

# Zum Einfluss des Messstellenausbaus auf Inklinometermessungen in Verbaumaßnahmen, Boden und Fels

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Ralf J. Plinninger  
Dr. Plinninger Geotechnik, Kirchweg 16, D-94505 Bernried  
email: [rp@plinninger.de](mailto:rp@plinninger.de)

Prof. Dr.-Ing. Michael Alber  
Ruhr-Universität Bochum, Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum  
email: [michael.alber@ruhr-uni-bochum.de](mailto:michael.alber@ruhr-uni-bochum.de)

MSc.-Geol. Jan Düllmann, Max Bögl Bau GmbH, Max-Bögl-Straße 1, 92369 Sengenthal/Neumarkt,  
email: [jan.duellmann@gmx.de](mailto:jan.duellmann@gmx.de)

## Zusammenfassung

Die messtechnische Überwachung von Verbaumaßnahmen, Böschungen und natürlichen Hängen in Boden und Fels mit Vertikalinklinometern stellt eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren der Geotechnik dar. Mit diesem Verfahren lassen sich bruchlose Verformungen (z.B. von Verbaumaßnahmen) und Massenbewegungen entlang definierter Scherfugen (z.B. Rotationsrutschungen oder Felsgleitungen) hinsichtlich Lage und Bewegungsbetrag erfassen. Bei einer großen Vielzahl auf dem Markt verfügbarer Messrohrtypen und Verfüllmedien stellt sich aber zwangsläufig 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 mit Laborversuchen unterschiedliche Materialkombinationen von Ringraumverfüllung und Messrohrtyp auf das Ergebnis von Inklinometermessungen an Gleit- und Scherflächen untersucht wurden. Der Beitrag zeigt darüber hinaus mögliche Konsequenzen, sowie praxisorientierte Empfehlungen zu deren Vermeidung auf.

## 1 Einführung: Messverfahren und Messgeräte

Vertikalinklinometer-Messungen stellen eines der am häufigsten eingesetzten geotechnischen Feldversucherverfahren zur Überwachung von Verbaumaßnahmen, Böschungen und natürlichen Hängen in Boden und Fels dar (Bild 1).



Bild 1: Inklinometermessung zur Überwachung einer Bohrpfahlwand bei einer tiefen innerstädtischen Baugrube (Foto: Dr. Plinninger Geotechnik).

Die Messung selbst erfolgt mit Hilfe von mobilen Sondeninklinometer-Systemen (Bild 1, Bild 2) oder mit Hilfe fest in verschiedenen Teufen aufgehängter Neigungsgeber (sog. „Ketten- oder „in-place - Inklinometer“).

Mit beiden Bauformen wird die absolute Neigung eines Teufenabschnitts in ein- bzw. zwei Raumrichtungen hochgenau ermittelt. Aus mehreren zeitlich aufeinander folgenden Messungen können relative Neigungsveränderungen in verschiedenen Teufen und Richtungen ermittelt und daraus auf die Relativverformung rechtwinklig zur Messstellenachse geschlossen werden.



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

Hinsichtlich der Verformungsmechanismen, die zu einem Messergebnis führen, können folgende zwei charakteristische Typen unterschieden werden:

1. duktile, bruchlose Verformungen (Bild 3), wie sie z.B. für der Verformung von Verbaumaßnahmen charakteristisch sind;
2. auf einer Durchscherung der Messstrecke basierende Verformungen. Derartige Verformungen (Bild 4) sind charakteristisch für Gleit- oder Scherflächen bei Böschungsbrüchen oder Hangbewegungen in Fest- oder Lockergestein.

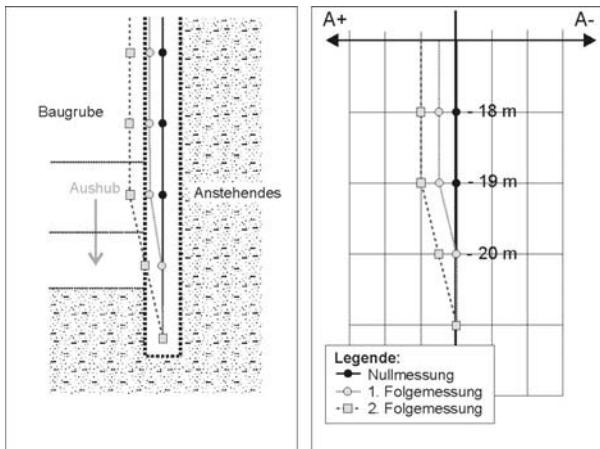


Bild 3: Schematische Darstellung einer Inklinometermessung bei bruchloser Deformation - „Ausbauchen“ eines Baugrubenverbaus.

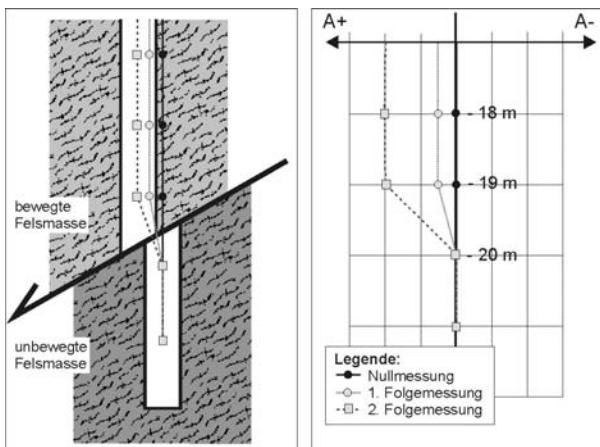


Bild 4: Schematische Darstellung einer Inklinometermessung bei bruchhafter Deformation - Schieferungsparallele Scherung eines metamorphen Festgestein.

## 2 Messstellenausbau - Möglichkeiten und Auswahlkriterien

Vor der Durchführung der eigentlichen Inklinometermessung muss im Beobachtungsbereich zunächst eine entsprechende Messstelle eingerichtet werden. Diese besteht grundsätzlich aus einem Inklinometermessrohr, das formschlüssig im Untergrund fixiert wird (Bild 5).

Während bei der Instrumentierung von Bohrfählen, Spundwänden oder Doppel-T-Trägern auch Installatio-

nen an Bewehrungskörben oder in zuvor eingebrachten Leerrohren möglich sind, sind bei Instrumentierungen im anstehenden Boden oder Fels meist Bohrungen erforderlich.

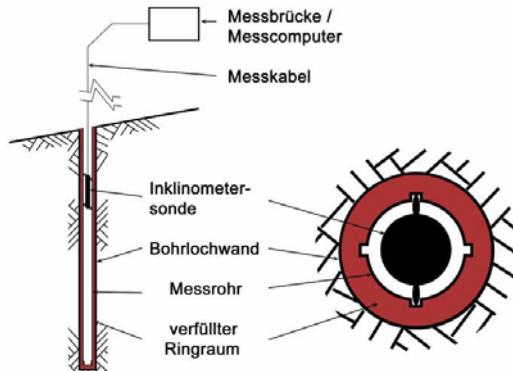


Bild 5: Schematischer Aufbau einer Inklinometermessstelle (aus [2], nach ISRM, 1981, verändert).

Die zutreffende Auswahl der Installationsmaterialien und deren fachgerechter Einbau sind von entscheidender Bedeutung für das Messergebnis. Die DGGT-Empfehlung Nr. 21 [1] stellt hierzu z.B. fest:

„Erfahrungen haben gezeigt, dass Messprobleme häufig auf die Wahl der falschen Messverrohrung und ihren nicht fachgerechten Einbau zurückzuführen sind.“ ([1], S. 15, Abs. 3).

### 2.1 Das Inklinometermessrohr

Wesentliches Element des Inklinometermessrohrs sind 4 präzise in Längsrichtung des Rohrs gefertigte Führungsnuhnen, in denen bei den späteren Messungen die Rollen der Messsonde laufen, bzw. in denen die Geber einer Inklinometerkette geführt werden.

Auf dem Markt sind eine Vielzahl von Inklinometer-Messrohrtypen verschiedener Hersteller verfügbar, die sich neben der Rohrgeometrie und Verbindungen (Außenmuffen, durchmesserkonstante Muffen, Schnellverbindungssysteme, u.v.m.) vor allem hinsichtlich der verwendeten Messrohrmaterialien und Materialstärken unterscheiden (Bild 6).



Bild 6: Beispiele für unterschiedliche Inklinometer-Messrohrtypen aus Aluminium und ABS (Foto: GeoMessTec e.K.).

In Mitteleuropa haben sich heute vor allem Kunststoffmessrohre (meist aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat, „ABS“) durchgesetzt. Messrohre aus Aluminium kommen seltener, Messrohre aus Stahl oder GFK nur in Ausnahmefällen zum Einsatz.

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 (über ca. 50 m) besteht die Gefahr, dass Messrohre aufgrund der Differenz zwischen Außendruck (hydrostatischer Druck des Verfüllmediums) und Rohr-Innendruck kollabieren und beschädigt werden. Selbst der Einsatz einer Klarwasserfüllung im Messrohr kann bei derartig tiefen Messstellen einen Rohrkollaps nicht sicher verhindern, da auch dann noch Dichteunterschiede von bis zu rd. 0,8 g/cm<sup>3</sup> auftreten und die auftretenden Druckdifferenzen in derartigen Tiefen erheblich sind. Neben der Möglichkeit, derartig tiefe Messstellen in mehreren Teilaabschnitten zu verfüllen, sollte hier von vorneherein auf stabilere Rohre mit ggf. größerer Materialstärke (und größerer Druckbeständigkeit) zurückgegriffen werden.
- Insbesondere bei aggressivem Wasserchemismus (insbes. NaCl-Gehalt) oder beim Kurzschluss von Bodenhorizonten mit unterschiedlichem elektrischen Potenzial können Messrohre aus Aluminium oder Stahl mittel- bis langfristig durch Korrosion der Messrohre unbrauchbar werden. Sofern dies nicht im Einklang mit einer sowieso nur kurzfristigen Messdauer steht, sollte der Einsatz von Kunststoffmessrohren oder Schutzbeschichtungen erworben 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 Die 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 nicht an den Boden angeschlossen sind, oder gar 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 Tabelle 1 zusammengestellt sind.

*Tabelle 1: Übersicht über Verfüllmedien zur Ringraumverfüllung von Inklinometermessstellen*

ungebundene Verfüllmedien	hydraulisch gebundene Verfüllmedien
Tonpellets	Zementsuspensionen
Sand	„Dämm“-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 Bohrplatzpunkt in den meist engen Ringspalt zwischen Bohrloch / Bohrverrohrung und Messrohr eingefüllt. Die Gefahr ungleichmäßiger Verteilung im Ringspalt, „Aufhängen“ an hervorstehenden Muffen, Nachsacken 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 [1] ergänzt hierzu:

*„Es wird empfohlen, eine Sand-Kies-Verfüllung nur in besonderen Fällen (z.B. bei großen Karst-hohlräumen im Baugrund) in Betracht zu ziehen“ ([1], S. 17, Abs. 2).*

Die entsprechende ISRM-Empfehlung [5] sieht grundsätzlich nur die Verfüllung mit Suspension vor.

**Suspensionen hydraulisch gebundener Verfüllmedien** ermöglichen aufgrund ihrer Fließeigenschaften eine deutlich formschlüssigere Verfüllung des Ringspalts. Bei diesen Feststoff-Wasser-Gemischen ist aber das Absatzmaß der eingesetzten Suspension zu beachten, d.h. das Abtrennen von Anmachwasser und Feststoffanteil beim Abbindeprozess: So bedeutet beispielsweise ein spezifisches Absatzmaß von 10 % bei einer 30 m tiefen Messstelle eine unweigerlich auf die oberen 3 Meter nicht (bzw. mit Wasser) hinterfüllte Messrohrstrecke.

Den Verformungseigenschaften des gewählten Verfüllmediums ist – insbesondere bei Messergebnissen, die auf einer Durchscherung der Messstrecke beruhen – ebenfalls ein nennenswerter Einfluss auf das Messergebnis einzuräumen. Bis dato lagen hierzu jedoch keine systematischen Ergebnisse vor.

### 3 Laboruntersuchungen

Im Rahmen einer Masterarbeit an der Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie der Ruhr-Universität Bochum [2] wurde im Laborversuch 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 10 Verfüllmedien herangezogen, wobei es sich um acht handelsübliche Produkte (verschiedene Dämmer®-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 (Bild 7).

*Tabelle 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* [%]
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	CEM III/B Zement (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



*Bild 7: Beispiel für den kompletten Probensatz eines Verfüllmediums (hier: Verfüllmedium Blitzdämmer® mit einem W/Z-Faktor von 0,55) mit verschiedenen Messrohren und Probekörpern für ein- und dreiaxiale Druckversuche.*

#### 3.1 Technische Kennwerte der Verfüllmedien

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

### 3.2 Laborscherversuche an Modell-Messstrecken

Die eingesetzte Versuchseinrichtung diente dazu, den Vorgang einer Felsgleitung entlang einer definierten Scherfuge zu simulieren („Translationsrutschung“, Schema siehe Bild 4).

Für die Durchführung der Scherversuche wurde das bei der Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie der RUB vorhandene Felsschergerät mit einer speziellen Probenaufnahme und Wegmesseinrichtung so modifiziert (Bilder 8 bis 10), dass „Modellmessstrecken“ aus Messrohr und Verfüllmedium mit einer Höhe von 20 cm bei vertikaler Belastung über eine definierte Scherfuge abgesichert werden konnten.

Zur Verformungsaufzeichnung wurden zwei Wegaufnehmerpaare verwendet:

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

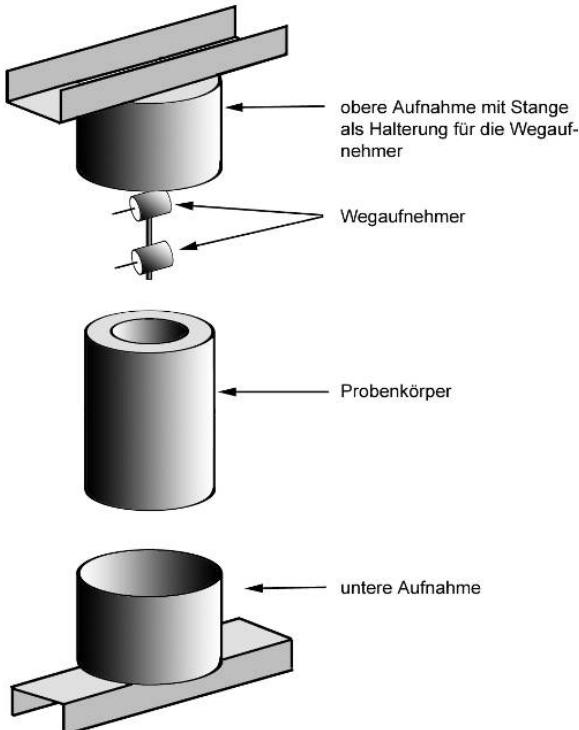


Bild 8: Schematischer Versuchsaufbau für die Laborscherversuche der Ruhr-Universität Bochum an Modellmessstrecken.

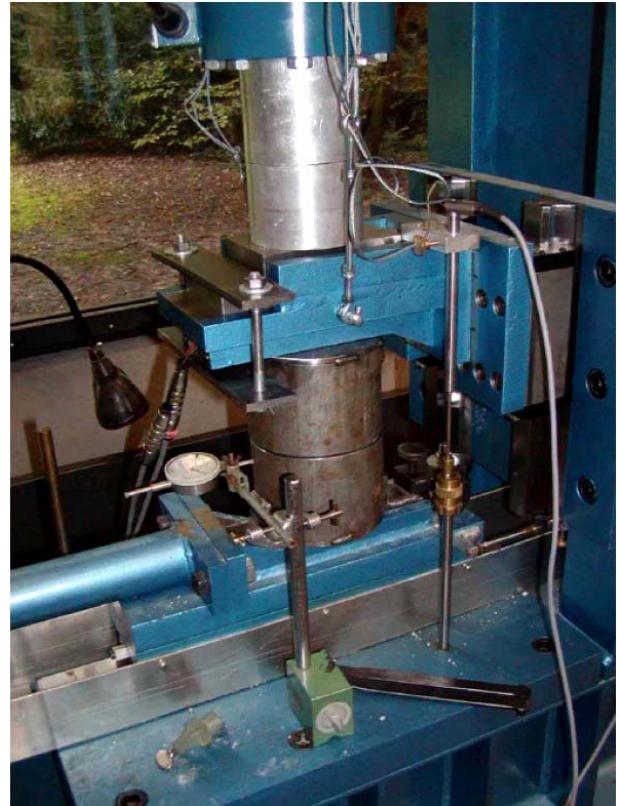


Bild 9: Foto der Versuchsausrüstung vor Versuchsbeginn.

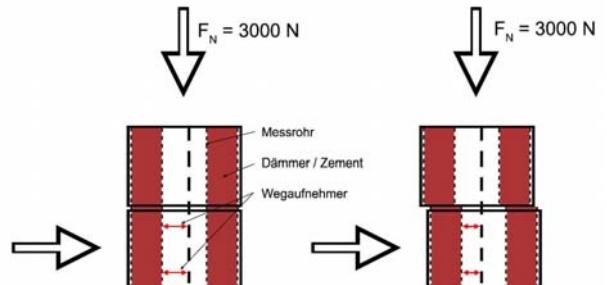


Bild 10: Schnitt durch die Versuchsausrüstung zu Beginn (links) und während der Scherung (rechts)

Um eine Scherung der Probe zu erzeugen, wurde der obere Teil in der Aufnahme festgehalten und der untere Teil verschoben. Die Teilschritte betrugen 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 (Bild 10). Bei diesen absoluten Verformungsbeträgen wäre auch im realen Einsatz das Messrohr so verformt, dass dessen Messbarkeit zumindest in Frage gestellt werden muss.

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  $1,5 \text{ bis } 2,0 \text{ g/cm}^3$

### 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 aufgebrachter Verformung der Messstrecke ( $s_A$ ) und auf der Innenseite des Messrohrs ge-

messener Verformung ( $s_I$ ) wurde für jede Kombination von Messrohrtyp und Verfüllmedium der „spezifische Dämpfungsfaktor“  $F_D$  bei Versuchsende ermittelt (Tabelle 3):

$$F_D = \frac{s_A}{s_I} \left[ \frac{mm}{mm} \right]$$

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

Probe	ABS dünnwandig	ABS dickwandig	Aluminium	ohne Rohr
	(SISGEO S131)	(SISGEO S141)	(SISGEO S111)	
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®, SD=Soildämmer®, OD=Originaldämmer®, Z=Zement, ZB=Zement-Bentonit-Mischung, jeweils mit Angabe des eingestellten Wasser/Feststoffanteil - Werts]

Farbcode:

Schattierung	$F_D$
	< 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 (ohne Messrohr bis minimal 1,07) 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 FD zwischen 1,1 - 2,3 und einem Mittelwert von rd. 1,7 die generell günstigsten Dämpfungsichten,
- die dickwandigen ABS-Messrohre (5,0 mm Wandstärke) zeigen mit FD zwischen 1,3 - 2,6 und einem Mittelwert von rd. 1,7 geringfügig höhere, aber immer noch vergleichsweise günstige Dämpfungsichten,

- die Aluminium-Messrohre zeigen mit FD zwischen 1,2 - 3,4 und einem Mittelwert von 2,3 die höchsten und damit tendenziell ungünstigsten Dämpfungsichten.

Die in einem zweiten Auswertungsschritt für jeden Messrohrtyp durchgeführte Gegenüberstellung von spezifischem Dämpfungsfaktor  $F_D$  und dem E-Modul des Verfüllmediums (Bilder 11 und 12) gibt zu der Vermutung Anlass, dass grundsätzlich der Einsatz von Verfüllmedien mit höherem E-Modul (-> festere Verfüllmedien) zu höheren  $F_D$ -Faktoren führt.

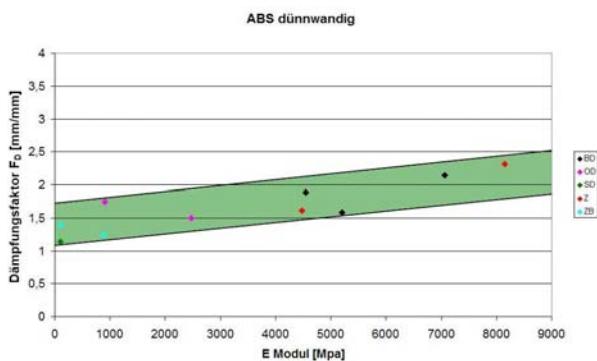


Bild 11: Dämpfungsfaktor  $FD$  für ABS-Messrohr 3,5 mm, aufgetragen gegen des E-Modul des Verfüllmediums.

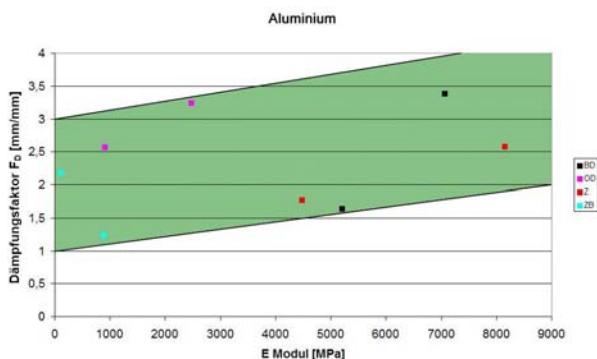


Bild 12: Dämpfungsfaktor  $FD$  für Aluminium-Messrohr, aufgetragen gegen des E-Modul des Verfüllmediums.

### 3.4 Zusammenfassung der Laborversuche

Eines der erstaunlichsten Ergebnisse der vorgestellten Laboruntersuchungen ist sicherlich, dass Verformungsraten, die aus Inklinometermessungen an Scherflächen abgeleitet werden, offensichtlich nicht immer ohne weiteres 1:1 auf die real an einer Scher- und Gleitfläche auftretende Verformung übertragen werden können.

Die aus den Versuchen ermittelten „Dämpfungsfaktoren“  $FD$  erreichen in keinem Fall einen Wert von 1,0 und die maximal ermittelten Werte von  $> 3$  bedeuten eine erhebliche „Dämpfung“ der tatsächlichen Verformung. Es ist also anzunehmen, dass die im Inklinometermessrohr gemessenen Verschiebungen 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) Dämpfungs-

faktoren aufwiesen, zeigt, dass Empfehlungen, wie der in der deutschen DGTT-Empfehlung Nr. 21 [1] niedergelegte Hinweis, 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® 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® 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 Messstellaenausbau 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.

### 4 Mögliche Fehlinterpretationen infolge des „Dämpfungseffekts“

Die Laborversuche haben gezeigt, dass sich die in einer versagenden Böschung oder einem Hang auftretenden Verschiebungen entlang einer definierten Scherfläche bei den Inklinometermessungen ggf. nur mit geringeren Beträgen also „gedämpft“ wiedergegeben werden. Die Probleme, die sich daraus ergeben können, sollen mit nachfolgendem, hypothetischem Beispiel veranschaulicht werden.

Bei einem  $30^\circ$  geneigten Lockergesteinshang aus steifem, leichtplastischen Ton der Bodengruppe TL ( $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 10 \text{ kN/m}^2$  und  $\varphi = 32,5^\circ$ ) wurden in einer FE-Modellrechnung die Festigkeitsparameter zunächst so lange abgemindert, bis ein Böschungsversagen mit typischem Gleitkreis eintrat (Bild 13).

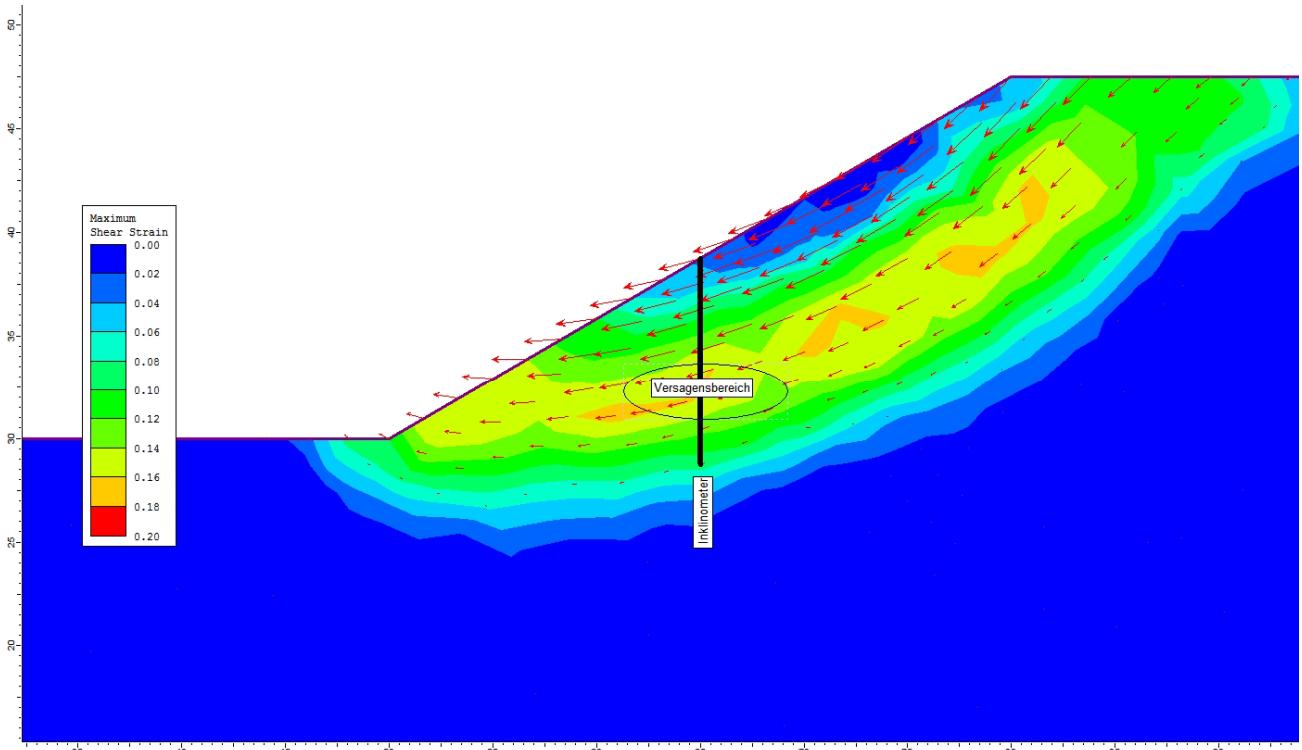


Bild 13: FE-Modellierung eines Böschungsbruchs in einer mit  $30^\circ$  geneigten Böschung. In der Bildmitte die Position und Tiefenlage der hypothetischen Inklinometermessstelle.

Die Betrachtung der horizontalen Verschiebungen entlang einer hypothetischen Inklinometermessstelle (Bild 14) zeigt, dass im Bereich des Grenzzustands eine Messgenauigkeit von rd. 1 mm notwendig wäre, um den Beginn des Böschungsversagens und die Tieflage der Scherfuge zu erfassen.

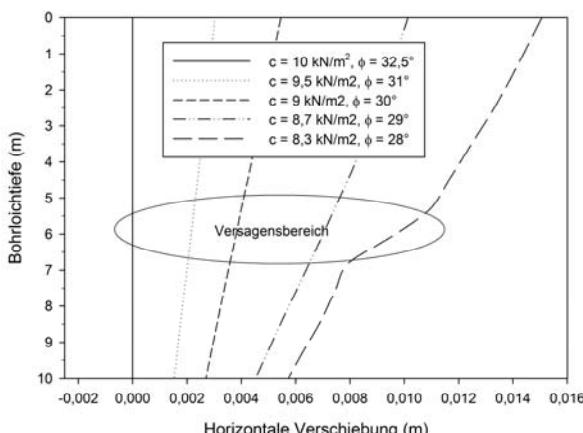


Bild 14: Rechenergebnisse der horizontale Verformungen in der hypothetischen Inklinometermessstelle, aufgetragen gegen die Teufe für verschiedene Parameterkombinationen..

Bei einer ungünstigen Kombination von Messrohr und Verfüllmedium mit einem Dämpfungsfaktor  $F_D \approx 3$  würde im Grenzzustand der Böschung trotz einer bereits kritischen Bodenverformung von rd. 1 mm nur eine horizontale Verschiebung von nur 0,3 mm aufgezeichnet werden.

Mit diesem (zu) niedrigen Messwert der tatsächlichen Verformung die Böschung würde das Versagen der Böschung entweder nicht erkannt werden können, bzw. ggf. fälschlich als (noch) standsicherer Zustand beurteilt werden, obwohl bereits der Bruchzustand eingetreten und eine Gleitfuge ausgebildet wurde.

Ähnliches lässt sich für Felsböschungen modellieren, wobei die Verschiebungen vor dem Versagen einer diskreten Scherfläche noch geringer sind, d.h. die Anforderungen an die Auflösung der Verschiebungen noch höher sein müssen.

## 5 Ausblick / Laufende Untersuchungen

Aufbauend auf den vorgestellten Laborversuchen an kleinmaßstäblichen Modellmessstrecken werden derzeit durch die Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie der Ruhr-Universität Bochum Großscherversuche durchgeführt, bei denen in Betonblöcke installierte Messstrecken mit 1,0 m Länge unter Realbedingungen definiert abgesichert und mit einem Sondeninklinometer vermessen werden.

Diese Versuche sind zum Zeitpunkt der Drucklegung der schriftlichen Fassung dieses Beitrags noch nicht abgeschlossen. Erste Ergebnisse sollen jedoch im Rahmen der mündlichen Präsentation im Januar 2010 vorgestellt werden.

## 6 Empfehlungen

Auf Grundlage der dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen sind aus Sicht der Verfasser derzeit folgende 5 Grundregeln für eine optimale Wahl von Messverrohrung und Verfüllmedium bei Vertikalinklinometer-Messstellen herauszuarbeiten:

1. **ABS-Messrohre vor Aluminiumrohren:** In Konsequenz der im Labor gemessenen Verformungseigenschaften und unter Berücksichtigung der geringen Korrosionsanfälligkeit sind ABS-Messrohre aus Sicht der Verfasser als Einbaumittel der Wahl anzusehen. Sie sind Aluminiumrohren (und Stahlrohren) 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 im Laborversuch die besten Ergebnisse und geringsten Schwankungen im Dämpfungsfaktor.
3. **Hydraulische vor ungebundenen Verfüllmedien:** Hydraulische Verfüllmedien sind 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 weitgehend stabilen Suspensionen der Vorzug 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 Messstelleinrichtung instabile Suspensionen verwendet, müssen diese Strecken entweder nachverfüllt oder bei der Interpretation der Messungen entsprechend berücksichtigt werden.
5. **Wenig feste vor festen Verfüllmedien:** Auf Basis der bisherigen Ergebnisse ist zu vermuten, dass der Einsatz von Verfüllmaterial mit geringerem E-Modul / geringerer Festigkeit ein günstigeres Systemverhalten erwarten lässt, als ein Material mit höherem E-Modul / 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. Auch 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.

## 7 Danksagungen

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

## 8 Literatur

- [1] DGQT – DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. (2002): Empfehlung Nr. 21 – Verschiebungsmessungen quer zur Bohrlochachse – Inklinometer- und Deflektometermessungen, Bau-technik, 4/2002.
- [2] DÜLLMANN, J. (2008): Versuche zur Optimierung des Einbaus von Inklinometermessrohren; Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 2008 (unveröffentlicht).
- [3] DÜLLMANN, J., PLINNINGER, R.J. & ALBER, M. (2009a): Systematische Analyse von Ringraumverfüllung und Messverrohrung bei Inklinometermessstellen.- in: ÖSTERREICHISCHER INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREIN (Hrsg., 2009): Tagungsbeiträge der 7. Österreichischen Geotechniktagung, 21./22.01.2009, Wien, 2009: 269 - 280.
- [4] DÜLLMANN, J., PLINNINGER, R.J. & ALBER, M. (2009b): Analyse des Ausbaus von Inklinometermessstellen und dessen Einfluss auf das Messergebnis.- in: SCHWERTER, R. (Hrsg., 2009): Veröffentlichungen 17. Tagung für Ingenieurgeologie - Zittau 6.-9. Mai 2009: 85 - 89.
- [5] ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1981): Suggested Methods for monitoring rock movement using a probe inclinometer.- in: ULUSAY, R & HUDSON, J.A. (Hrsg., 2007): The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006: S. 575-587.