

WATERSTOFSCEURGEVOELIGHEID BIJ HET
NAT-ONDERWATERLASSEN MET BEKLEDE
ELEKTRODE, BEPAALD MET BEHULP VAN
DE INPLANTPROEF.

J.H.A.v.Beurden

TEKST

afstudeerverslag
tussenafdeling der metaalkunde
technische hogeschool delft

Waterstofscheurgevoeligheid bij nat onderwaterlassen
met beklede elektrode, bepaald met behulp
van de inplantproef.

door J.H.A. van Beurden
april 1980

Verslag van het afstudeerwerk van
J.H.A. van Beurden, verricht aan de
Tussenafdeling der Metaalkunde
vakgroep: Toegepaste Metaalkunde
Sectie: Lastechnologie
Sectieleider: Prof. dr. ir. H.G. Geerlings
begeleider: ir. G.W. Boltje
assistentie: G.N. Kerkhof

Inhoudsopgave

	blz.
1 Inhoudsopgave	1
2 Samenvatting	3
Summary	4
3 Inleiding	5
4 Literatuuroverzicht van het nat-onderwaterlassen	6
4.1. De elektroden	6
4.1.1. De basische elektrode	6
4.1.2. De rutiel elektrode	7
4.1.3. De ijzeroxyde elektrode	7
4.1.4. De austenitsiche elektrode	8
4.2. Mechanische eigenschappen	8
4.3. Polariteit en lasparameters	9
4.4. Belvorming	10
4.5. Materiaaltransport in de boog	10
4.6. Waterstofscheurgevoeligheid	11
4.6.1. De invloedsfactoren	11
4.6.1.1. Spanningen	11
4.6.1.2. Structuur	12
4.6.1.3. Waterstof	13
4.6.2. Een waterstofscheurmechanisme	14
4.6.3. Koudscheurproeven	15
4.6.3.1. De C.T.S.-proef	15
4.6.3.2. De inplantproef	16
4.6.3.3. Resultaten met de C.T.S.-proef onderwater	17
4.6.3.4. Resultaten met de inplantproef in lucht	18
4.7. Konklusie	19
5 De executieve lasbaarheid	20
6 Temperatuurmeting	22
7 Waterstofbepalingen	23
7.1. Meetprocedure	23
7.2. Waarnemingen	24
7.3. Bespreking van de waarnemingen	25
8 De inplantproeven	28
8.1. De inplantbeproevingbank	28
8.2. De meetopstelling	29
8.3. Proefomstandigheden en meetmethode	29
8.4. De opzet van het onderzoek	30

blz.

8.5.	Waarnemingen	30
8.6.	Bespreking van de waarnemingen	31
9	Konklusies	35
10	Literatuurlijst	36
	bijlage I, II en II	1 t/m 8
	tabellen	1 t/m 19
	figuren	1 t/m 71

Samenvatting

Dit onderzoek is gewijd aan de waterstofscheurgevoeligheid bij het nat-onderwaterlassen met beklede elektroden. In het literatuuroverzicht worden naast enige theoretische aspecten van het nat-onderwaterlassen ook onderzoekresultaten van diverse auteurs besproken. De toepassing van verschillende typen elektroden onder water worden behandeld. Daarna worden aspecten belicht, die in belangrijke mate de waterstofscheurgevoeligheid beïnvloeden. Er zijn twee typen proeven om de waterstofscheurgevoeligheid te bepalen. Na het bespreken van resultaten met de CTS-proef (een "internal-restraint" proef) onder water en met de inplantproef (een "external-straint" proef) in lucht wordt gekonkludeerd dat de inplantproef een zeer geschikte methode is voor de bepaling van de waterstofscheurgevoeligheid.

In het praktisch gedeelte van dit onderzoek is aandacht besteed aan de executieve lasbaarheid. Gebleken is dat de boogspanning een grote invloed heeft op het lasuiterlijk. Na het ontwikkelen van een meetprocedure voor het bepalen van waterstofgehaltes, zijn een groot aantal metingen gedaan met verschillende typen elektroden, zowel in lucht als in water. Hieruit blijkt dat de waterstof die onderwater gemeten wordt voor een belangrijk gedeelte afkomstig is uit de bekleding en dat het dus zinvol is om ook voor onderwaterlassen droge elektroden te ontwikkelen. Verder is gebleken dat ijzeroxyde elektroden een aanzienlijke verlaging van het diffundeerbare waterstofgehalte veroorzaken. Na de behandeling van de ontwikkelde inplantmachine en de meetopstelling worden de hiermee verkregen resultaten besproken, waaruit blijkt dat de inplantproef een zeer geschikte methode is om subtiele verschillen in waterstofscheurgevoeligheid onderwater kwantitatief te bepalen.

Summary

An investigation is carried out concerning hydrogen cracking susceptibility of steel in wet-underwater welding with covered electrodes. Theoretical aspects are discussed and factors which influence hydrogen-cracking are explained. Results obtained with underwater C.T.S.-tests (an internal restrained cracking test) and implant-tests (an external restrained cracking test) in air led to the conclusion that the latter is a suitable method for determination of hydrogen cracking susceptibility.

In the experimental part of this investigation attention has been paid to operative weldability. It turns out that the arc voltage has a big influence on weld bead appearance. After development of a procedure to determine the amount of diffusible hydrogen in weld metal measurements were carried out with various types of electrodes in air and under water. Due to the fact that the experiments with underwater welding indicated that the hydrogen in the weld metal is coming from the coating of the electrode, it is important to develop dry electrodes for underwater welding. It also appeared that iron oxide electrodes decrease the amount of diffusible hydrogen to a marked extent. A remote controlled implant testing machine for use under water was developed. From the results obtained with this machine it could be concluded that small difference in susceptibility for hydrogen cracking of steel welded under water, could be determined with this equipment.

3. Inleiding

Bij het onderwaterlassen wordt onderscheid gemaakt tussen drooglassen en nat-lassen. Het drooglassen, ook wel hyperbaar-lassen genoemd, kan nog worden onderverdeeld in "habitat"-lassen en "hydrobox"-lassen. Bij het "habitat"-lassen bevinden zich zowel de lasser als de lasverbinding in een van het water afgescheiden ruimte. Bij de "hydrobox"-methode bevindt zich alleen de lasverbinding in een droge ruimte. In beide gevallen is de druk waaronder gelast wordt gelijk aan de omringende waterdruk. Bij het nat-onderwaterlassen hebben zowel de lasser als de lasverbinding direkt kontakt met water.

Dit onderzoek behandelt alleen aspecten die betrekking hebben op het nat-onderwaterlassen met beklede elektroden.

Het nat-lasproces heeft grote voordelen ten opzichte van de andere in de inleiding genoemde methoden. Er zijn geen grote extra voorzieningen nodig, waardoor deze methode aanzienlijk goedkoper is en een grote flexibiliteit heeft. De grotere flexibiliteit maakt deze methode bijzonder geschikt voor reparaties. Een ander voordeel is de grote vrijheid van de lasser (1). Verder is het nat lassen met beklede elektroden toepasbaar in alle lasposities (26, 27).

Er zijn aan de natte methode echter ook nadelen verbonden. Als gevolg van de hoge stolsnelheid van het smeltbad treden er vaak slakinsluitels en gasholtes op (1, 26, 27). Door de dissociatie van water is het waterstof- en zuurstofgehalte in de omgeving rond de boog hoog. De zuurstof veroorzaakt een oxydatie van enkele elementen. De belangrijkste elementen die geheel of gedeeltelijk oxyderen, zijn: koolstof, mangaan en silicium. Deze oxydatie is sterker naarmate gelast wordt op grotere diepte (28, 36). De waterstof in de boogatmosfeer lost gemakkelijk op in het gesmolten metaal en diffundeert naar de warmteïnvloedszone (W.I.Z.). Hier kan deze waterstof in combinatie met spanningen en een brosse structuur, die het gevolg is van de hoge afkoelsnelheid, waterstofscheuren veroorzaken. Dit type scheuren vormt een groot probleem bij nat lassen (1, 2, 10, 26, 36).

Andere problemen zijn randinkarteling en de onmogelijkheid van de lasser om het smeltbad te kunnen zien.

4. Literatuuroverzicht van het nat-onderwaterlassen

4.1. De elektroden.

Aan de bekleding van de elektrode worden verschillende eisen gesteld. De gassen uit de bekleding moeten bijdragen tot een stabiele boog en het vloeibare metaal beschermen. De slak heeft ook die beschermende functie. Zowel de gassen als de slak beïnvloeden de chemische samenstelling van het gesmolten materiaal. Een grote slakvorming is gewenst, zeker als deze een lage warmtegeleidbaarheid heeft, omdat dit de stolsnelheid vertraagt. Een verschil in uitzettingscoëfficiënt van de slak en het metaal is gunstig voor een goede slaklossing (26). Door variatie van de smelttemperatuur van de bekleding kan men de kelkgrootte beïnvloeden, hetgeen bij onderwaterlassen erg belangrijk is. Doordat de duiker het smeltbad en de boog niet kan zien, is hij alleen in staat de booglengte konstant te houden als hij slepend kan lassen. Het afsmelten van de bekleding moet daarom achterblijven bij het afsmelten van de kerndraad (26). De grootte van de kelk bepaalt de booglengte en dus de spanning waarmee gelast wordt.

Alle onderwaterlaselektroden worden voorzien van een waterdichte bescherm laag. Deze is noodzakelijk om afbrokkeling van de bekleding te voorkomen. Als de bekleding nat is, ontstaat er bij het inschakelen van de stroombron met de elektrode aan de minpool, waterstof aan de kerndraad. Deze drukt de bekleding weg. De kwaliteit van de bekleding kan aangetast worden door het water. De bescherm laag moet tevens in verband met de veiligheid elektrisch isolerend zijn. Verder mag de bescherm laag geen nadelige componenten in het lasmetaal achterlaten en moet de afbrandsnelheid gelijk zijn aan de afbrandsnelheid van de elektrode. Stalker (2) heeft goede resultaten met een vinyl-coating terwijl ook goede resultaten worden verkregen met Resikote DA. Blank en ijzermenie (6).

Er zijn verschillende typen elektroden onderzocht waarvan de resultaten hier worden samengevat.

4.1.1. De basische elektrode.

Vele onderzoekers komen tot de konklusie dat een basische elektrode niet geschikt is voor toepassing bij het nat-onderwaterlassen. De las verkrijgt een zeer onregelmatig uiterlijk en er treden grote fluktuaties in de stroomsterkte op. Er moet gelast worden met een korte konstante booglengte omdat er weinig speling in de spanning kan zijn voor het onderhouden van de boog.

Verder is er nauwelijks sprake van de vorming van een kelk. IJzer toevoegen aan een basische bekleding geeft wel een iets grotere speling in de spanning, maar leidt nog niet tot goede resultaten.

4.1.2. De rutiel elektrode.

Een rutiel elektrode geeft een stabielere boog dan een basische elektrode. Het lasuiterlijk is ook beter, maar als doorsneden van de las gemaakt worden, vertonen deze vaak waterstofscheuren (2). Silva e.a. (27) hebben een rutiel elektrode type A.W.S. E 6013 onderzocht. Zij konstateren een aanzienlijke randinkarteling en gasholtes in het lasmetaal. Betere resultaten vinden zij met een rutiel elektrode A.W.S. E 7024, waarbij ijzerpoeder aan de bekleding is toegevoegd. De toevoeging resulteert in een stabielere boog, een hogere neersmeltsnelheid en een beter lasuiterlijk. Deze elektroden zijn goed slepend te lassen.

4.1.3. De ijzeroxyde elektrode.

Goede resultaten worden verkregen met ijzeroxyde elektroden waarbij ijzerpoeder aan de bekleding is toegevoegd (2, 4, 27, 28). Dit type is slepend te lassen en heeft een stabiele boog. Gebleken is dat deze elektroden een geringe gevoeligheid hebben voor waterstofscheuren (2, 4, 28).

Belangrijk is de onderstaande evenwichtsreactie



De door het metaal opgenomen hoeveelheden gas zijn niet te berekenen, daar zich tijdens het lassen en de daaropvolgende afkoeling geen evenwicht instelt.

Er kunnen echter wel konklusies van kwalitatieve aard getrokken worden. In evenwichtstoestand geldt de volgende relatie

$$K = \frac{[\text{H}]^2 \cdot [\text{FeO}]}{P(\text{H}_2\text{O})} \quad (\text{II})$$

Hieruit volgt dat de opgenomen hoeveelheid waterstof zal afnemen naarmate de opgenomen hoeveelheid zuurstof groter is, bij gelijkblijvende $P(\text{H}_2\text{O})$. Deze ijzeroxyde elektroden zouden dus een lager waterstofgehalte geven (39). Volgens Reeve (24) echter, is het totale waterstofgehalte bij ijzeroxyde elektroden weinig lager dan bij rutiel elektroden, maar het diffundeerbare gehalte is bij de eerste aanzienlijk lager. Er diffundeert waterstof naar de uitscheidingslijnen. Deze bevatten een hoog percentage ijzeroxyde. De waterstof wordt hier volgens eerder genoemde reactie omgezet in water. Volgens Reeve (24) is de reactiesnelheidskonstante van vergelijking (I) naar rechts aanmerkelijk kleiner dan naar links. Dit betekent dat het een-

maal gevormde water niet snel omgezet wordt in waterstof en ijzeroxyde. Op deze manier wordt een aanzienlijk percentage waterstof gevangen.

Een verlaging van de gevoeligheid voor waterstofscheuren wordt niet alleen verklaard door een lager gehalte aan diffundeerbare waterstof. Als gevolg van de afbrand van koolstof, silicium en mangaan treedt een verlaging op van de vloeigrens, waardoor de inwendige spanning in de las lager is.

4.1.4. De austenitische elektrode.

De kans op waterstofscheurvorming in de warmteïnvloedszone is bij toepassing van een austenitisch lasmetaal kleiner. De waterstofoplosbaarheid in austeniet is groter dan in ferriet. Hierdoor is de aktiviteit van de waterstof geringer waardoor er minder naar de warmteïnvloedszone diffundeert, zodat het waterstofgehalte daar laag blijft.

Bij austenitische elektroden treden vaak wel scheuren op in het lasmetaal. De menging van het lasmetaal en het plaatmateriaal tijdens het lassen, gevolgd door een snelle afkoeling, veroorzaken brosse structuren in het lasmetaal die aanleiding zijn tot scheurvorming. Bij het onderwaterlassen is de menging in het algemeen groot, omdat met een hoge stroomdichtheid gelast wordt: de stroom is hoger en de boog is smaller dan in lucht (2). Hooggelegeerde elektroden zijn minder gevoelig voor scheurvorming in het lasmetaal.

Elektroden op nikkelbasis geven ongeveer dezelfde resultaten als de hooggelegeerde austenitische elektroden (4). De toepassing van elektroden waarvan de corrosiepotentiaal sterk afwijkt van het moedermateriaal moet worden vermeden in verband met het gevaar voor kontaktcorrosie.

4.2. Mechanische eigenschappen.

Verschillende onderzoekers (8, 27, 28, 36) hebben de mechanische eigenschappen van onderwater gelaste verbindingen onderzocht. Hoewel er onderlinge verschillen zijn is globaal de treksterkte (80%) en de ductiliteit 50% van een in lucht gelegde las. Dit wordt geïllustreerd door de resultaten weergegeven in tabel I.

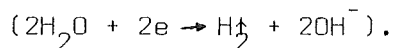
Er treedt een sterke afname op van alle mechanische eigenschappen als een las gemaakt wordt op grotere diepte (28). Tabel II toont de invloed van de diepte op de mechanische eigenschappen. Dit verschijnsel kan veroorzaakt worden door een toename van de poreusheid met de diepte (I) (zie figuur 1).

4.3. Polariteit en lasparameters.

Het lassen met wisselstroom is voor het onderwater lassen niet relevant, omdat dit te gevaarlijk is voor de duiker. Uit veiligheidsoverwegingen is het lassen met gelijkstroom vereist. De polariteit van de elektrode heeft een grote invloed op de vorm van het smeltbad. Wordt gelast met de elektrode aan de minpool ("straight-polarity") dan ontstaat er een relatief smal smeltbad met een diepe inbranding. Wordt gelast met de elektrode aan de pluspool ("reverse-polarity") dan wordt de las breder en is de inbranding geringer (26). (zie figuur 2). Deze verschillen worden veroorzaakt door het temperatuursverschil tussen de anode en de kathode. Ongeveer 80% van de warmte wordt ontwikkeld aan de anode, 5% aan de kathode en 15% van de warmte wordt afgevoerd door de gassen en de slak (26).

De adviezen ten aanzien van de juiste polariteit zijn nogal tegenstrijdig. Lassend met de elektrode aan de minpool treden er meer kortsluitingen op, maar is een grotere variatie mogelijk in de spanning (2). Er treedt een verminderde corrosie op van de elektrodehouder.

Het lassen aan de minpool zou ook leiden tot minder spatten, minder randinkarteling, een betere badvorm en een regelmatigere lasuiterlijk (27). Een nadeel is de kans op het afspringen van de bekleding van de kerndraad door waterstofvorming.



Ligt van de gelijkrichter de minpool aan aarde dan is het voor de duiker prettiger om te lassen met een elektrode aan de minpool, omdat de pluspool dan een rimpelspanning heeft die voor de duiker voelbaar is. Tsai en Masubuchi (26) vinden betere resultaten wanneer gelast wordt met een elektrode aan de pluspool.

De lasparameters hebben een grote invloed op het lasresultaat. Een grotere booglengte, dus een grotere boogspanning, veroorzaakt een grotere warmteinbreng en meer spatten. Een te lage stroom leidt tot een gerimpeld uiterlijk, veroorzaakt door een kleiner smeltbad dat onregelmatig stolt (26). Bij het onderwaterlassen treedt zowel door de waterstof als het omringende water een grotere koeling op van de boogkolom. Hierdoor is de kolom smaller, wat resulteert in een hogere stroomdichtheid. Dit is de belangrijkste verklaring voor het verschijnsel dat bij gelijkblijvende stroom de spanning stijgt met toenemende diepte. In figuur 3 is dit weergegeven. Eenzelfde verklaring is toepasbaar op figuur 4. Hier is te zien dat bij gelijkblijvende stroomsterkte de spanning bij bewegende boog hoger moet zijn, omdat de boog kouder zou zijn (37).

In tabel 3 zijn voor enkele elektroden de optimale lasparameters gegeven. De benodigde stroom is bij het nat-lassen ongeveer 20-25% groter dan bij het in lucht lassen.

4.4. Belvorming.

Voor het in stand houden van de boog is de voortdurende aanwezigheid van een dampbel tussen de elektrodetip en het werkstuk essentieel. Uit waarnemingen blijkt dat er altijd een minimum bel rond de boog aanwezig is (28). Deze bel is half bolvormig en groeit uit tot een zekere kritische grootte, waarna een deel van de bel opstijgt, met achterlating van de minimum bel. Zou deze minimum bel niet aanwezig blijven dan zou het bestaan van de lasboog onderwater onmogelijk zijn. Madatov heeft de samenstelling van de bellen bepaald. Hij vindt de volgende waarden (28): 62-82% H_2 , 10-24% CO, 4-6% CO_2 , 3% N_2 en wat metaaldamp. Tsai en Masubuchi hebben een mathematisch model ontwikkeld voor de belvorming. Hiervoor wordt verwezen naar de literatuur (26, 37).

Over de grootte van de kritische bel verschillen de waarnemingen (28). Zij variëren van 11 tot 30 mm. Er is een goede overeenstemming in het aantal bellen dat opstijgt (12-16 bellen/sec).

De hoeveelheid gas die ontwikkeld wordt, is afhankelijk van de elektrode. Ook wordt aangenomen dat de gasontwikkeling toeneemt met toenemende diepte (37). In tabel 4 is de gasontwikkeling weergegeven van enkele elektroden. Er is geen goede overeenstemming in de gegevens aanwezig.

4.5. Materiaaltransport in de boog.

Het materiaaltransport in de boog is globulair. Het transport vindt plaats met tamelijk kleine druppels. Soms echter ontstaat er een grotere druppel die kortsluiting veroorzaakt. Volgens onderzoek van Madatov (23) is het volume van de metaaldruppel op het moment van het loslaten van de kerndraad ongeveer tweemaal het volume direct voor het neerkomen in de laspoel. Tijdens de groei van de druppel aan de elektrodetip ontstaat ook waterstofgas, dat als bellen in de metaaldruppel aanwezig is. Tijdens de druppelovergang verdwijnen deze gasbellen, waardoor het volume van de druppel afneemt. De overgang van de druppel van de elektrode naar het bad duurt ongeveer 0,025 sec.

Tijdens de druppelovergang treedt er afbrand op van enkele elementen. Uit tabel 5 blijkt dat deze afbrand tevens afhankelijk is van de diepte. De afbrand wordt veroorzaakt door de zuurstof die vrijkomt bij de dissociatie van water in de boog (28).

De afbrand hangt hoofdzakelijk af van de vrije vormingsenthalpie van het oxide. Er treedt een aanzienlijk verlies op van de elementen: koolstof, mangaan en silicium.

4.6. Waterstofscheurgevoeligheid.

Een bekend probleem in de lastechniek is de waterstofscheurvorming. Deze scheurvorming is gevaarlijk omdat ze niet direkt optreedt, maar zelfs na enige dagen nog kan ontstaan. Een belangrijk deel van dit onderzoek is gewijd aan waterstofscheurvorming.

4.6.1. De invloedsfactoren.

Het ontstaan van waterstofscheuren moet worden toegeschreven aan de gelijktijdige aanwezigheid in het materiaal van spanningen, een scheurgevoelige structuur, waterstof en een voldoende lage temperatuur. Bij het onderwaterlassen is voldaan aan de laatste voorwaarde. De temperatuur is snel beneden de 150°C .

4.6.1.1. Spanningen.

Noodzakelijk voor de vorming van waterstofscheuren is de aanwezigheid van spanningen. Naarmate de spanningen hoger worden neemt kans op waterstofscheurvorming toe.

In laskonstrukties kunnen hoge spanningen optreden. Deze kunnen globaal onderverdeeld worden in twee categorieën: spanningen als gevolg van inwendige deformatie en spanningen als gevolg van uitwendige krimpverhinderings.

De eerste worden veroorzaakt door faseomzettingen en ongelijke temperatuurverdeling. Bij het onderwaterlassen treden hoge afkoelsnelheden op. Dit verlaagt de M_s -temperatuur, waardoor het staal langer in de austenitische fase afkoelt, wat een extra bijdrage aan de krimpspanning geeft. Ten gevolge van de sterk koelende werking van het water treedt er geen ontlaateffekt op van de martensiet in het traject van de lagere temperaturen. Hierdoor nemen de inwendige spanningen van de martensiet minder af dan bij het lassen in lucht.

De spanningen die optreden in de las als gevolg van krimpverhinderings worden o.a. bepaald door de stijfheid van de konstruktie. De mate van stijfheid wordt vastgelegd in een term genaamd "Intensity of Restraint": K of R_f . Deze is gedefinieerd onafhankelijk van de lasparameters en de lasnaadvorm. Het is mogelijk door metingen of berekeningen de "Intensity of Restraint" van lasconfiguraties te bepalen. Voorbeelden van deze bepalingen worden gegeven door Satoh (41). Als K bekend is, is met behulp van vergelijking (III) de krimpspanning in de las te berekenen.

$$P = m \cdot K$$

(III)

waarin P: de spanning is

m: een grootheid afhankelijk van materiaal, lasnaadvorm en lasparameters

K: "Intensity of Restraint", mate van krimpverhinderend

Figuur 6 toont de invloed van de lasnaadvorm bij gelijkblijvende warmteïnbreng op de krimpspanning die optreedt in het lasmetaal.

4.6.1.2. Struktuur.

De structuur in de warmteïnvloedszone wordt in belangrijke mate bepaald door de warmtecyclus die het materiaal ondergaat, en de chemische samenstelling van het moedermateriaal. Het gevaar voor een scheurgevoelige structuur neemt toe naarmate het koolstof equivalent en de afkoelsnelheid hoger worden.

Gebleken is, dat voor in lucht gelegde lassen, de temperatuurscyclus die leidt tot een bepaalde structuur het best gekarakteriseerd wordt door de afkoeltijd tussen 800°C en 500°C ($\Delta t_{800-500}$). Deze tijd is voor een in lucht gelegde las onafhankelijk van de bijbehorende piektemperatuur, mits deze hoger is dan 900°C . In lucht treden meestal afkoeltijden op die groter zijn dan 10 seconden. Bij het onderwater lassen worden veel kortere tijden gemeten (2-6 seconden). In de literatuur is door enkele onderzoekers aandacht besteed aan de mathematische benadering van de piektemperatuur en de bijbehorende afkoeltijd $\Delta t_{800-500}$ (12, 26, 37). Er worden belangrijke verschillen geconstateerd met modellen geldig voor het lassen in lucht. Onder water zou de afkoeltijd $\Delta t_{800-500}$ afhankelijk zijn van de piektemperatuur. Hoe hoger de piektemperatuur des te korter de afkoeltijd (26). In figuur 7 is de temperatuurscyclus gegeven van een in lucht gelegde las en van een onderwater gelegde las.

De structuur, die ontstaat is niet alleen afhankelijk van de temperatuurscyclus die het materiaal ondergaat, maar ook van de chemische samenstelling. De chemische samenstelling drukt men uit in het koolstof equivalent. Het is een maat voor de hardbaarheid van het metaal. Er zijn verschillende empirische formules ontwikkeld. In tabel 6 zijn er enkele weergegeven met hun geldigheidsgebied. Figuur 8 toont het verband tussen de piekhardheid en het koolstofequivalent, bij een gelijkblijvende temperatuurscyclus (10).

De structuur is scheurgevoeliger naarmate de hardheid hoger is, zodat in de W.I.Z. met name de piekhardheid van belang is. In tabel 7 zijn aan de literatuur ontleende piekhardheden gegeven. De piekhardheid onderwater is aanzienlijk hoger dan in lucht. In lucht wordt vaak een hardheid van 350 H_V als maximaal toelaatbaar geacht, een criterium waar onderwater nauwelijks aan voldaan kan worden.

4.6.1.3. Waterstof.

Een belangrijke hoeveelheid waterstof ontstaat uit de dissociatie van water. Zo bevat de bekleding van elektroden naast vocht uit de omgeving ook kristalwater, dat tijdens het lassen vrijgemaakt wordt en dissocieert in de boog.

Andere waterstofbronnen zijn: gehydrateerde oxides, vet en olie.

Bij het onderwaterlassen is de waterdamp rond de boog een bron van gedissocieerde waterstof. De gedissocieerde waterstof zal gemakkelijk in het vloeibare metaal oplossen. Gedurende het lassen en tijdens het afkoelen diffundeert de atomaire waterstof deels naar het tot austeniet omgezette deel van het moedermateriaal waarin het nog redelijk oplost. Tijdens de afkoeling gaat de austenitische structuur over in een ferritische of martensitische structuur. Figuur 9 laat zien dat de oplosbaarheid in deze structuur geringer is dan in de austenitische structuur. Afhankelijk van de lasomstandigheden bestaat er nu een structuur die oververzadigd is aan waterstof.

Wil men van verschillende elektrodensoorten of lasprocedures de hoeveelheid waterstof bepalen die zij leveren, dan moet hiervoor een meetprocedure ontwikkeld worden. Door het grote aantal invloedsfactoren en de hoge diffusiesnelheid van waterstof, vooral bij hogere temperatuur is het belangrijk dat alle apparatuur en alle handelingen goed omschreven zijn, zodat de metingen reproduceerbaar verricht kunnen worden (13). In bijlage 1 is een procedure gegeven zoals die voorgesteld is door Coe en overgenomen door "The International Organisation for Standardization" als internationale standaard ISO 3690-1977.

Hierbij wordt een lasrups gelegd onder nauwkeurig omschreven condities, waarna deze onmiddellijk wordt afgeschrikt in water en vervolgens overgebracht in aceton met vast CO₂. Na het ontslakken van de las en het losbreken van de proefblokjes worden deze in een glazen buis gebracht, waarin de waterstof opgevangen wordt. Na 72 uur wordt de hoeveelheid uitgetreden waterstof afgelezen en omgerekend naar een hoeveelheid waterstof per 100 gram neergesmolten lasmetaal bij 0°C en 1 atm. (Voor een volledige beschrijving wordt verwezen naar bijlage 1).

Het zal duidelijk zijn dat de gemeten waterstofniveaus maxima zijn en niet overeenstemmen met in werkelijke lasverbindingen optredende waterstofniveaus. De afkoeling van een werkelijke lasverbinding is langzamer dan de afkoeling bij de meetmethode waardoor er meer waterstof van de W.I.Z. weg diffundeert. De methode is echter goed te gebruiken voor een onderlinge vergelijking van waterstofgehaltenes van verschillende elektroden.

In lucht worden lage waterstofgehaltenes (tot 10 ml/100 gr smeltmetaal) gemeten wanneer basische elektroden op hoge temperaturen gebakken worden (350-500°C). Is er gevaar voor het optreden van waterstofscheuren dan kunnen soms ook elektroden gebruikt worden die een waterstofgehalte veroorzaken van 10-20 ml/100 gr smeltmetaal. Hoge waterstofgehaltenes (meer dan 20 ml/100 gr) moeten dan vermeden worden. Enkele onderzoekers hebben waterstofgehaltenes onderwater bepaald. In tabel 8 zijn deze waarden weergegeven. Hier is nog onderscheid gemaakt tussen de diffundeerbare hoeveelheid waterstof en de residuele hoeveelheid. De meetmethode waarmee deze waarden bepaald zijn is in de tabel weergegeven. Daar een nauwkeurige omschrijving van die methoden niet voorhanden is, moet men de interpretatie van de waterstofgehaltenes enige voorzichtheid betracht worden.

De gemeten hoeveelheden waterstof onderwater liggen aanmerkelijk hoger dan gehaltenes die men in lucht toelaatbaar acht in situaties waarbij er gevaar bestaat voor het optreden van waterstofscheuren. Volgens Ozaka (42) treedt er geen verhoging van de hoeveelheid waterstof op wanneer een beschermde of een onbeschermde elektrode gedurende 10 minuten of 1 uur in water heeft gelegen. De verhoging valt binnen de spreiding van de meetmethode (42). Zijn bevinding is enigszins in tegenspraak met de waarnemingen van Gooch e.a., die wanneer een onbeschermde elektrode 24 uur in water gelegen heeft, wel een verhoging van het waterstofgehalte maken (4).

4.6.2. Een waterstofscheurmechanisme.

Morlett, Johnson en Troiano (43) hebben een scheurmechanisme voorgesteld. Volgens hen zal de diffusie van waterstof hoofdzakelijk plaatsvinden door het gebied met de maximale triaxiale spanning, welke voor de kerf ligt. Hier is de dislokatedichtheid het grootst. Er zal zich een waterstof gradiënt instellen die overeenkomt met de spanningsgradiënt. Deze opeenhoping van waterstof veroorzaakt een lokale verbrossing van het materiaal. Het ontstaan of het voortlopen van een scheur wordt door deze lokale broosheid vergemakkelijkt.

De scheur loopt door tot in een gebied waar het materiaal nog taai is. Volgens het genoemde mechanisme zal voor de scheur wederom een bros gebied ontstaan, waardoor (stapsgewijs) verder scheuren mogelijk is. Dit verklaart het veelvoorkomend verschijnsel dat de scheurvorming zich geleidelijk ontwikkelt en soms pas geruime tijd na beëindiging van het lassen optreedt.

4.6.3. Koudscheurproeven.

De koudscheurproeven zijn globaal onder te verdelen in twee categorieën. Bij de ene categorie vindt de opbouw van de spanning op de proeflas plaats door inwendige deformatie, veroorzaakt door de warmteïnbreng en de laskonfiguratie. Men spreekt dan van "self restrained cracking tests". Bij de tweede categorie proeven wordt de belasting op de proeflas veroorzaakt door een uitwendig aangelegde kracht. Men spreekt nu van "external restraint cracking tests". In (40) wordt van iedere categorie een aantal beproevingsmethoden uitgebreid behandeld. Hier zullen kort ter sprake komen de CTS-proef en de implantproef. De CTS-proef omdat veel onderzoekers deze beproevingsmethode onderwater toegepast hebben, de implantproef omdat deze proef in dit onderzoek is toegepast.

4.6.3.1. De CTS-proef

In figuur 10 is het CTS (Controlled Thermal Severity) proefstuk afgebeeld. Deze bestaat uit twee platen, die met een bout op elkaar geklemd zijn en vervolgens met twee hoeklassen verankerd. Er worden twee proeflassen gelegd, de zgn. "bithermal-" en de "trithermal"-weld. De benamingen hebben betrekking op de mogelijkheden tot warmteafvoer. De afkoelsnelheid hangt samen met de plaatdikten en daarom wordt gerekend met de zgn. "Thermal Severity Number" (TSN).

$TSN = 4 (t + b)$ voor "bithermal welds".

$TSN = 4 (t + 2b)$ voor "trithermal welds".

t is de dikte van de topplaat in inches, b is de dikte van de bodemplaat in inches. De lasbaarheid wordt bepaald door de mate waarin scheuren optreden in de proeflassen.

4.6.3.2. De implantproef.

In de vierdejaars-scriptie (40) is uitvoerig aandacht besteed aan de implantproef. Hier zullen de belangrijkste facetten van de proef nogmaals worden besproken.

Figuur 11 is een afbeelding van het principe van de opstelling. Bij de proef wordt gebruik gemaakt van een moederplaat en een inplantstaaf. De moederplaat is voorzien van een gat, waarin de inplantstaaf geplaatst wordt. De cilindrische inplantstaaf die gemaakt is van het te onderzoeken materiaal is voorzien van een groef. De ligging van deze groef is zodanig dat na het leggen van de las deze zich in de W.I.Z. bevindt. Na afkoeling van de proeflas tot ca. 100°C wordt de inplantstaaf statisch belast, waarbij eventuele waterstofscheuren in de warmteïnvloedszone van de inplantstaaf ontstaan. Door de belasting te variëren kan men de spanning bepalen waarbij, voor het gebruikte lasprocédé, scheurinitiatie of breuk optreedt. In figuur 12 zijn de resultaten van een inplantproef schematisch weergegeven. In deze figuur is de inplantbreuksterkte uitgezet tegen de tijd. Duidelijk wordt hier het effect van de vertraagde scheurgroei geïllustreerd. De kritische breuksterkte is nu die spanning waarbij ook na langere tijd geen breuk optreedt (σ^*).

In het algemeen worden de proeven uitgevoerd met een inplantstaaf diameter van 8 mm. Soms wordt echter een diameter van 6 mm toegepast. Een veel gebruikte vorm van de groef is de rondgaande groef die een dusdanige afstand tot het einde van de staaf heeft dat deze na het leggen van de las in het grof korrelig gedeelte van de W.I.Z. valt.

De penetratiediepte van de las moet bepaald worden d.m.v. een proeflas. Om dit probleem te vermijden gaat men steeds meer over tot het gebruik van een schroefdraadvormige groef. Ook leiden nu kleine fluktuaties in de inbranddiepte niet meer tot een verhoging van de inplantbreuksterkte waardoor het aannemelijker is dat de kritische inplantbreuksterkten nu statistisch verdeeld zijn (32). Een veel toegepaste vorm van de groef is afgebeeld in figuur 13. Het is een V-vormige groef met een openingshoek van 40° en een diepte van een 0,5 mm. De afrondingsstraal is 0,1 mm. Tegenwoordig wordt ook wel metrisch schroefdraad gebruikt (M6). De passing van de inplantstaaf in het gat van de moederplaat is H7/h7. De afmetingen van de moederplaat zijn vaak 200 x 300 mm. Deze worden voorzien van 5 gaten voor een inplantproef. Het thermisch gedrag van de moederplaat moet gelijk zijn aan dat van het te beproeven materiaal. De proeflas moet een minimale lengte hebben van 100 mm met de inplantstaaf in het midden. De aangebrachte statische belasting dient over de netto doorsnede van de proefstaaf berekend te worden. Deze belasting mag pas aangebracht worden als de temperatuur van de warmteïnvloedszone beneden 100°C is. Als er niet direkt breuk optreedt moet de konstante belasting gedurende langere tijd gehandhaafd blijven. In de literatuur worden tijden genoemd van 16 uur (48), 24 uur (47, 32) en 48 uur (49).

Bij de inplantproef worden twee criteria gehanteerd. De belasting waarbij scheurinitiatie optreedt en de belasting waarbij breuk optreedt.

Deze laatste is het gemakkelijkst te bepalen en wordt dan ook het meest toegepast. Er zijn twee manieren waarop men de kritische breukspanning kan definiëren. Ten eerste als de spanning waarbij na 24 uur belasten geen breuk optreedt (σ_{IR}). Ten tweede als de spanning waarbij de kans op breuk bij een belastingsduur van 24 uur 50% is ($T_{50/50}$). De werkwijze ter bepaling van de kritische breukspanning volgens de eerste definitie is weergegeven in figuur 12. Deze methode heeft het nadeel dat incidentele factoren die bij een lage spanning tot breuk leiden een grote invloed hebben op de kritische breukspanning. Voor het bepalen van de kritische breukspanning zoals die door de tweede definitie wordt omschreven, wordt gebruik gemaakt van de "stair-case"-methode, een meetmethode die veel gebruikt wordt bij vermoeiingsonderzoek. In figuur 14 is de meetmethode weergegeven en ook de manier waarop de resultaten verwerkt worden. De eerste inplantproef wordt belast op een spanning die zeker tot breuk leidt. Daarna wordt de spanning iedere keer met een stapgrootte ΔT veranderd: De spanning wordt verhoogd als geen breuk is opgetreden, de spanning wordt verlaagd als wel breuk is opgetreden. Aanbevolen wordt om op deze manier ongeveer 15 meetpunten te bepalen (44,43). Daarna worden de resultaten verwerkt zoals dat is weergegeven in figuur 14.

Bij de "self restraint crackings tests", zoals de CTS-proef, wordt als criterium alleen het al of niet optreden van scheuren gehanteerd. Hierdoor worden kleine veranderingen in proefomstandigheden niet altijd waargenomen. Ook kan, zonder de lasparameters te veranderen, niet de spanning op de proeflas gevarieerd worden. De "external cracking tests" waaronder de inplantproef, hebben het voordeel dat kleine veranderingen in proefomstandigheden resulteren in een andere kritische breuksterkte. Figuur 15 toont de invloed van het waterstofgehalte op de inplantbreuksterkte. Tevens toont deze figuur de invloed van de chemische samenstelling op de inplantbreuksterkte. Deze waarden zijn bepaald met konstant H-gehalte, maar met verschillende staalsoorten en warmteïnbreng. Duidelijk is in beide figuren een verandering waarneembaar van de inplantbreuksterkte als een of meerdere scheurfactoren veranderen. Gekonkludeerd moet worden dat de inplantproef uitermate geschikt is voor het vaststellen van kleine verschillen in waterstofscheurgevoeligheid.

4.6.3.3. Resultaten met de CTS-proef onderwater.

Er zijn enkele onderzoekers die resultaten met CTS-proeven onderwater hebben gepubliceerd. Stalker e.a. (2) hebben enkele CTS-proeven gedaan. Hun resultaten staan weergegeven in tabel 9. Zij tonen dat in staal met een koolstofequivalent $Ceq_{I.I.W.}$ van 0,36, bij een ijzeroxyde elektrode of een austenitische elektrode met een hoog nikkelgehalte geen waterstofscheuren optreden in de W.I.Z., in

Tabel 9

tegenstelling tot een rutiel elektrode en een rutiel elektrode met ijzerpoeder toevoegingen. Worden CTS-proeven gedaan met platen die een koolstof equivalent $C_{eq_{I.I.W.}}$ van 0,42 hebben dan ontstaan er bij gebruik van de ijzeroxyde elektrode wel en de austenitische nikkel elektrode geen scheuren in de W.I.Z. In het lasmetaal geven beide scheuren.

Veel CTS-proeven zijn gedaan door Gooch e.a. (4). In tabel 10 is een deel van hun resultaten weergegeven. Uit hun onderzoek blijkt dat de kans op waterstofscheuren bij gebruik van de ijzeroxyde elektrode minimaal is. De CTS-proeven met deze elektrode op platen met verschillende koolstof equivalenten vertonen geen significante scheurvorming. Ook zijn geen waterstofscheuren waargenomen bij CTS-proeven die gelast zijn met een austenitische elektrode Ni/Cr, 40/20 en met elektroden op nikkelbasis. Deze elektroden vertonen alle wel scheuren in het lasmetaal. De resultaten met de ijzeroxyde elektrode zijn enigszins in tegenspraak met resultaten verkregen door Stalker e.a. (2) (zie tabel 9). Zij vonden bij verhoging van het koolstof equivalent wel waterstofscheurvorming in de W.I.Z.

CTS-proeven, uitgevoerd door Bouwman (12) met verschillende staalsoorten en de elektrode AW9 E6013 (ISO E 433RR22), leveren geen scheurvorming op in de W.I.Z. Ook hier komt evenals bij Gooch e.a. (4) duidelijk de beperking van de CTS-proef naar voren. Hoewel een invloedsfaktor verzwaaard wordt, wordt geen toename van de waterstofscheurgevoeligheid gekonstateerd. In alle gevallen waarin wel waterstofscheuren optreden is het niet mogelijk een gradatie aan te geven in de mate van waterstofscheurgevoeligheid. Dit geldt ten dele ook voor de resultaten van Ozaka e.a. (42). Zij beproeven de waterstofscheurgevoeligheid met behulp van de "Y-groovetest" (kategorie "self restraint test"). Hun resultaten staan vermeld in tabel 11. Ook zij kunnen niet aangeven welke elektrode bij een staal soort met een koolstof equivalent $C_{eq_{I.I.W.}}$ van 0,29 de grootste gevoeligheid voor waterstofscheuren veroorzaakt.

4.6.3.4. Resultaten met de inplantproef in lucht.

Er zijn voorzover bekend nog geen inplantproeven onderwater uitgevoerd. In lucht daarentegen hebben vele onderzoekers inplantproeven gedaan (31, 32, 33, 34, 35, 38, 44, 45, 46, 47). Het zou ondoenlijk en zinloos zijn al hun resultaten te vermelden. Hier worden alleen enige resultaten grafisch weergegeven van inplantproeven die bepaald zijn met staalsoorten waarvan de koolstofequivalenten ongeveer gelijk zijn aan de equivalenten die in dit onderzoek gebruikt worden. In figuur 17 t/m 20 zijn resultaten weergegeven van staalsoorten met een koolstof equivalent van 0,43 (St. 52). Figuur 21, 22 en 23 tonen de resultaten van staalsoorten met een kool-

stofequivalent van resp. 0,40 (St. 42), 0,34 en 0,23 (St. 37). Evenals in 4.6.3.2. is geconstateerd, leidt iedere variatie van factoren die de waterstofscheurgevoeligheid beïnvloeden tot een verandering van de kritische inplantbreuksterkte, zodat subtiele verschillen waarneembaar worden.

4.7. Konklusie.

Zoals uit voorgaand literatuuroverzicht is gebleken, is in veel onderzoeken aandacht besteedt aan de executieve lasbaarheid. Slechts enkele onderzoekers besteden aandacht aan de metaalkundige lasbaarheid. Een van de grootste problemen bij het nat-onderwaterlassen is de waterstofscheurgevoeligheid. De hoge waterstofgehaltes, afkoelsnelheden en krimpspanningen leiden vaak tot het ontstaan van dit type scheuren. Uit dit literatuuronderzoek is gebleken dat de "self restraint" scheurproeven slechts een grove indicatie geven voor de waterstofscheurgevoeligheid. Gezien de resultaten die verkregen zijn met de inplantproef mag verondersteld worden dat deze proef een veel betere beproevingsmethode is, die kwantitatief subtiele verschillen in waterstofscheurgevoeligheid weergeeft. Deze beproevingsmethode is voor zover bekend nog nooit bij het nat-onderwaterlassen toegepast.

Het doel van dit onderzoek is de ontwikkeling van apparatuur, die geschikt moet zijn om onderwater inplantproeven uit te voeren. Verwacht wordt dat met deze proef, gecombineerd met goede waterstofmetingen, een aantal elektroden beter vergeleken kunnen worden. Aan de hand van de resultaten zullen op metaalkundige gronden konklusies getrokken moeten worden over de bruikbaarheid van de inplantproef onderwater en over de richting waarin verbeteringen van beproefde elektroden moeten worden gezocht.

5. De executieve lasbaarheid.

Teneinde bij het onderzoek reproduceerbaar te kunnen lassen is een zwaarte-kracht lasapparaat (zie figuur 24) gekonstrueerd, waarmee elektroden slepend verlast worden. De druk op de elektrode wordt bepaald door het gewicht dat aan de ketting hangt. Opdat de druk op de elektrode konstant blijft, is het, gezien de konstruktie van het apparaat, noodzakelijk dat het tegengewicht afneemt gedurende het verlassen van de elektrode. Het tegengewicht is daarom zodanig langs de ketting verdeeld, dat dit tijdens het lassen geleidelijk afneemt. (vergelijk figuur 24A en 24B). De elektrodehouder maakt alleen een beweging in verticale richting. Het is hierdoor niet mogelijk de lashoek en de warmteïnbreng onafhankelijk van elkaar te veranderen, hetgeen duidelijk een beperking bleek van het lasapparaat.

Figuur 25 toont het vak, waarin alle proefnemingen zijn verricht. Het vak heeft een diameter van 1,5 meter en een hoogte van 0,75 meter en is gevuld met zoet water, dat kontinu gefilterd wordt. Alle proefnemingen zijn 30 cm onder het meetoppervlak uitgevoerd. De gebruikte stroombron is een transformator met gelijkrichter van het merk "Schorch" (type nr. SGR 400). Alle proeven zijn gelast met de elektrode aan de minpool. In tabel 13 zijn de bij dit onderzoek gebruikte elektroden gegeven.

Na enkele proeven bleek dat het naar de aansluitklem toe of van de aansluitklem aflassen een grote invloed heeft op het resultaat (zie figuur 26 en 27). Het lassen van de aansluitklem af geeft een aanzienlijk beter lasuiterlijk: De spanning (V) is lager (zie tabel 12), er treedt minder randinkarteling op, er is een betere slaklossing, de las is breder en er treedt beduidend minder spatten op. Als gelast wordt met gelijkstroom, treedt er een magnetische blaaswerking van de boog op. Deze blaaswerking is van de aansluitklem af gericht. Hierdoor zal de bekleding als van de aansluitklem af gelast wordt (zie figuur 28 en 29) op het steunpunt sneller afsmelten, waardoor de kelk kleiner, en dus de boogspanning lager wordt. Vermoedelijk is deze verlaging van de boogspanning de oorzaak van het betere lasuiterlijk.

De kwaliteit van het laswerk blijkt eveneens in belangrijke mate te worden beïnvloed door de hoek tussen elektrode en werkstuk. Met het veranderen van de hoek treedt er zowel een verandering op in de voortloopsnelheid als in de spanning (V). Het laatste is weergegeven in tabel 12. Een verklaring hiervoor moet gezocht worden in de wijze waarop gelast wordt. Bij slepend lassen is de booglengte, dus ook de spanning niet direkt te beïnvloeden. Wel indirekt: met het veranderen van de hoek verandert de booglengte, dus indirekt de spanning. In tabel 12 is aangegeven, welke

hoek de beste resultaten geeft. In tabel 13 zijn de verschillende elektroden met de bijbehorende lasparameters gegeven die in het verdere onderzoek zijn gebruikt.

6. Temperatuurmeting.

Om de temperatuurcyclus te meten die het materiaal in de W.I.Z. ondergaat is het noodzakelijk eerst de juiste afstand te bepalen van het thermokoppel t.o.v. de bovenkant van de plaat (afstand a in figuur 30). In lucht wordt meestal een waarde van a aangehouden van 3 mm. In water bleek deze waarde te klein te zijn. Bij het onderwaterlassen wordt gelast met een hogere stroomdichtheid, waardoor de afstand a vergroot moet worden, om direkt kontakt te voorkomen tussen het thermokoppel en het smeltbad. Goede metingen onderwater zijn verricht met een waarde van a tussen de 3,7 en 4 mm. Er worden dan piektemperaturen gemeten van 1000 à 1200°C.

Onderzocht is welke schakeling voor de meting van de temperatuurcyclus onderwater gebruikt kan worden. In figuur 31 zijn de drie onderzochte schakelingen afgebeeld. De traditionele schakeling A maakt gebruik van een compensatiekabel en een koude las die met een 50°C-kastje op konstante temperatuur wordt gehouden. Bij schakeling B wordt de koude las in het water, waarvan de temperatuur tijdens het lassen konstant verondersteld mag worden, gehouden. Het gebruik van de compensatiekabel kan nu vervallen. Nog eenvoudiger is schakeling C waarbij het meetkoppel direkt via koperdraden met de schrijver verbonden wordt. Er worden nu geen thermospanningen verwaarloosd, maar ze worden konstant verondersteld, omdat de omringende watertemperatuur niet of nauwelijks verandert. Gebleken is dat de drie schakelingen allen dezelfde resultaten geven, mits de temperatuur van de koude las op de juiste wijze in rekening wordt gebracht. Verdere temperatuurmetingen worden gedaan met de schakeling C, omdat deze uitvoering het eenvoudigst is.

In hoofdstuk 4.6.1.2. is naar voren gebracht dat de afkoeltijd $t_{800-500}$ kleiner wordt, naarmate de piektemperatuur hoger is. Om hiervan een indruk te krijgen, zijn proeven gedaan op een plaat, zoals afgebeeld in figuur 32. Er is gelast met elektrode B, met een warmteïnbreng van 2,5 MJ/m. Figuur 33 is een grafische weergave van de waarnemingen die vermeld staan in tabel 14. Duidelijk wordt de verandering van de afkoeltijd $t_{800-500}$ met de piektemperatuur waargenomen. Tot een piektemperatuur van ongeveer 1250°C is er een redelijke overeenstemming met de tendens, die in de literatuur is aangegeven. Daarna neemt de afkoeltijd weer iets toe met stijgende piektemperatuur. De belangrijkste konsekwentie hiervan is dat onderwater de warmtecyclus niet meer gekarakteriseerd wordt door een afkoeltijd alleen, maar dat ook altijd de piektemperatuur, waarbij deze afkoeltijd bepaald is, moet worden aangegeven.

7. Waterstofbepalingen.

7.1. Meetprocedure.

Ter beoordeling van de resultaten, is het noodzakelijk dat de meetprocedure welke in dit onderzoek is toegepast, nauwkeurig wordt beschreven. In bijlage 1 is de procedure beschreven welke is vastgelegd in de ISO-standaard 3690-1977. Deze procedure is niet direkt geschikt om onderwater toe te passen. Een gewijzigde procedure (de onderwater-procedure) is uitvoerig beschreven in bijlage 2. Daar deze procedure is afgeleid van de ISO 3690 standaard is het zinvol beide procedures met elkaar te vergelijken. Zij verschillen in de wijze waarop de elektrode verlast wordt, en waarop de proeflas afgeschrikt wordt.

In de ISO standaardprocedure worden de elektrode behandeling (droging) en de toe te passen lasparameters nauwkeurig omschreven. Bij de onderwater-procedure kan dit niet worden aangehouden, omdat de lasparameters onderwater niet vrij gekozen kunnen worden. Daarom worden bij de waterstofbepalingen de lasparameters zo gekozen dat een goede lasrups gelegd kan worden (zie tabel 13). Voor een goede vergelijkbaarheid van de hoeveelheid waterstof die in het lasmetaal wordt opgenomen is het wenselijk zowel in lucht als in water met dezelfde parameters te lassen, hetgeen in dit onderzoek ook is gebeurd.

Bij de ISO standaardprocedure moet binnen drie seconden de proeflas losgenomen worden uit het koperen koelblok en in water van 0°C en vervolgens in aceton met vast CO₂ gekoeld worden. Bij de onderwaterprocedure is de termijn van drie seconden niet haalbaar. Hier wordt de proeflas inklusief het koperen blok door het omringende water afgekoeld en wanneer de onderwaterprocedure in lucht wordt toegepast dan moet binnen drie seconden de proeflas met het koperen blok in water ondergedompeld worden. Het zou na het afkoelen in water wenselijk zijn de proeflas zo snel mogelijk in de koude aceton (-60°C) te dompelen, teneinde de waterstof, die vooral in de beginfase erg snel uittreedt, (30 ml/uur) direkt vast te vriezen. Daar er echter tijd nodig is voor een aantal handelingen moet dit onderdompelen in aceton - ook omwille van de reproduceerbaarheid - precies na 30 seconden gebeuren. Deze tijd is gekozen op basis van de handelingen die in het laboratorium verricht moeten worden. Voor waterstofbepalingen op grotere diepte of in een druktank moeten de handelingen verricht worden door een duiker, hetgeen ongetwijfeld meer tijd vergt dan 30 seconden. Ook de transporttijd naar het wateroppervlak en vervolgens naar de koude aceton zal groter worden. Deze tijd beïnvloedt de meting aanzienlijk. Voor een goede vergelijkbaarheid tussen de

resultaten verkregen in het laboratorium en in de praktijk moet onderzocht worden hoeveel waterstof er gedurende dit tijdsverschil uittreedt.

Om redenen van praktische aard, is gekozen voor onderdompeling van de proeflas in aceton van -60°C . De aceton wordt daartoe gekoeld met vloeibaar CO_2 . Hoewel aceton met vast CO_2 kouder is, moet een temperatuur van -60°C voldoende laag geacht worden om de waterstof vast te vriezen. Er moet ook gelet worden op het verschil in watertemperatuur. In het laboratorium schommelt deze tussen de 16°C en de 20°C . In praktijkomstandigheden kan deze beduidend lager zijn. Onderzocht moet worden in hoeverre dit de meting beïnvloedt.

De glazen buizen waarin de waterstof wordt opgevangen, zijn voorzien van een schaal met mililiter verdeling. De afgelezen waarde wordt met behulp van de formule uit bijlage I en II omgerekend naar een hoeveelheid ml. waterstof per 100 gram neergesmolten metaal. Bij deze omrekening wordt de afgelezen hoeveelheid waterstof met ongeveer 30 vermenigvuldigd. Het is daarom noodzakelijk de schaalverdeling op de glazen buizen nauwkeurig te ijken. De schaalverdelingen op de voor dit onderzoek gebruikte glazen buizen vertoonden soms afwijkingen van tien procent.

Uit de bijlagen I en II volgt dat ieder meetpunt uit vier waarnemingen bestaat. Om een indruk van de spreiding in de waarnemingen te geven, zijn in tabel 15 drie meetpunten gegeven, met de bijbehorende waarnemingen. In de meeste gevallen is de afwijking van het gemiddelde niet groter dan 10%, waaruit blijkt dat de onderwater-procedure, mits deze accuraat wordt uitgevoerd, redelijk reproduceerbaar is.

7.2. Waarnemingen.

Waterstofmetingen zijn verricht aan vier verschillende typen elektroden: elektrode A, B, C en D (zie tabel 13).

Om inzicht te verkrijgen in het verloop van de waterstofuitscheiding uit een proeflas met de tijd, is deze gedurende 14 dagen bepaald. In het begin is de hoeveelheid waterstof zelfs iedere 5 minuten afgelezen. Om de invloed van de onderdruk na te gaan is deze bij de ene buret wel aangebracht en bij de andere niet. De resultaten, die bepaald zijn met elektrode C, zijn weergegeven in figuur 34 (met onderdruk) en figuur 35 (atmosferische druk).

Met elektrode A (2 uur gedroogd op 350°C) is een waterstofbepaling gedaan, om de onderwater-procedure op zijn betrouwbaarheid te beoordelen. Bekend is dat gedroogde basische elektroden een waterstofgehalte geven dat in ieder geval

beneden de 10 ml/100 gr neergesmolten metaal moet liggen.

Met elektrode B zijn waterstofbepalingen gedaan zowel in lucht als in water, onbehandeld en na droging van 20 h op 150°C . Voor elektrode D zijn dezelfde omstandigheden genomen.

Voor elektrode C zijn waterstofbepalingen gedaan, zowel in lucht als in water, onbehandeld en na droging van 20 h op 160°C . Voor enkele proeflassen is niet alleen het gehalte diffundeerbare waterstof bepaald, maar ook dat van de residuele waterstof en van de ijzeroxyden. Deze waarnemingen zijn allen weergegeven in tabel 16. De parameters waarmee de proeflassen gemaakt zijn, staan vermeld in tabel 13.

7.3. Bespreking van de waarnemingen.

Uit figuur 34 en 35 blijkt dat de waterstofuitscheiding lang aanhoudt. Na 14 dagen is er nog nauwelijks een afbuiging van de krommen waar te nemen. Uit het verloop van beide krommen blijkt dat de aanwezigheid van de onderdruk geen merkbare invloed heeft op de hoeveelheid waterstof en de snelheid waarmee deze uitscheidt. Het verschil in hoeveelheid uitgetreden waterstof na 14 dagen blijft duidelijk binnen de spreiding van de procedure. De hoeveelheid waterstof die per tijdseenheid uittreedt, is in het begin van de proef het grootst (30 ml/uur). Het is daarom noodzakelijk bij de onderwater-procedure de tijd tussen het doven van de boog en het onderdompelen in de koude aceton zo kort mogelijk te houden, maar wel iedere keer even lang. Waterstofbepalingsprocedures waarbij de proeflas pas na 10 minuten onder kwik wordt gedompeld, zoals gedaan is door Bouwman (12), moeten dan ook verworpen worden.

Er wordt bij de waterstofscheur gevoeligheid onderscheid gemaakt tussen diffundeerbare en residuele waterstof. Het idee is dat de residuele waterstof gevangen zit in het rooster en er niet uit kan diffunderen. Uit de resultaten blijkt dat deze veronderstelling niet geheel juist is, en dat de residuele waterstof wel diffusie mogelijkheden heeft. Uit verdere resultaten zal blijken dat met betrekking tot koudscheuren het onderscheid wel op zijn plaats is. De hoeveelheid waterstof die men na 3×24 uur afleest, noemt men de hoeveelheid diffundeerbare waterstof. Het is noodzakelijk dat deze aflezing op tijd gebeurt en niet een halve dag later, omdat zelfs na 3 dagen de waterstofuittrekking nog vrij groot is (0,5 ml/100 g, uur). De temperatuur gedurende deze drie dagen beïnvloedt de gemeten hoeveelheid diffundeerbare waterstof en moet daarom konstant op 20°C worden gehouden.

De hoeveelheid waterstof van elektrode A (tabel 16, regel 1) is in overeenstemming met de verwachting. Kristalwater en vocht uit de bekleding zijn bij het lassen in lucht belangrijke waterstofbronnen. Het drogen van de elektrode resulteert zodoende in een lager waterstofgehalte. Daarom zijn de resultaten van elektrode B, gelast in lucht, geheel in overeenstemming met de verwachting. Bij het lassen onder water met elektrode B wordt geen toename van het waterstofgehalte gekonstateerd t.o.v. het lassen in lucht. Dit is enigszins verbazingwekkend, omdat altijd verondersteld wordt dat onderwaterlassen resulteert in hogere waterstofgehalten. Daarom waterdamp van de gevormde gasbel in de boog dissocieert en de aldus vrijgemaakte waterstof oplost in het lasmetaal. Ook onder water veroorzaakt een gedroogde elektrode minder diffundeerbare waterstof dan een niet gedroogde. Een zelfde resultaat is gevonden door Gooch (14). (zie tabel VIII). Met een rutielelektrode onder water vond hij waarden van 90 ml/100 g. Dompelde hij de elektrode eerst 24 h in water en verrichtte daarna een meting dan mat hij een gehalte van 102 ml/100 gr. Na droging (2 h op 150°C) van een ijzeroxyde elektrode vond hij een lager waterstofgehalte dan met een zelfde niet gedroogde elektrode. Al deze bevindingen staven de stelling dat ook bij onderwaterlassen het kristalwater en het vocht in de bekleding verreweg de belangrijkste waterstofbron is voor het lasmetaal.

Bij elektrode C vindt er een kleine toename van het waterstofgehalte plaats als onder water gelast wordt. Vooral met de gedroogde elektrode treedt deze verhoging duidelijk op. Overigens geeft elektrode C, die in lucht minder diffundeerbare waterstof geeft dan elektrode B ook onder water een lager gehalte. De toename van het waterstofgehalte in water t.o.v. lucht wordt nu veroorzaakt door dissociatie van waterdamp uit de bel atmosfeer. Verondersteld wordt dat er bij een stabiele boog geen menging plaats vindt tussen de waterdamp uit de bel en de boogatmosfera (elektrode B), vertoont de boog echter een minder stabiel karakter, dan treedt er wel menging op. De waterdamp uit de bel dissocieert in de boog en wordt deels als een extra hoeveelheid waterstof toegevoegd aan de reeds aanwezige waterstof (elektrode C). Een aanmerkelijk lager gehalte aan diffundeerbare waterstof wordt gemeten bij elektrode D. Zowel in lucht als in water is dit gehalte aanzienlijk lager dan bij de andere elektroden en ook de toename bij het onderwaterlassen is gering.

IJzeroxyde bepalingen zijn gedaan aan het lasmetaal van de onder water gelegde proeflassen, waarvan ook residuele waterstofgehalten bekend zijn. (zie tabel 16).

X
Elektrode D, de ijzeroxyde elektrode, heeft een significant hoger FeO-gehalte, hetgeen geheel in overeenstemming is met de verwachting. Dienovereenkomstig is het diffundeerbare waterstofgehalte laag en het residuele gehalte hoog. De verschillende in ijzeroxyde gehalte en in residuele waterstof tussen elektrode B en C zijn niet significant. Worden de hoeveelheden residuele waterstof van elektrode D vergeleken met de resultaten die Gooch (4) (zie tabel 8) verkregen heeft met eenzelfde type elektrode dan is er redelijke overeenstemming in het gehalte diffundeerbare waterstof. De hoeveelheid residuele waterstof vertoont echter grote verschillen. Een verklaring hiervoor is niet gevonden. Wordt de totale hoeveelheid waterstof vergeleken dan is hierin bij de drie onderzochte elektroden weinig verschil. Dit is in overeenstemming met bevindingen van Reeve (24), die stelt dat het totale waterstofgehalte bij ijzeroxyde elektroden maar weinig lager is, terwijl de diffundeerbare hoeveelheid waterstof aanzienlijk afneemt (zie hoofdstuk 4.1.3.).

De belangrijkste konklusies zijn dat de hoeveelheid waterstof ook onder water in belangrijke mate bepaald wordt door het kristalwater en het vochtgehalte van de bekleding en dat ijzeroxyde elektroden het diffundeerbare gehalte aan waterstof in belangrijke mate verlagen.

Deze bevindingen zijn belangrijk voor de vergaande elektrodeontwikkeling, een ontwikkeling die tot nu toe vooral gericht is op de lasser: boogstabiliteit, slaklossing en lasuiterlijk (elektrode B en C). De gerealiseerde verbeteringen hebben de praktische uitvoerbaarheid aanzienlijk vergroot. In de ontwikkeling zijn echter aspecten met betrekking tot de metaalkundige lasbaarheid te veel veronachtzaamd. Grote winst wordt geboekt wanneer elektroden ontwikkeld worden van het ijzeroxyde type, die een stabiel booggedrag vertonen en die voorzien zijn van een bekleding die weinig vocht en kristalwater bevat.

8. De inplantproeven

8.1. De inplantbeproevingbank.

De inplantbeproevingbank is afgebeeld in figuur 36, schematisch weergegeven in figuur 37. De inplantbank heeft een steuntafel, waarop de moederplaat van de inplantproef rust. Aan de onderzijde van de inplantstaaf, die voorzien is van schroefdraad M10, wordt een moer geschroefd. Deze moer schuift in een gaffel, waarvan de hoogte, afhankelijk van de dikte van de moederplaat en de lengte van de inplantstaaf, vooraf ingesteld kan worden. De kracht op de inplantstaaf wordt via een hefboom aangebracht. Aan de ene zijde van de hefboom is een gaffel en aan de andere zijde de vijzel bevestigd, waarmee kracht op de hefboom gebracht kan worden. Om te voorkomen dat de kracht wegvalt, wanneer er enige verlenging optreedt in de inplantstaaf, is tussen de vijzel en het steunpunt een verenpakket geplaatst, waardoor een zekere verlenging van de inplantstaaf slechts een geringe krachtafname tot gevolg heeft. In figuur 38 worden afbeelding gegeven van de drie manieren waarop de spanning aangebracht werd. In de eerste uitvoering gebeurde dit met een handwiel. Al spoedig bleek deze methode ongeschikt te zijn, omdat het aanbrengen van de spanning schoksgewijs ging (zie figuur 38A). Om dit te ondervangen, werd de vijzel vervolgens aangedreven door een wormwiel, met een overbreng verhouding van 1 : 20, dat weer met de hand aangedreven moest worden (zie figuur 38B). Hoewel de kracht nu gelijkmatig opgevoerd kon worden was deze methode toch niet geheel bevredigend. Afhankelijk van de omstandigheden zal de kracht de ene keer sneller dan de andere keer aangebracht worden. Voor een duiker onderwater is de situatie moeilijker dan in het laboratorium. Deze verschillen beïnvloeden de reproduceerbaarheid van de proef nadelig. Daarom is tenslotte de derde situatie gekonstrueerd, (zie figuur 38C), waarbij het wormwiel elektrisch wordt aangedreven. Daar voor de aandrijving een behoorlijk vermogen nodig is, en uit veiligheidsoverwegingen uitsluitend gelijkstroom gebruikt mag worden met een laag voltage, is gekozen voor een startmotor uit een auto, die dusdanig is gewijzigd dat ompoling van de spanning alleen over het anker mogelijk is, zodat de draairichting omgekeerd kan worden. De motor is geschikt gemaakt voor onderwater door hem in te bouwen in een plastic omhulling die op overdruk wordt gebracht.

De kracht op de inplantstaaf wordt gemeten met rekstrookjes die in een brugschakeling op de ijkstaaf zijn geplakt. In eerste instantie werden de rekstrookjes tegen de inwerking van water beschermd met siliconenkit. Al spoedig bleek deze oplossing niet te voldoen. Na beoordeling van verschillende alternatieven werd gekozen voor

een M-M-coating systeem* (Micro-Measurements). In bijlage 3 is de werking hiervan gegeven. Deze beschermingsmethode heeft tijdens de duur van dit onderzoek goed gewerkt en er wordt dan ook aanbevolen deze methode te blijven gebruiken.

8.2. De meetopstelling.

In figuur 39 is een blokschema gegeven van de meetopstelling. De kracht, die op de inplantstaaft werkt, wordt gemeten met behulp van rekstrookjes. De rekstrookjes geven hun signaal door aan een meetbrug (Helliger type 19). De schrijver waarin twee grenswaarde schakelaars zijn gebouwd, registreert dit signaal. De beide schakelaars staan in serie en besturen een transistorschakelaar, die een spanning van 220 V schakelt, waarmee het hoofdrelais wordt bediend. Bij inschakeling van het hoofdrelais wordt de startmotor bekrachtigd. De grenswaarde schakelaars zijn maat-breek kontakten, waarvan de stand afhankelijk is van de plaats van de looper op de schrijver. Dit is weergegeven in figuur 40. Als de looper zich links van grenswaarde schakelaar twee bevindt, gebeurt er niets. De startmotor kan nu alleen bekrachtigd worden door het handbediende maak-kontakt in te drukken, waardoor de spanning op de inplantstaaft oploopt en de looper tussen grenswaarde 2 en 1 komt. Doordat nu beide grenswaarde schakelaars kontakt maken blijft de startmotor bekrachtigd, terwijl het handbediende maak-kontakt losgelaten moet worden. Passeert de looper nu grenswaarde schakelaar 1 dan stopt de motor, waardoor ook de spanning niet meer toeneemt. Met de stand van grenswaarde schakelaar 1 wordt de uiteindelijke spanning op de inplantstaaft ingesteld.

8.3. Proefomstandigheden en meetmethode.

De afmetingen van de in dit onderzoek gebruikte inplantstaaft zijn aangegeven in figuur 41. De afmetingen van de moederplaat en de plaats van de gaten is aangegeven in figuur 42. De passing van de staaft in de moederplaat is een H7/h7-passing. De inplantstaaft bevindt zich halverwege de lasrups, waarvan de lengte in lucht 100 mm en in water 150 mm is. Het aanbrengen van de spanning gebeurt op het moment dat de inplantstaaft beneden de 100°C is. Als criterium van de inplantsterkte is het breukcriterium gekozen. De kritische inplantsterkte is gedefinieerd als de spanning, waarbij de kans op breuk 50% is. ($\sigma_{50/50}$). Voor de bepaling van deze

* Merknaam van Vishay Intertechnology, Inc. Michigan (USA), gevoerd door de firma Bos B.V., Zoetermeer.

sterkte is gebruik gemaakt van de "stair-case" methode zoals die is besproken in hoofdstuk 4.6.3.2.

8.4. De opzet van het onderzoek.

In dit onderzoek zijn 3 staalsoorten gebruikt, te weten St. 52, St. 42 en St. 37. Er zijn twee elektrode typen onderzocht, waarvan op grond van de waterstofmetingen kan worden verondersteld dat deze de scheurgevoeligheid verschillend beïnvloeden. Elektrode B met een relatief hoog gehalte aan diffundeerbare waterstof en elektrode D met een relatief laag gehalte worden hiervoor gebruikt (zie tabel 16).

Er zijn eerst twee series metingen met St. 52 in lucht gedaan. Hierbij werd elektrode B gebruikt, die met de hand werd verlast. In de eerste serie is gelast met een warmteïnbreng, zodanig dat er afkoelsnelheden bereikt worden, die overeenkomen met afkoelsnelheden die onderwater optreden. De tweede serie is gelast met een warmteïnbreng die onderwater wordt gebruikt. De moederplaten, die vervaardigd zijn van St. 37, hebben een dikte van 25 mm. Deze twee series zijn verricht om een vergelijking te kunnen maken met in de literatuur gepubliceerde resultaten.

X Onderwater zijn inplantproeven gedaan met St. 52, St. 42 en St. 52. De dikte van de uit St. 37 vervaardigde moederplaten zijn voor alle onderwatermetingen 16 mm. Met elektrode B werd voor iedere staalsoort de kritische inplantbreuksterkte bepaald. Met elektrode D werd alleen de scheurgevoeligheid van St. 42 en St. 52 onderzocht. Verder is van de drie staalsoorten het hardheidsverloop over de W.I.Z. bepaald en van iedere serie de piekhardheid gemeten. Ook is aandacht besteed aan het breukoppervlak en de ligging van de breuk.

8.5. Waarnemingen.

Tabel 17 geeft de chemische samenstelling en de mechanische eigenschappen van de gebruikte staalsoorten. Tabel 18 vat de resultaten samen van de inplantproeven; gegeven worden de kritische inplantbreuksterkte ($\sigma_{50/50}$ en σ_{IR}), de warmteïnbreng, de afkoeltijd, het koolstof equivalent, de piekhardheid en het diffundeerbaar waterstofgehalte. Bij iedere serie zijn in tabel 18 nog twee figuurnummers vermeld, waarvan het eerste nummer verwijst naar de figuur waarin de vermelde resultaten gebruikt zijn voor de bepaling van de inplantbreuksterkte ($\sigma_{50/50}$ en σ_{IR}) en het tweede nummer verwijst naar de figuur waarin van ieder meetpunt de tijd tot breuk

met de bijbehorende spanning is aangegeven. Figuur 57 en 58 tonen het hardheidsverloop over de warmteïnvloedszone van een las uit resp. de serie 1 en 2. Figuur 59, 60 en 61 geven het hardheidsverloop weer van onderwater gelegde lassen uit resp. de series 3, 5 en 7. De figuren 62, 63 en 64 tonen structuurfoto's van de W.I.Z. uit de series 3, 5 en 7 (St. 52, St. 42 en St. 37). Figuur 65 is een opname van een waterstofscheur in de S.I.Z. van St. 52. De opname in figuur 66 is gemaakt met de raster-elektronenmikroskoop (R.E.M.) van een breukoppervlak uit de serie 6. In dit breukoppervlak zijn drie gebieden te onderscheiden. Van ieder gebied is een uitvergroting gemaakt en afgebeeld in de figuren 67, 68 en 69. Het preparaat, waarvan de R.E.M. opname gemaakt is, is vervolgens ingebed en doorgeslepen zoals in figuur 70 is aangegeven. Figuur 71 toont deze structuurfoto's.

8.6. Bespreking van de waarnemingen.

De chemische samenstelling en de mechanische eigenschappen (tabel 17) van St. 37 en St. 52 voldoen aan de eisen gesteld in Din 17100. De chemische samenstelling van St. 42 voldoet hier echter niet aan. Het mangaangehalte dat volgens Din 17100 tussen de 0,2% en 0,5% moet liggen, is aanmerkelijk hoger (1,14%) waardoor de waterstofscheurgevoeligheid groter is.

De spanningen, vermeld in de figuren 43 t/m 56 zijn berekend over de netto doorsnede van de inplantstaaf. De kritische inplantbreuksterkte σ_{IR} is kleiner dan de kritische inplantbreuksterkte $\sigma_{50/50}$. Uit de betreffende figuren blijkt dat door het incidenteel optreden van een breuk bij een lage spanning σ_{IR} extra laag uitvalt, waardoor de betrouwbaarheid van dit criterium gering is. $\sigma_{50/50}$ is een gemiddelde van meerdere meetpunten, waardoor de invloed van incidentele afwijkingen verminderd wordt.

Series 1 en 2 zijn inplantproeven gedaan in lucht. Serie 1 heeft een afkoeltijd $\Delta t_{800-500}$ van ± 5 seconden, serie 2 van 10 seconden. Geheel in overeenstemming met de verwachting leidt een kortere afkoeltijd tot een brossere structuur, die scheurgevoeliger is en dienovereenkomstig een lagere inplantsterkte $\sigma_{50/50}$ heeft. De kritische inplantsterkten zijn resp. 31,5 en 38 kg/mm². Figuur 16 t/m 20 tonen resultaten uit de literatuur, bepaald aan vergelijkbare staalsoorten. Om een goede vergelijking mogelijk te maken zijn enige meetpunten uit de figuren 16 t/m 20 opgenomen in tabel 19. Er is een goede overeenkomst tussen Karpi (31) en Christensen (44,46). Beiden gebruiken een inplantstaaf met een diameter van 6 mm, die voorzien is van schroefdraad M6. Zij bepalen beiden met behulp van de stair-case methode de $\sigma_{50/50}$. Bij vergelijking van de resultaten van Granjon (45) en Chris-

tensen (44,46) moet rekening gehouden worden met de verschillende definities van de kritische inplantbreuksterktes. Bij een afkoeltijd $\Delta t_{800-500}$ van 5 sec., meten zij een ongeveer gelijke inplantbreuksterkte, hoewel de beproevingsvariabelen behoorlijk verschillen. Christensen vindt een kritische inplantbreuksterkte $\sigma_{50/50}$ van 20 kg/mm², Granjon vindt een kritische inplantbreuksterkte σ_{IR} van 28 kg/mm². Bij een afkoeltijd $\Delta t_{800-500}$ van 10 sec is er tussen beide onderzoekers geen vergelijking meer mogelijk. De oorzaak van de slechte overeenkomst tussen Granjon enerzijds en Christensen en Karpi anderzijds, wordt verklaard door een verschil in inplantstaafdiameter (10 mm of 6 mm), groefvorm (diepte 0,5 mm, openingshoek 40° of M6) en bepalingsmethode van de kritische inplantbreuksterkte (σ_{IR} of $\sigma_{50/50}$). Er is geen goede overeenstemming tussen de resultaten van dit onderzoek en die van de drie genoemde onderzoekers. Het is aannemelijk dat de verschillen in inplantstaafdiameter en groefvorm hiervan de oorzaak zijn.

Worden de $\sigma_{50/50}$ -waarden van de series 1, 2 en 3 met elkaar vergeleken dan vertonen deze een tendens die geheel in overeenstemming is met de theorie. Bij eenzelfde waterstofgehalte neemt met toenemende afkoeltijd $\Delta t_{800-500}$ de hardheid af en de inplantsterkte toe. Bij vergelijking van de $\sigma_{50/50}$ -waarden van de series 3, 5 en 7 komt de invloed van het koolstof equivalent naar voren. Bij gelijkblijvende lasparameters en elektrodetype neemt de inplantsterkte toe, naarmate het koolstof equivalent afneemt. Worden de $\sigma_{50/50}$ -waarden van de serie 3 met 4 en 5 met 6 vergeleken dan is duidelijk de invloed van het elektrode type zichtbaar. Een lager gehalte aan diffundeerbare waterstof resulteert bij eenzelfde structuur (zie piekhardheden) in een hogere kritische inplantbreuksterkte, waaruit blijkt dat niet het totale waterstofgehalte maar het diffundeerbare gehalte de scheur-gevoeligheid bepaalt. Met betrekking tot de scheurgevoeligheid is het gebruik van een ijzeroxyde elektrode (elektrode D) te prefereren boven het gebruik van een rutiel elektrode (elektrode B). Uit deze resultaten blijkt dat de inplantproef een zeer geschikte proef is om de waterstofscheurgevoeligheid te onderzoeken. Ook onderwater geven de resultaten van de inplantproef een goed inzicht in de invloed van verschillende factoren op de waterstofscheurgevoeligheid. Variatie van het koolstof equivalent en het diffundeerbare waterstofgehalte resulteren in een andere kritische inplantbreuksterkte. Hoewel de gevoeligheid van St. 37 voor waterstofscheuren, zeker als dit gelast wordt met elektrode D, gering is, mag aan de resultaten niet de konklusie verbonden worden dat (dit) staalsoort onderwater goed lasbaar is. Er kunnen zich in de praktijk lasverbindingen voordoen die een dusdanig hoge restspanning hebben dat er toch breuk optreedt. Blijft de spanning in de konstruktie beneden de in dit onderzoek bepaalde kritische inplantbreuksterkte (σ_{IR}), dan betekent dit nog geen scheurvrije verbinding.

Scheuren die onder statische belasting niet tot breuk leiden, kunnen dit onder dynamische belasting wel doen.

De foto's, in de figuren 62, 64 en 64 tonen de korrelgroei, die optreedt in de W.I.Z. Hoe hoger de piektemperatuur is, des te sterker is de korrelgroei. Bij St. 37 en St. 42 is nog duidelijk de austenit korrelgrens te zien, waarop de Widmannstättenferriet gekiemd heeft.

Bij St. 52 (figuur 64) ontstaat door het hogere koolstof equivalent geen Widmannstätten ferriet maar martensiet. De piekhardheid in de W.I.Z. bij St. 52 is dan ook veel hoger dan bij St. 37.

Bij St. 52 ontstaat op de austeniet korrelgrenzen eerst Widmannstätten ferriet, die ook gedeeltelijk de korrel ingroeit. Hierdoor neemt het percentage koolstof in de nog niet omgezette austeniet toe, waardoor martensiet of bainiet ontstaat. De piekhardheid in de W.I.Z. van St. 42 is dan ook aanzienlijk hoger dan die van St. 37. Zoals de foto in figuur 65 laat zien treedt scheurvorming op in het grofkorrelige deel van de W.I.Z., waar ook de hoogste hardheden gemeten worden.

Bij de bestudering van het breukoppervlak zijn drie verschillende typen waargenomen. Figuur 67 is een foto van een breukoppervlak van een waterstofscheur met interkristallijn karakter. De foto van figuur 68 toont een breukoppervlak zoals dat ontstaat bij overbelasting (restbreuk). Figuur 69 is een opname van een transkristallijne waterstofbreukoppervlak. Worden deze foto's met de afbeelding van figuur 71 vergeleken, dan blijkt dat de interkristallijne waterstofscheur in de W.I.Z. ligt, terwijl de andere twee typen scheuren in het lasmetaal optreden. Bij de series 1 t/m 5 en 7 komt transkristallijne waterstofscheurvorming in het lasmetaal nauwelijks voor. De breuk wordt duidelijk geïnitieerd door interkristallijne scheurvorming in de W.I.Z., terwijl de restbreuk plaatsvindt in het lasmetaal. Bij (serie 6 is veel transkristallijne waterstofscheurvorming in het lasmetaal waargenomen. De foto in figuur 71 toont nog enige scheurvorming in de W.I.Z., er zijn bij deze serie ook breuken waargenomen die volledig in het lasmetaal gesitueerd zijn. Worden de waterstofscheurgevoeligheden in de W.I.Z. met elkaar vergeleken dan mag de kritische inplantbreuksterkte $\sigma_{50/50}$ van serie 6 niet meer gebruikt worden. Wel kan gezegd worden dat de sterkte $\sigma_{50/50}$ groter is dan $52,5 \text{ kg/mm}^2$. Blijkbaar is bij een las gelegd met elektrode D het lasmetaal de zwakste plek, iets wat van een "dead-soft"-elektrode zeer aannehmelijk is.

De kritische inplantbreuksterkte is berekend over de netto doorsnede van de inplantstaaf. In het lasmetaal is het werkend oppervlak groter, maar het is niet juist uit te gaan van een oppervlak met een diameter van 8 mm. De treksterkte ligt dus tussen

de 41 kg/mm^2 ($\emptyset 8 \text{ mm}$) en de $52,5 \text{ kg/mm}^2$ ($\emptyset 7 \text{ mm}$). Deze waarde is in redelijke overeenstemming met de treksterkte die bepaald is door Boltje (8). Hij heeft met dezelfde elektrode een treksterkte van het lasmetaal gevonden van $49,3 \text{ kg/mm}^2$ (zie tabel 1) Om toch de waterstofscheurgevoeligheid van de W.I.Z. van St. 42 te kunnen bepalen, als gelast wordt met elektrode D, zou er een dusdanige inplantstaafdiameter en groefvorm gekozen moeten worden, waarbij eerder waterstofscheurvorming optreedt in de W.I.Z. dan in het lasmetaal. Onderzocht moet worden of met een inplantstaafdiameter van 6 mm, voorzien van M6 schroefdraad het gewenste effect bereikt wordt. Door de grotere kerfwerking van M6 t.o.v. de bij dit onderzoek toegepaste groefvorm, is dit wel te verwachten. De waarde van de inplantproef zou hierdoor vergroot worden.

9. Konklusies.

- De boogspanning heeft een grote invloed op de executieve lasbaarheid. Bij slepend lassen wordt de boogspanning beïnvloed door de lashoek en het al of niet naar de aansluitklem toe lassen.
- Teneinde de waterstofmetingen reproduceerbaar te kunnen verrichten, is het noodzakelijk de in dit onderzoek voorgestelde waterstofmeetmethode nauwkeurig toe te passen.
- De waterstof die bij onderwaterlassen opgenomen wordt, komt hoofdzakelijk uit de bekleding. Het is daarom zinvol elektroden te ontwikkelen waarvan het gehalte aan kristalwater en vocht van de bekleding aanzienlijk lager is dan de in dit onderzoek gebruikte elektroden. Het is wel noodzakelijk dat deze elektroden onderwater met een stabiele boog lassen, omdat anders gedissocieerde waterdamp uit de bel in het lasmetaal wordt opgenomen.
- IJzeroxyde elektroden veroorzaken in het lasmetaal een totaal waterstofgehalte dat niet lager is dan het waterstofgehalte van rutiel elektroden. Het gehalte aan diffundeerbare waterstof van de ijzeroxyde elektrode is echter aanzienlijk lager.
- De inplantproef is een beproevingsmethode, die zeer geschikt is om onderwater op kwantitatieve wijze de waterstofscheurgevoeligheid te meten. Onderzocht moet worden of door de toepassing van een inplantstaaf, die voorzien is van schroefdraad M6, het meetbereik nog vergroot wordt.
- Met betrekking tot de waterstofscheurgevoeligheid moet bij nat onderwaterlassen het gebruik van de elektrode ISO E 431 O 14 (elektrode D) sterk aanbevolen worden.

Literatuurlijst

1. Underwater Welding For Offshore Installations
International Seminar Handbook, London 9-10 March, 1976. The Welding Institute.
2. A.W. Stalker, B.Sc. e.a. - A preliminary study of underwater manual metal arc welding
Report Welding Institute RR 7406 3412/5B/74, December 1974.
3. A.W. Stalker, B.Sc. (eng.) e.a. - A preliminary study of the effect of increased pressure on the welding arc
Report Welding Institute RR 7504 3412/6/74, December 1974.
4. T.G. Gooch e.a. - An investigation of the properties of welds made under water
Second Progress Report, Report Welding Institute 3539/2/77 September 1977.
5. H. Suzuki - Cold cracking and its prevention in steel welding
I.I.W. Document.-IX-1974-78.
6. J. Cabelka - Proposition d'une nouvelle méthode d'essai de la soudabilité des aciers,
I.I.W. Doc.-IX-557-67.
7. H. v.d. Linden und W. Schönherr - Compilation of cold cracking tests
I.I.W. Doc.-IX-779-72.
8. G.W. Boltje - Studie van de lasbaarheid van staal bij het onderwaterlassen in open zee
Afstudeerverslag T.H.-Delft, juni 1977.
9. H.G. Geerlings - Fundamenten lastechnologie (aanvullingen)
Diktaat T.H. - Delft, september 1978.
10. H. Granjon - The implant method for studying the weldability of high strength steels
Metal Construction and Brit. Welding Journal, I (1969) 11, 509.
11. G. Rabensteiner, H. Rettenbacher - Einfluss auf den diffusiblen Wasserstoff im Schweissgut von umhüllten Stabelektroden
Schweisstechnik nummer 8, August 1978, 32 Jahrgang.

12. H.J. Bouwman - De mogelijkheid van onderwaterlassen met beklede elektrode
Afstudeerverslag T.H. Delft, 1971.
13. F.R. Coe - Welding Steels without hydrogen cracking
The Welding Institute, 1973.
14. Commission II Tentative procedure for the determination of hydrogen in mild
and low-alloy steel weld metal
Doc. I.I.W.-315-68 Welding in the world, 7 (1969) I, p. 16 t/m 27.
15. De bepaling van diffundeerbaar waterstof in neergesmolten lasmetaal van be-
klede laselektrode
Laboratorium voorschrift DLV-30-61, april 1969, Philips.
16. N. Christensen - Determination of total hydrogen contents in weld metal
Doc. IIS/IIW-153-64, Welding in the World vol. 3, no. 1 1965, pp. 13-21.
17. N. Christensen - Implant testing based on delayed fracture
I.I.W. Doc. IX-824-73.
18. Welding - Determination of hydrogen in deposited weld metal arising from the
use of covered electrodes for welding mild and low alloy steels
International Standard, Ref. No. ISO 3690-1977 (E).
19. D.W. Dickinson and G.D. Ries - Implant testing of medium to high strength steel -
A model for presiding delayed cracking susceptibility
Welding Research, July 1979, S 205 - S 211.
20. W. Schönherr und V. Neumann - Zur Aussagefähigkeit des Implantversuchs
Oerlikon Schweissmitteilungen (89) Nov. 1979.
21. Commissie II, The determination of the hydrogen content of ferritic arc weld
metal
voorstel voor I.I.W.-doc. II-485-79.
22. H. Suzuki - Cold cracking and its prevention in steel welding
I.I.W. Doc. IX-1110-79.
23. M.R. Inglis and T.H. North - Underwater welding: a realistic assessment
Welding and Metal Fabrication, april 1979.

24. L. Reeve - The relation between the hydrogen content of weld metal and its oxygen content
Transactions of the Institute of Welding, 1945, Vol. 8, pp. 385-396.
25. J. Kaljec - Hydrogen in weld metal; causes and remedies
Philips Welding Reporter, 1978/2.
26. T. Sai and K. Masubuchi - Interpretive Report on underwater welding
W.R.C. Bulletin 224.
27. E.A. Silva and T.H. Harlett - Shielded metal-arc, welding underwater with iron powder electrodes
Welding Journal Vol. 50, No. 6, June 1971, 406-415.
28. A.W. Stalker, B.Sc. (eng), and G.R. Salker B.Sc. - A review of the literature on underwater welding and cutting T_o
June 1974, RR 7405, 3412/1/74 - Appendix 1, December 1974.
29. P.H.M. Hart - Low sulphur levels in CMn steels and their effect on HAZ hardenability and hydrogen cracking
Intern rapport I.I.W., paper 20, 1977.
30. J.D. Fast - Waterstofarme lasstaven
Philips technisch tijdschrift, jaargang 14, no. 3.
31. A.J. Karpi, HAZ hardness and carbon equivalents predicting the implant fracture strength
I.I.W. Doc. IX-1102-78.
32. A.J. Karpi - Comments on the implant testing procedure
I.I.W. Doc. IX-1101-78.
33. A.J. Karpi - Effect of hydrogen content preheat temperature and cooling conditions on cold cracking of some heat resisting steels
I.I.W. Doc. IX-1103-78.
34. J. Koivula - The effect of GMA-welding parameters and alloying elements on the hydrogen induced cracking in low carbon Cr-steel
I.I.W. Doc. IX-1109-79.

35. C.F. Düren - Bedeutung des Implantversuchs für die Beurteilung der Baustellen-schweisssbarkeit von Grossrohren
Schweissen und Schneiden Jahrgang 31 (1979), heft 5, 201-205.
36. M.L. Levin and D.W. Kirkley - Welding underwater, Metal Construction and British Welding Journal Vol. 40, no. 5, May 1972, 167-170.
37. A. Brown, R.T. Brown, C.L. Tsai, K. Masubuchi - Report on fundamenteel research on underwater welding
Massachusetts Institute of Technology Report No. Mitsg 74-29, September 30, 1974.
38. K. Satoh, S. Matsui, H. Horikawa, O. Takagi, K. Terai, S. Yamada, Y. Okuma - Correlation of the implant test with the RRC and the TRC tests
Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 6, no. 1, april 1975,
I.I.W. Doc. IX-874-74.
39. S. Matsu - Weld cracking susceptibility in various groove shapes
I.I.W. Doc. IX-1048-77.
40. H. van Beurden - Een literatuurstudie over de inrichting en het gebruik van de implant-test
Intern rapport T.H.-Delft, scriptie oktober 1978.
41. K. Satoh, Y. Ueda, S. Matsui, M. Natsume, T. Terasaki, K. Fukuda, M. Tsuji
Studies on structural restraint severity relating to weld cracking in Japan (preliminary report) I.I.W. Doc. IX-956-76.
42. H. Ozaki, J. Naiman and K. Masubuchi - A study of hydrogen cracking in underwater steel welds
Metal Constr. and Brit. Welding Journal 56 (1977) August 231^s-237^s.
43. Prof. Geerlings - toegepaste lastechnologie
Diktaat aan de afdeling metalkunde.
44. N. Christensen - Weldability testing by the implant method
I.I.W. Doc. IX-983-76.

45. H. Granjon, S. Debiez et R. Gaillard - Etude de la soudabilité des aciers par la méthode des implants: résultats actuel et perspectives nouvelles
Soudage et Techn. Conn. 24, (1970), 103.
46. N. Christensen - Weldability testing by the implant method
I.I.W. Doc. IX-1037-77.
47. J. Tanaka and T. Kidada - Implant test for studying cold cracking
I.I.W. Doc. IX-959-76.
48. I.I.W. sub-commissie IX-B - Recommendation for the use of the implant test as a complementary information test on susceptibility to cold cracking in the welding of steels
Doc. I.I.W. IX-447-73.

Bijlage I

International Standard ISO 3690

THE DETERMINATION OF HYDROGEN IN MILD AND LOW ALLOY STEEL WELD METALS

Scope

The present method is intended for assessment of the content of diffusible hydrogen in weld metal from coated electrodes (Note 1). Moreover, the same procedure of welding and sampling is applicable for the determination of total hydrogen contents in mild and low alloy steel weld metal.

Principle of method

The electrode to be tested is used to deposit a single weld bead which is rapidly quenched. Both the welding and quenching procedures are carefully controlled. The specimen so produced is maintained at room temperature for a sufficient time to release its content of diffusible hydrogen, which is measured by volumetric methods and reported on unit mass of deposited or fused metal (Note 2).

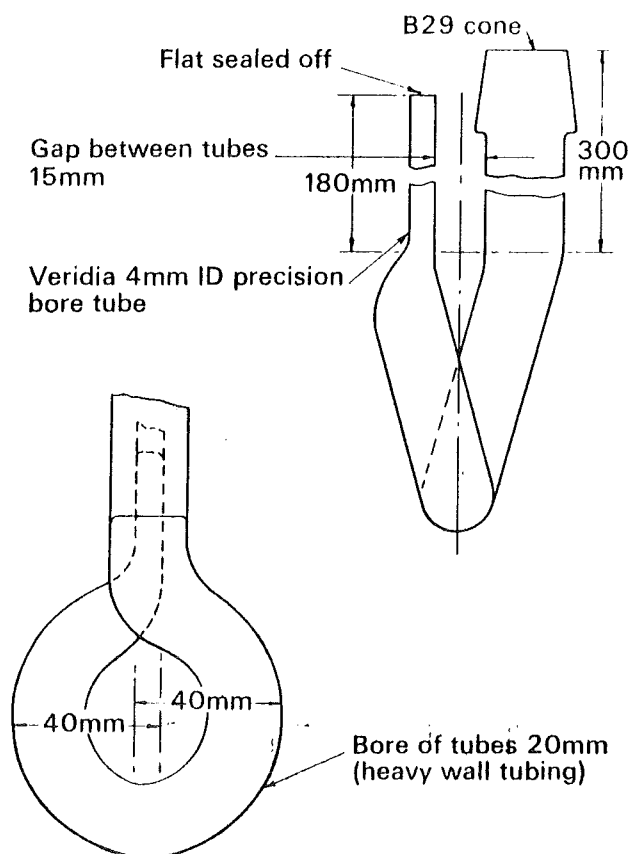
The total hydrogen content is defined for the present purposes as the sum of the diffusible and residual contents, the latter being determined by hot extraction at 650°C under vacuum or in a carrier gas.

Materials and reagents required for test

(a) Parent plate material

The testpiece assembly shall be prepared from a mild steel containing not more than 0.20%C,

B5 Diffusible hydrogen collecting apparatus



0.35%Si, and not more than 0.05%S. Prior to use in a determination of total hydrogen contents the testpiece shall be degassed under conditions equivalent to those employed in the subsequent hot extraction.

(b) Electrodes

Electrodes to be tested according to the present procedure shall be of 4mm core wire diameter, or of 3.15mm diameter in the case of electrodes of a metal recovery higher than 130%.

The electrodes to be tested shall be baked at 125°C for 2hr if no directions for drying are supplied by the manufacturer. This drying procedure is not to be applied to electrodes containing more than 5% by weight of cellulose in their coatings. If the electrode is claimed to be a hydrogen-controlled brand, the baking temperature shall be 250°C for 2hr; if the maker recommends a predrying treatment in the practical application of the electrodes this procedure shall be followed.

(c) Welding fixtures

A copper jig, as shown in Fig. B4, is used for the alignment and clamping of the testpiece assembly.

Apparatus for the determination of diffusible hydrogen

An example of a gas burette for the measurement of cold extracted gas is shown in Figs B5 and B6. Burettes of other designs may be employed, provided that the following requirements are fulfilled:

- Mercury is to be used as a confining liquid.
- It should be possible to maintain the sample under vacuum for a brief period to remove any trace of foreign gases trapped on the fractured surface of the sample. In burettes consisting of a single limb, this may be achieved through manipulation of the mercury level and the stop-cock, any gas released during the brief period of surface degassing being swept out of the burette before the measurements.
- It should be possible to read the volume of collected gas with a precision of at least 0.05ml (STP). For measurements of very low hydrogen contents it is recommended either to transfer the extracted gas to an apparatus, where the amount can be determined by more refined methods, or to use a burette of a design permitting a higher precision.

Preparation of test specimen

1 Testpiece assembly

Duplicate sets of testpieces shall be welded for each brand of electrode to be tested. Beads of 100mm overall length shall be deposited along the centreline of the testpiece assembly. No burning-off prior to the testing is allowed.

The testpiece assembly shown in Fig. B4 consists of run-on and run-off pieces and a central sample section of 30mm total length. Duplicate determinations shall be made using the entire length of this section. It may be divided into four

specimens of 7.5mm length each as indicated in Fig. B4 or two specimens 15mm each or one specimen of 15mm and two specimens of 7.5mm length. Three optional combinations are recommended:

- (a) No. 1 and 4 (2 × 7.5mm) analysed jointly
No. 2 and 3 (2 × 7.5mm) analysed jointly
- (b) No. 1 and 4 (2 × 7.5mm) analysed jointly
Central specimen (15mm) analysed separately
- (c) Two specimens (15mm each) analysed separately

The testpiece dimensions specified in Fig. B4 shall be maintained within the limits $\pm 0.25\text{mm}$; however, each set comprising run-on and run-off pieces and the central section shall be finished in one operation of grinding so as to ensure a uniform width. The central specimens shall be marked and weighed to the nearest 10mg.

2 Welding

The temperature of the jig shall be $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{degC}$ prior to testing. The welding current shall be the maximum stated by the manufacturer less 15A, the machine setting being controlled within a tolerance of $\pm 5\text{A}$. The speed of welding shall be adjusted to an electrode consumption between 12 and 13mm per 10mm bead length. The time spent in the deposition shall be noted.

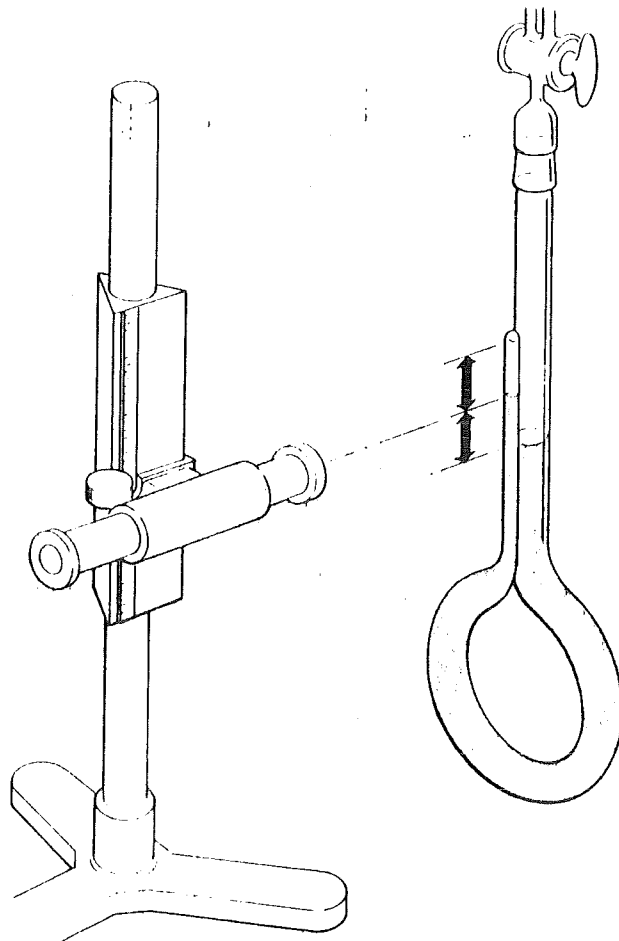
Three seconds after extinction of the arc the jig is released and the testpiece assembly is quenched in iced water and subsequently in alcohol or acetone saturated with solid carbon dioxide. The sample pieces are wire brushed and broken apart while cold. Using brief intermittent periods of cooling, the intervals spent outside the cooling bath in these operations shall not exceed 10sec each. The samples may now be stored at dry ice temperature for a period up to three days before analysis (Note 3).

Test procedure

1 Preparation of specimen for analysis

In transferring the samples from the cooling bath to the gas burette a shield of dry nitrogen shall be applied to avoid condensation of atmospheric humidity. The sequence of operations and the time spent in each of these shall be:

- (a) Wash in alcohol for a period between 3 and 5sec.
- (b) Wash in pure ether for a period between 3 and 5sec.
- (c) Dry in a blast of dry nitrogen supplied from a nozzle, particular attention being paid to the fractured faces of the specimen. This operation shall be accomplished in not less than 20 and not more than 22sec.
- (d) Maintaining a blanket of dry nitrogen, transfer the sample to the outer limb of the burette, where the sample is held in position clear of the mercury by a magnet. Evacuate the outer limb of the burette down to a pressure of roughly 0.1 torr. The time spent in these operations shall not be less than 20 and not more than 25sec.



B6 Collection and measurement of room temperature diffusible hydrogen

- (e) Transfer the sample through the mercury airlock to its final position in the measuring limb of the burette. This operation shall be accomplished within 5sec.

The total time spent in transferring the sample from the cooling bath until the measurements commence shall thus not exceed 60sec.

2 Analytical procedure (diffusible hydrogen)

The sample is maintained under reduced pressure at $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{degC}$ for a period of 72hr, when the final volume is measured. The samples are removed from the apparatus, lightly wire brushed so as to remove any oxide skin, and weighed to the nearest 10mg. If it is also desired to determine the amount of fused metal, the cross-section of the bead shall be measured on tracings or photographs of the fractured faces. These measurements are made after hot extraction if the residual hydrogen content is also to be assessed.

Calculations and expression of results

The volume measured after 72hr is converted to 0°C and 760mm. This volume, divided by one-hundredth of the gain in weight, is the diffusible hydrogen content, in ml/100g deposited metal.

The fused metal weight is obtained by multiplication of the gain in weight by the average ratio (fused metal/deposit area) determined on the two faces of the specimen, and the diffusible hydrogen content,

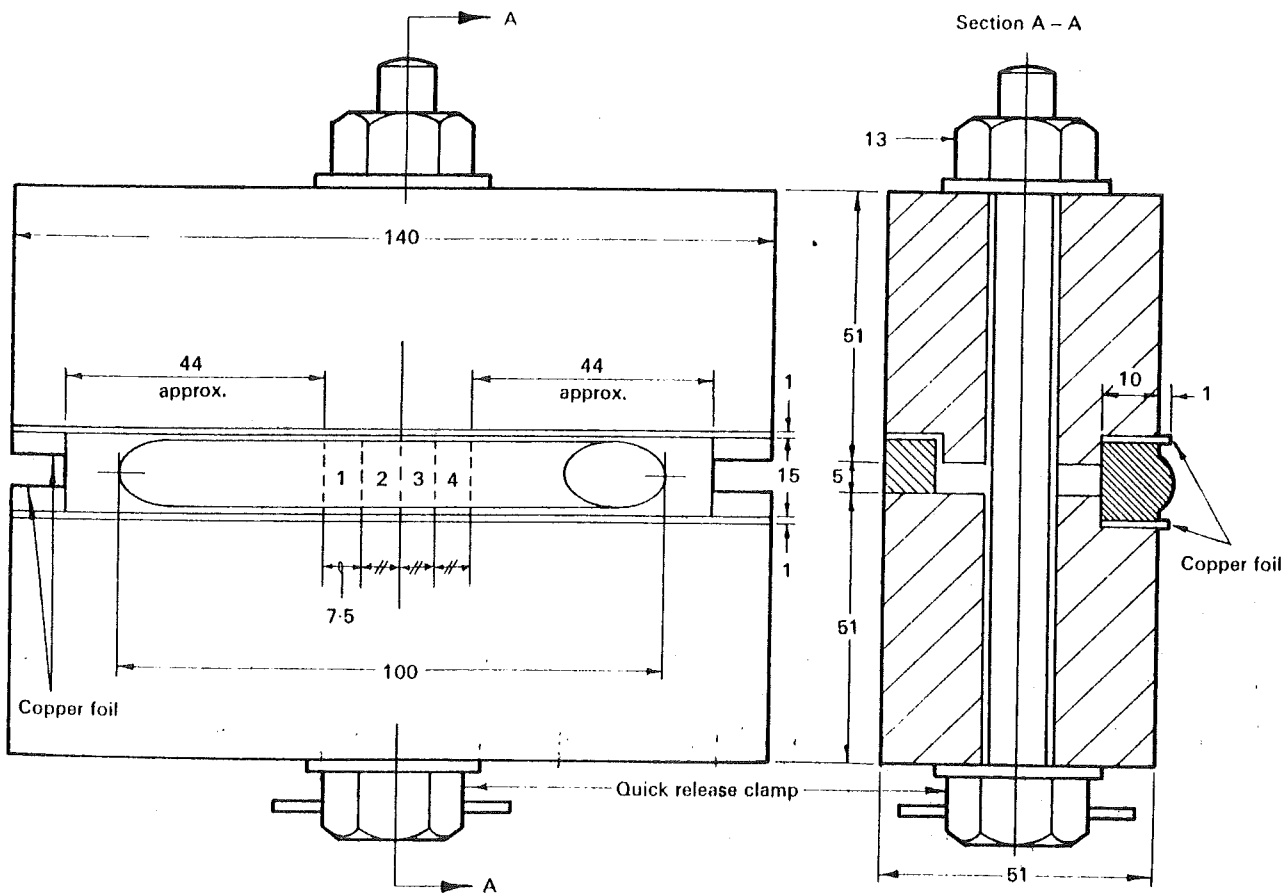
in ml/100g fused metal, is found by dividing the gas volume (STP) by one-hundredth of this weight.

Each separate content shall be reported, together with the average for each of the two beads tested and the overall average of the four values.

Reproducibility (Note 4)

Because of the high mobility of hydrogen in steel, particularly at elevated temperatures, the procedures laid down should be strictly followed to ensure constant sampling conditions. In a cooperative international study it was found that the average weld metal hydrogen level was subject to a standard deviation of about 7%. Full details of this investigation of reproducibility are given in document IIW/IIS-315-68 published in *Welding in the World*, 7 (1), 1969, 16-26. (See also Moreton, Mrs J., Parker, D. H., and Jenkins, N. Weld. Inst. Members Report M/61/71, April 1971.)

B4 IIW testpiece assembly for hydrogen sampling of weld deposits, dimensions in mm



Bijlage II

Bepaling van diffundeerbare waterstof

"De onderwater-procedure"

Principe van de procedure

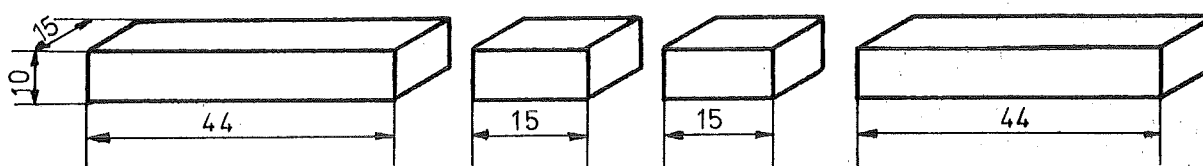
Met de te beproeven elektrode wordt op proefblokjes een lasrups gelegd, die direkt na het lassen snel afgekoeld wordt. De afkoelprocedure is nauwkeurig vastgelegd. De proefblokjes worden daarna in een buret gebracht, waarbij de waterstof, die uit de proeflas treedt, opgevangen wordt. Na 72 uur wordt het volume van deze diffundeerbare waterstof gemeten en omgerekend naar een hoeveelheid nl. per eenheid van massa neergesmolten metaal bij 0° en 760 mm Hg.

Het totale waterstofgehalte wordt gedefinieerd als de som van de diffundeerbare en de residuele waterstof. Deze laatste wordt gemeten door de proefblokjes, nadat het diffundeerbare gehalte is bepaald, te verwarmen op 650°C à 700°C in vacuum of in een draaggas.

Het vervaardigen van de proefblokjes

Voor iedere elektrode moeten twee sets gelast worden. Een set bestaat uit een aanloopstuk en een uitloopstuk van 44 mm en een centraal gedeelte van 30 mm. Het centrale gedeelte bevat de twee meetblokjes die gemerkt moeten worden en gewogen worden met een nauwkeurigheid van 5 mg. De afmetingen zijn in onderstaande figuur aangegeven.

In de maatvoering wordt een tolerantie toegestaan van $\pm 0,25$ mm. Iedere meetset moet in één handeling geslepen worden om zeker te zijn dat de breedte van een meetset gelijk is. De proefblokjes moeten gemaakt worden van staal dat niet meer bevat dan 0,2% C, 0,35% Si en 0,05% S. Voor gebruik moeten de proefblokjes ontgast worden onder dezelfde kondities die toegepast worden bij de bepaling van de residuele waterstof.



de afmetingen van de meetset

Het lassen

De temperatuur van het koperen blok, waarin de proefblokjes geklemd worden (voor afmeting zie bijlage I) moet gelijk zijn aan de omgevingstemperatuur. De lasparameters dienen gelijk te zijn aan de parameters, waarmee de elektrodes onderwater verlast worden. De las moet een lengte hebben van 100 mm en neergesmolten worden in het midden van de blokjes. Wordt een meting in lucht gedaan dan moet het koperen blok met de proefblokjes binnen 3 seconden na het doven van de boog ondergedompeld worden in water. Precies 30 seconden na het doven van de boog moet de proeflas uit het koperen blok verwijderd zijn en in de aceton van -60°C gedompeld worden.

De meetset moet geborsteld en van elkaar gebroken worden, terwijl deze koud is. De proefblokjes mogen tijdens deze handelingen niet langer dan 10 seconden uit de koude aceton blijven. Het is niet onderzocht hoe lang de proefblokjes op -60°C kunnen blijven voordat een meetbaar verlies aan waterstof optreedt. Een half uur is zeker een veilige bewaartijd.

De gasburet

Iedere proefblokje moet afzonderlijk geanalyseerd worden in een gasburet. In bijlage I is een voorbeeld gegeven van een gasburet zoals die bij de meting gebruikt kan worden. De konstruktie van de gasburet moet zodanig zijn dat het proefblokje gedurende korte tijd in onderdruk gehouden kan worden om sporen te verwijderen van vreemde gassen, die gevangen zitten aan het gebroken oppervlak. Deze gassen mogen de meting niet beïnvloeden. Als afsluitvloeistof moet kwik gebruikt worden. Het volume van het verzamelde gas moet men een nauwkeurigheid van minstens 0,05 ml afgelezen kunnen worden.

De meetprocedure

1. De meetblokjes moeten goed ontvet worden en nauwkeurig in het droog en schoon gemaakte koperen blok geplaatst worden.
2. Na het doven van de boog moet, als de proeflas in lucht is gelegd, het koperen blok inklusief de meetset binnen 3 seconden in water ondergedompeld worden.

3. In precies 30 seconden moet de meetset uit het koperen blok verwijderd zijn en in de aceton van -60° gedompeld worden.
4. Voor het verwijderen van de slak, hetgeen grondig moet gebeuren, en het losbreken van de meetblokjes mogen deze niet langer dan 10 seconden achtereen uit de koude aceton blijven.
5. Haal het meetblokje uit de koude aceton en spoel het in aceton of alkohol dat op kamertemperatuur is gedurende 3 tot 5 seconden.
6. Spoel vervolgens het meetblokje gedurende 3 tot 5 seconden in ether.
7. Droog het meetblokje in een gasstroom van droge stikstof en besteedt hierbij vooral aandacht aan de breukoppervlakken. Deze handeling mag niet korter dan 20 seconden en niet langer dan 22 seconden duren.
8. Breng het meetblokje in het open been, sluit dit af en houdt met een magneet het blokje vrij van het kwik. Zuig nu onderdruk in de buret. De tijd voor deze handelingen mag niet korter dan 20, en niet langer dan 25 seconden zijn.
9. Breng het proefblokje met de magneet door het kwikslot in het meetbeen. Deze handeling mag niet langer duren dan 5 seconden.

De totale tijd die besteed wordt om het proefblokje uit de koude aceton te halen en in het meetbeen te plaatsen moet minstens 55 seconden, en mag niet langer dan 60 seconden zijn.

De analytische procedure

Het proefblokje wordt gedurende 72 uur onder gereduceerde druk gehouden bij een temperatuur van $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Na het wegnemen van de onderdruk wordt het volume, de temperatuur, het verschil in kwikhoogte tussen de beide benen van de gasburet en de barometerstand bepaald. Het proefblokje wordt, nadat het uit de buret is verwijderd, licht geborsteld om oxyden te verwijderen, waarna het gewogen wordt met een nauwkeurigheid van 5 mg. Moet de residuele waterstof nog bepaald worden dan moet het proefblokje na het warmstoken gewogen worden.

Het gemeten volume na 72 uur wordt omgerekend naar een hoeveelheid waterstof per 100 gram neergesmolten metaal bij 0°C en 760 mm kwik. De hieronder vermelde formule kan hiervoor worden gebruikt.

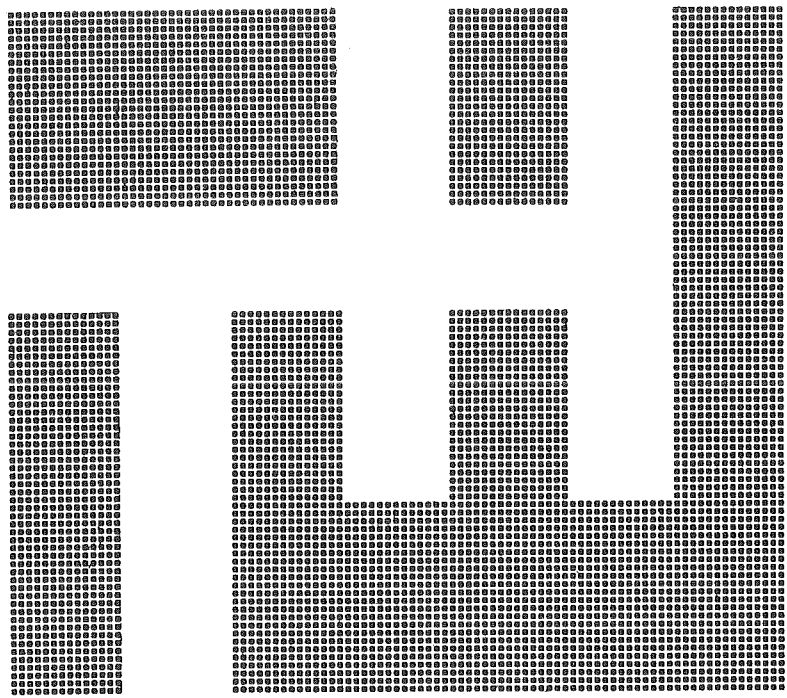
$$V_H = \frac{V \cdot (B - H)}{760} \times \frac{100}{g} \times \frac{273}{T} \quad \frac{\text{ml waterstof}}{100 \text{ gr neergesm. metaal}}$$

waarin:

- V Het afgelezen volume na 72 uur (ml)
- T de temperatuur waarbij V is afgelezen (°K)
- B de barometerstand (mm Hg)
- H het verschil in kwikhoogtes in beide benen van de buret (mm Hg)
- g het gewicht van de hoeveelheid neergesmolten metaal

Bijlage III

Het "M-M-coating" systeem bestaat uit drie verschillende "coatings". Eerst moeten de rekstrookjes geplakt en de elektrische verbinding gesoldeerd worden. Een veel optredend verschijnsel bij beschermde rekstrookjes is de penetratie van water tussen de draad en de bescherming door. Om deze penetratie te voorkomen moet de draad behandeld worden met M-coat B. Dit hecht zich goed aan de isolatie van de elektrische draden en brengen een goede verbinding tot stand met de eindbescherming. De M-coat B moet over een minimum afstand van 25 mm aangebracht worden. Soldeerverbindingen, metalen delen en de rekstrookjes moeten bedekt worden met een laag M-coat D. Deze "coating" isoleert de metalen delen van de elektrisch geleidende M-coat g. De M-coat g wordt in een voldoende dikke laag aangebracht en geeft de gewenste waterafdichting.



WATERSTOFSCHOURGEVOELIGHEID BIJ HET
 NAT-ONDERWATERLASSEN MET BEKLEDE
 ELEKTRODE, BEPAALD MET BEHULP VAN
 DE INPLANTPROEF.

J.H.A.v.Beurden

FIGUREN

afstudeerverslag
tussenafdeling der metaalkunde
technische hogeschool delft

Waterstofscheurgevoeligheid bij nat onderwaterlassen
met beklede elektrode, bepaald met behulp
van de inplantproef.

door J.H.A. van Beurden
april 1980

Verslag van het afstudeerwerk van
J.H.A. van Beurden, verricht aan de
Tussenafdeling der Metaalkunde
vakgroep: Toegepaste Metaalkunde
Sectie: Lastechnologie
Sectieleider: Prof. dr. ir. H.G. Geerlings
begeleider: ir. G.W. Boltje
assistentie: G.N. Kerkhof

Elektrode type	basis materiaal	omstandigheden	vloeigrens (N/mm ²)	treksterkte (N/mm ²)	verlenging (%)	insnoering (%)	lit.
E 7024	AISI 1020	in lucht	342	491	27,4	41,4	(27)
E 7024	AISI 1020	1 m water	330	419	9,1	16,0	(27)
E 6027	AISI 1020	in lucht	314	454	30,2	46,8	(27)
E 6027	AISI 1020	1 m water	358	454	10,4	13,1	(27)
E 6013	AISI 1020	1 m water	328	399	7,2	15,2	(27)
E 6013	-	3,6 m water	391	442	7,5	7,7	(28)
E 433R14	St52	16 m zeewater	400	479	-	12	(8)
E 431 D14	St52	16 m zeewater	404	493	-	13	(8)
E 6020	St52	16 m zeewater	390	502	-	9	(8)

Tabel 1: De mechanische eigenschappen van lasverbindingen gemaakt met beklede elektroden.

Lasdiepte (m)	Treksterkte (N/mm ²)	Face band angle (°)	Root band angle (°)	verlenging over 37 mm(%)
9	550	65	35	12
36	380	30	15	3

Tabel 2: De mechanische eigenschappen van een lasverbinding van lloyds Grade E steel onder de hand gelast op verschillende dieptes.

Elektrode type	diameter (mm)	stroom (A)	spanning (V)	literatuur
E 6013	4,0	170-190	35-29	(28)
E 6013	4,8	220-260	35-29	(28)
E 7014	4,0	170-210	-	(26)
E 7024	4,0	200-260	-	(26)
E 6027	4,0	240-280	-	(26)
E 433 R14	5	220-280	30-21	(8)
E 6020	5	230	27	(8)
E 6013	5	220	26	(8)

Tabel 3: Samenvatting van aanbevolen lasparameters bij natonderwaterlassen.

Elektrode type	literatuur	hoeveelheid gas (cm ³ /s)
E 6013 <i>met</i>	(37)	40
E 6013	(26)	100
E 6027	(28)	125
E 7024	(28)	60

Tabel 4: Gasontwikkeling bij het nat-onderwaterlassen.

Diepte (m)	Gew.% C	Gew.% Mn	Gew.% Si
20	0,26	0,63	0,16
40	0,19	0,21	0,08
60	0,09	0,12	0,03

Tabel 5: De chemische analyse van het lasmetaal op verschillende dieptes, bepaald door Madatov. (28)

Parameter	Samenstelling	Toepassingsgebied
$C_{eq_{IIW}}$	$C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \%$	C-Mn staalsoorten
$C_{eq_{JIW}}$	$C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Ni}{40} + \frac{Si}{24} \%$	C-Mn staalsoorten
P_{cm}	$C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$	zie IIW.Doc.IX-1074-78
P_{nb}	$C + \frac{Si}{20} + \frac{Mn}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{30} + \frac{Mo}{20}$	zie IIW.Doc.IX-959-76

Tabel 6: Enkele in de literatuur genoemde koolstofequivalenten.

Elektrode type	Staalsoort	T _{piek} (°C)	$\Delta t_{800-500}$ (s.)	Piekhardheid Hv{..}	lit.
E 433 R 14	St52	>1250	3,9	519 (0,1)	(8)
E 6020	St52	>1250	2,2	519 (0,1)	(8)
E 6020	St37	>1250	4,6	266 (0,1)	(8)
E 312-16	St52	-	-	542 (0,1)	(8)
E 312-16	St37	>1250	1,5	357 (0,1)	(8)
E 7024	AISI 1020	-	-	420 (?)	(27)
E 6027	AISI 1020	-	-	452 (?)	(27)
E 6013	AISI 1020	-	-	415 (?)	(27)
E 7014	Ceq _{IW} =0,39	-	-	420 (?)	(10)
E 11018	HY-80	-	-	480 (?)	(10)

Tabel 7: Piekhardheden zoals die gemeten worden bij onder water gelaste verbindingen in de warmte invloeds zone.

elektrode type	omstandigheden	methode	Waterstofgehalte(ml/100g bij 0° 1atm.)			lit.
			diffun- deerbare	residuele	totaal	
E Ra	in water	Na 10 min. onder kwik	-	-	33,3	(12)
E Rc	in water	idem	-	-	34,5	(12)
E B	in water	idem	-	-	25,5	(12)
E 6024	in water	IIW-standaard	43,0 ^x	3,3 ^o	46,3	(2)
E 6013	in water	idem	53,5 ^x	3,3 ^o	56,8	(2)
E 312-16	in water	idem	40,0 ^x	39,5 ^o	79,5	(2)
E 6020	in water	idem	24,0 ^x	13,5 ^o	37,5	(2)
Rutiel	onbeschermd in water	idem	90	4,4	94,4	(4)
Rutiel	beschermd in water	idem	86	3,9	90	(4)
Rutiel	onbeschermd 24h in water	idem	96	5,8	102	(4)
IJzeroxyde(zuur)	beschermd water	idem	68	3,4	71	(4)
Rutiel	beschermd water	idem	79	2,7	82	(4)
IJzer-oxyde	2h op 150° in water	idem	15	9,8	25	(4)
IJzer-oxyde	in water	idem	19	9,1	28	(4)

Vervolg z.o.z.

Vervolg tabel 8

Elektrode type	omstandigheden	methode	Waterstofgehalte(ml/100g bij 0° 1 atm.			lit.
			diffun- deerbare	residuele	totaal	
Rutiel 29/9	in lucht	IIW-standaard	0,5	13,3	13,8	(4)
Rutiel 29/9	onbeschermd in water	idem	45	42	87	(4)}
Basisch 40/20	onbeschermd in water	idem	5,2	93	98	(4)
Basisch 98%Ni	onbeschermd in water	idem	4,2	75	80	(4)
E 7014	in water	Glyserine	49*	-	-	(42)
E 7018	in water	idem	31*	-	-	(42)
E 8018	in water	idem	31*	-	-	(42)
E 11018	in water	idem	31*	-	-	(42)

* $H_{IIW} = 1,27H_{gl} + 2,2$

* na 20 dagen op 20°

° op 650°

Tabel 8: Waterstofgehaltenes bepaald door verschillende onderzoekers.

Elektrode type	warmteïnbreng (MJ/m)	Ceq _{IIW} van plaatmateriaal	Waterstofscheuren	
			in W.I.Z.	in lasmet.
Rutiel ijzerpoeder	2,0	0,31	ja	ja
IJzer oxyde	2,0	0,31	neen	neen
hoog nikkelgeh.	2,0	0,31	neen	neen
Rutiel	2,0	0,31	ja	ja
IJzer oxyde	1,0	0,31	neen	neen
hoog nikkelgeh.	1,0	0,31	neen	neen
IJzer oxyde	2,0	0,42	ja	ja
hoog nikkelgeh.	2,0	0,42	neen	ja

Tabel 9: resultaten van CTS-proeven onder water van Stalker(2).

Elektrode type	warmteïnbreng (MJ/m)	Ceq _{IIW} van het plaatmateriaal	Waterstofscheuren	
			in W.I.Z.	in lasmet.
Rutiel	1,2	0,31	ja	ja
Rutiel	2,1	0,31	ja	ja
zuur type	1,5	0,31-0,47	ja	ja
Rutiel	1,5	0,31-0,47	ja	ja
IJzer-oxyde	1,5	0,31-0,47	neen	neen
Basische	0,9	0,39	ja	ja
Rutiel-29/9 aust.	1,5	0,31;0,43	neen	ja
basische	2,0	0,36;0,40;0,47	neen	neen
basische hoog Ni	1,0;2,0	0,36-0,47	neen	neen

Tabel 10: Resultaten van CTS-proeven onder water van Gooch (4).

Ceq _{IIW} van het plaatmateriaal	Elektrode type	Waterstofscheuren in % v.d.laslengte	
		in lucht	in water
0,29	E 7014	0	0
0,29	E 7018	0	0
0,29	E 6024	0	0
0,38	E 8018	2	30
0,45	E 8018	21	26
0,85	E 11018	95	100
0,85	E 7018	18	100
0,85	E 310-16	1	80

Tabel 11: Waterstofscheurgevoeligheid bepaald door Ozaki(42) met behulp van de Y-groove proef.

Hoek	Elektrode type			
	E 43 22R3	E 433 R14	E 431 014	E 433 RR32
70°	23-24 V	25-26 V	28-32 V	28 V
60°	25-27 V	26 V	32 V	30 V
50°	-	30 V	30-31 V	32 V
40°	29 V	32 V	32 V	34 V
30°	-	-	32-33 V	-
naar pool toe	35 V(40°)	37 V(40°)	38 V(40°)	35 V(60°)

Tabel 12: De relatie tussen de spanning en de lashoek(hoek tussen de elektrode en het werkstuk) bij een stroom van 265 A met de elektrode aan de min, slepend verlast.

Elektrode type		omschrijving	letter aanduiding	kerndraad diameter (mm)	stroom (A)	spanning (V)	hoek ($^{\circ}$)
AWS	ISO						
E 7016	E 445 B14	basisch	A	3,25	155	32	-
	E 433 R14	rutiel	B	5	265	32	40
E 6012	E 433 RR32	rutiel+ijzerp.	C	5	265	30	60
E 6020	E 431 014	oxyderend	D	5	265	32	40

Tabel 13: De lasparameters welke in dit onderzoek zijn gebruikt.
(Elektrode aan de min-pool, lassen van de aansluitklem af.)

Piek-temperatuur ($^{\circ}$ C)	Afkoeltijd tussen de 800 $^{\circ}$ C en de 500 $^{\circ}$ C (s)
900-950	3,4
950-1000	3,0
1000-1050	3,05
1050-1100	2,8
1100-1150	2,73
1150-1200	2,5
1200-1250	2,4
1250-1300	2,5
1300-1350	2,5
1350-1400	2,6

Tabel 14: De relatie tussen de piektemperatuur en de afkoeltijd tussen de 800 en de 500 $^{\circ}$ C onder water. (plaatdikte 15mm, de warmteïnbreng 2,5 MJ/m).

Diffundeerbare waterstof (ml/100g neergesm. metaal, 0 ⁰ , 1 atm.)				
Gemiddelde	Meetwaarden			
57,9	57,0	59,0	57,9	57,6
39,8	40,5	35,0	40,7	43,2
18,7	19,0	19,7	15,2	20,9

Tabel 15: Het gemiddelde diffundeerbare waterstofgehalte van drie meetpunten, met de bijbehorende vier waarnemingen.

Elektrode type	behandeling	Waterstofgehalte (ml/100g neergesmolt. metaal bij 0° en 1 atm.)						FeO-gehalte van de in water gelegde las(ppm)
		in lucht			in water			
		diffundeerbare	residuele	totale	diffundeerbare	residuele	totale	
A	2 h op 350°C	5	1	6				
B	als geleverd	60,6	7±1,6	68	57,9	10±2	68	1374±100
B	20 h op 150°C	44,4			37,3			
C	als geleverd	33,7			39,8	16,7±4	56,5	1100±184
C	20 h op 160°C	23,8			37,5			
D	als geleverd	15,9			24,1	41±10	65	3049±208
D	20 h op 150°C	15,9			18,7			

Tabel 16: De met verschillende elektroden onder water en in lucht bepaalde waterstofgehaltenes.

Staalsoort	Gewichtsprocenten (%)											Ceq _{IIW}	σ_{vloe} (kg/mm ²)	σ_{breuk} (kg/mm ²)	rek (%)	insnoering (%)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V					
St37	0,12	0,22	0,47	0,017	0,038	0,08	0,13	0,01	0,02	0,07	-	0,23	27,8	42,4	31,6	71
St42	0,19	0,05	1,14	0,017	0,043	0,03	0,03	-	0,04	-	0,06	0,4	26,1	48,5	28,2	67
St52	0,20	0,35	1,38	0,022	0,019	0,02	0,02	-	0,05	0,02	-	0,44	38,0	54,0	29,5	74

Tabel 17: De chemische samenstelling en de mechanische eigenschappen van de in dit onderzoek gebruikte staalsoorten.

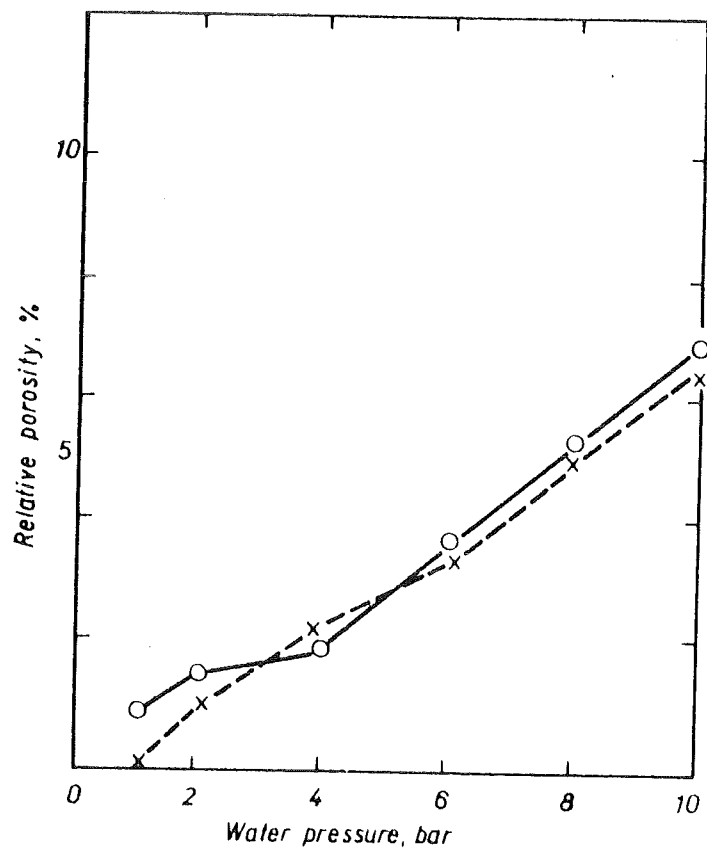
omstandigheden				temperatuur cyclus				structuur			implantsterktes				figuur nummer verwijzing	
serie nummer	staalsoort	elektrode type	omgeving	warmte inbreng (MJ/m)	plaatdikte(mm)	$\Delta t_{800-500}$ (s.)	$\Delta t_{\text{piek}-100}$ (s.)	$C_{eq\text{IIW}}$	piekhardheid (Hv 0,1)	diffundeerbaar waterstofgehalte (ml/100g 0° 1atm.)	$\sigma_{50/50}$ (kg/mm ²)	spreiding(kg/mm ²)	$\sigma_{\text{I.R.}}$ (kg/mm ²)	aantal meetpunten	voor berekening $\sigma_{50/50}$	voor de relatie tussen σ en de tijd tot breuk
1	St52	B	lucht	1,2	25	4,7	66	0,44	503	60,6	31,5	4	27,2	13	43	44
2	St52	B	lucht	2,5	25	9,7	127	0,44	450	60,6	38	1,5	32,6	17	45	46
3	St52	B	water	2,4	16	3,2*	33*	0,44	519	58	28	3	21,7	23	47	48
4	St52	D	water	2,4	16	3,2*	33*	0,44	508	24	37	2,5	32,6	20	49	50
5	St42	B	water	2,4	16	3,2*	33*	0,4	475	58	41	3	38,2	9	51	52
6	St42	D	water	2,4	16	3,2*	33*	0,4	485	24	>52,5	0,5	49,1	11	53	54
7	St37	B	water	2,4	16	3,2*	33*	0,23	297	58	50,5	0,1	49,1	6	55	56

*gemeten bij T_{piek} van 950°C

Tabel 18: De implantsterktes en andere hiermee samenhangende gegevens.

auteur	$\Delta t_{800-500}$ (s.)	piek hardheid (Hv(...))	Ceq_{IIW}	diffundeerbare waterstof (ml/100g)	spoeddiepte afr.hoek (mm) (mm) (mm) ($^{\circ}$)				staafdia.	methode	$\sigma_{50/50}$ (kg/mm ²)	$\sigma_{I.R.}$ (kg/mm ²)	lit.
Karpi	6,5	400(1)	0,41	15	1	0,65	0,1	60 $^{\circ}$	M6	stair-case	27	-	(31)
Christensen	4	-	0,43	15	1	0,65	0,1	60 $^{\circ}$	M6	stair-case	20	-	(44-46)
Christensen	9	-	0,43	15	1	0,65	0,1	60 $^{\circ}$	M6	stair-case	27	-	(44-46)
Granjon	5	475(?)	0,43	5-10	0	0,5	0,1	40 $^{\circ}$	10mm	-	-	28	(45)
v.Beurden	5	503(0,1)	0,44	60	2	0,5	0,1	40 $^{\circ}$	8mm	stair-case	31,5	27	-
v.Beurden	10	450(0,1)	0,44	60	2	0,5	0,1	40 $^{\circ}$	8mm	stair-case	38	32,5	-

Tabel 19: Een vergelijking van inplantsterktes, bepaald in lucht, door verschillende onderzoekers.



o-o-o V-naad.
 x-x-x vlakke plaat.

Fig.1: De invloed van de druk op de poreusheid van het lasmetaal. (1)

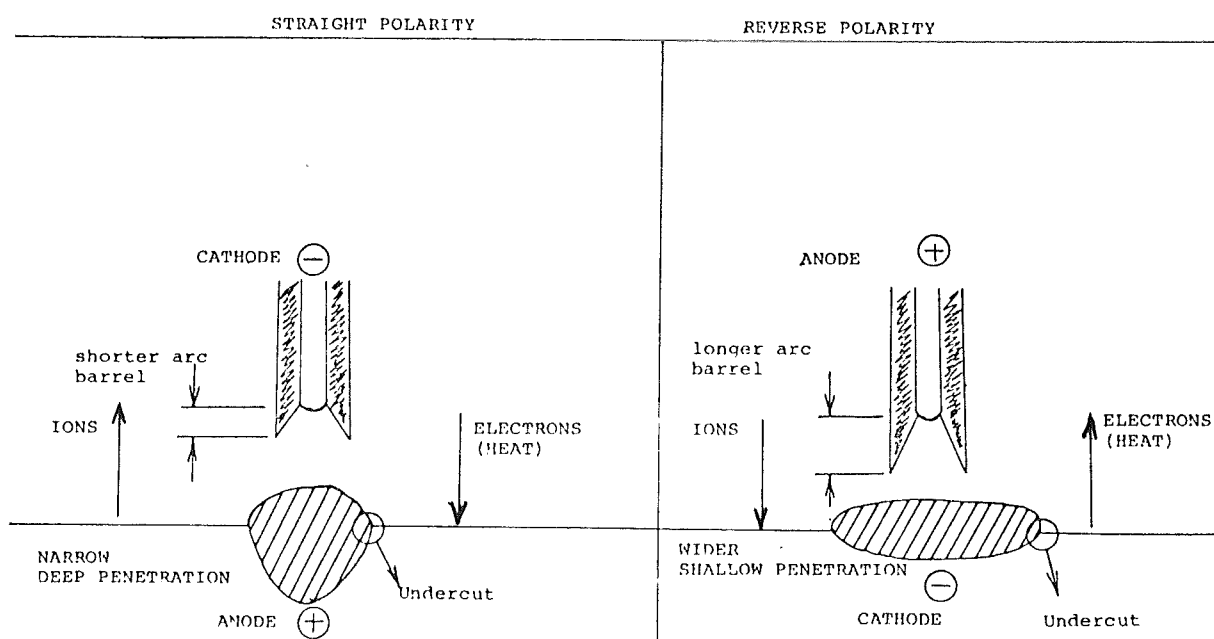


Fig.2: Het effect van de elektrode polariteit op de lasbad-vorm. (26)

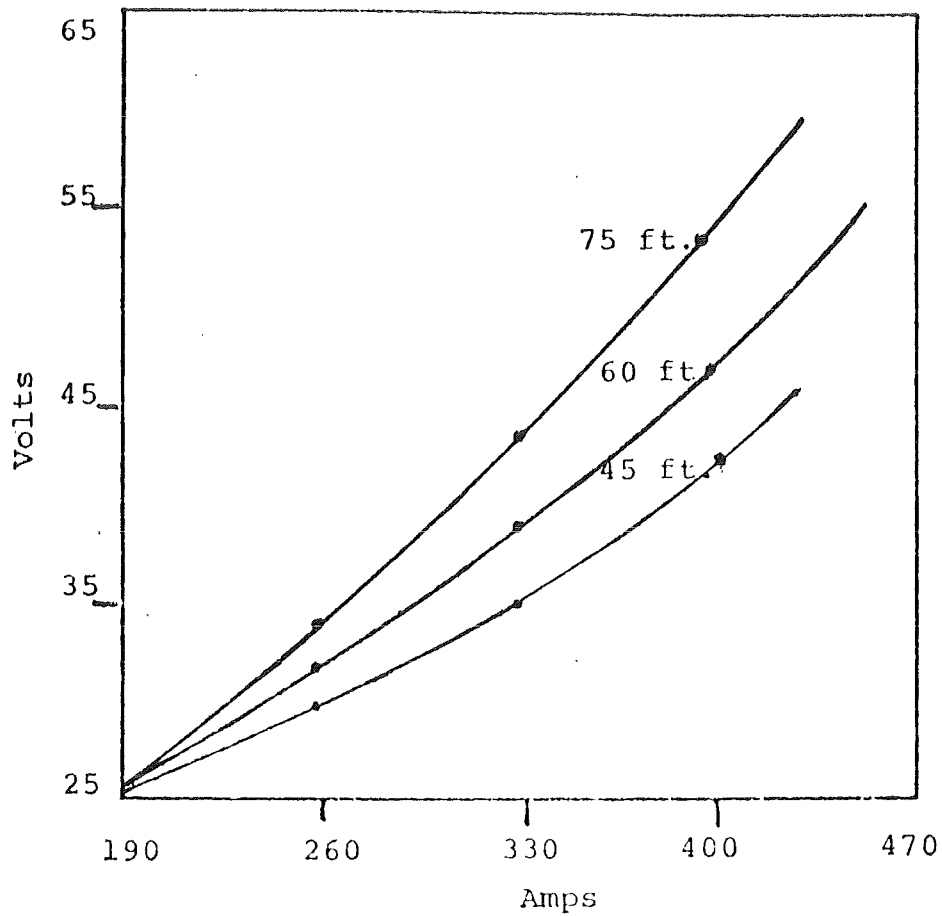


Fig.3: De relatie tussen de stroomsterkte en de boogspanning als gelast wordt met beklede elektrode in afhankelijkheid van de diepte, bij bewegende elektrode

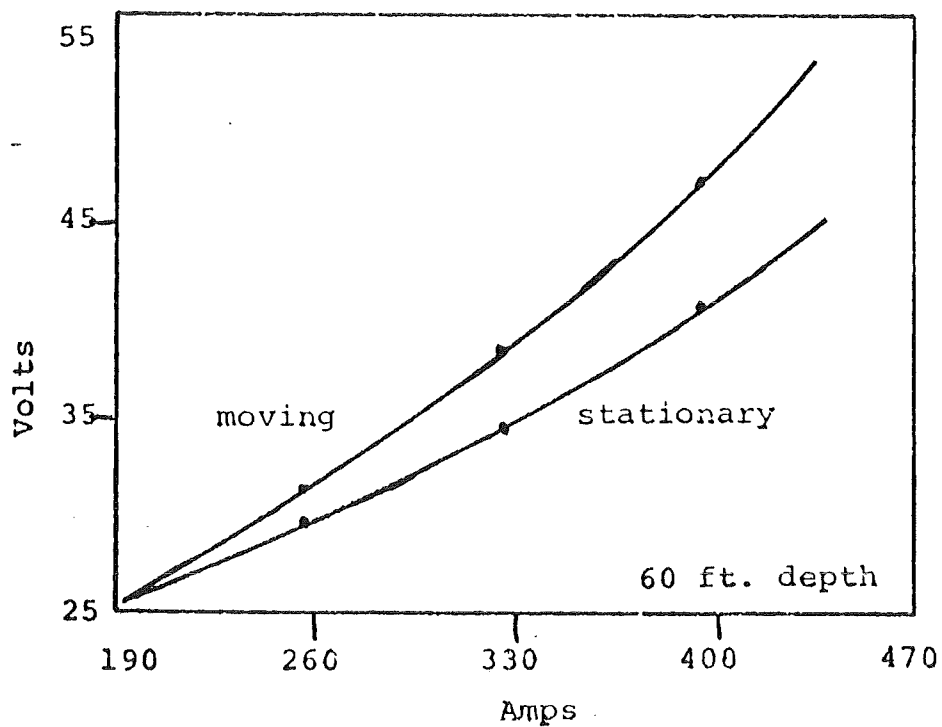


Fig.5: De relatie tussen de stroomsterkte en de boogspanning als gelast wordt met beklede elektrode met bewegende en stilstaande boog.

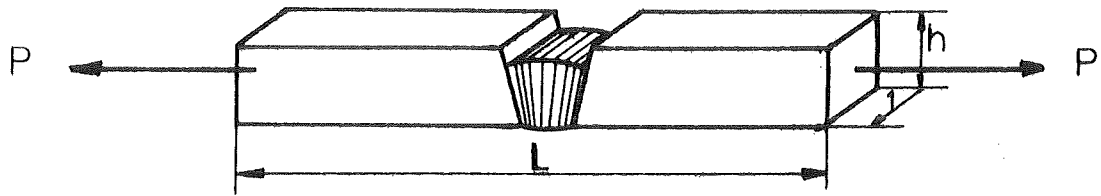


Fig.5: Een stompe las voor de berekening van de "intensity of restraint".

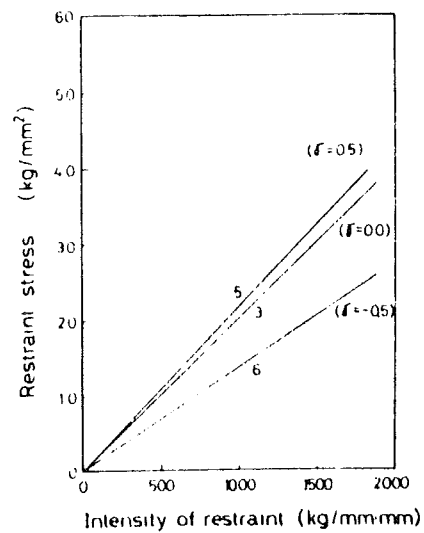
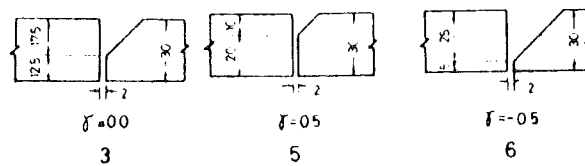


Fig.6: De relatie tussen de "intensity of restraint" en de spanning op het lasmetaal voor verschillende lasnaad vormen. (41)

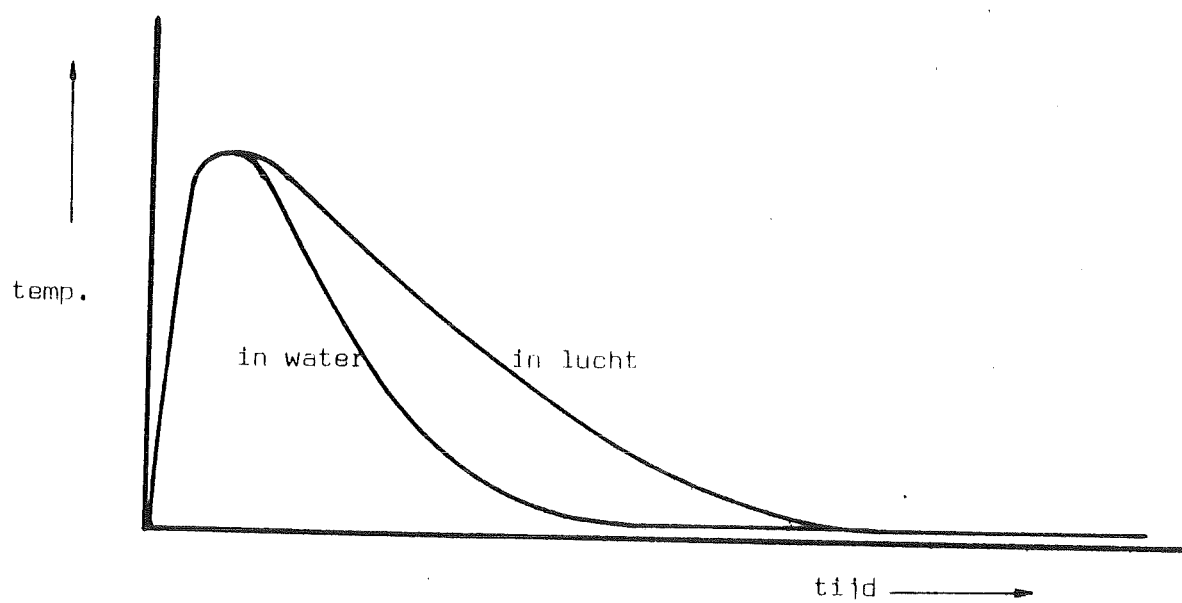


Fig.7: De temperatuurcyclus van de warmte invloeds zone van een in lucht en een in water gemaakte las.

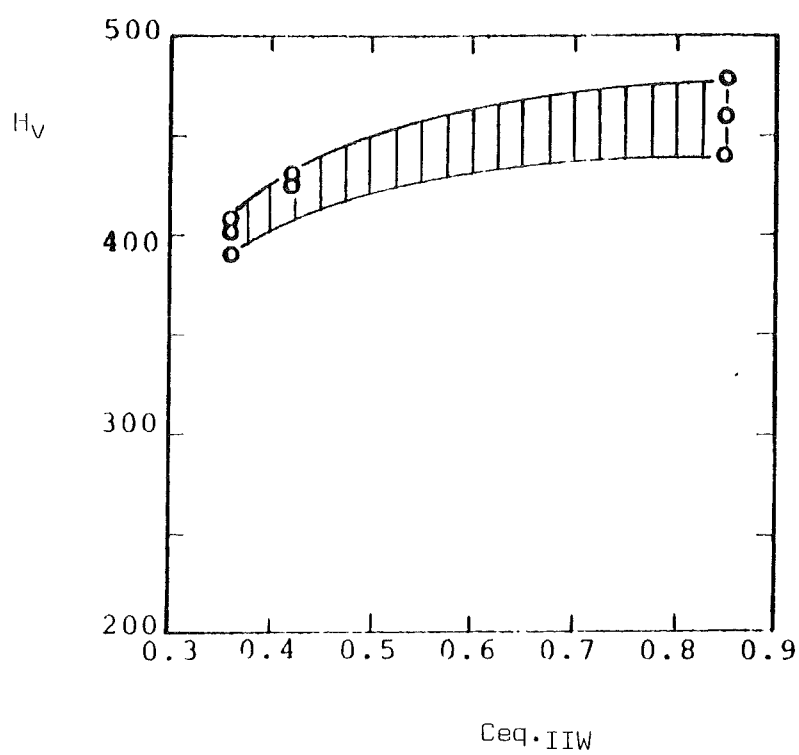


Fig.8: De relatie tussen het koolstofequivalent en de piekhardheid in de warmte invloeds zone van onder water gemaakte lassen.(10)

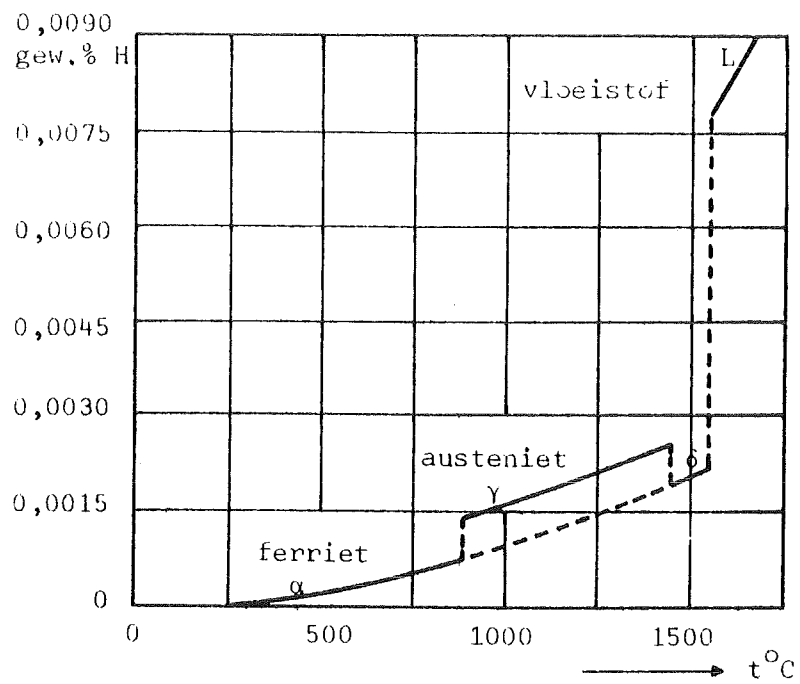


Fig.9: oplosbaarheid van waterstof in ijzer.

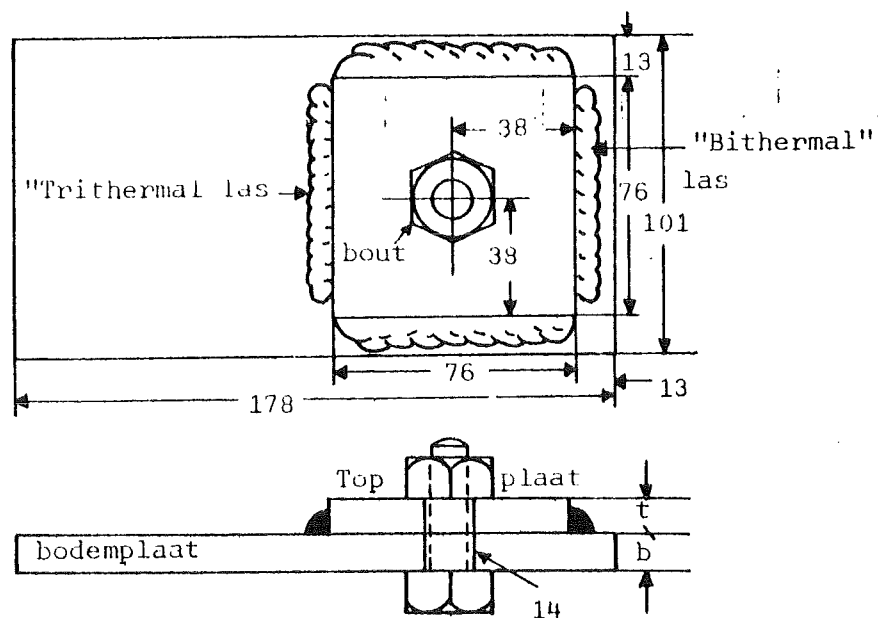


Fig.10: Het CTS-proefstuk.

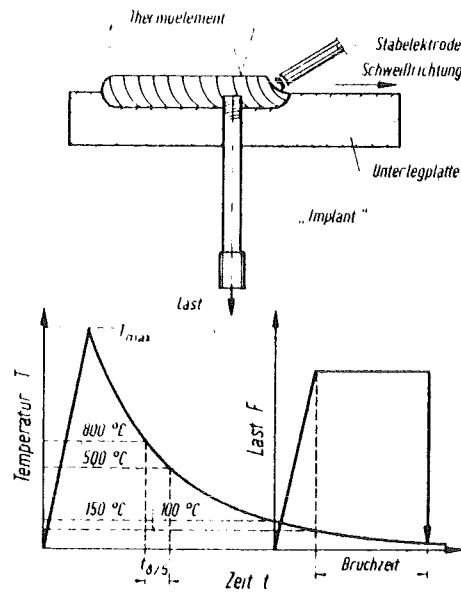


Fig.11: Het principe van de implant-proef.

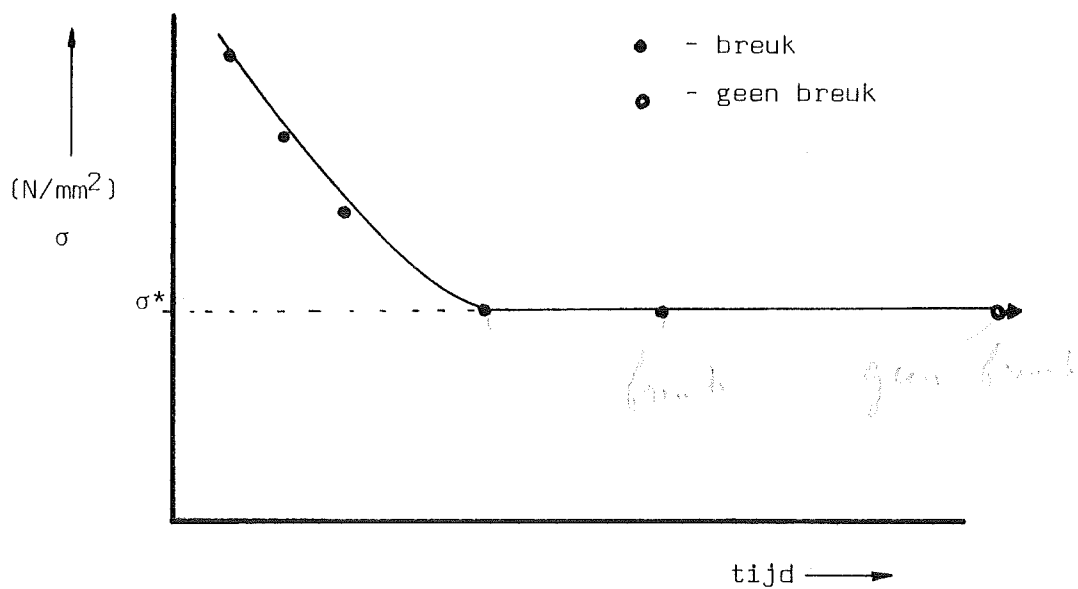


Fig.12: De invloed van de spanning op de vertraagde scheurgroei.

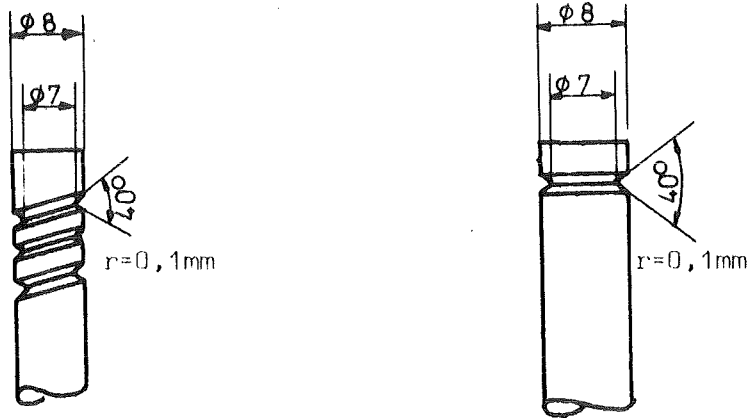


Fig.13: Twee typen groefvormen in de inplantstaaf.

Nom. spanning (N/mm ²)	i	n _i	i.n _i	i ² .n _i
349	2	2	4	8
327	1	2	2	2
305	0	1	0	0
$\sigma_0=305; \Delta\sigma=22$		N=5	A=6	B=10

$$\sigma_{50/50} = \sigma + \Delta\sigma \left(\frac{A}{N} + \frac{1}{2} \right) = 305 + 22 \left(\left(\frac{6}{5} \right) + \frac{1}{2} \right) = 342 \text{ (N/mm}^2\text{)}.$$

$$s = 1.62 \cdot \Delta\sigma \cdot \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) = 1.62 \cdot 22 \cdot \left(\frac{5 \cdot 10 - 36}{25} + 0.029 \right) = 21 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

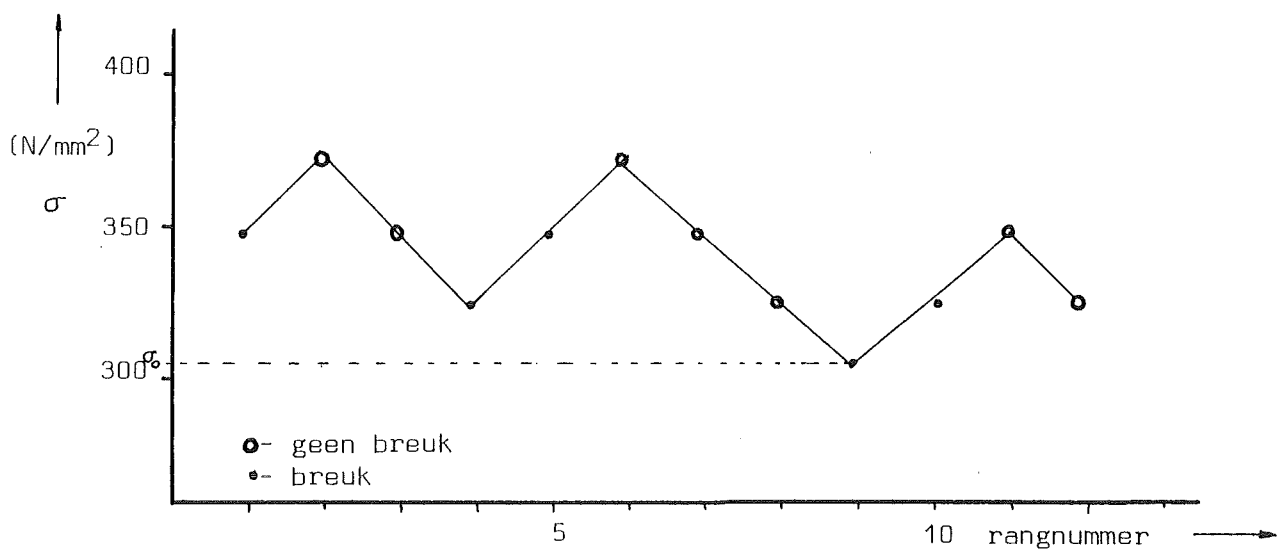
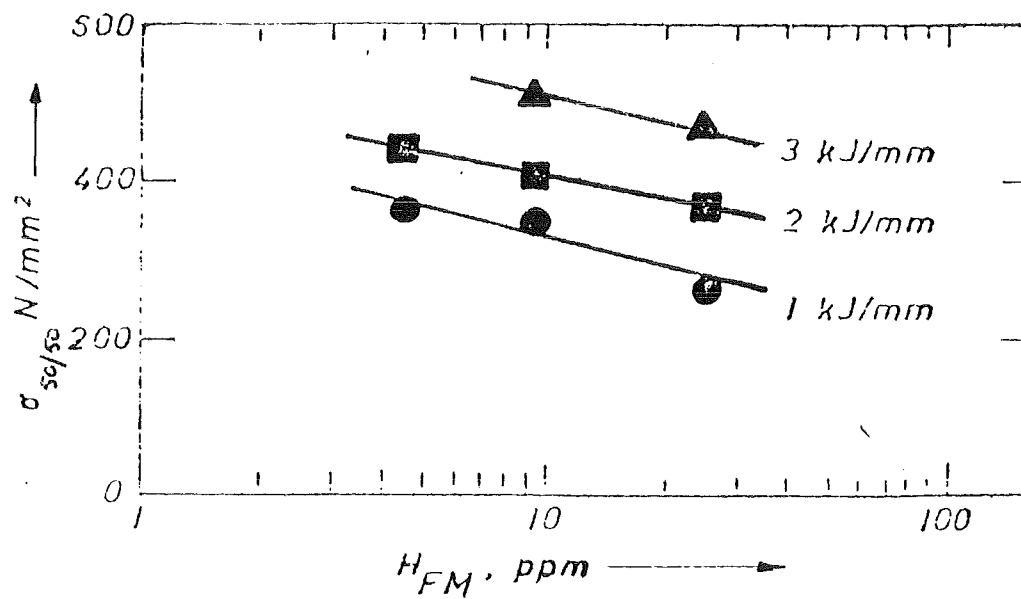
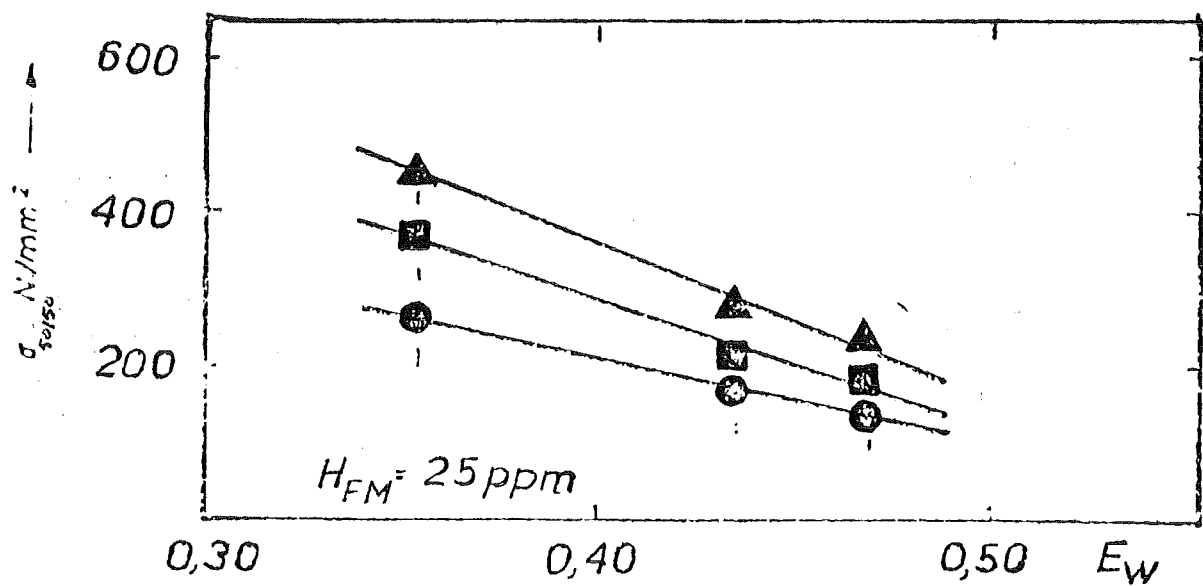


Fig.14: Het bepalen van de kritische inplantbreuksterkte m.b.v. de "staircase methode".



Groefvorm : M6.
 Mat.analyse: 0.089C, 0.31Si, 1.52Mn, 0.012P, 0.007Si, 0.035Al.
 Plaatdikte : 25mm
 Ceq_{IIW} : 0.353
 Methode : Stair-case.

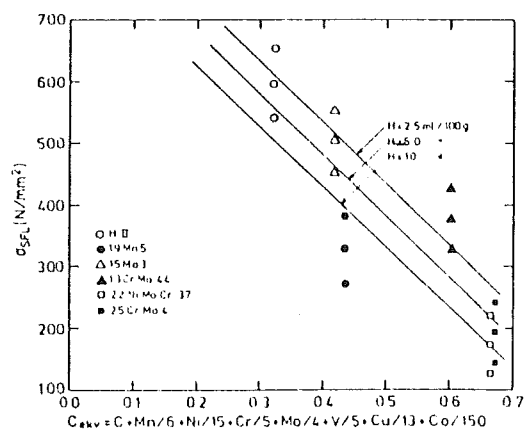
Fig.15: De relatie tussen de inplantsterkte en het waterstofgehalte in afhankelijkheid van de warmte inbreng.(44)



Groefvorm : M6
 Plaatdikte : 25mm
 Methode : Stair-case

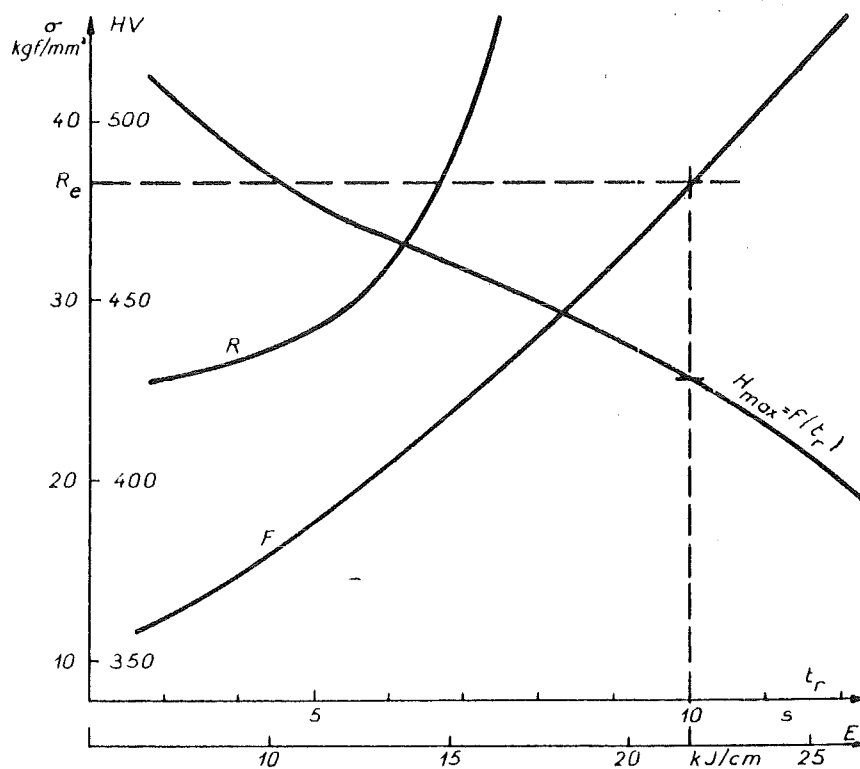
- - 1 MJ/m
- - 2 MJ/m
- ▲ - 3 MJ/m

Fig.16: Het effect van de staalsoort op de inplantsterkte.(44)



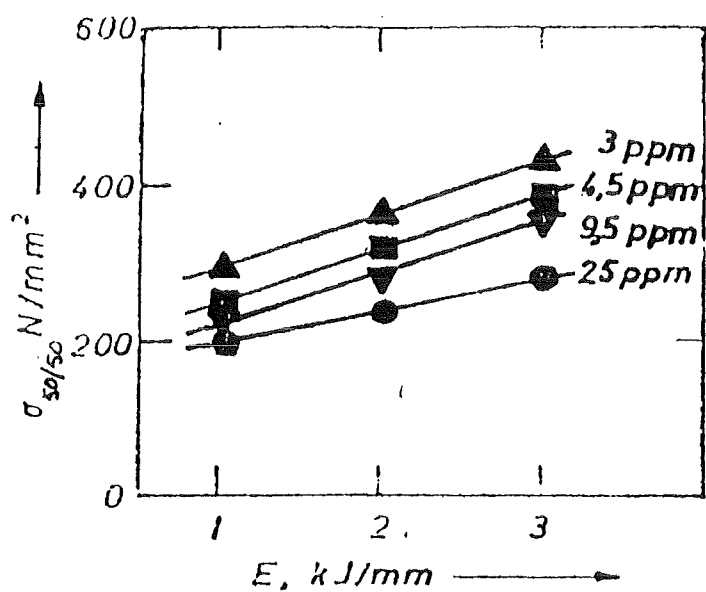
Groefvorm : M6
 Warmte inbreng : 1,4MJ/m
 Plaatdikte : 25mm
 H₂-gehalte : Basische elektrode
 Methode : Stair-case

Fig.17: De relatie tussen de implantsterkte en het koolstof-equivalent.(31)



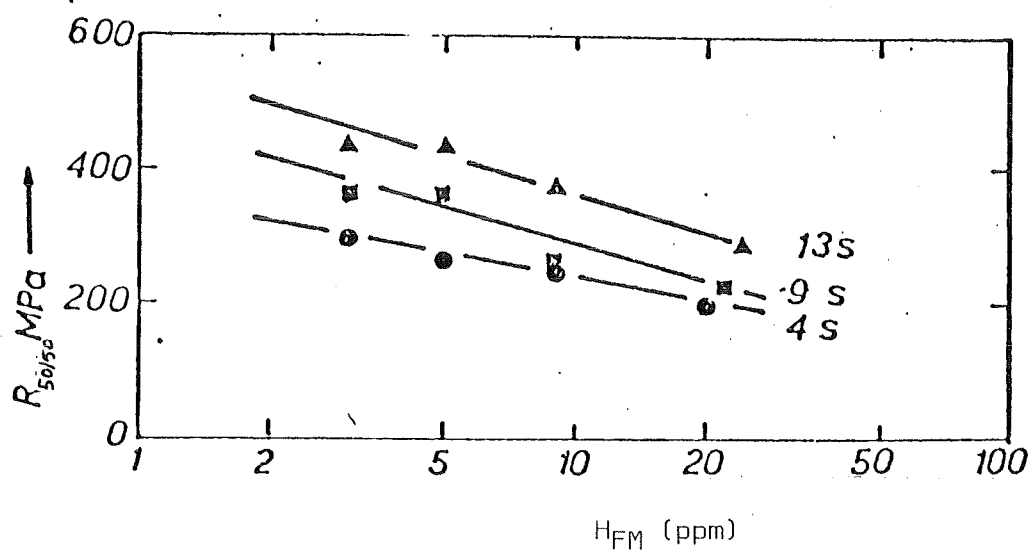
Groefvorm : diepte 0,5mm; $r=0,1\text{mm}$; openingshoek 40°
 Diameter : 10mm
 Mat.analyse: 0,20C; 1,37Mn; 0,35Si.
 Elektrode : Basisch gedroogd.
 Ceq_{IIW} : 0,43
 Methode : Geen stair -case.

Fig.18: De relatie tussen de inplantsterkte en de hardheid met de afkoeltijd.(45)



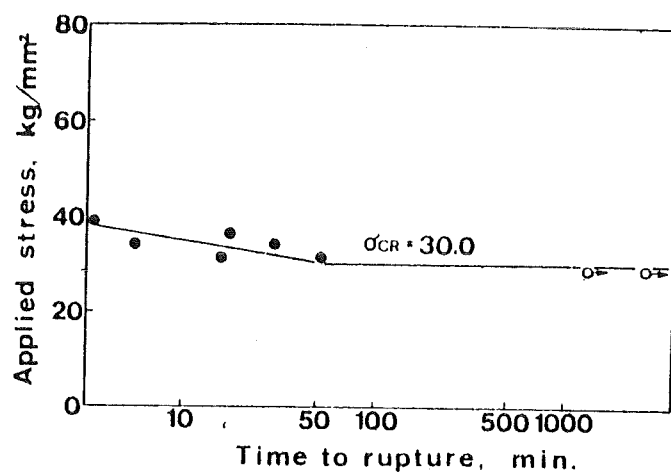
Mat. analyse: 0,18C;0,32Si;1,36Mn;0,03P;0,02S;0,08Cr;0,024Al;0,04Ni.
 Ce_{qIIW} : 0,43
 Plaatdikte : 25mm
 Groefvorm : M6
 Methode : stair-case

Fig .19: De relatie tussen de inplantsterkte en de warmte inbreng
 in afhankelijkheid van het waterstofgehalte.(44)



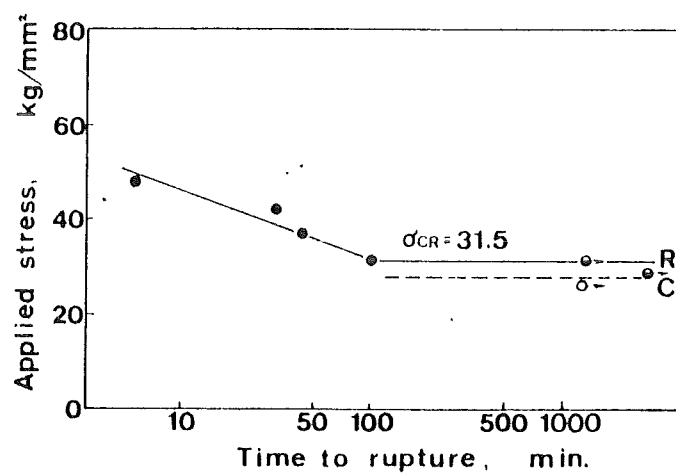
Groefvorm : M6
 Mat.analyse: 0,18C;0,32Si;1,36Mn;0,03P;0,02S;0,08Cr;0,024Al;0,04Ni.
 $C_{eq_{IIW}}$: 0,43
 Plaatdikte : 25mm
 Methode : stair-case.

Fig.20: De relatie tussen de inplantsterkte en het waterstofgehalte in afhankelijkheid van de afkoeltijd.(46)



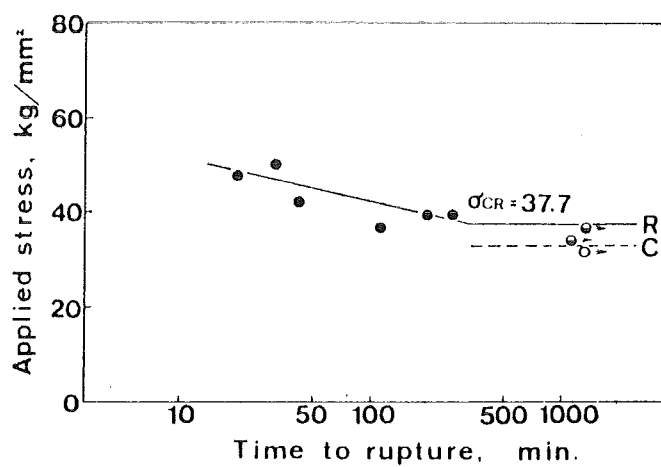
Groefvorm : diepte=0,5mm; openingshoek=40°; r=0,1mm
 Diameter : 8mm
 Mat.analyse : 0,16C; 0,35Si; 1,36Mn; 0,04P; 0,011S
 Ceq_{IIW} : 0,40
 H₂-gehalte : 5,8 ml/100g metaal
 Plaatdikte : 25mm
 Warmte inbreng : 1,7 MJ/m

Fig.21: De relatie tussen de spanning en de tijd tot breuk.(47)



Groef : diepte=0,5mm; r=0,1mm; openingshoek=40°
 Diameter : 8mm
 Mat.analyse : 0,1C; 0,33Si; 1,22Mn; 0,012P; 0,005S; 0,18Mo;
 0,15Cr; 0,11Cu
 $C_{eq_{IIW}}$: 0,34
 Plaatdikte : 25mm
 Warmte inbreng : 1,7MJ/m

Fig.22:De relatie tussen de spanning en de tijd tot breuk.(47)



Groefvorm : diepte=0,5mm; r=0,1mm; openingshoek=40°
 Diameter : 8mm
 Mat.analyse : 0,1C; 0,2Si; 0,73Mn; 0,014P; 0,015S;
 Ceq_{IIW} : 0,23
 Plaatdikte : 25mm
 Warmte inbreng : 1,7MJ/m
 H₂-gehalte : 5,8ml/100g metaal

Fig.23: De relatie tussen de spanning en de tijd tot breuk.(47)

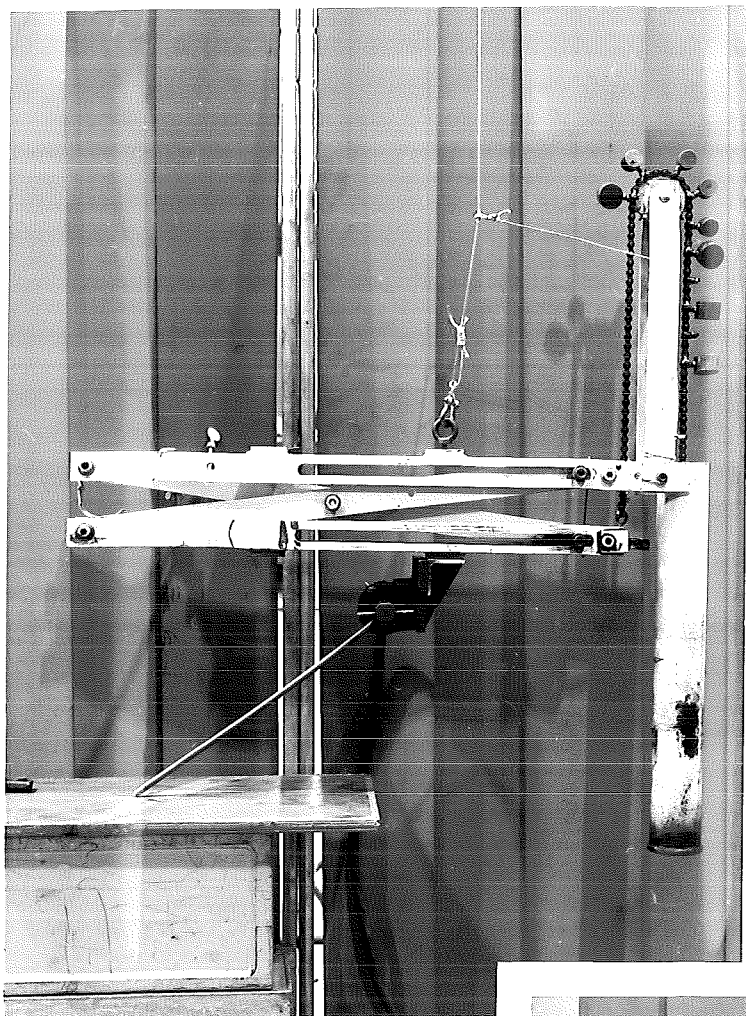
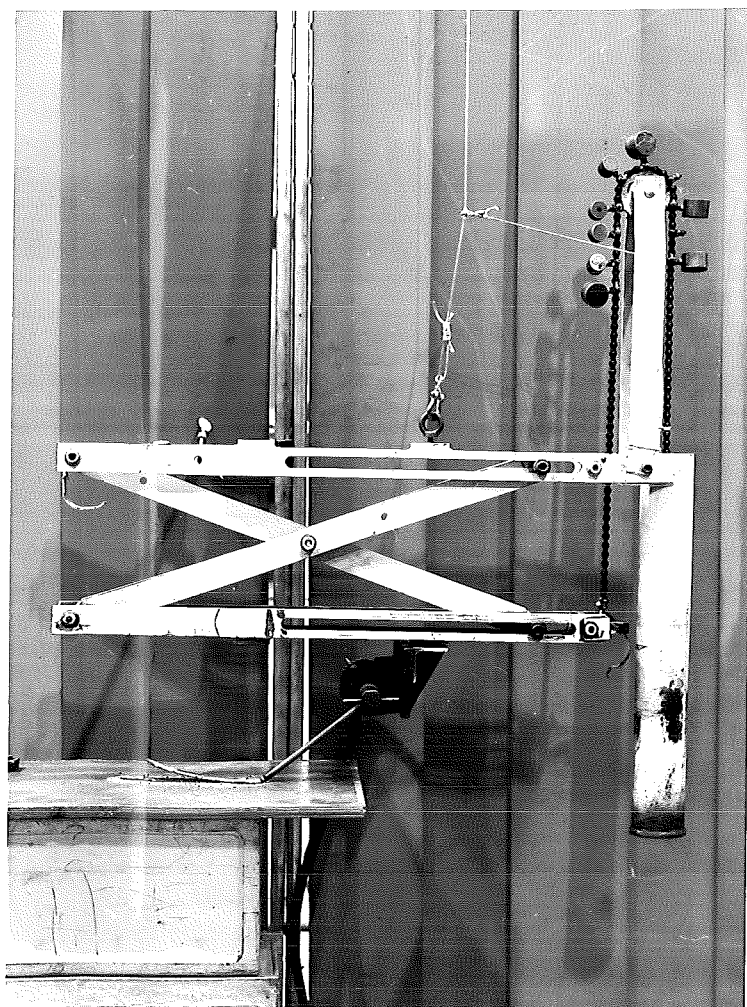


Fig.24: Het zwaartekracht-
lasapparaat in twee stand-
den



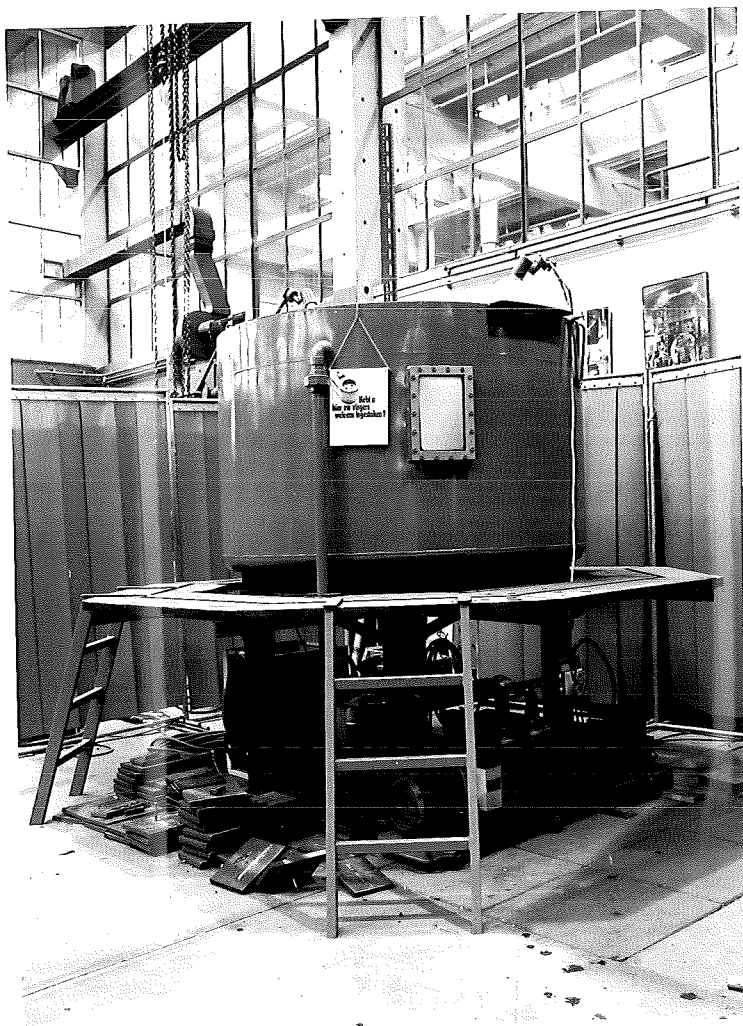


Fig. 25: Het waterreservoir waarin het onderzoek is uitgevoerd.

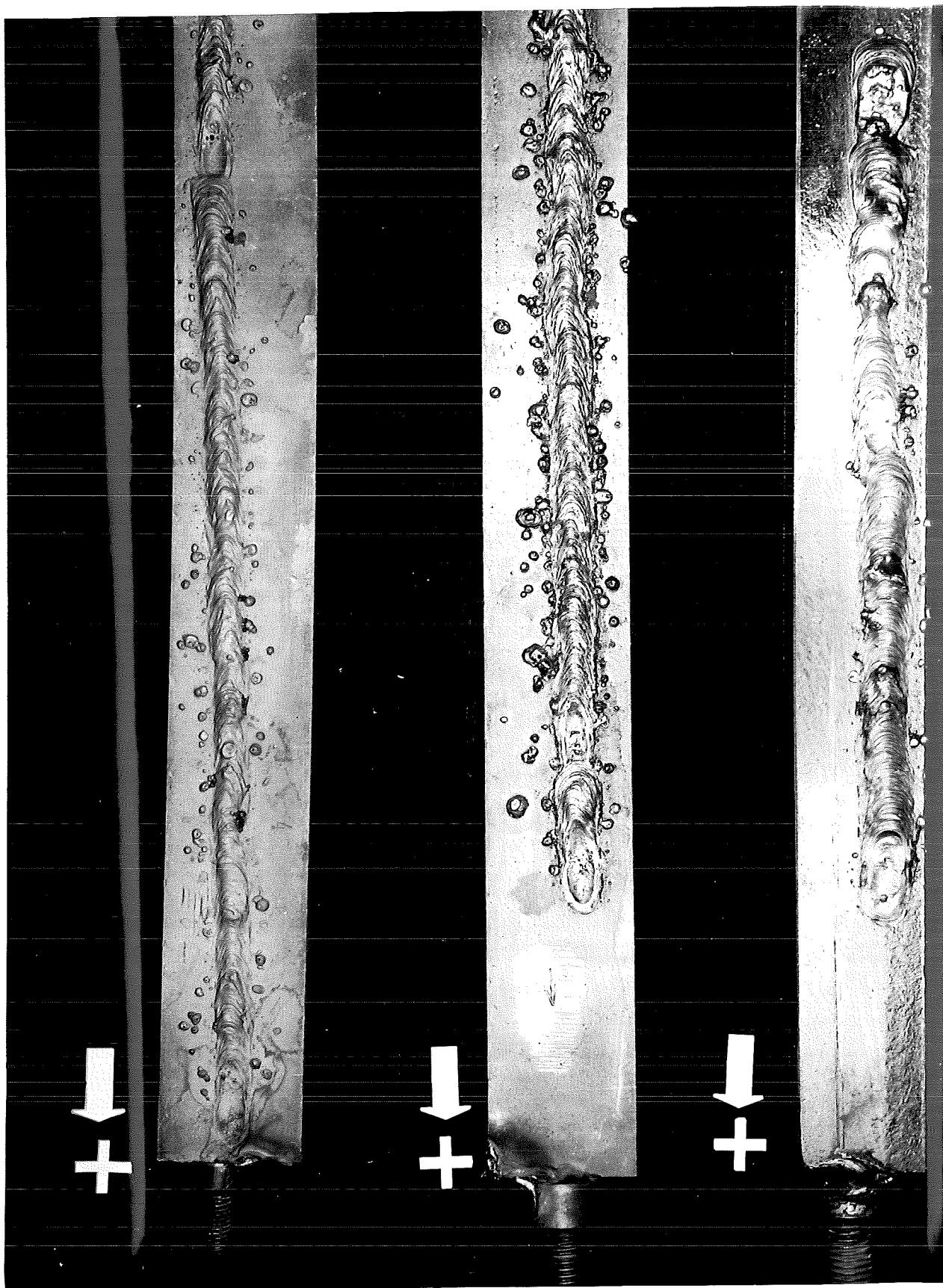


Fig.26: Het lasuiterlijk wanneer naar de aansluitklem toe wordt gelast. (+is de positie van de aansluitklem)



Fig.27: Het lasuiterlijk wanneer van de aansluitklem af wordt gelast. (+ is de positie van de aansluitklem.)

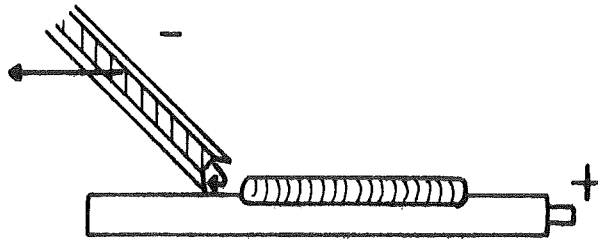


Fig.28: De blaaswerking wanneer van de aansluitklem wordt afgelast.

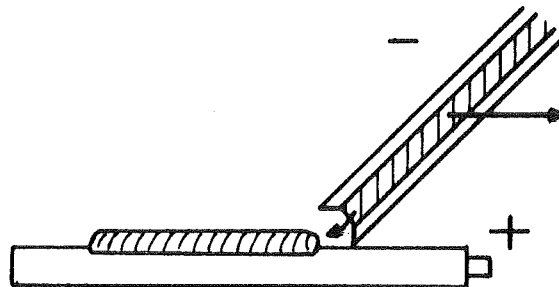


Fig.29: De blaaswerking wanneer naar de aansluitklem toe wordt gelast.



Fig.30: De afstand van het koppel tot het plaatoppervlak.

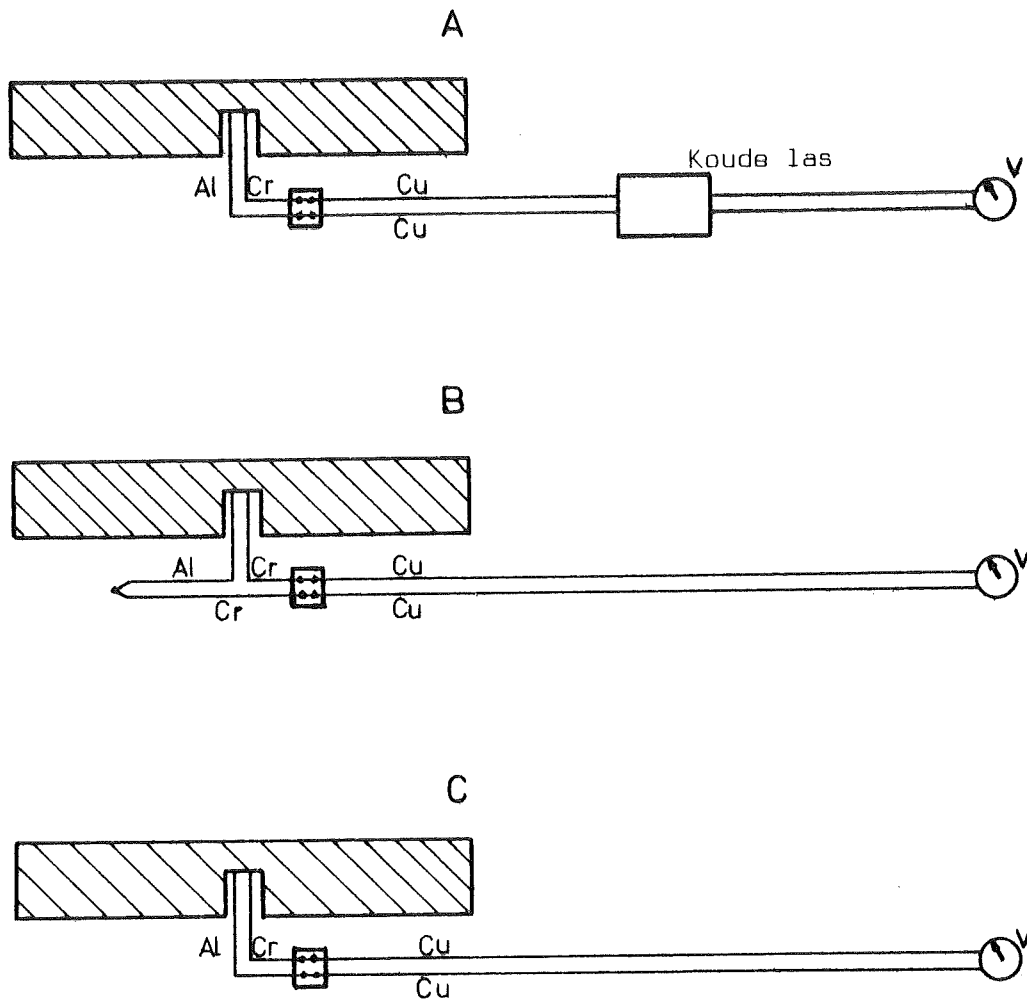


Fig.31: Drie schakelingen waarmee de temperatuurscyclus in de warmte invloeds zone gemeten kan worden.

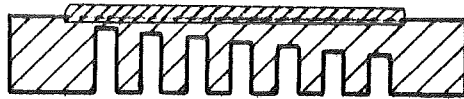


Fig. 32: De plaat die gebruikt is voor de bepaling van de relatie tussen de piektemperatuur en de afkoelsnelheid.

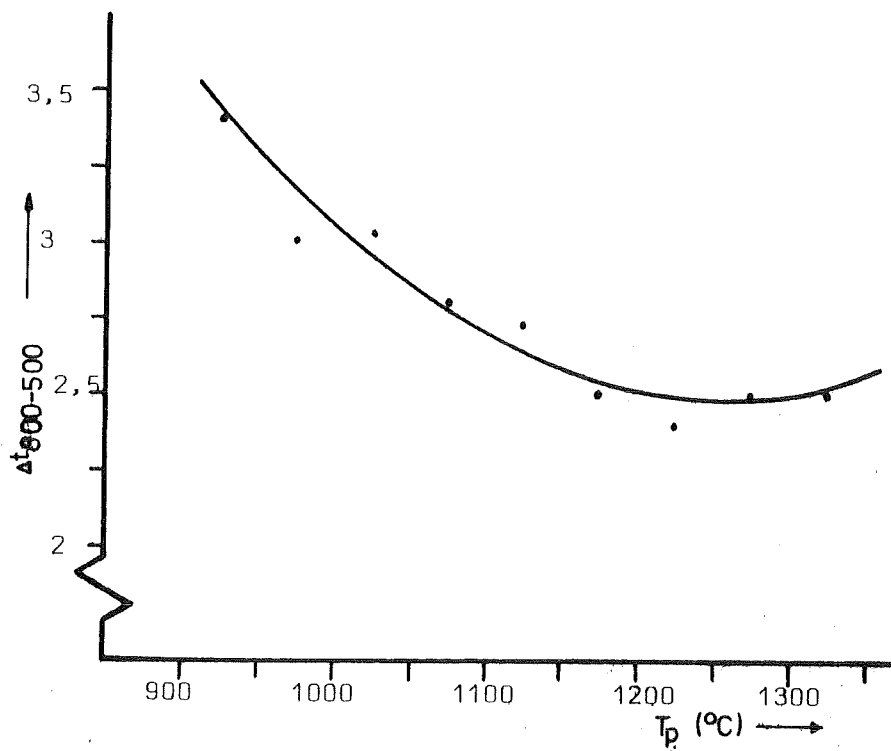


Fig. 33: De relatie tussen de afkoeltijd ($800^{\circ}-500^{\circ}$) en de piektemperatuur ($^{\circ}\text{C}$).

H₂ ↑

Fig.34: Het verloop van de waterstofuitscheiding gedurende 14 dagen, onder gereduceerde druk.

(ml/100g)

40
35
30
25
20
15
10
5
0

(ml/100g)

(ml/100g)

40
35
H₂ ↑
30

1 2 3 4 5 7 10 14 (dagen) →

(min.) →

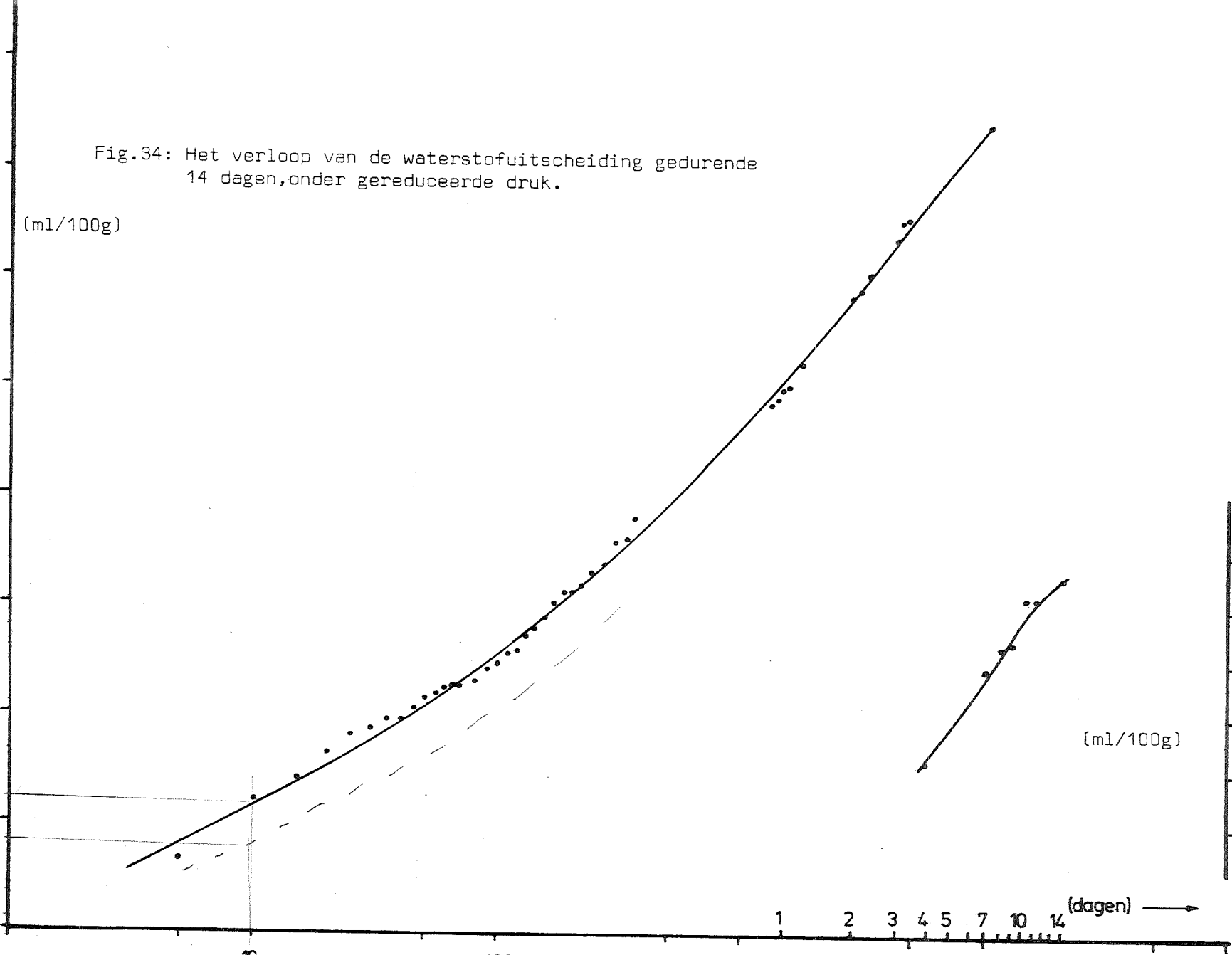
10

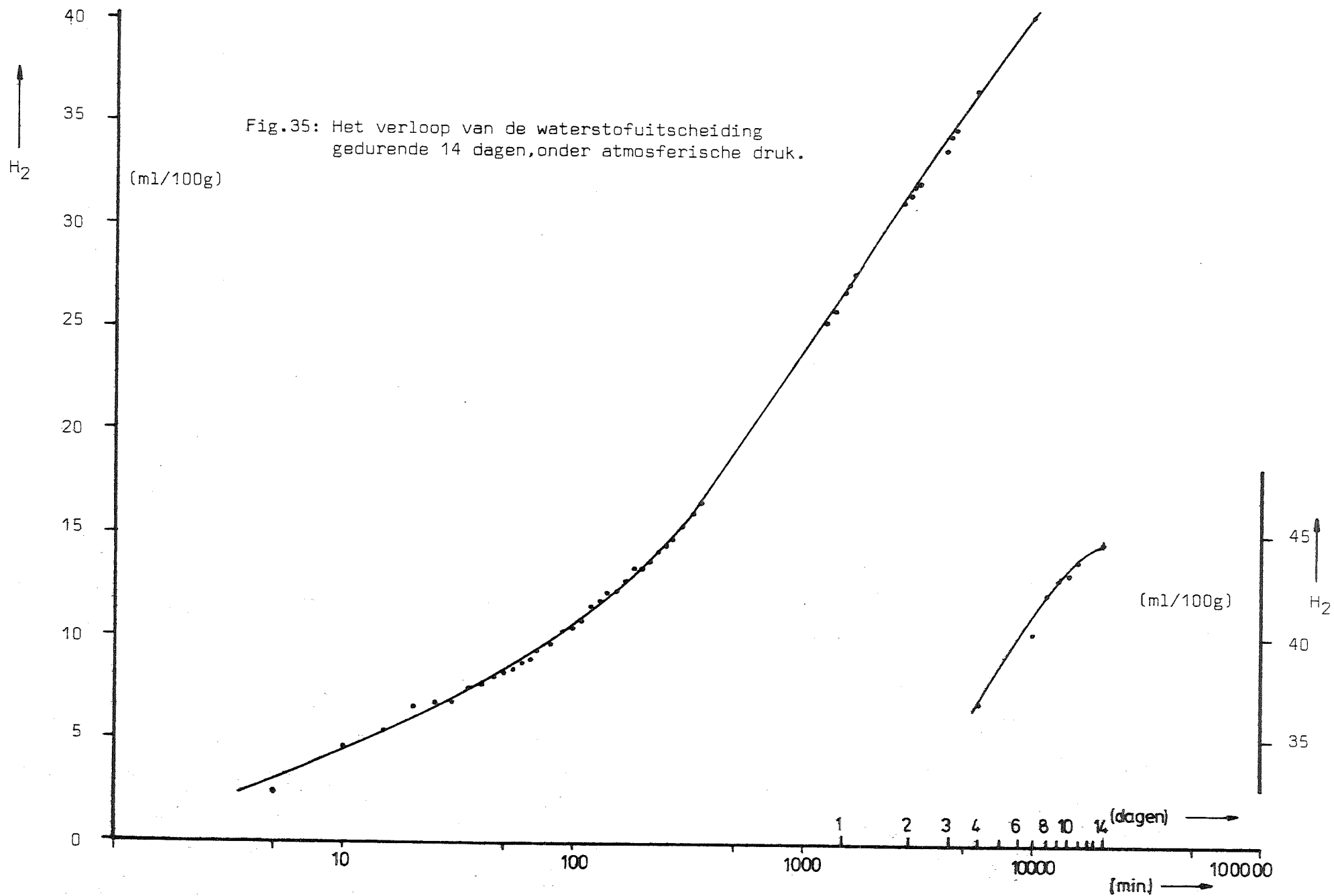
100

1000

10000

100000





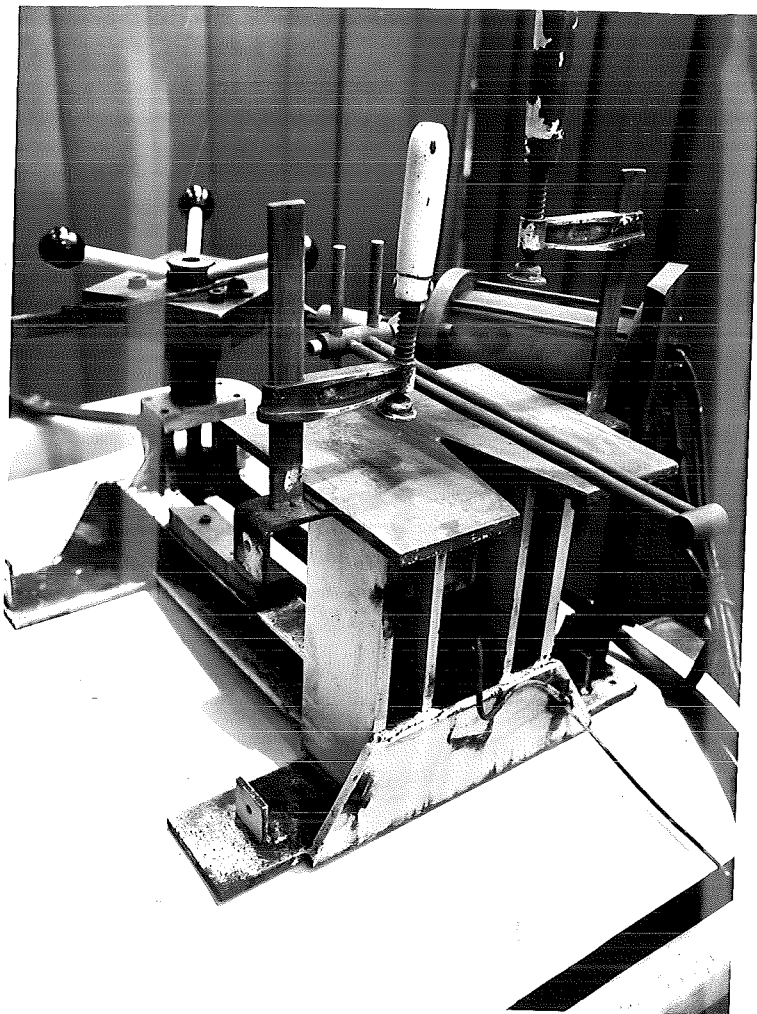


Fig.36: De implantbeproevingbank.

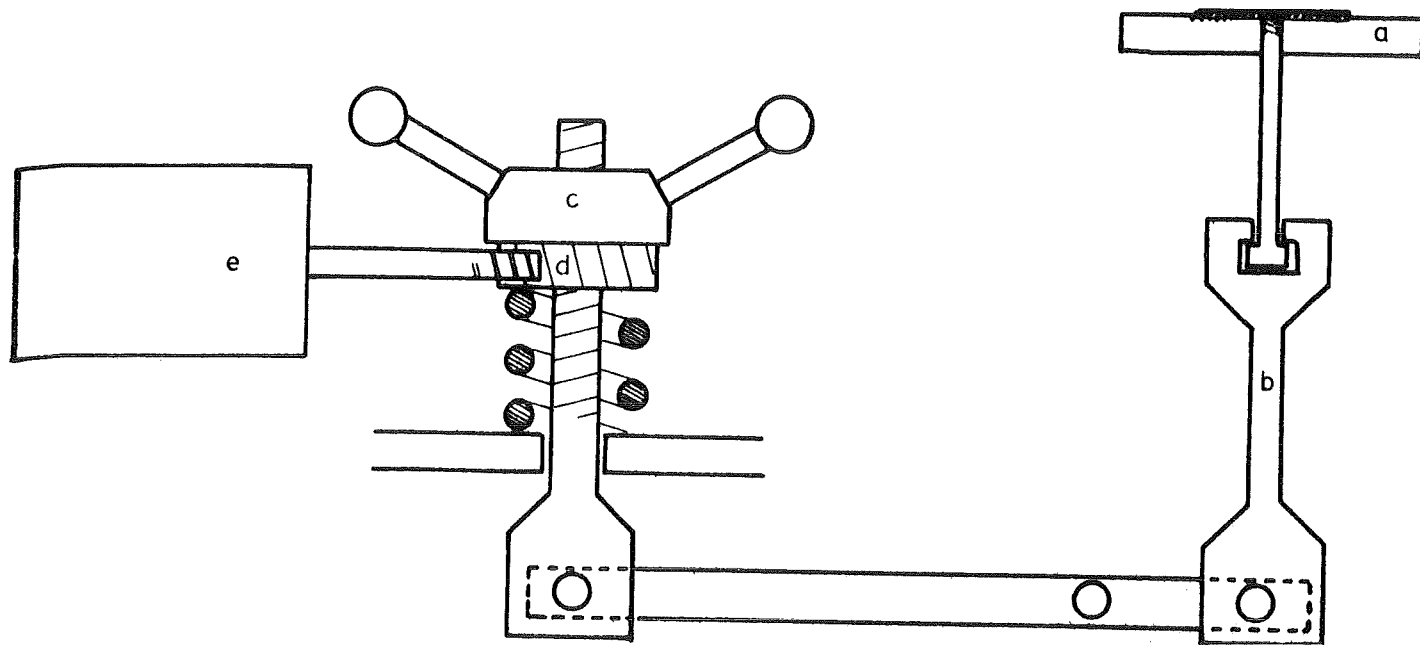
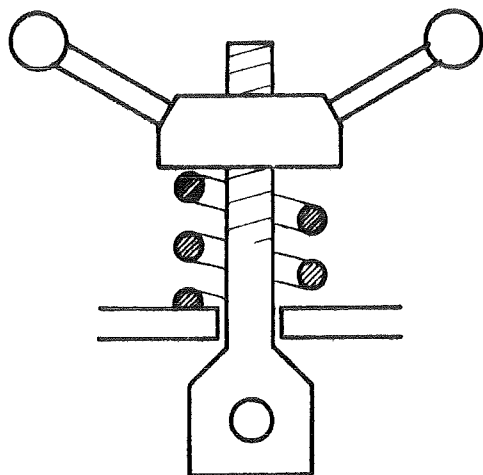
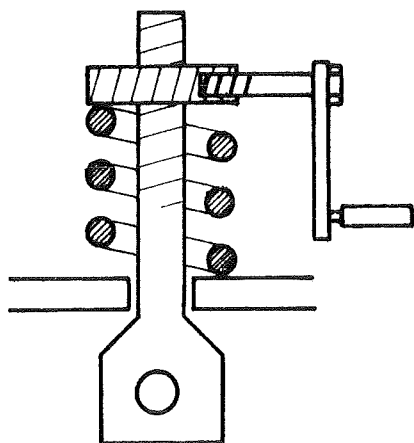
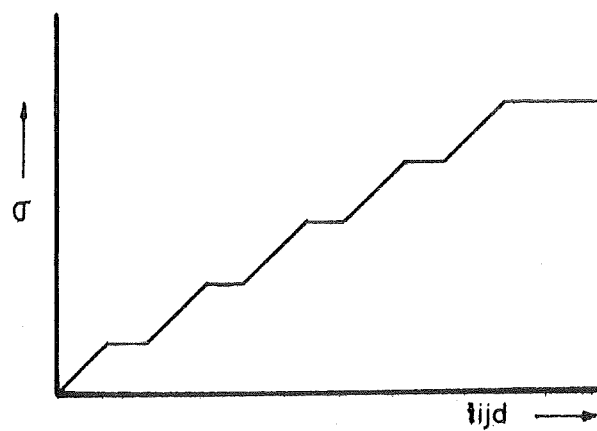


Fig.37: Het principe van de implantbeproevingbank.

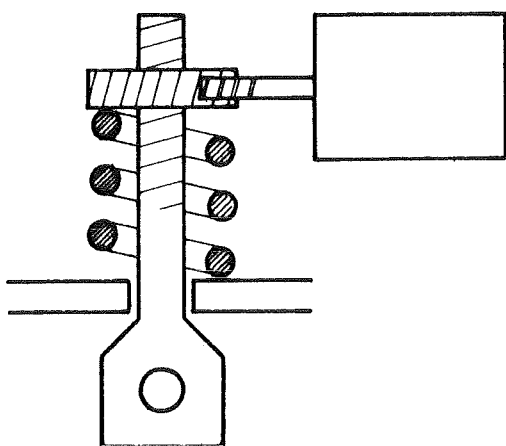
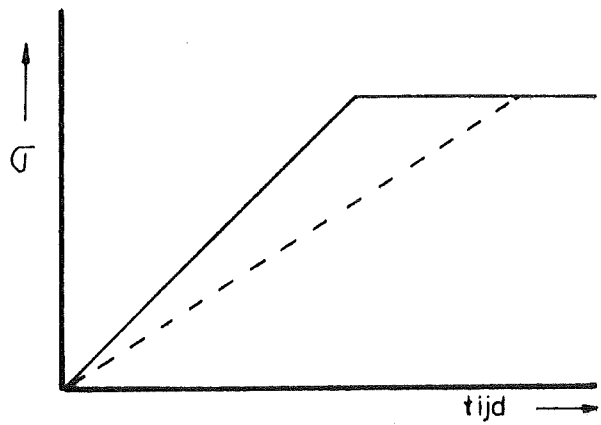
- a moederplaat+inplantstaaf.
- b ijkstaaf
- c handwiel
- d wormwiel
- e aandrijfmotor



A



B



C

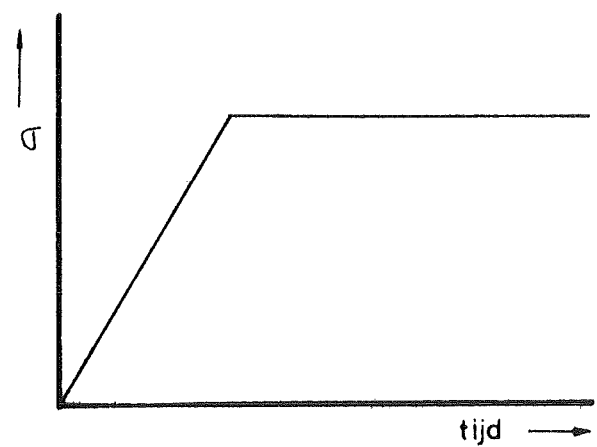


Fig.38: Drie manieren voor het aanbrengen van de spanning op de inplantstaaf.

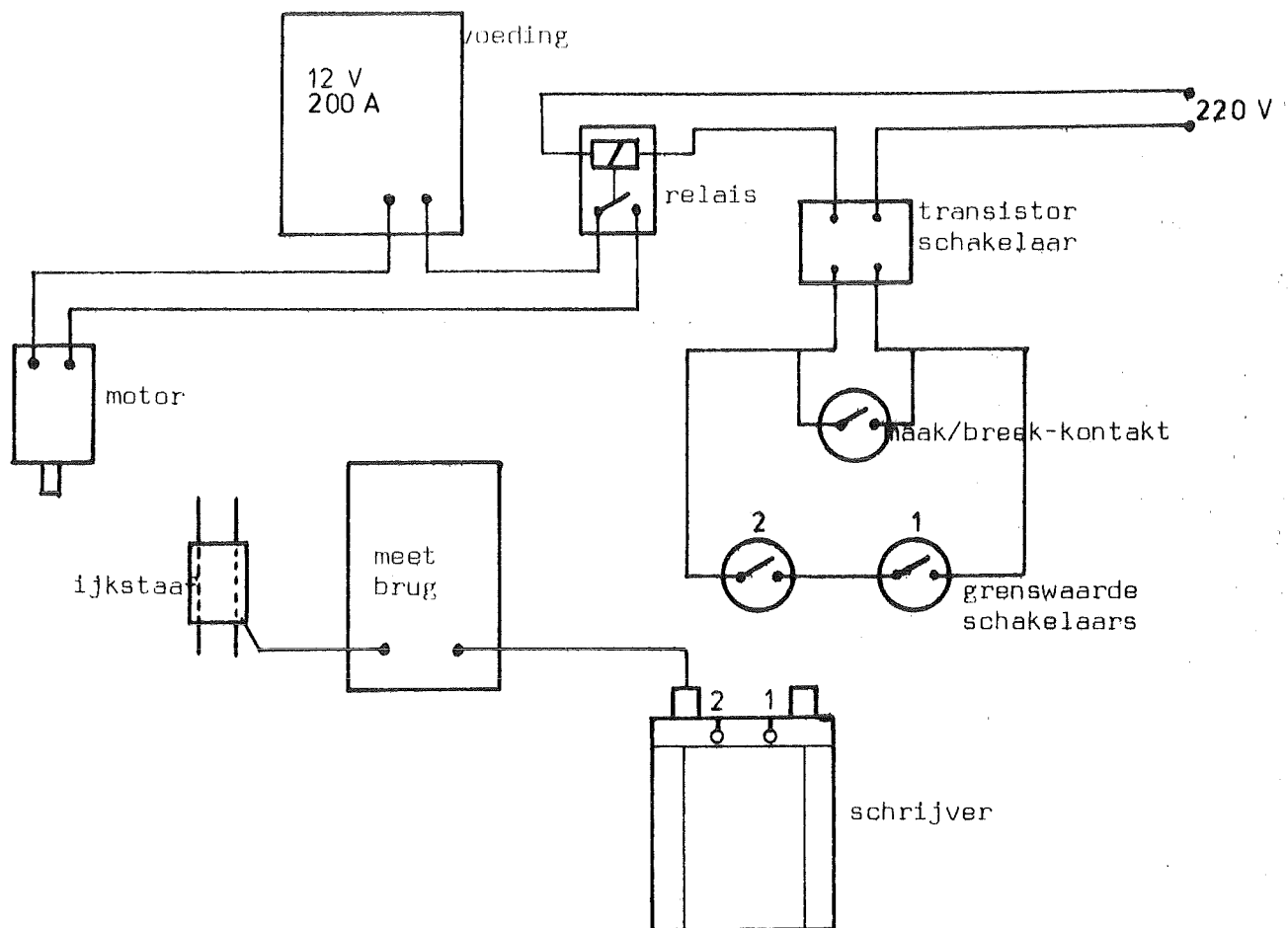


Fig.39: Blokschema van de schakeling.

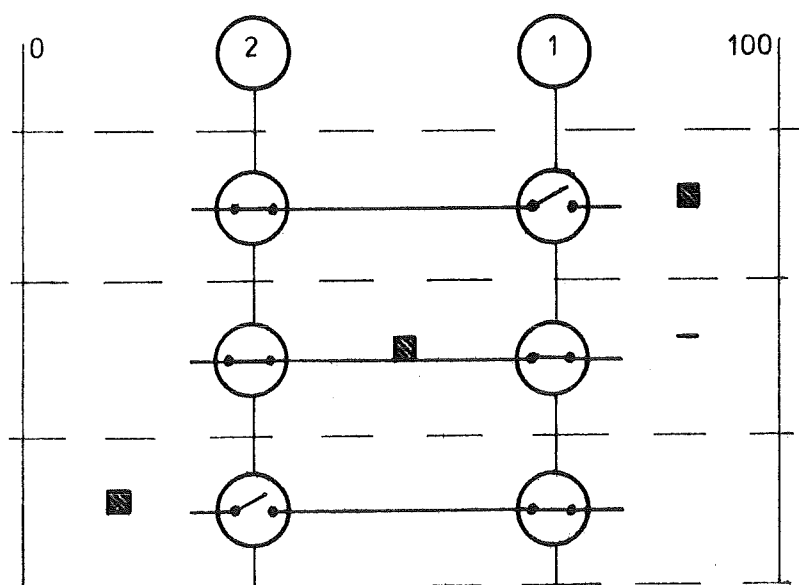


Fig.40: De stand van de grenswaardeschakelaars bij verschillende waarden van de looper.

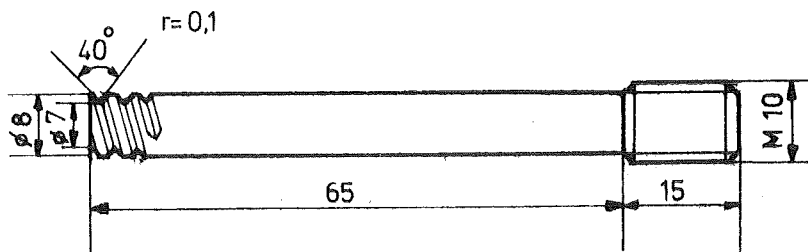


Fig.41: De implantstaaf.

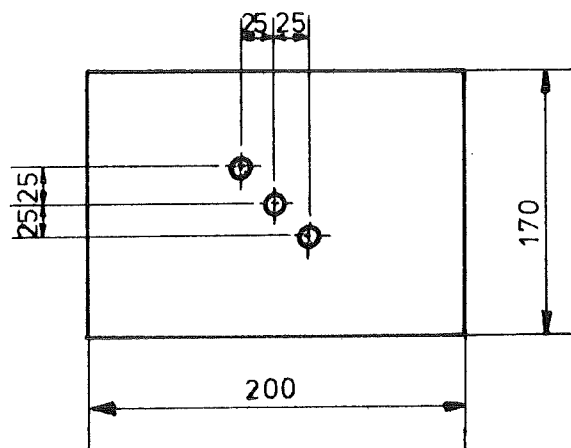


Fig.42: De moederplaat.

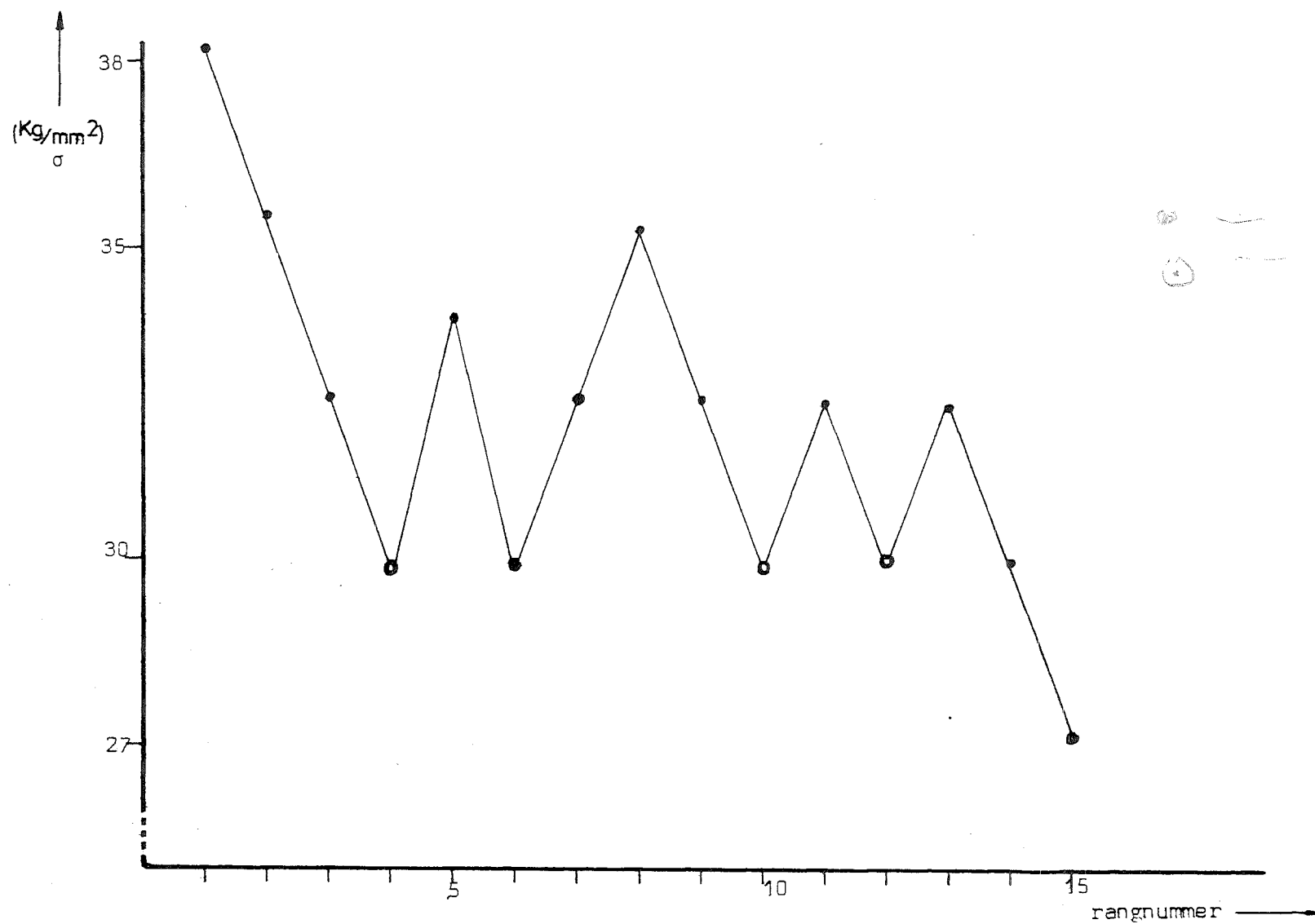


Fig.43: De meetpunten gebruikt bij de bepaling van de inplant-
breuksterkte van St 52 gelast met elektrode b in lucht. (serie 1 tabel 18)

1
B

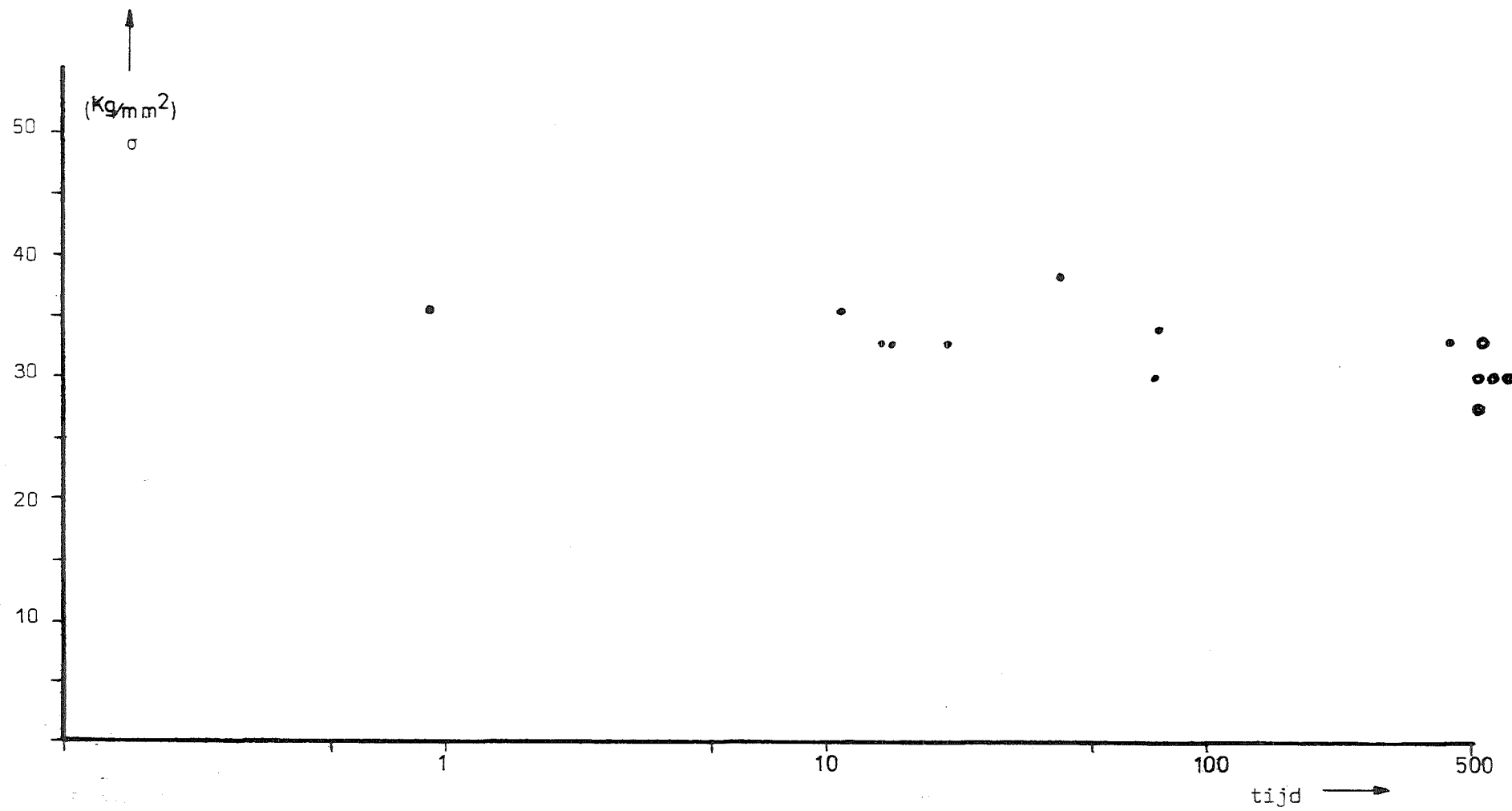


Fig.44: de relatie tussen de inplantbreuksterkte en de tijd tot breuk van St52 gelast met elektrode B in lucht (serie 1 tabel 18).

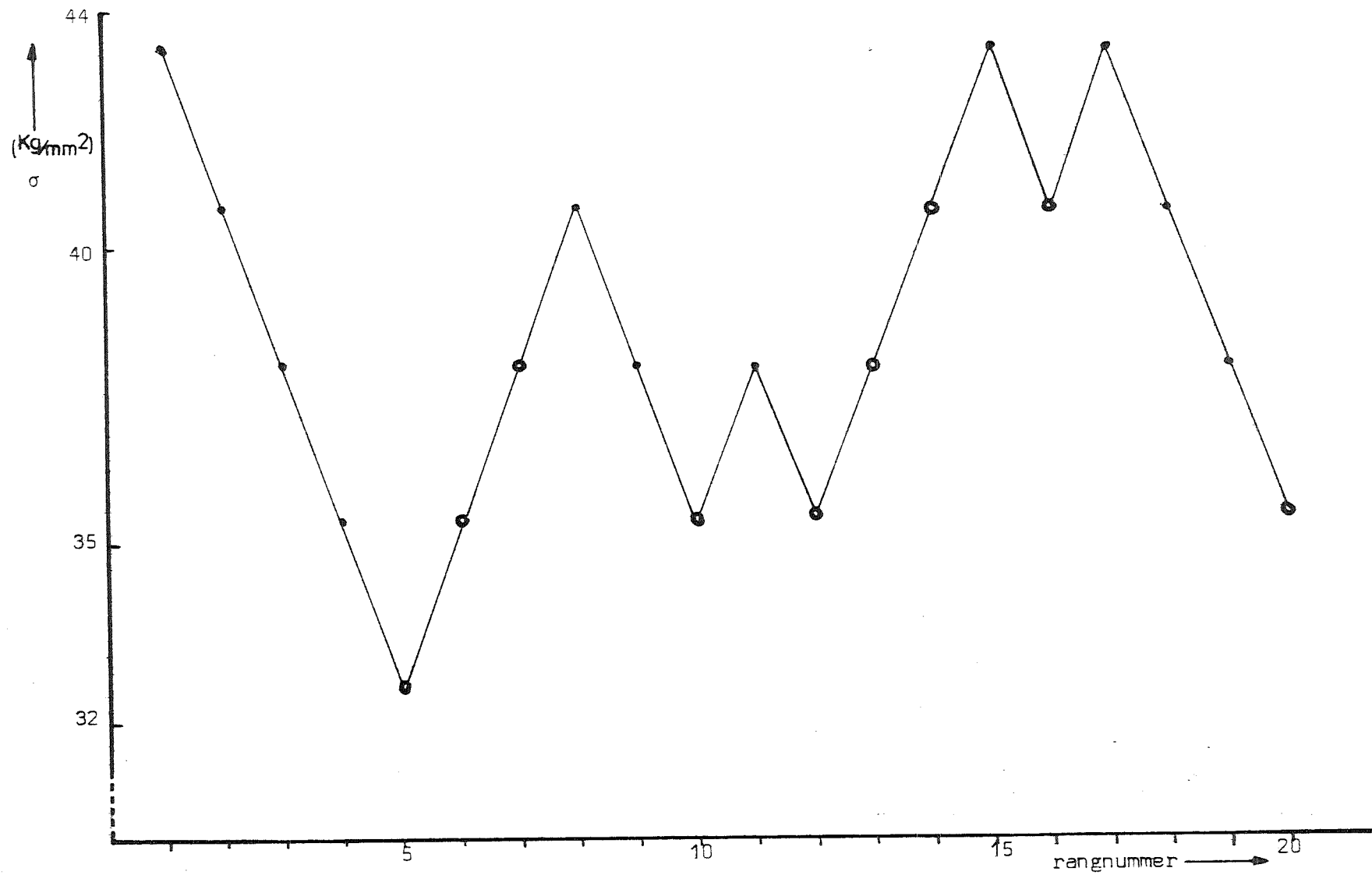


Fig.45: De meetpunten gebruikt bij de bepaling van de inplantbreuksterkte van St52 gelast met elektrode B in lucht. (Tabel 18 serie 2)

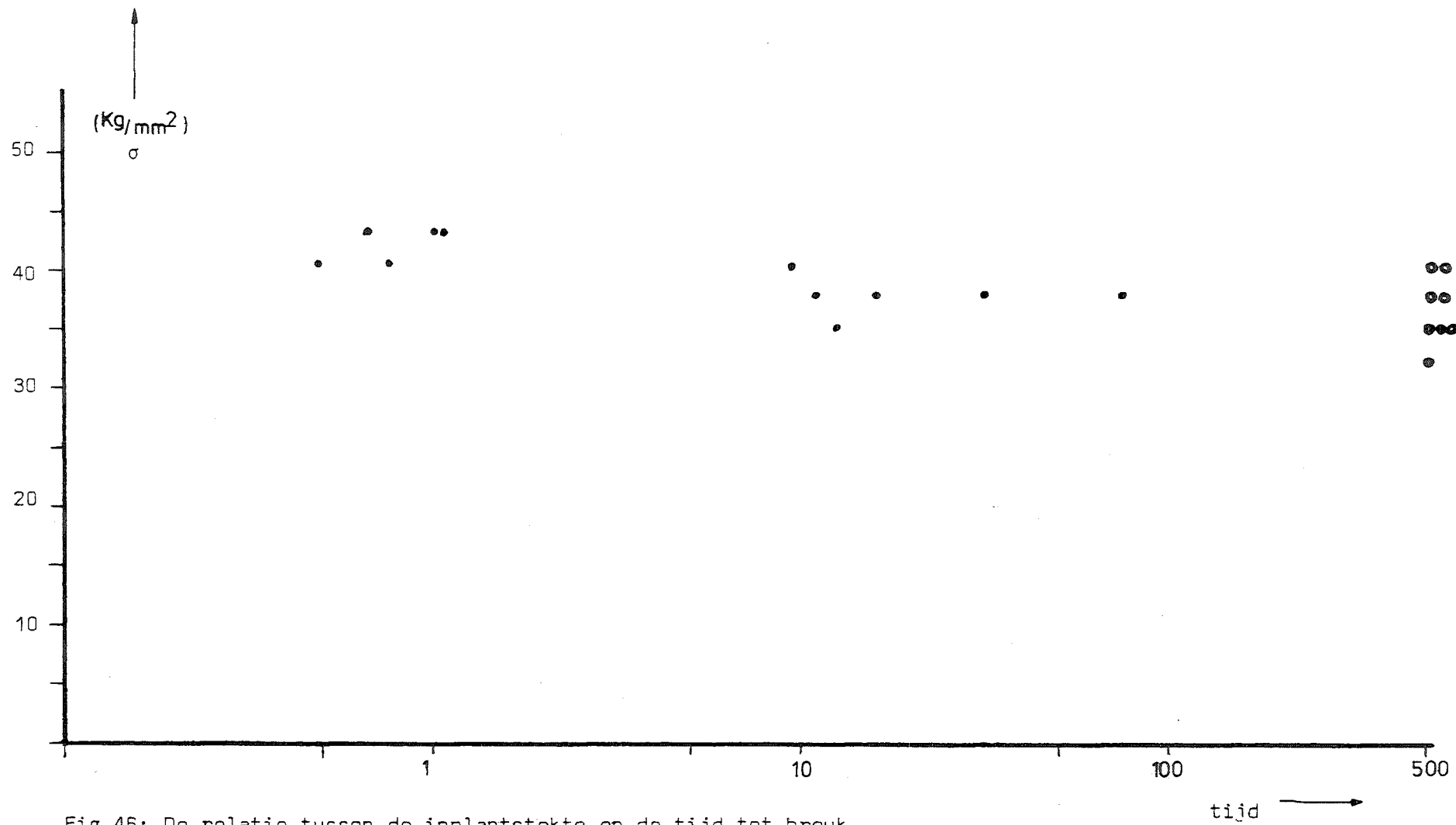


Fig.46: De relatie tussen de inplantstekte en de tijd tot breuk van St51 gelast met elektrode B in lucht.(serie 2 tabel 18)

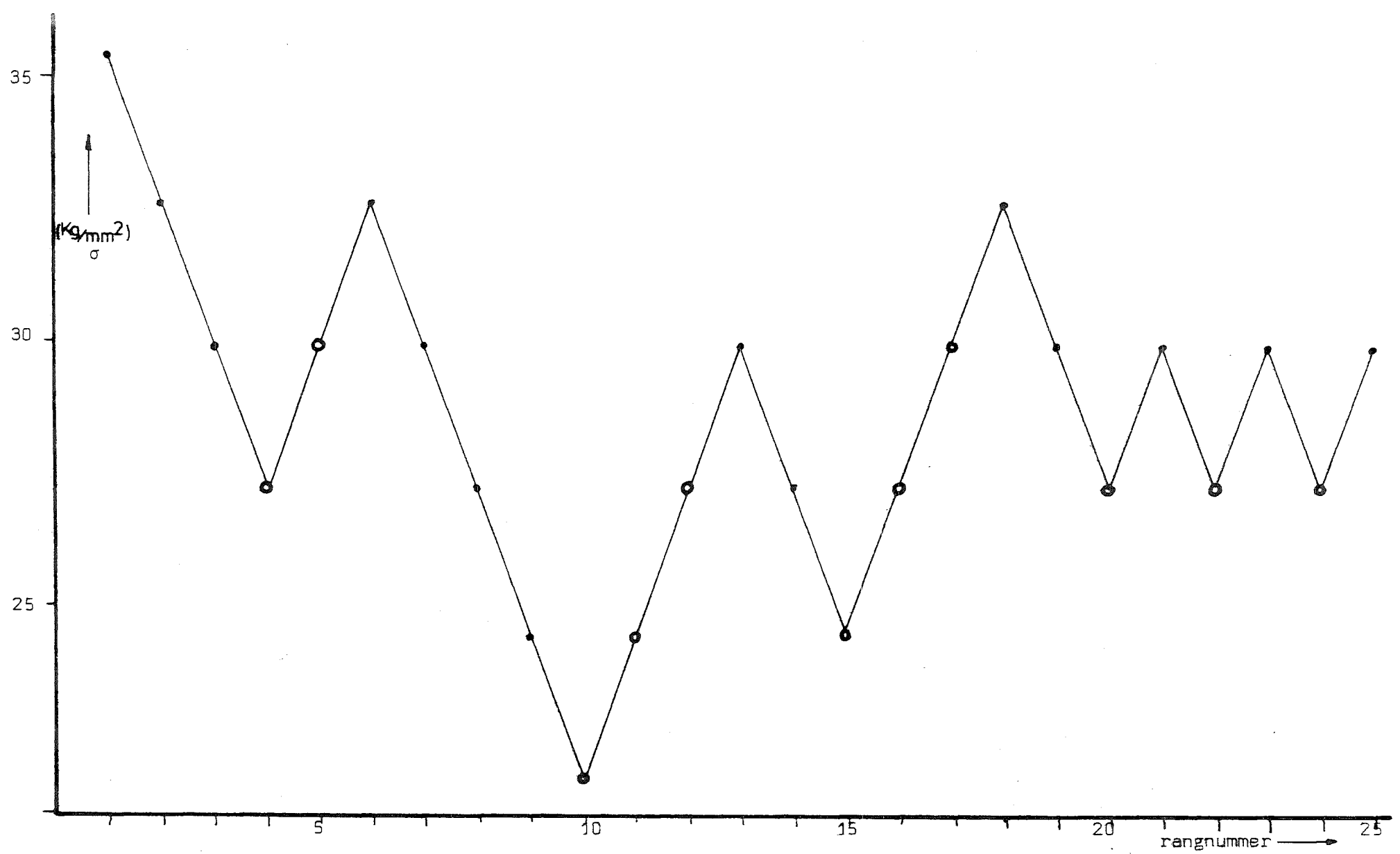


Fig.47: De meetpunten gebruikt bij de bepaling van de implantbreuksterkte van St52 gelast met elektrode B in water.(serie 3 tabel 18)

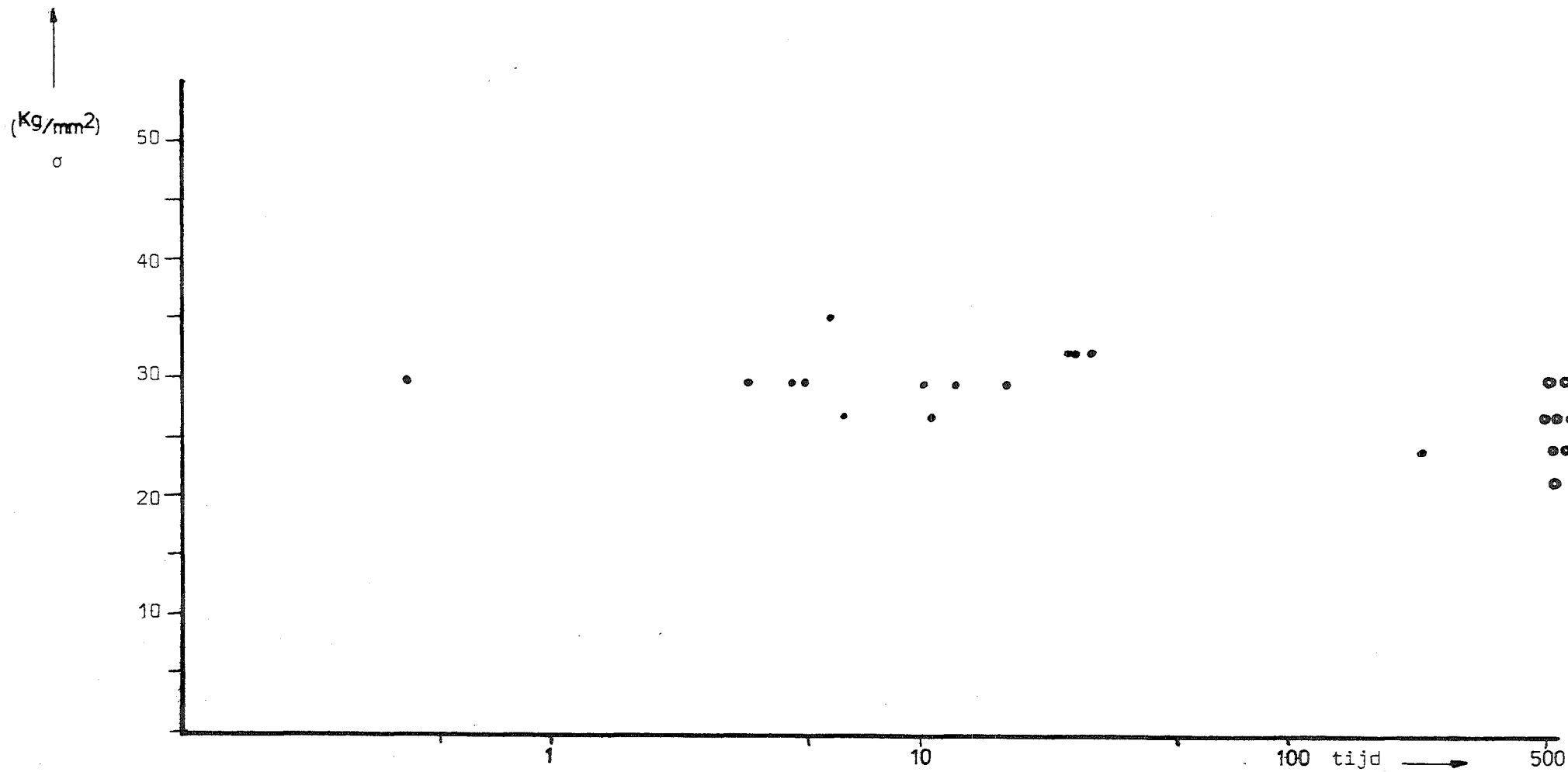


Fig.48: De relatie tussen de inplantbreuksterkte en de tijd tot breuk van St52 gelast met elektrode B onder water. (serie 3 tabel 18)

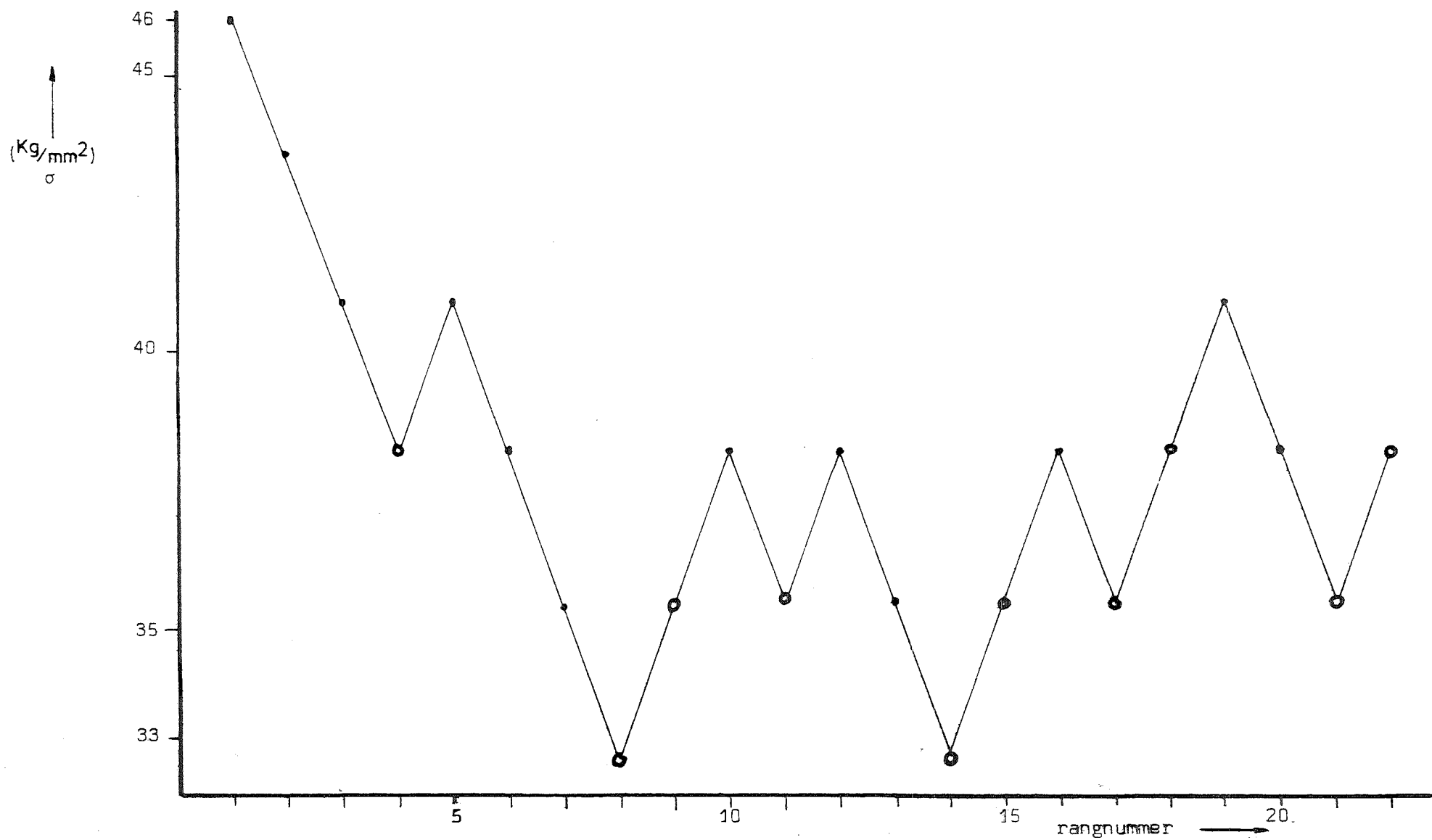


Fig.49: De meetpunten gebruikt bij de bepaling van de inplantbreuksterkte van St52 gelast met elektrode D in water. (serie 4 tabel 18)

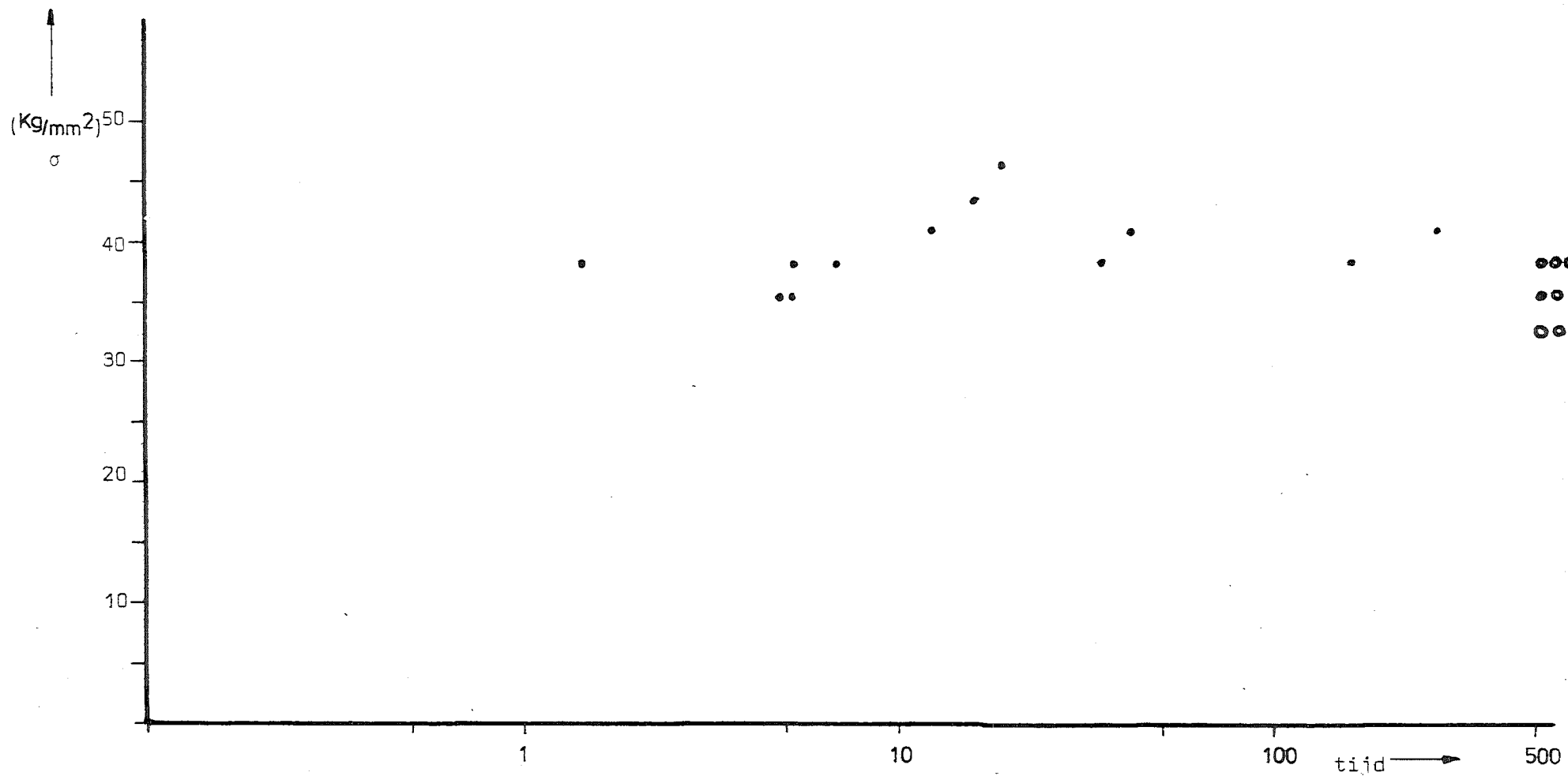


Fig.50: De relatie tussen de inplantsterkte en de tijd tot breuk van St52 gelast met elektrode D in water. (serie 4 tabel 18)

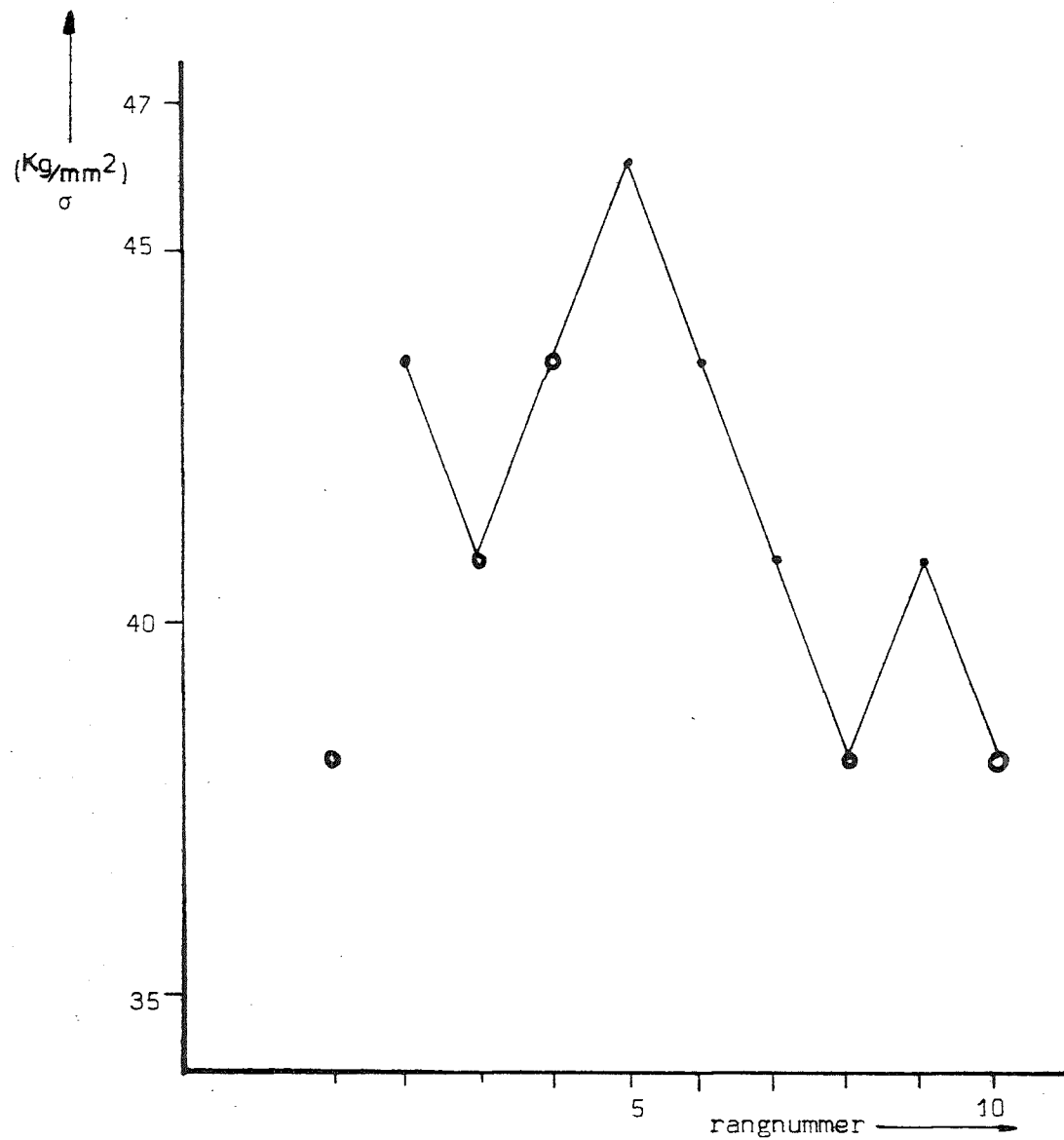


Fig.51: De meetpunten gebruikt bij de bepaling van de inplantbreuksterkte van St42 gelast met elektrode B in water. (serie 5 tabel 18)

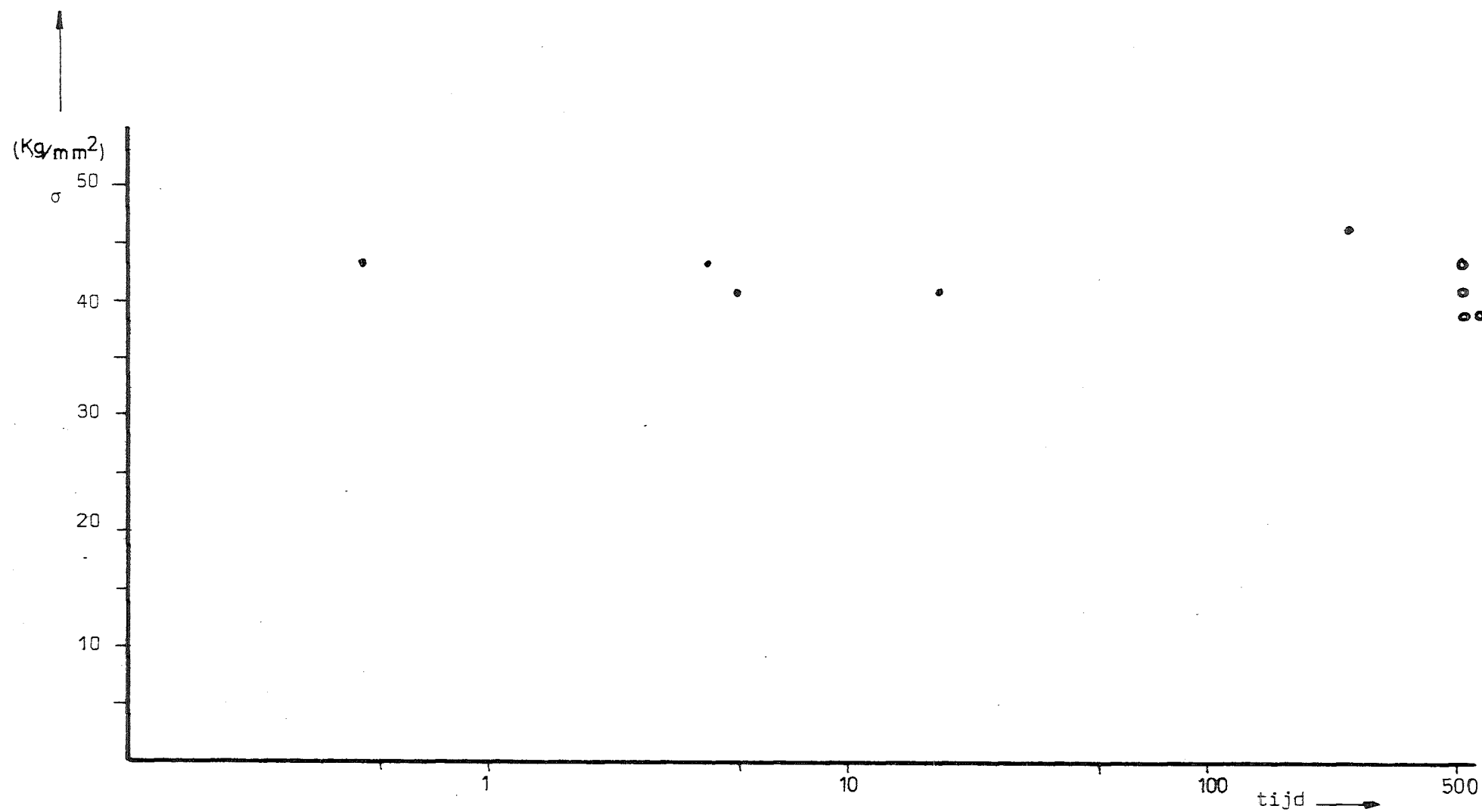


Fig.52: De relatie tussen de implantbreuksterkte en de tijd tot breuk van St42 gelast met elektrode B in water. (serie 5 tabel 18)

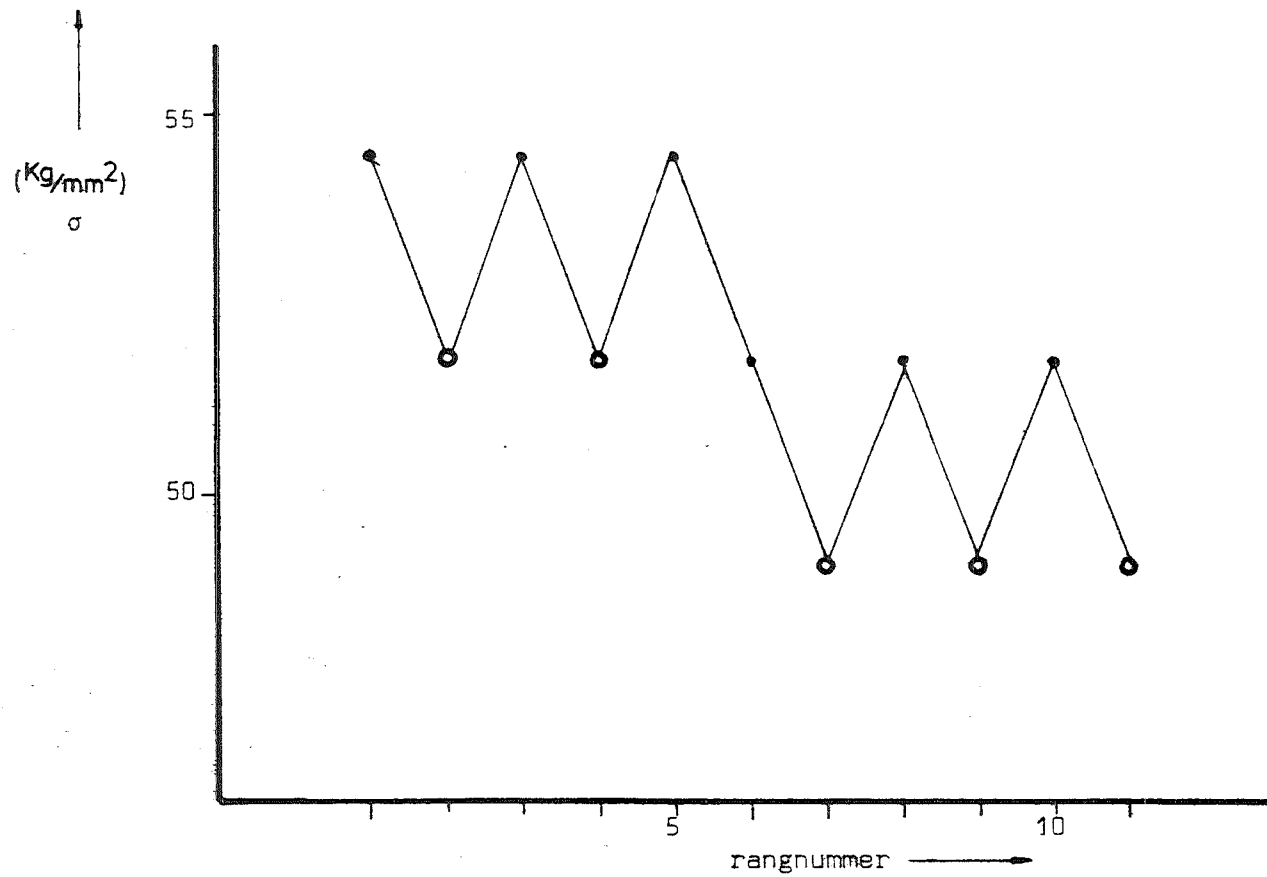


Fig.53: De meetpunten gebruikt bij de bepaling van de inplantbreuksterkte van St42 gelast met elektrode D in water. (serie 6 tabel 18)

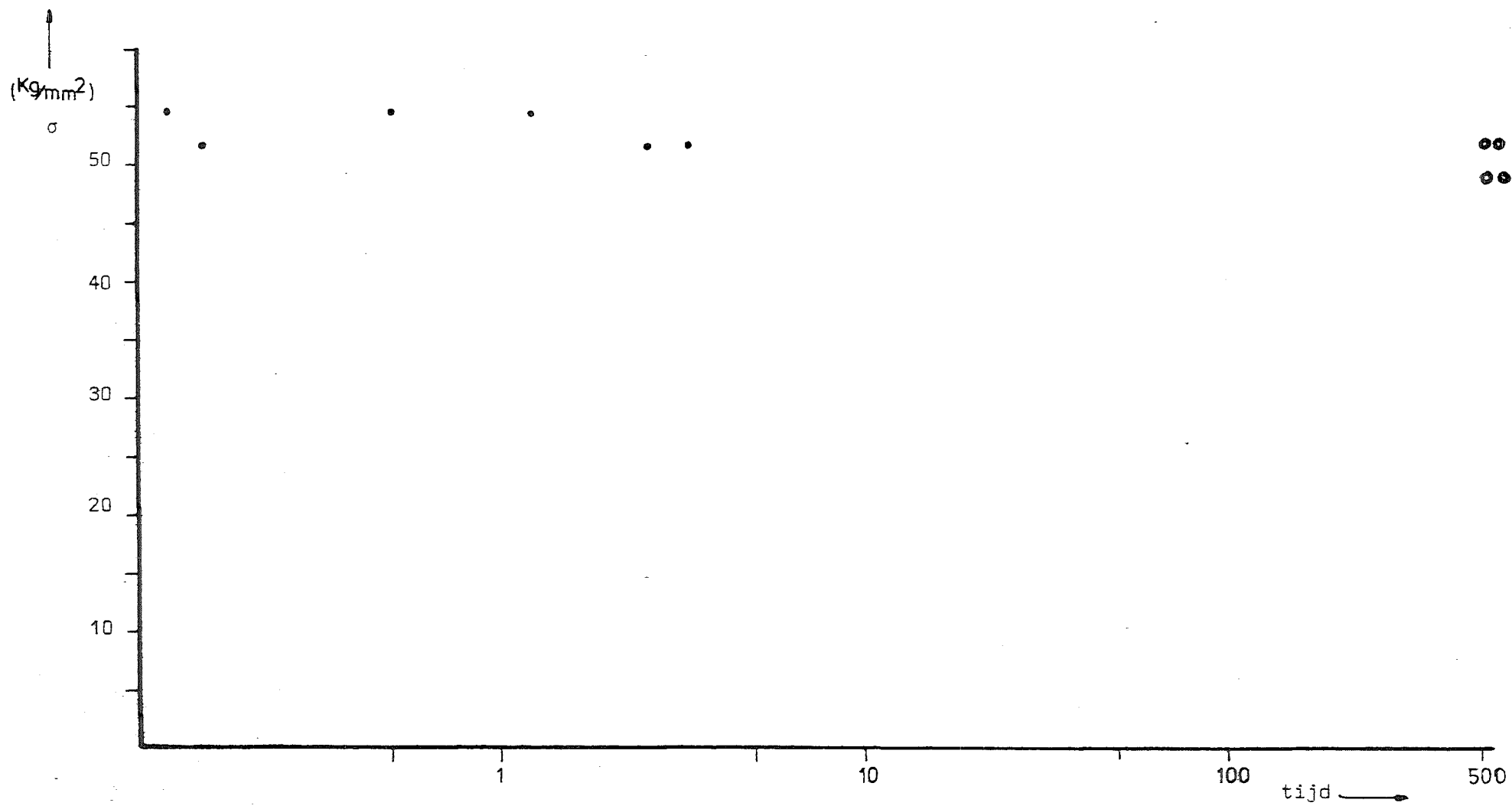


Fig. 54: De relatie tussen de inplantbreuksterkte en de tijd tot breuk van St42 gelast met elektrode D in water. (serie 6 tabel 18)

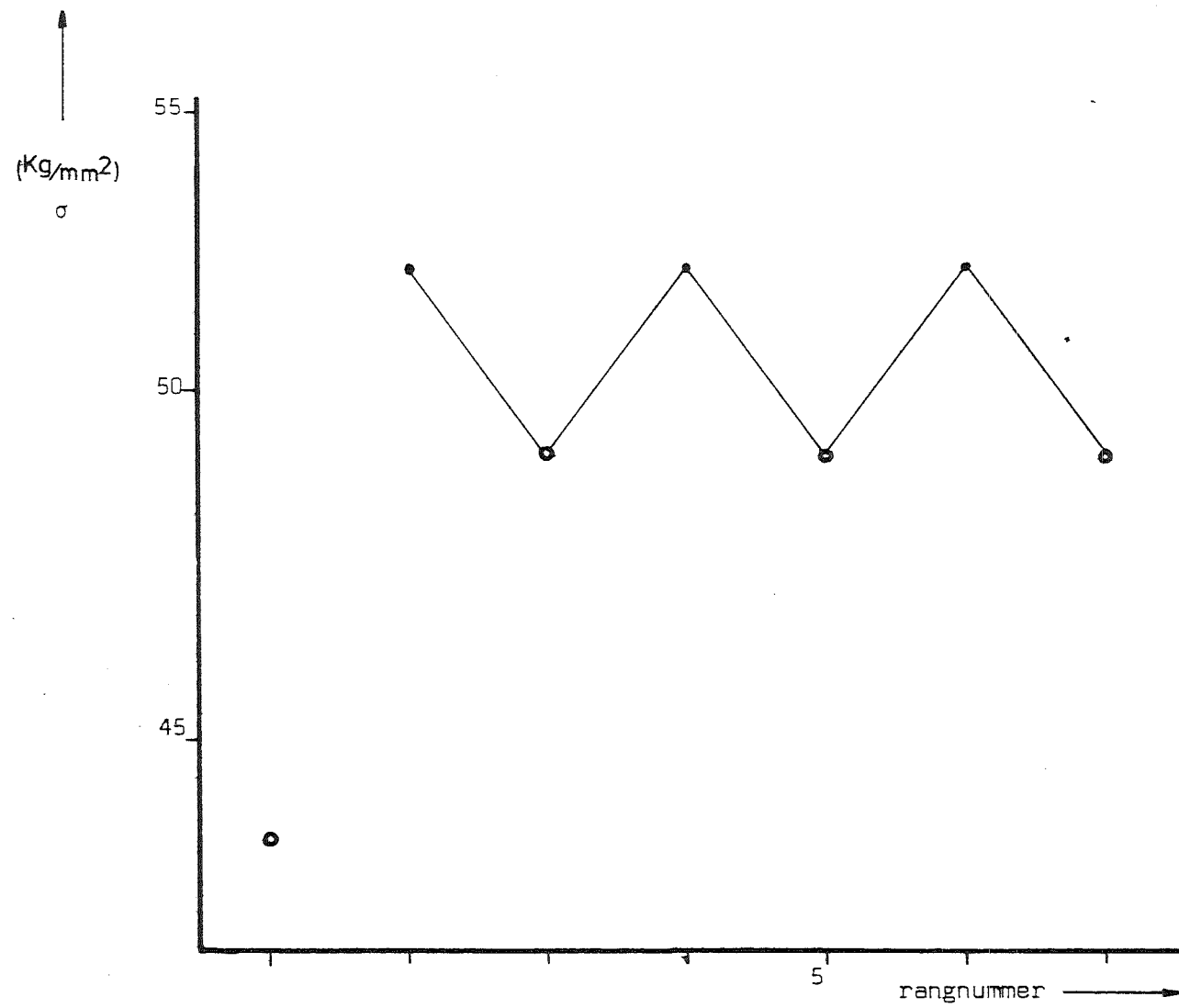


Fig.55: De meetpunten gebruikt bij de bepaling van de inplantbreuksterkte van St37 gelast met elektrode B in water.(serie 7 tabel 18)

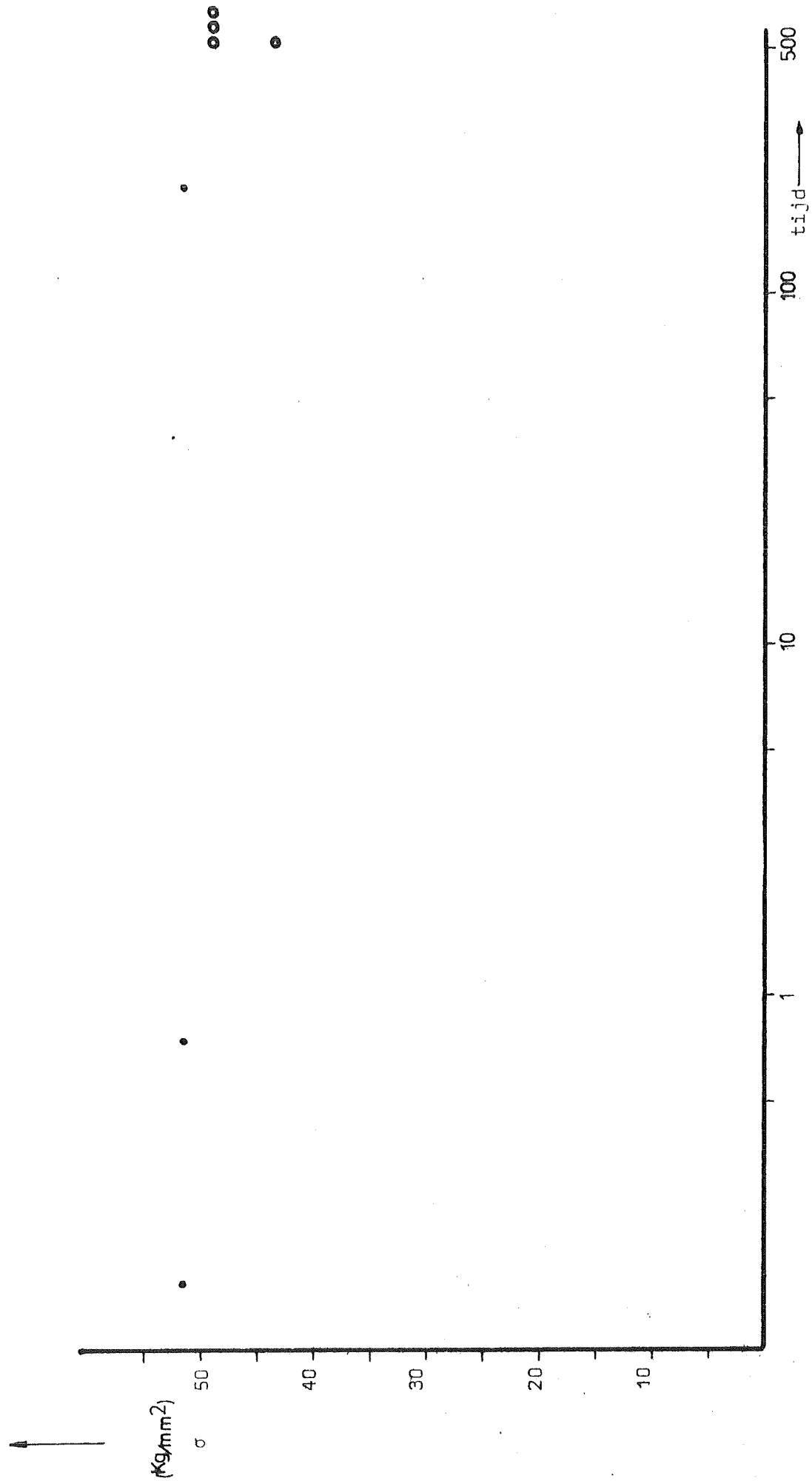


Fig. 56: De relatie tussen de inplantbreuksterkte en de tijd tot breuk van St37 gelast met elektrode B in water. (serie 7 tabel 18)

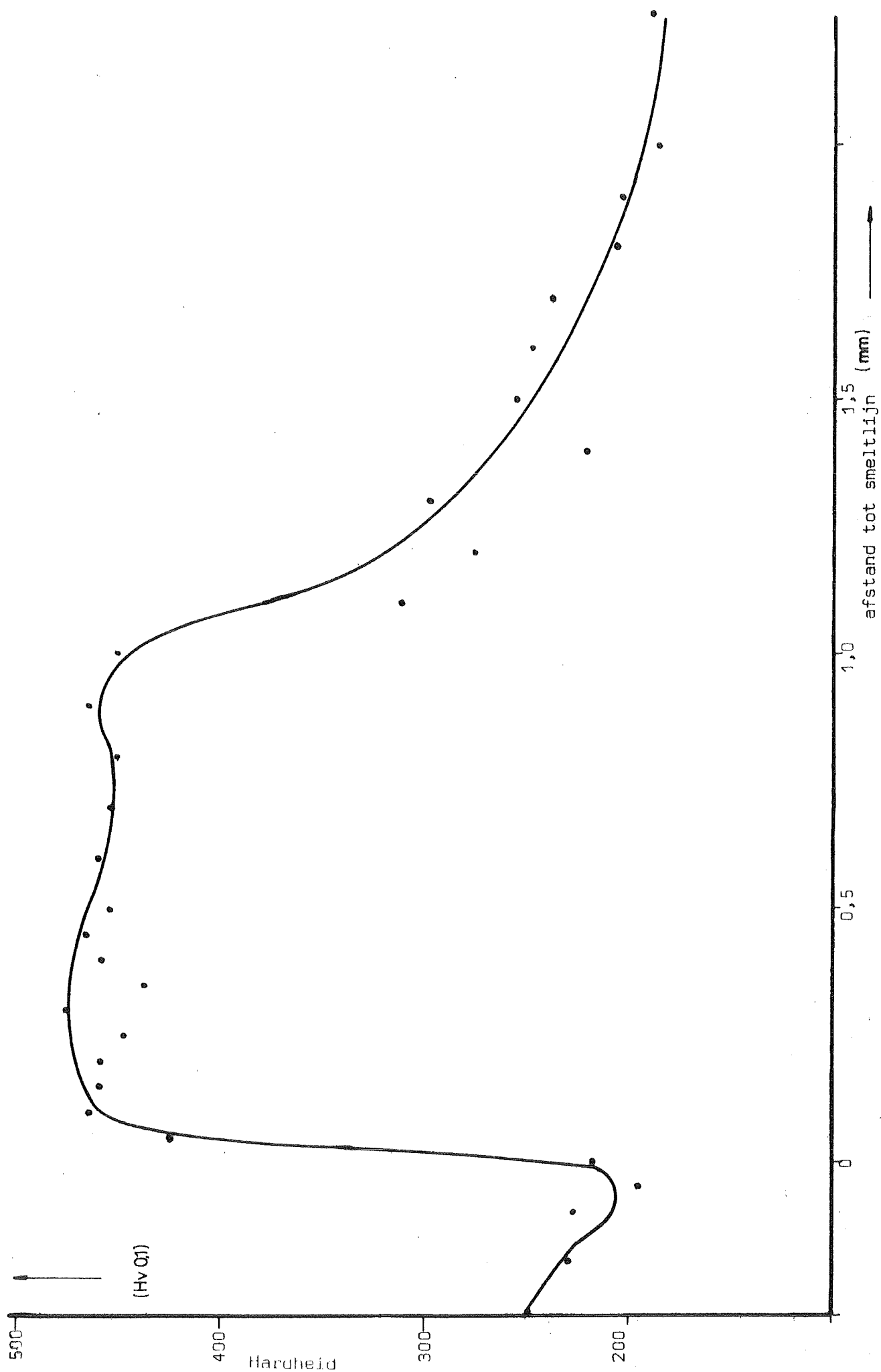


Fig. 57: Het hardheidsverloop over de warmte invloeds zone van een las uit de serie 1 tabel 18. (St52, lucht, 1.2 MJ/m)

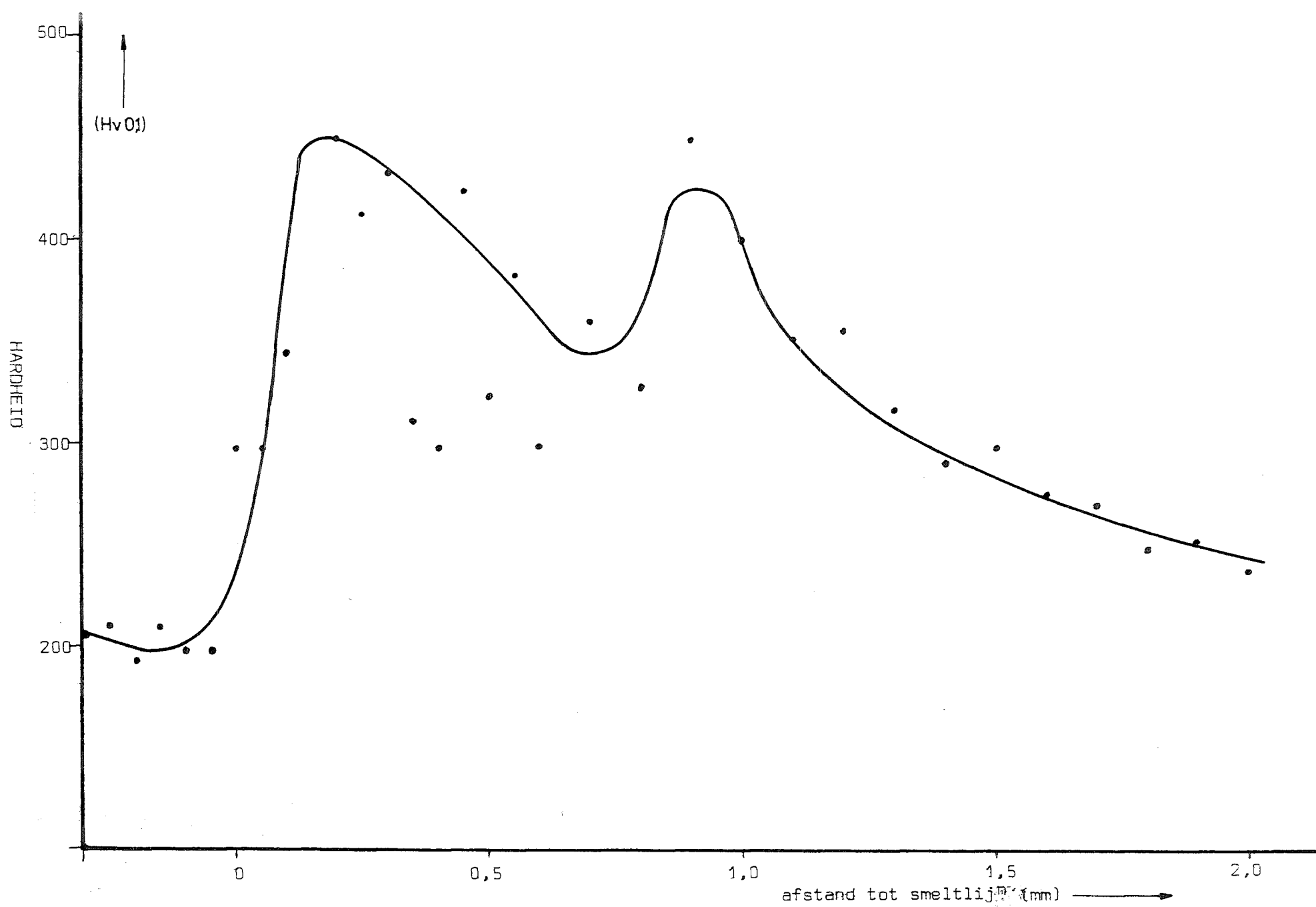


Fig.58: Het hardheidsverloop over de warmte invloeds zone van een las uit de serie 2. (St52, lucht, 2.5MJ/m)

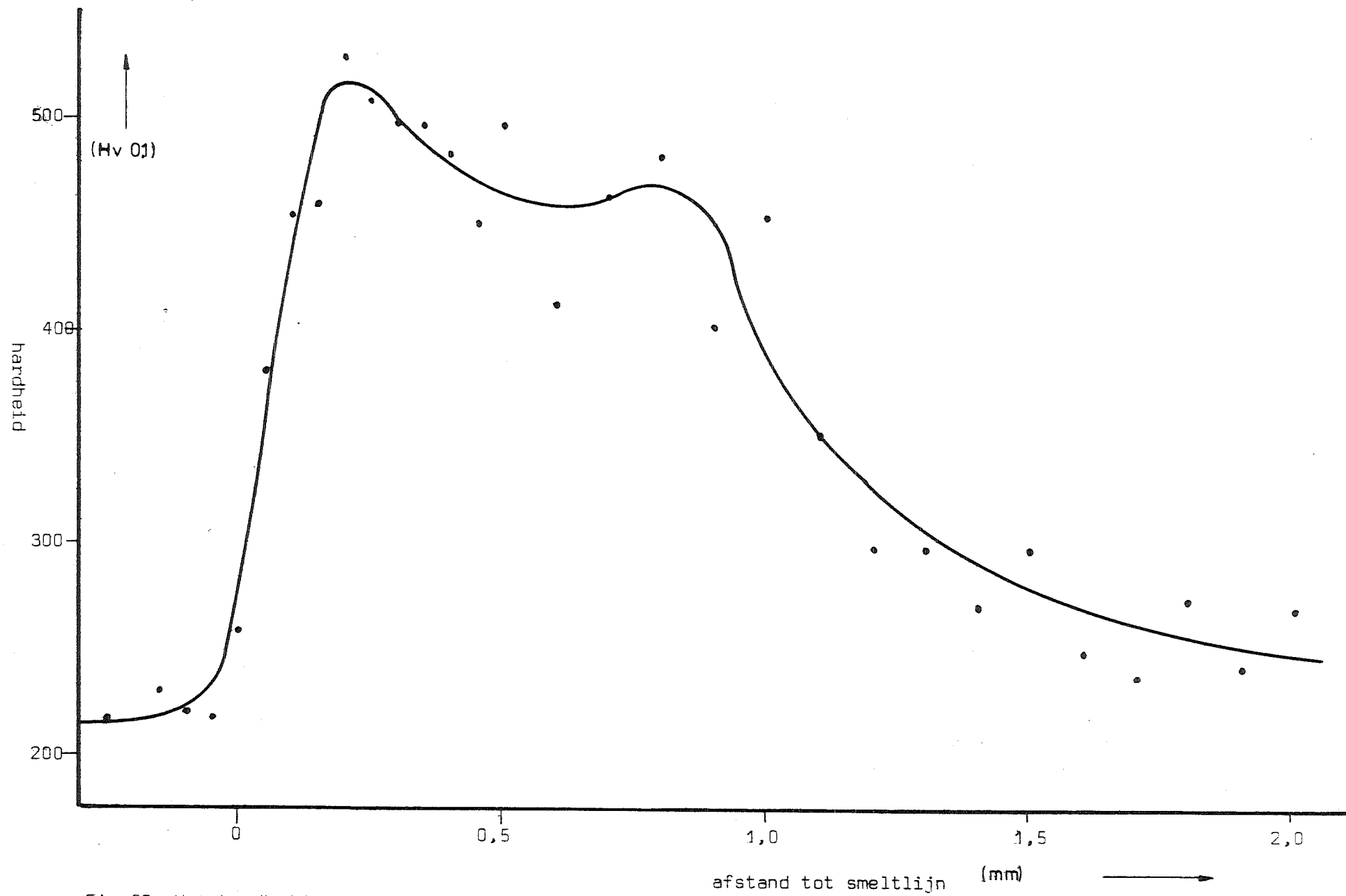


Fig.59: Het hardheidsverloop over de warmte invloeds zone van een las uit serie 3 van tabel 18.(St52,water)

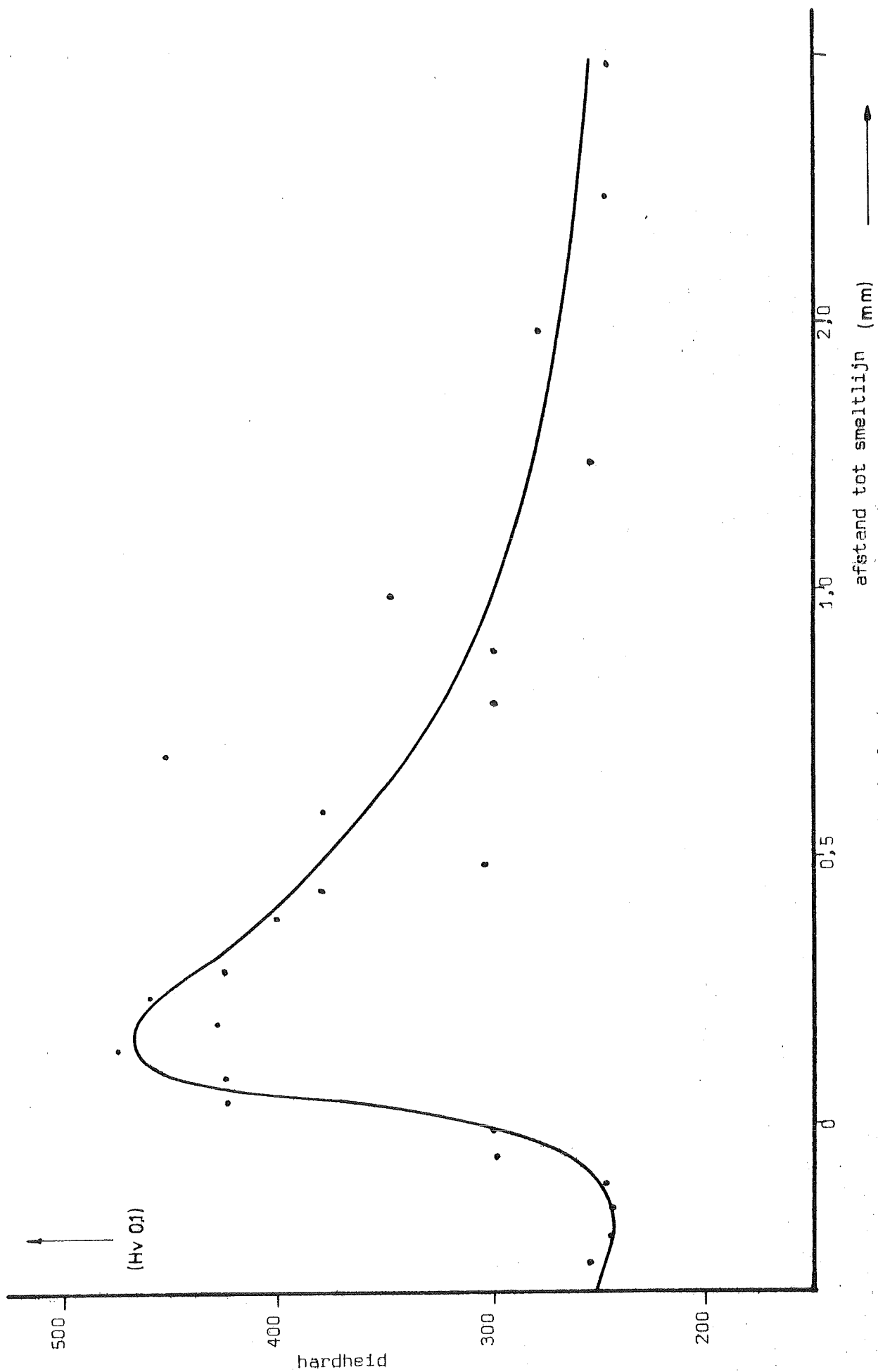


Fig.60: Het hardheidsverloop over de warmte invloeds zone van een las uit de serie 5 tabel 18. (St42, water)

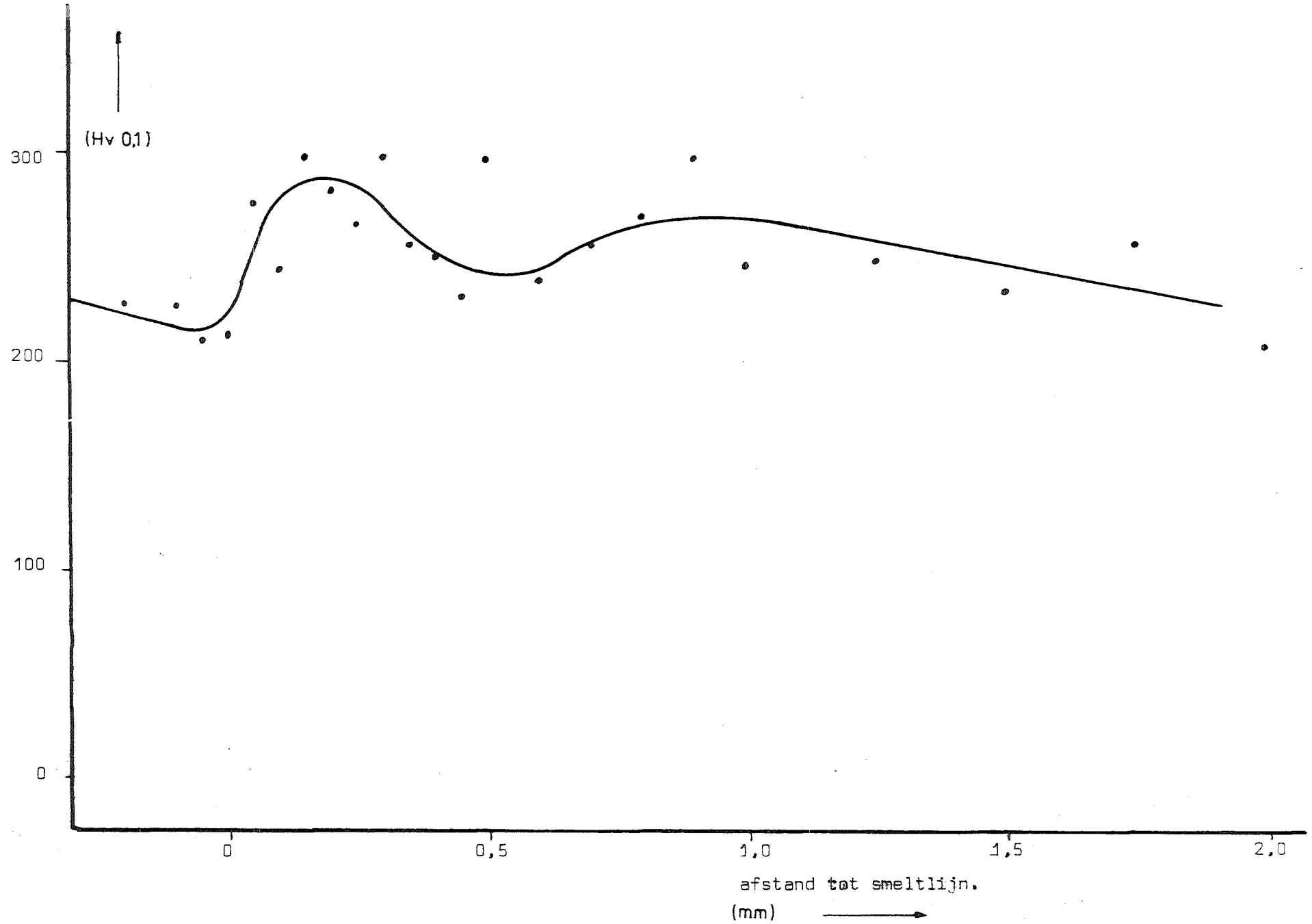
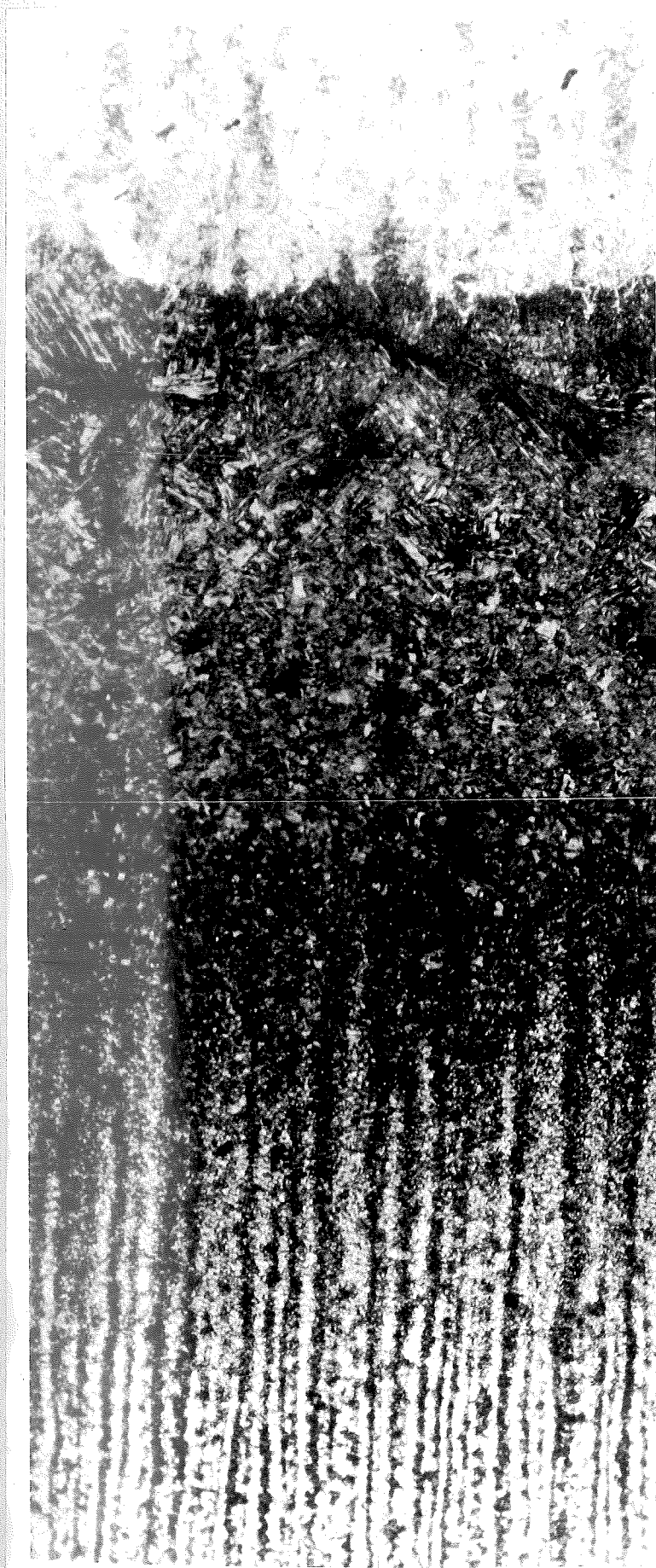


Fig.61: Het hardheidsverloop over de warmte invloeds zone van een las uit de serie 7 van tabel 18.(St37,water)



Lasmetaal

← smeltlijn

W.I.Z.

Fig.62: Een opname van de
W.I.Z. van St52.



lasmetaal

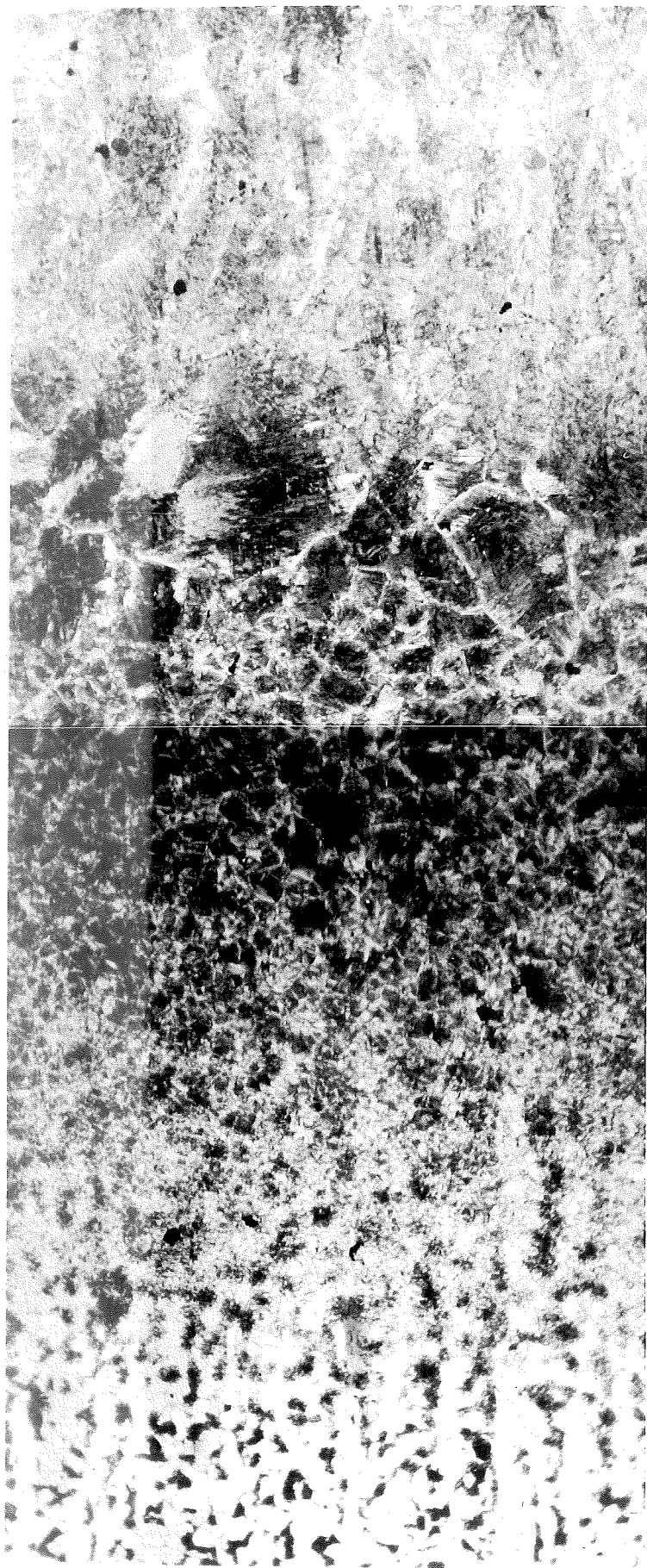
← smeltlijn

W.I.Z.

Fig.63: Een opname van de W.I.Z.
van St42.



Fig.65: Een waterstofscheur in de warmte invloeds zone van St52.



Lasmetaal

← smeltlijn

W.I.Z.

Fig.64: Een opname van de W.I.Z.
van St37.



lasmetaal

← smeltlijn

W.I.Z.

Fig.63: Een opname van de W.I.Z.
van St42.



fig.67

fig.68

fig.69

Fig.66: Een breukoppervlak van een inplantstaaf uit de serie 6 tabel 18. De figuurnummers verwijzen naar deuitvergrotingen van de verschillende typen breukoppervlakken.(vergr. 35x)

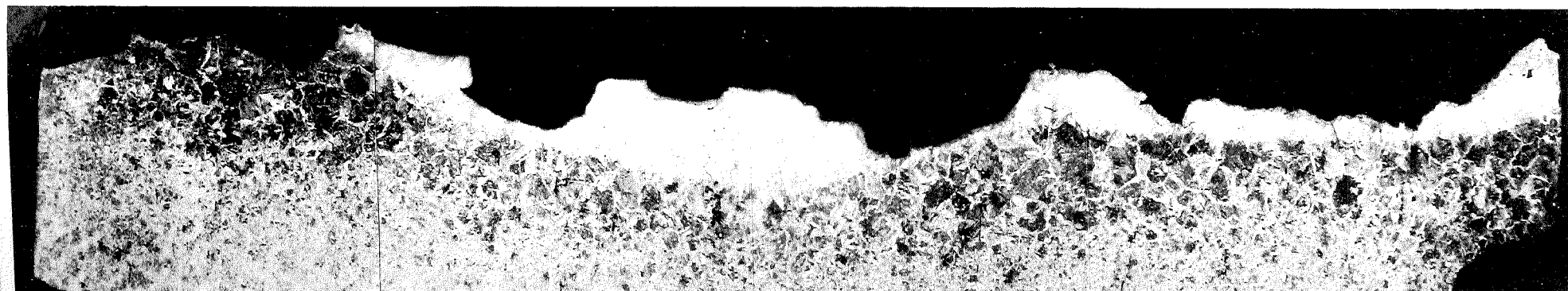


Fig.71: Een doorsnede van het in figuur 66 getoonde breukoppervlak.(vergr. 35x)



Fig.67: Het interkristallijn breukoppervlak in de warmte invloeds zone.
(vergroting 200 x)

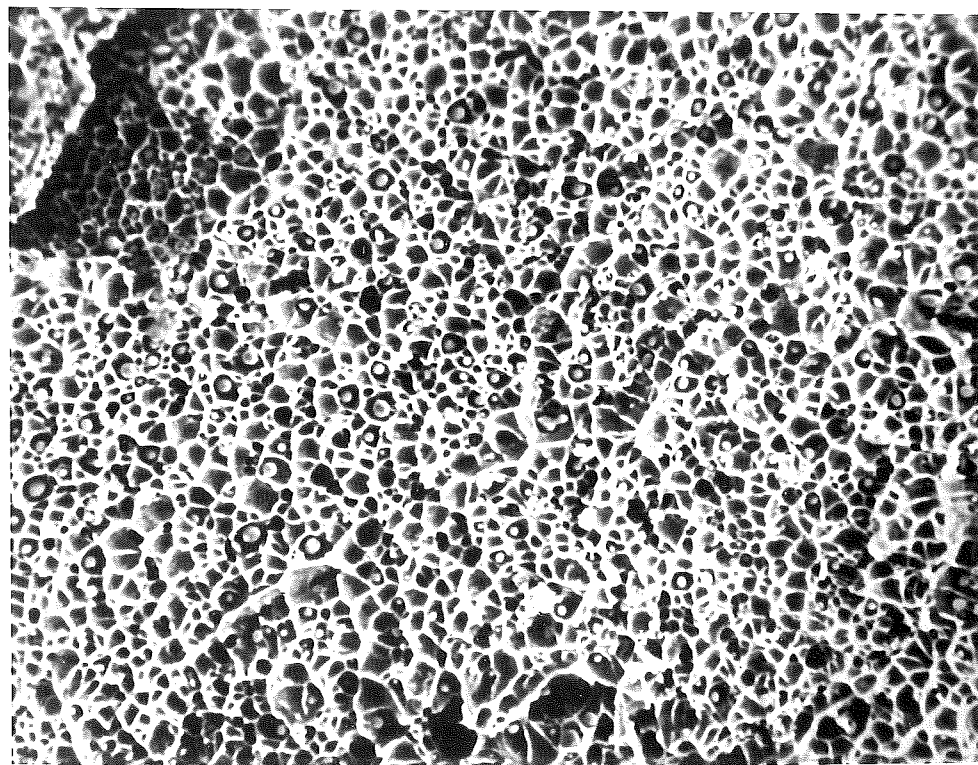


Fig.68: Een overbelastings breukoppervlak opgetreden in het lasmetaal.
(vergroting 1000 x)

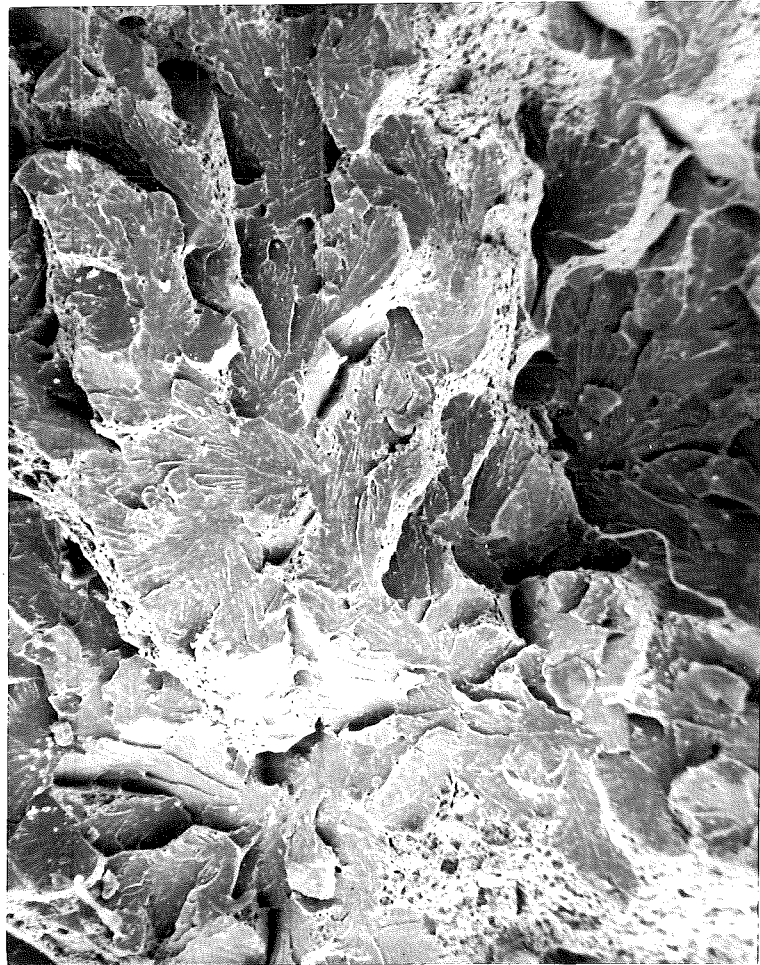


Fig.69: Het transkristallijn breukoppervlak in het lasmetaal.
(vergroting 200 x)

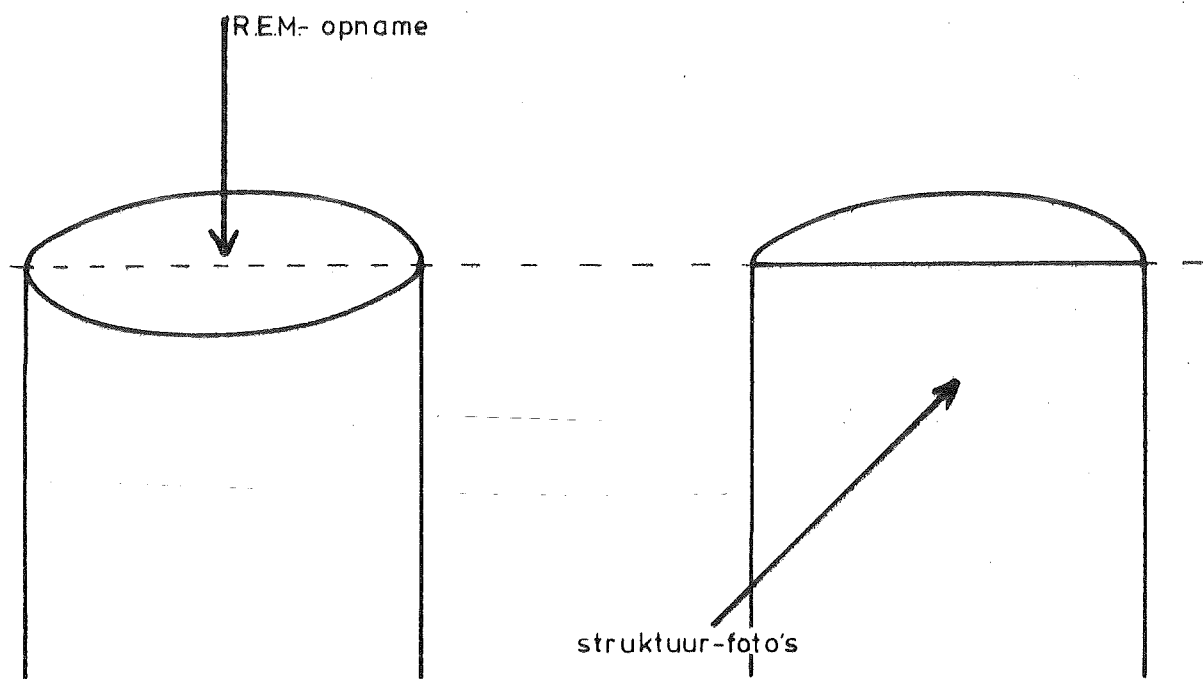


Fig.70: Aangegeven zijn de oppervlakken waarvan de opname gemaakt zijn
De R.E.M.-opnamen staan in figuren 66 t/m 69
De struktuurfoto is afgebeeld in figuur 71