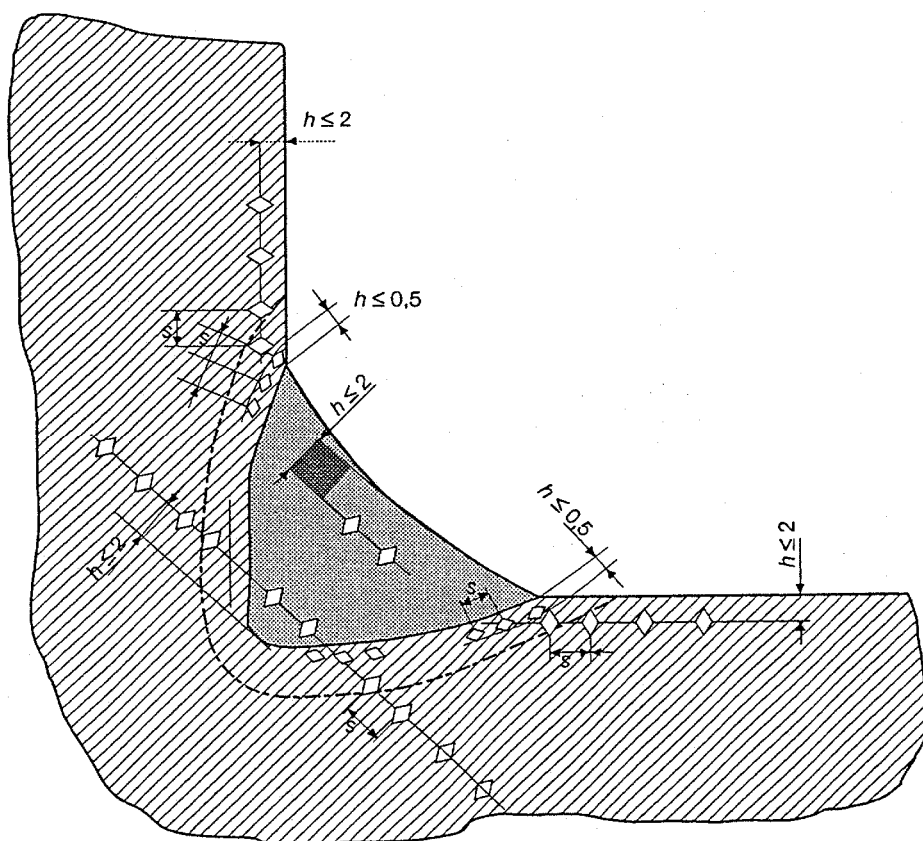




CENTRUM VOOR
NATUUR & TECHNIEK
HOGESCHOOL
UTRECHT

Destructief onderzoek van metalen en lasverbindingen



ir. C.A. Brak

titelblad:

Voorbeeld dat de plaats laat zien waar de hardheid in lasmetaal, warmtebeïnvloede zone en basismateriaal gemeten moet worden bij een hoeklas (Lloyd's Register 1995).

© 1996 C.A. Brak; 5^e revisie 2007

Niets uit dit dictaat mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, of op enige andere wijze zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur.

Inhoudsopgave

1. DESTRUCTIEF ONDERZOEK AAN LASVERBINDINGEN.....	5
1.1 INLEIDING	5
1.2 OVERZICHT VAN DESTRUCTIEVE TESTMETHODEN.....	6
2. MECHANISCHE BEPROEVINGEN	9
2.1 DE TREKPROEF.....	9
2.1.1 Korte beschrijving van de proef.....	9
2.1.1 Arbeid.....	13
2.1.2 Ware trekkromme	13
2.1.3 Invloed van de temperatuur	15
2.1.4 Invloed van de reksnelheid.....	15
2.1.5 Invloed van de meetlengte.....	16
2.1.6 De breuk.....	16
2.1.7 Constante van Poisson	17
2.1.8 Opgaven	18
2.1.9 De trekproef in een lasverbinding	18
2.2 DE BUIGPROEF	21
2.2.1 Algemeen.....	21
2.2.2 De buigproef in een lasverbinding (EN 910)	22
2.2.3 De breekproef (NEN-EN 287)	25
2.3 DE HARDHEIDSMETING	26
2.3.1 Brinell hardheidsmeting (NEN-EN-ISO 6505-1)	26
2.3.2 Vickers hardheidsmeting (NEN-EN-ISO 6506-1).....	28
2.3.3 Rockwell hardheidsmeting (NEN-EN-ISO 6508-1).....	30
2.3.4 Andere hardheidsmethoden en mobiele hardheidstestmethodes	31
2.3.5 Vergelijking tussen verschillende methoden	35
2.3.6 Hardheidsmetingen in een lasverbinding	37
2.4 DE KERFSLAGPROEF (NEN-EN 10045-1)	38
2.4.1 Inleiding	38
2.4.2 Uitvoering van de proef:	39
2.4.3 De kerfslagproef in lasverbindingen (NEN-EN 875)	43
2.4.4 Slagbuigproef.....	45
2.5 BREUKTAALHEIDSPROEVEN.....	46
2.5.1 De CTOD proef.....	46
2.5.2 CTOD proeven in lasverbindingen.....	47
2.5.3 De Wide Plate Test.....	50
2.5.4 De vermoeiingsproef.....	51
3. METALLOGRAFISCH ONDERZOEK	54
3.1 MACROSCOPISCH ONDERZOEK.....	54
3.2 MICROSCOPISCH ONDERZOEK	55
4. CORROSIETESTEN	56
4.1.1 Putcorrosietesten (pittingtest).....	56
4.1.2 Interkristallijne corrosietesten.....	56
4.1.3 Spanningscorrosietesten.....	58
4.1.4 Corrosietesten in lasverbindingen	58
5. SPECIALE TESTEN.....	59
5.1 DE KRIJPPROEF	59
5.1.1 Korte beschrijving van het krimpmechanisme	61
5.1.2 Larson-Miller extrapolatie.....	62
5.1.3 Krijpproeven in een lasverbinding	63

1. Destructief onderzoek aan lasverbindingen

1.1 Inleiding

In de begintijd van het lassen was er nog weinig vertrouwen in de sterkte van een lasverbinding. Vaak werd er nog een stripje staal over de lasnaad heen gelast. Op kritische plaatsen werd (wordt!) er nog geklonken in plaats van gelast.

Hoe werd de lasbaarheid nu beoordeeld?

Wat is eigenlijk lasbaarheid?

Op dit begrip en allerlei daarmee samenhangende aspecten wordt verderop in deze cursus nog uitgebreid ingegaan. Hier wordt volstaan met een korte inleiding.

Lasbaarheid kan worden onderscheiden in drie soorten:

- **Executieve lasbaarheid**
Aanvankelijk betrof dit vooral een visuele beoordeling. De las moest er goed uitzien, een vloeiend verloop hebben en geen scheuren en grote open gasholtes vertonen. Thans wordt de executieve lasbaarheid zowel beoordeeld op uiterlijk als op inwendig niet destructief onderzoek.
- **Metallurgische lasbaarheid**
Het lasmetaal en de door de laswarmte beïnvloede zone naast de las (HAZ, *Heat Affected Zone*) moeten gelijkwaardige mechanische eigenschappen hebben als het moedermateriaal. Voor de beoordeling van de metallurgische lasbaarheid werd aanvankelijk een lasconstructie (bijvoorbeeld een proefvat) kapot gemaakt.
Later zijn de resultaten van trekproeven op lasproefplaten gebruikt om met voldoende vertrouwen de barstdruk van een drukvat te voorspellen. Thans kan op basis van het destructief onderzoek aan lasproefplaten de metallurgische lasbaarheid voldoende worden beoordeeld.
- **Constructieve lasbaarheid**
Door schade en schande is geleerd dat een lasverbinding beproefd in een trekbank in het laboratorium niet altijd hetzelfde resultaat gaf als een lasverbinding in de praktijk. Soms trad in de praktijk een brose breuk op, dat wil zeggen een breuk zonder veel plastische vervorming of anders gezegd bij een spanning beneden de vloeigrens.
Dit in tegenstelling tot een zogenaamde overbelastingsbreuk welke ontstaat bijvoorbeeld bij het kapot persen van een drukvat.

Tijdens en na de Tweede Wereldoorlog is veel onderzoek gedaan naar het bros breken. Geheel gelaste Liberty schepen bleken bijvoorbeeld zomaar in de haven bros te breken. Uit een groot onderzoek bleek dat de platen welke bros braken een bepaalde kerfslagenergie (Charpy-V) niet haalden ($20 \text{ ft-1b} \approx 27 \text{ J}$). Deze kerfslagenergie is later met een veiligheidsmarge herleid tot een kerfslagwaarde van $3,5 \text{ kgm/cm}^2$ (KCV) en nu tot een **kerfslagenergie** van 27 J voor een staafje van $10 \times 10 \text{ mm}$ (KV). De relatie tussen een brosse breuk en een kerfslagwaarde bij een minimum bedrijfstemperatuur was toen gevonden. Later zijn veel uitgebreidere brosse breuk proeven in het laboratorium uitgevoerd. Hierbij bleek dat de dikte van het staal, de foutgrootte en de hoeveelheid lokale plastische vervorming c.q. de spanningen eveneens belangrijk waren.

Op basis van deze proeven (Wide Plate Tests) en de eerder opgedane ervaring is door de Shell een constructiecode opgesteld, die later door Stoomwezen als blad M 0110 is "overgenomen". Nog weer later is de theorie van de breukmechanica ontwikkeld. Eerst was dat de lineair-elastiche breukmechanica, om de brosse breuken in Polarisraketten van maraging staal te kunnen verklaren.

Later is de plastische breukmechanica theorie (COD-concept) ontwikkeld, welke een redelijke verklaring kon geven van het breukgedrag van de gewone, veel taaiere constructiestaalsoorten.

In dit hoofdstuk zullen de beproevingen die betrekking hebben op de metallurgische lasbaarheid worden besproken. Het is van belang vertrouwd te zijn met de standaardproeven, waarmee materiaaleigenschappen worden gemeten en inzicht te hebben in de betekenis van de verkregen gegevens.

1.2 Overzicht van destructieve testmethoden

Met betrekking tot materialen en lasverbindingen is er een zeer breed scala aan destructieve beproevingsmethoden. Dit zijn de standaard mechanische beproevingen, maar ook metallografisch onderzoek, corrosietesten en speciale technologische proeven.

In dit kader zullen de relevante onderzoeksmethoden beschreven worden met een verwijzing naar de actuele normen en/of codes. Immers, voor alle testen geldt dat deze strikt gedefinieerd moeten worden of zijn om reproduceerbaarheid te waarborgen. De testmethoden geven een waardeoordeel.

Een overzicht van destructieve testmethoden is weergegeven in onderstaande Tabel 1.

Het is noodzakelijk om altijd bij resultaten van beproevingen te vermelden volgens welke normen of codes deze uitgevoerd zijn.

Mechanische beproevingen	Overwegend statisch	Trekproef Buigproef Hardheidsmeting CTOD proef Wide Plate test
	Overwegend dynamische	Kerfslagproef Vermoeiingsproef
Metallografische onderzoeken		Macroscopisch onderzoek Microscopisch onderzoek
Corrosie proeven		Putcorrosietest Interkristallijne corrosietest Transkristallijne corrosietest
Speciale testen		Kruipproeven Ferrietmetingen Waterstofbepaling

Tabel 1 Overzicht van de belangrijkste beproevingsmethoden.
De speciale proeven ferrietmetingen en waterstofbepaling worden in het vak Lasmetaalkunde uitvoerig besproken.

Van de in Tabel 1 genoemde proeven vindt voor zover ze in dit hoofdstuk passen, een korte beschrijving van de uitvoering plaats en de wijze waarop de beproeving in lasverbindingen voorkomt.

Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen lasmetaalbeproevingen en beproeving van een lasverbinding. Verschillende normen en codes schrijven daarbij verschillende uitvoeringen voor. In dit hoofdstuk wordt uitgegaan van de NEN-EN normen, mits van toepassing.

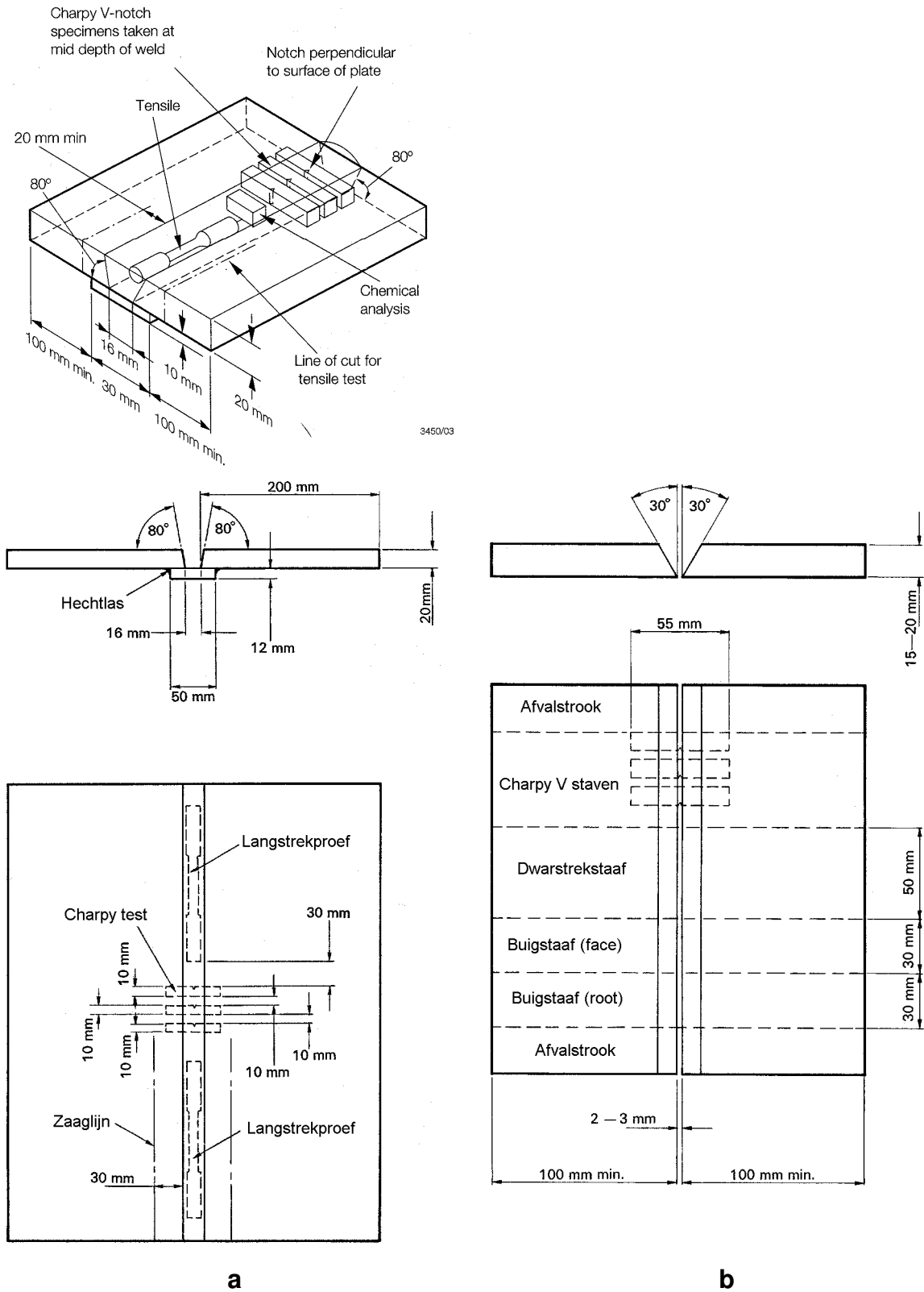
Voor het kwalificeren van lasprocedures voor boog- en autogeenlassen van staal en booglassen van nikkel en nikkellegeringen is NEN-EN-ISO 15614-1 van toepassing.

Deze norm definieert de voorwaarden voor de uitvoering van de lasmethodebeproevingen.

Voor Al en Al-legeringen wordt verwezen naar NEN-EN-ISO 15614-2.

Voor de beproevingen worden testplaten gelast (“lascoupons”). Voor zover het de lasmetaalbeproeving betreft, zijn de lasgegevens en de wijze van lassen voorgeschreven. Het lassen van de lasverbinding vindt plaats volgens lasprocedures.

Een voorbeeld van lascoupon voor de beproeving van lasmetaal is weergegeven in Figuur 1a. Voor de beproeving van een stompe lasverbinding kan het voorbeeld in Figuur 1b. dienen. Voor lasverbindingen in pijpen en voor hoeklassen gelden dergelijke voorschriften.



Figuur 1
 a) lascoupon voor lasmetaalbeproeving ; b) lascoupon voor lasverbinding (voorbeeld)

2. Mechanische beproevingen

2.1 De trekproef

De trekproef is wellicht de belangrijkste en meest algemene proef om een waardeoordeel te geven over de sterkte en taaiheid van een materiaal of een verbinding.

Bij deze proef wordt een proefstaaf met een constante snelheid één-assig gerekst tot breuk optreedt, waarbij voor een gegeven verlenging de benodigde kracht als een afhankelijke wordt gemeten.

Er bestaan 2 typen trekstaven; de ronde en platte trekstaaf, beide met varianten op de afmetingen, afhankelijk van de norm of code en de dikte en vorm van het te testen materiaal.

De proefstaafafmetingen en beproevingsmethode voor beproefing bij kamertemperatuur is in NEN-EN 10002-1 beschreven. Deze norm geldt hier ook als uitgangspunt. Indien de beproefing bij hoge temperatuur plaats moet vinden dan is NEN-EN 10002-5 van toepassing.

2.1.1 Korte beschrijving van de proef

Tijdens de proef, die met een matige snelheid wordt uitgevoerd wordt de kracht als functie van de verlenging gemeten en getekend.

Het verband tussen F en ΔL kan grafisch worden weergegeven, maar omdat het resultaat dan afhankelijk is van de afmetingen van de staaf, worden de begrippen spanning en rek gebruikt.

De grafische weergave van de spanning als functie van de rek wordt de *spanning-rek kromme* of **trekkromme** genoemd.

$$\text{spanning} : \sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{rek} : \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [\text{dimesieloos}]$$

In Figuur 2 is een (schematisch) spannings-rek diagram weergegeven. Uit deze weergave zijn een aantal karakteristieke punten af te leiden.

traject OB In het begin van de proef rekt het materiaal elastisch. Dat wil zeggen dat na het wegnemen van de belasting het materiaal terugveert naar zijn oorspronkelijke lengte L_0 . In Figuur 2 geldt dit voor het lijnstuk OB.

Aanvankelijk is de spanning recht-evenredig met de rek; in dit gebied geldt de wet van Hooke.

$$\text{Wet van Hooke: } \sigma = E \cdot \varepsilon$$

De constante E (MPa of N/mm^2) is hierin een materiaalconstante, de elasticiteitsmodulus.

$$\text{Treksterkte : } R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa of N/mm}^2]$$

De benodigde kracht voor verdere verlenging gaat nu dalen en bij punt E breekt de staaf. Na punt D concentreert de rek zich in een klein gebied van de staaf, zodat alleen daar de staaf dunner wordt: de staaf snoert in. Dat de spanning na punt D weer gaat dalen komt doordat deze op de oorspronkelijk doorsnede betrekking heeft.

Na de breuk van de proefstaaf kunnen de breekrek en de insnoering worden bepaald:

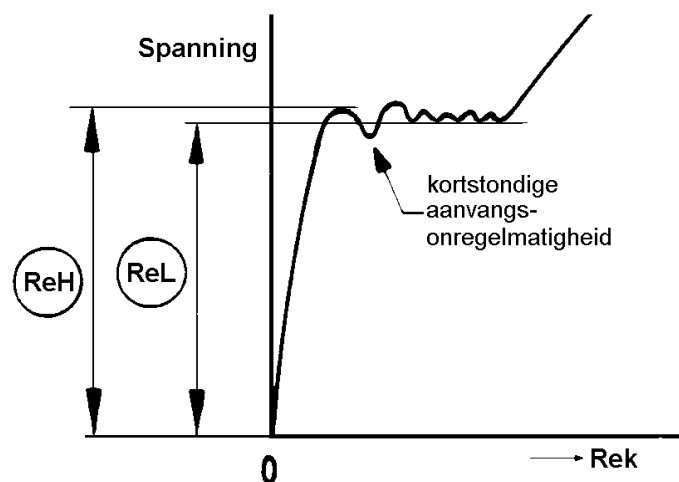
$$\text{breekrek : } A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\text{insnoering : } Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

Let erop dat in de formule van de insnoering gewerkt wordt met de oppervlakte S!

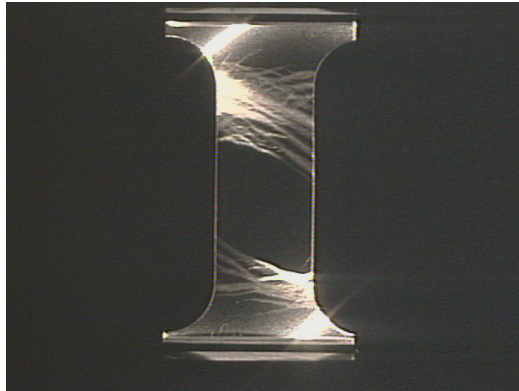
vloeigrens

De trekkromme van gegloeid constructiestaal vertoont een bijzonder verschijnsel: het vloeien (Figuur 3). Zodra de plastische deformatie begint, neemt de spanning sprongsgewijze af. Na het bereiken van een laagste punt blijft de spanning enige tijd schommelen, waarna de trekproef verder normaal verloopt. De spanning waarbij de eerste duidelijke daling van de kracht wordt waargenomen wordt de **bovenste vloeigrens** (R_{eH}) genoemd. De laagste spanning tijdens het vloeien, kortstondige onregelmatigheden buiten beschouwing gelaten, is de **onderste vloeigrens** (R_{eL}). Door het vloeien is de 0,2-rek grens niet te bepalen; **daarom wordt voor staal de onderste vloeigrens als maat genomen.**



Figuur 3 Deel van de trekkromme van zacht staal met vloeiverschijnsel.

Tijdens het vloeien wordt het materiaal niet homogeen gedeformeerd. De deformatie begint ergens en plant zich schoksgewijze door de staaf voort. De reeds gevloeiende gedeelten tekenen zich af als schuin liggende banden af (Lüdersbanden).



Figuur 4 Lüdersbanden tijdens het vloeien van staal

In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de belangrijkste eigenschappen die met een trekproef bepaald kunnen worden.

Eigenschap	symbool	eenheid	hoge waarde / lage waarde
Elasticiteitsmodulus	E	N/mm ²	stijf / slap
0,2%-rekgrens	R _{0,2}	N/mm ²	stug / week
Bovenste vloeigrens	ReH	N/mm ²	stug / week
Treksterkte	Rm	N/mm ²	sterk / zwak
Breukrek	At	%	taai / bros
Insnoering	Z	%	taai / bros

Tabel 2 Overzicht van de belangrijkste begrippen die samenhangen met de trekproef.

Voor materialen die geen duidelijk lineair gebied in het elastische deel kennen, zoals kunststoffen en grijs gietijzer (ijzer met grafiet) kan moet de E-modulus bepaald worden op één van de volgende manieren:

- Als tangens van de hoek die de raaklijn aan de kromme maakt bij een bepaalde (van belang zijnde) elastische spanning. We spreken dan van een **tangentmodulus** als $\sigma \neq 0$ en van **aanvangsmodulus** als $\sigma = 0$
In formule: $E_t = (d\sigma/d\varepsilon)_{\varepsilon = \varepsilon_1}$, respectievelijk $E_0 = (d\sigma/d\varepsilon)_{\varepsilon = 0}$
- Als gemiddelde elasticiteitsmodulus over een bepaald belastingstraject, gemeten vanaf $\sigma = 0$:
Dit wordt **secantsmodulus** genoemd: $E_s = \sigma_1/\varepsilon_1$.

2.1.1 Arbeid

Het oppervlakte onder de kromme *kracht - verlenging* en stelt de arbeid voor die nodig is om het proefstuk te vervormen. De dimensie is immers $N \times m = J$.

Het oppervlak onder de trekkromme (*spanning- rek*) stelt de specifieke arbeid voor; dit is de arbeid per volume-eenheid. De dimensie is nu $N/mm^2 \times l = Nm/mm^3 = J/m^3$.

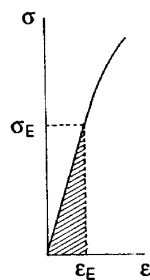
Een groot deel van de verrichte arbeid wordt omgezet in warmte. Het is duidelijk te merken dat de staaf op het moment van breken in het ingesnoerde gebied aanmerkelijk warmer is geworden.

Omdat in het elastische gebied geldt dat $\sigma = E \cdot \epsilon$, zal de specifieke elastische energie gelijk aan het driehoekige oppervlak onder de moduluslijn (zie Figuur 5).

Deze elastische energie komt weer vrij bij het ontlasten van het materiaal.

Dit is van groot belang voor bijvoorbeeld veren.

Voor bepaalde veren moet dit ingesloten oppervlak zo groot mogelijk zijn, dan is er immers een grote energieopslag. Een materiaal met een hoge rekgrens (eigenlijk elasticiteitsgrens) bij een "lage" E-modulus voldoet hieraan, zoals bijvoorbeeld messing en brons.



De arbeid verricht door de staaf in het elastische gebied komt weer vrij bij ontlasten van de staaf

Voor deze elastische arbeid vinden we:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{E} \quad (N/mm^2 \equiv J/mm^3)$$

W is groot als σ groot is en E klein.

Figuur 5 Elastische arbeid

2.1.2 Ware trekkromme

Als een staaf getrokken wordt, wordt hij niet alleen langer maar ook dunner. Deze diametervermindering is in het begin (in het elastische gebied) nog erg klein. Pas als er insnoering van de staaf optreedt, neemt de diameter zichtbaar af.

2.1.2.1 Ware spanning

Bij de trekproef wordt de spanning gedefinieerd als

$\frac{\text{belasting}}{\text{oorspronkelijke doorsnede}}$. Daar echter de doorsnede na het passeren van de

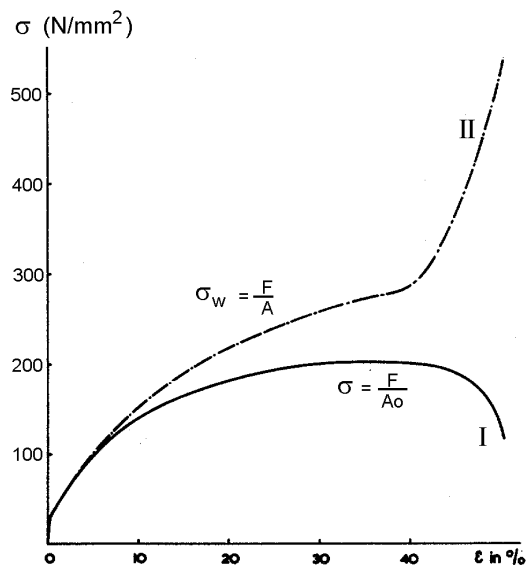
rekgrens merkbaar afneemt, zal de werkelijke spanning hoger zijn.

We kunnen een **ware spanning** σ_w definiëren als $\frac{\text{belasting}}{\text{doorsnede bij belasting}}$

Indien nu een grafiek getekend wordt van deze werkelijke spanning als functie van de rek ontstaat een figuur als weergegeven in Figuur 6. Deze kromme noemt men de **ware trekkromme**. In het begin zijn de afwijkingen nog klein: de staaf wordt maar langzaam en gelijkmatig dunner en de berekende spanning geldt nog voor het hele meetgebied van de staaf.

Na het passeren van de maximale belasting, als de rek zeer plaatselijk is, wordt de spanning ter plaatse van de insnoering zeer groot.

Voor de praktijk heeft de ware spanning (en de ware rek) slechts betekenis bij het vervormen van plaat. Een constructeur zal het materiaal nooit zover belasten dat blijvende vervorming of vermoeiing op kan treden: de spanningen liggen dan ruim onder de rekgrens



Figuur 6 Ware spanning σ_w van gegloeid koper (kromme II).

2.1.2.2 Ware rek

Naast ware spanning kan ook de ware rek bepaald worden. De staaf wordt immers steeds langer en als elke volgende (kleine verlenging) betrokken wordt op de er aan voorafgaande lengte krijgt men **ware rek ϵ_w** .

Stel men voert de trekproef stapsgewijs uit. Bij de n-de spanningsverhoging neemt de verlenging dan toe met de lengte ΔL_n . Dan volgt voor de *gewone* rek:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\Delta L_1}{L_0} + \frac{\Delta L_2}{L_0} + \frac{\Delta L_3}{L_0} + \dots = \sum \frac{\Delta L_n}{L_0}$$

Betrekt men de verlenging van elke volgende stap op de lengte van de staaf die daar direct aan vooraf gaat dan volgt:

$$\epsilon' = \frac{\Delta L_1}{L_0} + \frac{\Delta L_2}{L_1} + \frac{\Delta L_3}{L_2} + \dots = \sum \frac{\Delta L_n}{L_{n-1}}$$

Maken we nu de stapjes oneindig klein dan is het resultaat:

$$\varepsilon_w = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

Deze procedure heeft alleen maar zin als ze betrokken wordt op een stukje metaal dat homogeen wordt vervormd

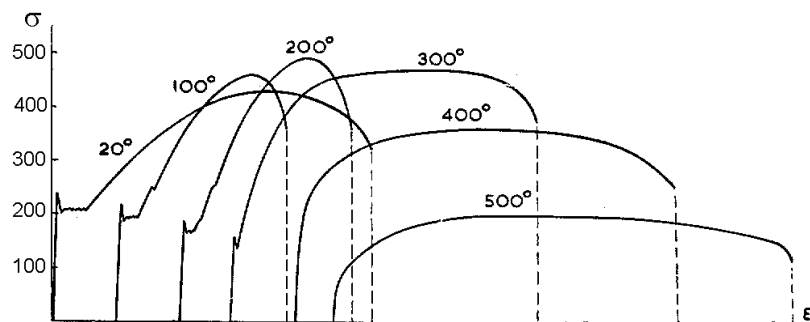
2.1.3 Invloed van de temperatuur

In het algemeen geldt dat metalen bij hogere temperatuur beter vervormbaar zijn dan bij lagere. De rekgrens en de treksterkte liggen lager, de rek en de insnoering zijn hoger.

Hierdoor is er minder energie nodig om materialen bij een hogere temperatuur te vervormen.

Een ander gevolg hiervan is dat een constructie, waarin inwendige spanningen aanwezig zijn bij temperatuurverhoging kunnen gaan vervormen.

Staal wijkt iets af van dit gedrag: tot ca. 200 °C stijgt de treksterkte, om vervolgens te gaan dalen. De rekgrens daalt steeds bij toenemende temperatuur.



Figuur 7 Trekkrommes van gegloeid (zacht) staal bij verschillende temperaturen. De treksterkte stijgt eerst tot ca 200 °C om daarna te dalen; de rekgrens daalt continu. (De nulpunten van de verschillende krommes zijn steeds naar rechts verschoven ter wille van de duidelijkheid)

2.1.4 Invloed van de reksnelheid

De snelheid waarmee de trekproef wordt uitgevoerd, de reksnelheid, heeft ook invloed op de trekkromme.

Bij toenemende reksnelheid nemen de rekgrens en treksterkte toe, terwijl de rek en insnoering afnemen. Bij kamertemperatuur is de invloed bij de meeste metalen niet zo groot, maar de snelheid wordt in de norm wel voorgeschreven, en is afhankelijk van de te meten grootte. Meestal kan worden volstaan met het voorschrijven van een maximale reksnelheid.

Voorbeeld Voor staal moet de spanningstoename in het elastische gebied liggen tussen de 6 en 30 N/mm²s⁻¹

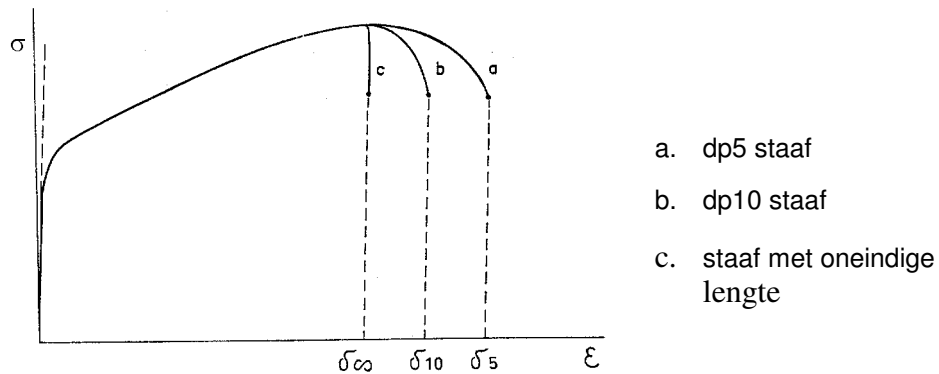
Voor zink moet de reksnelheid (12,5 ± 5) % per minuut bedragen (speciaal geval).

2.1.5 Invloed van de meetlengte

Hoe langer de staaf is, des te minder de invloed is die de rek bij de insnoering heeft op de totale rek. Omgekeerd: in een korte staaf wordt relatief groot deel van de staaf lengte door de rek bij insnoering ingenomen.

De vorm van de trekkromme is dus afhankelijk van de meetlengte.

Daarom moet de meetlengte bij de staaf vermeld worden. Standaard meetlengtes zijn dp_5 en dp_{10} , wat betekent dat de meetlengte 5, resp. 10 keer de diameter van de ronde staaf is.

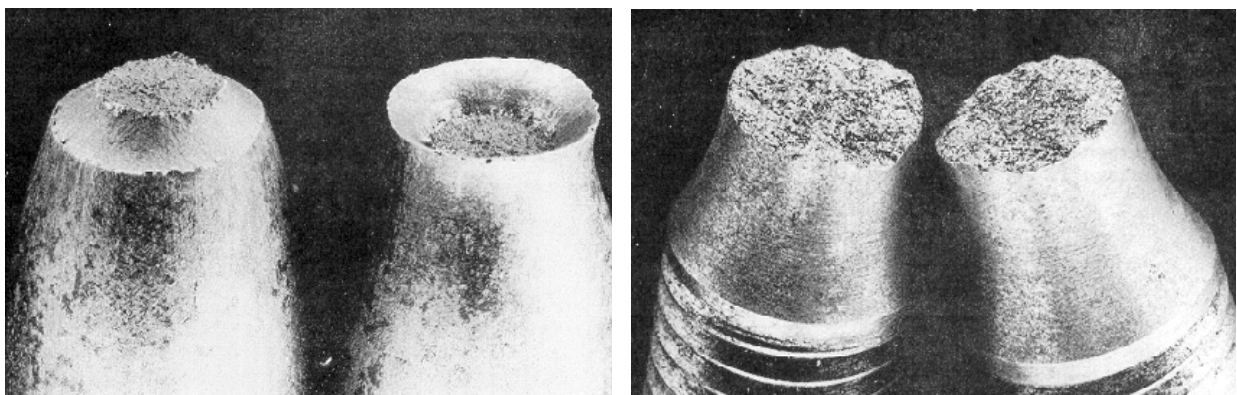


Figuur 8 De meetlengte heeft invloed op de gemeten rek

2.1.6 De breuk

Aan het breukvlak van een trekstaaf kan men zien of het materiaal taai of bros is. In een taai materiaal ontstaat een **kratervormige breuk**. De “wanden” van de krater staan onder een hoek van 45° met de staafas, als gevolg van afschuiving.

In een bros metaal treedt deze afschuiving niet op en zal het materiaal een **splijtbreuk** vertonen. Het hele breukoppervlak staat nagenoeg loodrecht op de staafas. Een typisch voorbeeld van een brossen breuk ontstaat bij gietijzer (Figuur 9).



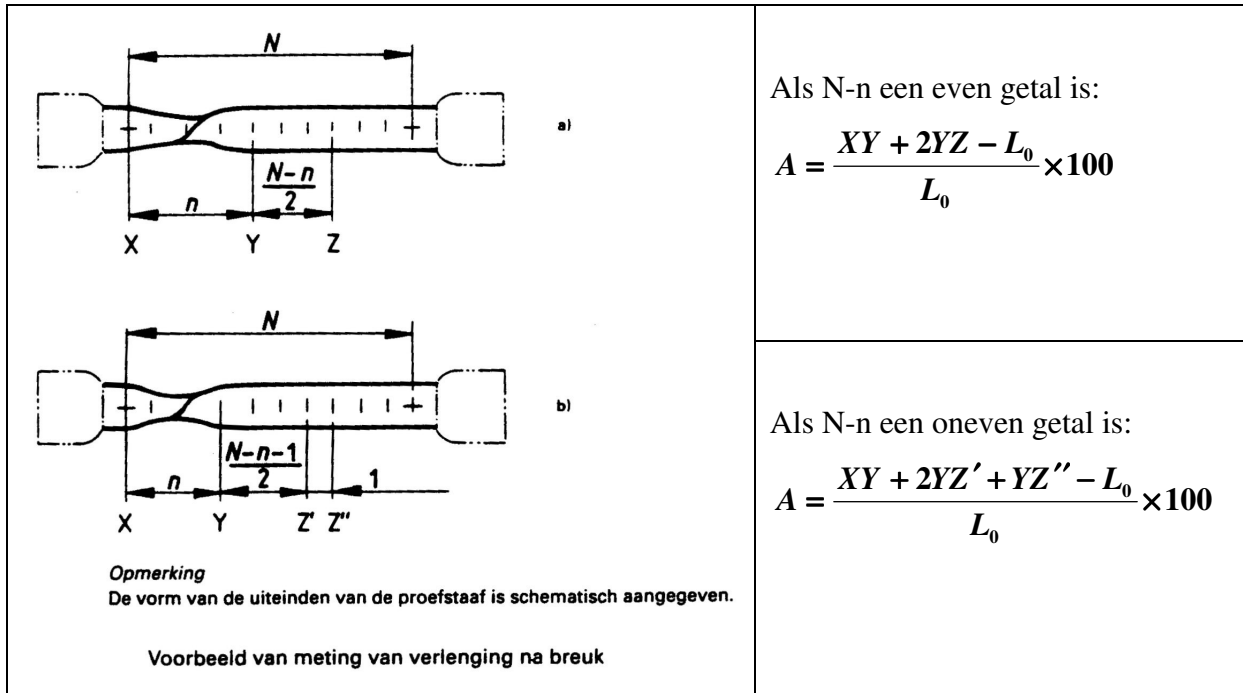
Breukvlak van taai metaal
(bijvoorbeeld zacht staal)

Breukvlak van bros materiaal
(bijvoorbeeld gietijzer)

Figuur 9 Breukvlakken van gebroken trekstaven.

De breuk zal niet altijd mooi in het midden van de staaf breken. Het gevolg daarvan is dat het kortste deel relatief meer gerekt is dan het langste deel. Hoe bepaal je de brekrek bij een excentrische breuk?

De procedure hiervoor is weergegeven in een bijlage van de norm EN-10002-2. Zie Figuur 10.



Figuur 10 Bepaling van de brekrek bij een asymmetrische breuk

2.1.7 Constante van Poisson

De verlenging van de staaf in het elastische gebied resulteert in een contractie in de richtingen daar loodrecht op. Voor een (quasi)-isotroop materiaal zijn de contracties in alle richtingen gelijk. Beschouw in het assenstelsel Z de richting van de verlenging en X en Y daar dus loodrecht op, dan geldt voor de rek ϵ_Z en voor de contracties $\epsilon_X = \epsilon_Y$

De **Poisson constante**, of **dwerscontractie-coëfficiënt** is nu gedefinieerd als: $\nu = -\frac{\epsilon_X}{\epsilon_Z} = -\frac{\epsilon_Y}{\epsilon_Z}$

Naast de elasticiteitsmodulus, $E = \sigma/\epsilon$ (wet van hooke) is ook een **glijdingsmodulus G** voor afschuiven gedefinieerd: $G = \tau/\gamma$, waarin τ de schuifspanning is γ tangens van de afschuifhoek

Voor kleine elastische rekken gelde een verband tussen E en G:

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Voor metalen ligt de constante van Poisson ν ongeveer bij 1/3.

Dit betekent dat het volume van de staaf in het elastische gebied toeneemt. Bij een waarde van $\nu = 0,5$ zou het volume gelijk blijven.

ν kan nooit groter zijn dan 0,5; deze waarde wordt benaderd door rubber.

2.1.8 Opgaven

1. Te beproeven materiaal S355
Trekstaaf type A5, \varnothing 10mm
Gemeten is : $F_{\max} = 43,58$ kN, $F_{0,2} = 28,67$ kN
Lengte na breuk 62,4 mm, kleinste \varnothing na breuk 8.3 mm

Bepaal of de resultaten aan de eisen voldoen

	R _{0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ %	Z %
Eis	>355	>510	>20	>25
Gemeten				

2. Laat grafisch zien dat het kracht - verlengingsdiagram (F-N) afhankelijk is van de afmetingen van de staaf
3. Een cilindrische trekstang van 20 m lengte moet een kracht doorleiden van 100.000 N. De verlenging mag niet meer bedragen dan 8 mm
Er kan een keuze gemaakt worden uit drie materialen: staal, koper en aluminium
Gegeven:
E-moduli Staal, Cu en Al respectievelijk $2,1 \times 10^5$, $1,2 \times 10^5$ en $0,7 \times 10^5$ N/mm²
Soortelijke massa's: Staal, Cu en Al respectievelijk 7800, 8900 en 2700 kg/m³.

Gevraagd

- a. Wat is de benodigde dikte in de drie uitvoeringen?
- b. Welke uitvoering zou leiden tot het laagste gewicht?
- c. Hoe groot in elke uitvoering de spanning?
- d. Als gegeven is dat de spanning in het staal niet hoger mag zijn dan 120 N/mm², in koper 80 N/mm² en in aluminium 70 N/mm² welke uitvoering is dan het lichtst? (Er geldt dan uiteraard geen eis betreffende de beperkte verlenging)

2.1.9 De trekproef in een lasverbinding

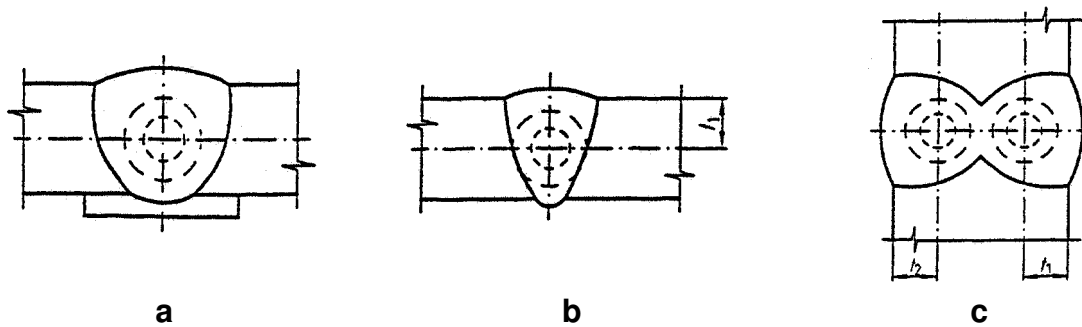
Hier maken we onderscheid in een trekproef van lasmetaal, de langstrektrekproef (NEN- EN 876) en een trekproef over de verbinding: de dwarstrektrekproef (NEN- EN 895).

langstrektrekproef

Bij de trekproef van lasmetaal in de langstrektrekproef kunnen de eerdergenoemde waarden (vloei grens, treksterkte, rek en insnoering) goed worden bepaald. De staaf wordt daarvoor op een voorgeschreven wijze uit de lascoupon genomen (zie Figuur 11) en conform EN 10002-1 beproefd.

Iedere proefstaaf moet een ronde doorsnede hebben en de maten moeten overeenstemmen met EN 10002-1. De gebruikelijke diameter is 10 mm. Indien dat niet mogelijk is moet de diameter zo groot mogelijk zijn, maar niet kleiner dan 4 mm.

De norm voorziet in een voorschrift betreffende de verslaglegging.



Figuur 11 Posities van de proefstaven volgens NEN-EN 876

- a) Positie van een proefstaaf uit zuiver lasmetaal voor de classificatie van lastoevoegmateriaal;
 b) Positie van een proefstaaf uit een eenzijdig gelaste verbinding (t_1 en t_2 zijn vast te leggen maten);
 c) Positie van proefstaven uit een tweezijdig gelaste verbinding.

dwarstrekkproef

Uit de trekproef dwars over de verbinding, de dwarstrekkproef, is alleen informatie te krijgen uit de plaats van de breuk en de treksterkte ter plaatse van de breuk

Bij zacht staal ontstaat de breuk altijd naast de lasverbinding;

Bij hoogvast staal kan ook breuk optreden in het lasmetaal.

Uit een dwarstrekkproef is **geen** rekgrens te bepalen. Daarvoor is een langstrekkproef nodig.

Bij een dwarstrekkproef is het ook niet duidelijk van welke zone (las, warmtebeïnvloede zone of plaatmateriaal) de rek afkomstig is. Bij zacht staal is de rek vooral afkomstig van het plaatmateriaal; dit is namelijk de zwakste zone. Bij hoogvast staal en gelijkwaardig lasmetaal is de rek uit alle zones afkomstig, maar niet noodzakelijkerwijs gelijk verdeeld.

Indien het lasmetaal te zwak is (“undermatching”) moet de rek opgebracht worden door het lasmetaal zelf; de kans is dan groot dat de vereiste rek niet gehaald wordt. Bovendien treedt de breuk dan op in de las.

Door vooraf maatstreepjes aan te brengen op de verschillende zones is wel een goede indruk van de rekverdeling te krijgen.

In NEN-EN-ISO 15614-1 wordt voor de lasmethodekwalificatie de plaats en de positie van de proefstaven vastgelegd.

Voor platen worden platte trekstaven gebruikt, waarvan de afmetingen en de positie door de plaatdikte worden bepaald. In overleg met de klant zijn ook ronde proefstaven mogelijk.

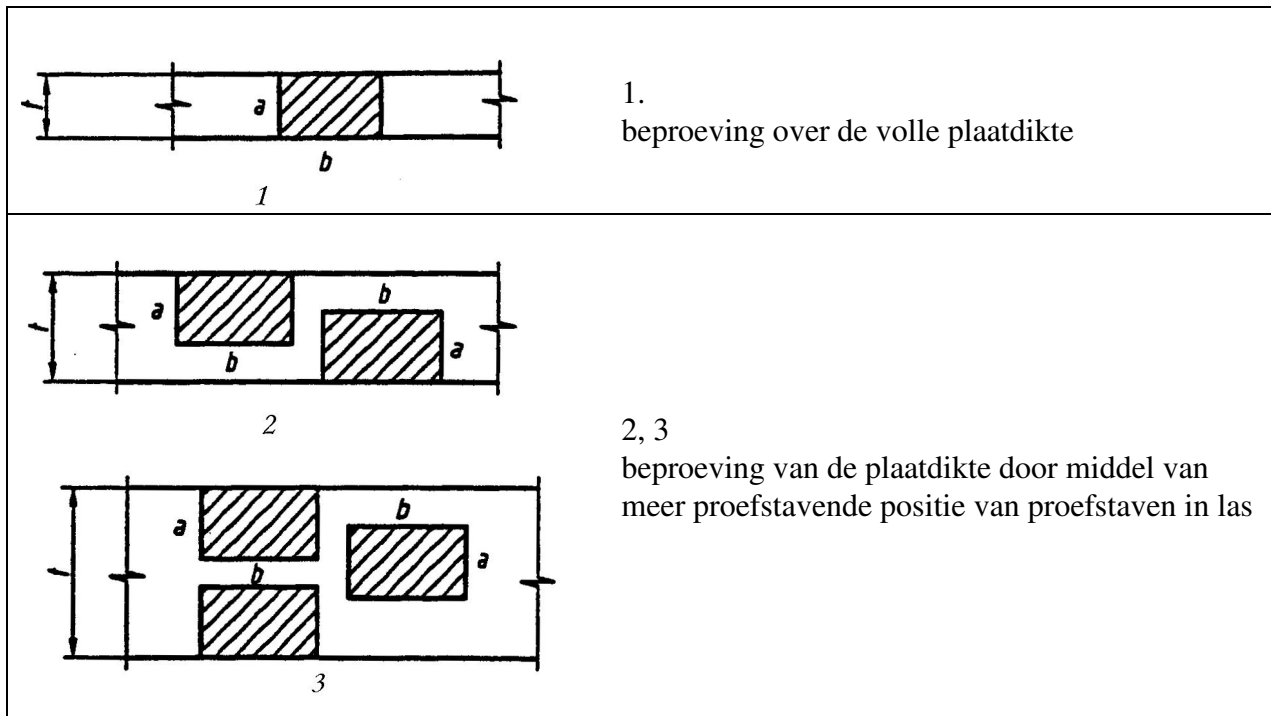
Bij pijpen is de trekstaaf gekromd. Ook kan de volle pijp worden beproefd; in dat geval zijn inzetstukken nodig om de staaf goed te kunnen inklemmen.

De proefstaven dienen te worden uitgevoerd volgens EN-895, waarin ook verwezen wordt naar EN 10002-1 voor de uitvoering van de proef.

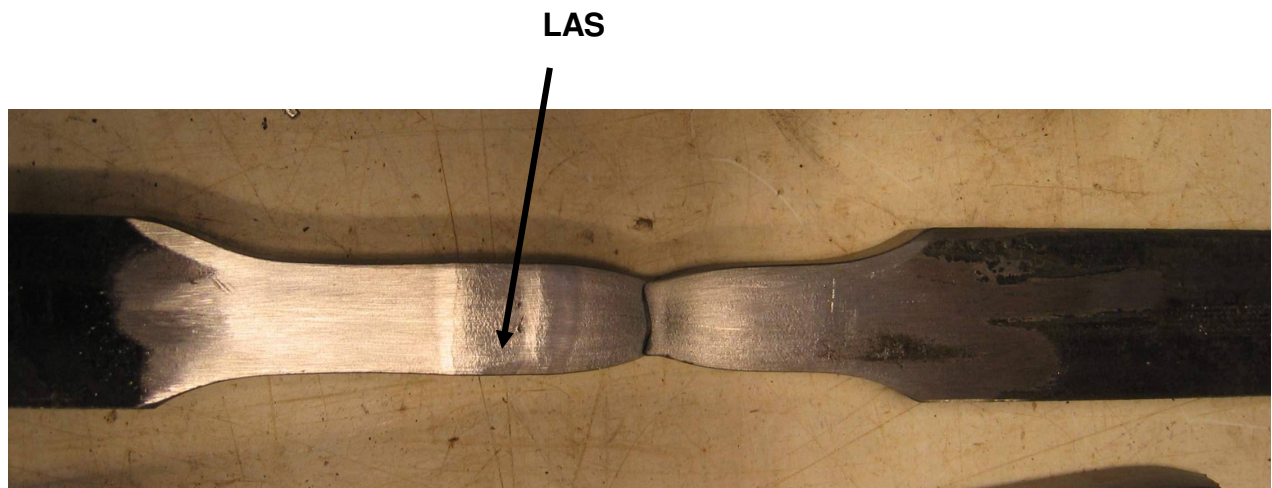
Uit een dwarstrekkstaaf is door visueel onderzoek nog de volgende informatie te verkrijgen:

- Lasfouten in het breukoppervlak;
- Fish eyes (waterstofscheuren);
- Harde zones die minder vervormen.

In het algemeen is de dikte van het proefstuk delijk aan de dikte van de plaat.
Bij grotere plaatdiktes kunnen meer proefstaven uitgenomen worden, zodat de gehele plaat beproefd word. Zie Figuur 12.



Figuur 12 Voorbeelden van de positie van dwarstrekstaven in lasverbindingen (EN 895)



Figuur 13 Dwarstrekstaaf
De breuk treedt op in het basismateriaal
Duidelijk is te zien dat de las en de wbz weinig rek vertoont in deze proef

2.2 De buigproef

2.2.1 Algemeen

De buigproef is een statische proef, welke bij materialen voornamelijk gebruikt wordt om de vervormbaarheid te bepalen. Verder is het mogelijk er de elasticiteitsmodulus van een materiaal mee te bepalen. Bij lassen wordt de proef met name toegepast om lasdefecten op te sporen.

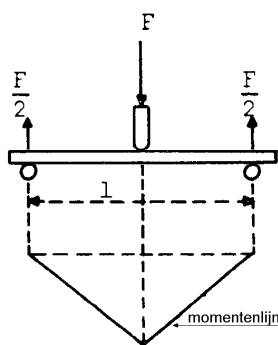
Bij de buigproef worden een buigstaaf, die op steunrollen is gelegd, gebogen door óf door een in het midden drukkend stempel (de driepuntsbuigproef, Figuur 14) óf door twee stempels die zich symmetrisch tussen de steunrollen bevinden (de vierpuntsbuigproef, Figuur 15).

Bij de driepuntsbuigproef is het buigend moment in het midden het grootst, en neemt in de richting van de steunpunten lineair af tot nul. Bij de vierpuntsbuigproef heerst er in het gehele gebied tussen de twee stempels een gelijk moment, daarbuiten neemt het naar de steunpunten eveneens lineair af tot nul.

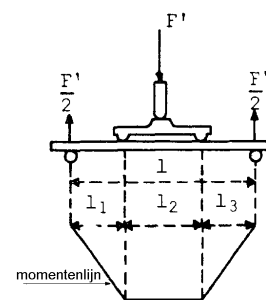
De optredende vervorming wordt bij een driepuntsbuigproef meestal bepaald door de doorbuiging te meten in het midden; bij de vierpuntsbuigproef meet men de kromtestraal of de doorbuiging van het middengedeelte.

Bij beproevingen van lassen wordt –vanwege de eenvoud– vrijwel alleen de driepuntsbuigproef toegepast. Daar het bij lassen vooral gaat om de vervorming wordt de proef in dat geval “**vervormingsbuigproef**” genoemd en de drukstempel “**buigdoorn**”. De afstand tussen de steunrollen moet zo groot zijn, dat de buigdoorn met de dubbelgevouwen rechthoekige proefstaaf er ruim doorheen kan worden gedrukt.

De diameter van de buigdoorn is gedefinieerd en afhankelijk van het te beproeven materiaal.



Figuur 14 Driepuntsbuigproef
Het moment is in het midden het grootst.



Figuur 15 Vierpuntsbuigproef
Het moment is in het midden constant.

De proef wordt meestal uitgevoerd zonder belastingsmeter.

Er wordt beoordeeld op het optreden van scheuren en de hoek waarover de proefstaaf gebogen kan worden.

In feite wordt door middel van de eisen met betrekking tot de maximale doordiameter een minimum rek van de uiterste vezel van de buigstaaf geëist. Meestal wordt niet gerealiseerd dat bij een buigproef een hogere rek kan worden vereist dan bij een trekproef.

Materiaal	Doordiameter (maximaal) bij plaatdikte d
koolstofstaal	Rm < 450 N/mm ² Rm 450-540 N/mm ² Rm ≥ 540 N/mm ²
laaggelegeerd staal	3d of 4d
austenitisch roestvaststaal	3d
overige materialen (geen plateringen)	4d

Tabel 3 Toegepaste doordiameter bij verschillende materialen.

Voorbeeld In en aantal gevallen in gegoten roestvaststaal bleek de vereiste taaiheid (rek) via de buigproef veel hoger te liggen dan die via de trekproef. Het is daarom, bij het niet halen van de buigproef nuttig te weten wat de rek in de buitenste vezel ongeveer bedraagt.

Bij buiging van een trekstaaf met een dikte d over en doordiameter D kan de rek in de uiterste vezel berekend worden uit het verschil ten opzichte van de neutrale lijn.

Na buigen is de uiterste vezel $\pi(D + 2d)$; de neutrale lijn $\pi(D + d)$.

Hieruit volgt:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\pi(D + 2d) - \pi(D + d)}{\pi(D + d)} = \frac{d}{D + d} \times 100\%$$

Voor een doordiameter $D = 3d$ is de rek in de uiterste vezel dus 25%.

Voor gegoten austenitisch roestvaststaal, zoals bijvoorbeeld X15 NiCr 35 25 is de haalbare rek bij de trekproef circa 15%. Het is daarom niet zo verwonderlijk dat de geëiste buigproef met $3d$ niet gehaald kan worden. Het gegoten austenitische roestvast

taal is toen ingedeeld bij de "overige materialen" ($4d$).

2.2.2 De buigproef in een lasverbinding (EN 910)

In een lasverbinding worden 4 soorten buigproeven onderscheiden, te weten:

- Dwars over de lasverbinding:
- Een buigproef met de rek over de sluitlaag (de buigproef, of *face bend*).
 - Een buigproef met de rek over de grondlaag (de tegenbuigproef, of *root bend*).
 - Een buigproef met de rek over de lasdikte (de zijbuigproef, of *side bend*).
- In de lengterichting
- Een buigproef in de lengterichting van de las (de langsbuigproef).
Deze kan eventueel ook uit zuiver lasmetaal bestaan.

Voor een lasverbinding geldt volgens EN 910:

- Bij plaatdiktes < 12 mm moeten 2 normaalbuig- en 2 tegenbuigproefstaven worden beproefd.
- Bij plaatdiktes > 12 mm volstaan 4 zijbuigstaven (aanbevolen).
- Voor ongelijksoortige verbindingen geldt: 1 normaal- en 1 tegenbuigstaaf in de lengterichting in plaats van 4 dwarsbuigproefstaven (aanbevolen).
- Als de rek $A \geq 20\%$ dan bedraagt de middellijn van de buigdoorn $4 \cdot t$ (t = plaatdikte).
Als de rek $A < 20\%$ dan geldt de formule $d = (100 \cdot t) / A$.

Voorbeeld *Materiaal 8 mm dikte*
*rek A = 25% → d = 4*8 = 32 mm*
rek A = 18% → d = 800/18-8 = 36,4 mm

Een buigproef over een lasverbinding moet voldoen aan de in de norm gestelde eisen: een bepaalde buighoek moet gehaald worden, zonder dat zichtbare scheuren optreden. Zo is er visueel veel informatie uit een gebogen staaf te halen:

Informatie uit de buig- en tegenbuigstaaf:

- Lasfouten in een eventueel breukvlak;
- Harde zones die minder vervormen dan het omliggende materiaal en daardoor boven het omgevende materiaal uitsteken (bijvoorbeeld een TIG-las in een zwart-wit verbinding waarbij de grondlaag met te weinig toevoegmateriaal is gelast);
- Zachte las die na buigen wat is weggezonden);
- Zachte WBZ bij TM of QT staal.

Gebogen buigstaven moet men altijd aan de zijkant bekijken op bindingsfouten of onvoldoende doorlassingen.

Gescheurde buigstaven kan men verder buigen om de oorzaak van het scheuren te vinden.

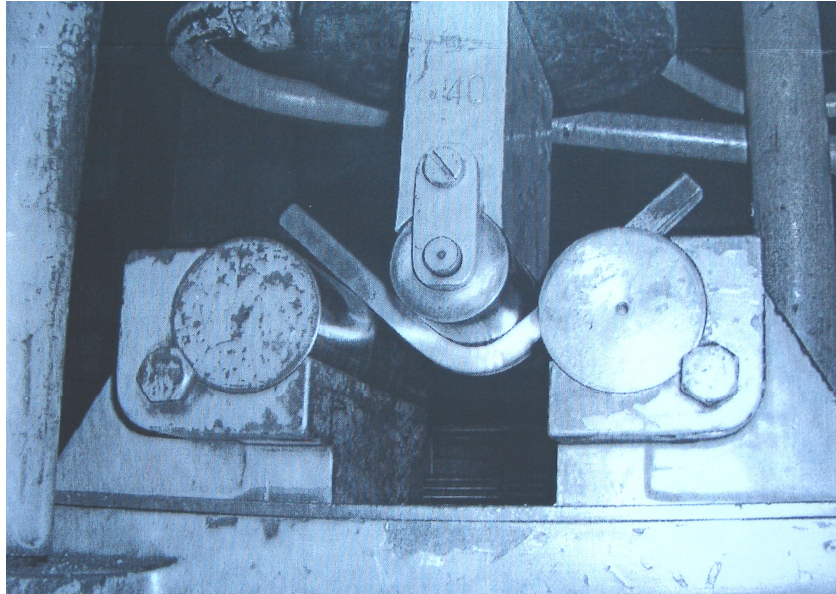
Informatie uit een zijbuigstaaf:

- Dezelfde informatie als de buig en tegenbuig;
- Bindingsfouten, slakinsluitingen en onvoldoende doorlassingen bij een tweezijdig gelaste las worden aangetoond;
- Harde plekken onder het oppervlak worden aangetoond (bijvoorbeeld, overgangslagen in een cladlas, waarbij teveel vermenging heeft plaatsgevonden of verkeerd lastoevoegmateriaal is gebruikt).

Een nadeel van deze proef ten opzichte van de buig- en tegenbuigproef is dat de doorlassing van enkelzijdige lassen slechts over een geringe lengte wordt onderzocht.

Informatie uit een langsbuigstaaf:

- Scheurtjes of brosse zones.
Langsbuigstaven worden alleen toegepast indien er grote verschillen in sterkte over de las te verwachten zijn.



Figuur 16 Voorbeeld van een buigproef



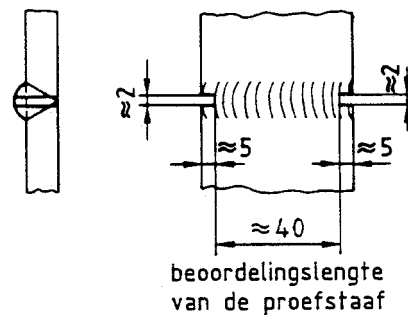
2.2.3 De breekproef (NEN-EN 287)

Bij de beproeving van de vaardigheid van lassers kan gebruik worden gemaakt van een eenvoudige uitvoering van de buigproef (buig- en tegenbuig): de breekproef (zie NEN-EN 287). Dit zijn proeven die, door de eenvoud kunnen worden uitgevoerd op de werkplek, waardoor een snelle en goedkope beoordeling van de vaardigheid van de lasser mogelijk is. Het doel is informatie te krijgen over type, verdeling en grootte van inwendige onvolkomenheden.

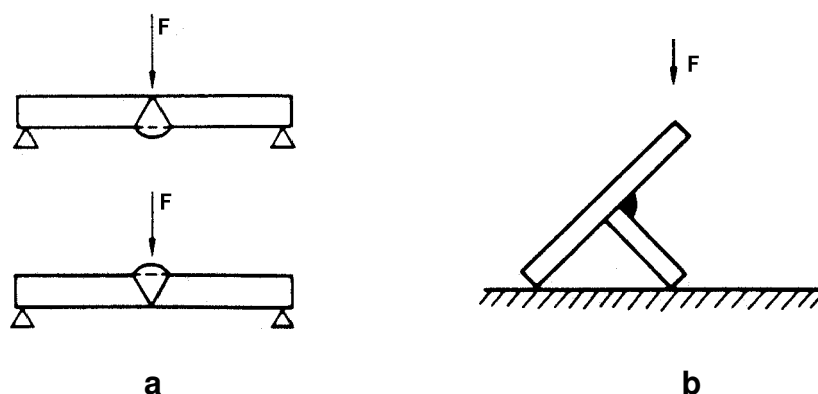
Het breken van stompe lassen in plaat of pijp kan worden vergemakkelijkt door het aanbrengen van een kerf van ca. 5 mm (zie Figuur 17); bovendien mag de overdikte worden verwijderd.

Ook voor de beoordeling van een hoeklassen is de beproeving eenvoudig.

Bij het maken van hoeklassen in geleverde platen ontstaat veel gasontwikkeling, die aanleiding kan geven tot (niet aan het oppervlakte komende) gasporositeit en gaskanalen. Door de breekproef worden ze echter op eenvoudige wijze zichtbaar gemaakt. De uitvoering van de proef is vrij simpel, zie Figuur 18b.



Figuur 17 Proefstuk voor de breekproef.



Figuur 18 Buig- en breekproef:
a) Buig en tegenbuig
b) Breekproef in een hoeklas (voorbeeld)

2.3 De hardheidsmeting

Hardheidsmetingen worden zeer veel uitgevoerd; het is een eenvoudige en snelle proef die informatie geeft over structuur en de sterkte van de las en de warmtebeïnvloede zone.

Het principe van de hardheidsproef is gebaseerd op de omstandigheid dat een materiaal door middel van een drukcontact, (bijvoorbeeld krassen) door een harder lichaam gedeformeerd kan worden. In dit licht gezien is de hardheidsmeting een relatieve meting, dat wil zeggen, materiaal A is harder dan B indien het materiaal B kan deformereren.

De eerste ontwikkelde hardheidsschaal, die van Mohs (1812), is hierop gebaseerd.

De thans belangrijkste meetmethodes die een meer kwantitatieve uitspraak over de hardheid kunnen doen zijn de methoden van Brinell, Rockwell en Vickers (1900-1930). Deze drie methodes (en de varianten ervan) zijn gebaseerd op het loodrecht indrukken van het te beproeven materiaal met een klein en hard indruklichaam. De grootte of diepte van de achtergebleven indrukking is een maat voor de hardheid.

2.3.1 Brinell hardheidsmeting (NEN-EN-ISO 6505-1)¹

Een indruklichaam (een **hardmetalen** kogel met een diameter D) wordt in het oppervlak van een proefstuk gedrukt na het wegnemen van de beproevingsbelasting F wordt de middellijn van de indrukking d gemeten.

De hardheid wordt aangegeven met het symbool **HBW**². De hardheid volgens Brinell is evenredig aan het quotiënt van de beproevingsbelasting en het gebogen oppervlak van de indrukking waarvan wordt aangenomen dat hij bolvormig is met een straal die overeenkomt met de halve middellijn van de kogel.

De hardheidswaarde mag niet groter zijn dan 650 HBW

$$\text{HBW} = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

waarin D = diameter van de kogel in mm,
d = gemiddelde diameter van de indrukking in mm
F = beproevingsbelasting in N

De factor 0,102 is ingevoerd om na de invoering van het SI stelsel dezelfde Brinell waarden te krijgen als voorheen (3000 kgf werd 29,42 kN).

De hardheidswaarde HBW is na de meting van d in een tabel af te lezen.

¹ Vernieuwde norm sinds jan 2006 en vervangt NEN-EN-ISO 6505-1 (1999)

² In oudere normen wordt de hardheid –indien gemeten met een stalen kogel– aangeduid met het symbool HB of HBS. In Amerikaanse literatuur ziet men het symbool HBN.

Het symbool HBW wordt voorafgegaan door de gevonden hardheidswaarde en gevolgd door een index die de beproevingsomstandigheden aangeeft in de volgende volgorde:

- de middellijn van de kogel (D) in mm;
- een getal dat de belasting aangeeft (de oude waarde in kgf !! (dus bij 14,71 kN wordt dit 1500;
- de belastingsduur in sec indien deze afwijkt van de gespecificeerde tijd (meestal 10-15 sec).

De Brinellhardheid heeft de dimensie van een spanning; de dimensie wordt echter **niet vermeld**.

Voorbeeld *600 HBW 1/30/20*

hardheid volgens Brinell van 600, bepaald met een hardmetalen kogel met een middellijn van 1 mm en een belasting van 294,2 N gedurende 20 sec

De beproevingsbelasting moet zo gekozen worden dat de middellijn van de indrukking ligt tussen de waarden $0,24D$ en $0,6D$, waarin D de kogeldiameter is. Daardoor wordt de indrukking niet te klein (onnauwkeurig) of te groot (uitstulping). Voor zachte materialen moet daarom met een lagere belasting gewerkt worden.

Bij het meten op dunne platen zijn aangepaste kogeldiameters nodig

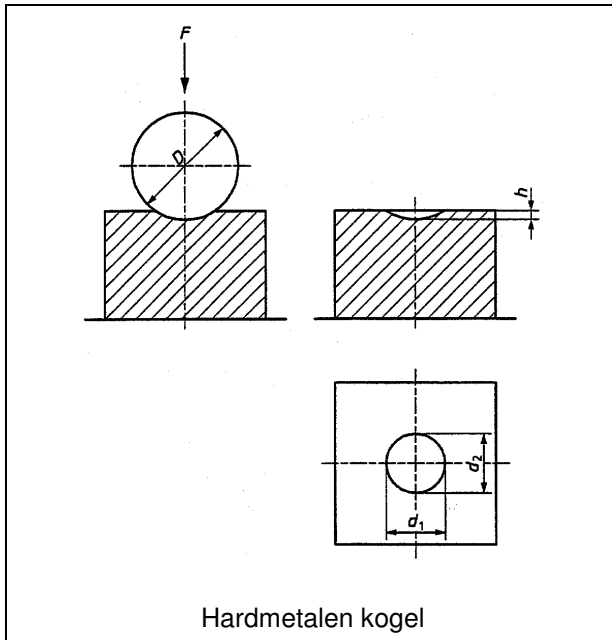
Let op

In veel apparaten wordt nog gebruik gemaakt van een gehard stalen kogel. Ook zijn veel metingen verricht met een gehard stalen kogel. Deze stalen kogel wordt gebruikt voor materialen met een hardheid niet groter dan 350 HBS.

Toepassingsgebied / Voor en nadelen

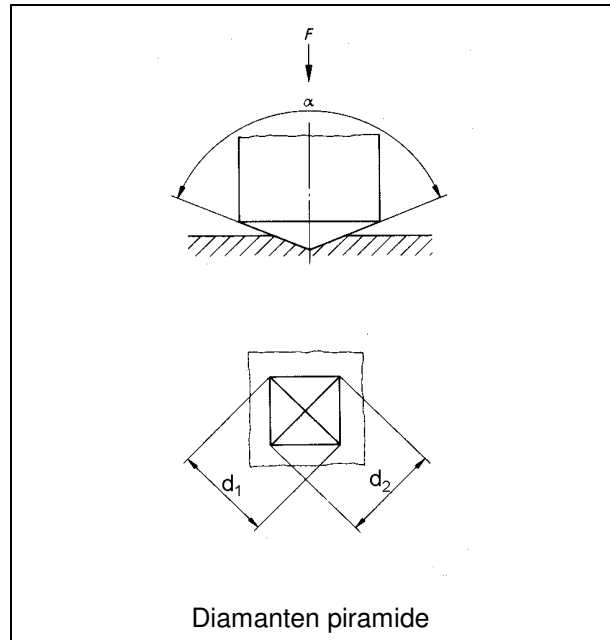
- Daar de indrukking vrij groot is wordt met de Brinellhardheid vooral een gemiddelde hardheid bepaald en is hierdoor ongeschikt voor plaatselijke metingen, zoals bijvoorbeeld bij een las vaak van toepassing is.
- Hierdoor wel geschikt om de hardheid van inhomogene materialen te meten;
- Levert beschadiging van het oppervlakte op
- Niet te harde materialen, anders vervormt de kogel
- Alle metalen, echter niet te dun, anders wordt de tafel onder het werkstuk meegemeten

Een variant van de Brinellhardheid is de “Meyerhardheid”, waarbij aangebrachte belasting gedeeld wordt door de projectie van het oppervlak van de indrukking. Deze hardheidswaarde, die theoretisch juister is, wordt in de praktijk alleen gebruikt bij de beschrijving van slijtage.



Hardmetalen kogel

Figuur 19 Brinell kogel en indrukking



Diamanten piramide

Figuur 20 Vickers piramide en indrukking

2.3.2 Vickers hardheidsmeting (NEN-EN-ISO 6506-1)

Aan de bezwaren van de Brinellmeting wordt grotendeels tegemoet gekomen door de methode volgens Vickers.

Het indruklichaam is hierbij een regelmatige vierzijdige diamanten piramide met een tophoek van 136°. Deze wordt met een belasting F in het oppervlak gedrukt.

Na het wegnemen van de belasting worden de beide diagonalen van de ontstane indrukking gemeten.

De Vickershardheid is evenredig met de quotiënt tussen de belasting en het oppervlakte van de indrukking, dat als een rechte piramide met een vierkant grondvlak wordt beschouwd (zie Figuur 20).

Wiskundig kan worden afgeleid dat het oppervlakte van de 4 zijvlakken van deze piramide gelijk is aan :

$$\frac{d^2}{2 \cdot \sin \frac{136}{2}}$$

zodat geldt:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

waarin F = belasting in N

d = gemiddelde lengte van de diagonaal in mm ((d1 + d2)/2)

Evenals de Brinellhardheid heeft de Vickershardheid de dimensie van een spanning. Deze dimensie wordt niet vermeld.

De hardheid volgens Vickers wordt weergegeven op de volgende wijze. Het symbool HV wordt voorafgegaan door de gevonden hardheidswaarde en gevolgd door een index die de beproevingsomstandigheden aangeeft in de volgende volgorde:

- een getal dat de belasting aangeeft in kgf
- de belastingsduur in sec indien deze afwijkt van de in de norm vastgelegde tijd (meestal 10-15 sec)

voorbeelden 640 HV 30

Een Vickershardheid van 640 gemeten met een beproevingsbelasting van 294,2 N (= 30 kgf)

545 HV 1/20

Een Vickershardheid van 545 gemeten met een beproevingsbelasting van 9,807 N (= 1 kgf) en een belastingstijd van 20 sec.

Een groot voordeel van deze methode is dat de indrukken gelijkvormig zijn, onafhankelijk van de indringdiepte (dat is bij Brinell niet). Daardoor is het mogelijk de belasting willekeurig te kiezen; de gevonden hardheden zijn dan toch met elkaar te vergelijken. Vanwege de keuze van de het indruklichaam (diamant) kunnen alle materialen met deze methode beproefd worden.

Door de te gebruiken gewichten kan de Vickersmethode verdeeld worden in 3 groepen

- Macro belasting-gebied, met belastingen van 49,03 tot 980,7 N (5-100 kgf)
- Lage belasting-gebied, met belastingen van 1,961 tot 29,42 N (0,2-3 kgf)
- Micro belasting-gebied, met belastingen < 1,961 N (<0,2 kgf)

De laatstgenoemde wordt meestal gewoon microvickers genoemd, hiermee zijn zulke kleine indrukken te maken dat daarmee hardheid van structuurbestanddelen kan worden bepaald. Microvickers wordt dan ook uitgevoerd met een als hardheidsmeter uitgevoerde microscoop, met een vergroting van 400×.

Een belasting van 294,2 N (= 30 kgf) is het meest gangbaar.

De tophoek van 136° is gekozen, opdat in het meetgebied tot 300 HBW ongeveer geldt: HV = HBW (eigenlijk HBS)

Voor- en nadelen

- De hardheid van zeer harde en zeer zachte materialen kan worden bepaald. Hiervoor wordt dezelfde schaal gebruikt
- De nauwkeurigheid is groter dan die van Brinell
- Door de mogelijkheid met zeer lage belastingen te kunnen meten kunnen dunne materialen en oppervlaktelagen worden gemeten.
- De oppervlaktebeschadiging is zeer gering
- De te meten oppervlakken moeten vlak en glad zijn (fijn geschuurd).

2.3.3 Rockwell hardheidsmeting (NEN-EN-ISO 6508-1)

De hardheidsbepaling volgens Rockwell gaat uit van een geheel ander principe. Met deze methode wordt de **diepte** van een indrukking gemeten.

Afhankelijk van de hardheid van het te onderzoeken materiaal wordt een keuze gemaakt uit 2 indruklichamen en verschillende beproevingsbelastingen (zie Tabel 4). De methoden volgens Rockwell C en B worden het meest gebruikt

Rockwell hardheden worden aangegeven met HRC, HRB, etc. achter de gemeten waarde, zoals 44 HRC, en 80 HRB

soort meting	indruklichaam	hoofdbelasting F1 N (kgf)	totale belasting F N (kgf)	meetbereik en toepassingsvoorbeeld
Rockwell C	diamanten kegel tophoek 120°	1373 (140)	1471 (150)	20-70 HRC gehard (en ontlaten) staal
Rockwell A	diamanten kegel tophoek 120°	490,3 (50)	588,4 (60)	60-88 HRA hardmetaal
Rockwell B	stalen kogel Ø 1,5875 mm	882,6 (90)	980,7 (100)	35-100 HRB zacht staal, messing, brons
Rockwell F	stalen kogel Ø 1,5875 mm	490,3 (50)	588,4 (60)	60-115 HRF koudgewalst blik, gegloeid koper

Tabel 4 Overzicht van de meest gebruikte Rockwell hardheidsmeetmethoden.

De meting wordt als volgt uitgevoerd

Het indruklichaam wordt langzaam en gelijkmatig in het werkstuk gedrukt totdat er een voordruk F_0 van 98,07 N (10 kgf) aanwezig is. Dan wordt de wijzer van een meetklok op 0 gezet.

De hoofdbelasting F_1 wordt dan aangebracht, waardoor het indruklichaam in het materiaal zakt. Dit is op de wijzer van de meetklok zichtbaar

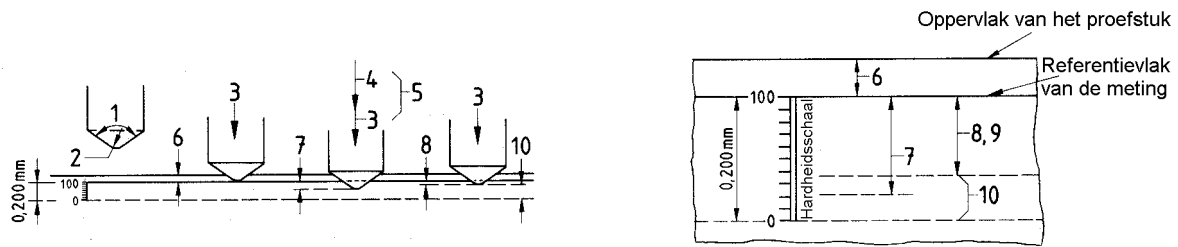
Na een voorgeschreven belastingstijd wordt de hoofdbelasting er weer afgenomen, waarna het indruklichaam door de elastische vering weer iets omhoog komt.

De wijzerstand die daarbij hoort is de gemeten Rockwell hardheid.

Elk meetstreepje vertegenwoordigt een diepte van 0,002 mm; het verschil tussen 2 opeenvolgende Rockwell hardheden is dus 0,002 mm.

In Figuur 21 is schematisch de meetmethode voor Rockwell C weergegeven.

Als de indrukking te klein wordt, treden meetfouten op (teveel elastische terugvering). Daarom zijn waarden boven 70 HRC niet betrouwbaar, maar ook waarden lager dan 20 HRC geven een te grote meetfout: er moet dan overgegaan worden op een stalen kogel of op een lagere belasting. Iets dergelijks geldt ook voor de andere schalen.



1. Diamanten indruklichaam met tophoek van 120°
2. Afronding 0,2 mm
3. Voordrukkkracht 10kgf (98 N)
4. Hoofddrukkkracht 140 kgf (1373 N)
5. Totale drukkkracht 150 kgf (1471 N)
6. Indringdiepte als gevolg van de voordrukkkracht Hierdoor wordt een referentievlak vastgelegd
7. Indringdiepte als gevolg van de hoofddrukkkracht
8. Indringdiepte (tb) die overblijft als de hoofddrukkkracht weer wordt weggenomen
9. =8, maar uitgedrukt in eenheden van 0,002 mm: $e = tb / 0,002$
10. Hardheid HRC = $100 - e$

Figuur 21 Meetmethode Rockwell C

Toepassingsgebied / Voor en nadelen

- weinig beschadigingen aan oppervlak
- snelle meting
- ook geschikt voor harde materialen
- minder nauwkeurig dan Brinell of Vickers
- de verschillende schalen hebben geen verband met elkaar
- niet geschikt voor inhomogene materialen

Behalve de in de tabel genoemde schalen (A, B, C en F) zijn er nog andere, specifiek voor dunne materialen of kleine proefstukken

2.3.4 Andere hardheidsmethoden en mobiele hardheidstestmethodes

Er zijn nog enkele andere hardheidsmethoden die gezien kunnen worden als varianten van de hierboven besproken meetmethoden.

Genoemd is reeds de **Meyerhardheid**, lijkend op de Brinell hardheid, alleen wordt nu de kracht niet gedeeld door de oppervlakte van de indrukking, maar door de projectie ervan.

Deze hardheidsmeting heeft alleen technische betekenis met betrekking tot slijtage (weerstand tegen snijden en krassen)

Een variant van de micro-Vickershardheid is de **Knoop-hardheid**, Bij deze meetmethode wordt gebruik gemaakt van een andere vorm van het indruklichaam. De Knoopdiamant geeft een langgerekte ruitvormige indrukking, waarmee iets nauwkeuriger dan met micro-Vickers gemeten kan worden (Figuur 22a)

Voor de praktijk, –het meten “in het veld”– zijn inmiddels veel apparaten ontwikkeld, waarvan de uitkomsten omgerekend kunnen worden naar een van de drie standaardhardheden.

Poldihamer (Figuur 22b)

Met één slag van een hamer wordt een kogelindrukking gelijktijdig in het te onderzoeken metaal als in een staaf met een bekende hardheid gemaakt. Door vergelijking van de diameters van beide indrukkingen kan de onbekende hardheid worden bepaald.

Hoewel deze methode minder nauwkeurig is dan de Brinell methode is ze praktisch te gebruiken in werkplaatsen en magazijnen.

De hamerslag is thans vervangen door een veergestuurde slag. Een moderne(re) uitvoering van dit apparaat wordt verkocht onder de naam **Telebrineller**

Ultrasonic Contact Impedance (UCI) (Figuur 22c)

Dit is een elektronisch apparaat waarbij een Vickers indruklichaam via een resonerende staaf met lichte veerkracht tegen het proefstuk wordt gedrukt. Naarmate de Vickers diamant verder het proefstuk indringt zal er een verandering van de trillingsfrequentie optreden. Hieruit is een hardheid af te leiden.

Leeb of rebound methode(Figuur 22d en e)

Een kogel van wolframcarbide wordt met een gedefinieerde veerkracht naar het te meten oppervlak “geschoten”. Het energieverlies van de opstuitende kogel wordt gemeten. In feite worden de snelheden vlak voor (V_i) en na de botsing (V_r) gemeten.

Dit levert de hardheid volgens **Leeb**: $HL = V_r/V_i * 1000$

Deze waarde kan worden omgezet naar bijvoorbeeld HRC (empirisch!)

Deze methode is afgeleid van de ***scleroscoop van Shore*** (Figuur 22f)

Hierbij wordt de opstuihoogte van een vrij vallend kogeltje of een stift opgemeten. Hoe harder het materiaal, des te hoger de opstuihoogte.

Dit is een dynamische hardheidsmeting en de hardheid die hiermee wordt bepaald wordt ook wel de elastische hardheid genoemd.

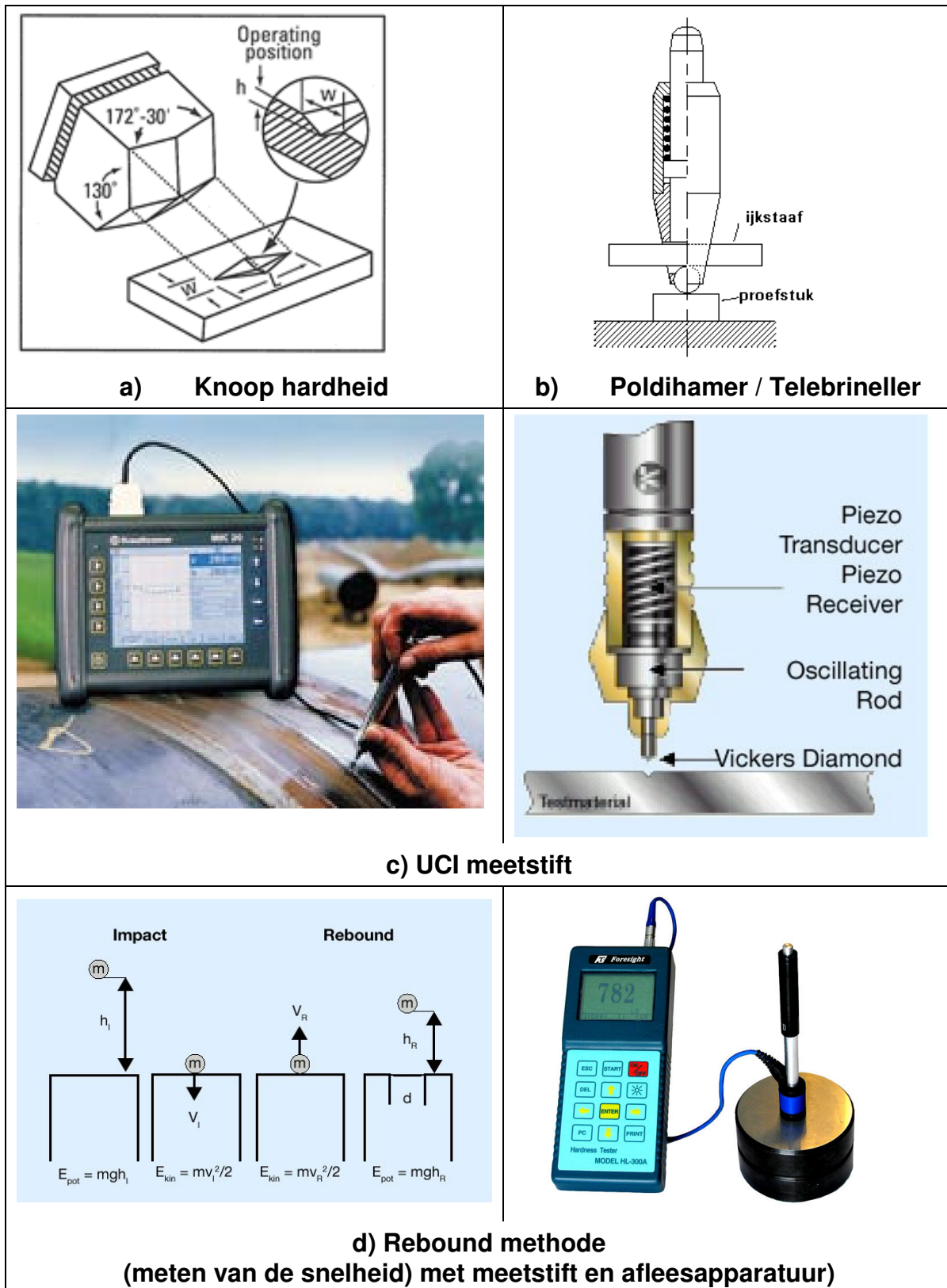
Met ijktabellen, waarin de elasticiteitsmodulus een belangrijke parameter is, kan deze waarde omgezet worden in andere hardheidswaarden

Technische producten zijn bekend onder namen als **Equotip** en **Dynamic**

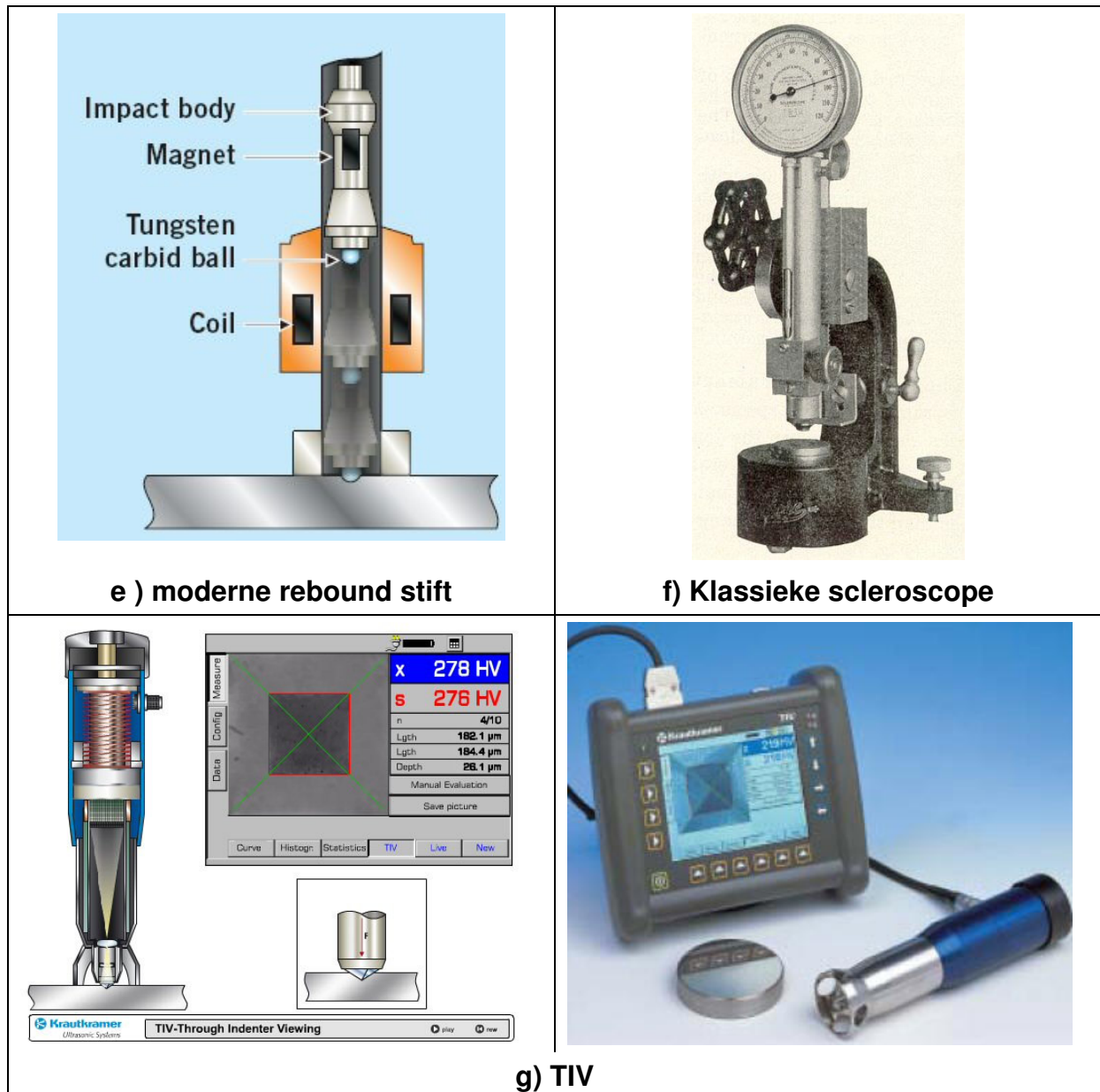
In tegenstelling tot de klassieke scleroscoop kunnen deze apparaten in alle posities worden toegepast.

Through-Intender-Viewing (TIV). (Figuur 22g)

Met dit nieuwe draagbare apparaat kan via een optisch systeem en een camera door de diamant van een Vickersdiamant gekeken worden. De indrukking (en het ontstaan ervan) wordt direct zichtbaar gemaakt op een display.



Figuur 22 Verschillende hardheid meetmethodes



Figuur 22 vervolg

Diverse hardheidsmeetmethoden

Een voordeel van verschillende van deze methodes is, dat ze kunnen worden uitgevoerd in alle posities en dat de achtergebleven indrukking zeer gering is. De meting heeft wel, net als alle andere methodes, een lokale plastische vervorming en dus versterking van het materiaal tot gevolg. Er dient dus altijd voldoende afstand tussen de meetpunten gehouden te worden, om onderlinge beïnvloeding te voorkomen.

De nauwkeurigheid van de resultaten van al deze methodes verdient wel de nodige aandacht.

2.3.5 Vergelijking tussen verschillende methoden

Het verband tussen de verschillende hardheidsschalen voor staal weergegeven in Figuur 23.

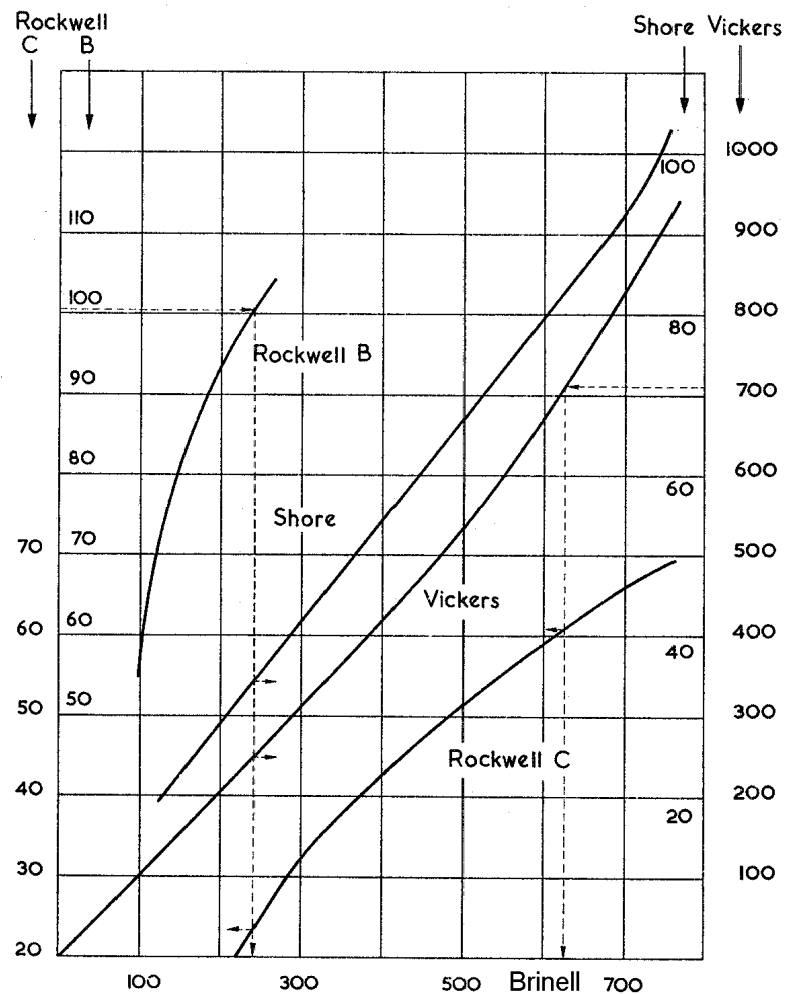
De hardheid voor Vickers is tot 300 HV gelijk aan die van Brinell (HBS); daarboven treden afwijkingen op als gevolg van de afplatting van de Brinell-kogel.

Omdat zowel de Vickers- als de Brinellhardheden de dimensie *spanning* hebben ligt een relatie met de trekproef voor de hand.

Voor **staal** blijkt dat de hardheden HV en HBS, ongeveer gelijk is aan $0,3 \times$ de treksterkte, uitgedrukt in N/mm^2 .

Bijvoorbeeld: $225 HBS_{10/3000} \approx 750 N/mm^2$.

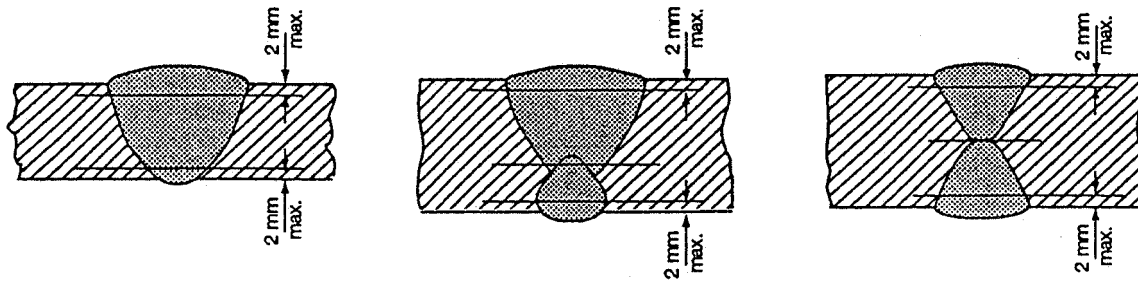
De hier gegeven vergelijkingen en omrekeningen is geldig voor gewoon staal, en niet voor roestvaststaal en non-ferro metalen. Daarvoor zijn andere omrekeningsfactoren beschikbaar.



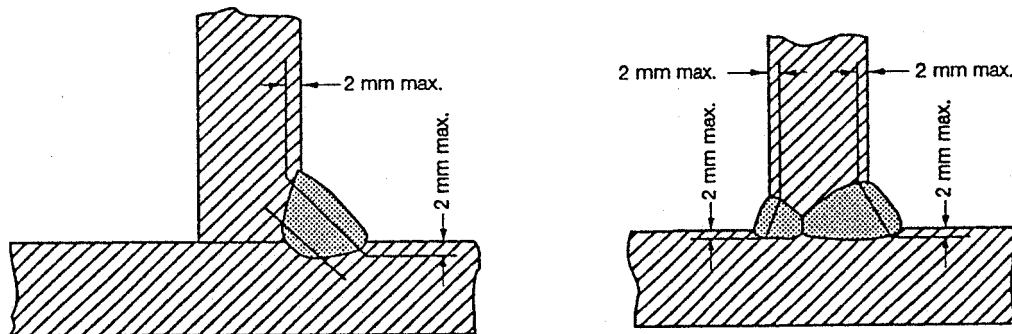
Figuur 23

Vergelijking tussen de verschillende hardheidsschalen.

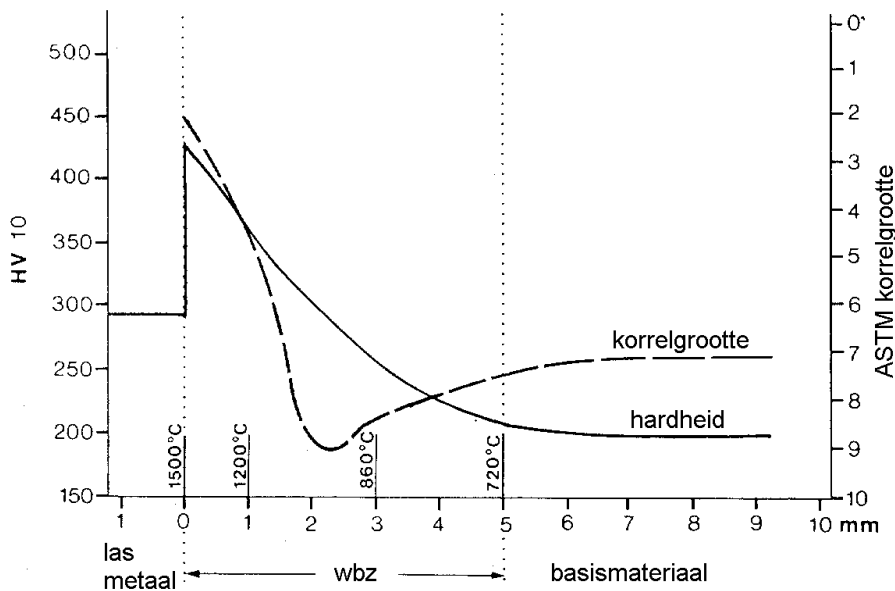
Alleen geldig voor staal.



Figuur 24 Indicatie van de positie van hardheidstraverses bij stompe lassen.



Figuur 25 Indicatie van de positie van hardheidstraverses bij hoeklassen en T-lassen



Figuur 26 Hardheidsverloop over las, de warmtebeïnvloede zone en basismateriaal van een normaalgeglieid staal.

2.3.6 Hardheidmetingen in een lasverbinding

In lasverbindingen wordt veel gebruik gemaakt van de methode Vickers, waarbij (bij staal) een belasting van 5 of 10 kgf gebruikelijk is. De metingen worden uitgevoerd op een macrodoorsnede, die fijn geschuurd en geëetst is, zodat de ligging van de las en de warmtebeïnvloede zone duidelijk naar voren komt.

Meestal worden een zogenaamde *hardheidstraverse* gemeten. Voorbeelden van dergelijke traverses zijn weergegeven in Figuur 24 voor stompe lasverbindingen en in Figuur 25 voor een hoeklas

De meetpunten moeten voldoende dicht bij elkaar liggen om een goed verloop van de hardheid zichtbaar te maken, maar ze mogen elkaar niet beïnvloeden. *De afstand, die tussen de meetpunten minimaal dient te worden aangehouden, is 0,7 mm bij HV 5 en 1,0 mm bij HV 10.*

Uit zo'n hardheidstraverse kan bij constructiestaal een uitspraak gedaan worden over het gevaar van scheurvorming, en of er voorgewarmd moet worden. Een en ander komt elders in deze cursus aan de orde.

In Figuur 26 is zo'n hardheidstraverse van constructiestaal weergegeven. Het verband met de korrelgrootte is hierin ook aangegeven.

Voor kwaliteitscontrole in de praktijk wordt overigens de Shoremethode (bijvoorbeeld Equotip) veel toegepast.

2.4 De kerfslagproef (NEN-EN 10045-1)

2.4.1 Inleiding

In de techniek is de kerfslagproef, naast de trekproef en de hardheidsproef één van de belangrijkste testmethoden.

Materialen met dezelfde mechanische eigenschappen en chemische samenstelling kunnen door de fabricagemethoden en verwerking, waaronder lassen, zeer verschillende kerftaaiheidseigenschappen hebben. Daarom is met name in de lastechniek de kerfslagproef bijna altijd een vereiste proef.

De kerfslagproef is een dynamische proef; het resultaat is afhankelijk van de snelheid van beproeving, de beproevingstemperatuur en natuurlijk van de geometrie van het proefstuk.

De proef is met name van belang bij de beproeving van staal en geeft informatie over de kerftaaiheid van het staal c.q. de algemene kwaliteit van het staal als functie van de temperatuur.

Alvorens een korte beschrijving te geven van de proef volgt eerst een korte historische achtergrond.

Uit de ervaring met de Liberty schepen was een directe relatie afgeleid tussen de kerfslagwaarde (Charpy-V of KCV) en het wel of niet optreden van een brosse breuk.

Gedacht werd dat de kerfslagproef een maatgevende proef zou zijn voor het voorkomen van brosse breuk. Dit bleek niet direct het geval te zijn.

Gepoogd werd om door andere soorten kerfslagstaven te nemen een betere relatie te vinden. Voorbeelden zijn, naast de Charpy-V, de U-kerf, de sleutelgatkerf, de Schnadt kerfslag proefstaaf enzovoorts. Deze staven hebben alle als basisafmetingen $55 \times 10 \times 10$ mm en verschillen alleen qua kerf. Ook veel grotere en dikkere kerfslagstaven werden beproefd. Helaas werd de directe relatie brosse breuk en een zekere kerfslagwaarde niet gevonden voor algemene toepassing.

Bekend wordt geacht dat de kerfslagwaarde (in kgm/cm^2) van een staalsoort bepaald kan worden als functie van de temperatuur. Bij hoge temperatuur wordt een hoge kerfslagwaarde verkregen (zogenaamde *upper shelf*), bij lage temperatuur een lage kerfslagwaarde (*lower shelf*). Hiertussen ligt een overgangsgebied. Gepoogd werd om de relatie met brosse breken te verbeteren door in plaats van de kerfslagwaarde het percentage taai/bros uit te zetten als functie van de temperatuur. Dit bleek geen verbetering op te leveren. Weer later is gepoogd onder andere in plaats van kerfslagwaarde de *laterale vervorming* (in mm) van het kerfslagstaafje onder de kerf als betere maatstaf te gebruiken. Het is alleen maar een alternatief, geen verbetering. Thans wordt door de meesten begrepen dat men met een kerfslagproef alleen nooit alle parameters van een brosse breuk in een constructie kan bepalen.

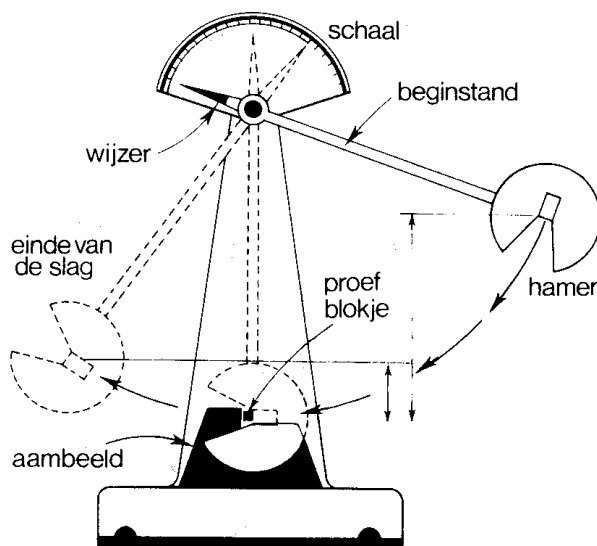
2.4.2 Uitvoering van de proef:

De proef wordt uitgevoerd met een kerfslaghamer (zie

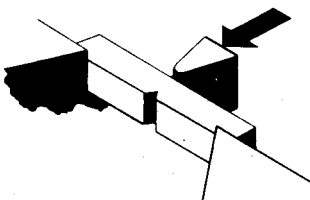
Figuur 27), die bestaat uit een stijf frame met een slingerhamer. Deze toestellen zijn genormaliseerd met een vermogen van 0,5 tot 300 Joule, afhankelijk van de toepassing. Voor metalen wordt in het algemeen een 300 J toestel gebruikt.

De kerfslaghamer wordt na een loze slag ter controle van het apparaat in de beginstand gebracht. De hamer heeft dan een vastgestelde hoeveelheid potentiële energie

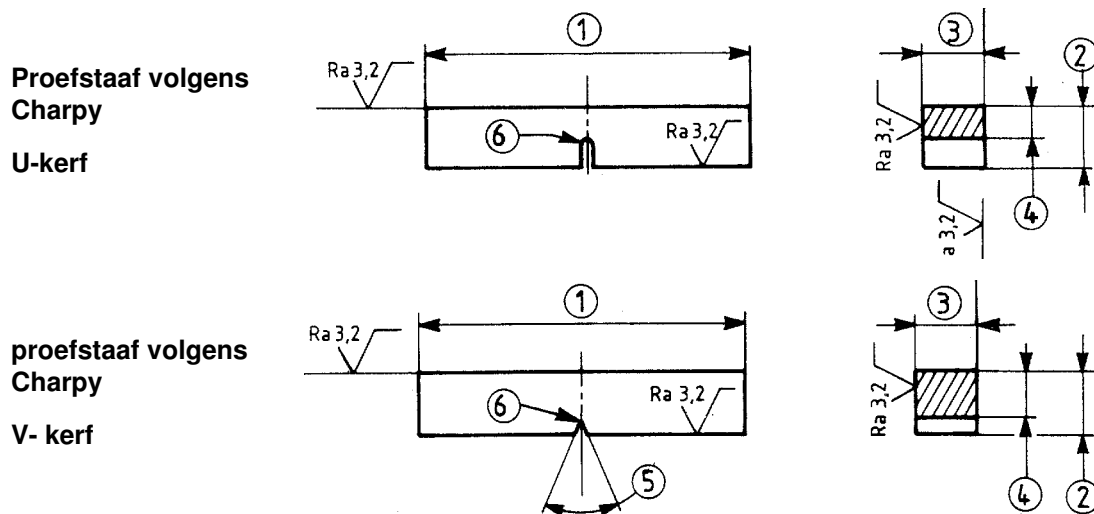
Het proefstaafje wordt op een gekalibreerde plaats neergelegd. Vervolgens wordt de hamer losgelaten en treft het staafje aan de niet-gekerfde zijde op het laagste punt, waardoor deze breekt. De hamer bereikt bij het doorzwaaien niet meer de uitgangspositie: een deel van de energie is door het staafje opgenomen en des te meer naarmate het staafje taaier is. De resterende zwaaihoogte van de hamer is dus een maat voor de door het staafje opgenomen energie. De hoeveelheid door het staafje opgenomen energie noemt men de **kerfslagenergie**³



Figuur 27 Kerfslaghamer en positie van het proefstaafje. detail van de wijzerplaat met schaalverdeling en meeneemwijzer



³ Let op: in de praktijk gebruikt men vaak de term kerfslagwaarde, terwijl men daarbij de kerfslagenergie bedoelt. In de



Figuur 28 Dimensies van standaard kerfslagstaafjes

Behalve deze energie, uitgedrukt in Joule, kan ook de **laterale expansie** gemeten worden. Afhankelijk van de taaiheid van het doorgeslagen staafje treedt een zekere mate van vervorming op, een verbreding naast de kerf. Deze verbreding, de laterale expansie, is bij taaiere materialen vrij groot.

Ook wordt wel het percentage dat bros gebroken is bepaald. Dit brose gedeelte is vaak goed zichtbaar aan het glinsterende uiterlijk van het breukvlak.

De standaardproefstaaf moet 55 mm lang zijn en een vierkante doorsnede met zijden van 10 mm hebben. Indien de afmetingen van de testplaat een proefstaafbreedte van 10 mm niet toelaat is ook een andere breedte toegestaan; deze breedte dient wel te worden vermeld.

De kerf zit in het midden van de lengterichting. Er zijn twee kerfvormen vastgesteld:

- V-kerf met een V- vorm van 45° , 2 mm diepte en een straal van 0,25 mm van de bodem van de kerf;
- U-kerf of sleutelgatkerf met een diepte van 5 mm en een straal van de bodem van de kerf van 1 mm.

Bij de standaardbeproeving wordt een beproevingstoestel (kerfslaghamer) gebruikt met een nominaal arbeidsvermogen van 300J

Een en ander leidt tot de volgende notatie bij de bepaling van de kerftaaiheid:

- KV of KU, aangevende de vorm van de kerf;
- indices die aangeven wat het beschikbare arbeidsvermogen is en wat de breedte van de proefstaaf is, indien deze waarden afwijken van de standaard condities.
- indien de staaf wordt vervormd, maar niet gebroken is kan de verbruikte breukenergie niet worden bepaald. Dit wordt in het beproevingsrapport vermeld.

voorbeelden: **KV = 120 J**

*nominale arbeidsvermogen 300J, standaard proefstaaf met V-kerf,
verbruikte energie bij breuk 120 J*

KU₁₅₀ = 65 J

*nominale arbeidsvermogen 150J, standaard proefstaaf met U-kerf,
verbruikte energie bij breuk 65 J*

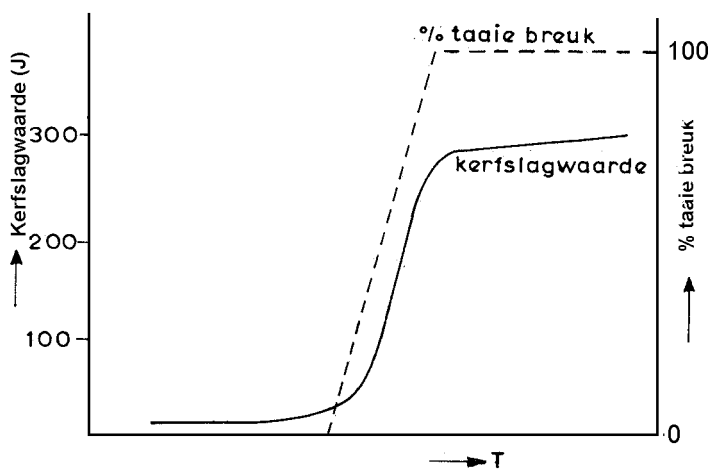
KV_{100/7,5} = 81 J

*nominale arbeidsvermogen 100J, proefstaaf met een beperkte dwarsdoorsnede en een
breedte van 7,5 mm, met V-kerf,
verbruikte energie bij breuk 81 J*

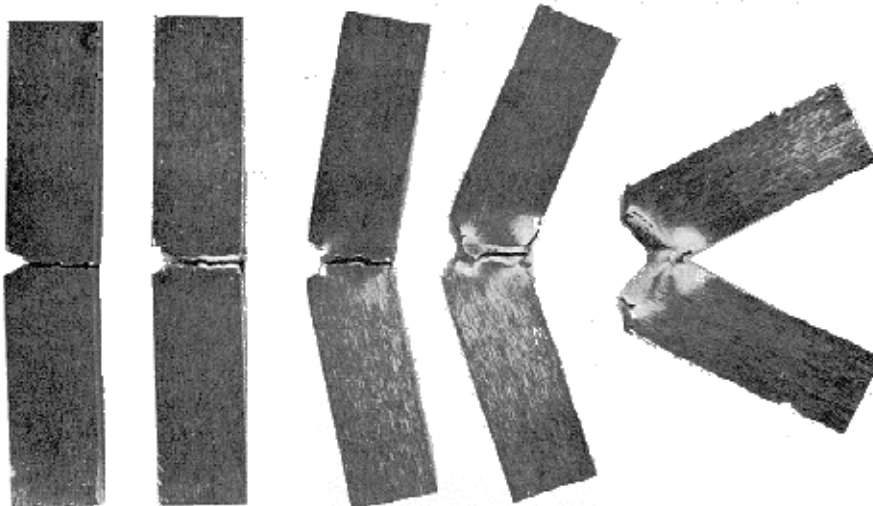
De kerfslagenergie van ongelegeerde en laaggelegeerde staalsoorten vertoont een sprongsgewijs verloop met de temperatuur. Dit verloop (Figuur 29) is kenmerkend voor materialen met een KRG rooster. Bij lage temperaturen is de kerfslagwaarde laag (brosse breuk). Boven de zogenaamde **overgangstemperatuur** worden hoge kerfslagwaarden bereikt (taaie breuk). Door legeren kan de overgangstemperatuur naar lagere temperaturen verschoven worden. Materialen, zoals aluminium, koper, austenitisch roestvaststaal hebben geen overgangstemperatuur.

In de buurt van de overgangstemperatuur is de spreiding van meetwaarden groot.

Andere kerfslagproeven (bijvoorbeeld IZOD) of kerfvormen (bijvoorbeeld DVM) worden verder niet besproken



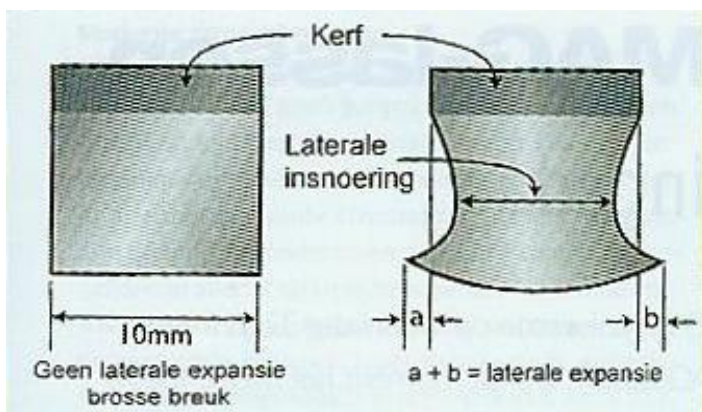
Figuur 29 Kerfslagenergie van ongelegeerd staal als functie van de temperatuur (overgangskromme, A_V -T kromme).



Figuur 30 Gebroken kerfslagstaafjes. Bij brossre breuk vindt (nagenoeg) geen vervorming plaats.



Figuur 31 Breukvlak van enkele kerfslagstaafjes



Figuur 32 Definitie laterale insnoering en laterale expansie

2.4.3 De kerfslagproef in lasverbindingen (NEN-EN 875)

De kerfslagproef is voor lasverbindingen en zeer belangrijke proef en wordt dan ook veel toegepast, zowel in het lasmetaal als in de overgangszone. Daarbij wordt de proef meestal in 3- of 5-voud per positie uitgevoerd. Naast het gemiddelde worden soms ook eisen gesteld aan individuele minimumwaarden. In bepaalde gevallen wordt een hele overgangskromme bepaald. Ook wordt wel eens een “kerfslagtraverse” vastgelegd. Dit gebeurt dan volgens een gestandaardiseerde methode (Cabelka-proef).

De positie van de kerf is zeer belangrijk: de resultaten zijn niet alleen afhankelijk van de plaats in de verbinding (las of WBZ), maar ook in lassen met meer lagen heeft de ligging van de kerf ten opzicht van de lagen duidelijk invloed.

De symbolen waarmee de kerfslagwaarde wordt aangeduid heeft betrekking op de volgende punten:

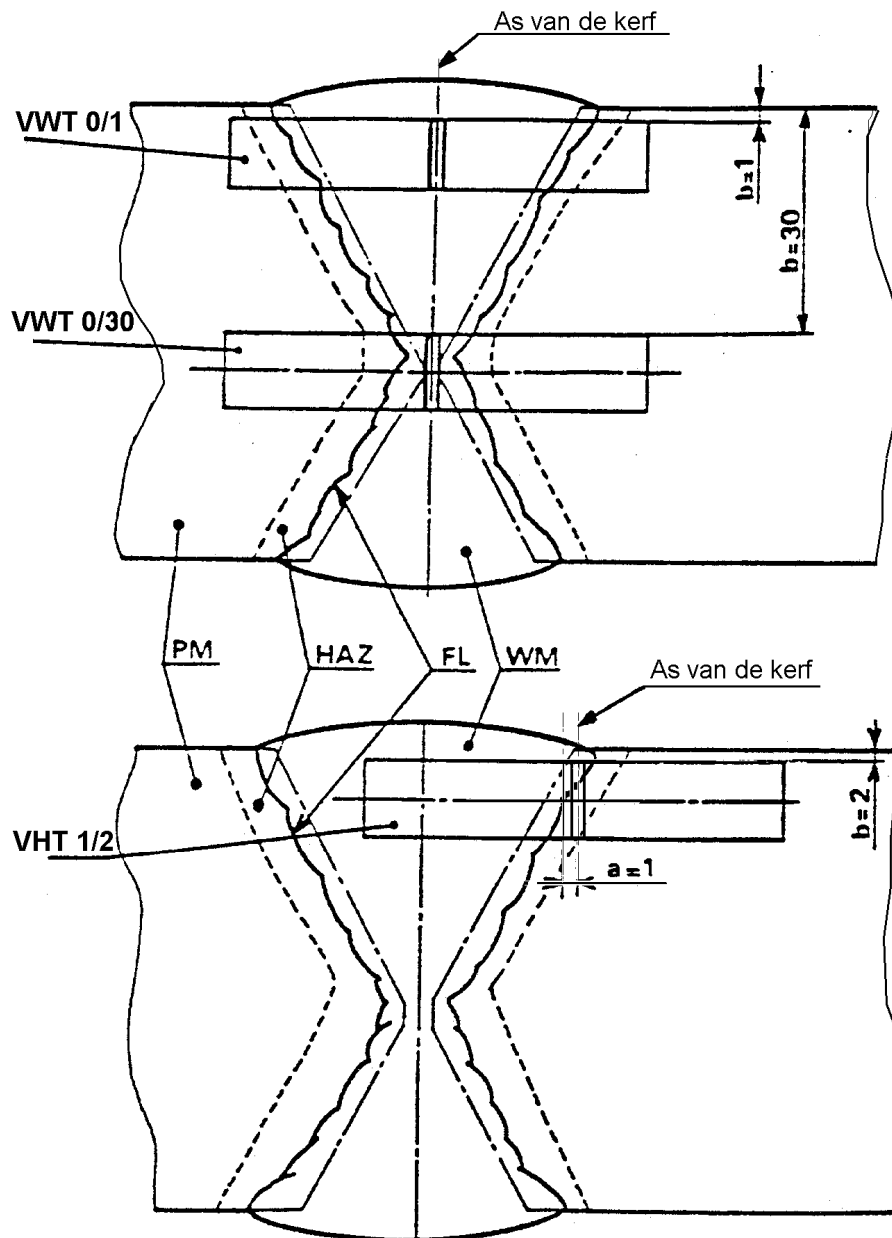
- De soort kerf van de Charpy staaf (V of U);
- Plaats van de kerf (W voor lasmetaal, en H voor warmtebeïnvloede zone. Het midden van de las en de smeltlijn zijn referentielijnen);
- Richting van de kerf (S indien evenwijdig aan het oppervlak, T indien in de dikterichting);
- a; Een getal dat de afstand tot de referentielijn aangeeft.
- b; Een getal dat de afstand tot het oppervlak van de plaat aangeeft.

Voorbeeld

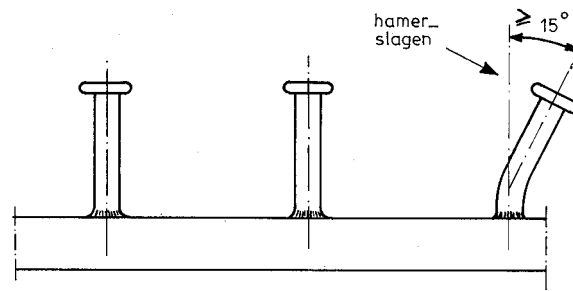
VHT 0/2:betekent:

Een Charpy-V kerfslagstaafje op de smeltlijn (H, a = 0). De kerf staat loodrecht op het oppervlakte van de plaat en begint 2 mm onder het oppervlak

In Figuur 33 zijn enkele typische voorbeelden weergegeven.



Figuur 33 Voorbeelden van markering van kerfslagstaafjes in een lasverbinding. (PM = basismateriaal; HAZ = warmtebeïnvloede zone; FL = smeltlijn; WM = lasmetaal).



Figuur 34 Slagbuigproef aan opgelaste stiften.

2.4.4 Slagbuigproef

Het is niet altijd nodig, en soms ook niet mogelijk om de kerftaaiheid van een materiaal met een kerfslagproef te bepalen. Men neemt dan vaak toevlucht tot eenvoudige alternatieve beproevingen.

Een voorbeeld hiervan is de slagbuigproef, die toegepast kan worden om de kwaliteit van de hechting te bepalen van stiften, die door stiftlussen aan een staalplaat zijn verbonden. Bij de keuring worden enkele stiften met een hamer krom geslagen. Als eis geldt bijvoorbeeld dat de las tot een buighoek van 15° niet mag bezwijken. Deze proef kan ook gezien worden als een bijzondere buigproef.

2.5 Breuktaaiheidsproeven

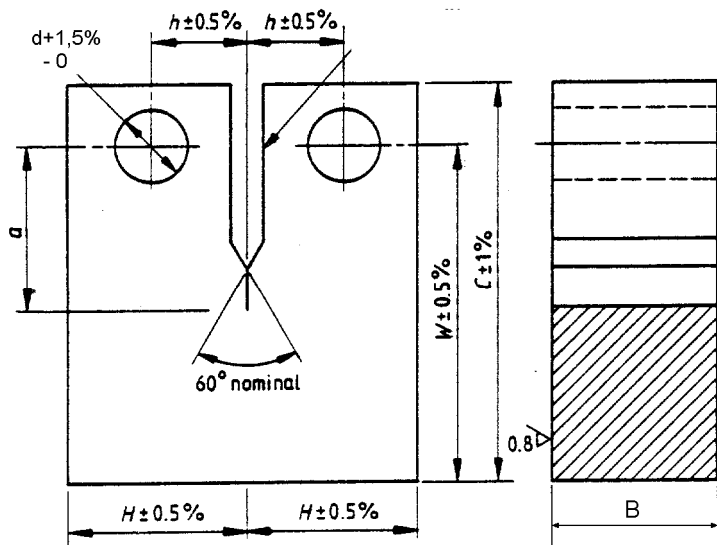
2.5.1 De CTOD proef

Meer en meer worden, voor de wat dikkere platen, CTOD proeven uitgevoerd. Dit is een proef waarbij de doorbuiging van een proefstuk, waarin een scheurtje is aangebracht, wordt bepaald.

De proef maakt deel uit van de bepaling van de constructieve lasbaarheid en wordt uitgevoerd aan proefplaten over de volle dikte van de plaat.

Met kerfslagproeven heeft men wel een indruk van de taaiheid op een bepaalde plaats, en door de lange ervaring hebben de resultaten veel zeggingskracht, maar er zijn geen kwalitatieve uitspraken mee te doen over toelaatbare foutgroottes, in relatie tot de spanningstoestand en de wanddikte van de constructie.

Indien meer informatie gewenst is, kunnen breukmechanica taaiheidsproeven uitgevoerd worden, bijvoorbeeld volgens BS 7448, deel 1 (1991). In deze norm wordt de bepaling van de K_{IC} , de kritische CTOD en de kritische J -waarde van metallische materialen beschreven.



Figuur 35 Proefstaaf dimensies van een zogenaamd compact specimen met een rechte kerf.

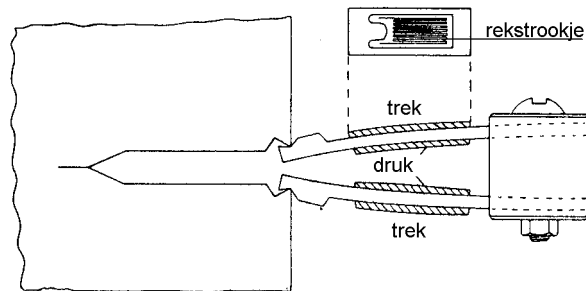
CTOD (Crack Tip Opening Displacement) is een dynamische brosse breuk proef. In de proefstaaf, die de volle dikte beslaat, wordt een groef (zaagsnede) aangebracht, van waaruit door middel van vermoeiing een scheur kan gaan groeien (zie Figuur 35). Als deze scheur een bepaalde lengte heeft, wordt de proefstaaf onderworpen aan een buigproef. De scheur gaat open staan en er vindt een hoekverdraaiing in de zaagsnede plaats. Indien het materiaal rondom de scheurtip plastisch deformeert wordt een grotere hoekverdraaiing gemeten dan bij een brossen scheuruitbreiding.

Het openen van de zaagsnede wordt met een speciale verplaatsingsmeter gemeten ("clip gauge"). In Figuur 36 is hiervan een voorbeeld gegeven. Dit levert een verplaatsing δ op die omgerekend wordt naar K_{IC} , kritische CTOD-waarde of kritische J-waarde.

Met de uit deze proef af te leiden gegevens kan een uitspraak gedaan worden over de kritische scheurlengte, waarbij de constructie instabiel (bros) breekt.

Voor een verdere uitleg en beschrijving wordt verwezen naar de module breukmechanica.

Figuur 36
Meting van de hoekverdraaiing bij de CTOD-proef.



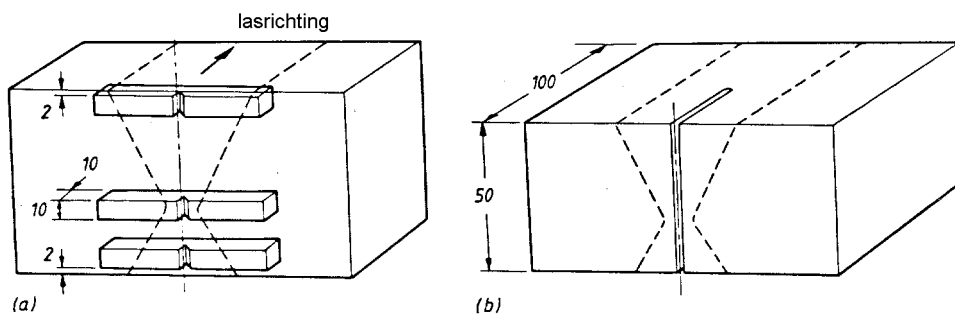
2.5.2 CTOD proeven in lasverbindingen

In lasverbindingen worden regelmatig CTOD-eisen gesteld, vooral in zware constructies, zoals die bijvoorbeeld in de offshore voorkomen..

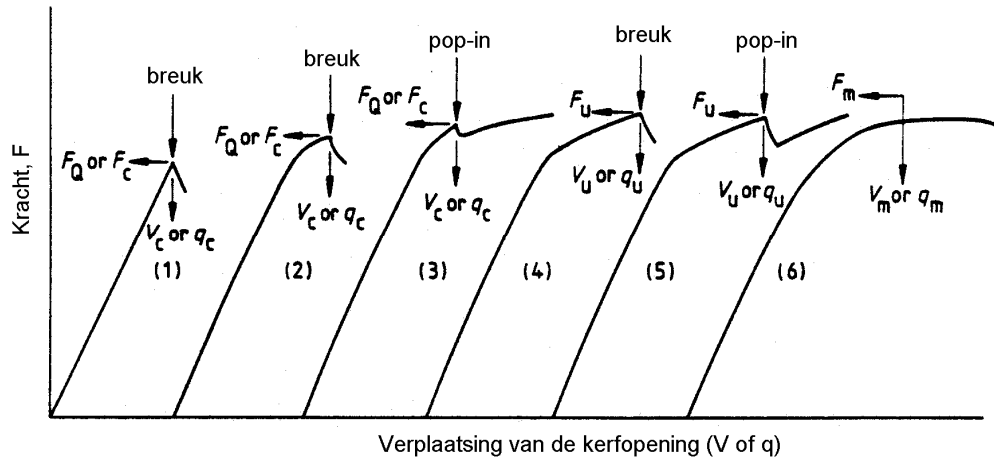
De wijzer waarop de proef uit een lasverbinding genomen kan worden is weergegeven in Figuur 37. Hierin is de overeenkomst met een kerfslagproef ook duidelijk. Uiteraard kan de kerf ook op andere posities worden geplaatst, zoals in de warmtebeïnvloede zone. Minder gebruikelijk is het de kerf in een lasverbinding in een andere richting te leggen. Dat gebeurt wel in plaatmateriaal.

De proef wordt meestal in drievoud uitgevoerd bij een temperatuur van $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

In Figuur 38 zijn een aantal karakteristieke vormen van CTOD krommes opgetekend. Het moge duidelijk zijn dat taaie materialen een grote verplaatsing van de kerfopening toestaan (bijvoorbeeld no 6)



Figuur 37 Positie van een CTOD-proefstuk (b) vergeleken met die van kerfslagstaafjes (a).



Figuur 38 Karakteristieke vormen van CTOD krommen: de kracht als functie van de verplaatsing van de kerftip.

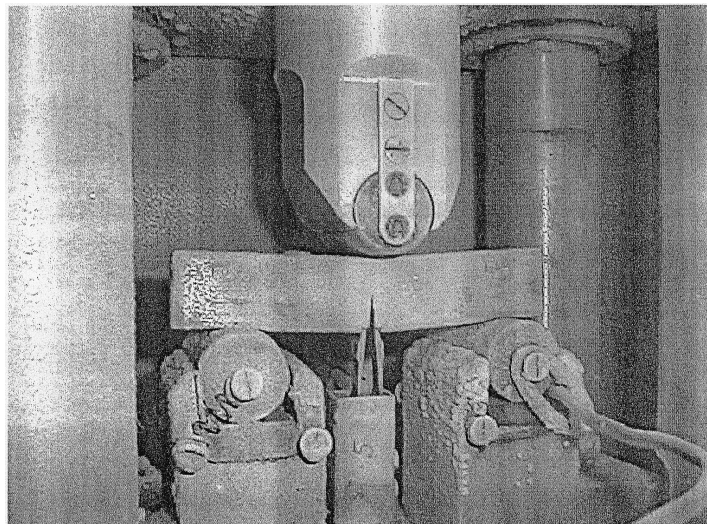
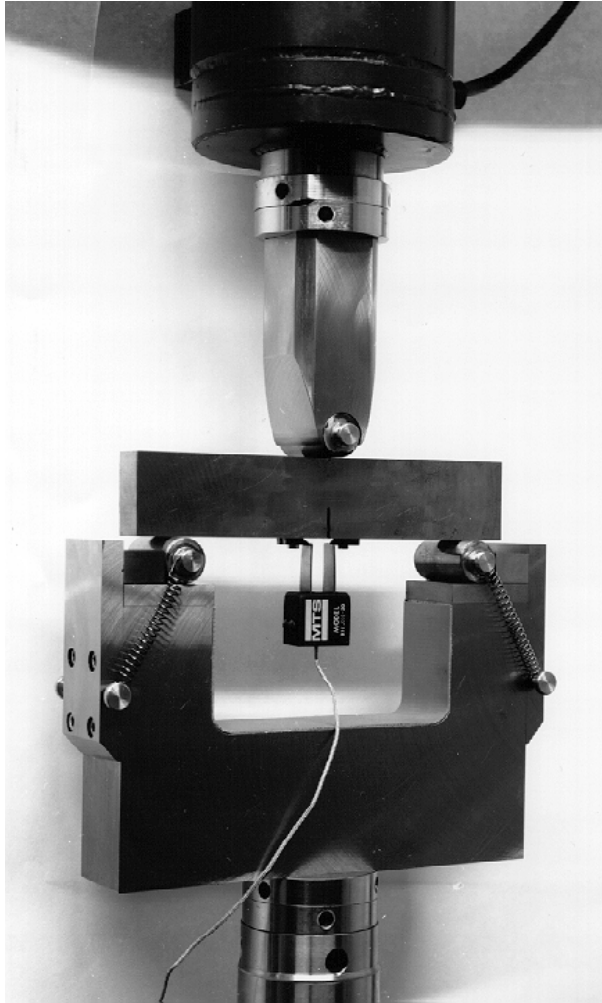
Voor de betekenis van de verschillende waarden van F , V en q wordt verwezen naar de norm BS 74448.

Een pop-in is een discontinuïteit en kan verschillende oorzaken hebben. Alleen als de pop-in heel klein is mag hij buiten beschouwing blijven.

Er zijn een aantal bezwaren tegen de CTOD proef.

- De CTOD proef is een dure proef:
 - er is veel materiaal nodig (ook zwaar en slecht handelbaar);
 - de proef vergt een nauwkeurige, tijdrovende voorbereiding: eerst een zaagsnede aanbrengen, dan een goed te definiëren vermoeiingsscheur;
 - er is dure apparatuur nodig;
 - de proef moet uitgevoerd worden door goed opgeleid personeel.
- In lasmetaal worden vaak een grote spreiding in de resultaten waargenomen. In homogeen, gegloeid plaatmateriaal liggen de resultaten van een CTOD proef in drievoud meestal vrij dicht bij elkaar; helaas is dit bij lasmetaal niet; daarmee is niet gezegd dat de verbinding dan niet deugd.

Er is veel gezocht naar een relatie tussen de CTOD waarde en de kerfslagwaarde. Helaas is dit, ondanks alle beweringen, nog niet gelukt. In sommige gevallen is voor een bepaalde lasuitvoering een empirisch verband weer te geven, maar zodra er iets aan de omstandigheid wordt gewijzigd is de relatie niet meer geldig.



*Figuur 39 Meetopstelling voor de bepaling van de CTOD breuktaaiheid
De beproeving op de onderste foto is bij $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, waardoor ijs op het proefstuk is afgezet.*

2.5.3 De Wide Plate Test

Met de Wide Plate Test wordt de weerstand tegen bros breken van een proefplaat die voorzien is van een kerf bepaald.

De proefplaat is een deel van de constructie en moet van voldoende afmetingen zijn.

De Wide Plate Test is in 1942 in Amerika ontwikkeld als een buigproef en later in 1962 als trekproef door Wells (Engeland) opnieuw geïntroduceerd waarbij het accent vooral op lasconstructies kwam te liggen.

De Wide Plate Test is één van de vele constructieve lasbaarheidsproeven, waarbij als het ware een deel van de lasconstructie op ware grootte op het gevaar van bros breken wordt beproefd. Twee grote platen, voorzien van een scherpe kerf worden aan elkaar gelast. De kerf is dusdanig gelegen dat door lasspanningen en laswarmte het materiaal in de bodem van de kerf bros kan worden. Door een trekproef met deze gelaste platen kan hierdoor een begin van een brosse breuk worden opgewekt, hetgeen bij een geheel statische trekproef nauwelijks te realiseren is.

Door proeven uit te voeren bij verschillende temperaturen wordt nagegaan bij welke temperatuur plastische deformatie aan het volledig doorscheuren voorafgaat.

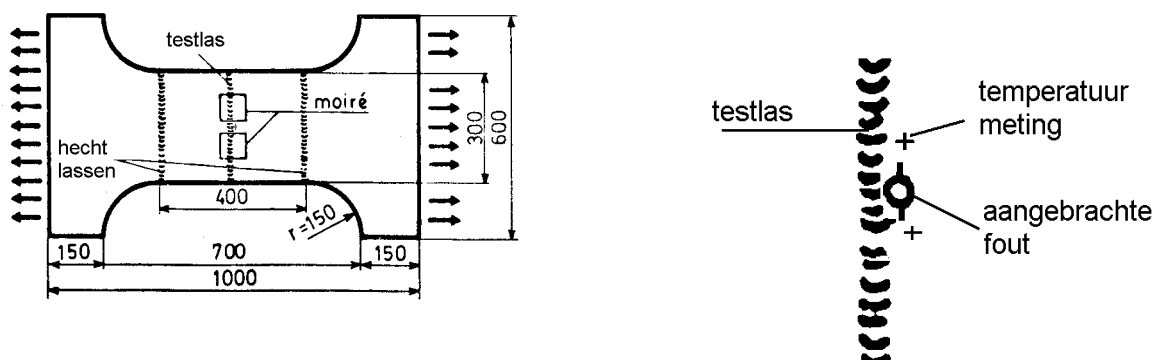
De kerf ligt meestal dwars over de las, maar kan ook in de lengterichting worden aangebracht, zowel in het lasmetaal als in de warmtebeïnvloede zone. In dat geval geeft men de voorkeur aan een K-naad, daar dan de positie van de kerf eenduidig is.

Voorts is de diepte van de kerf van belang (alleen aan het oppervlak of door de hele plaatdikte) en of de kerf aan de rand zit of in het midden.

Het aanbrengen van de kerf op de juiste plaats is een lastig karwei.

In Figuur 40 is een Wide Plate testplaat weergegeven (400 × 300 mm). Naast de kerf is een raster aangebracht waarmee men het spanningsverloop rondom de kerf goed kan bestuderen (moiré-patroon).

Evenals de CTOD proef is de proef duur. Vanwege de grote afmetingen van de proefplaat is er speciale apparatuur nodig.



Figuur 40 Voorbeeld van een Wide Plate testplaat met detail van de positie van de kerf

2.5.4 De vermoeiingsproef

Het bezwijken van een materiaal onder invloed van een wisselende belasting wordt vermoeiing genoemd. Een dynamische belasting kan aanleiding zijn tot vermoeiingsbreuk ondanks het feit dat de nominale spanning aanzienlijk lager kan zijn dan de statische materiaalsterkte.

Korte beschrijving van het mechanisme

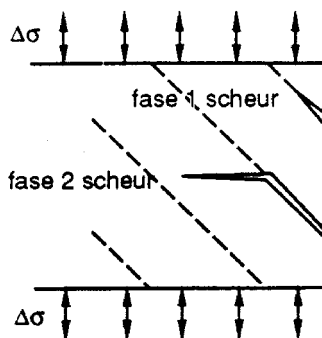
In het eerste stadium van vermoeiing ontstaan aan het oppervlak microscheuren onder 45° met de belastingsrichting.

Indien een materiaal door een trekspanning σ wordt belast treedt er een maximale schuifspanning op onder 45° met de belastingsrichting. Komt dit overeen met een glijrichting in het rooster van de korrel dan zal bij stijgende σ afschuiving optreden, het eerst aan het oppervlak omdat daar minder belemmering is.

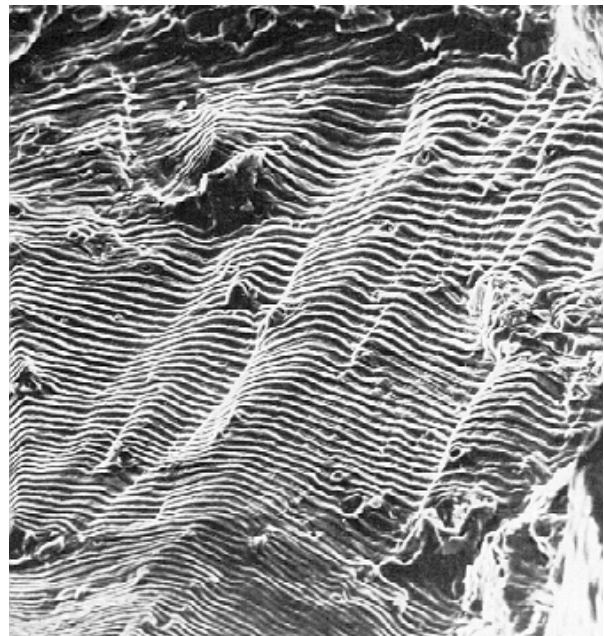
Als de belasting vervolgens omkeert zal de afschuiving ook in omgekeerde richting plaatsvinden, maar dan langs een ander (evenwijdig) glijvlak. Terugglijden langs hetzelfde glijvlak is niet meer mogelijk door versterking en oxidatie.

Afhankelijk van de ligging van dat tweede glijvlak kunnen in- en uitstulpingen ontstaan die na een aantal wisselingen uitgroeien tot een microscheur.

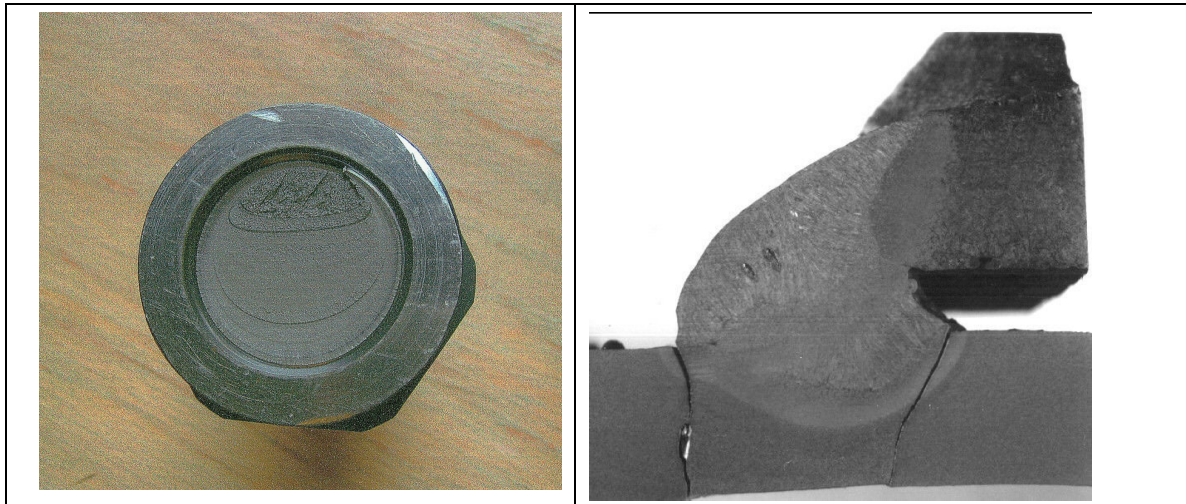
Deze eerste fase wordt bevorderd door de aanwezigheid van krassen in het oppervlak



Figuur 41
Schematische weergave van
scheurgroeirichting in eerste en tweede
fase



Figuur 42
Groeilijnen (straitions) in de tweede fase van de
vermoeiingsscheur in een Ni-legering. De groei richting
van de scheur is van onder naar boven.



Figuur 43 Vermoeingsbreuk in een bout
Vermoeiingsscheur in een las

Een groeiende microscheur veroorzaakt een steeds toenemende spanningsconcentratie. Hierdoor ontstaan aan de scheurtip zulke hoge spanningen dat de afschuiving ook in andere, aanvankelijk minder gunstige richtingen kan doorlopen. Er vormt zich dan een plastische zone in alle omringende korrels, ongeacht hun oriëntatie. Er treedt dan een tweede fase in, die gekenmerkt wordt door een cyclische uitbreiding van de scheur loodrecht op de belastingsrichting (zie Figuur 41). Deze scheurgroei stappen zijn bij voldoende vergroting goed te zien als richels aan het breukoppervlak (zogenaamde *striations*, Figuur 42).

Door onzuiverheden in het rooster resulteren in een snellere scheurgroei.

Op een gegeven moment is de resterende doorsnede te klein voor de heersende belasting en treedt statische breuk op.

Cyclische belastingen kunnen worden beschreven door de gemiddelde spanning, de amplitude, rimpel en de verhouding tussen maximale en minimale spanning (de rimpel). Vermoeingsproeven kunnen worden uitgevoerd aan ronde staven die roterende buiging ondergaan. Ook zijn vermoeingsproeven uit te voeren aan platen die in een trekbank een wisselende trek (een eventueel druk)spanning ondergaan. De frequentie van de proef moet wel hoog zijn anders duurt de proef te lang.

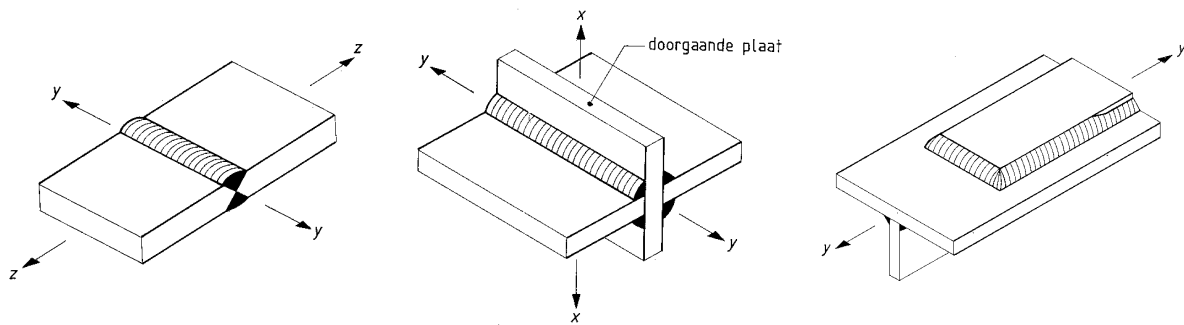
Uit een vermoeingsproef kunnen gegevens worden ontleend, die gebruikt worden bij de berekening van de levensduur van dynamisch belaste constructies.

Vermoeingsproeven in lasverbindingen

Net als bij de Wide Plate Test is er geen genormaliseerde lasproef waarmee men vermoeing test. Indien vermoeingsgegevens van een lasverbinding gewenst zijn wordt een geschikt proefstuk gekozen.

De vermoeiing kan uitgevoerd worden aan een complex constructieonderdeel, zoals een knooppunt of een vliegtuigvleugel, waarmee dan een integraal beeld van het gedrag van dat deel verkregen wordt

Goedkoper is het om standaard constructie-elementen te beproeven en de resultaten hiervan in de constructie toe te passen. In Figuur 44 zijn enkele van die constructie-elementen, ontleend aan NEN 2063 weergegeven.



Figuur 44 Enkele standaard lasdetails (NEN 2063). Elke van de getoonde lasdetails is weer onderverdeeld een aantal variaties.

3. Metallografisch onderzoek

Metallografisch onderzoek is belangrijk bij de kwaliteitsbeoordeling van materialen. Het is ook een onmisbare schakel in onderzoek naar schade oorzaken in constructies.

Voor lasverbindingen wordt veelvuldig gebruik gemaakt van macrodoorsnedes, kortweg macro's genoemd, meer nog dan van micro's.

3.1 Macroscopisch onderzoek

Van lasverbindingen worden vaak dwarsdoorsnede gemaakt om de hele verbinding te kunnen bekijken.

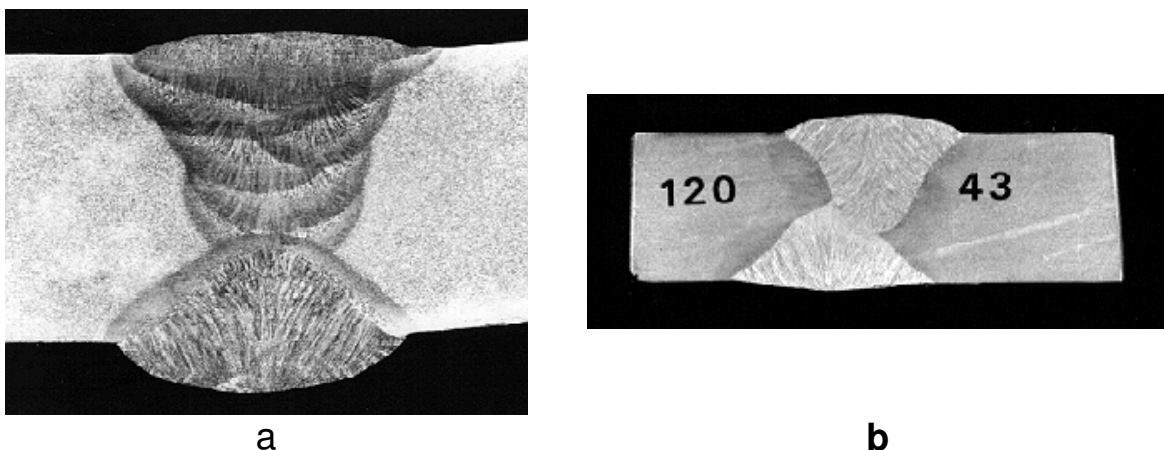
Na schuren (fijnschuren) en polijsten en etsen kunnen de las, de warmtebeïnvloede zone en het basismateriaal zichtbaar gemaakt worden. De vergroting waarmee de macro bekeken wordt is meestal gering, tot $\pm 10\times$.

Aan een macro kan informatie worden ontleend over

- de laagopbouw;
- de inbranding;
- de stollingsstuctuur (aanwezigheid, grootte en richting van dendrieten);
- lasfouten (nadat ze eerst met een NDO methode zijn opgespoord, anders is het een toevalstreffer).

Als voorbeeld zie de foto's van Figuur 45, waarop deze aspecten goed te zien zijn.

Op een macro kan eenvoudig de hardheid op de reeds eerder beschreven manier worden gemeten. Het is om deze reden dat een macro bijna altijd deel uitmaakt van een lasmethodebeproeving.



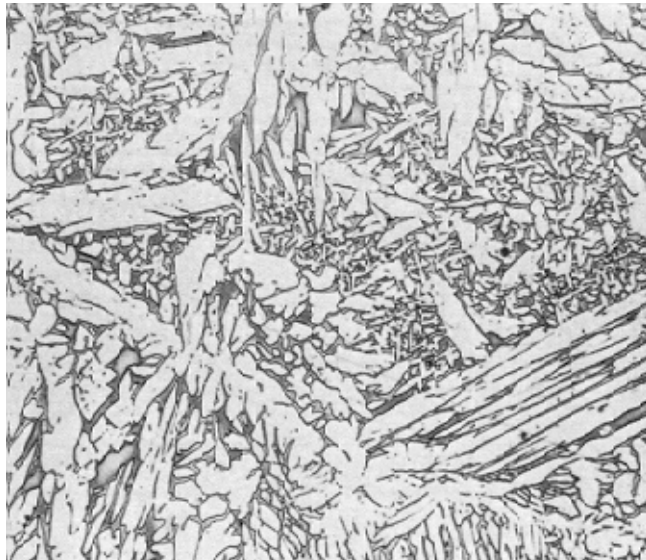
Figuur 45

- a) Macrodoorsnede, waarin stollingsstuctuur, WBZ en laagopbouw goed te zien is.
 b) In een OP-las laag-tegenlaag kan zo'n lasfout gemakkelijk ontstaan.

3.2 Microscopisch onderzoek

Indien een (dwars)doorsnede van een las zodanig wordt geprepareerd dat de microstructuur met een microscoop zichtbaar kan worden gemaakt, spreken we over een micropreparaat (een “micro”). Met vergrotingen van 50-1000 × kan men met de lichtmicroscoop de (giet)structuur, korrelgrootte, grotere uitscheidingen, insluitels en eventuele microscheuren in las en warmtebeïnvloede zone beoordelen (Figuur 46). Voor fijne uitscheidingen (precipitaten) zijn grotere vergrotingen noodzakelijk. Deze zijn mogelijk met elektronenmicroscopie.

Microscopisch onderzoek aan lasverbindingen wordt alleen in speciale gevallen uitgevoerd.



Figuur 46 *Microfoto van structuur van lasmetaal (Duplex RVS).*

4. Corrosieproeven

Corrosieproeven behoren tot de metallurgische lasbaarheidsproeven en kunnen deel uitmaken van de eisen van de afnemer. Belangrijke corrosieproeven zijn in dit geval.

- putcorrosieproeven
- interkristallijne corrosieproeven
- spanningscorrosieproeven

In een andere module in deze cursus wordt ingegaan op het fenomeen corrosie, het mechanisme en de verschillende vormen ervan. Voor het begrijpen van deze paragraaf wordt kennis van die module verondersteld.

Hier wordt volstaan met een beschrijving van enkele verschillende testen, speciaal voor roestvaststaal.

4.1.1 Putcorrosieproeven (pittingtest)

De gevoeligheid van een materiaal voor putcorrosie wordt meestal getest met de pittingtest volgens ASTM G48A

Een proefstukje 25×50 mm (geschuurd op papier no. 120) wordt ondergedompeld in 600 ml 10% FeCl₃.6H₂O en gedurende 72 uur bij een temperatuur van 22 °C of van 50 °C bewaard.

Daarna wordt het gewichtsverlies gemeten en de corrosiesnelheid berekend.

4.1.2 Interkristallijne corrosieproeven

Voor de beproeving van interkristallijne corrosie wordt veelal uitgegaan van ASTM A262, waarin praktijkuitvoeringen beschreven zijn voor verschillende materialen.

Genoemd worden:

- ASTM A262-A (oxaalzuur ets test)
- ASTM A262-C (volgens DIN: de Huey test)
- ASTM A262-E (volgens DIN: de Strauss test)
- ASTM G 28 (de Streicher test)

Oxaalzuur ets test

Met deze test wordt een gepolijst preparaat elektrolytisch geëts met oxaalzuur. Aan dit etsbeeld is af te lezen, aan de wijze waarop de etsing plaatsvindt, of beproeving met een volgende methode nog nodig is.

Deze methode is snel en goedkoop en geeft een goede eerste indruk van de aard en mate van uitscheidingen.

De Huey test is bedoeld voor roestvaststaal met laag C gehalte en voor gestabiliseerde soorten na een sensitiveringsbehandeling bij 650-675 °C

Het proefstukje in een 65% oplossing van kokend salpeterzuur gebracht waarin het 5 periodes van 48 uur verblijft. Na elke periode wordt het gewichtsverlies gemeten en kan de proef in bepaalde gevallen worden afgebroken.

Men test de gevoeligheid voor interkristallijne corrosie die het gevolg is van Cr-carbide uitscheidingen en van σ -fase uitscheidingen.

Het gewichtsverlies wordt omgerekend in een corrosiesnelheid, die meestal wordt uitgedrukt in mm per jaar.

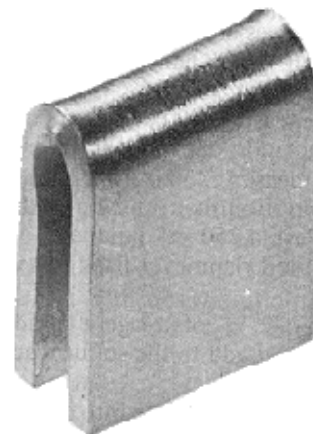
De Strauss is bedoeld voor austenitisch roestvaststaal, speciaal bedoeld om Cr-carbide uitscheidingen aan te tonen (geen σ -fase).

Het proefstukje wordt ondergedompeld in een oplossing van kopersulfaat in zwavelzuur (100 ml elk en 800 ml water), waaraan koperslijpsel is toegevoegd. Koperslijpsel moet het proefstukje bedekken. Daarna wordt de oplossing aan de kook gebracht.

De beproevingstijd is tenminste 24 uur (48-72 uur)

Na afloop wordt het proefstukje 180° gebogen over een doorn die gelijk is aan de plaatdikte en bij een vergroting tot ca. 20× onderzocht op scheuren (zie Figuur 47). Bij materialen met een lagere taaiheid is een kleinere buighoek toegestaan; er moet vergeleken worden met ongetest materiaal.

Figuur 47
Een gebogen koper-kopersulfaat-zwavelzuur test proefstuk



Voor nikkelrijke chroomhoudende legeringen, zoals Hastelloy en Inconel zijn deze corrosietesten niet geschikt. Daarvoor zou ASTM G28 kunnen dienen (DIN Streichertest)

Een proefstukje wordt ondergedompeld in een waterige kokende oplossing van ferrisulfaat en zwavelzuur.

De verblijftijd hangt af van de legering (meestal 24 of 120 uur).

Na de test wordt het gewichtsverlies gemeten en de corrosiesnelheid berekend.

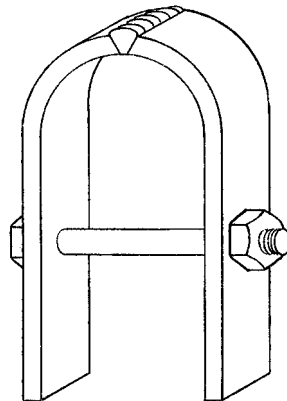
4.1.3 Spanningscorrosieproeven

Er zijn zeer veel proeven waarmee spanningscorrosie aangetoond kan worden. Kenmerkend is natuurlijk dat het in het proefstuk spanningen aanwezig moeten zijn. Deze worden meestal uitwendig aangebracht, waarbij het de moeilijkheid is precies de spanningen te kennen die in het materiaal aanwezig zijn.

Genoemd worden

- ASTM G36: spanningscorrosietest van austenitisch, ferritisch en Ni-basislegeringen.
Een proefstuk wordt onder spanning in een vat met een kokende $MgCl_2$ -oplossing gebracht. En regelmatig gecontroleerd op scheurinitiatie en scheurgroei. Een mogelijk proefstuk is weergegeven in Figuur 48.
- NACE TM 0177. Bij deze test wordt een staaf in een autoclaaf met testvloeistof met behulp van een ringveer onder spanning gehouden, waardoor de spanning zeer nauwkeurig gedoseerd kan worden.
- De Slow Strain Rate Test (SSRT); In feite is dit een hele langzame trekproef (1 week), waarbij men de zekerheid heeft dat er scheuren gaan optreden. Dat is bij de vorige proeven namelijk niet het geval. Deze test, die nog niet genormaliseerd is, wordt steeds meer toegepast.

*Figuur 48
Een las onder spanning voor
beproeving op spanningscorrosie.*



4.1.4 Corrosieproeven in lasverbindingen

De beschreven corrosieproeven zijn ook toepasbaar voor lasmetaal en lasverbindingen. De proefstukuitname is hierbij met grote zorg uit te voeren en er moet voorkomen worden, dat indien men de las wil meten ook de warmtebeïnvloede zone getest wordt.

5. Speciale proeven

Metalen (en met name lasverbindingen worden in speciale gevallen nog aan tal van andere proeven onderworpen om daarmee de geschiktheid voor de toepassing aan te tonen.

De meeste van die proeven zijn nogal specifiek en worden elders in deze cursus besproken. Het gaat om:

- Het meten van het ferrietgehalte in roestvaststaal.
- Het meten van het waterstofgehalte in lasmetaal (staal).
- Koudscheurproeven
- Warmscheurproeven.
- Slijtageproeven.

Hier wordt nog besproken: *de kruipproef*

5.1 De kruipproef

De tot nu toe besproken vervormings- en breukprocessen spelen zich af in een kort tijdsbestek. In de meeste gevallen —bij kamertemperatuur en bij niet te laag smeltende metalen— is het geoorloofd de factor tijd buiten beschouwing te laten.

Bij hogere temperatuur is dit echter niet meer zo. In dergelijke gevallen is het mogelijk dat een materiaal, ook wanneer het beneden de rek grens wordt belast, toch een toename van de rek vertoont, waardoor op den duur ongewenste vervorming en zelfs breuk kan optreden.

Dit voortgaande rekken noemt men **kruipen**.

Technische betekenis krijgt kruip bij temperaturen die hoger zijn dan $0,4 \times$ de smeltpunt in K. Zo zal lood, met een smeltpunt van 600 K reeds bij kamertemperatuur kruipen, aluminium bij ca 100 °C en ongelegeerd constructiestaal pas bij 450 °C.

Bij het onderzoek naar kruip worden twee soorten proeven uitgevoerd. Bij de eerste soort wordt de tijd tot breuk gemeten van een serie proefstaven die bij dezelfde temperatuur en verschillende waarden van opgelegde trekspanning worden beproefd. Door de spanning als functie van de tijd tot breuk weer te geven kan de spanning, die na een bepaalde tijd (bijvoorbeeld 10000 uur) tot breuk leidt door inter- of extrapolatie worden bepaald. Men noemt dit de **tijd-tot-breuksterkte**, of bijvoorbeeld de 10000-uurssterkte.

Bij de tweede soort proeven bepaald men de **kruipgrens**. Dit is de spanning die aangeeft dat bij overschrijding de vervorming een ontoelaatbare waarde heeft overschreden. Deze wordt gedefinieerd als de hoogste spanning —bij een bepaalde temperatuur— waarbij de reksnelheid of de totale rek na een bepaald aantal uren een vastgestelde waarde niet overschrijdt. Bij deze proeven wordt bij een zekere temperatuur een aantal proefstaven bij verschillende trekspanningen belast, waarbij het verloop van de rek met de tijd wordt geregistreerd (de kruipkromme, zie Figuur 49).

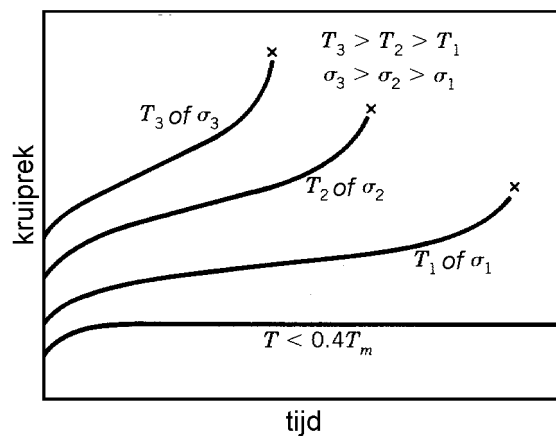
In Figuur 50 is een karakteristieke kruipkromme schematisch weergegeven. Bij het aanbrengen van de belasting treedt eerst een onmiddellijke elastische vervorming op (ϵ_0).

In het daarna volgende verloop van de rek met de tijd kan men dikwijls drie stadia onderscheiden:

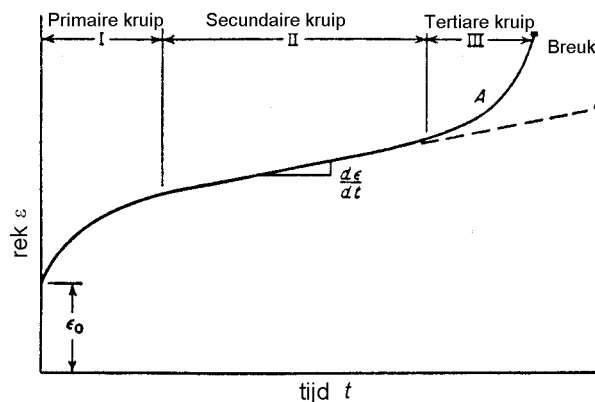
- I. het primaire of vertragingstadium, waarin de reksnelheid afneemt:
- II. het secundaire of eenparigheidsstadium, waarin de reksnelheid constant blijft:
- III. het tertiaire of versnellingsstadium, waarin de reksnelheid weer toeneemt, uiteindelijk leidend tot breuk.

Figuur 49

Kruipkrommes bij verschillende spanningen en temperaturen



\



Figuur 50

Standaard kruipkromme.

De waargenomen versnelling in het laatste stadium gaat gepaard met insnoering van de staaf, waardoor bij gelijkblijvende belasting de spanning toeneemt. Proeven bij een constante spanning vertonen geen versnelling, de gestippelde lijn (B) geeft het verloop bij een dergelijke proef.

Kruipproeven bij constante belasting worden echter zelden uitgevoerd.

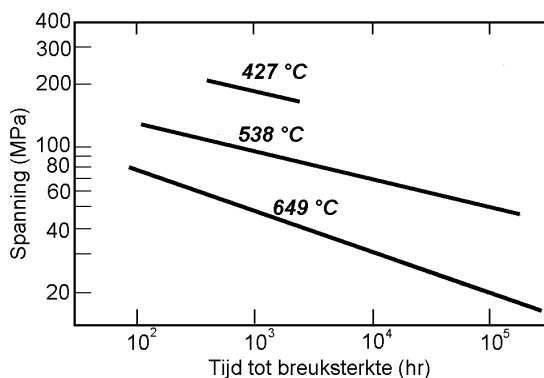
Bij een relatief lage spanning treedt het derde stadium niet op omdat de verlenging tot stilstand komt.

Bij toenemende spanning neemt de duur van het secundaire spanning steeds verder af, totdat uiteindelijk het derde stadium direct volgt op het eerste.

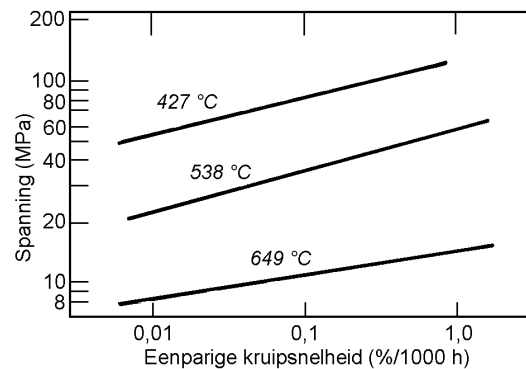
Het derde stadium dient, omdat het de inleiding is tot de uiteindelijke breuk, ten alle tijde vermeden te worden.

Hoewel het primaire krimpstadium niet verwaarloosd kan worden, duurt deze echter relatief kort. De bijdrage van het primaire stadium wordt in ontwerpsituaties veelal samen met de initiële vervorming als een elastische rek beschouwd. De hierna optredende vervorming wordt dan geheel bepaald door de helling van de krimpcurve in het secundaire stadium, de éénparige kruipsnelheid $d\epsilon/dt$ (*steady state creep rate*). De snelheidskruipgrens is derhalve een belangrijk gegeven bij ontwerpen tegen bezwijken tegen krimp.

Behalve door de spanning wordt krimp ook bepaald door de temperatuur (zie ook Figuur 51)



Figuur 51
Tijd-tot-breuksterkte als functie van de spanning en temperatuur.



Figuur 52
Eenparige kruipsnelheid als functie van de spanning en temperatuur. Met deze lijnen is extrapolatie mogelijk.

5.1.1 Korte beschrijving van het krimpmechanisme

Er zijn verschillende theoretische mechanismes voorgesteld waarvan de drie belangrijkste zijn:

- **dislocatiekrimp**, waarbij dislocaties door thermische geactiveerde diffusiemechanismen barrières kunnen passeren. Dit mechanisme treedt op bij relatief hoge spanningen. Door continue verplaatsing van dislocaties treedt blijvende vormverandering op.

- **diffusiekruip**, waarbij de vervorming tot stand komt door diffusie van vacatures en interstitiële atomen in het kristalrooster. Dit mechanisme treedt op bij wat lagere spanning.
Voor relatief hoge temperaturen vindt de diffusie door het hele kristalrooster plaats (bulk diffusie) en blijkt de kruipsnelheid omgekeerd evenredig te zijn met de korrelgrootte. Bij lagere temperaturen vindt de diffusie voornamelijk plaats langs de korrelgrenzen en blijkt de kruipsnelheid nog sterker met de korrelgrootte af te nemen, namelijk met de 3^e macht.
De weerstand tegen kruipen neemt dus toe met toenemende korrelgrootte
- **korrelgrensglijden**, waarbij de vervorming tot stand komt door het langs elkaar glijden van korrelgrenzen. Samen met de vorming van microholtes aan korrelgrenzen door concentraties van vacatures veroorzaakt het uiteindelijk interkristallijne breuk.
Hoge temperatuur kruipbreuken zijn dan ook meestal interkristallijn.

De drie mechanismes treden alle op, afhankelijk van spanning en temperatuur is de ene belangrijker dan de andere.

Door legeren van staal met geringe hoeveelheden Cr, Mo, W en V worden zeer veel kleine carbideuitscheidingen gerealiseerd, zowel in de korrel, als bij de korrelgrens. Enerzijds wordt hierdoor de dislocatiebeweging belemmerd, anderzijds bemoeilijkt het de diffusie van vacatures, zowel in de korrel als langs de korrelgrens.

5.1.2 Larson-Miller extrapolatie

Constructies werkend in het kruipgebied wordt dikwijls ontworpen voor een periode van meer dan 30 jaar. De in het laboratorium verkregen resultaten zijn in een veel kortere tijd verkregen en het zou mooi zijn als die door extrapolatie voor de praktijk geschikt gemaakt kunnen worden.

Er zijn in de loop van de tijd zeer veel extrapolaties verschenen, die vaak slechts betrekking hebben op één bepaald materiaal of op een materiaalgroep.

Eén extrapolatie, die veel wordt toegepast, vanwege de eenvoud, is de Larson-Miller extrapolatie, en is als volgt gedefinieerd:

$$\text{Larson - Miller parameter} = T (C + \log t_R)$$

Hierin is T de temperatuur in K, t_R de tijd-tot-breuksterkte in uur en C een constante.

De materiaalconstante C is materiaalafhankelijk en ligt tussen 17 en 23 uur. Een eerste benadering van 20 uur is gebruikelijk. In Figuur 53 is dit verband grafisch weergegeven als functie van de spanning.

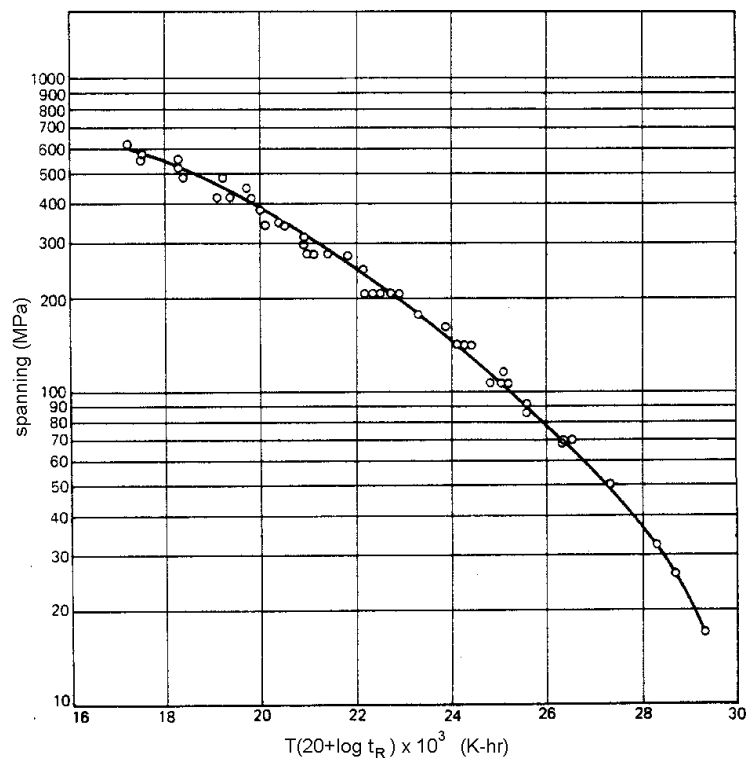
Deze extrapolatie is alleen toepasbaar voor legeringen.

Voorbeeld: Bepaal uit Figuur 52 de tijd tot breuk voor een component, die is onderworpen aan een spanning van 150 N/mm^2 respectievelijk 100 N/mm^2 bij $800 \text{ }^\circ\text{C}$
De Larson-Miller parameter voor een legering S590 is bij 150 N/mm^2 is 24×10^3 (Khr)

We berekenen dan:

$$\begin{aligned} 24 \times 10^3 &= T (20 + \log t_R) \\ &= 1073 (20 + \log t_R) \\ \log t_R &= 2.37 \\ \text{hieruit volgt } t_R &= 233 \text{ hr (9,7 dagen)} \end{aligned}$$

De Larson-Miller parameter bij een spanning van 100 N/mm^2 is $25,2 \times 10^3$, waaruit dan volgt: $t_R = 3059 \text{ uur} = 127 \text{ dagen}$.



Figuur 53

Tijd-tot-breuksterkte van een kruipvaste legering (S-590) als functie van de Larson-Miller parameter.

5.1.3 Kruipproeven in een lasverbinding

Er is geen voorschrift over de uitvoering van kruipproeven van lasverbindingen. In het geval er met kruip rekening gehouden moet worden (zoals bijvoorbeeld bij drukvaten), wordt bij de berekening in de ontwerpfase uitgegaan van gegevens die door de fabrikant van het (lastoevoeg)materiaal zijn bepaald. Het testen van lasmetaal vindt wel onder toezicht van keuringsinstanties plaats, goedkeuring van bijvoorbeeld TÜV wordt in Nederland door Stoomwezen overgenomen.

