

Schuifsterktebepaling van zeven houtsoorten voor de toepassing in verkeersbruggen

6 september 2002

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
Voorwoord	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
2 Doel van het onderzoek	11
3 De opzet van het onderzoek	13
4 De houtsoorten, afmetingen en andere kenmerken	15
5 De beproevingsprocedure	17
6 Bepalingen van de optredende spanningen	19
6.1 Buigspanningen	19
6.2 Spanningsanalyse	20
6.3 Eindigde elementenberekening	21
6.4 De elasticiteitsmodulus	24
7 Analyse van de proefresultaten	25
8 Bespreking van de resultaten en bepaling van de karakteristieke waarden	27
9 Conclusies	29
10 Referenties	31
Annex	33

Voorwoord

Voor het wegdek van beweegbare brugdekken werd tot op heden voornamelijk azobé toegepast. Deze houtsoort staat bekend om haar lange levensduur en zeer goede fysisch-mechanische eigenschappen. Ook voor de verbetering van de tegenwoordig steeds vaker toegepaste stalen brugdekken wordt naar oplossingen gezocht. Naast een belastingspreidende laag van staal of beton kan het gebruik van hout mogelijk een alternatief bieden.

De Nederlandse overheid heeft als beleid dat voor rijkswerken waar mogelijk hout uit duurzaam beheerde bossen wordt toegepast (FSC certificaat of gelijkwaardig). Voor toepassing in verkeersbruggen was dit tot op heden een probleem omdat onvoldoende kennis over de eigenschappen van de verschillende FSC houtsoorten bekend was.

Op verzoek van de Bouwdienst Rijkswaterstaat heeft de Dienst Weg- en Waterbouwkunde in samenwerking met de belangrijkste houtleveranciers onderzoek uitgevoerd naar de schuifsterkte van de houtsoorten karri, massaranduba, uchi, toraddo, angelim vermelho, piquia, azobé en vuren. Hierbij is vooral gekeken naar de manier waarop het hout in brugdekken wordt toegepast. In het voorliggende rapport is het onderzoek naar de schuifsterkte, dat uitgevoerd is door de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft gerapporteerd.

Aan dit onderzoek hebben de volgende partijen meegewerkt:

Bouwdienst Rijkswaterstaat Zoetermeer.
Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft
Technische Universiteit Delft

Ir. G. Nachtegaal
A. van den Burg (PL)
Dr. ir. J.W.G. van de Kuilen, Dr. ir. A.J.M. Leijten

GWW Houtimport, Reeuwijk

ing L. Elenbaas (levering massaranduba, angelim
vermehlo en uchi torrado
levering azobé en piquia
levering karri

Wijma BV, Kampen
W.J.R. Reef Hout, Goor

Met de resultaten van dit onderzoek komt kennis beschikbaar zodat voor verkeersbruggen meer duurzaam geproduceerd hout kan worden toegepast.

Samenvatting

Voor het wegdek van beweegbare brugdekken werd tot op heden voornamelijk azobé toegepast. Deze houtsoort, staat bekend om haar lange levensduur en zeer goede fysisch-mechanische eigenschappen.¹ Op verzoek van de Bouwdienst Rijkswaterstaat heeft de Dienst Weg- en Waterbouwkunde in samenwerking met een aantal houtleveranciers onderzoek uitgevoerd naar de schuifsterkte van een aantal houtsoorten die op duurzame wijze zijn geproduceerd (FSC certificaat), te weten karri, massaranduba, ichi torrado angelim vermelho, cumaru, piquia. Omdat de houtsoorten moeten worden vergeleken met azobé is dit tevens in het onderzoek betrokken en om een vergelijking te maken met de karakteristieke waarden zoals gegeven in de sterkteklassen is ook vuren meegenomen.

Uit het onderzoek volgt dat de schuifsterkte van hout moeilijk te bepalen is aan de hand van balken met een rechthoekige dwarsdoorsnede. Alleen indien een vijfpuntsbuigproef wordt uitgevoerd met een balk die in de vorm van een I-profiel is bewerkt, kan de schuifsterkte met succes worden bepaald.

Op basis van dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat met betrekking tot de schuifsterkte de houtsoorten azobé, massaranduba en angelim vermelho een vergelijkbare sterkte hebben. De houtsoorten Zuid-Afrikaans karri, uchi torrado en piquia hebben een iets lagere schuifsterkte, maar nog altijd ruim voldoende om de vergelijking met azobé aan te kunnen, zeker omdat voor alle afgeleide karakteristieke schuifsterktewaarden geldt dat zij ruim boven de waarden van de sterkteklassen liggen. Verder is duidelijk dat vergeleken met vuren de gemiddelde schuifsterkte van het hardhout ongeveer een factor 1.7 tot 2 hoger ligt. De schuifsterkte is gecorrigeerd voor het feit dat in een vijfpuntsbuigproef altijd de zwakste van de twee zijden bezwijkt, zodat het werkelijke gemiddelde van de sterkte hoger is.

Overzicht van de proefresultaten

Houtsoort	Volumieke massa (nat)		Gemiddelde schuifsterkte zonder correctie		Gemiddelde schuifsterkte met correctie		Gemiddelde elasticiteitsmodulus	
	kg/m ³	st.afw.	N/mm ²	st.afw.	N/mm ²	st.afw.	N/mm ²	st.afw.
Zuid-Afrikaans karri	1047	68	15.1	1.7	16.3	2.1	14500	3900
massaranduba	946	46	16.9	2.3	18.5	2.8	11750	3300
uchi torrado	1006	46	14.1	2.0	15.5	2.4	15750	2500
angelim vermelho	1071	142	17.3	1.9	18.6	2.4	15900	3250
piquia	1102	25	14.0	2.1	15.4	2.5	12750	1960
azobé	1225	32	16.5	1.8	17.7	2.1	13700	1750
vuren	482	48	8.7	0.7	9.1	0.9	11700	2300

Bovenstaande waarden voor de schuifsterkte zijn ontleend door schematisatie van de belasting als puntlasten alsmede van de opleggingen als puntopleggingen. Een eindige elementenberekening heeft aangetoond dat de spanningen wijzigen indien de afmetingen van de belastingen en de opleggingen in beschouwing worden genomen. Een nadere studie naar de in de praktijk aanwezige afmetingen lijkt zinvol gezien het feit dat de berekende schuifspanningen met de eindige elementenberekening voor de onderhavige geometrie ongeveer 20% lager liggen dan op grond van de normale handberekening wordt bepaald.

Een belangrijk sorteercriterium voor de hardhoutsoorten is de afwezigheid van kwasten en de mate van draadverloop (kleiner dan 1:10).

¹ Azobé is afkomstig uit Kameroen en Congo. Het hout is leverbaar met het Keurhout Certificaat. Het certificaat voor Azobé voldeed tijdens dit onderzoek nog niet op alle punten aan de minimum eisen voor duurzaam bosbeheer.

1 Inleiding

In een groot aantal bruggen zijn hardhouten rijdekken toegepast van de houtsoort azobé. De azobé delen worden parallel aangebracht en hebben veelal een hoogte van ongeveer 100 tot 150 mm. Het ontwerpcriterium voor dergelijke bruggedelen is meestal de schuifsterkte, terwijl in het gros van de **constructieve** toepassingen van azobé de buigsterkte/buigstijfheid het maatgevende ontwerpcriterium is. Over de buigsterkte is dan ook veel meer bekend dan over de schuifsterkte en de buigsterkte dient dan ook als basis om houtsoorten in te delen in sterkteklassen. De houtsoort azobé is ingedeeld in de Nederlandse sterkteklasse K70, hetgeen inhoudt dat de representatieve waarde van de buigsterkte van azobé 70 N/mm² bedraagt. Dit is de waarde waarmee in de praktijk berekeningen moeten worden uitgevoerd. Met de indeling in sterkteklasse K70 is ook de waarde van de schuifsterkte vastgelegd. Voor azobé is deze waarde 7 N/mm². Op Europees niveau is azobé ingedeeld in sterkteklasse D60, door een iets andere toewijzingsprocedure. De relatie tussen de buigsterkte en de schuifsterkte zoals gehanteerd voor de Europese sterkteklassen (Europese norm EN 338:1995) luidt als volgt:

$$f_{v,k} = 0.2f_{m,k}^{0.8}$$

De waarden voor de buigsterkte en de schuifsterkte zoals gehanteerd in de Nederlandse en de Europese sterkteklassen zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Karakteristieke waarde van de buigsterkte en de schuifsterkte conform de sterkteklassen.

Nederlandse sterkteklasse volgens NEN 5498			Europese sterkteklasse volgens EN 338:1995		
Sterkteklasse	Buigsterkte	Schuifsterkte	Sterkteklasse	Buigsterkte	Schuifsterkte
	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]
K43	43	4.3	D40	40	3.8
K50	50	5.0	D50	50	4.6
K60	60	6.0	D60	60	5.3
K70	70	7.0	D70	70	6.0
K80	80	8.0	-		

Deze relatie is gebaseerd op onderzoeken aan voornamelijk naaldhoutsoorten en bij het opstellen van de sterkteklassen tabellen in de huidige vorm (zowel nationaal als Europees) is bij gebrek aan voldoende gegevens dezelfde relatie gehanteerd voor de hogere sterkteklassen waar voornamelijk (tropische) hardhoutsoorten worden ingedeeld. Of deze relatie op deze wijze naar de zwaardere houtsoorten kan worden doorgetrokken is dan ook onduidelijk.

Met de komst van 'nieuwe' duurzaam geproduceerde hardhoutsoorten die mogelijk als alternatief voor azobé kunnen dienen is vraag ontstaan naar meer kennis omtrent de schuifsterkte van deze nieuwe hardhoutsoorten. Hiervoor is een onderzoeksprogramma opgesteld om de schuifsterkte van de nieuwe hardhoutsoorten in vergelijking tot vuren en azobé vast te stellen en om aan te geven hoe binnen Rijkswaterstaat deze nieuwe kennis kan worden toegepast bij de beoordeling van bestaande brugdekken die aan vervanging toe zijn. In figuur 1 op pagina 13 is de schuifsterkte visueel toegelicht

2 Doel van het onderzoek

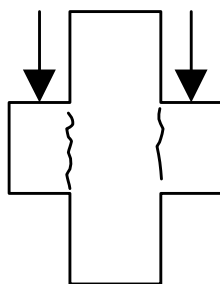
Het doel van het onderzoek is driedelig. De eerste doelstelling kan omschreven worden als het vergelijken van de schuifsterkte van azobé met vijf 'nieuwe' hardhoutsoorten afkomstig uit duurzaam beheerde bossen. De gekozen houtsoorten zijn Zuid-Afrikaans karri, massaranduba, uchi torrado, angelim vermehlo en piquia. De houtsoort vuren is eveneens toegevoegd als vergelijking en om de relatie met de sterkteklassen te kunnen analyseren. De tweede doelstelling is het nagaan van de draagkracht van het hout zoals het in de praktijk wordt toegepast, namelijk als houten ligger over meerdere steunpunten. Door de wijze van belasten ontstaat een zekere mate van boogwerking in het hout, waardoor een grotere draagkracht aanwezig zal zijn dan op grond van de normale ontwerpregels voor dwarskracht wordt voorspeld. Bovendien zijn de afmetingen van de belastingen en de opleggingen dusdanig groot ten opzichte van de overspanning, dat ook hier een gunstig effect vanuit gaat. Als derde doelstelling geldt dat de resultaten van het onderzoek een waardevolle bijdrage kunnen leveren aan het verbeteren van de Nederlandse en Europese normen met name waar het gaat om gegevens met betrekking tot hardhout.

3 De opzet van het onderzoek

In de literatuur zijn twee methoden te vinden voor het bepalen van de schuifsterkte.

Methode A.

De bepaling van de schuifsterkte volgens de directe methode met kleine kwastvrije proefstukken. Deze methode is weergegeven in figuur 1. Het proefstuk wordt in een kritieke doorsnede direct op afschuiving belast. Hier wordt de locale schuifsterkte vastgesteld. Nadeel van deze methode, die vroeger veel in zwang was, is dat behalve schuifspanningen ook andere niet gewenste spanningen worden opgewekt die bijdragen aan het bezwijken. Verder is het schuifoppervlak erg klein en het proefresultaat heeft dus betrekking op een lokale sterkte. Omdat de schuifsterkte een sterk volume-effect bezit geven deze proeven hoge waarden die niet zonder meer in de praktijk toepasbaar zijn.



Figuur 1: Directe schuifproef

Methode B.

De bepaling van de schuifsterkte door het belasten van houten liggers in een vijfpuntsbuigproef volgens figuur 2. Een kleine balkhoogte-overspanningsverhouding zorgt voor lage buigspanningen en hoge schuifspanningen. Bij deze methode wordt de locatie van de breuk niet vooraf opgelegd zoals bij de methode A. Aangezien het op afschuiving belaste volume groter is dan bij de vorige methode, leidt dit tot lagere maar ook meer realistische waarden voor de schuifsterkte. De wijze van belasten in deze proef komt overeen met de wijze van toepassing van balken in brugdekken. Overigens geldt ook voor deze beproevingsmethode dat andere spanningen worden geïntroduceerd, met name buigspanningen.



Figuur 2: Vijfpuntsbuigproef

Hoewel getracht wordt de buigspanningen te beperken en de schuifspanningen sterk te activeren kan het toch gebeuren dat er geen afschuiving plaats vindt. Een (buig)breuktype dat vaak bij hardhout ontstaat is scheurvorming door draadverloop. Een voorbeeld is gegeven in figuur 3.



Figuur 3: Scheurvorming in de trekzone ter plaatse van de belasting ten gevolge van draadverloop om een kwast in een vijfpuntsbuigproef, houtsoort karri.

4 De houtsoorten, afmetingen en andere kenmerken

De beproefde houtsoorten zijn karri, massaranduba, uchi torrado, angelim vermehlo, piquia, azobé en vuren (Sterkteklasse K24 conform NEN 5498/5466).

De proefstukken

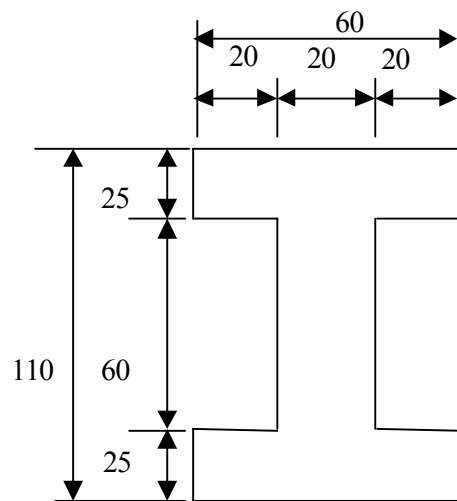
De houten balken in de brugdekdraagconstructies lopen meestal over meerdere stalen dragers met overspanningen van ongeveer 600 á 700 mm. De balkhoogte varieert van 110 tot 130 mm bij een balklengte van ongeveer 3000 m. De onderzochte balken bezitten afmetingen die hier globaal mee overeenkomen. Van elke houtsoort zijn 25 proefstukken beproefd.

De gemiddelde afmetingen, volumieke massa en vochtgehalte zijn in Tabel 1 weergegeven.

Tabel 1: Overzicht van de proefstukken

Houtsoort	Gemiddelde				
	lengte	breedte	dikte	volumieke massa	vochtgehalte
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[%]
Zuid-Afrikaans karri	3004	110	56	1047	27
massaranduba	2752	110	60	946	19
angelim vermelho	2646	110	60	1071	23
uchi torrado	2730	110	60	1006	24
piquia	3007	108	58	1102	>30
azobé	3050	111	61	1225	>30
vuren	2393	109	58	482	8

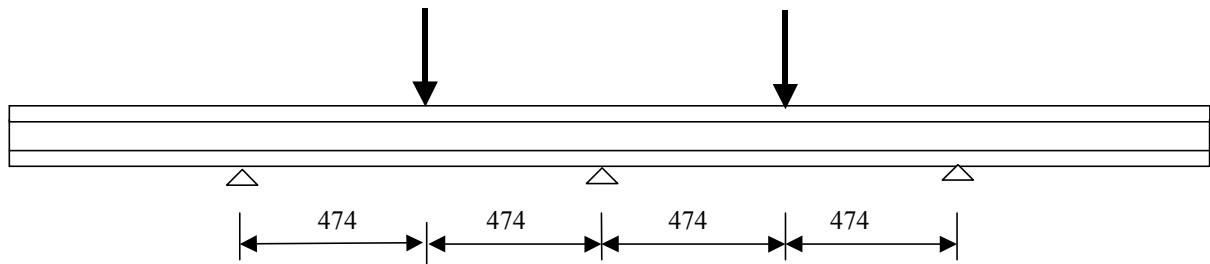
Het hout werd op maat aangeleverd door de verschillende houtleveranciers behalve het vuren dat rechtstreeks uit de timmerwerkplaats van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen werd betrokken. Het hardhout werd niet geconditioneerd tot het standaard beproevingsklimaat (20°C en 65% RV) een evenwichtsvochtgehalte van ongeveer 12% conform (EN 408). Een dergelijke klimatisering duurt lang en zou kunnen leiden tot ongewenste droogscheuren. Bovendien droogt hout in brugdekliggers niet uit tot 12% omdat het in een relatief vochtig klimaat wordt toegepast. De balken zijn dus beproefd onder de omstandigheden waaronder ze worden toegepast. In Tabel 1 is in de laatste kolom het vochtgehalte weergegeven gemeten na afloop van de proef met een elektrische houtvochtmeter. De volumieke massa is berekend door het gewicht van het proefstuk te delen door het volume. Indien de houtsoorten onderling moeten worden vergeleken is de volumieke massa in dit geval dus geen goede mogelijkheid. Hiertoe moet de volumieke massa per proefstuk onder geconditioneerde omstandigheden worden bepaald. Alleen de gewichten van de karri proefstukken hebben betrekking op de geschaafde rechthoekige doorsnede. Van alle andere proefstukken werd het gewicht bepaald nadat de doorsnede was geschaafd tot een dwarsdoorsnede zoals weergegeven in figuur 4.



Figuur 4: De dwarsdoorsnede van de proefstukken

5 De beproevingsprocedure

Na het bepalen van de afmetingen en het gewicht werd het proefstuk in de testopstelling gemonteerd. Het proefstuk werd gecentreerd hetgeen betekende dat beide balkuiteinden even ver over de eindoplegging staken zoals weergegeven in figuur 5.



Figuur 5: Opstelling vijfpuntsbuigproef

Verder werd de balk “ad random” in de opstelling geplaatst zonder specifiek te letten op groeistoringen of kwasten. Ter bepaling van de elasticiteitsmodulus werd het tussensteunpunt verwijderd en de doorbuiging in het midden van de hierdoor ontstane grote overspanning gemeten bij een kracht van 3 kN en 13 kN. Dit was niet geval voor het minder sterke vuren, waar de doorbuiging werd bepaald bij een kracht van 2 kN en 7 kN. Hierna werd de ligger ontlast en het middensteunpunt aangebracht. Een scharnierende constructie zorgt dat de uitgeoefende krachten door de testbank in twee gelijke porties over beide overspanningen worden verdeeld. Daarna werd de belasting opgevoerd totdat het proefstuk bezweek of de maximale kracht van de beproevingsbank werd bereikt (103.5 kN). Een beeld van een balk in de opstelling tijdens een beproeving is gegeven in figuur 6. Het breuktype alsmede de locatie van de breuk ten opzichte van het hart van de balk werd genoteerd.

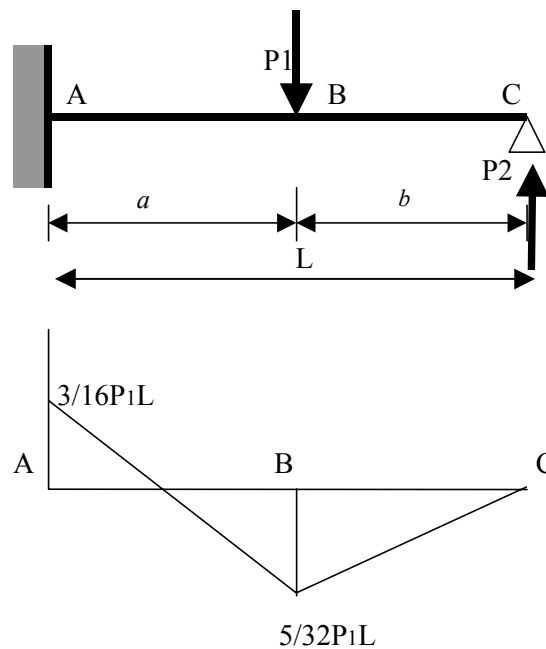


Figuur 6: Balk belast in vijfpuntsbuigproef

6 Bepalingen van de optredende spanningen

6.1 Buigspanningen

In figuur 7 is de momentenverdeling gegeven van het symmetrisch deel van de ligger van figuur 5.



Figuur 7: De momentenverdeling van de halve ligger uit vijfpuntsbuigproef van figuur 5

Verondersteld is dat de houtdoorsnede ter plaatse van het middensteunpunt niet roteert. De buigspanningen ten gevolge van de buigende momenten blijven relatief laag omdat de overspanninghoogte verhouding relatief klein is. De buigende momenten op de kritische plaatsen A en B bedragen:

$$\text{t.p.v. A} \quad M_A = \frac{3}{16} P_1 L$$

$$\text{t.p.v. B} \quad M_B = \frac{5}{32} P_1 L$$

6.2 Spanningsanalyse

Van groter belang is de schuifspanning in het zwaarst, op dwarskracht, belast deel van de ligger. Uitgaand van een symmetrische vervorming van de gehele ligger is de dwarskracht volgens de leer der mechanica:

$$\text{links van C} \quad V_C = \frac{5}{16} P_1$$

$$\text{rechts van A} \quad V_A = \frac{11}{16} P_1$$

Met behulp van:

$$f_v = \frac{DS}{bI}$$

met:

$$D = \frac{11}{32} F \quad \text{leidt dit tot de volgende theoretische schuifspanning:}$$

$$f_v = \frac{11FS}{32bI}$$

F is de maximale door de beproevingsbank uitgeoefende kracht

f_v is de schuifsterkte

D de maximale dwarskracht

S het statisch moment van het afgeschoven gedeelte van de doorsnede

b breedte van het afgeschoven deel

I is het traagheidsmoment gehele doorsnede

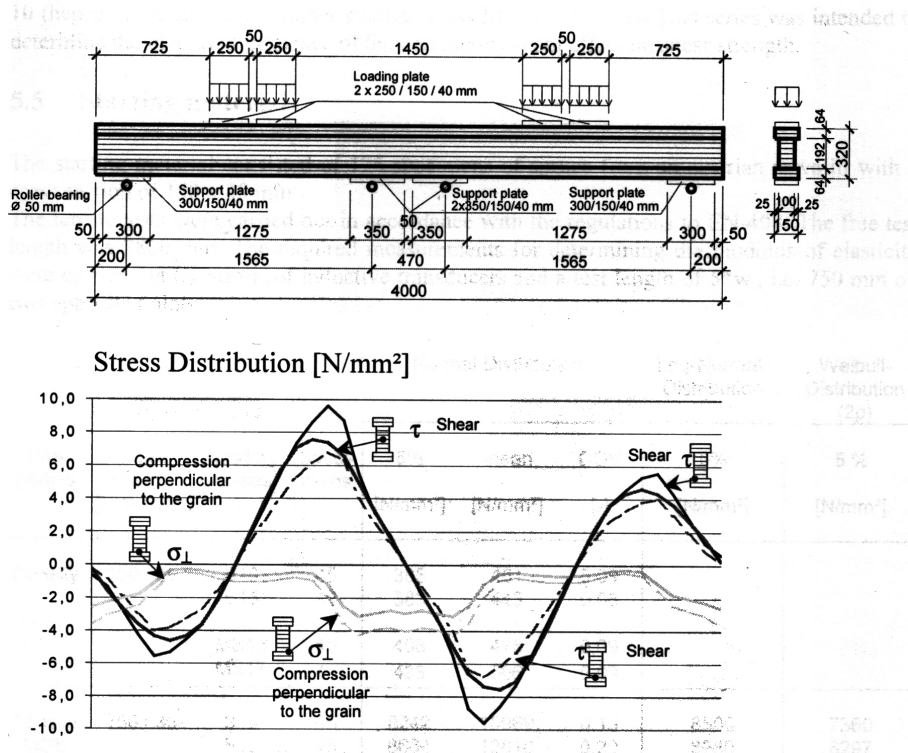
M.b.t. de bepaling van het statisch moment van de doorsnede is het van belang de plaats van de scheur vast te leggen.

Bij deze bepaling is ervan uitgegaan dat de belasting en de opleggingen geen eigen afmetingen hebben (puntvormig). In werkelijkheid bedragen deze afmetingen 120 mm. Hierdoor worden de waarden van het buigend moment en de dwarskracht lager en zal de theoretische bezwijkspanning zoals berekend volgens bovenstaande formules voor zowel de schuifsterkte als de buigsterkte te hoog zijn.

Naast het feit dat de theoretische puntlasten en opleggingen eigenlijk verdeelde belastingen en opleggingen zijn, speelt nog een aspect een rol. Als de afstand tussen de belasting en de oplegging klein is en de liggerhoogte groot zal een gedeelte van de belasting via boogwerking worden overgedragen. In dit geval bedraagt de verhouding tussen overspanning en balkhoogte $474/110 = 4.31$ bij een overspanningsverhouding - belastingsbreedte van $474/120 = 3.95$.

Een nauwkeuriger analyse middels een eindig elementenprogramma geeft meer inzicht in het werkelijk verloop van de spanningen. Om een indruk te geven welke invloed bovenstaande beschouwing kan hebben wordt de spanningsanalyse gegeven in figuur 8 zoals die van toepassing is op de liggers van Schickhofer [Lit 2]. Deze liggers van gelamineerd naaldhout bezitten een I-vormige dwarsdoorsnede. Naast de schuifspanning is tevens de drukspanning loodrecht op de vezel aangegeven. Overeenkomstig de toegepaste mechanica blijkt dat in het midden van het lijf (vanaf de zijkant beschouwd) de grootste schuifspanning optreedt. In dwarsrichting (de dikte van het lijf) geldt bovendien dat de schuifspanning

aan de zijkant van het lijf iets groter is dan in het hart. De verhouding tussen de hoogte van het lijf en de breedte is dusdanig dat deze invloed buiten beschouwing kan worden gelaten en dat de dwarskracht over de dikte van het lijf als constant kan worden aangehouden.



Figuur 8: Schuifspanningsverdeling in de liggers van Schickhofer [2]

De I-profielen zoals getest in dit onderzoek zijn anders van vorm en hebben een andere overspanning/hoogte verhouding, zodat de buig- en schuifspanningsverhoudingen anders zullen zijn. Daarom is voor de beproefde geometrie een eindige elementenmodel nodig.

6.3 Eindigde elementenberekening

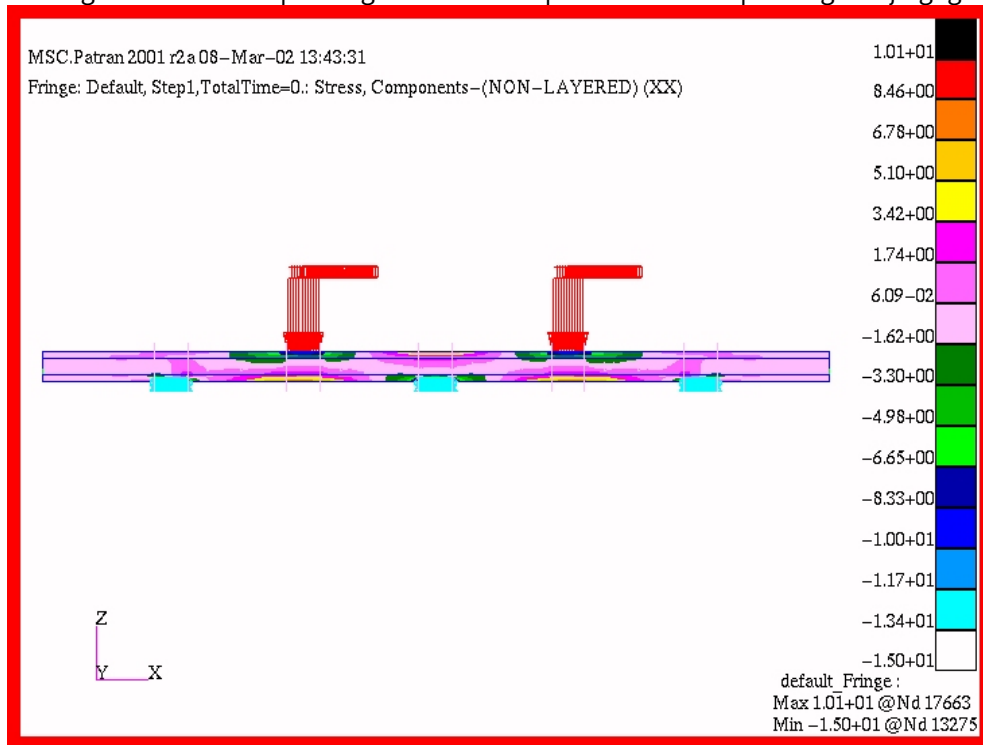
Voor de beproefde balken is een eindige elementenmodel gemaakt. De breedte van de opleggingen en de afmeting van de twee belastingspunten komen overeen met het werkelijke beproevingsschema in de opstelling.

In de berekeningen is op het hout een oppervlaktebelasting van 1 N/mm^2 aangebracht. Rekening houdend met de stalen platen voor de belastingsinleiding geeft dit een kracht per belastingspunt van $1 \times 120 \times 60 = 7200 \text{ N}$. Met deze belasting zijn vervolgens berekend:

1. de buigspanningen evenwijdig aan de vezel;
2. de schuifspanningen
3. de drukspanningen loodrecht op de vezel.

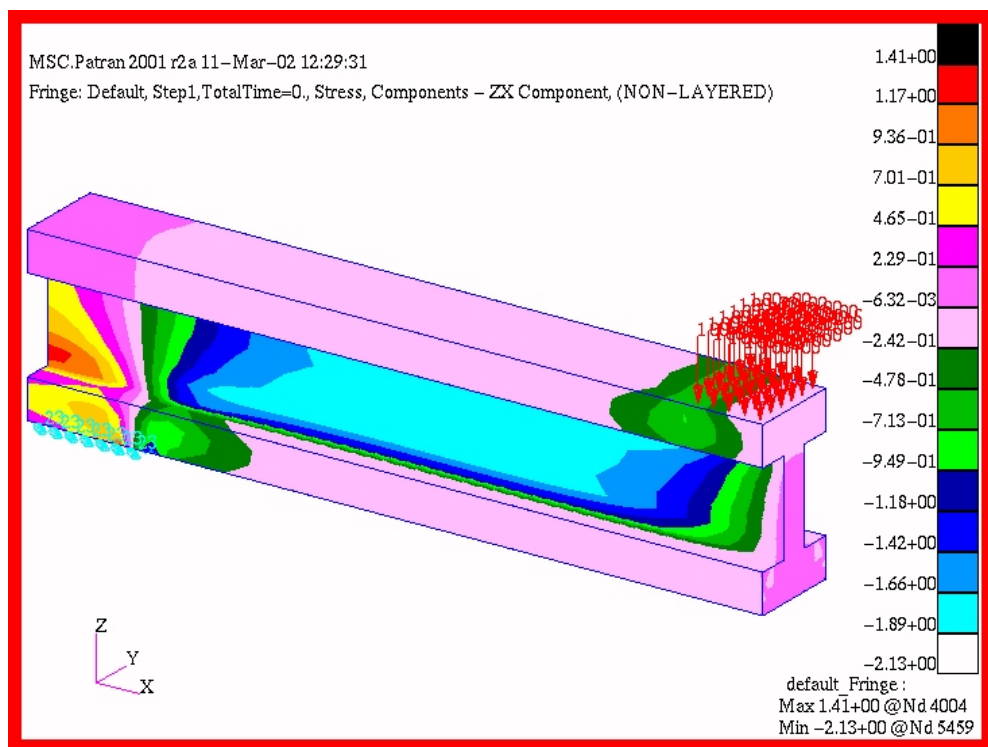
De elasticiteitsmodulus waarmee de berekening is uitgevoerd bedroeg 16000 N/mm^2 . Deze waarde is echter niet van invloed op de belastingsverdeling en de interne spanningen in de balk.

In figuur 9 zijn de buigspanningen evenwijdig aan de vezel weergegeven. In figuur 10 de schuifspanning en in figuur 11 de drukspanningen loodrecht op de vezel. Alle spanningen zijn gegeven in N/mm².

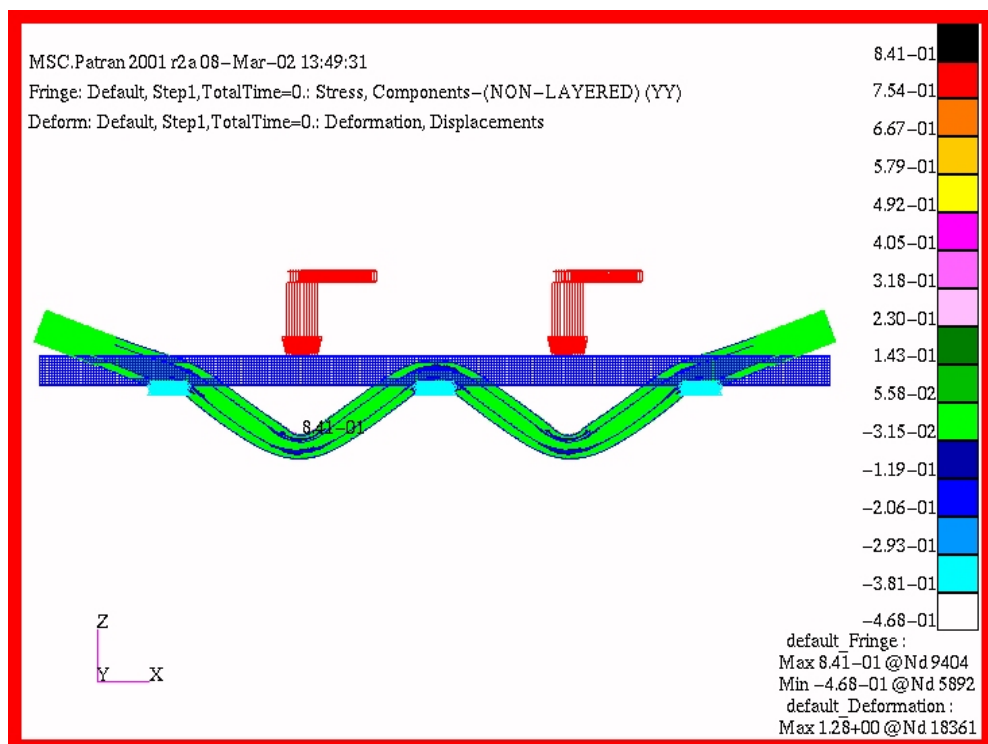


Figuur 9 Buigspanningen bij een vijfpuntsbuigproef.

Uit figuur 9 volgt dat bij een belasting van 7200 N per belastingspunt de maximale buigspanning 15 N/mm² bedraagt (drukspanning) aan de bovenzijde van de balk, direct onder de belasting. Deze waarde wordt echter lokaal verstoord door de belastinginleiding. Daarom wordt de spanning evenwijdig aan de vezel genomen aan de onderzijde van de balk onder de belastingspunten (trekspanning) en aan de bovenzijde van de balk ter plaatse van het middensteunpunt (trekspanning). De oplegreacties bedragen 2962 N aan de zijopleggingen en 8476 N bij het middensteunpunt.



Figuur 10. Schuifspanningsverloop tussen belasting en oplegging



Figuur 11 Belastingen loodrecht op de houtvezel (incl. vervormingen).

In principe kunnen de schuifspanningen worden vergeleken met de metingen door de maximale belasting zoals gemeten in de proef te relateren aan de numerieke belasting van 7200 N (per belastingspunt) en in een gelijke verhouding te schuifspanning bij de proef te bepalen. De berekende maximale schuifspanning uit de elementensom bedraagt 2.13 N/mm^2 .

6.4 De elasticiteitsmodulus

De bepaling van de elasticiteitsmodulus, E , werd bij de beproevingsprocedure reeds genoemd. en wordt afgeleid uit de middendoorbuiging, δ , van een vierpuntsbuigproef. De afstand tussen de belastingspunten in de proeven bedroeg $0,5 \times L$ zodat voor de berekening van de elasticiteitsmodulus de volgende formule kan worden aangehouden:

$$E = \frac{11 Fl^3}{768 \delta I}$$

waarin:

F de kracht op het proefstuk;

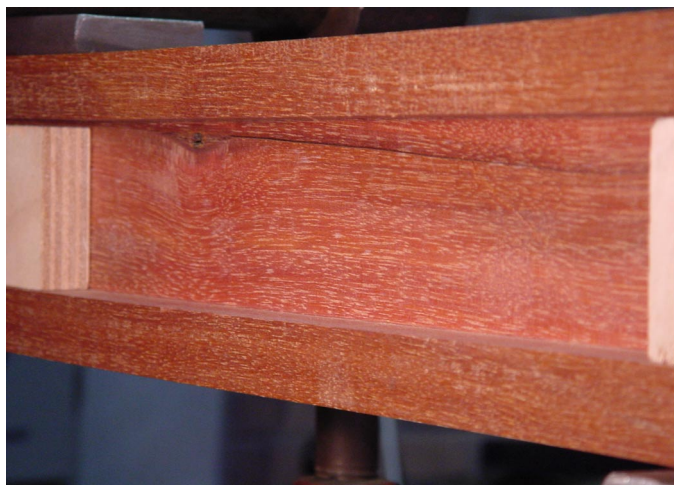
L de overspanning;

I het traagheidsmoment;

δ de doorbuiging, behorend bij F .

7 Analyse van de proefresultaten

De eerste beproevingen vonden plaats met de balken van karri. Deze balken hadden eerst een rechthoekige dwarsdoorsnede. Na afloop van de beproeving van deze 25 balken bleek niet alleen dat het percentage dwarskracht breuk laag was, slechts 8 van de 25 balken bezweken op afschuiving, en 10 balken konden niet tot bezwijken gebracht worden omdat de maximale kracht van de testbank werd bereikt. Teneinde hogere schuifspanningen op te wekken werd besloten de rechthoekige doorsnede van deze 10 balken te wijzigen in een I-profiel door het slaan van een tweezijdige sponning zodat de dwarsdoorsnede van figuur 4 werd verkregen. De houtsoort massaranduba werd eerst voorzien van een aan beide zijden uitgefreesde sponning van 10 mm diep over een hoogte van 60 mm. Echter, van de eerste zeven proefstukken bezweek er maar één proefstuk op dwarskracht de anderen bleken sterker dan de testbank. Uiteindelijk bleek een tweezijdige uitkeping van 20x60 mm voldoende om een dwarskracht breuk te forceren. Van alle volgende liggers van massaranduba, uchi torrado, angelim vermelho, azobé, piquia en vuren werd de doorsnede overeenkomstig aangepast. Op enkele uitzonderingen na bezweken alle proefstukken op dwarskracht (afschuiving). Het overschrijden van de drukspanning loodrecht op de vezel, ter plaatse van de ondersteuning en krachtinleidingspunten, vond alleen plaats bij de houtsoort karri en piquia maar waren geen aanleiding om de proef voortijdig af te breken. Voor de stabiliteit van het I-profiel was het soms gewenst om ter plaatse van de belastingspunten en het middensteunpunt de flensen onderling te steunen door het opvullen van de sponning met triplexplaatjes, zie figuur 9.



Figuur 9: Dwarskrachtscheur in het lijf van een proefstuk en opvulling met triplexplaatjes.

Door de beproevingsmethode met de vijfpuntsbuigproef (figuur 5) belast men steeds twee balkdelen ter weerszijden van het middensteunpunt simultaan waarbij de zwakste bepalend is voor de geregistreerde sterkte. In de bepaling van het gemiddelde en de standaardafwijking van de proefresultaten dient hiermede rekening gehouden te worden. Hierbij wordt uitgegaan van een standaard normale verdeling van de beproefde materiaalgrootheid. Daartoe worden de sterktecijfers gecorrigeerd. De statistische achtergrond wordt gegeven in Van Douwen, Kuipers en Loof [3]. Uit deze studie volgt:

$$x_1 = x_2 + c_1 \sigma_2$$

$$\sigma_1 = c_2 \sigma_2$$

waarbij:

x_1 is het gemiddelde van de gehele populatie

x_2 is het gemiddelde van de beproefde populatie

c_1 en c_2 zijn correctiefactoren

σ_1 en σ_2 zijn de standaardafwijkingen van de gehele en de beproefde populatie

Voor symmetrisch belaste proefstukken zoals in het onderhavige onderzoek volgt:

$$x_1 = x_2 + 0.68 \sigma_2$$

$$\sigma_1 = 1.21 \sigma_2$$

De gemiddelde sterktecijfers van de proefstukken zijn weergegeven in tabel 2. De individuele proefresultaten zijn gegeven in Annex 1. De resultaten van de volumieke massa zijn gebaseerd op het 'natte' vochtgehalte, dus zoals de balken zijn beproefd. In de derde en vierde kolom zijn de resultaten van de schuifsterkte gegeven. Deze resultaten zijn gebaseerd op het aantal balken dat daadwerkelijk op afschuiving is bezweken. Balken die op buiging zijn bezweken zijn hierin dus niet meegenomen. In de laatste kolom van tabel 2 is de gemiddelde waarde van de elasticiteitsmodulus gegeven met de standaardafwijking. Deze waarden zijn afgerond op 50 N/mm².

Tabel 2: Overzicht van de proefresultaten

Houtsoort	Volumieke massa (nat)		Gemiddelde schuifsterkte zonder correctie		Gemiddelde schuifsterkte met correctie		Gemiddelde elasticiteitsmodulus	
	kg/m ³	st.afw.	N/mm ²	st.afw.	N/mm ²	st.afw.	N/mm ²	st.afw.
Zuid-Afrikaans karri	1047	68	15.1	1.7	16.3	2.1	14500	3900
massaranduba	946	46	16.9	2.3	18.5	2.8	11750	3300
uchi torrado	1006	46	14.1	2.0	15.5	2.4	15750	2500
angelim vermelho	1071	142	17.3	1.9	18.6	2.4	15900	3250
piquia	1102	25	14.0	2.1	15.4	2.5	12750	1960
azobé	1225	32	16.5	1.8	17.7	2.1	13700	1750
vuren	482	48	8.7	0.7	9.1	0.9	11700	2300

8 Bespreking van de resultaten en bepaling van de karakteristieke waarden

Uit tabel 2 blijkt dat de schuifsterkte van alle 6 (sub)tropische houtsoorten aanzienlijk hoger is dan de waarde uit de sterkteklasetabel. Op basis van de proefresultaten is in tabel 3 een karakteristieke schuifsterkte $f_{0,05}$ gegeven. Hierbij is gesteld dat het aantal proefstukken op basis waarvan de karakteristieke waarde is bepaald voor iedere houtsoort 20 bedraagt. Gezien het feit dat tot op heden nagenoeg geen andere gegevens omtrent de schuifsterkte bekend zijn is ervan uitgegaan dat er a-priori geen standaardafwijking van de populatie per houtsoort bekend is. Dit is een veilige benadering conform Eurocode 1 Ontwerpgrondslagen (Basis of Design). Overigens blijkt de variatiecoëfficiënt van de schuifsterkte ongeveer vergelijkbaar met die voor de buigsterkte van azobé, die eveneens rond de 15% bedraagt. Alleen voor het Zuid-Afrikaans karri, is de werkelijke waarde van 7 proefresultaten aangehouden.

Tabel 3. Overzicht van de proefresultaten

Houtsoort	Gemiddelde schuifsterkte met correctie en karakteristieke waarde $f_{0,05}$					Gemiddelde elasticiteitsmodulus		
	n	N/mm ²	st.afw.	cov.	$f_{0,05}$	N/mm ²	st.afw.	cov.
Zuid-Afrikaans Karri	7	16.3	2.1	12.9	11.6	14500	3900	26.9
massaranduba	25	18.5	2.8	15.1	13.1	11750	3300	28.0
uchi torrado	22	15.5	2.4	15.5	10.9	15750	2500	15.9
angelim vermelho	23	18.6	2.4	12.9	14.0	15900	3250	20.4
piquia	22	15.4	2.5	15.6	10.8	12750	1960	15.4
azobé	18	17.7	2.1	11.9	13.6	13700	1750	12.8
vuren	20	9.1	0.9	9.9	7.4	11700	2300	19.7

Geconcludeerd kan worden dat er drie houtsoorten (azobé, massaranduba en angelim vermelho) een schuifsterkte van 13 N/mm² of hoger hebben en drie tussen de 10 en 12 N/mm² (karri, uchi torrado en piquia). Voor het ontwerp van brugdekken zou een vergelijkbare indeling in groepen kunnen worden gemaakt, waarbij de grenzen op 10 N/mm² resp. 13 N/mm² kunnen worden gesteld.

In zijn algemeenheid hebben sorteringregels van hout een grote invloed op de sterkte. Alleen de proefstukken van karri bezaten beperkt kwasten, de rest van de hardhoutsoorten was kwastvrij. Voor deze houtsoorten is andere sortering van belang namelijk het vezelverloop. Bij een enkel proefstuk bleek het vezelverloop plaatselijk 1:1 te zijn (draad loopt onder een hoek 45° met de lengterichting van het proefstuk) hetgeen resulteerde in vroegtijdig bezwijken met scheuren onder 45°. Houtsoorten voor de waterbouw dienen over het algemeen te voldoen aan een eis met betrekking tot draadverloop van 1:10.

De verhouding tussen de schuifspanningen en de buigspanningen kan als volgt worden beoordeeld. Uit de numerieke analyse is een maximale schuifspanning van 2.13 N/mm² naar voren gekomen bij een belasting van 7200 N per belastingspunt. De maximale buigspanning in de balk aan de onderzijde onder de belastingspunten bedraagt 10.1 N/mm² en aan de bovenzijde van het middensteunpunt 9.28 N/mm². Indien een belasting van 7200 N wordt aangehouden en de schuifspanning wordt bepaald aan de hand van figuur 7 wordt een waarde van 3.03 N/mm² gevonden indien de scheur zich in het hart zou bevinden en 2.65 N/mm² indien de scheur zich bij de flens zou bevinden. Volgens de elementenberekening bevindt zich de grootste dwarskracht bij de flens, zodat er $2.65 - 2.13 = 0.52$ N/mm² minder schuifspanning kan worden opgenomen. Met andere woorden, de schuifspanning is ongeveer 20% lager dan wanneer de afmetingen van de houten delen voor een brugdek volgens

figuur 7 worden bepaald. Deze vermindering ontstaat ten gevolge van boogwerking en het feit dat de puntlasten in werkelijkheid geen puntlasten zijn.

Deze twee effecten hebben ook gevolgen voor de oplegreacties, die niet conform figuur 7 zijn. Volgens figuur 7 zou de oplegreactie aan de zijkant 2250 N moeten bedragen, terwijl dit volgens de elementenberekening 2962 N is. Onder het middensteunpunt heeft de oplegreactie volgens figuur 7 een waarde van 9900 N, terwijl dit 8476 bedraagt. Het gevolg hiervan is dat de buigspanningen onder de puntlasten hoger zijn dan op grond van figuur 7 mag worden verwacht, (10.10 tegenover 9.86 N/mm²) terwijl ze bij het middensteunpunt juist lager zijn (9.28 tegenover 11.84 N/mm²). Het steunpuntsmoment blijkt dus aanzienlijk lager dan verwacht (22%), terwijl het veldmoment maar relatief weinig toeneemt (2.4%).

9 Conclusies

Het op dwarskracht belasten van een proefstuk met rechthoekige doorsnede leidt voor een klein aantal proefstukken tot bezwijken op dwarskracht. De meerderheid bezwijkt op buiging. Teneinde afschuiving te forceren is een hoge dwarskracht en een aangepaste doorsnede noodzakelijk. Beide werden verkregen enerzijds door het belasten middels een vijfpuntsbuigproef, figuur 2 en anderzijds door het veranderen van de rechthoekige proefstukdoorsnede tot een I-profiel, zoals aangegeven in figuur 3.

Alle houtsoorten hebben een aanzienlijk hogere schuifsterkte dan op grond van de sterkteklassen mag worden verwacht. Op basis van de resultaten en de afgeleide karakteristieke sterktewaarden, kan de conclusie worden getrokken dat voor de houtsoorten karri, uchi torrado en piquia een waarde van 10 N/mm² kan worden aangehouden. Voor azobé, massaranduba en angelim vermelho kan zelfs een waarde voor de karakteristieke schuifsterkte van 13 N/mm² worden aangehouden. In de praktijk betekent dit dat angelim vermelho en massaranduba kunnen worden gebruikt als een brugdek van azobé moet worden vervangen, zonder dat de afmetingen hoeven te worden gewijzigd indien de schuifsterkte het maatgevend ontwerpcriterium is. De nieuwe cijfers hebben tot gevolg dat in voorkomende gevallen de buigsterkte of de druksterkte loodrecht op de vezel het maatgevende ontwerpcriterium zou kunnen worden en niet meer de dwarskracht. Ontwerpberekeningen zullen dit moeten uitwijzen. In een aantal gevallen (bij karri en piquia) werden de drukspanningen loodrecht op de vezel dusdanig hoog dat er een mate van 'lokaal' bezwijken ontstond, zonder dat de proef behoefde te worden afgebroken. In de praktijk zijn de opleggingen naar verwachting groter dan in de test aangehouden. Onder de belastingspunten zal in de praktijk nog een zekere spreiding van de last plaatsvinden vanwege de deklaag die is aangebracht.

Met behulp van de elementenberekening is aangetoond dat bij deze configuratie van belastingen en opleggingen de maximaal optredende schuifspanning ongeveer 20% lager is dan op grond van de theorie wordt verwacht. Dit wordt veroorzaakt door boogwerking in het hout en het feit dat de puntlasten en opleggingen in werkelijkheid bepaalde afmetingen hebben. Afhankelijk van de geometrie van de constructie zal dit meer of minder zijn, maar gezien het feit dat de opleggingen en belastingspunten slechts 120 mm breed waren bij een overspanning van 948 mm (hart-op-hart), mag worden verwacht dat het in werkelijkheid enigszins vergelijkbaar zal zijn.

Omdat de karakteristieke schuifsterkte $f_{0,05}$ zoals is afgeleid in hoofdstuk 8 bepaald is aan de hand van berekeningen conform figuur 7, moeten deze cijfers ook alleen worden gebruikt indien het ontwerp op deze manier wordt berekend. Indien een nauwkeurige analyse wordt gedaan zoals hier met een eindige elementenmethode dan dienen de karakteristieke waarden te worden aangepast.

Als sorteercriterium wordt ervan uitgegaan dat de visuele eis met betrekking tot draadverloop van 1:10 wordt gehanteerd, zoals dit ook is gebeurd bij de vaststelling van de sterkteklassen.

10 Referenties

[1] STEP, Structural Timber Engineering Program, Lecture A7

[2] Schickhofer, Determination of shear strength values for GLT using visual and machine graded spruce lamination, CIB-W18/34-12-6.

[3] Douwen, Kuipers en Loof, Corrections to the mean value and the standard deviation from test series with symmetrical test specimens, Stevin lab. Report. 4-82-9/oe-5, May 1982.

Annex

.....

Overzicht van de proefresultaten

Annex 1 Zuid-Afrikaans karrie
Annex 2 massaranduba
Annex 3 uchi torrado
Annex 4 angelim vermelho
Annex 5 piquia
Annex 6 azobé
Annex 7 vuren

De eerste tabel a van elke Annex geeft de proefstukgegevens de tweede tabel b de beproevingsresultaten.

Annex 1a. Proefstukgegevens karri

proefstuk nummer	lengte [mm]	breedte [mm]	dikte [mm]	drsn gewicht [g]	vocht- gehalte [%]
1	3003	110	54	20177	>30
2	3003	110	55	19416	>30
3	3004	110	55	19566	>30
4	3004	108	55	19953	29
5	3005	110	56	19824	29
6	3001	109	56	18984	>30
7	3003	110	56	19057	28
8	3003	110	56	20827	>30
9	3004	111	56	18591	26
10	3005	111	55	19547	27
11	3003	110	56	18798	>30
12	3004	110	57	20679	27
13	3004	110	56	20097	>30
14	3005	111	56	19512	>30
15	3005	110	56	18702	>30
16	3004	110	56	19220	26
17	3005	110	57	15860	24
18	3005	109	56	19485	>30
19	3006	112	57	19062	27
20	3006	110	56	19966	24
21	3004	110	56	17100	>30
22	3005	109	55	20565	>30
23	3006	110	55	20377	28
24	3006	110	56	19305	25
25	3006	109	56	17785	27

Annex 1b. Proefresultaten Zuidafrikaans Karri*

bezwijk mechanisme	traagheids moment	dikte flens	dikte lijf	afstand hart tot scheur	statisch moment	Volumieke massa	Elasticiteits modulus	Schuifsterkte
	[mm ⁴]	[mm]	[mm]	[mm]		[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
afschuiving	5195073	24.0	20.0	30	56338	1131	12374	16.9
afschuiving	6100417					1069	12467	
afschuiving	6100417					1077	6126	
buigtrek+afschuiving	1497375					1118	14115	
afschuiving	1609813					1071	20330	
buigtrek	1595179					1036	15564	
afschuiving	1609813					1030		
afschuiving	5416907	24.0	20.0	20	63402	1126	10955	15.5
afschuiving	1624448					996		
buigtrek+afschuiving	1538969					1065	20762	
afschuiving	1609813					1016	19334	
afschuiving	1697603					1098	13741	
afschuiving	5416907	24.0	20.0	20	63402	1086	13031	13.0
buigtrek	1624448					1045		
afschuiving	5416907	24.0	20.0	30	58402	1010	10493	15.3
afschuiving	5416907	24.0	20.0	0	67402	1039	12232	17.0
trekbreuk	1697603					842	10875	
trekbreuk	1595179					1062	19455	
trekbreuk	1728468					993	15166	
afschuiving	5416907	24.0	20.0	30	58402	1078	12780	12.6
afschuiving	1609813					924	12198	
buigtrek	1511240					1142	15741	
afschuiving	1525104					1120	20951	
afschuiving	5416907	24.0	20.0	20	63402	1043	12232	15.6
afschuiving	1595179					969	18298	
	3022695.7	24		21.4285714	61536	1047	14510	15.14
						68	3917	1.72
						werkelijke gemiddelde		16.31
						werkelijke stand.dev		2.09

*voor de schuifsterkte zijn alleen de proefresultaten van de I-profielen gegeven.

Annex 2a Proefstukgegevens massaranduba

proefstuk nummer	lengte [mm]	breedte [mm]	dikte [mm]	gewicht [kg]	vocht- gehalte [%]
1	2750	110.6	59.6	17.17	19
2	2740	110.2	59.7	16.98	24
3	2750	110	60	16.07	19
4	2750	110.5	59.7	16.8	20
5	2750	110.5	59.9	15.84	21
6	2750	110.3	60	16.2	21
7	2750	110.4	60	16.76	22
8	2754	111	60	12.81	19
9	2758	110.3	60	11.75	20
10	2754	110.2	60	12.47	19
11	2755	110.6	60	11.73	20
12	2755	110.6	59.6	12.46	18
13	2754	110.5	60	12.73	20
14	2754	110.1	59.9	11.66	19
15	2756	110	60	11.83	19
16	2755	110	60	10.98	20
17	2757	110.2	60	11.83	17
18	2751	110.4	59.9	12.98	18
19	2751	110.1	59.8	12.33	20
20	2750	110.2	59.9	11.92	19
21	2754	110.4	59.7	12.33	19
22	2750	110	59.8	11.43	19
23	2750	110.2	60	11.95	17
24	2753	110.4	59.8	12.89	18
25	2752	109.9	59.9	12.96	19

Annex 2b. Proefresultaten massaranduba

bezwijk	traagheids	dikte	diepte	afstand hart	statisch	Volumieke	Elasticiteits	Schuif-
mechanisme	moment	flens	sponning	tot scheur	moment	massa	modulus	sterkte
	[mm ⁴]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ³]	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
afschuiving	5924972	24.3	20.0	28	64228	947	18106	17.3
afschuiving	5863483	24.1	20.0	28	63682	942	13536	18.9
afschuiving	5860573	24.0	20.0	0	71530	885	12524	21.6
afschuiving	5918006	24.3	20.0	28	64177	926	13521	15.3
afschuiving	5940493	24.3	20.0	28	64403	870	13147	14.7
afschuiving	5915172	24.2	20.0	0	72026	890	10930	18.0
afschuiving	5933438	24.2	20.0	20	68191	920	14307	16.7
afschuiving	6043728	24.5	20.0	20	69188	998	11965	18.6
afschuiving	5915172	24.2	20.0	0	72026	923	11461	17.3
afschuiving	5896939	24.1	20.0	0	71860	982	16072	19.9
afschuiving	5970068	24.3	20.0	28	64683	918	7713	16.2
afschuiving	5924972	24.3	20.0	28	64228	985	12674	15.9
afschuiving	5951736	24.3	20.0	28	64517	998	11470	17.1
afschuiving	5867618	24.1	20.0	28	63743	921	16977	16.0
afschuiving	5860573	24.0	20.0	0	71530	933	11332	17.1
afschuiving	5860573	24.0	20.0	20	67530	866	3892	15.3
afschuiving	5896939	24.1	20.0	20	67860	930	11741	9.1
afschuiving	5922225	24.2	20.0	20	68059	1023	15699	18.4
afschuiving	5856496	24.1	20.0	28	63630	978	10550	15.5
afschuiving	5885787	24.1	20.0	0	71708	942	6283	20.0
afschuiving	5899798	24.2	20.0	28	64012	975	10886	17.7
afschuiving	5838390	24.0	20.0	0	71228	908	9289	16.2
afschuiving	5896939	24.1	20.0	0	71860	942	11339	17.4
afschuiving	5911011	24.2	20.0	20	67926	1017	12234	17.0
afschuiving	5831378	24.0	20.0	0	71214	1028	6670	15.9
	5903459.2					946	11773	16.92
	46107.9					46.34	3302	2.32
							werkelijk gem	18.50
							werk.stand.de	2.80

Annex 3a. Proefstukgegevens uchi torrado

proefstuk nummer	lengte [mm]	breedte [mm]	dikte [mm]	gewicht [kg]	vocht- gehalte [%]
1	2499	110.4	60	16.31	22
2	2497	110.2	60	16.24	21
3	2502	110.4	60	14.98	22
4	2511	110	60	17.14	22
5	2511	110.6	59.6	16.76	23
6	2515	110.5	60	16.16	26
7	2511	110.2	59.8	17.34	23
8	2502	110	60	16.32	22
9	2511	110.6	60	18	28
10	2792	110.7	59.8	18.88	26
11	2815	110.5	60.1	19.38	26
12	2811	110.3	60.15	19.15	19
13	2806	110.3	60.1	18.1	24
14	2812	110.1	60	19.38	23
15	2812	110.2	60	19.28	23
16	3198	110.1	60	19.9	25
17	2809	110	60	18.56	24
18	2806	110	60	17.65	22
19	2815	110.3	60	19.05	26
20	2794	110.3	60	19.9	26
21	2814	110.2	60	17.69	21
22	2810	110.2	60	18.7	22
23	2806	110.1	60	20.01	27
24	2807	110	60.1	19.06	30
25	3195	110	60	19.81	21

Annex 3b. Proefresultaten uchi torrado

bezwijkmechanis	traagheids	dikte	fstand ha	statisch	Volumieke	Elasticiteits	Schuif-
	moment	flens	tot scheu	moment	massa	modulus	sterkte
	[mm ⁴]	[mm]	[mm]	[mm ³]	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
afschuiving	5933438	24.2	10	71191	985	6576	8.1
afschuiving	5896939	24.1	20	67860	984	13727	12.3
afschuiving	5933438	24.2	20	68191	904	14245	12.5
afschuiving	5860573	24.0	0	71530	1034	13824	12.6
afschuiving	5924972	24.3	2	71872	1013	16899	12.6
afschuiving	5951736	24.3	22	67517	969	15771	13.7
afschuiving	5874635	24.1	20	67597	1048	15994	15.3
afschuiving	5838390	24.0	20	67530	992	10726	10.0
afschuiving	5970068	24.3	5	72273	1080	19917	12.4
afschuiving	5965824	24.4	5	72135	1021	16011	12.4
afschuiving	5962980	24.3	10	71505	1037	16774	14.0
afschuiving	5931946	24.2	5	72002	1027	9633	16.8
afschuiving	5926355	24.2	20	68158	973	16555	11.5
afschuiving	5878740	24.1	20	67695	1043	17517	17.4
afschuiving	5896939	24.1	25	65610	1037	17611	15.4
afschuiving	5878740	24.1	29	63285	942	15696	14.0
afschuiving	5860573	24.0	20	67530	1001	17226	13.0
afschuiving	5860573	24.0	15	69280	953	15171	13.0
afschuiving	5915172	24.2	10	71026	1023	15438	17.1
buigtrek/draadve	5915172	24.2	20	68026	1076	19624	-
afschuiving	5896939	24.1	6	71500	951	14053	14.4
afschuiving	5896939	24.1	5	71610	1006	17481	15.8
trekbreuk	5878740	24.1		71695	1079	12853	-
afschuiving	5871665	24.0	20	67661	1027	14805	14.7
trekbreuk/dwarsh	5860573	24.0		71530	939	14820	-
	5905798.9				1006	15742	14.09
	38295.64				46.34	2483.90	2.00
						werkelijk gem	15.45
						werk.stand.d	2.42

Annex 4a. Proefstukgegevens angelim vermelho

proefstuk nummer	lengte [mm]	breedte [mm]	dikte [mm]	gewicht [kg]	vocht- gehalte [%]
1	2738	110.3	59.5	12.26	18
2	2736	110	59.6	12.63	18
3	2758	109.8	60.1	12.68	20
4	2750	109.9	60.2	20.86	19.5
5	2751	109.9	60	19.67	21
6	2738	110.3	59.9	20.8	23
7	2739	110.2	59.9	20.58	21
8	2739	110.2	60	20	21.5
9	2746	100	60	20	25
10	2742	110.1	60	19.8	26
11	2738	110.1	60	20.51	27
12	2732	110	59.5	19.64	22
13	2734	110.4	59.65	19.86	22
14	2746	110.2	59.6	19.85	20
15	2732	110.3	60.3	20.68	22
16	2750	110.3	60.4	20.1	23
17	2759	110.5	60.6	20.13	22
18	2759	110.5	60.5	20.3	24
19	2765	110	60.3	21.35	26
20	2761	110	59.4	20.2	22
21	2771	110	60.1	21.33	24
22	2755	110	60.1	20.05	21
23	2756	110.1	60.1	19.93	29
24	2757	109.9	60	20.29	29
25	2755	110	60	20.52	24
26	2756	109.8	60	19.71	26

Annex 4b. Proefresultaten angelim vermelho

bezwijkmechanisme	traagheids moment	dikte flens	afstand hart tot scheur	statisch moment	Volumieke massa	Elasticiteits modulus	Schuif- sterkte
	[mm ⁴]	[mm]	[mm]	[mm ³]	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
afschuiving	5859259	24.2	20	67365	682	14929	17.9
afschuiving	5816207	24.0	5	70680	704	15570	15.9
afschuiving	5835371	23.9	8	70708	697	18303	17.3
afschuiving	5864563	24.0	7	71172	1147	17559	17.9
afschuiving	5842440	24.0	5	71115	1084	15974	17.3
afschuiving	5903989	24.2	20	67894	1150	15424	12.8
afschuiving	5885787	24.1	10	70713	1138	17011	18.2
afschuiving	5885787	24.1	5	71610	1106	14942	21.2
afschuiving	4205573	19.0	20	51780	1214	21816	17.4
afschuiving	5878740	24.1	5	71445	1093	16639	16.1
afschuiving	5878740	24.1	15	69445	1134	2562	13.2
afschuiving	5805115	24.0	10	69799	1098	15428	19.5
afschuiving	5894192	24.2	15	69447	1103	16415	15.9
afschuiving/trekbreuk	5852330	24.1	22	66510	1101	15248	16.6
afschuiving	5948720	24.2	25	66138	1138	19444	17.6
afschuiving	5959903	24.2	5	72379	1097	15826	15.6
afschuiving	6019198	24.3	5	73015	1090	17090	18.5
afschuiving	6007954	24.3	5	72864	1101	15505	17.6
buigtrek+draadverloop	5893848	24.0			1164	15911	
afschuiving	5794023	24.0	0	70623	1120	18576	18.9
afschuiving	5871665	24.0	10	70676	1164	17858	20.5
afschuiving	5871665	24.0	10	70676	1101	16300	16.9
afschuiving	5889862	24.1	5	71595	1093	15740	17.6
afschuiving	5842440	24.0	0	71365	1116	15443	17.5
trekbreuk	5860573	24.0			1129	12027	
buigtrek+draadverloop	5824339	23.9			1086	16039	
	5815088				1071	15907	17.30
	332811				142	3267	1.94
					gecorr.	gemiddelde	18.62
					gecorr.	stand.afw.	2.35

Annex 5a. Proefstukgegevens piquia

proefstuk nummer	lengte	breedte	dikte	gewicht	vocht- gehalte
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[%]
1	3005	108.0	59.0	12.705	30
2	3008	107.7	57.9	13.405	30
3	3001	108.0	58.0	12.692	30
4	3012	108.2	57.9	12.702	30
5	2998	108.0	58.0	12.725	30
6	3009	108.0	58.0	12.622	30
7	3010	108.0	58.0	12.927	30
8	3009	-	-	12.825	30
9	3008	108.0	58.0	13.157	30
10	3008	107.9	57.7	12.458	30
11	3008	108.2	58.8	13.000	30
12	3007	108.1	58.0	12.438	30
13	3007	108.1	58.1	13.158	30
14	3010	108.2	58.1	12.742	30
15	3010	108.2	58.1	12.776	30
16	3008	108.1	57.9	12.508	30
17	3008	108.0	58.0	12.864	30
18	3004	108.1	58.0	12.418	30
19	3015	108.1	58.2	12.638	30
20	3008	108.0	58.0	13.181	30
21	3007	108.2	58.1	13.065	30
22	3010	108.0	58.0	13.026	30
23	3010	108.0	58.0	13.131	30
24	3009	108.0	57.9	13.064	30
25	3006	108.1	58.0	12.778	30

Annex 5b. Proefresultaten piquia

bezwijkmechanisme	traagheidsmoment	dikte flens	diepte sponning	afstand hart tot scheur	statisch moment	Volumieke massa	Elasticiteitsmodulus	Schuifsterkte
	[mm ⁴]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ³]	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
afschuiving	5591989	25.0	18.0	0	70884	1064	11796	14.59
afschuiving	5426005	24.9	18.8	10	67124	1162	15247	12.09
valbreuk	5487013	25.0	18.7		68837	1095		-
afschuiving	5510345	25.1	18.4	0	69257	1091	11241	14.05
afschuiving	5487013	25.0	18.8	14	66754	1098	11154	12.69
afschuiving	5487013	25.0	18.7	0	68837	1086	11949	14.40
afschuiving	5487013	25.0	18.8		68753	1111	12512	13.07
afschuiving	-	-	-	-	-	-	-	-
afschuiving	5487013	25.0	18.4	29	60175	1132	10290	11.27
valbreuk in trekzone	5438710	25.0	18.8	10	67155	1083	12235	13.38
afschuiving	5605349	25.1	18.7	10	69252	1091	14000	15.77
afschuiving	5503941	25.1	18.4	10	68186	1069	13177	-
afschuiving	5514468	25.1	18.4	10	68327	1128	15394	18.38
afschuiving	5531457	25.1	18.7	29	60593	1089	13555	13.90
afschuiving	5531457	25.1	18.5	14	67398	1092	11364	17.24
afschuiving	5493414	25.1	18.0	19	65484	1078	12479	12.50
afschuiving	5487013	25.0	18.8	18	65448	1107	15129	16.70
afschuiving	5503941	25.1	18.7	29	60332	1068	8227	9.99
afschuiving	5524995	25.1	18.3	19	65724	1077	11127	12.16
afschuiving	5487013	25.0	18.8	19	65071	1134	16203	15.38
afschuiving	5531457	25.1	18.5	19	65657	1118	15468	15.26
afschuiving	5487013	25.0	18.3	14	67077	1120	14465	15.85
afschuiving	5487013	25.0	18.2	9	68383	1129	11538	13.76
afschuiving	5476515	25.0	18.8	29	60071	1127	12917	14.47
afschuiving	5503941	25.1	18.7	19	65276	1098	11547	11.94
	5502962					1102	12740	14.04
	38814.35					24.92	1958	2.05
						gecorr.	gemiddelde	15.43
						gecorr.	stand.afw.	2.48

Annex 6a. Proefstukgegevens azobé

proefstuk nummer	lengte [mm]	breedte [mm]	dikte [mm]	gewicht [kg]	vocht- gehalte [%]
1	3053	110.2	59.8	24.66	21
2	3050	110.8	60.3	24.34	23
3	3052	110.4	61.4	25.57	29
4	3050	111	60.5	23.7	34
5	3052	111	60.1	25.63	32
6	3050	111	60.5	25.01	31
7	3051	111	60.7	24.64	35
8	3050	110.7	61.3	25.55	29
9	3052	110.3	59.3	23.54	32
10	3051	110.8	59.7	24.89	35
11	3051	111	62	25.76	29
12	3051	111	59.2	25.71	32
13	3052	110.5	60.6	26.1	35
14	3051	111	61.5	26.35	39
15	3050	111	60.2	25.58	31
16	3050	110.9	62	26.07	35
17	3051	110.3	63	26.22	23
18	3051	110	61.2	24.19	23
19	3051	110.3	61.5	24.75	32
20	3050	110.3	61	25.42	33
21	3051	110	59.8	24.79	35
22	3051	110.3	63.8	26.08	36
23	3051	110	61.1	24.87	33
24	3050	110.5	60.7	24.97	35
25	3051	110	60.7	24.07	31

Annex 6b. Proefresultaten azobé

bezwijkmechanisme	traagheids moment	dikte flens	afstand hart tot scheur	statisch moment	Volumieke massa	Elasticiteits modulus	Schuif- sterkte
	[mm ⁴]	[mm]	[mm]	[mm ³]	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
buigtrek/draadverl.	5874635	24.1			1226	11145	-
afschuiving	6040838	24.4	5	73155	1194	13422	15.93
afschuiving	6090421	24.2	10	73340	1236	12681	16.00
afschuiving	6100713	24.5	25	67585	1157	13653	14.23
afschuiving	6055125	24.5	0	73438	1259	10864	20.18
afschuiving	6100713	24.5	10	73019	1221	13878	17.56
afschuiving	6123507	24.5	10	73317	1199	12435	14.99
afschuiving	6067567	24.4	12	73228	1247	12913	17.61
afschuiving	5836893	24.2	25	64963	1179	15358	16.33
afschuiving	5972826	24.4	15	70252	1233	12179	18.49
afschuiving	6271667	24.5	10	75254	1227	12738	16.59
afschuiving	5952553	24.5	20	68172	1282	14500	19.09
afschuiving	6019198	24.3	25	66869	1277	12418	15.28
afschuiving	6214682	24.5	15	73153	1265	15835	16.64
afschuiving	6066522	24.5	22	68655	1255	14616	17.64
afschuiving	6252586	24.5	15	73694	1243	13588	15.60
afschuiving	6250652	24.2	5	76394	1237	15017	16.84
vezelverloop	5993673	24.0	-	-	1178	11256	-
afschuiving	6082912	24.2	5	74132	1196	15313	14.24
afschuiving	6026999	24.2	30	64103	1239	14592	13.37
vezelverloop	5838390	24.0	25	65074	1235	16941	-
vezelverloop	6340113	24.2	-	-	1215	14074	-
kwast/vezelverloop	5982582	24.0	10	72225	1213	17267	-
vezelverloop/afsch.	6030442	24.3	-	-	1221	11400	-
vezelverloop/afsch.	5938215	24.0	-	-	1182	14160	-
	6060977				1225	13690	16.48
	130885				32	1727	1.77
						werkelijk gem.	17.68
						werk.stand.de	2.14

Annex 7a. Proefstukgegevens vuren

proefstuk nummer	lengte	breedte	dikte	gewicht	vocht- gehalte
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[%]
1	2393	108.8	57.8	4516	9
2	2393	108.8	58.2	4794	7
3	2393	108.6	58.3	4687	9
4	2393	108.8	58.4	3675	6
5	2393	108.8	58.0	4729	7
6	2393	108.7	58.5	4896	8
7	2393	108.8	58.4	5042	8
8	2393	108.8	58.40	4493	8
9	2393	108.7	58.5	4891	7
10	2393	108.8	58.4	4795	8
11	2393	108.9	58.4	4976	8
12	2393	108.8	58.5	4301	7
13	2393	108.8	58.5	4865	6
14	2393	108.7	58.0	4249	7
15	2393	108.1	58.2	5365	11
16	2393	108.1	58.2	5021	8
17	2393	108.6	58.3	4964	9
18	2393	108.8	58.3	4825	10
19	2393	108.8	58.3	4513	8
20	2393	108.8	58.3	4368	8
21	2393	108.7	58.2	3571	8
22	2393	108.8	58.5	4447	7
23	2393	108.8	58.2	4602	9
24	2393	108.2	58.0	4617	7
25	2393	108.2	58.1	5696	12

Annex 7b. Proefresultaten vuren

bezwijkmechanis	traagheids	dikte	diepte	afstand har	statisch	Volumieke	Elasticiteits	Schuif-
	moment	flens	sponning	tot scheur	moment	massa	modulus	sterkte
	[mm ⁴]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ³]	[kg/m ³]	[Mpa]	[Mpa]
Dwarskracht	5601855	25.4	18.9	30	60631	471	12947	8.26
Dwarskracht	5644785	25.4	19.0	30	61048	494	10675	8.60
Dwarskracht	5621075	25.3	18.6	30	60811	483	13547	8.98
Dwarskracht	5666250	25.4	19.1	15	68078	377	8051	7.59
Buigtrek	5623320	25.4	19.0			490		-
Dwarskracht	5659686	25.4	19.6	30	61234	502	13624	9.21
Dwarskracht	5666250	25.4	19.0	20	66354	517	12395	8.90
Dwarskracht	5666250	25.4	18.7	30	61237	461	11395	8.22
Dwarskracht	5659686	25.4	18.9	30	61192	501	12320	8.84
Dwarskracht	5666250	25.4	18.5	20	66575	492	10354	9.86
Buigtrek	5683549	25.5	18.6			510	12723	-
Dwarskracht	5676983	25.4	18.8	30	61345	440	10236	9.76
Trekbreuk	5676983	25.4	18.5			498	11572	-
Dwarskracht	5606171	25.4	19.0	15	67435	441	9827	8.36
Dwarskracht	5524995	25.1	19.0	20	64994	559	14436	7.49
Dwarskracht	5524995	25.1	18.9	20	65038	523	15609	9.63
Buigtrek	5621075	25.3	19.0	30	60834	512	14006	9.66
Breuk door kwa	5655518	25.4	18.9			496		-
Dwarskracht	5655518	25.4	18.9	0	70370	464	10564	8.20
Dwarskracht	5655518	25.4	19.0	30	61151	449	6422	8.12
Dwarskracht	5627577	25.4	18.8	10	69118	369	7921	7.89
Dwarskracht	5676983	25.4	18.9	30	61351	455	12127	7.79
Breuk door kwa	5644785	25.4	19.0			475		-
Dwarskracht	5520901	25.1	18.8	30	59887	483	13436	8.70
Dwarskracht	5531457	25.1	18.9	30	59994	594	13370	8.88
	5630337					482	11707	8.65
	51693					48	2289	0.72
						gecorr.	gemiddelde	9.14
						gecorr.	stand.afw.	0.87

Duurzaam bouwen reeks (DAK)

nr.	Titel: subtitel (cursief)	DWW-Nummer
001	Duurzaam aanbesteden GWW	DWW-2002-044
002	Discussienotitie n.a.v. onderzoek "Duurzaam aanbesteden GWW" <i>resultaten van het onderzoek en ideeën voor vervolgacties</i>	DWW-2002-045
003	Duurzaam bouwen Zandmaas/Maasroute van <i>planvorming naar planuitwerking (Deel A)</i>	DWW-2002-046
004	Evaluatie Gebruik en hergebruik van hout voor remmingwerken en steigerconstructies bij de Oranjesluizen te Amsterdam	DWW-2002-050
005	Kosten en Baten van Duurzaam Bouwen <i>Voorbeeldprojecten</i>	DWW-2002-060
006	Quickduboscan DZH/TXE <i>een hulpmiddel voor het maken van dubo-ontwerpkeuzes bij de start van de planuitwerking</i>	DWW-2002-069 ISBN 90-369-5506-8
007	Schuifsterkte bepaling van zeven houtsoorten voor de toepassing in verkeersbruggen	DWW-2002-099
008	Checklist materialen wegenbouw <i>Checklist materialen en milieu voor wegconstructies Hoofddocument</i>	DWW-2002-124 ISBN 90-369-5521-1
009	Checklist materialen wegenbouw <i>Checklist materialen en milieu voor wegconstructies Achtergronddocument</i>	DWW-2002-125 ISBN 90-369-5522-X



Duurzaam bouwen-reeks nr 007

Schuifsterktebepaling van zeven houtsoorten voor de toepassing in verkeersbruggen

Colofon

Duurzaam bouwen Advies- en Kenniscentrum
(DAK)

Auteurs:

dr. ir. J.W.G. van de Kuilen, dr. ir. A.J.M.
Leijten
(Sectie Staal- & Houtconstructie TU Delft)

Vormgeving en opmaak:

C.M.J. Chamuleau en F.J.J. de Winter

Het DAK is een samenwerking tussen de
Dienst Weg- en Waterbouwkunde en de
Bouwdienst van Rijkswaterstaat

Informatie: www.duborws.nl

email: dubohelpdesk@dww.rws.minvenw.nl

DWW-2002-099



DAK