

Sanierung der Stauklappe eines Wasserkraftwerkes an der Iller

Peter Gerster

GERSTER ENGINEERING CONSULTING Kapellenstraße 173 D-89584 Ehingen/Do.
Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Schweißtechnik und -schäden
Telefon: 07391/757621 E-Mail: p.gerster@kabelbw.de

1. Einleitung und Problemstellung

Bereits in den Jahren 1938 bis 1944 wurden mehrere Illerstaustufen zwischen Kempten und Memmingen nach der Bauart **Arno Fischer** errichtet. Der Vorteil bei dieser Unterwasserausführung stellte die kriegswichtige Tarnung dar, die wenigen Dachflächen wurden begrünt und das Kraftwerk selbst konnte durch das Senken der Stauklappen vollkommen überströmt werden. Die erzeugte Leistung der Illerstaustufe VI in Legau beträgt 6 MW bei einer Fallhöhe von 8,2 Metern. Bauherr und Betreiber des Wasserkraftwerkes sind die Lech Elektrizitätswerke AG (LEW) in Augsburg.

Bei der Kraftwerksbauweise Arno Fischer (Reichspatent von 1935) bilden Wehr und Kraftwerk einen gemeinsamen Baukörper, das Stauklappenwehr verfügt dabei über 4 aufgesetzte Klappen und einen im Wehrkörper integrierten Maschinenraum. Das Kraftwerk verfügt über vier parallel angeordneten Strafloturbinen und vier Maschinensätze.



Bild 1: Luftaufnahme Staustufe 6 in Legau



Bild 2: Unterwasserkraftwerk Legau



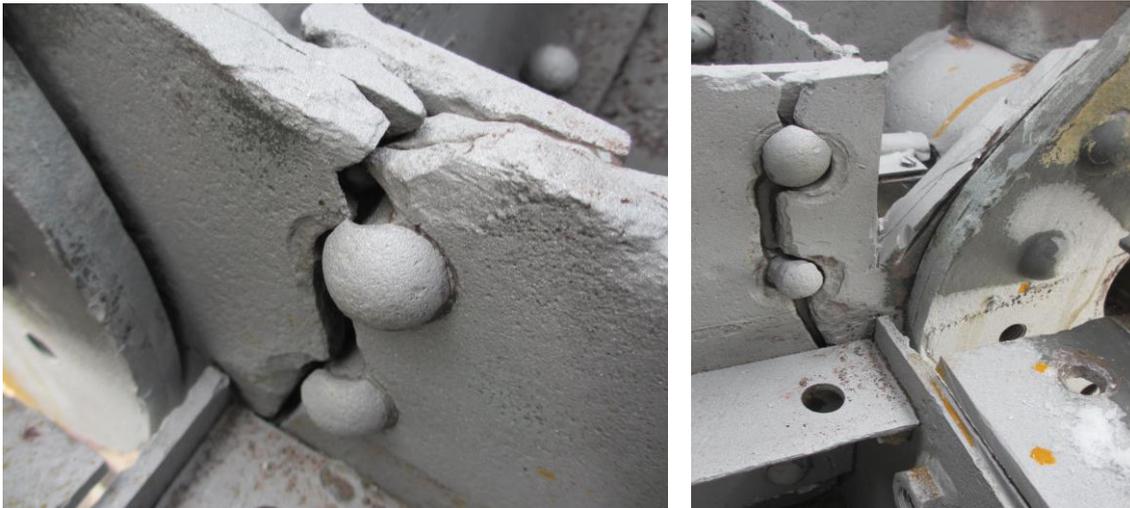
Bild 3: trockenengelegte Stauklappen 3 und 4



Bild 4: gerissenes Hauptlager Stauklappe 4

Bei einer Überprüfung der Stauklappen wurde an einer Stauklappe ein größerer Schaden entdeckt (siehe Bild 3). Bei dem am Hauptlager der Klappe 4 festgestellten Schaden handelt es sich um einen kompletten Bruch der beiden lastabtragenden Lagerblechwangen (eine Nietkonstruktion) der im Staubalken rückverankerten Lagerböcke (Bilder 4-6). Der Schadensumfang war so groß, dass die Klappe 4 trockengelegt werden musste und nicht mehr betrieben werden konnte. Ein Ingenieur-

büro wurde nun beauftragt, diese Nietkonstruktion durch eine Schweißausführung zu ersetzen und statisch zu berechnen.



Bilder 5 und 6: beidseitig gerissene lastragenden Lagerblechwangen (Nietkonstruktion)

Es handelt sich hierbei um eine Reparaturmaßnahme bei der der Altbestand und das Verankerungssystem des bestehenden Hauptlagers weiterverwendet werden sollen und bei der ggf. vorliegende Schädigungen der nicht einsehbaren und nicht freigelegten Bereiche nicht berücksichtigt werden konnte. Die Berechnungen der Antriebs- und Lagerkräfte der bestehenden Wehrklappe erfolgten auf der Grundlage der aktuell gültigen DIN 19704-1:2014-11.

Um eine Aussage zur Schweißbarkeit des damals verwendeten Stahles treffen zu können, musste als erstes festgestellt werden, um welchen Stahltyp es sich handelt. Die in dieser Zeit im Stahlwasserbau eingesetzten Altstähle waren in der Regel Flusseisen bzw. Flussstähle. Hierzu wurden Proben am Altstahl entnommen und beim IWT Solutions AG Prof. Dr. Peter Langenberg Untersuchungen bezüglich chem. Analyse und der mech. technologischen Eigenschaften.

2. Ergebnisse der Werkstoffuntersuchungen am Altstahl

Die Ergebnisse der Analysen sind in **Tabelle 1** aufgelistet. Eine vollständige Tabelle der Analyse aller Elemente kann dem Anhang A1 entnommen werden. Die chemischen Zusammensetzungen deuten darauf hin, dass es sich bei den untersuchten Materialproben um Flussstahl handelt. Die Elemente C, Si, und Mn liegen alle im für diese Stahlsorte typischen Zusammensetzungsbereich. Der Kohlenstoffgehalt ist im Vergleich zu heutigen Baustählen vom Typ S235 relativ niedrig, die Gehalte an Phosphor und Schwefel sind im Rahmen der heute noch üblichen Grenzen z.B. in der EN 10025 für S235. Stickstoff und Sauerstoffgehalt sind relativ hoch und der Al-Gehalt und der Si-Gehalt sind niedrig. Man kann also von unberuhigter Vergießungsart ausgehen.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	N	O
Probe	in Gew.-%								
P1818	0,037	<0,001	0,428	0,018	0,023	0,022	<0,002	0,015	0,029
Flussstahl aus Literatur									
[Lüd2006]	0,07	0,02		0,043				0,002	
[Lan96]	0,051	<0,005	0,43	0,040	0,036			-0,25	
[Wirtz]	0,08		0,32	0,07	0,05			in Abh. Des Herstellverfahrens	
Puddelstahl aus Literatur									
[Lan96]	0,012	0,033	0,064	0,093	0,01			ca.	
[Lüd2006]	0,025	0,147		0,396	0,061			0,004	ca. 0,5

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung

Das Ergebnis des Zugversuchs ist in **Tabelle 2** dargestellt. Die Probe hat eine geringfügig ausgeprägte Streckgrenze. Daher ist die Festlegung der unteren und oberen Streckgrenze eher als Anhaltspunkt zu sehen. Die Ergebnisse des Zugversuchs zeigen eine Streckgrenze $R_{p0,2}$ von 252 MPa und eine Zugfestigkeit R_m von 405 MPa. Damit liegt die vorhandene Probe im Bereich eines St 37.21 ($R_{eL} \sim 235\text{MPa}$ und $R_m \sim 412\text{MPa}$) nach DIN 1621 von 1924. Nach heutigem Maßstab kann der Stahl hinsichtlich der Festigkeit als S235 nach EN 10025 eingeordnet werden.

Versuch	d_0	S_0	L_0	$R_{p0,2}$	R_{eH}	R_{eL}	R_m	A
	[mm]	[mm ²]	mm	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
P1818	4,01	12,63	20	252	255	252	405	35,5

Tabelle 2: Ergebnis des Zugversuchs

Der Kerbschlagbiegeversuch wurde nach ISO 148-1 bei -20°C durchgeführt. Für heutige Baustähle im Außenbereich wird zur Vermeidung von Sprödbrech vielfach das Erreichen von 27 J bei -20°C gefordert. Nicht Erreichen dieses Wertes bedeutet jedoch nicht automatisch, dass sprödes Versagen zu erwarten ist, vielmehr kann für die gegebene Bauteilsituation anhand von Blechdicke, Werkstofffestigkeit, Beanspruchungen und tiefster Einsatztemperatur ermittelt werden, wie hoch die Mindestzähigkeit sein muss. Das Ergebnis des Versuchs ist in **Tabelle 3** aufgeführt. Alle 3 Proben liegen in der Tieflage und sind spröde gebrochen.

Versuch	Probenabmessung	Kerbform	T	Probe 1	Probe 2	Probe 3
	[mm ³]		[°C]	[J]	[J]	[J]
P1818	10x 10x 55	V	-20	3	3	3

Tabelle 3: Ergebnis des Kerbschlagbiegeversuchs

3. Beurteilung der Schweißbarkeit des Altstahls

Bei dem Stahl handelt es sich um eine unberuhigt vergossenen Flusstahl. Der Grad der Verunreinigungen ist relativ hoch nach heutigem Maßstab, aber üblich für die Zeit. Die chemische Zusammensetzung hat ein sehr niedriges Kohlestoffäquivalent aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehaltes.

Dennoch ist die Schweißneigung als eingeschränkt zu benennen. Im Randbereich wird eine Speckschicht mit geringen Verunreinigungen das Schweißen von Kehlnähten begünstigen. Bei Stumpfschweißungen können die ausgeprägten Seigerungen, insbesondere der hohe Sauerstoffgehalt zu Problemen mit dem Schweißbad führen, was zu Schweißfehlern führen kann. Es ist daher erforderlich, vorher an den Stählen für alle geplanten Nähte und Verfahren und Schweißer eine Qualifizierung vorzunehmen. Dabei sollten die heute im Stahlbau üblichen Standards der Schweißverfahrens- und Schweißer Qualifizierung berücksichtigt werden.

Üblicherweise werden für das Schweißen alter Stähle basische Elektroden empfohlen. Bereits im unbeeinflussten Altstahl war die Kerbschlagarbeit bei -20°C praktisch nur 3 Joule. Deshalb ist bei der Verfahrensprüfung ein besonderes Augenmerk hierauf zu richten.

4. Schweißtechnische Lösung zu Sanierung

Laut der Technischen Spezifikation und Leistungsbeschreibung des Statikbüros sind von der ausführenden Stahlbaufirma entsprechende Werkstattpläne, Stücklisten, sowie die Schweiß- und Prüfpläne zur Prüfung und Genehmigung einzureichen. Die Anforderungen der Ausführungsklasse EXC 2 nach DIN EN 1090:2018-09-2 sind vom Hersteller zu erfüllen. Die Schweißarbeiten haben in Übereinstimmung mit den Anforderungen des maßgebenden Teils der DIN EN ISO 3834 Teil 2 zu erfolgen. Ein Schweißplan, der u.a. die Schweißanweisungen, den Schweißfolgeplan und die Angaben zu den Anforderungen an die Abnahmekriterien enthält ist vorzuweisen. Entsprechende Schweiß- und Prüfanweisungen sind für alle vorkommenden Schweißnähte zu erstellen. Werkstoffzeugnisse (3.1) für alle zu erneuerten Bauteile müssen nachgewiesen werden.

Die in der Werkstatt und auf der Baustelle hergestellten Schweißnähte sind im folgenden Umfang zu prüfen:

- Sämtliche Schweißnähte 100% Sichtprüfung – Bewertungsgruppe C nach DIN EN ISO 5817
- 100% aller Schweißnähte MT-Prüfung nach DIN EN ISO 23278 – 2X
- 100% der Stumpfnahte, UT-Prüfung nach DIN EN ISO 11666 Schweißnahtgüte C

Die vorgenannten Prüfungen sind gemäß DIN EN ISO 17635 durchzuführen und zu bewerten

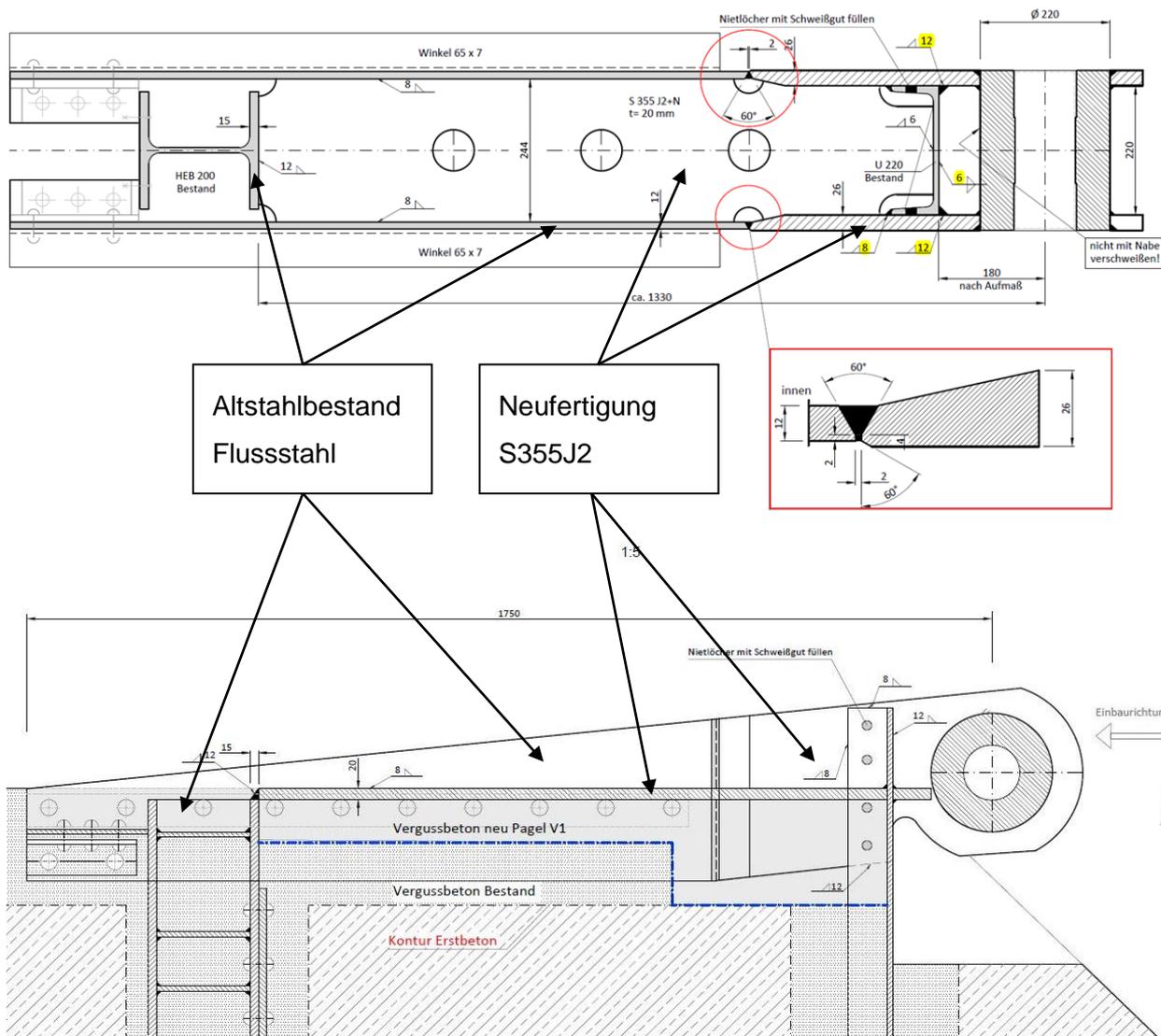


Bild 7: Zusammenbau der Lagerkomponenten

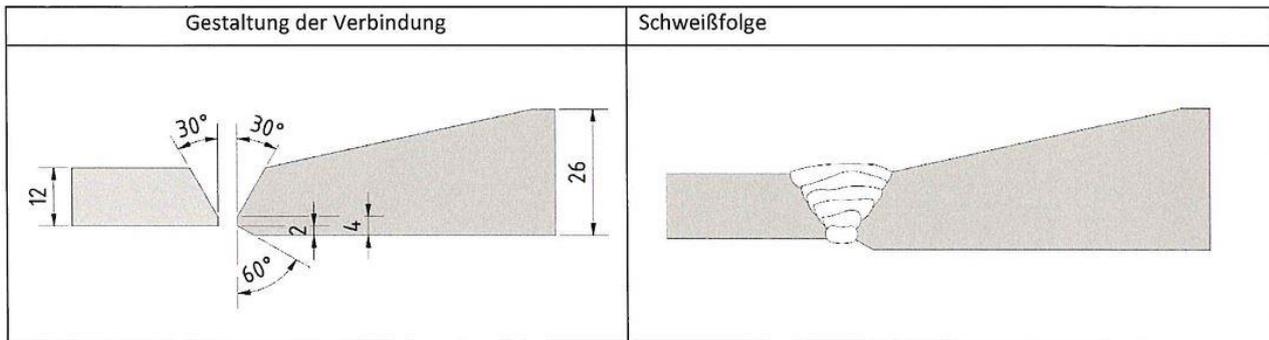
Gemäß den Ausführungszeichnungen Bild 7 wurden für die Stumpf- und Kehlnähte entsprechende Schweißanweisungen erstellt, als Vorbereitung für die durchzuführenden Verfahrensprüfungen. Wie von dem Werkstofflabor vorgeschlagen, wurde das Lichtbogenhandschweißen mit einer basischen Elektrode angewendet. Bild 8 zeigt den Ausschnitt einer vorläufigen Schweißanweisung für die hochbeanspruchte Stumpfnaht in steigender Position.

5. Durchgeführte Verfahrensprüfungen vor Fertigungsbeginn

Die kompletten Verfahrensprüfungen nach DIN EN ISO 15614-1 wurden unter Baustellenbedingungen (Zwangslage) geschweißt und vom akkreditierten Stuttgarter Labor der Element Materials Technology Hamburg GmbH ausgewertet. Im Einzelnen wurden Sichtprüfungen, MT- und RT-

Prüfungen, Zugversuche, Kerbschlagbiegeprüfungen, Makroschliffe und Härteverläufe durchgeführt und zwar für die Stumpfnah und für die Kehlnähte.

Schweißverfahren:	Lichtbogenhandschweißen	Schweißprozess:	111
Nahtart:	Stumpfnah BW / Blech (P) – Blech (P)	Grundwerkstoff:	S355 – 1.1 / Flusstahl
Werkstückdicke t (mm):	12 mm	Abstand b (mm):	3-4mm
Außendurchmesser D (mm):	-	Schweißposition:	PF-Steigposition
Kehlnahndicke a (mm):	-	Steghöhe (mm):	1-2mm
Nahtöffnungswinkel:	60°		
Einzelheiten der Fugenformvorbereitung:	schleifen / fräßen		
Art der Vorbereitung und Reinigung:	gestrahlt oder geschliffen (frei von Rost, losem Zunder und Fett)		



Einzelheiten für das Schweißen

Schweißraupe	Schweißprozess	Stromstärke (A) +/- 5	Spannung (V) +/- 5%	Stromart/ Polung	Draht-Vorschub (m/min)	Ausziehlänge (cm)	Wärmeeinbringung (kJoule/mm)	Tropfenübergang
1	111	70	-	=/+	-	-	-	-
2	111	90	-	=/+	-	-	-	-
3 - 4	111	96	-	=/+	-	-	-	-

Bild 8: Auszug der Schweißanweisung Stumpfnah steigend

Am Beispiel der Stumpfnah Flusstahl mit S355 werden jedoch nur einige Ergebnisse aus der Verfahrensprüfung dargestellt, die meiner Meinung nach wichtig sind. Bild 9 zeigt Ergebnisse aus dem Quersugversuch an Schweißnähten, erwartungsgemäß ist der Bruch im Übergang zum Altstahl eingetreten. Die Streckgrenze lag mit Rp 0,2 von 296 MPa sogar über dem Wert des unbeeinflussten Altstahls und Rm = 460 MPa.

Querzugversuch Schweißnaht gem. DIN EN ISO 4136 (2013-02)									
Transversal tensile test of welded joint acc. to DIN EN ISO 4136 (2013-02)									
10126 / 1									
Methode		: DIN EN ISO 6892-1							
Probenabm.		a = 10,64	b = 24,99	d = -	S ₀ = 265,89				
<i>Dimension</i>		[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]				
Temp. [°C]	ReH	Rt 0.5	Rp 0.2	Rp 1.0	Rm	Lo	A	Z	Bruchlage
<i>Temp. [°C]</i>	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[%]	[%]	<i>Fracture location</i>
min			inf.		inf.		inf.		
max	---	---	296	---	460	50 / 80	18,0	---	GW / Altstahl
Rt									
Bemerkung	Probe 1								
<i>Remark</i>									

Bild 9: Ergebnis Verfahrensprüfung Querzugversuch Stumpfnah

Die im Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 9016 ermittelten Werte der Kerbschlagarbeit bei -20°C in der Wärmeeinflusszone (WEZ) zum Altstahl im Mittel von 43 Joule lagen jedoch deutlich höher als die Werte aus der reinen Flusstahlproben (3 Joule) und entsprachen somit den heutigen Anforderungen. Dieses Ergebnis hat uns doch überrascht. In der Nahtmitte betrug der Mittelwert 72 Joule und in der WEZ zum Grundwerkstoff S355 wurde ein Mittelwert von 93 Joule erreicht. Damit wurden die nach Norm geforderten min. 27 Joule deutlich überschritten.

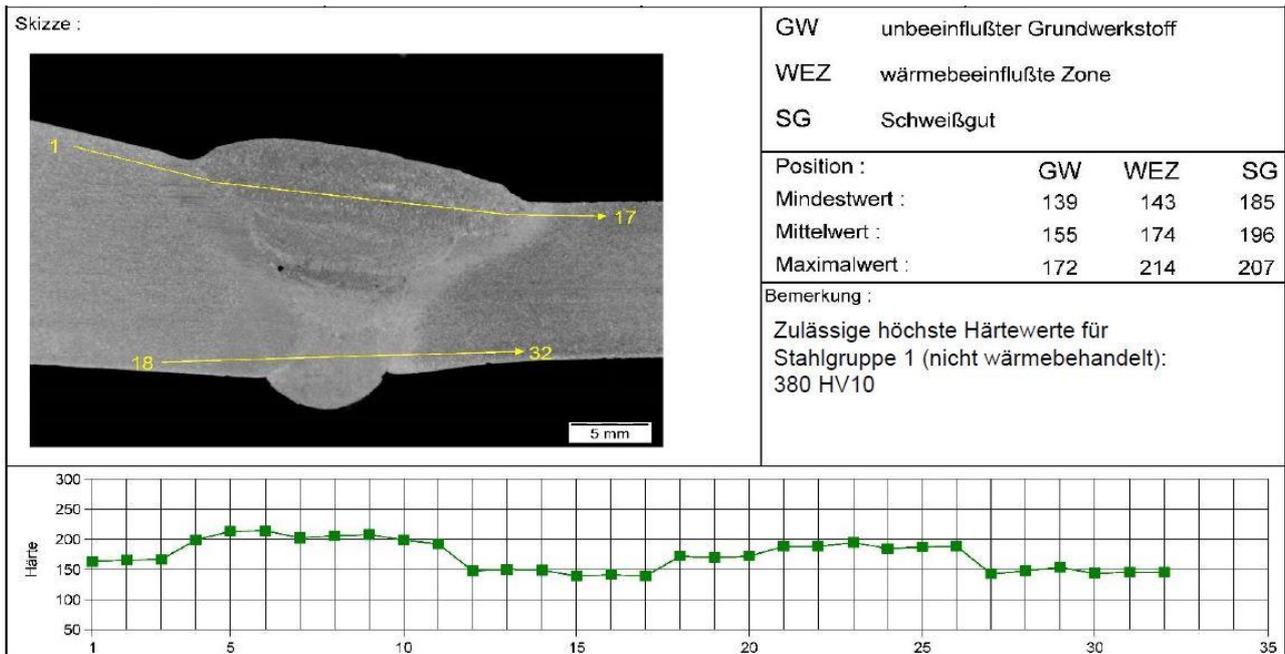


Bild 10: Härteverlauf des Stumpfstoßes

Bei dem Härteverlauf (Bild 10) zeigten sich keine Anomalitäten. Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehaltes konnte beim Flussstahl keine Aufhärtungen festgestellt werden und die im Schweißgut festgestellten Werte entsprechen der verwendeten Elektrode.

Auch die bei der mehrlagigen Kehlnahtprüfung erreichten Werte lagen ebenfalls alle im zulässigen Bereich und die in Bild 11 erreichten Werte zeigten ebenfalls keine Aufhärtungen.

Mit diesen hervorragenden Werten aller durchgeführten Prüfungen wurden die vorläufig erstellten Schweißanweisungen qualifiziert.

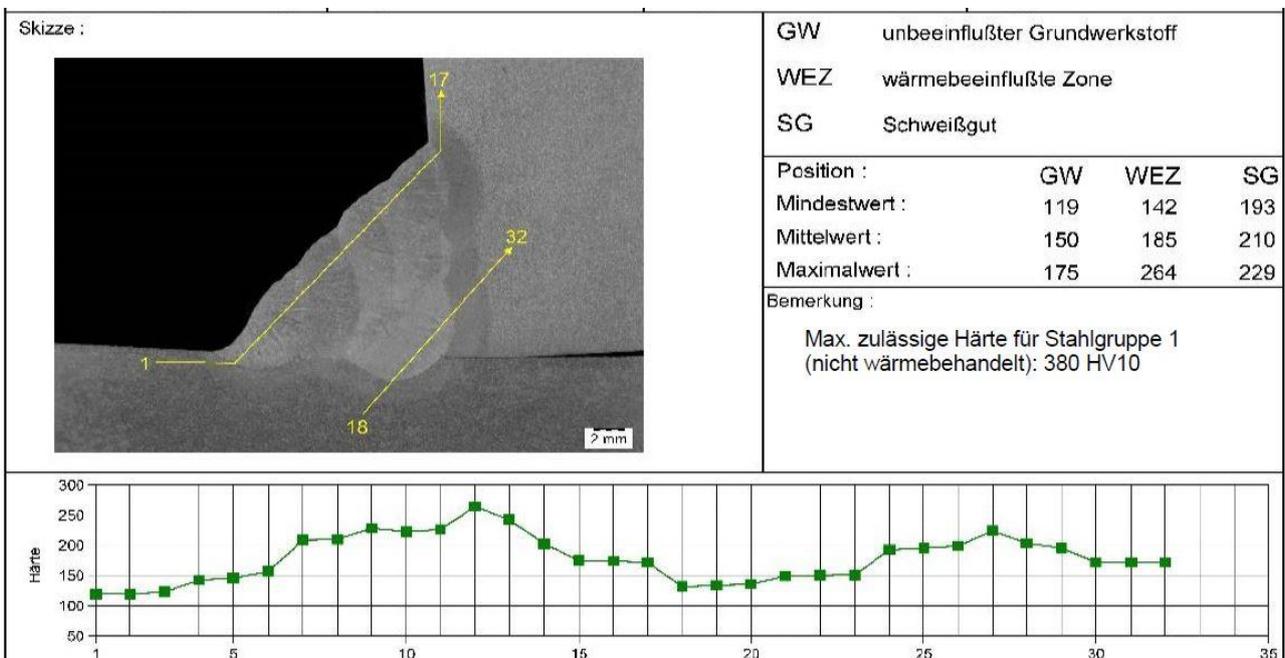


Bild 11: Härteverlauf der mehrlagigen Kehlnaht

Nach all den positiven Ergebnissen stand der Sanierung des Hauptlagers mit dieser gewählten Methode nichts mehr im Weg.

6. Durchführung der Schweißarbeiten unter Baustellenbedingungen

Nachdem nun alle Werkstoffuntersuchungen und Verfahrensprüfungen ohne Probleme abgeschlossen waren, konnte mit den Arbeiten in der Werkstatt und auf der Baustelle begonnen werden.



Bild 12: neugefertigte Untergruppe aus S355



Bild 13: MT-Prüfung der Untergruppe

Die Neufertigung des Hauptlagers konnte als Untergruppe in der Werkstatt des Auftragnehmers durchgeführt werden. Dort wurde auch gleich die Oberflächenrissprüfung nach dem Magnetpulververfahren durch einen zertifizierten Prüfer erledigt und dokumentiert (siehe Bilder 12 und 13).



Bild 14: Einrichtung der Baustelle



Bild 15: Einpassen des neuen Hauptlagers

Bild 14 zeigt die Situation an der trockengelegten Stauklappe, Vorwärmeeinrichtungen für die Stabelektroden und Bleche, Schweißgeräte usw. mussten herangeschafft werden. Die Positionierung der Untergruppe Hauptlager mit entsprechenden hydraulischen Pressen zeigt Bild 15. Der Beton an den lasttragenden Seitenwangen aus dem Altstahl musste so entfernt werden, dass die neue Baugruppe voll angeschlossen werden konnte. Mit ausreichenden Heftstellen wird das Lager in der richtigen Lage fixiert. Um eine einwandfreie Stumpfnah zu erhalten, wurden oben und unten Einlauf- und Auslaufbleche angeschweißt, wie in Bild 19 deutlich zu sehen ist. Für eine sichere Wurzelschweißung wurden auf der Rückseite Keramikbadsicherungen aufgeklebt wie ebenfalls in den Bildern 19 und 21 zu erkennen ist. Bild 20 zeigt die schwierige Situation (unter Flur) der auszuführenden Steignah.

Bevor nun mit den Schweißarbeiten begonnen werden konnte, musste der Schweißbereich gemäß den Schweißanweisungen vorgewärmt (siehe Bild 16) werden. Diese wurden ja durch die entsprechenden Verfahrensprüfungen qualifiziert. Bild 17 zeigt die Temperaturmessungen mit einem Infrarotthermometer.



Bild 16: Vorwärmen des Schweißbereiches



Bild 17: Temperaturmessung



Bild 18: Elektrodentrockenofen



Bild 19: Ein- und Auslaufbleche

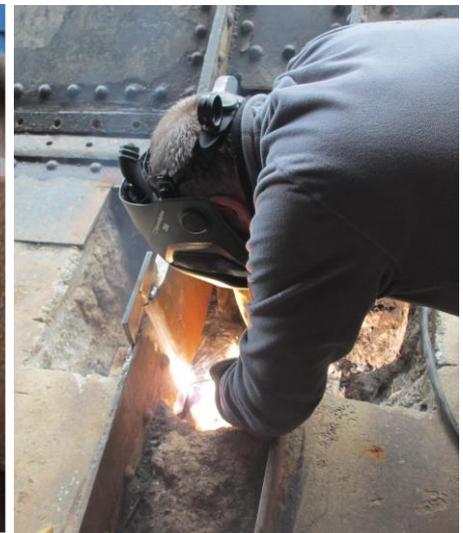


Bild 20: Wurzelschweißung

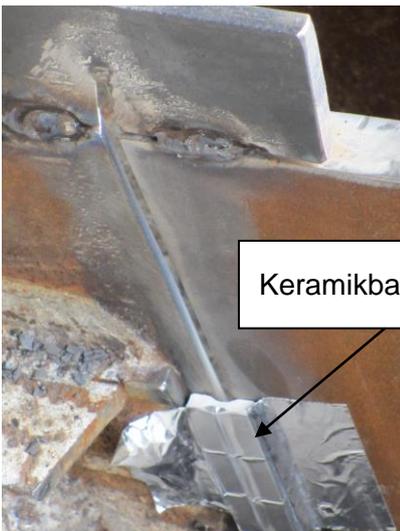


Bild 21: Keramikbadsicherung



Bild 22: fertige Wurzel



Bild 23: Ultraschall-Prüfung

Die verwendeten basischen Stabelektroden wurden direkt aus dem Elektrodentrockenofen (Bild 18) rückgetrocknet verarbeitet. Gemäß dem Vorschlag des Institut IWS Solutions AG wurde für diese Schweißverbindung Altstahl mit S355 eine basische Stabelektrode zu verwenden. Eingesetzt wurde der TYP MT-B10 nach DIN EN ISO 2560-A E42 4 B 32 H5.

Bild 22 zeigt die ausgebildete Wurzel und Bild 23 die anschließend ausgeführte Ultraschall-Prüfung durch einen zertifizierten US-Prüfer UT2 nach DIN EN ISO 9712. Die Anforderungen nach DIN EN ISO 11666, AL2 / DIN EN ISO 17640 Klasse B / DIN ISO 5817 – B wurden voll erfüllt.

Nachdem nun die hauptbeanspruchte Stumpfnahse geschweißt und geprüft war, konnten die einbetonierten Altstahl-Profile (U-Stahl und Breitflanschträger) in die Neukonstruktion eingebunden werden. Das aus dem Beton herausragende U-Profil wurde mit den Wangenblechen (30mm dick) verschweißt (Bild 24). Laut dem Bericht des Statik Büros sollten die Nietlöcher zugeschweißt werden, um aber nicht zu viel Wärme in den Altstahl einzubringen wurde darauf verzichtet.



Bild 24: Oberflächenrissprüfungen aller Nähte **Bild 25:** Lager fertig zum Einbetonieren

Um die hohen Lagerkräfte auch in den hinteren Breitflanschträger zu übertragen, wurde ein horizontales Schublech eingeschweißt und an diesen Träger angeschlossen (siehe Bild 25).

Abschließend wurden alle Schweißnähte einer kompletten Oberflächenrissprüfung nach dem Magnetpulver-Verfahren gemäß DIN EN ISO 17638 DIN EN ISO23278 geprüft und dabei keine Risse festgestellt. Nun konnte die Konstruktion mit einer Zinkstaubfarbe als Korrosionsschutz versehen werden und nach Trocknung teilweise wieder mit Beton gefüllt werden.

Quellen:

1. Statische Nachweise der Bau + Plan Ingenieurgesellschaft mbH für die Lech Elektrizität Werke AG Augsburg
2. Untersuchungsbericht der IWT Solutions AG Aachen Prof. Dr. Peter Langenberg
3. Untersuchungsbericht vom Stuttgarter Labor der Element Materials Technology Hamburg GmbH