

T8 rapport: experimenteel onderzoek

Restspanningen in stalen UPE 160 profielen

TUE BCO 01.22

Jaap Boon

oktober 2001

Begeleid door:
Prof. Ir. H.H. Snijder
Ir. D. la Poutré

Voorwoord

Dit project is opgezet naar aanleiding van een eerder gedane onderzoek naar kipstabiliteit in stalen UPE 160 profielen. Een vraag die uit dit onderzoek voortkwam was hoe de restspanningen in deze profielen verlopen en hoe groot deze restspanningen eigenlijk zijn. Van deze restspanningen is een redelijk beeld ontstaan, maar voor preciezer resultaten zullen nog enkele onderzoeken gedaan moeten worden.

Mijn dank gaat uit naar:

- Prof. Ir. H.H. Snijder en Ir. D. la Poutré, voor het begeleiden van dit project;
- De mannen uit het Pieter van Musschenbroek Laboratorium, met name Martien Ceelen en Theo v.d. Loo, voor het opzetten en helpen uitvoeren van de proeven
- De heren Ruurd Vis en Karel Jungschläger, TNO Bouw afdeling constructies te Rijswijk, voor het beschikbaar stellen van de hole-drilling apparatuur.

Jaap Boon
oktober 2001

Samenvatting

Het doel van dit onderzoek is: "Het bepalen van de restspanningen in een UPE 160 profiel ten gevolge van het niet-uniform afkoelen van het profiel na het warmwalsen".

Deze restspanningen kunnen op verschillende manieren worden bepaald, met behulp van niet destructieve-, semi-destructieve- en destructieve methoden. Dit onderzoek maakt gebruik van de semi-destructieve methode, de hole-drilling methode, en de destructieve methode, de sectioning methode. Beide methoden maken gebruik van het feit dat waar geen materiaal zit, geen spanning in het materiaal kan zitten.

Bij de hole-drilling methode worden kleine gaatjes door een rekrozet in het staal geboord. In het gaatje kan geen spanning zitten, dus de spanning zal van de restspanning naar 0 gaan verlopen. Dit verlopen van de spanning gaat gepaard met een lengteverandering in het staal. Deze lengteverandering kan met behulp van de rekrozet worden opgemeten en zo kan er terug gerekend worden naar de restspanningen van het profiel.

De sectioning methode maakt gebruik van hetzelfde principe, alleen worden hier geen kleine gaatjes geboord, maar worden er allemaal strookjes uit het profiel gezaagd. Ook hier wordt de lengteverandering opgemeten, maar hier met behulp van de Pfender-meter. Tevens worden rekken gemeten met behulp van 60 mm rekstroken. De restspanningen van het profiel worden vervolgens met de wet van Hooke berekend.

De resultaten van de hole-drilling methode zijn niet goed te interpreteren, omdat deze erg afwijken van het verwachte patroon. Ook is er geen symmetrie in de restspanningen te vinden, wat wel te verwachten is bij een symmetrisch profiel. De sectioning methode geeft wel een aardig betrouwbaar beeld van het verloop van de restspanningen in het UPE 160 profiel. Volgens deze methode liggen de uiterste restspanningen rond de - en + 70 N/mm², wat overeenkomt met de aanname van éénderde van de vloeispanning (300 N/mm²) uit een eerder verschenen Duits rapport [3].

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Restspanningen	5
2.1	Soorten restspanningen	5
2.2	De momenteel aangenomen restspanningen	6
2.3	Invloed van restspanningen	7
3	Onderzoeksmethoden	11
3.1	Niet-destructieve methoden	11
3.2	Semi-destructieve methoden	11
3.3	Destructieve methoden	11
3.4	Keuze van de methoden	12
4	Theorie achter de onderzoeksmethoden	13
4.1	Plaatsbepaling op het proefstuk	13
4.2	Hole-drilling methode	14
4.3	Sectioning methode	16
5	Experimentele berekeningen	19
5.1	Te verwachte lengteverandering	19
5.2	Mogelijke kromming	20
6	Uitvoering onderzoek	23
6.1	Vorbereiding van de proefstukken	23
6.1.1	Profiel voor het restspanningsonderzoek	23
6.1.2	Volgorde en plaatsing van de methoden	23
6.1.3	Reinigen van de proefstukken	25
6.2	Hole-drilling methode	26
6.3	Sectioning methode	28
7	Resultaten	31
7.1	Holle-drilling methode	31
7.2	Sectioning methode	31

8	Discussie	35	
	8.1	Vergelijking van de resultaten	35
	8.2	Problemen tijdens het onderzoek	36
9	Conclusies en aanbevelingen	39	
	9.1	Conclusies	39
	9.2	Aanbevelingen	40
	Literatuur	41	
	Bijlage I: gegevens rekrozetten Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd.	43	
	Bijlage II: elasticiteitsmodulus	47	
	Bijlage III: datasheets resultaten	55	
	Bijlage IV: foto's van de uitvoering van de hole-drilling- en de sectioningmethode	67	

1 Inleiding

Bij de capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen aan de faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven wordt onderzoek gedaan naar de eigenschappen van materialen en elementen. Dit onderzoek wordt soms gedaan naar aanleiding van opgekomen vragen uit voorgaande onderzoeken, zo is ook dit onderzoek ontstaan. Het onderzoek waaruit dit onderzoek voortkwam, ging over: "Lateral torsional buckling of channel shaped sections" [1]. Bij dit onderzoek is gekeken naar de kipstabiliteit (combinatie van torsie en buiging) van UPE 160 profielen. Een vraag die tijdens dit project ontstond is: wat is de invloed van de restspanningen in het profiel ten gevolge van de fabricage. Echter, de grootte van de restspanningen in het UPE profiel is niet bekend.

Voordat de UPE profielen daadwerkelijk kunnen worden onderzocht, moet er eerst gekeken worden naar de verschillende mogelijkheden om de restspanningen te meten en er moet gekeken worden naar de mogelijkheden om de metingen uit te voeren op de Universiteit. Dit leidt tot de probleemstelling die voor dit onderzoek van toepassing is: "Er zijn verschillende methoden om de restspanningen te bepalen, maar welke toe te passen is en goede resultaten geeft is nog niet bekend".

Het doel van dit onderzoek is: "Het bepalen van de restspanningen in een UPE 160 profiel ten gevolge van het niet-uniform afkoelen van het profiel na het warmwalsen".

In hoofdstuk 2 wordt eerst een beeld gegeven van wat restspanningen zijn, wat de aannames zijn voor UPE profielen en wat de invloed van de restspanningen is op de sterkte, stijfheid en de stabiliteit. In hoofdstuk 3 staan de verschillende mogelijke methoden om de restspanningen in profielen te bepalen. Hoofdstuk 4 is vervolgens een literatuurstudie naar de twee methoden (hole-drilling- en sectioning methode) die toegepast worden. Dit wordt gevolgd door hoofdstuk 5 waarin enkele berekeningen zijn gemaakt, om een indruk te krijgen van de mogelijke resultaten. Hoofdstuk 6 geeft vervolgens de uitvoering van het onderzoek. Er wordt in een stappenplan gegeven hoe het onderzoek is verlopen. De resultaten van dit onderzoek worden vervolgens in hoofdstuk 7 gegeven. In hoofdstuk 8 wordt de resultaten uit hoofdstuk 7 besproken op de mogelijke fouten, etc. Tenslotte worden in hoofdstuk 9 de conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan, naar aanleiding van het onderzoek en de resultaten.

2 Restspanningen

Tijdens dit onderzoek worden de restspanningen van een UPE 160 profiel onderzocht. Maar voordat er aan het onderzoek begonnen kan worden, is het nodig te weten wat restspanningen nu eigenlijk zijn, wat voor soorten er zijn, hoe ze ontstaan, wat voor invloed ze hebben, etc. In dit hoofdstuk zal in het kort worden ingegaan op de verschillende punten die hierboven zijn aangedragen.

2.1 Soorten restspanningen

Restspanningen zijn lokale druk- en trekspanningen in een profiel, plaat, las, etc., ontstaan tijdens de fabricage van het element. Lokale druk- en trekspanningen houdt in dat er in een element spanningen zitten die in elk punt in het element anders (kunnen) zijn (zie figuur 1 en figuur 2). Omdat er geen uitwendige krachten op het element aanwezig zijn moeten de lokale druk- en trekspanningen over het geheel van de doorsnede in evenwicht zijn.

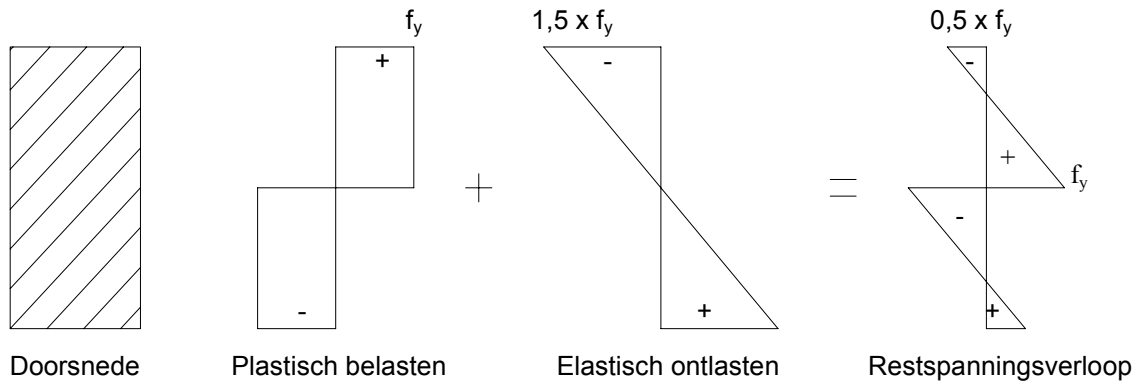
Het maakt eigenlijk niet uit wat voor soort fabricagemethode je toepast, want er ontstaan eigenlijk altijd restspanningen [2]. Verschillende methoden van het fabriceren van profielen waarbij restspanningen ontstaan zijn (overigens geeft elke fabricage methode natuurlijk ook zijn eigen soort restspanning):

- Warmwalsen, het materiaal wordt eerst verhit, dan gewalst en vervolgens weer afgekoeld;
- Lassen, waarbij de temperatuur plaatselijk heel hoog wordt voordat deze weer daalt;
- Koudwalsen / koudvervormen, waarbij het materiaal wordt belast tot over de vloeigrens.

Bij warmwalsen van profielen ontstaan restspanningen na het fabriceren [4] Deze worden gevormd door het niet-uniform afkoelen van de profielen. Dit niet-uniform afkoelen wordt voornamelijk veroorzaakt door twee punten, namelijk: de verschillende diktes in het profiel en de verhouding van het oppervlak ten opzichte van de omtrek. Het eerste zit vooral in de aansluiting van de flenzen met het lijf. Hier zit namelijk een verdikking, die tijdens het afkoelen langer warm blijft, waardoor dat gebied gedurende langere tijd zal blijven krimpen en er dus spanningen ontstaan. Het tweede punt zit voornamelijk bij de kopeinden van de flenzen. Hier is het oppervlak ten opzichte van de omtrek kleiner dan in de rest van het profiel, waardoor dit deel nog sneller afkoelt. Het gevolg hiervan is dat het krimpen ten gevolge van het afkoelen eerder stopt dan in andere delen van het profiel. Deze krimpverschillen zorgen ervoor dat de er aan de uiteinden van de flenzen en in het midden van het lijf drukspanningen ontstaan en op de hoekpunten (lijf en flenzen) trekspanningen ontstaan (zie figuur 2).

Bij lassen hebben de restspanningen eigenlijk dezelfde oorzaak als bij het warmwalsen, alleen met het verschil dat hier lokaal een enorm hoge temperatuur in het materiaal wordt gebracht, die het moedermateriaal laat vloeien om vervolgens weer af te koelen.

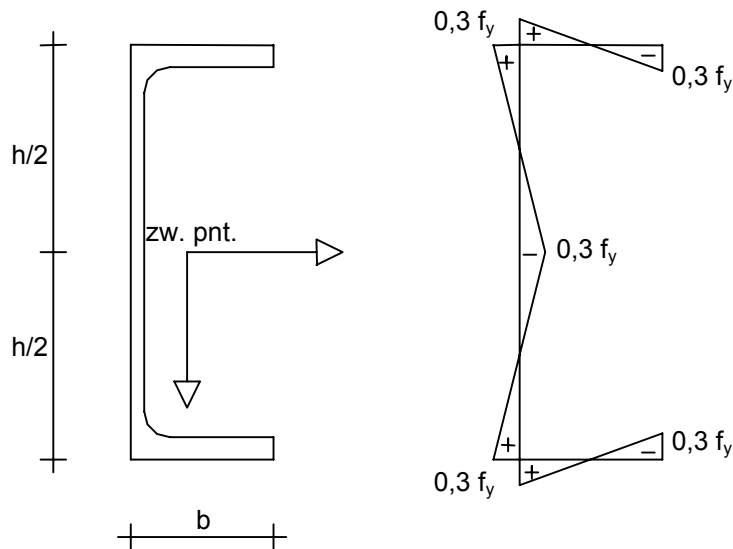
Restspanningen door koudwalsen of koudvervormen hebben eigenlijk een heel andere oorzaak. Hier ontstaan de restspanningen doordat het staal plastisch wordt vervormd. Dit houdt in dat er een belasting op het staal wordt gezet, die ervoor zorgt dat het materiaal plastisch gaat vervormen. Wordt deze belasting er nu weer af gehaald, dan zal het materiaal zich elastisch gaan ontspannen. Hierdoor blijft er een vervorming in het staal zitten die ervoor zorgt dat het staal de gewenste vorm heeft (zie figuur 1). De waarden in de onderstaande figuur zijn overigens alleen van toepassing op een rechthoekige doorsnede.



figuur 1: principe restspanningen door koudvervormen

2.2 De momenteel aangenomen restspanningen

In NEN 6771 zijn eigenlijk geen restspanningen opgenomen ten behoeven van U profielen, wel zijn de I en H profielen in de norm opgenomen. In Duitsland (waar dit UPE-profiel vandaan komt) is in een onderzoeksrapport [3] aangenomen dat zowel de druk- als de trekspanningen van het profiel $0,3 \times$ de vloeispanning (f_y) is (zie figuur 2).

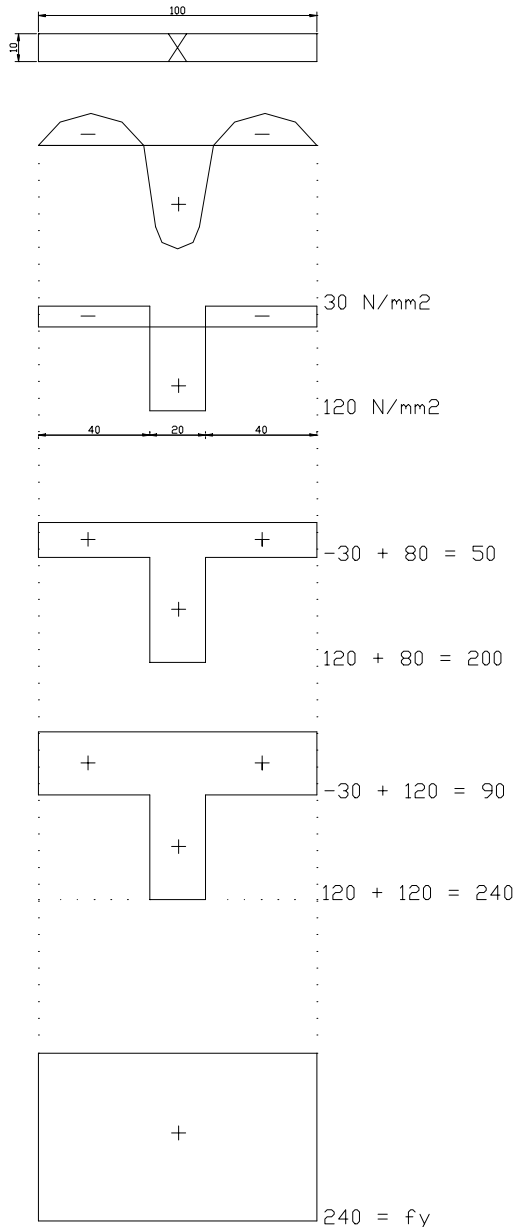


figuur 2: schematisering van de restspanningen

2.3 Invloed van restspanningen

Restspanningen hebben op de sterkte van het materiaal geen invloed, maar toch is het belangrijk om de restspanningen te bekijken [2]. Ze hebben namelijk wel invloed op de stijfheid en de stabiliteit van profielen.

Om een indruk te geven van de invloed van restspanningen, wordt hier een voorbeeld gegeven van een gelaste strip:



figuur 3: spanningsverloop bij las

Strip met stompe las in het midden en een spanning uit het vlak (zie ook figuur 4).

Kwalitatief verloop van de lassungspanningen als gevolg van laskrimp (is een vorm van restspanning).

Geschematiseerd verloop. De druk- en trekspanningen moeten evenwicht maken, immers de uitwendige belasting is 0. Dus $10 \times 20 \times 120 = 10 \times 80 \times 30$

Uitwendige belasting: $F = 80 \text{ kN}$

$$\sigma = 80.000 / 1000 = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \Delta l / l = F / 1000 * E = \sigma / E = 80 / E$$

Uitwendige belasting: $F_{el} = 120 \text{ kN}$

$$\sigma = 120.000 / 1000 = 120 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \Delta l / l = F / 1000 * E = \sigma / E = 120 / E$$

De middelste zone vloeit nu, want $f_y = 240 \text{ N/mm}^2$, maar de andere twee zones kunnen nog extra belasting opnemen ter grootte van:

$$F_{add} = 10 \times 80 \times (240 - 90) = 120 \text{ kN}$$

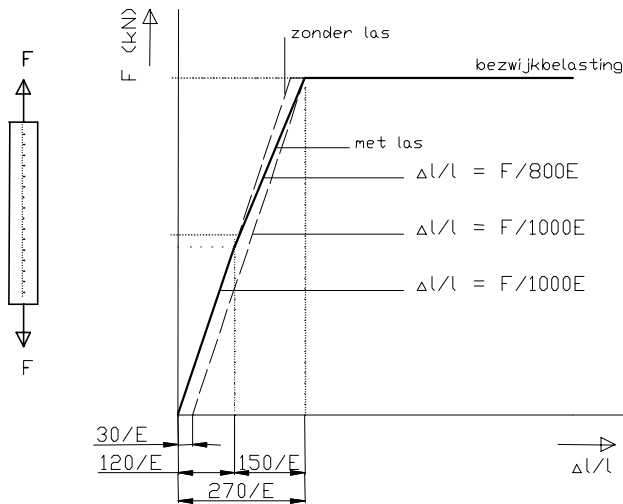
De gehele staaf vloeit dus bij:

$$F_{pl} = F_{el} + F_{add} = 240 \text{ kN}$$

De vervorming door F_{add} is groter dan door F_{el} , omdat slechts een deel van de doorsnede (800 mm^2) nog stijfheid bezit.

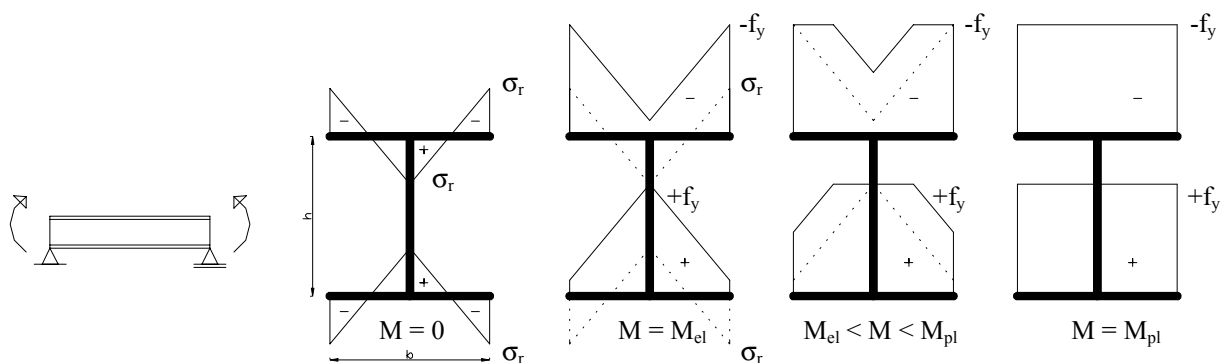
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \Delta l / l = F_{el} / 800 * E + F_{add} / 800 * E \\ &= 120 / E + 150 / E \end{aligned}$$

Als de gegevens uit het voorbeeld in een kracht-verlengingsdiagram worden weergegeven, ontstaat de onderstaande figuur. Hieruit kan vervolgens geconcludeerd worden dat de las en dus de restspanningen geen invloed uitoefenen op de grootte van de bezwijkbelasting en dus de sterkte van het materiaal. Er kan ook nog geconcludeerd worden dat de lasspanningen wel invloed uitoefenen op de vervorming van het materiaal. De blijvende vervorming die optreedt door het lassen is $30/E$, zie figuur 4.



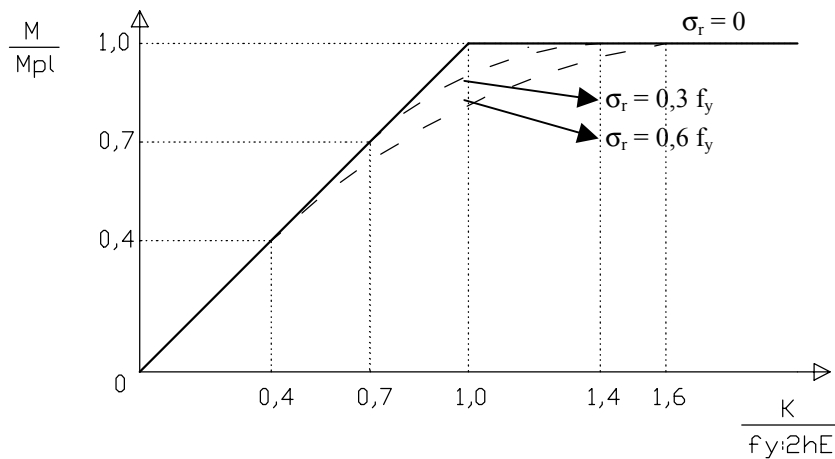
figuur 4: spannings-rek diagram bij las

Een soortgelijk effect treedt op voor walsspanningen in I-profielen, die op buiging worden belast. Het betreffende voorbeeld is hieronder weergegeven.



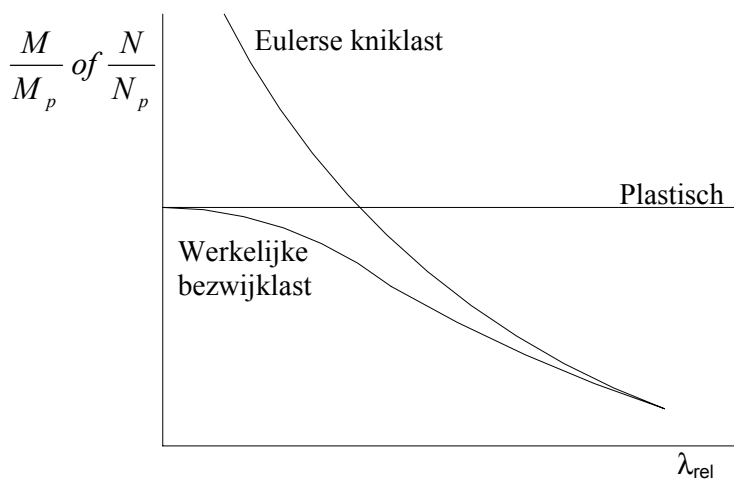
figuur 5: spanningsverloop bij warmgewalst profiel

In figuur 5 staat weergegeven hoe de spanningen in het I-profiel toenemen bij een toenemende belasting. Deze gegevens kunnen net als in het vorige voorbeeld in één grafiek worden weergegeven: figuur 6.



figuur 6: moment-krommingsdiagram warmgewalst profiel

Tenslotte nog de stabiliteit (knik en kip) van profielen en de invloed van de restspanningen hierop [2,5]. Het verschil tussen de grensbelasting van een perfect rechte staaf en de werkelijke knik- of kipbelasting wordt veroorzaakt door imperfecties in het materiaal en door restspanningen. De horizontale lijn in figuur 7 geeft de plastische grensbelasting (N/N_p of M/M_p) weer. De hyperbolische lijn geeft de Eulerse kniklast weer, en de lijn hieronder geeft het werkelijke verloop van de knik- of kipbelasting. In dit figuur is dus goed te zien dat de werkelijke kniklast een stukje onder de grenswaarde van de belasting van een perfect rechte staaf zit. Hieruit blijkt dus dat de restspanningen naast andere effecten, zoals imperfecties, invloed hebben op de stabiliteit van profielen.



figuur 7: stabiliteit profielen

3 Onderzoeksmethoden

In de loop der jaren zijn er verschillende methoden ontwikkeld om restspanningen te bepalen. Zo zijn er de niet-destructieve methoden, de semi-destructieve methoden en de destructieve methoden. Voordat de restspanningen van het UPE 160 profiel bepaald kunnen worden, moet er onderzocht worden wat de beste methode is om de restspanningen te bepalen, maar ook welke methode er mogelijk is om te gebruiken.

3.1 Niet-destructieve methoden

Binnen de niet-destructieve methoden zijn veel verschillende soorten te onderscheiden [6]. Zo zijn er methoden die gebruik maken van ultrasoon geluid (akoestiek) [7], van elektromagnetische golven (barkhausen), van neutronen diffractie, van röntgen diffractie [8,9] protonen verwijdering, nucleaire hyperfine (Mossbauer), chemisch etsen en kerven.

Uit een onderzoek van het Electric Power Research Institute [6] is gebleken dat van deze bovengenoemde methoden de röntgen (x-ray) diffractie methode de meest nauwkeurige is.

3.2 Semi-destructieve methoden

Onder de semi-destructieve methoden valt de zogenoemde "hole-drilling methode" [6].

De methode berust erop dat er een gaatje in het staal geboord wordt, waardoor de het staal zich bij het gaatje zal ontspannen (de restspanningen gaan daar naar 0, waar geen staal zit kunnen zich immers geen spanningen bevinden). Dit zo genaamde ontspannen houdt in dat er een rek en / of krimp zal optreden rond het gaatje. Deze rek / krimp is op te meten met behulp van rozet-rekstrookjes.

De Hole-drilling methode is een van de methodes die voor dit restspanningsonderzoek worden gebruikt.

3.3 Destructieve methoden

Tenslotte is er nog de destructieve methode, de zogenoemde "sectioning methode" [6].

Bij deze methode wordt het profiel in allemaal strookjes gesneden. Deze strookjes krijgen met dezelfde reden als bij de hole-drilling methode een verkorting en zeer waarschijnlijk ook een kromming. Uit deze vervorming van de strookjes kan de rek van de strookjes bepaald worden en vanuit de rek kan er terug gerekend worden naar de restspanningen die zich voor het verzagen in het profiel bevonden.

3.4 Keuze van de methoden

Voor dit onderzoek naar de restspanningen in stalen UPE 160 profielen wordt er gebruik gemaakt van de semi-destructieve- en de destructieve methode, met andere woorden de hole-drilling methode respectievelijk de sectioning methode.

Omdat dit onderzoek nieuw is bij Constructief Ontwerpen, is het in eerste instantie belangrijk dat er een globaal beeld wordt gevormd van de restspanningen in UPE 160 profielen. Daarom is voor het onderzoek de keuze gevallen op de hole-drilling- en de sectioning methode. Deze methoden worden al vele jaren gebruikt, en geven over het algemeen een redelijk goede indruk van de restspanningen in elementen. Verder is er gekozen om zowel de hole-drilling- als de sectioning methode toe te passen, zodat deze met elkaar vergeleken kunnen worden.

Van de niet-destructieve methoden kan de röntgen diffractie methode overigens wel op de TU Eindhoven uitgevoerd worden. De faculteit Scheikunde heeft namelijk de apparatuur staan waar dit onderzoek mee gedaan kan worden.

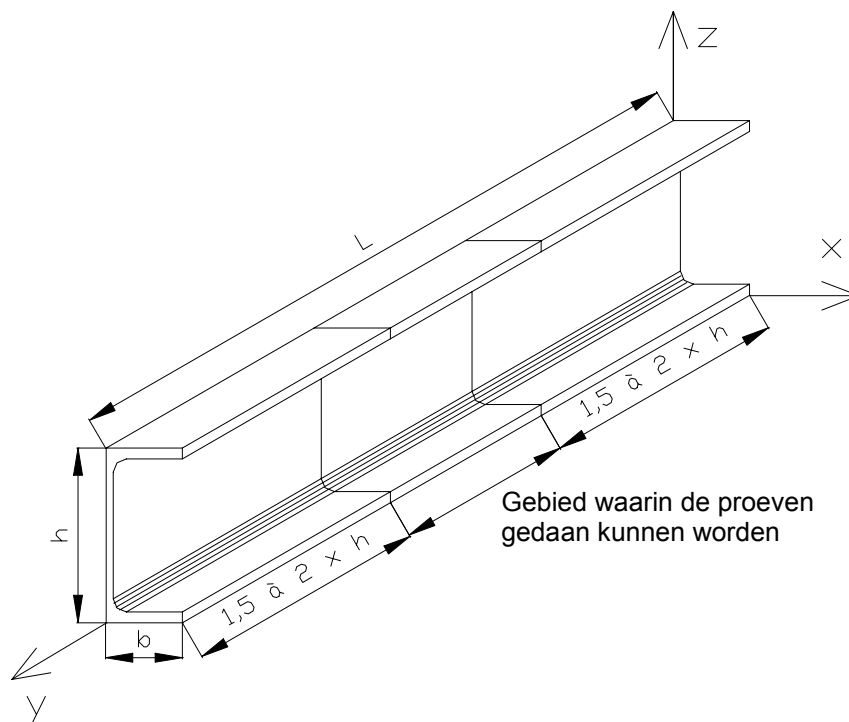
4 Theorie achter de uit te voeren methoden

Dit hoofdstuk is een literatuurstudie naar de theorie achter de hole-drilling- en de sectioning methode.

4.1 Plaatsbepaling op het proefstuk

Zowel voor de hole-drilling methode als de sectioning methode is het van belang om de plaats (over de lengte van het profiel) waar de proef gedaan zal worden goed uit te kiezen. In het geval van de hole-drilling methode is dit eenvoudiger dan bij de sectioning methode doordat de proefneming zelf vele malen kleiner is bij de hole-drilling methode (enkele millimeters) ten opzichte van de sectioning methode (enkele honderden millimeters).

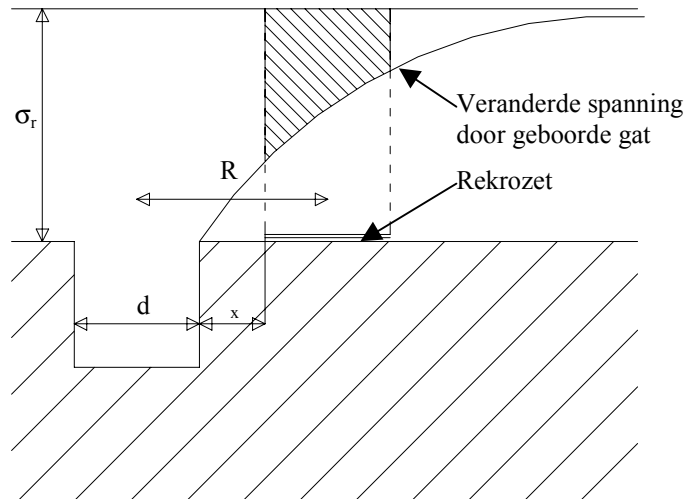
Een profiel heeft altijd een bepaalde lengte. Dit houdt dus in dat een profiel aan beide kanten een zaagsnede heeft. Ook hier geldt dat waar geen materiaal zit, geen spanningen kunnen zitten. Dit houdt dus in dat de restspanningen in de uiteinden van het profiel zijn veranderd door het zagen. Over een lengte ongeveer van 1,5 à 2 keer de hoogte van het profiel is de restspanning weer gelijkmatig verdeeld. Dit effect wordt het uitdempingseffect genoemd (figuur 8). De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de proefneming pas na een lengte van 1,5 a 2 keer de hoogte kan worden genomen.



figuur 8: uitdempingseffect

4.2 Hole-drilling methode

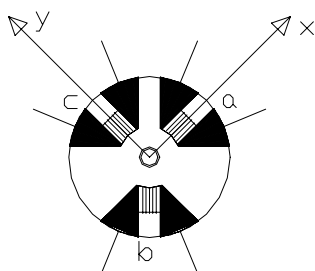
Met behulp van de hole-drilling methode kan relatief simpel een goede waarde voor de restspanningen in het profiel worden gevonden [10,11]. In figuur 9 is het principe achter de hole-drilling methode weergegeven.



figuur 9: principe van de hole-drilling methode

De methode berust op het feit dat waar geen materiaal zit, er zich geen spanningen kunnen bevinden. Dus dit houdt in dat op de plek waar de restspanningen gemeten moeten worden materiaal wordt weggehaald, zodat de restspanningen van hun beginwaarde terug zullen lopen naar 0 (gekromde lijn in figuur 9). De rekverandering rond het gat kan met rozetrekstroken worden gemeten. Vervolgens kan met behulp van formules de restspanning, σ_R , worden bepaald.

Het verlopen van de restspanningen van de beginwaarde naar 0 heeft tot gevolg dat het materiaal rond het geboorde gat iets zal rekken / stuiken. Dit rekken / stuiken wordt waargenomen door een rekrozet. [12,13] Een rekrozet bestaat uit drie rekstroken die op 0° , 45° en 90° zijn geplaatst (nummers a, b en c in figuur 10). Deze rekrozetten zijn een vereiste voor het onderzoek. Hun werking is gebaseerd op algemene analytische berekeningen waarbij wordt uitgegaan van een bi-axiale spanningsverdeling en het idee dat de hoofdspansingsrichtingen niet bekend zijn. Ook moet er rekening worden gehouden met de afstand x (figuur 9) die tussen de rekstrookjes en het geboorde gat zit. Omdat deze afstand x voor al de drie rekstrookjes geldt moet het gat dat geboord wordt perfect rond zijn en precies in het midden van de aangegeven cirkel op de rekrozetten worden geboord.



figuur 10: rekrozet

Het boren van een gat

De apparatuur om het gaatje in het staal te boren berust op het zogenoemde Air-abrassieve systeem (bijlage IV: foto 1 & 2). Dit systeem boort het gaatje, dat ongeveer 1,5 à 2 mm diameter moet hebben en ongeveer 1,5 mm diepte. Dit boren gebeurt met behulp van een mix van lucht en aluminiumpoeder dat onder grote druk op het proefstuk wordt gespoten, waardoor het gaatje ontstaat.

De voordelen van het boren van een gaatje met het Air-abrassieve systeem ten opzichte van een gewone boor is: ten eerste is het gaatje bij het Air-abrassieve systeem rond dan bij het gebruik van een boortje; ten tweede is de positie van de Air-abrassieve boor beter te plaatsen dan een gewone boor. Tenslotte nog het belangrijkste punt: door gebruik te maken van perslucht in plaats van een boortje worden er geen boorspanningen in het materiaal gebracht. Deze boorspanningen zouden namelijk de metingen kunnen beïnvloeden.

Opmeten van het gat

Het opmeten van de diameter en de diepte van het gat wordt met behulp van een microscoop gedaan. Deze microscoop wordt overigens ook gebruikt om te zorgen dat de boorunit van het Air-abrassieve systeem op de juiste plaats wordt gezet (bijlage IV: foto 6).

Het opmeten van de diepte van het gat gebeurt door het beeld scherp te stellen op het oppervlak van het proefstuk en vervolgens scherp te stellen op de bodem van het gat. Het verschil tussen deze waardes is de diepte van het gat.

Het opmeten van de diameter van het gat wordt gedaan door het (beweegbare) assenkruis te verplaatsen naar de rand van het gat. Het verschil tussen deze assenkruisen is de straal van het gat. De diameter is uiteraard 2 keer de opgemeten straal.

Bij de bepaling van de diameter en de diepte van het gat moet erop gelet worden dat dit altijd op dezelfde manier worden gedaan (bijvoorbeeld altijd van links naar rechts of van te diep naar minder diep, tot er eenscherp beeld ontstaat) anders kunnen de waardes per boring enorm verschillen. Ook is het verstandig om de metingen een aantal keren te doen, zodat de zuiverheid van de meting wordt vergroot.

Berekening van de restspanning

Na het boren van het gat kan er begonnen worden met het berekenen van de restspanning in het staal [13]. Er zijn verschillende reeksen formules, die in grote lijnen enorm op elkaar lijken, maar soms net een klein verschil vertonen. Deze kleine verschillen zijn afhankelijk van het type rekrozet dat wordt gebruikt. Het is dus zaak de formules behorende bij de toegepaste rekrozet te gebruiken (hier: FRS-2 van Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.). De formules voor het berekenen van de restspanningen zijn hieronder en op de volgende pagina weergegeven.

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b}{\varepsilon_c - \varepsilon_a} + \frac{n \cdot \pi}{2}$$

$$\text{als } \varepsilon_a > \varepsilon_c \quad \text{dan } n = 0$$

$$\text{als } \varepsilon_a < \varepsilon_c \quad \text{dan } n = 1$$

θ : richting van de grootste hoofdspanning, t.o.v. de x-as (0° rekstrook)
 $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$: waardes rekstrookjes (eindwaarde - beginwaarde)

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4 \cdot A} + \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4 \cdot B \cdot \cos 2\theta}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4 \cdot A} - \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4 \cdot B \cdot \cos 2\theta}$$

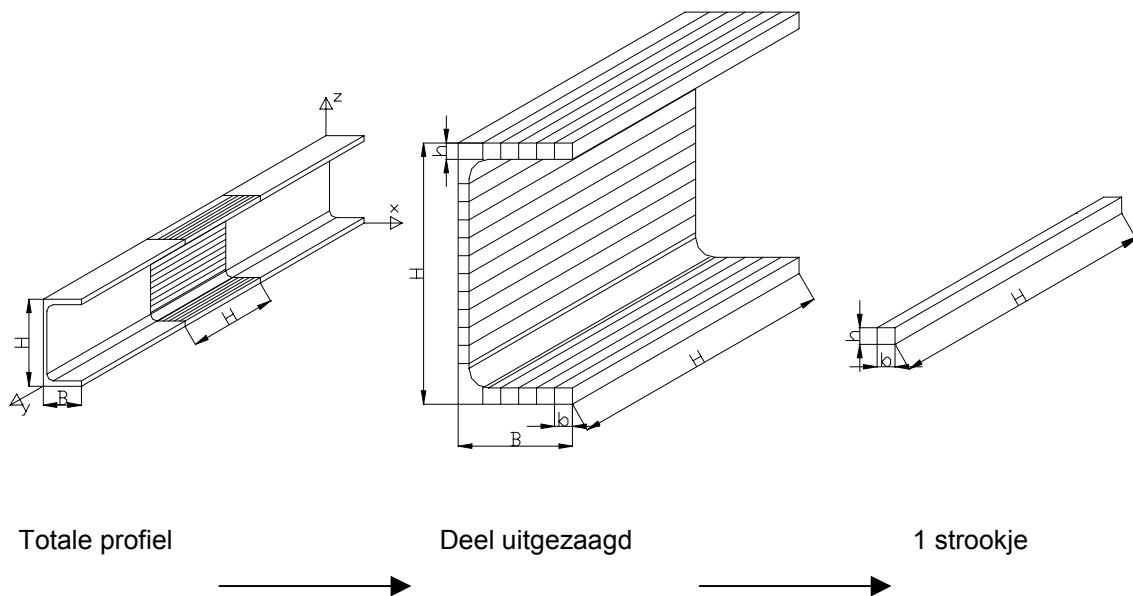
$$4 \cdot A = -\frac{(1+\nu) \cdot d^2}{2 \cdot E \cdot R^2}$$

$$4 \cdot B = -\frac{2 \cdot d^2}{E \cdot R^2} + \frac{3 \cdot (1+\nu) \cdot d^4}{8 \cdot E \cdot R^4}$$

$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$:	hoofdspanningen
E	:	elasticiteitsmodulus
ν	:	constante van Poisson
$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$:	waardes rekstrookjes (eindwaarde - beginwaarde)
d	:	diameter van het geboorde gat
R	:	straal, midden gat tot midden rekstrook

4.3 Sectioning methode

De sectioning methode is op hetzelfde principe gebaseerd als de hole-drilling methode, waar geen materiaal zit kan geen spanning zitten [14,15]. Bij de sectioning methode gebruikt men dit gegeven door een proefstuk uit een stuk profiel te snijden (figuur 11) en vervolgens in allerlei strookjes op te delen. Het gevolg van dit opdelen is dat in de strookjes een lengte- en wellicht ook een vormverandering zal optreden. Deze lengte- en vormverandering kan weer worden opgemeten en van daar uit kunnen de restspanningen worden berekend.



figuur 11: principe van de sectioning methode

Vorbereiding van het proefstuk

Als er gekeken wordt naar de restspanningen ontstaan door de fabricage van het profiel, moet er bij het uitzoeken van de proefstukken goed gekeken worden naar vervormingen en scheurtjes in het staal. Deze duiden erop dat het proefstuk tot over de vloeigrens is belast, waardoor de restspanningen in het staal zijn veranderd.

Het proefstuk moet minimaal drie keer de hoogte van het profiel zijn, dit in verband met het eerder genoemde uitdampingseffect. Bij koud verzagen moet hier nog een lengte van ongeveer 50 mm bij worden opgeteld. Bij gebruikmaking van vlam-snijden moet de totale lengte van het proefstuk minimaal vier keer de hoogte van het profiel zijn. Dit moet gedaan worden om de mogelijke verstoring van de restspanningen te voorkomen.

Vervolgens moet het proefstuk goed schoongemaakt en ontvet worden, zodat de rekstroken en de meetpunten zonder hinder van de walshuid van het profiel kunnen worden geplaatst.

Na het schoonmaken van het profiel kan er op het profiel worden aangegeven waar de te zagen strookjes zich zullen gaan bevinden en waar de meetapparatuur moet komen te zitten.

De laatste stap van de voorbereiding is het aanbrengen van de meetapparatuur. Voor het meten van de rek kan er gebruik gemaakt worden van rekstrookjes (elektronisch). Voor het bepalen van de verlenging / verkorting kan er gebruik gemaakt worden van mechanische instrumenten als de Whittemore-meter of de Pfender-meter. De Whittemore-meter meet de afstand tussen kleine gaatjes die in het proefstuk zijn gemaakt en de Pfender-meter maakt gebruik van kleine kogeltjes die in het proefstuk zijn geslagen. Het bereik van deze meters is een bepaalde vaste afstand (60, 100 of 300 mm) plus en min een afstand van 500 μm . Dit variabele deel wordt met behulp van een mechanisch klokje opgemeten.

Meettechniek

Het opmeten bij de sectioning methode is eenvoudig; er moet alleen met een aantal zaken rekening worden gehouden. Als eerste moet ervoor gezorgd worden dat de temperatuur tijdens de metingen constant blijft. Doordat de verschillen zeer klein zijn (micrometers) en metaal zeer goed geleidt, kan een temperatuurverschil al snel tot verkeerde waardes leiden. Ten tweede moet er ook rekening worden gehouden met mogelijke meetfouten die kunnen ontstaan en met een kromming van de strookjes. Om deze meetfouten mee te nemen in de berekening van de restspanningen is een aantal formules beschikbaar om de fouten te berekenen. Deze foutcorrecties (aangegeven met λ_s , λ_n , λ_h en λ_t) moeten bij de lengteverandering worden opgeteld.

Berekenen van de spanning

Aan de hand van de bepaalde verkorting (kromming) van de individuele strookjes kunnen de restspanningen in het profiel worden berekend. Hiervoor kan gewoon de wet van Hooke worden gebruikt, hieruit volgen de volgende formules:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$
$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

σ	:	spanning
E	:	elasticiteitsmodulus
ε	:	rek
Δl	:	lengte verandering
l	:	lengte (waarover gemeten wordt)

Bij eerder gedane proeven met de sectioning methode maakte men naast de wet van Hooke ook nog gebruik van enkele formules die de mogelijk optredende fouten meenamen. De

waarden van de uit de onderstaande formules moeten bij de waarden van de verlenging / verkorting worden opgeteld. De fouten die men constateerde waren:

- Fout door de kromming in de z richting (λ_s), kromming in het oppervlakte vlak (x-y vlak) van het totale staafje;
- Fout door de kromming in de y richting (λ_n), kromming in het normaalvlak (z-y vlak) tussen de twee meetpuntjes.

Welke er toegepast moet worden hangt af van de richting van de kromming (figuur 12).

$$\lambda_s = \frac{8 \cdot \delta^2}{3 \cdot L_g} \quad \text{met: } \delta = (S_f - S_i)$$

of:

$$\lambda_n = \frac{8 \cdot \delta^2}{3 \cdot L_g} \quad \text{met: } \delta = (N_f - N_i)$$

λ_s, λ_n = foutcorrectie

S_i = midden coördinaten van het oppervlak (z-richting), in begin situatie

S_f = midden coördinaten van het oppervlak (z-richting), na verzagen

N_i = midden coördinaten in het normaalvlak (y-richting), in begin situatie

N_f = midden coördinaten in het normaalvlak (y-richting), na verzagen

L_g = lengte tussen de meetpunten

δ = afstand tussen de begin en eind midden coördinaten

Fout door verkeerd plaatsen van de meetapparatuur op de gaatjes in het profiel, mede door de kromming, etc. (λ_h). Specifiek voor de Whittemore-meter.

$$\lambda_h = (4 d \delta / L_g) \tan \alpha / 2$$

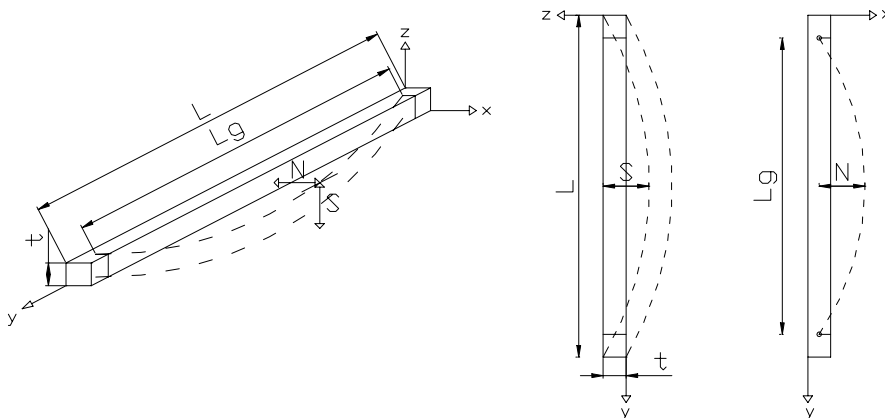
d = diameter gaatjes

α = interne hoek

Tenslotte is er nog een factor die in overweging neemt dat er bij de hierboven genoemde factoren is gekeken naar het oppervlak van de strookjes. Het kan nodig zijn een correctie voor de kromming toe te passen om de verkorting te bepalen bij het midden van de dikte van de strookjes, mits de metingen op het oppervlak zijn gedaan.

$$\lambda_t = 4 t \delta / L_g$$

t = dikte van de strip



figuur 12: mogelijke buiging van een sectioning strookje.

5 Experimentele berekeningen

In het vorige hoofdstuk is de theorie van de verschillende uit te voeren onderzoeken beschreven. Voordat er overgegaan wordt naar het daadwerkelijke onderzoek, wordt eerst nagegaan welke orde van grootte de resultaten van het onderzoek hebben. Dit heeft voornamelijk betrekking op de sectioning methode, omdat daar geen ervaring mee is. Voor de hole-drilling methode is dit niet van belang, omdat daar door de standaard apparatuur (Air-abrassive system) eigenlijk geen andere keuzes te maken zijn.

5.1 Te verwachte lengteverandering

De berekening wordt gedaan met behulp van de wet van Hooke. Om de orde van grootte van de optredende rek te bepalen moeten de spanning, de elasticiteitsmodulus en de lengte van het proefstuk worden vastgesteld.

In een rapport dat door een Duits instituut is geschreven [3], wordt gesteld dat de maximale restspanningen in profielen op ongeveer éénderde van de vloeispanning liggen. Als aangenomen wordt dat de vloeispanning 270 N/mm² is, is éénderde van de vloeispanning 90 N/mm².

De elasticiteitsmodulus van staal kan tussen de 190000 N/mm² en de 230000 N/mm² liggen. Dit wetende wordt er meestal gekozen om het gemiddelde te nemen. De elasticiteitsmodulus is dan 210000 N/mm².

Tenslotte is de lengte van het proefstuk nog nodig. In het theoriehoofdstuk is gesteld dat de lengte van het proefstuk ongeveer net zo lang moet zijn als het profiel hoog is. De hoogte van het profiel is 160 mm, dus de lengte van het proefstuk wordt 160 mm. Voor het gebruik van de Pfender meter houdt dit in dat de lengte tussen de meetkogeltjes 100 mm moeten zijn. De standaard maten van de Pfender-meter zijn namelijk 60, 100 en 300 mm, hier is dus de 100 mm het meest ideaal. De laatste te bepalen lengte is die van de rekstrookjes. Deze worden aangenomen 60 mm te zijn. Nu al de aannames gemaakt zijn kan de lengteverandering worden bepaald die het profiel zou moeten krijgen bij gebruikmaking van de sectioning methode.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \rightarrow \quad \sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \rightarrow \quad \Delta l = \frac{\sigma \cdot l}{E}$$

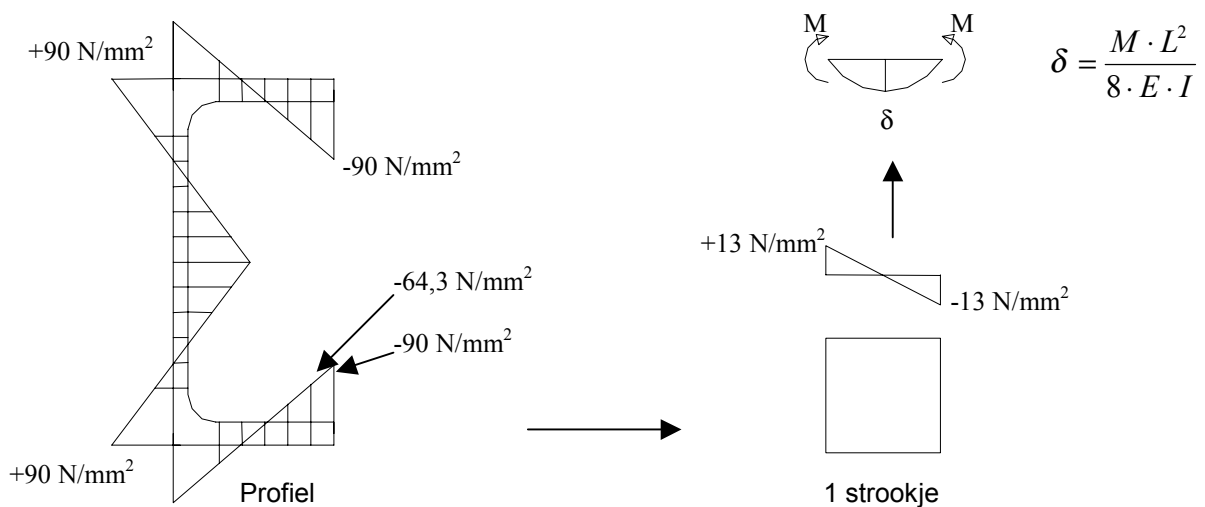
$$l = 160 \text{ mm} \quad \Delta l = \frac{\sigma \cdot l}{E} = \frac{90 \cdot 160}{210000} = 0,0686 \text{ mm} \quad (\text{lengteverandering proefstuk})$$

$$l = 100 \text{ mm} \quad \Delta l = \frac{\sigma \cdot l}{E} = \frac{90 \cdot 100}{210000} = 0,0429 \text{ mm} \quad (\text{lengteverandering Pfendermeter})$$

$$l = 60 \text{ mm} \quad \Delta l = \frac{\sigma \cdot l}{E} = \frac{90 \cdot 60}{210000} = 0,0257 \text{ mm} \quad (\text{lengteverandering rekstroken})$$

5.2 Mogelijke kromming

Een ander deel dat bekeken kan worden is of de correctiefactoren ten behoeve van de kromming bij de sectioning methode eigenlijk wel nodig zijn. Ook hier wordt de restspanning rond de éénderde van de vloeispanning genomen. Dit heeft tot gevolg dat de restspanning in de flens zal verlopen van +90 N/mm² tot -90 N/mm². Bij de sectioning methode worden allemaal strookjes van ongeveer 10 mm uit het profiel gezaagd. In zo'n strook (nog niet gezaagd) verloopt de restspanning van -90 N/mm² tot -64,3 N/mm² (figuur 13), het verschil is dan ongeveer 26 N/mm². Na verzagen leidt dit tot een spanningsverdeling van +13 N/mm² tot -13 N/mm², doordat er geen resulterende normaalspanning is.



figuur 13: ontstaan kromming

Gegevens voor de berekening van de verkorting:

- | | |
|---|---|
| - lengte van het strookje: | $L = 160 \text{ mm}$ |
| - lengte tussen de meetpuntjes: | $L_g = 100 \text{ mm}$ |
| - gestelde elasticiteitsmodulus: | $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ |
| - spanning uiteinde strookje: | $\sigma = 13 \text{ N/mm}^2$ |
| - gerelaxeerde (verdwenen) normaalspanning: | $\sigma_{\text{relax}} = 90 - 13 = 77 \text{ N/mm}^2$ |
| - dikte van het strookje (flens) | $t_f = 10 \text{ mm}$ |
| - hoogte van het strookje: | $h = 10 \text{ mm}$ |

De verkorting door de relaxatie kan berekend worden met de wet van Hooke:

$$\Delta_{\text{relax}} = \frac{\sigma_{\text{relax}} \cdot L_g}{E} = 0,037 \text{ mm}$$

Om de doorbuiging ten gevolge van de kromming te bepalen moeten eerst het traagheidsmoment en het moment worden berekend.

$$I = \frac{t_f \cdot h^3}{12} = \frac{10 \cdot 10^3}{12} = 833,33 \text{ mm}^4$$

$$M = \frac{\sigma \cdot 2 \cdot I}{h} = \frac{13 \cdot 2 \cdot 833,33}{10} = 2166,66 \text{ Nmm}$$

De doorbuiging over de lengte van het strookje (L) wordt vervolgens:

$$\delta_L = \frac{M \cdot L_g^2}{8 \cdot E \cdot I} = \frac{2166,66 \cdot 160^2}{8 \cdot 210000 \cdot 833,33} = 0,0396 \text{ mm}$$

De doorbuiging over het stuk tussen de meetpuntjes (L_g) wordt vervolgens:

$$\delta_{L_g} = \frac{M \cdot L_g^2}{8 \cdot E \cdot I} = \frac{2166,66 \cdot 100^2}{8 \cdot 210000 \cdot 833,33} = 0,0155 \text{ mm}$$

De straal horende bij de doorbuiging δ_{L_g} is:

$$R = \frac{\delta}{2} + \frac{L_g^2}{8 \cdot \delta} = 80769 \text{ mm}$$

Met de onderstaande formule kan vervolgens de schijnbare verkorting over het gebied L_g worden bepaald.

$$\Delta_{\text{schijnbaar}} = \int_0^{L_g} \sqrt{1 + \left[\frac{4 \cdot L_g - 8 \cdot x}{4 \cdot \sqrt{4 \cdot R^2 - 4 \cdot x^2 + 4 \cdot x \cdot L_g - L_g^2}} \right]^2} dx - L_g = 6,387 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

Eigenlijk wordt er dus een te grote verkorting ($\Delta_{\text{relax}} + \Delta_{\text{schijnbaar}}$) gemeten. Een deel hiervan wordt veroorzaakt door de kromming. De grootte van dit deel wordt hieronder weergegeven in de verhouding tussen de schijnbare en de relaxatie verkorting.

$$\frac{\Delta_{\text{schijnbaar}}}{\Delta_{\text{relax}}} = 1,742 \cdot 10^{-4}$$

Procentueel gezien is dit:

$$\left(1 - \frac{\Delta_{\text{relax}} - \Delta_{\text{schijnbaar}}}{\Delta_{\text{relax}}} \right) \cdot 100 = 0,017 \%$$

De conclusie die hieruit getrokken kan worden is, dat er 0,017% te veel verkorting wordt gemeten. Deze waarde is zo klein dat het niet relevant is de foutcorrecties met betrekking tot de kromming mee te nemen in de berekeningen voor de restspanningen.

6 Uitvoering onderzoek

In de voorgaande hoofdstukken is de theorie achter de verschillende methoden beschreven. Tijdens het beproeven van de restspanningen blijken bepaalde punten niet helemaal zo te gaan als staat beschreven in de theorie. Ook zijn er een aantal bevindingen gedaan die van belang zijn als er nog een verder onderzoek naar restspanningen zou komen. Deze bevindingen worden in dit hoofdstuk beschreven.

6.1 Voorbereiding van de proefstukken

Voordat er begonnen kan worden met het beproeven moet ervoor gezorgd worden dat de proefstukken goed zijn voorbereid. Tijdens dit onderzoek is gebleken dat deze voorbereiding erg belangrijk is voor een dergelijk onderzoek om problemen te voorkomen tijdens het toepassen van de verschillende methoden.

6.1.1 Profiel voor het restspanningsonderzoek

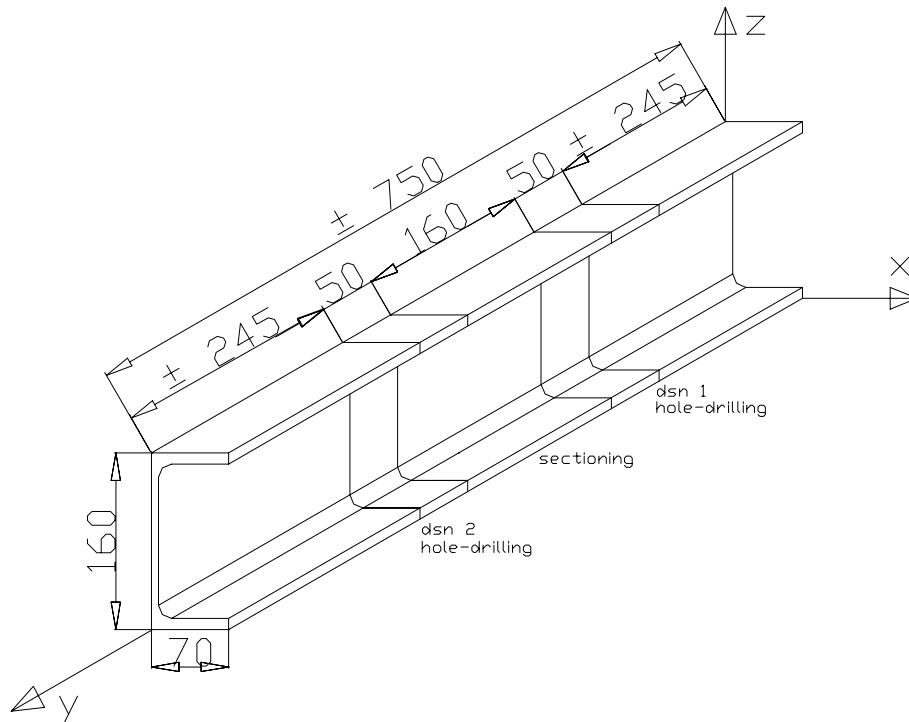
Doordat de beschikbare UPE 160 profielen gebruikt zijn voor de kipproef, moet erop gelet worden dat het te gebruiken profiel niet getordeerd is. De vervormingen in de profielen duiden erop dat de profielen tijdens de kipproef over de vloeigrens zijn belast, waardoor het profiel plastisch is vervormd. In hoofdstuk 2: restspanningen is gesteld dat plastisch vervormen restspanningen kan veroorzaken, dit houdt dus ook in dat plastisch vervormen de aanwezige restspanningen kan beïnvloeden. Drie van de vier aanwezige profielen zijn getordeerd, waardoor de proeven allemaal op één UPE 160 profiel gedaan moeten worden.

6.1.2 Volgorde en plaatsing van de methoden

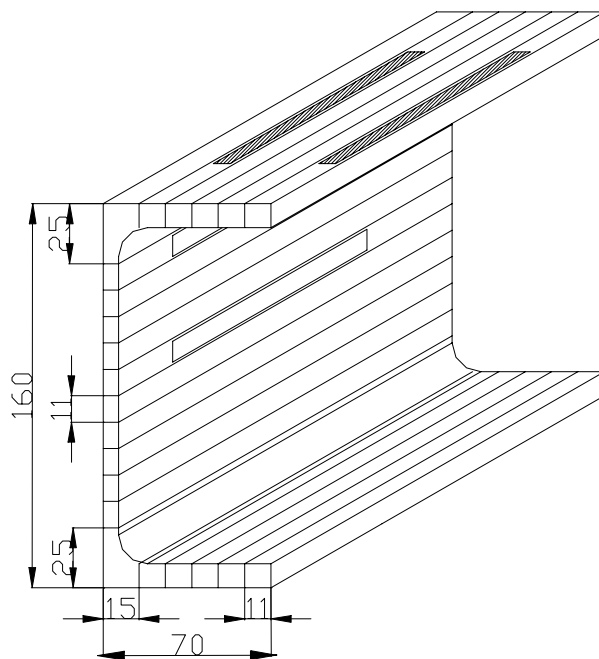
Op het overgebleven profiel moet zowel de hole-drilling methode als de sectioning methode worden toegepast. De plaatsing en de volgorde van de proeven is hierdoor erg belangrijk. De sectioning methode zal de restspanningen in het profiel het meest verstoren, daardoor is er gekozen om eerst de hole-drilling methode toe te passen voordat de sectioning methode wordt toegepast.

De plaats van de sectioning methode op het profiel wordt bepaald aan de hand van het uitdempingseffect. Vanaf de zaagsnede (in lengte richting) ongeveer 1,5 a 2 keer de hoogte van het profiel is het spanningsverloop weer normaal. Door het uitdempingseffect moet op het UPE 160 profiel een afstand van 240 mm tot 320 mm worden vrijgehouden waar geen restspanningsproeven op gedaan zullen worden. Het sectioning proefstuk moet 160 mm lang worden, als deze precies uit het midden van het profiel wordt gehaald is er aan beide kanten nog een stuk over van ongeveer 300 mm (zie figuur 14). Deze maatvoering wordt als eerste met een kraspen op het profiel aangegeven. Ook worden de te zagen strookjes op het profiel aangegeven. In de hoeken van het profiel worden de strookjes zo gekozen, dat zij niet door de ronding van de hoek heen gaan. Dit houdt in dat de hoekstrookje 20 mm bij 25 mm worden. In de flens blijft dan 50 mm ($70 - 20$) over, die verdeeld kan worden in 5 stroken van 10 mm. In het lijf blijft 110 mm ($160 - 2 \times 25$) over, die wordt verdeeld in strookjes van 11 mm (zie figuur 15). Ook kan er nog worden aangegeven waar de kogeltjes van de Pfender-meter

worden geslagen. Deze moeten een onderlinge lengteafstand hebben van 100 mm, dus dat houdt in dat deze allemaal op 30 mm van de uiteinden van het proefstuk moeten komen te zitten. In figuur 15 zijn ook vier vlakjes te zien (twee donker en twee licht), deze vlakken duiden erop dat er op deze plaats rekstroken komen te zitten (aan de buitenkant van het profiel), zodat er een vergelijking kan worden gemaakt tussen de metingen met de Pfendermeter en de metingen van de rekstroken.

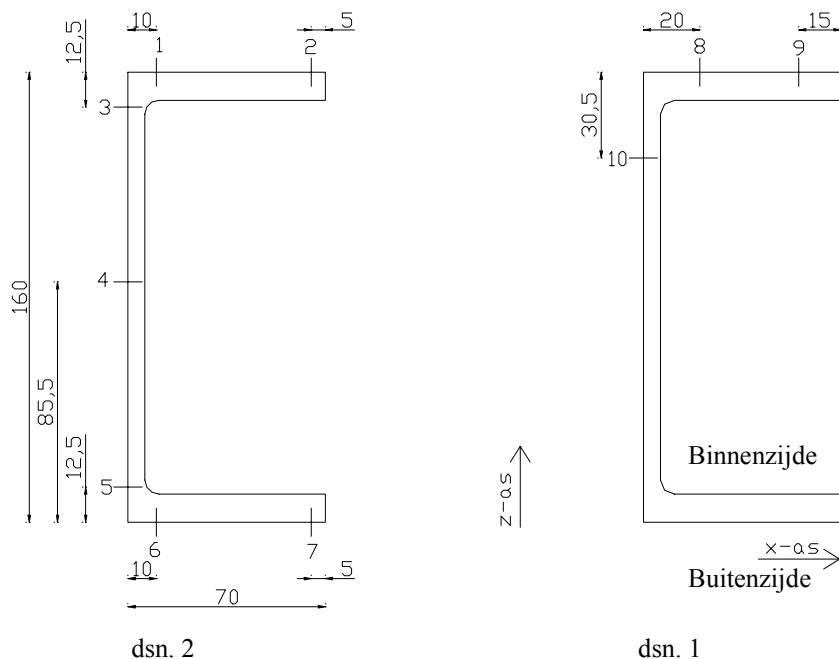


figuur 14: plaatsing van de methoden op het profiel



figuur 15: verdeling strookjes sectioning methode

Vervolgens wordt de plaats van de hole-drilling methode aangegeven op het profiel. Doordat de invloed op het omringende staal bij de hole-drilling methode erg gering zal zijn is er aangenomen dat deze op een afstand van 50 mm van het sectioning proefstuk gedaan kan worden. Doordat de gaatjes elkaar niet mogen beïnvloeden en de rekrozetten elkaar zouden overlappen, is er gekozen om twee doorsnedelijnen te nemen waar de proefneming op gedaan zal worden. Om deze waardes te kunnen vergelijken wordt er aan beide kanten van het proefstuk voor de section methode één doorsnedelijijn bepaald (zie figuur14). De nummers 1 t/m 10 in figuur 16 geven de volgorde en plaats van de geboorde gaatjes op de twee doorsneden aan. De plaats van de te boren gaatjes is zo bepaald dat deze in het midden van een strookje van de sectioning methode vallen, zodat de twee methoden met elkaar vergeleken kunnen worden.



figuur 16: verdeling van de gaatjes bij de hole-drilling methode

6.1.3 Reinigen van de proefstukken

Nu bepaald is waar de proefnemingen gedaan zullen worden, kan het profiel ten behoeve van de rekstroken worden schoongemaakt. Dit houdt in dat het staal moet worden ontdaan van de walshuid en worden ontvet. De walshuid moet verwijderd worden, omdat anders de rekstroken niet goed zouden kunnen blijven zitten en de mogelijkheid bestaat dat de walshuid eraf springt als er een rek of krimp in het staal optreedt. Het verwijderen van de walshuid wordt gedaan met een roterende slijptol. Wel moet er hierbij opgelet worden dat het staal niet te heet wordt, zodat de restspanningen worden beïnvloed, of dat er te diep geslepen wordt. Ten behoeve van de metingen met de Pfender-meter hoeft de walshuid er niet te worden afgehaald, dus alleen de plekken waar de rekstroken komen te zitten moeten goed worden gereinigd. Het ontvetten van de geschuurde plekken wordt gedaan met pure alcohol. Dit zorgt ervoor dat de lijm tussen de rekstroken en het staal goed kan hechten.

6.2 Hole-drilling methode

Als de voorbereiding van het profiel helemaal gedaan is, kan er begonnen worden met het toepassen van de verschillende methoden. Als eerste wordt de hole-drilling methode toegepast, omdat deze de restspanningen in het profiel het minst zal beïnvloeden. De bespreking van de hole-drilling methode zal gedaan worden aan de hand van een stappenplan.

Stap 1: Plaatsen rekstrookjes

Tijdens de voorbereidingsfase is aangegeven waar de rekrozetten (TML type FRS-2 van Tokkyo Sokki Kenkyujo CO., Ltd.) moeten komen. De rekrozetten bestaan uit drie rekstroken die onder een hoek van 0, 45 en 90 graden zitten (bijlage IV: foto 3). De rekrozetten worden zo gelijmd dat in de flenzen de rekstrook in de x-richting (0 graden) van de rozet in de dwarsrichting van het profiel komt te liggen (figuur 10 en 14), voor het lijf ligt deze rekstrook in de z-richting (0 graden) en de rekstrook in de y-richting (90 graden) in de lengterichting van het profiel komt te liggen.

Stap 2: Aanbrengen standaard

De tweede stap is de standaard voor de microscoop en de boormachine op het proefstuk te lijmen. Dit gebeurt met de lijm X60, deze verhardt snel, is zeer hard, maar toch goed weer te verwijderen, nadat de proefnemingen gedaan zijn. Het meest efficiënt werkt dit als de standaard zo gemonteerd wordt dat deze gebruikt kan worden voor meerdere proefnemingen zonder deze steeds te moeten verplaatsen.

Stap 3: Stellen standaard

Nu het voetstuk (standaard) op het profiel is gelijmd moet deze nog goed gesteld worden boven de rekrozet. Het stellen wordt gedaan door de microscoop in de standaard te plaatsen (beetje naaimachineolie gebruiken om dit soepel te laten verlopen). Stel vervolgens de standaard op de juiste plaats door het assenkruis op de microscoop gelijk te stellen met het assenkruis op de rekrozet. Als de assenkruizen boven elkaar zijn gezet moet de standaard met behulp van de stelbout worden vastgezet. Er moet hierbij opgelet worden dat door het aandraaien van de bout de microscoop niet verplaatst ten opzichte van het assenkruis op de rekrozet. Tenslotte moet de hoogte nog gewijzigd worden. Deze moet op ongeveer 1,5 mm van het proefstuk staan. Daarvoor werkt een plaatje van die dikte dat onder het geheel geschoven kan worden het best.

Stap 4: Opmeten van de 0 waardes

Voordat er begonnen kan worden met het boren van de gaatjes moeten de waardes van de rekrozetten worden genoteerd. Deze waardes worden de 0-metingen genoemd. Dit houdt in dat als er later metingen gedaan worden, de 0-metingen er altijd vanaf getrokken moeten worden om de juiste verlenging of verkorting te weten. Al deze 0-waardes moeten op een datasheet worden ingevoerd, zodat deze later makkelijk te verwerken zijn.

Stap 5: Boren van het gaatje

Nu de standaard op de juiste plaats staat en de 0-meting is gedaan kan de microscoop uit de standaard genomen worden de boormachine erin (wederom met behulp van naaimachineolie). De boormachine moet vervolgens aan de toevoerapparatuur (aluminiumoxide poeder en perslucht) worden aangesloten en de stofzuigerslang moet aan de boormachine worden aangesloten. Deze zorgt ervoor dat het poeder dat overblijft niet op het proefstuk blijft liggen, maar netjes weggezogen wordt. Tenslotte moet er nog gecontroleerd worden of de instellingen allemaal juist zijn.

De instellingen voor deze proef zijn:

- toevoer aluminiumpoeder 7 (stand van de knop);
- luchtdruk op 5,52 bar;
- boortijd 4 minuten;
- luchttoevoer 10 seconden.

Nadat dit alles gedaan is kan er begonnen worden met het boren. Dit is allemaal van tevoren ingesteld, dus het systeem hoeft alleen maar aangezet te worden (bijlage IV: foto 4).

Stap 6: Opmeten van het geboorde gat

Voor de berekeningen moeten de waarden van de rekstroken na het boren bekend zijn, de diameter van het geboorde gat en de diepte van het gat. De laatste twee worden wederom met de microscoop opgenomen. De boormachine moet dus weer uit de standaard gehaald worden en de microscoop moet er weer in geplaatst worden. De diameter is vervolgens met het beweegbare assenkruis in de microscoop te bepalen. De diepte van het gat wordt bepaald door eerst scherp te stellen op de bovenkant van het gat en daarna op de onderkant van het gat. Het verschil tussen de twee waarden geeft de diepte van het geboorde gat. De verlengingen en verkortingen die zijn opgetreden kunnen van het elektronische meetstation worden afgelezen. Al deze metingen worden drie keer uitgevoerd, zodat het opvalt als er bij bepaalde metingen fouten zijn gemaakt en om een rekenkundig gemiddelde te kunnen bepalen. Natuurlijk moeten al deze metingen ook weer op de datasheet worden ingevoerd (bijlage IV: foto 5).

Stap 7: Berekenen van de restspanningen

Nu alle gegevens bekend zijn kunnen de restspanningen worden berekend [13]. De formules die gebruikt zijn voor het berekenen van de restspanningen zijn degene van Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. Dit is de fabrikant van de gebruikte rekrozetten (FRS-2), en dus zijn deze formules het best toe te passen voor dit specifieke onderzoek (zie paragraaf 4.2 Hole-drilling methode; berekenen van de restspanningen).

In deze formules komt de materiaalafhankelijke elasticiteitsmodulus naar voren. In hoofdstuk 5 werd deze aangenomen op 210000 N/mm^2 , maar na het doen van trekproeven (bijlage II) is gebleken dat de elasticiteitsmodulus van de gebruikte profielen 200000 N/mm^2 is.

6.3 Sectioning methode

Als er geen proeven meer gedaan hoeven te worden met de hole-drilling methode kan er begonnen worden met de sectioning methode. Zeer belangrijk is het dat alles in één keer goed zal moeten, want doordat het een destructieve methode is kan een foutje niet zomaar hersteld (over gedaan) worden. Ook voor de sectioning methode is een stappenplan gemaakt.

Stap 1: Plaatsen van de meetkogeltjes en de rekstrookjes

Om de verlenging te kunnen bepalen wordt er gebruik gemaakt van de Pfender-meter (mechanische meetmethode) en rekstrookjes (elektronische meetmethode). Voor de Pfender-meter moeten er in elk strookje kogeltjes in het proefstuk worden gedrukt op een afstand van 100 mm van elkaar. Dit houdt in dat er dus 30 mm vanaf de kopeinden een kogeltje komt te zitten op elk aangegeven strookje. In de buitenomtrek worden de kogeltjes in het staal zelf gedrukt en voor de binnenomtrek worden de kogeltjes in kleine stalen plaatjes gedrukt en vervolgens op het proefstuk geplakt. De Pfender-meter heeft een nauwkeurigheid tot micrometers.

Naast deze Pfender-meter worden er ook rekstrookjes geplaatst. Op het proefstuk worden 4 rekstrookjes van 60 mm geplaatst. Deze rekstrooken worden tussen de kogeltjes van de Pfender-meter geplakt op het eerste, het vijfde, het zevende en het elfde strookje (figuur 15).

Tenslotte moeten de strookjes ook nog voorzien worden van een nummer, zodat na verzagen nog steeds duidelijk is, waar welk strookje in het profiel zat. Tijdens deze proef is dit gedaan met een watervaste stift, maar tijdens het vonken bleek dat dit erg onduidelijk wordt. Een betere optie is om de markering met een elektronische schrijver in het staal te branden.

Stap 2: Opmeten en controleren

Voordat er gezaagd mag worden is het zeer belangrijk dat de afstanden van de kogeltjes en de spanning in de rekstrookjes nauwkeurig worden genoteerd. Deze moeten op de datasheet worden ingevoerd. Voor de Pfender-meter geldt dat er 3 keer dezelfde meting gedaan moet worden, door dit te doen krijg je een zo nauwkeurig mogelijke meting. Bij de rekstrookjes moet eerst de zwevende waarde worden genoteerd (de waarde als er nog geen rekstrookje is aangesloten) en vervolgens de waarde als het rekstrookje is ingeplugd. Als het rekstrookje is ingeplugd, moet de meting na enige tijd worden gedaan, zodat de rekstrook kan stabiliseren. Het rekstrookje wordt namelijk iets warmer als het aangesloten is op de meetapparatuur (elektrische stroom), waardoor de elektrische weerstand van het rekstrookje iets verandert en deze weerstand vervolgens de meetresultaten beïnvloedt.

Stap 3) Zagen van het proefstuk

Uit het profiel kan nu het proefstuk worden gezaagd (bijlage IV: foto 7). Dit wordt gedaan met de vonkmachine. Er is gekozen voor de vonkmachine, omdat deze zeer nauwkeurig kan zagen met een zaagsnede van ongeveer 0,3 mm en hierdoor worden de restspanningen nauwelijks beïnvloed. Bij het zagen van het proefstuk worden de twee zijstukken, waarop de

hole-drilling methode is uitgevoerd, verwijderd. Deze zijstukken zijn later nog gebruikt bij trekproeven om de elasticiteitsmodulus van het profiel te bepalen (bijlage II).

Stap 4) Tweede meting

Nu het proefstuk op maat is gezaagd kunnen we gaan bekijken of de restspanningen al invloed hebben uitgeoefend op het proefstuk (dit is een tussentijdse meting). Wederom zullen alle strookjes opgemeten moeten worden met de Pfender-meter (dit houdt in elke meting 3 x doen voor een goede meting) en de rekstrookjes. Ook deze gegevens moeten in de datasheet worden ingevoerd.

Stap 5) Zagen van de strookjes

Met behulp van de vonkmachine zal het proefstuk worden verzaagd in kleine strookjes. Doordat de draad van de vonkmachine zeer dicht langs de rekstrookjes gaat moet er goed op gelet worden dat deze de rekstrookjes niet raakt, want anders gaat de machine erg haperen, waardoor de strookjes enigszins worden aangetast (bijlage IV: foto 8). Er moet dus rekening worden gehouden met de rekstrookjes, zodat deze geen verkeerde waardes gaan afgeven door de vloeistof en achterblijvende splinters van het staal. Daarom moet er over de contacten van de rekstrookjes een laag was worden aangebracht. De rekstrookjes zelf liggen door het plakken al in een bed van lijm (bijlage IV: foto 9).

Stap 6) Derde meting

Nu het proefstuk is gezaagd in smalle strookjes kunnen we ze voor de derde keer opmeten. Zoals in hoofdstuk 5 is beschreven, is de kromtestraal van de strookjes niet relevant. Wel zullen bij de laatste meting de breedtes en de diktes van de strookjes moeten worden opgemeten.

Stap 7) Berekenen van de spanning

Aan de hand van de bepaalde verkorting van de individuele strookjes kunnen de restspanningen in het profiel worden berekend. Voor dit berekenen van de restspanningen kan de wet van Hooke worden gebruikt (zie paragraaf 4.3 Sectioning methode; berekenen van de spanning). In deze formule wordt naast de rek ook de elasticiteitsmodulus gebruikt. Deze elasticiteitsmodulus is een materiaalafhankelijke factor, en uit de gedane trekproeven (bijlage II) blijkt dat de elasticiteitsmodulus voor dit profiel 200000 N/mm^2 is.

De strookjes hebben geen relevante kromming gekregen, waardoor het niet nodig is om de foutcorrecties met betrekking tot de kromming toe te passen.

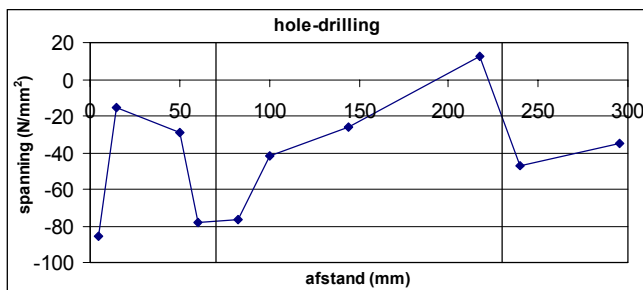
De andere foutcorrecties zijn ook niet toe te passen, omdat er gebruik is gemaakt van de Pfender-meter en niet de Whittemore-meter. De beschreven foutcorrecties zijn specifiek voor de Whittemore-meter en van de Pfender-meter is niet bekend of daar ook foutcorrecties voor zijn.

7 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de twee methodes behandeld. De resultaten worden weergegeven met grafieken. De datasheets en de berekeningen zelf zijn in de bijlage III geplaatst.

7.1 Hole-drilling methode

In figuur 17 is het resultaat van de berekening van de restspanningen ten opzichte van de afstand op het profiel weergegeven. De datasheets en de berekeningen staan in bijlage III. Op de verticale as is de spanning in N/mm^2 weergegeven en op de horizontale as is de lengte van de buitenomtrek van het profiel weergegeven. Fictief gezien is het profiel dus platgeslagen en langs een liniaal gelegd. Dit houdt dus in dat op afstand 70 mm en 230 mm zich een hoekpunt bevindt, dit is in de grafiek aangegeven met een verticale lijn.



figuur 17: restspanningen hole-drilling methode

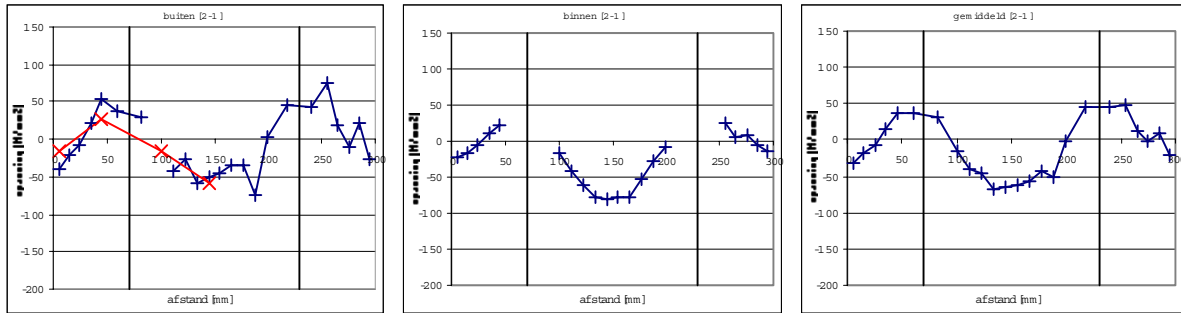
7.2 Sectioning methode

De datasheets en de berekeningen van de sectioning methode zijn bijgevoegd in bijlage III. In deze paragraaf zijn de uitwerkingen van deze tabellen in de grafieken weergegeven. In de titel van deze grafieken staan drie termen: buiten, binnen en gemiddeld. Dit slaat op de kant van het profiel waar de metingen op gedaan zijn. Zo heeft een profiel een buiten- en een binnen zijde (figuur 16). De grafiek met het gemiddelde geeft het gemiddelde tussen de waarden op de buitenomtrek en de binnenomtrek. Deze grafiek zou dus het beste beeld moeten geven van wat restspanningen zijn in het profiel. Ook staan er nog een paar nummers in de titel. Deze staan voor de metingen die gedaan zijn. Meting 1 is de zogenoemde 0-meting (het profiel is dus helemaal in tact). Meting 2 is de meting die gedaan is nadat de twee zijkanten van het profiel zijn gehaald en tenslotte meting 3 geeft de meting aan die gedaan is nadat de strookjes zijn gezaagd.

Vertikaal staat in de grafiek de restspanning weergegeven en horizontaal de afstand waar de meting gedaan is op het profiel Dit is dezelfde als bij de hole-drilling methode. De blauwe lijn in de grafieken is de meting met behulp van de Pfender-meter en de rode lijn in de grafieken is de meting gedaan met de rekstroken. Deze is alleen in de grafiek van de buitenomtrek weergegeven, omdat de rekstroken alleen op de buitenomtrek zijn geplaatst. Er kan hier dus geen gemiddelde van berekend worden, maar er kan wel een aardige vergelijking gemaakt worden tussen de resultaten met de Pfender-meter en de rekstroken.

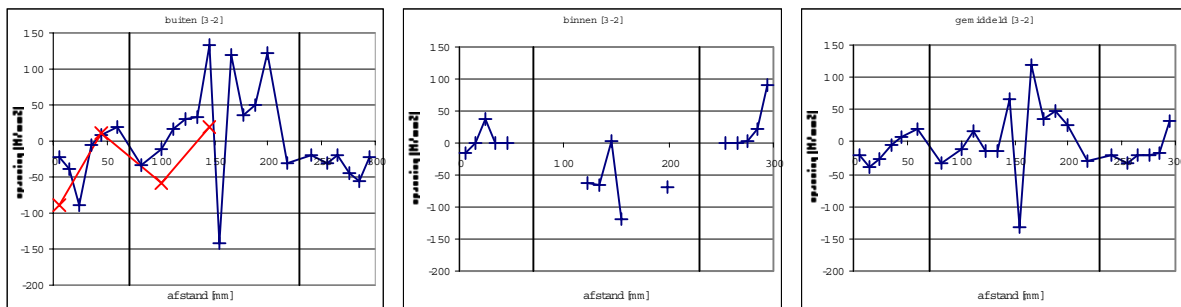
In de figuren zijn steeds drie grafieken weergegeven. De eerste geeft het resultaat over de buitenomtrek, de middelste geeft het resultaat over de binnenomtrek en de derde tenslotte geeft het gemiddelde tussen de eerste twee grafieken. Als in één van de eerste twee grafieken een resultaat niet is ingevuld, wordt in de grafiek van het gemiddelde de waarde van de andere van de eerste twee overgenomen.

In figuur 18 worden de grafieken weergegeven, waarbij het verschil van de 0-meting en de meting nadat de zijstukken zijn verwijderd is weergegeven.



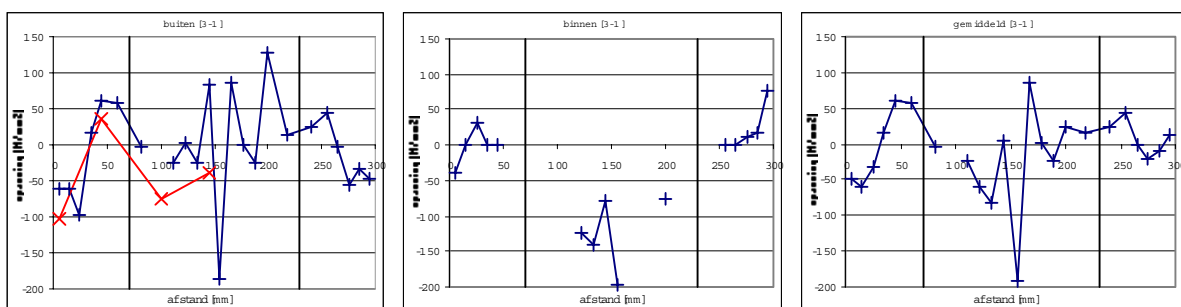
figuur 18: Restspanningen sectioning (verschil tussen de 1^{ste} en de 2^{de} meting)

In figuur 19 staan de grafieken, waarin het verschil is verwerkt van de derde meting (na verzagen strookjes) en de tweede meting.



figuur 19: Restspanningen sectioning (verschil tussen de 2^{de} en de 3^{de} meting, 1^{ste} x)

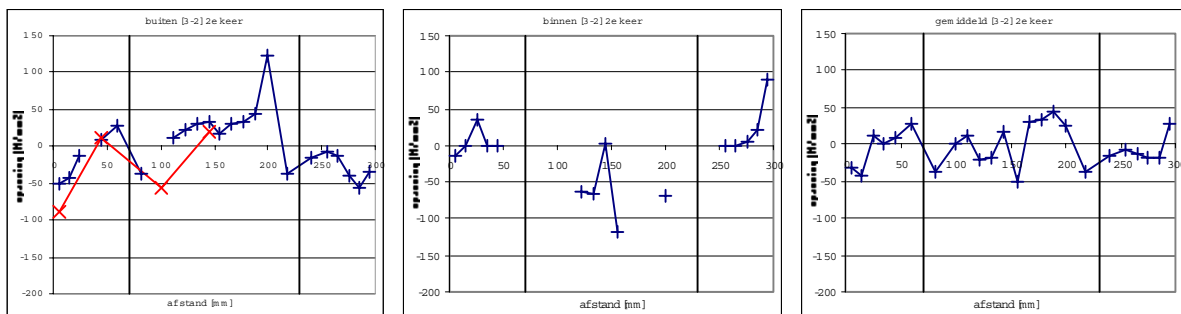
In figuur 20 is het verschil tussen de derde en de eerste meting genomen. De derde grafiek van figuur 20 geeft dus de uiteindelijke restspanning, gemiddeld over de binnen- en buitenomtrek weer, die met behulp van de sectioning methode is bepaald.



figuur 20: Restspanningen sectioning (verschil tussen de 1^{ste} en de 3^{de} meting, 1^{ste} x)

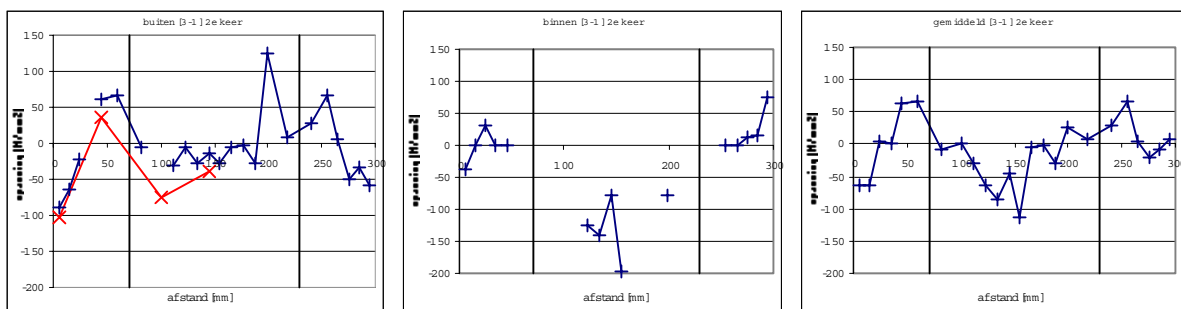
De meting van de buitenomtrek is vervolgens nog een tweede keer opgemeten. De tweede meting een dag later en de derde meting de dag daarop. Dit is gedaan om te bekijken of dit nog invloed had als de stroken een tijdje tot rust waren gekomen, en om te bekijken of de pieken in de meting (figuur 20) werkelijk daar aanwezig zijn, of dat er misschien een fout is gemaakt tijdens het opmeten. De binnenomtrek is in verband met de problemen die optraden bij de kogeltjes van de Pfender-meter niet nog een keer opgemeten, maar gewoon overgenomen uit figuur 19 en 20, de tweede grafiek

In figuur 21 is weer de vergelijking tussen de tweede en de derde meting weergegeven. Dit is dus weer alleen maar een tussenstap. Wel is hier al te zien dat er al veel minder pieken in zitten in vergelijking met de derde meting van de dag ervoor. De waarden van de rekstroken waren nagenoeg onveranderd met de dag ervoor.



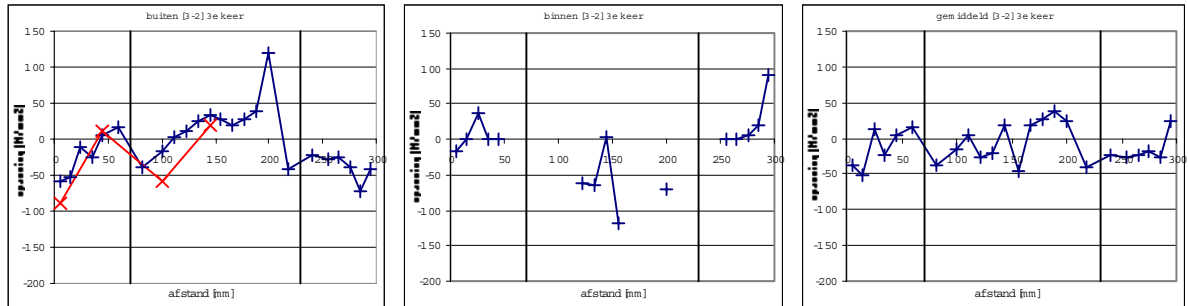
figuur 21: Restspanningen sectioning (verschil tussen de 2^{de} en de 3^{de} meting, 2^{de} x)

Figuur 22 geeft in grafiek drie weer de uiteindelijke restspanning, berekend nadat de strookjes een dag rust hebben gekregen.

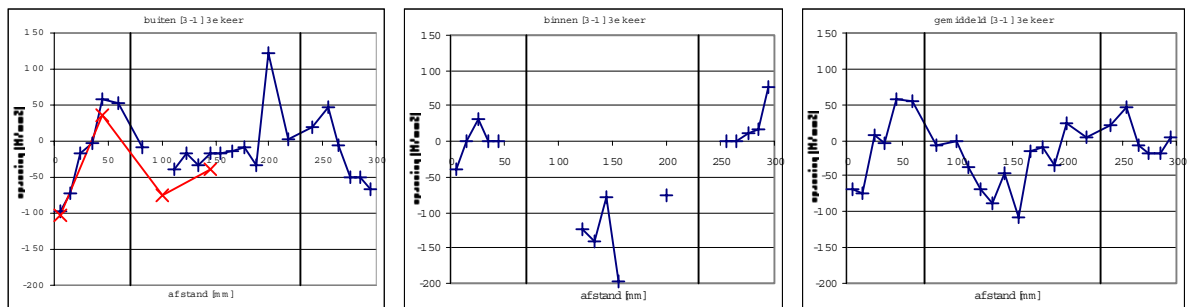


figuur 22: Restspanningen sectioning (verschil tussen de 1^{ste} en de 3^{de} meting, 2^{de} x)

In figuur 23 en figuur 24 wordt voor de derde keer gemeten langs de buitenomtrek. Hier is ook duidelijk te zien dat er minder pieken zijn gemeten dan bij de eerste keer.



figuur 23: Restspanningen sectioning (verschil tussen de 2^{de} en de 3^{de} meting, 3^{de} x)



figuur 24: Restspanningen sectioning (verschil tussen de 1^{ste} en de 3^{de} meting, 3^{de} x)

8 Discussie

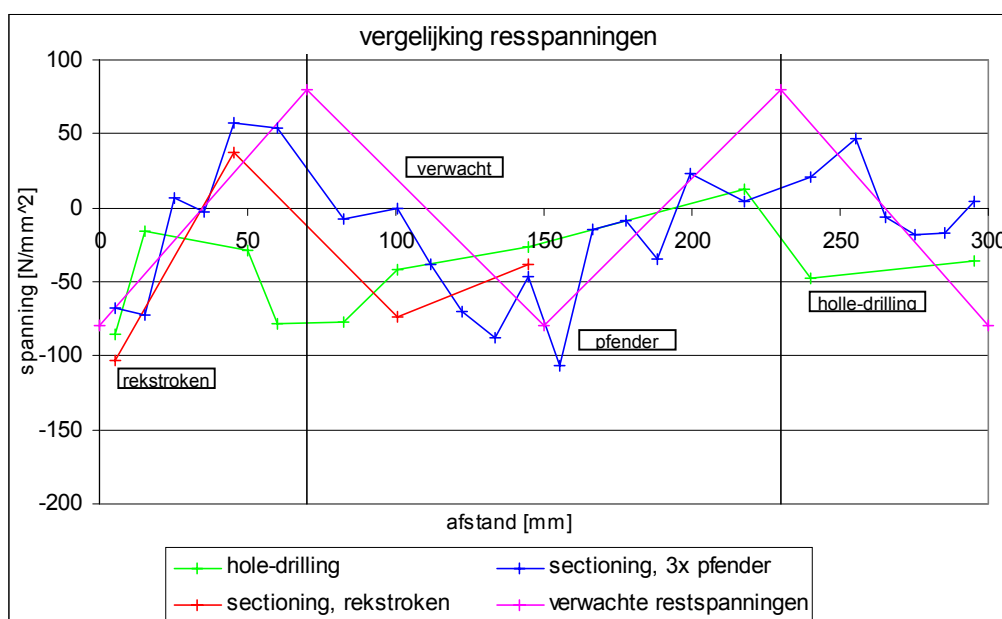
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de verschillende methoden besproken en met elkaar vergeleken. Ook kwamen er tijdens het onderzoek een aantal problemen naar voren die het onderzoek bemoeilijkten, maar er ook voor zorgden dat de resultaten niet altijd goed geïnterpreteerd konden worden.

8.1 Vergelijking van de resultaten

Om de vergelijking tussen de verschillende methoden en onderzoeksresultaten goed te kunnen maken zijn de resultaten in één grafiek verwerkt (figuur 25). De paarse lijn in het figuur geeft de verwachte restspanningen aan van 0,3 x de vloeispanning.

De sectioning methode is uitgevoerd met zowel de Pfender-meter als met de rekstroken, daarbij zijn de metingen met de Pfender-meter drie keer uitgevoerd, en de rekstroken één keer. Voor de rekstroken bleven de metingen nagenoeg gelijk, en bij de metingen met de Pfender-meter is het beste resultaat opgenomen, derde meting (figuur 25, blauwe lijn), want zo blijft figuur 25 overzichtelijker. De resultaten van de rekstroken zijn weergegeven met de rode lijn. Bij de sectioning methode valt op dat de waardes van zowel de rekstroken als de metingen met de Pfender-meter niet exact kloppen met de verwachte restspanningen, maar toch wel redelijk in de buurt komen, met betrekking tot de plaats en de grootte van de extreme resultaten. Ook is de verwachte symmetrie redelijk in de figuren terug te vinden.

De resultaten van de hole-drilling methode zijn in figuur 25 weergegeven met de groene lijn. De resultaten hiervan zijn wel enigszins opvallend, want deze komen totaal niet overeen met de verwachte resultaten. Dit houdt dan ook in dat deze resultaten ook niet overeen komen met de resultaten van de sectioning methode, waardoor een vergelijking zeer moeilijk zal gaan.



figuur 25: vergelijking van de resultaten

8.2 Problemen tijdens het onderzoek

Eerder is er al vermeld dat er tijdens de beproevingen problemen, of onvoorziene omstandigheden ontstonden, die ervoor zorgden dat de resultaten niet altijd goed te interpreteren, of zelfs tot stand te brengen zijn. In paragraaf 7.1 zijn de verschillende methoden vergeleken met elkaar en met de verwachte resultaten. Hier worden de opgetreden problemen beschreven.

Hole-drilling methode

Zoals in paragraaf 8.1 is vermeld, is het resultaat enorm afwijkend van de verwachte resultaten. De reden hiervoor is moeilijk te bepalen, omdat het uitvoeren van de metingen op zich redelijk voortvarend zijn verlopen. In hoofdstuk 6 is het stappenplan genoemd waarmee de metingen gedaan zijn. Dit stappenplan is een uitwerking van de documenten die bij de apparatuur meegeleverd waren, en deze stappen zijn gewoon gevolgd tijdens de beproevingen.

Buiten dat de metingen volgens een standaard proces zijn gedaan, is er wel een keuze gemaakt betreffende het model van uitwerken van de metingen. Er zijn algemene rekenmodellen en rekenmodellen voor specifieke rekrozetten. Voor het uitwerken van de resultaten is gekozen om de rekenmodellen van de fabrikant te gebruiken, namelijk Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. (bijlage I). Deze formules zijn speciaal voor de hole-drilling proef met deze specifieke rekrozetten gemaakt, en deze zouden dus de beste resultaten moeten geven.

Een andere eventuele mogelijkheid is dat de verstoring van de zaagsneden aan de buitenkanten van het profiel (profiel in oorspronkelijke staat, lengte van 750 mm) niet genoeg uitgedempt zijn, waardoor het spanningsverloop op het gebied van de proefneming anders is dan wanneer de proefneming nog meer naar het midden van het profiel zou zijn gedaan. Om deze mogelijke fout weg te nemen zou de plaats van de proefneming op 2 à 2,5 keer de hoogte in de lengte genomen moeten worden.

Nog een mogelijk probleem kan zijn dat de restspanningen in het gebruikte profiel al gewijzigd zijn door de eerder gedane proeven. De profielen zijn namelijk in proeven gebruikt om de kipstabiliteit te bekijken. Tijdens de voorbereiding van dit onderzoek bleek dat een aantal profielen al een vervorming (tordering) hadden. Dit duidt op een wijziging van de restspanningen. Dit mogelijke probleem is te verhelpen, door ongebruikte profielen te gaan beproeven.

Sectioning methode

Bij de sectioning methode zijn redelijk wat problemen naar voren gekomen, en deze hadden vooral te maken met het gebrek aan specifieke documentatie. Het was de eerste keer dat deze proef op de Technische Universiteit Eindhoven is uitgevoerd, en er moest met vallen en opstaan gezocht worden naar de beste methoden en technieken.

Één van de lastigste onderdelen van de sectioning methode was het bepalen van de techniek om de kogeltjes van de Pfender-meter op het profiel te plakken. Op de buitenomtrek en het lijf van de binnenomtrek zijn de kogeltjes in het staal gedrukt, en op de flenzen werden stalen plaatjes voorzien van een kogeltje geplakt. Op zich ging deze methode goed, maar bracht later tijdens het vonken toch enige problemen met zich mee.

Ten eerste begon het staal bij de kogeltjes na het vonken iets te roesten, wat mogelijk de resultaten van de metingen iets heeft beïnvloed. Misschien moet er een beschermlaagje van was worden aangebracht voor er met het vonken begonnen wordt, maar dan moet erop gelet worden dat de was vervolgens de metingen niet beïnvloedt.

Het tweede, en veel belangrijker punt was dat een aantal kogeltjes, zowel in het staal gedrukte, als geplakte kogeltjes los lieten, zodat er geen resultaat meer te bepalen was. Dit is in de resultaten goed te zien aan de lege plekken in de grafieken. Het valt op dat dit voornamelijk bij de geplakte plaatjes is voorgekomen. De oorzaak voor het loslaten van de in het profiel gedrukte kogeltjes is dat deze niet hard genoeg in het staal zijn gedrukt, en misschien mede door het ontstaan van een roestlaagje loslaten. Voor de geplakte kogeltjes is de oorzaak duidelijker. De plaatjes die op het profiel zijn geplakt overlappen de zaaglijnen (vonklijnen) op het profiel. Met andere woorden, de vonkmachine moest door de plaatjes heen zagen. Dit zou geen probleem moeten zijn, aangezien zowel het profiel als de plaatjes elektrisch geleidend zijn. Het probleem zit in de lijmlaag ertussen en de manier waarop de sommige plaatjes gelijmd zitten. De plaatjes zaten met lijm geplakt, waar de vonkmachine doorheen kon komen (proefsgewijs onderzocht), maar er ontstaat wel enige elektrische weerstand. Deze weerstand kan ervoor gezorgd hebben dat de plaatjes loslaten, of dat er haperingen in het strookje te zien zijn (bijlage IV: foto 10). Bij sommige plaatjes was nog te zien dat niet alleen een lijmlaagje, maar ook een luchtlaagje tussen de plaatjes en het profiel zit. Dit luchtlaagje zorgt ervoor dat het plaatje niet meer geleidt, waardoor de vonkmachine in het plaatje blijft steken en het er vervolgens met kracht af zal drukken, of dat de vonkmachine van zijn zaaglijn af zal lopen en rond het stalen plaatje zijn weg zal zoeken (bijlage IV: foto 11). Hieruit blijkt dus dat het plakken van de plaatjes niet echt een goede oplossing is. De meest ideale oplossing is om de kogeltjes in het profiel te slaan, en anders zou het lijm proces verbeterd moeten worden. Hierbij kan gedacht worden aan een beter geleidende lijm, kleinere plaatjes die de zaaglijn niet overlappen, of gewoon grotere strookjes nemen, zodat de zaaglijn niet meer wordt overlapt. Zijn deze oplossingen niet mogelijk, dan kan er misschien gebruik gemaakt worden van de Whittemore-meter, of van rekstroken. Voor de Whittemore-meter geldt dan nog wel dat de gaatjes aan de binnenkant van de flenzen moeten worden geboord, en bij de rekstroken moet erop gelet worden dat deze niet over de zaaglijnen heengaan. Dit is uitvoeringstechnisch ook niet ideaal, dus het meest verstandig is het om een betere methode te vinden om de kogeltjes van de Pfender-meter in het profiel te slaan.

Het plakken van de rekstroken moet zeer nauwkeurig gebeuren. Één rekstrook was iets over de zaaglijn geplakt, wat tot gevolg had dat de vonkmachine erg stoterig begon te zagen (bijlage IV: foto 12). Dit heeft waarschijnlijk ook invloed gehad op de gemeten resultaten. Zeer belangrijk is de maatvoering, voor waar de rekstroken geplaatst moeten worden, want een kleine afwijking in de maatvoering kan al tot gevolg hebben dat de vonkmachine niet goed zijn werk kan doen.

Ook kan er nog een afwijking optreden door het gebruik van de Pfender-meter. Aangezien de proefneming van de sectioning methode enkele weken duurt is het logisch dat de Pfender-meter ook voor andere proeven gebruikt wordt. De afmeting van de Pfender-meter wordt dan wel eens veranderd van 100 mm naar 60 mm of 300 mm, en vervolgens weer terug. Dit kan op zich erg precies gebeuren, maar zo'n verandering levert soms net een aantal micrometers verschil op. Voor de meeste metingen is dit niet zo heel erg, maar voor de sectioning methode kan dit aardige verschillen opleveren. Voor de sectioning methode is het dus het meest ideaal als de Pfender-meter niet voor andere proeven zou worden gebruikt.

Nog een mogelijk punt waardoor er fouten optreden in de waardes zit in de keuze om de foutcorrecties niet op te nemen in de formules. Een aantal van die foutcorrecties zijn specifiek voor een bepaald soort meetinstrument, de Whittemore-meter. De foutcorrecties voor de kromming zijn volgens de berekeningen in hoofdstuk 5 niet nodig, omdat deze zo klein is dat deze niet relevant is. Is er toch om de één of andere reden een kromming in een staafje, dan zal deze bij de faculteit werktuigbouwkunde opgemeten moeten worden, aangezien het bouwkunde laboratorium heeft geen apparatuur bezit om dit te meten.

Buiten de bovengenoemde problemen kunnen de resultaten ook hier beïnvloed zijn door de zaagsneden en de tordering ten gevolge van de eerder gedane proeven, zoals bij de hole-drilling methode is besproken. Een langer, nog niet eerder gebruikt profiel zal misschien betere resultaten geven.

9 Conclusies en aanbevelingen

In dit laatste hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen gegeven betreffende het onderzoek naar de restspanningen in UPE 160 profielen, bepaald met behulp van de hole-drilling methode en de sectioning methode.

9.1 Conclusies

Hieronder worden de conclusies van het onderzoek voor hole-drilling methode en de sectioning methode gegeven. Daarbij wordt ook op de problemen ingegaan, die de resultaten van de beproevingen hebben kunnen beïnvloeden.

Hole-drilling methode

De resultaten van de hole-drilling methode laten nog het één en ander te wensen over, en er moet nog eens grondig gekeken worden naar de manier waarop de proef is uitgevoerd. Het leek erop alsof de proeven zonder problemen zijn doorlopen, met behulp van de handleiding van de apparatuur, maar misschien is het verloop toch nog iets anders gegaan dan eigenlijk de bedoeling was.

Mogelijke problemen van de hole-drilling methode zijn:

- Keuzes van de toegepaste formules;
- Invloeden van eerder gedane proefnemingen en verzagingen.

Sectioning methode

De resultaten van de sectioning methode geven een redelijk beeld van het verloop van de restspanningen in het profiel (figuur 25), die overeenstemmen met het verwachte verloop. Dit geldt zowel voor de resultaten van de rekstroken als voor de resultaten van de Pfender-meter. De restspanning in de uiteinden (kopeinden) van de flenzen en het midden van het lijf hebben een drukspanning van rond de 70 N/mm^2 en de hoekeinden van het profiel hebben een trekspanning van rond de 70 N/mm^2 . Dit is ongeveer één derde van de vloeispanning, en dat lijkt dus op de waardes die in het rapport van het Duitse onderzoeksinstituut [3] zijn opgenomen.

Mogelijke problemen van de sectioning methode zijn:

- Roestvorming bij de kogeltjes;
- Loslaten van sommige gedrukte en de geplakte kogeltjes;
- Hapering door de geplakte kogeltjes en rekstroken;
- Gebruik van de Pfender-meter voor andere proeven;
- Niet toepassen van de foutcorrecties;
- Invloeden van eerder gedane proefnemingen en verzagingen.

9.2 Aanbevelingen

Tenslotte worden er nog enkele aanbevelingen gedaan, waardoor de resultaten van de hole-drilling methode en de section methode beter te interpreteren zijn, maar ook nauwkeuriger zullen worden.

Hole-drilling methode

- Proeven op langere (minimaal 1 m), ongebruikte stukken profiel doen;
- Verschillende soorten rekrozetten toepassen en vergelijken;
- De metingen en proeven altijd op dezelfde manier uitvoeren.

Sectioning methode

- Nummers van de strookjes met een elektrische schrijver in het profiel branden;
- De maatvoering goed en nauwkeurig doen;
- Proeven op langere (minimaal 1 m), ongebruikte stukken profiel doen;
- De kogeltjes beter gecontroleerd bevestigen op het proefstuk (drukken / lijmen);
- Eventueel meten met rekstroken of de Whittemore meter;
- Meenemen van de foutcorrecties van de meetinstrumenten;
- De metingen en proeven altijd op dezelfde manier uitvoeren;
- Na aansluiten van de rekstroken, deze de tijd geven te stabiliseren.

Niet-destructieve methode

Volgens de literatuur is de röntgen diffractie methode van de niet-destructieve methode de meest betrouwbare en momenteel veel toegepaste methode, waardoor het zeker de moeite waard is de UPE 160 profielen met deze methode te beproeven.

Literatuurlijst

- [1] Dagowin la Poutré,
Lateral torsional buckling of channel shaped sections
Eindhoven, TUE BCO 99.06, 1999

- [2] Prof. Ir. J.W.B. Stark,
Staalconstructies 2
Faculteit Bouwkunde Vakgroep Constructief Ontwerpen
Technische Universiteit Eindhoven

- [3] Forschung für die Praxis P 251
Bemessung von Einfeld- und Durchlaufträgern aus rundkantigem U-Stahl (DIN 1026)
nach dem Traglastverfahren unter Berücksichtigung einer Drehbettung und einer
Normalkraftbelastung
Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.

- [4] L.S. Blake,
Civil Engineer's Reference Book, Steel as a Structural material
London, Butterworths, 1989

- [5] Overall buckling of heavy rolled I-section columns
Third International Colloquium, Stability of Metal Structures,
Toronto, George Winter Memorial Session, SSRC-ECCS-NCE, 1983

- [6] J.F. Troop and H.S. Reemsnyder,
Residual stress effects in fatigue
Phoenix, Ariz., American Society for Testing and Materials, 1981

- [7] E. Drescher-Krasicka, C.P. Ostertag,
Residual stress measurements in welded steel beam column connections by
scanning acoustic microscopy
Kluwer Academic Publishers, Journal of materials science 34, 1999

- [8] I.C. Noyan, J.B. Cohen,
Residual Stress, Measurement by Diffraction and Interpretation
New York, Springer-Verlag, 1987


- [9] A. Niku-Lari,
Advances in surface treatments
Volume 4, International Guidebook on Residual Stresses
Oxford, Pergamon Press, 1986

- [10] Instruction Manual for the CEGB Air-Abrasive System for Measuring Residual Stresses
Central Electricity Generating Board, Research Division Berkley Nuclear Laboratories
TNO Bouw, Rijswijk
- [11] Karl Hoffmann,
An Introduction to Measurements using Strain Gages
Darmstadt, Hottunger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989
- [12] Y. Matsushima,
An Introduction to strain Gauging, second edition
Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.
- [13] Residual stress measurements by center-hole method using TML strain gauge type FRS
TML Pam E-106
Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.
- [14] Theodore V. Galambos,
Guide to Stability design Criteria for Metal Structures
Technical Memorandum No. 6: Determination of Residual Stresses
New York, Wiley-Interscience, 1988
- [15] Determination of Residual Stresses in Structural Shapes
Experimental Techniques, Vol. 5, No. 3, 4-7, Sept. 1981
Bethlehem, Pennsylvania, Structural Stability Research Council, Task Group 6
- [16] Metalen - Trekproef
Deel 1: Beproevingmethode (bij omgevingstemperatuur)
EN 10 002-1, CEN, Brussel, 1990

**TML RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS
BY CENTER-HOLE METHOD USING
TML STRAIN GAUGE TYPE FRS**

1. SPECIFICATIONS OF TML STRAIN GAUGES TYPE FRS

- Sensing foil : Cu-Ni alloy
- Carrier material : Epoxy resin
- Operating temperature : -30 to +80°C
- Compatible adhesive : TML type P-2 (Two-component Polyester adhesive)
TML type CN (Fast setting, single-component Cyanoacrylate Adhesive)

Gauge Pattern (actual size) Leads attached	Type	Dimensions (mm)			Nominal Resistance (Ω)	Gauge Factor (approx.)	Gauges per Package
		Gauge Length	Gauge Width	Base			
	FRS-2	1.5	1.3	φ9.5 Lateral Grid Centerline Dia φ5.14	120±0.5	2.0	10
	FRS-3	3	2.6	φ17.5 Lateral Grid Centerline Dia. φ10.26	120±0.5	2.1	6

2. METHOD

After sticking, wiring and balancing the gauge, drill a hole with a depth of 1.2 times the hole diameter at the center of the gauge and measure the output of each axis of the gauge. Residual stress can be calculated by the following equations.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\epsilon a + \epsilon c - 2\epsilon b}{\epsilon c - \epsilon a} + \frac{n\pi}{2} \dots\dots\dots(1)$$

when $\epsilon a > \epsilon c \dots\dots\dots n = 0$
 $\epsilon a < \epsilon c \dots\dots\dots n = 0$

$$\sigma_{max} = \frac{\epsilon a + \epsilon c}{4A} + \frac{\epsilon a + \epsilon c}{4B \cos 2\theta} \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\epsilon a + \epsilon c}{4A} - \frac{\epsilon a + \epsilon c}{4B \cos 2\theta} \dots\dots\dots(3)$$

$$4A = -\frac{(1+\nu)d^2}{2ER^2} \dots\dots\dots(4)$$



$$4B = \frac{2d^2}{ER^2} + \frac{3(1+\nu)d^4}{8ER^4} \dots\dots\dots (5)$$

Nomenclature

- θ : Angle between gauge 1 and maximum principal stress direction
- $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$: Measured strain by gauge 1, 2 and 3 of the FRS type gauge
- $\sigma_{max}, \sigma_{min}$: Maximum and minimum residual principal stresses
- ν : Poisson's ratio
- E : Young's modulus
- A, B : Constant
- d : Diameter of drilling hole
- R : Radius of lateral grid centerline of the FRS gauge

Table of Constants A and B for FRS-2 Gauge

d (mm)	Mild Steel	E = 21000 kgf/mm ² ν = 0.285	Alu- minium	E = 7500 kgf/mm ² ν = 0.33	
		-4A (×10 ⁶)	-4B (×10 ⁶)	-4A (×10 ⁶)	-4B (×10 ⁶)
1.0		4.632	13.893	13.424	38.850
1.1		5.605	16.677	16.243	46.621
1.2		6.670	19.673	19.331	54.978
1.3		7.828	22.866	22.687	63.878
1.4		9.079	26.241	26.312	73.277
1.5		10.422	29.781	30.205	83.125
1.6		11.858	33.466	34.366	93.368
1.7		13.387	37.279	38.796	103.949
1.8		15.008	41.197	43.495	114.810
1.9		16.722	45.199	48.462	125.885
2.0		18.529	49.261	53.698	137.106
2.1		20.428	53.360	59.202	148.404
2.2		22.420	57.468	64.974	159.701
2.3		24.504	61.559	71.015	170.921
2.4		26.681	65.604	77.324	181.980
2.5		28.951	69.574	83.902	192.792
2.6		31.314	73.438	90.749	203.269
2.7		33.769	77.163	97.864	213.316
2.8		36.316	80.717	105.247	222.837
2.9		38.957	84.064	112.899	231.730
3.0		41.690	87.168	120.819	239.893

Table of Constants A and B for FRS-3 Gauge

d (mm)	Mild Steel E = 21000 kgf/mm ² ν = 0.285		Aluminium E = 7500 kgf/mm ² ν = 0.33	
	-4A (×10 ⁶)	-4B (×10 ⁶)	-4A (×10 ⁶)	-4B (×10 ⁶)
2.8	9.115	26.336	26.414	73.540
2.9	9.777	28.092	28.335	78.427
3.0	10.463	29.886	30.323	83.419
3.1	11.172	31.718	32.378	88.510
3.2	11.905	33.583	34.501	93.693
3.3	12.660	35.481	36.690	98.960
3.4	13.439	37.407	38.948	104.305
3.5	14.241	39.360	41.273	109.719
3.6	15.067	41.336	43.665	115.195
3.7	15.916	43.333	46.124	120.724
3.8	16.788	45.348	48.651	126.298
3.9	17.683	47.379	51.245	131.908
4.0	18.601	49.421	53.907	137.546
4.1	19.543	51.471	56.636	143.202
4.2	20.508	53.528	59.433	148.867
4.3	21.496	55.586	62.296	154.531
4.4	22.507	57.644	65.228	160.185
4.5	23.542	59.696	68.226	165.818
4.6	24.600	61.741	71.292	171.421
4.7	25.681	63.774	74.425	176.982
4.8	26.786	65.792	77.626	182.492
4.9	27.913	67.790	80.894	187.939
5.0	29.064	69.765	84.230	193.312
5.1	30.238	71.713	87.633	198.599
5.2	31.436	73.630	91.103	203.789

NOTICE

As the equations (4) and (5) are theoretical, the nominal values of E, ν, R and d may have some possible errors in practical use. Therefore, some experimental measurement is recommended for determination of constants A and B. The constants A and B can be determined by the following equations.

$$A = \frac{1}{2E} (K_1 - \nu K_2) = \frac{K_1}{2E} \left(1 - \frac{\nu K_2}{K_1}\right)$$

$$B = \frac{1}{2E} (K_1 + \nu K_2) = \frac{K_1}{2E} \left(1 + \frac{\nu K_2}{K_1}\right)$$

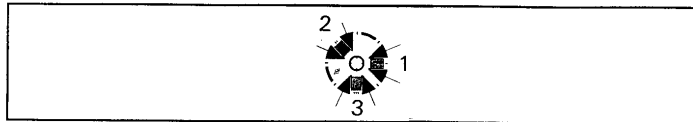
The constants K₁ and K₂ in the above equations are easily determined in a uniaxial stress field where

$$K_1 = \frac{\epsilon_{A'}}{\epsilon_{AL}} \quad \text{and} \quad \frac{\nu K_2}{K_1} = \frac{-\epsilon_{T'}}{\epsilon_{A'}}$$

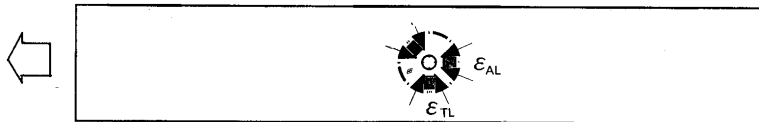
Ideally it is required to stick a rosette gauge to a test specimen of sufficient width to ensure that edge effects will not influence the behaviour local to the hole where this is made, then load the specimen to a known stress, form the hole and measure the relaxed strains.

- ϵ_{AL} Axial strain in calibration beam
- $\epsilon_{A'}$ Measured relaxed strain in axial direction due to hole forming
- $\epsilon_{T'}$ Measured relaxed strain in transverse direction due to hole forming

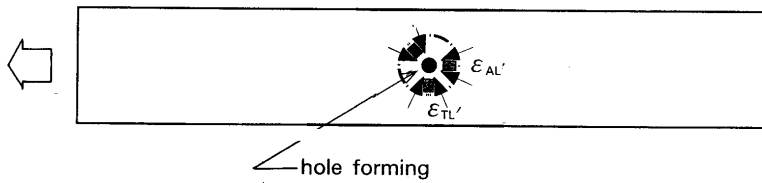
1st Step : Balancing at no load



2nd Step : Measuring of axial strain ϵ_{AL} and transverse strain ϵ_{TL} under load.



3rd Step : Measuring of relaxed axial and transverse strain $\epsilon_{A'}$, $\epsilon_{T'}$, by hole making under load.



$\epsilon_{A'}$ and $\epsilon_{T'}$ are the strains obtained by subtracting the strain value after hole forming from the value before hole forming under loading.

$$\epsilon_{A'} = \epsilon_{AL} - \epsilon_{AL'}$$

$$\epsilon_{T'} = \epsilon_{TL} - \epsilon_{TL'}$$



Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.

8-2, N

FETERIS Components

0, JAPAN

Sensors & M.M.I. Products

Scheveningsweg 15, 2517 KS The Hague, The Netherlands
 Phone: +31 (0)70-392 44 21 Fax: +31 (0)70-364 42 49
 E-Mail: sales@feteriscomponents.nl Website: feteriscomponents.com

Bijlage II: elasticiteitsmodulus

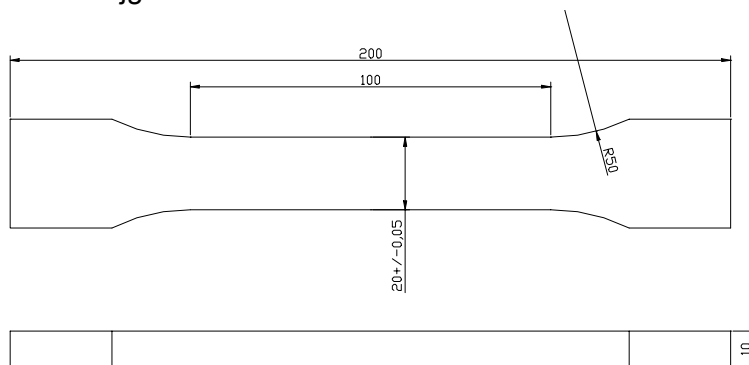
Voor de berekening van de restspanningen bij zowel de hole-drilling methode als bij de sectioning methode, is de elasticiteitsmodulus een zeer belangrijke factor. Deze elasticiteitsmodulus wordt namelijk aangenomen tussen de 190.000 en 230.000 N/mm² te liggen, en de rekken die tijdens de proeven bepaald zijn, liggen rond de tientallen micrometers. De spanning wordt vervolgens berekend door de elasticiteitsmodulus met de rek te vermenigvuldigen. Hieruit blijkt dus al dat deze elasticiteitsmodulus een enorme invloed uitoefent op de restspanning, dus is het verstandig de elasticiteitsmodulus van het staal ook experimenteel te bepalen. Dit wordt gedaan met behulp van de trekproef (zie ook mechanica 13 rapport van J. Boon).

De trekproef houdt in dat er aan een stuk staal getrokken wordt met een bepaalde snelheid, wat resulteert in een bepaalde kracht en de rek die in het stuk staal optreedt wordt wederom opgemeten. Met de wet van Hooke kan nu de elasticiteitsmodulus worden berekend.

De eerste twee staafjes zijn op de 100 kN trekbank uitgevoerd en het derde en vierde staafje zijn op de 400 kN trekbank uitgevoerd. Ook zijn er bij de eerste twee staafjes maar 2 rekstrooken (op de brede vlakken) gebruikt en bij de laatste twee staafjes 4 rekstrooken (op de brede vlakken en de smalle vlakken). De eerste wijziging is gedaan omdat bleek dat de klem van de 100 kN trekbank makkelijker slipt dan de klem van de 400 kN trekbank, waardoor er verkeerde resultaten ontstaan en de 400 kN trekbank beter is in te stellen dan de 100 kN trekbank. De tweede wijziging is gedaan, omdat bleek dat als het trekstaafje maar iets scheef zit er al een krachtenkoppel ontstaat. Door op alle kanten een rekstrook te plakken wordt een beter inzicht verkregen over deze krachtenkoppels.

Stap 1) Bepalen van de trekstaafjes

Om de goede waarde van de elasticiteitsmodulus te verkrijgen is het belangrijk dat de trekproef op hetzelfde profiel wordt gedaan als waar de andere proeven op zijn gedaan. De stukken staal die bij de sectioning methode aan beide kanten wordt weggehaald zijn hiervoor zeer geschikt, zodat er vier gelijke trekstaafjes uit het profiel gehaald kunnen worden, met een dikte van 10 mm (uit elke flens één) en een te trekken breedte van $20 \pm 0,05$ mm. De vorm van de trekstaafjes is in figuur 26 weergegeven. Deze vorm is overigens een standaard die ook in de programmatuur van de vonkmachine is opgenomen en is dus zeer makkelijk te verkrijgen.



figuur 26: trekstaafje

Stap 2) Voorbereiden trekstaafjes

Als eerste moet de walshuid van de trekstaafjes worden gehaald, omdat deze ervoor kan zorgen dat de klem van de trekbank gaat slippen over het trekstaafje, of het rekstrookje loskomen van het trekstaafje. Hierdoor zouden er verkeerde rekken worden opgenomen, wat resulteert in een verkeerde elasticiteitsmodulus.

Vervolgens moet het trekstaafje worden ontvet, zodat de rekstrookjes op het trekstaafje kunnen worden geplakt. Voor de eerste en de tweede proef betekent dit dat op beide brede vlakken van het trekstaafje een rekstrook van 60 mm wordt geplakt. Voor de derde en de vierde proef betekent dit dat er een rekstrook van 60 mm op de brede vlakken wordt geplakt en een rekstrook van 30 mm op de smalle kanten. Zeer belangrijk is het dat de rekstroken precies in het midden en uiterst precies (parallel) wordt geplakt, anders is er in de resultaten een krachtenkoppel terug te vinden.

Stap 3) Uitvoeren van de trekproeven

Nu de voorbereidingen gedaan zijn kan de proef daadwerkelijk uitgevoerd worden. Eerst moet de trekstaaf in de trekbank worden gezet. Hierbij moet er goed op gelet worden dat de trekstaaf loodrecht in de bank staat, anders ontstaat er een krachtenkoppel.

Vervolgens moet de snelheid ingesteld worden, waarmee er aan het staafje getrokken wordt. In het elastische gedeelte mag dit met 0,6 mm/min, en in het verstijvinggebied kan dit opgevoerd worden tot 16,5 mm/min. Deze waarden zijn bepaald aan de hand van de norm, EN 10 002-1 [16].

Als gekeken is of alle apparatuur is aangesloten en juist werkt, kan er begonnen worden met de proef.

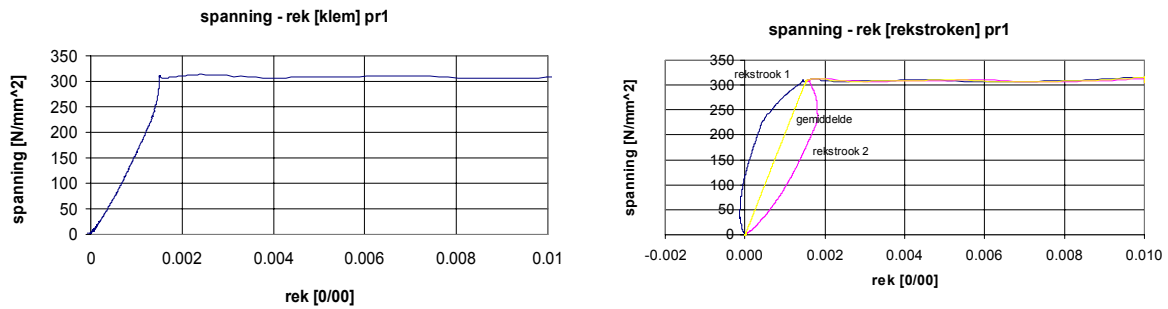
Stap 4) Analyseren en berekenen van de resultaten

Na het uitvoeren van de trekproeven zijn er een heleboel resultaten verkregen. Het is daardoor erg belangrijk dat deze goed geanalyseerd worden, voordat de daadwerkelijke elasticiteitsmodulus kan worden bepaald. Dit analyseren van de resultaten verloopt het best door waarden in een grafiek te zetten, en deze vervolgens in stukken te knippen in een elastisch gebied en een plastisch gebied. Het verstijvingsgebied wordt niet opgenomen, omdat daar de metingen zijn stopgezet. Om de elasticiteitsmodulus te bepalen is eigenlijk alleen het elastisch gebied van belang. Uit het plastische gebied is de vloeispanning te halen en in het verstijvinggebied kan de uiterste trekbelasting worden gehaald, mits de trekstaaf tot breuk wordt belast.

De elasticiteitsmodulus wordt vervolgens bepaald door een rechte lijn door het elastisch gebied te trekken. Hierbij moeten de instelverschijnselen en de overgang naar het plastisch gebied wel weggelaten worden. Hieruit volgt dat van het elastisch gebied alleen naar het gebied tussen 100 en 200 N/mm² gekeken moet worden. Van deze rechte lijn moet vervolgens de tangens genomen worden, en deze resulteert in de elasticiteitsmodulus. Doordat er bij de rekstroken aan beide kanten één wordt geplaatst, moet het gemiddelde worden genomen. Vervolgens wordt de rechte lijn door de punten van het gemiddelde genomen, en met behulp van de tangens wordt de elasticiteitsmodulus bepaald.

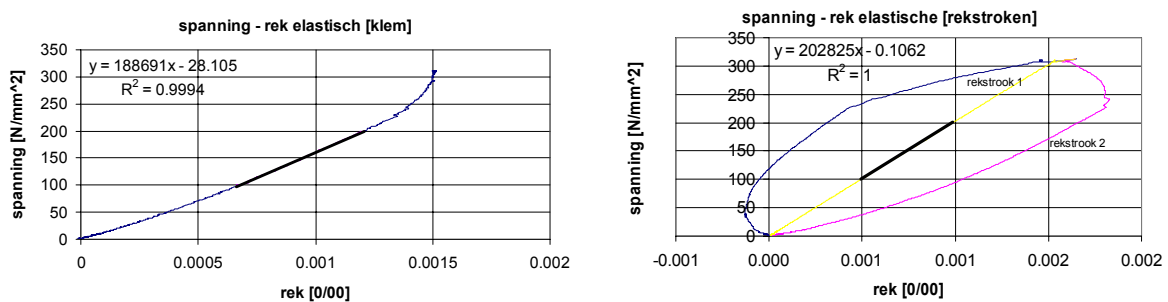
Resultaten

Hieronder zijn de resultaten van de eerste proefneming weergegeven. Bij deze trekproef is gebruik gemaakt van de klem (rek opnemer, die zich met mesjes aan het proefstuk vastklemt) en van rekstroken op de brede stukken. De klem is in de eerste grafiek van figuur 27 weergegeven (blauwe lijn), en de twee rekstroken zijn in de tweede grafiek van figuur 27 weergegeven (blauwe en paarse lijn).



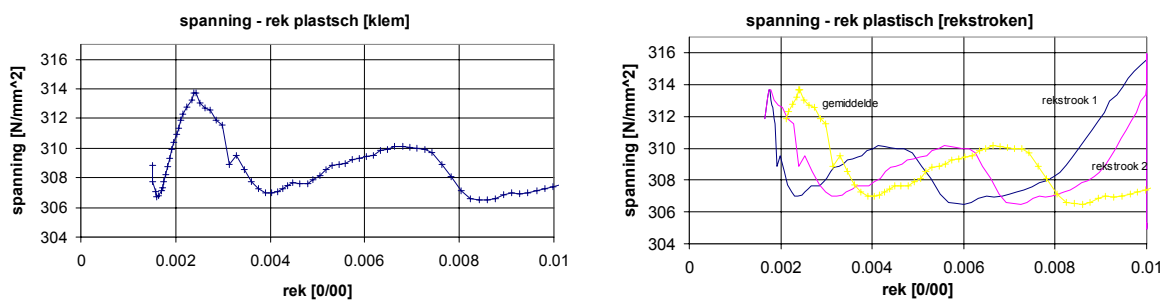
figuur 27: trekproef 1 resultaten

De grafieken in figuur 28 geven in het elastische deel van de trekproef weer. In de linker bovenhoek van deze grafieken wordt de functie van de rechte lijn gegeven. De richtingscoëfficiënt geeft de elasticiteitsmodulus van het proefstuk weer. De elasticiteitsmodulus bij de klem is 189.000 N/mm^2 , en de rekstroken 203.000 N/mm^2 .



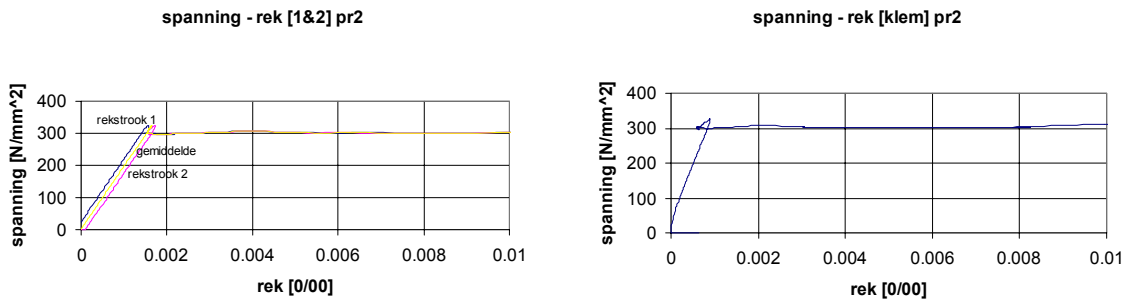
figuur 28: trekproef 1 resultaten elastisch gebied

In figuur 29 hieronder is het plastische gebied van de eerste trekproef weergegeven. Ook hier is de linker grafiek het resultaat van de klem en de rechter grafiek het resultaat van de rekstroken.



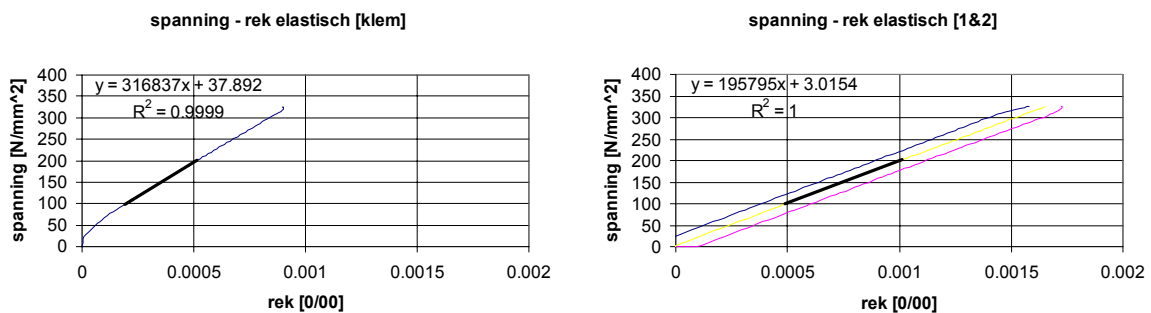
figuur 29: trekproef 1 resultaten plastisch gebied

De volgende drie figuren geven de resultaten van het tweede trekproef weer. Deze trekproef is op dezelfde trekbank (100 kN bank) uitgevoerd, en ook met twee rekstroken van 60 mm geplakt op de brede kant van het trekstaafje. Hieronder in figuur 30 is het resultaat van de tweede trekproef weergegeven.



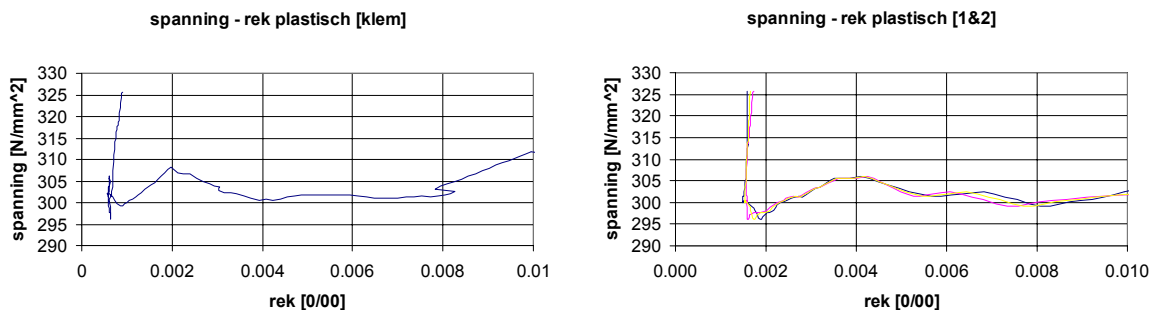
figuur 30: trekproef 2 resultaten

Vervolgens weer de trekproef resultaten van het elastische gebied, weergegeven in figuur 31, met de berekende elasticiteitsmodulus. Volgens de klem is de elasticiteitsmodulus 317.000 N/mm² en volgens de rekstroken is deze elasticiteitsmodulus 196.000 N/mm².



figuur 31: trekproef 2 resultaten elastisch gebied

Tenslotte wordt in figuur 32 het plastisch gebied van de tweede trekproef weergegeven.

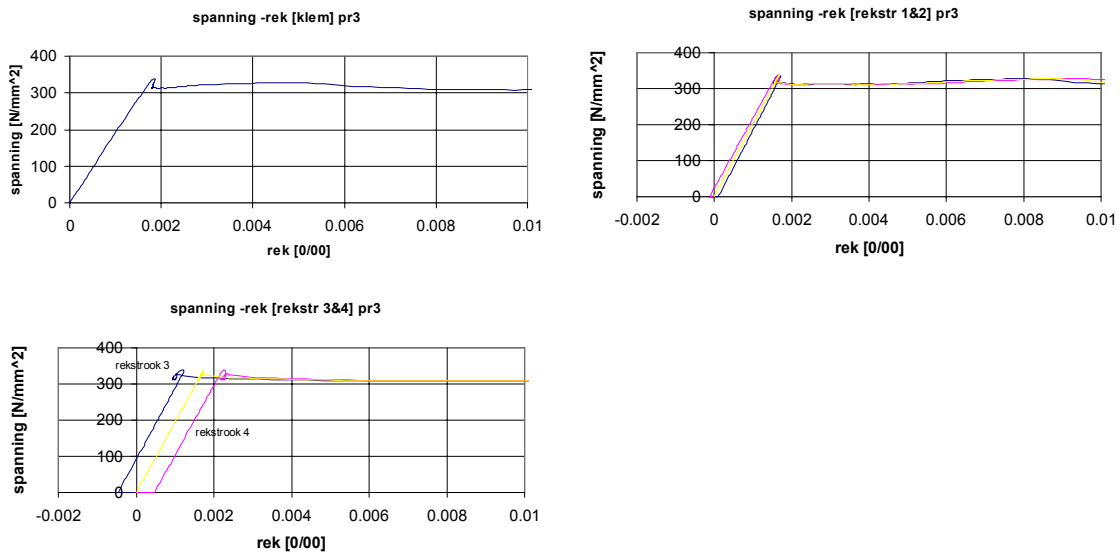


figuur 32: trekproef 2 resultaten plastisch gebied

De volgende twee trekproeven zijn op een andere trekbank gedaan, omdat de 100 kN bank veel slip vertoont, voordat de trekstaaf daadwerkelijk in de klemmen vast zit. Een andere reden is dat de inklemming bij de 400 kN bank nauwkeuriger verloopt, zodat het

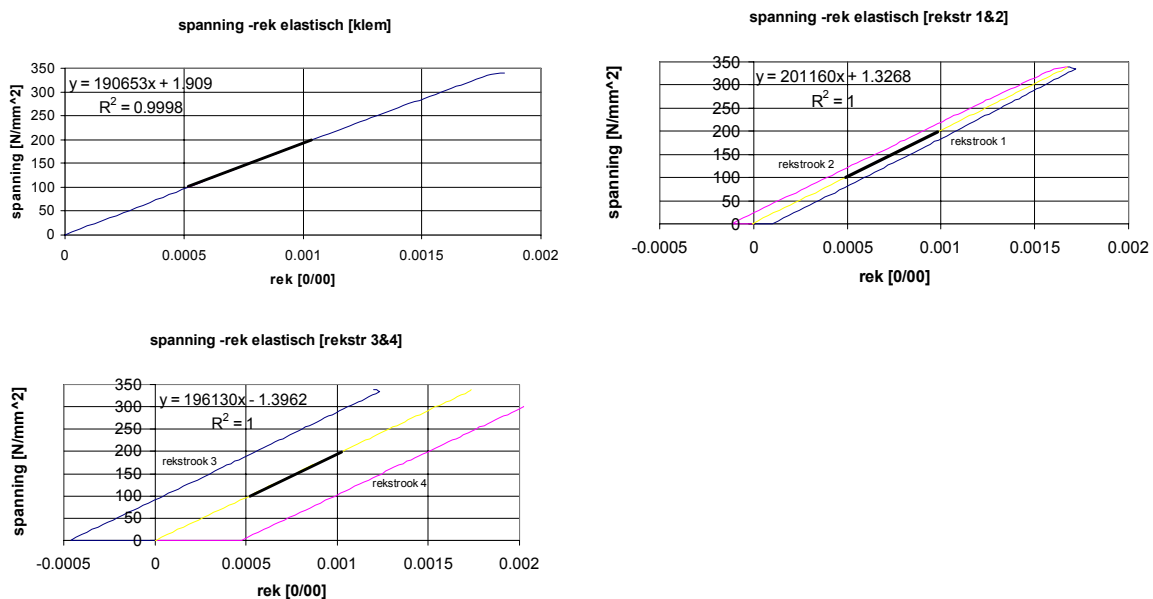
krachtenkoppel nog kleiner gemaakt kan worden. Buiten het doen van deze twee trekproeven op een andere bank is er voor gekozen om ook op de smalle stukken van het trekstaafje een rekstrook te plaatsten, zodat de verlenging aan al de kanten van het trekstaafje nauwkeurig worden opgenomen.

Figuur 33 geeft het resultaat van de derde trekproef weer. De eerste grafiek geeft het resultaat van de klem weer, de tweede geeft het resultaat van de rekstroken (1 & 2) op het brede vlak van het trekstaafje, en de derde geeft het resultaat van de rekstroken (3 & 4) op de smalle kant weer.

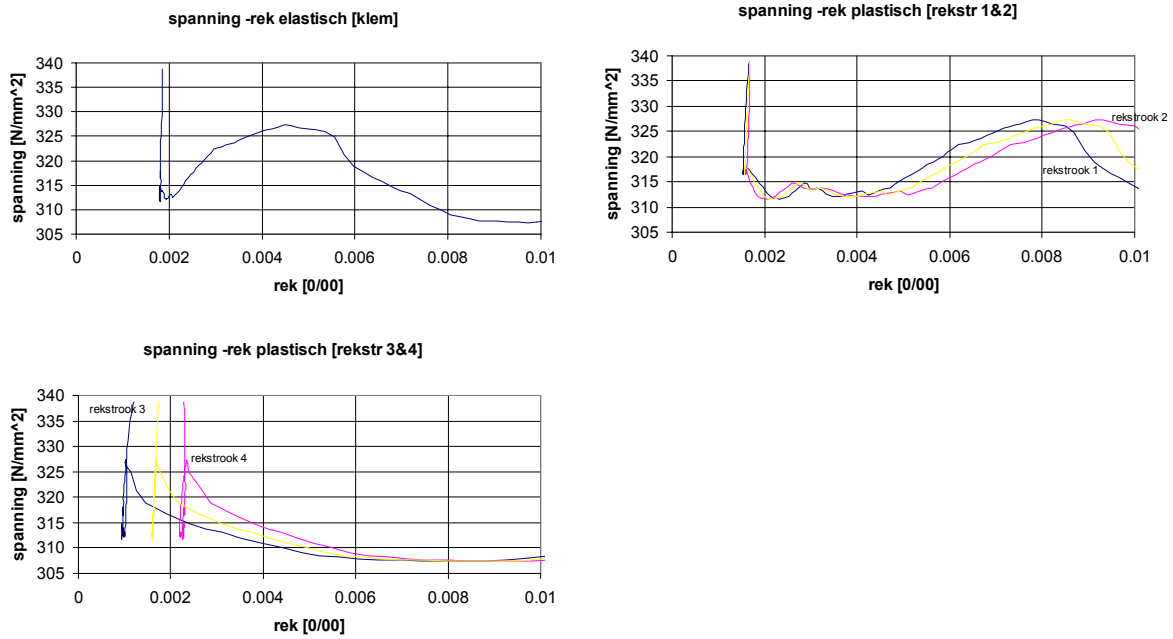


figuur 33: trekproef 3 resultaten

Deze grafieken in figuur 33 zijn vervolgens weer opgedeeld in een elastisch deel (figuur 34) en een plastisch deel (figuur 35). In figuur 34 is te zien dat de klem een elasticiteitsmodulus van 191.00 N/mm² heeft, de rekstroken 1 & 2: 201.000 N/mm² en de rekstroken 3 & 4: 196.000 N/mm²

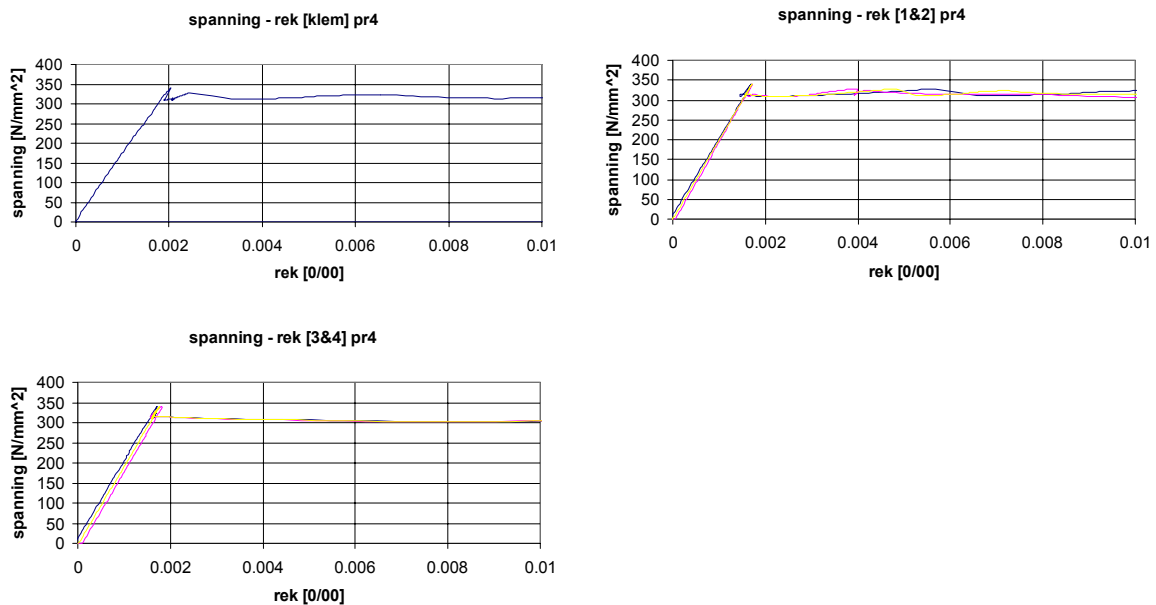


figuur 34: trekproef 3 resultaten elastisch gebied



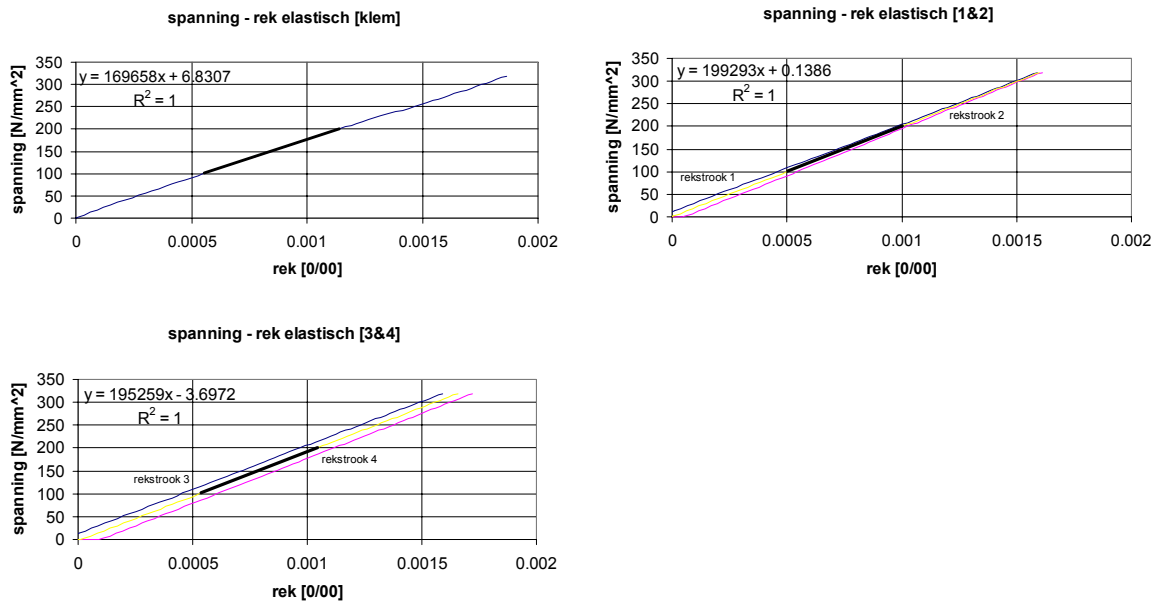
figuur 35: trekproef 3 resultaten plastisch gebied

Tenslotte de nog de vierde trekproef. Deze is op dezelfde manier uitgevoerd als de derde trekproef. In figuur 36 wordt eerst weer het verloop gegeven tot het verstijvingsgebied, in figuur 37 het elastisch gebied en in figuur 38 het plastisch gebied van de vierde trekproef.

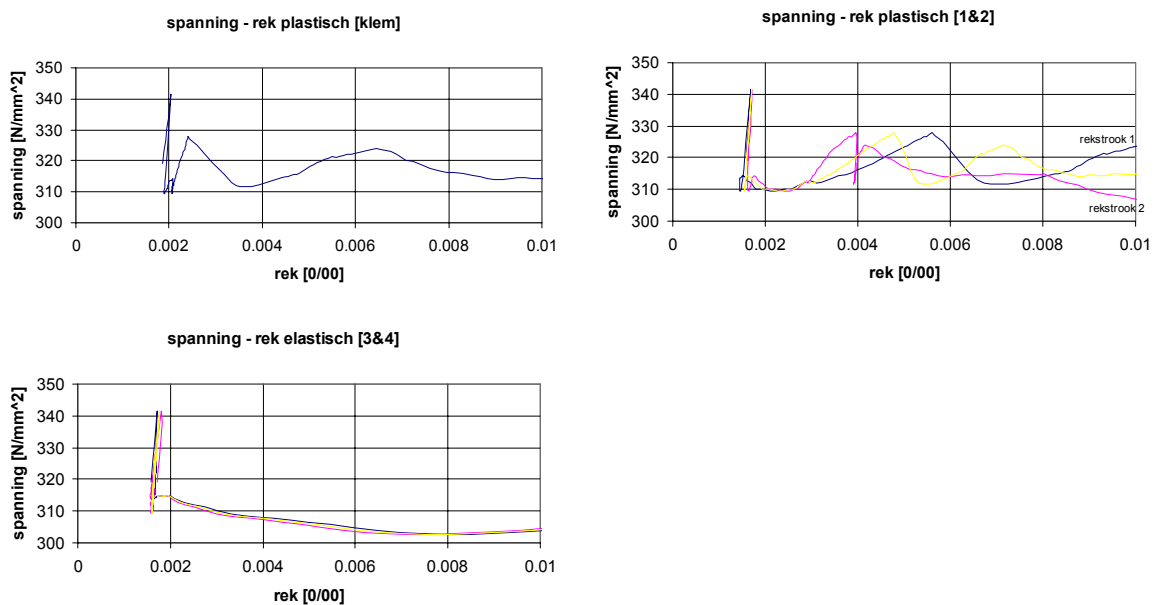


figuur 36: trekproef 4 resultaten

In figuur 37 wordt het elastisch gebied weergegeven. In deze grafieken is te zien dat de elasticiteitsmodulus voor de klem: 170.000 N/mm² is, voor de rekstroken 1 & 2: 199.000 N/mm², en voor de rekstroken 3 & 4: 195.000 N/mm².



figuur 37: trekproef 4 resultaten elastisch gebied



figuur 38: trekproef 4 resultaten plastisch gebied

Conclusie

Als er naar deze getallen gekeken wordt vallen vooral de elasticiteitsmodulus van 317000 N/mm² en van 170000 N/mm² op. Deze getallen zitten zover buiten het gebied tussen 190000 N/mm² en 230000 N/mm², dat deze waarden niet relevant zijn voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus. De waarde van 170000 N/mm² komt waarschijnlijk door het opgetreden krachtenkoppel. De klem meet namelijk aan één kant en heeft hierdoor niet de mogelijkheid het krachtenkoppel te corrigeren. De waarde van 317000 N/mm² komt vrijwel zeker doordat de klem is gaan slippen over het trekstaafje. Als er getrokken wordt aan een stuk staal zal op een gegeven moment de walshuid gaan schilferen en loslaten, nu is er wel geprobeerd om de walshuid zoveel mogelijk te verwijderen, maar het is natuurlijk mogelijk dat dit niet voldoende genoeg gebeurd is. Wel typerend is dat deze twee waarden allebei met behulp van de trekproefklem verkregen zijn.

De andere waarden van de elasticiteitsmodulus die verkregen zijn liggen allemaal rond de 200.000 N/mm². Deze gegevens zijn in de tabel hieronder opgenomen en daar de gemiddelde elasticiteitsmodulus uit bepaald.

nr.	klem [N/mm ²]	rekstr. 1&2 [N/mm ²]	rekstr. 3&4 [N/mm ²]	
1	189000	203000		
2		196000		
3	190000	201000	196000	Totaal
4		199000	195000	[N/mm ²]
tot.	189500	199750	195500	194917

De conclusie die hieruit volgt, is dat de elasticiteitsmodulus volgens het gemiddelde van de metingen 195000 N/mm² is. Hierbij zijn zowel de waarden van de klemmen als van de rekstroken meegenomen. Doordat de klemmen eerder al verkeerde waarden aangaven, door het optredende krachtenkoppel en slippen over het oppervlak van het trekstaafje, wordt voor de berekening van de restspanningen de elasticiteitsmodulus gebruikt die uit de waarden van de rekstroken komt. De conclusie is dat er een elasticiteitsmodulus wordt aangenomen van 200000 N/mm².

Bijlage III: datasheets hole-drilling en sectioning methode

Hole-drilling methode

De eerste tabellen betreffen de hole-drilling methode. De eerst tabel geeft de metingen weer en de twee daaropvolgende tabellen geven de berekeningen.

datasheet restspanningsonderzoek: hole-drilling methode

nr	code	bovenkant	onderkant	diepte	diameter	hoek	rek (mm/m)				
		(inch)	(inch)	(inch)	(inch)	(graden)	0-meting	1e meting	2e meting	3e meting	verschil
1	1 bfl 1	0.310	0.257	0.052	0.061	0	0.001	0.009	0.009	0.009	8.000
		0.308	0.258			90	-0.001	0.064	0.063	0.062	64.000
		0.312	0.259			45	-0.001	0.035	0.034	0.033	35.000
2	1 bfl 2	0.307	0.223	0.081	0.062	0	0.001	0.090	0.090	0.088	88.333
		0.301	0.222			90	-0.001	-0.026	-0.027	-0.030	-26.667
		0.301	0.221			45	-0.001	0.066	0.066	0.065	66.667
3	1 lijf 3	0.272	0.155	0.117	0.064	0	0.001	0.080	0.080	0.080	79.000
		0.269	0.153			90	-0.001	0.010	0.009	0.009	10.333
		0.271	0.154			45	-0.001	0.027	0.027	0.026	27.667
4	1 lijf 4	0.291	0.204	0.057	0.062	0	0.002	0.000	0.001	0.003	-0.667
		0.289	0.204			90	-0.001	0.026	0.030	0.031	30.000
		0.288	0.288			45	0.000	0.010	0.012	0.014	12.000
5	1 lijf 5	0.317	0.257	0.061	0.062	0	0.002	0.048	0.048	0.048	46.000
		0.317	0.256			90	-0.001	-0.035	-0.032	-0.031	-31.667
		0.318	0.255			45	0.000	-0.027	-0.025	-0.025	-25.667
6	1 ofl 6	0.333	0.267	0.060	0.06	0	0.001	0.071	0.071	0.071	70.000
		0.327	0.278			90	-0.001	-0.052	-0.052	-0.052	-51.000
		0.331	0.265			45	-0.001	0.029	0.028	0.028	29.333
7	1 ofl 7	0.330	0.267	0.063	0.06	0	0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-5.000
		0.325	0.263			90	-0.001	0.046	0.046	0.046	47.000
		0.328	0.265			45	-0.001	0.016	0.015	0.015	16.333
8	2 bfl 8	0.275	0.167	0.106	0.064	0	0.001	0.007	0.004	0.004	4.000
		0.273	0.169			90	-0.001	0.051	0.047	0.047	49.333
		0.274	0.167			45	-0.001	0.053	0.005	0.005	22.000
9	2 bfl 9	0.277	0.181	0.097	0.064	0	0.001	0.051	0.050	0.050	49.333
		0.278	0.182			90	-0.001	-0.071	-0.072	-0.072	-70.667
		0.276	0.178			45	0.000	0.003	0.002	0.002	2.333
10	2 lijf 10	0.300	0.206	0.093	0.064	0	0.000	0.020	0.018	0.018	18.667
		0.301	0.207			90	-0.001	0.045	0.043	0.043	44.667
		0.298	0.208			45	0.000	0.012	0.012	0.012	12.000
	poeder toevoer		7								
	luchtdruk		8								
	boortijd	4 min									

nr	afst.	code	diepte	diam.	rek			binnen straal	buiten straal	v	E	R	
					d	ea (0)	eb (45)						ec (90)
					(mm)	(mm)							
2	5	1 bfl 2	2.057	1.575	8.8333E-05	6.6667E-05	-2.6667E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
9	50	2 bfl 9	2.455	1.626	4.9333E-05	2.3333E-06	-7.0667E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
8	15	2 bfl 8	2.701	1.626	4.0000E-06	2.2000E-05	4.9333E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
1	60	1 bfl 1	1.321	1.549	8.0000E-06	3.5000E-05	6.4000E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
3	82.5	1 lijf 3	2.963	1.626	7.9000E-05	2.7667E-05	1.0333E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
10	100.5	2 lijf 10	2.354	1.626	1.8667E-05	1.2000E-05	4.4667E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
4	144.5	1 lijf 4	1.456	1.575	-6.6667E-07	1.2000E-05	3.0000E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
5	217.4	1 lijf 5	1.564	1.575	4.6000E-05	-2.5667E-05	-3.1667E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
6	240	1 ofl 6	1.532	1.524	7.0000E-05	2.9333E-05	-5.1000E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	
7	295	1 ofl 7	1.592	1.524	-5.0000E-06	1.6333E-05	4.7000E-05	2.57	4.75	0.285	200000	2.57	

nr	afst.	code	4A	4B	spanning		hoek			spanning x
					min	max	radialen	n	graden	
2	5	1 bfl 2	-1.21E-06	-3.42E-06	-11.4461	-90.8014	0.28	0	15.97	-85.3388
9	15	2 bfl 9	-1.29E-06	-3.62E-06	50.5608	-17.3649	0.11	0	6.12	-15.4764
8	50	2 bfl 8	-1.29E-06	-3.62E-06	-28.6966	-54.2932	1.67	1	95.82	-28.6966
1	60	1 bfl 1	-1.17E-06	-3.32E-06	-44.7677	-78.5594	1.59	1	91.02	-78.3274
3	82.5	1 lijf 3	-1.29E-06	-3.62E-06	-48.3095	-90.6983	-0.23	0	-13.18	-76.7329
10	100.5	2 lijf 10	-1.29E-06	-3.62E-06	-36.2646	-62.2858	2.06	1	118.28	-41.6421
4	144.5	1 lijf 4	-1.21E-06	-3.42E-06	-15.2063	-33.4303	1.66	1	94.94	-26.0888
5	217.4	1 lijf 5	-1.21E-06	-3.42E-06	17.8986	-41.6643	-0.35	0	-20.12	12.59549
6	240	1 ofl 6	-1.13E-06	-3.22E-06	22.7443	-56.3828	0.16	0	9.08	-47.333
7	295	1 ofl 7	-1.13E-06	-3.22E-06	-20.7694	-53.5894	1.66	1	95.09	-35.3076

Sectioning methode

De volgende tabellen geven de metingen van de sectioning methode weer. De tabellen met 1e meting in de titel geven de meetwaardes weer van de metingen op het nog ongezaagde profiel. De tabellen met 2e meting in de titel geven de meetwaardes nadat de twee zijstukken van het profiel zijn gehaald. Tenslotte geven de tabellen met 3e meting in de titel de meetwaardes van de strookjes, nadat het profiel helemaal verzaagd is. Met tweede en derde keer worden de extra metingen aangeduid, die gedaan zijn om de uiteindelijke resultaten te verifiëren.

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode 1e meting - voor verzagen

	nr.	code	lengte verandering (um)				rek (um/m1)			code	lengte verandering (um)			
			pfender-meter				rekstrookje				pfender-meter			
			1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld	0-meting	1e meting	+ 1 uur		1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld
bovenflens	1	bfl 1 out	526	525	525	525	-0.625	-0.949	-0.954	bfl 1 in	485	485	484	485
	2	bfl 2 out	525	525	519	523	XXX	XXX	XXX	bfl 2 in	485	484	484	484
	3	bfl 3 out	578	583	583	581	XXX	XXX	XXX	bfl 3 in	483	483	481	482
	4	bfl 4 out	97	99	99	98	XXX	XXX	XXX	bfl 4 in	479	478	478	478
	5	bfl 5 out	448	450	448	449	-0.003	-0.749	-0.751	bfl 5 in	476	475	475	475
	6a	bfl 6a out	366	367	367	367	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
lijf	6b	lijf 6b out	913	913	917	914	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
	7	lijf 7 out	747	746	745	746	-0.117	-0.648	-0.649	lijf 7 in	481	482	483	482
	8	lijf 8 out	922	919	918	920	XXX	XXX	XXX	lijf 8 in	547	547	547	547
	9	lijf 9 out	509	508	508	508	XXX	XXX	XXX	lijf 9 in	644	643	643	643
	10	lijf 10 out	715	717	715	716	XXX	XXX	XXX	lijf 10 in	577	575	577	576
	11	lijf 11 out	521	523	521	522	0.094	-0.032	-0.03	lijf 11 in	530	530	531	530
	12	lijf 12 out	478	478	479	478	XXX	XXX	XXX	lijf 12 in	480	479	480	480
	13	lijf 13 out	568	573	571	571	XXX	XXX	XXX	lijf 13 in	488	488	489	488
	14	lijf 14 out	550	547	549	549	XXX	XXX	XXX	lijf 14 in	484	484	484	484
	15	lijf 15 out	577	479	576	544	XXX	XXX	XXX	lijf 15 in	600	599	598	599
	16	lijf 16 out	271	272	272	272	XXX	XXX	XXX	lijf 16 in	648	647	646	647
17a	lijf 17a out	481	482	483	482	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX	
onderflens	17b	ofl 17b out	981	981	980	981	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
	18	ofl 18 out	613	613	610	612	XXX	XXX	XXX	ofl 18 in	485	485	484	485
	19	ofl 19 out	539	539	537	538	XXX	XXX	XXX	ofl 19 in	488	489	488	488
	20	ofl 20 out	625	627	624	625	XXX	XXX	XXX	ofl 20 in	489	488	488	488
	21	ofl 21 out	527	525	524	525	XXX	XXX	XXX	ofl 21 in	492	492	492	492
	22	ofl 22 out	576	578	573	576	XXX	XXX	XXX	ofl 22 in	489	487	488	488

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
2e meting - na verzagen profielstuk

	nr.	code	lengte verandering (um)				rek (um/m1)			code	lengte verandering (um)			
			pfender-meter				rekstrookje				pfender-meter			
			1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld	0-meting	1e metin	+ 1 uur		1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld
bovenflens	1	bfl 1 out	545	546	544	545	-0.625	-0.882	-0.881	bfl 1 in	496	496	496	496
	2	bfl 2 out	534	532	534	533	XXX	XXX	XXX	bfl 2 in	491	494	492	492
	3	bfl 3 out	585	586	585	585	XXX	XXX	XXX	bfl 3 in	483	485	487	485
	4	bfl 4 out	87	87	89	88	XXX	XXX	XXX	bfl 4 in	472	473	473	473
	5	bfl 5 out	423	420	424	422	-0.003	-0.887	-0.885	bfl 5 in	464	464	463	464
	6a	bfl 6a out	348	348	347	348	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
lijf	6b	lijf 6b out	900	898	899	899	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
	7	lijf 7 out	552	552	553	552	-0.117	-0.568	-0.565	lijf 7 in	490	490	490	490
	8	lijf 8 out	940	943	938	940	XXX	XXX	XXX	lijf 8 in	567	568	568	568
	9	lijf 9 out	521	522	523	522	XXX	XXX	XXX	lijf 9 in	674	674	675	674
	10	lijf 10 out	744	746	745	745	XXX	XXX	XXX	lijf 10 in	615	616	613	615
	11	lijf 11 out	546	546	547	546	0.094	0.26	0.259	lijf 11 in	570	570	570	570
	12	lijf 12 out	503	500	501	501	XXX	XXX	XXX	lijf 12 in	518	518	518	518
	13	lijf 13 out	587	588	588	588	XXX	XXX	XXX	lijf 13 in	526	528	527	527
	14	lijf 14 out	567	565	567	566	XXX	XXX	XXX	lijf 14 in	509	510	511	510
	15	lijf 15 out	582	581	580	581	XXX	XXX	XXX	lijf 15 in	612	614	612	613
	16	lijf 16 out	270	269	270	270	XXX	XXX	XXX	lijf 16 in	650	650	652	651
	17a	lijf 17a out	459	460	460	460	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
onderflens	17b	ofl 17b out	958	959	959	959	XXX	XXX	XXX		XXX	XXX	XXX	XXX
	18	ofl 18 out	576	574	574	575	XXX	XXX	XXX	ofl 18 in	474	472	472	473
	19	ofl 19 out	529	528	530	529	XXX	XXX	XXX	ofl 19 in	485	487	484	485
	20	ofl 20 out	631	630	631	631	XXX	XXX	XXX	ofl 20 in	485	485	483	484
	21	ofl 21 out	515	514	514	514	XXX	XXX	XXX	ofl 21 in	494	493	496	494
	22	ofl 22 out	587	588	590	588	XXX	XXX	XXX	ofl 22 in	495	495	495	495

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
3e meting - na verzagen strookjes

	nr.	code	lengte verandering (um)				rek (um/m1)			code	lengte verandering (um)			
			pfender-meter				rekstrookje				pfender-meter			
			1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld	0-meting	1e meting	+ 1 uur		1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld
bovenflens	1	bfl 1 out	560	555	554	556	-0.625	-0.435	-0.436	bfl 1 in	503	504	504	504
	2	bfl 2 out	554	552	554	553	XXX	XXX	XXX	bfl 2 in				0
	3	bfl 3 out	628	630	630	629	XXX	XXX	XXX	bfl 3 in	467	467	467	467
	4	bfl 4 out	90	90	90	90	XXX	XXX	XXX	bfl 4 in				0
	5	bfl 5 out	418	417	419	418	-0.003	-0.939	-0.937	bfl 5 in				0
	6a	bfl 6a out	337	338	337	337	XXX	XXX	XXX					0
lijf	6b	lijf 6b out	915	916	916	916	XXX	XXX	XXX					0
	7	lijf 7 out	557	557	558	557	-0.117	-0.281	-0.28	lijf 7 in	510	510	511	510
	8	lijf 8 out	933	932	931	932	XXX	XXX	XXX	lijf 8 in	563	567	577	569
	9	lijf 9 out	506	507	507	507	XXX	XXX	XXX	lijf 9 in	705	706	705	705
	10	lijf 10 out	728	727	728	728	XXX	XXX	XXX	lijf 10 in	648	647	646	647
	11	lijf 11 out	479	480	480	480	0.094	0.168	0.163	lijf 11 in	568	570	569	569
	12	lijf 12 out	571	572	573	572	XXX	XXX	XXX	lijf 12 in	577	578	578	578
	13	lijf 13 out	529	527	527	528	XXX	XXX	XXX	lijf 13 in				0
	14	lijf 14 out	550	549	546	548	XXX	XXX	XXX	lijf 14 in	695	550	555	600
	15	lijf 15 out	556	556	557	556	XXX	XXX	XXX	lijf 15 in	578	646	646	623
	16	lijf 16 out	210	208	207	208	XXX	XXX	XXX	lijf 16 in	685	686	685	685
	17a	lijf 17a out	475	475	474	475	XXX	XXX	XXX					0
onderflens	17b	ofl 17b out	969	968	968	968	XXX	XXX	XXX					0
	18	ofl 18 out	592	590	589	590	XXX	XXX	XXX	ofl 18 in				0
	19	ofl 19 out	539	540	539	539	XXX	XXX	XXX	ofl 19 in				0
	20	ofl 20 out	653	654	652	653	XXX	XXX	XXX	ofl 20 in	482	482	482	482
	21	ofl 21 out	543	542	542	542	XXX	XXX	XXX	ofl 21 in	484	483	484	484
	22	ofl 22 out	599	600	600	600	XXX	XXX	XXX	ofl 22 in	450	450	450	450

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
3e meting - na verzagen

2e keer

nr.	code	lengte verandering (um)				rek (um/m1)			code	lengte verandering (um)				
		pfender-meter				rekstrookje				pfender-meter				
		1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld	0-meting	1e meting	+ 1 uur		1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld	
bovenflens	1	bfl 1 out	571	570	570	570	0	-0.435	-0.436	bfl 1 in	503	504	504	504
	2	bfl 2 out	554	556	554	555	XXX	XXX	XXX	bfl 2 in				
	3	bfl 3 out	593	592	591	592	XXX	XXX	XXX	bfl 3 in	467	467	467	467
	4	bfl 4 out	190	193	194	192	XXX	XXX	XXX	bfl 4 in				
	5	bfl 5 out	418	416	419	418	0	-0.939	-0.937	bfl 5 in				
	6a	bfl 6a out	333	336	333	334	XXX	XXX	XXX					
lijf	6b	lijf 6b out	918	917	918	918	XXX	XXX	XXX					
	7	lijf 7 out	560	560	558	559	0	-0.281	-0.28	lijf 7 in				
	8	lijf 8 out	935	935	935	935	XXX	XXX	XXX	lijf 8 in				
	9	lijf 9 out	511	512	510	511	XXX	XXX	XXX	lijf 9 in	705	706	705	705
	10	lijf 10 out	731	729	730	730	XXX	XXX	XXX	lijf 10 in	648	647	646	647
	11	lijf 11 out	530	529	528	529	0	0.168	0.163	lijf 11 in	568	570	569	569
	12	lijf 12 out	493	493	491	492	XXX	XXX	XXX	lijf 12 in	577	578	578	578
	13	lijf 13 out	572	575	572	573	XXX	XXX	XXX	lijf 13 in				
	14	lijf 14 out	552	550	548	550	XXX	XXX	XXX	lijf 14 in				
	15	lijf 15 out	558	558	559	558	XXX	XXX	XXX	lijf 15 in				
	16	lijf 16 out	208	208	210	209	XXX	XXX	XXX	lijf 16 in	685	686	685	685
onderflens	17a	lijf 17a out	478	477	479	478	XXX	XXX	XXX					
	17b	ofl 17b out	965	966	968	966	XXX	XXX	XXX					
	18	ofl 18 out	582	575	580	579	XXX	XXX	XXX	ofl 18 in				
	19	ofl 19 out	535	535	538	536	XXX	XXX	XXX	ofl 19 in				
	20	ofl 20 out	650	650	652	651	XXX	XXX	XXX	ofl 20 in	482	482	482	482
	21	ofl 21 out	541	544	541	542	XXX	XXX	XXX	ofl 21 in	484	483	484	484
22	ofl 22 out	606	604	605	605	XXX	XXX	XXX	ofl 22 in	450	450	450	450	

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
3e meting - na verzagen

3e keer

nr.	code	lengte verandering (um)				rek (um/m1)			code	lengte verandering (um)				
		pfender-meter				rekstrookje				pfender-meter				
		1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld	0-meting	1e meting	+ 1 uur		1e keer	2e keer	3e keer	gemiddeld	
bovenflens	1	bfl 1 out	575	573	575	574	0	-0.435	-0.436	bfl 1 in	504	504	505	504
	2	bfl 2 out	559	560	559	559	XXX	XXX	XXX	bfl 2 in				
	3	bfl 3 out	590	590	591	590	XXX	XXX	XXX	bfl 3 in	472	471	471	471
	4	bfl 4 out	100	100	100	100	XXX	XXX	XXX	bfl 4 in				
	5	bfl 5 out	420	420	420	420	0	-0.939	-0.937	bfl 5 in				
	6a	bfl 6a out	340	340	339	340	XXX	XXX	XXX					
lijf	6b	lijf 6b out	918	919	917	918	XXX	XXX	XXX					
	7	lijf 7 out	560	561	560	560	0	-0.281	-0.28	lijf 7 in				
	8	lijf 8 out	939	942	935	939	XXX	XXX	XXX	lijf 8 in				
	9	lijf 9 out	518	514	516	516	XXX	XXX	XXX	lijf 9 in	707	706	706	706
	10	lijf 10 out	732	733	732	732	XXX	XXX	XXX	lijf 10 in	650	651	650	650
	11	lijf 11 out	530	530	529	530	0	0.168	0.163	lijf 11 in				
	12	lijf 12 out	490	487	485	487	XXX	XXX	XXX	lijf 12 in	573	575	574	574
	13	lijf 13 out	580	578	576	578	XXX	XXX	XXX	lijf 13 in	572	571	571	571
	14	lijf 14 out	551	553	555	553	XXX	XXX	XXX	lijf 14 in				
	15	lijf 15 out	561	562	561	561	XXX	XXX	XXX	lijf 15 in				
	16	lijf 16 out	210	211	210	210	XXX	XXX	XXX	lijf 16 in	585	586	586	586
onderflens	17a	lijf 17a out	480	480	480	480	XXX	XXX	XXX					
	17b	ofl 17b out	970	971	970	970	XXX	XXX	XXX					
	18	ofl 18 out	590	587	588	588	XXX	XXX	XXX	ofl 18 in				
	19	ofl 19 out	542	541	541	541	XXX	XXX	XXX	ofl 19 in				
	20	ofl 20 out	650	651	650	650	XXX	XXX	XXX	ofl 20 in	484	486	484	485
	21	ofl 21 out	550	550	552	551	XXX	XXX	XXX	ofl 21 in	485	486	485	485
22	ofl 22 out	608	612	608	609	XXX	XXX	XXX	ofl 22 in					

De volgende tabellen geven de berekeningen van de sectioning methode weer. Hier worden de spanningen weergegeven van de buitenkant, de binnenkant en het gemiddelde.

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 1e en 2e meting - buitenkant

	nr.	afst.	code	1e meting	2e meting	verschil	rek (e)	spanning
								E = 20000
		(mm)				I2-I1		e x E
bovenflens	1	5	bfl 1 out	0.525	0.545	0.020	0.000197	39.333
	2	15	bfl 2 out	0.523	0.533	0.010	0.000103	20.667
	3	25	bfl 3 out	0.581	0.585	0.004	0.000040	8.000
	4	35	bfl 4 out	0.098	0.088	-0.011	-0.000107	-21.333
	5	45	bfl 5 out	0.449	0.422	-0.026	-0.000263	-52.667
	6a	60	bfl 6a out	0.367	0.348	-0.019	-0.000190	-38.000
lijf	6b	82.5	lijf 6b out	0.914	0.899	-0.015	-0.000153	-30.667
	7	100.5	lijf 7 out	0.746	0.552	-0.194	-0.001937	
	8	111.5	lijf 8 out	0.920	0.940	0.021	0.000207	41.333
	9	122.5	lijf 9 out	0.508	0.522	0.014	0.000137	27.333
	10	133.5	lijf 10 out	0.716	0.745	0.029	0.000293	58.667
	11	144.5	lijf 11 out	0.522	0.546	0.025	0.000247	49.333
	12	155.5	lijf 12 out	0.478	0.501	0.023	0.000230	46.000
	13	166.5	lijf 13 out	0.571	0.588	0.017	0.000170	34.000
	14	177.5	lijf 14 out	0.549	0.566	0.018	0.000177	35.333
	15	188.5	lijf 15 out	0.544	0.581	0.037	0.000370	74.000
	16	199.5	lijf 16 out	0.272	0.270	-0.002	-0.000020	-4.000
17a	217.5	lijf 17a out	0.482	0.460	-0.022	-0.000223	-44.667	
onderflens	17b	240	ofl 17b out	0.981	0.959	-0.022	-0.000220	-44.000
	18	255	ofl 18 out	0.612	0.575	-0.037	-0.000373	-74.667
	19	265	ofl 19 out	0.538	0.529	-0.009	-0.000093	-18.667
	20	275	ofl 20 out	0.625	0.631	0.005	0.000053	10.667
	21	285	ofl 21 out	0.525	0.514	-0.011	-0.000110	-22.000
	22	295	ofl 22 out	0.576	0.588	0.013	0.000127	25.333

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 1e en 2e meting - binnenkant

	nr.	afst.	code	1e meting	2e meting	verschil	rek	spanning	gemiddeld E = 200000
								E = 200000	
		(mm)				I2-I1		e x E	
bovenflens	1	5	bfl 1 ins	0.485	0.496	0.0113	0.000113	22.667	31.000
	2	15	bfl 2 ins	0.484	0.492	0.0080	0.000080	16.000	18.333
	3	25	bfl 3 ins	0.482	0.485	0.0027	0.000027	5.333	6.667
	4	35	bfl 4 ins	0.478	0.473	-0.0057	-0.000057	-11.333	-16.333
	5	45	bfl 5 ins	0.475	0.464	-0.0117	-0.000117	-23.333	-38.000
	6a	60	bfl 6a ins						-38.000
lijf	6b	82.5	lijf 6b ins						-30.667
	7	100.5	lijf 7 ins	0.482	0.490	0.0080	0.000080	16.000	16.000
	8	111.5	lijf 8 ins	0.547	0.568	0.0207	0.000207	41.333	41.333
	9	122.5	lijf 9 ins	0.643	0.674	0.0310	0.000310	62.000	44.667
	10	133.5	lijf 10 ins	0.576	0.615	0.0383	0.000383	76.667	67.667
	11	144.5	lijf 11 ins	0.530	0.570	0.0397	0.000397	79.333	64.333
	12	155.5	lijf 12 ins	0.480	0.518	0.0383	0.000383	76.667	61.333
	13	166.5	lijf 13 ins	0.488	0.527	0.0387	0.000387	77.333	55.667
	14	177.5	lijf 14 ins	0.484	0.510	0.0260	0.000260	52.000	43.667
	15	188.5	lijf 15 ins	0.599	0.613	0.0137	0.000137	27.333	50.667
	16	199.5	lijf 16 ins	0.647	0.651	0.0037	0.000037	7.333	1.667
17a	217.5	lijf 17a ins						-44.667	
onderflens	17b	240	ofl 17b ins						-44.000
	18	255	ofl 18 ins	0.485	0.473	-0.0120	-0.000120	-24.000	-49.333
	19	265	ofl 19 ins	0.488	0.485	-0.0030	-0.000030	-6.000	-12.333
	20	275	ofl 20 ins	0.488	0.484	-0.0040	-0.000040	-8.000	1.333
	21	285	ofl 21 ins	0.492	0.494	0.0023	0.000023	4.667	-8.667
	22	295	ofl 22 ins	0.488	0.495	0.0070	0.000070	14.000	19.667

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 1e en 3e meting - buitenkant

	nr.	afst.	code	1e meting	3e meting	verschil	rek (e)	spanning	
								E = 200000	
								e x E	
		(mm)							
bovenflens	1	5	bfl 1 out	0.525	0.556	0.031	0.000310	62.000	
	2	15	bfl 2 out	0.523	0.553	0.030	0.000303	60.667	
	3	25	bfl 3 out	0.581	0.629	0.048	0.000480	96.000	
	4	35	bfl 4 out	0.098	0.090	-0.008	-0.000083	-16.667	
	5	45	bfl 5 out	0.449	0.418	-0.031	-0.000307	-61.333	
	6a	60	bfl 6a out	0.367	0.337	-0.029	-0.000293	-58.667	
lijf	6b	82.5	lijf 6b out	0.914	0.916	0.001	0.000013	2.667	
	7	100.5	lijf 7 out	0.746	0.557	-0.189	-0.001887		
	8	111.5	lijf 8 out	0.920	0.932	0.012	0.000123	24.667	
	9	122.5	lijf 9 out	0.508	0.507	-0.002	-0.000017	-3.333	
	10	133.5	lijf 10 out	0.716	0.728	0.012	0.000120	24.000	
	11	144.5	lijf 11 out	0.522	0.480	-0.042	-0.000420	-84.000	
	12	155.5	lijf 12 out	0.478	0.572	0.094	0.000937	187.333	
	13	166.5	lijf 13 out	0.571	0.528	-0.043	-0.000430	-86.000	
	14	177.5	lijf 14 out	0.549	0.548	0.000	-0.000003	-0.667	
	15	188.5	lijf 15 out	0.544	0.556	0.012	0.000123	24.667	
	16	199.5	lijf 16 out	0.272	0.208	-0.063	-0.000633	-126.667	
	17a	217.5	lijf 17a out	0.482	0.475	-0.007	-0.000073	-14.667	
	onderflens	17b	240	ofl 17b out	0.981	0.968	-0.012	-0.000123	-24.667
		18	255	ofl 18 out	0.612	0.590	-0.022	-0.000217	-43.333
19		265	ofl 19 out	0.538	0.539	0.001	0.000010	2.000	
20		275	ofl 20 out	0.625	0.653	0.028	0.000277	55.333	
21		285	ofl 21 out	0.525	0.542	0.017	0.000170	34.000	
22		295	ofl 22 out	0.576	0.600	0.024	0.000240	48.000	

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 1e en 3e meting - binnenkant

	nr.	afst.	code	1e meting	3e meting	verschil	rek	spanning
								E = 200000
								e x E
		(mm)						
bovenflens	1	5	bfl 1 ins	0.485	0.504	0.019	0.000190	38.000
	2	15	bfl 2 ins	0.484	0.000	-0.484	-0.004843	
	3	25	bfl 3 ins	0.482	0.467	-0.015	-0.000153	-30.667
	4	35	bfl 4 ins	0.478	0.000	-0.478	-0.004783	
	5	45	bfl 5 ins	0.475	0.000	-0.475	-0.004753	
	6a	60	bfl 6a ins					
lijf	6b	82.5	lijf 6b ins					
	7	100.5	lijf 7 ins	0.482	0.510	0.028	0.000283	
	8	111.5	lijf 8 ins	0.547	0.569	0.022	0.000220	
	9	122.5	lijf 9 ins	0.643	0.705	0.062	0.000620	124.000
	10	133.5	lijf 10 ins	0.576	0.647	0.071	0.000707	141.333
	11	144.5	lijf 11 ins	0.530	0.569	0.039	0.000387	77.333
	12	155.5	lijf 12 ins	0.480	0.578	0.098	0.000980	196.000
	13	166.5	lijf 13 ins	0.488	0.000	-0.488	-0.004883	
	14	177.5	lijf 14 ins	0.484	0.600	0.116	0.001160	
	15	188.5	lijf 15 ins	0.599	0.623	0.024	0.000243	
	16	199.5	lijf 16 ins	0.647	0.685	0.038	0.000383	76.667
17a	217.5	lijf 17a ins						
onderflens	17b	240	ofl 17b ins					
	18	255	ofl 18 ins	0.485	0.000	-0.485	-0.004847	
	19	265	ofl 19 ins	0.488	0.000	-0.488	-0.004883	
	20	275	ofl 20 ins	0.488	0.482	-0.006	-0.000063	-12.667
	21	285	ofl 21 ins	0.492	0.484	-0.008	-0.000083	-16.667
	22	295	ofl 22 ins	0.488	0.450	-0.038	-0.000380	-76.000

gemiddeld
E = 200000
50.000
60.667
32.667
-16.667
-61.333
-58.667
2.667
24.667
60.333
82.667
-3.333
191.667
-86.000
-0.667
24.667
-25.000
-14.667
-24.667
-43.333
2.000
21.333
8.667
-14.000

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 2e en 3e meting - buitenkant

	nr.	afst.	code	2e meting	3e meting	verschil	rek (e)	spanning
								E = 200000
		(mm)				l3-l2		e x E
bovenflens	1	5	bfl 1 out	0.545	0.556	0.011	0.000113	22.667
	2	15	bfl 2 out	0.533	0.553	0.020	0.000200	40.000
	3	25	bfl 3 out	0.585	0.629	0.044	0.000440	88.000
	4	35	bfl 4 out	0.088	0.090	0.002	0.000023	4.667
	5	45	bfl 5 out	0.422	0.418	-0.004	-0.000043	-8.667
	6a	60	bfl 6a out	0.348	0.337	-0.010	-0.000103	-20.667
lijf	6b	82.5	lijf 6b out	0.899	0.916	0.017	0.000167	33.333
	7	100.5	lijf 7 out	0.552	0.557	0.005	0.000050	10.000
	8	111.5	lijf 8 out	0.940	0.932	-0.008	-0.000083	-16.667
	9	122.5	lijf 9 out	0.522	0.507	-0.015	-0.000153	-30.667
	10	133.5	lijf 10 out	0.745	0.728	-0.017	-0.000173	-34.667
	11	144.5	lijf 11 out	0.546	0.480	-0.067	-0.000667	-133.333
	12	155.5	lijf 12 out	0.501	0.572	0.071	0.000707	141.333
	13	166.5	lijf 13 out	0.588	0.528	-0.060	-0.000600	-120.000
	14	177.5	lijf 14 out	0.566	0.548	-0.018	-0.000180	-36.000
	15	188.5	lijf 15 out	0.581	0.556	-0.025	-0.000247	-49.333
	16	199.5	lijf 16 out	0.270	0.208	-0.061	-0.000613	-122.667
17a	217.5	lijf 17a out	0.460	0.475	0.015	0.000150	30.000	
onderflens	17b	240	ofl 17b out	0.959	0.968	0.010	0.000097	19.333
	18	255	ofl 18 out	0.575	0.590	0.016	0.000157	31.333
	19	265	ofl 19 out	0.529	0.539	0.010	0.000103	20.667
	20	275	ofl 20 out	0.631	0.653	0.022	0.000223	44.667
	21	285	ofl 21 out	0.514	0.542	0.028	0.000280	56.000
	22	295	ofl 22 out	0.588	0.600	0.011	0.000113	22.667

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 2e en 3e meting - binnenkant

	nr.	afst.	code	2e meting	3e meting	verschil	rek	spanning
								E = 200000
		(mm)				l3-l2		e x E
bovenflens	1	5	bfl 1 ins	0.496	0.504	0.008	0.000077	15.333
	2	15	bfl 2 ins	0.492	0.000	-0.492	-0.004923	40.000
	3	25	bfl 3 ins	0.485	0.467	-0.018	-0.000180	-36.000
	4	35	bfl 4 ins	0.473	0.000	-0.473	-0.004727	4.667
	5	45	bfl 5 ins	0.464	0.000	-0.464	-0.004637	-8.667
	6a	60	bfl 6a ins					-20.667
lijf	6b	82.5	lijf 6b ins					33.333
	7	100.5	lijf 7 ins	0.490	0.510	0.020	0.000203	10.000
	8	111.5	lijf 8 ins	0.568	0.569	0.001	0.000013	-16.667
	9	122.5	lijf 9 ins	0.674	0.705	0.031	0.000310	62.000
	10	133.5	lijf 10 ins	0.615	0.647	0.032	0.000323	64.667
	11	144.5	lijf 11 ins	0.570	0.569	-0.001	-0.000010	-2.000
	12	155.5	lijf 12 ins	0.518	0.578	0.060	0.000597	119.333
	13	166.5	lijf 13 ins	0.527	0.000	-0.527	-0.005270	-120.000
	14	177.5	lijf 14 ins	0.510	0.600	0.090	0.000900	-36.000
	15	188.5	lijf 15 ins	0.613	0.623	0.011	0.000107	-49.333
	16	199.5	lijf 16 ins	0.651	0.685	0.035	0.000347	69.333
17a	217.5	lijf 17a ins					30.000	
onderflens	17b	240	ofl 17b ins					19.333
	18	255	ofl 18 ins	0.473	0.000	-0.473	-0.004727	31.333
	19	265	ofl 19 ins	0.485	0.000	-0.485	-0.004853	20.667
	20	275	ofl 20 ins	0.484	0.482	-0.002	-0.000023	-4.667
	21	285	ofl 21 ins	0.494	0.484	-0.011	-0.000107	-21.333
	22	295	ofl 22 ins	0.495	0.450	-0.045	-0.000450	-90.000

gemiddeld E = 200000
19.000
40.000
26.000
4.667
-8.667
-20.667
33.333
10.000
-16.667
15.667
15.000
-67.667
130.333
-120.000
-36.000
-49.333
-26.667
30.000
19.333
31.333
20.667
20.000
17.333
-33.667

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 1e en 3e meting - buitenkant

2e keer

	nr.	afst. (mm)	code	1e meting	3e meting	verschil 3-1	rek (e)	spanning
								$E = 200000$ $e \times E$
bovenflens	1	5	bfl 1 out	0.525	0.570	0.045	0.000450	90.000
	2	15	bfl 2 out	0.523	0.555	0.032	0.000317	63.333
	3	25	bfl 3 out	0.581	0.592	0.011	0.000107	21.333
	4	35	bfl 4 out	0.098	0.192	0.094	0.000940	
	5	45	bfl 5 out	0.449	0.418	-0.031	-0.000310	-62.000
	6a	60	bfl 6a out	0.367	0.334	-0.033	-0.000327	-65.333
lijf	6b	82.5	lijf 6b out	0.914	0.918	0.003	0.000033	6.667
	7	100.5	lijf 7 out	0.746	0.559	-0.187	-0.001867	
	8	111.5	lijf 8 out	0.920	0.935	0.015	0.000153	30.667
	9	122.5	lijf 9 out	0.508	0.511	0.003	0.000027	5.333
	10	133.5	lijf 10 out	0.716	0.730	0.014	0.000143	28.667
	11	144.5	lijf 11 out	0.522	0.529	0.007	0.000073	14.667
	12	155.5	lijf 12 out	0.478	0.492	0.014	0.000140	28.000
	13	166.5	lijf 13 out	0.571	0.573	0.002	0.000023	4.667
	14	177.5	lijf 14 out	0.549	0.550	0.001	0.000013	2.667
	15	188.5	lijf 15 out	0.544	0.558	0.014	0.000143	28.667
	16	199.5	lijf 16 out	0.272	0.209	-0.063	-0.000630	-126.000
17a	217.5	lijf 17a out	0.482	0.478	-0.004	-0.000040	-8.000	
onderflens	17b	240	ofl 17b out	0.981	0.966	-0.014	-0.000143	-28.667
	18	255	ofl 18 out	0.612	0.579	-0.033	-0.000330	-66.000
	19	265	ofl 19 out	0.538	0.536	-0.002	-0.000023	-4.667
	20	275	ofl 20 out	0.625	0.651	0.025	0.000253	50.667
	21	285	ofl 21 out	0.525	0.542	0.017	0.000167	33.333
	22	295	ofl 22 out	0.576	0.605	0.029	0.000293	58.667

gemiddeld
E = 200000
64.000
63.333
-4.667
-62.000
-65.333
6.667
30.667
64.667
85.000
46.000
112.000
4.667
2.667
28.667
-24.667
-8.000
-28.667
-66.000
-4.667
19.000
8.333
-8.667

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 2e en 3e meting - buitenkant

2e keer

	nr.	afst. (mm)	code	2e meting	3e meting	verschil 3-2	rek (e)	spanning
								$E = 200000$ $e \times E$
bovenflens	1	5	bfl 1 out	0.545	0.570	0.025	0.000253	50.667
	2	15	bfl 2 out	0.533	0.555	0.021	0.000213	42.667
	3	25	bfl 3 out	0.585	0.592	0.007	0.000067	13.333
	4	35	bfl 4 out	0.088	0.192	0.105	0.001047	
	5	45	bfl 5 out	0.422	0.418	-0.005	-0.000047	-9.333
	6a	60	bfl 6a out	0.348	0.334	-0.014	-0.000137	-27.333
lijf	6b	82.5	lijf 6b out	0.899	0.918	0.019	0.000187	37.333
	7	100.5	lijf 7 out	0.552	0.559	0.007	0.000070	
	8	111.5	lijf 8 out	0.940	0.935	-0.005	-0.000053	-10.667
	9	122.5	lijf 9 out	0.522	0.511	-0.011	-0.000110	-22.000
	10	133.5	lijf 10 out	0.745	0.730	-0.015	-0.000150	-30.000
	11	144.5	lijf 11 out	0.546	0.529	-0.017	-0.000173	-34.667
	12	155.5	lijf 12 out	0.501	0.492	-0.009	-0.000090	-18.000
	13	166.5	lijf 13 out	0.588	0.573	-0.015	-0.000147	-29.333
	14	177.5	lijf 14 out	0.566	0.550	-0.016	-0.000163	-32.667
	15	188.5	lijf 15 out	0.581	0.558	-0.023	-0.000227	-45.333
	16	199.5	lijf 16 out	0.270	0.209	-0.061	-0.000610	-122.000
17a	217.5	lijf 17a out	0.460	0.478	0.018	0.000183	36.667	
onderflens	17b	240	ofl 17b out	0.959	0.966	0.008	0.000077	15.333
	18	255	ofl 18 out	0.575	0.579	0.004	0.000043	8.667
	19	265	ofl 19 out	0.529	0.536	0.007	0.000070	14.000
	20	275	ofl 20 out	0.631	0.651	0.020	0.000200	40.000
	21	285	ofl 21 out	0.514	0.542	0.028	0.000277	55.333
	22	295	ofl 22 out	0.588	0.605	0.017	0.000167	33.333

gemiddeld
33.000
42.667
-11.333
-9.333
-27.333
37.333
-10.667
20.000
17.333
-18.333
50.667
-29.333
-32.667
-45.333
-26.333
36.667
15.333
8.667
14.000
17.667
17.000
-28.333

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 1e en 3e meting - buitenkant

3e keer

	nr.	afst.	code	1e meting	3e meting	verschil	rek (e)	spanning		gemiddeld
								E = 190000	E = 200000	
		(mm)				I3-I1		e x E		
bovenflens	1	5	bfl 1 out	0.525	0.574	0.049	0.000490	98.000	68.000	
	2	15	bfl 2 out	0.523	0.559	0.036	0.000363	72.667	72.667	
	3	25	bfl 3 out	0.581	0.590	0.009	0.000090	18.000	-6.333	
	4	35	bfl 4 out	0.098	0.100	0.002	0.000017	3.333	3.333	
	5	45	bfl 5 out	0.449	0.420	-0.029	-0.000287	-57.333	-57.333	
	6a	60	bfl 6a out	0.367	0.340	-0.027	-0.000270	-54.000	-54.000	
lijf	6b	82.5	lijf 6b out	0.914	0.918	0.004	0.000037	7.333	7.333	
	7	100.5	lijf 7 out	0.746	0.560	-0.186	-0.001857			
	8	111.5	lijf 8 out	0.920	0.939	0.019	0.000190	38.000	38.000	
	9	122.5	lijf 9 out	0.508	0.516	0.008	0.000077	15.333	69.667	
	10	133.5	lijf 10 out	0.716	0.732	0.017	0.000167	33.333	87.333	
	11	144.5	lijf 11 out	0.522	0.530	0.008	0.000080	16.000	46.667	
	12	155.5	lijf 12 out	0.478	0.487	0.009	0.000090	18.000	107.000	
	13	166.5	lijf 13 out	0.571	0.578	0.007	0.000073	14.667	14.667	
	14	177.5	lijf 14 out	0.549	0.553	0.004	0.000043	8.667	8.667	
	15	188.5	lijf 15 out	0.544	0.561	0.017	0.000173	34.667	34.667	
	16	199.5	lijf 16 out	0.272	0.210	-0.061	-0.000613	-122.667	-23.000	
	17a	217.5	lijf 17a out	0.482	0.480	-0.002	-0.000020	-4.000	-4.000	
	onderflens	17b	240	ofl 17b out	0.981	0.970	-0.010	-0.000103	-20.667	-20.667
		18	255	ofl 18 out	0.612	0.588	-0.024	-0.000237	-47.333	-47.333
		19	265	ofl 19 out	0.538	0.541	0.003	0.000030	6.000	6.000
		20	275	ofl 20 out	0.625	0.650	0.025	0.000250	50.000	18.667
21		285	ofl 21 out	0.525	0.551	0.025	0.000253	50.667	17.000	
22		295	ofl 22 out	0.576	0.609	0.034	0.000337	67.333	-4.333	

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode
spanning uit 2e en 3e meting - buitenkant

3e keer

	nr.	afst.	code	1e meting	3e meting	verschil	rek (e)	spanning		gemiddeld
								E = 200000	e x E	
		(mm)				I3-I2				
bovenflens	1	5	bfl 1 out	0.545	0.574	0.029	0.000293	58.667	37.000	
	2	15	bfl 2 out	0.533	0.559	0.026	0.000260	52.000	52.000	
	3	25	bfl 3 out	0.585	0.590	0.005	0.000050	10.000	-13.000	
	4	35	bfl 4 out	0.088	0.100	0.012	0.000123	24.667	24.667	
	5	45	bfl 5 out	0.422	0.420	-0.002	-0.000023	-4.667	-4.667	
	6a	60	bfl 6a out	0.348	0.340	-0.008	-0.000080	-16.000	-16.000	
lijf	6b	82.5	lijf 6b out	0.899	0.918	0.019	0.000190	38.000	38.000	
	7	100.5	lijf 7 out	0.552	0.560	0.008	0.000080	16.000	16.000	
	8	111.5	lijf 8 out	0.940	0.939	-0.002	-0.000017	-3.333	-3.333	
	9	122.5	lijf 9 out	0.522	0.516	-0.006	-0.000060	-12.000	25.000	
	10	133.5	lijf 10 out	0.745	0.732	-0.013	-0.000127	-25.333	19.667	
	11	144.5	lijf 11 out	0.546	0.530	-0.017	-0.000167	-33.333	-17.667	
	12	155.5	lijf 12 out	0.501	0.487	-0.014	-0.000140	-28.000	45.667	
	13	166.5	lijf 13 out	0.588	0.578	-0.010	-0.000097	-19.333	-19.333	
	14	177.5	lijf 14 out	0.566	0.553	-0.013	-0.000133	-26.667	-26.667	
	15	188.5	lijf 15 out	0.581	0.561	-0.020	-0.000197	-39.333	-39.333	
	16	199.5	lijf 16 out	0.270	0.210	-0.059	-0.000593	-118.667	-24.667	
17a	217.5	lijf 17a out	0.460	0.480	0.020	0.000203	40.667	40.667		
onderflens	17b	240	ofl 17b out	0.959	0.970	0.012	0.000117	23.333	23.333	
	18	255	ofl 18 out	0.575	0.588	0.014	0.000137	27.333	27.333	
	19	265	ofl 19 out	0.529	0.541	0.012	0.000123	24.667	24.667	
	20	275	ofl 20 out	0.631	0.650	0.020	0.000197	39.333	17.333	
	21	285	ofl 21 out	0.514	0.551	0.036	0.000363	72.667	25.667	
	22	295	ofl 22 out	0.588	0.609	0.021	0.000210	42.000	-24.000	

Datasheet restspanningsonderzoek: sectioning methode

Spanningen bepaald uit rekstroken

nr.	afst.	code	0 meting	1e meting	2e meting	3e meting
	(mm)					
1	5	bfl 1 out	-0.625	-0.954	-0.881	-0.436
5	45	bfl 5 out	-0.003	-0.751	-0.885	-0.937
7	100.5	lijf 7 out	-0.117	-0.649	-0.565	-0.28
11	144.5	lijf 11 out	0.094	-0.03	0.259	0.163

nr.	afst.	code	verschil	rek	spanning
	(mm)		um/m		e x E
			2-1		E = 200000
1	5	bfl 1 out	0.073	0.000073	14.6
5	45	bfl 5 out	-0.134	-0.000134	-26.8
7	100.5	lijf 7 out	0.084	0.000084	16.80
11	144.5	lijf 11 out	0.289	0.000289	57.8

nr.	afst.	code	verschil	rek	spanning
	(mm)		um/m		e x E
			3-1		E = 200000
1	5	bfl 1 out	0.518	0.000518	103.6
5	45	bfl 5 out	-0.186	-0.000186	-37.2
7	100.5	lijf 7 out	0.369	0.000369	73.80
11	144.5	lijf 11 out	0.193	0.000193	38.6

nr.	afst.	code	verschil	rek	spanning
	(mm)		um/m		e x E
			3-2		E = 190000
1	5	bfl 1 out	0.445	0.000445	84.55
5	45	bfl 5 out	-0.052	-0.000052	-9.88
7	100.5	lijf 7 out	0.285	0.000285	54.15
11	144.5	lijf 11 out	-0.096	-0.000096	-18.24

Bijlage IV: foto's van de uitvoering van de hole-drilling- en de sectioning methode

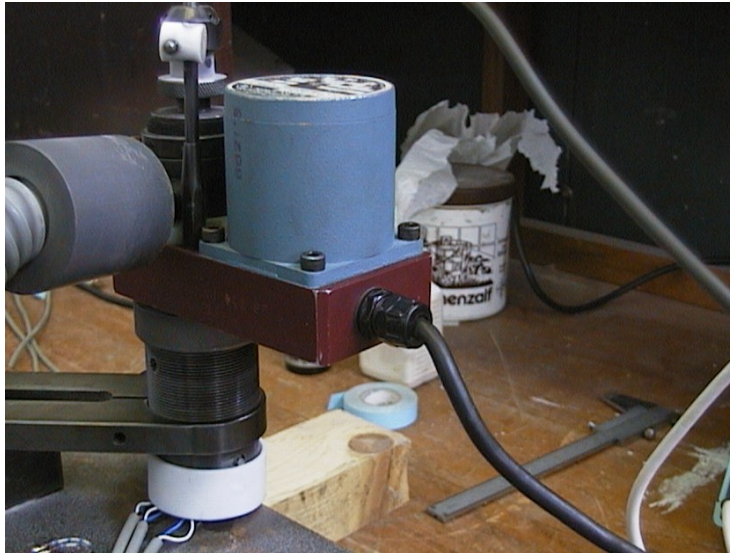


foto 1: boormachine hole-drilling methode



foto 2: totaal beeld Air abrassive system



foto 3: rekrozet na boren gat



foto 4: proefneming hole-drilling methode



foto 5: resultatenmeting hole-drilling methode 2

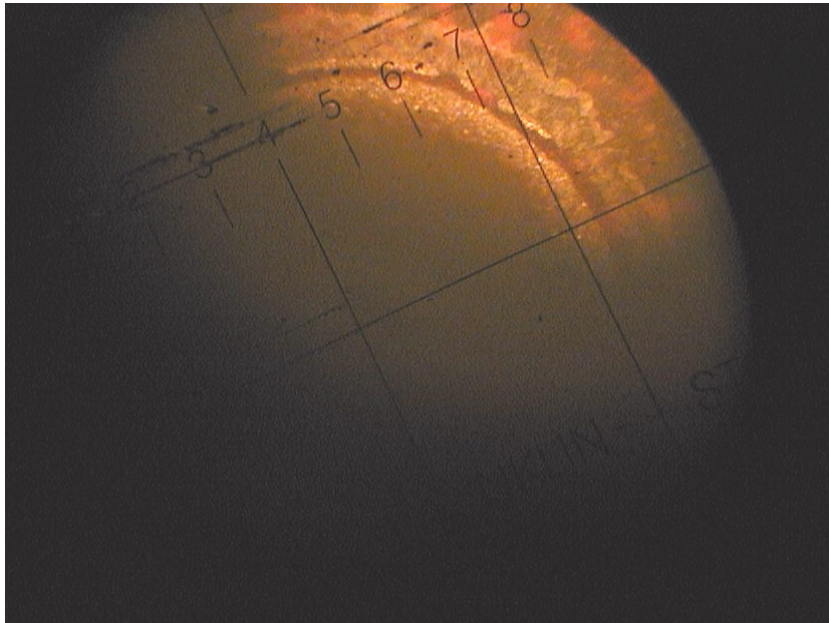


foto 6: zicht door de microscoop



foto 7: meting sectioning methode, na verzagen zijstukken



foto 8: meting van de sectioning methode, gezaagde strookjes



foto 9: montage rekstrook, afgedicht met was

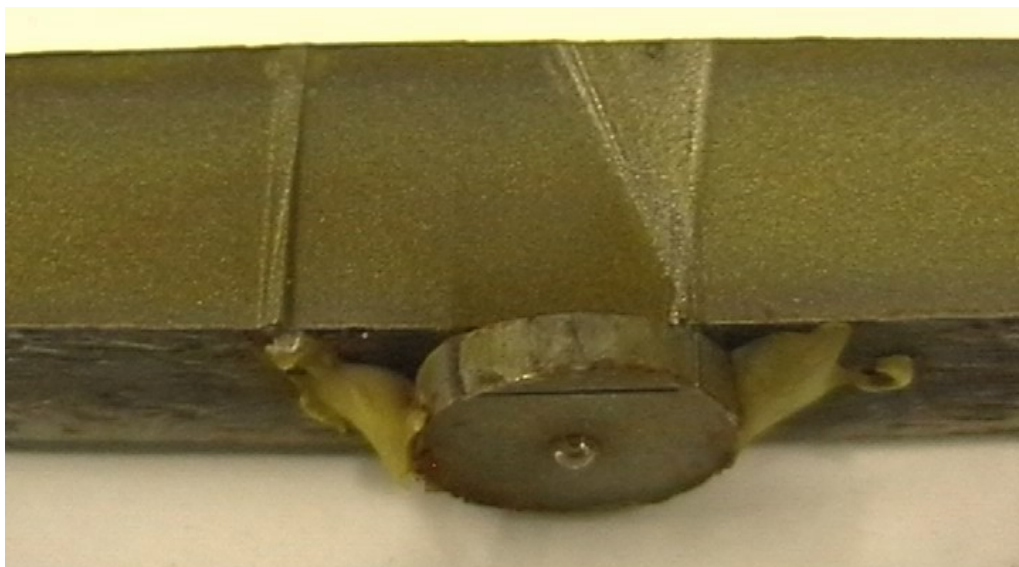


foto 10: hapering vonkmachine bij stalen plaatje

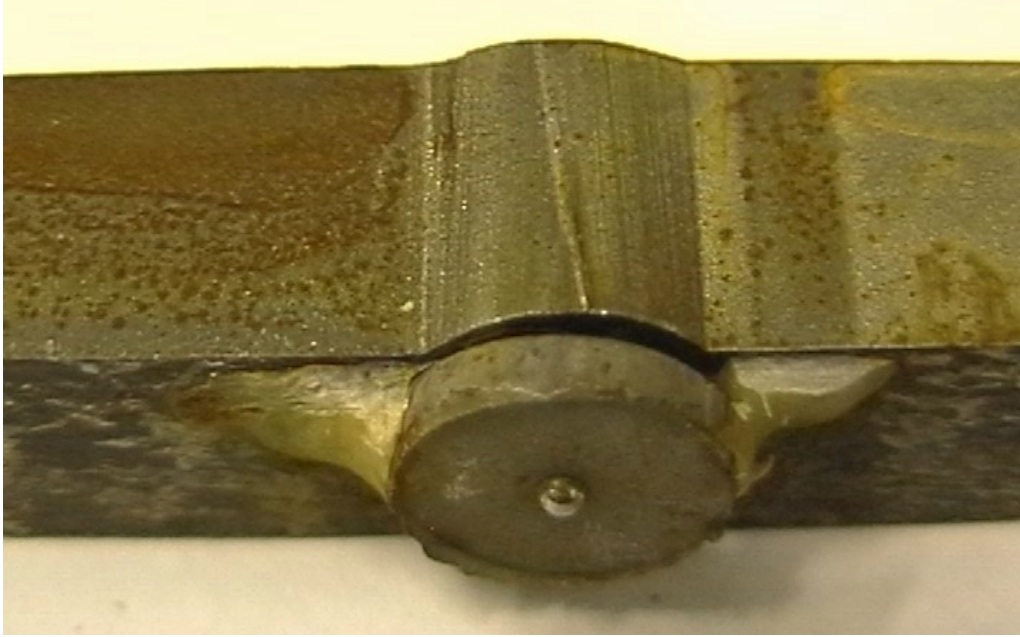


foto 11: om het stalen plaatje heen zagen van de vonkmachine 1



foto 12: geribbeld oppervlak door raken van de rekstrook tijdens het vonken