

Stoombuigen van hout voor constructieve toepassingen

Harold Heeffe

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Jan Belis

Begeleiders: Klaas De Rycke, ir. Didier Delince

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2010-2011



Stoombuigen van hout voor constructieve toepassingen

Harold Heeffe

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Jan Belis

Begeleiders: Klaas De Rycke, ir. Didier Delince

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2010-2011



DE TOELATING TOT BRUIKLEEN

De auteur geeft 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 beperkingen 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 author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

Zwijnaarde, januari 2011

Harold Heeffter

WOORD VOORAF

Het onderwerp van deze thesis is niet alledaags. Tijdens de opleiding burgerlijk ingenieur bouwkunde wordt er veel aandacht geschonken aan bouwmaterialen en constructiemethoden die goedkoop en efficiënt zijn. Zo hebben we een grote kennis over beton en staal opgebouwd, maar zijn andere materialen zoals hout nauwelijks besproken. Omdat hout een door weinig studenten gekend uniek mechanisch gedrag heeft, kan deze scriptie als grote meerwaarde beschouwd worden voor mijn opleiding als burgerlijk ingenieur.

Een tweede reden waarom het onderwerp van deze thesis in het oog springt, is dat er gewerkt wordt met gekromde elementen. Vaak wordt bij het ontwerp van een gebouw enkel met rechte en vlakke elementen gewerkt waardoor vaak op esthetisch vlak tekort wordt geschoten. Aangezien er bij dit onderwerp uitgegaan wordt van enkel gekromde lijnen ben ik ook op het gebied van geometrie verplicht het traditionele te verlaten.

In de eerste plaats wil ik Prof. dr. ir.-arch Jan Belis bedanken het beschikbaar stellen van het onderwerp en vervolgens de ondersteuning en begeleiding bij het uitwerken van deze masterscriptie. Verder wil ik Piet Dekeyser en Prof. Dr. Ir. Joris Van Acker van het Laboratorium voor Houttechnologie van de faculteit Bio-ingenieurswetenschappen bedanken voor de uitleg en het gebruik van hun laboratorium. Tenslotte wil ik Dennis Elias en Eric Vonk, technisch personeel van het Laboratorium voor Modelonderzoek, en Michel Willaert bedanken voor hun ondersteuning bij de technische details en hulp bij het uitwerken van het schaalmodel.

Harold Heeffter

Melle, 5 januari 2011

Stoombuigen van hout voor constructieve toepassingen

Door
Harold Heeffter

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2010 – 2011

Promotor: Prof. dr. ir.-arch Jan Belis
Begeleiders: Klaas De Rycke, ir. Didier Delincé

Faculteit Ingenieurswetenschappen
Universiteit Gent
Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: Prof. dr. ir. L. Taerwe

SAMENVATTING

Deze masterproef start met een gedetailleerde literatuurstudie over de structuur van hout en het gedrag ervan onder wisselende temperatuur en vochtgehalte. Voorts wordt onderzocht welke parameters een invloed hebben op het proces van het stoombuigen van hout. Deze parameters worden in de praktijk getest bij het buigen van hout op cirkelvormige mallen op beuken en eiken proefstukken.

Een tweede luik van de thesis is het onderzoek naar praktische implementatie van gebogen houten balken. Als model is gekozen voor een hyparschaal, die door middel van doorsnijdingen met goed gekozen vlakken beschreven wordt door parabolen. Vervolgens wordt een schaalmodel gemaakt met kleine afmetingen. Tenslotte worden enkele opmerkingen opgesomd die problemen kunnen opleveren bij een vergroting van de schaal.

TREFWOORDEN

Hout, stoombuigen, hypar, schaalmodel

Steam-bending of wood for construction purposes

Harold Heeffter

Supervisor: Prof Dr. Ir.-Arch Jan Belis

Abstract - This article starts with an overview of the mechanics of wood during the process of steam-bending. After discussing the main results of a parametric study on the Thonet method of steam-bending wood, this article finishes with an example of a practical implementation in the form of a scale model.

Keywords – Wood, Steam-Bending, Hypar, Scale Model

I. INTRODUCTION

Wood has been one of the key construction materials through the ages. Even in times where concrete and steel are engineer's favorites, wood is still indispensable in modern architecture.

Unlike steel or even concrete, wood is a very anisotropic material which reacts remarkably under the effect of moisture and water. This specific behavior is unique to wood but is little known since wood as a construction material is rarely taught in engineering courses.

Another aspect that receives little attention in engineering studies is the use of curved elements. Linear elements, such as beams and columns, are easy to build with and very cost-effective. However, in certain cases, the use of curved elements is, in addition to an esthetic improvement, the most efficient way to disperse forces and therefore sometimes the most economical solution.

II. WOOD IN DETAIL

A. Anisotropy of Wood

Due to the fact that wood is grown, it has a remarkable –yet complicated- microstructure. Dinwoodie simplifies the structure of wood as cells, primarily constructed from cellulose, embedded in a matrix that is constructed from lignin and hemicelluloses [1].

B. Wood and Moisture

One of the biggest problems in working with wood is that it is in constant contact with its environment by exchanging moisture. During this process, wood will continuously swell and shrink and as a result change dimensions. Moisture contents will also be found to be a vital parameter to the process of steam-bending.

C. Wood and Temperature

Like all materials, wood becomes more plastic and loses strength when heated. When wood is heated to a temperature of more than approximately 100°C, or when it is kept at a high temperature for a long period of time, the loss of strength becomes permanent. This is caused by the thermal decay that occurs when the cellulose molecules shorten and the chemical changes in the hemicelluloses. The reversible effects are

nothing more than an increased molecular movement and bigger crystal lattice.

III. THONET'S METHOD OF STEAM-BENDING

The technique of creating curved elements of wood originally started with cutting curved shapes from large blocks of wood. This method does not only waste a lot of wood and cannot be used for creating large elements, it works against the wood. As wood is very anisotropic and strongest along the grain, cutting it in shape will create sections where large forces will be exerted on weak directions of the wood. By bending wood, the angle of the grain changes and can be maintained along the longitudinal axis of the element which significantly increases the strength of the bent beam.

Wood Bending	Laminated Bending		
	Solid Wood Bending	Kerfing	
		Bending process using a chemical treatment	Ammonia treatment Alkali treatment
		Compression bending	
		Cold bending	
	Hot bending	Internal heating (microwave heating)	
		External bending	Direct heating method Hot plate method Boiling method
			Steaming method
			High pressure method Low pressure method

Figure 1: Classification of bending techniques [2]

The bending tests are performed by the steam-bending method first used by the famous furniture maker Michael Thonet in the early 20th century. He discovered that pre-treating the wood with heat enabled him to make large curvatures. For this he used non-pressurized steam. He was also one of the first to use tension straps which enabled him to bend wood with a minimum of tension in the wood. Since heated wood can be compressed up to 25% and only lengthened with 1.5%, radii of curvature of as little as 5cm can be reached for wood of 2cm thickness with the use of a bending strap. Without the use of a strap the minimum bending radius would be around 24cm [3].

IV. PARAMETERS AFFECTING THE STEAM-BENDING PROCESS

Since all samples are smaller than 110cm, a fairly small and simple oven can be used for steaming the wood. A hollow pipe with one lockable end and an entry hole for the steam, connected to a little steam generator, was used. The same mold was used for all tests: a circle segment of 90° with a radius of 10 cm.

A. Wood types

Since very high stresses are exerted on the wood, small defects in the wood can disrupt the entire bending process. Therefore, the highest quality standard is used to grade the

H. Heeffter is with the Civil Engineering Department, Ghent University (UGent), Gent, Belgium. E-mail: Harold.Heeffter@UGent.be .

wood before bending. The process of selecting the stock is described in the European Standard EN 975-1 [4].

Softwood and tropic wood do not bend well. Therefore all tests were performed on beech and oak. Because beech is prone to pressure faults on the concave side when the wood is not moist enough, oak was chosen for the scale model. The higher forces that are needed to bend oak are of no issue for the scale model since it is constructed from thin laths.

B. Moisture contents

Unlike the general assumption that steam is used to add moisture to the wood, it is only used to prevent it from drying out. Since it is vital that the wood contains enough moisture during bending, this means that the moisture already needs to be present before steaming. Tests were performed on oven dried wood and on the similar wood, soaked in water for a night.

Regardless of the duration of steaming or fixation in the mold or even the type of wood, all the dry wood sprung back with about 10° after a few weeks. On the other hand, the wet wood, which had a moisture contents of around 60%, would not spring back at all if it was allowed to set and dry long enough.

C. Other parameters

After testing the effects of duration of steaming, the conclusion is that steaming the stock for a period of 2 minutes per millimeter of thickness is the ideal time. More will unnecessarily weaken the wood, less and it will not be plastic enough.

The setting of a band is vital for it to stay permanent. For wet wood, the cooling of the wood is not enough. It needs to be dried in an oven for a few days until it reaches a moisture contents of approximately 25%. During this time, the sample needs to be kept in shape.

V. SCALE EFFECTS

Since no tests were performed on samples with dimensions needed for practical use, a theoretical study needs to be performed to predict the problems that will arise with the actual use of Thonet's method of steam-bending for construction purposes.

Almost anything can be made larger: the samples, molds and oven. However, finding wood of large dimensions without defects can be a challenge. Since the forces that will need to be imposed on the wood will be too big for manual bending, presses or jacks will be required which might slow down the process and give the wood a chance to cool even before it is bent.

For most practical uses of wooden beams, the height is larger than its width. This was never the case in the tests and will cause the beams to tilt during bending. To avoid this, complicated molds need to be built and side pressure needs to be exerted on the wood, possibly slowing the process down.

Even though there is no question about the steaming time of 2 minutes per millimeter thickness with small dimensions, this does not apply for thick beams. The thicker the wood, the slower it will warm up per millimeter of thickness. The right steaming period will certainly be longer than 2 min/mm and can only be found out by tests. Very long steaming periods can significantly weaken the wood and possibly dry out the outer wood before the inner wood has reached a temperature of 100°C.

VI. SCALE MODEL

A. Hyperbolic paraboloid

The *hypar* or hyperbolic paraboloid is a shape often used in construction because of the specific way it transfers forces when it is created as a ruled surface. Since this method would implicate the use of linear elements, a different method of generating the surface is chosen. With the use of pyFormex, a finite element program, a series of sequences lead to a form described by 7 different parabolas and a double hyperbola on the ground surface.

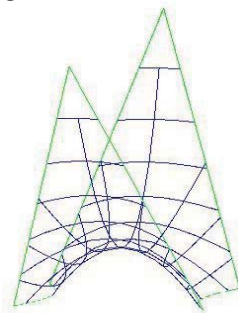


Figure 2: Form based on hypar

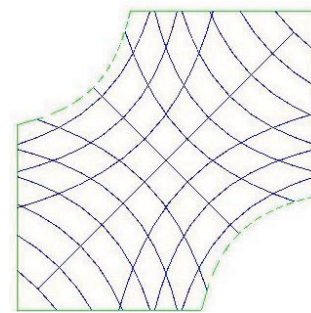


Figure 3: Vertical projection

The main difference with this surface and the more traditional hypar surface described as shifted, parallel and equal parabolas is the way they connect. With this method, the connections can be performed in a single plane, making the junctions a lot easier.

B. Practical implementation

Apart from the nodes connecting the edges, no difficulties were discovered while constructing a scale model.

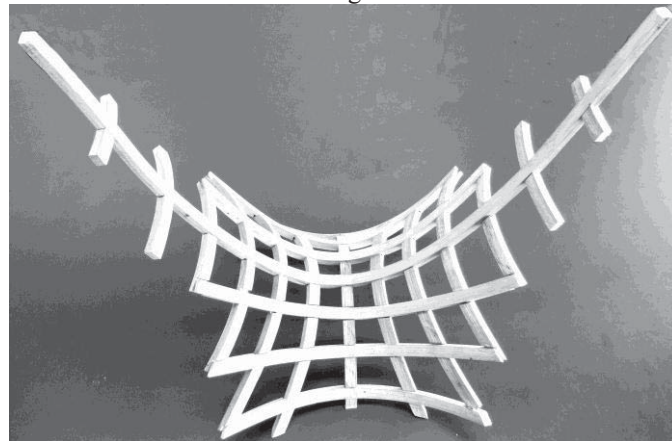


Figure 4: Scale model

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank Prof. Dr. Ir-Arch Jan Belis for the provision of this subject and his guidance.

REFERENCES

- [1] Dinwoodie, J. M. *Timber, Its nature and behaviour*. London and New York : E & FN Spon, 2000.
- [2] Katsuragi, Kohji. *The wood bending*. Japan: Furniture Maker Tai-Workshop, 2002.
- [3] Stevens, W. C. en Turner, N. *Wood Bending Handbook*. London: Her Majesty's Stationery Officer, 1970.
- [4] NBN EN 975-1. *Sawn Timber – Appearance grading of hardwoods – Part 1: Oak and Beach*. Brussels: Belgian institute for normalization, 1996.

INHOUDSTAFEL

1	INLEIDING	1
2	HOUT ALGEMEEN	2
2.1	De Cel en de Chemische Samenstelling van het Hout	2
2.2	Celweefsels	4
2.3	Groeiprocessen in het hout.....	5
2.3.1	Primaire en Secundaire Groei	5
2.3.2	Verkerning.....	6
2.3.3	Reactiehout	7
2.4	Vocht en Hout.....	8
2.4.1	Volumegewicht	8
2.4.2	Vochtgehalte	9
2.4.3	Vezelvezadigingspunt	9
2.4.4	Evenwichtsvochtgehalte	10
2.4.5	Krimp en Zwel: Werken van Hout	11
2.5	Mechanica van Hout.....	16
2.5.1	Vervormingen.....	17
2.5.2	Sterkte-Eigenschappen	20
2.5.3	Invloedsfactoren	24
2.5.4	Berekeningen	30
3	BUIGPROCESSEN VAN HOUT	32
3.1	Gelamineerd buigen	33
3.2	Buigen van massieve delen	34
3.3	Stoombuigen	34
3.3.1	Inleiding.....	34
3.3.2	Selecteren van het hout.....	35
3.3.3	Verweken van het hout.....	35
3.3.4	Spanningen in het hout.....	36
3.3.5	Buigtechnieken.....	38
3.3.6	Drogen en zetten van de kromming	40

3.3.7	Effect van het stomen op de eigenschappen van hout	41
4	PROEVEN.....	43
4.1	Doel.....	43
4.2	Proefopstelling	43
4.3	Het Hout	44
4.4	Parameters	46
4.4.1	Vochtgehalte	46
4.4.2	Optimale stoomtijd	47
4.4.3	Kromming.....	47
4.4.4	Droogtijd en droogcondities	47
4.4.5	Houtsoort	47
4.5	Hoe proeven evalueren?	47
4.6	Effect van het stomen op het vochtgehalte	48
4.7	Resultaten.....	50
4.7.1	Vochtgehalte	50
4.7.2	Stoomtijd.....	51
4.7.3	Droogtijd en droogcondities	51
4.7.4	Buigeigenschappen volgens houtsoort.....	54
4.8	Opmerkingen.....	55
4.8.1	Tijdsdruk.....	55
4.8.2	Rekken in het hout.....	55
4.8.3	Ongewenste rekken in het hout	57
4.8.4	Eigenspanningen in het hout	61
5	SCHAALMODEL.....	62
5.1	Hyparschalen	62
5.2	Genereren van de vorm: pyFormex	63
5.3	Verklaring van de gekozen vorm	66
5.4	Uitwerking van de vorm	68
5.5	Praktische uitvoering.....	71
6	TOEPASSING IN DE PRAKTIJK	73

6.1	Effect van schaalvergroting	73
6.2	Algemeen.....	74
7	APPENDICES	76
7.1	Appendix A	76
7.2	Appendix B.....	77
7.2.1	Bepaling van k' in functie van k	77
7.2.2	Bepaling maximale kromming.....	77
7.2.3	Bepaling booglengte van de parabool	78
7.3	Appendix C.....	79
7.4	Appendix D	82
8	BIBLIOGRAFIE	83
9	LIJST VAN FIGUREN.....	85
10	LIJST VAN TABELLEN.....	88

1 INLEIDING

Aangezien hout niet in grote mate aan bod is gekomen in de opleiding burgerlijk ingenieur is het in eerste instantie de bedoeling een grondig onderzoek te doen naar de opbouw en structuur van hout. In hoofdstuk 2 wordt de structuur van het hout geanalyseerd. Om het anisotroop en sterk hygroscopisch gedrag van hout te begrijpen is het nodig om te kijken hoe de cellen en weefsels tot stand komen in de groei van de boom. Er wordt ook in detail gekeken hoe hout zich gedraagt bij wijzigend vochtgehalte en temperatuur omdat deze van vitaal belang zijn bij het stoombuigen van hout.

In hoofdstuk 3 wordt het proces van buigen van hout volgens de methode van Thonet geplaatst tussen andere buigtechnieken. De verschillende manieren van stoombuigen worden uitgelegd waarbij telkens de wijze van het selecteren en verweken van hout worden geanalyseerd. Ook worden de spanningen en rekken in het hout tijdens het buigen onderzocht. Na het belang van goede droogcondities te hebben benadrukt, wordt het effect van het stoombuigen op de sterkte van het hout na drogen geanalyseerd.

De proeven worden aangevat in hoofdstuk 4. Hier wordt grote aandacht besteed aan de proefopstelling en het hout. Er wordt uitgelegd welke parameters onderzocht worden, waarom, en welk gedrag verwacht kan worden. Na voorop te stellen hoe succes van de proeven geëvalueerd kan worden, wordt het effect van het stomen op het vochtgehalte beschreven aan de hand van het stomen van blokjes hout met verschillende stoomtijden. Bij het tonen van de resultaten van de proeven wordt telkens één parameter geïsoleerd. Tenslotte worden in hoofdstuk 4 enkele opmerkingen gegroepeerd. Deze opmerkingen horen niet thuis bij één bepaalde parameter maar zijn toch van groot belang bij het verstaan van het proces van het stoombuigen.

In het vijfde hoofdstuk moet een vorm gekozen worden die dienst zal doen als schaalmodel. Er is gekozen door een vorm die gebaseerd is op een hyparschaal. Net omdat deze vorm beschreven kan worden door rechten loont het de moeite om het te doen met behulp van parabolen. Dit wordt gedaan door middel van pyFormex en wordt stap voor stap uitgelegd. Omdat er veel aandacht geschonken is aan bepaalde details is een praktische uitvoering mogelijk.

In het laatste hoofdstuk wordt kort nagegaan wat de mogelijke problemen zijn bij een toepassing van het systeem van stoombuigen voor reële toepassingen. Problemen die niet aan bod kwamen bij de techniek toegepast op kleine schaal worden voorspeld en, indien mogelijk, wordt ook een oplossing voorgesteld.

2 HOUT ALGEMEEN

2.1 DE CEL EN DE CHEMISCHE SAMENSTELLING VAN HET HOUT

Veel eigenschappen en gebreken van hout gaan terug op de microscopische samenstelling van hout. Dat is immers een anisotroop materiaal voornamelijk opgebouwd uit drie componenten: cellulose, hemicellulose en lignine. In dit deel zal dieper ingegaan worden op elk van deze componenten en de manier waarop zij de houtcel zullen vormen.

Voordat de structuur van de houtcel wordt ontleed, worden eerst de 'bouwmaterialen' besproken. De hoofdcomponent is cellulose: iets minder dan de helft van gedroogd hout bestaat hieruit.¹ Dit organische polymeer is een van de meest voorkomende stoffen in planten. Overall waar het voorkomt neemt het de vorm aan van microfibrillen, hetgeen min of meer parallel gegroepeerde moleculen van cellulose zijn. Een voorbeeld van bijna zuivere cellulosevezels is katoen. In hout echter treedt het steeds op samen met hemicellulose, wat ongeveer een kwart van het hout vormt. Hemicellulose is een verzamelnaam voor verschillende polysacchariden die net zoals cellulose voornamelijk lineaire macromoleculen zijn, maar dan veel kleiner: ze bevatten slechts 150 tot 200 suikergroepen. De laatste hoofdcomponent van hout is lignine: dit is een driedimensionaal polymeer dat instaat voor het laatste kwart van het hout. In tegenstelling tot cellulose en hemicellulose heeft lignine geen vaste chemische structuur, wat de beschrijving ervan vrij moeilijk maakt. De hoofdeigenschap en ook functie bij de vorming van het hout van lignine is steeds het verharden van de structuur.

De houtcel is de bouwsteen van het hout. Op zich bezit ze geen structurele functie, maar cellen met gelijke vorm of functie kunnen samenkomen tot weefsels zoals meristemen, steunweefsel, transportweefsel, ... die wel structuren vormen die het mechanische gedrag van hout bepalen. De cel wordt vaak opgesplitst in twee delen: de levende en levenloze.

De levende delen zijn de celinhoud of protoplast, dat bestaat uit de kern en het cytoplasma. De kern is de drager van alle erfelijke eigenschappen en stuurt de levensverschijnselen in het hout, terwijl het cytoplasma een verzameling is van celorganellen die functies vervullen zoals communicatie tussen de cellen, secretie en eiwitsynthese. Omdat de kern echter geen rechtstreekse invloed heeft op het mechanisch gedrag van het hout zal hier ook niet dieper op ingegaan worden.

De levenloze delen van een houtcel bestaan uit een plasmamembraan, de celwand en de vacuolen. Het membraan is een osmotisch actief scherm die de levende delen scheidt van de buitenwereld en bevindt zich net langs de binnenkant van de celwand. De vacuolen zijn de reservoirs van de cellen en slaan reserve –en afvalstoffen op. Hiervan kunnen er verschillende kleine zijn, of één grote die tot 90% van het celvolume kan beslaan.

¹ Uitzonderingen hierop zijn onder andere reactiehout, dat tot 60% cellulosevezels bevat: Muell (1958) [2].

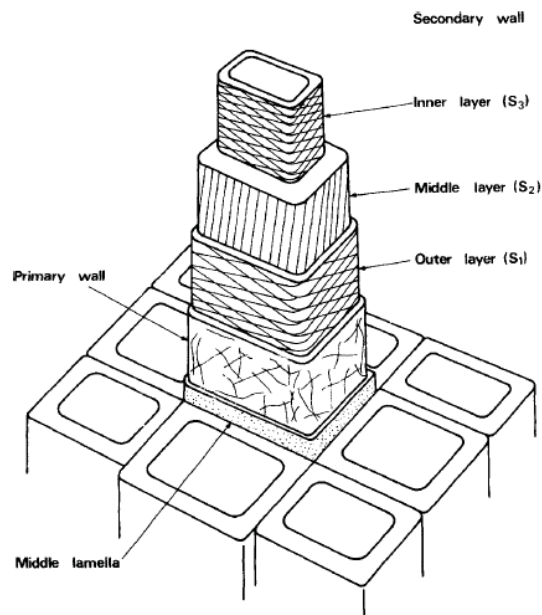
De vorming en opbouw van de celwand is een zeer complex fenomeen. Algemeen kan gesteld worden dat deze bestaat uit een geraamte, een matrix en korstvormende materialen.² Hout kan ook aanzien worden als vezels van cellulose in een matrix van hemicellulose en lignine waarin de lignine de matrix zijn stijfheid geeft [1].

Het geraamte of de vezels bestaan bijna volledig uit cellulose in de vorm van microfibrillen. Deze vezels worden tijdens de groei gebonden door een matrix bestaande uit hemicellulose die de primaire wand van de cel vormen samen met enkele andere polysacchariden. Deze primaire wand zorgt voor een oppervlaktevergroting van de wand aangezien deze gevormd wordt tijdens de groei van de cel. De microfibrillen zullen kriskras door elkaar worden afgezet tijdens de groei van de cel en zullen een grote trekvastheid geven aan de primaire cel.

De secundaire wand wordt gevormd in niet meer groeiende cellen door het plasmamembraan in drie verschillende fasen (zie Figuur 1). De eerste laag (S1) bestaat uit cellulose, pectine en een beetje lignine. Hierin liggen de fibrillen voornamelijk subhorizontaal onder een hoek van 50-70° met de verticale. De tweede laag (S2) bevat naast cellulose veel meer lignine. Hier liggen de fibrillen subverticaal in een spiraal om de as. Deze laag, die tot 90% van de totale dikte van de celwand bedraagt, bepaalt de belangrijkste eigenschappen van het hout, zoals bv. de treksterkte. De derde laag (S3) van de secundaire wand is analoog aan de S1. De secundaire wand zorgt voor de groei in dikte van de wand en het is ook in deze laag dat de lignificatie zal optreden. Dit is het verhouten van de wand waar lignine in S2 word afgezet. De lignine is hier dan de korstvormend stof waarvan in de opdeling volgens Waldrop sprake was.

De tertiaire wand is de laatste laag die gevormd wordt en vormt de binnenkant van de celwand. Net zoals in alle delen van de celwand zijn ook hier cellulosevezels aanwezig. Die vertonen een lichte helling maar zijn niet in een strikte evenwijdige ordening gegroepeerd zoals in de andere celwandlagen.

² Wardrop (1964) [2].



Figuur 1: Vereenvoudigde structuur van de celwand [1]

2.2 CELWEEFSELS

Het samengaan van bepaalde houtcellen vormt weefsels in het hout. Hier worden enkel de weefsels vermeld die bijdragen tot de sterkte en mechanische eigenschappen van het hout. Er dient echter een onderscheid gemaakt worden tussen hardhout (loofhout) en zachthout (naaldhout) aangezien deze structurele verschillen vertonen.

Een type vezel dat zowel in hardhout als zachthout voorkomt zijn de meristemen en het parenchym. De meristemen staan in voor de verticale groei van de boom en creëren door middel van celdeling, celstrekking en celdifferentiatie weefsels met verschillende functies. Parenchymcellen zijn korte cellen die opgevuld zijn met allerlei materialen en die ook opslaan.

Het verschil tussen loofhout en naaldhout zit voornamelijk in het transportweefsel en het weefsel dat instaat voor de sterkte van het hout.³ Bij zachthout worden deze twee functies door slechts één type weefsel uitgevoerd: de tracheïden. Dit hoofdzakelijk verticaal weefsel is oorspronkelijk levend maar sterft af bij rijpheid. Deze lange smalle cellen beslaan 90% of meer van het naaldhoutvolume. Deze holle cellen met dikke wand en tussenschotten staan zowel voor de sapstroom als voor de sterkte van het hout in. In sommige loofhoutsoorten is er ook sprake van tracheïden maar die worden meestal aanzien als overgangselementen naar vaten of vezels.

³ In Engelstalige literatuur worden vaak de begrippen 'hardwood' en 'softwood' gebruikt. In deze tekst worden ze respectievelijk vertaald door loofhout en naaldhout aangezien de Nederlandse termen 'hardhout' en 'zachthout' soms slaan op de hardheid van het hout. In het Engels wordt dit onderscheid niet strikt gemaakt maar spreekt men toch ook soms van Dicotyledons en Conferales indien men de nadruk wil leggen op het type boom.

Bij hardhout is er een duidelijke splitsing in de functie van transport en sterkte. Het transport van voedingsstoffen wordt verzorgd door de tracheeën (vaten) terwijl de sterkte verzekerd wordt door de vezels. De vaten zien er uit als buizen opgebouwd uit korte maar zeer wijde cellen (tot 1 mm diameter) die voortdurend met elkaar verbonden zijn zonder dwarse tussenschotten. Deze steeds dode cellen worden opgevuld eens hun functie niet meer vereist is, bijvoorbeeld bij het verkernen van spinhout. De vezels in het loofhout staan in voor de sterkte van het hout. Het zijn cellen met sterke wanden tot 2 mm lang. Het aandeel hiervan in het totale volume is sterk variërend en kan oplopen tot meer dan 50%.

Andere minder belangrijke weefsels zijn onder andere het bastweefsel, de vaatbundels en het harskanaal dat in geval van een wonde de boom beschermt tegen micro-organismen.

2.3 GROEIPROCESSEN IN HET HOUT

2.3.1 PRIMAIRE EN SECUNDAIRE GROEI

De groei van een levende boom vindt op verschillende fronten plaats: de wortels, de stam en de kroon waaronder de takken. Aangezien hout voor constructiedoeleinden enkel uit de stam bestaat, zullen we enkel de groei van de stam bespreken. Ook nadat het hout al gevormd is, treden in het hout chemische processen op die de eigenschappen ervan in grote mate wijzigen. Zo kunnen onder meer opdelingen gemaakt worden in vroeghout en laathout, kernhout en spinhout en kan er reactiehout ontstaan.

Er moet een onderscheid gemaakt worden tussen de primaire en secundaire groei van het hout. De primaire groei of lengtegroei treedt op bij het longitudinaal groeien van het hout en vindt plaats in de top van de stam waar primaire meristemen weefsels vormen door middel van celdeling. Daar worden onder andere het hout zelf, de bast en procambiumstrengen gevormd. Die laatste vormt later het cambium dat zich tussen de bast en het eigenlijke hout bevindt. Uiteraard gaat met deze lengtegroei ook een zekere diktegroei gepaard.

De secundaire (dikte)groei gaat uit van celdeling in het cambium; een zeer dunne laag waarin zowel cellen die in de bast terechtkomen als cellen richting midden van de stam worden afgezet. Doordat het cambium nieuwe cellen naar beide kanten kan afzetten ontstaat er een typische gelaagdheid van de stam waarbij het eigenlijke hout, dat bestaat uit het centraal gelegen dode kernhout en er rond het spinhout dat de opwaartse sapstroom voorziet, omgeven is door het cambium, waarrond de bast zit, die de buitenste dode laag, de schors, bevat. Een bijkomend gevolg hiervan is doordat het cambium steeds cellen naar binnen afsplitst, de omtrek ervan ook steeds vergroot en het ervoor moet zorgen dat het ook meegroeit. Ook is het zo dat de buitenste laag van de bast (schors) vaak niet genoeg kan uitzetten om de radiale lengtevermeerdering op te vangen en bijgevolg dus kan barsten.

Dit groeiproces treedt - vooral in onze gebieden - niet steeds even snel op. In periodes wanneer het weer optimaal is, en er dus veel voedsel voorradig is, treedt dit snel op, maar in andere periodes kan dit proces volledig stilvallen. Dit heeft als resultaat dat er ringen gevormd worden in het hout waarin een duidelijk onderscheid kan gemaakt worden tussen de periodes waar de groei snel is gegaan en deze waar hij traag verliep. Aan de hand van deze groeiringen (of jaarringen) kan de leeftijd van een boom geschat worden. Men moet wel rekening houden met het feit dat in sommige klimaten tweejaarlijkse groeiringen optreden. Het komt zelfs voor dat er helemaal geen groeiringen aanwezig zijn. Een voorbeeld hiervan is het tropisch regenwoud waar het klimaat het hele jaar door ongeveer hetzelfde blijft.

Binnen één enkele jaarring kunnen ook nog verschillen optreden. In het voorjaar wanneer er een plotse snelle groei van het hout is, worden eerder grote dunwandige cellen gevormd, het zogenaamde vroeghout, omdat dan de grootse sapstroom nodig is. Na de lente echter wordt laathout gevormd: het groeiproces vertraagt en er worden eerder cellen gevormd die instaan voor de stevigheid van de boom. Het stevigere laathout heeft een specifiek gewicht dat tot twee maal zo groot is als dat van het vroeghout [2].

2.3.2 VERKERNING

Een van de taken van de stam is de opwaartse sapstroom. Naarmate de diameter van de stam toeneemt, neemt ook het opwaartse debiet toe, zij het in mindere mate. Op een bepaald moment is de stam echter zo dik dat een deel ervan niet meer nodig is voor de opwaartse sapstroom. Vanaf dat moment treedt verkerning op.

Het oudste en meest centrale deel van de stam verliest eerst zijn functie voor transport. Dit hout wordt dan kernhout genoemd terwijl het levende deel van het hout dat instaat voor de sapstroom het spinhout wordt genoemd. Het verschil tussen deze twee types hout is van fundamenteel belang omdat er grote verschillen in hygroskopische eigenschappen zijn tussen deze dode en levende weefsels.

Het gemakkelijkst te hanteren kenmerk is het verschil in kleur. Bij de verkerning van het hout worden de transportkanalen opgevuld met allerlei stoffen waaronder looistoffen die in bruine oxydatieproducten worden omgezet [3]. Hierdoor heeft de kern doorgaans een duidelijk donkere kleur. Het is echter niet zo dat bij afwezigheid van een verkleuring geen kernhout aanwezig is: het echte criterium is steeds het al dan niet afsterven van het spinhout zodat deze niet meer in staat is de sapstroom te voorzien. Een ander gevolg van de indringing van allerlei stoffen is dat over het algemeen de kern een zeer zuur karakter krijgt [1]. Ook is het zo dat door het afsluiten van de geleidingsweefsels vooral bij loofhout een grotere natuurlijke duurzaamheid en een hogere resistentie tegen aantasting door micro-organismen bekomen wordt.

Samen met het indringen van verscheidene extracten treedt ook een uitdroging van het kernhout op waarbij het vochtgehalte daalt tot ongeveer 60%. Bij beuk bijvoorbeeld komt dit overeen met de toestand waar het meeste capillair water uit het hout verdwenen is. Dit proces gaat gepaard met het indringen van lucht in het kernhout. Verscheidene onderzoekers gaan er van uit dat net deze indringing van gas en zuurstof het verkerningsproces, onder andere door oxydatiereacties, op gang brengt [3].

Het verkerningsproces heeft vele implicaties voor het gebruik van het hout. Een belangrijk esthetisch aspect is het verkleuren van de kern die het hout een veel mooier uitzicht geeft en de waarde ervan verhoogt. Ook is de duurzaamheid over het algemeen verbeterd en toch boeten de mechanische eigenschappen er niet bij in. Het is echter wel zo dat het verschil in hygroscopisch gedrag zeer nadelige gevolgen met zich kan meebrengen bij het drogen van het hout zoals splijten of kromtrekken. Ook kan de verwerkbaarheid van het hout bemoeilijkt worden. Zo verloopt het drogen van lakken, vernissen en verven veel minder vlot bij het kernhout.

2.3.3 REACTIEHOUT

Reactiehout is een afwijkend structuurkenmerk waarbij een gedeelte van het hout een andere chemische samenstelling heeft en dus ook helemaal andere mechanische eigenschappen bezit. Er is ook een verschil tussen naaldhout en loofhout: bij naaldhout wordt drukhout gevormd langs de zijde van de boom die aan druk onderworpen wordt en bij loofhout wordt trekhout gevormd aan de trekzijde. De vorming hiervan is een poging van de boom om zichzelf in evenwicht te brengen onder invloed van een zeer vaak voorkomende dwarse belasting. Een typisch voorbeeld hiervan is de zwaartekracht die steeds een dwarse kracht uitoefent op de takken van de boom. In geval van een loofboom bijvoorbeeld wordt er dus trekhout gevormd aan de bovenkant van de tak. Dit verschijnsel kan echter ook voorkomen bij de stam van een boom door een overheersende windrichting, of wanneer de stam niet volledig verticaal staat. De aanwezigheid van reactiehout is meestal eenvoudig af te leiden door excentrische groeiringen en een minder zichtbare overgang tussen het vroeghout en laathout.

Drukhout is iets zwaarder dan het gewone hout en bevat een ligninegehalte dat 20 – 35% hoger ligt [3]. De microfibrillen verlopen veel vlakker in de celwand waardoor de lengtekrimp veel groter is: in plaats van 0,1 – 0,2% bedraagt deze 0,3 – 2,5%. Hierbij komt nog eens het feit dat ondanks de grotere dichtheid, de algemene mechanische eigenschappen (vooral de trekvastheid) veel geringer zijn. Het gebruik van hout afkomstig uit stammen waar zowel drukhout als gewoon hout aanwezig is, zorgt de differentiële krimp ervoor dat er barsten in het hout optreden en in de meeste gevallen dat het hout kromtrekt.

Bij trekhout bevat het hout een lagere hoeveelheid lignine en worden vaak gelatineuze vezels gevonden. Een groot nadeel hiervan is de bewerkbaarheid: het snijden en zagen van het hout

wordt bemoeilijkt, er treedt een ongelijkmatige droging op en verlijming en afwerking zijn van mindere kwaliteit.

2.4 VOCHT EN HOUT

Wanneer men werkt met hout moet men altijd rekening houden met het gedrag van het hout wanneer het in aanraking komt met water. Dit begint al voordat de boom geveld wordt. Het uniek hygroscopisch gedrag van het hout zorgt ervoor dat het water uit zijn omgeving kan onttrekken en opslaan. Na het vellen en drogen bevat het hout altijd een zekere minimale hoeveelheid water door interactie met het water in de atmosfeer. Tussen bepaalde grenzen beïnvloedt deze hoeveelheid water in grote mate de sterkte-eigenschappen, stijfheid, hardheid en weerstand tegen verweer.

2.4.1 VOLUMEGEWICHT

Bij hout is één van de meest bepalende parameters het volumegewicht. Hieruit kan men zeer snel de kwaliteit van het hout afleiden: hoe hoger het gewicht, hoe duurzamer het hout. Aangezien het vochtgehalte hier een zodanig grote invloed op heeft, gebruikt men verschillende termen om het soortelijk gewicht van het hout aan te duiden.

Een eerste is de densiteit. Hiermee wordt de werkelijke dichtheid van het houtweefsel bedoeld: ovendroog hout zonder holten. Deze waarde hangt enkel af van de cellulose/lignine verhouding en schommelt meestal rond $1,50 \text{ g/cm}^3$ [3]. De meest gebruikte term is echter het volumegewicht, wat de massa van het hout bij een bepaald vochtgehalte is per volume. Aangezien het volumegewicht beïnvloedt wordt door het vochtgehalte, wordt aangenomen dat indien men louter over volumegewicht spreekt, het vochtgehalte steeds tussen de grenzen van 12 en 15% ligt, wat zoals later zal blijken, overeen komt met luchtdroog hout.

Volumegewicht	Luchtdroog: 12-15%
Groen Volumegewicht	Net geveld: 50-300%
Ovendroog Volumegewicht	Ovendroog: 0%

Tabel 1: Vochtgehalten bij een bepaald volumegewicht.

Een variant op dit volumegewicht is het ovendroog volumegewicht, waarbij geen water meer in het hout aanwezig is. Aangezien het effect van water in het hout hiermee geëlimineerd is, is deze waarde een standaardwaarde van het hout. Een andere vaak gebruikte grootheid is het nat of groen volumegewicht dat uitgaat van het vochtgehalte van vers geveld hout.

Dat het vochtgehalte lang niet de enige parameter is die het volumegewicht beïnvloedt, werd aangetoond door Volkert door het volumegewicht van bepaalde delen van de stam te

onderzoeken.⁴ Ook ontstaat door de verschillende chemische samenstelling van elke houtsoort een ander volumegewicht.

2.4.2 VOCHTGEHALTE

Als er in verband met hout gesproken wordt over vochtgehalte, wordt de massa water op de massa ovengedroogde stof bedoeld. Dit betekent dat procentueel het vochtgehalte de waarde van 100% gemakkelijk kan overstijgen, namelijk wanneer het natte hout uit meer water dan droge stof bestaat. De moeilijkheid in verband met vochtgehalte is zeker en vast de bepaling ervan. Er bestaan hier twee werkwijzen: ofwel verwijdt men het water in het hout en meet men de massa overgebleven stof, ofwel berekent men via een gerelateerde eigenschap het vochtgehalte. De rechtstreekse methodes omvatten bijvoorbeeld de ovendroge methode, wat een zeer lange en destructieve methode is. Hier houdt men immers het proefstuk net boven de 100°C waardoor het vocht kookt en ontsnapt uit het hout. Een snellere methode is de distillatie methode die ongeveer hetzelfde doet, maar met veel kleinere stukken hout. Volgens Kollman & Côté is deze methode echter niet nauwkeurig omdat door de kleine proefstukken de invloed van het breken van de vezels niet te veronachtzamen is. Een veel gebruikte indirecte methode is die door middel van elektrische vochtmeters waarbij aan de hand van de geleidbaarheid op een proefstuk het vochtgehalte tot op 1% nauwkeurig kan worden bepaald.⁵

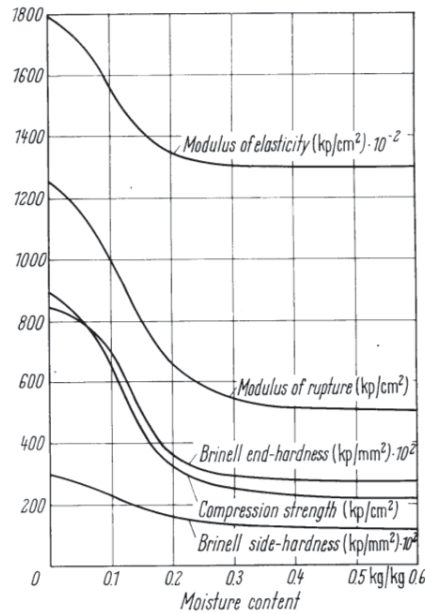
2.4.3 VEZELVERZADIGINGSPUNT

Een zeer belangrijke grens voor het vochtgehalte is het vezelverzadigingspunt (VVP). Dit is immers de grens waarbij alle vezels volledig zijn opgezwollen (verzadigd met gebonden of colloïdaal water) maar er geen vrij water aanwezig is in de ruwere capillaire structuur. Dit is dus het maximaal vochtgehalte dat het hout kan adsorberen vanuit atmosferische dampen. Meestal zal het vochtgehalte deze grens maar 1 maal overschrijden. Bij het vellen van de (levende) boom is het vochtgehalte steeds boven deze grens. Naarmate het hout uitdroogt, komt het vochtgehalte onder deze grens. Eens eronder kan het deze grens niet meer overschrijden zonder ondergedompeld te worden in water.

Het VVP verschilt van houtsoort tot houtsoort maar schommelt meestal rond 30%. Dit punt is van groot belang omdat veel eigenschappen van het hout veranderen onder deze waarde, wanneer er dus geen maximale hoeveelheid colloïdaal water meer aanwezig is. Op onderstaande figuur is duidelijk te zien dat de eigenschappen van het hout drastisch veranderen met het vochtgehalte wanneer dat waarden aanneemt die lager zijn dan 30%, wat net het VVP is.

⁴ Volkert (1941) [2].

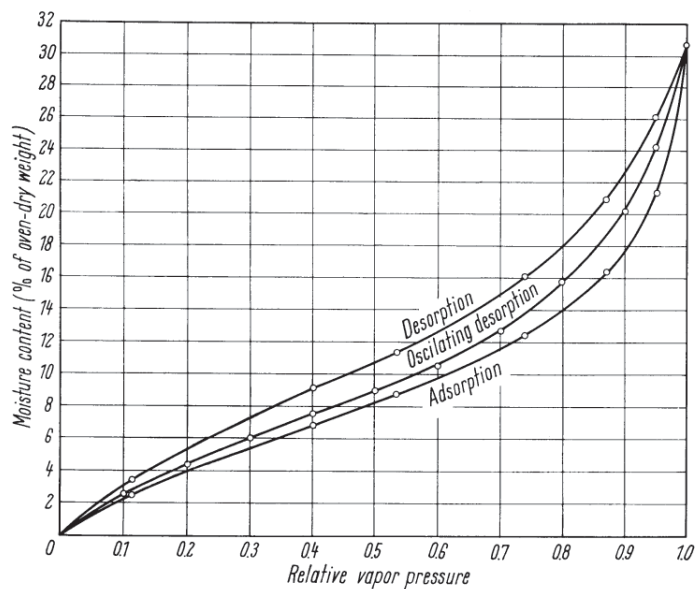
⁵ Deze methode is enkel toepasbaar tussen 7 en 25% vochtigheid en indien houtsoort en temperatuur in rekening worden gebracht en het materiaal goed opgeslagen en onderhouden is geweest [2].



Figuur 2: Effect van vochtgehalte op mechanische eigenschappen van sparrenhout [2]

2.4.4 EVENWICHTSVOCHTGEHALTE

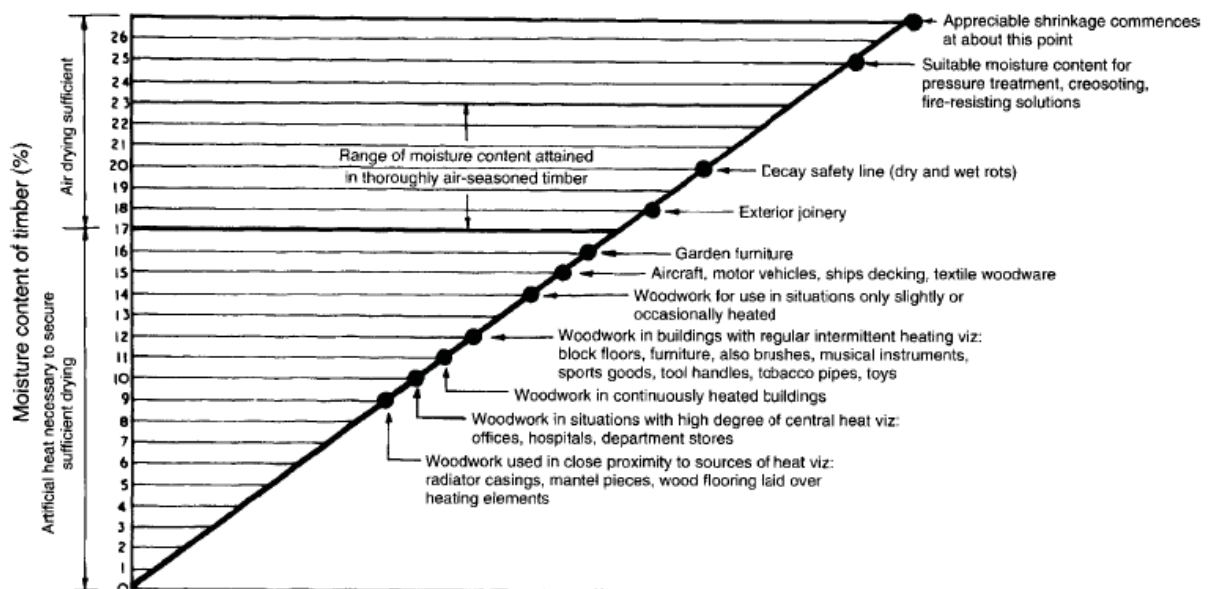
Een ander belangrijk begrip is het evenwichtsvochtgehalte (EV). Het is zo dat wanneer het vochtgehalte onder het VVP terecht komt, deze volledig afhankelijk is van de relatieve vochtigheid (RV) van de omgeving. Eens het hout voldoende tijd heeft gekregen om zijn eigen vochtgehalte aan te passen aan de relatieve vochtigheid van de omgeving spreekt men van evenwicht.



Figuur 3: Adsorptie-desorptie hysteresis curve voor sparrenhout [2]

Er kan een kleine afwijking optreden ten opzichte van de verwachte waarde, ook al heeft het hout de tijd gehad om naar het evenwichtsvochtgehalte te evolueren. Dit valt te verklaren door hysteresis. Er is immers een verschil tussen adsorptie (opnemen van vocht) en desorptie (afgeven van vocht). De tussenliggende curve wordt bekomen door oscillerende relatieve vochtigheden van de omgeving (zie Figuur 3).

Kennis van het EV is belangrijk om de gevolgen van een verandering in vochtgehalte te beperken. Bij het plaatsen van het hout moet men er zoveel mogelijk voor proberen zorgen dat het vochtgehalte hetzelfde is als het evenwichtsvochtgehalte van de omgeving waarin het hout geplaatst wordt. Zo zal er bovenop de atmosferische veranderingen - die in ieder geval zullen voorkomen - geen bijkomende krimp -en zwelverschijnselen optreden door het plaatsen van te nat of te droog hout. Het grootste verschil treedt op tussen binnen -en buitenomgeving. Bij binnenomgeving gaat men uit van RV van 30-60% terwijl men buiten uitgaat van 60-90% [5]. Hiermee corresponderen voor elke houtsoort twee grenzen van het EV waartussen het vochtgehalte schommelt. Een voorzichtige keuze van vochtgehalte van het plaatsen van het hout is het gemiddelde van deze twee waarden [5]. Een gepaste keuze van vochtgehalte van het te plaatsen hout hangt ook voor een groot deel af van de functie van het hout. Zo zal hout dat dicht bij warmtebronnen gebruikt wordt best een laag vochtgehalte hebben. Dinwoodie (2000) publiceerde enkele richtwaarden voor vochtgehaltes (zie Figuur 4).



Figuur 4: Evenwichtsvochtgehaltes van hout in verschillende omgevingen [1].

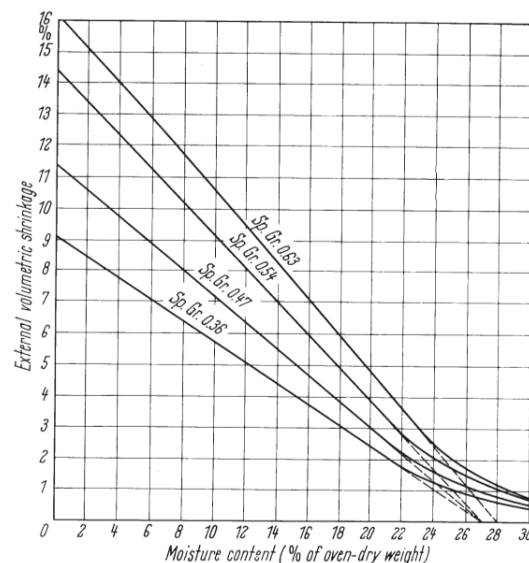
2.4.5 KRIMP EN ZWEL: WERKEN VAN HOUT

Zoals hierboven vermeld, is het hout onder invloed van wijzigende atmosferische omstandigheden ook aan verschillende vochtgehaltes onderworpen. Hiermee gaat ook een

lengteverandering van het hout gepaard. Dit proces noemt men het “werken” van het hout. Vooraleer men echter in deze situatie terechtkomt, moet het groene hout gedroogd worden tot het vochtgehalte rond 12% bedraagt. Hiermee gaat de grootste volumetrische verandering van het hout gepaard die men krimp noemt.

Bij het drogen van het hout tot aan het VVP verdwijnt dus enkel het vrije water uit het hout en blijft het overige gebonden of colloïdaal water nog aanwezig. Hierbij worden de holtes waar het water uit verdwijnt opgevuld met lucht en treedt er geen krimp op. Het is pas onder het VVP dat er met een wijziging in vochtgehalte ook een verandering in de afmetingen van het hout gepaard gaat. Men kan hierbij algemeen spreken van een lineair verband tussen de grootte van de krimp/zwel en de verandering in het vochtgehalte.

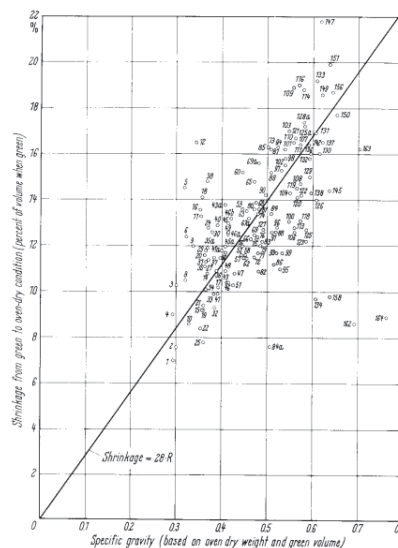
Bij zeer lage vochtgehaltenes (onder de 6%) zijn de krimp en zwel echter kleiner dan het te verwachten lineaire verband. Dit komt doordat het laatste water zeer sterk geadsorbeerd zit op de celwandbestanddelen zelf [3]. Bij grotere vochtgehaltenes, dicht bij het VVP, is er ook een afwijking ten opzichte van het lineaire verband. Op het eerste zicht zou er vanaf het VVP helemaal geen krimp of zwel meer mogen optreden bij grotere vochtgehaltenes. Het is echter zo dat bij het drogen of bevochtigen van het hout de effecten hiervan het eerst worden gevoeld aan het oppervlak en pas later in het centrum van het hout. Zo kan het zijn dat bij drogen het gemiddelde vochtgehalte nog steeds boven het VVP licht maar er toch al krimp opgetreden is in het hout. Dit komt doordat op dat moment de buitenkant van het hout al een vochtgehalte heeft onder het VVP en reeds beginnen krimpen is. Dit effect zal des te groter zijn naarmate de snelheid van drogen opgevoerd wordt. Dit verklaart waarom de kromme afwijkt van de stippellijn in Figuur 5 dicht bij het VVP.



Figuur 5: Volumetrische krimp in functie van vochtgehalte [2]

Men kan echter niet zomaar spreken over “de krimp” van een bepaalde houtsoort aangezien het ook op dit vlak een zeer anisotroop materiaal is. Er treedt een groot verschil op tussen de longitudinale, tangentiële en radiale lengteveranderingen. Als men het effect van deze drie richtingen samen wil kwantificeren maakt men gebruik van het begrip volumetrische krimp. Later zal hier dieper op ingegaan worden.

Het vochtgehalte is echter niet de enige factor die het werken van het hout beïnvloedt. Er is ook een verband tussen krimp en volumegegewicht. Houtsoorten met een groot volumegegewicht hebben proportioneel gezien meer celwand- en minder lumenvolume dan lichtere houtsoorten waardoor ze meer zwellen en krimpen. Bovendien bevatten ze bij dezelfde vochtgehaltes ook meer water. Ook is het zo dat het verschil tussen tangentiële en longitudinale krimp over het algemeen kleiner is dan bij lichtere houtsoorten.



Figuur 6: Verband tussen volumetrische krimp en volumegegewicht [2]

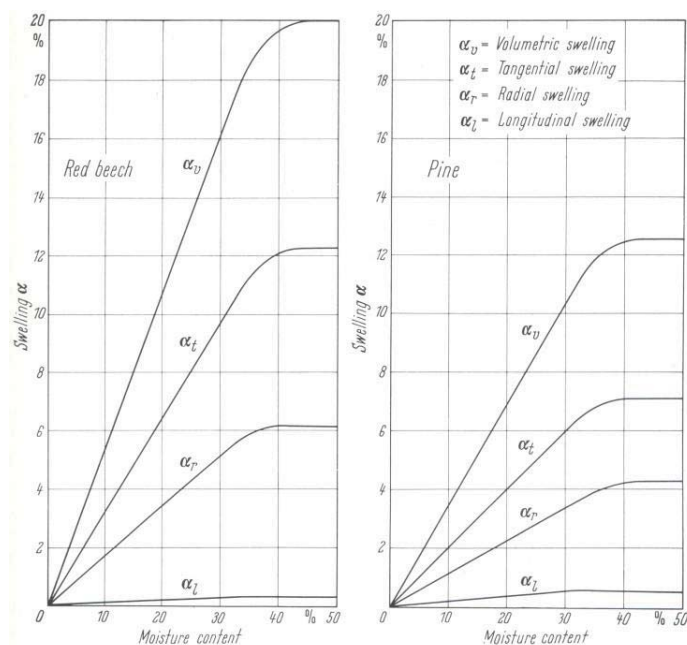
Er werden ook verbanden gevonden op het chemische niveau: de verhouding lignine heeft een grote invloed op de krimp. Hoe meer lignine het hout bevat, hoe lager de krimp is. Het effect hiervan is voor een deel ook de verklaring van het voorgaande waar de grotere krimp werd aangetoond bij zwaardere houtsoorten. Het is immers zo dat zwaardere houtsoorten een lager ligninegehalte hebben. Over het algemeen bevat loofhout minder lignine dan naaldhout waarmee onmiddellijk is verklaard waarom loofhout meer werkt dan naaldhout.

Ook zijn er nog enkele minder voor de hand liggende invloeden gevonden van het krimpgedrag van het hout. Zo heeft bijvoorbeeld de pH-waarde van het contactmedium een invloed en ook de plastische vervorming door grote spanningen beïnvloeden het krimpgedrag [2].

Zoals reeds eerder aangehaald is hout sterk anisotroop in zijn krimp- en zwelgedrag. Dit heeft een zeer grote invloed op het praktische gebruik van het hout. Naast de voor de hand liggende problemen die gepaard gaan met vrij grote volumetrische veranderingen, zorgt de anisotropie er bijvoorbeeld voor dat planken krom trekken en zo het verschil tussen zaagwijzen zoals het dosse zagen of kwartierszagen duidelijk maken (zie Figuur 8).

Een praktische manier om het anisotrope effect in rekening te brengen is het opsplitsen van krimp- en zwelcoëfficiënten in drie componenten: een longitudinale (β_l), transversale (β_t) en radiale (β_r) component. Voor elk van deze componenten geldt nog steeds het lineaire verband tussen krimp en verandering in vochtgehalte. De som van de drie is ongeveer de volumetrische coëfficiënt (β_v). Deze vereenvoudiging is te aanvaarden door de zeer kleine tweede orde coëfficiënten te verwaarlozen [2]. De grootste is de tangentiële, namelijk die in de richting van de groeiringen. De middelste, met een factor 1,5 tot 2,5 kleiner is de radiale [5]. De longitudinale, in de richting van de vezels, is in de meeste gevallen te verwaarlozen. Om een idee te krijgen van de grootte en de anisotropie van krimp haalt Kollman het voorbeeld aan van het drogen van groen hout tot ovendroog hout:

- B_t : 3,5 – 15%
- B_r : 2,4 – 11%
- B_l : 0,1 – 0,9%

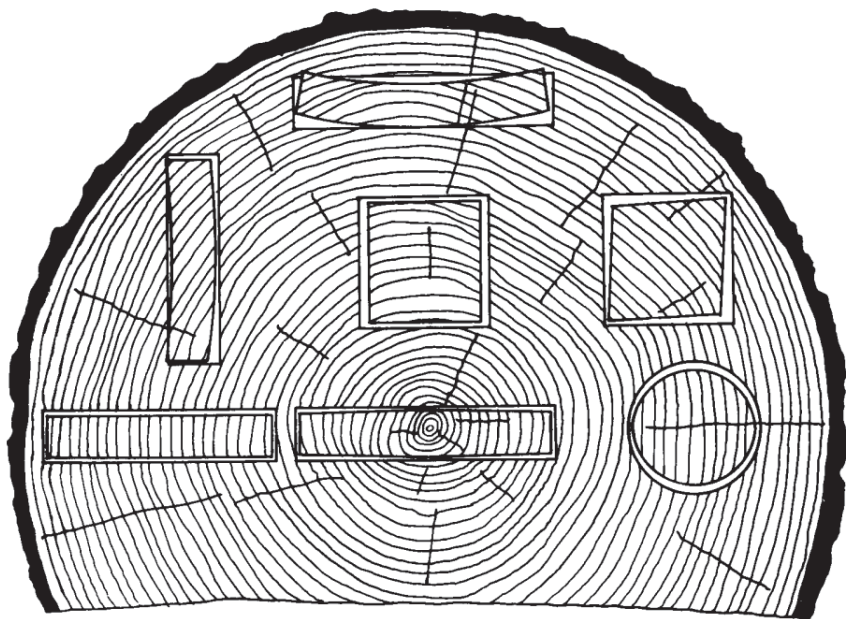


Figuur 7: Verband tussen zwel en rek voor loofhout en naaldhout [2]

Ook al is de longitudinale krimp zeer klein, toch zijn er een aantal uitzonderingen waar men wel rekening moet houden met dat effect. De belangrijkste ervan is wanneer er drukhout is

gevormd in het hout. In dit geval kan de longitudinale krimp tot tien maal hoger liggen dan de te verwachten waarde. Het U.S. Forest Products Laboratory heeft immers waarden tot 5,78% opgemeten voor de longitudinale krimp voor drukhout [4]. Trekhout krimpt ook meer dan normaal hout, al is de maximaal gemeten krimp slechts 1,7%. Ook al werd eerder aangetoond dat krimp over het algemeen vergroot met stijgend soortelijk gewicht van het hout, toch is dit effect omgekeerd voor de longitudinale krimp. Zo kan men voor uiterst lichte houtsoorten een vrij grote krimp waarnemen langs de vezel.

Het grootste struikelblok in verband met de anisotropie van het krimp/zwelgedrag van hout is de factor 1,5 à 2,5 die optreedt tussen de tangentiële en radiale component. Deze zorgt ervoor dat gezaagde sneden in het hout niet dezelfde vorm behouden bij het werken van het hout. Hierbij is de wijze van zagen zeer belangrijk. Afhankelijk van de plaats van waar een plank afkomstig is uit de stam kan men de richting en de grootte van het kromtrekken immers voorspellen bij wijzigende vochtgehaltes (zie Figuur 8).



Figuur 8: Karakteristieke vervorming na krimp [2]

Andere nadelige gevolgen zijn uiteraard de dimensieveranderingen, gedifferentieerde krimp/zwel door heterogene vochtinbreng, openen of aanspannen van verbindingen en voegen, scheiding van groeiringen, korstverharding, ... [5]. Het is zeer moeilijk om het hygroscopisch gedrag van hout te beïnvloeden en dus deze nadelige gevolgen te beperken. Kleine en tijdelijke successen zijn echter wel geboekt door het gebruik van een waterafwerende coating, bulking treatment (opvullen van de poreuze structuur) en mechanische modificatie van het hout.

In het voorgaande werden verbanden en gevolgen besproken die te maken hebben met het anisotroop werken van het hout maar er werd geen echte verklaring gegeven voor het aandrijvende proces. Dit is niet onbewust gedaan omdat er helemaal geen eenduidige verklaring achter zit. Er zijn echter wel heel wat elkaar niet uitsluitende theorieën opgebouwd om het verschijnsel van anisotrope krimp en zwel te verklaren.

De eerste en meest aanvaarde is die van de microfibrilaire hoek.⁶ Die gaat uit van de celwand bestaande uit een amorfe matrix van lignine en cellulose waarin sterke, stijve vezels ingebed zitten. De vezels zelf hebben geen neiging om water te adsorberen, terwijl de matrix dat wel doet. Indien de matrix apart zou beschouwd worden zou de krimp of zwel in alle richtingen even groot zijn. Het zijn echter de vezels die het grootste deel van de krimp verhinderen in de richting waarin ze ingebed zijn in de matrix. Als we teruggrijpen naar de opbouw van de celwand kunnen we opmerken dat die voor het grootste deel bestaat uit de S_2 -laag, waar de vezels een hoek maken van 10-30° met de longitudinale as. Dit verklaart meteen waarom de longitudinale component zo klein is. Ondanks het inbrengen van andere lagen werd echter geen afdoende verklaring gevonden voor het verschil tussen tangentiële en radiale krimp door middel van deze theorie.

Andere theorieën zoals de vroeghout-laathout interactie doen dit wel.⁷ In die theorie wordt gesteund op het verschil in densiteit tussen vroeg –en laathout. Aangezien het laathout een hogere densiteit heeft, krimpt het meer. In tangentiële richting moeten vroeghout en laathout tezamen bewegen en zal het sterkere laathout het vroeghout als het ware met zich meentrekken waarbij de resultante iets onder deze van het laathout ligt. In radiale zin echter is de totale krimp de som van beide componenten en bedraagt de resultante het gewogen gemiddelde van beide componenten, wat een lagere waarde is dan de tangentiële krimp.

2.5 MECHANICA VAN HOUT

Het mechanisch gedrag van hout wordt vaak opgesplitst in twee delen. Enerzijds worden de vervormingen bekeken en anderzijds de sterkte-eigenschappen. Beide begrippen zijn zeer ruim. Onder het eerste verstaat men niet alleen rekken en doorbuigingen maar ook elasticiteitsmoduli, plasticiteit en tijdsafhankelijke effecten zoals kruip en relaxatie. De sterkte-eigenschappen bevatten naast de drie grote eenheden treksterkte, druksterkte en buigsterkte ook iets minder belangrijke parameters zoals hardheid en torsie. Aangezien men met een sterk anisotroop materiaal werkt, moet er steeds een onderscheid worden gemaakt volgens belastingsrichting.

⁶ Deze theorie werd uitgewerkt door Barber & Meylan in 1964 [4].

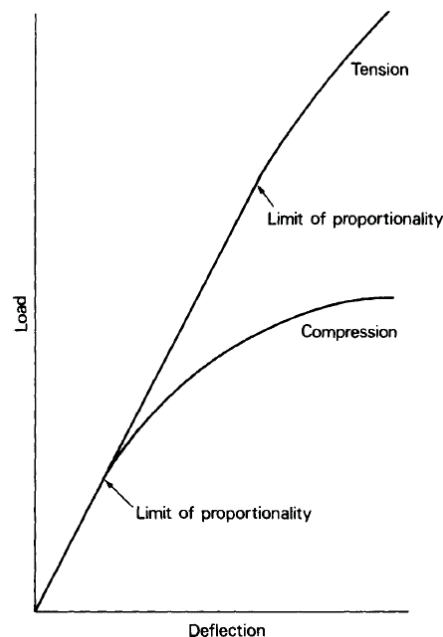
⁷ Deze theorie werd uitgewerkt door Pentoney in 1953 [4].

2.5.1 VERVORMINGEN

Zoals bij de meeste eigenschappen van hout zijn ook de vervormingen vrij complex: hout is een elasto-plastisch materiaal dat onderhevig is aan veel invloedsfactoren. Ook de belastingsduur beïnvloedt het vervorminggedrag drastisch: het gedrag van hout is bijvoorbeeld compleet verschillend voor zeer lange en zeer korte belastingen.

2.5.1.1 ELASTISCH GEDRAG VAN HOUT

Ook al is hout geen plastisch of elastisch materiaal, toch wordt vaak aangenomen dat hout een elastisch materiaal is. Door dit aan te nemen kan er vrij eenvoudig met hout gewerkt en gerekend worden. Er kan een elasticiteits- en glijdingsmodulus aan het hout gekoppeld worden aangezien er een constant verband is tussen belasting en vervorming. Door het anisotroop karakter van hout is er echter een groot verschil in de tangentiële, radiale en longitudinale component van beide grootheden. De verhouding van de rek loodrecht op de belasting op de rek evenwijdig met de belasting geeft voor elk belastingsgeval de bijhorende modulus van Poisson.



Figuur 9: Spanning-Vervormings-diagramma voor trek en druk, loodrecht op de vezel [1]

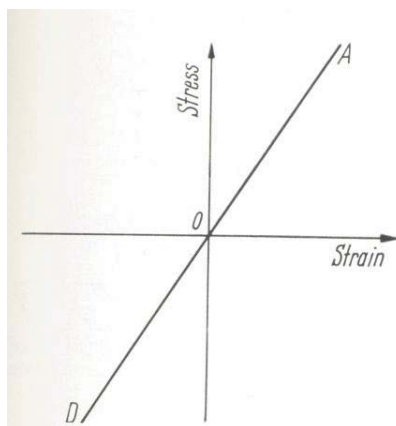
Zoals te zien in de Figuur 9 heeft het pas zin deze drie grootheden in te voeren zolang men zich bevindt onder de proportionaliteitsgrens. Erboven is immers geen lineair verband meer tussen rek en belasting en vallen vervormingen niet meer volledig weg na het wegnemen van de belasting. Een probleem bij het gebruik van dit model is dat het moeilijk is om deze grens te bepalen aangezien die af hangt van verschillende factoren. Ook de aard van de belasting speelt een rol: bij trekbelasting ligt de proportionaliteitsgrens nabij de breukbelasting terwijl ze bij drukbelasting slechts 60-85% bedraagt van de breukbelasting [5]. Een tweede voorwaarde voor

de invoer van het elastische model is dat de belastingen kortstondig zijn zodat er geen sprake is van relaxatie of kruip.

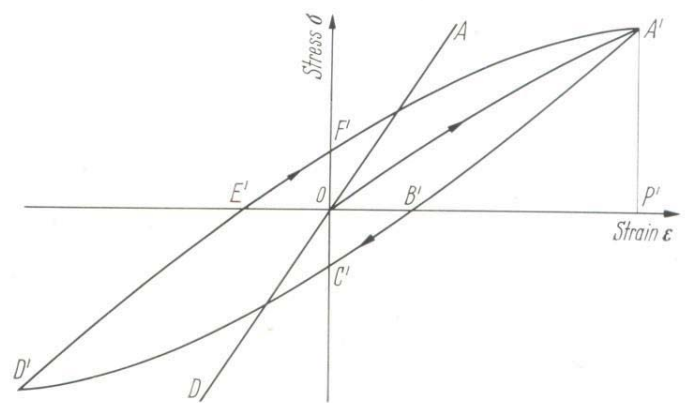
Kollman groepeerde de resultaten van verschillende onderzoeken naar de elasticiteitsmodulus en daaruit is een duidelijk verschil merkbaar tussen de elasticiteitsmoduli in de verschillende hoofdrichtingen [2]. Met voorsprong de grootste is diegene in longitudinale richting: E_l . Met een factor van ongeveer een tiende is de radiale (E_r) een stuk minder terwijl de tangentiële (E_t) de allerkleinste is: grofweg een twintigste van E_l . Als richtwaarde kan men stellen dat E_l voor de meeste houtsoorten tussen 2,5 en 17 GPa ligt, hetgeen een veelvoud kleiner is dan andere constructiematerialen zoals staal en beton, waarvan de E 's rond de 200 GPa gelegen zijn [5]. Hoe groter de elasticiteitsmodulus, hoe kleiner de vervormingen zijn onder een bepaalde last, waaruit dus blijkt dat het hout het makkelijkst vervormt als men het loodrecht op de vezels belast.

2.5.1.2 NIET-ELASTISCH GEDRAG VAN HOUT

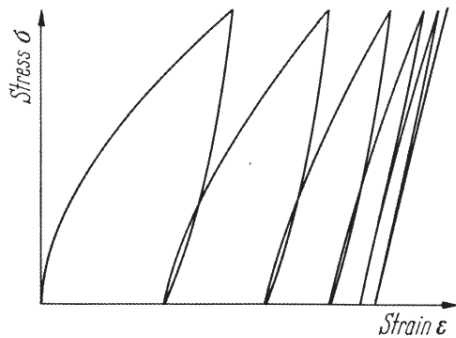
Als men berekeningen wil uitvoeren waarbij het hout belast wordt tot over de proportionaliteitsgrens, volstaat het elastisch model niet meer. Er zal rekening moeten worden gehouden met het elasto-plastisch gedrag van het hout. Dit houdt in dat bij het belasten de rek en de belasting niet langer lineair zijn en dat bij het ontlasten een andere kromme gevolgd wordt zodat er een blijvende (plastische) vervorming ontstaat. Dit gedrag werd door Barkas voorgesteld in Figuur 10 tot Figuur 13.



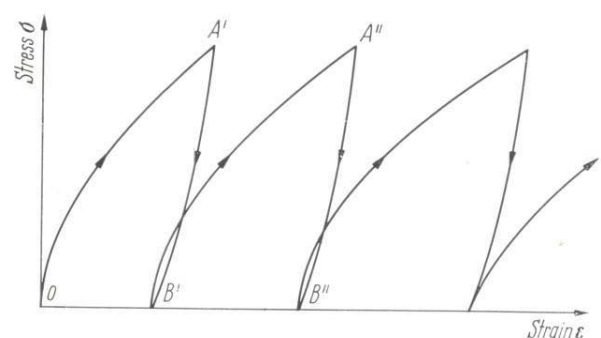
Figuur 10: Spanning-Vervormings-diagramma voor een ideaal elastisch lichaam [2]



Figuur 11: Spanning-Vervormings-diagramma voor een elasto-plastisch lichaam [2]



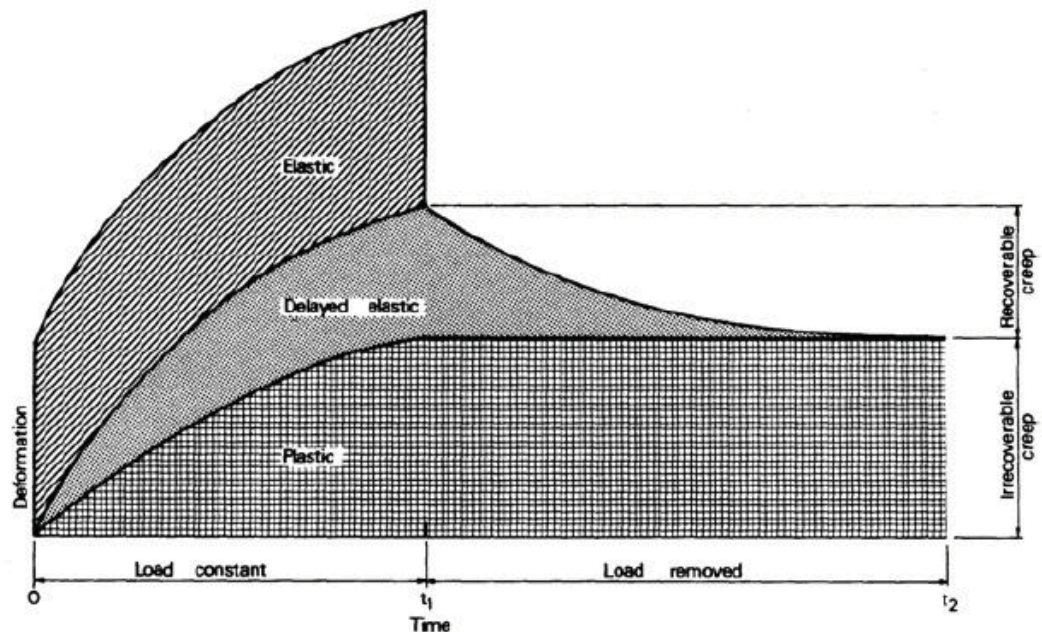
Figuur 12: Spanning-Vervormings-diagramma met stijgende elasticiteit [2]



Figuur 13: Spanning-Vervormings-diagramma met constante elasticiteit [2]

Het gedrag van hout onder wisselende belastingen die een plastische vervorming veroorzaken is uitzonderlijk. Er zijn omstandigheden waarin het hout bij elke belastingscurve ongeveer eenzelfde plastische vervorming ondergaat, terwijl onder andere omstandigheden de plastische vervorming geleidelijk afneemt totdat de vervormingskromme voor die bepaalde belasting deze evenaart als een elastisch materiaal.

Kruip is een verschijnsel dat zich voordoet in verschillende materialen, waaronder hout. Dit effect, waarbij het materiaal blijft vervormen in de tijd onder constante belasting, is reeds lange tijd gekend. Er werd zelfs al rekening mee gehouden toen hout volledig behandeld werd als een elastisch materiaal door een correctie in te voeren voor de variabele "tijd" [5]. Als er op een proefstuk een bepaalde last (constant in de tijd) wordt geplaatst van t_0 tot t_1 , zal de vervorming steeds toenemen. Het verschil tussen de oorspronkelijke (elastische) rek en die op tijdstip t_1 wordt kruip genoemd. De componenten ervan kunnen worden bepaald door de rekken te bekijken na t_1 , er zal immers een deel van de rek weer verdwijnen: dit deel wordt reversibele kruip genoemd en kan gezien worden als uitgesteld elastisch gedrag. Het permanente, irreversibele deel staat voor de plasticiteit van het materiaal (zie Figuur 14).



Figuur 14: Plastische en elastische component bij vervorming van hout [1].

Dit proces kan men ook “omgekeerd” beschouwen door niet de belasting constant te nemen en dan te kijken naar de vervormingen, maar een constante vervorming voorop te stellen en te kijken naar de nodige belasting in de tijd. Als men het materiaal wil indrukken zal men daarvoor een initiële belasting voor nodig hebben. Deze belasting zal dalen in functie van de tijd tot op een punt waar deze ongeveer constant blijft. Dit gedrag noemt men relaxatie.

Parameters die dit gedrag beïnvloeden werden in detail onderzocht en er is gebleken dat temperatuur en vochtigheid een grote rol spelen. Hoe hogere de temperatuur of vochtigheid, hoe groter de kruip en relaxatie. Ook zijn kleine wijzigingen in temperatuur of vochtigheid van grote invloed. Zij versterken het kruipgedrag in grote mate.

2.5.2 STERKTE-EIGENSCHAPPEN

In tegenstelling tot de vervormingen in een materiaal is het veel moeilijker om het begrip sterkte te verklaren. Terwijl men de vervormingen gewoon kan aflezen, is het moeilijk om “de sterkte” te meten. Een mogelijke definitie is de weerstand tot falen, maar dan bestaat de moeilijkheid erin om de faalgrens te bepalen. Algemeen wordt aanvaard dat wanneer een goed te onderscheiden breuk optreedt, die de faalgrens is. In andere gevallen wordt dan een arbitraire grens gekozen, en uitzonderlijk (bv druksterkte loodrecht op de vezels) wordt als faalgrens de proportionaliteitsgrens genomen.

In tegenstelling tot beton of staal is er voor hout een groot verschil in de opgemeten waarden en de waarden die gebruikt moeten worden in berekeningen. Bij de bepaling van de sterkte-eigenschappen tracht men steeds een zo groot mogelijke uniformiteit en consistentie te

behalen. Dit betekent dat de proeven steeds uitgevoerd worden op bepaalde stukjes hout die vrij zijn van alle defecten. De vezels zijn loodrecht, bevatten geen biologische of chemische aantastingen van het hout, geen knoesten in het hout, geen reactiehout, ... Het is duidelijk dat in de praktijk nooit zulke strenge normen gelden.

2.5.2.1 TREKSTERKTE

De anatomie van hout laat reeds vermoeden dat de grootste waarde van de treksterkte evenwijdig met de vezels zal zijn. De lange cellulosemoleculen zijn immers zeer sterke kettingen. Uit onderzoek van Meyer en Mark is immers gebleken dat de treksterkte van een hypothetische staaf uit dit materiaal 8000 N/mm^2 bedraagt; een waarde die alle gekende materialen zou overtreffen. Als we op iets grotere schaal kijken kan de treksterkte van houtvezels bepaald worden. Die kan wel gemeten worden en schommelt tussen de 200 en 1300 N/mm^2 . Uiteraard is de treksterkte van hout nog iets lager dan deze waarde door de afwijkingen van de ketens ten opzichte van de boomas en de aanwezigheid van zwakkere stoffen zoals hemicellulose tussen microfibrillen en celluloseketens. Ondanks deze afwijkingen van de houtstructuur bereikt hout toch een hoge treksterkte die kan oplopen tot 300 N/mm^2 voor tropische houtsoorten en $50\text{-}160 \text{ N/mm}^2$ voor hout in gematigde streken. Als men de relatief lage dichtheid van hout in rekening brengt, kan hout best wedijveren met hoogtechnologische koudgetrokken staaldraad op gebied van treksterkte per gewicht.

Material	Tensile strength kp/cm ²	Breaking length km
Steel wire, maximum	32,000	41
Iron wire, hard drawn	5,500... 8,400	7 ...10.8
Steel, building	5,200... 6,200	6.7... 8
Copper wire, hard drawn	4,200... 4,900	4.7... 5.4
Flax, Irish	6,000...11,000	40...75
Rayon, Acetate	10,000	75
Silk	3,500	25
Cotton	2,800... 8,000	18...53
Hemp	8,000... 9,000	52...58
Coniferous woods	500... 1,500	11...30
Broadleaved woods	200... 2,600	7...30
Bamboo	1,000... 2,300	10...35

Tabel 2: Treksterkte en breeklength van enkele materialen [2]

Die hoge waarden moeten echter wel met de nodige voorzichtigheid opgevat worden. Naast de algemene afwijkingen door defecten in het hout die niet op de proefstukken aanwezig waren, ontstaan samen met deze trekspanningen ook steeds schuifspanningen en die hebben langs de vezel een waarde van slechts 6-10% vergeleken met de treksterkte. Het hout heeft dus de neiging om af te schuiven of te splijten ter hoogte van de vasthechting. Dit effect zorgt ook voor een bijkomende moeilijkheid voor de bepaling van de treksterkte.

De hoge waarden voor de treksterkte evenwijdig met de vezels staan in sterk contrast met die loodrecht op de vezel. Transversale trekkrachten moeten te allen tijde vermeden worden in hout aangezien bij de minste scheurvorming (bijvoorbeeld krimp bij het drogen) de sterkte tot nul kan worden herleid. Dit komt doordat de sterkte in deze zin voornamelijk geleverd wordt door zeer zwakke secundaire bindingen. De dwarssterkte wordt om die reden ook nauwelijks bestudeerd, tenzij in sommige gevallen waarbij ze gebruikt wordt als een maat voor de splijtweerstand.

2.5.2.2 Druksterkte

In tegenstelling tot de treksterkte is de bepaling van de druksterkte vrij eenvoudig. Dit is meteen ook de reden waarom zoveel gegevens beschikbaar zijn, wat goed van pas komt aangezien de axiale druksterkte een belangrijke eigenschap is voor de beoordeling van bouw- en werkhout. Ondanks de vrij grote spreiding in resultaten voor zowel trek- als druksterktes kan men toch algemeen stellen dat de druksterkte evenwijdig met de vezels de helft is van de treksterkte, dus ongeveer 25-80 N/mm². De reden waarom er zulk een groot verschil is, ligt in de chemische opbouw van het hout en het verschillende breukmechanisme. Ook al is het houtskelet opgebouwd uit zeer sterke cellulosevezels, toch zijn het de andere componenten zoals de hemicellulose en in het bijzonder de lignine die bijdragen tot de druksterkte. Het falen zal optreden door instabiliteit van de submicroscopische structuur van de celwand. Al bij de helft van de breuksterkte knikken de microfibrillen en bij nog meer druk de hele celwanden en vezels.

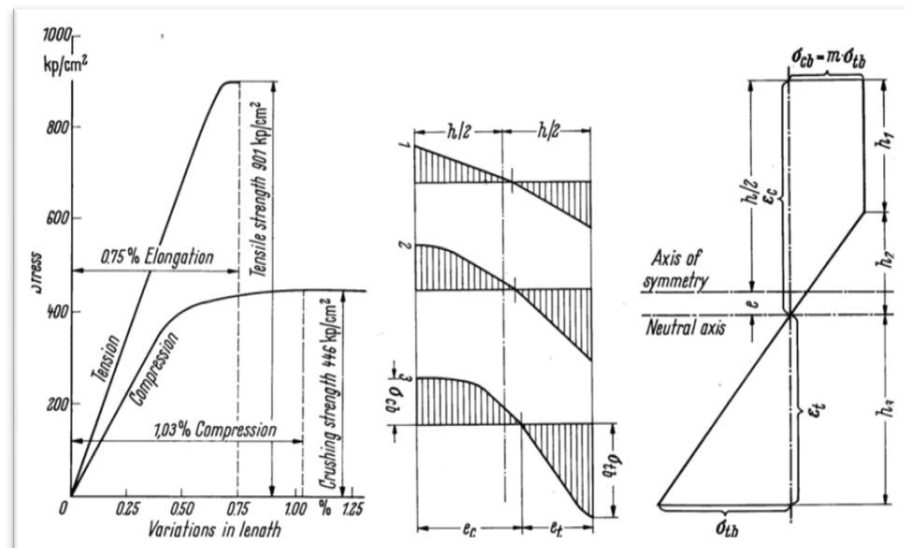
In tegenstelling tot bij trek is hier wel sprake van een dwarssterkte, al is dat begrip bij druk enigszins misleidend. In het geval van dwarsliggers en brugdekplanken bijvoorbeeld zal een druk loodrecht op de vezels eigenlijk geen maximumwaarde hebben maar blijft het hout gewoon plastisch vervormen. Daarom is de proportionaliteitsgrens vaak een waarde voor de dwarsdruksterkte en niet de breukdruk. De waarden hiervoor schommelen vaak rond de 4 N/mm².

2.5.2.3 Buigsterkte

De buigsterkte van hout is een maat voor de spanningen die het hout kan ondergaan wanneer het aan buiging onderworpen is. De buigsterkte is het maximaal buigend moment van de balk gedeeld door zijn weerstandsmoment. De eenheid is dus dezelfde als deze van treksterkte en druksterkte. Doordat er een vrij groot verschil is tussen het gedrag van hout onder druk of trek en omdat het buigingsgedrag net een combinatie van beiden is, is dat een erg complex mechanisme.

Aangezien de elasticiteitsmoduli voor trek en druk niet helemaal dezelfde zijn en er een verschil van een factor 2 zit tussen maximale druk en trek, wijzigt het spanningspatroon in het hout onder invloed van buiging met toenemend buigend moment. Dit betekent ook dat de positie

van de neutrale lijn (plaats waar geen spanning optreedt) varieert met wisselend buigend moment. In elk geval ligt deze dichter bij de kant van trek dan druk, aangezien de elasticiteitsmodulus voor trek steeds hoger is dan de die voor druk.



Figuur 15: Spanning-rek diagramma en spanningsverdeling [2]

Een zeer realistisch model is dat van Baumann die een parabolisch spanningsverloop in de drukzone aanneemt en een driehoekig in de trekzone [2]. Naarmate het buigend moment toeneemt, verplaatst de neutrale lijn zich steeds meer naar de trekzone.

De waarde van de buigsterkte bedraagt steeds ongeveer 1,75 keer de druksterkte in longitudinale zin. Aangezien de longitudinale treksterkte dubbel zo groot is als de druksterkte, zijn de treksterkte en buigsterkte ongeveer gelijk en mag de treksterkte gelijk genomen worden aan de buigsterkte indien hiervoor geen gegevens aanwezig zijn [5]. De treksterkte is immers veel moeilijker te bepalen.

2.5.2.4 ANDERE

Naast de drie grote sterkte-parameters zijn er ook nog vele minder belangrijke die het sterkte-gedrag van hout kwantificeren. Zo wordt vaak de afschuifweerstand meegegeven die uitdrukt hoe goed het lichaam weerstand biedt tegen de verschuiving van twee aan elkaar grenzende vlakken. Aangezien er drie hoofdrichtingen zijn, zijn er ook drie mogelijk afschuifvlakken die telkens twee van deze richtingen bevatten. De meest kritieke is afschuiving in een vlak evenwijdig met de vezel en loodrecht aan de straal van de stam [5]. Voor praktische toepassing wordt soms ook de torsiesterkte bepaald; een grootheid die niet altijd een fysische betekenis heeft maar wel bruikbaar is voor ontwerpers. Vervolgens wordt vaak de hardheid van het hout bepaald. Dit is de weerstand die het hout biedt tegen indringing. Hiervoor zijn heel wat proeven

ontwikkeld die elk een andere waarde geven en vooral gebruikt worden om houtsoorten onderling te vergelijken. Ten slotte kan er ook sprake zijn van slijtweerstand en splijtvastheid.

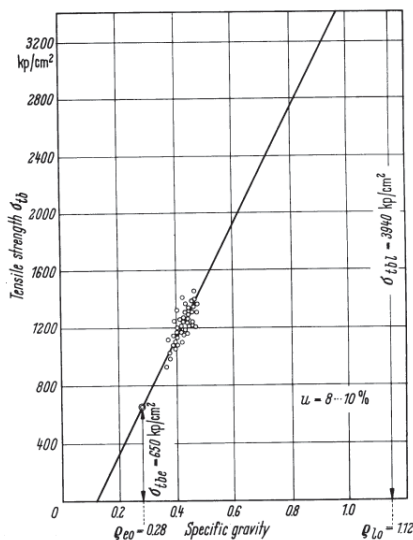
2.5.3 INVLOEDSFACTOREN

In voorgaande sterkte-eigenschappen is er altijd een zeer grote spreiding dat komt doordat er zoveel factoren zijn die het mechanische gedrag van het hout beïnvloeden. In het volgende deel zal telkens besproken worden hoe een bepaalde factor de drie hoofdeigenschappen en elasticiteitsmodulus beïnvloeden. Enkel de trend wordt aangetoond, terwijl de wiskundige verbanden hierachter vaak achterwege worden gelaten.

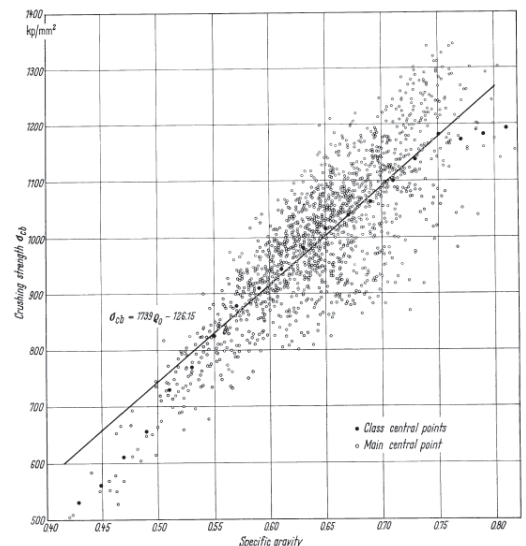
2.5.3.1 VOLUMEGEWICHT

Het volumegewicht is een zeer logische factor voor de sterkte-eigenschappen. Het volumegewicht is immers een maat voor de hoeveelheid stof die in een bepaald volume zit, en hoe meer stof er aanwezig is, hoe meer het kan bijdragen tot de sterkte. Algemeen gesteld is het ook zo dat hoe zwaarder een houtsoort is, hoe sterker deze is. Dit geldt zowel voor verschillende soorten hout als voor bomen van eenzelfde houtsoort. Het is echter wel zo dat houtsoorten verschillen in celsamenstelling en extracties die ook een invloed hebben op de sterkte. Dit impliceert dat het volumegewicht als een indicator van de sterkte-eigenschappen beschouwd dient te worden eerder dan een maat voor de sterkte.

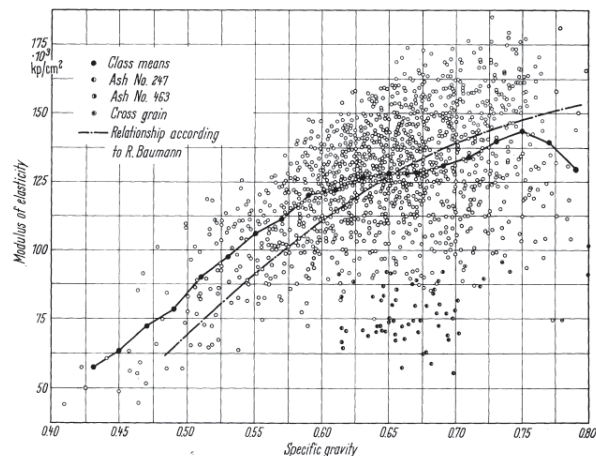
Tussen het volumegewicht en de elasticiteitsmodulus kan een lineair verband ondersteld worden waarbij echter een vrij grote spreiding aanwezig is. Dit duidt nog maar eens op het indicatief karakter van het volumegewicht. Ook opmerkelijk is dat er een veel strenger verband is bij naaldhout dan loofhout. Ook voor de treksterkte en druksterkte is een lineair verband.



Figuur 16: Treksterkte in functie van specifiek gewicht [2]



Figuur 17: Druksterkte in functie van specifiek gewicht [2]



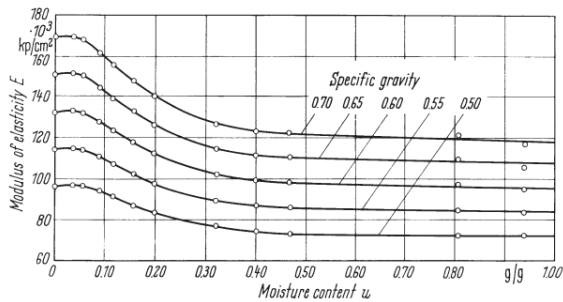
Figuur 18: Elasticiteitsmodulus in functie van specifiek gewicht [2]

2.5.3.2 VOCHTGEHALTE

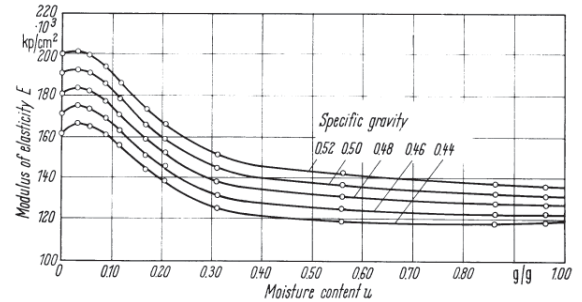
In tegenstelling tot het volumegewicht is voor het vochtgehalte en een bepaalde sterkte-eigenschap wel een zeer duidelijk verband. Het verband is zelfs in die mate gekend dat er formules bestaan die, uitgaande van de sterkte bij een bepaald vochtgehalte, de sterkte bij een ander vochtgehalte met voldoende nauwkeurigheid kunnen bepalen. Om het effect van vochtgehalte goed in te schatten, worden deze bepaald voor zowel groene toestand (boven VVP) als in luchtdroge toestand ($u = 12-15\%$).

Doorgaans kan men zeggen dat er geen significant verschil is in sterkte voor veranderingen in vochtgehalte boven het VVP (vezelvezadigingspunt). Onder het VVP kan de sterkte wijzigen over een factor van 2 tot 3 met veranderd vochtgehalte. Over het algemeen wordt het hout sterker naarmate het droger wordt, al wijst Dinwoodie op het feit dat afgaande van bepaalde experimenten de mechanische eigenschappen toch weer licht dalen eens ze onder een vochtigheid van 2% belanden [1].

Vochtig hout vertoont veel grotere plastische vormveranderingen. Bovendien mag men voor praktische toepassingen aannemen dat per % vochttoename 2% afname zal optreden in de elasticiteitsmodulus. Deze eigenschap is van groot belang bij het stoombuigen van hout: men moet er te allen tijde voor zorgen dat het hout niet uitdroogt tijdens de behandeling waar het voornamelijk de bedoeling is om het hout op te warmen: stroom voorkomt het traditionele uitdrogen van hout bij opwarming. Omdat ook de elasticiteitsmodulus niet veel meer verandert bij vochtgehaltes boven het VVP, loont het de moeite niet om het hout vochtiger te maken dan het VVP (zie Figuur 20).

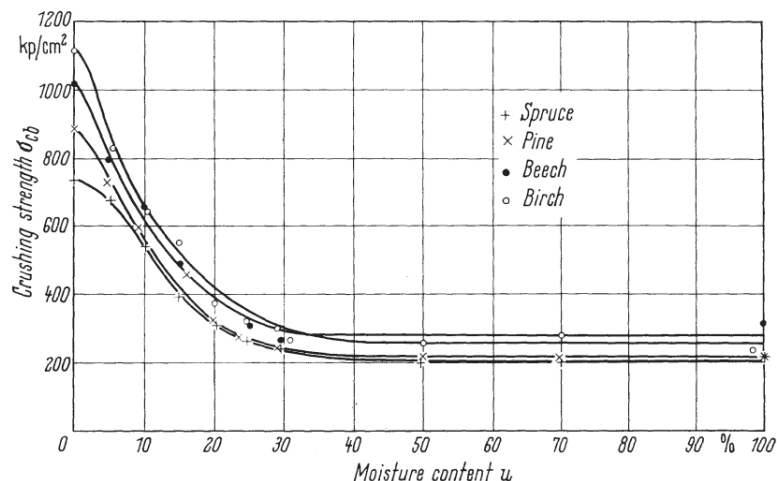


Figuur 19: Effect van vochtgehalte op E, parallel met de vezels van eik [2]



Figuur 20: Effect van vochtgehalte op E, parallel met de vezels van spar [2]

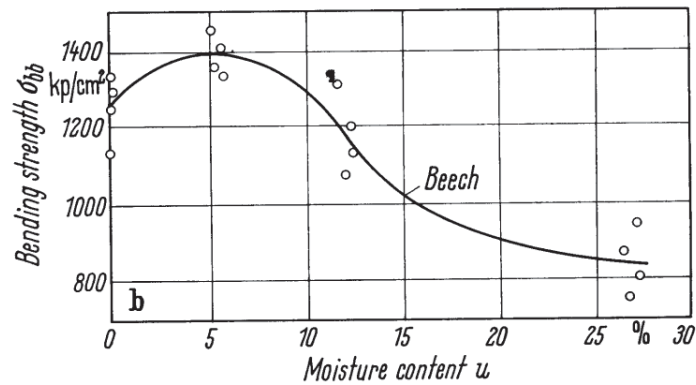
Het effect van het vochtgehalte op de druksterkte is veel groter. Dit wordt verklaard doordat de watermoleculen afgezet worden tussen de microfibrillen en dus diens afstanden ten opzichte van elkaar vergroten waardoor ook de krachten ertussen zullen verminderen. Als vuistregel mag hier aangenomen worden dat per % vochttoename de axiale druksterkte daalt met 4-6% (zie Figuur 21). Het effect op dwarsdruksterkte is minder maar nog steeds niet te verwaarlozen; die zal immers 2% dalen per % vochttoename.



Figuur 21: Effect van het vochtgehalte op druksterkte [2]

Het effect van het vochtgehalte op de treksterkte is minder uitgesproken en moeilijker te bepalen door de grote spreiding op de treksterkte. Men mag echter wel aannemen dat tussen $u = 10\%$ en het VVP per % vochttoename 3% sterkte wordt verloren. Er treedt een piek op voor $u = 8-10\%$ waarvoor nog steeds geen fysische reden is gevonden [5].

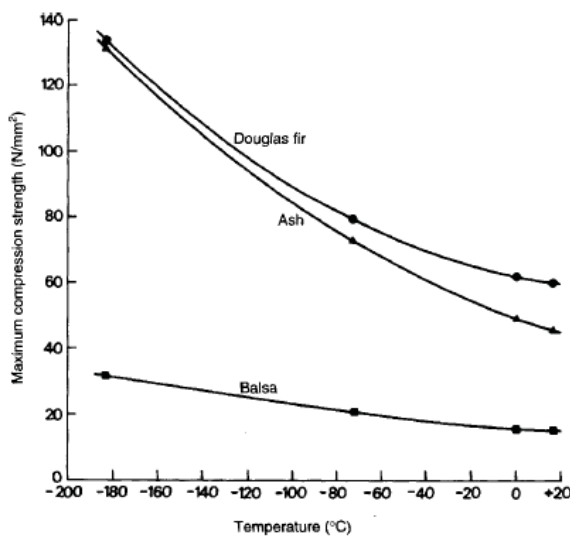
Door het verschillende gedrag van het vochtgehalte op de treksterkte en druksterkte is het verband tussen het vochtgehalte en de buigsterkte minder uitgesproken. Wat wel een constante is, is dat er een piek in de buigsterkte optreedt voor een waarde van 5%. Een lineair verband is enkel gerechtvaardigd voor vochtgehaltes tussen 8% en 15% (zie Figuur 22).



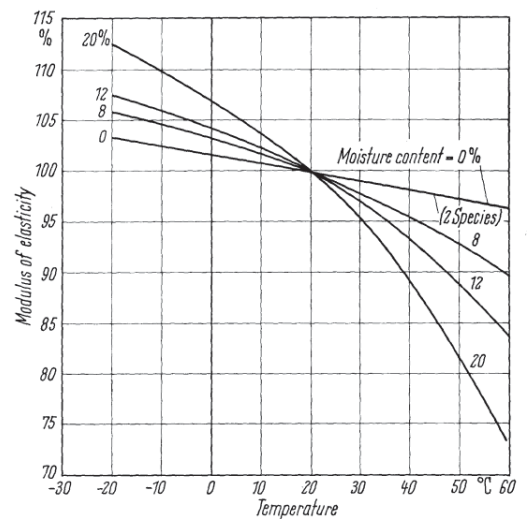
Figuur 22: Effect van vochtgehalte op de buigsterkte [2]

2.5.3.3 TEMPERATUUR

Algemeen kan men stellen dat de sterkte van hout afneemt bij stijgende temperatuur. Het effect van temperatuur hangt echter nauw samen met vochtgehalte, temperatuurniveau, duur van de verwarming, ... Als men echter voor een constant vochtgehalte de sterkte-eigenschappen beschouwt bij een temperatuur die varieert tussen de -200°C en $+20^{\circ}\text{C}$ kan volgens Dinwoodie een lineair verband aangenomen worden.



Figuur 23: Effect van temperatuur op longitudinale druksterkte [1]

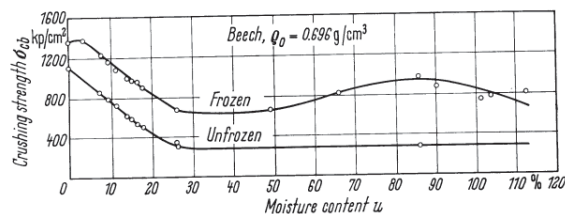


Figuur 24: Effect van de temperatuur op de elasticiteitsmodulus [2]

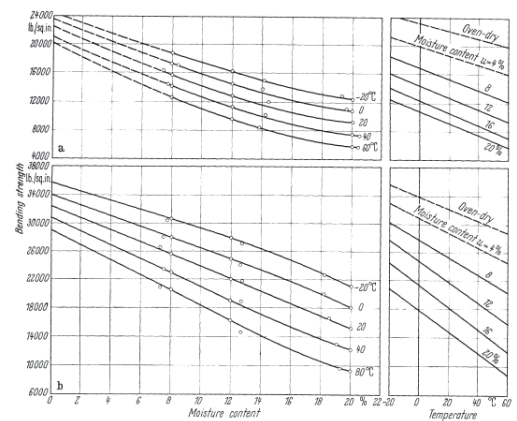
De duur van opwarming speelt echter een belangrijke rol. Enkel indien men voldoende lang of aan hoge temperatuur (meer dan 95°C) het hout verwarmt, treedt een blijvende verandering op. Dit is te wijten aan de thermische degradatie die optreedt door verkorting van de cellulosemoleculen en door de chemische veranderingen in de hemicellulose terwijl bij lagere temperaturen slechts een tijdelijk verhoogde moleculaire beweging en dus een vergrote roosterafstand optreedt [5].

Het verband tussen temperatuur en elasticiteitsmodulus werd uitgebreid onderzocht midden vorige eeuw.⁸ Sulzberger leidde verbanden af voor verschillende houtsoorten en verschillende vochtgehaltes (zie Figuur 24).

In tegenstelling tot de treksterkte, die nauwelijks beïnvloed wordt door de temperatuur, stijgt de druksterkte met dalende temperatuur. Als men het effect van het bevriezen van water in het hout buiten beschouwing laat is er een lineair verband tussen vochtgehalte en druksterkte. Een analoog verband wordt gevonden voor de buigsterkte.



Figuur 25: Effect van vochtgehalte en temperatuur op de druksterkte [2]

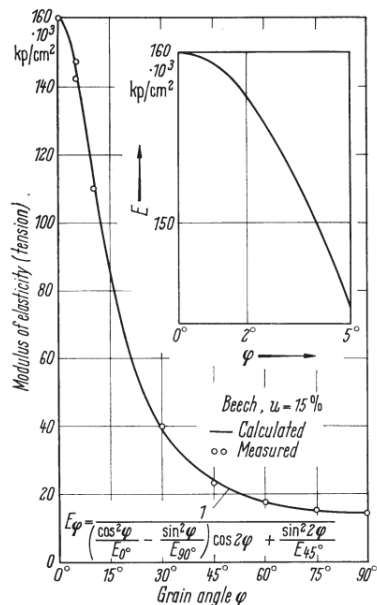


Figuur 26: Effect van vochtgehalte en temperatuur op de buigsterkte [2]

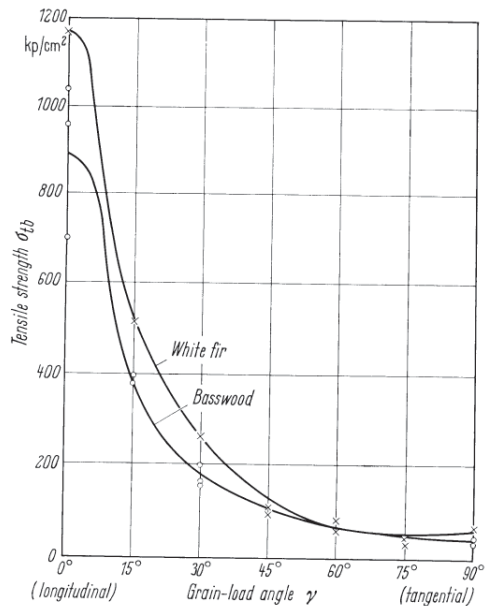
2.5.3.4 HOEK VAN DE VEZELS

De hoek waaronder de vezels lopen heeft een grote invloed op de mechanische eigenschappen van het hout. Dit is al voor een deel aan bod gekomen, namelijk overal waar een onderscheid werd gemaakt tussen longitudinale (hoek 0°) en transversale (hoek 90°) richting ten opzichte van de vezels. Onderstaande figuren geven richtwaarden voor niet alleen die twee posities, maar ook voor alle tussenliggende waarden. De verklaring ervoor is telkens een combinatie voor wat verteld werd over die bepaalde mechanische eigenschap in de richting van de vezels en er loodrecht op.

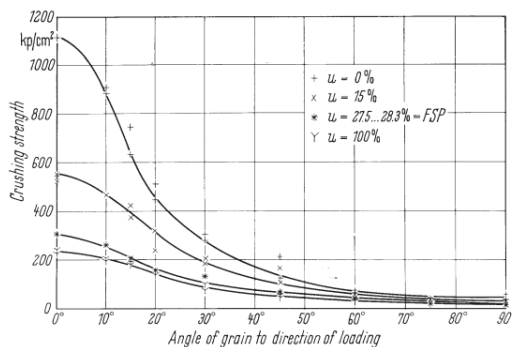
⁸ Sulzberger (1948) [2].



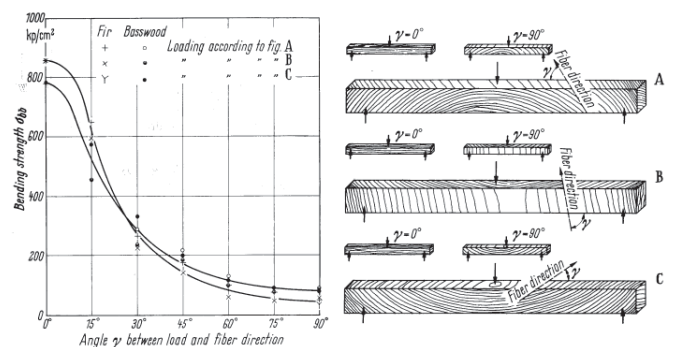
Figuur 27: Effect van de vezelhoek op de elasticiteitsmodulus [2]



Figuur 28: Effect van de vezelhoek op de treksterkte [2]



Figuur 29: Effect van de vezelhoek op druksterkte [2]



Figuur 30: Effect van de vezelhoek op de druksterkte [2]

Voorgaande betekent ook dat in het geval dat de vezels een kleine afwijking vertonen ten opzichte van de longitudinale as, er vooral voor de elasticiteitsmodulus en voor de treksterkte zeer grote dalingen optreden bij kleine hoekveranderingen. Wat droog hout betreft is dit ook voor de druksterkte het geval. Dit is meteen ook een van de redenen waarom het van groot belang is dat het de vezels in het hout zo recht mogelijk lopen bij buiging.

2.5.3.5 STRUCTUUR VAN HET HOUT

Het effect van het volumegewicht op mechanische eigenschappen is in feite afkomstig van de structuurverschillen die het volumegewicht beïnvloeden [5]. Voorbeelden hiervan zijn onder andere groeiringsbreedte en laathoutaandeel. Structuurafwijkingen die het volumegewicht van het hout niet beïnvloeden, zoals anisotropie en vezelafwijkingen, kunnen echter ook een grote invloed hebben op bepaalde mechanische eigenschappen.

2.5.3.6 BELASTINGSDUUR

Er is al gewezen op het feit dat in hout uitgestelde elastische vervormingen optreden, ook wel kruip genoemd. Door dit gedrag zijn laboproeven van een bepaalde duur enkel vergelijkbaar met proeven uitgevoerd met net dezelfde duur of na het toepassen van een correctie. Het verband tussen de sterkte en de tijd wordt onder gelijke omstandigheden beïnvloed door de aard van de belasting: permanent of periodisch. Bij een permanente belasting treedt kruip op, waardoor het falen van het proefstuk reeds kan optreden bij belastingen die slechts 50-75% van de breuklast zijn. In het geval van een periodische belasting treedt vermoeiing op en in dat geval kan de werkelijke faalspanning slechts een vierde zijn van die van een standaard belasting.

2.5.4 BEREKENINGEN

Zoals al aangehaald in de inleiding van dit deel zal er een vrij groot verschil zijn in de proefresultaten en de rekenwaarden van de mechanische eigenschappen van het hout. Men gaat voor berekeningen toch uit van de gemiddelde resultaten die gebaseerd zijn op bijna perfecte monsters. Wangaard stelde de procedure op om van die gemiddelde waarden uit laboproeven naar rekenwaarden te gaan [5].

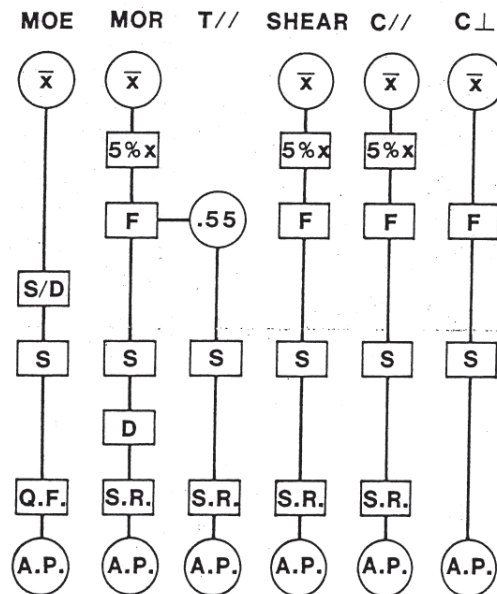


Fig. 10.91

Diagram of steps leading from average test results ($\bar{x}$) to the allowable properties as used by the designer (A.P.). The properties are modulus of elasticity (MOE), bending strength (MOR), tension parallel to grain (T//), shear parallel to grain (SHEAR), and compression parallel (C//) and perpendicular (C⊥) to grain. The adjustments are the calculation of the 5 percent exclusion limit (5X), the combined duration of load and safety factor (F), the special empirical factor for tension parallel to grain (0.55), shear deflection adjustment for modulus of elasticity (S/D), seasoning increases (S), depth factor (D), quality

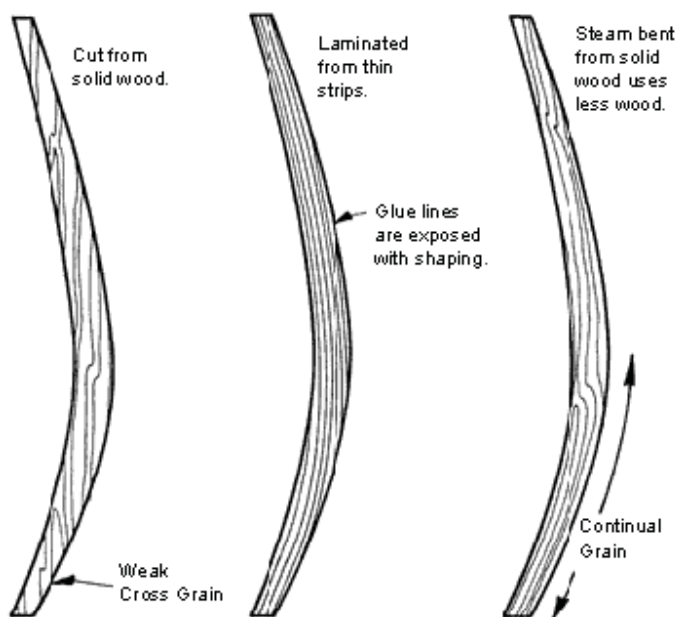
Figuur 31: Diagram voor de bepaling van veiligheidsfactoren [5]

Veel voorkomende stappen zijn delen door een veiligheidsfactor F , gelegen tussen 1,5 en 4,1 die het effect van de belastingsduur (standaard 10 jaar) en de werkelijke veiligheidsfactor combineert. De stap S slaat op het in rekening brengen van het effect van drogen, dat bepaalde sterkte-eigenschappen kan verhogen tot een factor 1,75. Deze procedures zijn vrij complex maar het in rekening brengen van verschillende factoren afzonderlijk leidt ertoe dat er toch een vrij kleine algemene veiligheidsfactor bekomen kan worden.

3 BUIGPROCESSEN VAN HOUT

De vaardigheid van het buigen van hout gaat terug tot in de Oudheid bij het vervaardigen van manden, of wanneer men afstapte van het maken van boten uit uitgeholde stammen. De simpele methode die toen gebruikt werd ging gepaard met grote beperkingen: zo werd de kromming slechts gehandhaafd zolang er kracht op het stuk uitgeoefend werd en was men niet in staat hout te buigen van grote diktes.

Een voor de hand liggende oplossing van deze problemen is het op maat zagen van de houtstukken. Dit heeft als voordeel dat er in theorie geen beperking staat op de kromtestraal of op de dikte van de gebruikte stukken. In vele gevallen voldoet deze techniek echter niet omdat de sterkte in grote mate vermindert doordat de vezels niet meer volgens de lengterichting geordend zijn. Zo zal men bijvoorbeeld niet kunnen vermijden schuifkrachten op te wekken in het vlak van de groeiringen. Ook gaat dit proces steeds gepaard met een groot verlies aan materiaal en worden de dimensies vaak beperkt door de dikte van de stam.



Figuur 32: Verloop van de vezels bij verschillende manieren om krommingen in hout te verkrijgen [6]

Gelukkig zijn er nu vele methodes beschikbaar om hout te buigen in allerlei vormen en dezelfde positie te handhaven zonder steun nodig te hebben van aangrenzende onderdelen. Deze methodes kunnen in twee grote groepen opgesplitst worden. De eerste groep bestaat uit allerlei technieken om massieve stukken hout zachter te maken en in een bepaalde vorm te fixeren, al dan niet met gebruik van warmte. De andere methodes gaan uit van het feit dat hout makkelijker te buigen is bij kleine diameters en het feit dat het effect defecten in het hout vermindert wordt door vele laagjes op elkaar te plaatsen. Zo worden dus verscheidene dunne lagen aan elkaar gelijmd al in de uiteindelijke positie.

Wood Bending	Laminated Bending					
	Solid Wood Bending	Kerfing				
		Bending process using a chemical treatment	Ammonia treatment			
			Alkali treatment			
		Compression bending				
		Cold bending				
		Hot bending	Internal heating (microwave heating)			
			External bending	Direct heating method		
				Hot plate method		
				Boiling method		
				Steaming method	High pressure method	
					Low pressure method	

Figuur 33: Mogelijke buigprocessen [7]

3.1 GELAMINEERD BUIGEN

Het is algemeen bekend dat hout ook zonder voorbehandeling gebogen kan worden. Van dit principe maakt de techniek van het gelamineerd buigen gebruik: zeer dunne strips hout worden tot kleine diameters gebogen. De vrij dunne strips worden naast elkaar gelegd en simultaan gebogen over eenzelfde vorm. De uiteinden worden niet ingeklemd zodat de strips vrij zijn om over elkaar te bewegen. Het uiteindelijk gekromde stuk bestaat uit een serie individuele strips die aan elkaar worden bevestigd door lijm. Eens deze gedroogd is zijn de afzonderlijke delen niet meer in staat om vrij over elkaar te glijden zodat bijna geen verandering in vorm meer kan optreden.

Deze manier van buigen heeft zeer belangrijke voordelen ten opzichte van stoombuigen van massieve delen. Er worden geen strenge eisen gesteld aan het hout: gelamineerd buigen kan men toepassen op elke houtsoort. De kwaliteit ervan moet ook niet zo hoog zijn aangezien defecten in het hout niet zullen optreden over de hele dikte van het stuk, maar slechts in 1 laag ervan. Het is ook mogelijk om grote lengtes te genereren door alternerende naden in de strips te voorzien die het geheel nauwelijks verzwakken. Ondanks het feit dat enige voorbehandeling vaak overbodig is, is het toch makkelijker om een vooraf bepaalde vorm te benaderen met deze techniek.

Het is echter zo dat gelamineerd buigen een grotere technische competentie vereist en dat de lijm die nodig is niet alleen problemen veroorzaakt aan de machines die het hout verwerken, maar ook esthetisch soms een negatieve invloed heeft. Het is zeer moeilijk om met deze techniek kromming te verkrijgen in twee verschillende vlakken. Ten slotte is deze techniek vaak ook duurder dan stoombuigen.

3.2 BUIGEN VAN MASSIEVE DELEN

Naast het buigen van gelamineerde delen bestaan er heel wat technieken die massieve delen hout buigen. Van deze technieken is het stoombuigen zonder druk slechts een ervan (zie Figuur 33). Een zeer eenvoudige is het inbrengen van groeven – kerfing – zodat het hout makkelijker buigt. Dit wordt gedaan op twee delen, waarna die met de zijde met groeven naar elkaar worden gelegd en samen met de groeven worden voorzien van lijm.

Koud buigen is de manier waar het hout in water wordt gelegd en vervolgens zonder warmte wordt gebogen. Uiteraard zullen hier geen grote krommingen mee verwezenlijkt kunnen worden. Het is ook mogelijk om de voorbehandeling met water te vervangen door een met een chemische stop zoals ammoniak. Hiermee kunnen al veel kleinere kromtestralen worden gevormd.

Een laatste manier om massieve delen zonder warmte te vervormen is het buigen door samendrukking. Het hout wordt koud in een buis geplaatst waar het net in kan. Vervolgens wordt door middel van een hydraulische cilinder een longitudinale samendrukking van ongeveer 10% gecreëerd. Na een terugveren van ongeveer de helft is het zeer eenvoudig om het hout te krommen tot een bepaalde vorm.

De andere methodes gebruiken warmte om het hout plastisch te maken. Dit kan geschieden door interne verwarming door middel van microgolven. Het gevaar bij kleine kromtestralen is dat door de zeer snelle opwarming het vocht onder druk aanwezig in en tussen de houtcellen kookt en zo de cellen scheurt. Hiermee gaat een groot verlies van sterkte gepaard. Een meer voor de hand liggende techniek is het verwarmen door contact met een warme plaat. Het risico met deze methode is dat het hout uitdroogt en niet meer eenvoudig te buigen is. Twee manieren om dat laatste te vermijden is het hout koken of in contact brengen met stoom. Hout opwarmen door middel van stoom kan versneld worden door de stoom warmer te maken dan 100°C door ze onder druk in contact te brengen met het hout.

3.3 STOOMBUIGEN

3.3.1 INLEIDING

De techniek van het stoombuigen is een oud ambacht dat tot op vandaag gebruikt wordt in het vervaardigen van o.a. meubels, boten en sportartikelen. Van alle voorgaande technieken is het misschien wel de meest economische, terwijl het toch de sterkte van het hout behoudt.

De grote doorbraak kwam er doordat Thonet niet alleen stoom gebruikte om het hout plastisch te vervormen, maar dat deed in combinatie met buigriemen – straps - en een buigvorm. Deze Oostenrijkse meubelmaker was immers de eerste die, na experimenten met gelamineerd buigen, er in slaagde om massieve delen te buigen met grote kromming door trek te vermijden in het hout door riemen aan te brengen aan de buitenzijde van het hout. Het succes van deze

methode is duidelijk aangezien ze in 150 jaar nauwelijks veranderd is en al 200 miljoen stoelen verkocht zijn die gevormd zijn met behulp van Thonet's techniek van stoombuigen [8].

3.3.2 SELECTEREN VAN HET HOUT

De kwaliteit van het hout dat gebruikt wordt bij stoombuigen moet steeds zeer hoog zijn. Doordat er bij het buigen grote rekken zullen optreden in het hout is het belangrijk dat het vrij is van defecten zoals knoesten. Op deze plaatsen kunnen barsten optreden en daarom moet het gebruik van dergelijk hout vermeden worden. Indien dit niet mogelijk is, moeten defecten steeds langs de convexe kant worden geplaatst: het dichtst bij de neutrale lijn. Het is zeer belangrijk dat de vezels allemaal in dezelfde richting lopen en dat deze niet veel afwijkt met de longitudinale as van het stuk hout: niet meer dan 1/15 [4].

Er is een zeer grote spreiding in de buigeigenschappen tussen de verschillende houtsoorten. Steven en Turner hebben voor de meest voorkomende houtsoorten de kleinste kromtestraal onderzocht voor 1 inch dik luchtdroog hout, zowel met als zonder strap [9].

Algemeen kan men zeggen dat loofhout beter buigt dan naaldhout en dat tropische houtsoorten niet goed buigen. Het is echter zo dat zelfs binnen een bepaalde houtsoort een grote spreiding kan optreden in verband met de buigeigenschappen. Er is gezocht naar een verband met soortelijk gewicht, sterkte, groeitempo en opgewekte spanning tijdens het buigen, maar er werd geen goede correlatie gevonden [4].

Het vochtgehalte van het hout is een parameter waarvan de invloed wel goed gekend is. Het is goed mogelijk om net geveld hout te buigen. Er zijn immers kleinere krachten nodig dan bij droger hout, maar het duurt veel langer om te drogen en te zetten na buigen en er is meer kans op kromtrekken. Het ideale vochtgehalte voor buigen bedraagt 15-25%, namelijk net onder het VVP. Het is mogelijk om nog droger hout te gebruiken: luchtdroog hout. De nadelen hiervan zijn dat fouten moeilijker op te sporen zijn in het hout, de voorbehandeling het hout kan doen vervormen en dat veel grotere krachten nodig zijn. Ook is er meer kans op scheuren aan de convexe zijde, net zoals er meer drukfouten kunnen optreden.

3.3.3 VERWEKEN VAN HET HOUT

Om een blijvende vervorming te creëren in het hout is het nodig om het hout plastisch te vervormen. Warm hout is meer plastisch dan koud hout en vochtig hout is meer plastisch dan droog hout. Een combinatie van warmte en vocht is dus de meest aangewezen techniek om het hout te verweken. De manier die hier besproken wordt, is het stoombuigen. Aangezien er bij de methode van Thonet niet met druk wordt gewerkt, bedraagt de temperatuur van de stoom ongeveer 100°C. Laboratorium tests hebben immers niet kunnen aantonen dat een hogere temperatuur een hogere plasticiteit impliceert [9]. Om een uniforme temperatuur van ongeveer 100°C te creëren in het hout volstaat 2 minuten stoomtijd per mm dikte. Minder en

het hout zal niet plastisch genoeg zijn, meer en de sterkte van het hout vermindert. Deze waarde varieert echter wel een beetje met het vochtgehalte van het hout en met de houtsoort. Een gepaste stoomtijd kan enkel met proeven bepaald worden.

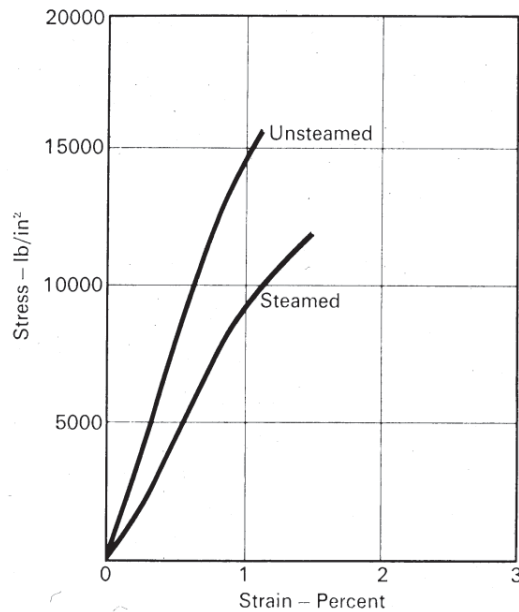
Het doel van werken met stoom is niet om het hout te bevochtigen, maar enkel op te warmen. Het is echter wel zo dat luchtdroog hout een kleine hoeveelheid vocht zal opnemen langs de zijkanten van het proefstuk. Aan de andere kant zal bij zeer vochtig hout een verlaging van vochtgehalte optreden tijdens het stomen. Voor hout met een vochtgehalte van 20-25% is het niet nodig om extra vocht aan het hout toe te voegen, zelfs niet voor zeer kleine kromtestralen. Ook voor vochtgehaltes van 15% is dit mogelijk niet nodig, maar voor lagere vochtgehaltes bij voorkeur wel.

3.3.4 SPANNINGEN IN HET HOUT

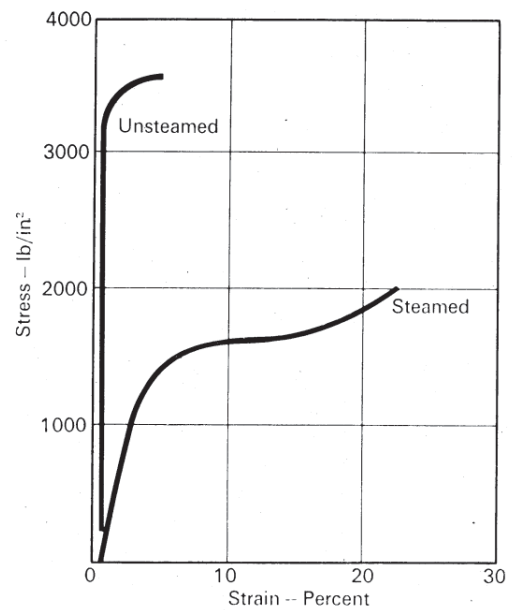
Zoals reeds eerder vermeld is hout vrij goed in het opnemen van drukkrachten, maar breekt snel bij belasting onder trek. Ook is er een groot verschil in de mate in de welke hout vervormt onder een zekere belasting bij trek of druk.⁹ In het elastische geval is deze verhouding de elasticiteitsmodulus E , maar aangezien het hier gaat om plastische vervorming mag deze term niet gebruikt worden. Een gevolg hiervan is dat bij buiging de neutrale lijn niet in het midden van het proefstuk zal liggen maar iets dichterbij de convexe kant. Er is dus ook een verschil in rek zijn aan druk of trekzijde.

Het stomen van hout heeft als gevolg dat het verschillend gedrag in trek en druk nog groter wordt. Het hout wordt in beide gevallen weker dan ervoor. Dit effect is vrij klein bij trek, maar des te groter bij druk. Het hout is dan in staat om vervorming tot meer dan 20% te ondergaan bij een belasting waar het zonder stomen nauwelijks 1% zou bij uitrekken.

⁹ Zie Figuur 9, vooral rechts van de proportionaliteitslimiet.



Figuur 34: Effect van stoom op de spanning/rek curve voor trek [9]



Figuur 35: Effect van stoom op de spanning/rek curve voor druk [9]

Er kan vrij eenvoudig een schatting gemaakt worden van de maximale kromtestraal voor een stuk hout gebogen in een cirkelvormige mal. Er moet immers steeds voldaan de onderstaande ongelijkheid [2].¹⁰

$$\varepsilon_t \geq \frac{a}{2 \cdot R}$$

Zolang er geen strap gebruikt wordt zal het hout falen aan de trekzijde waar een zeer geringe rek al breuk veroorzaakt. Het stomen zal in dat geval ook geen spectaculaire verandering in kromtestraal met zich meebrengen (zie Tabel 3). Het is pas wanneer een strap gebruikt wordt en de rek vastgehouden wordt op 0%, dat het effect van stomen, namelijk de zeer grote plastische vervorming op druk, invloed heeft en toelaat om te buigen met zeer kleine kromtestralen.¹¹

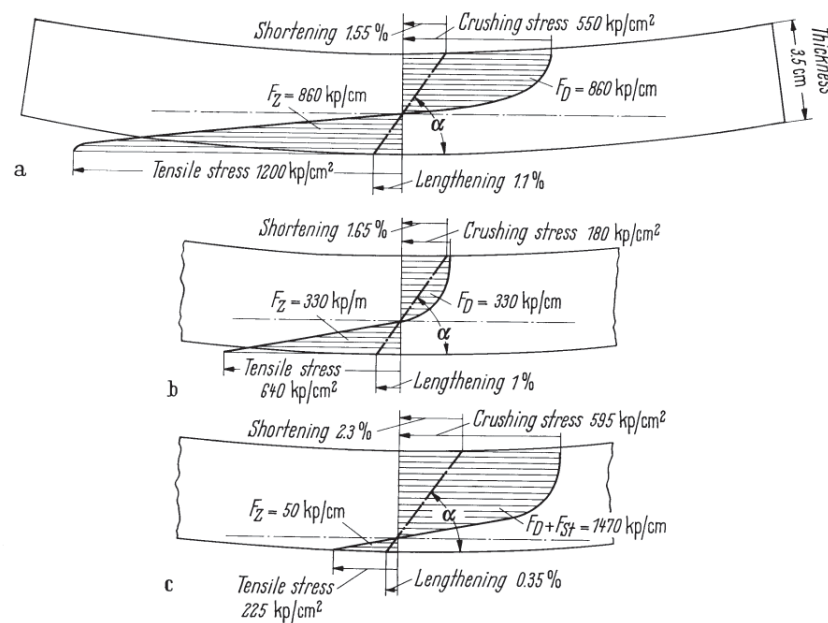
	$E_{t,max}$	$E_{d,max}$	$E_{t,f}$	$E_{d,f}$	$R_{theoretisch}/a$	$R_{proeven}/a$
Ongestoomd	1,1%	5%	1,1%	1,1%	45	-
Gestoomd ¹	1,5%	23%	1,5%	1,5%	33	12
Gestoomd ²	1,5%	23%	0%	23%	4	2,5

Tabel 3: Theoretische bepaling maximale kromtestralen voor ongestoomd hout, gestoomd hout¹ en gestoomd hout voorzien van een strap².

¹⁰ Ook al is dit hier niet vermeld, wordt er aangenomen dat de neutrale as in het midden van het hout ligt, terwijl ze in werkelijkheid dichterbij de convexe zijde ligt. Aangezien deze formule enkel geldt in het geval geen strap wordt gebruikt is deze vereenvoudiging aanvaardbaar. Dit blijkt immers uit Figuur 36. Het hout moet in theorie iets meer kunnen buigen dan deze formule weergeeft.

¹¹ Dit is een ideaal geval. Er zal steeds een kleine rek (bv 0,3%) optreden doordat de strap zelf ook een beetje rekt en er wat speling optreedt aan de inklemming.

Bovenstaande tabel toont het verschil in kromtestraal aan uitgaande van de gegevens uit Figuur 34 en Figuur 35, met behulp van de besproken, zeer benaderende, formule. Vervolgens zijn de rekken bij falen en de experimentele verhouding van a/R ook vermeld.¹² Er is aangenomen dat de neutrale lijn steeds in het midden ligt bij buigen zonder strap, en aan de convexe kant ligt bij het gebruik van een strap. Dat dit niet zo is, blijkt duidelijk uit een onderzoek van Kessel. Dit verklaart ook (gedeeltelijk) het verschil tussen de theoretische a/R en die gevonden uit door Stevens & Turner.



Figuur 36: Spanningsverdeling bij buiging voor niet-gestoomd hout (A), gestoomd hout (B) en gestoomd hout en voorzien van strap (C) [2]

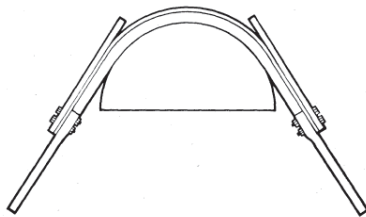
3.3.5 BUIGTECHNIEKEN

In de meeste gevallen is het nodig om de druk op te vangen aan de eindpunten van het te buigen stuk hout. Dit kan op meerdere manieren worden verwezenlijkt, maar meestal wordt gebruik gemaakt van metalen buigriemen waar twee blokjes worden aan bevestigd om de druk op te vangen. In het ideale geval zal hierdoor geen trek optreden in het hout, maar in de praktijk neemt de strap niet alle trek op. De convexe kant komt dus ook licht onder trek, wat zolang geen trekfouten optreden, een positief effect heeft op het buigproces aangezien het in lichte mate de indrukking aan de concave zijde vermindert.

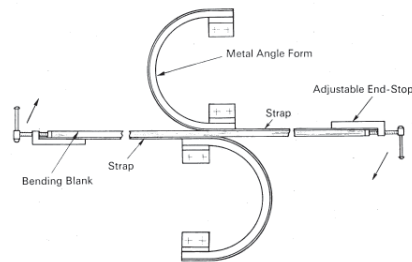
Het gebruik van straps is heel verschillend in drie situaties. In het geval van een enkelvoudige kromming in een vlak is ze vrij eenvoudig. In het geval van een tweevoudige of 'S' kromming is het al een pak ingewikkelder, en ten slotte is het zeer moeilijk om krommingen te verkrijgen in meerdere vlakken. Er moet steeds grote aandacht besteed worden aan de eindblokken

¹² Gehaald uit (11 p. 95).

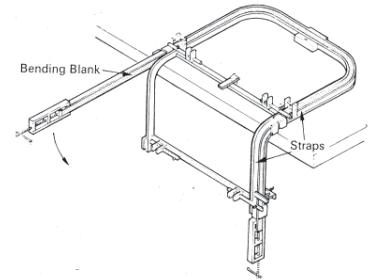
aangezien die alle kracht zullen opnemen. Om te voorkomen dat er teveel rek zou optreden aan de convexe kant is het noodzakelijk dat deze blokken zeer goed aansluiten met het hout. Dit kan gedaan worden door de eindblokken instelbaar te maken door middel van een schroef of het voorzien van dunne plaatjes om eventuele speling te vermijden. Om de spanning uniform te laten optreden in de lengtezin van het hout is het noodzakelijk om het buigen traag te laten verlopen.



Figuur 37: Enkelvoudige kromming in 1 vlak met strap [9]



Figuur 38: Tweevoudige kromming in 1 vlak met 2 straps [9]



Figuur 39: Meervoudige kromming in 2 vlakken met 3 straps [9]

De speling die optreedt tussen het hout en de eindblokken heeft een grote invloed op de spanningen die zullen veroorzaakt worden tijdens het buigen. Nobuyoshi Ishii deed onderzoek naar de spanningen veroorzaakt bij het buigen van proefstukken 30x50x1200mm hout van de netelboom en kwam met volgende resultaten naar voor.¹³

Speling (mm)	Spanning (N/mm ²)
0	52,3
1	42,1
2	42,8
3	33,3
4	32,3
5	21,9

Tabel 4: Spanning in functie van speling ter hoogte van eindblokken [7]

Als de eindblokken uitgerust zijn met een verstelbare schroef, kan voor aanvang reeds een druk opgewekt worden en/of tijdens het buigen de druk geleidelijk verminderen om te voorkomen dat er drukfouten optreden of dat een tegengestelde kromming optreedt.¹⁴ Deze laatste fout kan echter vermeden worden door de delen die niet gebogen worden voldoende recht te houden. Uiteraard heeft het verminderen van de druk uitgeoefend door de eindblokken als gevolg dat het hout kan scheuren aan de convexe kant.

Er zijn eigenlijk maar 2 soorten fouten die kunnen optreden in het hout. Ofwel faalt het door druk aan de concave zijde, ofwel door trek aan de convexe zijde. Fouten op trek zullen

¹³ Nobuyoshi (1993) [7]. Spanningen omgezet van kgf/cm² naar N/mm².

¹⁴ Dit verschijnsel is in detail uitgewerkt in 4.8.3.

optreden als de convexe zijde meer dan 1-2% rekt. Dit komt doordat de eindblokken niet nauw genoeg aansluiten op het hout, of dat ze er niet genoeg kracht kunnen op uitoefenen. Bij een goed ontworpen opstelling is dit echter altijd te vermijden. De fouten op druk zijn moeilijker te vermijden en treden op wanneer het hout teveel samengedrukt wordt, wanneer geconcentreerde krachten optreden door onvolmaaktheden of wanneer zwakke vlakken afschuiving veroorzaken. Dit kan het gevolg zijn van verschillende oorzaken: het hout is niet plastisch genoeg gemaakt, bevat niet het optimale vochtgehalte voor buigen of wanneer de vezels te veel afwijken van de lengterichting. Het is echter zo dat bij elk buigproces een zeker vervorming optreedt van de dwarsdoorsnede van het hout. De concave zijde wordt altijd iets breder doordat het plastisch gemaakte hout altijd de neiging heeft om zich te verplaatsen loodrecht op de richting van de kracht. Ook moet er rekening gehouden worden met de onvermijdelijke fouten die optreden ter hoogte van de eindblokken, namelijk het samendrukken of zelfs splijten van het hout.

3.3.6 DROGEN EN ZETTEN VAN DE KROMMING

Als een stuk hout uit de buigopstelling wordt gehaald heeft het de neiging om terug te veren naar zijn oorspronkelijke vorm. Dit is een natuurlijke reactie van het hout aangezien de grote drukkrachten aan de concave zijde het hout als het ware terug recht duwen. Om dit effect tegen te gaan moet het hout in zijn vorm gehouden worden tot het afgekoeld en voldoende gedroogd is. Dit noemt men het 'zetten' van het hout. Ook al zijn het afkoelen en drogen beiden belangrijk voor het zetten van een kromming, toch is het meestal het drogen dat de invloedrijkste factor is. Het zetten van een kromming kan men laten geschieden door het hout in de vorm te laten zitten of de uiteinden met staven vast te houden. Als men echter enkel de uiteinden vasthoudt, zal het hout neigen naar een zo uniform mogelijk kromming en kunnen gebogen stukken met variërende kromming hun vorm verliezen.

Bij het buigen met een niet te grote kromming kan de neiging van terugveren niet helemaal vermeden worden door goede condities waarin de kromming kan zetten. In dit geval is het nodig om het hout iets te veel te buigen om het terugveren te compenseren. Het drogen van hout gebogen met een grote kromming heeft echter soms tot gevolg dat de kromming vergroot. Dit onverwachte effect is het resultaat van het feit dat tijdens het drogen het hout zowel in de lengte als dikte krimpt. Het is dan ook logisch dat hoe natter het hout is voor drogen en hoe langer het gedroogd wordt, hoe groter het risico wordt op het naar binnen plooien van de kromming. Een gevaar dat hier mee gepaard gaat is het scheuren van het hout aan de convexe zijde tijdens het drogen.

Om het drogen van het hout te versnellen wordt vaak gekozen om het in een oven te verwarmen. Zo volstaat het in de meeste gevallen om het hout te drogen in een ruimte tot 60 a 70°C zonder de vochtigheid te controleren. De droogduur hangt vooral af van de dikte van het

hout, de ventilatie en het gewenste vochtgehalte, wat vaak met 24 tot 72 uur overeenkomt in geval van meubels [10]. Een goede indicatie voor voldoende droogtijd is vaak het feit dat de touwen die de eindpunten van een gekromd stuk hout samenhouden niet langer gespannen staan. Tenslotte is het zo dat de tijd die nodig is om een kromming te laten zetten steeds korter is dan de tijd die nodig is om het hout te drogen tot een vochtgehalte dat voldoet aan de gebruiksomstandigheden.

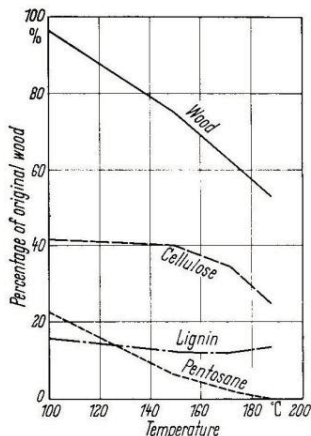
Nadat het hout de kans heeft gekregen om te zetten krijgt het zijn stijfheid en sterkte-eigenschappen voor het grootste deel terug. In welke mate dat gebeurt, hangt af van hoe lang het hout onderworpen is geweest aan een temperatuur van 100°C tijdens het stomen. Ook is het zo dat na het zetten de kromming niet permanent is in de tijd. Veranderingen in vochtgehalte van de omgeving zullen ook die van het hout beïnvloeden, wat op zijn beurt als gevolg heeft dat interne spanningen in het hout ontstaan en de kromming veranderen. De verschillende zones over de dikte van het hout zullen hier ook anders op reageren. Zo zullen de samengedrukte vezels aan de concave zijde veel meer veranderen in lengte onder wisselende vochtgehaltenes dan die aan de convexe zijde. Zo zal bij het krimpen de kromming toenemen en afnemen bij zwellen. Bij afwisselend drogen en herbevochtigen zal het toenemen van de kromming door drogen het effect van bevochtigen, namelijk het terugveren van het hout, niet volledig kunnen ongedaan maken. Het gevolg is dat bij wisselende vochtigheid de kromming langzaam verloren gaat. Een constante kromming kan dus enkel in stand gehouden worden als er een constant vochtgehalte aanwezig is in het hout, of wanneer de uiteinden vastgehouden worden door andere delen van de constructie.

3.3.7 EFFECT VAN HET STOMEN OP DE EIGENSCHAPPEN VAN HOUT

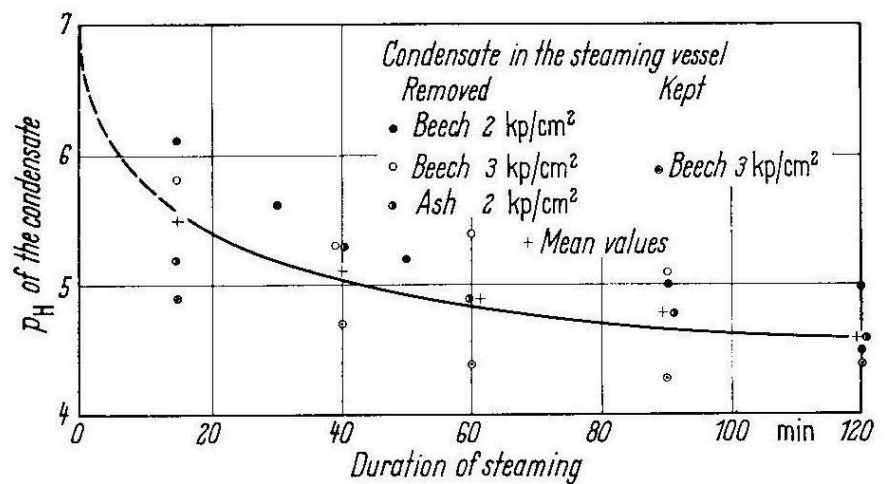
Er is reeds aangehaald dat door het buigproces het hout wat aan sterkte verliest. Dit komt door de combinatie van het hout te verwarmen tot 100°C en het dan plastisch te vervormen.

Het verwarmen van hout verandert in de eerste plaats het vochtgehalte. De mate waarin het dat doet hangt af van de stoomcondities. Indien het vocht de kans heeft te accumuleren ligt het evenwichtsvochtgehalte vrij hoog: 40-50% [2]. Wanneer het gecondenseerde vocht systematisch wordt verwijderd, bedraagt het evenwichtsvochtgehalte 22-25%. Droog hout neemt dus altijd vocht op tijdens het stomen terwijl nat ($u > 50\%$) altijd vocht verliest. In beide gevallen blijft er een laagje vocht aan het oppervlak hangen.

Niet alleen het vochtgehalte verandert tijdens het stomen, ook het droog gewicht van het hout verandert. Bij hoge temperatuur of lange stoomtijden treedt een hydrolyse reactie op die de relatieve hoeveelheden van cellulose en hemicellulose verandert. Bij deze chemische reacties treden zuren op die het goed mogelijk maken de reactie volgen door de pH te meten.

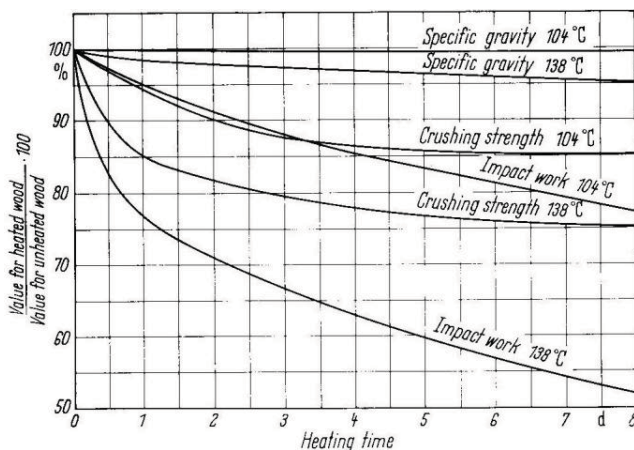


Figuur 40: Verandering droog gewicht na stomen [2]

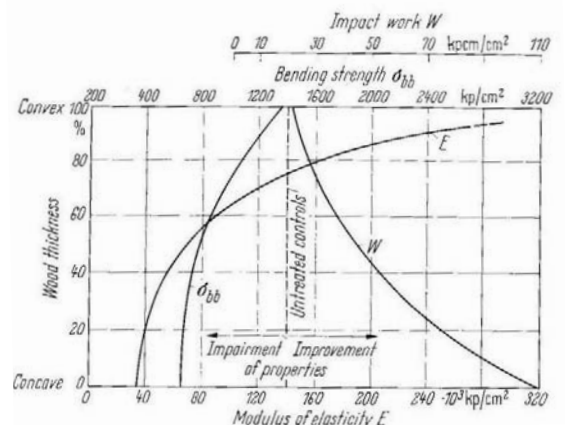


Figuur 41: Verandering zuurtegraad na stomen [2]

Bovenstaande figuren tonen duidelijk aan dat zelfs voor een temperatuur van slechts 100°C en korte stoomtijden (minder dan een uur) een verandering van droog gewicht en pH optreedt. Hiermee gaat uiteraard een verandering van mechanische eigenschappen gepaard die samengevat is in onderstaande figuren.



Figuur 42: Verlies aan sterkte na stomen [2]



Figuur 43: Verandering van eigenschappen van het hout na buigen [2]

Figuur 42 toont de gevolgen van het stomen op de sterkte. Ook al zijn de stoomtijden zeer klein vergeleken met de duur in die figuur, toch is er zeker sprake van een verlies aan bijvoorbeeld druksterkte door het stomen. De effecten van de grote plastische vervormingen door het stomen en buigen samen worden getoond in Figuur 43. Hier blijkt duidelijk dat de druk en treksterkte verminderen (deze worden samengenomen onder buigsterkte). Het materiaal wordt over het algemeen brozer waardoor de elasticiteitsmodulus en hardheid verhogen.

4 PROEVEN

4.1 DOEL

De proeven hebben als doel een inzicht te krijgen in het proces van stoombuigen van hout. Aangezien deze techniek een hoge mate van deskundigheid vereist is het noodzakelijk dat voor de eigenlijke proeven beginnen reeds heel wat inleidende testen zijn volbracht. Zo heeft de uitvoerder een bepaalde kunde opgebouwd bij het buigen van hout voordat de werkelijke proeven beginnen en kan men min of meer stellen dat het niveau van uitvoeren constant is. Hiervoor zijn dan ook een 30-tal inleidende testen uitgevoerd op verscheidene houtsoorten waarvan de resultaten niet worden opgenomen in deze tekst. De opgebouwde vaardigheid is van groot belang bij het vervaardigen van de schaalmodellen.

Een tweede doel van de proeven is een zicht te krijgen op verscheidene parameters van het buigproces. Er wordt uiteraard geen parameterstudie uitgevoerd, maar er wordt beoogd om de verschillende parameters te isoleren en vervolgens te toetsen of de resultaten overeenkomen met de verwachting door middel van enkele proeven.

Tenslotte hebben de proeven als doel om de beste uitgangssituatie te bepalen voor het buigen van het hout voor het schaalmodel. Zo moet worden bepaald welk hout gebruikt moet worden, aan welk vochtgehalte, de droogcondities, ... Al deze zaken moeten er toe leiden dat buigen van het hout voor het schaalmodel zo eenvoudig mogelijk verloopt en de kwaliteit van het uitgevoerde werk zo hoog mogelijk is.

4.2 PROEFOPSTELLING

Alle proefstukken worden gestoomd met behulp van een zelf gemaakte steambox. Het is zeer eenvoudig om dit zelf te construeren zolang de risico's die gepaard gaan met werken met stoom in acht worden genomen. Zo moeten alle gebruikte materialen bestand zijn tegen een temperatuur van 100°C en moet er voor gezorgd worden dat er nooit een overdruk kan ontstaan. De gebruikte doos is gemaakt uit een holle buis met een diameter van 20 cm en een lengte van 110 cm. Aan de ene kant zit een deksel terwijl de andere kant vast is en voorzien is van een inlaat voor de stoom. Om er voor te zorgen dat er steeds een bodempje condens aanwezig is om maximale luchtvochtigheid te garanderen is een kleine drempel gemaakt. Verder zijn aan de uitlaat meerdere gaatjes gemaakt om de stoom langs boven te laten ontsnappen zodat er geen overdruk kan ontstaan.

Voor het generen van de stoom zijn meerdere oplossingen maar er is gekozen voor een behangpapier afstomer.¹⁵ De Wagner W15 voldoet met zijn autonomie van ongeveer 70 minuten en een debiet van 50g/min. Mits een kleine omvorming van het handvat in een

¹⁵ De verscheidene alternatieven zijn o.a. een elektrische ketel, snelkoker of een professionele stoomgenerator [10].

ingangstuk voor de doos, is deze meteen te gebruiken voor het buigen van hout tot een dikte van 35 mm.¹⁶

Ook al worden straps kant-en-klaar verkocht, toch zijn de straps op maat gemaakt door aluminium zeer smal af te snijden en te voorzien van verstelbare eindpunten die de drukkrachten opnemen. Uit tests is gebleken door de zeer grote druk een dikte van 3 mm noodzakelijk is om te voorkomen dat de straps scheef trekken.



Figuur 44: Steambox



Figuur 45: Strap

De mallen worden vervaardigd uit (meerdere lagen) multiplex waardoor zeer gemakkelijk de vorm van een cirkel kan worden benaderd waarover de proefstukken manueel kunnen worden gebogen.

4.3 HET HOUT

Alle proeven worden uitgevoerd met slechts twee soorten hout: beuk en eik. Er is voor beuk gekozen omdat beuk een houtsoort is die zeer veel gebruikt wordt bij het vervaardigen van meubels en andere voorwerpen voor binnenshuis gebruik zoals trappen. Aangezien de techniek van Thonet vooral op meubels wordt toegepast, en beuk daar de meest gebruikte houtsoort voor is, zijn reeds heel wat proeven gedaan met beuk, wat vergelijking met andere testen eenvoudig maakt. Ook is beuk een van de best buigzame houtsoorten. Indien het hout echter in een iets vochtiger klimaat wordt blootgesteld zal beuk helemaal niet meer volstaan, maar een houtsoort zoals eik dan weer wel.¹⁷ Eik is vervolgens bijna even makkelijk buigbaar als beuk en is daarom een goed alternatief voor beuk in een vochtig klimaat.

¹⁶ De 35 mm wordt geschat door de autonomie (min) te delen door de verwachte stoomduur van 2 min/mm dikte.

¹⁷ Ook al wordt beuk voldoende beschermd door te teren of verven, toch zal bij gebruik in de buitenlucht reeds falen na amper 13 jaar. Eik echter kan onder dezelfde omstandigheden meer dan 100 jaar zijn sterkte bewaren [14].

Zoals reeds vermeld in de inleiding, is de kwaliteit van het hout van groot belang want er kunnen zeer grote spanningen optreden tijdens het buigen. Het is dan ook noodzakelijk om van een goed classificatiesysteem te vertrekken waar alle proefstukken aan getoetst worden. Er bestaan zeer gedetailleerde normen die beschrijven hoe beuk en eik moet gesorteerd worden door middel van een indeling op uiterlijk.¹⁸ Deze norm is onder andere van toepassing op gezaagd eik –en beukenhout met een rechthoekige doorsnede, niet dikker dan 27 mm. De norm bevat ook een afkeurcriterium voor verkleuring maar dit wordt niet gevolgd omdat dit het enige criterium is dat de sterkte van het hout –en dus het buigproces- niet beïnvloedt. De hoogste kwaliteitsklasse laat voor eik geen kwasten of scheurtjes toe in het hout en voor beuk geen kwasten maar wel kleine scheurtjes.

Alle proefstukken die niet voldoen aan de hoogste kwaliteitsvoorwaarden worden afgekeurd. Enkele voorbeelden van afgekeurde proefstukken worden hieronder weergegeven.



Figuur 46: Kleine kwast



Figuur 47: Grote kwast



Figuur 48: Afwijking van vezelrichting

Het hout wordt gedroogd aangekocht bij een groothandel in balken van vrij grote dimensies die vervolgens verzaagd worden tot de gepaste afmetingen. Elk lot wordt een naam gegeven waarbij de letter staat voor de houtsoort en het getal voor het lot nummer voor die bepaalde houtsoort.¹⁹ De naam van een proefstuk bestaat uit de naam van het lot waar het van afkomstig is, vervolledigd met een letter om de proefstukken uit de verschillende loten te onderscheiden.

Naam	Houtsoort	Afkomst	Vochtgehalte [%]
O01	Eik	-	12,9
A01	Es	-	12,5
B01	Beuk	-	9,2
O02	Amerikaanse Eik	Hanssen	11,0
B02	Pollmeier Beuk	Hanssen	10,7
O03	Amerikaanse Eik	Hanssen	11,3

Tabel 5: Vochtgehaltes per lot

¹⁸ Gezaagd hout – Indeling van loofhout op uiterlijk – Deel 1 : Eik en beuk [15].

¹⁹ De letter staat voor de eerste letter voor de Engelstalige benaming van de houtsoort.

4.4 PARAMETERS

Tijdens de proeven worden enkele parameters onafhankelijk van elkaar onderzocht. Het zal hier telkens maar om enkele proeven per parameter gaan. Het is namelijk de bedoeling om een trend waar te nemen en het gedrag te toetsen aan de verwachtingen. Er wordt geen parameterstudie beoogd. Ook worden er geen significantieniveaus onderzocht omdat de omvang van het aantal proefstukken veel te klein is. Het is dus van groot belang om bij alle gevonden verbanden en invloeden van de parameters steeds de beperkte schaal van het onderzoek in acht te nemen.

4.4.1 VOCHTGEHALTE

Bij het stomen van hout zijn twee factoren belangrijk: vochtgehalte en temperatuur. Aangezien gewerkt wordt met stoom onder atmosferische druk, blijft de temperatuur constant. Zo is meteen duidelijk dat het vochtgehalte de belangrijkste parameter is. Het is dus van groot belang om het vochtgehalte van de proefstukken nauwkeurig te kunnen meten. De beste methode hiervoor is de ovenmethode (zie 2.4.2). De methode staat beschreven in de Europese Norm.²⁰ Het vochtgehalte kan eenvoudig berekend worden volgens volgende formule:

$$u = \frac{M_{ini} - M_{droog}}{M_{droog}} \cdot 100\%$$

Hier staat M_{ini} voor het gewicht van het hout en M_{droog} voor het gewicht van het volledig gedroogde hout. Het hout wordt gedurende 24 uur in een oven van precies 103°C gehouden.²¹ De gedeeltelijke vernieling van het hout die hiermee gepaard gaat, maakt het noodzakelijk dat voor deze tests enkele monsters genomen worden per lot om het vochtgehalte te bepalen (zie 2.4.2). Aangezien bij het uitvoeren van deze test het Laboratorium voor Houttechnologie zijn materiaal ter beschikking heeft gesteld konden de ovens tot op een tiende van een graad worden geregeld en de massa tot op een tienduizendste van een gram worden afgelezen. Eens een vochtgehalte van het lot is bepaald, kan het vochtgehalte van elk proefstuk op elk moment worden berekend door:

$$u_2 = \frac{M_2 - \frac{M_1}{100\% + u_1}}{\frac{M_1}{100\% + u_1}} \cdot 100\%$$

Het is dus zeer eenvoudig om veranderingen het vochtgehalte van de proefstukken te bepalen via bovenstaande formule een voor een bepaald gewicht het vochtgehalte is gekend voor dat

²⁰ Vochtgehalte van een stuk gezaagd hout – Deel 1: Bepaling door de werkwijze met drogen in de oven [16].

²¹ Een hogere temperatuur kan het proces versnellen, maar daardoor kan er een chemische reactie optreden van bepaalde componenten in het hout waardoor de massa kan veranderen. (Gesprek met Prof. J. Van Acker)

proefstuk. Het is echter zo dat metingen ter plekke werden uitgevoerd met een weegschaal die slechts tot op 0,01 g meet. Deze nauwkeurigheid is echter meer dan voldoende aangezien er gewerkt wordt met proefstukken van meer dan 100 g.

4.4.2 OPTIMALE STOOMTIJD

De stoomtijd is een zeer vaag begrip bij het stoombuigen van hout. In Angelsaksische literatuur wordt meestal aangeraden om al het hout te stomen gedurende 1 uur per inch dikte (2,4 mm/min) terwijl in andere teksten 2 min/mm aangeraden wordt. Een theoretische reden hiervoor wordt nooit gegeven. Vaak wordt er wel bij vermeld dat bepaalde houtsoorten iets langer moeten stomen dan andere. Er bestaat dus vrij grote consensus over de duur van stomen, namelijk rond de 2 minuten per millimeter dikte.

4.4.3 KROMMING

De kromming heeft logischerwijze een grote invloed op de proefstukken. Ook al zijn de praktisch haalbare krommingen met strap zeer groot, toch zijn deze zeer moeilijk uit te voeren. Het is de bedoeling om na te gaan in welke mate deze bereikt kunnen worden, en welke invloed grotere krommingen hebben op de resultaten. Met de kromming bedoelt men eigenlijk de relatieve kromming aangezien de kromtestraal steeds gedeeld wordt door de dikte van het proefstuk. Zo wordt geïmpliceerd dat R/d een constante is en dat proeven met verschillende waarden van R of d dezelfde waarden moeten geven zolang de verhouding maar dezelfde is.

4.4.4 DROOGTIJD EN DROOGCONDITIES

Een zeer belangrijk aspect van het stoombuigen is het drogen en het zetten van het gekromd hout. Dit zal niet meteen een grote invloed hebben op het al dan niet slagen van een kromming of de defecten die daarbij zullen optreden, maar wel op het terugveren. Dit effect zal niet groot zijn bij het buigen van luchtdroog hout, maar des te groter wanneer hout gebogen wordt met een vochtgehalte boven het VVP. De omstandigheden waar het hout in droogt, zoals de manier waarop het in zijn vorm gehouden wordt en de temperatuur waaraan het droogt zijn ook van groot belang.

4.4.5 HOUTSOORT

Omdat er slechts twee houtsoorten gebruikt zijn in de proeven, namelijk beuk en eik, is er slechts een klein onderzoek gevoerd naar het effect van de houtsoort op het stoombuigen.

4.5 HOE PROEVEN EVALUEREN?

Wanneer kan een test geslaagd genoemd worden? Voor matige kromming mag men zich immers verwachten aan 20% mislukkingen terwijl een veel grotere fractie gebroken proefstukken verwacht mag worden naar mate men meer naar de limiet gaat. Het al dan niet breken van een proefstuk alleen is dus geen betrouwbare indicatie van de mogelijkheid tot het behalen van een bepaalde kromming. Aangezien het de bedoeling is om de invloed van

bepaalde parameters te onderzoeken in het domein waar de meeste proefstukken niet zouden mogen breken, is er nood aan andere criteria om de kwaliteit van het gebogen hout te bepalen.

Het optreden van kleine scheuren aan de convexe zijde en rimpels aan de concave zijde is een belangrijke indicatie voor de kwaliteit. Bij het optreden van scheuren wordt de test als gefaald beschouwd. Het is echter veel moeilijker om *alle* rimpels te vermijden. Om die reden wordt het aantal rimpels per lopende dm van het gekromde deel aan de concave zijde opgenomen bij de resultaten van de proeven.

Het is altijd zeer interessant te weten hoe een proefstuk precies gebogen is. Waar en in welke maten de rekken optreden geeft een goed inzicht in de globale vervorming van het hout. Het creëren van deze vervormingen is immers het doel van het buigen van hout. Om die reden worden zowel gemiddelde als de maximale rekken bepaald voor de convexe en concave zijde.²²

Een laatste maar zeer belangrijke evaluatie van een gebogen proefstuk is de mate waarin ze terugveert. Aangezien de kromming niet constant is in de tijd wordt de hoeveelheid van terugveren van de oorspronkelijke positie op verscheidene tijdstippen bepaald.

4.6 EFFECT VAN HET STOMEN OP HET VOCHTGEHALTE

Voordat de werkelijke proeven uitgevoerd worden, is het nuttig om het effect van het stomen op het vochtgehalte van hout na te gaan. Hiervoor volstaat het om proefstukken met verschillend vochtgehalte te stomen zonder deze achteraf te buigen. De proeven zijn uitgevoerd op de loten B02 en O02. Om een verhoogd vochtgehalte te verkrijgen is het hout gedurende 24 uur ondergedompeld in water. Er zijn dus proefstukken met twee verschillende initiële vochtgehaltes: de 'droge' met een vochtgehalte van 10-11% en de 'natte' met een vochtgehalte van rond 60%.

De proefstukken hebben een dikte van 1,7-1,8 cm en worden gestoomd tussen de 1 min/mm en 3 min/mm. Tabel 6 geeft de resultaten weer.

²² De begrippen gemiddelde en maximale rek worden in Appendix A uitgewerkt.

Naam	Lot	t/mm [min]	d [mm]	M _{droog} [g]	M _{ini} [g]	M _{eind} [g]	M ₀ [g]	u _{droog} [%]	u _{ini} [%]	u _{eind} [%]	Δu [%]	Δu _{gem} [%]
P1A	B02	1	17	22,36	22,36	23,31	20,292	10,19	10,19	14,87	4,68	4,62
P1B	B02	1	17	21,65	21,65	22,56	19,650	10,18	10,18	14,81	4,63	-
P1C	B02	1	17	21,32	21,32	22,22	19,341	10,23	10,23	14,89	4,65	-
P1D	B02	1	17	20,90	20,90	21,75	18,865	10,79	10,79	15,29	4,51	-
P2A	B02	2	17	22,94	22,94	24,10	20,654	11,07	11,07	16,68	5,62	5,44
P2B	B02	2	17	21,87	21,87	22,97	19,694	11,05	11,05	16,63	5,59	-
P2C	B02	2	17	21,32	21,32	22,34	19,193	11,08	11,08	16,40	5,31	-
P2D	B02	2	17	20,54	20,54	21,51	18,473	11,19	11,19	16,44	5,25	-
P3A*	B01	3	18	28,40	28,40	30,00	25,453	11,58	11,58	17,86	6,29	6,22
P3B*	B01	3	18	29,46	29,46	31,17	26,387	11,65	11,65	18,13	6,48	-
P3C*	B01	3	18	28,07	28,07	29,64	25,145	11,63	11,63	17,88	6,24	-
P3D*	B01	3	18	29,93	29,93	31,50	26,813	11,62	11,62	17,48	5,86	-
N1A	B02	1	17	23,10	33,53	31,70	20,774	11,20	61,40	52,59	-8,81	-9,59
N1B	B02	1	17	20,89	30,39	28,18	18,924	10,39	60,59	48,91	-11,68	-
N1C	B02	1	17	21,58	31,06	31,01	19,594	10,14	58,52	58,26	-0,26	-
N1D	B02	1	17	22,88	32,80	31,08	20,745	10,29	58,11	49,82	-8,29	-
N3A	B02	3	17	21,86	31,97	30,28	19,848	10,14	61,07	52,56	-8,51	-8,73
N3B	B02	3	17	19,89	29,30	27,80	18,061	10,13	62,23	53,92	-8,31	-
N3C	B02	3	17	20,56	30,20	28,68	18,675	10,09	61,71	53,57	-8,14	-
N3D	B02	3	17	21,56	31,65	29,70	19,545	10,31	61,93	51,96	-9,98	-
E2A	O02	2	17	23,67	23,67	24,66	21,389	10,66	10,66	15,29	4,63	4,88
E2B	O02	2	17	22,14	22,14	23,00	20,000	10,70	10,70	15,00	4,30	-
E2C	O02	2	17	22,50	22,50	23,79	20,316	10,75	10,75	17,10	6,35	-
E2D	O02	2	17	22,40	22,40	23,26	20,238	10,68	10,68	14,93	4,25	-

Tabel 6: Vochtgehaltes tijdens het stoomproces²³

Ook al is de omvang van deze test beperkt, toch zijn enkele duidelijke tendensen zichtbaar. Alle droge proefstukken ($u = 10\text{--}11\%$) hebben na stomen een verhoogd vochtgehalte terwijl de natte proefstukken ($u \approx 60\%$) een lager vochtgehalte hebben dan voordien. Het effect van de stoomduur is duidelijk bij de droge proefstukken. Hoe langer hout gestoomd wordt, hoe meer vocht het opneemt. Het hout zal initieel veel vocht opnemen (bijna 5% in de eerste min/mm dikte) maar nadien slechts in beperkte mate (enkele tienden % per extra min/mm).

De verandering van het vochtgehalte van hout met initieel hoog vochtgehalte is minder duidelijk. Door de grote spreiding in de resultaten valt enkel te besluiten dat het hout vocht verliest tijdens het stomen, maar niet in welke mate. Dit kan echter wel verklaard worden door het feit dat hout bevochtigd door het onderdompelen in water voor een korte tijd geen homogeen vochtgehalte heeft over de dikte. Het midden van het proefstuk is niet zo veel natter

²³ De rode waarden of met * slaan op proefstukken die in contact zijn gekomen met water tijdens het stoomproces en dus met een veel te hoog vochtgehalte. De proeven op proefstukken met een * zijn opnieuw uitgevoerd.

geworden als de buitenkanten, die in direct contact met het water hebben gestaan en zo veel vocht hebben opgenomen. Bij het stomen zal dat vocht aan de buitenkant snel kunnen ontsnappen. Eens daardoor een meer homogeen vochtgehalte over de dikte wordt bereikt, verloopt de verandering van vochtgehalte ook minder snel. Tenslotte zijn enkele proeven uitgevoerd op eik. Hieruit blijkt dat eik minder snel vocht opneemt dan beuk.

4.7 RESULTATEN

Bij de bespreking van de resultaten wordt een opsplitsing gemaakt per parameter om het geheel overzichtelijk te houden. Uiteraard worden bij de bespreking van een parameter al de andere zoveel mogelijk constant gehouden.

4.7.1 VOCHTGEHALTE

De mate waarin het vochtgehalte van het hout verandert tijdens het stomen en erna tijdens het drogen, staat beschreven in 4.6. Hier is het de bedoeling om te achterhalen in welke mate een verschil in initieel vochtgehalte van het hout het buigen beïnvloedt.

Deze proeven zijn allemaal uitgevoerd op hout dat een vochtgehalte heeft van ongeveer 11% of een bepaalde tijd in het water heeft gelegen en zo een vochtgehalte heeft bereikt van ongeveer 60%. Alle proefstukken zijn gebogen over dezelfde mal van 90° met een kromtestraal van 10 cm. Tabel 7 toont de maximale hoek aan die opgemeten werd nadat de proefstukken reeds weken uit hun vorm zijn gehaald. Het aantal drukfouten wordt uitgedrukt als de hoeveelheid grote rimpels die optreden aan de concave zijde, terwijl de trekfouten het aantal kleine scheurtjes zijn aan de convexe zijde. Omdat in deze tabel de proeven op het hout met laag vochtgehalte allemaal met beuk zijn uitgevoerd, en de proeven met hoog vochtgehalte met eik, is voor zowel de proeven met hoog vochtgehalte als deze met laag vochtgehalte een proef van het ander type hout toegevoegd om aan te tonen dat niet de houtsoort maar wel het vochtgehalte de verklaring is voor onderstaande tendensen.

Blok	Hout	Naam	u [%]	Terugveren [°]	Drukfouten	Trekfouten
B02	Beuk	B02E	10,7	10,5	6	1
B02	Beuk	B02F	10,7	11,0	5	1
B02	Beuk	B02G	10,7	9,0	6	1
B02	Beuk	B02H	10,7	9,0	6	1
O02	Eik	B02A	11,0	11,0	0	0
O02	Eik	O02F	30	1,5	0	0
O02	Eik	O02G	30	2,5	0	0
O02	Eik	P02I	70	0,0	0	0
O02	Eik	O02J	40	0,0	0	0
O02	Eik	O02K	40	1,0	0	0
B02	Beuk	B02U	60	1,0	0	0

Tabel 7: Terugveren van het hout in functie van het vochtgehalte

Voor zowel de uiteindelijke hoek van de kromming, het aantal drukfouten als het aantal trekfouten is er een groot verschil tussen vochtig ($u = \pm 60\%$) en droog ($u = \pm 11\%$) hout. Wanneer droog hout wordt gebogen is het niet mogelijk om een grote terugvering van het hout te vermijden. Dit is wel het geval bij nat hout mits goede droogcondities in acht worden genomen (Zie 4.7.3). Het is ook niet mogelijk om een hoog aantal drukfouten te vermijden in gebogen beukenhout zolang het hout droog is. De trekfouten kunnen onder controle gehouden worden indien er grote aandacht wordt besteed in het vermijden van onnauwkeurigheden die ongewenste trek kunnen veroorzaken in het hout (Zie 4.8.3).

4.7.2 STOOMTIJD

De stoomtijd is een parameter waar er een grote consensus over bestaat in de literatuur: ongeveer 2 minuten per mm dikte. De reden hiervoor is dat de meeste experimenten hebben aangetoond dat het hout niet plastisch genoeg is bij lagere waarden en er geen noemenswaardige verhoging is van de plasticiteit van hout bij langere stoomtijden. Het is de bedoeling om dit met enkele experimenten aan te tonen. Er wordt gebruik gemaakt van een mal met kromtestraal van 10 cm en een hoek van 90° .

Blok	Hout	Naam	u [%]	Stoomtijd [min/mm]	Hoek [°]	Drukfouten	Trekfouten
B02	Beuk	B02O	10,7	2	4,5	2	2
B02	Beuk	B02P	10,7	2	5,0	4	2
B02	Beuk	B02Q	10,7	4	5,5	5	2
B02	Beuk	B02R	10,7	4	5,5	5	1

Tabel 8: Effect van stoomtijd op buigproces

Het is zeer eenvoudig aan te tonen dat een stoomtijd van 1min/mm dikte niet volstaat om het hout te buigen aangezien elke poging om dit te doen is mislukt en het hout gebroken is. Met een stoomtijd van 2 min/mm lukte dit wel. Met hogere waarden lukt dit uiteraard ook, maar er is echter geen verbetering in het aantal trekfouten of drukfouten. Ook het terugveren is helemaal niet verbeterd. Het is dus beter om te stomen aan 2 min/mm dikte omdat het duurder wordt langer te stomen en de meeste mechanische eigenschappen van het hout achteruit gaan. Nog langere stoomtijden zijn praktisch niet mogelijk omdat de stoomgenerator slechts ± 70 minuten aan een stuk kan stomen.

4.7.3 DROOGTIJD EN DROOGCONDITIES

Het is niet alleen van belang om de parameters te onderzoeken die een invloed hebben op het buigproces tijdens het buigen zelf, maar zeker ook erna. Het is immers van groot belang om het hout de kans te geven zich te laten zetten. Dit betekent niet alleen dat het hout in vorm moet gehouden worden zolang het afkoelt, maar ook zolang het opdroogt.

Alle proeven zijn uitgevoerd met dezelfde mal, namelijk een straal van 10 cm en een hoek van 90° . De dikte van alle proefstukken bedraagt 17 mm. De manier om de droogcondities met

elkaar te vergelijken is de maat van terugveren van het hout. Dit wordt opgemeten op het moment dat het hout uit de mal (of houder voor te drogen) komt, na 1 en 3 dagen en na een lange periode van ongeveer 1 maand. Het verschil in de proeven zit in de houtsoort en vochtgehalte van de proefstukken, de duur van inklemming van de proefstukken en het al dan niet verwarmen van de proefstukken tijdens het drogen.

De vochtgehaltenes voor de proefstukken die 24 uur in water gelegen hebben, worden uitgemiddeld op 30% voor eik en 60% voor beuk, terwijl voor de beuken proefstukken die 48 uur in water hebben gelegen 70% vochtgehalte is aangenomen. Een groot probleem treedt op bij het drogen van de proefstukken: bij het uit de mal halen en ze te voorzien van een draad die toelaat om het hout te laten drogen zonder dat het terugveert, moet de strap verwijderd worden en een draad gespannen worden met behulp van een tijdelijke houder, opgebouwd uit nagels. Dit is de reden waarom bij de proefstukken voorzien van een draad een verschil is tussen de hoek van de mal (Hoek) en de hoek van de droogcondities (Hoek'). Vervolgens worden de proefstukken tussen de spalken van de verwarming gelegd. Dit is geen precieze methode, maar wel een doeltreffende omdat het doel is simpelweg om het vocht versneld uit het hout te laten verdwijnen bij temperaturen van 40-60°C. Ook al staat de verwarming geen 24 uur per dag aan, is dit een uitstekende methode om te drogen, die in de tabel aangeduid wordt door een 'Ja' bij 'Oven'.

Gegevens				Cirkelvormige mal: $R = 10\text{cm}$				Hoeken			
Blok	Hout	Naam	u [%]	Hoek [°]	Hoek' [°]	Tijd	Oven	0d [°]	1d [°]	3d [°]	1m [°]
B02	Beuk	B02E	10,7	90,0	90,0	24h	Neen	95,0	96,0	96,0	100,5
B02	Beuk	B02F	10,7	90,0	90,0	24h	Neen	97,0	97,5	97,5	101,0
B02	Beuk	B02G	10,7	90,0	90,0	24h	Neen	94,0	94,5	95,5	99,0
B02	Beuk	B02H	10,7	90,0	90,0	24h	Neen	94,5	95,0	96,5	99,0
B02	Beuk	B02I	10,7	90,0	90,0	1h	Neen	97,0	98,0	98,5	99,0
B02	Beuk	B02K	10,7	90,0	90,0	1h	Neen	98,0	99,5	100,0	101,0
B02	Beuk	NB02L	10,7	90,0	90,0	1h	Neen	98,5	100,5	100,5	100,5
B02	Beuk	B02M	10,7	90,0	90,0	24h	Neen	-	-	-	98,5
B02	Beuk	B02N	10,7	90,0	90,0	24h	Neen	-	-	-	100,5
O02	Eik	O02A	11,1	90,0	90,0	48h	Neen	94,0	94,5	96,0	101,0
B02	Beuk	B02O	10,7	90,0	95,5	5d	Neen	99,0	99,0	100,0	-
B02	Beuk	B02P	10,7	90,0	94,0	5d	Neen	96,5	98,0	99,0	-
B02	Beuk	B02Q	10,7	90,0	93,5	5d	Neen	98,0	99,0	99,0	-
B02	Beuk	B02R	10,7	90,0	90,5	5d	Neen	93,5	95,0	96,0	-
O02	Eik	O02C	11,1	90,0	92,5	5d	Neen	94,5	95,0	96,0	-
O02	Eik	O02D	11,1	90,0	92,5	5d	Neen	94,0	94,0	94,5	-
O02	Eik	O02E	11,1	90,0	93,0	5d	Neen	96,0	96,0	96,5	-
O02	Eik	O02F	30	90,0	91,5	3d	Ja	91,5	91,5	91,5	-
O02	Eik	O02G	30	90,0	92,5	3d	Ja	92,5	92,5	92,5	-
O02	Eik	P02I	70	90,0	90,0	3d	Ja	90,0	90,0	90,0	-
O02	Eik	O02J	70	90,0	90,0	3d	Ja	90,0	90,0	90,0	-
O02	Eik	O02K	70	90,0	90,5	3d	Ja	91,0	91,0	91,0	-
B02	Beuk	B02S	60	90	90	1h	Neen	130	-	-	-

Tabel 9: Terugveren van enkele proefstukken

Door de overvloed aan gegevens in Tabel 9 is een grafische voorstelling moeilijk. Het eerste wat opvalt is dat alle droge proefstukken (met een vochtgehalte van ongeveer 11%) na een maand een hoek hebben van ongeveer 100°. Dit is zowel het geval bij eik als bij beuk. Niet vanzelfsprekend is dat het niet uitmaakt hoe lang het proefstuk in de mal heeft gezeten. Proefstukken B02I, B02K en B02J hebben immers slechts 1 uur in de mal gezeten terwijl andere na één of zelfs twee dagen toch nog evenveel terugveren. Zelfs de proefstukken die 5 dagen in een vorm werden gehouden, veren evenveel terug.

Dat het bij natte proefstukken noodzakelijk is om goede droogcondities in acht te nemen werd duidelijk toen proefstuk B02S werd gestoomd en na 1 uur al uit de mal werd gehaald: het veerde immers bijna spontaan terug tot een hoek van ongeveer 130°, ook al was het proefstuk toen volledig afgekoeld. Het is dus zeker noodzakelijk om de proefstukken gedurende een lange periode in zijn vorm te fixeren zodat het vochtgehalte kan dalen. Om dat proces te versnellen moet men het proefstuk gewoon aan een temperatuur van 40-60°C blootstellen. Onder de 40°C duurt het drogen te lang, erboven riskeert men dat het hout weer plastisch wordt en

bijkomende ongewenste en ongecontroleerde vervorming ondergaat. Eens de proefstukken aan het drogen zijn bij een verhoogde temperatuur rijst de vraag hoe lang ze gedroogd moeten worden voordat men ze kan gebruiken en zonder het risico dat ze terugveren. Als ze in gebogen toestand worden gehouden door een draad is dit van zodra de draad niet meer onder spanning is. In het geval ovens drogen was dit al na 2 à 3 dagen, wanneer het vochtgehalte tot 30-40% is gedaald.

Een klein voordeel van het terugveren van de droge proefstukken is dat het vrij goed te voorspellen is en zo in rekening kan worden gebracht. Het terugveren treedt enkel op in het gebied waar het hout gekromd is. Er treedt dus niet alleen een vergroting van de hoek op, maar ook een verandering van de kromtestraal. Wanneer de opgemeten hoek vergroot tot 100° betekent dit dat het cirkelsegment vermindert van 90° naar 80°. Als aangenomen wordt dat de booglengte in beide gevallen dezelfde blijft, wordt de kromtestraal 11,25 cm:

$$b = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{1,i} \cdot H_1}{360} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{2,i} \cdot H_2}{360}$$

$$\Rightarrow R_{2,i} = \frac{R_{1,i} \cdot H_1}{H_2} = \frac{10cm \cdot 90^\circ}{80^\circ} = 11,25cm$$

Voorts zijn de booglengtes helemaal niet dezelfde aangezien het terugveren van het hout gebeurt doordat de concave kant iets van zijn grote stuk ongedaan maakt, zonder rek te induceren aan de convexe kant. De berekening loopt analoog als de constante booglengte niet wordt aangenomen aan de binnenzijde van het hout maar aan de buitenzijde. Als aangenomen wordt dat het hout 1,7 cm dik is, bedraagt een meer nauwkeurige schatting van de uiteindelijke kromtestraal 11,46 cm.

$$\Rightarrow R_{2,i} = \frac{(R_{1,i} + 1,7cm) \cdot H_1}{H_2} - 1,7cm = \frac{11,7cm \cdot 90^\circ}{80^\circ} - 1,7cm = 11,46cm$$

Het terugveren van het hout is meer uitgesproken voor grotere krommingen. Als hout gebogen wordt zonder constante kromming, veert het meer terug op bepaalde plaatsen en verliest het helemaal zijn beoogde vorm. Het is dus duidelijk dat het vermijden van terugveren van de proefstukken zeer belangrijk is en het buigen van luchtdroog hout ($u = 10-15\%$) vermeden moet worden om deze reden.

4.7.4 BUIGEIGENSCHAPPEN VOLGENS HOUTSOORT

Alle proeven zijn uitgevoerd met beuk en eik. Beiden soorten zijn immers gekend voor het gemak waarmee ze kunnen worden gebogen. Om die reden zijn ook geen grote verschillen gevonden in hun gedrag bij het stoombuigen. Tijdens de proeven kwamen volgende bevindingen wel naar boven.

De krachten die moeten worden uitgeoefend om de proefstukken te buigen is beduidend hoger voor eik dan voor beuk. De proeven worden allemaal met de hand uitgevoerd, dus is het zeer moeilijk om dit aan te tonen met behulp van cijfers, maar het effect is wel duidelijk. Vooral bij het buigen van vrij dikke en droge eiken latten moet er een zeer grote kracht uitgeoefend worden.

Een belangrijk nadeel bij het gebruik van beuk is dat er veel meer fouten optreden aan de drukzijde dan bij eik, waar deze nooit voorkomen. Deze 'rimpels' ontstaan omdat het hout niet plastisch genoeg is. Het hout extra lang stomen biedt geen oplossing, maar het in water laten weken gedurende een nacht en zo het vochtgehalte verhogen wel. Van de proefstukken B02E tot B02R ($u = 11\%$) treden er gemiddeld 5 grote defecten aan de concave zijde op per proefstuk. Ook treden er frequenter kleine scheurtjes op bij beuk dan bij eik. Als er een scheur optreedt bij eik heeft deze wel veel sneller de neiging om te propageren en het proefstuk volledig te breken. Aangezien een proefstuk als gefaald wordt beschouwd zodra een scheur –hoe klein ook– optreedt, faalt eik minder dan beuk.

Ook al heeft eik sneller de neiging om kleine scheurtjes te vertonen langs de groeiringen tijdens het versneld drogen van het hout, is er toch gekozen om het schaalmodel uit eik op te bouwen.

4.8 OPMERKINGEN

4.8.1 TIJDSDRUK

Het is van zeer groot belang dat het hout gebogen wordt bij een temperatuur van ongeveer 100°C. Er kan aangenomen worden dat het hout deze temperatuur heeft op het moment dat het de stoom verlaat. De volgende stap is het aanbrengen van de strap en alle klemmen en tussenplaatjes om die in zijn plaats te houden. Vervolgens moet het proefstuk in de mal geklemd worden door middel van twee klemmen. Pas dan kan men beginnen met het echte buigen van het proefstuk. Het spreekt vanzelf dat al deze handelingen een zekere tijd in beslag nemen en het hout voor een deel zal afgekoeld zijn. Om het verlies aan warmte, en dus ook plasticiteit, tot een minimum te herleiden is het van groot belang om de voorbereidende handelingen zo snel mogelijk uit te voeren. Het valt te verwachten dat eens grotere doorsneden gebogen worden en het hout niet langer met de hand te buigen valt, nog meer tijd zal nodig zijn waardoor de proefstukken meer afkoelen.

4.8.2 REKKEN IN HET HOUT

Bij het buigen van een proefstuk veranderen de lengtes. De concave zijde van het proefstuk zal verkorten terwijl de convexe zijde dezelfde zal blijven of zelfs verlengen. Uitgaande van deze lengteverschillen kunnen de rekken worden bepaald in het proefstuk. Als men gewoon het lengteverschil deelt door de oorspronkelijke lengte van het proefstuk wordt de gemiddelde rek bepaald over de hele lengte. Dit zegt eigenlijk niet veel omdat men enkel geïnteresseerd is in de

rek die optreedt waar het hout gekromd is. Het is echter moeilijk om te voorspellen waar de rek precies optreedt, en nog moeilijker om het op te meten voor en na buigen.

De beste methode voor de bepaling van de maximale rekken gaat enkel uit van totale lengtes van de proefstukken. Als er aangenomen wordt dat alle rek optreedt in het deel dat gekromd is, kan de maximale rek er bepaald worden door het verschil in lengte enkel toe te schrijven aan het gekromde deel. De proeven zijn uitgevoerd op 17 mm dik beukenhout en gebogen op een mal met kromtestraal 10 cm en hoek van 90°.

De gemiddelde en maximale rek en stuik worden als volgt berekend:²⁴

$$\varepsilon_{gem} = \frac{|L_0 - L_{i,e}|}{L_0} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \theta / 360^\circ - |L_0 - L_{i,e}|}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \theta / 360^\circ} \cdot 100\%$$

Gegevens		Lengtes		Rekken				Fouten	
Naam	L_0 [mm]	L_i [mm]	L_e [mm]	Stuik _{gem} [%]	Stuik _{max} [%]	Rek _{gem} [%]	Rek _{max} [%]	Druk	Trek
B02E	692	667	696	3,75	15,92	0,57	2,18	6	1
B02F	692	670	694	3,28	14,01	0,29	1,09	5	1
B02G	692	668	695	3,59	15,28	0,43	1,63	6	1
B02H	692	666	696	3,90	16,55	0,57	2,18	6	1
B02I	700	680	706	2,94	12,73	0,85	3,26	5	1
B02K	700	677	701	3,40	14,64	0,14	0,54	5	0
B02L	700	677	701	3,40	14,64	0,14	0,54	7	0
B02M	700	675	700	3,70	15,92	0,00	0,00	4	0
B02N	699	673	700	3,86	16,55	0,14	0,54	6	0

Tabel 10: Bepaling maximale rekken in gebogen proefstukken

Het valt meteen op dat hoewel we met $R/d = 8$ nog vrij ver verwijderd zijn van de maximale R/d van 2, de maximale stuik reeds heel hoog is: rond de 15%. Voor alle waarden van de maximale stuik zijn er veel drukfouten. Dit is zoals gezegd te wijten aan het lage vochtgehalte van het hout. De maximale trek is een heel stuk lager en schommelt tussen de 0% en 3%.²⁵ De hoge waarden zijn echter misleidend: overal waar de maximale trek hoger is dan 1% treden trekfouten op, die een vertekend beeld geven van de vervorming. Deze proeven komen dus goed overeen met de maximale waarden voor stuik en rek uit Figuur 34 en Figuur 35.

²⁴ Voor meer informatie, zie Appendix A.

²⁵ De maximale stuik voor beuk bedraagt $\pm 25\%$ en trek $\pm 1,5\%$.

Theoretisch kan de stuik ook berekend worden door een cirkelsegment van 90° en straal van 10 cm te herschalen met een factor $10/(10+1,7) = 85,5\%$. De theoretische verkorting bedraagt dus 14,5%. Dit komt ook vrij goed overeen met de proeven.

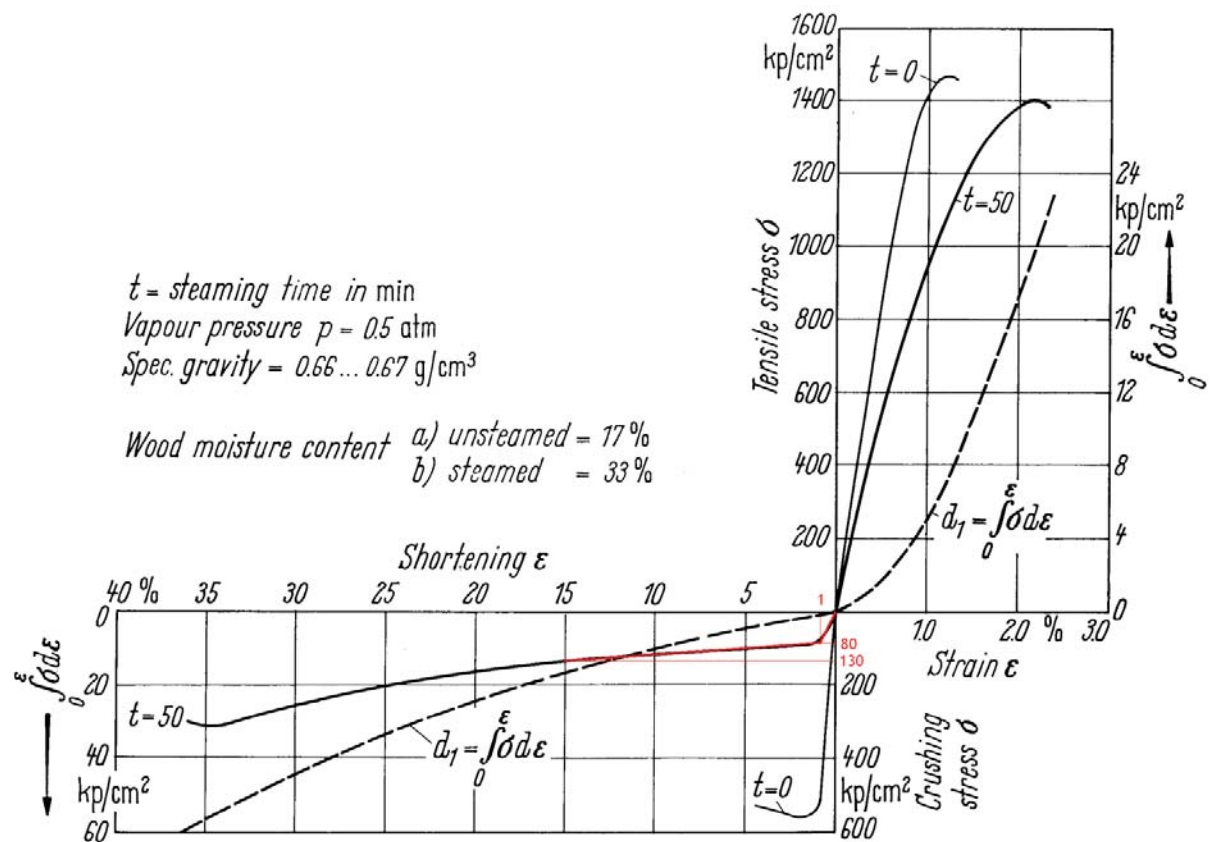
4.8.3 ONGEWENSTE REKKEN IN HET HOUT

Ook al is er geen speling tussen het proefstuk en de eindblokken, toch kunnen er andere oorzaken zijn voor een verlenging van het hout aan de convexe zijde. Er moet immers rekening gehouden worden met het feit dat de aluminium strap geen star materiaal is en zal uitzetten door de warmte die er op overgedragen wordt en door de trekspanningen die opgewekt worden tijdens het buigen. Ook kan een 'reverse bend' rek toelaten in het hout.²⁶

4.8.3.1 REK VAN DE ALUMINIUM STRAP

Proefstukken B02K en B02L, die geplooid zijn zonder enige scheur op te wekken, worden in detail bekeken. De maximale stuik bedraagt 14,5% en de maximale trek 0,5% voor beide proefstukken, die 17 mm hoog zijn en 21 mm dik. Aangezien de rek lineair verloopt over de dikte van het hout, is die hierdoor gekend op elk punt van de doorsnede. Een veel minder eenvoudige bepaling is de spanning opgewekt in het hout. Er wordt uitgegaan van proeven verricht op 1 inch dik beukenhout die 2 min/mm lang gestoomd zijn: dezelfde condities waaronder proefstukken B02K en B02L onderworpen werden.

²⁶ De reverse bends worden verder uitgelegd in 4.8.3.3.



Figuur 49: Vereenvoudiging van rek-spannings-diagramma [2]

In het geval van trek is er geen vereenvoudiging nodig in het geval van rekken tot een half procent. Daar geldt immers reeds een lineair verband tot 0,75% rek met richtingscoëfficiënt $\omega_t = 1600$. Hier kan men stellen dat $E_t = 16$ GPa. In het geval van druk wordt de werkelijke kromme benaderd door een bilineair verband voor het werkgebied tot 15%. Er wordt aangenomen dat de richtingscoëfficiënt $\omega_{d,1} = 80$ tot 1% en dan gelijk is aan $\omega_{d,2} = 3,57$.²⁷ Door bovenstaande vereenvoudigingen kan uit elke rek ook een corresponderende spanning bepaald worden door de rek te vermenigvuldigen met bijhogende E en achteraf omgezet worden naar N/mm².

²⁷ Voor de berekening van ω_t worden de punten (0, 0) en (0,75, 1200) genomen. Voor de berekening $\omega_{d,1}$ de punten (0, 0) en (1, 80) en tenslotte voor $\omega_{d,2}$ de punten (1, 80) en (15, 130).



Figuur 50: Spanningen en rekken in proefstuk tijdens buigen

Aan de hand van bovenstaande figuur is het eenvoudig om de kracht te bepalen die het volledige proefstuk te verwerken krijgt.

$$F = 21 * \left(\frac{1,1 \cdot 7,85}{2} + 15,3 \cdot 7,85 + \frac{15,3 \cdot (12,57 - 7,85)}{2} - \frac{0,6 \cdot 78,45}{2} \right) = 2877N$$

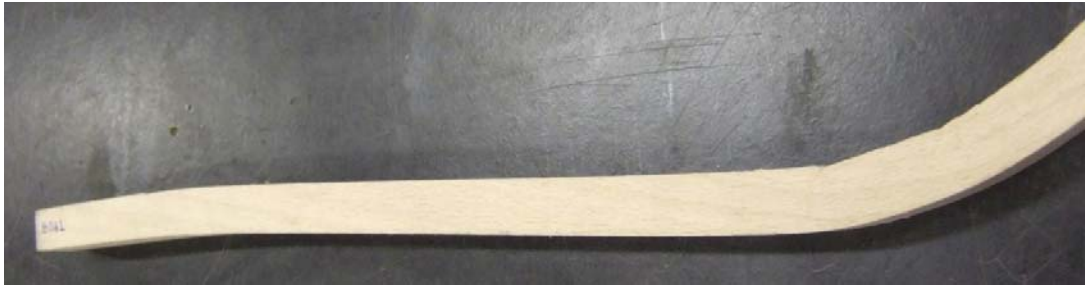
Uiteraard is het ook die kracht die de aluminium strap te verwerken krijgt. Als er aangenomen wordt dat de strap net even breed is als het proefstuk en 3 mm dik, veroorzaakt die kracht een spanning van 45,67 N/mm². De elasticiteitsmodulus van standaard aluminium bedraagt 69 GPa, dus er reedt een rek op van 0,07%.

4.8.3.2 THERMISCHE UITZETTING VAN DE ALUMINIUM STRAP

Er kan ook verwacht worden dat het aluminium bij contact met het warme hout voor een deel opwarmt. Het is moeilijk om stijging hiervan te meten of te schatten. Aangezien het doel is om een grootteorde van de rek die deze temperatuursverandering induceert te bekomen, is het voldoende om aan te nemen dat het aluminium met de helft van het temperatuursverschil tussen het hout en aluminium opwarmt. Het aluminium is op kamertemperatuur terwijl het hout ongeveer 100% bedraagt, dus de temperatuursstijging kan op 40°C geschat worden. Als rekening wordt gehouden met het feit dat aluminium een thermische uitzettingscoëfficiënt heeft van $23 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, gaat dergelijke stijging in temperatuur gepaard met een bijkomende rek in de strap van 0,09%. Deze rek is echter tijdelijk. Eens het aluminium samen met het hout afkoelt, verdwijnt dit effect. Dan is het hout ook afgekoeld en zal de extra 0,09% rek geen extra plastische vervormingen meer genereren in het hout. Zo kan dit effect wel als permanent beschouwd worden.

4.8.3.3 REVERSE BENDS

Een laatste manier waardoor rek kan ontstaan in het hout is door een 'reverse bend'. Dit is een fenomeen waarbij het hout in het deel waar het niet gekromd is een kromming aanneemt in de andere richting.



Figuur 51: Reverse bend

Aan de hand van proefstuk 002A wordt dit verschijnsel onderzocht. Over een afstand van 140 mm komt de strap los van het hout en komt in het midden los met 5 mm. Over die afstand wordt aangenomen dat het hout een cirkelvormig verloop vertoont. Als het verschil in lengte wordt bepaald tussen de twee lijnen die normaliter aan elkaar moeten grenzen, kan de rek berekend worden die hierdoor extra toegelaten wordt. Als R de onbekende straal is van de cirkel, kan ze m.b.v. de stelling van Pythagoras bepaald worden:

$$(R - 5)^2 + 70^2 = R^2$$

Hieruit volgt dat $R = 492,5$ mm. De halve openingshoek van het segment wordt berekend volgens $\arctan(70/487,5)$ en bedraagt $8,171^\circ$. Vervolgens kan het cirkelsegment bepaald worden:

$$\Delta l = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{2 \cdot 8,171}{360} = 140,5 \text{ mm}$$

Dit is een halve millimeter meer dan de lengte van de strap. Als weer aangenomen wordt dat alle rekken optreden in het gebogen deel van 157 mm lang, komt dit overeen met een extra rek van 0,3%.

4.8.3.4 **BESLUIT**

In theorie mag geen trek ontstaan in het hout. Dat dit wel gebeurt, is dus te wijten aan verschillende factoren: speling aan de eindblokken, rek ten gevolge van thermische uitzetting en krachten opgewekt in het aluminium en eventueel het ontstaan van reverse bends. De thermische rek bedraagt steeds evenveel en is de grootteorde van 0,1% terwijl de rek ten gevolge van spanning ook min of meer constant is en van dezelfde grootteorde is. De extra rek ten gevolge van een reverse bend hangt af van diens grootte, maar is beduidend groter dan de rekken in de strap zelf en kan makkelijk 0,3% bedragen. De som van deze rekken bedraagt 0,5%, wat reeds bijna de helft is van de maximaal toegestane rekken in het hout!²⁸ Er is dus niet veel ruimte voor mogelijke speling tussen de eindblokken en het proefstuk, wat nog eens het belang

²⁸ De maximale rek van gestoomde beuk bedraagt $\pm 1,5\%$: zie Figuur 34.

van een deze eindblokken benadrukt. Daar worden immers de tussenstukjes toegevoegd en mits een goede inklemming reverse bends vermeden.

4.8.4 EIGENSPANNINGEN IN HET HOUT

Als materiaal gebruikt wordt als een dragend element is het belangrijk om de krachten te weten die tijdens het productieproces zijn opgewekt omdat die de maximaal toe te laten krachten vaak drastisch verlagen. Hier is het materiaal uiteraard hout en het productieproces het stoombuigen.

Door het proces eigen aan het stoombuigen van hout via de methode van Thonet lijkt het enkel mogelijk dat eigenspanningen een reactie zijn op het buigen zelf. Dit betekent dat indien er eigenspanningen zijn opgetreden, er trekspanningen moeten zitten aan de convexe kant en drukspanningen aan de concave kant. Dit is echter niet mogelijk omdat die elkaar niet in evenwicht kunnen houden.

Er is een eenvoudige manier die kan nagaan of er eigenspanningen aanwezig zijn in het hout. Door op een plaats waar eigenspanningen verwacht worden een snede te maken wordt het evenwicht gestoord dat bestaat tussen de eigenspanningen en kunnen vervormingen optreden zodat een nieuw evenwicht gevormd wordt. Het al dan niet optreden van deze vervormingen is een goede indicatie voor het aanwezig zijn van eigenspanningen. Voor deze test wordt proefstuk B02U gebruikt. Met een dikte van 21 mm en een kromtestraal van 10 cm is het een van de sterkst gekromde proefstukken. Indien er eigenspanningen optreden tijdens het buigen, zijn ze in dit proefstuk dan ook het hoogst.



Figuur 52: Ongezaagde doorsnede



Figuur 53: Gezaagde doorsnede

Ondanks het feit dat indien er vervormingen zouden optreden, deze zeer klein zijn, kan gesteld worden dat het hout nabij de zaagsnede niet van vorm verandert. Samen met het eerder vermoeden dat geen eigenspanningen aanwezig zijn in het hout na buigen, kan gesteld worden dat het stoombuigen geen eigenspanningen in het hout teweeg brengt.

5 SCHAALMODEL

Een onderdeel van deze scriptie is met de gegaarde kennis over het proces van het stoombuigen een schaalmodel te genereren. Vooraleer kan worden overgegaan tot het bouwen van het schaalmodel moet eerst een vorm worden gekozen. Vervolgens moet een manier gevonden worden hoe die vorm best kan worden beschreven door gebogen latten.

Een vorm die vaak wordt gebruikt bij het bouwen in hout is de hyparschaal. De vorm van een hyperbolische paraboloid is eenvoudig op te bouwen aangezien het een van de weinige dubbel gekromde, anticlastische oppervlakken is die kan worden opgebouwd uit rechten. Het is dus een uitdaging om een oppervlak dat vaak gebruikt wordt te kiezen als vorm, maar niet op zijn gewone wijze op te bouwen door middel van rechte latten die getorst worden, maar door middel van niet getorste, gekromde latten.

5.1 HYPARSCHALEN

De hyperbolische paraboloid of hypar is een zeer recente vorm.²⁹ Ze werd immers pas ontdekt in de twintigste eeuw [12]. Voordien werden immers enkel enkelvoudig gekromde of dubbelgekromde oppervlakken met positieve Gaussiaanse index gebruikt.³⁰ Na enkele experimenten in de jaren dertig met hyparschalen kwam de grote doorbraak er in de jaren vijftig toen ze voor het eerst op grote schaal werden gebruikt door de Spaanse ingenieur Felix Candela als betonnen schaaldaken [12].

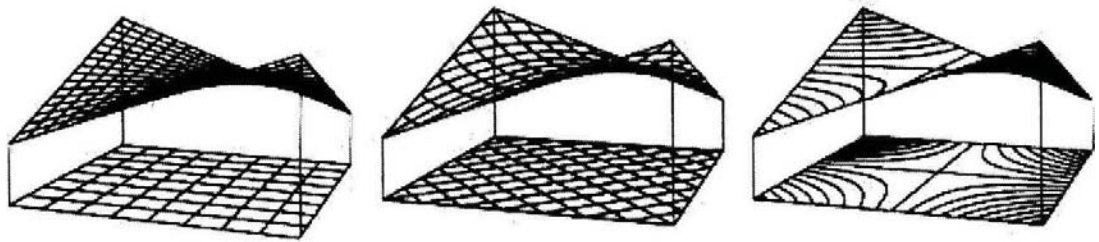
De onderstaande vergelijking geeft de algemene gedaante van een hyparvlak weer:

$$z = k \cdot x \cdot y$$

Hierin staat k voort een schaalparameter die onder andere de hoogte geeft van het punt (1,1). Het oppervlak is op twee manieren te genereren. Aangezien het een regeloppervlak is, is het op te bouwen uit rechten. Dat dit oppervlak een regeloppervlak is, komt tot uiting wanneer het gesneden wordt met de vlakken $x = A$ en $y = B$, met A en B willekeurige constanten, en twee paren van scharen oplevert (zie linkerdeel van Figuur 54). Wanneer het vlak gesneden wordt met de vlakken $z = A$ of $x = y + A$, bekomt men respectievelijk hyperbolen en parabolen.

²⁹ De term 'Hypar' werd voor het eerst gebruikt in 1967 door Heinrich Engel in zijn boek Structure Systems [17].

³⁰ Een positieve index van Gauss betekent dat de krommingsmiddelpunten van de twee hoofdrichtingen aan dezelfde kant van het oppervlak liggen. Een anticlastisch oppervlak heeft een negatieve index van Gauss.



Figuur 54: Verschillende weergaven van een hyperbolische parabolöide [11]

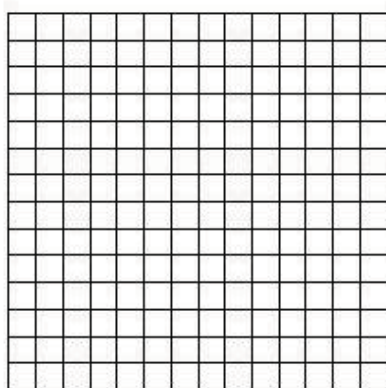
5.2 GENEREREN VAN DE VORM: PYFORMEX

Het genereren van de vorm wordt gedaan aan de hand van pyFormex.³¹ Dat is een eindig elementenprogramma dat uitermate geschikt is voor het genereren en aanpassen van geometrische modellen van 3D structuren door middel van wiskundige operaties. Dit wordt gedaan door middel van scripts geschreven in Python die de hele geometrie zullen genereren.

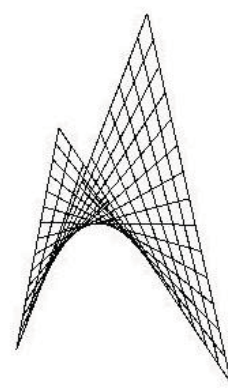
Er wordt vertrokken van de algemene vergelijking.

$$z = k \cdot x \cdot y \text{ met } x = -1..+1 \text{ en } y = -1..+1$$

Dit oppervlak kan echter niet gegenereerd worden door pyFormex aan de hand van een eenvoudig commando. De generatie gebeurt door individuele coördinaten te genereren door x en y als een rooster op te delen in 14 delen en de respectievelijke z -coördinaten te genereren met behulp van de algemene vergelijking. Een grafische voorstelling wordt bekomen door twee opeenvolgende punten te verbinden in zowel de x -richting als y -richting. Zo worden twee scharen van vlakken gecreëerd die een orthogonaal raster maken eens ze geprojecteerd worden op het xy -vlak.



Figuur 55: xy -projectie van hyparvlak



Figuur 56: Hyparvlak

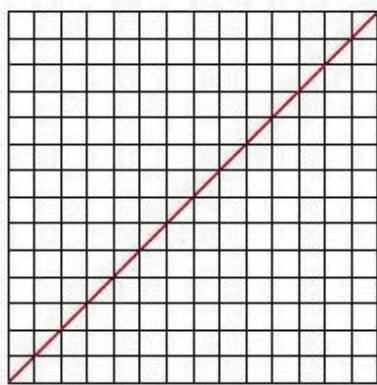
Uiteraard is het niet nuttig om de gebruikte voorstellen te kiezen voor de generatie van het oppervlak: ze is immers opgebouwd uit rechten. Een manier om hetzelfde oppervlak op te

³¹ pyFormex 0.8.3-a5 © Benedict Verhegghe

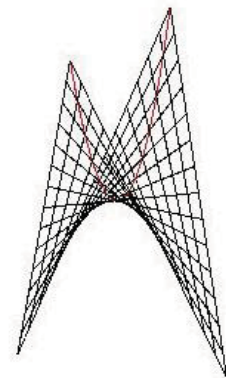
bouwen uit krommen die toch in 1 vlak zijn gelegen is door het oppervlak te snijden met bepaalde, welgekozen vlakken. Om die vlakken te kiezen wordt eerst een welbepaalde kromme geïsoleerd van het oppervlak. De hyparschaal wordt gesneden met het vlak $x = y$. Substitutie in de hoofdvergelijking geeft de vergelijking van volgende parabool:

$$Z = k' \cdot X^2$$

Hier zijn Z en X assen in het lokale assenstelsel dat bekomen wordt door middel van een rotatie van 45° rond de z -as. Vervolgens is k' een parameter die de parabool beschrijft.³²

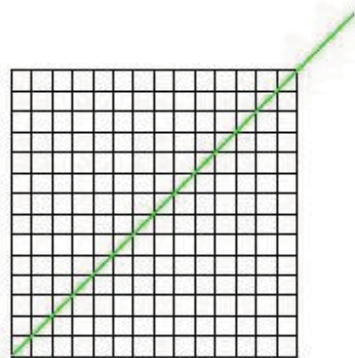


Figuur 57: xy -projectie hypervlak en parabool

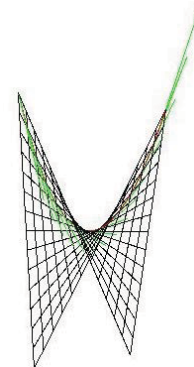


Figuur 58: Hypervlak en parabool

De volgende stap is het verdelen van de kromme in 14 delen en in elk punt de raaklijn opstellen.³³



Figuur 59: xy -projectie hypervlak, parabool en richtingsvectoren



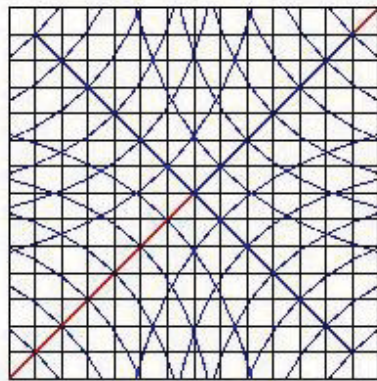
Figuur 60: Hypervlak, parabool en richtingsvectoren

Aan de hand van die raaklijnen kan telkens een vlak gecreëerd worden door het punt en met normale de raaklijn. De doorsnijding van die vlakken met de oorspronkelijke hyperpar kan benaderd worden door de beschrijvende rechten zoals voorgesteld in Figuur 56 te snijden met

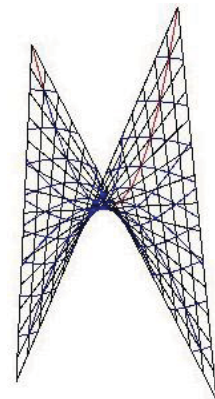
³² Het verband tussen k en k' wordt uitgewerkt in Appendix B.

³³ Het aantal 14 werd bekomen nadat door aanpassing bleek dat dat de meest gewenste vorm levert.

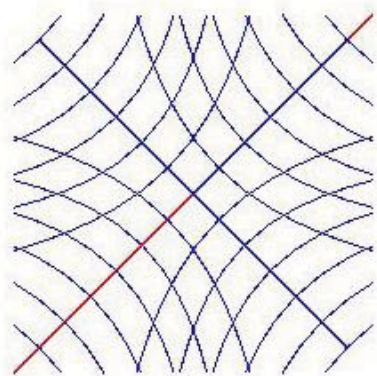
het vlak, en uitgaande van de gevonden punten een polyline te maken. Door de symmetrie hoeft dit hele proces niet herhaald te worden voor de andere richting uitgaande van een parabool die bekomen wordt door de oorspronkelijke schaal te snijden met het vlak $x = -y$, maar kunnen alle voorgaande krommen door middel van een rotatie van 45° en een spiegeling om het xy -vlak eenvoudiger bepaald worden.



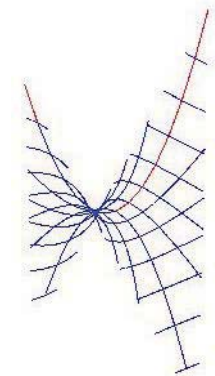
Figuur 61: xy -projectie hyparschaal en krommen



Figuur 62: Hyparschaal en krommen



Figuur 63: xy -projectie krommen

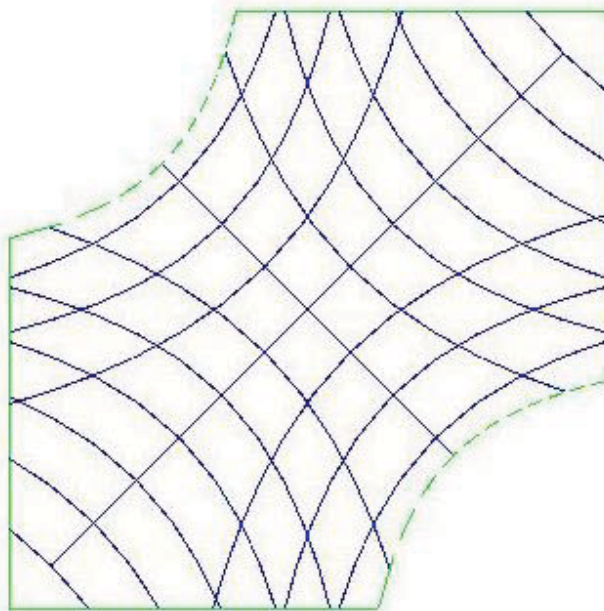


Figuur 64: Krommen

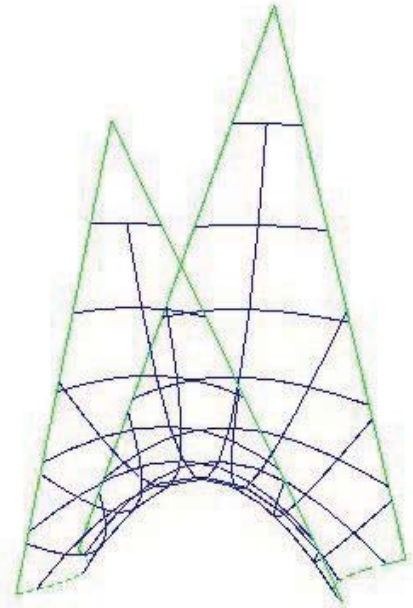
De vorm wordt vervolledigd eens het oppervlak gesneden wordt met het vlak $x = -0,5$ en alles wat zich onder het vlak bevindt weggelaten wordt. Na het tekenen van de rechte randen en de hyperbool volgt het hyperoppervlak beschreven op een welbepaalde manier. De vergelijking van de hyperbool is:

$$X \cdot Y = \frac{-0,5}{k}$$

Het lokale assenstelsel waarin de hyperbool wordt weergegeven, wordt bekomen door een translatie van het oorspronkelijke assenstelsel met de vector $[0, 0, -1/2]$.



Figuur 65: xy-projectie krommen en randen



Figuur 66: Krommen en randen

Het enige dat nog rest is het schalen van het geheel en bepaling van de parameter k . Na diverse pogingen bleken $k = 2,1$ en een schaalfactor van 20 de ideale waarden.³⁴ Deze geometrie brengt volgende zaken met zich mee:³⁵

- Lengte van centrale parabool: 105,9 cm
- Kleinste kromtestraal: 9,5 cm
- Hoogte van het centrale punt: 10 cm
- Hoogte van de hoogste punten: 52 cm
- Omschrijvend rechthoek grondvlak: 40 cm x 40 cm

5.3 VERKLARING VAN DE GEKOZEN VORM

Het opstellen van de beschrijvende krommen van het oppervlak is niet op een zeer gestructureerde manier gebeurd. Hier wordt onderzocht waarom niet voor een meer voor de hand liggende manieren is gekozen.

Als wordt uitgegaan van een parabool die men over een andere parabool verschuift kan men zeer eenvoudig een hypervlak opbouwen aan de hand van allemaal dezelfde parabolen zoals weergegeven in het midden van Figuur 54. Aangezien maar 1 mal gemaakt moet worden, lijkt deze situatie uitermate geschikt voor het vervaardigen van de gebogen latten. Het probleem stelt zich echter bij de uitvoering van dergelijk model. De verbinding van de latten is bijna onmogelijk voor een sterk gekromd oppervlak. Zolang er gewerkt wordt met krommen zonder

³⁴ Alle figuren zijn opgesteld aan de hand van deze twee waarden.

³⁵ Berekening van deze waarden aan de hand van k en s wordt gegeven in Appendix B. De code van het pyFormex script is gegeven in Appendix C.

dikte is er niets aan de hand, maar zodra de krommen een zekere breedte en dikte hebben ontstaan er problemen. De aansluiting van twee krommen die elkaar snijden moet immers met een bepaalde hoek uitgevoerd worden. Ongeacht voor welke manier aan bevestigen gekozen wordt, blijft dit een zeer vervelende zaak. Niet alleen op vlak van uitvoerbaarheid zijn er problemen, maar ook op esthetisch vlak.

Bij de constructie van hyperbolische paraboloiden uitgevoerd als regeloppervlak, wordt dit probleem dikwijls vermeden door de regels op te bouwen uit verschillende latten die alternerend doorlopen in de knooppunten. Om een goed contact tussen de latten te verzekeren in de knooppunten is het nodig dat de rechten getorst worden tussen twee knooppunten in.³⁶ Indien de latten van een op voorhand gekromde lijn getorst worden, zal de hele vorm verloren gaan. Het is dus van groot belang dat de krommen recht op een manier toekomen zodat in het snijpunt de twee dikte-assen van de latten met elkaar zo goed mogelijk overeenkomen.³⁷

Door de krommen te genereren volgens de manier uitgelegd aan de hand van pyFormex figuren, worden alle krommen in een bepaalde richting perfect aangesloten op de initiële parabool, die de middelste kromme is van de krommen gelegen in de andere richting. Dit wordt immers gedaan doordat het vlak die in elke kromme ligt loodrecht staat op de richtingsvector van die parabool. Dit betekent niet noodzakelijk dat dit ook het geval zal zijn voor de overige snijpunten. In elk geval rijgt de verbinding zo veel meer naar een verbinding waarbij de latten eenvoudig aan elkaar bevestigd kunnen worden.

De vorm werd symmetrische genomen om een gegronde reden. Er zijn telkens evenveel opdelingen gemaakt in de x als y richting bij het genereren van Figuur 58. Van deze symmetrie werd al eerder gebruikt gemaakt door slechts een deel van de vorm op te stellen en vervolgens door gepaste rotaties en spiegelingen de totale vorm te vervolledigen. Een ander gevolg van de symmetrie is dat op de randen na alle 20 houten latten kunnen worden gebogen door gebruik te maken van slechts 7 mallen. De vorm die de mallen moeten hebben wordt bepaald in 5.4. Daar zal ook bewezen worden dat de krommen ook parabolen zijn, weliswaar met een andere kromming.

Ten slotte is de vorm gesneden met een horizontaal vlak om het te kunnen funderen op een groter oppervlak. Deze doorsnijding zou het hele model immers laten rusten op twee punten.

³⁶ Een voorbeeld hiervan is het geraamte van de hyparschalen van het Nieuw Gerechtsgebouw van Antwerpen [18].

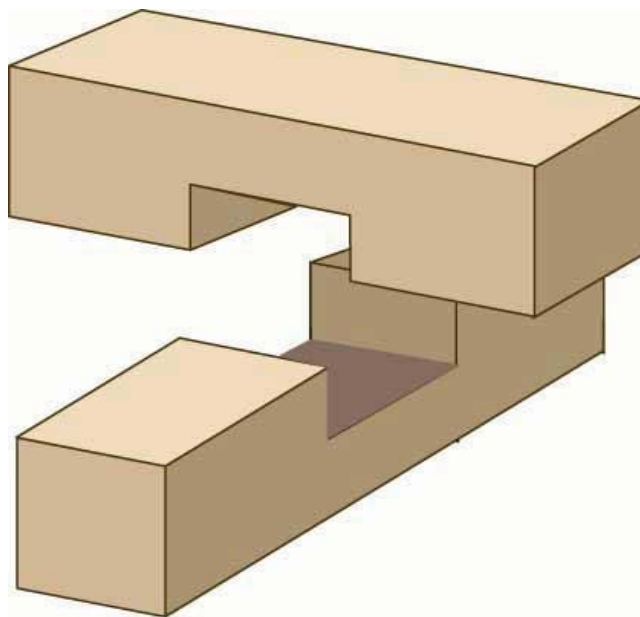
³⁷ Met dikte-as wordt de lokale richting van de gebogen houten lat bedoeld in dewelke de dikte ervan zou worden gemeten.

5.4 UITWERKING VAN DE VORM

Een onderdeel van de proeven was het bepalen van de optimale parameters voor het uitvoeren van het schaalmodel. Aan de hand van die testen is gekozen voor het gebruik van latjes Amerikaanse eik van 1 cm dik en 1,5 cm breed. De breedte is zo klein mogelijk gehouden om het schaalmodel licht te houden. Tevens is door het vermijden van een vierkante doorsnede de kans op torsen van het hout uit het vlak drastisch verkleind.

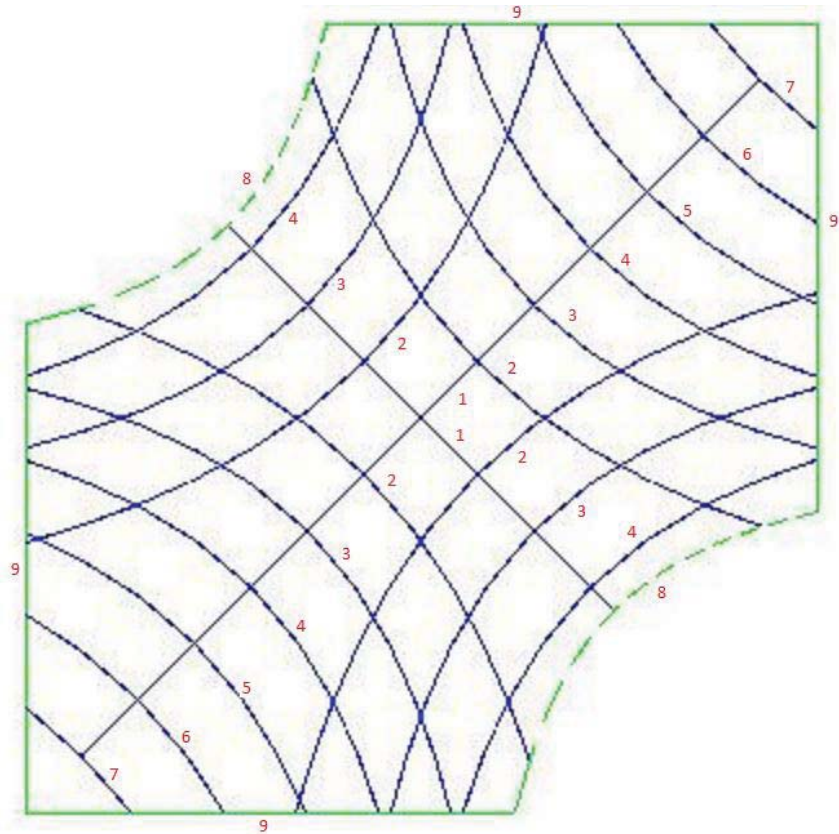
Aangezien het hout dat gebruikt wordt voor het schaalmodel (blok O03) een vochtgehalte heeft van 11,3%, is het van groot belang om het hout te bevochtigen. Om dat te verhogen voordat het hout gebogen wordt, wordt het gedurende ± 15 uur ondergedompeld in water. Als er gewerkt wordt met nat hout moet er uiteraard extra aandacht besteed worden aan de droogcondities. Het drogen gebeurt op dezelfde manier als bij proefstukken O02F tot O02K, namelijk door het gedurende enkele dagen te drogen tot het verbindingstouw zijn spanning verliest.

Vooraleer de mallen worden geconstrueerd, moet bepaald worden hoe de dikte ingerekend wordt in het model. De krommen die gegeven worden door het model zijn immers lijnen terwijl de houten latten die de krommen benaderen wel een dikte hebben. Er wordt voor gekozen om de theoretische krommen te gebruiken voor de binnenafmetingen van het model. Aangezien de verbindingen in het hout uitgevoerd worden door middel van een overlappingsverbinding is dit ook mogelijk in de knooppunten. Een gevolg is wel dat de theoretische lengtes die nodig zijn om het model op te bouwen niet volstaan aangezien aan de eindpunten een extra lengte voorzien moet worden om de verbinding te kunnen realiseren.



Figuur 67: Overlappingsverbinding [13]

Zoals reeds eerder gezegd zijn er heel wat minder mallen nodig dan er latjes nodig zijn. In totaal zijn er 26 latten nodig voor de bout van het model, waarvan 4 rechten. Er dienen 8 mallen gevormd worden waarvan er 4 twee maal gebruik kunnen worden voor een stuk hout te buigen en 4 vier maal.



Figuur 68: Aanduiding van de vorm van de latten in het xy-vlak

Er treedt wel een probleem op bij het maken van de mallen. Door de manier waarom het model is gegenereerd zijn de vergelijkingen van de individuele krommen niet wiskundig beschreven. Ze worden immers enkel grafisch voorgesteld door middel van enkele punten die verbonden worden door rechte lijnen die zo de gewenste krommen benaderen. Voor het vinden van de vergelijking van de krommen moet dus omgekeerd tewerk gegaan worden. Aan de hand van enkele punten kan een vergelijking gezocht worden waar alle punten aan voldoen. Zo zal ook uiteindelijk ontdekt worden welk type van kromme gegenereerd wordt door het proces uitgelegd in 5.2. Bovendien moeten de coördinaten van de punten die horen bij een bepaald kromme door middel van een translate en twee rotaties getransformeerd worden zodat ze in een vlak vallen waar een van de drie coördinaten steeds nul is.

Alle zeven krommen zijn parabolen.³⁸ Ze hebben echter allemaal een verschillende parameter A in de vergelijking:

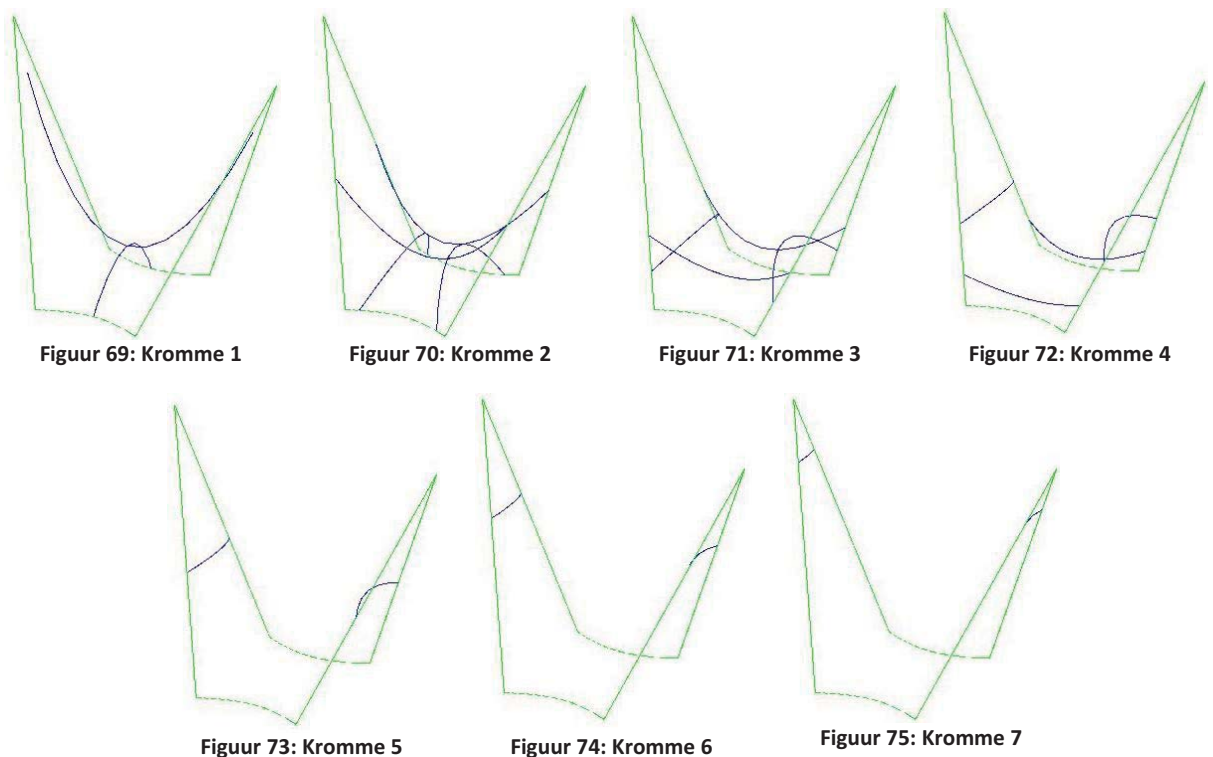
$$y = A \cdot x^2$$

	A	l [cm]	X_{max} [cm]	Y_{max} [cm]
Mal 1	0,0525	105,86	28,28	42,00
	0,0525	35,41	13,80	10,00
Mal 2	0,0447	50,51	18,62	15,49
	0,0447	46,91	17,68	13,97
Mal 3	0,0364	35,83	15,21	8,43
Mal 4	0,0303	27,57	12,64	4,84
Mal 5	0,0256	20,91	10,03	2,58
Mal 6	0,0220	14,47	7,12	1,12
Mal 7	0,0191	7,61	3,79	0,27

Tabel 11: Overzicht parabolen

Het valt op dat mallen 1 en 2 twee verschillende lengtes hebben. Dat komt omdat de kortste ervan doorsneden wordt met het vlak $x = -0,5$ bij het genereren van de krommen, nog voor het schalen van het geheel.

³⁸ Het bewijs hiervoor wordt geleverd in



De vergelijking van kromme 8 kan bepaald worden door een horizontale doorsnede te maken van het hyparvlak. Zo wordt steeds een hyperbool gegenereerd. Indien de hyparschaal gesneden wordt met het vlak $x = -0,5$ bekomt men na schalen volgende vergelijking:

$$y \cdot z = -95,24$$

5.5 PRAKTISCHE UITVOERING

De praktische uitvoering van het schaalmodel begint met het maken van alle mallen. Per kromme wordt een mal gemaakt. Dit was niet moeilijk omdat de vergelijkingen van de parabolen gekend zijn. De wiskundige vorm wordt op zo veel mogelijk punten uitgezet en verbonden zodat ze kan gezaagd worden uit een 2 cm dikke plaat multiplex. Dit betekent dat niet de aslijn van het houten latten, maar wel de binnenkant in de gewenste vorm zijn gebogen. De gemaakte fout is echter klein doordat de latten slechts 1 cm dik zijn. Aangezien het hout na het stomen in de mallen met een kleine extra kromming gedroogd wordt, heeft deze vereenvoudiging nauwelijks een invloed op de uiteindelijke vorm.

De eiken latjes hebben een dikte van 1 cm en een breedte van 1,5 cm. Aangezien ze een te laag vochtgehalte hebben moeten ze minstens een nacht in water geweekt worden zodat hun vochtgehalte minstens 30% bedraagt bij aanvang van het buigen. Om het hout na buigen de kans te geven om te zetten, wordt het in vorm gehouden en gedroogd gedurende 2 tot 5

dagen. De gekozen vorm bevat 22 gekromde lijnen. Om geen risico te nemen werd per mal een reserve exemplaar gemaakt zodat 30 proefstukken gebogen werden.

Aangezien gekozen is om de verbindingen half op half uit te voeren, en het feit dat er 83 verbindingen uit te voeren zijn, belooft de montage een helse klus te worden. Omdat het een anticlastisch oppervlak is, liggen de uit te voeren zaagsneden steeds aan dezelfde kant van de latten: de convexe of de concave zijde.³⁹ Er is gekozen om steeds de buitenkant, of de convexe kant, weg te zagen. De plaats van de krommen is specifiek gekozen om de aansluiting tussen de parabolen zo eenvoudig mogelijk te maken. Dit was echter niet mogelijk voor de verbindingen tussen de randen en de parabolen. Als gevolg hiervan bleek al snel dat een praktische uitvoering van deze knooppunten niet haalbaar was op deze kleine schaal zodat er voor gekozen is om de randen van het model weg te laten en dus enkel de parabolen overblijven. Een gevolg hiervan is dat om esthetische redenen dan ook gekozen is om op de plaatsen waar het mogelijk is, de vorm te laten stoppen op knooppunten waar twee parabolen samenkomen (zie Figuur 78).

Bij de montage van de delen wordt vertrokken van de twee krommen van het type 1 (Zie Figuur 76). Hier treden de knoppunten op regelmatige tussenafstand op in het xy -vlak. Door de basis van de parabolen op te delen in 14 delen, kunnen de plaatsen van de knooppunten geprojecteerd worden op de houten latten. Dit wordt nu wel gedaan op de aslijn van het hout om zo dicht mogelijk te blijven bij de gekozen vorm.

³⁹ Bij elk anticlastisch oppervlak liggen de hoofdkrommingsmiddelpunten aan weerskanten van het oppervlak. Aangezien bij een half op half verbinding twee verschillende kanten van de houten latten uitgezaagd moeten worden, betekent dit dat de kant van de zaagsneden voor beide krommen convex of concaaf is.

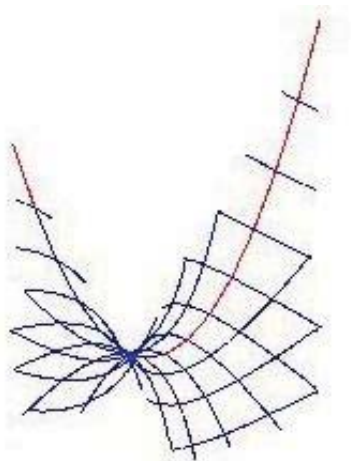


Figuur 76: Schaalmodel bij begin montage

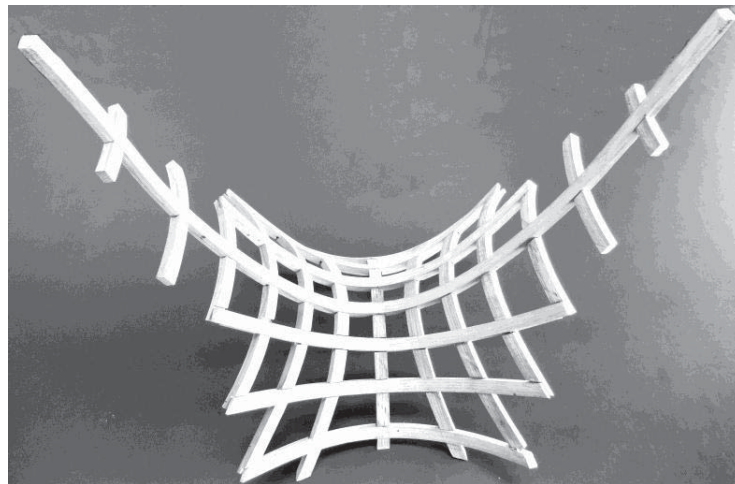


Figuur 77: Schaalmodel tijdens montage

Vervolgens worden van binnen naar buiten toe steeds meer latten aan het geheel toegevoegd. Deze worden tijdelijk in plaats gehouden door klemmen. Het geheel kan slechts helemaal op het einde gelijmd worden omdat bij toevoegen van elke kromme een kleine verandering optreedt in de rest van de constructie, hetgeen een zeker flexibiliteit vereist van de tijdelijke knooppunten. Pas als alle knooppunten zijn voorbereid kan het geheel gelijmd worden.



Figuur 78: Aangepaste vorm van schaalmodel



Figuur 79: Afgewerkt schaalmodel

6 TOEPASSING IN DE PRAKTIJK

6.1 EFFECT VAN SCHAALVERGROTING

Ook al is het onderwerp van de scriptie stoombuigen van hout voor constructieve toepassingen, zijn er geen testen uitgevoerd op proefstukken met grote afmetingen. Dit onderdeel gaat over de mogelijke problemen die verwacht kunnen worden wanneer proefstukken met grotere lengtes en diktes moeten worden gebogen en gemonteerd die niet aan bod kwamen in de uitgevoerde proeven.

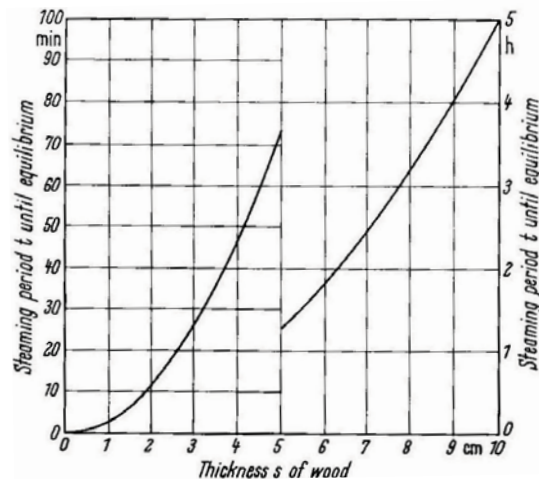
Bij het buigen van hout treden er zeer grote spanningen op. Als die spanning geconcentreerd wordt ter hoogte van onvolkomenheden zoals knoesten zal het leiden tot falen. Daarom is het van zeer groot belang dat het hout geen fouten vertoont (zie 4.3). Eens er gewerkt wordt met grotere diktes en lengtes is het zeer moeilijk om hout te vinden dat helemaal geen fouten meer bevat zoals verwacht werd voor het uitvoeren van de proeven op proefstukken tot diktes van 2 cm.

Op het eerste zicht is er ook geen probleem met proefopstelling bij het gebruik van grotere diktes. De oven kan vergroot worden, de generator van de stoom kan vervangen worden door een professioneel –maar duurder- alternatief. De straps en mallen kunnen ook zeer eenvoudig uitgevoerd worden in grotere dimensies. Er treedt echter wel een probleem op wanneer de houten balken met de hand moeten gebogen worden. De krachten zullen veel te groot zijn om dit te doen. Een mogelijkheid is om te werken met takels, vijzels of persen. Het probleem dat zich echter zal voordoen is dat het opstellen van deze werktuigen veel tijd in beslag neemt waardoor het hout afkoelt en het buigen veel minder goed lukt. Het is van groot belang om een goede opstelling uit te werken om de tijd tussen het uit de oven halen van het hout en het buigen zo klein mogelijk te houden.

Als houten balken constructief gebruikt worden, is de hoogte in de meeste gevallen groter dan de breedte omdat het grootste op te vangen moment in die richting werkt. In vele ontwerpen waar gebogen vormen worden gebruikt, moet het hout ook over die sterke as gebogen worden. Dit is nooit uitgevoerd in de proeven omdat het moeilijk is om knik te vermijden tijdens het buigen. Bij een realistisch ontwerp waarbij de hoogte groter is dan de breedte van de gekromde houten balken moeten dus op maat gemaakte mallen gebouwd worden om knik langs de zwakke as van het hout te vermijden.

Het is van groot belang om te onderzoeken of de stoomtijd van 2 min/mm wel lang genoeg is voor dikke proefstukken. Die tijd is nodig om het proefstuk op een homogene temperatuur te brengen van 100°C. Als gekeken wordt naar de tijd die nodig is om vierkante proefstukken die gebruikt zijn in de proeven op temperatuur te brengen, komt men uit bij slechts 0,6 min/mm. Het is dus noodzakelijk om zeker langer te stomen dan de tijd nodig om overal een temperatuur

van 100°C te bekomen aangezien de minimale stoomtijd 2 min/mm bedraagt (zie 4.7.2), terwijl het slechts 0,6 min/mm duurt om een homogene temperatuur te voorzien voor proefstukken van ongeveer 2cm.



Figuur 80: Duur voor een homogene temperatuur van 100°C wordt bekomen bij vierkante proefstukken voor verschillende diktes [2]

Als dezelfde figuur wordt gebruikt is het duidelijk dat voor proefstukken van bijvoorbeeld 10 cm dikte een minimale stoomtijd van 5 uur is vereist. Dit komt overeen met een minimale stoomtijd van 3 min/mm. Bij zo'n lange stoomduur moet ervoor gezorgd worden dat de buitenkant van het hout ondertussen niet uitdroogt. Dit kan verwezenlijkt worden door er voor te zorgen dat de stoom kan condenseren in de steambox en zo het evenichtsvochtgehalte niet tot onder 40% daalt.

Bij het creëren van een schaalmodel is het mogelijk om de relatief dunne houten latten manueel een kleine gewijzigde vorm te geven zodat ze passen in het geheel. Ook kan het hout een beetje getorst worden om de aansluitingen te vergemakkelijken indien dat nodig is. Eens gewerkt wordt met dikke balken is dit niet meer het geval. Aangezien bij een werkelijk project een grondiger ontwerp en betere plannen worden opgesteld kan worden aangenomen dat deze manuele aanpassingen ook niet meer nodig zijn.

Een voordeel van een schaalvergroting is het feit dat de knooppunten veel groter worden. Het is dus veel eenvoudiger om die aan elkaar te verbinden.

6.2 ALGEMEEN

Het proces van het stoombuigen van hout voor constructieve toepassingen heeft heel wat voordelen. In vele gevallen zijn gekromde elementen de optimale vorm voor de krachtswerking. Aangezien gebogen hout het sterkst is in de richting van de krommings-as, kan het in

combinatie met een goed gekozen vorm een heel efficiënt materiaal zijn. De vorm mag zelfs zeer willekeurig zijn: bijna alle soorten krommingen zijn praktisch uitvoerbaar.

Het buigen van het hout verloopt vrij snel. Net geveld hout kan gebogen worden terwijl oven droog hout slechts 24 uur nodig heeft om voldoende water op te nemen om een goed vochtgehalte voor buigen te bekomen. Het stomen zelf duurt maximaal enkele uren terwijl het buigen slechts seconden kost. Indien gebruikt wordt gemaakt van een oven bij het zetten van de kromming, is hout voldoende droog na enkele dagen om in de praktijk gebruikt te worden.

Anderzijds is het een zeer duur proces. Veel gebruikte houtsoorten in constructies zoals grenen en vuren buigen niet goed, waardoor een toevlucht gezocht moet worden tot duurder loofhout zoals beuk of eik. Bovendien moet dat hout van de allerhoogste kwaliteit zijn aangezien een klein defect in het hout het hele buigproces onmogelijk maakt. Als krommingen met kleine kromtestraal worden gebruikt moeten straps toegepast worden. Dit heeft als gevolg dat het hele proces moeilijk te automatiseren en zeer arbeidsintensief is. Dit alles leidt tot zeer hoge productiekosten.

Alle voordelen van het stoombuigen van massief hout gelden ook voor zijn grote concurrent, het lamineren, terwijl de nadelen veel minder zijn. Dit is meteen ook de reden waarom het stoombuigen van massief hout bijna nooit wordt gebruikt voor constructieve toepassingen. Tenzij men absoluut lijm wil vermijden of om esthetische redenen de balken massief wil gebruiken, is het zowel constructief als economisch niet te verantwoorden om af te stappen van het creëren van gekromde balken voor constructies door middel van lamineren.

7 APPENDICES

7.1 APPENDIX A

De gemiddelde rek van stuk hout kan bepaald worden aan de hand van de lengte van het hele proefstuk voor buigen (l_i) en na buigen (l_e) met onderstaande formule:

$$s = \frac{l_e - l_i}{l_i}$$

Kromlijnige afstanden kunnen worden gemeten door middel van een staaldraad. Deze moet de te meten kromme zo goed mogelijk benaderen en kan achteraf uitgerekt en gemeten worden. Dit moet zowel gedaan worden aan de convexe als de concave zijde. Deze rekken hebben niet veel betekenis omdat de delen van het proefstuk die niet gebogen worden er een invloed op hebben. Hoe groter ze worden genomen, hoe kleiner de rekken worden, ook al blijft de eigenlijke kromming dezelfde.

Om die reden is het nodig een rek te meten die enkel optreedt in de kromming zelf. Zolang gewerkt wordt met cirkelvormige mallen, is gemiddelde de rek over enkel de kromming gelijk aan de maximale rek. Omdat veel proeven uitgevoerd worden op een cirkelvormige mal is het nuttig om een formule uit te werken die voor zowel trek als druk de werkelijke waarden geeft uitgaande van volgende gegevens:

- oorspronkelijke lengte: l_0
- kromtestraal: R
- krommingshoek: ϑ
- lengte na buigen aan concave zijde: l_i
- lengte na buigen aan convexe zijde: l_e

De maximale stuik wordt gegeven door onderstaande formule:

$$s_{max,i} = 1 - \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\vartheta}{360} - (l_0 - l_i)}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\vartheta}{360}}$$

Terwijl de maximale rek gegeven wordt door:

$$s_{max,e} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\vartheta}{360} + (l_e - l_0)}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\vartheta}{360}} - 1$$

Bij het opstellen van deze formules is aangenomen dat alle rekken optreden in het deel waar het hout gekromd is en dat ze daar uniform optreden. Als het buigen traag genoeg uitgevoerd wordt, kan een uniforme rek zeker aangenomen worden. Het feit dat de niet-gekromde delen

geen rek vertonen na het buigen kan enkel proefondervindelijk aangetoond. Na het aanbrengen van verticale streepjes om de 10 mm over de hele lengte van proefstuk O02B, bleken die in het rechte deel precies even ver te staan van elkaar als voordien. Enkel in de overgangszone tussen het rechte en het gekromde deel was er sprake van enige beïnvloeding. Aangezien dit effect slechts optreedt in een zeer beperkt gebied (1 cm) mag dit verwaarloosd worden.

7.2 APPENDIX B

7.2.1 BEPALING VAN k' IN FUNCTIE VAN k

De vergelijking van de parabool volgt uit de snijding van volgende twee vlakken:

$$z = k \cdot x \cdot y \text{ en } x = y$$

Dit geeft in een lokaal assenstelsel, waarbij de X en Y assen 45° geroteerd zijn over de z -as en de z -as ook de Z -as is, het volgende:

$$Z = k' \cdot X^2$$

Voor de bepaling van k' worden beide vergelijking opgelost voor het punt waarvan de x en y coördinaat 1 zijn. Voor datzelfde punt geldt dat

$$X = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{2}$$

Substitutie van $(x,y) = (1,1)$ en $X = \sqrt{2}$ in beide vergelijking en gelijk stellen aan elkaar levert:

$$k \cdot 1 \cdot 1 = k' \cdot (\sqrt{2})^2$$

$$\Rightarrow k' = \frac{k}{2}$$

7.2.2 BEPALING MAXIMALE KROMMING

De maximale kromming wordt van de centrale parabool wordt berekend aan de hand van de vergelijking in het lokale assenstelsel, dus met gebruik te maken van k' .

$$Z = k' \cdot X^2$$

De kromtestraal van een parabool kan berekend worden via:

$$R(X) = \frac{\left(1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2\right)^{3/2}}{\frac{\partial^2 Z}{\partial X^2}} = \frac{(1 + (2 \cdot k' \cdot X)^2)^{3/2}}{2 \cdot k'}$$

De maximale kromtestraal treedt op voor $X = 0$:

$$R(0) = \frac{(1 + (2 \cdot k' \cdot 0)^2)^{3/2}}{2 \cdot k'} = \frac{1}{2 \cdot k'} = \frac{1}{k}$$

Uiteraard moet nog rekening gehouden worden met het schalen van het geheel:

$$R_{min} = \frac{s}{k} = \frac{20}{2,1} = 9,52cm$$

7.2.3 BEPALING BOOGLENGTE VAN DE PARABOOL

De bepaling van de booglengte van de centrale parabool wordt ook berekend aan de hand van de vergelijking in het lokale assenstelsel.

$$Z = k' \cdot X^2$$

De vergelijking van de booglengte is de volgende:

$$l = s \cdot \int_{X=-\sqrt{2}}^{X=\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2} = s \cdot \int_{X=-\sqrt{2}}^{X=\sqrt{2}} \sqrt{1 + (2 \cdot k' \cdot X)^2} = s \cdot \int_{X=-\sqrt{2}}^{X=\sqrt{2}} \sqrt{1 + k^2 \cdot X^2}$$

Rekening houdende met $s = 20$ en $k = 2,1$ leidt dit tot het volgende:

$$l = 20 \cdot 5,26 = 105,8cm$$

7.3 APPENDIX C

De pyFormex code:

```
#!/usr/bin/env pyformex --gui

clear()
from math import *
from geometry import *
from simple import *
from numpy import *

# Declaratie van parameters

am = 14. # Aantal onderverdelingen in XY richting
bm = 14. # Aantal onderverdelingen in -XY richting
k= 2.1 # Schaalfactor voor hyparschaal
d = -0.5 # x-coördinaat voor snijvlak (voor herschaling)
s=20. # Schaalfactor

# Declaratie van andere parameters en variabelen

a=0
b=0
c=0
x=zeros((int(am)+1,int(bm)+1))
y=zeros((int(am)+1,int(bm)+1))
z=zeros((int(am)+1,int(bm)+1))
tx=zeros((int(bm)+1,2*int(bm)+1))
ty=zeros((int(bm)+1,2*int(bm)+1))
tz=zeros((int(bm)+1,2*int(bm)+1))
f=zeros((2*int(bm)+1,1))
P = [[] * (int(bm) + 1)
N = [[] * (int(bm) + 1)
L = [[] * 8

# Generatie van punten voor algemeen oppervlak

while a < am+1:
    while b < bm+1:
        z[a,b] = 2.*(a-am/2)/am
        y[a,b] = 2.*(b-bm/2)/bm
        x[a,b] = k*y[a,b]*z[a,b]
        if z[a,b] == y[a,b]:
            rico = 2.*k*y[a,b]
            P[b]=point(x=x[a,b],y=y[a,b],z=z[a,b])
            N[b]=point(x=x[a,b]+rico,y=y[a,b]+1,z=z[a,b]+1)

#draw(line(p1=[x[a,b],y[a,b],z[a,b]],p2=[x[a,b]+rico*0.4,y[a,b]+1.*0.4,z[a,b]+1.*0.4]),color=
green)
        #print str(P[b]) + ' ' + str(N[b])
        b=b+1
    b=0
    a=a+1

a=0
b=0

# Generatie van krommen

while a < am+1:
    while b < bm+1:
```

```

z[a,b] = 2.*(a-am/2)/am
y[a,b] = 2.*(b-bm/2)/bm
x[a,b] = k*y[a,b]*z[a,b]
# if a == b and a != 0:
#   LL = line(p1=[x[a,b],y[a,b],z[a,b]],p2=[x[a-1,b-1],y[a-1,b-1],z[a-1,b-1]])
#   draw(LL,color=red)
c=0
while c < bm+1:
    if b != 0:
        L=line(p1=[x[a,b],y[a,b],z[a,b]],p2=[x[a,b-1],y[a,b-1],z[a,b-1]])

t=intersectionWithPlane(L,[P[c].x()[0][0],P[c].y()[0][0],P[c].z()[0][0]],[N[c].x()[0][0],N[c].y()[0][0],N[c].z()[0][0]])
    if t>=0 and t<=1 and b<=c and c>=bm/2:
        tx[c,f[c,0]] = (1-t[0])*x[a,b]+t[0]*x[a,b-1]
        ty[c,f[c,0]] = (1-t[0])*y[a,b]+t[0]*y[a,b-1]
        tz[c,f[c,0]] = (1-t[0])*z[a,b]+t[0]*z[a,b-1]
        #draw(point(x=tx[c,f[c,0]],y=ty[c,f[c,0]],z=tz[c,f[c,0]]),color=blue)
        if f[c,0] > 0:
            L1=line(p1=[tx[c,f[c,0]],ty[c,f[c,0]],tz[c,f[c,0]]],p2=[tx[c,f[c,0]-1],ty[c,f[c,0]-1],tz[c,f[c,0]-1]])
            L2=line(p1=[tx[c,f[c,0]],tz[c,f[c,0]],ty[c,f[c,0]]],p2=[tx[c,f[c,0]-1],tz[c,f[c,0]-1],ty[c,f[c,0]-1]])
            L3=line(p1=[tx[c,f[c,0]],-ty[c,f[c,0]],-tz[c,f[c,0]]],p2=[tx[c,f[c,0]-1],-ty[c,f[c,0]-1],-tz[c,f[c,0]-1]])
            L4=line(p1=[tx[c,f[c,0]],-tz[c,f[c,0]],-ty[c,f[c,0]]],p2=[tx[c,f[c,0]-1],-tz[c,f[c,0]-1],-ty[c,f[c,0]-1]])
            L5=L1.rotate(90,0).mirror(dir=0,pos=0, keep_orig=False)
            L6=L2.rotate(90,0).mirror(dir=0,pos=0, keep_orig=False)
            L7=L3.rotate(90,0).mirror(dir=0,pos=0, keep_orig=False)
            L8=L4.rotate(90,0).mirror(dir=0,pos=0, keep_orig=False)
            #draw([L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8],color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L1,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L2,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L3,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L4,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L5,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L6,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L7,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            draw(cut2AtPlane(L8,[d,0.,0.],[1.,0.,0.],side='+'),color=blue)
            f[c,0]=f[c,0]+1
        if c == 0:
            #draw(L)
            h=1
        if a != 0:
            L=line(p1=[x[a,b],y[a,b],z[a,b]],p2=[x[a-1,b],y[a-1,b],z[a-1,b]])
            if c == 0:
                #draw(L)
                h=1
            c = c+1
        b=b+1
    b=0
    a=a+1

a = 0.05+(-d)/k

# Tekenen van randen

while a<=1.0:
    L1=line(p1=[d,a,d/(a*k)],p2=[d,a-0.05,d/(a-0.05)/k])
    L2=line(p1=[d,d/(a*k),a],p2=[d,d/(a-0.05)/k,a-0.05])
    draw([L1,L2],color=green)

```

```

a=a+(1-0.05-(-d)/k)/10

draw(line(p1=[d,1,d/(1*k)],p2=[k,1,1]),color=green)
draw(line(p1=[d,d/(1*k),1],p2=[k,1,1]),color=green)
draw(line(p1=[d,-1,-d/(1*k)],p2=[k,-1,-1]),color=green)
draw(line(p1=[d,-d/(1*k),-1],p2=[k,-1,-1]),color=green)

print '-----'
print 'Hoogte van nulpunt boven vlak: ' + str(-d*s)
print 'Hoogte grootste parabool: ' + str(k*s)
print 'Totale hoogte: ' + str((k-d)*s)
print 'Afmetingen vierkant: ' + str(2.*s) + 'x' + str(2.*s)
print 'Lengte langste parabool: (voor k = 1.9): ' + str(s*4.7923)
print 'Kleinste kromtestraal: ' + str(s/k)
print '-----'

# End

```

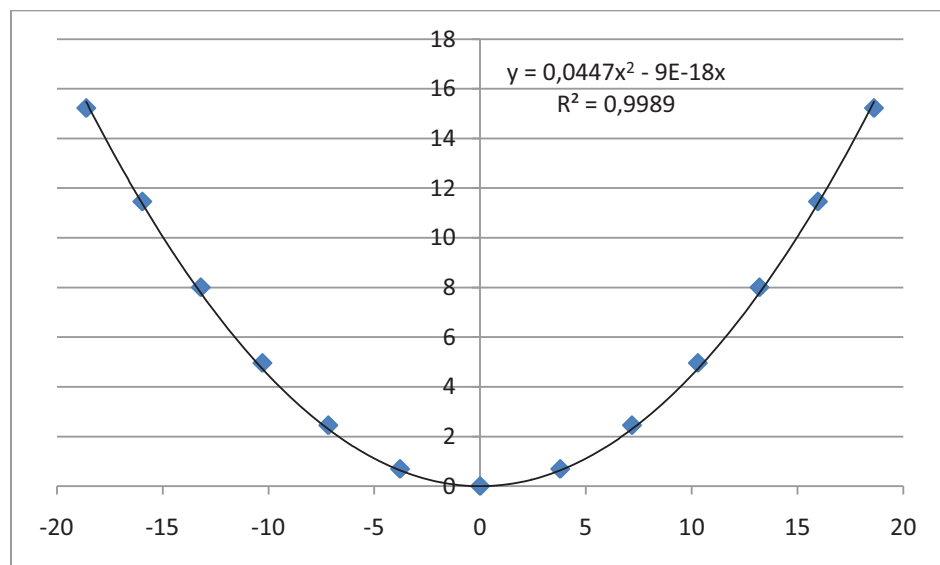
7.4 APPENDIX D

De kromme 2 wordt nu in detail geschouwd. Na een gepaste coördinatentransformatie worden de volgende punten gegeven door pyFormex:

X	Y
-18,6169	15,2206
-15,9679	11,4561
-13,2034	8,0030
-10,2900	4,9552
-7,1759	2,4490
-3,7857	0,6895
0,0000	0,0000
3,7857	0,6895
7,1759	2,4490
10,2900	4,9552
13,2034	8,0030
15,9679	11,4561
18,6169	15,2206

Tabel 12: XY-coördinaten van kromme 2 na transformatie

Als deze punten worden geplot en benaderd door een tweedegraadsvergelijking.



Figuur 81: Benadering van de kromme 2 aan de hand van enkele punten

De kromme die de punten benadert heeft een zeer kleine term in x, waardoor kan aangenomen worden dat de werkelijke vergelijking van de kromme gevonden is:

$$y = A \cdot x^2 = 0,0447 \cdot x^2$$

Dit is de vergelijking van een parabool.

8 BIBLIOGRAFIE

- [1] Dinwoodie, J. M. *Timber, Its nature and behaviour*. London and New York: E & FN Spon, 2000.
- [2] Kollmann, Franz F. P. en Côté, Jr, Wilfred A. *Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood*. New York: Springer, 1968.
- [3] Van Acker, Joris. *Houtanatomie*. Vakgroep Water -en Bosbeheer, Universiteit Gent, 2008.
- [4] Peck, Edwards C. *Bending Solid Wood to Form*. 1957, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook No.125.
- [5] Van Acker, Joris. *Houttechnologie*. Vakgroep Water -en Bosbeheer, Universiteit Gent, 2008.
- [6] Veritas. *Steam-Bending Instruction Booklet*. Lee Valley No. 05F15.01.
- [7] Katsuragi, Kohji. *The wood bending*. Japan: Furniture Maker Tai-Workshop, 2002.
- [8] *Presentation & Demo on Steam Bending of Wood*. Mitton, Roy. 2008. Suncoast Woodcrafters Guild.
- [9] Stevens, W. C. en Turner, N. *Wood Bending Handbook*. London: Her Majesty's Stationery Officer, 1970.
- [10] Schleining, Lon. *Take the mystery out of Steam-Bending*. The Taunton Press, Inc, 2009.
- [11] Belis, Jan. *Spatial structures - Ruimtelijke Constructies*. Vakgroep Bouwkundige Constructies, Laboratorium voor Modelonderzoek, 2009.
- [12] Soetens, Tim. *Ontwerp en nazicht van betonnen hypar dakschalen*. Gent: Universiteit Gent, 2010.
- [13] *Lap Joint Images*. yourdictionary.com. [Online] [Citaat van: 12 27 2010.] <http://images.yourdictionary.com/lap-joint>.
- [14] Wiselius, S.I. *Houtvademecum*. Antwerpen: Kluwer Technische Boeken B.V. Deventer, 1990.
- [15] *NBN EN 975-1. Gezaagd hout - Indeling van loofhout op uiterlijk - Deel 1 : Eik en beuk*. Brussel : Belgisch instituut voor normalisatie, 1996.

- [16] NBN EN 13183-1. *Vochtgehalte van een stuk gezaagd hout – Deel 1: Bepaling door de werkwijze met drogen in de oven*. Brussel: Belgisch instituut voor normalisatie, 1956.
- [17] Demaine, Erik. *Hyperbolic Paraboloids*. [Online] [Citaat van: 26 12 2010.] <http://erikdemaine.org/hypar/>.
- [18] Heeffer, Harold en Soetens, Tim. *Casestudy - Analyse van een ruimtelijke constructie: Nieuw Gerechtsgebouw Antwerpen*. Gent: Universiteit Gent, 2010.

9 LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Vereenvoudigde structuur van de celwand [1]	4
Figuur 2: Effect van vochtgehalte op mechanische eigenschappen van sparrenhout [2]	10
Figuur 3: Adsorptie-desorptie hysteresis curve voor sparrenhout [2]	10
Figuur 4: Evenwichtsvochtgehaltes van hout in verschillende omgevingen [1]	11
Figuur 5: Volumetrische krimp in functie van vochtgehalte [2]	12
Figuur 6: Verband tussen volumetrische krimp en volumegewicht [2]	13
Figuur 7: Verband tussen zwel en rek voor loofhout en naaldhout [2]	14
Figuur 8: Karakteristieke vervorming na krimp [2]	15
Figuur 9: Spanning-Vervormings-diagramma voor trek en druk, loodrecht op de vezel [1]	17
Figuur 10: Spanning-Vervormings-diagramma voor een ideaal elastisch lichaam [2]	18
Figuur 11: Spanning-Vervormings-diagramma voor een elasto-plastisch lichaam [2]	18
Figuur 12: Spanning-Vervormings-diagramma met stijgende elasticiteit [2]	19
Figuur 13: Spanning-Vervormings-diagramma met constante elasticiteit [2]	19
Figuur 14: Plastische en elastische component bij vervorming van hout [1]	20
Figuur 15: Spanning-rek diagramma en spanningsverdeling [2]	23
Figuur 16: Treksterkte in functie van specifiek gewicht [2]	24
Figuur 17: Druksterkte in functie van specifiek gewicht [2]	24
Figuur 18: Elasticiteitsmodulus in functie van specifiek gewicht [2]	25
Figuur 19: Effect van vochtgehalte op E, parallel met de vezels van eik [2]	26
Figuur 20: Effect van vochtgehalte op E, parallel met de vezels van spar [2]	26
Figuur 21: Effect van het vochtgehalte op druksterkte [2]	26
Figuur 22: Effect van vochtgehalte op de buigsterkte [2]	27
Figuur 23: Effect van temperatuur op longitudinale druksterkte [1]	27
Figuur 24: Effect van de temperatuur op de elasticiteitsmodulus [2]	27
Figuur 25: Effect van vochtgehalte en temperatuur op de druksterkte [2]	28
Figuur 26: Effect van vochtgehalte en temperatuur op de buigsterkte [2]	28
Figuur 27: Effect van de vezelhoek op de elasticiteitsmodulus [2]	29
Figuur 28: Effect van de vezelhoek op de treksterkte [2]	29
Figuur 29: Effect van de vezelhoek op druksterkte [2]	29
Figuur 30: Effect van de vezelhoek op de druksterkte [2]	29
Figuur 31: Diagram voor de bepaling van veiligheidsfactoren [5]	30
Figuur 32: Verloop van de vezels bij verschillende manieren om krommingen in hout te verkrijgen [6]	32
Figuur 33: Mogelijke buigprocessen [7]	33
Figuur 34: Effect van stoom op de spanning/rek curve voor trek [9]	37
Figuur 35: Effect van stoom op de spanning/rek curve voor druk [9]	37

Figuur 36: Spanningsverdeling bij buiging voor niet-gestoomd hout (A), gestoomd hout (B) en gestoomd hout en voorzien van strap (C) [2]	38
Figuur 37: Enkelvoudige kromming in 1 vlak met strap [9]	39
Figuur 38: Tweevoudige kromming in 1 vlak met 2 straps [9].....	39
Figuur 39: Meervoudige kromming in 2 vlakken met 3 straps [9].....	39
Figuur 40: Verandering droog gewicht na stomen [2].....	42
Figuur 41: Verandering zuurtegraad na stomen [2]	42
Figuur 42: Verlies aan sterkte na stomen [2]	42
Figuur 43: Verandering van eigenschappen van het hout na buigen [2]	42
Figuur 44: Steambox	44
Figuur 45: Strap	44
Figuur 46: Kleine kwast	45
Figuur 47: Grote kwast.....	45
Figuur 48: Afwijking van vezelrichting	45
Figuur 49: Vereenvoudiging van rek-spannings-diagramma [2].....	58
Figuur 50: Spanningen en rekken in proefstuk tijdens buigen	59
Figuur 51: Reverse bend	60
Figuur 52: Ongezaagde doorsnede	61
Figuur 53: Gezaagde doorsnede	61
Figuur 54: Verschillende weergaven van een hyperbolische paraboloïde [11]	63
Figuur 55: xy-projectie van hyparvlak.....	63
Figuur 56: Hyparvlak	63
Figuur 57: xy-projectie hyparvlak en parabool	64
Figuur 58: Hyparvlak en parabool	64
Figuur 59: xy-projectie hyparvlak, parabool en richtingsvectoren	64
Figuur 60: Hyparvlak, parabool en richtingsvectoren.....	64
Figuur 61: xy-projectie hyparschaal en krommen	65
Figuur 62: Hyparschaal en krommen	65
Figuur 63: xy-projectie krommen.....	65
Figuur 64: Krommen	65
Figuur 65: xy-projectie krommen en randen	66
Figuur 66: Krommen en randen	66
Figuur 67: Overlappingsverbinding [13]	68
Figuur 68: Aanduiding van de vorm van de latten in het xy-vlak	69
Figuur 69: Kromme 1.....	70
Figuur 70: Kromme 2.....	70
Figuur 71: Kromme 3.....	70
Figuur 72: Kromme 4.....	70

Figuur 73: Kromme 5.....	70
Figuur 74: Kromme 6.....	70
Figuur 75: Kromme 7.....	70
Figuur 76: Schaalmodel bij begin montage.....	72
Figuur 77: Schaalmodel tijdens montage.....	72
Figuur 78: Aangepaste vorm van schaalmodel	72
Figuur 79: Afgewerkt schaalmodel	72
Figuur 80: Duur voor een homogene temperatuur van 100°C wordt bekomen bij vierkante proefstukken voor verschillende diktes [2]	74
Figuur 81: Benadering van de kromme 2 aan de hand van enkele punten.....	82

10 LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Vochtgehaltes bij een bepaald volumegewicht.	8
Tabel 2: Treksterkte en breeklengthe van enkele materialen [2].....	21
Tabel 3: Theoretische bepaling maximale kromtestralen voor ongestoomd hout, gestoomd hout ¹ en gestoomd hout voorzien van een strap ²	37
Tabel 4: Spanning in functie van speling ter hoogte van eindblokken [7].....	39
Tabel 5: Vochtgehaltes per lot	45
Tabel 6: Vochtgehaltes tijdens het stoomproces	49
Tabel 7: Terugveren van het hout in functie van het vochtgehalte	50
Tabel 8: Effect van stoomtijd op buigproces	51
Tabel 9: Terugveren van enkele proefstukken	53
Tabel 10: Bepaling maximale rekken in gebogen proefstukken.....	56
Tabel 11: Overzicht parabolen	70
Tabel 12: XY-coördinaten van kromme 2 na transformatie	82

