Der Scout-Pig, ein intelligentes Molchsystem zum kontinuierlichen Aufmaß von Rohrleitungen

The scout-pig, an intelligent in-pipe crawler system for continuous surveillance of pipes

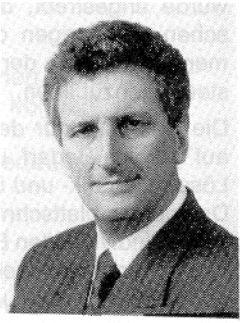
M. Veenker und J. Himmerich

Zusammenfassung

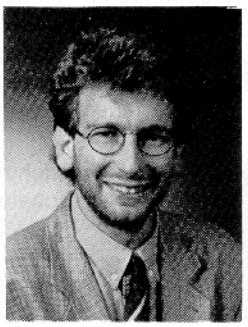
Das Prinzip der Trägheitsnavigation, das aus dem Flugwesen bekannt ist, wurde praktisch und theoretisch so weiter entwickelt, daß es bei der Vermessung von erdverlegten Leitungen mit Hilfe des intelligenten Molches „Scout-Pig" eingesetzt werden kann. Der Molch ist als autonome Einheit mit Meßkreiseln, Elektronik und Energieversorgung versehen und durchfährt eine Leitung mit dem Produktenstrom. Die Einsatzmöglichkeiten zur Leitungsvermessung, die entweder Einfluß in Rohrbücher oder Bestandspläne findet oder Grundlage einer Spannungsanalyse ist, werden dargestellt.

Summary

The principle of inertial navigation, familiar from aviation, has been practically and theoretically refined in such a way that it can now be used for surveying of sub-grade pipes using an intelligent „scout-pig" crawler machine. This pig takes the form of an autonomous unit, complete with measuring gyroscopes, electronic systems and energy supply, and passes through a pipe with the product flow. The potentials for use for piping surveying, which is either used for piping records or inventory schedules, or forms the basis for a stress analysis, are shown.



Dr.-Ing. Manfred Veenker
* 7. Mai 1947 in Meppen
Ingenieurbüro Dr. Veenker, Hannover; Tel. (05 11) 28 10 41. — Planung, Beratung und Berechnung auf den Gebieten Rohrleitungs- und Anlagenbau, Bauwesen und Maschinenbau. — Vereidigter Sachverständiger für Statik im Ingenieurbau.



Dipl.-Ing. Jörg Himmerich
* 11. Februar 1968 in Aachen
Ingenieurbüro Dr. Veenker, Hannover; Tel. (05 11) 28 10 41. — Tätigkeitsbereich EDV-Systeme, Ortung, Aufmaß und Bewertung von Rohrleitungen.

Einleitung

Erdverlegte Rohrleitungen oder Rohrleitungen im Offshore-Bereich entziehen sich einer geschlossenen Aufnahme ihrer Lage, da entweder das Einmessen mit großen Kosten verbunden ist (Aufgrabungen) oder andere Ortungsverfahren (Bodenradar o. ä.) zu ungenau sind. Es wurde deshalb ein Vermessungsmolch gebaut, der beim Durchfahren der Leitungen mit Hilfe von Trägheitskreiselsystemen und Wegmeßrädern eine genaue Aufnahme der räumlichen Leitungslage ermöglicht. Die so gewonnenen Daten können in das örtliche Vermessungsnetz transformiert werden und liefern einen Lageplan, der direkt als Grundlage des Bestandsplanes übernommen werden kann. Bei Wiederholung der Vermessung können Lageveränderungen aufgenommen werden, und die daraus resultierenden Krümmungsänderungen liefern direkt die Biegespannungen, die das Leitungssystem aus der Lageveränderung erfahren hat. Anhand von durchgeführten Projekten werden Arbeitsweise des Molches, Genauigkeit, Auswertung der Daten und Berechnungsgrundlagen für die Überwachung von Leitungen aufgezeigt.

Der Vermessungsmolch Scout-Pig

Der Scout-Pig ist ein Molch, der speziell für den Einsatz in der Leitungsvermessung entwickelt worden ist. Mit dem Scout-Pig können zwei Aufgabengebiete abgedeckt werden:

— die Lokalisierung einer Leitung, also die Aufnahme ihrer geodätischen Koordinaten, und
— die Aufnahme von Leitungsverformungen, aus denen die mechanische Beanspruchung des Rohres ermittelt werden kann (Spannungsanalyse).

Beschreibung des Vermessungsmolchs

Der Molch besteht aus zwei zylindrischen Körpern, die durch ein Kreuzgelenk miteinander verbunden sind (Bild 1). Auf den beiden Molchkörpern sitzen Kunststoffmanschetten, die den Molch in der Leitung zentrieren. Dank des zweiteiligen Aufbaus kann das Gerät gekrümmte Rohre ab einem Biegeradius von 3*D* durchfahren. Bei Leitungen mit mehr als 28'' Durchmesser wird nur ein großer Molchkörper verwendet, der beide Module des zweiteiligen Molches enthält. Der Molchkörper ist druckdicht, so daß er in Öl- und Gasleitungen beim üblichen Betriebsdruck eingesetzt werden kann. Zur Zeit ist der Molch in Leitungen von 8 bis 40 Zoll einsetzbar. Für Durchmesser im Zwischenbereich stehen verschieden große Molchkörper zur Verfügung, die dem vorhandenen Leitungsdurchmesser individuell mit den entsprechenden Manschetten angepaßt werden können.

An der Molchspitze befindet sich die gekapselte Antenne für ein System zur Ortung des Molches im Feld. Der vordere Molchkörper enthält die Akkus für die Stromversorgung und die Elektronik des Antennensystems. Mit dem Antennensystem können sowohl Signale von außen empfangen werden, als auch Signale gesendet werden. Im hinteren Molchkörper sind die Kreisel und die Elektronik zur Meßwertaufnahme und Meßwertspeicherung untergebracht. Die Kreisel sind so angeordnet, daß ihre Achsen im Raum rechtwinklig zueinander ausgerichtet sind. Dabei stimmt eine Achse mit der Molchlängsachse überein. Aus dem hinteren Molchkör-

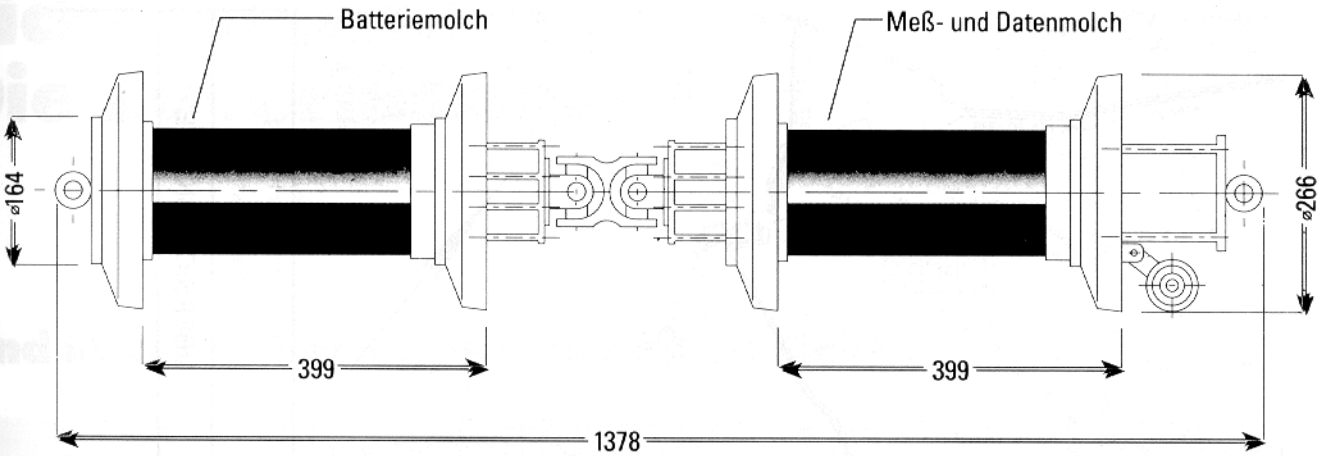


Bild 1: Längsschnitt durch den Meßmolch für eine Leitung DN 300 (10 3/4")
Fig. 1: Longitudinal section through a pig for a DIN 300 pipe (10 3/4")

per ragen zwei Räder heraus, die mit Federkraft gegen die Innenwand des Rohres gedrückt werden. Diese Räder messen die zurückgelegte Wegstrecke.

Die Arbeitsweise

Der Molch benutzt zum Aufnehmen der Winkeländerung schnell rotierende Kreisel, wobei das Prinzip der Trägheitsnavigation [1] verwendet wird. Zur Messung des zurückgelegten Weges werden die Umdrehungen der Meßräder gezählt. Die Meßwerte der Winkeländerung und der Wegzunahme werden in einem festen Zeittakt von 0,1 s abgespeichert. Während der Meßfahrt arbeitet der Molch ohne Verbindung mit der Außenwelt.

Die mit Hilfe der Kreisel gewonnenen Rohdaten müssen auf jeden Fall bezüglich diverser Einflüsse korrigiert werden:

— Die erste Korrektur wird notwendig, weil die Messung auf der sich drehenden Erde vorgenommen wird. Die Kreisel messen jedoch immer die Winkeländerung gegenüber einem im Raum feststehenden Koordinatensystem; dabei ist „Raum" mit „Weltraum" gleichzusetzen.
— Eine zweite Korrektur wird notwendig, weil die Meßfahrt über die gekrümmte Erdoberfläche führt; die Kartierung erfolgt dagegen in einem ebenen System. Schon bei einer kleinen Leitungslänge von nur 30 km beträgt der Höhenunterschied zwischen dem Bogen auf der gekrümmten Erdoberfläche und der Sehne, die letztendlich kartiert wird, im Scheitel 80 m.

Die Einflüsse der Erddrehung und der Erdkrümmung auf die Meßdaten werden im Anschluß an die Meßfahrt während der Datenauswertung eliminiert. Dabei werden Verfahren angewandt, die für die Trägheitsnavigation von Flugzeugen entwickelt worden sind.

Eine bekannte, aber unerwünschte Eigenschaft eines Kreisels ist seine Drift: Ein nicht bewegter Kreisel zeigt einen mit der Zeit anwachsenden scheinbaren Drehwinkel, den Driftwinkel, an. Dieser Driftfehler kann weitgehend dadurch ausgeschaltet werden, daß vor und nach dem Molchen die Drift der Kreisel gemessen und die Meßdaten bei der Auswertung entsprechend korrigiert werden.

Ablauf einer Molchung

Um Meßfehler infolge der Warmlaufphase der Kreisel ausschließen zu können, wird das System mindestens zwei Stunden vor Beginn der eigentlichen Meßfahrt in Betrieb gesetzt. Nach dem Einbau des Molches in die Startschleuse wird bei unbewegtem Molch eine etwa 30 min dauernde Driftmessung durchgeführt. Eine weitere Driftmessung ist nach der Meßfahrt, während der Molch in der Empfangsschleuse liegt, notwendig. Jeweils zu Beginn und zu Ende einer Driftmessung erhält der Molch über Funk von einem tragbaren Sender ein Markersignal, das im Molch mit aufgezeichnet wird. Mit Hilfe dieser Signale können während der Datenauswertung die Driftmessungen leichter wiedergefunden werden. Falls für einzelne Punkte im Verlauf der Leitung die Koordinaten bekannt sind oder bestimmt werden können, kann auch an diesen Stellen ein Markersender aufgestellt werden. Bei der Auswertung der Meßdaten sind dadurch Stützstellen für die Fehlerrechnung gegeben, die die Genauigkeit der Datenauswertung steigern können.

Während der Fahrt sendet auch der Molch selbst Funksignale aus. Mit einem Empfänger, der auf diese Signale reagiert, wird zum Beispiel die Ankunft des Molchs am Leitungsende angekündigt. Man kann dann den Druck in der Leitung und dadurch die Geschwindigkeit des Molchs rechtzeitig herunterregeln.

Nach der Driftmessung in der Empfangsschleuse wird der Molch aus der Leitung gezogen und die gespeicherten Meßdaten werden noch vor Ort in einen handelsüblichen Laptop-PC übertragen. Schon auf diesem PC kann die Datenauswertung durchgeführt werden. Als Vorarbeit werden anhand der aufgezeichneten Markersignale die Driftmessungen herausgesucht und gesondert ausgewertet. Die dabei berechneten aktuellen Driftwinkel der Kreisel sind Hilfswerte für die Auswertung der eigentlichen Molchfahrt.

In einem ersten Schritt der Auswertung werden die oben beschriebenen Korrekturen an den Rohdaten angebracht, und die Meßdaten werden in Koordinaten eines räumlichen Koordinatensystems umgewandelt. Nach kurzer Berechnungszeit können der Leitungsgrundriß und die Höhenangaben über die Leitungslänge auf dem Bildschirm des Laptops dargestellt werden.

In einem zweiten Schritt der Auswertung wird die Fehlerrechnung der Vermessungstechnik, die bekannte Helmert-Transformation, eingesetzt. Um die Genauigkeit zu steigern, sollten in regelmäßigen Abständen Festpunkte entlang der Leitung bekannt sein. Dabei werden an die Meßgenauigkeit, die mit der Zahl der vorhandenen Festpunkte wächst, der jeweiligen Meßaufgabe entsprechend unterschiedliche Anforderungen gestellt:

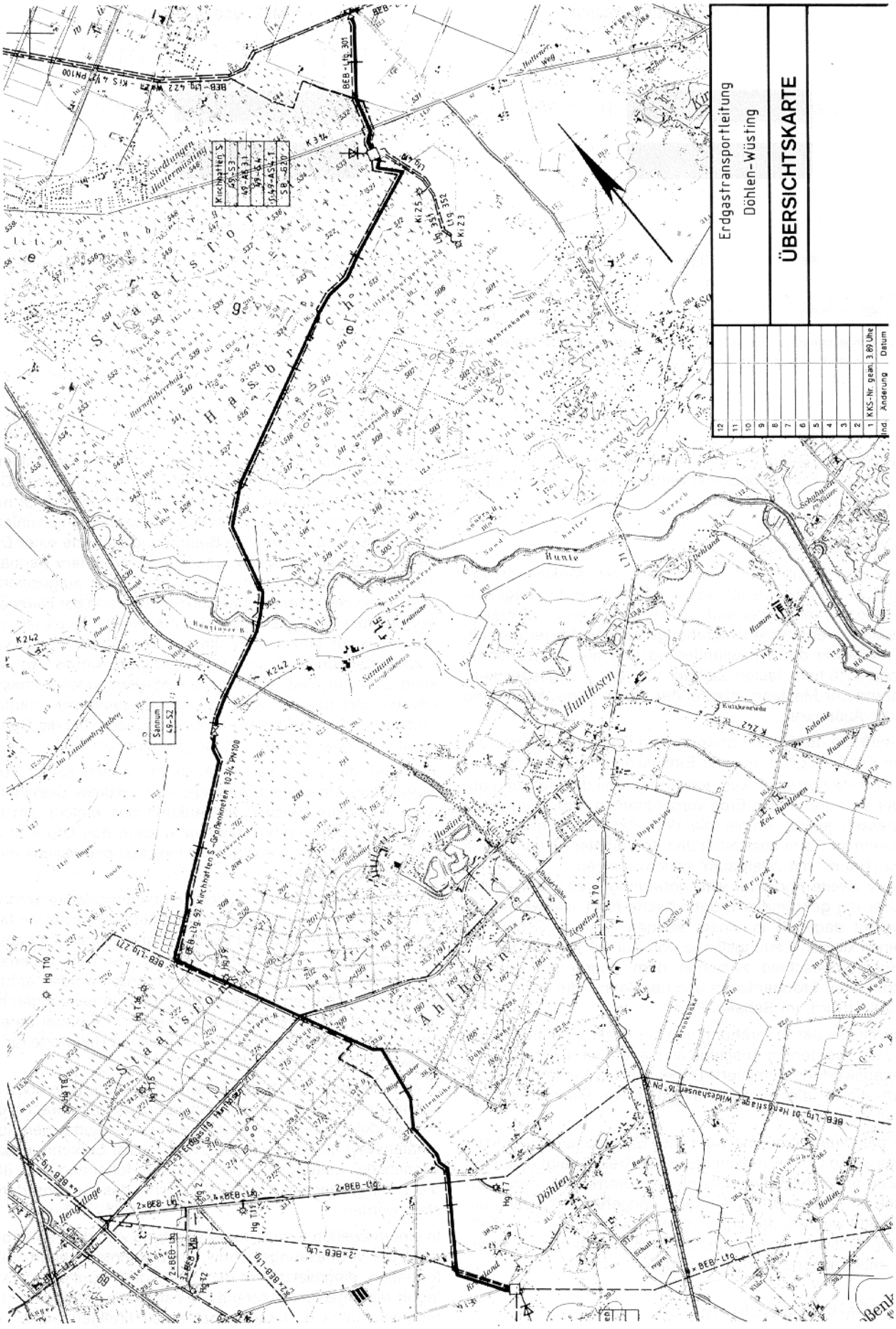


Bild 2: Grundriß aus vorhandenen Bestandsplänen
Fig. 2: Plan view from existing inventory schedules

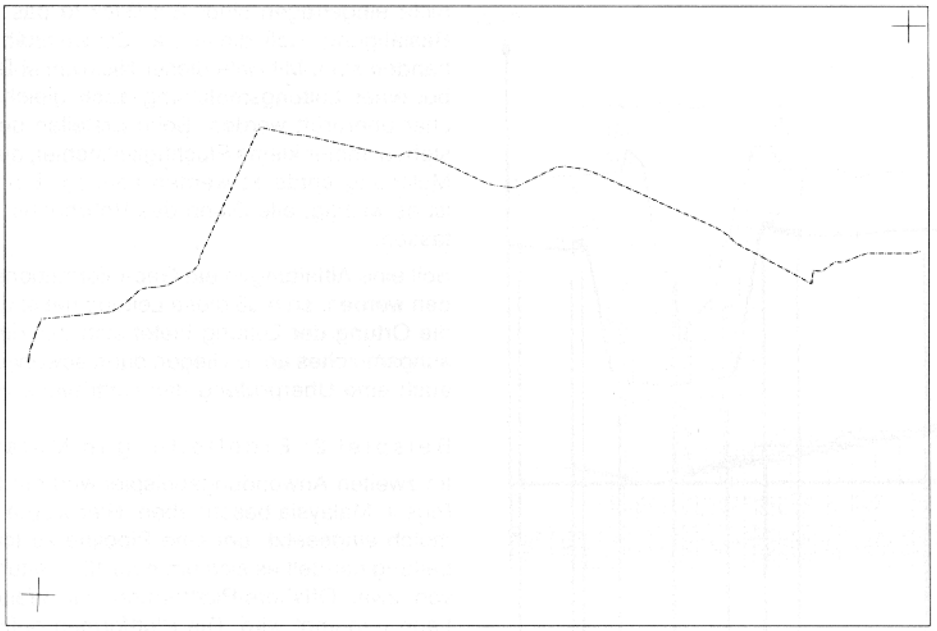


Bild 3: Grundriß-Plot als Ergebnis der Molchung
Fig. 3: Plan view plot as a result of pig surveying

— Geht es bei der Leitungsvermessung um ein Auffinden der Leitung im Offshore-Bereich, unter Packeis, in der Wüste usw., so kann die Genauigkeit nur im Meter-Bereich gehalten werden, da in einem solchen Fall meist nur wenig Festpunkte bekannt sind. Diese relativ große Ungenauigkeit kann jedoch in den genannten Bereichen im allgemeinen toleriert werden.
— Beim Einmessen einer Leitung zur Anlage oder Überprüfung von Bestandsplänen müssen Genauigkeitsanforderungen im Dezimeter-Bereich gestellt werden. Bei einer solchen Aufgabe kann allerdings auch davon ausgegangen werden, daß eine Vielzahl von Festpunkten bzw. TS-Punkten bekannt sind.
— Bei einer Leitungsüberwachung in setzungsgefährdeten Zonen (zum Beispiel Straßenkreuzungen, nicht tragfähige Böden, Dükervermessung usw.) muß mit einer Genauigkeitsanforderung im Zentimeter-Bereich gearbeitet werden. Bei solchen Aufgaben liegen Festpunkte im Abstand von weniger als hundert Meter vor, und die hohe Nahbereichsgenauigkeit des Vermessungssystems liefert die geforderte Genauigkeit problemlos.

Das Endergebnis ist eine Kartierung der Leitung, die zum Beispiel im Gauß-Krüger-Koordinatensystem erfolgen kann. Die so ermittelte Leitungslage kann direkt in die Bestandsdokumentation übernommen werden.

Anwendungsbeispiele

Beispiel 1: Gasleitung in Norddeutschland

Der Molch wurde durch eine 12 km lange Erdgasfernleitung geschickt, um Daten für eine Neukartierung der Leitung zu gewinnen. Das Ergebnis der Molchdatenauswertung wurde mit den Bestandsplänen (Bild 2) verglichen, die mit konventionellen Methoden aufgenommen waren. Für die Auswertung der Molchung waren der Start- und Endpunkt der Leitung sowie drei weitere Punkte im Verlauf der Leitung bekannt. Bild 3 zeigt die Auswertung der Molchdaten, und zwar unter Berücksichtigung der Fehlerrechnung der Vermessungstechnik. Rein optisch stimmt der Leitungsverlauf in den beiden Bildern gut überein. Genaueres kann man jedoch ohne einen zahlenmäßigen Vergleich nicht sagen, da allein die Strichbreite des Bestandsplanes im gegebenen Maßstab etwa 20 m ausmacht. Die erreichte Genauigkeit lag in einem Bereich, der der gestellten Aufgabe gerecht wird.

Die Leitung hat einen Düker, der knapp 7 km vom Ausgangspunkt der Leitung entfernt ist. Für diesen Düker wurde ein Aufriß der Leitung detailliert ausgewertet. Hierbei sollten die Höhenangaben der Bestandspläne mit den Ergebnissen der Molchauswertung verglichen werden. Für die so ermittelte Setzung wurde eine Spannungsermittlung durchgeführt.

Bild 4a zeigt als Kopie aus dem Bestandsplan mit 10facher Überhöhung die Abwicklung der Leitung im Aufriß in der näheren Umgebung des Dükers. Für das gleiche Teilstück der Leitung wurde auch der Aufriß anhand der Meßdaten geplottet (Bild 4b). Dabei wurde die Höhenlage des Anfangs- und Endpunktes dieses Teilstücks entsprechend den Bestandsplänen vorgegeben. Falls keine Bestandspläne vorliegen, können ersatzweise die zwei Punkte aufgegraben und höhenmäßig vermessen werden. Anhand der Meßdaten kann die aktuelle Höhenlage beliebiger Zwischenpunkte genau angegeben werden.

Wie in Bild 4a aus den breiten senkrechten Markierungen zu erkennen ist, sind im Bestandsplan auch Schweißnähte eingetragen. Wenn der Molch über eine Schweißnaht hinwegfährt, macht er eine kleine ruckartige Nickbewegung. In einem Diagramm, das den Nickwinkel des Molchs als Funktion der zurückgelegten Strecke darstellt, kann daher die Stelle jeder einzelnen Schweißnaht abgelesen werden. Bild 4c zeigt den Nickwinkel des Molchs im Bereich des Dükers. Das Wegtauchen der Leitung unter etwa 30 ° Neigung kann im Nickwinkel-Diagramm wegen des hier gewählten Maßstabes nicht mehr dargestellt werden. Von Interesse ist aber auch eher der Bereich, in dem die Leitung ungefähr horizontal verläuft und der Nickwinkel um Null Grad herum schwankt. Man erkennt einige Peaks in der Linie, die durch das „Hoppeln" über die Schweißnähte hinweg verursacht sind. Im Vergleich mit Bild 4a erkennt man die gute Übereinstimmung der Lage der Schweißnähte. Links vom Düker findet der Molch noch vier Schweißnähte, die im Bestandsplan

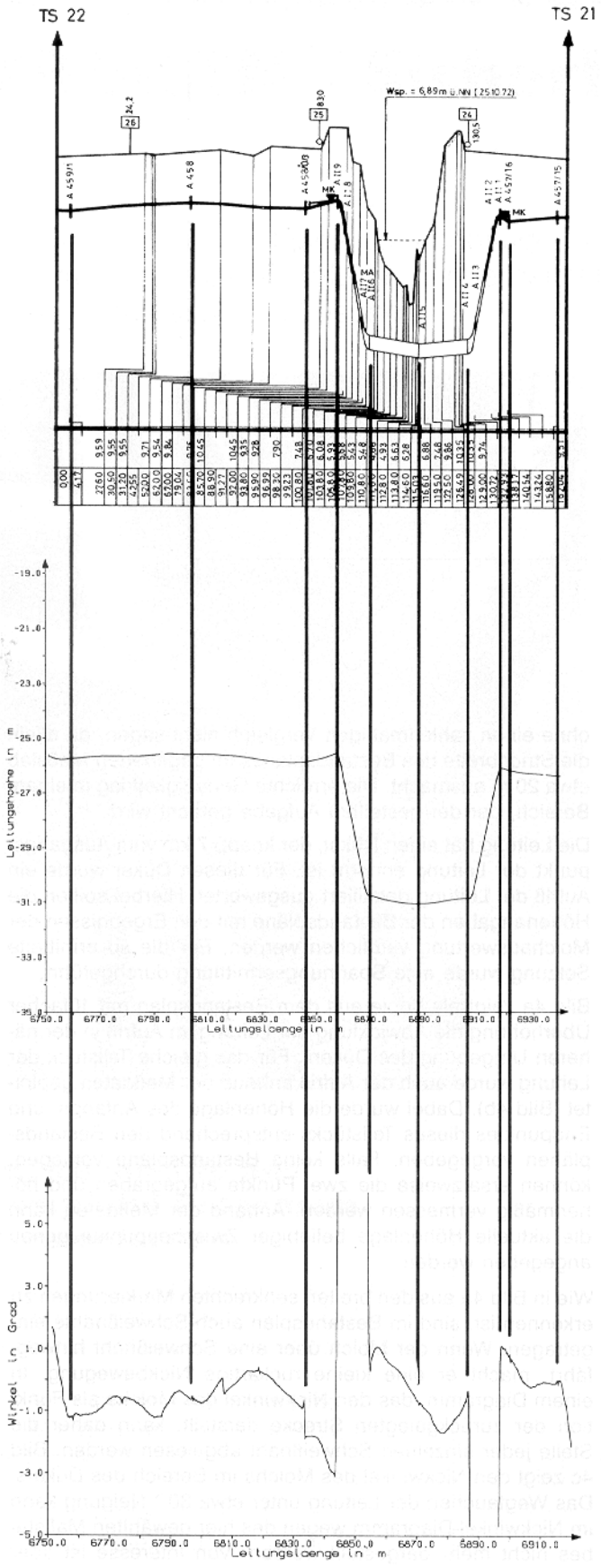


Bild 4: Aufriß der Leitung im Bereich des Dükers
a) Bestandsplan und b) Plot; c) Nickelwinkel-Diagramm

Fig. 4: Elevation of the pipe close to the culvert
a) Inventory schedule and b) Plot; c) Angle of inclination diagram

nicht eingetragen sind. Ein Blick in das Rohrbuch gibt die Bestätigung, daß diese vier Schweißnähte tatsächlich vorhanden sind. Mit Hilfe dieser Nickwinkel-Diagramme können bei einer Leitungsmolchung auch gleichzeitig die Rohrbücher überprüft werden. Beim Erstellen der Rohrbücher entstehen immer kleine Flüchtigkeitsfehler, die bei einer solchen Molchung entdeckt werden können. Beim Leitungsneubau ist es wichtig, alle Daten des Rohrbuchs ohne Fehler zu erfassen.

Soll eine Altleitung in ein Geo-Informationssystem eingebunden werden, so muß diese Leitung meist geortet werden. Für die Ortung der Leitung bietet sich der Einsatz des Vermessungsmolches an. Es liegen dann sowohl die Koordinaten als auch eine Überprüfung des Rohrbuchs vor.

Beispiel 2: Erdölleitung in Malaysia

Im zweiten Anwendungsbeispiel wird ein Einsatz der Scout-Pigs in Malaysia beschrieben. Hier wurde der Vermessungsmolch eingesetzt, um eine Pipeline zu lokalisieren. Bei der Leitung handelt es sich um eine 12''-Leitung, durch die Erdöl von zwei Offshore-Plattformen zur Weiterverarbeitung an Land gepumpt wird. Die Plattformen befinden sich etwa 12 km nördlich der Küste (Bild 5). Neben die bestehenden Plattformen soll eine weitere Plattform gebaut werden. Da die Lage der Leitung nicht genau bekannt ist, will der Betreiber sichergehen, daß die neue Plattform nicht auf die bestehende Leitung abgesetzt wird.

Zum Vermessen der Leitung zwischen der Plattform und der ersten Molchschleuse die unmittelbar an der Küste liegt, wird der Meßmolch eingesetzt. Neben dem Verlauf der ganzen Leitung interessiert dabei besonders der Bereich um die Plattform herum.

Von der Leitung ist nach Aussage des Betreibers nur wenig bekannt. Es liegen weder Angaben über die genaue Länge der Leitung noch konkrete Bestandpläne vor. Die Leitung verläuft etwa 13 km offshore über den Meeresgrund. In diesem Bereich ist die Leitung teilweise im Meeresgrund versandet. Danach verläuft die Pipeline etwa 2 km onshore. Die Leitung unterquert kurz vor der Empfangsschleuse einen Fluß. Ansonsten verläuft die Leitung im Onshore-Bereich über dem Erdboden.

Beim Bau der Pipeline wurde die Leitung am Strand vormontiert und dann mit Schiffen und Schwimmpontons zur Plattform hin eingezogen. Anschließend wurde die Leitung auf den Meeresgrund abgesenkt. Eine Vermessung der verlegten Leitung fand nicht statt. Eine Besichtigung und ein Bestimmen von Festpunkten entlang der Leitung ist nur im Onshore-Bereich möglich. Es handelt sich dabei um einen kleinen Bereich am Ende der Leitung mit einer Länge von etwa 2 km. Für den Bereich in dem die Leitung offshore ist, liegen über den Verlauf der Leitung keinerlei Angaben vor.

Um die Genauigkeit der Auswertung zu verbessern, wurden insgesamt vier Festpunkte gewählt. Es lagen die Koordinaten des Start- und Endpunktes sowie von zwei Festpunkten im Onshore-Bereich vor. Obwohl die Festpunkte nicht gleichmäßig über die Leitung verteilt waren, konnte die Lage der Leitung bestimmt werden. Aufgrund der Leitungsvermessung mit dem Meßmolch wurde vom Betreiber die Position der neuen Plattform festgelegt und die Plattform auf den Meeresboden abgesetzt.

Spannungsanalyse

Grundlagen

Im allgemeinen ist davon auszugehen, daß Gas- und Ölleitungen „spannungsfrei" verlegt werden oder daß der eingeprägte Spannungszustand (elastischer Bogen) bekannt und

dokumentiert ist. Die Spannungen, die nach dem Verlegen einer Leitung aufgrund von Unebenheiten des Grabens oder Toleranzen der Leitung im Rohrstrang verbleiben, sind in der Regel klein und spielen gegenüber der späteren Hauptbelastung aus Innendruck eine geringe Rolle.

Andere Verhältnisse ergeben sich bei Dükern oder eingezogenen Offshore-Leitungen, bei denen kein bestimmungsgemäßer Graben vorgehalten und überprüft werden kann. Allerdings werden diese Leitungen im allgemeinen vorgefertigt und können in der vorgefertigten Lage vermessen und als spannungsfrei angesehen werden. Wenn sich im späteren Betrieb der Leitung die Vermutung ergibt, daß die Leitungslage verändert wurde, so ist es möglich, aus dem Vergleich der Nullage und der veränderten Lage unmittelbar eine Spannungsanalyse abzuleiten.

Formelwerk

Für eine homogene Leitung gilt die Differentialgleichung des Balkens

$$E \cdot I \cdot w'' = -M.$$

Hierin ist

E der Elastizitätsmodul,
I das Flächenträgheitsmoment,
w die Biegelinie und
M das Biegemoment.

Mit Hilfe der Beziehung für die Krümmung

$$w'' = 1 / R$$

mit R als Krümmungsradius

und den bekannten Beziehungen für Biegemoment und Biegespannungen ergibt sich

$$\sigma = E \cdot r / R.$$

Darin ist

σ die maximale Biegespannung und
r der Außenradius der Rohrleitung.

Dieses Formelwerk ist geläufig und kann zur unmittelbaren Spannungsanalyse verwandt werden, wenn der Krümmungsradius (oder die Krümmungsänderung) einer Leitung bekannt sind. Auf spezielle Sicherheitsbetrachtungen gemäß [2] wird hier hingewiesen.

Aufmaß

Das Problem besteht im allgemeinen darin, diesen Krümmungsradius mit genügender Genauigkeit festzulegen.

Wird die Lageveränderung einer Leitung vermutet, so ist es natürlich oft möglich, die Leitung punktweise aufzugraben und sie so zu vermessen. Danach besteht die Möglichkeit, entweder durch jeweils drei Meßpunkte einen eindeutig definierten Krümmungskreis zu legen oder für den gesamten Leitungsabschnitt eine Näherungsfunktion aufzustellen und diese Funktion mit Hilfe der bekannten Punkte zu bestimmen.

Das Krümmungskreisverfahren liefert ungenaue Werte und ist für grobe Abschätzungen brauchbar. Das Aufstellen einer Näherungsfunktion, die dann zweimal abgeleitet werden muß, ist mit dem bekannten Problem behaftet, daß diese zweite Ableitung stark verschieden von der wirklichen Leitungskrümmung ist. Das ist immer dann der Fall, wenn Einzeleinwirkungen (zum Beispiel Fundamente) einen Anteil an der Leitungsverkrümmung haben.

Hier zeigt sich der Vorteil einer kontinuierlichen Vermessung mit dem Meßmolch. Bei den üblichen Strömungsgeschwindigkeiten, die im Bereich von 1 m/s liegen, ergibt sich in Abständen von jeweils 10 cm eine Lagebestimmung der aufgemessenen Leitung. Diese Fülle von Daten wird weiter verarbeitet, indem mit Hilfe der Spline-Funktionen [3] eine Näherungsfunktion aufgestellt wird, die den Kurvenverlauf sehr genau beschreibt und auch bezüglich der zweiten Ableitung zur Ermittlung der Krümmungen unproblematisch ist. Das heißt, die Auswertung der im Molchlauf gewonnenen Daten liefert unmittelbar die Biegespannungen des aufgemessenen Systems über die gesamte Länge. Wenn davon ausgegangen werden kann, daß die Leitungsverlegung im Rahmen der Toleranzen „gerade" war, so sind diese Spannungen zugleich die wirklichen Biegespannungen des Systems. Wenn bei der Verlegung Krümmungen erzeugt wurden, so liefert die Beachtung der Krümmungsdifferenzen die zugehörige Spannungsdifferenz.

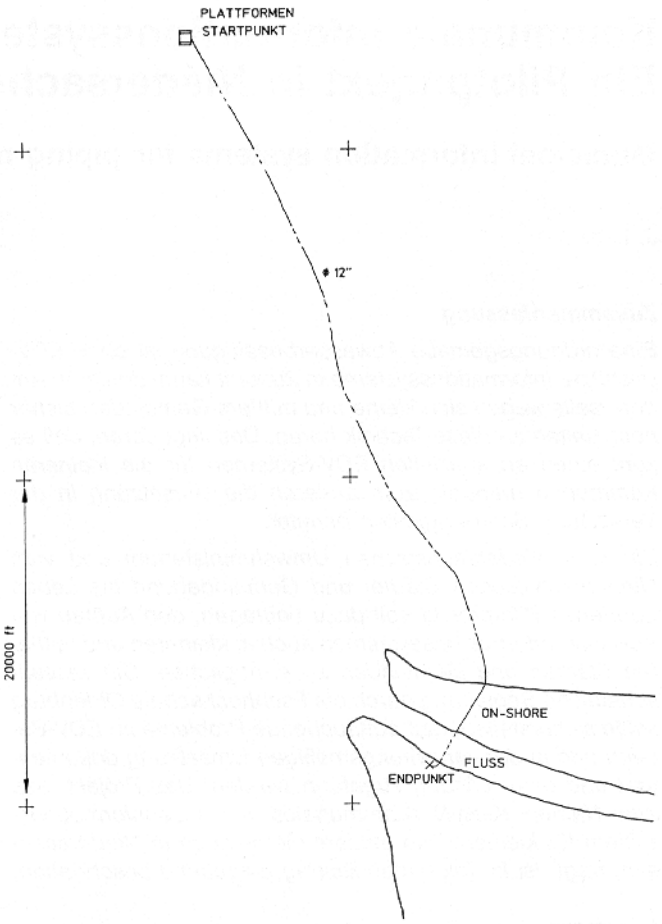


Bild 5: Übersichtskarte zum Einsatz des Meßmolches in Malaysia
Fig. 5: Overview map for use of the pig in Malaysia

Die hier beschriebene Leitungsvermessung mit Hilfe des Scout-Pig zur Ermittlung von Biegespannungen aus Lageveränderung hat dort ihren Stellenwert, wo entweder großflächige Verschiebungen angenommen werden müssen oder Lageveränderungen an unzugänglichen Stellen (Düker, Dämme) anzunehmen sind.

Schrifttum

[1] von Fabeck, W.: Kreiselgeräte. Würzburg: Vogel-Verlag, 1980
[2] Veenker, M.: Sicherheits- und Bemessungskonzept für Gashochdruckleitungen unter signifikanter äußerer Belastung. 3R internat. 30 (1992) Nr. 5, S. 266 ff.
[3] Späth, H.: Eindimensionale Spline-Interpolations-Algorithmen. München, Wien: Verlag R. Oldenbourg, 1990