

V/2 Vergleich verschiedener Höhenmessverfahren für Rohrleitungen

Dr.-Ing. Florian Kölsch

1 Situation

Aus verschiedenen Gründen ist es interessant, die Höhenlage von Rohren zu vermessen:

- Gefällemessungen zur Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Rohren
- Überdeckungsnachweis grabenlos verlegter Dölker
- Setzungsmessung unter Bauwerken durch wiederholte Höhenvermessung
- Nachweis zulässiger Biegeradien grabenlos verlegter Leitungen
- Erfassung und Katalogisierung innerstädtischer Rohrsysteme
- Lokalisierung blinder Leitungsenden

Für die Höhenvermessung stehen unterschiedliche Messverfahren zur Verfügung, die im Wesentlichen auf vier physikalischen Messprinzipien basieren:

- Hydrostatische Höhenvermessung
- Inklinometermessungen
- Ortung elektrischer Felder
- 3D-Kreiselmessungen

Die einzelnen Messverfahren weisen hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit, Einsatzbedingungen und Kosten erhebliche Unterschiede auf. Sowohl in der Literatur als auch in den einschlägigen technischen Richtlinien [z. B. 1] liegen nur begrenzt Informationen vor, die eine aussagekräftige Bewertung zulassen, welches Verfahren unter welchen Bedingungen einzusetzen ist. Im Rahmen mehrjähriger Vergleichsmessungen wurden daher im praktischen Einsatz verschiedene Messverfahren untersucht, um deren Eignung zu beurteilen.

2 Messverfahren

Unter den zum Einsatz gelangenden Messverfahren finden die Verfahren der hydrostatischen Höhenvermessung und der Inklinometermessung die größte Verbreitung. Die Messverfahren, die auf der Ortung elektrischer Felder basieren, sind in der praktischen Anwendung sehr verbreitet, insbesondere bei Bauunternehmen. Sie sind jedoch nur bedingt als Höhenmessverfahren einzustufen. Bei diesen Verfahren wird ein Sensor in die Rohrleitung eingebracht, der ein elektromagnetisches Feld erzeugt, das wiederum durch ein Empfängergerät an der Oberfläche erfasst wird. Die glockenähnliche räumliche Verteilung des Messsignals ermöglicht an der Oberfläche die Identifizierung der horizontalen Lage der Leitung (senkrecht zum stärksten Signal) und eine überschlägige Bestimmung der Tiefe. Hinreichend genaue Messungen mit diesem Verfahrens erfordern einen näherungsweise homogenen Baugrund und eine sorgfältige Anwendung. Tiefenaussagen erreichen in aller Regel keine höheren absoluten Genauigkeiten als $\pm 0,5\text{-}1\text{ m}$. Die relativen Genauigkeiten können jedoch besser sein, weshalb v. a. Hersteller grabenloser Rohrleitung die preiswerten, robusten und simpel zu handhabenden Geräte zur Überwachung des Rohrvortriebs erfolgreich einsetzen. Die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten werden bei Überdeckungen von mehr als 10-12 m erreicht, wenn die Messsignale zunehmend diffuser werden.

Die 3D-Kreiselvermessung stellt zwar eines der vielseitigsten Verfahren dar, da sie als einzige Methode auch exakte horizontale Lagekoordinaten liefern kann, sie wird in der Praxis jedoch nur in Sonderfällen eingesetzt. Die komplexe Technik, die auf Winkelberechnungen aus Kreiseln beruht, verursacht hohe Kosten, liefert durch die notwendige Summation der Messwerte in einseitig zugänglichen Rohrleitungen nur eingeschränkte Genauigkeit und erfordert minimale Leitungsquerschnitte von DN 200. Zudem kann bei der notwendigen Betriebsspannung von 380 V kein Explosionsschutz gewährleistet werden. In aktuellen Forschungsvorhaben [2] wird derzeit daran gearbeitet, die Leistungsfähigkeit der 3D-Kreiselvermessung zu verbessern.

Die hydrostatische Höhenvermessung ist das älteste Messprinzip. Die Höhe eines Punktes kann durch die vergleichende Messung zweier kommunizierender Wasserspiegel (Schlauchwaage) oder durch die Messung des der Höhendifferenz proportionalen Wasserdruckes (bei bekannter Höhenlage des Wasserspiegels) bestimmt werden. Da der Messpunkt bei einer Rohrleitung nicht zugänglich ist, findet ausschließlich die letztere Form der hydrostatischen Messung Anwendung. Der Aufbau der Wassersäule zwischen Referenzniveau und Messpunkt kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- Füllung des Rohres mit Wasser (häufig bei der Dükervermessung)
- Einbringen eines Drucksensors mit angeschlossener Wassersäule
- Einbringen einer Wassersäule (Messschlauch) mit außenliegendem Druckaufnehmer

Die Verfahren erreichen Messgenauigkeiten von 0,1 % des Höhenunterschiedes bzw. des Messbereiches des Druckaufnehmers, bei üblichen Systemen mit 5 m Messbereich somit ± 5 mm. Die Messungen sind unabhängig voneinander, so dass lokale Fehlmessungen benachbarte Punkte nicht beeinträchtigen. Die Sensitivität gegen Temperatur- und Luftdruckschwankungen erfordern hochqualifiziertes Personal. Da die Messungen zudem zeitintensiv sind, fallen entsprechende Kosten an.

Bei der Inklinometermessung wird in Intervallen die Neigung einer Rohrleitung gemessen und daraus der Höhenunterschied im Bereich des Intervalles ermittelt. Die einzelnen Höhendifferenzen werden aufsummiert und aus dem Ergebnis wird die Höhenlage des aktuellen Messpunktes berechnet. Die Inklinometer werden in zwei unterschiedlichen Varianten eingesetzt, in spezielle Messrohre eingepasste Inklinometerzüge und in Kamerafahrwagen integrierte Inklinometer. Spezielle Messrohre kommen praktisch nur bei der Setzungsmessung unter Bauwerken zum Einsatz. Für eine Höhenlagevermessung vorhandener Rohrleitungen ist das Verfahren nicht geeignet. In solchen Leitungen können Inklinometermessungen ausschließlich durch in Kamerafahrwagen integrierte Neigungssensoren ausgeführt werden. Für deren Einsatz ist ein minimaler Rohrquerschnitt von 150-180 mm erforderlich, der sich aus den Abmessungen des Kamerafahrwagens ergibt. Die eingesetzten Neigungsaufnehmer haben eine sehr hohe Messgenauigkeiten von 0,001 % Neigung. Die Genauigkeit der berechneten Höhe nimmt unabhängig von den Messbedingungen mit zunehmender Messlänge ab. Da die aktuelle Höhenlage eines Messpunktes durch Summation der vorausgegangenen Messungen errechnet wird, werden auch Messfehler aufsummiert. Unter optimalen Bedingungen ergibt sich bei einer Messunsicherheit von 1/100 mm je 10 cm Intervall bei 200 m Messlänge zwar eine theoretische Genauigkeit des Höhenwertes von ± 2 cm. Diese Genauigkeit erfordert jedoch eine fehlerfreie Entfernungsmessung sowie eine Fixierung des Inklinometers an der Rohrwandung, die bei der Messung mit dem Kamerafahrwagen nicht gegeben ist. In den einschlägigen Richtlinien der GSTT wird für diese Verfahren deshalb nur eine Messgenauigkeit von ± 84 cm (auf 200 m Rohrlänge) angegeben [1]. Wegen der Vielzahl von Ein-

flussparametern lässt sich die tatsächlich erreichbare Messgenauigkeit des Verfahren allerdings nur bedingt spezifizieren. Hinsichtlich der Kosten sind die Inklinometermessungen in speziellen Messrohren wegen vergleichbarer Personalaufwendungen (Dipl.-Ing.) mit der hydrostatischen Höhenvermessung vergleichbar, die kameraintegrierte Neigungsmessung ist durch Synergieeffekte und geringere Anforderungen an die fachliche Qualifikation des Personals deutlich günstiger.

3 Vergleichsmessungen

In den vergangenen Jahren haben bei der Rohrvermessung mit der hydrostatischen Höhenvermessung das genaueste und mit der Kameraneigungsmessung das billigste Messverfahren die größte Verbreitung gefunden. Bei höheren Ansprüchen an die Messgenauigkeit wie bei der Setzungsmessung auf Deponien wird eher auf die hydrostatische Vermessung zurückgegriffen, sind die Anfordererungen geringer wie bei der Gefällebestimmung in Abwasserrohren kommt meist die Kameraneigungsmessung zum Einsatz. Die großen Unterschiede bei den Kosten und bei der Messgenauigkeit haben jedoch Veranlassung gegeben, die Messgenauigkeit der Kameraneigungsmessung genauer zu untersuchen, um Fehlerquellen zu identifizieren und ggf. zu eliminieren und letztlich die geeigneten Einsatzbedingungen des Verfahrens zu definieren. Gleichzeitig sollte untersucht werden, ob sich die beiden Verfahren sinnvoll kombinieren lassen.

In den vergangenen 3 Jahren wurden fast 40 Rohrleitungen mit rund 5 km Haltungslänge parallel vermessen, wobei die exaktere hydrostatische Höhenvermessung als Referenzhöhe benutzt wurde. Diese Vorgehensweise beruht auf der Annahme, dass die hydrostatische Höhenvermessung über eine vielfach geprüfte, verlässliche Messgenauigkeit verfügt [3]. Da Abweichungen der Referenzhöhe dennoch nicht generell ausgeschlossen werden können, wurden in ausgewählten Rohrleitungen zudem terrestrische Kontrollmessungen durchgeführt, sofern dies möglich war. Die nachfolgende Bewertung der Ergebnisse hat zudem gezeigt, dass durch die Vielzahl der Messungen einzelne Abweichungen vernachlässigt werden können und die Resultate sowohl eine Fehleridentifizierung als auch eine -validierung zulassen. **Bild 1** gibt eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse, wobei die errechneten Abweichungen der Neigungsmessungen klassifiziert wurden. 85 % aller durchgeführten Vergleichsmessungen liegen in einem Fehlerbereich von 0,1 % bis 0,3 % Neigung mit einem größten ermittelten Höhenfehler von 40 cm. 5 % der Messungen weisen Fehler kleiner 0,1 % Neigung auf mit einem größten absoluten Höhenfehler von 2,5 cm. Diese Messungen können in den Grenzen der Aussagefähigkeit der Vergleichsmes-

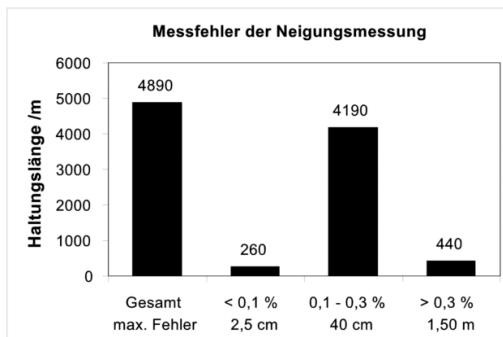


Bild 1: Vergleichsmessungen – Klassifizierung nach Fehlergröße

sungen als fehlerfrei eingestuft werden. Bei 10 % der Messungen wurden Fehler von mehr als 0,3 % Neigung festgestellt, der größte Messfehler betrug 1,50 m (Deponie Heinde/LK Hildesheim 1999: nach Aufgrabung terrestrisch kontrolliert).

Das Gesamtergebnis zeigt, dass aus Neigungsmessungen ohne weitere Kalibrierungen nur in Ausnahmefällen zutreffende Höhen ermittelt werden können. Ob Höhenfehler über Kalibriermessungen verteilt werden können, hängt von der Art und Verteilung der Fehler ab. Um diese beurteilen zu können, müssen die physikalischen Ursachen der Fehler bekannt sein. Zu den Fehlerursachen der Kameraneigungsmessung liegen bereits Untersuchungen vor [4]. Es wurden systematische und nicht-systematische Fehler identifiziert. Die systematischen Fehler werden durch Fehler beim Null-Abgleich des Messsignals auf der Kalibrierplatte und durch mechanische Einflüsse beim Ziehen des Kamerawagens hervorgerufen. Der Effekt, der durch die Bewegung des Fahrwagens erzeugt wird, ist in **Bild 2** prinzipiell dargestellt. Dieser Effekt ist richtungsabhängig und führt immer zu einer Erhöhung des Neigungssignals, d. h. die gemessene Neigung ist größer als die vorhandene. Die jüngeren Messungen zeigen, dass die ermittelten Fehler auf fast 90 % der untersuchten Haltungslänge ein positives Vorzeichen (zu große Neigung) aufweisen. Da der Kalibrierfehler dagegen prinzipiell mit beiden Vorzeichen auftreten kann, lässt sich folgern, dass der richtungsabhängige mechanische Fehler dominiert.

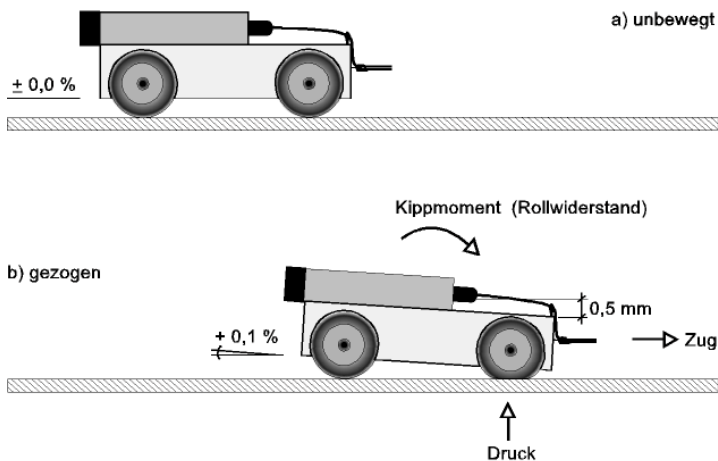


Bild 2: Messfehler infolge mechanischer Belastung des Fahrwagens

Auch systematische Fehler lassen sich nur unter bestimmten Bedingungen korrekt verteilen. Voraussetzung hierfür ist, dass der Fehler in konstanter Größe über die gesamte Haltungslänge auftritt. Obwohl unklar ist, ob die Hauptfehlerquelle (Bewegung des Fahrwagens) zu einem gleichmäßigen Fehler führt, wurden bei den vorliegenden Messungen mit einer Fehlerkorrektur über die Endhöhen häufig gute Ergebnisse erzielt. Die Qualität der korrigierten Ergebnisse wird jedoch deutlich schlechter, sobald der mittlere Neigungsfehler größer als 0,35 % ist. Das ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass bei größeren Neigungsfehlern zufällige Fehler eine stärkere Rolle spielen. **Bild 3** zeigt hierzu eine Messung im Steinzeugrohr mit unsauberen Muffenübergängen. Darüberhinaus hat sich gezeigt, dass die Fehlerverteilung auch bei geringeren mittleren

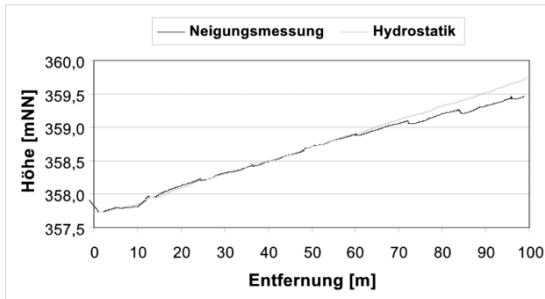


Bild 3: Zufällige Messfehler:
Einfluss unsauberer Muffen

Neigungsfehlern ($< 0,35\%$) dann zu größeren Abweichungen führt, wenn der Abstand der Stützstellen größer als 100 m wird. Als erster grober Anhaltswert bei der Bewertung einer Neigungsmessung kann angenommen werden, dass bei einer Verteilung eines mittleren Neigungsfehlers von 0,2-0,35 % ein Restfehler von 0,1 % verbleibt.

4 Bewertung

Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich hinsichtlich des praktischen Einsatzes der Kameraneigungsmessung verschiedene Rückschlüsse ziehen:

- In 85 % der untersuchten Haltungen wurde mit der Kameraneigungsmessung ein mittlerer Neigungsfehler $< +0,3\%$ erreicht.
- Neigungsfehler $< 0,35\%$ dürfen über Kalibrierhöhen verteilt werden, sofern das Höhenprofil keine eindeutig lokalen Abweichungen aufweist.
- Die durch Fehlerverteilung erreichbare Messunsicherheit beträgt 0,1 %, sofern der Stützstellenabstand kleiner 100 m ist.
- Die erreichbare Genauigkeit des Höhenwertes beträgt 1/1000 des Stützstellenabstandes (bei 20 m Stützstellenabstand: 2 cm).
- Die Auswertung muss so erfolgen, dass eine vergleichende Bewertung der gemessenen und der korrigierten Neigungen möglich ist. Bei der Abgabe von Höhenprofilen ist daher die Größe der durchgeführten Korrektur stets mitanzugeben.

Die genannten Genauigkeiten erfordern in jedem Fall eine sorgfältige Durchführung des Messvorganges. Insbesondere stellen die wiederholte Kalibrierung des Neigungssignales in Nullstellung und eine gleichmäßige Kabelführung eine notwendige Grundvoraussetzung für eine aussagekräftige Messung dar.

Literatur

- [1] Deutsche Gesellschaft für grabenloses Bauen e. V. (1999): Instandhaltung von Depoientwässerungsleitungen, GSTT-Informationen Nr. 9, Hamburg
- [2] Niemeyer, Katrycz (2000): Geodätische Sensoren und Methoden zur Bauwerksüberwachung. DFG-Sonderforschungsbereich 477: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung, Berichtskolloquium, TU Braunschweig

- [3] Collins (1987): Verformungsmessung an und in Deponien. In: Möglichkeiten der Überwachung und Kontrolle von Deponien und Altlasten. Fachseminar des Zentrums für Abfallforschung, Braunschweig
- [4] Kölsch (1998): Vergleichsmessungen an verschiedenen Deponien – Messergebnisse und Verfahrensvergleich. In: Rodatz (Hrsg.): Entwicklungen im Deponie- und Dichtwandbau, Mitteilung des IGB, TU Braunschweig, Heft 56:

Verfasser: Dr.-Ing. Florian Kölsch
Geschäftsführer, Dr. Kölsch Geo- und Umwelttechnik GmbH
Gliesmaroder Straße 100
38106 Braunschweig
Telefon: (05 31) 33 89 62
Telefax: (05 31) 33 89 63
e-mail: koelsch@dr-koelsch.de