



## Der Einfluss des Messstellenausbaus auf Inklinometermessungen an Felsscherflächen

MSc.-Geol. Jan Düllmann, Max Bögl  
 Bau GmbH, Neumarkt, Dipl.-Geol. Dr. Ralf Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried, Prof. Dr.-Ing. Michael Alber, Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie Ruhr-Universität Bochum

**V**ertikalinklinometermessungen gehören zu den am häufigsten eingesetzten geotechnischen Feldmessverfahren zur Überwachung von Massenbewegungen in Festgestein. Vor Durchführung der eigentlichen Messungen müssen im Beobachtungsbereich entsprechende Messstellen eingerichtet werden – meist mithilfe von Bohrungen.

Die Überwachung selbst erfolgt entweder periodisch – mithilfe tragbarer Sondeninklinometersysteme – oder automatisch durch Systeme mit fest installierten Neigungsgebern (so genannten „Inklinometerketten“). Mit beiden Verfahren wird die absolute Neigung der Messstelle in zwei Raumrichtungen hochgenau ermittelt. Aus mehreren zeitlich versetzten Messungen können relative Neigungsveränderungen in verschiedenen

Teufen und Raumrichtungen ermittelt und daraus Aussagen zu eventuellen Bewegungen, deren Tiefenlage und Bewegungsbeträgen abgeleitet werden (Bild 1).

Auf eine ausführliche Darstellung des Messverfahrens kann mit Verweis auf die Empfehlung Nr. 21 des AK 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. zu Verschiebungsmessungen quer zur Bohrlochachse (DGQT, 2002) und die ISRM-Empfehlung (ISRM, 1981) verzichtet werden.

### Messstellenausbau

Eine Inklinometermessstelle besteht grundsätzlich aus einem Inklinometermessrohr, das formschlüssig in einem Bohrloch oder Leerrohr fixiert wird (Bild 2). Die treffende Auswahl der Materialien und der fachgerechte Einbau sind von entscheidender Bedeutung für das Messergebnis. Die deutsche Empfehlung Nr. 21 des AK 3.3 der DGQT (DGQT, 2002, S. 15, Abs. 3) stellt hierzu fest: „Erfahrungen haben gezeigt, dass Messprobleme häufig auf die Wahl der falschen Messverrohrung und ihren nicht fachgerechten Einbau zurückzuführen sind.“

### Inklinometermessrohr

Wesentliches Element eines Inklinometermessrohrs sind vier präzise in Längsrichtung des Rohrs verlaufende Führungsnuuten, in denen bei den späteren Messungen die Rollen der Messsonde laufen. Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Inklinometer-Messrohrtypen verschiedener Hersteller verfügbar, die sich neben der Rohrgeometrie und den Verbindungen vor allem hinsichtlich der verwendeten Messrohrmaterialien und Wandstärken unterscheiden. In Mitteleuropa haben sich vor allem Kunststoffmessrohre (ABS) und Messrohre aus Aluminium durchgesetzt,

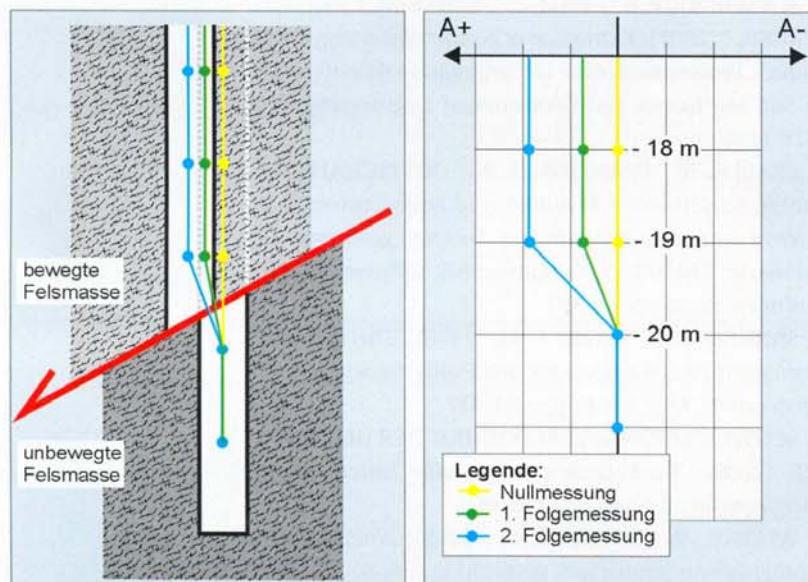


Bild 1. Schematische Darstellung der Ergebnisse von Inklinometermessungen an einer diskreten Scherfläche im Fels.

Die Überwachung von Hangbewegungen in Festgestein mittels Vertikalinklinometermessungen stellt ein wichtiges in-situ-Verfahren der Felsmechanik und Geotechnik dar. Bei einer breiten Vielzahl an verfügbaren Messrohrtypen und Verfüllmedien stellt sich aber zwangsläufig auch die Frage nach der „richtigen“ Auswahl und deren Einfluss auf das Messergebnis. Der vorliegende Beitrag fasst die Ergebnisse einer an der Ruhr-Universität Bochum durchgeföhrten Forschungsarbeit zusammen, bei der mithilfe von Laborversuchen grundlegende Materialeigenschaften und die Auswirkungen unterschiedlicher Materialkombinationen von Ringraumverfüllung und Messrohrtyp auf das Ergebnis von Inklinometermessungen an Gleit- und Scherflächen untersucht wurden. Der Beitrag zeigt mögliche Fehlerquellen bei Auswahl und Einrichtung von Inklinometermessstellen sowie praxisorientierte Empfehlungen zu deren Vermeidung auf.

seltener kommen Messrohre aus Stahl oder GFK zum Einsatz (Bild 3).

Wesentliche technische Entscheidungskriterien für die Auswahl des geeigneten Messrohrtyps sind neben prinzipiellen Überlegungen zum Rohrdurchmesser insbesondere die Messstellentiefe und das lokale Korrosionspotenzial:

Vor allem beim Einsatz von ABS-Rohren bei verhältnismäßig tiefen Messstellausbauten ( $>$  etwa 50 m) besteht die Gefahr, dass diese Kunststoffrohre aufgrund der Differenz zwischen Außendruck (dem hydrostatischen Druck des Verfüllmediums) und Rohrinnendruck beschädigt werden. Selbst der Einsatz einer Klarwasserfüllung im Messrohr kann bei derartig tiefen Ausbauten einen Rohrkollaps nicht immer verhindern, da auch dann noch Dichteunterschiede von bis zu rund  $0,8 \text{ g/cm}^3$  auftreten. Neben der Möglichkeit, solche Messstellen in mehreren Teilstücken zu verfüllen, kann auch von vornherein auf stabilere Rohre mit gegebenenfalls größerer Materialstärke zurückgegriffen werden.

Bei aggressivem Wasserchemismus – insbesondere bei NaCl-Gehalt – oder beim Kurzschließen von Bodenschichten mit unterschiedlichem elektrischen Potenzial können mit Aluminiumrohren ausgebaute Messstellen mittel- bis langfristig durch Korrosion der Messrohre unbrauchbar werden. Sofern dies nicht im Einklang mit einer sowieso nur kurzfristigen Messdauer steht, sollten entweder von vornherein korrosionsanfällige Messrohrmaterialien vermieden oder Schutzbeschichtungen erwogen werden.

Den Verformungseigenschaften des gewählten Messrohrs ist ebenfalls ein Einfluss auf das Messergebnis einzuräumen, bis dato lagen hierzu jedoch keine systematischen Ergebnisse vor.

### Ringraumverfüllung

Der vollständigen und formschlüssigen Verfüllung des Ringraums zwischen Bohrlochwand und Inklinometermessrohr kommt eine wesentliche Bedeutung für die Genauigkeit der Messungen zu. Messrohrstrecken, die infolge unzureichender Hinterfüllung in instabiler Lage verbleiben, führen zwangsläufig zu Zufallsergebnissen bei der Inklinometermessung und können die tatsächlich auftretenden Bewegungen nicht wiedergeben.

Als mögliche Verfüllmedien steht eine Vielzahl ungebundener und hydraulisch gebundener Baustoffe zur Verfügung:

Ungebundene Verfüllmedien werden in der Regel als Sackware in trockenem Zustand vom Bohrplatzpunkt in den zumeist engen Ringspalte eingefüllt. Hierbei besteht die Gefahr einer ungleichmäßigen Verteilung im Ringspalt sowie des „Aufhängens“ an hervorstehenden Muffen oder Rohrstößen, was nicht ausreichend hinterfüllte Rohrstrecken zur Folge hat. Diese Gefahr bleibt aus Sicht der Verfasser selbst dann bestehen, wenn Sand und Sand-Kies-Gemische eingespült werden und glattgemuffte

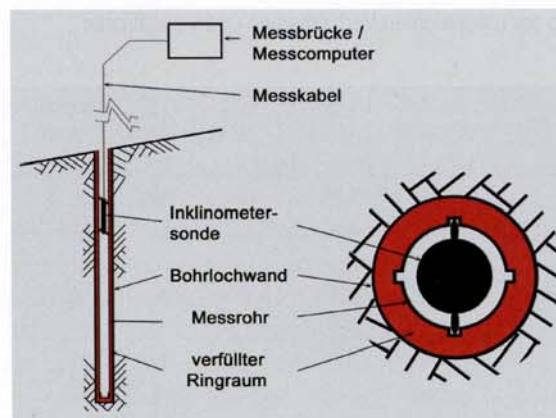


Bild 2. Schematischer Aufbau einer Inklinometermessstelle (ISRM, 1981, verändert).



Bild 3. Auswahl unterschiedlicher Inklinometermessrohre (von oben nach unten): Aluminiumrohr mit 76 mm Durchmesser, ABS-Rohr mit 71 mm Durchmesser und 3,5 mm Wandstärke, ABS-Rohr mit 70 mm Durchmesser und 5 mm Wandstärke und durchmesserkonstanter Muffe, ABS-Rohr mit 70 mm Durchmesser und 5 mm Wandstärke und Schnellkupplungssystem.

Messrohrtypen verwendet werden. Die Empfehlung Nr. 21 des AK 3.3 der DGGT (DGGT, 2002, S. 17, Abs. 2) ergänzt hierzu: „Es wird empfohlen eine Sand-Kies-Verfüllung nur in besonderen Fällen (zum Beispiel bei großen Karsthohlräumen im Baugrund) in Betracht zu ziehen“. Die ISRM-Empfehlung (ISRM, 1981) sieht hingegen grundsätzlich nur die Verfüllung mit Suspensionen vor.

Suspensionen besitzen bei entsprechender Herstellung gute Fließeigenschaften und ermöglichen daher eine deutlich formschlüssigere Verfüllung des Ringspalts. Dennoch ist bei diesen Feststoff-Wasser-Gemischen das Absatzmaß der eingesetzten Suspension, das heißt das Abtrennen von Anmachwasser und Feststoffanteil beim Abbindeprozess zu beachten: So bedeutet beispielsweise ein spezifisches Absatzmaß von 10 % bei einer 30 m tiefen Messstelle eine unweigerlich auf den oberen 3 m nicht hinterfüllte Messrohrstrecke.

Den Verformungseigenschaften des gewählten Verfüllmediums ist ebenfalls ein Einfluss auf das

Tabelle 1. Zusammenstellung der untersuchten Verfüllmedien und wesentlicher technischer Eigenschaften.

Kürzel	Bezeichnung	W/F-Wert	Dichte* [g/cm³]	UCS* [MPa]	E-Modul* [MPa]	Absetzmäßig* [%]
SD 0,45	Soildämmer®	0,45	1,58	0,05	100	0
ZB 1	Zement-Bentonit-Gemisch 5 : 1	1,67	0,76	0,36	884	8
ZB 2	Zement-Bentonit-Gemisch 3,3 : 1	1,85	0,50	0,10	100	16
OD 0,45	Originaldämmer®	0,45	1,58	7,0	2468	0
OD 0,7		0,70	1,42	1,7	912	0
BD 0,45	Blitzdämmer®	0,45	1,73	23,1	7063	0
BD 0,55		0,55	1,52	21,0	5206	0
BD 0,7		0,70	1,42	12,6	4550	0
Z 0,5	Zement CEM III/B (Andotherm Plus®)	0,5	1,58	36,8	8148	6
Z 0,8		0,8	1,25	24,6	4474	12,5

\* Kennwerte ermittelt nach 28 Tagen

Messergebnis einzuräumen. Bis dato lagen hierzu jedoch keine systematischen Ergebnisse vor.

### Laboruntersuchungen

Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie der Ruhr-Universität Bochum (DÜLLMANN, 2008) wurde systematisch der Einfluss verschiedener Materialien und deren Variation auf das Messergebnis von Inklinometermessungen anhand einiger praxisüblicher Kombinationen hydraulischer Verfüllmedien und Messrohrtypen untersucht.

Für die Untersuchungen wurden insgesamt zehn hydraulisch gebundene Verfüllmedien herangezogen, wobei es sich um acht handelsübliche Produkte (verschiedene Dämmer®-Sorten,

Hochofenzement CEM III/B) und zwei aus den Rohprodukten selbst hergestellte Zement-Bentonit-Mischungen (Verhältnis 5:1 und 3,3:1) handelte. Alle Mischungen wurden mit variierenden Wasser-Feststoff-Faktoren (W/F-Werte) hergestellt, sodass die Praxisanforderung einer guten Fließfähigkeit gegeben war.

### Technische Kennwerte der Verfüllmedien

Die Untersuchung der gebundenen Verfüllmedien mit herkömmlichen Versuchen, wie einaxialen Druckversuchen, Triaxial-Versuchen und Bestimmungen des Absatzmaßes, diente der Ermittlung grundlegender technischer Materialparameter, die wiederum wesentliche Parameter für die Interpretation der Verfüllmedien im Kontext der durchgeföhrten Scherversuche sind. Tabelle 1 stellt die untersuchten Verfüllmedien und deren wesentlichen technischen Eigenschaften vor.

### Scherversuche an Modell-Messstrecken

Für die Durchführung der Scherversuche wurde eine vorhandene Felsschereinrichtung mit einer speziellen Probenaufnahme und Wegmesseinrichtung so modifiziert (Bild 4), dass „Modellmessstrecken“ aus Messrohr und Verfüllmedium mit einer Höhe von 20 cm bei gleichzeitig vertikaler Belastung über eine definierte Scherfuge abgesichert werden konnten. Diese Versuchseinrichtung diente dazu, den Vorgang einer Felsgleitung entlang einer definierten Scherfuge zu simulieren (Translationsrutschung). Bei einer realen Messstelle würde die Neigungsveränderung des Messrohrs infolge Scherung zwischen hangendem (bewegtem) und liegendem (unbewegtem) Gebirge dabei als Hinweis auf Tiefenlage und Bewegungsrate einer Scherfuge interpretiert.

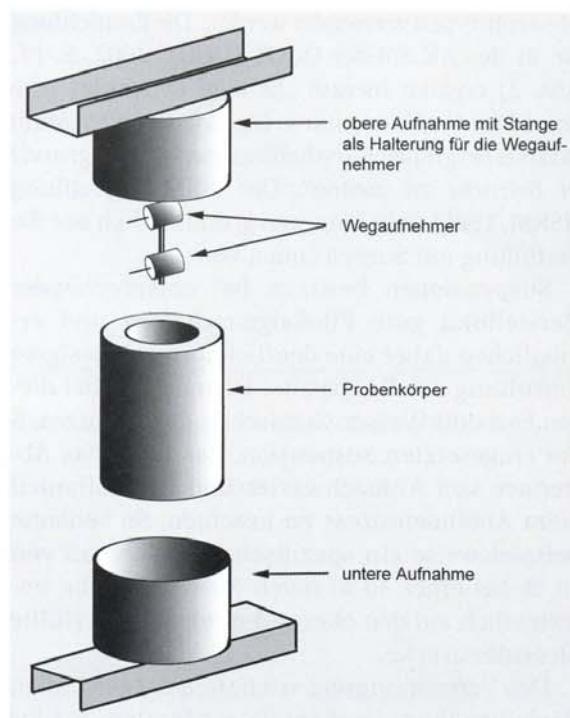


Bild 4. Versuchsaufbau für die direkten Scherversuche an Modellmessstrecken (Messrohr/Verfüllmedium-Kombinationen).



Zur Verformungsaufzeichnung wurden zwei Wegaufnehmerpaare verwendet, die der Aufzeichnung der von außen aufgebrachten Verformung  $d_A$  und der auf der Innenseite des Messrohrs gemessenen Verformung  $d_I$  dienten.

Die Versuche wurden mit einer konstanten Normalkraft von  $F_N = 3000 \text{ N}$  durchgeführt. Diese Kraft entspricht in etwa der Vertikalspannungskomponente in einer Bohrlochtiefe von 20 m bei einer Verfüllmaterialdichte von 1,5 bis 2,0 g/cm<sup>3</sup>.

### Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche wurden zunächst als Kraft-Verformungsdiagramme an der Versuchseinrichtung aufgezeichnet und später für die verschiedenen Materialkombinationen zusammengestellt. Als signifikante Kenngröße für die Beschreibung der Differenz zwischen außen aufgebrachter Verformung der Messstrecke ( $d_A$ ) und auf der Innenseite des Messrohrs gemessener Verformung ( $d_I$ ) wurde für jede Kombination von Messrohrtyp und Verfüllmedium ein „spezifischer Dämpfungsfaktor“ FD als Quotient aus  $d_A$  und  $d_I$  ermittelt.

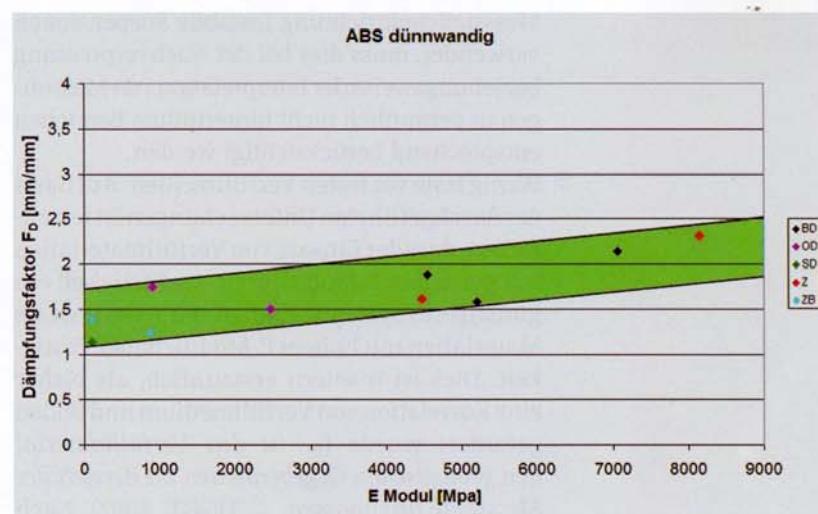
Es zeigten sich relativ stark differierende Dämpfungsfaktoren in einem Bereich von minimal 1,14 bis maximal 3,38. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse enthält DÜLLMANN et al. (2009). Die ermittelten Faktoren verteilen sich relativ heterogen auf die verschiedenen Messrohrtypen, wobei grundsätzlich folgende Trends erkennbar sind:

- ▷ Die dünnwandigen ABS-Messrohre (3,5 mm Wandstärke) zeigen mit  $F_D$  zwischen 1,14 und 2,32 und einem Mittelwert von 1,66 die insgesamt günstigste Dämpfung.
- ▷ Die dickwandigen ABS-Messrohre (5,0 mm Wandstärke) zeigen mit FD zwischen 1,26 und 2,59 und einem Mittelwert von 1,71 eine geringfügig höhere, aber immer noch vergleichsweise günstige Dämpfung.
- ▷ Die Aluminium-Messrohre zeigen mit  $F_D$  zwischen 1,24 und 3,38 und einem Mittelwert von 2,33 die höchste und damit tendenziell ungünstigste Dämpfung.

Die in einem zweiten Auswertungsschritt für jeden Messrohrtyp durchgeführte Gegenüberstellung von spezifischem Dämpfungsfaktor  $F_D$  und dem E-Modul des Verfüllmediums (Bild 5) gibt zu der Vermutung Anlass, dass grundsätzlich der Einsatz von Verfüllmedien mit höherem E-Modul zu höheren  $F_D$ -Faktoren führt.

### Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Eine der wesentlichsten Erkenntnisse der vorgestellten Untersuchungen ist sicherlich die Feststellung, dass Verformungsraten, die aus Inklinometermessungen an Scherflächen in Fels abgeleitet werden, offensichtlich nicht ohne Weiteres 1 : 1



auf die an einer Scher- und Gleitfläche auftretenden Verformungen übertragen werden können. Es ist anzunehmen, dass die gemessenen Verschiebungen die tatsächlichen Verformungen grundsätzlich eher unterbewerten. Dies ist insbesondere bei der „Kalibrierung“ entsprechender numerischer Modellierungen anhand derartiger in-situ-Verformungsmessungen zu berücksichtigen.

Ebenso eindeutig lässt sich die Tatsache herausstellen, dass die Wahl der Ausbaumaterialien einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis derartiger Inklinometermessungen ausübt. Auf Grundlage der dargestellten Ergebnisse sind aus Sicht der Verfasser folgende fünf Grundregeln für die Wahl von Messrohr und Verfüllmedium herauszuarbeiten:

- ▷ ABS-Messrohre vor Aluminiumrohren: In Konsequenz der ermittelten Dämpfung und unter Berücksichtigung ihrer geringen Korrosionsanfälligkeit sind ABS-Messrohre Aluminiumrohren unter den allermeisten Umständen vorzuziehen.
- ▷ Dünnwandige vor dickwandigen Rohren: Sofern es die Messstellentiefe zulässt, sind dünnwandige ABS-Messrohre dickwandigeren Messrohren vorzuziehen. Unabhängig vom verwendeten Verfüllmaterial zeigten die dünnwandigeren ABS-Rohre in den meisten Versuchen bessere (niedrigere) Dämpfung.
- ▷ Hydraulische vor ungebundenen Verfüllmedien: Hydraulische Verfüllmedien sind aufgrund ihrer grundsätzlich besseren Eignung zur formschlüssigen Verfüllung des Ringraums ungebundenen Medien grundsätzlich vorzuziehen. Dass ein Einsatz derartiger Medien unter problematischen Verhältnissen (zum Beispiel Antreffen von Hohlräumen) durchaus sinnvoll sein kann, bleibt davon unberührt.
- ▷ Suspensionsstabile vor instabilen Suspensionen: Werden hydraulische Verfüllmedien eingesetzt, so ist der Vorzug weitgehend suspensionsstabilen Medien zu geben, bei denen ein möglichst geringes Absetzmaß sicherstellt, dass einmal verfüllte Bereiche auch nach Abbinden der Suspension formschlüssig verfüllt bleiben. Wurden bei der

Bild 5. Dämpfungsfaktoren  $F_D$  für ABS-Messrohr mit einer Wandstärke von 3,5 mm abhängig E-Modul des Verfüllmediums gemäß Tabelle 1.

Messstelleneinrichtung instabile Suspensionen verwendet, muss dies bei der Nachverpressung beziehungsweise der Interpretation von Messungen in vermutlich nicht hinterfüllten Bereichen entsprechend berücksichtigt werden.

- ⇒ Wenig feste vor festen Verfüllmedien: Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, dass der Einsatz von Verfüllmaterialien mit geringem E-Modul/geringer Festigkeit ein günstigeres Systemverhalten erwarten lässt als Materialien mit hohem E-Modul/höherer Festigkeit. Dies ist insofern erstaunlich, als bisher eine Korrelation von Verfüllmedium und Boden gefordert wurde („...ist das Verfüllmaterial den geologischen Gegebenheiten im Bereich der Messstelle anzupassen...“, DGGT, 2002). Nach dieser Empfehlung wären in Fels festere und in Böden, abhängig von deren Art und Zustand, weniger feste Verfüllmaterialien einzusetzen. Auch im vorliegenden Modellversuch, der hinsichtlich seiner Rahmenumstände gut geeignet erscheint, die Verhältnisse an einer Scherfuge in Fels wiederzugeben, stellten sich dagegen die weniger festen Materialien mit niedrigem E-Modul als die besten Überträger der Scherbewegungen auf die Messrohre heraus – auch in Fels empfiehlt sich nach den vorliegenden Ergebnissen also ein möglichst „weicher“ Ausbau mit geringfester Ringraumverfüllung.

Die dargestellten Erfahrungen und Untersuchungen zeigen, dass die Materialauswahl und die Einrichtung von Inklinometermessungen eine anspruchsvolle Aufgabe darstellen, die mit der gebotenen Sorgfalt ausgeführt werden muss, sollen die ermittelten Ergebnisse eine repräsentative Aussage über die Bewegungsmechanismen und Bewegungsraten von Massenbewegungen erlauben.

#### Quellennachweis

DGGT (2002): Empfehlung Nr. 21 des AK 3.3 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. – Verschiebungsmessungen quer zur Bohrlochachse – Inklinometer- und Deflektometermessungen. Bautechnik, H. 4, S. 243-256.

DÜLLMANN, J. (2008): Versuche zur Optimierung des Einbaus von Inklinometermessrohren. Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, (unveröffentlicht).

DÜLLMANN, J.; PLINNINGER, R.; ALBER, M. (2009): Systematische Analyse von Ringraumverfüllung und Messverrohrung bei Inklinometermessstellen. ÖSTERREICHISCHER INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREIN (Hrsg.): Tagungsbeiträge der 7. Österreichischen Geotechniktagung, 21./22.01.2009, Wien, S. 269 - 280.

ISRM (1981): Suggested Methods for monitoring rock movement using a probe inclinometer. Ulusay, R. & Hudson, J.A. (2007) (eds.): The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006, S. 575-587.

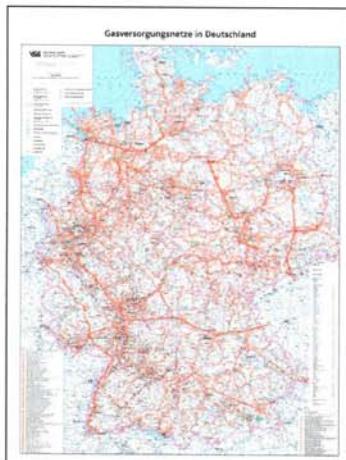
## Wirtschaftsgeographische Wandkarte

## NEUERSCHEINUNG

### Gasversorgungsnetze in Deutschland

Bearbeitet von Hubertus Schöneich,  
Auflage 2010

Wandkarte 96 x 130 cm, vierfarbig, Maßstab 1: 750 000 Mill., Preis 149,- €, inkl. Aufhängeleiste.  
Digitale Wandkarte (CD-ROM), Preis 230,- €.



Die Wandkarte zeigt das aktuelle Leitungsnetz der Bundesrepublik Deutschland mit seinen Anschlüssen an die Nachbarländer. Bei den Leitungsbetreibern wurden die Namen der neuen Netzgesellschaften berücksichtigt, deren Bildung durch das Energiewirtschaftsgesetz bedingt ist. An den Leitungen werden neben dem Betreiber auch der Nenndurchmesser (DN), der Nenndruck (PN) und die Übergabestationen in andere Netze dargestellt. Die namentlich aufgelisteten über 100 Erdgasfelder sowie die Erdölgasvorkommen zeigen die regionalen Schwerpunkte der deutschen Gasförderung. Berücksichtigt sind auch alle Untertage-Gasspeicher, Flüssiggasspeicher, Entschwefelungs- und Gaserzeugungsanlagen. Der topographische Hintergrund der Karte erleichtert die Orientierung.

**Faxbestellung + 49 (0) 20 54 / 9 24-149 Telefon + 49 (0) 20 54 / 9 24-123 · E-Mail vertrieb@vge.de · Internet www.vge.de**

Anzahl	Bestell-Nummer		Preis
	80 78 00	Gasversorgungsnetze in Deutschland · Wandkarte inkl. Aufhängeleiste	149,- €
	80 79 00	Gasversorgungsnetze in Deutschland · Digitale Version auf CD-ROM	230,- €

Umtausch/Rücksendegarantie: Bitte beachten Sie, dass nur originalverpackte und neuwertige Titel umgetauscht werden können. Wandkarten, CDs und DVDs sind vom Umtausch ausgeschlossen. Auslieferung über Firma Herold. Diese nimmt nur ausreichend frankierte Rücksendungen an. Alle Preise inkl. MwSt, zuzügl. Versandkosten.

**VGE**  
Verlag GmbH

Montebruchstraße 2 · 45219 Essen  
Telefon +49 (0) 20 54 / 9 24-123  
Telefax +49 (0) 20 54 / 9 24-149  
E-Mail vertrieb@vge.de  
Internet www.vge.de