

DVGW-Projekt SyWeSt H2: “Stichprobenhafte Überprüfung von Stahlwerkstoffen für Gasleitungen und Anlagen zur Bewertung auf Wasserstofftauglichkeit“

Abschlussbericht

Dr. Michael Steiner

Open Grid Europe GmbH, Essen

Dr. Ulrich Marewski

Open Grid Europe GmbH, Essen

Dr. Horst Silcher

MPA Universität Stuttgart



DVGW-Projekt SyWeSt H2: “Stichprobenhafte
Überprüfung von Stahlwerkstoffen für
Gasleitungen und Anlagen zur Bewertung auf
Wasserstofftauglichkeit“

Abschlussbericht

Januar 2023

DVGW-Förderkennzeichen G 202006

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Neubau oder der Umstellung von Gashochdruckleitungen ist entsprechend dem DVGW-Regelwerk - abhängig von der Auslegung und den verwendeten Werkstoffen - der Nachweis der Tauglichkeit der verwendeten Werkstoffe im Rahmen von aufwändigen, bruchmechanischen Untersuchungen zu erbringen. Um diesen bisher erforderlichen Prozess zu vereinfachen, wurde vom DVGW das Forschungsprojekt SyWeSt H2 initiiert, dessen Ziel es war, das bruchmechanische Werkstoffverhalten der verwendeten Stähle zu untersuchen.

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden an einem repräsentativen Querschnitt typischer, in Deutschland (und teilweise auch in Europa) verwendeter Pipeline- und Rohrleitungsstähle bruchmechanische Prüfungen durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben für alle geprüften Leitungs- und Rohrleitungsstähle die Tauglichkeit für den Transport von Wasserstoff, da sowohl die vorgegebene Mindestbruchzähigkeit eingehalten wurde als auch das Risswachstumsverhalten den Erwartungswerten entsprach.

Hinsichtlich der Beschreibung des Risswachstums konnte - im Vergleich zum amerikanischen Standard ASME B31.12 - eine Erweiterung des Gültigkeitsbereiches abgeleitet werden. Dies betrifft insbesondere die zusätzliche Einführung des Einflusses der Mittelspannung und des Einflusses des Wasserstoffdruckes auf das Risswachstum.

Aufgrund der festgestellten - verhältnismäßig geringen - Streubreite für das Risswachstum von Materialien unterschiedlicher Festigkeit und unterschiedlichsten Alters lässt sich die Folgerung ableiten, dass auch vergleichbare Werkstoffe, die in diesem Programm nicht geprüft wurden, durch die Versuchsergebnisse abgedeckt werden. Somit konnte das angestrebte Ziel des Forschungsprojektes SyWeSt H2 für die Gruppe der Pipelinestähle und der auf Anlagen verwendeten Rohrleitungsstähle erreicht werden.

Aufgrund der erforderlichen Fokussierung des Prüfprogramms auf Pipeline- und Anlagenstähle konnten nur einige, üblicherweise für Armaturengehäuse verwendete Werkstoffe geprüft werden. Diese durchgeführten Prüfungen ergaben überwiegend ebenfalls die Tauglichkeit der Werkstoffe für die Verwendung unter Wasserstoff. Da die Bandbreite und die möglichen Gefügestände dieser häufig gegossenen Materialien jedoch im Rahmen des durchgeführten Forschungsprogramms bei weitem nicht abgedeckt werden konnten, bietet sich zumindest für diese Werkstoffgruppe die Durchführung weiterer Prüfungen an.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	3
2	Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Durchführung der bruchmechanischen Prüfungen.....	4
2.1	Versuchsaufbau zur Durchführung der bruchmechanischen Versuche in Wasserstoffatmosphäre.....	6
2.2	Zyklische Versuche: Versuchsdurchführung und Auswertung nach ASME E647 [5].....	7
2.3	Statischer Bruchmechanikversuch: Versuchsdurchführung und Auswertung nach ASTM E1820.....	9
3	Untersuchte Materialien.....	11
3.1	Werkstoff L290 NE.....	13
3.2	Werkstoff 5L Grade A.....	21
3.3	Werkstoff St35.....	22
3.4	Werkstoff 15k (St35).....	26
3.5	Werkstoff X42.....	36
3.6	Werkstoff RR St43.7.....	42
3.7	Werkstoff P355 NH/NL2.....	43
3.8	Werkstoff L360NE.....	44
3.9	Werkstoff L360NB (Schmelze 2).....	46
3.10	Werkstoff X46 / StE320.7.....	48
3.11	Werkstoff StE360.7.....	49
3.12	Werkstoff StE480.7 TM.....	55
3.13	Werkstoff L360 NB.....	56
3.14	Werkstoff 14HGS.....	62
3.15	Werkstoff WSTE 420.....	74
3.16	Werkstoff St53.7.....	75
3.17	Werkstoff X56.7.....	81
3.18	Werkstoff St60.7.....	93
3.19	Werkstoff P460 NH.....	99
3.20	Werkstoff X70.....	106
3.21	Werkstoff L485.....	108
3.22	Werkstoff L485 ME.....	127
3.23	Werkstoff L485 (Schmelze 2).....	128
3.24	Werkstoff GRS550/X80.....	136
3.25	Werkstoff L415.....	144
3.26	Werkstoff P355 NL1.....	145
3.27	Werkstoff GJS400.....	147
3.28	Werkstoff P460 QL1.....	148
3.29	Werkstoff C22.3.....	149
3.30	Werkstoff GS C25 N.....	151
3.31	Werkstoff TStE 355N.....	153
4	Ergebnisse der Rissfortschrittmessungen.....	155
4.1	Risswachstum bei $p_{H_2} = 100$ bar und $R=0.5$	155

4.2	Risswachstumsgesetz in Abhängigkeit des Wasserstoffdruckes p_{H_2}	156
4.3	Zusätzliche Berücksichtigung der Mittelspannung (R-Wert)	159
5	Ausgewählte Ergebnisse für die Bruchzähigkeit	162
5.1	Ergebnisse für $p_{H_2} = 100$ bar.....	162
5.2	Ergebnisse für $p_{H_2} < 100$ bar.....	164
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	167
7	Literaturverzeichnis	169
8	Abkürzungsverzeichnis.....	170
9	Symbolverzeichnis.....	171
10	Abbildungsverzeichnis.....	172
11	Tabellenverzeichnis.....	176

1 Aufgabenstellung

Für den Wasserstofftransport im deutschen Gasnetz ist eine klar definierte Bewertung der Stahlbauteile auf Wasserstofftauglichkeit sowie die entsprechende Implementierung im DVGW Regelwerk erforderlich. In diesem Zusammenhang wurden beispielsweise das DVGW Merkblatt G409 [1] (für die Umstellung von Leitungen auf Wasserstoff) und das DVGW Arbeitsblatt G 463 [2] (für den Neubau von Leitungen) speziell auf das Medium Wasserstoff angepasst. Beide Regelwerke erfordern gegebenenfalls eine bruchmechanische Bewertung der Leitungen und Leitungsbauteile, wobei als Eingangsgrößen bruchmechanische Kennwerte erforderlich sind.

Bisher sind diese Kennwerte in einem internationalen Regelwerk nur in dem amerikanischen Regelwerk ASME B 31.12 [3] ausgewiesen. Konkret handelt es sich dabei um die Mindestbruchzähigkeit K_{Ic} und die Beschreibung des Rissfortschrittes (da/dN) unter dem Medium Wasserstoff. Grundlage der in dem amerikanischen Regelwerk ausgewiesenen Kenngrößen waren allerdings Untersuchungen an amerikanischen Werkstoffen, welche den in Europa bzw. auch in Deutschland verwendeten Werkstoffen sehr ähnlich, aber nicht identisch sind. Zudem ist die Umstellung bereits vorhandener, älterer Erdgasleitungen - mit älteren Werkstoffen - insbesondere für den Anwendungsbereich des DVGW-Regelwerkes von sehr großem Interesse, wobei eine direkte Übertragbarkeit der Untersuchungen aus dem amerikanischen Raum als problematisch einzustufen war.

Daher wurden bruchmechanische Untersuchungen speziell für die im deutschen (und teilweise europäischen) Raum verwendeten Leitungsstähle unter dem Medium Wasserstoff im Rahmen des umfangreichen DVGW Projektes SyWeSt H2 durchgeführt. Die Zielsetzung des Programms bestand darin, die dabei ermittelten bruchmechanischen Kennwerte mit den der ASME B 31.12 zugrunde liegenden Ergebnissen zu vergleichen, um die Anwendung auf die in Deutschland verwendeten Stähle zu validieren und gegebenenfalls eine modifizierte Korrelation für den Rissfortschritt zu erarbeiten.

2 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Durchführung der bruchmechanischen Prüfungen

Der zu untersuchende Werkstoff wurde aus Rohrleitungsabschnitten von Gashochdruckleitungen mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern und Wanddicken entnommen. Neben dem Grundwerkstoff sind in dem hier behandelten Zusammenhang auch die Bereiche der Schweißnähte (Längsnähte, Spiralnähte, Baustellenrundnähte) von Interesse (Abbildung 2.1).

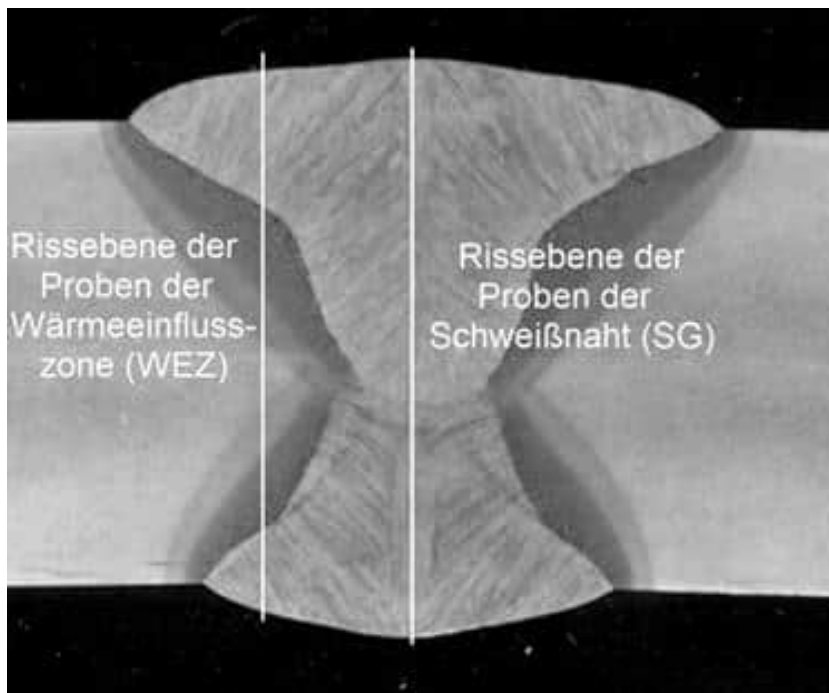


Abbildung 2.1: Querschliff eines UP-geschweißten Stahlrohres

Aufgrund der unterschiedlichen Rohrgeometrien von Gasfernleitungen ist die Probengröße für Bruchmechanikversuche eingeschränkt. Infolge der teilweise geringen Wanddicken wären Normproben so klein, dass sie technisch nicht mehr prüfbar wären und auch die Gültigkeit der Versuchsergebnisse stark eingeschränkt wäre. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sollen die Abmessungen der Proben aus verschiedenen Rohren ähnlich sein. Es wurde deshalb eine Probenform ausgewählt, die der Kontur einer C(T)20-Probe entspricht (Abbildung 2.2). In der Regel wurde - wenn möglich - eine Probendicke von 10 mm verwendet; diese Probendicke wurde in einigen Fällen (z.B. bei einer zu geringen Wanddicke) reduziert.

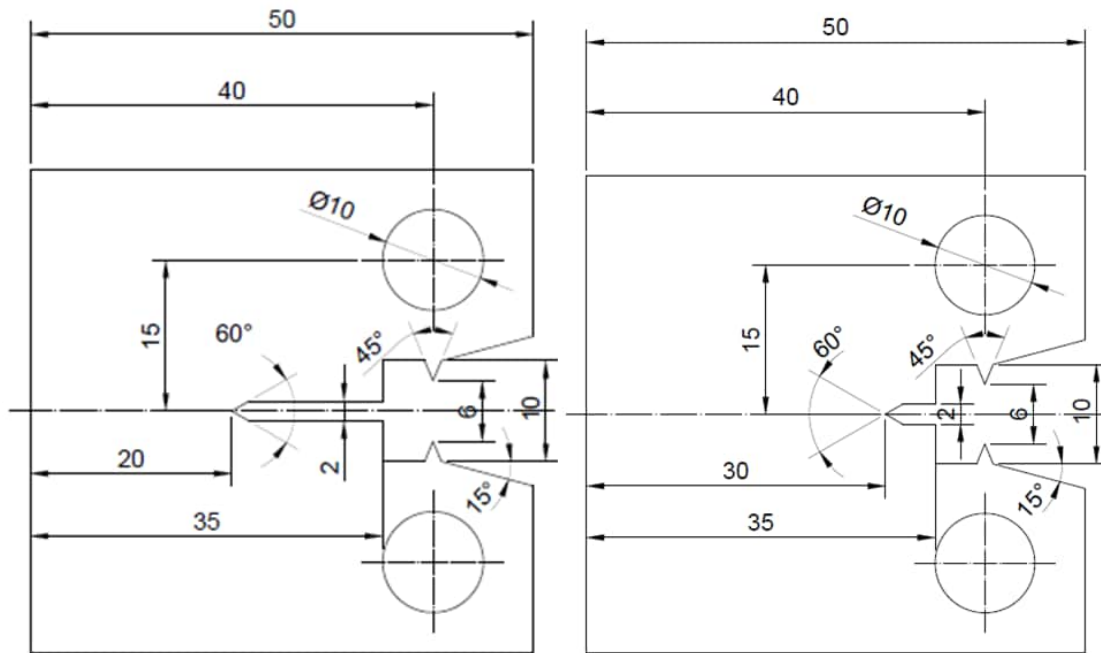


Abbildung 2.2: Probengeometrie für statische (links) und zyklische Versuche (rechts)

Die Proben wurden auf dem Rohrstück grob angerissen, ausgesägt und ein Rohling gefräst. Bei Schweißverbindungen werden die Stirnflächen zusätzlich geschliffen und angeätzt, um die Schweißnaht sichtbar zu machen. Dann wurde auf einem Anreißtisch die Kerbebene als Bezugsebene für die Fertigung festgelegt. Die Bolzenlöcher und die Kerbkontur der Proben wurden durch Drahterodieren herausgeschnitten.



Abbildung 2.3: Probenentnahme aus einem Rohr mit einer Spiralnaht

Vor der Prüfung müssen die Proben mit einem Ermüdungsanriss von etwa 2 mm versehen werden. Die Bedingungen für das Anschwingen der Proben sind in der Norm ASTM E1820-20 [4] vorgegeben. Die maximale Beanspruchung beim Anschwingen muss geringer sein als die Belastung zu Beginn des eigentlichen Versuchs. Die Proben für die zyklischen Versuche haben ein Anfangsrisstiefenverhältnis von etwa 0.3, bei dem statischen JR-Versuchen beträgt das Verhältnis etwa 0.5. Die C(T)-Proben der statischen Versuche wurden nach dem Anschwingen zur Erhöhung der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes an der Risspitze in der Rissebene 20% seitengekerbt.

2.1 Versuchsaufbau zur Durchführung der bruchmechanischen Versuche in Wasserstoffatmosphäre

Zur Ermittlung des Wasserstoffeinflusses war es erforderlich, die Proben während des Versuchs einer Druckwasserstoffatmosphäre auszusetzen.

Die Bereitstellung der Wasserstoffatmosphäre erfolgt in Autoklaven, die über eine geeignet abgedichtete Kolbenstangendurchführung das Aufbringen der Last auf die Probe ermöglichen (Abbildung 2.4).

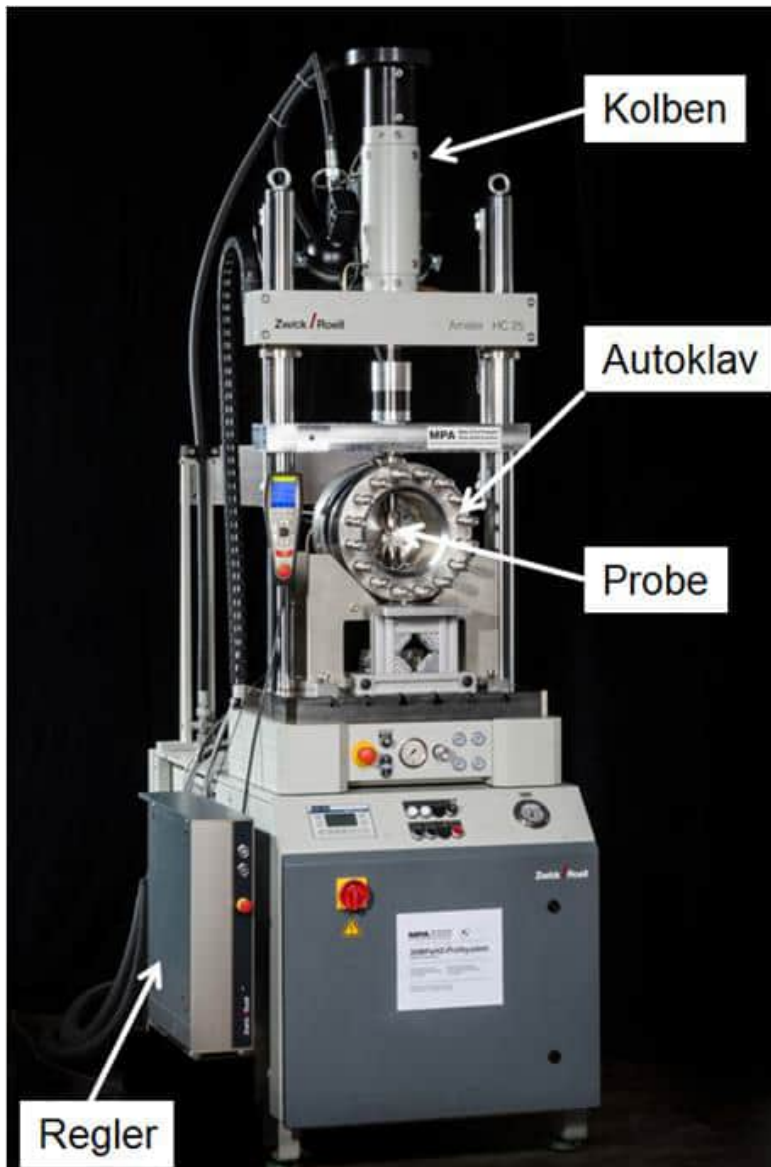


Abbildung 2.4: Servohydraulisches Prüfsystem der MPA Stuttgart mit integriertem Wasserstoffautoklaven

Vor dem Versuchsbeginn wurde die Probe im Autoklaven eingespannt und der Deckel des Autoklaven geschlossen. Durch mehrmaliges Spülen mit Wasserstoff wurde die erforderliche Gasreinheit eingestellt; anschließend wurde der Wasserstoff mit dem für die Versuchsdurchführung vorgesehenen Gasdruck zugeführt. Zur Überwachung der Versuchsparameter sind im Autoklaven Thermoelemente sowie ein Längenmessaufnehmer (Clip-Gauge)

vorhanden; die Kraftmessung erfolgte über eine außerhalb des Autoklavens installierte Kraftmessdose.

2.2 Zyklische Versuche: Versuchsdurchführung und Auswertung nach ASME E647 [5]

Aus der Beanspruchung ΔK zu Versuchsbeginn und dem Verhältnis K_{\min}/K_{\max} (R-Verhältnis) wird die Versuchslast ΔF berechnet. Der Versuch wurde lastgeregelt mit einer festgelegten Frequenz durchgeführt. Durch das Risswachstum Δa steigt bei konstanter Lastschwingbreite ΔF die zyklische Spannungsintensität ΔK an (Abbildung 2.5).

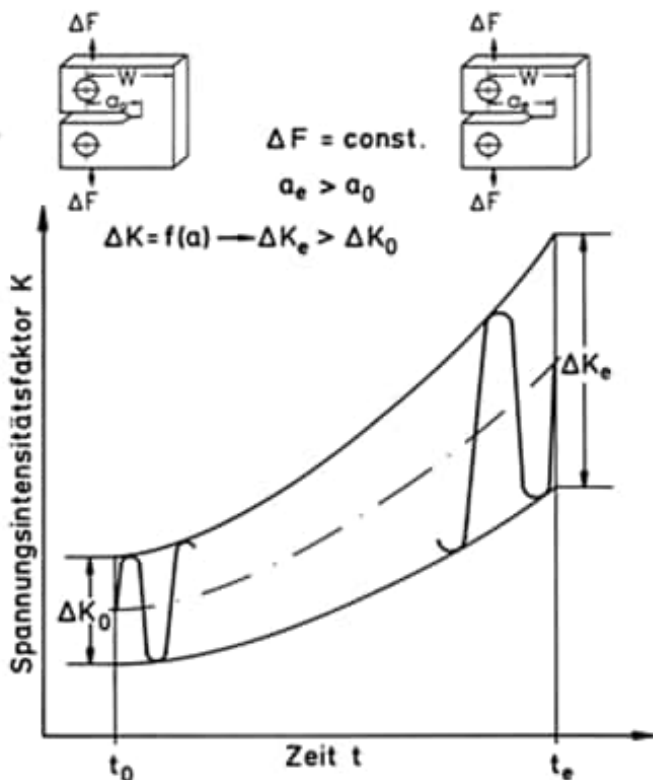


Abbildung 2.5: Ansteigen der zyklischen Spannungsintensität ΔK infolge der Rissvergrößerung

Beim festgelegten Versuchsende (Erreichen eines bestimmten ΔK -Wertes, eines bestimmten Rissfortschritts Δa oder dem Bruch der Probe) wurde der Versuch beendet und die Probe ausgebaut. Die Probe wurde zur Freilegung der Bruchfläche in flüssigem Stickstoff tiefgekühlt und in sprödem Zustand verformungsarm aufgebrochen. Auf der Bruchfläche wurden die Anfangsrisstiefe und die Endrisstiefe ausgemessen. Während des Versuchs wurden die Oberlast und die Unterlast über eine Kraftmessdose und die Werte der Rissöffnung COD über einen Clip-Gauge gemessen. Aus den Wertepaaren F_{\max} - COD_{\max} und F_{\min} - COD_{\min} ergibt sich eine Gerade, die der momentanen Steifigkeit der Probe entspricht. Durch das Risswachstum ändert sich die Steifigkeit, d.h. bei konstanten Lasten nimmt die Rissöffnung COD zu. Aus der Steifigkeit kann jeweils die aktuelle Risstiefe berechnet werden (Abbildung 2.6).

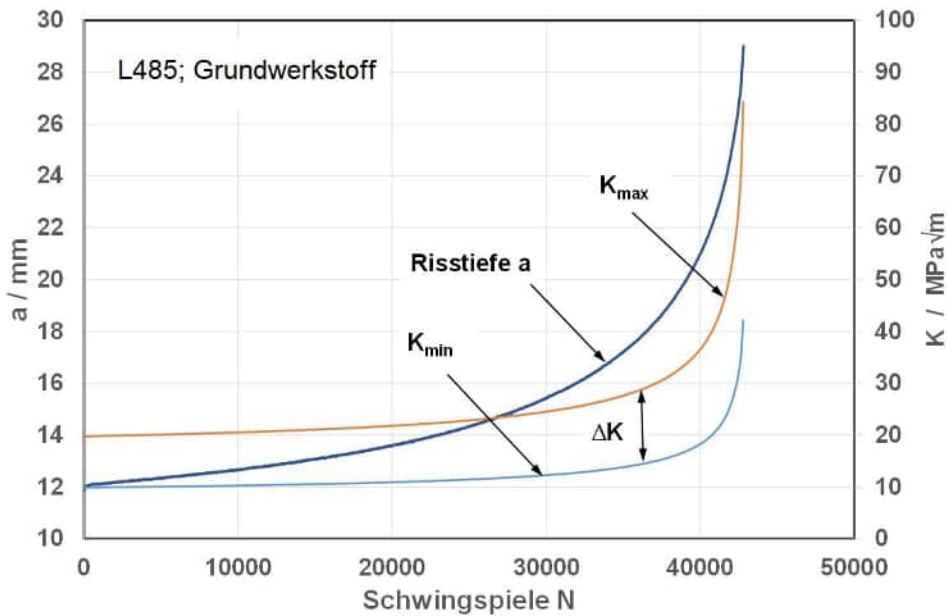


Abbildung 2.6: Risstiefe und Spannungsintensitäten K_{min} , K_{max} und ΔK in Abhängigkeit von der Anzahl der Zyklen während des Versuches

Der Zusammenhang zwischen Risstiefe und Steifigkeit wird über die Anfangsrisstiefe und die Anfangssteifigkeit kalibriert. Über die Endrisstiefe und die Endsteifigkeit wird dieser Zusammenhang überprüft und die Risswachstumswerte gegebenenfalls angepasst.

Der in der doppelt-logarithmischen Darstellung als Gerade erscheinenden Bereich der Risswachstumskurve (Abbildung 2.7: Bereich 2) kann durch die sogenannte „Paris Gleichung“

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

approximiert werden.

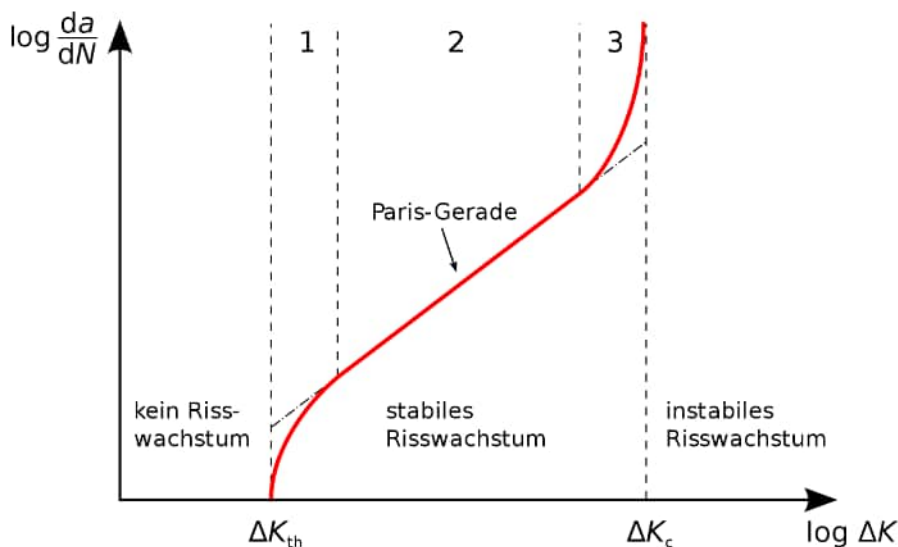


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des Risswachstums in Abhängigkeit von der zyklischen Spannungsintensität ΔK

Die Parameter C und m werden hierbei als Paris-Parameter bezeichnet. Zu niedrigeren ΔK -Werten fallen die Risswachstumsraten stärker ab (Bereich 1), bis kein messbares

Risswachstum mehr auftritt. Der zugehörige ΔK -Wert wird als Threshold-Wert bezeichnet. Bei höheren ΔK -Werten steigt die Risswachstumsrate stark an (Bereich 3). Aufgrund zunehmender (Wechsel-) Plastifizierung wird die Probe bei jedem Zyklus hierbei überelastisch verformt, bis der Riss so weit gewachsen ist, dass die Kraft F_{max} ausreicht die Probe zu zerreißen.

2.3 Statischer Bruchmechanikversuch: Versuchsdurchführung und Auswertung nach ASTM E1820

Die Probe für den statischen Bruchmechanikversuch wurde dehnungsgeregelt belastet, d.h. es wurde eine bestimmte Zunahme der Kerböffnung pro Zeiteinheit vorgegeben. Die Prüfmaschine liefert die hierfür erforderliche Last. Infolgedessen kann die Probe auch nach Durchschreiten der Höchstlast stabil weitergeprüft werden. In definierten Abständen wurde die Weiterbelastung gestoppt und die Probe um 20% der aktuellen Last teilentlastet. Dann wurde der Versuch bis zur nächsten Teilentlastung fortgesetzt (Abbildung 2.8).

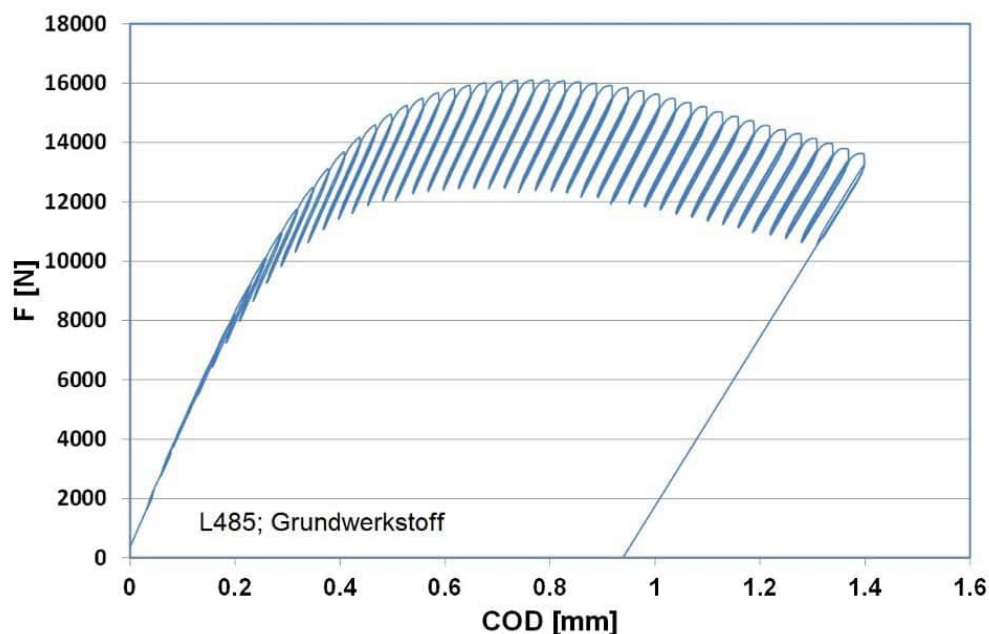


Abbildung 2.8: Last-Rissöffnungsdiagramm (F-COD)

Während des Versuches wird die Probe im Bereich der Rissspitze mehr und mehr plastisch verformt. Gleichzeitig wächst der Riss und vermindert die Tragfähigkeit der Probe. Ist der Riss ausreichend gewachsen, ohne dass die Probe zuvor gebrochen ist, wird die Probe entlastet und der Versuch beendet. Während des Versuchs wird die Last F und die Rissöffnung COD gemessen.

Die Fläche unter der F-COD-Kurve stellt die von der Probe aufgenommene Verformungsenergie dar, aus der das J-Integral berechnet wird. Aus den Teilentlastungen wird die Probensteifigkeit zu verschiedenen Stadien des Versuchs berechnet. Wie bei den zyklischen Versuchen wird aus den Steifigkeitsänderungen das Risswachstum berechnet, das mit dem nachher auf der Bruchfläche gemessenen Anfangs- und Endwert verglichen wird. Die Kombination der J- und Δa -Werte aus jeder Teilentlastung ergibt die J- Δa -Punkte. Durch die gültigen Punkte zwischen den sogenannten Offset-Lines bei 0,15 und 1,5 mm Risswachstum wird als Approximation eine Kurve der Form

$$J = A \cdot \Delta a^b$$

gelegt. Diese Kurve ist die Risswiderstandskurve oder JR-Kurve (Abbildung 2.9).

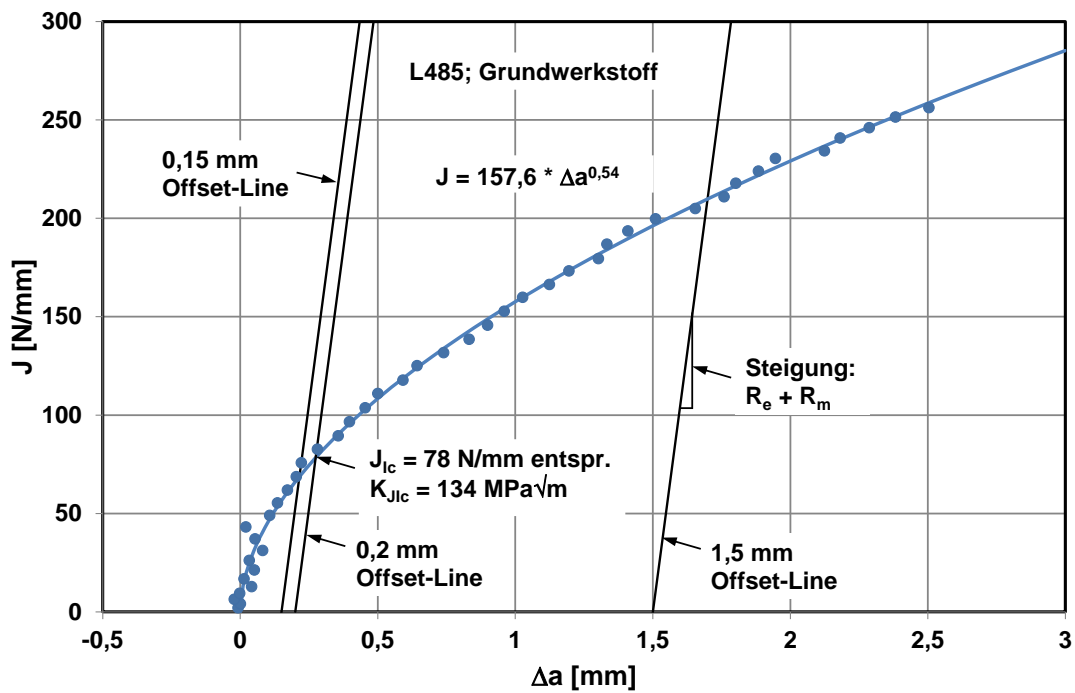


Abbildung 2.9: Risswiderstandskurve (JR-Kurve)

Mit dieser Kurve und der 0,2mm-Offset-Line wird der Bruchmechanikkennwert J_{1c} als Schnittpunkt der Kurve mit dieser Offset-Line ermittelt. Dieser J_{1c} -Wert kann formal über die Formel:

$$K_{J1c} = \sqrt{\frac{E \cdot J_{1c}}{1 - \mu^2}}$$

mit E (E-Modul $\sim 210\,000 \text{ MPa}$ und $\mu \sim 0,3$ für Stahl) bestimmt werden.

Im Gegensatz zum K_{1c} -Wert ist der K_{J1c} -Wert ein elastisch-plastischer Kennwert, der die Verformungsenergie des Versuchs beinhaltet.

3 Untersuchte Materialien

Die Abbildung 3.1 zeigt in einer zusammenfassenden Übersicht die untersuchten Materialien, die durchgeführten Untersuchungen sowie die wesentlichen Versuchsparameter.

Hierfür wurden der MPA Stuttgart mehrere Pipelinestähle und einige auf Anlagen verwendete Leitungsstähle zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurden auch einige (wenige) bei den Druckkörpern von Armaturen übliche Stähle untersucht. Das Versuchsprogramm wurde für die überwiegende Anzahl der Proben unter einem konstanten Wasserstoffdruck $p_{H_2} = 100$ bar durchgeführt.

Um den Einfluss des Wasserstoffdruckes auf die resultierenden bruchmechanischen Eigenschaften zu überprüfen, wurden an ausgesuchten Werkstoffen zusätzlich auch Prüfungen mit Wasserstoffdrücken $p_{H_2} < 100$ bar durchgeführt.

In der derzeit gültigen ASME B31.12 ist der Gültigkeitsbereich der beschriebenen Rissfortschrittgleichungen auf R-Werte ≤ 0.5 beschränkt. Aus diesem Grunde wurden darüber hinaus auch für zwei ausgewählte Werkstoffe (L360 und L485) Rissfortschrittsversuche bei R-Werten von $R = 0.1$ und $R = 0.7$ durchgeführt.

Da in der ASME B31.12 zusätzliche Begrenzungen hinsichtlich der maximalen Härte von Schweißnähten beschrieben sind, wurde außerdem auch exemplarisch an dem Werkstoff L485 der Einfluss unterschiedlicher Härten auf die bruchmechanischen Eigenschaften untersucht.

Werkstoff	Prüfung da/dN & JR	H2-Prüfdruck [bar]	R-Wert	
L290 NE	GW, SAWL	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Legende da/dN Risswachstum JR Bruchzähigkeit GW Grundwerkstoff WEZ Wärmeeinflusszone SAWL UP-Längsschweißnaht SAWH UP-Spiralschweißnaht ERW Electric Resistance Weld RN Rundschweißnaht </div>	0,5	
Grade A	GW, SAWL			
St35	GW			
15 k (St.35)	GW, SAWL, RN			
X42	GW, ERW, RN, WEZ			
RR St 43.7	GW			
P355 NH	GW			
L360 NE	GW			
StE 360.7	SAWL, GW			
L360 NB	SAWL GW			
14 HGS	GW, LN, RN			
TStE 355 N	GW			
WSTE 420	GW			
St53.7	RN, GW			
X56.7	GW, SAWL, RN			
St60.7	GW, RN			
P 460 NH	SAWL, GW			
X70	GW, SAWH, WEZ			
X70	GW, RN, WEZ			
L485	GW, SAWH, WEZ			
GRS550/X80	GW, SAWL			
L485 (HV hoch/niedrig)	GW, RN, WEZ			
L415 (Bogen)	GW, SAWL			
P355 NL1 (Armatur)	GW			
GJS 400 (Armatur)	GW			
C22.3 (Armatur)	GW			
GS C25 N (Armatur)	GW			
P460 QL1 (Armatur)	GW			
St35	GW			0 / 0,2 / 1 / 2 / 5 / 10 / 20 / 100
L485	GW			
L360 NB	GW, SG			
StE 320.7	GW, RN			10 / 100
StE 480.7 TM	GW, SAWL, RN			
L485	GW	100	0,1 / 0,5 / 0,7	
L360	GW			

Abbildung 3.1: Untersuchte Materialien

Die Bandbreite der geprüften Werkstoffe reicht vom St35 - mit relativ geringer Festigkeit - aus dem Herstellungsjahr 1930 bis zum Werkstoff GRS550 (X80). Im Rahmen der Verfügbarkeit des Versuchsmaterials wurde darauf geachtet, dass möglichst auch hinsichtlich der Festigkeitsstufe vergleichbare Werkstoffe neuer und älterer Fertigung untersucht wurden. So sind z.B. die Festigkeiten der Streckgrenze und der Zugfestigkeit der beiden Werkstoffe X70 und L485 nahezu identisch, wohingegen die Duktilitätseigenschaften und insbesondere die Kerbschlagarbeiten sich erheblich unterscheiden.

Die Auswahl des Probenmaterials folgt somit der in [6] beschriebenen Systematik (Abbildung 3.2), wonach die im Leitungsbau verwendeten Werkstoffe in Werkstoffklassen eingeteilt werden können.

Werkstoff ^[2]			
StE 210	St 34/35		Grade A
StE 240	St 37/38	L245	Grade B
StE 290	St 42/43	L290	X42
StE 320	St 47		X46
StE 360	St 52/53	L360	X52
StE 385	St 56		X56
StE 415	St 60	L415	X60
StE 445		L450	X65
StE 480	St 70	L485	X70
GRS 550		L555	X80
andere Werkstoffe			
unbekannt			
<small>[2] Andere Werkstoffe sind sinnbemäß zuzuordnen.</small>			

Abbildung 3.2: Werkstoffklassen des Leitungsbaus

Auf den nachfolgenden Seiten werden - soweit vorhanden - zu jedem untersuchten Stahl die Kenndaten, bestehend aus Baujahr, Herstellungsnorm, den speziellen Mindestkennwerten, sowie den gemessenen Kennwerten, die chemische Zusammensetzung sowie die geprüften Bruchzähigkeiten dargestellt. Im Anschluss ist der Rissfortschritt des untersuchten Stahls dargestellt. Bei ausgewählten Stählen wurden zudem Härtemessungen durchgeführt. Geprüft wurden dabei je nach Werkstoff der Grundwerkstoff, das Schweißgut, sowie die Wärmeeinflusszone. Alle gemessenen Werte beziehen sich auf eine Messung mit HV10.

3.1 Werkstoff L290 NE

Die Proben sind aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 711 mm und einer Wandstärke von 12.5 mm entnommen worden. Das Rohr ist SAW-Längsnaht-geschweißt.

Der Grundwerkstoff weist die untenstehenden Daten auf:

Tabelle 3.1: Kenndaten L290 NE

Herstellungsjahr	2020	
Herstellungsnorm	ISO 3183 (2018-09)	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	290
	R _m [MPa]	415
	K _v ¹ [J]	40
Materialkennwerte	R _e [MPa]	422
	R _m [MPa]	560
	K _v ¹ [J]	158

¹ Kerbschlag quer =90°, V-Probe nach DIN EN ISO 148-1 bei -20 °C.

Tabelle 3.2: Chemische Zusammensetzung L290 NE

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.15	0.2	1.57	0.02	0.002	0.15	0.15	0.05
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.15	0.01	0.017	0.02				

Tabelle 3.3: Bruchzähigkeiten L290 NE

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [MPa \sqrt{m}]
L290 NE	GW	39	153.4
L290 NE	SG-LN	39	156.4

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums im Dauerschwingversuch in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Dabei sind Proben aus folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut der Längsnaht (SG-LN)

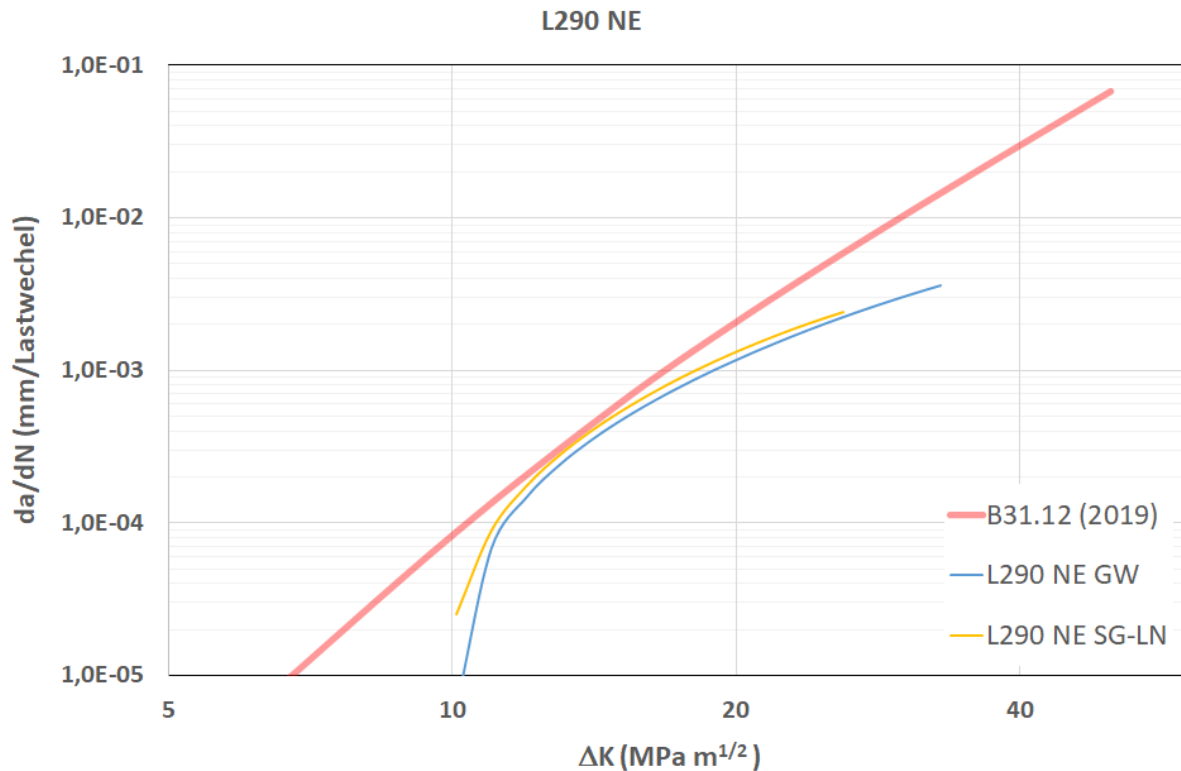


Abbildung 3.3: Rissfortschritt L290 NE

An zwei metallografischen Schliffproben der Positionsnummer 39 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.3 bis 3.8 zu entnehmen.


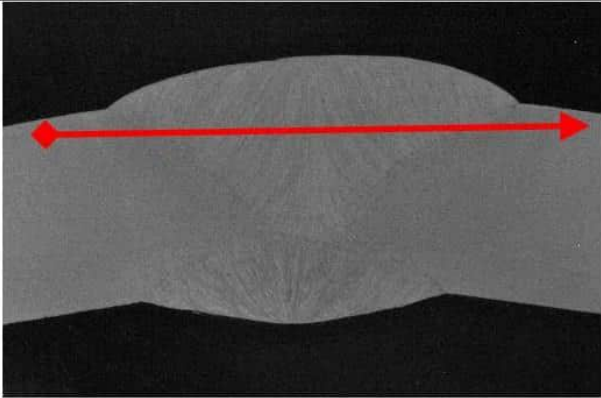
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung			Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie		
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 39.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	317,6	314,5	0,3160	186	181		GW 1
2	316,3	316,1	0,3162	185			
3	318,8	317,0	0,3179	184			
4	321,7	323,0	0,3223	178			
5	328,8	328,4	0,3286	172			
1	320,3	320,9	0,3206	180	188		WEZ 1
2	315,3	314,2	0,3148	187			
3	311,6	310,3	0,3109	192			
4	313,0	308,0	0,3105	192			
5	316,5	313,2	0,3149	187			
1	292,0	291,8	0,2919	218	202		SG
2	304,1	303,5	0,3038	201			
3	310,1	308,4	0,3093	194			
4	306,4	307,0	0,3067	197			
5	302,0	303,7	0,3028	202			
1	304,5	304,3	0,3044	200	193		WEZ 2
2	301,2	303,5	0,3023	203			
3	312,2	312,2	0,3122	190			
4	315,5	316,3	0,3159	186			
5	315,3	315,3	0,3153	187			
1	331,3	331,9	0,3316	169	176		GW 2
2	326,1	325,5	0,3258	175			
3	322,6	323,8	0,3232	178			
4	321,9	324,0	0,3230	178			
5	320,7	319,0	0,3199	181			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.4: Härtemessungen L290 NE (1)


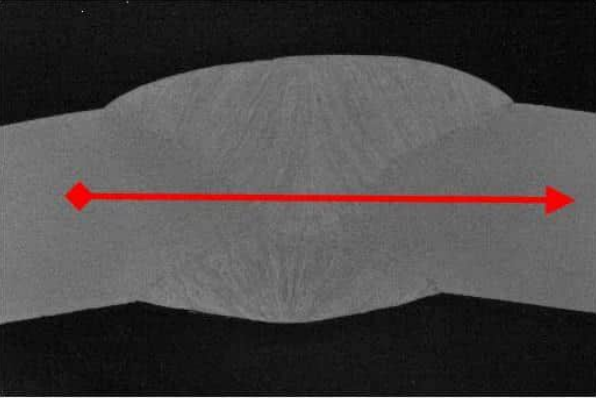
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 39.1; Mitte Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	324,8	326,5	0,3257	175	174		GW 1
2	325,9	326,7	0,3263	174			
3	326,9	326,3	0,3266	174			
4	324,4	327,3	0,3259	175			
5	325,7	329,6	0,3276	173			
1	321,1	327,9	0,3245	176	179		WEZ 1
2	321,1	317,6	0,3193	182			
3	320,3	319,4	0,3199	181			
4	320,5	320,9	0,3207	180			
5	323,6	322,8	0,3232	178			
1	316,1	316,9	0,3165	185	181		SG
2	320,3	319,7	0,3200	181			
3	318,8	319,9	0,3193	182			
4	323,4	321,5	0,3224	178			
5	325,0	322,3	0,3237	177			
1	323,8	326,3	0,3251	176	175		WEZ 2
2	330,0	330,0	0,3300	170			
3	321,9	321,5	0,3217	179			
4	324,2	323,4	0,3238	177			
5	325,5	325,5	0,3255	175			
1	340,6	339,6	0,3401	160	166		GW 2
2	339,8	342,9	0,3413	159			
3	332,5	334,6	0,3336	167			
4	328,4	329,4	0,3289	171			
5	327,9	330,6	0,3293	171			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.5: Härtemessungen L290 NE (2)


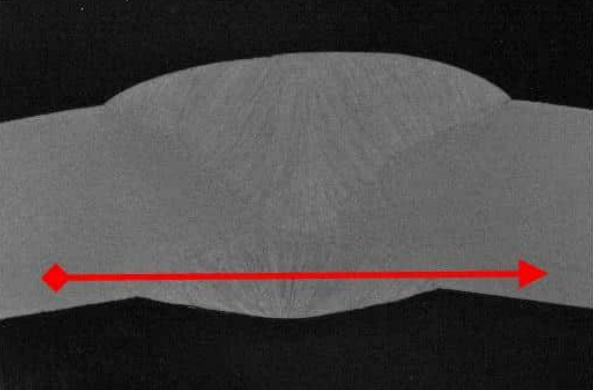
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 39.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	323,8	329,8	0,3268	174	165		GW 1
2	336,3	337,7	0,3370	163			
3	335,2	335,8	0,3355	165			
4	334,6	333,3	0,3340	166			
5	341,6	341,0	0,3413	159			
1	332,5	333,3	0,3329	167	173		WEZ 1
2	324,0	324,4	0,3242	176			
3	328,0	326,5	0,3272	173			
4	329,4	330,6	0,3300	170			
5	324,6	321,5	0,3231	178			
1	322,6	323,6	0,3231	178	175		SG
2	324,4	325,2	0,3248	176			
3	328,4	324,8	0,3266	174			
4	326,7	326,3	0,3265	174			
5	326,9	324,0	0,3255	175			
1	336,0	332,7	0,3344	166	165		WEZ 2
2	329,6	336,5	0,3330	167			
3	335,0	332,7	0,3339	166			
4	333,1	333,3	0,3332	167			
5	342,5	343,1	0,3428	158			
1	341,9	343,7	0,3428	158	162		GW 2
2	340,6	340,6	0,3406	160			
3	338,7	338,9	0,3388	162			
4	337,9	339,0	0,3384	162			
5	329,6	333,3	0,3315	169			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.6: Härtemessungen L290 NE (3)


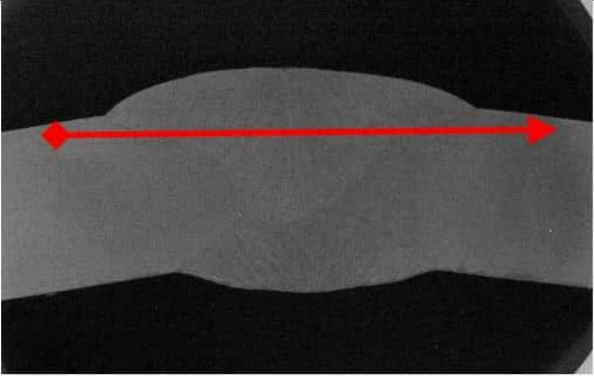
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 39.2; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	315,5	316,3	0,3159	186	186		GW 1
2	314,0	315,1	0,3146	187			
3	314,0	315,1	0,3146	187			
4	315,7	317,4	0,3165	185			
5	319,2	318,4	0,3188	182			
1	306,8	309,7	0,3082	195	194		WEZ 1
2	305,1	305,7	0,3054	199			
3	311,1	312,4	0,3118	191			
4	312,2	311,8	0,3120	191			
5	310,9	310,5	0,3107	192			
1	299,9	301,4	0,3007	205	199		SG
2	305,5	303,9	0,3047	200			
3	309,1	306,6	0,3078	196			
4	305,3	307,4	0,3064	198			
5	309,5	306,2	0,3078	196			
1	316,3	317,6	0,3170	185	188		WEZ 2
2	316,3	315,1	0,3157	186			
3	313,6	314,0	0,3138	188			
4	312,4	313,6	0,3130	189			
5	312,4	309,9	0,3111	192			
1	336,1	335,8	0,3359	164	175		GW 2
2	329,6	328,8	0,3292	171			
3	326,5	324,4	0,3255	175			
4	323,6	324,0	0,3238	177			
5	315,9	315,7	0,3158	186			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.7: Härtemessungen L290 NE (4)


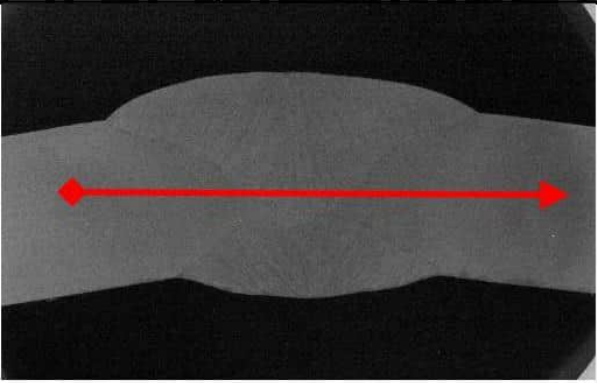
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 39.2; Mitte Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	321,5	325,0	0,3233	177	176		GW 1
2	321,7	324,0	0,3229	178			
3	327,3	324,2	0,3258	175			
4	322,8	323,4	0,3231	178			
5	325,9	327,1	0,3265	174			
1	318,8	321,7	0,3203	181	179		WEZ 1
2	319,9	319,9	0,3199	181			
3	321,3	320,9	0,3211	180			
4	323,0	319,4	0,3212	180			
5	324,6	326,9	0,3258	175			
1	316,5	315,1	0,3158	186	183		SG
2	318,4	315,3	0,3169	185			
3	317,2	316,1	0,3166	185			
4	322,3	321,5	0,3219	179			
5	322,8	320,1	0,3214	180			
1	320,7	320,7	0,3207	180	180		WEZ 2
2	320,9	319,0	0,3200	181			
3	321,3	323,6	0,3224	178			
4	319,4	319,9	0,3196	181			
5	320,3	319,9	0,3201	181			
1	341,0	341,2	0,3411	159	172		GW 2
2	330,2	332,9	0,3316	169			
3	326,1	324,8	0,3255	175			
4	321,7	322,8	0,3222	179			
5	322,5	325,5	0,3240	177			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.8: Härtemessungen L290 NE (5)


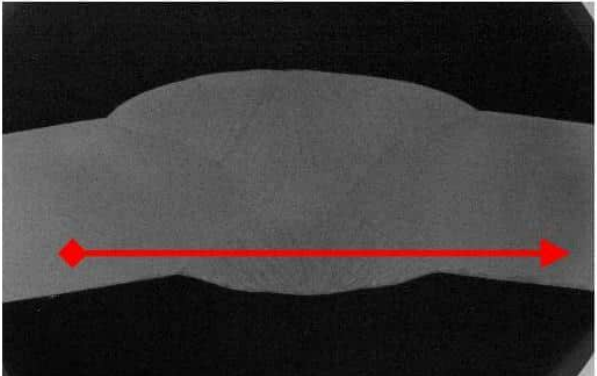
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 39.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	334,2	335,0	0,3346	166	163		GW 1
2	336,9	338,9	0,3379	162			
3	331,5	334,4	0,3329	167			
4	340,6	341,0	0,3408	160			
5	340,2	340,2	0,3402	160			
1	335,2	333,8	0,3345	166	171		WEZ 1
2	331,3	329,4	0,3303	170			
3	331,9	331,3	0,3316	169			
4	327,5	327,5	0,3275	173			
5	326,1	323,4	0,3247	176			
1	328,0	326,5	0,3272	173	174		SG
2	327,8	327,9	0,3278	173			
3	329,8	326,1	0,3279	172			
4	325,7	324,4	0,3250	176			
5	325,3	323,8	0,3245	176			
1	323,2	321,7	0,3224	178	176		WEZ 2
2	323,6	323,4	0,3235	177			
3	325,5	327,1	0,3263	174			
4	327,1	329,0	0,3281	172			
5	324,0	324,6	0,3243	176			
1	339,6	338,5	0,3391	161	166		GW 2
2	337,7	336,7	0,3372	163			
3	331,9	330,9	0,3314	169			
4	333,3	334,2	0,3338	166			
5	330,4	331,3	0,3309	169			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.9: Härtemessungen L290 NE (6)

3.2 Werkstoff 5L Grade A

Die Proben wurden einem Rohr mit 406,4 mm Durchmesser, einer Wandstärke von 10 mm und einem Rohrbogen mit einer Wandstärke von 13mm entnommen. Die Rohre sind nahtlos warmgewalzt hergestellt worden.

Die werkstoffspezifischen Daten zu diesem Werkstoff lauten:

Tabelle 3.4: Kenndaten 5L Grade A

Herstellungsjahr	1962	
Herstellungsnorm	API-STD 5L	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	207
	R _m [MPa]	331
	K _v [J]	Keine Anforderungen (k.A.)
Materialkennwerte	R _e [MPa]	297
	R _m [MPa]	422
	K _v [J]	17

Tabelle 3.5: Chemische Zusammensetzung 5L Grade A

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.15	0.14	0.57	0.017	0.02			
	Ni	V	Ti	Nb				

Tabelle 3.6: Bruchzähigkeiten 5L Grade A

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{J1c} [MPa√m]
5L Grade A (Rohr)	GW	42	109.5
5L Grade A (Bogen)	GW	42	107.4

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums im Dauerschwingversuch in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Die Proben wurden aus dem Grundwerkstoff entnommen.

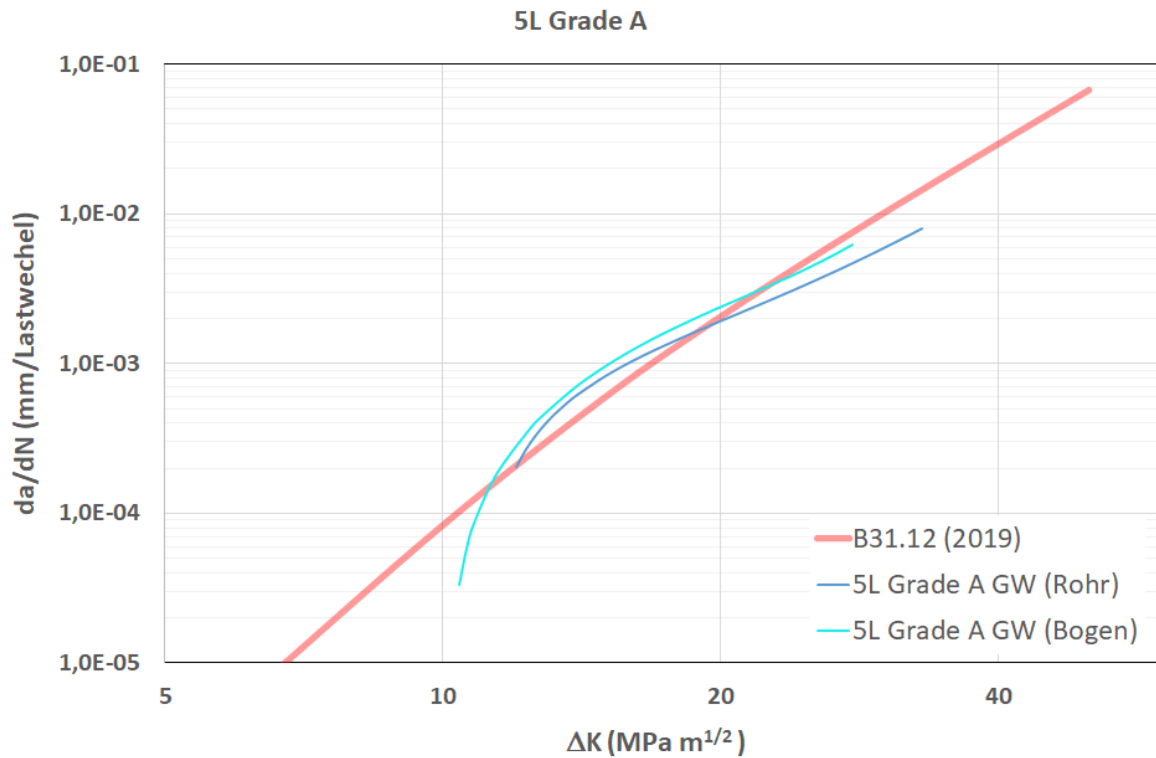


Abbildung 3.10: Rissfortschritt 5L Grade A

3.3 Werkstoff St35

Der Werkstoff St35 wurde von Leitungen aus zwei verschiedenen Baujahren geprüft.

Zunächst sind die Ergebnisse aus einer Leitung mit dem Baujahr 1930 dargestellt. Die Proben sind aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 400 mm und einer Wandstärke von 10 mm entnommen worden.

Die werkstoffspezifischen Daten lauten:

Tabelle 3.7: Kenndaten St35

Herstellungsjahr	1930	
Herstellungsnorm	DIN 1629	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	235
	R _m [MPa]	350
	K _v [J]	k.A.
Materialkennwerte	R _e [MPa]	294
	R _m [MPa]	458
	K _v ² [J]	10

² Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN 10045, V-Kerbe, Umfangsrichtung

Tabelle 3.8: Chemische Zusammensetzung St35

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.199	0.268	0.612	0.059	0.015	0.11	0.004	0.009
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.017	0.001	0.002	0.001				

Tabelle 3.9: Bruchzähigkeiten St35

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
St35	GW (100 bar)	1	101.9
St35	GW (20 bar)	31	96.1
St35	GW (10 bar)	30	100.8
St35	GW (5 bar)	29	133.3
St35	GW (2 bar)	28	135
St35	GW (1 bar)	27	148.1
St35	GW (0,2 bar)	26	147.3
St35	GW (Luft)	25	170.5

Für den Dauerschwingversuch in einer reinen Wasserstoffatmosphäre bei 100 bar Überdruck, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von 0,5 sind die Proben aus dem Grundwerkstoff erstellt worden. Die zugehörige Kennlinie des Rissfortschritts ist im Folgenden abgebildet.

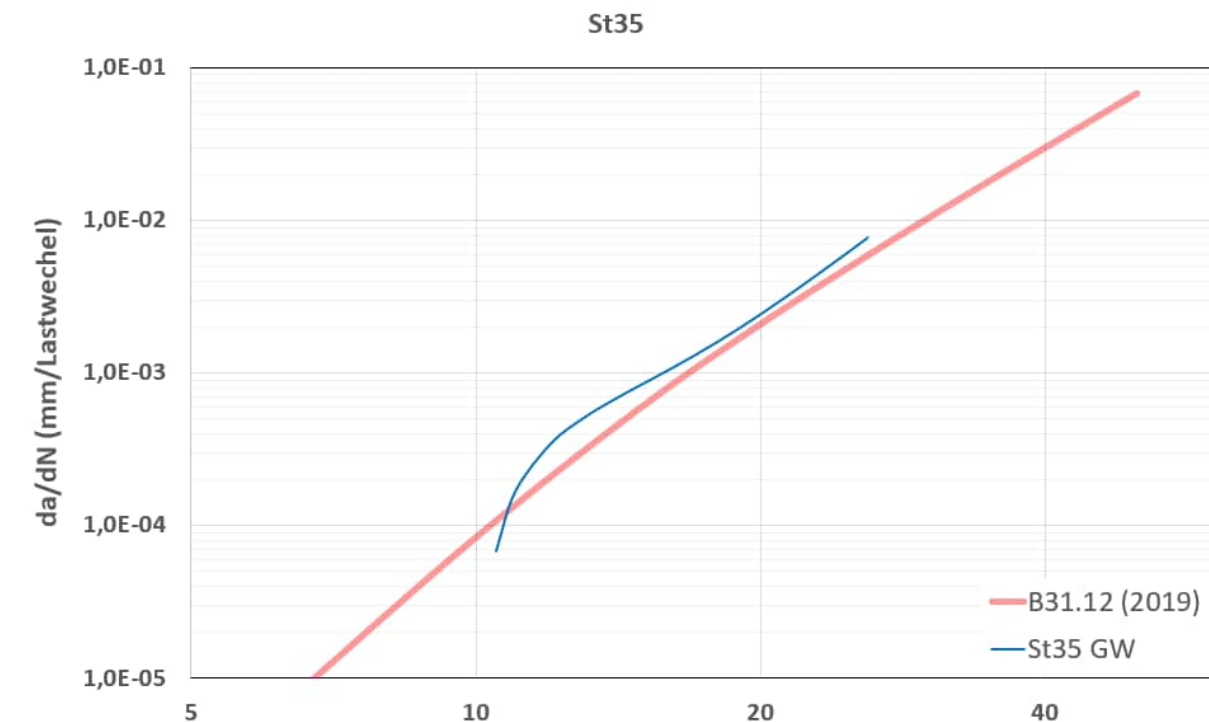


Abbildung 3.11: Rissfortschritt St35

Zusätzlich wurde der Werkstoff unter verschiedenen Drücken von Wasserstoff $p = 0$ bar, $p = 0.2$ bar, $p = 1$ bar, $p = 2$ bar, $p = 5$ bar, $p = 10$ bar und $p = 20$ bar untersucht. Die Ergebnisse der Rissfortschrittsmessungen sind nachfolgend dargestellt.

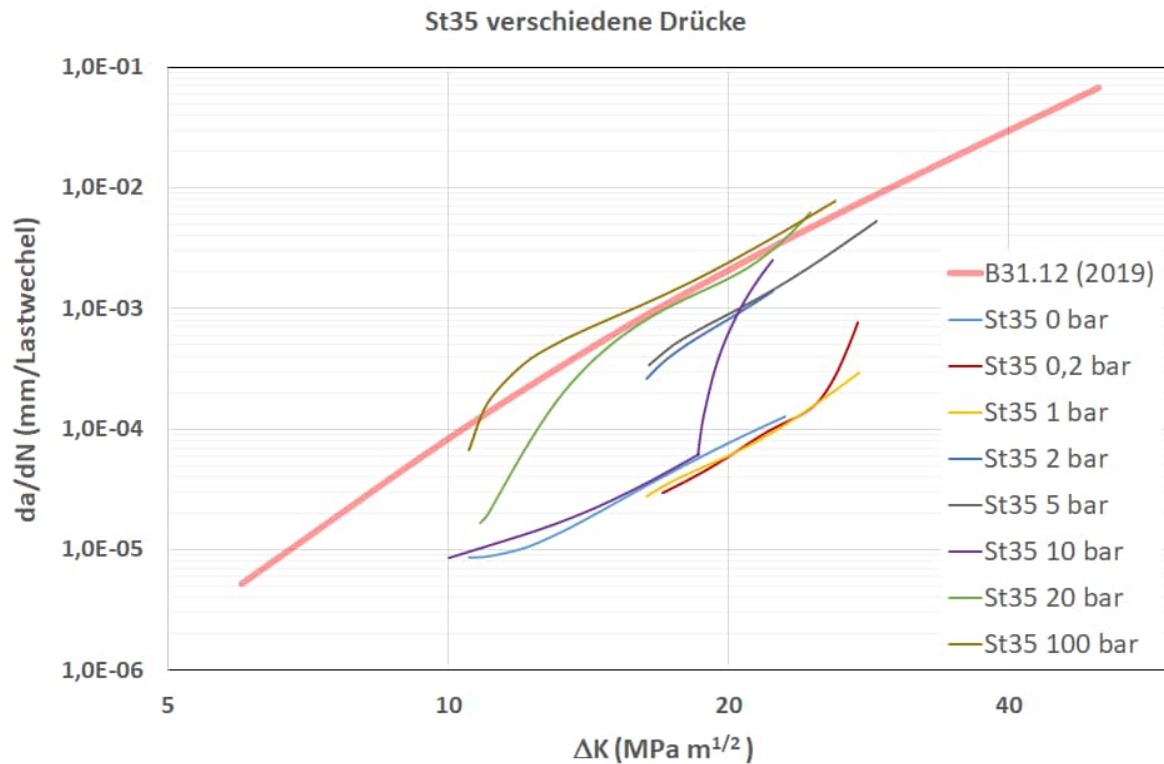


Abbildung 3.12: Rissfortschritt St35 unter verschiedenen Drücken

Für den Werkstoff St35 wurden weitere Proben aus Rohren mit dem Baujahr 1937 entnommen. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

Die Proben sind aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 323 mm und einer Wandstärke von 7,75 mm entnommen worden.

Die werkstoffspezifischen Daten lauten:

Tabelle 3.10: Kenndaten St35

Herstellungsjahr	1937	
Herstellungsnorm	DIN 1629	
Spez. min. Kennwerte	R_e [MPa]	235
	R_m [MPa]	350
	K_v [J]	k.A.
Materialkennwerte	R_e [MPa]	347
	R_m [MPa]	490
	K_v^3 [J]	94

³ Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN 10045, V-Kerbe, Charpy längs

Tabelle 3.11: chemische Zusammensetzung St35

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.116	0.13	0.4	0.032	0.017	0.065	0.02	0.005
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.032	0.001	0.001	0.001				

Tabelle 3.12: Bruchzähigkeiten St35

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
St35	GW (100 bar)	41	111.6
St35	GW (20 bar)	41	111.6
St35	GW (10 bar)	41	125.3
St35	GW (5 bar)	41	151.1
St35	GW (2 bar)	41	135
St35	GW (1 bar)	41	140.9
St35	GW (0,2 bar)	41	140.9
St35	GW (Luft)	41	173.9

Der Werkstoff wurde bei verschiedenen Drücken von Wasserstoff $p = 0$ bar, $p = 0,2$ bar, $p = 1$ bar, $p = 2$ bar, $p = 5$ bar, $p = 10$ bar, $p = 20$ bar und $p = 100$ bar untersucht. Die Kennlinien für den Rissfortschritt sind nachfolgend dargestellt.

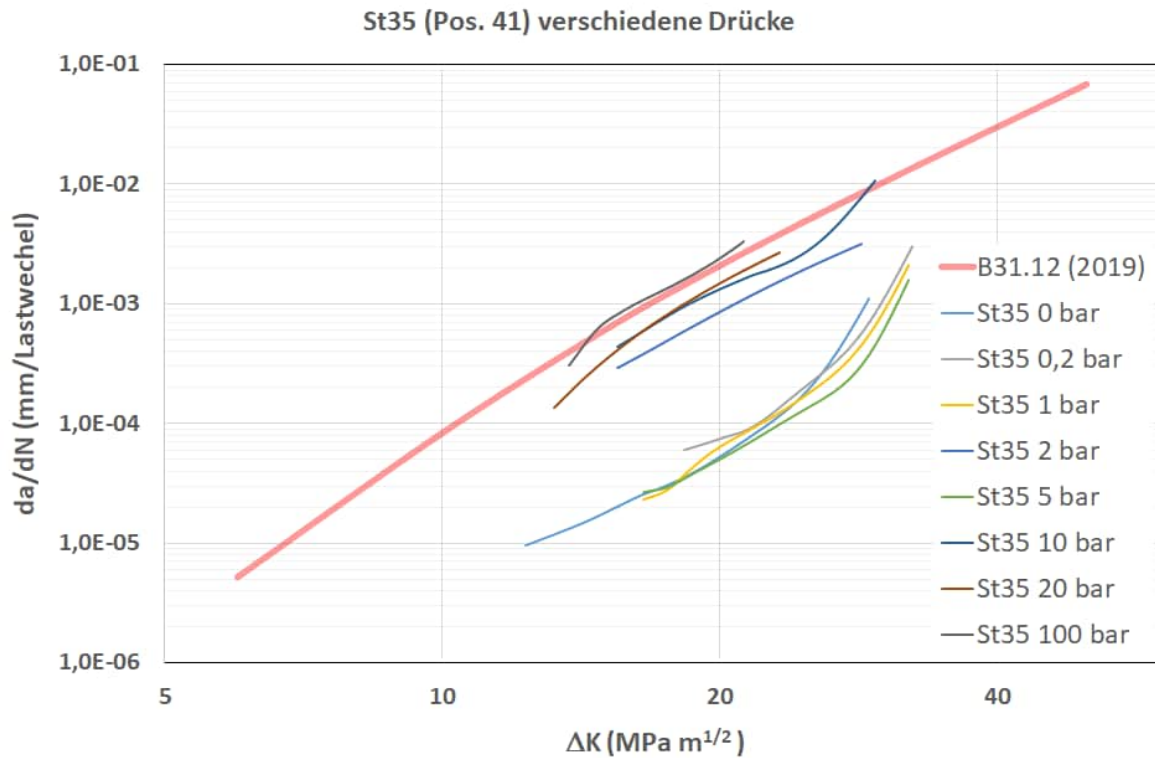


Abbildung 3.13: Rissfortschritt St35 (Pos.41) unter verschiedenen Drücken

3.4 Werkstoff 15k (St35)

Die Proben wurden einem Rohr mit einem Durchmesser von 420 mm und einer Wandstärke von 8 mm entnommen.

Die Kennwerte lauten:

Tabelle 3.13: Kenndaten 15k (St35)

Herstellungsjahr	1955	
Herstellungsnorm	GOST 5520-79	
Spez. min. Kennwerte	R_e [MPa]	225
	R_m [MPa]	370
	K_v^4 [J]	39
Materialkennwerte	R_e [MPa]	316
	R_m [MPa]	458
	K_v [J]	n.g.

⁴ Kerbschlag quer =90°, V-Probe nach DIN EN ISO 148-1 bei 0 °C.

Tabelle 3.14: Chemische Zusammensetzung 15k (St35)

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.16	0.13	0.42	0.013	0.043	0.14	0.02	
	Ni	V	Ti	Nb				

Tabelle 3.15: Bruchzähigkeiten 15k (St35)

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
15k (St35)	GW	23	98.4
15k (St35)	SG	23	99.6

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums im Dauerschwingversuch in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Dabei sind Proben aus folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Längsnaht (LN)

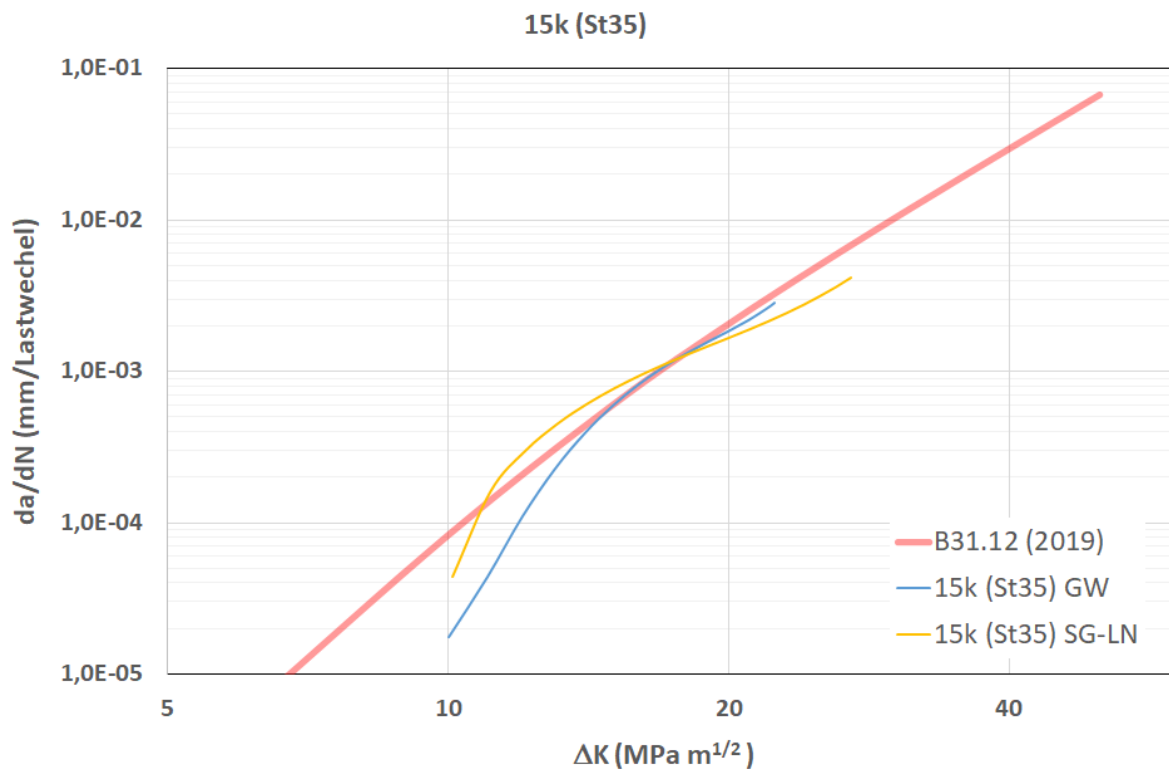


Abbildung 3.14: Rissfortschritt 15k (St35)

An vier metallografischen Schliffproben der Positionsnummer 23 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.14 bis 3.20 zu entnehmen.


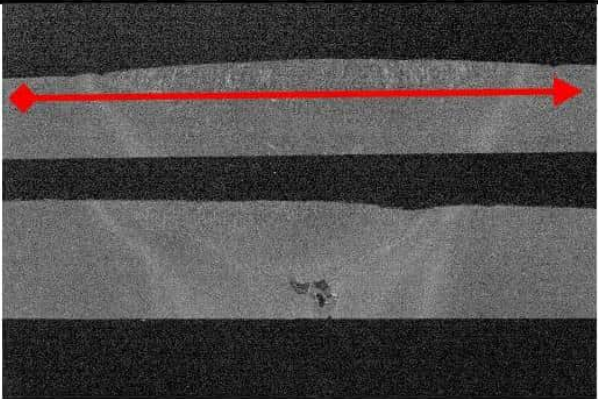
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 23A5S-1 (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	354,3	359,1	0,3567	146	142		GW 1
2	360,5	361,2	0,3608	142			
3	355,3	358,2	0,3568	146			
4	363,7	368,2	0,3659	138			
5	362,8	367,0	0,3649	139			
1	358,5	357,8	0,3581	145	147		WEZ 1
2	358,0	354,7	0,3564	146			
3	353,1	354,3	0,3537	148			
4	354,3	356,6	0,3555	147			
5	354,1	352,0	0,3531	149			
1	343,9	343,5	0,3437	157	155		SG
2	340,8	338,6	0,3397	161			
3	346,4	348,3	0,3474	154			
4	356,0	352,4	0,3542	148			
5	345,6	341,9	0,3437	157			
1	355,3	362,6	0,3590	144	149		WEZ 2
2	344,5	349,3	0,3469	154			
3	347,5	352,3	0,3499	151			
4	351,8	352,0	0,3519	150			
5	353,9	358,3	0,3561	146			
1	354,7	355,3	0,3550	147	142		GW 2
2	354,3	357,4	0,3559	146			
3	363,4	364,9	0,3642	140			
4	363,7	367,6	0,3656	139			
5	365,3	370,5	0,3679	137			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.15: Härtemessungen 15k (St35) (1)


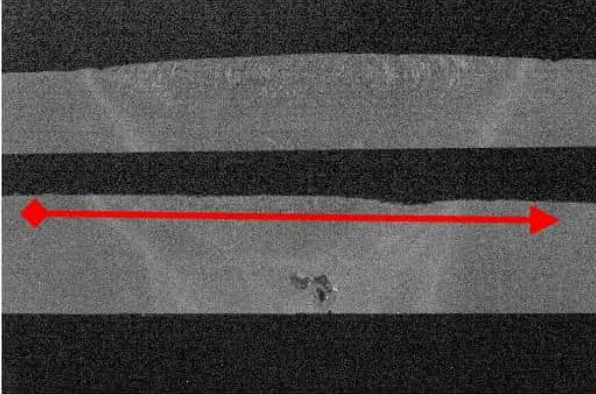
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung			Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie		
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 23A5S-2 (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV			
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	347,7	355,8	0,3517	150	148		GW 1
2	352,3	353,1	0,3527	149			
3	351,6	354,3	0,3530	149			
4	356,4	359,5	0,3579	145			
5	350,6	353,9	0,3522	149			
1	362,2	363,9	0,3630	141	146		WEZ 1
2	353,9	355,4	0,3546	147			
3	355,1	357,2	0,3562	146			
4	354,1	353,3	0,3537	148			
5	353,7	354,9	0,3543	148			
1	352,6	348,9	0,3508	151	151		SG
2	352,0	346,0	0,3490	152			
3	352,4	351,6	0,3520	150			
4	354,7	353,3	0,3540	148			
5	350,2	347,0	0,3486	153			
1	367,2	369,3	0,3682	137	147		WEZ 2
2	352,4	350,4	0,3514	150			
3	353,9	352,4	0,3532	149			
4	353,5	350,8	0,3521	150			
5	352,9	352,4	0,3527	149			
1	360,9	359,7	0,3603	143	147		GW 2
2	353,7	359,7	0,3567	146			
3	349,3	352,7	0,3510	151			
4	351,0	353,1	0,3520	150			
5	351,8	356,6	0,3542	148			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.16: Härtemessungen 15k (St35) (2)


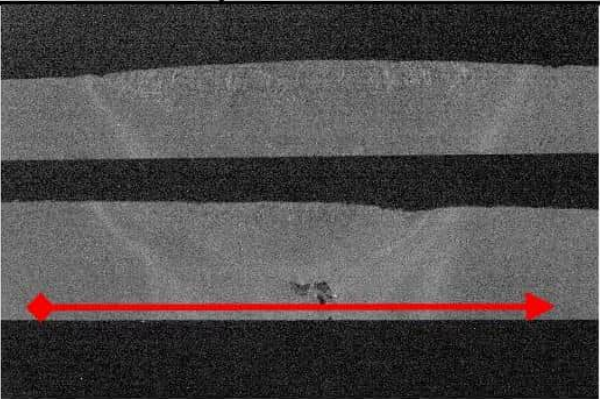
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 23A5S-2 (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	359,5	365,1	0,3623	141	144		GW 1
2	362,6	369,9	0,3663	138			
3	357,6	362,0	0,3598	143			
4	361,4	364,7	0,3630	141			
5	340,0	348,1	0,3440	157			
1	374,7	363,2	0,3689	136	146		WEZ 1
2	353,7	351,0	0,3523	149			
3	352,9	351,4	0,3521	150			
4	353,7	352,4	0,3531	149			
5	356,0	353,5	0,3547	147			
1	343,9	340,6	0,3423	158	159		SG
2	342,1	344,3	0,3432	157			
3	336,9	335,8	0,3364	164			
4	337,9	338,7	0,3383	162			
5	348,3	347,9	0,3481	153			
1	356,0	355,5	0,3558	147	148		WEZ 2
2	353,7	352,0	0,3529	149			
3	353,9	353,5	0,3537	148			
4	351,8	351,2	0,3515	150			
5	356,6	357,6	0,3571	145			
1	364,7	365,9	0,3653	139	142		GW 2
2	356,2	359,5	0,3578	145			
3	356,8	367,6	0,3622	141			
4	359,5	361,4	0,3604	143			
5	358,7	363,2	0,3610	142			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.17: Härtemessungen 15k (St35) (3)


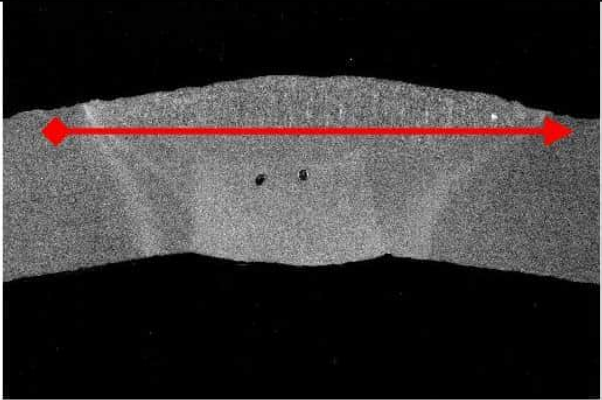
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 23C.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	355,8	362,8	0,3593	144	145		GW 1
2	355,3	361,4	0,3584	144			
3	348,7	355,6	0,3521	150			
4	352,7	360,7	0,3567	146			
5	357,6	364,7	0,3612	142			
1	347,3	353,5	0,3504	151	156		WEZ 1
2	341,6	343,1	0,3424	158			
3	341,2	345,0	0,3431	158			
4	341,6	345,4	0,3435	157			
5	342,9	346,6	0,3448	156			
1	331,9	328,0	0,3299	170	175		SG
2	325,0	328,8	0,3269	174			
3	325,9	330,0	0,3280	172			
4	327,3	316,7	0,3220	179			
5	322,5	322,3	0,3224	178			
1	347,7	353,3	0,3505	151	153		WEZ 2
2	344,3	350,8	0,3476	154			
3	351,2	344,8	0,3480	153			
4	347,9	350,0	0,3489	152			
5	344,6	347,0	0,3458	155			
1	359,7	361,4	0,3605	143	147		GW 2
2	353,7	357,0	0,3553	147			
3	352,9	359,9	0,3564	146			
4	352,2	354,7	0,3535	148			
5	352,7	354,9	0,3538	148			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.18: Härtemessungen 15k (St35) (4)


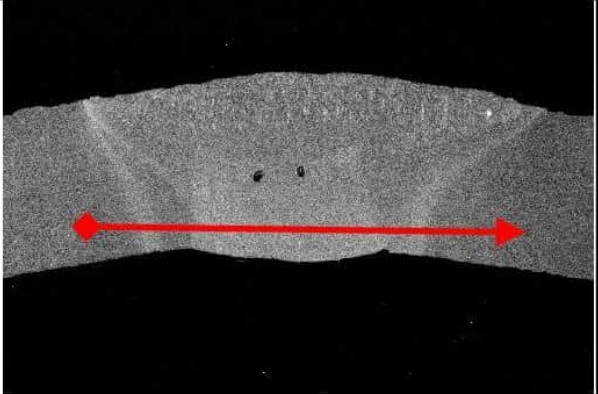
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 23C.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	344,8	349,8	0,3473	154	149		GW 1
2	343,3	346,0	0,3447	156			
3	348,9	357,6	0,3533	149			
4	357,4	364,9	0,3612	142			
5	357,6	360,7	0,3592	144			
1	349,9	350,2	0,3501	151	154		WEZ 1
2	352,6	349,8	0,3512	150			
3	343,5	349,1	0,3463	155			
4	341,0	343,1	0,3420	158			
5	344,4	343,8	0,3441	157			
1	332,3	330,6	0,3315	169	166		SG
2	333,3	334,8	0,3341	166			
3	338,9	336,3	0,3376	163			
4	335,2	334,0	0,3346	166			
5	335,2	335,8	0,3355	165			
1	345,6	344,1	0,3449	156	157		WEZ 2
2	353,1	352,0	0,3525	149			
3	341,1	340,8	0,3410	160			
4	340,8	339,5	0,3402	160			
5	342,3	343,7	0,3430	158			
1	362,0	363,9	0,3629	141	140		GW 2
2	363,9	371,5	0,3677	137			
3	365,7	367,8	0,3668	138			
4	363,4	365,7	0,3646	140			
5	355,6	359,5	0,3575	145			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.19: Härtemessungen 15k (St35) (5)


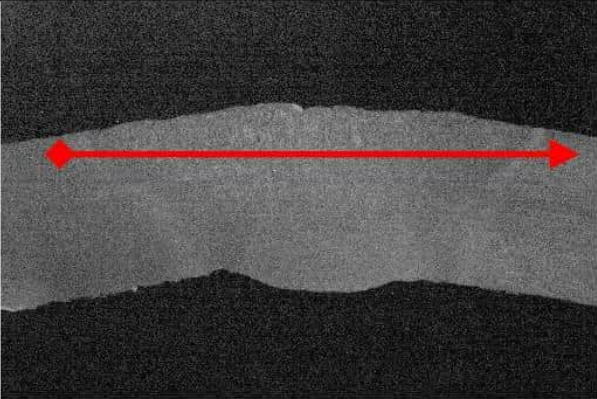
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 23C.2; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	353,7	358,0	0,3559	146	148		GW 1
2	346,4	349,1	0,3478	153			
3	354,5	359,3	0,3569	146			
4	352,9	359,1	0,3560	146			
5	354,1	356,4	0,3552	147			
1	332,8	332,8	0,3328	167	170		WEZ 1
2	331,9	329,6	0,3308	170			
3	330,6	330,8	0,3307	170			
4	333,1	329,6	0,3314	169			
5	327,3	329,0	0,3282	172			
1	316,4	321,5	0,3189	182	182		SG
2	324,2	318,6	0,3214	180			
3	320,3	315,9	0,3181	183			
4	322,1	320,5	0,3213	180			
5	320,7	315,7	0,3182	183			
1	347,0	342,9	0,3450	156	159		WEZ 2
2	344,1	344,1	0,3441	157			
3	339,2	339,6	0,3394	161			
4	343,9	336,7	0,3403	160			
5	340,8	340,4	0,3406	160			
1	354,3	359,9	0,3571	145	145		GW 2
2	357,6	364,3	0,3609	142			
3	357,2	358,9	0,3580	145			
4	355,3	361,6	0,3585	144			
5	353,9	358,0	0,3560	146			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.20: Härtemessungen 15k (St35) (6)


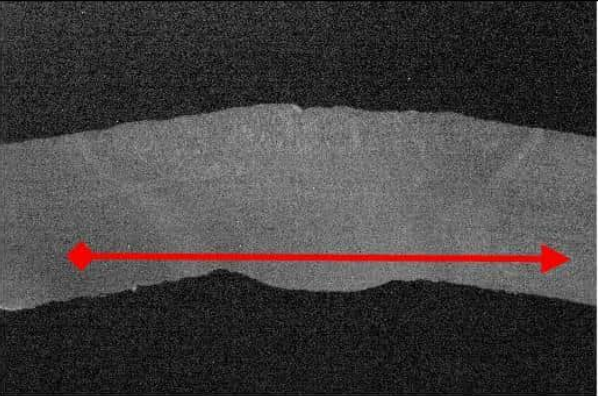
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 23C.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	342,5	346,2	0,3444	156	152		GW 1
2	343,9	350,4	0,3472	154			
3	350,6	350,8	0,3507	151			
4	354,1	353,7	0,3539	148			
5	349,6	352,7	0,3511	150			
1	330,9	329,8	0,3303	170	156		WEZ 1
2	344,6	343,1	0,3438	157			
3	354,1	351,4	0,3528	149			
4	354,7	351,8	0,3533	149			
5	347,9	346,8	0,3474	154			
1	335,8	333,1	0,3345	166	168		SG
2	335,0	329,2	0,3321	168			
3	335,2	330,6	0,3329	167			
4	329,8	326,5	0,3282	172			
5	333,1	329,6	0,3314	169			
1	347,5	342,3	0,3449	156	155		WEZ 2
2	344,3	340,2	0,3423	158			
3	348,7	344,8	0,3467	154			
4	347,3	343,1	0,3452	156			
5	350,2	346,0	0,3481	153			
1	348,1	353,3	0,3507	151	152		GW 2
2	346,2	349,5	0,3479	153			
3	348,9	351,4	0,3502	151			
4	346,2	352,0	0,3491	152			
5	340,8	351,0	0,3459	155			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.21: Härtemessungen 15k (St35) (7)

3.5 Werkstoff X42

Die Proben sind aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 406 mm und einer Wandstärke von 9 mm entnommen worden. Das Rohr ist ERW-Längsnaht-geschweißt.

Tabelle 3.16: Kenndaten X42

Herstellungsjahr	1961	
Herstellungsnorm	DIN 2470 / API-Sondervorschriften (API 5 LX)	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	289 (29.5 kg/mm ²)
	R _m [MPa]	414 (42.2 kg/mm ²)
	K _v /A [kgm/cm ²]	4
Materialkennwerte	R _e [MPa]	297 (30.3 kg/mm ²)
	R _m [MPa]	466 (47.6 kg/mm ²)
	K _v ⁵ /A [kgm/cm ²]	5

Tabelle 3.17: Chemische Zusammensetzung X42

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.17	0.24	0.65	0.013	0.042			
	Ni	V	Ti	Nb				

Tabelle 3.18: Bruchzähigkeiten X42

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
X42	GW	3	88.6
X42	RN	3	118.6
X42	RN-WEZ	3	115.7
X42	ERW1/2	3	104.1/105.2

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums im Dauerschwingversuch in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei sind Proben aus folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- ERW-Längsnaht (ERW)
- Rundnaht (RN)
- Wärmeeinflusszone der Rundnaht (WEZ)

⁵ Kerbschlag quer =0° DVM nach DIN 50116

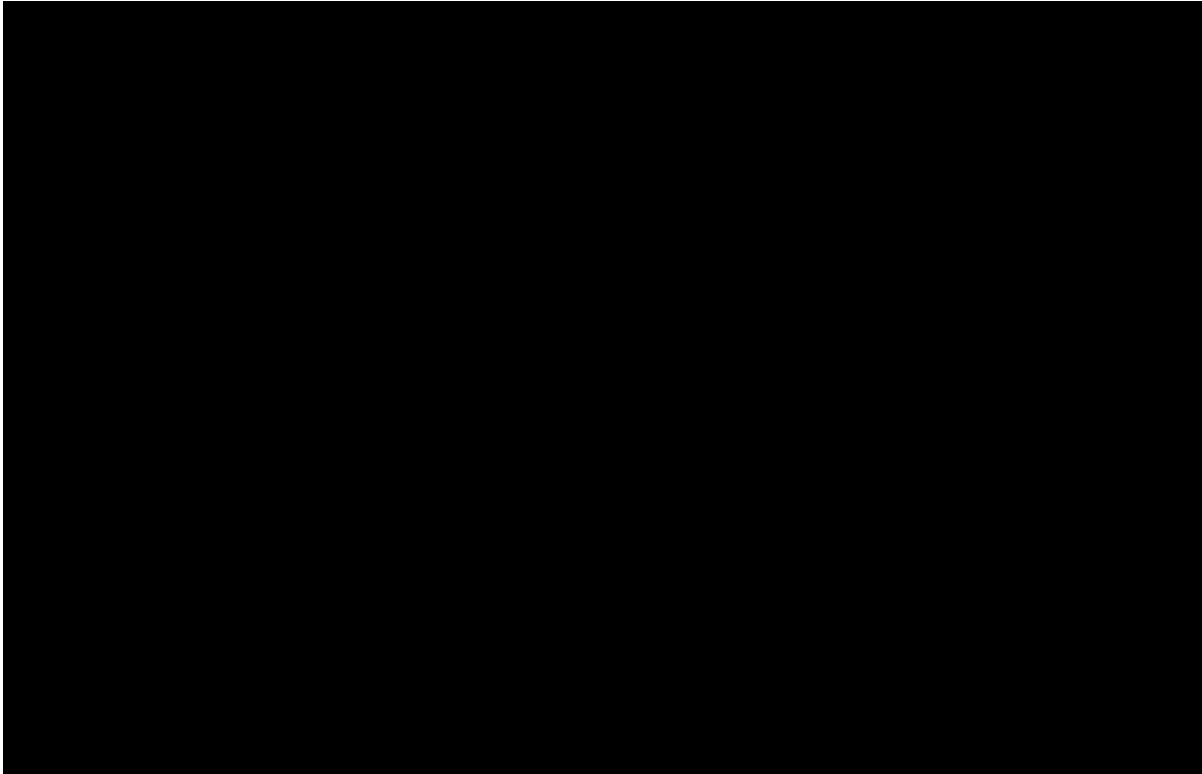


Abbildung 3.22: Rissfortschritt X42

An zwei metallografischen Schliffproben der Positionsnummer 3 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.22 bis 3.25 zu entnehmen.


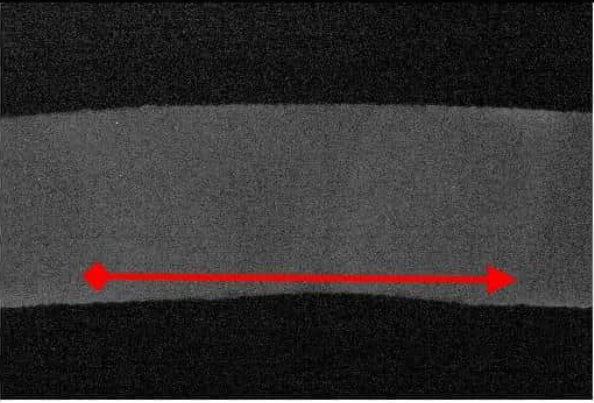
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 3 LN-1 (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	311,5	318,2	0,3149	187			
2	313,0	320,1	0,3165	185			
3	317,4	321,5	0,3194	182			
4	316,7	323,4	0,3201	181			
5	315,7	318,8	0,3173	184			
6	319,0	323,2	0,3211	180			
7	319,9	324,4	0,3221	179			
8	320,5	325,2	0,3229	178			
9	321,9	323,0	0,3224	178			
10	318,6	324,2	0,3214	180			
11	318,0	322,3	0,3202	181			
12	318,4	321,7	0,3201	181			
13	317,0	314,0	0,3155	186			
14	311,6	311,1	0,3113	191			
15	320,5	322,3	0,3214	180			
16	319,0	320,9	0,3200	181			
17	317,6	321,7	0,3196	181			
18	317,8	321,3	0,3195	182			
19	318,8	321,7	0,3203	181			
20	320,3	322,5	0,3214	180			
21	319,6	322,1	0,3209	180			
22	313,2	317,8	0,3155	186			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.24: Härtemessungen X42 (2)


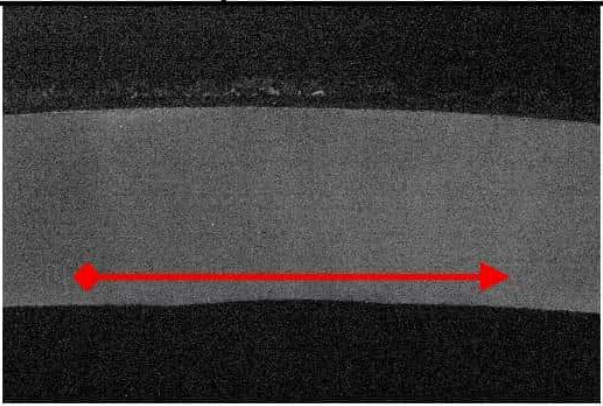
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 3 LN-2 (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23±/5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	306,4	314,0	0,3102	193			
2	306,8	314,2	0,3105	192			
3	307,8	313,4	0,3106	192			
4	308,4	312,8	0,3106	192			
5	310,5	312,6	0,3116	191			
6	314,7	318,8	0,3167	185			
7	318,2	320,3	0,3192	182			
8	319,9	322,3	0,3211	180			
9	318,2	322,4	0,3203	181			
10	318,0	320,9	0,3194	182			
11	319,2	320,3	0,3198	181			
12	318,6	320,7	0,3196	181			
13	321,9	323,0	0,3224	178			
14	315,9	313,8	0,3149	187			
15	319,8	318,2	0,3190	182			
16	317,4	322,8	0,3201	181			
17	320,3	323,8	0,3220	179			
18	319,4	323,0	0,3212	180			
19	320,3	323,2	0,3217	179			
20	320,1	321,1	0,3206	180			
21	317,8	323,2	0,3205	181			
22	316,1	323,0	0,3195	182			
23	316,3	323,4	0,3199	181			
24	314,7	323,2	0,3189	182			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.26: Härtemessungen X42 (4)

3.6 Werkstoff RR St43.7

Die Proben wurden einem Rohr mit einem Durchmesser von 406,4 mm und einer Wandstärke von 14,2 mm entnommen. Die Rohre sind nahtlos gefertigt.

Die spezifischen Werkstoffdaten hierzu sind:

Tabelle 3.19: Kenndaten RR St43.7

Herstellungsjahr	1972	
Herstellungsnorm	DIN 17172	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	294
	R _m [MPa]	422
	K _v /A [kgm/cm ²]	4
Materialkennwerte	R _e [MPa]	318
	R _m [MPa]	487
	K _v /A [kgm/cm ²]	n.g.

Tabelle 3.20: Chemische Zusammensetzung RR St43.7

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.17	0.26	0.93	0.0025	0.0017			
	Ni	V	Ti	Nb				

Tabelle 3.21: Bruchzähigkeiten RR St43.7

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
RR St43.7	GW	22	101.9

Für den Dauerschwingversuch in einer reinen Wasserstoffatmosphäre bei 100 bar Überdruck, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von 0.5 sind die Proben aus dem Grundwerkstoff erstellt worden. Das ermittelte Risswachstum ist im Folgenden abgebildet.

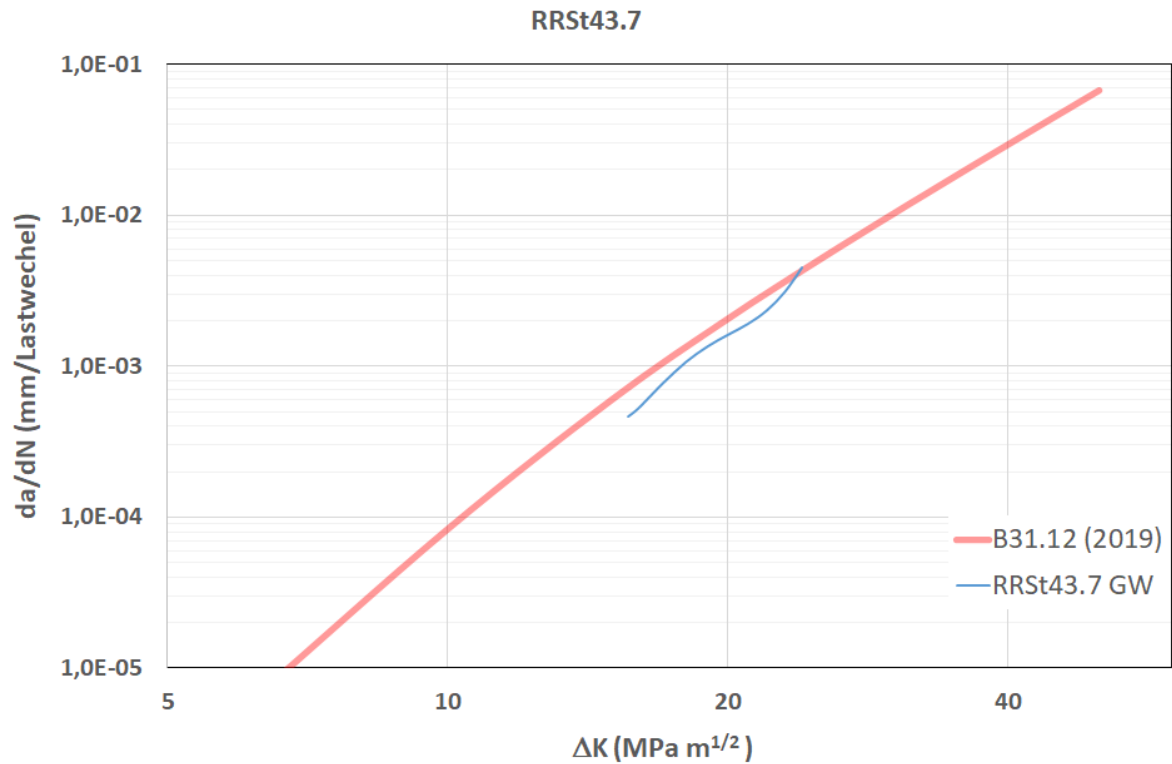


Abbildung 3.27: Rissfortschritt RRSt43.7

3.7 Werkstoff P355 NH/NL2

Die Proben wurden aus einer Platte von 15 mm Dicke entnommen.

Die spezifischen Werkstoffkennwerte dazu sind:

Tabelle 3.22: Kenndaten P355 NH/NL2

Herstellungsjahr	2019	
Herstellungsnorm	DIN EN 10028-3 (10/17)	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	355
	R _m [MPa]	490
	K _v ⁶ [J]	27
Materialkennwerte	R _e [MPa]	389
	R _m [MPa]	541
	K _v ⁶ [J]	108

⁶ V-Probe nach DIN EN ISO 148-1 bei -50 °C.

Tabelle 3.23: Chemische Zusammensetzung P355 NH/NL2

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.18	0.34	1.19	0.009	0.001	0.2	0.03	0.003
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.25	0.009	0.005	0.02				

Tabelle 3.24: Bruchzähigkeiten P355 NH/NL2

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
P355NH	GW	13	101.9

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Die hierfür verwendete Probe wurde dem Grundwerkstoff entnommen.

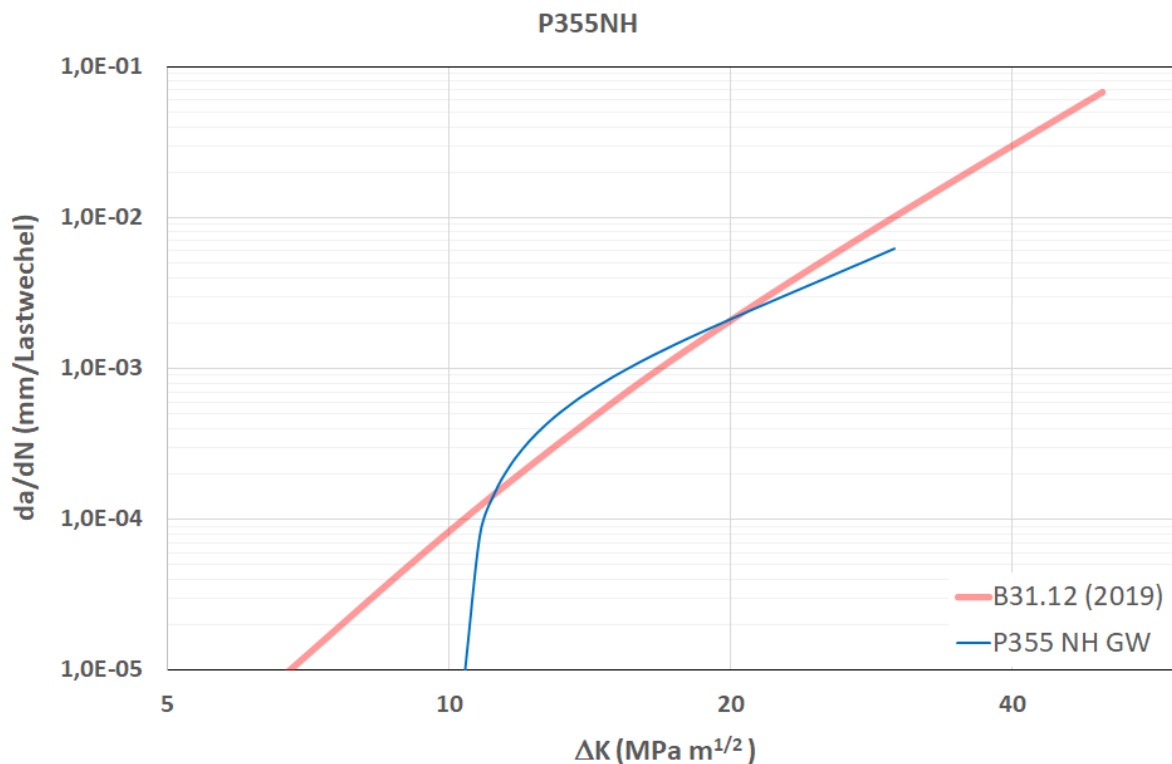


Abbildung 3.28: Rissfortschritt P355 NH

3.8 Werkstoff L360NE

Die Proben wurden aus einem HFI-längsnahtgeschweißten Rohr mit einem Durchmesser von 400 mm und einer Wandstärke von 10 mm entnommen.

Die spezifischen Werkstoffkennwerte lauten:

Tabelle 3.25: Kenndaten L360NE

Herstellungsjahr	2018	
Herstellungsnorm	ISO 3183 (11/12) M	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	360
	R _m [MPa]	460
	K _v ⁷ [J]	40
Materialkennwerte	R _e [MPa]	445
	R _m [MPa]	570
	K _v ⁷ [J]	190

Tabelle 3.26: Chemische Zusammensetzung L360NE

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.15	0.21	1.42	0.012	0.001	0.03	0.04	0.004
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.04	0.002	0.003	0.03				

Tabelle 3.27: Bruchzähigkeiten L360NE

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
L360 NE	GW	7	151.1

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5, R = 0.1 und R = 0.7 durchgeführt worden.

Die Proben wurden aus dem Grundwerkstoff entnommen.

⁷ Versuch nach Charpy, längs, V-Kerbe bei -20 °C.

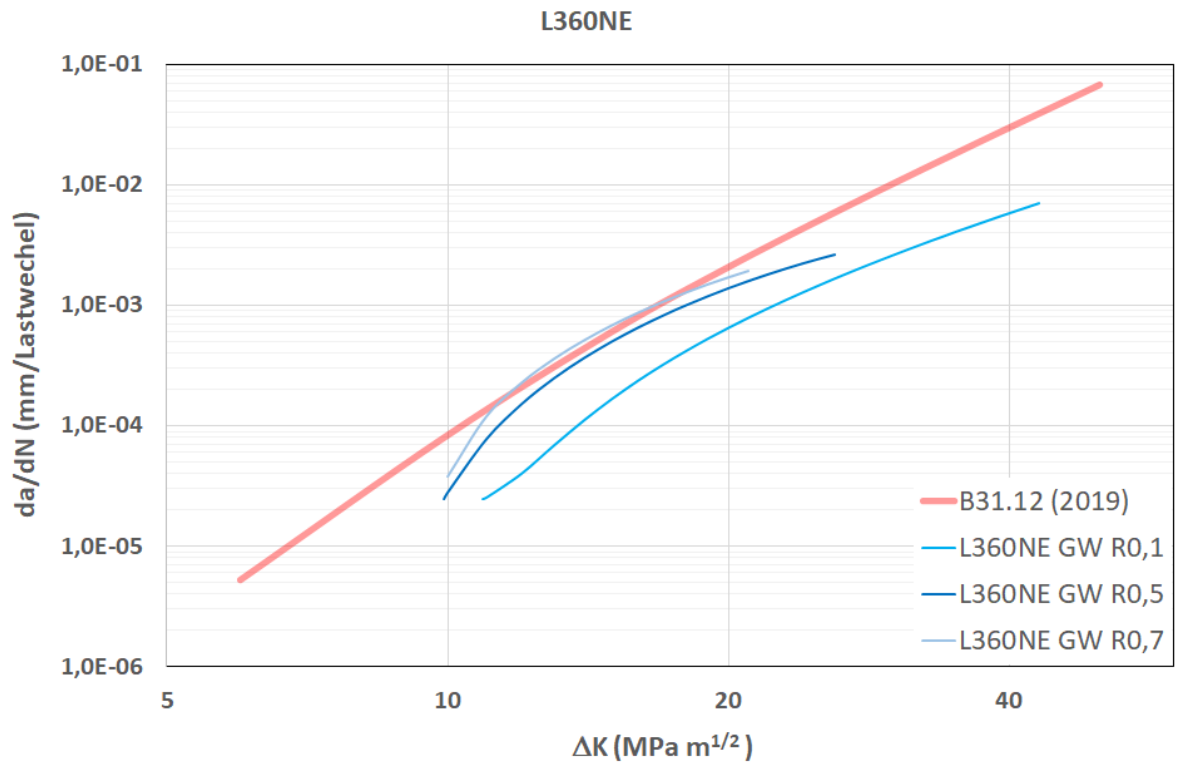


Abbildung 3.29: Rissfortschritt L360 NE

3.9 Werkstoff L360NB (Schmelze 2)

Die Proben wurden aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 406,4 mm und einer Wandstärke von 12,5 mm entnommen.

Die werkstoffspezifischen Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3.28: Kenndaten L360NB

Herstellungsjahr	2010	
Herstellungsnorm	EN 10208-2	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	360
	R _m [MPa]	460
	K _v [J]	40
Materialkennwerte	R _e [MPa]	449
	R _m [MPa]	592
	K _v [J]	145

Tabelle 3.29: Chemische Zusammensetzung L360NB

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.15	0.18	1.39	0.014	0.002	0.05	0.05	0
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.04	0	0	0.02				

Tabelle 3.30: Bruchzähigkeiten L360NB

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [MPa \sqrt{m}]
L360NB	GW	Schmelze 2	150 (100bar) / 148 (10bar)
L360NB	SG	Schmelze 2	140 (100bar) / 164 (10bar)

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 sowie 10 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Dabei sind Proben aus folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut (SG)

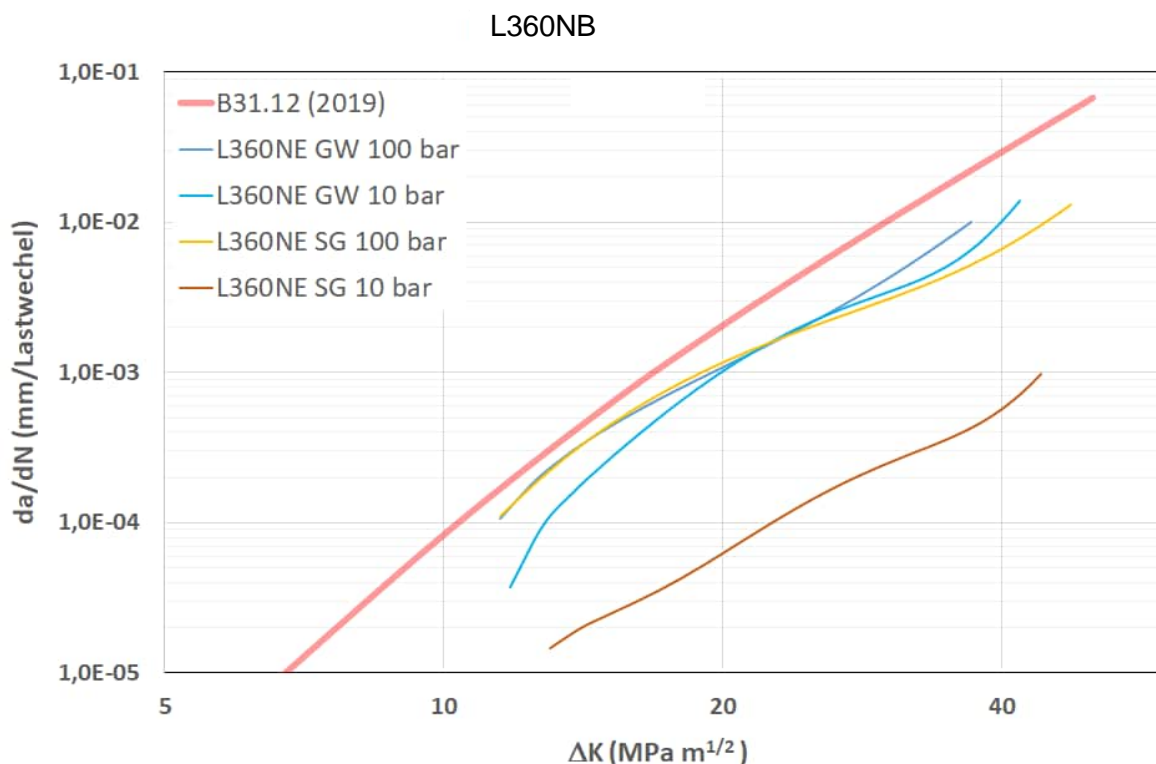


Abbildung 3.30: Rissfortschritt L360NB

3.10 Werkstoff X46 / StE320.7

Die Proben wurden aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 406,4 mm und einer Wandstärke von 8,8 mm entnommen.

Die werkstoffspezifischen Kennwerte sind in der untenstehenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3.31: Kenndaten X46 / StE320.7

Herstellungsjahr	1964	
Herstellungsnorm	DIN 17172	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	320
	R _m [MPa]	460
	K _v [J]	47
Materialkennwerte	R _e [MPa]	Ø 413
	R _m [MPa]	Ø 528
	K _v [J]	Ø 107

Tabelle 3.32: Chemische Zusammensetzung X46 / StE320.7

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.23	0.23	0.94	0.015	0.037	0.18	0.04	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.05	0	0	0.01				

Tabelle 3.33: Bruchzähigkeiten X46 / StE320.7

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{Jlc} [MPa√m]
X46 / StE320.7	GW		85 (100 bar) / 91 (10 bar)
X46 / StE320.7	SG-RN		115 (100 bar) / 135 (10 bar)

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 sowie 10 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei sind Proben aus folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut der Rundnaht (SG-RN)

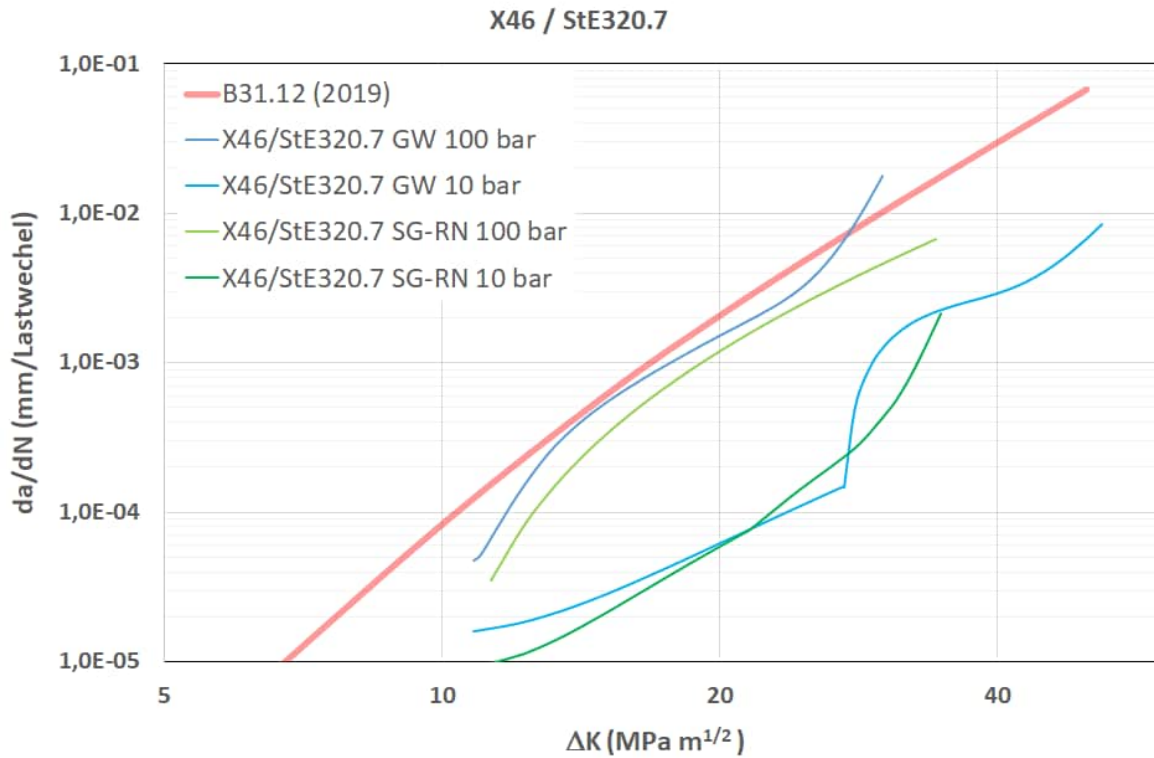


Abbildung 3.31: Rissfortschritt X46 / StE320.7

3.11 Werkstoff StE360.7

Die Proben sind aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 273 mm und einer Wandstärke von 8 mm entnommen worden. Das Rohr ist HF-Längsnaht-geschweißt.

Die werkstoffspezifischen Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3.34: Kenndaten StE360.7

Herstellungsjahr	1996	
Herstellungsnorm	DIN 17172	
Spez. min. Kennwerte	R_e [MPa]	360
	R_m [MPa]	510
	K_v [J]	47
Materialkennwerte	R_e [MPa]	451
	R_m [MPa]	554
	K_v [J]	281

Tabelle 3.35: Chemische Zusammensetzung StE360.7

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.105	0.151	1.1	0.02	0.005			
	Ni	V	Ti	Nb				
		0.001						

Tabelle 3.36: Bruchzähigkeiten StE360.7

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
StE360.7	GW	18	135.9
StE360.7	LN	18	81.8

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Die Proben sind aus dem Grundwerkstoff und der Längsnaht entnommen worden.

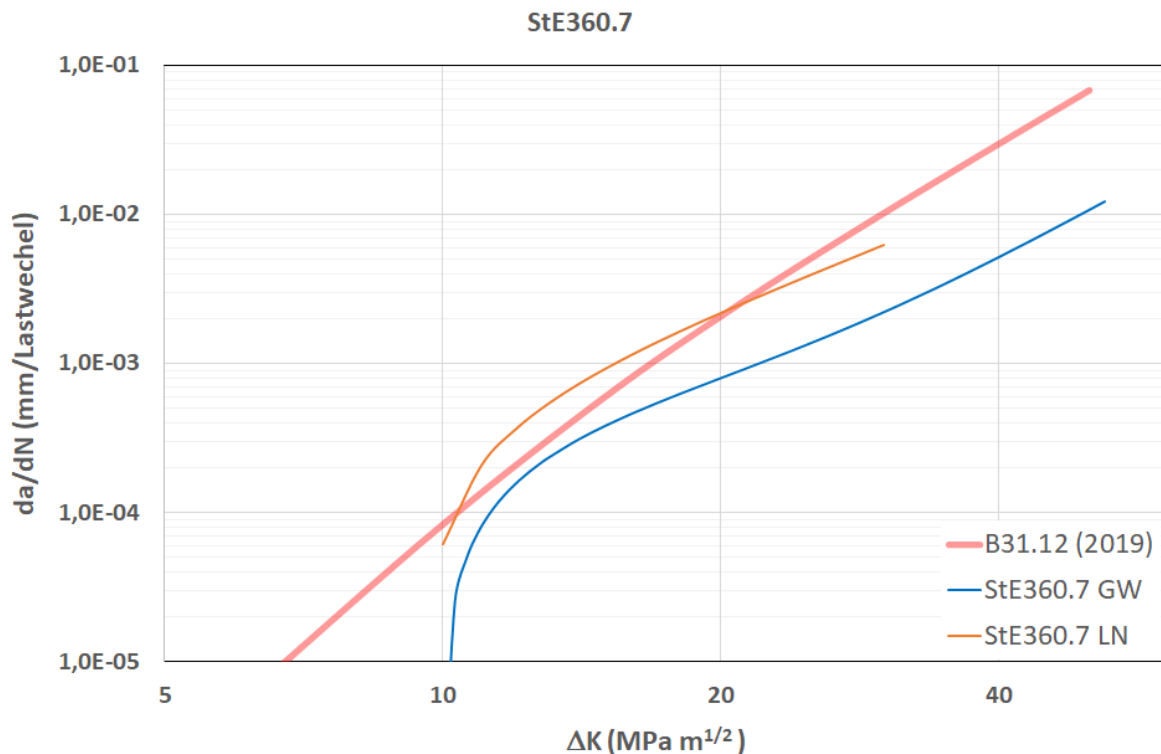


Abbildung 3.32: Rissfortschritt StE360.7

An zwei metallografischen Schliiffproben der Positionsnummer 18 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.32 bis 3.35 zu entnehmen.


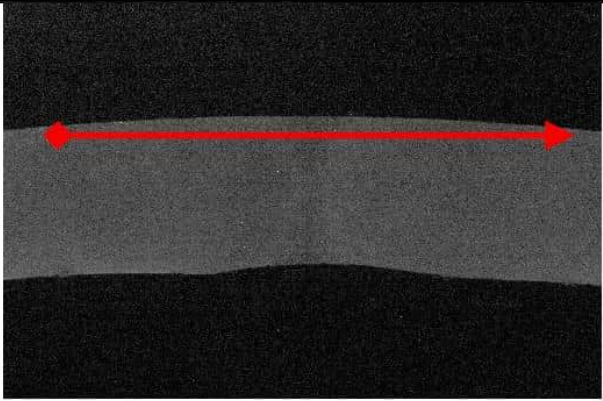
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 18.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm					280,8 µm	0,281 mm
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	292,5	300,8	0,2966	211			
2	293,9	301,6	0,2977	209			
3	294,9	301,6	0,2983	208			
4	292,0	298,9	0,2955	212			
5	291,2	297,0	0,2941	214			
6	288,5	295,6	0,2920	217			
7	289,1	293,9	0,2915	218			
8	286,9	292,7	0,2898	221			
9	285,6	291,0	0,2883	223			
10	284,2	290,6	0,2874	225			
11	281,9	275,2	0,2785	239			
12	273,2	267,5	0,2704	254			
13	278,3	287,7	0,2830	232			
14	280,2	287,9	0,2840	230			
15	287,3	290,2	0,2887	222			
16	284,6	287,3	0,2859	227			
17	283,3	289,5	0,2864	226			
18	287,9	288,7	0,2883	223			
19	289,6	293,1	0,2913	219			
20	287,7	294,3	0,2910	219			
21	287,9	290,2	0,2890	222			
22	287,9	283,6	0,2857	227			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.33: Härtemessungen StE360.7 (1)


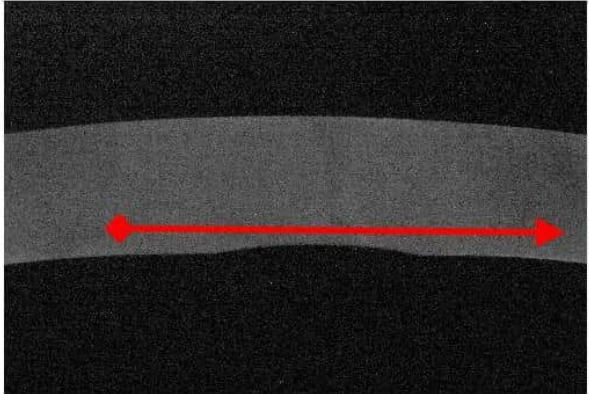
	Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung	Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie					
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 18.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 μm	280,8 μm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d ₁ μm	d ₂ μm	d _m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	294,3	300,3	0,2973	210			
2	293,5	301,0	0,2972	210			
3	296,6	301,0	0,2988	208			
4	294,7	300,6	0,2976	209			
5	292,0	299,7	0,2959	212			
6	292,9	298,7	0,2958	212			
7	293,1	298,5	0,2958	212			
8	290,2	296,2	0,2932	216			
9	288,9	296,6	0,2928	216			
10	288,9	296,2	0,2926	217			
11	278,8	276,3	0,2775	241			
12	292,3	299,5	0,2959	212			
13	290,0	298,7	0,2943	214			
14	291,4	301,4	0,2964	211			
15	296,4	304,7	0,3006	205			
16	294,9	303,0	0,2990	207			
17	292,9	302,2	0,2975	209			
18	293,9	303,0	0,2985	208			
19	292,7	304,3	0,2985	208			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.36: Härtemessungen StE360.7 (4)

3.12 Werkstoff StE480.7 TM

Die Proben wurden aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 813 mm und einer Wandstärke von 13,4 mm entnommen.

Die werkstoffspezifischen Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3.37: Kenndaten StE480.7 TM

Herstellungsjahr	1997	
Herstellungsnorm	DIN 17172	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	480
	R _m [MPa]	600
	K _v [J]	48
Materialkennwerte	R _e [MPa]	508
	R _m [MPa]	616
	K _v [J]	253

Tabelle 3.38: Chemische Zusammensetzung StE480.7 TM

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.09	0.39	1.59	0.013	0.001	0.03	0.03	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.04	0.06	0.00	0.04				

Tabelle 3.39: Bruchzähigkeiten StE480.7 TM

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
StE480.7 TM	GW		138 (100 bar) / 132 (10 bar)
StE480.7 TM	SG-LN		146 (100 bar) / 190 (10 bar)
StE480.7 TM	SG-UN		139 (100 bar) / 145 (10 bar)

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 sowie 10 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei sind Proben aus folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut der Längsnaht (SG-LN)
- Schweißgut der Umfangsnaht (SG-UN)

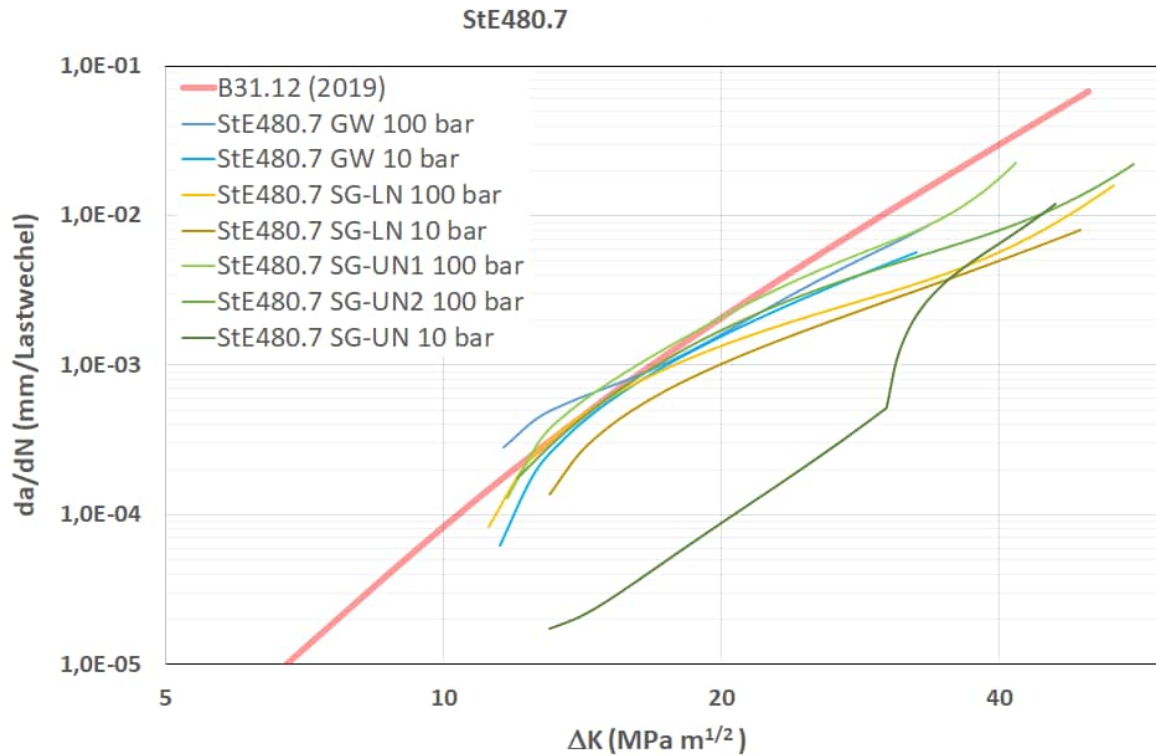


Abbildung 3.37: Rissfortschritt StE480.7 TM

3.13 Werkstoff L360 NB

Die Proben sind aus einem HFI-längsnahtgeschweißtes Rohr mit einem Durchmesser von 400 mm und einer Wandstärke von 8 mm entnommen worden.

Die werkstoffspezifischen Kennwerte sind:

Tabelle 3.40: Kenndaten L360 NB

Herstellungsjahr	2013	
Herstellungsnorm	DIN EN 10208-2	
Spez. min. Kennwerte	R_e [MPa]	360
	R_m [MPa]	460
	K_v^8 [J]	40
Materialkennwerte	R_e [MPa]	423
	R_m [MPa]	583
	K_v^8 [J]	156

⁸ V-Probe nach DIN EN ISO 148-1 bei 0 °C.

Tabelle 3.41: Chemische Zusammensetzung L360 NB

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.15	0.19	1.39	0.09	0.001	0.02	0.04	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.03	0.004	0.03	0.027				

Tabelle 3.42: Bruchzähigkeiten L360 NB

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
L360 NB	GW	20	128
L360 NB	SG-LN	20	132.4

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden. Dabei wurden die Proben dem Grundwerkstoff und der Längsnaht entnommen.

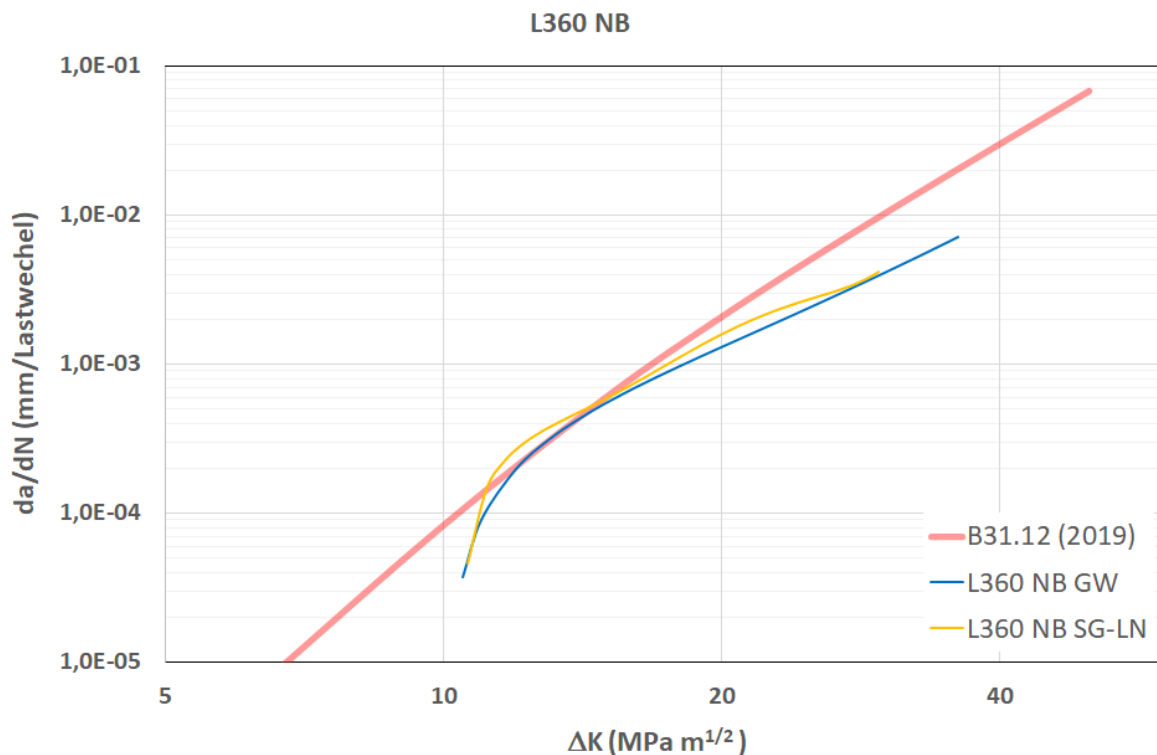


Abbildung 3.38: Rissfortschritt L360 NB

An zwei metallografischen Schlißproben der Positionsnummer 20 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.38 bis 3.41 zu entnehmen.


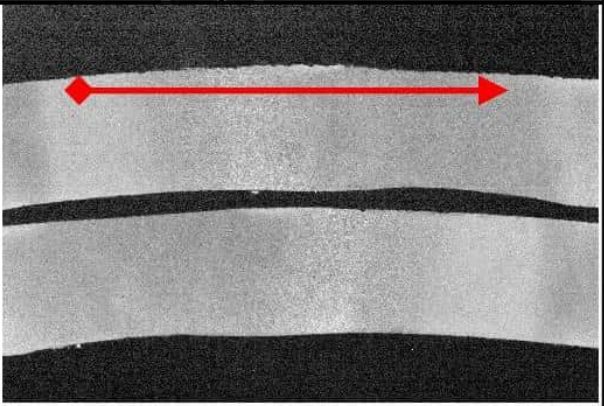
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 20HFLN-1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	293	301	0,2970	210			
2	294,5	301,4	0,2980	209			
3	270,7	280,6	0,2756	244			
4	262,2	263,6	0,2629	268			
5	262,8	265,1	0,2639	266			
6	259,9	261,9	0,2609	272			
7	258,2	259,0	0,2586	277			
8	253,8	256,1	0,2550	285			
9	255,7	256,1	0,2559	283			
10	255,7	255,7	0,2557	284			
11	264,5	259,4	0,2620	270			
12	270,0	273,4	0,2717	251			
13	275,0	275,6	0,2753	245			
14	285,4	289,6	0,2875	224			
15	292,2	293,1	0,2927	216			
16	293,5	296,0	0,2947	213			
17	291,4	291,8	0,2916	218			
18	290,6	292,0	0,2913	219			
19	295,4	291,2	0,2933	216			
20	294,1	295,6	0,2948	213			
21	289,8	293,3	0,2915	218			
22	291,2	291,8	0,2915	218			
23	287,1	290,6	0,2888	222			
24	287,9	287,3	0,2876	224			
25	291,0	291,4	0,2912	219			
26	292,7	295,8	0,2942	214			
27	295,4	299,1	0,2972	210			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.39: Härtemessungen L360 NB (1)


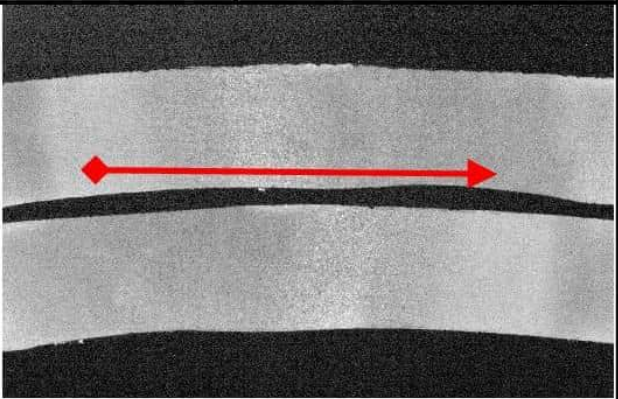
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 20HFLN-1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	290,0	300,1	0,2951	213			
2	283,9	294,5	0,2892	222			
3	283,7	286,4	0,2851	228			
4	282,7	286,4	0,2846	229			
5	281,7	285,6	0,2836	230			
6	276,1	279,4	0,2777	240			
7	266,1	267,3	0,2667	261			
8	255,5	259,0	0,2573	280			
9	251,2	259,4	0,2553	285			
10	258,6	262,4	0,2605	273			
11	272,1	272,5	0,2723	250			
12	282,9	283,7	0,2833	231			
13	291,6	294,3	0,2930	216			
14	297,9	301,8	0,2998	206			
15	298,9	299,7	0,2993	207			
16	299,3	302,0	0,3007	205			
17	298,5	301,8	0,3001	206			
18	298,7	303,9	0,3013	204			
19	302,4	299,9	0,3012	204			
20	299,9	303,2	0,3016	204			
21	302,2	302,2	0,3022	203			
22	302,6	305,7	0,3042	200			
23	303,2	306,2	0,3047	200			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.40: Härtemessungen L360 NB (2)


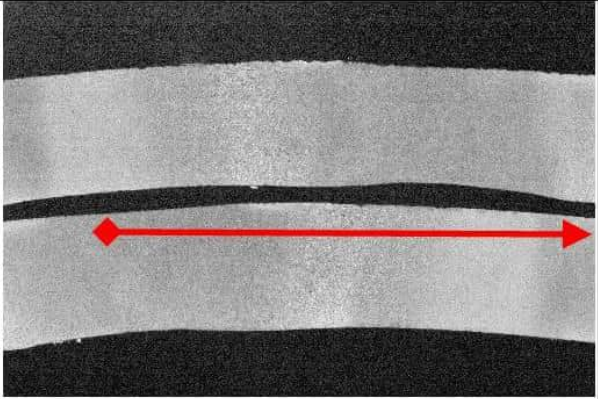
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 20HFLN-2, Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	294,3	295,2	0,2947	213			
2	295,2	295,4	0,2953	213			
3	288,9	291,6	0,2903	220			
4	284,4	287,7	0,2860	227			
5	288,7	288,3	0,2885	223			
6	289,4	285,8	0,2876	224			
7	290,2	294,1	0,2921	217			
8	288,9	293,7	0,2913	219			
9	289,1	293,3	0,2912	219			
10	288,7	288,9	0,2888	222			
11	292,0	294,3	0,2932	216			
12	289,8	294,3	0,2920	217			
13	287,7	288,5	0,2881	223			
14	279,2	280,6	0,2799	237			
15	264,9	272,7	0,2688	257			
16	260,9	265,3	0,2631	268			
17	253,0	254,3	0,2537	288			
18	255,5	259,5	0,2575	280			
19	254,9	258,6	0,2568	281			
20	255,7	256,1	0,2559	283			
21	261,7	261,9	0,2618	270			
22	268,6	266,9	0,2678	259			
23	268,4	268,2	0,2683	258			
24	268,2	278,3	0,2733	248			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.41: Härtemessungen L360 NB (3)


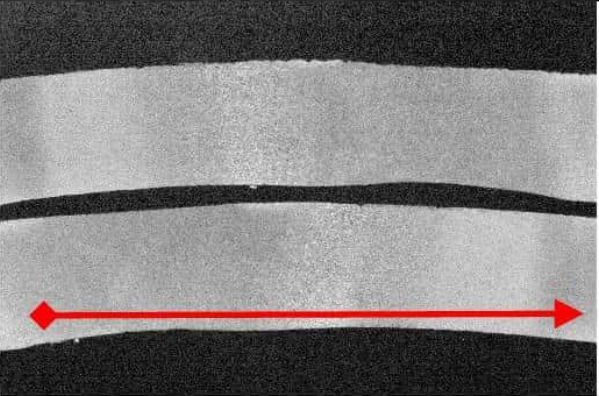
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 20HFLN-2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	296,8	299,1	0,2980	209			
2	302,8	303,9	0,3034	202			
3	304,7	306,8	0,3057	198			
4	304,9	306,6	0,3057	198			
5	304,5	305,3	0,3049	199			
6	301,2	303,2	0,3022	203			
7	302,8	303,0	0,3029	202			
8	300,3	302,4	0,3014	204			
9	299,7	302,6	0,3012	204			
10	302,4	304,3	0,3033	202			
11	300,1	300,1	0,3001	206			
12	291,4	294,3	0,2929	216			
13	283,3	283,1	0,2832	231			
14	275,0	272,3	0,2737	248			
15	261,3	264,6	0,2630	268			
16	254,7	257,2	0,2559	283			
17	254,7	256,8	0,2557	284			
18	265,9	267,8	0,2668	260			
19	273,8	279,2	0,2765	243			
20	280,2	284,8	0,2825	232			
21	285,4	289,3	0,2874	225			
22	283,3	287,7	0,2855	228			
23	279,6	292,9	0,2862	226			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.42: Härtemessungen L360 NB (4)

3.14 Werkstoff 14HGS

Die Proben wurden einem Rohr mit einem Durchmesser von 529 mm und einer Wandstärke von 9 mm entnommen.

Tabelle 3.43: Kenndaten 14HGS

Herstellungsjahr	1964	
Herstellungsnorm	GOST 5058 -65	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	343
	R _m [MPa]	491
	K _v /A [kgm/cm ²]	4
Materialkennwerte	R _e [MPa]	392 (40 kp/mm ²)
	R _m [MPa]	510 (52 kp/mm ²)
	K _v /A [kgm/cm ²] ⁹	5

Tabelle 3.44: Chemische Zusammensetzung 14HGS

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.149	0.48	1.05	0.032	0.025	0.13	0.70	0.005
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.07	0.002	0.009	<0.001				

Tabelle 3.45: Bruchzähigkeiten 14HGS

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
14HGS	GW	21	105.2
14HGS	SG-LN	21	105.2
14HGS	SG-RN	21	100.8

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei sind Proben aus folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Längsnaht (LN)
- Rundnaht (RN)

⁹ Kerbschlagversuch bei -40 °C. durchgeführt

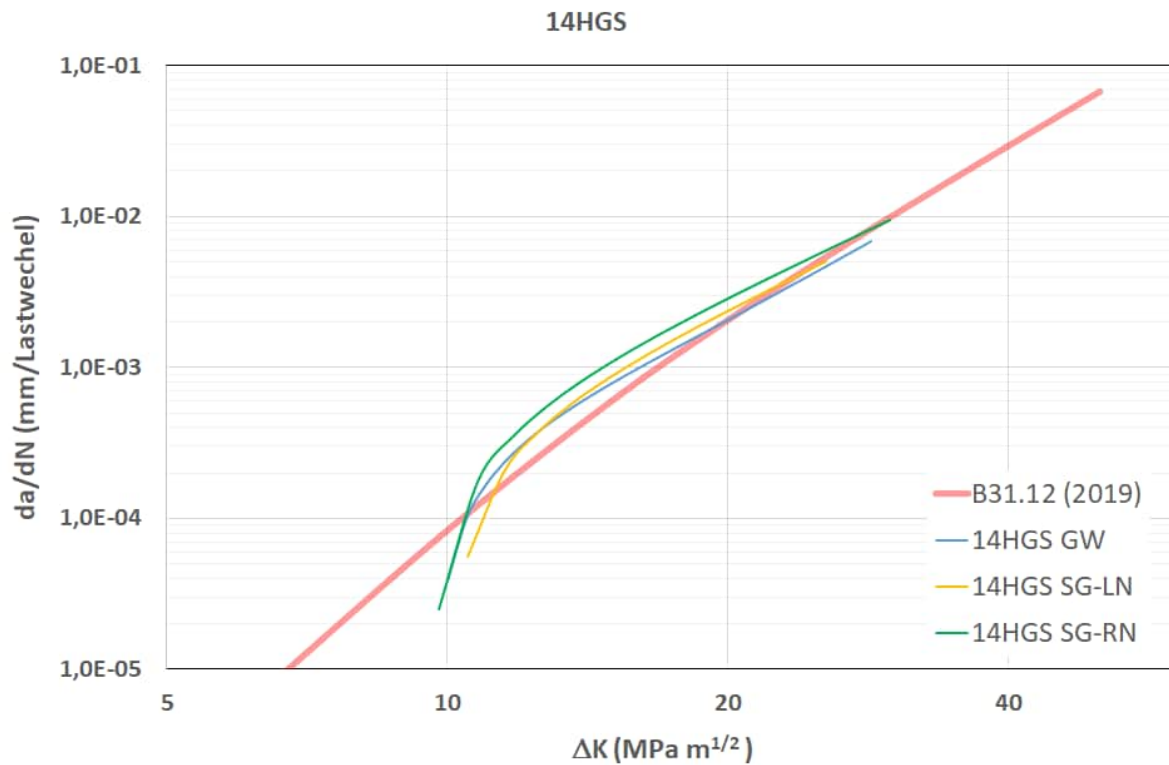


Abbildung 3.43: Rissfortschritt 14HGS

An vier metallografischen Schliifproben der Positionsnummer 21 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.43 bis 3.52 zu entnehmen.


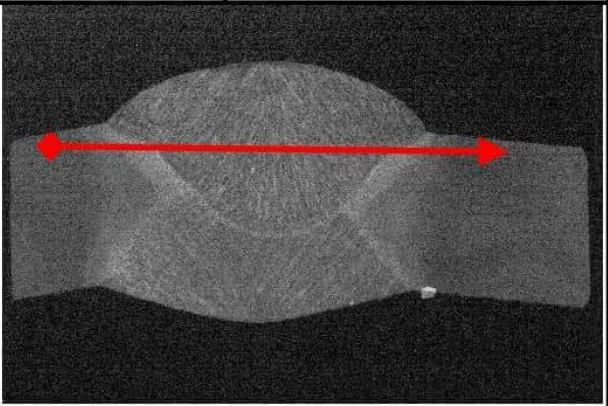
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21LN-1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	330,6	327,1	0,3289	171	168		GW 1
2	329,2	331,3	0,3302	170			
3	331,9	334,2	0,3330	167			
4	335,2	335,6	0,3354	165			
5	333,1	333,6	0,3333	167			
1	308,4	308,0	0,3082	195	208		WEZ 1
2	302,2	301,4	0,3018	204			
3	294,3	299,3	0,2968	210			
4	293,5	292,0	0,2928	216			
5	294,5	294,9	0,2947	213			
1	329,4	329,8	0,3296	171	171		SG
2	332,7	331,9	0,3323	168			
3	329,6	326,7	0,3282	172			
4	322,2	322,4	0,3223	179			
5	333,3	333,6	0,3334	167			
1	313,8	313,0	0,3134	189	204		WEZ 2
2	304,3	303,0	0,3037	201			
3	297,6	299,5	0,2986	208			
4	297,0	300,5	0,2988	208			
5	294,5	292,0	0,2933	216			
1	328,6	327,8	0,3282	172	173		GW 2
2	324,4	324,0	0,3242	176			
3	326,3	325,2	0,3258	175			
4	327,7	328,6	0,3282	172			
5	331,1	328,4	0,3297	171			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.44: Härtemessungen 14HGS (1)


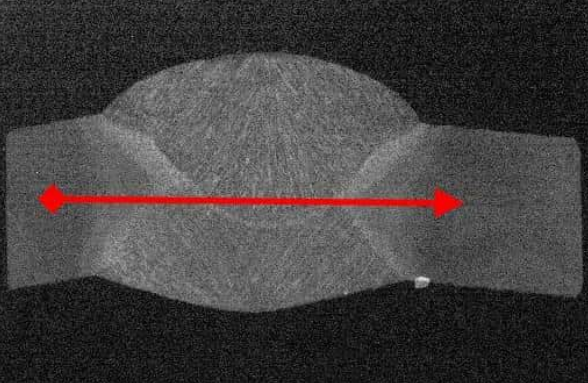
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21LN-1; Mitte Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	326,1	330,0	0,3281	172	167		GW 1
2	332,3	331,5	0,3319	168			
3	333,8	330,6	0,3322	168			
4	334,6	340,0	0,3373	163			
5	335,6	337,1	0,3364	164			
1	301,0	296,4	0,2987	208	199		WEZ 1
2	300,8	300,8	0,3008	205			
3	302,0	301,6	0,3018	204			
4	308,2	305,7	0,3070	197			
5	321,7	319,0	0,3204	181			
1	340,2	332,1	0,3362	164	168		SG
2	331,5	330,0	0,3307	170			
3	333,8	330,6	0,3322	168			
4	332,5	333,3	0,3329	167			
5	330,6	326,3	0,3285	172			
1	303,5	298,7	0,3011	205	202		WEZ 2
2	304,7	297,2	0,3010	205			
3	303,5	304,9	0,3042	200			
4	298,7	299,5	0,2991	207			
5	309,7	308,2	0,3090	194			
1	332,7	338,8	0,3357	165	169		GW 2
2	327,1	334,4	0,3308	169			
3	327,1	331,5	0,3293	171			
4	328,8	328,4	0,3286	172			
5	331,1	328,2	0,3296	171			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.45: Härtemessungen 14HGS (2)


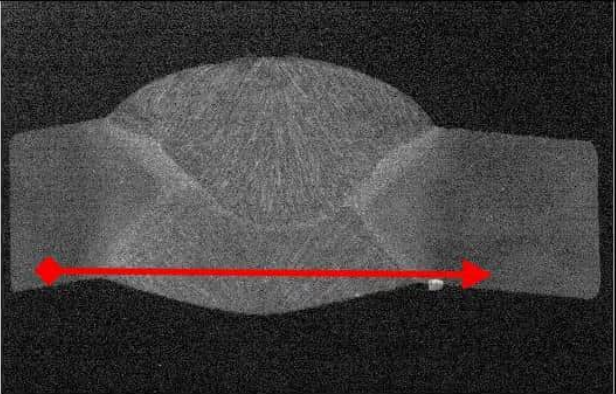
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21LN-1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	329,2	331,3	0,3302	170	170		GW 1
2	326,1	326,3	0,3262	174			
3	331,9	331,1	0,3315	169			
4	327,1	333,4	0,3302	170			
5	331,1	333,5	0,3323	168			
1	315,7	314,9	0,3153	187	193		WEZ 1
2	295,4	296,2	0,2958	212			
3	299,9	300,1	0,3000	206			
4	320,7	312,2	0,3164	185			
5	327,1	326,5	0,3268	174			
1	336,7	336,5	0,3366	164	167		SG
2	333,1	329,4	0,3313	169			
3	333,2	327,7	0,3305	170			
4	334,2	329,8	0,3320	168			
5	337,1	333,1	0,3351	165			
1	309,1	307,0	0,3080	195	190		WEZ 2
2	312,6	310,1	0,3113	191			
3	315,5	310,1	0,3128	190			
4	310,3	308,6	0,3095	194			
5	323,2	322,1	0,3227	178			
1	331,3	327,3	0,3293	171	175		GW 2
2	321,9	325,2	0,3236	177			
3	324,0	325,0	0,3245	176			
4	324,3	328,6	0,3264	174			
5	325,9	324,0	0,3250	176			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.46: Härtemessungen 14HGS (3)


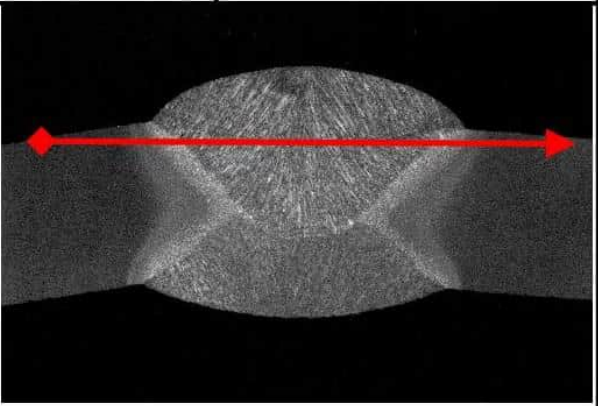
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21LN-2, Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	310,1	308,9	0,3095	194	192		GW 1
2	312,8	310,5	0,3117	191			
3	310,7	308,4	0,3096	193			
4	310,9	314,3	0,3126	190			
5	312,0	312,6	0,3123	190			
1	287,3	284,6	0,2859	227	231		WEZ 1
2	279,6	281,9	0,2807	235			
3	279,8	280,4	0,2801	236			
4	284,2	286,6	0,2854	228			
5	286,6	283,9	0,2853	228			
1	322,3	314,2	0,3183	183	186		SG
2	318,4	313,8	0,3161	186			
3	321,7	312,8	0,3173	184			
4	312,8	301,2	0,3070	197			
5	317,8	319,9	0,3188	182			
1	284,4	285,8	0,2851	228	225		WEZ 2
2	287,1	282,1	0,2846	229			
3	282,7	285,4	0,2841	230			
4	288,9	288,7	0,2888	222			
5	292,9	290,2	0,2915	218			
1	312,6	314,0	0,3133	189	186		GW 2
2	312,0	314,3	0,3131	189			
3	318,4	315,1	0,3167	185			
4	315,7	315,3	0,3155	186			
5	317,6	319,2	0,3184	183			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.47: Härtemessungen 14HGS (4)


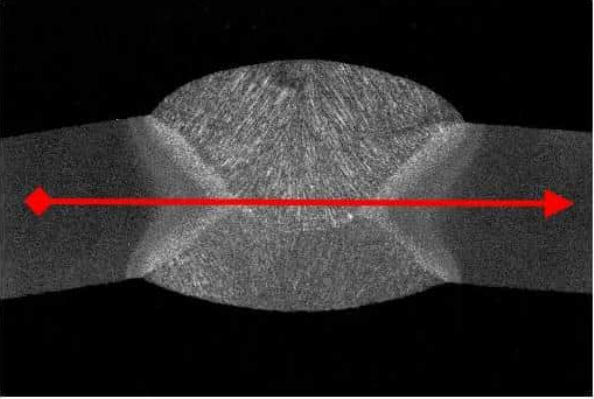
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21LN-2, Mitte Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23±5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	323,9	329,6	0,3267	174	176		GW 1
2	325,9	327,7	0,3268	174			
3	322,1	327,7	0,3249	176			
4	318,4	322,8	0,3206	180			
5	322,4	326,1	0,3242	176			
1	290,0	293,3	0,2916	218	212		WEZ 1
2	292,2	296,0	0,2941	214			
3	295,4	299,1	0,2972	210			
4	296,2	299,1	0,2976	209			
5	299,5	299,3	0,2994	207			
1	330,2	330,9	0,3305	170	171		SG
2	330,2	326,9	0,3286	172			
3	330,3	327,9	0,3291	171			
4	336,0	323,4	0,3297	171			
5	328,2	333,4	0,3308	170			
1	292,7	296,0	0,2943	214	210		WEZ 2
2	297,2	299,1	0,2982	209			
3	296,8	297,8	0,2973	210			
4	297,9	297,8	0,2979	209			
5	298,1	301,2	0,2996	207			
1	329,4	331,7	0,3305	170	172		GW 2
2	326,3	330,6	0,3285	172			
3	326,7	329,4	0,3281	172			
4	326,5	327,3	0,3269	174			
5	326,3	331,1	0,3287	172			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.48: Härtemessungen 14HGS (5)


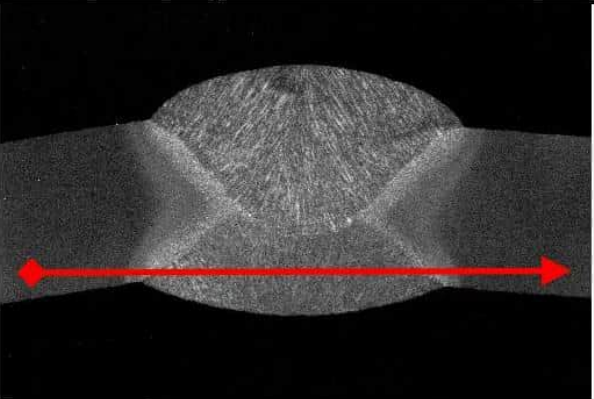
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21LN-2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	312,0	316,7	0,3144	188	190		GW 1
2	310,1	312,8	0,3115	191			
3	309,7	313,2	0,3114	191			
4	310,1	313,0	0,3116	191			
5	315,1	312,0	0,3135	189			
1	306,8	302,0	0,3044	200	203		WEZ 1
2	294,5	292,5	0,2935	215			
3	295,6	300,1	0,2979	209			
4	307,4	308,8	0,3081	195			
5	307,4	305,7	0,3066	197			
1	334,6	326,1	0,3303	170	169		SG
2	333,8	332,1	0,3329	167			
3	331,7	326,9	0,3293	171			
4	332,7	330,7	0,3317	169			
5	336,0	330,0	0,3330	167			
1	303,7	301,2	0,3024	203	199		WEZ 2
2	305,1	304,5	0,3048	200			
3	307,6	309,1	0,3083	195			
4	304,3	301,2	0,3027	202			
5	310,5	308,6	0,3096	193			
1	321,3	320,9	0,3211	180	184		GW 2
2	316,1	315,9	0,3160	186			
3	312,8	316,9	0,3149	187			
4	317,4	317,6	0,3175	184			
5	316,5	317,6	0,3171	184			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.49: Härtemessungen 14HGS (6)


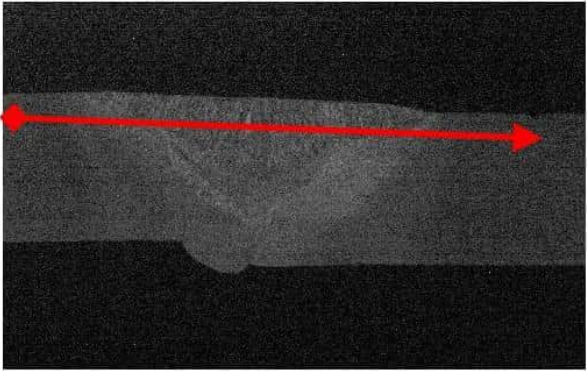
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21 UN (2); Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	323,2	324,7	0,3240	177	172		GW 1
2	326,8	326,8	0,3268	174			
3	331,4	328,6	0,3300	170			
4	333,9	327,8	0,3309	169			
5	331,9	332,4	0,3321	168			
1	365,0	327,0	0,3460	155	198		WEZ 1
2	297,9	303,3	0,3006	205			
3	292,1	298,2	0,2951	213			
4	295,4	293,1	0,2942	214			
5	301,0	304,1	0,3025	203			
1	315,6	320,1	0,3178	184	185		SG
2	323,2	315,3	0,3192	182			
3	311,0	306,9	0,3089	194			
4	327,8	316,1	0,3219	179			
5	315,8	313,3	0,3145	187			
1	304,1	301,0	0,3025	203	210		WEZ 2
2	300,2	298,2	0,2992	207			
3	294,4	294,9	0,2946	214			
4	294,9	299,5	0,2972	210			
5	294,1	294,9	0,2945	214			
1	330,8	330,8	0,3308	169	176		GW 2
2	327,8	328,0	0,3279	172			
3	322,4	322,2	0,3223	179			
4	322,4	323,2	0,3228	178			
5	320,4	321,2	0,3208	180			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.50: Härtemessungen 14HGS (7)


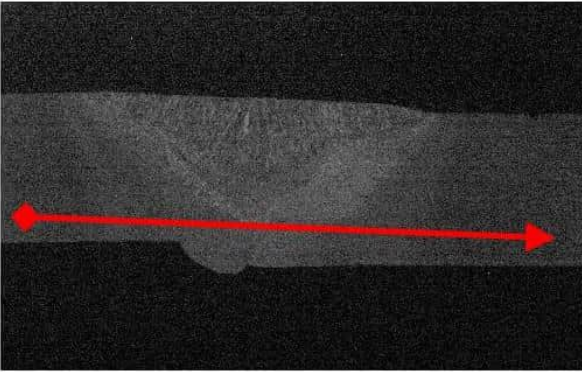
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21 UN (1); Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte 280,6 µm 280,8 µm 0,281 mm 235 HV		Sollwert: 237 HV 10					
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	326,0	325,5	0,3257	175	169		GW 1
2	331,1	330,8	0,3310	169			
3	329,1	332,9	0,3310	169			
4	332,6	336,0	0,3343	166			
5	333,9	334,4	0,3342	166			
1	317,3	319,4	0,3183	183	189		WEZ 1
2	313,0	313,2	0,3131	189			
3	307,4	312,0	0,3097	193			
4	311,7	311,2	0,3115	191			
5	313,2	313,2	0,3132	189			
1	330,6	333,9	0,3323	168	169		SG
2	329,8	331,9	0,3308	169			
3	333,1	332,6	0,3329	167			
4	329,6	329,8	0,3297	171			
5	332,9	330,8	0,3319	168			
1	307,9	308,7	0,3083	195	201		WEZ 2
2	308,1	308,7	0,3084	195			
3	306,1	307,6	0,3069	197			
4	305,1	301,8	0,3034	201			
5	290,5	294,9	0,2927	216			
1	339,3	336,2	0,3377	163	169		GW 2
2	333,4	335,2	0,3343	166			
3	330,3	331,9	0,3311	169			
4	329,3	327,5	0,3284	172			
5	325,2	326,3	0,3257	175			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.51: Härtemessungen 14HGS (8)


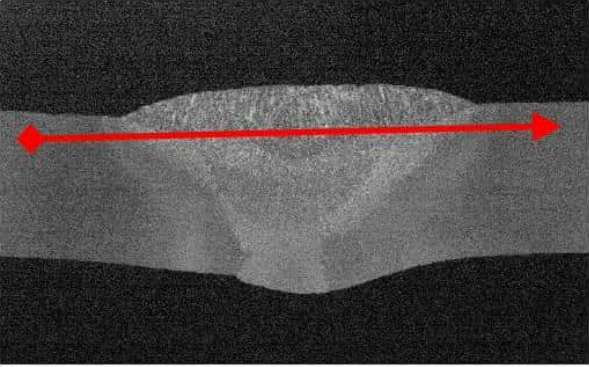
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21 UN (1), Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	311,3	314,9	0,3131	189	185		GW 1
2	311,8	320,2	0,3160	186			
3	311,8	314,9	0,3133	189			
4	316,3	319,2	0,3178	184			
5	321,5	322,1	0,3218	179			
1	329,4	329,8	0,3296	171	198		WEZ 1
2	306,0	308,9	0,3074	196			
3	294,7	302,0	0,2984	208			
4	298,9	294,5	0,2967	211			
5	302,4	299,5	0,3010	205			
1	319,2	320,9	0,3201	181	179		SG
2	324,0	324,4	0,3242	176			
3	316,3	320,3	0,3183	183			
4	321,5	311,3	0,3164	185			
5	330,2	327,9	0,3291	171			
1	298,5	295,8	0,2971	210	205		WEZ 2
2	303,9	303,5	0,3037	201			
3	297,6	296,0	0,2968	210			
4	305,1	307,2	0,3062	198			
5	298,7	298,3	0,2985	208			
1	332,3	332,1	0,3322	168	174		GW 2
2	330,2	331,7	0,3310	169			
3	324,0	324,6	0,3243	176			
4	319,5	326,9	0,3232	178			
5	325,1	321,1	0,3231	178			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.52: Härtemessungen 14HGS (9)


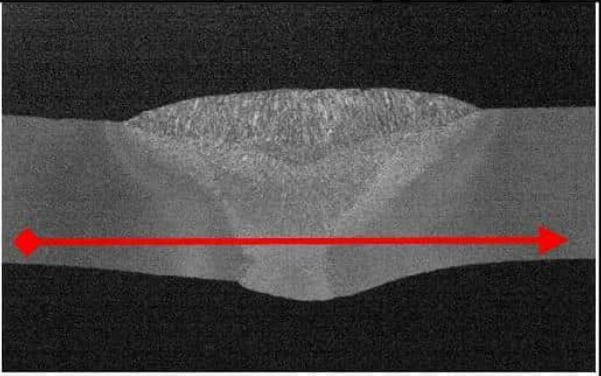
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 21 UN (1); Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	318,2	318,2	0,3182	183	168		GW 1
2	327,3	326,9	0,3271	173			
3	335,8	332,9	0,3344	166			
4	342,3	343,3	0,3428	158			
5	339,6	341,2	0,3404	160			
1	335,2	337,7	0,3365	164	172		WEZ 1
2	331,5	328,6	0,3300	170			
3	325,9	326,9	0,3264	174			
4	321,3	319,0	0,3202	181			
5	326,7	327,5	0,3271	173			
1	339,6	335,4	0,3375	163	162		SG
2	337,5	336,7	0,3371	163			
3	332,5	335,2	0,3339	166			
4	337,9	339,2	0,3385	162			
5	343,9	345,0	0,3444	156			
1	328,8	324,8	0,3268	174	168		WEZ 2
2	328,6	328,8	0,3287	172			
3	332,1	328,8	0,3304	170			
4	337,1	334,8	0,3359	164			
5	340,8	336,9	0,3389	161			
1	337,7	330,9	0,3343	166	174		GW 2
2	327,1	331,3	0,3292	171			
3	328,2	324,6	0,3264	174			
4	323,4	321,7	0,3226	178			
5	319,4	325,3	0,3224	178			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.53: Härtemessungen 14HGS (10)

3.15 Werkstoff WSTE 420

Die Proben wurden einem 15 mm dickem normalisierten Blech entnommen.

Sein Grundwerkstoff weist folgende mechanische Eigenschaften auf:

Tabelle 3.46: Kenndaten WSTE 420

Herstellungsjahr	2010	
Herstellungsnorm	DIN 17102	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	420
	R _m [MPa]	530
	K _v [J]	21
Materialkennwerte	R _e [MPa]	416
	R _m [MPa]	542
	K _v ¹⁰ [J]	179

Tabelle 3.47: Chemische Zusammensetzung WSTE 420

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.18	0.2	1.57	0.007	0.001	0.02	0.05	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.58	0.18	0.001	0.002				

Tabelle 3.48: Bruchzähigkeiten WSTE 420

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
WSTE 420	GW	10	99.6

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei wurde ausschließlich der Grundwerkstoff untersucht.

¹⁰ Probe gefertigt nach ISO-V 450, Versuch bei -20 °C. durchgeführt

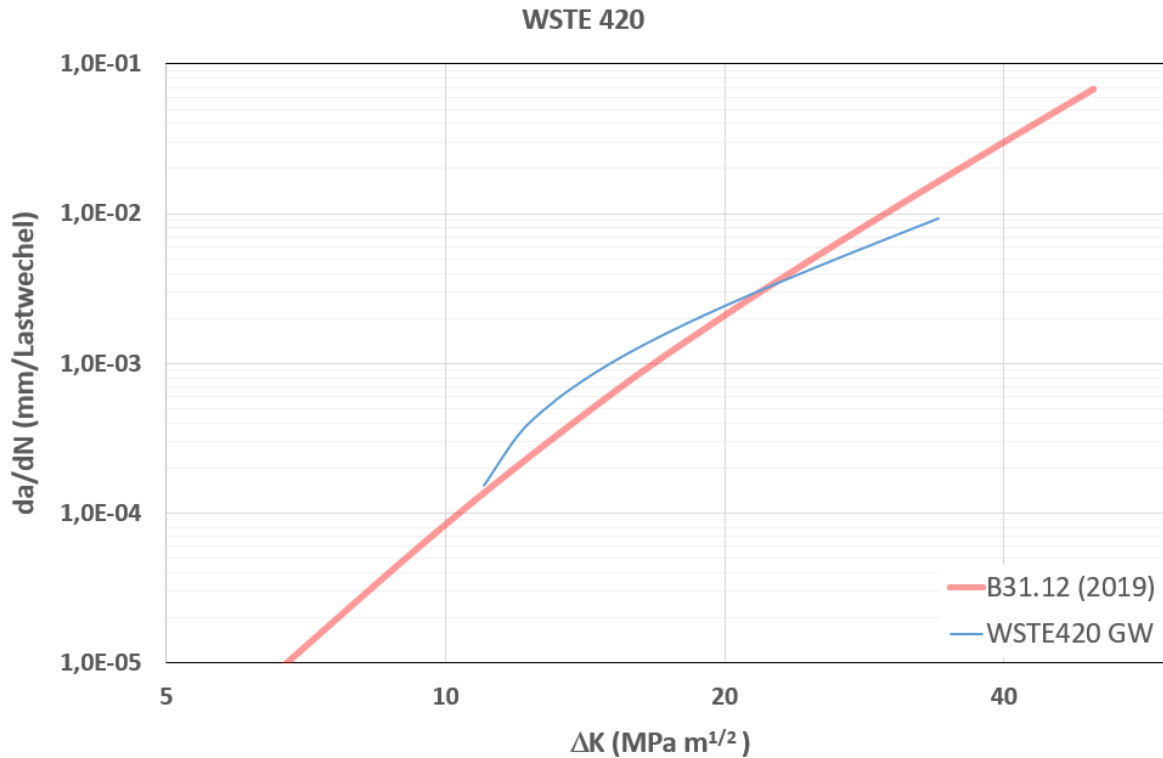


Abbildung 3.54: Rissfortschritt WSTE 420

3.16 Werkstoff St53.7

Die Werkstoffproben wurden einem Rohr mit einem Durchmesser von 770 mm und einer Wandstärke von 14,27 mm entnommen. Das Rohr wurde UP-längsnahtgeschweißt

Der Grundwerkstoff besitzt die nachfolgenden Eigenschaften:

Tabelle 3.49: Kenndaten St53.7

Herstellungsjahr	1972	
Herstellungsnorm	DIN 17172	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	363
	R _m [MPa]	510
	K _v /A [kgm/cm ²] ¹¹	4
Materialkennwerte	R _e [MPa]	381
	R _m [MPa]	560
	K _v /A [kgm/cm ²] ¹¹	8,8

¹¹ Kerbschlagbiegeversuch gemäß DIN 50115, Form DVM

Tabelle 3.50: Chemische Zusammensetzung St53.7

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.195	0.355	1.385	0.017	0.017			
	Ni	V	Ti	Nb				

Tabelle 3.51: Bruchzähigkeiten St53.7

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
St53.7	GW	19	117.7
St53.7	SG	19	128.9

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Dabei sind Proben folgender Arten entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Rundnaht (RN)

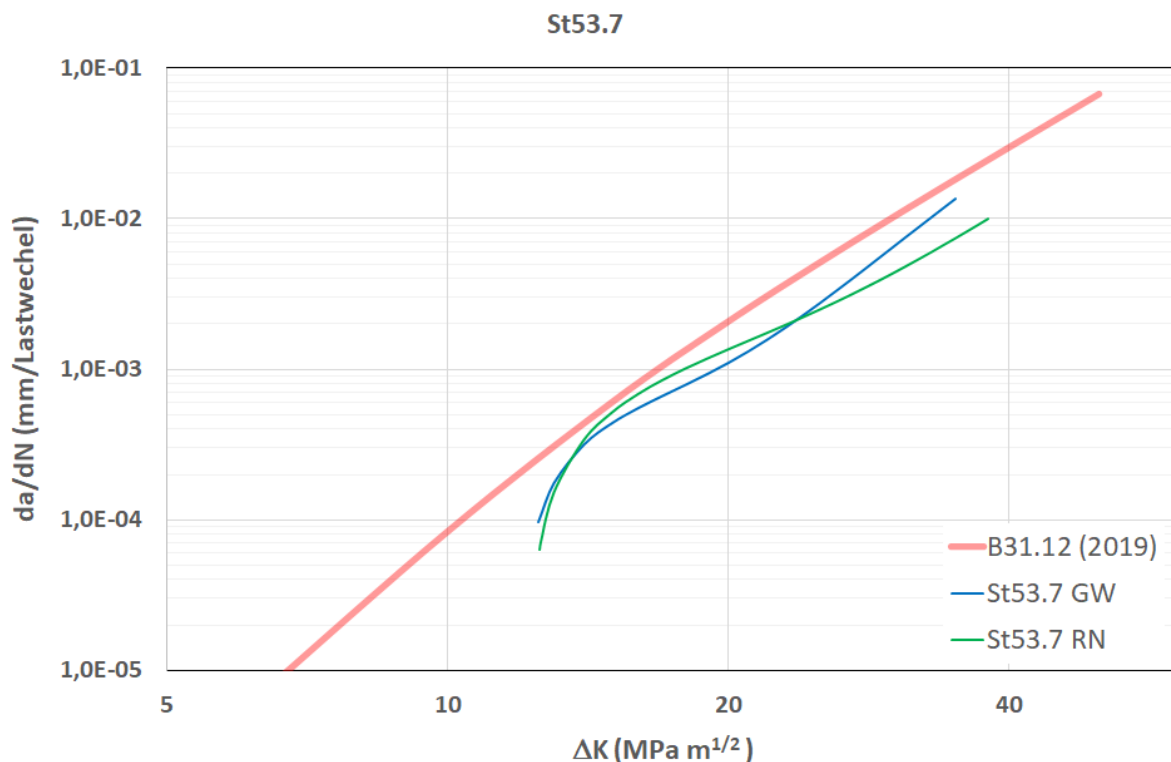


Abbildung 3.55: Rissfortschritt St53.7

An zwei metallografischen Schliiffproben der Positionsnummer 19 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.55 bis 3.58 zu entnehmen.


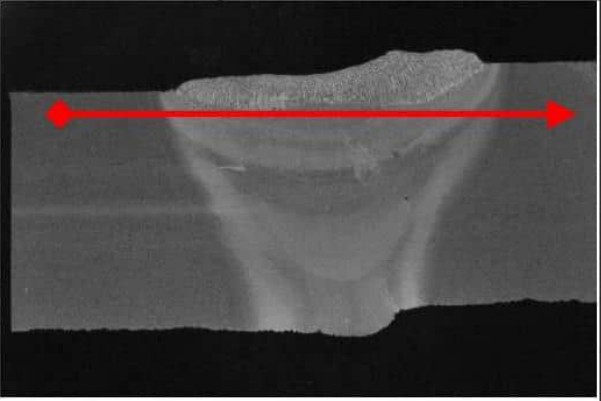
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 19.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	310,5	309,7	0,3101	193	185		GW 1
2	318,0	315,3	0,3166	185			
3	319,0	317,2	0,3181	183			
4	315,7	318,8	0,3173	184			
5	321,1	324,2	0,3227	178			
1	284,8	288,3	0,2865	226	223		WEZ 1
2	287,9	289,3	0,2886	223			
3	284,8	284,8	0,2848	229			
4	292,7	292,3	0,2925	217			
5	292,0	288,7	0,2904	220			
1	309,3	304,5	0,3069	197	192		SG
2	303,9	301,8	0,3028	202			
3	312,2	307,6	0,3099	193			
4	312,6	311,1	0,3119	191			
5	322,8	321,5	0,3221	179			
1	301,4	302,6	0,3020	203	220		WEZ 2
2	287,5	286,9	0,2872	225			
3	287,1	288,9	0,2880	224			
4	283,1	283,5	0,2833	231			
5	292,5	290,0	0,2912	219			
1	321,5	322,3	0,3219	179	181		GW 2
2	316,9	323,6	0,3203	181			
3	315,3	319,9	0,3176	184			
4	319,0	321,9	0,3205	181			
5	317,8	322,8	0,3203	181			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.56: Härtemessungen St53.7 (1)


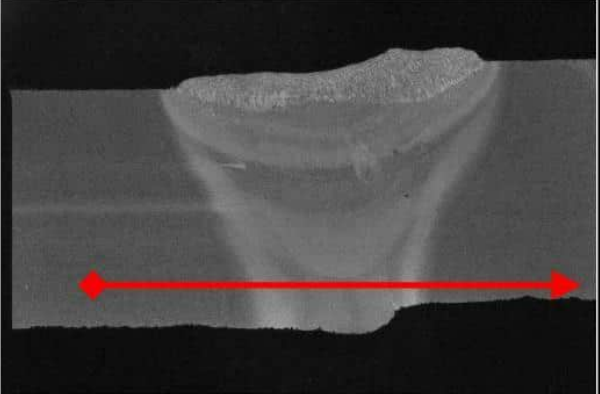
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 19.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	320,9	318,4	0,3196	181	179		GW 1
2	318,8	321,9	0,3204	181			
3	320,7	323,4	0,3220	179			
4	321,5	325,0	0,3233	177			
5	324,4	323,6	0,3240	177			
1	334,8	337,7	0,3363	164	171		WEZ 1
2	327,9	323,0	0,3255	175			
3	330,6	327,3	0,3290	171			
4	330,0	328,2	0,3291	171			
5	327,9	326,3	0,3271	173			
1	315,1	312,8	0,3139	188	180		SG
2	319,0	316,5	0,3178	184			
3	325,7	321,5	0,3236	177			
4	324,0	323,2	0,3236	177			
5	329,2	327,9	0,3286	172			
1	329,4	329,2	0,3293	171	183		WEZ 2
2	321,1	320,3	0,3207	180			
3	315,7	314,5	0,3151	187			
4	317,0	312,8	0,3149	187			
5	311,8	309,5	0,3106	192			
1	323,8	325,1	0,3244	176	177		GW 2
2	323,2	328,2	0,3257	175			
3	323,2	325,0	0,3241	177			
4	319,6	325,5	0,3226	178			
5	313,8	327,9	0,3209	180			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.57: Härtemessungen X56.7 (2)


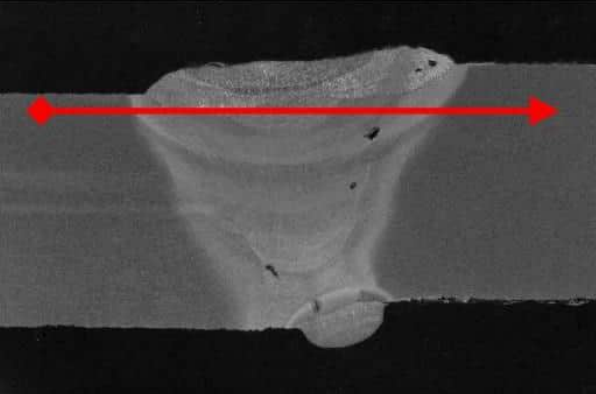
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 19.2; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	312,0	314,7	0,3133	189	185		GW 1
2	311,8	317,8	0,3148	187			
3	313,8	319,0	0,3164	185			
4	318,2	318,8	0,3185	183			
5	320,7	320,1	0,3204	181			
1	317,8	317,8	0,3178	184	192		WEZ 1
2	302,2	305,3	0,3038	201			
3	307,2	307,6	0,3074	196			
4	311,3	310,5	0,3109	192			
5	314,9	314,7	0,3148	187			
1	321,1	322,8	0,3219	179	178		SG
2	322,1	320,7	0,3214	180			
3	340,0	332,7	0,3364	164			
4	317,6	316,5	0,3171	184			
5	317,6	315,9	0,3167	185			
1	296,2	296,2	0,2962	211	210		WEZ 2
2	294,8	294,9	0,2948	213			
3	294,7	295,4	0,2951	213			
4	300,8	298,5	0,2996	207			
5	298,7	299,3	0,2990	207			
1	320,9	329,4	0,3252	175	185		GW 2
2	313,4	320,7	0,3171	184			
3	312,6	318,2	0,3154	186			
4	309,7	316,1	0,3129	189			
5	308,0	313,2	0,3106	192			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.58: Härtemessungen X56.7 (3)


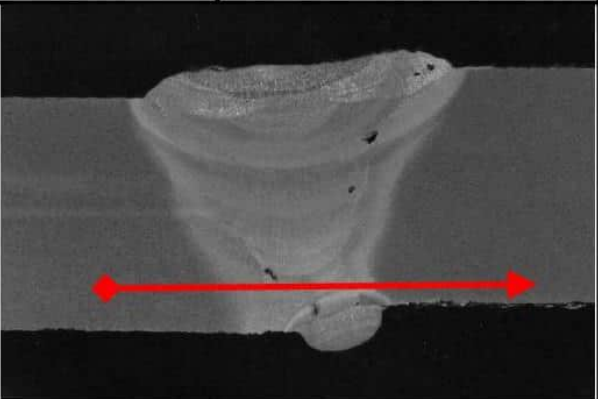
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 19.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	319,0	321,1	0,3201	181	180		GW 1
2	318,4	321,7	0,3201	181			
3	322,4	320,7	0,3215	179			
4	317,8	320,1	0,3189	182			
5	325,2	326,5	0,3259	175			
1	315,3	312,4	0,3138	188	188		WEZ 1
2	312,4	311,3	0,3119	191			
3	316,1	312,8	0,3145	188			
4	314,3	313,8	0,3140	188			
5	315,9	318,0	0,3169	185			
1	306,6	303,5	0,3050	199	280		SG
2	303,7	297,4	0,3006	205			
3	296,2	290,6	0,2934	215			
4	220,3	216,9	0,2186	388			
5	217,0	218,0	0,2175	392			
1	312,8	314,9	0,3138	188	198		WEZ 2
2	313,6	308,0	0,3108	192			
3	303,9	305,5	0,3047	200			
4	299,3	297,2	0,2983	208			
5	304,3	302,2	0,3033	202			
1	312,4	316,1	0,3143	188	192		GW 2
2	314,2	317,8	0,3160	186			
3	305,3	313,4	0,3094	194			
4	302,2	304,9	0,3036	201			
5	308,2	312,2	0,3102	193			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.59: Härtemessungen X56.7 (4)

3.17 Werkstoff X56.7

Die Werkstoffproben wurden einem längsnahtgeschweißten Rohr mit einem Durchmesser von 914,4 mm bei einer Wandstärke von 13,6 mm entnommen.

Die spezifischen Werkstoffkennwerte sind:

Tabelle 3.52: Kenndaten X56.7

Herstellungsjahr	1990	
Herstellungsnorm	API STD 5 LX	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	392
	R _m [MPa]	540
	K _v /A [kgm/cm ²]	4
Materialkennwerte	R _e [MPa]	486
	R _m [MPa]	615
	K _v ¹² [J]	23

Tabelle 3.53: Chemische Zusammensetzung X56.7

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.2	0.32	1.36	0.03	0.02	0.09	0.08	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
0.04	0.01	0.01	0.01					

Tabelle 3.54: Bruchzähigkeiten X56.7

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
X56.7	GW	12	99.6
X56.7	SG	12	122.5
X56.7	SG-UN	12	132.4

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei sind folgende Proben entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Längsnaht (LN)
- Wärmeeinflusszone (WEZ)

¹² Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy (EN ISO 148-1) bei 0°C.

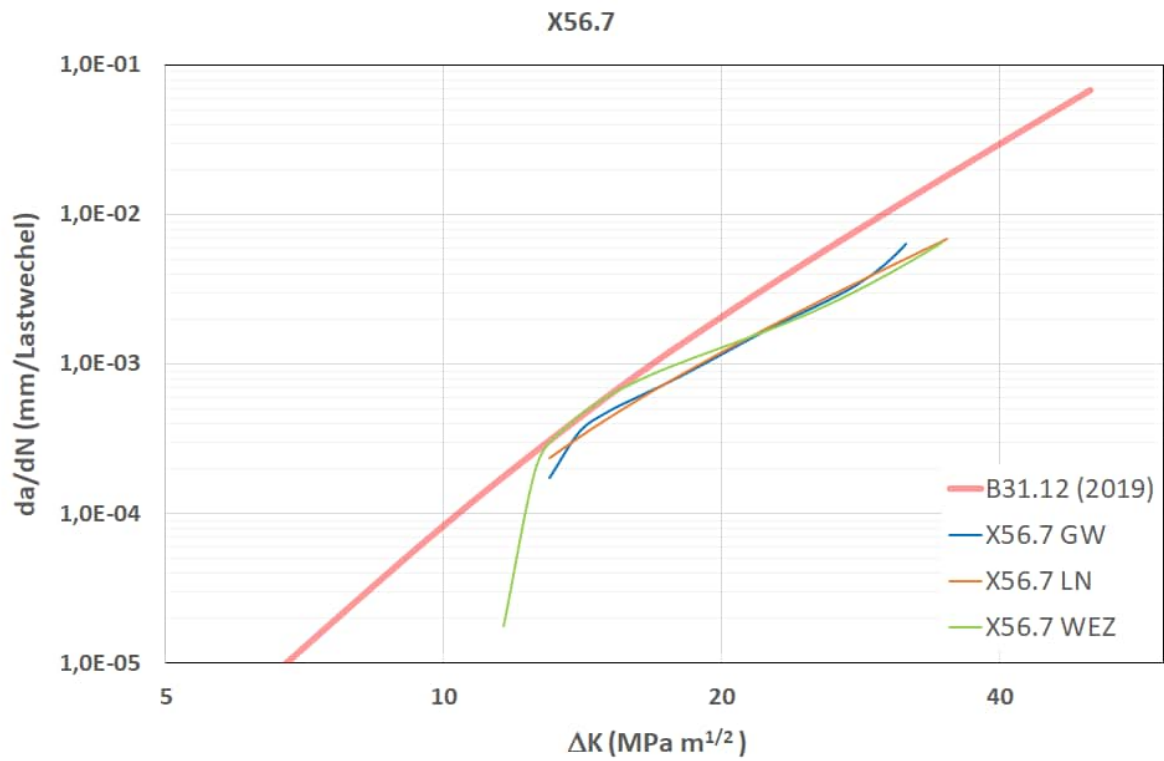


Abbildung 3.60: Rissfortschritt X56.7

An vier metallografischen Schliffproben der Positionsnummer 12 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.60 bis 3.69 zu entnehmen.


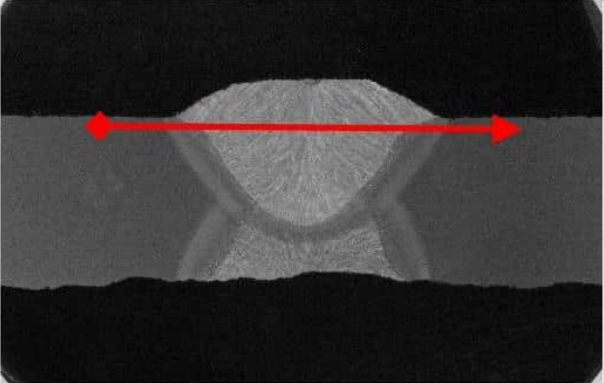
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.1-LN (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	296,2	293,1	0,2946	214	218		GW 1
2	293,1	292,9	0,2930	216			
3	288,5	288,9	0,2887	222			
4	288,8	292,1	0,2904	220			
5	292,7	292,2	0,2925	217			
1	272,7	270,9	0,2718	251	246		WEZ 1
2	275,3	274,6	0,2749	245			
3	268,8	269,2	0,2690	256			
4	279,8	277,5	0,2786	239			
5	280,2	276,3	0,2782	240			
1	275,6	273,8	0,2747	246	240		SG
2	277,3	278,8	0,2780	240			
3	279,4	280,6	0,2800	237			
4	279,0	275,4	0,2772	241			
5	279,8	280,4	0,2801	236			
1	268,6	267,1	0,2679	258	250		WEZ 2
2	270,5	273,6	0,2720	251			
3	273,8	273,6	0,2737	248			
4	270,2	275,0	0,2726	249			
5	274,2	276,3	0,2752	245			
1	292,9	294,1	0,2935	215	213		GW 2
2	294,8	296,2	0,2955	212			
3	291,6	293,5	0,2926	217			
4	295,4	296,6	0,2960	212			
5	299,9	297,2	0,2986	208			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.61: Härtemessungen X56.7 (1)


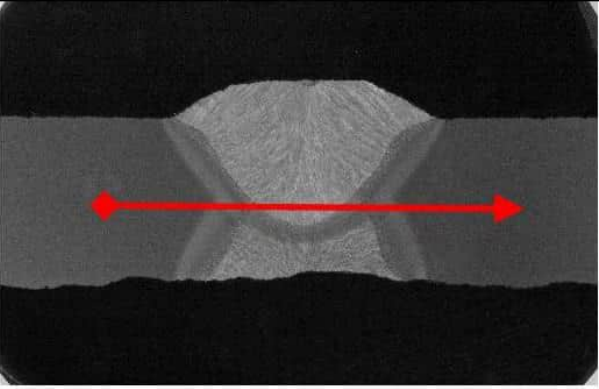
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.1-LN (Mitte) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	314,7	316,7	0,3157	186	191		GW 1
2	316,3	319,0	0,3177	184			
3	312,0	311,5	0,3118	191			
4	304,9	305,1	0,3050	199			
5	308,6	307,2	0,3079	196			
1	284,1	283,5	0,2838	230	223		WEZ 1
2	282,7	279,6	0,2811	235			
3	285,4	283,9	0,2847	229			
4	287,7	289,1	0,2884	223			
5	302,6	305,5	0,3041	201			
1	292,2	287,5	0,2899	221	214		SG
2	293,1	290,6	0,2918	218			
3	296,4	296,4	0,2964	211			
4	298,3	293,5	0,2959	212			
5	298,9	300,1	0,2995	207			
1	276,3	279,2	0,2777	240	231		WEZ 2
2	277,9	277,1	0,2775	241			
3	274,8	276,7	0,2758	244			
4	288,3	290,8	0,2895	221			
5	300,6	297,4	0,2990	207			
1	317,8	319,4	0,3186	183	188		GW 2
2	313,8	312,8	0,3133	189			
3	314,3	314,2	0,3143	188			
4	314,7	312,6	0,3136	189			
5	312,2	314,0	0,3131	189			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.62: Härtemessungen X56.7 (2)


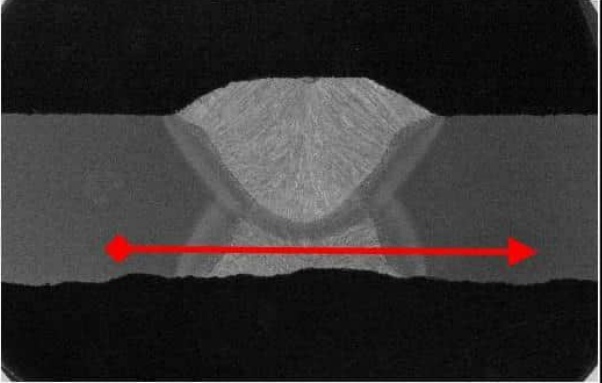
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.1-LN (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	295,8	299,1	0,2974	210	212		GW 1
2	293,7	298,3	0,2960	212			
3	291,6	297,2	0,2944	214			
4	292,0	297,6	0,2948	213			
5	292,9	301,6	0,2972	210			
1	304,9	305,5	0,3052	199	220		WEZ 1
2	293,9	294,9	0,2944	214			
3	291,2	292,2	0,2917	218			
4	285,2	284,8	0,2850	228			
5	276,5	278,4	0,2774	241			
1	287,9	287,3	0,2876	224	228		SG
2	286,2	286,4	0,2863	226			
3	283,9	280,0	0,2820	233			
4	286,2	284,2	0,2852	228			
5	283,3	285,0	0,2842	230			
1	295,6	296,8	0,2962	211	224		WEZ 2
2	287,9	289,8	0,2888	222			
3	286,2	287,5	0,2869	225			
4	285,2	284,6	0,2849	228			
5	282,9	281,5	0,2822	233			
1	299,7	302,4	0,3011	205	209		GW 2
2	293,5	298,9	0,2962	211			
3	292,5	296,2	0,2943	214			
4	296,8	297,4	0,2971	210			
5	298,3	305,1	0,3017	204			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.63: Härtemessungen X56.7 (3)


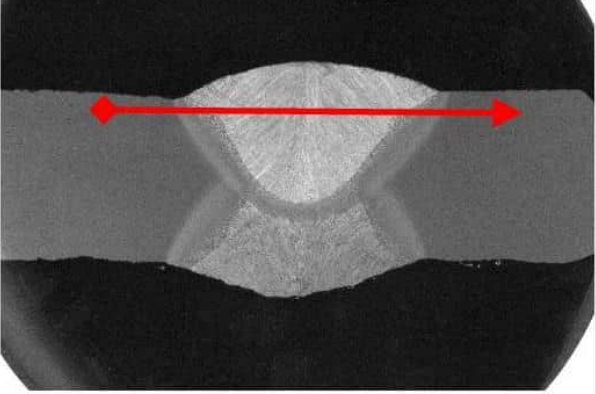
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.2-LN (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	302,8	296,8	0,2998	206	210		GW 1
2	297,6	298,1	0,2979	209			
3	299,7	295,6	0,2976	209			
4	297,5	294,1	0,2958	212			
5	294,7	294,9	0,2948	213			
1	281,0	277,5	0,2793	238	237		WEZ 1
2	282,9	274,2	0,2786	239			
3	276,9	278,1	0,2775	241			
4	282,9	281,3	0,2821	233			
5	281,7	279,6	0,2806	235			
1	282,1	280,8	0,2815	234	231		SG
2	285,8	281,9	0,2838	230			
3	286,6	284,4	0,2855	227			
4	282,3	282,7	0,2825	232			
5	285,2	282,7	0,2840	230			
1	289,8	292,2	0,2910	219	233		WEZ 2
2	280,8	277,3	0,2791	238			
3	283,1	278,5	0,2808	235			
4	280,0	282,1	0,2810	235			
5	280,6	277,1	0,2789	238			
1	304,1	304,1	0,3041	201	204		GW 2
2	298,9	297,4	0,2982	209			
3	302,2	300,5	0,3014	204			
4	301,4	301,0	0,3012	204			
5	302,0	302,4	0,3022	203			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.64: Härtemessungen X56.7 (4)


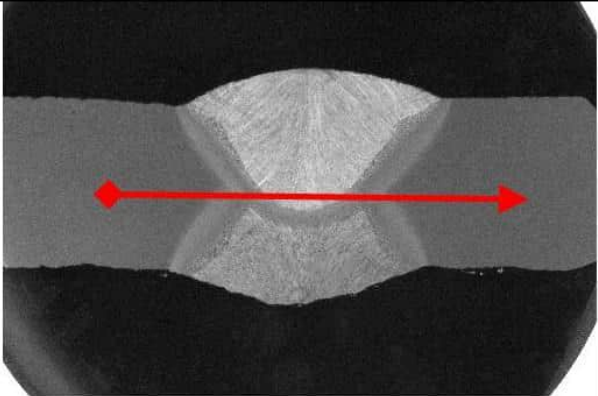
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.2-LN (Mitte) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	315,1	317,8	0,3164	185	188		GW 1
2	318,4	314,9	0,3166	185			
3	313,2	311,1	0,3122	190			
4	313,0	312,6	0,3128	190			
5	311,3	309,5	0,3104	192			
1	282,1	279,6	0,2808	235	215		WEZ 1
2	284,8	285,4	0,2851	228			
3	288,9	287,9	0,2884	223			
4	307,2	305,1	0,3062	198			
5	308,6	310,3	0,3095	194			
1	288,3	286,6	0,2875	224	214		SG
2	290,6	288,3	0,2895	221			
3	292,5	287,9	0,2902	220			
4	302,6	299,7	0,3012	204			
5	302,6	304,1	0,3034	202			
1	285,6	283,3	0,2845	229	220		WEZ 2
2	285,0	285,8	0,2854	228			
3	286,4	285,6	0,2860	227			
4	298,9	296,4	0,2976	209			
5	300,1	299,3	0,2997	206			
1	320,7	321,1	0,3209	180	187		GW 2
2	318,8	316,5	0,3177	184			
3	315,5	312,6	0,3140	188			
4	309,3	309,3	0,3093	194			
5	313,8	312,8	0,3133	189			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.65: Härtemessungen X56.7 (5)


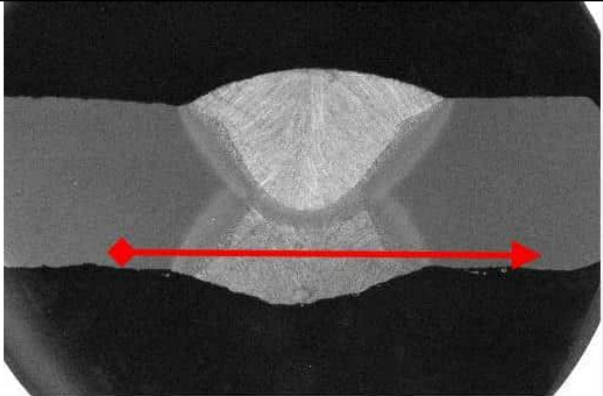
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.2-LN (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	301,6	300,5	0,3011	205	206		GW 1
2	302,0	303,9	0,3029	202			
3	296,4	300,8	0,2986	208			
4	297,6	302,6	0,3001	206			
5	297,2	300,6	0,2989	208			
1	289,1	286,2	0,2877	224	215		WEZ 1
2	286,4	289,8	0,2881	223			
3	294,9	292,9	0,2939	215			
4	293,9	299,1	0,2965	211			
5	304,5	302,8	0,3037	201			
1	300,1	302,4	0,3013	204	202		SG
2	302,2	302,8	0,3025	203			
3	300,1	299,9	0,3000	206			
4	308,2	306,4	0,3073	196			
5	304,9	304,1	0,3045	200			
1	307,6	306,4	0,3070	197	209		WEZ 2
2	299,3	295,6	0,2974	210			
3	297,0	298,1	0,2975	209			
4	294,5	292,9	0,2937	215			
5	293,9	291,6	0,2928	216			
1	310,3	310,7	0,3105	192	201		GW 2
2	304,1	307,4	0,3057	198			
3	300,8	302,2	0,3015	204			
4	299,3	301,8	0,3006	205			
5	298,5	301,4	0,2999	206			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.66: Härtemessungen X56.7 (6)


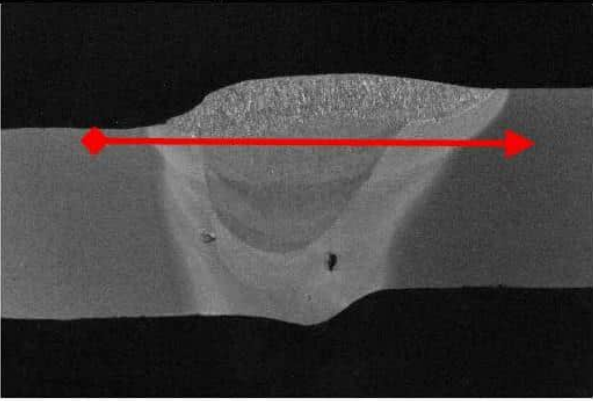
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.1-UN (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	305,3	308,4	0,3069	197	197		GW 1
2	305,7	308,6	0,3072	197			
3	304,7	305,1	0,3049	199			
4	306,4	310,1	0,3082	195			
5	305,7	309,7	0,3077	196			
1	296,4	295,8	0,2961	212	221		WEZ 1
2	285,0	286,9	0,2859	227			
3	284,0	292,0	0,2880	224			
4	287,6	285,8	0,2867	226			
5	294,3	294,2	0,2943	214			
1	308,0	303,0	0,3055	199	188		SG
2	305,9	304,7	0,3053	199			
3	314,5	315,7	0,3151	187			
4	314,1	314,7	0,3144	188			
5	332,3	331,5	0,3319	168			
1	291,0	287,7	0,2894	221	222		WEZ 2
2	286,6	291,4	0,2890	222			
3	286,9	287,7	0,2873	225			
4	290,6	291,6	0,2911	219			
5	289,6	287,3	0,2884	223			
1	304,3	312,6	0,3084	195	196		GW 2
2	306,3	314,5	0,3104	192			
3	303,7	312,6	0,3081	195			
4	304,1	306,8	0,3054	199			
5	302,0	310,3	0,3062	198			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.67: Härtemessungen X56.7 (7)


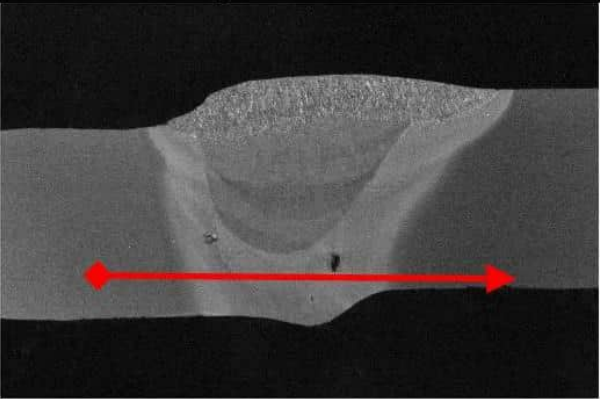
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.1-UN (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	303,9	309,5	0,3067	197	194		GW 1
2	303,7	307,6	0,3056	199			
3	305,1	310,1	0,3076	196			
4	309,1	312,2	0,3106	192			
5	313,6	317,6	0,3156	186			
1	317,4	316,3	0,3169	185	179		WEZ 1
2	318,4	319,0	0,3187	183			
3	324,2	323,2	0,3237	177			
4	322,3	323,6	0,3230	178			
5	328,2	331,1	0,3296	171			
1	313,4	311,3	0,3124	190	180		SG
2	315,3	312,8	0,3140	188			
3	326,5	326,1	0,3263	174			
4	320,1	317,6	0,3188	182			
5	337,3	334,8	0,3360	164			
1	335,4	340,2	0,3378	163	174		WEZ 2
2	322,3	326,3	0,3243	176			
3	313,6	323,0	0,3183	183			
4	322,1	329,6	0,3259	175			
5	320,5	330,0	0,3252	175			
1	316,3	324,4	0,3204	181	184		GW 2
2	314,2	322,6	0,3184	183			
3	314,5	323,4	0,3189	182			
4	314,0	320,3	0,3172	184			
5	308,4	319,7	0,3140	188			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.68: Härtemessungen X56.7 (8)


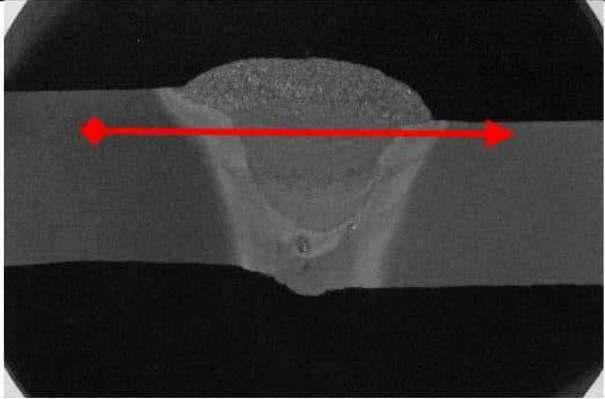
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.2-UN (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	313,0	319,3	0,3161	186	192		GW 1
2	310,1	313,6	0,3119	191			
3	305,7	309,7	0,3077	196			
4	305,5	313,8	0,3097	193			
5	308,0	310,5	0,3093	194			
1	291,4	293,3	0,2924	217	226		WEZ 1
2	285,8	286,2	0,2860	227			
3	284,4	286,4	0,2854	228			
4	280,6	286,9	0,2838	230			
5	284,4	284,6	0,2845	229			
1	315,7	320,3	0,3180	183	190		SG
2	316,5	312,6	0,3146	187			
3	310,1	300,5	0,3053	199			
4	312,2	307,8	0,3100	193			
5	316,5	313,2	0,3149	187			
1	300,5	297,8	0,2992	207	218		WEZ 2
2	289,3	288,1	0,2887	222			
3	281,9	281,7	0,2818	234			
4	290,4	288,3	0,2893	222			
5	299,3	299,1	0,2992	207			
1	315,1	316,3	0,3157	186	191		GW 2
2	312,8	316,7	0,3148	187			
3	310,3	309,9	0,3101	193			
4	310,1	311,1	0,3106	192			
5	304,3	309,3	0,3068	197			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.69: Härtemessungen X56.7 (9)


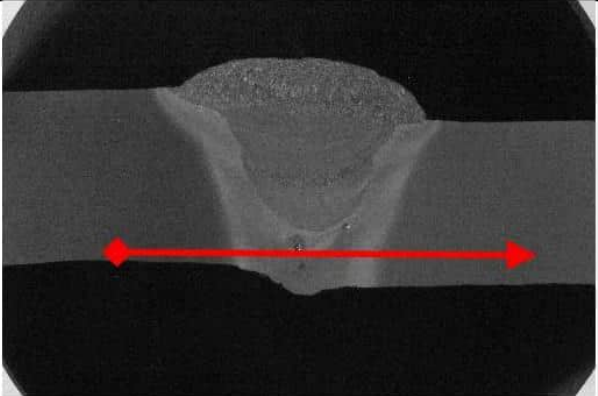
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 12.2-UN (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	315,2	326,3	0,3207	180	187		GW 1
2	309,7	320,9	0,3153	187			
3	313,2	316,9	0,3151	187			
4	306,6	315,1	0,3108	192			
5	309,1	316,5	0,3128	190			
1	314,7	318,6	0,3166	185	185		WEZ 1
2	318,2	314,9	0,3165	185			
3	318,0	316,1	0,3171	184			
4	318,0	316,7	0,3174	184			
5	319,0	314,0	0,3165	185			
1	326,9	325,0	0,3260	175	178		SG
2	313,4	314,0	0,3137	188			
3	318,4	315,3	0,3168	185			
4	332,1	330,2	0,3312	169			
5	331,3	328,4	0,3298	170			
1	320,7	318,8	0,3197	181	182		WEZ 2
2	320,1	318,8	0,3194	182			
3	320,1	317,8	0,3189	182			
4	320,5	320,3	0,3204	181			
5	318,2	318,0	0,3181	183			
1	315,9	319,9	0,3179	184	190		GW 2
2	313,6	317,4	0,3155	186			
3	311,6	316,1	0,3139	188			
4	307,8	312,2	0,3100	193			
5	303,5	309,7	0,3066	197			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.70: Härtemessungen X56.7 (10)

3.18 Werkstoff St60.7

Die Proben wurden einem spiralnahtgeschweißtem Rohr DN 950 mit 13 mm Wandstärke entnommen.

Der Grundwerkstoff weist folgende Eigenschaften auf:

Tabelle 3.55: Kenndaten St60.7

Herstellungsjahr	1973	
Herstellungsnorm	DIN 17172 / DIN 2470	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	412
	R _m [MPa]	549
	K _v /A [kgm/cm ²]	4
Materialkennwerte	R _e [MPa]	517
	R _m [MPa]	663
	K _v /A [kgm/cm ²] ¹³	6.7

Tabelle 3.56: Chemische Zusammensetzung St60.7

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.17	0.29	1.39	0.02	0.011			
	Ni	V	Ti	Nb				
		0.06						

Tabelle 3.57: Bruchzähigkeiten St60.7

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
St60.7	GW	6	148.1
St60.7	SG	6	129.8

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei sind folgende Proben entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut der Umfangsnaht (SG-UN)

¹³ Kerbschlagbiegeversuch nach DIN 50115, Kerbform: DVM, Temperatur: 0 °C.

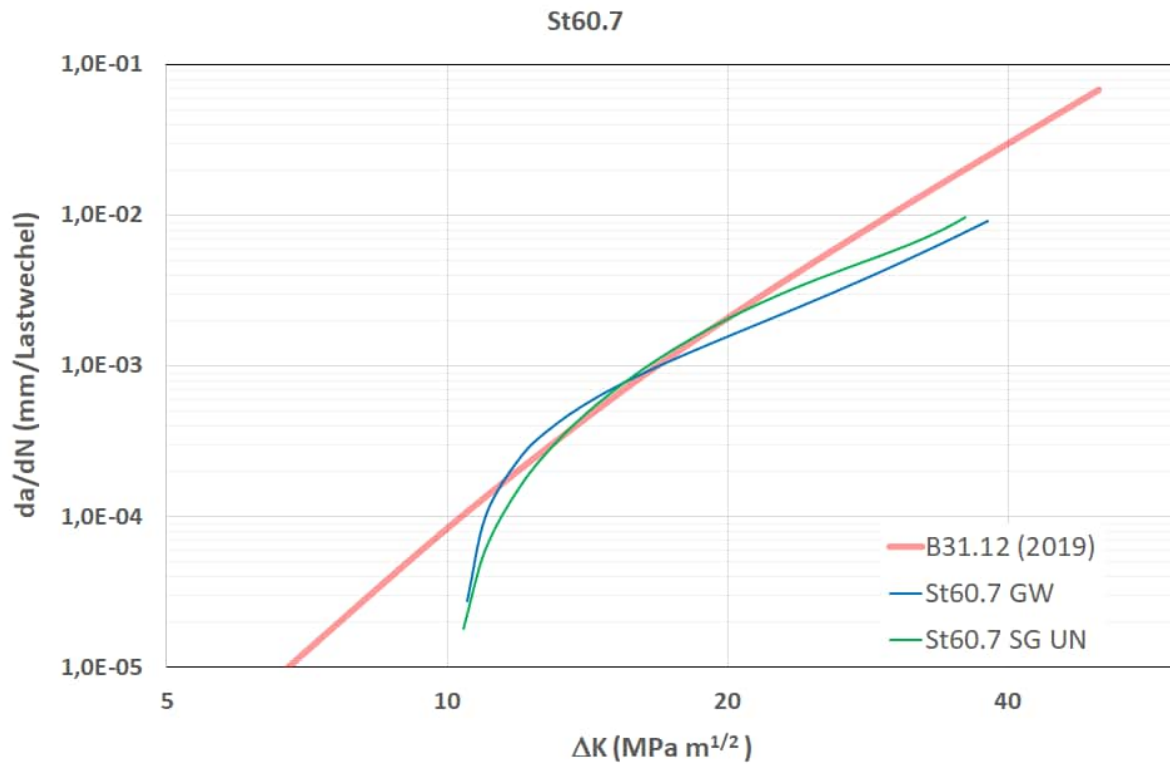


Abbildung 3.71: Rissfortschritt St60.7

An zwei metallografischen Schliifproben der Positionsnummer 6 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.71 bis 3.74 zu entnehmen.


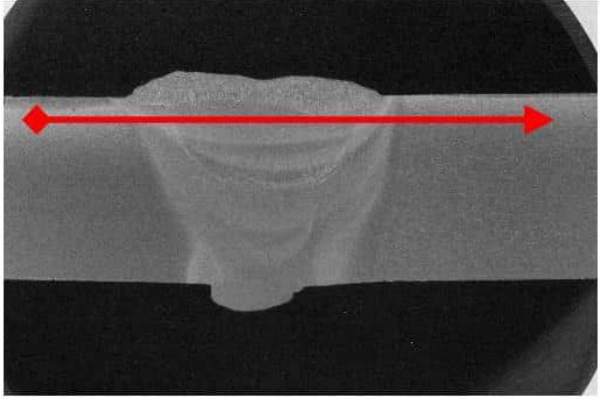
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 6.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	269,2	271,9	0,2706	253	244		GW 1
2	275,0	274,8	0,2749	245			
3	273,6	276,5	0,2750	245			
4	276,3	277,9	0,2771	242			
5	279,6	279,0	0,2793	238			
1	258,4	258,8	0,2586	277	279		WEZ 1
2	249,9	254,5	0,2522	292			
3	245,4	262,7	0,2540	287			
4	251,8	254,0	0,2529	290			
5	271,9	272,1	0,2720	251			
1	302,8	305,0	0,3039	201	187		SG
2	326,3	323,8	0,3250	176			
3	320,3	320,1	0,3202	181			
4	307,4	305,1	0,3063	198			
5	323,8	323,0	0,3234	177			
1	312,2	310,7	0,3114	191	208		WEZ 2
2	302,0	301,0	0,3015	204			
3	296,8	296,8	0,2968	210			
4	293,1	294,5	0,2938	215			
5	291,2	288,5	0,2899	221			
1	292,0	292,5	0,2923	217	221		GW 2
2	290,0	288,9	0,2894	221			
3	288,5	287,1	0,2878	224			
4	289,8	288,9	0,2893	221			
5	288,1	292,2	0,2902	220			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.72: Härtemessungen St60.7 (1)


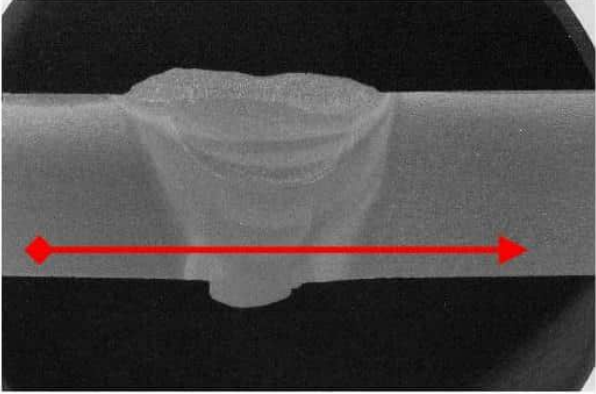
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 6.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	280,0	286,0	0,2830	232	229		GW 1
2	279,6	280,0	0,2798	237			
3	280,8	283,3	0,2821	233			
4	284,2	290,2	0,2872	225			
5	288,3	294,3	0,2913	219			
1	304,5	306,8	0,3056	199	201		WEZ 1
2	301,0	302,6	0,3018	204			
3	302,6	303,9	0,3033	202			
4	302,0	302,8	0,3024	203			
5	305,7	306,4	0,3061	198			
1	316,1	318,0	0,3170	184	179		SG
2	312,6	310,7	0,3117	191			
3	327,3	327,5	0,3274	173			
4	329,2	326,7	0,3279	172			
5	326,9	328,6	0,3277	173			
1	312,6	313,4	0,3130	189	199		WEZ 2
2	307,6	306,6	0,3071	197			
3	302,4	299,9	0,3012	204			
4	301,4	302,0	0,3017	204			
5	305,7	304,7	0,3052	199			
1	294,7	295,4	0,2951	213	216		GW 2
2	294,7	294,9	0,2948	213			
3	290,0	293,5	0,2917	218			
4	291,4	293,5	0,2925	217			
5	290,8	293,3	0,2920	217			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.73: Härtemessungen St60.7 (2)


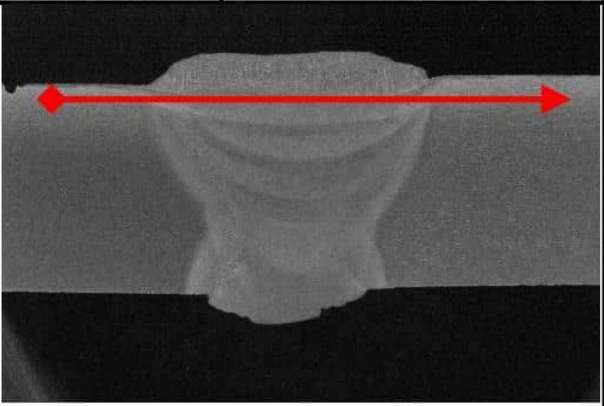
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 6.2; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	279,0	280,4	0,2797	237	233		GW 1
2	281,2	283,5	0,2824	233			
3	280,0	280,4	0,2802	236			
4	284,0	284,6	0,2843	229			
5	284,0	285,4	0,2847	229			
1	252,8	255,5	0,2542	287	267		WEZ 1
2	241,2	244,1	0,2426	315			
3	252,2	256,4	0,2543	287			
4	275,4	276,7	0,2761	243			
5	305,5	302,0	0,3038	201			
1	313,8	312,2	0,3130	189	189		SG
2	320,9	319,2	0,3201	181			
3	312,4	310,3	0,3113	191			
4	311,1	309,1	0,3101	193			
5	314,3	312,0	0,3131	189			
1	269,0	269,4	0,2692	256	245		WEZ 2
2	295,1	252,2	0,2736	248			
3	254,7	253,6	0,2542	287			
4	294,5	290,0	0,2923	217			
5	292,2	292,5	0,2923	217			
1	285,0	286,0	0,2855	228	229		GW 2
2	285,6	286,2	0,2859	227			
3	282,1	285,4	0,2837	230			
4	278,6	278,3	0,2784	239			
5	289,8	287,5	0,2886	223			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.74: Härtemessungen St60.7 (3)


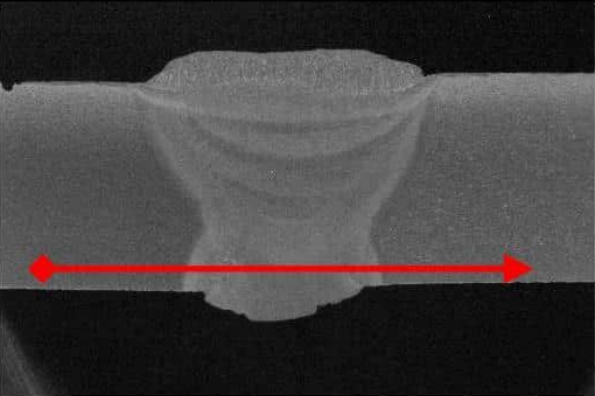
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 6.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	280,8	284,1	0,2825	232	223		GW 1
2	287,7	288,7	0,2882	223			
3	284,2	292,0	0,2881	223			
4	288,7	291,6	0,2902	220			
5	291,8	293,1	0,2925	217			
1	287,3	287,3	0,2873	225	212		WEZ 1
2	292,3	294,1	0,2932	216			
3	300,6	299,7	0,3001	206			
4	297,9	298,5	0,2982	209			
5	303,7	302,4	0,3030	202			
1	320,5	318,4	0,3194	182	183		SG
2	331,9	329,2	0,3305	170			
3	323,2	322,6	0,3229	178			
4	311,3	309,1	0,3102	193			
5	311,1	310,1	0,3106	192			
1	310,7	310,5	0,3106	192	192		WEZ 2
2	305,1	305,5	0,3053	199			
3	309,9	309,3	0,3096	193			
4	312,6	311,3	0,3120	191			
5	314,5	316,1	0,3153	187			
1	292,1	296,6	0,2943	214	217		GW 2
2	291,2	292,2	0,2917	218			
3	291,0	292,7	0,2918	218			
4	290,6	295,6	0,2931	216			
5	288,5	292,7	0,2906	220			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.75: Härtemessungen St60.7 (4)

3.19 Werkstoff P460 NH

Die Proben wurden einem rohrförmigen Überschieber mit einem Durchmesser von 700 mm und einer Wandstärke von 20 mm entnommen.

Der Werkstoff weist die nachfolgenden Eigenschaften auf:

Tabelle 3.58: Kenndaten P460 NH

Herstellungsjahr	2017	
Herstellungsnorm	DIN EN 10028-3	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	445
	R _m [MPa]	570
	K _v [J]	40
Materialkennwerte	R _e [MPa]	488
	R _m [MPa]	652
	K _v ¹⁴ [J]	80

Tabelle 3.59: Chemische Zusammensetzung P460 NH

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.177	0.253	1.508	0.013	0.009	0.018	0.046	0.012
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.024	0.143	0.002	0.001				

Tabelle 3.60: Bruchzähigkeiten P460 NH

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
P460 NH	GW	8	104.1
P460 NH	SG	8	154.9

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Dabei sind Proben folgender Arten entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Längsnaht (LN)

¹⁴ Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN10045, V-Kerb, quer

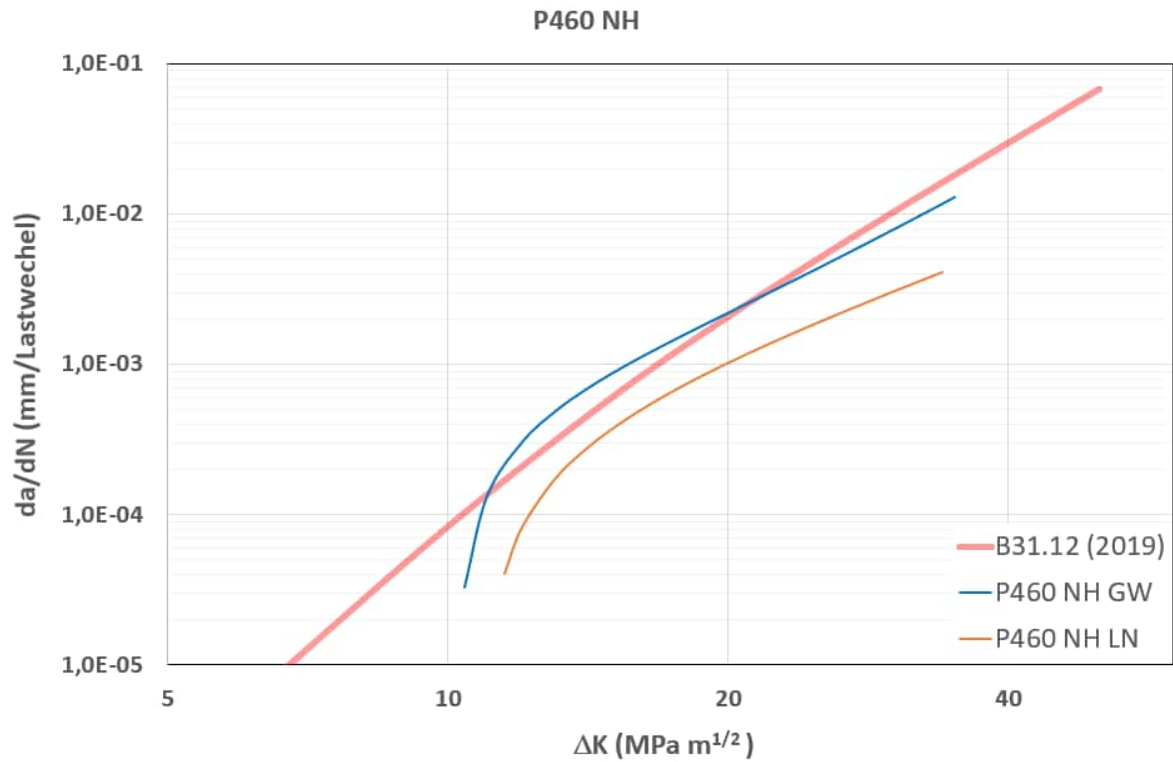


Abbildung 3.76: Rissfortschritt P460 NH

An zwei metallografischen Schliifproben der Positionsnummer 8 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.76 bis 3.80 zu entnehmen.


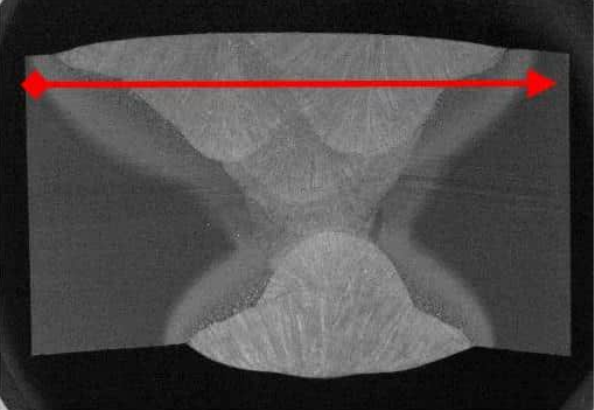
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 8.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23±5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	299,9	302,6	0,3013	204	206		GW 1
2	301,0	304,7	0,3028	202			
3	302,2	307,8	0,3050	199			
4	293,1	298,9	0,2960	212			
5	292,5	298,5	0,2955	212			
1	269,4	270,5	0,2699	254	255		WEZ 1
2	269,2	270,1	0,2696	255			
3	270,2	268,8	0,2695	255			
4	271,9	268,6	0,2703	254			
5	268,8	269,4	0,2691	256			
1	278,6	275,2	0,2769	242	242		SG
2	281,3	276,7	0,2790	238			
3	275,4	275,2	0,2753	245			
4	276,1	275,6	0,2759	244			
5	280,2	276,9	0,2785	239			
1	266,1	266,5	0,2663	261	261		WEZ 2
2	264,6	267,3	0,2660	262			
3	266,9	269,6	0,2683	258			
4	263,6	269,4	0,2665	261			
5	265,5	265,7	0,2656	263			
1	310,5	313,8	0,3122	190	198		GW 2
2	307,0	310,5	0,3088	195			
3	304,3	309,1	0,3067	197			
4	300,5	302,6	0,3016	204			
5	299,5	304,1	0,3018	204			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.77: Härtemessungen P460 NH (1)


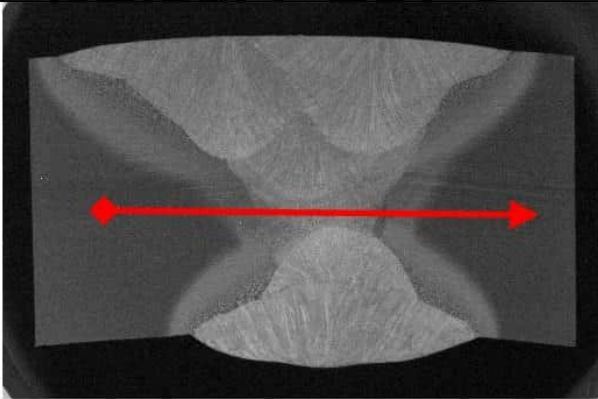
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 8.1; Mitte Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	299,9	299,1	0,2995	207	206		GW 1
2	299,3	300,2	0,2997	206			
3	298,7	302,4	0,3006	205			
4	296,6	302,4	0,2995	207			
5	301,2	303,3	0,3022	203			
1	285,0	280,6	0,2828	232	233		WEZ 1
2	292,3	291,4	0,2918	218			
3	282,3	283,9	0,2831	231			
4	286,9	283,9	0,2854	228			
5	269,8	268,4	0,2691	256			
1	291,4	289,3	0,2904	220	230		SG
2	279,4	277,7	0,2786	239			
3	288,7	284,2	0,2864	226			
4	287,9	284,4	0,2861	227			
5	281,5	279,0	0,2802	236			
1	274,2	276,7	0,2754	244	224		WEZ 2
2	308,9	309,3	0,3091	194			
3	294,1	288,9	0,2915	218			
4	303,7	301,6	0,3026	202			
5	267,1	266,9	0,2670	260			
1	301,4	306,4	0,3039	201	202		GW 2
2	297,2	299,9	0,2986	208			
3	302,0	305,9	0,3040	201			
4	301,4	307,0	0,3042	200			
5	304,9	306,8	0,3058	198			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.78: Härtemessungen P460 NH (2)


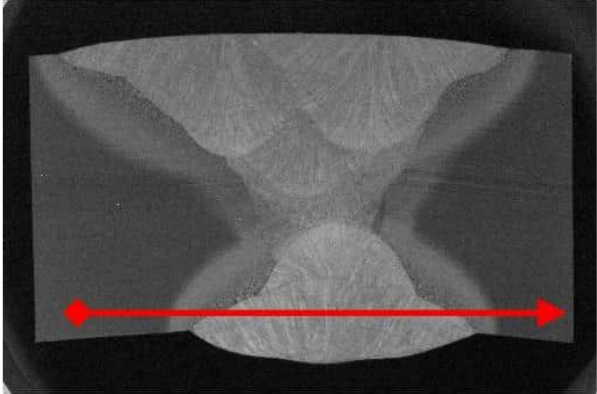
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 8.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	292,9	300,1	0,2965	211	205		GW 1
2	299,1	302,8	0,3010	205			
3	299,7	305,7	0,3027	202			
4	304,1	306,2	0,3051	199			
5	297,0	302,0	0,2995	207			
1	261,9	260,5	0,2612	272	276		WEZ 1
2	259,3	262,4	0,2608	273			
3	260,9	258,4	0,2597	275			
4	257,4	251,2	0,2543	287			
5	259,0	260,7	0,2599	275			
1	276,3	273,4	0,2748	246	242		SG
2	279,8	276,5	0,2781	240			
3	278,3	276,1	0,2772	241			
4	275,8	277,3	0,2766	242			
5	278,1	277,3	0,2777	240			
1	263,8	265,7	0,2647	265	270		WEZ 2
2	259,3	263,8	0,2615	271			
3	257,8	258,0	0,2579	279			
4	259,7	262,1	0,2609	272			
5	264,6	264,6	0,2646	265			
1	303,5	308,2	0,3058	198	198		GW 2
2	302,8	309,1	0,3060	198			
3	300,6	305,3	0,3029	202			
4	303,9	310,7	0,3073	196			
5	305,9	310,3	0,3081	195			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.79: Härtemessungen P460 NH (3)


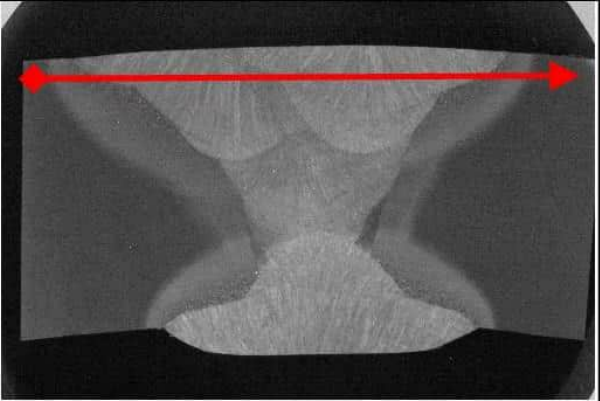
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 8.2; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	291,0	292,5	0,2917	218	218		GW 1
2	296,6	299,7	0,2982	209			
3	290,2	294,1	0,2921	217			
4	287,1	291,2	0,2891	222			
5	286,0	289,3	0,2877	224			
1	269,4	269,2	0,2693	256	253		WEZ 1
2	271,7	269,6	0,2707	253			
3	274,0	271,9	0,2730	249			
4	277,9	267,1	0,2725	250			
5	266,7	271,3	0,2690	256			
1	279,2	277,3	0,2782	240	242		SG
2	282,7	277,1	0,2799	237			
3	276,7	275,0	0,2758	244			
4	275,0	274,0	0,2745	246			
5	275,2	275,4	0,2753	245			
1	271,5	272,7	0,2721	250	256		WEZ 2
2	269,2	266,3	0,2678	259			
3	269,2	266,5	0,2679	258			
4	266,7	263,4	0,2651	264			
5	274,0	273,8	0,2739	247			
1	308,9	310,5	0,3097	193	203		GW 2
2	309,5	311,5	0,3105	192			
3	293,1	299,5	0,2963	211			
4	298,3	305,3	0,3018	204			
5	292,0	297,8	0,2949	213			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.80: Härtemessungen P460 NH (4)


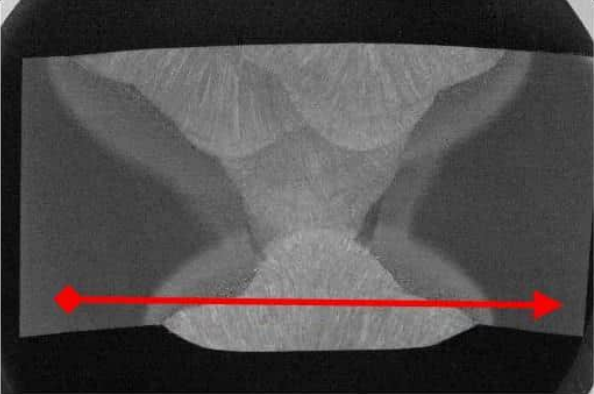
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 8.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	300,1	304,9	0,3025	203	204		GW 1
2	299,7	303,0	0,3014	204			
3	300,1	303,0	0,3016	204			
4	303,2	305,3	0,3043	200			
5	298,7	300,3	0,2995	207			
1	265,9	269,6	0,2678	259	269		WEZ 1
2	265,3	265,5	0,2654	263			
3	260,3	260,9	0,2606	273			
4	256,6	256,8	0,2567	281			
5	263,2	263,6	0,2634	267			
1	284,0	277,5	0,2807	235	235		SG
2	279,4	282,5	0,2809	235			
3	281,9	279,0	0,2804	236			
4	281,7	282,3	0,2820	233			
5	280,2	278,5	0,2794	238			
1	264,2	266,7	0,2655	263	266		WEZ 2
2	262,0	266,9	0,2644	265			
3	258,4	258,8	0,2586	277			
4	267,8	266,1	0,2669	260			
5	263,6	266,5	0,2651	264			
1	294,3	304,5	0,2994	207	207		GW 2
2	295,4	304,1	0,2997	206			
3	295,2	299,9	0,2975	209			
4	294,3	301,6	0,2980	209			
5	301,2	305,1	0,3031	202			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.81: Härtemessungen P460 NH (5)

3.20 Werkstoff X70

Die Proben wurde einem spiralnahtgeschweißten Rohr DN1100 mit einer Wandstärke von 15 mm entnommen.

Dessen Grundwerkstoff weist folgende Eigenschaften auf:

Tabelle 3.61: Kenndaten X70

Herstellungsjahr	1974	
Herstellungsnorm	DIN 2470/2 / DIN 17172 / Ruhrgasnorm RN 4205	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	491
	R _m [MPa]	598
	K _v /A [kgm/cm ²]	4
Materialkennwerte	R _e [MPa]	517
	R _m [MPa]	648
	K _v /A [kgm/cm ²] ¹⁵	7.1

Tabelle 3.62: Chemische Zusammensetzung X70

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.12	0.25	1.56	0.02	0.009			
	Ni	V	Ti	Nb				
		0.05		0.049				

Tabelle 3.63: Bruchzähigkeiten X70

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
X70	GW	11	122.5
X70	SG	11	94.9
X70	WEZ	11	88.6
X70	GW	4	81.8
X70	SG	4	103.0
X70	WEZ	4	76.0

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden. Untersucht wurden Position 4 (Bereich der Spiralnaht) sowie Position 11 (Bereich der Umfangsnaht).

Die Untersuchung beider Positionen umfasst folgende Zonen:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut (SG)
- Wärmeeinflusszone (WEZ)

¹⁵ Kerbschlagbiegetest quer, Probenform DVM, gemäß DIN 50115, bei 0 °C.

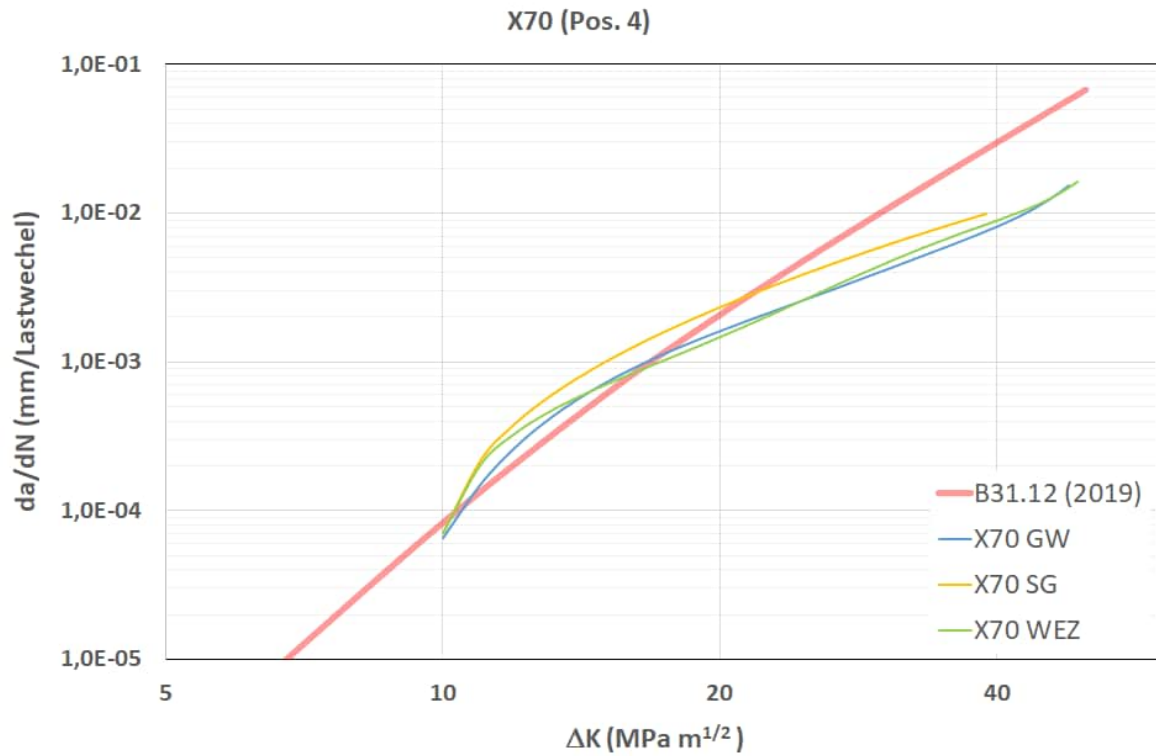


Abbildung 3.18: Rissfortschritt X70 (Pos.4)

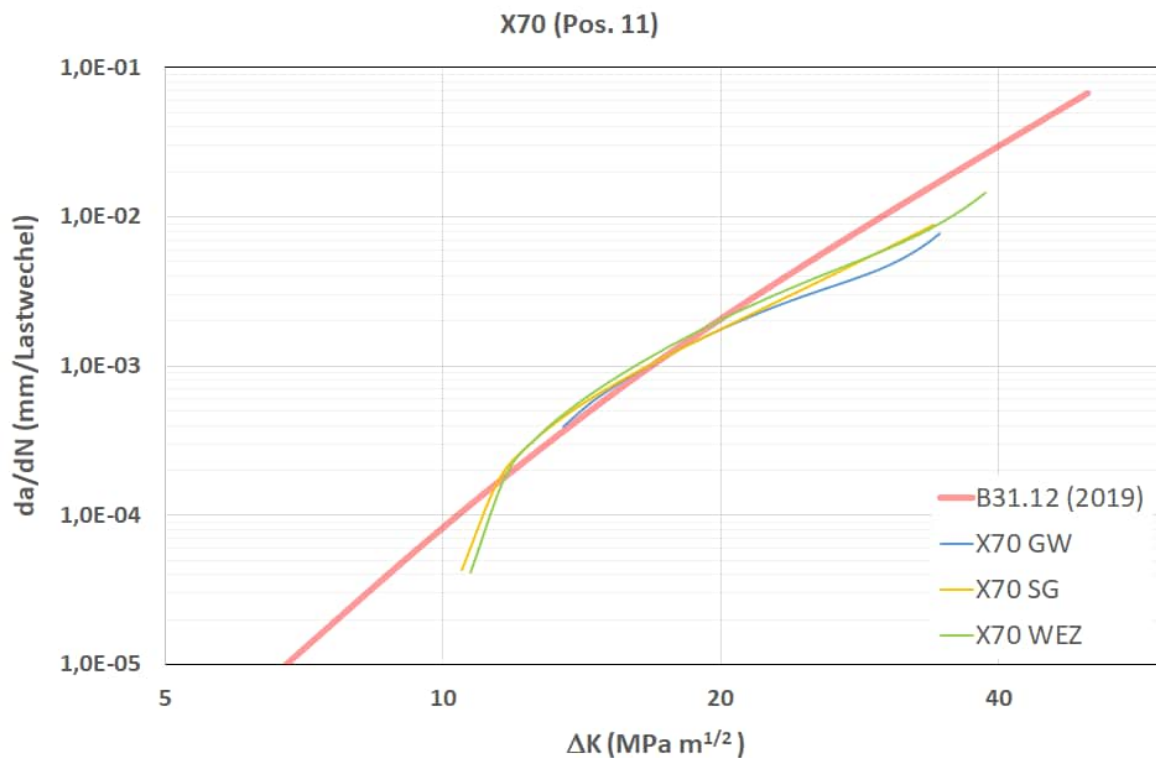


Abbildung 3.19: Rissfortschritt X70 (Pos.11)

3.21 Werkstoff L485

Die Proben der Positionsnummern 17, 32, 33, 34, 35 36,37,38, 40 und 43 wurden einem spiralnahtgeschweißten Rohr mit einem Durchmesser von 1016 mm und einer Wandstärke von 16,8 mm entnommen. Die Proben der Positionsnummer 2 wurden einem spiralnahtgeschweißtem Rohr DN1200 mit einer Wandstärke von 23 mm entnommen.

Die Kennwerte für die erstgenannten Positionsnummern lauten:

Tabelle 3.64: Kenndaten L485

Herstellungsjahr	2017	
Herstellungsnormen	DIN EN ISO 3183 Anhang M	
Spez. min. Kennwerte ¹⁶	R _e [MPa]	485
	R _m [MPa]	605
	K _v [J]	90
Materialkennwerte	R _e [MPa]	527
	R _m [MPa]	627
	K _v ¹⁷ [J]	280

Tabelle 3.65: Chemische Zusammensetzung L485

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.05	0.229	1.41	0.01	0.001	0.181	0.034	0.004
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.258	0.004	0.038	0.059				

¹⁶ Gemäß DIN EN ISO 3181 und RN 268-022 (Mai 2016)

¹⁷ Kerbschlagbiegetest nach Charpy (DIN EN ISO 148) mit V-Kerb bei 0 °C.

Tabelle 3.66: Bruchzähigkeiten L485

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
L485	GW	2	134.2
L485	SG	2	129.8
L485	WEZ	2	92.4
L485	GW	17	124.3
L485	SG	17	146.5
L485	SG-UN	17	100.8
L485	GW (Luft)	32	480.4 ¹⁸
L485	GW (0,2 bar)	33	203.2
L485	GW (1 bar)	34	198.6
L485	GW (2 bar)	35	186.7
L485	GW (5 bar)	36	173.9
L485	GW (10 bar)	37	175.8
L485	GW (20 bar)	38	163.6
L485	SG-UN (gehärtet)	40	74.4 (Rissprung)
L485	WEZ-UN (gehärtet)	40	67.9
L485	SG-WEZ	43	148.8
L485	SG-UN	43	100.8

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums der Positionsnummer 17 in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Hierbei wurden folgende Zonen untersucht:

- Grundwerkstoff (GW)
- Wärmeeinflusszone der Umfangsnaht (UN-WEZ)
- Wärmeeinflusszone (WEZ)

¹⁸ Abgeschätzter Wert, da die Auswertung aufgrund der Zähigkeitseigenschaften des Materials nicht normgerecht durchgeführt werden konnte

Außerdem wurde das Risswachstum zusätzlich bei einem R-Wert von $R = 0.1$ und $R = 0.7$ ermittelt. Diese Kennlinien sind auch dem nachfolgenden Diagramm zu entnehmen.

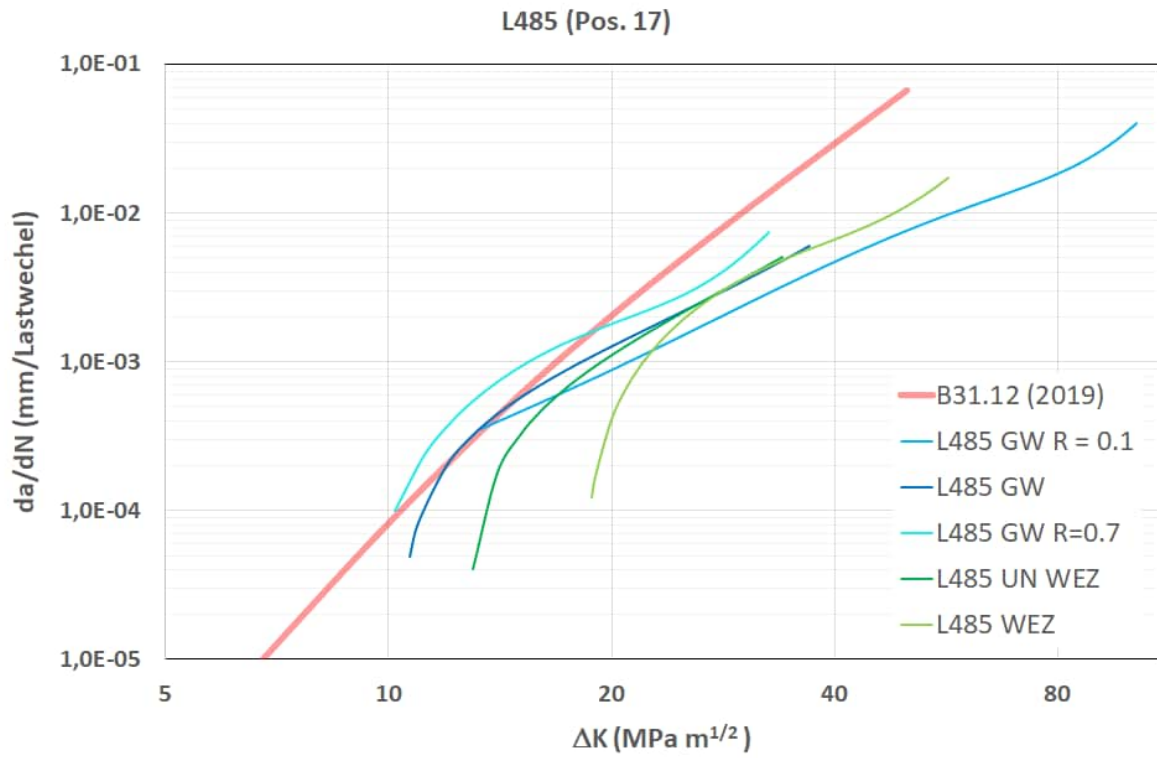


Abbildung 3.82: Rissfortschritt L485 (Pos.17)

Des Weiteren wurde der Werkstoff bei verschiedenen Drücken von Wasserstoff $p = 0 \text{ bar}$, $p = 0.2 \text{ bar}$, $p = 1 \text{ bar}$, $p = 2 \text{ bar}$, $p = 5 \text{ bar}$, $p = 10 \text{ bar}$ und $p = 20 \text{ bar}$ untersucht. Die Kennlinien sind nachfolgend dargestellt.

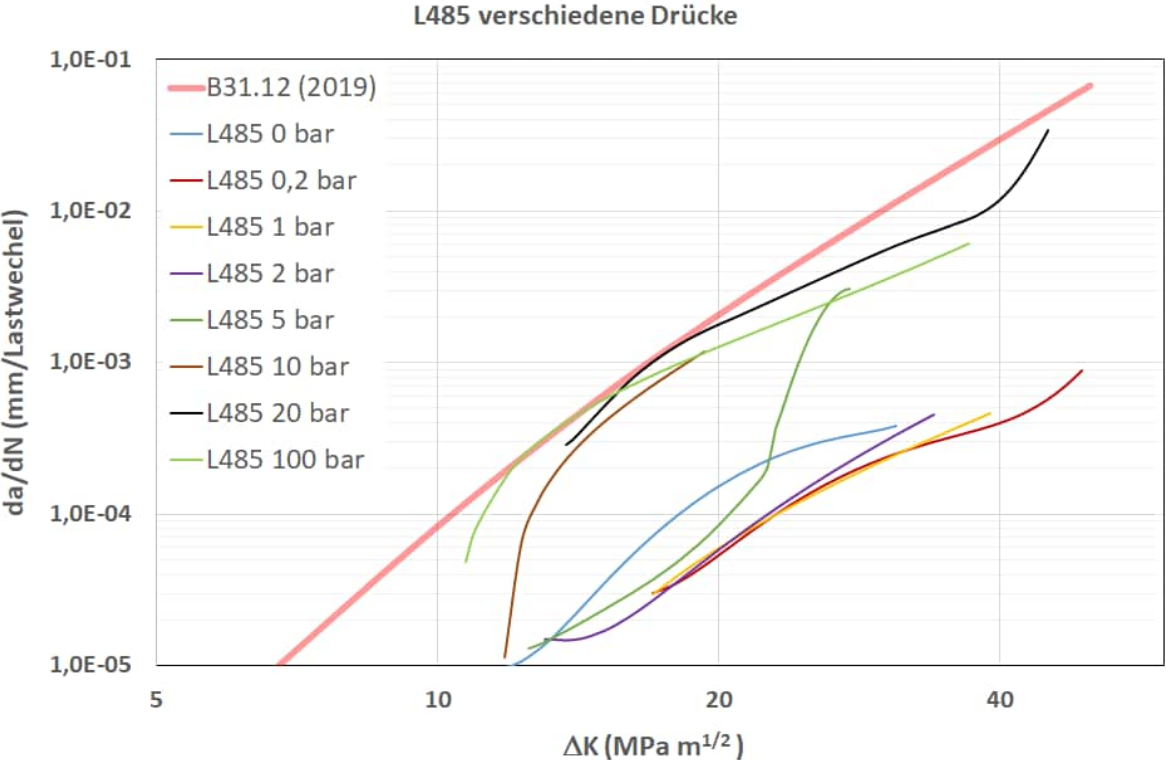


Abbildung 3.83: Rissfortschritt L485 bei verschiedenen Drücken

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums der Positionsnummer 43 (Bereich der Rundschweißnaht vergütet auf $\text{Ø } 296 \text{ HV}$) in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Die Proben wurden dem Schweißgut (SG) sowie der Wärmeeinflusszone (WEZ) entnommen.

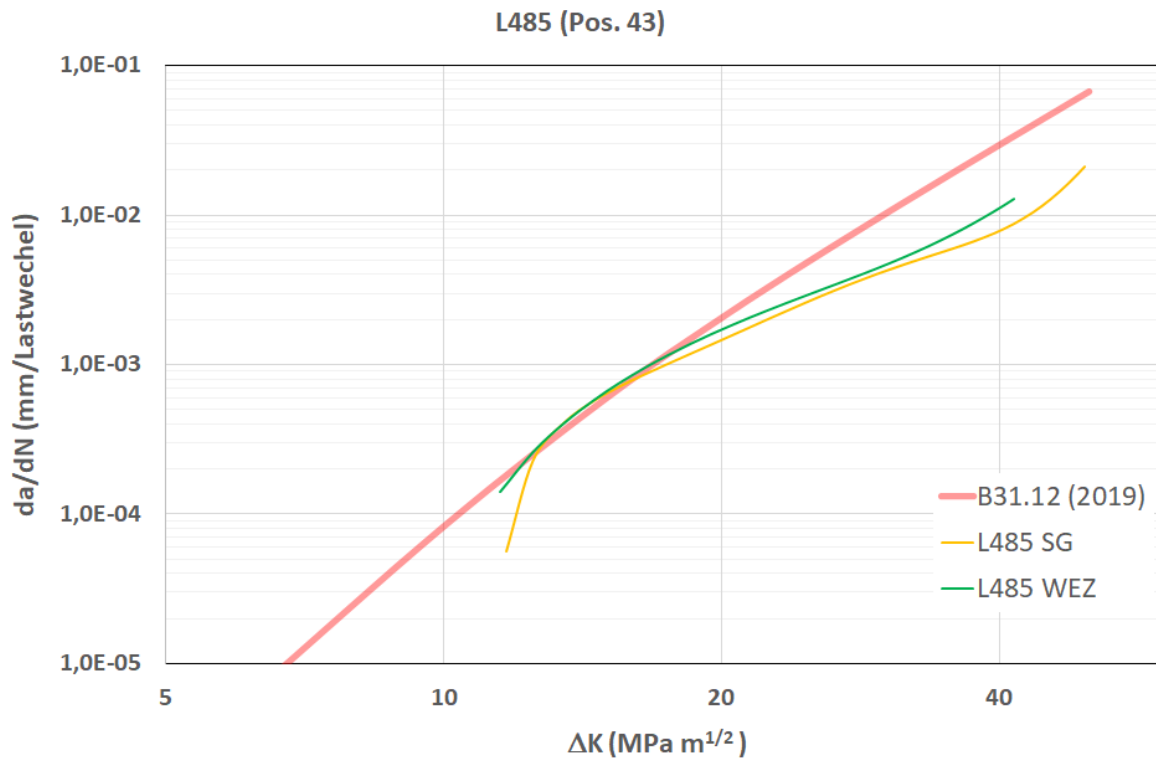


Abbildung 3.84: Rissfortschritt L485 (Pos.43; vergütet)

Zur Erzielung einer möglichst hohen Härte wurden die Proben der Pos. 40 in Wasser abgeschreckt. Die Härte dieser Proben (aus dem Bereich der Rundschweißnaht nahe der Innenoberfläche) betrug ca. 360 HV.

Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Die graphische Versuchsauswertung (Pos. 40) zeigt, dass bereits bei relativ geringen zyklischen Spannungsintensitäten eine deutlich Rissbeschleunigung (instabiler Rissfortschritt) auftrat.

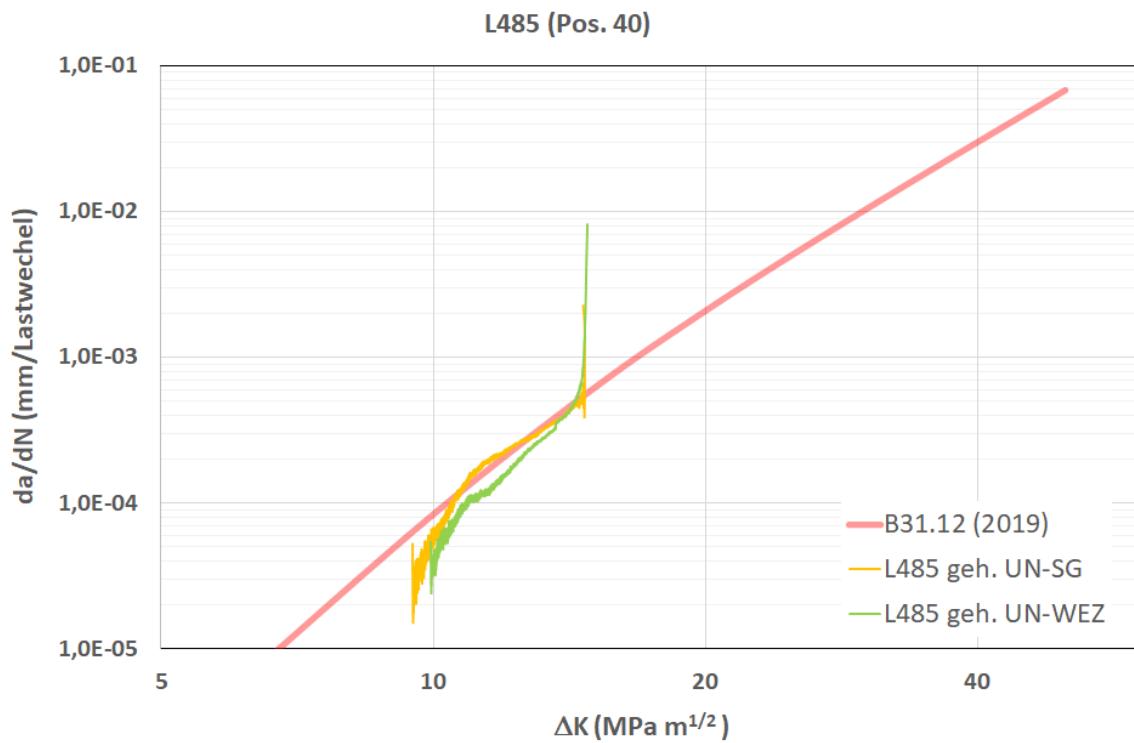


Abbildung 3.85: Rissfortschritt L485 (gehärtet)

An zwei metallografischen Schliifproben der Positionsnummer 17 und an einer metallografischen Probe der Positionsnummer 40 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen für Pos. 17 sind den Abbildungen 3.85 bis 3.88 und für Pos. 40 in den Abbildungen 3.89 bis 3.90 zu entnehmen.


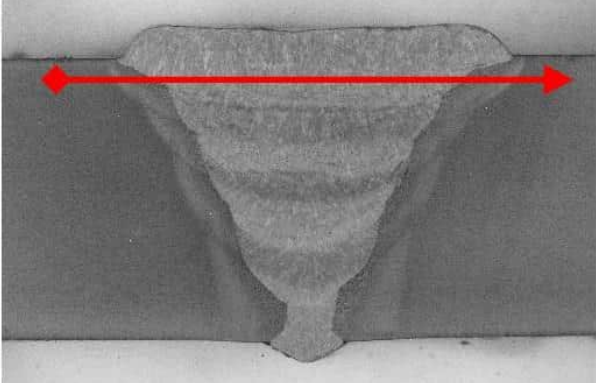
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 17.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	287,1	289,1	0,2881	223	227		GW 1
2	283,1	288,9	0,2860	227			
3	285,2	287,1	0,2861	227			
4	282,7	286,0	0,2844	229			
5	282,9	287,7	0,2853	228			
1	290,4	290,6	0,2905	220	220		WEZ 1
2	288,5	291,4	0,2900	221			
3	290,6	293,3	0,2919	218			
4	291,4	290,4	0,2909	219			
5	284,4	291,2	0,2878	224			
1	285,8	279,8	0,2828	232	228		SG
2	283,1	285,6	0,2844	229			
3	285,2	284,8	0,2850	228			
4	288,9	286,0	0,2875	224			
5	284,8	287,7	0,2862	226			
1	286,6	286,4	0,2865	226	228		WEZ 2
2	284,4	289,5	0,2870	225			
3	280,2	284,8	0,2825	232			
4	285,2	282,3	0,2837	230			
5	283,8	288,3	0,2860	227			
1	288,1	291,4	0,2898	221	227		GW 2
2	287,7	288,9	0,2883	223			
3	283,3	288,7	0,2860	227			
4	283,1	286,2	0,2847	229			
5	280,4	283,3	0,2819	233			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.86: Härtemessungen L485 Pos. 17 (1)


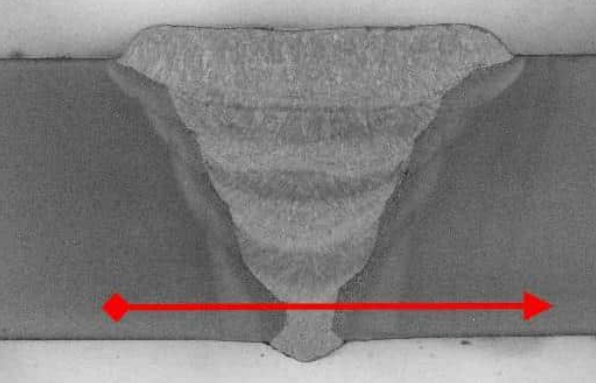
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 17.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	285,2	293,1	0,2891	222	220		GW 1
2	287,1	291,0	0,2890	222			
3	287,1	292,7	0,2899	221			
4	289,3	294,3	0,2918	218			
5	290,6	294,1	0,2923	217			
1	286,0	288,3	0,2872	225	231		WEZ 1
2	282,3	282,3	0,2823	233			
3	280,6	282,1	0,2814	234			
4	280,2	278,3	0,2793	238			
5	286,0	285,8	0,2859	227			
1	284,2	285,8	0,2850	228	229		SG
2	278,8	280,4	0,2796	237			
3	281,2	283,5	0,2824	233			
4	287,7	287,7	0,2877	224			
5	286,4	290,0	0,2882	223			
1	296,8	293,3	0,2950	213	230		WEZ 2
2	287,7	284,4	0,2860	227			
3	285,0	286,4	0,2857	227			
4	279,8	275,0	0,2774	241			
5	274,8	278,1	0,2765	243			
1	286,4	285,8	0,2861	227	229		GW 2
2	285,0	289,3	0,2872	225			
3	280,0	286,2	0,2831	231			
4	283,7	287,9	0,2858	227			
5	277,9	284,8	0,2813	234			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.87: Härtemessungen L485 Pos. 17 (2)


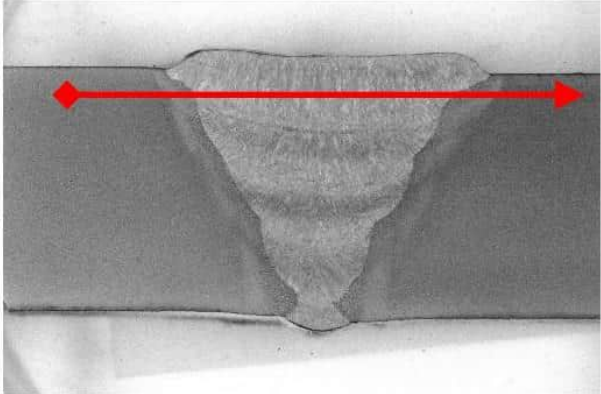
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 17.2; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	284,4	293,9	0,2891	222	223		GW 1
2	285,2	290,2	0,2877	224			
3	286,0	286,9	0,2864	226			
4	286,2	289,8	0,2880	224			
5	289,1	291,8	0,2905	220			
1	292,0	291,0	0,2915	218	214		WEZ 1
2	293,3	288,5	0,2909	219			
3	294,1	291,0	0,2926	217			
4	296,4	293,3	0,2949	213			
5	302,8	299,7	0,3013	204			
1	282,9	286,6	0,2848	229	229		SG
2	285,4	282,1	0,2837	230			
3	287,1	284,6	0,2858	227			
4	285,6	281,7	0,2836	231			
5	285,4	285,6	0,2855	228			
1	294,6	290,4	0,2925	217	220		WEZ 2
2	288,3	282,7	0,2855	227			
3	281,7	282,3	0,2820	233			
4	288,5	292,4	0,2905	220			
5	301,0	301,4	0,3012	204			
1	289,8	289,8	0,2898	221	224		GW 2
2	285,6	288,1	0,2869	225			
3	286,7	289,5	0,2881	223			
4	283,7	287,1	0,2854	228			
5	285,8	290,4	0,2881	223			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.88: Härtemessungen L485 Pos. 17 (3)


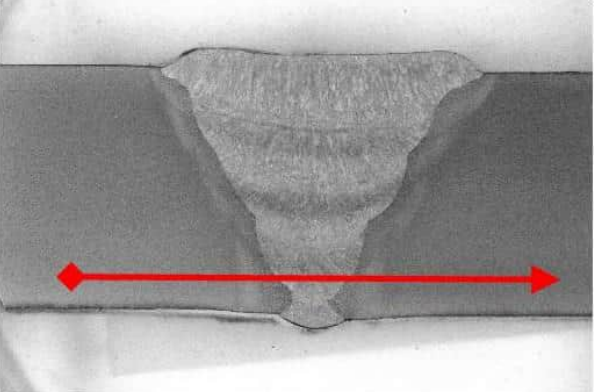
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 17.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	287,1	292,5	0,2898	221	220		GW 1
2	287,7	290,4	0,2890	222			
3	288,7	293,3	0,2910	219			
4	289,8	293,9	0,2918	218			
5	286,9	292,7	0,2898	221			
1	308,0	309,3	0,3086	195	204		WEZ 1
2	301,0	308,2	0,3046	200			
3	295,4	299,1	0,2972	210			
4	300,8	299,9	0,3003	206			
5	295,4	296,4	0,2959	212			
1	314,7	293,5	0,3041	201	212		SG
2	292,9	295,6	0,2942	214			
3	292,5	290,6	0,2915	218			
4	293,9	296,0	0,2949	213			
5	296,2	295,4	0,2958	212			
1	307,4	305,5	0,3065	197	210		WEZ 2
2	298,1	302,8	0,3004	205			
3	296,6	298,1	0,2974	210			
4	290,4	292,1	0,2912	219			
5	292,7	290,4	0,2915	218			
1	285,4	288,9	0,2872	225	228		GW 2
2	282,7	286,7	0,2847	229			
3	285,6	290,8	0,2882	223			
4	282,3	285,4	0,2838	230			
5	281,0	285,8	0,2834	231			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.89: Härtemessungen L485 Pos. 17 (4)


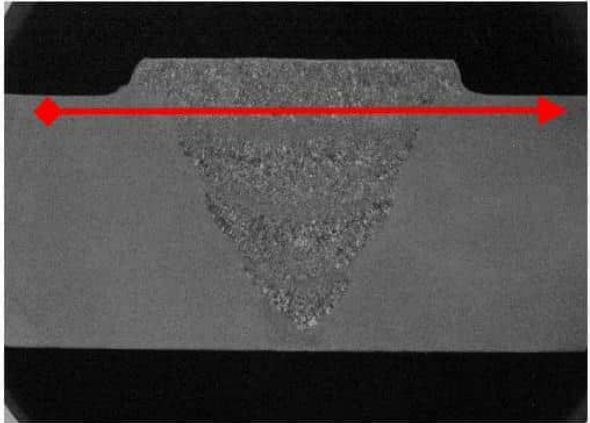
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 40.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	232,5	231,6	0,2321	344	351		GW 1
2	230,0	230,2	0,2301	350			
3	229,6	230,2	0,2299	351			
4	228,5	228,5	0,2285	355			
5	229,2	228,7	0,2289	354			
1	233,7	233,3	0,2335	340	334		WEZ 1
2	237,4	235,4	0,2364	332			
3	235,8	238,9	0,2374	329			
4	235,8	238,1	0,2369	330			
5	233,9	233,5	0,2337	339			
1	234,1	226,0	0,2301	350	345		SG
2	232,9	232,9	0,2329	342			
3	230,2	232,9	0,2315	346			
4	235,0	228,7	0,2319	345			
5	231,9	233,3	0,2326	343			
1	230,0	229,4	0,2297	352	343		WEZ 2
2	232,9	232,1	0,2325	343			
3	234,1	231,0	0,2326	343			
4	233,1	233,3	0,2332	341			
5	232,9	235,4	0,2341	338			
1	230,8	228,9	0,2299	351	346		GW 2
2	230,8	232,3	0,2315	346			
3	230,6	231,4	0,2310	347			
4	231,6	231,0	0,2313	347			
5	233,3	233,5	0,2334	340			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.90: Härtemessungen L485 Pos. 40 (5)


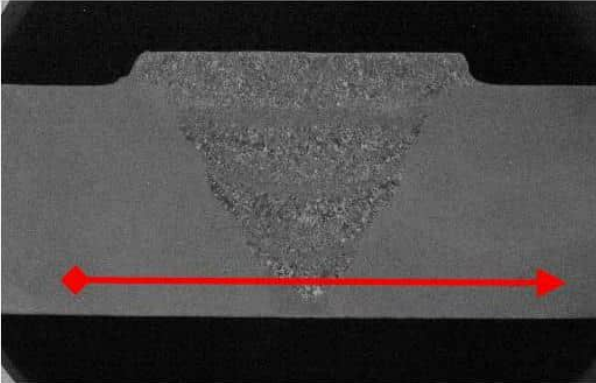
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 40.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	232,9	232,3	0,2326	343	350		GW 1
2	231,7	230,2	0,2309	348			
3	229,8	230,8	0,2303	350			
4	229,8	228,9	0,2294	352			
5	226,9	229,6	0,2282	356			
1	229,6	228,9	0,2293	353	365		WEZ 1
2	227,7	227,9	0,2278	357			
3	227,7	224,2	0,2259	363			
4	218,8	220,6	0,2197	384			
5	224,6	225,2	0,2249	367			
1	228,9	232,3	0,2306	349	366		SG
2	234,5	230,8	0,2327	343			
3	227,7	228,3	0,2280	357			
4	216,9	217,1	0,2170	394			
5	220,0	218,4	0,2192	386			
1	241,6	243,1	0,2423	316	345		WEZ 2
2	229,2	230,2	0,2297	352			
3	229,6	227,7	0,2286	355			
4	230,2	230,0	0,2301	350			
5	229,8	230,0	0,2299	351			
1	228,7	228,3	0,2285	355	350		GW 2
2	228,5	230,6	0,2296	352			
3	231,0	230,4	0,2307	348			
4	230,0	230,8	0,2304	349			
5	231,6	230,8	0,2312	347			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.91: Härtemessungen L485 Pos. 40 (6)

Die Proben der Positionsnummer 2 wurden einem spiralnahtgeschweißtem Rohr DN1200 mit der Wandstärke von 23 mm entnommen.

Die entsprechenden Kennwerte sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen:

Tabelle 3.67: Kenndaten L485

Herstellungsjahr	2009	
Herstellungsnormen	DIN EN ISO 3183 Anhang M	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	485
	R _m [MPa]	570
	K _v [J]	58
Materialkennwerte	R _e [MPa]	559
	R _m [MPa]	656
	K _v [J]	230

Tabelle 3.68: chemische Zusammensetzung L485

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.096	0.313	1.729	0.013		0.145	0.016	
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.202	0.008	0.027	0.045				

Ergebnisse der Rissfortschrittsuntersuchungen unter Wasserstoff:

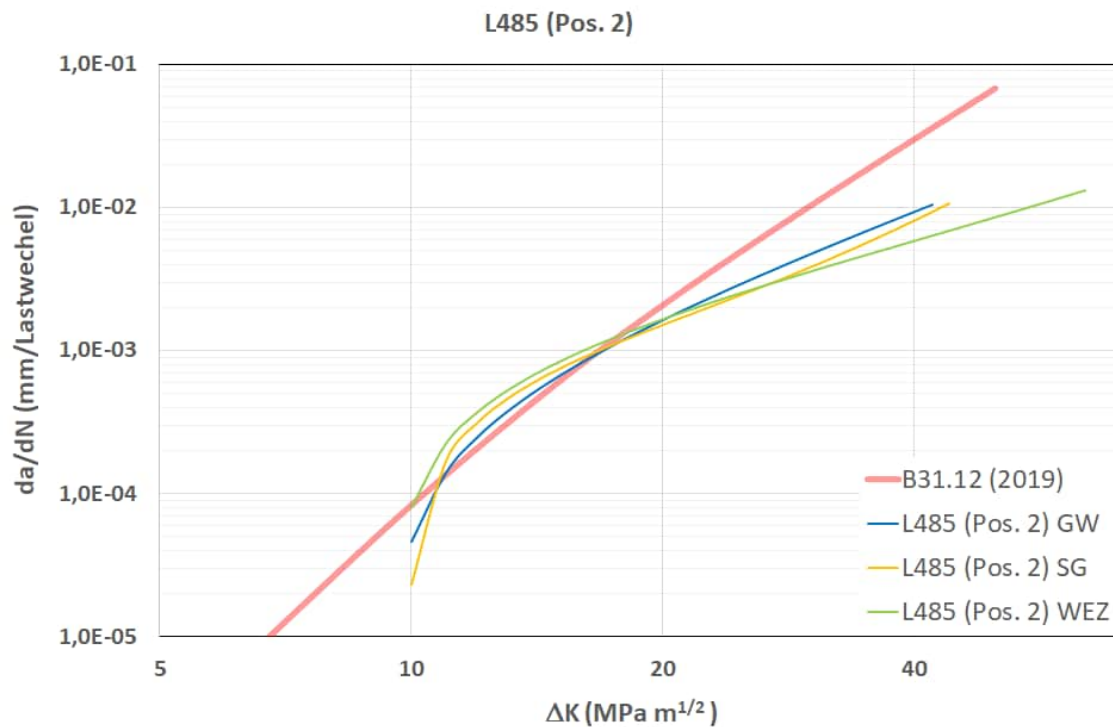


Abbildung 3.92: Rissfortschritt L485 (Pos.2)

An zwei metallografischen Schliffproben der Positionsnummer 2 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.92 bis 3.97 zu entnehmen.


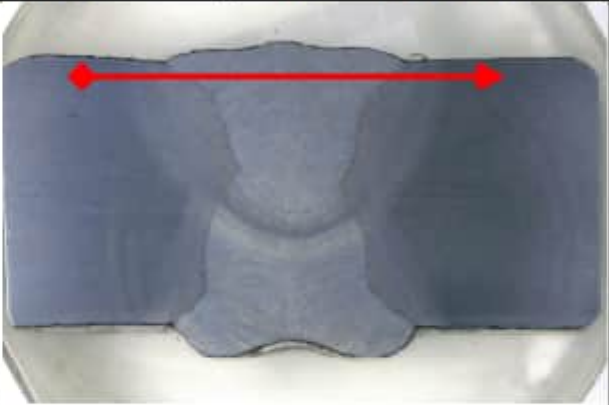
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 2.1 (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	285,0	283,1	0,2841	230	228		GW 1
2	282,1	285,8	0,2839	230			
3	281,2	287,1	0,2841	230			
4	282,5	289,5	0,2860	227			
5	280,0	295,4	0,2877	224			
1	312,6	306,4	0,3095	194	207		WEZ 1
2	299,9	299,9	0,2999	206			
3	297,2	297,6	0,2974	210			
4	295,6	298,3	0,2969	210			
5	293,7	297,2	0,2955	212			
1	293,1	298,1	0,2956	212	214		SG
2	292,9	297,9	0,2954	213			
3	292,0	293,9	0,2930	216			
4	292,7	294,1	0,2934	215			
5	295,4	292,9	0,2941	214			
1	303,2	304,9	0,3041	201	208		WEZ 2
2	302,6	297,8	0,3002	206			
3	297,9	294,9	0,2964	211			
4	302,6	292,7	0,2977	209			
5	298,7	294,7	0,2967	211			
1	275,2	287,3	0,2812	234	238		GW 2
2	273,4	283,9	0,2787	239			
3	273,4	286,9	0,2801	236			
4	271,5	283,8	0,2776	241			
5	272,3	284,8	0,2786	239			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.93: Härtemessungen L485 Pos. 2 (1)


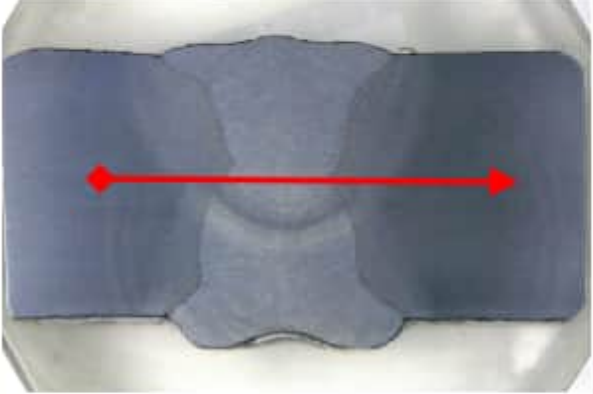
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 2.1 (Mitte) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	287,7	286,4	0,2871	225	226		GW 1
2	287,5	289,5	0,2885	223			
3	283,9	290,0	0,2870	225			
4	279,8	289,6	0,2847	229			
5	281,3	288,5	0,2849	228			
1	294,3	293,1	0,2937	215	208		WEZ 1
2	297,9	297,0	0,2974	210			
3	295,1	295,8	0,2955	212			
4	302,4	302,2	0,3023	203			
5	305,3	302,2	0,3038	201			
1	299,9	301,4	0,3007	205	213		SG
2	290,8	293,1	0,2919	218			
3	294,3	292,7	0,2935	215			
4	295,8	292,7	0,2942	214			
5	291,6	295,6	0,2936	215			
1	295,8	294,5	0,2952	213	210		WEZ 2
2	298,7	295,6	0,2971	210			
3	299,3	294,1	0,2967	211			
4	293,7	294,1	0,2939	215			
5	302,4	303,5	0,3029	202			
1	282,9	293,9	0,2884	223	220		GW 2
2	288,1	297,0	0,2926	217			
3	285,8	297,2	0,2915	218			
4	285,0	294,5	0,2898	221			
5	283,1	294,7	0,2889	222			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.94: Härtemessungen L485 Pos. 2 (2)


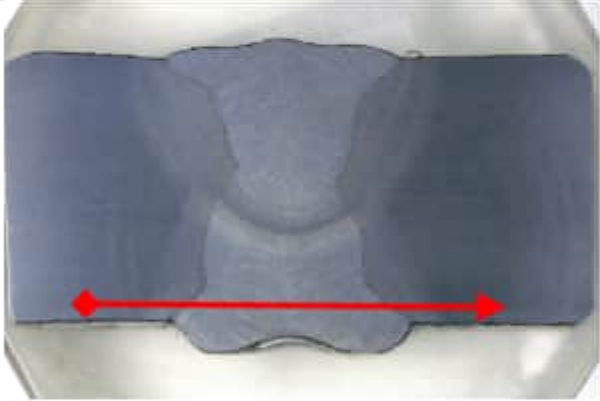
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 2.1 (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	271,9	270,3	0,2711	252	247		GW 1
2	267,8	277,9	0,2728	249			
3	268,6	280,0	0,2743	246			
4	269,8	281,7	0,2757	244			
5	269,4	283,7	0,2766	242			
1	283,7	289,5	0,2866	226	219		WEZ 1
2	289,8	293,1	0,2914	218			
3	291,0	293,9	0,2925	217			
4	290,6	291,8	0,2912	219			
5	290,6	293,7	0,2922	217			
1	280,0	281,5	0,2807	235	228		SG
2	287,5	284,6	0,2860	227			
3	286,2	286,2	0,2862	226			
4	286,8	283,3	0,2851	228			
5	288,1	287,3	0,2877	224			
1	286,7	291,0	0,2888	222	217		WEZ 2
2	293,5	291,8	0,2927	217			
3	291,5	291,0	0,2913	219			
4	295,4	294,5	0,2950	213			
5	289,8	298,5	0,2941	214			
1	265,1	282,1	0,2736	248	255		GW 2
2	264,0	273,4	0,2687	257			
3	262,6	274,4	0,2685	257			
4	262,4	275,4	0,2689	256			
5	261,9	274,4	0,2682	258			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.95: Härtemessungen L485 Pos. 2 (3)


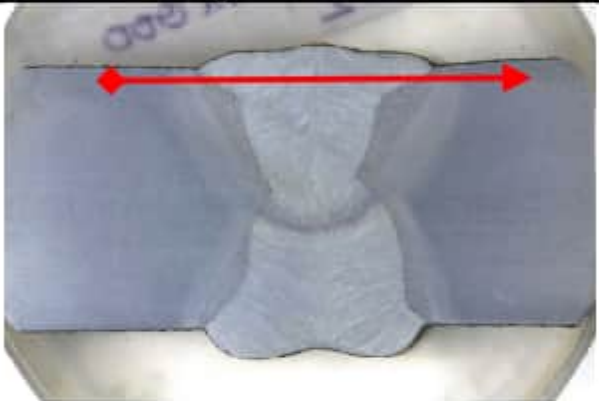
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung			Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie		
Auftragsnummer	9039784000						
Probenbezeichnung	2.2 (Decklage)						
Sachbearbeiter	Silcher						
Prüfgerät	Zwick Z 323 (neu)						
Ordnungsnummer	H2932-002-50430						
Prüfbedingungen							
<input checked="" type="checkbox"/>	HV	10	DIN EN ISO 6507-1:2018-07				
<input type="checkbox"/>	HBW		DIN EN ISO 6506-1:2015-02				
<input type="checkbox"/>	HRC		DIN EN ISO 6508-1:2016-12				
<input type="checkbox"/>	Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C						
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	268,4	277,1	0,2727	249	246		GW 1
2	265,7	280,0	0,2728	249			
3	268,4	280,8	0,2746	246			
4	269,0	282,3	0,2756	244			
5	270,0	285,4	0,2777	240			
1	294,0	292,0	0,2930	216	214		WEZ 1
2	294,1	297,8	0,2960	212			
3	288,9	298,5	0,2937	215			
4	298,5	294,7	0,2966	211			
5	291,8	290,8	0,2913	219			
1	291,0	291,4	0,2912	219	218		SG
2	293,7	294,5	0,2941	214			
3	289,5	290,2	0,2899	221			
4	291,4	291,4	0,2914	218			
5	292,5	291,2	0,2918	218			
1	317,6	314,7	0,3161	186	213		WEZ 2
2	289,6	288,1	0,2888	222			
3	290,0	297,0	0,2935	215			
4	286,2	290,0	0,2881	223			
5	295,2	288,5	0,2919	218			
1	279,4	291,6	0,2855	227	230		GW 2
2	278,8	289,3	0,2840	230			
3	276,1	288,3	0,2822	233			
4	277,7	288,3	0,2830	232			
5	282,3	290,6	0,2864	226			
Prüfdatum: 06.11.22							
Prüfer: Scheck							
(Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.96: Härtemessungen L485 Pos. 2 (4)


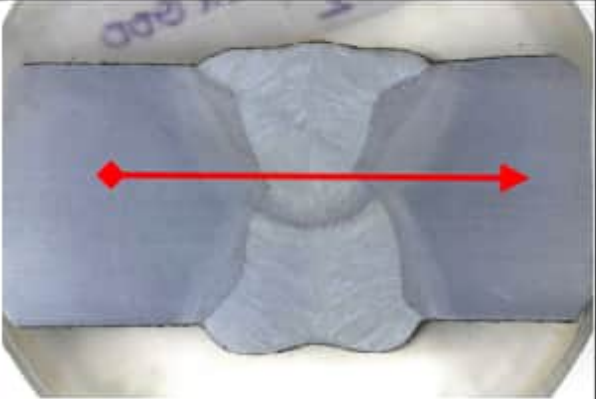
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie																																																																																																																																																								
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 2.2 (Mitte) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C																																																																																																																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kontrollplatte</th> <th>280,6 µm</th> <th>280,8 µm</th> <th>0,281 mm</th> <th>235 HV</th> <th colspan="2">Sollwert: 237 HV 10</th> </tr> <tr> <th>Eindruck-Nr.</th> <th>d₁ µm</th> <th>d₂ µm</th> <th>d_m mm</th> <th>Härte HV</th> <th>Mittelwert HV</th> <th>Abstand in mm</th> <th>Bemerkung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>286,2</td> <td>293,3</td> <td>0,2898</td> <td>221</td> <td rowspan="5">226</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">GW 1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>281,5</td> <td>292,9</td> <td>0,2872</td> <td>225</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>279,6</td> <td>287,9</td> <td>0,2837</td> <td>230</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>279,4</td> <td>290,4</td> <td>0,2849</td> <td>228</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>280,6</td> <td>291,2</td> <td>0,2859</td> <td>227</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>296,6</td> <td>291,8</td> <td>0,2942</td> <td>214</td> <td rowspan="5">211</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">WEZ 1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>291,4</td> <td>292,0</td> <td>0,2917</td> <td>218</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>292,2</td> <td>292,9</td> <td>0,2926</td> <td>217</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>299,3</td> <td>297,2</td> <td>0,2983</td> <td>208</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>304,5</td> <td>307,6</td> <td>0,3060</td> <td>198</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>291,4</td> <td>290,6</td> <td>0,2910</td> <td>219</td> <td rowspan="5">215</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">SG</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>291,6</td> <td>288,3</td> <td>0,2900</td> <td>221</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>295,8</td> <td>297,2</td> <td>0,2965</td> <td>211</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>294,1</td> <td>285,4</td> <td>0,2898</td> <td>221</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>302,6</td> <td>302,0</td> <td>0,3023</td> <td>203</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>292,0</td> <td>292,9</td> <td>0,2925</td> <td>217</td> <td rowspan="5">214</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">WEZ 2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>294,3</td> <td>292,9</td> <td>0,2936</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>290,8</td> <td>296,8</td> <td>0,2938</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>294,3</td> <td>294,1</td> <td>0,2942</td> <td>214</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>298,1</td> <td>299,1</td> <td>0,2986</td> <td>208</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>280,4</td> <td>288,5</td> <td>0,2845</td> <td>229</td> <td rowspan="5">230</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">GW 2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>279,2</td> <td>282,9</td> <td>0,2810</td> <td>235</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>283,5</td> <td>290,2</td> <td>0,2868</td> <td>225</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>279,0</td> <td>288,7</td> <td>0,2838</td> <td>230</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>280,2</td> <td>288,7</td> <td>0,2845</td> <td>229</td> </tr> </tbody> </table>						Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		Eindruck-Nr.	d ₁ µm	d ₂ µm	d _m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung	1	286,2	293,3	0,2898	221	226		GW 1	2	281,5	292,9	0,2872	225	3	279,6	287,9	0,2837	230	4	279,4	290,4	0,2849	228	5	280,6	291,2	0,2859	227	1	296,6	291,8	0,2942	214	211		WEZ 1	2	291,4	292,0	0,2917	218	3	292,2	292,9	0,2926	217	4	299,3	297,2	0,2983	208	5	304,5	307,6	0,3060	198	1	291,4	290,6	0,2910	219	215		SG	2	291,6	288,3	0,2900	221	3	295,8	297,2	0,2965	211	4	294,1	285,4	0,2898	221	5	302,6	302,0	0,3023	203	1	292,0	292,9	0,2925	217	214		WEZ 2	2	294,3	292,9	0,2936	215	3	290,8	296,8	0,2938	215	4	294,3	294,1	0,2942	214	5	298,1	299,1	0,2986	208	1	280,4	288,5	0,2845	229	230		GW 2	2	279,2	282,9	0,2810	235	3	283,5	290,2	0,2868	225	4	279,0	288,7	0,2838	230	5
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10																																																																																																																																																							
Eindruck-Nr.	d ₁ µm	d ₂ µm	d _m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung																																																																																																																																																					
1	286,2	293,3	0,2898	221	226		GW 1																																																																																																																																																					
2	281,5	292,9	0,2872	225																																																																																																																																																								
3	279,6	287,9	0,2837	230																																																																																																																																																								
4	279,4	290,4	0,2849	228																																																																																																																																																								
5	280,6	291,2	0,2859	227																																																																																																																																																								
1	296,6	291,8	0,2942	214	211		WEZ 1																																																																																																																																																					
2	291,4	292,0	0,2917	218																																																																																																																																																								
3	292,2	292,9	0,2926	217																																																																																																																																																								
4	299,3	297,2	0,2983	208																																																																																																																																																								
5	304,5	307,6	0,3060	198																																																																																																																																																								
1	291,4	290,6	0,2910	219	215		SG																																																																																																																																																					
2	291,6	288,3	0,2900	221																																																																																																																																																								
3	295,8	297,2	0,2965	211																																																																																																																																																								
4	294,1	285,4	0,2898	221																																																																																																																																																								
5	302,6	302,0	0,3023	203																																																																																																																																																								
1	292,0	292,9	0,2925	217	214		WEZ 2																																																																																																																																																					
2	294,3	292,9	0,2936	215																																																																																																																																																								
3	290,8	296,8	0,2938	215																																																																																																																																																								
4	294,3	294,1	0,2942	214																																																																																																																																																								
5	298,1	299,1	0,2986	208																																																																																																																																																								
1	280,4	288,5	0,2845	229	230		GW 2																																																																																																																																																					
2	279,2	282,9	0,2810	235																																																																																																																																																								
3	283,5	290,2	0,2868	225																																																																																																																																																								
4	279,0	288,7	0,2838	230																																																																																																																																																								
5	280,2	288,7	0,2845	229																																																																																																																																																								
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)																																																																																																																																																												

Abbildung 3.97: Härtemessungen L485 Pos. 2 (5)


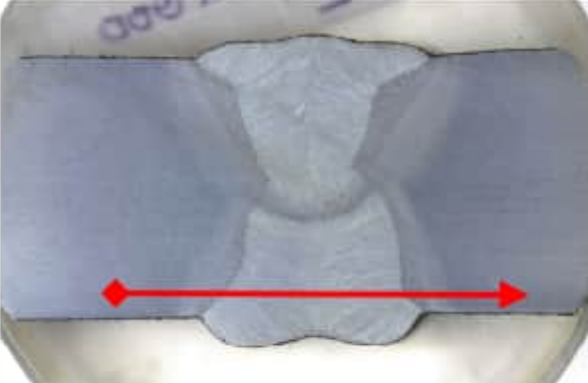
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 2.2 (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	262,6	274,4	0,2685	257	256		GW 1
2	258,0	276,5	0,2672	260			
3	261,3	275,2	0,2683	258			
4	262,2	276,3	0,2692	256			
5	267,3	280,8	0,2741	247			
1	287,7	289,1	0,2884	223	216		WEZ 1
2	290,4	296,6	0,2935	215			
3	293,7	292,5	0,2931	216			
4	296,2	294,8	0,2955	212			
5	294,7	294,3	0,2945	214			
1	289,8	291,2	0,2905	220	222		SG
2	288,7	287,7	0,2882	223			
3	292,7	287,9	0,2903	220			
4	286,2	287,1	0,2866	226			
5	291,2	290,0	0,2906	220			
1	289,3	286,8	0,2881	223	222		WEZ 2
2	291,0	288,3	0,2896	221			
3	284,6	290,4	0,2875	224			
4	285,8	285,8	0,2858	227			
5	294,7	294,5	0,2946	214			
1	269,6	281,7	0,2756	244	248		GW 2
2	267,6	280,6	0,2741	247			
3	264,6	278,3	0,2715	252			
4	265,1	276,3	0,2707	253			
5	269,4	280,2	0,2748	246			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.98: Härtemessungen L485 Pos. 2 (6)

3.22 Werkstoff L485 ME

Die Proben wurden einem Rohr mit einem Durchmesser von 813 mm und einer Wandstärke von 17,5 mm entnommen.

Die werkstoffspezifischen Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3.69: Kenndaten L485 ME

Herstellungsjahr	2017	
Herstellungsnormen	ISO 3183	
Spez. min. Kennwerte ¹⁹	R _e [MPa]	485
	R _m [MPa]	570
	K _v [J]	48
Materialkennwerte	R _e [MPa]	520
	R _m [MPa]	621
	K _v ²⁰ [J]	183

Tabelle 3.70: Chemische Zusammensetzung L485 ME

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.08	0.35	1.59	0.015	0.002	0.04	0.09	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.06		0.01	0.04				

Tabelle 3.71: Bruchzähigkeiten L485 ME

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
L485 ME	GW		115 (100 bar) / 154 (10 bar)
L485 ME	SG		159 (100 bar) / 179 (10 bar)

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 sowie 10 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Die Proben sind folgenden Bereichen entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut (SG)

¹⁹ Gemäß DIN EN ISO 3181 und RN 268-022 (Mai 2016)

²⁰ Kerbschlagbiegetest nach Charpy (DIN EN ISO 148) mit V-Kerb bei 0 °C.

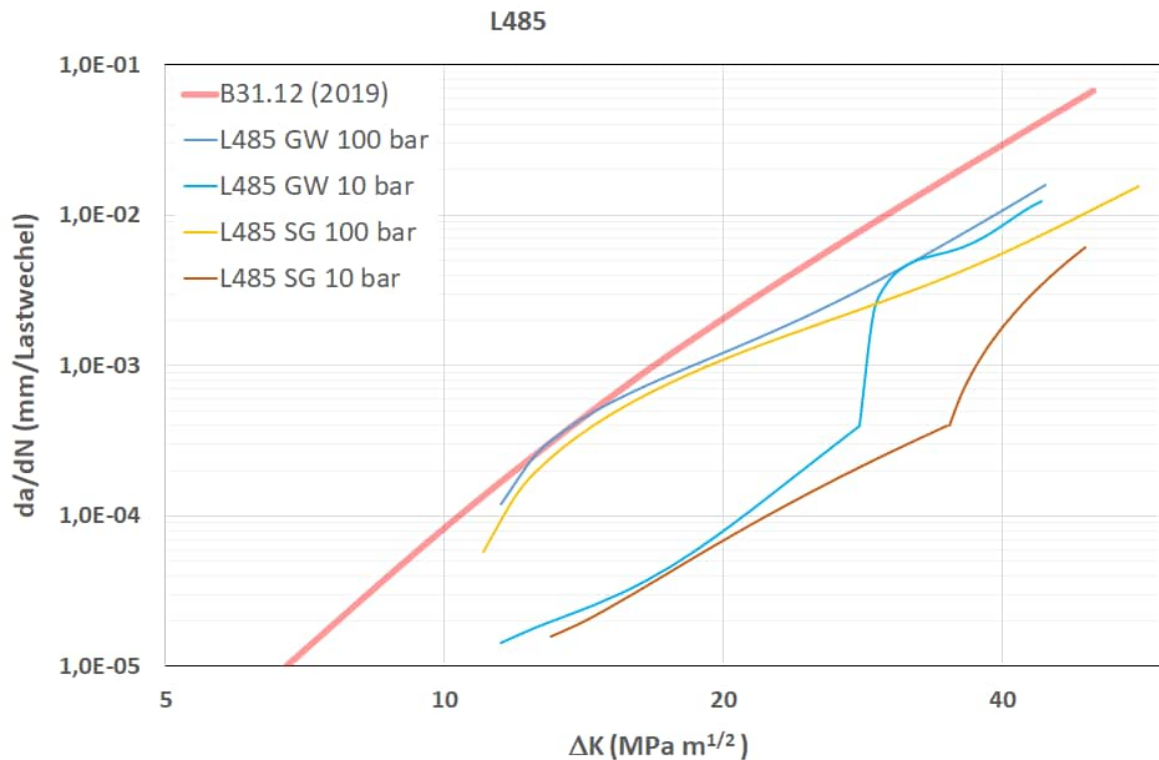


Abbildung 3.99: Rissfortschritt L485

3.23 Werkstoff L485 (Schmelze 2)

Die Werkstoffproben wurden einem längsnahtgeschweißten Rohr entnommen.

Die werkstoffspezifischen Kennwerte sind in der untenstehenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3.72: Kenndaten L485 (Schmelze 2)

Herstellungsjahr	2022	
Herstellungsnormen	DIN EN ISO 3183 Anhang M	
Spez. min. Kennwerte	R_e [MPa]	485
	R_m [MPa]	605
	K_v [J]	90
Materialkennwerte	R_e [MPa]	521
	R_m [MPa]	632
	K_v^{21} [J]	264

Tabelle 3.73: Chemische Zusammensetzung L485 (Schmelze 2)

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.084	0.35	1.75	0.014	0.0007	0.03	0.04	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.04		0.014	0.045				

²¹ Kerbschlagbiegetest nach Charpy (DIN EN ISO 148) mit V-Kerb bei -20 °C.

Tabelle 3.74: Bruchzähigkeiten L485 (Schmelze 2)

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
L485	GW	47	106.3
L485	SG	47	163.6

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums im Dauerschwingversuch in einer Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0,5$ durchgeführt worden.

Dabei sind Proben folgender Arten entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut (SG)

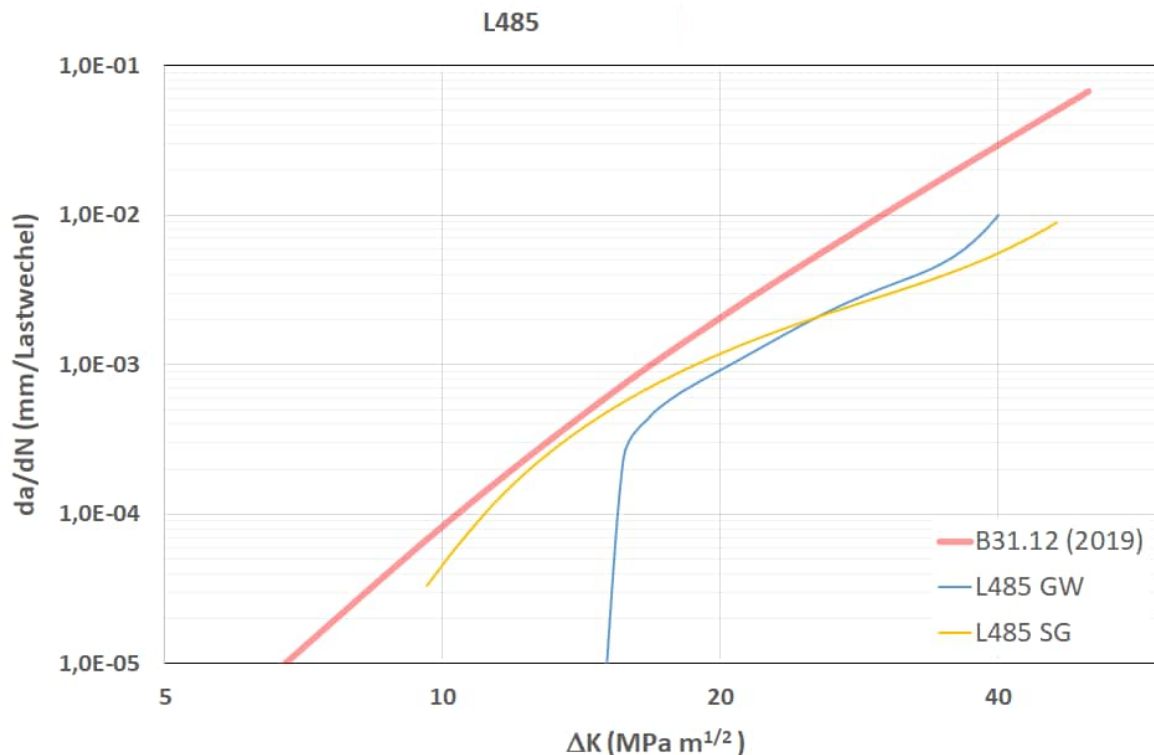


Abbildung 3.100: Rissfortschritt L485 (Schmelze 2)

An zwei metallografischen Schliifproben der Positionsnummer 47 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.100 bis 3.105 zu entnehmen.


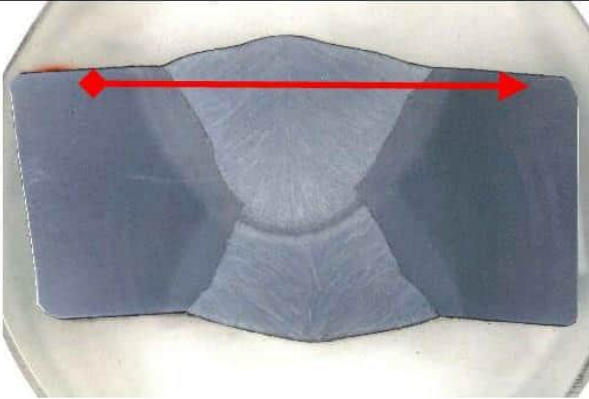
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 47.1 (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	313,8	327,1	0,3205	181	186		GW 1
2	313,6	327,3	0,3205	181			
3	309,3	320,3	0,3148	187			
4	297,6	314,0	0,3058	198			
5	308,0	325,5	0,3167	185			
1	308,6	311,5	0,3101	193	206		WEZ 1
2	289,3	296,6	0,2930	216			
3	294,5	295,4	0,2949	213			
4	298,1	298,9	0,2985	208			
5	303,5	302,2	0,3028	202			
1	286,9	291,0	0,2889	222	218		SG
2	291,2	289,8	0,2905	220			
3	294,3	290,8	0,2926	217			
4	294,5	292,9	0,2937	215			
5	293,5	289,3	0,2914	218			
1	295,3	294,2	0,2948	213	211		WEZ 2
2	299,5	296,8	0,2982	209			
3	297,4	301,4	0,2994	207			
4	294,9	294,1	0,2945	214			
5	294,8	294,3	0,2945	214			
1	315,5	330,9	0,3232	178	181		GW 2
2	314,3	326,7	0,3205	181			
3	311,6	326,3	0,3189	182			
4	312,6	324,0	0,3183	183			
5	315,1	329,0	0,3220	179			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.101: Härtemessungen L485 Pos. 47 (1)


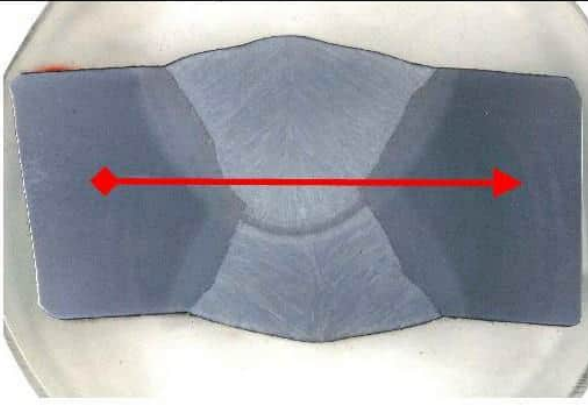
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 47.1 (Mitte) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	306,2	319,2	0,3127	190	185		GW 1
2	312,6	324,0	0,3183	183			
3	310,7	320,7	0,3157	186			
4	310,3	323,2	0,3167	185			
5	312,8	324,2	0,3185	183			
1	302,8	298,9	0,3009	205	210		WEZ 1
2	297,9	297,6	0,2978	209			
3	295,8	296,8	0,2963	211			
4	298,5	297,4	0,2980	209			
5	295,2	290,6	0,2929	216			
1	290,4	290,6	0,2905	220	220		SG
2	290,6	291,8	0,2912	219			
3	290,4	292,0	0,2912	219			
4	289,3	286,0	0,2877	224			
5	290,6	289,5	0,2901	220			
1	298,3	302,2	0,3002	206	209		WEZ 2
2	298,9	299,3	0,2991	207			
3	294,5	297,0	0,2958	212			
4	294,7	297,6	0,2962	211			
5	296,6	299,3	0,2980	209			
1	311,8	324,6	0,3182	183	188		GW 2
2	306,8	320,5	0,3136	189			
3	307,6	318,2	0,3129	189			
4	308,0	318,8	0,3134	189			
5	306,4	317,6	0,3120	191			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.102: Härtemessungen L485 Pos. 47 (2)


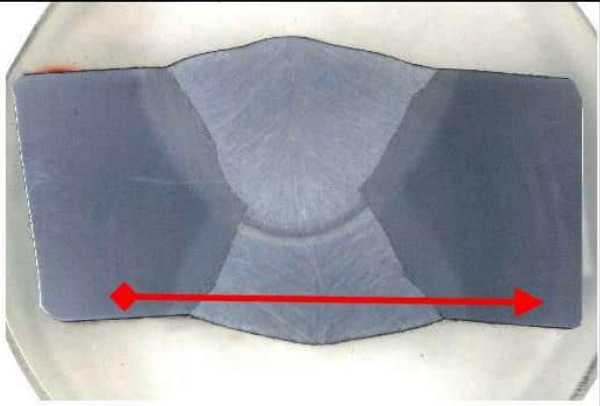
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 47.1 (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	311,3	318,8	0,3151	187	189		GW 1
2	307,2	318,2	0,3127	190			
3	308,4	316,7	0,3126	190			
4	305,9	318,0	0,3120	191			
5	307,0	318,0	0,3125	190			
1	295,6	292,2	0,2939	215	208		WEZ 1
2	301,4	306,0	0,3037	201			
3	298,5	301,6	0,3000	206			
4	293,3	299,5	0,2964	211			
5	299,9	302,4	0,3012	204			
1	291,8	294,1	0,2930	216	217		SG
2	295,2	291,8	0,2935	215			
3	292,2	290,4	0,2913	219			
4	290,4	292,0	0,2912	219			
5	290,8	292,0	0,2914	218			
1	295,6	298,9	0,2972	210	206		WEZ 2
2	299,1	303,2	0,3012	204			
3	299,9	300,8	0,3003	206			
4	302,8	300,1	0,3015	204			
5	297,7	303,7	0,3007	205			
1	313,6	324,6	0,3191	182	182		GW 2
2	310,9	324,8	0,3179	184			
3	313,4	324,4	0,3189	182			
4	313,4	324,8	0,3191	182			
5	313,4	326,3	0,3198	181			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.103: Härtemessungen L485 Pos. 47 (3)


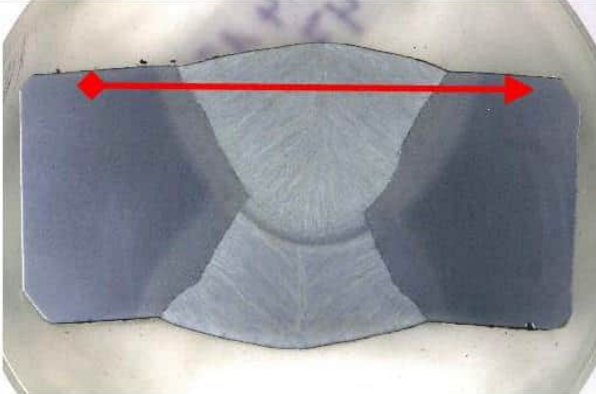
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 47.2 (Decklage) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	307,8	315,3	0,3116	191	187		GW 1
2	308,2	316,3	0,3123	190			
3	308,6	318,6	0,3136	189			
4	312,0	319,9	0,3159	186			
5	314,9	325,3	0,3201	181			
1	548,9	311,9	0,4304	100	188		WEZ 1
2	293,5	297,3	0,2954	213			
3	302,8	303,9	0,3034	202			
4	294,1	299,7	0,2969	210			
5	294,1	294,3	0,2942	214			
1	290,6	291,8	0,2912	219	219		SG
2	291,8	291,8	0,2918	218			
3	289,8	286,6	0,2882	223			
4	290,2	292,9	0,2915	218			
5	291,6	291,8	0,2917	218			
1	302,0	307,5	0,3047	200	206		WEZ 2
2	298,3	304,1	0,3012	204			
3	295,4	299,7	0,2975	209			
4	296,2	298,9	0,2975	209			
5	297,6	298,3	0,2980	209			
1	316,9	322,6	0,3198	181	186		GW 2
2	313,6	324,0	0,3188	182			
3	309,3	318,6	0,3139	188			
4	308,4	316,3	0,3124	190			
5	308,9	319,0	0,3139	188			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.104: Härtemessungen L485 Pos. 47 (4)


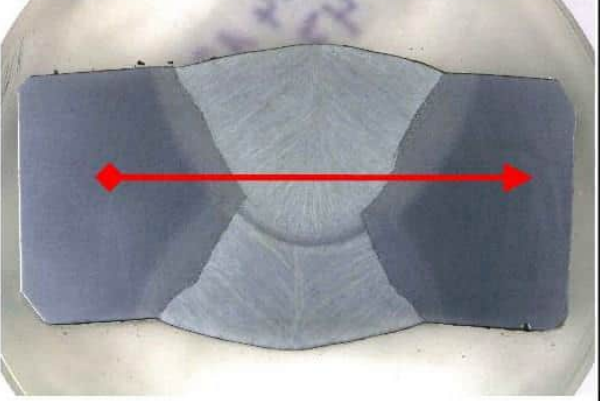
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 47.2 (Mitte) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	297,0	296,4	0,2967	211	195		GW 1
2	304,1	315,9	0,3100	193			
3	302,0	317,2	0,3096	193			
4	308,0	318,6	0,3133	189			
5	308,8	319,0	0,3139	188			
1	308,9	323,8	0,3163	185	204		WEZ 1
2	297,2	293,9	0,2956	212			
3	295,8	296,2	0,2960	212			
4	297,4	297,0	0,2972	210			
5	305,5	304,3	0,3049	199			
1	291,4	287,7	0,2896	221	218		SG
2	288,7	284,6	0,2866	226			
3	295,6	293,3	0,2944	214			
4	293,5	296,0	0,2947	213			
5	293,9	290,4	0,2921	217			
1	298,7	297,4	0,2981	209	210		WEZ 2
2	298,1	301,0	0,2995	207			
3	295,4	297,8	0,2966	211			
4	304,7	303,0	0,3039	201			
5	290,0	290,2	0,2901	220			
1	315,5	326,3	0,3209	180	189		GW 2
2	312,8	320,1	0,3164	185			
3	309,7	315,9	0,3128	190			
4	311,1	310,7	0,3109	192			
5	309,9	305,0	0,3075	196			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.105: Härtemessungen L485 Pos. 47 (5)


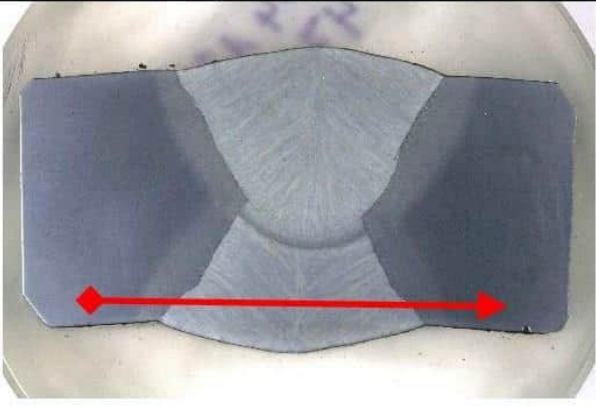
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 47.2 (Wurzel) Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	312,2	320,5	0,3163	185	187		GW 1
2	309,7	320,7	0,3152	187			
3	309,1	320,9	0,3150	187			
4	307,6	320,3	0,3139	188			
5	308,2	318,4	0,3133	189			
1	296,2	301,4	0,2988	208	204		WEZ 1
2	299,1	303,5	0,3013	204			
3	301,0	302,0	0,3015	204			
4	303,3	304,9	0,3041	201			
5	299,9	300,3	0,3001	206			
1	292,9	291,6	0,2923	217	217		SG
2	290,4	292,2	0,2913	219			
3	291,6	292,5	0,2920	217			
4	292,9	291,2	0,2920	217			
5	293,1	294,5	0,2938	215			
1	302,8	299,7	0,3013	204	206		WEZ 2
2	297,4	298,9	0,2982	209			
3	300,1	300,1	0,3001	206			
4	298,7	300,5	0,2996	207			
5	299,1	301,6	0,3003	206			
1	304,9	313,8	0,3094	194	190		GW 2
2	308,0	315,1	0,3116	191			
3	307,0	321,7	0,3144	188			
4	310,1	318,6	0,3144	188			
5	308,4	317,8	0,3131	189			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.106: Härtemessungen L485 Pos. 47 (6)

3.24 Werkstoff GRS550/X80

Die Werkstoffproben wurden einem längnahtgeschweißten Rohr DN1200 mit einer Wandstärke von 18,3 mm entnommen.

Die werkstoffspezifischen Daten sind:

Tabelle 3.75: Kenndaten GRS550/X80

Herstellungsjahr	1992	
Herstellungsnorm	DIN 17172 / API STD 5L	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	550
	R _m [MPa]	620
	K _v [J]	27
Materialkennwerte	R _e [MPa]	584
	R _m [MPa]	728
	K _v ²² [J]	130

Tabelle 3.76: Chemische Zusammensetzung GRS550/X80

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.1	0.4	1.97	0.016	0.001	0.03	0.05	0.01
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.03		0.017	0.044				

Tabelle 3.77: Bruchzähigkeiten GRS550/X80

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
GRS550/X80	GW	5	140.9
GRS550/X80	SG	5	154.2

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Es sind folgende Proben entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut der Längsnaht (SG-LN)

²² Kerbschlagbiegeversuch mit V-Kerb bei 0 °C.

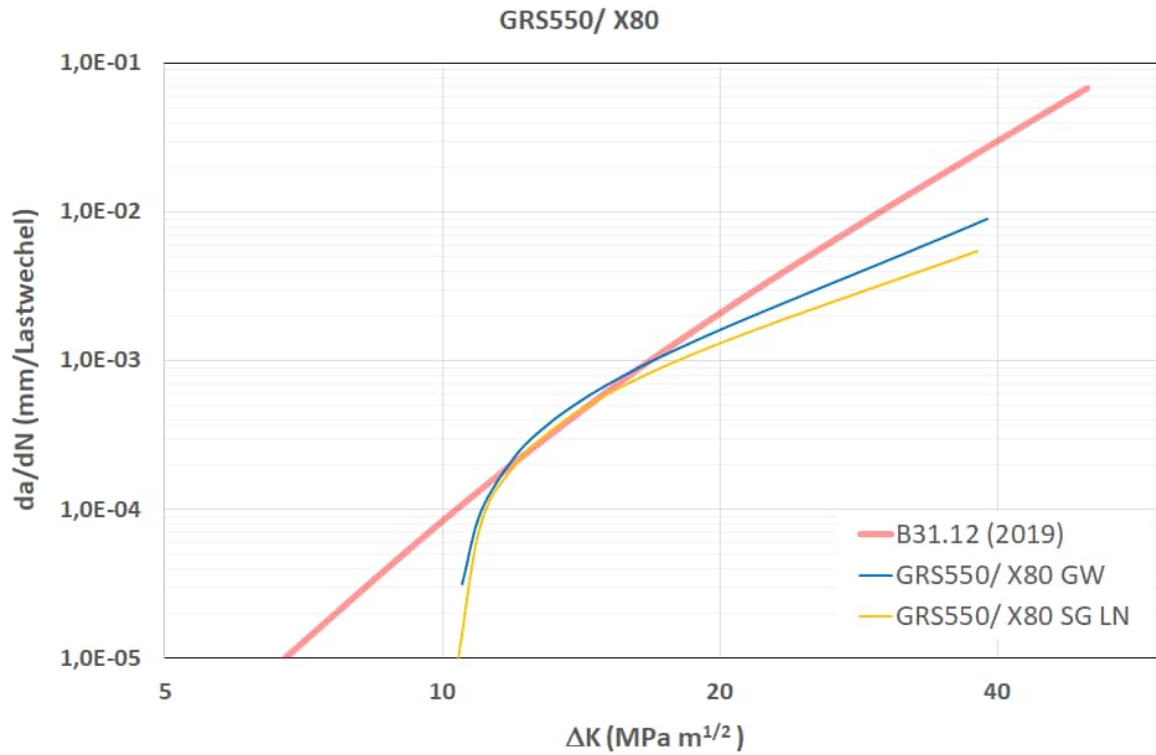


Abbildung 3.107: Rissfortschritt GRS550/X80

An zwei metallografischen Schliffproben der Positionsnummer 5 wurden Härtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Härtemessungen sind den Abbildungen 3.107 bis 3.112 zu entnehmen.


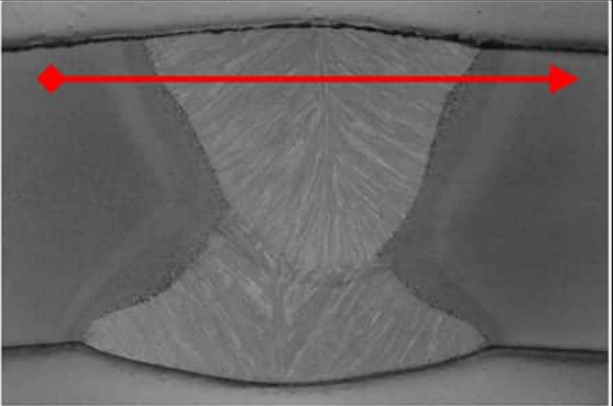
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung			Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie		
		Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 5.1; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C					
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	292,0	300,6	0,2963	211	213		GW 1
2	289,3	302,8	0,2961	212			
3	283,9	296,2	0,2901	220			
4	290,6	299,7	0,2952	213			
5	293,9	304,7	0,2993	207			
1	295,0	294,0	0,2945	214	217		WEZ 1
2	290,2	294,7	0,2925	217			
3	293,1	291,2	0,2921	217			
4	286,4	295,6	0,2910	219			
5	289,5	294,9	0,2922	217			
1	280,0	277,7	0,2789	238	238		SG
2	281,7	283,7	0,2827	232			
3	279,6	277,5	0,2785	239			
4	274,4	273,8	0,2741	247			
5	283,3	281,5	0,2824	233			
1	286,6	293,5	0,2901	220	220		WEZ 2
2	286,0	292,5	0,2893	222			
3	292,1	288,9	0,2905	220			
4	292,5	288,3	0,2904	220			
5	289,1	294,3	0,2917	218			
1	296,6	306,8	0,3017	204	207		GW 2
2	298,5	306,2	0,3023	203			
3	290,4	303,2	0,2968	210			
4	292,9	303,7	0,2983	208			
5	293,3	303,0	0,2982	209			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.108: Härtemessungen GRS550/X80 (1)


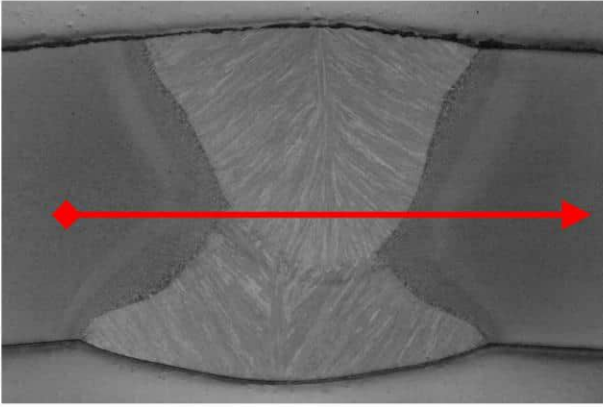
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie																																																																																																																																																										
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 5.1; Mitte Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C																																																																																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kontrollplatte</th> <th>280,6 µm</th> <th>280,8 µm</th> <th>0,281 mm</th> <th>235 HV</th> <th colspan="2">Sollwert: 237 HV 10</th> </tr> <tr> <th>Eindruck-Nr.</th> <th>d₁ µm</th> <th>d₂ µm</th> <th>d_m mm</th> <th>Härte HV</th> <th>Mittelwert HV</th> <th>Abstand in mm</th> <th>Bemerkung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>285,6</td> <td>297,2</td> <td>0,2914</td> <td>218</td> <td rowspan="5">214</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">GW 1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>287,3</td> <td>296,0</td> <td>0,2916</td> <td>218</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>290,0</td> <td>300,8</td> <td>0,2954</td> <td>213</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>289,1</td> <td>297,9</td> <td>0,2935</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>298,1</td> <td>305,1</td> <td>0,3016</td> <td>204</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>294,1</td> <td>290,8</td> <td>0,2925</td> <td>217</td> <td rowspan="5">217</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">WEZ 1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>290,8</td> <td>292,2</td> <td>0,2915</td> <td>218</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>291,6</td> <td>292,2</td> <td>0,2919</td> <td>218</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>293,3</td> <td>291,8</td> <td>0,2926</td> <td>217</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>293,1</td> <td>291,2</td> <td>0,2921</td> <td>217</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>281,0</td> <td>281,0</td> <td>0,2810</td> <td>235</td> <td rowspan="5">232</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">SG</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>284,6</td> <td>282,7</td> <td>0,2836</td> <td>230</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>284,6</td> <td>284,4</td> <td>0,2845</td> <td>229</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>282,3</td> <td>279,4</td> <td>0,2808</td> <td>235</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>284,6</td> <td>282,3</td> <td>0,2834</td> <td>231</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>295,2</td> <td>292,5</td> <td>0,2938</td> <td>215</td> <td rowspan="5">218</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">WEZ 2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>297,0</td> <td>289,2</td> <td>0,2931</td> <td>216</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>288,3</td> <td>296,2</td> <td>0,2923</td> <td>217</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>290,8</td> <td>288,5</td> <td>0,2897</td> <td>221</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>290,4</td> <td>289,1</td> <td>0,2898</td> <td>221</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>301,8</td> <td>308,8</td> <td>0,3053</td> <td>199</td> <td rowspan="5">209</td> <td rowspan="5"></td> <td rowspan="5">GW 2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>295,8</td> <td>305,7</td> <td>0,3008</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>294,5</td> <td>304,1</td> <td>0,2993</td> <td>207</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>290,0</td> <td>298,5</td> <td>0,2942</td> <td>214</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>286,8</td> <td>295,8</td> <td>0,2913</td> <td>219</td> </tr> </tbody> </table>						Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		Eindruck-Nr.	d ₁ µm	d ₂ µm	d _m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung	1	285,6	297,2	0,2914	218	214		GW 1	2	287,3	296,0	0,2916	218	3	290,0	300,8	0,2954	213	4	289,1	297,9	0,2935	215	5	298,1	305,1	0,3016	204	1	294,1	290,8	0,2925	217	217		WEZ 1	2	290,8	292,2	0,2915	218	3	291,6	292,2	0,2919	218	4	293,3	291,8	0,2926	217	5	293,1	291,2	0,2921	217	1	281,0	281,0	0,2810	235	232		SG	2	284,6	282,7	0,2836	230	3	284,6	284,4	0,2845	229	4	282,3	279,4	0,2808	235	5	284,6	282,3	0,2834	231	1	295,2	292,5	0,2938	215	218		WEZ 2	2	297,0	289,2	0,2931	216	3	288,3	296,2	0,2923	217	4	290,8	288,5	0,2897	221	5	290,4	289,1	0,2898	221	1	301,8	308,8	0,3053	199	209		GW 2	2	295,8	305,7	0,3008	205	3	294,5	304,1	0,2993	207	4	290,0	298,5	0,2942	214	5	286,8	295,8
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10																																																																																																																																																									
Eindruck-Nr.	d ₁ µm	d ₂ µm	d _m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung																																																																																																																																																							
1	285,6	297,2	0,2914	218	214		GW 1																																																																																																																																																							
2	287,3	296,0	0,2916	218																																																																																																																																																										
3	290,0	300,8	0,2954	213																																																																																																																																																										
4	289,1	297,9	0,2935	215																																																																																																																																																										
5	298,1	305,1	0,3016	204																																																																																																																																																										
1	294,1	290,8	0,2925	217	217		WEZ 1																																																																																																																																																							
2	290,8	292,2	0,2915	218																																																																																																																																																										
3	291,6	292,2	0,2919	218																																																																																																																																																										
4	293,3	291,8	0,2926	217																																																																																																																																																										
5	293,1	291,2	0,2921	217																																																																																																																																																										
1	281,0	281,0	0,2810	235	232		SG																																																																																																																																																							
2	284,6	282,7	0,2836	230																																																																																																																																																										
3	284,6	284,4	0,2845	229																																																																																																																																																										
4	282,3	279,4	0,2808	235																																																																																																																																																										
5	284,6	282,3	0,2834	231																																																																																																																																																										
1	295,2	292,5	0,2938	215	218		WEZ 2																																																																																																																																																							
2	297,0	289,2	0,2931	216																																																																																																																																																										
3	288,3	296,2	0,2923	217																																																																																																																																																										
4	290,8	288,5	0,2897	221																																																																																																																																																										
5	290,4	289,1	0,2898	221																																																																																																																																																										
1	301,8	308,8	0,3053	199	209		GW 2																																																																																																																																																							
2	295,8	305,7	0,3008	205																																																																																																																																																										
3	294,5	304,1	0,2993	207																																																																																																																																																										
4	290,0	298,5	0,2942	214																																																																																																																																																										
5	286,8	295,8	0,2913	219																																																																																																																																																										
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)																																																																																																																																																														

Abbildung 3.109: Härtemessungen GRS550/X80 (2)


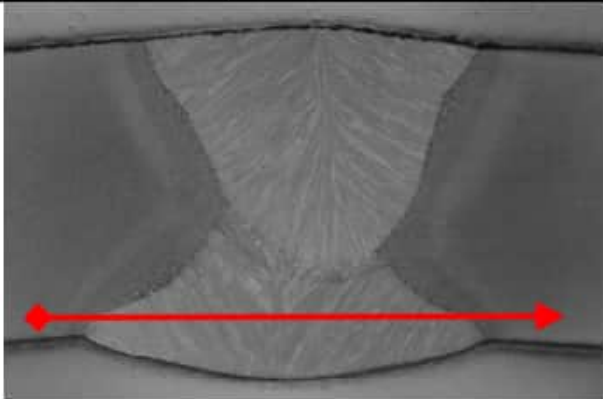
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 5.1; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	292,2	300,1	0,2962	211	211		GW 1
2	291,6	300,1	0,2959	212			
3	292,7	299,7	0,2962	211			
4	292,3	298,7	0,2955	212			
5	294,5	299,3	0,2969	210			
1	279,8	284,0	0,2819	233	222		WEZ 1
2	291,8	290,4	0,2911	219			
3	295,0	289,8	0,2924	217			
4	296,2	289,6	0,2929	216			
5	288,5	283,3	0,2859	227			
1	285,2	277,3	0,2813	234	243		SG
2	278,4	278,1	0,2783	240			
3	278,8	276,9	0,2778	240			
4	272,5	268,8	0,2707	253			
5	275,2	270,7	0,2729	249			
1	276,7	270,9	0,2738	247	235		WEZ 2
2	274,8	275,2	0,2750	245			
3	278,5	284,8	0,2817	234			
4	286,2	288,7	0,2875	224			
5	286,0	286,2	0,2861	227			
1	297,2	302,4	0,2998	206	210		GW 2
2	295,2	302,6	0,2989	208			
3	288,7	302,6	0,2957	212			
4	291,0	300,1	0,2956	212			
5	288,9	299,7	0,2943	214			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.110: Härtemessungen GRS550/X80 (3)


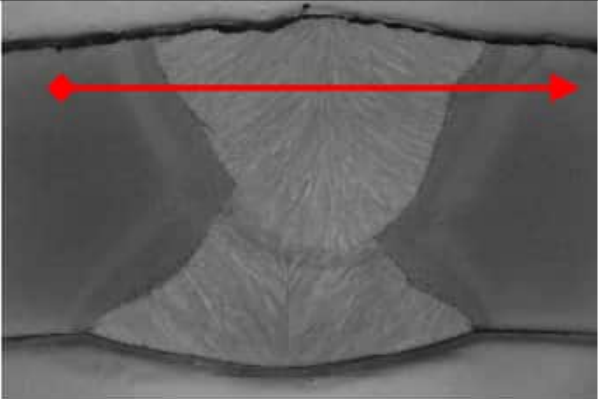
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 5.2; Decklage Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	291,2	305,4	0,2983	208	207		GW 1
2	294,3	304,7	0,2995	207			
3	292,2	304,3	0,2983	208			
4	292,0	303,5	0,2978	209			
5	297,6	306,2	0,3019	203			
1	296,8	298,9	0,2979	209	216		WEZ 1
2	297,7	289,8	0,2937	215			
3	289,0	294,8	0,2919	218			
4	290,0	290,8	0,2904	220			
5	290,2	292,0	0,2911	219			
1	280,6	282,7	0,2817	234	234		SG
2	283,5	282,9	0,2832	231			
3	283,9	281,3	0,2826	232			
4	282,1	276,5	0,2793	238			
5	281,7	281,9	0,2818	234			
1	296,0	291,6	0,2938	215	219		WEZ 2
2	291,6	293,7	0,2927	217			
3	288,5	292,2	0,2904	220			
4	293,7	287,5	0,2906	220			
5	280,4	292,9	0,2867	226			
1	299,7	305,5	0,3026	202	207		GW 2
2	297,2	308,5	0,3029	202			
3	292,9	302,8	0,2978	209			
4	292,9	302,4	0,2976	209			
5	289,6	299,3	0,2944	214			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.111: Härtemessungen GRS550/X80 (4)


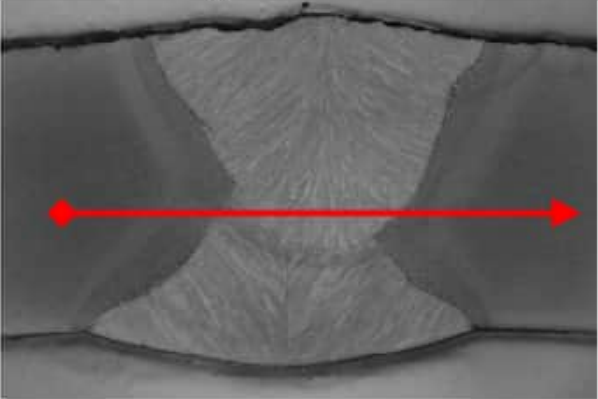
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 5.2; Mitte Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	285,0	295,8	0,2904	220	212		GW 1
2	285,2	301,8	0,2935	215			
3	290,8	304,3	0,2975	209			
4	293,3	302,8	0,2981	209			
5	293,3	303,9	0,2986	208			
1	290,4	293,9	0,2921	217	221		WEZ 1
2	286,6	282,9	0,2848	229			
3	284,4	284,6	0,2845	229			
4	292,7	295,8	0,2942	214			
5	293,1	292,7	0,2929	216			
1	280,8	280,2	0,2805	236	234		SG
2	284,4	281,3	0,2828	232			
3	282,3	282,9	0,2826	232			
4	280,4	278,3	0,2794	238			
5	283,3	278,8	0,2810	235			
1	294,3	292,7	0,2935	215	221		WEZ 2
2	289,5	290,8	0,2902	220			
3	286,4	291,6	0,2890	222			
4	290,6	286,0	0,2883	223			
5	285,4	288,9	0,2872	225			
1	295,2	307,6	0,3014	204	207		GW 2
2	296,6	304,3	0,3005	205			
3	293,5	306,6	0,3000	206			
4	292,9	304,5	0,2987	208			
5	289,8	301,0	0,2954	213			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.112: Härtemessungen GRS550/X80 (5)


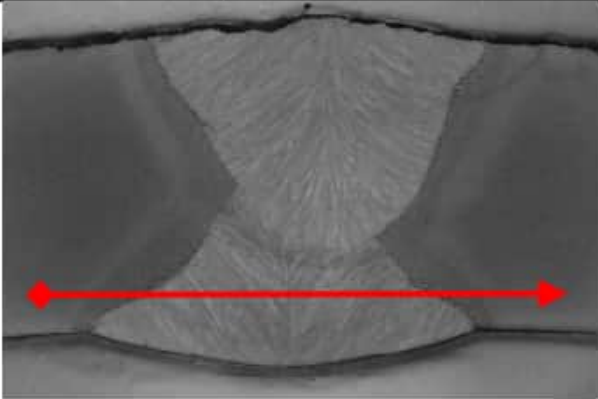
		Prüfprotokoll MPAS-PPB 52310-08/1 Härteprüfung		Referat Metallographie und Elektronenmikroskopie			
Auftragsnummer 9039784000 Probenbezeichnung 5.2; Wurzel Sachbearbeiter Silcher Prüfgerät Zwick Z 323 (neu) Ordnungsnummer H2932-002-50430 Prüfbedingungen <input checked="" type="checkbox"/> HV 10 DIN EN ISO 6507-1:2018-07 <input type="checkbox"/> HBW DIN EN ISO 6506-1:2015-02 <input type="checkbox"/> HRC DIN EN ISO 6508-1:2016-12 <input type="checkbox"/> Prüftemperatur, falls außerhalb (23+/-5) °C							
Kontrollplatte	280,6 µm	280,8 µm	0,281 mm	235 HV	Sollwert: 237 HV 10		
Eindruck-Nr.	d₁ µm	d₂ µm	d_m mm	Härte HV	Mittelwert HV	Abstand in mm	Bemerkung
1	293,1	302,0	0,2975	209	209		GW 1
2	297,0	301,8	0,2994	207			
3	295,4	304,3	0,2998	206			
4	291,4	299,9	0,2957	212			
5	293,3	302,0	0,2977	209			
1	282,3	288,1	0,2852	228	227		WEZ 1
2	276,1	283,1	0,2796	237			
3	285,6	291,4	0,2885	223			
4	283,7	292,2	0,2880	224			
5	287,1	290,8	0,2889	222			
1	282,9	284,0	0,2834	231	245		SG
2	279,2	276,5	0,2778	240			
3	276,3	275,8	0,2761	243			
4	270,2	270,9	0,2706	253			
5	269,4	269,6	0,2695	255			
1	278,8	276,9	0,2778	240	244		WEZ 2
2	263,2	268,8	0,2660	262			
3	275,0	276,5	0,2758	244			
4	274,8	279,2	0,2770	242			
5	282,1	284,2	0,2831	231			
1	298,5	306,2	0,3023	203	208		GW 2
2	296,4	305,7	0,3011	205			
3	294,3	303,9	0,2991	207			
4	288,3	299,9	0,2941	214			
5	293,3	303,5	0,2984	208			
Prüfdatum: 06.11.22 Prüfer: Scheck (Name und ggf. Unterschrift)							

Abbildung 3.113: Härtemessungen GRS550/X80 (6)

3.25 Werkstoff L415

Die Proben des Werkstoffes L415 wurden einem längsnahtgeschweißten Rohrbogen mit einem Durchmesser von 660 mm und einer Wandstärke von 11,1 mm entnommen.

Die werkstoffspezifischen Werte sind:

Tabelle 3.78: Kenndaten L415

Herstellungsjahr	2020	
Herstellungsnorm	EN ISO 3183	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	415
	R _m [MPa]	520
	K _v [J]	27
Materialkennwerte	R _e [MPa]	468
	R _m [MPa]	618
	K _v [J]	192

Tabelle 3.79: Chemische Zusammensetzung L415

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.098	0.254	1.369	0.016	0.0013	0.017	0.041	0.108
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.35	0.002	0.003	0.022				

Tabelle 3.80: Bruchzähigkeiten L415

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
L415	GW	9	108.5
L415	SG	9	138.4

Im Folgenden sind Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Es sind folgende Proben entnommen worden:

- Grundwerkstoff (GW)
- Schweißgut der Längsnaht (SG-LN)

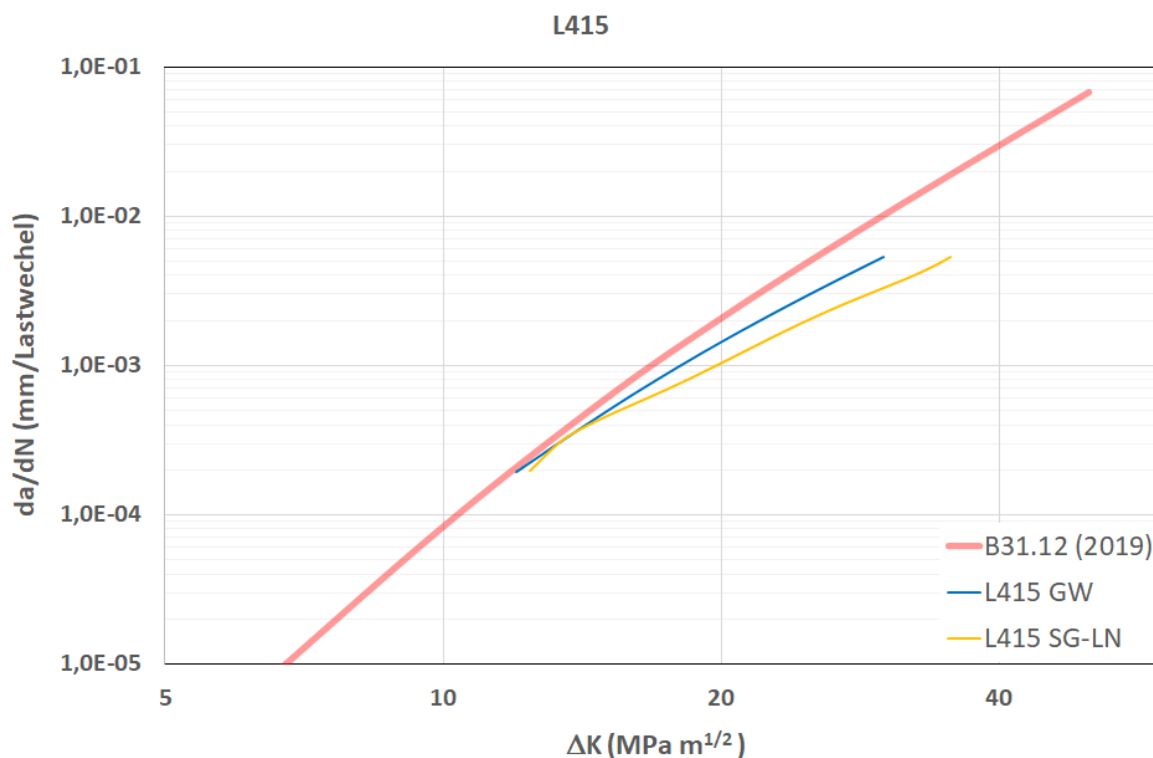


Abbildung 3.114: Rissfortschritt L415

3.26 Werkstoff P355 NL1

Die Proben wurden einem nahtlosen Stahlrohr mit einem Durchmesser von 368 mm und einer Wandstärke von 37 mm entnommen.

Die Kennwerte hierzu sind:

Tabelle 3.81: Kenndaten P355 NL1

Herstellungsjahr	2013	
Herstellungsnorm	API Spec. 5L (2013) / EN 10216-3	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	345
	R _m [MPa]	490
	K _v [J]	43
Materialkennwerte	R _e [MPa]	365
	R _m [MPa]	529
	K _v ²³ [J]	224

²³ Probenform gemäß ASTM A 370 quer bei 0°C

Tabelle 3.82: Chemische Zusammensetzung P355 NL1

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.15	0.2	1.3	0.1	0.002	0.14	0.12	0.04
	Ni	V	Ti	Nb				
		0.05	0.001	0.013				

Tabelle 3.83: Bruchzähigkeiten P355 NL1

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
P355 NL1	GW	15	111.6

Im Folgenden ist die Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Geprüft wurde ausschließlich der Grundwerkstoff.

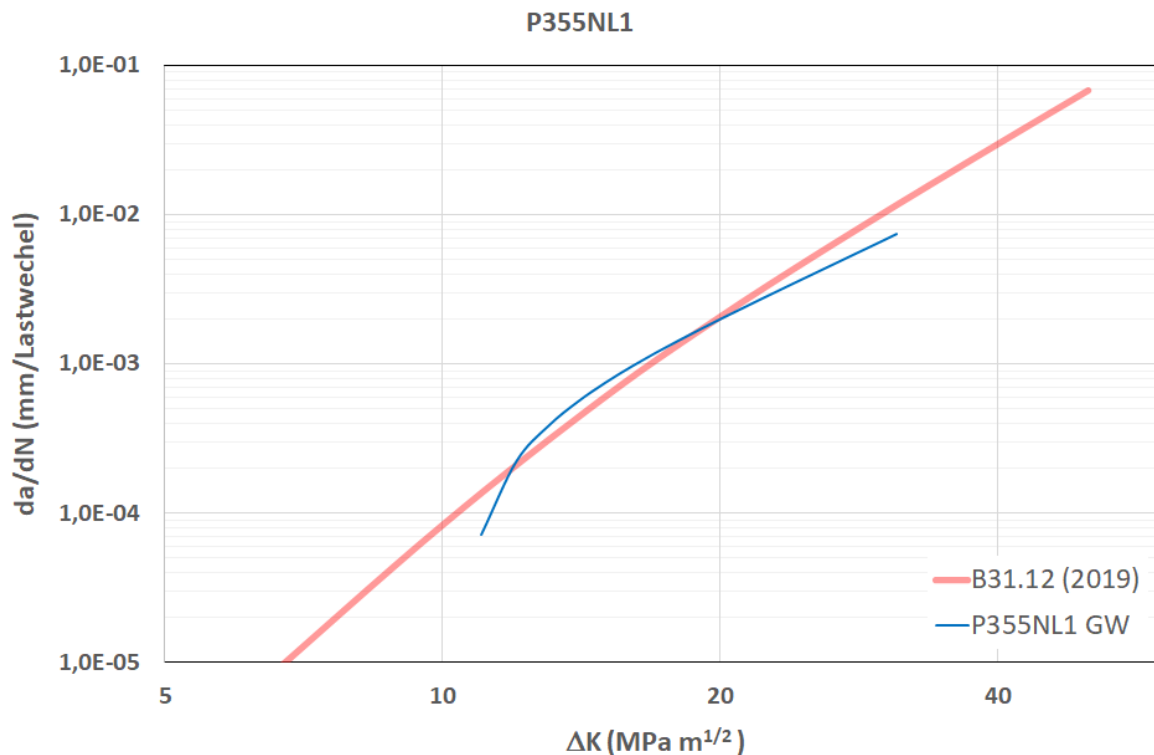


Abbildung 3.115: Rissfortschritt P355 NL1

3.27 Werkstoff GJS400

Der Werkstoff GJS400 (Kugelgraphit) findet teilweise auch als Druckkörper für Armaturen Verwendung. Bei der verwendeten Probe handelte es sich um eine Angusprobe.

Die Kennwerte sind:

Tabelle 3.84: Kenndaten GJS400

Herstellungsjahr	2022	
Herstellungsnorm	EN 1563	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	240
	R _m [MPa]	370
	K _v [J]	14
Materialkennwerte	R _e [MPa]	294
	R _m [MPa]	421
	K _v ²⁴ [J]	15

Tabelle 3.85: Chemische Zusammensetzung GJS400

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	3.822				0.0038			
	Ni	V	Ti	Nb				

Tabelle 3.86: Bruchzähigkeiten GJS400

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
GJS400	GW	14	62.2

Im Folgenden ist Kennlinie zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Die Untersuchung beschränkte sich auf den Grundwerkstoff.

²⁴ Kerbschlagbiegetest nach DIN EN ISO 148-1, Kerbform, KV2, Prüftemperatur: 0 °C.

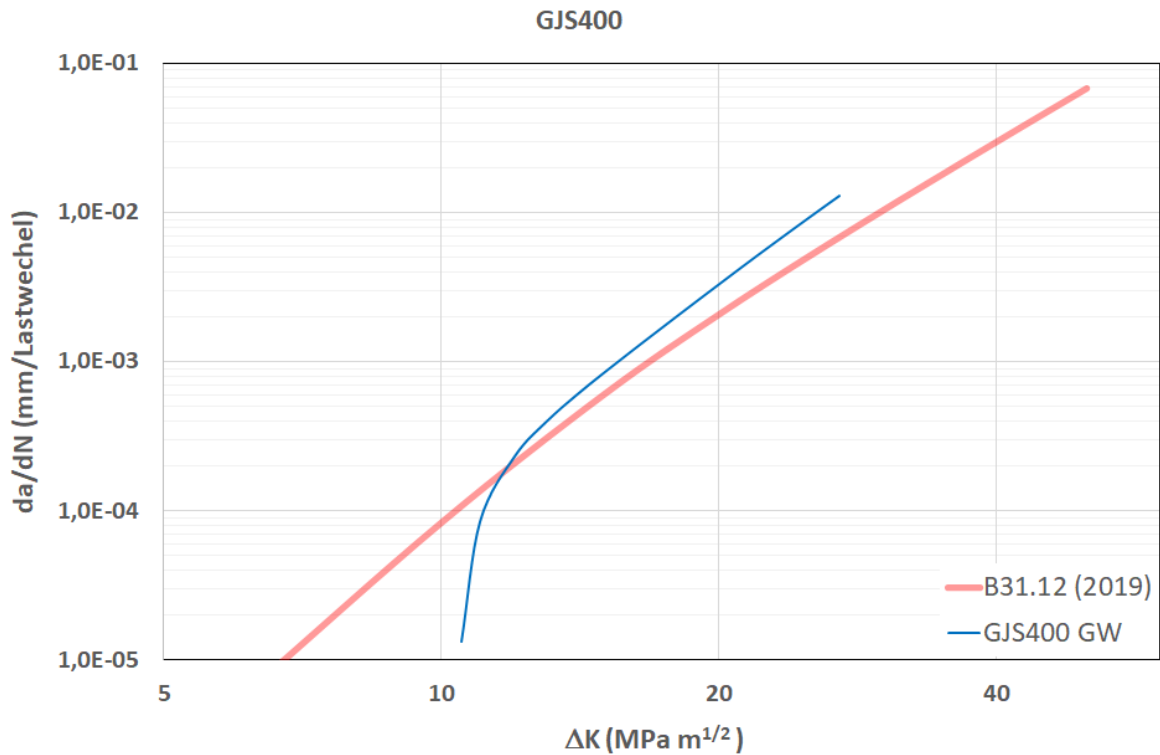


Abbildung 3.116: Rissfortschritt GJS400

3.28 Werkstoff P460 QL1

Der Stahlguß P460 QL1 wird unter anderem für Druckkörper von Armaturen eingesetzt. Das Probenstück hatte eine Dicke von 50 mm.

Er hat folgende Kennwerte:

Tabelle 3.87: Kenndaten P460 QL1

Herstellungsjahr	2019	
Herstellungsnorm	EN 10028-6 (2017)	
Spez. min. Kennwerte	R_e [MPa]	460
	R_m [MPa]	550
	K_v [J]	27
Materialkennwerte	R_e [MPa]	464
	R_m [MPa]	562
	K_v^{25} [J]	282

Tabelle 3.88: Chemische Zusammensetzung P460 QL1

Chemische	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.081	0.376	1.35	0.007	0.0005	0.159	0.058	0.087

²⁵ Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 bei -60 °C., Form: CV

Zusammensetzung [%]	Ni	V	Ti	Nb	
	0.27	0.05	0.002	0.018	

Tabelle 3.89: Bruchzähigkeiten P460 QL1

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [$MPa\sqrt{m}$]
P460 QL1	GW	16	118.6

Im Folgenden ist die Kennlinien zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Untersucht wurde der Grundwerkstoff.

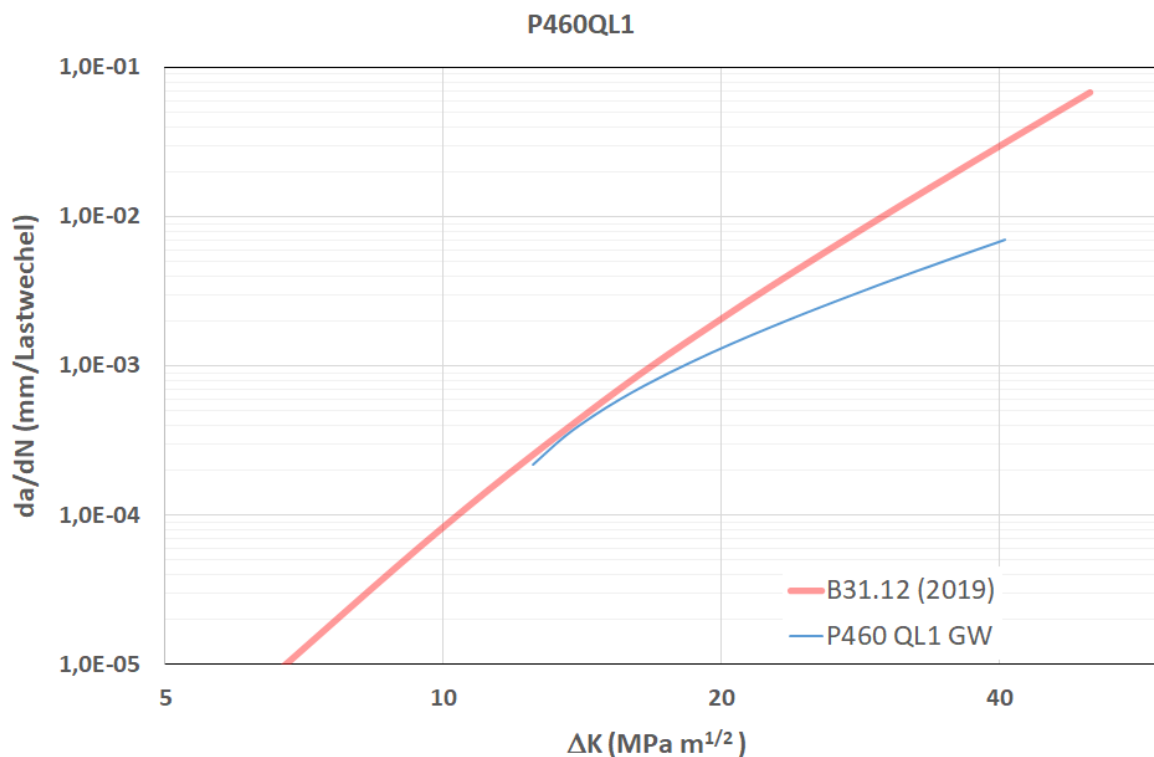


Abbildung 3.117: Rissfortschritt P460 QL1

3.29 Werkstoff C22.3

Die Proben wurden einer Platte mit einer Dicke von 20 mm entnommen.

Die Werkstoffkennwerte lauten:

Tabelle 3.90: Kenndaten C22.3

Herstellungsjahr	2022	
Herstellungsnorm	WB364	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	240
	R _m [MPa]	410
	K _v ²⁶ [J]	31
Materialkennwerte	R _e [MPa]	347
	R _m [MPa]	490
	K _v ²⁷ [J]	94

Tabelle 3.91: Chemische Zusammensetzung C22.3

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.16	0.154	0.741	0.026	0.012	0.027	0.017	0.005
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.001	0.001	0.001	0.001				

Tabelle 3.92: Bruchzähigkeiten C22.3

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
C22.3	GW	44	104.1

Im Folgenden ist die Kennlinie zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Untersucht wurde der Grundwerkstoff.

²⁶ Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 (2017-05), Kerbe_ KV2, Prüftemperatur: 20 °C.

²⁷ Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 (2017-05), Kerbe_ KV2, Prüftemperatur: 0 °C.

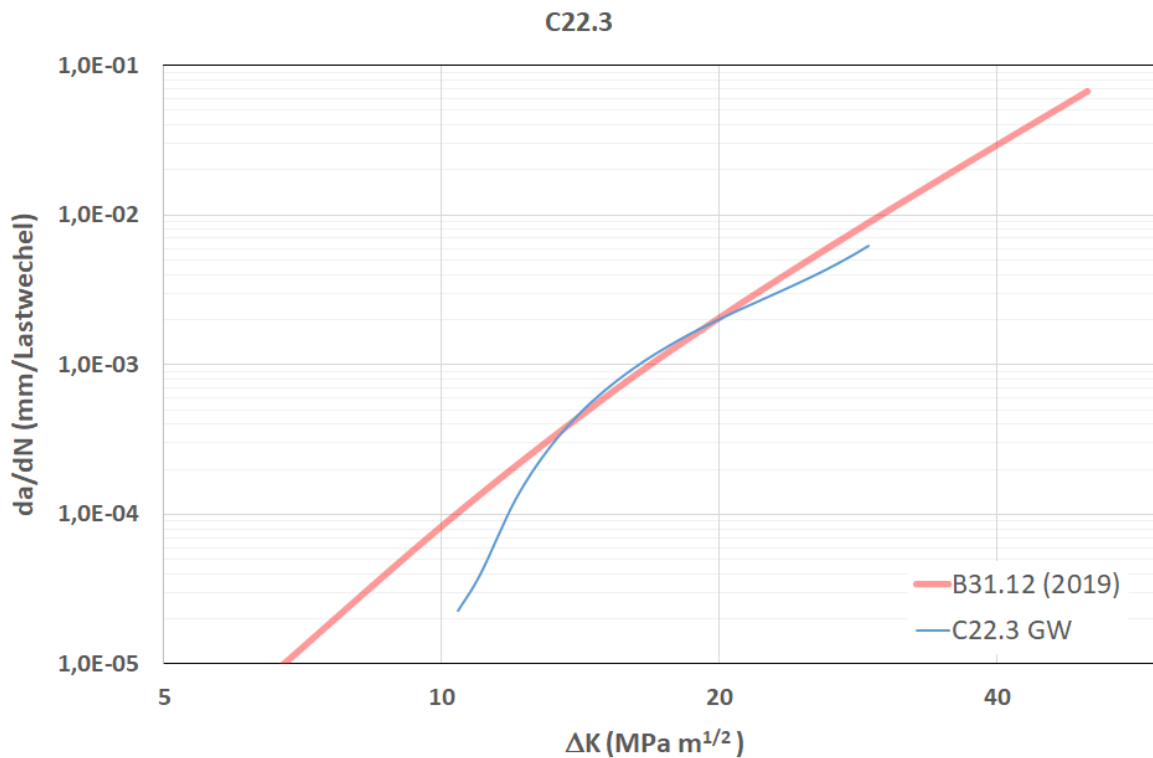


Abbildung 3.118: Rissfortschritt C22.3

3.30 Werkstoff GS C25 N

Der geprüfte Werkstoff wurde einem Armaturengehäuse entnommen.

Die Werkstoffkennwerte lauten:

Tabelle 3.93: Kenndaten GS C25 N

Herstellungsjahr	1993	
Herstellungsnorm	DIN 17245	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	245
	R _m [MPa]	440
	K _v [J]	27
Materialkennwerte	R _e [MPa]	311
	R _m [MPa]	472
	K _v ²⁸ [J]	18

²⁸Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 (2017), Probenform: KV2, Prüftemperatur: 0 °C., längs

Tabelle 3.94: Chemische Zusammensetzung GS C25 N

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.2	0.403	0.678	0.035	0.014	0.234	0.235	0.059
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.136	0.001	0.003	0.001				

Tabelle 3.95: Bruchzähigkeiten GS C25 N

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K_{JIC} [MPa \sqrt{m}]
GS C25 N	GW	46	111.6

Im Folgenden ist die Kennlinie zur Beschreibung des Risswachstum in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von $R = 0.5$ durchgeführt worden.

Untersucht wurde der Grundwerkstoff.

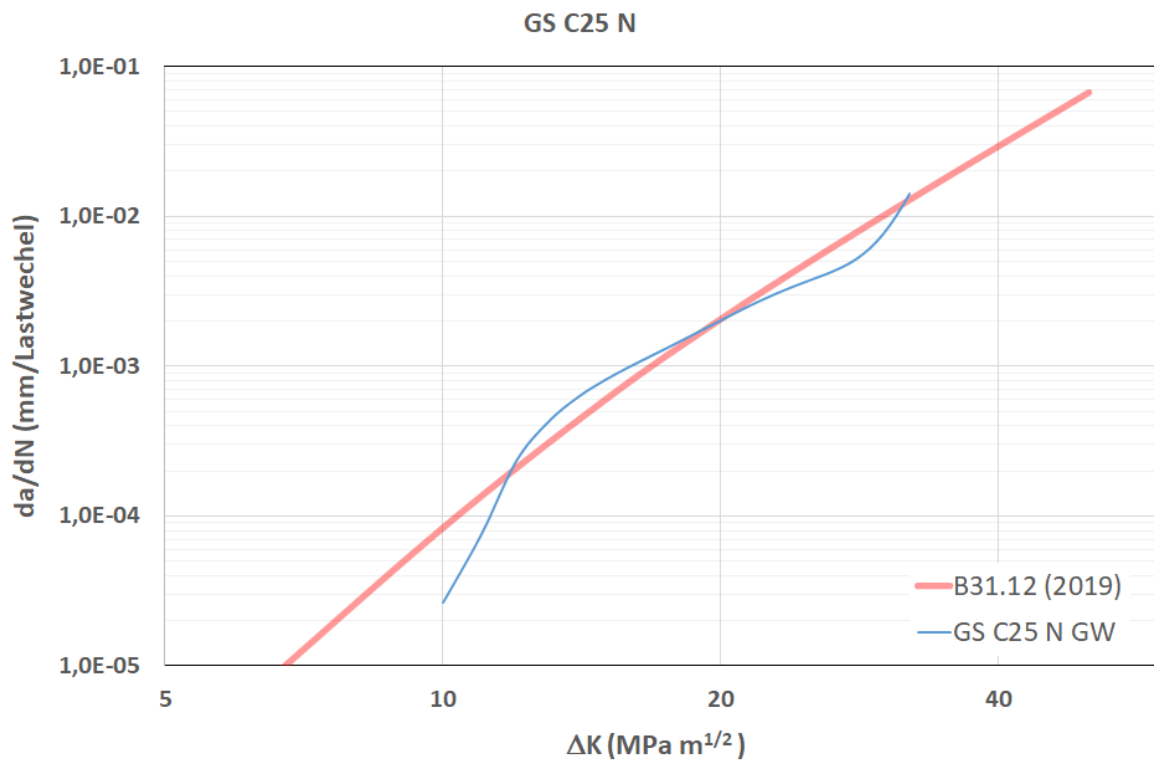


Abbildung 3.119: Rissfortschritt GS C25 N

3.31 Werkstoff TStE 355N

Die Proben wurden einem Blech der Dicke 20 mm entnommen.

Die Werkstoffkennwerte lauten:

Tabelle 3.96: Kenndaten TStE 355N

Herstellungsjahr	2002	
Herstellungsnorm	DIN 17102	
Spez. min. Kennwerte	R _e [MPa]	355
	R _m [MPa]	490
	K _v ²⁴ [J]	55
Materialkennwerte	R _e [MPa]	434
	R _m [MPa]	530
	K _v ²⁹ [J]	281

Tabelle 3.97: Chemische Zusammensetzung TStE 355N

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
	0.14	0.201	1.311	0.017	0.007	0.088	0.094	0.022
	Ni	V	Ti	Nb				
	0.039	0.025	0.003	0.03				

Tabelle 3.98: Bruchzähigkeiten TStE 355N

Werkstoff	Ort	Pos. Nr.	K _{JIC} [MPa√m]
TStE 355N	GW	45	133.3

Im Folgenden ist die Kennlinie zur Beschreibung des Risswachstums in Wasserstoffatmosphäre dargestellt. Die Rissfortschrittsuntersuchung ist bei einem Überdruck von 100 bar, einer Frequenz von 1 Hz und einem R-Wert von R = 0.5 durchgeführt worden.

Untersucht wurde der Grundwerkstoff.

²⁹Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 (2017), Probenform: KV2, Prüftemperatur: 0 °C., längs

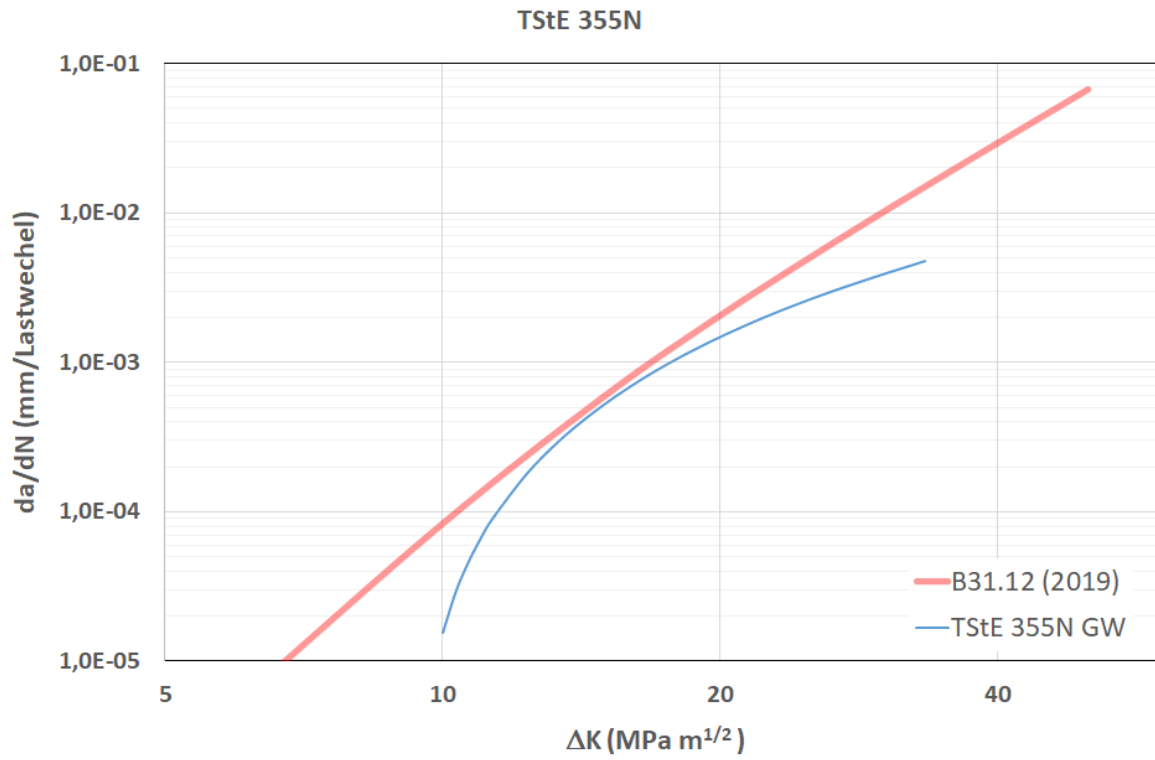


Abbildung 3.120: Rissfortschritt TStE 355N

4 Ergebnisse der Rissfortschrittsmessungen

4.1 Risswachstum bei $p_{H_2} = 100$ bar und $R=0.5$

Die zyklischen Bruchmechanikversuche wurden ebenso wie die statischen Versuche - an der überwiegenden Anzahl der Proben - unter einem konstanten Wasserstoffdruck $p_{H_2} = 100$ bar durchgeführt. In Übereinstimmung mit den zugrundeliegenden Versuchsparametern entsprechend [3] und [7] wurde hier die Prüffrequenz $f = 1$ Hz und das Mittelspannungsverhältnis $R = 0.5$ eingestellt.

In Abbildung 4.1 finden sich die Ergebnisse der zyklischen Rissfortschrittsversuche für das Grundmaterial, die Schweißnaht und die Wärmeeinflusszone der Schweißnaht der untersuchten Werkstoffe. Zum Vergleich ist die Rissfortschrittbeziehung entsprechend ASME B31.12 als rote Linie ebenfalls eingezeichnet.

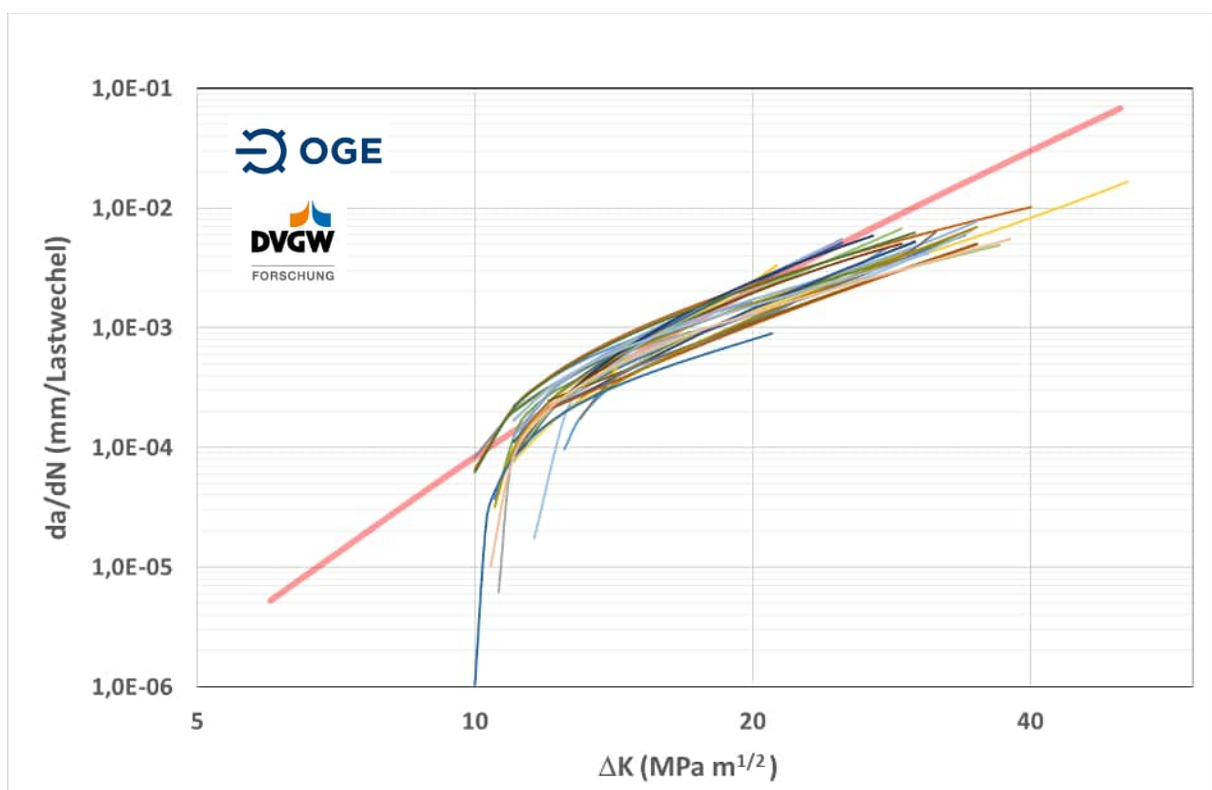


Abbildung 4.1: Ermitteltes Risswachstum unter Wasserstoff der untersuchten Werkstoffe (100 bar, $R = 0.5$)

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden jeweils die Rissfortschrittsraten im Bereich der Spannungsintensitäten ΔK ca. $10 \text{ MPa m}^{1/2}$ bis ca. $40 \text{ MPa m}^{1/2}$ ermittelt; die Ermittlung des unteren Schwellwertes ΔK_{th} war hier nicht das Ziel der durchgeführten Untersuchungen. Die Kenntnis sehr kleiner Spannungsintensitäten ist im Zusammenhang mit Lebensdauerprognosen für Gasleitungen von untergeordneter Bedeutung, da kleine Spannungsintensitäten praktisch keinen Einfluss auf das Ergebnis dieser Prognosen nehmen.

In Übereinstimmung mit den im amerikanischen Raum durchgeführten Untersuchungen bilden die gemessenen Risswachstumskurven im Wesentlichen ein – relativ homogenes – Streuband

unterhalb der Risswachstumsbeziehung entsprechend ASME B31.12, obwohl sehr unterschiedliche Materialien hinsichtlich der Festigkeit, der Gefügeausbildung und der Duktilität geprüft worden sind.

Bei einem genaueren Vergleich mit der Risswachstumsbeziehung nach ASME B31.12 zeigt sich in der Tendenz eine leichte Überschreitung des im Rahmen dieses Projektes gemessenen Risswachstums für kleine Spannungsintensitäten und eine Unterschreitung der Risswachstumsbeziehung für größere Spannungsintensitäten.

Daher ergibt sich die Möglichkeit eine genauere, konservative Annäherung an die Messdaten durchzuführen, indem das Risswachstumsgesetz in zwei bilineare Bereiche aufgeteilt wird (Abbildung 4.2). Diese übliche Vorgehensweise wurde z.B. bereits in [8] vorgeschlagen.

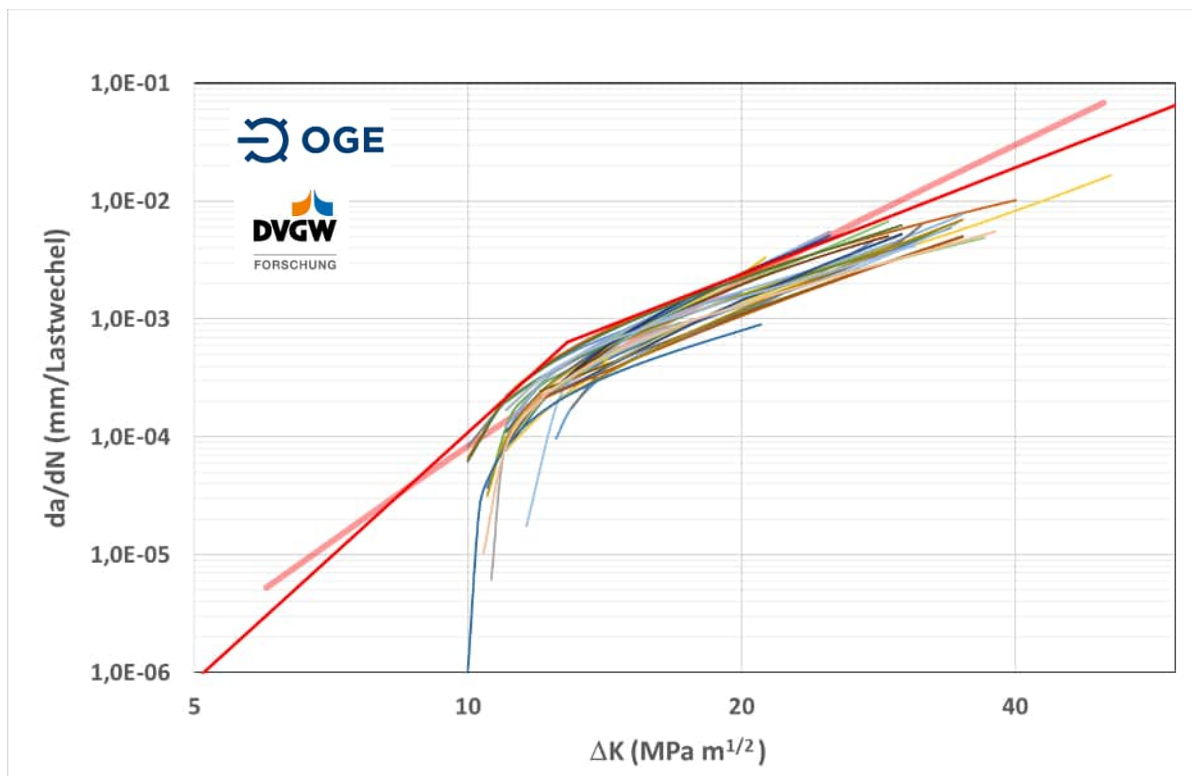


Abbildung 4.2: Konservative Beschreibung des ermittelten Risswachstums unter Wasserstoff für $p_{H_2} = 100$ bar und $R = 0.5$

Aus den ermittelten Versuchsdaten leitet sich das nachfolgende Risswachstumsgesetz für $p_{H_2}=100$ bar und $R=0.5$ ab:

$$\text{für } \Delta K \leq 12,851 \text{ MPa}\sqrt{m} \quad \frac{da}{dN} = 1,1 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta K^7$$

$$\text{für } \Delta K \geq 12,851 \text{ MPa}\sqrt{m} \quad \frac{da}{dN} = 3 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta K^3$$

p_{H_2} [bar] ; ΔK [$\text{MPa m}^{0.5}$] ; da/dN [mm/Lastwechsel]

4.2 Risswachstumsgesetz in Abhängigkeit des Wasserstoffdruckes p_{H_2}

Die Abbildungen 4.3 bis 4.5 zeigen Ergebnisse der Risswachstumsmessungen für zwei unterschiedliche Herstellungsjahre des Werkstoffes St35 sowie den Werkstoff L485, die bei Wasserstoffdrücken von $p_{H_2} = 0.2$ bar bis $p_{H_2} = 100$ bar durchgeführt worden sind. Es zeigte

sich, dass sich das Risswachstum - insbesondere für kleinere Spannungsintensitäten und kleinere Wasserstoffdrücke - zunächst ähnlich dem Risswachstum unter dem Medium Luft verhält. Bei Steigerung der zyklischen Spannungsintensität nähert sich das Risswachstum dem typischen Risswachstum für höhere Drücke bzw. für $p_{H_2} \approx 100$ bar an. Bei der Verwendung des - wie in Abbildung 4.2 - gezeigten - bilinearen Risswachstumsgesetz, kann man dieses Verhalten näherungsweise beschreiben, indem in die Risswachstumsbeziehung für kleinere Spannungsintensitäten eine Druckabhängigkeit berücksichtigt wird. Für größere Spannungsintensitäten wird angenommen, dass die Risswachstumsbeziehung unabhängig vom Wasserstoffdruck ist und damit dem Verhalten bei $p_{H_2} = 100$ bar entspricht. Diese Vorgehensweise wurde ebenfalls bereits in [8] vorgeschlagen und hinsichtlich der Anwendbarkeit auf die hier vorliegenden Daten überprüft.

Die modellhafte Beschreibung des Risswachstums für die entsprechenden Wasserstoffdrücke ist daher in den Bildern 4.3 bis 4.5 ebenfalls in der Form von „bilinearen“ Geraden - in gleicher farblicher Darstellung wie die entsprechende Messung - dargestellt.

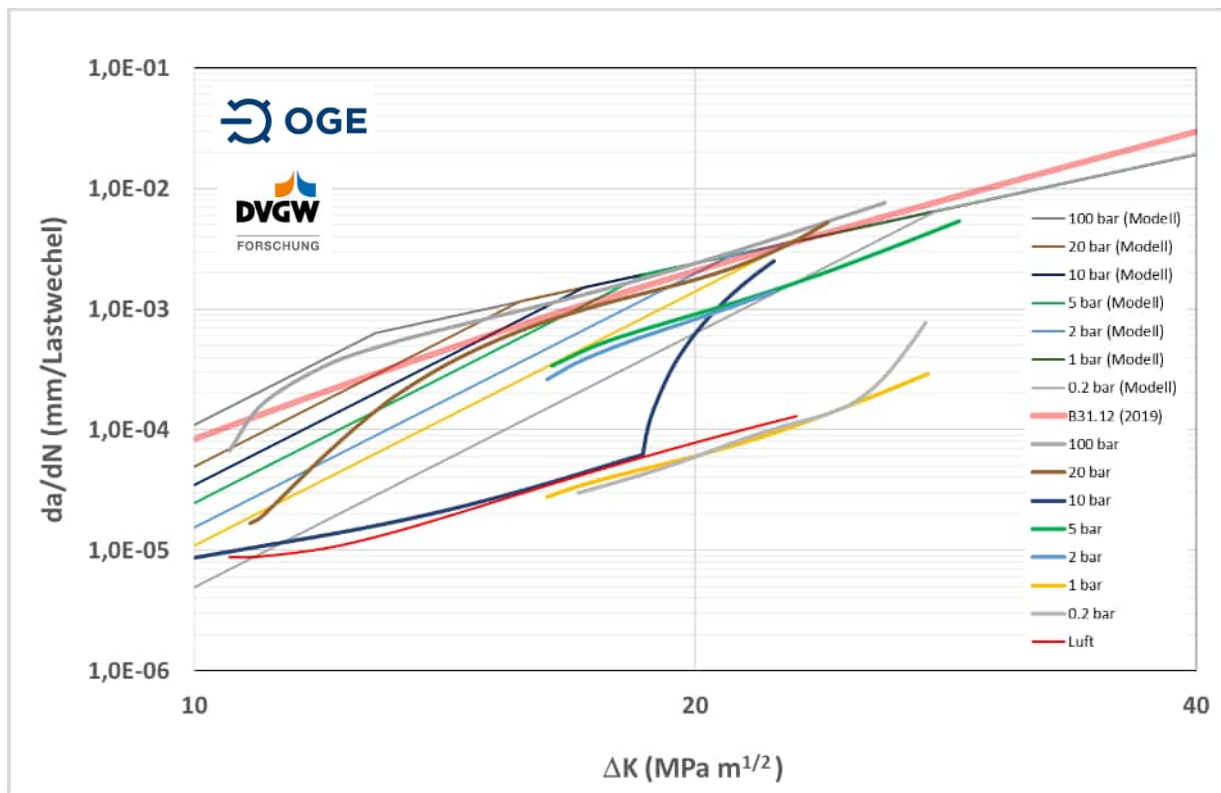


Abbildung 4.3: Risswachstum unter Wasserstoff für unterschiedliche Wasserstoffdrücke und „bilineares“ Modell (Werkstoff St35, Pos.25ff bei R = 0.5)

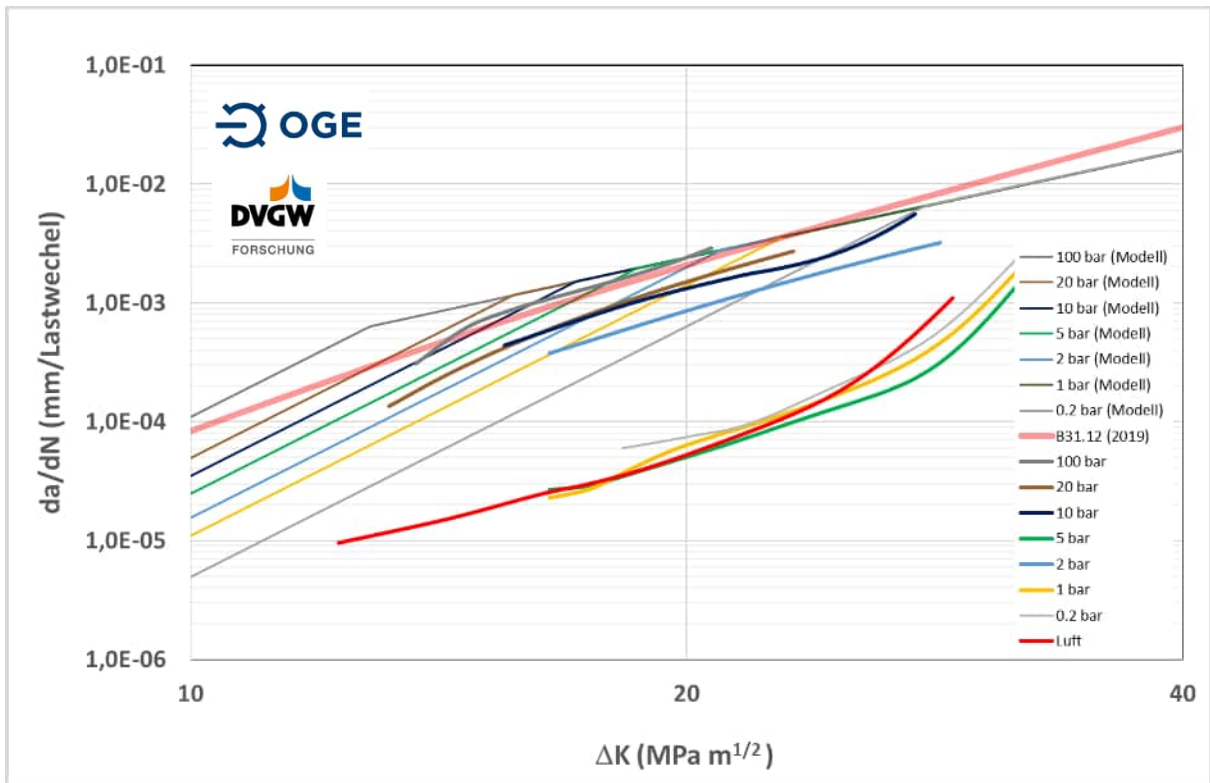


Abbildung 4.4: Risswachstum unter Wasserstoff für unterschiedliche Wasserstoffdrücke und „bilineares“ Modell (Werkstoff St35, Pos.41 bei R = 0.5)

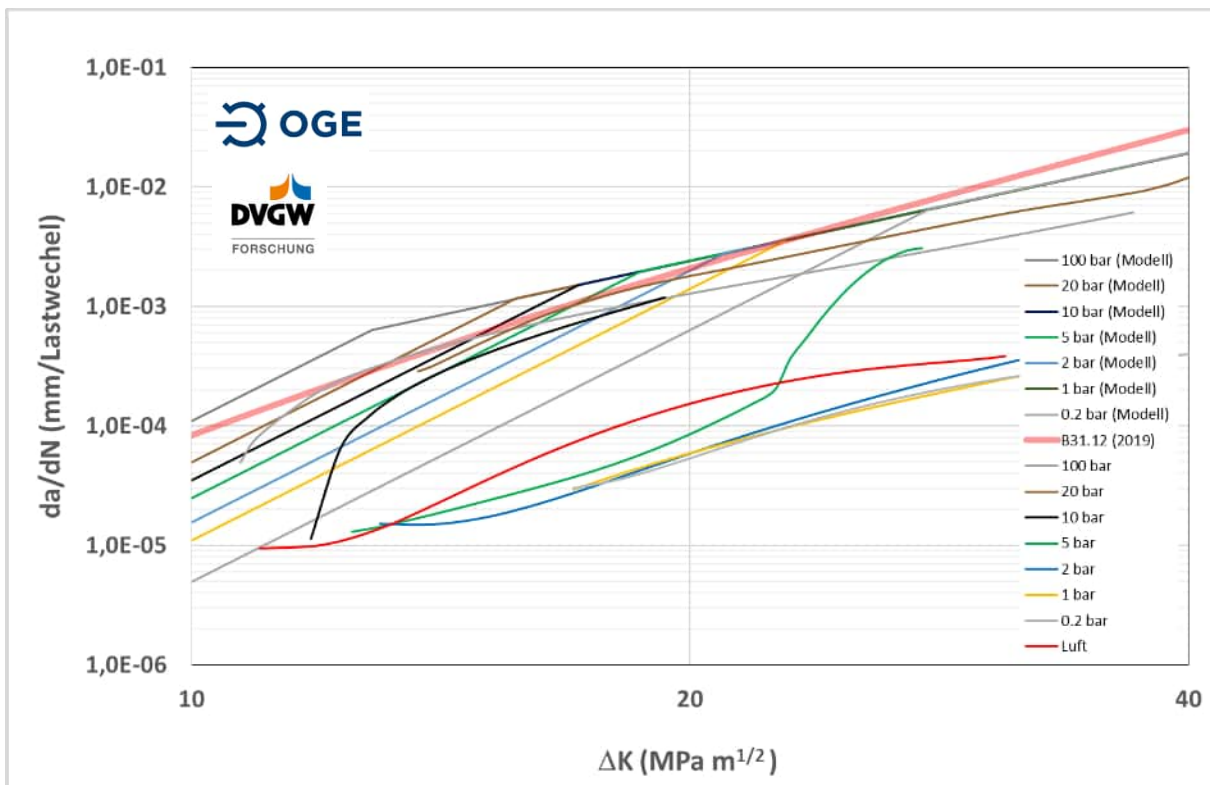


Abbildung 4.5: Risswachstum unter Wasserstoff für unterschiedliche Wasserstoffdrücke und „bilineares“ Modell (Werkstoff L485, Pos.32ff bei R = 0.5)

Die genauere Analyse des Risswachstumsverhaltens für verschiedene Wasserstoffdrücke p_{H_2} zeigt:

- bei kleineren Spannungsintensitäten und Wasserstoffdrücken ist das Risswachstum sehr vergleichbar mit dem Risswachstum unter Luft/Erdgas
- bei größeren Wasserstoffdrücken nähert sich das Risswachstum - auch bereits bei geringeren Spannungsintensitäten - sehr schnell dem Verhalten bei $p_{H_2} = 100$ bar an
- die Lage des Übergangsbereiches vom „langsamen“ Risswachstum zum H_2 -typischen, schnellen Risswachstum hängt von der Höhe des Wasserstoffdruckes ab, lässt sich allerdings nicht exakt vorhersagen

Die Messungen an dem Werkstoff L485 (Abbildung 4.5) zeigen beispielsweise in dem gesamten gemessenen Bereich der Spannungsintensitäten für die Drücke $p_{H_2} = 0.2$ bar bis $p_{H_2} = 2$ bar ein vergleichbares Risswachstum zu dem Medium Luft. Für den Druck $p_{H_2} = 5$ bar nähert sich die Risswachstumsgeschwindigkeit oberhalb von Spannungsintensitäten $\Delta K > 22$ MPa $m^{0.5}$ der typischen Wachstumsgeschwindigkeit von Wasserstoff an. Bei dem Wasserstoffdruck $p_{H_2} = 10$ bar beginnt der Übergang zu einer hohen Risswachstumsgeschwindigkeit bereits bei Spannungsintensitäten $\Delta K \approx 12$ MPa $m^{0.5}$.

Die Messungen an dem Werkstoff St35 (Abbildung 4.3 bis 4.4) ergeben für die kleinen Wasserstoffdrücke $p_{H_2} = 0.2$ bar und $p_{H_2} = 1$ bar (bzw. in einem Fall sogar für $p_{H_2} = 5$ bar) für alle untersuchten Spannungsintensitäten ΔK ebenfalls ein Risswachstumsverhalten entsprechend dem Medium Luft. Allerdings erwies sich das Risswachstum bei gleicher Spannungsintensität bei $p_{H_2} = 2$ bar größer als bei $p_{H_2} = 5$ bar (siehe Abbildung 4.4) oder bei $p_{H_2} = 10$ bar teilweise geringer als bei $p_{H_2} = 2-5$ bar (siehe Abbildung 4.3).

Die Einflussfaktoren, welche die Abhängigkeit des Risswachstums in Bezug auf die Höhe des Wasserstoffdruckes bestimmen, erscheinen daher sehr komplex und sind wahrscheinlich auch von den lokal vorliegenden Gefügeständen der Materialien bestimmt.

Im Rahmen der Anwendung eines konservativen Sicherheitskonzeptes ist es jedoch dennoch hilfreich, eine konservative Abschätzung des Risswachstums einzuführen.

Die ermittelten Versuchsdaten ergeben eine konservative Beschreibung des Risswachstums für $R=0.5$ mit:

$$\text{für } \Delta K \leq [3,6667 \cdot 10^{-6} \sqrt{p_{H_2}}]^{-0,25} \text{ MPa}\sqrt{m} \quad \frac{da}{dN} = 1,1 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta K^7 \cdot \sqrt{p_{H_2}}$$

$$\text{für } \Delta K \geq [3,6667 \cdot 10^{-6} \sqrt{p_{H_2}}]^{-0,25} \text{ MPa}\sqrt{m} \quad \frac{da}{dN} = 3 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta K^3$$

p_{H_2} [bar] ; ΔK [MPa $m^{0.5}$] ; da/dN [mm/Lastwechsel]

Anmerkung: Die angegebenen Gleichungen beinhalten die Gleichungen Abschnitt 4.1

4.3 Zusätzliche Berücksichtigung der Mittelspannung (R-Wert)

In dem amerikanischen Code [9] ist ein Vorschlag zur Umrechnung des Risswachstumsverhaltens auf beliebige R-Werte enthalten, soweit die entsprechenden

Versuche bei einem konstanten R-Wert durchgeführt worden sind. Die Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen einen Vergleich der gemessenen und nach [9] berechneten Verläufe des Risswachstums für $R = 0.1$ und $R = 0.7$ unter der Voraussetzung, dass diese Verläufe aus dem gemessenen Verlauf bei $R = 0.5$ berechnet wurden.

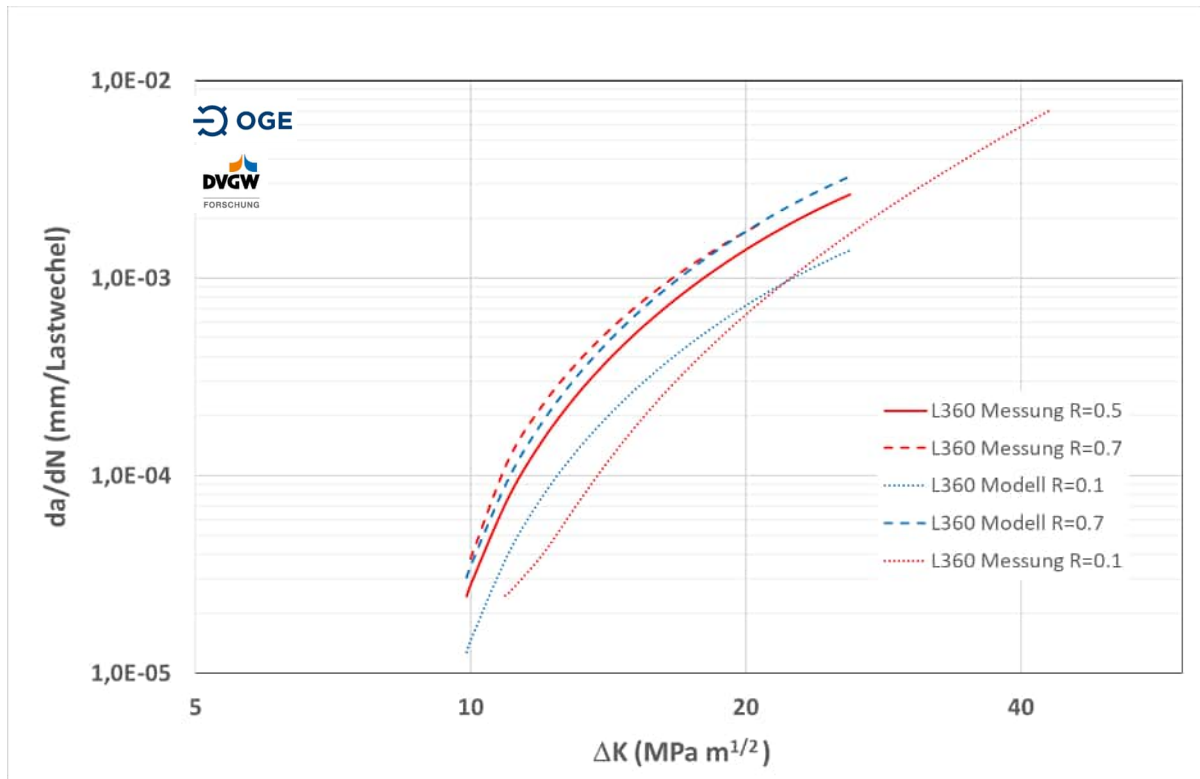


Abbildung 4.6: Berechneter und gemessener Einfluss des R-Wertes auf das Risswachstumsverhalten (Werkstoff L360, $R = 0.1$, $R = 0.5$, $R = 0.7$ $p_{H_2} = 100$ bar)

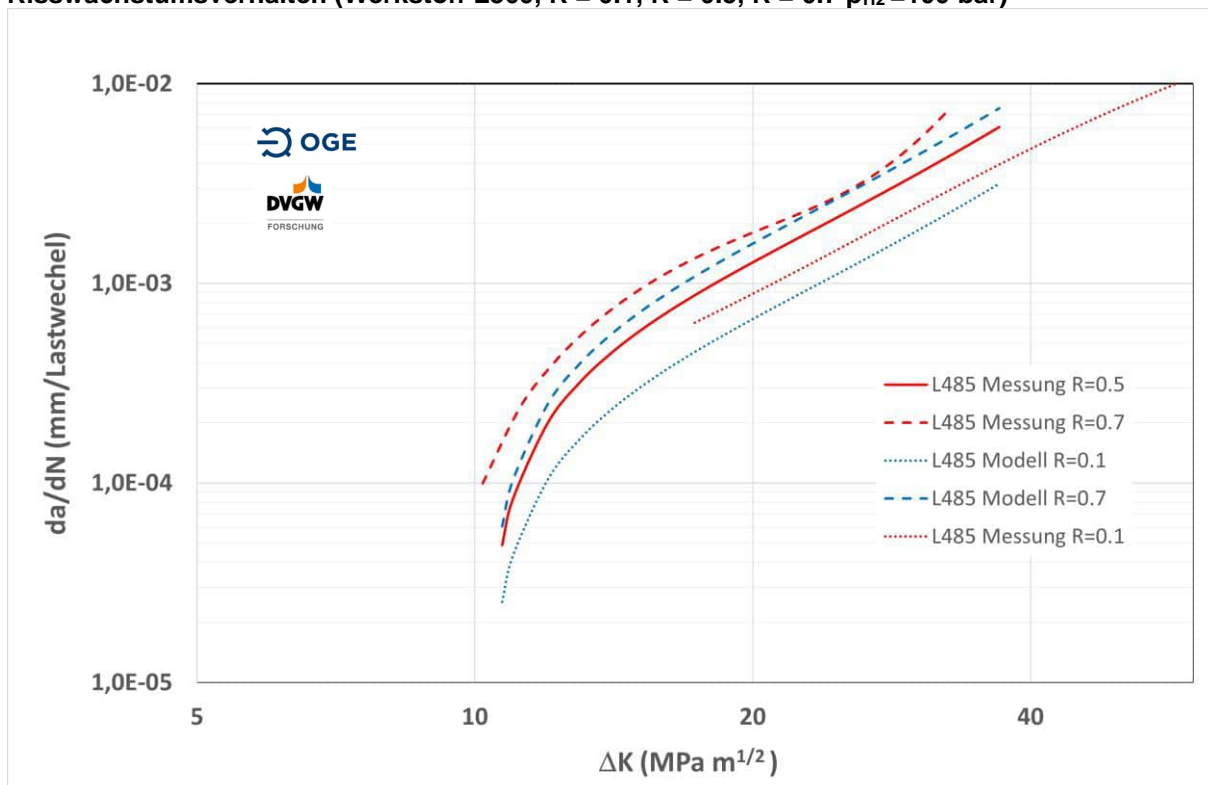


Abbildung 4.7: Berechneter und gemessener Einfluss des R-Wertes auf das Risswachstumsverhalten (Werkstoff L485, $R = 0.1$, $R = 0.5$, $R = 0.7$ $p_{H_2} = 100$ bar)

Die für $R = 0.7$ berechneten Verläufe entsprechen bei beiden Werkstoffen recht gut den tatsächlich gemessenen Verläufen des Risswachstums. Für $R = 0.1$ ist die Übereinstimmung zwischen dem berechneten und gemessenen Verläufen - im Kontext mit der Verwendung im Rahmen von Lebensdauerabschätzungen - noch als hinreichend genau zu bezeichnen.

Zur Illustration des Einflusses des R-Wertes auf das hier verwendete, bilineare Risswachstumsgesetz ist dieser in Abbildung 4.8 jeweils als punktierte rote Linie (für die R-Werte $R = 0.1$ und $R = 0.7$) eingetragen.

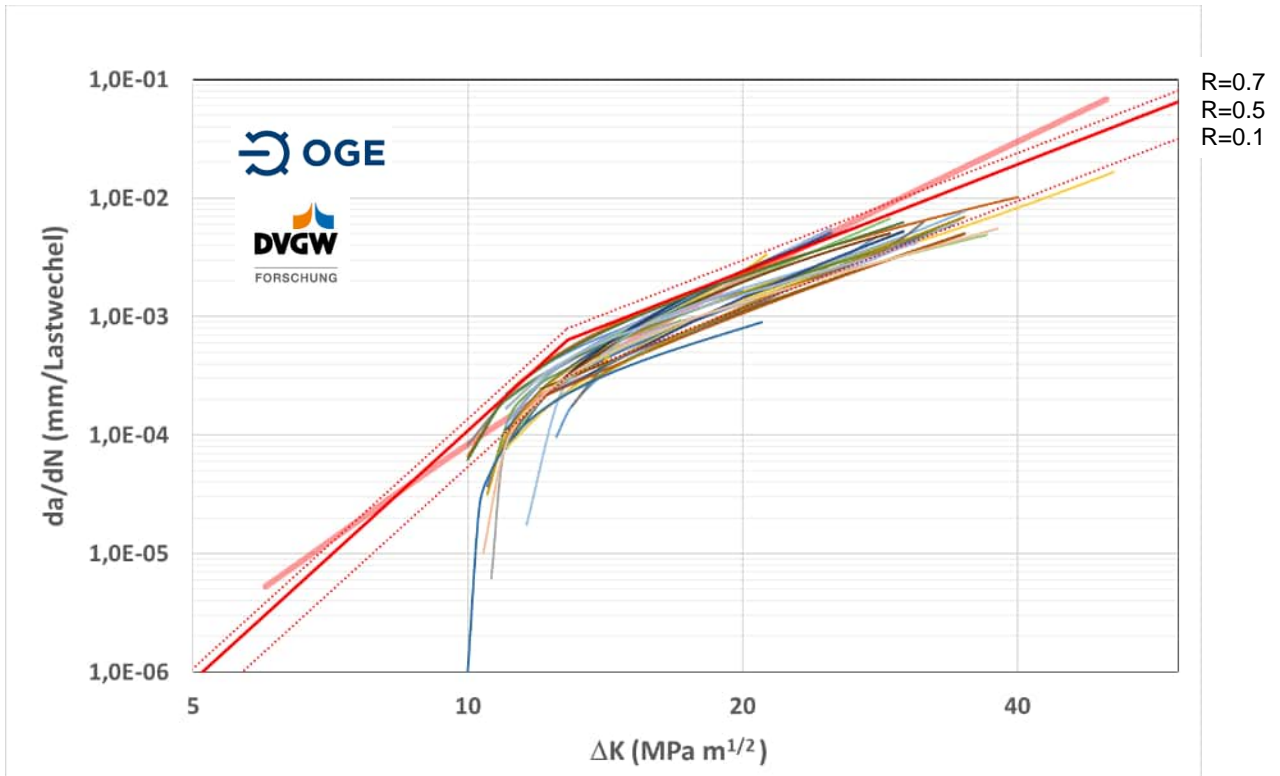


Abbildung 4.8: Bilineares Risswachstumsgesetz für $R=0.1$, $R=0.5$ und $R=0.7$ ($p_{H_2} = 100$ bar)

Aus den ermittelten Versuchsdaten leitet sich das nachfolgende Risswachstumsgesetz ab:

$$\text{für } \Delta K \leq \left[3,6667 \cdot 10^{-6} \sqrt{p_{H_2}} \right]^{-0,25} \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad \frac{da}{dN} = 4,4 \cdot 10^{-13} \cdot (1 + 3 \cdot R) \cdot \Delta K^7 \cdot \sqrt{p_{H_2}}$$

$$\text{für } \Delta K \geq \left[3,6667 \cdot 10^{-6} \sqrt{p_{H_2}} \right]^{-0,25} \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad \frac{da}{dN} = 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot (1 + 3 \cdot R) \cdot \Delta K^3$$

p_{H_2} [bar] ; ΔK [$\text{MPa m}^{0.5}$] ; da/dN [mm/Lastwechsel]

Anmerkung: Die angegebenen Gleichungen beinhalten die Gleichungen Abschnitt 4.1 und 4.2

5 Ausgewählte Ergebnisse für die Bruchzähigkeit

5.1 Ergebnisse für $p_{H_2} = 100$ bar

Die Abbildungen 5.1 bis 5.4 zeigen eine Übersicht der Ergebnisse für die Bruchzähigkeit K_{JIC} bei einem Prüfdruck $p_{H_2} = 100$ bar. Bei den in der Farbe „blau“ gekennzeichneten Daten handelt es sich um Prüfungen, die an den Grundwerkstoffen durchgeführt wurden; die „rot“ gekennzeichneten Daten stehen in Zusammenhang mit Prüfungen an Schweißnähten bzw. Wärmeeinflusszonen. In den Darstellungen ist zusätzlich der von den Regelwerken geforderte Mindestwert $K_{JIC} = 55 \text{ MPa m}^{0.5}$ gekennzeichnet.

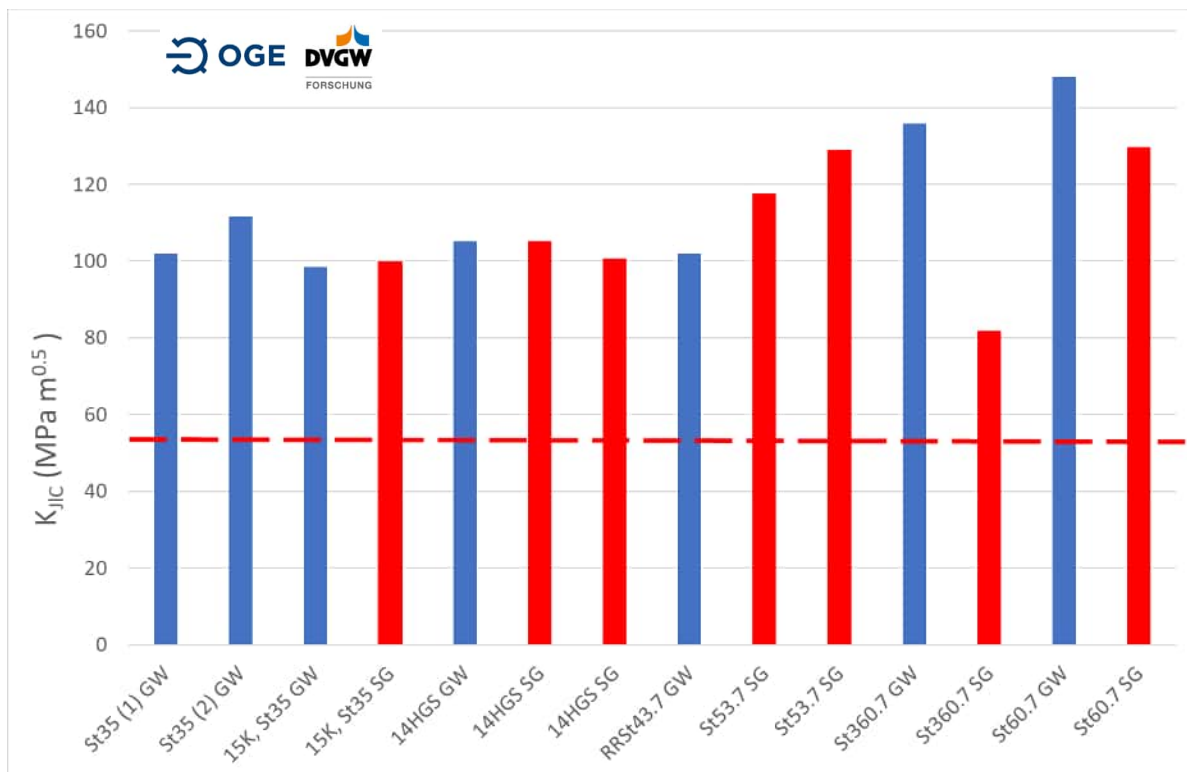


Abbildung 5.1: Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für die geprüften Leitungswerkstoffe (1)

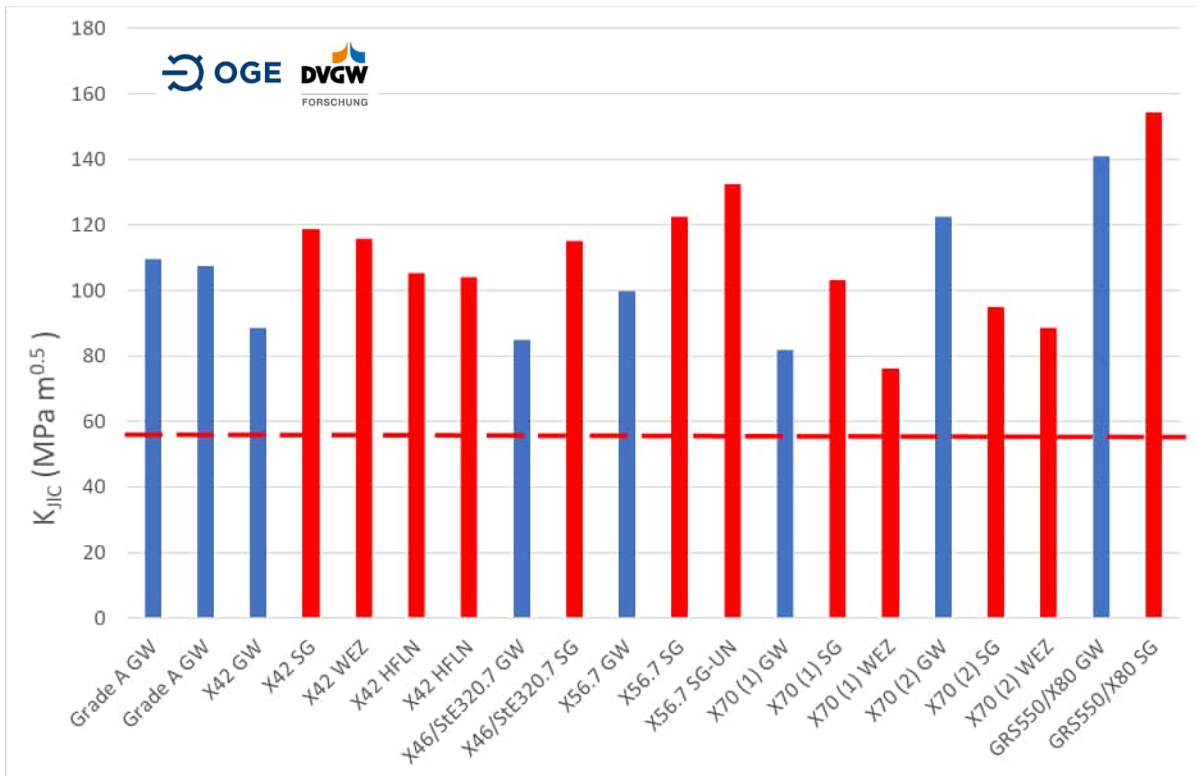


Abbildung 5.2: Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für die geprüften Leitungswerkstoffe (2)

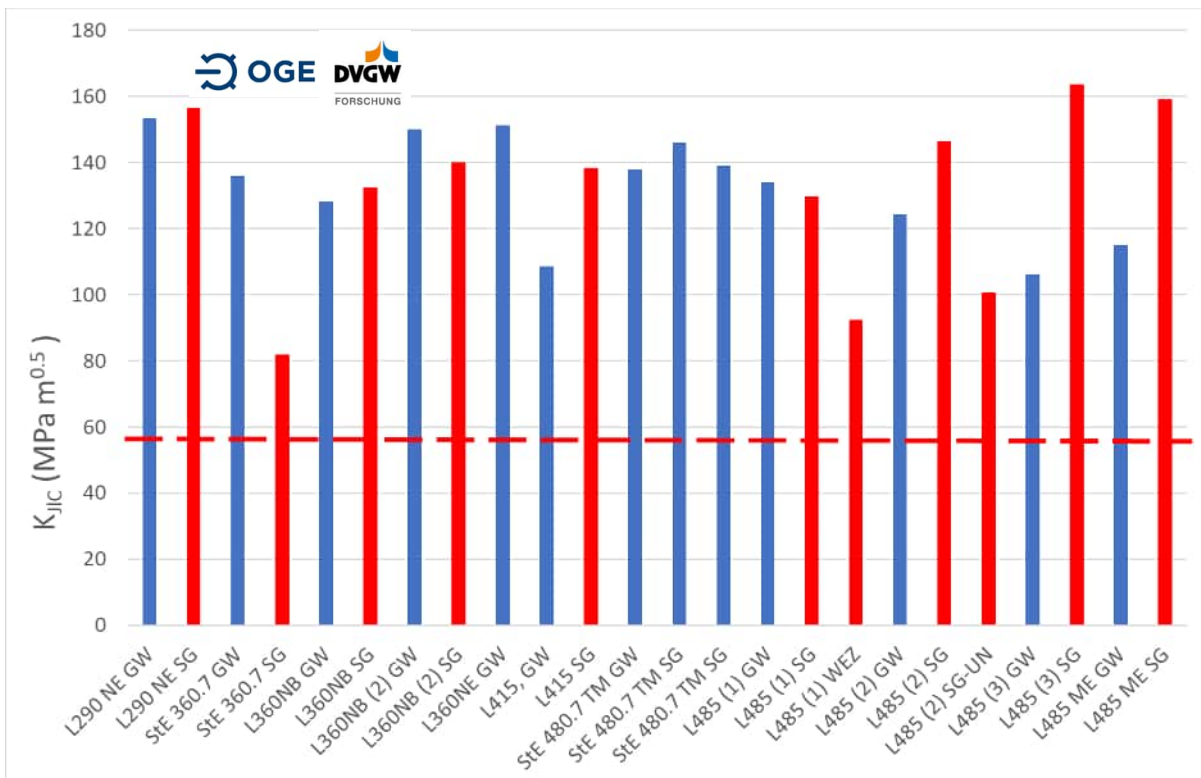


Abbildung 5.3: Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für die geprüften Leitungswerkstoffe (3)

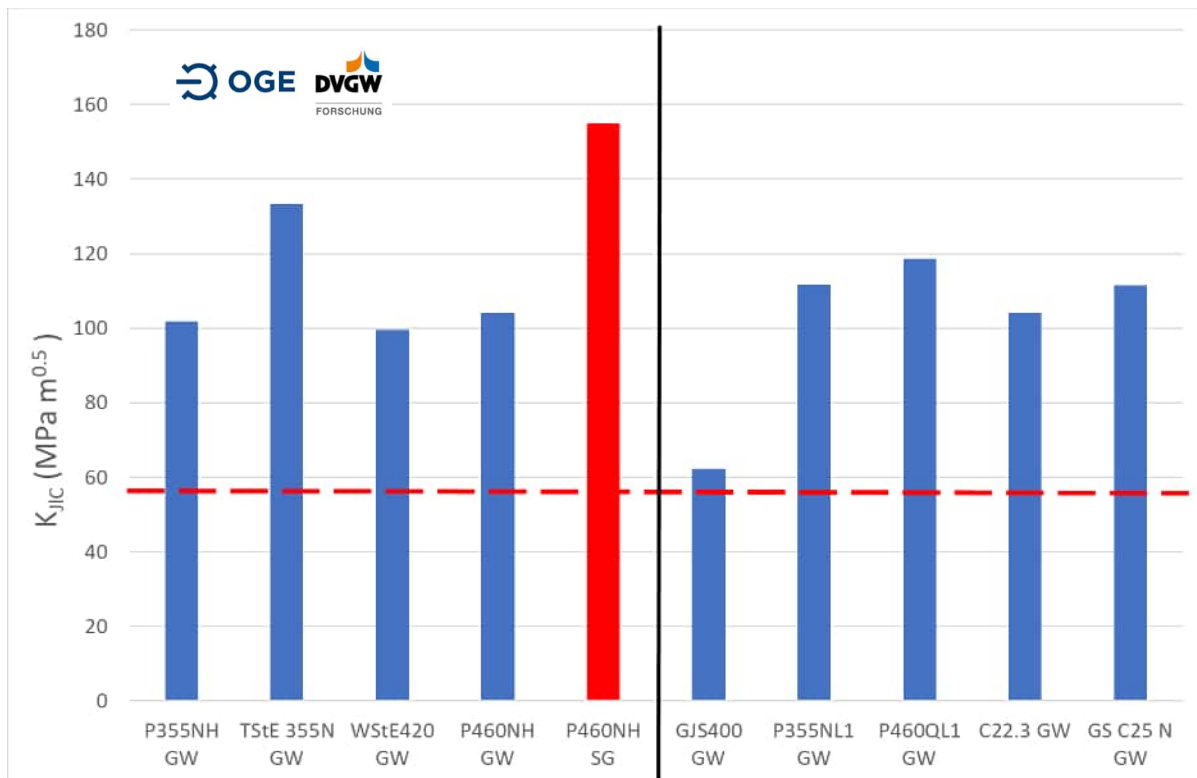


Abbildung 5.4: Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für Rohrleitungswerkstoffe und Armaturen (Druckkörper)

Alle untersuchten Proben erfüllten die Mindestforderung für die Bruchzähigkeit $K_{Ic} \geq 55 \text{ MPam}^{1/2}$ entsprechend ASME B31.12.

5.2 Ergebnisse für $p_{H_2} < 100 \text{ bar}$

Für den Werkstoff St35 wurde für zwei unterschiedliche Herstellungsjahre der Einfluss des Wasserstoffdruckes auf die resultierende Bruchzähigkeit überprüft (Abbildungen 5.5 und 5.6). Die Variation des Wasserstoffdruckes wurde dabei ausschließlich am Grundwerkstoff durchgeführt. Dabei wurden unter dem Medium Luft (0 bar H_2) die größten Bruchzähigkeiten $K_{JIC} \cong 170 \text{ MPa m}^{1/2}$ ermittelt. Bereits bei dem geringen Wasserstoffdruck $p_{H_2} = 0.2 \text{ bar}$ wurde eine reproduzierbare Verringerung der Bruchzähigkeit festgestellt. Diese verringerte sich bis zu Wasserstoffdrücken $p_{H_2} = 10\text{-}20 \text{ bar}$ auf Bruchzähigkeiten um $K_{JIC} \cong 100 \text{ MPam}^{1/2}$; bei weiterer Erhöhung des Wasserstoffdruckes bleibt diese Bruchzähigkeit annähernd konstant.

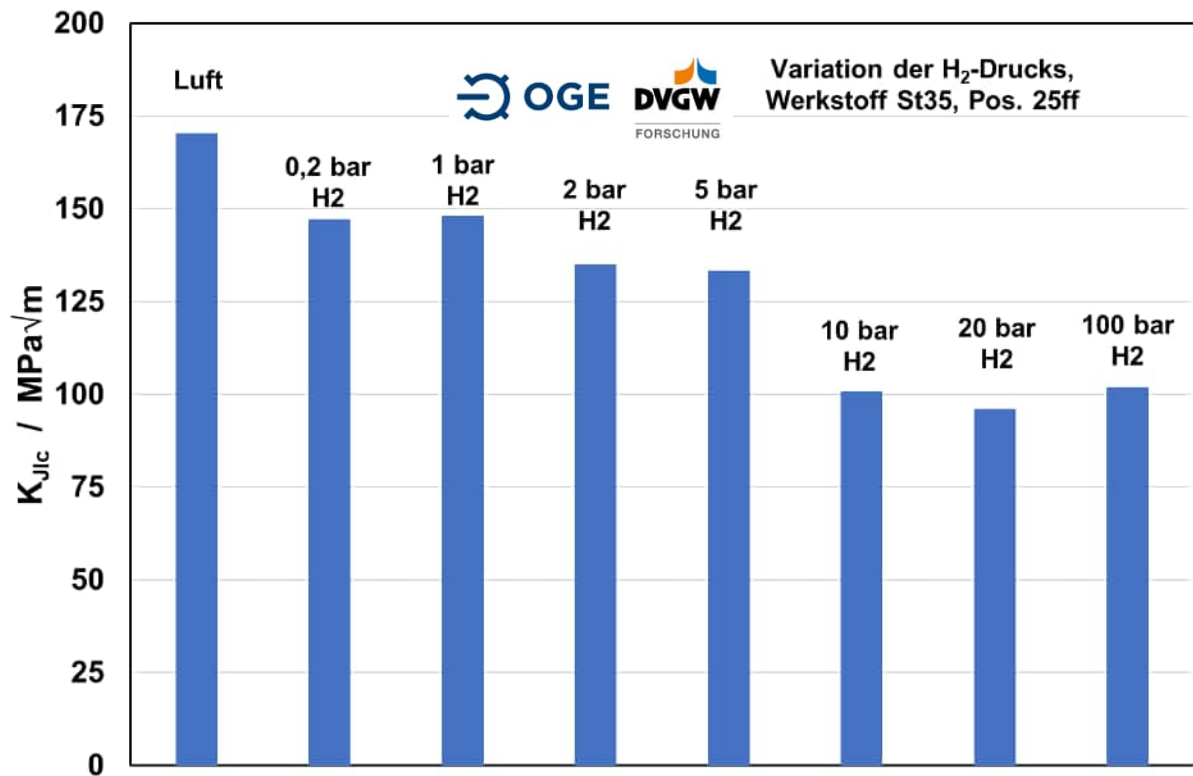


Abbildung 5.5: Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffdruck (St35 Pos.25ff)

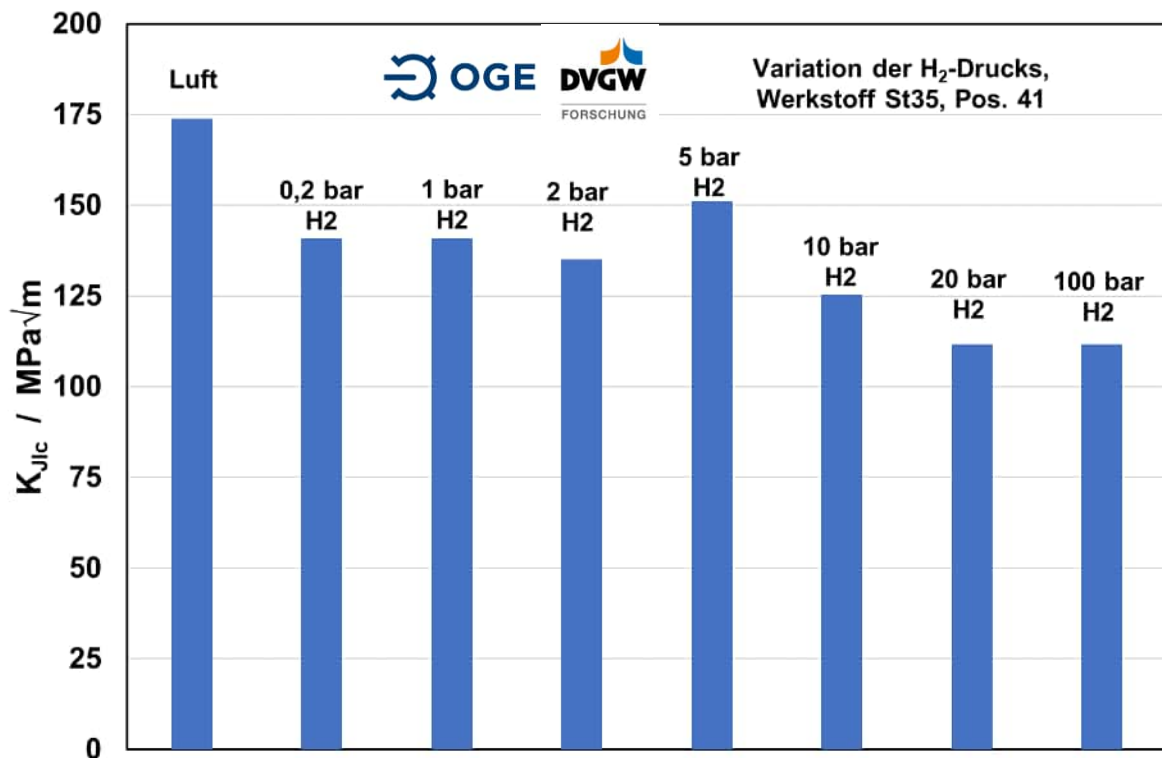


Abbildung 5.6: Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffdruck (St35 Pos.41)

Abbildung 5.7 zeigt für den aktuell verwendeten Werkstoff L485 die Abhängigkeit der Bruchzähigkeit vom Wasserstoffdruck p_{H_2} . Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich ebenfalls nur auf den Grundwerkstoff. Auch bei diesem Werkstoff wurde bereits eine deutliche Verringerung der Bruchzähigkeit bei geringen Wasserstoffdrücken festgestellt. Die Bruchzähigkeit verringerte sich in diesem Fall kontinuierlich mit der Vergrößerung des Wasserstoffdruckes p_{H_2} , wobei der geforderte Mindestwert $K_{Ic} \geq 55 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ jedoch deutlich übertroffen wurde.

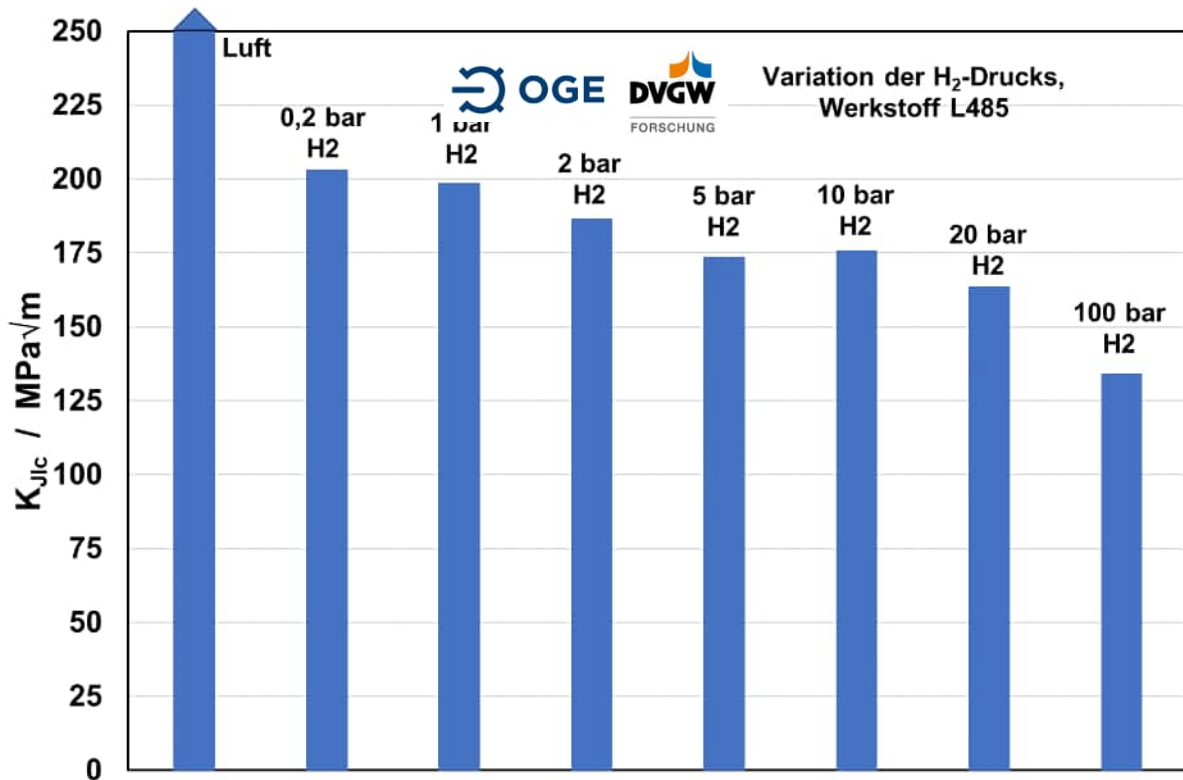


Abbildung 5.7: Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffdruck (L485)

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Primäres Ziel des Projektes SyWeSt H2 war es, die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der in dem amerikanischen Standard ASME B31.12 spezifisch für das Transportmedium Wasserstoff gegebenen, bruchmechanischen Kenngrößen auf die im deutschen Gashochdruckleitungsnetz vorhandenen Rohrmaterialien zu überprüfen.

Hierzu wurden an einer repräsentativen Auswahl von Pipeline- und Rohrleitungsstählen (unterschiedlichsten Alters und unterschiedlichster Materialfestigkeit) bruchmechanische Rissfortschrittsuntersuchen durchgeführt und die entsprechenden Ergebnisse mit den Rissfortschrittsbeziehungen der ASME B31.12 verglichen. Dieser Vergleich ergab, dass eine weitgehende – auch quantitative - Übereinstimmung zwischen den Rissfortschrittsbeziehungen der ASME und den im Rahmen dieses Projektes abgeleiteten Rissfortschrittsbeziehungen besteht.

Für alle in diesem Projekt geprüften Pipeline- und Rohrleitungsstähle liegt somit die grundsätzliche Tauglichkeit für den Transport von Wasserstoff vor.

Im Detail betrachtet, ist der im Rahmen dieses Projektes festgestellte Rissfortschritt im Vergleich zur ASME B31.12 für kleinere zyklische Spannungsintensitäten etwas größer und für größere zyklische Spannungsintensitäten etwas geringer.

In der praktischen Anwendung im Zusammenhang mit durchzuführenden Lebensdauerprognosen dürfte die Verwendung beider Rissfortschrittsgleichungen zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen. Gegenüber den Rissfortschrittsgleichungen ASME beinhalten die hier abgeleiteten „bilinearen“ Beziehungen allerdings auch den Einfluss des Wasserstoffdruckes und der Höhe der Mittelspannung (R-Wert). Hierdurch ist die Erstellung genauerer Lebensdauerprognosen möglich, die dann längere prognostizierte Betriebszeiten ergeben, wenn größere Spannungsintensitäten maßgeblich sind, oder relativ geringe Wasserstoff- oder Wasserstoffpartialdrücke vorliegen. Letzteres kann insbesondere in Verteilnetzen oder bei der Beimischung von Wasserstoff der Fall sein.

Neben dem Rissfortschrittsverhalten wurde auch der in der ASME B31.12 sowie in den DVGW-Regelwerken beschriebene Mindestwert für die Bruchzähigkeit überprüft. Dieser konnte ebenfalls von allen untersuchten Pipeline- und Rohrleitungsstählen - zum großen Teil sogar sehr deutlich - übertroffen werden. Dementsprechend wurde hier ebenfalls die grundsätzliche Tauglichkeit für den Transport von Wasserstoff nachgewiesen.

Zusätzlich zu den Prüfungen an Pipeline- und Rohrleitungsstählen wurden auch einige orientierende, bruchmechanische Prüfungen an Werkstoffen durchgeführt, die als Druckkörper für Armaturen Verwendung finden. Es zeigte sich, dass in den meisten Fällen eine Vergleichbarkeit mit den an Pipelinestählen gewonnenen Ergebnissen vorliegt. Somit ist zumindest die Anwendung bruchmechanischer Konzepte für Armaturenwerkstoffe möglich bzw. sinnvoll. Da jedoch die Vielfalt der potentiell verwendbaren Materialien sehr groß ist, wird die Initiierung eines zusätzlichen Versuchsprogramms speziell für diese Werkstoffe als sehr sinnvoll angesehen.

Das Untersuchungsprogramm SyWeSt H2 beinhaltet eine große Anzahl von Daten, wobei weitergehende Analysen/Auswertungen ebenfalls als sehr sinnvoll erscheinen. Dies betrifft insbesondere die Fragestellungen inwiefern z.B. das Alter, die Festigkeitsstufe, Phosphor- und

Schwefelgehalt oder das Kohlenstoffäquivalent die bruchmechanischen Eigenschaften der Werkstoffe beeinflussen.

Der Einfluss der Härte von Schweißnähten auf die resultierenden bruchmechanischen Eigenschaften konnte im Rahmen des Untersuchungsprogramms nur exemplarisch überprüft werden. Es ergaben sich jedoch Indikationen dafür, dass die in der ASME B31.12 angegebene Maximalhärte sehr konservativ ist, während die gemäß DVGW-Regelwerk mögliche Maximalhärte - mit Blick auf eine mögliche Versprödung infolge von Wasserstoff - zu hoch ist. Zur sinnvollen Festlegung genauer Grenzwerte wären allerdings systematische, zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Die Initiierung eines entsprechenden Versuchsprogramms wird auf europäischer Ebene derzeit diskutiert.

Die aus dem Projekt SyWeSt H2 abgeleiteten Rissfortschrittsbeziehungen beinhalten den Einfluss des Wasserstoff- bzw. Wasserstoffpartialdruckes, wobei dieser in sehr konservativer Weise (d.h. auf der „sicheren Seite“ liegend) abgeschätzt wurde. Tatsächlich wurde jedoch – bei den vorliegenden Messungen - für Wasserstoffdrücke $p_{H_2} \leq 1$ bar gar kein Einfluss des Wasserstoffs auf das Rissfortschrittsverhalten festgestellt. Sollte dieses Ergebnis auch für weitere Werkstoffe nachgewiesen werden können, könnte sich dies sehr vorteilhaft auf den Betrieb von Gasnetzen mit kleineren Drücken oder Zumischungen von Wasserstoff in größeren Netzen auswirken.

Grundsätzlich wäre auch eine genauere Beschreibung des Einflusses der Mittelspannung (R-Wert) wünschenswert. Hinsichtlich der vorliegenden Komplexität und des damit verbundenen Forschungsaufwandes wäre die Bearbeitung dieser Thematik allerdings als sehr aufwändig einzustufen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] DVGW, *DVGW-Merkblatt G 409 : Umstellung von Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Planung und Errichtung*, 2021.
- [2] DVGW, *DVGW Merkblatt G 409: Umstellung von Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar für den Transport von Wasserstoff; Planung und Errichtung*, 2020.
- [3] ASME, *ASME B31.12:2019 - Hydrogen Piping and Pipelines*.
- [4] ASTM International, *ASTM E1820-20 - Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*.
- [5] ASTM International, *ASTM E647-13a - Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*.
- [6] DVGW, *DVGW Arbeitsblatt G 410 (A) : Bestands- und Ereignisdatenerfassung Gas*, 2017.
- [7] R. L. Amaro, R. M. White, C. P. Looney, E. S. Drexler und A. J. Slifka, *Development of a Model for Hydrogen-Assisted Fatigue Crack Growth of Pipeline Steel*, Journal of Pressure Vessel Technology, 2018.
- [8] C. S. Marchi und J. A. Ronevich, *Fatigue and Fracture of Pipeline Steels in High-Pressure Hydrogen Gas*, Las Vegas, Nevada, 2022.
- [9] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, *Alternative Rules for Construction of High-Pressure Vessels; Rules for Construction of Pressure Vessels*, ASME International, 2010.

8 Abkürzungsverzeichnis

DVGW	<i>Deutscher Verein der Gas- und Wasserwirtschaft</i>
ERW	<i>Electric Resistance Welding</i>
GW	<i>Grundwerkstoff</i>
k.A	<i>keine Anforderungen</i>
LN	<i>Längsnaht</i>
n.g.	<i>nicht gemessen</i>
RN	<i>Rundnaht</i>
SG	<i>Schweißgut</i>
SG-LN	<i>Schweißgut der Längsnaht</i>
SG-RN	<i>Schweißgut der Rundnaht</i>
SG-UN	<i>Schweißgut der Umfangsnaht</i>
WEZ	<i>Wärmeeinflusszone</i>

9 Symbolverzeichnis

R_e	Mindeststreckgrenze	MPa
R_m	Mindestzugfestigkeit	MPa
K_v	Kerbschlagarbeit	J
K_{JIC}	Bruchzähigkeit aus J_{IC} -Wert errechnet	$MPa\sqrt{m}$
K_v / A	Kerbschlagzähigkeit	kgm/cm^2
E	Elastizitätsmodul	MPa
μ	Querkontraktionszahl	-
K_{min}/K_{max}	R-Verhältnis	-
$C \Delta K^m$	Paris Gleichung	mm/Lastwechsel
J	J-Integral	J/mm^2
A	Probenfläche	mm^2
Δa	Änderung der Risstiefe	mm
f	Prüffrequenz	Hz
R	Mittelspannungsverhältnis	-
ΔK	Spannungsintensität	$MPa\sqrt{m}$
ΔK_{th}	Unterer Schwellwert für das Risswachstum	$MPa\sqrt{m}$
p_{H_2}	Wasserstoffdruck	Bar
da/dN	Wachstum der Risstiefe pro Lastwechsel	mm/Lastwechsel

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Querschliff eines UP-geschweißten Stahlrohres	4
Abbildung 2.2:	Probengeometrie für statische (links) und zyklische Versuche (rechts)	5
Abbildung 2.3:	Probenentnahme aus einem Rohr mit einer Spiralnaht	5
Abbildung 2.4:	Servohydraulisches Prüfsystem der MPA Stuttgart mit integriertem Wasserstoffautoklaven.....	6
Abbildung 2.5:	Ansteigen der zyklischen Spannungsintensität ΔK infolge der Rissvergrößerung	7
Abbildung 2.6:	Risstiefe und Spannungsintensitäten K_{min} , K_{max} und ΔK in Abhängigkeit von der Anzahl der Zyklen während des Versuches	8
Abbildung 2.7:	Schematische Darstellung des Risswachstums in Abhängigkeit von der zyklischen Spannungsintensität ΔK	8
Abbildung 2.8:	Last-Rissöffnungsdiagramm (F-COD).....	9
Abbildung 2.9:	Risswiderstandskurve (JR-Kurve).....	10
Abbildung 3.1:	Untersuchte Materialien	12
Abbildung 3.2:	Werkstoffklassen des Leitungsbaus.....	13
Abbildung 3.3:	Rissfortschritt L290 NE	14
Abbildung 3.4:	Härtemessungen L290 NE (1)	16
Abbildung 3.5:	Härtemessungen L290 NE (2)	16
Abbildung 3.6:	Härtemessungen L290 NE (3)	17
Abbildung 3.7:	Härtemessungen L290 NE (4)	18
Abbildung 3.8:	Härtemessungen L290 NE (5)	19
Abbildung 3.9:	Härtemessungen L290 NE (6)	20
Abbildung 3.10:	Rissfortschritt 5L Grade A.....	22
Abbildung 3.11:	Rissfortschritt St35.....	23
Abbildung 3.12:	Rissfortschritt St35 unter verschiedenen Drücken.....	24
Abbildung 3.13:	Rissfortschritt St35 (Pos.41) unter verschiedenen Drücken	26
Abbildung 3.14:	Rissfortschritt 15k (St35).....	27
Abbildung 3.15:	Härtemessungen 15k (St35) (1).....	29
Abbildung 3.16:	Härtemessungen 15k (St35) (2).....	30
Abbildung 3.17:	Härtemessungen 15k (St35) (3).....	31
Abbildung 3.18:	Härtemessungen 15k (St35) (4).....	32
Abbildung 3.19:	Härtemessungen 15k (St35) (5).....	33
Abbildung 3.20:	Härtemessungen 15k (St35) (6).....	34
Abbildung 3.21:	Härtemessungen 15k (St35) (7).....	35
Abbildung 3.22:	Rissfortschritt X42.....	37
Abbildung 3.23:	Härtemessungen X42 (1).....	38
Abbildung 3.24:	Härtemessungen X42 (2).....	39
Abbildung 3.25:	Härtemessungen X42 (3).....	40
Abbildung 3.26:	Härtemessungen X42 (4).....	41
Abbildung 3.27:	Rissfortschritt RRSt43.7.....	43
Abbildung 3.28:	Rissfortschritt P355 NH.....	44
Abbildung 3.29:	Rissfortschritt L360 NE	46
Abbildung 3.30:	Rissfortschritt L360NB	47
Abbildung 3.31:	Rissfortschritt X46 / StE320.7	49
Abbildung 3.32:	Rissfortschritt StE360.7	50

Abbildung 3.33:	Härtemessungen StE360.7 (1).....	51
Abbildung 3.34:	Härtemessungen StE360.7 (2).....	52
Abbildung 3.35:	Härtemessungen StE360.7 (3).....	53
Abbildung 3.36:	Härtemessungen StE360.7 (4).....	54
Abbildung 3.37:	Rissfortschritt StE480.7 TM	56
Abbildung 3.38:	Rissfortschritt L360 NB	57
Abbildung 3.39:	Härtemessungen L360 NB (1)	58
Abbildung 3.40:	Härtemessungen L360 NB (2)	59
Abbildung 3.41:	Härtemessungen L360 NB (3)	60
Abbildung 3.42:	Härtemessungen L360 NB (4)	61
Abbildung 3.43:	Rissfortschritt 14HGS	63
Abbildung 3.44:	Härtemessungen 14HGS (1).....	64
Abbildung 3.45:	Härtemessungen 14HGS (2).....	65
Abbildung 3.46:	Härtemessungen 14HGS (3).....	66
Abbildung 3.47:	Härtemessungen 14HGS (4).....	67
Abbildung 3.48:	Härtemessungen 14HGS (5).....	68
Abbildung 3.49:	Härtemessungen 14HGS (6).....	69
Abbildung 3.50:	Härtemessungen 14HGS (7).....	70
Abbildung 3.51:	Härtemessungen 14HGS (8).....	71
Abbildung 3.52:	Härtemessungen 14HGS (9).....	72
Abbildung 3.53:	Härtemessungen 14HGS (10).....	73
Abbildung 3.54:	Rissfortschritt WSTE 420.....	75
Abbildung 3.55:	Rissfortschritt St53.7.....	76
Abbildung 3.56:	Härtemessungen St53.7 (1).....	77
Abbildung 3.57:	Härtemessungen X56.7 (2).....	78
Abbildung 3.58:	Härtemessungen X56.7 (3).....	79
Abbildung 3.59:	Härtemessungen X56.7 (4).....	80
Abbildung 3.60:	Rissfortschritt X56.7.....	82
Abbildung 3.61:	Härtemessungen X56.7 (1).....	83
Abbildung 3.62:	Härtemessungen X56.7 (2).....	84
Abbildung 3.63:	Härtemessungen X56.7 (3).....	85
Abbildung 3.64:	Härtemessungen X56.7 (4).....	86
Abbildung 3.65:	Härtemessungen X56.7 (5).....	87
Abbildung 3.66:	Härtemessungen X56.7 (6).....	88
Abbildung 3.67:	Härtemessungen X56.7 (7).....	89
Abbildung 3.68:	Härtemessungen X56.7 (8).....	90
Abbildung 3.69:	Härtemessungen X56.7 (9).....	91
Abbildung 3.70:	Härtemessungen X56.7 (10).....	92
Abbildung 3.71:	Rissfortschritt St60.7.....	94
Abbildung 3.72:	Härtemessungen St60.7 (1).....	95
Abbildung 3.73:	Härtemessungen St60.7 (2).....	96
Abbildung 3.74:	Härtemessungen St60.7 (3).....	97
Abbildung 3.75:	Härtemessungen St60.7 (4).....	98
Abbildung 3.76:	Rissfortschritt P460 NH.....	100
Abbildung 3.77:	Härtemessungen P460 NH (1).....	101
Abbildung 3.78:	Härtemessungen P460 NH (2).....	102
Abbildung 3.79:	Härtemessungen P460 NH (3).....	103
Abbildung 3.80:	Härtemessungen P460 NH (4).....	104

Abbildung 3.81:	Härtemessungen P460 NH (5).....	105
Abbildung 3.82:	Rissfortschritt L485 (Pos.17).....	110
Abbildung 3.83:	Rissfortschritt L485 bei verschiedenen Drücken	111
Abbildung 3.84:	Rissfortschritt L485 (Pos.43; vergütet)	112
Abbildung 3.85:	Rissfortschritt L485 (gehärtet).....	113
Abbildung 3.86:	Härtemessungen L485 Pos. 17 (1)	114
Abbildung 3.87:	Härtemessungen L485 Pos. 17 (2)	115
Abbildung 3.88:	Härtemessungen L485 Pos. 17 (3)	116
Abbildung 3.89:	Härtemessungen L485 Pos. 17 (4)	117
Abbildung 3.90:	Härtemessungen L485 Pos. 40 (5)	118
Abbildung 3.91:	Härtemessungen L485 Pos. 40 (6)	119
Abbildung 3.92:	Rissfortschritt L485 (Pos.2).....	120
Abbildung 3.93:	Härtemessungen L485 Pos. 2 (1)	121
Abbildung 3.94:	Härtemessungen L485 Pos. 2 (2)	122
Abbildung 3.95:	Härtemessungen L485 Pos. 2 (3)	123
Abbildung 3.96:	Härtemessungen L485 Pos. 2 (4)	124
Abbildung 3.97:	Härtemessungen L485 Pos. 2 (5)	125
Abbildung 3.98:	Härtemessungen L485 Pos. 2 (6)	126
Abbildung 3.99:	Rissfortschritt L485	128
Abbildung 3.100:	Rissfortschritt L485 (Schmelze 2)	129
Abbildung 3.101:	Härtemessungen L485 Pos. 47 (1)	130
Abbildung 3.102:	Härtemessungen L485 Pos. 47 (2)	131
Abbildung 3.103:	Härtemessungen L485 Pos. 47 (3)	132
Abbildung 3.104:	Härtemessungen L485 Pos. 47 (4)	133
Abbildung 3.105:	Härtemessungen L485 Pos. 47 (5)	134
Abbildung 3.106:	Härtemessungen L485 Pos. 47 (6)	135
Abbildung 3.107:	Rissfortschritt GRS550/X80	137
Abbildung 3.108:	Härtemessungen GRS550/X80 (1)	138
Abbildung 3.109:	Härtemessungen GRS550/X80 (2)	139
Abbildung 3.110:	Härtemessungen GRS550/X80 (3)	140
Abbildung 3.111:	Härtemessungen GRS550/X80 (4)	141
Abbildung 3.112:	Härtemessungen GRS550/X80 (5)	142
Abbildung 3.113:	Härtemessungen GRS550/X80 (6)	143
Abbildung 3.114:	Rissfortschritt L415	145
Abbildung 3.115:	Rissfortschritt P355 NL1	146
Abbildung 3.116:	Rissfortschritt GJS400	148
Abbildung 3.117:	Rissfortschritt P460 QL1	149
Abbildung 3.118:	Rissfortschritt C22.3.....	151
Abbildung 3.119:	Rissfortschritt GS C25 N.....	152
Abbildung 3.120:	Rissfortschritt TStE 355N.....	154
Abbildung 4.1:	Ermitteltes Risswachstum unter Wasserstoff der untersuchten Werkstoffe (100 bar, R = 0.5).....	155
Abbildung 4.2:	Konservative Beschreibung des ermittelten Risswachstums unter Wasserstoff für $p_{H_2} = 100$ bar und R = 0.5.....	156
Abbildung 4.3:	Risswachstum unter Wasserstoff für unterschiedliche Wasserstoffdrücke und „bilineares“ Modell (Werkstoff St35, Pos.25ff bei R = 0.5)	157

Abbildung 4.4:	Risswachstum unter Wasserstoff für unterschiedliche Wasserstoffdrücke und „bilineares“ Modell (Werkstoff St35, Pos.41 bei $R = 0.5$)	158
Abbildung 4.5:	Risswachstum unter Wasserstoff für unterschiedliche Wasserstoffdrücke und „bilineares“ Modell (Werkstoff L485, Pos.32ff bei $R = 0.5$).....	158
Abbildung 4.6:	Berechneter und gemessener Einfluss des R-Wertes auf das Risswachstumsverhalten (Werkstoff L360, $R = 0.1$, $R = 0.5$, $R = 0.7$ $p_{H_2} = 100$ bar)	160
Abbildung 4.7:	Berechneter und gemessener Einfluss des R-Wertes auf das Risswachstumsverhalten (Werkstoff L485, $R = 0.1$, $R = 0.5$, $R = 0.7$ $p_{H_2} = 100$ bar)	160
Abbildung 4.8:	Bilineares Risswachstumsgesetz für $R=0.1$, $R=0.5$ und $R=0.7$ ($p_{H_2} = 100$ bar)	161
Abbildung 5.1:	Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für die geprüften Leitungswerkstoffe (1)	162
Abbildung 5.2:	Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für die geprüften Leitungswerkstoffe (2)	163
Abbildung 5.3:	Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für die geprüften Leitungswerkstoffe (3)	163
Abbildung 5.4:	Ermittelte Bruchzähigkeiten (K_{JIC}) für Rohrleitungswerkstoffe und Armaturen (Druckkörper)	164
Abbildung 5.5:	Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffdruck (St35 Pos.25ff).....	165
Abbildung 5.6:	Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffdruck (St35 Pos.41).....	165
Abbildung 5.7:	Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffdruck (L485)	166

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Kenndaten L290 NE	13
Tabelle 3.2:	Chemische Zusammensetzung L290 NE	14
Tabelle 3.3:	Bruchzähigkeiten L290 NE	14
Tabelle 3.4:	Kenndaten 5L Grade A	21
Tabelle 3.5:	Chemische Zusammensetzung 5L Grade A	21
Tabelle 3.6:	Bruchzähigkeiten 5L Grade A	21
Tabelle 3.7:	Kenndaten St35	22
Tabelle 3.8:	Chemische Zusammensetzung St35	22
Tabelle 3.9:	Bruchzähigkeiten St35	23
Tabelle 3.10:	Kenndaten St35	24
Tabelle 3.11:	chemische Zusammensetzung St35	25
Tabelle 3.12:	Bruchzähigkeiten St35	25
Tabelle 3.13:	Kenndaten 15k (St35)	26
Tabelle 3.14:	Chemische Zusammensetzung 15k (St35)	27
Tabelle 3.15:	Bruchzähigkeiten 15k (St35)	27
Tabelle 3.16:	Kenndaten X42	36
Tabelle 3.17:	Chemische Zusammensetzung X42	36
Tabelle 3.18:	Bruchzähigkeiten X42	36
Tabelle 3.19:	Kenndaten RR St43.7	42
Tabelle 3.20:	Chemische Zusammensetzung RR St43.7	42
Tabelle 3.21:	Bruchzähigkeiten RR St43.7	42
Tabelle 3.22:	Kenndaten P355 NH/NL2	43
Tabelle 3.23:	Chemische Zusammensetzung P355 NH/NL2	43
Tabelle 3.24:	Bruchzähigkeiten P355 NH/NL2	44
Tabelle 3.25:	Kenndaten L360NE	45
Tabelle 3.26:	Chemische Zusammensetzung L360NE	45
Tabelle 3.27:	Bruchzähigkeiten L360NE	45
Tabelle 3.28:	Kenndaten L360NB	46
Tabelle 3.29:	Chemische Zusammensetzung L360NB	46
Tabelle 3.30:	Bruchzähigkeiten L360NB	47
Tabelle 3.31:	Kenndaten X46 / StE320.7	48
Tabelle 3.32:	Chemische Zusammensetzung X46 / StE320.7	48
Tabelle 3.33:	Bruchzähigkeiten X46 / StE320.7	48
Tabelle 3.34:	Kenndaten StE360.7	49
Tabelle 3.35:	Chemische Zusammensetzung StE360.7	49
Tabelle 3.36:	Bruchzähigkeiten StE360.7	50
Tabelle 3.37:	Kenndaten StE480.7 TM	55
Tabelle 3.38:	Chemische Zusammensetzung StE480.7 TM	55
Tabelle 3.39:	Bruchzähigkeiten StE480.7 TM	55
Tabelle 3.40:	Kenndaten L360 NB	56
Tabelle 3.41:	Chemische Zusammensetzung L360 NB	56
Tabelle 3.42:	Bruchzähigkeiten L360 NB	57
Tabelle 3.43:	Kenndaten 14HGS	62
Tabelle 3.44:	Chemische Zusammensetzung 14HGS	62
Tabelle 3.45:	Bruchzähigkeiten 14HGS	62
Tabelle 3.46:	Kenndaten WSTE 420	74

Tabelle 3.47: Chemische Zusammensetzung WSTE 420	74
Tabelle 3.48: Bruchzähigkeiten WSTE 420	74
Tabelle 3.49: Kenndaten St53.7	75
Tabelle 3.50: Chemische Zusammensetzung St53.7	75
Tabelle 3.51: Bruchzähigkeiten St53.7	76
Tabelle 3.52: Kenndaten X56.7	81
Tabelle 3.53: Chemische Zusammensetzung X56.7	81
Tabelle 3.54: Bruchzähigkeiten X56.7	81
Tabelle 3.55: Kenndaten St60.7	93
Tabelle 3.56: Chemische Zusammensetzung St60.7	93
Tabelle 3.57: Bruchzähigkeiten St60.7	93
Tabelle 3.58: Kenndaten P460 NH.....	99
Tabelle 3.59: Chemische Zusammensetzung P460 NH	99
Tabelle 3.60: Bruchzähigkeiten P460 NH.....	99
Tabelle 3.61: Kenndaten X70.....	106
Tabelle 3.62: Chemische Zusammensetzung X70	106
Tabelle 3.63: Bruchzähigkeiten X70.....	106
Tabelle 3.64: Kenndaten L485	108
Tabelle 3.65: Chemische Zusammensetzung L485.....	108
Tabelle 3.66: Bruchzähigkeiten L485	108
Tabelle 3.67: Kenndaten L485	120
Tabelle 3.68: Chemische Zusammensetzung L485.....	120
Tabelle 3.69: Kenndaten L485 ME	127
Tabelle 3.70: Chemische Zusammensetzung L485 ME	127
Tabelle 3.71: Bruchzähigkeiten L485 ME	127
Tabelle 3.72: Kenndaten L485 (Schmelze 2)	128
Tabelle 3.73: Chemische Zusammensetzung L485 (Schmelze 2)	128
Tabelle 3.74: Bruchzähigkeiten L485 (Schmelze 2)	129
Tabelle 3.75: Kenndaten GRS550/X80	136
Tabelle 3.76: Chemische Zusammensetzung GRS550/X80.....	136
Tabelle 3.77: Bruchzähigkeiten GRS550/X80	136
Tabelle 3.78: Kenndaten L415	144
Tabelle 3.79: Chemische Zusammensetzung L415.....	144
Tabelle 3.80: Bruchzähigkeiten L415	144
Tabelle 3.81: Kenndaten P355 NL1	145
Tabelle 3.82: Chemische Zusammensetzung P355 NL1	146
Tabelle 3.83: Bruchzähigkeiten P355 NL1	146
Tabelle 3.84: Kenndaten GJS400	147
Tabelle 3.85: Chemische Zusammensetzung GJS400.....	147
Tabelle 3.86: Bruchzähigkeiten GJS400	147
Tabelle 3.87: Kenndaten P460 QL1	148
Tabelle 3.88: Chemische Zusammensetzung P460 QL1.....	148
Tabelle 3.89: Bruchzähigkeiten P460 QL1	149
Tabelle 3.90: Kenndaten C22.3.....	149
Tabelle 3.91: Chemische Zusammensetzung C22.3	150
Tabelle 3.92: Bruchzähigkeiten C22.3.....	150
Tabelle 3.93: Kenndaten GS C25 N.....	151
Tabelle 3.94: Chemische Zusammensetzung GS C25 N	151

Tabelle 3.95: Bruchzähigkeiten GS C25 N.....	152
Tabelle 3.96: Kenndaten TStE 355N.....	153
Tabelle 3.97: Chemische Zusammensetzung TStE 355N	153
Tabelle 3.98: Bruchzähigkeiten TStE 355N.....	153

Impressum

DVGW Deutscher Verein des
Gas- und Wasserfaches e. V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein
Josef-Wirmer-Straße 1–3
53123 Bonn

Tel.: +49 228 9188-5
Fax: +49 228 9188-990
E-Mail: info@dvgw.de
Internet: www.dvgw.de

Download als pdf unter: www.dvgw.de

Nachdruck und Vervielfältigung nur im
Originaltext, nicht auszugsweise, gestattet.