STUDIE VAN DE LASBAARHEID VAN STAAL BIJ HET ONDERWATERLASSEN IN OPEN ZEE.

door G.W. Boltje

juni 1977

Verslag van het afstudeerwerk van G.W. Boltje
verricht aan de Tussenafdeling der Metaalkunde
Vakgroep : Toegepaste Metaalkunde
Sectie : Lastechnologie
Sectieleider: Prof. Dr. Ir. H.G. Geerlings

Inhoud.

Samenvatting I

Summary II

Voorwoord 1

Hoofdstuk 1 - Inleiding 2

Hoofdstuk 2 - Het onderwaterlaboratorium 9

Hoofdstuk 3 - Het lassen onderwater 13

Hoofdstuk 4 - Beschrijving van het onderzoek

4-1: Lassen met beklede elektroden 21
4-1-a: PLOT 75 21
4-1-b: PLOT 76 22
4-2: Stiftlassen 27

Hoofdstuk 5 - Presentatie en bespreking van de resultaten

5-1: Stiftlassen 31
5-1-1: Kanttekeningen bij de uitvoering van het onderzoek 31
5-1-2: Resultaten;bespreking 33
a - stroomsterkte 33
b - harding 34
c - scheurvorming 38
d - mechanische eigenschappen 39
e - lasparameters 39
f - de elektrische boog onderwater 40
5-2: Lassen met beklede elektroden 42
5-2-1: Resultaten 42
5-2-2: Bespreking der resultaten 47
a - lasgedrag 47
b - beoordeling laswerk 49
c - microscopisch onderzoek en harding 52
d - mechanische eigenschappen 56
e - chemische samenstelling 59

Hoofdstuk 6 - Conclusies en aanbevelingen 60

Appendix 61

Tabellen 62

Literatuur 67

Samenvatting.

Dankzij de samenwerking van twee Nederlandse werkgroepen zijn in de zomers van 1975 en 1976 experimenten met het onderwaterlassen onder praktijkomstandigheden uitgevoerd, waartoe een onderwaterlaboratorium is benut dat gelegen is op de bodem van de Oostzee.
De proeven betreffen uitsluitend het zogenaamde nat lassen, waarbij het zwaartepunt ligt bij het lassen met beklede elektroden. In 1975 is vooral de executieve lasbaarheid onderzocht, terwijl in 1976 de nadruk viel op de metallurgische lasbaarheid. Bij dit onderzoek zijn zeven elektroden betrokken, welke zeer verschillende kwaliteiten blijken te hebben. Vastgesteld is dat inkarteling en poreusheid niet inherent zijn aan het nat lassen. Bovendien blijkt één der ontwikkelde elektroden betere resultaten te geven dan een veel toegepaste commerciële onderwaterelektrode.
Daarnaast is in 1976 de toepasbaarheid van het stiftlassen onderzocht, hetgeen een uniek Nederlands initiatief is. Hoewel nog niet alle problemen zijn opgelost, kan op grond van dit onderzoek worden gesteld dat het stiftlassen onderwater een betrouwbare verbindingstechniek is, die in alle posities toepasbaar is en waarbij goede mechanische eigenschappen worden verkregen.

Summary

Due to the cooperation of two Dutch working groups experiments were carried out in the summers of 1975 and 1976 concerning underwater welding under working conditions. For this purpose an underwater laboratory on the bottom of the Baltic Sea was used.
The experiments covered exclusively wet-welding techniques, with the emphasis on welding with covered electrodes (SMA-welding). In 1975 the main point was the executive weldability, while in 1976 the metallurgical weldability was stressed. Seven types of electrodes were tested, five of which were developed for these experiments. These electrodes turned out to have very different properties. Undercutting and porosity were found not to be inherent to wet welding. One of the electrodes developed gave better results than an often used commercial underwater-electrode.
Also in 1976, the suitability of the drawn-arc stud welding process was investigated, which is an unique Dutch initiative. Although all problems have not been solved yet, it can be said on account of these experiments that stud welding underwater is a reliable technique, which can be applied in all positions giving good mechanical properties.

Voorwoord.

In de zomer van 1976 is de sectie Lastechnologie in de gelegenheid gesteld deel te nemen aan het gebruik van een in de Oostzee gelegen onderwaterlaboratorium ter uitvoering van experimenten met het onderwaterlassen onder praktijkomstandigheden. Deze gelegenheid is gerealiseerd dankzij de samenwerking van twee werkgroepen, die aktief zijn op het terrein van de onderwatertechniek, en waarin een aantal instellingen en ondernemingen deelnemen.
De experimenten zijn uitgevoerd in het kader van een afstudeeropdracht met de inhoud de proeven op te zetten, te doen uitvoeren en het daarbij verkregen proefmateriaal te onderzoeken. Daarnaast dienden ook de resultaten van reeds in 1975 uitgevoerde proeven geëvalueerd te worden. De bevindingen van het afstudeerwerk zijn in dit verslag gebundeld. Aangezien dit verslag in bredere kring dan gebruikelijk verspreid zal worden is de indeling aangepast.
De eerste drie hoofdstukken zijn van algemene aard en beschrijven respectievelijk het ontstaan van de onderwatertechniek en aktiviteiten op dit terrein in Nederland, het onderwaterlaboratorium, en het lassen onderwater. Hoofdstuk vier geeft een beschrijving van het onderzoek; de resultaten worden gepresenteerd en besproken in hoofdstuk vijf. De metaalkundige aspecten zullen dan ook in dit laatstgenoemde hoofdstuk de boventoon voeren. Tenslotte worden in hoofdstuk zes de resultaten samengevat en conclusies opgesteld, waarbij tevens aanbevelingen voor nader onderzoek naar voren komen.

Hoofdstuk 1 - Inleiding.

De inspanningen die de mens de laatste jaren levert op het terrein van de onderwatertechniek geven een spectaculaire groei te zien. Zeker op het gebied van de offshore techniek worden werkzaamheden uitgevoerd die een tiental jaren geleden als volslagen onmogelijk werden beschouwd. Hoewel minder in de schijnwerpers der publieke belangstelling tredend profiteert ook de onshore onderwatertechniek van deze ontwikkeling, met name in de civiele techniek, zoals bij de aanleg en het onderhoud van tunnels, dijken, bruggen, sluizen, etc.

Bij een korte terugblik op de ontwikkeling van de onderwatertechniek blijkt - afgezien van militaire behoeften - dat de vraag hiernaar ongeveer gelijke tred houdt met het groeiende besef van het schaarser worden van grondstoffen, met name van die voor de energieopwekking. Opgemerkt dient te worden dat ook politieke ontwikkelingen hierbij een grote rol hebben gespeeld.
De oliecrisis van 1973 is hiervan het meest treffende voorbeeld: feitelijk is het deze crisis geweest die de dringende noodzaak van een volwaardige offshore techniek, althans voor West-Europa, ondubbelzinnig kenbaar maakte.

Nu moet de ontwikkeling van de onderwatertechniek niet gezien worden als louter een kwestie van vraag en aanbod. De grote rem op de gehele ontwikkeling was namelijk het feit dat tot voor tien jaar het aanbod nauwelijks bestond. Dit is veroorzaakt door de beperkingen die tot dan toe door de duiktechniek aan de mens werden gesteld. Ter illustratie hiervan de volgende ontwikkelingen:
. voor de zuurstofvoorziening van de duiker is altijd gebruik gemaakt van samengeperste lucht, hetzij vanaf de oppervlakte toegevoerd met behulp van een persluchtleiding (midden 19e eeuw), hetzij meegevoerd in gascilinders op de rug (Cousteau en Gagnan, 1943).

Bij toenemende omgevingsdruk en dus toenemende diepte (tien meter waterkolom = 1 atm.) neemt de "narcotische" werking van stikstof toe. Hierdoor nemen het denkvermogen en de coördinatie van de motoriek af. Deze invloed maakt zich kenbaar vanaf ongeveer 50 meter diepte en is bij een diepte van 100 meter ronduit levensgevaarlijk.
Deze beperking in de duikdiepte is rond 1960 doorbroken toen men door nieuwe inzichten in de fysiologie algemeen overging op helium-zuurstof mengsels, de zogenaamde helioxgassen.
. Een beperking van nog ernstiger aard is de zogenaamde caissonziekte. Tijdens verblijf onder verhoogde druk wordt in het lichaam meer stikstof opgelost dan onder atmosferische druk (Paul Bert, omstreeks 1880). Wanneer men plotseling van een omgeving met verhoogde druk terugkeert naar normale atmosferische omstandigheden geeft de overmaat opgelost gas aanleiding tot het ontwikkelen van stikstofbellen in de bloedbaan, waardoor het zuurstoftransport wordt belemmerd. Dit brengt een functieverlies van het zenuwstelsel met zich mee dat in zijn sterkste vorm - uiteraard - dodelijk kan zijn. Om dit te voorkomen dient een zeer geleidelijke decompressie in acht te worden genomen, tijdens welke de in het bloed aanwezige overmaat stikstof verdwijnt. Bij toenemende verblijftijd neemt de in het lichaam opgeloste hoeveelheid gas toe totdat een zekere verzadigingswaarde optreedt; derhalve neemt ook de decompressietijd toe met de verblijftijd totdat de verzadigingswaarde is bereikt.
Om een indruk te geven van de tijd die hiermee gemoeid is, wordt onderstaande tabel gegeven.

diepte (m)	verblijftijd (uur)	decompressietijd (uur)	economische * duiktijd
50 **	0,2 - 1	0,5 - 3	0,29 - 0,25
75	0,5 - 1	2 - 5	0,20 - 0,17
93	0,5 - 1	3,3 - 9	0,13 - 0,10
137	0,5 - 1	12 - 22	0,04 - 0,04

* economische duiktijd = verblijftijd op diepte/verblijftijd op diepte plus decompressietijd.

** stikstof heeft in het menselijk lichaam een veel grotere oplosbaarheid dan helium.

Uit deze tabel blijkt welk een aanslag de decompressietijd vormt op de besteedbare tijd per werkdag van een duiker.
In dit licht bezien wordt het duidelijk waarom het niet interessant was een onderwatertechnologie te ontwikkelen: de mens is onder water niet produktief. Pas omstreeks 1965 is hierin verandering gekomen door de ontwikkeling van de techniek van het verzadigd duiken. De ideeën hiervoor zijn in de U.S.A. door Bond en in Frankrijk door Cousteau in 1957 ontwikkeld; de eerste realisatie vond plaats in 1962 door Cousteau met zijn Conshelf 1 . Hiermee wordt bedoeld dat de duiker gedurende de gehele periode dat hij met de uitvoering van een bepaalde taak belast is, leeft in een atmosfeer met een druk die overeenkomt met die van de arbeidsplaats. Deze periode kan enkele weken bedragen. Doordat de in het lichaam oplossende gassen hierbij de verzadigingswaarde bereiken neemt nu de decompressietijd niet meer toe bij een toenemende verblijftijd, zodat de economische duiktijk weer tot één kan naderen.
Hiertoe is dus een verblijfruimte nodig met alle gewenste en noodzakelijke voorzieningen, welke op druk gehouden wordt. Deze drukkamer kan onderwater worden geplaatst, bijvoorbeeld op de bodem van de zee, volledig onafhankelijk van "het buitengebeuren" zoals weersomstandigheden.
Ook kan de drukkamer aan boord van een schip worden geplaatst. Dit maakt dan een pendelcabine voor de duikers noodzakelijk.
Het is duidelijk dat een uitgebreid pakket van veiligheidsvoorzieningen noodzakelijk is om ervan verzekerd te zijn dat - ook in noodgevallen - de duiker op de gewenste druk blijft; zou de druk onverhoopt terugvallen naar atmosferische druk dan treden onherroepelijk zware embolieën op in de bloedbaan met grote kans op een dodelijke afloop.
Het zal duidelijk zijn, welk een groot voordeel het verzadigd duiken oplevert: de decompressie behoeft slechts eenmaal te worden doorlopen, nadat de werkzaamheden zijn voltooid. Met deze werkwijze is dan ook, ongeacht de diepte, een werkdag van zes "natte", dus produktieve uren een haalbare zaak mits men zulke evidente zaken als lichaamstemperatuur, etc. goed controleert.

Het is wellicht zinvol om op te merken dat vooral de medische en fysiologische kennis heeft moeten en nog zal bijdragen aan het oplossen van tal van problemen die zich voordoen bij de technisch zo eenvoudig uitvoerbaar schijnende techniek van het verzadigd duiken.

Resumerend kan gesteld worden dat het pas sedert 1965 zinvol is een onderwatertechnologie te ontwikkelen, daar het mogelijk werd langdurig werkzaamheden uit te voeren (dankzij het verzadigd duiken) op grote diepten (dankzij de heliox-gasmengsels). De maximaal bereikbare diepte neemt nog steeds toe: in de praktijk is de 300 m reeds overschreden, terwijl in laboratoria met mensen simulatieproeven worden uitgevoerd tot diepten van 600 m.*

Het zou de grenzen van het redelijke verre te buiten gaan indien hier een poging tot het beschrijven van de ontwikkelingen in het laatste decennium zou worden ondernomen. In de context van deze uiteenzetting is het echter nuttig enige woorden te wijden aan enkele initiatieven die binnen Nederland zijn ontwikkeld. Nederland is traditioneel altijd sterk verbonden geweest met ontwikkelingen op de wereldzeeën; ook tegenwoordig nog neemt het op enkele specifieke terreinen een markante plaats in. Daaruit is te verklaren dat in Nederland een groot aantal organisaties en werkgroepen aktief zijn om onderzoek op het gebied van de onderwatertechniek te initiëren, coördineren, stimuleren en wat dies meer zij. Een volledig overzicht hiervan wordt gegeven in referentie (1). Organisaties die op het voor het onderhavige onderzoek interessante terrein aktief zijn, worden in appendix I omschreven.

* Voor een goed begrip van het onderwatergebeuren zij nog opgemerkt dat van het aardoppervlak 70.8% ingenomen wordt door water. De gemiddelde diepte van het waterbekken bedraagt tussen de 3700 en 4100m. (hierover zijn de geleerden het nog niet eens). Het huidige relevante gebied voor de mens - dus ook voor de lastechnologie - is het zogenaamde continentale plat, dat gewoonlijk tot slechts 200 m diepte reikt. Het continentaal plat beslaat ongeveer 7½% van het wateroppervlak. De mening dat de mens reeds de aarde zou hebben "veroverd" berust dan ook op een groot misverstand.

Door de werkgroep Praktijk-Laboratorium voor de Onderwater-Techniek PLOT (zie appendix I) is in 1975 in Duitsland gedurende een maand een onderwaterlaboratorium, gelegen in de Oostzee, gehuurd ter evaluatie van de praktische gebruiksmogelijkheden. Deze maand is benut voor het uitvoeren van medisch en technisch onderzoek. Daarbij is gedurende een week aandacht besteed aan verbindingstechnieken, waaronder lijmen en lassen. Het beproeven van de verbindingstechnieken vond plaats in het kader van Neptunus (zie appendix I). Het Metaalinstituut T.N.O. heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de voorbereiding en de opzet van de toen uitgevoerde proeven met het lassen met beklede elektroden (voortaan te noemen: PLOT 75). Voor een werkverslag van de uitvoering wordt verwezen naar referentie (2). Het bij dit onderzoek verkregen proefmateriaal kon vervolgens niet worden onderzocht daar de werkgroep Neptunus, die zich hiermee zou belasten, financiële problemen ontmoette.
In het voorjaar van 1976 kreeg de Sectie Lastechnologie van de Tussenafdeling der Metaalkunde de uitnodiging in de komende zomer hetzelfde onderwaterlaboratorium te benutten ter uitvoering van lasexperimenten, hetgeen mogelijk was geworden door een bijdrage uit de beleidsruimte van de Technische Hogeschool Delft. Na enige aarzeling - het zou tenslotte de eerste "natte ervaring" worden - is besloten hiermee letterlijk in zee te gaan. Opgemerkt zij dat voordien reeds binnen de Sectie Lastechnologie aandacht besteed is aan enkele facetten van het onderwaterlassen *, namelijk in het kader van het afstudeerwerk van Bouwman (17) en Krouwel (18). Afwijkend van het thans uitgevoerde onderzoek zijn die experimenten op laboratoriumschaal uitgevoerd. Bij het besluit gebruik te maken van het onderwaterlaboratorium is overeengekomen ook de evaluatie van het proefmateriaal van PLOT 75 in het onderzoek op te nemen.

* Hoewel de term onderwater lassen semantisch niet juist is - beter zou zijn te spreken van lassen in water of lassen onder het wateroppervlak - wordt deze term gebruikt daar hij reeds is ingeburgerd, met bovendien equivalenten in de Engelse, Franse en Duitse taal: respectievelijk underwater welding, soudage sous l'eau en Unterwasserschweissen.

De werkzaamheden aan het dan nog te ontwikkelen onderzoek zijn aangevangen op 14 juni, terwijl op 27 augustus alles voor de uitvoering in de Oostzee gereed moest zijn. Gezien de korte tijd van voorbereiding, welke bovendien nog verkort is door vakantieperikelen, is nauwelijks de gelegenheid gevonden om vooraf de resultaten van PLOT 75 te verkrijgen. Dit neemt niet weg dat het huidige onderzoek (voortaan te noemen: PLOT 76) met betrekking tot het lassen met beklede elektroden te beschouwen is als een vervolg op PLOT 75. Daarnaast is een onderzoek uitgevoerd naar de bruikbaarheid van het stiftlassen onderwater, hetgeen volledig moet worden gezien in het kader van een door de werkgroep Neptunus geïnitieerd onderzoek.
Derhalve worden in dit verslag de resultaten van PLOT 75 plus de uitvoering benevens de resultaten van PLOT 76 behandeld.

Uit het voorgaande moge het bijzondere karakter van dit afstudeerwerk gebleken zijn. Gewoonlijk behelst een afstudeeropdracht het zelfstandig verrichten van een onderzoek. Het onderhavige onderzoek zou echter volstrekt onmogelijk geweest zijn zonder de actieve medewerking van een geheel team bij de uitvoering van de lasexperimenten in de Oostzee. Derhalve behoort reeds bij de aanvang van het verslag dit team in het volle licht gesteld te worden:

	J. Kapteijn	sectie lastechnologie - T.H. Delft:	begeleiding
	J.H. de Snoo		
*	P.G. Pommé	- duikbedrijf Vriens B.V. :	uitvoering laswerk
*	E.K. Venema	- Lab. Energievoorziening T.H. Delft	assistentie onderwater
*	R.G.J.C. Luttmer	- student Civiele Techniek - T.H. Delft	
	H. Dekker	- coörd. Offshoretechniek T.H. Delft:	coördinatie

* Ten behoeve van de uitvoering van de experimenten hebben deze personen gedurende een week in en om het onderwaterlaboratorium verbleven.

De aktiviteiten van dit team gedurende de uitvoering van de lasexperimenten zijn uitgebreid vastgelegd in een werkverslag (3).
Overigens is het resultaat van een dergelijke onderneming geheel afhankelijk van de voorbereiding. In deze context moeten alle leden van de sectie Lastechnologie gememoreerd worden voor hun geweldige inzet om de voorbereiding tijdig te voltooien. Daarnaast dient te worden opgemerkt, dat de uitvoering van dit onderzoek mogelijk is gemaakt door adviezen en materiële steun van:

duikbedrijf Vriens B.V.	te Bergen op Zoom
Philips Lasstavenfabriek B.V.	te Utrecht
Smit Weld B.V.	te Nijmegen
H. Meerhof	te Oisterwijk
Nelson Bolzenschweisstechnik GmbH	te Gevelsberg (BRD)
Smit-Tak bergingsbedrijf B.V.	te Rotterdam

Bij de uitvoering van de experimenten met het stiftlassen is door de heren Hagn en Lohmann, verbonden aan Nelson Bolzenschweisstechnik, onmisbare assistentie verleend.

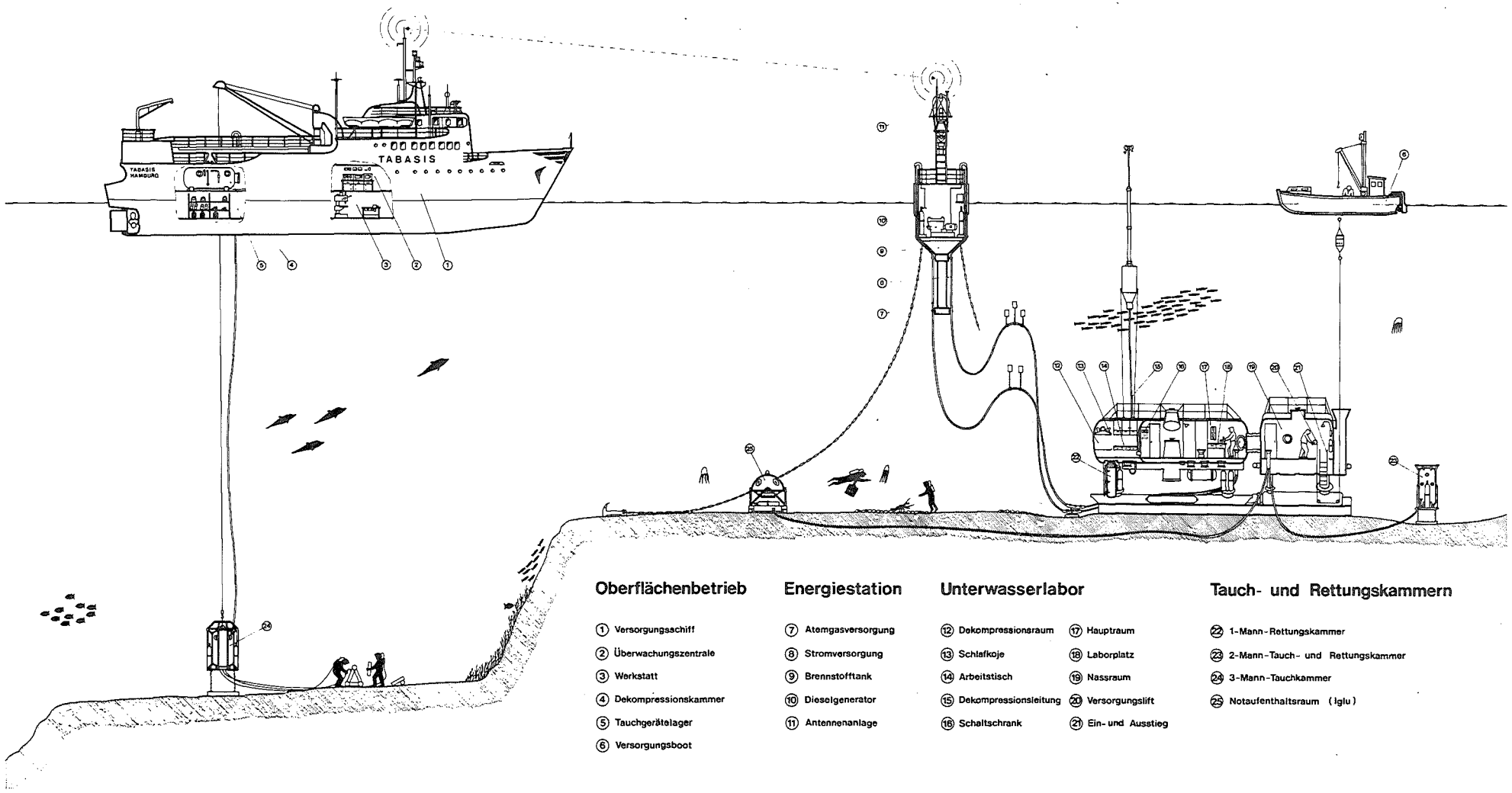


Fig. 1 - Schematisch overzicht van de voorzieningen, behorend tot het "Tauchsystem UWL - Helgoland".

Hoofdstuk 2 - Het onderwaterlaboratorium.

Bij de uitvoering van de experimenten van zowel PLOT 75 als PLOT 76 is gebruik gemaakt van het Unterwasserlabor (UWL) "Helgoland", dat gelegen is in de Oostzee nabij Neustadt:

positie in 1975 54°00'04"N - 10°50'04"O, diepte 16 m.

positie in 1976 54°05'48"N - 10°55'12"O, diepte 16 m.

Dit laboratorium is in 1969 gebouwd op initiatief van het Institut für Flugmedizin en het Biologische Anstalt Helgoland. Het vond zijn eerste standplaats in de Noordzee bij Helgoland. De verantwoordelijkheid voor het laboratorium is in 1972 overgedragen aan het Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schiffahrt (GKSS), waarmee vooral de technische kant van het beheer van de complexe installaties gediend is, hetgeen wordt weerspiegeld door de inmiddels gerealiseerde verbeteringen en uitbreidingen. Aangezien de opzet van een dergelijk laboratorium voor velen onbekend zal zijn wordt hiervan een korte beschrijving gegeven. De totale omvang van de huidige voorzieningen is in fig. 1 schematisch weergegeven.

Het UWL is een cilindervormig lichaam met een diameter van 2,5 m en is opgebouwd uit drie compartimenten: de decompressieruimten met controlepaneel (fig. 1 - nr. 12; lengte 2,5 m), de hoofdruimte (nr. 17 - lengte 6,5 m) en de natte ruimte (nr. 19 - lengte 4 m). De totale inhoud bedraagt 42 m^3. Tijdens normaal gebruik doet de decompressieruimte dienst als slaapvertrek. De hoofdruimte bevat werktafels, keuken, toilet, airconditioning, controlepanelen, enz. Met het oogmerk de luchtvochtigheid in de overige ruimten binnen de perken te houden is aan het oorspronkelijke laboratorium een natte ruimte gebouwd: hier bevinden zich de toegang, uiteraard aan de onderzijde, een douche en kasten ter droging van de duikpakken. De decompressieruimte wordt alleen als zodanig gebruikt wanneer een ploeg duikers hun werkperiode heeft voltooid. De ruimte kan daartoe van de hoofdruimte worden afgesloten met een luik. Gedurende de decompressie worden de druk en de samenstelling van de atmosfeer zeer geleidelijk gelijk gemaakt aan die van de lucht aan de oppervlakte. Bij een diepte van 16 m neemt deze decompressie ongeveer 18 uur

in beslag. Na afloop van deze periode wordt de druk in de decompressieruimte snel opgevoerd tot die van de hoofdruimte opdat het luik geopend kan worden. De duikers begeven zich dan naar de natte ruimte om hun duikpakken aan te trekken, verlaten het laboratorium en stijgen vervolgens naar de oppervlakte. Deze aktie moet uiteraard snel worden uitgevoerd opdat geen begin van verzadiging optreedt.
Het UWL gelijkt wat betreft ruimte en comfort op een grote caravan. Het biedt onderdak aan vier personen, waarvan steeds één man optreedt als "de bedrijfsleider", die belast is met de controle en het onderhoud. De temperatuur en luchtvochtigheid in het laboratorium bedragen respectievelijk ruim 25°C en 80%. Het zuurstofgehalte van de atmosfeer wordt ingesteld op 11%, althans op de diepte van 16 m. Tenslotte nog enkele uitwendige maten van het UWL: lengte 15 m, breedte 6,3 m, hoogte 6 m, gewicht op het droge 120 ton, onderwater te ballasten tot 20 ton negatief drijfvermogen, ontwerpdiepte 100 m.
Voor de voorziening van water, gas en elektriciteit wordt een energiestation gebruikt in de vorm van een boei (hoogte 13 m, diameter 3,8 m), waarin een dieselgenerator (25 kVA) en een compressor (240 Nl/min) zijn opgesteld, plus voorraden zuurstof, stikstof, helium, brandstof en drinkwater. Het UWL is door middel van een navelstreng met de boei verbonden. Samen met dit energiestation kan het UWL 15 à 20 dagen onafhankelijk van de wal werken. Mocht om welke reden dan ook dit station uitvallen, dan kan in het UWL nog gedurende 10 dagen een leefbaar klimaat worden gehandhaafd.
Uiteraard is een groot aantal voorzieningen nodig om een langdurig verblijf onderwater tot een veilige onderneming te maken. Voorop staat dat onder alle omstandigheden de duikers "onder druk" moeten blijven. De enige mogelijkheid tot terugkeer naar "aardse" omstandigheden kan slechts verlopen via een 18-urige decompressie. In eerste instantie is dan ook het UWL de enige veilige thuishaven. Om zich makkelijk te kunnen oriënteren in het werkterrein is rond het UWL met lijnen een markering als een spinneweb uitgezet met een straal van 70 m. In het werkgebied zijn twee "iglo's" (nr. 25) opgesteld, die in noodgevallen als tijdelijk onderkomen kunnen dienen. Een iglo is een aan de onderzijde open, half bolvormige constructie. In deze halve bolvorm wordt een leefbare atmosfeer gehandhaafd. Aangezien er een telefoonverbinding met het UWL aanwezig is kan de iglo tevens als communicatiepost worden gebruikt.

Indien de duikers in noodgevallen het UWL zouden moeten verlaten, dan kunnen zij gebruik maken van twee tweepersoons liften (nr. 23) die hen onder druk naar de oppervlakte brengen. De liften hebben een positief drijfvermogen en worden met grondankers op hun plaats gehouden. Na sluiten van het toegangsluik kunnen de duikers van binnenuit het grondanker ontkoppelen en stijgt de lift naar de oppervlakte. Door een schip of helicopter kan de lift vervolgens worden opgepikt. Voor de noodzakelijke decompressie moet de lift gekoppeld worden op een dekdecompressiekamer (nr. 4). Tenslotte bevindt zich onder het UWL nog een éénpersoons reddingskamer (nr. 22). Deze kamer is direkt vanuit het UWL - dus droog - toegankelijk. Het bergen van deze reddingskamer vindt plaats analoog aan die van de lift.
Het voorgaande maakt duidelijk dat aan de oppervlakte uitgebreide ondersteunende voorzieningen aanwezig moeten zijn. Deze vinden alle een plaats aan boord van het m.s. Tabasis (Tauchbasis, nr. 1). Het zenuwcentrum hiervan is de centrale (nr. 2) die 24 uur per dag is bemand. Alle aktiviteiten worden hier op de voet gevolgd, onder meer door het volgen van alle communicatie. Een deel van de communicatie verloopt via de energieboei als relaisstation. Het bevat radioverbindingen en een gesloten t.v.-systeem met het UWL. Alle alarmsystemen in het UWL, met name die van de gasdruk en -samenstelling, zijn in de centrale gedupliceerd.
Daarnaast zijn op de Tabasis voortdurend een arts en een ploeg oppervlakteduikers ter assistentie gereed. Aan boord bevindt zich de zespersoons dekdecompressiekamer die in noodgevallen voor decompressie gebruikt kan worden, en waarin ook via een luchtsluis medische assistentie kan worden verleend.
Ook is een uitstekend geoutilleerde werkplaats (nr. 3) aanwezig, zodat binnen de kortst mogelijke tijd defecte onderdelen gerepareerd of nieuwe onderdelen vervaardigd kunnen worden. Overigens staat deze werkplaats natuurlijk ook de aanwezige onderzoekers ter beschikking.

Rond het UWL is met boeien een "Sperrgebiet" uitgezet, waarin uit veiligheidsoverwegingen geen vaartuigen of personen aanwezig mogen zijn, althans voorzover zij niets met het UWL uitstaande hebben. Gezien haar afmetingen mag de Tabasis zich eveneens niet in dit gebied bevinden. Derhalve is er een klein hulpschip (nr. 6) aanwezig dat ondersteunende werkzaamheden boven het werkgebied van het UWL kan uitvoeren. Daar aan deze veiligheidsmaatregelen streng de hand wordt gehouden wordt in dit verboden gebied menig "toerist" verschalkt.

Hoofdstuk 3 - Het lassen onderwater.

Het is verrassend vast te stellen dat de kennis omtrent de mogelijkheid een elektrische boog onderwater in stand te houden door Sir Humphrey Davy reeds in 1802 is vastgelegd (4). De eerste praktische toepassing ter bereiding van colloïdale oplossingen van metalen en metaaloxyden door middel van verstuiven is in 1898 gemeld door Bredig (5). In constructieve zin vonden de eerste toepassingen plaats in 1915 voor het onderwater snijden, en in 1917 voor het lassen (6). Bij het laatste ging het feitelijk om het dichtsmelten van lekkende klinknagels van schepen op de Britse Royal Dockyard.
De eerste schreden op het gebied van het onderwaterlassen (OWL) vallen dus ongeveer samen met die van het lassen onder normale omstandigheden. De ontwikkeling van de laatste is tegenwoordig onvergelijkbaar veel verder gevorderd. Voor een beschrijving van de ontwikkelingen op het gebied van OWL wordt verwezen naar de literatuuroverzichten, die dankzij de zeer snel groeiende belangstelling voor dit onderwerp, talrijk zijn.
Ter oriëntatie wordt de inhoud van enkele van deze overzichten gegeven:

(7) Silva (1968)	- 29 referenties; voornamelijk (nogal populair-) wetenschappelijke beschouwingen over de potentiële toepassingsmogelijkheden van las- en snijprocessen op een diepte van 200 tot 5000 m.
(8) Bodger (1971)	- 48 referenties; historisch overzicht van het lassen tot 1970.
(9) Schaefer, Verhoeven (1972)	- 132 referenties; zeer korte opsomming van literatuur en patenten betreffende lassen en snijden.
(10) Stalker, Salter (1974)	- 112 referenties; nadruk op lassen met beklede elektroden, daarnaast andere las- en snijmethoden: 1970 - juni 1974.
(11) Dadian (1976)	- 40 referenties; nadruk op metallurgische aspecten van het OWL, getabelleerd: 1962-1975.
(12) Stalker (1976)	- 47 referenties; uitsluitend snijden, tot augustus 1975.

Uit deze literatuuroverzichten blijkt dat men zich tot omstreeks 1966 heeft beperkt tot het lassen met normale, zij het enigszins aangepaste, beklede elektroden. Daarna zijn onder impulsen van de snel toenemende interesse vele andere lasmethoden op hun merites voor het gebruik onderwater onderzocht. Hiertoe behoren de volgende processen: MIG en CO_2, TIG, Plasma, Explosief, Thermiet, Elektronenstraal, Zwaartekracht en Veerdruk, Firecracker (Elin-Hafergut) en Wrijving.
De indruk bestaat dat voor het merendeel deze onderzoekingen in het verkennend stadium zijn blijven steken; uitzonderingen zijn het MIG- en TIG-proces. Derhalve is tot op heden feitelijk alleen het lassen met beklede elektroden de enige universeel toepasbare methode.

Bij het beschouwen van het OWL is het nuttig stil te staan bij de verschillen die optreden in vergelijking met het lassen onder normale atmosferische omstandigheden.
Een grote rol speelt het slechte zicht. Is deze onderwater gewoonlijk al minimaal (0,5 - 10 m), de situatie wordt nog sterk verslechterd door gas- en stoomvorming tijdens het lassen. Door de zeer hoge temperatuur van de lasboog ontstaat stoom, en daarnaast wordt door de bekleding van de elektrode een aanzienlijke hoeveelheid gas en rook ontwikkeld. Door de hiermee gepaard gaande belvorming wordt de lasser het zicht op het lasbad volkomen ontnomen, met als gevolg een grote kans op lasfouten. Dit wordt enigszins ondervangen door het gebruik van zogenaamde contactelektroden, die dankzij een aparte samenstelling van de bekleding slepend - dus op de tast - kunnen worden verlast. Dit type bekleding bevat meestal ijzerpoeder, waardoor de elektroden bovendien een hoge neersmeltsnelheid hebben, zodat de lastijd en dus de verblijftijd onderwater wordt bekort. De ontwikkeling van de contactelektrode is in 1949 door de Nederlander Van der Willigen openbaar gemaakt (13).
De gasbelvorming aan de tip van de elektrode is overigens wel een noodzakelijk kwaad voor het in stand houden van de boog. Aangezien er zich periodiek gasbellen van de gasatmosfeer rond de boog losmaken en opstijgen, is de gasatmosfeer niet stabiel, hetgeen aanleiding geeft tot problemen met de boogstabiliteit.

Met als additioneel gegeven de moeilijke en levensvijandige omgeving waarin het lassen wordt uigevoerd, zal het duidelijk worden dat bij het OWL zeer hoge eisen worden gesteld aan de vakbekwaamheid. Nu heeft de ambachtelijkheid altijd hoog in het vaandel van de lastechniek gestaan en veelal zijn hooggekwalificeerde lassers dan ook louter en alleen belast met de uitvoering van laswerk, waardoor een hoog niveau van vakbekwaamheid bereikbaar wordt. Bij het OWL is deze continuïteit van werkzaamheden zelden of nooit aanwezig, daar de lasser zich vaak ook met andere duikaktiviteiten bezig moet houden. Deze menselijke factoren: vakbekwaamheid - levensvijandige omgeving - geen zicht op lasbad zullen in de toekomst dan ook zeker aanleiding geven tot de ontwikkeling van gemechaniseerde lasapparatuur.
Naast voornoemde factor, die de uitvoerbaarheid van het OWL negatief beïnvloedt, brengt het specifieke milieu ook een aantal factoren met zich mee die invloed hebben op het lasproces als zodanig.
Aangezien aan water een snellere warmteoverdracht plaatsvindt dan aan lucht treedt er bij OWL een hogere afkoelsnelheid dan normaal op. Dit is een zeer belangrijk gegeven daar voornamelijk het temperatuurverloop de metallurgische struktuur en de restspanningen van de lasverbinding bepaalt. Door de hoge afkoelsnelheid neemt de stolsnelheid toe, met als mogelijk gevolg een onvoldoende inbranding en slakinsluitsels en porositeiten in het lasmetaal. Bovendien treedt in de warmte- beïnvloede zone (heat-affected zone; HAZ) van het plaatmateriaal direkt naast de las een aanzienlijke harding op, waardoor de taaiheid achteruit gaat.
Deze achteruitgang kan tot dramatische proporties toenemen onder invloed van waterstof, die tijdens het lassen in het lasmetaal geïntroduceerd wordt. In de normale laspraktijk tracht men deze waterstofopname zoveel mogelijk tegen te gaan door speciale bekledingen toe te passen die bij temperaturen boven 100°C worden opgeslagen. Hiermede wordt beoogd het watergehalte in de bekleding zo laag mogelijk te houden. Bij OWL hebben deze maatregelen echter geen zin daar de boogatmosfeer voor zestig tot tachtig procent bestaat uit waterstof, die onder invloed van de zeer hoge boogtemperatuur door dissociatie van water en stoom vrijkomt. Deze waterstof lost snel op in vloeibaar staal en diffundeert dan gemakkelijk naar de HAZ in de plaat. Tezamen met de daar ontstane hardingsstrukturen kan ernstige verbrossing optreden, die onder invloed van de lasspanningen scheurvorming kan veroorzaken.

Een belangrijke factor bij het OWL is ook de omgevingsdruk die afwijkend is ten opzichte van het lassen onder normale omstandigheden. Globaal neemt met elke tien meter diepte de omgevingsdruk, en dus de druk van de boogatmosfeer en die op het lasbad met één atmosfeer toe. Dit heeft een aanzienlijke invloed op zowel de fysische processen die zich in de boog voltrekken (door verandering van grootheden zoals ionisatiegraad, temperatuur), als op de chemische reacties die zich in het lasbad afspelen (b.v. desoxydatie).

Gezien het voorgaande zou men mogen verwachten dat voor het OWL speciaal ontwikkelde apparatuur toegepast wordt, zoals stroombronnen met een aan de afwijkende boogkarakteristiek aangepaste statische en dynamische karakteristiek, elektroden met een aan de afwijkend verlopende chemische processen aangepaste samenstelling, enzovoorts.
Dit is echter geenszins het geval: de enige modificaties die op grote schaal worden aangetroffen zijn die welke de veiligheid betreffen, en die dus slechts het OWL toelaatbaar doen zijn. Wel mag worden aangenomen dat de enkele zeer gerenommeerde firma's op dit gebied enige, zorgvuldig geheim gehouden aanpassingen op bovenstaande problemen hebben weten te bewerkstelligen, waaraan zij dan ook hun wereldfaam hebben te danken. Dat op voornoemde probleemgebieden geen adequate oplossingen zijn aangedragen kan wellicht worden verklaard door het typisch empirische karakter van de lastechniek. Door de slechts fragmentarisch aanwezige wetenschappelijk gefundeerde kennis van voor de lastechniek zulke belangrijke fenomenen als temperatuurvelden, de kinetiek van gas/lasbad - en slak/lasbadreacties en fysische processen in de boog, heeft men onvoldoende inzicht in de veranderingen die als gevolg van afwijkende uitwendige omstandigheden optreden.
Om in de toekomst voor de aangevoerde problemen oplossingen te kunnen geven komt sedert 1972 op internationale schaal wetenschappelijk onderzoek - zij het slechts moeizaam - op gang (14, 15), vaak met steun van de overheid. Dat er weinig steun voor dit onderzoek komt van de zijde van industriële ondernemingen, waarvan men kan verwachten dat zij belang hebben bij een volwaardige onderwaterverbindingstechniek, vindt zijn verklaring in het

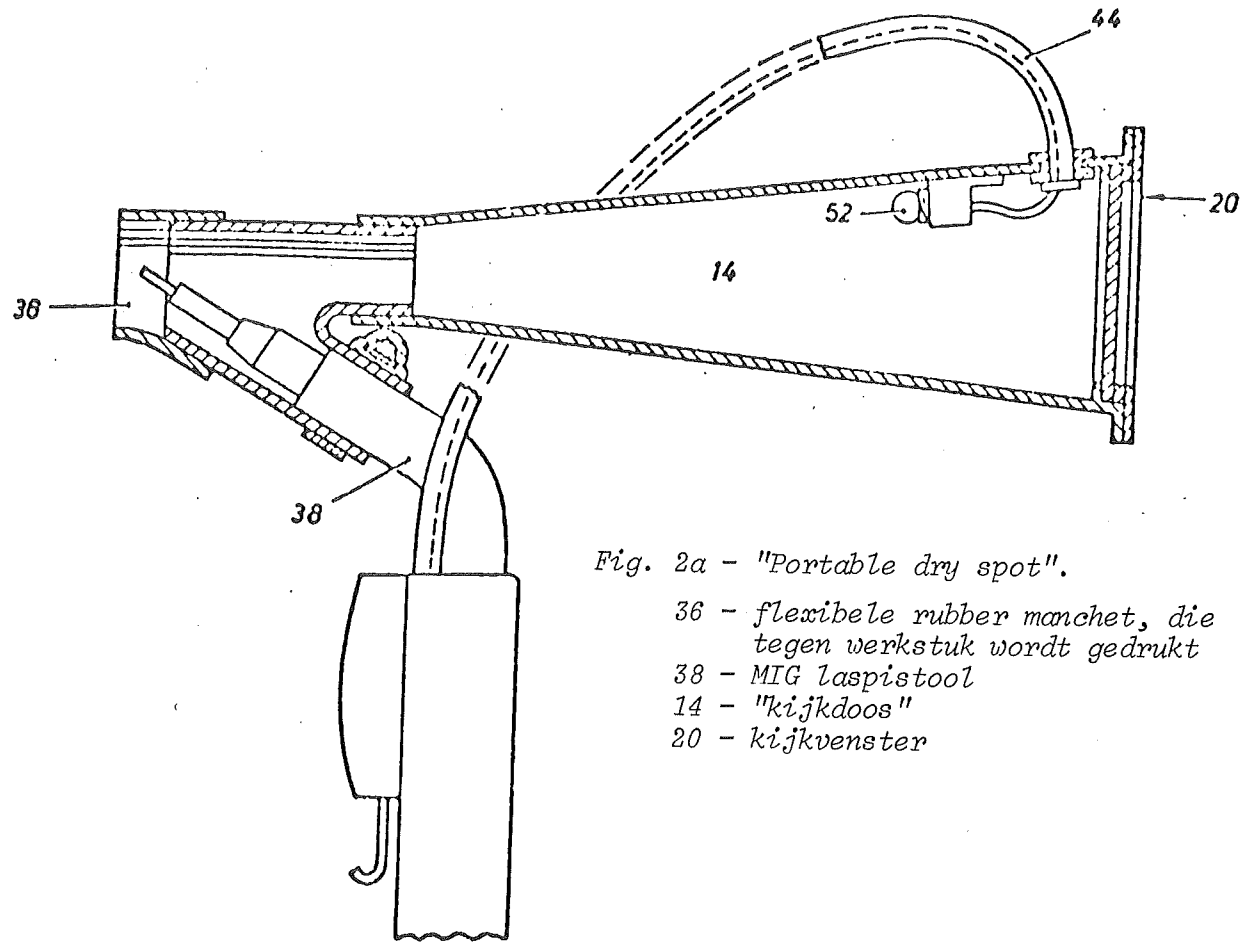
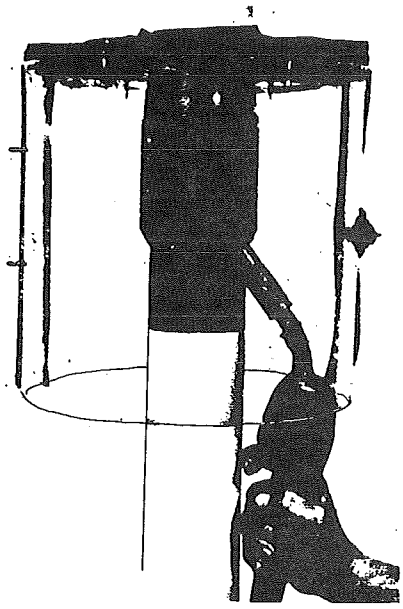


Fig. 2a - "Portable dry spot".

36 - flexibele rubber manchet, die tegen werkstuk wordt gedrukt
38 - MIG laspistool
14 - "kijkdoos"
20 - kijkvenster



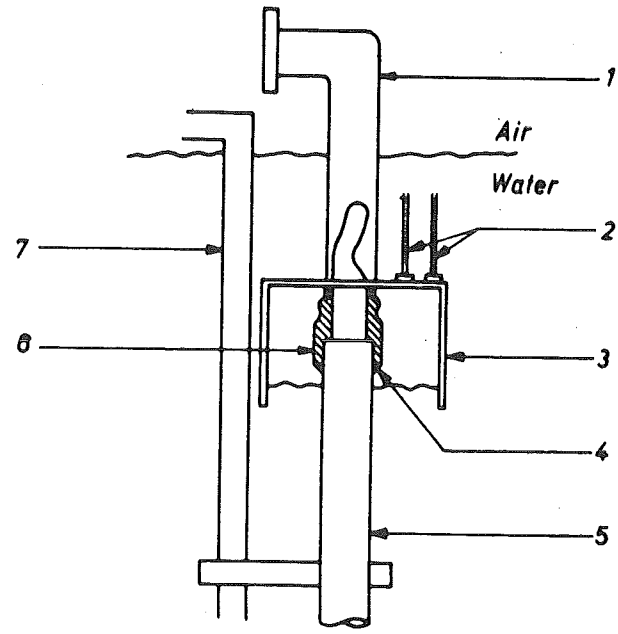


Fig. 2b - Hydrobox ter reparatie van een verticale pijpleiding (riser).

1 - nieuw aan te brengen pijpdeel; 2 - gasaansluitingen;
3 - Hydrobox, gemaakt van doorzichtige kunststof;
4 - hoeklas, gemaakt met Hydrobox; 5 - riser;
6 - lasmof, die boven water op nieuw pijpdeel is gelast;
7 - platform.

feit dat er een, zij het slechts schijnbare, oplossing bestaat, waarmee men tot op heden de problemen heeft kunnen omzeilen. De oplossing bestaat hieruit, dat men tracht de omstandigheden, die zich voordoen bij het lassen onder normale omstandigheden, zoveel mogelijk te benaderen bij de uitvoering van het OWL: het uitsluiten van water als omgevend medium*. Deze ontwikkeling komt voor een aanzienlijk deel uit de U.S.A.
In eerste instantie werd in een doosconstructie door middel van toegevoerd gas het water zeer plaatselijk uit de doos verdrongen, waarin met een elektrode of laspistool in het droge gemanipuleerd kan worden: de "portable dry spot" en de "hydrobox" (fig. 2a, 2b). Bij dit systeem bevindt de lasser zich dus wel in het water. Hiermee wordt bereikt dat het zicht op het lasbad tot een beter niveau wordt opgehaald, geen fluctuaties in de boogstabiliteit optreden als gevolg van periodiek ontsnappende bellen, en dat het waterstofgehalte in de boogatmosfeer drastisch wordt teruggebracht. Met deze constructie wordt de duiker-lasser wel beperkt in zijn bewegingsvrijheid met de lasboog, maar aan de andere kant is de constructie tamelijk eenvoudig en dus niet kostbaar.
Een volgende ontwikkeling is het gebruik van een hyperbare laskamer (fig. 3) met een open bodem die over het te lassen constructiedeel wordt geplaatst. Door het toevoeren van gas wordt het water uit deze laskamer verdrongen. In deze laskamer of habitat kan de lasser in het droge zijn werk uitvoeren bij een druk die gelijk is aan de omgevingsdruk ter hoogte van de bodem van de habitat. Hiermee bereikt men dus bovendien een goede manipulatiemogelijkheid van het lasbad, en de mogelijkheid door middel van voorwarmen van de te lassen constructie een hoge afkoelsnelheid te voorkomen. Daarenboven heeft men volledige vrijheid niet-destructief onderzoek, zoals radiografisch en ultrasoon onderzoek, uit te voeren. Men dient wel rekening te houden met een relatieve vochtigheid van de atmosfeer van tegen de 100%. Bij gebruik van een habitat wordt vooral het lassen met TIG, MIG en beklede elektroden toegepast.

* In dit verslag zal voor dit systeem de term "lassen in het droge" of "droog lassen" worden gebezigd, in tegenstelling tot het "lassen in het natte" of "nat lassen", waarvan in het voorgaande sprake is.

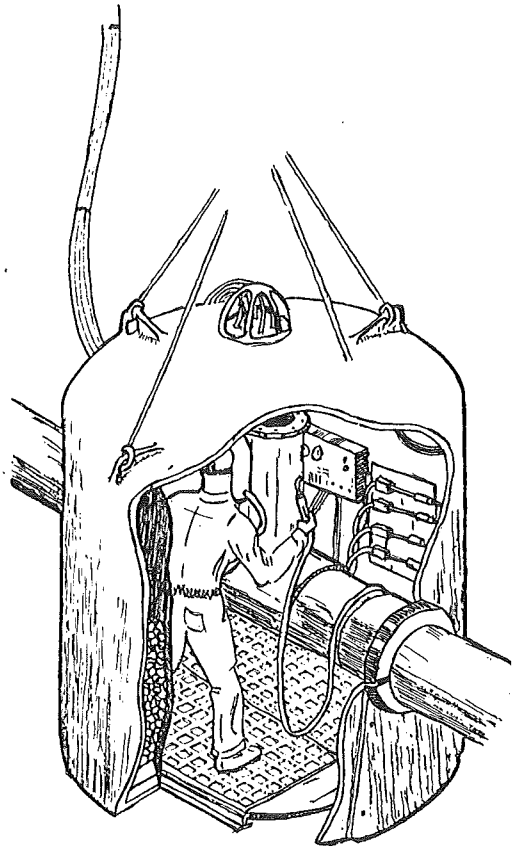


Fig. 3 - Hyperbare laskamer.

Het zal duidelijk zijn dat deze werkwijze een zeer geringe flexabiliteit heeft, daar voor elke constructie een precies passende habitat nodig is, tenzij seriewerk verricht wordt zoals bij de aanleg van een pijpleiding. Bovendien verlangt deze werkwijze uitgebreide voorzieningen aan de oppervlakte, zoals hefvermogen, gespecialiseerde, ondersteunende bemanning.
Het eindpunt van de ontwikkeling van deze werkwijze is uiteraard het gebruik van een drukcabine, die op de te lassen constructie wordt bevestigd, en waarin het milieu volledig gelijk is aan atmosferische omstandigheden, dus 1atm. druk en gecontroleerde luchtvochtigheid. Dit soort drukcabines wordt op het ogenblik door de Franse onderneming Comex ontwikkeld (16). Deze ontwikkeling zal uiteindelijk onvermijdelijk zijn daar de mens, bij steeds toenemende diepte, niet aan steeds toenemende druk blootgesteld kan worden.
Het voordeel van deze droge technieken is dat het mogelijk is hoogwaardige lassen te vervaardigen die bijvoorbeeld voldoen aan de strenge kwalificatie-eisen van het American Petroleum Institute, API. Overigens zou men zich moeten afvragen of het noodzakelijk is dat offshore constructies voldoen aan eisen die onshore worden gesteld.
Het nadeel van de droge habitattechniek is echter dat hij buitengewoon omslachtig is. Dit wordt veroorzaakt door de grote afmetingen van de habitat, waardoor deze tevens moeilijk waterdicht te bevestigen is aan de te lassen constructie, zodat hiermee veel tijd verloren gaat. Daarnaast moet bijvoorbeeld de samenstelling van de atmosfeer in de habitat voortdurend nauwkeurig worden gecontroleerd opdat deze leefbaar blijft zonder dat brand- of explosiegevaar ontstaat (partiële zuurstof- en waterstofdruk). Deze omstandigheden brengen met zich mee dat een grote hoeveelheid ondersteunende apparatuur met het daarbij horende bedienend personeel aan de oppervlakte aanwezig moet zijn. Het resultaat is tevens dat laswerk, dat met deze werkwijze wordt uitgevoerd, buitengewoon duur is. Ter illustratie moge het volgende dienen:

Bij de reparatie van een defecte pijpleiding wordt het beschadigde deel verwijderd waarna aan de overblijvende pijpeinden laskanten worden gemaakt. Vervolgens wordt aan de oppervlakte een precies passend pijpdeel, eveneens met laskanten, op maat gemaakt en vervolgens afgezonken en geplaatst in de pijpleiding. Deze werkzaamheden worden zonder bezwaar alle "in het natte" uitgevoerd, mits hiervoor de diepte niet te groot is. Om tenslotte de twee resterende lassen - aan weerszijden van het aangebrachte pijpdeel - te kunnen maken wordt een habitat aangebracht. De kosten van deze in wezen relatief eenvoudige onderneming bedragen op het continentaal plat van de Noordzee in de ordegrootte van tien miljoen gulden, voornamelijk veroorzaakt door de kosten die een habitat met zich meebrengt. Aan de andere kant moet men in overweging nemen dat bijvoorbeeld een breuk in een olietransportleiding op het Engelse deel van het continentaal plat in de noordelijke Noordzee een produktieverlies van 2½ miljoen pond sterling per dag veroorzaakte.

De huidige stand van de OWL-techniek beschouwend kan resumerend het volgende beeld geschetst worden.
Het unieke gegeven dat het mogelijk blijkt te zijn een lasboog onderwater in stand te houden maakt het in principe mogelijk in het natte lasverbindingen tot stand te brengen; naar het zich laat aanzien zullen beperkingen in diepte slechts van menselijke aard zijn. De kwaliteit van deze lasverbindingen is echter slecht. Dit kan goeddeels verklaard worden door het feit dat - jammer genoeg - de afgelopen dertig jaar er zich geen noemenswaardige ontwikkelingen hebben voorgedaan: eigenlijk betreft de enige aanpassing aan uit de dagelijkse laspraktijk ontleende technieken de veiligheid. Om het voornoemde principe te realiseren zullen verdergaande aanpassingen noodzakelijk zijn. Deze aanpassingen zullen slechts kunnen ontspruiten aan een beter inzicht in fundamentele processen die bij het lassen een belangrijke rol spelen.
Dat inzicht kan alleen door - deels wetenschappelijk - onderzoek worden verkregen. Hierop zal in latere hoofdstukken worden teruggekomen.
Aan de andere kant is de droge OWL-methode in staat om lasverbindingen van excellente kwaliteit te leveren. Een principieel nadeel van deze methode is dat het een constructie eist ter grootte van de te maken lasverbinding - een nadeel waarmee het oorspronkelijk karakter van eenvoud van de lastechniek als verbindingstechniek feitelijk op losse schroeven komt te staan.

Dit neemt niet weg dat de ontwikkeling van deze methode met veel verve ter hand is genomen en dat deze een hoge vlucht heeft genomen. Hieraan zal niet vreemd zijn dat acuut een zeer grote behoefte is ontstaan aan een betrouwbare OWL-techniek, waarbij kosten noch moeite behoefden te worden gespaard, als die betrouwbare techniek maar snel kwam.
Dit heeft waarschijnlijk zeer in het nadeel van de natte OWL-techniek gewerkt. Toch moet men beseffen dat alleen de natte techniek kan uitgroeien tot een flexibele en universeel toepasbare. Een dergelijke techniek is noodzakelijk voor de grote vlucht die de oceanologie ongetwijfeld zal nemen om niet alleen te voorzien in grondstoffen voor de energie-opwekking maar ook in andere grondstoffen zoals ertsen en in primaire levensbehoeften: voedsel.

Hoofdstuk 4 - Beschrijving van het onderzoek.

4-1: Lassen met beklede elektroden.

4-1a: PLOT 75.

De proeven van PLOT 75 zijn geheel gericht op het onderzoek naar de toepasbaarheid van beklede elektroden voor het OWL. Bij een verkennend onderzoek, uitgevoerd in een bak water bij het Metaalinstituut T.N.O., zijn uit een groot aantal merken en typen elektroden de vier meest belovende geselecteerd. Daarnaast is een vijfde elektrode, namelijk code E, ingebracht door de duiker-lasser die in 1975 de proefplaten heeft gelast. Deze elektrode is te beschouwen als een standaardelektrode bij het OWL in Nederland, en geeft daardoor een referentie met de praktijk. Deze vijf elektroden zijn als volgt te typeren:

elektrode A Ø 5 mm , rutielbekleding type ISO E 433 R 14,
B Ø 5 mm , zure bekleding
C Ø 5 mm , traagstollende rutielbekleding; handelselektrode voor OWL
D Ø 5 mm , oxyderende bekleding (ijzeroxyde) - type AWS E 6020
ISO E 431 O 14.
E Ø 4 mm , dikbeklede rutielelektrode; handelselektrode voor OWL,
type AWS E 6013

Voor het lassen met deze elektroden is als stroombron gebruik gemaakt van een lasaggregaat Lincoln SAE 400 (open spanning 50V, I_{max}=400A bij 40V). De stroomsterkte en spanning konden op meters worden afgelezen; hierbij is de stroomsterkte over een shunt gemeten. De toepasbaarheid van de elektroden A t/m D voor het OWL is getracht vast te stellen aan de hand van bevindingen bij het lassen van drie typen proefplaten:

* - het maken van hoeklassen in vijf posities, namelijk
  in het gootje (onder de hand)
  staande hoeklas onder de hand
  verticaal neergaand
  boven het hoofd
  horizontaal-verticaal (uit de zij)

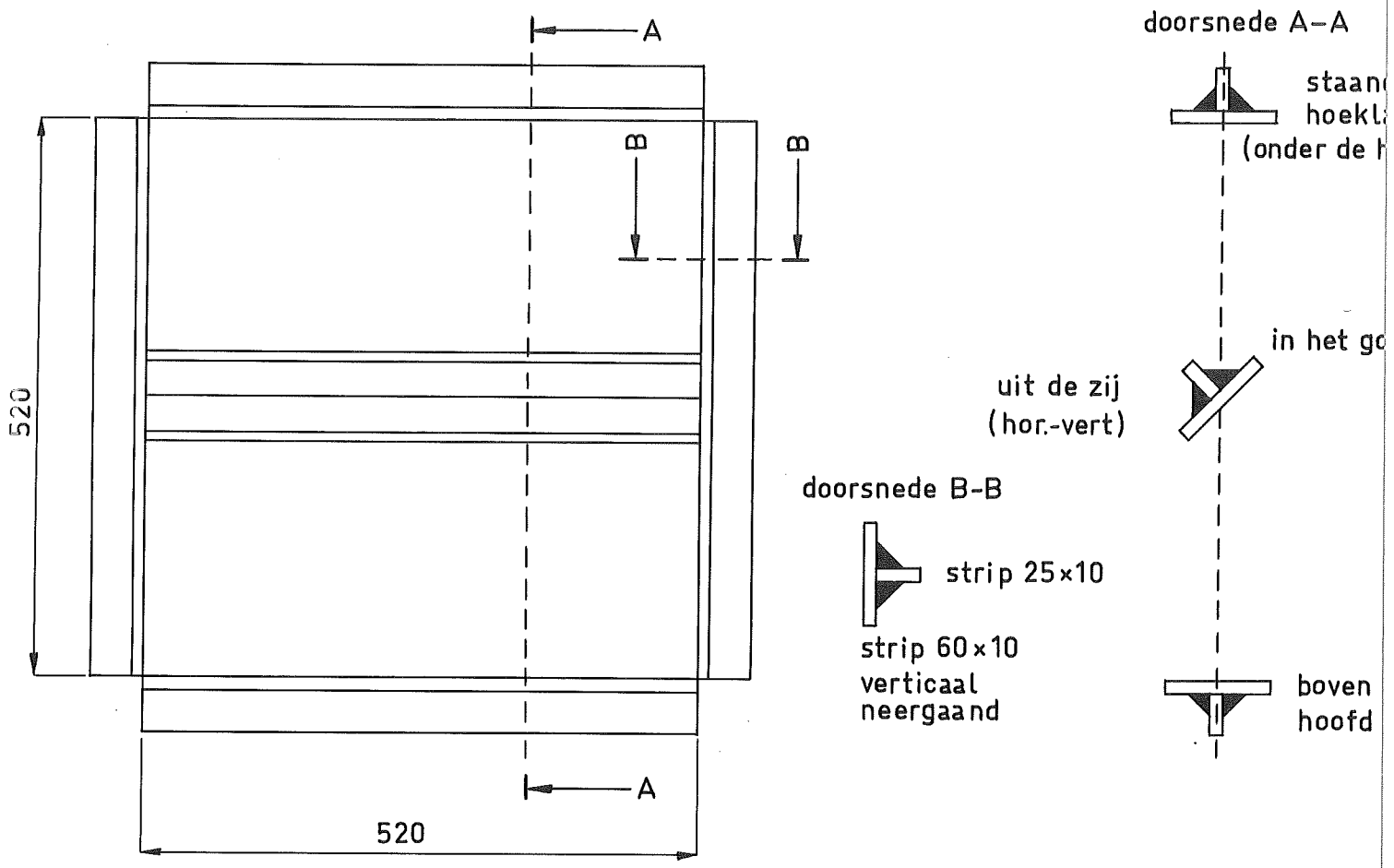


Fig. 4 - Hoeklasrek (PLOT 75).

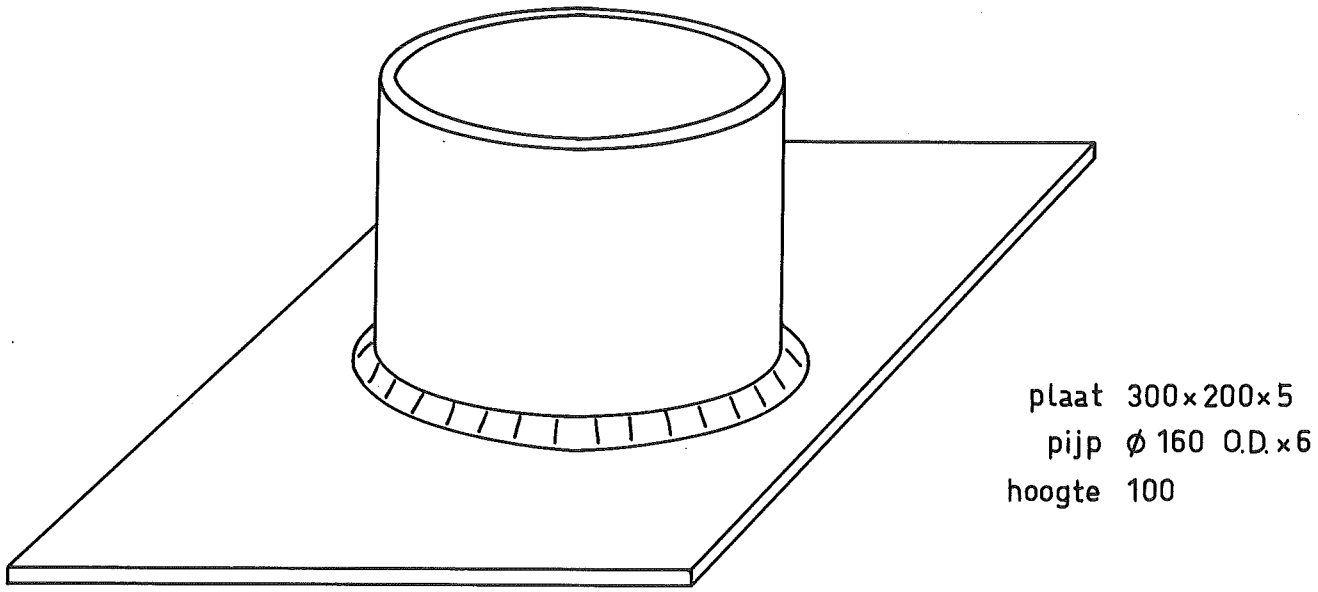


Fig. 5 - Pijp/plaatverbinding (PLOT 75).

Hiertoe is gebruik gemaakt van een rek (fig. 4) dat vervaardigd is uit strip 60 x 10 mm, kwaliteit St. 37. Het rek wordt geplaatst in een frame, waarin het in hoogte verstelbaar is. De hoeklassen zijn gelegd in één laag en zijn in duplo uitgevoerd.

* - Daarnaast is met elke elektrode onder de hand een staande hoeklas gemaakt om op een horizontaal opgestelde plaat een verticaal opgestelde pijp te lassen (fig. 5). De opzet was deze proefstukken aan een persproef te onderwerpen.

* - Tenslotte is met elke elektrode onder de hand een plaat van St. 37 met open V-naad met onderlegstrip (fig. 6) volgelast met 12 tot 16 rupsen.

Voor nadere details betreffende de feitelijke uitvoering der experimenten wordt verwezen naar (2).

De omschreven proeven leiden voornamelijk tot inzicht in de executieve lasbaarheid, dat wil zeggen dat nagegaan wordt of een metallische verbinding tot stand te brengen is, afhankelijk van randvoorwaarden zoals lasnaadvorm en laspositie. De geometrie van de proefplaten is minder geschikt om onderzoek te verrichten naar de lokale - met name de mechanische - eigenschappen van de lasverbinding, de zogenaamde metallurgische lasbaarheid.

Uit lastechnische overwegingen is te verwachten dat het omringend medium bij het OWL veeleer problemen van metallurgische dan van executieve aard met zich mee zal brengen. Daarom is besloten om de experimenten van PLOT 76 voornamelijk te wijden aan onderzoek naar de metallurgische lasbaarheid.

4-1b: PLOT 76.

Op grond van de resultaten van PLOT 75 zijn drie van de vijf typen beproefde elektroden geselecteerd voor gebruik bij het uitvoeren van de proeven van PLOT 76. Daarnaast zijn twee nieuwe elektroden (hetzelfde type maar verschillend fabrikaat) in het onderzoek betrokken. Deze zijn gekozen op grond van de resultaten van experimenten die zijn uitgevoerd bij het proefdraaien van het programma voor PLOT 76. Dit heeft plaatsgevonden in een oefentank bij het duikbedrijf Vriens op 7 augustus 1976. De hierbij verkregen resultaten zijn vermeld in een intern rapport (19).

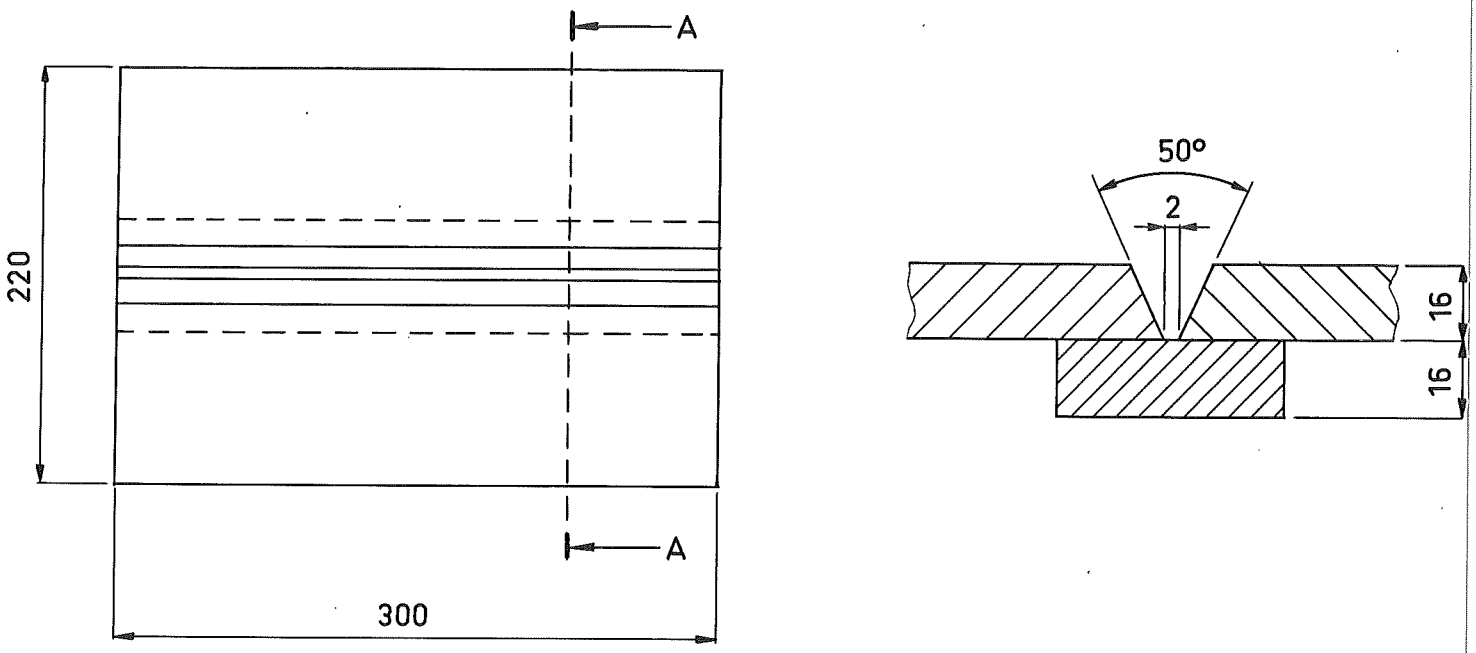


Fig. 6 - Proefplaat met open V-naad (PLOT 75).

De typering van de vijf elektroden van PLOT 76 luidt als volgt:

elektrode A Ø 5 mm, rutielbekleding type ISO E 433 R 14

D Ø 5 mm, oxyderende bekleding (ijzeroxyde) - type ISO E 431 O 14 AWS E 6020

E Ø 5 mm, dikbeklede rutielelektrode, handelselektrode voor OWL, type AWS E 6013,

F Ø 5 mm, RVS elektrode met ca. 30Cr-10Ni, type AWS E 312-16, rutielbekleding

G Ø 4 mm, hetzelfde type als F, maar ander fabrikaat

Zowel de opzet van het onderzoek als de daadwerkelijke realisatie zijn reeds uitvoerig omschreven in respectievelijk het draaiboek (20) en het werkverslag (3), zodat hier slechts in het kort de uitvoering wordt omschreven.

Als stroombron is gebruik gemaakt van een gelijkrichter-transformator Arcos G 600 (open spanning 65V, maximale stroomsterkte 600 A gelijkstroom), die gevoed wordt door een boordgenerator van de Tabasis. Uit veiligheidsoverwegingen is aan de secundaire zijde van de transformator een zware dubbelpolige messchakelaar opgenomen. Zolang er niet wordt gelast, wordt hiermee het lascircuit spanningsloos gemaakt, dus bijvoorbeeld bij het inzetten van een nieuwe elektrode.

Over deze messchakelaar is de spanning gemeten en continu geregistreerd met een recorder. Om hieruit de boogspanning te berekenen moet gecompenseerd worden voor de weerstand van het lascircuit. Na beëindiging van de proeven is deze weerstand gemeten met een Thomsonbrug. Om energieverliezen in het ongebruikelijk lange lascircuit van ca. 140 m zoveel mogelijk te beperken zijn voor zover mogelijk twee laskabels parallel geschakeld, elk met een dwarsdoorsnede van 70 of 95 mm^2.

Wegens storingen in de meetelektronica kon de stroomsterkte niet worden gemeten over een shunt (500 A - 100 mV), zodat toen maar met een magnetische veldsterktemeter (een zogenaamde stroomtang) gemeten is. Aangezien stroomsterkte en spanning gekoppeld zijn door de karakteristiek van de transformator, is het voldoende een van beide variabelen te registreren om het lasproces volledig te kunnen volgen mits de karakteristiek bekend is. In dit geval is daartoe de spanning gebruikt.

Voor communicatie stonden drie systemen ter beschikking. In de eerste plaats een DUC-set (Diver's Underwater Communication), een rechtstreekse lijnverbinding tussen de lasser en de leider van de experimenten op de Tabasis, die het mogelijk maakt dat de beide personen met elkaar spreken

(tweerichtingsverkeer). De DUC-set wordt gebruikt om commando's door te geven, zoals het onderbreken en sluiten van het lascircuit met de messchakelaar of om overleg te plegen om tot een juiste instelling van de transformator te komen. Hieruit blijkt dat de DUC-set een onmisbaar communicatiemiddel is, vooral bij het in acht nemen van de veiligheidsmaatregelen. Aan de andere kant is het gebruik van de DUC-set beperkt vanwege de matige kwaliteit van het geluid en de slechte verstaanbaarheid, met alle kans op misverstanden. (Men bedenke dat de duiker het mondstuk van zijn ademhalingsautomaat reeds in de mond heeft, zodat spreken niet een triviale aangelegenheid is).
Voor meer uitgebreid overleg is dan ook gebruik gemaakt van een draadloze portofoonverbinding met het UWL, die een zeer goede geluidskwaliteit heeft. Bij gebruik hiervan moet de duiker zich naar de natte ruimte van het UWL begeven. Aangezien hij daar toch regelmatig komt om bijvoorbeeld lucht te halen, betekent dit geen groot bezwaar. Dit tweede communicatiesysteem wordt bovendien benut om metingen te synchroniseren die deels in het UWL en deels op de Tabasis worden verricht.
Het derde communicatiesysteem is een beeldverbinding: een onderwatercamera geeft op een monitor op de Tabasis rechtstreeks het gebeuren rond de lastafel weer. Hoewel dit dus eenrichtingsverkeer is, is dit visueel contact van buitengewoon belang geweest. De uitvoering van de experimenten kan rechtstreeks gevolgd worden en problemen zijn onmiddelijk waar te nemen. Juist door het kenmerkende karakter van experimenten is dit van grote importantie. Ook de verbale communicatie met de DUC-set is hiermee in het bijzonder gediend, immers, een goed verstaander heeft maar een half woord nodig. Daarnaast biedt dit t.v.-systeem de interessante mogelijkheid de beelden met een videorecorder vast te leggen. Deze kunnen later gebruikt worden voor het reconstrueren van het verloop van de uitvoering der experimenten, en - afhankelijk van het resultaat - voor demonstratiedoeleinden.
Overigens is bij het lassen het gebruik van een t.v.-systeem ook aan beperkingen gebonden. Zo mag de camera bijvoorbeeld niet op de lasboog worden gericht wegens het gevaar voor inbranden van het lichtgevoelige element. Bovendien hebben wij met de videorecorder veel hinder ondervonden van het feit dat de frekwentie van het 220-volt boordnet van de Ta-basis niet constant was, waardoor de beeldsynchronisatie

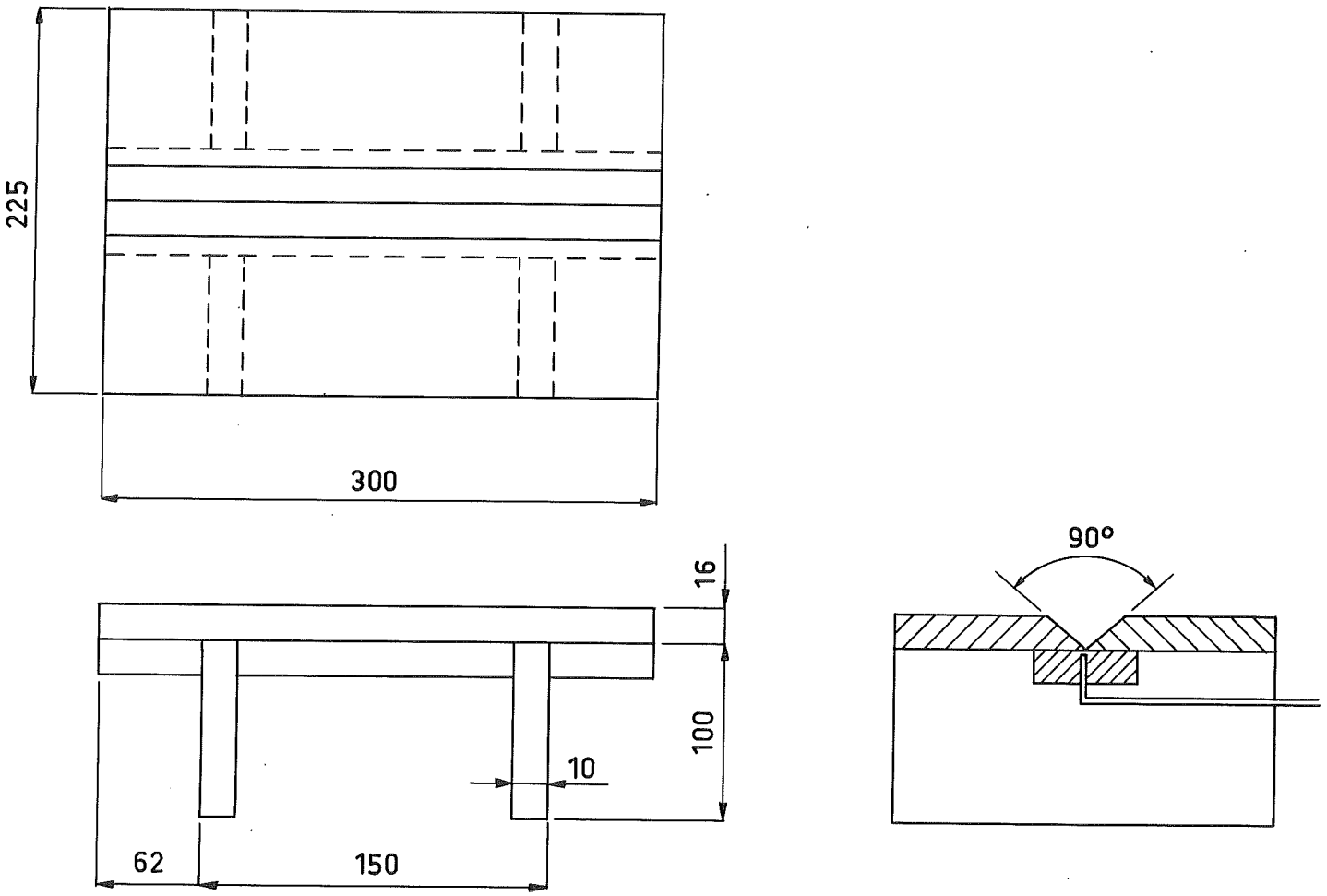


Fig. 7 - Proefplaat met gesloten V-naad plus onderlegstrip en verstijvingsribben (PLOT 76).

volkomen verloren gaat. Wat dit betreft lijkt het verstandiger een door accu's of batterijen gevoede recorder te gebruiken.

Met de vijf reeds vermelde typen elektroden zijn twee experimenten uitgevoerd, hetgeen wordt weerspiegeld door het gebruik van twee typen proefplaten.

x- De metallurgische lasbaarheid is bepaald aan de hand van lassen die onder de hand gemaakt zijn in een vlakke plaat met gesloten V-naad met onderlegstrip. In vergelijking met het gelijksoortige type proefplaat dat voor PLOT 75 is gebruikt, zijn een aantal veranderingen aangebracht. In de eerste plaats is plaat van St. 52 gebruikt, hetgeen voor de offshorepraktijk meer relevant is dan St. 37. In de tweede plaats is in elke proefplaat een thermokoppel aangebracht in de onderlegstrip op 0,4 à 0,6 mm van de wortel van de naad. Met behulp hiervan is het temperatuurverloop bij het lassen van de grondnaad geregistreerd. Als koude las van het koppel is het in dit geval meest triviale lichaam met constante temperatuur gebruikt, namelijk de zee. Om de meetkabel zo kort mogelijk te houden is de recorder die voor de registratie van het temperatuurverloop is gebruikt in het UWL opgesteld. Met deze registratie is de alom in de literatuur vermelde snelle afkoeling bij het OWL gekwantificeerd.
Een derde verandering ten opzichte van PLOT 75 is dat er onder de proefplaat verstijvingsribben zijn aangebracht (fig. 7). Hiermee wordt het kromtrekken van de plaat als gevolg van het krimpen bij stollen en afkoelen van het lasmetaal bij de gegeven geometrie van de naad tegengegaan. Indien deze maatregel niet wordt getroffen is het onmogelijk rechte en vlakke proefstaven dwars op de lasnaad uit de plaat te nemen, zodat dit tot een oneconomisch gebruik van het verkregen lasmetaal leidt. Bovendien komt het tegengaan van krimp (zogenaamde sterke "restraint" omstandigheden) meer overeen met de normale laspraktijk, zodat uit het oogpunt van inwendige spanningen dit type proefplaat interessanter is.
De lasnaad van deze proefplaten is gevuld met zeven tot negen lasrupsen. Gedurende de uitvoering van het laswerk is door de lasser voor elk elektrodetype tweemaal een vragenlijst ingevuld omtrent zijn bevindingen met betrekking tot een aantal kenmerken, namelijk het ontsteken en

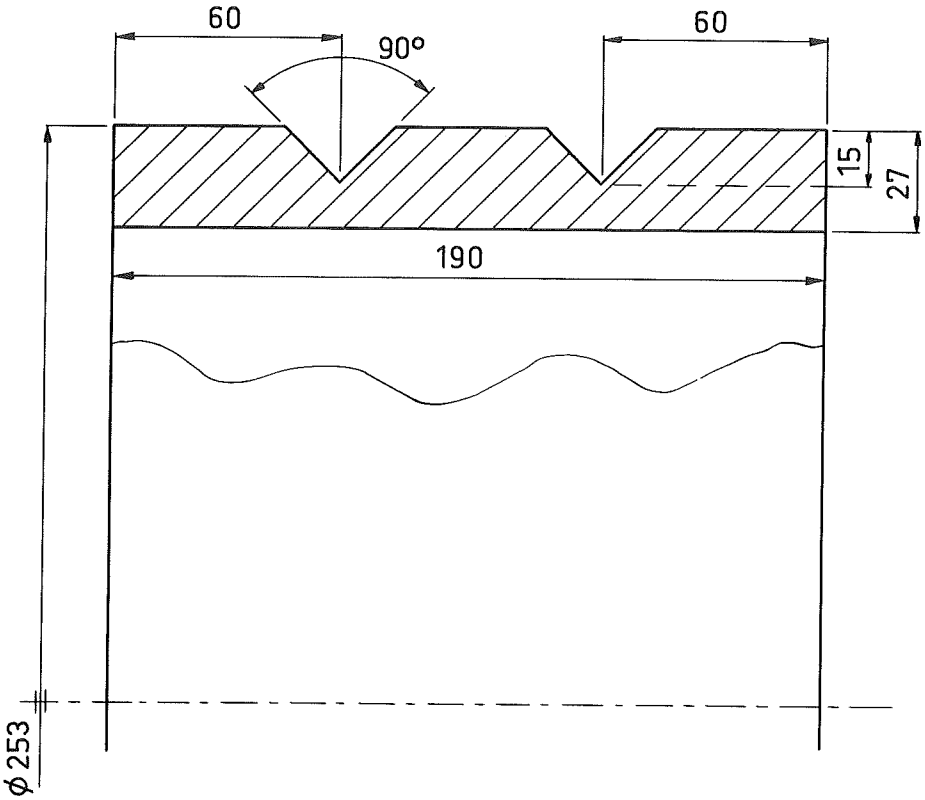


Fig. 8 - Pijpstuk met rondgaande V-naden (PLOT 76).

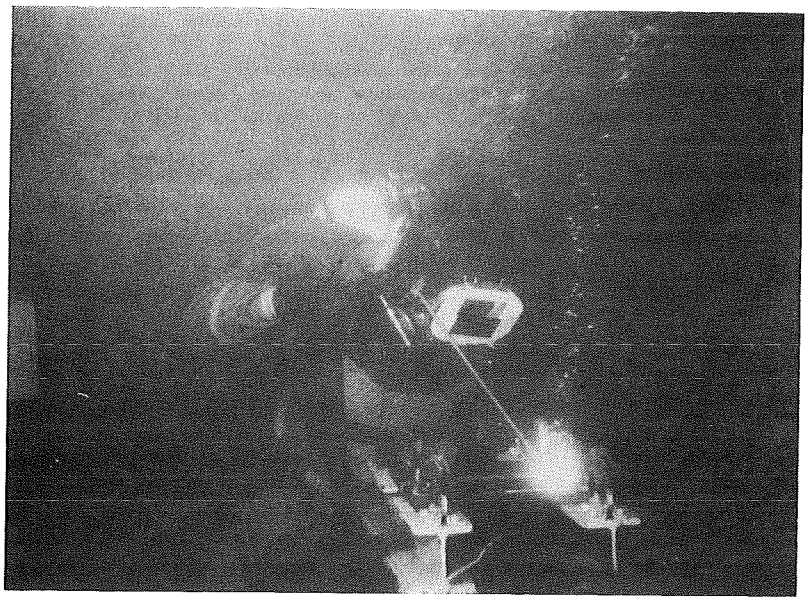


Fig. 10 - Uitvoering van laswerk aan een vlakke plaat met V-naad.

de stabiliteit van de boog, de kelkvorming en de toestand van de bekleding, het spatten, de slaklossing en de mate van vertroebeling van het water dat door het lassen teweeg wordt gebracht (de zichtbaarheid). Door het gebruik van watervast papier kon de lasser deze zaken zelf administreren, zodat de communicatie, en daarmee de kans op misverstanden beperkt wordt.

Naast de vijf platen van St. 52 zijn ook nog twee gelijksoortige proefplaten van St. 37 onder identieke omstandigheden gelast. Hiermee kan de invloed van de chemische samenstelling van de plaat op de kwaliteit van de lasverbinding worden onderzocht. Bovendien kan als aanvulling op PLOT 75 het effect van sterke "restraint" omstandigheden bij St. 37 worden nagegaan.

*- Het tweede uitgevoerde experiment betreft een louter toegepast onderzoek, namelijk het vaststellen van de bruikbaarheid van de vijf reeds vermelde typen elektroden voor het lassen van een rondgaande naad in een horizontaal opgestelde pijp van wederom St. 52. Nog afgezien van pijpleidingen is dit in de offshoretechniek een zeer veel voorkomende opgave, daar praktisch alle constructies zijn opgebouwd uit pijpvormige elementen. De moeilijkheid die zich bij deze opstelling voordoet is dat bij het vorderen met de las de positie voortdurend verandert. Gegeven het feit dat bij het OWL door de gasontwikkeling er geen zicht op het lasbad is, zodat men gedwongen is slepend te lassen, wordt in dit geval neergaand gelast. Indien de positie in de lasnaad wordt geïndiceerd volgens de wijzerplaat van een uurwerk, dan wordt dus met lassen aangevangen op 12 uur en gaat men via 3 uur naar 6 uur, waarna de andere helft van de las, weer beginnend op 12 uur, eveneens neergaand wordt gemaakt. Het laat zich denken dat voorbij de positie 3 uur het steeds moeilijker zal worden het lasbad in bedwang te houden. Bij dit experiment is met elk elektrodetype een V-vormige groef van slechts 180° gevuld, lopend van 12 naar 6 uur daar de andere helft van de rondgaande naad volkomen gelijkwaardig is. De afmetingen van de gebruikte pijpstukken en naadvorm zijn in fig. 8 vermeld; de pijpstukken zijn bij de uitvoering op borsthoogte opgesteld. Afgezien van de temperatuurmetingen, die hier achterwege zijn gebleven, is de uitvoering op volkomen analoge wijze geschied zoals beschreven bij de vlakke platen. Deze organisatie van de werkzaamheden is schematisch weergegeven in fig. 9. Een indruk van de uitvoering van het laswerk aan de vlakke plaat wordt gegeven door figuur 10.

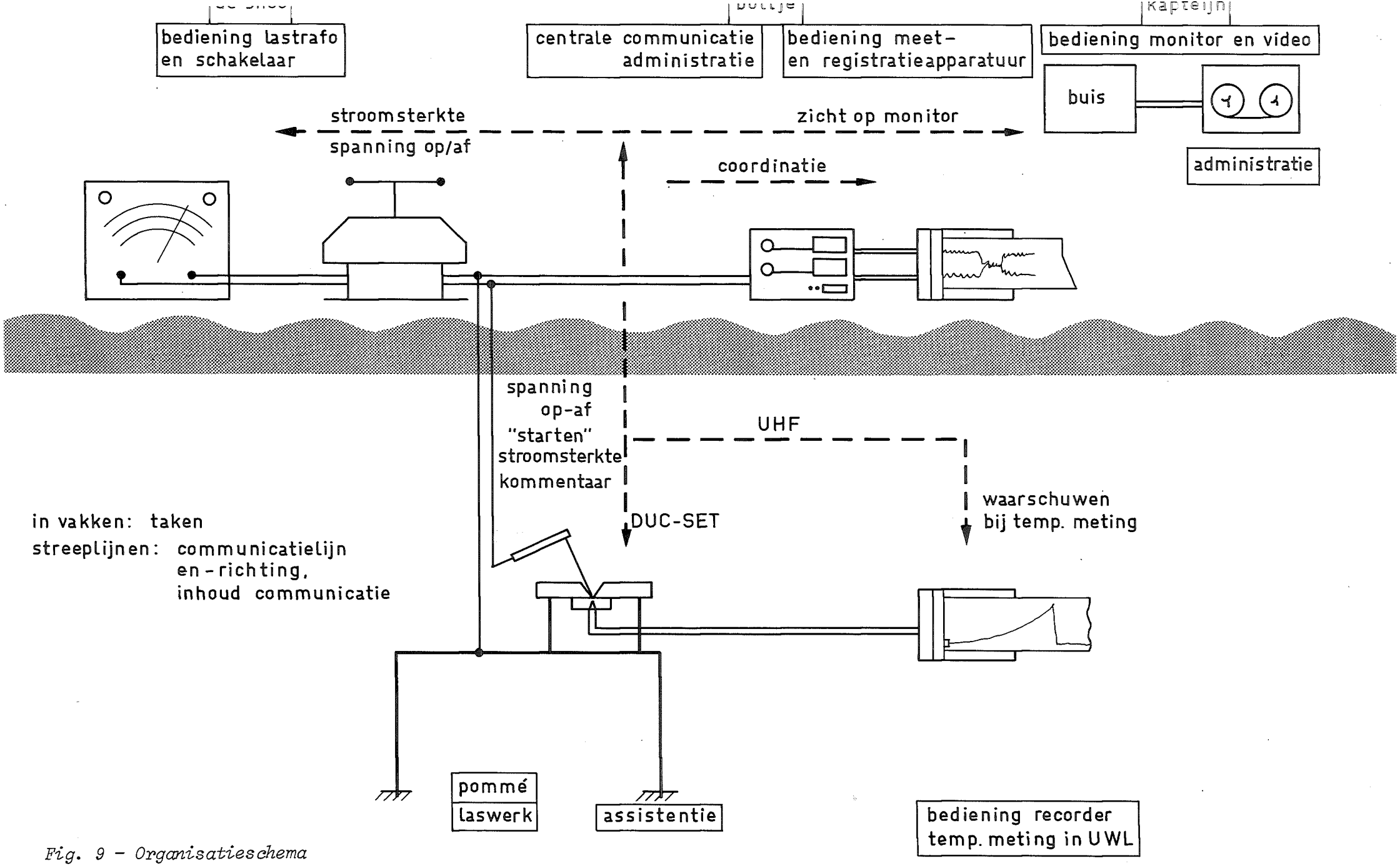
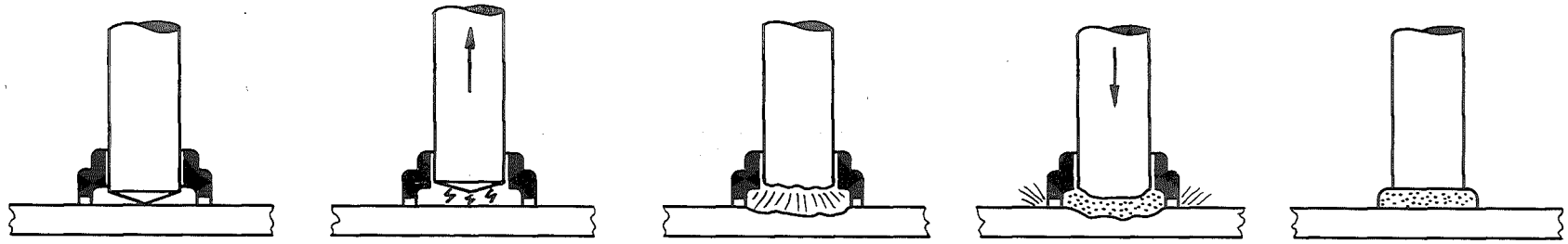


Fig. 9 – Organisatieschema elektrodelassen.

opm.: bij het lassen van pijp geen temp. meting



a - stift in uitgangspositie, kortsluiting plaat-stift.

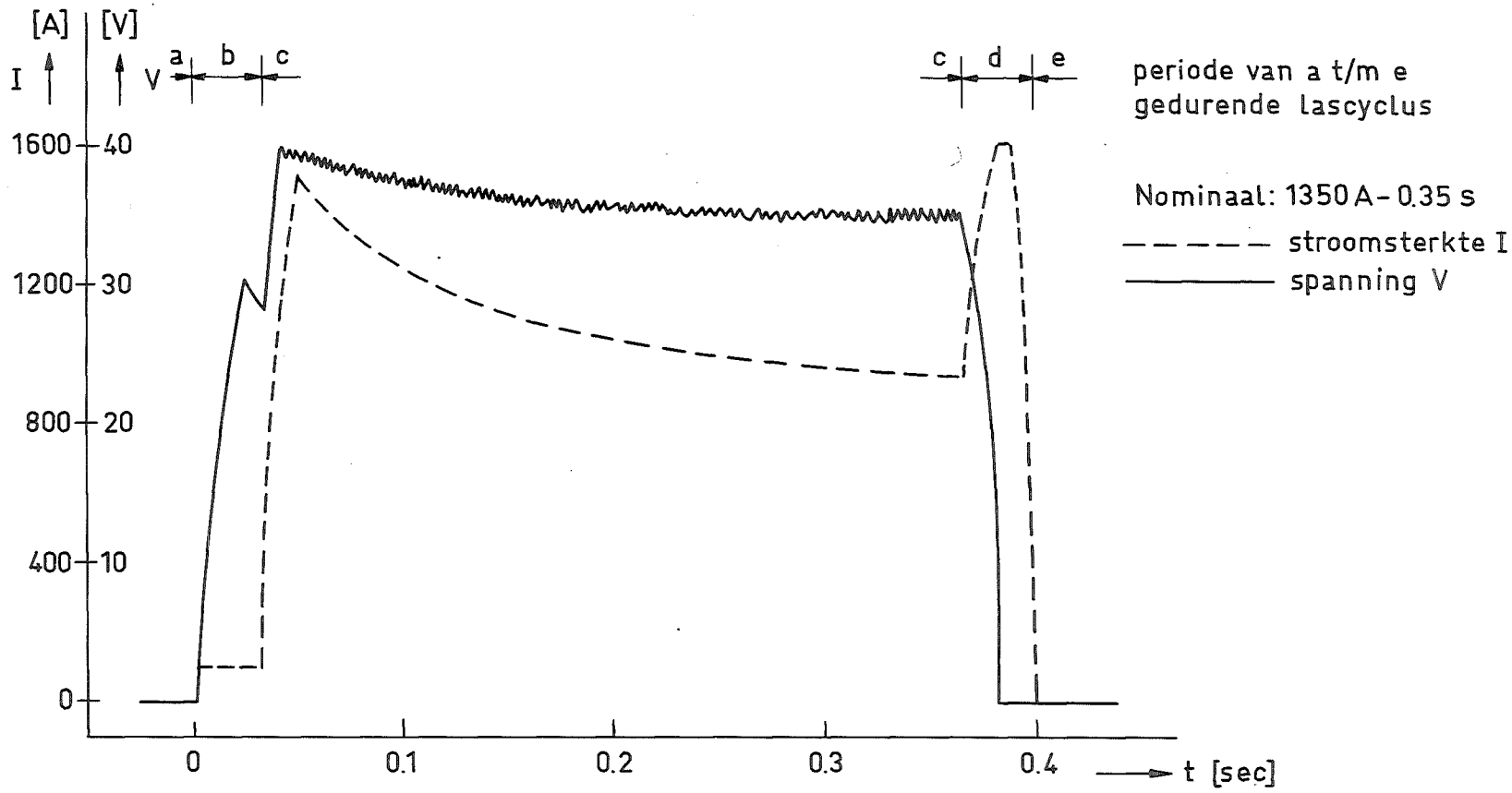
b - boogontsteking met voorstroom tijdens het heffen van de stift.

c - stifteinde en plaat smelten bij het doorlopen van de lasstroom.

d - stift wordt in het smeltbad gedoopt.

e - stiftlasverbinding met een goed gevormde kraag op overgang plaat-stift.

Fig. 11 - Principe van het stiftlassen.



f. Verloop van de boogspanning en de stroomsterkte met de tijd

4-2: Stiftlassen

Stiftlassen is een semi-automatisch booglasproces waarmee stiftvormige elementen loodrecht op een vlak worden gelast. Hierbij moet worden gedacht aan verbindingselementen zoals draadeinden, betonankers, haken, maar ook stuitnokken en centreringspennen, etc. Dit proces ontleent zijn bestaansrecht aan de snelle wijze waarop deze elementen worden aangebracht, daar boren, tappen, schroeven of wat dies meer zij, overbodig zijn.
De verschillende varianten van het stiftlassen en hun huidige specifieke toepassingsgebieden worden in een recent overzicht behandeld (21).
Alleen het proces dat bij het onderzoek van PLOT 76 is gebruikt zal hier worden beschreven.
Het betreft het stiftlasproces waarbij de boogontsteking plaatsvindt door het heffen van de stift vanuit kortsluitpositie (het Nelson-proces). Hierbij wordt gelijkstroom gebruikt met de stift aan de minpool en de plaat of het werkstuk aan plus. In de uitgangspositie staat de stift op de plaat (fig. 11a). Het proces wordt gestart door het indrukken van de "trekker van het laspistool" of van een knop aan de stuurkast die het verloop van het lasproces regelt. Bij de start gaat er een zogenaamde voorstroom van ca. 100A lopen, terwijl de stift vanuit kortsluitpositie (spanning = 0 V) van de plaat wordt geheven. Hierdoor wordt de boog ontstoken (fig. 11b). (Men vergelijke dit met het ontsteken van de boog door het aantikken van de elektrode bij andere booglasprocessen). De hefhoogte bedraagt, afhankelijk van de diameter van de stift, 1 tot 4 mm. en bepaalt de spanningsval over de boog, die gewoonlijk 30 à 45 V is. De hefbeweging wordt verkregen door een elektromagneet te bekrachtigen, die zich in het laspistool bevindt.
Deze beweging neemt circa 40 milliseconden in beslag waarna in de stuurkast de hoofdschakelaar wordt gesloten zodat door de boog de feitelijke lasstroom gaat lopen (fig. 11c). Hierdoor smelt het stifteinde en in de plaat ontstaat plaatselijk een smeltbad. De lasstroom en -duur zijn afgezien van de laspositie afhankelijk van de diameter van de stift en variëren van ongeveer 400A en 0,2s voor Ø 6 tot 3000A en 1,5s voor Ø 30 mm. De stroomsterkte wordt ingesteld op de gelijkrichter-transformator en de lasduur met een klok op de stuurkast.

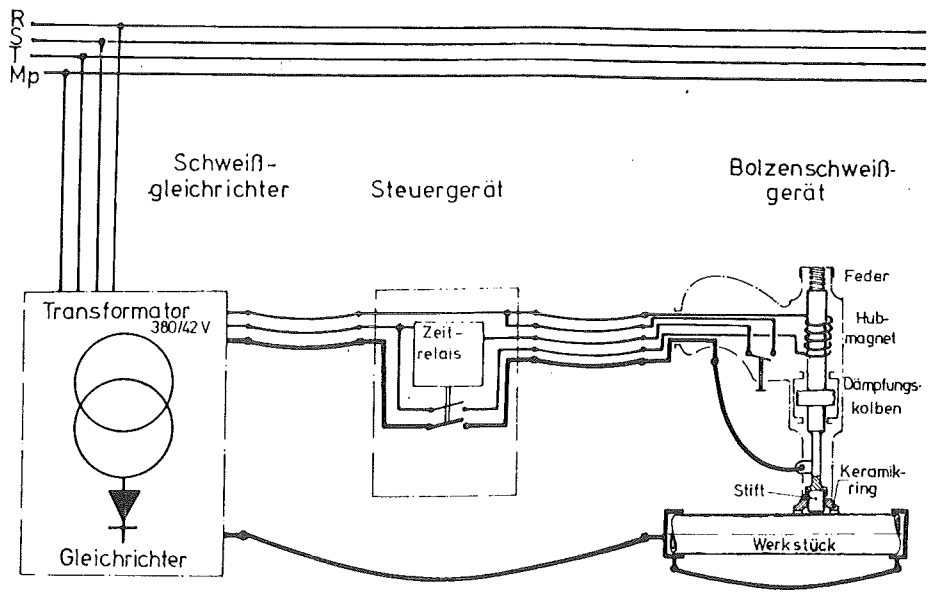


Fig. 12 - Schematische weergave van de stiftlasapparatuur (23)

Na verloop van de ingestelde lasduur wordt de elektromagneet in het laspistool stroomloos gemaakt zodat de stift met behulp van een in het pistool ingebouwde veer naar de plaat wordt bewogen en in het smeltbad wordt gedoopt (fig. 11 d). Aangezien bij grote diameters het smeltbad nogal groot wordt, moet in dat geval de teruggaande beweging worden gedempt. Om ervan verzekerd te zijn dat het smeltbad nog goed vloeibaar is als de stift daarin gedoopt wordt, blijft de lasstroom tot dit moment gehandhaafd. Dit levert in fig. 11 f waarin het verloop van de boogspanning en lasstroom met de tijd zijn weergegeven, de kortsluitpiek.
Om de booginitiatie te stimuleren wordt bij stalen stiften een aluminium kogeltje op de te lassen zijde aangebracht. Dit puntvormige contact zal in de aanvankelijke kortsluitpositie als de voorstroom gaat lopen heet worden, zodat door thermische emissie boogontsteking mogelijk is. Daarna zal het makkelijk ioniseerbare aluminium (6,0 eV tegen 7,9 eV voor ijzer) in het begin bijdragen aan de boogstabiliteit. Bovendien wordt gesteld dat het aluminium het lasbad zal desoxyderen, zodat de kwaliteit van de verbinding wordt verbeterd.
Om overmatige oxydatie te vermijden, wordt een keramische ring gebruikt om het lasbad af te schermen van de omgeving. Bovendien beperkt deze ring de grootte van het smeltbad in de plaat en voorkomt het weglopen van vloeibaar metaal indien op een verticale plaat moet worden gelast. Daarnaast beschermt hij de lasser tegen spatten en de felle straling van de boog. Tenslotte dient de ring als "gietvorm" om een goed gevormde bolle overgang van plaat naar stift te krijgen in de gelaste toestand (fig. 11e).
De tot dusverre beschreven uitrusting voor het stiftlassen onder normale omstandigheden is schematisch weergegeven in fig. 12. Uit het voorgaande is duidelijk dat het stiftlassen een snel proces is; het proces zelf duurt 0,1 - 1,5 sec en daarna moet met een eenvoudige handeling een nieuwe stift plus keramische ring in het pistool worden geplaatst.
De enige taak die dan nog rest is het pistool op de juiste plaats tegen het werkstuk te drukken. Zoals reeds in hoofdstuk 3 gesteld, is het voor het OWL wenselijk om snel te werken om de duiktijd - en daarmee de decompressietijd - te beperken, en wegens de afwezigheid van zicht op het lasbad het lasproces te mechaniseren. Derhalve is het evident het stift-

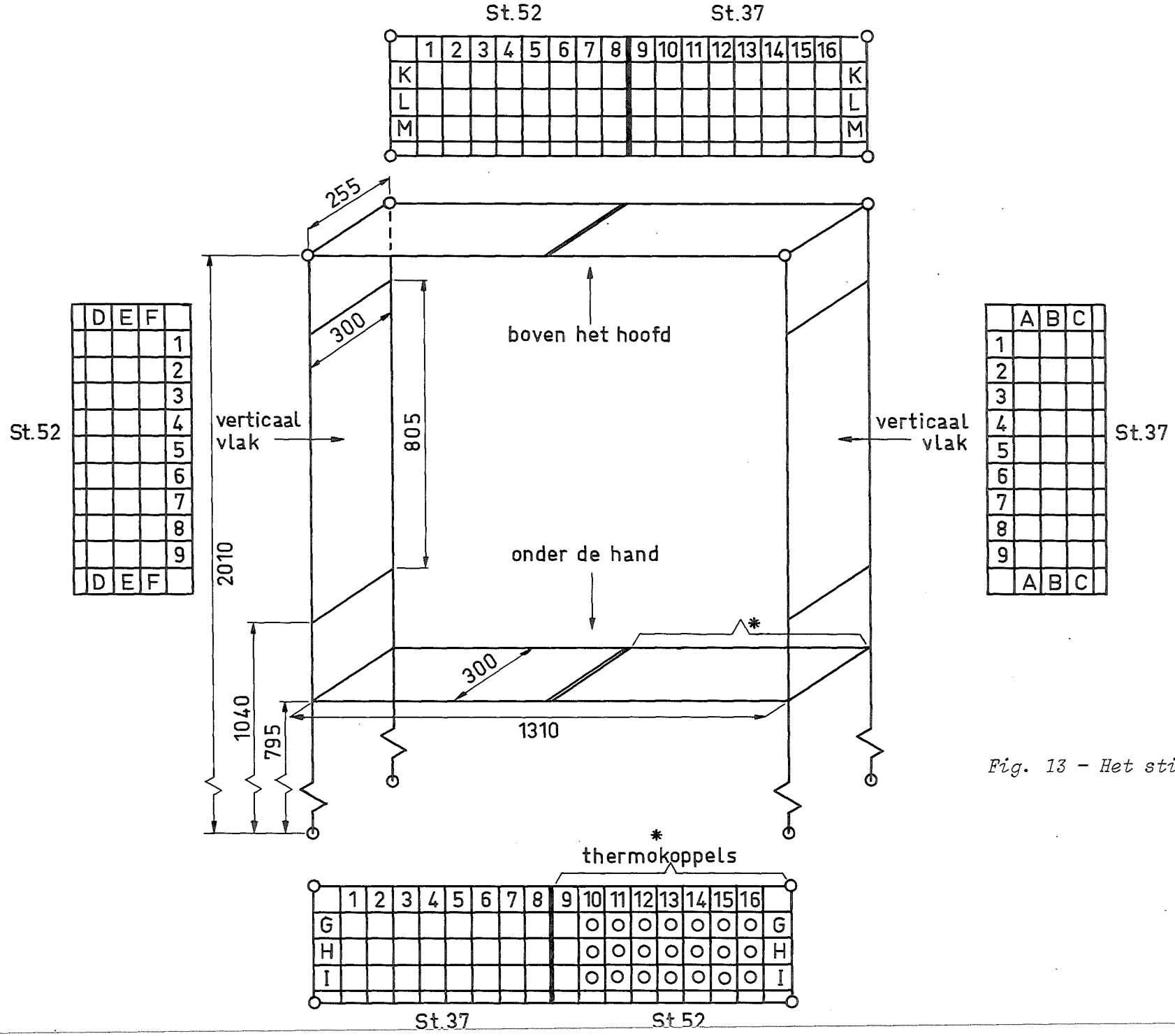


Fig. 13 - Het stiftlasrek (PLOT 76)

lassen te benutten om onderwater verbindingen tot stand te brengen.
De werkgroep Neptunus heeft in 1975 het initiatief genomen te onderzoeken of het stiftlassen een geschikte techniek is voor toepassing onderwater. De eerste ervaringen gaven aanleiding tot optimisme en zijn inmiddels, vertaald in enigszins voorbarig enthousiaste termen, aan het papier toevertrouwd (22). Het gegeven dat stiftlassen onderwater mogelijk is verdiende alleszins een nadere evaluatie van de toepassingsmogelijkheden onder praktijkomstandigheden.
Derhalve is de doelstelling van dit deel van het onderzoek van PLOT 76 geweest de beperking van de stiftdiameter vast te stellen bij het lassen van stiften op zowel St. 37 als St. 52 in de drie posities: onder de hand, op een verticale plaat en boven het hoofd. De beperking vloeit voort uit het feit dat bij toenemende diameter het smeltbad tenslotte zo groot zal worden dat het, afhankelijk van de positie, wegloopt. Daar bij het OWL een snellere stolling plaatsvindt, mag verwacht worden dat deze beperking minder snel optreedt dan bij het lassen in lucht.
Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van een normaal stiftlaspistool met pneumatische demping van de teruggaande stiftbeweging. Derhalve is om het pistool een waterdicht huis van rubber aangebracht. Hierin wordt met lucht een geringe overdruk ten opzichte van de omgeving gehandhaafd met behulp van een ademhalingsautomaat. Daar deze automaat reageert op "vraag en aanbod" van gas kon de pneumatische demping onveranderd worden gehandhaafd. Als stroombron is een speciaal daartoe geschikt lasaggregaat gebruikt (maximale stroomsterkte 2000 A bij 50 V).
Deze vond op het bovendek van de Tabasis een plaats.
De stiften zijn gelast op een rek dat wordt weergegeven in fig. 13.
De 10 mm dikke platen van St. 37 en St. 52 zijn in vakken opgedeeld zodat op eenvoudige wijze de uitvoering van het onderzoek geadministreerd kan worden. De opzet is om per stiftdiameter, te weten 16, 13 en 9½ mm, in elke positie en op elke staalsoort een aantal instellingen van stroomsterkte en lasduur te beproeven.

Om deze instellingen te meten wordt een oscilloscoop gebruikt. In de plaat van St. 52 voor het lassen onder de hand is in elk vak een thermokoppel aangebracht. De positie van het koppel wordt in het vak gemarkeerd door een schietroos.
De metingen worden verder uitgevoerd op een wijze die identiek is aan het reeds beschrevene bij het lassen met beklede elektroden; dit geldt tevens voor het in acht nemen van de veiligheidsmaatregelen en de gebruikte communicatiesystemen. Voor uitgebreide informatie wordt wat dit betreft wederom verwezen naar het draaiboek (20). Een indruk van de uitvoering der experimenten met het stiftlassen wordt gegeven door fig. 14.

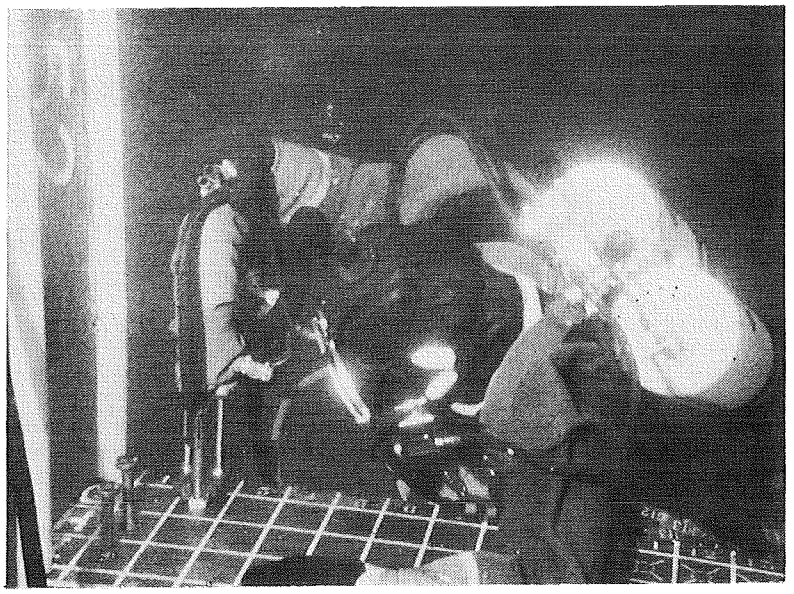


Fig. 14 - Uitvoering van de experimenten met het stiftlassen in de positie onder de hand.

Hoofdstuk 5 - Presentatie en bespreking van de resultaten.

5-1: Stiftlassen.

5-1-1: Kanttekeningen bij de uitvoering van het onderzoek.

De experimenten in de Oostzee hebben niet die resultaten opgeleverd waarop gerekend was. Dit is veroorzaakt door moeilijkheden die zich bij de uitvoering hebben voorgedaan:

* Vooraf was onderkend dat het ontsteken van de boog in zout water moeilijker zou verlopen dan in zoet water, waarin reeds enige ervaring was opgedaan. In samenwerking met de vestiging van Nelson in Duitsland is de boogonsteking in de voorbereidingsperiode onderzocht, waarbij werd vastgesteld dat een klein propje staalwol als hulpmiddel voor het starten van de boog in zout water onontbeerlijk is. In tegenstelling tot de verwachting waren de door Nelson geleverde stiften niet van staalwol voorzien, zodat dit alsnog op de Tabasis moest worden gedaan.
  Een aantal bevestigingsmethoden voor de staalwol en alternatieven om de boogontsteking te stimuleren zijn geprobeerd (zie werkverslag (3)) waarbij bleek dat vastlijmen van de staalwol het meeste uitzicht op succes bood. De gebruikte lijm is Araldit Rapid van Ciba-Geigy, een twee-componenten epoxylijmsoort. Men dient te bedenken dat de ontledingsprodukten van deze lijm het lasproces en daarmede de lasverbinding zouden kunnen beïnvloeden.
* Doordat om het laspistool een waterdicht huis was aangebracht waren een aantal instelschroeven niet meer toegankelijk. Het pistool was afgesteld voor gebruik van Ø 16 mm stiften, waarmee dan ook succesvolle proeven zijn uitgevoerd. Getracht is een te geringe uitsteeklengte bij de stiften met kleinere diameter op te vangen met het aanbrengen van vulringen onder de stifthouder van het pistool. Het is echter niet gelukt op deze wijze stiften met Ø 12 en 9.5 mm te verlassen. Het is niet duidelijk geworden wat hiervan de oorzaak is geweest. Een mogelijke verklaring wordt aan het einde van deze paragraaf beschreven.
* Door niet opgehelderde oorzaken raakte onze lasmonitor defect. Dit is een elektronische meeteenheid met digitale uitlezing van stroomsterkte, lasspanning en lastijd, die optimaal is afgeschermd tegen stoorsignalen

welke bij het lassen door de hoge stroomsterkten kunnen worden geïnduceerd. Op de lasmonitor wordt alle registratieapparatuur, zoals oscilloscoop en schrijvers aangesloten. Daar wij bij alle metingen van dit apparaat afhankelijk waren, heeft het defect raken veel problemen veroorzaakt.
Na overleg met de elektronische dienst van de T.H. is besloten de nog bruikbare componenten van het meetsysteem op aangepaste wijze in het lascircuit op te nemen, zodat rechtstreekse metingen konden worden uitgevoerd. Bij het stiftlassen heeft dit niet gebaat: de hierbij opgewekte stoorsignalen zijn te groot om op deze wijze zinvolle metingen te verrichten (overigens heeft het ombouwen van de meetopstelling wel tot succes geleid bij het lassen met beklede elektroden; hierbij hebben de metingen de gewenste gegevens opgeleverd).
Feitelijk heeft dit laatste probleem de experimenten met het stiftlassen gedegradeerd tot een louter empirische aangelegenheid. Dit neemt niet weg dat een aantal resultaten geboekt zijn die zeker hun waarde hebben.
Voor zover bekend is bij deze proeven voor het eerst aangetoond dat in open zee het stiftlasproces in alle posities kan worden toegepast.
Verwacht mag worden dat dit resultaat een krachtige stimulans is voor het verder tot ontwikkeling brengen van deze techniek.
Inmiddels begint dankzij voornoemde resultaten de toepassing van het stiftlassen onderwater binnen Nederland op bescheiden schaal op gang te komen. Naar het zich laat aanzien ligt vooral in de civiele sector een breed toepassingsterrein voor het stiftlassen. Met name het vooruitzicht dankzij deze techniek ook onderwater constructies van gewapend beton te kunnen maken is zeer aantrekkelijk. Dit is dan ook de achtergrond voor een onderzoek dat in samenwerking met Rijkswaterstaat en het duikbedrijf Vriens is uitgevoerd om de mechanische eigenschappen van stiftlasverbindingen te bepalen die op 6 m diepte in Noordzeewater zijn gemaakt. Aangezien de betonankers, waarom het hier gaat, vooral op afschuiving worden belast, is de nadruk op het bepalen van de schuifsterkte gevallen. Hierbij zijn, evenals in de Oostzee, stiften van Ø 16 mm gebruikt. Deze proeven zijn voorbereid en uitgevoerd op 11-13 november 1976 bij de Kreekraksluizen in de Oosterschelde (waterweg Antwerpen - Rotterdam).

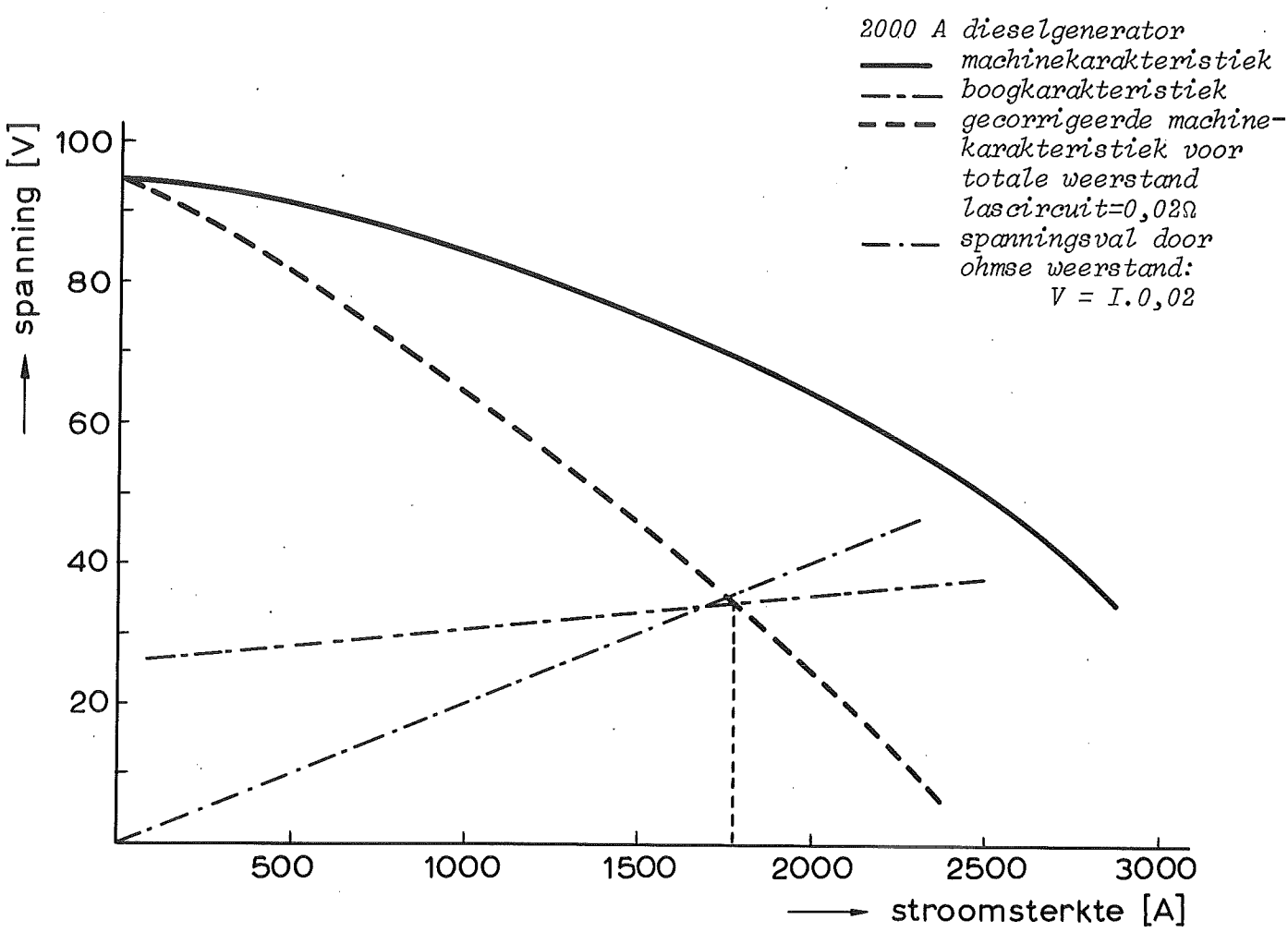


Fig. 15 - Stroom-spanning karakteristiek bij stiftlassen.

Ook op een aantal andere locaties in Nederland is door ons dankbaar gebruik gemaakt van de gelegenheid om metingen te verrichten. Het onvolledige beeld dat, door de omschreven problemen, de proeven in de Oostzee hebben opgeleverd, kon aldus worden aangevuld. Bovendien is de stiftlasapparatuur een week op het laboratorium ter beschikking geweest, zodat ook onder optimale experimenteeromstandigheden proeven konden worden uitgevoerd.

5-1-2: Resultaten; bespreking.

a-Stroomsterkte.

In een publikatie van de zijde van Neptunus (22) is uiteengezet dat het bijzondere karakter van het stiftlassen onderwater blijkt uit het feit dat een tweemaal zo hoge stroomsterkte nodig is in vergelijking met normale omstandigheden. Dit zou betekenen dat bij de boogspanning een stroomsterkte van ca. 3000 A ter beschikking moet staan voor het lassen van Ø 16 mm stiften, hetgeen zeker op zee nogal problemen geeft. Daar van het OWL met beklede elektroden bekend is dat slechts een 5 à 10% hogere stroomsterkte nodig is in vergelijking met lassen in lucht, rijst de vraag waarom bij het stiftlassen een 100% hogere stroomsterkte noodzakelijk zou zijn. Nauwkeurige metingen van de stroomsterkte die onderwater door de boog loopt tonen echter dat deze beperkt is tot 1600 à 1800 A bij een Ø 16 mm stift. Dit betekent een stroomdichtheid van 8 à 9.10^6 A/m^2, hetgeen goed overeenkomt met de praktische begrenzing van een vlamboog tot 10^7 A/m^2, althans onder normale omstandigheden (39). De waarneming dat toch een veel hoger vermogen beschikbaar moet zijn wordt als volgt verklaard.
In fig. 15 is het verband tussen spanning en stroomsterkte (de karakteristiek) van een stiftlasgenerator weergegeven bij de instelling van maximale stroomsterkte: in dit geval 2000 A. Hieruit blijkt dat de afgegeven stroomsterkte afhankelijk is van de spanning waarmee de trafo wordt belast. In de figuur is tevens aangegeven welke spanning in lucht minimaal nodig is om de lasboog in stand te houden. Behalve door de boogspanning wordt de trafo echter ook belast door de spanningsval die in het lascircuit optreedt.

Voor het eenvoudigste geval van een weerstandbelasting van het circuit neemt de spanningsval lineair toe met de stroomsterkte. Een normale laskabel met een doorsnede van 70 mm^2 en een lengte van 80 m heeft een weerstand van 0.02 Ω, nog afgezien van koppelingen, enzovoorts. Bij het OWL is deze lengte zeker niet onredelijk daar het veelal onmogelijk is de stroombron dichtbij het werkstuk te plaatsen. De spanningsval als gevolg van deze weerstand is onderin het diagram weergegeven. Om de resterende stroomopbrengst van de trafo te verkrijgen moet de spanningsval op de karakteristiek in mindering worden gebracht. Hieruit blijkt dan dat in dit geval een stroomsterkte van maximaal 1780 A kan worden verkregen. Wil men van deze lastrafo van nominaal 2000 A ook werkelijk 2000 A trekken, dan mag de totale weerstand van het gehele circuit de 0.014 Ω niet overschrijden! Hierbij moet rekening gehouden worden met de extra weerstand van koppelingen, de schakelaar in de stuurkast en de overgang stifthouder-stift in het laspistool.
Bij de experimenten in de Oostzee bedroeg de weerstand van het totale kabelpakket ter lengte van 140 m 0.022 Ω, zodat bij 2000 A een spanningsval van 44 V zou optreden. Volgens fig. 15, die geldt voor een gelijksoortige machine als wij gebruikt hebben (2000 A bij 50 V), blijkt dat bij maximaal vermogen de stroomsterkte dan 1600 A geweest kan zijn.
Bij de experimenten bij de Kreekraksluizen zijn de stiften verlast met een gemeten stroomsterkte van 1500-1800 A.
Inmiddels is bovenstaande verklaring bevestigd. Was aanvankelijk met een normaal kabelpakket om Ø 16 mm stiften onderwater te lassen nominaal 3000-3600 A nodig, bij gebruik van 120 mm^2-kabels blijkt ook bij grote kabellengten nominaal 2000 A toereikend. Hiermee is het probleem van de energievoorziening aanzienlijk gereduceerd.

b-Harding.

Bij het stiftlassen onderwater treden zeer hoge afkoelsnelheden op: in de Oostzee is een afkoeltijd van 800°C tot 500°C gemeten van $\Delta t_{800-500}$ = 1,9 s,

FIG. 16 - STIFTLASSEN ONDERWATER.

HARDHEIDSPROFIEL VAN HAZ IN PLAAT.

MICROHARDHEID - VICKERS 100 GRAM : H_V (0.1)

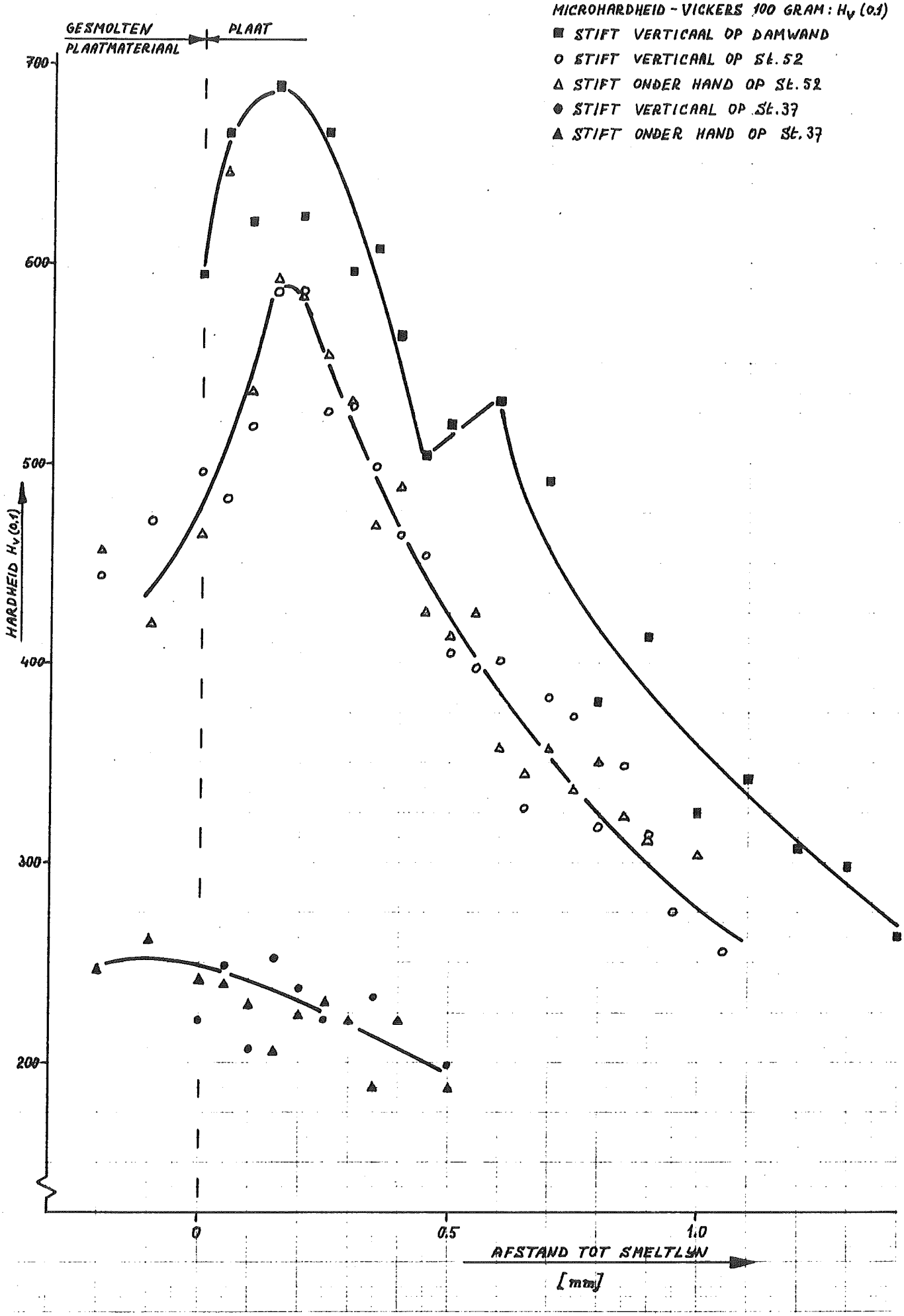
■ STIFT VERTICAAL OP DAMWAND

○ STIFT VERTICAAL OP St. 52

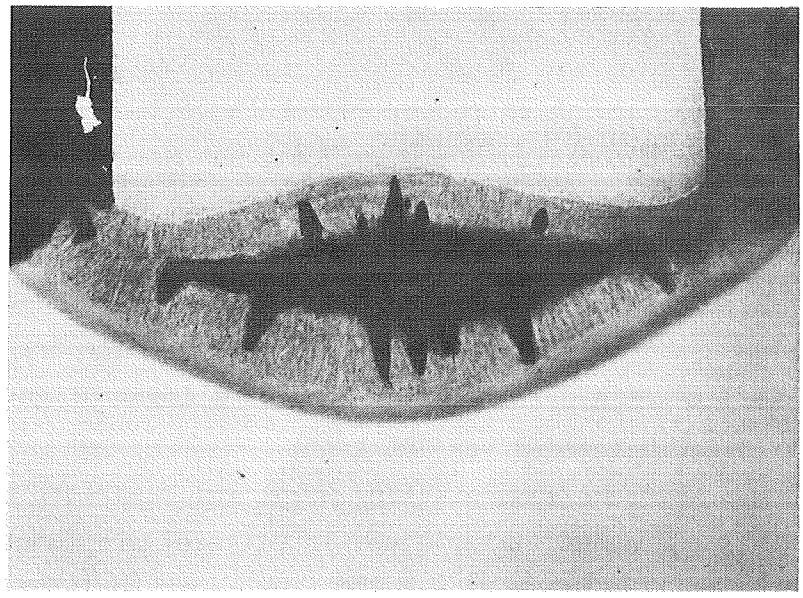
△ STIFT ONDER HAND OP St. 52

● STIFT VERTICAAL OP St. 37

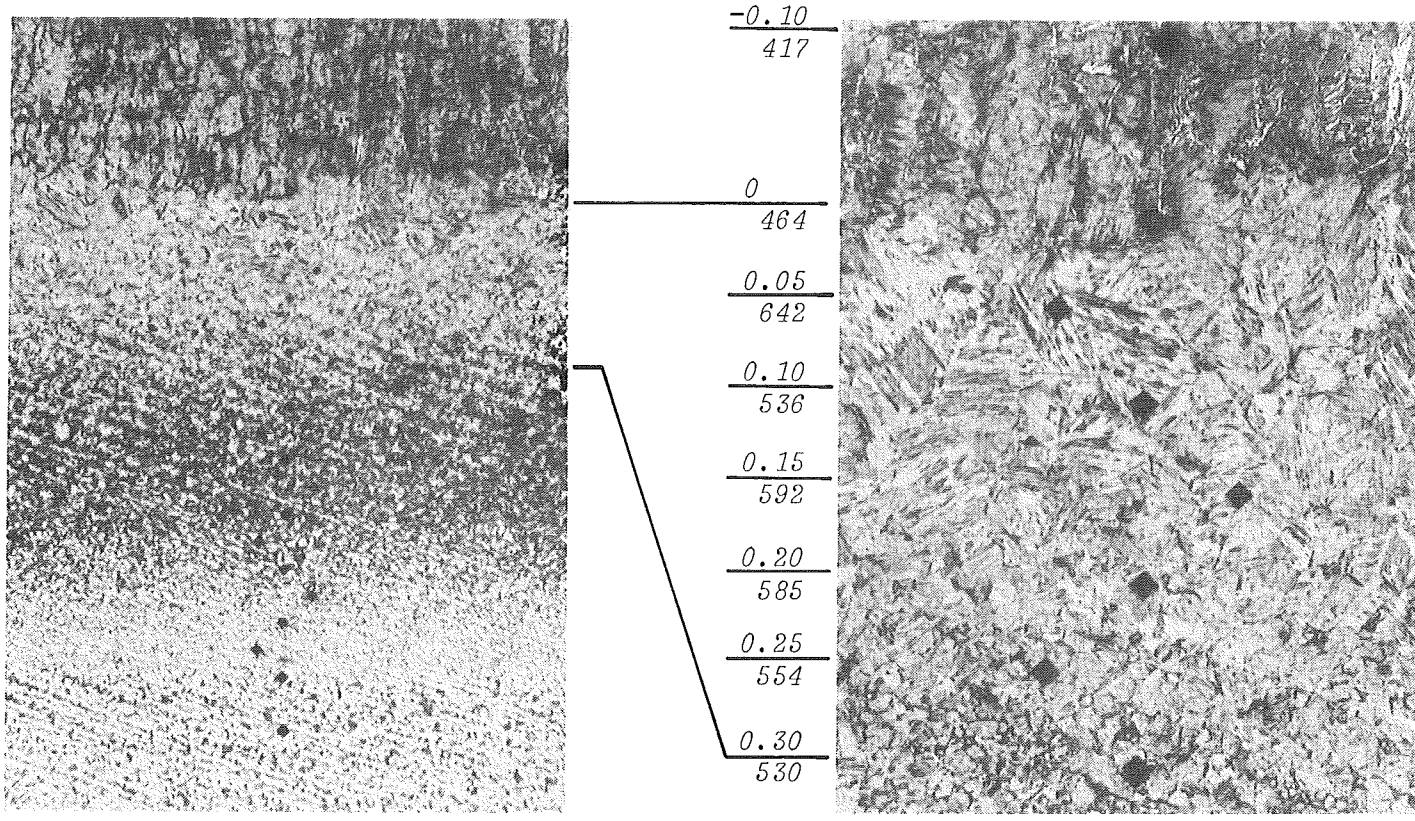
▲ STIFT ONDER HAND OP St. 37



waarbij $(\frac{dT}{dt})_{800}$ = -330 ^{o}C/s en $(\frac{dT}{dt})_{500}$ = -200 ^{o}C/s (stift G16 - instelling 2300 A, 0.8 s). Door deze hoge afkoelsnelheid kan in de warmtebeïnvloede zone (HAZ) een sterke harding optreden. Een grote invloed op het verloop van de hardheid in de HAZ heeft, zoals verwacht kon worden, de chemische samenstelling van de plaat. In de stiften zelf treedt nauwelijks harding op, daar ze juist met het oog hierop van een ongelegeerd staal zijn gemaakt: ST 37-3 volgens DIN 17100. Door de snelle warmteafvoer bij het OWL is de HAZ smaller dan gewoonlijk. Om toch goed reproduceerbare hardheidswaarden te verkrijgen zijn daarom microhardheidsmetingen uitgevoerd met Vickersdiamant en een belasting van 100 gram.
De invloed van de chemische samenstelling wordt geïllustreerd door fig. 16, waarin de hardheid van de HAZ in de plaat is uitgezet als functie van de afstand tot de smeltlijn. Het door het IIW genormeerd koolstofequivalent (zie paragraaf 5-2-1) bedraagt voor het St 37 C_{eq} = 0,14 en voor het St 52 C_{eq} = 0,44; voor de volledige chemische analyse wordt verwezen naar tabel I. De hardheidsprofielen in fig. 16 hebben betrekking op de stiften G 16 (2300 A - 0,8 s), D 2 (2400 A - 0,5 s), A 2 (2400 A - 0,5 s) en G 2 (2300 A - 1,1 s). Deze hardheidsprofielen blijken goed reproduceerbaar te zijn, ondanks dat de warmte-inbreng per stift nogal verschilt.
Bij de proeven bij de Kreekraksluizen zijn stiften gelast op een stuk staal van het type dat door Rijkswaterstaat wordt gebruikt voor damwanden van bouwputten. De chemische analyse (zie tabel I) komt overeen met die van de warmgewalste staalsoort R St 42-1 of R St 42-2 volgens DIN 17100. Hoewel het koolstofequivalent met de waarde 0,41 lager is dan dat van St 52, treedt hierbij toch een grotere harding op. Deze stiften zijn gelast met 1500-1800 A, 0,42 s. Het hardheidsprofiel wordt in fig. 16 gegeven.
De foto's van de dwarsdoorsnede van stift G 16 geven in de fig. 17 een indruk van de hardingsstructuren van de HAZ in de plaat. Op de macrofoto (fig. 17a) is aan de mate van aanetsen het grote verschil in harding van de HAZ in de plaat en in de stift ($H_V(0,1)_{max}$ = 309) te zien. De wijze waarop de hardheidsmetingen zijn uitgevoerd blijkt uit fig. 17b, waarin de gehele HAZ van de plaat wordt weergegeven:



17 - a - V = 5½x - nital



17 - b - V = 62x - nital
HAZ in plaat; microhardheids-meting met stapgrootte 0.05 mm.

17 - c - V = 220x - nital
Detail HAZ met grofkorrelige martensiet.

Fig. 17 - Stiftlas G 16, onder de hand gelast op St. 52 (zie ook fig. 16) nominaal 2300 A - 0,8 s; $\Delta t_{800-500}$ = 1,9 s.

- aan de bovenzijde, boven de smeltlijn die met 0 gemerkt is, het gesmolten plaatmateriaal,
- aan de onderzijde de zwart-witte banenstructuur van de onbeïnvloede plaat, hetgeen een perliet-ferriet walsstructuur is,
- daartussen de HAZ met:
  * bovenaan de donkergrijze, harde en grofkorrelige martensiet, die in fig. 17c herkenbaar is (temperatuurgebied met piekwaarden van ongeveer 1500-1100°C),
  * in het midden de zwarte, fijnkorrelige structuur met als hoofdbestanddelen bainiet en perliet (temperatuurgebied ongeveer 1100-850°C)
  * onderaan de lichte, "zachtgegloeide" structuur met ferriet, ontaarde perliet en hardingsprodukten als gevolg van een gedeeltelijke austeniet-transformatie (temperatuurgebied ongeveer 850-750°C).

Gezien fig. 17a was het nutteloos om de stiften, die in de Oostzee gelast zijn, aan mechanische beproevingen te onderwerpen, omdat hier van een zeer onvolwaardige lasverbinding sprake is. Daarom zijn die proeven uitgevoerd met de stiften die gelast zijn in de Oosterschelde. Uit de foto van de dwarsdoorsnede van een dezer stiften (fig. 18) blijkt de verbetering van de beheersing van dit lasproces, die in korte tijd bereikt is.(Hierbij mogen de inspanningen van P.G.Pommé niet onvermeld blijven.) De enkele holten die zich in de lasverbinding bevinden zijn niet ongebruikelijk bij deze lastechniek en zijn van weinig betekenis. De zichtbare scheur is het gevolg van de onderwerping aan de "hamerproef", waarbij de stift tegen de plaat is platgeslagen, dus 90° omgebogen, zonder te bezwijken. Ondanks dit resultaat bestaat er natuurlijk twijfel aan de taaiheid van de verbinding, gezien de hoge hardheden. Om hierin enig licht te brengen wordt in de onderstaande tabel II een vergelijking gemaakt met gegevens uit de literatuur, die betrekking hebben op het lassen onder normale omstandigheden.

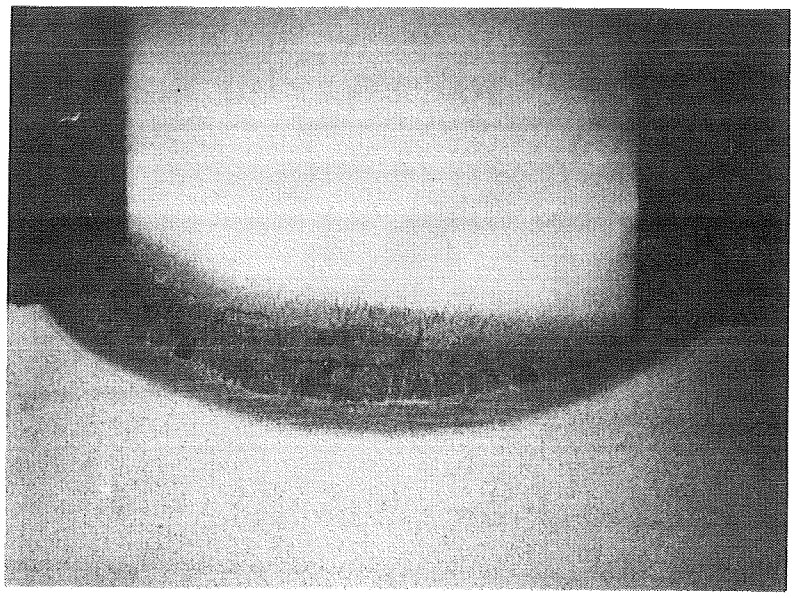


Fig. 18 - V = 4½× - nital
Stift gelast op damwand in Oosterschelde
(Noordzeewater, diepte 6 m.)

Tabel II - Vergelijking tussen de hardheidsmaxima bij het stiftlassen onderwater en onder normale omstandigheden.

uitvoering		staalsoort	C_{eq}	plaat-dikte (mm)	stiftdia-meter (mm)	hardheid	
						H_V max.	H_V(kg)
PLOT 76	OWL	St. 37	0,14	10	16	262	0,1
PLOT 76	OWL	St. 52	0,44	10	16	642	0,1
Oosterschelde	OWL	damwand	0,41	10	16	689	0,1
Welz, Dietrich (24)		St. 37	0,23	12	22	225	5
id.		St. 52	0,35	12	22	350	5
id.		*bouwstaal	0,51	12	22	500	5
Chapeau, Piraprez (25)		St. 52	0,35	30	16	490	0,5

* hoogvast staal met $\sigma_{0,2}$ = 78 en σ_b = 85 kgf/mm^2.

Deze vergelijking wordt enigszins vertroebeld door de verschillende belasting bij de hardheidsmetingen. Aangezien de structuur niet homogeen is blijkt dat de macrohardheid een gemiddelde hardheid van verschillende structuurbestanddelen bepaalt, zodat de maximale hardheidswaarden lager uitkomen dan bij microhardheidsmetingen. Zo blijkt uit eigen waarnemingen aan gehard C- staal dat 500 H_V(5) = 580 H_V(0,1) en 530 H_V(5) = 640 H_V (0,1). Welz en Dietrich (24) hebben de statische en dynamische mechanische eigenschappen van een groot aantal stiftlasverbindingen bepaald. Bij de drie vermelde staalsoorten bleken deze eigenschappen volkomen bevredigend. Uit bovenstaande vergelijking moge blijken dat althans het hardheidsniveau geen beletsel vormt voor acceptabele mechanische eigenschappen bij het onderwaterlassen van stiften op St. 37 en St. 52.

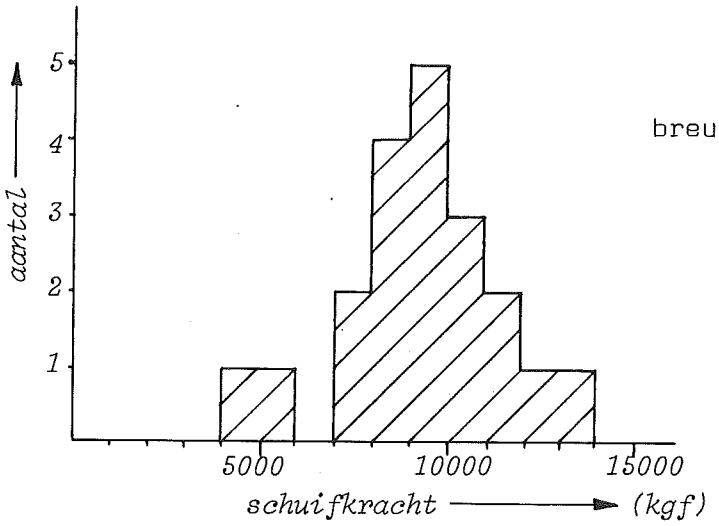
Voor de damwand kan dit gezien het hardheidsniveau, niet worden gesteld. Interessanter is het werk van Chapeau en Piraprez (25), die aan de hand van "implantproeven", waarbij tevens deformaties zijn gemeten, de taaiheid van een stiftlasverbinding, in vergelijking met het oorspronkelijke plaatmateriaal hebben vastgesteld. Bij het gemeten hardheidsniveau blijkt deze taaiheid ruim voldoende. Het belang van dit artikel voor ons onderzoek ligt vooral in het feit dat op een 30 mm dikke plaat wordt gelast, waarbij de warmteafvoer driedimensionaal van aard is (theoretisch gesteld is de plaat dan te beschouwen als een oneindige halfruimte). Aangezien in dat geval de warmtegeleiding van het staal een grotere invloed heeft op de afkoeling dan de warmteoverdracht van staal naar water, zal deze situatie het stiftlassen onderwater benaderen. Uit dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat bij het OWL van stiften op St. 52 met een $C_{eq} \leqslant 0{,}35$ ondanks de hoge hardheden de taaiheid voldoende zal zijn. Veelal wordt als indicatie voor de taaiheid van de HAZ de maximaal optredende hardheid aangevoerd, waarbij als veilige grenswaarde $H_v(10) = 350$ à 400 geldt; in dit geval blijkt dat dus te conservatief. Opgemerkt zij dat bij deze beschouwing een mogelijke verbrossing door waterstof niet is overwogen.

c-Scheurvorming.

Ondanks de optredende hoge hardheden bij het stiftlassen zijn geen koudscheuren waargenomen. Hiermee worden niet-gepubliceerde waarnemingen bevestigd die gedaan zijn aan stiftlasverbindingen die in zoet water gemaakt zijn op plaat van St. 52 en HY 100; dit is uitgevoerd in het kader van Neptunus. Naast een voor koudscheuren gevoelige structuur, wederom veelal geïndiceerd met de hardheid, zijn behalve waterstof ook trekspanningen noodzakelijk om dit type scheuren te doen ontstaan (zie ook paragraaf 5-2-2-c). Deze trekspanningen zijn gewoonlijk krimpspanningen ten gevolge van het lassen. Bij het stiftlassen doet zich dit nauwelijks voor, daar er vrije krimp kan optreden in de lengterichting van de stift. Hiermee kan verklaard worden dat stiftlasverbindingen minder gevoelig zijn voor het optreden van koudscheuren dan - zoals nog zal blijken - lasverbindingen die gemaakt zijn met beklede elektroden.

d-Mechanische eigenschappen.

Van vijfentwintig niet-geselecteerde stiften van Ø 16 mm die in de Oosterschelde op "damwand"-staal zijn gelast, is in twintigvoud de schuifsterkte en in vijfvoud de treksterkte bepaald. De resultaten zijn als volgt:



Resultaten van vijf trekproeven:

breukbelasting (kgf)	locatie breuk
8500	onder HAZ in plaat
8480	
6550	
7600	gedeeltelijk in las,
4220	gedeeltelijk onder HAZ in plaat.

Histogram van twintig schuifproeven.

Hieruit blijkt dat bij drie stiften de lasverbinding slecht is geweest. Desondanks zijn een gemiddelde schuifsterkte van 45 kgf/mm^2 en een gemiddelde treksterkte van 35,6 kgf/mm^2, betrokken op de doorsnede van de stift, volkomen bevredigende resultaten. Deze getallen zijn niet zonder meer vergelijkbaar vanwege de locatie van het breukvlak, dat vaak deels onder de HAZ in de plaat ligt, zodat bij schuifproeven wrijvingsverliezen optreden over een groter oppervlak dan de doorsnede van de stift.

e-Lasparameters.

Bij het stiftlassen onderwater zijn een groot aantal variabelen te onderkennen, waarvan verwacht kan worden dat de optimale waarden verschillen van die in lucht. Aangezien nog geen van deze parameters voor het OWL is geoptimaliseerd zal nog veel onderzoek verricht moeten worden, waarbij een rol lijkt te zijn weggelegd voor de werkgroep Neptunus, maar toch ook zeker voor de fabrikant van de stiftlasapparatuur. In eerste instantie lijkt het verstandig de werkelijke, dus gemeten stroomsterkte 10 à 20% hoger te kiezen dan gebruikelijk ter compensatie van warmteverliezen - dit in navolging van

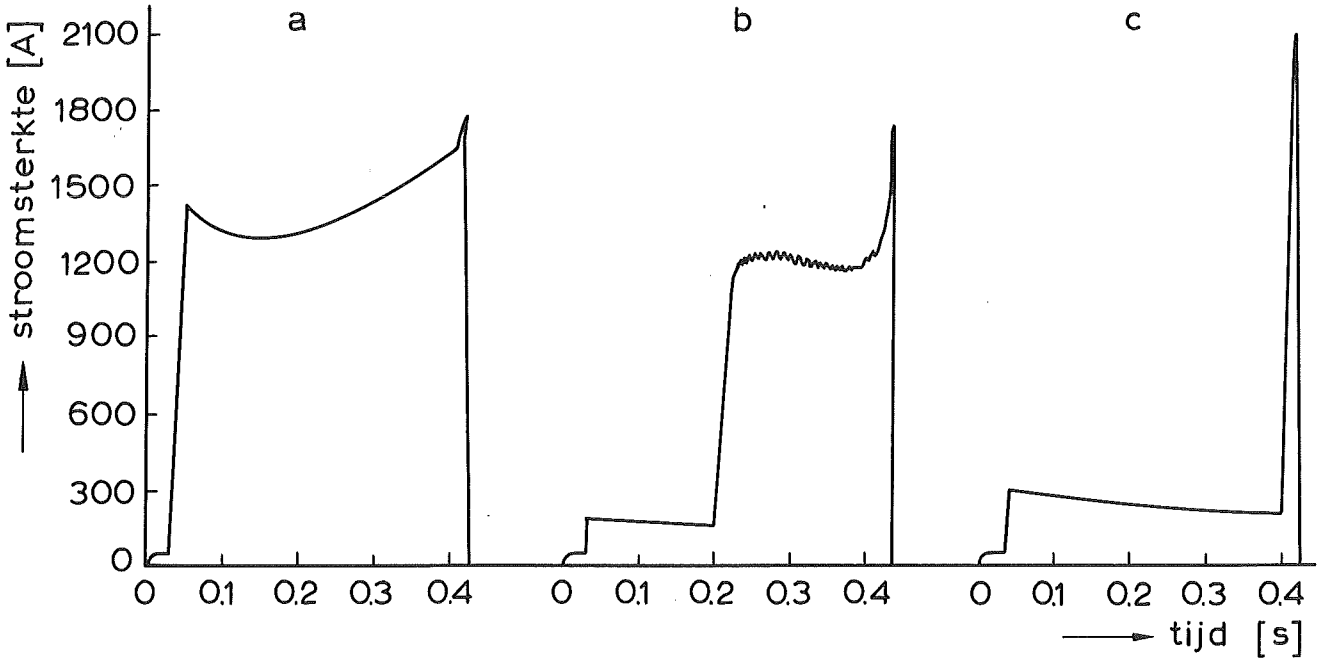


Fig. 19 - Waarnemingen van problemen met de boogontsteking bij het stiftlassen.
- a - normaal verlopend proces bij toepassing onderwater (vergelijk met fig. 11 voor normaal proces in lucht).
- b - moeizame boogontsteking, waardoor lastijd wordt gehalveerd, zodat de lasverbinding slecht zal zijn. Bij de uitvoering zal dit echter niet worden opgemerkt.
- c - geen boogontsteking, procestijd wordt afgesloten met kortsluitpiek.

de ervaringen met het OWL met beklede elektroden. Uit de literatuur (26, 27) is bekend dat met name de stroomsterkte en lasduur een grote invloed hebben op de mechanische eigenschappen van de lasverbinding.
Daarnaast zal bij het OWL wellicht de boogspanning, die mede wordt bepaald door de hefhoogte, sterker op de voorgrond treden. Bovendien moet worden nagegaan hoeveel de stift afsmelt gedurende de boogtijd en hoe diep het smeltbad in de plaat is. Hieraan moet de uitsteeklengte van de stift (dat is de lengte waarmee de stift uit de keramische ring steekt voordat met lassen wordt begonnen) worden aangepast. Al deze variabelen zijn uiteraard afhankelijk van de stiftdiameter. De diepte en het zoutgehalte van het water zijn mogelijk ook van invloed.
Tenslotte nog een opmerking over het uiterlijk van de stiftlasverbinding. In de normale praktijk blijkt dat indien de kraag tussen plaat en stift rondom goed gesloten is, men veelal met een verbinding van goede kwaliteit te doen heeft. Bij het OWL blijkt dit uiterlijk kenmerk niet meer als beoordelingscriterium hanteerbaar te zijn. Enkele stiftlassen met een goed gevormde kraag bleken van binnen hol (zie fig. 17a).

f-De elektrische boog onderwater.

Bij de inmiddels langzaam op gang komende praktische toepassing van het stiftlassen onderwater is vastgesteld dat zich een verschijnsel voordoet dat grootschalige toepassing van deze techniek vooralsnog in de weg staat.
Gebleken is dat bij het lassen van stiften op een constructie ongeacht de afmetingen, de eerste stiften, in aantal variërend van acht tot veertig, vlot te verlassen zijn, waarna problemen gaan optreden met de boogontsteking die tenslotte zo ernstig van aard worden dat het lassen volstrekt onmogelijk wordt. Dit kan worden geïllustreerd door metingen van de stroomsterkte (fig. 19).
Indien men nadat het lassen onmogelijk geworden is, een dag wacht en vervolgens weer verder gaat treedt dezelfde reeks verschijnselen op.
Dit doet vermoeden dat er sprake is van een soort ladingsopbouw in de te lassen constructie die de boogontsteking verhindert; de lading zou dan na relatief lange tijd verminderen en uiteindelijk verdwijnen. Elektrotechnici zijn echter van mening dat dit onmogelijk geacht moet worden. Ter volledige informatie nog de volgende gegevens:

. in lucht treedt dit verschijnsel niet op.
. het verschijnsel doet zich voor in zowel zoet als zout water.
. het verschijnsel trad in alle gevallen op bij constructies die in sterke mate natuurlijk geaard waren (ver onder het grondwaterpeil geheide damwanden), maar het staat niet vast dat dit een noodzakelijk voorwaarde is. Zo kan het mislukken van de experimenten in de Oostzee met de stiften van Ø 13 en Ø 9½ mm hierdoor veroorzaakt zijn.
  Hoewel het verschijnsel nog niet goed gedefinieerd is zijn er aanwijzingen dat ook bij andere boogprocessen onderwater dergelijke problemen kunnen optreden.
. bij het proefdraaien van het onderzoekprogramma van PLOT 76 (19) is gebleken dat het lassen van de grondlaag met hooggelegeerde roestvaste elektroden geen moeilijkheden oplevert, maar dat bij de tweede laag ernstige problemen met het starten of de boogstabiliteit ontstaan.
. voor het snijden onderwater wordt het oxyarcproces veel toegepast. Hierbij wordt door een holle elektrode een krachtige zuurstofstroom in het smeltbad geblazen. Dit proces is verder geheel analoog aan het OWL met beklede elektroden, met het verschil dat een hogere stroomsterkte, tot 400 A, wordt toegepast. Bij het verrichten van snijwerkzaamheden met negatieve polariteit van de elektrode aan een te bergen schip bleek na een maand de boog niet meer te ontsteken. Na het veranderen van de polariteit traden echter geen problemen meer op (28).

Uit het voorgaande wordt duidelijk dat er bij gebruik van een elektrische boog onderwater verschijnselen optreden die zich onder normale omstandigheden niet voordoen. Over de aard van deze verschijnselen kan men slechts gissen; gedacht kan worden aan elektrische, magnetische, maar vooral elektrochemische mechanismen die het starten van een boog kunnen verhinderen. In de literatuur is voor zover bekend nooit melding gemaakt van de omschreven verschijnselen, zodat hier een dankbaar terrein voor onderzoek braak ligt, temeer daar slechts na oplossing van dit probleem de verdienstelijke eigenschappen van het stiftlassen onderwater in de praktijk benut kunnen worden.

5-2: Lassen met beklede elektroden.

Een groot aantal resultaten is verkregen door onderzoek aan het materiaal dat de lasproeven met beklede elektroden van PLOT 75 en PLOT 76 hebben opgeleverd. Deze resultaten worden eerst samengevat in tabellen, zodat ze als vergelijkingsmateriaal kunnen dienen. In de daarna volgende bespreking zou het te ver gaan alle resultaten te beschouwen; dit wordt dan ook beperkt tot belangrijke of belangwekkende bevindingen.
Vooraf moet nog worden opgemerkt dat het kritisch uitwerken van de resultaten van PLOT 75 om twee redenen ernstig wordt bemoeilijkt. In de eerste plaats betreft dit het onderzoek naar het gedrag van de elektroden bij het maken van hoeklassen in vijf posities: in het door ons ontvangen proefmateriaal ontbreekt een ondubbelzinnige codering waaruit blijkt in welke posities de hoeklassen zijn gemaakt. Hoewel dit materiaal is onderzocht, zou het weinig zinvol zijn de resultaten nu reeds te presenteren. Binnenkort zal worden getracht om aan de hand van het uiterlijk van de lassen alsnog vast te stellen in welke positie ze zijn gelast. In de tweede plaats waren de elektroden vooraf niet van een waterdichte deklaag voorzien, met als gevolg dat de bekleding van de elektrode wordt "opgeblazen" zodra deze onder spanning komt te staan. Dit heeft ertoe geleid dat de experimentele elektroden A, B en D met toevallig voorhanden zijnde middelen van een dergelijke laag werden voorzien (zie werkverslag (2)). Dit is te betreuren daar uit de literatuur (30, 31) bekend is dat deze deklaag het lasgedrag van een elektrode sterk kan beïnvloeden. Daarenboven zijn elektroden van eenzelfde type in de onderscheidelijke lasposities van verschillende lagen voorzien, zodat zelfs die resultaten feitelijk niet met elkaar vergelijkbaar zijn (zie verder tabel III). Dat een waterdichte deklaag noodzakelijk is om in zeewater te kunnen lassen is overigens al ruim veertig jaar bekend (29) en sedertdien talloze malen bevestigd.

5-2-1: Resultaten.

De resultaten zijn in de tabellen III t/m VI en de daarbij behorende opmerkingen samengevat. De chemische analyses worden in tabel I gegeven.
Omtrent de inhoud en indeling van deze tabellen is het volgende van belang:

Tabel I - Chemische analyse: De chemische samenstellingen van zowel het plaatmateriaal als het lasmetaal worden hier in gewichtsprocenten aangegeven. Van een viertal elektroden is tevens de samenstelling van neergesmolten lasmetaal gegeven dat verkregen is door onder normale omstandigheden, dus in lucht, proefplaten met V-naad van St. 52 te lassen. Indien het gehalte Si, Cr of Cu lager is dan 0,01 wordt dit met een streepje aangegeven; open plaatsen in de tabel geven aan dat het gehalte niet is geanalyseerd. De gehalten van Mo, V, Nb en Al blijken zodanig laag dat het niet van belang is ze te vermelden.
In de tabel is het koolstofequivalent gegeven dat volgens de IIW-norm is berekend:

$$C_{eq}\ (IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Het koolstofequivalent beoogt de bijdrage van een aantal elementen aan de hardbaarheid van laaggelegeerde C-Mn staalsoorten te relateren aan het koolstofgehalte dat, zoals uiteraard uit de formule blijkt, de sterkste invloed heeft op de hardbaarheid van staal. Voor het lasmetaal van hoogge-legeerde elektroden wordt dus geen koolstofequivalent gegeven.

Tabel III - Gedrag van elektroden: In deze tabel zijn de meetgegevens van de lasparameters en de bevindingen van de lasser samengevat. In 1975 en 1976 is het laswerk verricht door verschillende personen hetgeen tot verschillen in de bevindingen leidt. Derhalve zijn de resultaten uitgesplitst naar jaar van uitvoering.
Als kerndraaddiameter van de elektroden is zoveel mogelijk 5 mm aangehouden om een zo groot mogelijke warmteinbreng te verkrijgen; slechts in twee gevallen zijn 4 mm elektroden gebruikt. Behalve bij de roestvaste elektroden is steeds gelast met de elektrode aan de minpool.
Bij de nu volgende gegevens van de lasparameters worden alleen de gemiddelde waarden aangegeven.
De cijfers voor de spanning van 1976 hebben betrekking op de boogspanning, daar gecompenseerd is voor de inwendige weerstand van het totale lascircuit, zijnde 0,022 Ω. Het meten van deze weerstand met een Thomsonbrug heeft plaatsgevonden op een licht slingerend schip, met als gevolg een licht

slingerende nulpuntsinstelling van de meetapparatuur. De hierdoor optredende onnauwkeurigheid zal wellicht hebben bijgedragen aan de nogal laag uitgevallen, berekende boogspanning. Deze liggen aan de lage zijde van het spanningsinterval waarin elektroden onderwater verlasbaar zijn (32). Aangezien de weerstand in 1975 niet gemeten is, zijn de spanningsgegevens van dat jaar de boven water gemeten waarden, dus niet de boogspanning. Deze gegevens kunnen dan ook alleen onderling worden vergeleken.
Bij PLOT 76 is de spanning continu geregistreerd met een recorder, zodat later kon worden vastgesteld in welke mate spanningsfluctuaties zijn opgetreden. De beoordeling hiervan is weergegeven in de kolom "regelmaat". Daarnaast is uit de registratie af te lezen hoe vaak een boogdoving plaatsgevonden heeft (Hiermee worden die boogdovingen bedoeld waarbij door de lasser de boog opnieuw moet worden gestart, en dus niet de zeer korte boogdovingen welke bijvoorbeeld kunnen optreden bij kortsluiting als gevolg van de druppelovergang, en die alleen met een oscilloscoop zijn vast te stellen.). Het vermelde aantal boogdovingen per elektrode is de gemiddelde waarde van 9 tot 12 elektroden.
De gegevens van regelmaat en boogdovingen hebben betrekking op het onder de hand lassen; bij lassen in andere posities verslechteren deze kenmerken.
De beoordelingen van het lasgedrag der elektroden door de lassers zijn in de volgende kolommen weergegeven. Bij de elektroden A, B en D van PLOT 75 is aangegeven welke deklaag uiteindelijk is aangebracht; men lette hierbij op de invloed van de verschillende lagen van elektrode B.
Bij PLOT 75 is op initiatief van de lasser de altijd door hemzelf gebruikte elektrode E voor een deel in het onderzoek betrokken; de door hem gegeven beoordelingen van dit elektrodetype blijken subjectief. Zijn collega van 1976 komt althans tot een andere beoordeling, hoewel ook hij in de praktijk regelmatig elektrode E gebruikt. Overigens wordt zijn mening ondersteund door de in de tabel gegeven meetresultaten: matige regelmaat, dus boogstabiliteit, en vrij veel boogdovingen.
Tenslotte moet worden opgemerkt dat elektrode G aanvankelijk met 180 A is verlast, hetgeen tot zeer slechte resultaten leidt. Hierbij blijkt onder andere geen inbranding op te treden, zodat de "las" los in de naad komt te liggen. Ongelukkiger wijze is dit gebeurd bij de eerste drie lasrupsen in de vlakke plaat St. 52 met V-naad. Hierdoor kan deze lasnaad nauwelijks gebruikt worden voor mechanische beproeving, hoewel de overige lasrupsen, gelast met 200 A, een goede verbinding vormen.

Tabel IV - Beoordeling lassen: Het laswerk is in de eerste plaats visueel beoordeeld op inkarteling, spatten, slak en open porositeit, en de algemene indruk van het uiterlijk. Van de platen met V-naad zijn röntgenfoto's gemaakt, die zijn beoordeeld aan de hand van een IIW-catalogus. De kwaliteit van het laswerk wordt aangegeven met een cijfer tussen 1 = zeer goed en 5 = zeer slecht, waarna met trefwoorden is aangeduid wat de aard der lasfouten is.
De mate waarin porositeit optreedt is vastgesteld door de hoeklassen open te breken en kijkend door een microscoop het aantal gasholten te tellen. Naast het aantal is de grootte van de gasholten van belang; met beide rekening houdend is een beoordeling opgesteld. Hierbij is vastgesteld dat lassen van elektrode D gemiddeld 2½ tot 3 maal minder gasholten bevatten van bovendien geringere afmetingen dan van de elektroden A, B en C.

Tabel V - Harding: Doorsneden van de lassen in de vlakke platen met V-naad van PLOT 76 zijn microscopisch nauwkeurig onderzocht.
Hiertoe behoort ook het meten van de Vickers microhardheid met een belasting van 100 gram: H_V (0,1). Vanaf de smeltlijn is het verloop van de hardheid in de HAZ als functie van de afstand tot de smeltlijn gemeten voor de sluitlaag en voor de onderliggende laag van elke lasverbinding. Op deze hardheidsprofielen wordt bij de bespreking van de resultaten verder ingegaan. In deze tabel wordt alleen de piekwaarde van de hardheid en de afstand van de plaats van de piekwaarde tot de smeltlijn gegeven. Deze getallen worden in verband gebracht met de warmteinbreng van de grondlaag en het geregistreerde temperatuurverloop, waaruit de afkoeltijden tussen 800 en 500°C zijn berekend en tevens de afkoelsnelheden bij 800 en 500°C. In alle platen van St. 52 komen scheuren voor in de HAZ. Veelal zijn dit typische "underbead-cracks" die evenwijdig aan de smeltlijn in de HAZ lopen. De afstand van de scheuren tot de smeltlijn is eveneens gegeven. Behalve bij elektrode G zijn in het lasmetaal en het plaatmateriaal van St. 37 geen scheuren waargenomen. Overigens zijn in het lasmetaal wel vele microscopisch kleine bolvormige slakinsluitsels waargenomen. Op de scheurvorming wordt bij de bespreking van de resultaten nog teruggekomen.

Tabel VI - Mechanische eigenschappen: De mechanische eigenschappen van de las-verbindingen zijn bepaald met proef-staven die dwars op de las uit de vlakke platen met V-naad zijn genomen. Reeds is opgemerkt dat bij de platen van PLOT 75 een krimp van 14 tot 23° is opgetreden. Daardoor kunnen uit deze platen eigenlijk alleen nog net kerf-slagstaafjes genomen worden. Ter bepaling van de keuze van de elektroden van PLOT 76 zijn uit deze platen echter ook nog staven voor buigproeven gehaald. Om een indruk van de taaiheid van de dwarsdoorsnede van de gehele las te krijgen is gekozen voor "side-bend" beproeving.
Uit de platen van St. 52 van PLOT 76 zijn proefstaven gehaald voor de kerf-slagproef, de side-bend buigproef en de trekproef, behalve natuurlijk uit de plaat van elektrode F omdat, zoals reeds vermeld, de las los in de naad ligt.
Nadere gegevens van de proeven:

. kerfslagproef: uitgevoerd met een 30 kgm kerfslaghamer bij 0°C. De staafjes zijn dwars op de las uit de plaat genomen, met de Charpy-V-kerf (V-vormige kerf met openingshoek 45°, afrondingsstraal 0,25 mm, diepte 2 mm) in het lasmetaal loodrecht op het plaatoppervlak.
In de tabel is de opgenomen energie en de kerfslagwaarde van elke proef opgegeven, benevens de gemiddelde kerfslagwaarde per elektrode.

. side-bend test: dikke proefstaaf d = 10 mm op één uitzondering na (zie tabel), diameter buigdoorn D = 40 mm, diameter oplegrollen 30 mm, vrije doorlaat 70 mm. In de tabel is de buighoek Q aangegeven waarbij scheurtjes van 2 à 3 mm op-treden, waardoor de buigkracht niet verder toeneemt.

. trekproef: type I - prismatische trekstaaf
type II- prismatische trekstaaf die in het lasmetaal aan weerszijden 1,5 mm is ingenomen met een frees van 3,5 mm diameter.

De in de tabel aangegeven vloeigrens σ_v heeft betrekking op het plaatmateriaal daar bij proefstaven van type II geen vloeiverschijnsel is waargenomen. Aange-zien de lassen in de trekstaven smal zijn, is het moeilijk een behoorlijke maat voor de taaiheid te geven, zeker gezien de locatie en dus het scheve verloop van de breuk. Om toch een onderlinge vergelijking mogelijk te maken is gebruik gemaakt van de insnoering ψ, waarbij moet worden opgemerkt dat deze natuurlijk niet vergelijkbaar is met de insnoering van een cilindrische, proportionele trekstaaf.

Van elektrode G worden geen resultaten gegeven. Het feit dat bij de eerste drie lasrupsen in de proefplaat de inbranding volledig ontbreekt, doet de trekproef nogal ongelukkig verlopen. Overigens bestaat de indruk dat de taaiheid aanzienlijk beter is dan van het overige lasmetaal, zoals ook uit de resultaten van de kerfslagproeven blijkt.
Bij de interpretatie van de resultaten dient te worden overwogen dat bij alle proefstaven van PLOT 76 reeds haarscheurtjes in de HAZ aanwezig zijn, terwijl dat bij PLOT 75 niet het geval is.

5-2-2: Bespreking der resultaten.

Het lassen met beklede elektroden is bij het OWL zonder twijfel de meest toegepaste techniek. Hieraan zijn dan ook in de vakliteratuur vele artikelen gewijd, die in aard en kwaliteit sterk uiteenlopen. Het gevolg is dat op praktisch elk terrein tegenstrijdige gegevens zijn te signaleren. Uit las-technisch en metaalkundig oogpunt is het werk dat verricht is in Frankrijk door het "Institut de Soudure" (30), in Engeland door het "Welding Institute" (10, 32, 38) en in de Verenigde Staten door het "Massachusetts Institute of Technology" (MIT)* (14, 33, 36) het meest interessant en objectief. Niet onvermeld mag blijven dat sedert 1955 in de Sovjet Unie door het Paton laboratorium een constante stroom publicaties wordt geproduceerd, die op welhaast klassieke wijze uitmunten in onvolledigheid van gegevens. Daarnaast blijken in de westerse wereld steeds meer verpakte reclameboodschappen in erkende vakbladen te verschijnen. Bij de nu volgende bespreking zullen de resultaten die goed kwantificeerbaar zijn worden getoetst aan gegevens uit de literatuur.

a-Lasgedrag.

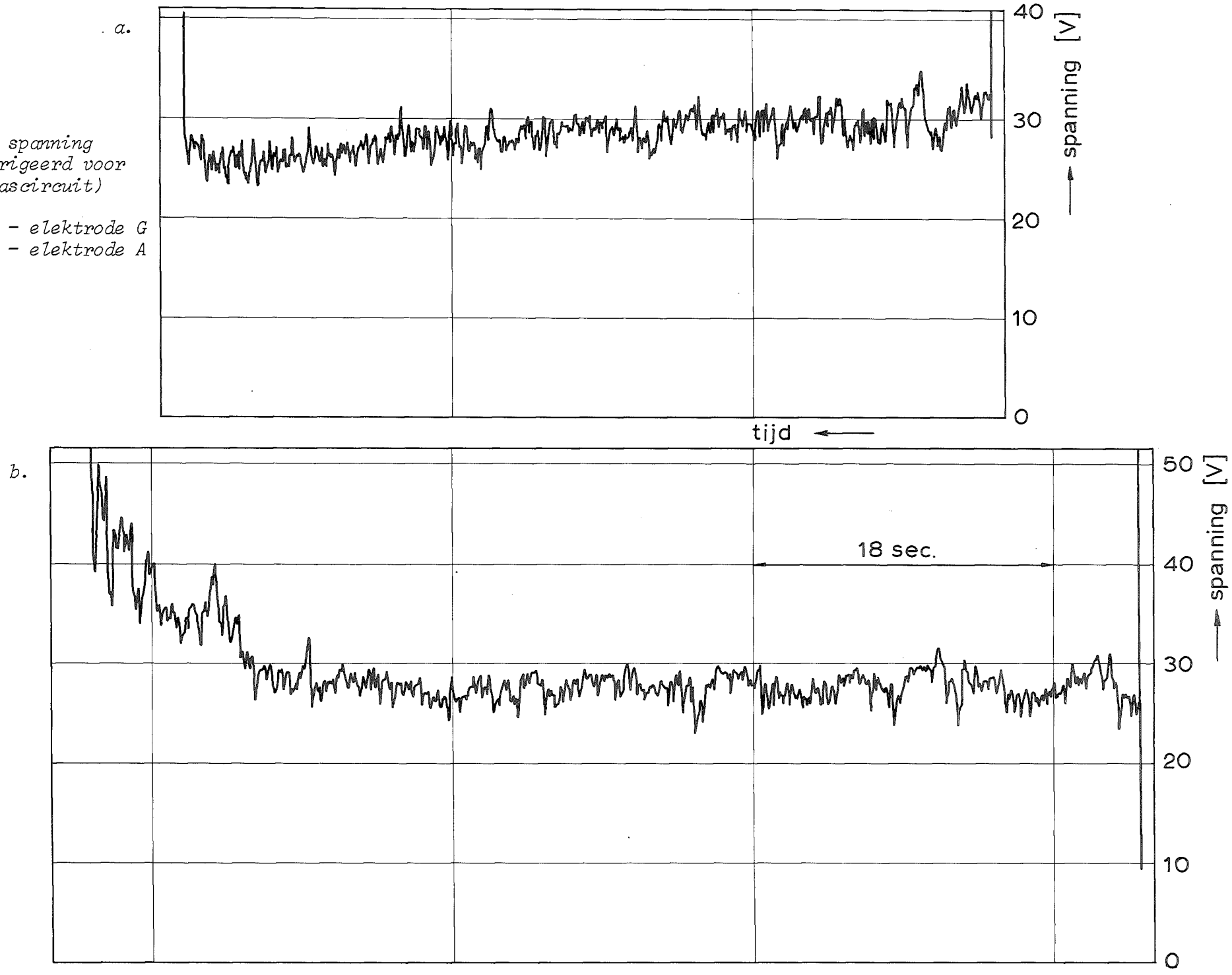
Omtrent de bij het OWL met beklede elektroden toe te passen stroom-sterkte bestaat in de literatuur overeenstemming, en wel dat deze 15-25% hoger moet zijn dan in lucht (b.v. 30, 33). Deze regel heeft bij ons werk tot bevredigende resultaten geleid, met één interessante uitzondering:

*Kortgeleden verscheen een evaluatie van het OWL (56), waarin voornamelijk onderzoek wordt besproken, dat aan het MIT is verricht.

Fig. 20 -

Registratie spanning (niet gecorrigeerd voor weerstand lascircuit)

20 - a - elektrode G
20 - b - elektrode A



de Cr-Ni elektrode G vereist 200 A en dat is 75% hoger dan in lucht.
Uit de literatuur is slechts één opgave bekend voor dit type elektrode van dezelfde diameter: 190A bij 26,5 V (32). Verder wordt slechts vermeld dat austenitische elektroden moeilijk verlasbaar zijn (15, 37).
Aanvankelijk is getracht deze elektrode te verlassen met 180 A, hetgeen tot praktisch dezelfde resultaten leidde als bij elektrode F (zelfde type, ander merk): zeer slechte regelmaat, meer dan vijf boogdovingen per elektrode en totale afwezigheid van inbranding. Een verhoging van de stroomsterkte met 20 A bracht een ware metamorfose teweeg bij elektrode G en maakte deze tot de makkelijkst verlasbare elektrode van het gehele onderzoek. De hiermee gelaste V-naad heeft dan ook zonder twijfel het beste uiterlijk en is niet te onderscheiden van een in lucht gemaakte las. Achteraf kan worden verwacht dat ook elektrode F betere resultaten zou hebben gegeven bij een aanzienlijke verhoging van de stroomsterkte. Als praktisch bezwaar moet worden aangevoerd dat het bij deze hoge stroomsterkten ondenkbaar is in positie te lassen.
De registratie van de spanning (fig. 20a) levert bij elektrode G het verrassende resultaat dat gedurende het lassen de spanning daalt. In alle andere gevallen levert deze registratie een langzaam stijgende of een pas na verloop van tijd plotseling stijgende (fig. 20b) spanning op. In het laatste geval leidt dat tot het doven van de boog door het instorten van de stroomsterkte, aangezien stroomsterkte en spanning gekoppeld zijn door de karakteristiek van de stroombron.
Brown (33) heeft opgemerkt dat in het algemeen bij dikbeklede elektroden een hogere dan normale boogspanning optreedt en dat dit effect bij negatieve polariteit kleiner is dan bij positieve. Als gevolg van de machinekarakteristiek kan hierdoor vaak de optimale stroomsterkte niet bereikt worden, waardoor de inbranding en de warmteinbreng afnemen.
Een verklaring voor de plotseling oplopende boogspanning is moeilijk te geven. Het meest voor de hand liggend is een toenemende kelkdiepte. Dit is met enkele proeven te verifiëren, maar waarom dit verschijnsel bij enkele elektroden zo plotseling kan optreden is niet duidelijk. Wellicht is het in dit verband nog interessant op te merken dat Silva (35) heeft vastgesteld dat de gasvorming gedurende het lassen met de tijd afneemt.

Het zou interessant zijn om na te gaan of een tijdens het lassen dalende spanning, waarbij dus de stroomsterkte toeneemt, een duidelijke bijdrage levert aan de goede laseigenschappen, en of dit door een juiste keuze van de bekledingsdikte te realiseren is.
De beoordelingen van het lasgedrag der elektroden door de lassers leiden tot de volgende conclusies:

- elektrode A last het prettigst, gevolgd door respectievelijk C, D en E.
- elektrode G levert ongekend goede laseigenschappen, maar is ongeschikt voor lassen in positie.
- elektrode F is bij de gebruikte stroomsterkte onbruikbaar.
- bij goed gekozen watervaste deklaag biedt elektrode B uitzicht op goede laseigenschappen.
- bij het lassen in niet-horizontale positie is hoeklassen in principe goed uitvoerbaar, omdat de lasnaad op de tast goed te volgen is. Bij een rondgaande lasnaad in een pijp, die in meerdere lagen gevuld moet worden is dit, behalve voor de grondlaag, veel moeilijker. Bovendien is voorbij de positie "half vijf" het lasbad niet meer in bedwang te houden. Derhalve wordt in de literatuur voor dit werk een elektrodediameter van 4 of zelfs 3,2 mm aanbevolen (15, 30, 35).

Het zou echter aanbeveling verdienen om na te gaan of een verbetering te verkrijgen is door, in navolging van de op land gebruikelijke praktijk, het continue aanpassen van de stroomsterkte aan de positie, hetgeen door de lasser zelf wordt ingesteld met behulp van afstandsbediening.

b-Beoordeling laswerk.

In de literatuur wordt veel aandacht besteed aan de factoren die bij het OWL de stollingswijze van het lasmetaal negatief beïnvloeden. Daarbij treden vooral op de voorgrond randinkarteling, slakinsluitsels en poreusheid. Randinkarteling is een probleem dat veel gesignaleerd wordt (14, 17, 30, 33, 34, 36). Het wordt verklaard door de zeer snelle stolling (14, 33), waarbij tevens de gasontwikkeling gedurende het lassen een belangrijke invloed heeft (30). Er zijn aanwijzingen dat een negatieve polariteit van de elektrode betere resultaten geeft dan een positieve (34), hoewel daarover geen eenstemmigheid heerst (17). Randinkarteling kan het verwijderen van de slak sterk

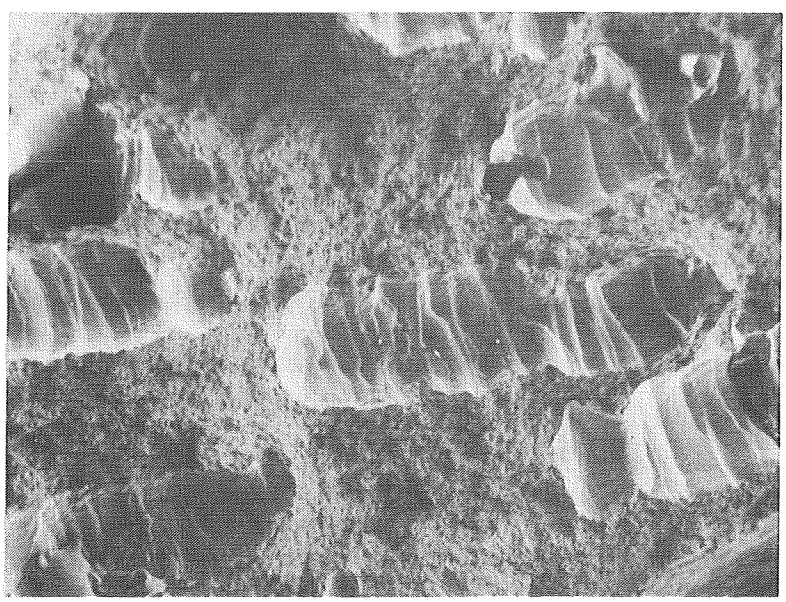
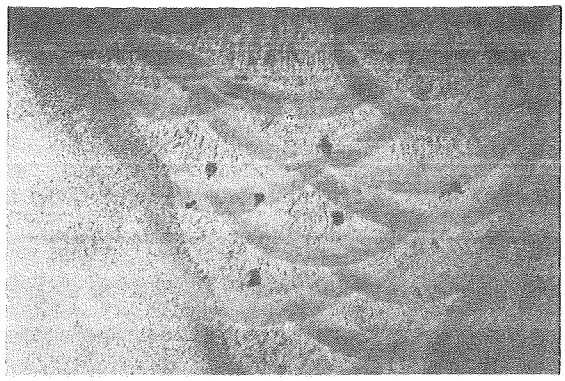
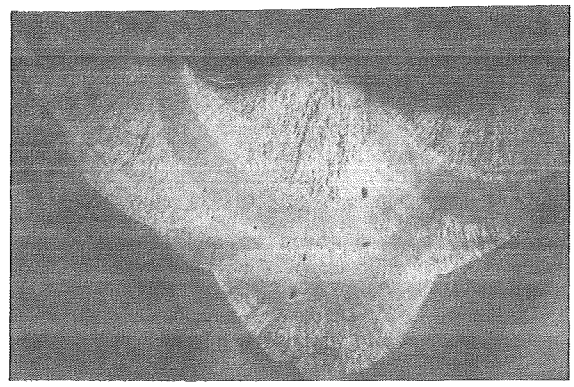


Fig. 21 - Rasterelektronenmicroscoop, V = 30×
Breukvlak kerfslagstaaf: elektrode E.
Typisch wormvormige gasholten.

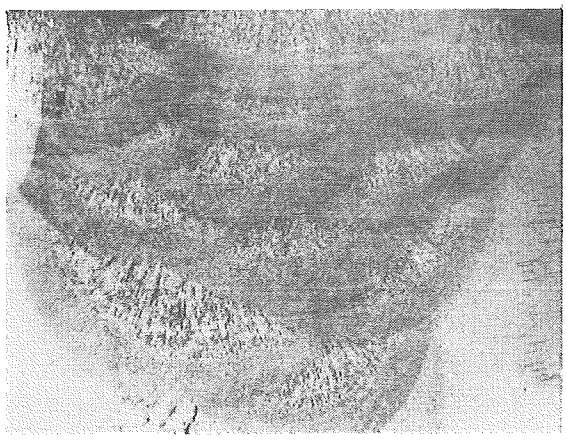
belemmeren, waardoor bij lassen in meerdere lagen problemen ontstaan (36). Bij het OWL in het bijzonder veroorzaakt een slechte slaklossing kostbaar tijdverlies.
Het is verrassend dat in ons onderzoek in principe bij geen der elektroden problemen met randinkarteling zijn opgetreden. Men moet dus aannemen dat bij deze elektroden het optreden van inkarteling het gevolg is van niet-optimale lasparameters of een foutieve stand van de elektrode. Het laatste wordt in de hand gewerkt bij het lassen in niet-horizontale positie.
Slakinsluitsels in het lasmetaal is bij het OWL een algemeen optredend verschijnsel als gevolg van de snelle stolling, waardoor de slak geen gelegenheid heeft naar het oppervlak van het lasbad te komen. In het lasmetaal van PLOT 76 worden de slakdeeltjes als microscopisch kleine bolletjes in niet te verwaarlozen aantallen aangetroffen. Grotere slakinsluitsels zijn op de röntgenfoto's van de V-naden van PLOT 76 nauwelijks waargenomen, maar wel in die van PLOT 75. Bij het niet-horizontaal lassen zijn enkele malen flinke slakinsluitsels waargenomen; kennelijk worden deze dan eerder ingevangen.
Uit het voorgaande moge blijken dat zowel inkarteling als slakinsluitsels in ernstige vorm vermijdbaar zijn. De zeer kleine slakbolletjes lijken door hun vorm geen ernstige bedreiging voor de kwaliteit van de lasverbinding te vormen.
Gasholten lijken wat dat betreft ernstiger van aard, gezien de hoeveelheid waarin ze aanwezig zijn. Vastgesteld is dat het aantal gasholten toeneemt met de diepte (37). Dit kan niet zonder meer aan de toenemende druk worden geweten: in het droge treedt bij basische elektroden geen en bij rutiel zeer grove porositeit op bij toenemende druk (38, 41) tot 32 atm.
Er is slechts één artikel in de literatuur dat zich toelegt op onderzoek naar variabelen die de poreusheid beïnvloeden (39). De vorming van porositeiten is sterk afhankelijk van de stroomsterkte, en is bij een bepaalde stroomsterkte zelfs geheel vermijdbaar. Uit het artikel valt af te leiden dat de boogstabiliteit een belangrijke grootheid is. Dit zou verklaard kunnen worden door een sterkere turbulentie van het lasbad bij slechte boogstabiliteit. De polariteit heeft geen invloed. Bij MIG-lassen op 10 cm waterdiepte met gebruik van argon of CO_2 als schermgas ontstaan gasholten die ca. 70% H_2 en 10% CO bevatten (40). Bij MIG-lassen onder normale omstandigheden bevatten de gasholten voornamelijk N_2 en CO_2.



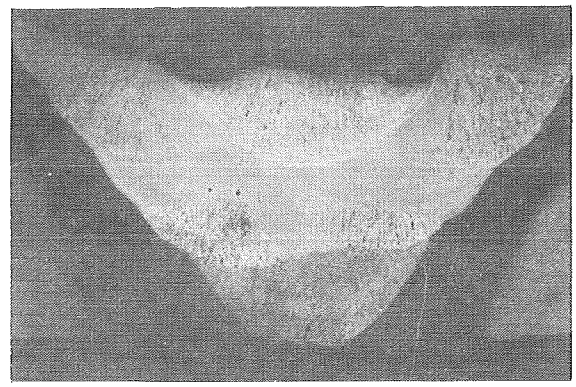
22 - a - PLOT 75 - elektrode A



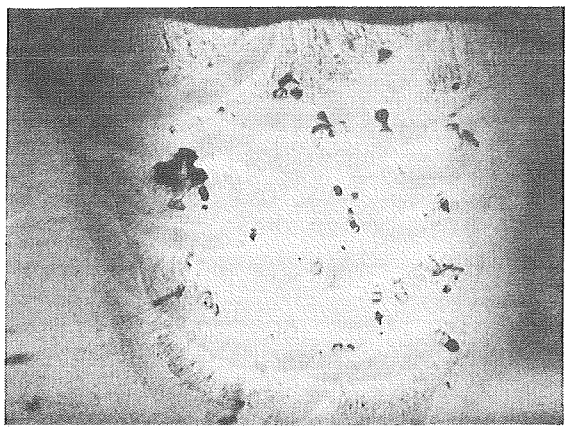
22 - b - PLOT 76 - elektrode A



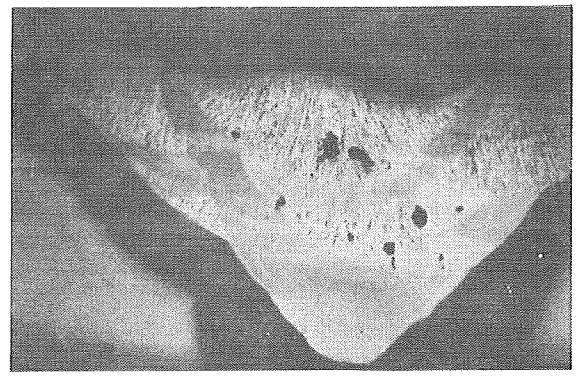
22 - c - PLOT 75 - elektrode D



22 - d - PLOT 76 - elektrode D



22 - e - PLOT 75 - elektrode E



22 - f - PLOT 76 - elektrode E

Fig. 22 - Dwarsdoorsneden van platen met V-naad: vergelijking tussen PLOT 75 en PLOT 76.
V = 4½x - nital.

Zoals ook wel verwacht kon worden mag dus worden aangenomen dat de vorming van gasholten bij het nat OWL wordt veroorzaakt door de opname van waterstof in het smeltbad (Hierop wordt nog nader teruggekomen). Aangezien de oplosbaarheid van waterstof in de vloeibare fase veel groter is dan in de vaste, zal tijdens het stollen waterstof worden uitgescheiden. Indien het stollingsfront zich sneller verplaatst dan dat een gasbel groeit zal poreusheid ontstaan (43). Dit kan nog bevorderd worden door kiemvormingsproblemen bij de belvorming. Als de verplaatsingssnelheid van het stollingsfront gelijk is aan de groeisnelheid van de bellen ontstaan de typische gelede gaskanalen (wormholes). Deze komen voor in het lasmetaal van de elektroden B, C en E en in geringe mate in A: zie fig. 21. Het lasmetaal van de roestvaste elektroden F en G bevat weinig gasholten, hetgeen deels verklaard kan worden door de hogere oplosbaarheid van waterstof in austeniet. Ook de oxyderende elektrode D geeft veel minder poreusheid dan de overige, hetgeen verklaard zou kunnen worden door een hoger zuurstofgehalte in zowel het lasbad als de boogatmosfeer. Het eerste vermindert de viscositeit en de oppervlaktespanning van het lasbad, waardoor de ontgassing wordt bevorderd, en het tweede heeft een remmende invloed op de waterstofopname (43).
Een en ander wordt geïllustreerd door fig. 22, waarin de dwarsdoorsneden van de lassen van elektroden A, D en E in V-naad van zowel PLOT 75 als PLOT 76 zijn weergegeven; hierbij blijkt dat ook per jaargang nogal wat verschillen optreden.
Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat het voor de hand ligt dat de positie waarin gelast wordt belemmeringen voor de ontgassing kan veroorzaken door het opstijgen van gasbellen te verhinderen; indien mogelijk moet men trachten dit door aanpassing van de geometrie van de verbinding te voorkomen (30).
Resumerend kan gesteld worden dat, hoewel algemeen het ontstaan van gasholten als inherent aan het nat lassen wordt beschouwd, uit onze resultaten blijkt dat dit verschijnsel wel degelijk in positieve zin te beïnvloeden is.
Met betrekking tot de inbranding heeft Brown (33) vastgesteld dat in het algemeen geen problemen optreden. De inbranding is evenredig met de stroomdichtheid van de boog. Aangezien bij het OWL een hogere stroomsterkte dan normaal wordt gebruikt, en bovendien de boog wordt "samengeknepen", is in het algemeen de penetratie bij het OWL groter dan onder normale omstandigheden.

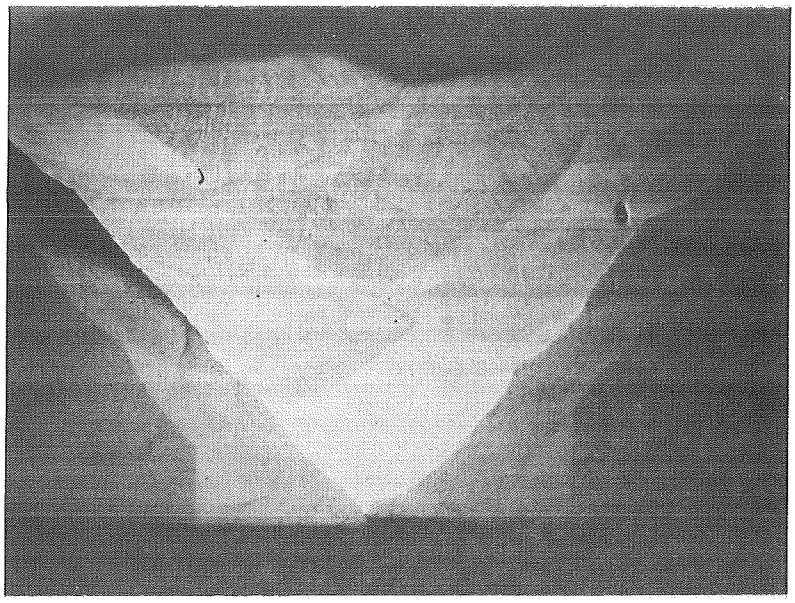


Fig. 23 - V = 4½x - Vilella, gevolgd door nital.
PLOT 76 - elektrode G (austenitisch).

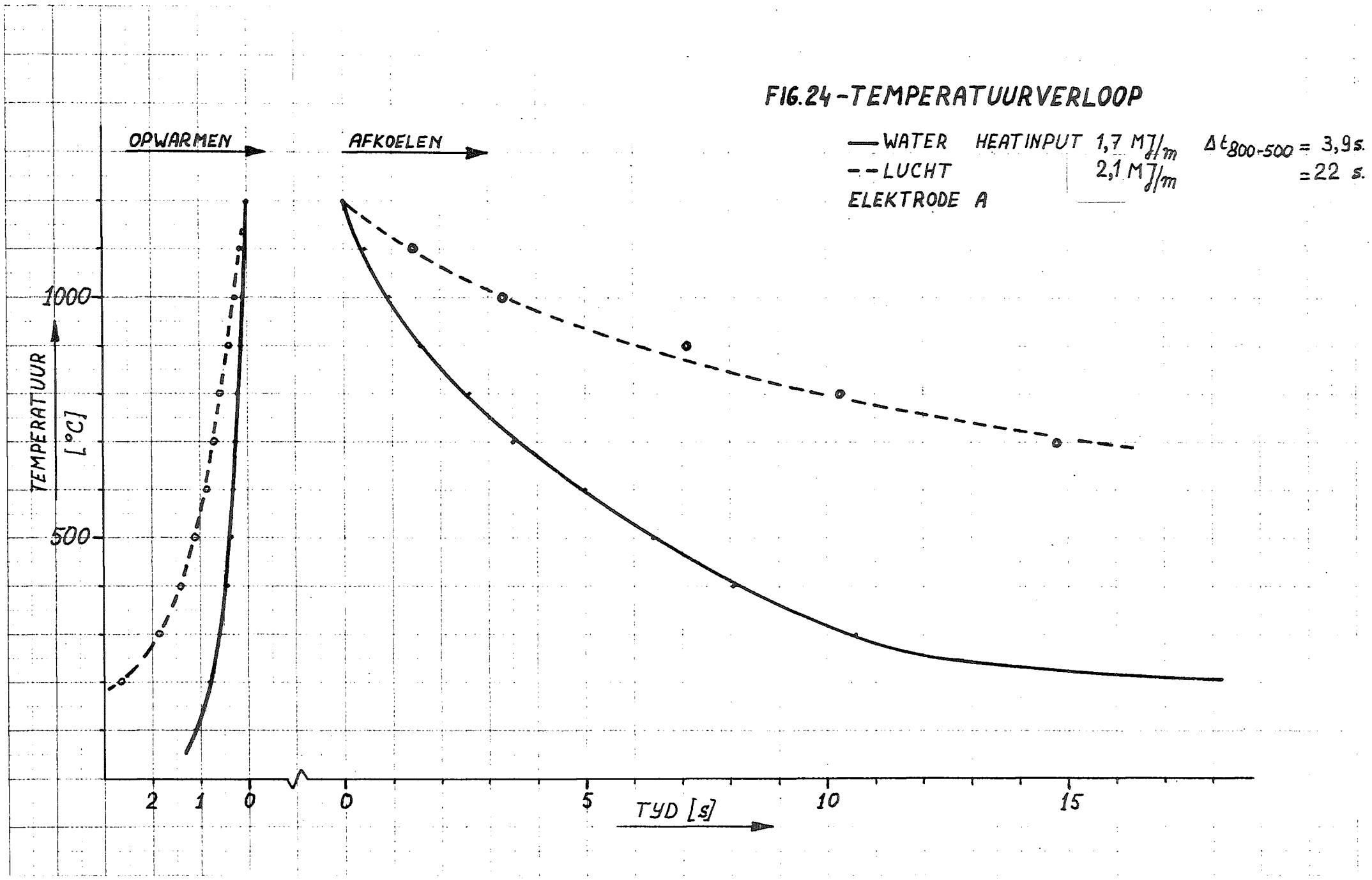


FIG.24 - TEMPERATUURVERLOOP
OPWARMEN
AFKOELEN
—WATER HEATINPUT 1,7 MJ/m
--LUCHT 2,1 MJ/m
ELEKTRODE A
Δt800-500 = 3,9 s.
= 22 s.
1000
500
TEMPERATUUR [°C]
2
1
0
0
5
10
15
TYD [s]

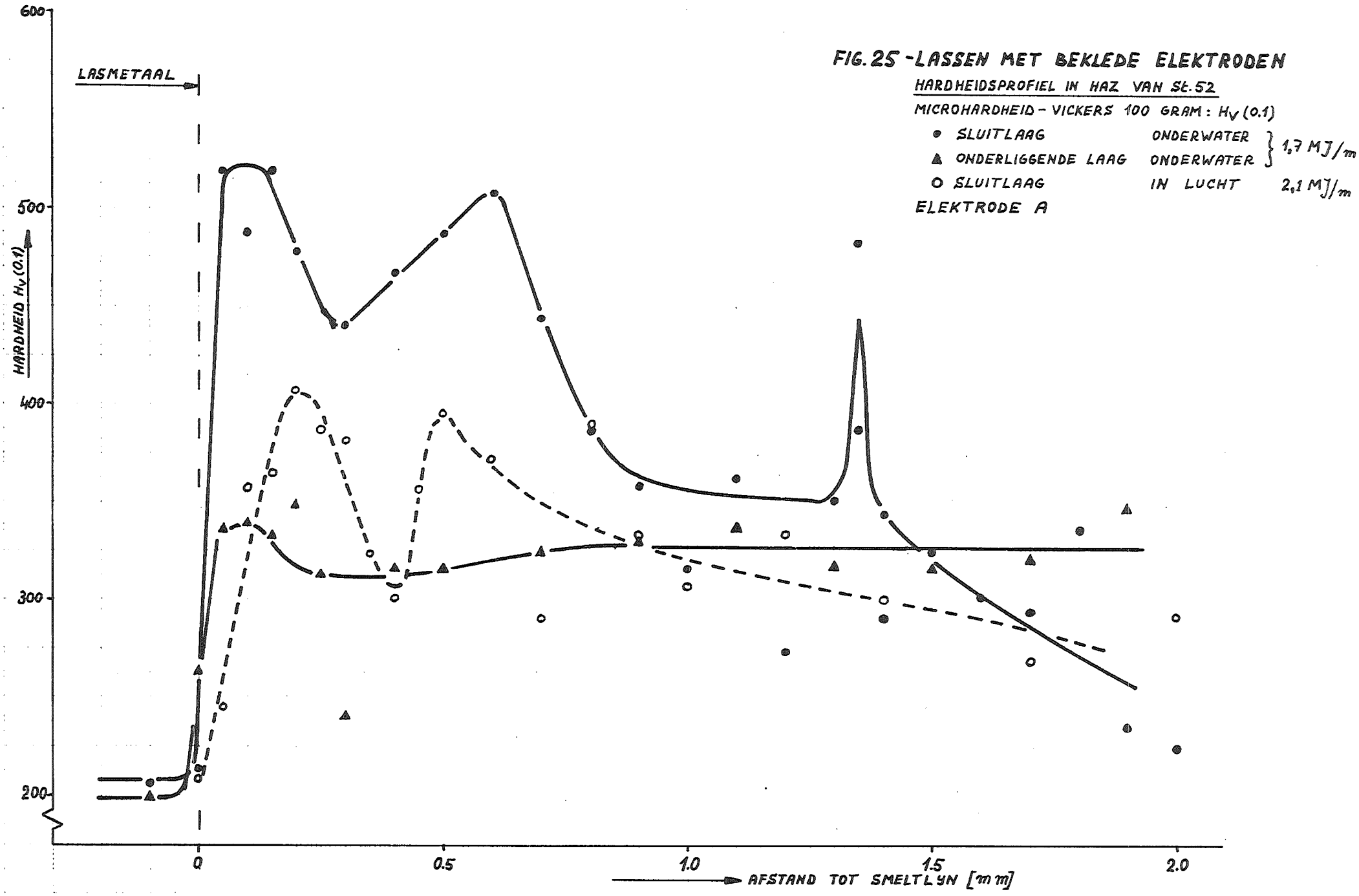


FIG. 25 - LASSEN MET BEKLEDE ELEKTRODEN
HARDHEIDSPROFIEL IN HAZ VAN St. 52
MICROHARDHEID - VICKERS 100 GRAM : Hv (0.1)
● SLUITLAAG ONDERWATER
▲ ONDERLIGGENDE LAAG ONDERWATER
1,7 MJ/m
○ SLUITLAAG IN LUCHT 2,1 MJ/m
ELEKTRODE A
LASMETAAL
HARDHEID Hv (0.1)
600
500
400
300
200
0
0.5
1.0
1.5
2.0
AFSTAND TOT SMELTLYN [mm]

Bij ons onderzoek blijkt elektrode D de grootste inbranding te geven. Behalve bij de elektroden F en G is de inbranding bij de overige elektroden toereikend, alhoewel de indruk bestaat dat deze niet optimaal is. Hieraan zijn echter geen metingen verricht; voor uitgebreide beschouwingen op dit terrein wordt verwezen naar R.T. Brown (14, 33).
Bij de elektroden F en G geeft de inbranding problemen. Elektrode G geeft zelfs bij 200 A (Ø 4 mm!) nog een zeer geringe penetratie, zoals uit fig. 23 blijkt. Ongetwijfeld zal de positieve polariteit van de elektrode hieraan hebben bijgedragen, maar het verklaart niet de afwezigheid van inbranding bij elektrode F en bij elektrode G met 180 A. Ten tweede male gaan hierbij de gedachten uit naar het reeds bij het stiftlassen aangevoerde idee, dat bij een elektrische vlamboog onderwater zich bijzondere verschijnselen kunnen voordoen die in de literatuur nog niet eerder gesignaleerd zijn.

c-Microscopisch onderzoek en harding.

In tabel V zijn de resultaten van de temperatuurregistratie vermeld. Ter vergelijking zijn enkele platen met vrijwel dezelfde lasparameters gelast onder normale omstandigheden; hierbij treedt een $\Delta t_{800-500}$ van 10 à 20 seconden op (zie fig. 24). Aangezien bij de verschillende elektroden de warmteinbreng niet veel verschilt moet men verwachten dat de resulterende harding per plaat vrijwel hetzelfde is. Dit blijkt inderdaad het geval zodat voor de platen van St. 52 kan worden volstaan met het hardheidsverloop in één las.
In fig. 25 worden drie hardheidsprofielen van de HAZ weergegeven. In de eerste plaats die van de sluitlaag: hierbij blijkt dat bij het lassen van een enkele laag hoge hardheden optreden. In een onderliggende laag is de hardheid tot een zeer acceptabel niveau gedaald als gevolg van het uitgloeien van de HAZ tijdens het lassen van de volgende laag. Ter vergelijking is als derde het hardheidsprofiel van de sluitlaag van een onder normale omstandigheden gelaste plaat gegeven. De toelaatbaarheid van het hierbij bereikte hardheidsniveau is een grensgeval.

Het al of niet toelaatbaar zijn van hardheidswaarden wordt bepaald door de mogelijkheid van het optreden van koudscheuren (waterstofscheuren, underbeadcracking, delayed cracking, etc.). Hierbij spelen echter meerdere factoren een rol. Zonder hierop diep in te gaan is het zinvol op te merken dat tegelijkertijd aan vier voorwaarden moet zijn voldaan, wil dit verschijnsel optreden:

- aanwezigheid van waterstof
- een gevoelige structuur
- trekspanningen
- voldoende lage temperatuur (< 150°C)

Voor nadere beschouwingen wordt verwezen naar de grote hoeveelheid literatuur op dit gebied (b.v. 47,48). Men tracht ter voorkoming van dit type scheuren òf één der factoren volledig uit te schakelen, bijvoorbeeld de gevoelige structuur, òf de "som" der factoren beneden een bepaalde grenswaarde te houden. De aanwezigheid van waterstof en trekspanningen zijn bij vlamboogprocessen niet te voorkomen maar de mate waarin ze aanwezig zijn verschilt van geval tot geval.

Met betrekking tot het OWL kan omtrent deze factoren nog worden opgemerkt:

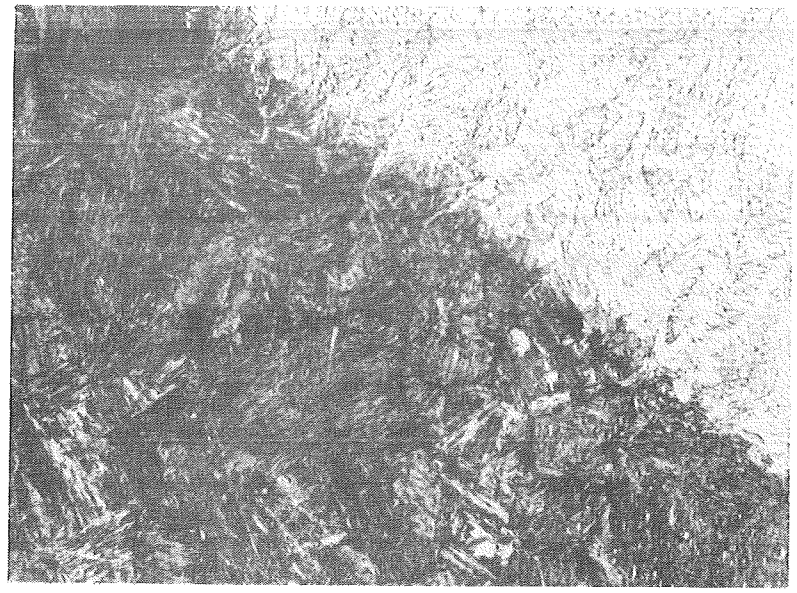
. de boogatmosfeer bestaat voornamelijk uit waterstof. De samenstelling is niet precies bekend maar de opstijgende bellen bevatten 60-80% H_2 (6, 49). Het waterstofgehalte in het lasmetaal zal dus veel hoger zijn dan gewoonlijk: normaal is een gehalte van 10 à20 ml $H_2/_{100\ g}$, terwijl bij OWL gehalten optreden van 30-80 ml $H_2/_{100\ g}$ (17, 32).

. een structuur wordt scheurgevoelig geacht indien de hardheid $H_V > 350$ à 400. Door de snelle afkoeling bij het OWL treden hogere hardheden op.

. de mate waarin trekspanningen optreden is behalve van de geometrie van de lasverbinding ook afhankelijk van de afkoelsnelheid, waardoor bij het OWL de situatie ongunstiger wordt.

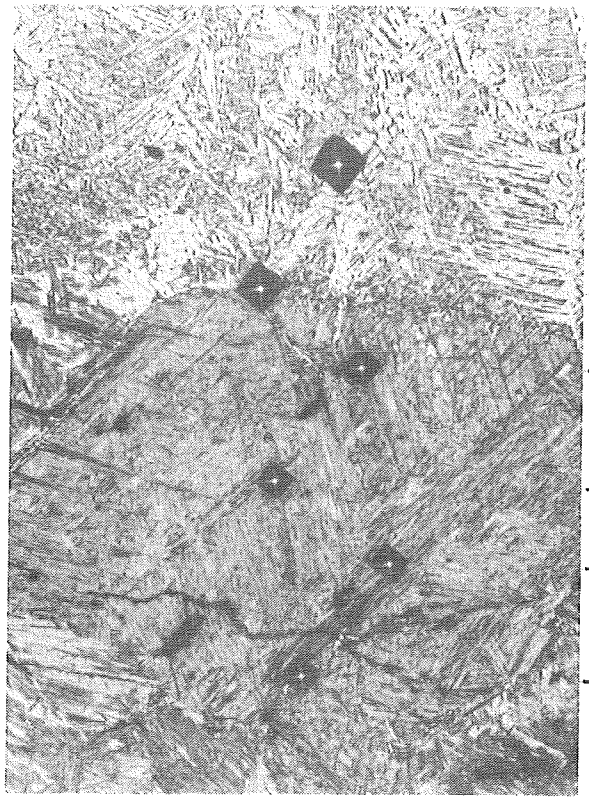
. in de normale praktijk verhoogt men vaak de temperatuur om het scheuren tegen te gaan. Door een voorwarmtemperatuur van hoger dan ± 150°C tijdens het lassen en enige tijd daarna te handhaven voorkomt men in de eerste plaats dat scheurvorming optreedt. In de tweede plaats zal gedurende het lassen een geringere afkoelsnelheid optreden, waardoor minder harding optreedt. In de derde plaats diffundeert waterstof bij deze temperaturen reeds met een aanzienlijke snelheid, zodat de aanvankelijk in het lasmetaal en de HAZ geconcentreerde waterstof zich over de gehele plaat zal verdelen,

HAZ



lasmetaal

26 - a - V = 100x - nital
Elektrode D: HAZ onder sluitlaag.



hardheid Hv (0,1)	afstand tot smeltlijn (mm)
210	-0.05
268	0
446	0.05
536	0.10
525	0.15
450	0.20

26 - b - V = 250x - nital
Elektrode E: HAZ onder sluitlaag.

Fig. 26 - PLOT 76: underbeadcracks in St. 52.

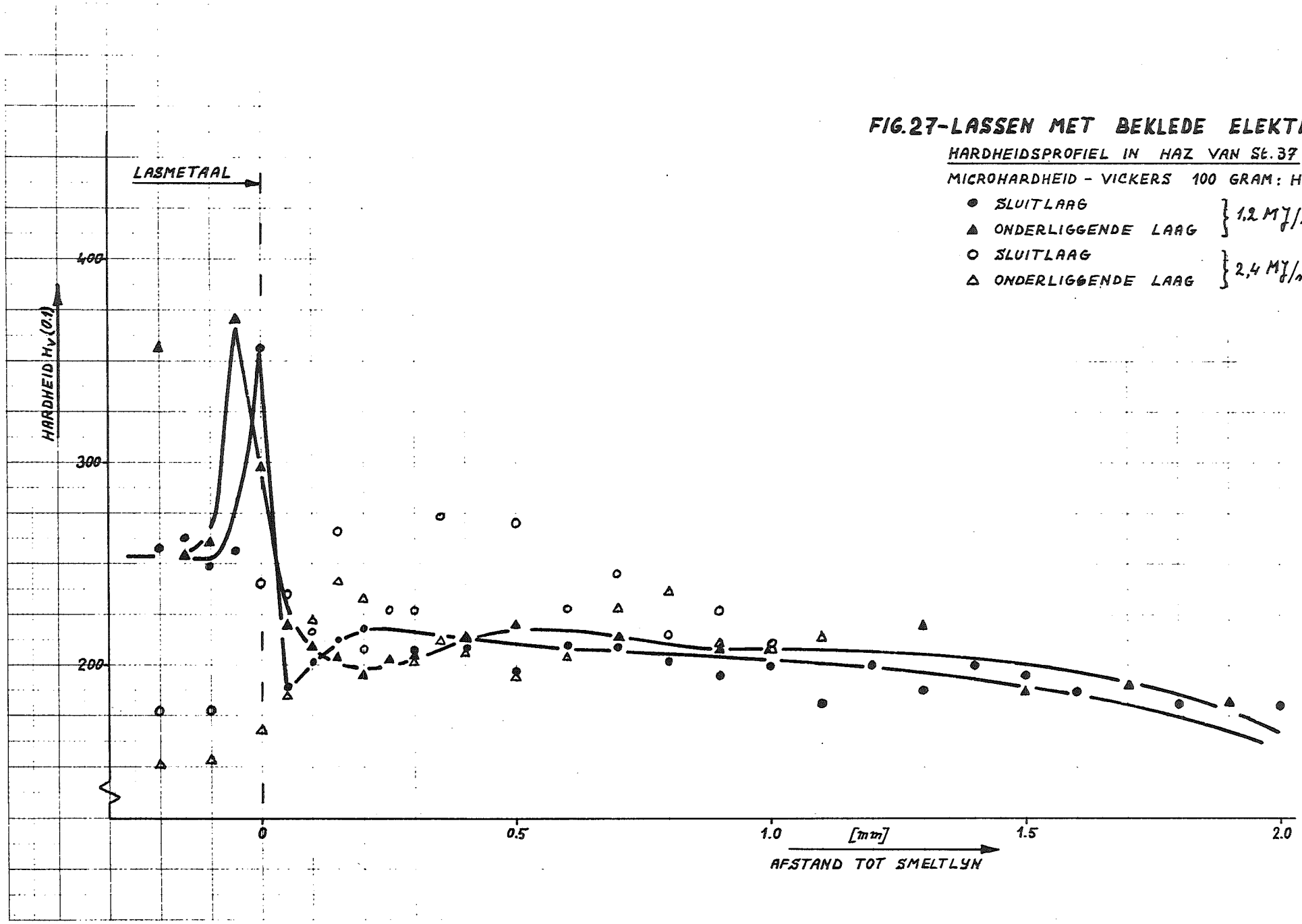


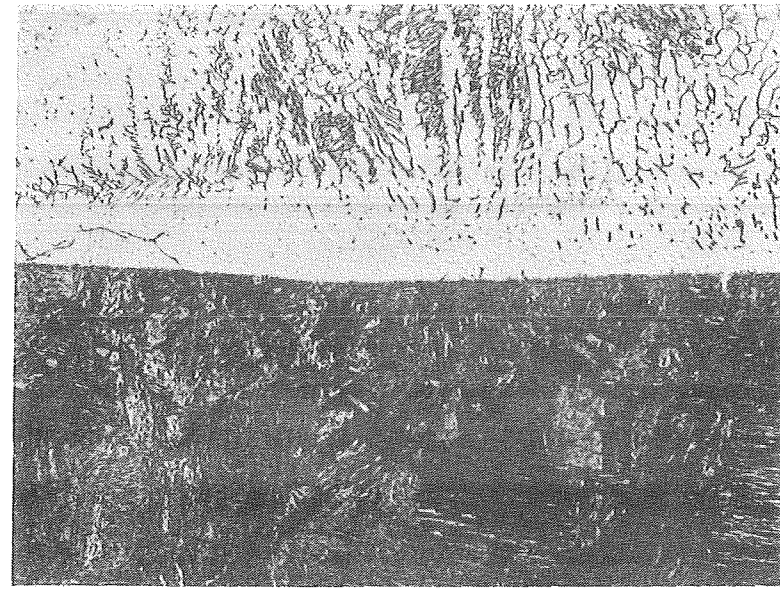
FIG.27-LASSEN MET BEKLEDE ELEKTRODEN.

HARDHEIDSPROFIEL IN HAZ VAN St.37

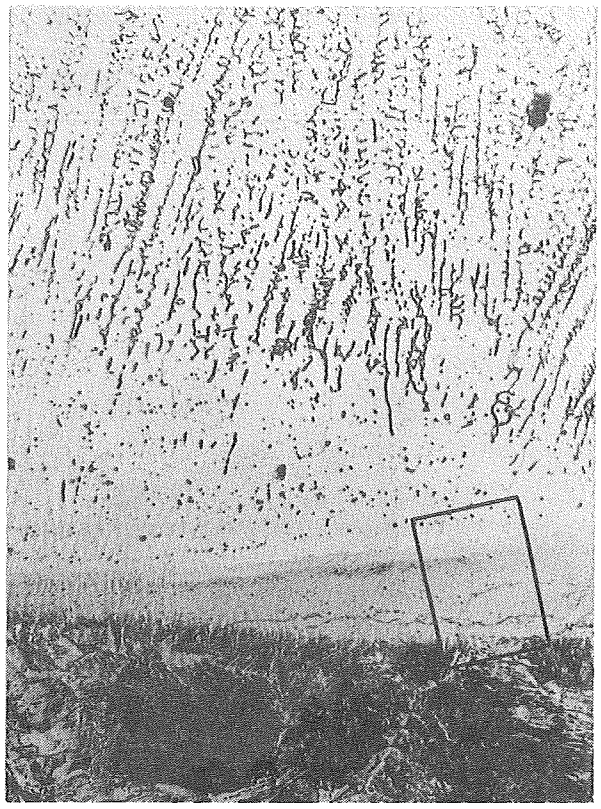
MICROHARDHEID - VICKERS 100 GRAM: $H_V(0,1)$

● SLUITLAAG } 1,2 MJ/m -ELEKTRODE G
▲ ONDERLIGGENDE LAAG

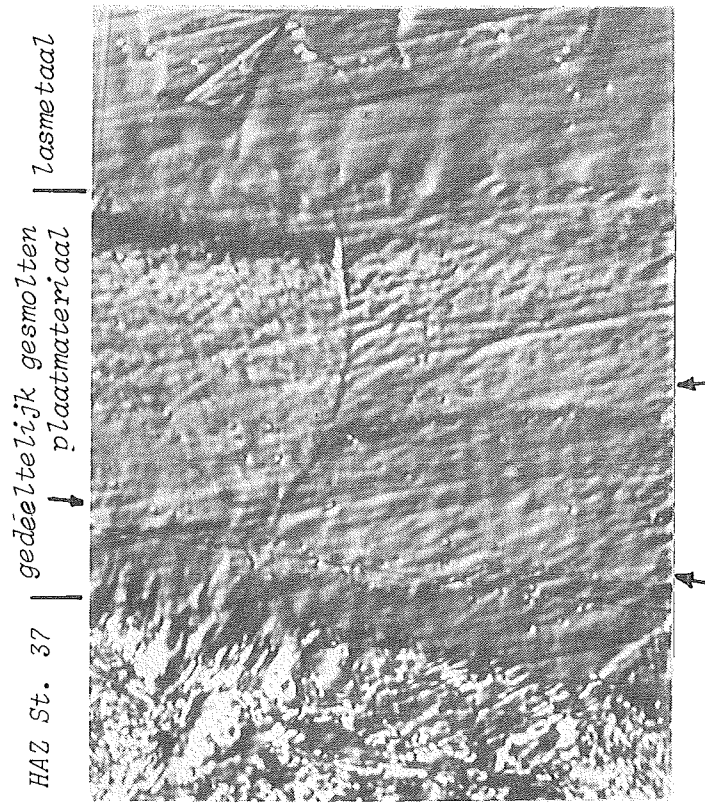
○ SLUITLAAG } 2,4 MJ/m -ELEKTRODE D
△ ONDERLIGGENDE LAAG



28 - a - V = 250×
Elektrode G op St. 52.
"Underbeadcrack" in HAZ; hardingsscheuren in gedeeltelijk gesmolten, met lasmetaal opgemengd plaatmateriaal.



28 - b - V = 250×
V-naad in St. 37 - elektrode G
Scheuren in gedeeltelijk gesmolten plaatmateriaal
Kader geeft fig. 28 - c.



28 - c - V = 1200× - interferentiecontr
V-naad in St. 37 - elektrode G
Scheurvertakking (zie pijltjes) langs aangesmolten korrelgrens in gedeeltelijk gesmolten plaatmateriaal.

Fig. 28 - Scheuren in lasverbindingen, gemaakt met roestvaste elektrode G.

zodat het gehalte in de HAZ lager wordt (47). Het voorwarmen is dus een uitermate nuttige techniek om het scheuren te voorkomen; tot op heden is men er echter niet in geslaagd dit voor gebruik onderwater op bevredigende wijze te realiseren.

Bij het natte OWL is de kans op scheuren dus groot. Bij ons onderzoek komen in alle platen van St. 52 in de HAZ underbeadcracks voor (fig. 26); in de platen van St. 37 is dit type scheuren echter niet waargenomen. Men moet veronderstellen dat in beide soorten proefplaten een gelijke hoeveelheid waterstof aanwezig is. Derhalve zijn in St. 37 een minder scheurgevoelige structuur of lagere trekspanningen aanwezig. Beide gevallen zijn juist:

. in St. 37 treedt in de HAZ veel minder harding op: zie fig. 27.
. in het gebruikte type proefplaat treedt zeer sterke "restraint" op, waarbij men moet aannemen dat inwendige spanningen optreden ter grootte van de vloeigrens; bij St. 37 is dat lager dan bij St. 52.

Door het lassen in meerdere lagen worden de onderliggende lagen steeds uitgegloeid waardoor de hardheid afneemt tot beneden het niveau waarbij gevaar voor scheuren bestaat. Waargenomen is echter dat in de HAZ van vrijwel elke laag scheuren aanwezig zijn, hoewel ze fijner zijn dan die bij de sluitlaag. Derhalve moet worden aangenomen dat het scheuren snel plaatsvindt, namelijk voordat een volgende laag gelast wordt. Dit betekent dat scheuren binnen tien minuten optreedt.

Austenitisch lasmetaal heeft een grotere oplosbaarheid voor waterstof dan normaal ferritisch lasmetaal. Daarom zal minder waterstof worden uitgestoten en aan de HAZ worden afgegeven, zodat het gevaar voor koudscheuren afneemt. Bij de door ons beproefde roestvaste elektroden F en G, waarvan het lasmetaal ca 90% austeniet bevat, treden in St. 52 toch scheuren in de HAZ op.(zie fig. 28a). Derhalve is bij deze combinatie van hardheid en inwendige trekspanning het waterstofgehalte nog te hoog. Bovendien komen zowel bij St. 52 als St. 37 ook scheuren voor in het gedeeltelijk gesmolten, met lasmetaal opgemengde plaatmateriaal: fig. 28b. Door het opnemen van Ni en Cr is de hardbaarheid van deze zone veel groter dan van het plaatmateriaal (de hardheid bedraagt ca. H_V (0,1) = 500). Uit fig. 28c blijkt dat in deze martensitische zone scheurvertakking optreedt langs aangesmolten korrelgrenzen. In de literatuur wordt gemeld dat dit type scheuren optreedt onder sterke restraint-omstandigheden (37).

Bij de zeer sterke restraint van onze proefplaten blijkt dat St. 37 onderwater goed lasbaar is en St. 52 niet. Hierbij moet worden opgemerkt dat het door ons gebruikte St. 52 in relatief sterke mate hardbaar is, hetgeen tot uitdrukking

komt in het hoge koolstofequivalent. Het is mogelijk deze resultaten te toetsen aan gegevens in de literatuur, want die zijn in relatief grote getale aanwezig (14, 17, 32, 37). Niettemin is het nauwelijks mogelijk kwantitatieve vergelijkingen te maken omdat in geen enkel geval alle vier factoren die de scheurvorming beheersen bekend zijn:

- Van de vele publicaties op het gebied van nat OWL zijn er slechts drie die het waterstofgehalte van de lassen opgeven (17, 32, 34). Hierbij blijken per elektrodetype aanzienlijke verschillen op te treden. Bovendien is het waarschijnlijk dat het waterstofgehalte afhankelijk is van de diepte (49, 50).
- Van geen der onderzoekingen is het niveau van de inwendige spanningen bekend; slechts twee maken gebruik van gestandaardiseerde CTS-koudscheurproeven (17, 32).
- De hardheid wordt algemeen als de belangrijkste factor gezien en hiervan zijn dan ook vrij veel gegevens bekend. Men gebruikt veelal macrohardheidswaarden die gemeten worden bij belastingen variërend van 2½ tot 30 kgf zodat de intervallen niet kleiner zijn dan 1 mm. Uit fig. 25 blijkt echter dat binnen 1,5 mm drie hardheidspieken aanwezig zijn. Derhalve kan men aannemen dat de macrohardheid niet een gevoelige indicator is voor scheurgevoelige structuurbestanddelen. Microhardheidsprofielen worden slechts in drie gevallen gegeven (14 en 33, 17, 34).

Uit het voorgaande moge blijken dat op basis van het tot op heden verrichte werk niet kan worden afgewogen wanneer zich met betrekking tot koudscheuren een gunstige ontwikkeling zou voordoen daar de resultaten niet voldoende zijn gedefiniëerd.

Voor toekomstig onderzoek zal het aanbeveling verdienen de scheurvorming meer systematisch te onderzoeken. Een proef die bijzonder geschikt lijkt bij het OWL is de implantproef (51, 52). Deze beproevingsmethode is gevoeliger dan andere koudscheurproeven (51). Bovendien werkt men hierbij met goed kwantificeerbare variabelen, zodat geringe verschillen tussen elektrodetypen nauwkeurig kunnen worden vastgesteld.

Zo is bij ons onderzoek de indruk ontstaan dat de mate waarin koudscheuren optreedt (grofheid en totale lengte der scheuren) per elektrode verschilt; dit zou met de implantproef kunnen worden vastgesteld. Indien deze experimenten worden gecombineerd met waterstofbepalingen, microhardheidsmetingen en het opnemen van afkoelkrommen kan men een goed inzicht verkrijgen in de te stellen eisen aan laswerk dat onderwater wordt uitgevoerd.

d-Mechanische eigenschappen:

De in de tabel vermelde resultaten spreken voor zich. In de literatuur zijn veel gegevens vermeld, zodat een vergelijking mogelijk is:

I-Kerfslagwaarde bij $0^{o}C$, uitgedrukt in kgm/cm^{2}:

elektrodetype				
AWS E 6013	1,21	3,80**	2,61***	*:(34)-zoetwater, 1 m diep
6027	1,35	*		**:(37)- id, 3,7 m
7024	1,63			***:(36)- id, ca. ½ m

Een vergelijking van deze waarden met de bij onze proeven behaalde resultaten toont dat de elektroden A, B en E veelbelovend zijn, temeer daar in het lasmetaal hiervan veel poreusheid aanwezig is. Zoals te verwachten was levert elektrode G veel hogere kerfslagwaarden dan de overige elektroden. Elektrode D stelt nogal teleur in vergelijking met de overige elektroden; uit (30) is bekend dat dit type elektrode weinig behoeft achter te blijven bij de andere typen.
Tenslotte valt op te merken dat de minimum kerfslagwaarde bij $0^{o}C$ voor Amerikaanse "marine steels" 2,6 kgm/cm^{2} is; een goede las onder normale omstandigheden haalt bij $0^{o}C$ minstens 6 kgf/cm^{2}. Uit de tabel blijkt dat bij het OWL het lasmetaal dus uitgesproken bros is.

II-Side bend test: in de literatuur zijn voor het lasmetaal van nat OWL geen gegevens gemeld van side bend tests. Er zijn wel gegevens over:

face bend tests	(53) -	resultaat maximale buighoek 65°
root bend tests	(53) -	35°
bij hoeklassen tee-bend tests	(36) -	36°

Daarnaast wordt in (15) als algemene waarde voor face bend tests 50° aangegeven; tenslotte is er nog een Russische publicatie met ongespecificeerde buigproeven (55) die buighoeken van 90° vermeldt.
Buigproeven ontlenen hun bestaansrecht aan de eenvoudige wijze waarop ze een indruk geven van de taaiheid van lasverbindingen (normaal bij face bend een buighoek van 180°), terwijl bovendien bepaalde lasfouten er gemakkelijk mee kunnen worden aangetoond. Lasfouten zijn ook de oorzaak van de buitengewoon grote spreiding van de resultaten bij ons onderzoek.

Daarbij komt tot uitdrukking dat in het algemeen de taaiheid zeer gering is, met elektrode A als opmerkelijke uitschieter met nog niet eerder in de literatuur vermelde grote buighoeken. Overigens verdient het aanbeveling om ter bepaling van de taaiheid uit te gaan van een trekproef.

III-Trekproeven: in de literatuur worden als waarden voor de treksterkte, rek en insnoering vermeld:

elektrodetype	treksterkte (kgf/mm^2)	rek (%)	insnoering (%)	referentie
oxyderend	44,5	-	17	
zuur	50	-	8,5	(30)
rutiel	44,5	-	5,5	
E 6013	30	6,8	9,1	(36)
E 6013	45,1	7,5	7,7	(37)
E 6013	42,7	9,1	16,0	
E 6027	46,3	10,4	13,1	(34)
E 7024	40,7	7,3	15,8	

Onder normale omstandigheden bedraagt de rek 25-30% en de insnoering 40-50%. De achteruitgang van de taaiheid zoals die spreekt uit de cijfers voor rek en insnoering uit bovenstaande tabel, en die van de "insnoering" van onze resultaten (zie tabel VI), vormt het voornaamste probleem bij het nat OWL. Van de door ons beproefde elektroden treedt het oxyderende type D naar voren: hierbij wordt een relatief goede taaiheid gecombineerd met een alleszins aanvaardbare treksterkte. Overigens blijkt dit nog duidelijker uit gegevens in de literatuur, zie (30) en vooral (32). Daarnaast moet worden opgemerkt dat de indruk bestaat dat elektrode G nog betere taaiheidseigenschappen heeft, maar dit kan niet gekwantificeerd worden.

Resumerend kan het volgende signalement van de beproefde elektroden worden opgesteld:

A- experimentele elektrode; van de normale (d.w.z. niet-roestvaste) elektroden het beste verlasbaar en het beste uiterlijk van de las; relatief weinig poreusheid en interessante mechanische eigenschappen.

B- experimentele elektrode; alleen bij PLOT 75 toegepast waarbij een ongeschikte deklaag is aangebracht: wellicht daardoor een groot aantal slechte eigenschappen; in dit licht bezien toch nog verrassende mechanische eigenschappen; derhalve een nader onderzoek waard, maar dan goed uitgevoerd.

C- handelselektrode voor het OWL, heeft redelijk goede laseigenschappen maar geeft erg slecht resultaat, zowel met betrekking tot het lasuiterlijk als de mechanische eigenschappen.

D- experimentele elektrode; nogal uiteenlopende kwaliteiten: goed verlasbaar maar zeer slechte slaklossing, matig uiterlijk maar de beste röntgenbeoordeling, o.a. door zeer geringe poreusheid; kerfslagwaarde en buighoek vallen tegen, maar is in de trekproef het taaist.
Uit metaalkundig oogpunt is deze elektrode toch het interessantst; voor een discussie hierover wordt verwezen naar (30) en (32).

E- handelselektrode voor OWL, veel toegepast in Nederland: dankt dit wellicht aan de goede verlasbaarheid; erg veel poreusheid maar desondanks mechanische eigenschappen van redelijk niveau.
Wordt echter op alle fronten door de experimentele elektrode A voorbij gestreefd.

F en G-elektroden voor moeilijk lasbare en hooggelegeerde staalsoorten, dus niet bedoeld voor OWL. Het optreden van hardingsscheuren in de diffusiezône van het plaatmateriaal, zelfs bij St. 37, lijkt een onoverkomelijk bezwaar. Vooral elektrode G is toch interessant door de buitengewoon goede laseigenschappen en het resulterend fraaie uiterlijk van de las. Dit verdient alleszins nader onderzoek.

Hoewel het vermogen tot plastisch deformeren natuurlijk gering blijft, blijkt uit het voorgaande dat de goede eigenschappen van de elektroden A, D en G in één elektrode gecombineerd een ideale onderwaterelektrode zou opleveren. Dit is natuurlijk slechts een hypothetische mogelijkheid, maar het geeft wel aan dat de bekleding afgezien van de mogelijkheid verbeteringen te realiseren door speciale lasmetaalsamenstellingen te gebruiken, de belangrijkste variabele is om verbeteringen te bewerkstelligen. In deze richting dient het onderzoek dan ook - vooralsnog op laboratoriumschaal - voortgang te vinden.

e- Chemische samenstelling.

Tenslotte moet nog aan tabel I met de chemische analysen aandacht worden besteed. Bij vergelijking van de chemische samenstelling van lasmetaal dat onder normale omstandigheden en bij het OWL verkregen is, blijkt dat van een aantal elementen bij het OWL een aanzienlijke afbrand plaatsvindt.
De procentuele afbrand van deze elementen wordt in onderstaande tabel gegeven.

	C	Mn	Si	P
elektrode A	9	38	50	60
D	0	67	-	18
E	12	47	58	39
G	24	28	29	-

Procentuele afbrand bij OWL

(gebaseerd op één waarneming)

Madatov (50) heeft dit voor het eerst gesignaleerd met betrekking tot C, Mn en Si; hij heeft dit in verband gebracht met kwantitatieve gegevens omtrent de levensduur van druppels lasmetaal die aan de elektrode worden gevormd en overgaan naar het lasbad. De door ons gevonden afbrand van P is in de literatuur nog niet eerder gesignaleerd.
De boogatmosfeer bevat als gevolg van de dissociatie van water stellig veel zuurstof, hoewel dit nooit gemeten is. Wellicht wordt hierdoor de afbrand van de desoxydanten C, Mn en Si verklaard. Daarnaast blijkt de afbrand van deze elementen toe te nemen met de diepte (50).
Met deze achtergrond zijn experimentele elektroden beproefd met verschillend gehalte aan desoxydanten (53). Bij een toenemend gehalte desoxydanten blijkt de taaiheid van het lasmetaal toe te nemen ten koste van de sterkte.
Naast de invloed van de samenstelling van de boogatmosfeer is ook de invloed van de druk belangrijk, zoals simulatieproeven met droog OWL uitwijzen met betrekking tot P en S (54). Theoretische overwegingen op dit gebied ontbreken in de literatuur. De ontwikkeling van de lastechniek (onder normale omstandigheden) in historisch perspectief beschouwend maakt het aannemelijk dat hierin echter wel de sleutel ligt tot verbetering van de kwaliteit van laswerk dat onderwater wordt uitgevoerd.

Hoofdstuk 6 - Conclusies en aanbevelingen voor nader onderzoek.

a - Stiftlassen.

1 - In tegenstelling tot de aanbeveling van de fabrikanten dat bij het stiftlassen de te verbinden delen zorgvuldig van vocht moeten worden ontdaan om een goede lasverbinding te verkrijgen blijkt het mogelijk in alle posities het stiftlassen als betrouwbare verbindingstechniek te benutten voor gebruik onder water.

2 - Het stiftlassen volgens het Nelsonproces is een geëigende techniek voor toepassing onderwater, daar met dit semi-automatisch proces op snelle wijze verbindingen met goede mechanische eigenschappen te maken zijn.

3 - Er zal nog veel empirisch ontwikkelingsonderzoek verricht moeten worden ter optimalisering van de lasparameters; daarbij moet ook aandacht worden geschonken aan de taaiheid van de lasverbinding.

4 - De nadere bestudering van de voor het eerst gesignaleerde invloed van water op het booglasproces vereist wetenschappelijk onderzoek.

b - Lassen met beklede elektroden.

1 - De experimentele rutielelektrode A heeft betere laseigenschappen en geeft betere resultaten dan de in de praktijk veel toegepaste handelselektrode E; dit rechtvaardigt voortgang van het door de werkgroep Neptunus geïnitieerde onderzoek. Daarbij dient nadruk te worden gelegd op de aangetoonde mogelijkheden tot verbetering van de laseigenschappen (roestvaste elektrode G) en tot vermindering van de poreusheid (oxyderende elektrode D).

2 - Randinkarteling en poreusheid zijn niet inherent aan het nat onderwaterlassen. Afgezien van menselijke factoren is het enige principiële probleem de verbrossing van de lasverbinding als gevolg van hoge afkoelsnelheden en waterstofgehalten. Dit kan worden tegengegaan door het voorwarmen van de lasnaad; de ontwikkeling van een voorwarmmethode is dan ook urgent.

3 - Bij toekomstig onderzoek behoren implantproeven een belangrijke plaats in te nemen, omdat hiermee - vooralsnog onbekende - goed gekwantificeerde gegevens betreffende de verbrossing worden verkregen.

4 - Aprioristische verklaringen hebben tezamen met empirisch onderzoek tot op heden geen doorbraak kunnen bewerkstelligen ten aanzien van het nat onderwaterlassen. Zelfs de randvoorwaarden (boogatmosfeer, stolsnelheid, etc.) waarbinnen een oplossing gevonden moet worden zijn niet gedefinieerd. Hiertoe is wetenschappelijk onderzoek noodzakelijk.

Appendix I.

Van de organisaties en werkgroepen, die aktief zijn op het voor dit onderzoek interessante terrein, kunnen onder andere worden genoemd:

ICVO - interdepartementale commissie voor oceanografie, in 1971 opgericht door de ministeries van buitenlandse zaken, onderwijs en wetenschappen, economische zaken, financiën, defensie, landbouw en visserij, volksgezondheid en milieuhygiëne, verkeer en waterstaat. Het doel van de commissie is om een gecoördineerd overheidsstandpunt op het gebied van de oceanologie tot stand te brengen.

POOL - planninggroep voor het oceanografisch onderzoek op lange termijn; in 1975 opgericht door minister Trip op verzoek van de ICVO, daar zij van mening was dat er op het terrein van de oceanologie kennishiaten bestonden. De POOL zal deze hiaten moeten aangeven en onderzoekprojekten zodanig stimuleren dat binnen een periode van vijf jaar een voor Nederland noodzakelijk kennisniveau is bereikt. In de POOL hebben vertegenwoordigers van de overheid, de wetenschap en de industrie zitting.

IRO - industriële raad voor oceanologie, opgericht in 1971.
De raad heeft ten doel het bevorderen van de belangen van het Nederlands bedrijfsleven op het gebied van de oceanologie, en staat daarmee op de "denklijn" van het ministerie van economische zaken.

SMOZ - stichting materiaalonderzoek in de zee, opgericht in 1971 op initiatief van de Tussenafdeling der Metaalkunde van de T.H.-Delft. De stichting onderzoekt materialen voor maritieme doeleinden en constructies buitengaats.

PLOT - werkgroep praktijklaboratorium voor de onderwatertechniek, in 1972 opgericht door de Technische Hogeschool Delft, Rijkswaterstaat en Koninklijk Instituut voor de Marine om de wenselijkheid van een onderwaterlaboratorium te onderzoeken en zonodig te realiseren.

Neptunus - een projekt dat door het Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL) in 1973 is gestart ter ontwikkeling van onderwatertechnieken voor het maken van verbindingen, zoals lijmen en lassen, en het inspecteren van constructies. Dit projekt wordt bekostigd door de deelnemende industrieën en een stimuleringssubsidie van het Metaalinstituut T.N.O.

WOT - WErkgroep Offshore Technologie, ingesteld in 1976 door de T.H.-Delft ter coördinatie van onderzoek en onderwijs.

Tabel I - Chemische analyse

Plaatmateriaal		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	C_{eq} (IIW)
PLOT 75	hoeklas	0.089	0.02	0.38	0.011	0.024	0.04	0.04	0.12	0.18
	V-naad	0.14	0.04	0.45	0.021	0.057	0.07	0.05	0.14	0.25
PLOT 76	V-naad, St.37	0.12	0.02	0.65	0.018	0.018	0.03	0.04	0.07	0.24
	V-naad, St.52	0.17	0.24	1.54	0.013	0.017	0.17	0.13	0.09	0.48
	pijp, St.52	0.19	0.45	1.37	0.019	0.023	0.01	0.04	0.02	0.42
	stiftlas, St.37	0.059	0.27	0.37	0.021	0.016	0.01	0.03	0.10	0.13
	stiftlas, St.52	0.19	0.37	1.41	0.017	0.013	0.03	0.01	0.03	0.44
	stiftlas, dam	0.26	0.08	0.83			0.02	0.04		0.41
Lasmetaal	A	0.073	0.03	0.33	0.022	0.012	0.02	0.06	0.05	0.14
	B	0.06	0.13	0.35	0.020	0.016		0.03	-	0.12
	C	0.05	0.18	0.35	0.021	0.021		0.03	-	0.11
	D	0.04	-	0.01	0.018	0.011	-	0.06	0.06	0.05
	E	0.053	0.21	0.26	0.016	0.014	0.02	0.04	0.01	0.10
	F	0.11	0.61	0.52	*	0.012	22.0	8.4	0.09	-
	G	0.091	0.40	1.35	*	0.010	22.5	11.9	0.08	-
	A - droog	0.08	0.06	0.53	0.055	0.013	0.04	0.06	0.04	0.18
	D - droog	0.04	-	0.03	0.022	0.011	-	0.08	0.05	0.05
	E - droog	0.06	0.50	0.49	0.026	0.013	0.04	0.05	0.02	0.15
	G - droog	0.12	0.56	1.87	*	0.014	23.6	12.6	0.07	-

* Cr stoort de analyse van P.

Tabel III - Gedrag van elektroden.

Elektrode	PLOT	diameter	polariteit	spanning (V)	stroom-sterkte (A)	regelmaat	boogdoving per elektr.	starten	boogstabili-teit	kelk	zichtbaar-heid	toestand-bekleding	spatten	slaklossing	opmer-kingen
A	75	5	-	30	220			+	+	o	Δ	+	+	+	1
	76	5	-	21	280	+	0.1	o	+	o	Δ		o	+	
B	75	5	-	31	230			o	-	-	Δ	-	o	o	2.3
	75	5	-	36	230			o	o	Δ	o	o	+	+	4
C	75	5	-	30	240			+	+	Δ	o	+	Δ	+	
D	75	5	-	32	230			+	o	Δ	o	o	o	-	1.5
	76	5	-	23	230	+	0.2	o	+	o	o		o	-	
E	75	4	-	33	205			+	+	+	+	+	+	+	
	76	5	-	26	220	Δ	2.3	Δ	Δ	o	o		o	+	
F	76	5	+	29	220	Δ	4.7	o	-	Δ	Δ		+	+	
G	76	4	+	24	200	+	0.1	o	+	+	+		-	+	

+ goed
o redelijk
Δ matig
- slecht

Opmerkingen:
1 - elektroden boven water ingesmeerd met siliconen/rubber afdichtingspasta: "Terostat 33" van Terosom GmbH te Heidelberg.
2 - elektroden boven water gelakt met cellulox.
3 - lasmetaal te dun vloeibaar om hoeklassen te maken; bekleding smelt niet af, zodat grote druk op elektrode moet worden uitgeoefend: afbrokkelen bekleding.
4 - elektroden ingesmeerd met onder 1) genoemd middel - ditmaal echter in UWL uitgevoerd.
5 - elektrode last traag, geeft een flinke inbranding en heeft een relatief zeer snelstollend lasmetaal; de slak zit muurvast.

Tabel IV - Beoordeling lassen.

		VISUEEL				BREUKVLAK EN RADIOGRAFIE		
elektrode	PLOT	inkarteling	spatten	slak en poreusheid	algemeen uiterlijk	breukvlak	klasse	opmerkingen toelichting
A	75	+	+	+	+	o	4	fout in doorlassing; poreusheid
	76	+	+	+	+		3	poreusheid en gaskanaaltjes
B	75	Δ	o	o	Δ	Δ	4	vol met grove poreusheid
C	75	o	o	+	o	Δ	4	poreusheid en slakdeeltjes
D	75	Δ	o	+	Δ	+	4	potentieel goed, maar slakkebanen
	76	+	+	+	Δ		2	plaatselijk zeer geringe poreusheid
E	75	+	+	+	+		4	
	76	Δ	+	+	Δ		4	vol met grove poreusheid; gaskanalen
F	76	+	+	-	-		5	las ligt los in naad
G	76	+	+	+	+		3	geringe poreusheid

Tabel V - Harding.

			GRONDLAAG							HARDHEID - SCHEUREN		
elektrode	PLOT	plaat-materiaal	spanning (V)	stroom-sterkte (A)	voortloop-snelheid (mm/S)	T_p* (°C)	$-(\frac{dT}{dt})_{800}$ (°C/s)	$-(\frac{dT}{dt})_{500}$ (°C/s)	$\Delta t_{800-500}$ (S)	$H_v(0,1)_{max}$	d (mm)	afstand underbeadcracks tot smeltlijn (mm)
A	76	St.52	22	260	3.4	>1250	110	65	3.9	519	0.05	0.115
D	76	St.52	27	230	3.2	>1250	130	85	2.2	519	0.05	0.125 - 0.200
		St.37	22	230	2.5	>1250	65	60	4.6	266	0.15	———
E	76	St.52	28	220	3.2	>1250	180	85	2.3	536	0.10	0.18 - 0.32
F	76	St.52	29	220	3.4	1240	115	50	3.8	536	0.30	0.15
G	76	St.52				381	-	-	-	542	0.05	0 en 0.20
		St.37	28	210	4.6	>1250	310	120	1.5	357	0.00	0

* Vastgesteld is dat bij het nat OWL de afkoelsnelheden hoger zijn naarmate de bereikte piektemperatuur T_p hoger is (14,56); dit in tegenstelling met het lassen onder normale omstandigheden, waarbij de afkoelsnelheid van plaatsen met een T_p > 900 °C vrijwel constant is (57, 58).

Tabel VI - Mechanische eigenschappen.

Elektrode	Charpy V- kerfslagwaarde bij 0°C (30 kgm. hamer)					side-bend test				trekproef						
	PLOT	Nr	kgm	kgm/cm²	gemiddeld kgm/cm²	PLOT	Nr	D/d	Q	PLOT	Nr	type	kgf/mm² σ_v	kgf/mm² σ_b	% ψ	locatie breukvlak
A	75	A-1	2.05	2.6		75	A-2	4	115							
		A-2	4.30	5.4			A-3	4	83							
		A-3	3.10	3.9	3.9											
		A-4	3.00	3.8												
		A-5	3.15	3.9												
	76	0-2	2.28	2.9		76	0-3	4	19	76	0-8	II	-	59.1	-	las
		0-4	2.84	3.6	3.4		0-6	4.47	44		0-1	I	40.0	45.1	12	HAZ
		0-7	3.10	3.9							0-5	I	-	39.5	-	HAZ/las
B	75	B-1	3.10	3.9		75	B-2	4	21							
		B-2	2.45	3.1			B-3	4	60							
		B-3	2.50	3.1	3.4											
		B-4	2.20	2.8												
		B-5	3.20	4.0												
C	75	C-1	1.40	1.8		75	C-2	4	12							
		C-2	1.70	2.1			C-3	4	22							
		C-3	1.65	2.1	2.2											
		C-4	1.85	2.3												
		C-5	2.00	2.5												
D	75	D-1	1.70	2.1		75	D-2	4	21							
		D-2	1.30	1.6												
		D-3	1.75	2.2	2.0											
		D-4	1.80	2.3												
		D-5	1.25	1.6												

Tabel VI - Mechanische eigenschappen (vervolg).

Elektrode	Charpy V - kerfslagwaarde bij 0°C (30 kgm. hamer)					side-bend test				trekproef						
	PLOT	Nr	kgm	kgm/cm²	gemiddeld kgm/cm²	PLOT	Nr	D/d	Q	PLOT	Nr	type	kgf/mm² σ_v	kgf/mm² σ_b	% ψ	locatie breukvlak
D	76	9-3	1.94	2.4		76	9-4	4	20	76	9-6	II	-	55.5	15	las
		9-5	1.51	1.9	2.1						9-1	I	40.7	46.6	11	las
		9-8	1.64	2.1							9-2	I	40.2	45.0	13	las
											9-7	I	40.7	50.1	14	las
E	75	E-1	2.00	2.5		75	E-2	4	9							
		E-2	2.50	3.1			E-3	4	31							
		E-3	2.60	3.3	3.0											
		E-4	2.55	3.2												
		E-5	2.40	3.0												
	76	5-1	2.95	3.7		76	5-6	4	21	76	5-3	II	-	53.2	13	las
		5-5	2.78	3.5	3.7						5-2	I	39.5	49.3	9	HAZ
		5-7	3.22	4.0							5-8	I	38.9	48.1	7	HAZ
G	76	3-1	4.91	6.1		76	3-2	4	64							
		3-3	4.88	6.1	6.3		3-5	4	7							
		3-4	5.39	6.7												

Literatuur

(1) Anon - Nederlandse organisatie en verenigingen, overheidsinstellingen, stichtingen en universitaire instellingen direkt of indirekt werkzaam op oceanologisch en/of offshore gebied.
Industriële Raad voor Oceanologie, Delft, september 1975.

(2) H. Dekker - Verslag van het onderzoek in het onderwaterlaboratorium "Helgoland" van 13 juni - 11 juli 1975.
Werkgroep PLOT, TH-Delft, 1976.

(3) G.W. Boltje - PLOT 76: Werkverslag van de lasproeven onderwater, verricht van 1 - 8 september 1976 bij het UWL "Helgoland" in de Oostzee.
Laboratorium voor Metaalkunde, Delft, september 1976.

(4) H. Davy - An account of some experiments of Galvanic electricity.
Journal Royal Institution 1 (1802) 165-167.

(5) G. Bredig - Darstellung colloidaler Metallösungen durch elektrische Zerstäubung.
Zeitschr. angewandte Chemie 10 (1898) 951-954.

(6) W.N. Kemp - Underwater arc welding
Trans. Inst. of Welding 8 (1945) 152-156.

(7) E.A. Silva - Welding processes in the deep ocean.
Naval Engineers J. 80 (1968) 561-568.

(8) J.F. Bodger - Underwater welding - a review of the literature.
Weld. Intern. Res. and Development 1 (1971) no. 4

(9) R. Schaefer, H. Verhoeven - Unterwasserschneiden und Unterwasserschweissen.
Schw. u. Schn. 24 (1972) 349-353.

(10) A.W. Stalker, G.R. Salter - A review of the literature on underwater welding and cutting to june 1974
Weld. Inst. Rep. 3412/1/74 (RR/SMT-R-7405)
The Welding Institute, Abington - England, dec. 1974.

(11) M. Dadian - Review of the literature on the weldability underwater of steels.
Document IIW -495-76 (ex. doc. IX-931-75).
Welding in the world 14 (1976) 80-99.

(12) A.W. Stalker - A survey of underwater cutting techniques
Weld. Inst. Rep. SMT-R-7610.
The Welding Institute, Abington - England, 1976.

(13) P.C. van der Willigen - Contact arc welding.
Welding J. 25 (1949) 313s-320s.

(14) A.J. Brown, R.T. Brown, C. Tsai, K. Masubuchi - Report on fundamental research on underwater welding.
Report No. MITSG 74-29, Massachusetts Institute of Technology,
Cambridge (Mass.) - USA, september 1974.

(15) M.L. Levin, D.W. Kirkley - Welding underwater.
Met. constr. and Brit. welding J. 40 (1972) 167-170.

(16) R. Goodfellow - Problems and developments when welding in deep water.
International Seminar Handbook, 73-83.
Underwater welding for offshore installations, London 9-10 March 1976.
The Welding Institute.

(17) H.J. Bouwman - De mogelijkheid van onderwater lassen met beklede elektroden
Afstudeerverslag, Laboratorium voor Metaalkunde, Delft 1971.
(18) W.H. Krouwel - Lassen onder verhoogde gasdruk,
Afstudeerverslag, Laboratorium voor Metaalkunde, Delft 1976.
(19) G.W. Boltje - Intern rapport d.d. 13 augustus 1976.
Laboratorium voor Metaalkunde, Delft.
(20) G.W. Boltje - PLOT 76: Instructies en aanwijzingen voor de lasproeven onderwater.
Laboratorium voor Metaalkunde, Delft 22 augustus 1976.
(21) T.E. Shoup - Stud Welding
WRC-bulletin 214, april 1976.
(22) P.H. van Lent - Stiftlassen onder water, een nieuwe werkwijze met grote toepassingsmogelijkheden.
Lastechniek 42 (1976) 19-21.
(23) F.K. Krüger - Bolzenschweissen im Kesselbau.
Der Praktiker 28 (1976) 7-9.
(24) W. Welz, G. Dietrich - Festigkeitsuntersuchungen an Bolzenschweissverbindungen.
Schw. u. Schn. 23 (1971) 308-311.
(25) W. Chapeau, E. Piraprez - Mesure de la ductilité résiduelle de la zone thermiquement affectée par le soudage de goujons connecteurs.
Revue de la soudure. - Lastijdschrift 31 (1975) 177-189.
(26) F. Eichhorn, A.R. Shaheeb - Untersuchungen zum Lichtbogen - Bolzenschweissen von hochlegierten, zunderbeständigen Stahlstiften auf niedriglegierte Kesselstähle.
Mitt. VGB 50 (1970) 504-515.
(27) W.A. Baeslack, G. Fayer, S. Ream, C.E. Jackson - Quality control in arc stud welding.
Welding J. 54 (1975) 789-798.
(28) privécommunicatie met J. Pols en P.G. Pommé.
(29) K. Hrenoff, M. Livshitz - Electric arc welding underwater.
Welding J. 13 (1934) nr. 4 15-18.
(30) R. Kermabon, P. Berthet - Le soudage à l'arc sous l'eau.
Soudages et Techn. connexes 16 (1962) 179-192.
(31) M.L. Levin - Welding in the sea.
Meerestechnik/Marine Technology 4 (1973) nr. 3, 73-77.
(32) A.W. Stalker, P.H.M. Hart, G.R. Salter - A preliminary study of underwater manual metal arc welding.
Weld. Inst. Rep. 3412/5B/74 (RR/SMT-R-7406)
The Welding Institute, Abington-England, dec. 1974.
(33) R.T. Brown, K. Masubuchi - Fundamental research on underwater welding
Welding J. 54 (1975) 178s-188s.
(34) E.A. Silva, T.H. Hazlett - Shielded metal-arc welding underwater with iron powder electrodes.
Welding J. 50 (1971) 406-415.
(35) E.A. Silva - Gas production and turbidity during underwater shielded metal-arc welding with iron powder electrodes.
Naval Engineers J. 83 (1971) nr. 6, 59-64.

(36) K. Masubuchi, M.B. Meloney - Underwater welding of low-carbon and high-strength (HY-80) steel.
Sixth annual offshore technology conference, Houston-Texas 1974 OTC 1951, 170-190.

(37) C.E. Grubbs, O.W. Seth - Multipass all position wet welding.
Fourth annual offshore technology conference, Houston-Texas, 1972 OTC 1620, II 41 - II 54.

(38) A.W. Stalker, G.R. Salter - A preliminary study of the effect of increased pressure on the welding arc.
Weld. Inst. Rep. 3412/6/74 (RR/SMT-R-7504).
The Welding Institute, Abington - England, dec. 1974.

(39) I. Masumoto, Y. Nakashima, A. Kondo, K. Matsuda - Study on underwater welding, Report I (in Japanse taal)
Yosetsu Gakkai Shi (J. Japan Welding Soc.) 40 (1971) 683-693.

(40) ibid - Report II, pp. 748-754.

(41) J.D. Fast - Oorzaken van porositeit in lasnaden.
Philips Techn. Tijdschrift 11 (1949) 101-110.

(42) D.G. Howden - Mass transfer of metal vapor and anode temperatures in arc melting.
Welding J. 48 (1969) 125s - 132s.

(43) U. Bleeck, M.G. Frohberg - Beitrag zur Porenbildung beim Schweissen von Eisenwerkstoffen.
Schw. u. Schn. 26 (1974) 384-386.

(44) G.J. Davies, J.G. Garland - Solidification structures and properties of fusion welds.
Intern. Met. Reviews 20 (1975) 83-106.

(45) A.J. Brown, J.A. Staub, K. Masubuchi - Fundamental study of underwater welding
zie (37): OTC 1621, II 54 - II 64.

(46) H. van der Velde - Temperatuur verdelingen rondom lasnaden.
Afstudeerverslag, Laboratorium voor Metaalkunde, Delft 1977.

(47) F.R. Coe - Welding steels without hydrogen cracking
The Welding Institute, Cambridge - England 1973.

(48) H. Granjon - Cold cracking in the welding of steels.
Welding in the world 9 (1971) 382-397.

(49) A.I. Shlyamin, T.N. Dubova - Semi-automatic underwater welding
Welding Production 8 (1961) 49-55.

(50) N.M. Madatov - Influence of the parameters of the underwater welding process on the intensity of metallurgical reactions.
Welding Production 17 (1970) nr. 12, 21-25.

(51) P. Hart, F. Watkinson - Development and use of the implant cracking test
Welding J. 51 (1972) 349s-357s.

(52) V. Neumann - Erfahrungen mit dem Implantversuch zum Bewerten der Kaltrissneigung von Baustählen.
Schw. u. Schn. 28 (1976) 467-469.

(53) D.W. Kirkley - Underwater welding: key techniques for construction and repair.
Offshore Scotland Conference, March 1973.

(54) P.H.M. Hart - The potential weldability problems in underwater offshore engineering materials.
zie (16): pp. 3-9.

(55) N.M. Madatov - Underwater welding electrodes with coatings containing iron powder.
Welding Production 8 (1962) 25-30.

(56) C.L. Tsai, K. Masubuchi - Interpretive report on underwater welding.
W.R.C. Bulletin 224, febr. 1977.

(57) J. Kas, T.J.v. Adrichem - Einfluss der Schweissparameter auf den Abkühlverlauf in der Schweissverbindung.
Schw. u. Schn. 21 (1969) 199-203.

(58) D. Uwer, J. Degenkolbe - Temperaturzyklen beim Lichtbogenschweissen
Schw. u. Schn. 24 (1972) 485-489.