna de valleien letterlijk worden ingesnoerd. Om deze insnoeringen te realiseren zouden te grote krachten nodig zijn, met grote kans op breuk van het latwerk. Hierdoor werd er gekozen voor een geleidelijke groei van de uitstulpingen en de insnoeringen van de gridshell.

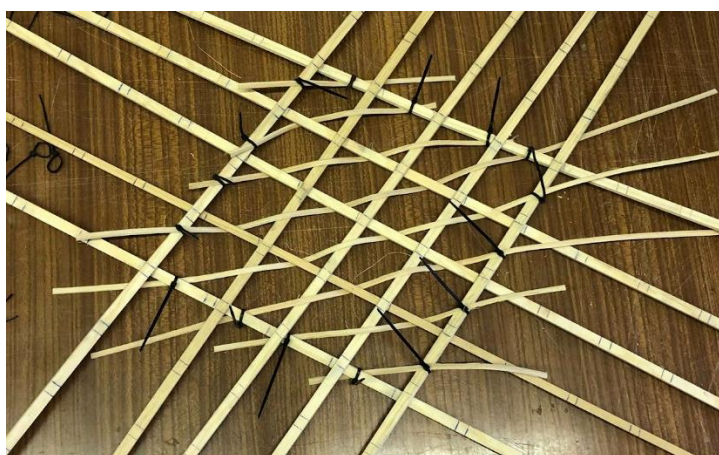
6.1.2.6 Vergroten van de stijfheid

Naar voorbeeld van het stervormig rasterpatroon van Centre Pompidou-Metz (Figuur 2-10, p.8), werd getracht de stijfheid van de gridshell te vergroten. Bij deze methode wordt het raster met vierkante mazen in twee lagen op elkaar gelegd, waarna diagonaal tussen de latten geweven wordt (Figuur 6-22).



Figuur 6-22: Stervormig weefpatroon

Deze diagonaalweving kan slechts toegepast worden eenmaal het vlakke latwerk is vervormd tot een hyparschaal. Door de doorsnede van de latten was het echter niet mogelijk om de latten diagonaal door het raster te weven. De spanningen in de latten werden namelijk te groot waardoor de latten braken. Als alternatief werd er geweven met pitriet. Pitriet heeft echter een heel lage stijfheid, waardoor het effect van het diagonaal weven verdwijnt en de gridshell niet stijf genoeg is om te blijven staan (Figuur 6-23).



Figuur 6-23: Mislukte poging tot stervormig weefpatroon met pitriet

6.1.3 Conclusie

Het is belangrijk om tijdens het weven de juiste spanning in het latwerk te genereren opdat het vlakke latwerk elastisch zou verbuigen tot een hyparschaal. Indien deze spanning te laag is, valt het latwerk uiteen tijdens het erectieproces; bij een te grote spanning zal er echter breuk optreden. Daarnaast is het cruciaal om de randen van het raster op zo'n manier vast te zetten dat de rotatiebeweging van het latwerk tijdens het erectieproces toegelaten wordt, maar de verschuiving van de latten wordt tegengegaan. Indien de verschuiving van de latten niet wordt geblokkeerd, wordt het latwerk niet elastisch vervormd tijdens het erectieproces en wordt een geweven regelloppervlak met rechte ribben verkregen.

De juiste spanning in het latwerk kan gegenereerd worden door enkele parameters in acht te nemen, namelijk het erectieproces, de vochtigheidsgraad van het hout en de verhouding tussen sectiedoorsnede en de dimensies van de rastermazen.

Bij de methode van het weven is het onmogelijk om de stijfheid van de gridshell te vergroten door de knooppunten van het raster verder aan te spannen eenmaal de gridshell is vervormd. De knooppunten aan de rand van de gridshell verstijven door middel van een bijkomende sjoerverbinding, zou een antwoord kunnen bieden op dit probleem, evenals de verankering aan een ringbalk. Doordat het geweven latwerk buigt, waaiert de vorm uit. Hierdoor is het noodzakelijk om een voor-gebogen ringbalk van bijvoorbeeld multiplex te gebruiken. Dit is echter niet wenselijk doordat er gestreefd wordt naar een lowtech gridshell van massief hout. Indien de knooppunten van de gebogen randlatten zouden gefixeerd worden, zouden er nog steeds kolommen aangebracht moeten worden om de hyparschaal te ondersteunen. Ook dit is niet wenselijk voor het architecturaal ontwerp.

Daarnaast wordt het windverband pas aangebracht eenmaal de knooppunten stijf zijn. Het aanbrengen van een geweven windverband brengt echter een bijkomende parameter met zich mee om de spanning in het latwerk op het juiste niveau te houden. In de referentie van Shoei Yoh (paragraaf 6.1.1 Weven van gridshells) wordt de stijfheid van de gridshell gerealiseerd door een betonlaag aan te brengen, waardoor de bamboe gridshell dienst doet als verloren bekisting. Dit is een zeer efficiënte manier om de stijfheid te realiseren, maar is echter niet wenselijk voor het architecturaal ontwerp.

6.2 Sjorren

Bij de gewezen verbindingen werden enkele moeilijkheden duidelijk. De spanningen die ontstonden in het latwerk belemmerden de vervorming tot een hyparschaal. Daarnaast was het een hele uitdaging om voldoende stijfheid in de structuur te creëren. Deze twee factoren gaven aanleiding tot het uittesten van de sjorverbinding. Daarnaast wordt het raster 45 graden gedraaid, worden de randlatten als ringbalk gebruikt en wordt het erectieproces van de gridshell aangepast

6.2.1 Theorie

Sjorren is een eeuwenoude techniek om constructie-elementen aan elkaar te verbinden. Deze techniek wordt bij ons vandaag nog steeds uitvoerig gebruikt door onder andere jeugdbewegingen (Figuur 6-24). Ook bij het *Japan Pavilion* op Expo 2000 in Hannover werd gebruikt gemaakt van sjorverbindingen (Figuur 6-25).



Figuur 6-24: Sjorconstructie (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen)



Figuur 6-25: Sjorverbinding Japan Pavilion (bron: Hiroyuki Hirai)

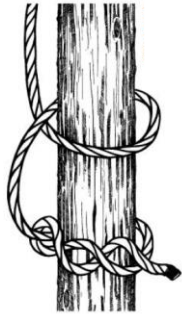
6.2.1.1 Touw

Voor het sjorren van constructies worden doorgaans twee touwsoorten gebruikt; polyprop en sisal. Polyprop is een kunstvezel met een grote breeksterkte van 210 kg die zichtbaar rekt voor breuk optreedt. Het touw is duurzaam en heeft een levensduur van 10 tot 15 jaar. [26]

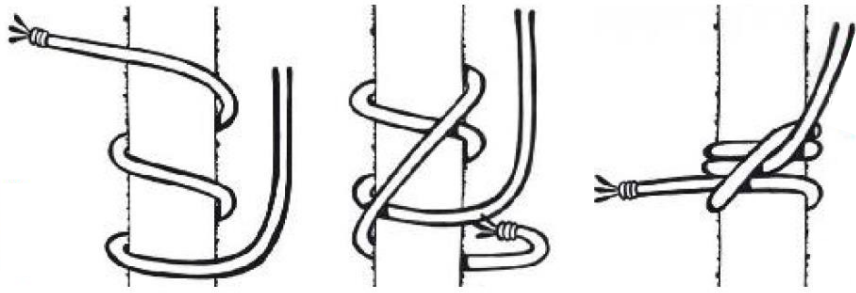
Sisaltouw is opgebouwd uit korte natuurlijke vezels en heeft een kleinere breeksterkte van 90 kg. Breuk treedt onverwachts op. Sisal krimpt bij vocht en is gevoelig voor rotting, hierdoor heeft sisal een kortere levensduur van gemiddeld 1,5 jaar. [26]

6.2.1.2 Verbindingen

Elke sjorverbinding start met een beginknoop. Dit kan een timmermanssteek of een mastworp zijn en hangt af van de aard van de verbinding. Een killicksteek is een timmermanssteek die een zekere beweging toelaat (Figuur 6-26). Een magnussteek daarentegen is een mastworp met een vaste knoop (Figuur 6-27). [27]



Figuur 6-26: Killicksteek
(bron: Scouts en Gidsen
Vlaanderen)

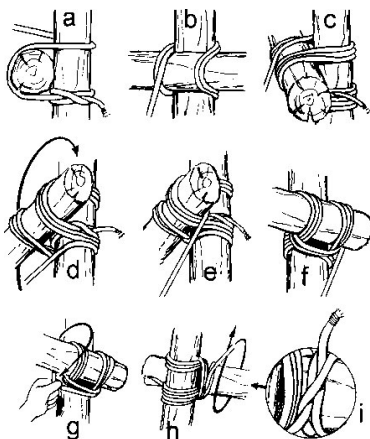


Figuur 6-27: Magnussteek (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen)

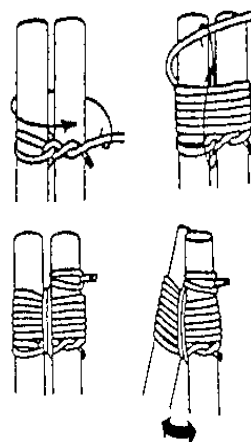
De kruissjorring is een van de meest gebruikte sjorverbindingen voor dragende structuren (Figuur 6-28). Hierbij wordt het touw eerst vastgeknoopt aan een van de elementen door middel van een mastworp, waarna het touw driemaal in een kruisvorm rond het knooppunt wordt gewikkeld. Vervolgens wordt de verbinding gewoeld waardoor de verbinding wordt aangespannen. Als laatste wordt een mastworp gelegd aan hetzelfde element waar ook de beginknoop van het touw werd bevestigd. [26]

De vorksjorring wordt voornamelijk gebruikt voor het verlengen van twee latten. Het touw wordt aan een van de latten bevestigd door middel van een timmermanssteek. Vervolgens wordt het touw minstens zesmaal rond de latten gewikkeld. Hierna wordt het touw gewoeld, waardoor de latten een beperkte rotatiebeweging kunnen maken. Hierbij wordt het touw verder aangespannen (Figuur 6-29). [27]

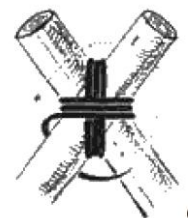
De diagonalsjorring wordt gebruikt om twee latten die loodrecht op elkaar liggen te verbinden. Hierbij wordt het touw bevestigd door middel van een mastworp, waarna het touw driemaal van boven naar onder wordt gewikkeld. Vervolgens wordt het touw driemaal van links naar rechts gewikkeld waarna het touw tussen de latten wordt gewoeld. Het touw wordt vervolgens vastgeknoopt door middel van een mastworp (Figuur 6-30). Deze verbinding laat nog enige beweging van de latten toe. [27]



Figuur 6-28: Kruissjorring, met d-e-f het woelen van de verbinding (bron: Graaf Ottogroep Doetinchem)



Figuur 6-29: Vorksjorring (bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen)

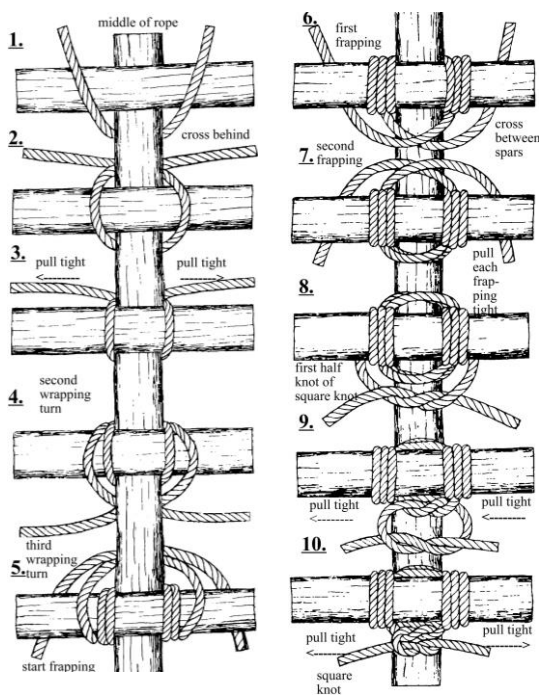


Figuur 6-30: Diagonalsjorring
(bron: Scouts en Gidsen Vlaanderen)

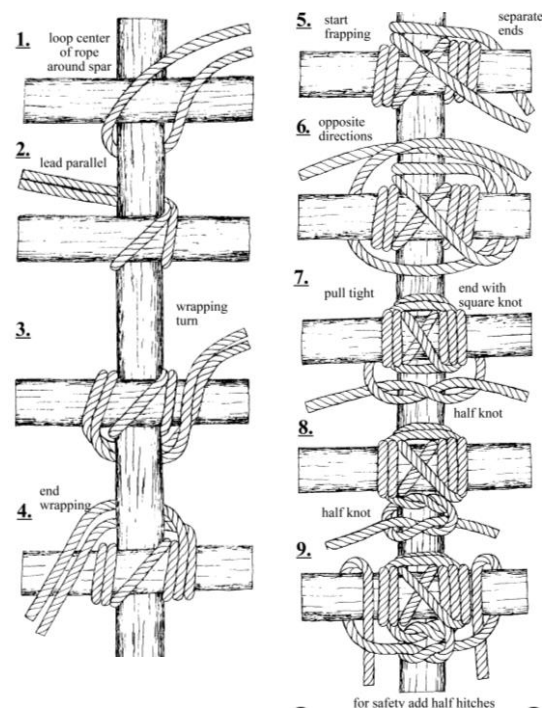
Naast de westerse sjarverbandingen, zijn er ook andere sjarverbandingen die gebruikt worden in de rest van de wereld. De Japanse sjarverbandingen verschillen met de Westerse verbandingen doordat het touw aan het begin als een lus wordt aangebracht rond een van de elementen, in plaats van het vast te knopen. Op deze manier worden beide uiteinden van het touw gelijktijdig gewikkeld rond het knooppunt waardoor de spanning in het touw tijdens het sjarren beter gecontroleerd kan worden. [27]

Bij de Japanse kruissjarring wordt het touw wederom driemaal rond de elementen gewikkeld. Hierna wordt de verbinding eveneens gewoeld en vastgeknoopt. Bij de Japanse gecombineerde kruissjarring wordt een diagonaal sjarren gecombineerd met een kruissjarring. Hierdoor wordt het touw slechts twee maal rond de elementen gewikkeld. Wederom wordt de verbinding gewoeld en vastgeknoopt. Omdat het touw slechts tweemaal rond de elementen is gewikkeld, kan deze wat losser zijn dan de klassieke kruissjarring. Indien het knooppunt zeer stijf moet zijn, is het aangeraden op het einde nog een derde omwikkeling rond de elementen te realiseren (Figuur 6-31). [27]

De Japanse gecombineerde kruissjarring is de verbinding die het sterkst aanleunt bij de uitgevoerde verbinding van het Japans paviljoen van Shigeru Ban. Bij het Japans paviljoen worden de verbandingen echter niet meer gewoeld (Figuur 6-32).



Figuur 6-31: Japanse kruissjarring [27]

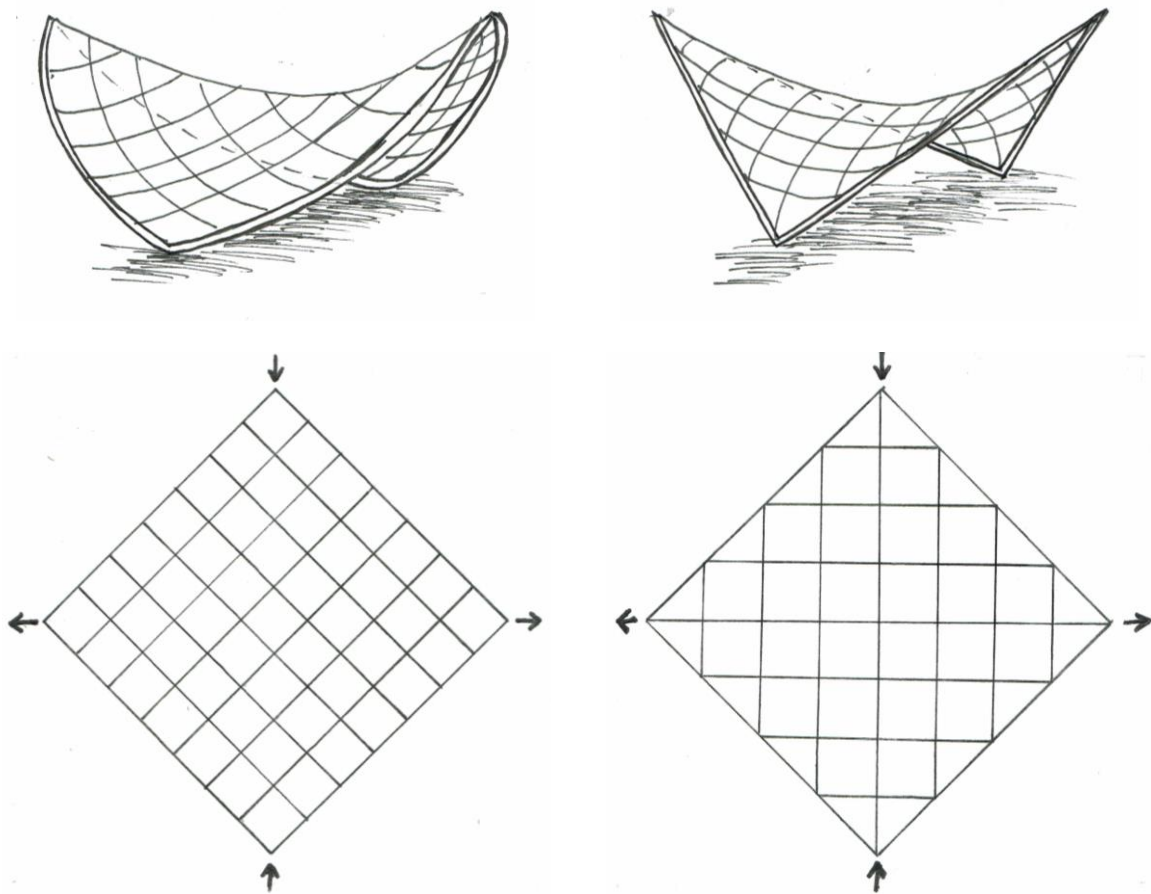


Figuur 6-32: Japanse gecombineerde kruissjarring [27]

6.2.2 Maquette-onderzoek

6.2.2.1 Grenenhout 4 x 9 mm

Door het latwerk 45 graden te draaien, wordt een orthogonaal raster verkregen (Figuur 6-34). De latten krommen volgens de tegengestelde hoofdkromming van een anticlastisch oppervlak (zie paragraaf 2.2). Hierbij bestaat het latwerk van de hyparschaal uit twee sets van gelijke en evenwijdige parabolen die elkaar loodrecht kruisen. Daarnaast buigen de latten volgens de parabolen van een hyperbolische paraboloid, waardoor het latwerk niet uitwaaiert zoals bij het diagonaal raster (Figuur 6-33) en de ringbalk uit rechte elementen vervaardigd kan worden.



Figuur 6-33: Hyparschaal met diagonaal raster

Figuur 6-34: Hyparschaal met orthogonaal raster

De maquette werd gemaakt op schaal 1:5. Voor het raster werden dezelfde grenenhouten latten (doorsnede 4 x 9 mm) gebruikt als in de voorgaande testmaquettes (paragraaf 6.1.2). Ten gevolge van de vaak optredende breuken van de latten in de voorgaande testmaquettes, bleef er een beperkte voorraad aan latten over om het raster te maken. Hierdoor werden twee latten uit het raster gehaald waardoor het raster varieert van mazen van 100 x 100 mm en 100 x 200 mm (Figuur 6-35). De knooppunten van het latwerk werden met keukentouw verbonden door middel van een kruissjorring (Figuur 6-36). Vervolgens werd het latwerk bevestigd aan de ringbalk door middel van een kruissjorring (Figuur 6-37). Deze verbinding laat geen rotatie noch verschuiving van het latwerk toe. Doordat het raster 45 graden is gedraaid tot een orthogonaal raster, zou het latwerk geen

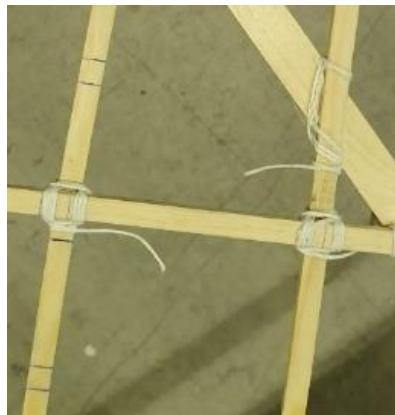
rotatiebeweging meer ondergaan waardoor het mogelijk is deze verbinding toe te passen. Later wordt deze bewerking echter ontkracht.

De ringbalk heeft een doorsnede van 18 x 18 mm, een lengte van 1,35 m en vormt een kader van 550 x 550 mm. Aan weerszijden van het kader kent de ringbalk een overkraging van 400 mm. Om een vlotte vervorming van het latwerk te bewerkstelligen, werden de vier hoekpunten van de ringbalk door middel van een enkelvoudige sjaorring verbonden. In tegenstelling tot het latwerk dient de ringbalk wel een rotatiebeweging te maken zodat het latwerk zou vervormen tot een hyparschaal.

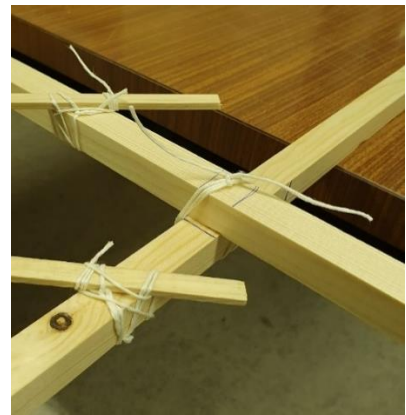
In voorgaande testmaquettes werd vastgesteld dat de hyparschaal moeilijk kon blijven staan op zijn twee steunpunten waardoor de structuur omkantelde (Figuur 6-38). Door de latten van de ringbalk te verlengen, steken ze 400 mm uit tot voorbij het latwerk. Wanneer het latwerk vervolgens wordt vervormd tot een hyparschaal, kan de structuur rusten op vier steunpunten (Figuur 6-39). Hierdoor komt de hyparschaal eveneens hoger te liggen, waardoor het aangenamer vertoeven is onder de structuur.



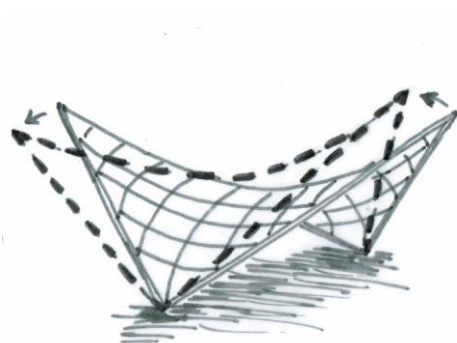
Figuur 6-35: Latwerk bevestigd aan ringbalk



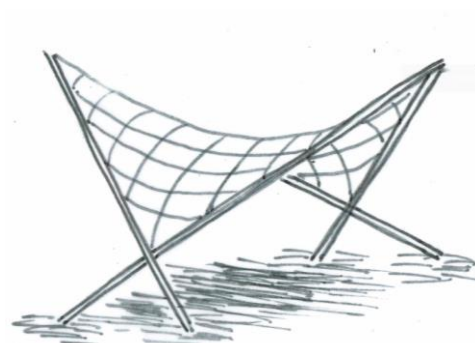
Figuur 6-36: Kruissjaorring latwerk



Figuur 6-37: Kruissjaorring en enkelvoudige sjaorring van ringbalk



Figuur 6-38: Hyparschaal met twee steunpunten



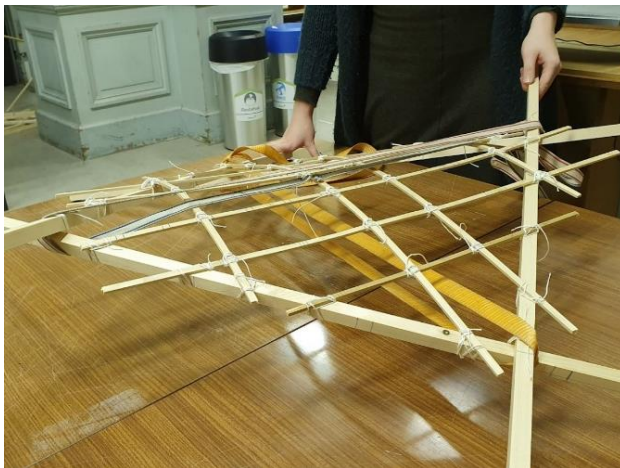
Figuur 6-39: Hyparschaal met vier steunpunten

Tijdens het erectieproces vervormden enkel de bovenste latten volgens een bolle kromming. De latten die een holle kromming zouden aannemen, bleven recht waardoor een monoclastische vorm werd bekomen (Figuur 6-40). Een eerste hypothese, die later werd weerlegd, was dat de volgorde waarin de twee lagen latten op elkaar worden gemonteerd, een rol zou spelen tijdens het erectieproces. De latten die een bolle kromming maken,

zouden de onderliggende latten recht trekken (Figuur 6-44). Wanneer het latwerk werd gedraaid opdat de latten die bol zouden krommen onderaan lagen en de latten die hol zouden krommen bovenaan, werd de gewenste anticlastische kromming van het latwerk alsnog gerealiseerd (Figuur 6-41).

Bij nader inzien was dit echter niet de reden waarom de latten oorspronkelijk niet hun gewenste kromming behaalden. Indien deze theorie zou kloppen, zou bij het omkeren van het latwerk hetzelfde probleem moeten opduiken. De bovenste latten, die deze keer hol zouden krommen, zouden de onderliggende bolle latten recht duwen (Figuur 6-45).

De ware reden waarom bij de tweede test het latwerk wel de gewenste vorm behaalt, heeft te maken met de knooppuntverbindingen tussen het latwerk en de ringbalk. In de eerste test waren de holle latten te los verbonden aan de ringbalk, waardoor tijdens het erectieproces de latten konden verschuiven (Figuur 6-42). Hierdoor konden de spatkrachten niet opgevangen worden door de ringbalk en bleven de holle latten recht (Figuur 6-46). In de tweede test werden de verbindingen tussen het latwerk en de ringbalk harder aangespannen waardoor de gewenste vorm wel werd gerealiseerd (Figuur 6-43).



Figuur 6-40: Monoclastisch



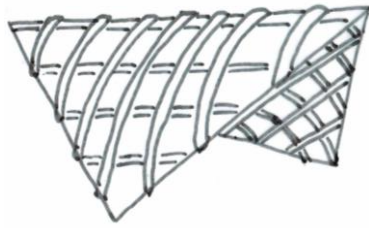
Figuur 6-41: Anticlastisch



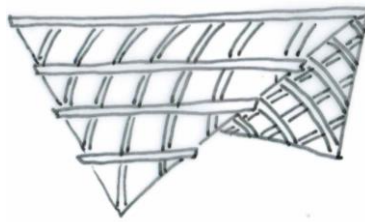
Figuur 6-42: Te losse verbindingen aan de ringbalk met monoclastisch latwerk



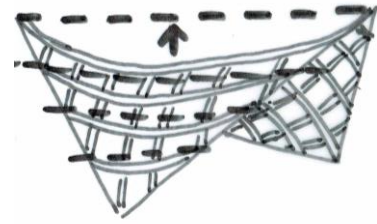
Figuur 6-43: Vaste verbindingen aan ringbalk met anticlastisch latwerk



Figuur 6-44: Bolle latten boven met monoclastisch latwerk

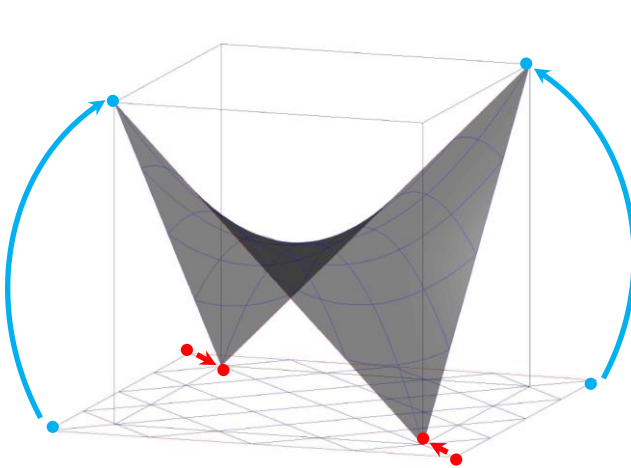


Figuur 6-45: Bolle latten onder met monoclastisch latwerk

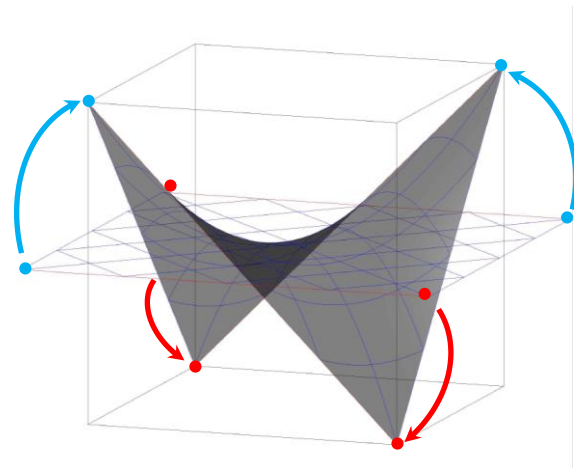


Figuur 6-46: Holle latten boven met anticlastisch latwerk

Tijdens het vervormen van het latwerk werd vastgesteld dat er grote spatkrachten werden ontwikkeld. Hierdoor dienen grote krachten uitgeoefend te worden om de ringbalk met het latwerk te vervormen tot een hyparschaal. Wanneer het latwerk vanop het maaiveld werd vervormd, moesten de toppunten een grote verplaatsing realiseren (Figuur 6-47). Dit zorgde voor een moeizaam erectieproces. Geïnspireerd door het erectieproces van de *Downland Gridshell* (zie paragraaf 3.3.2), werd de hypar vanop een zekere hoogte vervormd. Door te starten vanop het laagste punt van de vallei, dit is het zwaartepunt van de kubus, dienen alle hoekpunten van het raster een even grote rotatie en verplaatsing te realiseren (Figuur 6-48). Op deze manier kan het latwerk gelijkmatig vervormd worden, wat de kans op breuk reduceert. Tijdens het erectieproces van de *Downland Gridshell* werd het latwerk ondersteund door spreidbalken die dagelijks enkele centimeters werden verlaagd of verhoogd. In de testmaquette werden deze spreidbalken vervangen door balken aan de randen van het latwerk. Eenmaal het erectieproces is voltooid en de gridshell de gewenste vorm heeft bereikt, zullen deze balken worden verstijfd om de functie van ringbalk te vervullen.



Figuur 6-47: Erectieproces vanop het maaiveld



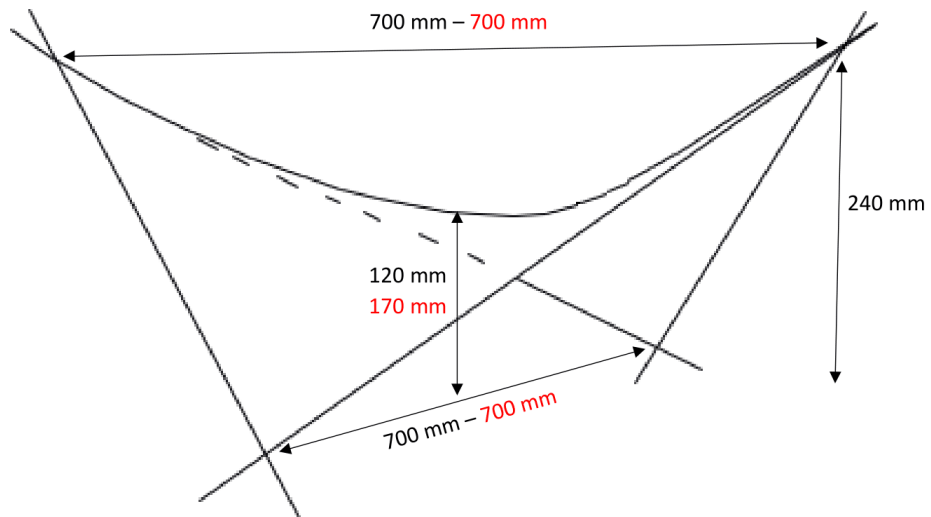
Figuur 6-48: Erectieproces vanop het laagste punt van de vallei

Bijgevolg werden de twee bovenste hoekpunten van de structuur opgehangen aan een balk en werden de twee onderste hoekpunten verbonden met een gewicht van 10 kg. Vervolgens werd het latwerk bevochtigd en kon het erectieproces beginnen. Het touw dat de twee bovenste hoekpunten verbond met de dwarsbalk werd aangespannen zodat de twee bovenste hoekpunten naar elkaar toe zouden bewegen en de holle kromming gerealiseerd zou worden. Tegelijkertijd werd het touw dat de onderste twee hoekpunten verbond met het gewicht van 10 kg eveneens aangespannen, waardoor de twee onderste hoekpunten naar elkaar toe bewogen en de holle kromming gerealiseerd werd. Door de grote spatkrachten in het latwerk werd het erectieproces over drie dagen verspreid. Dagelijks werd het latwerk bevochtigd en enkele centimeters aangespannen (Tabel 6-1). Het resultaat is een hyparschaal die sterk aanleunt bij de gerealiseerde gridshells besproken in hoofdstuk 3 (Figuur 6-50).

		
Overspanning toppunten: 0,80 m Overspanning steunpunten: 0,75 m Hoogte vallei: 0,14 m	Overspanning toppunten: 0,79 m Overspanning steunpunten: 0,75 m Hoogte vallei: 0,14 m	Overspanning toppunten: 0,70 m Overspanning steunpunten: 0,70 m Hoogte vallei: 0,17 m

Tabel 6-1: Erectieproces hyparschaal

Bij een overspanning van 0,70 m en een diagonale lengte van de ringbalk van 0,55 m zou de hoogte van de vallei 120 mm moeten bedragen, gemeten vanaf de twee laagste hoekpunten van de hyparschaal (Figuur 6-49). Na opmeting van de gridshell is vastgesteld dat het laagste punt van de vallei zich op een hoogte van 170 mm bevindt, gemeten vanaf de twee laagste hoekpunten van het latwerk. Dit is 50 mm hoger dan de theoretische hoogte. Dit hoogteverschil wordt veroorzaakt door te losse verbindingen tussen het latwerk en de ringbalk. Hierdoor kan het latwerk verschuiven waardoor het minder sterk kan verbuigen en de gewenste kromming niet verkregen wordt.



Figuur 6-49: Theoretische (zwart) en effectieve (rood) afmetingen van de maquette



Figuur 6-50: Hyparschaal

6.2.2.2 Grenenhout 7 x 10 mm met ringbalk Ø 19 mm

Doordat de voorgaande maquette zonder toestemming werd afgebroken door derden vanwege plaatsgebrek in een gedeeld werkatelier, kon het onderzoek niet worden afgerond. Hierdoor was het noodzakelijk om een tweede maquette te bouwen om de stijfheid van de structuur te controleren. Dit incident werd benut om bepaalde ontwerpbeslissingen te optimaliseren. Hiervoor werd een hyparschaal ontworpen op schaal 1:2.

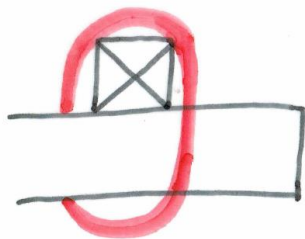
In de voorgaande testmaquette verliep de vervorming van het latwerk moeizaam. Door een beperkt aanbod van houtsoorten bij de plaatselijke houthandelaar, kon er niet afgeweken worden van de houtsoort. Hierdoor was het noodzakelijk om de oorspronkelijke doorsnede van het latwerk van 4 x 9 mm te verkleinen. Latten met een doorsnede van 7 x 10 mm werden versneden uit planken van 7 x 90 x 3300 mm. De latten werden gedurende een nacht geweekt in folie, waarna dit gedurende vijf uur in de zon heeft gelegen (Figuur 6-51). Hierdoor zijn de latten zeer buigzaam geworden.



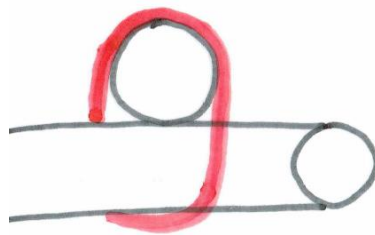
Figuur 6-51: Weken van de latten in folie

Daarnaast is in de vorige testmaquette vastgesteld dat een vierkante doorsnede de nodige rotatiebeweging van de ringbalk tijdens het erectieproces bemoeilijkt. De randlatten dienen tijdens het erectieproces een rotatiebeweging te maken in de langs- en dwarsrichting. Hiervoor zou een bolscharnier gebruikt kunnen worden. Doordat de hyparschaal met lowtech verbindingen dient opgebouwd te worden, is het ongewenst om hiervoor een stalen verbinding te gebruiken. Hierdoor wordt er getest met ronde doorsnedes. Daarnaast sluit het touw beter aan op ronde doorsnedes (Figuur 6-52, Figuur 6-53). Hierdoor kan het touw beter aangespannen worden en ontstaan er grotere wrijvingsspanningen. Deze wrijvingsspanningen blokkeren de verschuiving van het latwerk tijdens het erectieproces.

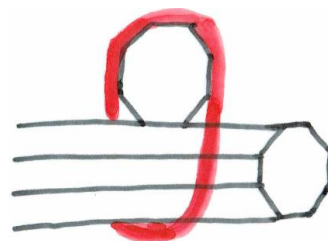
Op de markt zijn er echter geen ronde secties in grote lengtes vrij verkrijgbaar. Door gebrek aan geschikte infrastructuur werd er geopteerd voor een achthoekige doorsnede, waarbij de hoeken van een vierkante doorsnede werden afgezaagd (Figuur 6-54). Bovendien was de maximale doorsnede die verzaagd kon worden 19 x 19 mm. Doordat de doorsnede van het latwerk kleiner is en de latten langer zijn dan de voorgaande testmaquette, zullen de latten buigzamer zijn. De testmaquette zal uitwijzen of de randlatten met een doorsnede van 19 x 19 mm nog steeds voldoende stijf zijn om de spatkrachten van het latwerk op te vangen.



Figuur 6-52: Aansluiting touw vierkante doorsnede



Figuur 6-53: Aansluiting touw ronde doorsnede



Figuur 6-54: Aansluiting touw achthoekige doorsnede

De ringbalk werd gemonteerd waarop vervolgens het latwerk werd bevestigd. Om snelle uitdroging van het latwerk te vermijden, werden de latten tijdens de montage regelmatig bevochtigd met water (Figuur 6-55). De knooppunten werden verbonden door middel van een Japanse kruissjorring. Met deze verbinding kan er tijdens het sjorren meer controle uitgeoefend worden op de aangebrachte spanning dan bij de Westerse variant. De vier hoekpunten van de ringbalk werden verbonden door middel van een enkelvoudige sjorring (Figuur 6-56). Sisal werd gebruikt om de verbindingen te sjorren. Wanneer het touw bevochtigd wordt, zal het krimpen waardoor er grotere wrijvingsspanningen worden uitgeoefend op de knooppunten en de verschuiving van het latwerk verder wordt tegengegaan.



Figuur 6-55: Montage van het latwerk



Figuur 6-56: Enkelvoudige sjorring van de ringbalk met rechts Japanse kruissjorring

Eenmaal het latwerk was bevestigd aan de ringbalk, kon het erectieproces beginnen. Het latwerk werd op een hoogte van 1 m vervormd; dit is de hoogte van de vallei. Het proces verloopt gelijkaardig zoals dat van de voorgaande maquette waarbij de kromming van het latwerk werd gerealiseerd door gelijktijdig de toppunten en de onderste steunpunten naar elkaar toe te bewegen. Hierbij werd vastgesteld dat het centrale punt van de hyparschaal zakte tot onder de theoretische hoogte van 1 m van de vallei. Daarnaast werd de holle kromming sterker, terwijl de bolle kromming enkel aan de randen gerealiseerd werd. De bolle latten knikten in het centrum van de hyparschaal (Figuur 6-57). Wanneer een kracht werd uitgeoefend op het centrale punt van het latwerk om de bolling van de latten te forceren, trad er breuk op in drie latten. Deze breuk trad steeds op ter hoogte van kwasten in het latwerk (Figuur 6-59). Daarnaast waren de vier latten van de ringbalk gekromd onder invloed van de spatkrachten (Figuur 6-58).



Figuur 6-57: Geknikte hyparschaal



Figuur 6-58: Knik van het latwerk met rechts de gebogen randlat



Figuur 6-59: Breuk van lat ter hoogte van een kwast

6.2.2.3 Grenenhout 7 x 10 mm met ringbalk Ø 60 mm

Het latwerk werd losgekoppeld van de ringbalk, de gebroken latten werden vervangen en het latwerk werd gedurende twee dagen geweekt in water. Bij het vervangen van de latten werd een kwaliteitscontrole uitgevoerd waarbij latten met kwasten afgekeurd werden om breuk van het latwerk te voorkomen.



Figuur 6-60: Bevochtigen van het latwerk

Bij het bouwen van de vorige maquette werden de krachten die inwerken op de ringbalk onderschat. De ringbalk werd vervangen door stijve palen van grenenhout met een ronde doorsnede van 60 mm en een lengte van 2,50 m. Bij de vorige testmaquette verliep de vervorming van de ringbalk zeer stroef. Door de zeer losse verbindingen was er weinig controle over de vervorming van de ringbalk. Daarnaast werden de randlatten op elkaar geduwd door de spatkrachten waardoor de rotatiebeweging van de ringbalk verder werd belemmerd. Bijgevolg werden de verbindingen bij deze nieuwe maquette vervangen door een vorksjorring. Hierbij werd een lat met doorsnede 19 x 19 mm tussen de twee palen aangebracht waarrond vervolgens gesjord werd (Figuur 6-61). Hierna werd de lat verwijderd en werd een bolscharnier gewoeld (Figuur 6-62). Eenmaal alle hoekpunten verbonden waren, werd de ringbalk vervormd om de rotatiebeweging te controleren (Figuur 6-63). Dankzij het gesjorde bolscharnier verliep de vervorming vlot en gecontroleerd (Figuur 6-64). Er werd echter vastgesteld dat de sjorverbinding minder sterk aangespannen was. Om te voorkomen dat de verbindingen alsnog zouden verschuiven onder invloed van de spatkrachten van het latwerk, werd de sjorring op elke paal afzonderlijk verstevigd (Figuur 6-65). Deze extra sjorring kwam niet in contact met het bolscharnier om de rotatiebeweging niet te belemmeren. Vervolgens werden reeds de nodige trekkers aangebracht aan een zijde van de overkragingen van de ringbalk om een vlotte bevestiging mogelijk te maken wanneer het erectieproces voltooid zou zijn (Figuur 6-66).



Figuur 6-61: Sjorren



Figuur 6-62: Woelen van bolscharnier



Figuur 6-63: Ringbalk



Figuur 6-64: Rotatie van de ringbalk



Figuur 6-65: Versterking vorksjorring



Figuur 6-66: Aanbrengen van trekkers

Het latwerk werd wederom gemonteerd aan de ringbalk en werd regelmatig bevochtigd om uitdroging te voorkomen (Figuur 6-67). Het latwerk werd vervormd vanop een hoogte van 0,90 m; dit is de theoretische hoogte van het centraal punt van het latwerk dat tevens het laagste punt is van de vallei. Om te voorkomen dat dit centraal punt wederom naar beneden geduwd werd, zoals bij de voorgaande testmaquette, werd een stapel emmers onder dit centraal punt geplaatst.

Het erectieproces verliep op een gelijkaardige manier als bij de vorige testmaquette. Als eerste zakten de twee onderste hoekpunten onder invloed van de zwaartekracht. Hierbij ontstond de bolle kromming van het latwerk (Figuur 6-68). Vervolgens werden de bovenste twee hoekpunten omhooggetrokken (Figuur 6-69). Hierbij werd hetzelfde fenomeen vastgesteld als bij de vorige maquette. De bolle kromming werd sterker terwijl de holle kromming enkel optrad aan de randen van het latwerk (Figuur 6-71); in het midden bleven de latten recht. Wanneer het centrale punt werd aangeduwd ontstond er knik. Wanneer de gridshell verder vervormd werd, werd de golfbeweging eveneens waargenomen in de naastliggende holle latten (Figuur 6-72). Bovendien veranderde de bolle kromming eveneens in een golfbeweging, waardoor breuk optrad nabij het middelpunt van de bolle latten. Op deze plaatsen waren de latten verzwakt door een onderbreking van de vezels (Figuur 6-73).



Figuur 6-67: Bevochtigen van het latwerk



Figuur 6-68: Laten zakken van de onderste hoekpunten



Figuur 6-69: Omhoogtrekken van de bovenste hoekpunten



Figuur 6-70: Aanduwen van het centraal punt



Figuur 6-71: Holle kromming aan de randen van het latwerk



Figuur 6-72: Golfbeweging van de holle latten (kleur) en bolle latten (kleur)



Figuur 6-73: Breuk van de latten ter hoogte van vezelonderbreking



Figuur 6-74: Uiteenspatten van de ringbalk

Door het bolscharnier werd de ringbalk uit elkaar geduwd onder invloed van de spatkracht van het latwerk. Dankzij de versteviging rond de gesjorde bolscharnieren werd het volledig uiteenspatten van de ringbalk vermeden (Figuur 6-74). Wanneer een kracht werd uitgeoefend op de ringbalk om de balk terug te draaien in zijn oorspronkelijke toestand, werd de knik van van de latten versterkt (Figuur 6-75). Doordat het latwerk op een andere manier bevochtigd werd dan de vorige maquette, waren de latten minder buigzaam. Hierdoor moesten grotere krachten uitgeoefend worden en de vervorming van de latten kwam minder sterk tot uiting (Figuur 6-76).



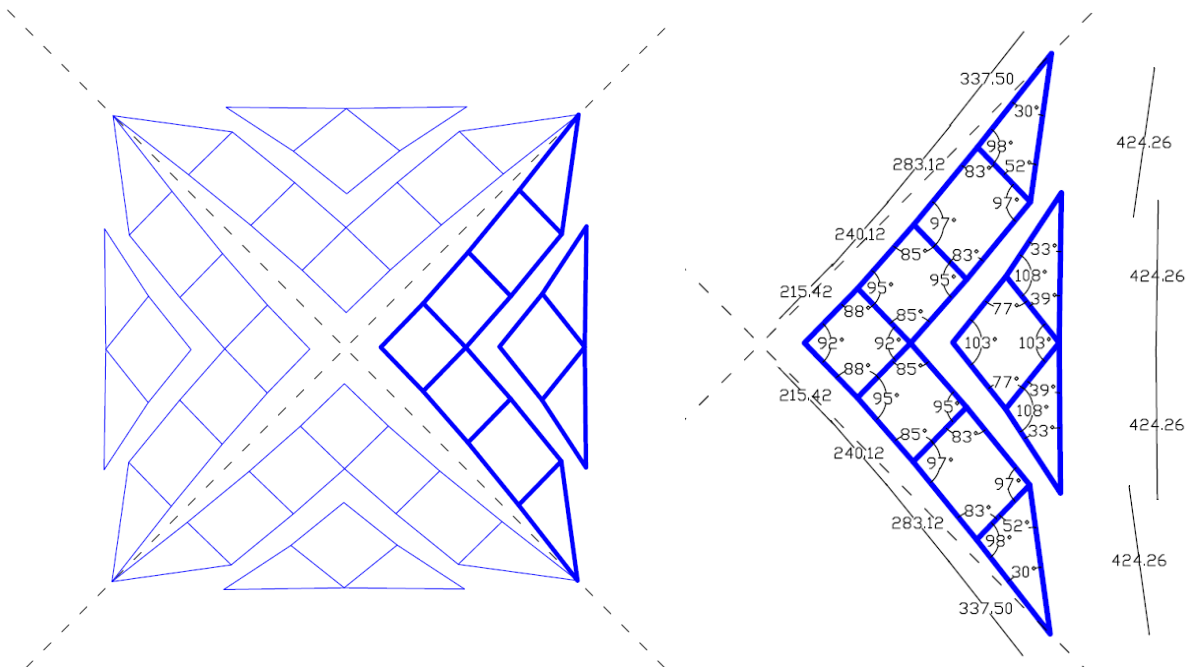
Figuur 6-75: Terugdraaien van de ringbalk leidt tot sterkere vervorming van het latwerk



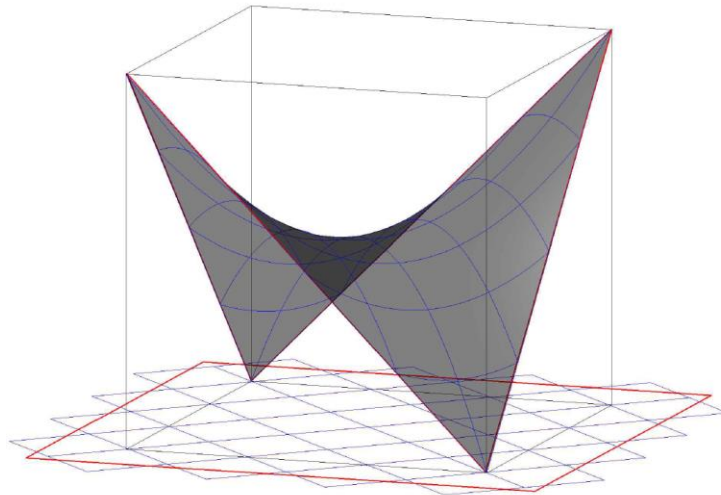
Figuur 6-76: Eindresultaat

6.2.3 Structurele analyse

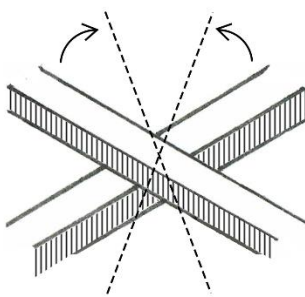
Aan het begin van het maquette-onderzoek met sjoerverbindingen werd een foutieve vaststelling gemaakt. Doordat het raster 45 graden werd gedraaid, werd er foutief geredeneerd dat er geen rotatiebeweging in het latwerk zou plaatsvinden en alle hoeken van het raster tijdens het erectieproces loodrecht bleven. Bovendien werd er foutief gedacht dat de afmetingen van de mazen van het raster tijdens het erectieproces behouden bleven. Wanneer door middel van een digitale simulatie in *Rhino* het raster vervormd werd tot een hyparschaal (Figuur 6-78) en vervolgens het bekomen raster uitgevouwen werd door middel van *Pepakura*, werd echter vastgesteld dat het raster alsnog een kleine rotatiebeweging maakt waardoor de hoeken van het raster variëren tussen 77 en 103 graden. Bovendien werd er vastgesteld dat er naast deze rotatiebeweging, eveneens een translatiebeweging plaatsvindt. Hierdoor veranderen de afmetingen van de mazen. Naar het centrum toe worden de mazen kleiner, terwijl de mazen naar de randen toe groter worden (Figuur 6-81). Het raster met vierkante mazen wordt bijgevolg getransformeerd tot een raster met ruiten en parallellogrammen (Figuur 6-77). Doordat de knooppunten zeer strak verbonden waren, werd deze noodzakelijke rotatie- en translatiebeweging tegengegaan waardoor knik optrad in het latwerk (Figuur 6-80).



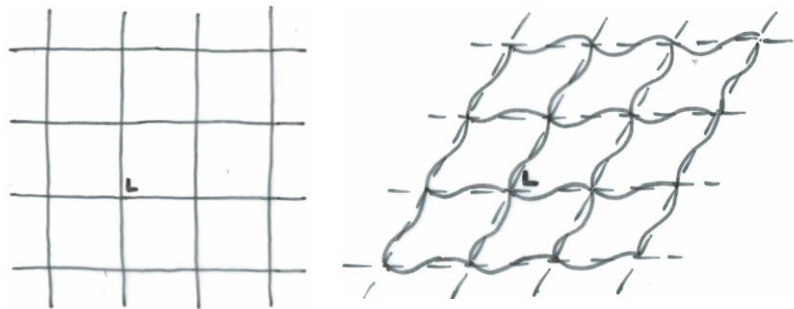
Figuur 6-77: Vervormde raster van hyparschaal



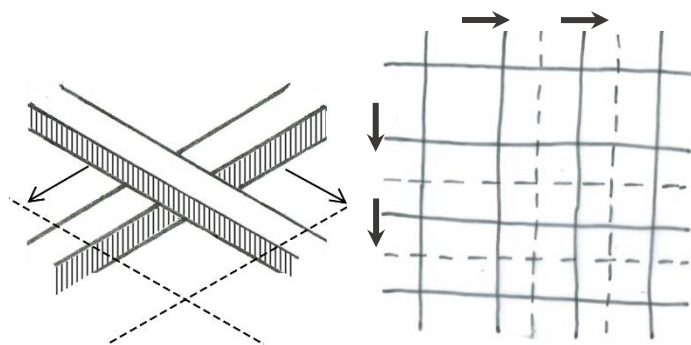
Figuur 6-78: Vervormde hyparschaal



Figuur 6-79: Rotatiebeweging latwerk



Figuur 6-80: Knik in latwerk door vaste knooppunten

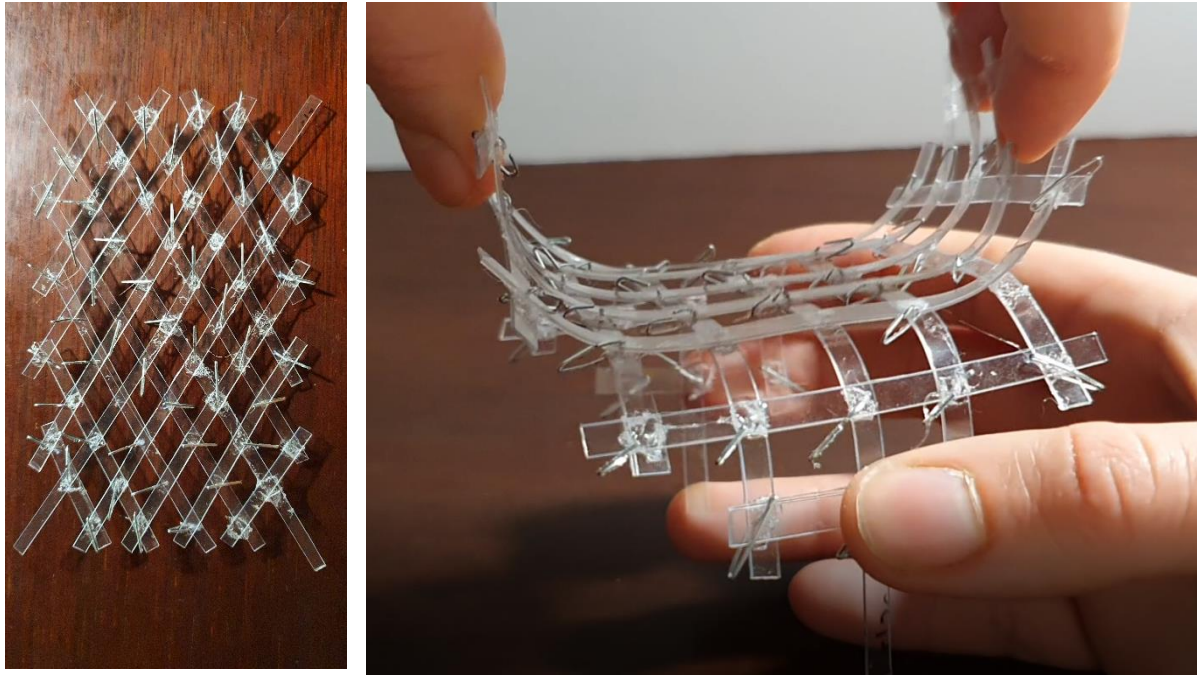


Figuur 6-81: Translatiebeweging latwerk

Indien de translatiebeweging alsnog toegestaan zou worden, wordt het echter onmogelijk om de controle over de beweging in het latwerk te behouden. Om zowel de rotatie- als translatiebeweging toe te staan, zouden de knooppunten zeer los moeten zijn. Met een lowtech verbinding als sjarren is het echter niet mogelijk om zowel de rotatie- als translatiebeweging op een gecontroleerde manier uit te voeren, aangezien de latten zouden

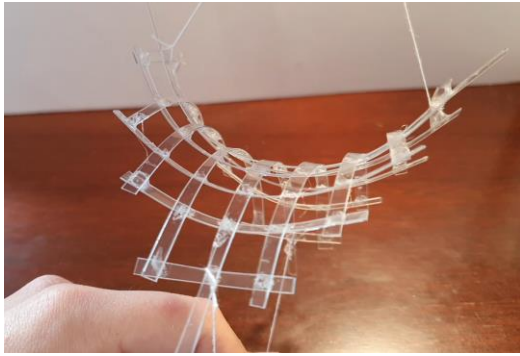
kunnen verschuiven waardoor het raster uiteen zou vallen. Dit fenomeen wordt verder besproken bij de testmaquettes van het regeloppervlak in paragraaf 7.4.

Om het knikgedrag van de hyparschaal in detail te bestuderen, werd net als voor de ontwikkeling van de *Mannheim Multihalle* (zie paragraaf 3.1.1) een PMMA maquette gemaakt met vierkante mazen en verbindingen die een rotatiebeweging toelaten. Vervolgens werd het latwerk vervormd tot een hypar en werd in het latwerk knik vastgesteld doordat de nodige translatiebeweging werd belemmerd (Figuur 6-82).

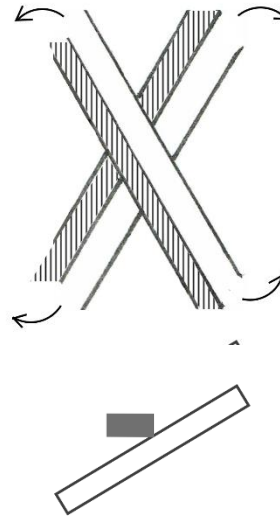
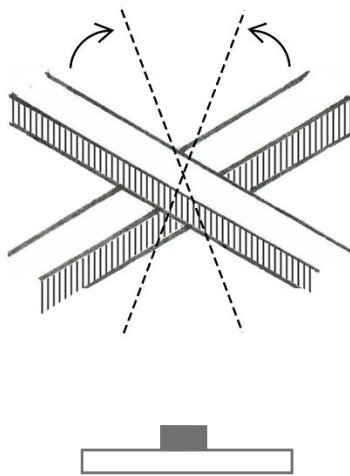


Figuur 6-82: Vervorming PMMA maquette met vaste verbindingen

Een tweede PMMA maquette werd gemaakt met hetzelfde raster met vierkante mazen waarbij de latten werden verbonden door middel van lijm die niet volledig opgedroogd was (Figuur 6-83). Op deze manier was een zekere rotatie- en translatiebeweging van de latten mogelijk. Dankzij deze verbindingen werd vastgesteld dat de kruisende latten tijdens het erectieproces los komen van elkaar en slechts een contactpunt hebben (Figuur 6-84). Deze beweging werd in de maquette op schaal 1:2 (zie paragraaf 6.2.2.3) tegengehouden door de vaste kruissjorring van het latwerk, wat daar leidde tot knik. In de tweede PMMA maquette is er centraal echter een afvlakking van de kromming zichtbaar die mogelijk wijst op te vaste verbindingen die de nodige rotatie- en translatie beweging niet volledig toelaten.

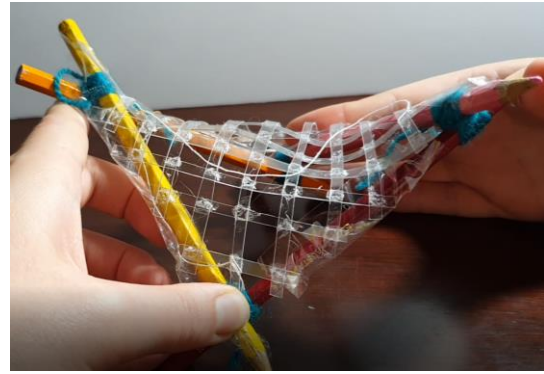


Figuur 6-83: Vervorming PMMA maquette met lossere verbindingen

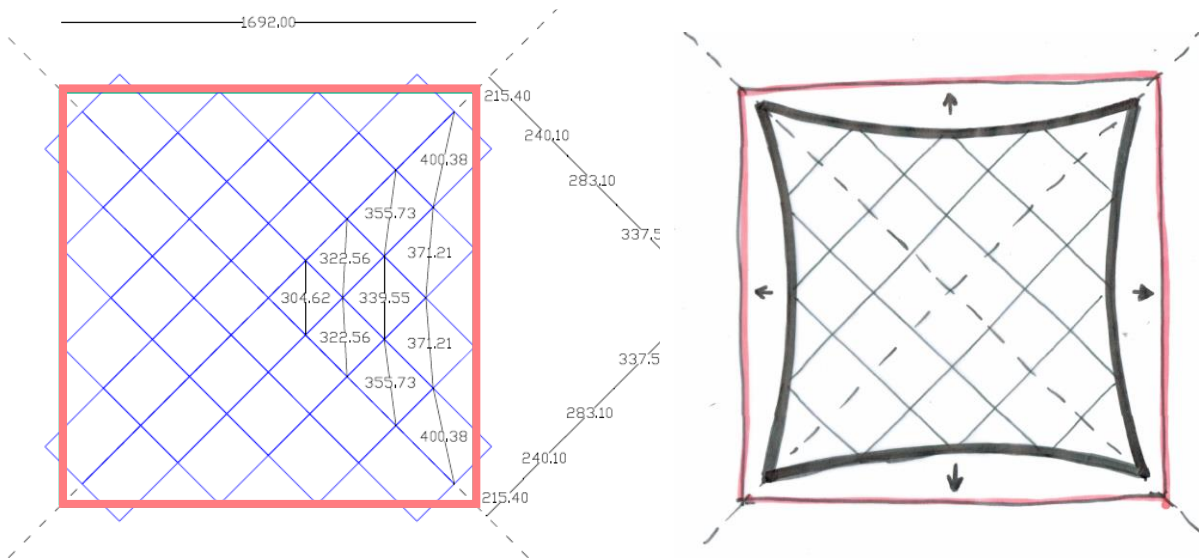


Figuur 6-84: Rotatiebeweging latwerk

In de testmaquette op schaal 1:5 werd vastgesteld dat indien het latwerk niet werd bevestigd aan de ringbalk met vaste verbindingen tijdens het erectieproces, het latwerk afvlakte onder invloed van de spatkrachten (zie Figuur 6-46 p.65). Om de invloed van een ringbalk op de vervorming van het latwerk tijdens het erectieproces te bestuderen, werd de tweede PMMA maquette met lossere verbindingen bevestigd aan een stijve ringbalk. De vier hoekpunten van de ringbalk werden verbonden door middel van een vorksjorring om een vlotte vervorming van de ringbalk toe te staan. Waar het latwerk zonder ringbalk en met losse verbindingen eerder de dubbele kromming in zekere mate behaalde, werd dit nu tegengehouden door de ringbalk en vervormde het latwerk onder invloed van knik (Figuur 6-85). Hieruit kan worden besloten dat het latwerk met losse verbindingen op zichzelf vervormd moet worden tot een hyparschaal, waarna de ringbalk met stijve elementen bevestigd kan worden aan het latwerk om de spatkrachten op te vangen en de structuur te verstijven. Dit is de gebruikte methode bij de besproken casestudies in hoofdstuk 3.



Figuur 6-85: Vervorming van PMMA maquette met ringbalk leidt tot knik

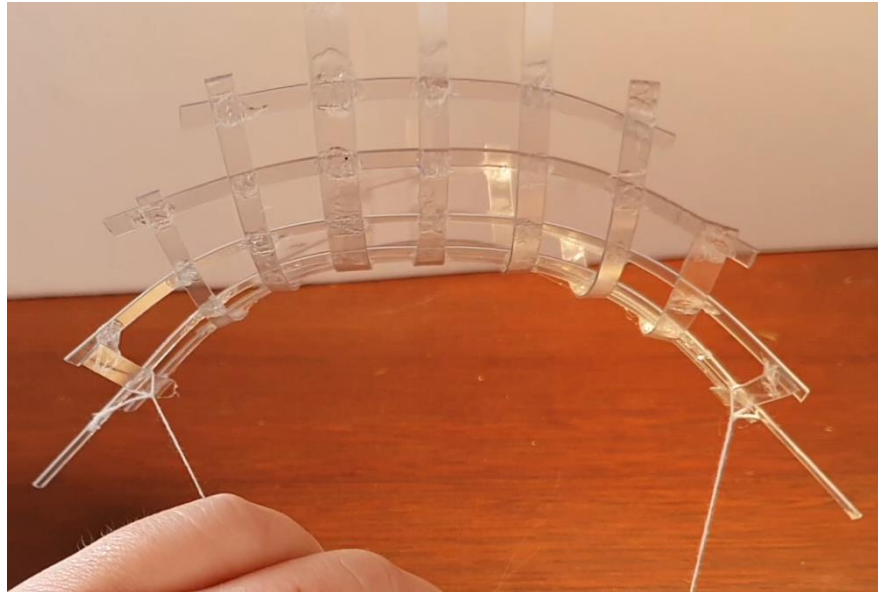


Figuur 6-86: Vervormen van vlak latwerk (blauw) met ringbalk (rood)

Er werd een derde PMMA maquette gemaakt zonder ringbalk volgens het vlak raster weergegeven in Figuur 6-86 bestaande uit vierkante- en rechthoekige mazen die groter worden naar de randen toe (Figuur 6-88). De afmetingen zijn gebaseerd op het vervormd raster uit Figuur 6-77. De latten werden verbonden door middel van lijm die niet volledig opgedroogd was waardoor de latten niet van elkaar zouden getrokken worden, maar die de rotatiebeweging van het raster niet zou belemmeren (Figuur 6-87). Wanneer het raster werd vervormd, werd een hypar verkregen waar de kromming in het midden afvlakt (Figuur 6-88). Vermoedelijk werd deze afvlakking veroorzaakt doordat de gebruikte verbindingen alsnog de nodige vervorming van het latwerk belemmerden.



Figuur 6-87: Rotatie latwerk



Figuur 6-88: Derde PMMA maquette met afvlakking van het latwerk

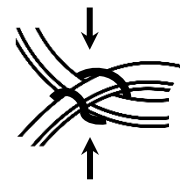
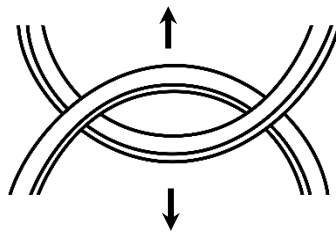
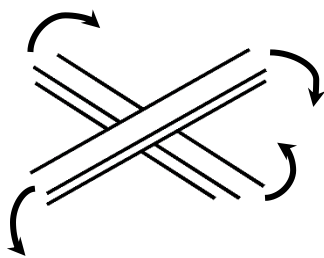
In de eerste testmaquette op schaal 1:5 was er een vermoeden dat de volgorde van de latten een invloed zou hebben op de vervorming van het latwerk (Figuur 6-45 p.65). Door een PMMA maquette te testen werd vastgesteld dat de volgorde van de latten niet zozeer de vorm van de gridshell beïnvloedt, maar wel de spanning die uitgeoefend wordt op de verbindingen. Wanneer de bovenste laag latten bol kromt en de onderste hol, hebben de latten de neiging om van elkaar getrokken te worden (Figuur 6-89). De verbindingen dienen in dit geval grote trekkrachten op te vangen om deze beweging tegen te gaan. Hierdoor dienen de verbindingen zeer vast te zijn, waardoor de vervorming van het latwerk belemmerd kan worden (Figuur 6-91). Het is daarom aangeraden om de volgorde van de latten om te keren (Figuur 6-90). Wanneer de bovenste laag latten hol wordt getrokken, en de onderste laag latten bol, worden de latten op elkaar gedruwd, waardoor de verbindingen louter de rotatiebeweging van het latwerk moeten toestaan (Figuur 6-92).



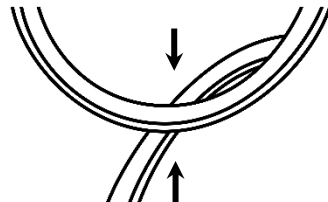
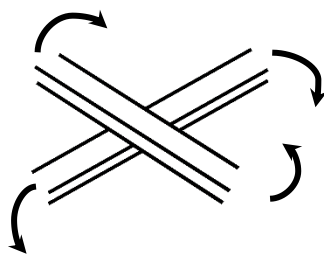
Figuur 6-89: Lostrekken van latwerk



Figuur 6-90: Samenduwen latwerk



Figuur 6-91: Bolle latten boven



Figuur 6-92: Holle latten boven

6.2.4 Conclusie

Uit de voorgaande testmaquettes kan geconcludeerd worden dat het latwerk tijdens het erectieproces niet verbonden mag worden aan de ringbalk. Door te werken met een vorksjoring tussen de vier hoekpunten kan de ringbalk wel vervormen om de gewenste stijve rand te vormen van de hyparschaal, maar wordt de vervorming van het latwerk belemmerd. Wanneer het latwerk vast verbonden wordt aan de ringbalk tijdens het erectieproces, wordt de nodige rotatie- en translatiebeweging van het latwerk belemmerd en zal er knik optreden in het latwerk. Het latwerk kan echter niet met losse verbindingen gemonteerd worden aan de ringbalk aangezien het latwerk te sterk zal verschuiven en de kromming van het latwerk niet behaald wordt.

Een mogelijke manier om het latwerk alsnog zonder ringbalk te vervormen tot een hyparschaal, is door het latwerk op meerdere plaatsen te ondersteunen en gelijkmatig te vervormen. Deze methode werd toegepast bij grootschalige gridshells als *Downland Gridshell* en *Japan Pavilion* en werd uitgebreid besproken in paragraaf 3.3.2. Deze methode vereist echter een complexe infrastructuur die botst op het initiële doel van deze masterscriptie om een lowtech hyparschaal te ontwikkelen met beperkte middelen.

Wanneer het latwerk zonder ringbalk wordt vervormd kan een hyparschaal gevormd worden. De bekomen vormen in de PMMA maquette was echter geen perfecte hypar waardoor de kromming in het centrum werd afgevlakt. Deze afvlakking zou het gevolg zijn van verbindingen die niet optimaal ontworpen zijn en de vrije vervorming van het latwerk tegengaan. Het is echter niet vanzelfsprekend om een lowtech verbinding te ontwikkelen die de juiste vervorming van het latwerk op een gecontroleerde manier toelaat.

7 Regeloppervlak

In dit hoofdstuk wordt er afgestapt van het elastisch buigen en wordt een gridshell met rechte ribben onderzocht. Dit met het doel het erectieproces te vereenvoudigen. Doordat er gewerkt wordt met rechte ribben die niet elastisch gebogen worden, bevatten deze geen spanning die behouden moet blijven. Daardoor zou de structuur kunnen blijven staan zonder bijkomende steunpunten, zoals kolommen.

7.1 Referenties

7.1.1 Vigilante del Maule, Carlos Jarpa

Midden in een wijngaard te Maule, Chili werd Vigilante del Maule gebouwd, ontworpen door Carlos Jarpa (Figuur 7-1). Deze uitkijktoren gunt de eigenaar van de wijngaard een overzicht over zijn velden, maar ook voorbijgangers kunnen genieten van het 360° panoramisch zicht. De vorm van de toren is een catenoïde. Een catenoïde is een driedimensionale vorm die door het roteren van een kettinglijn-kromme rond de z-as wordt gevormd. Deze vorm wordt veel gebruikt bij torenconstructies zoals watertorens en koeltorens.



Figuur 7-1: Vigilante del Maule (bron: Carlos Jarpa)

Deze structuur behoort tot de categorie van stijve gridshells en de subcategorie van rechte ribben (Schema 2-1 p.6). De houten elementen worden niet gebogen, elastisch noch plastisch. Omdat hout een beperkte lengte heeft, worden de elementen verlengd met een stalen verbinding. Hierdoor verliep de opbouw van dit bi-directioneel raster in drie fasen waar bij elke fase de latten individueel werden verlengd (Figuur 7-2).



Figuur 7-2: Opbouw Vigilante del Maule (bron: Carlos Jarpa)

De structuur werd verstijfd door tien ringen, bestaande uit stalen beugels die aan elkaar bevestigd zijn door middel van bouten (Figuur 7-3). Deze bouten kunnen aangespannen worden waardoor de stalen beugels als een klemverbinding op de knooppunten werken. Dankzij dit systeem worden de latten niet verzwakt door een boutgat. In de eindfase werd het uitkijkplatform toegevoegd dat eveneens voor extra stijfheid van de structuur zorgde (Figuur 7-4).



Figuur 7-3: Stalen beugels (bron: Carlos Jarpa)

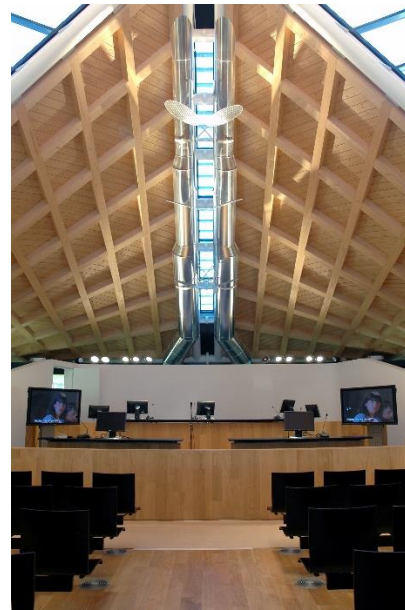


Figuur 7-4: Uitzichtplatform (bron: Carlos Jarpa)

7.1.2 Gerechtsgebouw Antwerpen, Richard Rogers



Figuur 7-5: Gerechtsgebouw Antwerpen (bron: Regie der Gebouwen)

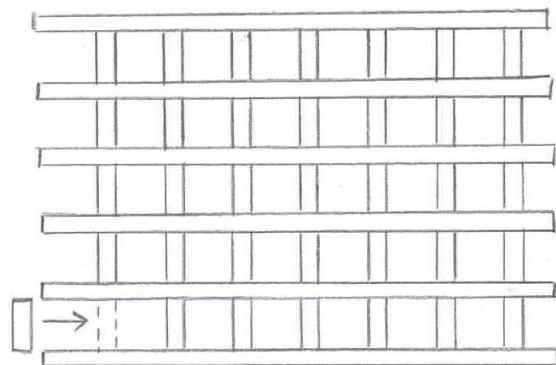


Figuur 7-6: Interieur gerechtsgebouw Antwerpen (bron: Regie der Gebouwen)

Een andere referentie is het gerechtsgebouw in Antwerpen, ontworpen door Richard Rogers (Figuur 7-5, Figuur 7-6). De daken zijn gridshells bestaande uit rechte, stijve ribben. De hyparschalen werden geconstrueerd in een werkplaats in Hoboken waarna ze per boot getransporteerd werden. Het stalen frame doet dienst als ringbalk waarop de houten structuur lat per lat werd bevestigd (Figuur 7-7). Het bi-directioneel raster is opgebouwd uit rechte elementen. In de ene richting werden de elementen geplaatst over de volledige lengte. Daarna werden er tussen deze elementen kortere segmenten voorzien in de andere richting (Figuur 7-8).



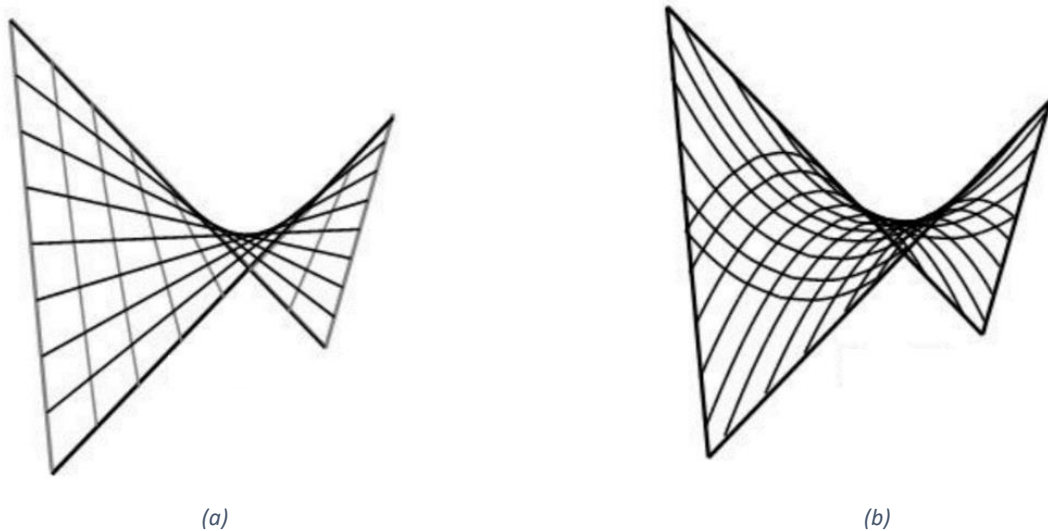
Figuur 7-7: Constructie schaaldaken (bron: Regie der Gebouwen)



Figuur 7-8: Raster daken gerechtsgebouw Antwerpen

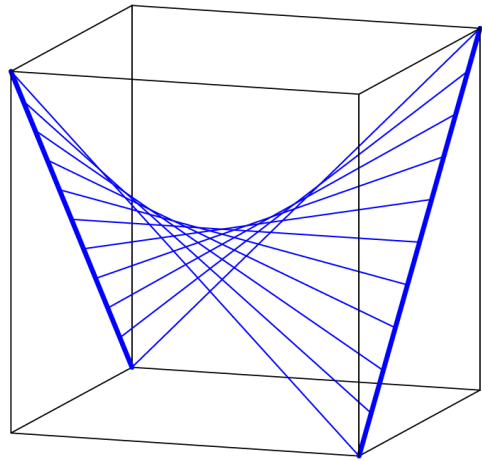
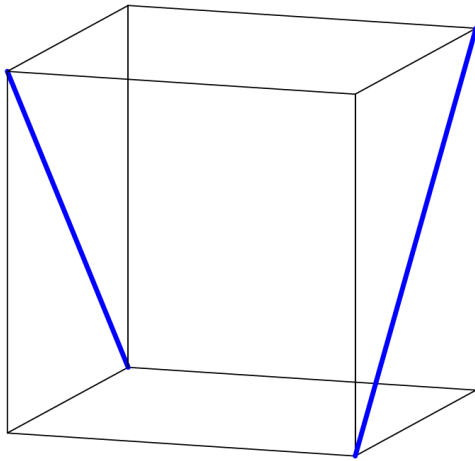
7.2 Theorie

Zoals eerder vermeld, wordt er gewerkt met een hyperbolische parabolöide, beter gekend als een hypar. Deze vorm bestaat uit twee sets parabolen die elk in een andere richting gekromd zijn en loodrecht op elkaar liggen, maar een hypar kan ook bestaan uit uitsluitend rechten (Figuur 7-9). Dit worden regeloppervlakken genoemd. Door elk punt op het oppervlak gaat er minstens een rechte. Bij een hyperbolische parabolöide zijn dat zelfs twee rechten. [28]

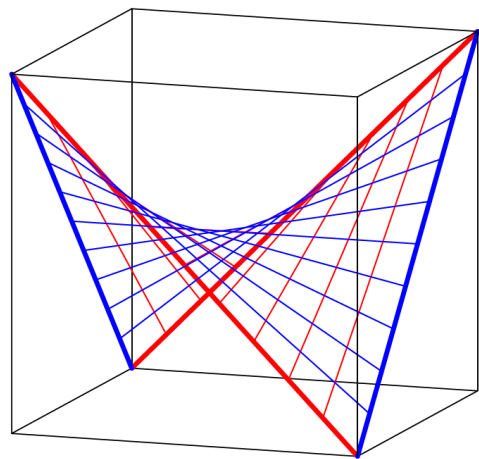
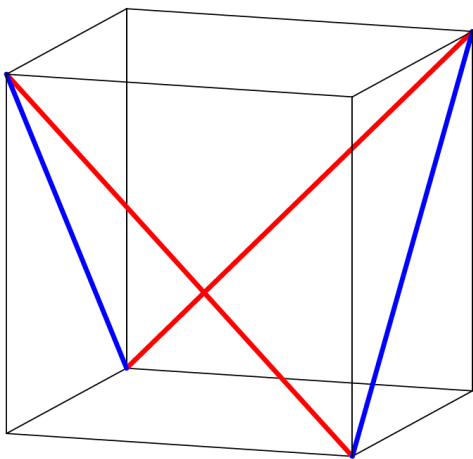


Figuur 7-9: Hyperbolische parabolöide, opgebouwd uit twee sets rechten (a) of twee sets parabolen (b) (bron: Liliane Van Maldeghem)

Het genereren van de rechten van een hypar kan gebeuren aan de hand van een kubus. De kruisende diagonalen van twee evenwijdige, opstaande zijden van de kubus worden in gelijke delen opgedeeld. De verbindingslijnen van overeenkomstige punten vormen een eerste set rechten voor de hypar (Figuur 7-10). Voor het genereren van de tweede set rechten wordt gebruik gemaakt van de kruisende diagonalen van de overblijvende twee opstaande zijden (Figuur 7-11). Opnieuw worden de verbindingslijnen getekend en wordt zo de hypar bekomen. In dit geval is de hypar gelijkzijdig. [28]



Figuur 7-10: Genereren van de eerste set rechten van een gelijkzijdige hypar



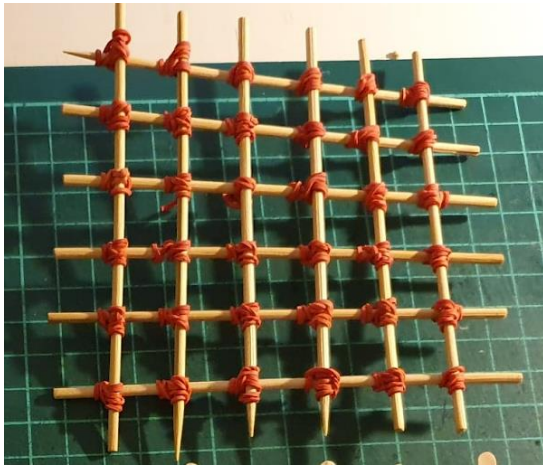
Figuur 7-11: Genereren van de tweede set rechten van een gelijkzijdige hypar

7.3 Maquette-onderzoek

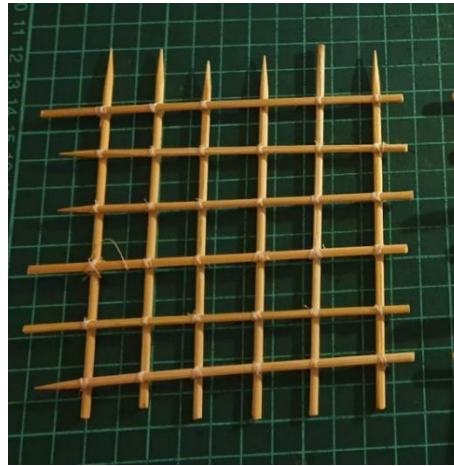
Bij voorgaande referenties werden de latten een voor een geplaatst om zo de anticlastische vorm te verkrijgen. Om de opbouw eenvoudig te houden, werd er in dit onderzoek gestreefd naar een vlak raster dat werd vervormd tot een hyparschaal.

7.3.1 Bamboe stokken (diameter 2 mm), raster met mazen van 20 x 20 mm

Door middel van bamboe stokken met een diameter van 2 mm, werden twee rasters gemaakt met mazen van 20 x 20 mm. Het latwerk werd op elkaar gelegd en verbonden door middel van elastiek (Figuur 7-12) of naaigaren (Figuur 7-13).

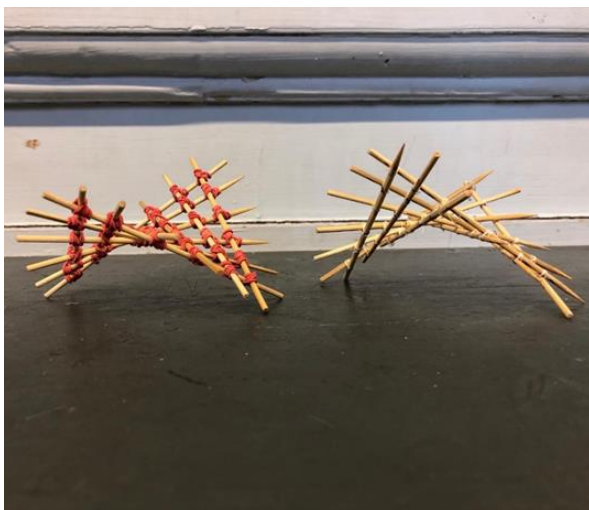


Figuur 7-12: Bamboe raster verbonden met elastiek

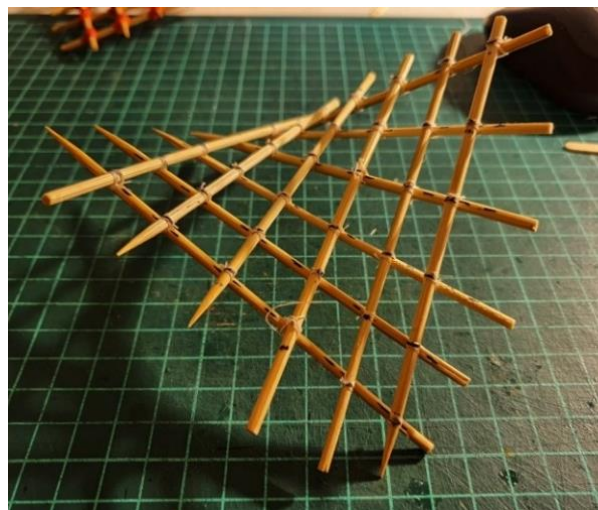


Figuur 7-13: Bamboe raster verbonden met naaigaren

Bij het vervormen van het latwerk kon de hypar worden gevormd. Deze maquettes konden blijven staan zonder extra steunpunten (Figuur 7-14). Het gedrag van het latwerk kon worden geanalyseerd aan de hand van de markeringen aangebracht ter hoogte van de knooppunten. Deze markeringen tonen aan dat de latten verschuiven wanneer het latwerk wordt vervormd tot een hyparschaal (Figuur 7-15).



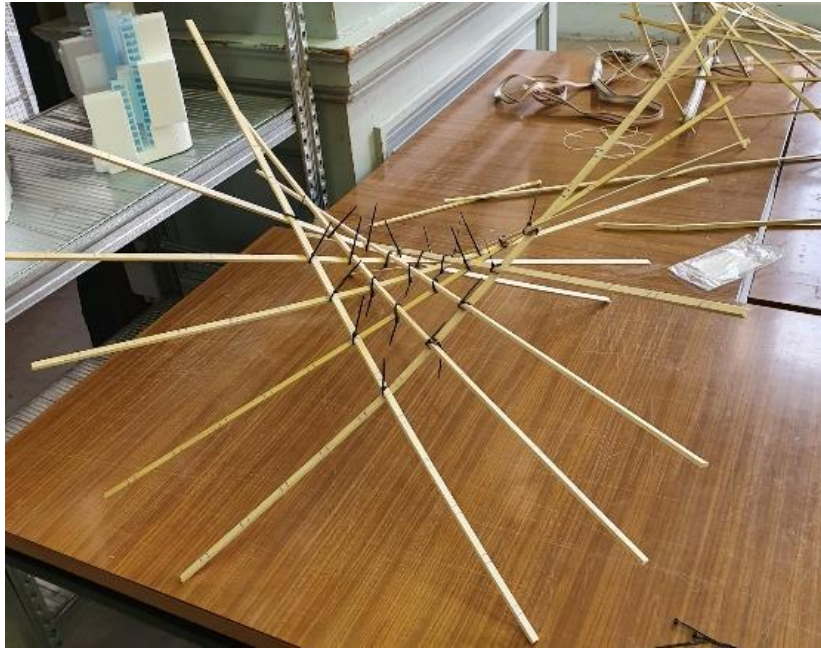
Figuur 7-14: De hyparschalen



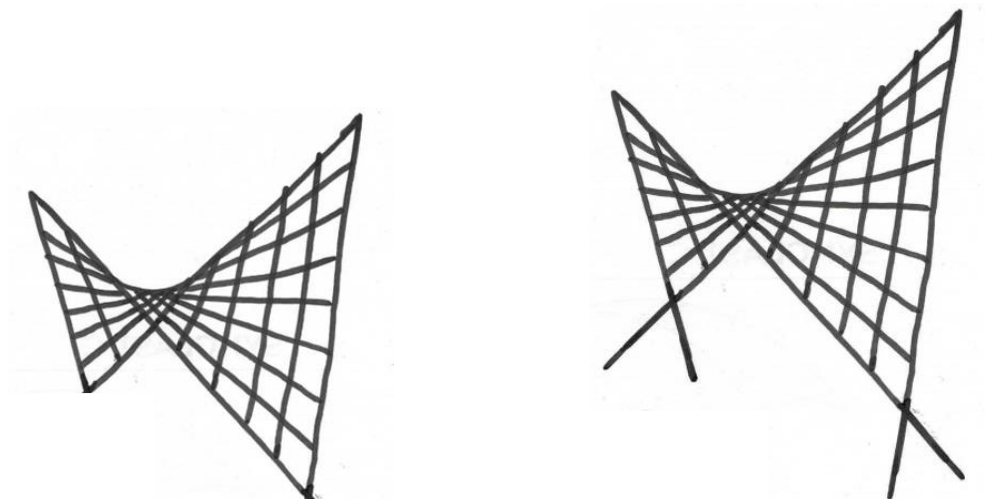
Figuur 7-15: Markeringen op de knooppunten

7.3.2 Grenenhout (doorsnede 4 x 9 mm), raster met mazen van 50 x 50 mm

Grenenhout (doorsnede 4 x 9 mm) werd gebruikt voor een volgende test. Met mazen van 50 x 50 mm werden tien latten in twee lagen op elkaar gelegd en verbonden met behulp van kabelbinders. Hier werd ook duidelijk dat het belangrijk was dat de kabelbinders niet te strak of te los werden bevestigd. Het raster kon vervormd worden tot een hyparschaal en bleef uiteindelijk op zichzelf staan (Figuur 7-16). De latten waren bewust te lang en staken uit het kader. Hiermee kwam het zadeloppervlak hoger te staan (Figuur 7-17).



Figuur 7-16: Maquette met grenenhout en kabelbinders



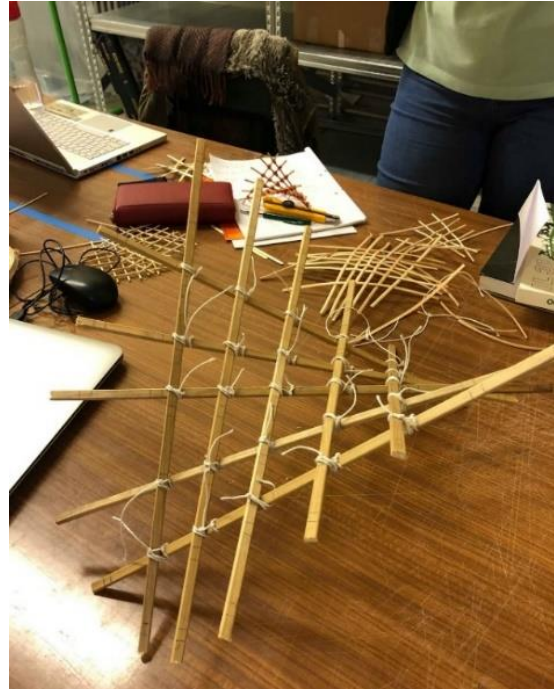
Figuur 7-17: Door het verlengen van de randlatten komt de hyparschaal hoger te staan

Om de kabelbinders te vervangen werd gezocht naar een andere knoopverbinding. Hierbij werd er verder gewerkt op de verkregen kennis uit het maquette-onderzoek besproken in paragraaf 6.2.1. Als eerste werd de kruissjorring getest. Deze knoop was te strak, nog voordat de verbinding werd gewoeld. Hierdoor werd de beweging van het latwerk geblokkeerd en kon de hyparschaal niet gevormd worden (Figuur 7-18).

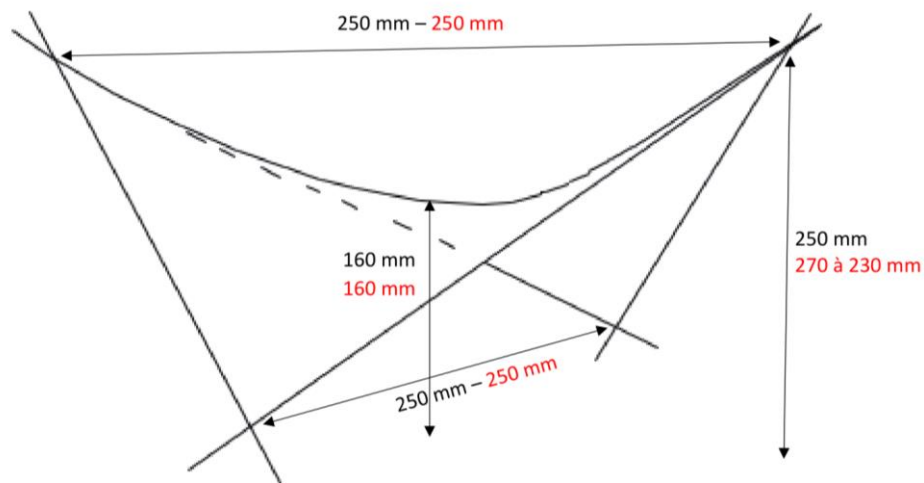
Vervolgens werd een tweede sjormethode getest; de enkelvoudige sjorverbinding. Deze verbinding werd gebruikt bij het *Japan Pavilion* op Expo 2000 (zie paragraaf 3.2). Bij deze methode wordt het touw diagonaal gewikkeld rond de knooppunten, waardoor verschuiving van de latten mogelijk wordt en de hyparschaal gevormd kan worden (Figuur 7-19). Eens de hyparschaal overeind stond, bleek het echter onmogelijk de verbindingen aan te spannen door te woelen om zo de stijfheid van de structuur te vergroten.



Figuur 7-18: Maquette met kruissjorverbindingen



Figuur 7-19: Maquette met enkelvoudige sjorverbindingen



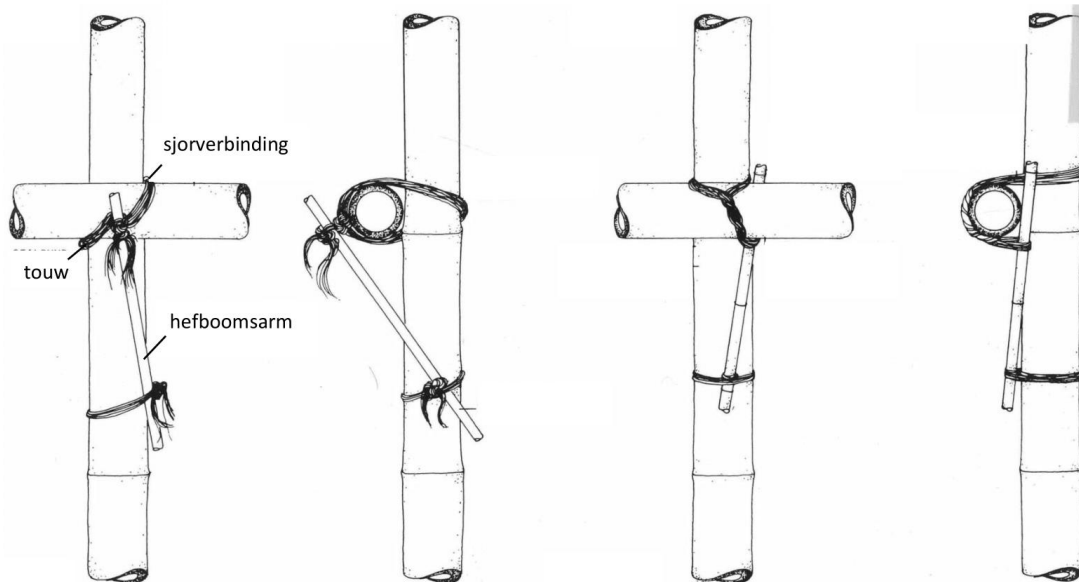
Figuur 7-20: Theoretische (zwart) en effectieve (rood) afmetingen van de maquette

Door de losse verbindingen was het latwerk verschoven waardoor deze niet meer overeenkwam met de theoretische vorm; de hypar was veel lager dan verwacht. Na bijstelling van het latwerk werd de hyparschaal opgemeten en werd vastgesteld dat de effectieve afmetingen ditmaal zo goed als volledig overeenkwamen met de theoretische waarden (Figuur 7-20). De overspanningen tussen de twee toppunten en de twee onderste

steunpunten zijn gelijk en komen overeen met de theoretische afmetingen. Bovendien bevindt het centrale punt van de hyparschaal, het laagste punt van de vallei, zich op de gewenste hoogte. Enkel de hoogte van de toppunten week af van de theoretische waarde van 250 mm. Aangezien de latten tijdens het erectieproces verschoven, was het moeilijk om de controle te behouden over de positie van de knooppunten. Hierdoor was de hyparschaal gekanteld waardoor de hoogte van de toppunten varieert tussen 230 mm en 270 mm.

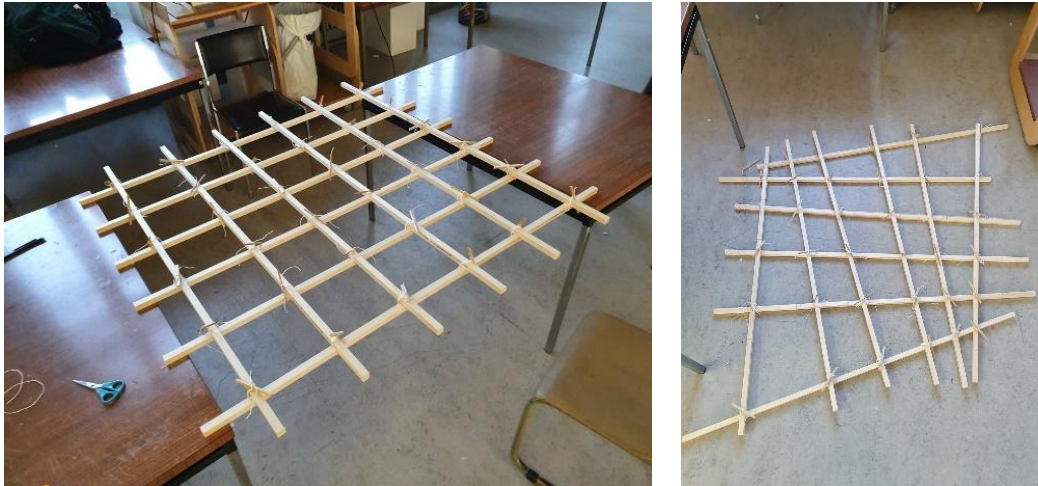
7.3.3 Vurenhout (doorsnede 18 x 18 mm), met behulp van een hefboomsarm

De uitdaging was dus om een verbinding te ontwerpen die los genoeg is om de verschuiving van het latwerk toe te staan, maar vast genoeg is om de vorm van de hypar te kunnen behouden. Het aanbrengen van de nodige spanning kan gebeuren met behulp van een hefboomsarm (Figuur 7-21). Deze soort verbindingen worden voornamelijk toegepast bij bamboeconstructies. De hefboomsarm wordt aan de verbinding geknoopt. Eenmaal de structuur rechtstaat, wordt de hefboomsarm geroteerd om zo de spanning in de verbinding te vergroten en de structuur stijver te maken. Nadat de verbinding aangespannen is, wordt de hefboomsarm vastgeknoopt aan een van de latten om zo de aangebrachte spanning in de knoopverbinding te kunnen behouden.



Figuur 7-21: Het aanspannen van sjorverbindingen met behulp van een hefboomsarm [6]

Voor deze maquette werd gebruik gemaakt van vurenhout (doorsnede 18 x 18 mm). De latten van 1,35 m lang werden gelegd volgens een raster met mazen van 200 x 200 mm. Het latwerk werd verbonden via losse, enkelvoudige sjorverbindingen met extra hefboomsarm. Zo konden de knooppuntverbindingen aangespannen worden op het moment dat de hyparschaal gevormd was (Figuur 7-23). Bij een poging om het latwerk te vervormen naar een hyparschaal, viel het raster uiteen (Figuur 7-22). Het vormen van een hyparschaal en daardoor het aanspannen van de verbindingen was dus onmogelijk. Aan de randen verschoven de latten het meest.



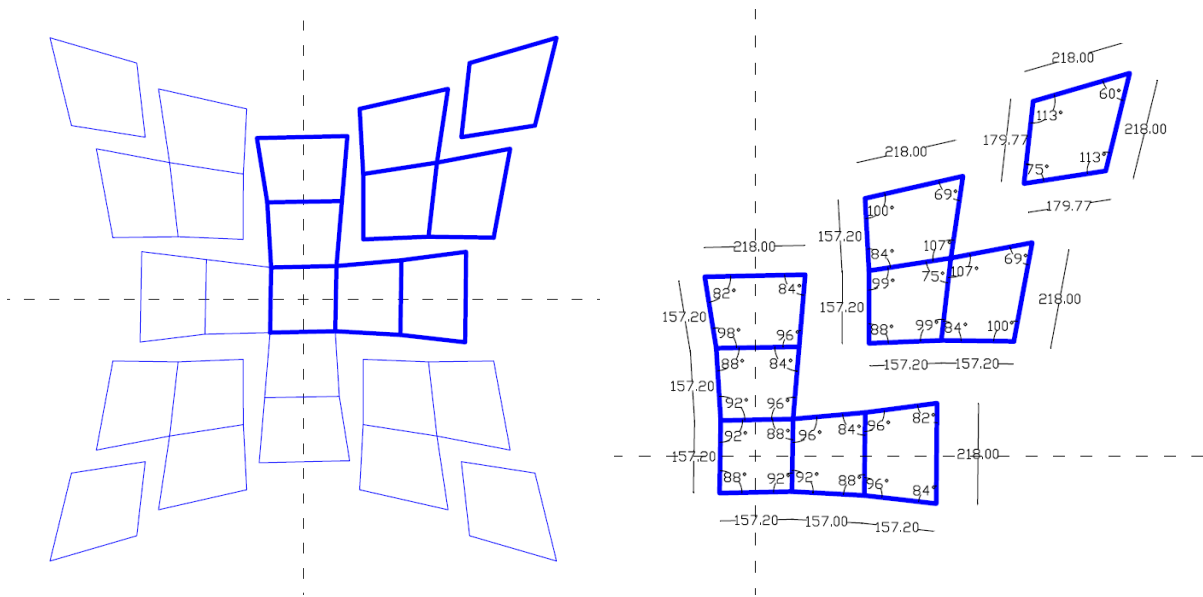
Figuur 7-22: Latwerk met enkelvoudige sjorverbinding en aangeknoopte hefboomsarm



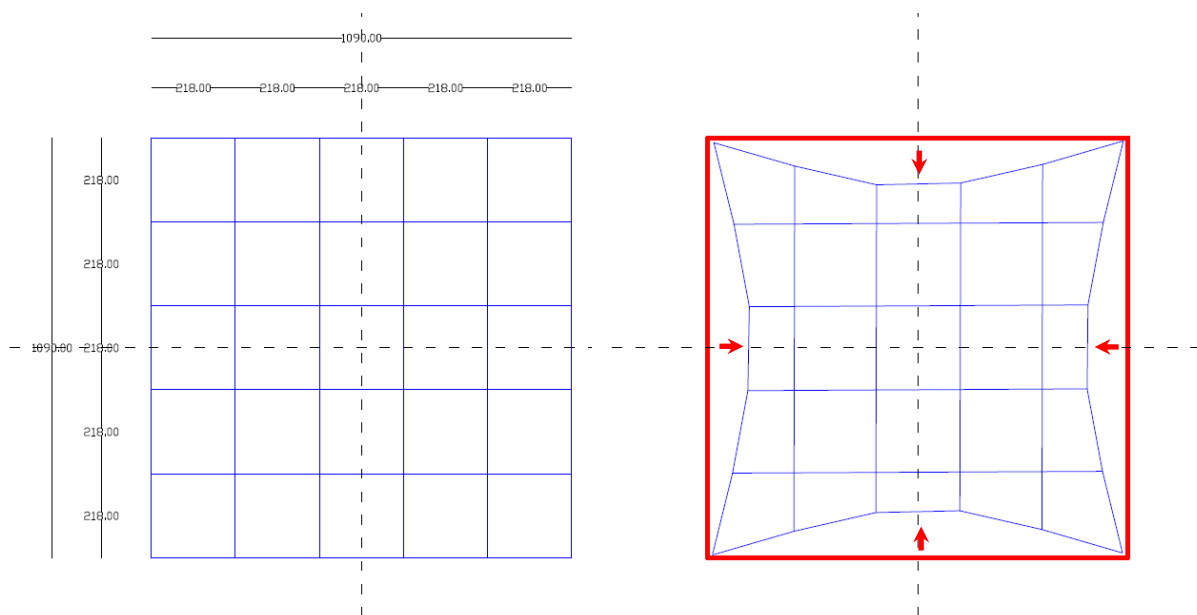
Figuur 7-23: Detailfoto van de sjorverbindingen met aangeknoopte hefboomsarm

7.4 Structurele analyse

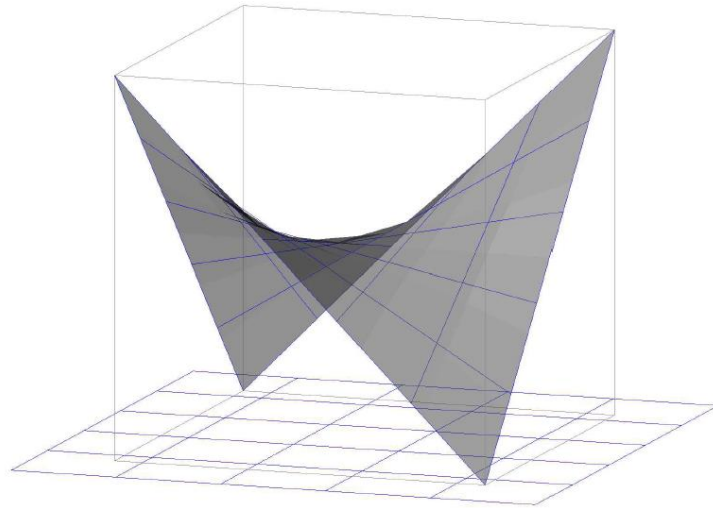
Wanneer door middel van een digitale simulatie in *Rhino* het raster vervormd werd tot een hyparschaal (Figuur 7-26) en vervolgens het bekomen raster uitgevouwen werd door middel van *Pepakura*, werd vastgesteld dat het initieel raster met vierkante mazen transformeerde tot een raster met willekeurige vierhoeken (Figuur 7-24). De mazen werden naar het centrum toe kleiner, waardoor in theorie de afmetingen varieerden tussen 218 x 218 mm en 157 x 157 mm. Daarnaast varieerden de hoeken tussen 69 en 113 graden. Doordat de latten korter werden naar het centrum toe en de buitenste afmetingen van de mazen van 218 mm behouden bleven, wou het raster krimpen (Figuur 7-25).



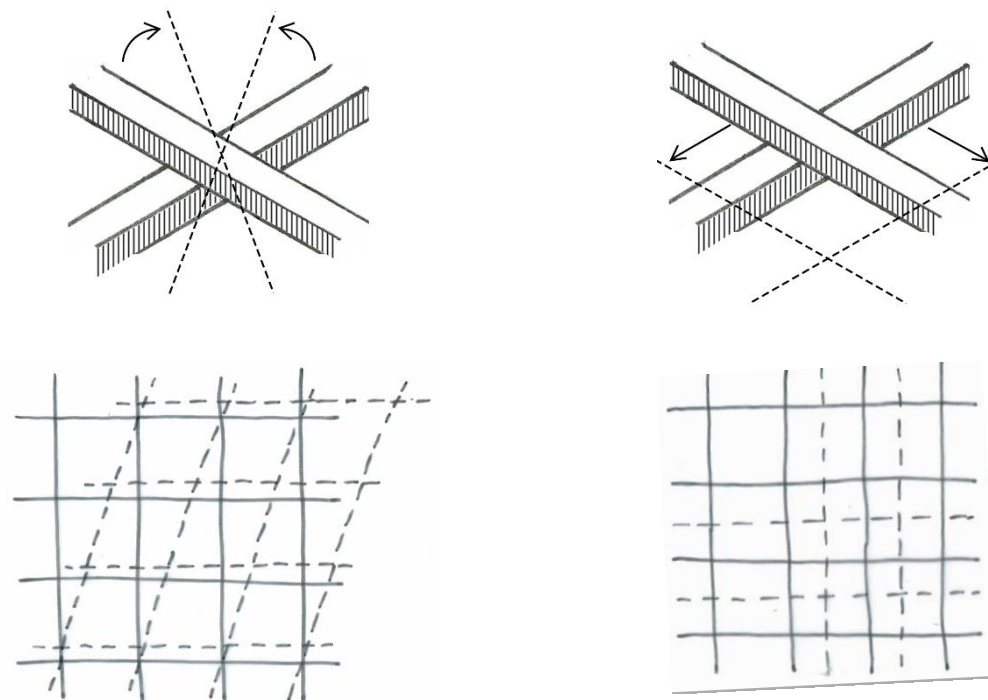
Figuur 7-24: Vervormde raster van hyparschaal



Figuur 7-25: Vervorming vlak raster met vierkante mazen naar raster met willekeurige vierhoeken



Figuur 7-26: Vervormde hyparschaal



Figuur 7-27: Rotatiebeweging latwerk

Figuur 7-28: Translatiebeweging latwerk

Op deze manier vond er tijdens het erectieproces zowel een rotatie- (Figuur 7-27) als translatiebeweging (Figuur 7-28) plaats in het latwerk. Wanneer de verbindingen te vast waren, werd deze dubbele beweging tegengehouden waardoor het latwerk niet vervormde. Wanneer de verbindingen los waren, werden deze rotatie- en translatiebeweging toegestaan waardoor een hyparschaal gevormd kon worden. Doordat de rotatie- en translatiebeweging gelijktijdig moesten optreden tijdens het erectieproces, werd bij een schaalvergroting de controle over de vervorming van het latwerk tijdens het erectieproces verloren. Door het eigengewicht verschoven de latten sterker dan theoretisch toegelaten. In combinatie met de losse verbindingen aan de randen leidde dit tot het uiteenvallen van het latwerk.

7.5 Conclusie

Uit het maquette-onderzoek kan besloten worden dat het ontwikkelen van een hyparschaal als een regeloppervlak enkele voordelen, maar ook nadelen met zich meebrengt. Doordat de elementen niet elastisch gebogen worden, kunnen ze met de juiste verbindingen op zichzelf staan. Dat is een voordeel voor het erectieproces en zorgt er ook voor dat er amper of geen extra steunelementen zoals kolommen nodig zijn om de structuur te laten staan in zijn gewenste vorm. Het nadeel van deze methode zijn echter de verbindingen die de nodige beweging van het latwerk toelaten. De verbindingen dienen tijdens het erectieproces voldoende los te zijn om zowel de rotatie- als de translatiebeweging van het latwerk toe te staan. Op kleine schaal is dit realiseerbaar mits het achteraf bijstellen van het latwerk om de gewenste afmetingen te bekomen. Op grotere schaal kan de vervorming van het latwerk echter niet meer op een gecontroleerde manier gebeuren waardoor het latwerk uiteenvalt. Eenmaal het erectieproces voltooid is, dienen de verbindingen voldoende aangespannen te worden om de verkregen vorm te behouden.

8 Asymptotische Gridshell

Uit het onderzoek gevoerd in hoofdstuk 6 en 7 werd vastgesteld dat het latwerk tijdens het erectieproces zowel een rotatie- als translatiebeweging ondergaat. In dit hoofdstuk wordt er verder gebouwd op de kennis verworven uit hoofdstuk 6 en 7. Uit voorgaand onderzoek is vastgesteld dat het latwerk tijdens het erectieproces zowel een rotatie- als translatiebeweging ondergaat. In dit hoofdstuk wordt onderzocht op welke manier het erectieproces vereenvoudigd kan worden zodat een zuivere hyparschaal gevormd kan worden met lowtech verbindingen en zonder extra steunelementen als kolommen of trekkabels. Hiervoor wordt wederom onderzoek gedaan naar het elastisch buigen, maar wordt het latwerk gemonteerd volgens een asymptotisch raster.

8.1 Referenties

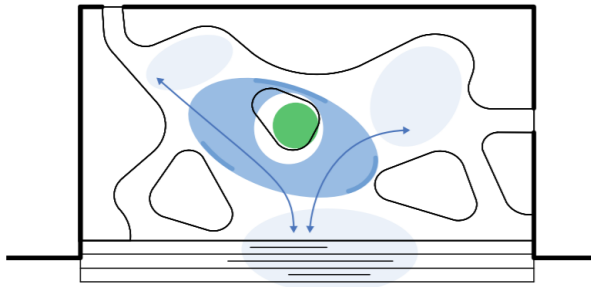
8.1.1 The Asymptotic Gridshell, TU München, Eike Schling

Ter gelegenheid van het 150-jarig bestaan van de Technische Universiteit van München kwam in september 2017 *The Asymptotic Gridshell* (Figuur 8-1) tot stand. Dit paviljoen werd op de binnenplaats van de universiteit gebouwd en is het resultaat van het doctoraatsonderzoek van Eike Schling.



Figuur 8-1: *The Asymptotic Gridshell* (bron: Felix Noe)

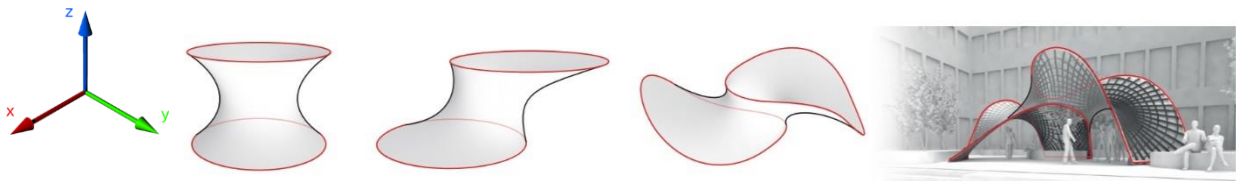
Deze constructie wordt ook wel het *INSIDE/OUT* paviljoen genoemd. Dit is te danken aan de vorm die werd gecreëerd tijdens de ontwerpfase. De site is een binnenplaats die bestaat uit meerdere groene eilandjes met daartussen wandelpaden. Eén van de grootste ontwerpvereisten was dat er nog doorgangen mogelijk moesten zijn naar verschillende wandelpaden (Figuur 8-2). De vorm van het paviljoen is afgeleid van een catenoïde (Figuur 8-4). Door de positie en vorm van de twee cirkelvormige grenscurven aan te passen, lijkt de binnenkant van de catenoïde naar buiten gedraaid en is een architectonische ruimte ontworpen die zich aanpast aan de site (Figuur 8-4), vandaar de benaming *INSIDE/OUT pavilion*.



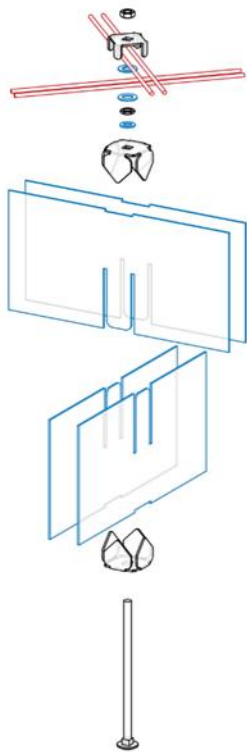
Figuur 8-2: Inplantingsplan (bron: Eike Schling)



Figuur 8-3: Bovenaanzicht paviljoen (bron: Felix Noe)



Figuur 8-4: De vorm is afgeleid van een catenoïde die is aangepast aan de vereisten van de locatie. De rode lijnen zijn de grenscurven en de zwarte lijnen zijn de kettinglijnkrommen van de catenoïde. (bron: Eike Schling)



Figuur 8-5: Opbouw van de verbindingen (bron: Eike Schling)

The Asymptotic Gridshell is de eerste gridshell die gebruik maakt van zogenaamde asymptotische curven op een minimaaloppervlak. [29] Deze termen (asymptotische curven en minimaaloppervlak) worden in paragraaf 8.2 verder uitgelegd. Het raster werd niet vrij ontworpen, maar met behulp van een zelf ontwikkeld algoritme kon de universiteit van München de asymptotische curven bepalen van dit minimaaloppervlak. Deze nieuwe constructietechniek zorgt voor een eenvoudig fabricage- en constructieproces. De lamellen van het raster werden vervaardigd als rechte elementen die tijdens het bouwproces elastisch werden gebogen. [29, 30]

De roosterstructuur is opgebouwd uit 1000 m roestvrijstalen lamellen van 1,5 mm dik en 100 mm breed. Het beslaat een oppervlakte van ca. 100 m² (ca. 9 x 12 m) en weegt slechts 18 kg / m², in totaal 16 ton. De constructie zelf is gebaseerd op zeer eenvoudige processen.

De structuur is ontubdeld en bestaat uit twee lagen lamellen. Deze werden aan elkaar bevestigd door middel van loodrechte sleuven die tot het midden van de elementen gaan (Figuur 8-5). Zo bevinden deze lamellen zich in hetzelfde vlak. De sleuven zijn dubbel zo breed als de dikte van de stalen elementen zodat rotatie mogelijk wordt tijdens de montage en het erectieproces van het raster. De constructie werd in negen segmenten opgebouwd. Elk segment werd eerst vlak gemonteerd en licht gebogen om vervolgens verder elastisch te verbuigen tot de gevraagde vorm. De verbinding werd vergrendeld door middel van twee stervormige ringen aan de boven- en onderkant van de knoop. Aan de hand van een extra kruisvormige klem werden de diagonale kabels verbonden aan de structuur

met behulp van een enkele bout- en moerverbinding (Figuur 8-5, Figuur 8-6). Door elk knooppunt op 90 graden te bevestigen en de extra kabelsteunen en randstroken toe te voegen, werd de vorm in zijn uiteindelijke geometrie verstijfd. [29] Eens de negen segmenten allemaal vast stonden in hun juiste geometrie, werden ze als een grote 3D puzzel aan elkaar bevestigd op de site. (Figuur 8-7)



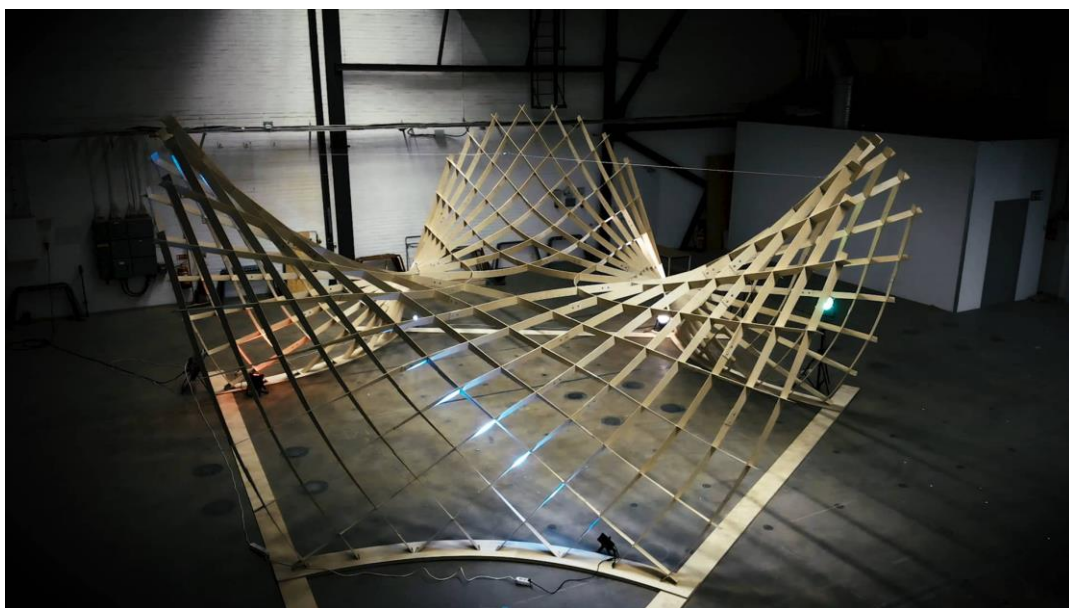
Figuur 8-6: Opbouw van de verbindingen (bron: Felix Noe)



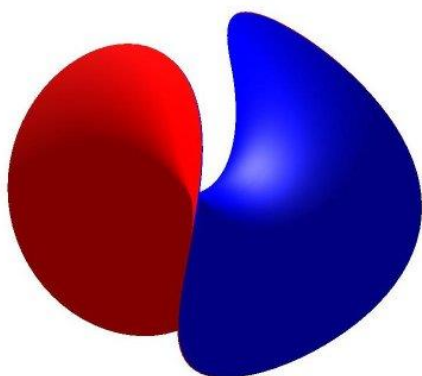
Figuur 8-7: Een van de negen segmenten tijdens de opbouw (bron: Felix Noe)

8.1.2 The Asymptotic Gridshell, TU Göteborg, Emil Adiels

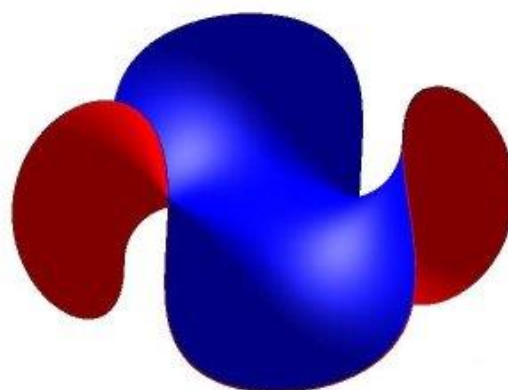
Een ander voorbeeld van deze constructietechniek is het paviljoen dat opgebouwd werd tijdens een workshop aan de Technische Universiteit Chalmers te Göteborg, Zweden. Onder leiding van Emil Adiels werd in 2018 een houten, asymptotische gridshell gebouwd samen met de studenten van de faculteit Architectuur en Ingenieurswetenschappen (Figuur 8-8). Er werd gebruikt gemaakt van multiplex elementen van 6 mm dik en 100 mm breed om dit paviljoen te bouwen. De vorm van het paviljoen bestaat uit een driedelig Enneper-opervlak (Figuur 8-9). Bij deze methode wordt het vlak raster elastisch gebogen om daarna bij het erectieproces opnieuw een rechte vorm te bekomen. Dit is een andere methode dan bij het voorgaande voorbeeld van Eike Schling, waar een vlak en licht gebogen raster verder elastisch gebogen wordt om de anticlastische vorm te bekomen. De gridshell van Emil Adiels werd bevestigd aan een grondplaat die als ringbalk dient. Een driedelige trekkabel zorgt ervoor dat de bovenste hoekpunten overeind blijven (Figuur 8-8).



Figuur 8-8: Asymptotic Gridshell (bron: Emil Adiels)



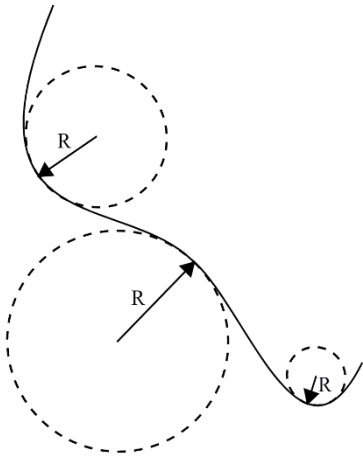
Figuur 8-9: Enneper-oppervlak (bron: Robert Ferréol)



Figuur 8-10: Driedelig Enneper-oppervlak (bron: Robert Ferréol)

8.2 Theorie

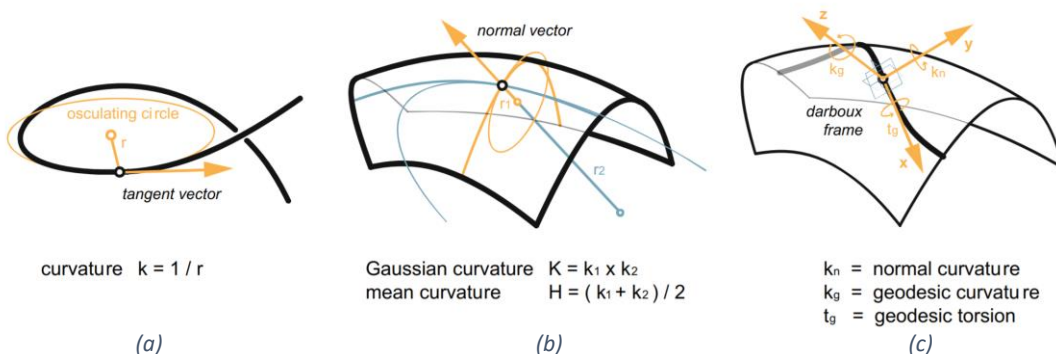
Om de werking van deze asymptotische gridshells te kunnen begrijpen moet er gekeken worden naar de kromming van de curve op oppervlakken.



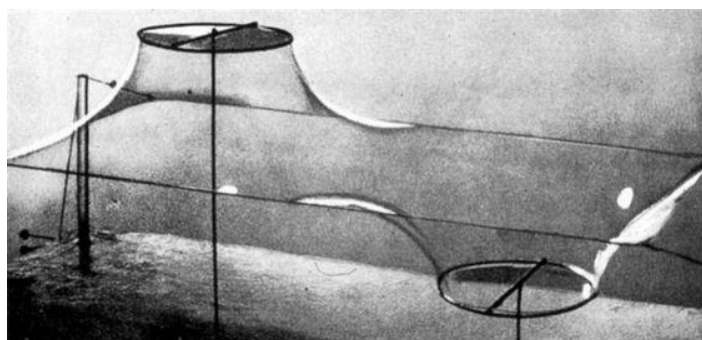
Figuur 8-11: Osculerende cirkels langs een vlakke kromme (bron: SARC)

De kromming k van een vlakke kromme is de inverse van zijn krommingsstraal r . Dit wordt gemeten op de osculerende cirkel van een willekeurig punt langs de curve (Figuur 8-11 en Figuur 8-12a). Een osculerende cirkel is de cirkel die in een gegeven punt van een vlakke kromme, de kromme het best benadert. De straal van deze cirkel is dan de krommingsstraal r van de kromme. Om de Gaussiaanse kromming G en gemiddelde kromming H van een oppervlak te kunnen bekomen, wordt er gekeken naar de twee hoofdkrommingen k_1 (oranje) en k_2 (blauw) (Figuur 8-12b). Deze zijn te vinden door middel van orthogonale vlakken die door de normaalvector van de vlakke kromme snijden. Eerder in paragraaf 2.2 werd besproken dat het oppervlak anticlastisch is als k_1 en k_2 tegengestelde oriëntaties hebben, dat wil zeggen dat hun osculerende cirkels aan weerszijden van het oppervlak liggen. Als k_1 en k_2 tegengestelde oriëntaties hebben en dezelfde absolute waarde, dan is de gemiddelde kromming nul.

Oppervlakken met een constante gemiddelde kromming van nul worden minimaaloppervlakken genoemd. Dit is een type van anticlastische oppervlakken dat kan gevonden worden in de natuur in de vorm van zeepmembranen. [31] Frei Otto maakte gebruik van schaalmodellen uit zeepmembraan, om zo het minimaaloppervlak te genereren (Figuur 8-13).



Figuur 8-12: Definities van de kromming (bron: Eike Schling)



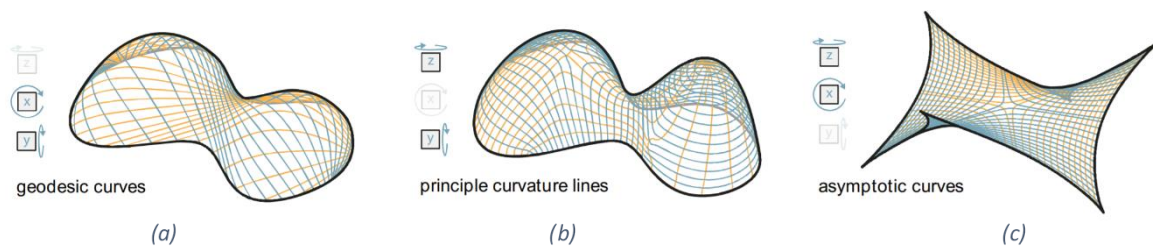
Figuur 8-13: Schaalmodel uit zeepmembraan (bron: Frei Otto)

Het meten van de kromming van een curve op een oppervlak gebeurt volgens het Darboux-frame (Figuur 8-12c). Dit coördinatiesysteem bestaat uit de normaalvector z , de raakvector x en de raak-normaalvector y . Bij het verplaatsen van het Darboux-frame langs de oppervlaktecure, kan de rotatiesnelheid rond alle drie de assen gemeten worden. Deze drie soorten kromming zijn de normaalkromming k_n (rotatie rond de raak-normaalvector y), de geodetische kromming k_g (rotatie rond de normaalvector z) en de geodetische torsie t_g (rotatie rond de raakvector x). [31]

Imagine an ant walking along a surface. To follow the implied line, the ant must either walk up or downhill to follow the normal curvature; it could turn left or right to follow the geodesic curvature; or it must turn around the axis of the line to be able to stand with its legs straight on the surface – this is called the geodesic torsion. (Tang, Kilian, Vo, Wallner, Pottmann, AAG 2016)

Een voorbeeld van een gridshell waar de drie krommingstypen gelijktijdig voorkomen is de *Mannheim Multihalle* van Frei Otto (paragraaf 3.1). Hier moeten de latten in alle richtingen worden gebogen. Het ontduddeld houten raster moet flexibel genoeg zijn om de buiging en torsie te kunnen doorstaan.

Als een van de drie krommingstypen (normaalkromming, geodetische kromming of geodetische torsie) wordt weggelaten, kunnen er specifieke lijnnetwerken gecreëerd worden, die elk op hun beurt doorslaggevende voordelen hebben voor de constructie van gebogen draagconstructies. [30]



Figuur 8-14: Geodetische krommen (a), hoofdkrommingen (b) en asymptotische krommen (c) (bron: Eike Schling)

Bij het weglaten van de geodetische kromming (rotatie rond de normaalvector z) bekomen we een raster van geodetische krommen (Figuur 8-14a). De vlakke elementen worden gebogen rond de raakvector x en de raak-normaalvector y maar niet rond de normaalvector z . [31]

Een verdwijnende geodetische torsie (rotatie rond de raakvector x) heeft een raster van hoofdkrommen als resultaat (Figuur 8-14b). Deze stroken worden gebogen rond de normaalvector z en de raak-normaalvector y maar niet rond de raakvector x . [31]

Voor dit onderzoek zijn de asymptotische krommen het meest interessant (Figuur 8-14c). Hier ontbreekt de normaalkromming (rotatie rond de raak-normaalvector y) en dit is enkel mogelijk bij anticlastische oppervlakken. Ze kunnen gevormd worden uit vlakke stroken, loodrecht op het oppervlak. Hierdoor worden de stroken enkel gebogen om hun zwakke as en belast om hun sterke as. Als het anticlastische oppervlak een minimaaloppervlak is, dan kruisen de elementen onder een hoek van 90 graden. [31] Dit zorgt voor een groot voordeel voor fabricage en materiaalefficiëntie.

Een ander voordeel van deze constructietechniek is de ingebouwde energie (*inbuilt energy*). De door actieve buiging ingebouwde spanningsenergie creëert een capaciteit om het erectieproces van de constructie te

ondersteunen. [32] Dit verschijnsel is duidelijk te zien bij het maquette-onderzoek van Emil Adiels. Hier maakt hij gebruik van stroken uit multiplex die volgens de asymptotische curven worden gemonteerd in een vlak raster. De stroken zijn voorzien van een sleuf ter hoogte van de knooppunten. Eens het raster compleet is zorgt de ingebouwde spanningsenergie ervoor dat de hyparschaal gevormd wordt (Figuur 8-15).

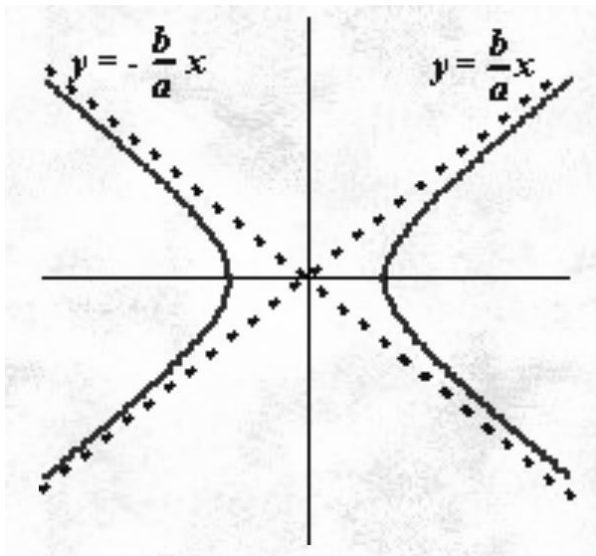


Figuur 8-15: Erectieproces asymptotische gridshell (bron: Emil Adiels)

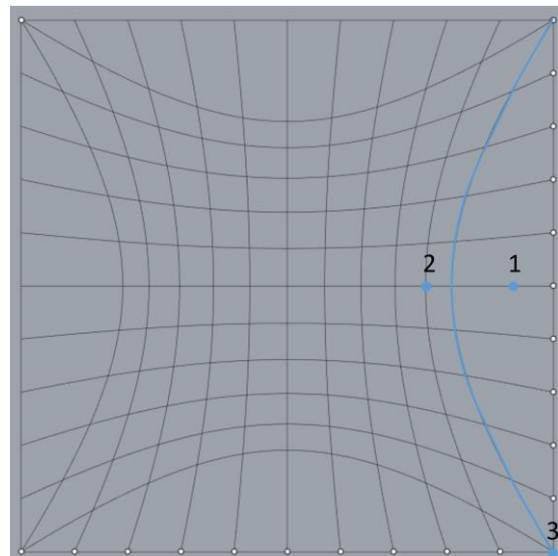
8.3 Maquette-onderzoek

8.3.1 Karton (doorsnede 1,5 x 15 mm)

Het ontwerpen van het eerste raster gebeurde met behulp van het computerprogramma *Rhino*. Het raster voor de testmaquettes bestaat uit hyperbolen in twee richtingen, loodrecht op elkaar. Deze komen tot stand door twee schuine asymptoten die elkaar kruisen (Figuur 8-16). De hyperbolen werden getekend in *Rhino* met eenzelfde focuspunt maar met een verschillend centrum en eindpunt (Figuur 8-17). Om de eindpunten van de hyperbolen te kunnen bepalen, werd de zijde van het vierkant verdeeld in tien gelijke delen. In het midden van het raster werden twee rechten voorzien die loodrecht op elkaar staan. Deze twee centrale rechten worden niet gebogen tijdens de montage van het latwerk. Hierdoor vormen deze rechten een basis bij het monteren van het latwerk en wordt de verdere montage van het latwerk vereenvoudigd.



Figuur 8-16: Hyperbool met de schuine asymptoten (bron: h.hofstede)



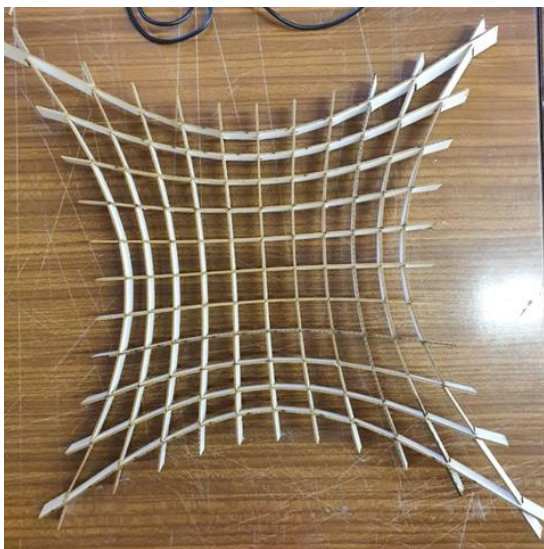
Figuur 8-17: Ontwerp van het raster in Rhino met aanduiding van het focuspunt (1), centrum (2) en eindpunt (3)

Bij het onderzoek werd er vastgesteld dat de materiaalkeuze belangrijk is. De eerste testmaquette bestaat uit gelasercut karton met latten van 1,5 mm dik en 15 mm breed en het volledig raster heeft een omtrek van 300 x 300 mm (Figuur 8-19). De knopen zijn voorzien van sleuven over de helft van de hoogte van het karton. Op deze manier kunnen de verschillende elementen aan elkaar bevestigd worden en liggen de latten in hetzelfde vlak. Doordat de sleuven de neutrale vezel onderbreken, zorgen ze voor een verzwakking van de sectie. Bij het maken van het raster werd vastgesteld dat op de plaats van de sleuven het karton bezweek en plooid (Figuur 8-18).

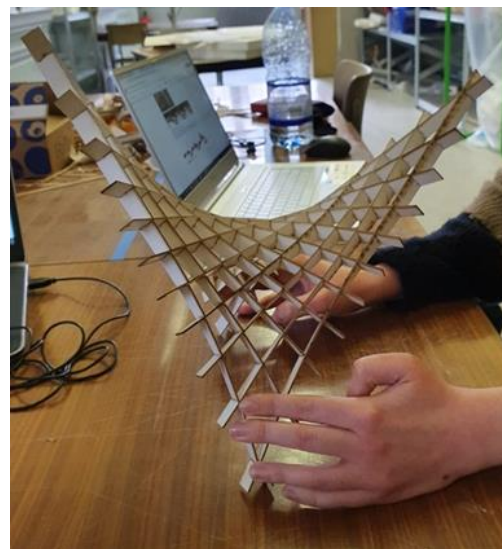


Figuur 8-18: Breuk ter hoogte van de sleuf in het karton

Als we het resultaat vergelijken met de voorgaande referentie (Figuur 8-15), zien we dat de capaciteit voor het erectieproces van het raster veel lager ligt. Bij de voorgaande referentie kon de hyparschaal gevormd worden zonder extra krachten uit te oefenen op het latwerk. De kartonnen maquette heeft deze capaciteit niet en het raster blijft vlak. Dit komt door verschillende factoren. Ten eerste is karton zeer buigzaam maar niet stijf genoeg om de ingebouwde energie te kunnen verwezenlijken. Ten tweede is het raster ook niet optimaal ontworpen om dit erectieproces te kunnen bekomen. De buitenste latten van het raster zijn niet voldoende gekromd om de ingebouwde energie te creëren. De latten in het midden zijn ook niet voor-gebogen en geven een grote weerstand tegen de vervorming van het raster. Door de twee hoekpunten naar elkaar te duwen kon de gevraagde vorm alsnog verkregen worden (Figuur 8-20). Daarbij werd vastgesteld dat de latten in het midden onderhevig zijn aan torsie als de onderste punten te dicht naar elkaar worden geduwd.



Figuur 8-19: Het raster van de kartonnen testmaquette



Figuur 8-20: De transformatie van het vlakke raster naar de hyparschaal

8.3.2 Multiplex (doorsnede 3,6 x 36 mm)

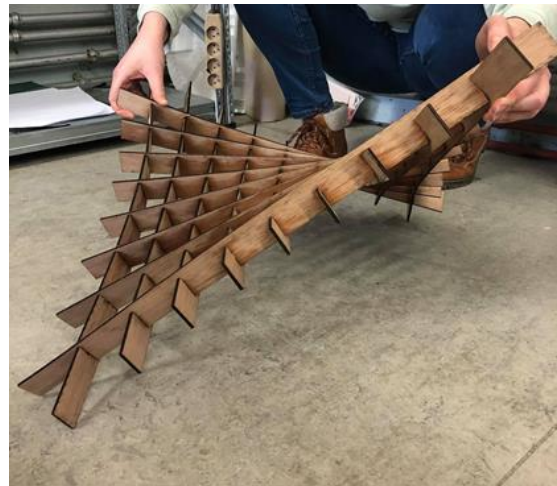
De tweede testmaquette bestaat uit multiplex stroken van 3,6 mm dik en 36 mm breed. Dit materiaal is stijver dan karton en dus minder buigzaam. De verbindingen zijn hetzelfde als bij de eerste maquette, namelijk met sleuven over de helft van de breedte. Hetzelfde raster werd gebruikt.

Bij het monteren van het latwerk verliep het buigen van de elementen zeer moeizaam. Hierdoor zaten niet alle latten in hetzelfde vlak maar zaten ze maar deels in de sleuf. Na het weken in warm water van de multiplex latten, waren de elementen meer buigzaam en kon het latwerk beter gemaakt worden (Figuur 8-21). Op sommige plaatsen, vooral bij de sterkst gekromde latten, was het onmogelijk de latten volledig te verbinden in de sleuf. Dit komt doordat het hout zich uitgezet had bij het weken en er geen speling was voorzien in de sleuven. Bij *The Asymptotic Gridshell* van Eike Schling (Figuur 8-5 p.99) werd er vastgesteld dat de breedte van de sleuf twee maal de dikte van de stalen elementen is. Deze speling is er om rotatie toe te staan. In de geteste multiplex maquette is de breedte van de sleuf gelijk aan de dikte van de multiplex, waardoor dus geen speling is toegelaten en de latten niet overal in passen.

De transformatie van het vlakke raster naar de hyparschaal verliep moeizaam. Dit had verschillende redenen. Een eerste reden is het feit dat het raster niet optimaal ontworpen was door een gebrek aan buiging van de buitenste latten. Ten tweede had het hout zijn ingebouwde spanningsenergie verloren doordat het nat was bij de montage. Ten derde waren de multiplex elementen ook zwaarder waardoor er meer spanningsenergie nodig was dan bij de kartonnen maquette. Ten slotte werd het raster verkeerd verschaald.



Figuur 8-21: Het raster van de multiplex testmaquette

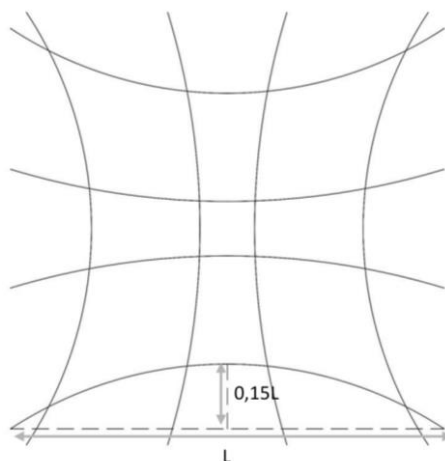


Figuur 8-22: De transformatie van het vlakke raster naar de hyparschaal

8.3.3 Vurenhout (doorsnede 7 x 27 mm)

Uit de vorige testmaquettes is vastgesteld dat karton en multiplex niet de juiste materialen zijn voor het construeren van een asymptotische gridshell. Karton is te buigzaam en multiplex is door zijn kruislingse verlijming te stijf. Naast de materiaalkeuze was de verbinding een uitdaging. De methode met de sleuf over de helft van de breedte is structureel gezien niet interessant vanwege de sterke verzwakking van de latten.

De volgende testmaquette bestaat uit massief hout (vurenhout) met een doorsnede van 7 x 27 mm en 2,70 m lang. Alvorens het raster werd ontworpen, werd eerst de maximale buiging van de latten onderzocht voordat breuk optrad. Dit werd getest door druk uit te oefenen op de beide uiteinden van de lat waardoor de lat om zijn zwakke as boog. Hier werd waargenomen dat de hoogte van de kromming 400 mm bedroeg. Dit komt op een maximale buiging van 15% (Figuur 8-23). Op basis van deze gegevens werd het raster opgesteld. De randlatten moesten het sterkst buigen (15%); de latten in het midden hoefden slechts minimaal te buigen. Voor deze test werden slechts acht latten gebruikt, waarvan vier randlatten en vier latten in het midden (Figuur 8-23). Op deze manier was het mogelijk het ontworpen raster, de houtsoort en de verbindingen snel en eenvoudig te testen. In een volgende maquette wordt dit raster volledig ontworpen en getest.



Figuur 8-23: Raster testmaquette met $L = 2,70\text{ m}$

De verbindingen moeten ervoor zorgen dat de latten gebogen kunnen blijven tijdens de montage van het raster. Eens het raster wordt vervormd naar de hyparschaal moeten de verbindingen een rotatiebeweging van de latten toestaan. Initieel werd gedacht om een ondiepe sleuf te voorzien in de latten. Bij deze latten was dit echter niet mogelijk omdat de breedte van de doorsnede (27 mm) te klein was. Als oplossing werden er per knooppunt twee paar nagels voorzien met een tussenafstand van 10 mm (Figuur 8-24). Hierdoor werden de latten vastgezet bij de montage van het raster (Figuur 8-25, Figuur 8-27). Tijdens het erectieproces hadden de latten de neiging om zich van elkaar te verwijderen en een neerwaartse of opwaartse beweging te maken ten opzicht van elkaar. Om de latten samen te houden werd er een extra enkelvoudige sjoerverbinding aangebracht (Figuur 8-26). Deze verbinding zorgde voor de nodige rotatiebeweging tijdens de vervorming van het latwerk.



Figuur 8-24: Nagels op de knooppunten



Figuur 8-25: Montage van het latwerk

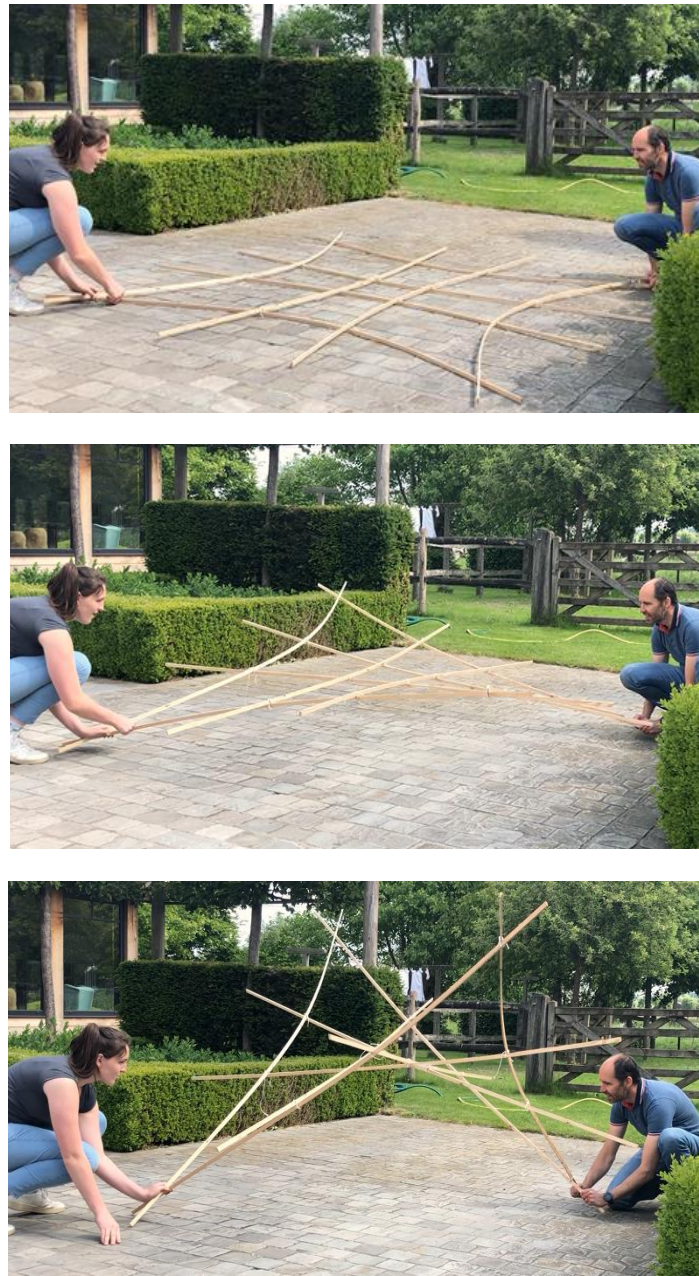


Figuur 8-26: Toevoeging van een eenvoudige sjoerverbinding



Figuur 8-27: Vlak latwerk voor het erectieproces

Het erectieproces verliep zoals gewenst. Bij het dichterbijbrengen van twee onderste diagonale hoekpunten werden de twee overige hoekpunten omhoog gedruwd door de ingebouwde spanning van de voor-gebogen latten (Figuur 8-28). De verbindingen zorgden ervoor dat de latten aan elkaar bevestigd bleven zonder de noodzakelijke rotatiebeweging van het latwerk tijdens het erectieproces te belemmeren. Eens de hyparschaal gevormd was, werd een touw tussen de twee steunpunten aangebracht. Deze trekker ving de kleine spatkrachten op die ontstonden ten gevolge van het doorzakken van de latten onder hun eigengewicht.



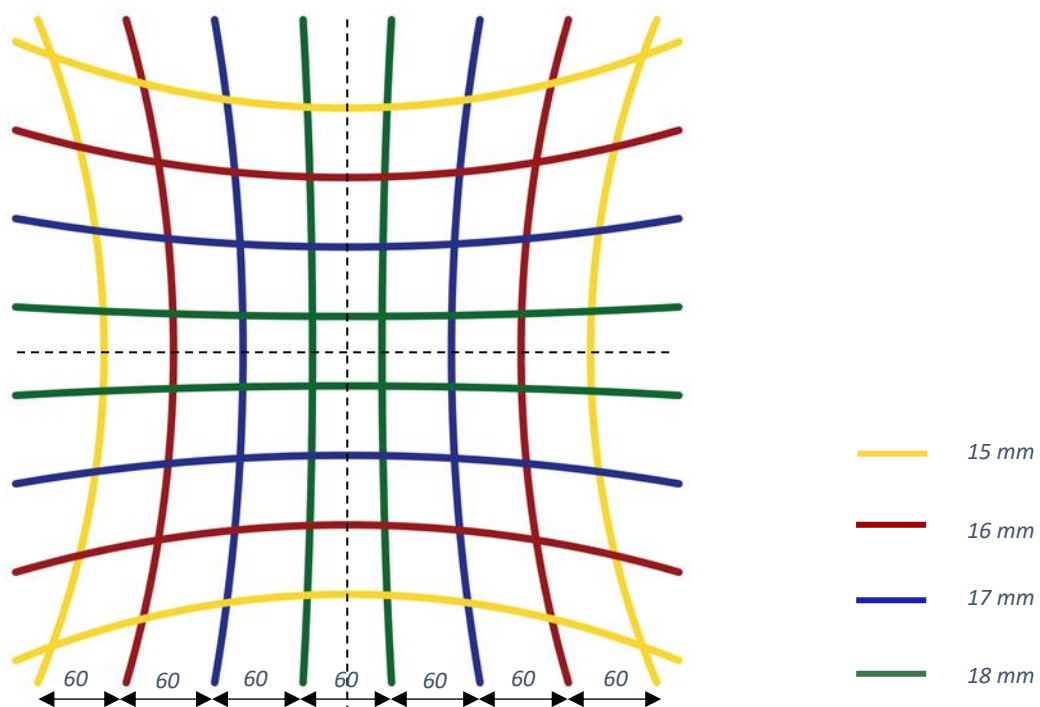
Figuur 8-28: Erectieproces van vlak latwerk naar hyparschaal

8.3.4 Noors dennenhout (doorsnede 22 x 45 mm)

Na de eerste test met massief hout werd de stap gemaakt naar stijvere latten met grotere doorsnedes. Hierdoor konden de nagels vervangen worden door een ondiepe sleuf en kon een hyparschaal gecreëerd worden die hoog genoeg is om onder te vertoeven.

Bij deze laatste maquette werden plafondlatten gebruikt. Dit is Noors dennenhout met een doorsnede van 22 x 45 mm en 4,50 m lang. De plafondlatten zijn stijver dan het vurenhout van de vorige testmaquette door de houtsoort en de grotere doorsnede van de latten. Het is belangrijk om een juiste doorsnede te vinden om zo de ideale stijfheid te kunnen verkrijgen in de latten. De latten moeten voldoende buiging toestaan om het asymptotisch raster te kunnen vormen, waaronder de doorsnede niet te groot mag zijn. Daarnaast moet er voldoende spanning gecreëerd worden in de latten voor een vlot erectieproces, waaronder de doorsnede ook niet te klein mag zijn.

Het Noors dennenhout was initieel te dik (22 mm) om voldoende buiging van de latten te verkrijgen. Daarom werd er beslist om de latten af te schaven naar een aanvaardbare dikte van 15 mm. Dezelfde test die ook bij de vorige maquette werd gedaan, om de maximalen buiging te onderzoeken, werd opnieuw toegepast. Hier werd waargenomen dat de hoogte van de kromming 450 mm bedroeg. Over een lengte van 4,50 m komt dit op een maximale buiging van 10%. Op basis van deze gegevens werd een raster getekend van 8 x 8 latten (Figuur 8-29). Het raster is gelijk verdeeld en de latten liggen aan de rand onderling 60 mm van elkaar (Figuur 8-29).



Figuur 8-29: Raster testmaquette

De buiging van de latten is recht evenredig met de positie ten opzichte van het midden van het raster. De buitenste latten liggen 210 mm van het midden van het raster en hebben een buiging van 10%. Bijgevolg zijn de latten die 150 mm van het midden liggen voor 7,14% gebogen. Deze berekening wordt weergegeven in onderstaande vergelijking. De buiging van de andere latten werd op dezelfde manier berekend. Deze gegevens worden voorgesteld in Tabel 8-1.

$$\frac{210 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} = \frac{10 \%}{x} \Rightarrow x = 7,14 \%$$

Positie ten opzichte van het midden van het raster (mm)	Buiging (%)	Dikte van de lat (mm)	Breedte van de lat (mm)	Lengte van de lat (m)
210	10	15	45	4,50
150	7,14	16	45	4,50
90	4,28	17	45	4,50
30	1,43	18	45	4,50

Tabel 8-1: Gegevens asymptotisch raster

Aangezien de latten naar binnen toe niet 10% moeten buigen, werd beslist om deze latten een dikkere doorsnede te geven dan de randlatten. Hierdoor bevatten deze latten meer ingebouwde spanning en kunnen deze meer bijdragen aan het erectieproces van het latwerk. Uiteindelijk hebben de buitenste latten een dikte van 15 mm. De latten naar het midden toe hebben een dikte van 16 mm, 17 mm en 18 mm (Figuur 8-29, Tabel 8-1). De latten hebben nog altijd dezelfde breedte van 45 mm en een lengte van 4,50 m.

De sleuven moeten breed genoeg zijn om het latwerk te monteren en de rotatiebeweging toe te staan. Uit de vorige testmaquettes werd vastgesteld dat de randlatten elkaar onder een scherpe hoek kruisen en dat een rechte sleuf niet voldoende is om de latten te verbinden. Daarom werden de sleuven voorzien in de vorm van een trapezium (Figuur 8-31). Deze sleuven zijn slechts 5 mm diep om de lat zo min mogelijk te verzwakken. Dat is minder diep dan de sleuven van de voorgaande kartonnen en multiplex testmaquettes waarbij de sleuf steeds tot in de helft van de doorsnede werd aangebracht.



Figuur 8-30: Uitbeitelen van de sleuven



Figuur 8-31: Sleuven

Nadat alle sleuven uitgebeiteld waren, werd het latwerk gemonteerd (Figuur 8-32, Figuur 8-34). De beste methode is om van binnenuit te beginnen met de minst gebogen latten en vervolgens naar buiten te werken om te eindigen met de vier randlatten die het sterkst gekromd waren. Een extra sjoorverbinding werd voorzien opdat de latten verbonden bleven tijdens de vervorming van het latwerk (Figuur 8-33). Hier werd gebruik gemaakt van een kruissjorring in plaats van een enkelvoudige sjoorverbinding. De kruissjorring vermijdt dat de hoge latten (45 mm) zouden kantelen.



Figuur 8-32: Montage van het latwerk



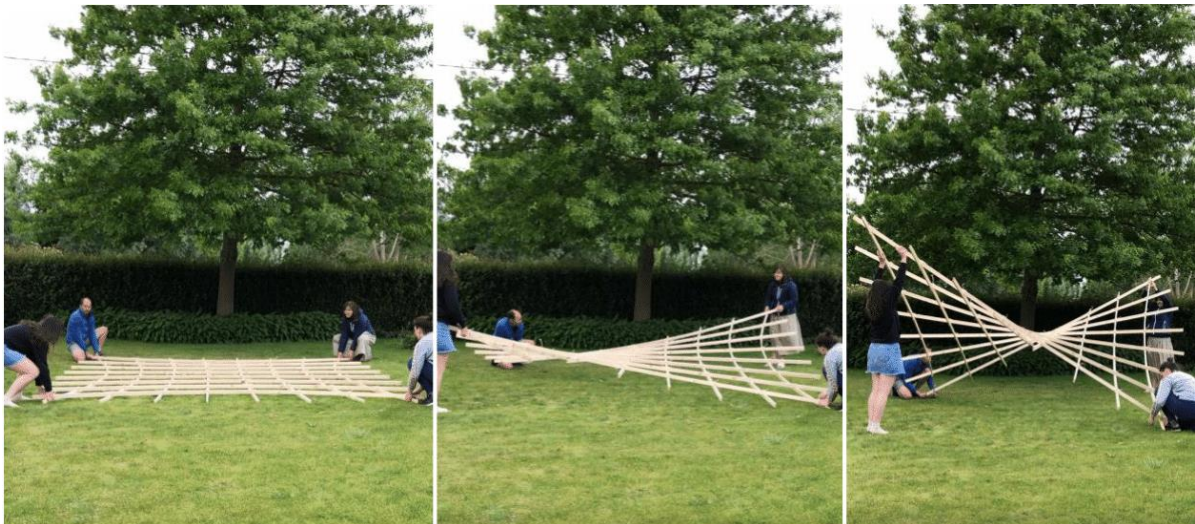
Figuur 8-33: Kruissjorring



Figuur 8-34: Vlak latwerk voor het erectieproces



Figuur 8-35: Houten piketpalen met spanvijzen



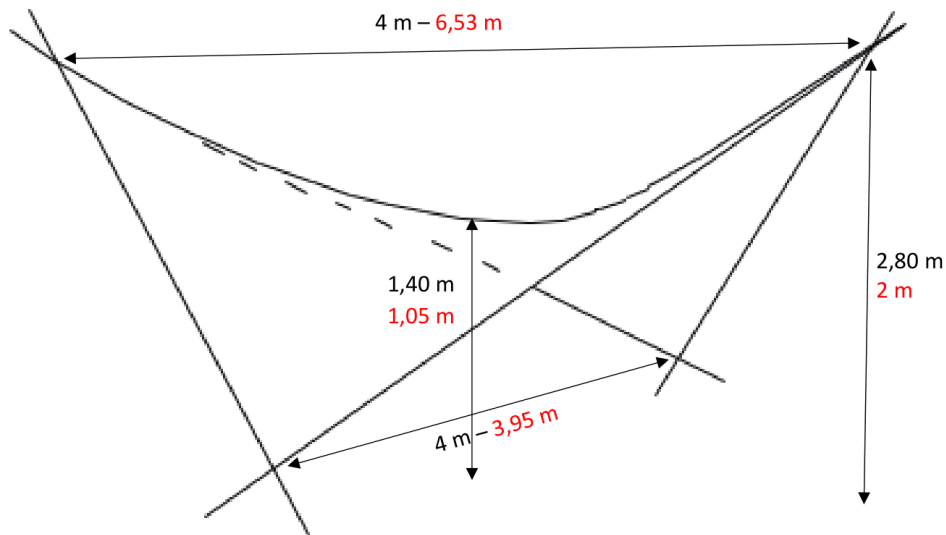
Figuur 8-36: Erectieproces van vlak latwerk naar hyparschaal

Opnieuw verliep het erectieproces zoals gewenst. Deze keer was het niet mogelijk om slechts met twee personen het latwerk te vervormen tot een hyparschaal. Door het eigengewicht van het houten latwerk moesten de twee toppunten naar omhoog geholpen worden (Figuur 8-36). Hiervoor was er echter geen grote kracht nodig, louter een lichte aandrijving naar boven was voldoende.

Door middel van spanvijzen werd de structuur bevestigd aan houten piketpalen die in de grond werden geslagen (Figuur 8-35). Dit werd tweemaal herhaald aan beide steunpunten. Deze verankering was nodig zodat de hyparschaal niet zou omkantelen en de vorm behouden bleef.

Theoretisch gezien, in een gewichtloze toestand, zouden alle latten terug volledig recht moeten zijn. In de praktijk zien we dat de buitenste latten nog een lichte buiging ondergaan (Figuur 8-43). Dit komt door het eigengewicht van de structuur. De latten zakken door de zwaartekracht naar beneden, waardoor vooral de buitenste latten terug buigen. Deze buigen omdat ze niet stijf genoeg zijn. Het gebruiken van stijvere latten is geen oplossing omdat deze de juiste buiging moet kunnen ondergaan bij het monteren van het vlak raster. Het toevoegen van een trekker tussen de twee bovenste punten zou deze neerwaartse beweging van de hoogste punten kunnen tegengaan.

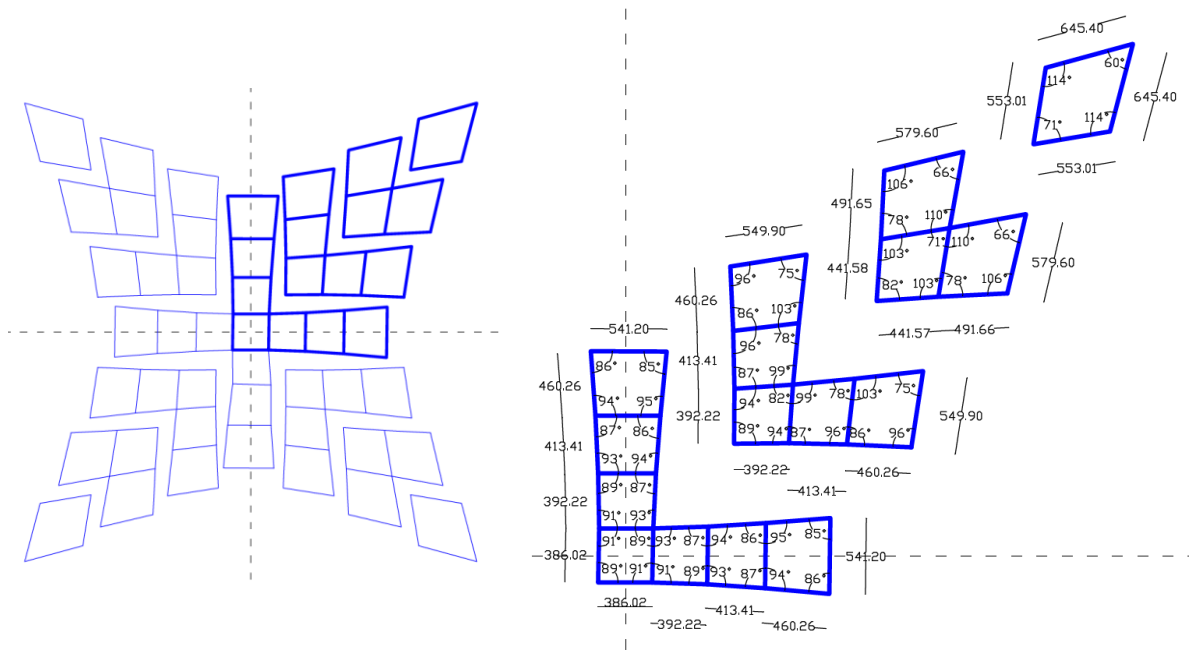
Wanneer de effectieve afmetingen opnieuw worden vergeleken met de theoretische waarden zien we inderdaad dat de toppunten lager liggen (Figuur 8-37). Daardoor is de effectieve hoogte van de toppunten 0,80 m lager dan de theoretische waarde. De afstand tussen de twee toppunten is hierdoor ook groter dan wat theoretisch verwacht werd. Bovendien zakt het centrale punt van de vallei 0,35 m tot een hoogte van 1,05 m.



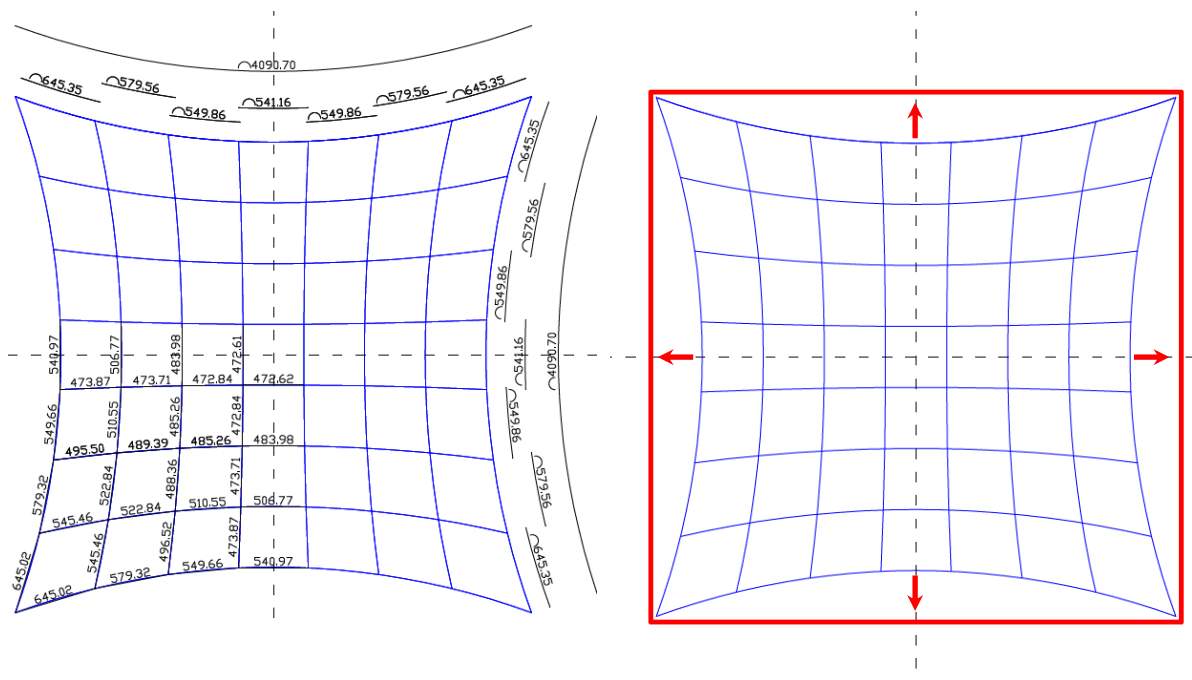
Figuur 8-37: Theoretische (zwart) en effectieve (rood) afmetingen van de maquette

8.4 Structurele analyse

Om het gedrag van het latwerk te verstaan, werd de hyparschaal met asymptotisch raster gesimuleerd in *Rhino* (Figuur 8-40), waarna het bekomen raster werd uitgevouwen met het programma *Pepakura*. Op deze manier werd vastgesteld dat het bekomen raster in theorie sterk aanleunt aan het raster van een regeloppervlak (Figuur 8-38). Het raster is opgebouwd uit vierhoeken die groter worden naar de randen toe. In theorie variëren de hoeken tussen 60 en 114 graden.

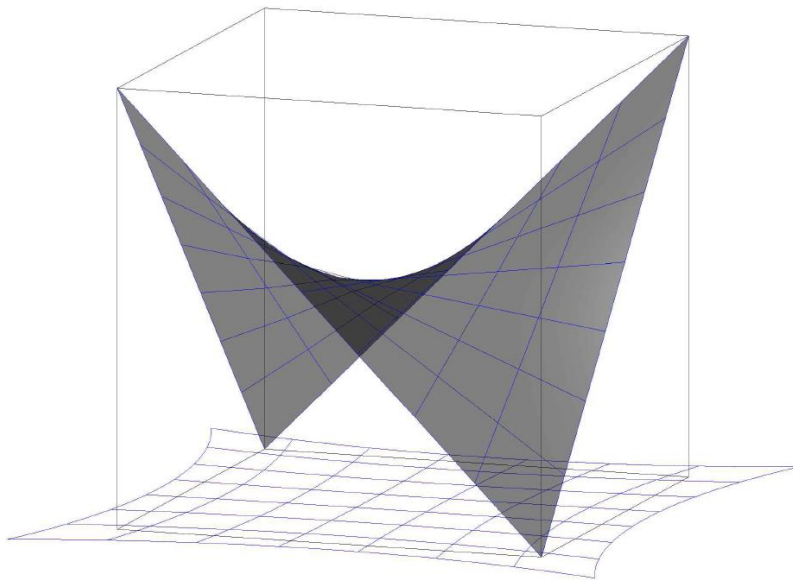


Figuur 8-38: Vervormde raster van hyparschaal

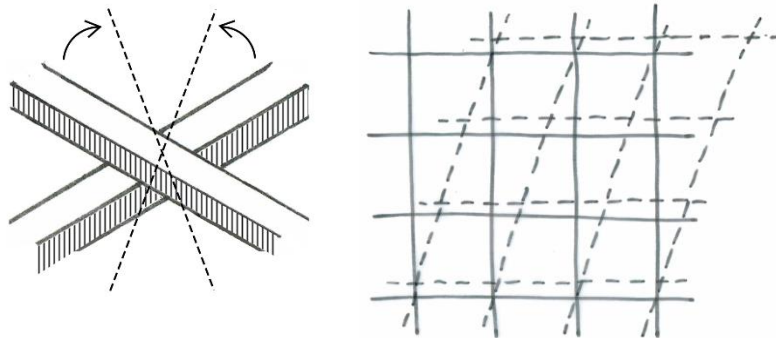


Figuur 8-39: Vervorming vlak asymptotisch raster

Doordat de elementen van het latwerk in vlakke toestand gebogen zijn, wordt er reeds rekening gehouden met de nodige vervorming van het latwerk tijdens het erectieproces. Dankzij de kromming van de elementen worden de latten rechtgetrokken waardoor de mazen vergroten en het latwerk uitzet naar de randen toe (Figuur 8-39). Op deze manier moet er geen rekening gehouden worden met een mogelijke translatiebeweging van het latwerk. Tijdens het erectieproces treedt er enkel een rotatiebeweging op (Figuur 8-41), die wordt toegelaten dankzij de brede maar ondiepe sleuven in de latten.

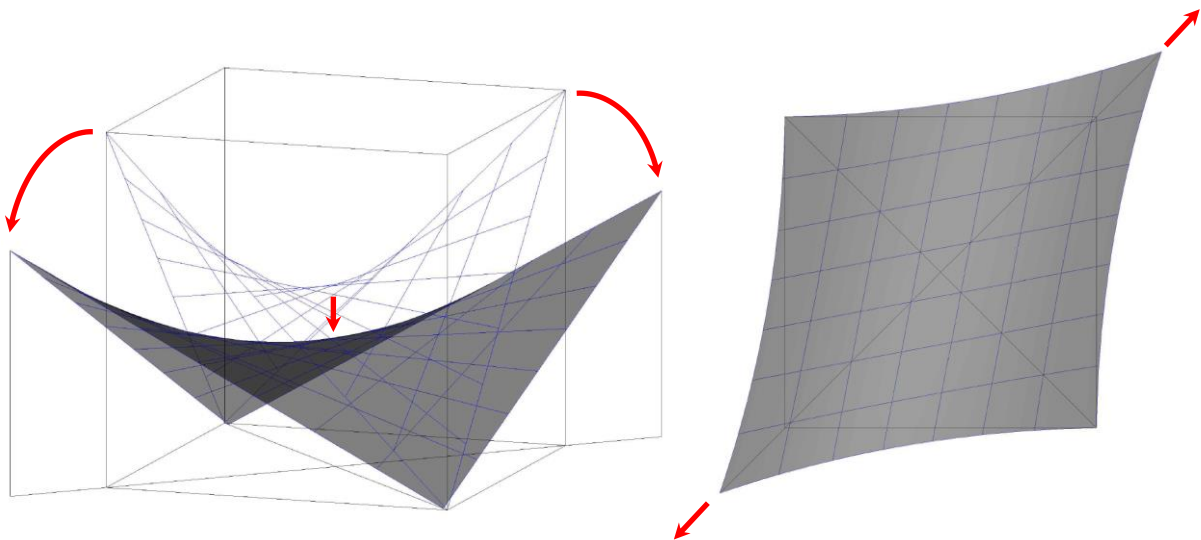


Figuur 8-40: Vervormde hyparschaal



Figuur 8-41: Rotatiebeweging latwerk

In theorie kan het raster op deze manier vervormen tot een regeloppervlak. In de praktijk zakt de hyparschaal door het eigengewicht, waardoor de latten een zekere buiging vertonen en worden de mazen kleiner (Figuur 8-42). Bijgevolg zullen ook de afmetingen van de hyparschaal na opmeting verschillen van de theoretische afmetingen. De hoogte van de toppunten ligt lager, de overspanning tussen de toppunten wordt groter, waardoor ook het centrale punt van de hypar, het laagste punt van de vallei, lager zal liggen.



Figuur 8-42: Zakken van hyparschaal door eigengewicht

8.5 Conclusie

Door te werken met een asymptotisch raster wordt er vanaf het begin rekening gehouden met de vervorming van het raster tot een hyperbol. Tijdens het erectieproces worden de gekromde latten rechtgetrokken waardoor een zuivere hyparschaal gevormd kan worden die sterk aanleunt bij een regeloppervlak. Hierbij moet er rekening gehouden worden met verschillende parameters. Ten eerste is de keuze van het materiaal van groot belang. De ingebouwde energie moet aanwezig zijn om het erectieproces te kunnen voltooien. Hiervoor is de houtsoort en de correcte doorsnede van de latten belangrijk. Ten tweede moet het raster correct ontworpen worden. De buitenste latten moeten genoeg spanning bevatten om het erectieproces te kunnen ondersteunen. Ten slotte zorgen de ondiepe sleuven in de latten voor de nodige rotatie van het latwerk tijdens het erectieproces. Eens deze parameters correct aanwezig zijn is het mogelijk om met een eenvoudig erectieproces een hyparschaal te vormen. De twee toppunten worden met weinig hulp omhoog gehesen door het dichterbijbrengen van de twee steunpunten. De structuur zakt echter door zijn eigengewicht. Dit kan opgelost worden met behulp van een trekker tussen de twee toppunten, een stijve ringbalk of door het aanspannen van de knooppuntverbindingen.



Figuur 8-43: Resultaat

9 Eindconclusie

Aan de hand van uitgebreid maquette-onderzoek werden drie verschillende methodes getest om een lowtech anticlastische gridshell te ontwikkelen uit massief hout en met beperkte middelen. Uit alle geteste methodes, bleek er één uitschieter te zijn die het doel van deze masterscriptie behaalde.

In hoofdstuk 6 werd de verworven kennis uit de besproken casestudies toegepast voor het ontwikkelen van een hyparschaal volgens de constructiemethodes van traditionele elastische gridshells. Hierbij werd gestart van een vlak raster met vierkante mazen waarvan de dimensies van de mazen behouden blijven tijdens het erectieproces. Om de stalen verbindingen te elimineren werden weef- en sjortechnieken onderzocht.

Bij de weeftechnieken werd vastgesteld dat de aangebrachte spanningen bij het verweven van het latwerk, het erectieproces sterk beïnvloedden. Bovendien werd het latwerk opgebouwd volgens een diagonaal raster, waardoor het latwerk uitwaaierte naar de randen toe en geen zuivere hyparschaal bekomen werd. Daarnaast zou de stijfheid van de structuur volledig afhankelijk zijn van de ringbalk, die bovendien niet op een lowtech manier vervaardigd zou kunnen worden en het doel niet bereikt kan worden.

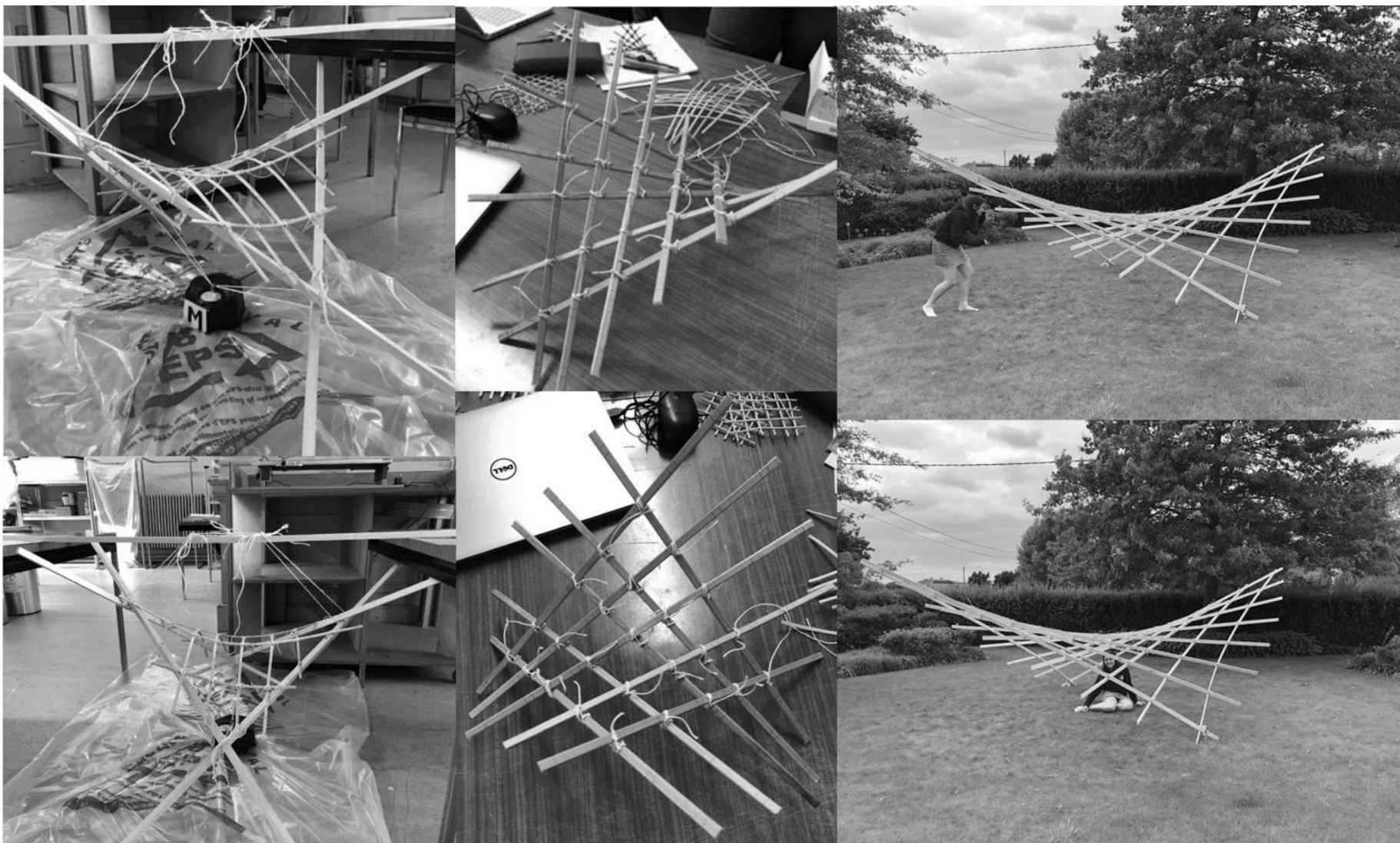
De methode van de traditionele elastische gridshells met vierkante mazen werd verder onderzocht door middel van sjoerverbindingen. Hierbij werd het raster 45 graden gedraaid, waardoor een afgevlakte hyparschaal verkregen werd waarbij het laagste punt van de vallei hoger kwam te liggen dan verwacht. Wanneer het latwerk tijdens het erectieproces bevestigd was aan de ringbalk, ontstond er knik in het latwerk doordat de nodige rotatie- en translatiebeweging van het latwerk belemmerd werden. Het vervormen van het latwerk zonder ringbalk zou echter een complexe infrastructuur vereisen die botste op het doel om met beperkte middelen een hyparschaal te ontwikkelen.

In hoofdstuk 7 werd een hyparschaal als een regeloppervlak onderzocht. Bij deze methode werd er gestart vanuit een vlak raster met vierkante mazen en losse sjoerverbindingen om de nodige rotatie- en translatiebeweging van het latwerk toe te staan. Hierdoor werd een hyparschaal verkregen die op zichzelf kon staan zonder bijkomende ringbalk of kolommen. Na bijstelling van het latwerk werd een gelijkzijdige hyparschaal bekomen waarvan de afmetingen grotendeels overeen kwamen met de theoretische waarden. Door op grotere schaal te werken, werd de controle over de vervorming van het latwerk verloren en viel het latwerk uiteen. Ook hier kan het doel niet bereikt worden.

Ten slotte werd in hoofdstuk 8 de derde constructiemethode getest van de asymptotische gridshells. Bij deze methode werd gestart vanuit een asymptotisch raster waarvan het latwerk rechtgetrokken wordt tijdens het erectieproces. Doordat de elementen uit het latwerk vooraf gebogen werden, was het latwerk tijdens het erectieproces louter onderhevig aan een rotatiebeweging. Hierdoor werd de controle over de vervorming van het latwerk behouden en werd een eenvoudig erectieproces gerealiseerd. Door het eigengewicht zakte de structuur, waardoor het laagste punt van de vallei lager kwam te liggen. Om dit te vermijden zou een ringbalk of trekkers aangebracht moeten worden wanneer het erectieproces is voltooid. Met de methode van de asymptotische gridshells werd een zuivere hyparschaal bekomen die sterk aanleunde bij een regeloppervlak en die op zichzelf kon blijven staan zonder ondersteund te worden door kolommen.

Er kan besloten worden dat het ontwikkelen van een lowtech gridshell met een anticlastische vorm uit massief hout mogelijk is, rekening houdend met tal van parameters. Uit het gehele onderzoek bleek de methode van de asymptotische gridshell de meest succesvolle manier te zijn om dit doel met beperkte middelen te bereiken. De hyparschaal bleef staan zonder kolommen als extra steunelement. Bovendien was het mogelijk om de hyparschaal binnen een beperkte tijdspanne te ontwikkelen met een beperkt budget, mankracht en infrastructuur. Tenslotte werd een overspanning van 4 m behaald en was het mogelijk om onder de hyparschaal te vertoeven.

In het algemeen kan gesteld worden dat gridshells lichtgewicht structuren zijn met zeer veel potentie. Doordat gridshells met een minimum aan materiaal zeer grote overspanningen kunnen overbruggen, zijn ze economisch zeer interessant. Met dit onderzoek is bewezen dat complexe stalen verbindingen niet altijd een must zijn bij gridshells. Asymptotische gridshells bieden een mogelijk toekomstperspectief voor de ontwikkeling van elastisch en regelmatig gebogen gridshells met een zuivere anticlastische vorm.



10 Bibliografie

- [1] L. Glaeser, *The work of Frei Otto*. New York: The Museum of Modern Art, 1972.
- [2] S. Chiu, "FORM FINDING - Frei Otto: Spanning the future," ed, 2016.
- [3] G. Vrachliotis, "Ein Denkmal der Experimentalkultur."
- [4] J. Rombouts, "Optimal design of gridshells," Doctor of Engineering Science, Faculty of Engineering Science, KU Leuven, Leuven, 2019.
- [5] P. Charest, P. Shepherd, R. Harris, A. Potvin, C. Dembers, and S. Ménard, "Patchwork Gridshells: using modularity to facilitate prefabrication and simplify construction," *Journal of IASS*, vol. 60, no. 201, 3, 2019.
- [6] K. Dunkelberg *et al.*, H. D. Siegfried Gass, Jürgen Hennicke, Ed. *Bambus: Bambus als Baustoff: Bauen mit pflanzlichen Stäben*. Stuttgart: Karl Krämer, 1985.
- [7] E. Happold and I. Liddell, "Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau," *The Structural Engineer*, vol. 53, no. 3, 1975.
- [8] IL, 13; *Multihalle Mannheim*. Stuttgart: Stuttgart Karl Krämer Verlag, 1979.
- [9] W. Nerdinger and F. Otto, *Frei Otto: Complete Works: Lightweight Construction, Natural Design*. Basel: Birkhäuser, 2005.
- [10] "Japanischer EXPO-Pavillon in Hannover," *Detail: Zeitschrift für Architektur + Baudetail*, vol. 40, no. 6, 2000.
- [11] M. McQuaid, *Shigeru Ban*. New York: Phaidon, 2003.
- [12] S. Ban, F. Otto, and H. Yoshimatsu, *Shigeru Ban: projects in process to Japanese Pavilion, Expo 2000 Hannover*. Tokio: TOTO Shuppan, 1999.
- [13] "Japanischer Pavillon Expo 2000 in Hannover," *Detail: Zeitschrift für Architektur + Baudetail*, vol. 40, no. 1, 2000.
- [14] "Shigeru Ban Architects: the Japan Pavilion," *a+u: Architecture and Urbanism*, vol. 9, no. 360, 2000.
- [15] "Downland Gridshell at the Weald and Downland Open Air Museum, Chichester," *AD: Architectural Design*, vol. 73, no. 1, 2003.
- [16] J. Chilton and G. Tang, *Timber gridshells : architecture, structure and craft*. London Routledge, Taylor & Francis Group, 2017.
- [17] M. Dickson and R. Harris, "The Downland gridshell: Innovative design in timber," *Ingenia*, no. 18, 2004.
- [18] O. Kelly, R. Harris, M. Dickson, and J. Rowe, "Construction of the Downland Gridshell," *Structural Engineer*, vol. 79, no. 17, 2001.
- [19] W. a. D. Museum. <https://www.wealddown.co.uk/buildings/downland-gridshell/> (Geraadpleegd op 19 maart 2020).
- [20] "Weald and Downland Museum bei Chichester," *Detail : Zeitschrift für Architektur + Baudetail*, vol. 41, no. 5, 2001.

- [21] R. Klaassen and E. de Munck, *Houtvademecum*. Zwolle Uitgeverij Vakbladen.com & Smartwave, 2018.
- [22] H. Heeffer, "Stoombuigen van hout voor constructieve toepassingen," Ingenieurswetenschappen en Architectuur, Universiteit Gent, Gent, 2011.
- [23] IL, 10; *Gitterschalen.- Grid shells*. Stuttgart: Berthold Burkhardt, 1974.
- [24] L. Van Maldeghem and A. Van Maldeghem, "Wiskunde en Architectuur: Cursus voor de vrije ruimte."
- [25] A. Iannacci, S. Yoh, and K. Kurokawa, *Shoei Yoh : in response to natural phenomena*. Milaan: l'Arca, 1997.
- [26] J. Bosmans, *Grote sjorconstructies: Leidraad bij grote sjorconstructies*. Antwerpen: Scouts en Gidsen Vlaanderen, 2014.
- [27] G. L. Findley, *Rope Works*. New York: Hermon, 1999.
- [28] L. Van Maldeghem and A. Van Maldeghem, "Wiskunde en Architectuur," in *Cursus voor de vrije ruimte*, ed, 2011.
- [29] E. Schling, "Repetitive Structures - Design and construction of curved support structures with repetitive parameters," Fakultät für Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Technische Universität München, München, 2018.
- [30] E. Schling. "Asymptotic Gridshell." Technische Universiteit München.
<https://eikeschling.com/2016/09/06/asymptotic-gridshell/> (Geraadpleegd op 28 maart 2020).
- [31] E. Schling, D. Hitrec, and R. Barthel, "Designing Grid Structures Using Asymptotic Curve Networks," presented at the Humanizing Digital Reality, Parijs, 2017.
- [32] E. Adiels *et al.*, "The design, fabrication and assembly of an asymptotic timber gridshell," presented at the FORM and FORCE, Barcelona, 2019.

