

## **Systematische Analyse von Ringraumverfüllung und Messverrohrung bei Inklinometermessstellen**

MSc.-Geol. Jan DÜLLMANN  
Max Bögl Bau GmbH, Neumarkt

Dipl.-Geol. Dr. Ralf PLINNINGER  
Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried

Prof. Dr.-Ing. Michael ALBER  
Ruhr-Universität Bochum, Arbeitsgruppe Ingenieurgeologe

### **KURZFASSUNG**

Die Überwachung von Hangbewegungen mit Vertikalinklinometermessungen stellt ein wichtiges Verfahren der 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 durchgeführten 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 darüber hinaus mögliche Fehlerquellen bei Auswahl und Einrichtung von Inklinometermessstellen sowie praxisorientierte Empfehlungen zu deren Vermeidung auf.

### **ABSTRACT**

Probe inclinometer measurements represent one of the most commonly used methods when it comes to the investigation of slope instabilities in rock and soil. Nevertheless, with a wide variety of casing types, grout and backfilling materials available, the choice of the best suited installation materials and the influence of the chosen materials on the testing results of a specific installation remains mostly vague. The presented paper resumes the findings of a recent research work conducted at Ruhr-Universität Bochum. By use of different laboratory tests, basic material properties and impacts on the result of inclinometer measurements at shear planes coming from different casing/grout-combinations were investigated. Additionally the paper resumes some more findings on possible installation problems and presents practical suggestions for their solution.

## 1. DAS INKLINOMETER-MESSVERFAHREN

### 1.1. Messverfahren und Messgeräte

Inklinometermessungen stellen eines der am häufigsten eingesetzten geotechnischen Feldversuchsverfahren zur Überwachung von Massenbewegungen in Fest- oder Lockergesteinen dar. Vor Durchführung der eigentlichen Messungen müssen im Beobachtungsbereich jedoch Inklinometer-Messstellen (meist mit Hilfe von Bohrungen) eingerichtet werden (Abb. 1).

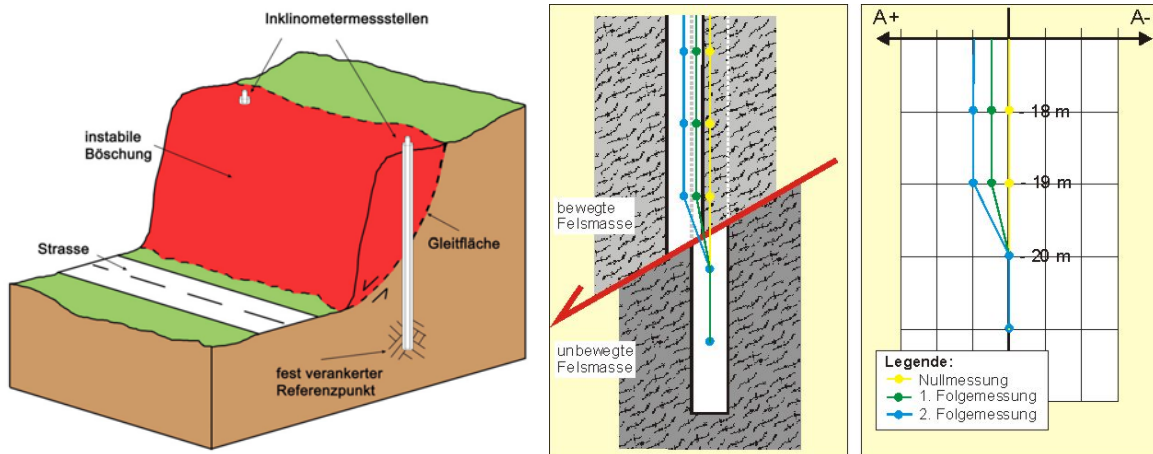


Abb. 1: Links: Schematische Darstellung für die Instrumentierung eines Rutschhanges mit 2 Inklinometermessstellen.

Links: Schematische Gegenüberstellung von Scherbewegung und typischer Messdarstellung auf Basis dreier aufeinander folgender Inklinometermessungen.

Die Messung selbst erfolgt mit Hilfe von Inklinometersonden (Abb. 2) oder fest installierten Neigungsgebern (sog. „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 (Abb. 1, rechts).



Abb. 2: Beispiel für ein modernes Sondeninklinometer-System (Foto: SIGEO s.r.l.)

## 2. MESSSTELLENAUSBAU - MÖGLICHKEITEN UND AUSWAHLKRITERIEN

Eine Inklinometer-Messstelle besteht grundsätzlich aus einem Inklinometermessrohr, das formschlüssig in einem Bohrloch (oder Leerrohr) fixiert wird (Abb. 3). Die treffende Auswahl der Materialien und deren fachgerechter Einbau sind von entscheidender Bedeutung für das Messergebnis. Die deutsche DGGT-Empfehlung Nr. 21 [DGGT, 2002] stellt hierzu treffend fest: „Erfahrungen haben gezeigt, dass Messprobleme häufig auf die Wahl der falschen Messverrohrung und ihren nicht fachgerechten Einbau zurückzuführen sind.“ (S. 15, Abs. 3).

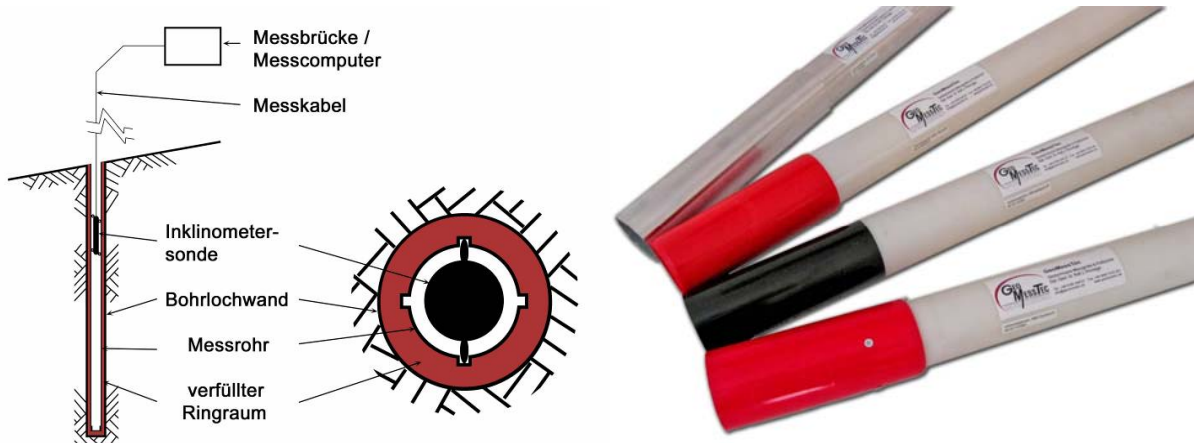


Abb. 3: Links: Schematischer Aufbau einer Inklinometermessstelle (nach ISRM, 1981, verändert).

Rechts: Beispiele für unterschiedliche Inklinometer-Messrohrtypen, von oben: Aluminiumrohr  $\varnothing$  76 mm, ABS-Rohr  $\varnothing$  71 mm / 3,5 mm Materialstärke, ABS-Rohr  $\varnothing$  70 mm / 5 mm Materialstärke mit glatter (durchmesserkonstanter) Muffe, ABS-Rohr / 5 mm Materialstärke mit Schnellkupplungssystem.

### 2.1. Inklinometermessrohr

Wesentliches Element des Inklinometermessrohrs sind 4 präzise in Längsrichtung des Rohrs gefertigte Führungsnuten, in denen bei den späteren Messungen die Rollen der Messsonde laufen.

Auf dem Markt sind eine Vielzahl von Inklinometer-Messrohrtypen verschiedenster Hersteller verfügbar, die sich neben der Rohrgeometrie und Verbindungen (Außenmuffen, durchmesserkonstante Muffen, Schnellverbindungssysteme) vor allem hinsichtlich der verwendeten Messrohrmaterialien und Materialstärken unterscheiden. In Mitteleuropa haben sich vor allem Kunststoffmessrohre (ABS) und Messrohre aus Aluminium durchgesetzt, seltener kommen Messrohre aus Stahl oder GFK zum Einsatz (Abb. 3, rechts).

Wesentliche technische Entscheidungskriterien für die Auswahl des geeigneten Messrohrtyps sind neben prinzipiellen Überlegungen zum einzusetzenden Rohrdurchmesser insbesondere die Messstellentiefe und die Bewertung des Korrosionspotenzials:

- Vor allem beim Einsatz von ABS-Rohren in verhältnismäßig tiefen Messstellenausbauten ( $>$  ca. 50 m) besteht die Gefahr, dass diese Messrohre aufgrund der Differenz zwischen Außendruck (hydrostatischer Druck des Verfüllmediums) und Rohrrinnendruck beschädigt werden. Selbst der Einsatz einer Klarwasserfüllung im Messrohr kann bei derartig tiefem Ausbau einen Rohrkollaps nicht sicher verhindern, da auch dann noch Dichteunterschiede von bis zu rd.  $0,8 \text{ g/cm}^3$  auftreten und die auftretenden Druckdifferenzen in derartigen Tiefen erheblich sind. Neben der Möglichkeit, derartig tiefe Messstellen in mehreren

Teilabschnitten zu verfüllen, kann auch von vorneherein auf stabilere Rohre mit ggf. größerer Materialstärke zurückgegriffen werden.

- Insbesondere bei aggressivem Wasserchemismus (insbes. NaCl-Gehalt) oder beim Kurzschließen von Bodenschichten mit unterschiedlichem elektrischen Potenzial können mit Aluminiumrohren ausgebaute Messstellen mittel- bis langfristig durch Korrosion der Messrohre unbrauchbar gemacht werden. Sofern dies nicht im Einklang mit einer sowieso nur kurzfristigen Messdauer steht, sollte der Einsatz von Kunststoffmessrohren 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.

## 2.2. Ringraumverfüllung

Der vollständigen und formschlüssigen Verfüllung des Ringraums zwischen Bohrlochwandung 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 stehen ein Vielzahl ungebundener und hydraulisch gebundener Baustoffe zur Verfügung, die in nachstehender Tab. 1 zusammengestellt sind.

Tab. 1: Übersicht über Verfüllmedien zur Ringraumverfüllung

ungebundene Verfüllmedien	hydraulisch gebundene Verfüllmedien
Tonpellets	Zementsuspensionen
Sand	„Dämmer“-Suspensionen (industriell hergestellte Zement-Bentonit-Mischungen)
Sand-Kies-Gemische	vor Ort hergestellte Zement-Bentonit-Suspensionen

Ungebundene Verfüllmedien werden in der Regel als Sackware in trockenem Zustand vom Bohransatzpunkt in den zumeist engen Ringspalt eingefüllt. Die Gefahr ungleichmäßiger Verteilung im Ringspalt, „Aufhängen“ an hervorstehenden Muffen und in Folge nicht ausreichend hinterfüllter Rohrstrecken besteht aus Sicht der Verfasser selbst dann, wenn Sand und Sand-Kies-Gemische eingespült werden und glattgemuffte Messrohrtypen verwendet werden. Die DGGT-Empfehlung Nr. 21 [DGGT, 2002) ergänzt hierzu: „Es wird empfohlen eine Sand-Kies-Verfüllung nur in besonderen Fällen (z.B. bei großen Karsthohlräumen im Baugrund) in Betracht zu ziehen“ (S. 17, Abs. 2), während die ISRM-Empfehlung [ISRM, 1981] grundsätzlich nur die Verfüllung mit Suspension vorsieht.

Selbst wenn Suspensionen aufgrund ihrer Fließeigenschaften eine deutlich formschlüssigere Verfüllung des Ringspalts ermöglichen, ist bei diesen Feststoff-Wasser-Gemischen das Absatzmaß der eingesetzten Suspension, d.h. 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 die oberen 3 Meter nicht hinterfüllte Messrohrstrecke.

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

### 3. 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 Inclinometermessungen anhand einiger praxisüblicher Kombinationen hydraulischer Verfüllmedien und Messrohrtypen untersucht.

Für die Untersuchungen wurden insgesamt 10 Verfüllmedien herangezogen, wobei es sich um acht handelsübliche Produkte (verschiedene Dämmel<sup>®</sup>-Sorten, Hochofen-Zement) 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 hergestellt, so dass die Praxisanforderung einer guten Fließfähigkeit gegeben war.

Insgesamt wurden 20 Einaxiale Druckversuche, 20 Triaxial-Versuche, 20 Bestimmungen des Absatzmaßes sowie 40 direkte Scherversuche an Modellmessstrecken (Rohr/Verfüllmedium-Kombinationen) durchgeführt (Abb. 4).



Abb. 4: Beispiel für den kompletten Probensatz eines Verfüllmediums (hier: Verfüllmedium Blitzdämmel<sup>®</sup> mit einem W/Z-Faktor von 0,55) mit verschiedenen Messrohren und Probekörpern für ein- und triaxiale Druckversuche.

### 3.1. Technische Kennwerte der Verfüllmedien

Nachstehende Tab. 2 stellt die untersuchten Verfüllmedien und deren wesentliche technische Eigenschaften vor.

Tab. 2: Zusammenstellung der untersuchten Verfüllmedien und wesentlicher technischer Eigenschaften.

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

\* Kennwerte ermittelt nach 28 Tagen

### 3.2. Laborscherversuche an Modell-Messtrecken

Die eingesetzte 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 als Hinweis auf Tiefenlage und Bewegungsrate einer Scherfuge interpretiert.

Für die Durchführung dieser Scherversuche wurde eine vorhandene Felsschereinrichtung mit einer speziellen Probenaufnahme und Wegmesseinrichtung so modifiziert (Abb. 5), dass „Modellmessstrecken“ aus Messrohr und Verfüllmedium mit einer Höhe von 20 cm bei vertikaler Belastung über eine definierte Scherfuge abgeschert werden konnten.

Zur Verformungsaufzeichnung wurden zwei Wegaufnehmerpaare verwendet:

- Wegaufnehmer des Felsschergeräts zur Aufzeichnung der „absoluten“, von Außen auf die Modellmessstrecke aufgebrachten Verformung,
- 2 induktive Wegaufnehmer innerhalb des Messrohres, einen Zentimeter unterhalb der Scherfuge bzw. einen Zentimeter über dem Boden

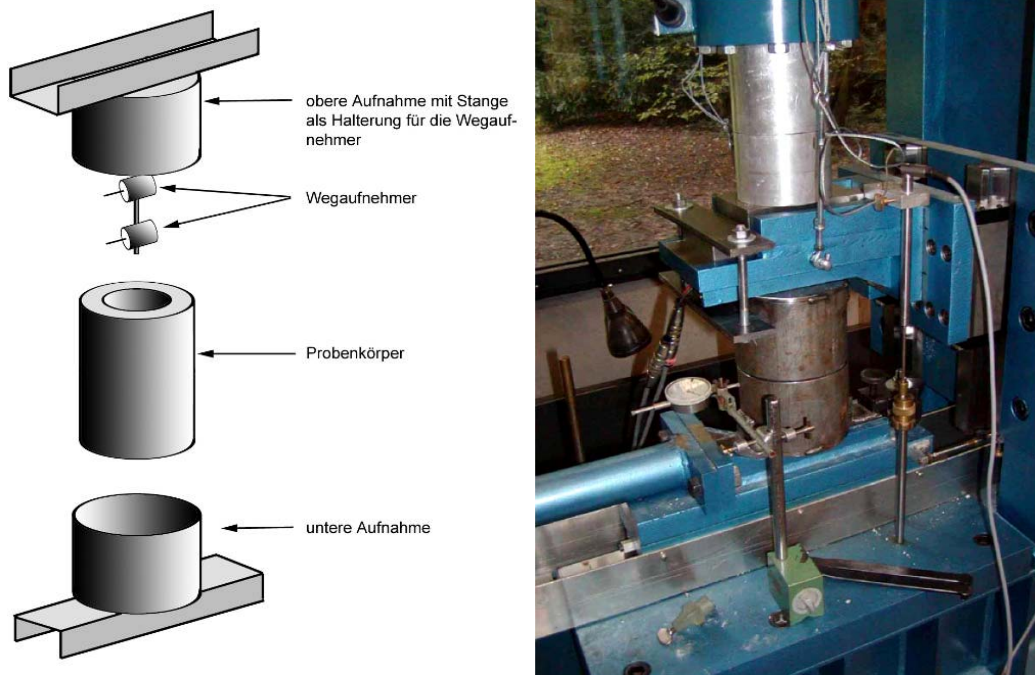


Abb. 5: Versuchsaufbau für die Laborscherversuche an Modellmessstrecken.

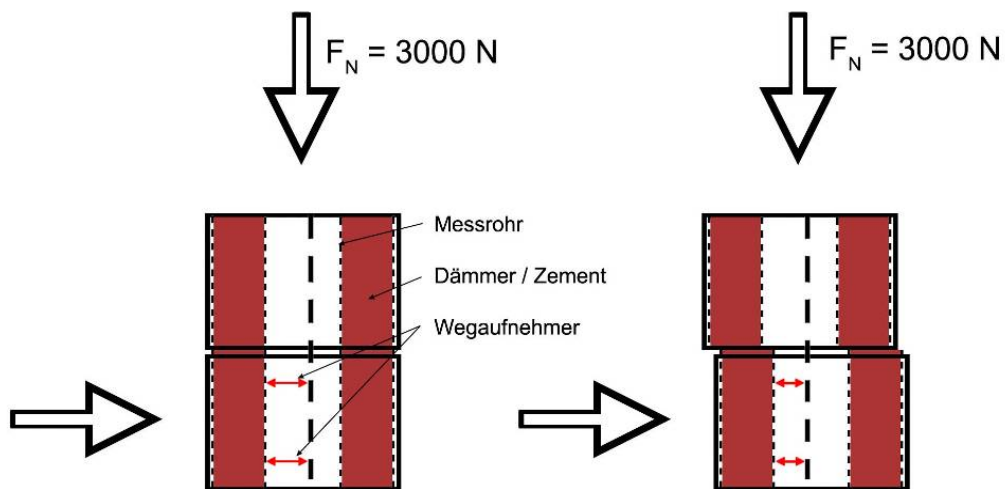


Abb. 6: Schnitt durch die Versuchsanlage zu Beginn (links) und während der Scherung (rechts)

Um eine Scherung der Probe zu erzeugen, wurde der obere Teil in der Aufnahme festgehalten und der untere Teil verschoben. Die Teilschritte betragen dabei je einen Millimeter bis ein Versatz von 10 mm erreicht war. Danach wurde noch dreimal um je 2 mm versetzt, bis die Messbereiche der Messaufnehmer ihre Grenze überschritten hatten (Abb. 6).

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>

### 3.3. 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 aufgebrauchte Verformung der Messstrecke ( $\varepsilon_A$ ) und auf der Innenseite des Messrohrs gemessener Verformung ( $\varepsilon_I$ ) wurde für jede Kombination von Messrohrtyp und Verfüllmedium der „spezifische Dämpfungsfaktor“  $F_D$  ermittelt (Tab. 3):

$$F_D = \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_I} \left[ \frac{mm}{mm} \right]$$

Tab. 3: Ermittelte „Dämpfungsfaktoren“  $F_D$  für die verschiedenen Materialkombinationen.

Probe	ABS dünnwandig	ABS dickwandig	Aluminium	ohne Rohr
	(SISGEO 0S13100600)	(SISGEO 0S13100700)	(SISGEO 0S11100540)	
BD 0,45	2,15	-	3,38	1,66
BD 0,55	1,58	2,59	1,64	1,51
BD 0,7	1,89	1,87	-	1,21
OD 0,45	1,50	1,36	3,24	1,15
OD 0,7	1,75	2,03	2,57	1,07
SD 0,45	1,14	1,33	-	1,28
Z 0,5	2,32	2,17	2,58	1,16
Z 0,8	1,61	1,39	1,78	1,87
ZB 1	1,24	1,38	1,24	1,24
ZB 2	1,40	1,26	2,18	-

Legende: BD=Blitzdämmer<sup>®</sup>, SD=Soildämmer<sup>®</sup>, OD=Originaldämmer<sup>®</sup>, Z=Zement, ZB=Zement-Bentonit-Mischung, jeweils mit Angabe des eingestellten Wasser/Feststoffanteil - Werts]

Farbcode:

Farbe	$F_D$
	< 1,5
	1,5 - 2,0
	2,0 - 2,5
	> 2,5



Es zeigten sich relativ stark differierende Dämpfungsfaktoren in einem Bereich von minimal 1,14 bis maximal 3,38. 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 - 2,32 und einem Mittelwert von 1,66 die generell günstigsten Dämpfungsraten,
- die dickwandigen ABS-Messrohre (5,0 mm Wandstärke) zeigen mit  $F_D$  zwischen 1,26 - 2,59 und einem Mittelwert von 1,71 geringfügig höhere, aber immer noch vergleichsweise günstige Dämpfungsraten,
- die Aluminium-Messrohre zeigen mit  $F_D$  zwischen 1,24 - 3,38 und einem Mittelwert von 2,33 die höchsten und damit tendenziell ungünstigsten Dämpfungsraten.

Die in einem zweiten Auswertungsschritt für jeden Messrohrtyp durchgeführte Gegenüberstellung von spezifischem Dämpfungsfaktor  $F_D$  und dem E-Modul des Verfüllmediums (Abb. 7, Abb. 8) gibt zu der Vermutung Anlass, dass grundsätzlich der Einsatz von Verfüllmedien mit höherem E-Modul (-> festere Verfüllmedien) zu höheren  $F_D$ -Faktoren führt.

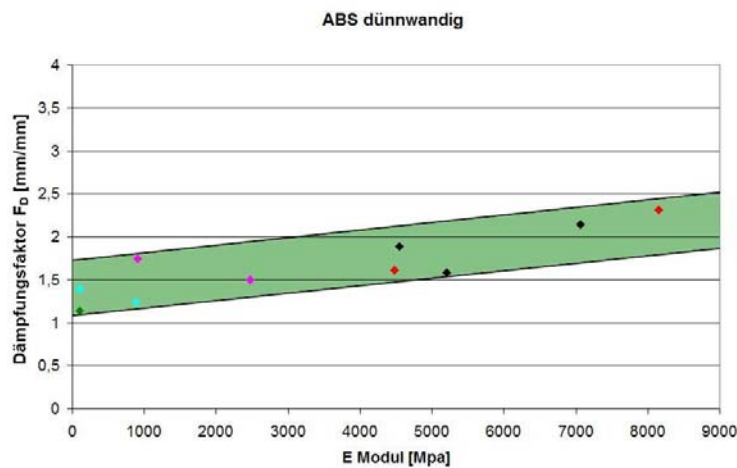


Abb. 7: Dämpfungsfaktor  $F_D$  für ABS-Messrohr 3,5 mm, aufgetragen gegen des E-Modul des Verfüllmediums.

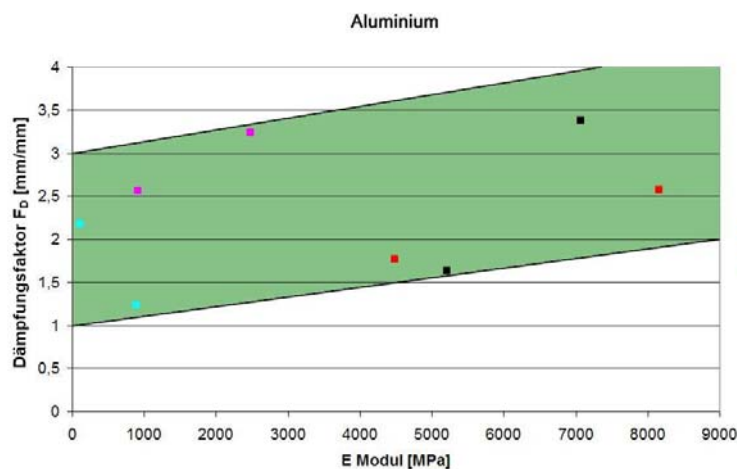


Abb. 8: Dämpfungsfaktor  $F_D$  für Aluminium-Messrohr, aufgetragen gegen des E-Modul des Verfüllmediums.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Eines der erstaunlichsten Ergebnisse der vorgestellten Laboruntersuchungen ist sicherlich, dass Verformungsraten, die aus Inklinometermessungen an Scherflächen abgeleitet werden offensichtlich nicht ohne weiteres 1:1 auf die real an einer Scher- und Gleitfläche auftretende Verformung übertragen werden können. Die aus den Versuchen ermittelten „Dämpfungsfaktoren“  $F_D$  erreichen in keinem Fall einen Wert von 1,0 und die maximal ermittelten Werte von  $> 3$  bedeuten eine erhebliche „Dämpfung“ der tatsächlichen Verformung – zumindest solange die Ringraumverfüllung nicht vollständig durchgeschert wurde. Es ist also anzunehmen, dass die im Inklinometermessrohr gemessenen Verschiebungen – zumindest im Bereich geringer absoluter Verformungen – die tatsächlichen Verschiebungen grundsätzlich eher unterbewerten.

Ebenso eindeutig lässt sich die Tatsache herausstellen, dass die Wahl der Verfüllmedien als auch die Wahl des Messrohrtyps einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis von derartigen Messungen haben. Die Tatsache, dass Verfüllmaterialien mit hohem E-Modul und hohen Festigkeiten die höchsten (ungünstigsten) Dämpfungsfaktoren aufwiesen, zeigt, dass Empfehlungen, wie die in der deutschen DGGT-Empfehlung Nr. 21 [DGGT, 2002] niedergelegte Formulierung „...ist das Verfüllmaterial den geologischen Gegebenheiten im Bereich der Messstelle anzupassen...“ nicht immer zur zielführenden Materialauswahl beitragen.

Hinsichtlich der „Dämpfung“ der Scherbewegung lieferten unabhängig von der Wahl des Messrohres die Mischungen von Soil Dämmer<sup>®</sup> und die selbst gemischten Zement-Bentonit Proben (SD 0,45 und ZB1) die besten Ergebnisse. Die ermittelten Faktoren dieser Proben variierten zwischen 1,14 und 1,38. Die schlechtesten Faktoren lieferten die Proben aus festerem Blitzdämmer<sup>®</sup> und reinem Zement mit geringen Wasseranteilen (BD 0,45 und Z 0,5). Die Faktoren lagen bei allen Kombinationen mit den verschiedenen Messrohren über einem Wert von 2 und stiegen bis auf einen Maximalwert von 3,38 (BD 0,45; Aluminium Messrohr). Erhöht man den Wasseranteil der Suspension, verbessern sich die Ergebnisse zwar auf Faktoren von etwa 1,6 bis 1,9 (BD 0,7 und Z 0,8), trotzdem sollte aber von einem Messstellenausbau mit Blitzdämmer oder reinem Zement verzichtet werden.

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.

## 5. EMPFEHLUNGEN

Auf Grundlage der dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen sind aus Sicht der Verfasser folgende 5 Grundregeln für eine optimale Wahl von Messrohr und Verfüllmedium herauszuarbeiten:

1. **ABS-Messrohre vor Aluminiumrohren:** In Konsequenz der gemessenen Verformungseigenschaften und unter Berücksichtigung der geringen Korrosionsanfälligkeit sind ABS-Messrohre aus Sicht der Verfasser als Einbaumittel der Wahl anzusehen. Sie sind Aluminiumrohren unter den allermeisten Einsatzumständen vorzuziehen.
2. **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 die besten Ergebnisse und die geringsten Schwankungen im Dämpfungsfaktor.
3. **Hydraulische vor ungebundenen Verfüllmedien:** Hinsichtlich der verwendeten Verfüllmedien sind aus Sicht der Verfasser hydraulische Verfüllmedien aufgrund ihrer grundsätzlich besseren Eignung zur formschlüssigen Verfüllung des Ringraums zwischen Messrohr und Bohrlochwandung ungebundenen Medien wie Sand, Sand-Kies-Gemischen o.ä. vorzuziehen. Dass ein Einsatz derartiger Medien unter problematischen Verhältnissen, wie beim Antreffen von Hohlräumen, dennoch sinnvoll sein kann, bleibt davon unberührt.
4. **Suspensionsstabile vor instabilen Suspensionen:** Werden hydraulische Verfüllmedien eingesetzt, so ist der Vorzug weitgehend suspensionsstabilen Materialien zu geben, bei denen ein möglichst geringes Absetzmaß sicherstellt, dass einmal verfüllte Bereiche auch nach Abbinden der Suspension dauerhaft formschlüssig verfüllt bleiben. Wurden bei der Messstelleneinrichtung instabile Suspensionen verwendet, muss dies bei der Interpretation der Messungen in den vermutlich nicht hinterfüllten (oberflächennahen) Bereichen entsprechend berücksichtigt werden.
5. **Wenig feste vor festen Verfüllmedien:** Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, dass der Einsatz von Verfüllmaterialien mit geringen E-Modulen / geringer Festigkeit ein günstigeres Systemverhalten erwarten lässt, als Materialien mit hohen E-Modulen / hoher Festigkeit. Die bisher vertretene Hypothese der Korrelation von Verfüllmedium und Boden würde bedeuten, dass in Fels festere und in Böden weniger feste Verfüllmaterialien einzusetzen sind. Im vorliegenden Modellversuch, der hinsichtlich seiner Rahmenumstände gut geeignet erscheint, die Verhältnisse einer Scherfuge in Fels wiederzugeben, stellten sich demgegenüber die weniger festen Materialien mit niedrigen E-Modulen als die besten Überträger der Scherbewegungen auf die Messrohre heraus.

## **6. DANKSAGUNGEN**

Die Verfasser bedanken sich bei den Firmen SISGEO/Masate, GeoMessTec/Bernried, Süd-Chemie/Moosburg und HeidelbergCement Baustoffe für Geotechnik/Ennigerloh für die Unterstützung der Forschungsarbeit und die großzügig zur Verfügung gestellten Materialproben Ihrer Produkte.

## **LITERATUR**

- DGGT – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2002): Empfehlung Nr. 21 – Verschiebungsmessungen quer zur Bohrlochachse – Inklinometer- und Deflektometermessungen, Bautechnik, 4/2002.
- Düllmann, J. (2008): Versuche zur Optimierung des Einbaus von Inklinometermessrohren; Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 2008 (unveröffentlicht).
- ISRM – International Society for Rock Mechanics (1981): Suggested Methods for monitoring rock movement using a probe inclinometer.- in: Ulusay, R & Hudson, J.A. ((2007): The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006: S. 575-587.