



09/06/2009 08:30

Blick in den Fernwärmedüker

Undichte Muffen im Großprofil

Ermittlung der Schadensursachen für Undichtigkeiten in einem Fernwärmedüker, DN 3000 und Erstellung eines Sanierungskonzeptes.

**VON DIPL.-ING. CHRISTIAN PASCHEN, INGENIEURBÜRO HENSCHEL, HATTINGEN UND
DIPL.-ING. STEFAN MARKS, ZERNA INGENIEURE, KÖLN**

Die Steag Fernwärme GmbH betreibt seit etwa 25 Jahren Fernwärmeleitungen, die im Schutze eines Dükers aus Stahlbetonrohren den Rhein-Herne-Kanal in Gelsenkirchen kreuzen. Seit Fertigstellung der im Rohrvortrieb hergestellten Dükerleitung ist es immer wieder zu Undichtigkeiten in den Rohrmuffen gekommen. Im Jahr 2009 wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Ermittlung der Schadensursachen aufgestellt und abgearbeitet.

Veranlassung

Im Zuge des Baus der Fernwärmeschiene Ruhr-Ost wurde im Jahr 1986 der Rhein-Herne-Kanal unterirdisch mittels Rohrvortrieb unterfahren. Die so hergestellte Dükerleitung zur Aufnahme der Fernwärmeleitungen weist seitdem zahlreiche Undichtigkeiten auf, wobei insbesondere im Fugenbereich zwischen den Rohrsegmenten Wasser eingedrungen ist.

Die Abdichtungskonstruktion der Fugen wurde während der Bauausführung und Gewährleistungsphase mehrfach überarbeitet und repariert. Nach rückblickender Beurteilung waren diese Abdichtungsmaßnahmen nicht erfolgreich bzw. nicht dauerhaft erfolgreich. Nach wie vor kommt es zu weiteren Undichtigkeiten, die in den Muffenbereichen durch Inaugenscheinnahme zu erkennen sind.

Im Sommer 2009 wurde das Ingenieurbüro Henschel, Hattingen, beauftragt, eine Untersuchung und gutachterliche Bewertung der Schäden und möglicher Schadensursachen vorzunehmen. Darüber hinaus sollten Empfehlungen für eine dauerhafte Abdichtung der schadhafte Rohrmuffen gegeben werden.

Bauwerksbeschreibung

Der Düker wurde auf einer Länge von ca. 260 m mit Vortriebsrohren aus Stahlbeton, DN 3000,



Bild 7: Nicht alltägliche Vermessungsarbeiten unter erschwerten Bedingungen



Bild 8: Grundwasserentnahme durch einen Mitarbeiter der Steag Fernwärme GmbH

Recherchen zur Herstellungsphase

Zur Analyse der Bauausführung stellte der AG alle noch vorhandenen Planungsunterlagen und Bauakten zur Verfügung. Die Sichtung dieser Unterlagen gab Einblick in die Planung und Bauausführung der Vortriebsstrecke. Insbesondere dem Schriftverkehr zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer war zu entnehmen, dass es während der Bauausführung zu unterschiedlichen Problemen kam: Ausfall der Hydraulikanlage, Steuer- und Anfahrprobleme nach Stillstand der Vortriebsmaschine, ungeeignete Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit und mangelnder Arbeitsraum zwischen den gestoßenen Fugenbändern benachbarter Rohre) für die Ausführung der Schweißarbeiten an den Fugenbändern.

Vermessung

Durch ein Vermessungsbüro wurde im Dezember 2009 (Vollastperiode), im August 2010 (Teillastperiode) und im Januar 2011 (Vollastperiode) je eine lage- und höhenmäßige Bestandsvermessung der Dükerleitung durchgeführt, um den Einfluss der unterschiedlichen Betriebszustände auf die Lage bzw. Lageänderung der Dükerleitung ermitteln zu können.

Dazu wurden im Vorlauf der ersten Vermessung Messmarken in den Viertelspunkten (Kämpfer, Sohle und Scheitel) eines jeden Vortriebsrohres (Muffen- und Spitzende) befestigt. Diese wurden dann im Rahmen der dreimaligen Bestandsvermessungen höhen- und lagemäßig erfasst um die Lage bzw. Lageänderung des Rohrstranges im Raum und die Lageabweichung der Muffen untereinander (vertikale, horizontale und axiale Lageabweichung) ermitteln und darstellen zu können.

Ein weiterer Untersuchungsschritt sah vor, dass in der Leitungszone anstehende Grundwasser zu entnehmen und auf beton-, stahl- und kunststoffangreifende Bestandteile hin zu untersuchen. Die Analyseergebnisse sollten sowohl Hinweise auf mögliche Schädigungen der vorhandenen Bauteile geben, als auch in die Auswahl geeigneter Sanierungskonstruktionen einfließen.

Für die Grundwasserentnahme wurden im Dezember 2009 an den vorhandenen Bentonit-Injektionsöffnungen der Vortriebsrohre Entnahmehähne montiert um eine einfach handhabbare und dauerhafte Probenahme zu ermöglichen.

Die Grundwasserproben wurden gemäß DIN 4030, „Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase“ und gemäß DIN 50929, „Korrosion der Metalle; Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung“, auf Beton- und Stahlaggressivität untersucht. Zusätzlich wurden die Proben mit Hilfe einer Gaschromatografie und Massenspektrometrie untersucht, um gegebenenfalls unbekannte organische Verbindungen zu identifizieren.

Numerische Simulation

Durch die Zerna Ingenieure GmbH, Köln, wurde unter Anwendung der Methode der Finiten Elemente in numerischen Simulationen der Bauzustand des Rohrvortriebs sowie der Betriebszustand der Dükerleitung untersucht. Zur Bewertung der Schadenssituation des Fernwärmedükers wurden die numerischen Untersuchungen an einem dreidimensionalen Finite-Elemente-Modell eines Vortriebsrohres (einschl. angrenzender Druckübertragungsringe) durchgeführt.

Ziel war es, die Auswirkungen aus Bau- und Betriebszustand auf die Vortriebsrohre und insbesondere die Stoß- bzw. Muffenbereiche der Stahlbetonrohre zu ermitteln.

Untersuchungsergebnisse

Vermessung

Grundsätzlich ist bei der Interpretation der Vermessungsergebnisse zu berücksichtigen, dass sie lediglich einen kleinen zeitlichen Ausschnitt der bisherigen „Lebensdauer“ der Dükerleitung abbilden. Erschwerend kommt hinzu, dass der „vermessungstechnische Nullpunkt“, die rechnerische Ausgangslage nach Abschluss der Vortriebsarbeiten, aufgrund mangelnder Bauakten unbekannt ist. Insofern können zurückliegende Einflüsse auf die Lage der Dükerleitung, z.B. unplanmäßige Kurvenfahrten, Temperaturbeaufschlagung nach Inbetriebnahme als Fernwärme-Dükerleitung und die „abklingenden“ Bergsenkungen des Steinkohlebergbaus nur abgeschätzt aber nicht quantifiziert werden.

Die Auswertung der Vermessungsergebnisse lässt den Schluss zu, dass es zwischen einzelnen Belastungsperioden (von Volllast- zur Teillastperiode und von Teillast- zur Volllastperiode) des Beobachtungszeitraums zu Lageänderungen (vertikale, horizontale und axiale Lageabweichung) der einzelnen Vortriebsrohre und zu Lageänderungen zwischen den Rohren gekommen ist. In einzelnen Rohrmuffen wurden Lageabweichungen bis zu 1,7 cm ermittelt. Darüber hinaus konnten Lageänderungen der Rohre zwischen zwei Vermessungszeitpunkten und eine anschließende teilweise Rückstellung der Rohrlagen bis zum nächsten Vermessungszeitpunkt ermittelt werden. Es ist somit zusätzlich von einer temperaturabhängigen

Bewegung des Rohrstrangs über die Zeit auszugehen.

Desweiteren konnte gezeigt werden, dass die ermittelten Verschiebungen und Abwinkelungen der Rohre untereinander als „teilweise reversibel“ zu bezeichnen sind: Beim Wechsel von der Teillastperiode 2010 (Messung 08/2010) zur Vollastperiode 2011 (Messung 01/2011) konnte eine Rückstellbewegung der einzelnen Rohre bzw. des Rohrstranges festgestellt werden, wobei aber die messtechnische Ausgangslage (Messkampagne 2009) der im Rohrstrang fixierten Messpunkte nicht wieder erreicht wurde.

Diese nicht vollständige Rückstellung der Dükerleitung lässt den Schluss zu, dass neben den Temperaturlastwechseln zwischen Voll- und Teillastperiode weitere äußere Krafteinwirkungen vorhanden sein müssen. Ob es sich dabei zum Beispiel um die abklingenden Bergsenkungen des ehemaligen Steinkohlebergbaus handelt, kann nur im Rahmen weiterer, einen längeren Beobachtungszeitraum abdeckender Messkampagnen ermittelt werden.

Grundwasserbeprobung

In den entnommenen Grundwasserproben konnte keine Beton-, Stahl- und/oder Kunststoffaggressivität nachgewiesen werden. Auch die gaschromatografischen und die massenspektrometrischen Analysen lieferten keine zusätzlichen Anhalts- oder Verdachtsgründe für chemische Schädigungsmechanismen.

Numerische Simulation

Die numerische Simulation von Spannungsverteilungen in den Rohrendquerschnitten mittels Finite-Elemente-Modell umfasste den Zustand der planmäßigen (Solllage) Bauausführung, den Bauzustand der unplanmäßigen Kurvenfahrten (Rohrabwinkelungen bzw. -schiefstellungen) und den Betriebszustand zwischen Temperaturlastwechseln.

Zunächst wurde der Bauzustand untersucht,

da bereits unmittelbar nach Fertigstellung des Vortriebes die ersten Schäden an den Rohren und Muffen dokumentiert worden sind.

Ursprünglich war ein geradliniger Vortrieb geplant. Doch zeigen die dokumentierten Schwierigkeiten beim Rohrvortrieb sowie die vorhandene Kurve des Dükers, dass unplanmäßige Radien aufgefahren wurden. Die Kurvenfahrten haben die Rohre in ungeplanter Weise belastet, da die Steuerbewegungen des Vortriebes zu sehr hohen Belastungen in den Rohrstirnflächen führten. Mit der numerischen Simulation des Bauzustandes sollten daher die Auswirkungen der ungeplanten Kurvenfahrt untersucht werden. Im Blickpunkt stand die Spannungsentwicklung im Fugenbereich der Rohre unter maximaler planmäßiger Vortriebskraft bei gleichzeitiger Variation des Fugenklaffungsmaßes z/da , welches die gegenseitige Schiefstellung der Rohre beschreibt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die numerische Simulation des Bauzustandes ein Überschreiten der zulässigen Betondruckspannungen gezeigt werden konnte. Die Spannungskonzentrationen treten insbesondere im Bereich des Falzes der Ringdichtung auf, da sich der Betonquerschnitt des Vortriebsrohres an dieser Stelle am stärksten verjüngt. Es kommt zu einer Rissbildung im Beton, die zu einer Umläufigkeit des Dichtungsringes führen kann.

Die ungeplante Kurvenfahrt des Vortriebs führte wahrscheinlich zu einer Schädigung der äußeren Dichtung in Form eines elastischen Dichtungsringes. Von der Schädigung sind möglicherweise beide Kämpferseiten betroffen, da bei der aufgefahrenen S-Kurve Steuerbewegungen in beide Richtungen erforderlich waren.

Die im Rahmen der Vermessung festgestellten Lageabweichungen und räumlichen Schiefstellungen der Rohre untereinander wurden ebenfalls hinsichtlich der Spannungsentwicklung

in den Rohrenden untersucht. So errechnete sich auf Grundlage der Vermessung zum Beispiel die maximale Veränderung der gegenseitigen räumlichen Schiefstellung zwischen zwei benachbarten Rohren zu etwa $0,19^\circ$. Innerhalb des Modells aus Finiten Elementen (FE) wurden unterschiedlich große Schiefstellungen als entsprechende Zwängungen einzelner Rohre abgebildet. Dabei zeigte sich, dass bereits bei ca. einem Zehntel der o.g. Schiefstellung $\frac{3}{4}$ der zulässigen Betondruckspannungen erreicht werden und das FE-Modell bei einer weiteren Steigerung der Schiefstellung (Zwängung) versagt.

Ohne weiteren rechnerischen Nachweis lässt sich somit auf eine Betonschädigung der Muffenkonstruktion lange vor Erreichen der maximalen Rohrabwinkelung schließen. Anders formuliert kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der unplanmäßigen Kurvenfahrten und starken Auslenkungen des Rohrstranges während des Vortriebs bereits die zulässigen Betondruckspannungen überschritten bzw. die Rohre geschädigt worden sind.

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Untersuchungen lassen sich für die festgestellten Undichtigkeiten der Rohrmuffen zwei wesentliche Ursachen bzw. Schadensmechanismen herleiten:

- Entgegen der ursprünglichen Ausführungsplanung, die einen werkseitigen Einbau der innen liegenden Muffendichtungen während der Rohrherstellung vorsah, wurden die verwendeten Fugenbänder erst nach dem Ausschalen der Stahlbeton-Vortriebsrohre eingebaut. Hierzu diente eine in der jeweiligen Rohrstirnfläche umlaufende Nut, die bei der Herstellung der Rohre schalungstechnisch realisiert wurde. Die Fugenbänder wurden in diese Nut eingebracht und anschließend die verbleibenden Hohlräume mit Vergussmörtel geschlossen. Aufgrund dieses nicht-molithischen Aufbaus des aufgelösten Querschnitts am Rohrende kann eine Umläufig-

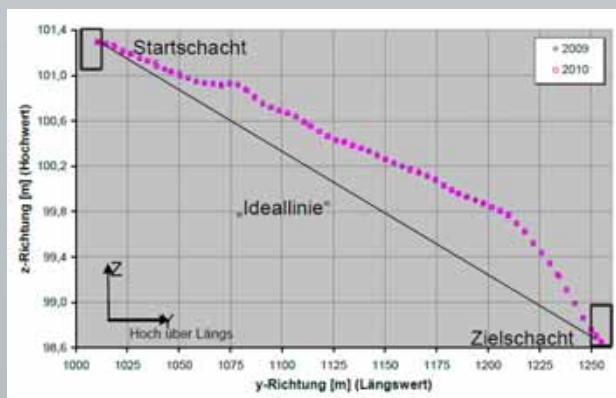


Bild 9: Vertikale Abweichung des Dükers von der geplanten Trasse

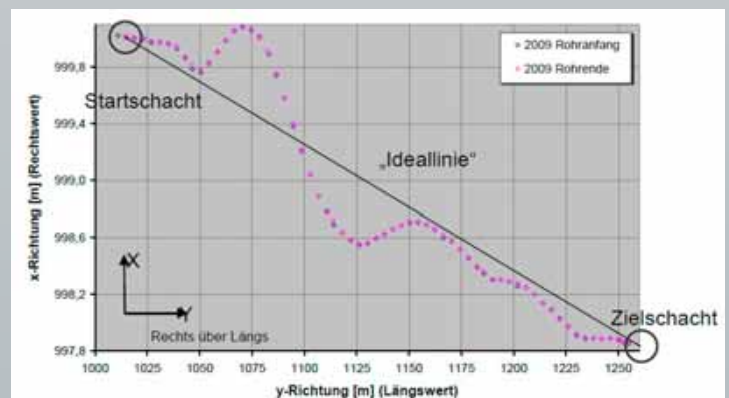


Bild 10: Horizontale Abweichung des Dükers von der geplanten Trasse

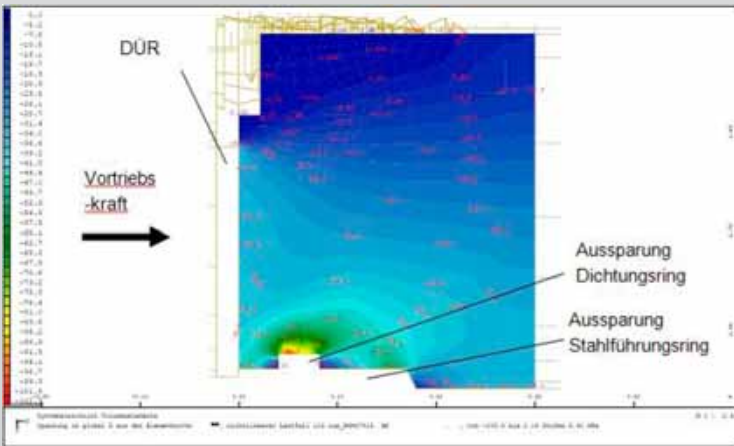


Bild 11: Spannungen im Rohrspitzende für $z/d_a = 0,50$, während der Rohrvortriebs

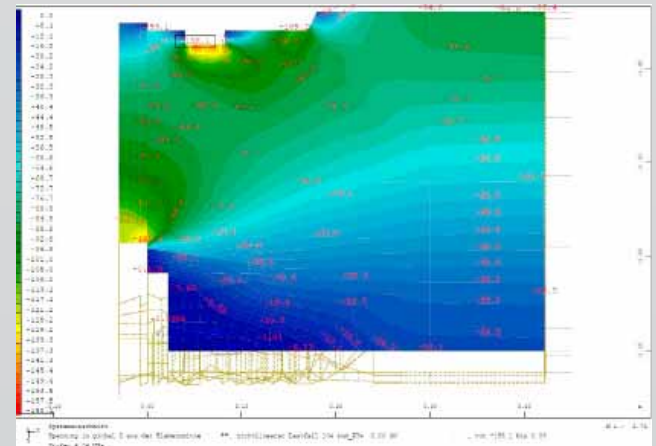


Bild 12: Spannungen im Rohrspitzende, Betriebszustand (resultierend aus der Lageänderung/Zwängung)

keit des vergossenen Dichtelements – und damit eine Undichtigkeit - nicht ausgeschlossen werden.

- Die in den Bauakten der Vortriebsarbeiten dokumentierten Ausfälle der Hydraulikanlage machten mehrmals aufwändige Reparaturen erforderlich und führten zu mehrtägigen Unterbrechungen des Rohrvortriebs. Es ist davon auszugehen, dass beim anschließenden, mehrmaligen Wiederauffahren des Vortriebs relativ hohe Vortriebskräfte erforderlich wurden, um die Mantelreibung zwischen Boden und Rohraußenseite zu überwinden. Des Weiteren kam es während des Vortriebs zu unplanmäßigen Kurvenfahrten und relativ starken Abweichungen von der Sollachse. Zur Korrektur wurden entsprechende Gegensteuerbewegungen eingeleitet, um zum Abschluss des Vortriebs die vorgegebene Zielhöhe und -lage erreichen zu können. Es ist davon auszugehen, dass sowohl die unplanmäßigen Kurvenfahrten und Gegensteuerbewegungen sowie die vermutlich erhöhten Vortriebskräfte beim Wiederauffahren des Rohrstrangs zu Überschreitungen der zulässigen Druckspannungen in den Rohrenden führten.

Sanierungskonzept

Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse, den angestellten Schlussfolgerungen und unter Berücksichtigung der Maßgaben des Auftraggebers wurden die unterschiedlichsten Sanierungsverfahren und Sanierungsmaterialien hinsichtlich ihrer Eignung untersucht und bewertet. Dabei waren, neben zahlreichen anderen baulichen und betrieblichen Randbedingungen, folgende drei maßgebliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Eine zeitweilige Außerbetriebnahme oder gar Demontage der Fernwärmeleitungen zum Zwecke der Dükersanierung ist grundsätzlich nicht möglich. Der Einbau eines Abdichtungssystems für undichte Rohrmuffen muss daher unter beengten Platzverhältnissen möglich sein.
- Das Abdichtungssystem für undichte Rohrmuffen muss mindestens die aus den Vermessungsergebnissen rechnerisch ermittelten „Rohr-Bewegungen“ (Lageabweichungen und Schiefstellungen) aufnehmen können.
- Das Abdichtungssystem für undichte Rohrmuffen muss hinsichtlich Herstellung und

Dauerhaftigkeit für die gegebenen Temperaturbedingungen geeignet sein.

Für eine nachhaltige und damit langlebige Abdichtung der schadhaften Muffenbereiche der Stahlbetonrohre kamen daher lediglich zwei Verfahrensarten in Betracht:

- Die Injektion (Packerinjektion) von Kunstharz in die undichten Rohrmuffen der Dükerleitung und das um die Rohrleitung anstehende Bodenmaterial. Dichtwirkung durch dauerelastisches Verschließen der Beton-Risse und Manschettenwirkung auf der Rohraußenseite.
- Der Einbau von Innenmanschetten bestehend aus Stahlspannringen und Dichtprofilen, die den schadhaften Muffenbereich benachbarter Rohre vollständig überdecken und somit ein vollständig neues, innen liegendes Dichtsystem darstellen.

Dem AG wurde vorgeschlagen, beide Möglichkeiten der Schadensbehebung im Rahmen von „Testbaustellen“ ausführen zu lassen, um mögliche Systemvergleiche hinsichtlich Handhabbarkeit, Dauerhaftigkeit, Arbeitsaufwand, Kosten, u.a. anstellen zu können. ■

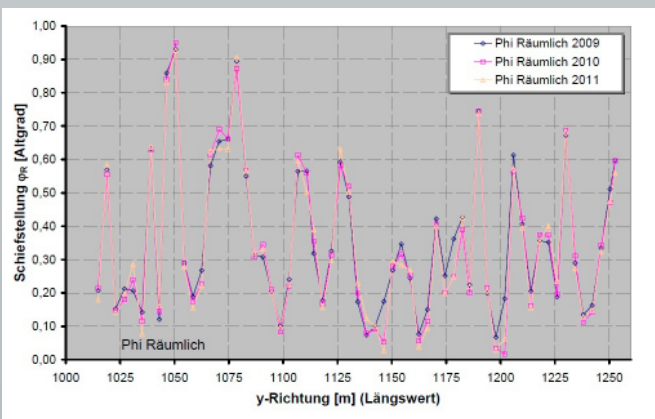


Bild 13: Räumliche Schiefstellung der Rohre untereinander

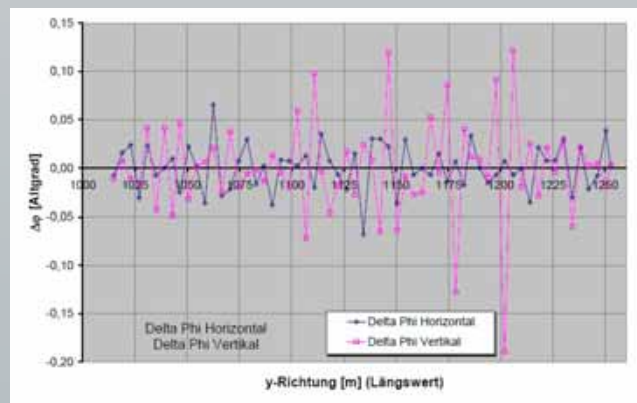


Bild 14: Schiefstellung der Rohre untereinander in der horizontalen- und vertikalen Ebene