

# Omzeilen van het sandelin-effect

Onderzoek naar de lasbaarheid van een laag  
siliciumhoudende lasdraad (ZINQWeld)

**ing. Senne Moortgat**  
**ing. Debby Van den Eynde**

Promotor:  
dr. ing. Patrick Van Rymenant, EWE

Promotor bedrijf:  
ing. Tim Buyle, IWE-EWE

Masterproef ingediend tot het behalen  
van de graad van master of Science  
in Welding Engineering

© Copyright 2014 KU Leuven,

Deze scriptie vormt een onderdeel van een examen. De tijdens de masterproefverdediging geformuleerde opmerkingen zijn niet opgenomen in deze tekst.

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot KU Leuven Campus De Nayer, Jan De Nayerlaan 5, B-2860 Sint-Katelijne-Waver, +32 15 31 69 44 of via e-mail [iiw.thomasmore.denayer@kuleuven.be](mailto:iiw.thomasmore.denayer@kuleuven.be).

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.





# Omzeilen van het sandelin-effect

Onderzoek naar de lasbaarheid van een laag  
siliciumhoudende lasdraad (ZINQWeld)

**ing. Senne Moortgat**  
**ing. Debby Van den Eynde**

Promotor:  
dr. ing. Patrick Van Rymenant, EWE

Promotor bedrijf:  
ing. Tim Buyle, IWE-EWE

Masterproef ingediend tot het behalen  
van de graad van master of Science  
in Welding Engineering



# Woord Vooraf

---

Deze masterproef is tot stand gekomen op vraag van Lastek en betreft het onderzoek naar het omzeilen van het sandelin-effect door gebruik te maken van een laag siliciumhoudende lasdraad (ZINQWeld). Lastek kreeg de vraag van een internationale groep verzinkerijen om een lasdraad te ontwikkelen waarbij de ongewenste verdikking van de zinklaag ter hoogte van de lasnaad niet meer optreedt. Aan het op punt stellen van een geschikte lasmethode mochten wij meewerken. Dit project heeft ons vele mogelijkheden geboden omtrent praktische proeven en een bezoek aan verzinkerij Galva Power Antwerpen.

Ondanks dat het niet onze eerste masterproef is, heeft het ons niet weerhouden om veel bij te leren. Het sandelin-effect en het opstellen van een lasprocedure (WPS) waren ons tot voor dit jaar volledig vreemd. Aan de hand van dit jaarwerk hebben we gaandeweg meer en meer voeling gekregen met het onderwerp en met de laspraktijk in het algemeen.

Omdat we mochten meewerken aan dit innovatief project willen we onze dank betuigen aan Lastek en Galva Power die dit project mogelijk maakten. In het bijzonder aan het personeel dat gezorgd heeft voor het verlassen en verzinken van onze proefstukken.

Een speciaal woord van appreciatie verdient Chris Sapart voor alle informatie die hij ons verschaftte omtrent het thermisch verzinken en eveneens voor het uitvoeren van de diktemetingen van de zinklaag op onze proefstukken. Nog een bijzondere dank aan onze promotoren Patrick Van Rymenant en Tim Buyle voor de goede raadgevingen, het opvolgen van de verwezenlijking van deze masterproef en het nalezen van de scriptie.

Senne Moorgat  
Debby Van den Eynde

© Copyright 2014 KU Leuven,

Deze scriptie vormt een onderdeel van een examen. De tijdens de masterproefverdediging geformuleerde opmerkingen zijn niet opgenomen in deze tekst.

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot KU Leuven Campus De Nayer, Jan De Nayerlaan 5, B-2860 Sint-Katelijne-Waver, +32 15 31 69 44 of via e-mail [iiw.thomasmore.denayer@kuleuven.be](mailto:iiw.thomasmore.denayer@kuleuven.be).

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.





# Abstract

---

Na het galvaniseren van gelaste structuren treedt regelmatig het sandelin-effect op. Dit is een overdikte van de zinklaag ter hoogte van de lasnaad, de las heeft bijkomend een matter uiterlijk. Deze masterproef beoogt het omzeilen van deze fenomenen door onderzoek te doen naar de lasbaarheid van een laag siliciumhoudende lasdraad (ZINQWeld) voor het MAG-lasproces.

Het probleem vindt zijn oorzaak bij een verhoogd siliciumgehalte in de lasnaad ten gevolge van het hogere siliciumgehalte in de massieve lasdraad ten opzichte van dat van het basismateriaal. Indien het siliciumgehalte zich bevindt in een bepaald bereik, treedt het sandelin-effect in werking.

Proeven wijzen uit dat het probleem verholpen wordt wanneer gebruik wordt gemaakt van een laag siliciumhoudende lasdraad (ZINQWeld). Een laag siliciumgehalte, namelijk bij ZINQWeld is dit 0,14% ten opzichte van een standaard lasdraad met 0,7%, zorgt echter voor een verhoogde viscositeit en groter risico op porositeiten. Om deze problemen te minimaliseren wordt de invloed van onder andere de lasparameters, type gas en stroombron bestudeerd. Uit een visuele beoordeling blijkt dat elk gas en type stroombron zijn toepassingsgebied heeft, met andere woorden kan er geen algemeen beste combinatie van gas en stroombron worden gekozen dat voor elke lasnaadvorm en materiaaldikte de beste resultaten oplevert. Echter wordt wel een aanvaardbaar kwaliteitsniveau bereikt met ZINQWeld volgens ISO 5817.

In dit onderzoek is aangetoond dat in een opmengingsbereik tussen circa 10 tot circa 50 % een bevredigende zinklaagdikte wordt gevonden met ZINQWeld. Dit betekent dat geen overdikte van de zinklaag aanwezig is op de lasnaad en dat de laag voldoet aan de minimum dikte volgens ISO 1461. Wanneer geen verdikking optreedt wordt aangenomen dat er een goede hechting aanwezig is tussen de zinklaag en het basismateriaal.

Twee lasdraden met identieke chemische samenstelling worden toegepast. Proefondervindelijk wordt geconstateerd dat bij gebruik van de 1,2 mm ZINQWeld lasdraad geen duidelijke kwalitatieve voorkeur bestaat omtrent het beschermgas. De 1,0 mm lasdraad daarentegen geeft uitsluitend een goed resultaat met beschermgas Arcal 12. Ondanks de identieke samenstelling kan besloten worden dat de 1,2 mm lasdraad een betere lasbaarheid vertoont.

Het belangrijkste besluit van dit onderzoek is dat de ZINQWeld lasdraad voor elke toekomstige toepassing een oplossing biedt voor de overdikte van de lasnaad die wordt verkregen met een standaard lasdraad. Dit wordt aangetoond met enkele voorlopige lasprocedures (pWPS'en) die worden opgesteld aan de hand van proefstukken van klanten.

Trefwoorden: Galvaniseren, Sandelin-effect, ZINQWeld, Lasnaadoverdikte, Silicium



# Abstract

---

Hot dip galvanized welded steel structures, when made of sensitive steels, often show abnormalities in the coating layer, particularly on the weld surface. The aspect of the coating layer, with an increased thickness over the welds in comparison with the normal layer, shows a dull grey look and is aesthetically less appealing. This is known as the sandelin-effect. The scope of this master thesis aims to avoid this phenomenon by investigating the weldability of a low silicon consumable (ZINQWeld) for the MAG-welding process.

The problem originates from the increased silicon content in the weld metal used, due to the higher silicon content in the consumable in comparison with the base material. If the Silicon level is within specific ranges, the sandelin-effect will occur.

Tests show that the problem disappears when a welding consumable with low Silicon content (ZINQWeld) is used. For ZINQWeld the Silicon content is 0.14%, compared to a standard welding wire with 0.7% and unfortunately yielding an increased viscosity and a higher risk of porosities in the weld metal. To reduce these secondary problems, the influence of the welding parameters, the composition of the shielding gas and the welding power source used have been studied. A visual evaluation shows that each shielding gas and type of power source used has its own scope. In other words, there isn't an optimal over all combination of shielding gas and power source to be chosen that produces satisfactory results for each weld shape and material thickness. However, an acceptable level of quality is achieved with ZINQWeld according to ISO 5817.

This study shows that in a dilution range between approximately 10 to 50% a satisfactory zinc coating thickness is found with ZINQWeld. This implicates that the increase in thickness of the zinc layer on the weld is not excessive and that the layer meets the minimum thickness according to ISO 1461. When no increased growth in coating thickness occurs, it is assumed that there is a good adhesion between the zinc layer and the base material.

Two welding wires with identical chemical composition are used. Using the 1.2 mm ZINQWeld welding wire, experiments show no clear qualitative preference for the shielding gas. The 1.0 mm welding wire on the other hand, only yields a good result when using the shielding gas Arcal 12. Despite the welding wires identical chemical composition, it can be argued that the 1.2 mm welding wire shows a better weldability.

The main conclusion of this study is that the ZINQWeld consumable provides a solution related to the Sandelin-effect for any future welding application in comparison with a standard welding wire. This is demonstrated with different Preliminary Welding Procedures Specifications (pWPSs) that are drawn up based on test pieces from customers.

Keywords: Galvanizing, Sandelin-effect, ZINQWeld, Silicon



# Summary

## Avoiding sandelin-effect

### Research into the weldability of a low silicon consumable

After galvanizing a welded steel structure, often the sandelin-effect appears. This implicates that an unstable and local growth of the zinc layer is observed at the location of the weld seam. Additionally, the surface layer over the weld has a dull grey appearance. These phenomena are caused by the higher silicon level in the weld material compared to the base metal. If the silicon level in the weld material is within a certain range, the sandelin-effect occurs. The objective of this study is to avoid these phenomena by an investigation into the weldability of a low silicon consumable (ZINQWeld) for MAG welding. The silicon content in this wire is increased to 0.14%, compared to 0.7% in a standard welding wire. The low silicon content results in a higher viscosity of the weld pool and induces a considerable higher risk of porosities. By studying the welding variables, like the shielding gas mixture and the power source used, and by carrying out a test sequence, the effects of the lack of silicon will be minimized. An acceptable quality level can be accomplished after visual examination following ISO 5817. For dilution rates, approximately between 10 to 50% a good zinc layer thickness is achieved with ZINQWeld.

#### Keywords

Galvanizing, Sandelin-effect, ZINQWeld, Silicon

#### Introduction

Many steel structures are hot-dip galvanised to protect them against corrosion. After galvanising, the weld becomes visible because of the local larger thickness of the zinc coating. Furthermore there is a less good adhesion and the layer is capricious and has a poor appearance. These effects do not disappear when the seam is grinded of prior to the galvanising step. For many years, Silicon has been generally known as a major cause of these phenomena, in particular the different silicon content of the welding consumable (MAG-welding) compared to that of the base metal. If the silicon

content of the weld is in a specific range, the sandelin-effect will occur, resulting in a zinc coating that grows in an irregular way. A welding wire without silicon seems to be the solution, but that is without taking into account its positive effects on the viscosity of the weld pool and its deoxidation effects. Without silicon the viscosity of the weld pool is too high and also many porosities will occur. Hence for these reasons, a low silicon welding consumable is considered as not being user-friendly by welders in practice. A procedure to weld with a low silicon wire will be defined.

#### Backgrounds

A hot dip galvanized zinc coating is formed by diffusion between iron and molten zinc. The coating exists of a series of iron-zinc alloys, each with a specific zinc content, which metallurgically bond the coating to the substrate. The characteristics of the hot dip process, like immersion time, temperature of the zinc bath, and the composition of the material determine the overall thickness and metallurgical properties of a zinc coating. Alloying elements in steel, such as phosphorus and silicon, can strongly influence the rate of zinc attack. The reactivity of the material is mainly dependent on the silicon level and is shown on the sandelin-curve (Figure 1.1-1).

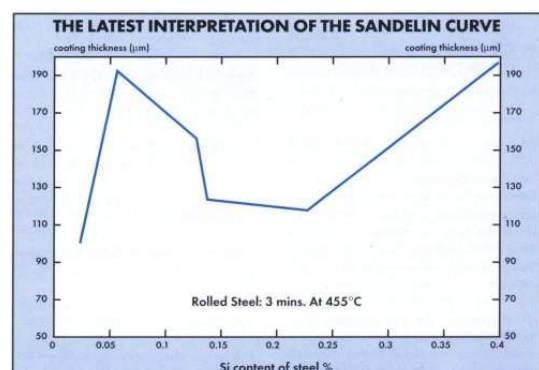


Figure 1.1-1: Sandelin curve [1]

Silicon leads to irregular iron-zinc-alloy layers and might cause a rapid thickening of the coating. In the curve is shown that a silicon level of 0.15 to 0.20%

has to be achieved in order to reduce the coating growth. Standard unalloyed steel has a low silicon content, the content in welding wires is much higher because of its positive influence on the weldability. After welding the weld metal has a higher silicon content than the base metal because of the dilution. The difference in silicon content in these two regions leads to a difference in coating thickness. [1-3]

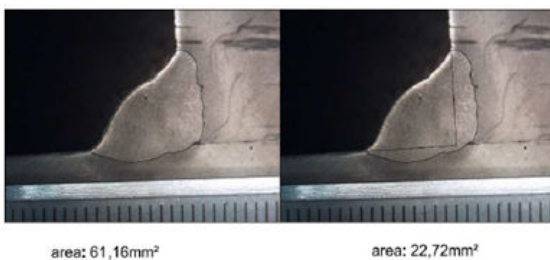
## Experimental procedure

Based on the applications, some relevant test pieces are chosen. In table 1 the different parameters are shown. The test pieces are welded with ZINQWeld 1.2 mm wire and visually examined based on the specifications in ISO 5817. Both the surface imperfections and the internal imperfections are evaluated. Subsequently the pieces are sent to the galvanizing plant and after galvanizing the coating thickness is measured.

**Table 1: Variables of testpieces set 1**

Seam & Thickness	Gas	Power source
FW 12 mm	Arcal 14	Conventional
BW (V) 10 mm	Atal 6	Pulse mode
BW (X) 20 mm	Arcal 21	
FW 3 mm	Teral 23	
BW (I) 3 mm		

After making these measurements, the pieces are grinded and etched with nital to make the fusion line visible. Based on this view and the original dimensions of the weld preparation, the dilution can be defined, see figure 2. A relation between the visual examination, the coating thickness and the dilution is made. The best parameters are chosen.



**Figure 2: Defining dilution**

After the first set of test pieces, a second set is tested. This set consists of pieces, delivered by customers and welded with the best parameters of set 1. Set 2 is welded with wires with diameter 1.2 and 1.0 mm, the last one is more suitable for the applications. Also a fifth gas type, Arcal 12, is tested. Based on this second set, preliminary welding procedure specifications are made.

## Results

The first test is the verification of the welding consumable (ZINQWeld). These tests were positive, no excessive growth or poor appearance of the zinc coating was found.



**Figure 3: Galvanized grinded and non-grinded weld with ZINQWeld**

In table 2, the results of the visual examination are shown. The type of weld joint design has a considerable higher influence on the class, definitely more pronounced than the type of shielding of gas used or the power source used. The best results are obtained at the fillet weld with a plate thickness of 3 mm and the butt weld with X-preparation. It should be noted that only the first pass is welded and examined. A fillet weld with plate thickness 12 mm, which is pulse welded with shielding gas Arcal 14, can be excluded due to the bad quality, as even class D is not achieved. This weld is too asymmetric to be acceptable.

**Table 2: Results of visual examination ISO 5817**

	Arcal 21		Atal 6		Arcal 14		Teral 23	
	Con	Pul	Con	Pul	Con	Pul	Con	Pul
FW 12mm	D	D	D	D	D	/	D	D
BW(V) 10mm	D	C	C	C	C	C	C	C
BW(X) 20mm	B	B	B	B	C	B	B	B
FW 3mm	B	B	B	B	B	B	B	B
BW(I) 3mm	D	D	D	C	D	D	D	D

In practice the reinforcement of the weld is often grinded and in this case some imperfections are removed. The class of a grinded weld would be higher. Each gas mixture and type of power source have their scope, there is no overall best combination to choose in gas mixture and power source to use that ensures good results for each type of joint and material thickness. However, the quality achieved is of an acceptable level.

The thickness of the zinc coating on the weld is of the same order of magnitude as the thickness on the base metal. In fact, on every test piece the zinc coating on the weld has a lower thickness than that on the base metal. The minimum thickness is

specified in ISO 1461 and on every test piece the coating complies with these specifications.

The dilution rate in the test pieces is between 10 to 50 % and depends mainly on the type of weld joint design used rather than on the gasmixture and/or type or power source used.

Although for every test piece a good coating thickness is achieved independently of the parameters or the dilution rate, in consequence the visual examination is regarded as decisive. The results of this examination do not lead to an optimal gas mixture or power source. When the economical aspect is considered together with the qualitative aspect of test pieces set 1, the shielding gases Atal 6 and Arcal 21 would be preferred.

The second part of test pieces is welded with two different diameters of consumables, namely 1.0 mm and, as in set 1, diameter 1.2 mm. Using the 1.2 mm, there are several shielding gases that can be used to reach an acceptable quality level, in contrast with diameter 1.0 mm, which only yields a good result with shielding gas Arcal 12. This difference is remarkable because both wires have identical chemical compositions. The explanation for the difference has to be found in the fact that they are produced in a different wire drawing mill. The measured coatings on the pieces of set 2 don't even exhibit the slightest thickening at the welding seam.

## Conclusions

By using ZINQWeld, the sandelin-effect is avoided. Both the excessive growth as the less shiny surface no longer exist. Both phenomena can be attributed to the silicon content in the welding wire. If a material with a silicon content, which induces the sandelin-effect, is welded, a thicker coating will be formed. In this case the thicker coating is not only formed on the weld but uniformly over the whole surface.

Welding with ZINQWeld results in a wide variety of qualities by only small variations in the parameter settings. It is difficult to find the optimal parameters for a specific type of test piece

(material, thickness, weld seam preparation, shielding gas, power source, ...).

This study shows that in a dilution range between approximately 10 to 50% a satisfactory zinc coating thickness is found with ZINQWeld. This implicates that no excessive thickening of the zinc layer occurs on the weld and that the layer meets the minimum thickness according to ISO 1461. When no increased coating growth occurs, it is assumed that a good adhesion is present between the zinc layer and the base material.

Using the 1.2 mm ZINQWeld welding wire, it is experimentally proven that no clear qualitative preference exists concerning the shielding gas. In this case, the economical aspects are decisive. The 1.0 mm welding consumable on the other hand, only yields a good result in combination with the shielding gas Arcal 12. Both wires are welded in pulse mode. Despite the identical composition, it can be argued that the 1.2 mm welding wire has a better weldability.

The main conclusion of this study is that the ZINQWeld consumable provides a solution related to the thickening of the weld for any future application. This is demonstrated with different Welding Procedures Specifications (WPSs) that are drawn up based on test conducted on customers test specimen.

## References

1. HDGASA. *The reactions between iron & zinc*. [cited 2013 13 november]; Available from:<http://www.ckit.co.za/secure/conveyor/troghed/corrosion-protection/steel-protection/steel-protection---08-iron-zinc-reactions.htm>.
2. Kozdras, M.S. and P. Niessen, *Silicon-induced destabilization of galvanized coatings in the sandelin peak region*. Metallography, 1989. vol. 22: p. 253-267.
3. Reumont, G., P. Perrot, and J. Foct, *Thermodynamic study of the galvanizing process in a Zn-0.1%Ni bath*. Journal of Materials Science, 1998. vol. 33(19): p. 4759-4768.





# Inhoudsopgave

---

<b>WOORD VOORAF</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>VII</b>
<b>INHOUDSOPGAVE</b> .....	<b>XI</b>
<b>LIJST MET GEBRUIKTE SYMBOLEN EN AFKORTINGEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LIJST VAN FIGUREN</b> .....	<b>XV</b>
<b>LIJST VAN TABELLEN</b> .....	<b>XVII</b>
<b>HOOFDSTUK 1: INLEIDING</b> .....	<b>1</b>
1.1 SITUERING VAN HET ONDERZOEKSDOMEIN.....	1
1.2 DOELSTELLING.....	2
1.3 METHODE.....	3
<b>HOOFDSTUK 2: LITERATUURSTUDIE</b> .....	<b>5</b>
2.1 THERMISCH VERZINKEN.....	5
2.1.1 <i>Inleiding</i> .....	5
2.1.2 <i>Discontinu thermisch verzinken</i> .....	6
2.2 MORFOLOGIE VAN ZINKLAGEN OP STAAL.....	8
2.2.1 <i>Morfologie en mechanisme</i> .....	8
2.2.2 <i>Sandelin-effect</i> .....	10
2.2.2.1 <i>Reactiviteit van staal</i> .....	10
2.2.2.2 <i>Invloed van onderdompelingstijd en galvanisatietemperatuur</i> .....	13
2.2.2.3 <i>Gevolg sandelin-effect</i> .....	16
2.3 HET LASPROCES: HALFAUTOMAATLASSEN.....	16
2.3.1 <i>Inleiding</i> .....	16
2.3.2 <i>Karakteristieken</i> .....	17
2.3.2.1 <i>Boogkarakteristiek</i> .....	17
2.3.2.2 <i>De karakteristiek van de stroombron</i> .....	18
2.3.3 <i>Methoden van druppelovergang</i> .....	20
2.3.3.1 <i>Kortsluitbooglassen</i> .....	20
2.3.3.2 <i>Open booglassen</i> .....	22
2.3.4 <i>Beschermgassen voor het lassen van on- of laaggelegeerd staal</i> .....	23
2.4 OPMENGING EN GEOMETRISCHE KENMERKEN VAN HET LASBAD.....	25
2.4.1 <i>Inleiding</i> .....	25
2.4.2 <i>Parameters</i> .....	25
2.4.2.1 <i>Draadsnelheid</i> .....	26
2.4.2.2 <i>Lasspanning</i> .....	28
2.4.2.3 <i>Lassnelheid</i> .....	29
2.4.2.4 <i>Lassnelheid en lasspanning</i> .....	30
2.4.2.5 <i>Draadsnelheid en lasspanning</i> .....	31
2.4.2.6 <i>Werkstuk-mondstuk afstand</i> .....	32
2.4.2.7 <i>Elektrodepolariteit</i> .....	34
2.4.2.8 <i>Hoek lastoorts</i> .....	35
2.4.2.9 <i>Beschermgas</i> .....	35
2.4.2.10 <i>Warmte-inbreng</i> .....	37
2.4.2.11 <i>Opeenvolging van lagen</i> .....	38
2.4.2.12 <i>Lasproces</i> .....	38
2.5 LASBAARHEID EN INVLOED VAN SILICIUM.....	39
2.5.1 <i>Begrip</i> .....	39
2.5.2 <i>Invloed silicium op lasbaarheid</i> .....	40
2.5.2.1 <i>Effecten van silicium en mangaan op staal</i> .....	40
2.5.2.2 <i>Effecten van silicium en mangaan in de lasdraad</i> .....	42
2.6 <i>BESTAANDE OPLOSSINGEN</i> .....	44

2.6.1 Toevoegingen aan het zinkbad .....	44
2.6.2 Hoogtemperatuurverzinken .....	46
2.6.3 Beschermgas in functie van het siliciumgehalte .....	46
2.7 TOEPASSINGSDOMEIN .....	47
2.8 BESLUIT LITERAATUURSTUDIE .....	49
<b>HOOFDSTUK 3: MATERIALEN EN METHODEN .....</b>	<b>51</b>
3.1 PROEFPROGRAMMA .....	51
3.2 PARAMETERS .....	51
3.2.1 Lasdraad .....	51
3.2.2 Beschermgas .....	51
3.2.3 Stroombron en laspositie .....	52
3.2.4 Proefstukken proefreeks 1 .....	53
3.2.5 Samenvatting proefreeks 1 .....	53
3.2.6 Proefstukken proefreeks 2 .....	54
3.3 BEOORDELING WERKSTUKKEN .....	55
3.3.1 Beoordeling onverzinkte werkstukken .....	55
3.3.1.1 Visuele controle van de lasnaad: ISO 5817 .....	55
3.3.1.2 Algemene visuele beoordeling lasnaad .....	56
3.3.2 Diktemetingen zinklaag .....	56
3.3.3 Macrografie van de lasnaad .....	58
3.3.3.1 Algemeen .....	58
3.3.3.2 Algemene methode .....	58
3.3.3.2 Vereenvoudigde methode .....	59
3.3.3.3 Bepaling opmenging .....	60
<b>HOOFDSTUK 4: PROEVEN .....</b>	<b>61</b>
4.1 INLEIDING .....	61
4.2 VERIFICATIE LASDRAAD ZINQWELD .....	61
4.3 LASPARAMETERS .....	62
4.4 BEOORDELING ONVERZINKTE PROEFSTUKKEN: PROEFREEKS 1 .....	63
4.4.1 Visuele beoordeling van de lasnaad: ISO 5817 .....	63
4.4.2 Algemene visuele beoordeling van de lasnaad .....	66
4.4.3 Besluit visuele beoordeling .....	70
4.5 DIKTEMETINGEN ZINKLAAG PROEFREEKS 1 .....	70
4.6 OPMENGING PROEFREEKS 1 .....	72
4.6.1.1 Validatie vereenvoudigde methode .....	72
4.6.1.2 Resultaten opmenging .....	73
4.7 ANALYSE RESULTATEN PROEFREEKS 1 .....	75
4.8 PROEFSTUKKEN KLANTEN: PROEFREEKS 2 .....	80
4.9 DIKTEMETING ZINKLAAG PROEFREEKS 2 .....	82
4.10 LASMETHODEBESCHRIJVING (WPS) .....	83
4.10.1 Opstellen WPS .....	83
4.10.2 Geldigheidsgebied .....	83
4.10.2.1 Moedermateriaalgroepen .....	83
4.10.2.2 Materiaaldikte .....	84
<b>HOOFDSTUK 5: ALGEMEEN BESLUIT .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERENTIELIJST .....</b>	<b>87</b>
<b>GERAADPLEEGDE NORMEN .....</b>	<b>91</b>
<b>BIJLAGEN .....</b>	<b>93</b>

# Lijst met gebruikte symbolen en afkortingen

---

## Griekse letters:

$\Gamma$	Gamma
$\delta$	Delta
$\zeta$	Zèta
$\eta$	Eta

## Chemische elementen:

Al	Aluminium
Fe	Ijzer
Si	Silicium
Zn	Zink

## Gassen:

Ar	Argon
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
He	Helium
O <sub>2</sub>	Zuurstof

## Processen:

GMAW	Gas Metal Arc Welding
MAG	Metal Active Gas welding
MIG	Metal Inert Gas welding
TIG	Tungsten Inert Gas welding

## Andere:

CE-markering	Conformité Européenne
CP	Constant Potential
CV	Constant Voltage
ISO	International Organization for standardization
pWPS	preliminary Welding Procedure Specification
WPS	Welding Procedure Specification
WPQR	Welding Procedure Qualification Record



## Lijst van figuren

---

Figuur 2.1-1 Uitzicht van de oppervlakte van een verzinkt element [2].....	5
Figuur 2.1-2 Corrosiebeschermingsmethoden van staal door zink [5].....	5
Figuur 2.1-3 Ophangen van de stalen elementen [9].....	6
Figuur 2.1-4 Stappen in het productieproces van discontinu thermisch verzinken [5].....	7
Figuur 2.1-5 Zinkbad [11] .....	8
Figuur 2.2-1 De verschillende fasen in een zinklaag [5].....	9
Figuur 2.2-2 Regelmatige (links) versus onregelmatige (rechts) ijzerzinklegering: effect van silicium op de ijzerzinklegering [15].....	10
Figuur 2.2-3 Sandelin curve [12].....	11
Figuur 2.2-4 Ternair Fe-Zn-Si systeem op 450°C [17] .....	11
Figuur 2.2-5 Invloed van silicium op de galvanisatiereactie [14].....	12
Figuur 2.2-6 Relatie onderdompelingstijd en coatingdikte voor verschillende siliciumgehalten [12] .....	13
Figuur 2.2-7 Zinkrijke zone van het ijzer-zink systeem [13, 19].....	14
Figuur 2.2-8 Invloed van de temperatuur op de diffusie van ijzer in gesmolten zink [12].....	15
Figuur 2.2-9 Invloed Si+P en de zinkbadtemperatuur op de zinklaagdikte [5].....	15
Figuur 2.2-10 Visueel verschil door verschil in staalsamenstelling [22] .....	16
Figuur 2.3-1 Schematische voorstelling MIG/MAG lassen [26] .....	17
Figuur 2.3-2 Boogkarakteristiek [24].....	18
Figuur 2.3-3 Ijklijnen van booglasprocessen [27] .....	18
Figuur 2.3-4 Vlakke karakteristiek van een stroombron [24] .....	19
Figuur 2.3-5 Voorgeprogrammeerde synergische lijnen [24] .....	19
Figuur 2.3-6 Schematische ligging van de booggebieden bij het MAG lassen [24].....	20
Figuur 2.3-7 Cyclus van het kortsluitbooglasproces [24] .....	21
Figuur 2.3-8 Invloed van de smoorspoel op het verloop van de spanning en stroom bij plotse variaties [24].....	21
Figuur 2.4-1 Badgeometrie [34, 35].....	25
Figuur 2.4-2 Invloed van de draadsnelheid op de ligging van het werkpunt en de geometrie van de las [24] .....	26
Figuur 2.4-3 Effect van draadaanvoer op de geometrie van het lasbad [35].....	27
Figuur 2.4-4 Macrografie van dwarsdoorsneden van enkelvoudige lasrupsen vervaardigd bij een lasstroom stijgend van 140-300A in stappen van 40A. Merk de verschillende vergrotingen van de figuren op, meetschaal is per mm. [32].....	27
Figuur 2.4-5 Relatie tussen lasstroom en penetratiediepte met verschillende spanning, draadtoevoer en toortshoek [39].....	28
Figuur 2.4-6 Invloed van ligging van het werkpunt en de geometrie van de inbranding bij variatie van de spanning [24] .....	28
Figuur 2.4-7 Effect van spanning op de lasbadgeometrie [35].....	29
Figuur 2.4-8 Macrografie van dwarsdoorsneden van een enkelvoudige lasrups vervaardigd bij een toename van de lassnelheid van 40, 60, 100, 120 en 140 mm/min. Merk de verschillende vergrotingen van de figuren op, meetschaal is per mm. [32] .....	29
Figuur 2.4-9 Effect van lassnelheid op de badgeometrie [35].....	30
Figuur 2.4-10 Interactie tussen spanning en lassnelheid op de penetratie en de breedte van het lasbad [35] .....	31
Figuur 2.4-11 Interactie tussen spanning en draadtoevoer op de penetratie, overdikte en breedte van het lasbad [35].....	31
Figuur 2.4-12 Effect van nozzle-to-plate afstand op de geometrie van het lasbad [35].....	32

Figuur 2.4-13 Interactie tussen lassnelheid en afstand tussen werkstuk en mondstuk (N) op de penetratie [35] .....	33
Figuur 2.4-14 Bijhorende parameters bij de drie onderstaande figuren [35].....	34
Figuur 2.4-15 Effect van spanning, draadsnelheid en afstand mondstuk-plaat met parameter interacties op de opmenging [35].....	34
Figuur 2.4-16 Invloed van de hoek van de lastoorts op de badgeometrie [40].....	35
Figuur 2.4-17 Verschillende inbranding afhankelijk van percentages CO <sub>2</sub> in beschermgas [42] .....	36
Figuur 2.4-18 Thermische conductiviteit en enthalpie van gassen in functie van de temperatuur [44].....	36
Figuur 2.4-19 Opmenging ten opzichte van warmte-inbreng voor de eerste pas van verschillende lasprocessen. [32] .....	38
Figuur 2.5-1 Effect van silicium en mangaan op de vorm van de lasrups [56] .....	42
Figuur 2.5-2 Effect Mn/Si-verhouding op de kerftaaiheid [54].....	43
Figuur 2.6-2 Vergelijking uitzicht MicroZINQ met klassiek thermisch verzinken [61] .....	45
Figuur 2.7-1 Thermisch verzinkte leuning [69] .....	47
Figuur 2.7-2 Thermisch verzinkt chassis [68] .....	47
Figuur 3.2-1 Koker.....	54
Figuur 3.2-2 Profiel (raam) .....	54
Figuur 3.2-3 Profiel (hoek) .....	55
Figuur 3.2-4 Buis (lantaarnpaal) .....	55
Figuur 3.3-1 Elco 456 [71].....	56
Figuur 3.3-2 Microscoop.....	59
Figuur 3.3-3 Voorbeeld berekening opmenging. Meetschaal is per mm.....	60
Figuur 4.2-1 Met klassieke lasdraad .....	62
Figuur 4.2-2 Met ZINQWeld.....	62
Figuur 4.4-1 Grote porositeit. Meetschaal is per mm. (P31) .....	64
Figuur 4.4-2 Gemiddelde grote van porositeit. Meetschaal is per mm. (P23).....	65
Figuur 4.4-3 Porievrije snede. Meetschaal is per mm. (P35).....	65
Figuur 4.5-1 Voorbeeld proefstukken V- en X-naad .....	72
Figuur 4.6-1 Macrografie volgens de officiële methode. Meetschaal is per mm. ....	72
Figuur 4.6-2 Macrografie volgens de vereenvoudigde methode. Meetschaal is per mm. ....	73
Figuur 4.7-1 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor verschillende proefstukvormen .....	76
Figuur 4.7-2 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor verschillende proefstukvormen .....	76
Figuur 4.7-3 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor verschillende gassen .....	77
Figuur 4.7-4 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor verschillende gassen .....	77
Figuur 4.7-5 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor pulserend en conventioneel lassen .....	78
Figuur 4.7-6 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor pulserend en conventioneel lassen.....	78
Figuur 4.7-7 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor combinatie gas en stroom.....	79
Figuur 4.7-8 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor combinatie gas en stroom .....	79
Figuur 4.8-1 Proefstuk gelast met lasdraad 1,0 mm en beschermgas Arcal 21 .....	80
Figuur 4.8-2 Proefstuk gelast met lasdraad 1,0 mm en beschermgas Atal 6 .....	80
Figuur 4.8-3 Proefstuk gelast met lasdraad 1,0 mm en beschermgas Arcal 12 .....	81
Figuur 4.10-1 Stappen in het WPS kwalificatie proces [74].....	83

## Lijst van tabellen

---

Tabel 2.3-1 Overzicht eigenschappen gassen [29, 30] .....	24
Tabel 2.5-1 Typische samenstelling ongelegeerd staal [25].....	41
Tabel 2.5-2 Grenswaarden Si en Mn in staal volgens verschillende normering .....	41
Tabel 2.5-3 Draadsamenstellingen volgens DIN 8589 [25].....	42
Tabel 2.6-1 Vergelijking eigenschappen microZINQ met klassiek thermisch verzinken [61] .....	45
Tabel 3.2-1 Beschermgassen .....	52
Tabel 3.2-2 Proefstukken proefreeks 1 .....	53
Tabel 3.2-3 Overzicht van de variabelen proefreeks 1 .....	53
Tabel 3.2-4 Eigenschappen van de geleverde proefstukken.....	54
Tabel 3.3-1 Vereist aantal referentiegebieden ( ISO 1461 ).....	57
Tabel 3.3-2 Minimale dikte zinklaag volgens ISO 1461 .....	57
Tabel 4.2-1 Vergelijking dikte zinklaag lasdraden.....	61
Tabel 4.4-1 Klasse bepaald volgens ISO 5817 voor verschillende lasnaden en gassen met conventionele en pulserende stroombron .....	63
Tabel 4.4-2 Aantal fouten van I-naad 3mm volgens ISO 5817.....	63
Tabel 4.4-3 Algemene visuele beoordeling voor V-naad met plaatdikte 10 mm.....	66
Tabel 4.4-4 Algemene visuele beoordeling hoeknaad met plaatdikte 12 mm.....	66
Tabel 4.4-5 Algemene visuele beoordeling X-naad met plaatdikte 20 mm .....	67
Tabel 4.4-6 Algemene visuele beoordeling hoeknaad met plaatdikte 3 mm.....	67
Tabel 4.4-7 Algemene visuele beoordeling I-naad met plaatdikte 3 mm.....	68
Tabel 4.4-8 Opsomming van de beste en de slechtste resultaten per proefstuk .....	69
Tabel 4.5-1 Diktemetingen zinklaag X20.....	70
Tabel 4.5-2 Diktemetingen zinklaag Hoek12.....	71
Tabel 4.5-3 Diktemetingen zinklaag V10.....	71
Tabel 4.5-4 Eisen dikte zinklaag ISO 1461 .....	71
Tabel 4.6-1 Opmengingen I3 .....	73
Tabel 4.6-2 Opmengingen hoek3 .....	74
Tabel 4.6-3 Opmengingen V10 .....	74
Tabel 4.6-4 Opmengingen hoek12 .....	74
Tabel 4.6-5 Opmengingen X20 .....	75
Tabel 4.9-1 Gemiddelde zinklaagdikte van enkele proefstukken van proefreeks 2.....	82
Tabel 4.10-1 Geldigheidsgebied voor de materiaaldikte en lasmetaaldikte van stompe lassen (EN ISO 15614-1) .....	84





# Hoofdstuk 1: Inleiding

---

## 1.1 Situering van het onderzoeksdomein

Gelaste metaalstructuren vertonen na het galvaniseren in vele gevallen een overdikte aan zink, dikwijls in combinatie met een verminderde hechting ter hoogte van de lasnaden. De lasnaden hebben bovendien niet het mooie glanzende uitzicht zoals verwacht na onderdompeling in het zinkbad bij het thermisch verzinkproces. Na het vlakslippen van de lasnaden treedt eveneens de verdikking op.

Het probleem vindt zijn oorzaak bij een verhoogd siliciumgehalte in de lasnaad ten gevolge van het hogere siliciumgehalte in de massieve lasdraad ten opzichte van het basismateriaal. Indien het siliciumgehalte zich bevindt in een bepaald bereik, treedt het sandelin-effect in werking. Dit wil zeggen dat de zinklaag op afwijkende wijze aangroeit.

Bij het halfautomaatlassen (MIG/MAG) wordt silicium toegevoegd in de lasdraad ter verlaging van de viscositeit van het smeltbad. Voor het lassen van staal wordt gebruik gemaakt van CO<sub>2</sub>-toevoegingen in de gasbescherming ter bevordering van een stabiele vlamboog. CO<sub>2</sub> is echter geen inert gas op hoge temperatuur wat resulteert in zuurstof in de beschermde zone. Silicium is een desoxiderend element en biedt een oplossing aan dit probleem. Zo kan met toevoeging van silicium wel een las verkregen worden met goede mechanische eigenschappen.

De oplossing lijkt een lasdraad met een verlaagd siliciumgehalte, hierdoor kan echter de viscositeit van het lasbad te hoog worden en kunnen tevens porositeiten optreden aan het naadoppervlak. Een procedure om zulke draad toch te kunnen verlassen wordt uitgewerkt.

## 1.2 Doelstelling

Het doel van deze masterproef is het verbeteren van het lasgedrag van een laag silicium houdende lasdraad door de invloed van onder andere de lasparameters, type gas en stroombron te onderzoeken. Nadat deze invloeden gekend zijn, wordt gezocht naar een optimale keuze voor verschillende soorten lasnaadvormen zoals hoeknaden, X-naden, I-naden en V-naden. De geteste naadvormen en bijhorende materiaaldiktes zijn diegene die in de praktijk veelvuldig worden toegepast.

Een belangrijk aspect om de overdikte van de zinklaag op de lasnaad te beperken is de kennis van het siliciumgehalte in de lasnaad. Het siliciumgehalte van het basismateriaal is verschillend van dat van de gebruikte lasdraad. Vandaar dat de opmenging, wat zoveel betekent als het percentage basismateriaal in het lasmateriaal, van zeer groot belang is. De opmenging is dan weer afhankelijk van onder andere de gebruikte parameters en het type lasnaad. De opmenging wordt bepaald in functie van deze variabelen, vervolgens wordt gezocht naar een relatie tussen de opmenging en de overdikte.

Eventueel kan ook een gebied afgebakend worden waarbinnen de opmenging mag variëren met steeds een voldoende kwaliteit van de lasnaad.

Het uiteindelijke doel van dit project is het opstellen van een kwalificering van een lasprocedure, Preliminary Welding Procedure Specification (pWPS). Daarbij worden extra mechanische proeven op de lasnaden uitgevoerd.

## 1.3 Methode

De hierboven geformuleerde doelstellingen worden op een systematische manier aangepakt.

In hoofdstuk 2 wordt de vereiste informatie uit de literatuur samengebundeld. Eerst wordt uitgelegd waarom materialen worden verzinkt met een verdere toespitsing op het discontinu thermisch verzinkproces. Vervolgens wordt de morfologie en het mechanisme van zinklagen op staal besproken met extra aandacht voor het sandelin-effect, welke een verklaring geeft voor het optreden van een overdikte van de zinklaag op de lasnaad. De kennis van het lasproces, namelijk halfautomaatlassen, met in het bijzonder het type boog en gebruikte beschermgas vormt een essentieel item in deze masterproef. Een belangrijk aspect omtrent het siliciumgehalte in de lasnaad is de optredende opmenging. Daarom is het belangrijk om alle invloedsfactoren in kaart te brengen om hiermee rekening te houden bij het opstellen van de proeven. Doordat silicium een groot aandeel heeft in de ontwikkeling van de overdikte van de zinklaag wordt vervolgens gekeken wat de noodzaak is van de aanwezigheid van silicium in de lasnaad. De paragraaf over de bestaande oplossingen geeft inzicht in de methoden die reeds onderzocht zijn om het vooropgestelde probleem aan te pakken. Ten slotte wordt het toepassingsgebied van het gegeven probleem omschreven. Het toepassingsdomein is noodzakelijk voor de keuze van de lasnaadvormen en de bijhorende materiaaldiktes bij de proefstukken.

Hoofdstuk 3 handelt over de gebruikte materialen en geeft eveneens een korte beschrijving van de uitgevoerde proeven op zowel onverzinkt als verzinkt staal.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 het praktische proefprogramma aangevat. Het eerste luik van het praktisch gedeelte bestaat erin om met de kennis van het toepassingsdomein een keuze te maken betreffende de lasnaadvormen en materiaaldiktes die beproefd zullen worden. Vervolgens wordt de lasdraad ZINQWeld geverifieerd, opdat deze wel degelijk een veel kleinere of geen overdikte van de zinklaag op de lasnaad vertoont, in vergelijking met een standaard lasdraad. Nadat de proefstukken zijn gelast met bijhorende parameters, welke door een ervaren lasser worden bepaald, worden ze visueel beoordeeld volgens enerzijds ISO 5817 en anderzijds aan de hand van een zelf opgestelde checklist. Daarna worden de proefstukken verzinkt en wordt de dikte van de zinklaag opgemeten en beoordeeld. Na de diktemetingen wordt de opmenging bepaald van elk proefstuk. Een analyse van de visuele beoordelingen, de zinklaagdiktemetingen en de opmenging wordt uitgevoerd om de beste parameters te kunnen selecteren. Op basis van deze parameters worden proefstukken van klanten gelast en worden preliminary Welding Procedure Specifications (pWPS'en) opgesteld.

Het besluit van deze masterproef wordt verwerkt in hoofdstuk 5.

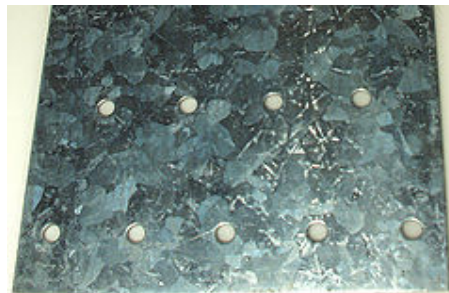


# Hoofdstuk 2: Literatuurstudie

## 2.1 Thermisch verzinken

### 2.1.1 Inleiding

Staal dat wordt blootgesteld aan atmosferische omstandigheden krijgt te maken met corrosie. Zink kan worden toegepast als deklaag op het staal, waarbij deze optreedt als kathodische beschermingslaag. Aangezien zink minder edel is dan staal, wordt een zinkanode gevormd. Dit wil zeggen dat het zink zich opoffert indien corrosie optreedt. Verzinken wordt ook toegepast wegens zijn gunstige decoratieve eigenschappen. In Figuur 2.1-1 wordt een voorbeeld van een oppervlakte van een verzinkt element afgebeeld. [1]



Figuur 2.1-1 Uitzicht van de oppervlakte van een verzinkt element [2]

Voor het verzinken van metaal bestaan meerdere methoden, zie Figuur 2.1-2. Zo wordt een onderscheid gemaakt tussen onder andere thermisch verzinken of galvaniseren, electrolytisch verzinken, schooperen en sherardiseren of diffusieverzinken. Bij electrolytisch verzinken wordt een relatief dunne, zeer goed hechtende zinklaag op het metaal aangebracht via een electrolytische werkwijze. Bij schooperen wordt een verwarmde zink(legering)draad of -poeder met een spuitpistool op het staal gespoten. Sherardiseren wordt gerealiseerd door het staal in trommels op hoge temperatuur met zinkpoeder te laten reageren. Thermisch verzinken kan op continue of discontinue wijze worden uitgevoerd. Continu thermisch verzinken wordt hoofdzakelijk gebruikt voor dun plaatmateriaal, welke met een grote snelheid (grootte-orde 100 m/min) wordt verzinkt. Dit proces levert dunne zinklagen op van 4 tot 30  $\mu\text{m}$ . Het discontinu thermisch verzinken levert een zinklaag op met grotere dikte, ongeveer 50 tot 150  $\mu\text{m}$  en met een ingewikkelde opbouw. Dit proces wordt in dit onderzoek gebruikt en wordt verder uitgebreider toegelicht (2.1.2). [1, 3, 4]



Figuur 2.1-2 Corrosiebeschermingsmethoden van staal door zink [5]

## 2.1.2 Discontinuu thermisch verzinken

Het verzinkproces bestaat al meer dan 250 jaar en is één van de pijlers van de Noord-Amerikaanse industrie sinds 1890. Verzinken vindt toepassingen in een brede waaier van markten om staal te beschermen tegen corrosie. Voor thermisch verzinken worden de termen ‘galvaniseren’, ‘warm verzinken’, ‘vuurverzinken’ of ‘volbadverzinken’ eveneens gebruikt. [6, 7]

De meeste ferro-materialen zijn geschikt om thermisch verzinkt te worden. Zo worden zuiver koolstofstaal (< 1100 MPa) en laag gelegeerd staal, warm- en koudgewalst staal, gietstaal, ductiel ijzer, gietijzer, roestvast staal en zelfs verweerde stalen regelmatig voorzien van een beschermende zinkcoating via het thermisch verzinkproces. De chemische samenstelling van het materiaal beïnvloedt de karakteristieken van de zinkcoating. De stukken die thermisch verzinkt kunnen worden variëren in grootte van kleine stukken zoals bouten en sluitringen tot lange staalprofielen en grote gelaste staalassenblages met een gewicht van meerdere tonnen. [6, 8]

Het principe van thermisch verzinken bestaat erin om elementen onder te dompelen in een zinkbad. Dit zinkbad is een stalen kuip gevuld met gesmolten zink. De smelttemperatuur van zink bedraagt 419,5 °C, het bad wordt verhit tot 445 à 465 °C. Aan het gesmolten zink worden elementen toegevoegd in concentraties van grootteorde 0,1 % of minder. De belangrijkste toevoegingen zijn Al, Ni, Pb, Sn en Bi. Deze toevoegingen hebben invloed op het uitzicht van de coating. Zo worden bij bepaalde gehalten en combinaties van toegevoegde elementen de glans en bloemenstructuur beïnvloed, alsook de dikte van de coating wordt beïnvloed. [7]

Wanneer een stuk staal wordt verzinkt dient het enkele stappen te doorlopen, zie Figuur 2.1-4. Als eerste wordt het staal aangebonden, dit wil zeggen dat het aan een rolbrug wordt vastgemaakt door middel van ophang- en aanbindgereedschap (Figuur 2.1-3). De nodige gaten dienen hiervoor voorzien te worden.



**Figuur 2.1-3 Ophangen van de stalen elementen [9]**

Daarna wordt het staal ontzinkt indien al een zinklaag of restanten ervan aanwezig zijn. Vuil, vet en olie dient alsook verwijderd te worden aangezien bij aanwezigheid van vet de zinklaag minder hecht of zelfs afwezig blijft. Dit gebeurt door alkalisch ontvetten in een 5-20 % loogoplossing bij 40 tot 90 °C gevolgd door een spoeling of in laag geconcentreerde zoutzuurbaden met toevoeging van bevochtigers bij 20 tot 40 °C. Vetten hebben ook nadelige effecten op verdere verloop van het proces,

zo vervuilen ze onder andere de beits- en fluxbaden wat resulteert in een kortere standtijd van deze baden. Het ontvetten wordt gevolgd door spoelen. Het ontvetten kan oppervlaktevervuilingen zoals epoxy's, vinyl, asfalt of lasslakken niet verwijderen. Zandstralen of andere mechanische reinigingsmethodes worden toegepast om deze verontreinigingen te verwijderen. De volgende stap in het proces is het beitsen. Dit zorgt voor walshuid- en roestverwijdering teneinde een chemisch proper oppervlak te bekomen en gebeurt in een zoutzuuroplossing. Na het beitsen wordt ook gespoeld om de kwaliteit van de flux in de volgende stap zo min mogelijk aan te tasten. Het fluxen gebeurt met een flux of vloeimiddel in een zinkchloride of ammoniumchloride-oplossing bij een zoutconcentratie van 300-400 g/l en bij een temperatuur van 20 tot 70 °C. Het staaloppervlak wordt gereinigd en oxiden worden verwijderd zodat het optimaal met zink kan reageren. Na deze behandeling wordt niet gespoeld ter behoud van een fluxlaagje. Dit verhindert immers oxidatie alvorens het staal in het zinkbad wordt gedompeld. Wanneer de fluxlaag in contact komt met het zink wordt het ontbonden, wat leidt tot een goede bevloeiing van het staaloppervlak met de zink. Alvorens het stuk in het zinkbad wordt gedompeld moet het droog zijn, dat gebeurt in een oven van ongeveer 90 °C. De droging in de oven zorgt tevens voor een gelijkmatigere fluxverdeling, welke dan weer zorgt voor een gelijkmatigere reactie, daarenboven is door 'voorwarming' in de oven de thermische schok die het werkstuk ondervindt, verminderd. Hierbij dient echter wel opgelet te worden dat het stuk niet overdroogd wordt zodat het fluxlaagje niet ontbindt. [6, 7, 10]



**Figuur 2.1-4 Stappen in het productieproces van discontinu thermisch verzinken [5]**

Na het doorlopen van deze voorbereidingen kan het stuk worden ondergedompeld, zie Figuur 2.1-5. Hierbij dient zeer aandachtig te werk gegaan te worden, aangezien het gehele oppervlak in aanraking moet komen met zink en nergens luchtbellens mogen ingesloten worden. Alles moet zo spatloos mogelijk verlopen. Toch moet de dompelsnelheid voldoende hoog gehouden worden zodat een goede uniformiteit van de zinklaag tot stand komt. Bij het hijsen of uithalen moet ook met de nodige voorzichtigheid gewerkt worden, eveneens geldt hier dat de snelheid voldoende groot moet zijn omdat het zink niet te lang mag afvloeien ter behoud van een dikke zinklaag. Hier is het weliswaar enkel het zuivere zink dat kan afvloeien aangezien de legeringslagen vast zijn. De hijsnelheid bedraagt doorgaans 1,2 tot 1,5 m/min. Na het hijsen worden de zinkdruppels die zich aan de onderzijde van het stuk hebben gehecht, verwijderd door trillen en/of slagen. Na het verzinken wordt het stuk gekoeld door lucht of water met als doel de bovenste zuivere zinklaag te behouden. Zonder de afkoeling zou deze na enige tijd volledig zijn omgezet in ijzer-zinklegeringslagen. Eveneens kan tijdens het quenchen een passiveringslaag worden aangebracht door elementen toe te voegen. Na het doorlopen van het hele proces wordt het stuk losgemaakt. De gebruikte ophang- en aanbindgereedschappen behoren nu tot schroot. Het materiaal dat opnieuw kan gebruikt worden, dient ontzinkt te worden. Het materiaal wordt alvorens de verzending geïnspecteerd op hechting, laagdikte en uniformiteit. [7, 8, 10]



**Figuur 2.1-5 Zinkbad [11]**

De opbouw van de verzinklaag is echter vrij ingewikkeld. Gedurende de onderdompeling groeien door diffusie van ijzer en zink een aantal ijzer-zinklegeringslagen op het staaloppervlak. Na verwijdering uit het zinkbad en een voldoende snelle afkoeling stolt bovenop de ijzer-zinklegeringslagen en laag zuiver zink. Tussen de lagen heerst een zeer goede hechting aangezien de lagen door diffusie zijn ontstaan, de lagen zijn namelijk metallurgisch verankerd aan het staaloppervlak. Na het thermisch verzinken kan het staal in mindere mate vervormd worden vanwege de dikke en harde legeringslagen die er aan gehecht zijn. Door deze verhinderde vervorming ontstaan minder scheuren in de verzinklaag. [4, 7, 12]

## **2.2 Morfologie van zinklagen op staal**

### **2.2.1 Morfologie en mechanisme**

Bij het thermisch verzinken van staal diffunderen de zinkatomen onmiddellijk in het ijzer. De ijzeratomen diffunderen tegelijk naar buiten toe, weliswaar met een veel lagere snelheid. Op die manier ontstaan verschillende compacte en stabiele intermetallische verbindingen aan het oppervlak, namelijk ijzer-zinklegeringslagen. Elke laag heeft een specifieke verhouding van ijzer en zink. Bovenaan bevindt zich een nagenoeg zuivere zinklaag, deze wordt de  $\eta$ -laag genoemd. Daaropvolgend worden de  $\zeta$ -,  $\delta$ -,  $\Gamma_1$ - en  $\Gamma$ -laag onderscheiden, respectievelijk met toenemend ijzergehalte. Deze ijzer-zinklegeringslagen (Figuur 2.2-1) vormen 50 tot 70 % van de totale coatingdikte. Iedere ijzer-zink intermetallisch fase wordt hieronder kort omschreven. [6, 13]

#### Zeta ( $\zeta$ -) fase

De  $\zeta$ -fase bevat moleculen met de chemische verbinding  $\text{FeZn}_{13}$ . Deze fase heeft een ijzergehalte van ongeveer 5-6 %. De fase wordt gevormd uit de peritectische reactie tussen de  $\delta$ -fase en het vloeibaar zink op een temperatuur van circa 530 °C. De  $\zeta$ -fase wordt gevormd tussen de  $\eta$ - en de  $\delta$ -fase en is isomorf met een monokliene kristalstructuur. [13]

#### Delta ( $\delta$ -) fase

De  $\delta$ -fase,  $\text{FeZn}_{10}$ , heeft een ijzergehalte van 7,0-11,5 % en heeft een hexagonale kristalstructuur. De  $\delta$ -fase wordt gevormd uit een peritectische reactie van de  $\Gamma$ -fase en vloeibaar zink op een temperatuur van 665°C. [13]

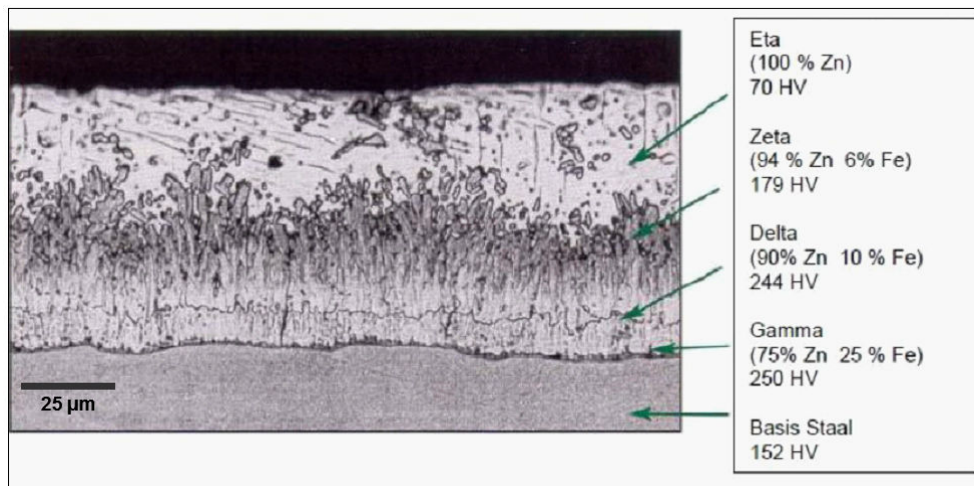


### Gamma<sub>1</sub> (Γ<sub>1</sub>-) fase

De Γ<sub>1</sub>-fase, met chemische formule Fe<sub>5</sub>Zn<sub>21</sub>, heeft een ijzergehalte van 17,0-19,5 % en heeft een kubisch vlakke gecenterde structuur in zijn kristalrooster. De moleculen in de fase worden gevormd door een peritectoïdische reactie tussen de Γ- en de δ-fase bij een temperatuur van circa 550 °C. Deze fase uit zich als een ononderbroken laag tussen de Γ- en de δ-laag. [13]

### Gamma (Γ-) fase

De Γ-fase, Fe<sub>3</sub>Zn<sub>10</sub>, heeft een ijzergehalte van 23,5-28,0 %. De structuur van het kristalrooster is kubisch ruimtelijk gecenterd. De fase wordt gevormd uit een peritectische reactie op 782 °C tussen α-Fe en vloeibaar zink. [13]



**Figuur 2.2-1 De verschillende fasen in een zinklaag [5]**

Het mechanisme wordt beschreven aan de hand van ijzer dat wordt ondergedompeld in een zinkbad op 450 °C. De eerste fase die daarbij gevormd wordt op het oppervlak tijdens de intermetallische reacties is de ζ-fase. Indien de diffusie van Zn in Fe verwaarloosbaar wordt gesteld bij 450 °C, ontstaat een metastabiel evenwicht tussen het basismateriaal en de vloeistof met een percentage van 7 % Fe. Deze concentratie komt exact overeen met de ζ-verbinding. Bij de start van de onderdompeling zijn de voorwaarden voor kiemvorming van de ζ-kristallen dus voldaan. Een bijkomende factor die deze kiemvorming bevordert en bovendien ook de groei ervan bevordert is de zuilvormige kristalstructuur die veel eenvoudiger is dan die van de andere Fe-Zn intermetallische verbindingen. De voortgaande groei van deze kristallen overheerst op de vorming van nieuwe ζ-kristallen. Hoe dan ook, als het gesmolten zink oververzadigd is met ijzer, en voldoende kiemvorming van nieuwe kristallen plaatsvindt, vormen vele ζ-kristallen zich in de gesmolten zink. [13, 14]

De vorming van de ζ-laag wordt nagenoeg onmiddellijk vervolgd door het ontstaan van de δ-laag aangezien het ijzergehalte in de ζ-fase in contact met het staal snel stijgt. De δ-fase heeft een zuilvormige morfologie als gevolg van een voorkeursoriëntatie in een richting langs de basis van de hexagonale structuur. Na enige tijd, kunnen scheuren van dit basisvlak van de δ-laag zich uitbreiden naar de naburige lagen, namelijk de ζ- en Γ-laag. [13]

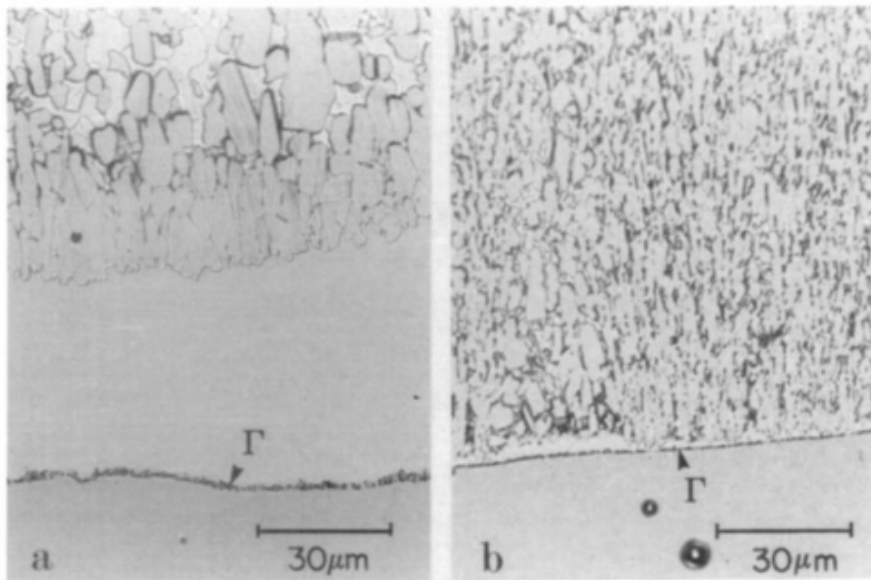
Na enige incubatietijd wordt vervolgens de zeer smalle Γ-laag gevormd die zowel de Γ- als de Γ<sub>1</sub>-fase bevat. De Γ-fases verschijnen als een dunne laag met een vlakke overgang tussen het staaloppervlak en de δ-laag. [13]

## 2.2.2 Sandelin-effect

### 2.2.2.1 Reactiviteit van staal

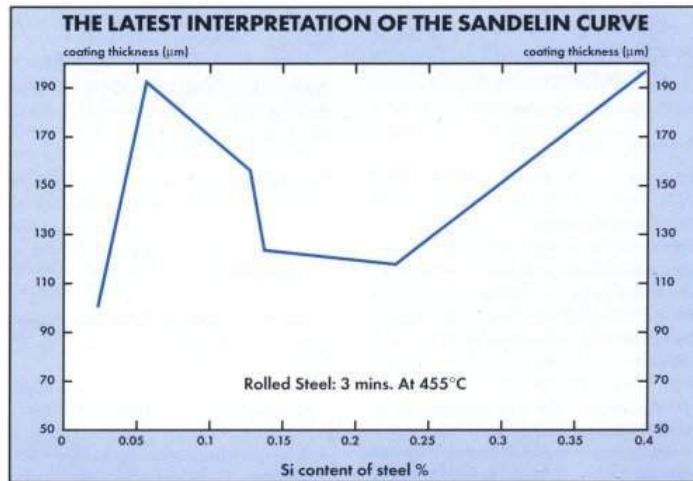
De reactie tussen vloeibaar zink en staal, die tijdens het thermisch verzinken plaatsvindt, vertoont ongewone kinetische eigenschappen. Een duidelijke verklaring is hiervoor nog steeds niet bekend. Industriële staalsoorten bevatten toevoegingen van chemische elementen en deze hebben een invloed op de reactiviteit van het materiaal met de gesmolten zink. Legeringselementen in staal kunnen de snelheid van de zinkcorrosie dus sterk beïnvloeden. Koolstof, fosfor en vooral silicium geven aanleiding tot een versnelde lineaire zinkaanval. [14]

Silicium beïnvloedt de reactie tussen ijzer en zink. Dikke legeringslagen worden gevormd, waarbij de  $\zeta$ -fase domineert. De  $\zeta$ -laag wordt omgevormd tot een laag van kleine of stengelachtige kristallen Figuur 2.2-2.



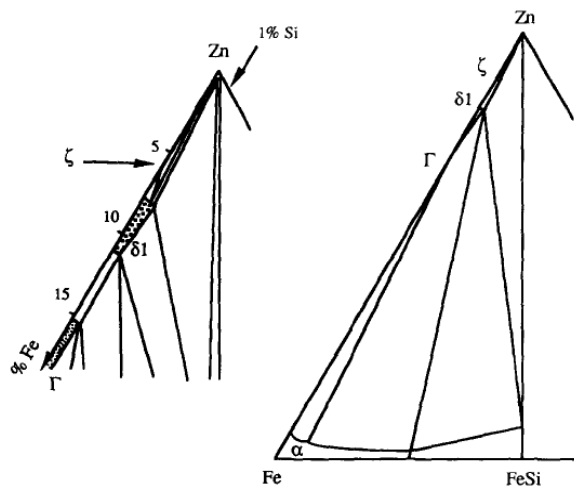
**Figuur 2.2-2 Regelmatige (links) versus onregelmatige (rechts) ijzer-zinklegering: effect van silicium op de ijzerzinklegering [15]**

De sandelin-curve, Figuur 2.2-3, geeft de typische waarden weer van de siliciumgehalten die een hogere reactiviteit vertonen en dus een grotere coatingdikte tot gevolg hebben. De zone tussen 0,05 en 0,125 % Si wordt de sandelin-piek genoemd. Wanneer het siliciumgehalte 0,3 % overschrijdt, wordt opnieuw een stijging van de invloed waargenomen. Staal met zulke siliciumgehalten wordt hoogreactief staal genoemd. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het siliciumgehalte ofwel beperkt moet blijven tot minder dan 0,05 %, dit wordt niet reactief staal genoemd, of zich in de zone moet bevinden tussen 0,125 en 0,3 %. Voor fosfor wordt een gelijkaardige invloed waargenomen, deze treedt eerder als versneller op. Bij staal met hoge kwaliteit wordt het fosforgehalte zodanig laag gehouden dat dit weinig invloed heeft. Desondanks komt in de praktijk regelmatig staal voor met mindere kwaliteit waarbij het fosforgehalte onaanvaardbare waardes aanneemt voor verzinken. [12, 16]

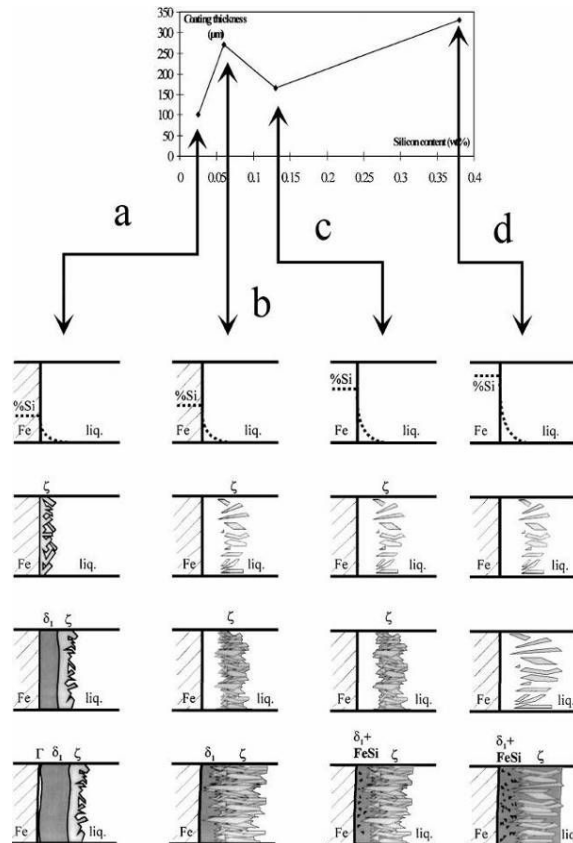


Figuur 2.2-3 Sandelin-curve [12]

Het Fe-Zn-Si systeem op 450 °C, Figuur 2.2-4, wordt gekarakteriseerd door enerzijds het bestaan van een Fe-Si verbinding waarvan de zinkoplosbaarheid ongeveer 1 % Zn bedraagt, anderzijds geldt een lage oplosbaarheid van silicium in Fe-Zn intermetallische verbindingen. Bij de opname van 1 % silicium in de ijzer-zinklegeringslagen op een temperatuur van 450 °C verdwijnt reeds de oplosbaarheid van silicium in de ζ-fase. De ζ-fase kan dus geen binair evenwicht bereiken met de Fe-Si verbinding. Bij diezelfde omstandigheden vindt een ontbinding plaats in de δ-fase. De overmaat aan silicium leidt tot enerzijds precipitatie van Fe-Si partikels en anderzijds tot kiemvorming en groei van de siliciumhoudende δ-fase. [17]



Figuur 2.2-4 Ternair Fe-Zn-Si systeem op 450°C [17]



**Figuur 2.2-5 Invloed van silicium op de galvanisatiereactie [14]**

Samengevat verandert de structuur van de coating van een opeenvolging van stabiele en compacte lagen van evenwichtige fasen naar een massa van fijne  $\zeta$ -kristallen omgeven door een  $\eta$ -Zn matrix. Staalsoorten worden in drie categorieën onderverdeeld naargelang hun reactiviteit. Staal met een siliciumgehalte lager dan 0,07 % (Figuur 2.2-5a) wordt hyposandelinstaal genoemd en vertoont een morfologie die nauwelijks afwijkt van ijzer zoals beschreven in 2.2.1. [15, 18]

Indien het siliciumgehalte 0,07 % bedraagt, wordt gesproken over een sandelinstaal (Figuur 2.2-5b). Silicium hoopt zich op aan het grensvlak. Uit het fasediagram (Figuur 2.2-4), kan worden afgeleid dat het vloeibare zink niet meer in evenwicht is met de  $\zeta$ -fase, maar wel met de  $\delta$ -fase.  $\zeta$ -kristallen worden relatief ver van het staaloppervlak gevormd in de vloeistof ter vorming van een dikke tweefasige  $\zeta+\eta$ -laag. Zolang deze intermediaire fase bestaat verloopt de diffusie van ijzer sneller en varieert deze lineair met de tijd. Wanneer de  $\zeta$ -laag, gevormd door kiemvorming in de vloeibare zink, compact is, groeit de  $\delta$ -laag in evenwicht met de vloeibare zink tussen het staaloppervlak en de  $\zeta$ -laag. Bijgevolg vertraagt de reactie en verdwijnt de overmaat aan silicium in de  $\delta$ -fase. [14, 18]

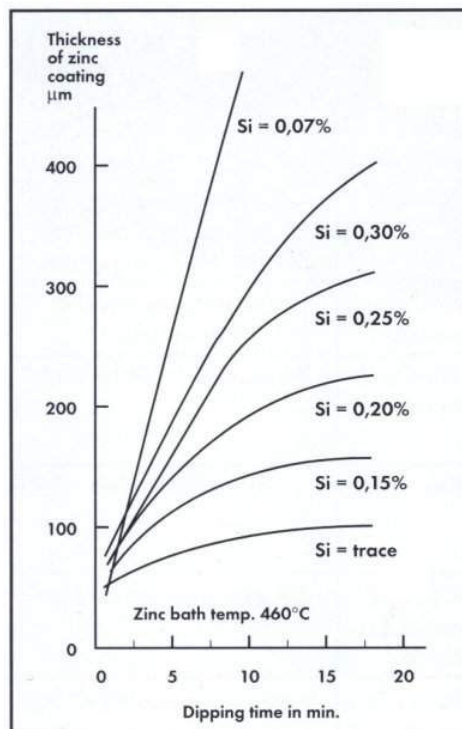
Hypersandelin stalen (Figuur 2.2-5c en d) hebben een siliciumgehalte groter dan 0,1 % en worden gekarakteriseerd door een nog dikkere  $\zeta$ -laag en door een fijne precipitatie van Fe-Si in de gemixte  $\delta+\zeta$ -fasen. Indien de vloeibare fase opgesloten zit tussen het staaloppervlak en de  $\zeta$ -laag en er een siliciumverzadiging heerst, wordt aan de voorwaarden voldaan voor de kiemvorming van Fe-Si. De vloeibare fase stolt in een tweefasig  $\delta+\text{Fe-Si}$  mengsel. De periode waarbij de kinetiek lineair met de tijd varieert wordt korter en de totale kinetiek is bijgevolg trager. Indien het siliciumgehalte de kernvorming blijft bevorderen en de groei van de  $\zeta$ -fase dus onderhouden blijft naar de vloeistof toe, wordt de groei van  $\zeta$ -kristallen loodrecht op het Fe-Zn grensvlak vergemakkelijkt. De groei parallel aan het grensvlak en bijgevolg ook het samenknippen van de  $\zeta$ -kristallen vertraagt. De resulterende dikte

is groter dan die bij een sandelin staal. De morfologie toont de makkelijke groei van de  $\zeta$ -fase loodrecht op het Fe-Zn grensvlak. Het mengsel  $\delta$ +Fe-Si limiteert aan de ene zijde de groei van de  $\zeta$ -fase parallel aan het grensvlak en aan de andere zijde is deze laag in contact met het vloeibare zink, dit laatste leidt tot een hogere concentratiegradiënt. Door deze hogere concentratiegradiënt is de coating zo dik. [17, 18]

### 2.2.2.2 Invloed van onderdompelingstijd en galvanisatietemperatuur

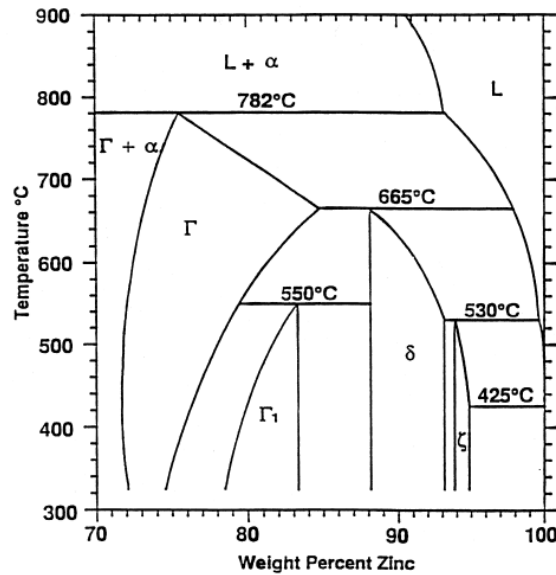
Niet alleen de eigenschappen van het ondergedompelde staal hebben invloed op de reactie. Het verzinkproces heeft eveneens een aantal bepalende parameters, namelijk de onderdompelingstijd en de temperatuur van het zinkbad. Daarnaast speelt de dikte van het staal tevens een grote rol bij de dikte van de zinklaag, zo heeft een basismateriaal met een grotere dikte een dikkere zinklaag. Uiteraard vermindert de dikte van de zinklaag door de jaren heen om wille van blootstelling aan de atmosfeer, stof, ..., tevens zorgt contact met chemische producten voor een verminderde zinklaagdikte. [5]

Het vloeibare zink kan door de gevormde structuur doordringen tot aan het staaloppervlak en deze reactie blijft doorgaan gedurende de onderdompelingstijd. Hoe groter de onderdompelingstijd, hoe dikker de zinklaag. De relatie tussen onderdompelingstijd en de dikte van de coating wordt voor stalen met verschillende siliciumgehalten weergegeven in Figuur 2.2-6. Desondanks valt op te merken dat de invloed van silicium niet evenredig stijgt met het siliciumgehalte, maar verloopt zoals de curve afgebeeld in Figuur 2.2-3. [12]



Figuur 2.2-6 Relatie onderdompelingstijd en coatingdikte voor verschillende siliciumgehalten [12]

Een andere dominerende invloedsfactor voor de snelheid van de reactie is de temperatuur van het zinkbad. Bij onderdompeling van zuiver ijzer in zink wordt eerst de  $\zeta$ -laag gevormd. De oplosbaarheid van zink in ijzer in de  $\zeta$ -laag verandert aanzienlijk bij stijging van de galvanisatietemperatuur van 425 tot 530 °C (Figuur 2.2-7).

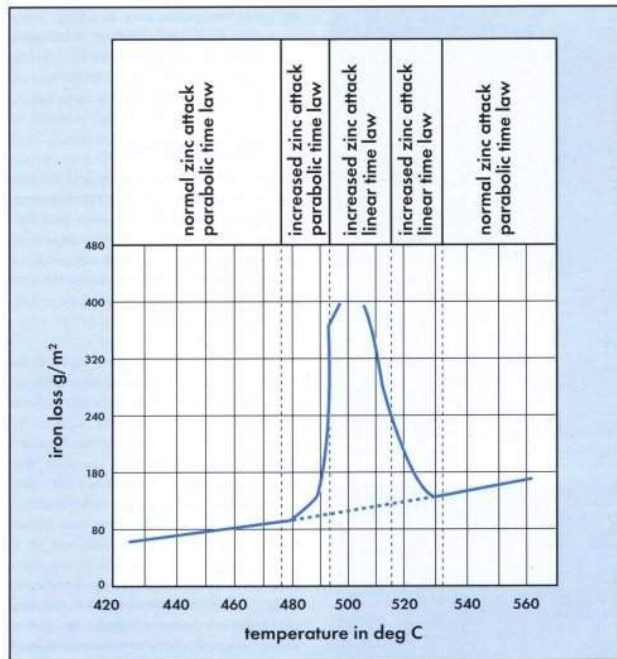


Figuur 2.2-7 Zinkrijke zone van het ijzer-zink systeem [13, 19]

Bij een galvanisatietemperatuur tussen 450 en 490 °C, bevindt zich een compacte en coherente  $\zeta$ -laag bestaande uit zuilvormige kristallen boven de  $\delta$ -laag. De snelheid van de reactie verloopt parabolisch met de tijd (Figuur 2.2-8). De  $\Gamma$ -laag vormt een barrière voor de diffusie tussen zink- en ijzeratomen. De diffusie in deze fase wordt beschouwd als ‘snelheidscontroleerend’.

Indien de temperatuur verhoogd wordt tot 490 °C, verandert de  $\zeta$ -laag wat betreft morfologie en korrelgrootte aanzienlijk, de oplosbaarheid in de  $\zeta$ -laag daalt. De legeringselementen segregeren in de korrelgrenzen van de  $\zeta$ -laag tijdens de vorming ervan, daardoor worden vloeibare zakken gevormd. Deze vloeibare zakken belemmeren de vorming van een coherente en compacte  $\zeta$ -laag en resulteert in de vorming van vloeibare banen met als gevolg dat het vloeibaar zink onmiddellijk in contact kan komen met de  $\delta$ -laag. De  $\delta$ -laag wordt geërodeerd door vloeibaar zink. De snelle reacties op het grensvlak versnellen de groei van de  $\zeta$ -laag. Het naast elkaar bestaan van de  $\zeta$ -laag en de vloeibare zink leidt tot een spanningsafname in de  $\delta$ -laag waardoor versnippering van de  $\delta$ -laag optreedt. In de  $\delta$ -laag ontstaan verschillende scheuren. Dit maakt direct contact mogelijk met de  $\Gamma$ -fase of het staal zelf wat resulteert in een nog snellere aanval op het staal. De zinkaanval verloopt lineair met de tijd. Daardoor wordt een coating gevormd die bijna volledig bestaat uit ijzer-zinklegeringslagen. In de temperatuurzone tussen 490 en 530 °C wordt gesproken over een lineaire zinkaanval.

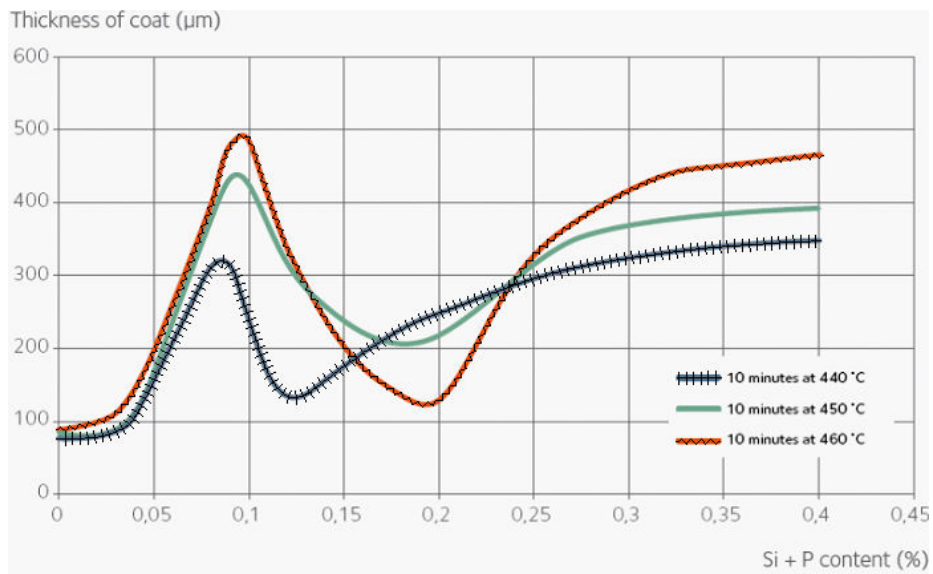
Bij een galvanisatietemperatuur boven 530 °C wordt terug een parabolische reactie waargenomen. De  $\zeta$ -laag verdwijnt en de  $\delta$ -laag raakt het vloeibare zink onmiddellijk. Bij afwezigheid van deze  $\zeta$ -laag verdwijnt de spanning en ontstaan scheuren in de  $\delta$ -laag. De erosie van de  $\delta$ -laag versnelt op hogere temperatuur en de dikte van de gevormde coating is dunner dan deze tussen 480 °C en 530 °C. [6, 13, 19, 20]



Figuur 2.2-8 Invloed van de temperatuur op de diffusie van ijzer in gesmolten zink [12]

Het galvanisatieproces gebeurt op een temperatuur lager dan 480 °C, meer bepaald tussen 440 en 460 °C. [12]

Zoals eerder vermeld heeft de temperatuur van het zinkbad een wezenlijke invloed op de dikte van de zinklaag. Daarnaast kan opgemerkt worden, aan de hand van Figuur 2.2-9, dat de sandelin-curve niet zonder meer een opwaartse verschuiving ondergaat met toenemende badtemperatuur. De sandelin-piek blijft nagenoeg ongewijzigd bij 0,8-0,9 % Si+P, maar het dalpunt verplaatst van 0,12 % bij 440 °C naar 0,2 % bij 460 °C. Daarbovenop blijft de hoogte van het dalpunt, dus de dikte van de zinklaag, ongewijzigd.



Figuur 2.2-9 Invloed Si+P en de zinkbadtemperatuur op de zinklaagdikte [5]

### 2.2.2.3 Gevolg sandelin-effect

De vorming van de verdikte ijzer-zinklegeringslaag aan het oppervlak zorgt voor een grillige structuur en/of een matte, ruwe en donker grijze kleur, welke afwijkt van het normale glanzende, blauwachtige uitzicht van een gegalvaniseerd staal, zie Figuur 2.2-10. Dit normale uitzicht wordt bepaald door een nagenoeg zuivere zinklaag bovenop het oppervlak. Door de reactiesnelheid van de vorming van deze lagen kan de dikte van de coating sterk afwijken alsook de corrosieweerstand en adhesie kunnen laag uitvallen. Bovendien is de structuur van de verdikte zinklaag vrij open waardoor bij het aanbrengen van verfsystemen en vooral poedercoating kleine kratertjes en blaasjes kunnen ontstaan. [12, 14, 21]



Figuur 2.2-10 Visueel verschil door verschil in staalsamenstelling [22]

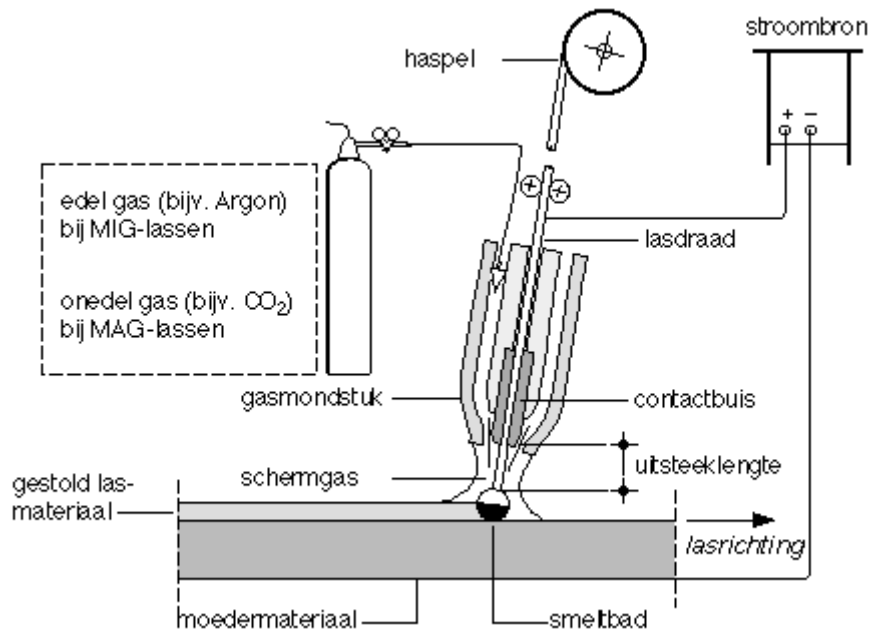
## 2.3 Het lasproces: halfautomaatlassen

### 2.3.1 Inleiding

Het MIG/MAG lasproces wordt omwille van zijn veelzijdigheid en snelheid zeer regelmatig toegepast. Voor toepassingen waarbij het mogelijk is wordt steeds naar dit lasproces gegrepen, vandaar dat dit onderzoek uitsluitend handelt over het MIG/MAG lasproces. [23]

Bij het halfautomaatlassen wordt een elektrische boog tot stand gebracht tussen het werkstuk en een continu afsmeltende draadelektrode. Het halfautomaatlassen is een gasbooglasproces, wat wil zeggen dat de toevoegdraad en het smeltbad door een beschermgas worden afgeschermd tegen de inwerking van zuurstof en stikstof uit de lucht. Eveneens vormt bij een gasbooglasproces elektrische energie de warmtebron. Halfautomaatlassen wordt aangeduid door de afkortingen MIG (Metal Inert Gas) of MAG (Metal Active Gas), afhankelijk van het type beschermgas. In de ASME Code wordt de afkorting GMAW gebruikt wat staat voor 'Gas Metal Arc Welding'. In Figuur 2.3-1 wordt de opstelling van het halfautomaatlasproces op schematische wijze weergegeven. [24, 25]



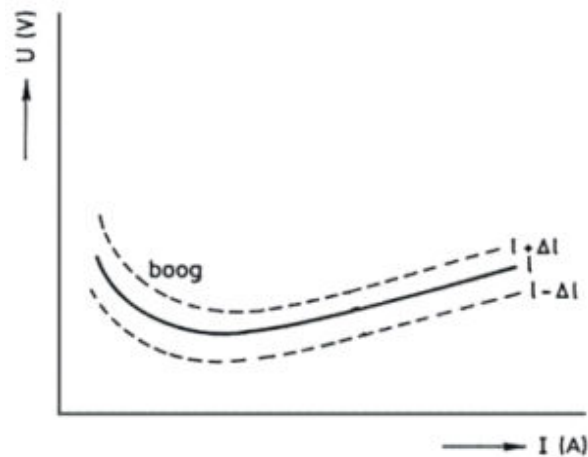


Figuur 2.3-1 Schematische voorstelling MIG/MAG lassen [26]

## 2.3.2 Karakteristieken

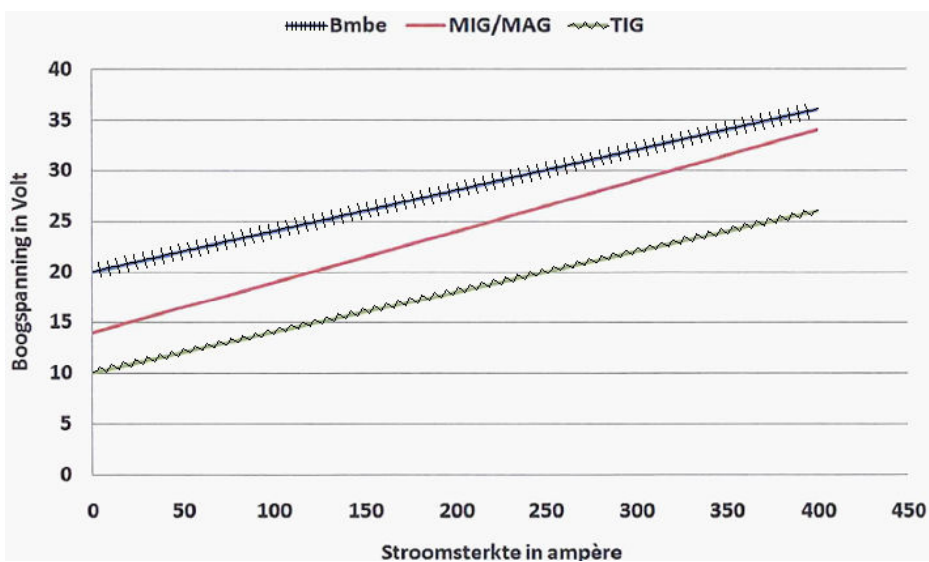
### 2.3.2.1 Boogkarakteristiek

De boog wordt gestart door een kortsluiting die ontstaat doordat de continu aangevoerde draad het werkstuk raakt. De kortsluiting leidt de ionisatie van het beschermgas in. Eenmaal de boog gestart, situeert deze zich tussen het toevoegmateriaal, dit is een continu aangevoerde draad, en het basismateriaal. De boog is een plasma en bijgevolg een elektrische geleider. De ionen en elektronen worden door de stroom geproduceerd. Bij een bepaalde stroom en een bepaalde booglengte ontstaat een stabiele situatie, die gedurende een zekere periode kan worden aangehouden. Bij een te grote booglengte ( $> 20$  mm) kan de boog doven doordat de afstand door de elektronen niet kan overbrugd worden. Een te kleine booglengte kan echter leiden tot het aan elkaar smelten van de oppervlakken waartussen de boog brandt, wat een kortsluiting veroorzaakt. De gehanteerde stroomsterkte en de lasspanning hebben een bepaalde relatie. Deze relatie wordt onder andere bepaald door het beschermgas en lastoevoegmateriaal. Het verloop van de spanning en stroomsterkte van een boog wordt de boogkarakteristiek genoemd (Figuur 2.3-2). Deze karakteristiek bevat een gekromd en een lineair gedeelte. In het lineair gedeelte brandt de boog stabiel, in het gekromde gedeelte is de ionisatiegraad te laag om de boog stabiel te houden. [24]



Figuur 2.3-2 Boogkarakteristiek [24]

Lineaire ijklijnen worden opgesteld om eenduidige waarden te verkrijgen voor de spanning en de stroomsterkte bij variaties van de booglengte tijdens het lassen (Figuur 2.3-3). In moderne apparatuur wordt niet meer met een ijklijn gewerkt, desondanks zijn de stroom- en spanningsparameters conform met de ijklijn afgeregeld. [27]

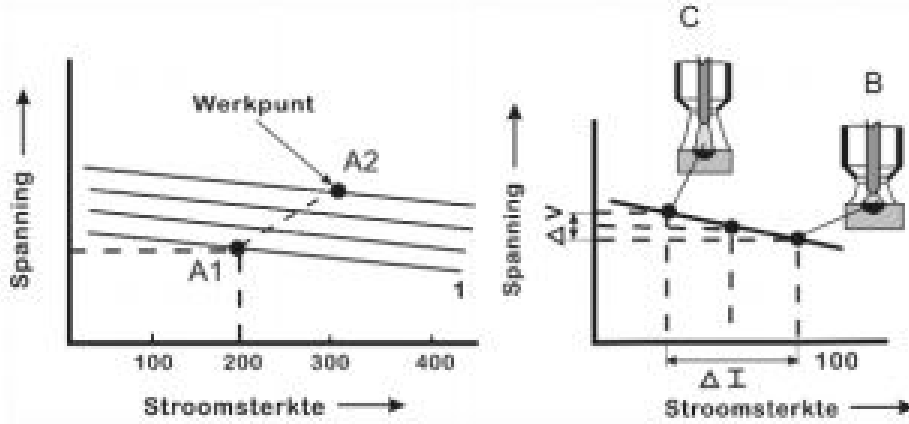


Figuur 2.3-3 Ijklijnen van booglasprocessen [27]

### 2.3.2.2 De karakteristiek van de stroombron

Een stroombron heeft twee stroom-/spanningskarakteristieken, een statische en een dynamische. De statische karakteristiek van de stroombron kan ofwel dalend ofwel nagenoeg vlak zijn. Deze karakteristiek bepaalt hoe de stroombron reageert wat betreft de grootte van de stroomsterkte en de spanning, bij een wisselende belasting. De boog die wordt onderhouden tijdens het lassen vormt de belasting en ook bij variatie in de booglengte ontstaat een wijziging van deze belasting. Daarop reageert de stroombron dan volgens de karakteristiek. De dynamische karakteristiek is moeilijker te achterhalen. Deze bepaalt mede het gedrag van de stroombron tijdens het lassen. [24]

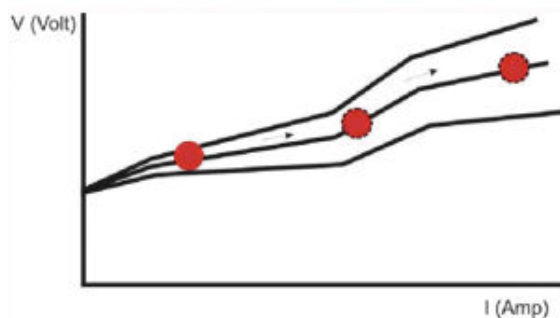
Bij MIG/MAG lassen wordt uitsluitend gewerkt met een stroombron met een nagenoeg vlakke karakteristiek, afgebeeld op Figuur 2.3-4. Deze karakteristiek wordt gebruikt voor processen waarbij een constante draadsnelheid wordt gehanteerd en waarbij de draad voldoende dun is. De stroombron wordt ook aangeduid met CP (Constant Potential) of CV (Constant Voltage). Aangezien een dalende karakteristiek in het halfautomaatlassen niet aan bod komt, wordt deze niet verder besproken. [24, 27]



**Figuur 2.3-4 Vlakke karakteristiek van een stroombron [24]**

Bij een stroombron met vlakke karakteristiek verandert de stroomsterkte bij een booglengtevariatie met als doel het constant houden van de booglengte. De spanning blijft nagenoeg constant. De draadsnelheid moet gelijk zijn aan de afsmeltsnelheid bij een bepaald werkpunt. Indien de booglengte stijgt, ten gevolge van een daling van de draadsnelheid, daalt de stroom waardoor minder draad wordt afgebrand en de booglengte dus terug korter wordt. Een nieuw werkpunt wordt gevormd met een lagere draadsnelheid en een lagere afsmeltsnelheid. Indien de booglengte daalt, door een stijging van de draadsnelheid, stijgt de stroom waardoor meer draad wordt afgebrand en de booglengte vervolgens weer langer wordt. In deze situatie wordt tevens een nieuw werkpunt gevormd. Dit effect treedt behalve bij draadsnelheidsvariëaties ook op bij booglengtevariëaties en wordt het zelfregulerend effect van het MIG/MAG proces genoemd. [24, 27]

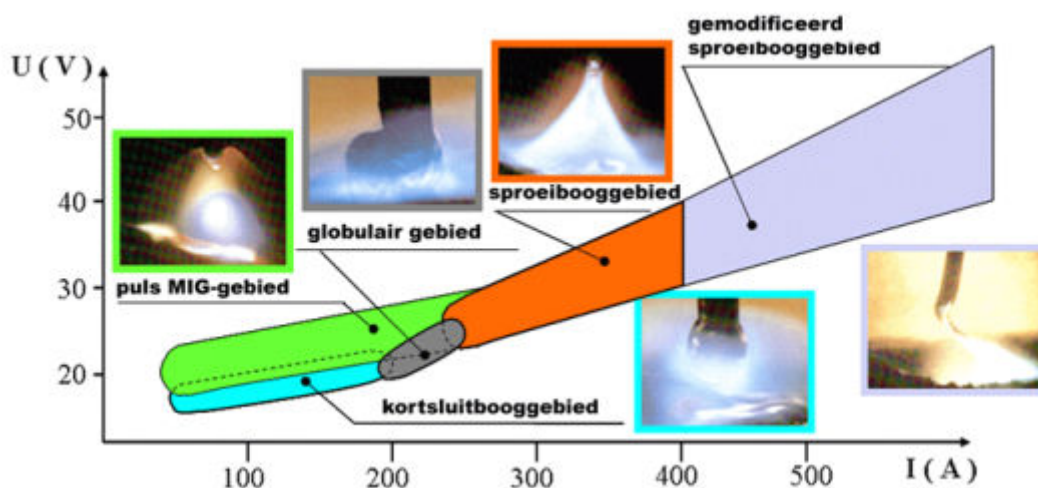
Moderne stroombronnen bevatten geen karakteristieken, maar op deze bronnen kan elk willekeurig werkpunt ingesteld en verplaatst worden over het volledige bereik van de stroombron, weliswaar volgens vastgestelde lijnen. Deze voorgeprogrammeerde lijnen worden synergische lijnen genoemd. Fabrikanten van stroombronnen programmeren voor elke materiaalsoort en -dikte op basis van hun ervaring zulke synergische lijnen (Figuur 2.3-5). [24, 27]



**Figuur 2.3-5 Voorgeprogrammeerde synergische lijnen [24]**

### 2.3.3 Methoden van druppelovergang

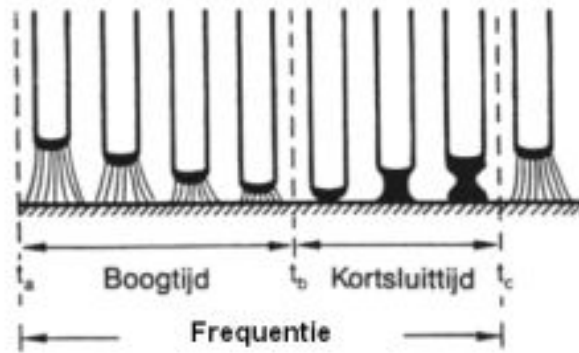
MAG lassen kan worden toegepast met verschillende boogtypen, zo worden de kortsluitboog en de open boog onderscheiden. De methode van materiaaloverdracht wordt vastgelegd door de instelling van de stroombron, de keuze van het beschermgas en het lastoevoegmateriaal. De verschillende boogtypen komen tot stand door het werkpunt, het snijpunt van de boogkarakteristiek en de (vlakke) statische karakteristiek van de stroombron, te verschuiven. De verschillende domeinen, telkens met hun typische boog, worden op Figuur 2.3-6 afgebeeld. Het open boog type kan nog verder worden onderverdeeld in de globulaire boog, de pulsboog, de sproei-boog en de gemodificeerde sproei-boog of roterende boog. [24, 25, 27]



Figuur 2.3-6 Schematische ligging van de booggebieden bij het MAG lassen [24]

#### 2.3.3.1 Kortsluitbooglassen

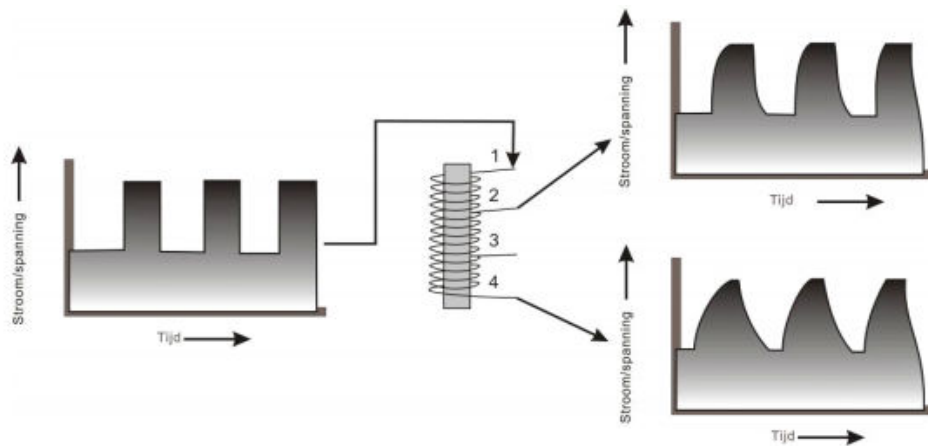
Het gebied van het kortsluitbooglassen bevindt zich links onderaan in het stroom-spannings-diagram. De boogenergie is door de lage stroom en spanning uiteraard relatief klein en blijkt onvoldoende om gedurende een langere tijd een open boog in stand te kunnen houden. De druppelovergang ontstaat doordat de lasdraad kortsluiting met het werkstuk maakt en er bijgevolg een hoge kortsluitstroom optreedt. De stroom in de draad induceert elektromagnetische krachten die de druppelafplitsing tot stand brengen, het zogenaamde 'pinch-effect'. Na de kortsluiting ontstaat een open boog, welke zorgt voor het smelten van de lasdraad, maar vrijwel onmiddellijk weer uitdooft. Deze cyclus herhaalt zich weer wanneer de continu aangevoerde draad het werkstuk raakt en opnieuw kortsluiting ontstaat (Figuur 2.3-7). [24, 25]



**Figuur 2.3-7** Cyclus van het kortsluitbooglasproces [24]

De kortsluitfrequentie ligt doorgaans tussen 30 en 200 Hz. Deze frequentie wordt verhoogd door een hogere draadsnelheid te hanteren, de afgesmolten metaaldruppels zijn dan ook kleiner. De kortsluitingen zijn niet zichtbaar, de lasser ziet een continu brandende boog. Desondanks zijn de verschillende kortsluitingen wel hoorbaar, dit geluid kan worden beschreven als ‘knetteren’. [24]

Kortsluitbooglassen wordt vanwege de lagere stroomsterkte toegepast op dunnere materialen, bij doorlassingen en bij lassen in positie. Het nadeel van dit proces is de aanwezigheid van spatten. Tijdens de kortsluiting neemt de stroom zeer snel toe tot de kortsluitwaarde wordt bereikt zodat de insnoering eveneens zeer snel gebeurt. Deze snelle insnoering kan leiden tot een explosieve verdamping van het ingesnoerde gedeelte van de lasdraad waardoor spatten ontstaan. Deze snelle toename van de stroom kan worden verlaagd door de toepassing van een smoorspoel die de zelfinductie in het lascircuit verhoogt (Figuur 2.3-8). [24, 25, 28]



**Figuur 2.3-8** Invloed van de smoorspoel op het verloop van de spanning en stroom bij plotse variaties [24]

### 2.3.3.2 Open booglassen

Bij toepassing van een hogere stroom en spanning wordt het overgangs- of transitiepunt overschreden en is dus voldoende boogenergie beschikbaar om een open boog continu in stand te kunnen houden. Dit overgangspunt is afhankelijk van onder andere de stroomsterkte en spanning, het type beschermgas en het type lasdraad. [24, 25]

#### ***Globulaire boog***

Wanneer met een open boog wordt gelast met een relatief lage stroomsterkte ontstaat een globulaire boog. De boogenergie is voldoende groot om de boog te onderhouden, maar de elektromagnetische krachten zijn te klein om kleine druppels te kunnen afsplitsen. De druppelafplitsing geschiedt meer door de zwaartekracht waardoor grotere druppels ontstaan. Dit proces veroorzaakt veel spatten en de boog brandt onrustig. [24, 25]

#### ***Sproeihoog***

Bij het verhogen van spanning en stroom vanuit het kortsluitbooggebied ontstaat een boog waarbij het materiaal wordt afgesplitst in de vorm van een nevel van fijne metaaldruppels, de zogenaamde sproeihoog. Het smeltbad is dun vloeibaar en een grote inbranding wordt veroorzaakt door de hogere warmte-inbreng en de grotere snelheid van de metaaldruppels. Door deze eigenschappen kan een sproeihoog enkel worden toegepast in lassen zonder vooropening en in de posities waarbij een dun vloeibaar smeltbad geen probleem vormt zoals bij onder de hand lassen en bij staande hoeklassen. Sproeihooglassen is zeer geschikt voor het lassen van dikkere materialen aangezien een hogere draadsnelheid dient gehanteerd te worden vanwege de hogere stroomsterkte. De verhoging van de draadsnelheid leidt tot een hogere neersmeltsnelheid. De sproeihoog wordt meestal gebruikt in de vlakke positie. [24, 25, 28]

#### ***Pulsboog***

Bij dunne materialen is een lage stroomsterkte vereist vanwege de lage maximale warmte-inbreng. Om dit toch nog te kunnen toepassen met een open boog is het pulslassen ontwikkeld. Bijvoorbeeld bij het lassen van aluminium is een open boog vereist voor het wegbranden van de oxidelaag, echter is de toegelaten warmte-inbreng laag. Hier biedt het pulslassen de oplossing. Het principe berust op de toepassing van twee verschillende stroomsterktes, namelijk de basisstroom en de puls- of piekstroom. Naast de instelling van de grootte van de stroomsterktes dient voor beide stromen ook de juiste stroomtijd te worden ingesteld. De pulsstroom ligt boven het overgangspunt en zorgt voor de druppelafplitsing, terwijl de basisstroom net voldoende hoog is om de open boog in stand te houden. Op deze manier wordt een lagere gemiddelde stroom bereikt en vervolgens dus ook een beperkte warmte-inbreng. Het smeltbad is bijgevolg klein waardoor lassen in alle posities mogelijk wordt. Ter behoud van een stabiele procesvoering is het belangrijk dat telkens één druppel per puls wordt afgesmolten. Bij synergische puls-MIG apparatuur is de draadsnelheid aan de puls frequentie gekoppeld zodat telkens één druppel afsplitst. Na het aangeven van het lasdraadtype, de draaddiameter en het beschermgas, kan een draadsnelheid worden gekozen waarbij door de synergische instelling van de machine automatisch wordt gelast met één druppel per puls. Een voordeel ten opzichte van kortsluitbooglassen is dat bij pulslassen minder spatten ontstaan. Met het pulslassen wordt een gecontroleerde en stabiele boog verkregen. [24, 25, 28]

### ***Gemodificeerde sproeiboog of roterende boog***

Wordt met nog hogere stroom en spanning gewerkt dan ontstaat een roterende boog. Door een grotere uitsteeklengte te hanteren wordt deze boog nog meer bevorderd. Door weerstandverhitting verweekt de lasdraad en begint deze ten gevolge van de inwerkende elektromagnetische krachten te roteren. Hier wordt ook een hoge lassnelheid bereikt doordat een hoge draadsnelheid kan worden toegepast. Het lassen met een roterende boog is een zeer efficiënt proces, echter ontstaat een groot lasbad waardoor enkel onder de hand kan worden gelast. Een tweede nadeel is dat andere eisen worden gesteld aan het apparaat en dat dit dan ook duurder is. [24, 25]

### **2.3.4 Beschermgassen voor het lassen van on- of laaggelegeerd staal**

De keuze van het geschikte beschermgas is van groot belang bij het MIG/MAG lasproces voor de uiteindelijke kwaliteit van de lasverbinding. De kwaliteit van de lasverbinding wordt onder andere gekenmerkt door het uiterlijk, de geometrie, de mechanische eigenschappen en de chemische samenstelling van de las, het spatgedrag, de afwezigheid van lasfouten, ... De functie van een beschermgas wordt dus zeker niet beperkt tot het beschermen van de lasdraad en het smeltbad tegen de invloed van de omringende lucht. Het beschermgas heeft ook invloed op de boogvorming, oppervlaktespanning, inbrandingsdiepte, bevochtiging tijdens het lassen, uitgezonden elektromagnetische straling van de boog (UV, IR), de hoeveelheid en samenstelling van de ontwikkelde lasrook, ... [24, 25]

Twee soorten gassen kunnen onderscheiden worden, zo bestaan enerzijds inerte gassen en anderzijds actieve gassen. Inerte gassen worden gehanteerd bij MIG lassen en reageren niet met andere elementen. Tot deze categorie behoren de zogenaamde edelgassen zoals argon en helium en worden nagenoeg uitsluitend gebruikt voor het lassen van non-ferromaterialen. Het lassen van staal met zuivere edelgassen is minder toepasbaar omdat dan een onstabiele boog ontstaat. Lassen van staal met 100 % argon zorgt voor een ongerichte boog en een bolle las, dat kan voorkomen worden door toevoeging van een oxiderend gas zoals CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>. Actieve gassen worden gebruikt bij MAG lassen en reageren bij het lassen wel met andere elementen. Voorbeelden van actieve gassen zijn koolzuurgas en stikstof. De reactiviteit van actieve gassen resulteert in afbrand van legeringselementen, maar beïnvloedt tevens de grootte van de overgaande metaaldruppels, het type druppelovergang en de geometrie van de las. CO<sub>2</sub> veroorzaakt een sterke insnoering van de boog, enerzijds door de hoge warmtegeleiding en anderzijds door de benodigde dissociatie energie. Koolzuurgas kan ongemengd worden toegepast, weliswaar enkel in het kortsluitbooggebied. Het gebruik van zuiver CO<sub>2</sub> brengt steeds een grove en zijdelingse druppelovergang met zich mee, ook wel 'repelled transfer' genoemd, doordat de overgangsstroomsterkten zo hoog liggen dat ze praktisch onbruikbaar zijn. Een ruwe lasnaad en veel spatten zijn hier het gevolg van. [24, 25]

Een fijne druppelovergang wordt steeds verkozen, omdat het aantal spatten dan beperkt blijft. Onder andere voor deze reden geniet bij het lassen van staal een menggas de voorkeur. Doorgaans bestaan menggassen uit argon met een aanvulling van 15 tot 20 % CO<sub>2</sub>. Door toepassing van CO<sub>2</sub> wordt de boogenergie vergroot door enerzijds een hogere boogspanning en anderzijds de dissociatie van CO<sub>2</sub>. Door de hoge boogtemperatuur treedt dissociatie van CO<sub>2</sub> op, daarbij wordt CO en O gevormd. Op het werkstuk vindt de omgekeerde reactie plaats en daarbij komt warmte vrij. Deze warmte wordt afgegeven aan het smeltbad. Door de verhoogde spanning en de extra warmte wordt een dun vloeibaar smeltbad, een brede inbranding en een goede ontgassing van het smeltbad verkregen. Bij een groter percentage CO<sub>2</sub> wordt een diepere inbranding verkregen. In plaats van een diepere inbranding kan ook met een hogere lassnelheid gewerkt worden. Beschermgassen met meer dan 30 % CO<sub>2</sub> gedragen zich

als zuivere CO<sub>2</sub> gassen, wat niet gewenst is. Een groter zuurstofgehalte in het beschermgas resulteert in een vloeibaarder smeltbad, omdat de oppervlaktespanning wordt verlaagd. Net zoals bij CO<sub>2</sub> ontstaat er dissociatie in de boog en recombinitie op het werkstuk, doch is het effect minder sterk. In moderne beschermgassen wordt gewerkt met een lager CO<sub>2</sub> gehalte en kleine toevoegingen van O<sub>2</sub> tot maximaal 5 %. Een bijkomend voordeel van menggassen is dat de toevoegingen van CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> of H<sub>2</sub> inwerken op het smeltbad en de oppervlaktespanning verlagen. Dit heeft als gevolg dat bij zulke beschermgassen het overgangspunt zich bij een lagere stroomsterkte en spanning situeert, de bevochtiging en de druppelafplitsing worden dus bevorderd. Het resultaat is een beter aangevloede las. Bij lassen met een menggas brandt de boog stabiel en wordt een betere inbrandingsvorm van de las verkregen ten opzichte van met zuiver argon. Desondanks moet opgepast worden met toevoegingen van CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> voor het groter risico op porositeiten, voornamelijk indien onvoldoende reducerende elementen, zoals silicium en mangaan, in de lasdraad worden toegevoegd. [24, 25]

**Tabel 2.3-1 Overzicht eigenschappen gassen [29, 30]**

Eigenschap	Gas			
	Argon	CO <sub>2</sub>	Helium	O <sub>2</sub>
Ionisatie energie [eV]	15,7	13,7	24,5	12,1
Warmtegeleiding [W/m K] bij 1atm en 0°C	0,016	0,015	0,146	0,024
Soortelijke massa t.o.v. lucht	1,38	1,53	0,138	1,105

In Tabel 2.3-1 worden enkele eigenschappen van een aantal gassen opgesomd. Ionisatie is het proces waarbij atomen een of meerdere elektronen verliezen, het overblijvende deel van het atoom is een ion met een positieve lading. Het elektron is een onafhankelijk deeltje geworden dat vrij door het gas beweegt. Helium heeft een opmerkelijke grotere ionisatie energie dan argon wat een hogere boogspanning met zich meebrengt, deze zorgt enerzijds voor een grotere warmte-afgifte aan het basismateriaal, maar anderzijds voor een moeilijker boogontsteking. Bij de soortelijke massa valt op te merken dat argon en CO<sub>2</sub> duidelijk zwaarder zijn dan lucht, door deze eigenschap zijn dit ideale gassen om het smeltbad optimaal af te dekken. De kleinere dichtheid van helium zorgt er dan weer voor dat een veel grotere hoeveelheid gas moet worden aangevoerd. [29, 31]



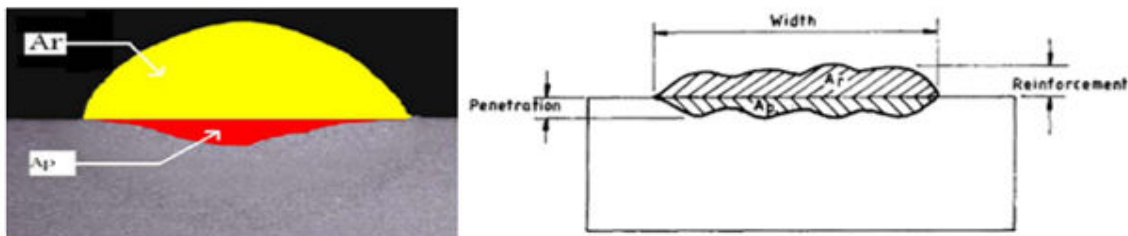
## 2.4 Opmenging en geometrische kenmerken van het lasbad

### 2.4.1 Inleiding

Bij het GMAW lasproces kan de las door vele kenmerken worden gedefinieerd. Een van deze kenmerken is de opmenging van de las. De opmenging kan worden gedefinieerd als de mate van verandering in de samenstelling van het neergesmolten metaal door menging met het moedermateriaal. Praktisch komt het neer op de verhouding van het penetratiegebied ten opzichte van de totale lasoppervlakte. In Figuur 2.4-1 wordt dit verduidelijkt met  $A_p$ , het oppervlak van het penetratiegebied of 'fusion area' en  $A_r$  de overdikte, ook wel 'deposit area' genoemd. [32, 33]

De opmenging wordt praktisch bepaald als:

$$\% \text{ opmenging} = \left( \frac{A_p}{A_p + A_r} \right) \times 100\%$$



Figuur 2.4-1 Badgeometrie [34, 35]

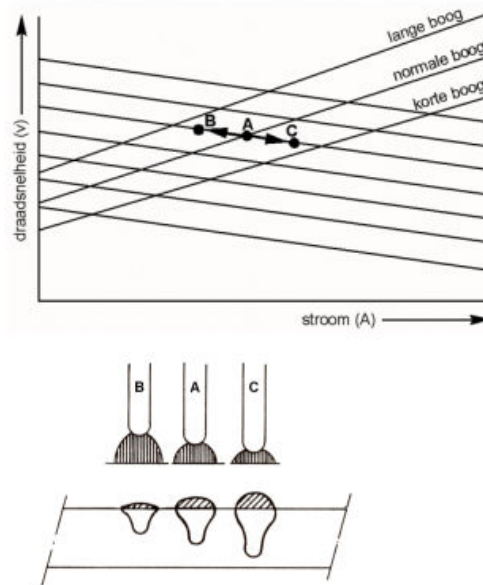
De opmenging kan sterk variëren met het gebruikte lasproces en met de gebruikte lasparameters. Een aantal variabelen welke effect hebben op de opmenging zijn onder andere de lasstroom, de boogspanning, de polariteit van de stroom, de elektrodediameter, de elektrode uitsteeklengte, de lassnelheid, de laspositie, de samenstelling van het beschermgas, ... Voor het MIG/MAG lasproces wordt meestal een opmenging tussen 30 à 50 % gevonden. [32, 36]

### 2.4.2 Parameters

Hieronder worden een aantal invloedsfactoren voor de geometrie van de lasnaad afzonderlijk besproken. De basisparameters van een lastoestel voor MAGlassen zijn de draadsnelheid en de lasspanning. Bij een toestel dat werkt met karakteristieken kan de lasspanning verhoogd worden door een volgende karakteristiek in te stellen. Meestal bestaat de lasregeling uit twee knoppen, één voor de grove regeling en een andere voor de fijnregeling. Telkens dienen de draadsnelheid en de spanning samen geregeld te worden om het gewenste resultaat te verkrijgen. Deze en andere invloedsrijke parameters zoals lasstroom, lassnelheid en werkstuk-mondstuk afstand worden besproken, waarbij eveneens de interactie tussen deze parameters wordt verduidelijkt. Uiteraard zijn dit niet de enige parameters, zo kan bijvoorbeeld het type lasproces of de aard van het beschermgas de geometrie beïnvloeden. [24, 25]

### 2.4.2.1 Draadsnelheid

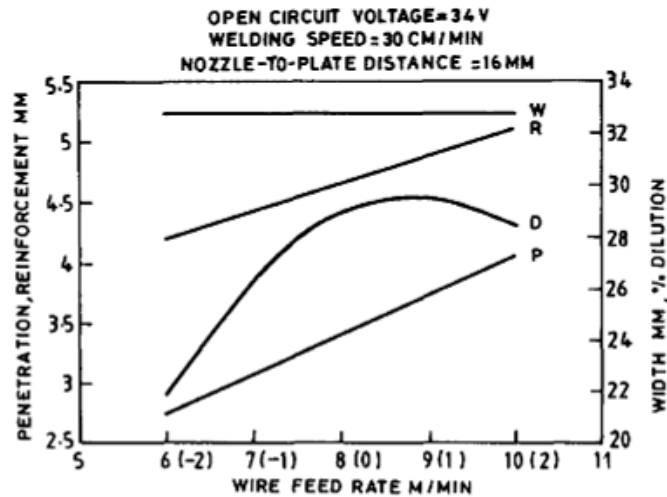
Aangezien wordt gewerkt met een vlakke karakteristiek (2.3.2.2) bepaalt de draadsnelheid de stroomsterkte. Op Figuur 2.4-2 wordt het werkpunt en de geometrie van de lasdoorsnede weergegeven bij variatie van de draadsnelheid. [24, 25]



**Figuur 2.4-2 Invloed van de draadsnelheid op de ligging van het werkpunt en de geometrie van de las [24]**

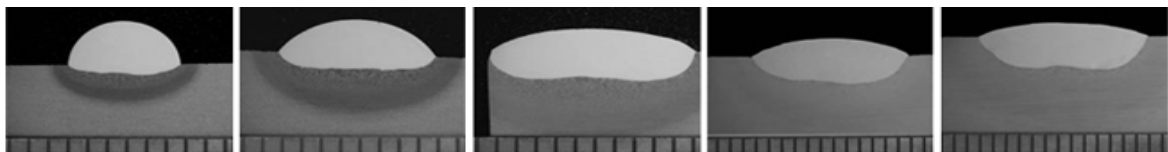
Verschillende onderzoeken [34, 37] tonen aan dat de draadsnelheid een significante invloed heeft op de opmenging. Bij GMAW leidt een verhoogde draadsnelheid tot een hogere stroom. Door de hoge lasstroom stijgt de warmte-inbreng per lengte-eenheid van de lasnaad wat de penetratiediepte vergroot. Bovendien zijn gesmolten druppels die zich aan het uiteinde van de lasdraad bevinden, welke een deel van het smeltbad vormen, oververhit. Deze extra warmte en grotere druppelvorming leidt tot een grotere penetratiediepte en dus een grotere opmenging. De diepte van de penetratie stijgt lineair bij stijging van de lasstroom. Een zeer lage lasstroom zorgt voor een onvoldoende penetratie en leidt zo tot accumulatie van lasmetaal op het basismateriaal. De draadtoevoer heeft een grotere invloed op de opmenging dan de lasspanning, de afstand tussen werkstuk en elektrode, de lassnelheid en de gasstroomsnelheid. [34, 38, 39]

Murugan en Parmar [35] toonden aan dat de penetratie (P) en overdikte (R) stijgen met een stijgende draadsnelheid en de opmenging (D) daarentegen slechts stijgt tot een bepaald maximum en daarna weer daalt, zie Figuur 2.4-3. Tevens merkten ze op dat de breedte (W) niet wordt beïnvloed door de draadsnelheid. Deze laatste opmerking wordt weerlegd door recenter onderzoek van Kannan en Yoganandh [40] die ook voor de breedte van het lasbad een stijging vonden bij een toenemende snelheid van de draadtoevoer.



**Figuur 2.4-3 Effect van draadaanvoer op de geometrie van het lasbad [35]**

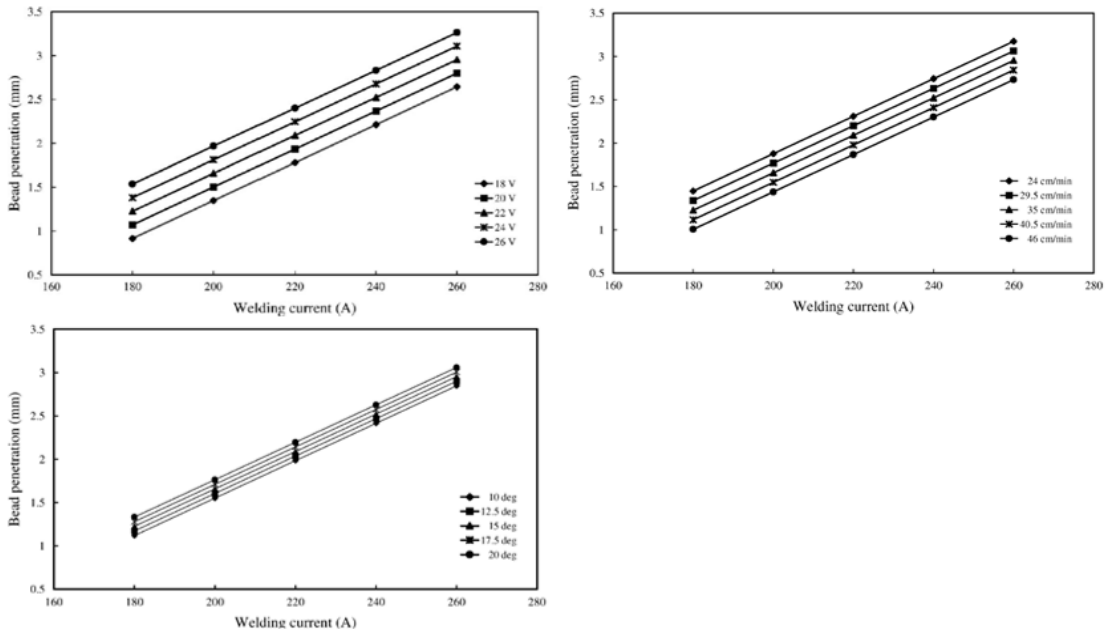
De variaties van de afmetingen van de lasrups bij stijging van de lasstroom worden weergegeven in Figuur 2.4-4. De resultaten van de experimenten tonen aan dat de breedte van de lasrups bijna lineair stijgt met de lasstroom voor constante waarden van de andere lasparameters. De diepte van de penetratie vertoont een verhoging, terwijl de lashoogte lichtjes daalt met stijging van de lasstroom. De mate van de stijging van de lasbreedte is significant hoger dan de mate van stijging of daling van de penetratiediepte of lashoogte. Deze resultaten suggereren een stijging van de hoeveelheid gesmolten basismateriaal wat zorgt voor een grotere opmenging. [32]



**Figuur 2.4-4 Macrografie van dwarsdoorsneden van enkelvoudige lasrupsen vervaardigd bij een lasstroom stijgend van 140-300A in stappen van 40A. Merk de verschillende vergrotingen van de figuren op, meetschaal is per mm. [32]**

Het effect van de stroom op de 'deposit area' is minimaal. Desondanks wanneer lasstroom samen met uitsteeklengte wordt bekeken, kan worden gezien dat bij grotere uitsteeklengtes de stroom wel een invloed heeft. [33]

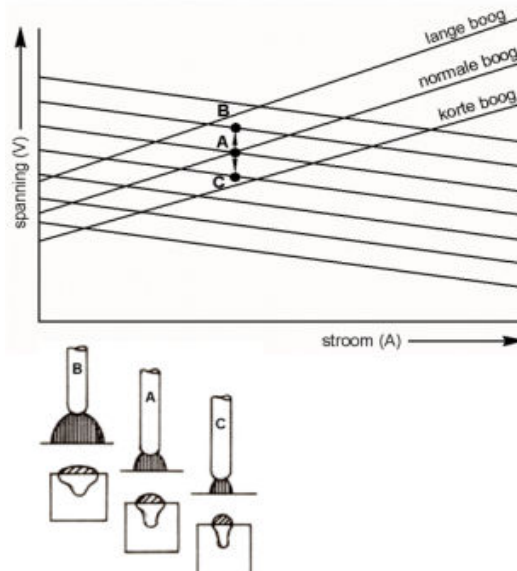
In Figuur 2.4-5 kunnen de verschillende relaties gezien worden tussen de lasstroom en de penetratiediepte met verschillende spanning, draadtoevoer en toortshoek. De relatie tussen lasstroom en penetratiediepte vertoont steeds een rechtevenredig verband ongeacht met welke van de drie parameters wordt gevarieerd.



**Figuur 2.4-5 Relatie tussen lasstroom en penetratiediepte met verschillende spanning, draadtoevoer en toortshoek [39]**

### 2.4.2.2 Lasspanning

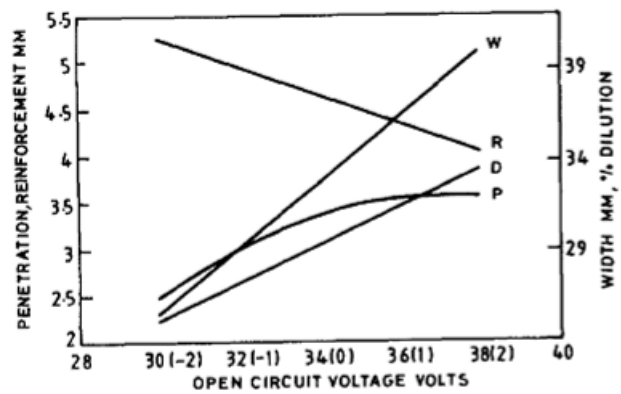
Bij verhoging van de lasspanning wordt het werkpunt verticaal verschoven naar de volgende karakteristiek (Figuur 2.4-6). De booglength wordt groter, de boogwarmte is minder groot ter hoogte van het werkstuk waardoor een bredere en minder diepe las wordt verkregen. [24, 25]



**Figuur 2.4-6 Invloed van ligging van het werkpunt en de geometrie van de inbranding bij variatie van de spanning [24]**

De open spanning heeft eveneens invloed op de opmenging, maar in mindere mate dan de draadsnelheid. Een toename van de open spanning resulteert in een toename van de boogspanning die bijgevolg de boogkegel vergroot waardoor de boog zich verspreidt over een groter oppervlak op het basismateriaal. Dat resulteert in een grotere lasnaadbreedte en een relatief minder diepe penetratie die bijgevolg in een lagere opmenging van het vulmetaal resulteert. [37]

Andere onderzoeken [35, 38, 39] tonen echter aan dat een grotere lasspanning een stijging van de penetratiediepte veroorzaakt, weliswaar tot een bepaald maximum bereikt is (Figuur 2.4-7). Het effect van de spanning op de penetratiediepte is veel kleiner dan het effect ten gevolge van de stroom. Studies [34, 35] tonen een grotere opmenging aan bij een toenemende lasspanning. Bij toenemende spanning is een daling van de 'deposit area' waar te nemen. [33, 35]

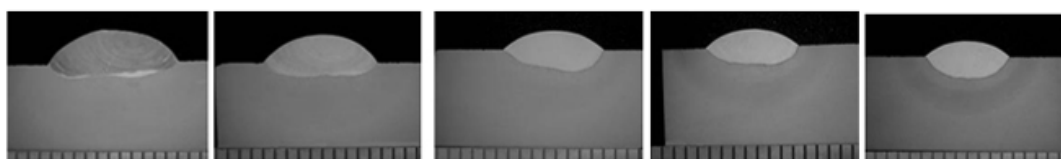


Figuur 2.4-7 Effect van spanning op de lasbadgeometrie [35]

### 2.4.2.3 Lassnelheid

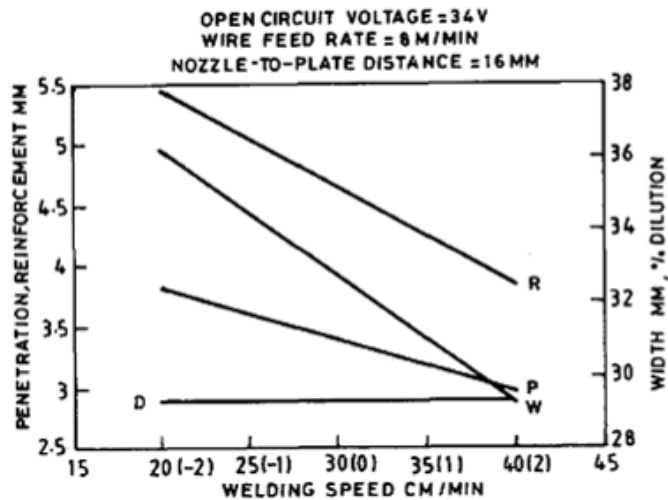
De lassnelheid is één van de minst significante variabelen die de opmenging beïnvloedt, dit is wellicht te wijten aan het feit dat elke wijziging in de lassnelheid alle dimensies van de lasnaad proportioneel beïnvloedt, zie Figuur 2.4-8. Bovendien is de smeltsnelheid van de draad niet afhankelijk van de lassnelheid welke een hogere stroom vereist voor haar samensmelting. Niettemin verhoogt de opmenging met verhoging van de lassnelheid omdat het nieuwe oppervlak van het basismetaal direct wordt blootgesteld aan de lasboog wat resulteert in meer smelting van het basismateriaal. De mate van de stijging is echter opmerkelijk lager dan met gevarieerde lasstroom. Bij hogere lassnelheden vertoont de opmenging een gestabiliseerde tendens. De lasbreedte daalt met stijging van de lassnelheid. De penetratiediepte blijft hetzelfde, bijna onafhankelijk van de lassnelheid. De lashoogte vertoont een daling met stijging van de lassnelheid. [32, 37]

Onderzoek van Aghakhani et al. [34] tekenen echter een kleinere opmenging op bij een grotere lassnelheid.



Figuur 2.4-8 Macrografie van dwarsdoorsneden van een enkelvoudige lasruips vervaardigd bij een toename van de lassnelheid van 40, 60, 100, 120 en 140 mm/min. Merk de verschillende vergrotingen van de figuren op, meetschaal is per mm. [32]

Volgens onderzoek [35, 39] leidt een grotere lassnelheid tot een kleinere penetratiediepte. Echter volgens [38] wordt bij een toenemende lassnelheid eerst een stijging van de penetratiediepte tot een maximale waarde waargenomen waarbij vervolgens de penetratiediepte daalt bij verdere stijging van de lassnelheid. Kannan en Yoganandh [40] stellen vast dat de penetratie stijgt op een constante wijze bij een stijgende lassnelheid aangezien met een lage lassnelheid de boog ongeveer verticaal gericht is. Zo verhindert het smeltbad het effect van de boog en voorkomt een diepere penetratie.



Figuur 2.4-9 Effect van lassnelheid op de badgeometrie [35]

In Figuur 2.4-9 is duidelijk dat de penetratiediepte, de overdikte en de breedte van het lasbad verminderen met toenemende snelheid, maar de opmenging niet significant wordt beïnvloed door de lassnelheid. [35, 39]

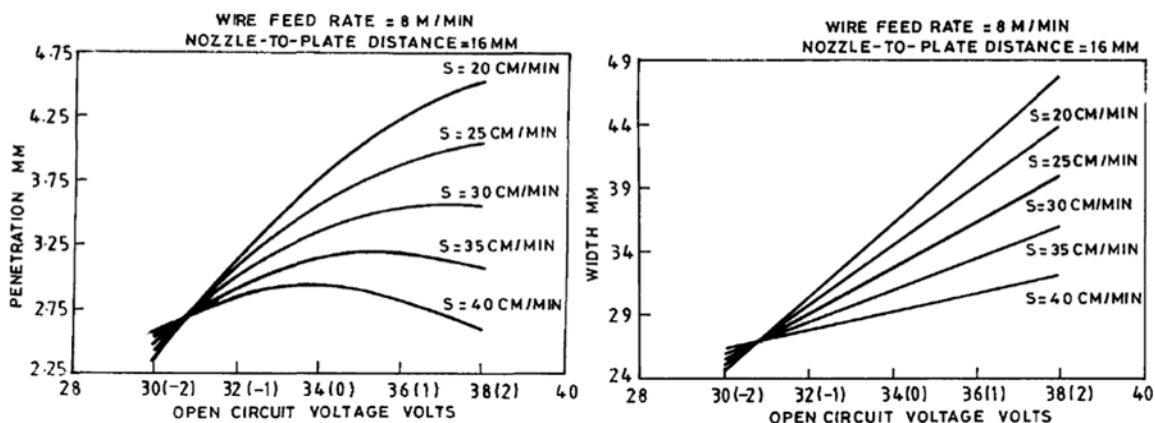
De hoogte van de overdikte en de breedte van het lasbad verminderen met stijging van lassnelheid. Dat komt door de verminderde warmte-inbreng per eenheidslengte van de lasnaad wanneer de lassnelheid toeneemt en minder toevoegmateriaal wordt gebruikt per eenheidslengte van de las. [40]

Een stijging van de ‘deposit area’ kan worden waargenomen bij stijging van de lassnelheid. [33]

#### 2.4.2.4 Lassnelheid en lasspanning

De toename van de opmenging bij stijgende lasspanning stijgt veel sterker bij een lagere lassnelheid. Wanneer twee lassnelheden worden vergeleken, wordt bij een bepaalde lasspanning de opmenging gelijk voor beide lassnelheden. De opmenging verkregen met lagere lassnelheid is hoger dan deze met hogere lassnelheid. Dit kan worden toegeschreven aan het feit dat voorbij het punt met gelijke opmenging het effect van de hogere warmte-inbreng speelt. De warmte-inbreng verhoogt de diepte van penetratie van de lasnaad en dus ook de opmenging. Dit heeft een groter effect dan de verhoogde penetratie door de directe beïnvloeding van de boog op het koude basismateriaal bij een hogere lassnelheid. [37]

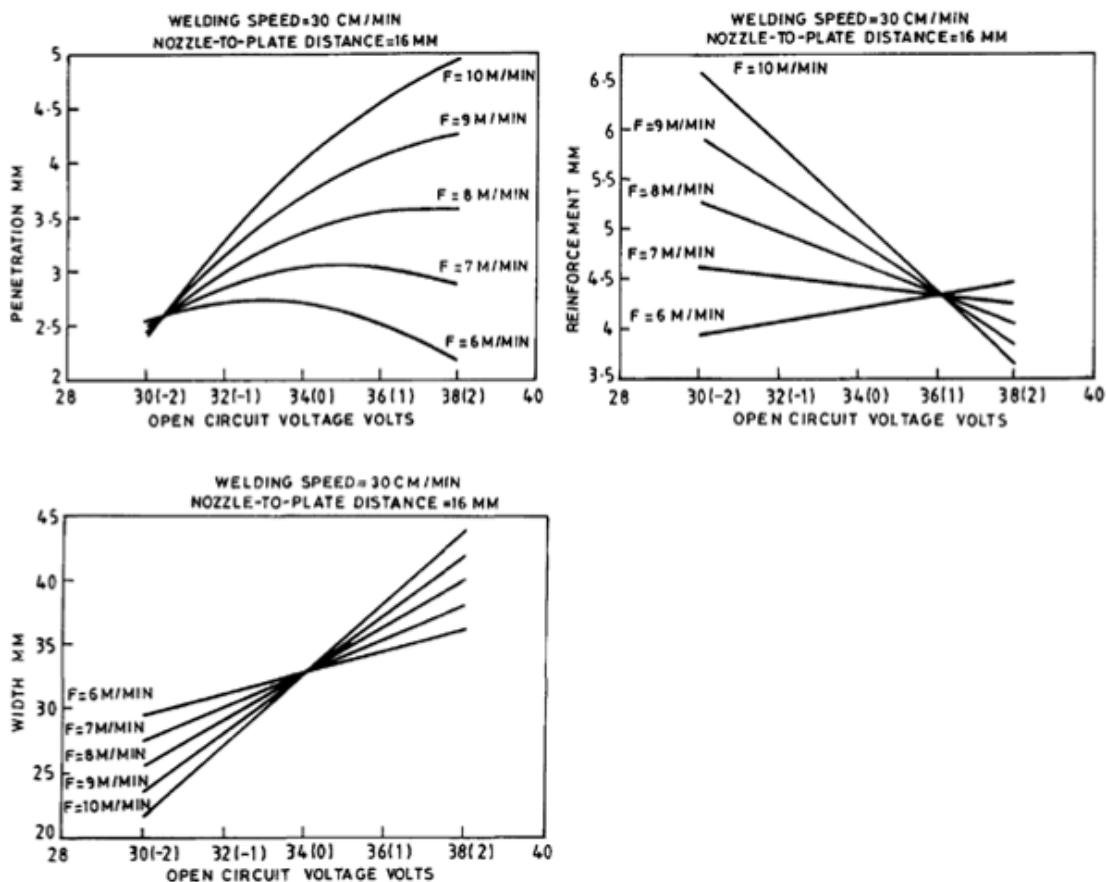
De penetratie stijgt met stijgende lasspanning maar daalt met stijgende snelheid. Dit komt door de reductie van warmte-inbreng wanneer de snelheid stijgt. In Figuur 2.4-10 kan worden gezien dat de penetratie en breedte van het lasbad sterker toeneemt bij lagere lassnelheden (S) ten opzichte van hogere lassnelheden. [35]



Figuur 2.4-10 Interactie tussen spanning en lassnelheid op de penetratie en de breedte van het lasbad [35]

#### 2.4.2.5 Draadsnelheid en lasspanning

Bij een stijgende lasspanning zorgt een lage draadsnelheid voor een kleine toename in penetratiediepte, dit ten opzichte van een hoge draadsnelheid die de penetratiediepte sterk doet stijgen. Bij een hoge draadsnelheid stijgt de lasstroom en dus ook de warmte-inbreng en dat leidt tot een grotere penetratiediepte. Figuur 2.4-11 toont aan dat bij een lage draadsnelheid (F) de penetratie licht stijgt met stijging van de spanning. Bij hogere draadsnelheden stijgt de penetratie sterk met stijging van de spanning. [35]



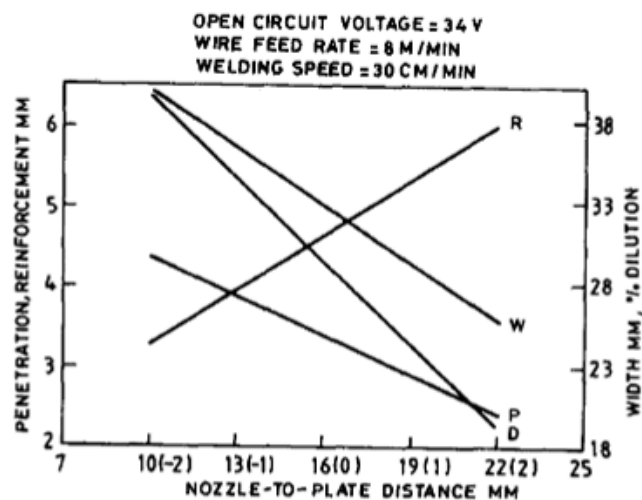
Figuur 2.4-11 Interactie tussen spanning en draadtoevoer op de penetratie, overdikte en breedte van het lasbad [35]

De overdikte daalt met stijging van de spanning wanneer de draadsnelheid constant wordt gehouden. Een hogere draadsnelheid zorgt bij kleine en middelmatige spanningen tot een verhoging van de overdikte, dat wordt veroorzaakt door de hogere afzettingsgraad bij hogere draadsnelheden. [35]

De breedte van het lasbad stijgt bij toenemende spanning, dat wordt veroorzaakt doordat een hogere spanning resulteert in een vergroting van de lengte en spreiding van de lasboog. Dit effect is meer overheersend bij hogere draadsnelheden, wat een gevolg is van een stijging van afzetting van metaal bij een hogere draadsnelheid. [35]

#### 2.4.2.6 Werkstuk-mondstuk afstand

Een grotere afstand tussen werkstuk en mondstuk, ook bekend als nozzle-to-plate distance (N), leidt tot een kleinere opmenging, penetratiediepte en breedte (Figuur 2.4-12). De overdikte stijgt met stijging van de afstand. [34, 35, 37]



Figuur 2.4-12 Effect van nozzle-to-plate afstand op de geometrie van het lasbad [35]

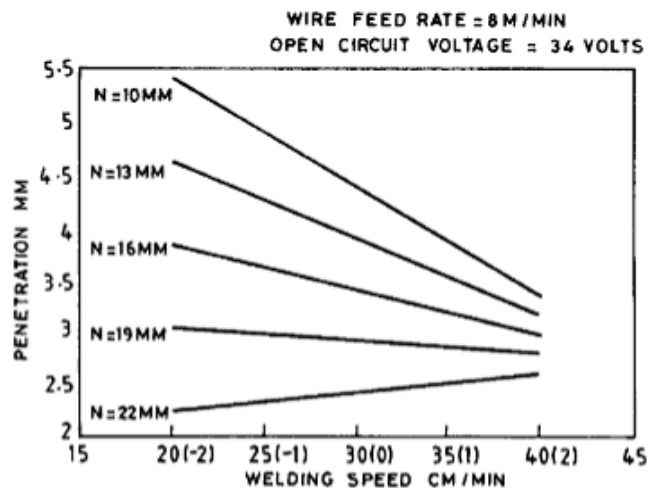
De afstand tussen mondstuk en werkstuk heeft een aanzienlijke invloed op de opmenging. Een toename van de afstand heeft een stijging van de smelthoeveelheid van de draad als gevolg door de ohmse verwarming ( $i^2R$ ). Deze verhoogde ohmse verwarming helpt bij het bereiken van de benodigde warmte voor het smelten van de draad, bijgevolg trekt de draad minder lasstroom uit de voedingsbron. Dit verlaagt de warmte-inbreng per eenheid lengte van de lasnaad en heeft zo een verkleining van het samensmeltingsgebied tot gevolg. De verhoogde afstand tussen mondstuk en werkstuk veroorzaakt een verspreiding van de energie van de boog op het basismateriaal. Dit resulteert in minder smelten van het basismateriaal waardoor vermindering van de opmenging optreedt. Een langere uitsteeklengte resulteert in een hogere 'deposit area'. De uitsteeklengte, welke de afstand is tussen het einde van het elektrisch contactpunt en het einde van de ongesmolten elektrode, heeft een relatief sterke invloed. [33, 37]



Volgens onderzoek [40] daalt de penetratiediepte in lichte mate met een toenemende afstand, maar stijgen de badbreedte en de hoogte van de overdikte bij een toenemende afstand tussen mond- en werkstuk. Een grotere afstand zorgt voor een stijging van de weerstand in het circuit, welke resulteert in een lagere stroom. Dat veroorzaakt een lagere warmte-inbreng per eenheidslengte van de lasnaad met een daling van de 'fusion area' als gevolg. Bijgevolg daalt de penetratiediepte. Een toenemende afstand zorgt voor een stijging van de booglengte, bijgevolg vergroot de breedte van het lasbad als gevolg van een bredere lasboog. De hoogte van de overdikte stijgt omdat hetzelfde volume materiaal wordt afgezet.

Bij interactie van de werkstuk-mondstuk afstand met de lasspanning, stijgt de opmenging bij stijgende lasspanning sneller bij een kleine afstand tussen werkstuk en mondstuk. [37]

Wanneer de interactie van de werkstuk-mondstuk afstand met de lassnelheid wordt bekeken (Figuur 2.4-13), blijkt dat de penetratie daalt met een stijgende afstand en lassnelheid. Dit is te wijten aan de kleinere warmte-inbreng per eenheidslengte bij een hogere lassnelheid en grotere afstand. Bij een bepaalde afstand keert echter deze trend, de penetratie stijgt bij stijgende snelheid. Echter is deze stijging klein. [35]

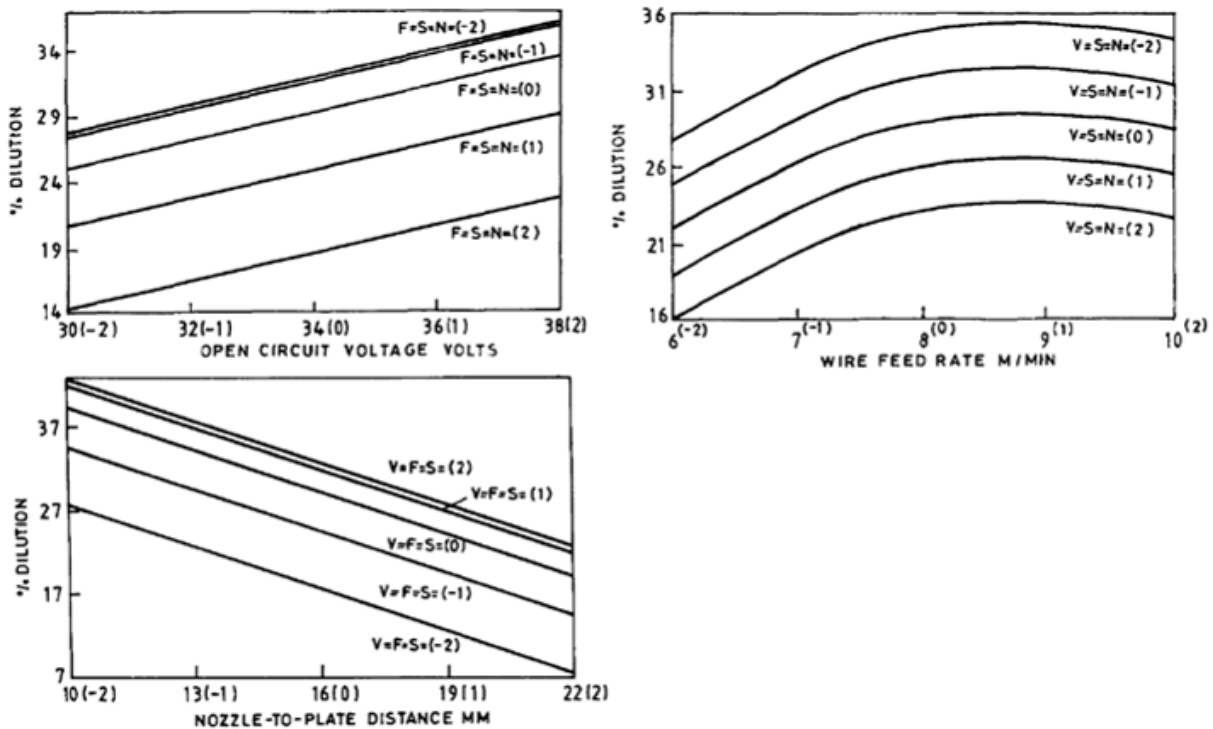


Figuur 2.4-13 Interactie tussen lassnelheid en afstand tussen werkstuk en mondstuk (N) op de penetratie [35]

De drie onderstaande figuren hebben een totaal verschillende trend (Figuur 2.4-15), bij variatie van de spanning stijgt de opmenging met stijging van de spanning, met variatie van de draadsnelheid stijgt de opmenging tot een maximum waarde en daalt vervolgens met stijging van de draadsnelheid, en bij de derde figuur daalt de opmenging met stijging van de afstand tussen plaat en mondstuk. De vermindering van opmenging ten gevolge van de toenemende afstand tussen plaat en mondstuk is significant, namelijk tot 20 %. De parameters die horen bij de drie figuren worden vermeld in Figuur 2.4-14. [35]

Parameter	Units	Notation	Factor levels				
			-2	-1	0	1	2
Open-circuit voltage	volt	$V$	30	32	34	36	38
Feed rate	m/min	$F$	6	7	8	9	10
Welding speed	cm/min	$S$	20	25	30	35	40
Nozzle-to-plate distance	mm	$N$	10	13	16	19	22

Figuur 2.4-14 Bijhorende parameters bij de drie onderstaande figuren [35]



Figuur 2.4-15 Effect van spanning, draadsnelheid en afstand mondstuk-werkstuk en onderlinge interacties op de opmenging [35]

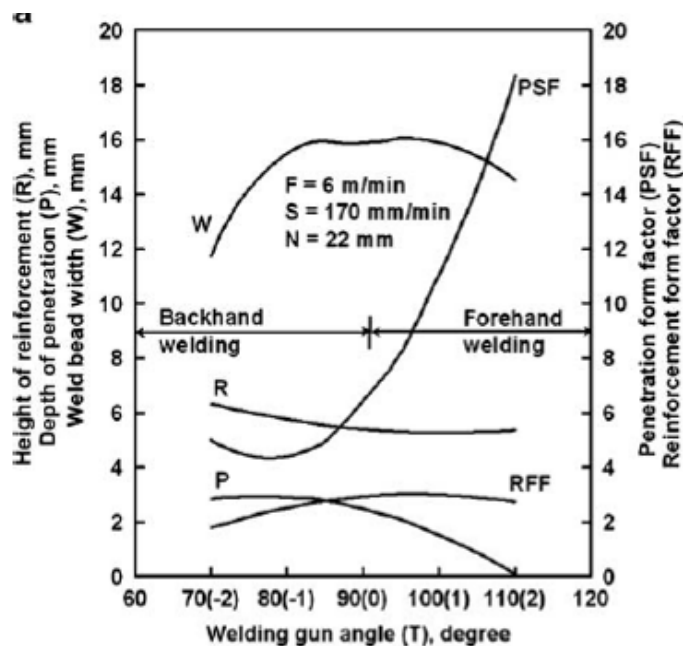
### 2.4.2.7 Elektrodepolariteit

Een positieve polariteit van de elektrode heeft een vergroting van de lasrupsbreedte als gevolg. Een duidelijke grotere 'deposit area' wordt bereikt wanneer de elektrode negatief is ten opzichte van de elektrode positief is. Het effect van de elektrodepolariteit is significant. [33] [41]

### 2.4.2.8 Hoek lastoorts

De diepte van de penetratie, de mate van de overdikte en de breedte van het lasbad verminderen met stijging van de hoek van de lastoorts vanuit zijn centerpunt (90°) naar de bovengrens (110°), zie Figuur 2.4-16. Bij slepend lassen (hoek > 90°), wanneer de hoek wordt vergroot, gaat het gesmolten metaal onder de boog vloeien wat resulteert in een kleinere penetratie, een kleinere breedte van het lasbad en een verminderde hoogte van de overdikte.

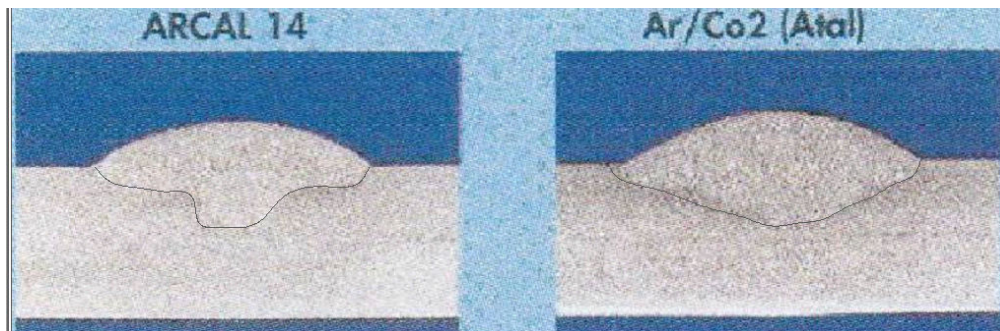
De diepte van de penetratie en hoogte van de overdikte stijgen en de breedte van het lasbad daalt met daling van de hoek van de lastoorts vanuit het centerpunt (90°) naar de ondergrens (70°). Bij stekend lassen (hoek < 90°) wanneer de hoek wordt verkleind gaat de druk van de boog het gesmolten metaal opscheppen vanuit onder de boog, de diepte van de penetratie en de hoogte van de overdikte stijgen terwijl de breedte van het lasbad vermindert. [40]



Figuur 2.4-16 Invloed van de hoek van de lastoorts op de badgeometrie [40]

### 2.4.2.9 Beschermgas

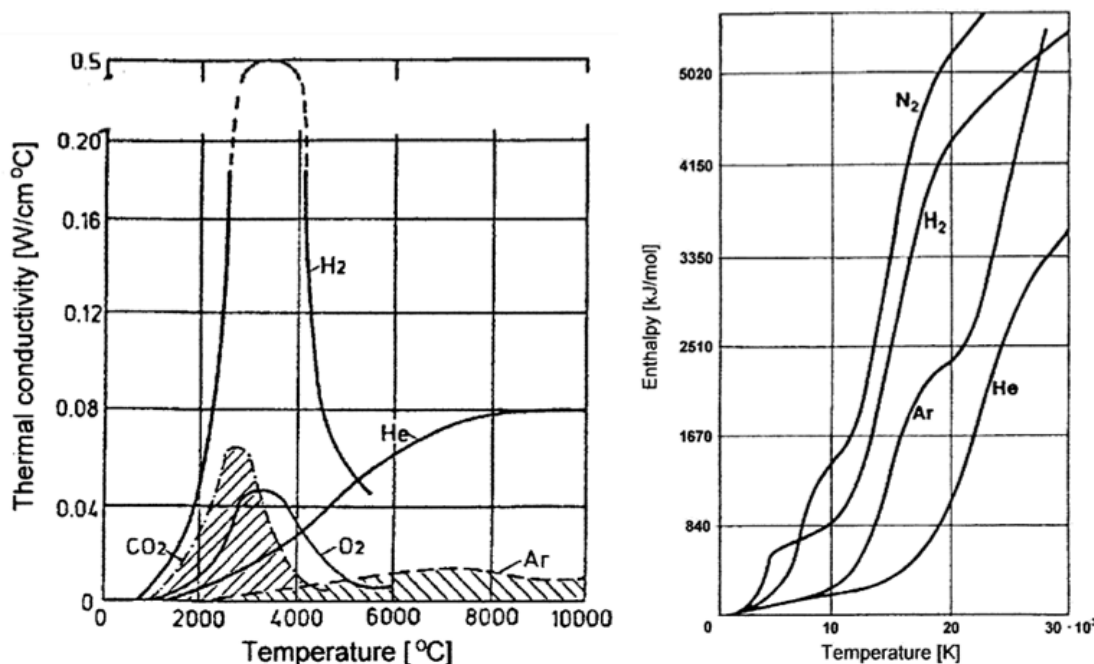
Zoals in 2.3.4 reeds werd aangehaald zorgt lassen van staal met 100 % argon voor een ongerichte boog en een bolle las, dat kan voorkomen worden door toevoeging van een oxiderend gas zoals CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>. Bij MAG lassen worden actieve gassen zoals koolzuurgas en stikstof gebruikt, deze beïnvloeden de geometrie van de las. CO<sub>2</sub> veroorzaakt een sterke insnoering van de boog. In Figuur 2.4-17 wordt de lasnaadgeometrie van een argonbescherming vergeleken met deze van een koolzuurgasbescherming. [24, 25]



Figuur 2.4-17 Verschillende inbranding afhankelijk van percentages CO<sub>2</sub> in beschermgas [42]

Voor het verkrijgen van een fijne druppelovergang wordt een menggas gehanteerd. Door de verhoogde spanning en extra warmte die zulk gas met zich meebrengt wordt een dun vloeibaar smeltbad, een brede inbranding en een goede ontgassing van het smeltbad verkregen. Bij een groter percentage CO<sub>2</sub> wordt een diepere inbranding verkregen. In plaats van een diepere inbranding kan ook met een hogere lassnelheid gewerkt worden. Een groter zuurstofgehalte in het beschermgas resulteert eveneens in een vloeibaarder smeltbad, omdat de oppervlaktespanning wordt verlaagd. Het effect hiervan is echter minder sterk dan bij CO<sub>2</sub>. [24, 25]

De thermische geleidbaarheid van het gas, zie Figuur 2.4-18, beïnvloedt de boogtemperatuur en de temperatuur van het lasbad. Toevoeging van een bepaalde hoeveelheid helium bij het beschermgas zorgt voor een stijging van de thermische geleidbaarheid en ionisatiespanning, welke de boogspanning verhoogt. De stijging van de boogspanning produceert een hogere boogenergie en draagt bij aan de gas- en plasmavloeikrachten. Daardoor is de boog stijver, het druppelbad is constanter en het resultaat is een diepere penetratie van de las. Toevoeging van zuurstof zorgt voor vermindering van de oppervlakte trekkracht en laat gemakkelijker ionisatie van het gasmengsel toe. Toevoeging van CO<sub>2</sub> zorgt voor een stijging van de boogstijfheid en laspenetratie en heeft een schoonmakingseffect. [43]



Figuur 2.4-18 Thermische conductiviteit en enthalpie van gassen in functie van de temperatuur [44]

De thermische geleidbaarheid van waterstof tussen 3000 en 4500 K is bijna tien keer hoger dan deze van argon, zie Figuur 2.4-18. Deze temperatuur overheerst tijdens het lassen. [44]

De enthalpie van waterstofgas is hoger dan die van argon in het hele bereik van de temperatuur, zie Figuur 2.4-18. De enthalpie van het beschermgas beïnvloedt de boogvorming, de boogvorm en de spreiding van de temperatuur in de boog. Toevoeging van waterstof bij argon zorgt voor een stijging van de spanningsval in de boog en de boogenergie. Door de hoge thermische geleidbaarheid van waterstof wordt de boog smaller en stijgt de energieconcentratie, welke zorgt voor een diepere penetratie. Waterstof is een reducerend gas wat ervoor zorgt dat het oxidevorming tegengaat aan het oppervlak van de laatste laag van de las. Het uitzicht van de las is steeds mooier. Toevoeging van waterstof als bescherming tegen de atmosfeerlucht zorgt daarnaast echter bijkomend voor enkele moeilijkheden. De oplosbaarheid van waterstof in gesmolten metaal is namelijk heel hoog. Waterstof in staal en andere metalen zorgt voor gasbellen en scheuren. Toevoeging van waterstof bij argon als beschermgas verandert de statische boogkarakteristiek. Het zorgt eveneens voor een stijging van de boogenergie en bijgevolg wordt een grotere hoeveelheid materiaal gesmolten. De toevoeging zorgt tevens voor een stijging van de smeltefficiëntie van de lasboog. Ook bij MIG lassen zorgt toevoeging van waterstof bij argon voor stijging van de smeltefficiëntie van de boog, echter is de stijging heel wat minder dan bij TIG lassen. [44]

Bij MIG lassen zorgt toevoeging van waterstof bij argon als beschermgas voor een verhoging van de hoeveelheid gesmolten materiaal, het zorgt tevens voor een stijging van de boogweerstand, welke zorgt voor een daling van de stroomintensiteit. Dankzij het smelten van het vulmateriaal steekt materiaal over door de boog, metaalionen zijn ook dragers van de elektrische stroom. Bij toevoeging van waterstof bij argon bij MIG lassen stijgt de hoeveelheid gesmolten materiaal met 10-30 %. De gasstroomsnelheid heeft op zichzelf geen effect op de opmenging. Enkel door interactie met andere parameters kan het de opmenging beïnvloeden. [34, 44]

#### 2.4.2.10 Warmte-inbreng

Onderzoek door Kumar et al. [32] toont aan dat de warmte-inbreng geen rechtsreeks effect heeft op de opmenging. Dezelfde warmte-inbreng kan worden bereikt door proportioneel de lasstroom en lassnelheid te variëren. De verschillende processen hebben een geheel ander effect op de penetratiediepte en de daaruit volgende opmenging. De mate van overlapping tussen aangrenzende laspassen is ook een belangrijke variabele die de opmenging beïnvloedt, in vele gevallen meer dan de warmte-inbreng. De opmenging stijgt bij het MIG lasproces met stijging van de warmte-inbreng wanneer de stijging van de warmte-inbreng wordt bereikt door een stijging van de lasstroom met constante lassnelheid. Terwijl de opmenging daalt met stijging van de warmte-inbreng wanneer de stijging van de warmte-inbreng wordt gerealiseerd door daling van de lassnelheid en constante lasstroom. [32]

De warmte-inbreng per eenheidslengte stijgt met een stijging van de lasstroom, en daalt met een stijging van de lassnelheid. Dat betekent dat dezelfde warmte-inbreng kan worden bereikt door zowel een lagere lassnelheid met een lagere stroom of door gebruik te maken van een hogere lasstroom en hogere lassnelheid. Voor productieve voordelen gaan producenten voor de laatste optie. Een warmte-inbreng bereikt met een hogere stroom en hogere lassnelheid produceert een aanzienlijk hogere opmenging dan dezelfde warmte-inbreng door een lagere stroom met lagere lasstroom. De resultaten bij MIG lasexperimenten vertonen gelijkaardige tendensen alhoewel in dit geval een hogere lasstroom wordt geassocieerd met een hogere afzettingsgraad. Deze resultaten stellen het doel in vraag om enkel de warmte-inbreng te specificeren als meest kritische factor bij codes en normen in lasprocedures. [32]

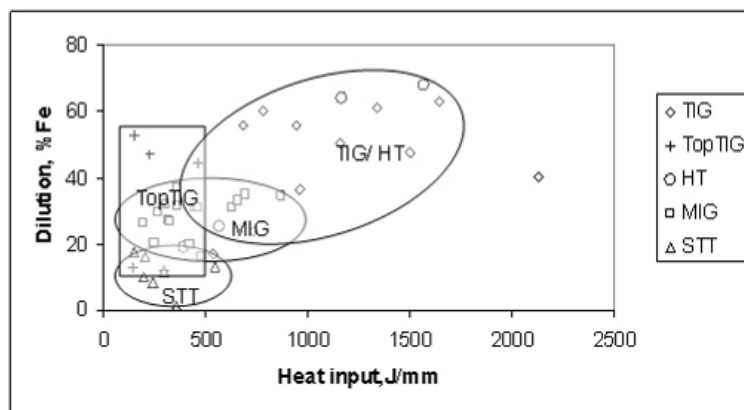
#### 2.4.2.11 Opeenvolging van lagen

Significante verschillen bij de opmenging worden gevonden tussen de eerste pas en de daaropvolgende passen. Doordat bij de eerste pas de boog rechtstreeks in het nog zuivere basismateriaal brandt, heerst een significant hogere smelting van het basismateriaal. Bij de daaropvolgende overlappende passen wordt een deel van de eerste pas terug gesmolten. Dit zorgt ervoor dat minder basismateriaal wordt gesmolten en eventueel een evenwicht wordt bereikt na enkele passen. De opmenging van de eerste pas is dus aanzienlijk groter dan de daaropvolgende laspassen. [32]

#### 2.4.2.12 Lasproces

Het type lasproces beïnvloedt de geometrische kenmerken van het lasbad. De invloed van de reeds aangehaalde parameters kan bij het ene proces groter zijn dan bij het andere. In paragraaf 2.4.2.9 werd reeds aangehaald dat de toevoeging van waterstof bij argon zorgt voor een stijging van de smeltefficiëntie van de boog. Bij het MIG lassen is deze stijging bijvoorbeeld veel minder dan bij het TIG lassen. [44]

Figuur 2.4-19 toont de opmenging ten opzichte van de warmte-inbreng voor de eerste laspas voor verschillende lasprocessen. Zowel conventionele TIG en hotwire TIG produceren een grote spreiding van warmte-inbreng en opmenging. Elektronisch gecontroleerde overdracht door een kortsluitboog produceert steeds een opmenging van minder dan 20 % in de eerste pas. Bij dezelfde warmte-inbreng is de opmenging bij TopTIG afhankelijk van hoe de warmte-inbreng wordt gecontroleerd. Voor grotere waarden van stroom en lassnelheid, is de opmenging significant hoger (~50 %) dan deze (~20 %) bij lagere waarden van de stroom en lassnelheid, terwijl de warmte-inbreng constant wordt gehouden. De grootte van opmenging bij hotwire TIG is gelijkaardig aan diegene voor een conventioneel TIG lasproces. TIG en MIG lasprocessen produceren lassen met een groot bereik van opmengingen. TIG lassen veroorzaakt de grootste spreiding van opmenging, afhankelijk van de procesparameters kan de opmenging lager dan 10 % zijn of oplopen tot 70 %. Bij MIG lassen is de opmenging meestal minder dan 40 %. [32]



Figuur 2.4-19 Opmenging ten opzichte van warmte-inbreng voor de eerste pas van verschillende lasprocessen. [32]

## 2.5 Lasbaarheid en invloed van silicium

### 2.5.1 Begrip

Lasbaarheid is geen goed gedefinieerde eigenschap, zoals geleidbaarheid, hardbaarheid of vloeibaarheid, maar moet omschreven worden en is afhankelijk van vele omstandigheden. [45]

Lasbaarheid wordt onder andere bepaald door [45]:

- Het soort lasproces;
- De omgeving;
- De samenstelling van de legering;
- De naadvorm;
- De afmetingen van de constructie.

Door het IIW is een definitie opgesteld, die luidt als volgt [45]:

*“Een metaal is bij een gegeven wijze van lassen en een gegeven toepassing in gestelde mate lasbaar, wanneer met dat metaal, nadat de voorzorgen voor die gestelde mate zijn getroffen, een lasconstructie kan worden verkregen met continue-metallische gelijkwaardige verbindingen, die zowel door zijn eigenschappen als door zijn ligging in de constructie voldoet aan de eisen, welke aan de basis voor de beoordeling zijn overeengekomen.”*

Lasbaarheid van metalen is afhankelijk van volgende parameters [45]:

- De wijze van lassen, het type lasproces is hier bepalend;
- De toepassing van het materiaal;
- De te nemen voorzorgsmaatregelen, zo wordt de lasbaarheid slechter bij een toename van de vereiste voorzorgsmaatregelen;
- De verkregen eigenschappen zoals sterkte of kerfslagwaarde;
- Het kunnen voldoen aan overeengekomen eisen: lasbaarheidsproeven.

Drie aspecten kunnen worden onderscheiden bij lasbaarheid. Voor het bepalen van de executieve lasbaarheid worden proeven uitgevoerd waarbij nagegaan wordt of een verbinding tot stand kan worden gebracht, deze heeft ook betrekking op lasfouten zoals poreusheid en inkarteling. De hiervoor aangewende proeven zijn voornamelijk niet-destructief. De metallurgische lasbaarheid wordt aangetoond met proeven waarmee de lokale eigenschappen worden bepaald, zoals mechanische eigenschappen en corrosievastheid van de las en de warmtebeïnvloede zone. De proeven bestaan uit hardheidsmetingen, trek-, buig- en kerfslagproeven. De eigenschappen van de las, als een deel van de constructie vormen de constructieve lasbaarheid. [45]

## 2.5.2 Invloed silicium op lasbaarheid

### 2.5.2.1 Effecten van silicium en mangaan op staal

Staal is een legering van ijzer en koolstof waarbij steeds toevoegingen van Mn en Si voorkomen om onzuiverheden zoals O, N, S en P te binden. Deze verontreinigingen zijn afkomstig van het erts of schroot en zijn moeilijk te verwijderen. Mangaan gaat bijvoorbeeld binden met zwavel ter vorming van MnS en wordt daarom in alle staalsoorten toegepast met een minimum gehalte van 0,2 % omwille van de taatheid. Tevens kunnen nog andere verbindingen tot stand komen zoals MnS, MnO, MnFeS, ... Silicium heeft een grote affiniteit voor zuurstof wat leidt tot vorming van SiO<sub>2</sub>, samen met eventueel toevoeging van aluminium wordt gekalmeerd staal gecreëerd. In de praktijk moet een minimum van 0,1 % Si aanwezig zijn om te kunnen spreken van gekalmeerd staal. Tegenwoordig wordt steeds gekalmeerd staal gebruikt met enkele uitzonderingen voor constructiestaal. [46-48]

Mangaan is een element dat een grotere affiniteit heeft voor koolstof dan ijzer, waardoor het eventueel ijzer gaat verdringen en zelf carbiden gaat vormen. Mangaan is echter een zwakke carbidevormer. Silicium vormt met koolstof een zeer stabiel carbide, namelijk SiC 'carborundum', echter de vormingstemperatuur ervan ligt veel hoger dan het smeltpunt van staal zodat deze carbiden in staal niet voorkomen. [47]

Zowel mangaan als silicium zorgen voor oplosharding, een substitutionele versterking van het staal. Deze harding is relatief gering, voornamelijk bij lage percentages. Door een warmtebehandeling kan de sterkte fors toenemen wanneer carbides worden gevormd. Als legeringselement wordt Si enkel gebruikt bij specifieke toepassingen zoals in verenstaal ter bevordering van de elastische eigenschappen, het kan ook ingezet worden voor de bijzondere magnetische eigenschappen die gepaard gaan met een extra hoeveelheid silicium tot ± 1-3 % Si. Daarnaast wordt silicium als legeringselement eveneens gebruikt in hittevast staal en transformatorblik. Als oplosversterking wordt Si tot 0,5 % gebruikt omwille van de brosheid en slechte lasbaarheid die samengaan met een hoger siliciumgehalte. Mangaan daarentegen wordt vaker als legeringselement ingezet en vaak ter verhoging van de sterkte in plaats van koolstof, dit omdat het de rekgrens en treksterkte verhoogt zonder verlaging van de taatheid en de lasbaarheid. Er treedt namelijk oplosharding en korrelverfijning op. Om deze reden bevatten sterkere legeringen dan ook een hoger Mn-gehalte tot ca 1,3-1,8 %. Voor deze eigenschap wordt mangaan regelmatig toegepast in constructiestaal, machinestaal en roestvaststaal. Een stijging van het mangaangehalte in het lasmetaal tot 1,96 % betekent een opmerkelijke daling van de impactsterkte. [46, 47, 49, 50]

Omdat mangaan een austenietvormer is, kan het gebruikt worden om de FCC structuur te bekomen. Dit wordt toegepast bij Mn-stalen door een typische toevoeging van 9 % Mn. Deze stalen zijn zeer vervormbaar, maar niet roestvast en worden tegenwoordig nog maar zelden gebruikt. In tegenstelling tot mangaan is silicium een ferrietvormer. [47]

Bij de studie [51] waarbij siliciumtoevoegingen tot circa 0,7 % werden bestudeerd, werd besloten dat een hoger siliciumgehalte leidt tot kleinere korrels en een hogere treksterkte. Silicium verfijnt de korrels door zijn effect op de austenietkorrelgrootte. De fijne austenitische korrelgrootte verkregen door Si toevoegingen leidt tot een fijne ferrietkorrel. Het slechte impactgedrag ervaren bij Si-gehaltes groter dan 0,7 % in staal, komt door de hoge graad van vaste oplossingsharding (hoewel deze stalen nog steeds een fijne korrelgrootte hebben). De graad van versterking van laagkoolstofstalen door Si is meer merkbaar bij grofkorrelige dan bij fijnkorrelige proefstukken. [51, 52]



Een hoger Si gehalte promoot de segregatie van Mn naar de austenietkorrelgrens en de vorming van granulair bainiet. [52]

Mangaan en silicium hebben een invloed op het koolstofequivalent, CEV stijgt met stijging van Si, echter is deze stijging veel sterker bij toenemend Mn-gehalte. Hoe hoger het koolstofequivalent, des te groter de doorharding en slechter de lasbaarheid is. [48]

Bij een groot gehalte aan MnS kunnen lamellaire scheuren optreden, deze doen zich voor in staal met vrij grote dikte waarin platgewalste insluitels aanwezig zijn. Deze langgerekte MnS-insluitels zijn nefast voor de overgangstemperatuur, met andere woorden daalt de taaiheid enorm. Daarentegen heeft de binding van mangaan met zwavel een belangrijke positieve invloed op de ontwikkeling van stolscheuren. Zowel silicium als mangaan hebben een negatief effect op ontlaatbrosheid. [53]

Een typische samenstelling van ongelegeerd staal is weergegeven in Tabel 2.5-1.

**Tabel 2.5-1 Typische samenstelling ongelegeerd staal [25]**

Type staal	%Mn	%Si	%C
Ongelegeerd staal	0,25-1,9	0,07-1,0	0,09-0,18

De grenzen voor het silicium- en mangaangehalte volgens verschillende normering worden weergegeven in Tabel 2.5-2.

**Tabel 2.5-2 Grenswaarden Si en Mn in staal volgens verschillende normering**

Norm	%Mn	%Si
ISO/TR 15608 groep 1	≤ 1,8	≤ 0,6
EN 10025-2 S235 S355	≤ 1,40 ≤ 1,60	/ ≤ 0,55
EN 10020 Ongelegeerd staal	≤ 1,65	≤ 0,6
AISI 1010 1020 1030; ASTM A36 Low-carbon steels	0,50-1,0	0,10-0,25
ASTM A36	≤ 0,85-1,35	≤ 0,4

### 2.5.2.2 Effecten van silicium en mangaan in de lasdraad

Standaard lasdraden voor ongelegeerd staal zijn volgens DIN 8589 de SG1, SG2 en SG3 lasdraden. De SG1 lasdraad kan niet gebruikt worden met zuiver CO<sub>2</sub> als beschermgas. [25]

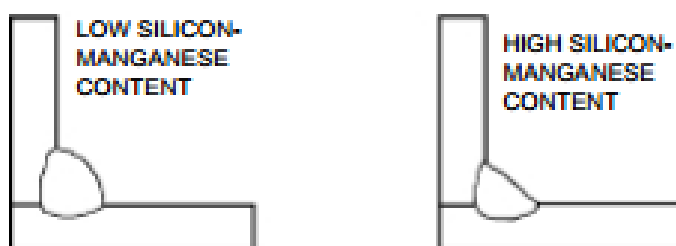
**Tabel 2.5-3 Draadsamenstellingen volgens DIN 8589 [25]**

Type lasdraad	%Mn	%Si	%C
SG1	1,0-1,3	0,5-0,7	0,07-0,12
SG2	1,3-1,6	0,7-1,0	0,07-0,14
SG3	1,6-1,9	0,8-1,2	0,07-0,14

Om dezelfde mechanische eigenschappen te bereiken moet de samenstelling van de las gelijkaardig zijn. Hierbij is het belangrijk om rekening te houden met meer of minder afbrand van Mn en Si van de lasdraad in functie van het gebruikte beschermgas. Hoe meer CO<sub>2</sub> wordt gebruikt, des te lager is het Mn- en Si-gehalte in de las. [25]

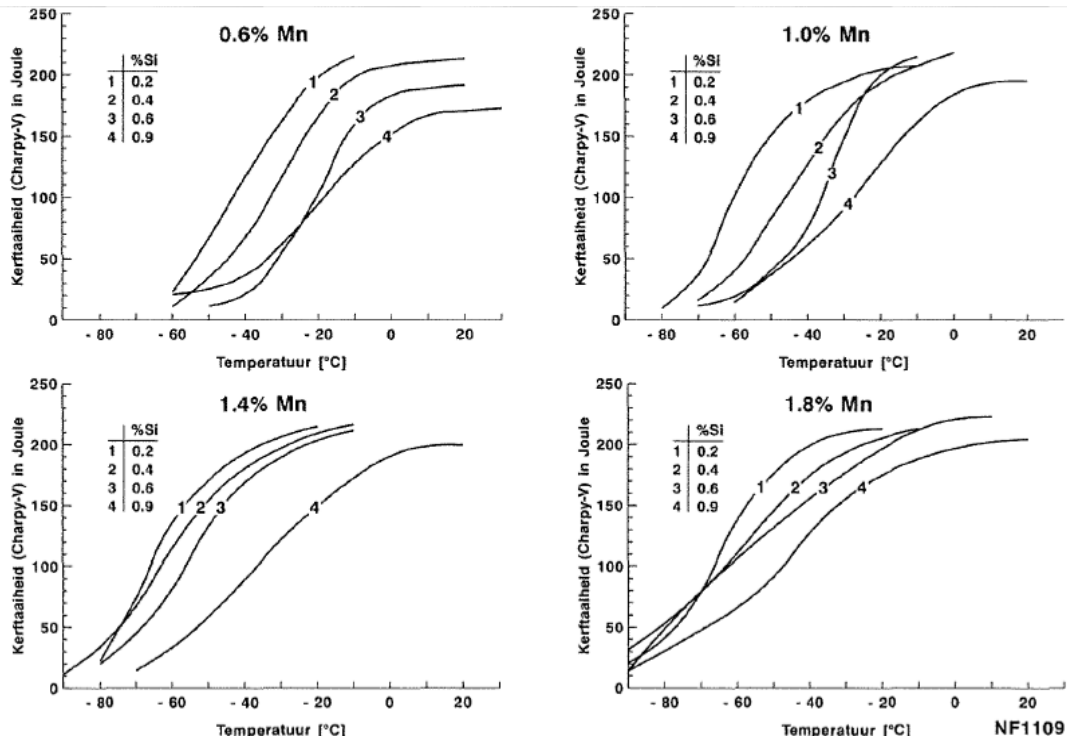
Mangaan en silicium zijn noodzakelijke elementen die toegevoegd moeten worden bij het lassen om de reeds besproken redenen. Mangaan is nodig om de mechanische eigenschappen van het metaal, voornamelijk de sterkte en de taaiheid, op een zeker niveau te brengen of te houden. Tevens heeft het enige desoxiderende werking. Silicium dient om aanwezige zuurstof in het lasmetaal aan zich te binden. Zo wordt onder andere poreusheid ten gevolge van vorming van CO in het lasmetaal voorkomen. Het siliciumgehalte in het lasmetaal moet minimum 0,2 % bedragen om een gekalmeerde stolling te verkrijgen en zo kan een lasmetaal met acceptabele mechanische eigenschappen verkregen worden. Een hogere waarde heeft een verslechtering van de kerfslagwaarde tot gevolg. Daarnaast moet het zuurstofgehalte zoveel mogelijk worden beperkt om de kerfslagwaarde onder controle te houden. Een laag zuurstofgehalte heeft echter tot gevolg dat waterstof en stikstof gemakkelijker uit de boogatmosfeer worden opgenomen en dat het lasmetaal door de hogere oppervlaktetspanning slechter aanvloeit. Dat kan worden gecompenseerd door verhoging van het Si-gehalte, welke zorgt voor een verlaging van de oppervlaktetspanning, maar daarnaast de kerfslagwaarde nadelig beïnvloedt. [25, 54-56]

Kortom worden mangaan en silicium toegevoegd als legeringselement in lasdraden omdat ze de lasbaarheid en de mechanische eigenschappen op een positieve manier beïnvloeden. Bovenop de werking als desoxidant zorgen silicium en mangaan voor een minder viskeus lasbad en een betere boogstabiliteit, zie Figuur 2.5-1. Met een voldoende hoog siliciumgehalte in de lasdraad wordt een minimale hoeveelheid spatten en porositeiten verkregen. Silicium en mangaan zorgen voor een mooi lasoppervlak en een optimale fusie van het lasbad met de zijwand. [28, 56]



**Figuur 2.5-1 Effect van silicium en mangaan op de vorm van de lasrups [56]**

Het Si-gehalte van het lasmetaal houdt verband met het Mn-gehalte van het lasmetaal. Alhoewel silicium een positieve invloed heeft op de bevochtiging, het aanvloeien van het lasmetaal en op de slaklossing, heeft het een desastreus effect op de taaiheid. Uit onderzoek is gebleken dat desondanks silicium een ongunstige invloed heeft op de taaiheid, dit negatieve effect minimaal is bij een siliciumgehalte beneden de 0,5 % als het mangaangehalte ongeveer 1,5 % bedraagt. Bij lagere waarden van mangaan, tot zo'n 0,6 % wordt het verschil veel duidelijker en moet gestreefd worden naar 0,2 - 0,3 % Si. Algemeen kan gesteld worden dat de 'upper-shelf' zakt en de curve zijdelings verschuift naar een hogere temperatuur als het siliciumgehalte stijgt, zie Figuur 2.5-2. Bij een mangaan-silicium verhouding van groter of gelijk aan twee wordt een mooier lasmetaal verkregen dan bij een verhouding gelijk aan één. [54]



**Figuur 2.5-2 Effect Mn/Si-verhouding op de kerftaaiheid [54]**

Britse normen adviseren een Si-Mn verhouding van 0,25 tot 0,4 in laagkoolstof constructiestaal, met een bovengrens voor Si van  $0,4 \pm 0,03$  %. Siliciumgehaltenes hierboven verbeteren de trekeigenschappen en impactgedrag op kamertemperatuur. Circa 1 % Mn verbetert het impactgedrag van stalen door een verfijning van de dikte van de carbiden. Bij stalen met een laag mangaangehalte ( $< 1,3$  %) en een vast siliciumgehalte worden betere resultaten verkregen wat betreft vloeigrens, ductiliteit en rek wanneer de Si-Mn verhouding toeneemt. [57]

De verbetering van de trekeigenschappen wordt veroorzaakt door een hogere Si-Mn verhouding, de reden hiervoor wordt gevonden uit de (Mn,Fe)S fase in staal. Zwavelfases in staal zijn dikwijls onzuiver, omdat ze als overgangselement gevormd worden wat ze hard en bros maken, in het bijzonder bij temperaturen onder 200 °C. Mangaan wordt rond de insluitsels verminderd omdat het diffundeert naar de zwavelfase, terwijl Fe uit de zwavel diffundeert. De verwijdering van Mn onmiddellijk rond de insluitsels reduceert de sterkte van staal en de brosheid van de zwavelfase op een temperatuur onder 200 °C (koudvormingstemperatuur voor staal) wat de ductiliteit van staal aantast. Het leidt dus tot relatief lage waarden van deze eigenschappen van stalen met een hoger Mn-gehalte, dus met een lagere Si-Mn verhouding. Bij stalen met een hogere Si-Mn verhouding leidt een

reductie van het mangaangehalte tot een reductie van het voorkomen van zwavelinluitsels. Bovendien impliceert een hoger Si-gehalte in staal een lager zuurstofgehalte, omdat Si een meer krachtige desoxidator is dan Mn. Een lager zuurstofgehalte in staal leidt tot een hogere oplosbaarheid van zwavel in staal, zodat de S-fase later wordt gevormd op lagere temperaturen, waar het risico op opname van Fe kleiner is.

Mn reduceert de vorming van FeS (MnS heeft een lagere vormingsenergie dan FeS) en versterkt het staal. De rol van Mn in staal als desulfator is eerder secundair, aangezien het grootste gedeelte van de ontzwaveling gebeurt door andere elementen (Ca, Mg). Te veel Mn versnelt de vorming van (Mn,Fe)S. [57]

## 2.6 Bestaande oplossingen

Hier worden mogelijke oplossingen besproken om de optredende verdikking ter plaatse van het hoger siliciumgehalte te vermijden. Het probleem kan worden tegengegaan door de samenstelling van het zinkbad aan te passen ter voorkoming of afremming van de reactie van silicium met zink. Anderzijds wordt een oplossing aangewend voor MAGlassen waarbij de gassamenstelling wordt aangepast ter reductie van het siliciumgehalte in de lasnaad. [28]

### 2.6.1 Toevoegingen aan het zinkbad

De chemische samenstelling van gesmolten zink en de fysische parameters kunnen de groei van de legeringslaag beperken. De toevoeging van lage hoeveelheden Al, Pb, Ge, Ti, Ni, Bi, Cu, Cd of Sn kan bijdragen tot de oplossing door de zink-staal reactie te remmen en/of de vloeibaarheid van het bad te verhogen. Daarnaast wordt een geschikte instelling van de fysische parameters geëist zoals de onderdompelingstijd die de dikte van de legeringslaag bepaalt, de opnamesnelheid van het bad welke de hoeveelheid van ongelegeerd hechtend zink bepaalt en de temperatuur die zowel invloed heeft op de gelegeerde lagen en vrije zinklagen. [58]

De toevoeging van nikkel aan het gesmolten zink kan een wijziging van de sandelin-curve tot gevolg hebben. Nikkel kan de schadelijke effecten van silicium overwinnen, namelijk door de groei van de  $\zeta$ -kristallen die een metastabiel evenwicht aangaan met de vloeistof te wijzigen en vertragen. De oplosbaarheid van silicium in de  $\zeta$ -fase verdwijnt en in de  $\delta$ -fase lost 1 % van het silicium op. Het evenwicht tussen de Fe-Zn intermetallische verbinding en de vloeibare fase zijn verschoven naar het  $\Gamma_2$ -vloeistof evenwicht, dit is het bezinksel, indien het Si-gehalte kleiner is dan 0,1 %. Desondanks zijn ook nadelen verbonden aan een toevoeging van nikkel. Nikkel wordt opgebouwd uit lagen die leiden tot ternaire verbindingen en in sommige omstandigheden wordt zwevend bezinksel gevormd. [14]

Het probleem kan over het algemeen op bevredigende wijze opgelost worden door aluminiumtoevoegingen. Een concentratie van meer 0,16 % Al leidt tot een dikkere  $\eta$ -laag en een geheel of gedeeltelijke onderdrukking van de vorming van de  $\zeta$ - en de  $\delta$ - laag. Aluminium heeft een grotere affiniteit voor ijzer dan zink en vormt een beschermende Fe-Al of Fe-Al-Zn laag. De industriële toepassing ervan is beperkt wegens de ingewikkelde oppervlaktebehandeling vereist voor de onderdompeling in het galvanisatiebad. Bovendien kan de sterk exotherme aard van de Fe-Al intermetallische verbindingen leiden tot het wegbreken van lagen. Dit gebeurt op een onstandvastige en onvoorspelbare wijze. [14, 59]

MicroZINQ is een uniek en gepatenteerd discontinu thermisch verzinkproces waarbij gebruik wordt gemaakt van een enkelvoudige onderdompeling in een hoog aluminiumhoudende legering die is ontwikkeld door Galva Power in samenwerking met de automobielenindustrie. De vraag in deze industrie naar een dunnere, lichtere en minder milieubelastende zinklaag is groot. Ongeveer 5 % aluminium wordt toegevoegd aan het bad. De verkregen zinklaag is veel dunner, 10 à 15 micron laagdikte bij staal, welke een vierde is van de laagdikte bij andere thermische verzinkprocessen. Het grote voordeel van microZINQ is dat een veel dunnere laag verkregen wordt met een zeker zo goede corrosieweerstand als een klassiek zinklaag, hierbovenop komt nog eens de ongevoeligheid voor het sandelin-effect. In Tabel 2.6-1 worden enkele eigenschappen van microZINQ en klassiek thermisch verzinken met elkaar vergeleken. Op Figuur 2.6-1 kan duidelijk een verschil waargenomen worden tussen het met microZINQ verzinkte gedeelte en het klassiek thermisch verzinkte gedeelte, het ene gedeelte blijft mooi blinkend terwijl het andere mat wordt welke typisch is voor het sandelin-effect. De grote nadelen van microZINQ op dit moment zijn dat door de beperkte laagdikte het niet voldoet aan de minimum diktes opgelegd in ISO 1461 en dat de productiecapaciteit nog beperkt is. De procedure voor een goedkeuring van een norm voor Discontinuu Thermisch Verzinkte Aluminiumrijke Zinklegeringen is echter bezig in zowel de DIN als ASTM normering. [60, 61]

**Tabel 2.6-1 Vergelijking eigenschappen microZINQ met klassiek thermisch verzinken [61]**

Eigenschappen	microZINQ 5	Klassiek thermisch verzinken
Legering	95 % Zn + 5 % Al	> 98 % Zn
Verzinkingstemperatuur	420 °C	445-455 °C
Zinklaagdikte of van de legering	Bij staal: ± 8-15µm	Bij staal: ± 50-150µm
Siliciumgevoelig	Nee	Ja
Norm	ASTM A 1072 Goedkeuring in aanvraag	DIN EN ISO 1461
Hardheid van de zinklaag	70 HV	Tot 350 HV
Hechting (ISO4624)	19-30 N/mm <sup>2</sup>	20-27 N/mm <sup>2</sup>
Buigtest	Zeer goed 180° Plooibaar zonder scheuren	Slecht Loskomen/Afschuiven zinklaag



**Figuur 2.6-1 Vergelijking uitzicht MicroZINQ met klassiek thermisch verzinken [61]**

## 2.6.2 Hoogtemperatuurverzinken

Hoogtemperatuurverzinken of ook wel deltaverzinken genoemd is een andere methode om een zink-ijzerlegeringslaag aan het oppervlak van een element te verkrijgen. Bij het hoogtemperatuurverzinken is de temperatuur van het zinkbad ruim 100 °C hoger dan het zinkbad bij het klassiek thermisch verzinken. Zulke zinklagen bestaan enkel uit een delta fase en hebben dus aan het oppervlak geen zuivere zinklaag. Door deze typische morfologie treedt het sandelin-effect niet op en wordt dus geen verdikking waargenomen bij een plaatselijk hogere concentratie silicium. Het nadeel van deze methode is dat de corrosiebescherming op lange termijn minder gunstig is aangezien een minder goede kathodische bescherming heerst vanwege het gebrek aan zuiver zink. Bovendien zit in de delta fase een hoog percentage ijzer, dit kleurt op termijn bruin en geeft een visueel nadeel. De werkstukken dienen een zorgvuldige afwerking verkregen te hebben alvorens ze verzinkt worden. Het deltaverzinken wordt voornamelijk toegepast wanneer oneffenheden ongewenst zijn, dus een gladde coating vereist is. [16, 62]

## 2.6.3 Beschermgas in functie van het siliciumgehalte

Een oplossing werd gevonden door Christoph Matz [63] voor halfautomaatlassen onder een specifiek beschermgas. De nadruk wordt gelegd op het lassen van een dunne metalen plaat van niet- of laaggelegeerd staal van ongeveer 5 mm dik. De oplossing bestaat erin om de hoeveelheid actief gas in het beschermgas aan te passen aan de hoeveelheid silicium in de lasdraad. Het beschermgas is een mengsel dat bestaat uit ten minste helium, een actief gas en een aanvullend inert gas. Het actief gas bestaat bij voorkeur uit O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> of een combinatie en voor het inert gas wordt argon aangewend. Om problemen met defecte lasnaden te voorkomen, heeft het de voorkeur om een lasdraad te selecteren met een hoog siliciumgehalte indien mogelijk, omdat silicium zorgt voor een goede vloeibaarheid en bevochtiging van het lasbad en het werkt tevens als desoxidator.

Een standaard lasdraad heeft een siliciumgehalte tussen 0,7 en 1,2 %, daarbij wordt een beschermgas gebruikt met 30-50 % He, 0,5-1,5 % CO<sub>2</sub> en verder aangevuld met argon. In het geval dat een lasdraad met een verlaagd of middelmatig siliciumgehalte wordt gebruikt, met ongeveer 0,2 % tot 0,4 % Si, is het aandeel van het actieve gas in het totale volume van het beschermgas ongeveer 1 % tot 5 %. Indien een lasdraad met een laag gehalte aan Si van ongeveer 0,05 % tot 0,1 % wordt gebruikt, wordt het aandeel van het actieve gas in het totale volume van het beschermgas opgevoerd tot ongeveer 3 % tot 10 %. Een daling van de hoeveelheid silicium in de lasdraad zorgt dus voor een hoger percentage van actief gas in het beschermgas. Een toename van de hoeveelheid actief gas is nodig voor een betere warmteoverdracht en warmte-inbreng en het kan tevens zorgen dat de spatten worden verminderd door verminderde vorming van silicaten. [63]

Het doel om een silicaatvrij lasproces te realiseren wordt bereikt met verschillende gasmengsels, op basis van de fundamentele trend dat hoe meer actief gas (CO<sub>2</sub> of O<sub>2</sub>) aanwezig is in het beschermend gasmengsel, des te lager het siliciumgehalte in de draad is. Een vermindering van de hoeveelheid actief gas zorgt voor een daling van de warmtegeleidbaarheid, boogstabiliteit en penetratiediepte. Een grotere hoeveelheid helium wordt toegevoegd bij vermindering van actief gas aangezien helium zorgt voor een verhoging van de boogstabiliteit en een stijging van de warmtetransmissie waardoor het risico op poriën en slechte vloeibaarheid van het lasbad verkleint. De hoeveelheid helium wordt echter beperkt gehouden om de kosten onder controle te houden. De hoeveelheid helium varieert sterk, deze bevindt zich meestal tussen 10 en 70 % ten opzichte van het totaal gebruikte gasvolume. [63]

## 2.7 Toepassingsdomein

Om relevante proeven te kunnen opstellen is het aangewezen het toepassingsdomein te onderzoeken. Het betreft hier constructies die ter bevordering van de weerstand tegen corrosie of omwille van andere doeleinden zoals esthetiek, thermisch verzinkt worden. Deze constructies bevatten dan ook lasnaden waarbij het gekende probleem van het sandelin-effect optreedt. Algemeen kan gezien worden dat 45 % van de verzinkte materialen bestemd zijn voor constructiedoeleinden welke daarmee het hoofdaandeel vormt van verzinken, daaropvolgend vormt het straatmeubilair met 18 % het tweede grootste doelgebied [64]. Als toepassingsdomein kunnen onder andere volgende categorieën onderscheiden worden:

- Constructie in brede zin [65] (bijvoorbeeld: hangarbouw, serrebouw, bruggenbouw, ...);
- Stellingen, hekwerken en leuning (Figuur 2.7-1) [66];
- Verlichtingspalen [21];
- Hoogspanningsmasten [67];
- Auto (bijvoorbeeld: chassis, carrosseriebalken, aanhangwagens) (Figuur 2.7-2) [68].



Figuur 2.7-1 Thermisch verzinkte leuning [69]



Figuur 2.7-2 Thermisch verzinkt chassis [68]

Bij Galva Power is 80 % van het staal dat in de markt verzinkt wordt van staalkwaliteit S235 en S355. De helft daarvan zijn staalconstructies voor industriebouw, met andere woorden handelsprofielen zoals IPE, HEB, IPN, kokers, buizen, ... Deze komen meestal voor als losse steunbalken, maar ook in alle gelaste constructies zoals in spanten, frames, ... De andere 50 % bestaat uit gelast smederijwerk, serie producten en serie laswerken, gelaste plaatwerkconstructies.

Het toepassingsgebied betreft voornamelijk leuning, barrières, hekwerken, stallenbouw, stad- en stedelijk meubilair, wachthokken, bouw volgens architecten, brugleuningwerk, portieken, ... en vooral ook waar alles na het verzinken nog gelakt wordt. Eveneens masten en lichtpalen vallen in het toepassingsgebied, vooral dan lichtpalen die nadien gecoat worden. Deze opsomming van constructies of onderdelen bevatten allemaal zichtdelen en vlakken waarbij na het slijpen van de lasnaden en na het verzinken ervan een ophoping van de zinklaag zichtbaar is die na het lakken nog meer opvalt. Voornamelijk waar vierkante of rechthoekige kokers in verstek aan elkaar gelast worden, is deze verdikking storend. [16]

In de toepassingen komen hoofdzakelijk hoeknaden voor, maar ook I-, V-, X-, K- en U-naden, al dan niet met een open stand. Overwegend kan gesteld worden dat de dikte van het materiaal varieert van 3 tot 20 mm. In de toepassingsdomeinen gaat het hoofdzakelijk om constructiestaal. De meeste constructies worden manueel gelast, soms wordt een robot aangewend.



## 2.8 Besluit literatuurstudie

Tijdens het verzinkproces ontstaan door diffusie verschillende ijzer-zinklegeringslagen met aan het oppervlak een zuivere zinklaag welke bekomen wordt door na het verzinken voldoende snel af te koelen. Het verzinkproces en de samenstelling van het te verzinken materiaal zijn bepalend voor de aard en de dikte van de gevormde ijzer-zinklegeringslagen. Het verzinkproces wordt in dit onderzoek als constante beschouwd aangezien de invloed van de samenstelling van het materiaal wordt onderzocht. De reactiviteit van het materiaal hangt nauw samen met de concentratie silicium, zo zorgt silicium enerzijds voor een onregelmatige ijzer-zinklegering en anderzijds voor een eventueel dikkere zinklaag. De reactiviteit van het materiaal en de daarbij horende dikte van de zinklaag stijgt niet lineair met de concentratie silicium, de relatie wordt aangegeven door de sandelin-curve. Op deze curve is duidelijk te zien dat een siliciumgehalte van 0,15-0,25 % moet nagestreefd worden om een dunne zinklaag te verkrijgen ofwel dat silicium volledig moet geband worden. Indien het siliciumgehalte zich niet in dit bereik bevindt, wordt een dikke, grillige legeringslaag verkregen waarbij de adhesie en corrosieweerstand sterk gereduceerd kunnen zijn.

Standaard ongelegeerd staal bevat een laag siliciumgehalte. Lastoevoegmateriaal bevat doorgaans een groot percentage silicium omwille van de positieve invloed op de lasbaarheid. Het lasmetaal heeft dus een groter siliciumgehalte dan het omringende basismateriaal, welke een overdikte van de zinklaag kan veroorzaken op de lasnaad met de bijhorende reeds aangehaalde nadelen. De kennis van het siliciumgehalte in de lasnaad is van groot belang voor de beperking van de overdikte van de zinklaag op de lasnaad. Het siliciumgehalte is afhankelijk van de gehalten in het basismateriaal en toevoegmateriaal en de optredende opmenging. De opmenging is afhankelijk van vele factoren zoals alle in te stellen parameters, het gebruikte lasproces en parameters die afhankelijk zijn van de kwaliteit van de lasser. In het onderzoek dient op een zodanige wijze te werk worden gegaan dat zoveel mogelijk invloedsfactoren uitgeschakeld of geminimaliseerd kunnen worden.

Indien lasnaden kunnen bekomen worden met een weinig afwijkend siliciumgehalte van dat van het omliggende basismateriaal is deze verdikking niet meer aanwezig. Hieromtrent zijn reeds enkele oplossingen gevonden zoals toevoegen van bepaalde elementen aan het zinkbad. Doordat deze aangepaste samenstelling een kleinere dikte van de zinklaag als gevolg heeft, voldoet het niet meer aan de normering, daarenboven is de productiecapaciteit vandaag de dag nog beperkt. Een tweede oplossing wordt gevonden bij MAGlassen door de hoeveelheid actief gas te wijzigen aan de hand van het siliciumgehalte in de lasdraad.

Moderne stroombronnen werken met behulp van synergische lijnen, welke onder meer afhankelijk zijn van de gebruikte lasdraad. Omdat het onderzoek zich toespitst op een nieuwe lasdraad, kan eveneens een nieuwe synergische lijn opgesteld worden. De keuze van de stroombron is onder meer afhankelijk van het gebruikte boogtype. Voor onder de hand te lassen kan een conventionele stroombron worden gebruikt waarbij de doorlassing gebeurt door middel van kortsluitbooglassen en de daarop volgende lagen met sproeihoog, evenals kan gebruik worden gemaakt van een pulserende stroombron.

Een echte oplossing voor het halfautomaatlasproces waarbij de stukken in een klassiek zinkbad worden ondergedompeld is nog niet bekend. Wel wordt aangegeven dat door aanpassing van het actieve gas in de beschermgassamenstelling de lasbaarheid van een laag siliciumhoudende draad kan verbeteren. In de laatste paragraaf van de literatuurstudie werd het toepassingsgebied afgebakend waarbij de effecten van het sandelineffect als zeer ongewenst ervaren worden. Een laag siliciumhoudende draad kan een oplossing bieden aan het besproken probleem, echter dient de lasbaarheid van zulke draad te worden onderzocht.



# Hoofdstuk 3: Materialen en methoden

---

## 3.1 Proefprogramma

Aan de hand van het toepassingsgebied kunnen relevante proefstukken worden gekozen. Deze proefstukken worden gelast en visueel beoordeeld aan de hand van ISO 5817. Daarna worden de proefstukken naar de verzinkerij gestuurd waar ze thermisch verzinkt worden zoals in 2.1.2 beschreven staat. Vervolgens wordt een diktemeting van de zinklaag uitgevoerd. De proefstukken worden aangeëtsd zodat de grens tussen de werkelijke lasnaad en de warmtebeïnvloede zone zichtbaar wordt. Aan de hand van deze grens, de fusieline, en de originele situatie kan de opmenging berekend worden. De opmenging is bepalend voor het siliciumgehalte in de lasnaad en dus bepalend voor de dikte van de zinklaag (2.2.2). Het doel is dus om een relatie te kunnen leggen tussen de opmenging en de dikte die deze opmenging met zich meebrengt.

Nog opgemerkt dient te worden dat wordt uitgegaan van het feit dat een goede zinklaagdikte ter hoogte van de lasnaad, dus geen overdikte, samengaat met een goede hechting van de zinklaag op het basismateriaal. Er bestaan geen standaard testen om de hechting tussen de zinklaag en het basismateriaal te beproeven (ISO 1461), daarom wordt hier ook niet verder op ingegaan.

In de volgende paragrafen worden de gebruikte materialen, parameters en proeven voor de lastesten gespecificeerd.

## 3.2 Parameters

### 3.2.1 Lasdraad

Om aan de problematiek van het sandelin-effect (2.2.2) een oplossing te bieden, is een lasdraad met een laag siliciumgehalte ontworpen, namelijk 0,14 %. Het gaat om de ZINQWeld, de exacte chemische samenstelling wordt in deze studie niet vermeld omwille van confidentiële redenen. Deze massieve draad heeft een zeer hoge zuiverheid en een laag silicium- en koolstofgehalte. De zinklaag op de lasnaad vertoont geen verdikking maar is gelijkmatig. Deze vaststelling van Lastek wordt eveneens in dit onderzoek bevestigd. Elke lasproef wordt gelast met deze draad, de lasdraad is dus geen variabele in het onderzoek. Wel wordt in de tweede reeks van proefstukken zowel een lasdraad aangewend met een diameter van 1,0 mm als van 1,2 mm, in de eerste reeks wordt enkel de laatste gebruikt. De chemische samenstelling van beide lasdraden is identiek.

### 3.2.2 Beschermgas

Volgens de literatuurstudie (2.3.4; 2.6.3) bevat het geschikte gas ongeveer 0-5 % O<sub>2</sub>, 5-15 % CO<sub>2</sub>, 10-70 % He en verder aangevuld met Argon. Omdat gebruik wordt gemaakt van een lasdraad met een laag siliciumgehalte, moet het gedeelte actief gas (O<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub>) relatief hoog zijn. Helium kan ook aan het gas worden toegevoegd, maar wordt in deze testen niet gebruikt. Helium wordt voornamelijk toegepast wanneer een grotere inbranding noodzakelijk is en de hoeveelheid actief gas laag is. Een nadeel van helium is het veroorzaken van spatten. Teral 23 en 24 komen dus in eerste instantie in aanmerking. Verder kan worden besloten dat de hoeveelheid CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> niet te hoog mag zijn omdat gewerkt wordt met een laag siliciumgehalte in de draad. Door het gebrek aan desoxidans treedt minder reductie op.

Als beschermgas voor halfautomaatlassen van staal wordt een mengsel van argon, koestofdioxide en al dan niet een toevoeging van zuurstof aangewend. De gebruikte gassen met hun samenstelling worden in Tabel 3.2-1 weergegeven. De veiligheidsfiches van de verschillende gassen worden gegeven in bijlage A.

**Tabel 3.2-1 Beschermgassen**

Gas	Ar [%]	CO <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> [%]
Arcal 21	92	8	0
Atal 6	82	18	0
Arcal 14	96	3	1
Teral 23	90,5	5	4,5
Arcal 12	98	2	0

Arcal 14 is specifiek geoptimaliseerd voor het pulserend lassen, maar kan eveneens gebruikt worden voor niet-pulserend lassen. Met Arcal 14 vermindert de hoeveelheid spatten ongeacht de waarde van de stroomsterkte. Daarnaast zorgt het geringe oxiderend vermogen voor een fraai lasuiterlijk met weinig slak en bijzonder weinig rookontwikkeling. Dit steeds ten opzichte van een Atal gasmengsel dat uitsluitend uit argon en CO<sub>2</sub> bestaat. De CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-dosering zorgt voor een optimale inbranding, een goede aanvloeiing en een homogene structuur. Arcal 14 is een gasbescherming voor ongelegeerd staal voor hoge kwaliteit en kleine diktes. [70]

Een Atal gasmengsel is een standaard gasbescherming voor ongelegeerd staal voor algemeen gebruik. Het menggas bestaat hoofdzakelijk uit argon, met toevoeging van CO<sub>2</sub>. Atal gasmengsels worden hoofdzakelijk gebruikt bij grotere diktes (> 5 mm) en met een conventionele stroombron. [70]

Arcal 21 is een beschermgas voor ongelegeerd staal voor hoge kwaliteit en algemeen gebruik. De toepassing ervan beperkt zich tot kleine diktes en wordt voornamelijk met een pulserende stroombron gelast. [70]

Een Teral gas is net zoals een Atal gas een standaard beschermgas, echter is de toepassing ervan beperkt tot kleine diktes. [70]

Bij proefreeks 2 wordt naar aanleiding van slechte resultaten met de andere gassen, bij gebruik van de lasdraad met 1,0 mm doorsnede, beschermgas arcal 12 uitgetoet. Dit menggas bevat slechts 2% CO<sub>2</sub> en geen zuurstof. Het is wel duurder ten opzichte van Atal 6 en Arcal 21.

### 3.2.3 Stroombron en laspositie

Twee verschillende stroombrontypes worden aangewend voor de lasproeven. De productfiche van de gebruikte stroombron, Mega puls 400, wordt gegeven in bijlage A. Elke combinatie van type proefstuk en type beschermgas wordt zowel met een conventionele stroombron als met een pulserende stroombron gelast. De proeven beperken zich tot het onder de hand lassen. Elke proef wordt stekend gelast zodat dit geen invloedsfactor is voor de opmenging (2.4.2.8).

### 3.2.4 Proefstukken proefreeks 1

Aan de hand van het toepassingsdomein worden de proefstukken bepaald (2.7). Proeven met een hoeknaad en een I-, V- en X-naad worden opgesteld en leiden tot indicatieve waarden voor de andere lasnaadvormen. De proeven worden uitgevoerd op plaatjes met volgende diktes: 3, 10, 12 en 20 mm. In Tabel 3.2-2 worden de naadvormen met bijhorende dikte en eventueel de toegepaste opening opgesomd. In bijlage C worden schetsen van de proefstukken weergegeven. In de toepassingsdomeinen gaat het hoofdzakelijk over constructiestaal (2.7). De proeven worden dan ook uitsluitend op constructiestaal uitgevoerd met staalsoort S235JR.

**Tabel 3.2-2 Proefstukken proefreeks 1**

Naadvorm	Opening [mm]	Dikte plaat [mm]
Hoeknaad	/	12
V-naad	3	10
X-naad	3	20
Hoeknaad	/	3
I-naad	2	3

Bij de V- en X- naad wordt enkel de eerste pas gelast. Hoe meer passen worden gelast, hoe meer de samenstelling van het lasmetaal gelijk op dat van het toevoegmateriaal (2.4.2.11). De zinklaag groeit dus minder aangezien het toevoegmateriaal een zeer laag siliciumgehalte heeft. Indien enkel de eerste pas bestudeerd wordt, is het siliciumgehalte in de naad hoger en is de zinklaag dus dikker dan deze in werkelijkheid is bij een volledig gelaste naad.

### 3.2.5 Samenvatting proefreeks 1

De lasdraad en laspositie zijn constante parameters. De vorm van de lasnaad, samenhangend met de plaatdikte, het type beschermgas en het type stroombron vormen de variabelen in het onderzoek. Voor elke combinatie wordt door een gekwalificeerde lasser de juiste instelparameters zoals onder andere de stroom en spanning 'vastgelegd'. Een gekwalificeerd lasser wordt ingezet om de variatie van de parameters die een invloed hebben op de opmenging, zoals werkstuk-mondstuk afstand (2.4.2.6) en hoek lastoorts (2.4.2.8) te minimaliseren.

**Tabel 3.2-3 Overzicht van de variabelen proefreeks 1**

Lasnaadvorm & plaatdikte	Beschermgas	Stroombron
Hoeknaad 12 mm	Arcal 14	Conventioneel
V-naad 10 mm	Atal 6	Pulserend
X-naad 20 mm	Arcal 21	
Hoeknaad 3 mm	Teral 23	
I-naad 3 mm		

### 3.2.6 Proefstukken proefreeks 2

De proefstukken van proefreeks 2, Figuur 3.2-1 tot en met Figuur 3.2-4, worden geleverd door klanten en zijn dus proefstukken waarop de lasdraad in de toekomst dient te worden toegepast. Deze proeven worden uitgevoerd met een lasdraad met dikte 1,2 mm, in tegenstelling tot de eerste proefreeks wordt hier ook een 1,0 mm draad aangewend. Het gebruik van een lasdraad met dikte 1,0 mm is meer relevant aangezien het in het toepassingsgebied voornamelijk om elementen gaat met kleine dikte. Deze draaddiameter was tijdens de eerste proefreeks echter nog niet voorhanden. In Tabel 3.2-4 worden de eigenschappen weergegeven van de verschillende proefstukken.

**Tabel 3.2-4 Eigenschappen van de geleverde proefstukken**

Nummers	Aard	Dikte [mm]	Materiaal
7,8,19,20	Koker	4	235 JR
13,14,15,16,21,22	Plaat 1	6	235 JR
9,10,11,12,23,24	Plaat 2	6	355 MC
17,18	Profiel	2	235 JR
1,2,3,4	Buis (lantaarnpaal)	4	235 JR



**Figuur 3.2-1 Koker**



**Figuur 3.2-2 Profiel (raam)**



**Figuur 3.2-3 Profiel (hoek)**



**Figuur 3.2-4 Buis (lantaarnpaal)**

Van elk proefstuk werden meerdere exemplaren geleverd, opnieuw is er waar kon gevarieerd wat betreft gas en stroombrontype. Proefstukken 4 en 19 tot 23 werden bij de klant gelast met klassiek lastoevoegmateriaal. Bij de kwaliteitsbeoordeling, die deze keer slechts oppervlakkig wordt uitgevoerd, dus niet uitgebreid volgens de norm, van deze stukken kan afgeleid worden dat geen hoge kwaliteit vereist wordt. Het is dan ook deze kwaliteit die de lasser bij de proefstukken nastreeft.

### **3.3 Beoordeling werkstukken**

#### **3.3.1 Beoordeling onverzinkte werkstukken**

##### **3.3.1.1 Visuele controle van de lasnaad: ISO 5817**

Aan de hand van een visuele beoordeling volgens ISO 5817 kan per specifieke fout of lasonvolkomenheid een klasse aangeduid worden die maatgevend is voor de grootte van de fout. Drie klassen worden onderscheiden, zo is B de klasse van het hoogste niveau, de fout is hier dus minimaal of niet aanwezig. Klasse B wordt gevolgd door klasse C en klasse D met afnemend kwaliteitsniveau. Klasse D is het laagst aanvaardbare niveau. Indien de fout groter is dan toegelaten voor klasse D, kan de las niet worden geaccepteerd. Een lasnaad kan uiteraard per fout verschillen van klasse. De laagste klasse is bepalend voor de klasse van de lasnaad. De behaalde klasse is bepalend voor het toepassingsdomein van de lasnaad.

Om de verschillende fouten op te meten wordt gebruik gemaakt van de three-scale weld gauge (ISO 17637) en een schuifmaat, met beide instrumenten wordt met een nauwkeurigheid van 0,1 mm afgelezen.

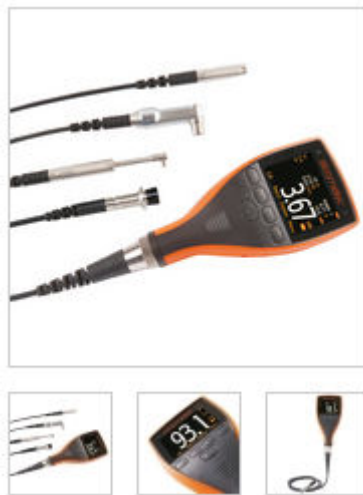
### 3.3.1.2 Algemene visuele beoordeling lasnaad

De lasnaden worden eveneens beoordeeld door een aantal zelf opgestelde criteria. Deze criteria zijn fouten en onregelmatigheden die het meest worden vastgesteld in de lasnaden. Aan de hand van deze beoordeling kunnen eventueel makkelijker besluiten genomen worden wat betreft de verschillende parameters dan aan de hand van de beoordeling volgens de norm. De gebruikte criteria zijn:

- 1) Onregelmatige las
- 2) Randinkarteling
- 3) Porositeiten met het blote oog zichtbaar
- 4) Niet goed aanvloeien
- 5) Lijn in het midden zichtbaar
- 6) Uitgezakte hoeklas
- 7) Onvoldoende inbranding bij doorlassing
- 8) Slechte eindkratervulling
- G) Algemeen goede las

### 3.3.2 Diktemetingen zinklaag

De dikte van de zinklaag wordt volgens ISO 1461 opgemeten. Instrumenten voor magnetische methoden meten ofwel de magnetische aantrekkingskracht tussen een permanente magneet en het basismetaal, beïnvloed door de coating, ofwel de weerstand van de magnetische flux door de coating en het basismateriaal. In deze metingen wordt gebruik gemaakt van het instrument Elco 456, dit wordt voor elk gebruik gekalibreerd met gecertificeerde kalibratieplaatjes ( ISO 2178 ).



**Figuur 3.3-1 Elco 456 [71]**



De metingen worden in een bepaald aantal referentiegebieden uitgevoerd. Het aantal en de positie van de referentiegebieden wordt gekozen in relatie tot de vorm en de omvang van het voorwerp, om een resultaat te krijgen dat zo representatief mogelijk is voor de gemiddelde zinklaagdikte. Op een lang controlevoorwerp moeten de referentiegebieden ongeveer 100 mm van de uiteinden en ongeveer in het midden worden gekozen. De gebieden hebben een grootte van minimaal 10 cm<sup>2</sup> en dienen de gehele dwarsdoorsnede van het voorwerp te omvatten. In elk referentiegebied dient op tenminste vijf plaatsen te worden gemeten waarna het gemiddelde steeds wordt berekend. Bij de berekening van het gemiddelde wordt geen rekening gehouden met sterk afwijkende metingen. Aangezien het steeds om proefstukken gaat waarvan de oppervlakte kleiner is dan twee vierkante meter, wordt slechts één referentiegebied vereist, zie Tabel 3.3-1.

**Tabel 3.3-1 Vereist aantal referentiegebieden ( ISO 1461 )**

Category	Size of significant surface area	Number of reference areas to be taken per article
a	> 2 m <sup>2</sup>	≥ 3
b	> 100 cm <sup>2</sup> to ≤ 2 m <sup>2</sup>	≥ 1
c	> 10 cm <sup>2</sup> to ≤ 100 cm <sup>2</sup>	1
d	≤ 10 cm <sup>2</sup>	1 on each of <i>N</i> articles

NOTE 2 m<sup>2</sup> = 200 cm × 100 cm; 100 cm<sup>2</sup> = 10 cm × 10 cm.

Van elk proefstuk wordt de laagdikte van de zinklaag zowel naast de lasnaad als op de lasnaad gemeten. Op die manier kan worden nagegaan of er al dan niet een verdikking optreedt ter hoogte van de lasnaad. Het gemiddelde van de vijf metingen in het referentiegebied dient groter te zijn dan de minimale coatingdikte aangegeven in de norm, zie Tabel 3.3-2.

**Tabel 3.3-2 Minimale dikte zinklaag volgens ISO 1461**

Article and its thickness	Local coating thickness (minimum) <sup>a</sup>	Local coating mass (minimum) <sup>b</sup>	Mean coating thickness (minimum) <sup>c</sup>	Mean coating mass (minimum) <sup>b</sup>
	µm	g/m <sup>2</sup>	µm	g/m <sup>2</sup>
Steel > 6 mm	70	505	85	610
Steel > 3 mm to ≤ 6 mm	55	395	70	505
Steel ≥ 1,5 mm to ≤ 3 mm	45	325	55	395
Steel < 1,5 mm	35	250	45	325
Castings ≥ 6 mm	70	505	80	575
Castings < 6 mm	60	430	70	505

NOTE This table is for general use: individual product standards may include different requirements including different categories of thickness. Local coating mass and mean coating mass requirements are set out in this table for reference in such cases of dispute.

<sup>a</sup> See 3.8.  
<sup>b</sup> Equivalent coating mass using a nominal coating density of 7,2 g/cm<sup>3</sup> (see Annex D).  
<sup>c</sup> See 3.9.

### 3.3.3 Macrografie van de lasnaad

#### 3.3.3.1 Algemeen

Aangezien in dit onderzoek enkel de zichtbaarheid van de opgemengde zone vereist wordt, volstaat een vereenvoudigde methode voor de macrografie van de lasnaad. Het schuren wordt slechts uitgevoerd tot een relatief grove fijnheid, vervolgens wordt met verdunde nital de fusieline zichtbaar gemaakt. Om aan te tonen dat deze vereenvoudigde methode eveneens tot voldoende nauwkeurige resultaten leidt, wordt ze gevalideerd. Deze validatie wordt simpelweg uitgevoerd door twee proefstukken uit één enkele lasnaad te verifiëren. De lasnaad wordt op één plaats doorgezaagd, beide zijden doen dienst als proefstuk. Dezelfde tekening zou op de macrografie moeten verschijnen met eveneens dezelfde resultaten voor de opmenging.

#### 3.3.3.2 Algemene methode

Een metallurgisch werkstuk voor macroscopisch en/of microscopisch onderzoek dient een representatieve doorsnedeoppervlakte van het materiaal te hebben. Om duidelijke structurele details te kunnen onderscheiden, wordt het oppervlak vrij gemaakt van onregelmatigheden ten gevolge van oppervlaktevervorming, krassen en andere oppervlaktefouten. Het werkstuk dient een aantal stappen te doorlopen waarbij het wordt voorbereid voor het onderzoek. De stappen worden hieronder opgesomd en besproken. Aangezien een fout in één van de stappen moeilijk of zelfs onherstelbaar is in het verdere verloop van de voorbereiding, is elke stap kritisch. [72]

##### Stap 1: Selecteren en snijden van een doorsnede oppervlakte

De eerste stap in de voorbereiding van het werkstuk bestaat uit de selectie en scheiding van monsters uit het bulkmateriaal, ook 'sampling' genoemd. De eerste scheiding wordt met een gewone slijpschijf mechanisch verzorgd, daarbij dient men ver genoeg van de geïnteresseerde zone verwijderd te blijven om ongewenste effecten te vermijden. Dergelijke processen gaan steeds gepaard met warmteontwikkeling welke rekristallisatie, lokale tempering, en in extreme gevallen zelfs lokaal smelten van het materiaal tot gevolg hebben. Vervolgens wordt het monster met een meer gesofisticeerde slijpschijf (Struers) bewerkt om de gewenste snede te bekomen. Dit proces veroorzaakt geen wijziging van het oppervlak van de doorsnede en kan dus wel in de nabijheid van de te onderzoeken zone gebeuren. [72]

##### Stap 2: Inbedden

Het inbedden van het monster is noodzakelijk bij de voorbereiding van onregelmatige, kleine, zeer zachte, poreuze of brosse werkstukken. Tevens is het inbedproces noodzakelijk indien automatisch apparatuur wordt gebruikt bij één van de volgende stappen. Het gebruikte inbedproduct voldoet aan verschillende eisen, zo wordt een goede adhesie met het monster vereist en dienen de mechanische eigenschappen zoals de hardheid voldoende te zijn. Daarnaast wordt een zekere chemische weerstand tegen de toegepaste etsmiddelen vereist. Als inbedmiddel wordt fenolhars gebruikt. [72]

##### Stap 3: Polijsten

Het ingebedde monster wordt met steeds fijner schuurmateriaal gepolijst. De laatste polijstbeurt wordt uitgevoerd op een doek met diamant en vloeistof zodat een uiterst glad oppervlak wordt verkregen. [72]

#### Stap 4: Etsen

Het etsmiddel moet zodanig worden gekozen dat de lasdoorsnede zichtbaar wordt. De lasdoorsnede reageert dus anders met het etsmiddel dan het basismateriaal waardoor een kleurverschil ontstaat. Als etsmiddel voor een macrografie wordt een mengsel van 90 ml ethanol en 10 ml salpeterzuur aanbevolen. [72]

#### 3.3.3.2 Vereenvoudigde methode

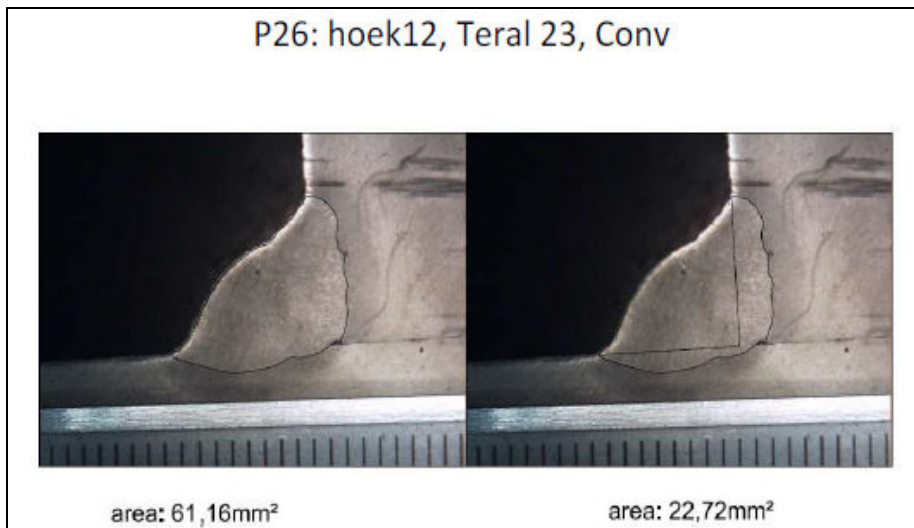
Nadat het werkstuk op de juiste grootte is gezaagd wordt het vervolgens geschuurd met slechts twee verschillende grofheden. De krassen veroorzaakt door het zagen worden er uit geschuurd aan de hand van een schuurpapier met fijnheid P120. Vervolgens wordt geschuurd met P800 om de krassen te verfijnen. Na het schuren met P800 wordt het proefstuk aangeëts met verdunde nital. Nital bestaat uit 100 ml ethanol 96 % en 1-10 ml salpeterzuur 65 %. Het gebruikte mengsel bestaat uit 15 ml  $\text{HNO}_3$  en 300 ml ethanol. Deze aanetsing gebeurt tot de fusielijns duidelijk zichtbaar is, meestal ligt de aanetstijd tussen één en drie minuten. Na het etsen wordt het werkstuk ondergedompeld in water om het zuur af te spoelen en vervolgens ondergedompeld in Norvanol D ter corrosiepreventie. Norvanol D bestaat uit 83,5 % ethanol, 2,5 % ether en 14 %  $\text{H}_2\text{O}$ . De laatste stap is het drogen van het werkstuk met behulp van een haardroger. Na deze stap is het werkstuk klaar voor onder de microscoop te bekijken en een foto te nemen, zie Figuur 3.3-2. Deze vereenvoudigde methode wordt eerst gevalideerd met de volledige etsmethode.



**Figuur 3.3-2 Opstelling microscoop**

### 3.3.3.3 Bepaling opmenging

Voor elk proefstuk wordt de opmenging bepaald met behulp van een macrografie. Op deze macrografie is de fusielijns duidelijk herkenbaar zodat de oppervlakte van de opgemengde zone kan worden opgemeten. De oorspronkelijke situatie wordt gereconstrueerd op de macrografie. Zoals in de literatuurstudie reeds werd aangehaald (2.4.1) is de opmenging niet meer dan de verhouding van het penetratiegebied ten opzichte van de totale lasoppervlakte. Dit wil zeggen dat de oppervlakte waarbij de opgemengde zone de oorspronkelijke situatie overlapt dient gedeeld te worden door de totale oppervlakte van de opgemengde zone. In Figuur 3.3-3 wordt dit voor een proefstuk weergegeven.



**Figuur 3.3-3 Voorbeeld berekening opmenging. Meetschaal is per mm.**

De opmenging bedraagt hier:

$$\frac{A_p}{A_p + A_r} \times 100\% = \frac{22,72 \text{ mm}^2}{61,16 \text{ mm}^2} \times 100\% = 37\%$$

De opmenging wordt bepaald tot op 1 % nauwkeurig, echter wordt steeds een tolerantie van  $\pm 5\%$  beschouwd. Deze tolerantie is nodig aangezien de oorspronkelijke situatie niet met zekerheid kan hertekend worden. Factoren die dit bemoeilijken zijn onder andere de door krimp gerealiseerde vervorming en de nauwkeurigheid van de naadvoorbereiding, deze laatste is namelijk zeer moeilijk nauwkeurig nameetbaar. Het feit dat de opmenging gebaseerd is op slechts één macrografie vormt een bijkomende reden voor het toepassen van de tolerantie. Deze opmenging is qua grootteorde zeker maatgevend, echter is een voldoende ruime tolerantie noodzakelijk.

# Hoofdstuk 4: Proeven

---

## 4.1 Inleiding

Het onderzoek start met de zoektocht naar een lasdraad die resulteert in een zinklaag zonder overdiktes ter hoogte van de lasnaden. Nadat een ontwikkelde samenstelling hiervoor bevredigende resultaten levert, wordt de lasbaarheid van deze lasdraad geoptimaliseerd. De proefstukken die hiervoor worden aangewend komen overeen met het eerder onderzochte toepassingsgebied. Aan de hand van deze proefstukken worden de lasparameters gezocht en wordt vervolgens het haalbare kwaliteitsniveau afgeleid met behulp van een visuele beoordeling. De proefstukken worden verzinkt, daarna wordt van ieder proefstuk de zinklaagdikte opgemeten en de opmenging bepaald. Een tweede reeks van proefstukken bestaat uit elementen geleverd door klanten. Deze worden gelast en verzinkt, eveneens volgt een zinklaagdiktemeting ter controle. Op basis van deze proefstukken wordt een pWPS opgesteld.

## 4.2 Verificatie lasdraad ZINQWeld

De meest gunstige lasdraad wordt gekozen aan de hand van enkele proeflassen. Deze proeflassen worden verzinkt en de zinklaagdikte wordt opgemeten. De volledige resultaten worden weergegeven in bijlage B. In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten samengevat.

Wanneer de gemiddelde dikte van de zinklaag op de lasnaad van een klassieke lasdraad wordt vergeleken met ZINQWeld is het duidelijk dat de klassieke lasdraad een enorme verdikking vertoont terwijl dit bij ZINQWeld zich niet voordoet, zie Tabel 4.2-1. Tevens is visueel duidelijk een verschil waar te nemen. In Figuur 4.2-1 is duidelijk een verdikking te zien ter hoogte van de lasnaad ten opzichte van het omringende materiaal, terwijl dit in Figuur 4.2-2 volledig afwezig is. Wanneer het Si-gehalte van de twee gebruikte draden wordt vergeleken, kan tevens een groot verschil opgemerkt worden. Zo heeft een standaard lasdraad een Si-gehalte van ongeveer 0,7 % terwijl de ZINQWeld lasdraad slechts 0,14 % Si bevat. De verdikking en het visuele verschil dat opgemerkt wordt kan rechtstreeks aan het Si-gehalte toegeschreven worden.

**Tabel 4.2-1 Vergelijking dikte zinklaag lasdraden**

	<b>Klassieke lasdraad</b>	<b>ZINQWeld</b>
Zink op plaat [ $\mu\text{m}$ ]	69	116
Zink op weggeslepen las [ $\mu\text{m}$ ]	295	109



**Figuur 4.2-1 Met klassieke lasdraad**



**Figuur 4.2-2 Met ZINQWeld**

### **4.3 Lasparameters**

De gebruikte draad, ZINQWeld, vertoont een grote variatie in uiteindelijke laskwaliteit bij slechts kleine variaties van de ingestelde parameters. Daarom wordt bij aanvang van elke lasproef met een bepaald type proefstuk, beschermgas en stroombron de combinatie gezocht van de parameters die leiden tot de best mogelijke laskwaliteit. Tot deze parameters behoren de draadsnelheid, de lasspanning en de lasstroom. Het vaststellen van deze optimale combinatie wordt bewerkstelligd door een ervaren lasser. De uiteindelijke gebruikte effectieve parameters waarmee wordt gelast, niet de ingestelde, per gas en voor elke lasnaad worden in bijlage D weergegeven.

## 4.4 Beoordeling onverzinkte proefstukken: proefreeks 1

### 4.4.1 Visuele beoordeling van de lasnaad: ISO 5817

**Tabel 4.4-1 Klasse bepaald volgens ISO 5817 voor verschillende lasnaden en gassen met conventionele en pulserende stroombron**

Proefstuk	Arcal21		Atal6		Arcal14		Teral23	
	Conv	Puls	Conv	Puls	Conv	Puls	Conv	Puls
<b>Hoek12</b>	D	D	D	D	D	/*	D	D
<b>V10</b>	D	C	C	C	C	C	C	C
<b>X20</b>	B	B	B	B	C	B	B	B
<b>Hoek3</b>	B	B	B	B	B	B	B	B
<b>I3</b>	D	D	D	C	D	D	D	D

\*voldoet niet aan klasse D

Uit Tabel 4.4-1 kan besloten worden dat het soort gas en type stroombron (conventioneel of pulserend) weinig invloed heeft op de klasse van de lasnaad. De soort lasnaad echter heeft een grote invloed. De beste resultaten, de hoogste klassen, worden verkregen bij de hoeknaad met een plaatdikte van 3 mm en de X-naad. Desondanks moet opgemerkt worden dat slechts de eerste pas bij de X-naad werd gelast en beoordeeld, bij deze beoordeling werd enkel rekening gehouden met al dan niet aanwezigheid van ondersnijding. Daarnaast kan worden besloten dat pulserend lassen met Arcal 14 van een hoeknaad met plaatdikte 12 mm uitgesloten is, dit resulteert in een kwaliteit die niet voldoet aan klasse D. De las is te asymmetrisch om aanvaardbaar te zijn. Bij het gebruik van een conventionele stroombron leidt Arcal 14 tevens voor een meer asymmetrische las dan de andere gebruikte gassen.

Enkel voor de I-naad met plaatdikte 3 mm is het nuttig om een extra tabel op te maken met een vergelijking tussen de verschillende gassen en tussen de pulserende en conventionele stroombron. Per combinatie wordt aangegeven hoeveel fouten van welke categorie worden vastgesteld.

**Tabel 4.4-2 Aantal fouten van I-naad 3mm volgens ISO 5817**

nr	gas	puls/conv	ISO 5817			klasse
			B	C	D	
P1	Atal 6	puls	7	2	0	C
P2	Teral 23	conv	6	1	2	D
P3	Arcal 14	puls	6	0	3	D
P4	Arcal 21	conv	7	1	1	D
P5	Arcal 21	puls	6	2	1	D
P6	Arcal 14	conv	5	2	2	D
P7	Teral 23	puls	8	0	1	D
P8	Atal 6	conv	7	0	2	D

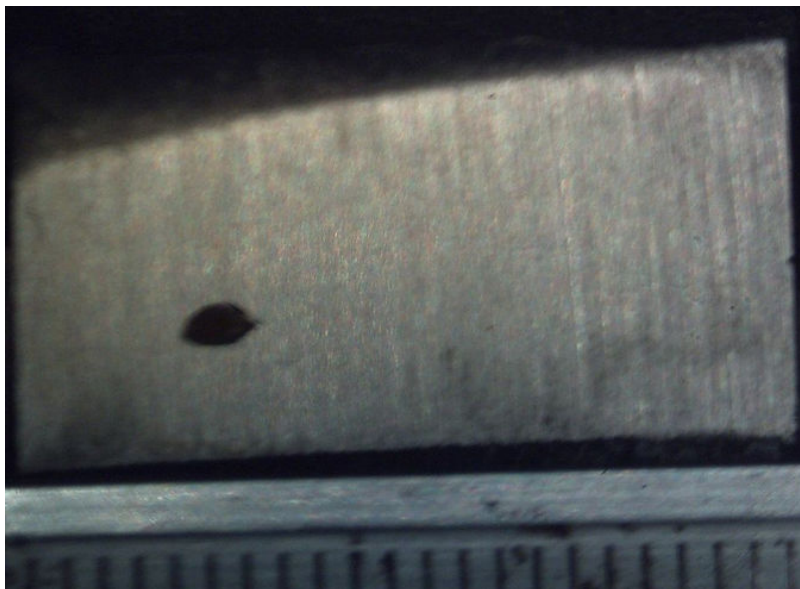
Uit Tabel 4.4-2 blijkt dat pulserend lassen met Atal 6 niet in fouten resulteert van klasse D, daardoor heeft deze lasnaad de hoogste klasse, namelijk klasse C. Uit de tabel kan ook duidelijk worden afgeleid dat lassen van de I-naad met Arcal 14 leidt tot veelvuldige fouten. De uitgebreide resultaten worden gegeven in bijlage E.

Belangrijk hierbij op te merken is dat in de praktijk de lasnaad vaak wordt weggeslepen waardoor onvolkomenheden eveneens worden verwijderd. Daardoor ligt de klasse van een vlakgeslepen las doorgaans hoger en is het toepassingsgebied dus ook groter. Daarenboven worden deze proeven uitgevoerd met behulp van een lasdraad met dikte 1,2 mm, welke de resultaten ook negatief beïnvloedt. Bij deze proeven wordt uitgegaan van een 'worst case' scenario, in de praktijk wordt eerder een dikte van 1,0 mm gehanteerd.

Na het onderzoek naar de oppervlaktefouten worden ook de inwendige fouten volgens ISO 5817 onderzocht. Nadat alle proeven zijn uitgevoerd op de proefstukken wordt de lasnaad doorgezaagd. Op basis van een langse en een dwarse snede wordt de lasnaad beoordeeld op porositeiten. De langse snede wordt geschuurd (Struers) tot de eventuele aanwezige poriën in die snede zichtbaar worden. Voor de beoordeling van de dwarse snede wordt gebruik gemaakt van de macrografie voor het bepalen van de opmenging, zie paragraaf 3.3.3. De klassen worden weergegeven in bijlage E.

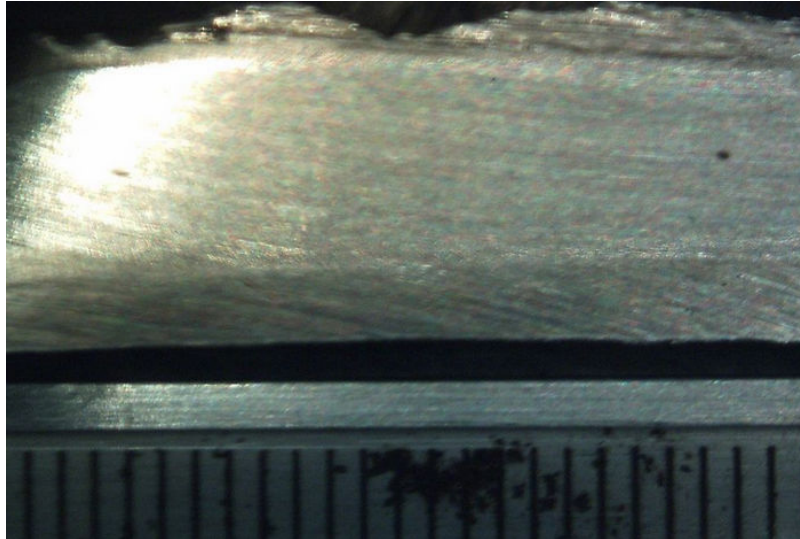
In het algemeen worden nauwelijks tot geen porositeiten aangetroffen in de lasnaden en wordt klasse B behaald. Bij de proefstukken met dikte 10 mm of groter worden soms grotere porositeiten waargenomen. Deze behalen klasse C, enkel V10 gelast met Arcal 21 (P22) vormt hier een uitzondering en levert slechts klasse D op.

De onderstaande figuren tonen enkele voorbeelden van langse doorsneden. De afbeeldingen zijn zo gekozen dat de eerste een grote porositeit weergeeft, de tweede een minder grote. De derde afbeelding toont een porievrije snede. De dwarsdoorsneden worden weergegeven in bijlage G.

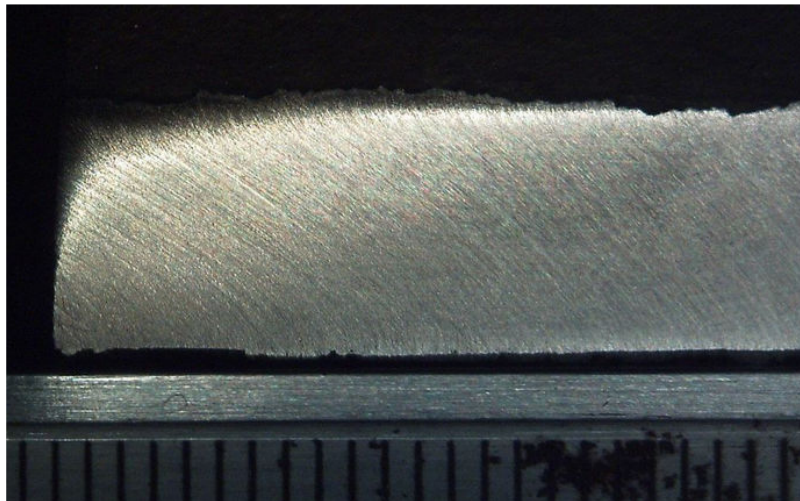


**Figuur 4.4-1 Grote porositeit. Meetschaal is per mm. (P31)**





**Figuur 4.4-2 Gemiddelde grote van porositeit. Meetschaal is per mm. (P23)**



**Figuur 4.4-3 Porievrije snede. Meetschaal is per mm. (P35)**

Indien proefstuk P22 buiten beschouwing wordt gelaten, kan worden geconcludeerd dat bij inwendige fouten steeds klasse C kan worden gegarandeerd.

## 4.4.2 Algemene visuele beoordeling van de lasnaad

In volgende tabellen (Tabel 4.4-3 tot Tabel 4.4-7) worden de lasnaden visueel beoordeeld aan de hand van zelf opgestelde criteria, welke worden weergegeven in de legende. Per fout wordt overlopen waar deze voornamelijk voorkomt of juist niet voorkomt. Vervolgens wordt per type proefstuk aangegeven welk beschermgas en stroombron tot de slechtste en beste resultaten leidt.

Legende

- 1) Onregelmatige las
- 2) Randinkarteling
- 3) Porositeiten met het blote oog zichtbaar
- 4) Niet goed aanvloeiën
- 5) Lijn in het midden zichtbaar
- 6) Uitgezakte hoeklas
- 7) Onvoldoende inbranding bij doorlassing
- 8) Slechte eindkratervulling
- G) Algemeen goede las

**Tabel 4.4-3 Algemene visuele beoordeling voor V-naad met plaatdikte 10 mm**

nr	gas	puls/conv	1	2	3	4	5	6	7	8	totaal	G
P17	Teral 23	puls								x	1	x
P18	Atal 6	conv				x				x	2	
P19	Arcal 14	puls			x				x		2	
P20	Arcal 14	conv				x			x	x	3	
P21	Arcal 21	puls									0	x
P22	Arcal 21	conv				x				x	2	
P23	Atal 6	puls				x				x	2	
P24	Teral 23	conv	x		x				x		3	

Algemene opmerking bij de V-naad: de doorlassing verloopt vrij moeilijk.

**Tabel 4.4-4 Algemene visuele beoordeling hoeknaad met plaatdikte 12 mm**

nr	gas	puls/conv	1	2	3	4	5	6	7	8	totaal	G
P25	Atal 6	puls						x		x	2	
P26	Teral 23	conv								x	1	x
P27	Arcal 21	puls									0	x
P28	Arcal 21	conv								x	1	x
P29	Arcal 14	puls						x		x	2	
P30	Arcal 14	conv	x			x				x	3	
P31	Teral 23	puls				x				x	2	
P32	Atal 6	conv				x					1	x

**Tabel 4.4-5 Algemene visuele beoordeling X-naad met plaatdikte 20 mm**

nr	gas	puls/conv	1	2	3	4	5	6	7	8	totaal	G
P33	Atal 6	puls								x	1	x
P34	Teral 23	conv								x	1	
P35	Arcal 14	puls			x						1	
P36	Arcal 21	conv								x	1	
P37	Arcal 21	puls								x	1	
P38	Arcal 14	conv								x	1	x
P39	Teral 23	puls	x			x				x	3	
P40	Atal 6	conv								x	1	

Algemene opmerkingen bij X-naad: door de dikkere plaat kan de warmte beter worden afgevoerd, vandaar dat deze naadvorm vrij goed lasbaar is.

Opmerking bij Teral 23 conv: De las wordt onregelmatiger naar het einde toe.

**Tabel 4.4-6 Algemene visuele beoordeling hoeknaad met plaatdikte 3 mm**

nr	gas	puls/conv	1	2	3	4	5	6	7	8	totaal	G
P9	Teral 23	puls								x	1	x
P10	Atal 6	conv					x			x	2	
P11	Arcal 21	puls					x				1	
P12	Arcal 14	conv					x			x	2	
P13	Arcal 14	puls								x	1	x
P14	Arcal 21	conv								x	1	
P15	Atal 6	puls					x			x	2	
P16	Teral 23	conv					x			x	2	

Algemene opmerkingen bij hoeknaad met plaatdikte 3 mm: De las koelt te hard af van buiten naar binnen toe, vandaar de lijn met onzuiverheden in het midden. De lasparameters resulteren in een globulaire boog, de kleine dikte beperkt de mogelijkheid van een sproeihoog.

**Tabel 4.4-7 Algemene visuele beoordeling I-naad met plaatdikte 3 mm**

nr	gas	puls/conv	1	2	3	4	5	6	7	8	totaal	G
P1	Atal 6	puls									0	x
P2	Teral 23	conv			x	x					2	
P3	Arcal 14	puls		x		x				x	3	
P4	Arcal 21	conv		x	x	x					3	
P5	Arcal 21	puls		x	x						2	
P6	Arcal 14	conv		x					x	x	3	
P7	Teral 23	puls			x						1	
P8	Atal 6	conv		x		x					2	

Algemene opmerkingen bij I-naad: Vanwege de kleine opening verloopt de doorlassing vrij moeilijk. De warmte-inbreng is te hoog voor de plaat waardoor er door wordt gebrand. Intervallassen biedt hieraan een oplossing. Elk proefstuk van I 3 is gelast door intervallassen.

Opmerking bij Arcal 21 puls: Door veel CO<sub>2</sub> wordt een te diepe inbranding verkregen.

Opmerking bij Arcal 21 conv: Slechte las.

Randinkarteling (fout 2) wordt enkel waargenomen bij de I-naad. Bij pulserend lassen met Atal 6 en conventioneel of pulserend lassen met Teral 23 komt deze fout niet voor. Een grote fout, namelijk porositeiten (fout 3), wordt gevonden bij het lassen van de V-naad met Arcal 14 pulserend en conventioneel met Teral 23 op het einde van de lasnaad, tevens worden zulke porositeiten gevonden bij het lassen van de X-naad met Arcal 14 pulserend. Porositeiten onderaan de doorlassing door intervallassen doen zich bij de testen uitsluitend voor bij het lassen van een I-naad met Teral 23 en Arcal 21 (zowel pulserend als conventioneel). Doorlassingen bij een V-naad verlopen over het algemeen zeer moeilijk voor al de geteste beschermgassen, voornamelijk het slecht aanvloeien is een probleem (fout 4). Enkel pulserend lassen met Arcal 14 en conventioneel met Teral 23 kunnen hier een bevredigend resultaat leveren. Indien de resultaten van de I-naad van de aanvloeijing in de doorlassing mee in rekening worden gebracht, kan besloten worden dat het beschermgas Teral 23, vooral pulserend gelast, de beste resultaten hiervoor levert. Eveneens worden goede resultaten bekomen bij Arcal 21 pulserend en Arcal 14 conventioneel gelast. Bij de V-naad leidt het gebruik van Arcal 14 conventioneel ook tot een goede aanvloeijing. Een lijn van onzuiverheden in het midden van de lasnaad (fout 5) doet zich voornamelijk voor bij de hoeklas met een plaatdikte van 3 mm. Bij pulserend lassen met Teral 23 of conventioneel lassen met Arcal 21 wordt deze fout vastgesteld, bij pulserend lassen met Arcal 14 in mindere mate. Een uitgezakte hoeklas (fout 6) komt vooral voor bij grotere plaatdiktes. Bij pulserend lassen kan enkel Teral 23 een goed resultaat opleveren, bij conventioneel lassen wordt dit probleem niet aangetroffen. Arcal 14 is geen geschikt gas voor het lassen van een V-naad of I-naad, het resulteert regelmatig in fouten zoals onvoldoende inbranding bij de doorlassing (fout 7).

Uit Tabel 4.4-3 tot Tabel 4.4-7 kan duidelijk worden afgeleid dat een slechte eindkratervulling (fout 8) veelvuldig voorkomt, enkel bij hoeknaden met een plaatdikte van 3 mm is deze duidelijk minder aanwezig. Tevens kan worden opgemerkt dat deze fout zich bijna niet voordoet bij Arcal 21 pulserend gelast, enkel bij de X-naad.

Per proefstuk worden nu de beste en slechtste combinaties weergegeven. Eveneens wordt bekeken of een bepaald gas steeds goede of slechte resultaten oplevert, hetzelfde wordt gedaan voor het type stroombron. Bij deze resultaten wordt tevens rekening gehouden met de visuele beoordeling volgens ISO 5817 in paragraaf 4.4.1.

**Tabel 4.4-8 Opsomming van de beste en de slechtste resultaten per proefstuk**

Proefstuk	Beste resultaten			Slechtste resultaten		
	Combinatie	Gas Algemeen	Stroom Algemeen	Combinatie	Gas Algemeen	Stroom Algemeen
<b>I3</b>	Atal 6 P	Atal 6	Puls	Arcal 14 P/C Arcal 21 C	Arcal 21 Arcal 14	Conv
<b>Hoek3</b>	Arcal 14 P* Teral 23 P*	/	/	/	/	/
<b>V10</b>	Arcal 21 P Teral 23 P	/	Puls	Arcal 21 C Teral 23 C	Arcal 14	Conv
<b>Hoek12</b>	Teral 23 C Arcal 21 P/C	Arcal 21	/	Arcal 14 P/C	Arcal 14	/
<b>X20</b>	Atal6 P*	/	/	Teral 23 P	Teral 23	Puls

\*In het algemeen mooiste las, niet bepaald aan de hand van soort of aantal aanwezige onvolkomenheden

Het lassen van een V-naad wordt het best uitgevoerd door pulserend lassen met Teral 23 of Arcal 21. Een hoeklas met plaatdikte 12 mm wordt dan weer beter met een conventionele stroombron uitgevoerd, enkel Arcal 14 geeft hierbij slechte resultaten. Desondanks kan opgemerkt worden dat ook pulserend lassen met Arcal 21 tot goede resultaten leidt bij deze hoeklas. Na het lassen van de hoeklas van 3 mm en de X-naad kan gezien worden dat geen enkel gas uitkomt als beste. Voor het lassen van een I-naad met plaatdikte 3 mm wordt het beste resultaat verkregen met Atal 6 pulserend gelast.

Arcal 14 duikt meermaals op in de kolommen van de slechtste resultaten. Zoals bij de beste resultaten wordt voor hoek3 ook geen slechtste waargenomen. Arcal 21 levert geen goede resultaten bij de I-naad en ook Teral 23 valt slecht uit bij de X20.

### 4.4.3 Besluit visuele beoordeling

Het is duidelijk dat geen uitsluitend goede combinatie van het type beschermgas en type stroombron kan worden gevonden, voor elke toepassing kan echter wel de beste combinatie worden gezocht. Tevens kunnen enkele combinaties volledig worden uitgesloten, zoals het pulserend lassen van een hoeklas met plaatdikte 12 mm met Arcal 14. Eveneens kan worden besloten, voornamelijk uit de beoordeling volgens ISO 5817, dat de hoeklas met plaatdikte 3 mm en de eerste pas van de X-naad met een hogere kwaliteit kunnen worden gelast ten opzichte van de V- of I-naad en de hoeknaad met plaatdikte 12 mm.

Hieruit kan besloten worden dat elk gas en type stroombron zijn toepassingsgebied heeft, er kan geen algemeen goede combinatie van gas en stroombron worden gekozen dat in elk geval goede resultaten oplevert. Volgens de visuele beoordeling kan wel Arcal 14 uitgesloten worden. Echter wordt wel een aanvaardbaar kwaliteitsniveau bereikt met ZINQWeld volgens ISO 5817.

### 4.5 Diktemetingen zinklaag proefreeks 1

Zoals reeds besproken in paragraaf 3.3.2 zijn de waarden in Tabel 4.5-1, Tabel 4.5-2 en Tabel 4.5-3 gemiddelden van 5 diktemetingen. Bij de teststukken met plaatdikte 3 mm is de lasnaad te smal om de zinklaag op de las te kunnen meten. Van deze proefstukken bestaan dus geen resultaten van de diktemeting. Bij geen enkele combinatie lasnaad-beschermgas wordt een dikkere zinklaag gevonden op de lasnaad ten opzichte van die op het omringend materiaal. Dit is in overeenstemming met de resultaten bij de verificatie van de lasdraad (paragraaf 4.2). Zoals reeds aangehaald in paragraaf 3.1 wordt uitgegaan van een goede hechting tussen de zinklaag en het basismateriaal wanneer geen overdikte aanwezig is. Voor uitgebreide resultaten wordt verwezen naar bijlage F.

**Tabel 4.5-1 Diktemetingen zinklaag X20**

Nr	Gas	Puls/conv	Zink op plaat [µm]	Zink op las [µm]
P33	Atal 6	Puls	113	86
P34	Teral 23	Conv	258	134
P35	Arcal 14	Puls	208	Too small access
P36	Arcal 21	Conv	178	176
P37	Arcal 21	Puls	200	157
P38	Arcal 14	Conv	243	129
P39	Teral 23	Puls	234	97
P40	Atal 6	Conv	149	101

**Tabel 4.5-2 Diktemetingen zinklaag Hoek12**

Nr	Gas	Puls/conv	Zink op plaat [µm]	Zink op las [µm]
P25	Atal 6	Puls	127	127
P26	Teral 23	Conv	139	86
P27	Arcal 21	Puls	155	110
P28	Arcal 21	conv	136	84
P29	Arcal 14	Puls	168	94
P30	Arcal 14	Conv	168	105
P31	Teral 23	Puls	129	83
P32	Atal 6	Conv	167	105

**Tabel 4.5-3 Diktemetingen zinklaag V10**

Nr	Gas	Puls/conv	Zink op plaat [µm]	Zink op las [µm]
P17	Teral 23	Puls	188	125
P18	Atal 6	Conv	176	86
P19	Arcal 14	Puls	222	108
P20	Arcal 14	Conv	226	144
P21	Arcal 21	Puls	209	99
P22	Arcal 21	Conv	186	106
P23	Atal 6	Puls	193	107
P24	Teral 23	Conv	177	101

Het systematisch optreden van een kleinere dikte van de zinklaag op de lasnaad, welke nu steeds optreedt bij de gebruikte draad en wat het omgekeerde effect is ten opzichte van een klassieke lasdraad (zie paragraaf 4.2), vormt geen probleem zolang de dikte voldoet volgens ISO 1461. Een probleem kan wel optreden wanneer de dikte op de lasnaad in dergelijke mate verschillend is ten opzichte van het omringend materiaal dat de lasnaad visueel zichtbaar wordt en als storend ervaren wordt. In eerste instantie wordt met deze laatste opmerking geen rekening gehouden.

**Tabel 4.5-4 Eisen dikte zinklaag ISO 1461**

Dikte materiaal	Lokale laag dikte (minimum) [µm]	Gemiddelde laag dikte (minimum) [µm]
Staal > 6mm	70	85
1,5mm ≤ Staal ≤ 3mm	45	55

Uit de diktemetingen van de zinklaag op de lasnaad kan worden besloten dat de overmatige verdikking, zoals deze voorkomt bij een klassieke lasdraad, niet meer wordt waargenomen. De zinklaag op de lasnaad is van dezelfde grootteorde als deze op de plaat. De minimumeis volgens de norm wordt steeds gehaald.



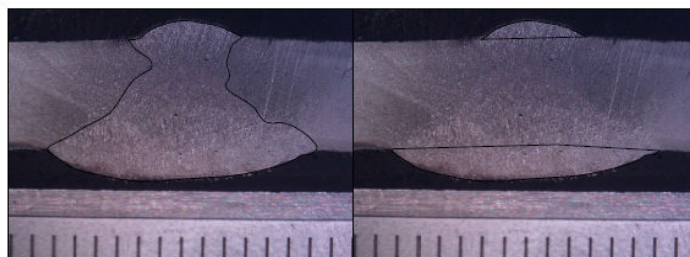
**Figuur 4.5-1** Voorbeeld proefstukken V- en X-naad

In Figuur 4.5-1 kan duidelijk een verschil gezien worden in het uitzicht van de (gelaste) V-naad en X-naad voorbereiding. De 12 mm dikke plaat met V-naad voorbereiding heeft een duidelijk meer glanzend uiterlijk ten opzichte van het doffe, matte uiterlijk van de 20 mm dikke plaat met X-naad voorbereiding. Dit effect is natuurlijk enkel en alleen te wijten aan het basismateriaal omdat het materiaal rond de lasnaad hetzelfde uiterlijk heeft als de lasnaad.

## 4.6 Opmenging proefreeks 1

### 4.6.1.1 Validatie vereenvoudigde methode

In Figuur 4.6-1 en Figuur 4.6-2 worden respectievelijk de macrografieën van de officiële en van de vereenvoudigde methode afgebeeld.

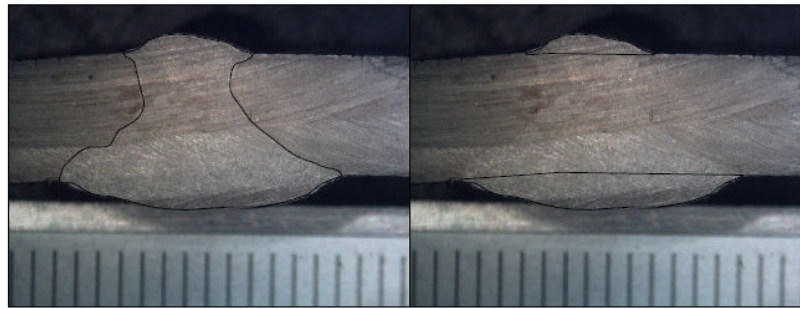


area: 51,41 mm<sup>2</sup>

area: 2,74+15,27=18,01mm<sup>2</sup>

**Figuur 4.6-1** Macrografie volgens de officiële methode. Meetschaal is per mm.





area: 54,59 mm<sup>2</sup>

area: 3,41+15,07=18,48mm<sup>2</sup>

**Figuur 4.6-2 Macrografie volgens de vereenvoudigde methode. Meetschaal is per mm.**

De vorm van de opgemengde zone is voor beide figuren, in spiegelbeeld weliswaar, gelijkend. Dit geldt eveneens voor de oppervlakten. De subtiele verschillen kunnen verklaard worden doordat beide oppervlakken een schuurbehandeling kregen en dus zo een zeer klein volume is verdwenen. Beide oppervlakken zijn dus niet meer afkomstig van exact dezelfde snede. De zichtbaarheid van de fusielijn is op beide figuren gelijkwaardig. De opmengingen bedragen respectievelijk voor de officiële en de vereenvoudigde methode 35 en 34 procent. In 3.3.3.3 wordt beschreven dat een tolerantie van 5 % op het resultaat van de opmenging wordt toegepast. Uitgaande van deze elementen kan besloten worden dat de vereenvoudigde methode in dit onderzoek volstaat.

#### 4.6.1.2 Resultaten opmenging

Zoals reeds toegelicht in paragraaf 3.3.3.3 wordt de opmenging van elk proefstuk bepaald met behulp van een macrografie. Voor de macrografieën wordt verwezen naar bijlage G.

De resultaten worden in onderstaande tabellen weergegeven.

**Tabel 4.6-1 Opmengingen I3**

nr	gas	puls/conv	lasmetaal [mm <sup>2</sup> ]	deel in basis [mm <sup>2</sup> ]	opmenging [%] (± 5 %)
P1	Atal 6	puls	13,08	1,73	13
P2	Teral 23	conv	15,98	5,12	32
P3	Arcal 14	puls	14,18	1,40	10
P4	Arcal 21	conv	14,05	2,53	18
P5	Arcal 21	puls	13,32	2,13	16
P6	Arcal 14	conv	12,55	2,05	16
P7	Teral 23	puls	19,45	4,49	23
P8	Atal 6	conv	19,61	4,45	23

**Tabel 4.6-2 Opmengingen hoek3**

<b>nr</b>	<b>gas</b>	<b>puls/conv</b>	<b>lasmetaal [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>deel in basis [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>opmenging [%] (± 5 %)</b>
P9	Teral 23	puls	/	/	/
P10	Atal 6	conv	17,30	6,22	36
P11	Arcal 21	puls	17,77	4,40	25
P12	Arcal 14	conv	10,85	1,14	11
P13	Arcal 14	puls	16,20	1,33	8
P14	Arcal 21	conv	11,47	3,08	27
P15	Atal 6	puls	16,05	3,81	24
P16	Teral 23	conv	14,57	3,71	25

**Tabel 4.6-3 Opmengingen V10**

<b>nr</b>	<b>gas</b>	<b>puls/conv</b>	<b>lasmetaal [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>deel in basis [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>opmenging [%] (± 5 %)</b>
P17	Teral 23	puls	56,26	9,46	17
P18	Atal 6	conv	54,92	9,52	17
P19	Arcal 14	puls	51,98	4,67	9
P20	Arcal 14	conv	42,15	4,56	11
P21	Arcal 21	puls	55,62	6,38	11
P22	Arcal 21	conv	68,20	12,14	18
P23	Atal 6	puls	45,17	5,47	12
P24	Teral 23	conv	34,70	6,84	20

**Tabel 4.6-4 Opmengingen hoek12**

<b>nr</b>	<b>gas</b>	<b>puls/conv</b>	<b>lasmetaal [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>deel in basis [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>opmenging [%] (± 5 %)</b>
P25	Atal 6	puls	88,08	46,75	53
P26	Teral 23	conv	61,16	22,72	37
P27	Arcal 21	puls	67,47	24,93	37
P28	Arcal 21	conv	62,89	27,37	44
P29	Arcal 14	puls	57,61	20,03	35
P30	Arcal 14	conv	70,51	29,05	41
P31	Teral 23	puls	84,39	34,86	41
P32	Atal 6	conv	73,82	27,29	37

Tabel 4.6-5 Opmengingen X20

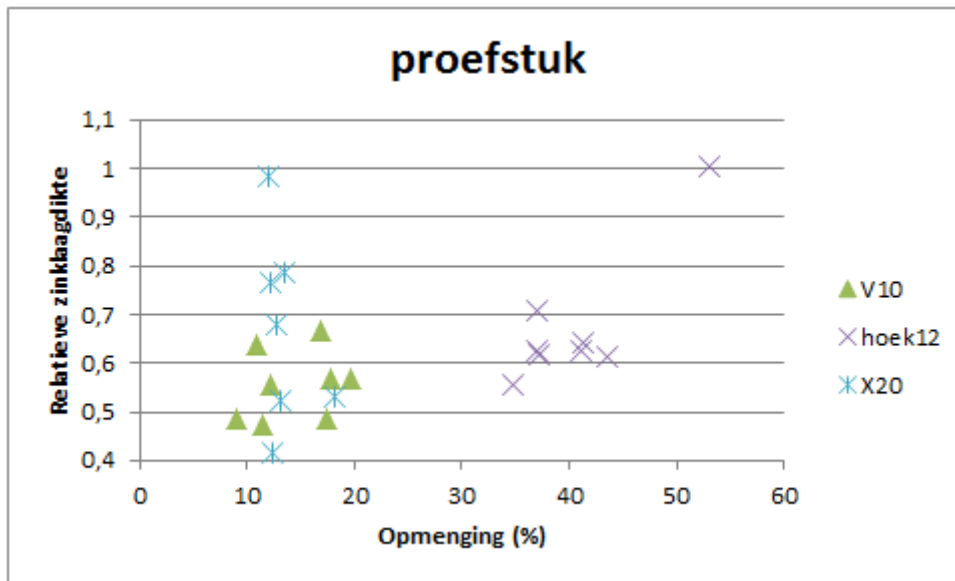
nr	gas	puls/conv	lasmetaal [mm <sup>2</sup> ]	deel in basis [mm <sup>2</sup> ]	opmenging [%] (± 5 %)
P33	Atal 6	puls	56,00	6,78	12
P34	Teral 23	conv	47,05	6,18	13
P35	Arcal 14	puls	50,26	6,88	14
P36	Arcal 21	conv	48,60	5,87	12
P37	Arcal 21	puls	51,10	6,90	14
P38	Arcal 14	conv	66,22	12,08	18
P39	Teral 23	puls	51,38	6,34	12
P40	Atal 6	conv	54,29	6,97	13

De opmenging is voornamelijk afhankelijk van de vorm van het proefstuk. Zo zijn opmengingen gemeten van grootteorde 40 % bij hoek 12 en slechts 10 % bij X20. Binnen hetzelfde proefstuk worden afwijkende waarden waargenomen. Het totale bereik van opmengingen van deze proefstukken ligt tussen 8 en 53 %.

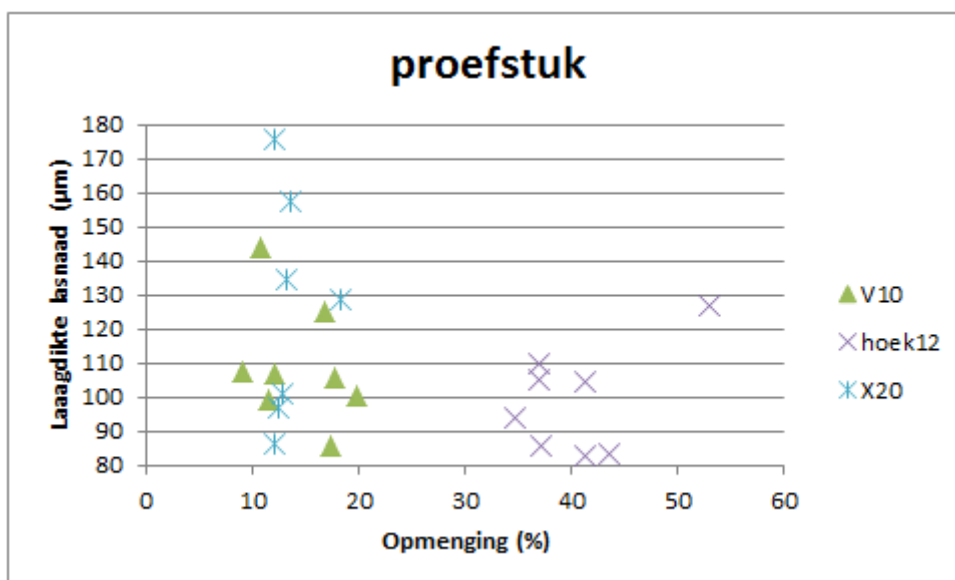
#### 4.7 Analyse resultaten proefreeks 1

Vooraf werd per proefstuk een visuele beoordeling uitgevoerd en werd per proefstuk de zinklaagdikte en opmenging bepaald. De dikte van de zinklaag werd gemeten zowel op de plaat als op de lasnaad. Hieruit kan de relatieve zinklaagdikte op de lasnaad worden bepaald door de dikte op de lasnaad te delen door de dikte op de plaat. Een relatie tussen de opmenging en de werkelijke en relatieve zinklaagdikte wordt gezocht. Hierbij worden zowel de proefstukvorm als het soort gas als de stroombron apart bekeken. Eveneens wordt een grafiek opgesteld waarin gas en stroom samen worden afgebeeld.

Zoals reeds opgemerkt in paragraaf 4.5 zijn de lasnaden bij de proefstukken met plaatdikte 3 mm te smal om de zinklaag op de las te kunnen meten. Van deze proefstukken bestaan dus geen resultaten van de diktemeting.

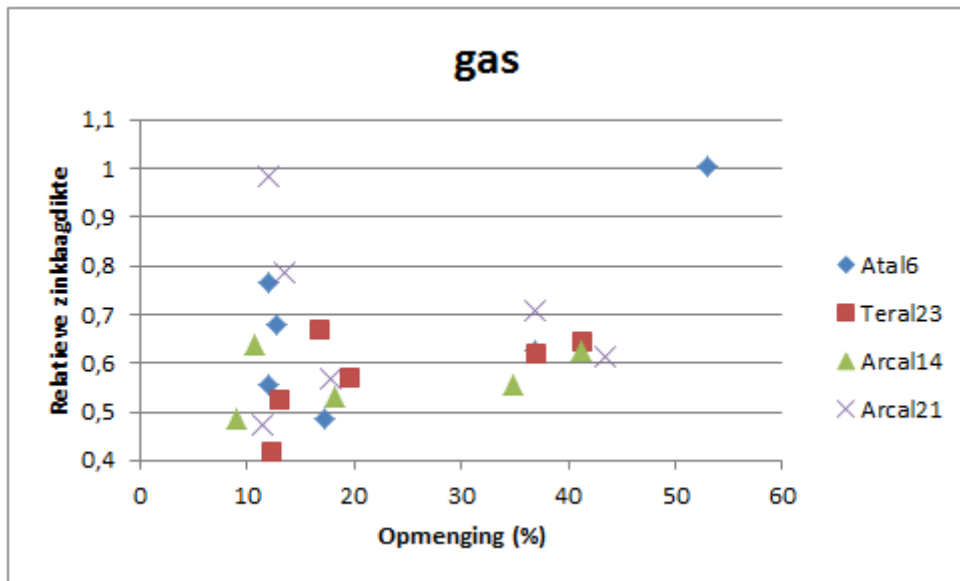


Figuur 4.7-1 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor verschillende proefstukvormen

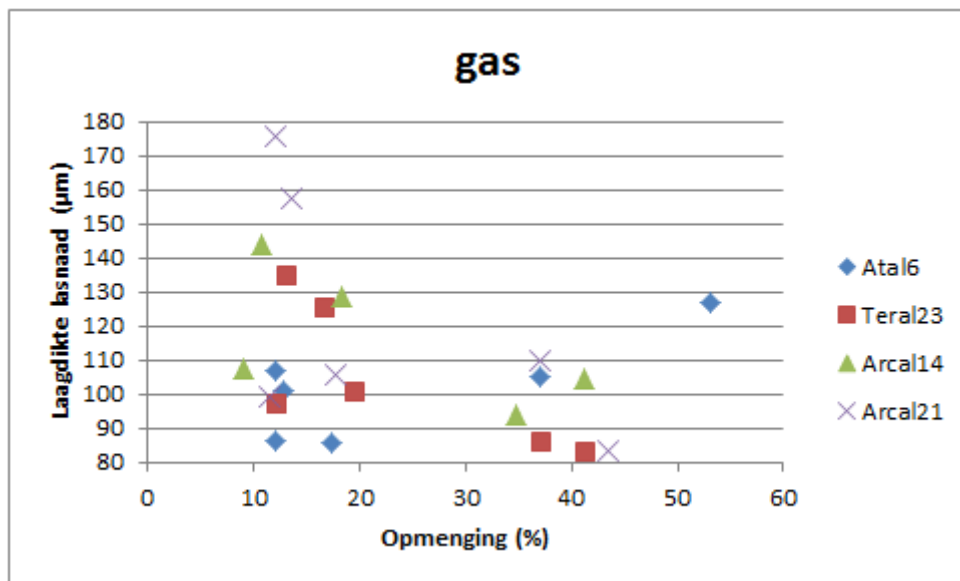


Figuur 4.7-2 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor verschillende proefstukvormen

Uit Figuur 4.7-1 kan worden afgeleid dat hoek12 een opmerkelijk grotere opmenging ( $\pm 40\%$ ) heeft dan de andere proefstukvormen ( $\pm 10-20\%$ ), toch blijft de relatieve zinklaagdikte beperkt tot circa 0,6, wat vergelijkbaar is met de andere proefstukvormen. In Figuur 4.7-2 kan worden afgelezen dat de zinklaagdikte op de lasnaad slechts 80 tot 130  $\mu\text{m}$  bedraagt. Bij X20 wordt een constante opmenging waargenomen, echter varieert de relatieve dikte van 0,4 tot 1, eveneens wordt een variërende zinklaagdikte op de lasnaad van 80 tot 180  $\mu\text{m}$  waargenomen.

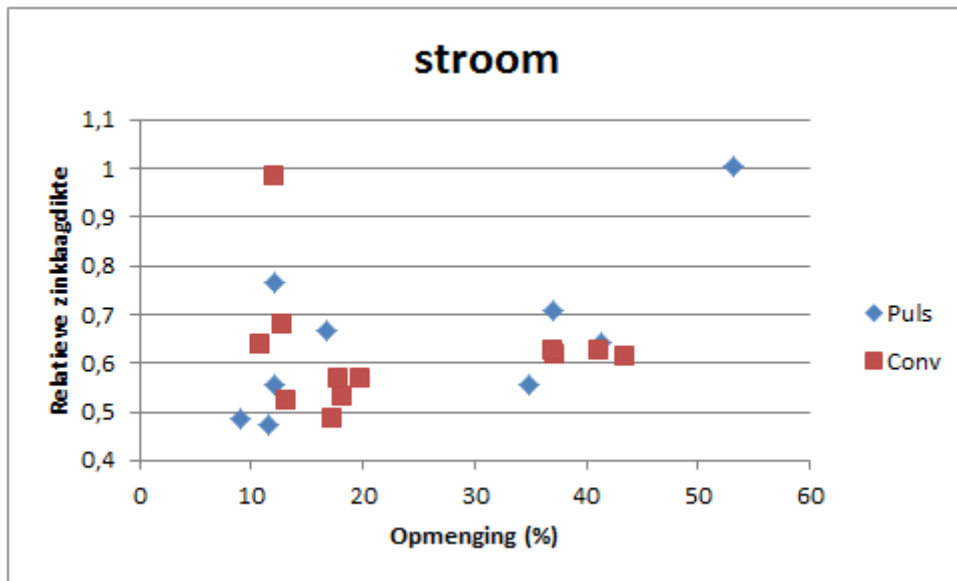


Figuur 4.7-3 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor verschillende gassen

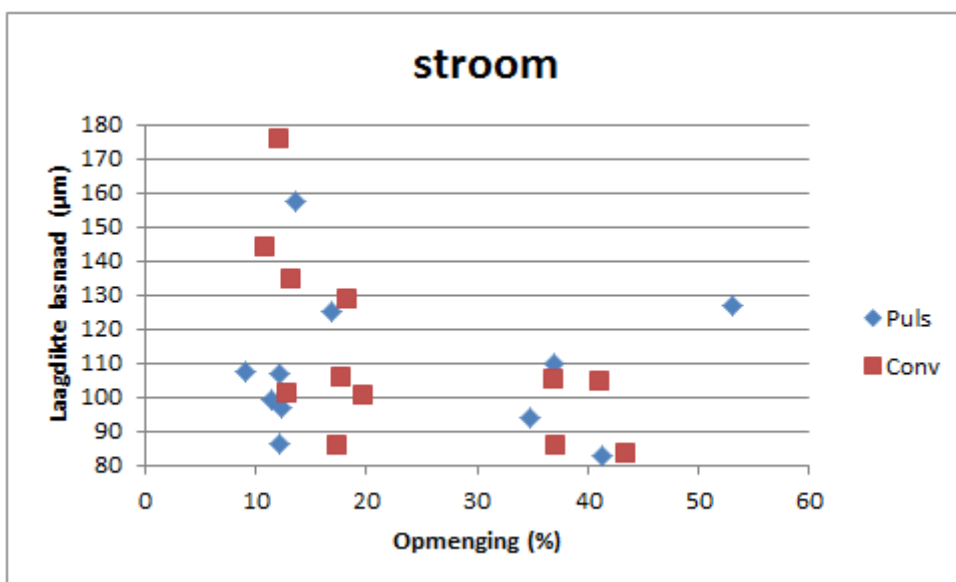


Figuur 4.7-4 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor verschillende gassen

Indien de invloed van het gas wordt bestudeerd, zie Figuur 4.7-3 en Figuur 4.7-4, kan worden geconcludeerd dat Arcal 14 en Teral 23 leiden tot de kleinste relatieve zinklaagdiktes. De werkelijke zinklaagdikte op de lasnaad is het kleinst bij de proefstukken gelast met Atal 6 en Teral 23. Zowel de zinklaagdikte op de lasnaad als de relatieve zinklaagdikte is hoger bij Arcal 21. Bij Arcal 14 worden de kleinste opmengingen waargenomen. Desondanks moet opgemerkt worden dat de invloed van het soort gas op de opmenging en zinklaagdikte minimaal is. Het grootste effect op de opmenging kan bij deze testen toegeschreven worden aan de proefstukvorm.

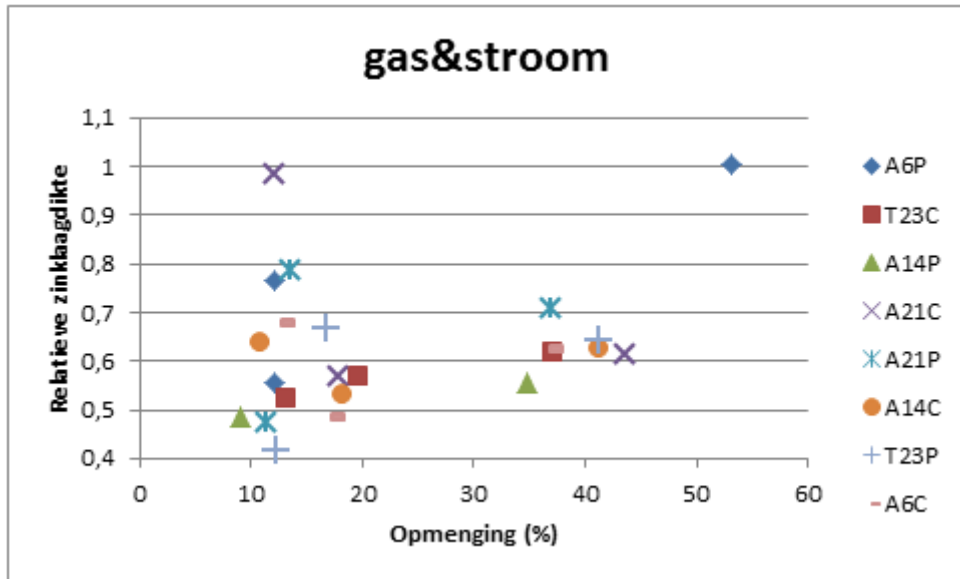


Figuur 4.7-5 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor pulserend en conventioneel lassen

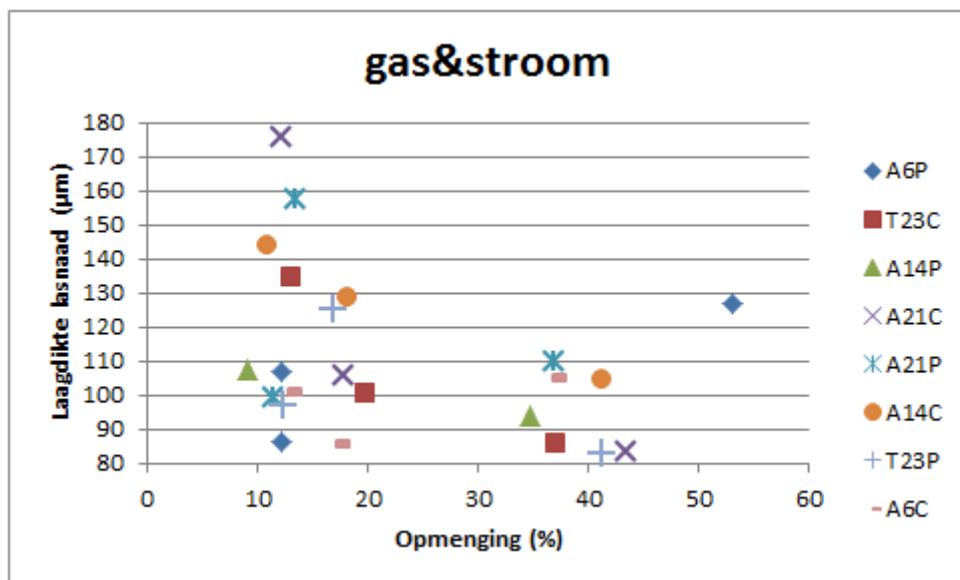


Figuur 4.7-6 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor pulserend en conventioneel lassen

Lassen met conventionele of pulserende stroombron, Figuur 4.7-5, leidt niet tot merkbare verschillen bij de relatieve zinklaagdikte. Indien de werkelijke laagdikte op de lasnaad wordt bestudeerd, Figuur 4.7-6, kan worden besloten dat bij conventioneel lassen de laagdikte iets grotere waarden aanneemt.



Figuur 4.7-7 Opmenging in functie van de relatieve zinklaagdikte voor combinatie gas en stroom



Figuur 4.7-8 Opmenging in functie van de zinklaagdikte voor combinatie gas en stroom

Indien de combinaties van gas en stroom worden bestudeerd, Figuur 4.7-7 en Figuur 4.7-8, worden geen opmerkelijk nieuwe verschillen geconstateerd.

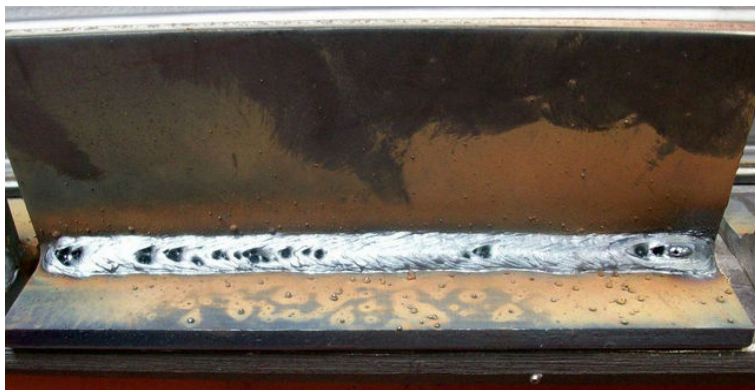
Uit deze analyse kan worden geconcludeerd dat enkel het type gas een kleine invloed heeft. Hoewel voor elke proefstuk goede resultaten werden bekomen onafhankelijk van de parameters of de bekomen opmenging, wordt de visuele beoordeling als bepalend beschouwd. Aangezien uit de visuele analyse is gebleken dat de kwaliteit eerder afhankelijk is van de proefstukvorm en in mindere mate van de geteste parameters is de kostprijs doorslaggevend. Atal 6 en Arcal 21 zijn op basis van de kostprijs de meest voordelige gassen, maar ook bij de visuele beoordeling scoren deze gassen niet slecht waardoor deze gassen worden gebruikt voor het verdergaand onderzoek.

## 4.8 Proefstukken klanten: proefreeks 2

Vooraleer op de proefstukken, zie paragraaf 3.2.6, te lassen wordt met de resultaten van de eerste proefreeks op enkele plaatjes getest. Deze testen met de 1,0 mm lasdraad verlopen anders dan verwacht, de geselecteerde gassen (Arcal 12 en Atal 6) leveren niet de verwachte resultaten. Grote poriën zijn aanwezig in de lasnaad, zie Figuur 4.8-1 en Figuur 4.8-2.



**Figuur 4.8-1** Proefstuk gelast met lasdraad 1,0 mm en beschermgas Arcal 21



**Figuur 4.8-2** Proefstuk gelast met lasdraad 1,0 mm en beschermgas Atal 6



Tijdens de variaties wordt eveneens geëxperimenteerd met een ander gas dan de gebruikte bij de eerste proefreeks, namelijk Arcal 12. Dit is een gas met een hoog gehalte argon, de samenstelling bestaat uit 98 % argon en 2 % CO<sub>2</sub>. Dit gas levert in combinatie met de 1,0 mm draad een mooi resultaat, zie Figuur 4.8-3. Een oorzaak van dit betere resultaat moet gezocht worden in het grotere gehalte argon in het beschermgas. Argon zorgt ervoor dat de lasnaad minder snel afkoelt en de zuurstof, die aan de basis ligt van de poriën, de tijd krijgt om uit de lasnaad te diffunderen.



**Figuur 4.8-3 Proefstuk gelast met lasdraad 1,0 mm en beschermgas Arcal 12**

Bij de lasproeven met de 1,2 mm draad wordt Atal 6 en Arcal 12 als beste beschermgassen geselecteerd. Hier worden niet de grote poriën waargenomen met Atal 6 en Arcal 21, en lassen met Arcal 12 leidt hier niet tot de beste resultaten. Beide lasdraden bestaan uit dezelfde chemische samenstelling, dus deze verschillen zijn opmerkelijk. De lasdraden zijn afkomstig uit verschillende draadtrekkerijen, de verklaring voor het afwijkende lasgedrag zal waarschijnlijk hier moeten gezocht worden.

Na deze vaststellingen worden de proefstukken gelast. De gebruikte parameters per proefstuk worden weergegeven in bijlage H.

## 4.9 Diktemeting zinklaag proefreeks 2

Van proefreeks 2 wordt van elke proefstuksoort een diktemeting van de zinklaag uitgevoerd. De resultaten van deze metingen worden uitgebreid weergegeven in bijlage I. In Tabel 4.9-1 worden enkel de gemiddelde waarden getoond. Bij een gedeelte van de proefstukken wordt de lasnaad weggeslepen alvorens deze naar de verzinkerij worden gestuurd. Dit wegslijpen wordt echter zeer grof uitgevoerd waardoor tijdens het verzinken een groot reactieoppervlak heerst en zo dus de gesmolten zink fel kan reageren met het staaloppervlak. Om die reden ontstaat een grotere zinklaagdikte.

**Tabel 4.9-1 Gemiddelde zinklaagdikte van enkele proefstukken van proefreeks 2**

			Zinklaagdikte [ $\mu\text{m}$ ]		
			Oorspr. opp.	Geslepen opp.	Lasnaad
<b>Koker</b>	19	klant	69		268
	20	klant	62		189
	7	ZINQWeld	68	99	85
<b>Plaat</b>	21	klant		63	181
	24	klant		65	147
	15	ZINQWeld		112	100
	16	ZINQWeld		111	110
<b>Profiel</b>	17	ZINQWeld		103	97
<b>Buis</b>	4	klant	91		275
	3	ZINQWeld			107

Proefstukken 4 en 19 tot 23 werden bij de klant gelast met klassiek toevoegmateriaal en vertonen hier de verwachte dikke zinklaag. De lasnaden geproduceerd met ZINQWeld vertonen deze overdikte nauwelijks of niet, dit is in overeenstemming met de eerder uitgevoerde proeven. Opgelet dient te worden bij deze resultaten dat bij de geslepen proefstukken de zinklaagdikte op de lasnaad wordt vergeleken met de zinklaagdikte op het geslepen oppervlak en niet met de zinklaagdikte op het oorspronkelijke oppervlak. In de praktijk is het aangewezen dat het geslepen oppervlak even vlak is als het oorspronkelijke oppervlak zodat ter plaatse van deze overgang geen dikteverschil in de zinklaag optreedt.

Uit deze resultaten kan worden besloten dat de dikte van de zinklaag op een lasnaad met ZINQWeld 60 % kleiner is dan deze verkregen op een lasnaad met klassiek toevoegmateriaal. Daarenboven kan worden gezien dat de ZINQWeld lasdraad voor elke toekomstige toepassing, verschillende materialen en lasnaadvormen, een oplossing biedt voor de overdikte van de lasnaad die wordt verkregen met een standaard lasdraad.

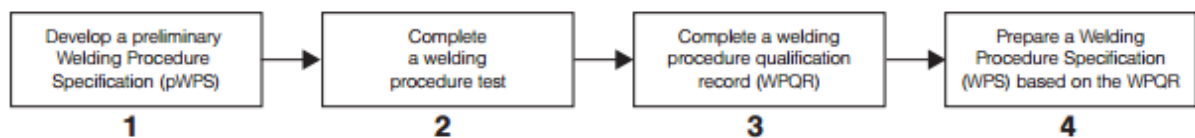
## 4.10 Lasmethodebeschrijving (WPS)

### 4.10.1 Opstellen WPS

Lassen is een speciaal proces, wat betekent dat de uitkomst niet volledig te verifiëren is door het keuren of beproeven van het desbetreffend product. Onvolkomenheden kunnen hierbij bijvoorbeeld pas blijken bij gebruik van het product. Daardoor moet volgens normen van kwaliteitssystemen meestal een lasproces worden uitgevoerd aan de hand van een schriftelijk vastgelegde methode, dit is een lasmethodebeschrijving of Welding Procedure Specification (WPS). Een WPS is noodzakelijk om een goede basis te bieden voor de planning van de laswerkzaamheden en voor kwaliteitsborging tijdens het lassen. Er zijn verschillende manieren tot het bekomen van een goede WPS. De geldigheid van de bekomen WPS is gelimiteerd tot hetzelfde type van verbinding die wordt gebruikt bij de test. De inhoud van de voorlopige en definitieve lasmethodebeschrijving wordt weergegeven in ISO 15609. Het gaat hierbij om alle nodige informatie om een lasverbinding te produceren, zoals informatie over de fabrikant, het moedermateriaal, de geldigheid voor alle lasmethoden en de geldigheid voor bepaalde lasprocessen. [73]

Vooraleer de proefstukken worden gelast wordt een pWPS (preliminary Welding Procedure Specification) opgesteld. Daarna worden de proefstukken gelast volgens de condities beschreven in de pWPS. Om te bepalen of de beschreven methode goed is en bijgevolg de pWPS goedgekeurd kan worden, worden verschillende testen uitgevoerd, dit is de lasmethodekwalificatie of Procedure Qualification Record (PQR).

Indien de testen voldoen aan de eisen kan een WPS worden opgesteld en kan de lasprocedure officieel worden toegepast.



Figuur 4.10-1 Stappen in het WPS kwalificatie proces [74]

Aan de hand van de proefstukken van proefreeks 2 wordt een pWPS opgesteld, deze worden weergegeven in bijlage J.

### 4.10.2 Geldigheidsgebied

Aan de hand van de opgestelde pWPS'en kan een geldigheidsgebied worden afgebakend. Dit wordt uitgevoerd op basis van EN ISO 15614-1:2004.

#### 4.10.2.1 Moedermateriaalgroepen

Aangezien slechts enkel materiaal wordt gebruikt uit groep 1, zijn deze pWPS'en enkel geldig voor het lassen van materialen uit groep 1.

#### 4.10.2.2 Materiaaldikte

**Tabel 4.10-1 Geldigheidsgebied voor materiaaldikte en lasmetaaldikte van stompe lassen (EN ISO 15614-1)**

Dimensions in millimetres

Thickness of test piece <i>t</i>	Range of qualification	
	Single run	Multi-run
$t \leq 3$	0,7 <i>t</i> to 1,3 <i>t</i>	0,7 <i>t</i> to 2 <i>t</i>
$3 < t \leq 12$	0,5 <i>t</i> (3 min.) to 1,3 <i>t</i> <sup>a</sup>	3 to 2 <i>t</i> <sup>a</sup>
$12 < t \leq 100$	0,5 <i>t</i> to 1,1 <i>t</i>	0,5 <i>t</i> to 2 <i>t</i>
$t > 100$	Not applicable	50 to 2 <i>t</i>

<sup>a</sup> when impact requirements are specified the upper limit of qualification is 12 mm unless impact testing has been performed.

Per pWPS kan het geldigheidsgebied voor de materiaaldikte worden opgesteld.

De pWPS'en opgesteld op basis van de lastesten op de buizen (1 en 3):

- Materiaaldikte 4 mm ;
- De langsnaad op de buis kan in één pas worden gevuld.

Geldigheidsgebied pWPS 1 en 3:

$$0,5t \text{ (3min.)} \rightarrow 1,3t = 0,5 \times 4 \text{ (3min.)} \rightarrow 1,3 \times 4 = 3 \rightarrow 5,2 \text{ mm}$$

De pWPS'en opgesteld op basis van de lastesten op de kokers (7 en 8):

- Materiaaldikte 4 mm;
- De verbindingslas voor de kokerdelen wordt in meerdere passen gelast.

Geldigheidsgebied pWPS 7 en 8:

$$3 \rightarrow 2t = 3 \rightarrow 2 \times 4 = 3 \rightarrow 8 \text{ mm}$$

De pWPS'en opgesteld op basis van de lastesten op de platen (9 tot 16):

- Materiaaldikte 6 mm;
- De las wordt in meerder passen gelegd.

Geldigheidsgebied pWPS 9 tot 16:

$$3 \rightarrow 2t = 3 \rightarrow 2 \times 6 = 3 \rightarrow 12 \text{ mm}$$

De pWPS opgesteld op basis van de lastesten op de profielen (17):

- Materiaaldikte 2 mm;
- De las wordt in één pas gelegd.

Geldigheidsgebied pWPS 17:

$$0,7t \rightarrow 1,3t = 0,7 \times 2 \rightarrow 1,3 \times 2 = 1,4 \rightarrow 2,6 \text{ mm}$$

## Hoofdstuk 5: Algemeen besluit

---

In hoofdstuk 1 (paragraaf 1.2) is de doelstelling van dit onderzoek vastgelegd. Samengevat kan deze doelstelling als volgt opgevat worden:

*Deze masterproef beoogt het omzeilen van het sandelin-effect, dit is een overdikte van de zinklaag ter hoogte van de las en een matter uiterlijk, dat zich voordoet na het galvaniseren van gelaste structuren. Dit door onderzoek te doen naar de lasbaarheid van een laag siliciumhoudende lasdraad (ZINQWeld) voor het MAGlassen. In deze studie wordt gezocht naar een methode om dergelijke draad te kunnen verlaten met uiteindelijk een pWPS als beoogde resultaat.*

Dit hoofdstuk beschrijft de belangrijkste resultaten van het gevoerde onderzoek.

Vooreerst kan besloten worden dat bij de gebruikte lasdraad ZINQWeld (Si-gehalte 0,14 %) het sandelin-effect, welke zich voordoet bij gebruik van een klassieke lasdraad (Si-gehalte 0,7 %), niet meer waargenomen wordt. Zowel de overdikte ter hoogte van de lasnaad als het matter uiterlijk komt niet meer voor bij gebruik van de ZINQWeld lasdraad. Beide fenomenen kunnen dus volledig toegeschreven worden aan het Si-gehalte in de lasdraad.

Bij gebruik van de ZINQWeld lasdraad kan een grote variatie van de uiteindelijke laskwaliteit opgemerkt worden bij slechts kleine variaties van de ingestelde parameters. Om deze reden is het moeilijker om de juiste parameters te zoeken voor een bepaald type proefstuk (materiaalsoort, dikte, lasnaadvoorbereiding, stroombron, gasbescherming, ...).

Uit de visuele beoordeling kan besloten worden dat elk gas en type stroombron zijn toepassingsgebied heeft, geen algemeen goede combinatie van gas en stroombron kan worden gekozen dat in elk geval goede resultaten oplevert. Wel kan beschermgas Arcal 14 uitgesloten worden wegens de slechte resultaten. Daarnaast kan opgemerkt worden dat steeds een aanvaardbaar kwaliteitsniveau bereikt wordt met ZINQWeld volgens ISO 5817.

Voor de geteste proefstukken kan besloten worden dat de zinklaagdikte ter hoogte van de lasnaad steeds voldoet aan de minimale zinklaagdikte volgens ISO 1461. Eveneens wordt de overmatige verdikking op de lasnaad ten opzichte van het omringend materiaal niet meer waargenomen bij toepassing van ZINQWeld. Wanneer geen verdikking optreedt wordt verondersteld dat een goede hechting heerst tussen de zinklaag en het basismateriaal.

Het systematisch optreden van een kleinere dikte van de zinklaag op de lasnaad bij de gebruikte draad, wat het omgekeerde effect is ten opzichte van een klassieke lasdraad, vormt geen probleem zolang de dikte voldoet volgens ISO 1461. Een probleem kan wel optreden wanneer de dikte op de lasnaad in dergelijke mate verschillend is ten opzichte van het omringend materiaal dat de lasnaad visueel zichtbaar wordt en als storend ervaren wordt. Bij de geteste proefstukken wordt dit probleem niet opgemerkt.

Wanneer een materiaal wordt gelast met een siliciumgehalte waarbij het sandelin-effect optreedt zal nog steeds een dikkere zinklaag en een matter uiterlijk waargenomen worden. Belangrijk hierbij op te merken is dat deze fenomenen nu uniform optreden over het ganse oppervlak en niet enkel ter hoogte van de lasnaad.

Het opmengingsbereik ligt tussen circa 10 tot circa 50 %. Aangezien de zinklaagdikte in elk proefstuk voldoet volgens ISO 1461, kan worden besloten dat een opmenging in dit opmengingsbereik resulteert in een goede zinklaagdikte op de lasnaad. Tevens kan opgemerkt worden dat de opmenging in dit onderzoek voornamelijk afhankelijk is van de vorm van het proefstuk.

Doordat voor elk proefstuk goede resultaten worden bekomen onafhankelijk van de parameters of de bekomen opmenging, wordt de visuele beoordeling als bepalend beschouwd. Aangezien uit de visuele analyse is gebleken dat de kwaliteit eerder afhankelijk is van de proefstukvorm en in mindere mate van de geteste parameters is de kostprijs doorslaggevend. Wanneer het economische aspect samen wordt bekeken met het kwalitatieve aspect bieden beschermgassen Atal 6 en Arcal 21 de voorkeur.

Het pulserend of conventioneel lassen resulteert niet in grote verschillen, hier wordt dus de keuze vrij gelaten. In praktijk wordt Arcal 21 eerder pulserend op dun materiaal toegepast, waar Atal 6 dan eerder conventioneel wordt toegepast op dikker materiaal.

De proeven met de 1,2 mm draad leiden niet tot een duidelijk beter toepasbaar gastype, vandaar gaat de keuze uit naar Arcal 21 wat een vrij goedkoop gas is. Uit de proeven met de proefstukken van klanten blijkt dat de 1,0 mm draad best wordt gelast met Arcal 12. Steeds wordt de lasdraad pulserend toegepast.

Deze studie heeft aangetoond dat een laag siliciumhoudende lasdraad zoals ZINQWeld een oplossing biedt voor de zichtbare nadelen bij het optreden van het sandelin-effect. De in de praktijk gebruikte materialen en lasnaadvormen werden uigetest en goed bevonden qua visuele aspect enerzijds en het kwalitatieve aspect van de las anderzijds. Deze resultaten hebben dan ook geleid tot verschillende pWPS'en. Desondanks bestaan er nog steeds interessante pistes die het waard zijn te onderzoeken. Naast het bestuderen van andere mogelijke oplossingen kan het reeds gevoerde onderzoek aangevuld worden door het opstellen van een synergische lijn voor de ZINQWeld lasdraad.

## Referentielijst

---

1. ALCO. *Oppervlaktebehandeling voor metalen: Elektrolytisch verzinken*. [cited 2013 5 oktober]; Available from: <http://www.alcobvba.be/alco/aanbod/elektrolytisch-verzinken.shtml>.
2. *Galvaniseren*. 2005 [cited 2014 10 februari]; Available from: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Galvaniseren>.
3. Weert-Groep. *Verzinken en poedercoaten*. 2013 [cited 2013 17 november]; Available from: <http://www.weertgroep.be/nl-nl/1/61/thermisch-verzinken.aspx>.
4. Clusta. *Thermisch verzinken*. Fiche Nr. 5 - juli 1997 [cited 2014 8 maart]; Available from: <http://www.bmt.nl/groepen/000/000-011/000-011-010>.
5. Sapart, C., *Presentatie: duroZINQ verzinken*. 2013, Galva Power.
6. AGA (American Galvanizers Association), *Design Guide-The Design of Products to be Hot-Dip Galvanized after Fabrication*. 2010, American Galvanizers Association.
7. IBBT. *Thermisch verzinken*. 2012 [cited 2013 17 november]; Available from: <http://ibbt.emis.vito.be/node/42655>.
8. AGA (American Galvanizers Association), *Design Guide-The Design of Products to be Hot-Dip Galvanized after Fabrication*. 2000, American Galvanizers Association.
9. Graepel. *Thermisch verzinken tegen corrosie*. [cited 2014 12 februari]; Available from: <http://www.graepel.de/nl/producten/andere-producten-en-verzinkerij/verzinkerij/>.
10. GalvaPower. *Wat is thermisch verzinken?* [cited 2013 24 november]; Available from: <http://www.galvapower.com/nl/toepassingen/proces-thermisch-verzinken.aspx>.
11. Joskin. *Galvanisatie*. 2014 [cited 2014 12 februari]; Available from: [http://www.joskin.com/?page=galvanisation&user\\_lang=nl](http://www.joskin.com/?page=galvanisation&user_lang=nl).
12. HDGASA (Hot Dip Galvanizers Association Southern Africa). *The reactions between iron & zinc*. [cited 2013 13 november]; Available from: <http://www.ckit.co.za/secure/conveyor/troughed/corrosion-protection/steel-protection/steel-protection---08-iron-zinc-reactions.htm>.
13. Marder, A.R., *The metallurgy of zinc-coated steel*. Progress in Materials Science, 2000. vol. 45: p. 191-271.
14. Reumont, G., P. Perrot, and J. Foct, *Thermodynamic study of the galvanizing process in a Zn-0.1%Ni bath*. Journal of Materials Science, 1998. vol. 33(19): p. 4759-4768.
15. Kozdras, M.S. and P. Niessen, *Silicon-induced destabilization of galvanized coatings in the sandelin peak region*. Metallography, 1989. vol. 22: p. 253-267.
16. Sapart, C., *E-mail: Toepassingsdomein ZINQWeld*. 2014, Galva Power.
17. Foct, J., G. Reumont, and P. Perrot, *Interpretation of the role of silicon on the galvanizing reaction based on kinetics, morphology and thermodynamics*. Scripta Metallurgica et Materialia, 1993. vol. 28: p. 1195-1200.
18. Foct, J., et al., *How does silicon lead the kinetics of the galvanizing reaction to lose its solid-solid character*. Journal De Physique IV, 1993. vol. 3(C7): p. 961-966.
19. Bicao, P., et al., *Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing*. Surface and Coatings Technology, 2008. vol. 202(9): p. 1785-1788.
20. Watson, K.B., et al., *Welding consumables for galvanizing kettles*. Australasian Welding Journal, 2001. vol. 46: p. 33-47.
21. Zinkinfo-Benelux. *Thermisch verzinken*. [cited 2014 12 februari]; Available from: <http://zinkinfobenelux.com/nl>.

22. Thielco-Staalindustrie. *Doordacht construeren*. [cited 2014 12 februari]; Available from: [http://www.thielco.nl/\\_download/doordacht%20construeren.pdf](http://www.thielco.nl/_download/doordacht%20construeren.pdf).
23. ITW-welding. *MIG/MAG lassen*. [cited 2014 5 maart]; Available from: <http://www.itw-welding.com/media/Pdf/Las%20advies/QSmigd.pdf>.
24. FME-CWM, *vm 124: MIG/MAG lassen en zijn varianten*. 2008.
25. Essers, W.G. and F. Neessen, *MIG/MAG en gevulde draad lassen*, in *International Welding Engineer: Lasprocessen en apparatuur*. 2011 Nederlands Instituut voor Lastechniek.
26. Van Beek, B. *Lassen van staalconstructies*. [cited 2013 20 november]; Available from: [http://www.cybercomm.nl/~cesmetel/kennisweb/lassen/las0\\_1.htm](http://www.cybercomm.nl/~cesmetel/kennisweb/lassen/las0_1.htm).
27. Prinsen, J. and A. Gales, *Stroombronnen voor het booglassen*, in *International Welding Engineer: Lasprocessen en apparatuur*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
28. Avesta-Welding. *Solid wires for all methods*. 2012 [cited 2014 13 februari]; Available from: <http://www.midwaymetals.com.au/wp-content/uploads/2012/02/WELDING-WIRE.pdf>.
29. Essers, W.G., *De elektrische boog*, in *International Welding Engineer: Lasprocessen en apparatuur*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
30. Air-Liquide. *L'encyclopédie des Gaz*. 2013 [cited 2014 4 februari]; Available from: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp>.
31. Essers, W.G. and T. Luijendijk, *TIG lassen*, in *International Welding Engineer: Lasprocessen en apparatuur*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
32. Kumar, V., et al. *CRA Weld Overlay - Influence of welding process and parameters on dilution and corrosion resistance*. 2010 [cited 2013 14 november]; Available from: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/cra-weld-overlay-influence-of-welding-process-and-parameters-on-dilution-and-corrosion-resistance/>.
33. Yang, J.L., S.R. Chandel, and J.M. Bibby. *The effects of process variables on the weld deposit area of submerged arc welds*. 1993 [cited 2013 14 november]; Available from: [http://www.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1993\\_01\\_s11.pdf](http://www.aws.org/wj/supplement/WJ_1993_01_s11.pdf)[http://www.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1993\\_01\\_s11.pdf](http://www.aws.org/wj/supplement/WJ_1993_01_s11.pdf).
34. Aghakhani, M., E. Mehrdad, and E. Hayati, *Parametric Optimization of Gas Metal Arc Welding Process by Taguchi Method on Weld Dilution*. *International Journal of Modeling and Optimization*, 2011. vol. 1(3): p. 216-220.
35. Murugan, N. and R.S. Parmar, *Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel*. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994. vol. 41(4): p. 381-398.
36. Pors, W., *Beschermende lagen*, in *International Welding Engineer: Materiaalkunde*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
37. Shahi, A.S. and S. Pandey, *Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. vol. 196(1-3): p. 339-344.
38. Karadeniz, E., U. Ozsarac, and C. Yildiz, *The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes*. *Materials & Design*, 2007. vol. 28(2): p. 649-656.
39. Kim, I.S., et al., *A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO2 arc welding*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. vol. 136(1-3): p. 139-145.



40. Kannan, T. and J. Yoganandh, *Effect of process parameters on clad bead geometry and its shape relationships of stainless steel claddings deposited by GMAW*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010. vol. 47(9-12): p. 1083-1095.
41. Yang, L.J., R.S. Chandel, and M.J. Bibby, *The effects of process variables on the bead width of submerged-arc weld deposits*. Journal of Materials Processing Technology, 1992. vol. 29(1-3): p. 133-144.
42. Air-Liquide, *Arcal 14 MAG-lassen van koolstofstaal*.
43. Suban, M. and J. Tušek, *Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used*. Journal of Materials Processing Technology, 2001. vol. 119(1-3): p. 185-192.
44. Tušek, J. and M. Suban, *Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel*. International Journal of Hydrogen Energy, 2000. vol. 25(4): p. 369-376.
45. Brak, C.A., *Structuur van de lasverbinding*, in *International Welding Engineer: Materiaalkunde*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
46. Brak, C.A., *Legeringen en fase-diagrammen, binaire legeringen*, in *International Welding Engineer: Materiaalkunde*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
47. Brak, C.A., *Ijzer-koolstoflegeringen*, in *International Welding Engineer: Materiaalkunde*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
48. Brak, C.A., *Ongeleegde C en C-Mn staalsoorten*, in *International Welding Engineer: Materiaalkunde*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
49. Bekkers, K., *Fijnkorrelstaalsoorten*, in *International Welding Engineer: Materiaalkunde*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
50. Varnauskas, V., V. Rudzinskas, and O. Černašėjus, *Influence of covering components of welding electrodes on chemical composition and mechanical properties of fused metal*. 2004: Materials science.
51. Anya, C. and T. Baker, *The Effect of Silicon on the Grain Size and the Tensile Properties of Low Carbon Steels*. 1989: Materials Science and Engineering. p. 197-206.
52. CAI, M., et al., *Transformation Behavior of Low Carbon Steels Containing Two Different Si Contents*. 2009: Journal of Iron and Steel Research. p. 55-60.
53. Brak, C.A., *Scheuren in lasverbindingen*, in *International Welding Engineer: Materiaalkunde*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
54. Neessen, F., *Booglassen met beklede elektroden*, in *International Welding Engineer: Lasprocessen en apparatuur*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
55. NIL. *Laskennis opgefrist nr. 59: Lasbaarheid van materialen - staal*. 2009 [cited 2014 12 februari]; Available from: [http://www.nil.nl/public/cms/lists/upload/59\\_staal.pdf](http://www.nil.nl/public/cms/lists/upload/59_staal.pdf).
56. ESAB. *Carbon & Low Alloy Steel Filler Metals for the GMAW, GTAW and SAW Welding Processes*. 2000 [cited 2014 13 februari]; Available from: [http://www.esabonline.com/EUWeb/AWTC/Lesson6\\_9.htm](http://www.esabonline.com/EUWeb/AWTC/Lesson6_9.htm).
57. Anya, C., *Higher silicon to manganese ratios in low carbon structural steels*. 1991: Journal of material science letters. p. 562-564.
58. Ben nasr, J., et al., *Optimization of hot-dip galvanizing process of reactive steels: Minimizing zinc consumption without alloy additions*. Materials Letters, 2008. vol. 62(19): p. 3328-3330.
59. De Abreu, Y., et al., *Study of zinc coatings on steel substrate attained by two different techniques*. Surface and Coatings Technology, 1999. vol. 120-121(0): p. 682-686.

60. ZINQ and G. Power. *microZINQ Minder is Meer*. 2014 [cited 2014 4 februari]; Available from: <http://www.zinq.com/nl/thermisch-verzinken/microzinqr/> Available from: <http://www.galvpower.com/nl/MICROZINQ.aspx>.
61. Pinger, T. and C. Sapat, *Presentatie: Eigenschappen microZINQ 5 en vergelijking met het klassiek discontinu thermisch verzinken*. 2013, Fontaine Technologie.
62. Weert-Groep. *Deltacoat*. 2014 [cited 2014 8 april]; Available from: <http://www.galvaco.be/nl-nl/1/100/deltacoat.aspx>.
63. Matz, C., *Method For Arc Welding With Consumable Electrode*, L. AG, Editor. 2010, LINDE AG
64. Garcia de Lucas, C., *Presentation: Review of European Markets in 2007*. 2008, EGGA: Copenhagen.
65. EGGA (European General Galvanizers Association). *Presentatie: Duurzaam bouwen met thermisch verzinken*. [cited 2014 12 februari]; Available from: [http://www.infosteel.be/staalbouwdag10/brunoDursin\\_NL.pdf](http://www.infosteel.be/staalbouwdag10/brunoDursin_NL.pdf).
66. Altrad-Benelux. *Mefran steigers*. [cited 2014 12 februari]; Available from: <http://altrad-benelux.be/nl/products/mefran-steigers/mefran-steigers/multivit>.
67. van Eijnsbergen, J.F.H. and J. Bakker. *Maxpro*. 2000 [cited 2013 15 december]; Available from: <http://www.mecolin.nl/maxpro.html>.
68. Eendengarage. *Gegalvaniseerd chassis*. 2010 [cited 2014 12 februari]; Available from: <http://www.eendengarage.com/chassisvergroting1.htm>.
69. Francken-Metaal. *Verzinkerij*. [cited 2014 12 februari]; Available from: <http://www.franckenmetaal.nl/index.php/verzinkerij/>.
70. Air-Liquide. *MIG lassen*. 2011 [cited 2014 16 februari]; Available from: <http://www.airliquide.be/nl/toepassingen-gassen/lassen-snijbranden-thermisch-opspuiten/mig-lassen.html>.
71. Elcometer. *Elcometer 456*. 2013 [cited 2014 8 april]; Available from: <http://www.elcometer.com/nl/component/productmanager/productmanager?prod=138>.
72. Petzow, G., *Metallographic Etching*. 2 ed. 1999, Materials Park, Ohio: American Society for Metals.
73. van den Berg, R., *Kwaliteitsborging en kwaliteitscontrole*, in *International Welding Engineer: Fabricage en toepassingen*. 2011, Nederlands Instituut voor Lastechniek.
74. BCSA, Corus, and SCI. *Steel Industry Guidance Notes SN 46: Welding Procedure Specifications (WPSs)*. 2010 [cited 2014 2 mei]; Available from: <http://www.steelconstruction.org/resources/guidance-notes.html>.

# Geraadpleegde normen

---

ISO 5817:2007	Welding — Fusion-welded joints in staal, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections
NPR-CEN-ISO/TR 15608rev:2004	Welding - Guidelines for a metallic materials grouping system
NEN-EN 10025-2	Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels
NEN-EN 10020	Definition and classification of grades of steel
ASTM A36	Standard specification for carbon structural steel
ISO 1461: 2009	Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles – Specifications and test methods
ISO 15609	Beschrijven en goedkeuren van lasmethoden voor metalen – Lasmethodebeschrijving – Deel 1: Booglassen
ISO 15613	Beschrijven en goedkeuren van lasmethoden voor metalen – Goedkeuring op basis van een lasproef voor aanvang van de productie
ISO 15614	Beschrijven en goedkeuren van lasmethoden voor metalen – Lasmethodebeproeving – Deel 1: Boog- en autogeenlassen van staal en booglassen van nikkel en nikkellegeringen
ISO 2178	Non-magnetic coatings on magnetic substrates – Measurement of coating thickness – Magnetic method
NBN-EN ISO 17637:2011	Niet-destructief onderzoek van lassen – Visueel onderzoek van gesmeltlaste verbindingen
NEN-EN 439	Lastoevoegmaterialen – Beschermgassen voor booglassen en snijden



## Bijlagen

---

Bijlage A	<b>Veiligheidsfiches van de gebruikte gassen en de folder van de gebruikte stroombron</b>
	Dit document bevat de veiligheidsfiches van achtereenvolgens arcal 21, atal 6, arcal 14, teral 23 en arcal 12. Daarnaast bevat deze bijlage tevens de technische gegevens van de gebruikte stroombron.
Bijlage B	<b>ZINQWeld verificatie</b>
	Dit document bevat de resultaten van de verificatie van de lasdraad ZINQWeld.
Bijlage C	<b>Lasnaadvoorbereiding proefreeks 1</b>
	Dit document bevat de schetsen van de verschillende lasnaadvoorbereidingen van de teststukken van proefreeks 1.
Bijlage D	<b>Identificatie teststukken proefreeks 1</b>
	Dit document bevat de resultaten van de gebruikte parameters (o.a. effectieve spanning en stroom) voor het lassen van de werkstukken van proefreeks 1.
Bijlage E	<b>Visuele controle ISO 5817</b>
	Dit document bevat de resultaten van de visuele beoordeling volgens ISO 5817.
Bijlage F	<b>Zinklaagdiktemetingen proefreeks 1</b>
	Dit document bevat de resultaten van de diktemetingen van de zinklaag op de proefstukken van proefreeks 1.
Bijlage G	<b>Resultaten macrografieën</b>
	Dit document bevat de resultaten van de macrografieën ter bepaling van de opmenging.
Bijlage H	<b>Identificatie teststukken proefreeks 2</b>
	Dit document bevat de resultaten van de gebruikte parameters voor het lassen van de proefstukken afkomstig van de klanten.
Bijlage I	<b>Zinklaagdiktemetingen proefreeks 2</b>
	Dit document bevat de resultaten van de diktemetingen van de zinklaag op de proefstukken van proefreeks 2.
Bijlage J	<b>Preliminary Welding Procedure Specifications</b>
	Dit document bevat de pWPS'en die werden opgesteld aan de hand van de proefstukken van proefreeks 2.



## **Bijlage A: Productfiches gassen**

Deze bijlage is enkel beschikbaar in de digitale versie.





# Bijlage B: ZINQWeld verificatie



Welding wire development : ZINQWELD

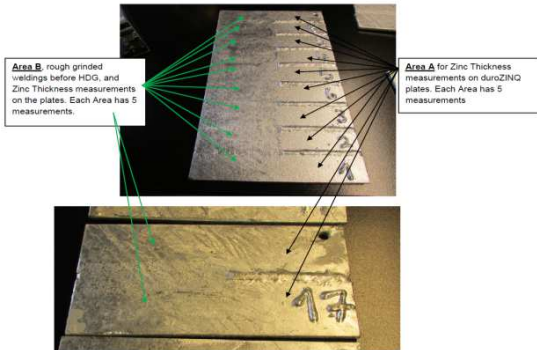
Test	Wire Composition			Diameter	Gaz			Current		Area A on Picture					Area B on picture					Area C on picture									
	D1	D2	D3		ATAL 6	ARCAL 21	ARCAL 14	DC	DC pulse	Zinc Layer Thickness					Zinc Layer thickness					Zinc layer Thickness									
										On the plate surface around welding strips					On the plate surface around grinded welded strip					On grinded Welding strip									
1	x			1,2	x					131	114	128	116	125	123	102	114	102	123	125	113	93	114	113	133	82	107	16	6
1'	x			1,2	x			x		108	109	123	115	117	114	117	113	117	114	110	114	74	87	85	75	80	80	34	34
2	x			1,2		x		x		111	122	130	144	139	129	145	101	117	122	103	118	198	210	217	184	203	202	-73	-85
2'	x			1,2		x		x		122	121	110	116	118	117	137	137	117	114	117	124	95	115	114	111	97	106	11	18
3	x			1,2			x	x		109	126	117	128	89	114	148	114	128	126	112	126	162	124	145	194	128	151	-37	-25
3'	x			1,2			x	x		108	113	107	106	114	110	114	121	131	108	119	119	121	101	118	120	129	118	-8	1
4		x		1,2	x			x								136	131	106	110	121	121	67	99	94	84	63	81		39
5		x		1,2		x		x		120	123	112	132	134	124	149	141	152	154	126	144	110	105	81	121	78	99	25	46
6		x		1,2			x	x		115	110	107	109	115	111	145	120	152	119	143	136	139	159	149	110	144	140	-29	-4
7			x	1,0	x			x		109	109	110	114	115	111	122	139	119	121	121	124	66	87	67	93	70	77	35	48
8			x	1,0		x		x		112	129	115	104	126	117	121	106	131	122	108	118	178	197	198	185	161	184	-67	-66
8'			x	1,0		x		x		116	117	115	124	112	117	129	125	118	130	124	125	76	96	88	85	100	89	28	36
9			x	1,0			x	x		122	128	124	114	140	126	119	145	139	146	110	132	108	81	78	101	85	91	35	41
10			x	1,0			x	x		114	117	106	120	108	113	139	129	137	108	113	125	84	109	95	72	65	85	28	40
11	x			1,2	x			x		100	106	112	112	109	108	113	117	110	114	113	113	80	69	110	90	86	87	21	26
12	x			1,2		x				117	107	112	114	116	113	130	127	112	121	116	121	96	109	119	108	94	105	8	16
13	x			1,2			x			107	114	102	101	111	107	128	145	124	106	120	125	117	83	113	86	98	99	8	25
14			x	1,0	x			x		114	117	113	121	120	117	114	117	121	134	137	125	94	93	101	98	86	94	23	30
15			x	1,0		x		x		117	118	121	112	111	116	124	125	117	112	117	119	95	91	91	123	90	98	18	21
16			x	1,0		x		x		111	115	117	103	106	110	135	125	121	101	125	121	68	104	103	97	86	92	19	30
									AVG	ZINC Thickness on the steel plates	116				123	ZINC Thickness on the grinded weld strips	109												

**CONCLUSION ZINQWeld: the Zinc Thickness on the HDG plates is ± Equal on the Zinc Thickness on the grinded ZINQWeld Strips**  
**No Reaction between ZINQWeld and Zinc appeared**

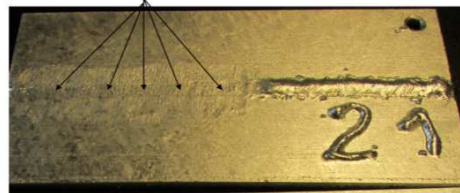
On sheet with classical W					Zinc layer	
Zinc Layer on the sheet between the welding strips					On the 4 grinded welding strip (Area C)	
76	66	62	69	73	AVG μ	AVG μ
					69	298
						317
						270
						314
						304
						284
						286
						283
						292
						313
						289
						285
						272
						291
						313
						320
						314
						302
						286
						276
						302
						303
						286
					AVG Zinc Layer on grinded classical welding strip	295

Conclusion: the Zinc Thickness with classical Zinc Welding material SG2 increased from 69 μ till 295 μ what means that Zinc have a very high reaction with the classical SG3 welding material.

duroZINQ® Thickness measurements on 3 Areas



Area C 5 Measurements on duroZINQ, ZINQWeld welding surface



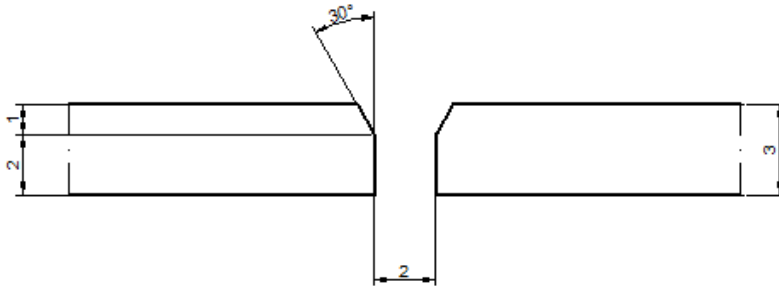


## Bijlage C: Lasnaadvoorbereiding

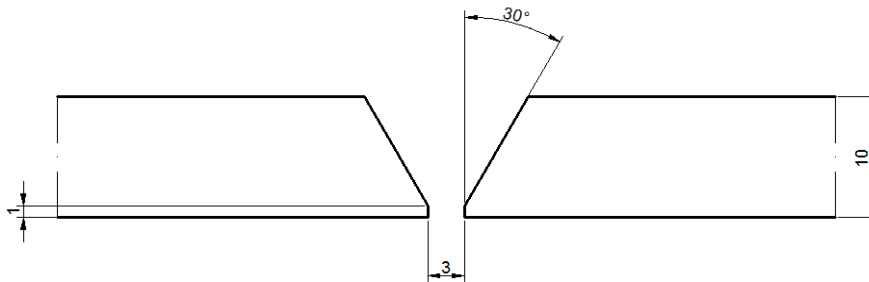
afmetingen in mm

hoeken in graden

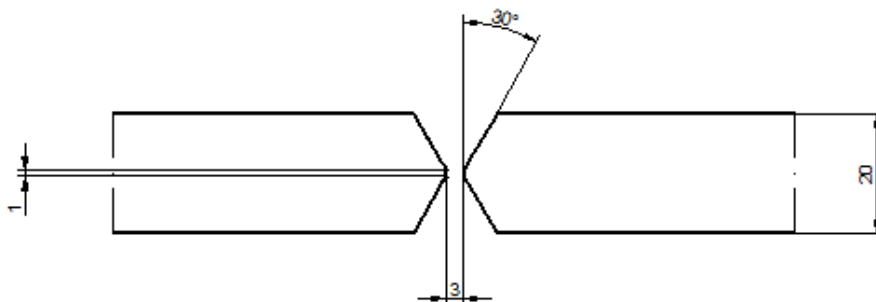
I-naad 3mm



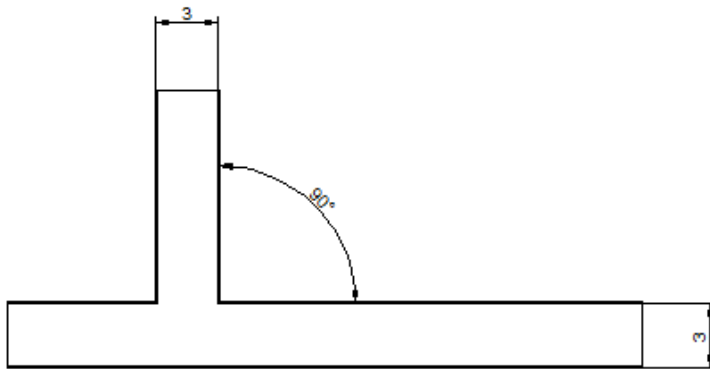
V-naad 10mm



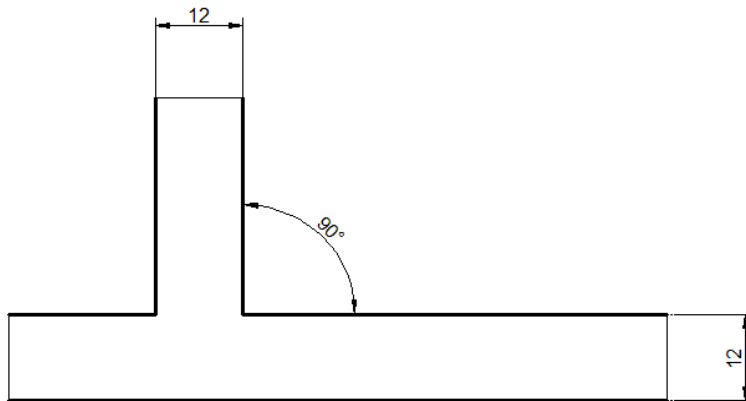
X-naad 20mm



Hoek 3mm



Hoek 12mm



## Bijlage D: Identificatie teststukken proefreeks 1

Proefplaatjes per gas:

	Atal 6	Arcal 14	Arcal 21	Teral 23
Hoek 12mm	P25, P32	P29, P30	P27, P28	P26, P31
V-naad 10mm	P18, P23	P19, P20	P21, P22	P17, P24
X-naad 20mm	P33, P40	P35, P38	P36, P37	P34, P39
Hoek 3mm	P10, P15	P12, P13	P11, P14	P9, P16
I-naad 3mm	P1, P8	P3, P6	P4, P5	P2, P7

Identificatie proefplaatjes:

Hoeklas: dikte 12 mm				
Nummer	P25	P27	P29	P31
Stroombron	Pulserend	Pulserend	Pulserend	Pulserend
Gas	Atal 6	Arcal 21	Arcal 14	Teral 23
Instelling plaatdikte [mm]	7	7	7	7
Effectieve spanning [V]	35,0	29,3	28,8	29,0
Effectieve stroomsterkte [A]	320	264	264	260
Draadsnelheid [m/min]	11	9,2	9,2	9,2

Hoeklas: dikte 12 mm				
Nummer	P26	P28	P30	P32
Stroombron	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel
Gas	Teral 23	Arcal 21	Arcal 14	Atal 6
Instelling plaatdikte [mm]	10,0	9,8	10,0	9,8
Effectieve spanning [V]	29,8	29,6	29,8	30
Effectieve stroomsterkte [A]	277	274	283	257
Draadsnelheid [stand]	4	4	4	4

V-naad: dikte 10 mm, opening 3mm				
Nummer	P17	P19	P21	P23
Stroombron	Pulserend	Pulserend	Pulserend	Pulserend
Gas	Teral 23	Arcal 14	Arcal 21	Atal 6
	Doorlassing			
Instelling plaatdikte [mm]	1,5	1,5	1,7	1,5
Effectieve spanning [V]	15,5	15,3	16,5	15,1
Effectieve stroomsterkte [A]	75	80	94	83
Draadsnelheid [m/min]	1,9	1,9	2,2	1,9
	Opvulling			
Instelling plaatdikte [mm]	5	3,5	5	5
Effectieve spanning [V]	26,7	24,0	29,4	29,8
Effectieve stroomsterkte [A]	238	148	223	210
Draadsnelheid [m/min]	7,3	5	7,9	7,9

V-naad: dikte 10 mm, opening 3mm				
Nummer	P18	P20	P22	P24
Stroombron	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel
Gas	Atal 6	Arcal 14	Arcal 21	Teral 23
Doorlassing				
Instelling plaatdikte [mm]	1,2	1,2	1,6	1,3
Effectieve spanning [V]	16,4	16,5	16,6	16,8
Effectieve stroomsterkte [A]	110	115	111	111
Draadsnelheid [stand]	4	4	4	4
Opvulling				
Instelling plaatdikte [mm]	9,1	9,2	9,1	9,2
Effectieve spanning [V]	28,6	28,5	26,2	28,7
Effectieve stroomsterkte [A]	230	254	250	235
Draadsnelheid [stand]	4	4	4	4

X-naad: dikte 20 mm, opening 3mm				
Nummer	P33	P35	P37	P39
Stroombron	Pulserend	Pulserend	Pulserend	Pulserend
Gas	Atal 6	Arcal 14	Arcal 21	Teral 23
Doorlassing				
Instelling plaatdikte [mm]	1,8	1,9	1,9	1,9
Effectieve spanning [V]	16,9	17,2	17,2	17,2
Effectieve stroomsterkte [A]	88	95	92	95
Draadsnelheid [m/min]	2,3	2,5	2,5	2,5
Opvulling				
Instelling plaatdikte [mm]	9	9	9	9
Effectieve spanning [V]	32,0	31,5	31,5	31,7
Effectieve stroomsterkte [A]	256	289	278	276
Draadsnelheid [m/min]	10,2	10,3	10,3	10,3

X-naad: dikte 20 mm, opening 3mm				
Nummer	P34	P36	P38	P40
Stroombron	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel
Gas	Teral 23	Arcal 21	Arcal 14	Atal 6
Doorlassing				
Instelling plaatdikte [mm]	1,8	1,9	1,6	1,7
Effectieve spanning [V]	17,3	17,3	17,1	16,9
Effectieve stroomsterkte [A]	135	138	128	122
Draadsnelheid [stand]	5	5	5	5
Opvulling				
Instelling plaatdikte [mm]	9,2	9,2	9,2	9,1
Effectieve spanning [V]	28,1	28,2	28,5	28,4
Effectieve stroomsterkte [A]	273	268	258	242
Draadsnelheid [stand]	5	5	5	5

Hoeklas: dikte 3 mm				
Nummer	P9	P11	P13	P15
Stroombron	Pulserend	Pulserend	Pulserend	Pulserend
Gas	Teral 23	Arcal 21	Arcal 14	Atal 6
Instelling plaatdikte [mm]	3	3	3	3
Effectieve spanning [V]	22,3	22,3	22,3	22,3
Effectieve stroomsterkte [A]	173	172	170	168
Draadsnelheid [m/min]	5,3	5,3	5,3	5,3

Hoeklas: dikte 3 mm				
Nummer	P10	P12	P14	P16
Stroombron	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel
Gas	Atal 6	Arcal 14	Arcal 21	Teral 23
Instelling plaatdikte [mm]	3,1	3,2	3,2	3,2
Effectieve spanning [V]	20,8	20,8	20,7	20,6
Effectieve stroomsterkte [A]	177	177	173	177
Draadsnelheid [stand]	3,5	3,5	3,5	3,5

I-naad: dikte 3 mm, opening 2 mm				
Nummer	P1	P3	P5	P7
Stroombron	Pulserend	Pulserend	Pulserend	Pulserend
Gas	Atal 6	Arcal 14	Arcal 21	Teral 23
Instelling plaatdikte [mm]	1,4	1,4	1,4	1,4
Effectieve spanning [V]	16,0	15,6	16,0	15,8
Effectieve stroomsterkte [A]	73	73	70	71
Draadsnelheid [m/min]	1,8	1,8	1,8	1,8

I-naad: dikte 3 mm, opening 2 mm				
Nummer	P2	P4	P6	P8
Stroombron	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel	Conventioneel
Gas	Teral 23	Arcal 21	Arcal 14	Atal 6
Instelling plaatdikte [mm]	1,0	1,0	1,0	1,0
Effectieve spanning [V]	16,0	15,9	15,8	16,0
Effectieve stroomsterkte [A]	111	100	112	107
Draadsnelheid [stand]	3,5	3,5	3,5	3,5





## Bijlage E: Visuele controle ISO 5817

Verklaring afkortingen tabel ISO 5817

<b>nr:</b>	<b>ISO 6520-1 reference</b>	<b>Imerfection designation</b>
1.7	5011/2012	Continous/ intermittent undercut
1.8	5013	Shrinkage groove
1.9	502	Excess weld metal (butt weld)
1.11	504	Excess penetration
1.12	505	Incorrect weld toe
1.13	506	Overlap
1.14	511	Incomp fillet
1.16	512	Excessive asymmetry of fillet weld
1.17	515	Root concavity
2.3	2011/2012	Gas pore/ uniformly distributed porosity

\* waarden zijn steeds het gemiddelde van 3 metingen

X = niet aanwezig = klasse B

Pulserend				1.7	1.8	1.9		1.11		1.12	1.13		1.14	1.16		1.17	2.3	
nr	gas	naad	t [mm]	klasse	klasse	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	klasse	b [mm]	h [mm]	h [mm]	z1 [mm]	z2 [mm]	h [mm]	klasse	
P27	Arcal 21	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	8,8	9,3	NVT	B	
P21		V	10	X	X	NVT	NVT	3,7	1,8	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	B	
P37		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P11		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,3	4,7	NVT	B
P5		I	3	D	X	5,4	1,2	2,5	1,4	C	X	X	X	NVT	NVT	X	B	
P25	Atal 6	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	8,0	9,0	NVT	B	
P23		V	10	X	X	NVT	NVT	3,6	2,5	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	B	
P33		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P15		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,3	4,3	NVT	B
P1		I	3	B	X	5,3	0,8	2,7	1,5	C	X	X	X	NVT	NVT	X	B	
P29	Arcal 14	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	6,7	10,5	NVT	C	
P19		V	10	X	X	NVT	NVT	3,1	1,9	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	B	
P35		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P13		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,7	5,1	NVT	B
P3		I	3	D	X	5,0	2,0	2,0	0,4	D	X	X	X	NVT	NVT	X	B	
P31	Teral 23	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	8,9	8,5	NVT	C	
P17		V	10	X	X	NVT	NVT	3,9	2,6	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	B	
P39		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P9		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,0	5,3	NVT	B
P7		I	3	X	X	6,0	1,3	4,1	2,3	B	X	X	X	NVT	NVT	X	B	

Conventioneel				1.7	1.8	1.9		1.11		1.12	1.13		1.14	1.16		1.17	2.3	
nr	gas	naad	t [mm]	klasse	klasse	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	klasse	b [mm]	h [mm]	klasse	z1 [mm]	z2 [mm]	h [mm]	klasse	
P28	Arcal 21	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	8,5	9,1	NVT	B	
P22		V	10	X	X	NVT	NVT	5,6	3,3	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	D	
P36		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P14		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,0	4,2	NVT	B
P4		I	3	D	X	5,8	1,0	2,1	1,1	C	X	X	X	NVT	NVT	X	B	
P32	Atal 6	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	8,7	7,7	NVT	B	
P18		V	10	X	X	NVT	NVT	3,7	2,2	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	B	
P40		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P10		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,0	4,2	NVT	B
P8		I	3	X	X	6,2	0,9	4,6	2,5	D	X	X	X	NVT	NVT	X	B	
P30	Arcal 14	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	7,8	9,9	NVT	B	
P20		V	10	X	X	NVT	NVT	2,8	1,8	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	B	
P38		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	C
P12		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,2	4,2	NVT	B
P6		I	3	D	X	5,1	1,6	3,4	1,5	D	X	X	X	NVT	NVT	X	B	
P26	Teral 23	hoek	12	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	8,0	8,4	NVT	B	
P24		V	10	X	X	NVT	NVT	3,0	1,2	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	X	C	
P34		X	20	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P16		hoek	3	X	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	4,3	4,3	NVT	B
P2		I	3	D	X	5,9	0,3	3,5	2,4	B	X	X	C	NVT	NVT	X	B	

## Klasses

Pulserend				1.7	1.8	1.9	1.11	1.12	1.13	1.14	1.16	1.17	2.3	
nr	gas	naad	t	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	
			[mm]											
P27	Arcal 21	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P21		V	10	B	B	NVT	C	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	B
P37		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P11		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P5		I	3	D	B	B	C	C	B	B	B	NVT	B	B
P25	Atal 6	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P23		V	10	B	B	NVT	C	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	B
P33		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P15		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P1		I	3	B	B	B	C	C	B	B	B	NVT	B	B
P29	Arcal 14	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	> D	NVT	C
P19		V	10	B	B	NVT	C	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	B
P35		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P13		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P3		I	3	D	B	D	B	D	B	B	B	NVT	B	B
P31	Teral 23	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	B	NVT	C
P17		V	10	B	B	NVT	C	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	B
P39		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P9		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P7		I	3	B	B	B	D	B	B	B	B	NVT	B	B

Conventioneel				1.7	1.8	1.9	1.11	1.12	1.13	1.14	1.16	1.17	2.3	
nr	gas	naad	t	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	klasse	
			[mm]											
P28	Arcal 21	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P22		V	10	B	B	NVT	C	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	D
P36		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P14		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P4		I	3	D	B	B	B	C	B	B	B	NVT	B	B
P32	Atal 6	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P18		V	10	B	B	NVT	C	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	B
P40		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P10		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P8		I	3	B	B	B	D	D	B	B	B	NVT	B	B
P30	Arcal 14	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	C	NVT	B
P20		V	10	B	B	NVT	C	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	B
P38		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	C
P12		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P6		I	3	D	B	C	C	D	B	B	B	NVT	B	B
P26	Teral 23	hoek	12	B	NVT	NVT	NVT	D	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P24		V	10	B	B	NVT	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B	C
P34		X	20	B	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT	B
P16		hoek	3	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	NVT	NVT	B	NVT	B
P2		I	3	D	B	B	D	B	B	B	C	NVT	B	B



## Bijlage F: Zinklaagdiktemetingen van proefreeks 1

40 Steel sheets duroZINQ Galvanized & welded with ZINQWeld											
Galvanized 16 12 2013 Measurements 21 01 2014											
Situation visit 23 01 2014											
1°	8 plates 3mm Stud weld							AVG $\mu$ Zn	$\mu$ Zn on Weld	AVG $\mu$ Zn	%Less Zn on ZINQWeld
	Plate nr	$\mu$ Zn on plate									
	P1	59,6	51,8	54	53	58	55,28	Not possible to measure. Too small	0		
	P2	64,9	77,9	81	80,3	82,2	77,26		0		
	P2	72,4	76,7	83,5	74,4	90,5	79,5		0		
	P4	76,4	74,9	79,5	90,4	78,5	79,94		0		
	P5	77,3	83,3	80,3	76,8	74,7	78,48		0		
	P6	84,1	78,7	80,5	74,1	93,5	82,18		0		
	P7	78,6	77,1	87,5	73,9	79,7	79,36		0		
	P8	77,3	80,5	82,2	91	72,9	80,78		0		
							76,59		0		
2°	7 Plates 3mm Corner welded									0	
	P10	70,7	72,8	70,8	66,3	71,5	70,42	Not possible to measure. Too small	0		
	P11	64,4	86,2	71,2	80,3	62,2	72,86		0		
	P12	70	67,1	79,8	78,7	71,6	73,44		0		
	P13	79,4	61,3	76,1	85,1	81,6	76,7		0		
	P14	67,3	60,6	69,4	62,3	56,2	63,16		0		
	P15	61,5	66,5	73,7	60,6	64,3	65,32		0		
	P16	74	61,6	54,6	62,6	74,4	65,44		0		
	TOTAL AVG						69,62		0		

3°	8 plates 10 mm V- ZINQWeld											0		
	P17	180	174	191	182	211	187,6	163	180	81,7	68,7	131	124,88	
	P18	185	165	174	184	173	176,2	95,2	81,2	77,7	85,9	88,5	85,7	
	P19	221	213	226	216	234	222	101	126	121	99,6	91,3	107,78	
	P20	241	216	219	257	196	225,8	177	128	156	120	139	144	
	P21	216	215	200	202	214	209,4	96,7	98	94,3	115	92,5	99,3	
	P22	185	186	187	185	186	185,8	86,9	88,4	120	143	91	105,86	
	P23	178	195	182	221	187	192,6	83,8	118	164	86,1	81,9	106,76	
	P24	163	177	185	167	192	176,8	106	94,8	127	96,4	79,1	100,66	
	TOTAL AVG						197						109,36	45%less
4°	8 plates 20 mm K- ZINQWeld											0		
	P33	101	121	115	113	113	112,6	77,8	74,9	126	65	87	86,14	
	P34	257	281	230	227	295	258	91,6	158	140	152	130	134,32	
	P35	215	190	214	218	202	207,8	no representative measurements were possible , too small access						
	P36	191	176	170	169	186	178,4			158	189	180	175,6667	
	P37	210	212	185	205	190	200,4	92,3	154	286	97,5		157,45	
	P38	234	246	242	240	253	243	102	126	137		150	128,75	
	P39	232	246	230	229	234	234,2	81,5	94,9	114	76,7	119	97,22	
	P40	131	148	147	164	153	148,6	89	122	123	87,6	84,2	101,16	
	TOTAL AVG						197,87						125,81	37%less
5°	8 Plates 12 mm Corner ZINQWeld													
	P25	130	124	158	114	108	126,8	135	136	139	98,6		127,15	
	P26	147	134	143	140	129	138,6	58,3	89,6	76,7	129	75	85,72	
	P27	148	158	181	145	142	154,8	94,9	119	104	107	123	109,58	
	P28	138	165	132	114	131	136	57,8	81	112	78	88,6	83,48	
	P29	167	171	175	174	155	168,4	67,1	129	107	78,3	87,3	93,74	
	P30	177	148	176	181	156	167,6	87,6	107	105	112	111	104,52	
	P31	144	131	119	115	134	128,6	63,9	120	86,2	83,7	60,2	82,8	
	P32	163	160	179	171	164	167,4	112	94,7	131	109	78,1	104,96	
	TOTAL AVG						148,52						98,99	33%Less

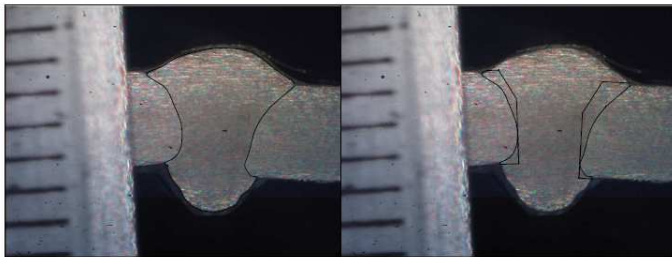


# Bijlage G: Macrografie

Schaalenheid: 1mm

Macrografie: P1-P4

P1: i3, Atal 6, Puls



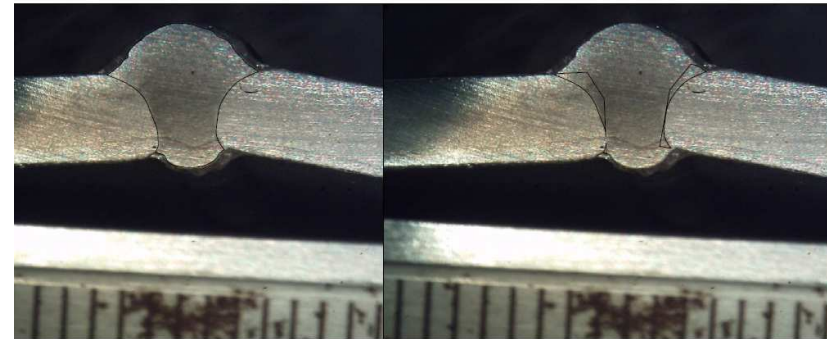
area: 13,08mm<sup>2</sup> area: 1,11+0,62=1,73mm<sup>2</sup>

P2: i3, Teral 23, Conv



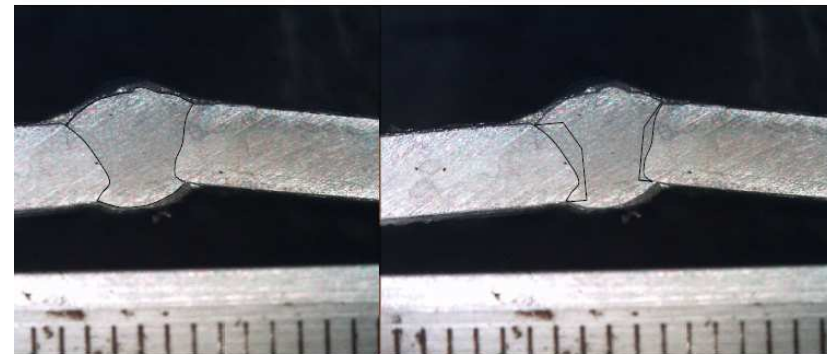
area: 15,98mm<sup>2</sup> area: 2,15+2,97 =5,12mm<sup>2</sup>

P3: i3, Arcal 14, Puls



area:14,18mm<sup>2</sup> area: 0,83+0,02+0,55=1,40mm<sup>2</sup>

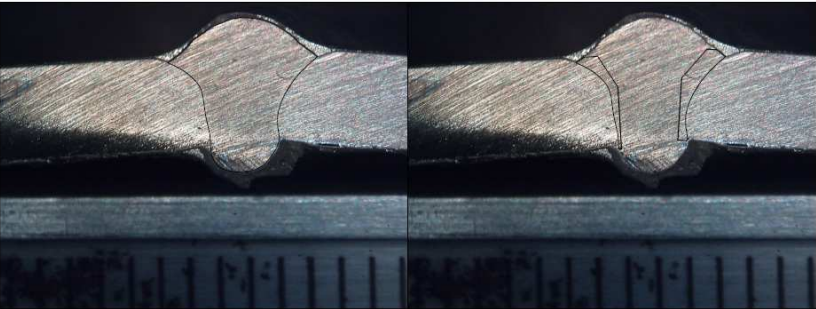
P4: i3, Arcal 21, Conv



area: 14,05mm<sup>2</sup> area: 0,67+1,86=2,53mm<sup>2</sup>

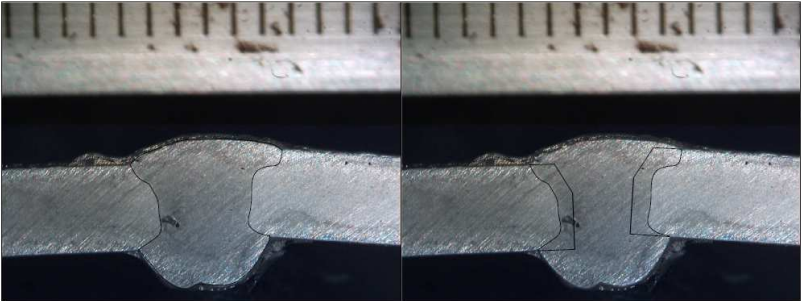
Macrografie: P5-P8

P5: i3, Arcal 21, Puls



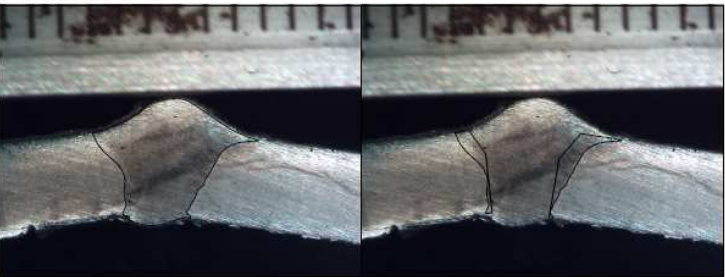
area: 13,32mm<sup>2</sup> area:0.82+1.13=2.13mm<sup>2</sup>

P7: i3, Teral 23, Puls



area: 19,45mm<sup>2</sup> area: 2,09+2,40=4,49mm<sup>2</sup>

P6: i3, Arcal 14, Conv



area: 12,55mm<sup>2</sup> area:0.76+1.29=2.05mm<sup>2</sup>

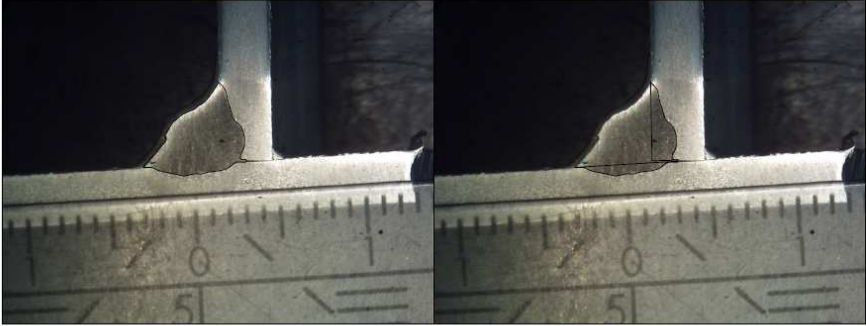
P8: i3, Atal 6, Conv



area: 19,61mm<sup>2</sup> area:2.47+1.98=4.45mm<sup>2</sup>

Macrografie: P10-P12

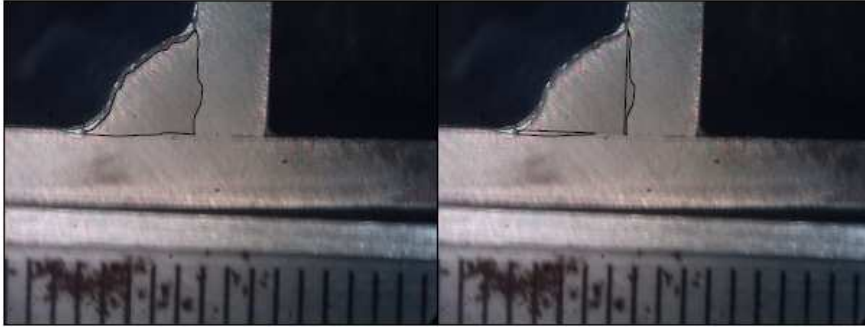
P10: hoek3, Atal 6, Conv



area: 17,30mm<sup>2</sup>

area: 2,11+4,11 = 6,22mm<sup>2</sup>

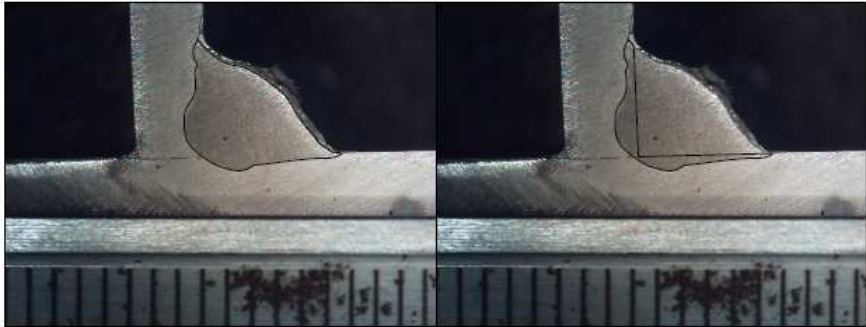
P12: hoek3, Arcal 14, Conv



area: 10,85mm<sup>2</sup>

area: 0,68+0,46 = 1,14mm<sup>2</sup>

P11: hoek3, Arcal 21, Puls

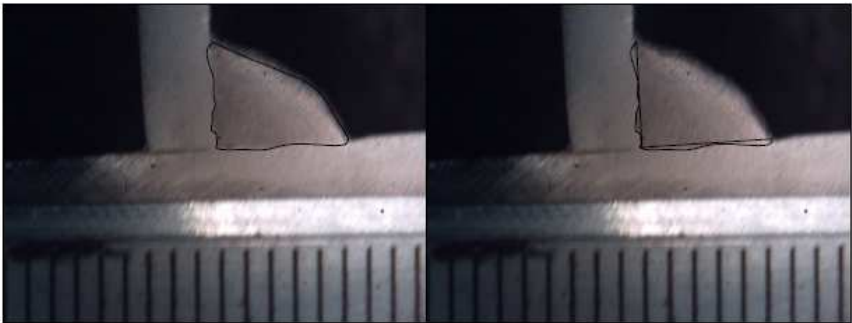


area: 17,77mm<sup>2</sup>

area: 4,40mm<sup>2</sup>

Macrografie: P13-P16

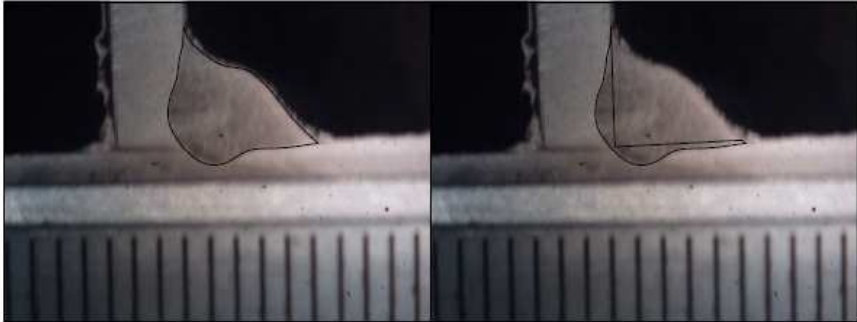
P13: hoek3, Arcal 14, Puls



area: 16,20 mm<sup>2</sup>

area: 1,33mm<sup>2</sup>

P15: hoek3, Atal 6, Puls



area: 16,05mm<sup>2</sup>

area: 3,81mm<sup>2</sup>

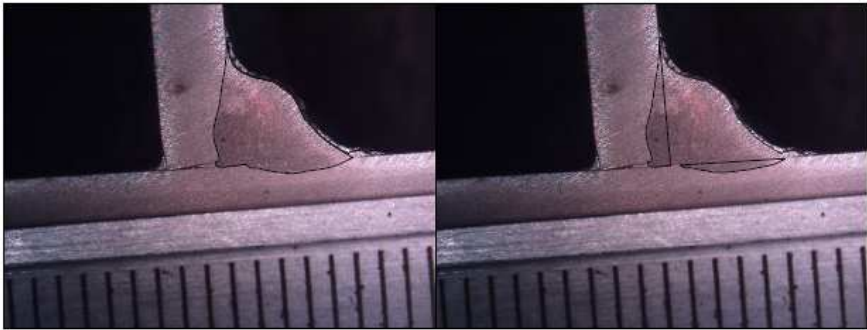
P14: hoek 3, Arcal 21, Conv



area: 11,47mm<sup>2</sup>

area: 1,27+1,81= 3,08mm<sup>2</sup>

P16: hoek3, Teral 23, Conv

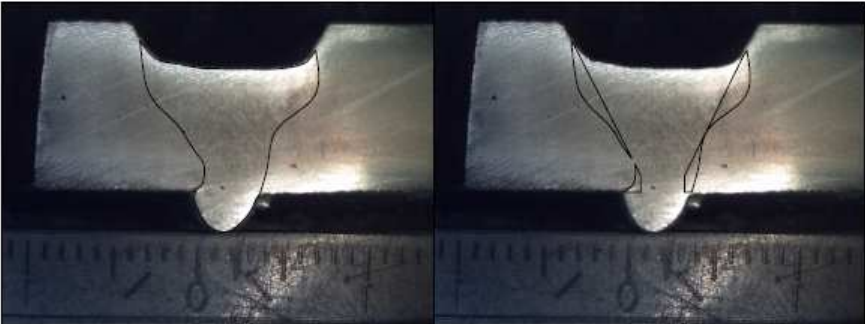


area: 14,57mm<sup>2</sup>

area: 2,54+1,17 = 3,71mm<sup>2</sup>

Macrografie: P17-P20

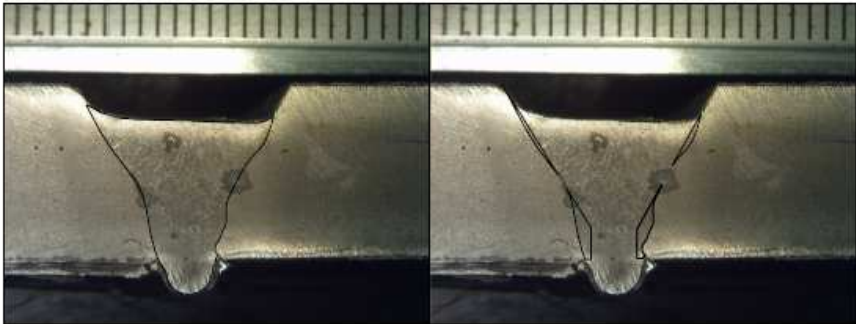
P17: V10, Teral 23, Puls



area:56,26mm<sup>2</sup>

area:4,99+0,60+3,87=9,46mm<sup>2</sup>

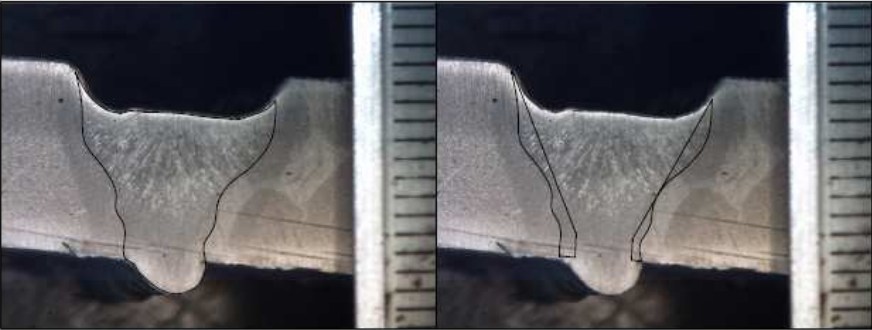
P19: V10, Arcal 14, Puls



area: 51,98mm<sup>2</sup>

area:1,54+0,58+1,87+0,68=4,67mm<sup>2</sup>

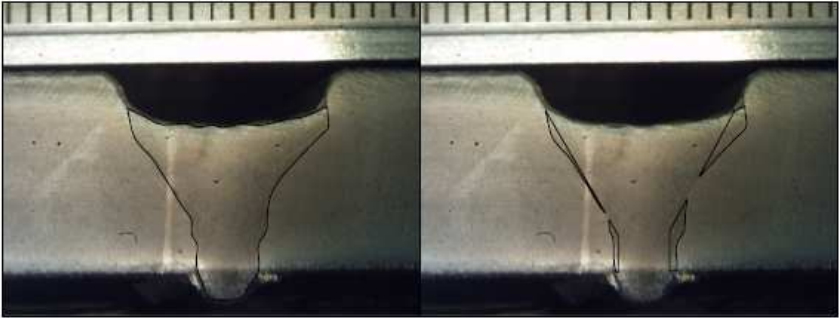
P18: V10, Atal 6, Conv



area: 54,92mm<sup>2</sup>

area: 3,75+5,77=9,52mm<sup>2</sup>

P20: V10, Arcal 14, Conv

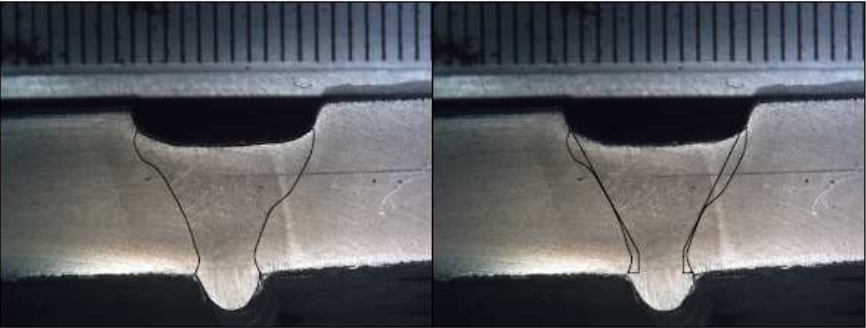


area:42,15mm<sup>2</sup>

area:1,84+1,31+0,52+0,89=4,56mm<sup>2</sup>

Macrografie: P21-P24

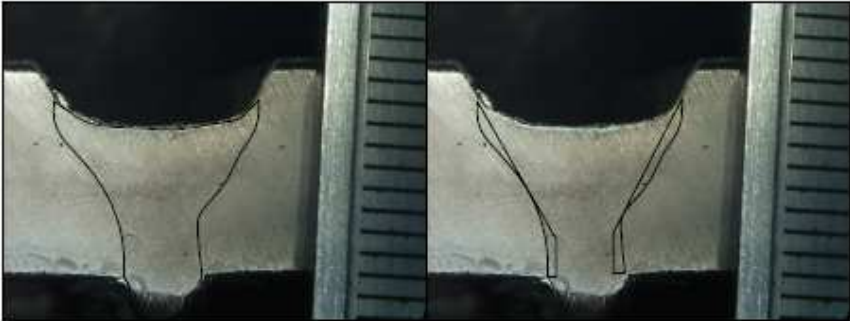
P21: V10, Arcal 21, Puls



area:55.62mm<sup>2</sup>

area:2,69+3,69=6,38mm<sup>2</sup>

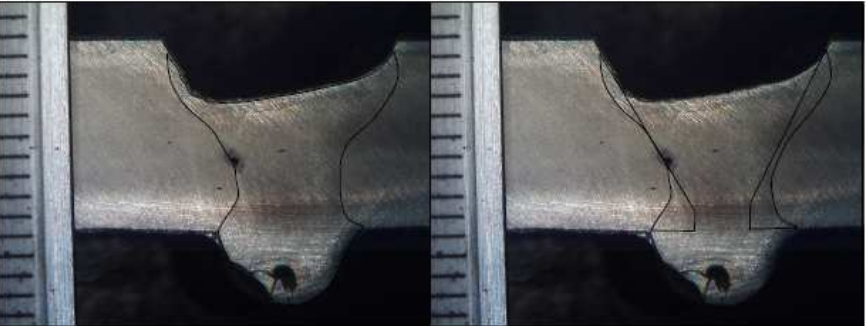
P23: V10, Atal 6, Puls



area:45,17mm<sup>2</sup>

area: 3,0+2,47=5,47mm<sup>2</sup>

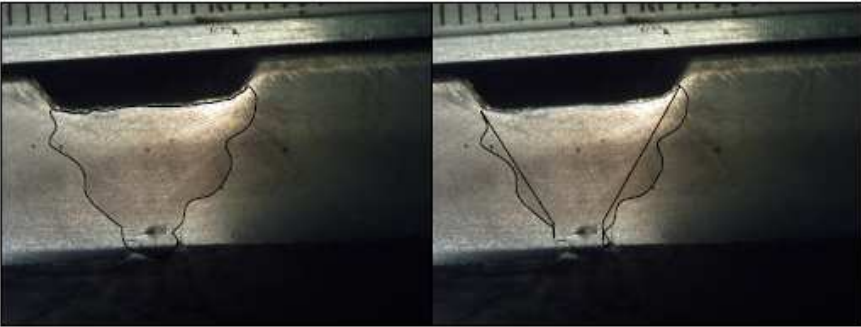
P22: V10, Arcal 21, Conv



area: 68.20mm<sup>2</sup>

area:6,95+5,19=12,14

P24: V10, Teral 23, Conv

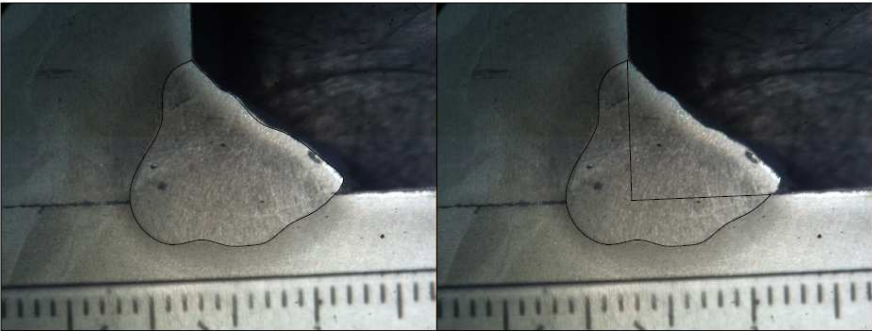


area: 34,70 mm<sup>2</sup>

area: 4,62+2,22=6,84mm<sup>2</sup>

Macrografie: P25-P28

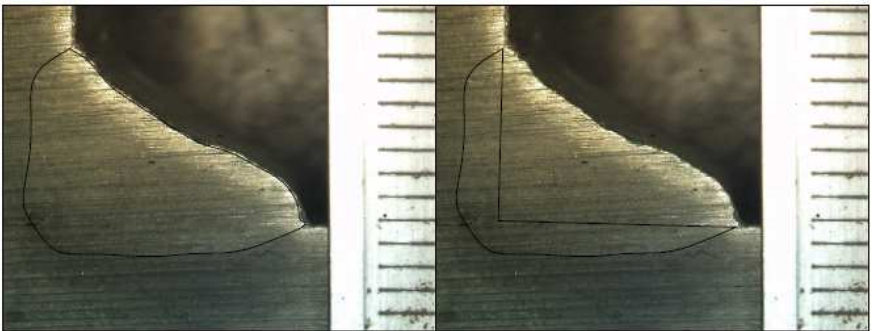
P25: hoek12, Atal 6, Puls



area: 88,08 mm<sup>2</sup>

area: 46,75mm<sup>2</sup>

P27: hoek12, Arcal 21, Puls



area: 67,47mm<sup>2</sup>

area: 24,93mm<sup>2</sup>

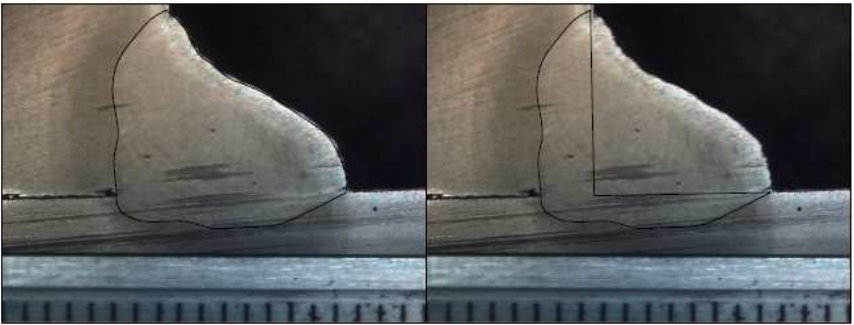
P26: hoek12, Teral 23, Conv



area: 61,16mm<sup>2</sup>

area: 22,72mm<sup>2</sup>

P28: hoek12, Arcal 21, Conv

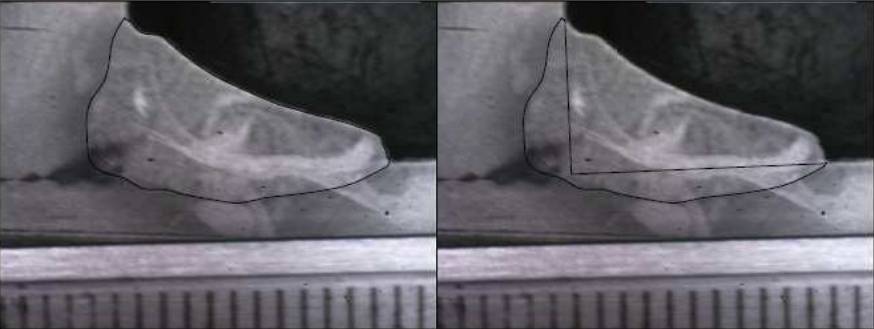


area: 62,89mm<sup>2</sup>

area: 27,37mm<sup>2</sup>

Macrografie: P29-P32

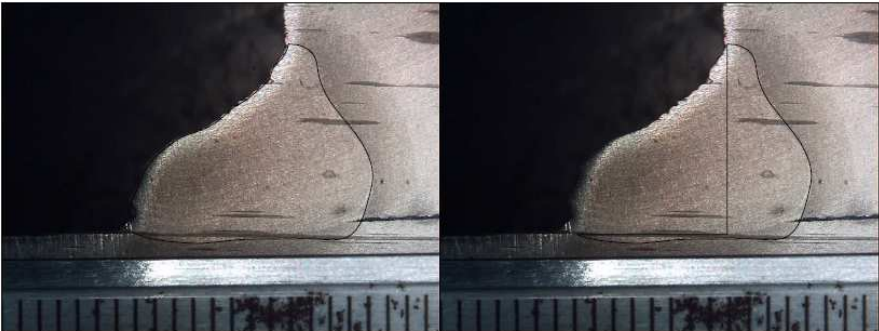
P29: hoek12, Arcal 14, Puls



area: 57,61mm<sup>2</sup>

area: 20,03mm<sup>2</sup>

P31: hoek12, Teral 23, Puls



area: 84,39mm<sup>2</sup>

area: 34,86mm<sup>2</sup>

P30: hoek12, Arcal 14, Conv



area: 70,51mm<sup>2</sup>

area: 29,05mm<sup>2</sup>

P32: hoek12, Atal 6, Conv



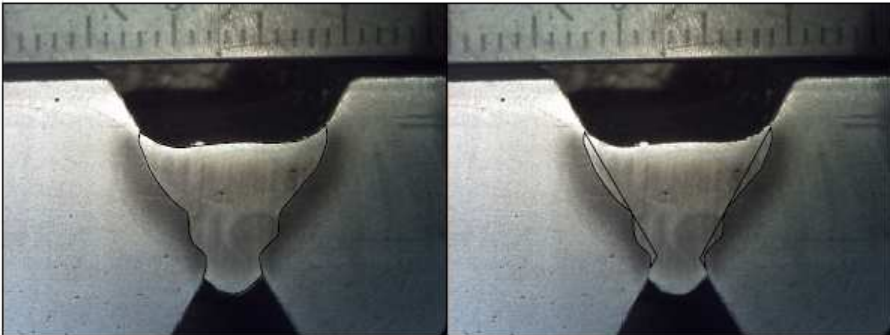
area: 73,82mm<sup>2</sup>

area: 27,29mm<sup>2</sup>



Macrografie: P33-P36

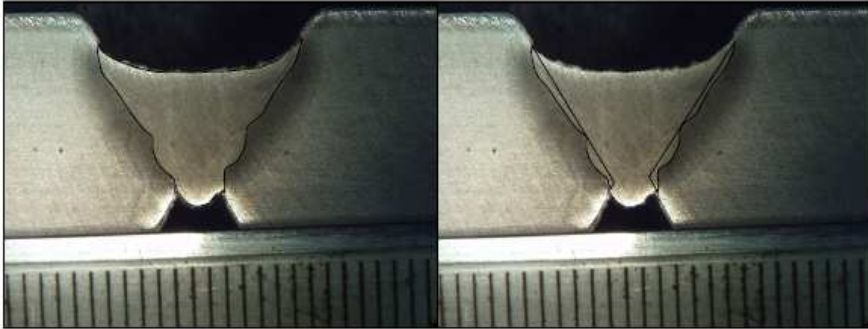
P33: X20, Atal 6, Puls



area: 56,00mm<sup>2</sup>

area: 3,13+3,65=6,78mm<sup>2</sup>

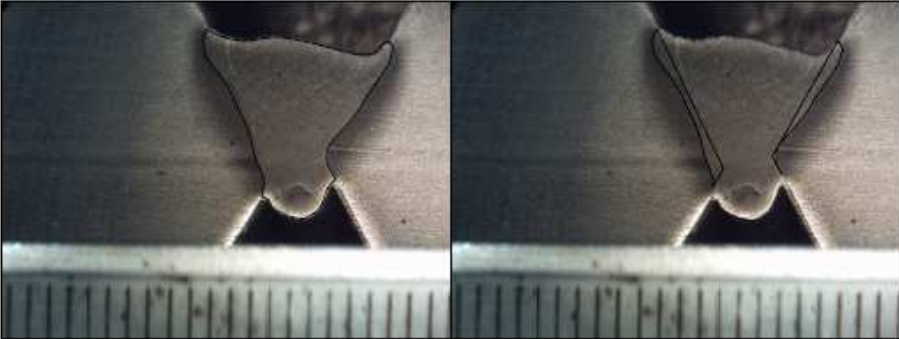
P35: X20, Arcal 14, Puls



area: 50,26mm<sup>2</sup>

area: 3,16+3,72=6,88mm<sup>2</sup>

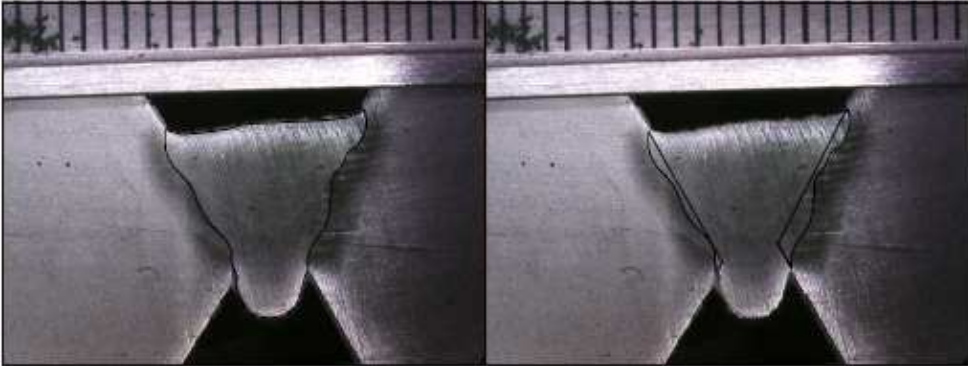
P34: X20, Teral 23, Conv



area: 47,05mm<sup>2</sup>

area: 3,69+2,49=6,18mm<sup>2</sup>

P36: X20, Arcal 21, Conv

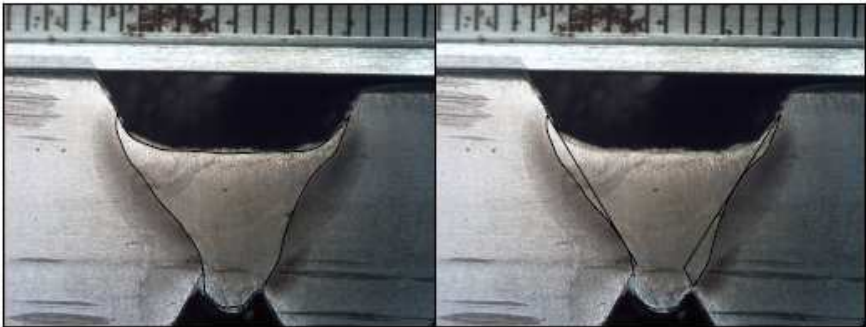


area: 48,60mm<sup>2</sup>

area: 3,90+1,97=5,87mm<sup>2</sup>

Macrografie: P37-P40

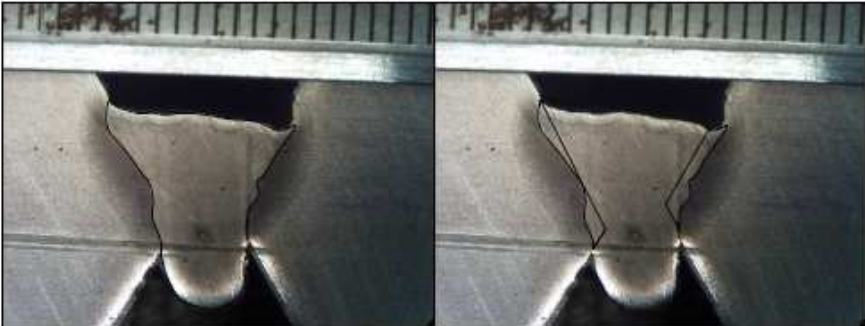
P37: X20, Arcal 21, Puls



area:51,10mm<sup>2</sup>

area:3,70+3,20=6,90mm<sup>2</sup>

P39: X20, Teral 23, Puls



area:51,38mm<sup>2</sup>

area:3,33+3,01=6,34mm<sup>2</sup>

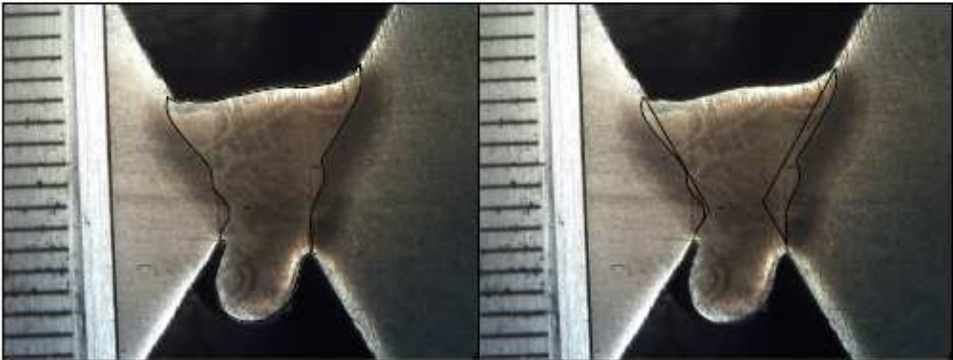
P38: X20, Arcal 14, Conv



area:66,22mm<sup>2</sup>

area:4,62+7,46=12,08mm<sup>2</sup>

P40: X20, Atal 6, Conv



area:54,29mm<sup>2</sup>

area:5,32+1,65=6,97mm<sup>2</sup>

## Bijlage H: Identificatie teststukken proefreeks 2

? : Parameter onbekend, proefstuk bij klant gelast

### Kokers

	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Draaddiameter [mm]	1,0	1,2	?	?
Gas	Arcal 12	Atal 6	M24	M21
Puls/Conv	Puls	Puls	?	?
Eff spanning [V]	19,5	23,3	?	?
Eff stroom [A]	100	110	?	?
Draadsnelheid [m/min]	5,1	3,4	?	?
Ingestelde dikte [mm]	2,2	2,4	?	?
Voortloopsnelheid [mm/min]	300	300	?	?

### Profielen

	<b>17</b>	<b>18</b>
Draaddiameter [mm]	1,0	1,0
Gas	Arcal 12	Arcal 12
Puls/Conv	Puls	Puls
Eff spanning [V]	20,6	18,5
Eff stroom [A]	100	95
Draadsnelheid [m/min]	5,1	5,1
Ingestelde dikte [mm]	2,2	2,2
Voortloopsnelheid [mm/min]	375	300

### Buizen

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Draaddiameter [mm]	1,2	1,2	1,0	?
Gas	Atal 6	Atal 6	Arcal 12	?
Puls/Conv	Puls	Puls	Puls	?
Eff spanning [V]	21,4	24,3	19,2	?
Eff stroom [A]	120	113	85	?
Draadsnelheid [m/min]	3,6	3,4	4,8	?
Ingestelde dikte [mm]	2,5	2,4	2,1	?
Voortloopsnelheid [mm/min]	300	300	300	?

Platen S355 MC

	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
Draaddiameter [mm]	1,2	1,2	1,2	1,0	?	?
Gas	Atal 6	Arcal 21	Arcal 12	Arcal 12	M24	M21
	doorlassing					
Puls/Conv	Puls	Puls	Puls	Puls	?	?
Eff spanning [V]	21,1	19,7	19,8	17,4	?	?
Eff stroom [A]	103	104	104	89	?	?
Draadsnelheid [m/min]	3,1	3,1	3,1	4,7	?	?
Ingestelde dikte [mm]	2,1	2,1	2,1	2,9	?	?
Voortloopsnelheid [mm/min]	300	325	300	320	?	?
	2 <sup>e</sup> pas					
Puls/Conv	Puls	Puls	Puls	Puls	?	?
Eff spanning [V]	21,1	19,7	19,8	20,9	?	?
Eff stroom [A]	103	104	104	129	?	?
Draadsnelheid [m/min]	3,1	3,1	3,1	6,7	?	?
Ingestelde dikte [mm]	2,1	2,1	2,1	2,9	?	?
Voortloopsnelheid [mm/min]	300	310	310	310	?	?

Platen S235 JR

	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
Draaddiameter [mm]	1,2	1,2	1,2	1,0	?	?
Gas	Arcal 12	Arcal 21	Atal 6	Arcal 12	M24	M21
	doorlassing					
Puls/Conv	Puls	Puls	Puls	Puls	?	?
Eff spanning [V]	19,1	22	22,6	17,2	?	?
Eff stroom [A]	104	103	101	78	?	?
Draadsnelheid [m/min]	3,1	3,1	3,1	4,3	?	?
Ingestelde dikte [mm]	2,1	2,1	2,1	1,9	?	?
Voortloopsnelheid [mm/min]	310	320	300	300	?	?
	2 <sup>e</sup> pas					
Puls/Conv	Puls	Puls	Puls	Puls	?	?
Eff spanning [V]	20,9	19,7	19,8	18,1	?	?
Eff stroom [A]	129	104	104	89	?	?
Draadsnelheid [m/min]	6,7	3,1	3,1	4,7	?	?
Ingestelde dikte [mm]	2,9	2,1	2,1	2,1	?	?
Voortloopsnelheid [mm/min]	290	300	300	300	?	?

## Bijlage I: Zinklaagdiktemetingen van proefreeks 2

Schichtdicke messungen 28 04 2014

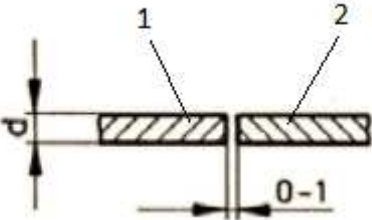
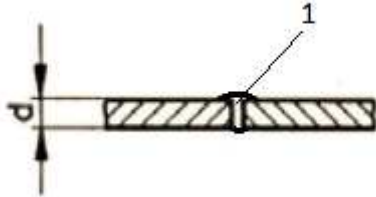
<b>Koker</b>	<b>µm duroZINQ Rohren</b>					<b>Mittel</b>	<b>µm auf VDL Schweissnaht</b>					<b>Mittel</b>
<b>19</b>	77,3	79,7	62,7	60,6	65,5	<b>69,16</b>	264	259	267	282	270	<b>268,4</b>
<b>20</b>	63	60,2	59,5	58,5	66,5	<b>61,6</b>	189	190	194	179	194	<b>189,2</b>
	<b>µm duroZINQ auf glattes Rohr</b>						<b>µm auf ZINQWeld Schweissnaht</b>					
<b>7</b>	69,9	69,6	61,7	71,2	69,3	<b>68,34</b>						
	<b>µm duroZINQ auf geschliffen Oberfläche des Rohr</b>											
	98,1	102	103	98,2	92	<b>98,66</b>	78,2	84,4	88,5	85,8	88,9	<b>85,16</b>
<b>Plaat</b>	<b>µm duroZINQ geschliffenes Bereich</b>					<b>Mittel</b>	<b>µm auf VDL Schweissnaht</b>					<b>Mittel</b>
<b>21</b>	53	68,1	67,5	66,1	60,3	<b>63</b>	164	180	187	182	193	<b>181,2</b>
<b>24</b>	55,9	84	58,8	62,1	64,8	<b>65,12</b>	165	153	116	155	144	<b>146,6</b>
	<b>µm duroZINQ geschliffenes Oberfläche des Blech</b>						<b>µm auf ZINQWeld Schweissnaht</b>					
<b>15</b>	125	111	110	100	114	<b>112</b>	96,1	92,1	97,2	117	96,6	<b>99,8</b>
<b>16</b>	109	113	111	113	108	<b>110,8</b>	112	104	117	99,4	115	<b>109,5</b>
<b>Profiel</b>	<b>µm duroZINQ geschliffenes Bereich</b>					<b>Mittel</b>	<b>µm auf ZINQWeld Schweissnaht</b>					<b>Mittel</b>
<b>17</b>	103	101	94	105	114	<b>103,4</b>	101	107	98,2	92	88,6	<b>97,37</b>
<b>Buis</b>	<b>µm duroZINQ auf Rohr</b>					<b>Mittel</b>	<b>µm auf Schweissnaht des Kunde</b>					<b>Mittel</b>
<b>4</b>	86,4	92,9	80,9	114	81,1	<b>91,06</b>	362	313	311	255	132	<b>274,6</b>
<b>3</b>							<b>µm auf ZINQWeld Schweissnaht</b>					
							106	117	97,6	107	105	<b>106,52</b>



## Bijlage J: preliminary Welding Procedure Specifications

pWPS-nr	1	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: I-naad  
 Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
 2: S235JR  
 Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
 2: groepnr. 1.1  
 Materiaaldikte (mm): 4  
 Laspositie: PA  
 Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
 Lasnaadvorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

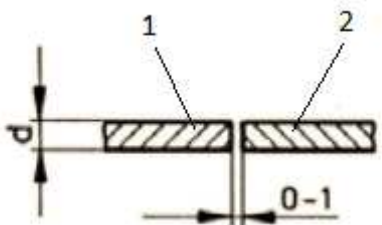

### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/mm)
1	135	1,2	120	21,4	Pulserend EP	3,6	300	0,5

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
 Beschermgas: M21: 82% Ar 18% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Atal 6)  
 Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 9  
 Voorwarmtemperatuur: RT  
 Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
 PWHT: /

pWPS-nr	3	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: I-naad  
 Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
 2: S235JR  
 Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
 2: groepnr. 1.1  
 Materiaaldikte (mm): 4  
 Laspositie: PA  
 Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
 Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

#### Lasdetails

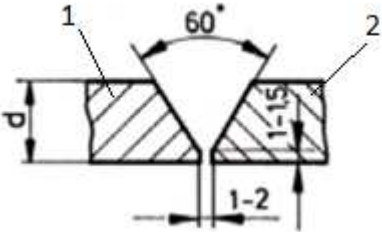
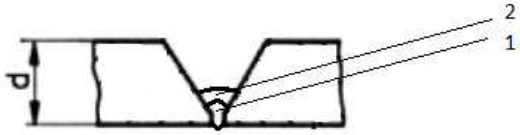
Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/mm)
1	135	1,0	85	19,2	Pulserend EP	4,8	300	0,3

Toevoegmateriaalaanduiding en –fabricaat: ZINQWeld  
 Beschermgas: M12: 98% Ar 2% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 12)  
 Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 9  
 Voorwarmtemperatuur: RT  
 Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
 PWHT: /



pWPS-nr	7	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
2: S235JR  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
2: groepnr. 1.1  
Materiaaldikte (mm): 4  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

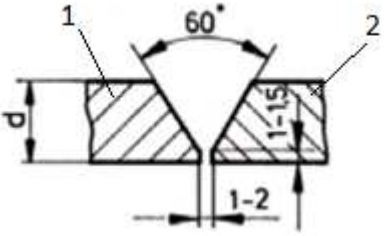
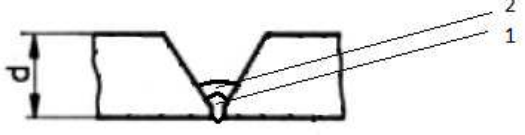
#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,0	78	17,2	Pulserend EP	4,3	300	0,3
2	135	1,0	89	18,1	Pulserend EP	4,7	300	0,3

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 98% Ar 2% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 12)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 9  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /

pWPS-nr	8	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
2: S235JR  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
2: groepnr. 1.1  
Materiaaldikte (mm): 4  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

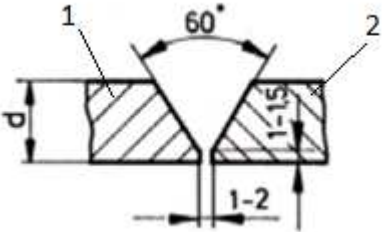
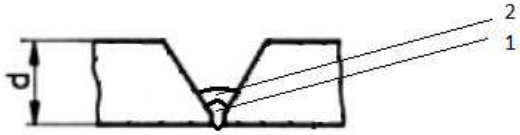
#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,2	101	22,6	Pulserend EP	3,1	300	0,5
2	135	1,2	104	19,8	Pulserend EP	3,1	300	0,4

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 82% Ar 18% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Atal 6)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 12  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /

pWPS-nr	9	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S355MC  
2: S355MC  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.2  
2: groepnr. 1.2  
Materiaaldikte (mm): 6  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,2	103	21,1	Pulserend EP	3,1	300	0,4
2	135	1,2	103	21,1	Pulserend EP	3,1	300	0,4

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 82% Ar 18% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Atal 6)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 12  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /

pWPS-nr	10	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S355MC  
2: S355MC  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.2  
2: groepnr. 1.2  
Materiaaldikte (mm): 6  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde

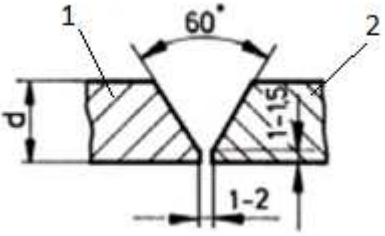
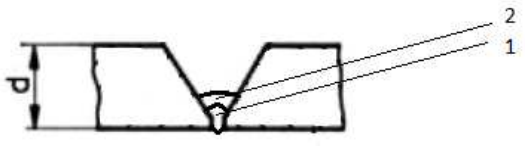
#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,2	104	19,7	Pulserend EP	3,1	300	0,4
2	135	1,2	104	19,7	Pulserend EP	3,1	300	0,4

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 92% Ar 8% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 21)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 12  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /

pWPS-nr	11	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S355MC  
2: S355MC  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.2  
2: groepnr. 1.2  
Materiaaldikte (mm): 6  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,2	104	19,8	Pulserend EP	3,1	300	0,4
2	135	1,2	104	19,8	Pulserend EP	3,1	300	0,4

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 82% Ar 18% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Atal 6)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 12  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /

pWPS-nr	12	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
 Aanduiding moedermateriaal: 1: S355MC  
 2: S355MC  
 Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.2  
 2: groepnr. 1.2  
 Materiaaldikte (mm): 6  
 Laspositie: PA  
 Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
 Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde

#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,0	89	17,4	Pulserend EP	4,7	320	0,3
2	135	1,0	129	20,9	Pulserend EP	6,7	310	0,5

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
 Beschermgas: M12: 98% Ar 2% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 12)  
 Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 9  
 Voorwarmtemperatuur: RT  
 Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
 PWHT: /

pWPS-nr	13	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
 Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
 2: S235JR  
 Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
 2: groepnr. 1.1  
 Materiaaldikte (mm): 6  
 Laspositie: PA  
 Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
 Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde

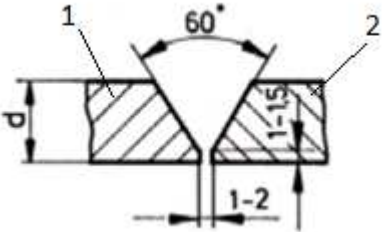
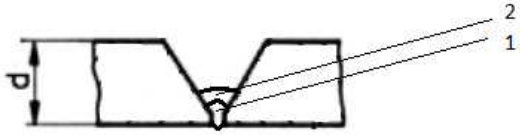
#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,2	104	19,1	Pulserend EP	3,1	300	0,4
2	135	1,2	129	20,9	Pulserend EP	6,7	300	0,5

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
 Beschermgas: M12: 98% Ar 2% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 12)  
 Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 12  
 Voorwarmtemperatuur: RT  
 Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
 PWHT: /

pWPS-nr	14	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
2: S235JR  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
2: groepnr. 1.1  
Materiaaldikte (mm): 6  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

#### Lasdetails

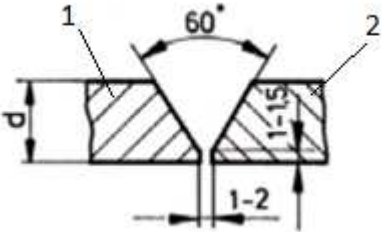
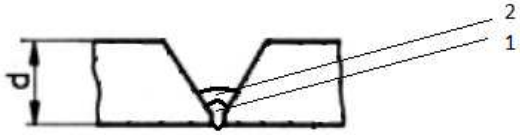
Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,2	103	22,0	Pulserend EP	3,1	300	0,5
2	135	1,2	104	19,7	Pulserend EP	3,1	300	0,4

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 92% Ar 8% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 21)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 12  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /



pWPS-nr	15	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
2: S235JR  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
2: groepnr. 1.1  
Materiaaldikte (mm): 6  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,2	101	22,6	Pulserend EP	3,1	300	0,5
2	135	1,2	104	19,8	Pulserend EP	3,1	300	0,4

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 82% Ar 18% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Atal 6)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 12  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /

pWPS-nr	16	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: V-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
2: S235JR  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
2: groepnr. 1.1  
Materiaaldikte (mm): 6  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvoorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde

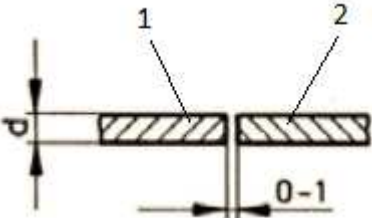
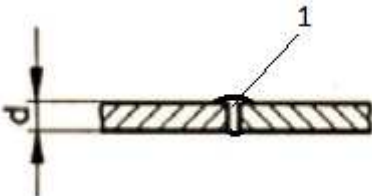
#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/cm)
1	135	1,0	78	17,2	Pulserend EP	4,3	300	0,3
2	135	1,0	89	18,1	Pulserend EP	4,7	300	0,3

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M21: 98% Ar 2% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 12)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 9  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /

pWPS-nr	17	Standaard	EN ISO 15609-1
Fabrikant	Lastek	Datum	02/05/14

Soort lasnaad: I-naad  
Aanduiding moedermateriaal: 1: S235JR  
2: S235JR  
Groep moedermateriaal: 1: groepnr. 1.1  
2: groepnr. 1.1  
Materiaaldikte (mm): 2  
Laspositie: PA  
Wijze van voorbereiding en reiniging: Slijpen en borstelen  
Lasnaadvorbereiding: Zie tekening

Vormgeving van de lasverbinding	Lasvolgorde
	

#### Lasdetails

Laag	Lasproces	Diameter van toevoeg materiaal (mm)	Stroom (A)	Spanning (V)	Stroomsoort/polariteit	Draadtoevoersnelheid (m/min)	Voortloopsnelheid (mm/min)	Warmte-inbreng (kJ/mm)
1	135	1,0	100	20,6	Pulserend EP	5,1	375	0,3

Toevoegmateriaalaanduiding en -fabricaat: ZINQWeld  
Beschermgas: M12: 98% Ar 2% CO<sub>2</sub> (EN 439) (Arcal 12)  
Gasstroomsnelheid beschermgas (l/min): 9  
Voorwarmtemperatuur: RT  
Maximale interpastemperatuur (°C): 150  
PWHT: /





FACULTEIT INDUSTRIELE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
CAMPUS DE NAYER (@Thomas More)  
Jan De Nayerlaan 5  
2860 SINT-KATELIJNE-WAVER, België  
tel. + 32 15 31 69 44  
iiv.thomasmore.denayer@kuleuven.be  
www.iiv.kuleuven.be



LID VAN **ASSOCIATIE  
KU LEUVEN**