



Nutzbarkeit numerischer Simulationen zur Bestimmung der Dämpfungsfaktoren für Vertikalinklinometermessungen

Usability of numerical simulations for the determination of damping coefficients for vertical inclinometer measurements

Katharina Bluck¹

¹ Katharina Bluck, Ruhr-Universität Bochum, Katharina.Bluck@rub.de

Zusammenfassung

Vertikalinklinometermessungen stellen ein wichtiges Verfahren zur Überwachung von Hangbewegungen dar. Die externen Verschiebungen sind hierbei oft höher als die internen vom Inklinometer gemessenen. Zur Ermittlung des Einflusses der Ringraumverfüllung und der Messverrohrung auf die Messergebnisse eines Inklinometers hat die Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie der Ruhr-Universität Bochum die Dämpfungsfaktoren verschiedener Kombinationen von Verfüllung und Verrohrung bestimmt. Die in den Laborversuchen ermittelten Parameter (ρ , c , K , E , einax. Druckfestigkeit, Reibungswinkel) und Randbedingungen wurden auf numerische Modelle übertragen und Dämpfungsfaktoren anhand der ermittelten Verschiebungen berechnet. Die Ergebnisse der Modellierungen zeigen, dass numerische Simulationen alternativ zu Laborversuchen eingesetzt werden können. Zahlreiche Kombinationen von Messverrohrung und Verfüllmaterial und den damit einhergehenden Dämpfungsfaktoren lassen sich schnell und kostengünstig bestimmen. Der Einbau von Vertikalinklinometern kann somit gezielter erfolgen und Messergebnisse können mit Hilfe des ermittelten Dämpfungsfaktors F_D korrigiert werden.

Schlüsselworte: Vertikalinklinometer, Inklinometermessung, Dämpfungsfaktor, Modellierung, Hangbewegung, Numerische Simulation, FLAC3D

Abstract

Verticalinclinometer measurements are an important geotechnical tool for the determination of slope movements. It is challenging to estimate the influence of the backfilling- and casing-material on the measurement results. The work group of Engineering Geology at the Ruhr-University Bochum has investigated the influence of backfilling- and casing material on the measurement results and has determined damping factors for various material combinations. The specific parameters from the laboratory tests were transferred to numerical models to get an estimation, if this method is helpful for the calculation of damping factors. Therefore the displacements has been measured internally and externally as well as compared. Numerical simulations are an alternative to laboratory tests. Numerous of different combinations of casing- and backfilling-material are possible to compute. Various damping factors can be obtained fast and cost-saving, so that the measurement results from the field tests can be corrected with the damping factors. Furthermore a projected installation of the inclinometer occur by testing the various and arbitrary combinations with the numerical model to get the effective casing and backfilling behaviour. The installation of aluminium casing is problematicly, because the modelling indicate high damping factors. Generally are thin-walled ABS-casing to prefer as well as cement, Blitzdämmter® and sand as backfillingmaterial to get low damping factors.

Keywords: Verticalinclinometer, inclinometer measurements, damping factor, modeling, slope movement, numerical simulation, FLAC3D

1 Einleitung

In der Geotechnik sind Vertikalinklinometermessungen ein gängiges Verfahren um Hangbewegungen im Locker- und Festgestein zu überwachen. Es gibt eine Vielzahl an verfügbaren Messrohrtypen und Verfüllmedien, die in unterschiedlichen Kombinationen zu unterschiedlichen Messergebnissen des Vertikalinklinometers führen.

Es galt diese zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten zu untersuchen und entsprechende Dämpfungsfaktoren zu ermitteln. Hierbei wurden zunächst Dämpfungsfaktoren im Labor bestimmt, indem die Wechselwirkung von drei Rohr-

typen und insgesamt zehn Materialien der Ringraumverfüllungen untersucht wurden. Alle Untersuchungen wurden am gleichen Festgesteinstyp durchgeführt.

Im Anschluss wurden die Laborversuche durch numerische Berechnungen modelliert. Dabei wurden die ermittelten Materialeigenschaften des Festgesteines, der Rohre und Verfüllmaterialien sowie die Randbedingungen auf das numerische Modell übertragen.

Ziel war die Überprüfung der Anwendbarkeit und Limitation numerischer Simulationen auf das Inklinometermessverfahren.

2 Inklinometermessungen

Inklinometermessungen lassen sich im Locker- und Festgestein durchführen. Es wird eine Inklinometer-Messstelle eingerichtet (Abb. 1) und über Inklinometersonden die eigentliche Messung durchgeführt. Hierbei wird die absolute Neigung der Messstelle in zwei Raumrichtungen hochgenau (auf zwei Nachkommastellen) ermittelt. Somit können zeitabhängige Neigungsveränderungen in verschiedenen Teufen und Raumrichtungen ermittelt werden und folglich Abschätzungen zur Bewegung, deren Teufe und Bewegungsbeiträge erfolgen (DÜLLMANN ET AL., 2009).

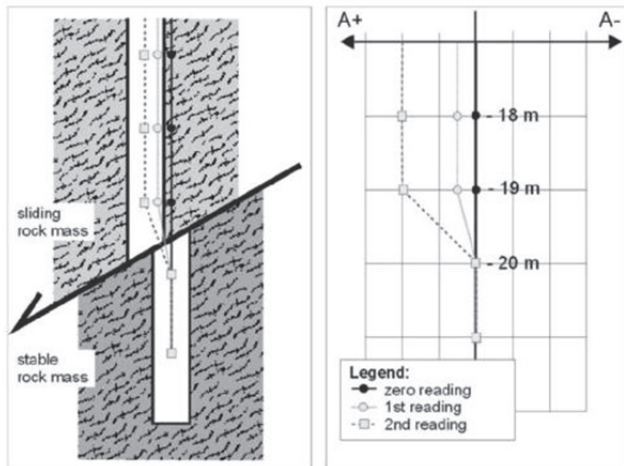


Abb. 1: Schematische Messdarstellung und Scherbewegung von drei aufeinander folgenden Inklinometermessungen.

Fig. 1: Schematic application and shear movement of three sequent inclinometer measurements.

Die deutsche DGGT- EMPFEHLUNG NR. 21 weist hierbei direkt auf die Kernproblematik hin: „Erfahrungen haben gezeigt, dass Messprobleme häufig auf die Wahl der falschen Messverrohrung und ihren nicht fachgerechten Einbau zurückzuführen sind...“ (S.15, Abs.3). Desweiteren ist laut DIN 4107-3 „der geotechnischen Situation angepasstes Material der Messverrohrung...“ (S.17, Abs.3c) zu wählen.

Durch die freigestellte und nicht vereinheitlichte Wahl der Messrohre und Verfüllmaterialien kann es folglich zu fehlerhaften Messungen kommen, da keine Abstimmung von Gebirge, Verfüllmaterial und Messrohr erfolgte.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie an der Ruhr-Universität Bochum wurde systematisch der Einfluss verschiedener Materialien auf das Messergebnis von Inklinometermessungen anhand einiger praxisüblicher Kombinationen hydraulischer Verfüllmedien und Messrohrtypen untersucht (DÜLLMANN ET AL. 2009). Die Abb. 2 zeigt hierbei zum besseren Verständnis die verwendete Apparatur.

Diese Untersuchungen und Vorgehensweisen werden im Folgenden verkürzt dargestellt und sind detailliert in DÜLLMANN ET AL. (2009): „Systematische Analyse von Ringraumverfüllungen und Messverrohrung bei Inklinometermessstellen“, nachzulesen.

3 Laboruntersuchungen

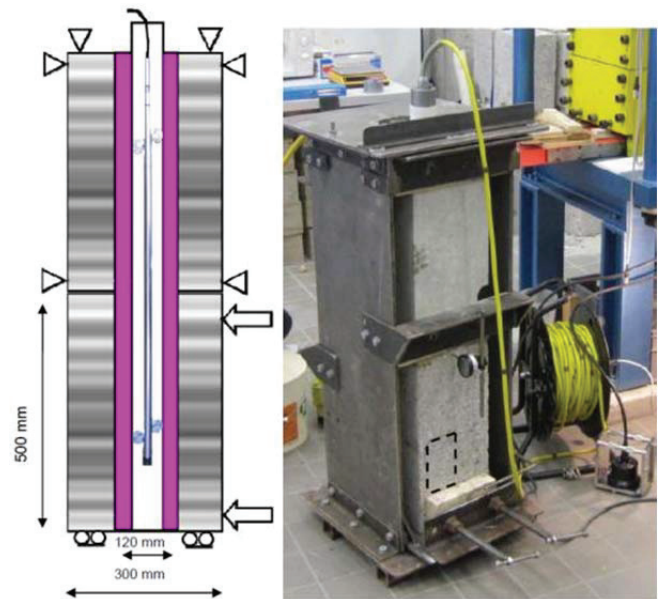


Abb. 2: Links: Schema der Testapparatur mit Betonblöcken (weiß/grau Design), Verfüllung (lila), ABS 3mm Rohr und Inklinometer. Rechts: Foto der Apparatur während eines Testes (DÜLLMANN ET AL., 2009).

Fig. 2: Left: Scheme of the test apparatus with concrete blocks (white/grey pattern), backfill (purple), ABS 3mm casing and inclinometer. Right: Photo of the apparatus during testing (DÜLLMANN ET AL., 2009).

Die Laborergebnisse lieferten die technischen Eigenschaften der Verfüllmedien und des umgebenden Betonblockes. Die Dämpfungsfaktoren F_D (s. Tab. 1) wurden mit der Formel ermittelt:

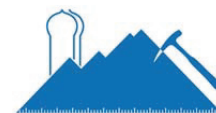
$$F_D = \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_l}$$

ε_A : Verformung der Messstrecke [mm]

ε_l : Verformung des Rohres an der Innenseite gemessen [mm]

Zusammenfassend lässt sich aus den Laborergebnissen folgende Tendenzen bestimmen:

- dünnwandige ABS-Messrohre sind gegenüber den dickwandigen zu bevorzugen
- Aluminium-Messrohre liefern tendenziell ungünstige Dämpfungsraten
- Verfüllmedien mit höherem E-Modul führen zu höheren F_D - Faktoren (DÜLLMANN ET AL. 2009).



Tab. 1: Ermittelte Dämpfungsfaktoren F_D für verschiedene Materialkombinationen (DÜLLMANN ET AL. 2009).

Tab. 1: Appraised damping factors F_D for various material combinations (DÜLLMANN ET AL. 2009).

Probe	ABS dünnwandig	ABS dickwandig	Aluminium	ohne Rohr
	SISGEO 013100600	SISGEO 013100700	SISGEO 011100540	
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	1,76	1,87
ZB 1	1,24	1,38	1,24	1,24
ZB 2	1,40	1,26	2,18	-

Legende: BD =Blitzdämmerr®, SD =Soildämmerr®, OD =Originaldämmerr®, Z =Zement, ZB =Zement-Bentonit-Mischung, jeweils mit Angabe des eingestellten Wasser/Feststoffanteil-Wertes

Farbcode der Eignung:

gut	< 1,5
mäßig	1,5-2,0
mangelhaft	> 2,0

4 Numerische Simulation

4.1 FLAC^{3D}

FLAC^{3D} ¹ ist ein drei-dimensionales kontinuumsmechanisches Rechenprogramm für geotechnische Fragestellungen, das nach der Methode der finiten Differenz arbeitet und ein explizites Zeitintegrationsschema verwendet. FLAC^{3D} bietet eine Bibliothek unterschiedlicher elastischer, elasto-plastischer, viskoser und visko-elastoplastischer Stoffgesetze. Für die vorhandene Fragestellung wurde aufgrund der aus dem Labor ermittelten Kennwerte für das Gebirge und die Verrohrungen von einem elastisch-isotropen Material ausgegangen. Für die Verfüllungen wurden folgende Stoffgesetze gewählt: Mohr-Coulomb (alle Verfüllungen ohne die folgenden Ausnahmen), Drucker-Prager (ZB1, ZB2) oder isotrop-elastisch (Sand). Die Wahl der geeigneten Stoffgesetze wurde mit Hilfe von Rückrechnungen der Laborversuche getroffen.

4.2 Modellerstellung

Die im Labor verwendete Apparatur wurde mit den genauen Abmessungen in FLAC^{3D} (ITASCA, 2008) nachmodelliert. Abb. 3 zeigt (links) die einzelnen Komponenten des numerischen Modells. Alle Berechnungen wurden für den gleichen Festgesteinstyp („Gebirge“ in Abb. 3) durchgeführt. Für die Messverrohrung und die Verfüllung wurden unterschiedliche Parameter des zu untersuchenden Materials

verwendet. Des Weiteren wird wie im Laborversuch darauf geachtet, dass eine Verschiebung von max. 3cm des unteren Blockes zum oberen gewährleistet wird.

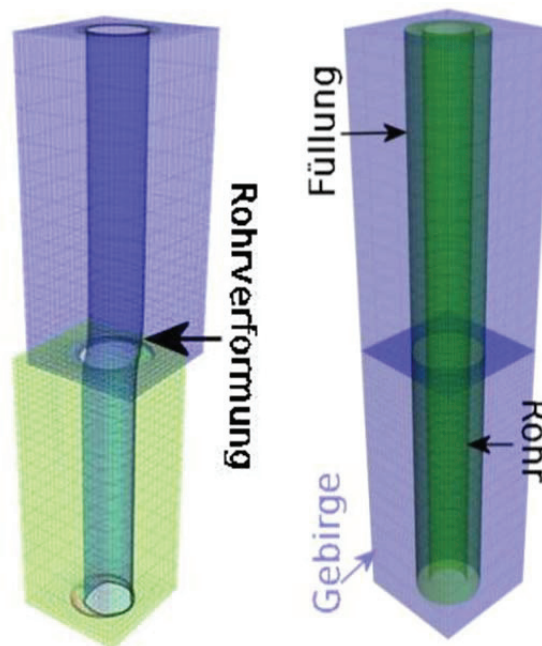


Abb. 3: Links: Numerisches Modell (unbelastet) mit Betonblock (blau), Ringraumverfüllung (äußerer Ring) und ABS 3mm Rohr (innerer Ring). Rechts: deutliche Rohrverformung nach Verschiebung des unteren Blockes um 3cm.

Fig. 3: Left: Numerical model (unstressed) with concrete block (blue), backfill (outer ring) and ABS 3mm casing (inner ring). Right: Clearly casing deformation after displacement about 3cm of the lower block.

4.3 Aufgezeichnete Parameter

Während der Berechnung wurden die folgenden Werte aufgezeichnet:

- Verschiebung/Versatz an Rohr und Gebirge in 3 Raumrichtungen an 5 Messpunkten, die einen Abstand von 10 cm zueinander haben (s. Abb.4)
- Scherspannung der Füllung

Aus diesen Parametern lassen sich die Abweichungen des Versatzes im Rohr gegenüber des äußeren Versatzes messen und die Dämpfungsfaktoren F_D ermitteln.

4.4 Messergebnisse

Die Simulationen ermöglichen ebenfalls eine Bestimmung der internen und externen Verschiebungen. Tabelle 2 zeigt die ermittelten F_D -Werte. Es wird deutlich, dass die numerischen Berechnungen beim Soildämmerr®, der ZB2 (Zement-Bentonit-Mischung 5:1) und den Clay-Pellets größere Abweichungen von den gemessenen Werten aufweist, dies ist auf das bei den durchgeführten Berechnungen verwendete Stoffgesetz zurückzuführen. Bei Anwendungsbezug sind die Berechnungen unter Verwendung eines anderen Materialgesetzes zu wiederholen. Für alle anderen Rohr/Verfüll Kombinationen, zeigt sich aber die Anwendbarkeit des entwickelten numerischen Modells.

¹ ITASCA Consulting Group, Inc. Flac (Fast Lagrangian Analysis of Continua.), Version 4.0, 2008

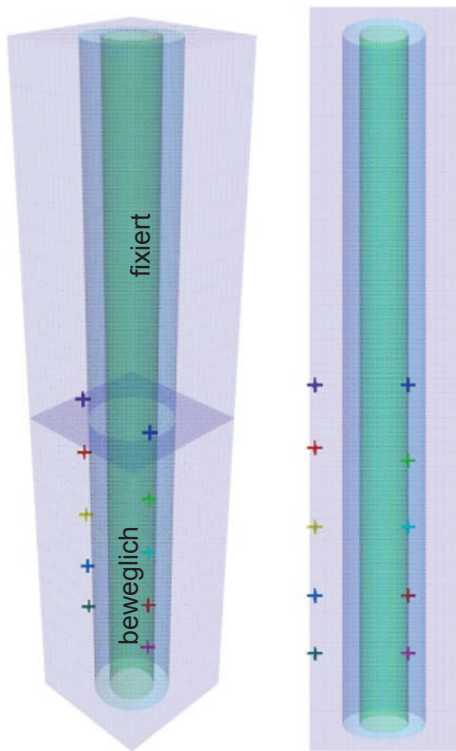


Abb. 4: Numerisches Modell in der Schräg- (links) und Frontalansicht (rechts) mit Darstellung der Aufzeichnungspunkte der Verschiebungen im „Gebirge“ (Betonblock) und an der Rohrinneenseite.

Fig. 4: Numerical model application frontal and aslope with the measurement points of the displacement in the casing and concrete block.

Der Einbau von Aluminiumrohren erweist sich als ungünstig, da hohe Dämpfungsfaktoren erzielt werden. Hohe Dämpfungsfaktoren weisen auf eine geringe interne Verschiebung hin. Generell sind daher die ABS-Rohre zu bevorzugen; vor allem dickwandige. Laut Modellierung sind alle Stoffe außer Soildämmer®, ZB 2 (Zement-Bentonit Gemisch 5:1) und die Tonpellets geeignet. Alle anderen Verfüllmedien liefern niedrige Dämpfungsraten und zeigen eine gute bis mäßige Eignung als Verfüllmaterial zwischen Verrohrung und Gebirge.

Tab. 2: Numerisch ermittelte Dämpfungsfaktoren F_D für verschiedene Materialkombiantionen.

Tab. 2: Numerically estimated damping factors F_D for various material combinations.

Probe	ABS dünnwandig	ABS dickwandig	Aluminium	ohne Rohr
	SISGEO 013100600	SISGEO 013100700	SISGEO 011100540	
BD 0,45	1,22	1,39	1,67	1,18
BD 0,55	1,36	1,34	1,43	1,25
BD 0,7	1,23	1,29	1,65	1,13
OD 0,45	1,27	1,20	2,05	1,10
OD 0,7	1,33	1,19	1,77	1,06
SD 0,45	5,98	5,27	32,24	1,10

Z 0,5	1,09	1,05	1,50	1,07
Z 0,8	1,17	1,12	1,79	1,05
ZB 1	1,83	1,51	2,26	1,14
ZB 2	4,33	4,09	11,37	1,23
Sand	1,38	1,43	3,98	1,07
CP	4,01	4,14	14,34	1,05

Legende: BD =Blitzdämmer®, SD =Soildämmer®, OD =Originaldämmer®, Z =Zement, ZB =Zement-Bentonit-Mischung, jeweils mit Angabe des eingestellten Wasser/Feststoffanteil-Wertes, CP =Clay-Pellets

Farbcode der Eignung:

gut	< 1,5
mäßig	1,5-2,0
mangelhaft	> 2,0

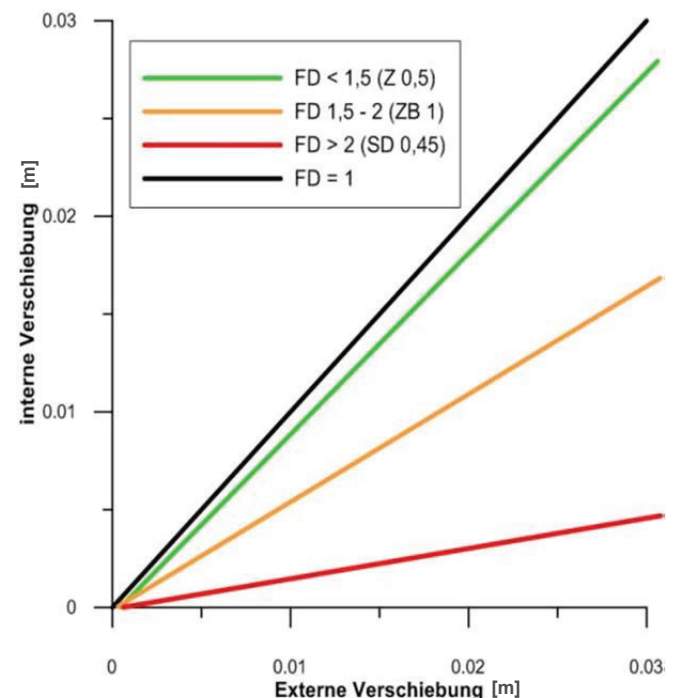


Abb. 5: Graphische Darstellung ausgewählter Dämpfungsfaktoren zur Visualisierung der Problematik (Farbcode: s. Tab.2). Reduktion der Steigung (von grün nach rot) aufgrund von fehlerhaften Verschiebungsmessungen.

Fig. 5: Application of chosen damping factors for the visualisation of the problematic (colour code: Tab.2). Reduction of slope (from green to red) because of incorrect displacement measurements.

5 Fazit

Die numerisch ermittelten Ergebnisse liefern einen nützlichen und effizienten Überblick über im Feld anwendbare Kombinationen von Messverrohrungs- und Ringraumverfüllungstypen (s. Abb. 4). Es lassen sich klar taugliche und untaugliche Kombinationsmöglichkeiten ermitteln, die im Gelände eingesetzt werden können. Fehlerhafte Messergebnisse lassen sich so reduzieren und Hangbewegungen exakter ermitteln, wodurch eine Risikominimierung erreicht werden kann.



Die Kombination von numerischen Modellierungen und Laborversuchen bietet für das Vertikalinklinometerverfahren neue Möglichkeiten, die die Qualität von Standsicherheits- und Hangbewegungsabschätzungen im Festgestein erhöhen.

Die Anwendung auf Lockergestein ist ebenfalls möglich, muss aber in einem nächsten Schritt noch genauer untersucht werden. Erste Testrechnungen haben vielversprechende Ergebnisse geliefert, allerdings muss hier das zu verwendende Stoffgesetz genauer bestimmt werden.

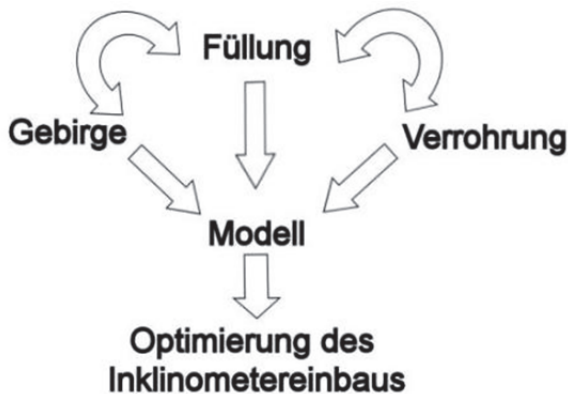


Abb. 4: Schematische Darstellung aller Einflussfaktoren auf das Modell und deren Kopplung untereinander. Verdeutlichung der Variabilität des Modells, alle Parameter unabhängig voneinander veränderbar.

Fig.4: Schematic figure of all factors of influence at the model and their linking among each other. Clarification of the variability of the model all parameters independent changeable from each other.

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. M. Alber bedanken für die Unterstützung und zur Verfügungsstellung aller Daten.

Mein Dank gilt ebenfalls der ITASCA Consultants GmbH, sowohl für die Möglichkeit, die Berechnungen durchzuführen als auch für wertvolle Hilfestellungen und Ideen.

Literatur

- DGGT (2002): Empfehlung Nr. 21 des AK 3.3 der deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Verschiebung quer zur Bohrlochachse - Inklinometer- und Deflektormessungen – Bautechnik, Nr. 4: 243-256.
- DIN 4107-3 (2011): Geotechnische Messungen – Teil 3: Inklinometer- und Deflektometermessungen – Beuth Verlag, Berlin.
- DÜLLMANN, J. (2008): Versuche zur Optimierung des Einbaus von Inklinometermessrohren – Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, (unveröffentlicht).
- DÜLLMANN, J. & PLINNIGER, R. & ALBER, M. (2009): Systematische Analyse von Ringraumverfüllungen und Messverrohrung bei Inklinometermessstellen – Österreichischer Ingenieur- und Architekturverein, Veröff. 7. Österreichische Geotechniktagung, Wien 21.-22 Januar 2009, 269-280.
- ITASCA CONSULTING GROUP INC (2008): FLAC 3D, Version 4.0, Command Reference - Minneapolis Minnesota.
- ITASCA CONSULTING GROUP INC (2008): FLAC 3D, Version 4.0, FISH in FLAC 3D - Minneapolis Minnesota.
- ITASCA CONSULTING GROUP INC (2008): FLAC 3D, Version 4.0, Theory and Background - Minneapolis Minnesota.
- ULUSAY, R. & HUDSON, J. A., ISMR (1981): Suggested Methods for monitoring rock movement using a probe inclinometer, The complete ISMR suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1976 - 2006, 575-587.