

<b>Zeitschrift:</b>	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
<b>Band:</b>	106 (2014)
<b>Heft:</b>	4
<b>Artikel:</b>	Schweissnahtprüfung beim Bai des KW Jungbach : Praxiserfahrungen mit dem TOFD-Prüfverfahren beim Bau einer Hochdruckleitung aus Stahl mit geringem Durchmesser
<b>Autor:</b>	Paneka, Andreas
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-939758">https://doi.org/10.5169/seals-939758</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 10.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Schweissnahtprüfung beim Bau des KW Jungbach

## Praxiserfahrungen mit dem TOFD-Prüfverfahren beim Bau einer Hochdruckleitung aus Stahl mit geringem Durchmesser

Andreas Panenka

### Zusammenfassung

Beim Bau des Wasserkraftwerks Jungbach der KW Jungbach AG kam für die zerstörungsfreie Prüfung der Baustellennähte das Verfahren nach der Beugungsauszeittechnik (TOFD) zum Einsatz. Für die zerstörungsfreie Prüfung der Schweissnähte waren ursprünglich Durchstrahlungsprüfungen vorgesehen. Durch die schwierige Erreichbarkeit des Projektgebiets wäre aber für den Transport der Strahlungsquelle nur der Heli gekommen, mit all den damit verbundenen Risiken und Kosten. Daher wurde das TOFD-Verfahren als gleichwertiger Ersatz für die Durchstrahlungsprüfungen evaluiert und zunächst auch eingesetzt. Nach kurzer Zeit musste der Einsatz aber wieder abgebrochen werden. Aus den Erfahrungen mit dem TOFD-Prüfverfahren, die trotz des kurzen Einsatzes gesammelt werden konnten, werden Empfehlungen für einen erfolgreichen Einsatz auf der Baustelle formuliert. Bei Berücksichtigung der Empfehlung kann der Einsatz des TOFD-Systems durchaus eine Alternative zur Röntgenprüfung darstellen.

Jungbachs erhöht sich die Neigung auf fast 60°. Die Leitung unterquert in einem 65 m langen Rohrstollen den Jungbach, um schliesslich auf 1258.50 m +NN in die Krafthauskaverne zu münden, in der sie an die Verteilleitung zu den beiden Maschinensätzen anschliesst.

Die Stahlleitung besteht aus vorgefertigten Rohren und Rohrbögen mit einer Nennwandstärke von 14.2 mm bzw. 20 mm sowie einer inneren und äusseren Zementmörtelbeschichtung (ZM-Beschichtung). Die äussere Beschichtung wurde mit Gewebeeinlagen verstärkt. Die Rohre wurden aus einem Stahl der Güte P355N hergestellt. Das Spitzende für die Muffenverbindung zur Gussleitung wurde aus Stahl nachgebaut. Die Leitung ist bis auf den Abschnitt im Rohrstollen erdverlegt. Im Rohrstollen liegt sie auf Gleitlagern, die in Längsrichtung und geringfügig auch quer zur Rohrachse verschiebbar sind. Die Lager sind mittels eigens angefertigten Rohrschellen am Rohr befestigt.

Die Leitung ist mit vier Festpunkten in ihrer Lage gesichert. Der erste Festpunkt liegt direkt nach dem Übergang von

### 1. Das Kraftwerk Jungbach

Das Kleinwasserkraftwerk am Jungbach bei St. Niklaus im Oberwallis ist das jüngste Neubauprojekt der EnAlpin AG. Eine 2.6 km lange Druckleitung verbindet die Wasserfassung auf ca. 2355 m +NN mit den beiden Pelton-Turbinensätzen in der Maschinenkaverne auf 1258.50 m +NN. Die beiden Maschinensätze weisen jeweils eine Nennleistung von 2.4 MW auf und sollen zusammen eine Jahresleistung von ungefähr 14 GWh liefern. Die Wasserfassung beherbergt das für diese Art von Kraftwerken typische Tiroler Wehr, einen Sandfang mit Spülmöglichkeit und die Rohrbruchsicherung. Die daran anschliessende Druckleitung besteht bis zu einem Druckniveau von ca. 93 bar aus duktilem Gusseisen. Die letzten 120 Höhenmeter werden mithilfe von verschweissten Stahlrohren überwunden. Der statische Druck beläuft sich in Summe auf 1097 m WS. Der Bemessungsdruck wurde auf 11.73 MPa festgelegt. Die Inbetriebsetzung ist für das Frühjahr 2015 vorgesehen. Die KW Jungbach AG gehört zu 51% der Gemeinde St. Niklaus und zu 49% der Altesch AG, einer Tochtergesellschaft der EnAlpin AG.

### 2. Die Stahlleitung

Die 377 m lange Stahldruckleitung mit einem Aussendurchmesser von 457 mm schliesst auf einer Höhe von ca. 1421.50 m +NN direkt an die Gussleitung an. Sie folgt für ca. 150 m einem schmalen Wanderweg, bevor sie in einen ca. 162 m langen Steilhang abknickt. Der Steilhang weist eine Neigung von ca. 41° auf. Auf den letzten Metern vor der Unterquerung des

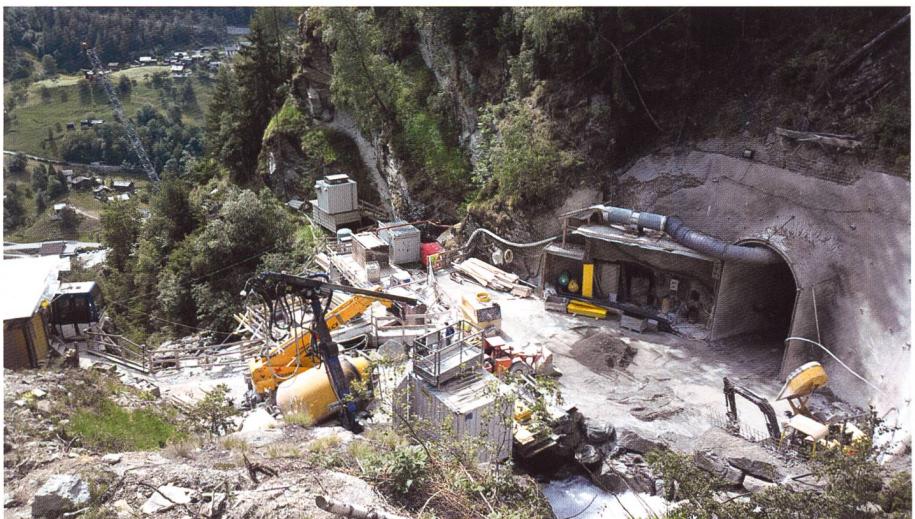


Bild 1. Der Vorplatz der Kaverne des KW Jungbach ist der einzige einigermassen flache Bereich im Projektgebiet und wird daher für die Baustelleneinrichtungen verwendet.

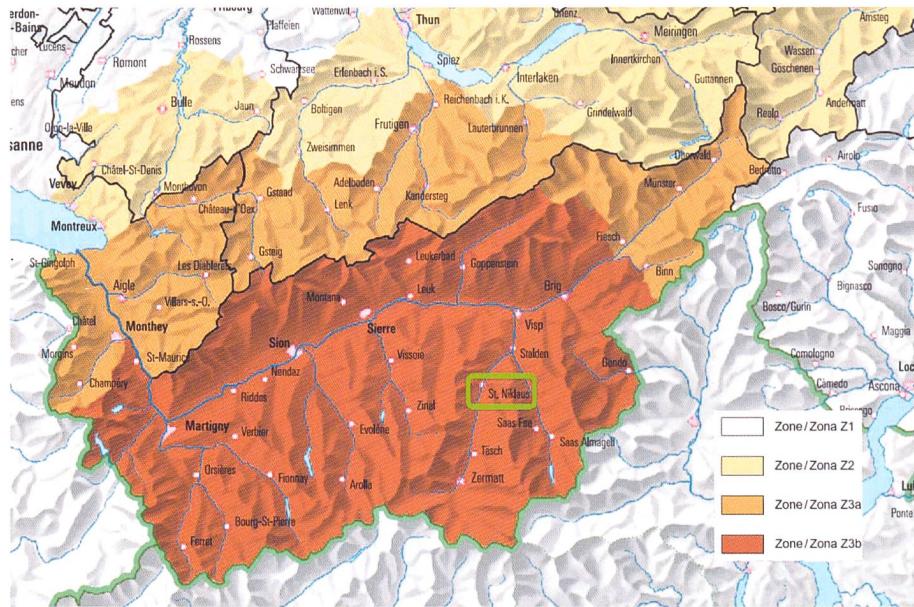


**Bild 2.** Die mit Faserzementmörtel beschichtete Stahlleitung wird in einem Rohrgraben verlegt, der später wieder verfüllt wird.

der Gussleitung, um dort unzulässig hohe axiale Verschiebungen zu unterbinden. Die weiteren Festpunkte liegen vor bzw. nach dem Steilhang und am Ende des Rohrstollens vor dem Übertritt in die Kaverne. Auf Expansionen oder Dehnstücke wurde zu gunsten von geringeren Festpunktkräften gänzlich verzichtet. Dennoch wurden zwei der vier Festpunkte mittels vorgespannter Anker gegen Verschieben gesichert.

### 3. Bemessungsgrundlagen

Die gesamte Rohrleitung wurde als gegenüber dem Innendruck selbsttragende Konstruktion bemessen. Die Bögen wurden nach EN 13480 bemessen, um auch die Wandstärkenänderung durch das Biegen berücksichtigen zu können. Positive Effekte aus der Vergleichsspannung wurden bei der Festlegung der Rohr-



**Bild 3.** Das Dorf St. Niklaus im Tal nach Zermatt liegt in der Zone mit der höchsten Erdbebengefährdung in der Schweiz [1].

wandstärke vernachlässigt. Beim Wiederverfüllen des Rohrgrabens musste auf kontrolliertes Verdichten des Füllmaterials verzichtet werden. Daher wurde bei der Berechnung auf der sicheren Seite liegend die Reibung zwischen Rohr und Erdreich nicht berücksichtigt. Die Bettung der Leitung in radialer Richtung wurde nach den Richtlinien der ASCE für granulare Böden abgeschätzt. In dem gewählten geschlossenen System der Leitung wirken die Zwangskräfte aus Querkontraktion und Temperaturänderung. Außerdem wurde für den Leistungsabschnitt im Rohrstollen die Erdbebeneinwirkung nach SIA 261, Kapitel 16 berücksichtigt. Das Projektgebiet liegt in Zone Z3b (Bild 3). Die Beiwerte wurden ohne detaillierte Analyse des Tragwerkverhaltens des Untergrunds auf der konservativen Seite festgelegt. Der Bemessungswert für die horizontale Erdbebenbeschleunigung ( $S_d$ ) wurde mit dem Plateauwert des elastischen Antwortspektrums berechnet (vgl. SIA 261, Kapitel 16). Selbst mit diesem äußerst konservativen Ansatz blieb der Innendruck der massgebende Lastfall für die Bemessung der Rohrwandstärke.

Auf eine Betrachtung der Betriebsfestigkeit wurde verzichtet, da bei diesem Kraftwerkstyp ohne Pumpbetrieb nicht von einer nennenswerten Anzahl an Druckschwankungszyklen ausgegangen werden kann.

### 4. Die Qualitätssicherung: Auswahl des Prüfverfahrens

Wie bereits geschildert, verläuft die Leitung in unwegsamem Gelände. Alles Material und Werkzeug, das nicht händisch trans-

portiert werden konnte, musste mit dem Helikopter auf Platz gebracht und versetzt werden. Dies gilt auch für die Ausrüstung zur zerstörungsfreien Prüfung. Ursprünglich war eine Durchstrahlungsprüfung (RT-Verfahren) sämtlicher Baustellennähte ausgeschrieben. In Anbetracht des Aufwands für den Transport der Strahlenquelle mittels Helikopter sowie der damit verbundenen Sicherheitsvorkehrungen und terminlichen Zwänge, wurde nach gleichwertigen Alternativen gesucht. Dabei boten sich die sogenannten advanced techniques nach der Beugungslaufzeittechnik (Time of Flight Diffraction, TOFD; vgl. ISO 10863) und der phasengesteuerten Array-Technologie (Phased Array, PA-UT, vgl. ISO 13588) an. Beides sind bildgebende Verfahren, deren Messergebnisse permanent auf Datenspeichern festgehalten werden können. Bei Bedarf könnten so die Prüfergebnisse für jede Schweißnaht jederzeit kontrolliert werden, ohne die Prüfung selbst erneut durchführen zu müssen. Einen ersten grossen Einsatz im Bereich der Wasserkraft hatten diese Verfahren beim Neubau der Druckleitung für das Kraftwerk Cleuson-Dixence [2]. Im Gegensatz zum RT-Verfahren sollten die Ergebnisse zeitnah vorliegen, da das Warten auf die Entwicklung von Filmnegativen entfällt. Statistische Vergleiche der gängigen Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung zeigen, dass das TOFD-Verfahren theoretisch eine deutlich höhere Detektionswahrscheinlichkeit (Probability Of Detection, POD) und eine wesentlich geringere Pseudofehlerrate (False Call Rate, FCR) als die herkömmliche manuelle Ultraschalltechnik nach dem Reflexionsschall-

verfahren (Puls-Echo, PE, vgl. ISO 16810 u.a.), aufweist. Auch gegenüber der Röntgentechnik hat das TOFD-Verfahren noch deutlich bessere Werte (vgl. Bild 4).

Nach Entwicklung des TOFD-Verfahrens war gerade die hohe Detektionsrate eine Hürde bei der Etablierung als praxistaugliches Prüfverfahren. Bei Schweißnähten, die nach dem klassischen UT-Verfahren als akzeptabel eingestuft worden waren, wurden bei TOFD-Prüfungen bis dahin unentdeckte Unregelmäßigkeiten aufgespürt. Bis vor kurzem fehlten jedoch eine Einordnung des Verfahrens und dessen Zulässigkeitsgrenzen in Bezug auf die Bewertungsgruppen nach ISO 5817 in den Regelwerken für zerstörungsfreie Prüfungen. In der bis März 2010 gültigen DIN EN 12062 war das TOFD-Verfahren noch nicht zu finden. Eine normgerechte Bewertung der mittels TOFD aufgespürten Unregelmäßigkeiten war also schwierig. Erst mit der Einführung der Nachfolgenorm ISO 17635 wurde diese Einordnung möglich. In Verbindung mit den Normen ISO 5817, ISO 10863 über die Anwendung und ISO 15626 über die Zulässigkeitsgrenzen (zuvor geregelt in der EN 15617) lassen sich nun auch für dieses Prüfverfahren die dazugehörigen Zulässigkeitsgrenzen je nach Bewertungsgruppe festlegen (Bild 5).

Für PA-UT existiert bis jetzt noch keine ISO-Norm für Zulässigkeitsgrenzen, die in dieses System passen würde. Deswegen findet PA-UT in der ISO 17635 bis jetzt noch keine Berücksichtigung. In der Praxis wird dieses System daher noch nicht ohne Weiteres zur Bewertung von Fehlern eingesetzt. Als Arbeitserleichterung beim Auffinden von Fehlern wird es allerdings schon regelmäßig eingesetzt. Die Bewertung findet dann jedoch wieder mit dem PE-UT statt.

Die Wahl fiel schliesslich auf das TOFD-Verfahren für die Prüfung der Schweißnähte. Wegen dem geringen Durchmesser wurde ein semiautomatisches Prüfverfahren gewählt. Der Schlitten mit den Prüfköpfen wird dabei manuell auf dem zuvor auf dem Rohr befestigten Führungssystem bewegt. Die Oberflächenrissprüfung wurde mittels Eindringprüfung (PT, vgl. ISO 3452) durchgeführt.

## 5. Festlegung der Zulässigkeitsgrenzen

Die bereits in die Jahre gekommenen, aber immer noch hilfreichen Empfehlungen des Comité Européen de la Chaudronnerie et de la Tôlerie (C.E.C.T. Ausgabe 1984 [5]; Appendix 0) geben Anhaltspunkte über

die Einordnung von Druckrohrleitungen in Sicherheitsklassen. Rohrleitungen wie die des KW Jungbach mit einem Wasserdruck von über 500 m WS sollten demnach unabhängig vom Rohrdurchmesser stets in die höchste Sicherheitsklasse A eingestuft werden. Dieser Sicherheitsklasse ist dann auch die höchste Inspektionsklasse I zugeordnet (vgl. C.E.C.T., Annex IV, Table 1). Daraus resultieren der Prüfumfang für die zerstörungsfreien Prüfungen und die Zulässigkeit von Fehlern. Für Schweißnähte der Klasse I gilt: 100% RT oder UT; bei Verwendung von UT-Prüfungen sind

noch 5–20% RT-Prüfungen durchzuführen; Risse, Bindefehler und ungenügende Durchschweissung sind nicht erlaubt. Mit diesen Vorgaben liegt die Druckleitung des KW Jungbach in der Bewertungsgruppe B oder C nach (ISO 5817, Tabelle 1). Aufgrund des ausserordentlich hohen Drucks von über 110 bar wurde allerdings die strengere Klasse B gewählt. Daraus ergeben sich für das TOFD-Prüfverfahren gemäss ISO 17635, Anhang A.7.1 folgende Mindestanforderungen: Prüfklasse C nach ISO 10863 mit Zulässigkeitsgrenze 1 nach ISO 15626 (vgl. Bild 6).

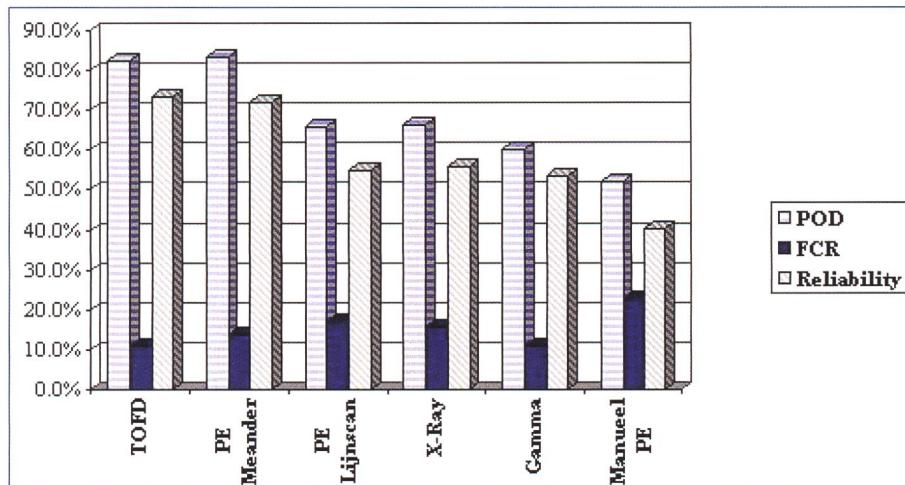


Bild 4. Übersicht über die Detektionswahrscheinlichkeit und Pseudofehlerrate der unterschiedlichen zfP-Methoden; [3].

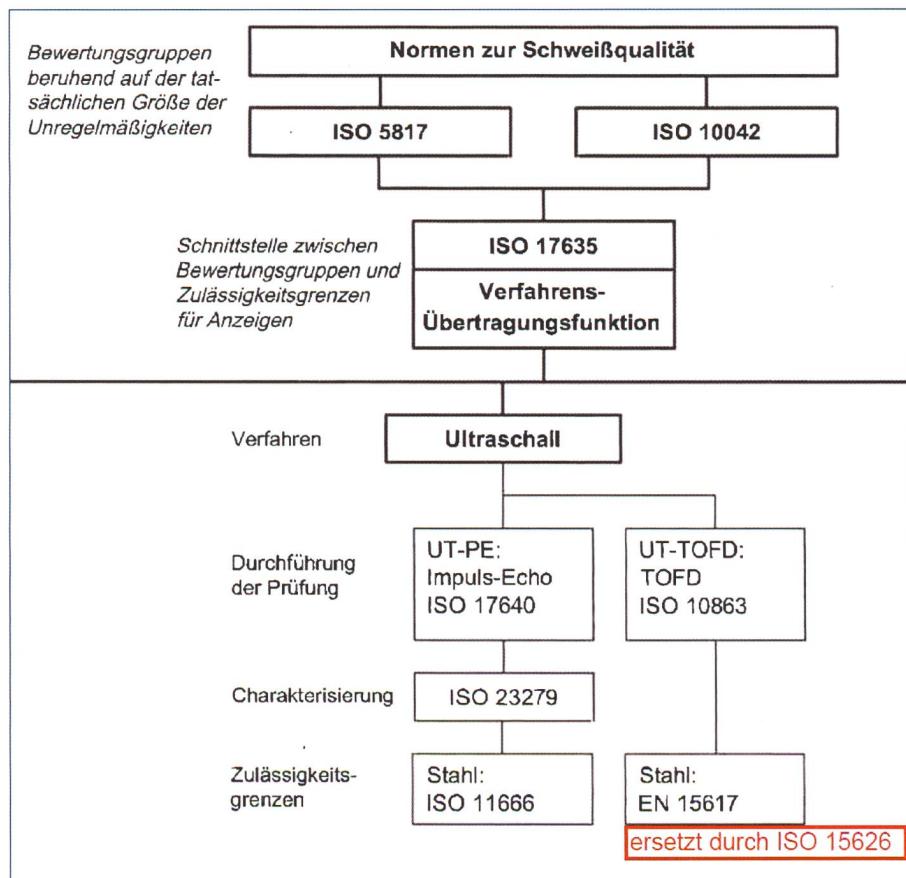
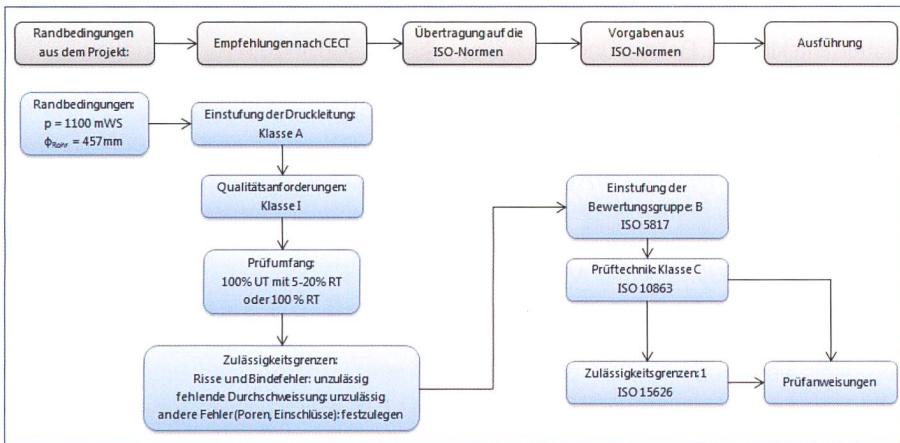


Bild 5. Auszug aus der ISO 17365 mit der Einordnung des TOFD-Verfahrens in die ISO-Regelwerke; EN 15617 wurde durch ISO 15626 ersetzt; [4].



**Bild 6. Übersicht über die Zuordnung der Zulässigkeitsgrenzen nach ISO in Verbindung mit den Empfehlungen der C.E.C.T.**

## 6. Praxiserfahrungen mit dem TOFD-Verfahren

Die Einführung des TOFD-Systems auf der Baustelle KW Jungbach stand von Beginn an unter keinem guten Stern. Durch eine zweimonatige Verspätung seiner Rohrlieferung stand der Unternehmer bereits bei Montagebeginn unter erheblichem Zeitdruck. Die Rohre im Bereich der Festpunkte mussten so rasch wie möglich eingebaut und für die Baumeisterarbeiten freigegeben werden.

Trotz des Zeitdrucks konnten vier Nähte mittels TOFD-Verfahren geprüft werden. Die gesamte Ausrüstung für das TOFD-System wiegt ca. 40 kg. Die Installation des Systems wurde stellenweise durch Fixierungen der Rohre im Bereich der Festpunkte behindert. Die Fixierungen mussten erst versetzt oder angepasst werden, damit das System installiert werden konnte.

Nach Inbetriebnahme des Systems ging das Auffinden von Unregelmäßigkeiten noch relativ schnell vonstatten. Innerhalb einer Stunde konnten grundlegende Aussagen über die Nahtqualität getroffen werden (Inhomogenität vorhanden ja/nein?). Die tatsächliche Bewertung der Unregelmäßigkeit (zulässig oder nicht?) hingegen dauerte bei den ersten Versuchen dann doch deutlich länger als erwartet. Reparaturen konnten erst am nächsten Morgen veranlasst werden.

Die als reparaturbedürftig interpretierten Unregelmäßigkeiten bzw. Inhomogenitäten waren dann bei einer Naht so häufig, dass die Naht vollständig ausgeschliffen und ein zweites Mal geschweisst wurde. Auch die anderen Nähte wiesen laut TOFD-Prüfung erheblichen Reparaturbedarf auf. Stellenweise war auch nach der sorgfältigen Reparatur der ersten Fehler keine Verbesserung der Qualität festzustellen. Die überwiegende Anzahl der fest-

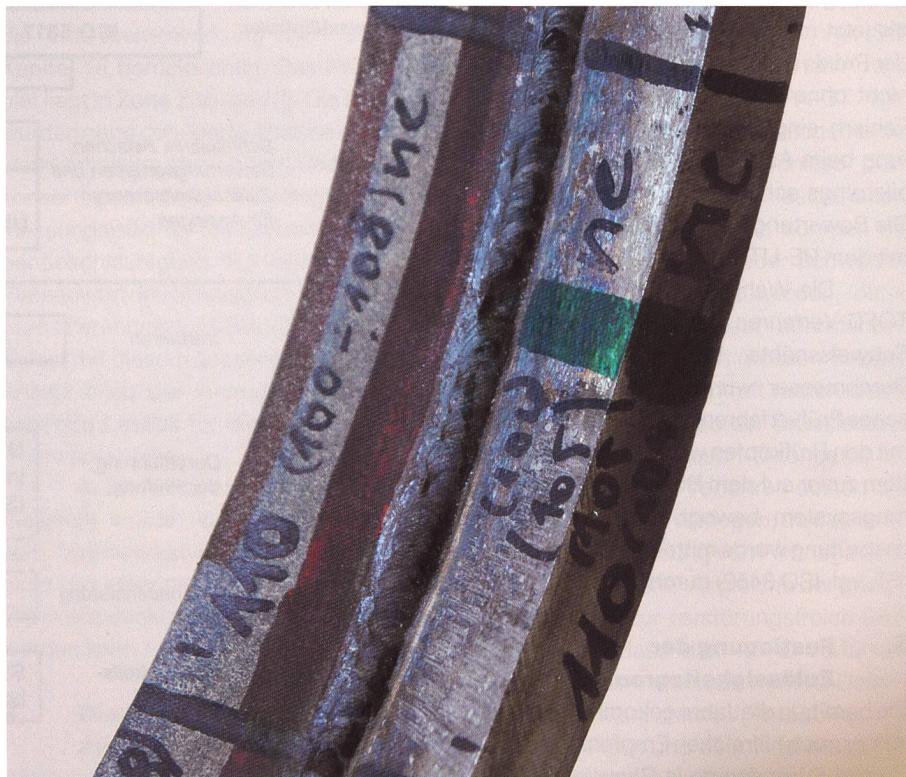
gestellten Fehler betraf den Wurzelbereich der Schweißnaht.

Trotz der engen Terminlage wurde deshalb entschieden, bei diesen vier Nähten vor Ort zusätzliche Prüfungen mittels Durchstrahlverfahren, klassischem Ultraschallverfahren und visuelle Kontrollen mithilfe von Endoskopen durchzuführen. Ein Stück Rohr mit einer der Schweißnähte wurde herausgetrennt, um es beim Unternehmer genauer zu untersuchen sowie Schweißversuche durchführen zu können. Außerdem wurden vor Ort zwei Nähte mittels TIG/E-Hand-Verfahren zu Vergleichszwecken geschweisst. Dies sollte Aufschluss über die mögliche Ursache der vielen, als unzulässig eingestuften Inhomogenitäten geben.

Die Schweißversuche ergaben, dass der Einfluss der ZM-Beschichtung auf die Qualität der Nahtwurzel nahezu vernachlässigbar ist. Alles andere wäre auch stark verwunderlich gewesen, da die Beschichtung im Schweißnahtbereich normgerecht ausgeführt wurde. Die Wahl des Schweißverfahrens für die Wurzellage zeigte ebenfalls nur einen geringen Einfluss auf die UT-Prüfergebnisse für den Wurzelbereich. Die geringfügig bessere Qualität der Nahtwurzel rechtfertigte also nicht den deutlich erhöhten Aufwand bei der Verwendung des TIG-Verfahrens vor Ort.

Die visuelle Kontrolle des herausgetrennten, von der Innenbeschichtung befreiten Nahtbereichs offenbarte eine Reihe von Details, die ebenfalls einen Einfluss auf die Prüfergebnisse gehabt haben könnten (Bild 7): Das manuelle Schweißen mit Elektroden führte zwangsläufig zu einer eher unregelmäßigen Wurzeloberfläche. Durch den geringen Durchmesser der Druckleitung (DN450) konnte die Nahtwurzel aber nicht nachbearbeiten werden. Auffällig war auch ein deutlicher Kantenversatz, resultierend aus den geometrischen Unregelmäßigkeiten der Rohre selbst. Der Versatz lag genau in dem Bereich, in dem mittels TOFD-Verfahren ein Fehler in der Nahtwurzel über nahezu ein Drittel des Umfangs festgestellt wurde.

Auch die Ergebnisse der RT-Prüfungen konnten eine Reihe von Unregel-



**Bild 7. Detailaufnahme von der herausgetrennten Schweißnaht mit den Markierungen der Prüfergebnisse mittels TOFD (rot) und Radiographie (grün).**

mässigkeiten, die mittels TOFD-Verfahren als unzulässiger Fehler identifiziert wurden, nicht bestätigen. Durch eine abschliessende visuelle Kontrolle der Nachoberfläche konnte bei einem weiteren Befund der RT-Prüfung die Einstufung ebenfalls noch korrigiert werden.

## 7. Gründe für den Verzicht auf das TOFD-Verfahren

Nach dem Vorliegen der Untersuchungsergebnisse wurde entschieden, bei diesem Projekt auf einen weiteren Einsatz des TOFD-Verfahrens zu verzichten. Als ausschlaggebend für diese Entscheidung können folgende fünf Gründe genannt werden:

- 1) Der Einsatz des TOFD-Systems stellte sich als zeitintensiver heraus als anfangs angenommen. Die terminliche Situation liess jedoch keine weitere Verzögerung zu. Dies hätte negative Auswirkungen auf das Terminprogramm gehabt.
- 2) Die tatsächliche Bewertung der angezeigten Unregelmässigkeiten war ebenfalls zeitintensiver ursprünglich angenommen. Die notwendigen Reparaturen hätten deshalb erst am darauffolgenden Tag durchgeführt werden können. Bei der vorherrschenden terminlichen Situation konnte dies nicht verantwortet werden.
- 3) Die Bewertung von Unregelmässigkeiten als Fehler liess sich mit anderen Prüfmethoden nicht eindeutig reproduzieren. Die detaillierten Untersuchungen an der herausgetrennten Naht ergaben teilweise erhebliche Korrekturen der Bewertung von Unregelmässigkeiten. Unter den gegebenen Umständen stellte dieser, sehr auf der sicheren Seite liegende Reparaturbedarf eine erhebliche Belastung des Zeitplans dar. Eine nachträgliche Kalibrierung des Systems und Schulung der Prüfer konnte ebenfalls aufgrund der terminlichen Situation durch den stark verzögerten Montagebeginn nicht mehr durchgeführt werden.
- 4) Unbehandelte Nahtoberflächen mit unter Umständen erheblicher Wurzelüberhöhung erschweren die Interpretation der Anzeigen. Gerade die oberflächennahen Bereiche stellen für das TOFD-Verfahren eine grosse Herausforderung dar (vgl. ISO 10863, Kapitel 4 und 5). Muss wie bei KW Jungbach aufgrund des geringen Durchmessers der Rohrleitung auf eine Nachbearbeitung der Nahtwurzel verzichtet werden, erschwert dies zusätzlich die Interpretation der Anzeige.
- 5) Der Einfluss von geometrischen Imperfektionen auf die Interpretation von Fehlern im Wurzelbereich scheint erheblich zu sein. Die Rohre trafen herstellungsbe-

dingt leicht oval auf der Baustelle ein. Die ISO 5817 erlaubt von 10% in der Bewertungsgruppe B bis hin zu 25% der Wandstärke in der Bewertungsgruppe D. Auf der Baustelle bestand jedoch keine Möglichkeit, die Rohre nachträglich zu bearbeiten. Die Rohre wurden daher mit dem resultierenden Kantenversatz eingebaut.

Anstelle des TOFD-Verfahrens kam eine herkömmliche UT-Prüfung zum Einsatz. Die Befunde der UT-Prüfung wurden bei ca. 20% der Schweißnähte mittels RT-Prüfungen verifiziert, um sicherstellen zu können, dass in den schwer zugänglichen Abschnitten der Leitung, in denen keine RT-Prüfung möglich war, die UT-Anzeigen richtig interpretiert werden. Dies entspricht ebenfalls den bereits beschriebenen Empfehlungen der C.E.C.T. für diese Druckrohrklasse.

## 8. Empfehlungen für einen zukünftigen Einsatz des TOFD-Verfahrens

Aus den Gründen für den Verzicht auf den Einsatz beim Projekt KW Jungbach können folgende Empfehlungen für den möglichen Einsatz des TOFD-Verfahrens abgeleitet werden:

- Eine ausreichende terminliche Vorplanung für den Einsatz dieser Technik ist unabdingbar. Bei Termindruck empfiehlt es sich, auf bewährte Verfahren zurückzugreifen (vgl. Gründe 1 bis 3).
- Sollten die Schweißnähte nur einseitig zugänglich sein, empfehlen sich vorläufige Versuche mit Vergleichskörpern zur Kalibrierung des TOFD-Systems und Schulung der Prüfer (vgl. Gründe 2 und 3 sowie ISO 10863, Tabelle 1).
- Die Ausführung der Schweißnahtdetails muss aus technischer Sicht für das TOFD-Verfahren geeignet sein. Dies beinhaltet u.a. eine Nachbearbeitung von Wurzelüberhöhungen und Nahtoberflächen sowie die strikte Einhaltung von geometrischen Toleranzen (vgl. Grund 4).
- Eine zusätzliche visuelle Kontrolle der Nahtwurzel scheint notwendig zu sein, um Unregelmässigkeiten an der Nahtoberfläche richtig evaluieren zu können (vgl. Grund 5).

## 9. Schlussfolgerung

Der Versuch, das TOFD-Verfahren bei der Montage der Druckrohrleitung des KW Jungbach einzusetzen, war wegen den aufgezeigten Gründen nicht von Erfolg gekrönt. Zusammenfassend kann

als grundlegende Empfehlung festgehalten werden, dass Lieferanten, die dieses neuartige Verfahren erfolgreich einsetzen wollen, eine sorgfältige Vorbereitung in terminlicher und technischer Hinsicht einzuplanen haben. Für Ad-hoc-Einsätze ist das Verfahren (noch) nicht geeignet.

## 10. Ausblick

Der grosse Vorteil des TOFD-Systems ist die Möglichkeit, die Prüfungsergebnisse dauerhaft zu speichern und zu visualisieren, ohne dafür auf die in alpinem Gelände nur unter erheblichem Aufwand einsetzbare Durchstrahlungstechnik zurückgreifen zu müssen. Gerade bei kleineren Projekten in unzugänglichen Gebieten könnte sich das als entscheidender Grund für den in Zukunft verstärkten Einsatz des TOFD-Verfahrens erweisen.

## Literatur

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2003). SIA 261: Einwirkungen auf Tragwerke.
- [2] Fassel, C. (1998). Non destructive testing of the Cleuson-Dixence Shaft. Conference on High Strength Steel for Hydropower Plants. Takasaki 20.-22.07.2009.
- [3] Verkooijen, J. (1998). The Need for Reliable NDT Measurements in Plant Management Systems. 7th European Conference on Non-destructive Testing. Kopenhagen 26.-29.05.1998
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2010). DIN EN ISO 17635 Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe.
- [5] Comité Européen de la Chaudronnerie et de la Tôlerie (1984). Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydro electric installations.

## Anschrift des Verfassers

Andreas Panenka, AF-Consult Switzerland AG,  
Täfernstrasse 26, CH-5405 Dättwil/Baden