

Lassen van kruipvaste CrMo-staalsoorten



Fred Neessen

Voorheen Lincoln Smitweld

Foto's: Fred Neessen en Fabricom

LZL – 23 Juni 2026 - 1.NF

Lassen van kruipvaste CrMo-staalsoorten

Claus Centrale te Maasbracht

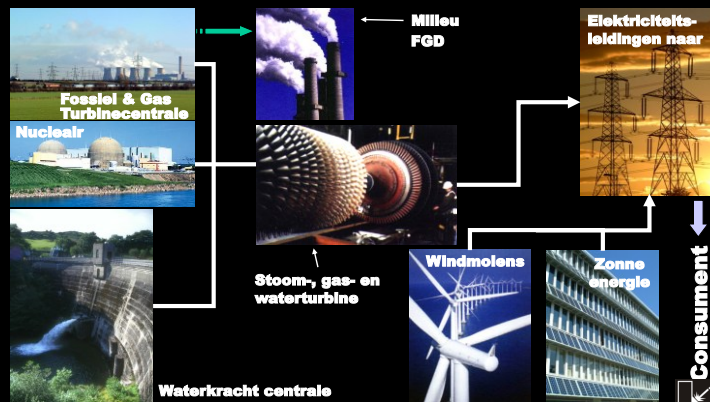
62.500 elektriciteitscentrales in de wereld



LZL – 23 Juni 2026 - 2.NF



Energieopwekking

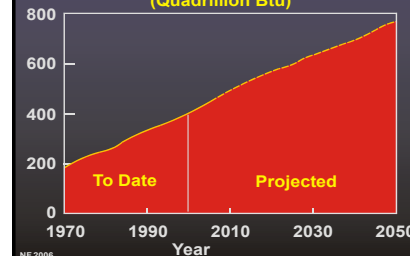


LZL – 23 Juni 2026 - 3.NF



Energieopwekking

Worldwide Energy Use (Quadrillion Btu)



NF.2006



Verlichte energiecentrale met schoorstenen
bij nacht op de Maasvlakte, Rotterdam



LZL – 23 Juni 2026 - 4.NF



Kraken

Wereldwijd verwerken 825 raffinaderijen
83,8 miljoen vaten ruwe olie per dag.
(in 2030, nog eens 180 meer)

LZL – 23 Juni 2026 – 6.NF

Kruipvaste basismaterialen

- Energiecentrales
- Petrochemische fabrieken
- Olieraffinaderijen
- Procesindustrie

Microstructuur kruipvast staal

LZL – 23 Juni 2026 – 7.NF

Onderwerpen

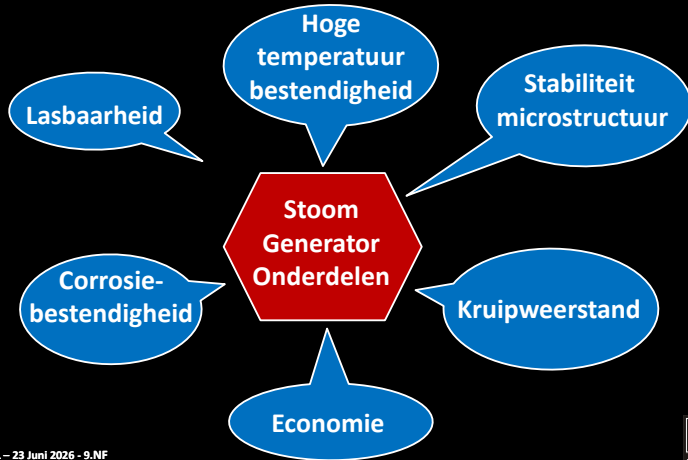
- Inleiding
- Functie c.q. invloed legeringselementen
- Hoog temperatuur materialen
- Ontvangen vragen
 - Voorwarmen
 - Soft & Hard Zone
 - Type IV scheuren
- P91 & P92
- Samenvatting, conclusie

Bron: Karl E. Dawson

P22/P91 weld interface
(2h PWHT @ 730°C 50µm)

LZL – 23 Juni 2026 – 8.NF

Eisen inzake toepassingen voor energiecentrales



LZL – 23 Juni 2026 - 9.NF



Warmvaste staalsoorten

- Ongelegeerd staal max. 350°C
- Boven 450°C kruipen
- Legeren met: Cr - Mo - V - W - Ti - Nb
- Ferritisch Perlitisch (19Mn6 - 15Mo3) zijn N-gegleeid, geen gevaar voor sterke harding in HAZ
- Bainitisch (martensitisch) ferritisch (10CrMo9-10) zijn veredeld en zijn luchthardend
 - Oppassen met de martensitische $\Rightarrow$ harde brosse zones in HAZ en lasmetaal

LZL – 23 Juni 2026 - 10.NF



Belangrijkste elementen en hun effect ⁽¹⁾:

- Koolstof, Stikstof en Borium
 - Noodzakelijk voor de vorming van carbiden, nitriden en boriden (complexe precipitaten) in combinatie met alle hierna genoemde elementen

LZL – 23 Juni 2026 - 11.NF



Belangrijkste elementen en hun effect ⁽²⁾:

- Molybdeen, vanadium, wolfrum en kobalt
 - Dit zijn **substitutioneel**, oplosbare legeringselementen. Door hun relatief grote atoomgrootte (in vergelijking met Fe) veroorzaken ze een vervorming van de matrix, wat leidt tot een hogere vloeigrens. Ze vormen bovendien **stabiele carbiden**, waardoor de kruipweerstand toeneemt
 - Bovendien **vertraagt Mo de omzetting van austeniet in perliet sterker dan die in bainiet**. Een bainitische (relatief grofkorrelige) structuur komt de kruipsterkte bij hogere temperaturen ten goede

LZL – 23 Juni 2026 - 12.NF



Belangrijkste elementen en hun effect ⁽³⁾:

■ Chroom

- Chroom versterkt het vertragende effect dat molybdeen heeft op de eerder beschreven transformatieprocessen
- Dit geldt bij een chroomgehalte tussen 2 en 3%
- Samen met ijzer en koolstof vormt chroom carbiden die de kruipweerstand verhogen



LZL – 23 Juni 2026 - 13.NF

Belangrijkste elementen en hun effect ⁽⁴⁾:

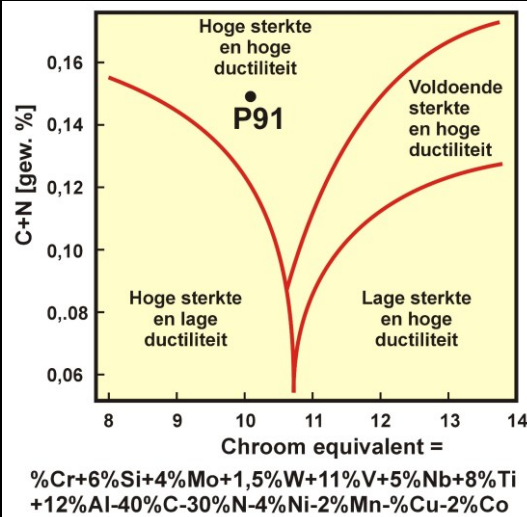
■ Chromium, Vanadium & Niobium

- In combinatie met koolstof vormen deze elementen carbiden die zowel **op de korrelgrens als binnenin de korrel precipiteren**
- Carbiden die **binnen in de korrel precipiteren**, hebben het **sterkste positief effect** op de kruipweerstand **bij lage temperaturen**
- Bij **hogere temperaturen** hebben precipitaten **op de korrelgrenzen** de grootste invloed



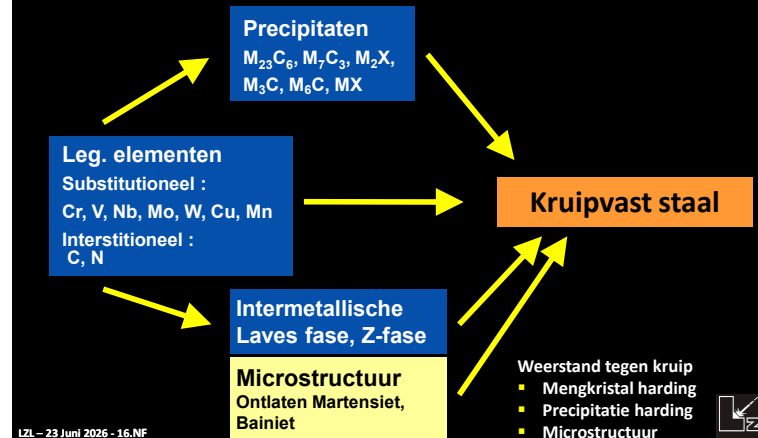
LZL – 23 Juni 2026 - 14.NF

Invloed chemische samenstelling op mechanische eigenschappen van staalsoorten met 9 Chroom



LZL – 23 Juni 2026 - 15.NF

Kruip- en warmvast staal



LZL – 23 Juni 2026 - 16.NF

Modified 9Cr-staal (P91)

Element	Hoeveelheid	Invloed
C	0,08 - 0,12	Vorming carbiden en carbonitriden
N	0,03 - 0,07	Vorming van carbonitriden
V	0,18 - 0,25	VC (VNb)C (VNb)(CN)
Nb	0,06 - 0,10	NbC (NbV)C (NbV)(CN)
Cr	8,0 - 9,5	Oxidatie weerstand; vorming van $Cr_{23}C_6$
Mo	0,85 - 1,05	Vaste oplossingsharding, stabilisatie van $M_{23}C_6$; vorming van Mo_2C en Laves
Ni	< 0,40	Beperking van vorming deltaferriet
Mn	0,3 - 0,6	residu
Si	0,2 - 0,4	residu
Al	< 0,040	desoxidatie
P	< 0,020	onzuiverheid
S	< 0,010	onzuiverheid

Vanadium-precipitaten
lossen gemakkelijk op bij
hoge temperaturen

LZL - 23 Juni 2026 - 17.NF

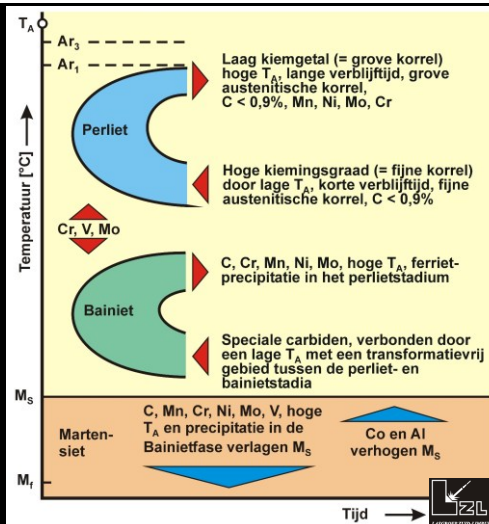


Invloed van legeringselementen

	Gunstig	Minder gunstig
B	Kruipsterkte en hardbaarheid bij afschrikken verbeteren. $M_{23}C_6$ -deeltjes stabiliseren grofkorrelvorming vertragen	Vermindert de kerftaaiheid
C	Noodzakelijk voor de aanmaak van $M_{23}C_6$ en NbC	
Co	Onderdrukt δ -ferriet	
Cr	Verbeterd de oxidatiebestendigheid. Verlaagt M_s , verhoogt A_1 . Hoofdbestanddeel van $M_{23}C_6$	
Cu	Onderdrukt δ -ferriet	Bevordert precipitatie van Fe_2M
Mn		Verlaagt kruipsterkte. Verlaagt A_1
Mo	Verlaagt M_s . Verhoogt A_1 . Oploshardening	Versneld de groei van $M_{23}C_6$
N	Noodzakelijk voor VN	
Nb	Vormt MX en draagt bij aan de sterkte	Bevordert precipitatie van Z fase
Ni		Verlaagt kruipsterkte. Verlaagt A_1
Re	Voorkomt verlies van kruipbreuksterkte. Verlaagt M_s	Verlaagt A_1
Si	Verbetering van oxidatiebestendigheid	Verlaagt kruipsterkte
V	Vormt MX en draagt bij aan de sterkte	
W	Verlaagt M_s , verhoogt A_1 . Vertraagd grof korrelvorming bij $M_{23}C_6$, Oploshardening	



Invloed legerings- elementen op de positie van de transformatie- lijnen in het TTT- diagram



LZL - 23 Juni 2026 - 19.NF



Overzicht van enkele ferritische hoogtemperatuurmaterialen

Materiaal	DIN	ASTM / ASME	Globale samenstelling				
			C	Mn	Cr	Mo	andere
C	St35.8		$\leq 0,17$	0,06	-	-	-
C-Mn	19Mn5		0,20	1,15	$< 0,30$	-	-
C-Mo	15Mo3, 16Mo5	Grade P1	0,16	0,55	-	0,5	-
1Cr0,5Mo	13CrMo4-4	Grade P12	0,14	0,55	0,90	0,55	-
1¼Cr¼Mo	-	Grade P11	$< 0,15$	0,45	1,25	0,55	-
2¼Cr1Mo	10CrMo9-10	Grade P22	0,12	0,55	2,25	1,05	-
½Cr½Mo(V)	14MoV6-3	Grade P2?	0,14	0,55	0,45	0,60	0,27V
5Cr½Mo	12CrMo19-5V	Grade P5	0,12	0,45	5,0	0,55	-
9Cr1Mo	X12CrMo19-1V	Grade P9	0,11	0,45	9,0	1,0	-
12Cr1MoV	X20CrMoV12-1	-	0,20	$< 1,0$	12,0	1,0	0,3V/0,55Ni
9Cr1MoVNbN	X10CrMoVNb9-1	Grade P91	0,10	0,45	9,0	1,0	0,2V/0,08Nb/0,050N
9Cr-1.8W-V-Nb	X10CrWMoV Nb9-2	Grade P92	0,10	0,45	9,0	0,5	-
13CrAlSi	X10CrAl13	-	$< 0,12$	1,0	13,0	-	1Si/1Al
24CrAlSi	X10CrAl24	-	$< 0,12$	1,0	24,5	-	Si/1,5Al

LZL - 23 Juni 2026 - 20.NF



Vergelijking van productnamen met korte beschrijvingen

Productnaam	Structuur	EN mat. No.	EN omschrijving
WB36	Bainitisch (martensitisch) ferritisch	1.6368	15NiCuMoNb5-6-4
T/P11		1.5415	16Mo3
T/P12		1.7335	13CrMo4-5
T/P22		1.7380	10CrMo9-10
T/P23, HCM2S		--	7CrWMoVNB9-6
T/P24		1.7378	7CrMoVTiB10-10
T/P9	Gemodificeerd Martensitisch Cr-staal	1.7386	X12CrMo9-1
T/P91		1.4903	X10CrMoVNb9-1
T/P91, E911		1.4905	X11CrMoWVNb9-1-1
T/P92, NF616		1.4901	X10CrWMoVNb9-2
X20		1.4922	X20CrMoVW12-1
VM12		1.4931	X13CrWMoVNb12-1

LZL – 23 Juni 2026 - 21.NF



Overzicht van enkele austenitische stalen (basis 18/10) voor hoogtemperatuurtoepassingen

ASTM / ASME, DIN, Mat. Nr.	C	Mn	Cr	Ni	andere
304	< 0,08	< 2,0	19	9,5	-
304H	< 0,04-0,10	< 2,0	19	9,5	-
304N	< 0,08	< 2,0	19	9,5	0,10-0,16N
(1.4948) X6CrNi8-11	0,04-0,08	< 2,0	18	11	-
316	< 0,08	< 2,0	17	12,5	2-3Mo
316H	0,04-0,10	< 2,0	17	12,5	2-3Mo
316N	< 0,08	< 2,0	17	12,5	2-3Mo
(1.4919) X6CrNiMo17-13	0,04-0,08	< 2,0	17	13	2,0-2,5Mo
(1.4981) X8CrNiMoNb16-13	0,04-0,10	< 1,5	16,5	16,5	1,6-2Mo/10xCsNb(+Ta)≤1,2
(1.4910) X3CrNiMoN17-13	< 0,04	< 1,5	17	13	2,0-2,8Mo/0,10-0,18N
321	< 0,08	< 2,0	18,5	11,0	5xCSTi≤0,6
321H	0,04-0,10	< 2,0	18,5	11,0	4xCSTi≤0,6
1.4511 X6CrNiTi18-10	< 0,08	< 2,0	18	10,5	5xCSTi≤0,8
347	< 0,08	< 2,0	18,5	11,0	10xCsNb(+Ta)1,0
347H	0,04-0,08	< 2,0	18,5	11,0	10xCsNb(+Ta)1,0
(1.4550) X6CrNiNb18-10	0,04-0,10	< 2,0	18	10,5	10xCsNb(+Ta)1,0
(1.4961) X8CrNiNb16-13	< 0,08	< 1,5	16	13	10xCsNb(+Ta)1,2
(1.4988) X8CrNiMoNbV16-13	0,04-0,10	< 1,5	16	13	1,1-1,5Mo/0,7V/10xCsNb



Overzicht van enkele hoger gelegerde austenitische stalen voor hoogtemperatuurtoepassingen

ASTM / ASME	DIN	Globale samenstelling					
		C	Mn	Cr	Ni	Si	andere
309	-	< 0,15	< 2,0	23	14	1	-
310	-	< 0,15	< 2,0	25	20	1	-
330	-	< 0,15	< 2,0	15,5	35	-	-
- (1.4841) X15CrNiSi25-20	≤ 0,20	< 2,0	25	20	1,5-2,5	-	-
- (1.4864) X12NiCrSi36-16	≤ 0,15	< 2,0	16	36	1,2-2,0	-	-
- (1.4867) X10NiCrAlTi32-20	≤ 0,12	< 2,0	20	32	≤ 1,0	0,14-0,06Al/0,15-0,6Ti	-
Alloy 800H	-	0,08	< 1,5	20	32	≤ 1,0	0,14-0,06Al/0,15-0,6Ti
- (1.4848) G-X40CrNiSi25-20	0,40	< 1,5	25	20	1,0-2,5	-	-
- (1.4859) G-10NiCrNb32-20	0,10	< 1,5	20	32	0,5-1,5	0,5-1,5Nb	-
- (1.4852) G-X40NiCrNb35-25	0,40	< 1,5	25	35	1,0-2,0	1,2-1,8Nb	-
ACI Hk40	-	0,40	< 1,5	25	20	≤ 1,75	-
ACI HP40	-	0,40	< 2,0	26	35	≤ 2,0	-

LZL – 23 Juni 2026 - 23.NF



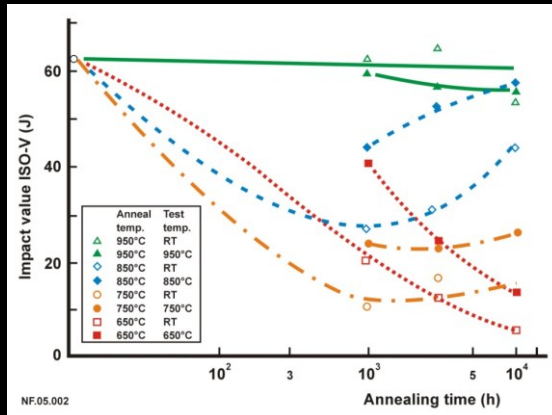
Overzicht van enkele Ni- en Co-basis legeringen voor hoogtemperatuurtoepassingen

Handelsnaam	Globale samenstelling						
	C	Cr	Ni	Co	Mo	W	andere
Ni-basis:							
Inconel 600	0,08	16	rest	-	-	-	8Fe
Inconel 625	0,05	20	rest	-	9	-	2,5Fe/3,6Nb
Inconel 617	0,07	22	rest	12	9	-	1Al/0,3Ti
Inconel 718	0,04	19	rest	-	3	-	18Fe/5Nb
Inconel X750	0,04	15	rest	-	1	-	7Fe/1Nb/2,5T
Nimonic 80A	0,06	20	rest	-	-	-	1,4Al/B/Zr
Nimonic 105	0,15	15	rest	20	5	-	1,3Ti/4,7Al
Nimonic 115	0,16	14	rest	13	3	-	3,8Ti/4,9Al
IN 300	0,15	10	rest	15	3	-	4,7Ti/5,5Al/B/Zr/V
Co-basis:							
Haynes 188	0,10	22	22	rest	-	14	1,5Fe/La
Haynes 151 (cast)	0,50	20	-	rest	-	13	B

LZL – 23 Juni 2026 - 24.NF



Evolutie van kerftaaiheid bij RT en op gloeitemp. van NiCro 60/20 na verschillende gloeibehandelingen



LZL - 23 Juni 2026 - 25.NF



Warmtebehandeling in verband met lassen

- Over het algemeen vereisen kruipbestendige staalsoorten, vanwege hun microstructuur (ferritisch-bainitisch of martensitisch), een **voorwarmtemperatuur (Tp)** voorafgaand aan het laswerk
- Tijdens het lassen wordt een **interpass temperatuur (Ti)** voorgeschreven die niet mag worden overschreden en die evenmin onder de voorwarmtemperatuur mag komen
- Na voltooiing van de lasverbinding is een **spannings verlichtende warmtebehandeling na het lassen (PWHT)** vereist. Deze warmtebehandeling is nodig om betrouwbare las- en HAZ-eigenschappen te garanderen
- De duur en temperatuur van een PWHT zijn **afhankelijk van het soort basismateriaal, de wanddikte en voorschriften volgens de normen**

LZL - 23 Juni 2026 - 26.NF



Temper gloeibehandeling

Legering	Voorwarmen	Gloeien (EU)	Gloeien (USA)
CMn	20	580 - 620	595 - 680
½Mo	100 - 150	580 - 620	595 - 720
½Mo+½Cr	100 - 150	580 - 620	595 - 720
1Cr+½Mo	100 - 150	640 - 680	620 - 730
1¼Cr+½Mo	100 - 150	640 - 680	705 - 760
2Cr+½Mo	150 - 200	640 - 680	705 - 760
2¼Cr+1Mo	100 - 150	630 - 670	705 - 770
2¼Cr+1MoV	200 - 250	690 - 720	690 - 710
5Cr+½Mo	200 - 250	720 - 780	705 - 770
7Cr+½Mo	200 - 250	720 - 780	705 - 760
9Cr+1Mo	200 - 250	720 - 780	705 - 760

LZL - 23 J



Basismateriaal	Na het lassen		
Staal type	AC ₁ temp.	Temper temperatuur	Aanbevolen tempertemp.
15M03 / 16Mo5	729°C	600-680°C	580-630°C
13CrMo4-4	770°C	650-730°C	660-700°C
14MoV6-3	730°C	690-720°C	690-740°C
10CrMo9-10	804°C	680-780°C	690-750°C
12CrMo19-5	815°C	660-760°C	730-760°C
X12CrMo9-1	820°C	730-780°C	675-750°C
X10CrMoVNb9-1	820°C	730-780°C	750-780°C
X20CrMoV12-1	835°C	730-780°C	750-780°C

Data van Europese staalfabrikanten
USA (ASTM) kan verschillende specificaties hebben

LZL - 23 Juni 2026 - 28.NF



Lassen ⁽¹⁾

- Wanneer door afkoeling lasspanningen ontstaan in een microstructuur met lage ductiliteit van de laszone, is het risico op scheurvorming groot
 - Voorwarmen om de temperatuurgradiënt te minimaliseren, die een dubbele functie heeft: het controleren van de hardheid en het beheersen van spanningen ontstaan door afkoeling
 - Een juiste keuze en behandeling van LTVM om waterstofopnamen in de las tot een minimum te beperken
 - Handhaaf de voorwarmtemperatuur om eventuele waterstof uit de las te laten diffunderen en ongecontroleerde omzetting in martensiet te voorkomen
- De fabrikant moet bij het opstellen van zijn lasprocedures rekening houden met deze voorzorgsmaatregelen. De details moeten als een essentieel onderdeel daarvan worden opgenomen

LZL – 23 Juni 2026 - 29.NF



Lassen ⁽²⁾

Een goede lasprocedure moet :

- Voorwarmen 200°C - 250°C
- Voor maximale kerftaaiheid, licht zwaaien met relatief lage warmte-inbreng ($\leq 1,5$ kJ/mm)
- Interpass temperatuur max. 300°C
- Na het lassen afkoelen tot omgevingstemperatuur om er zeker van te zijn dat de martensietomzettingen (met name in het basismetaal) volledig zijn voltooid
- PWHT: 2 uur (of meer) op 760 - 780°C (afhankelijk van de samenstelling)

LZL – 23 Juni 2026 - 30.NF



Lassen ⁽³⁾

- Gebruik elektroden direct uit de Sahara ReadyPack, of droog ze anders voor gebruik gedurende 1 uur bij een temperatuur van 300 tot 400°C
- Verwarm het te lassen basismetaal, afhankelijk van de dikte, voor op minimaal $\geq 250^\circ\text{C}$ en voer een PWHT-behandeling uit bij minimaal 750°C
- Gebruik de back-step-methode en start de lasboog in de lasnaad op een startplaatje om porositeit en startproblemen te voorkomen
- Een zo kort mogelijke lasboog
- Blijf binnen het opgegeven stroombereik, bijvoorbeeld: elektrode diam. 2,5 mm in PA positie binnen een bereik van 60 tot 90A

LZL – 23 Juni 2026 - 31.NF



Conclusie

- Bij het lassen moeten voorzorgsmaatregelen worden genomen, met name wat betreft de regeling van de voorverwarming, de interpass temperatuur, het tussentijdse verminderen van spanningen en de naverwarming, om koudscheuren te voorkomen
- Er moeten geoptimaliseerde lasmaterialen worden gebruikt met een lage H_{DM} -waarde en een zeer laag gehalte aan onzuiverheden om verbrossing tijdens het gebruik te beperken
- Deze staalsoorten zijn bestand tegen zeer hoge temperaturen (690-710°C) bij de nabehandeling na het lassen, wat gunstig is voor de taaiheid van het lasm

LZL – 23 Juni 2026 - 32.NF



Richtlijnen voor lassen van CrMo staalsoorten ¹⁾

- Houd u altijd aan de **voorgeschreven voorwarm- en maximale interpass temperaturen**
 - Anders kan dit leiden tot scheuren of een sterk verminderde taaiheid in de HAZ en het lasmetaal
- Overschrijd de maximale interpass temperatuur niet
- Ga niet onder de (minimale) voorwarmtemperatuur
- Voer PWHT uit volgens de voorschriften in de normen

LZL – 23 Juni 2026 - 33.NF



Richtlijnen voor lassen van CrMo staalsoorten ²⁾

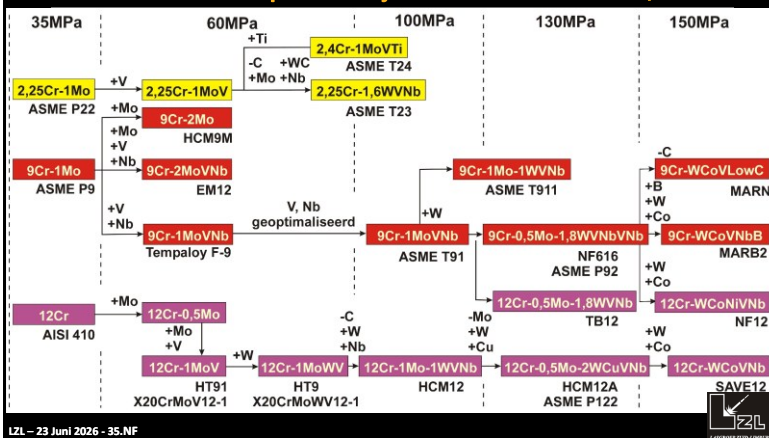
- Houd de laagdikte onder controle. Voor optimale taaiheidseigenschappen wordt een maximale naaddikte van 3 - 4 mm aanbevolen c.q. 4 - 5 mm
 - Dunne lagen zorgen voor een goede korrelverfijning na het lassen
- Licht zwaaien is gunstig voor de laagdikte
- Over het algemeen wordt een maximale warmte-inbreng van **2 kJ/mm** aanbevolen

LZL – 23 Juni 2026 - 34.NF



Ontwikkeling van 9 – 12%Cr staalsoorten 100.000 uur kruipsterkte bij 600°C

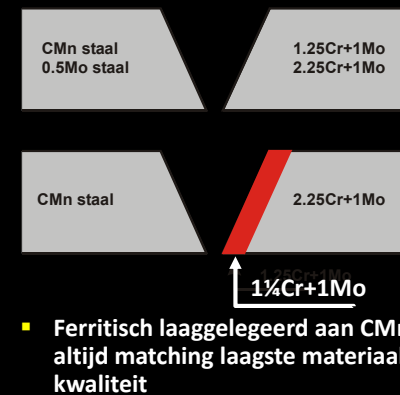
Bron Masuyama



LZL – 23 Juni 2026 - 35.NF



Diverse CrMo- en CMn-staal



- Ferritisch laaggelegeerd aan CMn altijd matching laagste materiaal kwaliteit

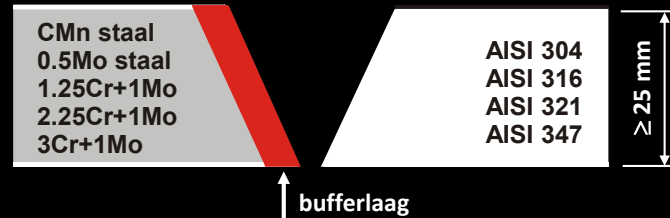
- Gloeien op gemid. van beide temperaturen
- Houddtijd 1,5 x de gloeitijd hoogste temp.
- Indien niet aan de mech. eigenschappen voldaan kan worden, overstappen naar bufferlaag
- PWHT na bufferlaag van 2%Cr-1Mo
- Na aflassen PWHT van laagste materiaal

LZL – 23 Juni 2026 - 36.NF



CrMo-staal aan roestvast staal

- Bufferlaag met een type bufferlaag lastoevoegmateriaal
- Temper gloeiing uitvoeren
- Austenitisch aflassen



LZL – 23 Juni 2026 - 37.NF



VRAGEN

Met dank aan Marcel Jansen

LZL – 23 Juni 2026 - 38.NF



Na inlassen van P91 afsluiter in P91 leiding, wordt afkeur geconstateerd. Na 2^{de} keer lassen eveneens afkeur, dit voor PWHT. Wat betekent dit voor het basismateriaal c.q. las na veelvuldige warmte-inbreng?

1

- Herhaald lassen (↑ H.I.) en Tempergloeien ⇒ gevolgen voor de microstructuur en mech. eigenschappen
 - ⇒ kan onherstelbaar verzwakt, dan volledig vervangen of opnieuw N + Temperen
 - Vergroving $M_{23}C_6$ en Nb carbiden
 - Vorming ongewenste fasen, brosse δ -ferriet of ongetemperde martensiet
 - Oplossen precipitaten, microlegeringselementen V en Nb
 - ✦ Bij excessieve hitte lossen deze op wat de sterkte en kruipsterkte drastisch vermindert
 - Iedere keer opnieuw lassen en gloeien telt dit op in de Larson Miller Parameter en de Holomon-Jaffe Parameter
 - ✦ Te vaak gloeien ⇒ permanente materiaal verzwakking

LZL – 23 Juni 2026 - 39.NF



Na inlassen van P91 afsluiter in P91 leiding, wordt afkeur geconstateerd. Na 2^{de} keer lassen eveneens afkeur, dit voor PWHT. Wat betekent dit voor het basismateriaal c.q. las na veelvuldige warmte-inbreng?

1

Gevolgen voor het basismateriaal en de las na herhaalde warmte-inbreng

Effect	Gevolg voor P91	Risico
Harding (HAZ)	Hardheid > 290 HV ⇒ brosheid, scheurgevoeligheid	Koudscheuren, vertraagde scheuren (HIC)
Microstructuur-verandering	Vergroving van carbiden, en oplossen V, Nb (microleg.)	Verminderde kruipsterkte, brosheid
Waterstofopname	Vertraagde scheuren, porositeit	Scheuren tijdens of na PWHT
Thermische vermoeidheid	Accumulatie van schade door herhaalde warmtecycli	Verminderde levensduur, vroeg falen
Ontmenging legeringen	Hardheid > 290 HV ⇒ brosheid, scheurgevoeligheid	Corrosie, verminderde sterkte

LZL – 23 Juni 2026 - 40.NF



In WB36 warmtewisselaar zit een WB36 nozzle waarop WB36 cap is gelast.
In het verleden tot 2 keer gescheurd, gerepareerd en weer lek. Nu wordt
15Mo3 cap aangelast. Wat zijn de aandachtspunten?

2

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
0,13	1,0	0,3	0,1	1,1	0,35	0,65	0,03

- Vervanging van CMn-staal
- V+M alloy WB36:
 - ASME - A335 P36
 - DIN - 15NiCuMoNb5
 - EN 10216-2; 15NiCuMoNb5-6-4
- Maximale bedrijfstemperatuur 450°C:
 - Ontworpen voor treksterkte, niet voor kruip
- Voedingswaterleiding

WB36 (P36)



LZL – 23 Juni 2026 - 41.NF

In WB36 warmtewisselaar zit een WB36 nozzle waarop WB36 cap is gelast.
In het verleden tot 2 keer gescheurd, gerepareerd en weer lek. Nu wordt
15Mo3 cap aangelast. Wat zijn de aandachtspunten?

2

- WB36 = 15NiCuMoNb5, met 0,15C, 1,2Ni en 0,5-0,8Cu
 - Verschil in thermische uitzetting en mechanische eigenschappen kan spanningen veroorzaken in de laszone
- Vraag is, waarom voor de 2^e keer gescheurd?
 - Dikte verschillen
 - Overgangen
 } ⇒ Spanningsconcentratie of anders!!!
- WB36 is een ware scheurvormer
 - Altijd voorwarmen (volgende sheet)
 - Altijd gloeien na het lassen (volgende sheet)
 - De opwarm- en afkoelsnelheden zijn laag (volg. sheet)



LZL – 23 Juni 2026 - 42.NF

Invloed Cu in WB36

2

- Sterkte (of anders!!!)
 - Geeft Cu rijke precipitaten tijdens tempering of bij lange termijn expositie, verhoogt de Re en Rm
- Taaiheid & ductiliteit
 - Precipiteert en geeft harding in matrix ⇒ verlaging kerftaaiheid en verhoogt de overgangstemperatuur tussen ductiel en bros
- Thermische veroudering
 - Bij gebruik tussen 320-350°C ⇒ mogelijk precipiteert rest Cu wat leid tot geïnduceerde hardheidsverhoging en verbrossing



LZL – 23 Juni 2026 - 43.NF

Aanbevolen lasgegevens voor WB36

2

Wand-dikte	Lassen		Voorwarm-temp. voor snijden met een brander
	Voorwarm- en inter-pass temperatuur Tp - Ti [°C]	Afkoeltijd ΔT8-5 [sec]	
≤ 15	≥ 80 - ≤ 150	10 - 30	≥ RT
> 15 ≤ 30	≥ 100 - ≤ 180	10 - 30	≥ RT
> 30 ≤ 50	≥ 120 - ≤ 220	10 - 30	≥ 100°C
> 50	≥ 120 - ≤ 250	10 - 30	≥ 120°C

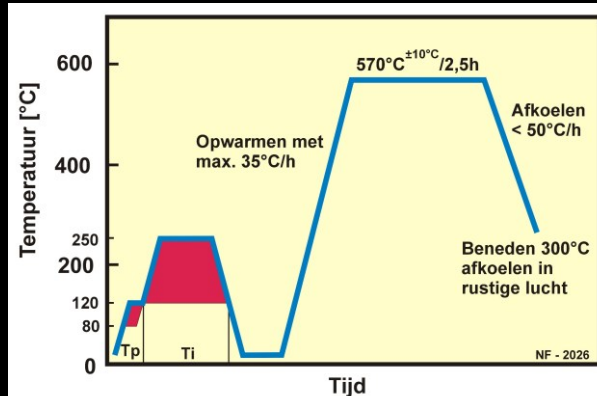
Voorwarm- en interpassstemperatuur zijn afhankelijk van de wanddikte



LZL – 23 Juni 2026 - 44.NF

2

Verwarmingscyclus tijdens en na het lassen van WB36

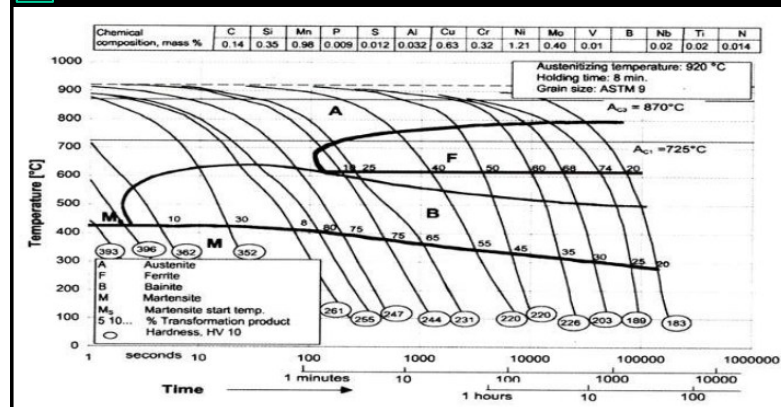


LZL - 23 Juni 2026



2

CCT diagram van WB36



LZL - 23 Juni 2026 - 46.NF



Warmtebehandeling 15Mo3 aan WB36:
600-650°C/2 minuten per mm

2

WB36 (P36) lastoevoegmaterialen

Process	Toevoeg-materiaal	AWS	EN ISO
GTAW	MnMo	ER80S-D2	
SMAW	1NiMo.B	E9018-G	
FCAW		E81T1-A1	T Mo P C 1 Of T Mo B C 1
SAW	1NiMo/LA436	EF3	

- Voorwarmen / interpass: 100 - 250°C
- PWHT: 590°C



LZL - 23 Juni 2026 - 47.NF



2

WB36 - 15NiCuMoNb (1.6368) / 10CrMo9-10 (1.7380)

- WB 36 is een ware scheurvormer, altijd minimaal 180°C voorwarmen bij grotere dikten
 - Grondlaag LNT 12 (SL 12G) en met Conarc 70G aflassen
- 15Mo3 en 16Mo5 Tp = 100-250°C, PWHT 600-670°C
- 13CrMo44 en 10CrMo9-10,
 - 150-200-250°C voorwarmen en PWHT 650-720°C resp. 690-750°C gedurende 1 uur per 25 mm wanddikte
- Alloy 800 toepassing in het temperatuurgebied van 650-825°C lassen met NiCro 70/15
 - Boven 825°C lassen met NiCro 70/19

LZL - 23 Juni 2026 - 48.NF



3 Wat zijn de valkuilen tijdens het lassen van de verbinding 14MoV6-3 / P91 ?

Samenvattende aanbevelingen			
Onderwerp	14MoV6-3	P91	Oplossing
Preheat	150-250°C	200-300°C	Gebruik 200–250°C als compromis
PWHT	650-700°C	740-780°C	Tweetraps PWHT of Ni-basis lasmateriaal
Lastoevoegmateriaal	matching MoV of met B3 ?	E9015-B9	ENiCrFe-2 of tussenliggend 5Cr-½Mo(V) ??
Warmte-inbreng	10-30 kJ/cm	10-25 kJ/cm	Beperk tot 10-25 kJ/cm
Afkoeling	Gecontroleerd	Langzaam	Isolerende dekens, gecontroleerde afkoeling

LZL – 23 Juni 2026 – 49.NF



11 4) Wat zijn de risicofactoren bij het lassen van 14MoV6-3 aan P91 (of andere martensitische materialen)?

- Spanningen door verschillende materialen
 - MoV en P91 verschil in chem. en fysieke eigenschappen ⇒ ongelijkmatige uitzetting en krimp (verwarmen/afkoelen)
Oplossing: correcte T_p en eventueel **naadflanken bufferen**
- PWHT na lassen
 - Risico: materialen zijn martensietvormers, als gelast zeer hard/bros
 - Oplossing: direct PWHT bij 730-775°C ⇒ geleidelijk opwarmen en afkoelen moet gecontroleerd plaatsvinden om thermische spanningen te voorkomen

LZL – 23 Juni 2026 – 50.NF



11 4) Wat zijn de risicofactoren bij het lassen van 14MoV6-3 aan P91 (of andere martensitische materialen)?

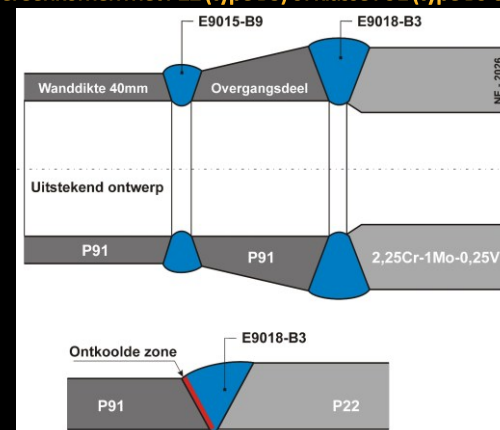
- Koudscheuren: zeer snel afkoelen ⇒ brosse structuur
 - Voorwarmen 200-250°C c.q. laag H_2 houdende LTVM
 - Direct na lassen soaken indien mogelijk
- Softening en Type IV scheuren
 - Deel HAZ temperatuur bereikt net onder AC_1 (transformatiepunt) ⇒ kan zachtere microstructuur geven en is bij lang gebruik gevoelig voor kruip (vervorming) ⇒ Type IV scheuren

LZL – 23 Juni 2026 – 51.NF



Om de overgang te maken tussen de wanddikte van de P91-buis en een CrMoV-klep huis is een overgangsdeel van Grade P91 gebruikt. Het LTVM voor de dikkere las, kan overeenkomen met P22 (type B3) of klasse P91 (type B9 of B91)

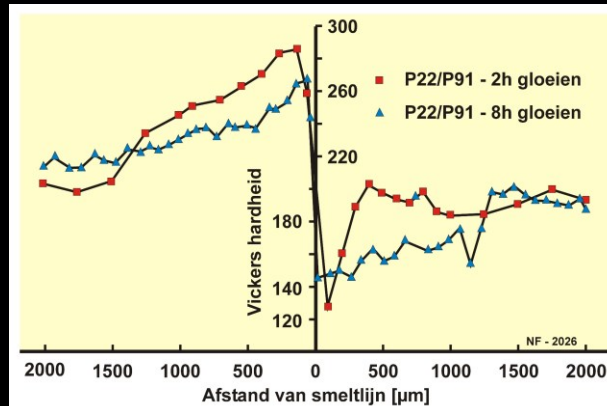
3



LZL – 23 Juni 2026 – 52.NF



Hardheidsprofiel van P22/P91-verbinding die na het lassen op 730°C is gegloeid



LZL – 23 Juni 2026 - 53.NF



Soft en Hard Zone

LZL – 23 Juni 2026 - 54.NF



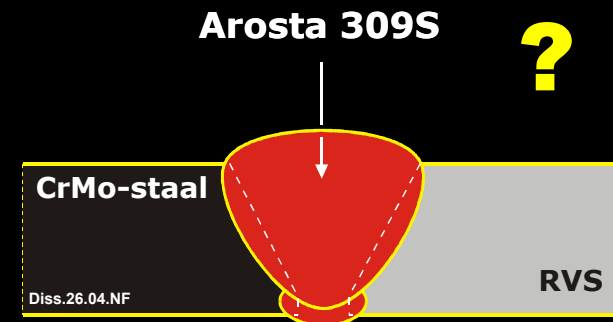
Staal aan roestvast staal

- Zwart / wit maximale bedrijfstemperatuur 300°C met een 309 LTVM
 - E(R)309 kan ook niet in CrMo staalsoorten
 - Deze moeten een Temper gloeibehandeling ondergaan op hoge temperatuur => verbrassing
- Zwart / wit toepassingen op hoge bedrijfstemperatuur bijvoorbeeld lassen met Ni-basis LTVM

LZL – 23 Juni 2026 - 55.NF



Verbindingslas CrMo-staal / RVS

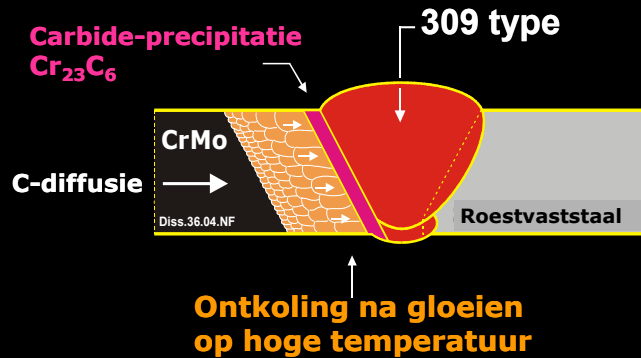


LZL – 23 Juni 2026 - 56.NF

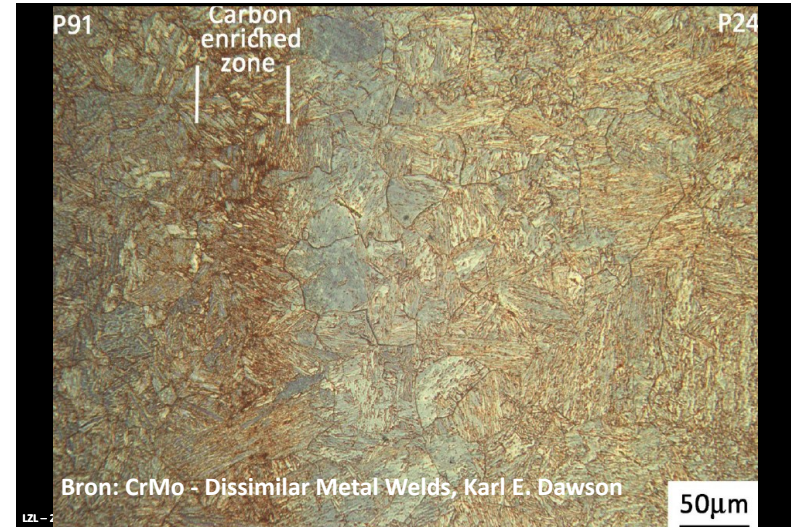


CrMo-staal / RVS lasverbinding, gelast met 309 type lastoevoegmateriaal

Het ontstaan van carbide-precipitatie

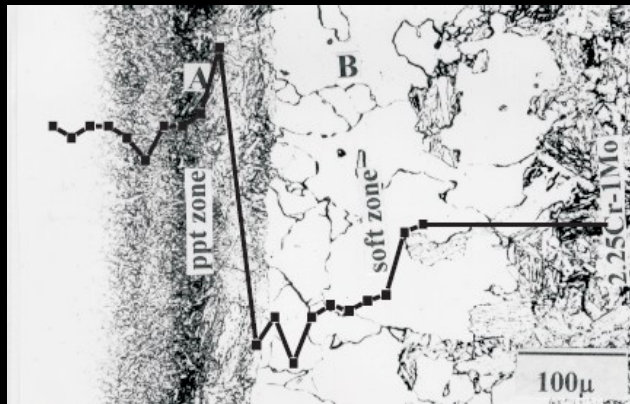


LZL – 23 Juni 2026 - 57.NF



LZL – 23 Juni 2026 - 58.NF

Kritische overgang



LZL – 23 Juni 2026 - 59.NF



Invloed van gloeitemperatuur en gloeitijd op kerftaaiheid en ferrietgehalte

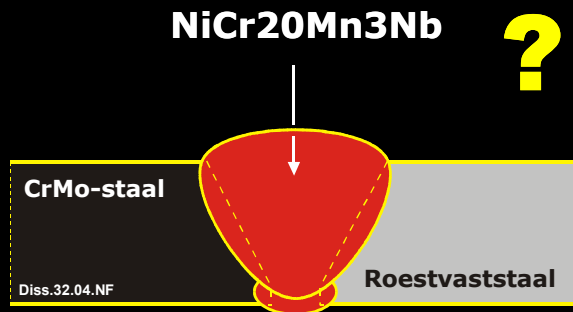
Poeder: P2000S

- 20°C	als gelast		2h/560°C		2h/580°C		6h/600°C	
Draad	Joule	Ferriet	Joule	Ferriet	Joule	Ferriet	Joule	Ferriet
309L	65	29	63	28	62	26	5	4
309Mo	55	31	26	12	20	9	ND	ND

LZL – 23 Juni 2026 - 60.NF



CrMo-staal / RVS verbinding



LZL – 23 Juni 2026 - 61.NF



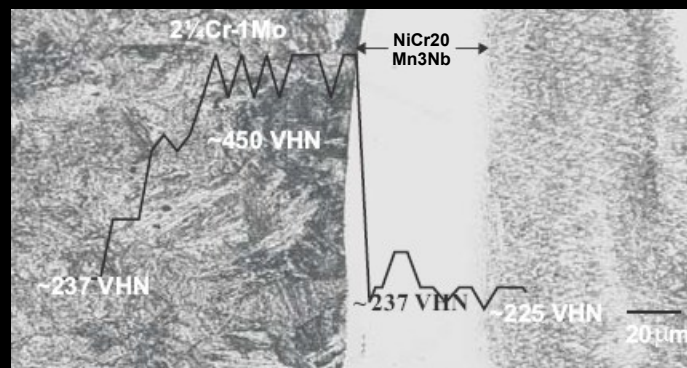
Principe van C-diffusie bij lasverbindingen van RVS / CrMo-staalsoorten



LZL – 23 Juni 2026 - 62.NF



De oplossing



LZL – 23 Juni 2026 - 63.NF



De uitzettingscoëfficiënt van NiCr20Mn3Nb lasmetaal is ~ gelijk aan die van on- en laaggeleg. staal maar verschilt ca. 50% van die aan RVS

NiCr20Mn3Nb
 $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ [mm/m/}^\circ\text{C]}$

E309L-16
 $\alpha = 18 \cdot 10^{-6}$

On- en laaggelegeerd staal	1.4301 (304)
$12 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$

Diss.35.04.NF

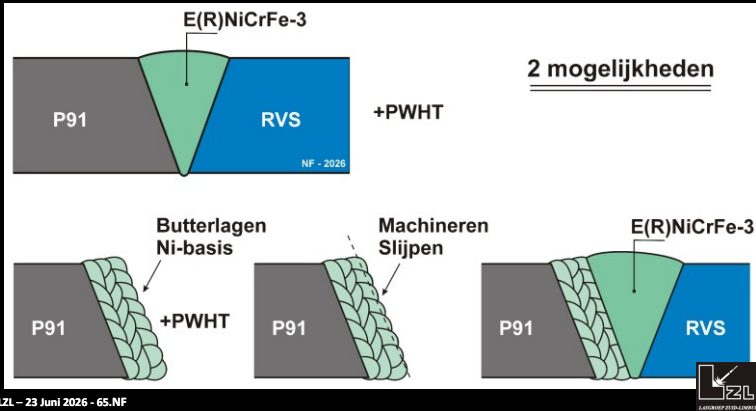
Spanning

De grootste spanning treedt dus op aan de RVS-zijde

LZL – 23 Juni 2026 - 64.NF



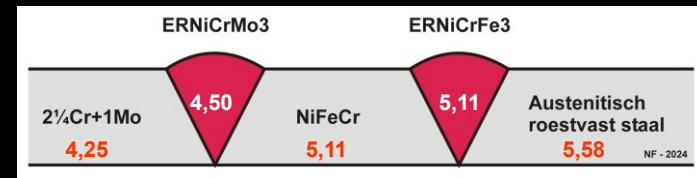
Twee veelgebruikte fabricagemethoden bij productie van DMW's van Grade 91:
a) lassen met een LTVM op nikkelbasis en warmtebehandeling van de gehele las;
b) aanbrengen van een laag LTVM op nikkelbasis aan de zijde van Grade 91



LZL – 23 Juni 2026 - 65.NF

CrMo-ongelijksoortige verbindingen

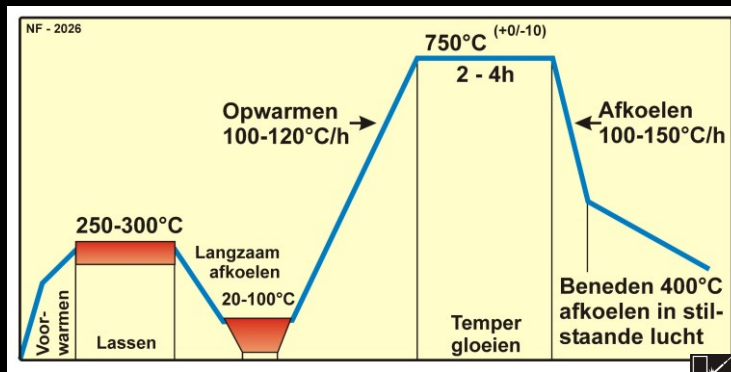
Verlagen van vermoeiing als gevolg van thermisch uitzetting



- 2¼ Cr = 4,25 µmm/mm°C
- NiCrFe = 5,11 µmm/mm°C
- RVS = 5,58 µmm/mm°C
- ERNiCrFe = 5,11 µmm/mm°C
- ERNiCrMo3 = 4,50 µmm/mm°C

LZL – 23 Juni 2026 - 66.NF

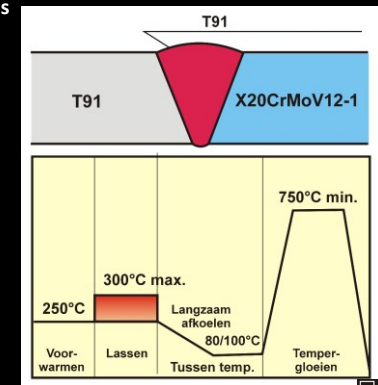
Warmtebehandelingen vóór en ná lassen van martensitisch kruipvast CrMo-staal: P91, E911 en P92



LZL – 23 Juni 2026 - 67.NF

T/P91 aan X20CrMoV12-1 (12% Cr RVS)

- Lastechniek voor deze combi is gelijk aan die van T/P91
- Voorwarmen 250°C en max. interpass temperatuur van 300°C
- Langzaam afkoelen tot onder de 100°C maar niet lager dan 80°C om scheurvorming te voorkomen
- Tempergloeien op 750°C en vervolgens langzaam laten afkoelen in rustige lucht of onder een isolatiedeken
- P91 (E9015-B9) LTVM toepassen

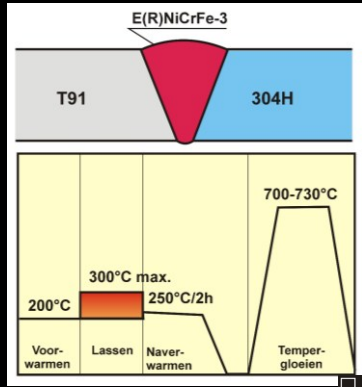


LZL – 23 Juni 2026 - 68.NF

Bron: Vallourec-Industries

T/P91 aan austenitisch RVS 304H

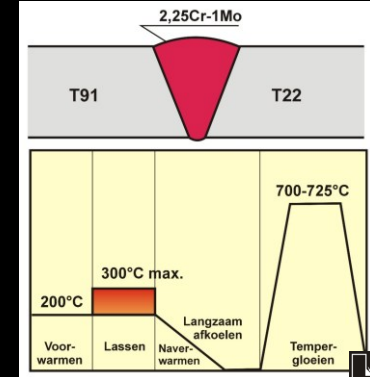
- Voorwarmen 200°C en Ti van max. 300°C
- Na het lassen de verbinding gedurende 2h op 250°C vasthouden voor het afkoelen tot RT
- Tempergloeien op 700-730°C
- NiCro 70/19 (E NiCrFe-3) lastoevoegmateriaal toepassen



LZL – 23 Juni 2026 - 69.NF

Warmtebehandeling vóór en ná het lassen van T/P91 aan ongelijksoortig T22 staal

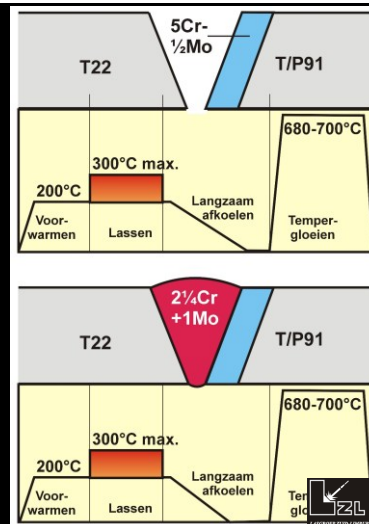
- Voorwarmen 250°C en Ti van max. 300°C
- Afkoelen tot onder de 100°C, enkele uren vasthouden om een volledige transformatie te krijgen
- Tempergloeien op 700-730°C n
- B3 LTVM toepassen
- Alternatief:** P91 bufferen met 5Cr-½Mo en verbinding aflassen met E B3
- Tempering 680-700°C
- Minder C-diffusie, spanningen



LZL – 23 Juni 2026 - 70.NF

Alternatief: T22 aan T/P91

- Voorwarmen 250°C en Ti van max. 300°C
- P91 bufferen met 5Cr-½Mo lasmetaal en verbinding aflassen met E B3
- Tempering 680-700°C
- Minder C-diffusie en minder lasspanningen door geringer verschil in uitzettingscoëfficiënt



LZL – 23 Juni 2026 - 71.NF

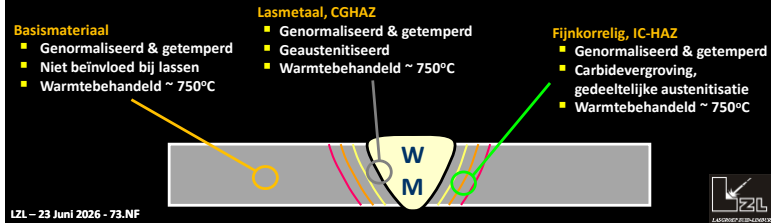
TYPE IV SCHEUREN

LZL – 23 Juni 2026 - 72.NF

Lasprocedures & Type IV problemen

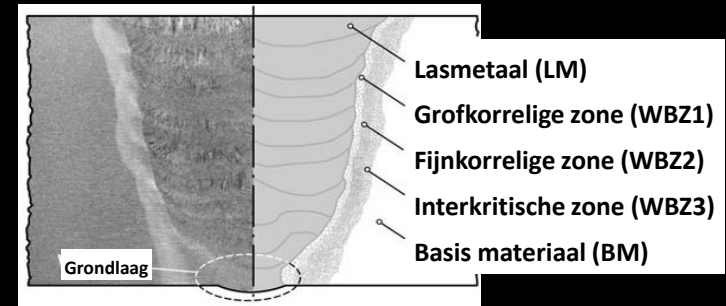
9–12% Cr ferritische-stalen voor energiecentrales zijn meestal:

- Austenitisch tussen 1.050 en 1.080°C
- Getransformeerd tot martensiet
- Getemperd tussen 740 en 820°C
- Warmtebehandeling na het lassen bij ~ 740-760°C



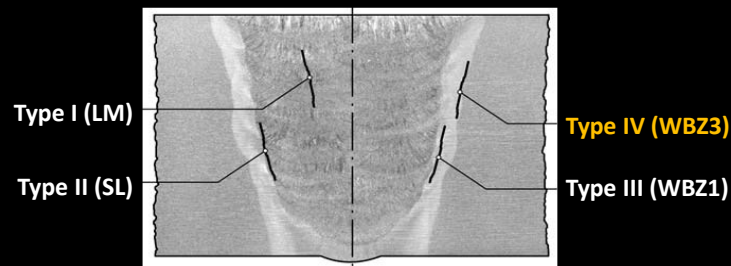
LZL – 23 Juni 2026 - 73.NF

Klassieke indeling van een lasverbinding in vijf zones



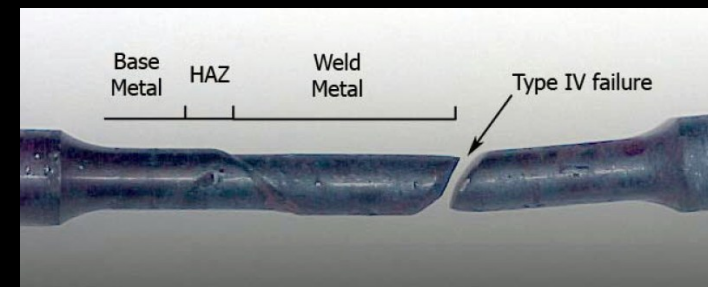
LZL – 23 Juni 2026 - 74.NF

Scheur classificatie in gelaste onderdelen naar ECCC [91] en [92]



LZL – 23 Juni 2026 - 75.NF

Type IV fouten



Kruipbreuk – Type IV zone

LZL – 23 Juni 2026 - 76.NF

Interpretatie van trends

- Type IV-scheurvorming treedt op in de zachtere kruip zone tussen gebieden ... die harder zijn bij kruip
- Er is een mismatch in kruiprek binnen de HAZ tijdens een dwarslas ... kruiptest
- Mismatch induceert tri-axiale spanningen in de type IV-regio, wat ... gelokaliseerde schade bevordert. (Albert et al. (2004); Li et al. (2003))
 - De tri-axialiteit afneemt bij bredere type IV-gebieden
- Bredere HAZ's, type IV-zones, verwacht bij hogere voorwarmtemperatuur
- H.I. minder significant omdat de omgevingstemp. op grotere afstand niet wordt beïnvloed; daarentegen verandert voorwarmen de omgevingstemp. op grotere afstand



LZL – 23 Juni 2026 - 77.NF

Conclusie

- Verbeter het type IV-fenomeen met maximale voorverwarming ...temperatuur die consistent is met faseovergangen en praktische ...aspecten
- Voorwarmtemperatuur is belangrijk omdat type IV-scheurvorming lokaal optreed; een verhoging leidt tot een verbreding en de-lokalisatie van het type IV-gebied
- De Type IV-breukspanning is ongevoelig voor warmte-inbreng. De breedte van de Type IV-zone is meer afhankelijk van voorverwarming, omdat dit de omgevingstemperaturen op afstand beïnvloedt.
- Daarom hoeft de productiviteit niet in het gedrang te komen



LZL – 23 Juni 2026 - 78.NF

3

14MoV6-2 / X20CrMoV12-1 ¹⁾

- **Waarom deze verbinding?**
- Onderhoud, daar waar geen tussenstuk mogelijk is. En wel telkens wanneer er geen tussenstuk of overgangsstuk kan worden voorzien en het staal 14MoV6-3 rechtstreeks met het X20CrNiV12-1 moet worden verbonden door middel van lassen
- Probleem: ontkoolde zone en hoe deze zich zal verhouden in de praktijk (levensduur) en kruipweerstand
- Vraag of bij de keuze van het LTVM, rekening houdend met de eigenschappen op lange termijn, het lasmetaal of de warmtebeïnvloede zone in aanmerking moet worden genomen
- Bij ongelijksoortig is de HAZ altijd een kritisch punt
 - Lage kerftaaiheid lasmetaal is op te lossen
 - Veel meer problemen leveren "de ontkoolde- en de carbide-zone" op



LZL – 23 Juni 2026 - 79.NF

3

14MoV6-2 / X20CrMoV12-1 ²⁾

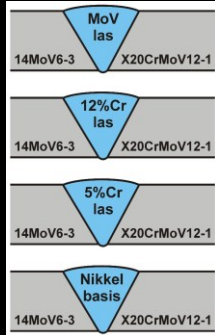
- **Antwoord hierop??**
- Een LTVM dat de C-diffusie verhindert en tegelijkertijd garandeert dat kerftaaiheid lasmetaal ruim voldoet ⇒ **Ni-basis voldoet** hier aan, echter:
 - Duur, risico warmscheuren in lasmetaal
 - Voordeel Ni-basis, uitzettingscoëfficiënt tussen die van 14MoV6-3 en X20 ligt
 - Een belangrijke eigenschap om de spanningen rond de smeltlijn niet onnodig hoog te laten uitvallen
- LTVM gelijk aan MoV en X20 hebben zich vroeger in de praktijk bewezen en schadegevallen zijn nauwelijks bekend ???
 - Bij **14MoV6-3 LTVM** heeft echter in de HAZ aan de hooggelegeerde zijde tot lage kerftaaiheid geleid
 - Bij **X20CrMoV12-1** lage kerftaaiheid in lasmetaal. X20 LTVM is zeer ongunstig i.v.m. warmtebehandeling, MoV temper gloeien op 690-730°C terwijl X20 wordt aangeraden van 720-780°C



LZL – 23 Juni 2026 - 80.NF

3 14MoV6-2 / X20CrMoV12-1 ³⁾

Lassen met:



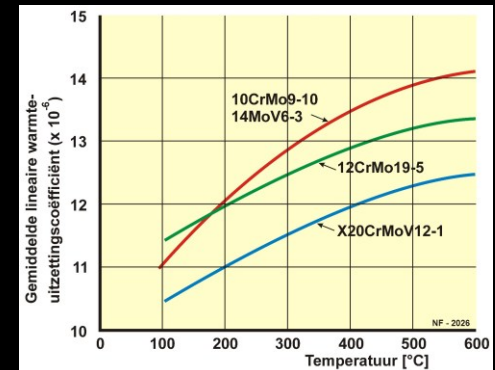
- **Wat nu dan??**
- **Overwegingen zijn:**
 - De hittebestendigheid en taaiheid mogen door geen van de gekozen maatregelen worden aangetast
 - Het moet mogelijk zijn om scheurvrije lasverbindingen te realiseren tegen economisch aanvaardbare kosten
 - De thermische uitzettingscoëfficiënten van de gebruikte materialen moeten vergelijkbaar zijn om grotere interne spanningen te voorkomen

LZL – 23 Juni 2026 - 81.NF



3 14MoV6-2 / X20CrMoV12-1 ⁴⁾

- Tp van 250°C
- Doorlassen TIG met B3 (10CrMo9-10)
- Vullen met SMAW 5Cr-½Mo
- Afkoelen naar 90°C en 2 uur vasthouden
- Opwarmen naar 720°C en 2h houden
- Langzaam afkoelen naar 300°C
- Goede sterkte, hardheid en kerftaaiheid



LZL – 23 Juni 2026 - 82.NF



4 Lassen van 10CrMo9-10 aan 13CrMo4-5, voorwarmen, gloeien, met welke draad lassen en waar op letten

- **Voorwarmen:**
 - 13CrMo4-5: 150-250°C (<25 mm: 150-200°C; >25 mm: 200-250°C)
 - 10CrMo9-10: 200-300°C (>50 mm: 250-300°C)
 - Combinatie: Kies de hoogste vereiste temperatuur van beide materialen → 200-300°C (meestal 250°C als compromis)
- Lastoevoegmateriaal B2 en/of B3. Grotere dikten B3 nemen
- Warmte-inbreng 1,0-2,5 kJ/mm en een laagdikte van 4-5mm
- Langzaam afkoelen, gebruik een isolatiedeken

LZL – 23 Juni 2026 - 83.NF



4 Lassen van 10CrMo9-10 aan 13CrMo4-5, voorwarmen, gloeien, met welke draad lassen en waar op letten

Vervolg

- Temper gloeien 680-720°C => typisch 700°C, 1h/25mm gedurende minimaal 2h en max. 8h
- Afkoelen 150°C/h tot 300°C
- Waar op letten:
 - Voorkom scheuren (H₂-geïnduceerde en warmscheuren)
 - Dus geen hoge H.I. en diepe nauwe lasnaden is dunnere laag
 - Hardheid HAZ max. 220-250
 - Kerftaaiheid 27J @ -20°C voor P22

LZL – 23 Juni 2026 - 84.NF



4 Samenstelling van 13CrMo4-4 basismateriaal

- Austeniet: alleen boven $\sim 450^{\circ}\text{C}$ (M_s)
- Afhankelijk van de afkoelsnelheid $\sim 900^{\circ}\text{C}$ tot $\sim 300^{\circ}\text{C}$ kunnen de volgende structuren ontstaan:

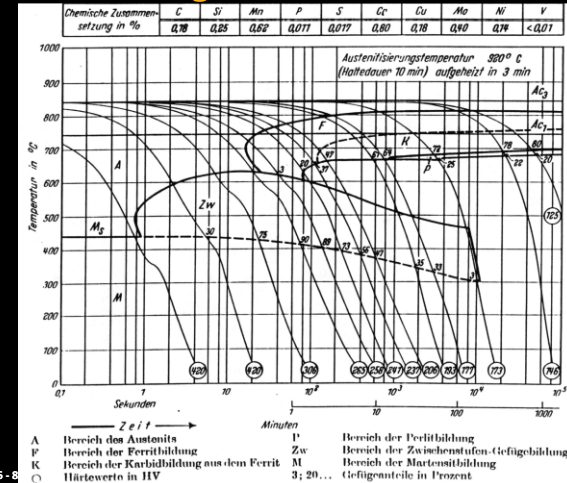
↕ Martensiet 420 HV
 ↕ Bainiet + Martensiet
 ↕ Ferriet + Bainiet + Martensiet
 ↕ Ferriet + Carbiden + Martensiet
 ↕ Ferriet + Carbiden + Perliet + Martensiet
 ↕ Ferriet + Carbiden + Perliet 125 HV

Hardheid neemt af
afkoelsnelheid neemt af

LZL – 23 Juni 2026 - 85.NF



4 CCT-diagram voor 13CrMo4-4



LZL – 23 Juni 2026 - 8



4 10CrMo9-10, 1.7380 (P22)

- Laaggelegeerd chroom-mangaan, perlitisch, kruipbestendig constructiestaal voor toepassingen bij hoge temperaturen tot 580°C in de energiesector
- In vergelijking met andere CrMo-staalsoorten onderscheidt 10CrMo9-10 zich door de aanwezigheid van $M_{23}C_6$ -carbiden en door zijn weerstand tegen waterstofcorrosie in middendrukapparatuur en -systemen bij temperaturen tot 500°C

LZL – 23 Juni 2026 - 87.NF



4 Thermische behandeling 10CrMo9-10 (P22)

- Normaliseren op $930-960^{\circ}\text{C}$ en afkoelen in rustige lucht
- Harden op $920-950^{\circ}\text{C}$ en afkoelen in olie
- Isotherme behandeling bij $930-960^{\circ}\text{C}$ en afkoelen in stilstaande lucht
- Temper gloeien op $730-760^{\circ}\text{C}$ en afkoelen in stilstaande lucht

LZL – 23 Juni 2026 - 88.NF



4

Warmvast – warmvast bijv. 13CrMo4-5 / 10CrMo9-10

- Lastoevoegmateriaal:
 - G CrMo 1 Si
 - E CrMo1 B 4 2 H5
 - W CrMo 1 Si
- Voorverwarmen 100 - 300°C afhankelijk wanddikte
- Warmtebehandeling: Temper gloeien 600-650°C of hoger, afhankelijk materiaaldikte etc.



LZL – 23 Juni 2026 - 89.NF

P12 (13CrMo4-5) / P22 (10CrMo9-10)

- Bij elke combinatie weer bekijken, denk aan warmtebehandeling
- Algemeen: de laagst gelegeerde als toevoegmateriaal en als gloeibehandeling een compromis tussen beide tenminste als er geen extra voorschriften zijn.
- VdTÜV merkblatt 451 geeft goede richtlijnen hiervoor



LZL – 23 Juni 2026 - 90.NF

5

Dunne wanddikte van 10CrMo9-10 en 13CrMo4-5 (tot 7,0) wel voorverwarmen en niet gloeien, mag dat en waar kan je tegenaan lopen m.b.t. de warmtehuishouding en de juiste materiaalstructuur

- Microstructuur na lassen bij NIET gloeien, 10CrMo9-10 & 13CrMo4-5 zijn ferritisch-perlitisch in basistoestand
- Na lassen zonder gloeien:
 - Heat Affected Zone:
 - ❖ Fijnkorrelig areaal (goede taaiheid)
 - ❖ Grove korrelzone (minder taai, gevoelig voor scheuren)
 - ❖ Martensiet, als afkoeling te snel is. Afkoeling vertragen bv. met isolerende deken
 - Lasmetaal:
 - ❖ Afhangelijk van toevoegmateriaal (bijv. 10CrMo9-10 lasdraad) kan het bainitisch of ferritisch-perlitisch zijn

Mag het?

Materiaal	Dunne wand	Voorverwarmen	Gloeien	Risico's
10CrMo9-10	☒ Ja < 7mm	☒ 150–250°C	Niet verplicht	Koudscheuren, martensiet, restspanningen
13CrMo4-5	☒ Ja < 7mm	☒ 100–200°C	Niet verplicht	Minder kritisch, maar risico op scheuren blijft



LZL – 23 Juni 2026 - 91.NF

6

Is backinggas wel noodzakelijk bij P91 en de andere kruipvaste staalsoorten

- Voor P91 altijd maar ook voor P23, P24, P92, etc. Waarom?
 - Voorkomen van oxidatie
 - Kwaliteit doorlassing, zorgen voor een zuivere, foutloze las
 - Weerstand tegen kruip, oxidatie of vervuiling kan de prestaties op lange termijn onder zware belasting en bij hoge temperaturen aantasten
 - Voorschrift Code: ASME BPVC Sectie IX en EN ISO 15614-1 schrijven vaak het gebruik van een backinggas voor
- Aanbevolen werkwijzen
 - Gebruik bij voorkeur 100% argon als backing gas
 - Zorg voor een doorstromingsnelheid van 5–10 l/min
 - **≥ 3% Cr, zonder meer altijd backing gas toepassen**



LZL – 23 Juni 2026 - 92.NF

7 1) Problematiek m.b.t. T22 kruipvast mat., zonder gloeien veel problemen in vnl. verdampers van grote centrales. Wel of niet gloeien?

- **Problematiek rond T22** (2.25Cr-1Mo) kruipvast staal in verdampers van elektriciteitscentrales is een complex en actueel onderwerp, met name als het gaat om **kruipschade, lasrestspanningen en waterstof gerelateerde degradatie** (zoals waterstofopname). Het al dan niet toepassen van gloeien (PWHT) is een cruciale afweging, met voor- en nadelen
- **Argumenten vóór gloeien**
 - **Preventie van waterstofscheuring:** Gloeien vermindert de gevoeligheid voor HIC/SSC door spanningen te verminderen
 - **Langere levensduur:** Betere kruipweerstand en minder risico op vroeg falen
 - **Normen en codes:** Veel normen (bv. ASME BPVC, EN 13445) schrijven PWHT voor dikwandige T22-componenten, met name in kritische toepassingen

LZL – 23 Juni 2026 – 93.NF



7 2) Problematiek m.b.t. T22 kruipvast mat., zonder gloeien veel problemen in vnl. verdampers van grote centrales. Wel of niet gloeien?

- **Argumenten tegen gloeien**
 - **Praktische beperkingen:** Grote verdampers zijn moeilijk gelijkmatig te verwarmen → risico op thermische spanningen of onvolledig gloeien
 - **Kruipschade al aanwezig:** Bij kruipschade, kan gloeien de situatie verergeren door versnelde groei van bestaande scheuren
 - **Alternatieven:** Lage-temperatuur gloeien (bv. 500–550°C) of lokaal gloeien kan een compromis zijn, maar is niet altijd voldoende
- **Algemene richtlijn:**
 - Gloeien, sterk aanbevolen voor dikwandige (> 25mm) T22-componenten in kritische toepassingen
 - Niet gloeien als:
 - Component al kruipschade heeft
 - Gloeien technisch niet haalbaar is (bv. ter plekke in een centrale)
 - Er alternatieven zijn (bv. lage-temperatuur PWHT, betere lasprocedures)

LZL – 23 Juni 2026 – 94.NF



8 Gevolg van te kort voorwarmen en gloeien of te lang voorwarmen en gloeien

- **Te kort voorwarmen:**
 - te snelle afkoeling, ⇒ brosse martensietvorming. Dit leidt gegarandeerd tot koudscheuren en waterstofbrosheid
- **Te lang voorwarmen:**
 - geen direct defect, maar kost onnodig veel energie, tijd en oxidatie
- **Te kort gloeien:**
 - De las is niet voldoende spanningsarm, wat bij belasting kan leiden tot onverwachte vervorming of scheuren tijdens bedrijf
- **Te lang gloeien:**
 - De sterkte en de kruipweerstand van het staal nemen onherroepelijk af. Tevens kunnen de lascarbiden te grof worden (overtreding van de ontlaattoemperatuur)

LZL – 23 Juni 2026 – 95.NF



8 Gevolgen van te lang voorwarmen of gloeien

- Kruipvaste staalsoorten danken hun hittebestendigheid aan een specifieke structuur van carbiden en micro-elementen. **Te langdurige verhitting verstoort dit evenwicht**
- **Verlies van kruipsterkte en vloeigrens:** Langdurig gloeien (of op een te hoge temperatuur) zorgt ervoor dat de fijne microstructuur grof wordt en uitzakt. Hierdoor verliest het materiaal zijn vermogen om onder hoge druk en temperatuur zijn vorm te behouden
- **Carbide-groei:** Door te lang op hoge temperatuur te blijven, klonteren carbiden samen (coalescentie). Dit gaat direct ten koste van de treksterkte en kruipweerstand op de lange termijn

LZL – 23 Juni 2026 – 96.NF



8

■ Gevolgen van te kort voorwarmen of gloeien

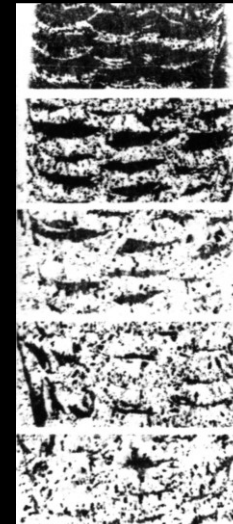
- **Koudscheuren en breuk:** koelt de warmte-beïnvloede zone (WBZ) te snel af $\Rightarrow$ een harde, brosse microstructuur (martensiet)
- **Interne spanningen:** blijven de restspanningen in het laswerk. Risico op scheurvorming achteraf als vermoeiingsbreuken bij dynamische belasting
- **Beste praktijk voor CrMo-staal**
 - **Voorwarmen:** Afhankelijk van de dikte en legering dien je te verwarmen tussen de (150 en 350°C). Deze temperatuur moet behouden blijven tot het moment van gloeien
 - **Temper gloeien:** meestal tussen 580 en 650°C. Een goede vuistregel is een houdtijd van ongeveer 2 minuten per millimeter wanddikte



LZL – 23 Juni 2026 - 97.NF

8

■ Invloed gloeiduur op de microstructuur van 5Cr+½Mo puur lasmetaal: tussenfase en martensiet (ontbonden) tot carbiden en ferriet

750°C
3 h750°C
8 h750°C
15 h750°C
30 h750°C
50 h

LZL – 23 Juni 2026 - 98.NF

9

Binnen EN 13445-4 wordt bij PWHT verwezen naar Tabel 11.1-1. Daarbij wordt aangegeven dat bijzonderheden in het hogere bereik van de houdtijd en/of temperatuur een negatieve invloed kunnen hebben op mechanische eigenschappen zoals rekgrens, treksterkte en taaiheid. Ook het cumulatieve effect van meerdere hittecycli dient te worden meegenomen.

- Dit effect wordt beschreven met de Hollomon-Jaffe-parameter (P) volgens de formule:

$$P = T_s \times (20 + \log t) \times 10^{-3}. \text{ (is waarde 20 voor alle materialen gelijk?)}$$
- Verder geeft de norm aan dat:
- Zonder voorafgaande overeenkomst tussen de fabrikant van het drukapparaat en de materiaalproducent, de feitelijke ontlaattemperatuur van NT- of QT-materiaal niet lager mag zijn dan de toelaatbare temperatuur volgens Tabel 11.1-1. Een PWHT-temperatuur hoger dan de ontlaattemperatuur kan leiden tot aantasting van de mechanische eigenschappen.
- In Tabel 11.1-1 is een P_{crit} -waarde gedefinieerd, die niet mag worden overschreden zonder aantoning van de mechanische eigenschappen (bijv. 10CrMo9-10 HAZ: P_{crit} 19,2 en X10CrMoVNb9-1: P_{crit} 20,5).



LZL – 23 Juni 2026 - 99.NF

9

- Graag zou ik hierop de volgende vragen beantwoord zien:
- Waarom is dit punt zo belangrijk en hoe kritisch is dit in de praktijk?
- Welke waarden moeten precies in de Hollomon-Jaffe-formule worden meegenomen?
 Geldt dit alleen voor de PWHT, of moeten ook eerdere warmtebehandelingen (ontlatingstemperaturen en tijd) tijdens de materiaalproductie (bijv. buis- of plaatfabricage) worden meegenomen?
- Of bij een reparatie in bijv. X10CrMoVNb9-1, moet hier ook de bedrijfsuren in worden meegenomen?
- En wat is het verschil tussen de Hollomon-Jaffe-parameter en de Larson-Miller-parameter?



LZL – 23 Juni 2026 - 100.NF

9 Breuk door lasspanningen bij CrMo-staal

$$P = K (30 + \log t) \Rightarrow \text{LM (Lasmetaal)}$$

$$P = T_s \times (20 + \log t) \times 10^{-3} \Rightarrow \text{HJ (Basismateriaal)}$$

P = Larson Miller Parameter

= Hollomon Jaffe Parameter

K = temperatuur in Kelvin (= °C + 273)

t = tijd in uren

30 = een constante die verandert voor verschillende materialen



LZL – 23 Juni 2026 – 101.NF

9 Hollomon-Jaffe-parameter

- De Hollomon-Jaffe-parameter (ook wel temperingsparameter genoemd) is een formule in de metallurgie die de uitwisselbaarheid van tijd en temperatuur tijdens het harden en ontlaten van staal kwantificeert. Hiermee is het mogelijk om gelijke materiaaleigenschappen (bijv. hardheid) te bereiken bij verschillende combinaties vanhoudtijd en temperatuur

Waarom wordt het gebruikt?

- Door de parameter te berekenen, kun je voorspellen hoe hard of zacht een type staal blijft na een warmtebehandeling. Een hogere parameterwaarde resulteert in een zachter staal (met een lagere treksterkte) vanwege de langere blootstelling aan hitte of hogere temperaturen

Procesoptimalisatie:

- Aan tonen dat een kortere warmtebehandeling op een hogere temperatuur hetzelfde effect heeft als een langere warmtebehandeling op een lagere temperatuur



LZL – 23 Juni 2026 – 102.NF

10 Materiaalgroep 5 en 6 volgens CEN ISO/TR 15608

Gelegeerde staalsoorten voor drukvaten, hittebestendig tot maximaal 550°C

5	Vanadium vrije Cr-Mo staalsoorten met C ≤ 0,35%	
5.1	0,75% ≤ Cr ≤ 1,5% en Mo ≤ 0,7%	EN 10028-2 (13CrMo4-5)
5.2	1,5% ≤ Cr ≤ 3,5% en 0,7 < Mo ≤ 1,2%	(10CrMo9-10)
5.3	3,5% ≤ Cr ≤ 7,0% en 0,4 < Mo ≤ 0,7%	EN 10028-2 (12CrMo5)
5.4	7,0% ≤ Cr ≤ 10% en 0,7 < Mo ≤ 1,2%	EN 10216-2 (X11CrMo9-1)

Gelegeerde staalsoorten voor drukvaten, hittebestendig tot maximaal 550°C

6	Cr-Mo-(Ni) – staalsoorten met hoog V-gehalte	
6.1	0,3% ≤ Cr ≤ 0,75% en 0,7 - Mo ≤ 0,7% en V ≤ 0,35%	EN 10216-2 (14MoV6-3)
6.2	0,75% ≤ Cr ≤ 3,5% en 0,7 en 0,7 Mo < 0,7% ≤ 1,2% en V ≤ 0,35%	EN 10028-2 (13CrMoV9-1)
6.3	3,5% ≤ Cr ≤ 7,0% / Mo ≤ 0,7% en 0,45% ≤ V ≤ 0,55%	-
6.4	7,0% ≤ Cr ≤ 12,5% / 0,7% < Mo ≤ 1,2% en V ≤ 0,35%	EN 10028-2 (X10CrMoVNb9-1)



LZL – 23 Juni 2026 – 103.NF

10 EN 13480-4 stelt dat bij lassen van materiaalgroep 5.2 aan 6.4 LTVM van groep 6.4 moet worden gebruikt.

- Bij andere combinaties, zoals 6.1 aan 6.4 of 5.1 aan 6.1, wordt echter lastoevoegmateriaal van de lager gelegeerde groep voorgeschreven
- Mijn vraag hierbij is of dit een bewuste normkeuze is of mogelijk een typefout, wat is de eventuele achterliggende metallurgische reden

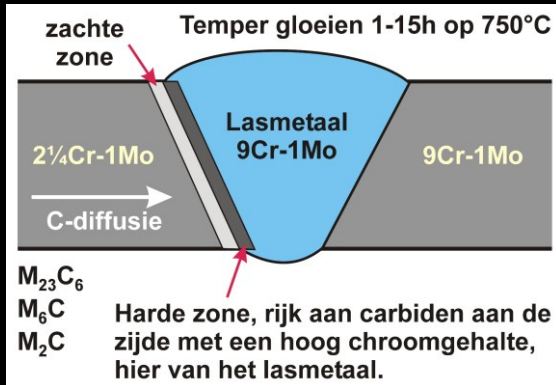
Groep	Materiaal	Tp	Temper	LTVM
5.1	13CrMo4-5	150-250 (300)	1-2h/600-650	E-B2
6.1	14MoV6-3	200-300	1-2h/680-720	E*018-B1 (V)
6.4	X10CrMoVNb9-1	150-200-250	1-2h/730-760	E -B9
5.2 / 6.4	P22 / P91	150-200-250	650-750 vs 4h/730-780	E -B9
5.1 / 6.1	P11 / 14MoV	200-300	600-700	E....-B2, Chromet 1V
6.1 / 6.4	14MoV / P91	200-250	710-730 4h/730-780	E-B3 ??



LZL – 23 Juni 2026 – 104.NF

Voorbeeld problemen bij ongelijksoortige lasverbinding na temper gloeien

10



LZL – 23 Juni 2026 – 105.NF

10

AWS A5.5 (2007) Classification system for low-alloy steel electrodes for Shielded Metal Arc Welding

E 8018-B6 H4R → SL 502

C-Mn steel electrodes
Cr-Mo steel electrodes

H4 = max. 4
H8 = max. 8
H16 = max. 16

Meets requirements of
absorbed moisture test

H_{DM} (ml/100g)

Chemical composition
deposited weld metal

Type of coating and current

Welding position

min. tensile strength

Covered electrode

symbol	Cr	Mo	V	others	PWHT
A1	-	0,40-0,65	-	-	1h/620±15
B1	0,40-0,65	0,40-0,65	-	-	1h/620±15
B2	1,00-1,50	0,40-0,65	-	-	1h/690±15
B3	2,00-2,50	0,90-1,20	-	-	1h/690±15
B4	1,75-2,25	0,40-0,65	-	-	1h/690±15
B5	0,40-0,65	1,00-1,25	< 0,05	-	1h/690±15
B6	4,0-6,0	0,45-0,65	-	Ni < 0,40	1h/740±15
B7	6,0-8,0	0,45-0,65	-	Ni < 0,40	1h/740±15
B8	8,0-10,5	0,85-1,20	-	Ni < 0,40	1h/740±15
B9	8,0-10,5	0,85-1,20	V 0,15-0,30	Nb 0,02-0,10 N 0,02-0,07	2h/760±15

Tensile Rm [ksi]	Tensile Rm [MPa]	Yield (Rp0.2) [ksi]	Yield (Rp0.2) [MPa]	Digit	Type of coating	Current
70	490	57	390	10	Cellulose (organic)	DC only
80	550	67	460	11	Cellulose (organic)	AC or DC
90	620	77	530	13	Rutile	AC or DC
100	690	87	600	15	Basic, + low H ₂	DC only
110	760	97	670	16	Basic, + low H ₂	AC or DC
120	830	107	740	18	Basic, low H ₂ , + iron powder	AC or DC
				20/27	High iron oxide	AC or DC

11

2) Wat te doen als de hardheid onder de 200HV ligt?

- Controleer de meting:
 - Oppervlakte effect (ontkoling) ⇒ 0,5 mm wegslijpen
- Oorzaak:
 - Te hoge H.I. , tijdens PWHT oververhit of te langzaam afgekoeld
 - Onjuiste PWHT, te lange gloeitijd of te hoge temperatuur (boven kritisch gebied)
 - ✓ kan de precipitaten (MX-deeltjes) in P91 vernietigen
- Actie: uitslijpen en opnieuw lassen, nieuwe WPQ of component opnieuw normaliseren

LZL – 23 Juni 2026 – 108.NF

11

1) Bij P91 moet de hardheid tussen de 200 en 290HV liggen na lassen. Hoe kritisch is dit?

Eis: EN ISO 15614-1: ≤ 350 HV10kg

Eis: API RP 582 (non-sour): 200-290 HV

- P91 ⇒ kruipsterkte door getemperde martensiet
- > 290 HV ⇒ onvoldoende getemperd ⇒ bros en gevoelig voor koude scheuren (delayed cracking)
- < 200 HV ⇒ oververhitting?, te lang gloeien (overtempering) waardoor microstructuur veranderd in zacht ferriet ⇒ geen mech. sterkte en kruipweerstand
 - Te repareren door ontcoole laag weg te slijpen

LZL – 23 Juni 2026 – 107.NF

11 3) Wat is de invloed van heatinput, interpass en preheat op de omzetting van austeniet naar martensiet bij P91?

- Tp - H.I. en Ti bepalen samen de afkoelsnelheid
- Tp meestal 200-300°C vertraagt afkoelen
 - Doel: H₂ kan ontsnappen en voorkomt spontane brosse martensiet. Structuur blijft austenitisch tot Ms
- Ti bij P91 meestal iets onder 300°C
 - Doel: te hoge H.I. stabiliseert austeniet
 - ✦ Gaat niet volledig over in martensiet
 - ✦ Daardoor brosse structuur ⇒ risico op scheuren. Daarom Ti < Ms



LZL - 23 Juni 2026 - 109.NF

11 3) Wat is de invloed van heatinput, interpass en preheat op de omzetting van austeniet naar martensiet bij P91?

- H.I. invloed ⇒ meer warmte in materiaal
 - Voorkeur P91 is laag tot gemiddelde H.I.
 - Hoge H.I. = grotere HAZ
 - = Langzamer afkoelen
 - = mogelijke korrelgroei
 - = verlies kruipsterkte en hoge hardheid
 - Voltooien van martensiet
 - Omzetting bij P91 start bij ong. 400°C (Ms) en is volledig voltooid als temperatuur afgekoeld is tot 100°C voor PWHT kan worden toegepast (CCT diagram)



LZL - 23 Juni 2026 - 110.NF

TOT ZOVER DE VRAGEN



Foto's: Jan Ype Krol, PMF

LZL - 23 Juni 2026 - 111.NF

Voorwarm- en interpasstemperatuur voor CrMo-staalsoorten

Samenstelling	Dikte	Tv (H _{DM} ≤ 5 ml)	Ti	PWHT
Cr<1 en Mo<0,5	t < 12 mm	Niet nodig	≤ 200°C	Niet nodig
0,3Mo	t ≤ 15 mm	20°C	≤ 250°C	≤ 16 mm / NIET
	t > 15 ≤ 30 mm	75°C		> 16 mm / 620 - 700°C
	t > 30 mm	75°C		> 16 mm / 620 - 700°C
1¼+½Mo	t ≤ 15 mm	20°C	≤ 300°C	≤ 13 mm / NIET
	t > 15 mm	100°C		> 13 mm / 675 - 750°C
½Cr+½Mo+¼V	t ≤ 15 mm t > 15 mm	100°C	≤ 300°C	
2¼+1Mo	t ≤ 15 mm	75°C	≤ 350°C	≤ 10 mm / NIET
	t > 15 mm	100°C		> 10 mm / 670 - 745°C
5Cr+½Mo 9Cr+1Mo	alle	150°C	≤ 350°C	alle 670 - 760°C
12CrMoV	t ≤ 8 mm	150°C	≤ 300°C ≤ 450°C	alle 730 - 760°C
	t > 8 mm	200°C mart.		
	t > 8 mm	350°C aust.		



LZL - 23 Juni 2026 - 112.NF

Typische microstructuur van T/P91 na normaliseren en temper gloeien

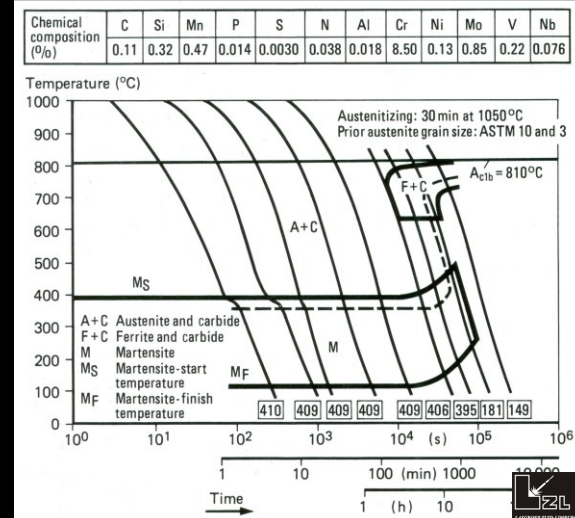
P91

Microstructuur: getemperde martensiet

LZL – 23 Juni 2026 - 113.NF



CCT- diagram van P91



LZL – 23 Juni 2026 - 114.NF



Lassen van T/P91

- Volledig martensitisch staal $\Rightarrow$ Geen vocht, water, H_2
- LTVM type B9, c.q. E CrMo91 ($\text{Ni} + \text{Mn} < 1,5$)
- $T_p \geq 200^\circ\text{C}$ en voor $d > 6\text{mm} \geq 250^\circ\text{C}$ en T_i max. 300°C
- Na lassen waterstofarm gloeien $2\text{h}/300^\circ\text{C}$ over minimaal 75mm beide zijde van de las
- Dan voor PWHT de las afkoelen tot onder 100°C
- De las temper gloeien op $740-760^\circ\text{C}$ (780) gedurende minimaal 2 uur
 - Vaak wordt aangegeven dat de Temper gloeitemperatuur minimaal 15°C beneden ontlaattemperatuur moet liggen

LZL – 23 Juni 2026 - 115.NF



P91 basismateriaal

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V	Nb	N
0,1	0,4	0,4	9	1	0,1	0,2	0,08	0,05

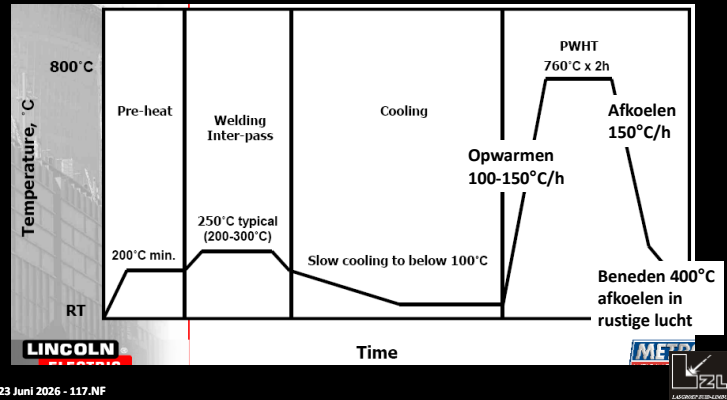
- Voorwarmen: 200°C
- Interpass: 300°C
- Afkoelen voor PWHT:
 - Beneden 100°C
- PWHT:
 - 760°C ; 2 uur min.



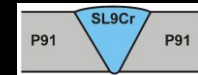
LZL – 23 Juni 2026 - 116.NF



P91: thermische cyclus bij het lassen



Lasverbindingen P91 / P91

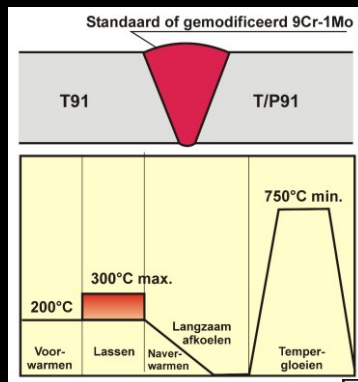


- Verbindingen in dik- en dunwandig P91
 - T_p 200°C
 - T_i max. 300°C
 - Toevoegmat. ER90S-B91, E9015-B91
 - Langzaam afkoelen tot 20-100°C en minimaal 1 uur vasthouden
 - Tempergloeien 750-770°C, gedurende
 - Lasproces: doorlassen GTAW, vul- en sluitlagen met SMAW, GMAW, FCAW, SAW

LZL - 23 Juni 2026 - 118.NF

Warmtebehandeling vóór en ná het lassen van T/P91 (9Cr-1Mo-staal)

- De lasbaarheid van P91 is te vergelijken met X20
- Voorwarmen 200°C en T_i van max. 300°C
- Lassen met E B9 LTVM of equivalent
- Langzaam afkoelen tot onder de 100°C om een complete transformatie naar martensiet te krijgen
- Tijd tussen transformatie en temper gloeien mag maximaal 1 week zijn.
- Componenten moeten droog worden opgeslagen



LZL - 23 Juni 2026 - 119.NF

Bron: Vallourec-Industries

P91 Metrode lastoevoegmaterialen

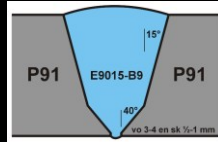
Proces	Toevoegmateriaal	AWS	EN ISO
GTAW	9CrMoV-N	ER90S-B9	
SMAW	Chromet 9-B9	E9015-B9	
	Chromet 9MV-N	E9015-B9	
	Chromet 9MVN+	E9015-B9	
	Chromet 91VNB	E9015-B9	
FCAW	Supercore F91	E91T1-B9	
GMAW	Cormet M91	E90C-G	
SAW draad	9CrMoV-N	EF9	
SAW poeder	LA491 / LA492	--	

LZL - 23 Juni 2026 - 120.NF

P91 pijp, t = 40 mm in 6G

Root: ER90S-B9 en vullen: E CrMo9-1 B 42 H5

- Tp: TIG 200-225°C en SMAW: > 250°C
- Ti ≤ 300°C
- Soaken: 2½ uur @ 250-300°C
- Post heat: 2 uur @ 80-90°C
- 1^{ste} Temper gloeiing: 160-170 min @ 745-750°C
 - Resultaat: te lage kerftaaiheid bij -10 en +21°C
- 2^{de} Temper gloeiing: 180-190 min @ 760-765°C
- P91 gebruikelijke praktijk:
 - 3 uur of minder op 760°C is te laag voor kerftaaiheid en hardheid (HV10 ≤ 265) of grove korrel HAZ
 - Betere waarden op 780°C of 3-4 uur op 760°C



LZL – 23 Juni 2026 - 121.NF



Beklede elektrode SL 9Cr (P91)

Invloed PWHT op kerftaaiheid van zuiver neergesmolten lasmetaal

PWHT [°C]	Diam. [mm]	Kerftaaiheid ISO-V @ RT [J]		Laterale expansie @ RT [mm]	
		Enkele waarde	Gemid.	Enkele waarde	Gemid.
6h/730	3,2	111-112-105	109	1,49-1,60-1,32	1,47
6h/730	3,2	95-95-109	100	1,37-1,24-1,24	1,28
6h/730	4,0	61-59-60	60	1,05-1,08-0,98	1,04
2h/750	2,5	79-79-75	78	-	-
2h/750	3,2	62-54-67	61	-	-
6h/750	3,2	68-76-73-70-88	75	0,82-1,04-1,05-0,95-0,92	0,95
6h/750	4,0	106-110-113-96-93	104	1,25-1,43-1,53-1,22-1,16	1,32
6h/760	2,5	84-93-82	88	1,29-1,17-1,03	1,16
6h/760	3,2	84-96-94	91	1,20-1,20-1,21	1,20
6h/760	4,0	75-66-75	72	1,00-0,90-0,85	0,92

LZL – 23 Juni 2026 - 122.NF



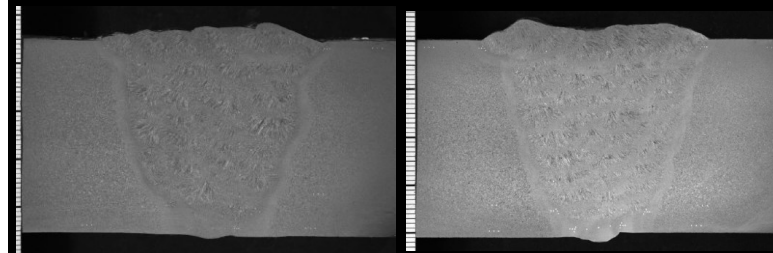
Mechanische eigenschappen na 1^{ste} en 2^{de} gloeiing

	- 10°C	gem.	+ 21°C	gem.	+ 21°C: 2 ^{de} Temper	gem.
Mid weld Cap	35-14-25	25	46-47-54	49	70-85-89	81
HAZ Cap	25-172-27	75	13-15-126	51	198-200-227	208
Mid weld Root	14-6-20	13	26-47-43	39	78-69-91	79
HAZ Root	163-21-36	73	73-113-70	85	173-164-167	168
Eisen	≥ 28 Joule	≥ 40	≥ 28 Joule	≥ 40	≥ 28 Joule	≥ 40
Dwarstrek: ASME ≥ 585, EN ≥ 630			726 - 723		710 – 695 Eis ASME 585	
All weld metal bij + 600°C						
Rp0,2	Eis EN 10216-2 Rp0,2: ≥ 215 MPa		401 MPa		271 MPa	
530 MPa				341 MPa		
A5			15%		19%	

LZL – 23 Juni 2026 - 123.NF



Macro P91 , t = 40 mm, enkele en dubbele temper gloeiing



- Temper gloeien:
160-170 min @ 745-750°C

- Temper gloeien:
745-750°C/160-170 minuten
+
180-190 min @ 760-765°C

LZL – 23 Juni 2026 - 124.NF



P91 ongelijksoortige combinaties

Combinatie	Uitvoering
P91 aan P22	B3 & PWHT @ 730°C
P91 aan P11	Butter P91 met B2 & PWHT @ 730°C; dan, verbinding met B2 & PWHT @ 590°C
P91 aan RVS	Butter P91 met Ni-basis & PWHT @ 760°C; dan, verbinding RVS met Ni-basis

LZL – 23 Juni 2026 - 125.NF



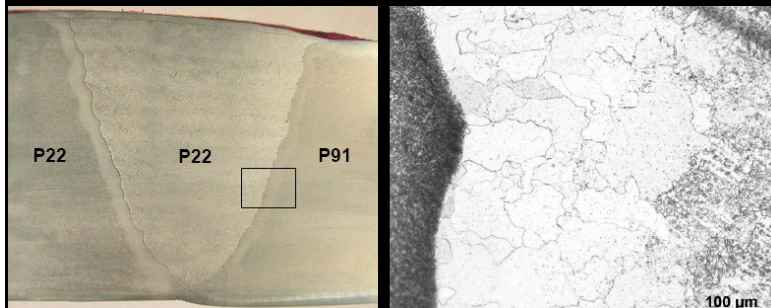
Belangrijke lasvariabelen T/P22 vs T/P91

Variabelen	T/P22	T/P91
Voorwarmen	Altijd	Altijd !
PWHT (WB na lassen)	Soms (code)	Altijd !
N & T (na buigen of koud vervormen)	Soms	Altijd ! (> 18% deformatie)
Materiaal certificaat	Zelden !	Altijd ! (PWHT < Ac1)
Eisen taaiheid	Zelden ! (Power Ind.)	Altijd !
Nawarmen (H ₂ -arm)	Zelden !	Altijd ! (niet voor GTAW)
Koelen tot <100°C voor PWHT	Nee	Ja ! (resultaten onderzoek)
Lasvolgorde	Zelden !	Altijd !
Backing gas	Nee! (indien niet vereist)	Altijd !

LZL – 23 Juni 2026 - 126.NF



Macro- en microstructuur P22/P91 lasverbinding



Macrostructuur ongelijksoortige lasverbinding P22-P91

ongelijksoortige lasnaad
ontkoolde zone in P22 lasmetaal
grenzend aan P91 basismetaal

LZL – 23 Juni 2026 - 127.NF



Lasprocedure

- Aanzienlijk verschil in lassen van T/P91 vs de laaggelegeerde staalsoorten die traditioneel in de energiesector worden gebruikt

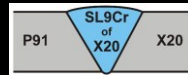
Lasparameters	T/P22	T/P91
Lastoevoegmateriaal	Matching	Matching
Voorwarmen T _p	200 - 250°C	200 - 250°C
Interpass T _i	max. 300°C	max. 300°C
Afkoelen < 100°C voor PWHT	NEE	JA
Temper gloeien	690 - 720°C	750 - 760°C
Backing gas	NEE !!!	JA

LZL – 23 Juni 2026 - 128.NF

Bron: ETD



Lasverbindingen P91 / X20



	X20 LTVM	P91 LTVM
Tp	350°C	250°C
Ti	max. 450°C	max. 300°C
LTVM	LNT X20, etc. Austenitisch / Martensitisch	ER90S-B9, E9015-B9, (ERNiCr-3, ERNiCrFe-3)
Afkoelen	Langzaam max. 150°C/uur naar 80-100°C	Langzaam max. 150°C/uur naar 80-100°C
Tempering	1-2h/25mm op 740-750°C	1-2h/25mm op 740-760°C
Lasproces	Doorlassen GTAW Vullen/sluiten GTAW	Doorlassen GTAW Vullen/sluiten, SMAW/SAW

LZL – 23 Juni 2026 - 129.NF



Praktijk: P91 / X20CrMoV12-1 Pijp 31,8 x 6,3 mm, V60° lasnaad

Lassen:

- Tp 220°C en Ti max 300°C
- Doorlassen GTAW (zonder backing gas), CrMo2
- Aflassen GTAW met ER90S-B9, 2,4 mm lasdraad
 - HI = 1,3 – 2,1 kJ/mm
- Temper gloeien: zie volgende sheet

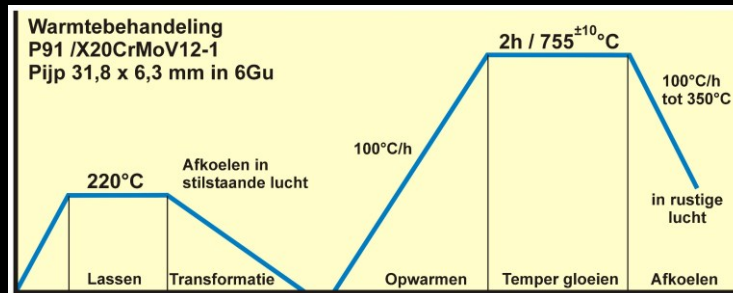
Test resultaten:

- Dwarstrek in BM gebroken, 703 en 712 MPa (≥ 630)
- Buigstaven, root en face 180° zonder aantekening
- HV10: Eis van ≤ 380
 - Las 279-309, BM 225 – 246, HAZ 279-309

LZL – 23 Juni 2026 - 130.NF



Gloeibehandeling P91 / X20 pijp 31,8 x 6,3 mm



LZL – 23 Juni 2026 - 131.NF



P91/P92 etc. zijn

GEEN ordinaire CrMo's

LZL – 23 Juni 2026 - 132.NF



P91 & P92 basismateriaal - warmtebehandeling

■ Normaliseren:

- Specificaties : 1040 - 1095°C
- Industriële praktijk : 1040 - 1080°C

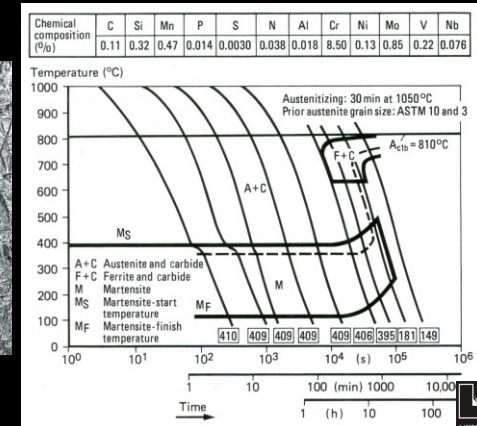
■ Tempering:

- Specificaties : 730 - 790°C
- Industriële praktijk : 750 - 780°C

LZL – 23 Juni 2026 - 133.NF



P91 transformatiediagram (CCT)



LZL – 23 Juni 2026 - 134.NF



P91 Lasmetaallegering

- C : hetzelfde als basismateriaal
- Mn : } desoxidanten
- Si : }
- Nb : Lager dan bij basismateriaal
- V : hetzelfde als basismateriaal
- Ni : Verbetert de taaiheid, verlaagt A_{C1},
vermindert rest ferriet, hoge concentraties
verminderen kruipsterkte
- Co : vermindert rest ferriet (P92)

LZL – 23 Juni 2026 - 135.NF



P91 Warmtebehandeling

- Basismateriaal
 - Buigen en vormen
- Lassen
 - Voorverwarmen
 - PWHT
- Een onjuiste warmtebehandeling kan ertoe leiden dat P91 eigenschappen krijgt die gelijkwaardig zijn aan die van P22

LZL – 23 Juni 2026 - 136.NF



Voorwarm/interpass temperatuur



Foto: Jan Ype Krol, PMF

- Voorwarmen is niet heel veeleisend... 200°C is meestal voldoende (lager voor GTAW)
- Voorverwarming is absoluut niet vergevingsgezind
- Plaatselijke verhitting met autogeenbranders is moeilijk te controleren en wordt afgeraden
- Interpass wordt beïnvloed door massa



LZL – 23 Juni 2026 - 137.NF

Nawarmen of waterstofarm gloeien

- Praktijk ...
 - Voorverwarmen (~200°C) tot 400°C
 - 15 min. tot 4 uur
 - Afkoelen tot onder 100°C voor het nawarmen
- Echter, als
 - Laag waterstof houdende lastoevoegmaterialen
 - Juiste voorverwarming
 - Juiste reinheid
- Nawarmen is optioneel



LZL – 23 Juni 2026 - 138.NF

Warmtebehandeling P91

- Voor temper gloeien en samenstelling van het lasmetaal is het volgende vereist:
 - Smal bereik: 730-775°C
 - Temperatuurbereik wordt beperkt/beïnvloed door nikkel- en mangaangehalte van het lasmetaal
 - Ni + Mn verlagen de lagere kritische transformatietemperatuur
 - Dit probleem wordt behandeld in ASME I, PW-39
 - U heeft de daadwerkelijke samenstelling van het lasmetaal nodig; "standaard testcertificaten" zijn onacceptabel!



LZL – 23 Juni 2026 - 139.NF

Lasprocedure P91/P92

	P91	P92
Voorverwarmen	200°C	
Interpass temp.	300°C	
Nawarmen	Optioneel	Optioneel
Afkoelen tot RT Nawarmen	OK, indien <80 mm	OK, indien <50 mm
PWHT	Afkoelen tot beneden de 100°C 760°C	
PWHT tijd	min. 2h	min. 2 – 4h



LZL – 23 Juni 2026 - 140.NF

Samenvatting & conclusies (1)

- Kruipvaste CrMo-staalsoorten hebben een lang verleden en worden met veel succes toegepast in de energieopwekking en de Petro-chemische industrie
- Om het lassen heden met succes uit te voeren is het noodzakelijk de nodige ervaring op te doen teneinde de opdrachtgevers en de Olie- en Energiemaatschappijen, als uiteindelijke klant, ervan te overtuigen dat aan de eisen en de specificaties wordt voldaan

LZL – 23 Juni 2026 - 141.NF



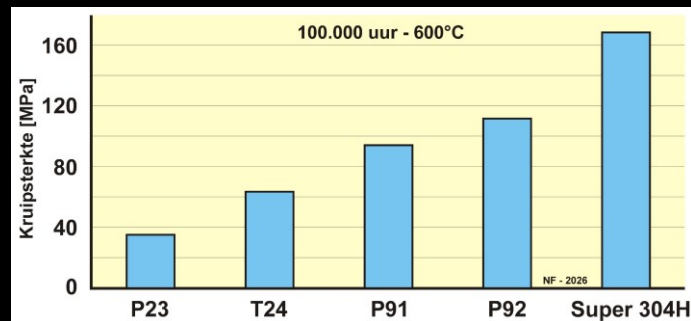
Samenvatting & conclusies (2)

- Als gevolg van de toenemende eisen en de ontwikkeling van moderne CrMo(V)-staalsoorten en die, die in grotere diktes worden toegepast worden de parametervensters kleiner
- De toekomst is echter dat de ontwikkeling van CrMo-stalen met toevoegingen van V, W, Ni, Ti, B en N verder gaat om aan de nieuwe proces-omstandigheden met hogere temperatuur en druk te kunnen voldoen

LZL – 23 Juni 2026 - 142.NF



Kruipsterkte, 100.000 uur bij 600°C



LZL – 23 Juni 2026 - 143.NF



Materialen voor belangrijke componenten in USC energiecentrales ((Ultra Super Critical) Blum I 1998, Husemann 199)

Ovenpanelen	Chemische samenstelling [%]	Max. stoom temp. voor P = 325 bar
HCM2S	0,01C-2,25Cr-0,3Mo-1,6W-V-Nb-N-B	625°C
7CrMoTiB10-10	0,07C-2,4Cr-1Mo-V-Ti-N-B	625°C
HCM12	0,1C-12Cr-1Mo-1W-V-Nb-N	650°C
Oververhitters: TP347HFG	0,08-18Cr-12Ni-2Mn-Nb	650°C

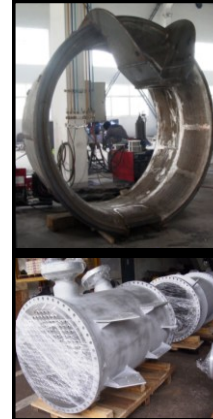
LZL – 23 Juni 2026 - 144.NF



Trends in 2025-2026

- MarBN-stalen worden steeds vaker getest in pilotprojecten voor toekomstige centrales
- Waterstofbestendigheid is een sleutelfactor voor nieuwe staalsoorten (bv. voor groene H₂-centrales)
- Lassen en warmtebehandeling blijven kritische factoren voor de levensduur van kruipvaste stalen
- Duurzaamheid: bijv. low-carbon kruipvaste stalen (bv. door Stegra in Zweden, die in 2026 de eerste low-carbon staalfabriek opent)

LZL – 23 Juni 2026 - 145.NF



Foto's: Fred Neessen

LZL – 23 Juni 2026 - 146.NF

Bedankt voor
uw aandacht

