

Mitteilungen
Heft 12

Uwe Bartl

Zur Mobilisierung
des passiven Erddrucks
in kohäsionslosem Boden

Dresden 2004

ISSN 1434-3053

Mitteilungen
Heft 12

Uwe Bartl

Zur Mobilisierung
des passiven Erddrucks
in kohäsionslosem Boden

Dresden 2004

ISSN 1434-3053

Mitteilungen - Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden
ISSN 1434-3053
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. I. Herle

© Institut für Geotechnik - TU Dresden - 2004

Bei Vervielfältigungen und Übersetzungen wird um Quellenangabe gebeten.

Briefanschrift:
Institut für Geotechnik
TU Dresden
01062 Dresden

Besucheradresse:
Neuffer-Bau, George-Bähr-Straße 1
01069 Dresden

Telefon: 0351/ 463 34248
Fax: 0351/ 463 34131
E-Mail: geotech@rcs.urz.tu-dresden.de



Zur Mobilisierung des passiven Erddrucks in kohäsionslosem Boden

Von der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Uwe Bartl
geb. am 24. Mai 1965 in Annaberg-Buchholz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietrich Franke
Prof. Dipl.-Ing. Dr. Otto Pregl
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Peter-Andreas von Wolffersdorff

Tag der Verteidigung: 12. März 2004

Vorwort des Betreuers

In der Bodenmechanik ist die Versuchstechnik nach wie vor eine der wichtigsten Quellen für neue Erkenntnisse. Eine besondere Bedeutung besitzen dabei Modellversuche. Gerade auch für die Weiterentwicklung numerischer Berechnungsverfahren stellen die Versuchsergebnisse eine wichtige Grundlage dar.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der möglichen Stützwirkung des Erddrucks, die entscheidend von Art und Größe der Bewegung zwischen Wand und Boden abhängt. Neben der Auswertung neuerer Versuche anderer Autoren wurden vom Verfasser selbst eine ganze Reihe von Modellversuchen durchgeführt. Um neue Erkenntnisse gewinnen zu können waren Verbesserungen gegenüber der an anderen Standorten verwendeten Versuchstechnik erforderlich. So wurde ein Versuchskasten mit größeren Abmessungen und eine Messtechnik, die eine feinere Auflösung der Messungen gestattet, für die 1g-Versuche im Institut in Dresden verwendet.

Eine wesentliche Bereicherung erfuhren die Untersuchungen des Doktoranden durch parallel durchgeführte Zentrifugenversuche, die Herr Professor Pregl an seinem Institut an der Universität für Bodenkultur in Wien ermöglichte. Auf diese Weise konnte auch der Einfluss des Spannungsniveaus in die Untersuchungen einbezogen werden, was für die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf größere Abmessungen und damit für deren praktische Nutzung sehr wichtig ist.

Besonderer Dank gebührt der DFG, die die Untersuchung gefördert hat und Herrn Prof. Dr. Otto Pregl, der die Arbeit mit Rat und Tat großzügig unterstützt hat.

Dietrich Franke

Dresden, im März 2004

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Last-Verformungsverhalten ebener Wände unter Berücksichtigung definierter Wandbewegungsarten für den Fall des passiven Erddrucks in kohäsionslosem Boden.

Dazu wurden Versuche zum passiven Grenzzustand – Grenzverschiebung, passive Erddruckkraft, Neigung der passiven Erddruckkraft, rechnerische Erddruckbeiwerte, Angriffshöhe bzw. Erddruckverteilung und Bruchkörperlänge – und zum Mobilisierungsverhalten der Erddruckkraft jeweils für die drei Wandbewegungsarten durchgeführt und ausgewertet. Der Einfluss der variierten Randbedingungen wie Lagerungsdichte, Art der Wandoberfläche und Einfluss des Spannungsniveaus wurde somit quantitativ ermittelt.

Danken möchte ich an erster Stelle Herrn Prof. Franke und Herrn Dr. von Wolffersdorff für die Förderung und Unterstützung der Arbeit während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geotechnik der TU Dresden bzw. als Mitarbeiter der BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Pregl und seinem ehemaligen Mitarbeiter und meinem guten Freund Herrn Dr. Ferdinand Ferstl, mit deren Hilfe ich die geotechnische Zentrifuge des Instituts für Geotechnik an der Universität für Bodenkultur Wien im Rahmen der Arbeit nutzen konnte.

Bei der Bearbeitung des Themas wurde ich weiterhin von meinen ehemaligen Kollegen und Diplomanden des Instituts und meinen Kollegen bei BAUGRUND DRESDEN tatkräftig unterstützt, wobei ich besonders meine guten Freunde und Kollegen Herrn Prof. Jens Engel, Herrn Dipl.-Ing. Thilo Sembdner und Frau Sabine Preißer nennen möchte.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinem Bruder für ihre Zuversicht und Unterstützung in den zurückliegenden Jahren.

Uwe Bartl

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
1 EINLEITUNG.....	1
2 WISSENSSTAND	5
2.1 Bisherige Versuche.....	5
2.2 Ansätze zur passiven Grenzverschiebung.....	22
2.3 Ansätze zur Mobilisierung.....	26
2.4 Berechnungen.....	45
2.5 Schlussfolgerungen.....	48
3 VERSUCHSTECHNIKEN UND VERSUCHSBODEN.....	51
3.1 1g-Versuche.....	51
3.1.1 Versuchsstand.....	51
3.1.2 Versuchsablauf.....	59
3.2 Zentrifugen-Versuche.....	62
3.2.1 Zentrifuge und Zentrifugen-Modelltechnik.....	62
3.2.2 Erddruck-Modellkasten.....	66
3.2.3 Versuchsablauf.....	70
3.3 Versuchsboden.....	71
3.3.1 Mineralogische und granulometrische Beschreibung.....	71
3.3.2 Scherfestigkeit.....	73
3.3.3 Zusammendrückbarkeit.....	77

4	VERSUCHSERGEBNISSE	79
4.1	Definitionen	79
4.2	Parallelverschiebung	82
4.3	Kopfpunktdrehung	91
4.4	Fußpunktdrehung	99
5	AUSWERTUNG DER VERSUCHE	107
5.1	Grundlagen zur Auswertung.....	107
5.2	Parallelverschiebung	114
5.2.1	Passiver Grenzzustand.....	114
5.2.2	Mobilisierung der Erddruckkraft	139
5.2.3	Bewertung.....	148
5.3	Kopfpunktdrehung	150
5.3.1	Passiver Grenzzustand.....	150
5.3.2	Mobilisierung der Erddruckkraft	172
5.3.3	Bewertung.....	181
5.4	Fußpunktdrehung	183
5.4.1	Passiver Grenzzustand.....	183
5.4.2	Mobilisierung.....	189
5.4.3	Bewertung.....	195
5.5	Vergleichende Bewertung und Empfehlungen	197
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	205
	LITERATURVERZEICHNIS	209

ANHANG (auf CD-ROM)

A	ERGEBNISSE DER VERSUCHE VON MAO	A.1
A.1	Erläuterungen.....	A.1
A.2	Parallelverschiebung.....	A.6
A.3	Kopfpunktdrehung.....	A.11
A.4	Fußpunktdrehung.....	A.16
B	AUSWERTUNG DER VERSUCHE VON MAO	B.1
B.1	Parallelverschiebung.....	B.1
B.2	Kopfpunktdrehung.....	B.5
B.3	Fußpunktdrehung.....	B.9
C	ERGEBNISSE 1G-VERSUCHE.....	C.1
C.1	Parallelverschiebung.....	C.1
C.2	Kopfpunktdrehung.....	C.41
C.3	Fußpunktdrehung.....	C.59
D	AUSWERTUNG 1G-VERSUCHE	D.1
D.1	Parallelverschiebung.....	D.1
D.2	Kopfpunktdrehung.....	D.51
D.3	Fußpunktdrehung.....	D.77
E	ERGEBNISSE ZENTRIFUGENVERSUCHE	E.1
E.1	Parallelverschiebung.....	E.1

E.2 Kopfpunktdrehung E.2

E.3 Fußpunktdrehung E.2

F AUSWERTUNG ZENTRIFUGENVERSUCHE F.2

F.1 Parallelverschiebung F.2

F.2 Kopfpunktdrehung F.2

1 Einleitung

Vor ca. 60 Jahren kam SCHÜTTE (1941) im Zusammenhang mit der Berechnung von Spundwänden zu folgender Schlussfolgerung: *"Die Beziehungen zwischen 1. Erdwiderstand und Verschiebung und 2. Druckverlagerung und Wandverformung sind noch nicht bekannt Beide Beziehungen werden nach Art der Formänderungen und der Bodeneigenschaften mancherlei Abwandlungsmöglichkeiten aufweisen und es erscheint recht zweifelhaft, ob es gelingen kann, sie in Abhängigkeit von einigen messbaren Kennziffern des Bodens allgemein gültig aufzustellen. Selbst aber, wenn dies gelänge, wird sich doch die Verteilung der äußeren und inneren Kräfte bei einer verankerten Bohlwand nicht allgemein gültig vorausberechnen lassen, weil diese im Zusammenhang mit den bezeichneten Beziehungen durch 3. den Bauvorgang wesentlich beeinflusst wird. Trotzdem ist es wichtig den Beziehungen 1 und 2 weiter nachzuspüren..."*

Zum jetzigen Zeitpunkt stellten z.B. VON WOLFFERSDORFF / MAYER (1996) im Zusammenhang mit der Auswertung von rechnerischen Verformungsprognosen zu einem großmaßstäblichen Spundwand-Feldversuch (VON WOLFFERSDORFF, 1994 und 1997) fest, *"...dass das Einrütteln der Spundwand einen Spannungszustand erzeugte, der sehr stark von dem gewohnten Erdruchdruck abwich. Dieser ungewöhnliche Ausgangsspannungszustand prägte das weitere Kraft-Verformungs-Verhalten der Spundwand in allen nachfolgenden Versuchszuständen. Der Versuch zeigte, dass es mit gegenwärtig gebräuchlichen Methoden nicht möglich ist, die Verformungen von Stützkonstruktionen ausreichend zuverlässig vorherzusagen, auch nicht mit Hilfe moderner numerischer Berechnungsverfahren."*

Man kann somit feststellen, dass auch heute noch Forschungsbedarf zur Problematik der Abhängigkeit des Erddrucks von der Relativbewegung zwischen Boden und Wand besteht. In diesem Zusammenhang spielt es eine wichtige Rolle, ob der Erddruck die Funktion einer Belastung oder einer Stützung der Wand darstellt. Im Allgemeinen liegt die Größe des belastenden Erddrucks zwischen aktivem Erddruck und Ruhedruck und die Größe des stützenden Erddrucks zwischen Erdruchdruck und passivem Erddruck. Während im ersten Fall die Wandbewegung im Bereich von wenigen Tausendsteln der Wandhöhe von Bedeutung sind, sind es im zweiten Fall Wandbewegungen in einer

Größenordnung, die etwa hundert mal größer ist. Die viel größeren Wandbewegungen, die bei der Erzeugung des stützenden Erddrucks bis hin zum passiven Erddruck auftreten, erfordern eine Begrenzung des praktisch nutzbaren stützenden Erddrucks nicht nur im Hinblick auf die erforderliche Standsicherheit sondern auch im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit. Während im ersten Fall die Größe des Erddrucks an den genannten Grenzen sich etwa wie 1:2 verhält, ist es im zweiten Fall etwa wie 1:10 bis 1:20.

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem Fall des stützenden Erddrucks und damit der Mobilisierung des Erdwiderstands bis zum Eintreten des passiven Grenzzustands.

In der "Erddruck-Norm" DIN V 4085-100 (1996) ist z.B. eine Darstellung nach Bild 1.1 enthalten. Darin sind zwei Kurven zur Mobilisierung der Erdwiderstandskraft E in Abhängigkeit vom Wandbewegungsbetrag s qualitativ für nichtbindigen Boden dargestellt.

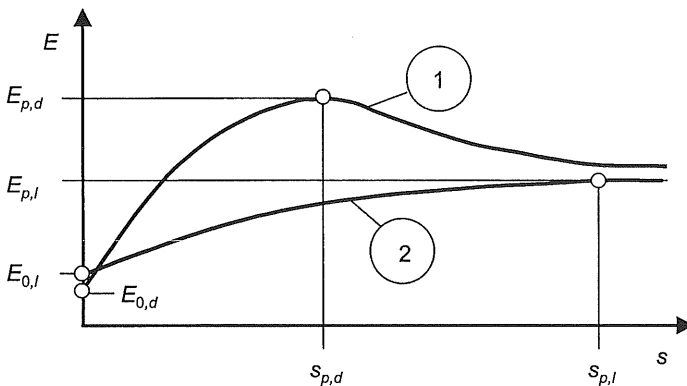


Bild 1.1: Prinzipdarstellung der Erddruckkraft - Bewegungsabhängigkeit nach DIN V 4085-100 (1996)

Bei nichtbindigem Boden wird zwischen dem Verhalten bei einer mitteldichten bis dichten Lagerung (Kurve 1) und einer lockeren Lagerung (Kurve 2) unterschieden. Die Abbildung zeigt, dass bei dichter Lagerung die mobilisierte Erddruckkraft einen Maximalwert (Peakwert = passiver Grenzwert - $E_{p,d}$) erreicht und bei weiterer Wandbewegung wieder abnimmt und sich einem Restwert annähert. Bei lockerer La-

gerung weist der Mobilisierungsverlauf dagegen keinen Peakwert auf. Nach Erreichen des Maximalwertes (passiver Grenzwert $E_{p,l}$) bleibt die mobilisierte Erddruckkraft nahezu konstant. Sie stellt sich somit auf einem Plateauwert ein.

Die Darstellung enthält bereits die Erkenntnis, dass bei einer dichten Lagerung des Bodens ein geringerer Betrag an Wandbewegung (Grenzverschiebung $s_{p,d}$ bzw. $s_{p,l}$) erforderlich ist, um die passive Erddruckkraft (Grenz- bzw. Bruchwert $E_{p,d}$ bzw. $E_{p,l}$) zu erreichen, als bei einem Boden mit lockerer Lagerung.

Eventuelle Einflüsse des Bewegungs- bzw. Verformungsverhaltens der Wand auf die Mobilisierung des stützenden Erddrucks werden durch die Kurven jedoch nicht verdeutlicht.

Zur vereinfachten Beschreibung des möglichen Bewegungs- bzw. Verformungsverhaltens einer Wand bei der Mobilisierung des stützenden Erddrucks wurden z.B. drei sogenannte Grundarten der Wandbewegung (Wandbewegungsarten) definiert. Diese sind im Bild 1.2 dargestellt. Bei der Parallelverschiebung ist der Betrag der kennzeichnenden Wandbewegung s über die gesamte Wandhöhe h konstant. Bei der Drehung um eine Achse im Fuß der Wand – im Folgenden auch als Fußpunktdrehung bezeichnet – wird der Betrag der kennzeichnenden Wandbewegung s am Kopfpunkt der Wand gemessen, bei der Drehung um eine Achse im Kopf der Wand – Kopfpunktdrehung – dagegen am Wandfuß.

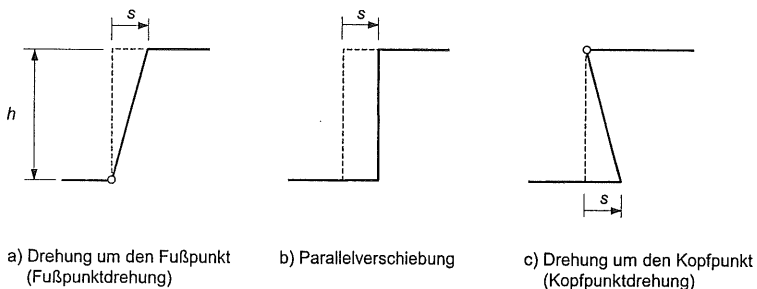


Bild 1.2: Grundarten der Wandbewegung

Zur quantitativen Beschreibung des Mobilisierungsverhaltens finden sich in der „Erddruck-Norm“ Angaben zum erforderlichen Wandbewegungsbetrag zur Mobilisierung

von 50% des passiven Erddrucks und zur möglichen Grenz-(Bruch-)verschiebung ($s_{p,d}$ bzw. $s_{p,i}$). In der Literatur (WEISSENBACH 1975) und im weiteren technischen Regelwerk, DIN 4085 (1987), EAU (1990), ÖNORM B 4434 (1993) u.a.) finden sich zum Mobilisierungsverhalten weitere Empfehlungen. Alle diese Angaben wurden aus Versuchen verschiedener Autoren gewonnen, bei denen, wie im Abschnitt 2 gezeigt werden soll, unterschiedlichste versuchstechnische Randbedingungen vorlagen.

Diese bisherigen Versuche lassen allerdings bereits erkennen, dass die Mobilisierung des passiven Erddrucks zumindest von folgenden Kenngrößen beeinflusst wird:

- Art der Wandbewegung (z. B. Parallelverschiebung)
- Größe der Wandbewegung
- Beschaffenheit der Wand: (Steifigkeit, Rauigkeit)
- Versuchsgeometrie (Wand, Boden, Neigung der Wand in der Ausgangslage)
- Ausgangsspannungszustand im Boden (Einbauart, Geländeauflast)
- Eigenschaften des Bodens (Korngrößenverteilung, Ausgangslagerungsdichte, Scherfestigkeit, Dilatanz, Kornbruchspannung)

Zur Quantifizierung dieser Einflüsse sind Messungen an wirklichen Bauwerken wenig geeignet, da sie allenfalls Messungen im Sinne von Stichproben ermöglichen. Für systematische Messungen haben sich dagegen Modellversuche oft bewährt

Umfangreiche Serien von Modellversuchen sind die Grundlage für die vorliegenden Untersuchungen zur Mobilisierung des passiven Erddrucks.

2 Wissensstand

2.1 Bisherige Versuche

Aus der Literatur ist erkennbar, dass nur wenige Beiträge zum Last-Verformungsverhalten ebener Wände mit definierten Bewegungsarten für den Fall stützender Erddruck vorliegen. Als besonderes Problem kommt hinzu, dass die durchgeführten Versuche hinsichtlich der Modellierung nicht äquivalent sind. Sie unterscheiden sich hinsichtlich

- Größe und Geometrie des Versuchsstandes,
- Art der Wandbewegung,
- Erzeugung der Wandbewegung,
- Modellboden,
- und Messung des Erddrucks bzw. der Erddruckkraft.

Oftmals sind auch wichtige Angaben zu den Randbedingungen der Versuche nicht oder nur unvollständig dokumentiert.

Zur Veranschaulichung dieses Sachverhaltes werden nachfolgend die Versuchsbedingungen ausgewählter Beiträge kurz erläutert. Auf Versuche mit eingespannten Wänden, wie z.B. von LAUMANS (1976), RAUH (1991) u.a., wird jedoch nicht eingegangen. Eine Zusammenstellung von Modell- und Großversuchen zum passiven Erddruck und teilweise zu seinem Mobilisierungsverhalten ist auch bei BESLER (1998) zu finden.

TERZAGHI (1920)

Die ersten Modellversuche mit gleichzeitiger Messung der Erdwiderstandskraft wurden von TERZAGHI dokumentiert. Es wurde der horizontale und vertikale Kraftanteil an einer 2 inch (0.05 m) hohen Modellwand gemessen. Wegen der geringen Größe der

Versuchseinrichtung können diese Versuche aber nur als der Beginn systematischer Untersuchungen zum passiven Erddruck bewertet werden.

SCHILLER (1924) / FRANZIUS (1924)

Die Versuche stellen die ersten Erdwiderstandsversuche mit einem größerem Modell dar. Der Versuchskasten bestand aus Holz, die Seitenwände aus Glas (Bild 2.1). Die Versuchswand hatte eine Höhe von ca. 1.50 m und eine Breite von 1.00 m. Die Wandbewegung (Parallelverschiebung) wurde noch manuell eingetragen. Die Versuchsergebnisse sind auf Grund der Randbedingungen, wie dem großen Höhen/Breitenverhältnis der Versuchswand, einer dabei fehlenden Gleitschicht auf den Seitenwänden, der Messgenauigkeit u.a. für weitere Betrachtungen jedoch nicht wertbar.

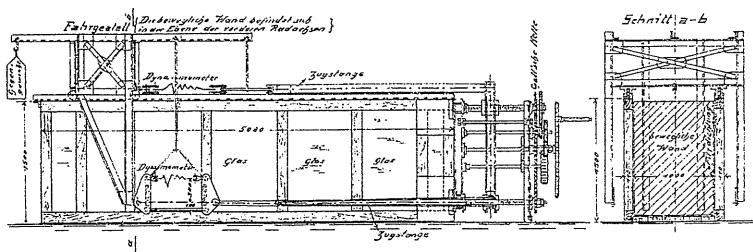


Bild 2.1: Erddruck-Versuchsstand von SCHILLER (1924) und FRANZIUS (1924)

STRECK (1926)

Der Autor nutzte den gleichen Versuchsstand wie SCHILLER (1924). Komplett modifiziert wurden jedoch die Versuchswand und die Kraftmesseinrichtung. Die Eintragung der Wandbewegung (Parallelverschiebung der senkrechten Wand) erfolgte weiterhin mit dem manuellen Antrieb über drei Zugstangen.

STRECK verwendete die Versuchsergebnisse, zu denen auch der Gleitflächenverlauf gehörte, zur Aufstellung eines Berechnungsverfahrens zur Ermittlung von Beiwerten für den passiven Erddruck. Nach verschiedenen Erweiterungen z.B. von WEIßENBACH und KEMPFERT finden diese Beiwerte auch heute noch Verwendung – z.B. KEMPFERT (1994). Mobilisierungskurven des Erdwiderstandes sind nicht dokumen-

tiert. Es sei noch angemerkt, dass bei diesen Versuchen zum ersten Mal eine Schmierung der Innenseiten des Kastens zum Einsatz kam. Hierzu wurde das Glas der Wände mit Schmierseife bestrichen und mit Papier abgedeckt.

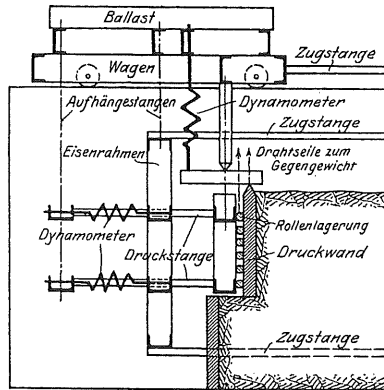


Bild 2.2: Versuchswand von STRECK (1926)

FRANZIUS (1928) und (1928b)

Mit einem verbesserten Versuchsstand (Bild 2.3) führte FRANZIUS großmaßstäbliche Modellversuche zum passiven Erddruck durch. Mit diesen Versuchen wurde zum ersten Mal das eigentliche Mobilisierungsverhalten der Erdwiderstandskraft eingehender untersucht und die Wandverschiebungs-Kraft-Verläufe aufgezeichnet. Die senkrechte Versuchswand wurde dabei jeweils parallel verschoben. Die Höhe der Versuchswand wurde zwischen 1.00 und 1.80 m variiert. Bei allen Versuchen befand sich der Wandfuß direkt über dem Kastenboden, d.h. unterhalb des Fußes stand kein Modellboden an. Bei dem Modellboden, der von STEINFELD (1953) genauer beschrieben wird, handelte es sich um einen Grob- bis Mittelsand mit bis zu 20 % Fein- bis Mittelkiesanteil.

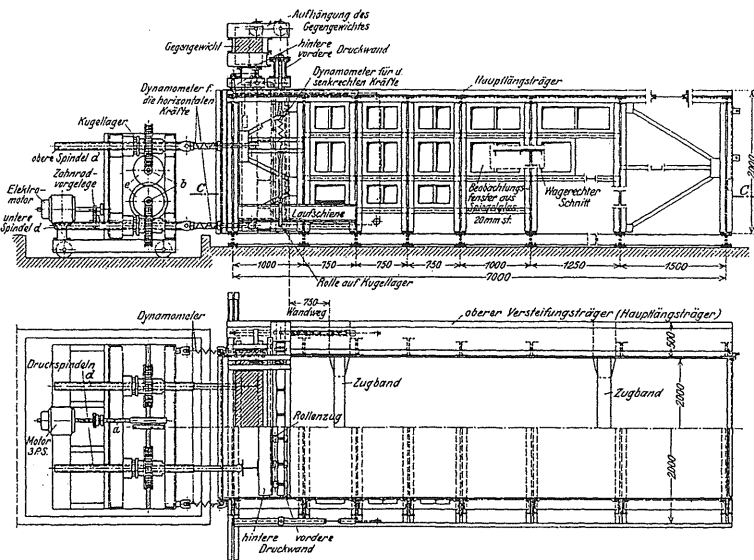


Bild 2.3: Versuchstand nach FRANZIUS (1928)

Die Erdwiderstandsversuche wurden mit dicht gelagertem Sand durchgeführt, wobei der Sand zum einen teilgesättigt mit einem hohen Sättigungsgrad und zum anderen voll gesättigt eingebaut war. Bei den Versuchen wurden weiterhin zwei unterschiedliche Lagerungsarten der Versuchswand eingesetzt. Eine Versuchsreihe wurde mit einer tangential gestützten (unbeweglichen) Wand durchgeführt, so dass die mobilisierte Tangentialkraft an der Wand und somit die Erddruckneigung gemessen werden konnte. Bei der anderen Reihe war die Wand tangential nicht gestützt. Sie konnte sich mittels der Rollenlagerung und des Gegengewichtes auch vertikal verschieben (Bild 2.4).

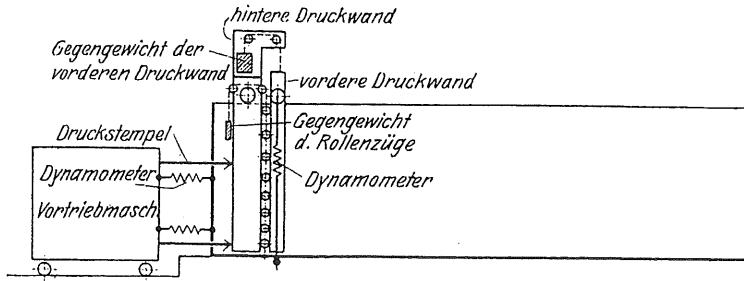


Bild 2.4: Prinzipskizze des Versuchsstandes nach FRANZIUS (1928)

Ein Beispiel für die gemessenen Kraft-Verschiebungs-Kurven ist im Bild 2.5 in dimensionsfreier Art aufgeführt. Der gemessene Normalkraftanteil auf die Wand wird dabei in dimensionsfreier (normierter) Form nach Gl. (2.1) angegeben.

$$K_{Rn} = \frac{2 \cdot E_n}{\gamma \cdot h^2} \quad (2.1)$$

$K_{Rn}...$	normierte mobilisierte Erddruckkraft – Normalanteil
$E_n...$	mobilisierte Erddruckkraft – Normalanteil
$\gamma...$	Wichte des Bodens
$h...$	Wandhöhe

Die gemessene Neigung der Erddruckkraft als Verhältniswert zwischen dem tangential und dem normal zur Wandoberfläche wirkenden Kraftanteil ist nach Gl. (2.2) als Tangens des Erddruckneigungswinkels im Bild 2.5 aufgetragen.

$$\tan \delta_R = \frac{E_t}{E_n} = \frac{K_{Rt}}{K_{Rn}} \quad (2.2)$$

$\tan \delta_R...$	Tangens des Neigungswinkels der mobilisierten Erddruckkraft E
$E_t...$	mobilisierte Erddruckkraft – Tangentialanteil
$K_{Rt}...$	normierte mobilisierte Erddruckkraft – Tangentialanteil

Als Besonderheit der Versuchsergebnisse kann vermerkt werden, dass in keinem der dokumentierten Versuche ein Maximalwert der Erddruckkraft erreicht wurde. Die Erddruckkraft steigt mit zunehmender Verschiebung der Wand an. Die Ergebnisse deuten weiterhin auf einen Einfluss der Wandhöhe hin. Die Versuche mit unterschiedlichen Wandhöhen zeigen eine unterschiedliche Mobilisierung der normierten Erddruckkraft. Somit ist bei gleichem Betrag der Wandverschiebung bei einer höheren Wand die normierte mobilisierte Erddruckkraft kleiner als bei einer niedrigeren Wand. Bei Versuchen mit einer tangential gestützten Wand (z.B. Bild 2.5) wirkt der Tangentialanteil der Kraft bereits kurz nach Beginn der Wandverschiebung nach oben (Erddruckneigung nach Definition DIN 4085-100 negativ). Nach einem bestimmten Verschiebungsbetrag nähert sich der Betrag der mobilisierbaren Erddruckneigung einem Maximum an.

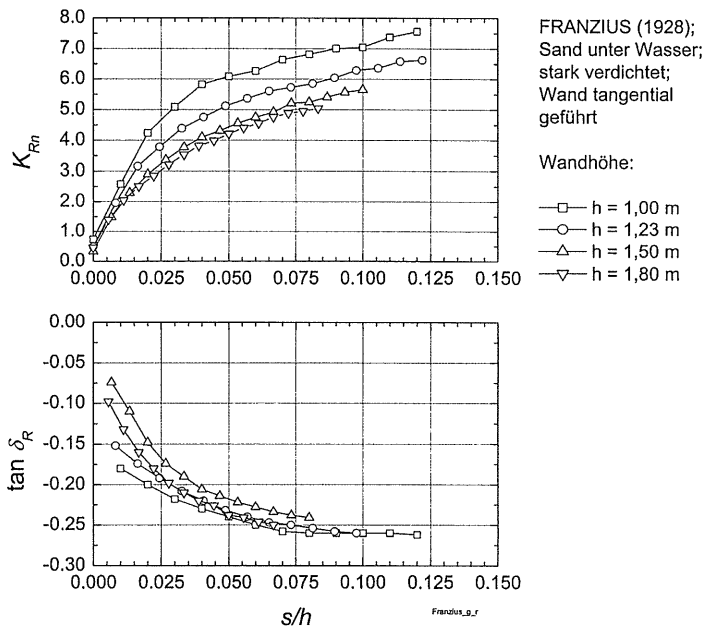


Bild 2.5: Versuchsergebnisse von FRANZIUS (1928b) mit verdichtetem Sand unter Wasser und einer tangential geführten Wand

FRANZIUS benutzte die Versuche für die erste Aufstellung eines Ansatzes zur Ermittlung der Grenzverschiebung in Abhängigkeit von der Wandhöhe (siehe Gl. (2.5)). Er definierte dazu den „Grenzwert“, indem er die passive Erddruckkraft auf der Grundlage der Erddruckbeiwerte nach STRECK ermittelte und zu diesem Wert aus den Versuchen die zugehörige Verschiebung als „Grenzverschiebung“ festlegte. Nach heutigem Kenntnisstand wurde dabei jedoch der Reibungswinkel mit $\varphi = 33^\circ$ deutlich zu niedrig angesetzt, und bei den Versuchen mit teilgesättigtem Sand wurde der Erddruckanteil infolge der Kapillarkohäsion nicht berücksichtigt.

MECKE (1935)

Der Autor modifizierte die Versuchsanlage von FRANZIUS, um Erdwiderstandsversuche mit einer geneigten Versuchswand, horizontaler Wandverschiebung und horizontaler Geländeoberfläche durchführen zu können (Bild 2.6). Der Fuß der Versuchswand wurde gegenüber den Versuchen von FRANZIUS höher gesetzt, so dass unterhalb der Wand noch Modellboden ansteht.

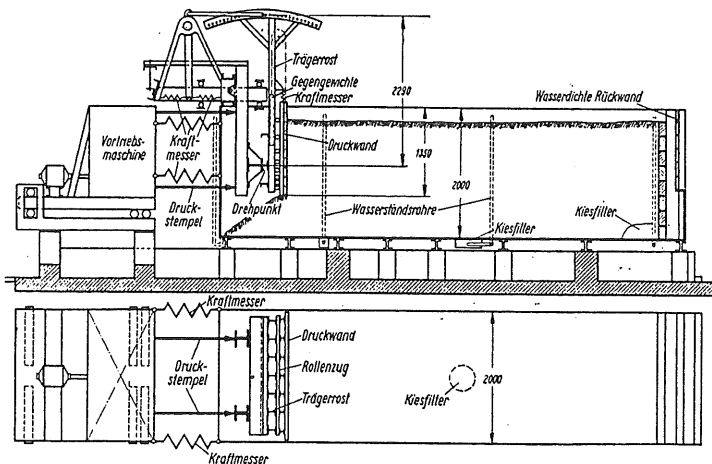


Bild 2.6: Schnitt und Grundriss des Versuchszustandes von MECKE (1935)

Als Versuchsboden kam der gleiche Sand zum Einsatz, der bereits von FRANZIUS verwendet worden war. Dieser Sand wurde immer in einem teilgesättigten Zustand mit

einem Wassergehalt von 5 bis 7 % und einer Feuchtdichte von 1.8 t/m^3 eingebaut. Die Versuche wurden mit einer Wandhöhe (Hinterfüllhöhe) von 0.60 bis 1.10 m durchgeführt. Die Versuchswand war dabei immer tangential gestützt. Gemessen wurde die horizontale und tangentielle Erddruckkraft.

MECKE dokumentierte die Kraft-Verschiebungs-Verläufe von 4 Versuchen an einer 0.60 m hohen Wand (Bild 2.7). Von diesen Versuchen sind 2 Versuche mit einer senkrechten Wand und je 1 Versuch mit einer positiv bzw. negativ geneigten Wand durchgeführt worden. Angaben zum Neigungswinkel der Wand fehlen jedoch.

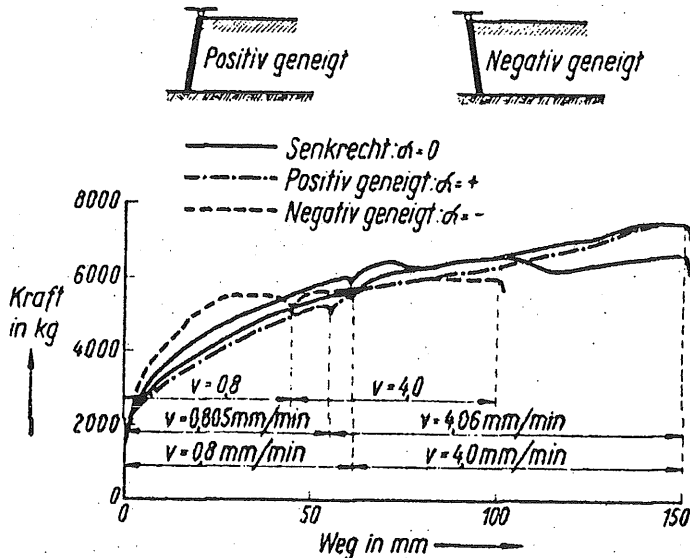


Bild 2.7: Versuchsergebnisse von MECKE (1935)

TSCHEBOTARIOFF/JOHNSON (1953)

Da die Originalquellen nicht zugänglich sind, basieren die nachfolgenden Erläuterungen auf den Angaben von GIESE (1955). GIESE fasste die Ergebnisse der Versuche von TSCHEBOTARIOFF wie folgt zusammen:

- Die Beiwerte für den passiven Erddruck nach KREY (ebene Gleitfläche) ergeben für negative Erddruckneigungswinkel viel zu große Werte.

- b) Die Beiwerte nach CAQUOT-KERISEL (1948) kommen den wirklichen Verhältnissen bei negativer Erddruckneigung näher, sind jedoch auch noch etwas zu groß.
- c) Die von STRECK angegebenen Beiwerte stimmen ziemlich genau mit den Versuchsergebnissen überein.

Die Besonderheit der verwendeten Versuchseinrichtung besteht in der Messung der auf die Seitenwände, die Rückwand und den Boden des Versuchskastens wirkenden Kräfte (Bild 2.8). Solche Messungen wurden bei keinen anderen Versuchen zum Erdwiderstand vorher als auch nachher wieder durchgeführt.

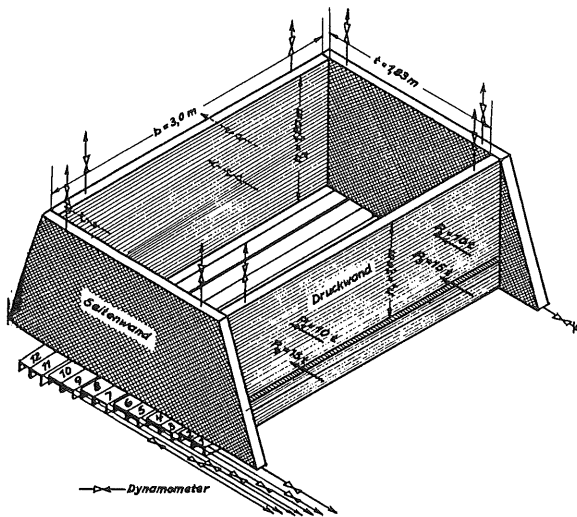


Bild 2.8: Versuchsstand von TSCHEBOTARIOFF/JOHNSON nach GIESE (1955)

Die Angaben zur Höhe der Versuchswand reichen von 0.60 m (BESLER 1998) bis zu 1.00 m (siehe Bild). Die maximale Innenhöhe des Kastens betrug 1.20 m. Somit verblieb unterhalb des Wandfußes noch eine Füllhöhe von 0.20 m. Die Breite der Versuchswand, welche gleichzeitig die Messwand darstellte, betrug 3.00 m und die Länge des Kastens 1.80 m.

ROWE / PEAKER (1965)

Die Autoren führten Versuche an trockenem Mittelsand mit lockerer und dichter Lagerung durch. Die Versuchswand war dabei 1.83 m breit und 0.46 m hoch und in 3 gleich breite vertikale Segmente aufgeteilt (Bild 2.9). Der Erddruck wurde nur am mittleren Segment, der eigentlichen Messwand gemessen. Zum ersten Mal wurde eine solche Aufgliederung der Versuchswand in Messwandabschnitt und Seitenwandabschnitte bei Erdwiderstandsversuchen vorgenommen. Auf eine spezielle Gleitschicht auf den Seitenwänden des Versuchskastens wurde somit verzichtet. In die Messwand waren drei vertikale Reihen mit je 6 Spannungsmessdosen zur Ermittlung der Normalspannungsverteilung über die Wandhöhe eingebaut. Die Erddruckresultierende an der Messwand wurde zusätzlich mit drei normal und zwei tangential zur Wandfläche angeordneten Kraftmessringen ermittelt.

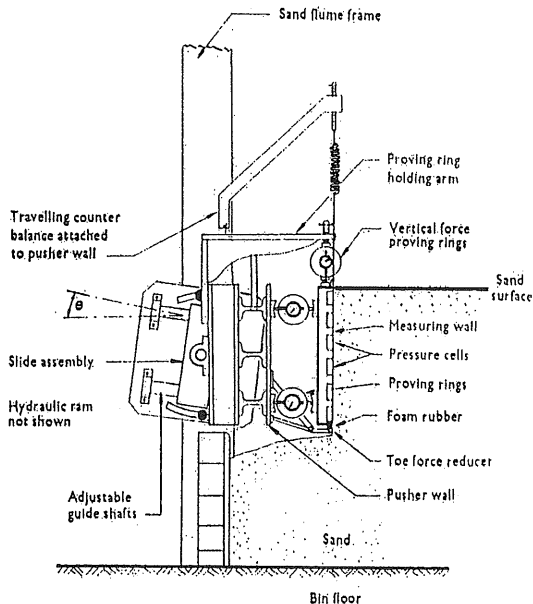


Bild 2.9: Schnitt durch die Messwand nach ROWE/PEAKER (1965)

Bei den Versuchen wurde die Versuchswand mittels zweier Hydraulikzylinder tangential geführt gegen den trockenen Versuchssand verschoben. Neben der Lagerungs-

dichte des Sandes und wurde die Vorschubrichtung θ der Versuchswand variiert. Die Vorschubrichtung der senkrechten Wand war somit nicht bei allen Versuchen parallel zur horizontalen Geländeoberfläche, sondern auch aufwärts bzw. abwärts dazu geneigt.

JAMES (1965), BRANSBY (1968) und LORD (1969)

Einige Versuchsergebnisse der o.g. Autoren wurden von ROSCOE (1970); JAMES, BRANSBY (1970) und ALTES (1972) vorgestellt.

Der Versuchskasten (Bild 2.10), dessen Seitenwände aus Glas bestanden, hatte eine Länge von 2.40 m, eine Breite von 0.19 m und eine Höhe von 1.50 m. Die Versuchswand hatte eine maximale Höhe von 0.33 m. Zur Dicke und zum Material liegen keine Angaben vor. Die Wandoberfläche war bei allen Versuchen mit Sandpapier beklebt. Zur Erddruckmessung waren in die Wand drei vertikale Reihen mit Druckmessdosen eingebaut, mit denen sowohl Normal- als auch Tangentialspannungen gemessen werden konnten. Damit konnte zum ersten Mal die Mobilisierung der Erddruckneigung über die Wandhöhe gemessen werden.

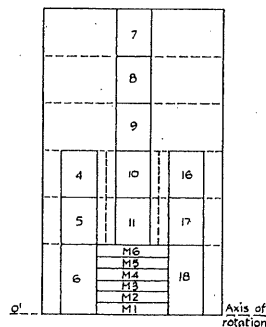
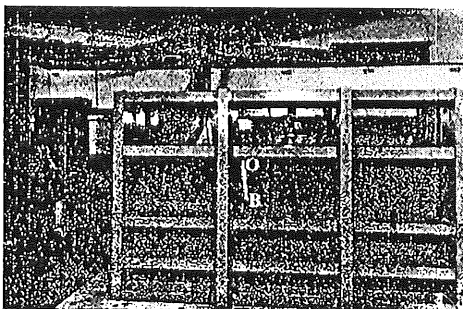


Bild 2.10: a) Ansicht des Versuchsstandes nach JAMES / BRANSBY (1970)

b) Messdosen in der Versuchswand

Die Besonderheit der Versuche bestand darin, dass zur Aufnahme der Spannungs- und Verformungsfelder im Sand Röntgenmesstechnik eingesetzt wurde. Deshalb war der Kasten mit einer Breite von 0.19 m vergleichsweise schmal ausgebildet.

Von den Autoren wurden Versuchen mit Fußpunktdrehung und Kopfpunktdrehung an einem trockenen Sand durchgeführt. Dabei wurde die Lagerungsdichte variiert. Neben dem Betrag der Erddruckkraft und der Erddruckneigung wurde dabei auch die Angriffshöhe der Kraft an der Wand ermittelt.

NARAIN u.a. (1969)

Die Autoren führten Versuche an trockenem Sand mit den bekannten drei definierten Wandbewegungsarten durch. Die Abmessungen des Versuchskastens (Bild 2.11) betragen dabei 1.50 m in der Länge, 0.90 m in der Breite und 0.61 m in der Höhe.

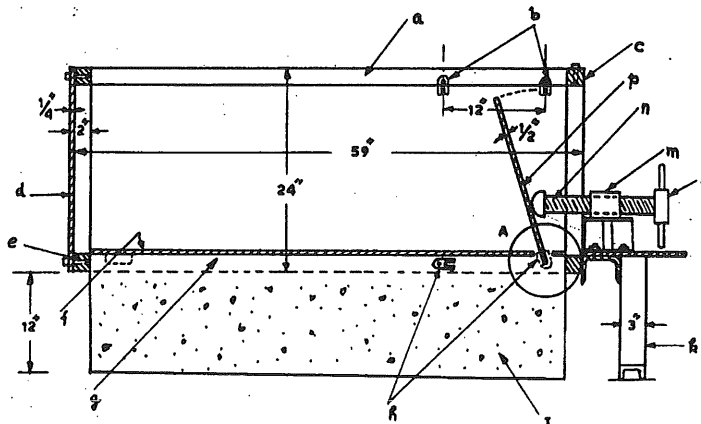


Bild 2.11: Schnitt durch den Versuchskasten von NARAIN u.a. (1969)

Die Messwand mit der Breite von 0.90 m wurde bis zu ihrer Gesamthöhe von 0.45 m mit trockenem Sand hinterfüllt. Die Dicke der Wand betrug 1.3 cm. Es wurde der Normalanteil des Erddrucks mit 4 Spannungsmessdosen, die in einer vertikalen Reihe in die Wand eingebaut waren, gemessen. Die Wandbewegung wurde mechanisch per Hand mit einer Geschwindigkeit von ca. 1.2 mm/min erzeugt. Die äußere Kraft wurde in der Tiefe $z = 0.67 \cdot h$ direkt über einen Laststempel in die Wand eingetragen. Da die Wand keinerlei Aussteifungen besaß, kann sie nicht als vollkommen starr angesehen werden.

VOGT (1984)

Der Autor führte 3 großmaßstäbliche Modellversuche an einer mit Sand hinterfüllten Wand (Bild 2.12) durch. Die Versuchswand im Großversuch hatte eine Breite von 9.20 m und eine Höhe von 4.00 m. Die Versuche – alle mit Fußpunktdrehung und zyklischer Lasteintragung – wurden im Freigelände mit feuchtem Sand durchgeführt. Beim Versuchseinbau wurden zwei verschiedene Lagerungsdichten erreicht.

Mit Druckmessdosen wurde die Normal- und Schubspannungsverteilung an der Wand gemessen. Außerdem waren Horizontalextensometer zu Messung der Deformationen im Boden eingebaut. Wie die Biegelinien zeigten, ist die Wand als nicht starr einzuordnen. Zudem wurden zum Teil stark differierende Ausgangsspannungsverteilungen an der Versuchswand festgestellt. Auf der Grundlage seiner Versuche formuliert VOGT einen Mobilisierungsansatz für den Erddruck, der in Abschnitt 2.3 erläutert wird.

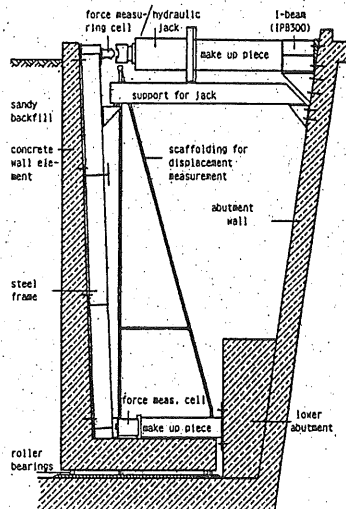


Bild 2.12: Schnitt durch die Versuchswand von VOGT (1984)

MAO (1993)

Die Autorin führte Versuche zu den drei Grundwandbewegungsarten durch. Der Versuchsstand besaß eine Länge von 0.775 m, eine Breite von 0.198 m und eine Höhe von 0.50 m. Die Höhe der 0.195 m breiten Versuchswand (Bild 2.14) wurde zwischen 0.10 m und 0.25 m variiert. Es wurden Versuche mit behinderter und unbehinderter tangentialer Wandbewegung, verschiedenen Wandoberflächen und unterschiedlichen Sättigungsgraden des Sandes durchgeführt. Gemessen wurden die resultierenden Horizontal- und Vertikalkräfte an der Führungs- und Belastungsvorrichtung oberhalb der Sandoberfläche, aus denen der Horizontal- und Normalanteil, die Neigung und Angriffshöhe der resultierenden Erddruckkraft an der Wand ermittelt wurden.

Bei allen Versuchen wurden nach Einbau des Sandes in den Versuchsstand, vor Beginn der Wandbewegung, alle Messaufnehmer auf Null abgeglichen. Der Erddruck im Ausgangszustand – normal E_{An} und tangential E_{At} – ist somit nicht in den Messwerten enthalten.

Im Bild 2.13 sind beispielhaft die von MAO dokumentierten Versuchsergebnisse für 6 Versuche mit geführter Parallelverschiebung und einer mitteldichten Lagerung des trockenen Sandes dargestellt. Dabei wurde die Wandhöhe h variiert. Von MAO wurden dabei jeweils 4 Versuchszustände dokumentiert – $0.25 \cdot (E_p - E_A)$, $0.50 \cdot (E_p - E_A)$, $0.75 \cdot (E_p - E_A)$ und passiver Grenzzustand $(E_p - E_A)$.

Im oberen Diagramm ist die Mobilisierung des normierten Normal- bzw. Horizontalanteils des verschiebungsabhängigen Anteils der Erddruckkraft ΔK_{Rn} nach Gl. (2.3) zu sehen.

$$\Delta K_{Rn} = \frac{2 \cdot \Delta E_n}{\gamma \cdot h^2} = \frac{2 \cdot (E_n - E_{An})}{\gamma \cdot h^2} \quad (2.3)$$

Der Neigungswinkel der Erddruckkraft δ_R wird somit im Ausgangszustand ebenfalls nicht gemessen. Der Tangens des im Versuch gemessen resultierenden Erddruckneigungswinkels – Bild 2.13 unteres Diagramm – ergibt sich deshalb wie folgt:

$$\tan \delta^*_R = \frac{\Delta E_t}{\Delta E_n} = \frac{E_t - E_{At}}{E_n - E_{An}} \quad (2.4)$$

Da die Versuche von MAO die bislang umfangreichste Versuchsreihe zum Mobilisierungsverhalten der passiven Erddruckkraft darstellen und die Ergebnisse sehr gut dokumentiert sind, werden diese bei der Auswertung der eigenen Versuche im Abschnitt 5 als Vergleichswerte herangezogen. Die Ergebnisse der Versuche von MAO mit der tangential unbeweglichen (geführten) Wand an trockenem Sand und die Kennwerte des Versuchssandes sind im Anhang A dargestellt.

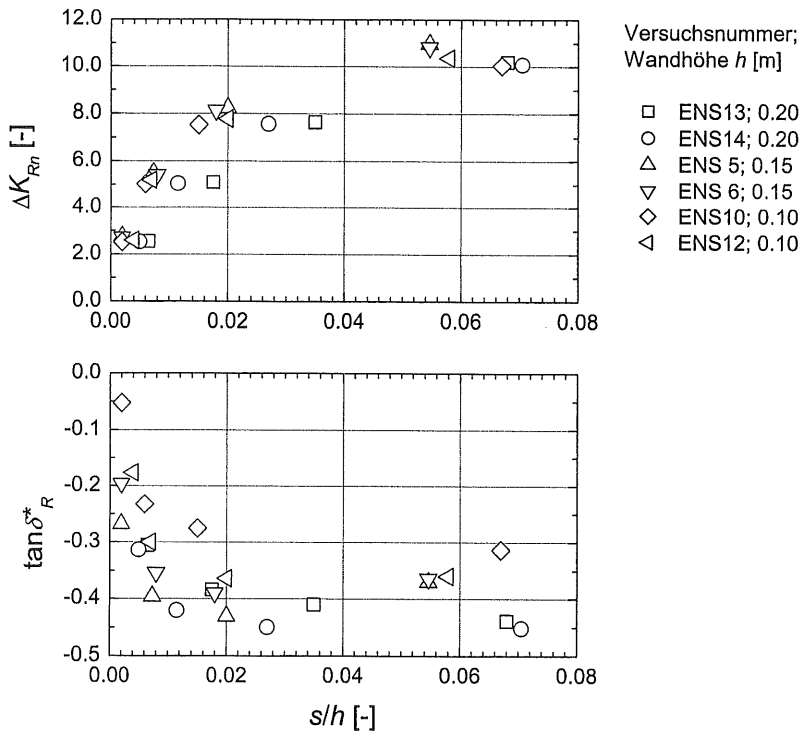


Bild 2.13: Mobilisierung der normierten verschiebungsabhängigen Erddruckkraft, Versuchsergebnisse MAO (1993) Parallelverschiebung; Sand trocken; ($D = 0.65$; $I_D = 0.69$)

FANG u.a. (1994)

Die Autoren führten Versuche mit verschiedenen Wandbewegungsarten durch, wobei die Lagerungsdichte des trockenen Sandes und die Beschaffenheit der Wandoberfläche nicht variiert wurden. Neben den drei Grundwandbewegungsarten wurden Drehbewegungen um Achsen oberhalb des Wandkopfes und unterhalb des Wandfußes ausgeführt. Der Versuchsstand (Bild 2.15) hatte eine Länge von 2.00 m, eine Breite von 1.00 m und eine Höhe von 0.61 m. Die mit Sand hinterfüllte Versuchswand besaß eine Höhe von 0.50 m.

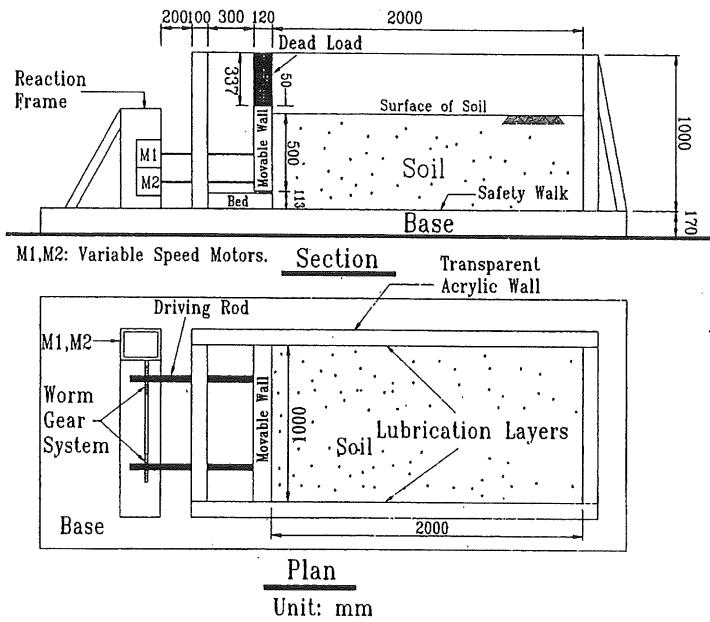


Bild 2.15: Versuchsaufbau nach FANG u.a.(1994)

Die Versuchswand bildete eine 0.12 m starke Stahlplatte, in die elektrische Druckmessdosens zur Messung der Normalspannung eingebaut waren. Eine Messung der mobilisierten Tangentialspannung an der Wand und der resultierenden Tangentialkraft erfolgte nicht.

2.2 Ansätze zur passiven Grenzverschiebung

FRANZIUS (1928)

FRANZIUS gibt auf Grundlage seiner Modellversuche für die Abhängigkeit der passiven Grenzverschiebung s_p (in mm) von der Wandhöhe h (in m) die Gl. (2.5) an.

$$s_p = \alpha \cdot h^\beta \quad (2.5)$$

Die Koeffizienten α und β der Gl. (2.5) gibt FRANZIUS entsprechend den Randbedingungen in seinen Versuchen nach Tabelle 2.1 an.

Tabelle 2.1: Koeffizienten α und β nach FRANZIUS (1928)

	α [-]	β [-]
Sand unter Wasser, raue Wand	33	2.5
sehr feuchter Sand, raue Wand	50	2.0
sehr feuchter Sand, glatte Wand	29	1.5

HORN (1970)

HORN formuliert auf der Grundlage eigener Versuche und von Versuchen anderer Autoren zum *räumlichen* Erdwiderstand die Abhängigkeit der Grenzverschiebung s_p (in cm) von der Wandhöhe h (in m) und der relativen Lagerungsdichte des Bodens I_D entsprechend Gleichung (2.6).

$$s_p = 10.4 \cdot h^{1.5} (1 - 0.625 \cdot I_D) \quad (2.6)$$

Sowohl in die EAU (1990) als auch in die DIN V 4085-100 (1996) wurde dieser Ansatz von HORN, in der veränderten Form nach Gl. (2.7), übernommen. In der genannten Norm gilt dieser Ansatz allerdings nur für breite (räumliche) Druckflächen mit einem Verhältnis von Höhe / Breite kleiner als 3.3. Das Ergebnis, die passive Grenzverschie-

ung s_p , erhält man hierbei in mm. Die relative Lagerungsdichte I_D wurde hier durch die Lagerungsdichte des Bodens D ersetzt.

$$s_p = 100 \cdot (1 - 0.6 \cdot D) \cdot \sqrt{h^3} \quad (2.7)$$

DIN V 4085-100 (1996)

In der Erddruck-Norm sind die Anhaltswerte nach Tabelle 2.2 für die auf die Wandhöhe bezogene passive Grenzverschiebung zusammengestellt. Diese Werte sind Querschnittswerte aus der Literatur.

Tabelle 2.2: Anhaltswerte für die passive Grenzverschiebung nach DIN V 4085-100 (1996)

Lagerungsdichte des Bodens	Grenzverschiebung s_p/h [-] bei		
	Fußpunktdrehung	Parallelverschiebung	Kopfpunktdrehung
locker	0.07 – 0.25	0.05 – 0.10	0.06 – 0.15
dicht	0.05 – 0.10	0.03 – 0.06	0.05 – 0.06

BESLER (1995)

BESLER stellte auf der Grundlage der Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit Gl. (2.8) einen Ansatz zur Ermittlung der Grenzverschiebung auf. Die Grenzverschiebung wird hierbei mit Hilfe eines sogenannten Grundwertes s_{p0} und entsprechenden Faktoren $f_{D,1}$, $f_{\delta,1}$, und $f_{S,1}$ berechnet. Die für die drei Wandbewegungsarten ermittelten mittleren Grundwerte (Tabelle 2.3) beschreiben die Grenzverschiebung für den Modellsand von MAO bei einer Lagerungsdichte von $D = 0,65$, einem Sättigungsgrad von $S_r = 0$ und einem Erddruckneigungswinkel von $\delta_p = 0$.

$$s_p / h = (s_{p0} / h) \cdot f_{D,1} \cdot f_{\delta,1} \cdot f_{S,1} \quad (2.8)$$

$s_{p0} / h \dots$ Grundwert der normierten passiven Grenzverschiebung [1]

Für die Verschiebung bei Erreichen von 50% des passiven Erddruckes („50%-Verschiebung“) wird mit Gl. (2.9) der gleiche Ansatz wie nach Gl (2.8) aber mit dem Grundwert $s_{(50\%E_{ph})_0}$ und den Faktoren $f_{D,2}$, $f_{\delta,2}$, und $f_{S,2}$ vorgeschlagen.

$$s_{(50\%E_{ph})} / h = \left(s_{(50\%E_{ph})_0} / h \right) \cdot f_{D,2} \cdot f_{\delta,2} \cdot f_{S,2} \quad (2.9)$$

$$s_{(50\%E_{ph})_0} / h \dots \text{Grundwert der normierten „50\%-Verschiebung“ [1]}$$

In den Berechnungsansätzen nach Gl. (2.8) und (2.9) wird der Einfluss des Spannungsniveaus nicht berücksichtigt. Dieser Einfluss wurde später von BESLER (1998) durch einen entsprechenden Faktor berücksichtigt (s. Gl. (2.13)).

Tabelle 2.3: Mittelwerte der Grundwerte der bezogenen Grenz- bzw. „50%-Verschiebung“

Wandbewegungsart	Grenzverschiebung s_{p0} / h [-]	„50%-Verschiebung“ $s_{(50\%E_{ph})_0} / h$ [-]
Fußpunktdrehung	0.0470	0.0108
Parallelverschiebung	0.0387	0.0050
Kopfpunktdrehung	0.0450	0.0121

Zur Ermittlung des Mittelwertes der Faktoren $f_{D,1}$ und $f_{D,2}$ zur Berücksichtigung des Einflusses der Lagerungsdichte des Bodens auf die Grenzverschiebung wird Gl. (2.10) vorgeschlagen.

$$f_{D,1} = f_{D,2} = 1.715 - 1.100 \cdot D \quad (2.10)$$

Die Faktoren $f_{D,1}$ und $f_{D,2}$ können mit den Kennwerten des Modellsandes von MAO (1993) – siehe Anhang A – auch mit den Gl. (2.11) oder (2.12) beschrieben werden.

$$f_{D,1} = f_{D,2} = 1.761 - 1.107 \cdot I_D \quad (2.11)$$

$$f_{D,1} = f_{D,2} = 3.950 \cdot e_0 - 1.479 \quad (2.12)$$

Die Mittelwerte der Faktoren $f_{\delta,1}$ und $f_{\delta,2}$ zur Berücksichtigung des Einflusses einer negativen Erddruckneigung auf die Grenzverschiebung und die „50%-Verschiebung“ sind in der Tabelle 2.4 zusammengestellt.

Tabelle 2.4: Mittelwerte der Faktoren $f_{\delta,1}$ und $f_{\delta,2}$ zur Berücksichtigung des Einflusses einer negativen Erddruckneigung auf die Grenzverschiebung und die „50%-Verschiebung“

Erddruckneigungswinkel δ_p	$f_{\delta,1}$ [-] (Grenzverschiebung)	$f_{\delta,2}$ [-] („50%-Verschiebung“)
$\delta_p = 0$	1.0	1.0
$0 < \left \frac{-\delta_p}{\varphi} \right \leq 0.25$	$1.0 + 2.28 \left \frac{-\delta_p}{\varphi} \right $	$1.0 + 5.76 \left \frac{-\delta_p}{\varphi} \right $
$\left \frac{-\delta_p}{\varphi} \right > 0.25$	1.57	2.44

Die Vorschläge für die Mittelwerte der Faktoren $f_{s,1}$ und $f_{s,2}$ zur Berücksichtigung des Einflusses des Sättigungsgrades auf die Grenzverschiebung und die „50%-Verschiebung“ sind in der Tabelle 2.5 zusammengestellt. Die Werte für Sättigungsgrade von $0 < S_r < 1$ können nur für die Modellversuche von MAO gelten, da der Einfluss der dabei vorhandenen Kapillarkohäsion maßstabsabhängig ist und die Wandhöhe bei diesen Versuchen nur zwischen 0.10 m und 0.25 m variiert wurde.

Tabelle 2.5: Mittelwerte der Faktoren $f_{s,1}$ und $f_{s,2}$ zur Berücksichtigung des Einflusses des Sättigungsgrades auf die Grenzverschiebung und die „50%-Verschiebung“

Sättigungsgrad S_r	$f_{s,1}$ [-] (Grenzverschiebung)	$f_{s,2}$ [-] („50%-Verschiebung“)
$S_r = 0$	1.0	1.0
$0 < S_r < 1$	1.73	2.12
$S_r = 1$	1.58	2.21

BESLER (1998)

BESLER erweitert seinen Ansatz zur Ermittlung der Grenzverschiebung nach Gl. (2.8) um einen Maßstabsfaktor der Form:

$$f_{M,1} = \left(\frac{h_P}{h_M} \right)^\lambda \quad (2.13)$$

h_P ...	Wandhöhe des Prototypen
h_M ...	Wandhöhe des Modells
λ ...	Exponent

In Gl. (2.13) ist die mittlere Wandhöhe bei den Versuchen von MAO mit $h_M = 0.175$ m als Bezugshöhe anzusetzen. Damit ergibt sich der Maßstabsfaktor zu:

$$f_{M,1} = \left(\frac{h_P}{0.175 \text{ m}} \right)^\lambda \quad (2.14)$$

Für den Exponenten λ schätzt BESLER auf der Grundlage der Versuche von FRANZIUS und MAO an Sand unter Auftrieb einen Wert zwischen 0.14 ($\delta_p = -15^\circ$) und 0.33 ($\delta_p = 0$) ab. Er schlägt schließlich vor, den Exponenten auf der Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zentrifugen-Versuche von WOLFRAM (1995) mit $\lambda = 0.25$ anzusetzen.

Aus Gl. (2.8) wird damit:

$$s_p / h = (s_{p0} / h) \cdot f_{D,1} \cdot f_{\delta,1} \cdot f_{s,1} \cdot f_{M,1} \quad (2.15)$$

2.3 Ansätze zur Mobilisierung

Für Spannungs-Verformungs-Beziehungen, wie z.B. die Mobilisierung des passiven Erddrucks bzw. der Erddruckkraft, wurden bereits eine Reihe von empirischen Ansätzen verwendet. Einige davon werden im Folgenden vorgestellt.

KONDNER (1963)

KONDNER schlägt mit Gl. (2.16) eine hyperbolische Beziehung zur allgemeinen Beschreibung der Mobilisierung der Deviatorspannung beim Triaxial-Versuch in Abhängigkeit von der axialen Dehnung vor.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a + b \cdot \varepsilon} \quad (2.16)$$

$\sigma_1 - \sigma_3 \dots$	mobilisierte Deviatorspannung
$\varepsilon \dots$	kennzeichnende bzw. mobilisierte Formänderung
$a, b \dots$	versuchstechnisch zu ermittelnde Beiwerte

BRINCH HANSEN (1965)

BRINCH HANSEN schlägt zur Beschreibung von allgemeinen Verformungs-Spannungs-Zusammenhängen einen Potenzansatz nach Gl. (2.17) vor.

$$\frac{\tau}{\tau_f} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^n + a \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^n \right] \quad (2.17)$$

$\tau \dots$	mobilisierte Spannung
$\tau_f \dots$	Grenz- (Bruch-) wert der Spannung
$\varepsilon \dots$	mobilisierte kennzeichnende Dehnung
$\varepsilon_f \dots$	Grenz- (Bruch-) wert der mobilisierten kennzeichnenden Dehnung
$a, n \dots$	Beiwerte zur Beschreibung des Mobilisierungsverhaltens

Die Konstanten a und n (mit dem Definitionsbereich zwischen 0 und 1) müssen experimentell bestimmt werden.

Der Vorschlag von BRINCH HANSEN wurde im Entwurf der DIN 4085 (Feb. 1980) als Ansatz zur Beschreibung Mobilisierungsverhaltens der Resultierenden des Erdwiderstands verwendet. Auf dieser Grundlage wurden Mobilisierungskurven für unterschiedliche Lagerungsdichten des Bodens abgeleitet.

Mit dem Mobilisierungsgrad des verformungsabhängigen Erdwiderstands

$$\chi_R = \frac{E - E_0}{E_p - E_0} = \frac{K - K_0}{K_p - K_0} \quad (2.18)$$

und dem Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung

$$\lambda_R = \frac{s}{s_p} \quad (2.19)$$

lässt sich der Ansatz nach Gl. (2.17) mit Gl. (2.20) darstellen.

$$\chi_R = \lambda_R^n + a \cdot \lambda_R (1 - \lambda_R^n) \quad (2.20)$$

Mit $a = 1$ ergibt sich aus Gl. (2.20):

$$\chi_R = \lambda_R + \lambda_R^n - \lambda_R^{n+1} \quad (2.21)$$

Entwurf DIN 4085 (Febr. 1980)

Im Entwurf der Norm wurden aus Gl. (2.21) folgende spezielle Mobilisierungsfunktionen für verschiedene Böden und Lagerungsdichten abgeleitet:

- für dicht gelagerten nichtbindigen und halbfesten bindigen Boden mit $n = 1/3$:

$$\chi_R = \lambda_R + \lambda_R^{1/3} - \lambda_R^{4/3} \quad (2.22)$$

- für locker gelagerten nichtbindigen Boden mit $n = 1/2$:

$$\chi_R = \lambda_R + \lambda_R^{1/2} - \lambda_R^{3/2} \quad (2.23)$$

- für weichen bindigen Boden mit $n = 1$:

$$\chi_R = 2\lambda_R - \lambda_R^2 \quad (2.24)$$

Die o.g. Vorschläge zur Beschreibung der Mobilisierung der passiven Erddruckkraft auf der Grundlage des Ansatzes von BRINCH HANSEN sind im Bild 2.16 dargestellt. Es wird z.B. ersichtlich, dass zur Erreichung eines Mobilisierungsgrades des verfor-

mungsabhängigen Erdwiderstands von $\chi_R = 0.5$ ein Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung von $\lambda_R = 0.1$ bis 0.3 erforderlich ist.

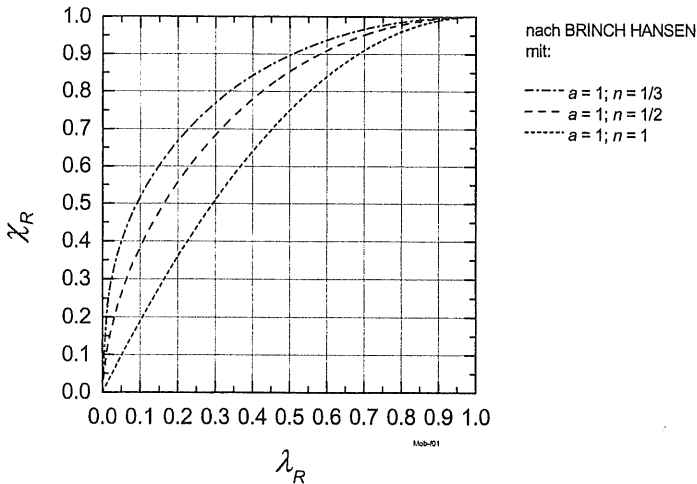


Bild 2.16: Vorschläge zur Beschreibung der Mobilisierung des Erdwiderstands nach Entwurf DIN 4085 (Febr. 1980)

HORN (1970 und 1972)

HORN nutzt zur Beschreibung der Mobilisierung der räumlichen Erdwiderstandskraft zur Auswertung seiner Großversuche den hyperbolischen Ansatz nach Gl. (2.25). Die Koeffizienten zur Beschreibung seiner Versuchsergebnisse gibt er mit $a = 0.12$ und $b = 0.88$ an. Die Anwendung des Ansatzes wird von HORN auf den Bereich von $0.1 \leq (s/s_p) \leq 1$ eingeschränkt, da sich bei $s = 0$ (Ausgangszustand) nicht die Erd-druckkraft im Ausgangszustand ergibt.

$$E = \left(\frac{(s/s_p)}{a + b \cdot (s/s_p)} \right) \cdot E_p \quad (2.25)$$

s ... mobilisierte kennzeichnende Wandverschiebung

s_p ... kennzeichnende Wandverschiebung im passiven Grenzzustand

NENDZA (1973)

NENDZA schlägt vor, die Mobilisierung des verformungsabhängigen Erdwiderstands mit Hilfe eines „Viertellkreises“ zu beschreiben. Dies gibt z.B. der Ansatz nach Gl. (2.26) wieder.

$$\chi_R = \left(1 - (1 - \lambda_R)^2\right)^{0.5} \quad (2.26)$$

FRANKE (1983)

Unter der Berücksichtigung von damals verfügbaren Versuchsergebnissen aus der Literatur stellt FRANKE mit der Gl. (2.27) einen gegenüber Gl. (2.26) verallgemeinerten Ansatz vor. Als Exponent schlägt er $x = 0.7$ vor.

$$\chi_R = \left(1 - (1 - \lambda_R)^2\right)^x \quad (2.27)$$

Im Bild 2.17 sind die Vorschläge von NENDZA und FRANKE zur Mobilisierung der Erdwiderstandskraft im Vergleich zu den Vorschlägen nach Entwurf DIN 4085 (Febr. 1980) dargestellt.

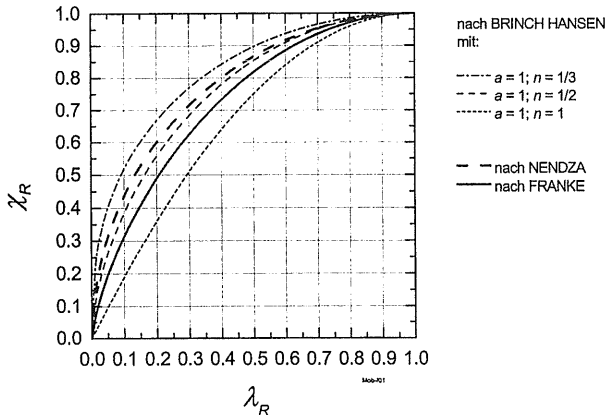


Bild 2.17: Vorschläge zur Beschreibung der Mobilisierung des passiven Erddrucks nach Entwurf DIN 4085 (Febr. 1980), NENDZA und FRANKE

VOGT (1984)

Auf der Grundlage seiner Versuche stellt VOGT mit der Gl. (2.28) einen hyperbolischen Ansatz zur Beschreibung der Mobilisierung des normierten Erddrucks (Erddruckbeiwert) K_L in Abhängigkeit von der auf die örtliche Tiefe z bezogenen örtlichen Wandverschiebung s_L auf. Die Grenzwerte K_{ph} und K_0 werden hier über die Tiefe z als konstant angenommen.

$$K_L = K_0 + (K_{ph} - K_0) \cdot \frac{(s_L / z)}{a + (s_L / z)} \quad (2.28)$$

Der normierte Erddruck bzw. Erddruckbeiwert ist wie folgt definiert:

$$K_L = \frac{\sigma}{\gamma \cdot z} \quad (2.29)$$

Mit dem Beiwert a soll der Einfluss der Lagerungsdichte des Bodens auf das Mobilisierungsverhalten berücksichtigt werden. Er wird von VOGT auf der Grundlage eigener Versuche mit $a = 0.03$ bzw. auf der Grundlage der Versuche von LAUMANS mit $a = 0.11$ angegeben. Im Merkblatt FGSV (1994) wird für dicht bis locker gelagerten Sand $0.01 \leq a \leq 0.1$ empfohlen.

In Bild 2.18 und Bild 2.19 wird die mit dem Ansatz von VOGT ermittelte Mobilisierung des Erddruckbeiwertes über die normierte Wandhöhe (z/h) in Abhängigkeit von der normierten kennzeichnenden Wandverschiebung (s/h) für zwei unterschiedliche Beiwerte a für die drei Grundwandbewegungsarten dargestellt.

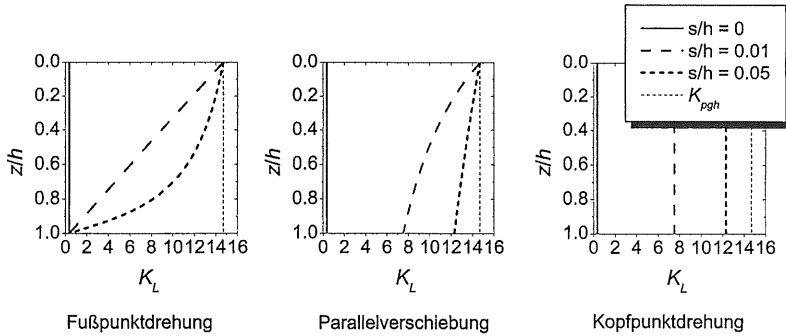


Bild 2.18: Mobilisierter Erddruckbeiwert nach dem Ansatz von VOGT für dicht gelagerten Sand mit $a = 0.01$ (mit $\varphi = 40^\circ$; $\delta_p = -\varphi$; $K_{ph} = 14.70$; $K_0 = 0.36$)

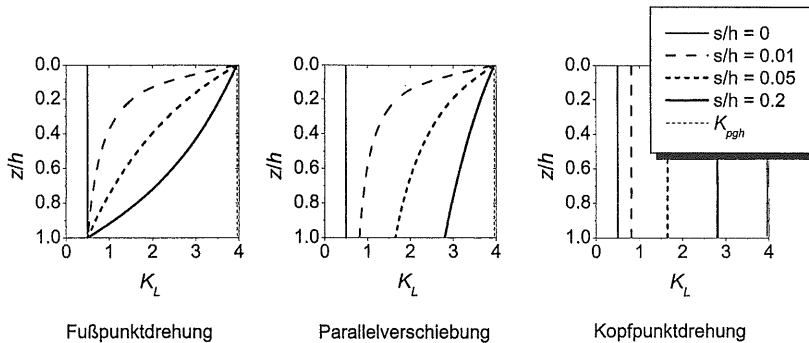


Bild 2.19: Mobilisierter Erddruckbeiwert nach dem Ansatz von VOGT für locker gelagerten Sand mit $a = 0.1$ ($\varphi = 30^\circ$; $\delta_p = -1/3\varphi$; $K_{ph} = 3.96$; $K_0 = 0.50$)

Zur besseren Verdeutlichung des Ansatzes von VOGT sind in Bild 2.20 und Bild 2.21 die sich daraus ergebenden Erddruckverläufe für die beiden Beispiele aufgeführt.

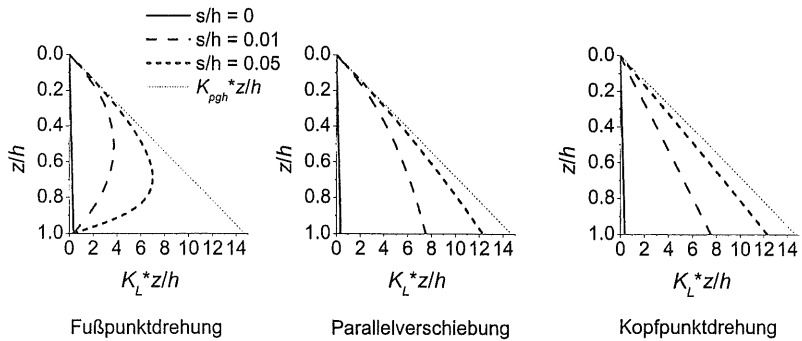


Bild 2.20: Mobilisierter Erddruck (normiert) nach dem Ansatz von VOGT für dicht gelagerten Sand mit $a = 0.01$ (mit $\varphi = 40^\circ$; $\delta_p = -\varphi$; $K_{ph} = 14.70$; $K_0 = 0.36$)

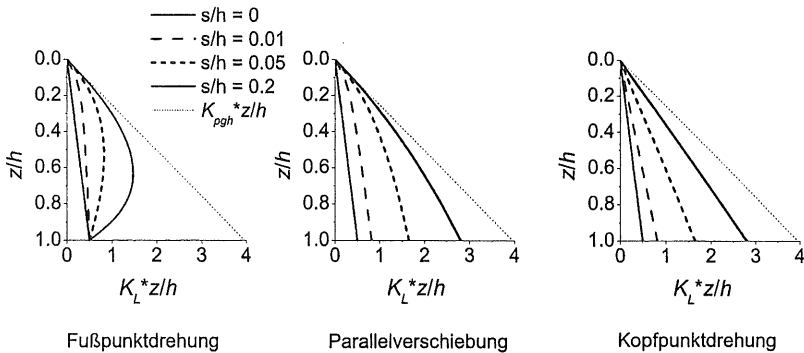


Bild 2.21: Mobilisierter Erddruck (normiert) nach dem Ansatz von VOGT für locker gelagerten Sand mit $a = 0.1$ (mit $\varphi = 30^\circ$; $\delta_p = -1/3\varphi$; $K_{ph} = 3.96$; $K_0 = 0.50$)

ZIEGLER (1987)

ZIEGLER verwendet zur Beschreibung des Mobilisierungsverhaltens der verformungsabhängigen Erdwiderstandskraft einen Potenzansatz nach Gl. (2.30).

$$\Delta K_R = b_i \cdot \left(\frac{s}{h}\right)^\alpha \tag{2.30}$$

Der normierte verschiebungsabhängige Anteil der Erddruckkraft wird dabei wie folgt beschrieben:

$$\Delta K_R = \frac{2 \cdot \Delta E}{\gamma \cdot h^2} = \frac{2 \cdot (E - E_0)}{\gamma \cdot h^2} \quad (2.31)$$

Für die Mobilisierungsfunktion der stützenden Erddruckkraft schlägt ZIEGLER, in Abhängigkeit von der Wandbewegungsart, die in der Tabelle 2.6 aufgeführten Werte für α und β_i vor. Diese Angaben basieren auf der Grundlage von Triaxial-Versuchen mit Karlsruher Versuchssand und Finite-Elemente-Berechnungen.

Tabelle 2.6: Koeffizienten α und β_i nach ZIEGLER für Gl. (2.30)

	α [-]	β_i [-]
Fußpunktdrehung (FPD)	0.93	99
Parallelverschiebung (PV)		275
Kopfpunktdrehung (KPD)		212

Wie Bild 2.22 verdeutlicht, ergeben sich mit dem Ansatz nach Gl. (2.30) und den Koeffizienten aus der Tabelle 2.6 nahezu lineare Mobilisierungskurven.

Der o.g. Mobilisierungsansatz für die Erddruckkraft wird von ZIEGLER auch zur Beschreibung der Mobilisierung des Erddrucks verwendet. Auf der Grundlage von Annahmen zum Erddruckverlauf über die Wandhöhe und der örtlichen Wandverschiebung s_L stellt er Erddruckansätze für die Grundwandbewegungsarten auf. Diese Ansätze werden durch Gl. (2.32), (2.33) und (2.34) beschrieben. Für zwei Zahlenbeispiele ist die Erddruckmobilisierung nach diesen Ansätzen in Bild 2.23 und Bild 2.24 dargestellt.

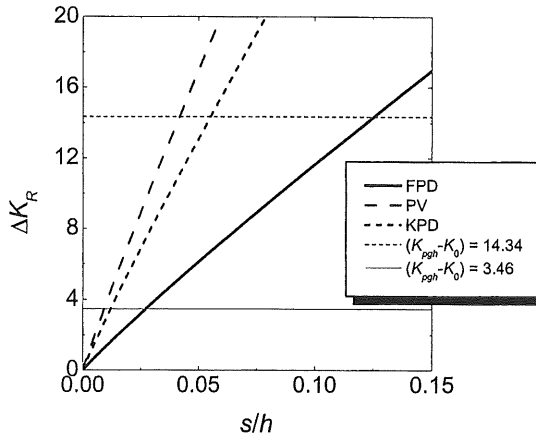


Bild 2.22 Mobilisierung der Erddruckkraft nach ZIEGLER

Fußpunktdrehung

Bei Annahme des Erddruckverlaufs über die Wandhöhe mit einer Parabel 2. Ordnung

$$e = A_4 z^2 + B_4 z + C_4$$

ergibt sich der Erddruck für $0 \leq z/h \leq 1$ in dimensionsfreier Schreibweise

$$\frac{e}{\gamma h} = K_L \cdot \left(\frac{z}{h}\right) = 3 \left[K_0 + b_1 \left(\frac{s_L}{z}\right)^\alpha \left(\frac{z/h}{1-(z/h)}\right)^\alpha \right] \left[1 - \left(\frac{z}{h}\right) \right] \left(\frac{z}{h}\right) \quad (2.32)$$

Parallelverschiebung

Bei Annahme eines linearen Erddruckverlaufs über die Wandhöhe

$$e = A_5 z + B_5$$

ergibt sich folgender Erddruck für $0 \leq z/h \leq 1$ in dimensionsfreier Schreibweise

$$\frac{e}{\gamma h} = K_L \cdot \left(\frac{z}{h}\right) = \left[K_0 + b_1 \left(\frac{s_L}{z}\right)^\alpha \left(\frac{z}{h}\right)^\alpha \right] \left(\frac{z}{h}\right) \quad (2.33)$$

Kopfpunktdrehung

Bei Annahme eines Erddruckverlaufs über die Wandhöhe mit einer Parabel 2. Ordnung

$$e = A_6 z^2 + B_6 z + C_6$$

ergibt sich folgender Erddruck für $0 \leq z/h \leq 1$ in dimensionsfreier Schreibweise

$$\frac{e}{\gamma h} = K_L \cdot \left(\frac{z}{h}\right) = \left[K_0 + \frac{3}{2} \cdot b_1 \left(\frac{s_L}{z}\right)^\alpha \right] \left(\frac{z}{h}\right) \quad (2.34)$$

Wie Bild 2.23 und Bild 2.24 zeigen, erzeugen die Ansätze von ZIEGLER für die drei verschiedenen Wandbewegungsarten unterschiedliche Erddruckverläufe über die Wandhöhe. Die Erddruckverläufe sind jedoch unabhängig von der Wahl der Scherfestigkeit (Lagerungsdichte) des Bodens. Außerdem nimmt der Erddruck bei zunehmender Wandbewegung immer weiter zu, so dass der passive Erddruck – hier zunächst linear mit der Tiefe zunehmend eingetragen – örtlich überschritten wird. Denn ein oberer Grenzwert ist im Ansatz nicht berücksichtigt.

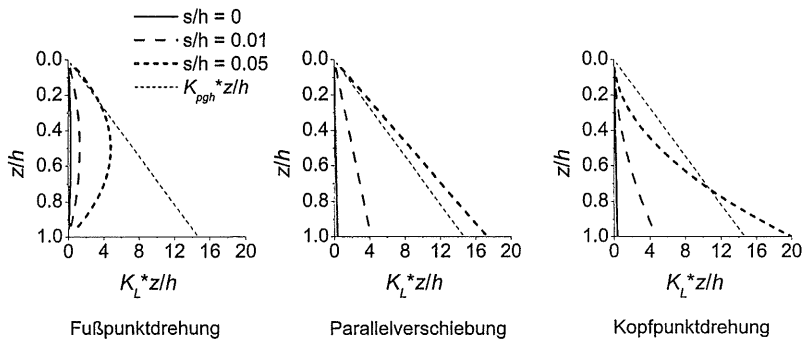


Bild 2.23: Mobilisierter Erddruck (normiert) nach dem Ansatz von ZIEGLER (mit $\varphi = 40^\circ$; $\delta_p = -\varphi$; $K_{ph} = 14.70$; $K_0 = 0.36$)

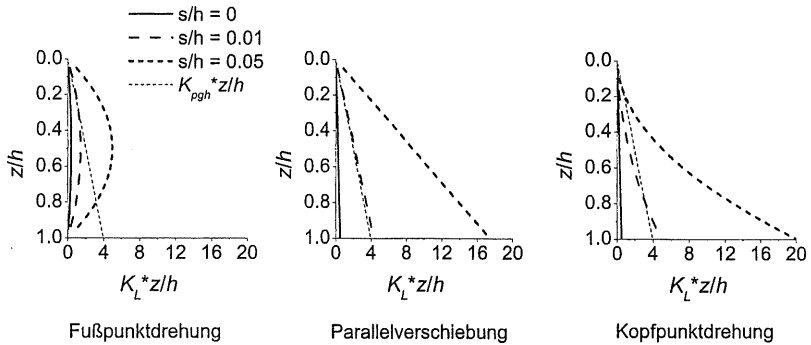


Bild 2.24: Mobilisierter Erddruck (normiert) nach dem Ansatz von ZIEGLER (mit $\varphi = 30^\circ$; $\delta_p = -1/3\varphi$; $K_{ph} = 3.96$; $K_0 = 0.50$)

Zur weiteren Veranschaulichung sind in Bild 2.25 für ein Zahlenbeispiel die mobilisierten Erddruckbeiwerte über die Wandhöhe in Abhängigkeit von der Wandbewegung dargestellt.

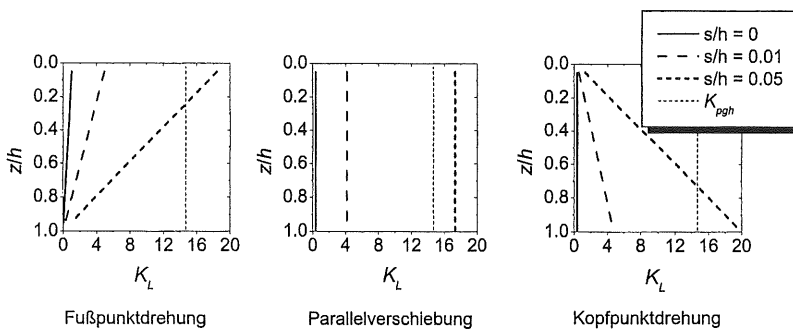


Bild 2.25: Mobilisierter Erddruckbeiwert nach dem Ansatz von ZIEGLER (mit $\varphi = 40^\circ$; $\delta_p = -\varphi$; $K_{ph} = 14.70$; $K_0 = 0.36$)

DIN V 4085-100 (1996)

In der Erddruck-Vornorm von 1996 sind die Anhaltswerte nach Tabelle 2.7 für die auf die Wandhöhe bezogene Verschiebung zur Mobilisierung von 50% der passiven Erddruckkraft zusammengestellt. Diese Werte sind Querschnittswerte aus der Literatur.

Tabelle 2.7: Anhaltswerte für die Verschiebung zur Mobilisierung von 50% der passiven Erddruckkraft nach DIN V 4085-100 (1996)

Lagerungsdichte des Bodens	„50%-Verschiebung“ $s_{(50\%E_{ph})} / h$ [-] bei		
	Fußpunktdrehung	Parallelverschiebung	Kopfpunktdrehung
locker	0.015 – 0.040	0.009 – 0.015	0.010 – 0.015
dicht	0.011 – 0.020	0.005 – 0.010	0.005 – 0.013

Mit den Werten der Tabelle 2.7 und Tabelle 2.2 lässt sich z.B. nach Gl. (2.35) der Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung bei Erreichen von 50% der passiven Erddruckkraft $\lambda_{R, 50\%E_{ph}}$ ermitteln.

$$\lambda_{R, 50\%E_{ph}} = \frac{s_{(50\%E_{ph})}}{s_p} \quad (2.35)$$

Ermittelt man diesen Kennwert auf der Grundlage der Angaben in der Vornorm, so erhält man die in der Tabelle 2.8 zusammengestellten Werte.

Tabelle 2.8: Anhaltswerte für den Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung bei Erreichen von 50% der passiven Erddruckkraft $\lambda_{R, 50\%E_{ph}}$ auf der Grundlage der Angaben in DIN V 4085-100 (1996)

Lagerungsdichte des Bodens	$\lambda_{R, 50\%E_{ph}}$ [-] bei		
	Fußpunktdrehung	Parallelverschiebung	Kopfpunktdrehung
locker	0.214 – 0.160	0.180 – 0.150	0.167 – 0.100
Mittelwert locker	0.19	0.17	0.13
dicht	0.220 – 0.200	0.167	0.100 – 0.217
Mittelwert dicht	0.21	0.17	0.16

Nach den Anhaltswerten der Norm liegt die erforderliche Verschiebung zur Mobilisierung von 50% der passiven Erddruckkraft somit bei einer Größe von 10 bis 22% der erforderlichen Verschiebung zur Mobilisierung des passiven Grenzwertes.

BARTL, FRANKE (1997) und FERSTL, PREGL (1997)

Der Vorschlag zur Beschreibung des Mobilisierungsverhaltens der passiven Erddruckkraft stellt eine Verallgemeinerung der Ansätze von NENDZA (1973) und von FRANKE (1983) dar. Die dimensionslosen Exponenten b und c müssen auf der Grundlage von bekannten Mobilisierungsverläufen festgelegt bzw. ermittelt werden.

$$\chi_R = \left(1 - (1 - \lambda_R)^b\right)^c \quad (2.36)$$

Der Ansatz soll dabei nicht auf die Beschreibung der resultierenden Erddruckkraft E beschränkt sein. Die Eignung des Ansatzes wird im Folgenden zur Beschreibung der Mobilisierung des Horizontalanteils E_h bzw. des Normalanteils E_n der Erddruckkraft untersucht.

BESLER (1998)

BESLER schlägt zur Beschreibung der Mobilisierung des Horizontalanteils der stützenden Erddruckkraft einen Ansatz in Form der Gl. (2.37) vor. Der dimensionsfrei dargestellte Horizontalanteil der mobilisierten stützenden Erddruckkraft K_{Rh} wird in Abhängigkeit vom Mobilisierungsgrad der kennzeichnenden Grenzverschiebung λ_R und den drei dimensionsfreien Koeffizienten A , B und C ausgedrückt.

$$K_{Rh} = A + \frac{B}{C + \lambda_R} \quad (2.37)$$

Zur Ermittlung des Funktionsverlaufes für den betrachteten Fall werden nur folgende drei Stützstellen („Basiswerte“) genutzt: 1. Ruhezustand, 2. Zustand bei Erreichen von 50% der passiven Erddruckkraft, 3. passiver Grenzzustand (Bild 2.26 bzw. Bild 2.27). Neben den dimensionsfreien Resultierenden des Erdruhedrucks K_0 und des passiven Erddrucks K_{ph} , werden die Grenzverschiebung s_p und die „50%-Verschiebung“ $s_{(50\%E_{ph})}$ auf der Grundlage der Ansätze und Einflussfaktoren von BESLER (s. Abschnitt 2.2) als Eingangsgrößen benötigt. Die Koeffizienten A , B und C in der Gl. (2.37) sind wie folgt definiert:

$$C = \frac{K_{ph} \cdot \lambda_{R, 50\%E_{ph}}}{2(K_{ph} - K_0) \cdot \lambda_{R, 50\%E_{ph}} + 2K_0 - K_{ph}} \quad (2.38)$$

$$A = K_{ph} + C(K_{ph} - K_0) \quad (2.39)$$

$$B = -(C + C^2)(K_{ph} - K_0) \quad (2.40)$$

Im Folgenden wird die Ermittlung der Mobilisierungsfunktionen nach dem Ansatz von BESLER an zwei Beispielen erläutert. Dabei wurde die passive Erddruckkraft bei allen Wandbewegungsarten mit dem gleichen passiven Erddruckbeiwert berücksichtigt, obwohl bei den verschiedenen Wandbewegungsarten im Grenzzustand eine unterschiedliche Größe der Kraft erreicht wird. Aber auch bei der Vernachlässigung dieses Effektes kann das mit dem Ansatz von BESLER prognostizierte Mobilisierungsverhalten qualitativ beurteilt werden kann.

Beispiel 1: trockener Sand mit lockerer Lagerung:

$$I_D = 0,30; \varphi = 35^\circ; \delta_p = -\frac{1}{3}\varphi; \alpha = \beta = 0$$

$$K_0 \approx 1 - \sin \varphi = 0,43; K_{pgh} = K_{ph} = 5,40 \text{ (nach PREGL) und damit } \frac{K_{ph}}{2} = 2,70$$

Beispiel 2: trockener Sand mit dichter Lagerung:

$$I_D = 0,80; \varphi = 42^\circ; \delta_p = -\frac{1}{3}\varphi; \alpha = \beta = 0$$

$$K_0 \approx 1 - \sin \varphi = 0,33; K_{pgh} = K_{ph} = 8,60 \text{ (nach PREGL) und damit } \frac{K_{ph}}{2} = 4,30$$

Zunächst werden nach den Ansätzen von BESLER gemäß Abschnitt 2.2 die Grenzverschiebungen bzw. „50%-Verschiebungen“ berechnet. In Tabelle 2.9 und Tabelle 2.10 sind die Ergebnisse für die drei Grundwandbewegungsarten zusammenstellt.

Tabelle 2.9: Grenzverschiebung s_p / h nach BESLER für die Beispiele

	Lagerungs- dichte	s_{p0} / h	$f_{D,1}$	$f_{\delta,1}$	$f_{\delta,1}$	s_p / h
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Fußpunktdrehung (FPD)	locker	0.0470	1.43	1.57	1.0	0.106
	dicht	0.0470	0.88	1.57	1.0	0.065
Parallel- verschiebung (PV)	locker	0.0387	1.43	1.57	1.0	0.087
	dicht	0.0387	0.88	1.57	1.0	0.053
Kopfpunktdrehung (KPD)	locker	0.0450	1.43	1.57	1.0	0.101
	dicht	0.0450	0.88	1.57	1.0	0.062

Tabelle 2.10: „50%-Verschiebung“ $s_{(50\%E_{p,0})} / h$ nach BESLER für die Beispiele

	Lagerungs- dichte	$s_{(50\%E_{p,0})} / h$	$f_{D,2}$	$f_{\delta,2}$	$f_{\delta,2}$	$s_{(50\%E_{p,0})} / h$
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Fußpunktdrehung (FPD)	locker	0.0108	1.43	2.44	1.0	0.038
	dicht	0.0108	0.88	2.44	1.0	0.023
Parallel- verschiebung (PV)	locker	0.0050	1.43	2.44	1.0	0.017
	dicht	0.0050	0.88	2.44	1.0	0.011
Kopfpunktdrehung (KPD)	locker	0.0121	1.43	2.44	1.0	0.042
	dicht	0.0121	0.88	2.44	1.0	0.026

Mit diesen Werten lassen sich nunmehr die Koeffizienten für den Mobilisierungsansatz nach BESLER ermitteln. Diese Ergebnisse sind in der Tabelle 2.11 für die drei Grundwandbewegungsarten zusammenstellt. Danach liegt die erforderliche Verschiebung zur Mobilisierung von 50% der passiven Erddruckkraft somit bei einer Größe von 20 bis 42% der erforderlichen Verschiebung zur Mobilisierung des passiven Grenzwertes.

Tabelle 2.11: Koeffizienten der Mobilisierungsfunktion nach BESLER für die Beispiele

	Lagerungsdichte	$\lambda_{R, 50\%E_{ph}}$	A	B	C
		[-]	[-]	[-]	[-]
Fußpunktdrehung (FPD)	locker	0.36	15.25	-29.38	1.98
	dicht	0.35	20.66	-29.63	1.46
Parallelverschiebung (PV)	locker	0.20	7.42	-2.84	0.41
	dicht	0.21	11.88	-4.57	0.40
Kopfpunktdrehung (KPD)	locker	0.42	32.85	-179.09	5.52
	dicht	0.42	38.31	-136.45	3.59

Die sich ergebenden Basiswerte (Stützstellen) und die Mobilisierungskurven für den Horizontalanteil der Erddruckkraft nach BESLER sind in Bild 2.26 und Bild 2.27 dargestellt. Danach kann man feststellen, dass beim Ansatz nach BESLER bei allen drei Wandbewegungsarten die Lagerungsdichte des Bodens nahezu keinen Einfluss auf das Mobilisierungsverhalten der stützenden Erddruckkraft hat. Dies lässt sich auf den Ansatz zur Ermittlung des Mobilisierungsgrades der Grenzverschiebung bei Erreichen von 50% der passiven Erddruckkraft zurückführen (s. Tabelle 2.11). Weiterhin kann man sehen, dass mit den Ansätzen sowohl für die Fußpunktdrehung, als auch für die Kopfpunktdrehung ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung und der Mobilisierung des Horizontalanteils der verschiebungsabhängigen passiven Erddruckkraft prognostiziert wird.

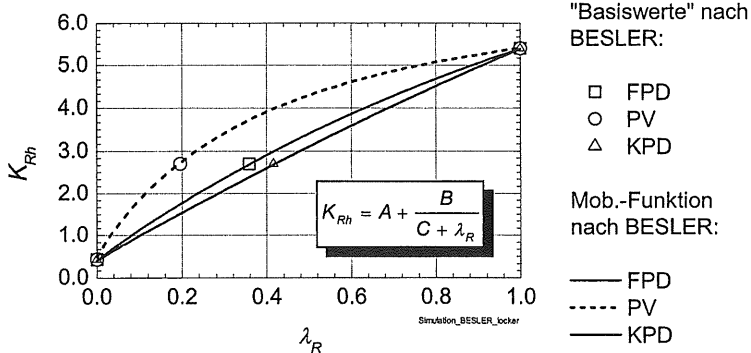


Bild 2.26: Mobilisierung nach BESLER bei lockerer Lagerung (Beispiel 1)

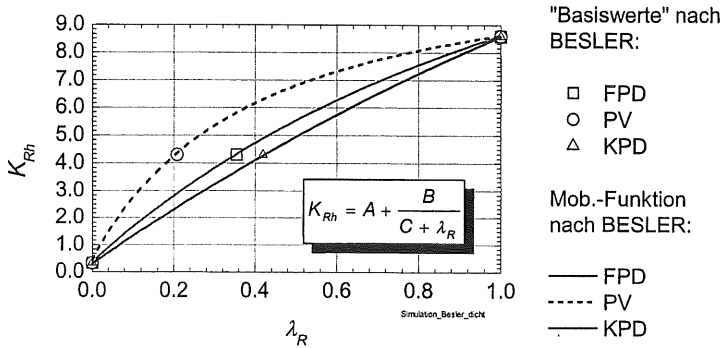
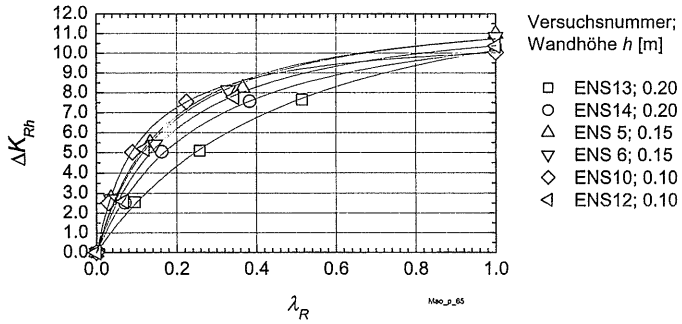
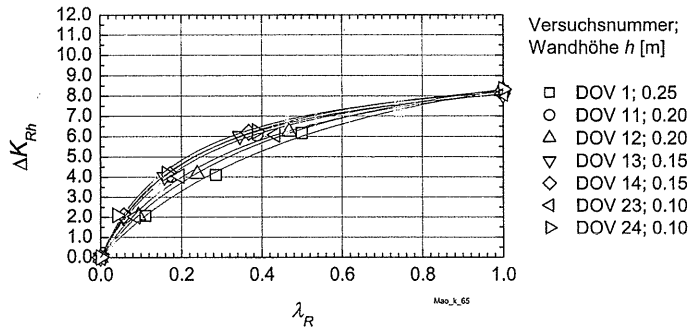


Bild 2.27: Mobilisierung nach BESLER bei dichter Lagerung (Beispiel 2)

In Bild 2.28 bis Bild 2.30 sind die Versuchsergebnisse von MAO (1993) zu den drei Grundwandbewegungsarten (Wand tangential gestützt) und einer Lagerungsdichte des trockenen Sandes von $D = 0.65$ ($I_D = 0.69$) zusammengestellt. Dabei ist, in Anlehnung nach BESLER, jeweils die Mobilisierung des verformungsabhängigen Horizontalanteils der Erddruckkraft ΔK_{Rh} über den Mobilisierungsgrad der passiven Grenzverschiebung λ_R aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass speziell bei der Kopfpunktdrehung die Mobilisierung der Erddruckkraft in den Versuchen anders verläuft als man sie nach dem Vorschlag von BESLER abschätzen würde. Die erforderliche Verschiebung zur Mobilisierung von 50% der passiven Erddruckkraft liegt in den Versuchen mit Kopfpunktdrehung bei einer Größe von ca. 16 bis 24% der erforderlichen Verschiebung zur Mobilisierung des passiven Grenzwertes, anstatt bei 42% nach der Ermittlung nach BESLER.

Weitere Versuchsergebnisse von MAO (1993) und eigene Auswertungen dazu sind im Anhang A und B zusammengestellt.

Bild 2.28: Versuchsergebnisse von MAO mit Parallelverschiebung, $D = 0.65$ Bild 2.29: Versuchsergebnisse von MAO mit Kopfpunktdrehung, $D = 0.65$

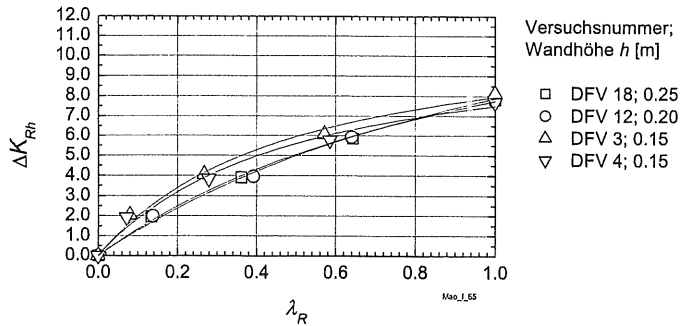


Bild 2.30: Versuchsergebnisse von MAO mit Fußpunktdrehung, $D = 0.65$

2.4 Berechnungen

ABDEL-RAHMAN (1999) führte Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zum Mobilisierungsverhalten des Erdwiderstands für die drei Grundwandbewegungsarten mit einem hypoplastischen Stoffgesetz durch. Dabei wurden drei Lagerungsdichten eines trockenen Sandes und verschiedene Wandhöhen simuliert. Bei den Berechnungen wurde der Wandreibungsbeiwert mit $\mu = \tan \delta = 0$ angesetzt.

Die Berechnungsergebnisse können zur Erddruckkraft wie folgt zusammengefasst werden:

für Parallelverschiebung:

- Bei dichter Lagerung ($e_0 = 0.55$; $I_D = 0.94$) tritt ein Peakwert der Erddruckkraft (passive Erddruckkraft) mit nachfolgendem Kraftabfall auf.
- Bei mitteldichter ($e_0 = 0.65$; $I_D = 0.62$) und lockerer ($e_0 = 0.75$; $I_D = 0.20$) Lagerung tritt kein Peakwert, sondern nur noch ein Plateauwert der Kraft auf. Der Grenzzustand und damit die Grenzverschiebung kann somit nicht mehr eindeutig aus der Erddruckkraft-Verschiebungskurve abgelesen werden.
- Mit zunehmender Wandhöhe (Spannungsniveau) nimmt die normierte passive Erddruckkraft K_{Rpp} ab und die normierte Grenzverschiebung s_p / h zu.

für Kopfpunktdrehung:

- Bei allen untersuchten Lagerungsdichten tritt ein Peakwert der Erddruckkraft (passive Erddruckkraft) mit nachfolgendem Kraftabfall auf.
- Mit zunehmender Wandhöhe (Spannungsniveau) nimmt die normierte passive Erddruckkraft K_{Rhp} ab und die normierte Grenzverschiebung s_p / h zu.
- Die passive Erddruckkraft ist bei gleicher Lagerungsdichte und Wandhöhe kleiner als bei der Parallelverschiebung.
- Die Grenzverschiebung ist bei gleicher Lagerungsdichte und Wandhöhe größer als bei der Parallelverschiebung.

für Fußpunktdrehung:

- Bei allen untersuchten Lagerungsdichten tritt bei der Erddruckkraft kein Maximalwert, weder Peak- noch Plateauwert auf. Mit zunehmender Kopfverschiebung (maximaler, berechneter Drehwinkel $\alpha \approx 20^\circ$) nimmt die Erddruckkraft immer weiter zu. Eindeutiger Werte für den Grenzzustand können nicht abgeleitet werden.

Die vom Autor berechneten Grenzzustandswerte der Erddruckkraft und der kennzeichnenden Wandbewegung (Bild 1.2) für die Parallelverschiebung und die Kopfpunktdrehung sind in Tabelle 2.12 und Tabelle 2.13 zusammengestellt.

Tabelle 2.12: Berechnungswerte zum Grenzzustand bei Parallelverschiebung

Wandhöhe	$I_D = 0.94$		$I_D = 0.62$		$I_D = 0.20$	
	K_{Rhp}	s_p / h	K_{Rhp}	s_p / h	K_{Rhp}	s_p / h
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.2	6.24	0.019	4.33	0.040	3.74	0.046
0.5	5.97	0.024	4.26	0.042	3.70	0.049
1.0	5.77	0.029	4.20	0.046	3.67	0.052
2.0	5.57	0.036	4.14	0.050	3.63	0.055
6.0	5.25	0.044	4.04	0.056	3.58	0.064

Tabelle 2.13: Berechnungswerte zum Grenzzustand bei Kopfpunktdrehung

Wandhöhe	$l_D = 0.94$		$l_D = 0.62$		$l_D = 0.20$	
	K_{Rhp}	s_p / h	K_{Rhp}	s_p / h	K_{Rhp}	s_p / h
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.2	5.41	0.035	3.98	0.038	3.46	0.032
0.5	5.14	0.039	3.90	0.046	3.42	0.037
1.0	4.96	0.047	3.84	0.048	3.38	0.044
2.0	4.76	0.050	3.76	0.054	3.33	0.051
6.0	4.47	0.066	3.64	0.068	3.25	0.065

Es ist nicht plausibel, dass die vom Autor für Kopfpunktdrehung und lockere Lagerung ($l_D = 0.20$) dokumentierten Grenverschiebungen kleiner sind als die bei mitteldichter Lagerung und zum Teil auch kleiner als die bei dichter Lagerung. Diese Werte werden deshalb bei den eigenen Auswertungen (s. Abschnitt 5.3.1) nicht berücksichtigt.

Nach Angabe des Autors lassen sich seine Berechnungsergebnisse zur Mobilisierung der passiven Erddruckkraft bei Parallelverschiebung und Kopfpunktdrehung gut mit dem Ansatz von BARTL, FRANKE nach Gl. (2.36) und den in der Tabelle 2.14 zusammengestellten Werten für die Koeffizienten b und c beschreiben.

Tabelle 2.14: Beiwerte b und c für Gl. (2.36) nach FEM-Berechnungen von ABDEL-RAHMAN

	Ausgangsporenzahl e_0 [-]	Bez. Lagerungsdichte l_D [-]	b [-]	c [-]
Parallelverschiebung (PV)	0.65	0.62	3.67	1.0
	0.55	0.94	1.93	1.0
Kopfpunktdrehung (KPD)	0.65	0.62	2.75	0.94
	0.55	0.94	2.75	0.95

In Bild 2.31 sind die sich daraus ergebenden Kurven für den Mobilisierungsgrad des Horizontalanteils der Erdwiderstandskraft χ_{Rh} dargestellt. Danach ist zu sehen, dass sich in den FEM-Berechnungen bei der Parallelverschiebung eine Abhängigkeit des Mobilisierungsverhaltens von der Lagerungsdichte des Bodens ergibt, bei der Kopfpunktrotation jedoch nicht (Kurven liegen übereinander).

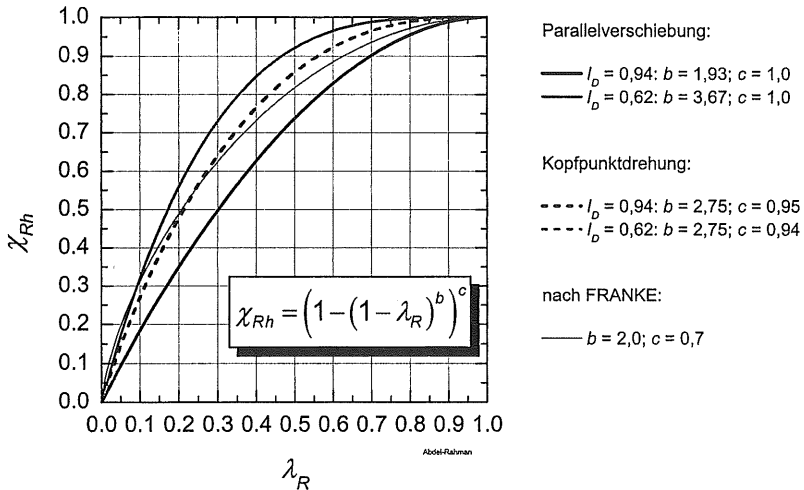


Bild 2.31: Mobilisierung der passiven Erddruckkraft nach den FEM-Berechnungen von ABDEL-RAHMAN (1999)

2.5 Schlussfolgerungen

Die im Abschnitt 2.1 kurz dargestellten Versuchsanordnungen verschiedener Autoren zeigen ein breites Spektrum in den einzelnen Modellparametern. Da die ausgeführten Versuche hinsichtlich der Einflussgrößen nicht gleichwertig sind, sind die quantitativen Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Mobilisierung des Erdwiderstandes und des passiven Erddrucks nicht vergleichbar.

Bei den in den Versuchen notwendigen, gezielten Parametervariationen sind vor allem die Modellgesetze (GÖRTLER (1975)) zu beachten. Dies führt dabei zu folgenden Forderungen (HETTLER (1981), RAUH (1991) u.a.) an solche Versuche:

- Die Darstellung des Last-Verformungs-Verhaltens muss in dimensionsloser Form erfolgen.
- Die Modelle müssen (den Prototypen bzw. untereinander) geometrisch, mechanisch und kinematisch ähnlich sein.
- Der Boden muss im Modell und im Prototyp die selbe Lagerungsdichte (Porenzahl), den selben Reibungswinkel, die selbe Dilatanz und die selbe Kornbruchspannung besitzen.

Als weiteres wesentliches Problem bei Modellversuchen, speziell hinsichtlich der Aussagekraft bzw. Übertragbarkeit der Ergebnisse von kleinmaßstäblichen 1g-Modellversuchen auf größere Abmessungen bzw. Prototypen, steht die Frage nach dem Einfluss des Spannungsniveaus auf die Versuchsergebnisse, sowohl auf den Grenzzustand als auch auf den Gebrauchszustand (WALZ (1982), HETTLER (1995) u.a.). Zur Untersuchung dieses Problems hat sich in den letzten Jahren die Zentrifugen-Versuchstechnik durchgesetzt.

Schwerpunkte der Untersuchungen waren die Qualifizierung der Versuchseinrichtung bis zur Auswertetechnik und Untersuchungen zum Einfluss

- der Wandbewegungsart,
- der Ausgangslagerungsdichte,
- der Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) der Wand,
- und des Spannungsniveaus

auf die Mobilisierung des Erdwiderstands.

3 Versuchstechniken und Versuchsboden

3.1 1g-Versuche

3.1.1 Versuchsstand

Die Versuchsanlage (Bild 3.1) wurde vom Autor in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verarbeitungsmaschinen- und Verarbeitungstechnik der TU Dresden entworfen und von der Firma Stahl-Technik-Straub (STS) konstruiert und gefertigt. Der Versuchsstand, speziell die Versuchswand und die Messtechnik, wurden während des Zeitraumes der Untersuchungen in mehreren Entwicklungsstufen verbessert. Im Folgenden wird die Versuchstechnik erläutert, mit der die in dieser Arbeit dokumentierten 1g-Versuche durchgeführt wurden.

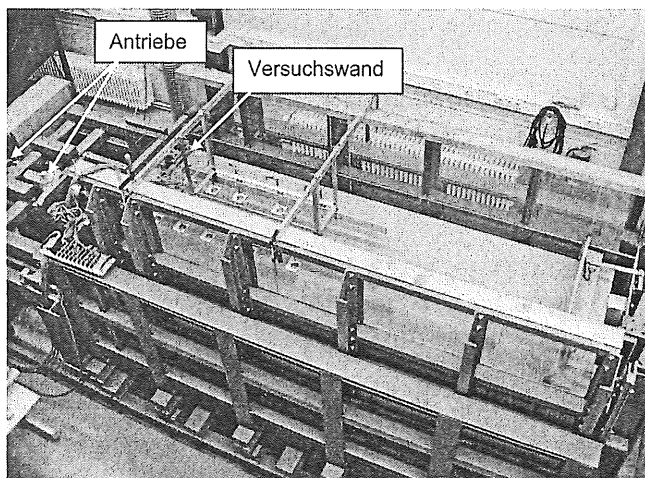


Bild 3.1: Erddruck-Versuchsstand mit Antrieben und Versuchswand

Die Versuchswand (Bild 3.2) mit einer Breite von 1.00 m und einer Höhe von 0.564 m ist als eine tangential gestützte (geführte) Wand ausgebildet. Damit wird ein tangentiales Ausweichen der Wand während des Versuches verhindert. Die Versuchswand ist in

drei separat gestützte Segmente aufgeteilt. Die eigentliche Messwand mit einer Breite von 0.40 m befindet sich in der Mitte der Versuchswand (Bild 3.3a) und ist über 2 Tangentialstützungen (D, E) und 3 Normalstützungen (A, B, C) statisch bestimmt auf dem sogenannten Wandträger gelagert.

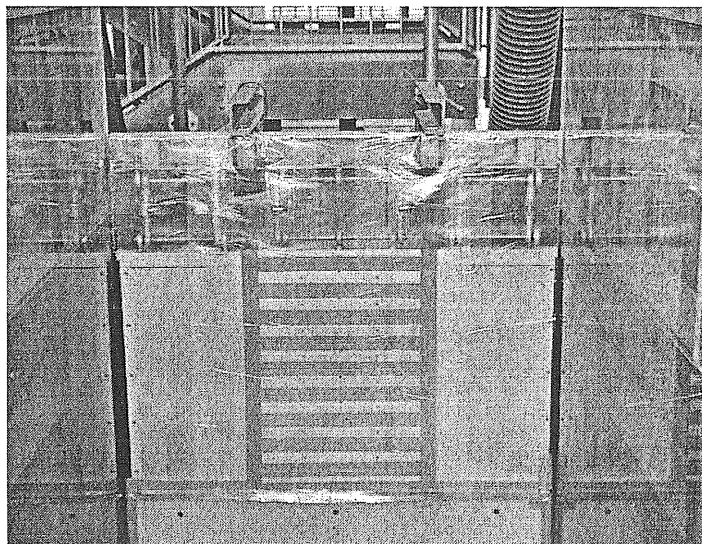


Bild 3.2: Versuchswand (Versuch mit Wandoberfläche Folie)

In die Messwand sind außerdem 8 am Institut entwickelte und gefertigte Erddruckmessdosen zur Erfassung der Erddruckverteilung über die Wandhöhe integriert. Seitlich an die Messwand schließt jeweils eine sogenannte Seitenwand (Bild 3.3b) mit einer Breite von 0.30 m an. Diese Seitenwände sind auch jeweils über 2 Tangentialstützungen und 3 Normalstützungen statisch bestimmt an den Wandträger gekoppelt.

An beiden Seitenwänden sind an den äußeren Rändern Abstreifer aus Kunststoff angebracht, die ein Herausrieseln des Modellsandes während des Versuchs verhindern. Der ca. 3 mm breite Spalt zwischen Messwand und Seitenwand und der Spalt zwischen den Erddruckmessdosen wurden mit Kunststoffklebeband gedichtet.

Alle drei Wandsegmente sind aus einer Hartaluminiumlegierung gefertigt, dessen Oberfläche poliert ist. Die Dicke dieser Platten beträgt jeweils 30 mm.

Der Wandträger ist durch zwei Bolzen je nach Bewegungsart in der oberen oder unteren Drehachse der Wand an den Führungsschlitten angekoppelt. Dieser ist auf 4 Horizontalführungen gelagert und kann durch einen elektromechanischen („äußeren“) Antrieb horizontal bewegt werden. In den Schlitten ist ein zweiter elektromechanischer („innerer“) Antrieb integriert, der direkt am Wandträger angreift und mit dem die jeweilige Drehbewegung erzeugt werden kann. Mit dieser Bauweise lassen sich mit der Versuchswand sowohl die 3 definierten Grundwandbewegungsarten (Drehung um den Kopf- bzw. Fußpunkt und Parallelverschiebung), als auch kombinierte Bewegungen aus Drehung und Verschiebung ausführen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden allerdings nur Versuche mit den Grundwandbewegungen durchgeführt.

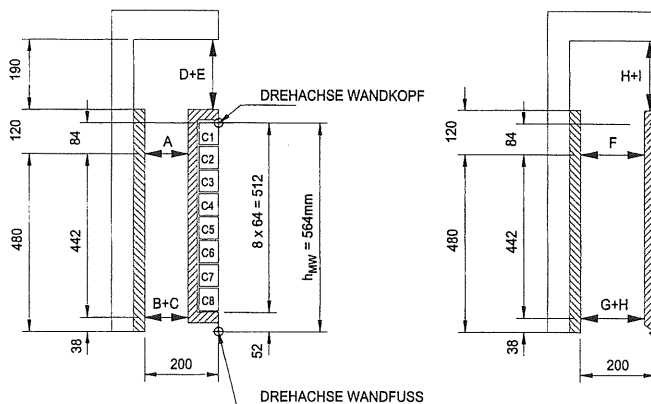


Bild 3.3: a) Messwand

b) Seitenwand

In die entsprechenden Stützpunkte der beiden Wandsegmente (A bis I in Bild 3.3) waren elektrische DMS-Kraftaufnehmer¹ (-messdosen) mit Vollbrückenschaltungen eingebaut. So konnte während der Versuche neben dem Betrag der kennzeichnenden Wandbewegung s der mobilisierte normale und tangentielle Anteil der Erddruckkraft auf die Messwand und die normale Erddruckkraft auf die linke Seitenwand (von der Sandseite aus gesehen) gemessen werden. Der tangentielle Anteil der Erddruckkraft auf die linke Seitenwand konnte ab dem Versuch Nr. 049 gemessen werden. Mit den in die Messwand integrierten Erddruckmessdosen (C1 bis C8 in Bild 3.3) wurde ab dem Ver-

¹ DMS = Dehnmessstreifen

such Nr. 032, zusätzlich zum resultierenden Erddruck, die Mobilisierung des Erddrucks über die Wandhöhe mit Normal- und Tangentialanteil gemessen. Der Erddruck auf den untersten Bereich der Wand (52 mm), in dem keine Messdose angeordnet werden konnte, kann in der Auswertung aus der Differenz zwischen gemessener resultierender Erddruckkraft an der Messwand und der Summe des Erddrucks auf die Messdosen C1 bis C8 ermittelt werden. Dieser Erddruckanteil wird in der nachfolgenden Darstellung der Versuchsergebnisse und ihrer Auswertung unter der Abkürzung ‚C9‘ aufgeführt. In der Tabelle 3.1 ist die mittlere Tiefe der Erddruck-Messdosen in der Versuchswand, auf die Wandhöhe bezogen, aufgeführt.

Tabelle 3.1: Mittlere Tiefe der Erddruckmessdosen

Nr. [-]	Bez. Tiefe z/h [-]
C1	0.05
C2	0.17
C3	0.28
C4	0.39
C5	0.51
C6	0.62
C7	0.73
C8	0.85
‚C9‘	0.95

Der Versuchskasten für den Modellboden (Bild 3.4) besaß zum Beginn der Untersuchungen eine Länge von $l_K = 1.785\text{ m}$. Dies entspricht einem Verhältniswert von Kastenlänge l_K (= Hinterfülllänge) zur Höhe der Versuchswand h_{MW} von $l_K / h_{MW} = 3.16$. Die Breite des Kastens entspricht der Versuchswandbreite von 1.00 m.

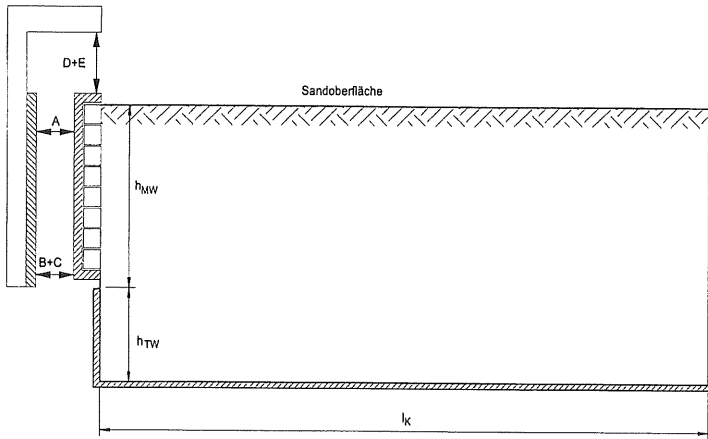


Bild 3.4: Längsschnitt Versuchskasten und Messwand

Durch einen Umbau des Kastens für andere Modellversuche wurde sowohl die Länge als auch die Höhe des Kastens vergrößert. Dadurch konnten auch einzelne Versuche mit einer vergrößerten Hinterfülllänge von $l_K = 2.72 \text{ m}$ ($l_K / h_{MW} = 4.82$) durchgeführt werden, um den Einfluss der Hinterfülllänge beurteilen zu können.

Die Innenseiten des Kastens sind aus durchgehenden, ebenen Plexiglasplatten von 30 mm Dicke ausgebildet. Als Schutz vor einer Zerkratzung des Plexiglases durch den Versuchssand wurden vor dem Kunststoffglas 5 mm dicke Glasplatten angeordnet. Die Füllhöhe des Kastens unterhalb des Fußes der Versuchswand h_{TW} betrug bei den Versuchen ca. 0.30 m.

Die nach Vorversuchen mit verschiedenen Prototypen ab dem Versuch Nr. 032 eingesetzte Erddruckmessdose ist in Bild 3.5 und Bild 3.6a dargestellt. Die eingezeichneten Pendelstäbe symbolisieren dabei die 5 integrierten Messaufnehmer. Der tangentielle Anteil der Erddruckkraft wird über die zwei Tangentialaufnehmer D und E über die Rückwand auf die Messwand abgeführt, die drei Normalkraftaufnehmer A bis C tragen den normalen Erddruckanteil sowie ein Versatzmoment aus der tangentialen Stützung ab. Alle 5 Einzelaufnehmer sind mittels einer Spitzen-Kalotten-Lagerung gelenkig in die Messdosen eingebaut. Diese Ausbildung der Lager hat sich bei der gewählten Baugröße der Messdose als die geeignetste erwiesen. Die Aufnehmer werden durch insgesamt 4 Federn (2 Normal und 2 Tangential) in ihren Kalotten gehalten.

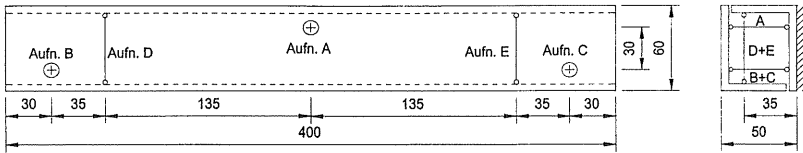


Bild 3.5: Draufsicht und Querschnitt der entwickelten Erddruck-Messdose

In Bild 3.6b ist die erste Variante der in den Messdosen eingesetzten Kraftaufnehmer (ohne DMS und Verdrahtung) dargestellt. Diese Aufnehmerbauart wurde vom Versuch Nr. 032 bis 048 eingesetzt. Der Aufnehmer ist aus Stahl, hat einen quadratischen Vollquerschnitt und besitzt an beiden Enden eingeschraubte gehärtete Stahlspitzen. Diese Spitzen sitzen im eingebauten Zustand in gehärteten Kalotten aus Stahl. Die Aufnehmer wurden in der verschlankten Aufnehmermitte mit DMS beklebt und verkabelt. Elektrisch waren diese Aufnehmer als Einzel-DMS mit einer gemeinsamen Temperaturkompensation für je 10 Aufnehmer (2 Messdosen) geschaltet. Jeder Aufnehmer wurde vor dem Einbau in die Messdose in einer speziellen Vorrichtung kalibriert.

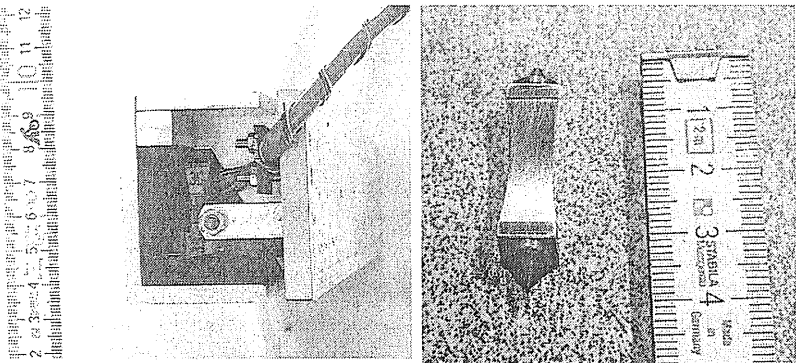


Bild 3.6: a) Messdose (Querschnitt)

b) Aufnehmer (ohne DMS)

Bei den Versuchen Nr. 032 – 047, die mit den o.g. Aufnehmern durchgeführt wurden, zeigte es sich, dass die Messwertstabilität der Aufnehmer bei hohen Lufttemperaturen nicht zufriedenstellend war. So wichen die Messwerte im Ausgangszustand bei voll-

ständig hinterfüllter Versuchswand, vor Beginn der Wandbewegung, zum Teil deutlich vom Ruhezustand ab. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Messbereich der Aufnehmer mit bis zu 6 kN zu groß angenommen war.

Aus diesen Gründen wurden neue Aufnehmer (Bild 3.7) für die Erddruckmessdosen entworfen und gebaut. Die Aufnehmerquerschnittsfläche wurde dabei verkleinert, indem Stahlrohrquerschnitte mit Abmessungen (Außendurchmesser x Rohrdicke) von 8 x 1 mm (Aufnehmer A in den Dosen C5 – C8 und mit Messbereich bis 4 kN) und 6 x 0.6 mm (übrige Aufnehmer und mit Messbereich bis 1.2 kN) gewählt wurden. Diese Aufnehmer wurden mit DMS beklebt und elektrisch als DMS-Vollbrücke verkabelt. Die Aufnehmer wurden ebenfalls mit gehärteten Spitzen ausgerüstet. Jeder Aufnehmer wurde ebenfalls vor dem Einbau in die Messdose in einer speziellen Vorrichtung kalibriert. Mit diesen neuen Aufnehmern in den Dosen konnte eine deutlich bessere Messwertstabilität in der Phase der Versuchsvorbereitung erreicht werden. Die Aufnehmer wurden bei allen Versuchen ab Nr. 048 eingesetzt.

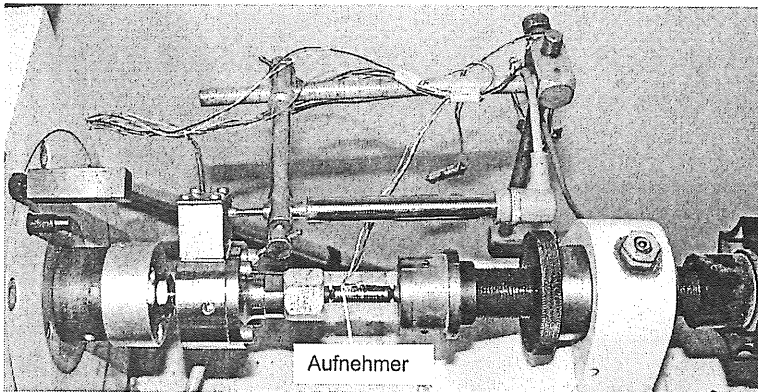


Bild 3.7: Aufnehmer neuer Bauart in der Kalibriervorrichtung

Ab dem Versuch Nr. 038 konnten bei den Versuchen vertikale Wegaufnehmer zur Messung von Vertikalverschiebungen an der Sandoberfläche s_{OF} eingesetzt werden. Dabei wurden 10 induktive Messaufnehmer mit einem max. Messweg von 100 mm nach dem Einbau des Bodens auf der Sandoberfläche installiert (Bild 3.8). Die Aufnehmer waren in 2 parallelen Reihen an 5 Positionen an ein Gestell angeschraubt,

welches nach dem Bodeneinbau am Versuchskasten befestigt wurde. Die Taststifte der Aufnehmer besaßen am unteren Ende jeweils Aluminiumteller, die zur Reibungsverminderung über eine Zwischenlage aus Papier auf der Sandoberfläche aufsaßen.

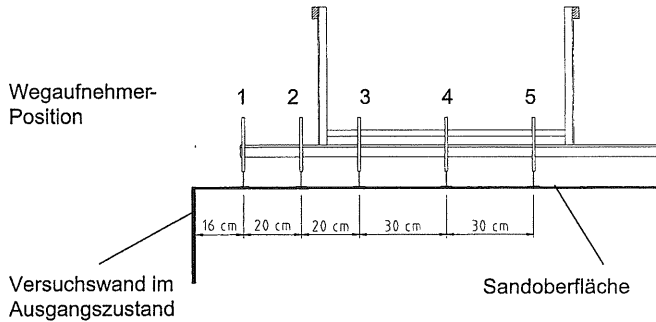


Bild 3.8: Anordnung der vertikalen Wegaufnehmer auf der Sandoberfläche

In der Tabelle 3.2 sind die horizontalen Abstände der vertikalen Wegaufnehmer von der Versuchswand im Ausgangszustand zusammengestellt.

Tabelle 3.2: Abstand der Wegaufnehmer von der Versuchswand im Ausgangszustand $s = 0$

Positions-Nr. [-]	Abstand von der Versuchswand x [m]	Bez. Abstand x/h [-]
1	0.16	0.28
2	0.36	0.64
3	0.56	0.99
4	0.86	1.52
5	1.16	2.06

Bei der Auswertung dieser Messungen an der Sandoberfläche wurden die Mittelwerte der jeweils zwei Messgeber an den entsprechenden Positionen 1 – 5 (Bild 3.8) gebildet. Bei der Auftragung der Versuchsergebnisse (z.B. Anhang C) wurde eine durch die zugehörige kennzeichnende Wandbewegung normierte Darstellung (s_{OF}/s) gewählt.

3.1.2 Versuchsablauf

Zuerst wurde die Versuchswand in die Ausgangsstellung gefahren. Anschließend wurde die Messtechnik in Betrieb genommen. Die Messaufnehmer wurden auf Null abgeglichen.

Der anschließende Einbau des Versuchsbodens erfolgte mit der sogenannten Sandregen bzw. Sandrieselmethode. Dieses Verfahren ist aus der Literatur zu bodenmechanischen Modellversuchen mit trockenem Sand hinlänglich bekannt. Prinzipiell kann dabei zwischen der Punktregen-, Linienregen- und Flächenregenmethode unterschieden werden. Die Punktregenmethode kam z.B. bei den Versuchen von MAO (1993) und von BESLER (1998) zum Einsatz, währenddessen z.B. PULSFORT (1986) und RAUH (1991) mit Hilfe eines Flächenregens arbeiteten.

Bei den eigenen 1g-Versuchen wurde die Punktregenmethode eingesetzt (Bild 3.9). Dabei besteht die Rieseleinrichtung aus einem an einem Brückenkran hängendem Container (pyramidenförmiger Trichter) mit einem Auslass mit Absperrschieber, einem am Auslass befestigten Textilschlauch und einem am unteren Ende dieses Schlauches befestigten Sandverteiler. Mit Hilfe dieses Verteilers wurde der am Schlauchende austretende Sand „punktförmig“ über ein Lochsieb und mit definierter Fallhöhe in den Versuchskasten eingerieselt.

Zur Erzielung einer bestimmten angestrebten Ausgangslagerungsdichte des Sandes müssen die Komponenten der Rieseleinrichtung und die Fallhöhe entsprechend abgestimmt werden. Dabei zeigte es sich, dass mit der Technik und dem Versuchssand Lagerungsdichten bis ca. $I_D = 0.60$ im Erddruckkasten herstellbar waren. Zur Erreichung einer höheren Lagerungsdichte wurden von SIEBER (1999) weitere Untersuchungen zur Rieseltechnik durchgeführt. Durch konstruktive Anpassungen gelang es schließlich auch Lagerungsdichten bis ca. $I_D = 0.85$ im Erddruckkasten reproduzierbar herzustellen. Die Rieselintensität betrug dabei ca. 0.9 kg/s .

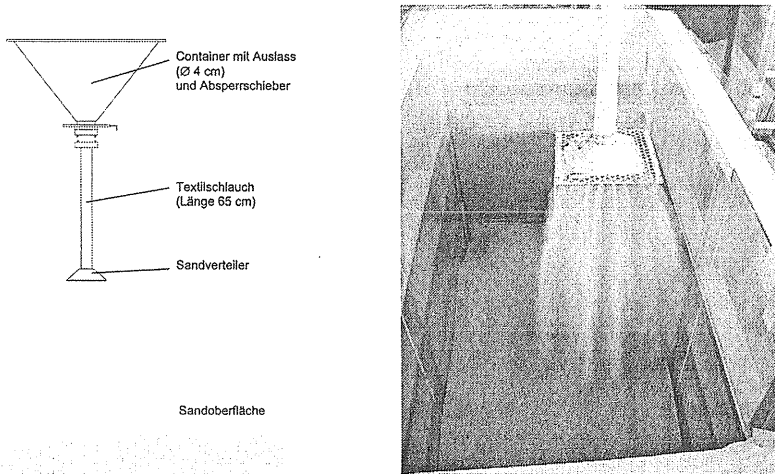


Bild 3.9: Prinzipdarstellung Rieseleinrichtung (links) und Einbau des Sandes (rechts)

Vor dem Einregnen des Sandes wurde der Riesel-Container (Trichter) an den Sandsilos befüllt und anschließend mit einer Kranwaage gewogen. Die Masse je Container betrug dabei jeweils ca. 240 kg. Der Riesel-Container mit Rieseleinrichtung wurde anschließend mit Hilfe eines Abstandslothes zur Einhaltung der definierten Rieselhöhe über dem Versuchsstand positioniert und durch Öffnung des Absperrschiebers am Container wurde mit dem Rieseln begonnen. Die Einrichtung wurde während des Rieselns mit Hilfe des Brückenkrans in Bahnen längs über den Kasten gefahren. Der Sand wurde in dieser sich wiederholenden Abfolge in Lagen in den Versuchskasten eingebaut. Vor Erreichen des Fußes der Versuchswand wurden die Messaufnehmer nochmals auf Null abgeglichen, um den Ausgangsspannungszustand nach vollständigem Sandeinbau möglichst genau zu messen. Mit dem Erreichen des Kopfes der Versuchswand war der Sandeinbau beendet. Danach wurde die Sandoberfläche mit einer Lehre horizontal und eben abgezogen. Anschließend wurden die Wegaufnehmer auf der Geländeoberfläche installiert.

Das mit dem Versuchsboden zu füllende Volumen betrug je nach der eingestellten Hinterfülllänge ca. 1.53 m^3 bis 2.33 m^3 , d.h. es war für einen Versuch je nach Ausgangslagerungsdichte eine Masse zwischen 2.4 t und 4.1 t Modellsand in den Kasten einzubauen. Der Einbau des Sandes dauerte mehrere Stunden.

Nach Abschluss dieser Vorarbeiten wurde der Erddruckversuch durch den Start der Wandbewegung an der Steuerungseinheit gestartet. Die Geschwindigkeit der Wandbewegung wurde dabei für alle Versuche mit 1 mm/min konstant vorgegeben.

Während des Versuches wurden alle installierten Messgeber:

- 2 Wegaufnehmer für die Wandbewegung,
- 10 Kraftaufnehmer für die Erddruckkraft,
- 50 Kraftaufnehmer in den Erddruckmessdosen und
- 10 Wegaufnehmer auf der Sandoberfläche

durch 2 Vielstellen-Messgeräte (UPM60) der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) in einem vorgegeben Zeitintervall (i.d.R. 1 min) abgefragt und in einem PC mit dem Programm BEAM verarbeitet und gespeichert. Messwerte und Berechnungsergebnisse (z.B. Erddruck, Erddruckkraft u.a.) konnten somit bereits während des Versuches online dargestellt und kontrolliert werden.

Weiterhin wurde der Versuch visuell überwacht, um die Ausbildung von Bruchflächen und Bruchkörpern verfolgen zu können. Die Versuche wurden auch nach dem Erreichen eines Bruches im Boden fortgeführt, um die weitere Mobilisierung von Erddruck und Erddruckkraft ermitteln zu können. Nach dem Versuchsende, d.h. dem Stopp der Wandbewegung, wurden die Gleitflächenaustrittskanten auf der Geländeoberfläche markiert, fotografiert und vermessen. Anschließend wurde die Versuchswand in die Ausgangsstellung zurückgefahren und dadurch entlastet.

Vor dem Entleeren des Versuchskastens wurden die Weggeber auf der Sandoberfläche abgebaut. Dabei wurde der Sand manuell mit Hilfe eines Förderbandes in die Vorratssilos zurücktransportiert.

3.2 Zentrifugen-Versuche

3.2.1 Zentrifuge und Zentrifugen-Modelltechnik

Die geotechnische Zentrifuge am Institut für Geotechnik der Universität für Bodenkultur Wien (Bild 3.10) ist ein Fabrikat der Firma Trio-Tech (USA). Die technischen Daten der Zentrifuge sind in der Tabelle 3.3 zusammengestellt.

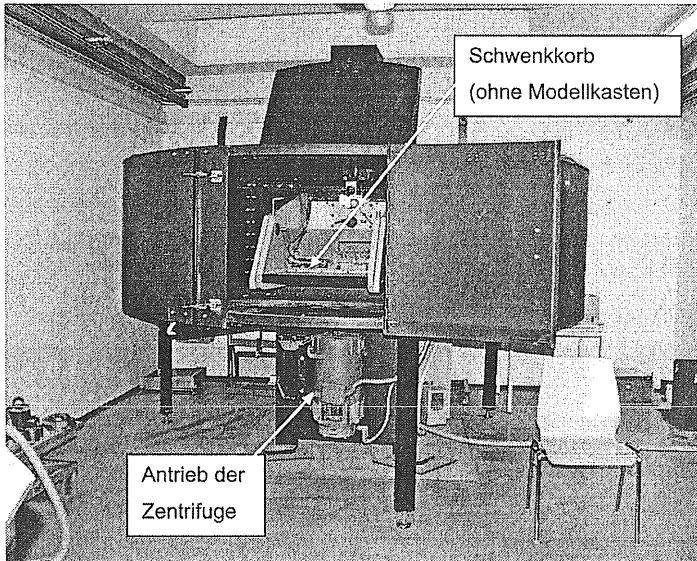


Bild 3.10: Geotechnische Zentrifuge

Tabelle 3.3: Technische Daten der Zentrifuge

max. Radialbeschleunigung	200g
max. Zuladmasse des Modells	90,7 kg
Gesamtkapazität	9070 kg
Durchmesser	3,048 m
Radius des Schwingkorbes	1,302 m
Gesamtgewicht	2041 kg
Aufspannfläche auf dem Schwenkkorb für einen Modellkasten	54x56 cm
Max. Modellhöhe	56 cm
Geschwindigkeitsbereich	0 - 400 U/min
Antrieb	Elektromotor

Die Zentrifuge besitzt einen Schleifringturm mit 56 Schleifringen zur

- Messsignalübertragung,
- Videoübertragung,
- und Stromübertragung

sowie spezielle Zuleitungsmöglichkeiten für

- Druckluftversorgung
- und Wasserversorgung.

Die Drehzahl kann vorgegeben und dadurch das jeweilige Zentrifugenmodell im Schwenkkorb einer resultierenden Beschleunigung des n_g -fachen der Erdbeschleunigung ausgesetzt werden. Die maximale Radialbeschleunigung in der Wiener Zentrifuge beträgt max. 200g.

Mit n_g -Versuchen in der Zentrifuge kann z.B. in einem Bodenmodell mit der Modellhöhe h_M mit Hilfe eines entsprechenden Beschleunigungsmaßstabes n_g der gleiche Spannungszustand wie an einem bezüglich der charakteristischen Längen n -fachen Prototypen unter einfacher Erdbeschleunigung nachgebildet werden, Gl. (3.1).

$$\sigma_M = \sigma_P \quad (3.1)$$

σ_M ... charakteristische Spannung im Modell, z.B. in kN/m²

σ_P ... charakteristische Spannung im Prototypen, z.B. in kN/m²

Für die charakteristische Spannung – hier die Vertikalspannung im Boden – nach Gl. (3.1) lässt sich somit die Gl. (3.2) formulieren.

$$h_M \cdot \rho \cdot g \cdot n_g = h_P \cdot \rho \cdot g \quad (3.2)$$

h_M ... Wandhöhe des Modells [m]

h_P ... Wandhöhe des Prototypen [m]

ρ ... Dichte des Modellbodens [g/cm³ bzw. t/m³]

g ... Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

n_g ... Maßstabsfaktor der Erdbeschleunigung

Um im Zentrifugenmodell die gleiche charakteristische Spannung wie im Prototypen zu erzielen, ist bei gleicher Dichte im Zentrifugen-Modell und im Prototyp der Maßstabsfaktor der Erdbeschleunigung nach Gl. (3.3) zu wählen.

$$n_g = \frac{h_P}{h_M} \quad (3.3)$$

Um im Zentrifugen-Erddruckmodell mit einer Wandhöhe von $h = h_M = 0.120 \text{ m}$ die gleiche charakteristische Spannung (Spannungsniveau) wie im 1g-Erddruckmodell mit einer Wandhöhe von $h = h_P = 0.564 \text{ m}$ einzustellen, ist z.B. das Zentrifugen-Modell nach Gl. (3.3) einer n_g -fachen Erdbeschleunigung von

$$n_g = \frac{h_P}{h_M} = \frac{0.564}{0.120} = 4,7$$

auszusetzen.

Dies wird dadurch erreicht, dass das Modell in der Zentrifuge durch die Wahl einer entsprechenden Winkelgeschwindigkeit (Umdrehungszahl) dieser n_g -fachen Erdbeschleunigung ausgesetzt wird.

In der Zentrifuge wirkt auf das Modell neben der horizontal gerichteten Radialkraft die vertikal gerichtete Erdanziehungskraft. Die daraus auf das Modell wirkende resultierende Kraft ergibt sich nach Gl. (3.4) zu:

$$F_{\text{res}} = \sqrt{F_{\text{horiz}}^2 + F_{\text{vert}}^2} = \sqrt{(m \cdot \omega^2 \cdot r)^2 + (m \cdot g)^2} \quad (3.4)$$

- ω ... Winkelgeschwindigkeit
- m ... Masse
- r ... Radius (Abstand zwischen Rotationsachse und Modell)

Die resultierende Kraft ist nach Gl. (3.5) gleich dem n_g -fachen Produkt aus Erdbeschleunigung und Masse.

$$F_{\text{res}} = n_g \cdot g \cdot m \quad (3.5)$$

Aus Gl. (3.4) und (3.5) folgt

$$n_g \cdot g \cdot m = \sqrt{(m \cdot \omega^2 \cdot r)^2 + (m \cdot g)^2} \quad (3.6)$$

Die erforderliche Winkelgeschwindigkeit zur Einstellung einer n_g -fachen Erdbeschleunigung lässt sich daraus wie folgt bestimmen.

$$\omega = \sqrt{\frac{g \cdot \sqrt{n_g^2 - 1}}{r}} \quad (3.7)$$

Die erforderliche Drehzahl U der Zentrifuge ergibt sich schließlich wie folgt:

$$U = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \sqrt{n_g^2 - 1}}{r}} \quad (3.8)$$

Streng genommen lässt sich nur an einem Punkt des Modells die gleiche charakteristische Spannung wie an einer Prototypen-Wand einstellen, da der Radius r nicht über die Höhe des Zentrifugen-Wandmodells konstant ist.

Nach Gl. (3.8) ist z.B. zur Erzielung eines Spannungsniveaus von $n_g = 4.7$ an einem Punkt im Modell mit einem Abstand $r = 1.222\text{m}$ von der Rotationsachse (*entspricht bei dem verwendeten Erddruck-Modellkasten dem Abstand von der Rotationsachse zum unteren Drittelpunkt der Erddruck-Modellwand*) eine Drehzahl der Zentrifuge von

$$U = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{9.81\text{m/s}^2 \cdot \sqrt{4.7^2 - 1}}{1.222\text{m}}} = 0.966\text{ s}^{-1} = 58.0\text{ min}^{-1}$$

erforderlich. Bei gleichem Radius für $n_g = 10$ eine Drehzahl von $U = 85.3\text{ min}^{-1}$ und für $n_g = 30$ eine Drehzahl von $U = 148.1\text{ min}^{-1}$.

Weiterführende Ausführungen zu Modellgesetzen und Maßstabeffekten bei Zentrifugenversuchen werden hier nicht gegeben. Es kann z.B. auf die Veröffentlichungen von TAYLOR (1995) und FUGLSANG, KREBS OVESEN (1988) verwiesen werden.

3.2.2 Erddruck-Modellkasten

Für die Erddruckversuche wurde ein spezieller Modellkasten entwickelt, der auf den Schwenkkorb der Zentrifuge montiert werden kann (Bild 3.11).

Die Versuchswand in diesem Modellkasten hat, bedingt durch die Randbedingungen der Zentrifuge, insbesondere wegen der Schwenkkorbabmessungen, eine Höhe von 0.120 m und eine Breite von 0.250 m. Die Versuchswand gliedert sich, ähnlich wie bei den 1g-Versuchen, in drei Segmente. Die eigentliche Messwand, die sich in der Mitte befindet, ist 0.150 m breit, so dass der Einfluss der Reibung des Versuchsmaterials an den Seitenwänden des Kastens auf die Messergebnisse möglichst klein gehalten werden kann. Die Oberfläche der aus einem Aluminiumblech mit einer Dicke von 15 mm hergestellten Versuchswand ist poliert. Für die Versuche mit raueren Wandoberflächen wurde mittels Spezialklebstoff Schleifpapier mit der Körnung 220 bzw. Körnung 40 aufgebracht.

Auf einem Wandträger sind die beiden Seitenwände der Versuchswand, die Halterungen für die Tangentialkraftaufnehmer, die Normalkraftaufnehmer und eine Rückhaltefeder für die Messwand montiert. Die Messwand hängt somit frei an den zwei Tangentialkraftaufnehmern und wird mittels einer Rückhaltefeder auf drei gelenkig gelagerte Normalkraftaufnehmer gespannt. Die Messwand ist somit statisch bestimmt gelagert. Während des Versuchs wurden die Wandbewegung, der Tangentialanteil und

der Normalanteil der auf die Wand wirkenden Erddruckkraft gemessen. Eine Messung des Erddrucks, wie bei den 1g-Versuchen, war nicht möglich.

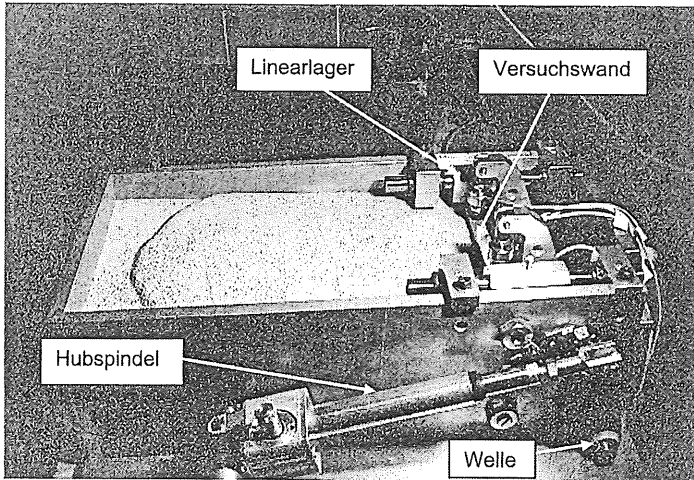


Bild 3.11: Modellversuchskasten (nach Versuch mit Parallelverschiebung)

Für die Parallelverschiebung der Wand erfolgt die horizontal verschiebliche Lagerung über zwei auf dem Versuchskasten aufgesetzte Linearlager, die jeweils in zwei Blöcken gefasst und justiert sind. Die Halteblöcke sind auf den Seitenwänden des Kastens aufgeschraubt (Bild 3.11).

Für die Drehbewegungen werden die zwei Linearlager einschließlich ihrer Halteblöcke entfernt. Der Wandträger für die Versuchswand kann dann entweder am Wandkopf bzw. am Wandfuß mittels zwei Bolzen an die Kastenseitenwände drehbar angekoppelt werden.

Der so gestaltete Modellkasten ermöglicht somit die drei definierten Grundwandbewegungsarten im „geführten“ Modus, d.h. Verhinderung des tangentialen Ausweichens der Wand. Ein 12 V DC-Motor mit einem Stirnradgetriebe und variabler Untersetzung bildet den Antrieb. Er ist außen am Versuchskastens angeordnet. Die Kraftübertragung erfolgt linear über einen Hubzylinder (Spindel) und einen „äußeren“ Hebelarm auf eine gehärtete Chrom-Molybdän-Stahl-Welle mit dem Durchmesser 24 mm (Bild 3.11). Auf

dieser Welle sind außerdem zwei „innere“ Hebelarme befestigt (nicht sichtbar im Bild 3.11). Von diesen zwei Hebelarmen wird die Bewegung über zwei Pendelstäbe auf den Wandträger und damit die Versuchswand übertragen.

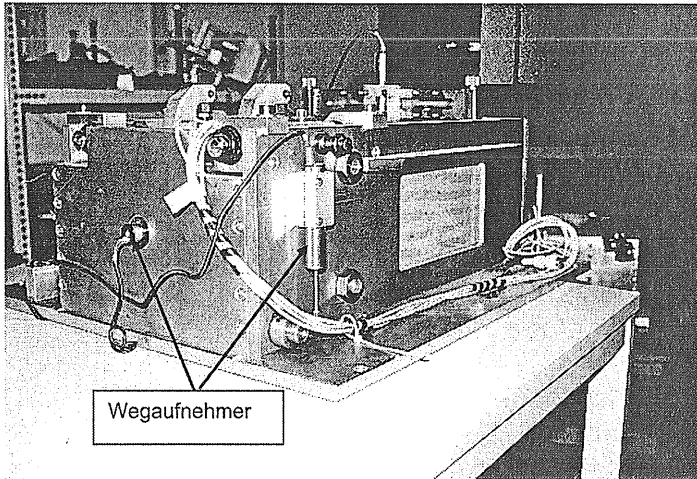


Bild 3.12: Wegaufnehmer am Modellkasten

Für die Ausbildung des Behälters waren Anforderungen sowohl aus bodenmechanischen als auch aus konstruktiven Aspekten maßgebend. Der Modellkasten musste auf die Aufspannfläche im Schwennkorb ($0.61 \times 0.54 \text{ m}^2$) montiert werden können. Die vorhandene Länge von 0.61 m musste weitgehend für den Modellboden genutzt werden, um eine unbehinderte Ausbildung des Grenzzustandes im Boden zu ermöglichen. Wesentliche Teile des Antriebs der Versuchswand wurden deshalb seitlich herausgelegt. Mit der dadurch erreichten Hinterfüllraumlänge von $l_k = 0.46 \text{ m}$ ($l_k/h = 3.8$) dürften Einflüsse der Kastenlängenabmessung auf die Versuchsergebnisse, auch für die Ausbildung von gekrümmten äußeren Gleitflächen, weitgehend ausgeschlossen sein. Die Füllhöhe des Kastens bis zur Oberkante der Versuchswand ist auf 0.16 m begrenzt. Dies bedeutet, dass unterhalb des Fußpunktes der Wand noch 0.040 m Versuchsmaterial ansteht.

Die Wegmessung erfolgt über einen an der Außenseite des Kastens auf der Antriebswelle angebrachten Hebelarm und einem Wegaufnehmer (Bild 3.12). Ein zweiter

Wegaufnehmer kann für den Fall „Parallelbewegung“ in die Rückwand des Versuchskastens eingesetzt werden. Verwendet wurden Wegaufnehmer der Firma SAIWGAMO / SCHLUMBERGER (DCR 15). Der maximale Messweg beträgt 15 mm.

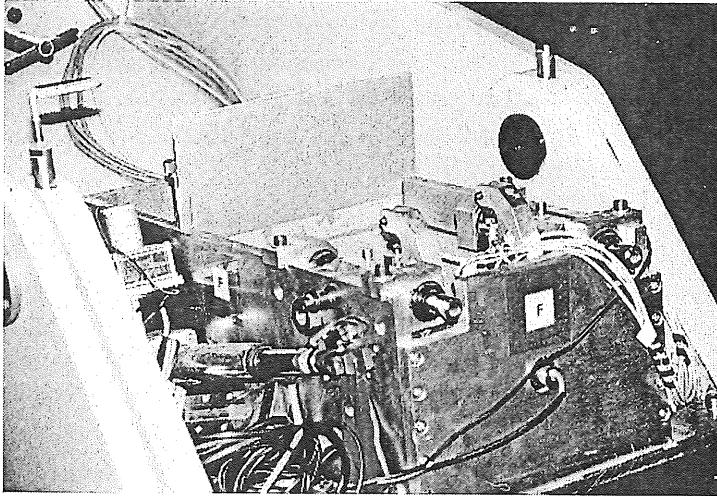


Bild 3.13: Modellversuchskasten (eingrichtet für Parallelverschiebung) auf dem Schwennkorb der Zentrifuge montiert (mit Schablone zum Abziehen der Sandoberfläche)

Die Kraftmessung ist so auszulegen, dass die Mobilisierung der Erddruckkraft zwischen dem Ausgangs- (Ruhe-) und dem Grenzzustand erfasst werden kann. Hierzu musste die Größe der eintretenden Kräfte im Fall des Grenzzustandes, für den die Aufnehmer auszulegen sind, im Vorfeld abgeschätzt werden. Verwendet wurden Kraftaufnehmer der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik HBM (U 9A) mit einer Nennlast von 2 kN.

Die an den jeweiligen Messgebern gemessenen Werte werden über die Schleifringe an die Steuerungskonsole weitergegeben. Von den Schleifringen werden die Daten an ein Vielstellen-Messgerät UPM60 von HBM weitergeleitet, und von diesem werden die Messdaten direkt an einen PC zur Speicherung und Weiterbearbeitung übergeben.

3.2.3 Versuchsablauf

Die Vorbereitung der Erddruckversuche erfolgt zunächst außerhalb der Zentrifuge. Die Lagerung bzw. Führung der Versuchswand wird entsprechend der vorgesehenen Wandbewegungsart gewählt und die Wand wird in die Ausgangsstellung gefahren. Anschließend wurde der trockene Versuchssand (Dresdner Sand 93) mit der gewählten Ausgangslagerungsdichte eingebaut. Ein Einbau des Modellbodens in der Zentrifuge mit gleichzeitiger Messung des Einbauzustandes, wie bei den 1g-Versuchen, wurde in Vorversuchen getestet. Diese Methode erschwerte jedoch die Versuchsvorbereitung und zeigte, dass die Messwerte nach Sandeinbau nicht verwertbar waren, da sie zu sehr streuten.

Nach Einbau des Sandes wird der Modellkasten mittels Kran in den Schwenkkorb der Zentrifuge gehoben und befestigt. Die Messaufnehmer (5 Kraftaufnehmer und 1 bis 3 Wegaufnehmer) und der Motor des Antriebs werden elektrisch angeschlossen. Alle Verbindungen werden noch mal geprüft. Danach wird die Zentrifuge geschlossen. Alle Aufnehmer (Kraft und Weg) werden über die Messsoftware auf Null abgeglichen. Dadurch wird ein vergleichbarer Bezugszustand für alle Versuche geschaffen. In den Messwerten aller 5 registrierten Kräfte wird damit der 1g-Anteil nach Einbau des Modellbodens eliminiert. Dies wirkt sich bei Versuchen unter 5-facher Erdbeschleunigung (5g) entsprechend stärker aus als z.B. bei Versuchen unter 35-facher Erdbeschleunigung (35g).

Am Messgerät bzw. im PC-Programm wird der Zyklus der Messwertabfrage eingestellt und diese gestartet. Anschließend wird die Zentrifuge gestartet und die Umdrehungszahl erhöht bis die angestrebte Winkelgeschwindigkeit und damit das vorgesehene Spannungsniveau im Modell erreicht ist. Nach Erreichen des geplanten Spannungsniveaus wird die Umdrehungszahl der Zentrifuge konstant gehalten und der Erddruckversuch durch das Starten der Wandbewegung begonnen. Bei allen Versuchen wurde mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 mm/min gearbeitet.

Nach dem Versuchsende mit dem Stopp der Wandbewegung wird die Umdrehungszahl der Zentrifuge heruntergefahren und die Zentrifuge zum Stillstand gebracht. Anschließend wird die Gleitflächenaustrittskante auf der Geländeoberfläche fotografiert und vermessen.

Schließlich wird der Modellkasten aus der Zentrifuge ausgebaut und entleert.

3.3 Versuchsboden

3.3.1 Mineralogische und granulometrische Beschreibung

Als Versuchsmaterial kam ein eng gestufter, fein-, mittel- bis grobkörniger Quarzsand aus der Region Dresdner Heller zum Einsatz. Dieser sogenannte Hellersand, der als Versuchssand im Jahr 1993 beschafft und bis 1999 verwendet wurde, trägt institutsintern die Bezeichnung „Dresdner Sand 93“ bzw. „Hellersand 93“.

Die mineralischen Hauptanteile dieses Sandes sind Quarz (SiO_2) und Feldspat (Microcline – KAlSi_3O_8). Einen dritten größeren Anteil stellen die Alibite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Die Kornform (Bild 3.14) wird von LAUER (2000) nach der Klassifikation von POWERS als „subangular“ bis „angular“, nach den Klassifikationen von YOUD und BIA-REZ/HICHER als „subangular“ und nach HERLE als „eckig/abgerundet“ bezeichnet.

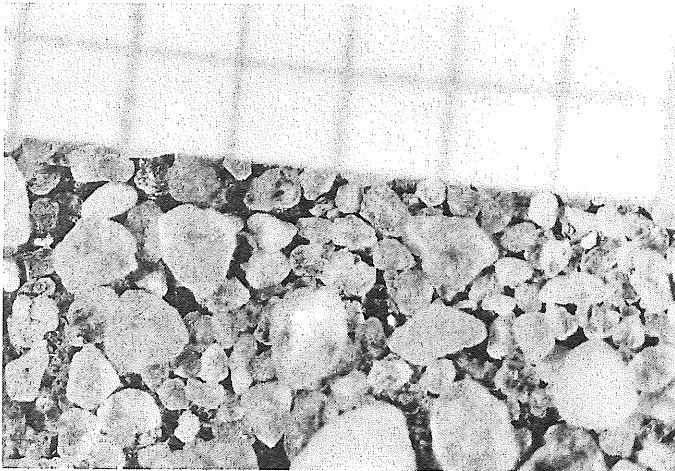


Bild 3.14: „Dresdner Sand 93“ (Maßstab – Millimeterpapier)

Die Kornverteilung des Sandes (Bild 3.15) wurde zu verschiedenen Zeitpunkten überprüft. Dabei zeigte sich, dass sich die Zusammensetzung während des Zeitraumes der durchgeführten Erddruckversuche nicht wesentlich verändert hat.

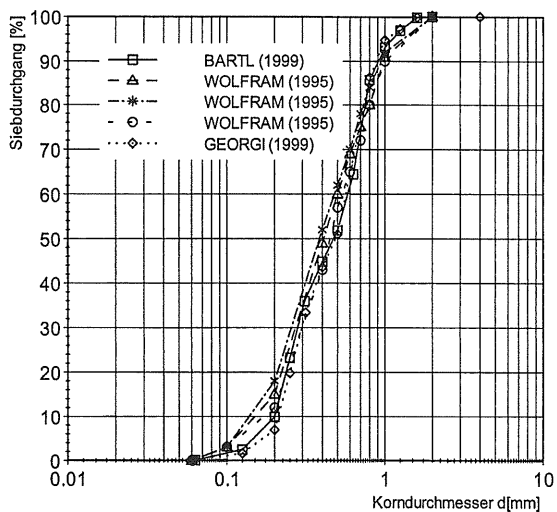


Bild 3.15: Kornverteilung „Dresdner Sand 93“ nach LAUER (2000)

Die bodenmechanischen Kennwerte des Sandes sind in der Tabelle 3.4 zusammengestellt. Nach DIN 18196 kann der Modellboden als enggestufter Sand (SE) klassifiziert werden.

Tabelle 3.4: Kennwerte für den „Dresdner Sand 93“

Ungleichförmigkeitszahl U	2.9
Krümmungszahl C_c	0.7
d_{10}	0.20 mm
d_{15}	0.23 mm
d_{30}	0.28 mm
d_{50}	0.48 mm
d_{60}	0.59 mm
d_{85}	0.80 mm
Korndichte ρ_s	2.65 g/cm ³

Die nach DIN 18126 ermittelten Kennwerte zu den Grenzen der Lagerungsdichte des „Dresdner Sandes 93“ sind in der Tabelle 3.5 zusammengestellt.

Tabelle 3.5: Kennwerte zu den Grenzen der Lagerungsdichte nach DIN 18126

	Lockerste Lagerung	Dichteste Lagerung
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1.515	1.818
Porenanteil n [-]	max $n = 0.428$	min $n = 0.314$
Porenzahl e [-]	max $e = 0.749$	min $e = 0.458$

3.3.2 Scherfestigkeit

Die Ergebnisse von Rahmen und Kreisringscherversuchen am „Dresdner Sand 93“ sind in Tabelle 3.6 und Tabelle 3.7 zusammengestellt. Da die Erddruckversuche auch mit anderen Ausgangslagerungsdichten als denen der Scherversuche durchgeführt wurden, ist die Anwendung einer Näherungsbeziehung zweckmäßig. Für den eingesetzten Modellsand wurden von LAUER (2000) verschiedene Näherungsbeziehungen untersucht. Mit dem Ansatz von ENGEL (2002) nach Gl. (3.9) bis (3.11) kann die Abhängigkeit des Reibungswinkels von der Ausgangslagerungsdichte beschrieben werden. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau wird dabei nicht berücksichtigt.

Tabelle 3.6: Ergebnisse Rahmenscherversuche nach LAUER (2000)

Lagerung	e_0 [-]	I_D [-]	ρ_d [g/cm ²]	φ' [°]
locker	0.673 – 0.659	0.26 – 0.31	1.581 – 1.597	33.9 – 34.1
mitteldicht	0.602	0.50	1.656	37.4
dicht	0.445	1.04	1.832	46.3

Tabelle 3.7: Ergebnisse Kreisringscherversuche nach LAUER (2000)

Lagerung	e_0 [-]	I_D [-]	ρ_d [g/cm ³]	φ' [-]
mitteldicht	0.600	0.51	1.656	34.8
dicht	0.467	0.97	1.804	43.5

Nach ENGEL (2002) lässt sich die Beziehung zwischen Reibungswinkel und Ausgangslagerungsdichte mit den Gl. (3.9) bis Gl. (3.11) beschreiben.

$$\cot \varphi' = \cot \varphi'_{\min} - I_D (\cot \varphi'_{\min} - \cot \varphi'_{\max}) \quad (3.9)$$

$$\cot \varphi'_{\min} = \frac{0.2335 + 0.952 \max e - 0.0565 \ln U - 0.0017 \ln \left(\frac{d_{50}}{1 \text{mm}} \right)}{\ln(1 + \max e)} \quad (3.10)$$

$$\cot \varphi'_{\max} = \frac{0.0476 + 0.705 \max e - 0.033 \ln U - 0.0209 \ln \left(\frac{d_{50}}{1 \text{mm}} \right)}{\ln(1 + \max e)} \quad (3.11)$$

Der Reibungswinkel φ'_{\min} ist der lockersten Lagerung und der Reibungswinkel φ'_{\max} der dichtesten Lagerung zugeordnet.

Für den „Dresdner Sand 93“ ergibt sich die Gl. (3.9) zu:

$$\cot \varphi' = 1.589 - 0.594 I_D \quad (3.12)$$

In der Tabelle 3.8 sind die nach dem Ansatz von ENGEL (2002) ermittelten Reibungswinkel für 5 verschiedene Lagerungsdichten des verwendeten Sandes zusammengestellt.

Tabelle 3.8: Reibungswinkel für den „Dresdner Sand 93“ nach dem Ansatz von ENGEL

l_b [-]	e_0 [-]	ρ_d [g/cm ³]	γ_d [kN/m ³]	$\cot \varphi'$ [-]	φ' [°]
0.00	0.749	1.515	14.9	1.640	32.2
0.25	0.675	1.582	15.5	1.492	34.8
0.50	0.605	1.651	16.2	1.343	37.7
0.75	0.532	1.730	17.0	1.195	41.1
1.00	0.458	1.818	17.8	1.049	45.2

Von PREGL (1998) wird ein Ansatz zur Ermittlung des Reibungswinkels (Scherwinkels) in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte des Bodens (Porenzahl e_0) und der wirksamen Normalspannung σ' nach Gl. (3.13) angeführt. Diese Gleichung wird nach PREGL Mohrsche Bruchbedingung genannt.

$$\varphi' = a + b \cdot \log\left(\frac{e_0}{e_b}\right) + c \cdot \log\left(\frac{\sigma'}{\sigma_b}\right) \quad (3.13)$$

Für den „Dresdner Sand 93“ werden von LEHNER – siehe PREGL (2000) – die Parameter der Mohrschen Bruchbedingung mit $a = 39.8^\circ$, $b = -55.1^\circ$ und $c = -8.5^\circ$ ($e_b = 0.50$ und $\sigma_b = 100$ kPa) angegeben. In der Tabelle 3.9 sind die nach LEHNER/PREGL ermittelten Reibungswinkel für den eingesetzten Sand, 5 verschiedene Lagerungsdichten und 4 verschiedene Normalspannungen zusammengestellt.

Tabelle 3.9: Reibungswinkel für den „Dresdner Sand 93“ nach LEHNER/PREGL

l_b [-]	e_0 [-]	φ' [°] bei			
		$\sigma' = 10$ kPa	$\sigma' = 50$ kPa	$\sigma' = 100$ kPa	$\sigma' = 250$ kPa
0.00	0.749	38.6	32.7	30.1	26.7
0.25	0.675	41.1	35.2	32.6	29.2
0.50	0.605	43.7	37.8	35.2	31.9
0.75	0.532	46.8	40.9	38.3	34.9
1.00	0.458	50.4	44.5	41.9	38.5

Aus den Werten der Tabelle 3.9 und der Darstellung im Bild 3.16 ist zu sehen, dass der Reibungswinkel nach dem Ansatz von LEHNER/PREGL bei konstanter Lagerungsdichte (I_D) mit zunehmender wirksamer Normalspannung abnimmt. Danach verringert sich z.B. bei $I_D = 1.0$ der Reibungswinkel von $\varphi' \approx 50^\circ$ bei $\sigma' = 10$ kPa auf $\varphi' \approx 38^\circ$ bei $\sigma' = 250$ kPa. Bei einer Normalspannung von $\sigma' = 50$ kPa ergibt sich nach LEHNER/PREGL etwa der gleiche Reibungswinkel wie nach dem Ansatz von ENGEL. Das Bild 3.16 bzw. Bild 3.17, in dem die Reibungswinkel nach dem Ansatz von LEHNER/PREGL über die wirksame Normalspannung aufgetragen sind, zeigt aber ebenfalls, dass der Ansatz auch bei lockerster Lagerung ($I_D = 0$ bzw. $e_0 = \max e$) zu einem von der wirksamen Spannung (Spannungsniveau) abhängigen Reibungswinkel führt. Diese prognostizierte Abhängigkeit bei lockerster Lagerung stimmt nicht mit ansonsten in der Literatur dokumentierten Ergebnissen von Triaxial-Versuchen an Sand (siehe z.B. ABDEL-RAHMAN, 1999) überein. Danach nimmt die Spannungsabhängigkeit des Reibungswinkels mit abnehmender Lagerungsdichte immer weiter ab. Bei lockerster Lagerung ist schließlich keine Spannungsabhängigkeit mehr festzustellen, der Reibungswinkel ist dann konstant. Der Reibungswinkel nach dem Ansatz von LEHNER/PREGL wird deshalb bei der Versuchsauswertung nicht verwendet.

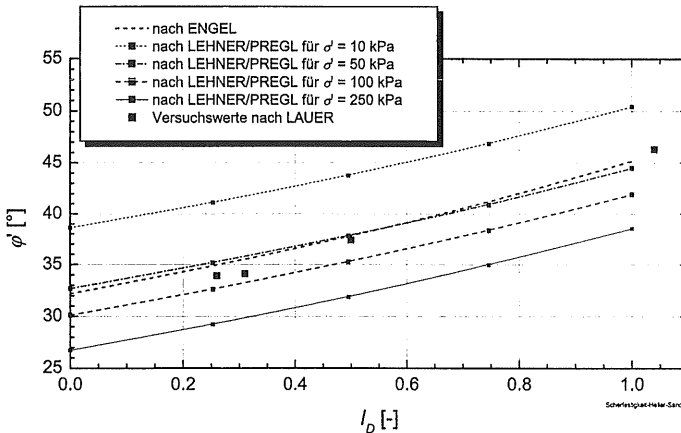


Bild 3.16: Reibungswinkel φ für den „Dresdner Sand 93“ in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D

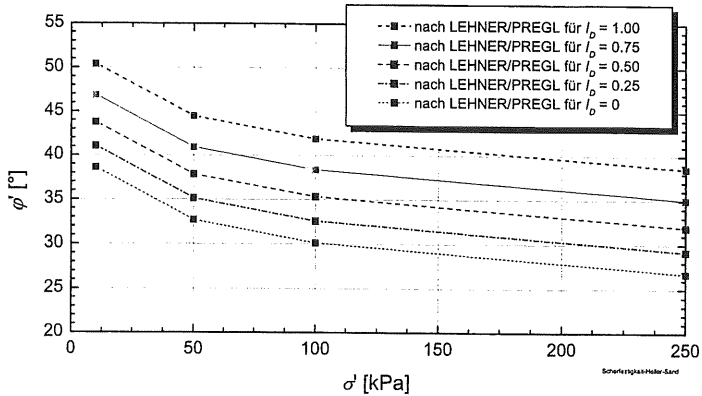


Bild 3.17: Reibungswinkel φ für den „Dresdner Sand“ nach LEHNER/PREGL in Abhängigkeit von der wirksamen Normalspannung

Die Kennwerte für den Versuchssand von MAO (1993) sind im Anhang A.1 zusammengestellt.

3.3.3 Zusammendrückbarkeit

Zur Beschreibung eines spannungsabhängigen Steifemoduls lässt sich der Ansatz von OHDE nach Gl. (3.14) nutzen.

$$E_s = 100 \text{ kN/m}^2 \cdot \nu \cdot \left(\frac{\sigma'}{100 \text{ kN/m}^2} \right)^w \quad (3.14)$$

Für den eingesetzten Sand wurden die Parameter ν und w sowohl für die Erstbelastung als auch für die Wiederbelastung von LAUER (2000) mit Ödometerversuchen für verschiedene Ausgangslagerungsdichten bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3.10 zusammengestellt.

Tabelle 3.10: Parameter ν und w aus Ödometerversuchen nach LAUER (2000)

e_0 [-]	l_D [-]	Erstbelastung		Wiederbelastung	
		ν [-]	w [-]	ν [-]	w [-]
0.727	0.08	265	0.56	564	0.89
0.595	0.53	349	0.58	596	0.84
0.516	0.80	391	0.46	547	0.76

Für andere Ausgangslagerungsdichten lassen sich die Parameter ν und w z.B. mit Hilfe der Korrelationen von MOUSSA (aus ENGEL 2002) ermitteln. Für den „Dresdner Sand 93“ mit $(\max e - \min e) = 0.292$ ergeben sich die Parameter nach MOUSSA wie folgt:

$$\nu \approx \frac{137 (\max e)^{6.46}}{e_0^4 \left(\log(2.49 (\max e)^{1.4}) - \log(e_0) \right)} \quad (3.15)$$

$$w \approx 1 - \log(2.49 (\max e)^{1.4}) + \log(e_0) \quad (3.16)$$

Die Ergebnisse aus den Ödometerversuchen und den Korrelationen nach MOUSSA sind für die Erstbelastung in der Tabelle 3.11 zusammengestellt.

Tabelle 3.11: Parameter ν und w für Erstbelastung aus Ödometerversuchen und Korrelationen nach MOUSSA

e_0 [-]	l_D [-]	Versuch		nach MOUSSA	
		ν [-]	w [-]	ν [-]	w [-]
0.727	0.08	265	0.56	211	0.64
0.595	0.53	349	0.58	379	0.55
0.516	0.80	391	0.46	588	0.49

4 Versuchsergebnisse

4.1 Definitionen

Der auf eine Wand wirkende Erddruck lässt sich an einem Punkt der Wand mit der Tiefe z durch den Betrag e und die Angriffsrichtung δ_L beschreiben (Bild 4.1 – links). Die daraus auf die gesamte Wand mit der Höhe h resultierende Erddruckkraft lässt sich durch den Betrag E , die Angriffsrichtung δ_R und die Angriffshöhe an der Wand z_R beschreiben (Bild 4.1 – rechts). Für die bei der Auswertung verwendeten Wandneigungswinkel α und Erddruckneigungswinkel δ , werden die Winkeldefinitionen der DIN V 4085-100 (1996) verwendet (Bild 4.1). Die Geländeoberfläche war bei allen Erddruckversuchen horizontal ($\beta = 0$).

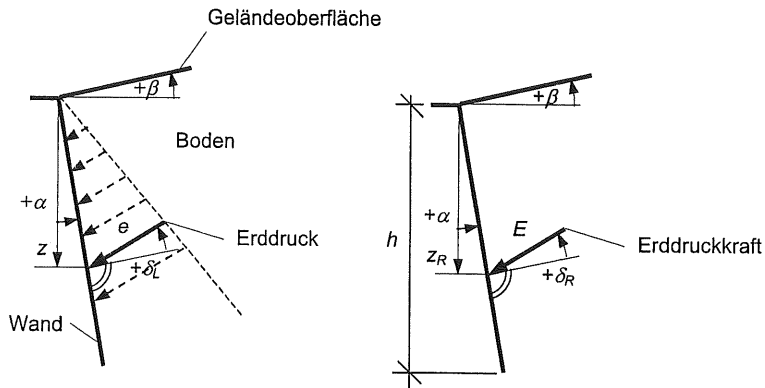


Bild 4.1: Winkeldefinitionen nach DIN V 4085 (1996)

Aus den bei den 1g-Versuchen und den Zentrifugen-Versuchen an der Messwand gemessenen normalen und tangentialen Komponenten der Erddruckresultierenden E_n und E_t lassen sich der normierte Betrag des Normalanteils der mobilisierten Erddruckkraft K_{Rn} , der Betrag des Tangentialanteils der mobilisierten Erddruckkraft K_{Rt} und der Tangens des Erddruckneigungswinkels der mobilisierten Erddruckkraft $\tan \delta_R$ nach den Gl. (4.1) bis (4.3) ermitteln. Die normierte Angriffshöhe der mobilisierten Erddruckkraft

z_R/h wird aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht infolge der normal zur Wandoberfläche wirkenden Erddruckkraft E_n ermittelt.

Bei der allgemein üblichen Vorgehensweise zur Erddruckberechnung werden Erddruckbeiwerte (z.B. K_{pgh} für den passiven Fall) benutzt, die von einem linear mit der Tiefe zunehmenden Erddruck ausgehen. Zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit wird dies in den Gl. (4.1) und (4.2) beibehalten, auch wenn andere Erddruckverteilungen vorliegen.

$$K_{Rn} = \frac{2 \cdot E_n}{\gamma \cdot h^2} \quad (4.1)$$

$$K_{Rt} = \frac{2 \cdot E_t}{\gamma \cdot h^2} \quad (4.2)$$

$$\tan \delta_R = \frac{E_t}{E_n} = \frac{K_{Rt}}{K_{Rn}} \quad (4.3)$$

Bei den Zentrifugen-Versuchen (siehe Abschnitt 3.2) ergibt sich die Wichte des Bodens zu:

$$\gamma = n_g \cdot \rho \cdot g \quad (4.4)$$

Der normierte Betrag des Horizontalanteils der mobilisierten Erddruckkraft K_{Rn} lässt sich mit Gl. (4.5) berechnen.

$$K_{Rn} = \frac{K_{Rn}}{\cos \delta_R} \cdot \cos(\alpha + \delta_R) = K_R \cdot \cos(\alpha + \delta_R) \quad (4.5)$$

Aus den bei den 1g-Versuchen mit Hilfe der Erddruckmessdosen in verschiedenen Tiefen z gemessenen normalen und tangentialen Komponenten des Erddrucks e_n und e_t lassen sich der normierte Betrag des Normalanteils des mobilisierten Erddrucks K_{Ln} (auch Erddruckbeiwert), der Betrag des Tangentialanteils des mobilisierten Erddrucks K_{Lt} und der Tangens des Erddruckneigungswinkels des mobilisierten Erddrucks $\tan \delta_L$ nach den Gl. (4.6) bis (4.8) ermitteln.

$$K_{Ln} = \frac{e_n}{\gamma \cdot z} \quad (4.6)$$

$$K_{Lt} = \frac{e_t}{\gamma \cdot z} \quad (4.7)$$

$$\tan \delta_L = \frac{e_t}{e_n} = \frac{K_{Lt}}{K_{Ln}} \quad (4.8)$$

Der normierte Betrag des Horizontalanteils des mobilisierten Erddrucks K_{Ln} wird nach Gl. (4.9) ermittelt.

$$K_{Lh} = \frac{K_{Ln}}{\cos \delta_L} \cdot \cos(\alpha + \delta_L) = K_L \cdot \cos(\alpha + \delta_L) \quad (4.9)$$

Das Spannungsniveau der Versuche wird mit Hilfe des Verhältniswertes von äquivalenter Wandhöhe h_E nach Gl. (4.10) zu einer Bezugshöhe h_V ausgedrückt. Für diese Bezugshöhe wird im Folgenden $h_V = 1\text{ m}$ gewählt.

$$h_E = h_M \cdot n_g \quad (4.10)$$

h_M ... Höhe der Modellwand [m]

Die 1g-Versuche haben danach eine äquivalente Wandhöhe von $h_E = 0.564\text{ m}$, Zentrifugen-Versuche mit $h_M = 0.12\text{ m}$ und $n_g = 10$ eine äquivalente Wandhöhe von $h_E = 1.20\text{ m}$ und mit $h_M = 0.12\text{ m}$ und $n_g = 30$ eine äquivalente Wandhöhe von $h_E = 3.60\text{ m}$.

4.2 Parallelverschiebung

Im Bild 4.2 sind die Ergebnisse von 16 1g-Versuchen zur Mobilisierung der widerstehenden Erddruckkraft in Abhängigkeit von der Wandbewegung mit Aluminium-Wandoberfläche dargestellt. Dabei wurde die Ausgangslagerungsdichte des Bodens variiert. Das obere Diagramm zeigt die Mobilisierung des normierten Normalanteils (hier gleich Horizontalanteil) der Erddruckkraft K_{Rn} , das mittlere Diagramm die resultierende Erddruckneigung (resultierender Reibungsbeiwert) $\tan\delta_R$ und das untere Diagramm die normierte Angriffshöhe der Kraft z_R/h an der Wand. Die Versuchsergebnisse der einzelnen 1g-Versuche sind im Anhang C dargestellt.

Bei der Mobilisierung des Normalanteils bzw. Horizontalanteils der Erddruckkraft ist festzustellen, dass bei einer lockeren bis mitteldichten Lagerung des Sandes die Mobilisierungskurve flacher ansteigt als bei einer mitteldichten bis dichten Lagerung des Sandes. Außerdem ist zu erkennen, dass nur bei einer mitteldichten bis dichten Lagerung des Sandes ein Peakwert der Erddruckkraft mit einem nachfolgendem Abfall auftritt. Bei einer lockeren Lagerung wird dagegen kein Maximum der Erddruckkraft erreicht, weder ein Peakwert noch ein Plateauwert nach Bild 1.1.

Die resultierende Erddruckneigung ist bei allen Versuchen im Ausgangszustand positiv, d.h. die Tangentialkomponente der Erddruckkraft wirkt an der Wand nach unten. Bereits nach einer geringen Bewegung der Wand kehrt sich die Wirkungsrichtung um, so dass anschließend bis zum Ende des Versuches die Erddruckkraft mit einer nach oben gerichteten Tangentialkomponente an der Wand angreift. Das Mobilisierungsverhalten der Erddruckneigung lässt dabei eine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte erkennen. Bei lockerer Lagerung des Bodens ist eine größere Wandbewegung zum Abbau der positiven Erddruckneigung erforderlich als bei einer dichten Lagerung. Die im passiven Grenzzustand erreichte resultierende Erddruckneigung zeigt allenfalls eine geringe Abhängigkeit von der Lagerungsdichte (siehe Abschnitt 5.2.1).

Die Angriffshöhe der Erddruckkraft liegt zu Versuchsbeginn im Bereich des unteren Drittelpunktes der Wand von $z/h = 0.67$. Mit zunehmender Wandverschiebung wandert der Angriffspunkt geringfügig nach oben. Eine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte ist dabei nicht zu erkennen.

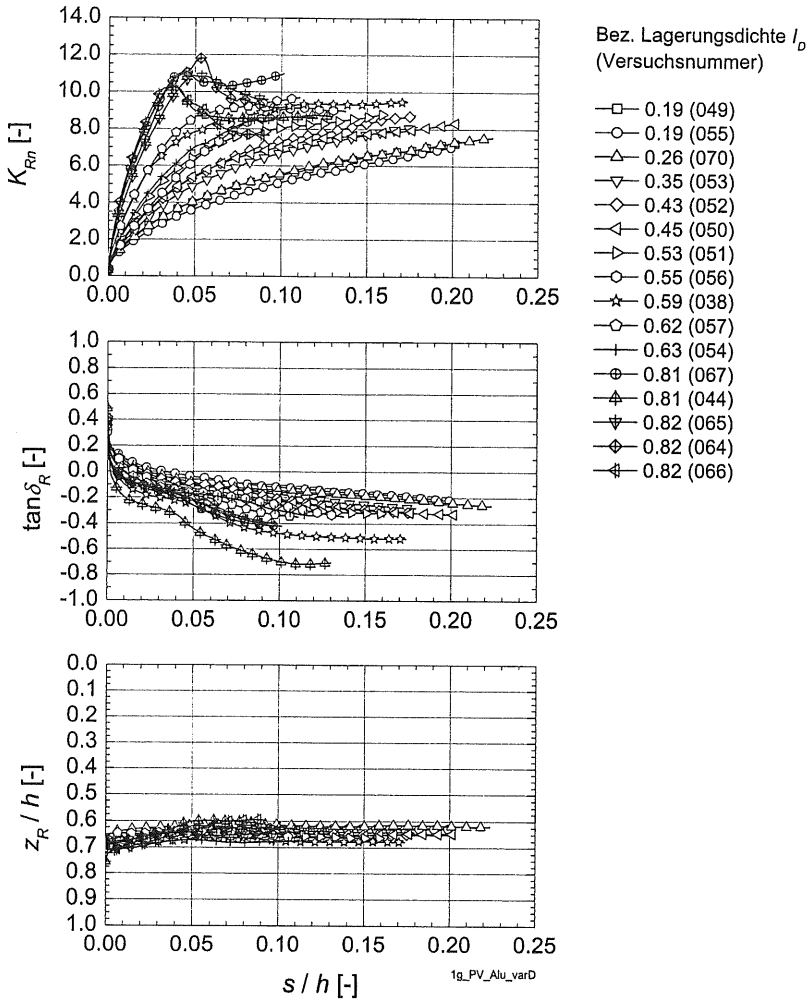


Bild 4.2: Mobilisierung der Erddruckkraft – 1g-Versuche, Parallelverschiebung, Aluminium-Wandoberfläche, Variation der Ausgangslagerungsdichte I_D

Im Bild 4.3 sind für einen 1g-Versuch mit dichter Lagerung (Nr. 066, $I_D = 0.82$) die Ergebnisse zur Mobilisierung der normierten Erddruckkraft K_{Rn} , des normierten Erddrucks an den 8 Erddruckmessdosen K_{Ln} , die resultierende Erddruckneigung $\tan \delta_R$ und die

lokale Erddruckneigung $\tan\delta_L$ und die auf die Wandbewegung bezogenen Vertikalverschiebungen an der Sandoberfläche s_{OF}/s über die normierte kennzeichnende Wandbewegung s/h dargestellt.

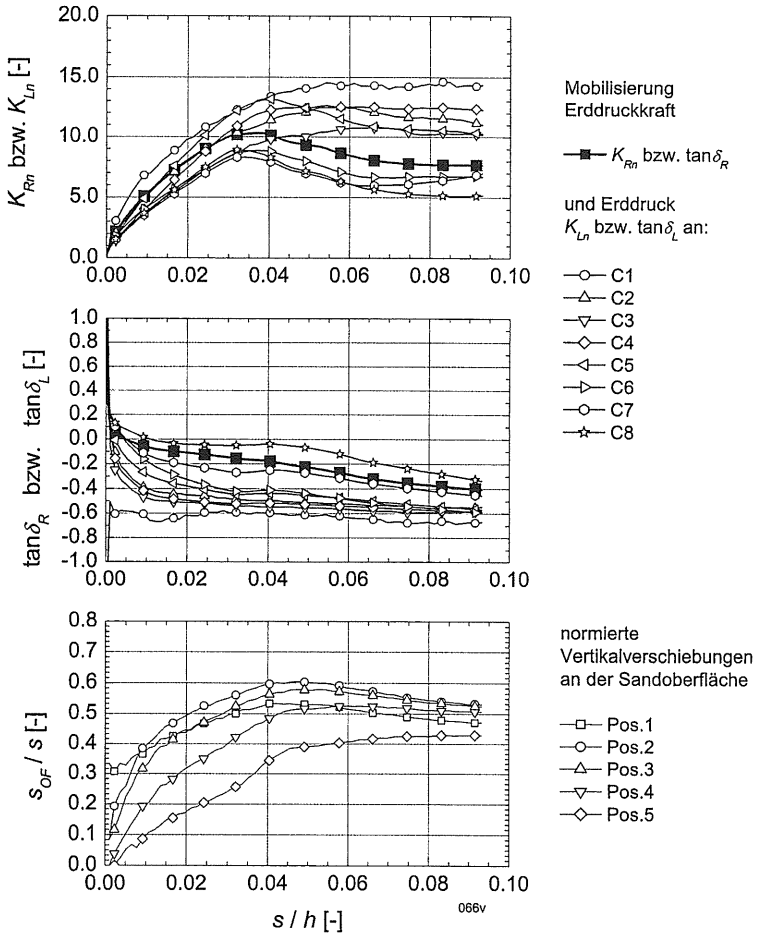


Bild 4.3: Mobilisierung der Erddruckkraft, Erddruck und Verschiebungen an der Sandoberfläche – 1g-Versuch Nr. 066, Parallelverschiebung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.82$

Bei diesem Versuch wird ein Peakwert der Erddruckkraft nach einer normierten Wandverschiebung von $s/h \approx 0.04$ erreicht. Dieser Peakwert wird gleichzeitig als passiver Grenzzustand definiert ($s/h = s_p/h$). Bei der Versuchsbeobachtung zeigt sich, dass das Erreichen des Peakwertes nahezu mit der vollständigen Ausbildung der Gleitfläche im Boden – Bruchkante an der Sandoberfläche sichtbar – zusammenfällt. Auch an fast allen Erddruck-Messdosen werden Peakwerte erreicht.

Die Peak- bzw. Plateauwerte der Erddruckkraft und des Erddrucks und die zugehörige Wandbewegung (normierte kennzeichnende Grenzverschiebung $s/h = s_p/h$ und normierte lokale Grenzverschiebung $s_L/h = s_{Lp}/h$) sind für den o.g. Versuch in Bild 4.4 zusammengestellt. Dabei zeigt sich, dass der Größtwert des Erddrucks in einer größeren Tiefe (z.B. Messdose C8 bei $z/h = 0.85$) bereits nach einer geringeren Wandbewegung erreicht wird als in einer geringeren Tiefe (z.B. Messdose C5 bei $z/h = 0.51$). Dabei ist der Maximalwert des normierten Erddrucks K_{Lnp} in einer größeren Tiefe kleiner als in einer geringeren Tiefe.

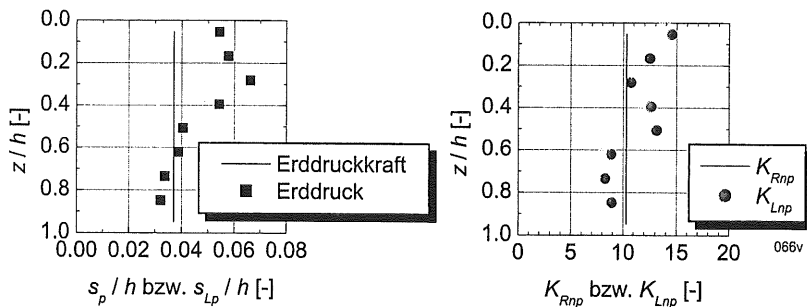


Bild 4.4: Lokale Grenzverschiebung und Peak- bzw. Plateauwert des Erddrucks (Normalanteil) sowie kennzeichnende Grenzverschiebung und Peakwert der Erddruckkraft – 1g-Versuch Nr. 066, Parallelverschiebung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.82$

Im Bild 4.3 ist weiterhin zu sehen, dass bei dem betrachteten Versuch der Betrag der resultierenden Erddruckneigung ab einer Wandverschiebung von $s/h \approx 0.04$ wieder stärker zunimmt. Diese Unstetigkeit bei der Mobilisierung der resultierenden Erddruckneigung (result. Reibungsbeiwert) fällt ca. mit dem Erreichen des Peakwertes der Erddruckkraft zusammen. Die Mobilisierung der lokalen Erddruckneigung (lokaler Rei-

bungsbeiwert) zeigt eine Abhängigkeit von der Tiefenlage (Bild 4.3). In geringer Tiefe (z.B. C2) erreicht die Erddruckneigung einen größeren Betrag als in einer größeren Tiefe (z.B. C8).

Im Bild 4.5 oben sind für den Versuch in üblicher Form die auf die Wandhöhe bezogenen Vertikalverschiebungen an der Sandoberfläche s_{OF}/h über die normierte Wandverschiebung s/h dargestellt. Man sieht, dass die Hebung der Sandoberfläche an allen Messpositionen mit zunehmender Wandverschiebung kontinuierlich anwächst.

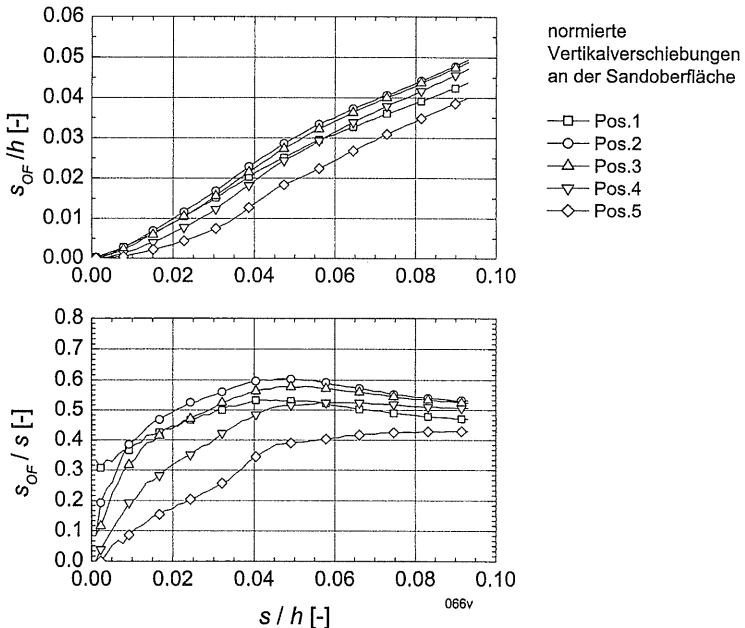


Bild 4.5: Normierte Vertikalverschiebungen an der Sandoberfläche – 1g-Versuch Nr. 066, Parallelverschiebung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.82$

In der in Bild 4.5 unten bzw. Bild 4.3 verwendeten Darstellungsart werden dagegen Peakwerte beim Verhältniswert s_{OF}/s erreicht (z.B. an der Aufnehmerposition 1 bei einer Wandbewegung von $s/h \approx 0.04$ und an der Position 3 bei $s/h \approx 0.05$). Nach Erreichen dieses Maximums bleibt das Verhältnis von Vertikalverschiebung (Hebung) s_{OF} zur Wandverschiebung s nahezu konstant. Dies weist auf die Ausbildung eines

Bruchkörpers im Boden vor der Wand hin, der sich bei weiterer Wandbewegung nahezu als Starrkörper verhält.

Im Bild 4.6 ist der Erddruckverlauf vor der Wand über die Tiefe z/h für 5 verschiedene Mobilisierungsgrade der verformungsabhängigen Erddruckkraft im Grenzzustand in Anlehnung an Gl. (2.18) – hier Normalanteil E_n – für den Versuch Nr. 066 dargestellt. Der Mobilisierungsgrad $\chi_{Rn} = 0$ beschreibt den Ausgangszustand (Ruhezustand) und $\chi_{Rn} = 1$ den passiven Grenzzustand bei Erreichen des Peakwertes. Im linken Diagramm ist der normierte Erddruck K_{Ln} nach Gl. (4.6) dargestellt und im rechten Diagramm wurde der normierte Erddruck mit der jeweiligen normierten Tiefe multipliziert. Danach ist ersichtlich, dass die Erddruckverteilung nach dem Beginn der Wandbewegung von einer dreieckförmigen Verteilung etwas abweicht. Dies wird durch die Tiefenlage der Resultierenden (Bild 4.2) bestätigt, die höher liegt als der untere Drittelspunkt der Wand.

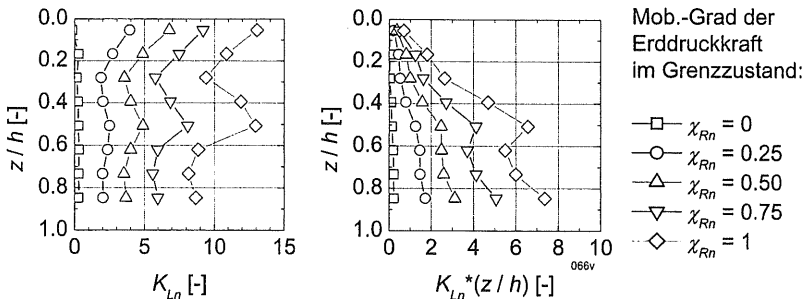


Bild 4.6: Mobilisierung des Erddrucks (Normalanteil) – 1g-Versuch Nr. 066, Parallelverschiebung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.82$

Im Bild 4.7 ist die lokale Erddruckneigung vor der Wand über die Tiefe z/h für 5 Mobilisierungsgrade der passiven Erddruckkraft für den Versuch Nr. 066 dargestellt. Das linke Diagramm enthält den Tangens des lokalen Erddruckneigungswinkels $\tan \delta_L$ nach Gl. (4.8) und das rechte Diagramm den mit dem wirksamen Reibungswinkel des Bodens ϕ' normierten lokalen Erddruckneigungswinkel δ_L / ϕ' .

Es ist zu erkennen, dass die lokale Erddruckneigung im Ausgangszustand ($\chi_{Rn} = 0$) – nach Einrieseln des Sandes – positiv ist (Definition nach Bild 4.1) und über die Tiefe

nahezu konstant bleibt. Die Messgenauigkeit der Messdosen ist auf Grund der kleinen Erddrücke im Ausgangszustand bis zu einer Tiefe von etwa $z/h=0.5$ zu gering, so dass diese Werte nicht dargestellt sind.

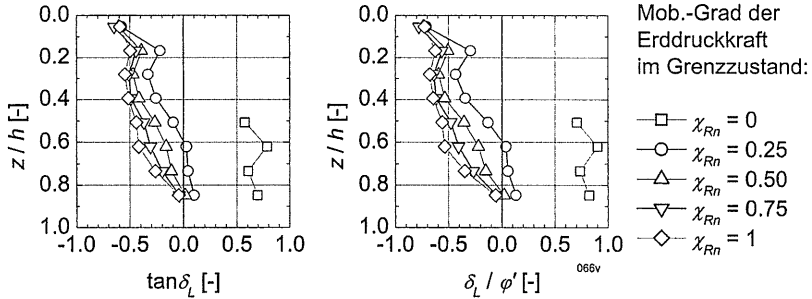


Bild 4.7: Mobilisierung der lokalen Erddruckneigung – 1g-Versuch Nr. 066, Parallelverschiebung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.82$

Mit Beginn der Mobilisierung des stützenden Erddrucks nimmt die Erddruckneigung im oberen Wandbereich schnell negative Werte an und erreicht hier auch schnell einen Grenzwert mit $\tan \delta_L \approx -0.5$ bzw. $\delta_L / \varphi' \approx -0.7$. Im unteren Wandbereich wird dieser Wert auch im passiven Grenzzustand nicht erreicht. Die lokale Erddruckneigung ist somit sowohl vom Mobilisierungsgrad als auch von der Tiefenlage an der Wand abhängig.

Analog zum Bild 4.2 sind im Bild 4.8 die Ergebnisse von 9 Zentrifugen-Versuchen zur Mobilisierung der widerstehenden Erddruckkraft über die Wandbewegung mit der Aluminium-Wandoberfläche und dichter Lagerung des Bodens (Mittelwert $I_D = 0.83$) zusammengestellt. Dabei wurde das Spannungsniveau variiert. Die Versuchsergebnisse der weiteren Zentrifugen-Versuche mit Parallelverschiebung sind im Anhang E enthalten.

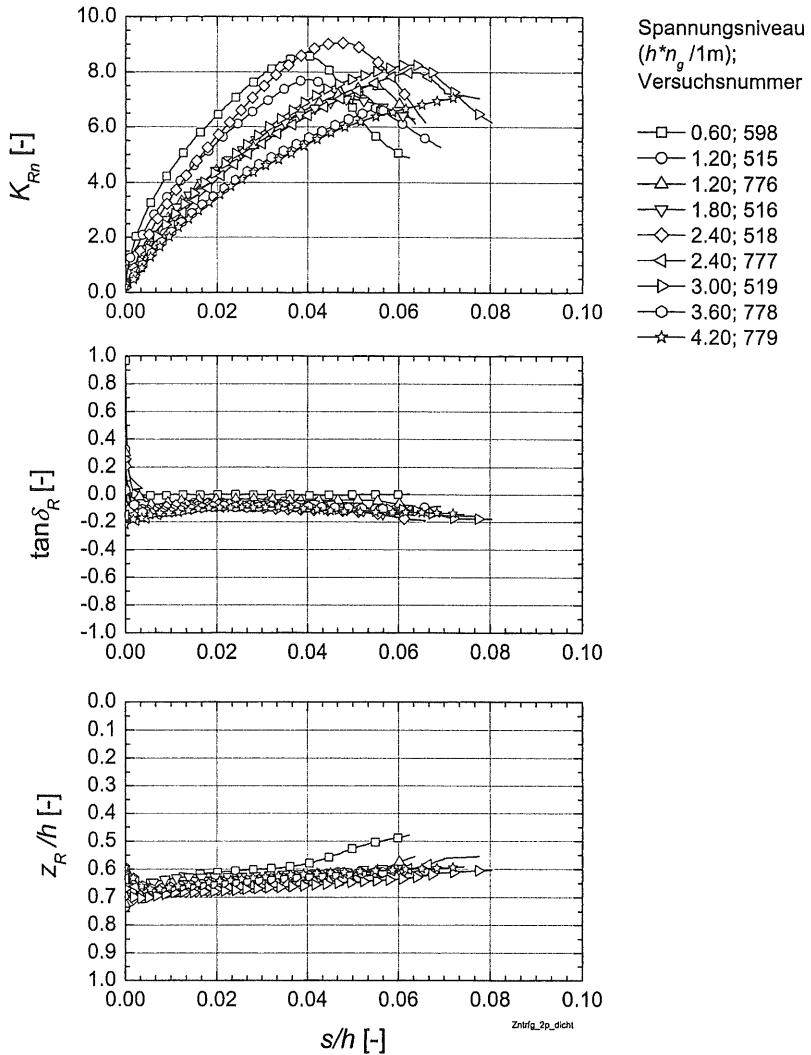


Bild 4.8: Mobilisierung der Erdruckkraft – Zentrifugenversuche WOLFRAM (1995), Parallelverschiebung, Aluminium-Wandoberfläche, dichte Lagerung, Variation des Spannungsniveaus

Bei der Mobilisierung des normierten Normalanteils bzw. Horizontalanteils der Erddruckkraft K_{Rn} ist festzustellen, dass bei allen Versuchen ein Peakwert mit einem nachfolgendem Abfall der Erddruckkraft auftritt. Dabei deutet sich sowohl beim Betrag der passiven Erddruckkraft als auch bei der Grenzverschiebung eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau an. Der Betrag der passiven Erddruckkraft nimmt mit anwachsendem Spannungsniveau ab und die zugehörige Grenzverschiebung nimmt zu.

Die Neigung der Erddruckkraft $\tan \delta_R$ ist bei allen Versuchen zu Beginn positiv. Bereits nach einer geringen Bewegung der Wand kehrt sich die Wirkungsrichtung um, so dass anschließend bis zum Ende des Versuches die Erddruckkraft nach oben an der Wand angreift. Die Größe dieser mobilisierten Erddruckneigung (Reibungsbeiwert) ist nur gering vom Spannungsniveau abhängig.

Die normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft liegt zu Versuchsbeginn im Bereich des unteren Drittelpunktes der Wand von $z/h \approx 0.67$. Mit zunehmender Wandverschiebung wandert der Angriffspunkt an der Wand leicht nach oben. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau ist dabei nicht zu erkennen.

4.3 Kopfpunktdrehung

Analog zu Bild 4.2 sind im Bild 4.9 die Ergebnisse von 5 1g-Versuchen zur Mobilisierung der widerstehenden Erddruckkraft über die normierte kennzeichnende Wandbewegung s/h , d.h. der Verschiebung s am Wandfuß, mit Aluminium-Wandoberfläche dargestellt. Die Versuchsergebnisse der einzelnen 1g-Versuche sind im Anhang C dargestellt.

Bei der Mobilisierung des Normalanteils der Erddruckkraft ist festzustellen, dass bei einer lockeren bis mitteldichten Lagerung des Sandes die Mobilisierungskurve flacher ansteigt als bei einer mitteldichten bis dichten Lagerung des Sandes. Im Unterschied zur Parallelverschiebung erreicht die Erddruckkraft bei allen Lagerungsdichten einen Maximalwert. Bei einer mitteldichten bis dichten Lagerung tritt dieses Maximum als Peakwert mit einem nachfolgendem starken Abfall der Erddruckkraft auf. Bei den Versuchen mit lockerer bis mitteldichter Lagerung war zu beobachten, dass bereits vor Erreichen des Maximalwertes der Erddruckkraft die Gleitfläche bis zur Sandoberfläche durchgängig ausgebildet war. Die Ausbildung der Gleitfläche zeichnet sich in den Mobilisierungskurven der Kraft und der Erddruckneigung als eine gewisse Unstetigkeit ab. Der Zustand der Ausbildung der Gleitfläche wurde bei den beiden Versuchen mit lockerer bis mitteldichter Lagerung (Nr. 033 und 035) in der Auswertung (Abschnitt 5.3) als passiver Grenzzustand betrachtet. Bei einer mitteldichten bis dichten Lagerung wurde die Gleitfläche dagegen erst nach dem Überschreiten des Peakwertes der Erddruckkraft an der Geländeoberfläche sichtbar.

Die resultierende Erddruckneigung ist bei allen Versuchen zu Beginn positiv, d.h. die Tangentialkomponente der Erddruckkraft wirkt an der Wand nach unten. Mit fortschreitender Bewegung der Wand nimmt die Erddruckneigung ab, wird Null und anschließend negativ, so dass die Erddruckkraft von unten nach oben an der Wand angreift. In der Mobilisierung der Erddruckneigung ist dabei eine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte zu erkennen. Bei lockerer Lagerung des Bodens ist eine größere Wandbewegung zum Abbau der positiven Erddruckneigung erforderlich als bei einer dichten Lagerung. Die im passiven Grenzzustand erreichte resultierende Erddruckneigung zeigt jedoch keine ausgeprägte Abhängigkeit von der Lagerungsdichte (siehe Abschnitt 5.3.1). Sie erreicht dabei auch nur einen Betrag gering über Null und ist somit kleiner als bei der Parallelverschiebung.

Die Angriffshöhe der Erddruckkraft liegt zu Versuchsbeginn im Bereich des unteren Drittpunktes der Wand von $z/h = 0.67$. Nach Beginn der Wandbewegung wandert der Angriffspunkt nach unten. Eine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte ist dabei nicht zu erkennen.

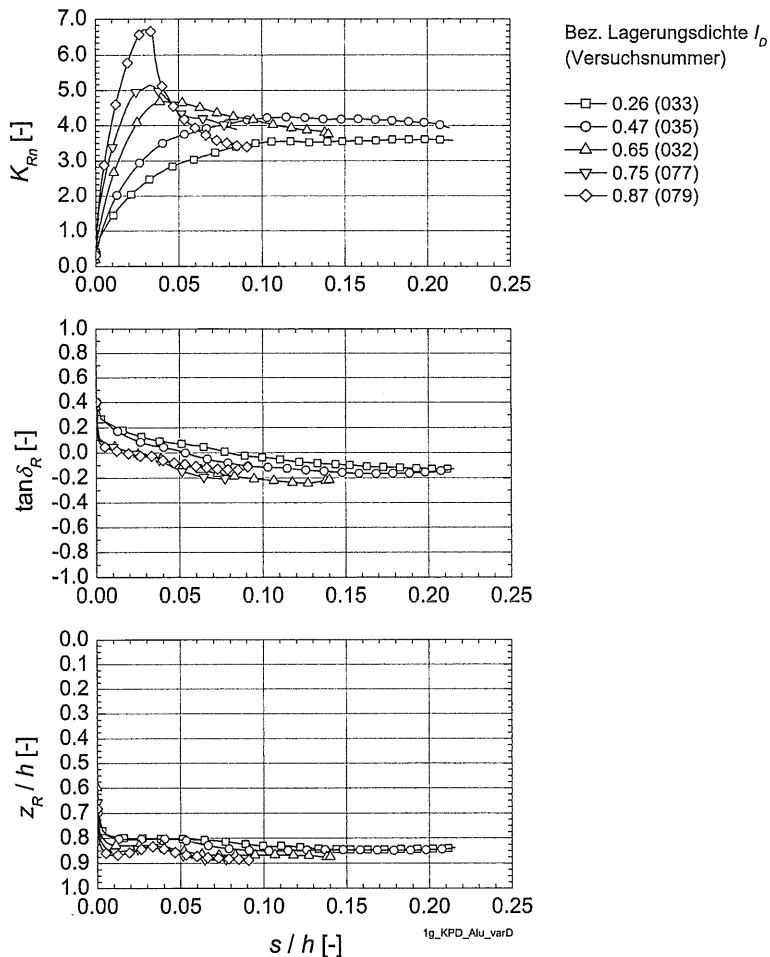


Bild 4.9: Mobilisierung der Erddruckkraft – 1g-Versuche, Kopfpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, Variation der Ausgangslagerungsdichte I_D

Im Bild 4.10 sind für den 1g-Versuch Nr. 079 mit dichter Lagerung ($I_D = 0.87$) die Ergebnisse zur Mobilisierung der normierten Erddruckkraft K_{Rn} , des normierten Erddrucks K_{Ln} , die resultierende Erddruckneigung $\tan\delta_R$ und die lokale Erddruckneigung $\tan\delta_L$ sowie die auf die Wandbewegung bezogene Vertikalverschiebung an der Sandoberfläche s_{OF}/s über die normierte Wandbewegung s/h dargestellt.

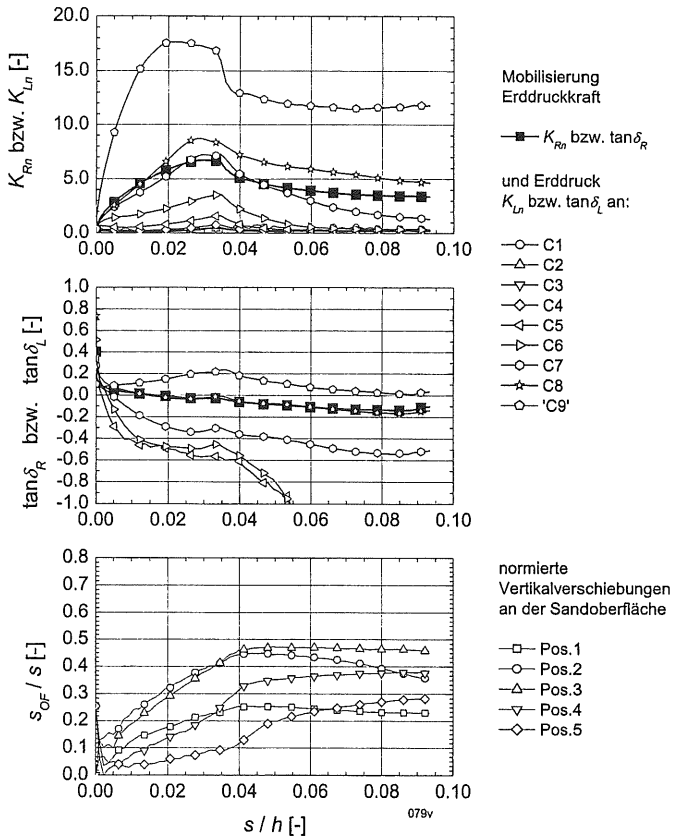


Bild 4.10: Mobilisierung der Erddruckkraft, Erddruck und normierte Hebung an der Geländeoberfläche – 1g-Versuch Nr. 079, Kopfpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.87$

Bei diesem Versuch wird der Peakwert der Erddruckkraft nach einer normierten kennzeichnenden Wandbewegung von $s/h = s_p/h \approx 0.03$ erreicht. Auch der Erddruck zeigt in allen Tiefenlagen einen Peakwert. Es ist zu erkennen, dass dieser Größtwert des Erddrucks in einer größeren Tiefe (z.B. Messdose C8 bei $z/h = 0.85$) bereits nach einer geringeren Wandbewegung erreicht wird als in einer geringeren Tiefe (z.B. Messdose C5 bei $z/h = 0.51$). Dabei ist der Maximalwert des normierten Erddrucks K_{Lnp} in einer größeren Tiefe wesentlich größer als in einer geringeren Tiefe.

Die normierte kennzeichnende Wandbewegung für den Grenzzustand der Erddruckkraft s_p/h , die normierten lokalen Grenzverschiebungen s_{Lp}/h nach Gl. (4.11), der Peakwert der Resultierenden K_{Rnp} und die Peakwerte des Erddrucks K_{Lnp} sind für den o.g. Versuch in Bild 4.11 zusammengestellt.

$$s_{Lp} = s_p \cdot \left(\frac{z}{h} \right) \quad (4.11)$$

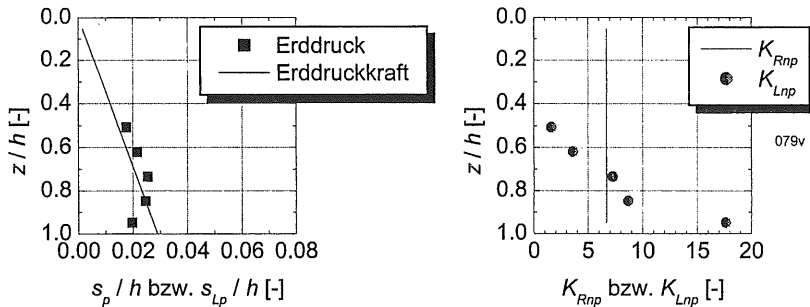


Bild 4.11: Normierte lokale Grenzverschiebung und Peakwert des Erddrucks (Normalanteil) sowie normierte kennzeichnende Grenzverschiebung und Peakwert der Erddruckkraft – 1g-Versuch Nr. 079, Kopfpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.87$

Die normierten Hebungen an der Geländeoberfläche in Abhängigkeit von der Wandverschiebung werden im Bild 4.10 analog zur im Abschnitt 4.2 beschriebenen Parallelverschiebung dargestellt. Es ist zu sehen, dass nach einer normierten kennzeichnenden Wandbewegung von $s/h \approx 0,04$, und somit nach Überschreiten der

passiven Grenzverschiebung von $s_p/h \approx 0,03$, an den Positionen 1 bis 3 ein Peakwert von s_{0F}/s erreicht wird. Nach Erreichen dieses Maximums bleibt das Verhältnis von Vertikalverschiebung (Hebung) zur Wandverschiebung nahezu konstant. Dies weist wie bei der Parallelverschiebung auf die Ausbildung eines Bruchkörpers im Boden vor der Wand hin, der sich bei weiterer Wandbewegung nahezu als Starrkörper verhält, und bestätigt damit auch die Beobachtung, nach der die Gleitfläche bei einer dichten Lagerung erst nach dem Überschreiten des Peakwertes der Erddruckkraft (passiver Grenzzustand) an der Sandoberfläche sichtbar wird.

Analog zum Bild 4.6 für die Parallelverschiebung ist im Bild 4.12 der Erddruckverlauf vor der Wand über die normierte Tiefe z/h für 5 verschiedene Mobilisierungsgrade der verformungsabhängigen Erddruckkraft im Grenzzustand in Anlehnung an Gl. (2.18) – hier Normalanteil E_n – für den Versuch Nr. 079 dargestellt.

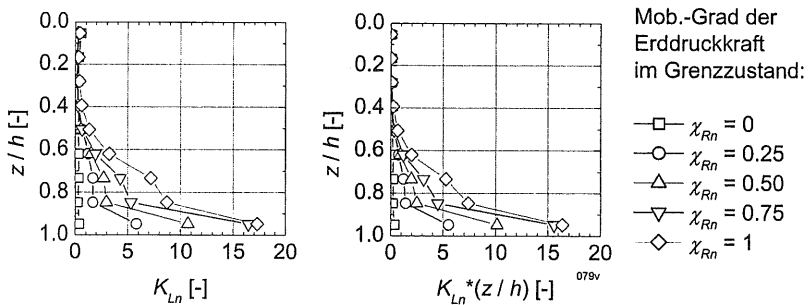


Bild 4.12: Mobilisierung der Erddruck (Normalanteil) – 1g-Versuch Nr. 079, Kopfpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.87$

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die Erddruckverteilung nach dem Beginn der Wandbewegung von einer dreieckförmigen Verteilung stark abweicht. Der Erddruck nimmt mit der Tiefe überlinear zu. Das bestätigt auch die Tiefenlage der Resultierenden (Bild 4.9), die im Grenzzustand tiefer als der untere Drittelspunkt der Wand liegt.

Im Bild 4.13 ist analog zum Bild 4.7 die lokale Erddruckneigung vor der Wand über die normierte Tiefe z/h für 5 Mobilisierungsgrade der passiven Erddruckkraft für den Versuch Nr. 066 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die lokale Erddruckneigung im Ausgangszustand – nach Einrieseln des Sandes – positiv ist und über die Tiefe nahezu konstant bleibt. Die Messgenauigkeit ist auf Grund der kleinen Erddrücke bis zu einer

Tiefe von $z/h \approx 0.5$ zu gering, so dass diese Werte nicht dargestellt sind. Mit Beginn der Wandbewegung nimmt die Erddruckneigung im mittleren Wandbereich schnell negative Werte an. Im untersten Wandbereich wird auch im passiven Grenzzustand keine negative Erddruckneigung mobilisiert. Die lokale Erddruckneigung ist somit sowohl vom Mobilisierungsgrad als auch von der Tiefenlage an der Wand abhängig.

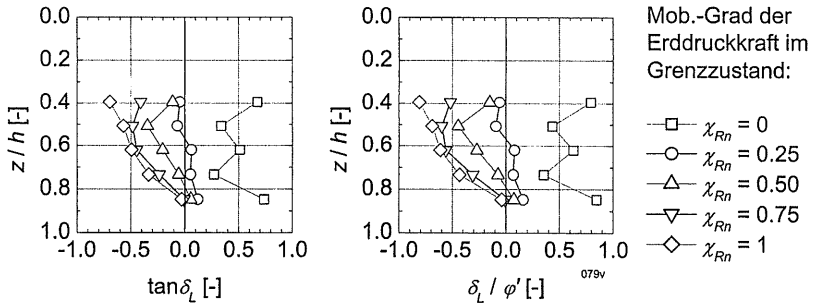


Bild 4.13: Mobilisierung der lokalen Erddruckneigung – 1g-Versuch Nr. 079, Kopfpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.87$

Analog zum Bild 4.8 sind im Bild 4.14 die Ergebnisse von 10 Zentrifugen-Versuchen zur Mobilisierung der widerstehenden Erddruckkraft über die Wandbewegung mit der Aluminium-Wandoberfläche und einer dichten Lagerung des Bodens (Mittelwert $I_D = 0.84$) zusammengestellt. Dabei wurde das Spannungsniveau variiert. Die Versuchsergebnisse der weiteren Zentrifugen-Versuche mit Kopfpunktdrehung sind im Anhang E zusammengestellt.

Zur Mobilisierung des normierten Normalanteils der Erddruckkraft K_{Rn} ist festzustellen, dass bei allen Versuchen ein Peakwert (passiver Grenzwert) mit einem nachfolgendem Abfall der Erddruckkraft auftritt. Dabei ist sowohl beim Betrag der passiven Erddruckkraft als auch bei der Grenzverschiebung eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau erkennbar. Der Betrag der passiven Erddruckkraft nimmt dabei mit zunehmendem Spannungsniveau ab und die Grenzverschiebung zu.

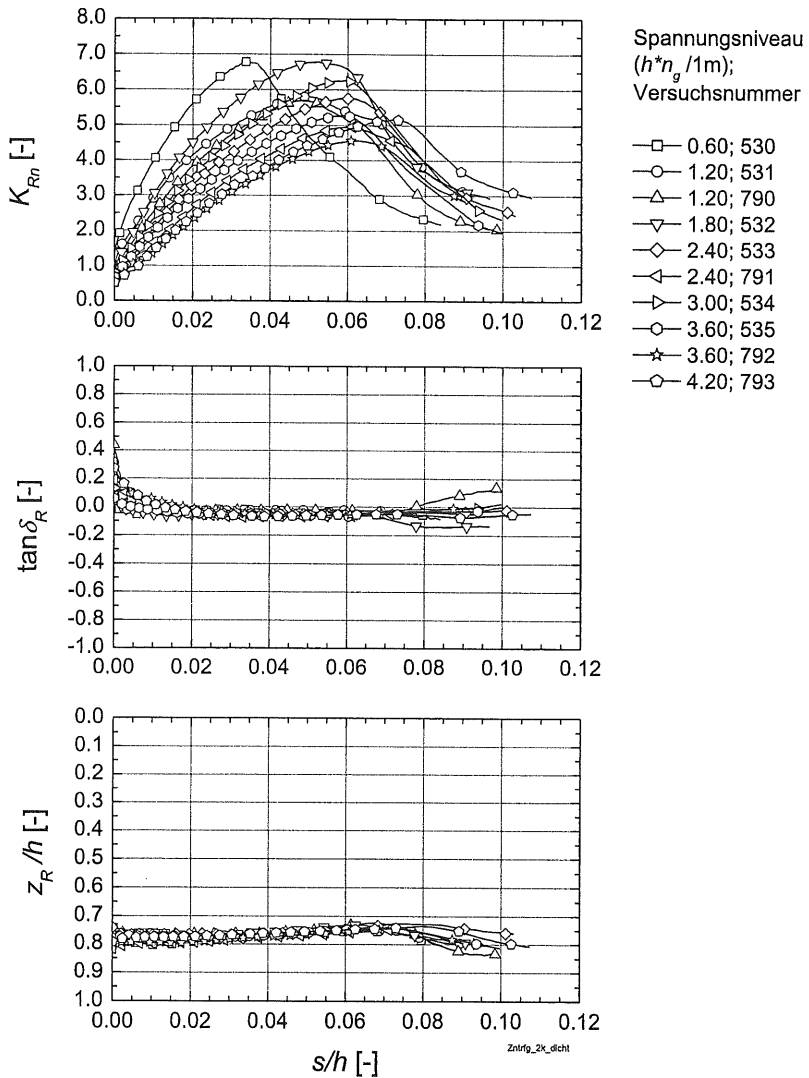


Bild 4.14: Mobilisierung der Erddruckkraft – Zentrifugenversuche WOLFRAM (1995), Kopfpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, dichte Lagerung, Variation des Spannungsniveaus

Die resultierende Erddruckneigung $\tan \delta_r$ ist bei allen Versuchen vor dem Start der Wandbewegung positiv. Bereits nach einer geringen Bewegung der Wand baut sich die Erddruckneigung ab, so dass anschließend bis zum Ende des Versuches die Erddruckneigung nahezu Null ist. Eine negative Erddruckneigung wird somit nicht mobilisiert. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau ist dabei nicht zu erkennen.

Die Angriffshöhe der Erddruckkraft liegt bereits kurz nach Versuchsbeginn unterhalb des unteren Drittelpunktes der Wand, in einem Bereich von $z/h \approx 0.80$. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau ist dabei nicht feststellbar.

4.4 Fußpunktdrehung

Analog zum Bild 4.2 und Bild 4.9 sind im Bild 4.15 die Ergebnisse von 11 1g-Versuchen zur Mobilisierung der widerstehenden Erddruckkraft über die kennzeichnende Wandbewegung, d.h. der normierten Verschiebung s/h am Wandkopf, mit der Aluminium-Wandoberfläche dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen 1g-Versuche sind im Anhang C dargestellt.

Bei der Mobilisierung des Normalanteils der Erddruckkraft ist festzustellen, dass bei einer lockeren bis mitteldichten Lagerung des Sandes die Mobilisierungskurve flacher ansteigt als bei einer mitteldichten bis dichten Lagerung des Sandes. Außerdem ist zu erkennen, dass bei keiner Lagerungsdichte ein Maximum der Erddruckkraft erreicht wird, weder ein Peakwert noch ein Plateauwert nach Bild 1.1.

Die resultierende Erddruckneigung ist bei allen Versuchen zu Beginn positiv, d.h. die Tangentialkomponente der Erddruckkraft wirkt an der Wand nach unten. Mit fortschreitender Bewegung der Wand nimmt die Erddruckneigung ab, wird Null und anschließend negativ, so dass die Erddruckkraft von unten nach oben an der Wand angreift. Die Mobilisierung der Erddruckneigung lässt dabei keine ausgeprägte Abhängigkeit von der Lagerungsdichte erkennen.

Die Angriffshöhe der Erddruckkraft liegt zu Versuchsbeginn im Bereich des unteren Drittelpunktes der Wand von $z/h = 0.67$. Nach Beginn der Wandbewegung wandert der Angriffspunkt stark nach oben, erreicht eine maximale Höhe von $z_R/h \approx 0.40$ und fällt danach wieder etwas ab. Eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Lagerungsdichte ist dabei nicht feststellbar.

Bei den Versuchen war zu beobachten, dass sich mit fortschreitender Wandbewegung (Kopfverschiebung) an der Geländeoberkante nach dem Auftauchen einer ersten „wandnahen“ Gleitflächenaustrittskante immer weitere Gleitflächenaustrittskanten ausbildeten. Eine durchgängige „äußere“ Gleitfläche, beginnend am Wandfuß, wie bei der Parallelverschiebung und der Kopfpunktdrehung bildete sich bei den Versuchen mit Fußpunktdrehung nicht aus. Dies wurde auch von MAO (1993) für diese Wandbewegungsart festgestellt.

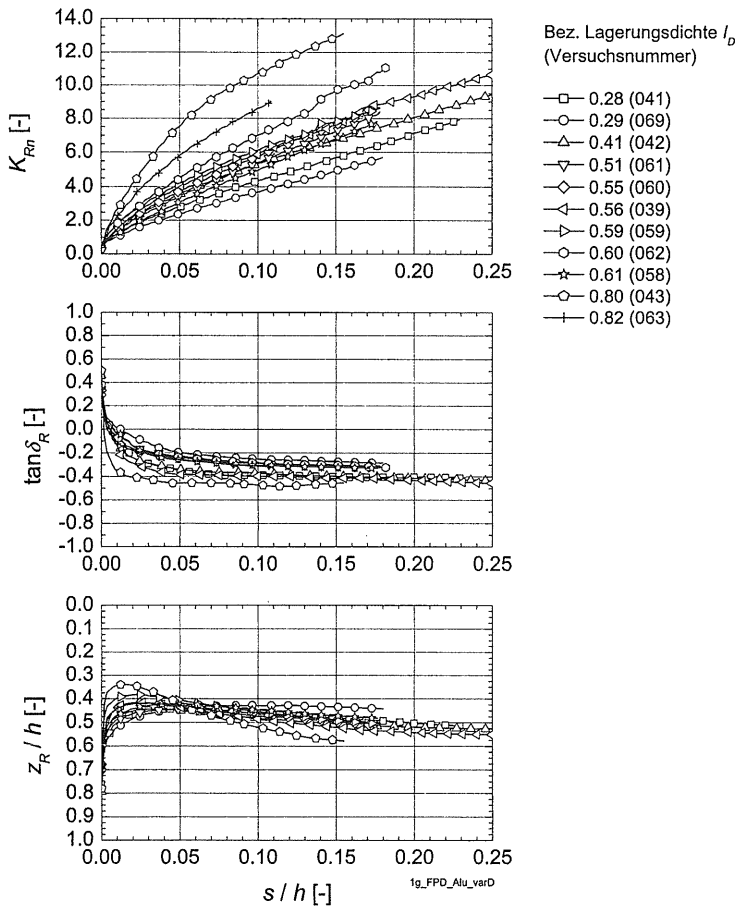


Bild 4.15: Mobilisierung der Erdruckkraft – 1g-Versuche, Fußpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, Variation der Ausgangslagerungsdichte I_D

Im Bild 4.16 sind für den 1g-Versuch Nr. 063 mit dichter Lagerung ($I_D = 0.82$) die Ergebnisse zur Mobilisierung der normierten Erdruckkraft K_{Rm} , des normierten Erddrucks K_{Ln} , die resultierende Erddruckneigung $\tan \delta_R$ und die lokale Erddruckneigung $\tan \delta_L$, sowie die auf die Wandbewegung bezogene Vertikalverschiebung (Hebung) an der Sandoberfläche s_{0r}/s über die normierte Wandbewegung s/h dargestellt.

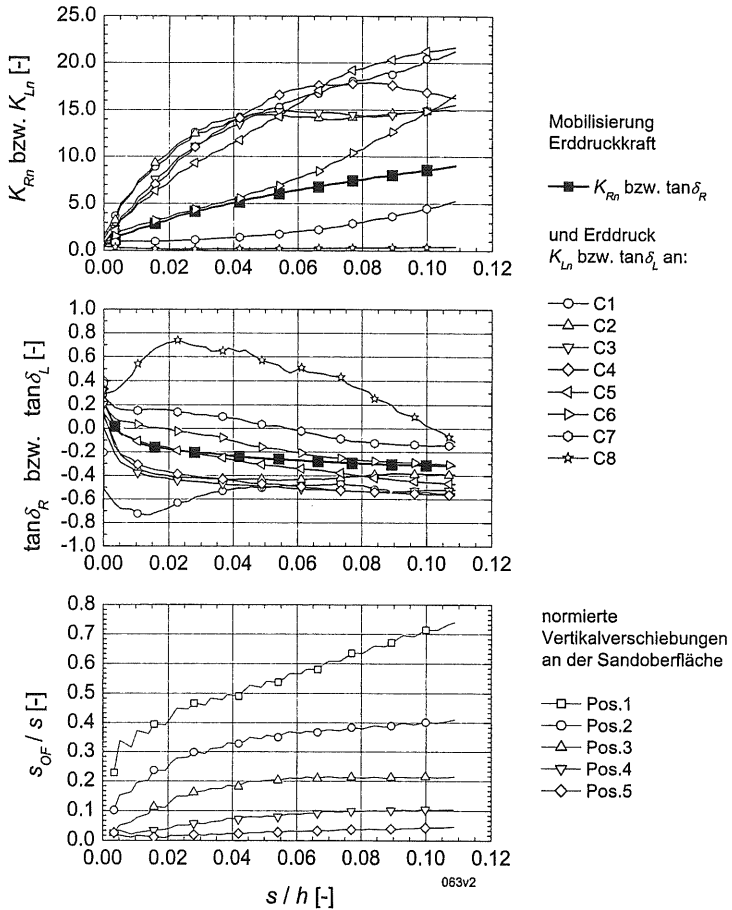


Bild 4.16: Mobilisierung der Erddruckkraft, Erddruck und Verschiebungen an der Geländeoberfläche – 1g-Versuch Nr. 063, Fußpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, $I_D = 0.82$

Auch bei diesem Versuch wird kein Maximum – kein Peak- bzw. Plateauwert – der Erddruckkraft erreicht. Allerdings erreicht der Erddruck im oberen Wandbereich Maximalwerte, welche als Peakwerte auftreten. Im unteren Wandbereich nimmt der

Erddruck dagegen mit fortschreitender Wandbewegung überproportional zu, erreicht aber keinen Grenzwert.

Die normierten lokalen Grenzverschiebungen nach Gl. (4.12) und die Maximalwerte – hier Peakwerte – des Erddrucks sind für den o.g. Versuch in Bild 4.17 zusammengestellt.

$$s_{Lp} = s_p \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (4.12)$$

Wie bereits oben erwähnt, erreicht der Erddruck nur im oberen Wandbereich Maximalwerte mit einer zugehörigen lokalen Grenzverschiebung. Ein globaler Grenzwert der Erddruckkraft wurde nicht erreicht.

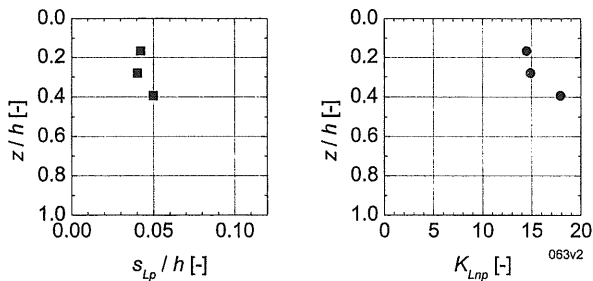


Bild 4.17: Lokale Grenzverschiebung und Maximalwert des Erddrucks (Normalanteil) – 1g-Versuch Nr. 063, Fußpunktdrehung

Den Vertikalverschiebungen an der Sandoberfläche in Abhängigkeit von der Wandverschiebung (Bild 4.16) wird auf Grund des fortschreitenden Staffelbruches im Boden (ohne Ausbildung eines „Gesamtbruchkörpers“) bei dieser Wandbewegungsart keine besondere Aussagekraft zugemessen.

Im Bild 4.18 ist analog zu Bild 4.6 und Bild 4.12 der Erddruckverlauf vor der Wand über die normierte Tiefe z/h für 5 Mobilisierungsgrade der verformungsabhängigen Erddruckkraft dargestellt. Dazu wurde der Mobilisierungsgrad $\chi_{Rn} = 1$ über die Erddruckkraft bei einer kennzeichnenden Wandverschiebung (Kopfverschiebung) von $s/h = 0.10$ bestimmt.

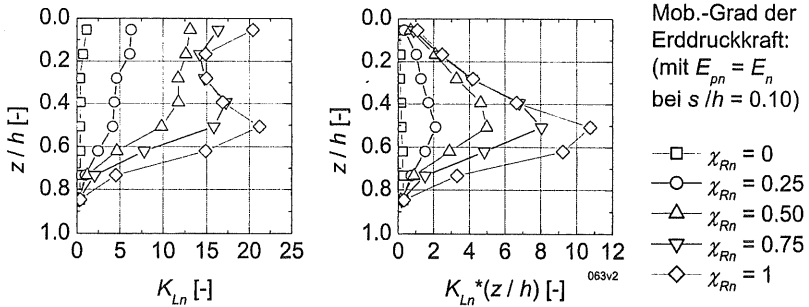


Bild 4.18: Mobilisierung des Erddrucks (Normalanteil) – 1g-Versuch Nr. 063, Fußpunktdrehung

Es wird deutlich, dass die Erddruckverteilung nach dem Beginn der Wandbewegung von einer dreieckförmigen Verteilung stark abweicht. Der Erddruck nimmt bei allen Mobilisierungsgraden bis zu einer Tiefe von $z/h \approx 0.4$ näherungsweise linear zu und erreicht in einer Tiefe von $z/h \approx 0.5$ seinen Größtwert an der Wand. Ab dieser Tiefe fällt er zur Tiefe von $z/h \approx 0.9$ fast linear auf den Erddruck im Ausgangszustand ab. Dies wird auch von der Tiefenlage der Resultierenden gemäß Bild 4.15 bestätigt, die oberhalb der Wandmitte liegt.

Im Bild 4.19 ist analog zu Bild 4.7 und Bild 4.13 die lokale Erddruckneigung an der Wand über die normierte Tiefe z/h für die in Bild 4.18 aufgeführten Mobilisierungsstände der Erddruckkraft für den Versuch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die lokale Erddruckneigung im Ausgangszustand – nach Einrieseln des Sandes – positiv ist und über die Tiefe nahezu konstant bleibt. Mit Beginn der Mobilisierung des stützenden Erddrucks nimmt die Erddruckneigung im oberen Wandbereich schnell negative Werte an und erreicht hier einen Grenzwert mit $\tan \delta_L \approx -0.5$ bzw. $\delta_L / \varphi' \approx -0.7$. Im unteren Wandbereich wird dieser Wert nicht erreicht. Die lokale Erddruckneigung ist somit sowohl vom Mobilisierungsgrad als auch von der Tiefenlage an der Wand abhängig.

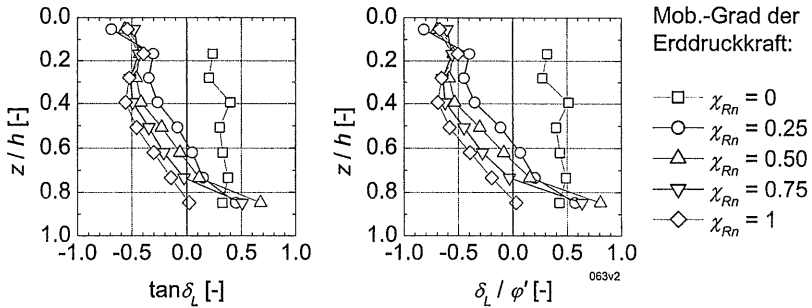


Bild 4.19: Mobilisierung der lokalen Erddruckneigung – 1g-Versuch Nr. 063, Fußpunktdrehung

Im Bild 4.20 sind analog zu Bild 4.8 und Bild 4.14 die Ergebnisse von 5 Zentrifugen-Versuchen zur Mobilisierung der widerstehenden Erddruckkraft über die Wandbewegung bei einer Aluminium-Wandoberfläche und einer dichten Lagerung des Bodens (Mittelwert $I_D = 0.85$) zusammengestellt. Dabei wurde das Spannungsniveau variiert. Die Ergebnisse der anderen Zentrifugen-Versuche mit Fußpunktdrehung sind im Anhang E enthalten.

Bei der Mobilisierung des normierten Normalanteils der Erddruckkraft K_{Rn} ist festzustellen, dass die Kurven einen unbeständigen Verlauf aufweisen. Die Erddruckkraft erreicht bei $s/h \approx 0.10$ jeweils ein „Zwischenplateau“, steigt anschließend wieder an und erreicht zum Teil einen Peakwert. Das Mobilisierungsverhalten weicht somit deutlich vom Verhalten in den 1g-Versuchen (s. Bild 4.15) ab.

Die resultierende Erddruckneigung $\tan \delta_r$ ist bei allen Versuchen zu Beginn positiv. Bereits nach einer geringen Bewegung der Wand kehrt sich die Wirkungsrichtung um, erreicht einen geringen negativen Wert von $\tan \delta_r \approx -0.2$ und bleibt anschließend bis zum Ende des Versuches nahezu konstant. Die Mobilisierung der Erddruckneigung (resultierender Reibungsbeiwert) lässt keine signifikante Abhängigkeit vom Spannungsniveau erkennen.

Nach Beginn der Wandbewegung wandert der Angriffspunkt stark nach oben, erreicht eine maximale Höhe von $z_R/h \approx 0.40$ und fällt mit weiterer Wandbewegung wieder ab. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau ist dabei nicht zu erkennen.

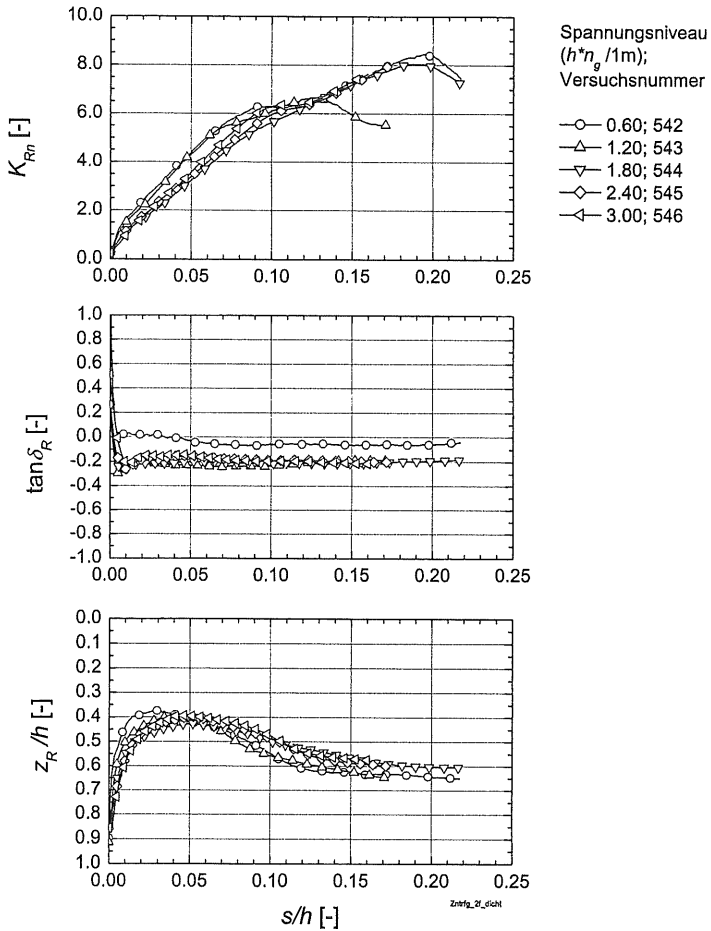


Bild 4.20: Mobilisierung der Erddruckkraft – Zentrifugenversuche WOLFRAM (1995), Fußpunktdrehung, Aluminium-Wandoberfläche, dichte Lagerung, Variation des Spannungsniveaus

5 Auswertung der Versuche

5.1 Grundlagen zur Auswertung

Bei der Auswertung der Erddruckversuche ist auch der Vergleich zwischen der im Grenzzustand gemessenen Erddruckkraft und der rechnerischen passiven Erddruckkraft von Interesse.

Zur rechnerischen Ermittlung des Beiwertes für den passiven Erddruck K_p bzw. K_{ph} stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Eine schon etwas zurückliegende Zusammenstellung und Bewertung solcher Verfahren und den daraus resultierenden Beiwerten wurde von WEIßENBACH (1983) vorgelegt. Zwischenzeitlich wurden von verschiedenen Autoren, aufbauend auf diese Verfahren, neue Beiwert-Tabellen, Erweiterungen bzw. Näherungsansätze veröffentlicht. Zuletzt wurden von WINKLER (2003) Erddruckbeiwerte für den passiven Fall nach verschiedenen Berechnungsverfahren vorgestellt und bewertet. Gemeinsam ist diesen Verfahren, dass sie von einem über die gesamte Wandhöhe konstanten Erddruckneigungswinkel ($\delta = \delta_R = \text{const.}$) und i.d.R. von einem linear mit der Tiefe zunehmenden Erddruck an der Wand ausgehen.

So werden z.B. von PREGL (2000) Ansätze zur Ermittlung von Erddruckbeiwerten angegeben, die auf dem Charakteristikenverfahren (s. PREGL 1999) beruhen.

KERISEL/ABSI (1990) veröffentlichten neue Tabellen mit Beiwerten für den passiven Erddruck. Diese gehen auf das Plastizitätstheoretische Berechnungsverfahren von CAQUOT/KERISEL (siehe WEIßENBACH 1983) zurück. Die Tabellen enthalten Werte für bestimmte Fälle. Zwischenwerte müssen interpoliert werden. Frühere Tabellen mit entsprechenden Erddruckbeiwerten wurden von CAQUOT/KERISEL (1948) und CAQUOT/KERISEL/ABSI (1972) veröffentlicht.

Von GUDEHUS (2001) werden Näherungsformeln zur Ermittlung von Beiwerten angegeben, welche die z.B. bei GUDEHUS (1996) angegebenen Tabellenwerte wiedergeben sollen. Die Beiwerte für von GUDEHUS mit „Rotation“ bezeichneten Fall basieren dabei auf einem Verfahren mit einem Starrkörper auf einer kreiszylindrischen Gleitfläche. Die Beiwerte für den Fall „Translation“ ergeben sich aus einem Verfahren mit einem Zweikörperbruchmechanismus mit ebenen Gleitflächen.

KEMPFERT (1994) erweitert das Verfahren von STRECK/WEIßENBACH zur Berechnung von Erddruckbeiwerten auf geneigte Geländeoberflächen und vergleicht die danach ermittelten Beiwerte mit den Werten aus anderen Verfahren. Das Verfahren von STRECK/WEIßENBACH/KEMPFERT setzt eine „gebrochene“ äußere Gleitfläche an.

Von GÜNTHER (1993) wurden Programme zur Ermittlung der Erddruckbeiwerte auf der Grundlage von kreis- bzw. spiralförmigen Gleitflächen veröffentlicht.

Nachfolgend werden Beiwerte K_{pgh} zur Ermittlung des passiven Erddrucks infolge Eigenlast des Bodens nach den o.g. Verfahren bzw. Näherungsansätzen für den Fall $\alpha = \beta = 0$ dargestellt. Für verschiedene Erddruckneigungen δ_p / φ sind die Beiwerte K_{pgh} in Bild 5.1 für einen Reibungswinkel von $\varphi = 35^\circ$ und in Bild 5.2 für einen Reibungswinkel von $\varphi = 45^\circ$ dargestellt. Es gelten die Winkeldefinitionen gemäß Bild 4.1.

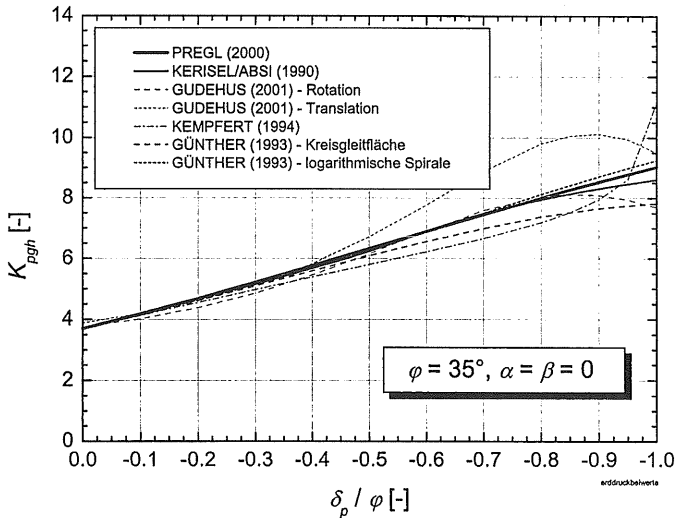


Bild 5.1: Beiwerte für den passiven Erddruck für den Fall $\varphi = 35^\circ$, $\alpha = \beta = 0$ und negativer Erddruckneigung δ

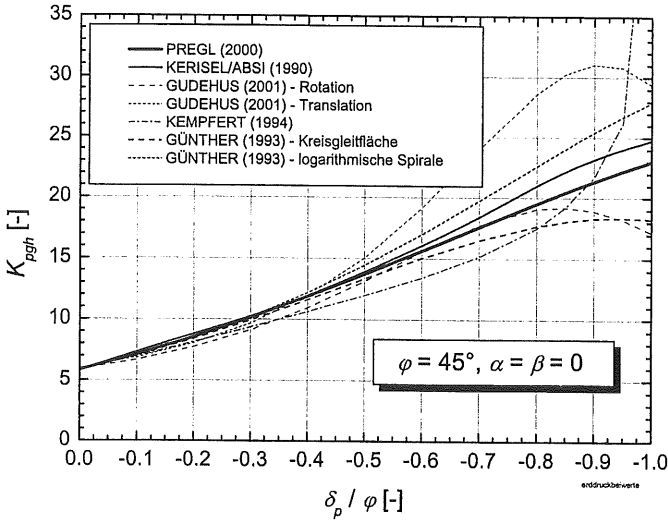


Bild 5.2: *Beiwerte für den passiven Erddruck für den Fall $\varphi = 45^\circ, \alpha = \beta = 0$ und negativer Erddruckneigung δ*

Aus den Diagrammen ist zu erkennen, dass die Erddruckbeiwerte nach den verschiedenen Verfahren für Erddruckneigungswinkel von $\delta = \delta_p = 0$ bis ca. $\delta = \delta_p \approx -0.33 \cdot \varphi$ nahezu übereinstimmen. Bei größeren Beträgen des Erddruckneigungswinkels nehmen die Abweichungen zu. Wie Bild 5.2 zeigt, sind diese Unterschiede um so größer, je größer der Reibungswinkel des Bodens ist.

Für die nachfolgenden Auswertungen der Erddruckversuche werden als Vergleichswerte die Beiwerte nach PREGL (2000) herangezogen. Diese weisen über alle Erddruckneigungswinkel einen stetigen Verlauf auf, liefern mit die kleinsten Erddruckbeiwerte und decken sich weitgehend mit den Beiwerten von KERISEL/ABSI. Des Weiteren ist mit dem Verfahren nach PREGL die theoretische Bruchkörpergeometrie (Gleitflächenverlauf) einfach zu ermitteln.

Für den Sonderfall $\alpha = \beta = 0$ ergibt sich der Erddruckbeiwert nach PREGL infolge Eigenlast des Bodens zu:

$$K_{pg} = K_{pg,0} \cdot i_{pg} \tag{5.1}$$

Mit dem Grundwert $K_{pg,0}$ für $\delta_p = 0$ von

$$K_{pg,0} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5.2)$$

und dem Beiwert i_{pg} zur Berücksichtigung eines Erddruckneigungswinkels $\delta_p \neq 0$:

$$i_{pg}(\delta_p \leq 0) = (1 - 0.53 \cdot \delta_p)^{0.26 + 5.96 \cdot \varphi} \quad (5.3)$$

$$i_{pg}(\delta_p > 0) = (1 + 0.41 \cdot \delta_p)^{-7.13} \quad (5.4)$$

Der Horizontalanteil ergibt sich für $\alpha = 0$ zu:

$$K_{pgh} = K_{pg} \cdot \cos \delta_p \quad (5.5)$$

In Bild 5.3 sind Erddruckbeiwerte K_{pgh} nach PREGL für verschiedene Reibungswinkel und Erddruckneigungswinkel für den Sonderfall $\alpha = \beta = 0$ dargestellt.

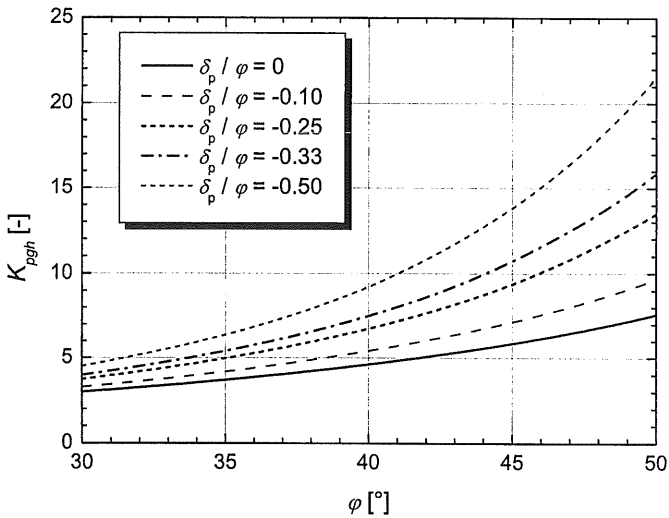


Bild 5.3: Beiwerte für den passiven Erddruck für den Fall $\alpha = \beta = 0$ nach PREGL (2000)

In Bild 5.4 ist der Gleitflächenverlauf nach dem Charakteristikenverfahren nach PREGL bei verschiedenen Erddruckneigungswinkeln und einem Reibungswinkel von $\varphi = 40^\circ$ für den Fall der senkrechten Wand $\alpha = 0$ und horizontaler Sandoberfläche $\beta = 0$ dargestellt. Für den Grundfall $\delta_p = 0$ ergibt sich eine ebene äußere Gleitfläche. Mit zunehmendem negativen Erddruckneigungswinkel nimmt die rechnerische Bruchkörperlänge l_{BC} zu.

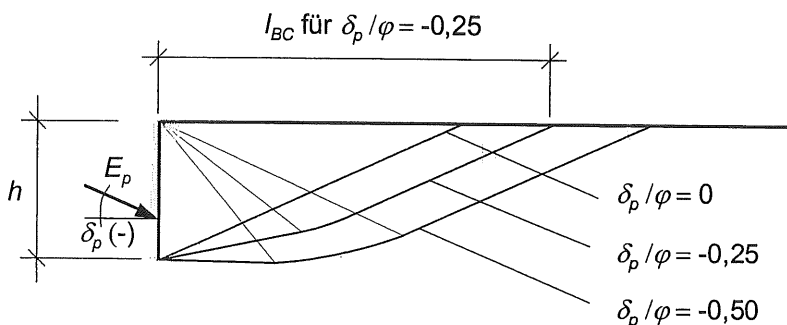


Bild 5.4: Gleitflächenverlauf für den Fall $\alpha = \beta = 0$ und $\varphi = 40^\circ$ nach PREGL (2000)

In Bild 5.5 ist die normierte Bruchkörperlänge l_{BC} / h nach PREGL für verschiedene Reibungswinkel und Erddruckneigungswinkel für den Sonderfall $\alpha = \beta = 0$ dargestellt. Bei einem Reibungswinkel von $\varphi = 40^\circ$ ergibt sich z.B. mit einer normierten Erddruckneigung von $\delta_p / \varphi = 0$ eine rechnerische Bruchkörperlänge von $l_{BC} \approx 2.2 \cdot h$ und mit $\delta_p / \varphi = -0.50$ eine Länge von $l_{BC} \approx 3.4 \cdot h$.

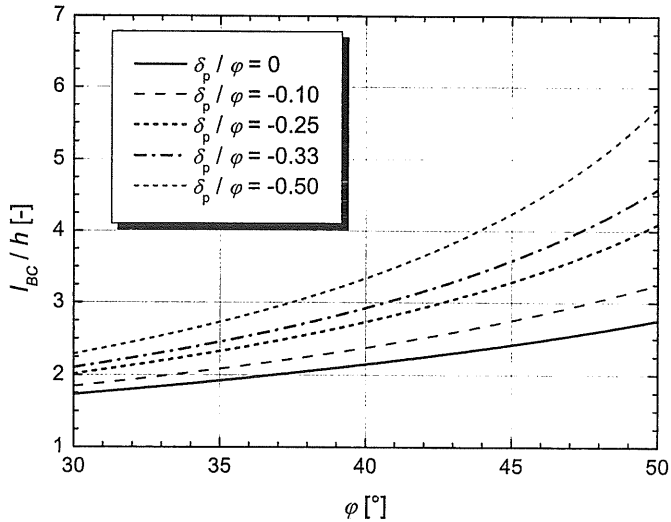


Bild 5.5: Normierte Bruchkörperlänge I_{BC}/h für den Fall $\alpha = \beta = 0$ nach PREGL (2000)

Zur Beschreibung des Mobilisierungsverhaltens der stützenden Erddruckkraft in Abhängigkeit von der Wandbewegung wurden die Versuche mit Hilfe von zwei verschiedenen Ansätzen ausgewertet.

ΔK_{Rn} ergibt sich nach einem hyperbolischen Ansatz mit:

$$\Delta K_{Rn} = \frac{(s/h)}{T1 \cdot (s/h) + T2} \quad (5.6)$$

Dabei wird der bewegungsabhängige Normalanteil der stützenden Erddruckkraft ΔK_{Rn} in Abhängigkeit von der normierten kennzeichnenden Wandbewegung s/h mit Hilfe der Beiwerte $T1$ und $T2$ beschrieben. Diese Beiwerte sind auf der Grundlage der Versuche zu bestimmen.

ΔK_{Rn} ergibt sich in Anlehnung an Gl. (2.31) nach:

$$\Delta K_{Rn} = \frac{2 \cdot \Delta E_n}{\gamma \cdot h^2} = \frac{2 \cdot (E_n - E_{0n})}{\gamma \cdot h^2} \quad (5.7)$$

In Anlehnung an Gl. (2.36) wird der Mobilisierungsgrad des verformungsabhängigen Normalanteils der Erddruckkraft χ_{Rn} vom Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung λ_R wie folgt beschrieben:

$$\chi_{Rn} = \left(1 - (1 - \lambda_R)^b\right)^c \quad (5.8)$$

λ_R nach Gl. (2.19) und χ_{Rn} in Anlehnung an Gl. (2.18) nach

$$\chi_{Rn} = \frac{E_n - E_{0n}}{E_{pn} - E_{0n}} = \frac{K_{Rn} - K_{Rn0}}{K_{Rnp} - K_{Rn0}} \quad (5.9)$$

Die Koeffizienten b und c sind dabei aus den Versuchen zu bestimmen.

5.2 Parallelverschiebung

5.2.1 Passiver Grenzzustand

In Bild 5.6 ist die normierte kennzeichnende Grenzverschiebung s_p/h (siehe Bild 1.1 und Bild 1.2) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D für die eigenen 1g-Versuche ($h=0.56$ m) und die 1g-Versuche von MAO ($h=0.15..0.25$ m) dargestellt. Es sind darin nur die Ergebnisse der Versuche mit einer mitteldichten bis dichten Lagerung aufgeführt, da bei einer lockeren Lagerung die Versuche kein Maximum der Erddruckkraft aufweisen. Von MAO (1993) wurde für diesen Fall der passive Grenzzustand über ein gewähltes Verschiebungsmaß von $s/h \approx 0.08$ für $D=0.35$ ($I_D=0.39$) definiert. Diese festgelegten Werte werden in den folgenden Diagrammen nicht berücksichtigt.

Die eigenen Versuche zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Lagerungsdichte, wobei mit einer mitteldichten Lagerung die Streuung der Versuchswerte deutlich zunimmt. Bei den Ergebnissen nach MAO ist dagegen die Abhängigkeit von der Lagerungsdichte nur schwach ausgeprägt.

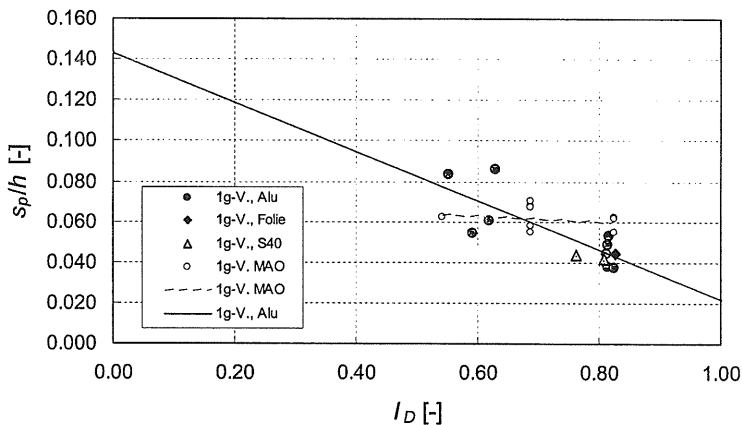


Bild 5.6: Normierte passive Grenzverschiebung bei Variation der Lagerungsdichte

Die Abhängigkeit der normierten Grenzverschiebung s_p/h von der bezogenen Lagerungsdichte I_D lässt sich für die eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche z.B. durch Gl. (5.10) beschreiben.

$$s_p/h = -0.121 \cdot I_D + 0.143 \quad (5.10)$$

Das Bestimmtheitsmaß liegt bei $R^2 = 0.63$ (9 Versuche).

Eine Abhängigkeit der Grenzverschiebung von der Art der Wandoberfläche ist bei den vorliegenden Versuchen mit dichter Lagerung nicht festzustellen.

In Bild 5.7 ist zusätzlich zu den 1g-Versuchsergebnissen die nach den Ansätzen von BESLER (1995 u. 1998) bzw. HORN (1970) – s. Abschnitt 2.2 – ermittelte und die aus den FEM-Berechnungen von ABDEL-RAHMAN (1999) – s. Abschnitt 2.4 – resultierende normierte kennzeichnende Grenzverschiebung eingetragen. Die nach BESLER ermittelte Grenzverschiebung ist in Tabelle 5.1 zusammengestellt. Dabei wurde für beide dargestellte Versuchsreihen jeweils der Mittelwert des gemessenen bezogenen Erddruckneigungswinkels δ_p/φ (Bild 5.16) eingesetzt. In Tabelle 5.2 ist die nach HORN ermittelte Grenzverschiebung aufgeführt. Dabei wurde für beide dargestellte Versuchsreihen jeweils die mittlere Wandhöhe h eingesetzt.

Es ist festzustellen, dass die mit dem Ansatz von BESLER ermittelten normierten Grenzverschiebungen bei mitteldichter bis dichter Lagerung über den in den eigenen 1g-Versuchen gemessenen Werten liegen. Mit den Versuchsergebnissen von MAO ergibt sich erwartungsgemäß eine gute Übereinstimmung, da der Ansatz von BESLER auf diesen Versuchsergebnissen beruht. Der Ansatz von HORN liefert Werte die bei dichter Lagerung nah an den Werten der eigenen 1g-Versuche liegen. Wie bereits im Abschnitt 2.2 erläutert, wurde der Ansatz von HORN für den räumlichen Erdwiderstand aufgestellt und die Abhängigkeit von der Wandbewegungsart und der Erddruckneigung wurde dabei nicht berücksichtigt. Für die Versuche von MAO liefert der Ansatz von HORN hingegen zu kleine Werte. Die Berechnungen von ABDEL-RAHMAN ergeben Grenzverschiebungen die kleiner sind, als sie bei den 1g-Versuchen gemessen wurden. Dies ist insofern plausibel, da bei den Berechnungen die Wandreibung mit $\tan \delta = 0$ angenommen wurde und z.B. aus den Versuchen von MAO bekannt ist, dass die Grenzverschiebung bei negativer Wandreibung größer ist als bei einer Wand ohne

Reibung. Die errechnete Grenzverschiebung für lockere Lagerung ($I_D = 0.20$) erscheint jedoch als zu gering.

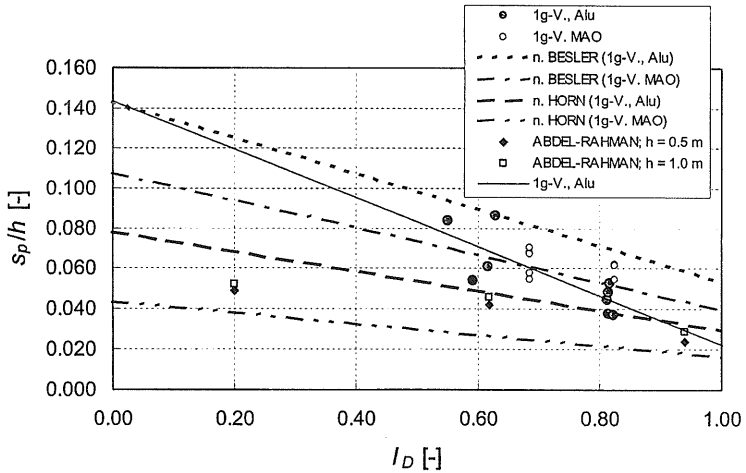


Bild 5.7: Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungsansätzen von BESLER und HORN bei Variation der Lagerungsdichte

Tabelle 5.1: Grenzverschiebung s_p / h nach BESLER (s. Abschnitt 2.2), $f_{s,1} = 1.0$

Versuchsreihe	I_D	δ_p / φ	s_{p0} / h	$f_{b,1}$	$f_{s,1}$	$f_{M,1}$	s_p / h
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1g-V., Alu	0	-0.35	0.0387	1.761	1.57	1.34	0.143
1g-V., Alu	1.0	-0.35	0.0387	0.654	1.57	1.34	0.053
1g-V. MAO	0	-0.55	0.0387	1.761	1.57	1.00	0.107
1g-V. MAO	1.0	-0.55	0.0387	0.654	1.57	1.00	0.040

Tabelle 5.2: Grenzverschiebung s_p / h nach HORN (s. Abschnitt 2.2)

Versuchsreihe	l_D	h	s_p	s_p / h
	[-]	[m]	[cm]	[-]
1g-V., Alu	0	0.560	4.4	0.078
1g-V., Alu	1.0	0.560	1.6	0.029
1g-V. MAO	0	0.175	0.8	0.044
1g-V. MAO	1.0	0.175	0.3	0.016

Die Abhängigkeit der normierten Grenzverschiebung s_p / h von $\tan \varphi'_1$ nach ENGEL lässt sich für die eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche z.B. durch Gl. (5.11) beschreiben (s. Bild 5.8).

$$s_p / h = -0.279 \cdot \tan \varphi'_1 + 0.297 \quad (5.11)$$

Das Bestimmtheitsmaß liegt bei $R^2 = 0.63$ (9 Versuche).

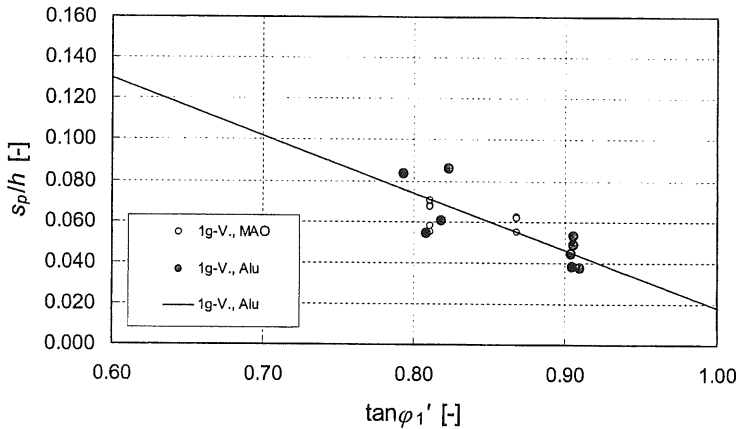


Bild 5.8: Normierte passive Grenzverschiebung bei Variation des Lagerungsdichte

Der Einfluss des Spannungsniveaus auf die normierte kennzeichnende Grenzverschiebung bei dichter Lagerung ist in Bild 5.9 dargestellt. Die bezogene Lagerungsdichte der Zentrifugen-Versuche betrug $I_D = 0.83 \pm 0.03$ (9 Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche) bzw. $I_D = 0.81 \pm 0.02$ (9 Versuche S220). Die ebenfalls eingetragenen eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche besaßen eine Lagerungsdichte von $I_D = 0.82 \pm 0.00$ (5 Versuche).

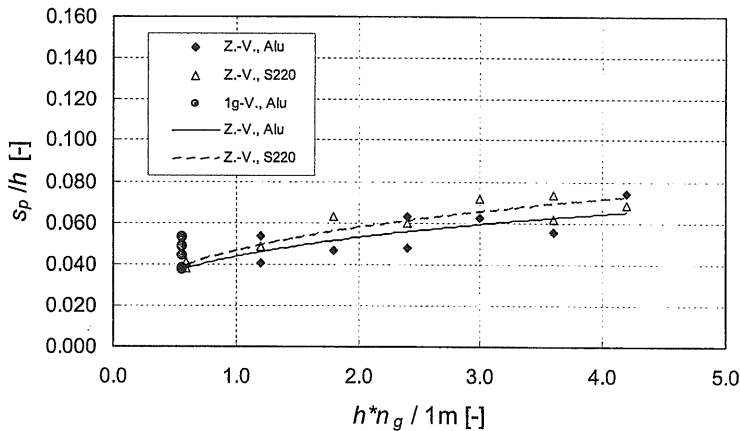


Bild 5.9: Normierte passive Grenzverschiebung für dichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Die Zentrifugen-Versuche (Z.-V.) mit dichter Lagerung, die mit unterschiedlichen Wandoberflächen durchgeführt wurden, zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Grenzverschiebung vom Spannungsniveau. So vergrößert sich die normierte Grenzverschiebung im untersuchten und dargestellten Bereich des Spannungsniveaus von $h \cdot n_g / 1m = 0.60$ bis 4.20 nahezu auf das Doppelte von $s_p / h = 0.04$ auf $s_p / h = 0.07$. Der Zusammenhang zwischen dem Spannungsniveau und der normierten Grenzverschiebung lässt sich z.B. durch eine Potenz-Funktion nach Gl. (5.12) beschreiben.

$$s_p / h = \left(\frac{s_{p0}}{h} \right) \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{\beta_s} \quad (5.12)$$

Der Beiwert s_{p0}/h entspricht dabei der normierten Grenzverschiebung bei einem Spannungsniveau (bzw. äquivalente Wandhöhe) von $h \cdot n_g = 1 \text{ m}$.

Für die Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche (10 Stück) ergibt sich

$$s_p / h = 0.044 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{0.28} ; (R^2 = 0.66) \quad (5.13)$$

und für die Versuche mit Wandoberfläche „Schleifpapier S220“ (17 Stück)

$$s_p / h = 0.047 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{0.30} ; (R^2 = 0.90). \quad (5.14)$$

Bei gleichem Spannungsniveau ($h \cdot n_g / 1 \text{ m} \approx 0.6$) stimmen die Ergebnisse der eigenen 1g-Versuche mit einer Aluminium-Wandoberfläche mit den Ergebnissen der Zentrifugen-Versuche gut überein.

In Bild 5.10 ist zusätzlich zu den Zentrifugen-Versuchsergebnissen die nach den Ansätzen von BESLER (1995 u. 1998) bzw. HORN (1970) – s. Abschnitt 2.2 – ermittelte und die aus den FEM-Berechnungen von ABDEL-RAHMAN (1999) – s. Abschnitt 2.4 – resultierende normierte kennzeichnende Grenzverschiebung eingetragen. Ausgewählte Werte der nach BESLER ermittelten Grenzverschiebung sind in Tabelle 5.3 zusammengestellt. Dabei wurde für beide dargestellte Versuchsreihen jeweils der Mittelwert des gemessenen bezogenen Erddruckneigungswinkels δ_p / φ eingesetzt. In Tabelle 5.4 ist die nach HORN ermittelte Grenzverschiebung aufgeführt.

Es ist erkennbar, dass die mit dem Ansatz von BESLER ermittelten normierten Grenzverschiebungen über den in den Zentrifugen-Versuchen gemessenen Werten liegen. Die Tendenz der Zunahme der Grenzverschiebung mit der Wandhöhe bzw. dem Spannungsniveau wird jedoch gut wiedergegeben. Dies beruht darauf, dass der Exponent im Maßstabsfaktor $f_{M,1}$, der bei der Ermittlung nach BESLER mit $\lambda = 0.25$

angesetzt wurde (s. Abschnitt 2.2), auf den dargestellten Zentrifugen-Versuchen beruht. Der Ansatz von HORN liefert nur beim kleinsten untersuchten Spannungsniveau Werte, die nahe an den Werten der Versuche liegen. Die Tendenz der Zunahme der Grenzverschiebung mit der Wandhöhe bzw. dem Spannungsniveau bei den Versuchen wird damit jedoch nicht richtig wiedergegeben. Die Berechnungen von ABDEL-RAHMAN ergeben Grenzverschiebungen die kleiner sind, als sie bei den Zentrifugen-Versuchen gemessen wurden. Die Tendenz der Zunahme der berechneten Grenzverschiebungen (s. Bild 5.10) lässt sich durch die Potenzfunktion nach Gl. (5.12) beschreiben. Für die berechneten Werte ergibt sich der Exponent bei $I_D = 0.94$ zu $\beta_s = 0.25$ und bei $I_D = 0.62$ zu $\beta_s = 0.10$. Das Anwachsen der Grenzverschiebung mit zunehmendem Spannungsniveau ist somit etwas geringer, als es in den Zentrifugen-Versuchen gemessen wurde.

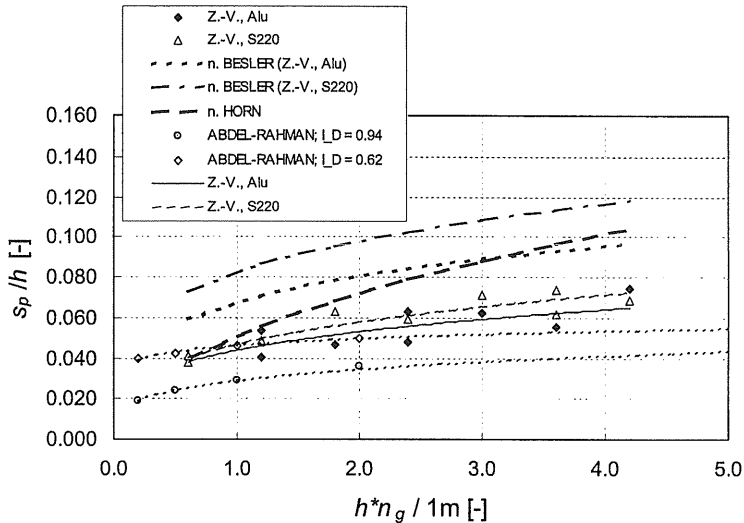


Bild 5.10: Normierte passive Grenzverschiebung für dichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Tabelle 5.3: Grenzverschiebung s_p / h nach BESLER (s. Abschnitt 2.2), $f_{s,1} = 1.0$

Versuchsreihe	$h_M \cdot n_g$	δ_p / φ	s_{p0} / h	$f_{b,1}$	$f_{s,1}$	$f_{M,1}$	s_p / h
	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Z.-V., Alu	0.60	-0.14	0.0387	0.853	1.319	1.36	0.059
Z.-V., Alu	4.20	-0.14	0.0387	0.853	1.319	2.21	0.096
Z.-V., S220	0.60	-0.34	0.0387	0.875	1.57	1.36	0.072
Z.-V., S220	4.20	-0.34	0.0387	0.875	1.57	2.21	0.118

Tabelle 5.4: Grenzverschiebung s_p / h nach HORN (s. Abschnitt 2.2)

Versuchsreihe	l_D	$h_M \cdot n_g$	s_p	s_p / h
	[-]	[m]	[cm]	[-]
Z.-V., Alu	0.82	0.60	2.4	0.039
Z.-V., Alu	0.82	4.20	43.6	0.104

Der Einfluss des Spannungsniveaus auf die normierte kennzeichnende Grenzverschiebung bei mitteldichter Lagerung ist in Bild 5.11 dargestellt. Die bezogene Lagerungsdichte der Zentrifugen-Versuche betrug $l_D = 0.52 \pm 0.01$ (7 Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche), $l_D = 0.51 \pm 0.02$ (5 Versuche S220) bzw. $l_D = 0.52 \pm 0.02$ (6 Versuche S40).

Die Zentrifugen-Versuche (Z.-V.) mit mitteldichter Lagerung des Sandes zeigen, wie die Versuche mit dichter Lagerung, eine Abhängigkeit der Grenzverschiebung vom Spannungsniveau. Beschreibt man den Zusammenhang zwischen dem Spannungsniveau und der normierten Grenzverschiebung durch eine Potenz-Funktion nach Gl. (5.12), so ergibt sich

für die Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche

$$s_p / h = 0.091 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{0.08} ; (R^2 = 0.24), \quad (5.15)$$

für die Versuche mit Wandoberfläche „Schleifpapier S220“

$$s_p / h = 0.066 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{0.11} ; (R^2 = 0.36), \quad (5.16)$$

und für die Versuche mit Wandoberfläche „Schleifpapier S40“

$$s_p / h = 0.072 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{0.14} ; (R^2 = 0.46). \quad (5.17)$$

Die Exponenten zeigen, dass der Einfluss des Spannungsniveaus auf die Grenzverschiebung geringer als bei dichter Lagerung ist. Jedoch nimmt auch die Streuung der Versuchswerte gegenüber dichter Lagerung zu, wie die Bestimmtheitsmaße zeigen.

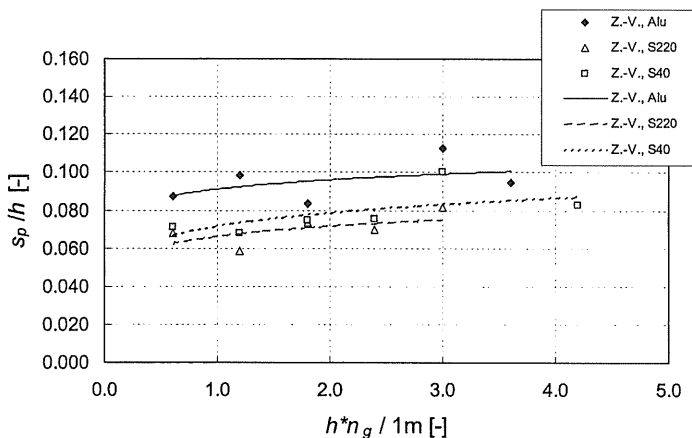


Bild 5.11: Normierte passive Grenzverschiebung für mitteldichtedichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Bild 5.12 zeigt die normierte passive Erddruckkraft K_{Rnp} (Normalanteil) in Abhängigkeit vom Reibungswinkel für die eigenen 1g-Versuche und die 1g-Versuche von MAO. Der Reibungswinkel φ_1' bezeichnet dabei den nach dem Ansatz von ENGEL (siehe Abschnitt 3.3.2 und Anhang A.1) ermittelten Reibungs- bzw. Scherwinkel. Bei der Parallelverschiebung der senkrechten Wand ist der Normalanteil K_{Rnp} gleich dem Horizontalanteil K_{Rhp} der passiven Erddruckkraft. Die deutliche Abhängigkeit der passiven Erddruckkraft von der Scherfestigkeit bzw. Lagerungsdichte ist in Bild 5.12 zu erkennen.

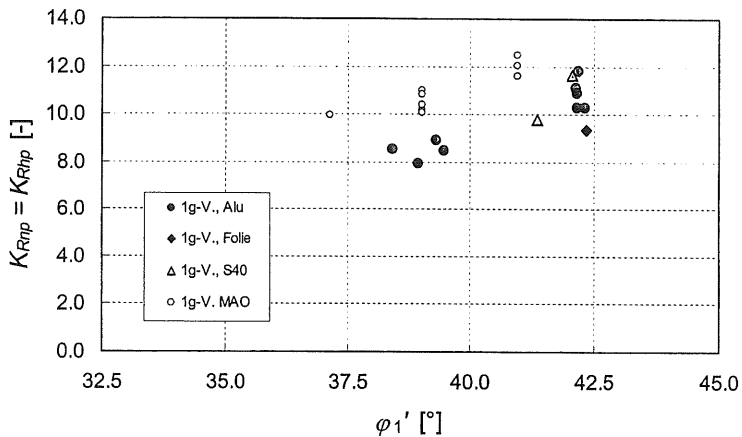


Bild 5.12: Normierte passive Erddruckkraft bei Variation der Lagerungsdichte

Wie im Abschnitt 2.1 erläutert wurde, enthalten die Messwerte bei MAO durch die „Nullsetzung“ vor dem Start der Wandbewegung nicht die Erddruckanteile im Ruhezustand. Die so ermittelte normierte Erddruckkraft wäre somit nach Gl. (2.3) als ΔK_{Rn} , bzw. im passiven Grenzzustand als ΔK_{Rnp} zu bezeichnen. Im Grenzzustand wird der sich dadurch ergebende Fehler jedoch vernachlässigbar ($K_{Rnp} \approx \Delta K_{Rnp}$), so dass im Folgenden auf eine Unterscheidung verzichtet wird. Die deutliche Abhängigkeit der normierten passiven Erddruckkraft von der Lagerungsdichte ist erkennbar.

Im Bild 5.13 ist die normierte passive Erddruckkraft K_{Rnp} (Normalanteil) für dichte Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass die passive Erddruckkraft mit zunehmendem Spannungsniveau leicht abnimmt. Zur Beschreibung dieses Verhaltens wurde ein Potenz-Ansatz nach Gl. (5.18) gewählt.

$$K_{Rnp} = K_{Rnp,0} \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{\beta_K} \quad (5.18)$$

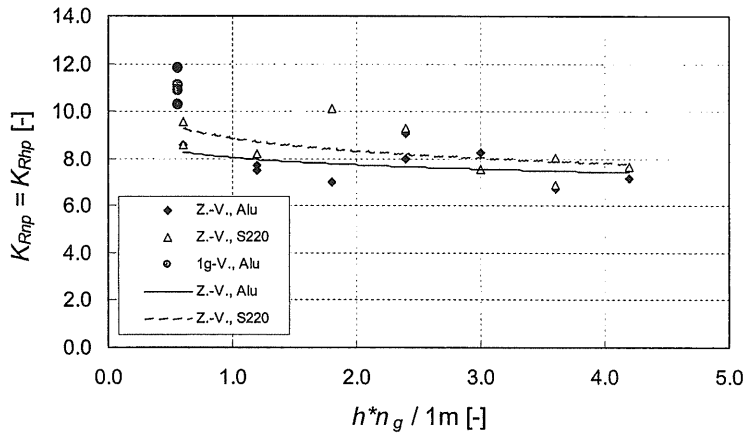


Bild 5.13: Normierte passive Erddruckkraft für dichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Für die dargestellten Zentrifugen-Versuche mit dichter Lagerung und Aluminium-Wandoberfläche (9 Stück) ergibt sich

$$K_{Rnp} = 8.05 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{-0.06} ; (R^2 = 0.13) \quad (5.19)$$

und für die Versuche mit Wandoberfläche „Schleifpapier S220“ (9 Stück)

$$K_{Rnp} = 8.88 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1 \text{ m}} \right)^{-0.09} ; (R^2 = 0.32). \quad (5.20)$$

Das geringe Bestimmtheitsmaß zeigt, dass der funktionale Zusammenhang nur schwach ausgebildet ist. Die Versuchsergebnisse ließen sich auch mit einem vom Spannungsniveau unabhängigen Mittelwert beschreiben.

Bei einer raueren Wandoberfläche (S220) werden etwas größere passive Erddruckkräfte erreicht als mit glatterer Oberfläche (Alu). Bei einem gleichen Spannungsniveau von $h \cdot n_g \approx 0.6 \text{ m}$ erreichen die passiven Erddruckkräfte bei den eigenen 1g-Versuchen mit Aluminium-Wandoberfläche etwas höhere Beträge als bei den Zentrifugen-Versuchen. Bei den 1g-Versuchen wurde allerdings auch ein größere negative Erddruckneigung an der Wand mobilisiert (s. Bild 5.17).

In Bild 5.14 ist die normierte passive Erddruckkraft K_{Rnp} (Normalanteil) für mitteldichte Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Das Diagramm zeigt, wie bei dichter Lagerung, dass die passive Erddruckkraft mit zunehmendem Spannungsniveau leicht abnimmt.

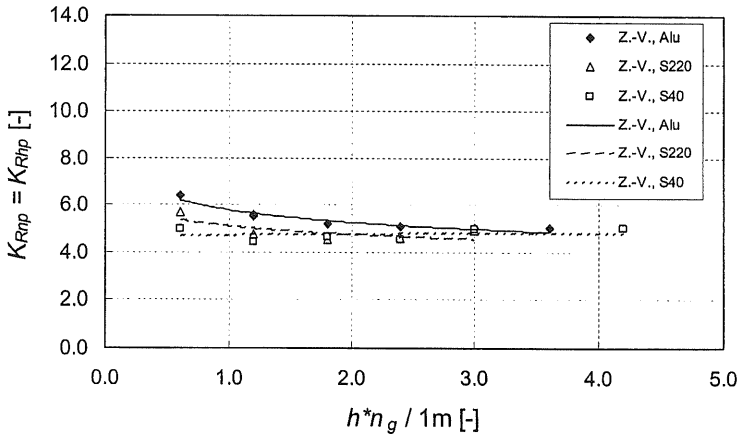


Bild 5.14: Normierte passive Erddruckkraft für mitteldichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Für die dargestellten Zentrifugen-Versuche mit dichter Lagerung und Aluminium-Wandoberfläche ergibt sich nach Gl. (5.18)

$$K_{Rnp} = 5.78 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1\text{m}} \right)^{-0.14} ; (R^2 = 0.92) \quad (5.21)$$

und für die Versuche mit Wandoberfläche „Schleifpapier S220“

$$K_{Rnp} = 5.11 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1\text{m}} \right)^{-0.10} ; (R^2 = 0.52). \quad (5.22)$$

Bei den Versuchsergebnissen mit Wandoberfläche „Schleifpapier S40“ ist keine Abhängigkeit vom Spannungsniveau mehr feststellbar.

In Bild 5.15 ist der im Grenzzustand mobilisierte Reibungsbeiwert $\tan \delta_{Rp}$ der Erdruckkraft dargestellt. Wie im Abschnitt 2.1 erläutert wurde, enthalten die Messwerte bei MAO durch die „Nullsetzung“ vor dem Start der Wandbewegung nicht die Erddruckanteile im Ruhezustand. Die so ermittelte resultierende Erddruckneigung wurde deshalb nach GL. (2.4) als $\tan \delta^*_R$ gekennzeichnet. Im Grenzzustand wird der sich dadurch ergebende Fehler jedoch vernachlässigbar ($\tan \delta^*_{Rp} \approx \tan \delta_{Rp}$), so dass in den vorliegenden Darstellungen auf eine Unterscheidung verzichtet wird.

Die Abhängigkeit des im Grenzzustand mobilisierten resultierenden Reibungsbeiwertes $\tan \delta_{Rp}$ von $\tan \varphi'_1$ lässt sich für die eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche z.B. mit

$$\tan \delta_{Rp} = 0.224 \cdot \tan \varphi'_1 - 0.424 \quad (5.23)$$

und für die Versuche von MAO mit

$$\tan \delta_{Rp} = 0.224 \cdot \tan \varphi'_1 - 0.577 \quad (5.24)$$

angegeben. Diese Abhängigkeit ist allerdings nur schwach ausgeprägt. Der Mittelwert liegt bei den eigenen 1g-Versuchen (Alu) bei $\tan \delta_{Rp} \approx -0.24$ und bei den Versuchen von MAO bei $\tan \delta_{Rp} \approx -0.39$. Ein Einfluss der Art der Wandoberfläche ist bei den eigenen 1g-Versuchen nicht feststellbar.

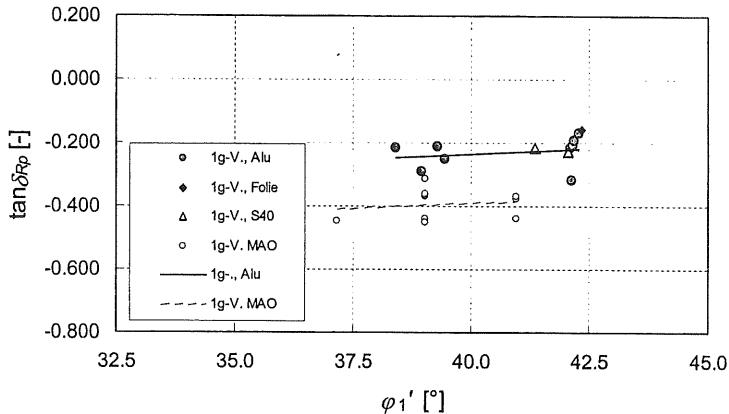


Bild 5.15: Neigung der Erddruckkraft bei Variation der Lagerungsdichte

Bezieht man den resultierenden Neigungswinkel δ_{Rp} auf den entsprechenden Reibungswinkel ϕ_1' , so ergeben sich bei den eigenen 1g-Versuchen Werte zwischen $\delta_{Rp} / \phi_1' \approx -0.20 \dots -0.42$ und bei den Versuchen von MAO von $\delta_{Rp} / \phi_1' \approx -0.45 \dots -0.65$ (Bild 5.16).

In Bild 5.17 ist der im Grenzzustand mobilisierte Reibungsbeiwert $\tan \delta_{Rp}$ der Erddruckkraft für dichte Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass $\tan \delta_{Rp}$ nicht wesentlich vom Spannungsniveau beeinflusst wird. Bei den Zentrifugen-Versuchen mit Aluminium-Wandoberfläche liegt der resultierende Reibungsbeiwert im Mittel bei $\tan \delta_{Rp} = -0.086 \pm 0.043$ und bei den Versuchen mit der Oberfläche S220 im Mittel bei $\tan \delta_{Rp} = -0.180 \pm 0.082$. Wie Bild 5.17 zeigt, werden bei den 1g-Versuchen mit Aluminium-Wandoberfläche und den Zentrifugen-Versuchen mit „Schleifpapier S220“ im Grenzzustand nahezu gleich große Erddruckneigungen $\tan \delta_{Rp}$ erreicht.

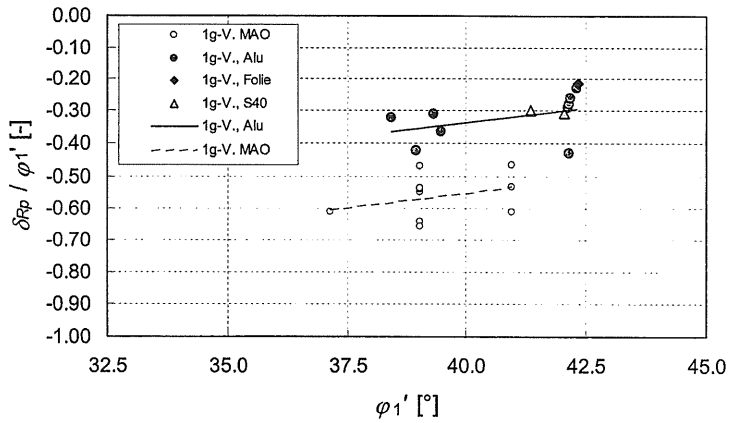


Bild 5.16: Normierter Neigungswinkel der Erddruckkraft bei Variation der Lagerungsdichte

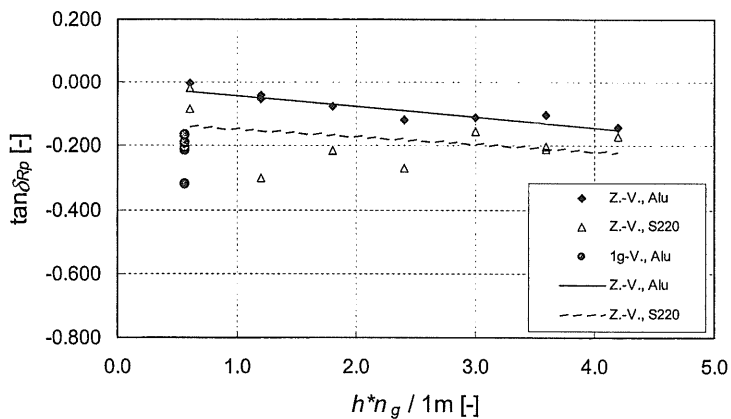


Bild 5.17: Neigung der Erddruckkraft bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

Im Bild 5.18 ist der im Grenzzustand mobilisierte Reibungsbeiwert $\tan \delta_{Rp}$ der Erddruckkraft für mitteldichte Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass $\tan \delta_{Rp}$ analog dichter Lagerung nicht wesentlich vom Spannungsniveau beeinflusst wird. Bei mitteldichter Lagerung sind keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Wandoberflächen mehr feststellbar.

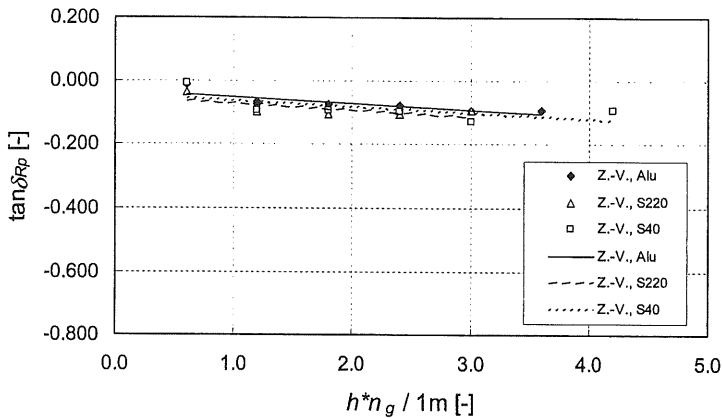


Bild 5.18: Neigung der Erddruckkraft bei Variation des Spannungsniveaus für mitteldichte Lagerung

Im Bild 5.19 sind Erddruckbeiwerte K_{pgh} nach dem Verfahren von PREGL in Abhängigkeit von dem Reibungswinkel φ_1 für die 1g-Versuche aufgetragen. Die als Punkte eingetragenen Beiwerte wurden für die einzelnen Erddruckversuche ermittelt. Dabei wurde neben dem Reibungswinkel φ_1 der im jeweiligen Versuch im Grenzzustand ermittelte resultierende Erddruckneigungswinkel $\delta_p = \delta_{Rp}$ angesetzt. Der so ermittelte Erddruckbeiwert wird im Folgenden mit $K_{pgh,1}$ bezeichnet. Weiterhin wurden die Erddruckbeiwerte für den gesamten dargestellten Bereich von $\varphi_1' = 32.5^\circ$ bis $\varphi_1' = 45^\circ$ ermittelt und als Kurven eingetragen. Der Erddruckneigungswinkel δ_p wurde bei den Beiwerten (1a) nach Gl. (5.23) und bei den Beiwerten (2a) nach Gl. (5.24) ermittelt. Bei den Beiwerten (1b) wurde der Mittelwert für die eigenen 1g-Versuche (Alu) mit

$\tan \delta_{Rp} \approx -0.24 \Rightarrow \delta_{Rp} = \delta_p = -13.5^\circ$ und bei den Beiwerten (2b) der Mittelwert für die Versuche von MAO mit $\tan \delta_{Rp} \approx -0.39 \Rightarrow \delta_{Rp} = \delta_p = -21.3^\circ$ angesetzt. Diese zwei verschiedenen Ansätze des resultierenden Erddruckneigungswinkels führen zu keinem wesentlichen Unterschied beim Erddruckbeiwert.

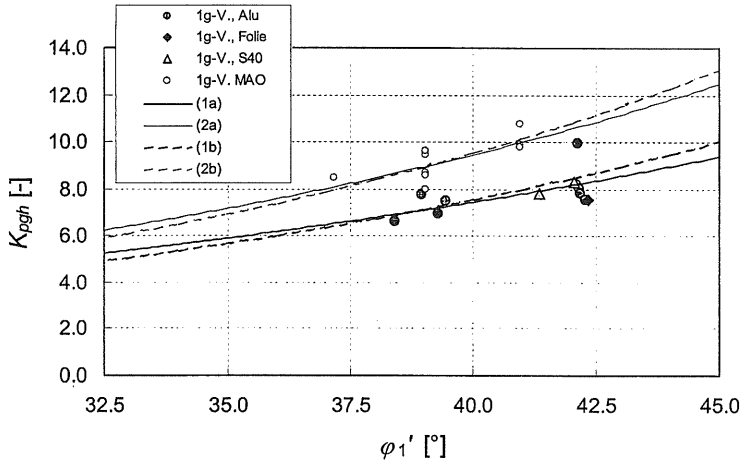


Bild 5.19: Erddruckbeiwerte K_{pgh} bei Variation der Lagerungsdichte

In Bild 5.20 sind die Verhältniszahlen von gemessener normierter Erddruckkraft K_{Rhp} (Bild 5.12) zum Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ (Punkte in Bild 5.19) in Abhängigkeit vom Reibungswinkel für die 1g-Versuche dargestellt. Im untersuchten Bereich ist die gemessene Erddruckkraft bei allen Versuchen größer als die rechnerische passive Erddruckkraft.

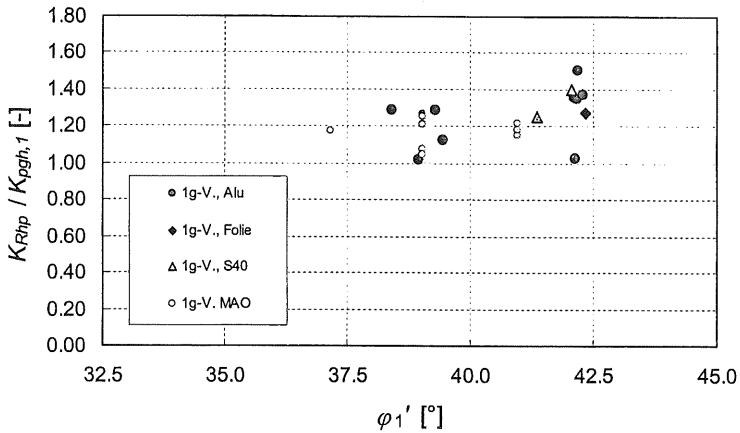


Bild 5.20: Verhältnis aus gemessener passiver normierter Erddruckkraft K_{Rhp} (Horizontalanteil) und Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ bei Variation der Lagerungsdichte

Im Bild 5.21 sind die Erddruckbeiwerte $K_{pgh,1}$ für die Versuche mit dichter Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Analog Bild 5.19 wurde bei der Ermittlung für den Erddruckneigungswinkel der im jeweiligen Versuch im Grenzzustand ermittelte resultierende Erddruckneigungswinkel $\delta_p = \delta_{Rp}$ angesetzt. Da der hierbei angesetzte Reibungswinkel ϕ_1 für die jeweilige Lagerungsdichte konstant ist, ist auch der errechnete Erddruckbeiwert nur vom angesetzten Erddruckneigungswinkel abhängig. Da wiederum dieser Neigungswinkel bei den Zentrifugen-Versuchen eine leichte Abnahme mit Anwachsen des Spannungsniveaus aufweist (Bild 5.17), nimmt der Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ mit steigendem Spannungsniveau zu.

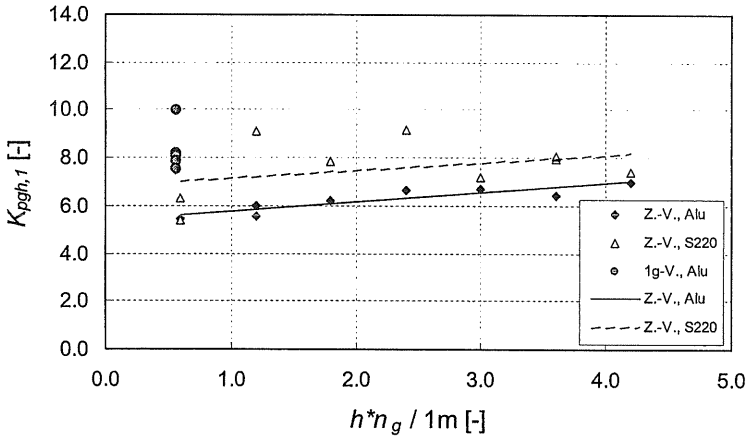


Bild 5.21: Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

Das Bild 5.22 zeigt analog Bild 5.20 die Verhältniswerte von gemessener normierter Erddruckkraft K_{Rhp} (Bild 5.13) und dem Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ (Bild 5.21) in Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Im untersuchten Spannungsbereich ist die gemessene Erddruckkraft bei allen Versuchen größer als die mit $K_{pgh,1}$ ermittelbare passive Erddruckkraft. Der Verhältniswert nimmt jedoch mit zunehmendem Spannungsniveau deutlich ab.

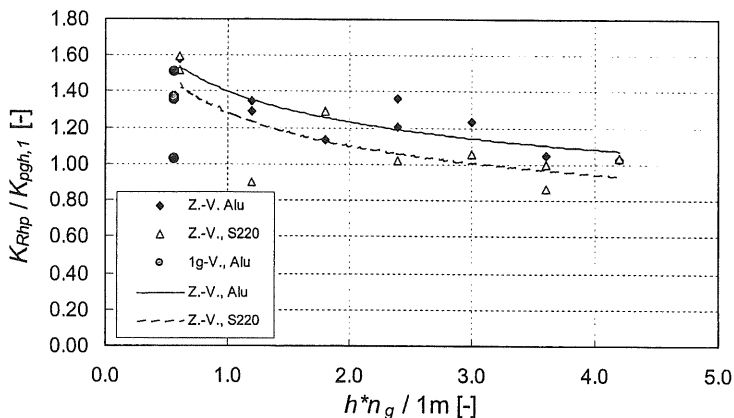


Bild 5.22: Verhältnis von gemessener normierter Erddruckkraft K_{Rhp} und Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

In Bild 5.23 ist die normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft im Grenzzustand in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D für die 1g-Versuche dargestellt. Es ist zu sehen, dass die im Grenzzustand mobilisierte Angriffshöhe – und damit auch die Erddruckverteilung über die Wandhöhe – weitgehend unabhängig von der Lagerungsdichte bzw. dem Reibungswinkel φ_1 ist. Dies ist sowohl bei den eigenen 1g-Versuchen (im Mittel $z_{Rp} \approx 0.65 \cdot h$), als auch bei den Versuchen von MAO (im Mittel $z_{Rp} \approx 0.67 \cdot h$) festzustellen. Eine Abhängigkeit der Angriffshöhe von der Art der Wandoberfläche deutet sich allenfalls schwach an – die Resultierende bei einer glatten Wandoberfläche (Folie) liegt etwas tiefer als bei einer raueren Oberfläche (Aluminium).

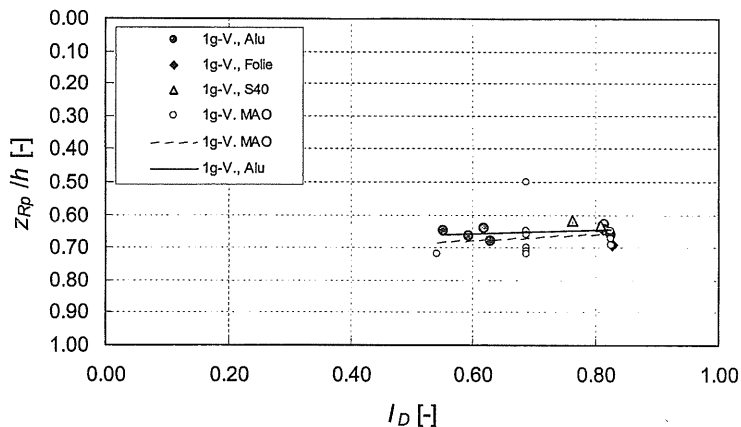


Bild 5.23: Normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft bei Variation der Lagerungsdichte

Bild 5.24 zeigt die normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft im Grenzzustand für die Versuche mit dichter Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Eine Abhängigkeit der Angriffshöhe vom Spannungsniveau ist nicht feststellbar. Es zeigt sich eher ein Einfluss der Art der Wandoberfläche auf die Angriffshöhe und damit die Erddruckverteilung. Die passive Erddruckkraft liegt bei einer raueren Wandoberfläche (z.B. Schleifpapier S220) mit $z_R/h = 0.57 \pm 0.02$ höher als bei einer glatteren Oberfläche (Aluminium) mit $z_R/h = 0.61 \pm 0.02$. Es zeigt sich weiterhin, dass die Ergebnisse der eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Oberfläche mit den Ergebnissen der Zentrifugen-Versuche nahezu übereinstimmen.

Für die Zentrifugen-Versuche mit mitteldichter Lagerung ist die normierte Angriffshöhe in Abhängigkeit vom Spannungsniveau in Bild 5.25 dargestellt. Gegenüber der dichten Lagerung sind hier die Unterschiede zwischen den verschiedenen Wandoberflächen geringer.

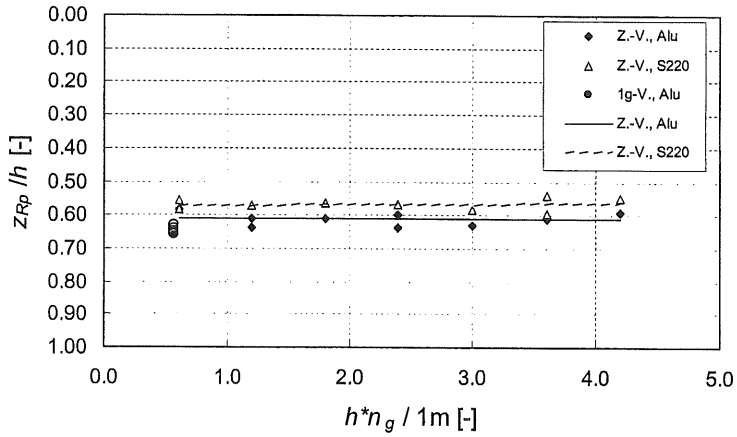


Bild 5.24: Normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

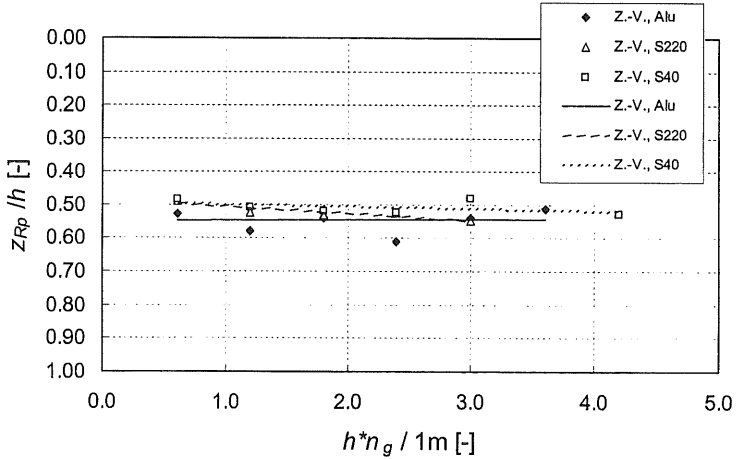


Bild 5.25: Normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft bei Variation des Spannungsniveaus für mitteldichte Lagerung

In Bild 5.26 ist die an der Sandoberfläche gemessene Bruchkörperlänge l_B , auf die Wandhöhe h bezogen (siehe Bild 5.4), in Abhängigkeit vom Reibungswinkel φ_1' für die 1g-Versuche dargestellt. In diesem Diagramm sind auch die Ergebnisse der Versuche mit einer lockeren bis mitteldichten Lagerung erfasst, die kein Maximum der Erddruckkraft aufweisen. Die Bruchkörperlänge ist weitgehend unabhängig von der Lagerungsdichte – sowohl bei den eigenen Versuchen als auch bei den Versuchen von MAO. Bei den eigenen 1g-Versuchen mit einer Aluminium-Wandoberfläche liegt die normierte Länge bei $l_B/h = 2.54 \pm 0.18$ (14 Versuche) und bei den Versuchen von MAO bei $l_B/h = 2.70 \pm 0.18$ (12 Versuche).

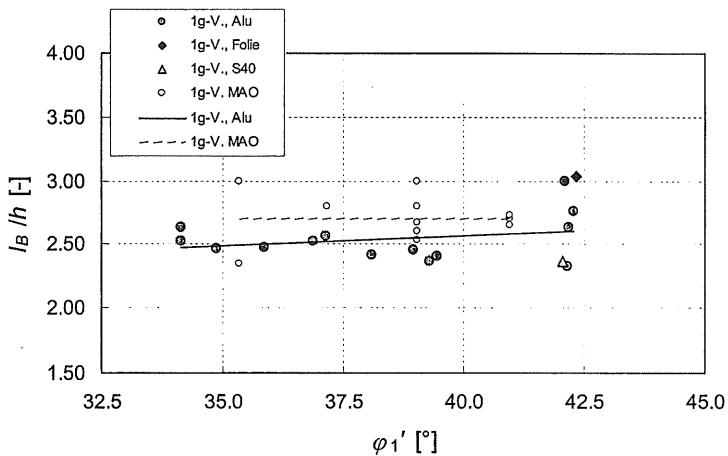


Bild 5.26: Normierte gemessene Bruchkörperlänge bei Variation der Lagerungsdichte

Bild 5.27 zeigt die Verhältniszerte von gemessener Bruchkörperlänge l_B zur rechnerischen Bruchkörperlänge $l_{BC,1}$ nach PREGL in Abhängigkeit vom Reibungswinkel für die 1g-Versuche. Analog zur Berechnung des Erddruckbeiwertes $K_{pg,h,1}$ wurde bei der Ermittlung der Bruchkörperlänge $l_{BC,1}$ der Reibungswinkel φ_1' und der im jeweiligen

Versuch im Grenzzustand ermittelte resultierende Erddruckneigungswinkel $\delta_\rho = \delta_{Rp}$ angesetzt.

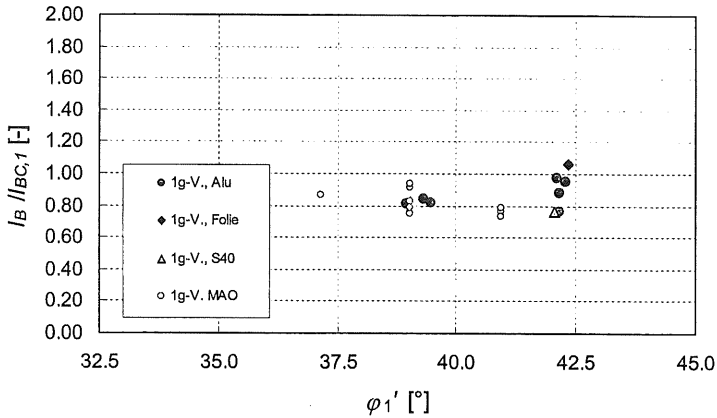


Bild 5.27: Verhältnis der gemessenen Bruchkörperlänge I_B zur rechnerischen Bruchkörperlänge $I_{BC,1}$, bei Variation der Lagerungsdichte

Eine eindeutige Abhängigkeit des Verhältnisses vom Reibungswinkel ϕ_1' bzw. der Lagerungsdichte ist nicht festzustellen. Das Verhältnis erreicht eine Größe von $I_B / I_{BC,1} \approx 0.70 \dots 1.00$. Der sich im Versuch ergebende Bruchkörper ist somit meist kürzer als der rechnerische Bruchkörper.

Eine signifikante Abhängigkeit der normierten gemessenen Bruchkörperlänge I_B / h (Bild 5.28) bzw. des Verhältnisses $I_B / I_{BC,1}$ (Bild 5.29) vom Spannungsniveau ist nicht festzustellen. Es zeigt sich eher ein Einfluss der Art der Wandoberfläche auf die Bruchkörperlänge I_B . Bei glatterer Oberfläche der Wand (Alu) ist der Bruchkörper länger als bei einer rauerer Oberfläche (S220).

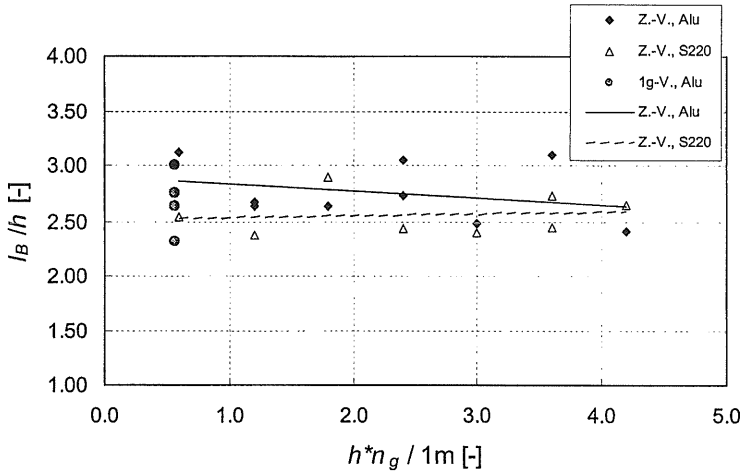


Bild 5.28: Normierte gemessene Bruchkörperlänge bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

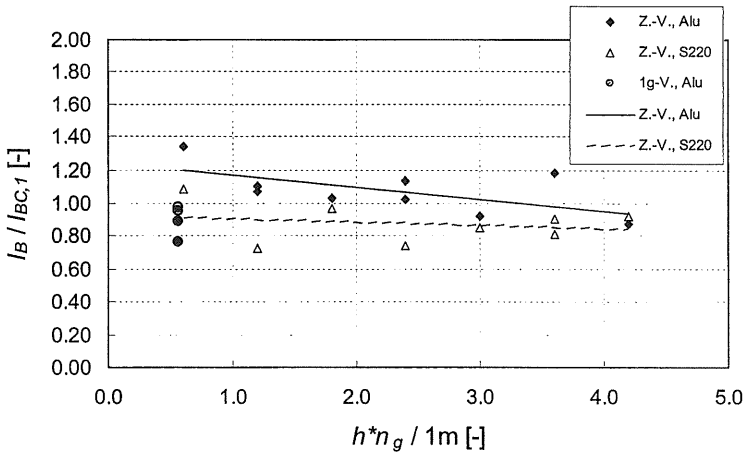


Bild 5.29: Verhältnis der gemessenen Bruchkörperlänge l_B zur rechnerischen Bruchkörperlänge $l_{BC,1}$ bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

5.2.2 Mobilisierung der Erddruckkraft

In Bild 5.30 sind die aus den 1g-Versuchen ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ (siehe Anhang D.1 und B.1) der Gl. (5.6) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte aufgetragen. Beide Beiwerte zeigen dabei eine deutliche Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Die Ergebnisse aus den Versuchen von MAO stimmen bei einer Lagerungsdichte von $I_D \approx 0.82$ mit den Ergebnissen der eigenen 1g-Versuchen nahezu überein, obwohl bei den zwei Versuchsreihen die Randbedingungen verschieden waren. Die Art der Wandoberfläche zeigt bei den vorliegenden Ergebnissen für eine dichte Lagerung dagegen keinen ausgeprägten Einfluss.

Die Abhängigkeit der Beiwerte von der bezogenen Lagerungsdichte I_D lässt sich für die eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche z.B. mit

$$T1 = 0.173 \cdot e^{-1.37 \cdot I_D}; (R^2 = 0.88) \quad (5.25)$$

und

$$T2 = 0.013 \cdot e^{-2.53 \cdot I_D}; (R^2 = 0.90) \quad (5.26)$$

angeben. Die Beschreibung des Zusammenhangs mit Hilfe einer Exponentialfunktion in der obigen Form hat den Vorteil, dass z.B. der Beiwert $T2$ für alle Lagerungsdichten definiert ist und immer Werte größer Null annimmt, und somit die Mobilisierungsfunktion nach Gl. (5.6) auch bei $s/h = 0$ definiert ist.

Die Abhängigkeit der Beiwerte vom Tangens des Reibungswinkels kann für die eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche z.B. auch mit

$$T1 = 1.498 \cdot e^{-3.64 \cdot \tan \varphi'}; (R^2 = 0.87) \quad (5.27)$$

und

$$T2 = 0.808 \cdot e^{-6.85 \cdot \tan \varphi'}; (R^2 = 0.92) \quad (5.28)$$

angegeben werden.

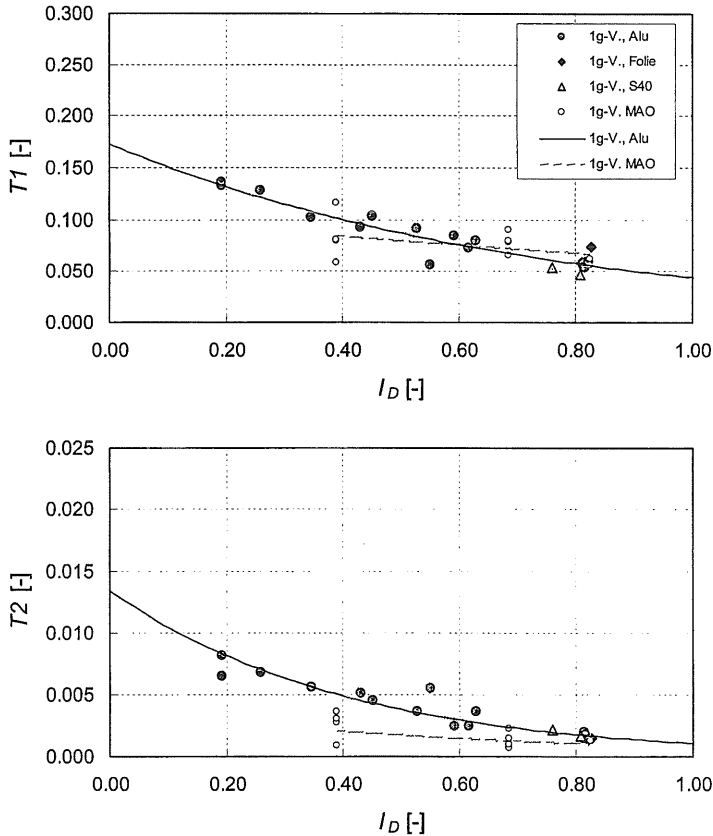


Bild 5.30: Beiwerte $T1$ und $T2$ für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.6) bei Variation der Lagerungsdichte

Bei Aluminium-Wandoberfläche und einer äquivalenten Wandhöhe von $h_E \approx 0.6$ m erhält man für eine bezogene Lagerungsdichte von $I_D = 0.30$ danach $T1 = 0.115$ und $T2 = 0.006$ und für $I_D = 0.80$ ergibt sich $T1 = 0.058$ und $T2 = 0.002$. Die sich damit ergebenden Mobilisierungsfunktionen sind in Bild 5.31 dargestellt.

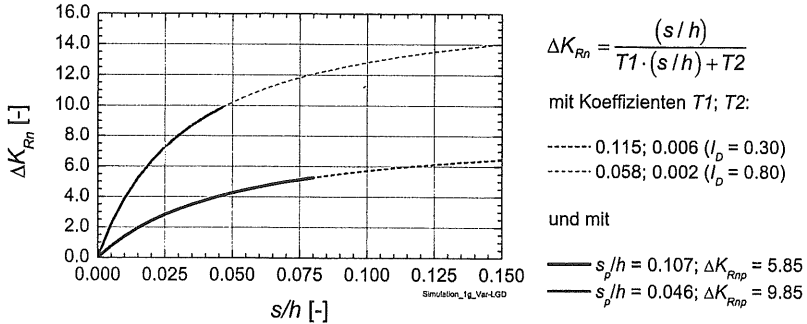


Bild 5.31: Beispiel für Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.6) mit den ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ für 2 Lagerungsdichten, $h_E \approx 0.6$ m

In Bild 5.32 sind die aus den Zentrifugen-Versuchen mit dichter Lagerung nach Gl. (5.6) ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ (siehe Anhang F.1) in Abhängigkeit vom Spannungsniveau aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass nur der Beiwert $T2$ vom Spannungsniveau abhängig ist, der Beiwert $T1$ dagegen nicht. Der Beiwert liegt im Mittel bei $T1 = 0.075 \pm 0.009$ (Alu) bzw. $T1 = 0.059 \pm 0.016$ (S220).

Die Abhängigkeit des Beiwertes $T2$ lässt sich z.B. mit

$$T2 = 0.0007 \cdot (h \cdot n_g / 1\text{m}) + 0.0010; (\text{Alu}, R^2 = 0.71) \quad (5.29)$$

bzw.

$$T2 = 0.0009 \cdot (h \cdot n_g / 1\text{m}) + 0.0018; (\text{S220}, R^2 = 0.61) \quad (5.30)$$

beschreiben. Die Art der Wandoberfläche hat somit nur einen geringen Einfluss.

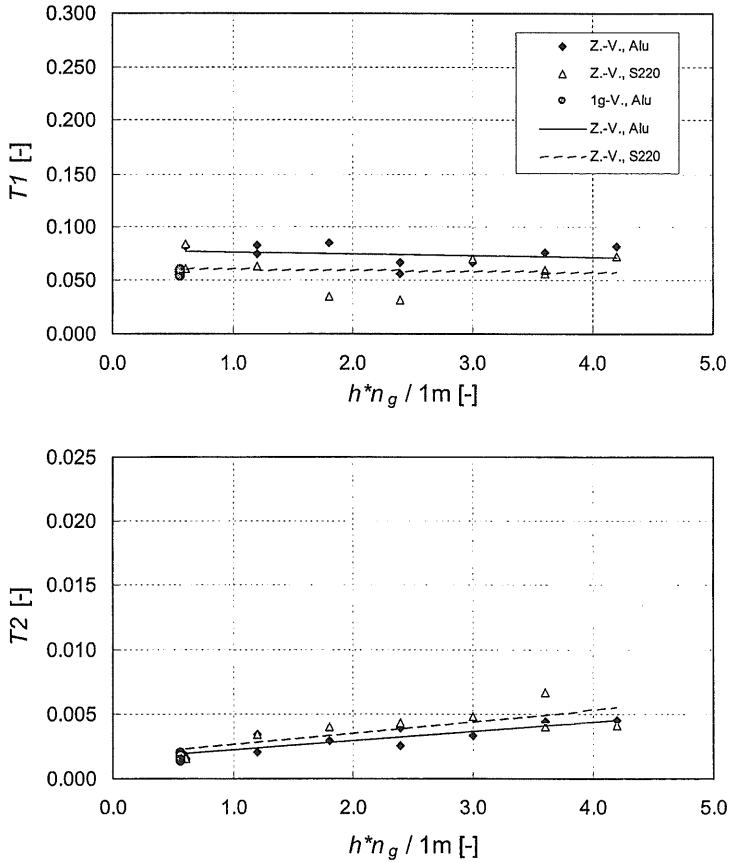


Bild 5.32: Beiwerte $T1$ und $T2$ für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.6) bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

Bei einer äquivalenten Wandhöhe von $h_E = 0.6m$ erhält man danach (Aluminium-Wandoberfläche, dichte Lagerung) $T1 = 0.075$ und $T2 = 0.001$ und für eine äquivalente Wandhöhe von $h_E = 3.6m$ ergibt sich $T1 = 0.075$ und $T2 = 0.004$. Die sich damit ergebenden Mobilisierungsfunktionen sind im Bild 5.33 dargestellt. Dabei wurde der passive Grenzwert über die passive Grenzverschiebung ermittelt (s. Bild 5.9).

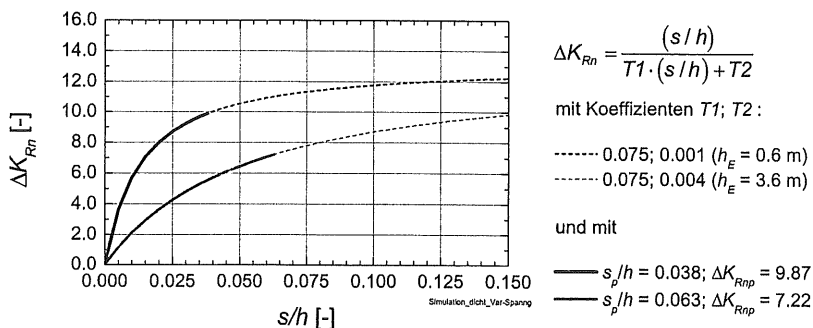


Bild 5.33: Beispiel für Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.6) mit den ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ für 2 verschiedene Spannungsniveaus bei dichter Lagerung

Bild 5.34 zeigt die aus den einzelnen 1g-Versuchen ermittelten Koeffizienten b und c der Gl. (5.8) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte (s. Anhang D.1 bzw. Anhang B.1). Im Gegensatz zur Auswertung mit dem hyperbolischen Mobilisierungsansatz (Bild 5.30) werden hier nur die Versuche verwendet, die ein eindeutiges Maximum (Grenzwert) in der Erddruckkraft aufweisen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Beiwerte b und c keine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte I_D aufweisen und die Werte aus den Versuchen von MAO besonders bei mitteldichter Lagerung stärker streuen. Für die eigenen 9 Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche liegen die Werte nach Bild 5.34 im Mittel bei $b = 1.53 \pm 0.18$ und $c = 0.74 \pm 0.03$. Die sich mit diesen Beiwerten für die eigenen 1g-Versuche ergebenden Mobilisierungskurven sind in Bild 5.35 dargestellt. Der Versuch mit Folien-Wandoberfläche zeigt einen etwas steileren Anstieg als die Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche und die Versuche mit Oberfläche „Schleifpapier S40“ einen etwas flacheren Anstieg. Bild 5.36 zeigt die aus den Mobilisierungskurven für die Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche abgeleitete „mittlere“ Mobilisierungskurve, die sich bei einem konstanten Beiwert von $c = 0.70$ mit $b = 1.43$ beschreiben lässt. Die ebenfalls eingetragene „obere“ und „untere“ Mobilisierungskurve wurde aus der Standardabweichung „abgeleitet“.

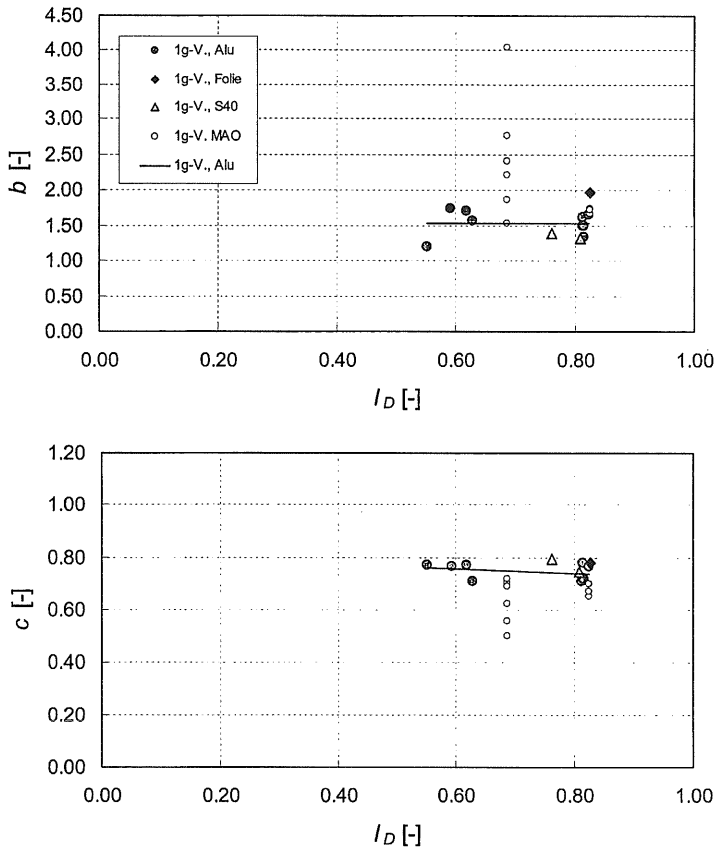


Bild 5.34: Beiwerte b und c für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.8) bei Variation der Lagerungsdichte

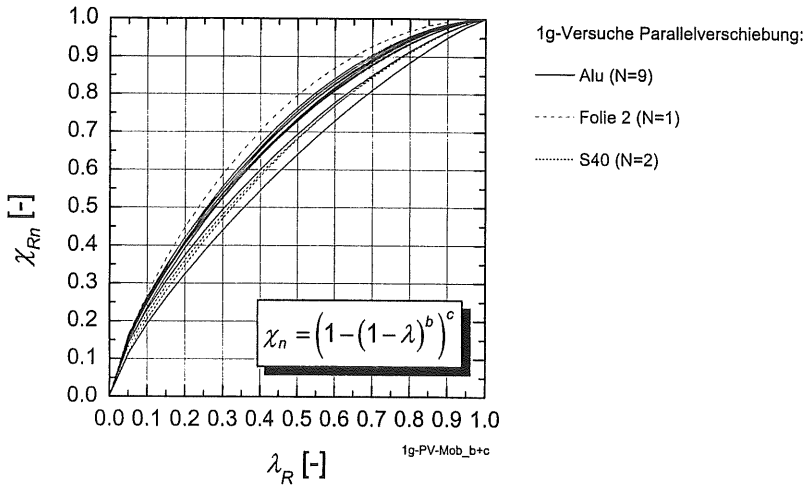


Bild 5.35: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

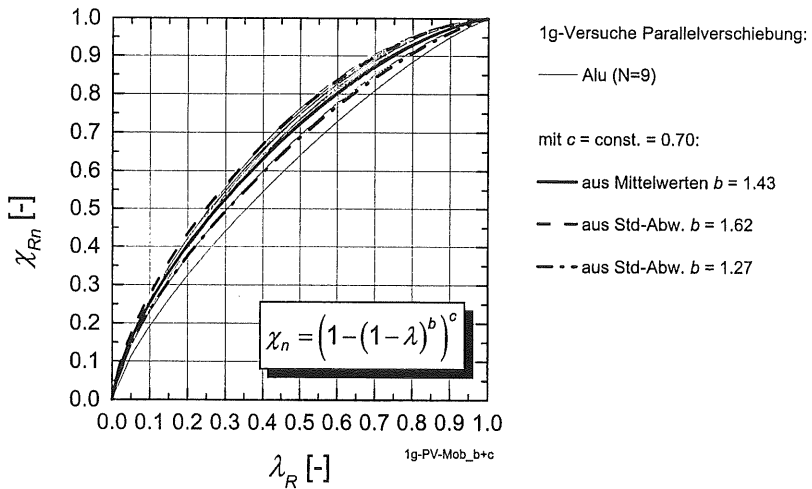


Bild 5.36: „Mittlere“ Mobilisierungsfunktion nach Gl. (5.8)

Bild 5.37 zeigt die aus den Zentrifugen-Versuchen mit dichter Lagerung (s. Anhang F.1) ermittelten Beiwerte b und c der Gl. (5.8) in Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Der Beiwert b zeigt dabei keine Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Für die Zentrifugen-Versuche mit dichter Lagerung liegt er im Mittel bei $b = 1.42 \pm 0.15$ (Alu) bzw. $b = 1.35 \pm 0.15$ (S220).

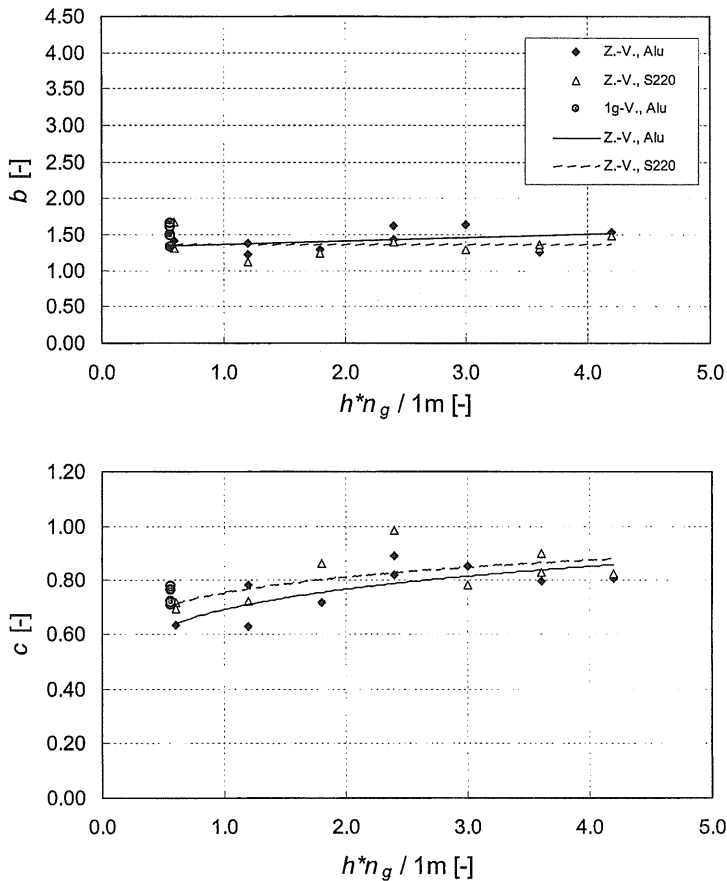


Bild 5.37: Beiwerte b und c für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.8) bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

Der Beiwert c nimmt nach Bild 5.37 mit steigendem Spannungsniveau zu. Diese Zunahme lässt sich z.B. durch eine Potenz-Funktion mit

$$c = 0.69 \cdot (h \cdot n_g / 1\text{m})^{0.15}; (\text{Alu}, R^2 = 0.58) \quad (5.31)$$

bzw.

$$c = 0.75 \cdot (h \cdot n_g / 1\text{m})^{0.11}; (\text{S220}, R^2 = 0.50) \quad (5.32)$$

beschreiben. Im Mittel ergibt sich $c = 0.77 \pm 0.09$ (Alu) bzw. $c = 0.81 \pm 0.09$ (S220).

Die sich mit diesen Beiwerten für die Zentrifugen-Versuche ergebenden Mobilisierungskurven sind in Bild 5.38 für Aluminium-Oberfläche und in Bild 5.39 für die Oberfläche aus Schleifpapier S220 dargestellt. Ebenfalls eingetragen sind in den Bildern die aus den Mobilisierungskurven abgeleiteten „mittleren“ Mobilisierungskurven mit einem konstanten Beiwert $c = 0.70$. Die Kurven mit rauherer Wandoberfläche (S220) verlaufen danach etwas flacher als bei einer glatteren Oberfläche (Alu).

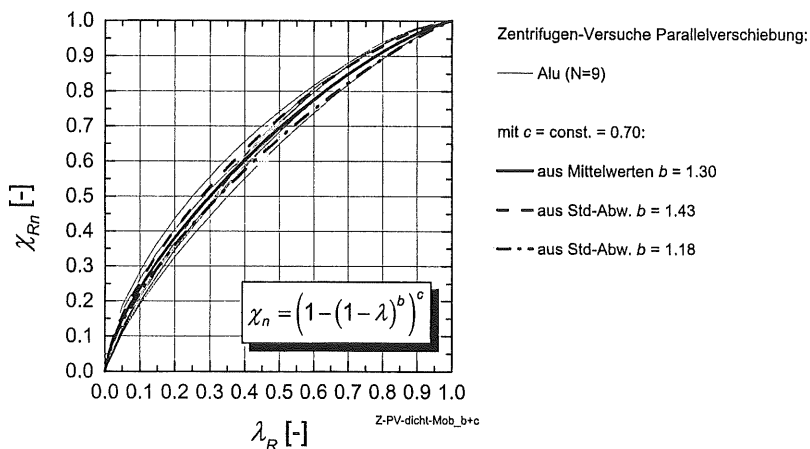


Bild 5.38: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

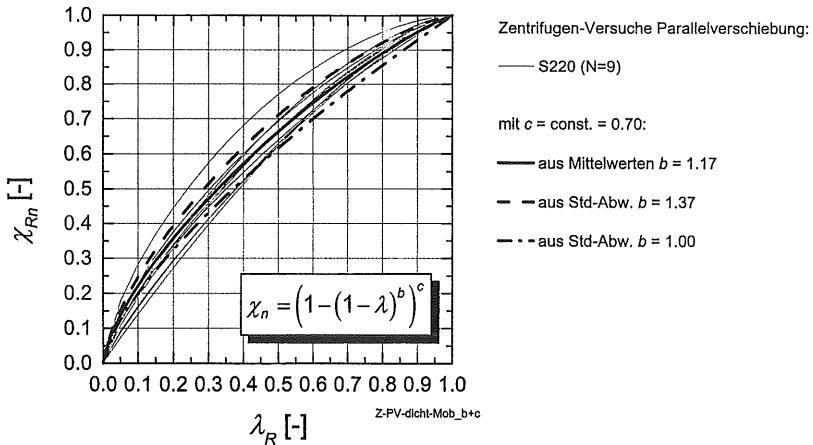


Bild 5.39: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

5.2.3 Bewertung

Die Ergebnisse der Versuche zum stützenden Erddruck bei Parallelverschiebung werden wie folgt zusammengefasst:

Passiver Erddruck (Grenzzustand):

- Der Betrag der gemessenen passiven Erddruckkraft (Normalanteil E_{pn} bzw. K_{Rnp}) nimmt mit steigender Lagerungsdichte zu und steigendem Spannungsniveau ab. Bei lockerer bis mitteldichter Lagerung tritt im Versuch kein Grenzwert der Erddruckkraft (Maximum) auf.
- Die normierte Grenzverschiebung s_p/h nimmt mit steigender Lagerungsdichte ab und mit steigendem Spannungsniveau zu. Die Zunahme mit steigendem Spannungsniveau ist bei dichter Lagerung stärker ausgeprägt als bei mitteldichter Lagerung.
- Die Neigung der passiven Erddruckkraft $\tan \delta_{Rp}$ zeigt keine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und nur eine geringe Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Bei einer raueren Wandoberfläche wird eine größere Neigung erreicht als bei einer glatteren Oberfläche.

- Die normierte Angriffshöhe der passiven Erddruckkraft z_{Rp}/h zeigt keine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und dem Spannungsniveau. Bei einer raueren Wandoberfläche liegt der Angriffspunkt der Resultierenden höher als bei einer glatteren Oberfläche.
- Die normierte gemessene Bruchkörperlänge l_B/h zeigt keine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und dem Spannungsniveau. Bei einer raueren Wandoberfläche ist der Bruchkörper länger als bei einer glatteren Oberfläche.

Mobilisierung der Erdwiderstandskraft (Normalanteil):

- Die Mobilisierung der Größe der stützenden Erddruckkraft in Abhängigkeit von der normierten Wandbewegung vom Ausgangszustand bis zum passiven Grenzzustand lässt sich mit einem hyperbolischen Ansatz nach Gl. (5.6) mit 2 Beiwerten für alle Lagerungsdichten – auch lockere Lagerung – und den untersuchten Spannungsbereich gut beschreiben. Die zwei Beiwerte sind von der Lagerungsdichte abhängig. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau zeigt dagegen nur der Beiwert T_2 . Die Art der verwendeten Wandoberfläche hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Beiwerte.
- Der Mobilisierungsgrad der passiven Erddruckkraft in Abhängigkeit vom Mobilisierungsgrad der passiven Grenzverschiebung lässt sich z.B. mit einem Ansatz nach Gl. (5.8) mit 2 Beiwerten im untersuchten Spannungsbereich beschreiben. Beide Beiwerte zeigen keine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Die Art der verwendeten Wandoberfläche hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Beiwerte. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau deutet sich nur beim Beiwert c an. Mit ausreichender Genauigkeit lässt sich der gemessene Mobilisierungsverlauf aber auch mit einem konstanten Beiwert von $c = 0.70$ beschreiben.

5.3 Kopfpunktdrehung

5.3.1 Passiver Grenzzustand

Analog zu Bild 5.6 ist in Bild 5.40 die normierte kennzeichnende Grenzverschiebung s_p/h in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D für die eigenen 1g-Versuche ($h = 0.56$ m) und die 1g-Versuche von MAO ($h = 0.15..0.25$ m) dargestellt. Der Grenzzustand wurde, wie im Abschnitt 4.3 erläutert, bei mitteldichter bis dichter Lagerung über den Peakwert der Erddruckkraft definiert und bei lockerer bis mitteldichter Lagerung

Sowohl bei den eigenen Versuchen als auch bei den Versuchen von MAO ist eine deutliche Abhängigkeit der normierten Grenzverschiebung von der Lagerungsdichte zu erkennen. Die Grenzverschiebung nimmt mit steigender Lagerungsdichte ab. Dieser Zusammenhang lässt sich durch eine lineare Funktion gut erfassen. Für die eigenen 1g-Versuche (Aluminium-Wandoberfläche) ergibt sich

$$s_p/h = -0.051 \cdot I_D + 0.074; (R^2 = 0.90) \quad (5.33)$$

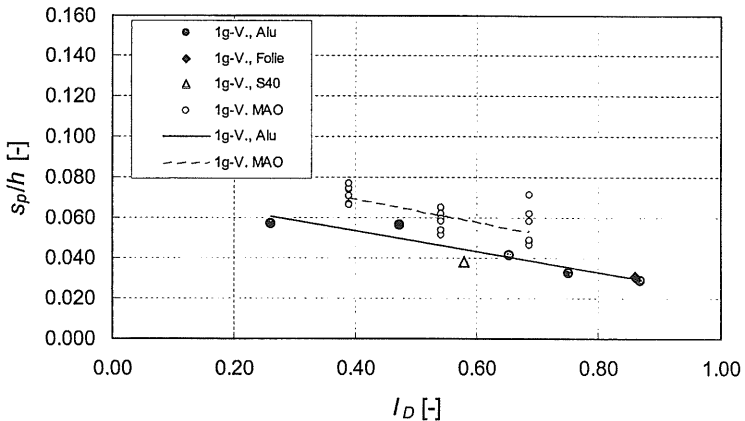


Bild 5.40: Normierte passive Grenzverschiebung bei Variation der Lagerungsdichte

und für die Versuche von MAO

$$s_p / h = -0.056 \cdot I_D + 0.092; (R^2 = 0.52). \quad (5.34)$$

Eine Abhängigkeit der Grenzverschiebung von der Art der Wandoberfläche ist bei den vorliegenden Versuchen nicht festzustellen.

Analog zu Bild 5.7 ist in Bild 5.41 zusätzlich zu den 1g-Versuchsergebnissen die nach den Ansätzen von BESLER (1995 u. 1998) bzw. HORN (1970) – s. Abschnitt 2.2 – ermittelte und die aus den FEM-Berechnungen von ABDEL-RAHMAN (1999) – s. Abschnitt 2.4 – resultierende normierte kennzeichnende Grenzverschiebung eingetragen. Die nach BESLER ermittelte Grenzverschiebung ist in Tabelle 5.5 zusammengestellt. Dabei wurde für beide dargestellte Versuchsreihen jeweils der Mittelwert des gemessenen bezogenen Erddruckneigungswinkels δ_p / φ eingesetzt. In der Tabelle 5.2 ist die nach HORN ermittelte Grenzverschiebung aufgeführt. Dabei wurde für beide dargestellte Versuchsreihen jeweils die mittlere Wandhöhe h eingesetzt.

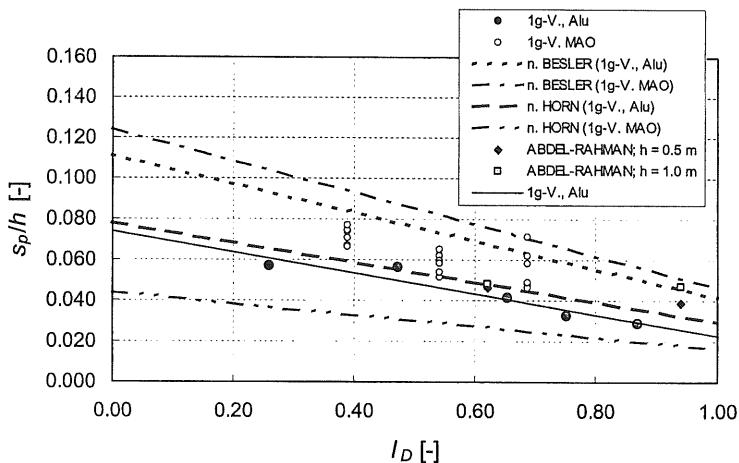


Bild 5.41: Normierte passive Grenzverschiebung bei Variation der Lagerungsdichte

Es ist erkennbar, dass die mit dem Ansatz von BESLER ermittelten normierten Grenzverschiebungen jeweils über den in den Versuchsreihen gemessenen Werten liegen, auch für die Versuche von MAO, obwohl der Ansatz von BESLER auf diesen Versuchen beruht. Der Ansatz von HORN liefert Werte, die nahe an den Werten der eigenen 1g-Versuche liegen, obwohl der Ansatz für den räumlichen Erdwiderstand aufgestellt wurde und die Abhängigkeit von der Wandbewegungsart und der Erddruckneigung nicht berücksichtigt. Für die Versuche von MAO liefert der Ansatz hingegen zu kleine Werte. Die Berechnungen von ABDEL-RAHMAN ergeben Grenzverschiebungen die bei dichter Lagerung größer sind, als sie bei den 1g-Versuchen gemessen wurden, und Grenzverschiebungen bei mitteldichter Lagerung im Bereich der für die eigenen 1g-Versuche aufgestellten Regressionsgeraden. Die berechneten Grenzverschiebungen zeigen keine signifikante Abhängigkeit von der Lagerungsdichte.

Tabelle 5.5: Grenzverschiebung s_p / h nach BESLER (s. Abschnitt 2.2), $f_{s,1} = 1.0$

Versuchsreihe	l_D	δ_p / φ	s_{p0} / h	$f_{d,1}$	$f_{\delta,1}$	$f_{M,1}$	s_p / h
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1g-V., Alu	0	-0.02	0.045	1.761	1.046	1.34	0.111
1g-V., Alu	1.0	-0.02	0.045	0.654	1.046	1.34	0.041
1g-V. MAO	0	-0.36	0.045	1.761	1.570	1.00	0.124
1g-V. MAO	1.0	-0.36	0.045	0.654	1.570	1.00	0.046

In Bild 5.42 ist die aus den 1g-Versuchen mit Aluminium-Wandoberfläche ermittelte normierte passive Grenzverschiebung in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte für Kopfpunktdrehung nach Gl. (5.33) mit

$$s_p / h = -0.051 \cdot l_D + 0.074$$

und für Parallelverschiebung nach Gl. (5.10) mit

$$s_p / h = -0.121 \cdot l_D + 0.143$$

dargestellt. Bei der Kopfpunktdrehung ist demnach bei fast allen Lagerungsdichten eine geringere kennzeichnende Wandbewegung erforderlich, um den Grenzzustand zu erreichen, als bei der Parallelverschiebung. Der Unterschied wird jedoch mit zunehmender Lagerungsdichte geringer.

Die Abhängigkeit der normierten Grenzverschiebung s_p/h von $\tan\varphi'_1$ nach ENGEL lässt sich für die eigenen 1g-Versuche mit Kopfpunktdrehung und Aluminium-Wandoberfläche z.B. durch Gl. (5.35) beschreiben.

$$s_p/h = -0.135 \cdot \tan\varphi'_1 + 0.154; (R^2 = 0.92) \quad (5.35)$$

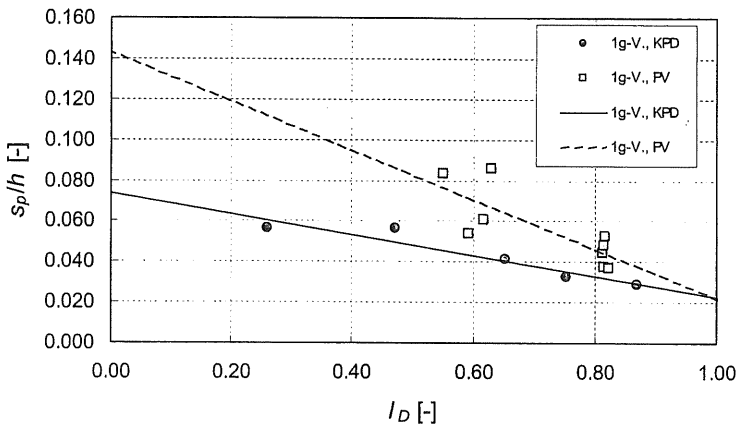


Bild 5.42: Normierte passive Grenzverschiebung für 1g-Versuche (Alu) mit Kopfpunktdrehung (KPD) und Parallelverschiebung (PV) bei Variation der Lagerungsdichte

Analog zu Bild 5.9 ist in Bild 5.43 die normierte kennzeichnende Grenzverschiebung für dichte Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Die bezogene Lagerungsdichte der 17 Zentrifugen-Versuche betrug $I_D = 0.83 \pm 0.03$. Der ebenfalls eingetragene 1g-Versuch mit Aluminium-Wandoberfläche besaß eine etwas höhere

Lagerungsdichte von $l_D = 0.86$. Von MAO liegen keine Versuche zur Kopfpunktdrehung mit einer vergleichbar hohen Lagerungsdichte vor.

Die Zentrifugen-Versuche (Z.-V.), die mit unterschiedlichen Wandoberflächen (Aluminium „glatt“ und Schleifpapier S220 „rau“) durchgeführt wurden, zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Grenzverschiebung vom Spannungsniveau. So vergrößert sich die normierte Grenzverschiebung im untersuchten und dargestellten Bereich des Spannungsniveaus von $h \cdot n_g / 1\text{m} = 0.60$ bis 4.20 nahezu auf das Doppelte – von $s_p / h \approx 0.03 \dots 0.04$ auf $s_p / h \approx 0.07$. Der Zusammenhang zwischen dem Spannungsniveau und der normierten Grenzverschiebung lässt sich für dichte Lagerung wie bei der Parallelverschiebung z.B. durch eine Potenz-Funktion nach Gl. (5.12) beschreiben.

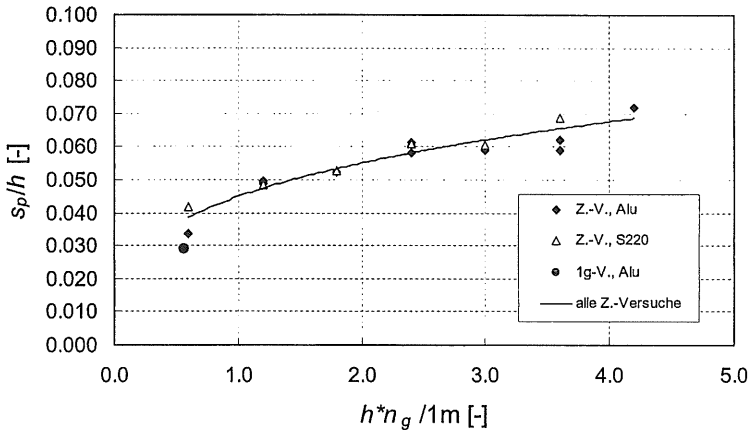


Bild 5.43: Normierte passive Grenzverschiebung bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

Eine Abhängigkeit der Grenzverschiebung von der Art der Wandoberfläche ist nicht festzustellen. Für die Zentrifugen-Versuche mit dichter Lagerung (17 Versuche) ergibt sich

$$s_p / h = 0.045 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1\text{m}} \right)^{0.29} ; (R^2 = 0.90). \quad (5.36)$$

Die Beiwerte und damit der Funktionsverlauf sind mit dem Ergebnis für die Parallelverschiebung nahezu identisch (s. Bild 5.9).

Bei gleichem Spannungsniveau ($h \cdot n_g / 1 \text{ m} \approx 0.6$) stimmen die Ergebnisse der eigenen 1g-Versuche mit einer Aluminium-Wandoberfläche mit den Ergebnissen der Zentrifugen-Versuche gut überein.

Der sich aus den Versuchsreihen mit Parallelverschiebung (dichte und mitteldichte Lagerung, s. Abschnitt 5.2.1) und mit Kopfpunktdrehung (dichte Lagerung) ergebende Exponent β_s in Gl. (5.12) zur Beschreibung des Einflusses des Spannungsniveaus auf die normierte Grenzverschiebung sind in Bild 5.44 in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte dargestellt. Der Zusammenhang zwischen der bezogenen Lagerungsdichte und dem Exponenten β_s lässt sich z. B. mit

$$\beta_s = 0.44 \cdot (l_D)^{2.13}; (R^2 = 0.90) \quad (5.37)$$

beschreiben. Bei einer Lagerungsdichte von $l_D = 0$ ergibt sich danach auch der Exponent zu Null, d. h. das Spannungsniveau hat bei lockerster Lagerung keinen Einfluss auf die Grenzverschiebung. Bei dichtester Lagerung ergibt sich $\beta_s = 0.44$.

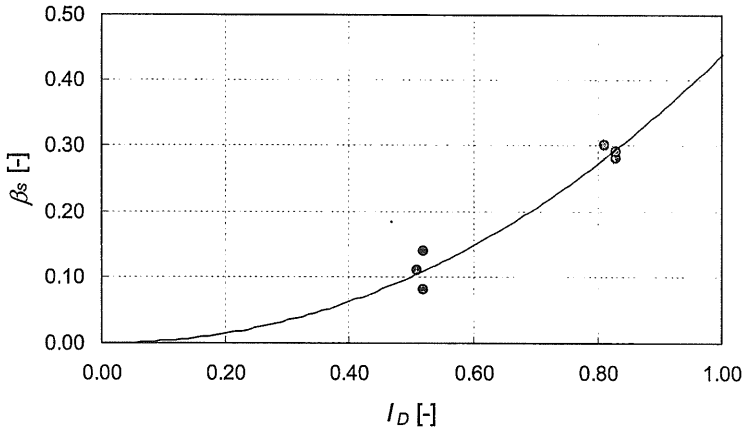


Bild 5.44: Exponent β_s in Gl. (5.12) zur Beschreibung des Einflusses des Spannungsniveaus auf die Grenzverschiebung in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte

In Bild 5.45 ist, analog zu Bild 5.10, zusätzlich zu den Zentrifugen-Versuchsergebnissen die nach den Ansätzen von BESLER (1995 u. 1998) bzw. HORN (1970) – s. Abschnitt 2.2 – ermittelte und die aus den FEM-Berechnungen von ABDELRAHMAN (1999) – s. Abschnitt 2.4 – resultierende normierte kennzeichnende Grenzverschiebung eingetragen. Ausgewählte Werte der nach BESLER ermittelten Grenzverschiebung sind in Tabelle 5.6 zusammengestellt. Dabei wurde für beide dargestellte Versuchsreihen jeweils der Mittelwert des gemessenen bezogenen Erddruckneigungswinkels δ_p / φ eingesetzt. In Tabelle 5.4 ist die nach HORN ermittelte Grenzverschiebung aufgeführt.

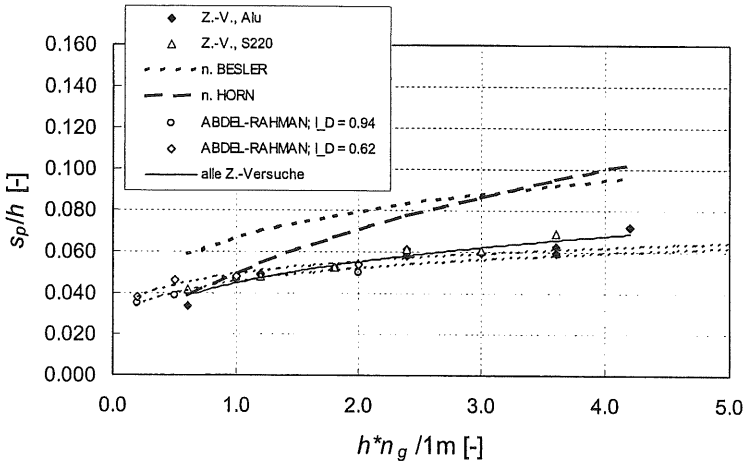


Bild 5.45: Normierte passive Grenzverschiebung für dichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Es ist erkennbar, dass die mit dem Ansatz von BESLER ermittelten normierten Grenzverschiebungen über den in den Zentrifugen-Versuchen gemessenen Werten liegen. Die Tendenz der Zunahme der Grenzverschiebung mit der Wandhöhe bzw. dem Spannungsniveau wird jedoch gut wiedergegeben. Dies beruht darauf, dass der Exponent im Maßstabsfaktor $f_{M,1}$, der bei der Ermittlung nach BESLER mit $\lambda = \beta_s = 0.25$ angesetzt wurde, auf den im Rahmen dieser Arbeit von WOLFRAM (1995) durchgeführten Zentrifugen-Versuchen beruht (s. Abschnitt 2.2). Der Ansatz von HORN liefert nur beim kleinsten untersuchten Spannungsniveau Werte die nah an den Versuchsergebnissen liegen. Die Tendenz der Zunahme der Grenzverschiebung mit der Wandhöhe bzw. dem Spannungsniveau bei den Versuchen wird mit den Ansatz jedoch nicht richtig wiedergegeben. Die Berechnungen von ABDEL-RAHMAN ergeben Grenzverschiebungen, die nahe an den Werten der Zentrifugen-Versuche liegen. Die Tendenz der Zunahme der berechneten Grenzverschiebungen (s. Bild 5.10) lässt sich durch eine Potenzfunktion nach Gl. (5.12) beschreiben. Für die berechneten Werten ergibt sich der Exponent bei $I_D = 0.94$ zu $\beta_s = 0.19$ und bei $I_D = 0.62$ zu $\beta_s = 0.16$. Das Anwachsen der Grenzverschiebung mit zunehmendem Spannungsniveau ist somit geringer als es in den Zentrifugen-Versuchen gemessen wurde.

Tabelle 5.6: Grenzverschiebung s_p / h nach BESLER (s. Abschnitt 2.2), $f_{s,1} = 1.0$

Versuchsreihe	$h_M \cdot n_g$	δ_p / φ	s_{p0} / h	$f_{d,1}$	$f_{s,1}$	$f_{M,1}$	s_p / h
	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Z.-V.	0.60	-0.06	0.0450	0.842	1.137	1.36	0.059
Z.-V.	4.20	-0.06	0.0450	0.842	1.137	2.21	0.095

Analog zu Bild 5.12 zeigt Bild 5.46 die normierte passive Erddruckkraft K_{Rnp} in Abhängigkeit vom Reibungswinkel für die eigenen 1g-Versuche und die 1g-Versuche von MAO. Die deutliche Abhängigkeit vom Reibungswinkel bzw. der Lagerungsdichte ist zu erkennen.

Vergleicht man die bei Kopfpunktdrehung und Parallelverschiebung in den eigenen 1g-Versuchen (Alu) gemessene passive Erddruckkraft (Bild 5.47), so sieht man, dass bei der Kopfpunktdrehung nur ca. 50...60 % der Kraft bei der Parallelverschiebung erreicht wird.

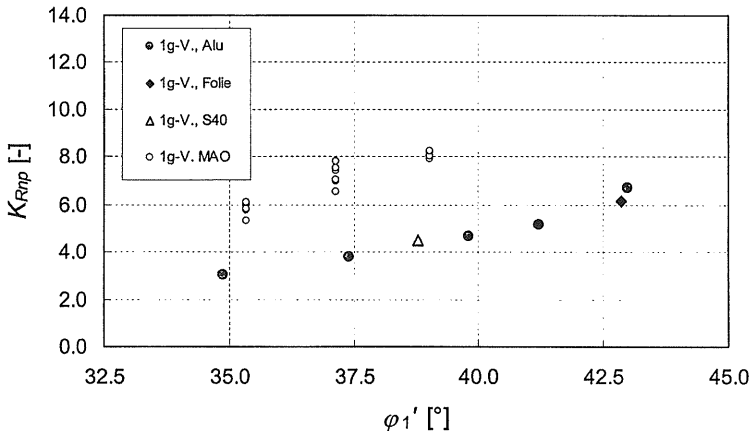


Bild 5.46: Normierte passive Erddruckkraft bei Variation der Lagerungsdichte

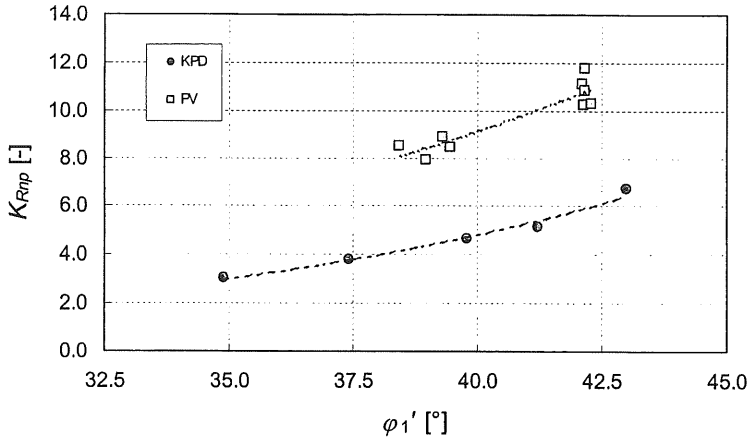


Bild 5.47: Normierte passive Erddruckkraft für 1g-Versuche (Alu) mit Kopfpunktdrehung (KPD) und Parallelverschiebung (PV) bei Variation der Lagerungsdichte

In Bild 5.48 ist die normierte passive Erddruckkraft K_{Rnp} (Normalanteil) in Abhängigkeit vom Spannungsniveau für dichte Lagerung dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass die passive Erddruckkraft mit steigendem Spannungsniveau leicht abnimmt. Zur Beschreibung dieses Verhaltens kann analog zur Parallelverschiebung (Bild 5.13) ein Potenz-Ansatz nach Gl. (5.18) gewählt werden. Eine Abhängigkeit der Grenzverschiebung von der Art der Wandoberfläche ist dabei nicht festzustellen.

Für die dargestellten Zentrifugen-Versuche mit dichter Lagerung (17 Stück, Alu und S220) ergibt sich

$$K_{Rnp} = 6.01 \cdot \left(\frac{h \cdot n_g}{1\text{m}} \right)^{-0.12} ; (R^2 = 0.32). \quad (5.38)$$

Der funktionale Zusammenhang ist wie bei der Parallelverschiebung nur schwach ausgebildet.

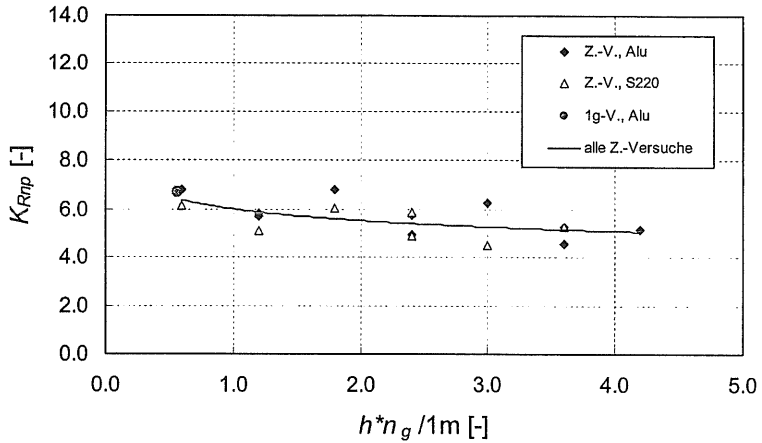


Bild 5.48: Normierte passive Erddruckkraft für dichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Vergleicht man die bei Kopfpunktdrehung und Parallelverschiebung in den Zentrifugen-Versuchen mit dichter Lagerung gemessene passive Erddruckkraft (Bild 5.49), so sieht man, dass bei der Kopfpunktdrehung nur ca. 65...70 % der Kraft der Parallelverschiebung erreicht wird.

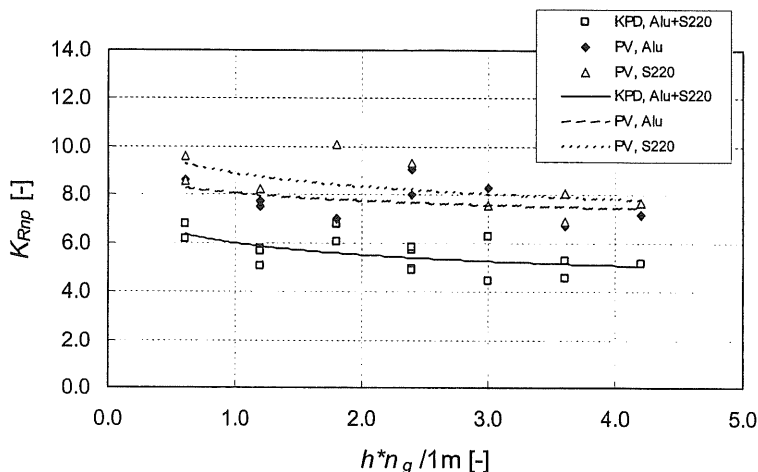


Bild 5.49: Normierte passive Erddruckkraft für Zentrifugen-Versuche mit Kopfpunktdrehung (KPD) und Parallelverschiebung (PV) für dichte Lagerung bei Variation des Spannungsniveaus

Analog zu Bild 5.15 ist in Bild 5.50 der im Grenzzustand mobilisierten Reibungsbeiwertes $\tan \delta_{Rp}$ der Erddruckkraft dargestellt. Wie bei der Parallelverschiebung zeigt $\tan \delta_{Rp}$ nur eine schwach ausgeprägte Abhängigkeit vom Reibungswinkel bzw. der Lagerungsdichte, so dass hier auf die Angabe eines funktionalen Zusammenhangs verzichtet wird. Bei den eigenen 1g-Versuchen (Aluminium-Wandoberfläche) liegt der Mittelwert bei $\tan \delta_{Rp} = -0.01 \approx 0$ und bei den Versuchen von MAO bei $\tan \delta_{Rp} \approx -0.25$. Der im Grenzzustand mobilisierte resultierende Neigungswinkel zeigt wie bei den eigenen 1g-Versuchen mit Parallelverschiebung auch keine Abhängigkeit von der Art der Wandoberfläche.

Im Vergleich zur Parallelverschiebung wird bei der Kopfpunktdrehung im passiven Grenzzustand eine wesentlich kleinere Erddruckneigung mobilisiert (Bild 5.51).

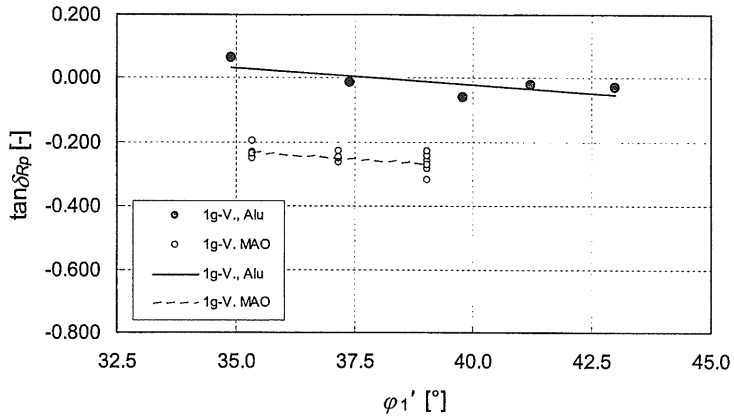


Bild 5.50: Neigung der Erddruckkraft bei Variation der Lagerungsdichte

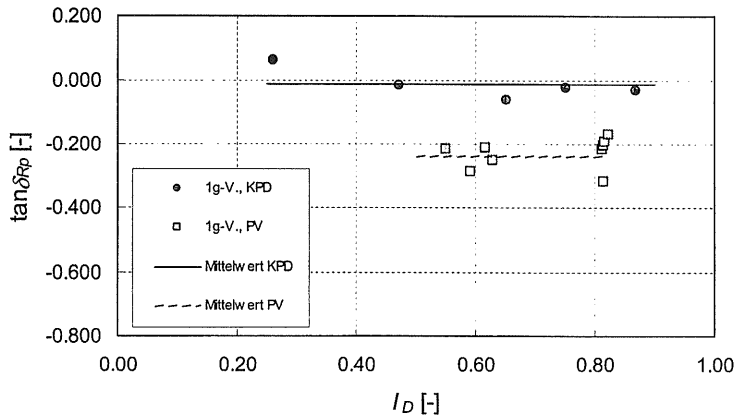


Bild 5.51: Neigung der Erddruckkraft für 1g-Versuche (Alu) mit Kopfpunktdrehung (KPD) und Parallelverschiebung (PV) bei Variation der Lagerungsdichte

In Bild 5.52 ist der im Grenzzustand mobilisierte Reibungsbeiwert $\tan \delta_{Rp}$ der Erd-druckkraft (resultierender Reibungsbeiwert) für dichte Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass $\tan \delta_{Rp}$ analog zur Parallel-verschiebung gemäß Bild 5.17 nicht wesentlich vom Spannungsniveau beeinflusst wird. Die Art der Wandoberfläche hat, wie bei den 1g-Versuchen mit Kopfpunktdrehung, keinen Einfluss auf die Erddruckneigung. Bei den 17 Zentrifugen-Versuchen mit Kopfpunktdrehung und dichter Lagerung liegt der resultierende Reibungsbeiwert im Mittel bei $\tan \delta_{Rp} = -0.04 \pm 0.02$. Wie sich zeigt, werden bei den Zentrifugen-Versuchen und 1g-Versuchen (Aluminium-Wandoberfläche) im Grenzzustand nahezu gleich große Erddruckneigungen $\tan \delta_{Rp}$ erreicht.

Die resultierende Erddruckneigung im passiven Grenzzustand ist, wie bei den 1g-Versuchen mit variiert Lagerungsdichte, bei der Kopfpunktdrehung kleiner als bei der Parallelverschiebung (Bild 5.53).

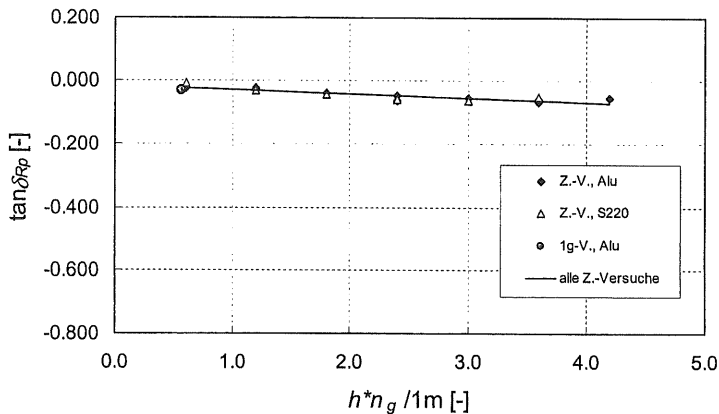


Bild 5.52: Neigung der Erddruckkraft bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

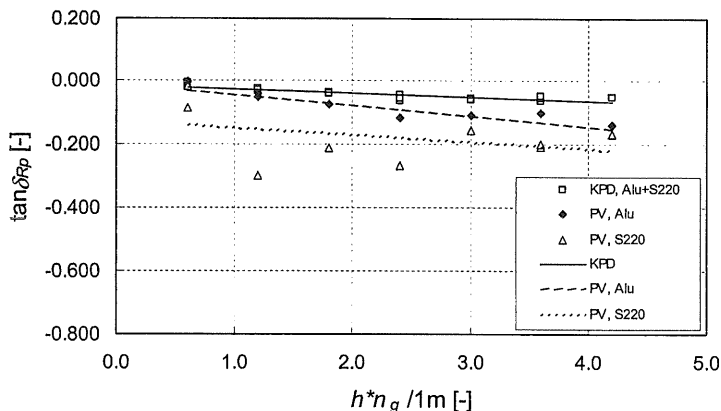


Bild 5.53: Neigung der Erddruckkraft für Zentrifugen-Versuche mit Kopfpunktdrehung (KPD) und Parallelverschiebung (PV) bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

Analog zu Bild 5.19 zeigt Bild 5.54 die Erddruckbeiwerte K_{pgh} in Abhängigkeit vom Reibungswinkel für die 1g-Versuche. Die als Punkte eingetragenen Beiwerte wurden für die einzelnen Erddruckversuche ermittelt. Dabei wurde neben dem Reibungswinkel φ_1 der im jeweiligen Versuch im Grenzzustand ermittelte resultierende Erddruckneigungswinkel $\delta_p = \delta_{Rp}$ und der Neigungswinkel der Wand mit $\alpha = \alpha_p = 0$ angesetzt. Der so ermittelte Erddruckbeiwert wird mit $K_{pgh,1}$ bezeichnet. Weiterhin wurden die Erddruckbeiwerte für den gesamten dargestellten Bereich von $\varphi_1' = 32.5^\circ$ bis $\varphi_1' = 45^\circ$ ermittelt und als Kurven eingetragen. Bei den Beiwerten (1b) wurde der Mittelwert für die eigenen 1g-Versuche (Alu) mit $\tan \delta_{Rp} \approx -0.01 \Rightarrow \delta_{Rp} = \delta_p = -0.6^\circ$ und bei den Beiwerten (2b) der Mittelwert für die Versuche von MAO mit $\tan \delta_{Rp} \approx -0.25 \Rightarrow \delta_{Rp} = \delta_p = -14^\circ$ angesetzt. Auch hierbei wurde der Wandneigungswinkel mit $\alpha = \alpha_p = 0$ angesetzt.

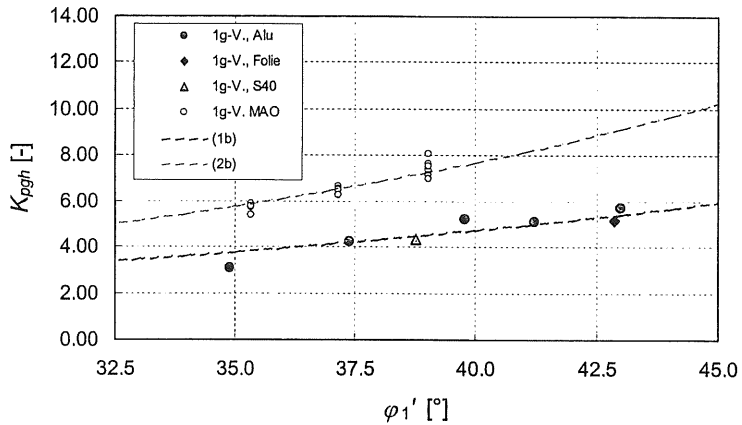


Bild 5.54: Erddruckbeiwert K_{pgh} bei Variation der Lagerungsdichte

In Bild 5.55 sind die Verhältniswerte von gemessener normierter Erddruckkraft K_{Rhp} (Horizontalanteil) zum Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ (Bild 5.54) in Abhängigkeit vom Reibungswinkel für die 1g-Versuche dargestellt. Die gemessene Erddruckkraft stimmt mit der rechnerischen passiven Erddruckkraft nahezu überein.

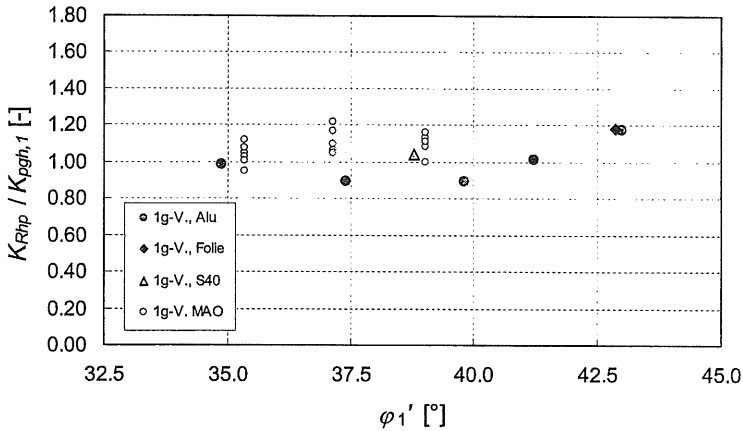


Bild 5.55: Verhältnis aus gemessener normierter Erddruckkraft K_{Rhp} und Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ bei Variation der Lagerungsdichte

Analog zu Bild 5.21 zur Parallelverschiebung sind in Bild 5.56 die Erddruckbeiwerte $K_{pgh,1}$ für die Versuche mit dichter Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau dargestellt. Da der bei den Zentrifugen-Versuchen gemessene Erddruckneigungswinkel $\tan \delta_{Rp}$, der in die Ermittlung von $K_{pgh,1}$ eingeht, mit anwachsendem Spannungsniveaus leicht abfällt (Bild 5.52), nimmt $K_{pgh,1}$ mit steigendem Spannungsniveau leicht zu.

Bild 5.57 zeigt die Verhältniswerte von gemessener normierter Erddruckkraft K_{Rhp} und dem Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ in Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Im untersuchten Spannungsbereich nimmt das Verhältnis mit steigendem Spannungsniveau deutlich ab. Im Gegensatz zur Parallelverschiebung (Bild 5.22) ist die gemessene passive Erddruckkraft K_{Rhp} nicht mehr bei allen Versuchen größer als die rechnerische passive Erddruckkraft $K_{pgh,1}$.

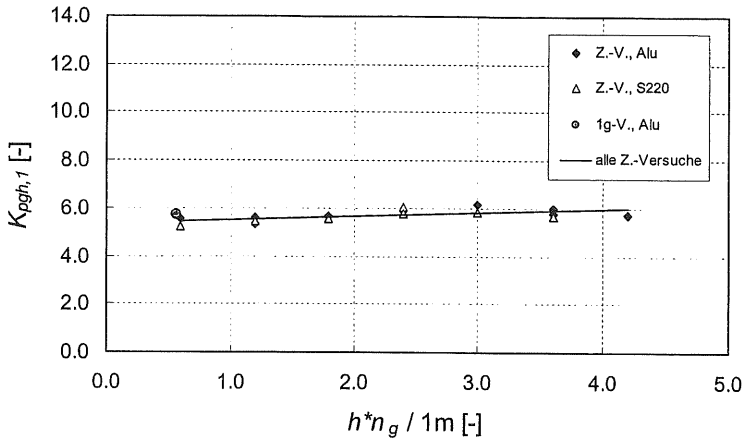


Bild 5.56: Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

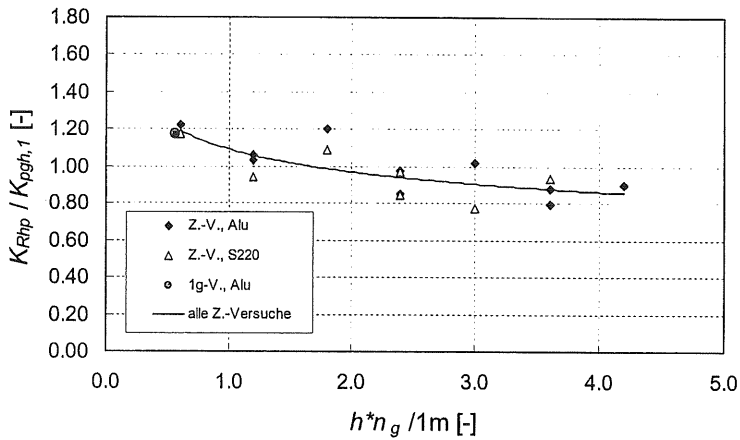


Bild 5.57: Verhältnis von gemessener normierter Erddruckkraft K_{Rhp} und Erddruckbeiwert $K_{pgh,1}$ bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

Bild 5.58 zeigt die normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft im Grenzzustand in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D für die 1g-Versuche. Es ist zu

sehen, dass die Angriffshöhe – und damit auch die Erddruckverteilung über die Wandhöhe allenfalls gering von der Lagerungsdichte abhängt (im Mittel $z_{Rp} \approx 0.83 \cdot h$). Bei den Versuchen von MAO (im Mittel $z_{Rp} \approx 0.77 \cdot h$) ist dies nicht festzustellen. Eine Abhängigkeit der Angriffshöhe von der Art der Wandoberfläche ist nicht feststellbar.

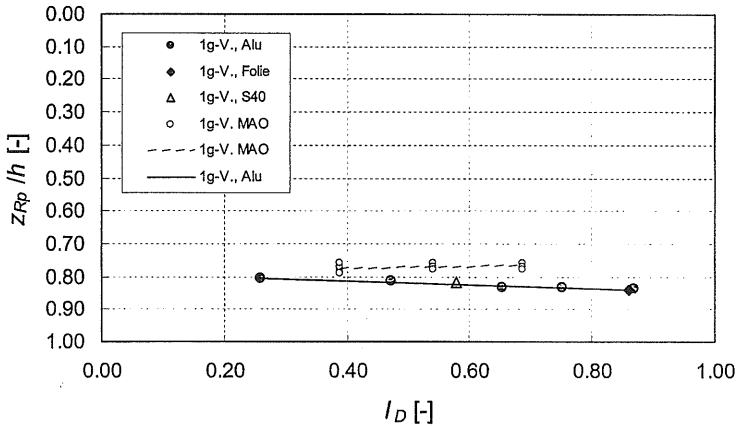


Bild 5.58: Normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft bei Variation der Lagerungsdichte

Bild 5.59 zeigt die normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft im Grenzzustand für die Versuche mit dichter Lagerung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Eine Abhängigkeit der Angriffshöhe vom Spannungsniveau ist wie bei der Parallelverschiebung (Bild 5.24) nicht feststellbar. Ein Einfluss der Art der Wandoberfläche auf die Angriffshöhe und damit die Erddruckverteilung ist im Gegensatz zur Parallelverschiebung nicht vorhanden. Die passive Erddruckkraft liegt bei den dargestellten 17 Zentrifugenversuchen im Mittel bei $z_R/h = 0.75 \pm 0.01$. Es zeigt sich weiterhin, dass die Angriffshöhe beim 1g-Versuch mit $z_{Rp} \approx 0.83 \cdot h$ tiefer liegt als bei den Zentrifugenversuchen.

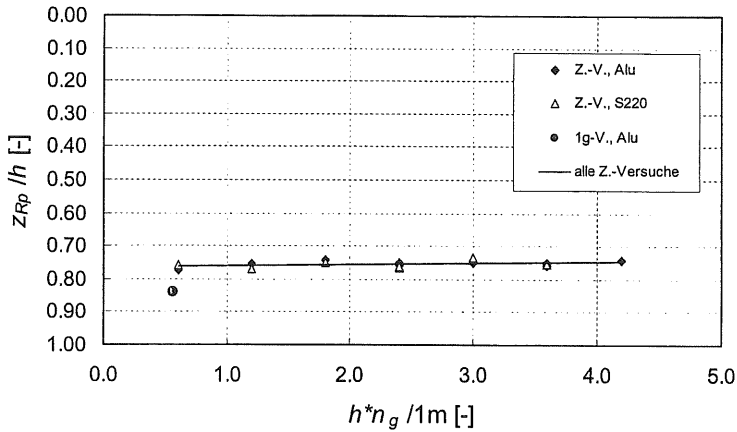


Bild 5.59: Normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung

In Bild 5.60 ist die an der Sandoberfläche gemessene normierte Bruchkörperlänge l_B / h in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte l_D für die 1g-Versuche dargestellt. Eine eindeutige Unabhängigkeit der Bruchkörperlänge von der Lagerungsdichte, wie sie sich bei der Parallelverschiebung ergibt (Bild 5.26), ist bei den eigenen 1g-Versuchen nicht festzustellen. Statt dessen nimmt die Bruchkörperlänge mit steigender Lagerungsdichte zu. Bei den Versuchen von MAO ist die normierte Bruchkörperlänge über die Lagerungsdichte konstant. Bei den eigenen 1g-Versuchen liegt die normierte Länge im Mittel bei $l_B / h = 1.78 \pm 0.30$ (5 Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche) und bei den Versuchen von MAO bei $l_B / h = 1.93 \pm 0.15$ (19 Versuche). Eine Abhängigkeit der Bruchkörperlänge von der Art der Wandoberfläche ist nicht feststellbar.

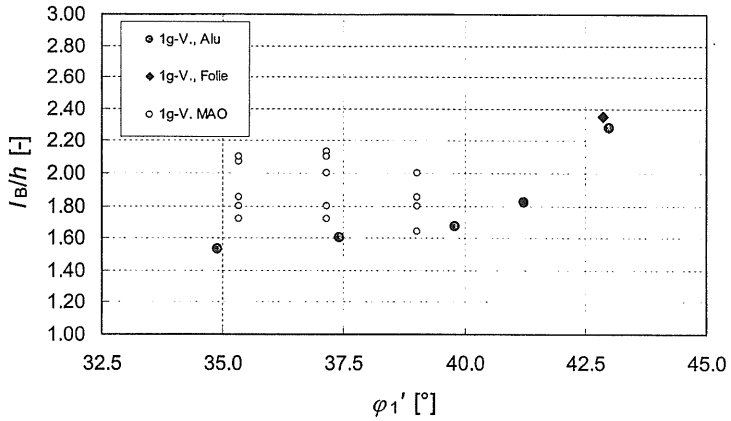


Bild 5.60: Normierte gemessene Bruchkörperlänge bei Variation der Lagerungsdichte

Das Bild 5.61 zeigt die Verhältniswerte von gemessener Bruchkörperlänge l_B zur rechnerischen Bruchkörperlänge $l_{BC,1}$ nach PREGL in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D für die 1g-Versuche.

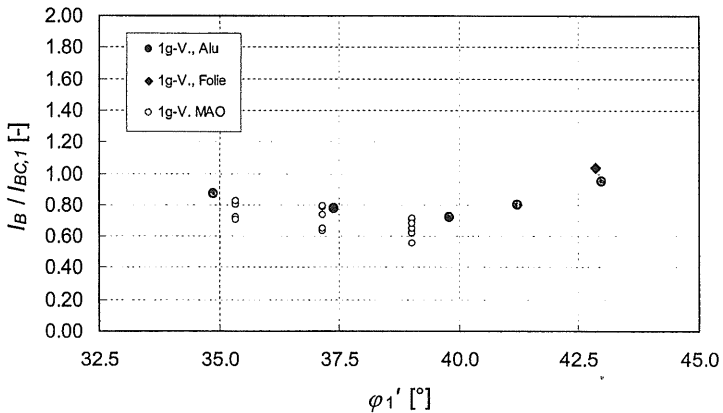


Bild 5.61: Verhältnis der gemessenen Bruchkörperlänge l_B zur rechnerischen Bruchkörperlänge $l_{BC,1}$ bei Variation der Lagerungsdichte

Eine eindeutige Abhängigkeit des Verhältnisses von der Lagerungsdichte ist nicht festzustellen. Das Verhältnis erreicht eine Größe von $l_B / l_{BC,1} \approx 0.70 \dots 1.00$. Der sich im Versuch ergebende Bruchkörper ist somit meist kürzer als der rechnerische Bruchkörper.

Eine Abhängigkeit der normierten gemessenen Bruchkörperlänge l_B / h (Bild 5.62) bzw. des Verhältnisses $l_B / l_{BC,1}$ (Bild 5.63) vom Spannungsniveau ist nicht festzustellen. Dieses Ergebnis stimmt mit dem bei Parallelverschiebung überein.

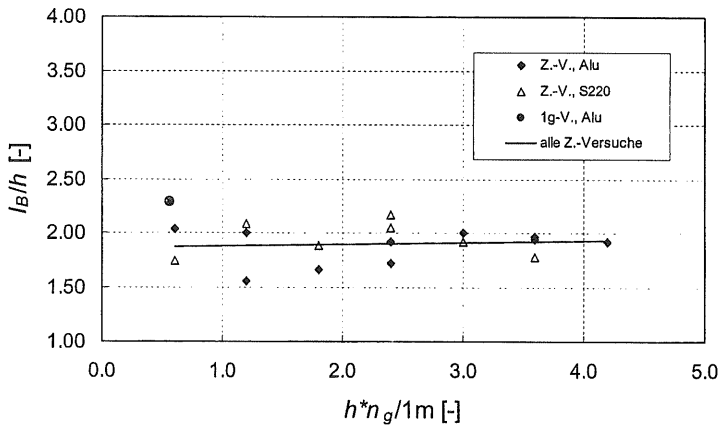


Bild 5.62: Normierte gemessene Bruchkörperlänge bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung,

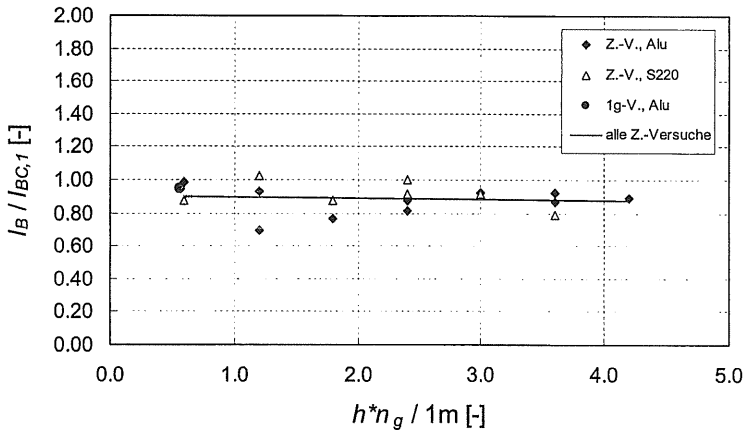


Bild 5.63: Verhältnis der gemessenen Bruchkörperlänge I_B zur rechnerischen Bruchkörperlänge $I_{BC,1}$ bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung,

5.3.2 Mobilisierung der Erddruckkraft

Analog zu Bild 5.30 sind in Bild 5.64 die aus den 1g-Versuchen ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ der Gl. (5.6) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D aufgetragen. Beide Beiwerte zeigen dabei eine deutliche Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Die Art der Wandoberfläche hat nach den vorliegenden Ergebnissen für dichte Lagerung keinen ausgeprägten Einfluss.

Diese Abhängigkeit der Beiwerte von der bezogenen Lagerungsdichte I_D lässt sich für die eigenen 1g-Versuche mit Kopfpunktdrehung und Aluminium-Wandoberfläche mit

$$T1 = 0.359 \cdot e^{-1.29 \cdot I_D}; (R^2 = 0.94) \quad (5.39)$$

und

$$T2 = 0.016 \cdot e^{-2.83 \cdot I_D}; (R^2 = 0.96) \quad (5.40)$$

angeben.

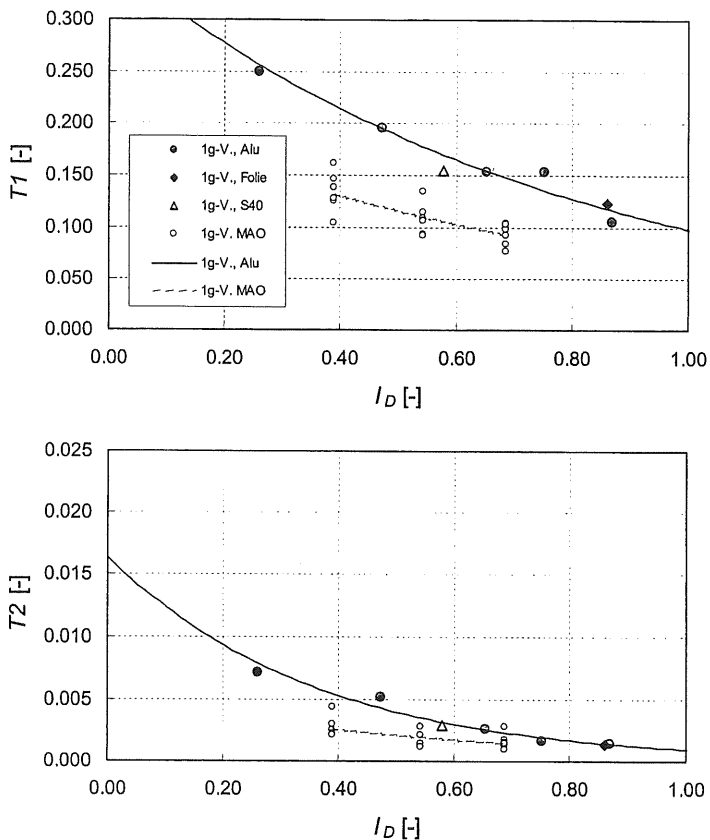


Bild 5.64: Beiwerte T_1 und T_2 für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.6) bei Variation der Lagerungsdichte

Die Abhängigkeit der Beiwerte von $\tan \varphi_1'$ nach ENGEL kann für die eigenen 1g-Versuche mit Kopfpunktdrehung und Aluminium-Wandoberfläche z.B. mit

$$T_1 = 2.672 \cdot e^{-3.39 \cdot \tan \varphi_1'}; (R^2 = 0.95) \quad (5.41)$$

und

$$T2 = 1.264 \cdot e^{-7.37 \cdot \tan \phi'} ; (R^2 = 0.96) \quad (5.42)$$

angegeben werden.

Bei Aluminium-Wandoberfläche und einer äquivalenten Wandhöhe $h_E \approx 0.6$ m erhält man für eine bezogene Lagerungsdichte von $I_D = 0.30$ danach $T1 = 0.244$ und $T2 = 0.007$, und für $I_D = 0.80$ ergibt sich $T1 = 0.128$ und $T2 = 0.002$. Die sich damit nach Gl. (5.6) ergebenden Mobilisierungsfunktionen sind im Bild 5.65 dargestellt.

Im Bild 5.65 wurde der Grenzwert auf der Grundlage der Grenzverschiebung nach Gl. (5.33) ermittelt und berücksichtigt.

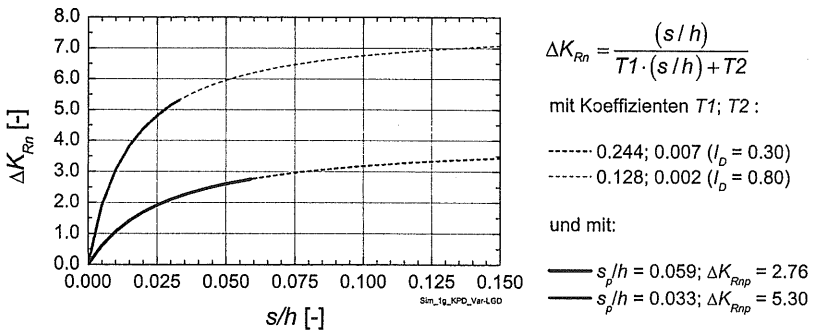


Bild 5.65: Beispiel für Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.6) mit den ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ für 2 Lagerungsdichten, $h_E \approx 0.6$ m

In Bild 5.66 sind analog zu Bild 5.32 die aus den Versuchen mit dichter Lagerung ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ nach Gl. (5.6) in Abhängigkeit vom Spannungsniveau aufgetragen. Wie bei der Parallelverschiebung hat dabei nur der Beiwert $T2$ eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Der Beiwert $T1$ lässt sich für die 17 Zentrifugen-Versuche besser durch einen spannungsunabhängigen Mittelwert von $T1 = 0.087 \pm 0.022$ wiedergeben. Die Abhängigkeit von $T2$ vom Spannungsniveau kann mit

$$T2 = 0.0018 \cdot (h \cdot n_g / 1m) + 0.0020 ; (R^2 = 0.66) \quad (5.43)$$

beschrieben werden. Die Art der Wandoberfläche hat keinen ausgeprägten Einfluss.

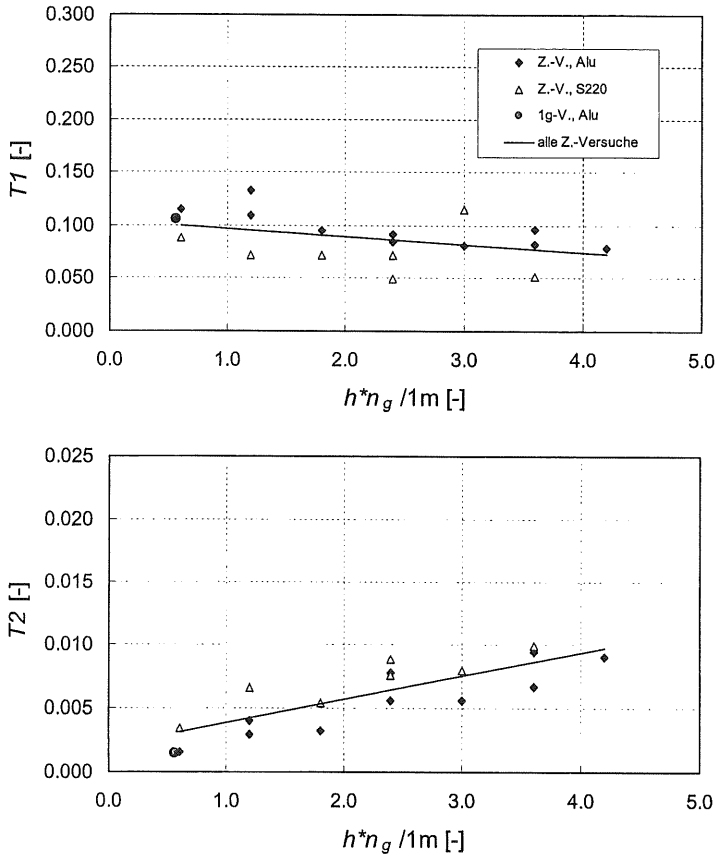


Bild 5.66: *Beiwerte $T1$ und $T2$ für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.6) bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung*

Bei Aluminium-Wandoberfläche, dichter Lagerung und einer äquivalenten Wandhöhe von $h_E = 0.6m$ erhält man danach $T1 = 0.087$ und $T2 = 0.003$, und für eine äquivalen-

te Wandhöhe von $h_E = 3.6$ m ergibt sich $T1 = 0.087$ und $T2 = 0.008$. Die sich damit ergebenden Mobilisierungsfunktionen sind im Bild 5.67 dargestellt.

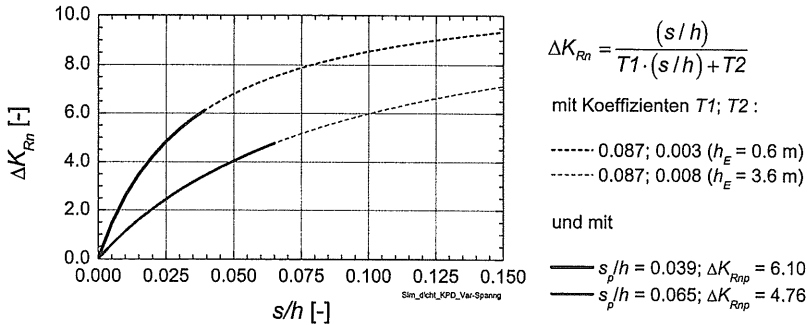


Bild 5.67: Beispiel für Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.6) mit den ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ für 2 verschiedene Spannungsniveaus bei dichter Lagerung

Analog zu Bild 5.34 zeigt Bild 5.68 die aus den einzelnen 1g-Versuchen ermittelten Koeffizienten b und c der Gl. (5.8) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D (siehe Anhang D.2 bzw. B.2). Da sich im Gegensatz zur Parallelverschiebung in den 1g-Versuchen mit Kopfpunktdrehung bei allen Lagerungsdichten der Grenzzustand eindeutig bestimmen ließ, sind hier alle Versuchswerte eingetragen. Die eigenen 1g-Versuche zeigen, dass die Beiwerte b und c nicht von der Lagerungsdichte abhängig sind. Für die 5 Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche liegen die Werte nach Bild 5.68 im Mittel bei $b = 1.63 \pm 0.23$ bzw. $c = 0.66 \pm 0.06$. Die Werte aus den Versuchen von MAO weisen eine größere Streuung auf. Die sich mit diesen Beiwerten für die eigenen 1g-Versuche ergebenden Mobilisierungskurven sind in Bild 5.69 dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchen mit Verschiedenen Wandoberflächen sind nicht festzustellen. Bild 5.70 zeigt die aus den Mobilisierungskurven für die Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche abgeleitete „mittlere Mobilisierungskurve“, die sich bei einem konstanten Beiwert von $c = 0.70$ mit $b = 1.71$ beschreiben lässt. Die ebenfalls eingetragene „obere“ und „untere“ Mobilisierungskurve wurde aus der Standardabweichung „abgeleitet“.

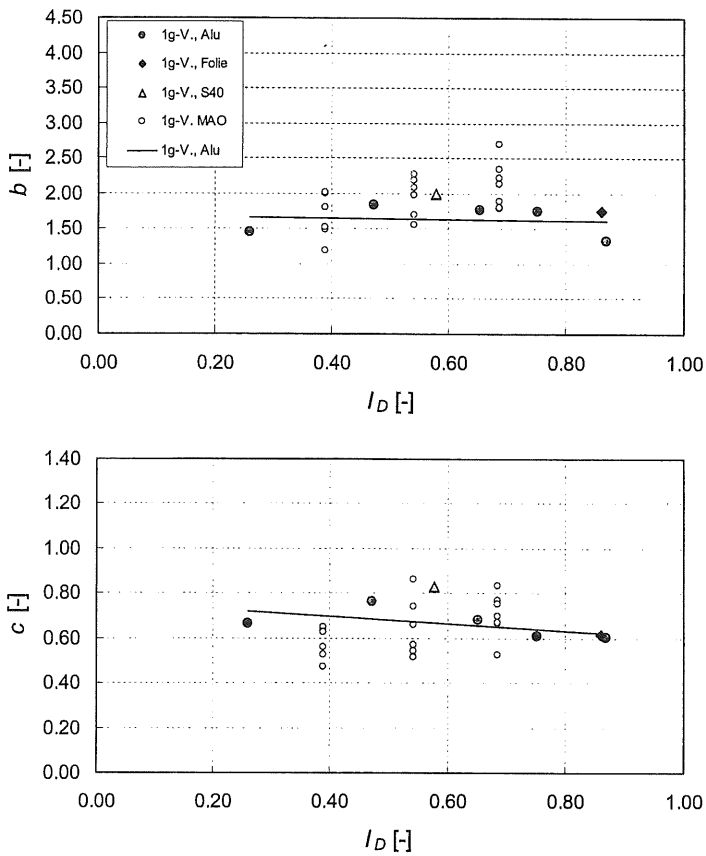


Bild 5.68: Beiwerte b und c für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.8) bei Variation der Lagerungsdichte

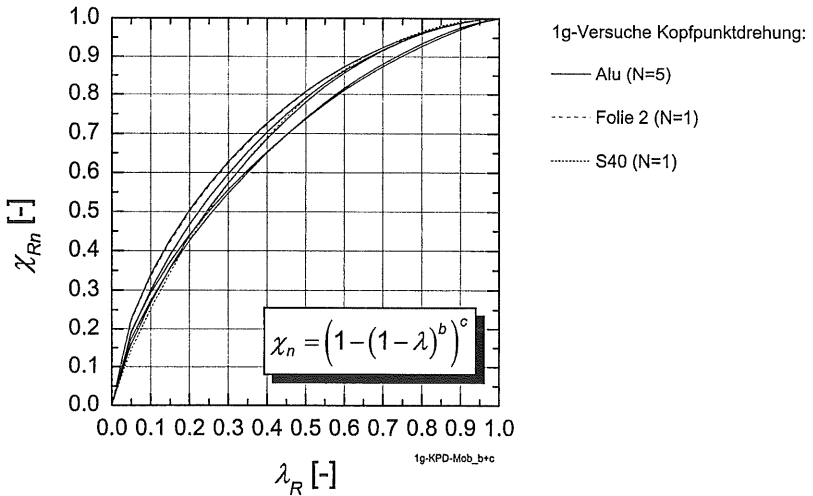


Bild 5.69: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

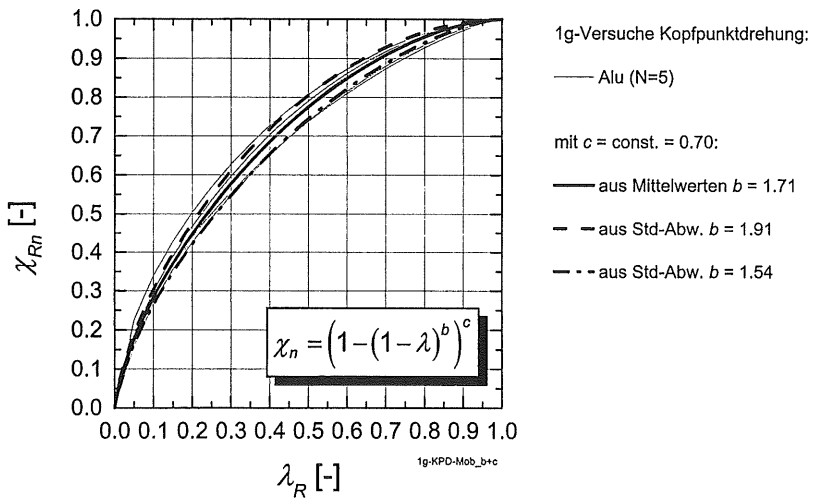


Bild 5.70: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

Bild 5.71 zeigt die Beiwerte b und c der Gl. (5.8) in Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Der Beiwert b ist nicht vom Spannungsniveau abhängig. Für die 17 Zentrifugen-Versuche mit dichter Lagerung liegt er im Mittel bei $b = 1.54 \pm 0.12$.

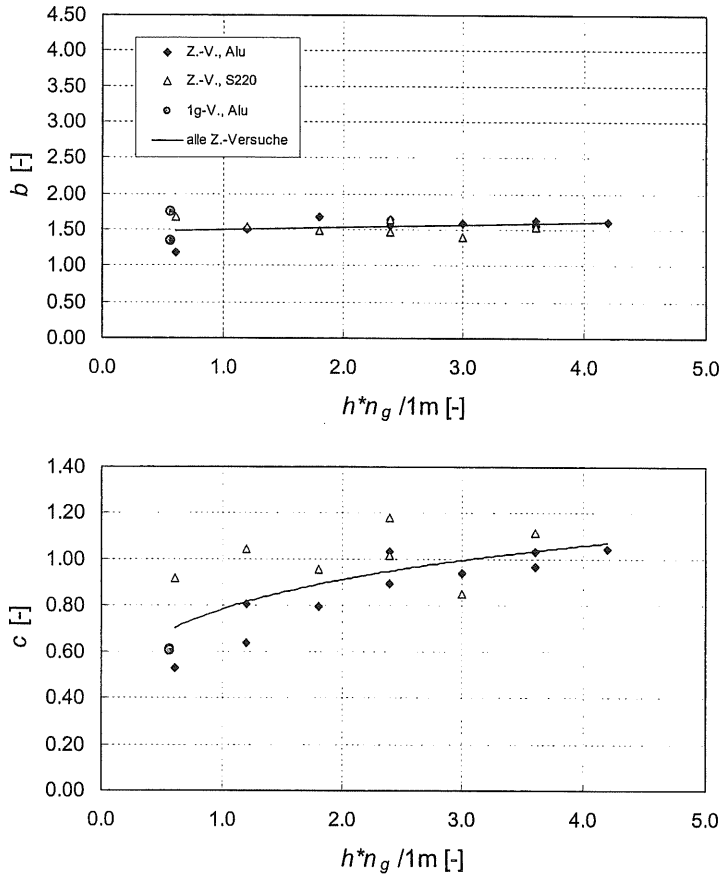


Bild 5.71: Beiwerte b und c für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.8) bei Variation des Spannungsniveaus für dichte Lagerung,

Der Beiwert c (im Mittel $c = 0.93 \pm 0.16$ für die 17 Zentrifugen-Versuche) nimmt mit steigendem Spannungsniveau zu. Diese Zunahme lässt sich z.B. durch die Potenzfunktion

$$c = 0.79 \cdot (h \cdot n_g / 1m)^{0.22}; (R^2 = 0.40) \tag{5.44}$$

beschreiben. Ein signifikanter Einfluss der Art der Wandoberfläche ist aus den vorliegenden Versuchen nicht festzustellen.

Die sich mit diesen Beiwerten für die Zentrifugen-Versuche ergebenden Mobilisierungskurven sind in Bild 5.72 für Aluminium-Oberfläche und in Bild 5.73 für die Oberfläche aus Schleifpapier S220 dargestellt. Die Kurven mit rauerer Wandoberfläche (S220) verlaufen danach etwas flacher als bei einer glätteren Oberfläche (Alu). Ebenfalls eingetragen sind in den Bildern die aus den Mobilisierungskurven abgeleiteten „mittleren“ Mobilisierungskurven mit einem konstanten Beiwert $c = 0.70$. Es ist zu erkennen, dass eine solche Vereinfachung das Mobilisierungsverhalten in den Zentrifugen-Versuchen nur bedingt wiedergibt.

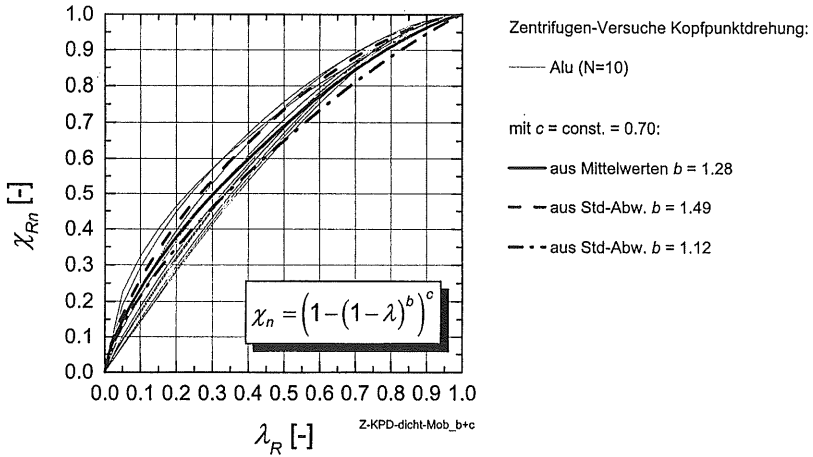


Bild 5.72: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

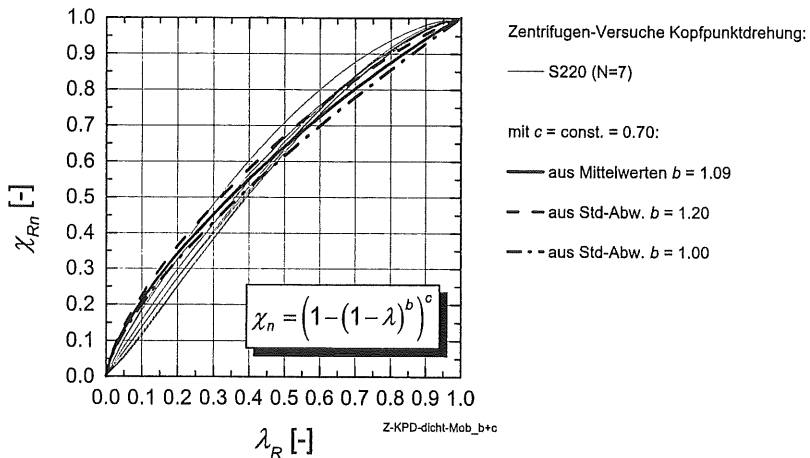


Bild 5.73: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

5.3.3 Bewertung

Die Ergebnisse der Versuche zum stützenden Erddruck bei Kopfpunktdrehung werden wie folgt zusammengefasst:

Passiver Erddruck (Grenzzustand):

- Der Betrag der gemessenen passiven Erddruckkraft (Normalanteil E_{pn} bzw. K_{Rnp}) nimmt mit steigender Lagerungsdichte zu und steigendem Spannungsniveau ab. Bei allen untersuchten Lagerungsdichten tritt im Versuch ein Grenzwert der Erddruckkraft (Maximum) auf. Bei lockerer bis mitteldichter Lagerung ist die Gleitfläche bereits vor Erreichen der maximalen Erddruckkraft komplett ausgebildet.
- Die normierte Grenzverschiebung s_p/h nimmt mit steigender Lagerungsdichte ab und mit steigendem Spannungsniveau zu.

- Die Neigung der passiven Erddruckkraft $\tan \delta_{Rp}$ zeigt keine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und nur eine geringe Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Die Art der eingesetzten Wandoberfläche hatte keinen Einfluss auf die Erddruckneigung.
- Die normierte Angriffshöhe der passiven Erddruckkraft z_{Rp}/h zeigt eine geringe Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und keine Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Die Art der untersuchten Wandoberflächen hat keinen Einfluss auf die Angriffshöhe.
- Ein eindeutiger Einfluss der Lagerungsdichte auf die normierte gemessene Bruchkörperlänge l_B/h lässt sich aus den vorliegenden Versuchen nicht ableiten. Das Spannungsniveau hat keinen Einfluss. Die Art der eingesetzten Wandoberfläche zeigt keinen signifikanten Einfluss.

Mobilisierung der Erdwiderstandskraft (Normalanteil):

- Die Mobilisierung der Größe der stützenden Erddruckkraft in Abhängigkeit von der normierten Wandbewegung lässt sich vom Ausgangszustand bis zum passiven Grenzzustand z.B. mit einem hyperbolischen Ansatz nach Gl. (5.6) mit 2 Beiwerten für alle Lagerungsdichten – auch lockere Lagerung – und dem untersuchten Spannungsbereich beschreiben. Beide Beiwerte zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Vom Spannungsniveau ist dagegen nur der Beiwerte T_2 abhängig. Die Art der verwendeten Wandoberfläche hat keinen starken Einfluss auf die Beiwerte.
- Der Mobilisierungsgrad der passiven Erddruckkraft in Abhängigkeit vom Mobilisierungsgrad der passiven Grenzverschiebung lässt sich z.B. mit einem Ansatz nach Gl. (5.8) mit 2 Beiwerten für alle Lagerungsdichten und den untersuchten Spannungsbereich beschreiben. Beide Beiwerte sind nicht von der Lagerungsdichte abhängig. Die Art der verwendeten Wandoberfläche zeigt keinen starken Einfluss auf die Beiwerte. Eine Abhängigkeit vom Spannungsniveau deutet sich nur beim Beiwert c an. Mit ausreichender Genauigkeit lässt sich der gemessene Mobilisierungsverlauf bei den 1g-Versuchen aber auch mit einem konstanten Beiwert von $c = 0.70$ beschreiben.

5.4 Fußpunktdrehung

5.4.1 Passiver Grenzzustand

Wie die Ergebnisse der 1g-Versuche mit Fußpunktdrehung (Bild 4.15) zeigen, wird bei keiner Lagerungsdichte ein Maximum der Erddruckkraft erreicht. Der Wert der resultierenden Erddruckneigung $\tan \delta_{Rp}$ und die normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft z_R / h erreichen jedoch nach einer ausreichend großen Wandbewegung einen nahezu konstanten Wert. Nach einer ausreichenden Wandbewegung (Kopfverschiebung) tritt an der Sandoberfläche eine erste „wandnahe“ Gleitflächenaustrittskante auf. Bei weiterer Bewegung der Wand treten immer weitere Austrittskanten auf der Sandoberfläche auf.

Von MAO (1993) wurde das gleiche Mobilisierungs- und Bruchverhalten dokumentiert. Da ebenfalls kein Maximalwert bei der Erddruckkraft auftrat, wurde von MAO für diesen Fall der passive Grenzzustand über gewählte Verschiebungsmaße von $s / h \approx 0.11$ für $D = 0.35$ ($I_D = 0.39$) und $s / h \approx 0.08$ für $D = 0.65$ ($I_D = 0.69$) definiert. Die so festgelegten Grenzzustandswerte von MAO werden in den folgenden Diagrammen nicht berücksichtigt. Die von BESLER (1995 u. 1998) aufgeführten Kennwerte zur Ermittlung der Grenzverschiebung (Abschnitt 2.2) für die Fußpunktdrehung beruhen auf diesen von MAO festgelegten „Grenzzustandswerten“.

Als Anhaltspunkt bzw. Kriterium für das Erreichen des passiven Grenzzustandes wurde nachfolgend der Zustand des Auftretens der ersten Bruchkante an der Sandoberfläche herangezogen. In den Diagrammen sind die zu diesem Zustand gehörenden Messwerte für die 1g-Versuche mit Fußpunktdrehung und Aluminium-Wandoberfläche eingetragen. Zum Vergleich sind auch jeweils die entsprechenden 1g-Versuchsergebnisse zur Kopfpunktdrehung und Parallelverschiebung dargestellt, die bereits in den vorangehenden Abschnitten behandelt wurden.

Bild 5.74 zeigt die normierte passive Grenzverschiebung s_p / h in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte. Wie bei den anderen Wandbewegungsarten, lässt sich die Abhängigkeit der Grenzverschiebung von der Lagerungsdichte durch eine lineare Funktion gut erfassen. Für die Versuche mit Fußpunktdrehung lässt sich der Zusammenhang z.B. durch

$$s_p/h = -0.111 \cdot I_D + 0.141; (R^2 = 0.65) \quad (5.45)$$

ausdrücken. Dies stimmt mit dem Zusammenhang für die Parallelverschiebung nach Gl. (5.10) mit

$$s_p/h = -0.121 \cdot I_D + 0.143$$

nahezu überein.

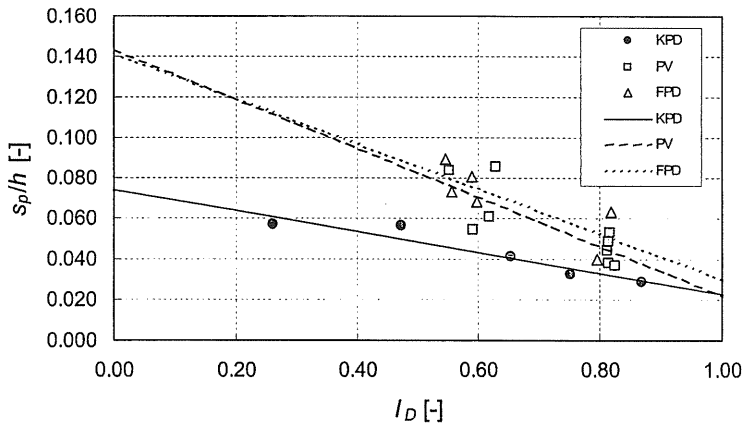


Bild 5.74: Normierte passive Grenzverschiebung für 1g-Versuche (Alu) und alle Wandbewegungsarten bei Variation der Lagerungsdichte

In Bild 5.75 ist zusätzlich zu den 1g-Versuchsergebnissen die nach den Ansätzen von BESLER (1995 u. 1998) bzw. HORN (1970) – s. Abschnitt 2.2 – ermittelte normierte passive Grenzverschiebung eingetragen. Die nach BESLER ermittelte Grenzverschiebung ist in Tabelle 5.7 zusammengestellt. Dabei wurde der Mittelwert des gemessenen bezogenen Erddruckneigungswinkels $\delta_p / \varphi = \delta_{Rp} / \varphi_1' = -0.46$ angesetzt. In der Tabelle 5.2 ist die nach HORN ermittelte Grenzverschiebung aufgeführt.

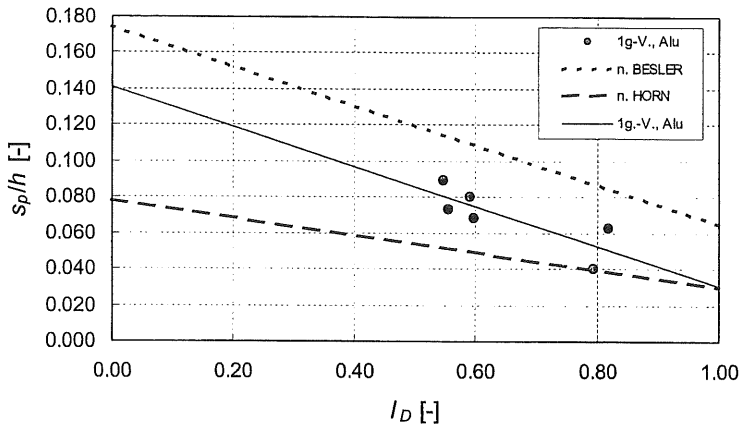


Bild 5.75: Normierte passive Grenzverschiebung bei Variation der Lagerungsdichte

Es ist festzustellen, dass die mit dem Ansatz von BESLER ermittelten normierten Grenzverschiebungen über den aus den eigenen 1g-Versuchen ermittelten Werten liegen. Die Tendenz der Zunahme der normierten Grenzverschiebung mit abnehmender Lagerungsdichte bei den Versuchen wird mit dem Ansatz jedoch wiedergegeben. Der Ansatz von HORN liefert Werte, die weitgehend unter den gemessenen Werten liegen.

Tabelle 5.7: Grenzverschiebung s_p/h nach BESLER (s. Abschnitt 2.2), $f_{s,1} = 1.0$

Versuchsreihe	I_D	δ_p / φ	s_{p0} / h	$f_{d,1}$	$f_{s,1}$	$f_{M,1}$	s_p / h
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1g-V., Alu	0	-0.46	0.047	1.761	1.57	1.34	0.172
1g-V., Alu	1.0	-0.46	0.047	0.654	1.57	1.34	0.065

Vergleicht man die bei Fußpunktdrehung und Parallelverschiebung gemessene passive Erddruckkraft (Bild 5.76), so sieht man, dass bei der Fußpunktdrehung mit $I_D = 0.60 \dots 0.80$ nur ca. 62...64 % der Kraft bei der Parallelverschiebung erreicht wird.

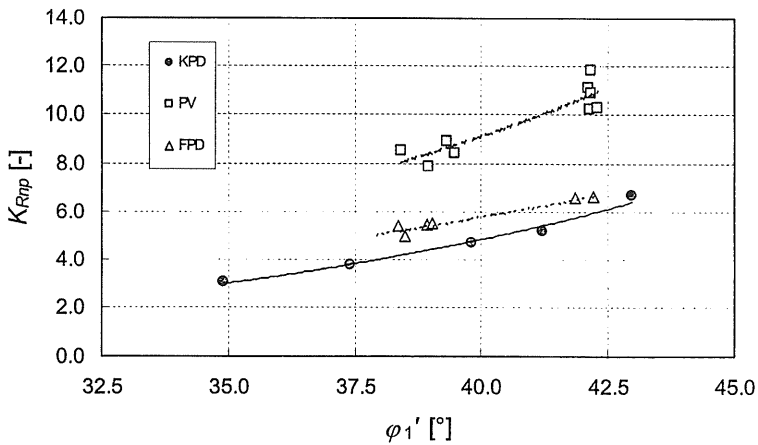


Bild 5.76: Normierte passive Erddruckkraft für 1g-Versuche (Alu) und alle Wandbewegungsarten bei Variation der Lagerungsdichte

Die bei der Fußpunktdrehung mobilisierte resultierende Erddruckneigung (Bild 5.77) liegt mit $\tan \delta_{Rp} = -0.32$ (Mittelwert) etwas über dem Wert bei der Parallelverschiebung mit $\tan \delta_{Rp} = -0.24$ (Mittelwert). Eine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte ist wie bei den anderen Wandbewegungsarten nicht festzustellen. Die Werte der bei der Kopfpunktdrehung sind deutlich kleiner (im Mittel $\tan \delta_{Rp} \approx 0$). Ein ähnliches Ergebnis ist auch bei den Versuchen von MAO festzustellen (Bild 5.78).

Der bei den Versuchen (eigene 1g-Versuche und Versuche von MAO) im Grenzzustand gemessene Angriffspunkt der Kraft bei der Fußpunktdrehung liegt im Mittel in einer Tiefe von $z_{Rp} = 0.40 \dots 0.44 \cdot h$ (Bild 5.79 und Bild 5.80) und damit deutlich höher als z.B. bei der Parallelverschiebung.

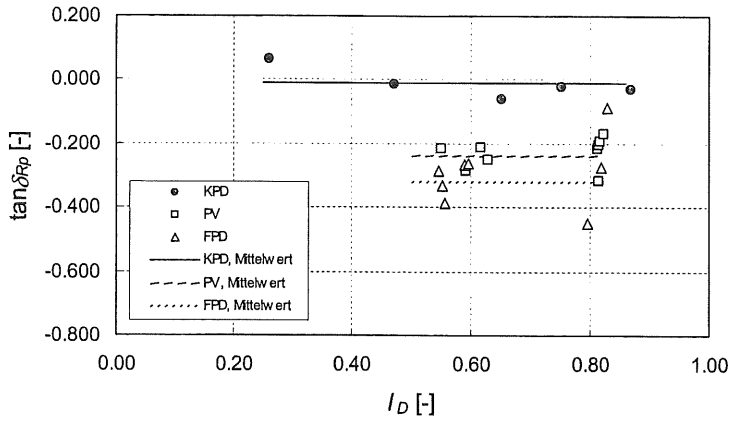


Bild 5.77: Neigung der Erddruckkraft für 1g-Versuche (Alu) und alle Wandbewegungsarten bei Variation der Lagerungsdichte

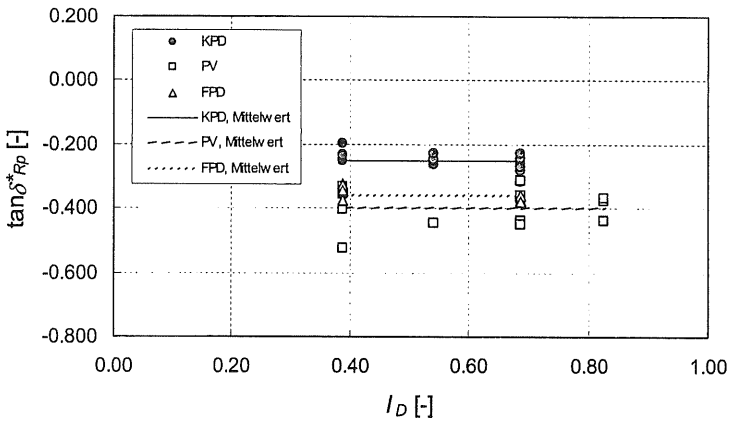


Bild 5.78: Neigung der Erddruckkraft für Versuche von MAO (1993) und alle Wandbewegungsarten bei Variation der Lagerungsdichte

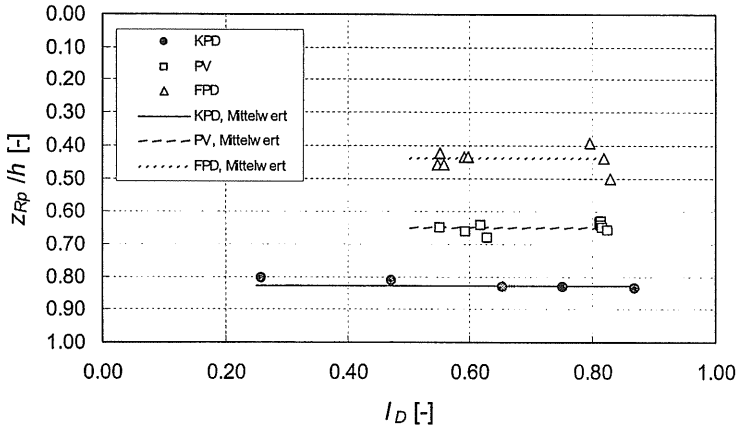


Bild 5.79: Normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft für 1g-Versuche (Alu) und alle Wandbewegungsarten bei Variation der Lagerungsdichte

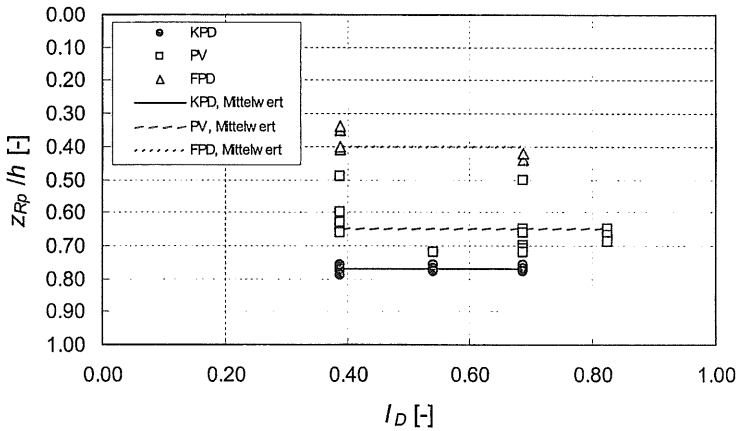


Bild 5.80: Normierte Angriffshöhe der Erddruckkraft für Versuche von MAO (1993) und alle Wandbewegungsarten bei Variation der Lagerungsdichte

5.4.2 Mobilisierung

Nachfolgend wird das Mobilisierungsverhalten des bewegungsabhängigen Normalanteils der stützenden Erddruckkraft ΔK_{Rn} in Abhängigkeit von der normierten kennzeichnenden Wandbewegung s/h (Kopfverschiebung) mit Hilfe des hyperbolischen Ansatzes nach Gl. (5.6) ausgewertet. In Bild 5.81 sind die aus den 1g-Versuchen ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ der Gl. (5.6) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D aufgetragen. Beide Beiwerte zeigen dabei eine deutliche Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Die Art der Wandoberfläche hat nach den vorliegenden Ergebnissen keinen ausgeprägten Einfluss.

Diese Abhängigkeit der Beiwerte von der bezogenen Lagerungsdichte I_D lässt sich für die eigenen 1g-Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche mit

$$T1 = 0.178 \cdot e^{-1.26 \cdot I_D}; (R^2 = 0.81) \quad (5.46)$$

und

$$T2 = 0.031 \cdot e^{-2.15 \cdot I_D}; (R^2 = 0.76) \quad (5.47)$$

beschreiben.

Die Abhängigkeit der Beiwerte vom Tangens des Reibungswinkels $\tan \varphi_1'$ kann z.B. mit

$$T1 = 1.294 \cdot e^{-3.36 \cdot \tan \varphi_1'}; (R^2 = 0.82) \quad (5.48)$$

und

$$T2 = 0.910 \cdot e^{-5.74 \cdot \tan \varphi_1'}; (R^2 = 0.77) \quad (5.49)$$

angegeben werden.

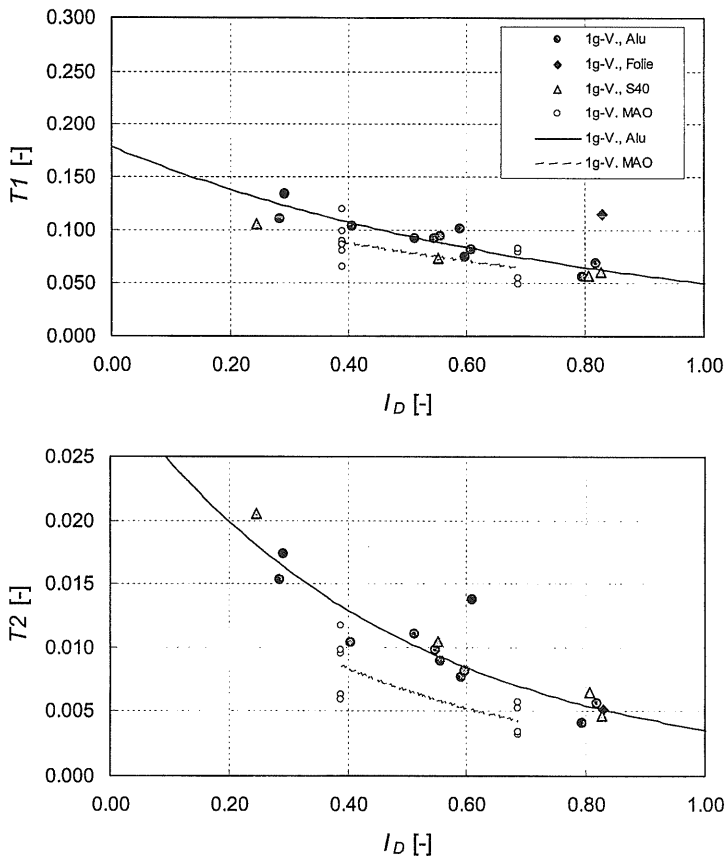


Bild 5.81: Beiwerte $T1$ und $T2$ für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.6) bei Variation der Lagerungsdichte

Bei Aluminium-Wandoberfläche und einer äquivalenten Wandhöhe $h_E \approx 0.6$ m erhält man für eine bezogene Lagerungsdichte von $I_D = 0.30$ danach $T1 = 0.122$ und $T2 = 0.016$, und für $I_D = 0.80$ ergibt sich $T1 = 0.065$ und $T2 = 0.006$. Die sich damit nach Gl. (5.6) ergebenden Mobilisierungsfunktionen sind im Bild 5.82 dargestellt.

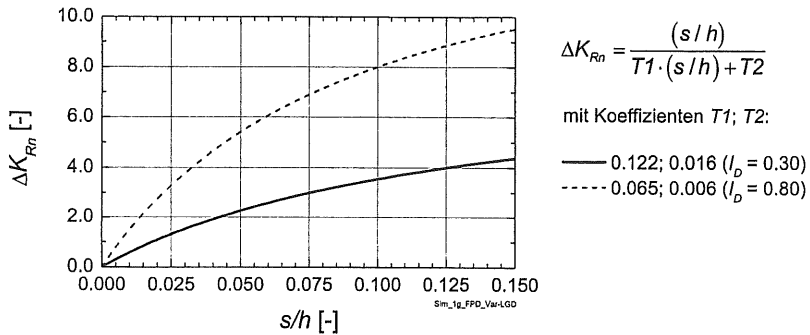


Bild 5.82: Beispiel für Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.6) mit den ermittelten Koeffizienten $T1$ und $T2$ für 2 Lagerungsdichten, $h_E \approx 0.6$ m

Zum Vergleich sind in Bild 5.83 die aus den eigenen 1g-Versuchen mit Aluminium-Wandoberfläche ermittelten Beiwerte $T1$ und $T2$ in Gl. (5.6) für alle drei Wandbewegungsarten zusammengestellt. Danach stimmt der Beiwert $T1$ bei Parallelverschiebung und Fußpunktdrehung und der Beiwert $T2$ bei Parallelverschiebung und Kopfpunktdrehung nahezu überein.

Bild 5.84 zeigt die aus den einzelnen 1g-Versuchen ermittelten Koeffizienten b und c der Gl. (5.8) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte l_D (siehe Anhang D.3). Die Versuche zeigen, dass die Beiwerte b und c nicht von der Lagerungsdichte abhängig sind. Für die 6 Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche liegen die Werte im Mittel bei $b = 1.05 \pm 0.07$ bzw. $c = 0.69 \pm 0.05$. Die sich mit diesen Beiwerten für diese Versuche ergebenden Mobilisierungskurven sind in Bild 5.85 dargestellt. Bild 5.70 zeigt die aus den Mobilisierungskurven für die Versuche mit Aluminium-Wandoberfläche abgeleitete „mittlere Mobilisierungskurve“, die sich bei einem konstanten Beiwert von $c = 0.70$ mit $b = 1.06$ beschreiben lässt. Die ebenfalls eingetragene „obere“ und „untere“ Mobilisierungskurve wurde aus der Standartabweichung „abgeleitet“.

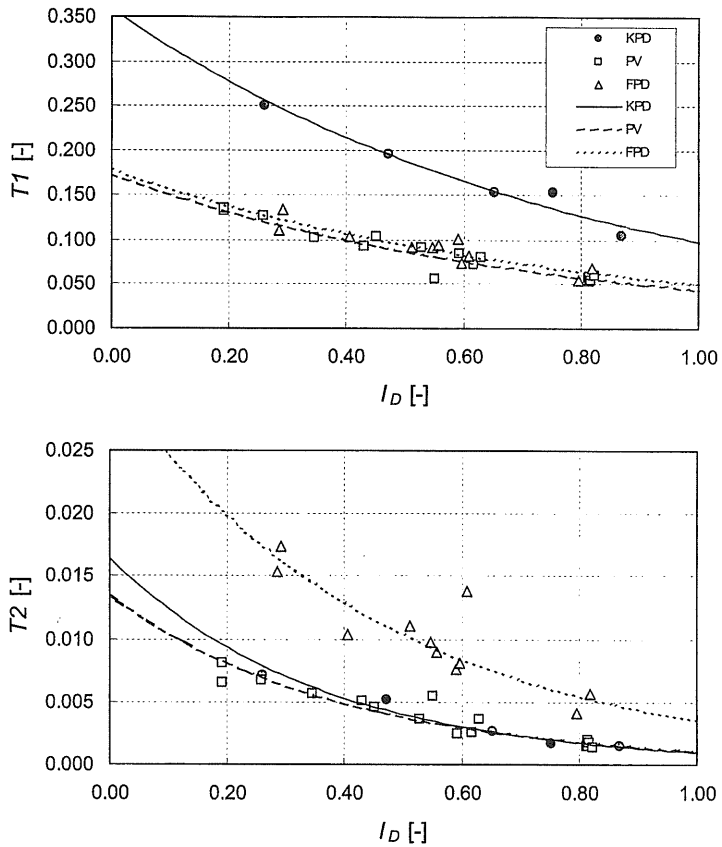


Bild 5.83: Beiwerte $T1$ und $T2$ für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.6) und alle Wandbewegungsarten bei Variation der Lagerungsdichte

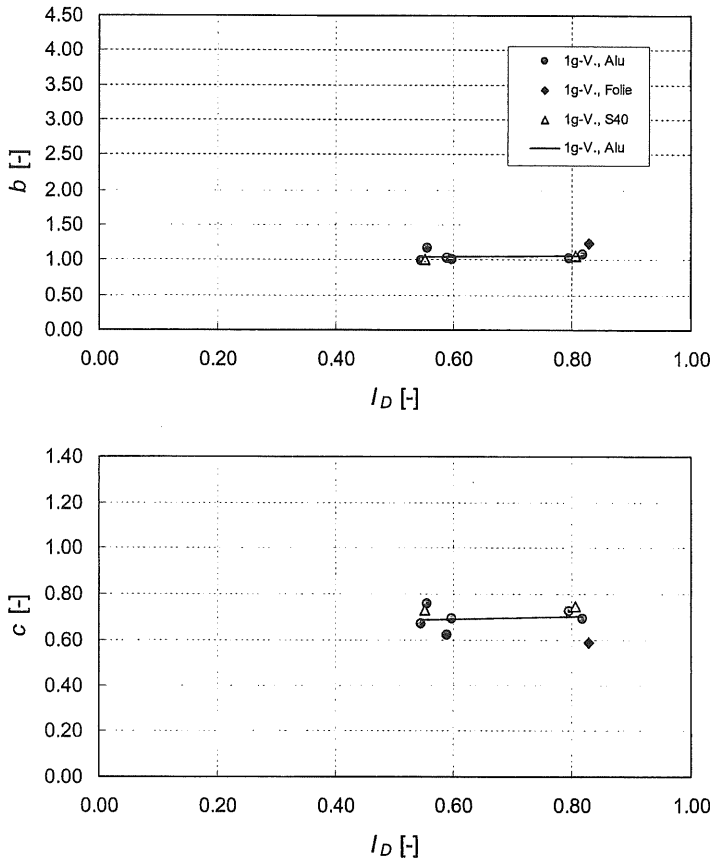


Bild 5.84: Beiwerte b und c für den Mobilisierungsansatz nach Gl. (5.8) bei Variation der Lagerungsdichte

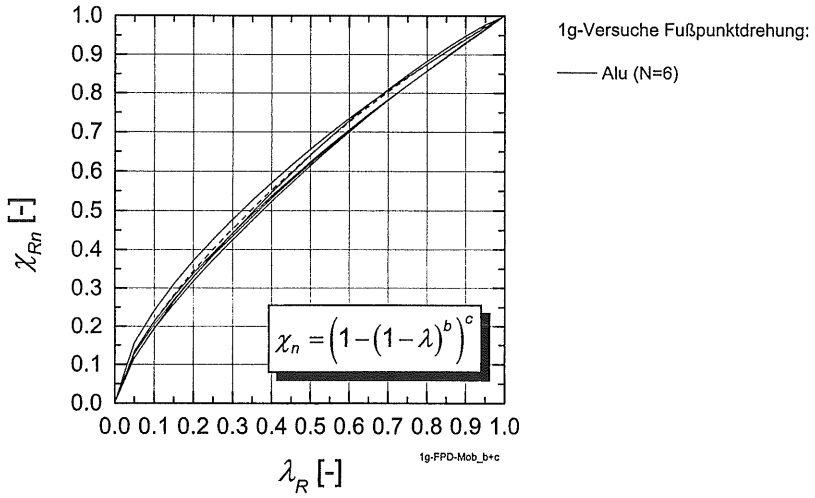


Bild 5.85: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

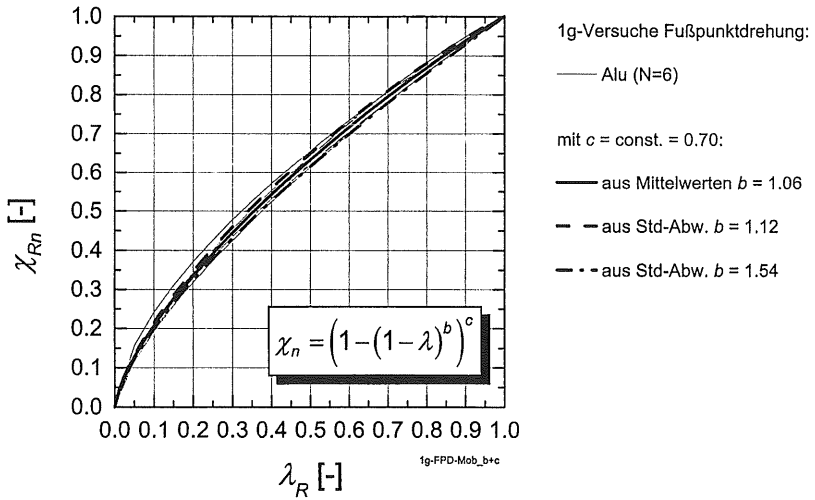


Bild 5.86: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) mit den ermittelten Koeffizienten b und c

In Bild 5.87 zeigt die aus den 1g-Versuchen mit Aluminium-Wandoberfläche ermittelten Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) für alle Wandbewegungsarten. Es wird deutlich, dass sich der Mobilisierungsverlauf bei allen Bewegungsarten mit einem vereinheitlichten, konstanten Beiwert $c = 0.70$ und einem unterschiedlichen Beiwert b gut beschreiben lässt.

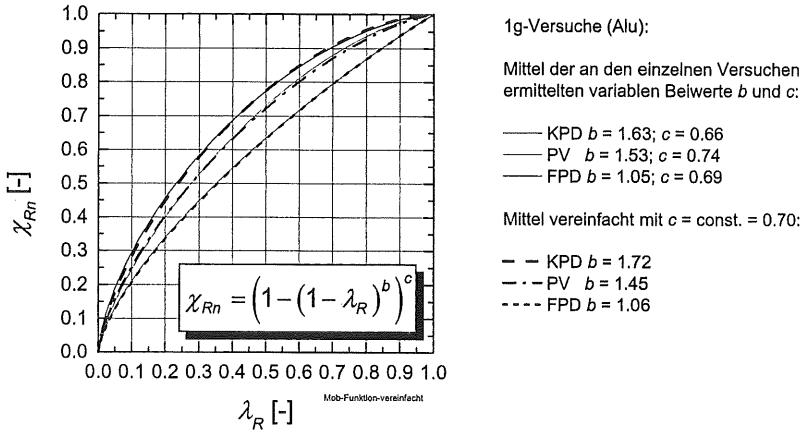


Bild 5.87: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) für 1g-Versuche (Alu) für alle Wandbewegungsarten

5.4.3 Bewertung

Die Ergebnisse der Versuche zum stützenden Erddruck bei Fußpunktdrehung werden wie folgt zusammengefasst:

Passiver Erddruck (Grenzzustand):

- Bei allen Lagerungsdichten wird kein Maximalwert der Erddruckkraft erreicht, obwohl Gleitflächen im Sand auftreten („Staffelbruch“).

- Als Anhaltspunkt bzw. Kriterium für das Erreichen des passiven Grenzzustandes wurde der Zustand des Auftretens der ersten Bruchkante an der Sandoberfläche herangezogen.

Mobilisierung:

- Die Mobilisierung der Größe der stützenden Erddruckkraft (Normalanteil) in Abhängigkeit von der normierten kennzeichnenden Wandbewegung (Kopfverschiebung) lässt sich mit einem hyperbolischen Ansatz nach Gl. (5.6) mit 2 Beiwerten für alle Lagerungsdichten gut beschreiben. Beide Beiwerte zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Die Art der verwendeten Wandoberfläche hat keinen starken Einfluss auf die Beiwerte.
- Die Neigung der Erddruckkraft $\tan \delta_R$ erreicht nach dem Beginn der Wandbewegung relativ zügig einen negativen Maximalwert und bleibt anschließend nahezu konstant (s. Bild 4.15 bzw. Bild A.12).
- Die Angriffshöhe der Erddruckkraft liegt zu Versuchsbeginn im Bereich des unteren Drittelpunktes der Wand von $z/h = 0.67$. Nach Beginn der Wandbewegung wandert der Angriffspunkt stark nach oben, erreicht eine maximale Höhe von $z_R/h \approx 0.40$ und fällt danach wieder etwas ab (s. Bild 4.15 bzw. Bild A.12).
- Der Mobilisierungsgrad der passiven Erddruckkraft in Abhängigkeit vom Mobilisierungsgrad der passiven Grenzverschiebung lässt sich auch mit einem Ansatz nach Gl. (5.8) mit 2 Beiwerten beschreiben. Beide Beiwerte zeigen keine Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Die Art der verwendeten Wandoberfläche hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Beiwerte. Mit guter Genauigkeit lässt sich der gemessene Mobilisierungsverlauf aber auch mit einem konstanten Beiwert von $c = 0.70$ beschreiben.

5.5 Vergleichende Bewertung und Empfehlungen

Nur bei der Kopfpunktdrehung tritt bei allen untersuchten Lagerungsdichten ein Grenzwert der Erddruckkraft auf. Bei lockerer bis mitteldichter Lagerung war bei den 1g-Versuchen allerdings zu beobachten, dass bereits vor Erreichen dieses Grenzwertes die Gleitfläche bis zur Sandoberfläche durchgängig ausgebildet war. Bei den beiden 1g-Versuchen mit der geringsten Lagerungsdichte wird deshalb der Zustand der Ausbildung der Gleitfläche als Grenzzustand betrachtet.

Bei der Parallelverschiebung ist das Erreichen eines Grenzwertes der Erddruckkraft nur bei dichter bis mitteldichter Lagerung festzustellen. Bei lockerer Lagerung bis mitteldichter Lagerung wird kein Grenzwert erreicht, obwohl bis zum Versuchsende die Gleitflächen jeweils komplett ausgebildet waren.

Bei der Fußpunktdrehung wird bei keiner Lagerungsdichte ein Grenzwert der Erddruckkraft erreicht, obwohl sich während des Versuchs stoffbruchartige Gleitflächen im Sand ausbilden.

Nach den Versuchsergebnissen kann der Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte (I_D bzw. $\tan \varphi'_1$) und der normierten Grenzverschiebung s_p/h durch eine Gerade beschrieben werden. Mit abnehmender Lagerungsdichte nimmt dabei aber die Streuung der Grenzverschiebung zu.

Der Anstieg der Geraden ist bei der Kopfpunktdrehung flacher als bei der Parallelverschiebung (s. Bild 5.42).

Bei den eigenen Versuchen wurden Wände mit unterschiedlicher Rauigkeit eingesetzt. Ein Einfluss auf die Grenzverschiebung war nicht feststellbar.

Die Zentrifugen-Versuche zur Parallelverschiebung und zur Kopfpunktdrehung bei mitteldichter bis dichter Lagerung zeigen, dass mit steigendem Spannungsniveau die Grenzverschiebung zunimmt. Dabei ist der Einfluss des Spannungsniveaus bei mitteldichter Lagerung geringer ausgeprägt als bei dichter Lagerung (s. Abschnitt 5.2.1). Gleichzeitig nimmt bei mitteldichter Lagerung auch die Streuung der Versuchswerte zu.

Da die Zentrifugen-Versuche mit Fußpunktdrehung ein deutlich anderes Verhalten als die eigenen 1g-Versuche und die Versuche von MAO zeigen (s. Abschnitt 4.4), wurden diese Versuche bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Zur Auswertung der eigenen 1g-Versuche mit Fußpunktdrehung hinsichtlich des Grenzzustandes und der Grenzver-

schiebung wurde das Auftreten der ersten Bruchkante an der Sandoberfläche herangezogen. Es zeigt sich, dass die daraus abgeleitete normierte kennzeichnende Grenzverschiebung mit der Grenzverschiebung bei Parallelverschiebung nahezu übereinstimmt (s. Bild 5.74). Da für die Versuche von MAO (1993) zur Fußpunktdrehung keine entsprechenden Beobachtungen vorliegen, wurden sie nicht in die Auswertung zur Grenzverschiebung und zur passiven Erddruckkraft einbezogen.

Mit dem Vorschlag von BESLER (1995 / 1998) zur Ermittlung der Grenzverschiebung, der im Wesentlichen auf den Versuchsergebnissen von MAO (1993) beruht, können die eigenen Versuchsergebnisse nicht wiedergeben werden (s. Abschnitt 5.2.1 und 5.3.1).

Bild 5.88 zeigt alle bereits bei der Auswertung zur Parallelverschiebung im Abschnitt 5.2.1 dargestellten Versuchsergebnisse zur normierten Grenzverschiebung in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte. Eingetragen sind sowohl die eigenen Versuche (1g und Zentrifuge) als auch die Versuche von MAO. Hinsichtlich ihrer Randbedingungen unterscheiden sich die Versuche z. B. durch das Spannungsniveau/Wandhöhe und den im Grenzzustand mobilisierten resultierenden Reibungsbeiwert $\tan \delta_{rp}$. Die normierte Grenzverschiebung dieser 57 Versuche (12 1g-Versuche, 36 Zentrifugen-Versuche und 9 1g-Versuche von MAO) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte lässt sich mit

$$s_p / h = -0.087 \cdot I_D + 0.124 ; (R^2 = 0.50) \quad (5.50)$$

beschreiben. Dies stimmt mit dem Ergebnis zu den eigenen 1g-Versuchen mit Aluminium-Wandoberfläche (s. Abschnitt 5.2.1) nahezu überein.

Eine weitere Differenzierung der Beschreibung der Grenzverschiebung hinsichtlich der untersuchten Einflussgrößen wie Spannungsniveau und dem im Grenzzustand mobilisierten resultierenden Erddruckneigungswinkel an der Wand, wie sie z.B. von BESLER vorgeschlagen wurde, wird für die praktische Anwendung auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht empfohlen. So zeigte die Art der Wandoberfläche und damit die Rauigkeit bei den eigenen Versuchen keinen signifikanten Einfluss. Außerdem war bei den vorliegenden Versuchen (eigene und MAO) durch den Versuchsablauf (Sandeinbau vor einer bestehenden Wand) im Ausgangszustand immer eine positive Erddruckneigung vorhanden. Dies dürfte auch die während des Versuchs und im Grenzzustand gemessene mobilisierte Erddruckneigung (bzw.

mobilisierter Reibungsbeiwert) beeinflussen. Für andere Situationen, wie z.B. dem Einbau der Wand in einen bestehenden Bodenkörper, und somit wahrscheinlich einer negativen Erddruckneigung im Ausgangszustand, liegen bislang keine Untersuchungen vor. Die Abhängigkeit der Grenzverschiebung von Lagerungsdichte und Spannungsniveau, und somit der Wandhöhe, ist nach den eigenen Untersuchungen allenfalls für die untersuchte Lagerungsdichte von $I_D \approx 0.82$ klar trennbar. Bei mitteldichter Lagerung nimmt zum einen der Einfluss des Spannungsniveaus ab und zum anderen nimmt die Streuung der Versuchswerte zu. Der anteilige Einfluss von Lagerungsdichte und Spannungsniveau ist somit nicht mehr ausreichend trennbar.

Für den Fall Parallelverschiebung in trockenem Sand (Bild 5.88) wird deshalb empfohlen, die Abhängigkeit der normierten Grenzverschiebung von den variierten Randbedingungen allein über die bezogene Lagerungsdichte vereinfacht mit

$$s_p / h = -0.090 \cdot I_D + (s_p / h)_0 \quad (5.51)$$

zu beschreiben.

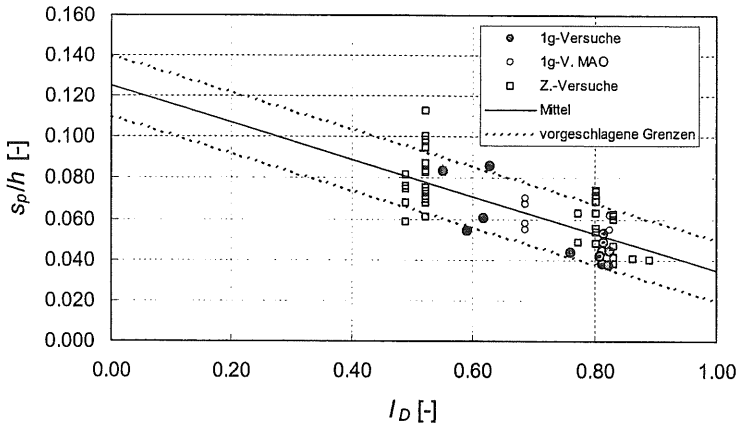


Bild 5.88: Normierte passive Grenzverschiebung für Parallelverschiebung bei Variation der Lagerungsdichte, der Wandoberfläche und des Spannungsniveaus

Der Parameter $(s_p/h)_0$ beschreibt dabei die normierte Grenzverschiebung bei einer Lagerungsdichte von $I_D = 0$ und liegt im Mittel bei $(s_p/h)_0 = 0.125$. Die Einflüsse der untersuchten Randbedingungen, wie Spannungsniveau und Erddruckneigung, und die Streuung der Versuchswerte lassen sich durch eine „obere“ und „untere“, zum Mittelwert parallele Grenze mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Als Grenzen werden die Werte $(s_p/h)_0 = 0.110$ und 0.140 vorgeschlagen (s. Bild 5.88). Die Grenzverschiebung bei $I_D = 1.0$ ergibt sich danach zu $s_p/h = 0.020$ bis 0.050 , im Mittel zu $s_p/h = 0.035$.

Für den Fall Fußpunktdrehung in trockenem Sand wird auf der Grundlage der Versuchsbeobachtungen (s. Abschnitt 5.4.1) empfohlen, die Abhängigkeit der normierten Grenzverschiebung von den variierten Randbedingungen ebenfalls mit Gl. (5.51) und den oben genannten Werten für $(s_p/h)_0$ zu beschreiben.

Bild 5.89 zeigt alle bereits bei der Auswertung zur Kopfpunktdrehung im Abschnitt 5.3.1 dargestellten Versuchsergebnisse zur normierten Grenzverschiebung in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte, insgesamt 43 Versuche (7 1g-Versuche, 17 Zentrifugen-Versuche und 19 1g-Versuche von MAO). Hinsichtlich ihrer Randbedingungen unterscheiden sich auch diese Versuche z. B. durch das Spannungsniveau/Wandhöhe, und den im Grenzzustand mobilisierten resultierenden Reibungsbeiwert $\tan \delta_{Rp}$.

Für den Fall Kopfpunktdrehung in trockenem Sand wird ebenfalls empfohlen, die Abhängigkeit der normierten Grenzverschiebung von den variierten Randbedingungen allein über die bezogene Lagerungsdichte zu beschreiben. Da zu mitteldichter Lagerung keine Zentrifugen-Versuchsergebnisse vorliegen, wird empfohlen den Anstieg der Geraden auf der Grundlage der 1g-Versuche (eigene und MAO, s. Abschnitt 5.3.1) vereinfacht mit -0.050 anzusetzen. Der Zusammenhang zwischen der normierten Grenzverschiebung und der bezogenen Lagerungsdichte ergibt sich damit zu:

$$s_p/h = -0.050 \cdot I_D + (s_p/h)_0 \quad (5.52)$$

Zur Beschreibung des Wertebandes für die normierte Grenzverschiebung (Bild 5.89) wird als unterer bzw. oberer Wert $(s_p/h)_0 = 0.070$ bzw. 0.110 vorgeschlagen. Die Versuchsergebnisse lassen sich dadurch mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Im

„Mittel“, könnte z.B. $(s_p/h)_0 = 0.090$ angesetzt werden. Die Grenzverschiebung für $I_D = 1.0$ ergibt sich danach zu $s_p/h = 0.020$ bis 0.060 , im Mittel zu $s_p/h = 0.040$.

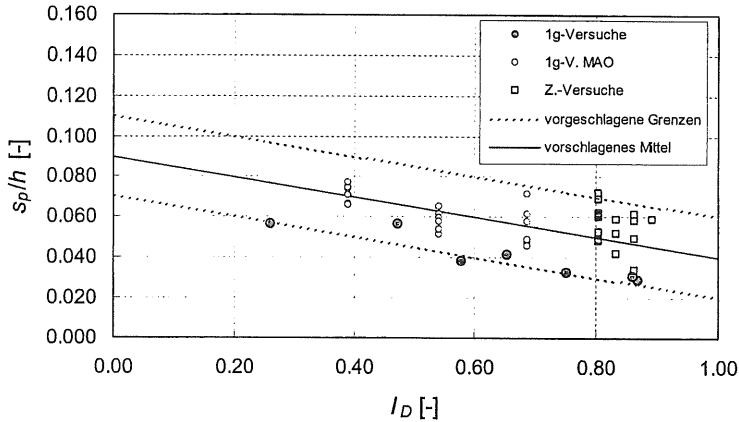


Bild 5.89: Normierte passive Grenzverschiebung für Kopfpunktdrehung bei Variation der Lagerungsdichte und des Spannungsniveaus

Für den Fall „Sand unter Wasser“ wird vorgeschlagen, die Grenzverschiebung auf der Grundlage von Gl. (5.51) bzw. (5.52) zu ermitteln und mit einem Erhöhungsfaktor zu beaufschlagen. Dieser kann z.B. nach BESLER (s. Abschnitt 2.2) im Mittel mit 1.6 angesetzt werden.

Die in den Zentrifugen-Versuchen gemessene passive Erddruckkraft (Normalanteil E_{pn} bzw. K_{Rnp}) nimmt mit steigendem Spannungsniveau leicht ab. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Spannungsniveau und der Größe der gemessenen Kraft ist allenfalls schwach ausgebildet (s. Abschnitt 5.2.1 und 5.3.1). Die passive Erddruckkraft wird jedoch wesentlich von der Wandbewegungsart beeinflusst. Die größte Kraft wird dabei bei der Parallelverschiebung erreicht. Bei Kopfpunktdrehung erreicht die Erddruckkraft im Grenzzustand nur ca. 50...70 % der Kraft bei Parallelverschiebung. Gleichzeitig ist bei der Kopfpunktdrehung der im Grenzzustand mobilisierte Erddruckneigungswinkel δ_{rp} wesentlich kleiner als bei der Parallelverschiebung. Dies ist bei

allen Versuchen der Fall (eigene und Versuche von MAO). Berechnet man also die passive Erddruckkraft für den Fall Kopfpunktdrehung, und setzt dabei den gleichen Erddruckneigungswinkel wie bei der Parallelverschiebung an, so ist die ermittelte Kraft auf 50 - 70 % abzumindern. Bei Fußpunktdrehung erreicht die Erddruckkraft im Grenzzustand nur ca. 62...64 % der Kraft bei Parallelverschiebung. Der dabei im Grenzzustand mobilisierte Erddruckneigungswinkel δ_{Rp} hat aber ungefähr die gleiche Größe, wie bei der Parallelverschiebung.

Die Erddruckverteilung und damit die Angriffshöhe der passiven Erddruckkraft an der Wand ist stark von der Wandbewegungsart abhängig. Die Erddruckverteilung bzw. die Angriffshöhe der passiven Erddruckkraft an der Wand zeigt im Grenzzustand nur eine geringe Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und keine Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Die Art der untersuchten Wandoberflächen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Angriffshöhe. Es zeigt sich (s. Anhang D), dass der lokale Wandreibungsbeiwert im Grenzzustand am Kopf den größten negativen Wert aufweist – die Tangentialspannung wirkt von unten nach oben an der Wand (negativ nach Definition in Bild 4.1) – und mit zunehmender Tiefe abnimmt. Am Wandfuß entstehen Bereiche, in denen die Tangentialspannung von oben nach unten wirkt (positiv).

Bei der Parallelverschiebung nimmt der Erddruck (Normal- bzw. Horizontalanteil) näherungsweise linear mit der Tiefe zu. Es kommt nahezu zu einer Dreiecksverteilung mit dem größten Erddruck am Wandfuß. Die Erddruckkraft greift damit im unteren Drittel der Wand an. Der bei den Versuchen gemessene Angriffspunkt liegt etwas höher und der gemessene Erddruck ist im oberen Wandbereich etwas größer als mit linearer Zunahme prognostiziert. Dies wird in erster Linie auf den oben beschriebenen Effekt der Mobilisierung einer größeren negativen Erddruckneigung im oberen Wandbereich zurückgeführt.

Bei der Kopfpunktdrehung nimmt der Erddruck mit der Tiefe überproportional zu. Diese Zunahme lässt sich (s. Anhang D.2) z.B. durch eine Potenzfunktion beschreiben. Der bei den Versuchen gemessene Angriffspunkt der Kraft liegt in einer Tiefe von $z_{Rp} = 0.75...0.83 \cdot h$. Die Angriffshöhe und somit die Verteilung ist nur schwach von der Lagerungsdichte abhängig und vom Spannungsniveau und der Art der Wandoberfläche unabhängig.

Bei der Fußpunktdrehung nimmt der Erddruck bis zu einer Tiefe von in etwa der halben Wandhöhe näherungsweise linear zu und erreicht dort seinen Größtwert (s. An-

hang D.3). Ab dieser Tiefe nimmt der mobilisierte Erddruck wieder ab und ist am Wandfuß nahezu Null. Die Erddruckverteilung kann somit näherungsweise mit einem Dreieck beschrieben werden, das seinen Größtwert in Nähe der Wandmitte aufweist. Der bei den Versuchen (eigene 1g und MAO) im Grenzzustand gemessene Angriffspunkt der Kraft liegt in einer Tiefe von $z_{Rp} = 0.40 \dots 0.44 \cdot h$.

Der Mobilisierungsgrad der passiven Erddruckkraft in Abhängigkeit vom Mobilisierungsgrad der passiven Grenzverschiebung (Bild 5.90) lässt sich für praktische Anwendungen z.B. mit einem Ansatz nach Gl. (5.8) mit 2 Beiwerten für alle Lagerungsdichten und den untersuchten Spannungsbereich ausreichend genau beschreiben.

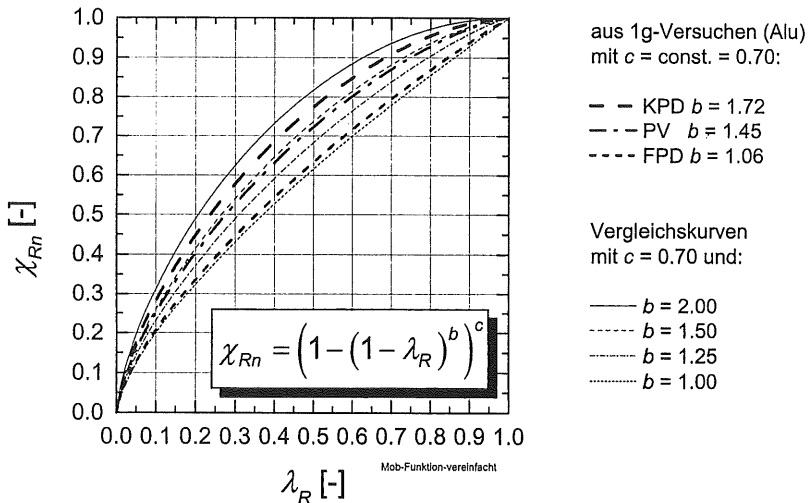


Bild 5.90: Mobilisierungsfunktionen nach Gl. (5.8) für alle Wandbewegungsarten

Auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchungsergebnisse wird empfohlen den Beiwert c als Konstante mit $c = 0.70$ anzusetzen. Der Mobilisierungsgrad des von der Wandverschiebung abhängigen Anteils der passiven Erddruckkraft in Abhängigkeit von der Wandbewegungsart lässt sich allein durch die Variation des Beiwertes b beschreiben. Die aus den vorliegenden Untersuchungen abgeleiteten und für die praktische Anwendung empfohlenen „mittleren“ Mobilisierungskurven für die drei Grundwandbe-

wegungsarten und der zugehörige Beiwert, die unabhängig von der Lagerungsdichte sind, werden in Bild 5.90 aufgeführt.

Die Abschätzung einer zu einem speziellen Mobilisierungsgrad der passiven Erddruckkraft gehörenden Wandverschiebung kann über den Mobilisierungsgrad der Grenzverschiebung mit

$$\lambda_{Rn} = 1 - \left(1 - \lambda_{Rn}^{(1/c)}\right)^{(1/b)} \quad (5.53)$$

erfolgen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Mobilisierungsverhalten des passiven Erddrucks in kohäsionslosem Boden und 3 verschiedenen Arten der Wandbewegung.

Systematische Messungen bei Modellversuchen zur o.g. Problematik mit einer gezielten Variation von Einflussparametern, u. a. der Lagerungsdichte und des Sättigungsgrades des Sandes, lagen bislang nur von MAO (1993) vor. Bei den 1g-Modellversuchen von MAO war allerdings das Spannungsniveau mit einer Wandhöhe von 0.10 bis 0.25 m sehr gering. BESLER (1995) veröffentlichte auf der Grundlage der Versuche von MAO einen Ansatz zur Ermittlung der passiven Grenzverschiebung. Dieser soll mit Hilfe eines sogenannten Grundwertes der Grenzverschiebung und verschiedenen Faktoren für Einflussgrößen, wie Lagerungsdichte, Erddruckneigung und Sättigungsgrad des Sandes die Ermittlung der Grenzverschiebung ermöglichen. Von BESLER werden alle diese Faktoren mit Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Später wurde dieser Ansatz von BESLER (1998) noch um einen Vorschlag zur Berücksichtigung der Vorbelastung des Bodens und um einen Faktor zur Berücksichtigung des Maßstabes (Wandhöhe/Spannungsniveau) erweitert. Der vorgeschlagene Maßstabsfaktor beruht dabei im Wesentlichen auf den von WOLFRAM (1995) im Rahmen der hier vorgelegten Untersuchungen durchgeführten Zentrifugen-Modellversuche mit dichter Lagerung und ist bei BESLER deshalb nicht von der Lagerungsdichte abhängig. Der von BESLER (1998) zur Beschreibung des Mobilisierungsverhaltens der Erddruckkraft entwickelte hyperbolische Ansatz (s. Abschnitt 2.3) wurde bei den eigenen Untersuchungen nicht berücksichtigt, da er neben dem Grenzwert nur auf einen „Mobilisierungszwischenwert“, die sogenannte „50%-Verschiebung“, aus den Versuchen von MAO zurückgreift.

Systematische Berechnungen zum Mobilisierungsverhalten des Erddrucks (passiv und aktiv) bei den definierten Grundwandbewegungsarten mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) und eines speziellen bodenmechanischen Stoffgesetzes wurden von ABDEL-RAHMAN (1999) durchgeführt (Abschnitt 2.4). Dabei wurden drei Lagerungsdichten eines kohäsionslosen (trockenen) Sandes und verschiedene Wandhöhen (Variation des Spannungsniveaus im Boden) simuliert. Bei den

Berechnungen wurde der Wandreibungsbeiwert mit $\mu = \tan \delta = 0$ angesetzt, d. h. eine resultierende bzw. lokale Erddruckneigung ist sowohl vor Eintragung der Wandbewegung als auch während der Wandbewegung nicht vorhanden. Spezifische Effekte z.B. durch Einbau des Sandes vor der Wand wie bei den Modellversuchen und ihr Einfluss auf die Ausgangsspannung an der Wand, die mobilisierte Erddruckneigung, den Erddruck und die Erddruckkraft wurden somit vernachlässigt. Die Berechnungsergebnisse geben jedoch z.B. Mobilisierung der Erddruckverteilung und die Grenzverschiebung bei dichter Lagerung gut wieder. Das Mobilisierungsverhalten der Erddruckkraft bei den eigenen Versuchen wird bei diesen Berechnungen zur Zeit noch nicht zutreffend wiedergegeben.

Die eigenen Untersuchungen begannen mit dem Entwurf, Bau und Inbetriebnahme der gesamten verwendeten 1g-Modellversuchstechnik einschließlich der Entwicklung spezieller Erddruckmessdosen und einer bei Großmodellversuchen üblichen Sandeinbautechnologie. Mit dieser Messtechnik wurde es möglich auch die Erddruckverteilung über die Wandhöhe, einschließlich des normal- und Tangentialanteils zu messen. Durch die enge und freundschaftliche Zusammenarbeit mit dem Institut für Geotechnik der Universität für Bodenkultur Wien (Prof. Pregl) konnte im Rahmen der Untersuchungen auch die dortige Zentrifugen-Modelltechnik genutzt werden. Dadurch wurden Modellversuche zum Einfluss des Spannungsniveaus ermöglicht. Die im Rahmen der Untersuchungen eingesetzten Modelltechniken und die bodenmechanischen Kennwerte des Versuchssandes sind in Abschnitt 3 beschrieben.

Im Abschnitt 4 werden die eigenen Versuchsergebnisse für die verschiedenen Wandbewegungsarten zusammengestellt beschrieben. Diese Zusammenstellung und Beschreibung wesentlicher Versuchsbeobachtungen zeigt bereits qualitativ die Abhängigkeit der Mobilisierung des stützenden Erddrucks und der resultierenden Erddruckkraft von der Wandbewegungsart, der Lagerungsdichte und deuten den Einfluss des Spannungsniveaus an.

Die Ergebnisse der eigenen und der Versuche von MAO werden in Abschnitt 5 ausgewertet. Die Auswertung erfolgte im Hinblick auf den passiven Grenzzustand bezüglich der Größen Grenzverschiebung, passiver Erddruckkraft, resultierender Erddruckneigung, rechnerische Erddruckbeiwerte, Angriffshöhe und Bruchkörperlänge sowie zum Mobilisierungsverhalten der Erddruckkraft jeweils für die entsprechende Wandbewegungsart. Der quantitative Einfluss der gezielt variierten Randbedingungen

wie Lagerungsdichte, Art der Wandoberfläche und Einfluss des Spannungsniveaus wurde ermittelt.

Auf der Grundlage dieser Auswertungen werden in Abschnitt 5.5 die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen herausgestellt und bewertet. Zusammenfassend werden Ansätze zur Ermittlung der passiven Grenzverschiebung bzw. des Mobilisierungsverhaltens der passiven Erddruckkraft in Abhängigkeit von der Wandbewegungsart und den untersuchten Einflussgrößen vorgestellt. Mit diesen Ansätzen können für entsprechende Fälle die Grenzverschiebung und der Mobilisierungsverlauf der passiven Erddruckkraft bei ebenen Wänden in nichtkohäsivem Boden abgeschätzt werden.

Die Untersuchungsergebnisse können außerdem für die Verbesserung entsprechender Verfahren zur Berechnung von Stützkonstruktionen genutzt werden. Eine Anwendung wäre z. B. die Verbesserung der Ansätze zur Grenzverschiebung und dem Mobilisierungsverhalten im modifizierten Bettungszahlverfahren nach NEUBERG (2002). Weiterhin können die Versuchsergebnisse zur Kalibrierung von Berechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode, die in der geotechnischen Ingenieurpraxis bereits vielfältig eingesetzt werden, bzw. der Verbesserung der implementierten Stoffgesetze dienen.

Literaturverzeichnis

- ABDEL-RAHMAN, K. (1999): Numerische Untersuchungen von Maßstabseffekten beim Erddruck in Sand. Schriftenreihe des Lehrstuhls Baugrund-Grundbau der Universität Dortmund, Heft 22.
- ALTES, J. (1972): Die Bedeutung der Verformungen in der Bodenmechanik - 10. Rankine Lecture 1970. In: Der Bauingenieur, 47. Jg., S. 101-105.
- ARNOLD, M. (1996): Untersuchungen zum Erdwiderstand auf eine ebene Wand für den Fall Drehung der Wand um eine Achse im Wandkopf. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der TU Dresden, unveröffentlicht.
- ARNOLD, M.; FRANKE, D.; BARTL, U. (2003): A solution to concurrent measurement of the normal and tangential earth pressure in model tests. Aus: Natau, O.; Fecker, E.; Pimentel, E. (Hrsg.): Geotechnical Measurements and Modelling - Proc. Int. Symp. on Geotechnical Measurements and Modelling, 2003, Karlsruhe. Lisse / Abington / Exton / Tokyo (A.A.Balkema Publishers). S. 321-326.
- BARTL, U. (1995): Zum Stand der Erddruckversuche am Institut. Aus: Franke, D. (Hrsg.): OHDE-Kolloquium 1993. Dresden. (=Mitteilungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 2) S. 67-86.
- BARTL, U. (1995): Untersuchungen zum Erdwiderstand auf ebene Wände am Beispiel von 1g-Modellversuchen mit Kopfpunktdrehung. Aus: Franke, D. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Franke. Dresden. (=Mitteilungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 3) S. 201-216.
- BARTL, U.; FRANKE, D. (1997): Ergebnisse von Modellversuchen zur Untersuchung der Abhängigkeit des stützenden Erddrucks von Wandbewegungen - am Beispiel von Zentrifugenversuchen mit Kopfpunktdrehung. Aus: Franke, D. (Hrsg.): OHDE-Kolloquium 1997. Dresden. (=Mitteilungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 4) S. 1-27.

- BARTL, U.; FRANKE, D. (1998): Zur Mobilisierung des passiven Erddrucks in trockenem Sand. Aus: Maric, B.; Lisac, Z.; Szavits-Nossan, A. (Hrsg.): Geotechnical Hazards - Proc. 11. Danube - European Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam / Brookfield (A.A.Balkema). S. 189-196.
- BARTL, U.; RÖßNER, T.; FERSTL, F. (2001): Mobilisierung des passiven Erddrucks in einem kohäsiven Boden. Aus: Franke, D. (Hrsg.): OHDE-Kolloquium 2001. Dresden. (=Mitteilungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 9) S. 87-104.
- BESLER, D. (1995): Verschiebungsgrößen bei der Mobilisierung des Erdwiderstandes von Sand. In: Bautechnik, 72. Jg., H. 11, S. 748-755.
- BESLER, D. (1998): Wirklichkeitsnahe Erfassung der Fußauflagerung und des Verformungsverhaltens von gestützten Baugrubenwänden. Schriftenreihe des Lehrstuhls Baugrund-Grundbau, Universität Dortmund, Heft 22.
- BRANSBY, P.L. (1968): Stress and strain in sand caused by rotation of a model wall. Cambridge University, Ph.D. thesis.
- BRINCH HANSEN, J. (1965): Some Stress-Strain Relationships for Soils. in: Proc. of the 6. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. I, Montreal, University of Toronto Press, S. 231-234.
- CAQUOT, A.; KERISEL, J. (1948): Aktive and Passive Earth Pressure Tables. Paris (Gauthier Villars).
- CAQUOT, A.; KERISEL, J.; ABSI, E. (1972): Aktive and Passive Earth Pressure Tables. Paris (Bordas).
- CZERWINKA, B. (1995): Untersuchungen zum Erdwiderstand auf eine geführte Wand mittels Modellversuchen. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der Universität für Bodenkultur, Wien, unveröffentlicht
- EAU 1990 (1990): Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen EAU 1990. Hrsg: Arbeitsausschuß "Ufereinfassungen" der hafentechnischen Ges. e.V. und der Dt. Ges. für Erd- und Grundbau e.V., 8. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin
- ENGEL, J. (2002): Verfahren zur Festlegung von Kennwerten für bodenmechanische Kennwerte. (=Mitteilungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 10).

- FANG, Y.-S.; CHEN, J.-M.; CHEN, C.-Y. (1997): Earth pressure with sloping backfill. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, H. 3, S. 250-259.
- FANG, Y.-S.; CHEN, T.-J.; WU, B.-F. (1994): Passive earth pressures with various wall movements. In: Journal of Geotechnical Engineering, 120. Jg., H. 8, S. 1307-1323.
- FANG, Y.-S.; ISHIBASHI, I. (1986): Static earth pressures with various wall movements. In: Journal of Geotechnical Engineering, 112. Jg., H. 3, S. 317-333.
- FERSTL, F.; PREGL, O. (1997): Untersuchungen über das Belastungs-Verschiebungsverhalten von geotechnischen Konstruktionen. Aus: Franke, D. (Hrsg.): OHDE-Kolloquium 1997. Dresden. (=Mittellungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 4) S. 29-48.
- FGSV (1994): Merkblatt über den Einfluß der Hinterfüllung auf Bauwerke. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Köln.
- FRANKE, D. (1983): Beiträge zur praktischen Erddruckberechnung. Dissertation (B), TU Dresden, (Habilitationsschrift).
- FRANZIUS, O.(1924): Versuche mit passivem Erddruck. In: Der Bauingenieur, 5. Jg., H. 10, S. 314-320.
- FRANZIUS, O. (1928a): Neuere Einrichtungen für Versuche über Erddruck, Erdwiderstand, Bodenreibung, Fundamentreibung usw. In: Der Bauingenieur, 9. Jg., H. 7, S. 118-119. und H. 8, S. 136-137.
- FRANZIUS, O. (1928b): Erddruckversuche im natürlichen Maßstabe. In: Der Bauingenieur, 9. Jg., H. 43, S. 787-792. und H. 44, S. 813-815.
- FUGLSANG, L.D., KREBS OVESEN, N. (1988): The application on the theory of modelling to centrifuges studies. In: Graig, W.H., James, R.G., Schofield, A.N. (ed.), Centrifuges in soil mechanics. Balkema, Rotterdam, S.119-138
- GIESE, H. (1955): Über den räumlichen Erdwiderstand. In: Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau – Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover – Heft 7. Hannover, S. 57-123.
- GRAHAM, J. (1968): Plane plastic failure in cohesionless soils. In: Geotechnique, 18. Jg., S. 301-316.

- GRAHAM, J. (1971): Calculation of passive pressure in sand. In: Canadian Geotechnical Journal, 8. Jg., S. 566-578.
- GUDEHUS, G. (1996): Erddruckermittlung. Aus: Smoltczyk, U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch, Teil1: Geotechnische Grundlagen. 5. Auflage. Ernst & Sohn. Berlin. S. 273-398.
- GUDEHUS, G. (2001): Erddruckermittlung. Aus: Smoltczyk, U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch, Teil1: Geotechnische Grundlagen. 6. Auflage. Ernst & Sohn. Berlin. S. 401-430.
- GÜNTHER, H. (1993): Programme und Tools für Erddruck und Erdwiderstand mit gekrümmten und ebenen Gleitflächen. Braunschweig und Wiesbaden (Viehweg).
- HETTLER, A. (1997): Maßstabeffekte beim Erddruck in Sand. Aus: Franke, D. (Hrsg.): OHDE-Kolloquium 1997. Dresden. (=Mitteilungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 4) S. 49-71.
- HETTLER, A.; ABDEL-RAHMAN, K. (2000): Numerische Simulation des Erddruckproblems in Sand auf Grundlage der Hypoplastizität. In: Bautechnik, 77. Jg., H. 1, S. 15-29.
- HORN, A. (1970): Sohlreibung und räumlicher Erdwiderstand bei massiven Gründungen in nichtbindigen Böden. Aachen. (= Mitt. d. Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Reihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, TH Aachen, H. 110)
- HORN, A. (1972): Resistance and movement of laterally loaded abutments. Proc. 5. European Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., Vol. 1, 143-148, Madrid
- JAMES, R.G. (1965): Stress and strain fields in sand. Cambridge University, Ph.D. thesis.
- JAMES, R.G.; BRANSBY, P.L. (1970): Experimental and theoretical investigations of a passive earth pressure problem. In: Geotechnique, 20. Jg., S. 17-37. and discussion In: Geotechnique, 21. Jg. (1971), No. 2, S. 173-175; No. 4, S. 421-423 and Geotechnique, 22. Jg. (1972), No. 2, S. 363-365.
- JAMES, R.G.; BRANSBY, P.L. (1971): A velocity field for some passive earth pressure problems. In: Geotechnique, 21. Jg., H. 1, S. 61-83.

- KAISER, T. (1995): Untersuchungen zur Mobilisierung des Erdwiderstandes und des passiven Erddrucks an einer senkrechten, parallel geführten Wand mittels Modellversuchen in einer geotechnischen Zentrifuge. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der TU Dresden, unveröffentlicht.
- KEMPFFERT, H.-G. (1994): Erdwiderstandsbeiwerte bei geneigter Geländeoberfläche. Aus: Festschrift des Arbeitskreises Baugruben zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anton Weißenbach. Dortmund. (=Schriftenreihe des Lehrstuhls Baugrund-Grundbau, Universität Dortmund, Heft 21) S. 119-131.
- KERISEL, J.; ABSI, E. (1990): *Active and Passive Earth Pressure Tables*. 3rd Edition. Rotterdam / Brookfield (A.A.Balkema).
- KONDNER, R. L. (1963): Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. In: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Am. Soc. Civil Engrs.*, Vol. 89, S. 115-143.
- KREMER, A. (1998): Das Tragverhalten von eingespannten biegsamen Stützwänden im bodenmechanischen 1g-Modellversuch. Grundbau, Bodenmechanik und Unterirdisches Bauen, Bergische Universität GH Wuppertal, Bericht-Nr. 18.
- KUMAR, J.; SUBBA RAO, K.S. (1997): Passive pressure coefficients, critical failure surface and its kinematic admissibility. In: *Geotechnique*, 47. Jg., H. 1, S. 185-192.
- LAUER, C. (2000): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Konzept der Referenzzustände für nichtbindige und gemischtkörnige Böden. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der TU Dresden, unveröffentlicht.
- LAUMANS, Q. (1977): Verhalten einer ebenen, in Sand eingespannten Wand bei nicht-linearem Stoffverhalten des Bodens. Baugrundinstitut, Universität Stuttgart, Heft 7.
- LORD, J. A. (1969): *Stresses and strains in an earth pressure problem*. Cambridge University, Ph.D. thesis.
- MAO, P. (1995): Erdwiderstandsversuch mit drei verschiedenen Bewegungsarten. Aus: Franke, D. (Hrsg.): *OHDE-Kolloquium 1993*. Dresden. (=Mitteilungen - Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 2) S. 53-66.

- MECKE, W. (1935): Versuche über passiven Erddruck mit senkrechten und geneigten Druckwänden. In: Mitteilungen der Hannoverschen Hochschulgemeinschaft, H. 16, S. 148-151.
- MILLIGAN, G.W.E.; BRANSBY, P.L. (1976): Combined active and passive rotational failure of a retaining wall in sand. In: Geotechnique, 26. Jg., H. 3, S. 473-494.
- NAKAI, T. (1985): Finite Element computations for active and passive earth pressure problems of retaining wall. In: Soils and Foundations, 25. Jg., H. 3, S. 98-112.
- NARAIN, J.; SARAN, S.; NANDAKUMARAN, P. (1969): Model study of passive pressure in sand. In: Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. ASCE, 95. Jg., S. 969-983. and discussion by BRANSBY, P.L.; LEE, I.K. In: Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. ASCE, 96. Jg. (1970), S. 1061-1067.
- NENDZA, H. (1973): Sicherung tiefer Baugruben neben Bauwerken. In: Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, , H.8, S. 698-702.
- NEUBERG, C. (2002): Ein Verfahren zur Berechnung des räumlichen passiven Erddrucks vor parallel verschobenen Trägern. (= Mitteilungen – Institut für Geotechnik, TU Dresden, Heft 11).
- NEUMEUER, H. (1960): Erddruck und Erdwiderstand Zusammenstellung bisheriger Ergebnisse von Versuchen. Berlin (Wilhelm Ernst & Sohn).
- PREGL, O. (1998): Verformbarkeit und Scherfestigkeit von Gesteinen. Handbuch der Geotechnik. Band 8. Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur Wien.
- PREGL, O. (1999): Kontinuumsmechanik / Statische Aufgaben. Handbuch der Geotechnik. Band 5. Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur Wien.
- PREGL, O. (2000): Bemessung von Stützbauwerken. Handbuch der Geotechnik. Band 16. Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur Wien.
- PRISTAVNIK, R. (1996): Großmodellversuche zum passiven Erddruck. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der Universität für Bodenkultur, Wien, unveröffentlicht.
- RAUH, R. (1991): Beitrag zum Tragverhalten horizontal belasteter, im nichtbindigen Boden eingespannter Wandsysteme unter besonderer Berücksichtigung einer Böschungsgeometrie. Grundbau, Bodenmechanik und Unterirdisches Bauen, Bergische Universität GH Wuppertal, Bericht-Nr. 11.

- ROSCOE, K.H. (1970): The influence of strains in soil mechanics. In: *Geotechnique*, 20. Jg., H. 2, S. 129-170.
- RÖßNER, T. (1997): Konzeption und Durchführung von Zentrifugen-Modellversuchen zum Erdwiderstand in einem kohäsiven Boden. Großer Beleg, Institut für Geotechnik, TU Dresden, unveröffentlicht.
- ROWE, P.W.; PEAKER, K. (1965): Passive earth pressure measurements. In: *Geotechnique*, Jg., S. 57-78. and correspondence by MEYERHOFF, G.G. In: *Geotechnique*, 15. Jg. (1965), S. 409. and reply by ROWE, P.W. In: *Geotechnique*, 16. Jg. (1966), H. 1, S. 78.
- RUF, M. (1996): Untersuchungen zum Erdwiderstand auf eine ebene Wand für den Fall Drehung der Wand um eine Achse im Wandfuß. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der TU Dresden, unveröffentlicht.
- SCHILLER, H.: Mittel und Wege zur Messung des passiven Erddrucks und ihre ersten Ergebnisse nebst einem Ueberblick über die Entwicklung des Erddruckproblems. TH Hannover, 1924.
- SCHMIDT, H.-H.; VOGT, N. (1986): Teilweise mobilisierter Erddruck. Aus: Dt. Ges. f. Erd- und Grundbau (DGEG) (Hrsg.): 8. Donau-Europäische Konferenz über Bodenmechanik und Grundbau - Nürnberg 1986, Band I. Nürnberg (Eigenverlag). S. 37-42.
- SCHÜRMAN, A. (1997): Zum Erddruck auf unverankerte flexible Verbauwände. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 30.
- SCHÜTTE, H. G. (1940): Anwendungen der Erddrucktheorie bei der Berechnung von Spundwänden und Kaimauern. In: *Der Bauingenieur*, 21. Jg., H. 14/16, S. 105-124.
- SCHÜTTE, H. G. (1941): Einspannungsbedingungen verankerter Bohlwände. In: *Der Bauingenieur*, 22. Jg., H. 19/20, S. 193 - 197. und Bemerkungen von SCHULTZE, E. und Erwiderung von Schütte. In: *Der Bauingenieur*, 23. Jg. (1942), H. 5/6, S. 44-46.
- SCHÜTTE, H. G. (1941): Wirkungen von Formänderungen verankerter Bohlwände und des stützenden Bodens auf die Verteilung der äußeren und inneren Kräfte. Aus: Hafentechnische Gesellschaft (Hrsg.): Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 18. Band, 1939-1940 Berlin (Springer-Verlag). S. 55-63.

- SIEBER, R. (1999): Erdwiderstandsmobilisierung in trockenem, dicht gelagertem Sand in Abhängigkeit von der Wandbewegungsart. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der TU Dresden, unveröffentlicht.
- SLAMNIG, V. (1995): Großmodellversuche zum Erdwiderstand. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der Universität für Bodenkultur, Wien, unveröffentlicht.
- SOKOLOVSKI, V. V. (1965): Statics of Granular Media. Pergamon Press, Oxford
- SOUBRA, A.-H.; KASTNER, R.; BENMANSOUR, A. (1999): Passive earth pressures in the presence of hydraulic gradients. In: Geotechnique, 49. Jg., H. 3, S. 319-330.
- STEINFELD, K. (1953): Über den räumlichen Erdwiderstand. In: Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau – Franzius-Institut der TH Hannover – Heft 3. Hannover, S. 51-152.
- STRECK, A. (1926): Beitrag zur Frage des passiven Erddruckes. In: Der Bauingenieur, 7. Jg., H. 1, S. 1-3 und H.2, S.32-37.
- STRECK, A. (1950): 23 Jahre Baugrundforschung in der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau (Franzius-Institut). Bericht zur Mitgliederversammlung der Gesellschaft der Förderer der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau (Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover) am 17. Nov. 1950.
- TAYLOR, R.N. (1995): Centrifuges in modelling: principles and scale effects. In: Taylor, R.N. (Ed.): Geotechnical Centrifuge Technology. Chapman & Hall, Glasgow, S.19-33.
- TERZAGHI, K. (1920): Old Earth-Pressure Theories and New Test Results. In: Engineering News-Record, 85. Jg., H. 14, S. 632-637.
- VOGT, N. (1984): Erdwiderstandsermittlung bei monotonen und wiederholten Wandbewegungen in Sand. Stuttgart. (= Baugrundinstitut, Universität Stuttgart, Mitteilung 22)
- von WOLFFERSDORFF, P.-A. (1994): Feldversuch an einer Spundwand in Sandboden: Versuchsergebnisse und Prognosen In: Geotechnik, 17. Jg., S. 73-83.
- von WOLFFERSDORFF, P.-A. (1997): Verformungsprognosen für Stützkonstruktionen. (= Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 141)

- von WOLFFERSDORFF, P.-A.; MAYER, P.-M. (1996): Gebrauchstauglichkeitsnachweise für Stützkonstruktionen. In: Geotechnik, 19. Jg., H. 4, S. 291-300.
- WALZ, B. (1982): Bodenmechanische Modelltechnik als Mittel zur Bemessung von Grundbauwerken. Aus: Walz, B. (Hrsg.): Grundbau, Bodenmechanik und Tunnelbau an der Universität - GH Wuppertal. Forschungs- und Arbeitsberichte aus den Bereichen Grundbau, Bodenmechanik und Unterirdisches Bauen, Bericht-Nr.1 Wuppertal. S. 45-90.
- WEGENER, D. (1998): Zum Erdwiderstand in trockenem Sand in Abhängigkeit von der Ausgangslagerungsdichte. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der TU Dresden, unveröffentlicht.
- WEIßENBACH, A. (1983): Beitrag zur Ermittlung des Erdwiderstandes. In: Der Bauingenieur, 58. Jg., S. 161-173.
- WEIßENBACH, A. (1997): Bodenmechanische Einspannung von Baugrubenwänden. Aus: Vermeer, P.A. (Hrsg.): 3. Stuttgarter Geotechnik-Symposium - 24. Juni 1997 - Baugruben in Locker- und Festgestein. Stuttgart (Eigenverlag). (=Mittteilung 42) S. 99-107.
- WEIßENBACH, A. (1985): Baugruben Teil II - Berechnungsgrundlagen. Berlin - München - Düsseldorf (Wilhelm Ernst & Sohn).
- WEIßENBACH, A.; GOLLUB, P. (1995): Neue Erkenntnisse über mehrfach verankerte Ortbetonwände bei Baugruben in Sandboden mit tiefliegender Injektionssohle, hohem Wasserüberdruck und großer Bauwerkslast. In: Bautechnik, 72. Jg., H. 12, S. 780-799.
- WINKLER, A. (2003): Ermittlung des passiven Erddrucks mit Beiwerten. In: Bautechnik, 80. Jg., S. 81-89.
- WITTLINGER, M. (1994): Ebene Verformungsuntersuchungen zur Weckung des Erdwiderstandes bindiger Böden. Stuttgart (Eigenverlag). (= Institut für Geotechnik der Univ. Stuttgart, Mitteilung 35)
- WOLFRAM, F. (1995): Untersuchungen zum Erdwiderstand auf eine geführte Wand mittels Modellversuchen in einer geotechnischen Zentrifuge und FE-Vergleichsrechnungen. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik der TU Dresden, unveröffentlicht.

ZIEGLER, M. (1987): Berechnung des verschiebungsabhängigen Erddrucks in Sand. Karlsruhe. (= Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 101)

Anhang
auf beiliegender CD-ROM

Mitteilungen - Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden

ISSN 1434-3053

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Franke

- | | | | |
|---------|-----------------------|------|--|
| Heft 1 | Franke, D.
(Hrsg.) | 1992 | Das Institut für Geotechnik an der TU Dresden
+ Die Veröffentlichungen Johann Ohdes |
| Heft 2 | Franke, D.
(Hrsg.) | 1995 | OHDE-Kolloquium 1993 |
| Heft 3 | Franke, D.
(Hrsg.) | 1995 | Festschrift zum 60. Geburtstag von
Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Franke |
| Heft 4 | Franke, D.
(Hrsg.) | 1997 | OHDE-Kolloquium 1997 |
| Heft 5 | Engel, J. | 1998 | Entwicklung von Datenstrukturen
für bodenmechanische Anwendungen |
| Heft 6 | Vogt, L. | 1998 | Untersuchungen zum Tragverhalten und
zur Verbesserung der Standsicherheit
von Stützmauern |
| Heft 7 | al Diban, I. | 2000 | Das Tragverhalten horizontal belasteter, in
nichtbindigem Boden eingespannter starrer
Träger, in ebenem und geböschtem Gelände |
| Heft 8 | Winkler, A. | 2001 | Ermittlung des Erddrucks im Bruchzustand bei
Drehung einer Wand um den Kopfpunkt |
| Heft 9 | Franke, D.
(Hrsg.) | 2001 | OHDE-Kolloquium 2001 |
| Heft 10 | Engel, J. | 2002 | Verfahren zur Festlegung von Kennwerten für
bodenmechanische Nachweise |
| Heft 11 | Neuberg, C. | 2002 | Ein Verfahren zur Berechnung des räumlichen
passiven Erddrucks vor parallel verschobenen
Trägern |

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

- | | | | |
|---------|-----------|------|---|
| Heft 12 | Bartl, U. | 2004 | Zur Mobilisierung des passiven Erddrucks in
kohäsionslosem Boden |
|---------|-----------|------|---|

Mitteilungen
Heft 12

Uwe Bartl

Zur Mobilisierung
des passiven Erddrucks
in kohäsionslosem Boden

(Anhang)

Dresden 2004

ISSN 1434-3053

Mitteilungen - Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden

ISSN 1434-3053

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. I. Herle

© Institut für Geotechnik - TU Dresden - 2004

Bei Vervielfältigungen und Übersetzungen wird um Quellenangabe gebeten.

Briefanschrift:

Institut für Geotechnik

TU Dresden

01062 Dresden

Besucheradresse:

Neuffer-Bau, George-Bähr-Straße 1

01069 Dresden

Telefon: 0351/ 463 34248

Fax: 0351/ 463 34131

E-Mail: geotech@rcs.urz.tu-dresden.de

A Ergebnisse der Versuche von MAO

A.1 Erläuterungen

MAO nutzte als Modellboden den sogenannten „Karlsruher Sand“. Die Kornverteilung dieses Quarzsandes ist in Bild A.1 dargestellt. Nach DIN 18196 kann der Modellboden als enggestufter Sand (SE) klassifiziert werden.

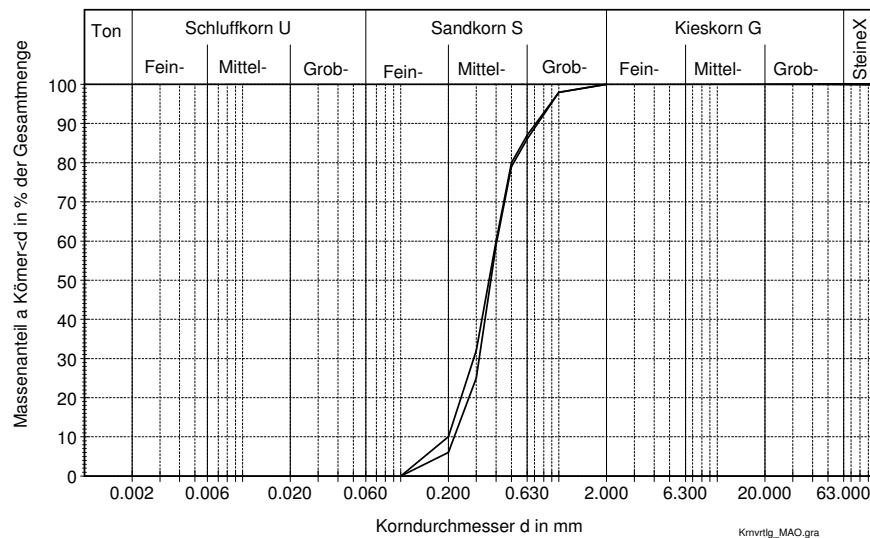


Bild A.1: Kornverteilung Versuchssand von MAO

Die bodenmechanischen Kennwerte des Sandes sind in der Tabelle A.1 bis Tabelle A.3 zusammengestellt.

Tabelle A.1: Kennwerte für den von MAO verwendeten „Karlsruher Sand“

Ungleichförmigkeitszahl U	[-]	1,8
Krümmungszahl CC	[-]	1
d_{10}	[mm]	0,22
d_{15}	[mm]	0,23
d_{30}	[mm]	0,30
d_{50}	[mm]	0,35
d_{60}	[mm]	0,40
d_{85}	[mm]	0,60
Korndichte ρ_s	[g/cm ³]	2,653

Tabelle A.2: Kennwerte zu den Grenzen der Lagerungsdichte nach DIN 18126

	Lockerste Lagerung	Dichteste Lagerung
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1.456	1.721
Porenanteil n [1]	max $n = 0.451$	min $n = 0.351$
Porenzahl e [1]	max $e = 0.820$	min $e = 0.540$

Tabelle A.3: Kennwerte der Lagerungsdichte für den Sand von MAO

D	ρ_d	γ_d	n	e_0	I_D
[-]	[g/cm ³]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[-]
0.00	1.458	14.3	0.451	0.820	0.00
0.25	1.524	15.0	0.426	0.741	0.28
0.50	1.590	15.6	0.401	0.668	0.54
0.75	1.657	16.3	0.376	0.601	0.78
1.00	1.723	16.9	0.351	0.540	1.00

In der Tabelle A.4 sind für verschiedene Lagerungsdichten die Reibungswinkel des Versuchssandes von MAO nach verschiedenen Ansätzen zusammengestellt. Der Reibungswinkel φ'_{Triax} wurde nach MAO mit Hilfe von Triaxial-Versuchen bestimmt. Die Werte φ'_{MAO} wurden von MAO auf der Grundlage eines Ansatzes in der EAU (1990) von den Werten φ'_{Triax} abgeleitet und sollen nach MAO für den ebenen Verformungszustand gelten. Von MAO wurden die Werte φ'_{MAO} bei der Auswertung

der Erddruckversuche herangezogen. Der dritte Reibungswinkel in der Tabelle A.4 basiert auf dem Ansatz von ENGEL (2002) nach Gl.(3.9) bis Gl. (3.11).

Tabelle A.4: Reibungswinkel für den Sand von MAO

D	e_0	I_D	φ'_{Triax} n. MAO	φ'_{MAO} n. MAO	φ' n. ENGEL
[-]	[-]	[-]	[°]	[°]	[°]
0.00	0.820	0.00	27.9	31.4	31.4
0.25	0.741	0.28	31.6	35.5	34.2
0.50	0.668	0.54	35.0	39.4	37.2
0.75	0.601	0.78	38.1	42.9	40.3
1.00	0.540	1.00	41.0	46.2	43.6

In Bild A.2 sind die (spannungsunabhängigen) Reibungswinkel nach Tabelle A.4 in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte dargestellt.

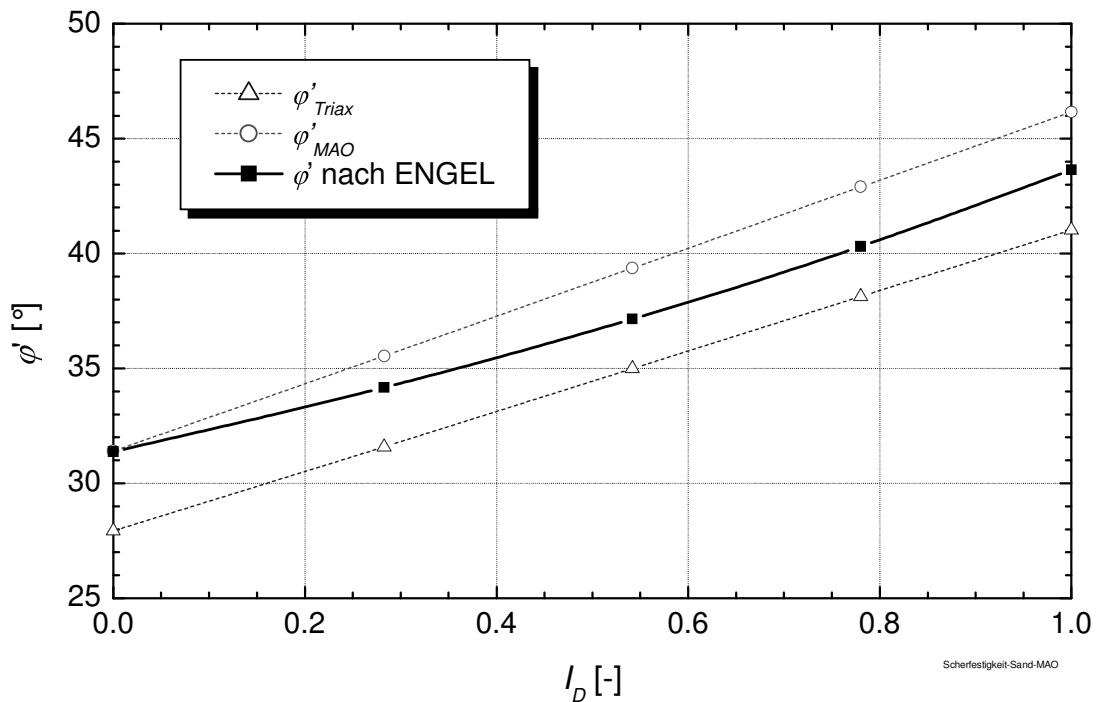


Bild A.2: Reibungswinkel φ' für den Versuchssand von MAO in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D

In Bild A.3 bzw. Bild A.4 sind die Reibungswinkel bzw. Tangens des Reibungswinkels für beide Versuchssande nach dem Ansatz von ENGEL (s. Abschnitt 3.3.2) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte dargestellt.

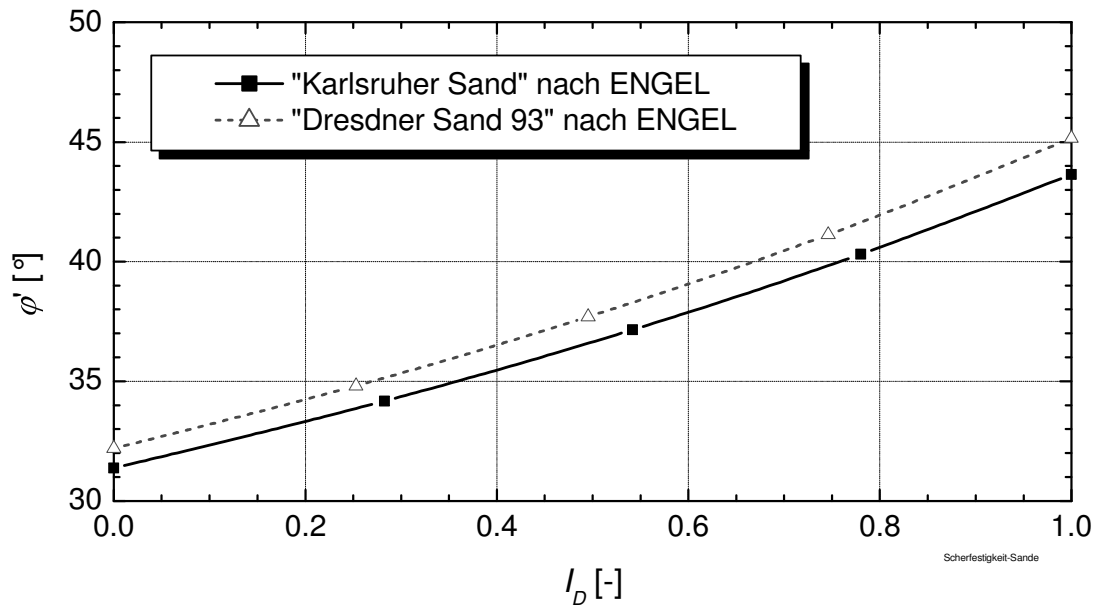


Bild A.3: Reibungswinkel ϕ' für den „Karlsruher Sand“ und für den „Dresdner Sand 93“ nach ENGEL (2002) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D

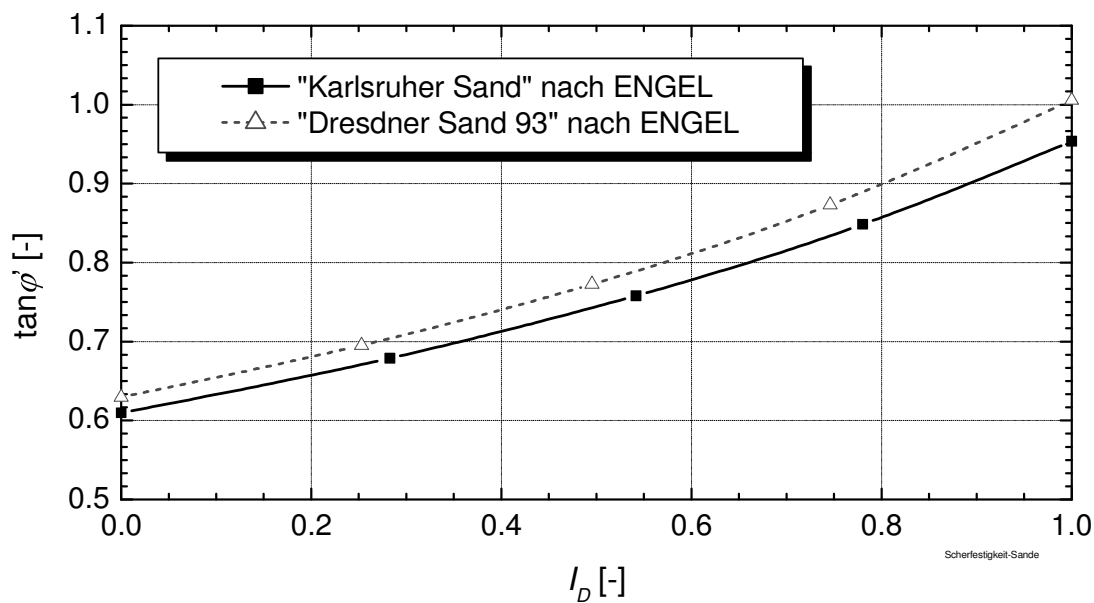


Bild A.4: $\tan \phi'$ für den „Karlsruher Sand“ und für den „Dresdner Sand 93“ nach ENGEL (2002) in Abhängigkeit von der bezogenen Lagerungsdichte I_D

Von MAO wurde bei der Auswertung der Messergebnisse der Verhältniswert aus Vertikalanteil und Horizontalanteil der Erddruckkraft grundsätzlich als Tangens des Erddruckneigungswinkels δ (im passiven Grenzzustand δ_p) angegeben. Diese Definition gilt allerdings nur für den Fall der parallelverschobenen senkrechten Wand. Allgemein formuliert handelt es sich bei dem Verhältniswert aus Vertikalanteil und Horizontalanteil der Erddruckkraft um den Tangens des Winkels zur Horizontalen ω .

$$\frac{E_v}{E_h} = \tan \omega \quad (\text{A.1})$$

Hinzu kommt, dass die Messwerte vor dem Start der Wandbewegung auf „Null gesetzt“ wurden und somit die „Ruhedruckanteile“ nicht enthalten sind. Der angegebene Verhältniswert wird deshalb bei der eigenen Auswertung als Winkel ω_R^* bzw. im passiven Grenzzustand als ω_{Rp}^*

$$\frac{E_v - E_{0v}}{E_h - E_{0h}} = \frac{\Delta E_v}{\Delta E_h} = \tan \omega_R^* \quad (\text{A.2})$$

angegeben. Der eigentliche resultierende Erddruckneigungswinkel (Winkel zur Wandnormalen) wurde mit Hilfe der Wandneigung α (Definition nach Bild 4.1) mit

$$\delta_R^* = \omega_R^* - \alpha \quad (\text{A.3})$$

neu ermittelt.

Der Erddruckneigungswinkel ist in den nachfolgenden Diagrammen als δ_R^* bzw. δ_{Rp}^* bezeichnet. Auf diesen Winkeln basierende Werte, wie z.B. der Normalanteil der normierten Erddruckkraft ΔK_{Rn} wurden auf der Grundlage der von MAO dokumentierten Versuchsergebnisse neu berechnet und bei den eigenen Betrachtungen verwendet.

A.2 Parallelverschiebung

senkrechte Wand; Wand tangential nicht beweglich, trockener Sand

Tabelle A.5: Versuche von MAO mit Parallelverschiebung – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	h	D	γ	e_0	I_D	ϕ' n. ENGEL
[-]	[-]	[mm]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]
1	ENS17	200	0.80	16.4	0.589	0.83	41.0
2	ENS18	200	0.80	16.4	0.589	0.83	41.0
3	ENS2	150	0.80	16.4	0.589	0.83	41.0
4	ENS13	200	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
5	ENS14	200	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
6	ENS5	150	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
7	ENS6	150	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
8	ENS10	100	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
9	ENS12	100	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
10	ENS29	150	0.50	15.6	0.668	0.54	37.2
11	ENS23	250	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
12	ENS25	250	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
13	ENS16	200	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
14	ENS9	100	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3

Tabelle A.6: Versuche von MAO mit Parallelverschiebung -- passiver Grenzzustand

Versuch	D	s_p / h	ω_{Rp}^*	α_p	δ_{Rp}^*	z_{Rp} / h	ΔK_{Rhp}
[-]	[-]	[-]	[°]	[°]	[°]	[-]	[-]
ENS17	0.80	0.062	-20.60	0.00	-20.60	0.65	12.02
ENS18	0.80	0.062	-23.70	0.00	-23.70	0.67	12.44
ENS2	0.80	0.055	-20.30	0.00	-20.30	0.69	11.61
ENS13	0.65	0.068	-23.70	0.00	-23.70	0.65	10.20
ENS14	0.65	0.071	-24.30	0.00	-24.30	0.70	10.09
ENS5	0.65	0.055	-20.30	0.00	-20.30	0.71	10.98
ENS6	0.65	0.055	-20.00	0.00	-20.00	0.72	10.84
ENS10	0.65	0.067	-17.40	0.00	-17.40	0.66	10.04
ENS12	0.65	0.058	-19.80	0.00	-19.80	0.50	10.37
ENS29	0.50	0.062	-24.10	0.00	-24.10	0.72	9.93
ENS23	0.35	0.148	-27.70	0.00	-27.70	0.66	10.01
ENS25	0.35	0.089	-19.60	0.00	-19.60	0.60	10.81
ENS16	0.35	0.077	-18.40	0.00	-18.40	0.63	7.98
ENS9	0.35	0.080	-21.90	0.00	-21.90	0.49	8.06

* Der Grenzzustand für die Versuche mit $D=0.35$ wurde von MAO über ein Verschiebungskriterium festgelegt, da bei dieser Lagerungsdichte kein Maximalwert der Erddruckkraft erreicht wurde.

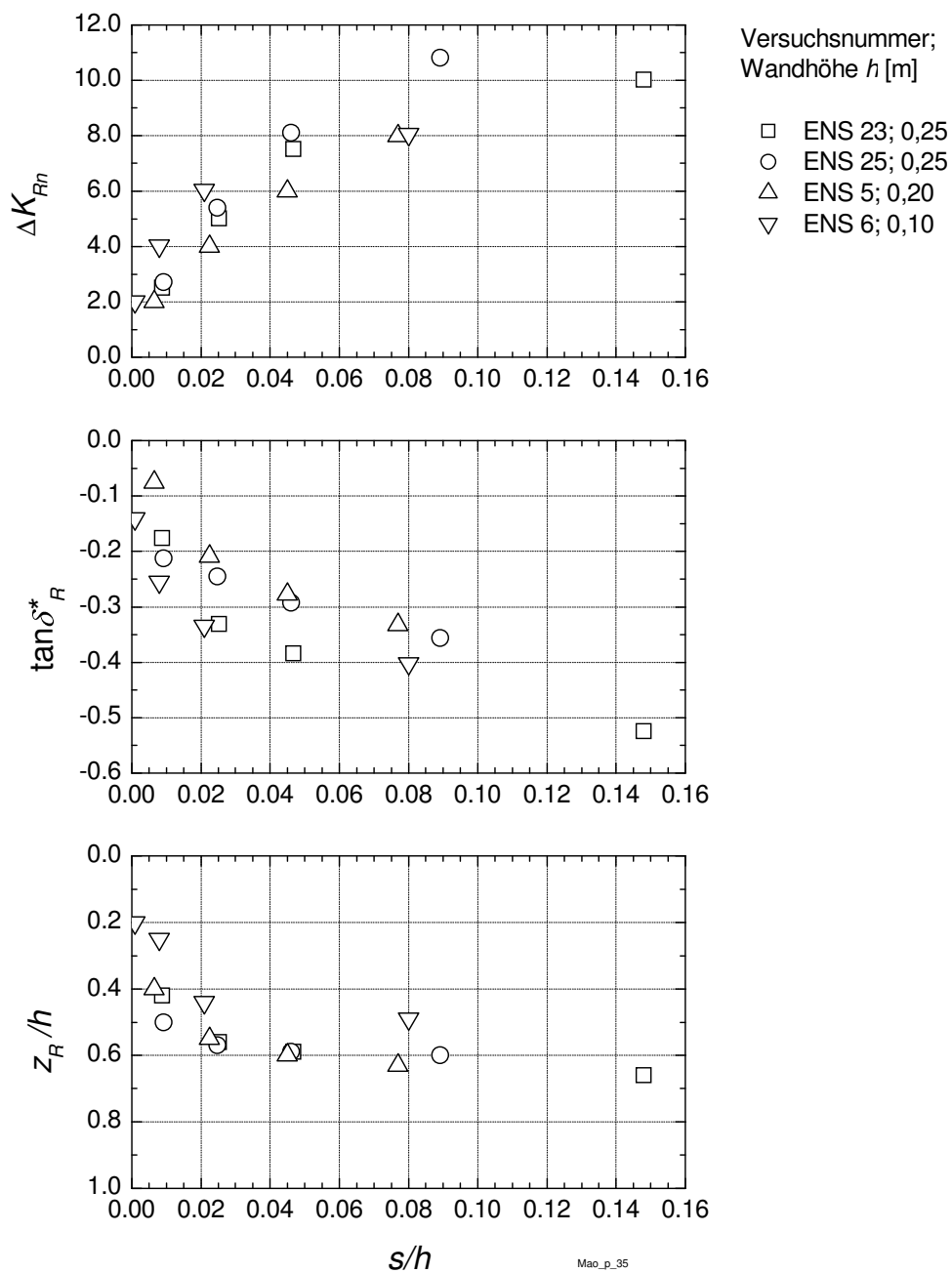


Bild A.5: Versuchsergebnisse MAO (1993) Parallelverschiebung; Sand trocken; ($D = 0,35$; $I_D = 0,39$; $e_0 = 0,711$); Mobilisierung Erdruckkraft

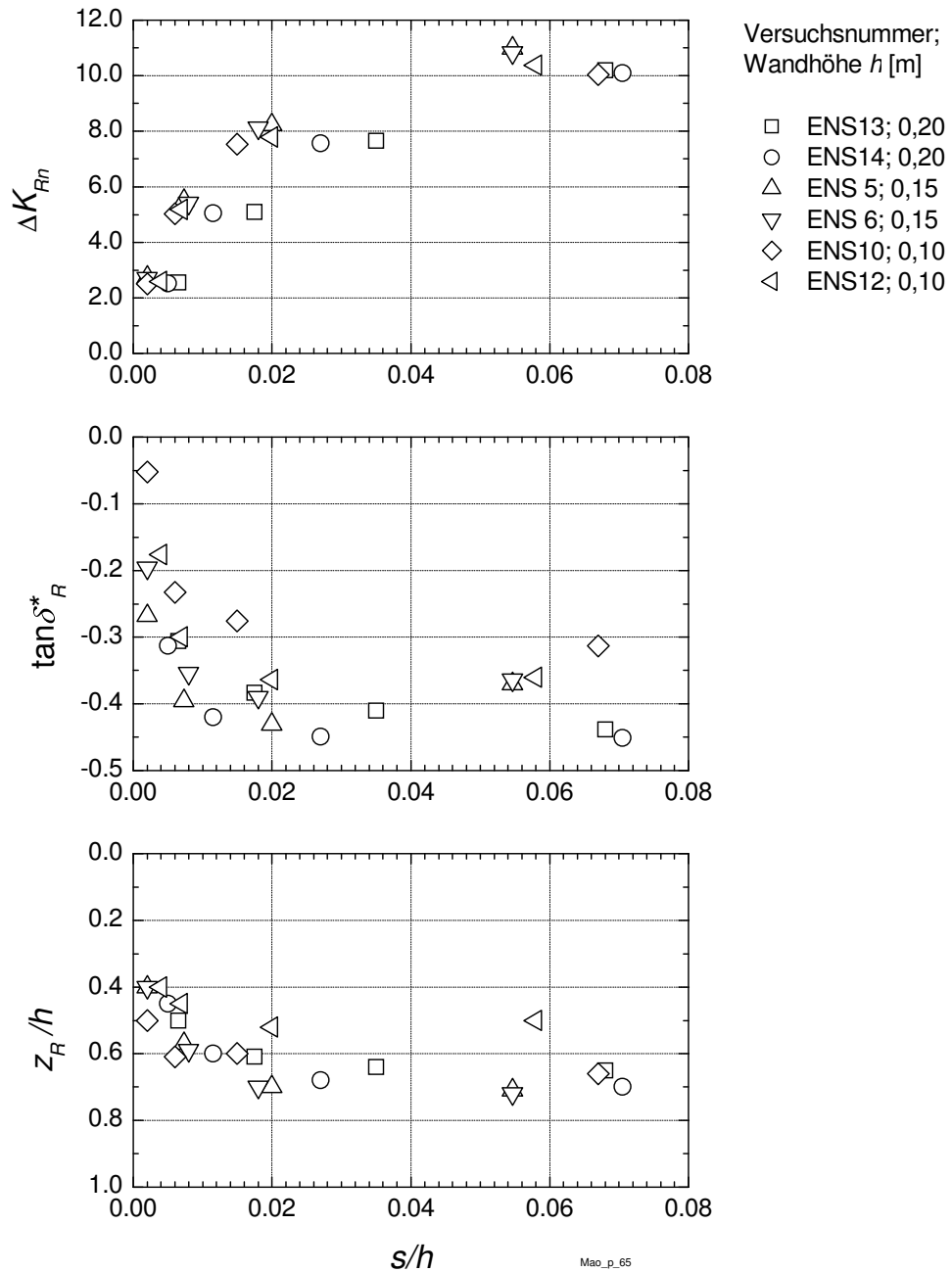


Bild A.6: Versuchsergebnisse MAO (1993) Parallelverschiebung; Sand trocken; ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$; $e_0 = 0,628$); Mobilisierung Erddruckkraft

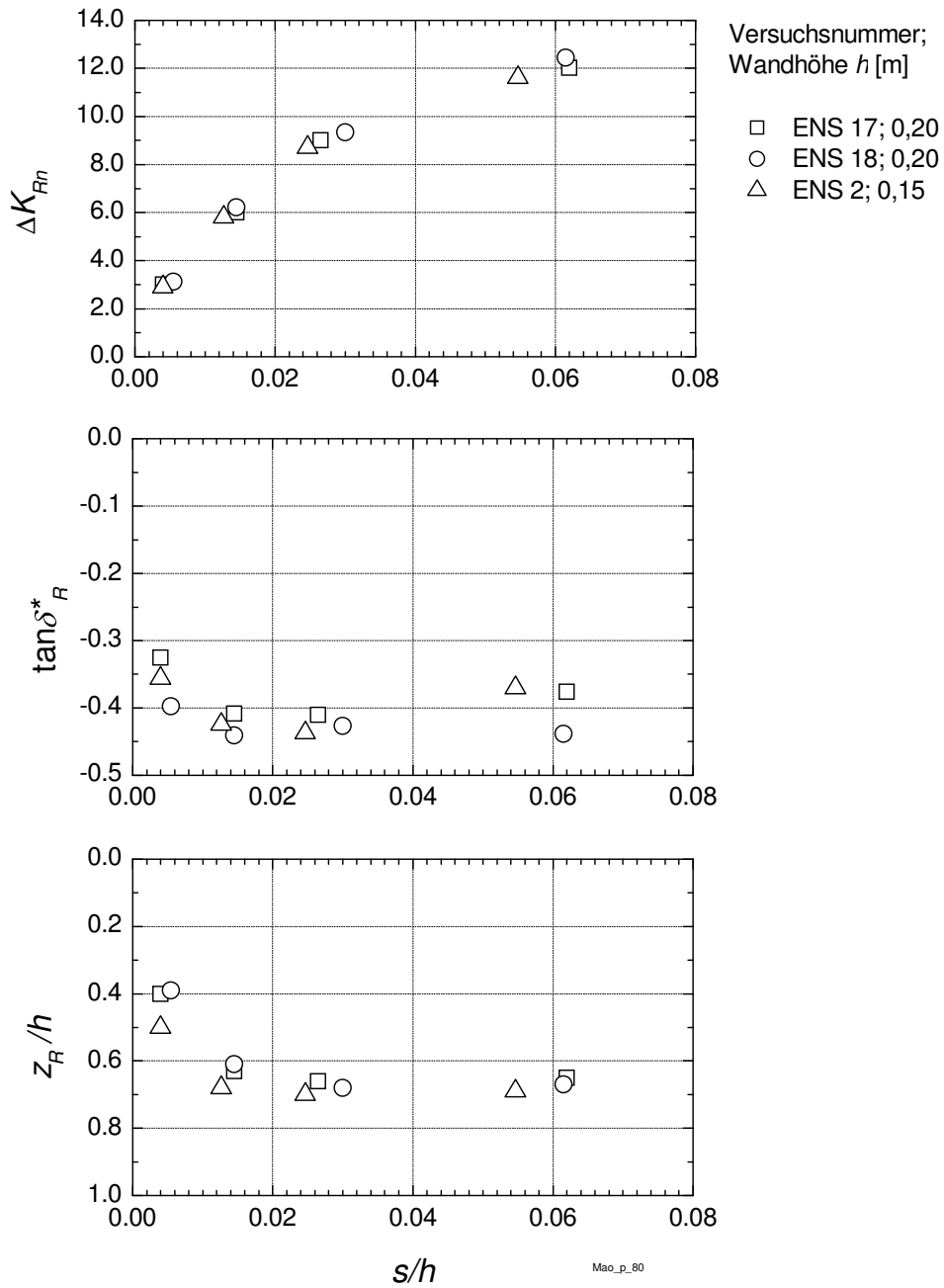


Bild A.7: Versuchsergebnisse MAO (1993) Parallelverschiebung; Sand trocken; ($D = 0,80$; $I_D = 0,83$; $e_0 = 0,589$); Mobilisierung Erddruckkraft

A.3 Kopfpunktdrehung

senkrechte Wand; Wand tangential nicht beweglich, trockener Sand

Tabelle A.7: Versuche von MAO mit Kopfpunktdrehung – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	h	D	γ	e_0	I_D	ϕ' n. ENGEL
[-]	[-]	[mm]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]
1	DOV1	250	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
2	DOV3	250	0.50	15.6	0.668	0.54	37.2
3	DOV6	250	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
4	DOV7	200	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
5	DOV8	200	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
6	DOV9	200	0.50	15.6	0.668	0.54	37.2
7	DOV11	200	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
8	DOV12	200	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
9	DOV13	150	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
10	DOV14	150	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
11	DOV15	150	0.50	15.6	0.668	0.54	37.2
12	DOV16	150	0.50	15.6	0.668	0.54	37.2
13	DOV17	150	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
14	DOV18	150	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
15	DOV20	100	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
16	DOV21	100	0.50	15.6	0.668	0.54	37.2
17	DOV22	100	0.50	15.6	0.668	0.54	37.2
18	DOV23	100	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
19	DOV24	100	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0

Tabelle A.8: Versuche von MAO mit Kopfpunktdrehung — passiver Grenzzustand

Versuch	D	s_p / h	ω_{Rp}^*	α_p	δ_{Rp}^*	z_{Rp} / h	ΔK_{Rhp}
[-]	[-]	[-]	[°]	[°]	[°]	[-]	[-]
DOV1	0.65	0.062	-12.20	3.52	-15.72	0.76	8.22
DOV3	0.50	0.062	-10.40	3.52	-13.92	0.76	7.90
DOV6	0.35	0.067	-7.30	3.82	-11.12	0.77	6.03
DOV7	0.35	0.074	-9.60	4.23	-13.83	0.79	6.14
DOV8	0.35	0.066	-9.50	3.78	-13.28	0.78	6.18
DOV9	0.50	0.065	-11.10	3.72	-14.82	0.77	7.07
DOV11	0.65	0.049	-12.40	2.81	-15.21	0.76	8.11
DOV12	0.65	0.048	-11.80	2.75	-14.55	0.77	8.30
DOV13	0.65	0.071	-13.50	4.08	-17.58	0.76	8.04
DOV14	0.65	0.058	-10.30	3.32	-13.62	0.77	8.26
DOV15	0.50	0.059	-10.40	3.40	-13.80	0.76	7.51
DOV16	0.50	0.051	-11.20	2.94	-14.14	0.76	7.61
DOV17	0.35	0.071	-9.00	4.04	-13.04	0.77	5.86
DOV18	0.35	0.075	-9.80	4.27	-14.07	0.76	5.92
DOV20	0.35	0.077	-8.80	4.40	-13.20	0.79	5.43
DOV21	0.50	0.058	-10.60	3.32	-13.92	0.77	7.11
DOV22	0.50	0.054	-9.70	3.09	-12.79	0.78	6.58
DOV23	0.65	0.046	-10.20	2.63	-12.83	0.77	8.09
DOV24	0.65	0.049	-12.40	2.81	-15.21	0.78	8.32

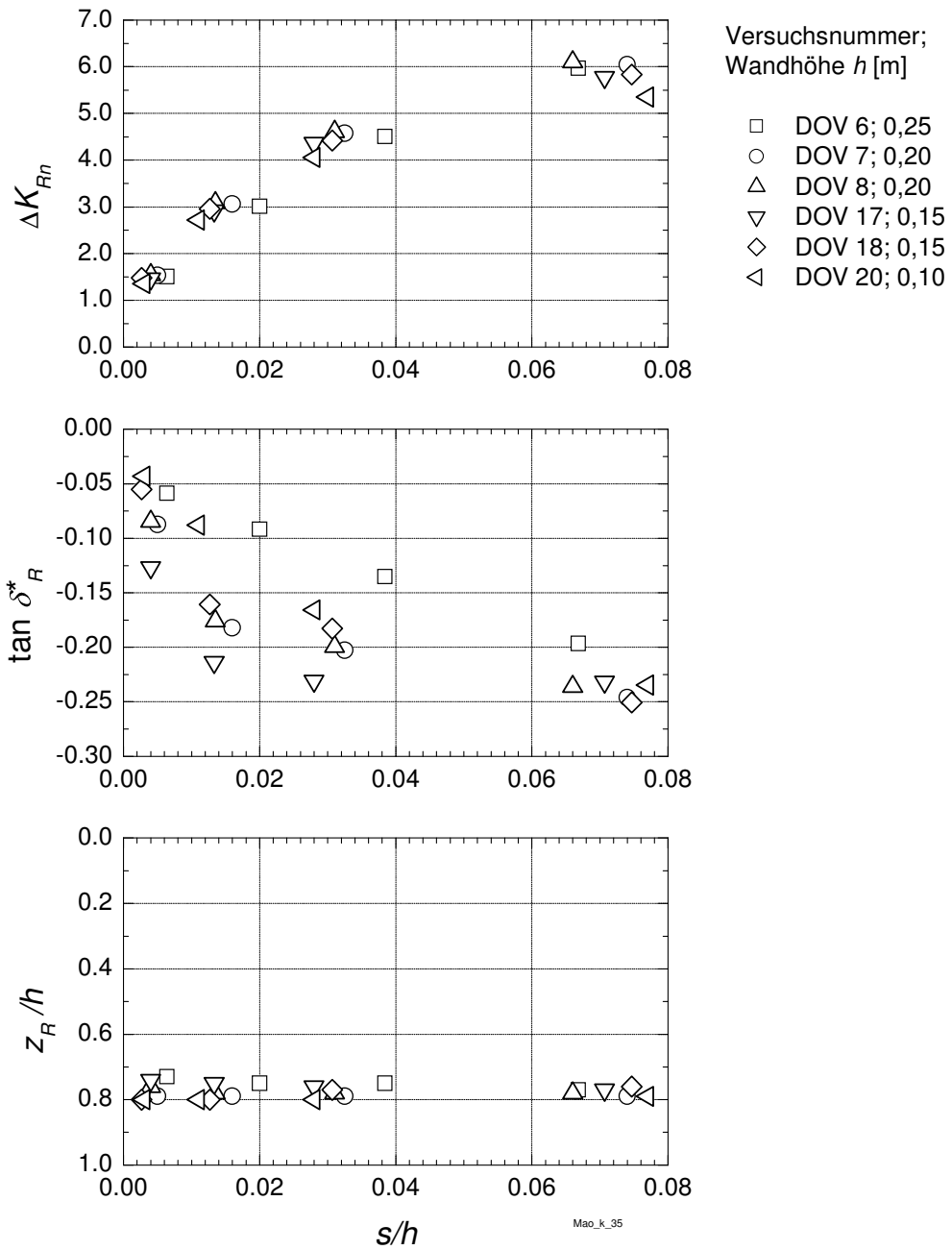


Bild A.8: Versuchsergebnisse MAO (1993) Kopfpunktdrehung; Sand trocken; ($D = 0,35$; $I_D = 0,39$; $e_0 = 0,711$); Mobilisierung Erddruckkraft

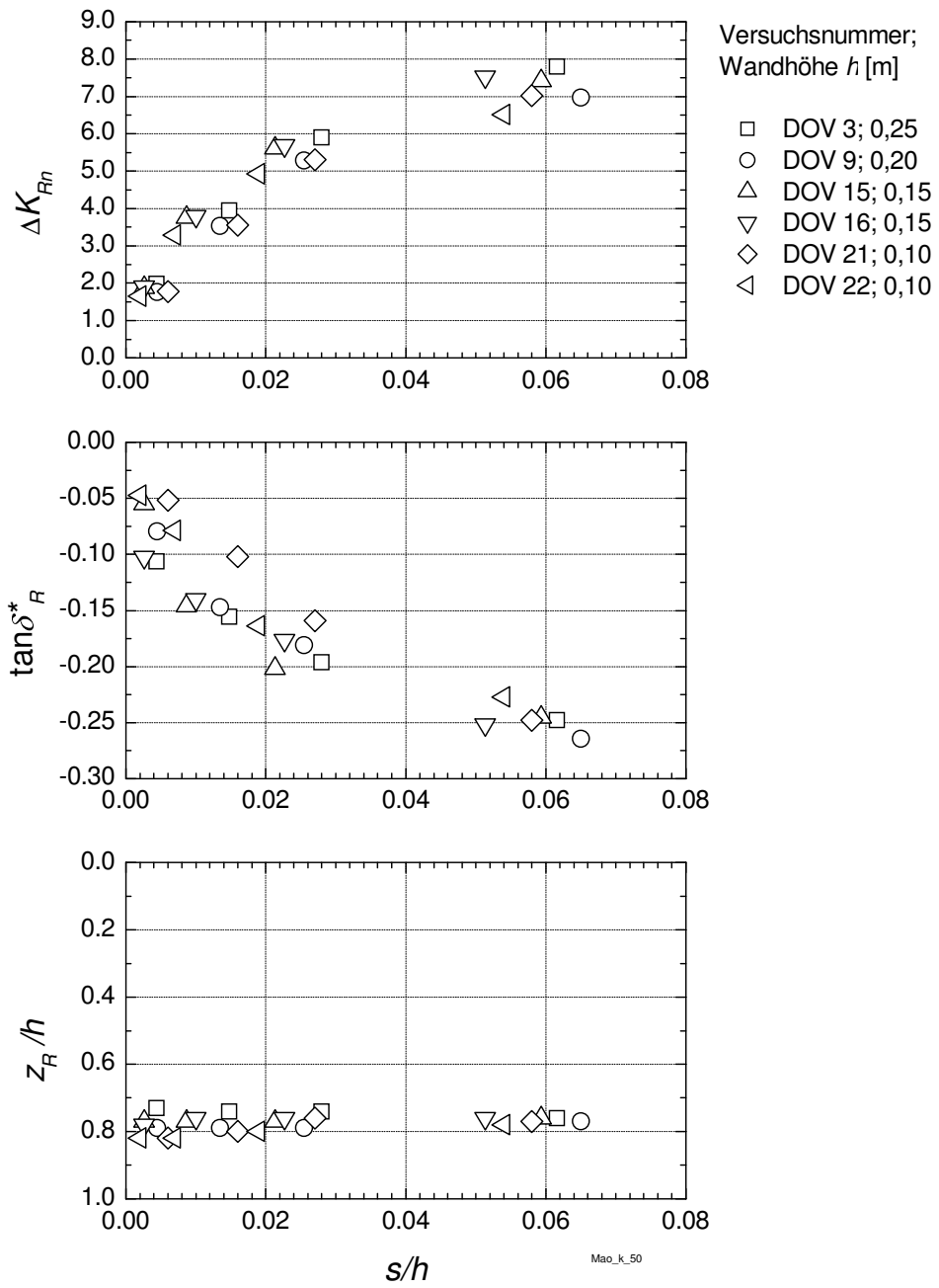


Bild A.9: Versuchsergebnisse MAO (1993) Kopfpunktdrehung; Sand trocken; ($D = 0,50$; $I_D=0,54$; $e_0 = 0,668$); Mobilisierung Erddruckkraft

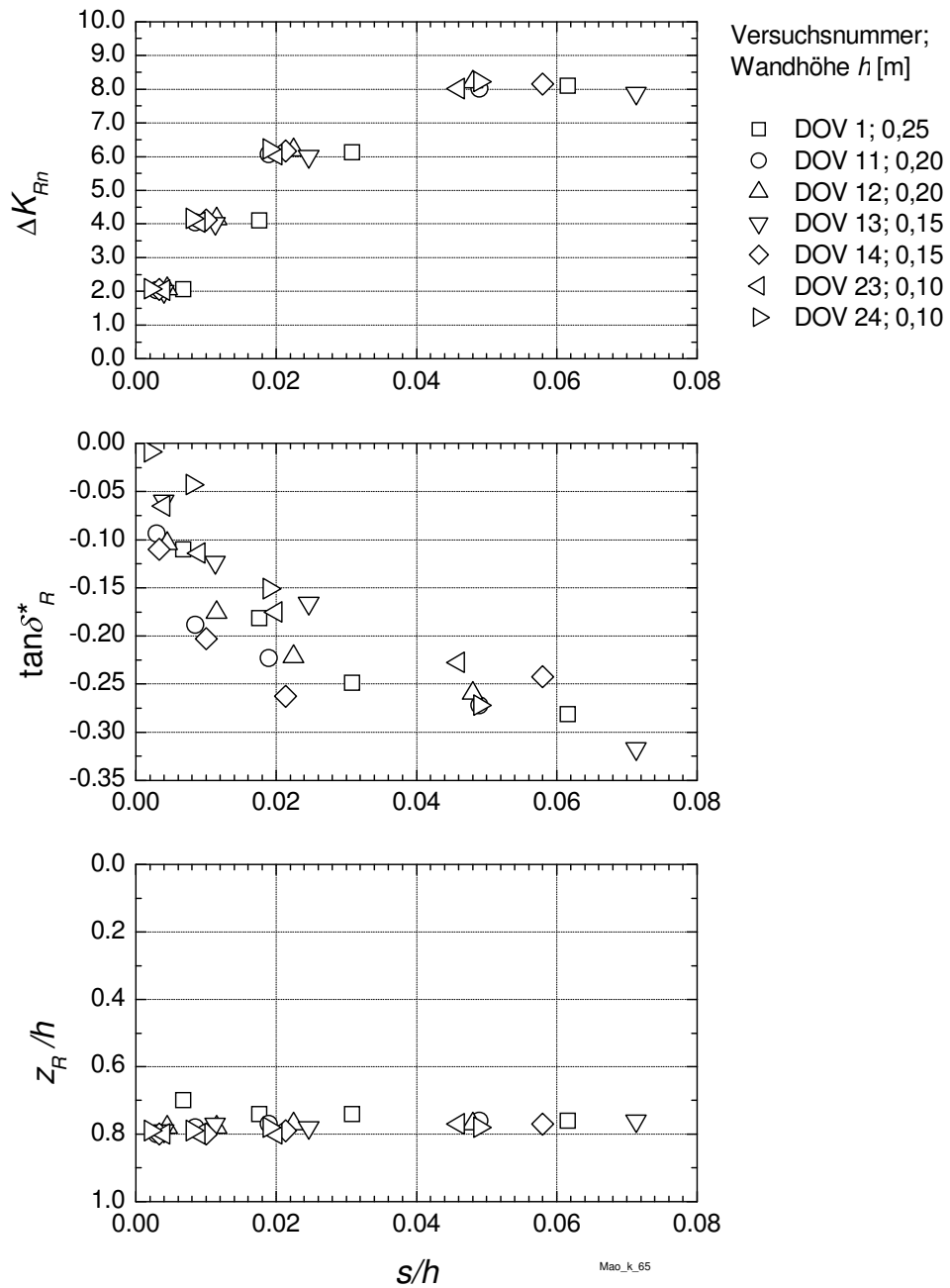


Bild A.10: Versuchsergebnisse MAO (1993) Kopfpunktdrehung; Sand trocken; ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$; $e_0 = 0,628$); Mobilisierung Erddruckkraft

A.4 Fußpunktdrehung

senkrechte Wand; Wand tangential nicht beweglich, trockener Sand

Tabelle A.9: Versuche von MAO mit Fußpunktdrehung – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	h	D	γ	e_0	I_D	ϕ' n. ENGEL
[-]	[-]	[mm]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]
1	DFV18	250	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
2	DFV12	200	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
3	DFV3	150	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
4	DFV4	150	0.65	16.0	0.628	0.69	39.0
5	DFV13	250	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
6	DFV14	200	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
7	DFV15	200	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
8	DFV5	150	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
9	DFV11	150	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3
10	DFV8	100	0.35	15.2	0.711	0.39	35.3

Tabelle A.10: Versuche von MAO mit Fußpunktdrehung – passiver Grenzzustand (per Definition von MAO festgelegt)

Versuch	D	s_p / h	ω_{Rp}^*	α_p	δ_{Rp}^*	z_{Rp} / h	ΔK_{Rhp}
[-]	[-]	[-]	[°]	[°]	[°]	[-]	[-]
DFV18	0.65	0.075	-25.00	-4.30	-20.70	0.42	7.82
DFV12	0.65	0.077	-25.00	-4.37	-20.63	0.44	7.91
DFV3	0.65	0.075	-24.00	-4.27	-19.73	0.42	8.11
DFV4	0.65	0.074	-25.00	-4.23	-20.77	0.42	7.69
DFV13	0.35	0.106	-24.10	-6.07	-18.03	0.40	5.58
DFV14	0.35	0.104	-25.20	-5.94	-19.26	0.41	5.67
DFV15	0.35	0.106	-24.60	-6.05	-18.55	0.40	5.41
DFV5	0.35	0.107	-24.40	-6.09	-18.31	0.35	6.27
DFV11	0.35	0.106	-25.10	-6.05	-19.05	0.35	5.73
DFV8	0.35	0.109	-26.80	-6.22	-20.58	0.34	6.10

Der Grenzzustand für die aufgeführten Versuche mit Fußpunktdrehung wurde von MAO über Verschiebungskriterien festgelegt, da bei dieser Lagerungsdichte kein Maximalwert der Erddruckkraft erreicht wurde.

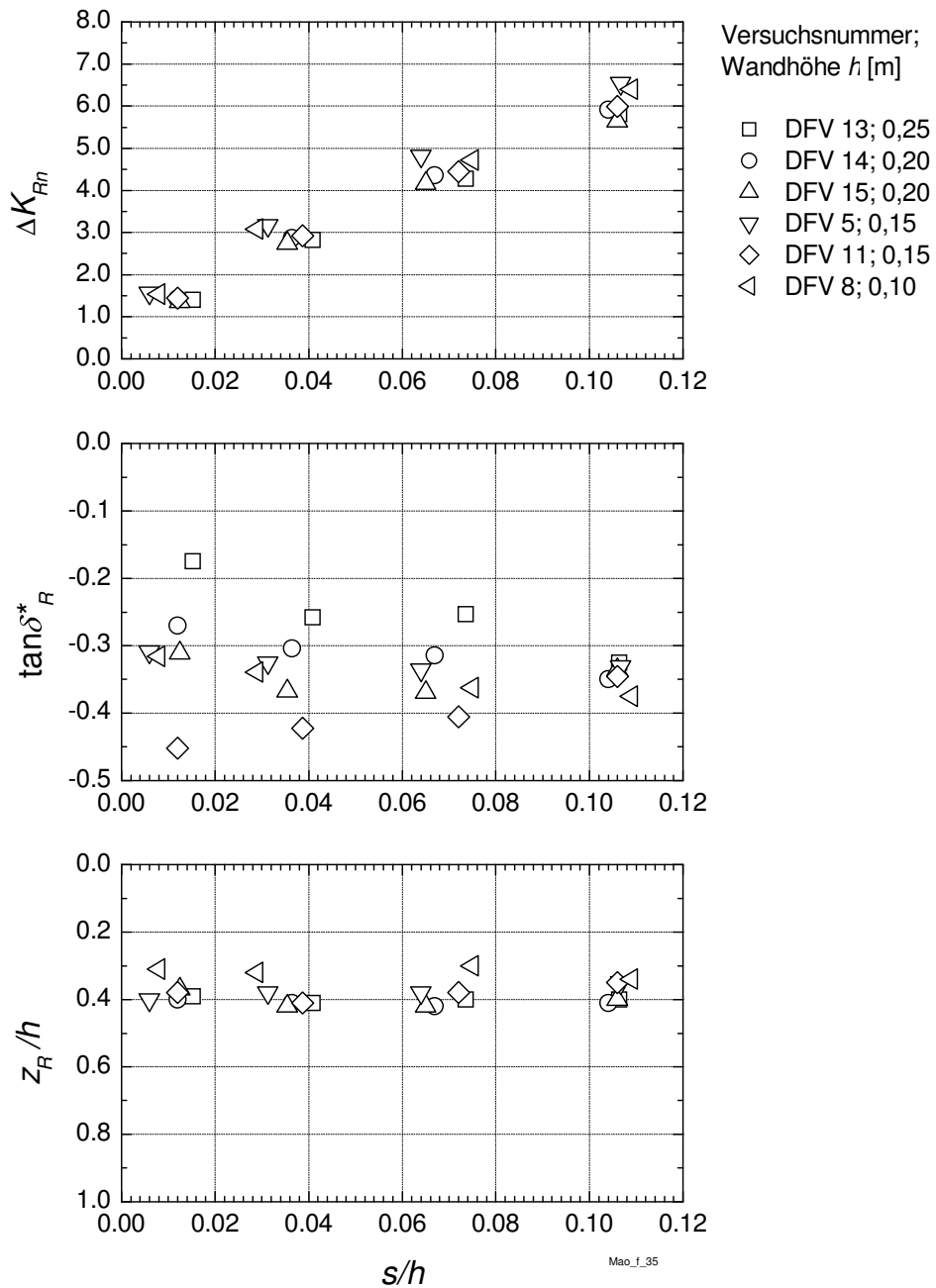


Bild A.11: Versuchsergebnisse MAO (1993) Fußpunktdrehung; Sand trocken; ($D = 0,35$; $I_D = 0,39$; $e_0 = 0,711$); Mobilisierung Erddruckkraft

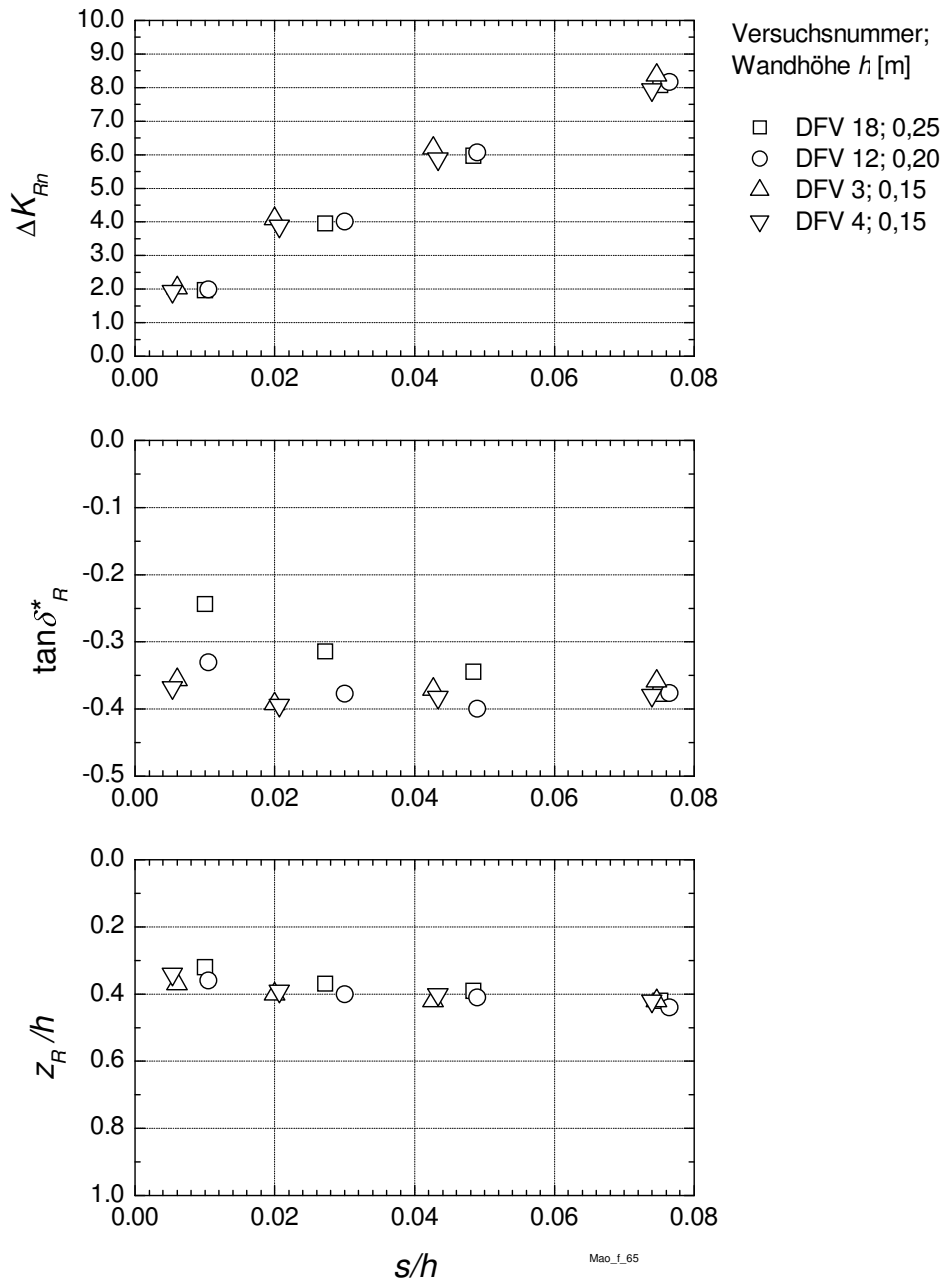


Bild A.12: Versuchsergebnisse MAO (1993) Fußpunktdrehung; Sand trocken; ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$; $e_0 = 0,628$); Mobilisierung Erddruckkraft

B Auswertung der Versuche von MAO

B.1 Parallelverschiebung

senkrechte Wand; Wand tangential nicht beweglich, trockener Sand

Tabelle B.1: Versuche von MAO mit Parallelverschiebung – Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen

Versuch	D	$T1$	$T2$	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
ENS17	0.80	0.0616	0.0014	1.75	0.65
ENS18	0.80	0.0560	0.0015	1.66	0.70
ENS2	0.80	0.0626	0.0013	1.72	0.67
ENS13	0.65	0.0653	0.0023	1.53	0.70
ENS14	0.65	0.0784	0.0015	2.41	0.72
ENS5	0.65	0.0798	0.0007	1.87	0.50
ENS6	0.65	0.0792	0.0008	2.22	0.56
ENS10	0.65	0.0902	0.0006	4.05	0.63
ENS12	0.65	0.0800	0.0010	2.76	0.69
ENS29	0.50	-	-	-	-
ENS23	0.35	0.0802	0.0028	-	-
ENS25	0.35	0.0586	0.0030	-	-
ENS16	0.35	0.0805	0.0036	-	-
ENS9	0.35	0.1162	0.0009	-	-

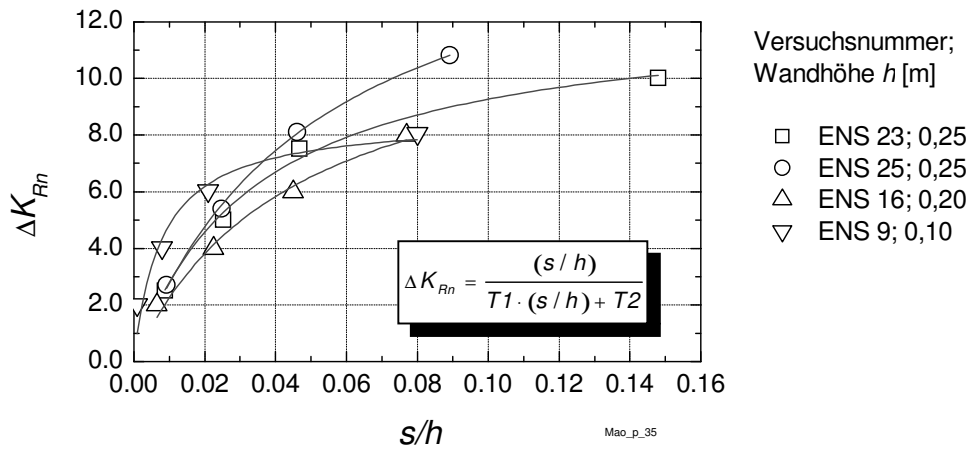


Bild B.1: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit PV und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,71$ ($D = 0,35$; $I_D = 0,39$)

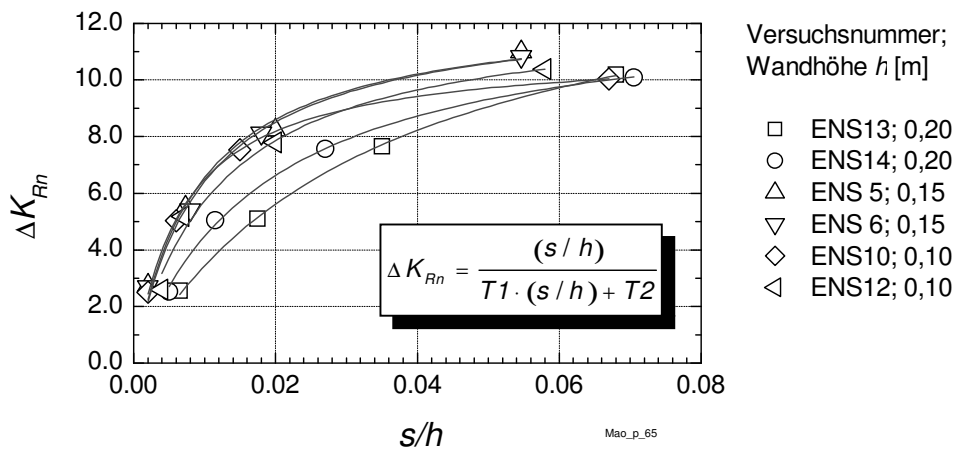


Bild B.2: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit PV und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,63$ ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$)

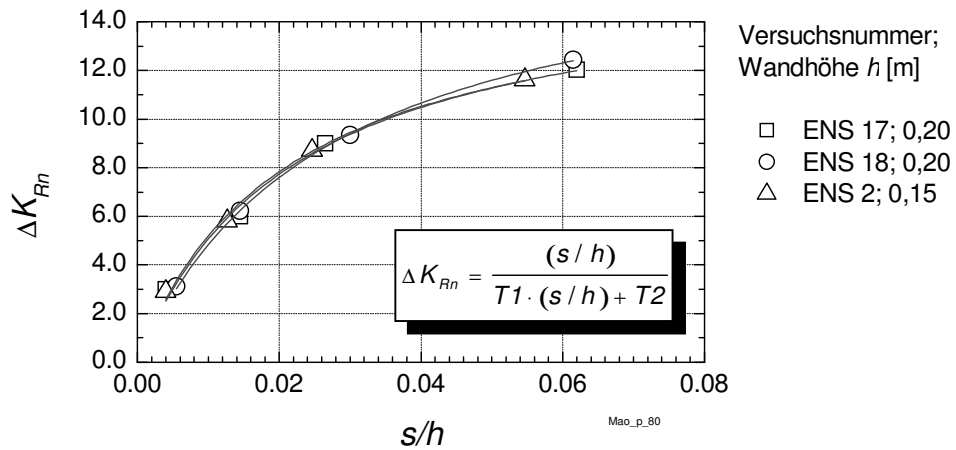


Bild B.3: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit PV und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,59$ ($D = 0,80$; $I_D = 0,83$)

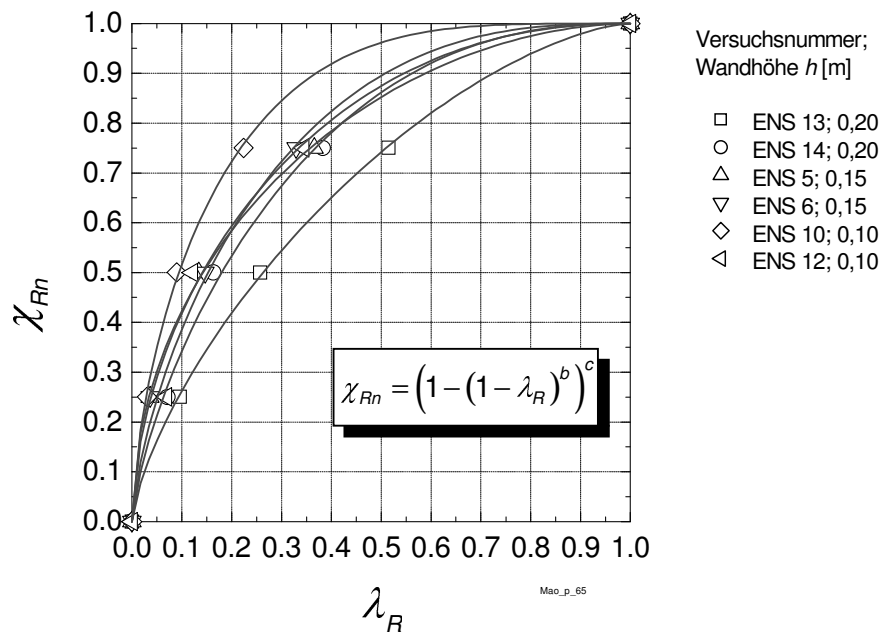


Bild B.4: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit PV und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,63$ ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$)

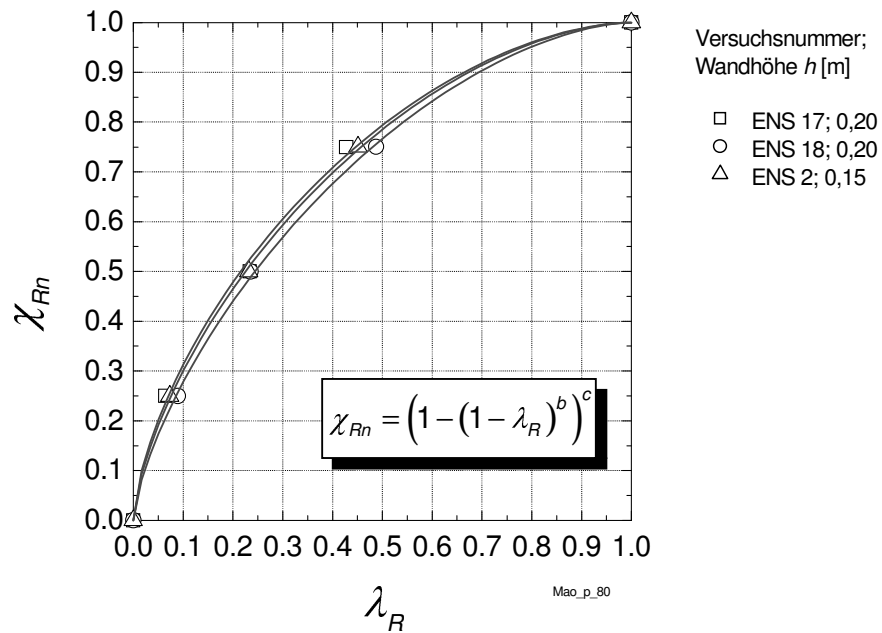


Bild B.5: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit PV und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,59$ ($D = 0,80$; $I_D = 0,83$)

B.2 Kopfpunktdrehung

senkrechte Wand; Wand tangential nicht beweglich, trockener Sand

Tabelle B.2: Versuche von MAO mit Kopfpunktdrehung – Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen

Versuch	D	T_1	T_2	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
DOV1	0.65	0.0774	0.0028	1.78	0.83
DOV3	0.50	0.0934	0.0022	1.69	0.66
DOV6	0.35	0.1045	0.0044	1.19	0.64
DOV7	0.35	0.1251	0.0030	1.80	0.65
DOV8	0.35	0.1279	0.0026	1.50	0.56
DOV9	0.50	0.1095	0.0022	2.28	0.74
DOV11	0.65	0.0999	0.0012	2.22	0.66
DOV12	0.65	0.0845	0.0018	1.89	0.77
DOV13	0.65	0.1041	0.0016	2.70	0.70
DOV14	0.65	0.0989	0.0014	2.35	0.67
DOV15	0.50	0.1146	0.0013	2.19	0.57
DOV16	0.50	0.1065	0.0015	1.56	0.55
DOV17	0.35	0.1379	0.0026	2.00	0.63
DOV18	0.35	0.1463	0.0022	1.52	0.47
DOV20	0.35	0.1618	0.0022	2.02	0.53
DOV21	0.50	0.0927	0.0028	1.98	0.86
DOV22	0.50	0.1352	0.0012	2.08	0.52
DOV23	0.65	0.0927	0.0015	2.14	0.75
DOV24	0.65	0.1029	0.0010	1.80	0.52

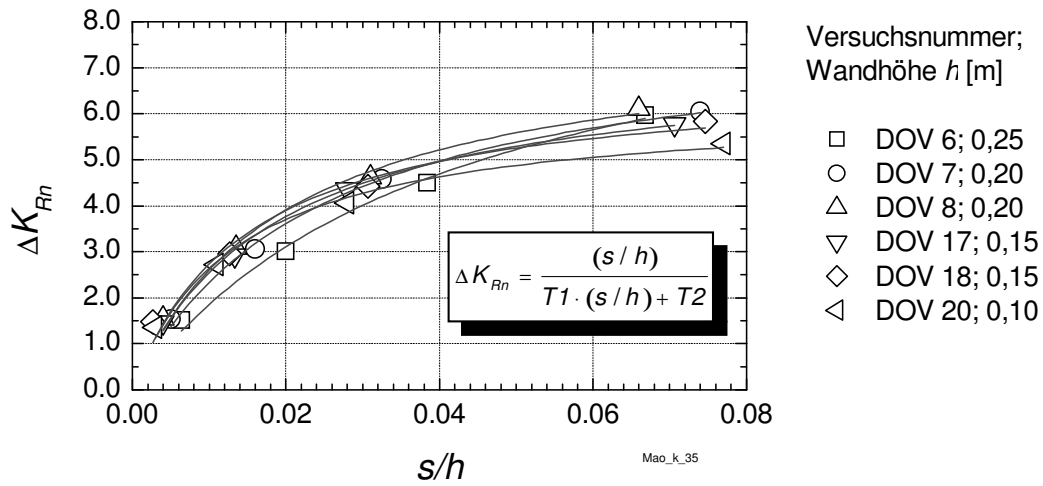


Bild B.6: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit KPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,71$ ($D = 0,35$; $I_D = 0,39$)

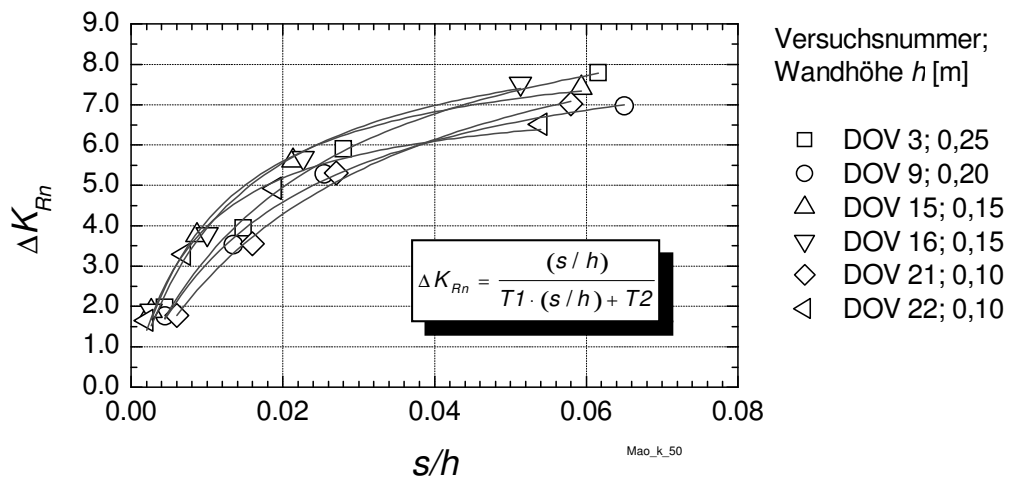


Bild B.7: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit KPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,67$ ($D = 0,50$; $I_D = 0,54$)

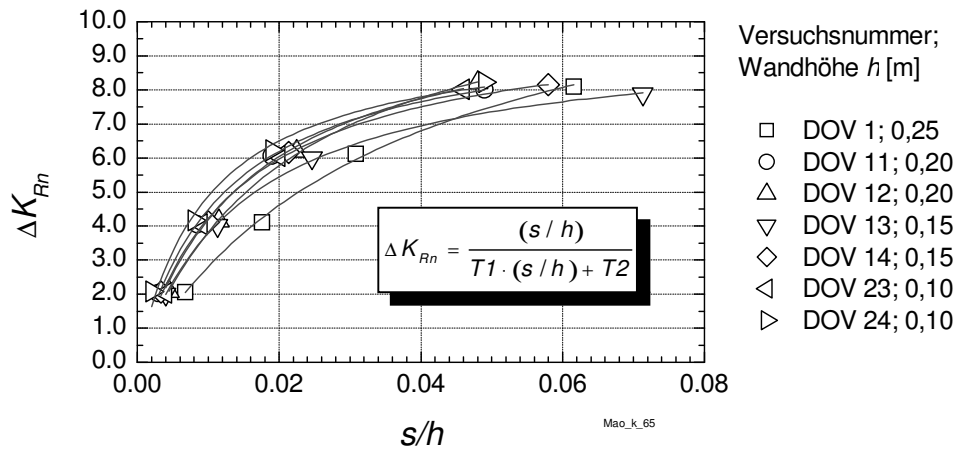


Bild B.8: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit KPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,63$ ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$)

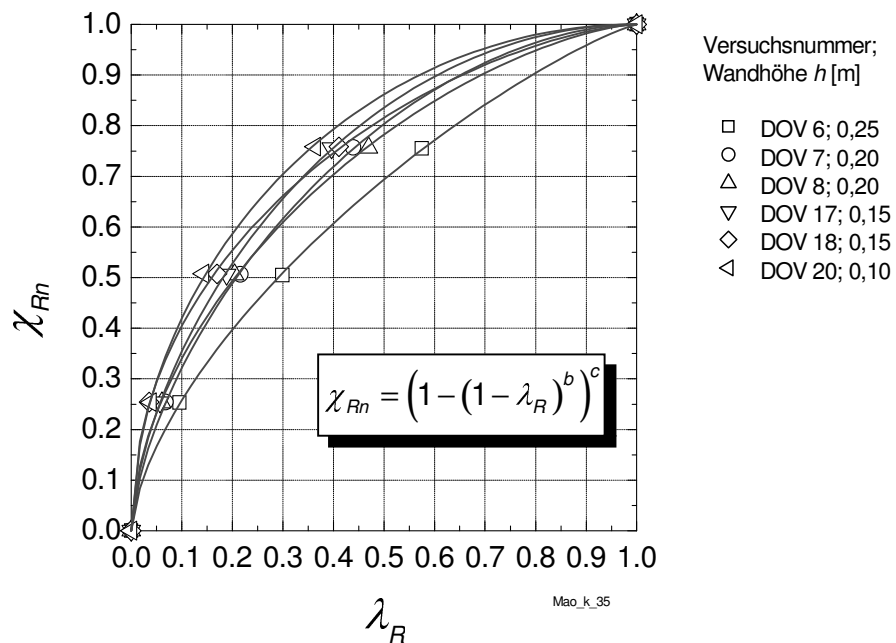


Bild B.9: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit KPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,71$ ($D = 0,35$; $I_D = 0,39$)

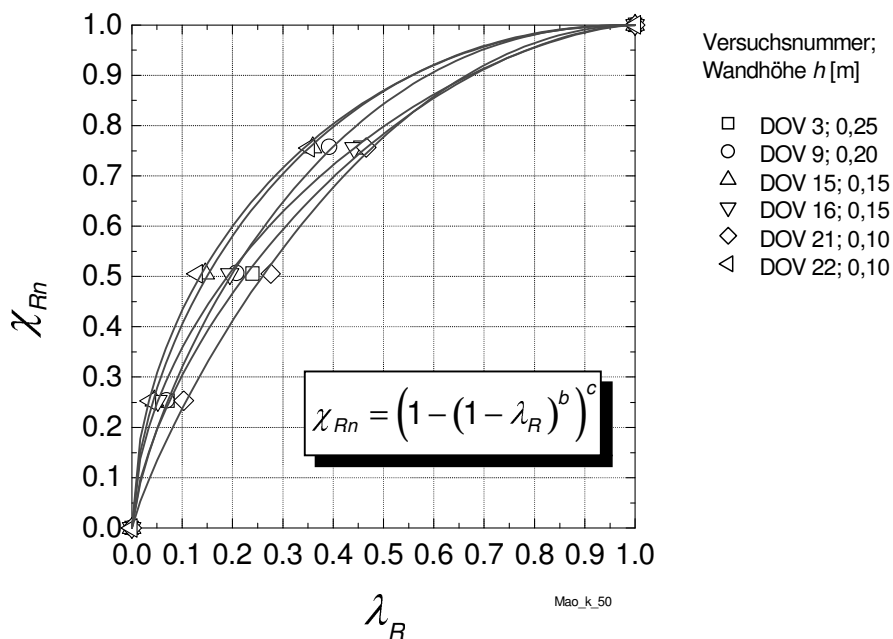


Bild B.10: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit KPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,67$ ($D = 0,50$; $I_D = 0,54$)

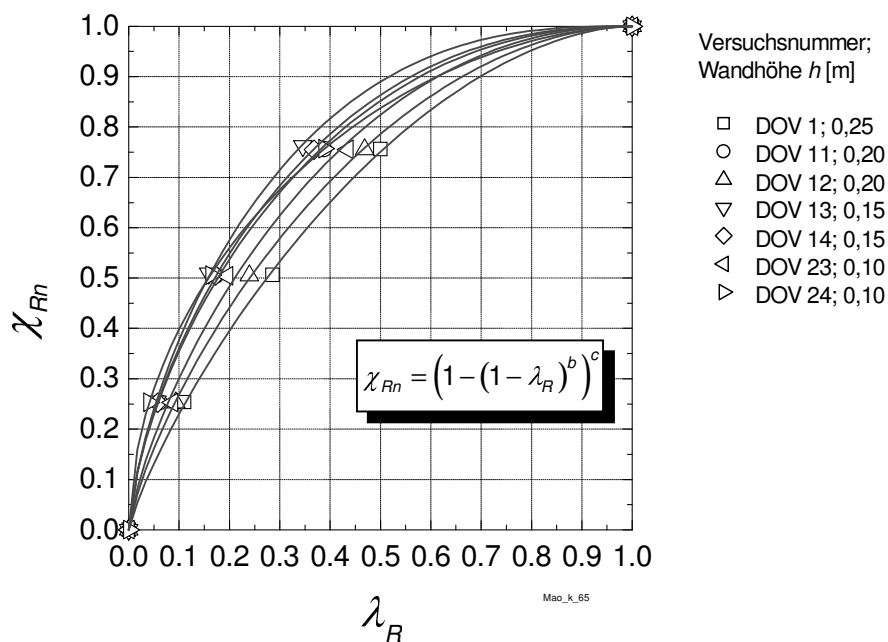


Bild B.11: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit KPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,63$ ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$)

B.3 Fußpunktdrehung

senkrechte Wand; Wand tangential nicht beweglich, trockener Sand

Tabelle B.3: Versuche von MAO mit Fußpunktdrehung – Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen

Versuch	D	$T1$	$T2$
[-]	[-]	[-]	[-]
DFV18	0.65	0.0550	0.0053
DFV12	0.65	0.0485	0.0057
DFV3	0.65	0.0791	0.0032
DFV4	0.65	0.0829	0.0034
DFV13	0.35	0.0647	0.0118
DFV14	0.35	0.0808	0.0095
DFV15	0.35	0.0895	0.0095
DFV5	0.35	0.0987	0.0063
DFV11	0.35	0.0866	0.0098
DFV8	0.35	0.1193	0.0059

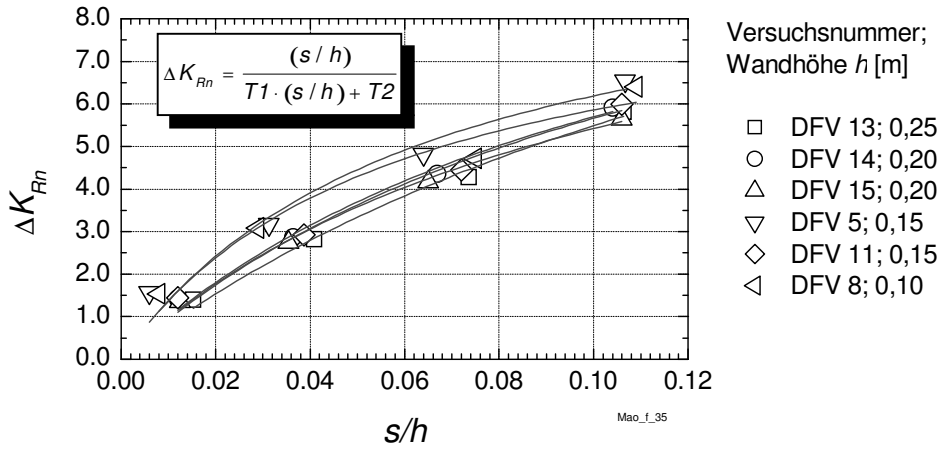


Bild B.12: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit FPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,71$ ($D = 0,35$; $I_D = 0,39$)

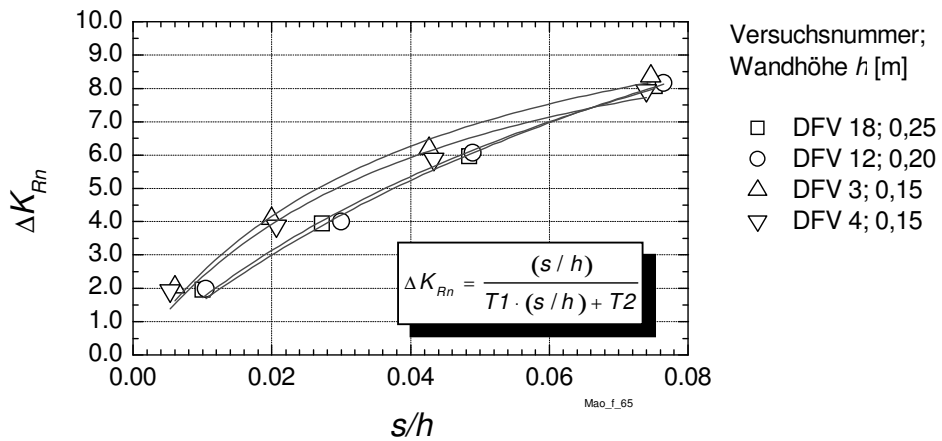


Bild B.13: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse von MAO (1993) mit FPD und Anfangsporenzahl $e_0 = 0,63$ ($D = 0,65$; $I_D = 0,69$)

C Ergebnisse 1g-Versuche

C.1 Parallelverschiebung

Tabelle C.1: 1g-Versuche mit Parallelverschiebung ($h_{MW} = 0.564 \text{ m}$) – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	WOF	l_k/h_{MW}	γ	e_0	l_D	φ_1'
[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]
1	038	Alu	3.16	16.5	0.576	0.59	39.0
2	044	Alu	3.16	17.2	0.511	0.81	42.1
3	046	S40	3.16	17.0	0.527	0.76	41.4
4	049	Alu	3.16	15.4	0.693	0.19	34.1
5	050	Alu	3.16	16.1	0.617	0.45	37.1
6	051	Alu	3.16	16.3	0.595	0.53	38.1
7	052	Alu	3.16	16.0	0.624	0.43	36.9
8	053	Alu	3.16	15.8	0.648	0.35	35.9
9	054	Alu	3.16	16.6	0.565	0.63	39.5
10	055	Alu	3.16	15.4	0.693	0.19	34.1
11	056	Alu	3.16	16.4	0.588	0.55	38.4
12	057	Alu	3.16	16.6	0.569	0.62	39.3
13	064	Alu	3.16	17.2	0.511	0.82	42.2
14	065	Alu	3.16	17.2	0.511	0.82	42.2
15	066	Alu	4.82	17.2	0.508	0.82	42.3
16	067	Alu	3.16	17.2	0.512	0.81	42.1
17	070	Alu	4.82	15.5	0.674	0.26	34.9
18	071	Folie2	3.16	17.2	0.507	0.83	42.3
19	074	S40	3.16	17.2	0.513	0.81	42.1

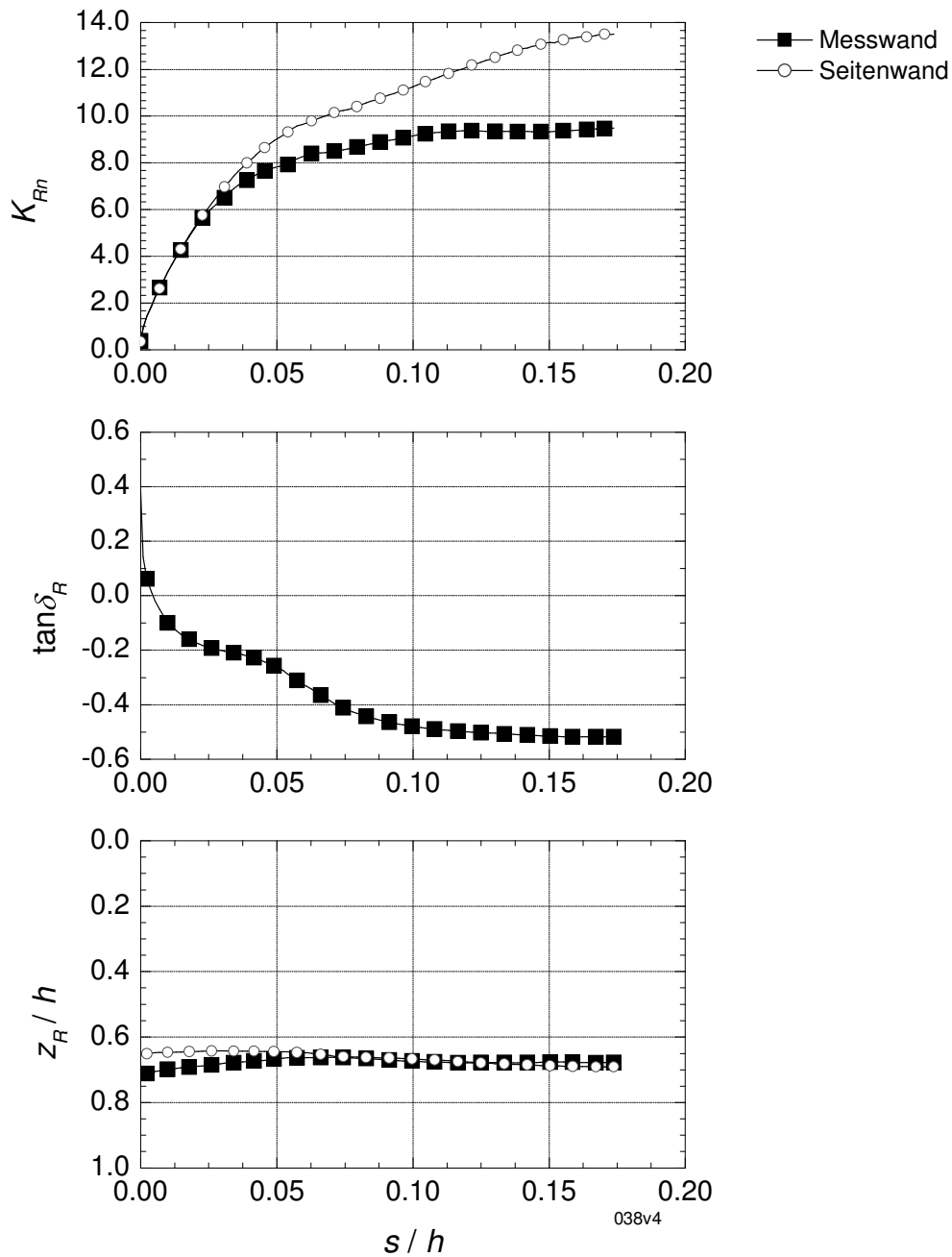


Bild C.1: Versuch 038 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,576$; $I_D = 0,59$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

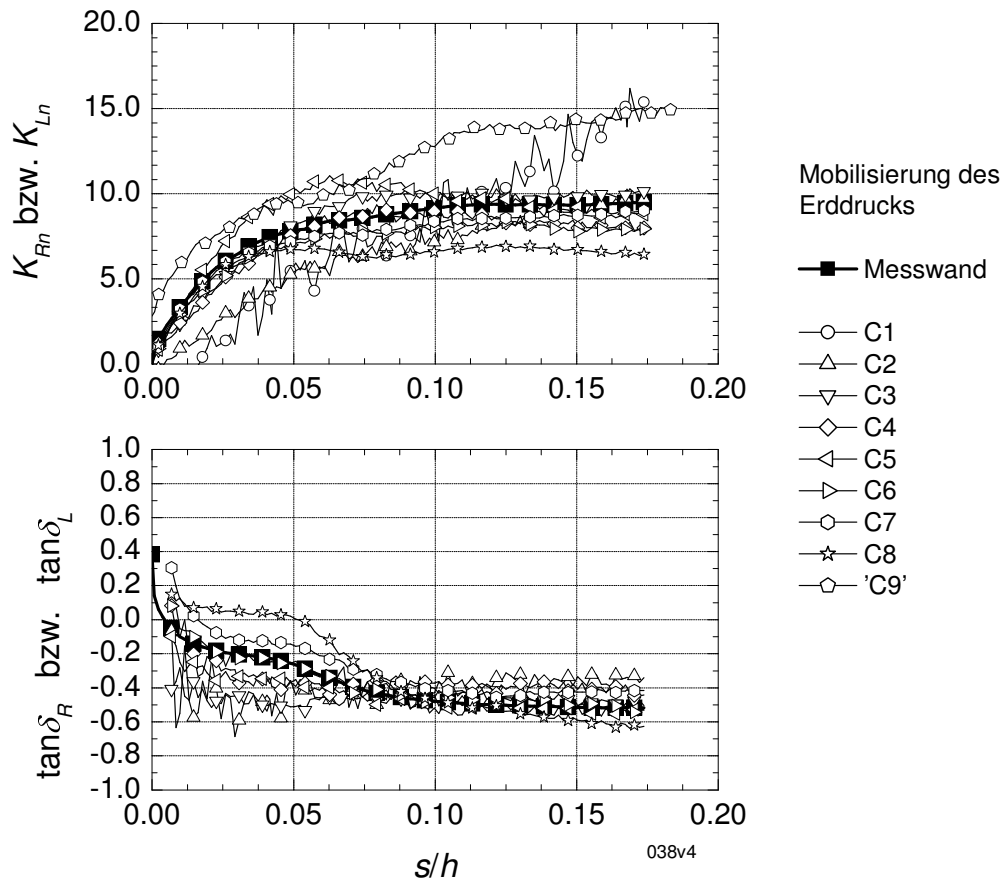


Bild C.2: Versuch 038 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,576$; $I_D = 0,59$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

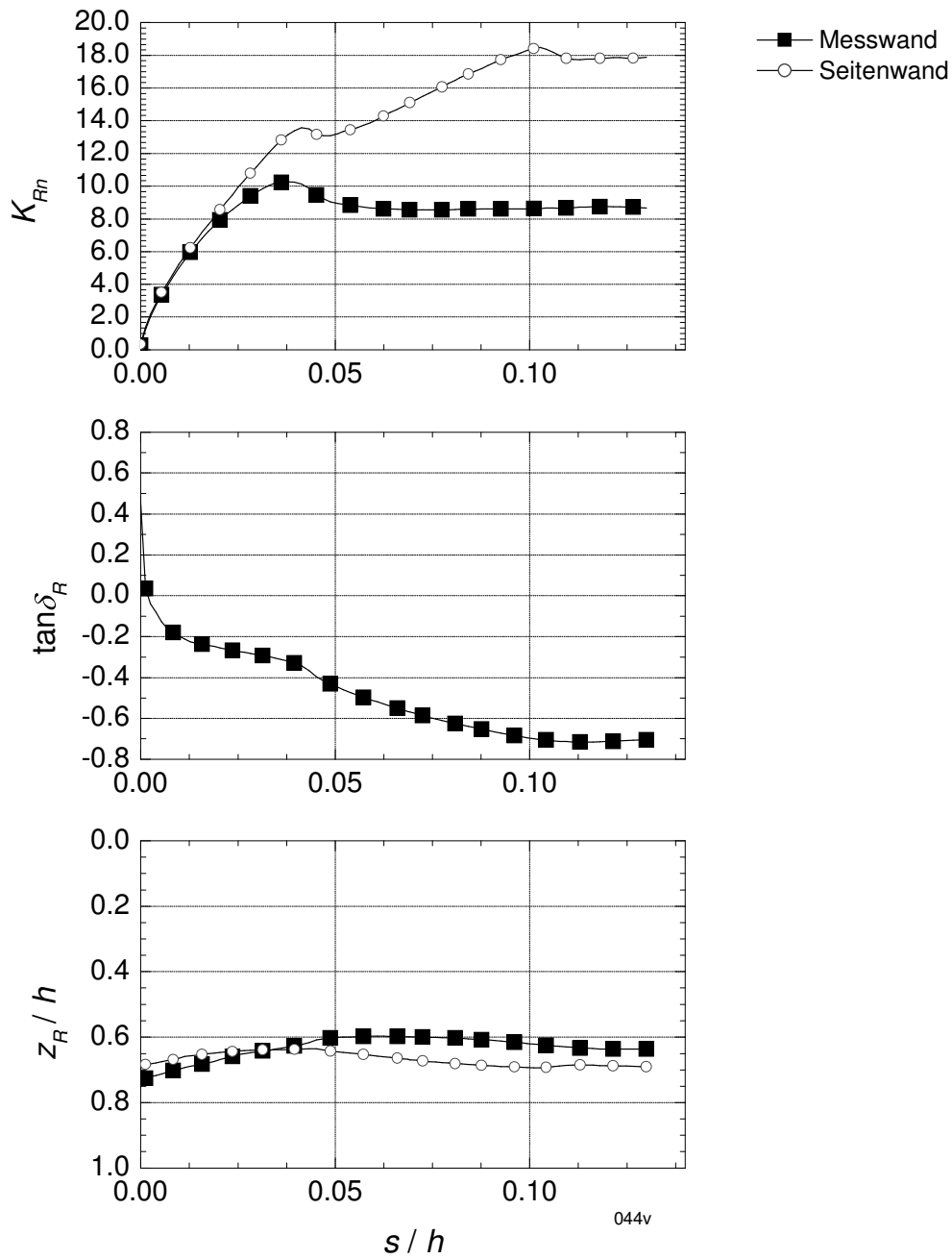


Bild C.3: Versuch 044 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,511$; $l_D = 0,81$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

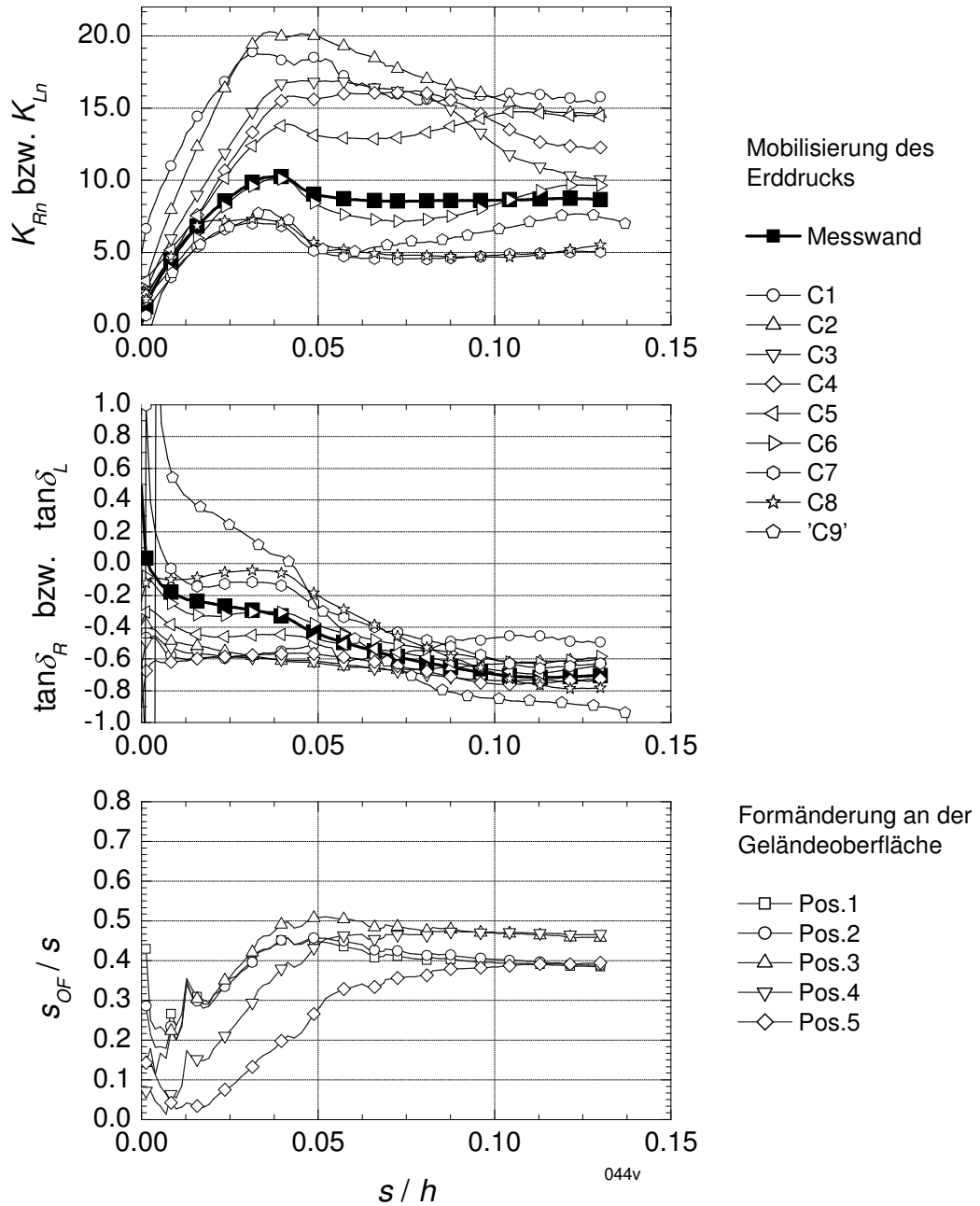


Bild C.4: Versuch 044 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,511$; $I_D = 0,81$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

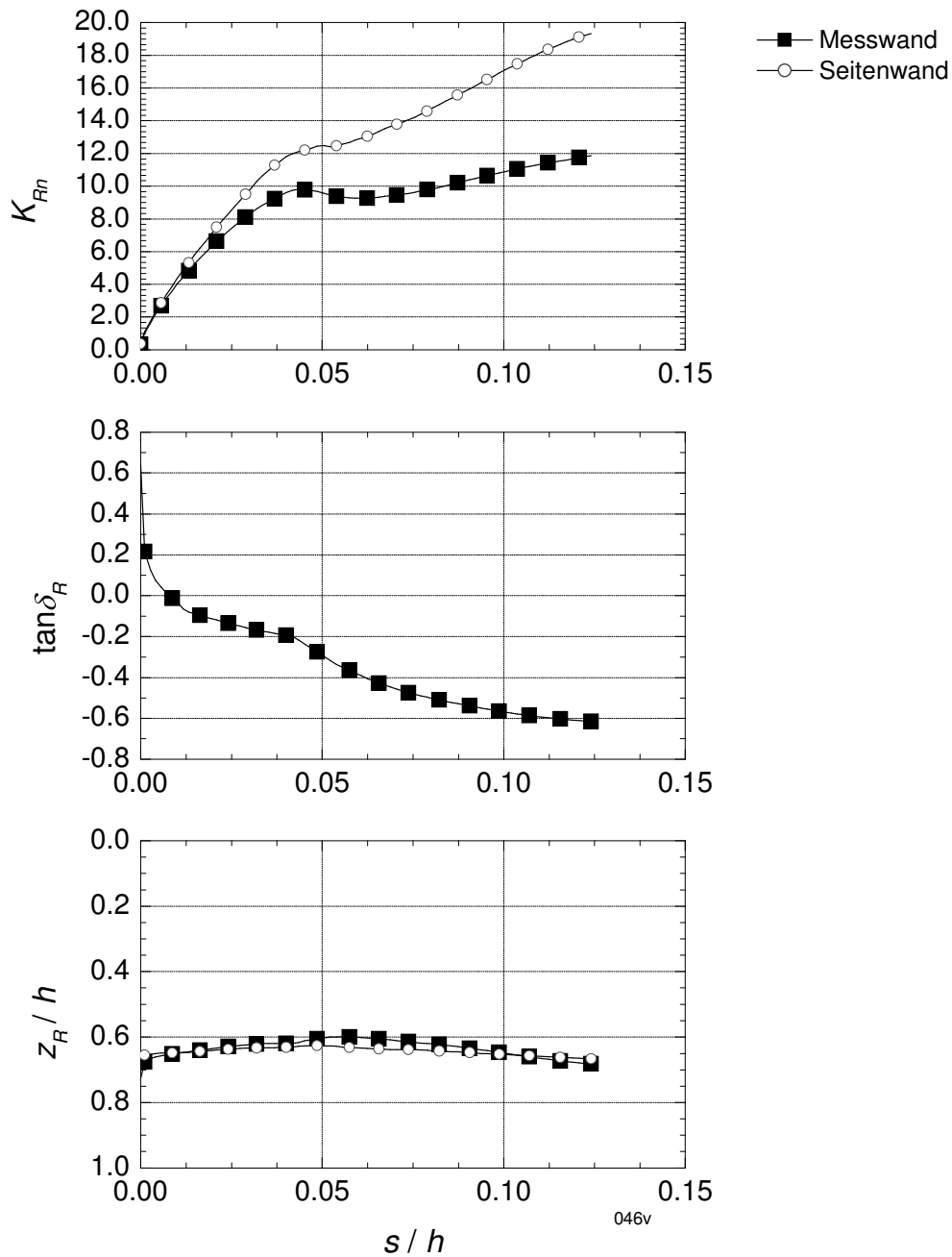


Bild C.5: Versuch 046 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,527$; $I_D = 0,76$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruckkraft

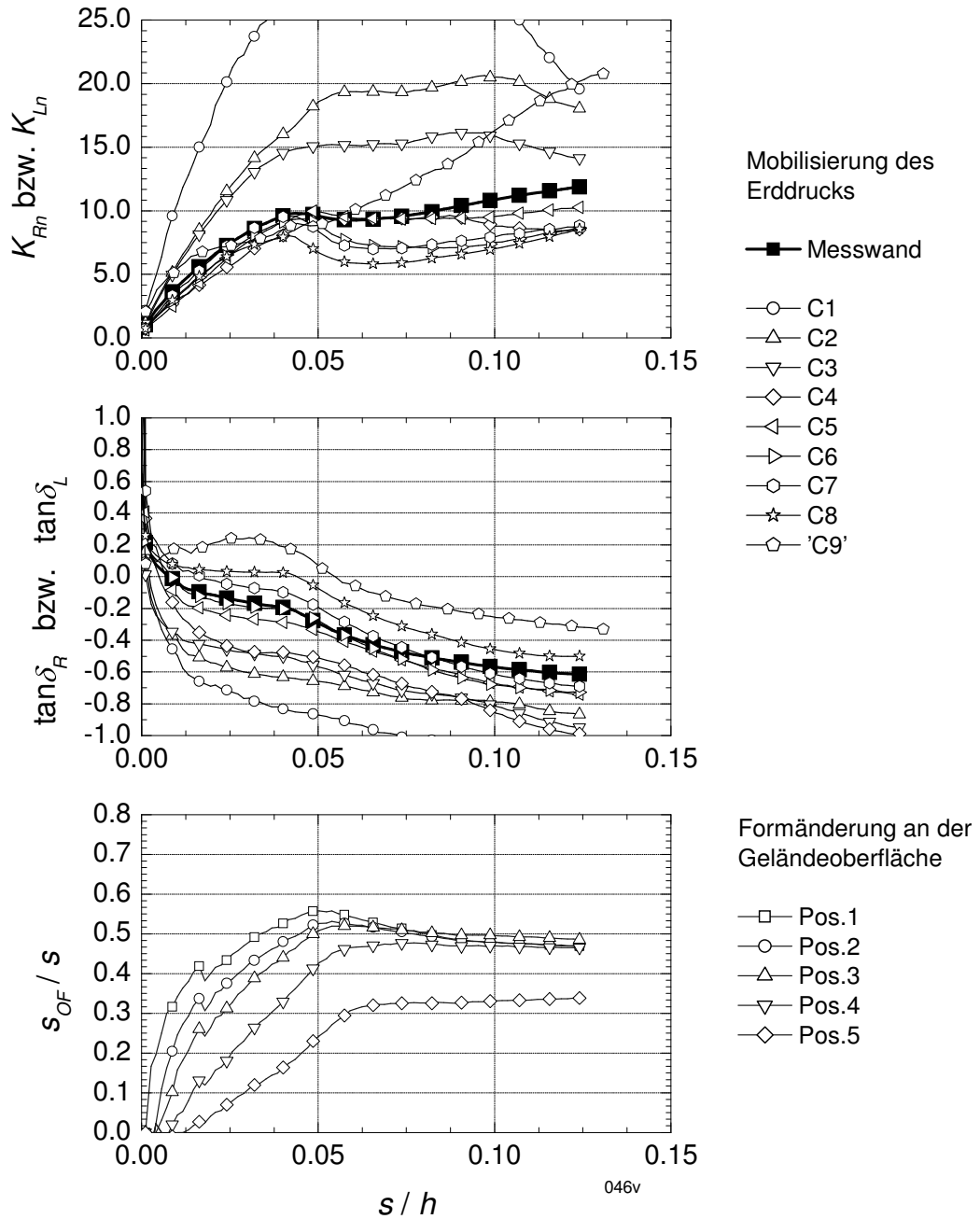


Bild C.6: Versuch 046 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,527$; $I_D = 0,76$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

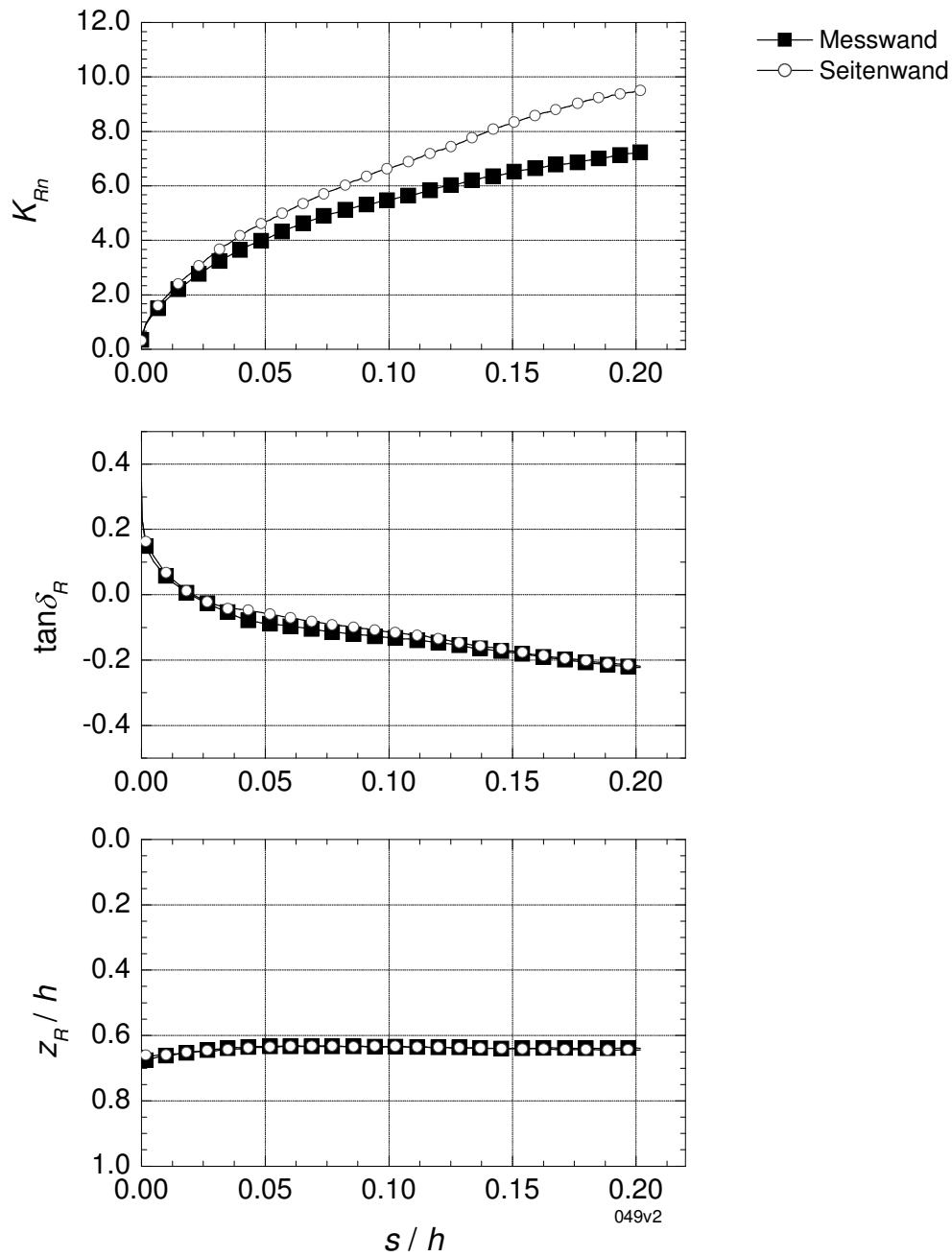


Bild C.7: Versuch 049 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,693$; $I_D = 0,19$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

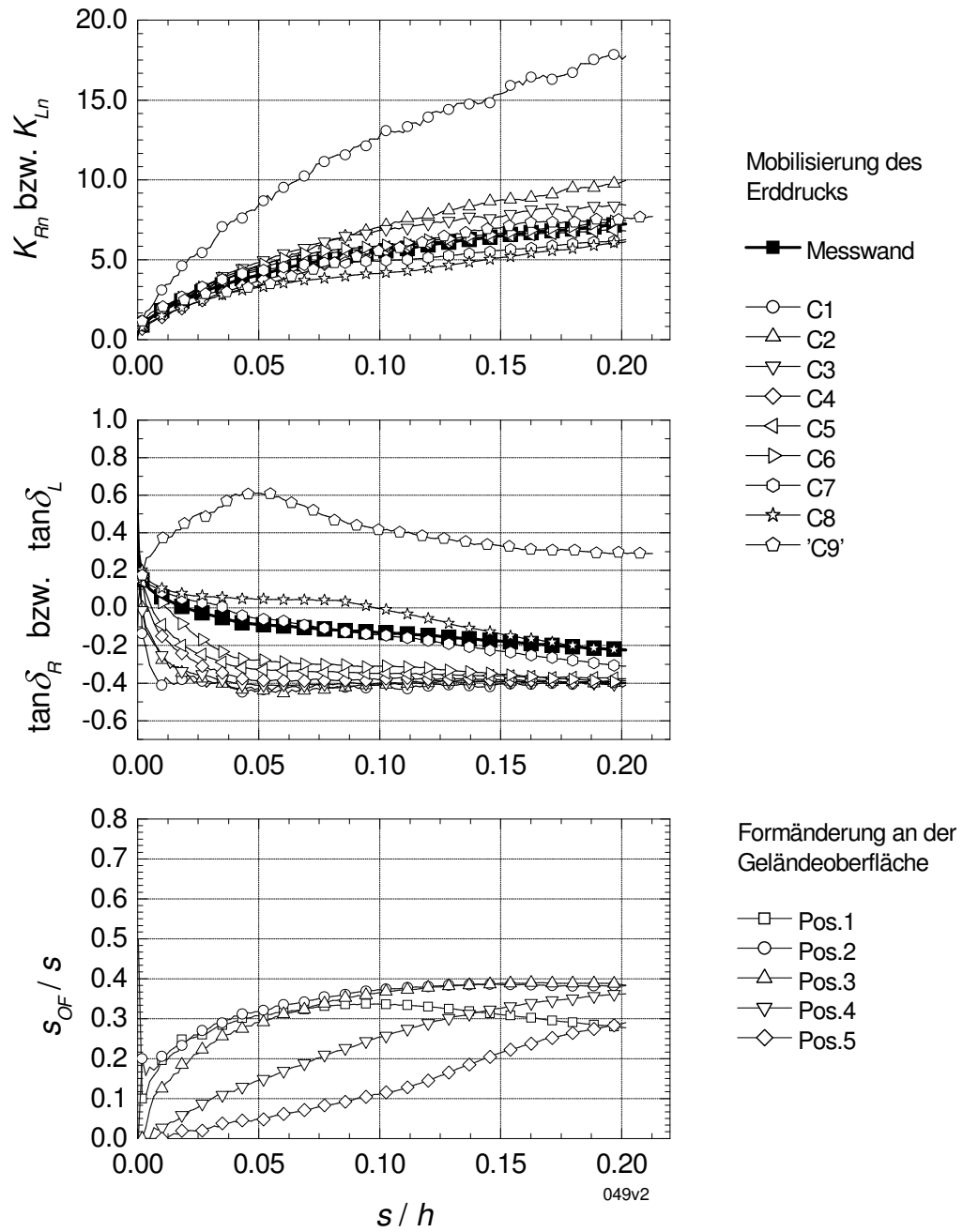


Bild C.8: Versuch 049 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,693$; $I_D = 0,19$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

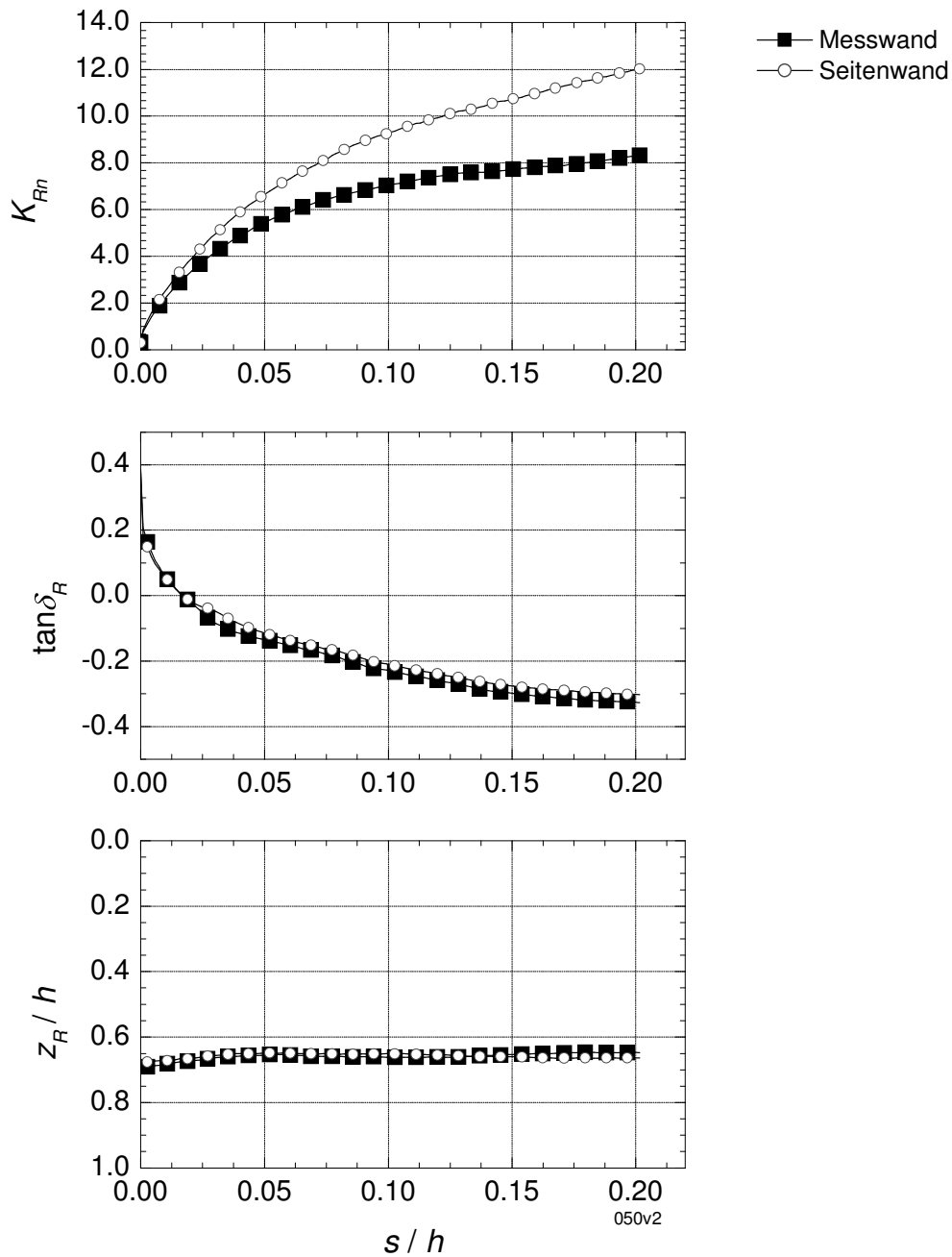


Bild C.9: Versuch 050 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,617$; $I_D = 0,45$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

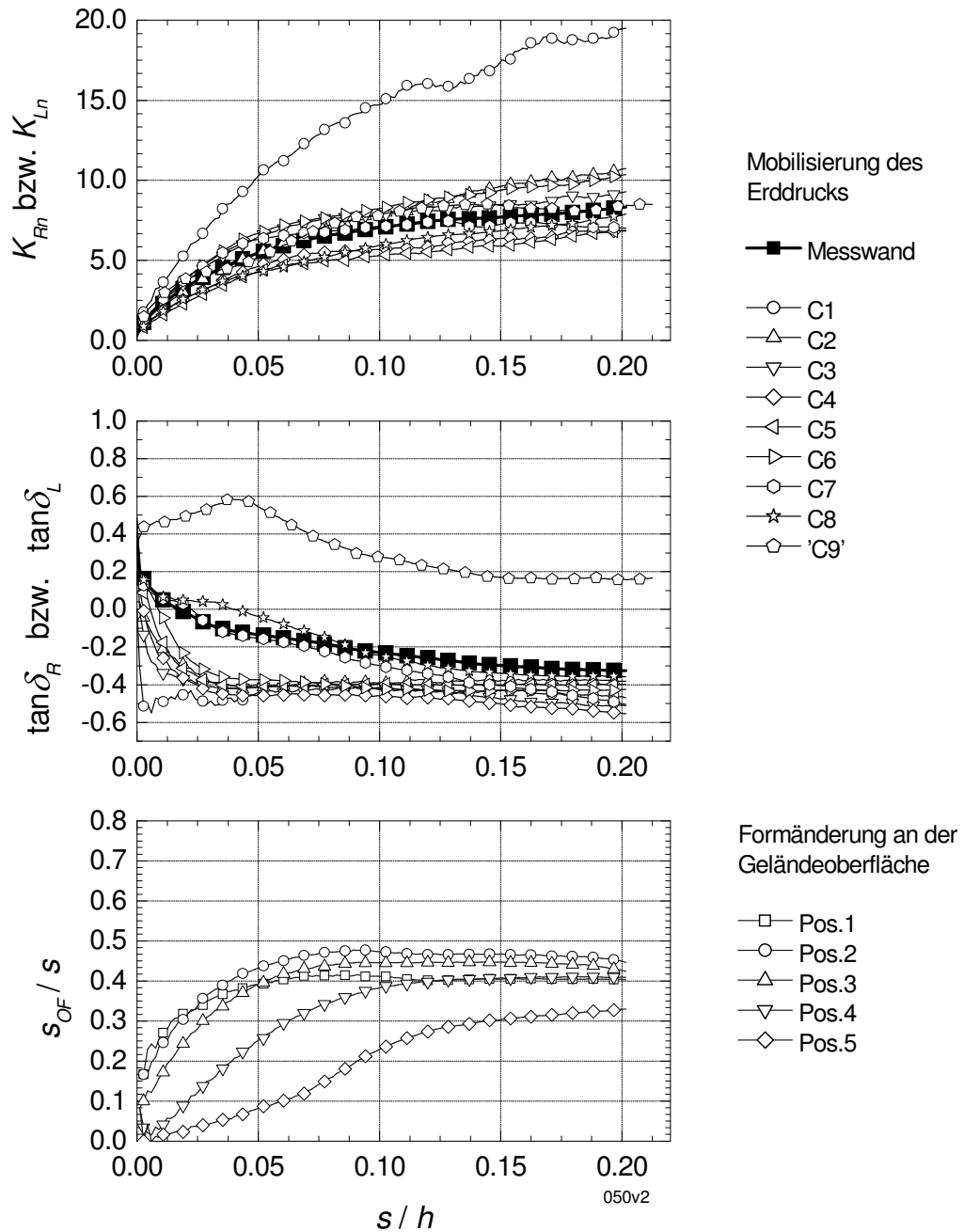


Bild C.10: Versuch 050 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,617$; $I_D = 0,45$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

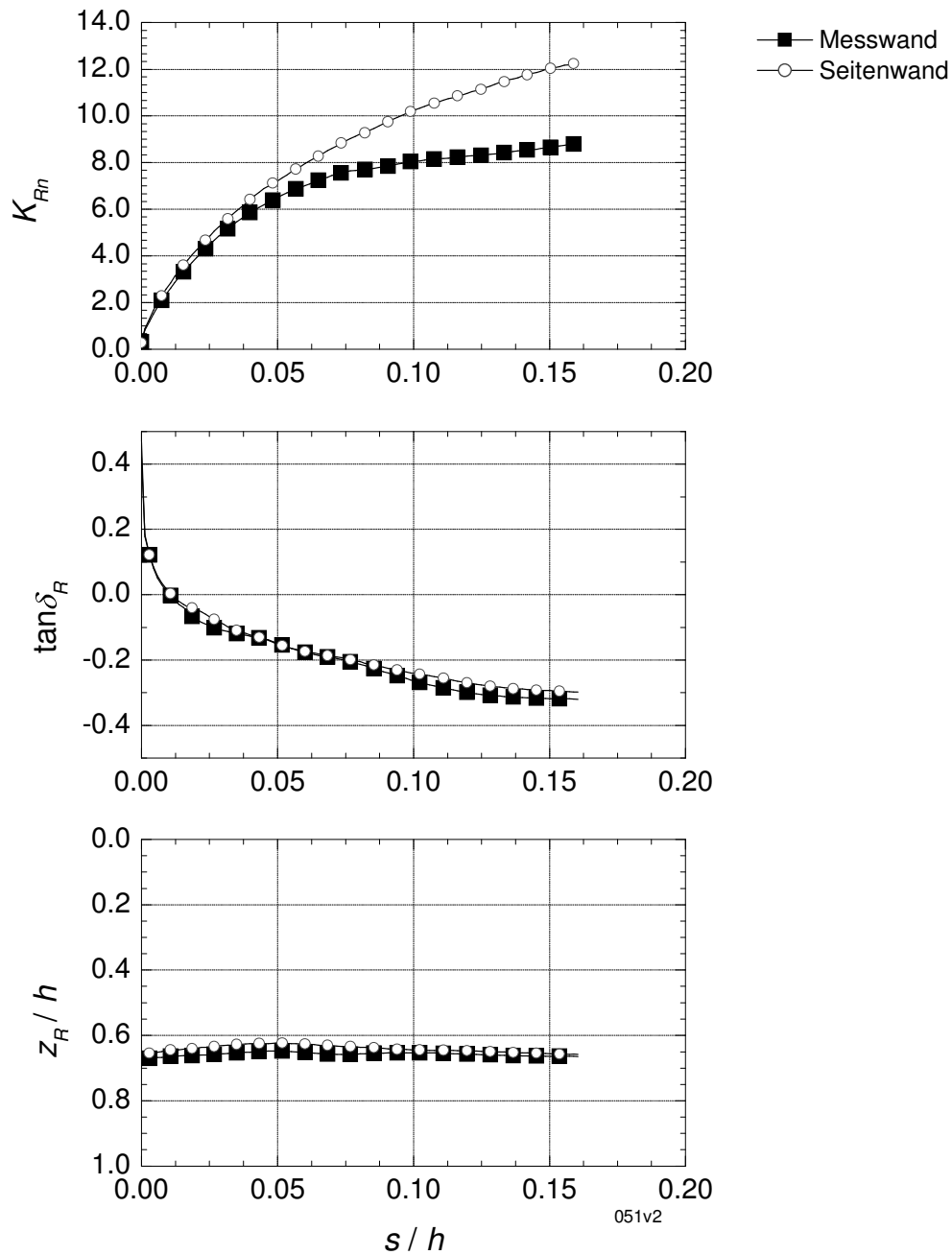


Bild C.11: Versuch 051 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,595$; $I_D = 0,53$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

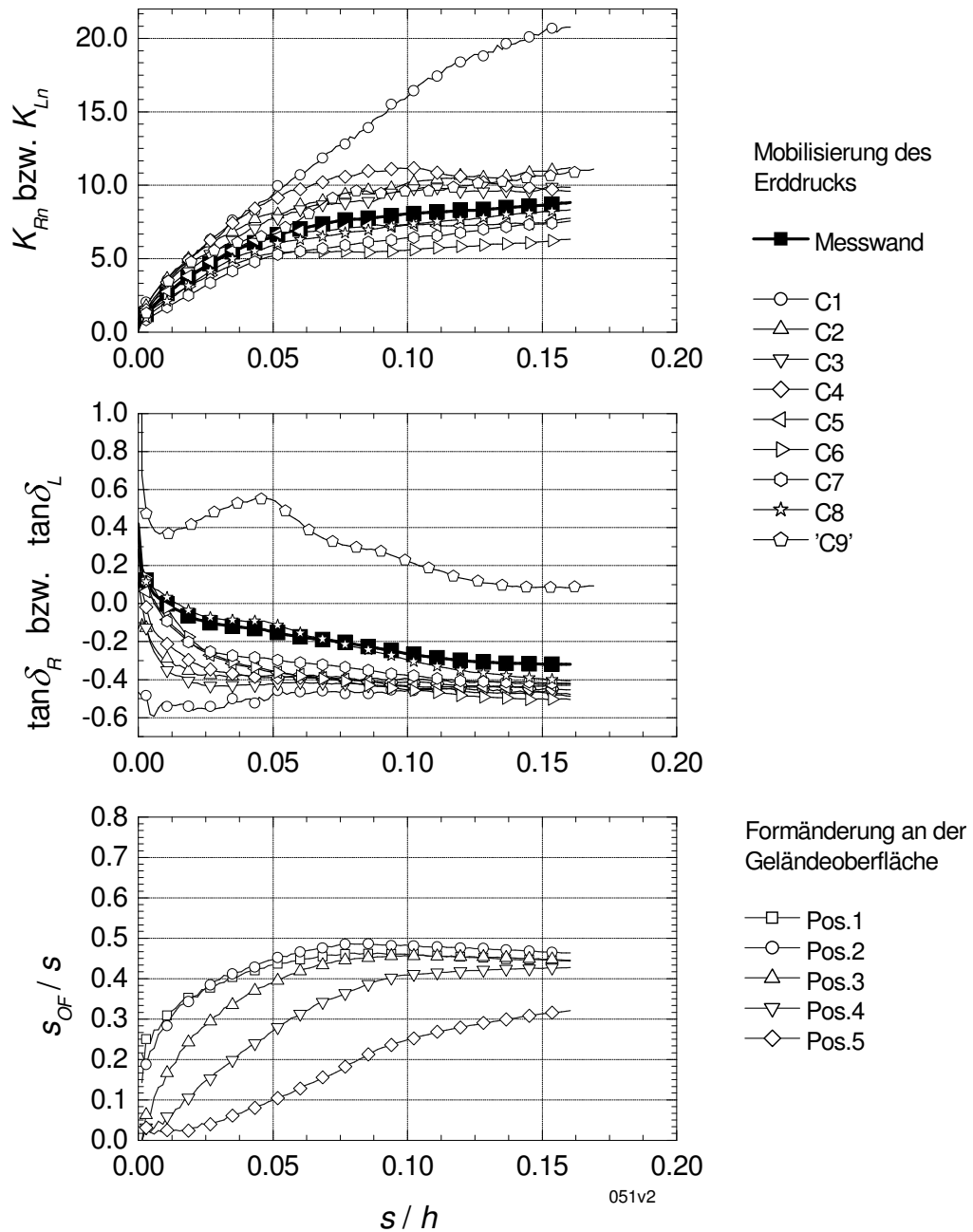


Bild C.12: Versuch 051 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,595$; $I_D = 0,53$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

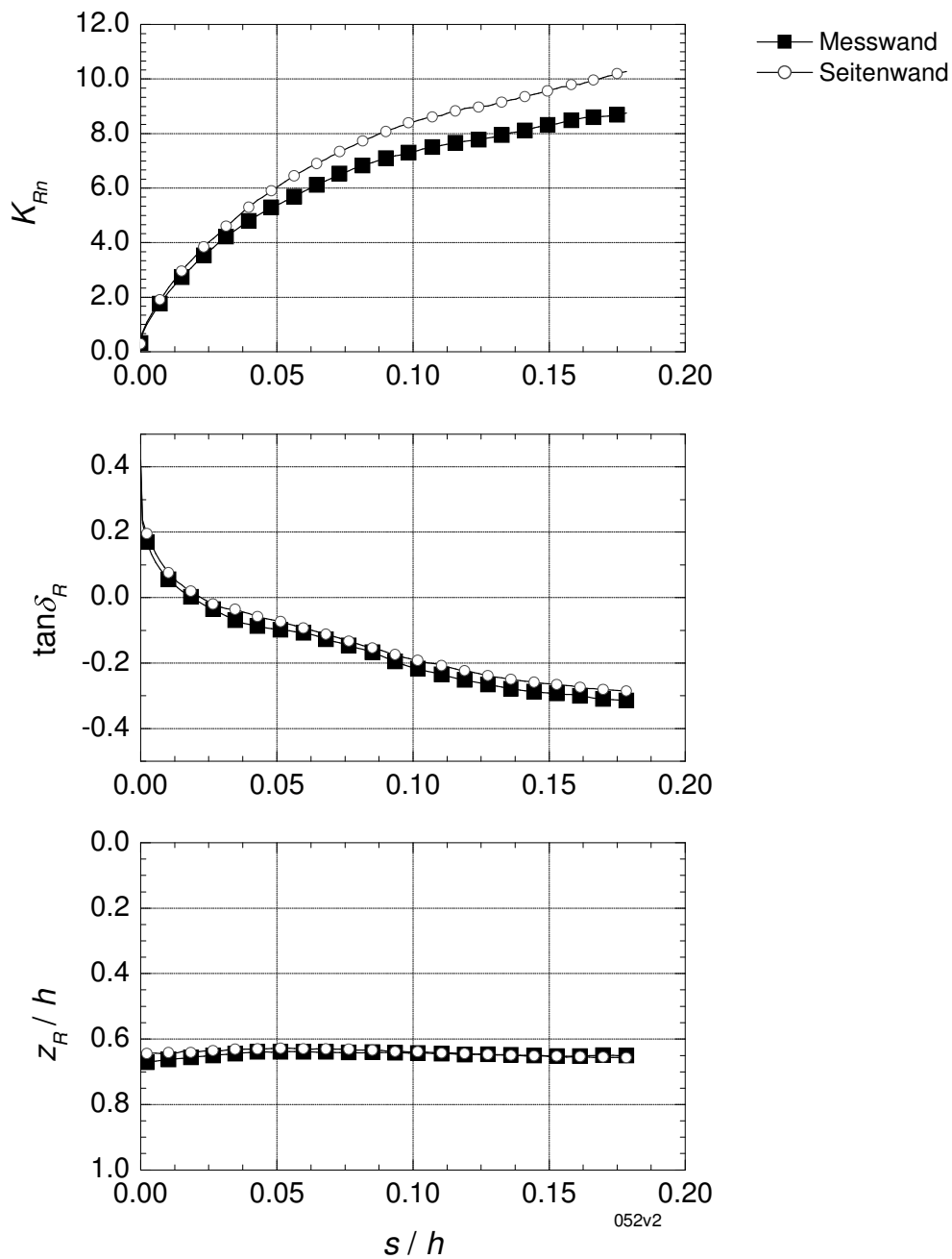


Bild C.13: Versuch 052 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,624$; $I_D = 0,43$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

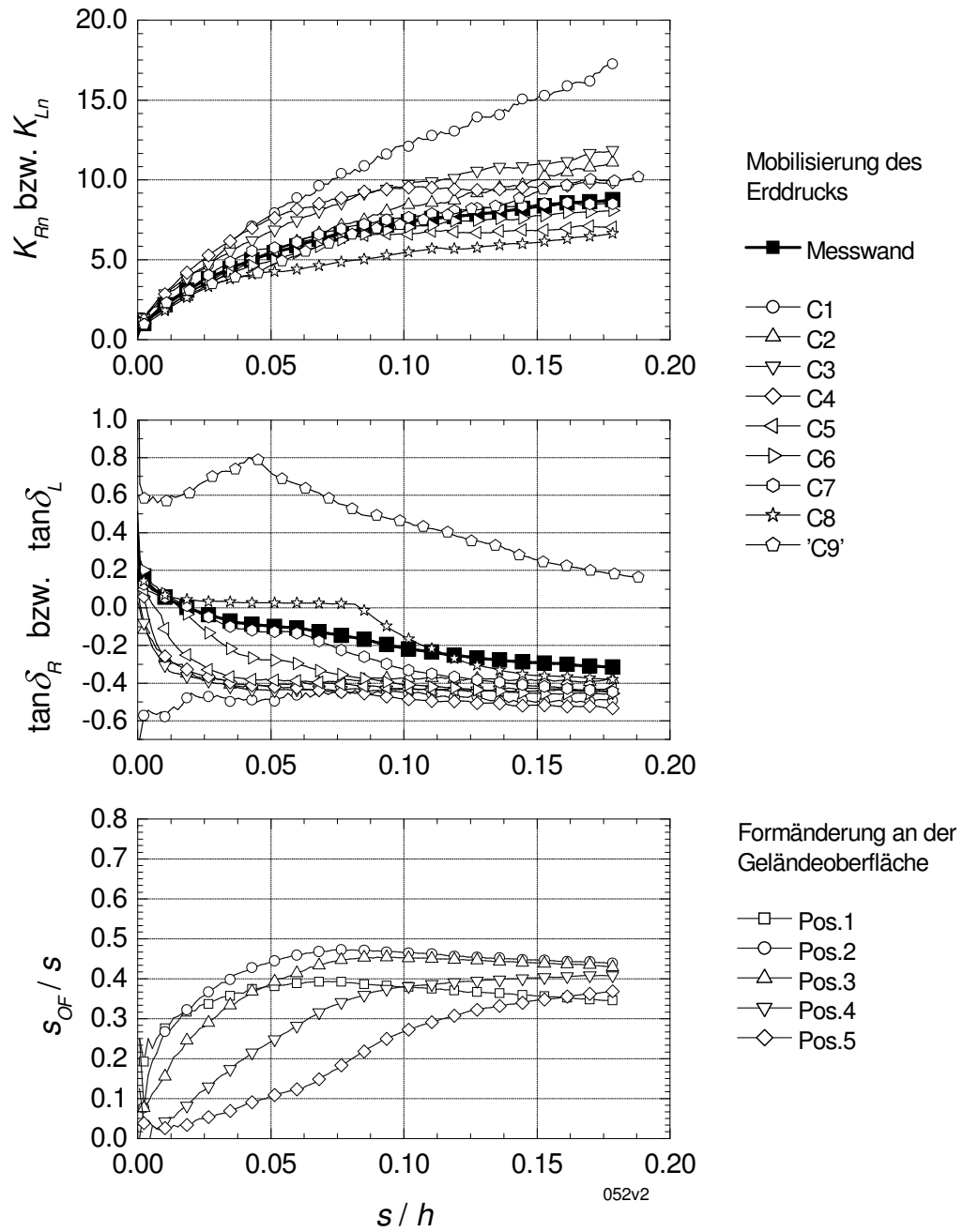


Bild C.14: Versuch 052 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,624$; $I_D = 0,43$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

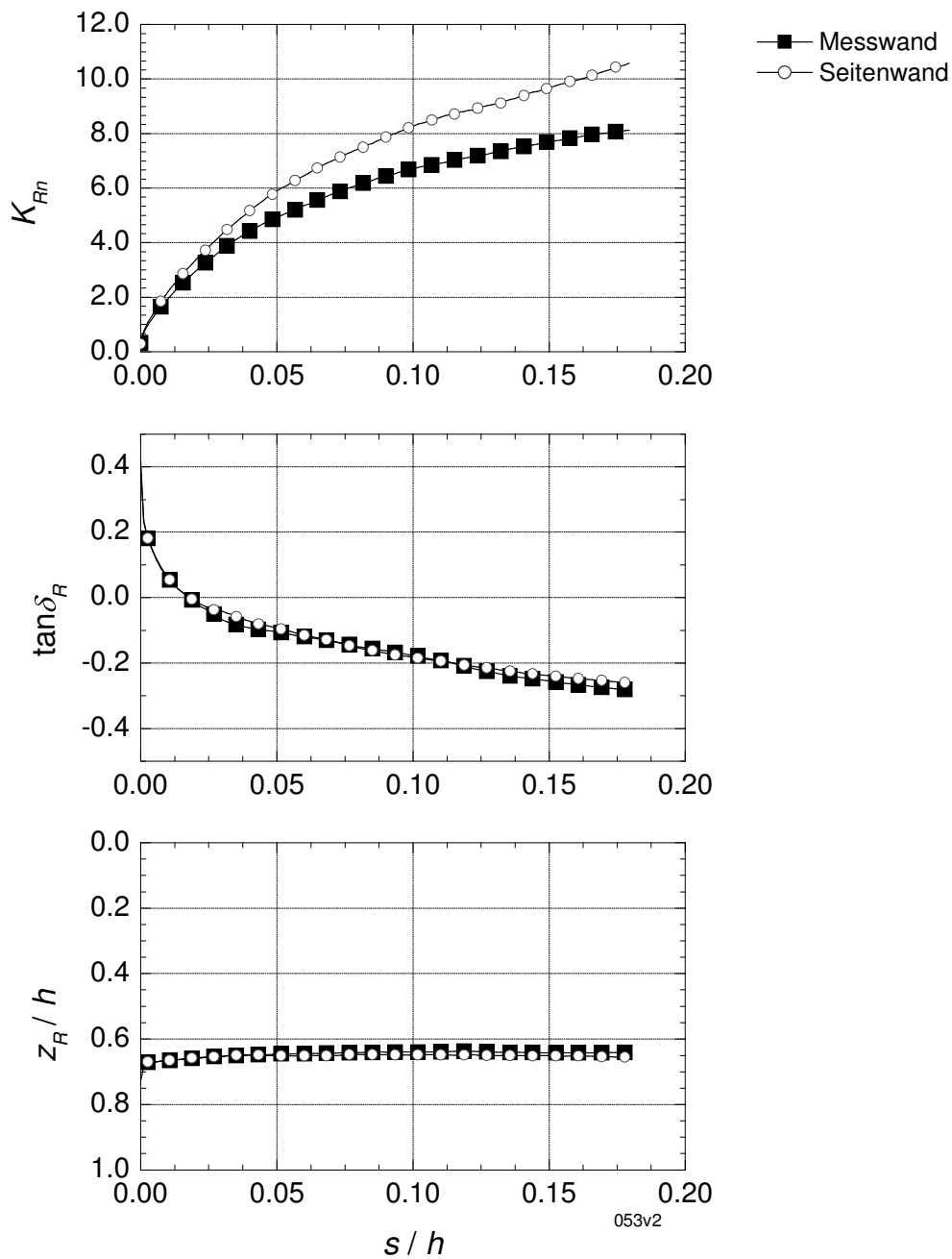


Bild C.15: Versuch 053 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,648$; $I_D = 0,35$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

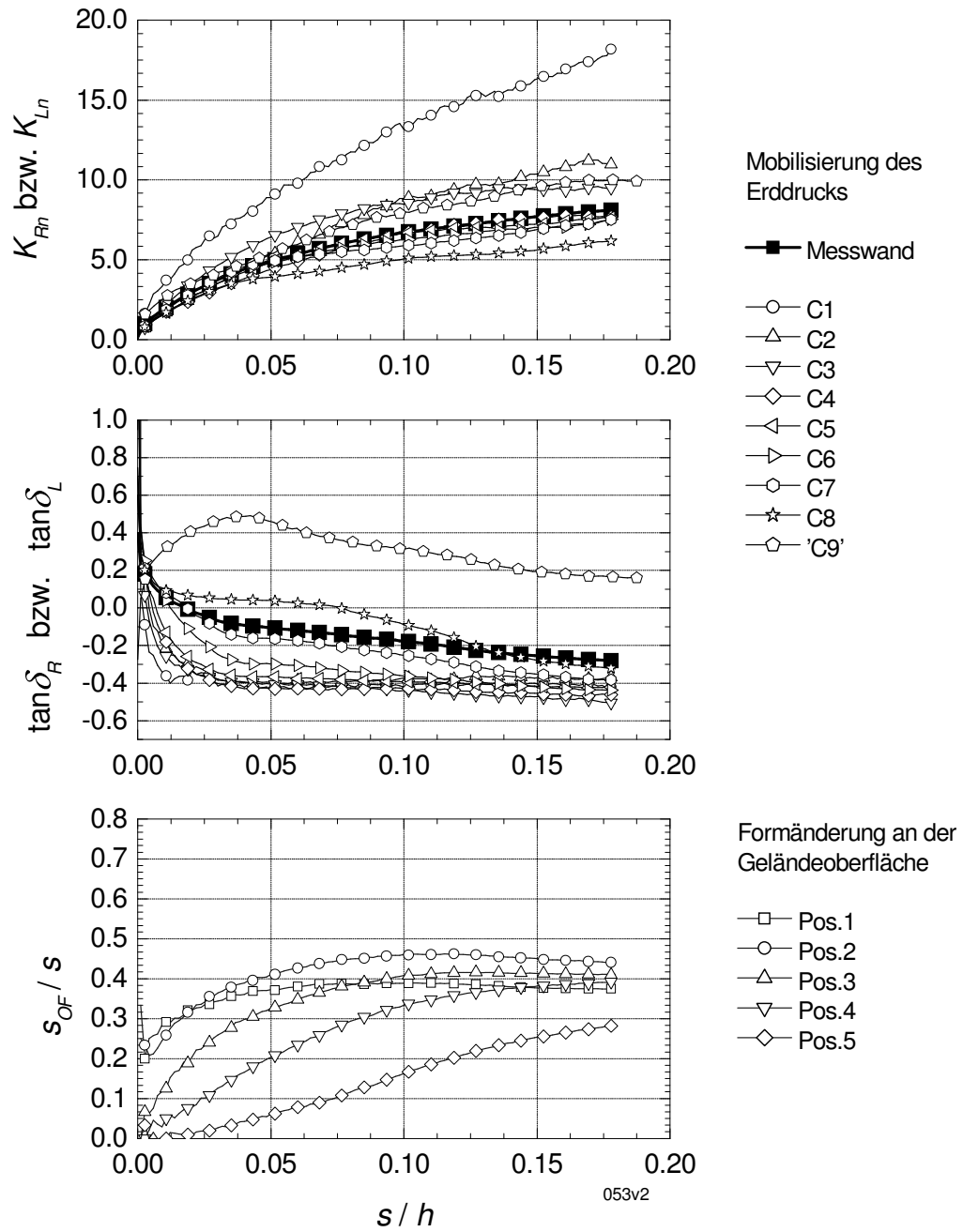


Bild C.16: Versuch 053 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,648$; $I_D = 0,35$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

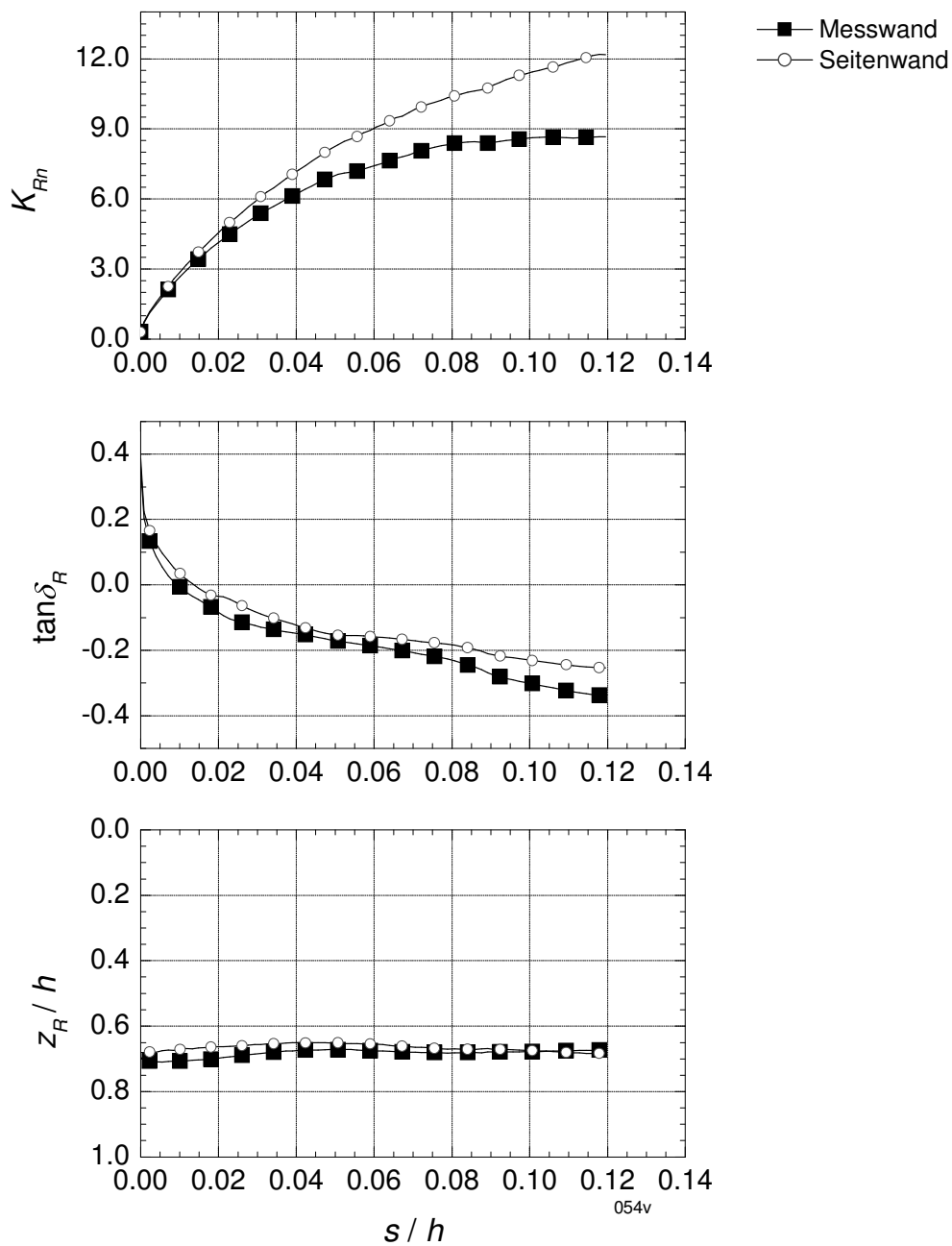


Bild C.17: Versuch 054 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,565$; $I_D = 0,63$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

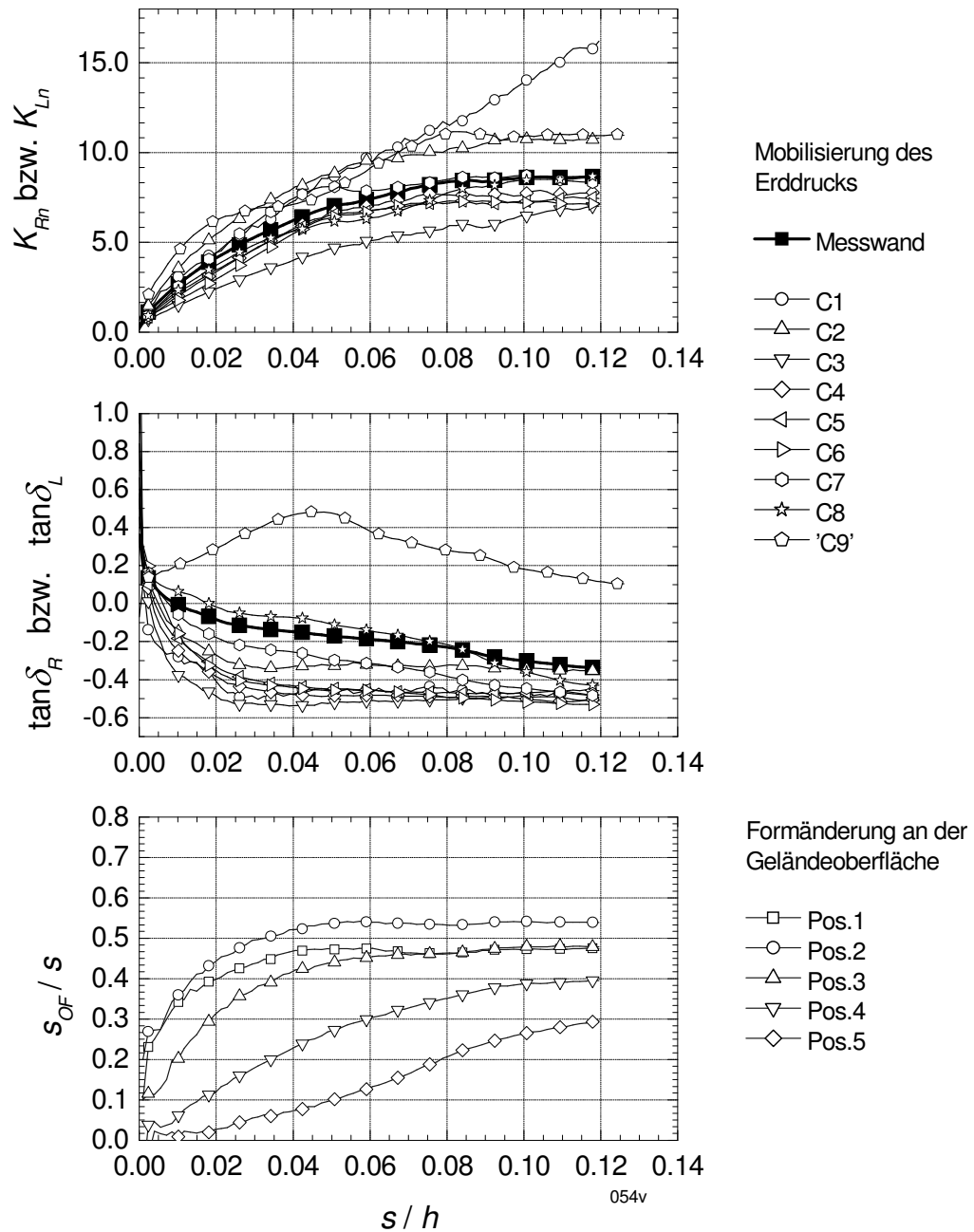


Bild C.18: Versuch 054 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,565$; $I_D = 0,63$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

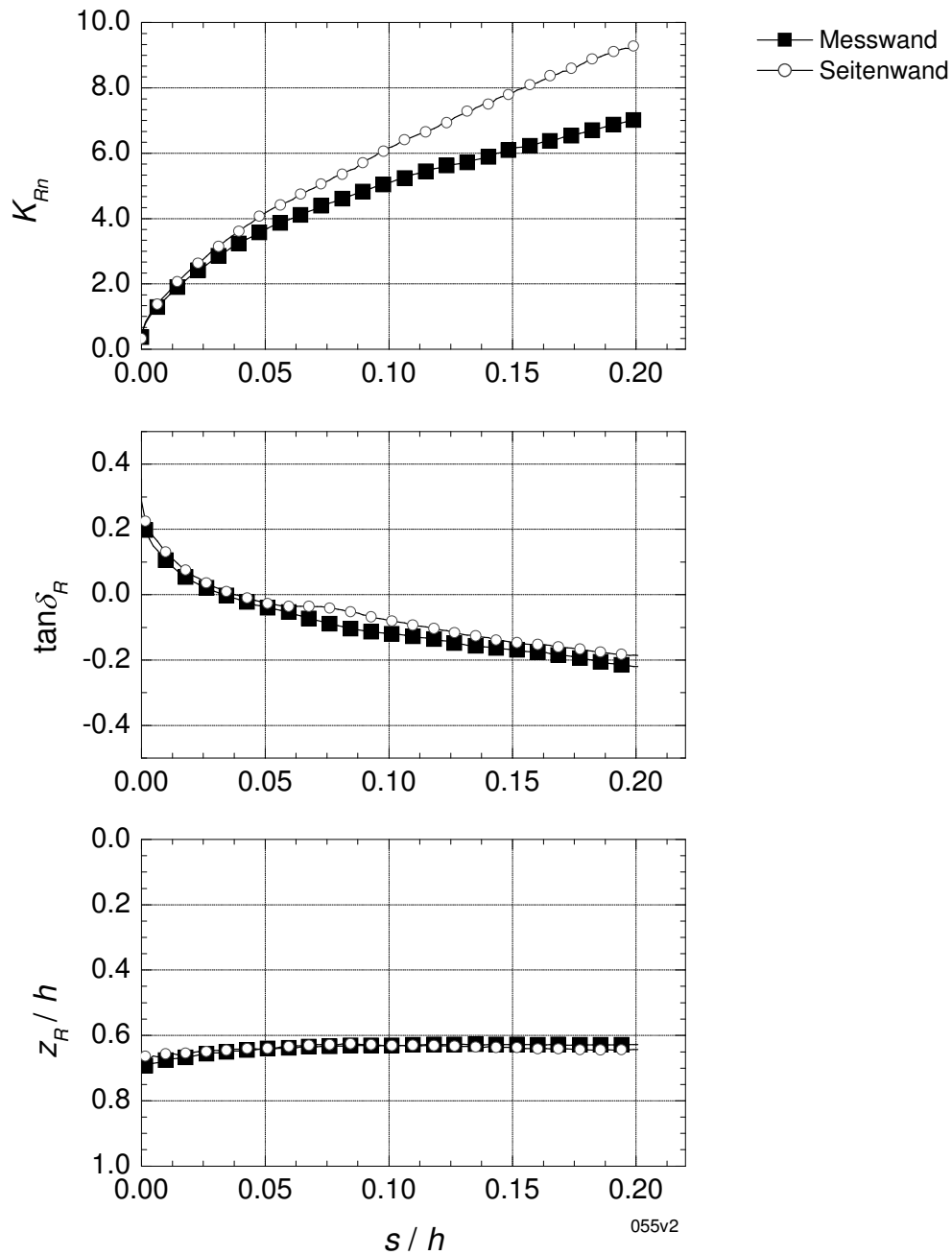


Bild C.19: Versuch 055 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,693$; $I_D = 0,19$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

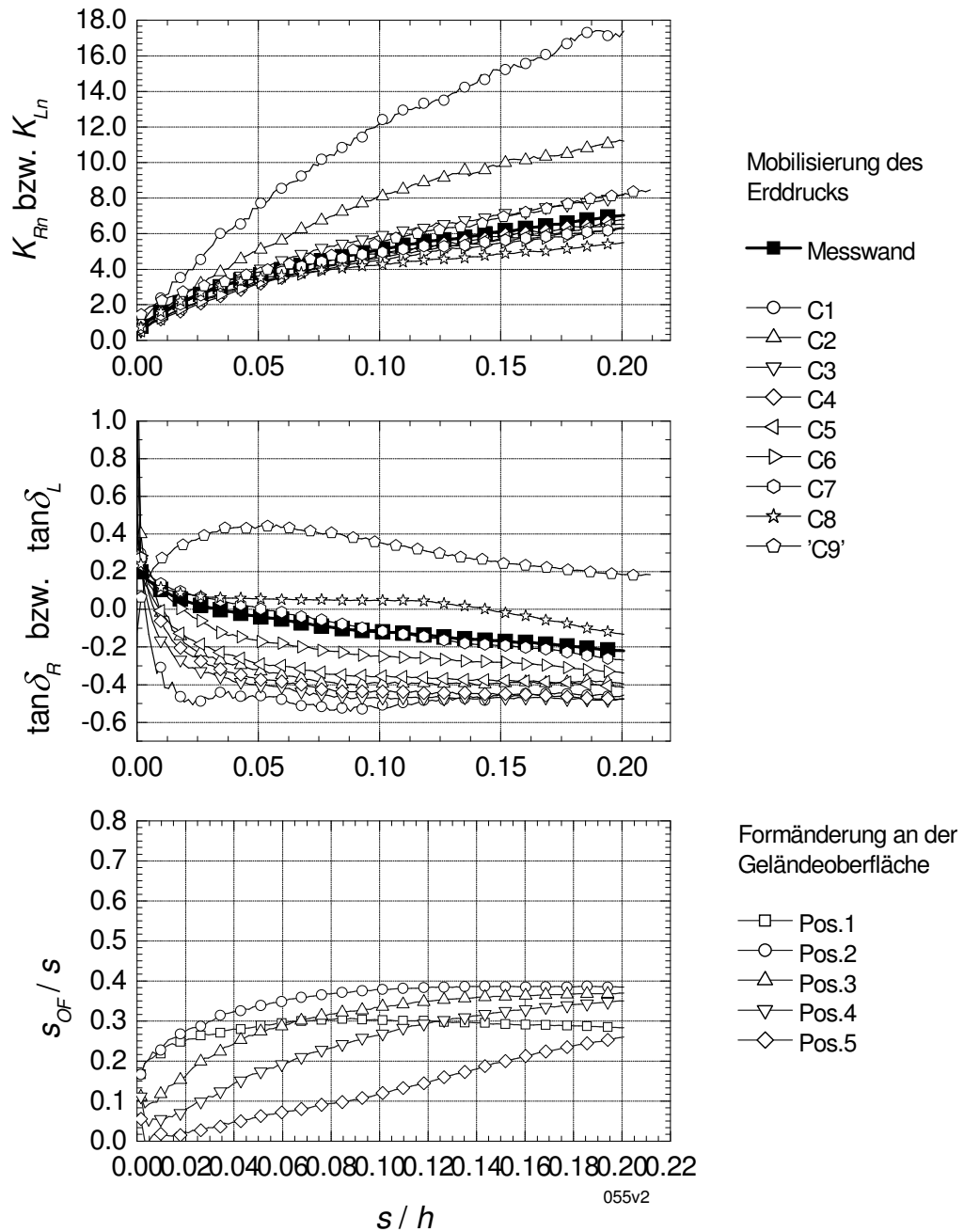


Bild C.20: Versuch 055 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,693$; $I_D = 0,19$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

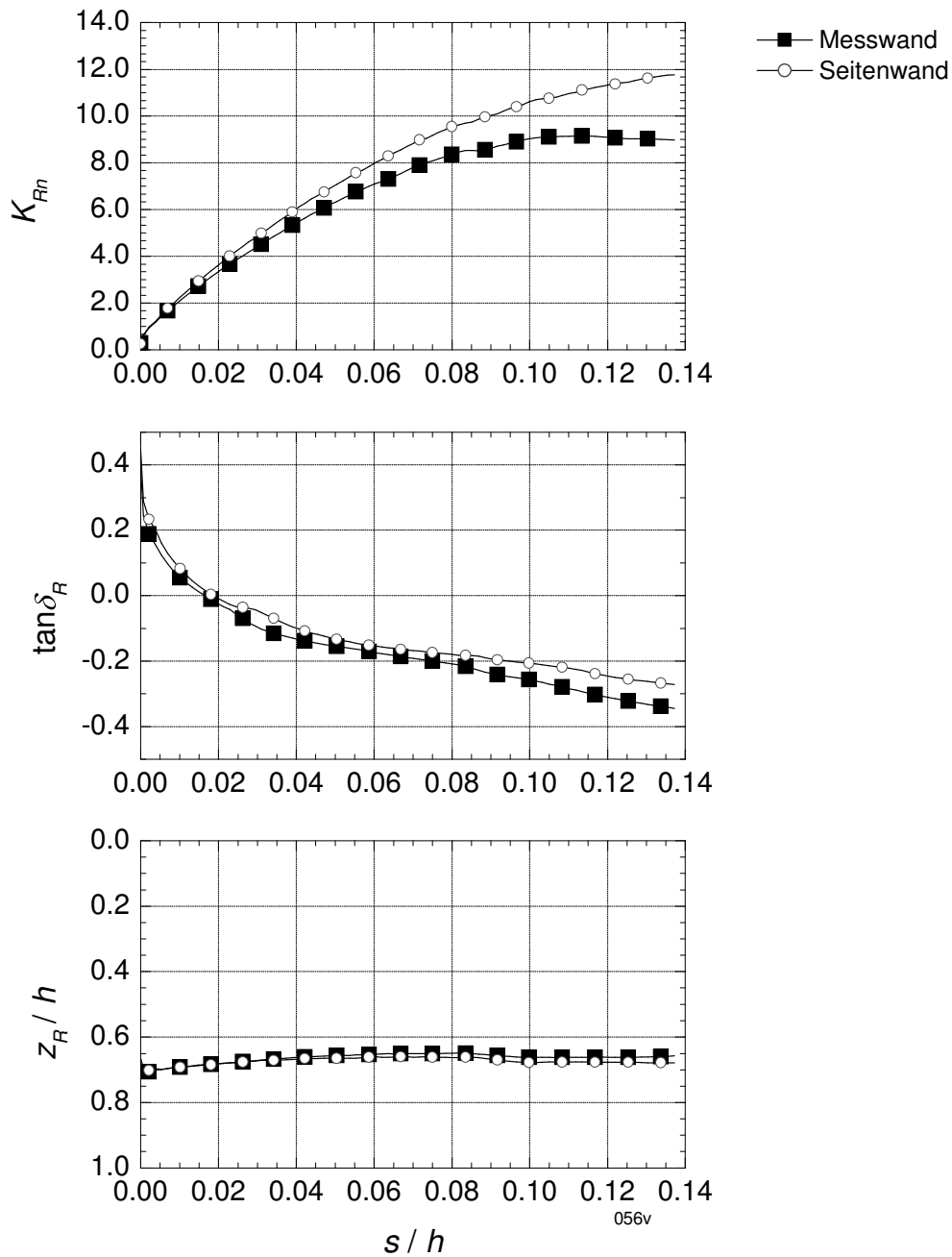


Bild C.21: Versuch 056 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,588$; $I_D = 0,55$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

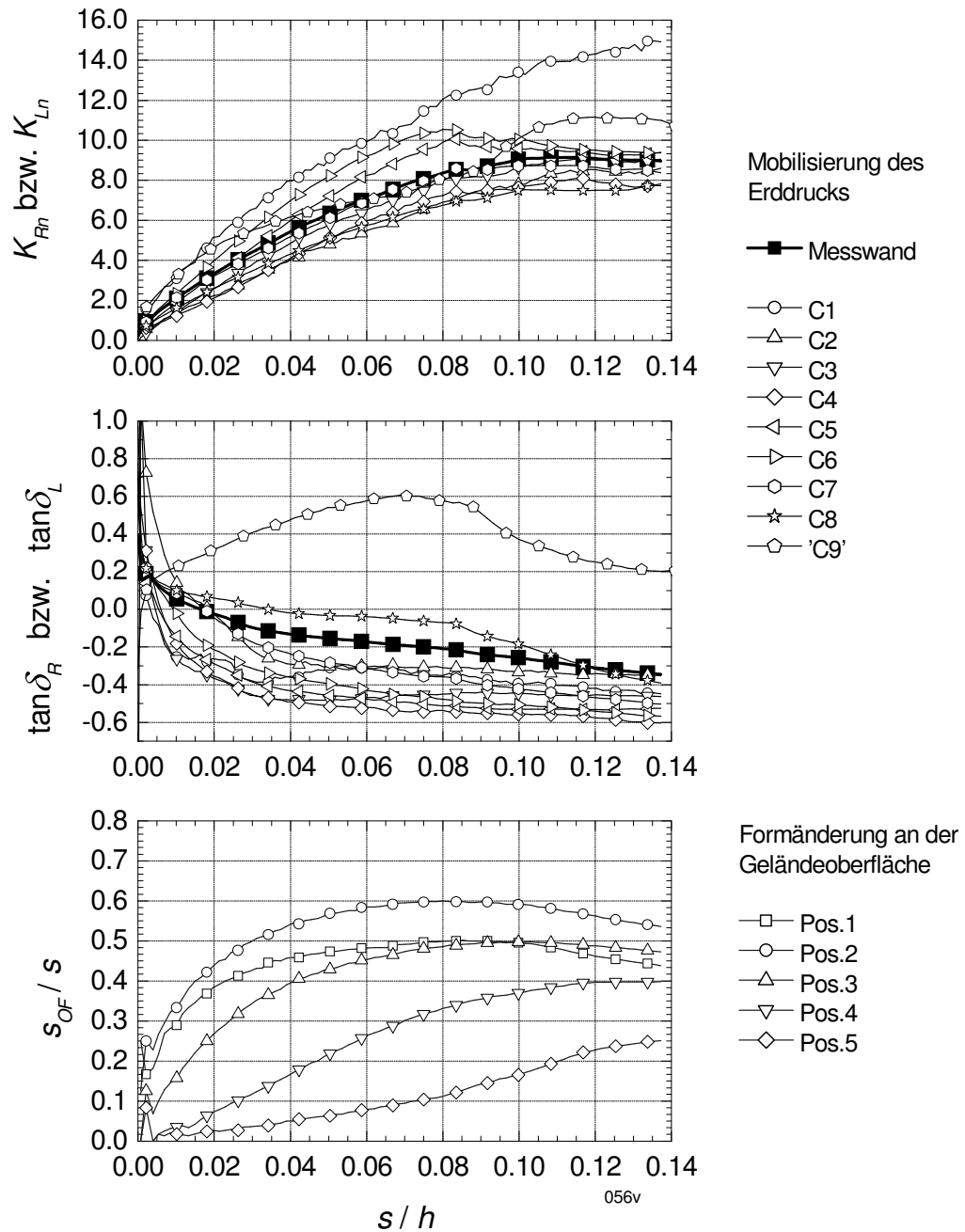


Bild C.22: Versuch 056 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,588$; $I_D = 0,55$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

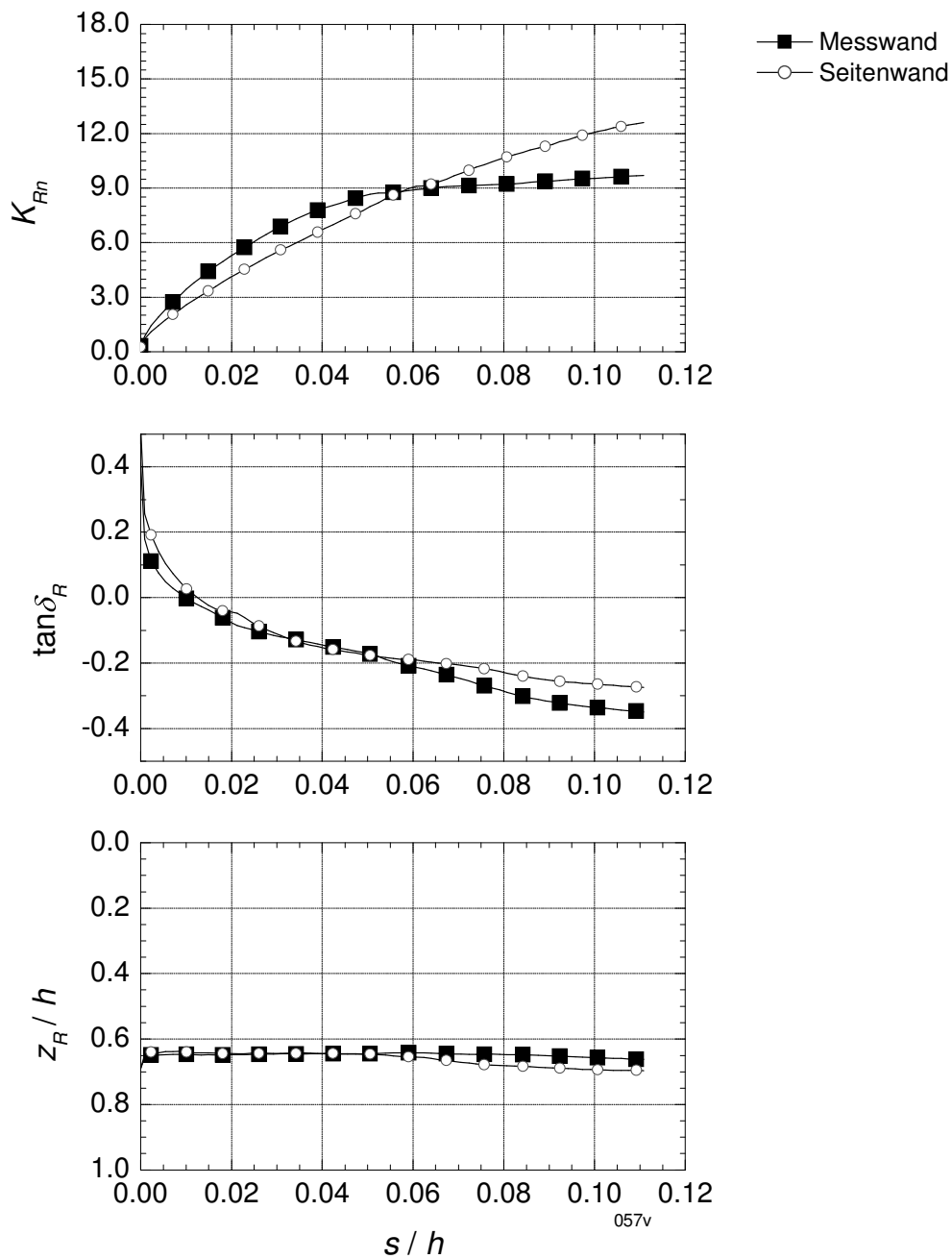


Bild C.23: Versuch 057 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,569$; $l_D = 0,62$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

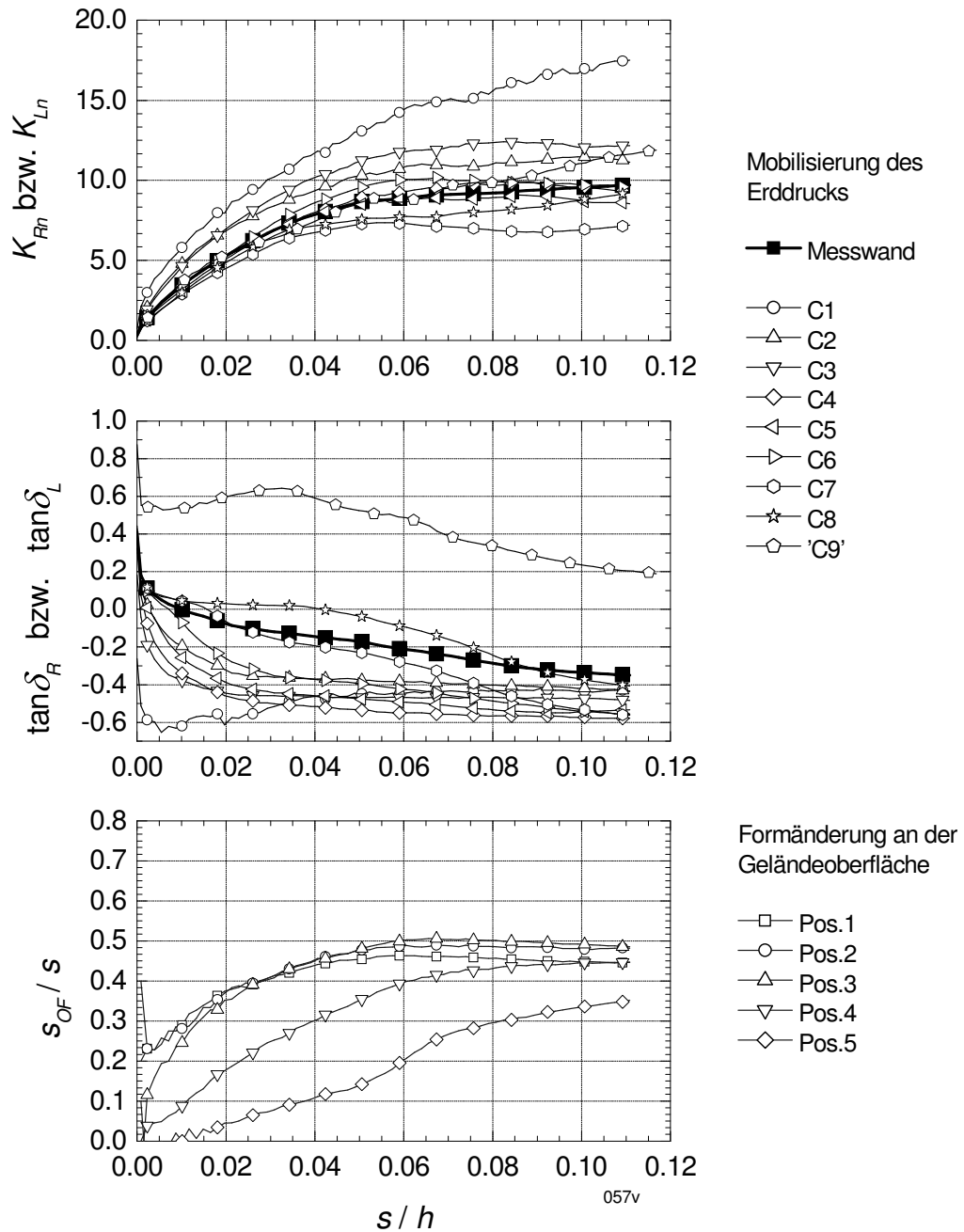


Bild C.24: Versuch 057v – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,569$; $I_D = 0,62$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

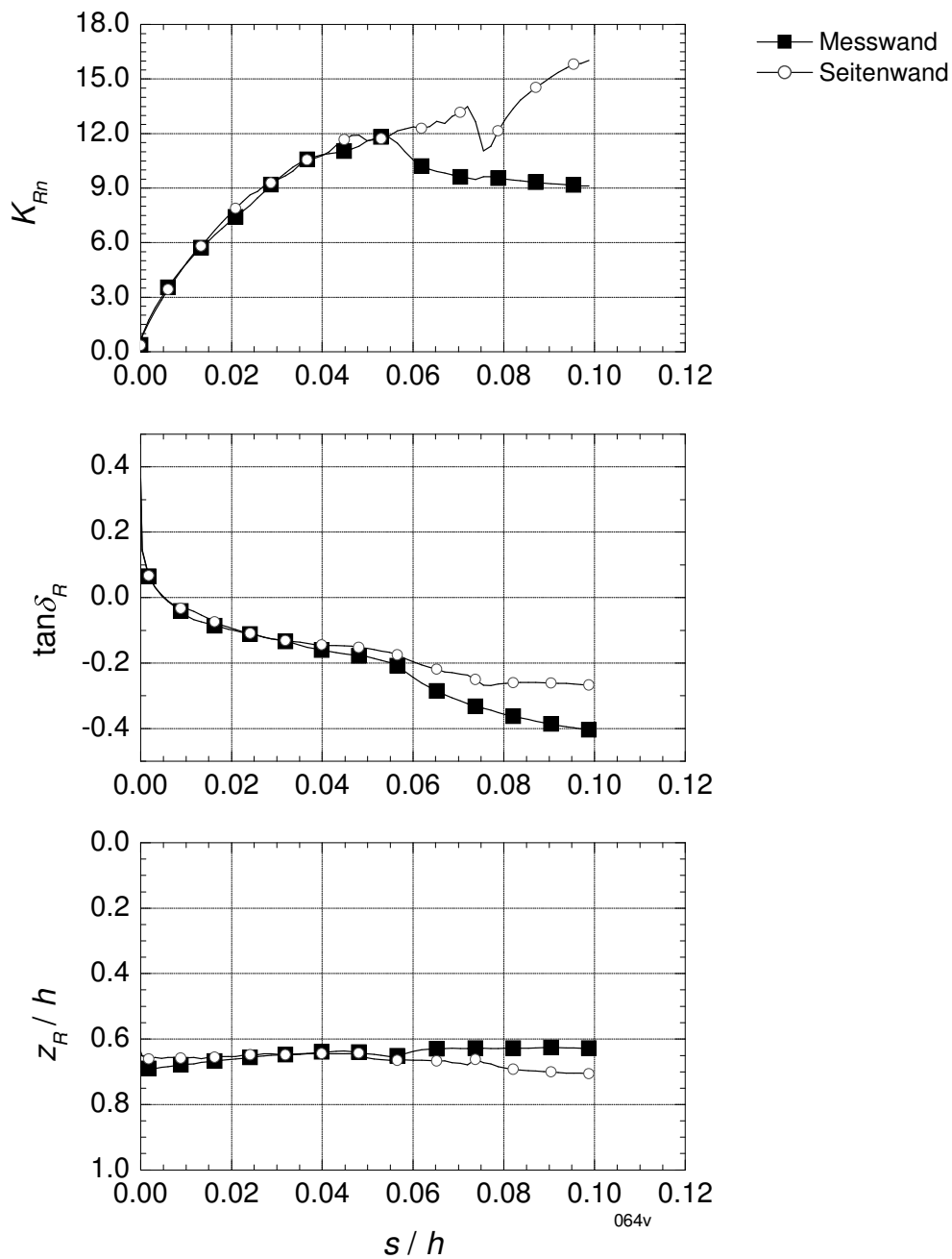


Bild C.25: Versuch 064 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,511$; $I_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

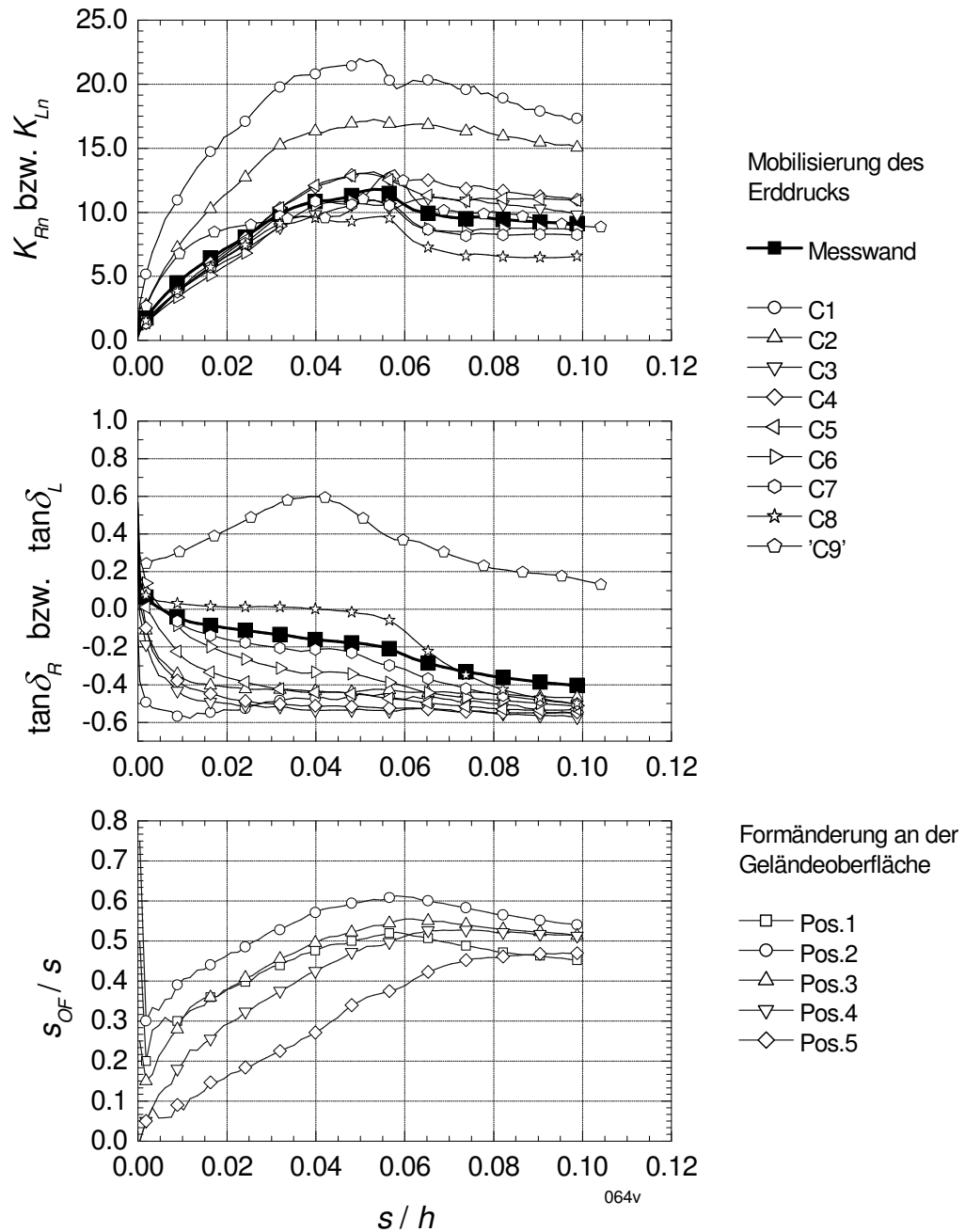


Bild C.26: Versuch 064 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,511$; $I_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

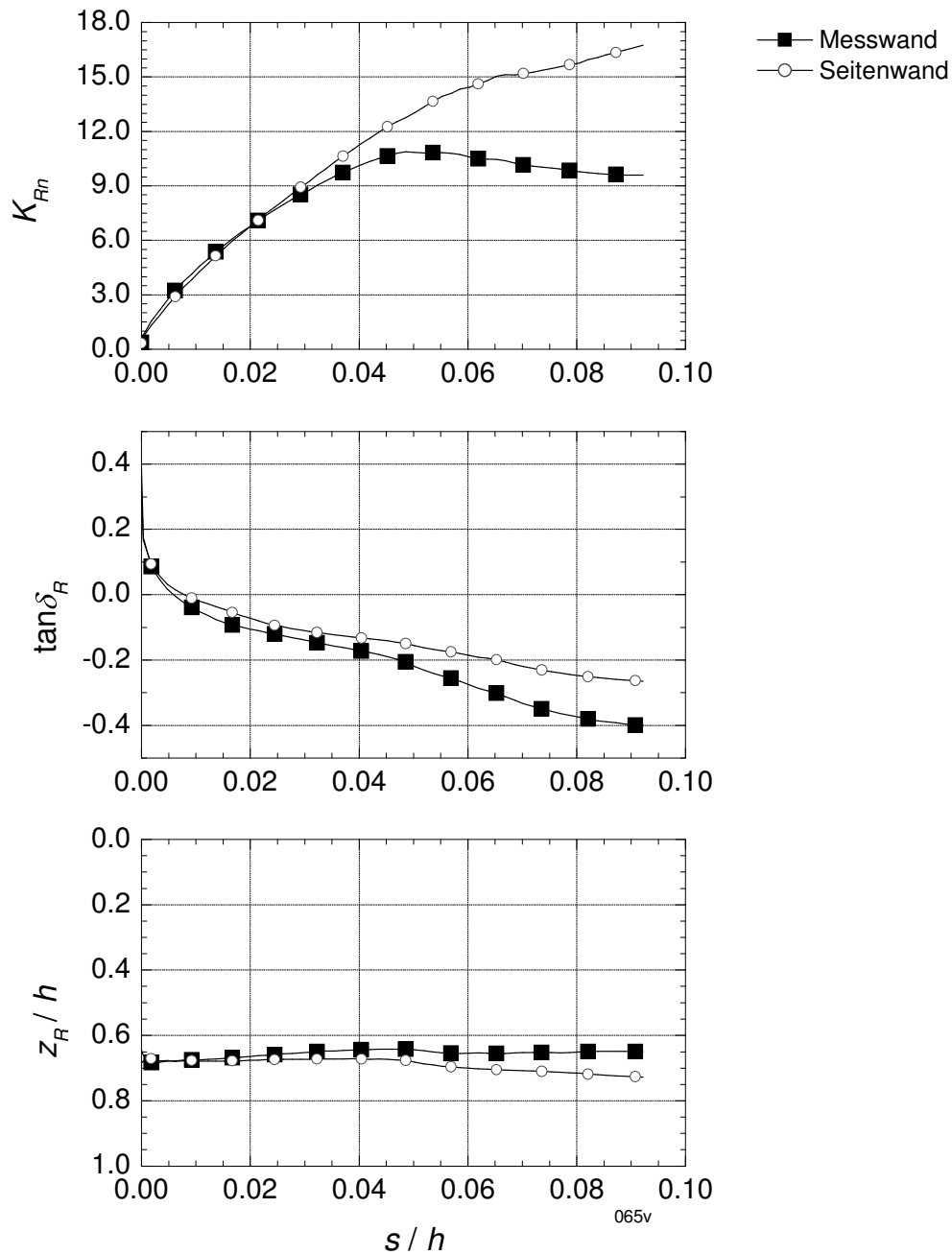


Bild C.27: Versuch 065 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,511$; $l_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

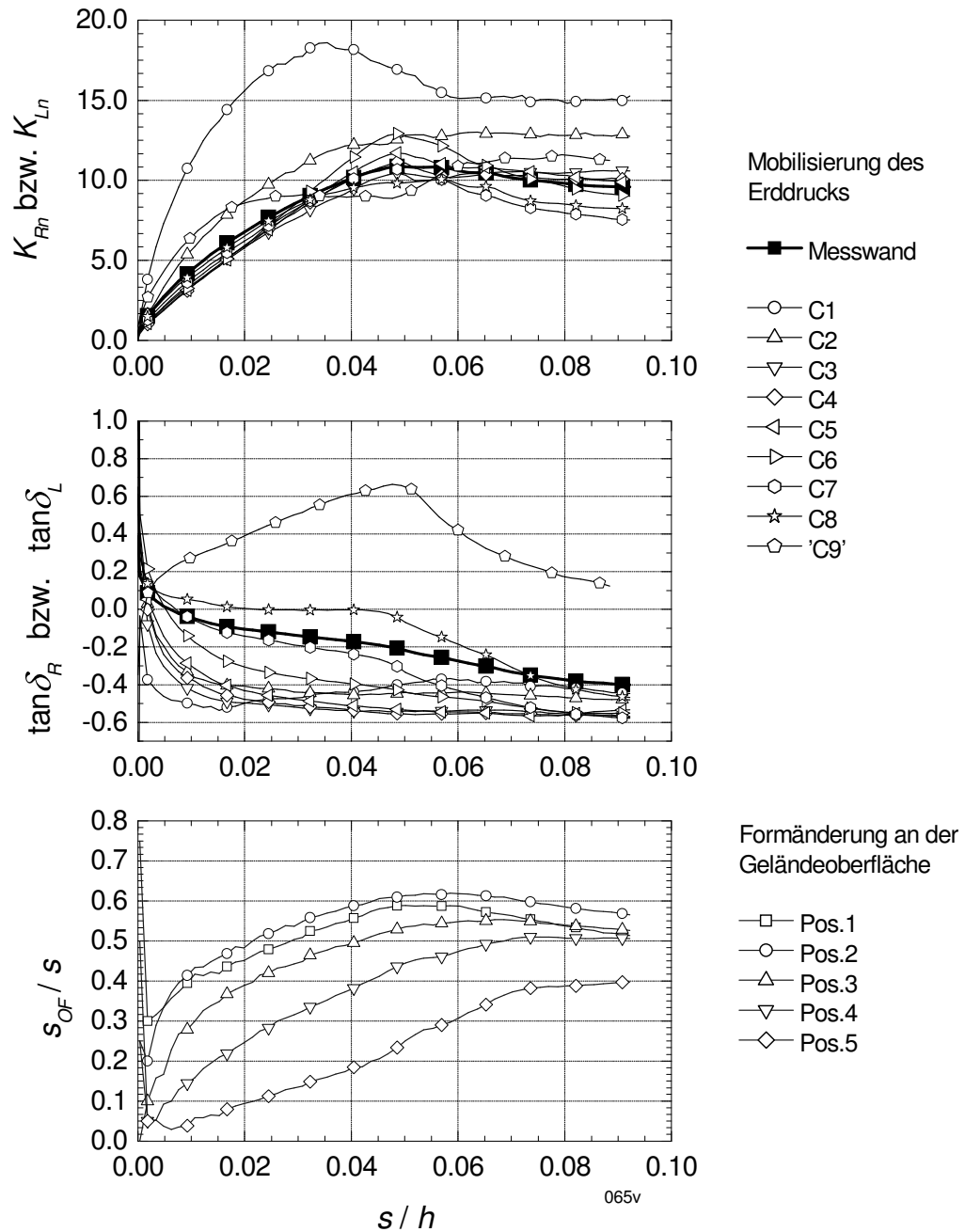


Bild C.28: Versuch 065 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,511$; $I_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

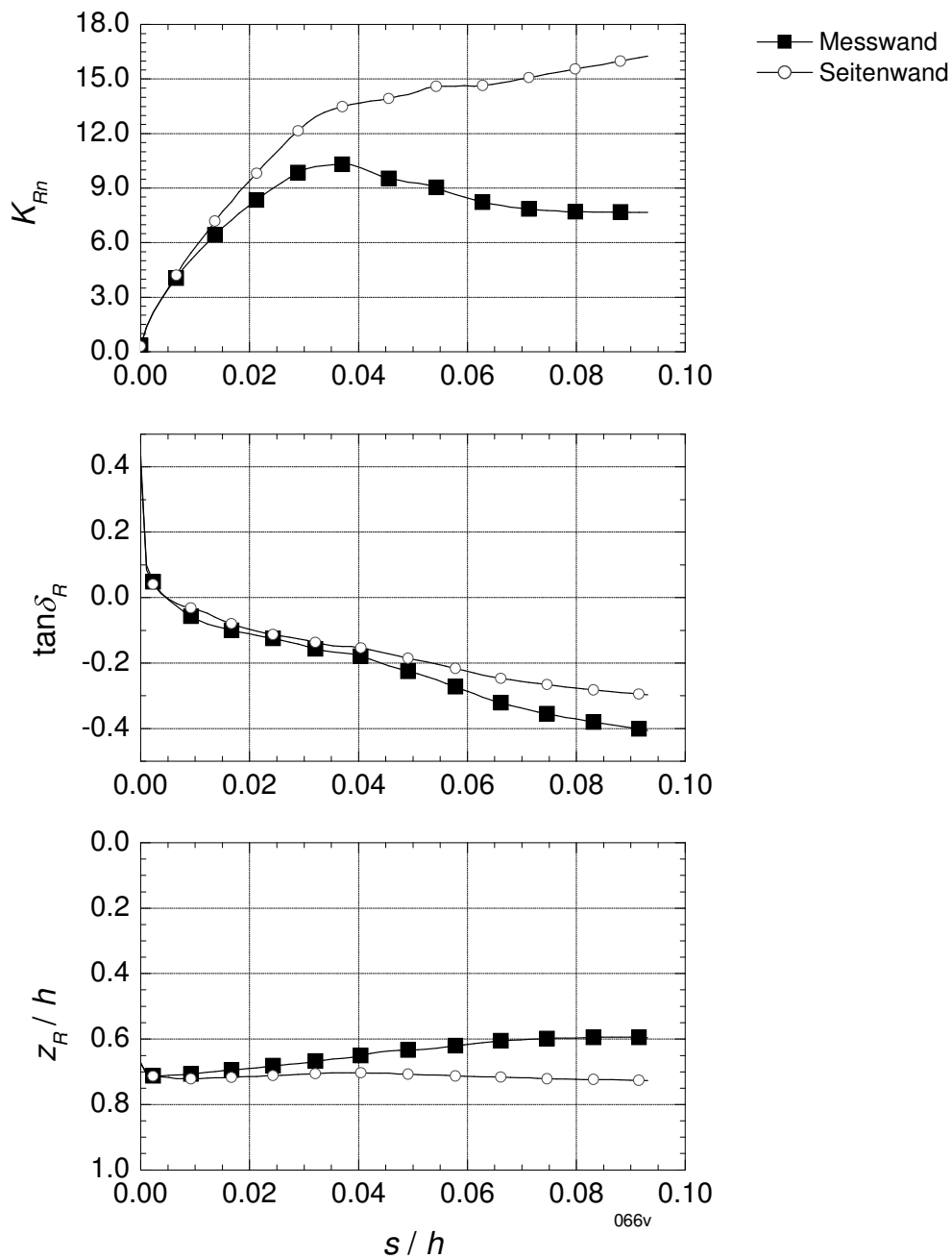


Bild C.29: Versuch 066 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,508$; $I_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

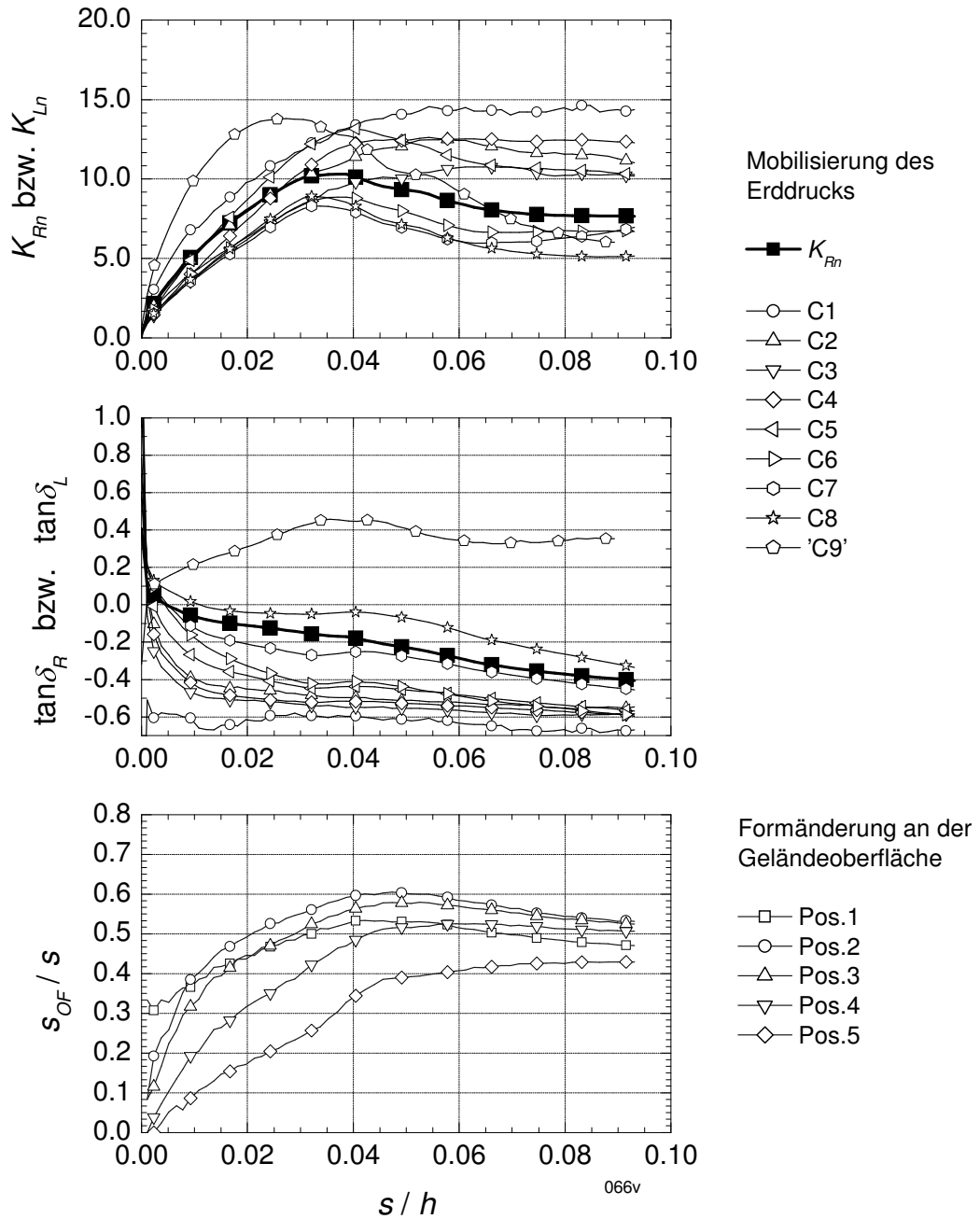


Bild C.30: Versuch 066 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,508$; $I_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

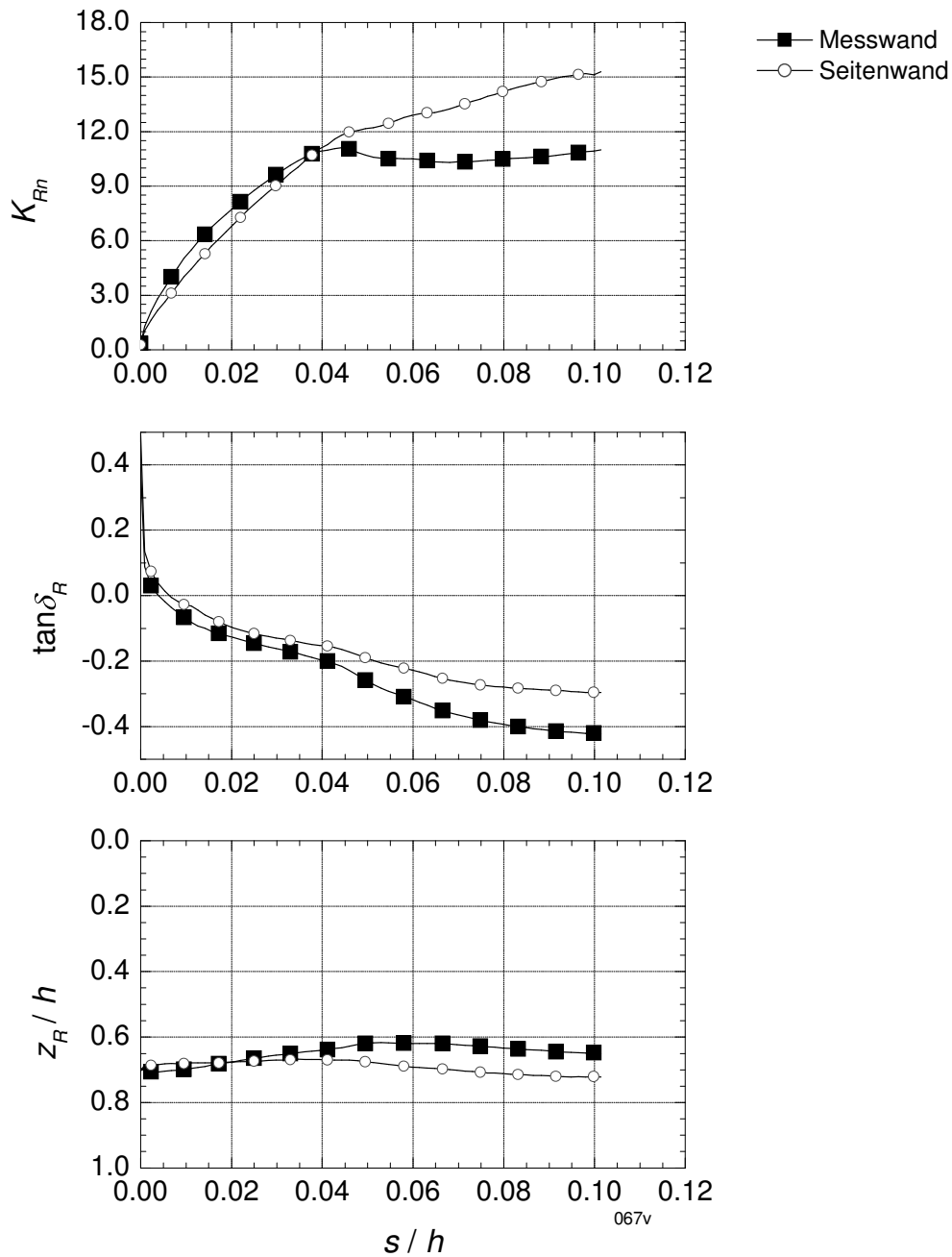


Bild C.31: Versuch 067 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,512$; $I_D = 0,81$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

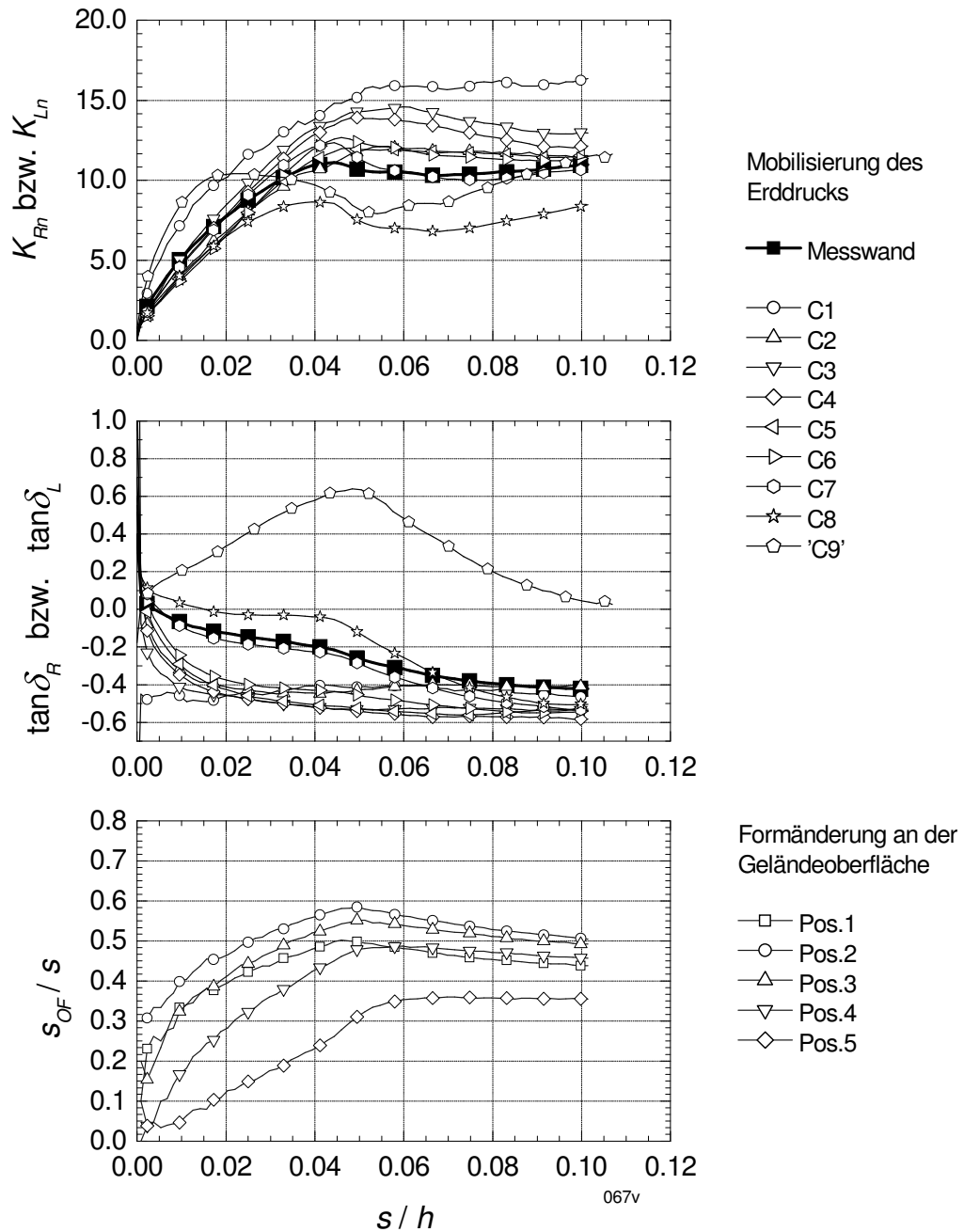


Bild C.32: Versuch 067 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,512$; $I_D = 0,81$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

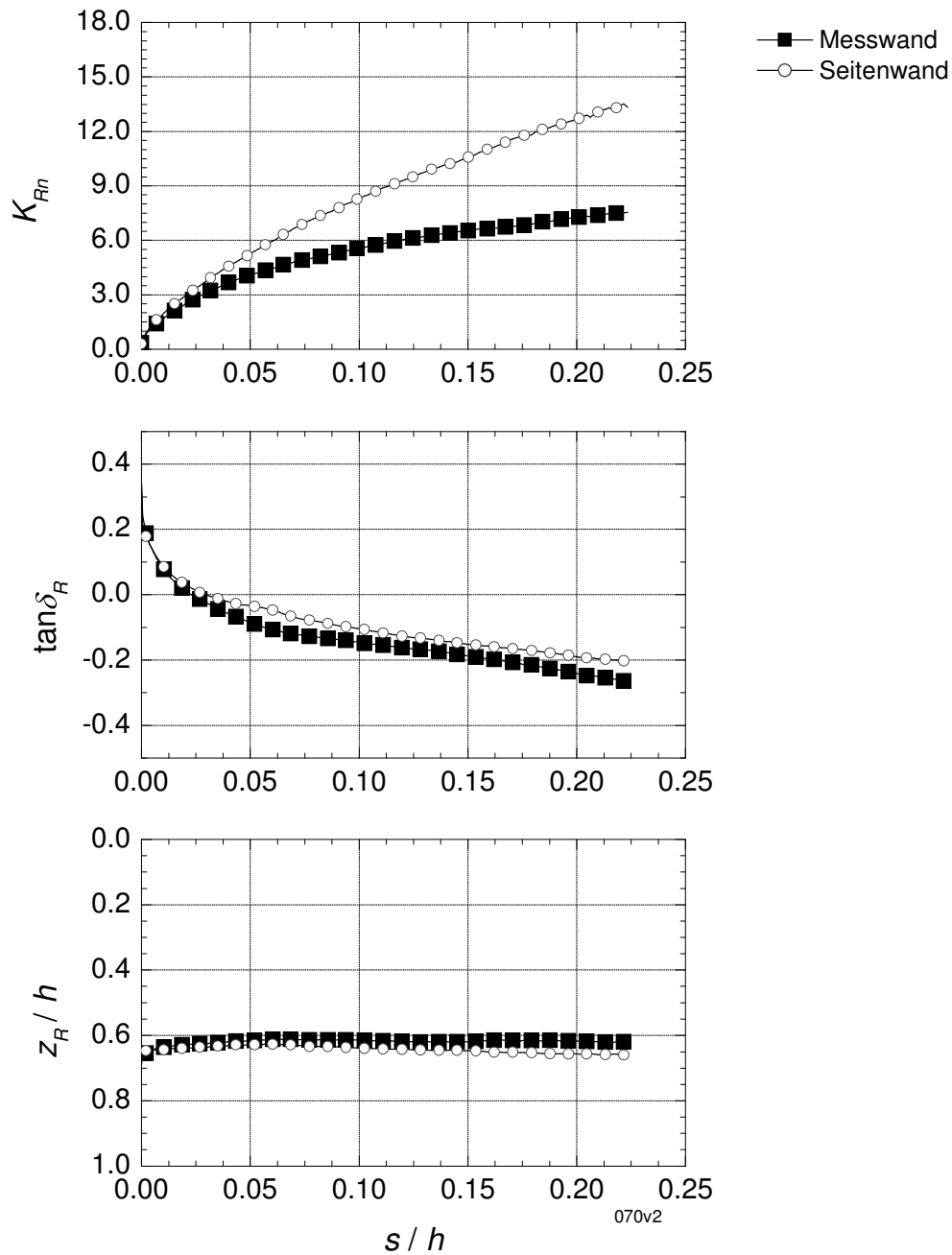


Bild C.33: Versuch 070 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,674$; $I_D = 0,26$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

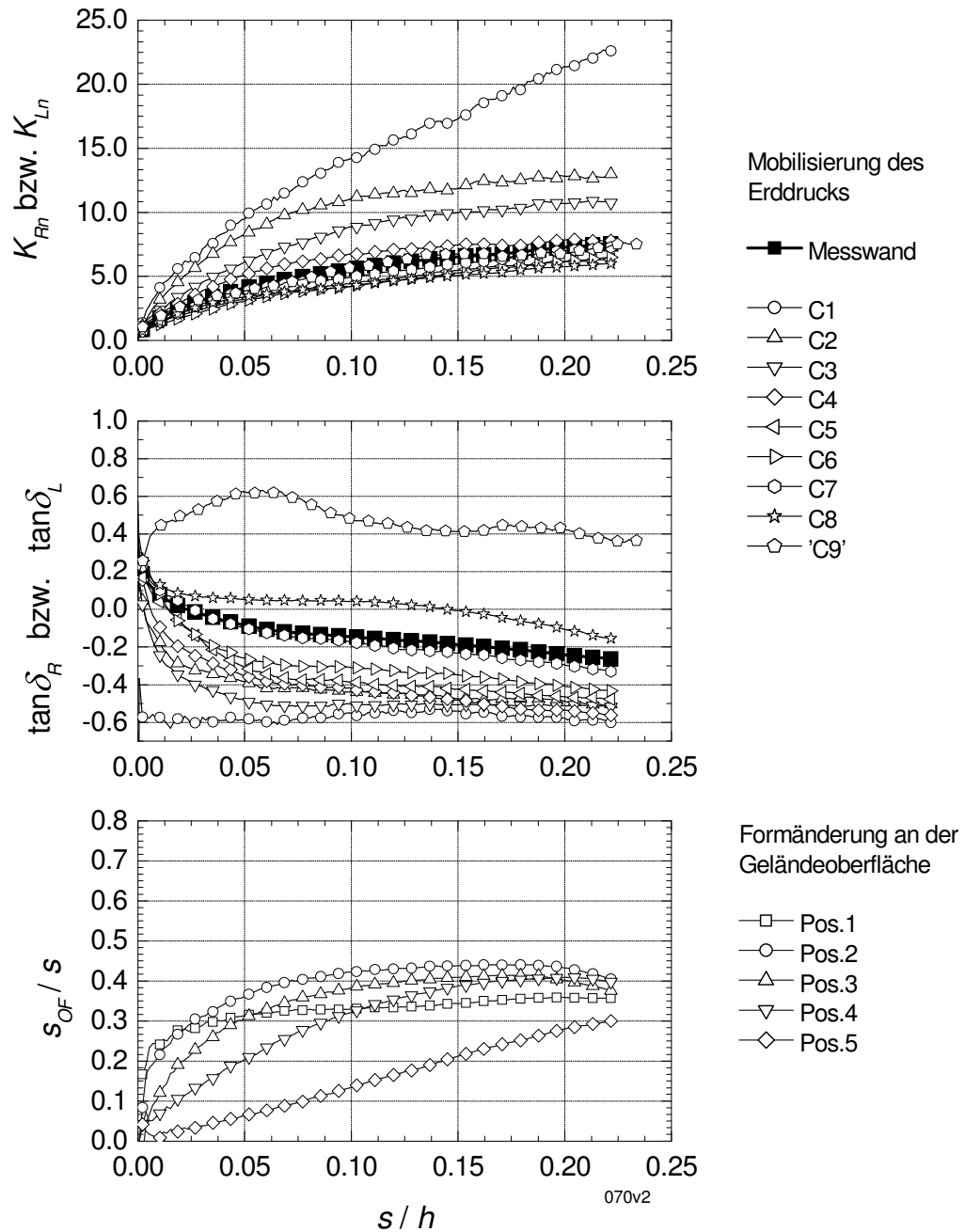


Bild C.34: Versuch 070 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,674$; $I_D = 0,26$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

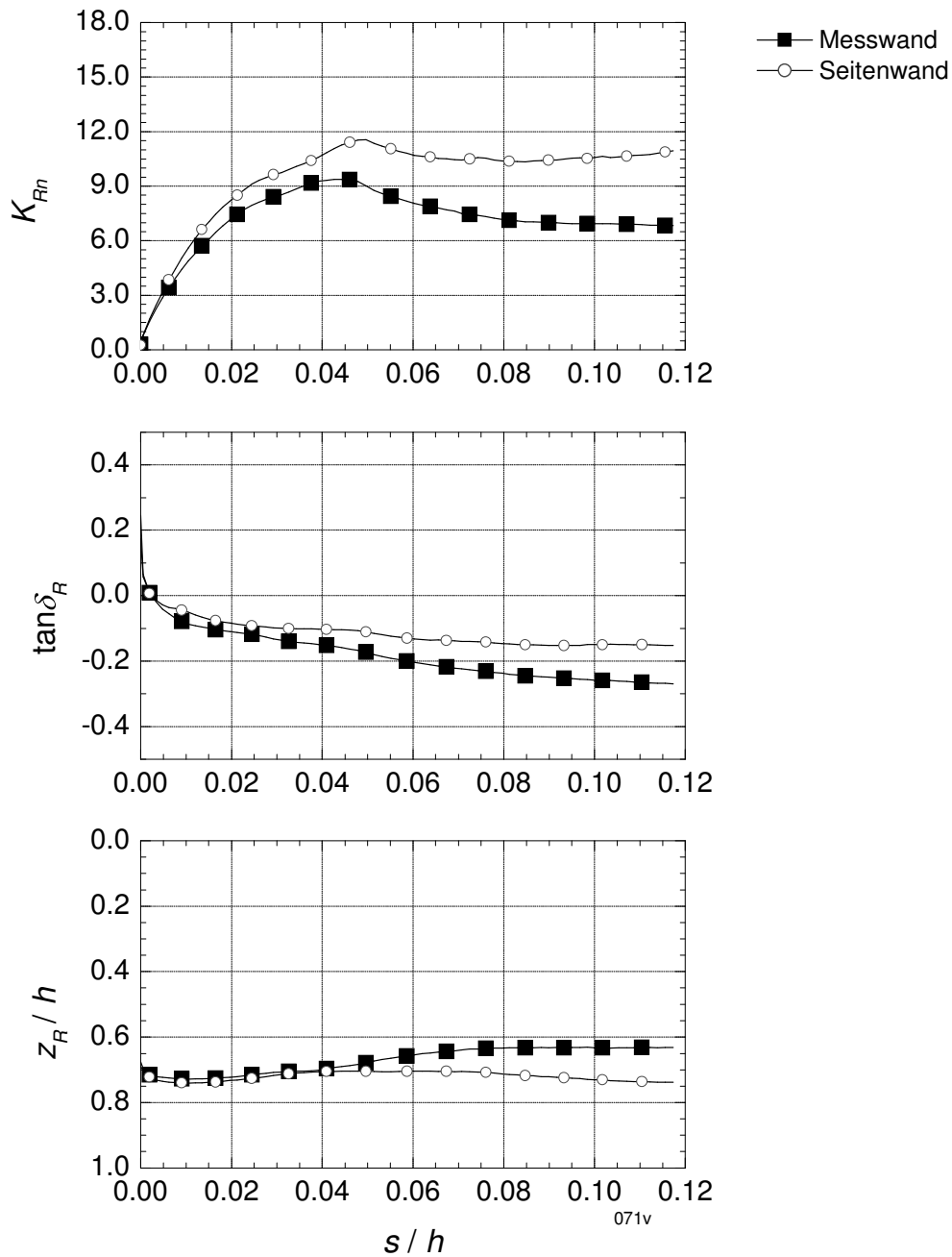


Bild C.35: Versuch 071 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,507$; $I_D = 0,83$) – Wandoberfläche Folie 2 – Mobilisierung Erddruckkraft

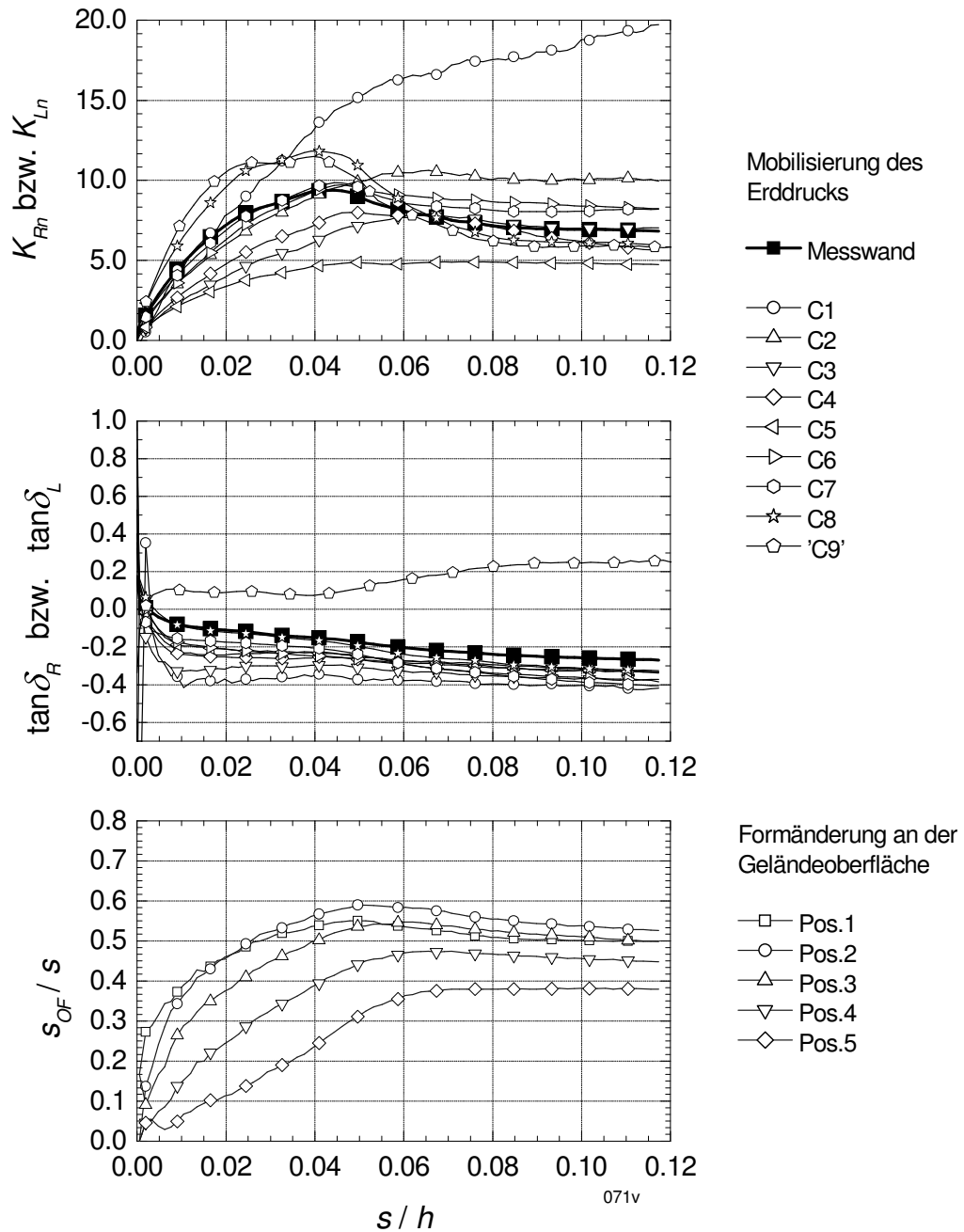


Bild C.36: Versuch 071 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,507$; $I_D = 0,83$) – Wandoberfläche Folie 2 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

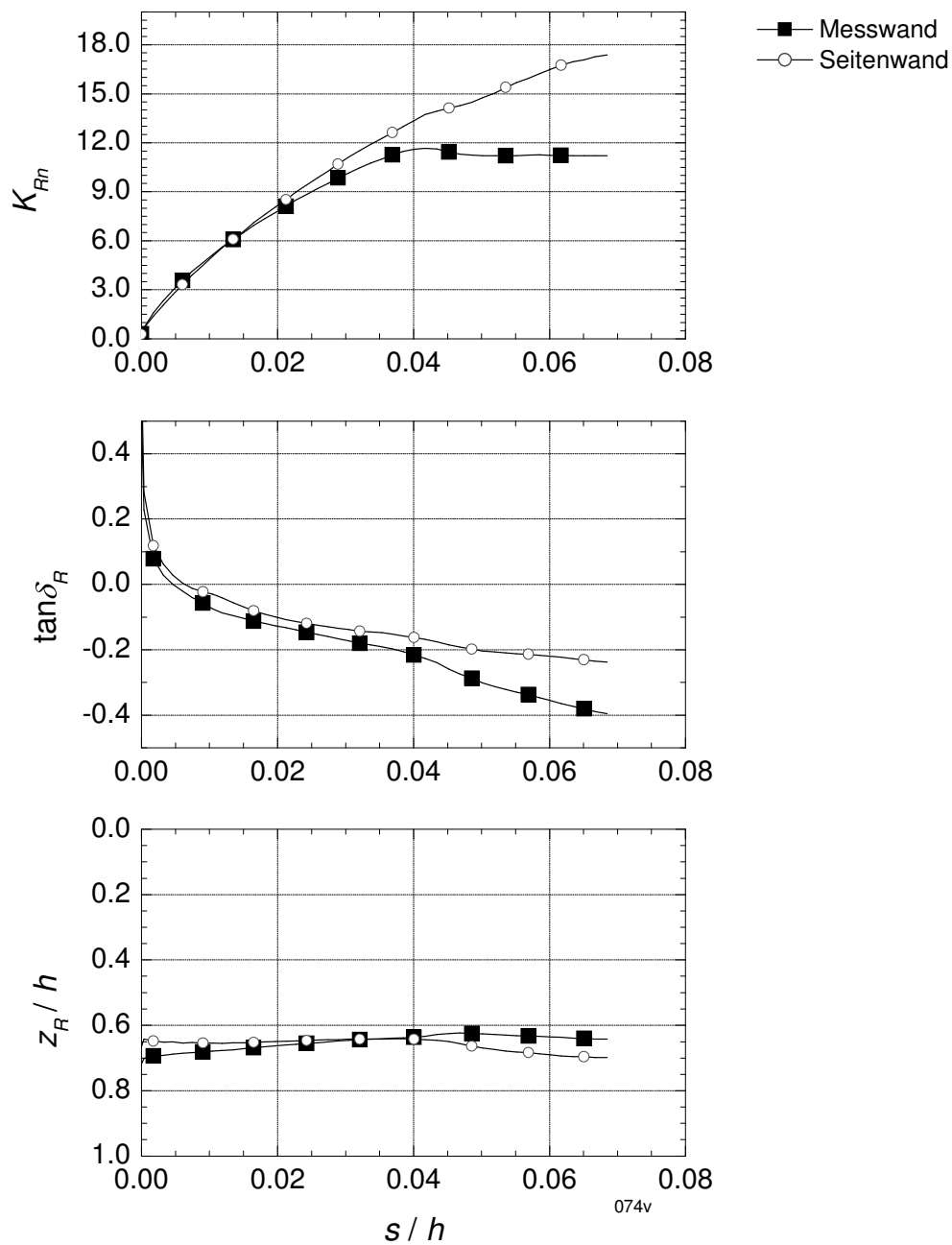


Bild C.37: Versuch 074 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,513$; $I_D = 0,81$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruckkraft

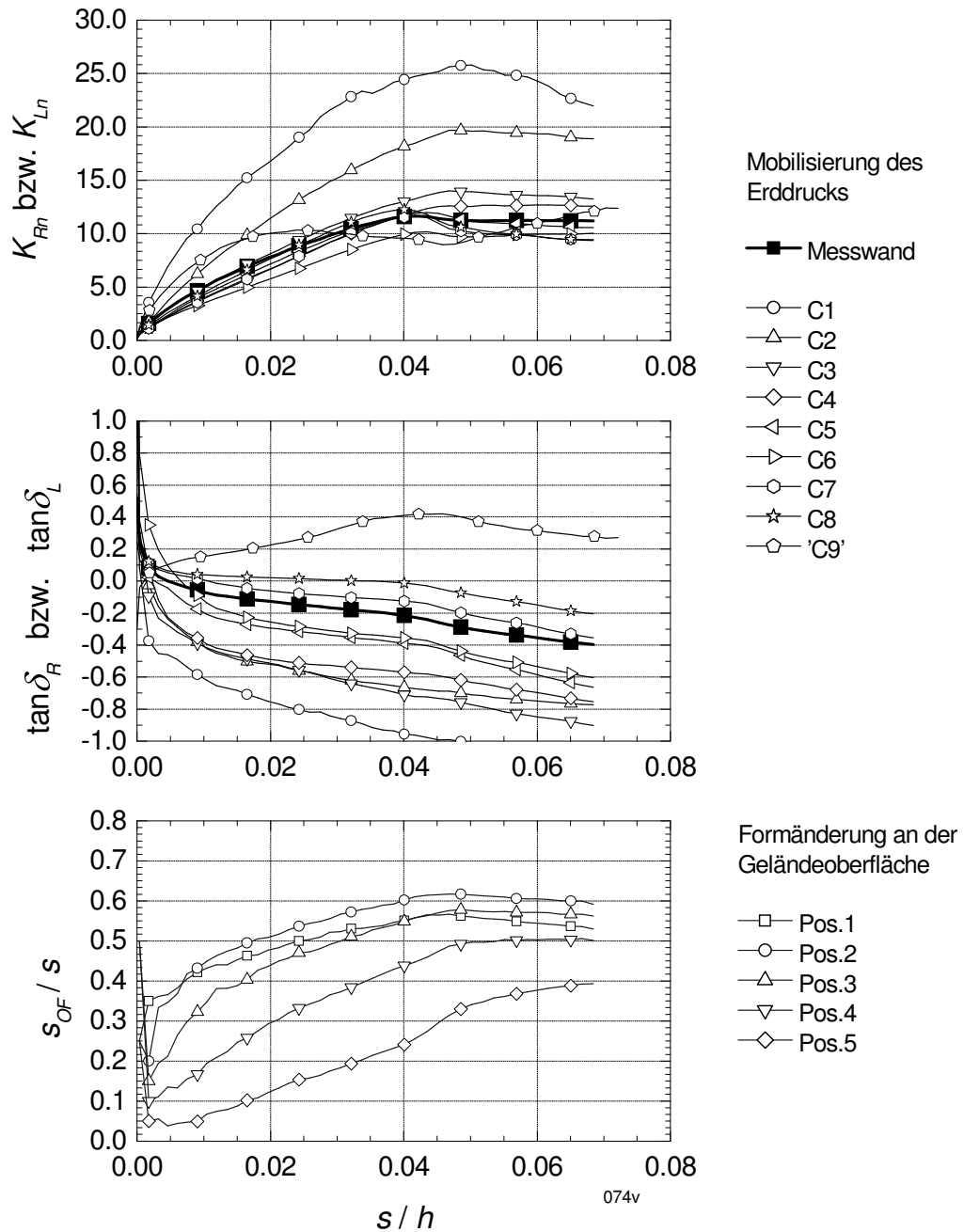


Bild C.38: Versuch 074 – Parallelverschiebung ($e_0 = 0,513$; $I_D = 0,81$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

C.2 Kopfpunktdrehung

Tabelle C.2: 1g-Versuche mit Kopfpunktdrehung ($h_{MW} = 0,564 \text{ m}$) – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	WOF	l_K/h_{MW}	γ	e_0	I_D	φ_1'
[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]
1	032	Alu	3.16	16.7	0.558	0.65	39.8
2	033	Alu	3.16	15.5	0.673	0.26	34.9
3	035	Alu	3.16	16.1	0.611	0.47	37.4
4	036	Folie1	3.16	16.7	0.561	0.64	39.7
5	037	S40	3.16	16.5	0.580	0.58	38.8
6	077	Alu	3.16	17.0	0.529	0.75	41.2
7	078	Folie2	3.16	17.4	0.498	0.86	42.9
8	079	Alu	3.16	17.4	0.495	0.87	43.0

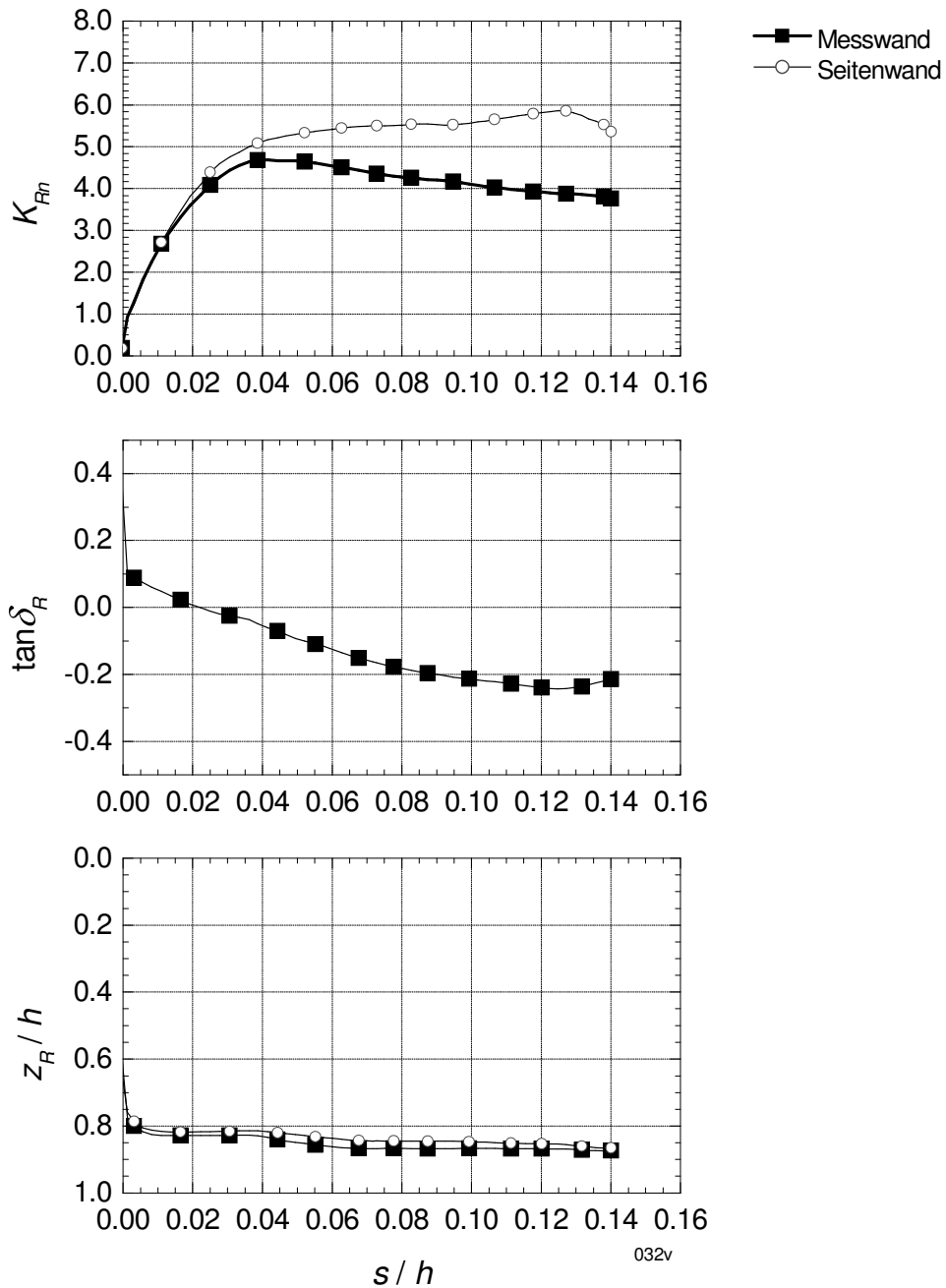


Bild C.39: Versuch 032 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,558$; $I_D = 0,65$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

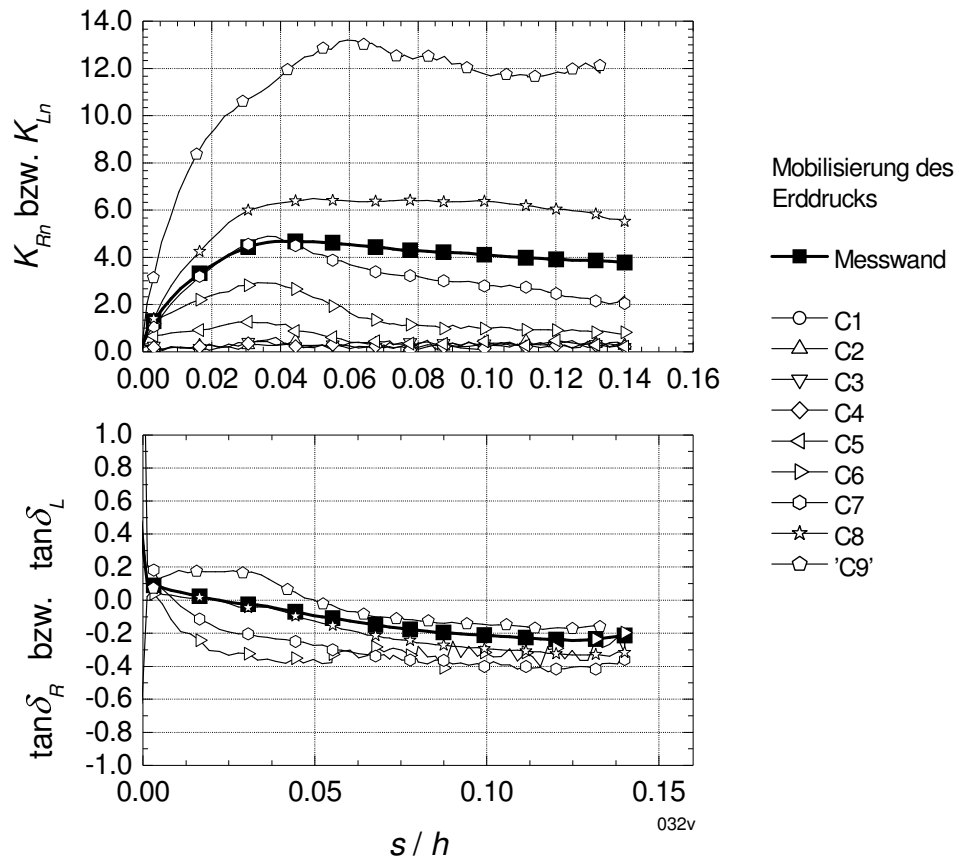


Bild C.40: Versuch 032 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,558$; $I_D = 0,65$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

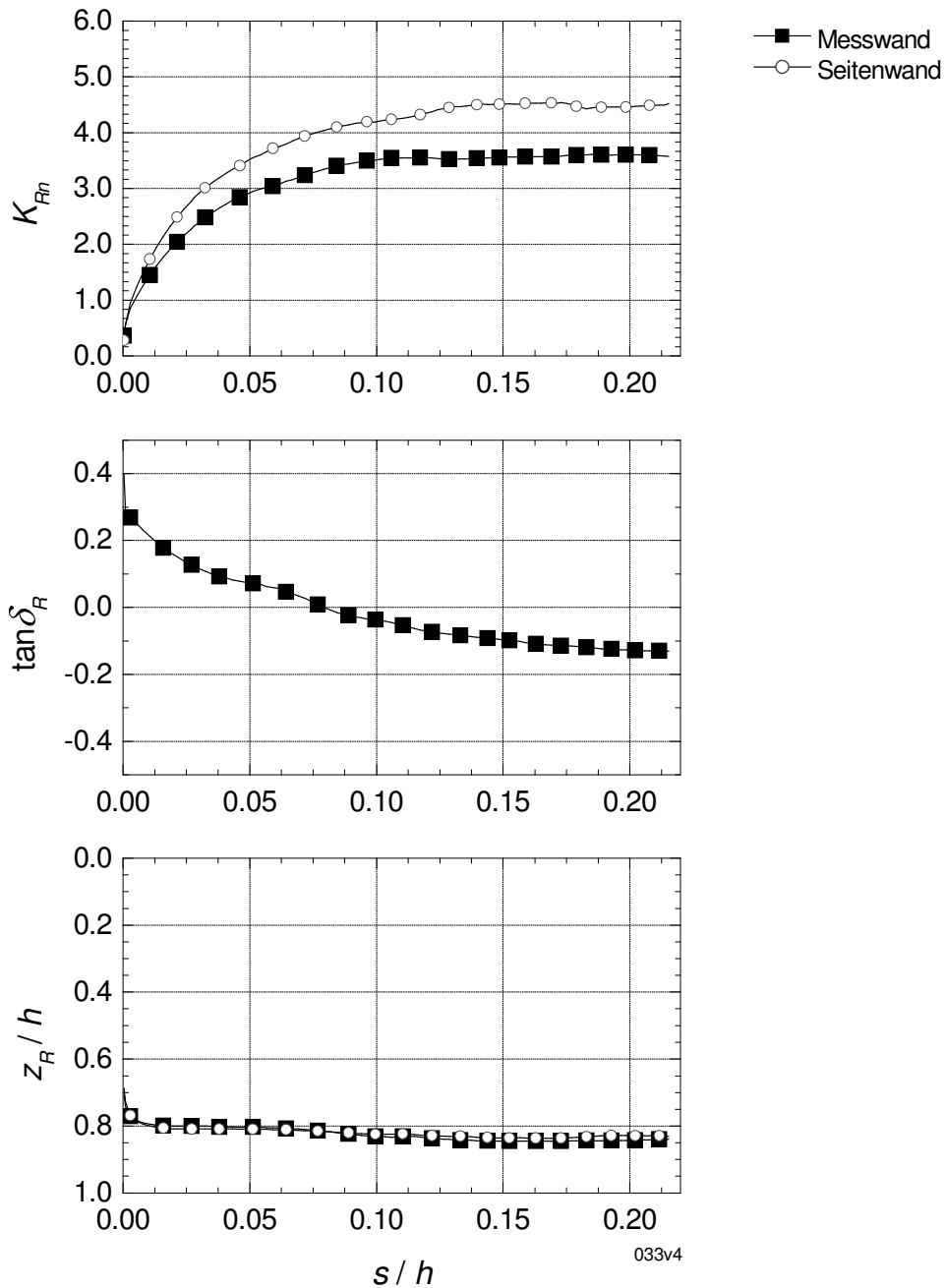


Bild C.41: Versuch 033 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,673$; $I_D = 0,26$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

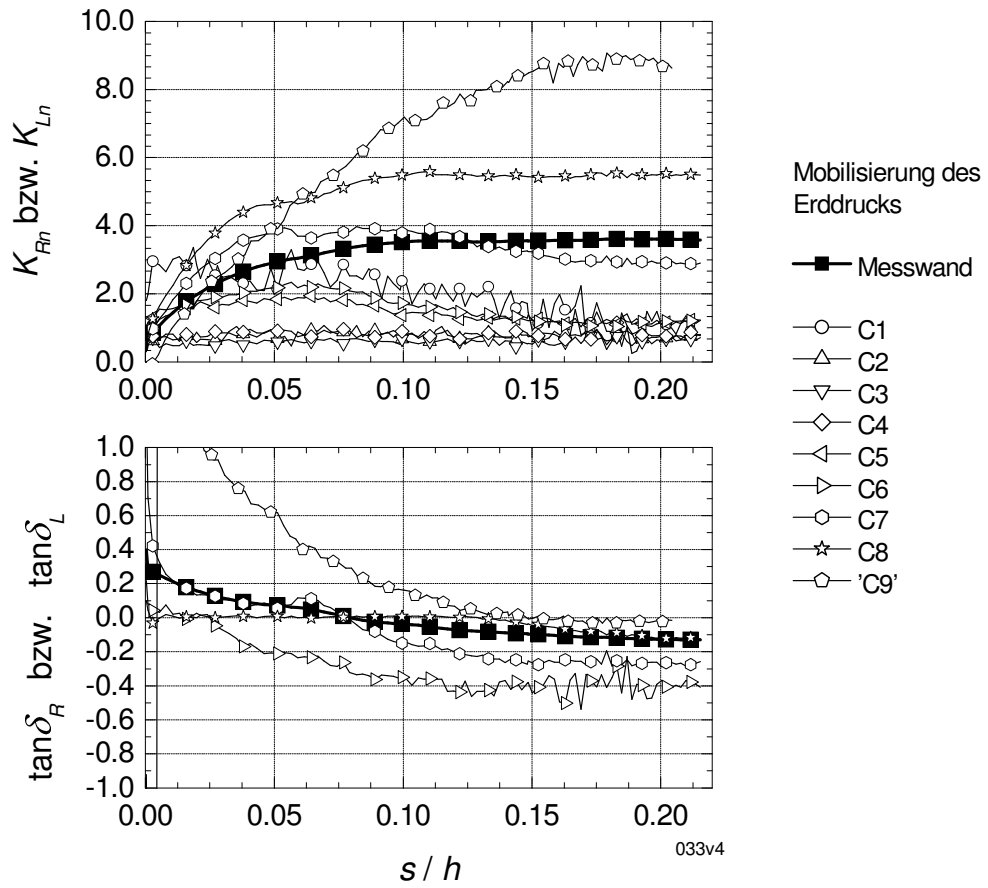


Bild C.42: Versuch 033 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,673$; $I_D = 0,26$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

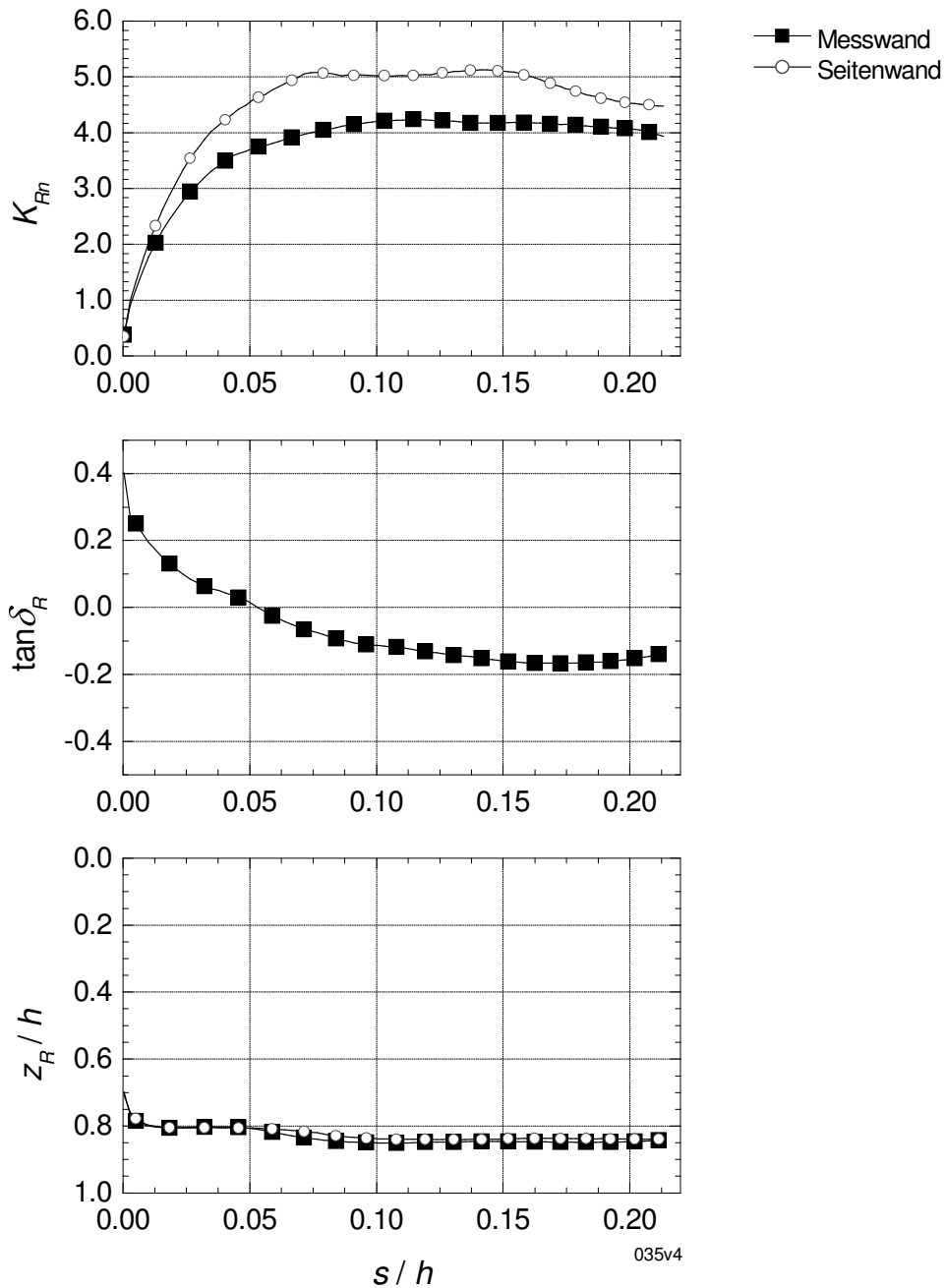


Bild C.43: Versuch 035 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,611$; $I_D = 0,47$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

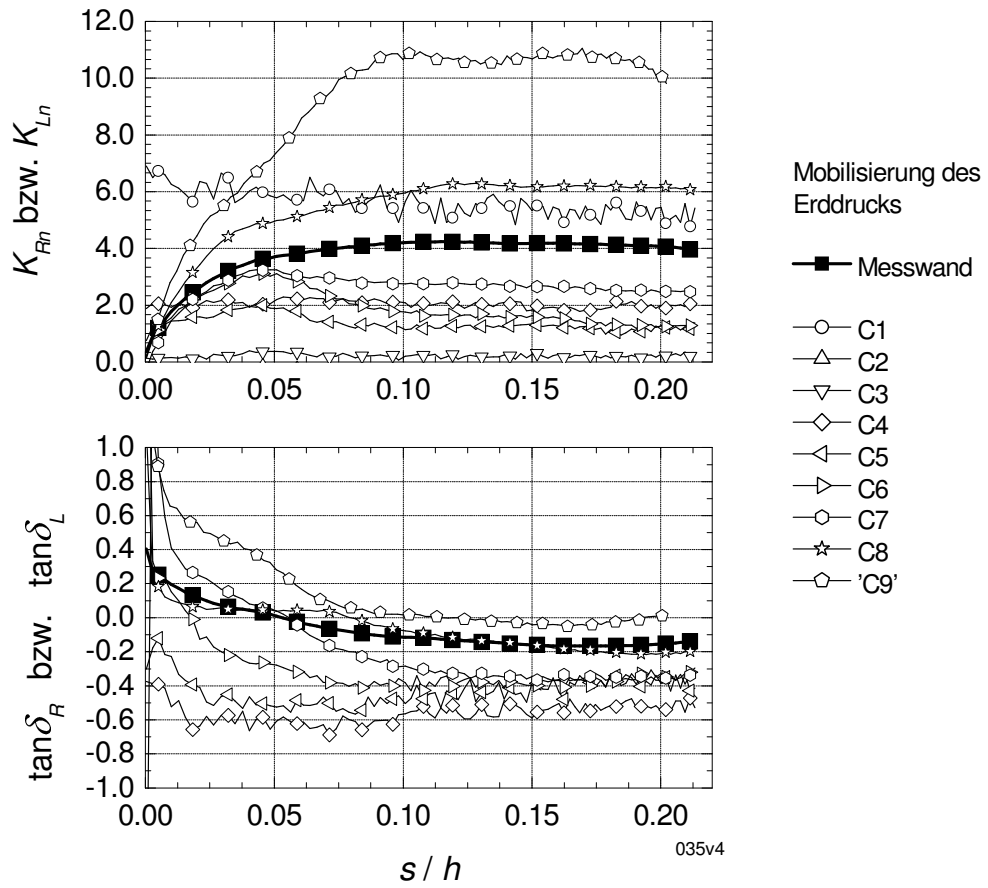


Bild C.44: Versuch 035 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,611$; $I_D = 0,47$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

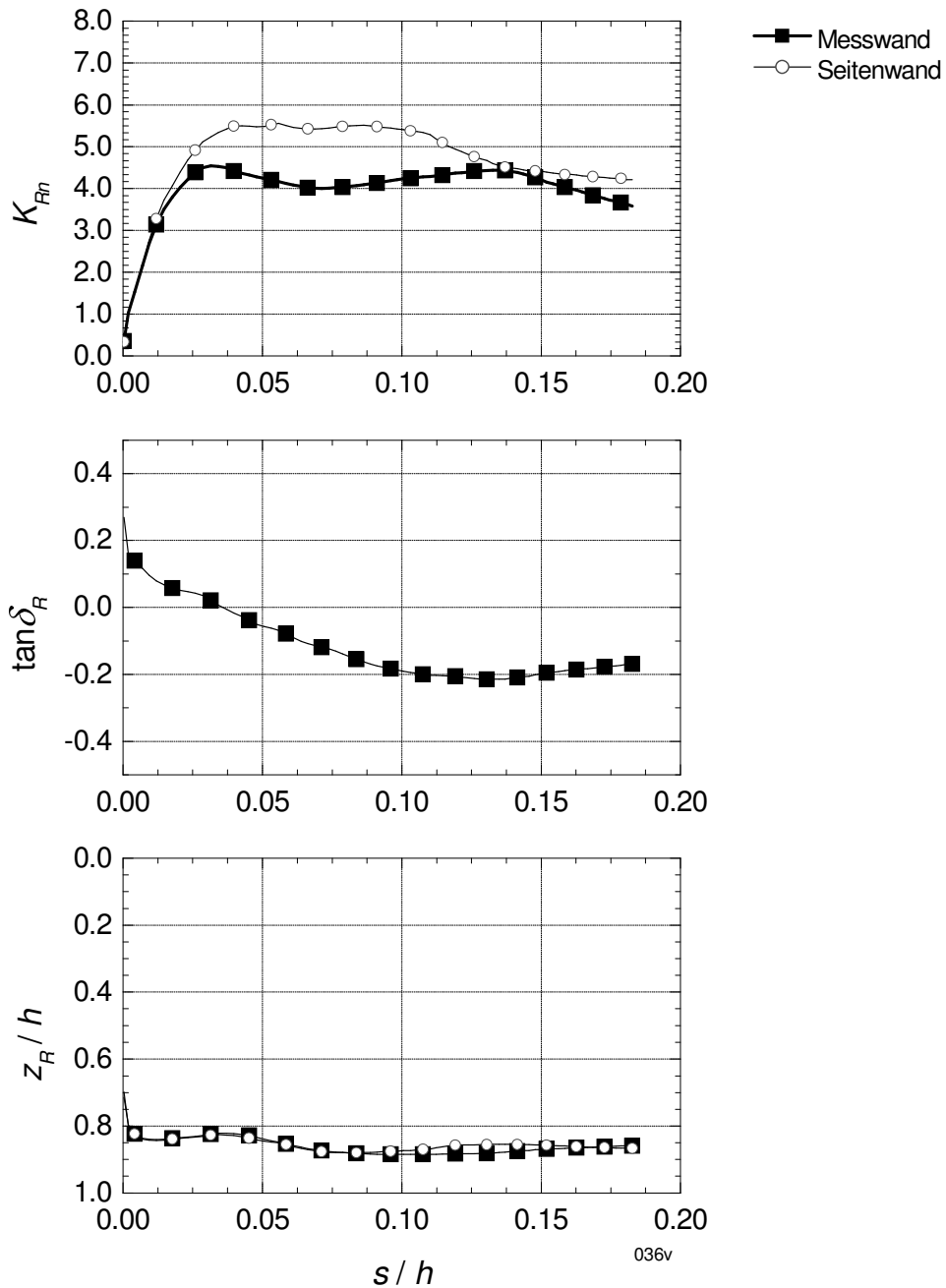


Bild C.45: Versuch 036 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,561$; $I_D = 0,64$) – Wandoberfläche Folie 1 – Mobilisierung Erddruckkraft

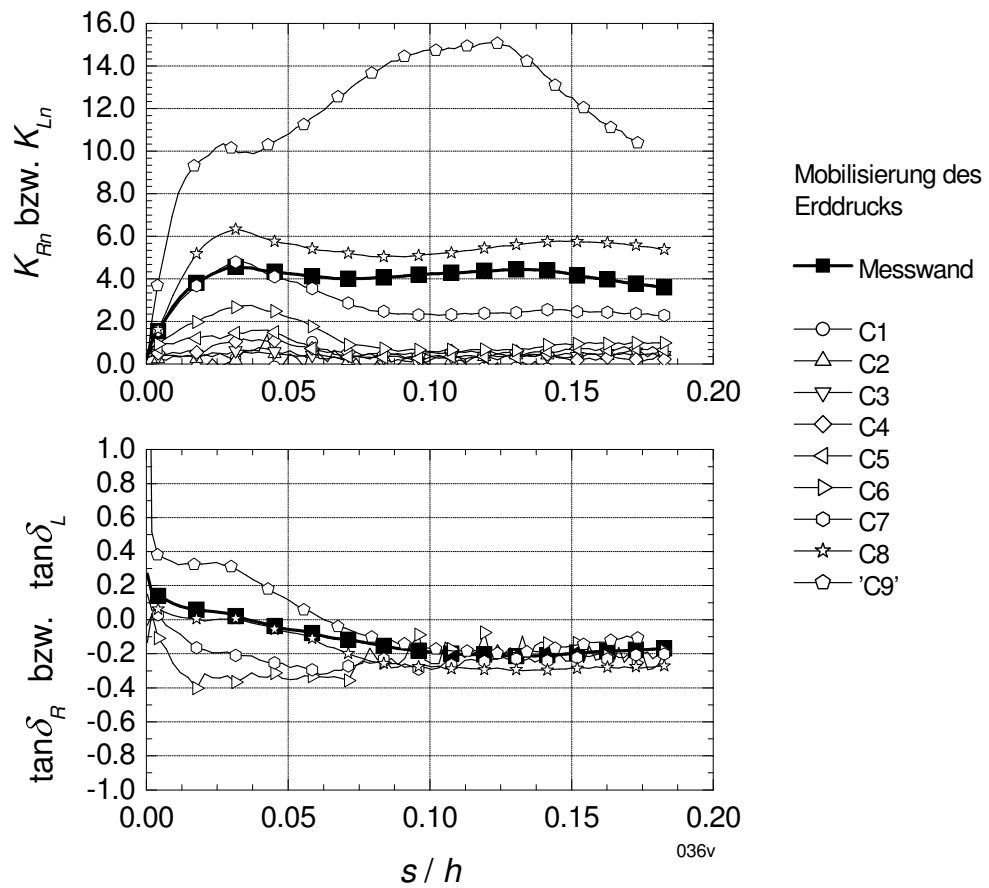


Bild C.46: Versuch 036 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,561$; $I_D = 0,64$) – Wandoberfläche Folie 1 – Mobilisierung Erddruck

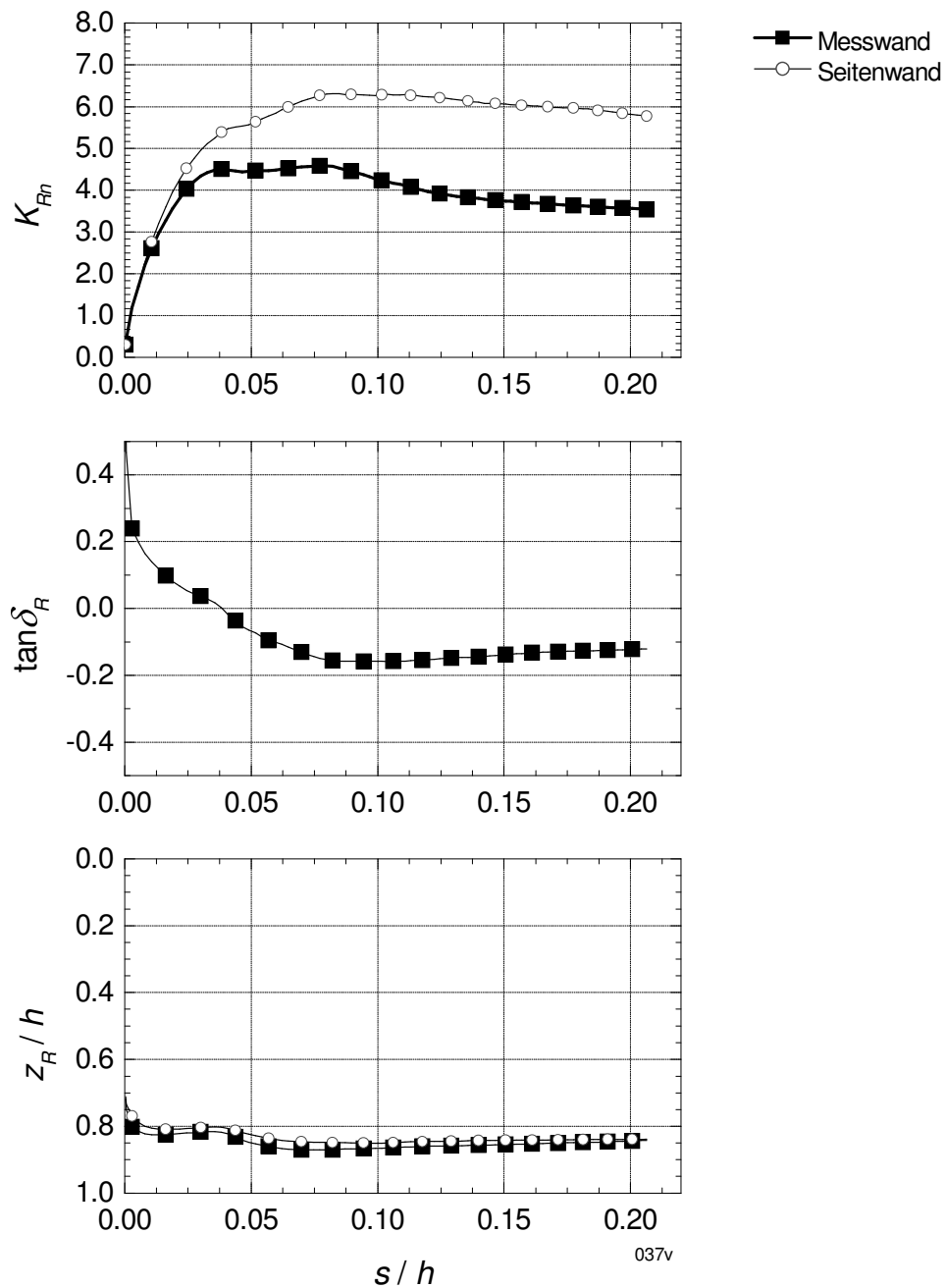


Bild C.47: Versuch 037 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,580$; $I_D = 0,58$) –
 Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruckkraft

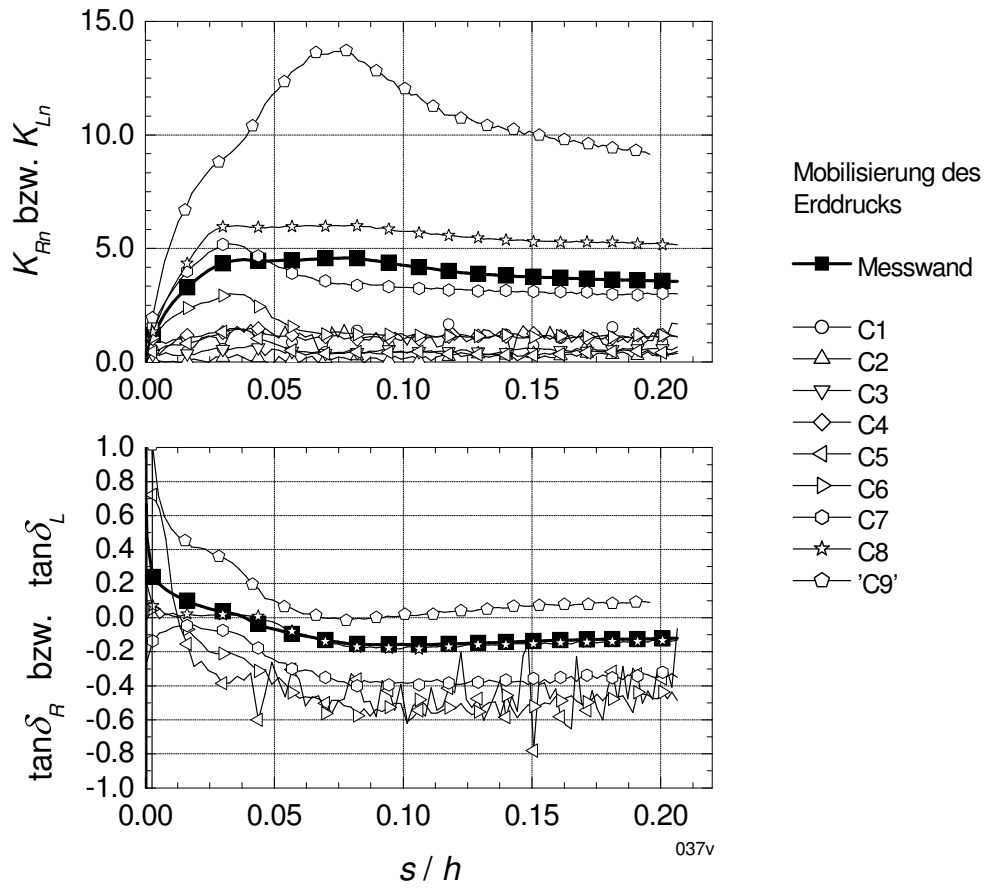


Bild C.48: Versuch 037 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,580$; $I_D = 0,58$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruck

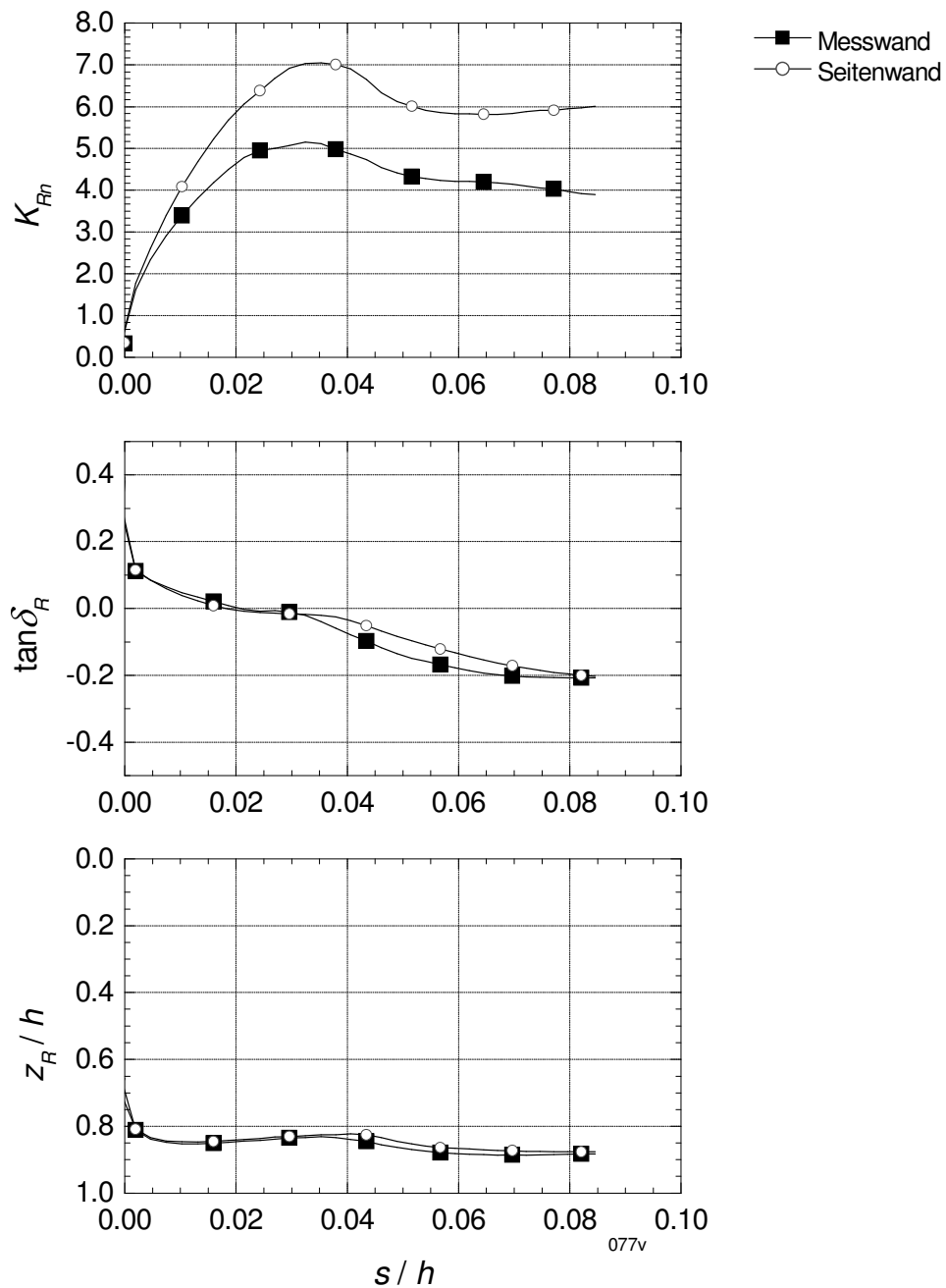


Bild C.49: Versuch 077 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,529$; $I_D = 0,75$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

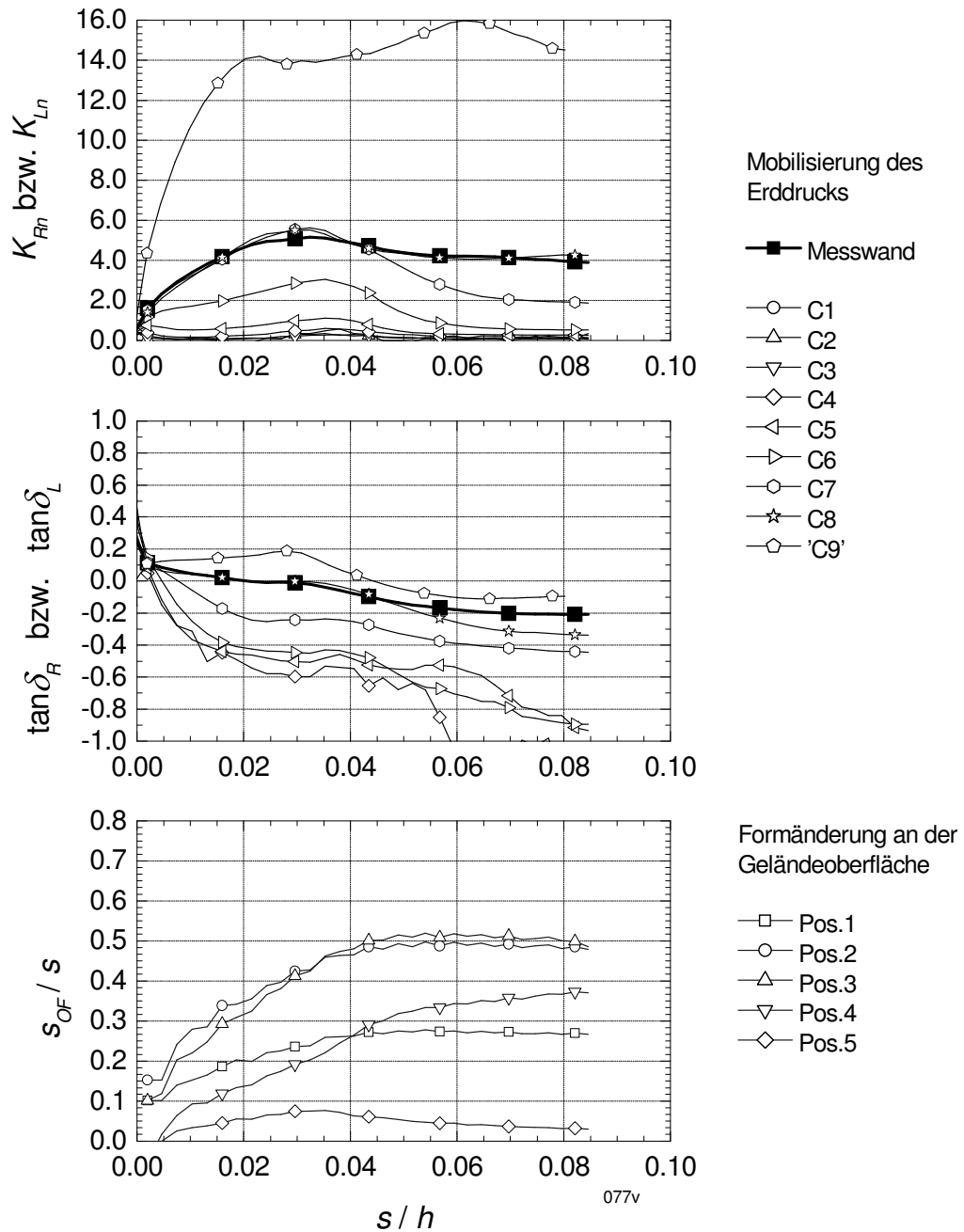


Bild C.50: Versuch 077 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,529$; $I_D = 0,75$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

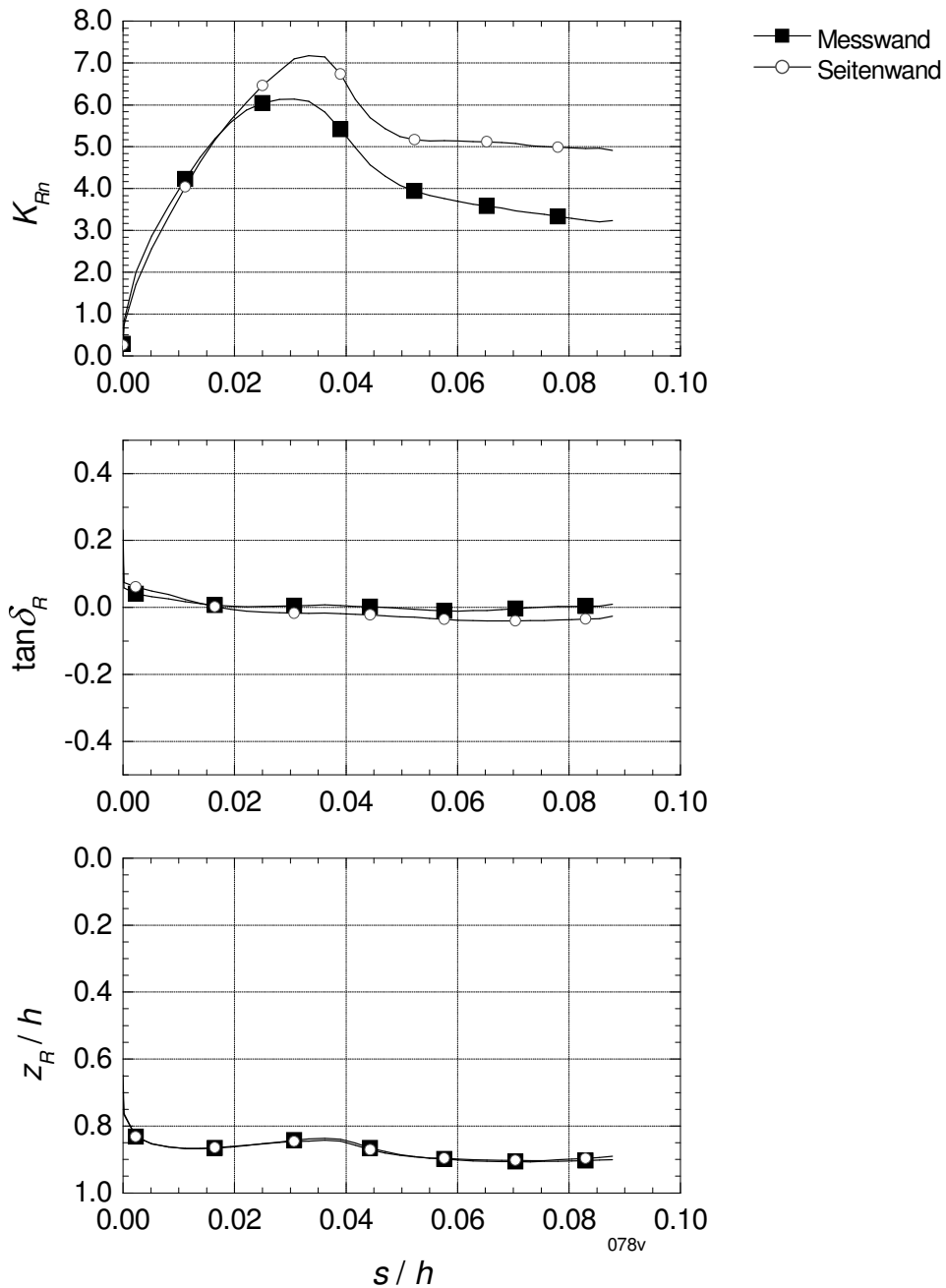


Bild C.51: Versuch 078 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,498$; $I_D = 0,86$) – Wandoberfläche Folie 2 – Mobilisierung Erddruckkraft

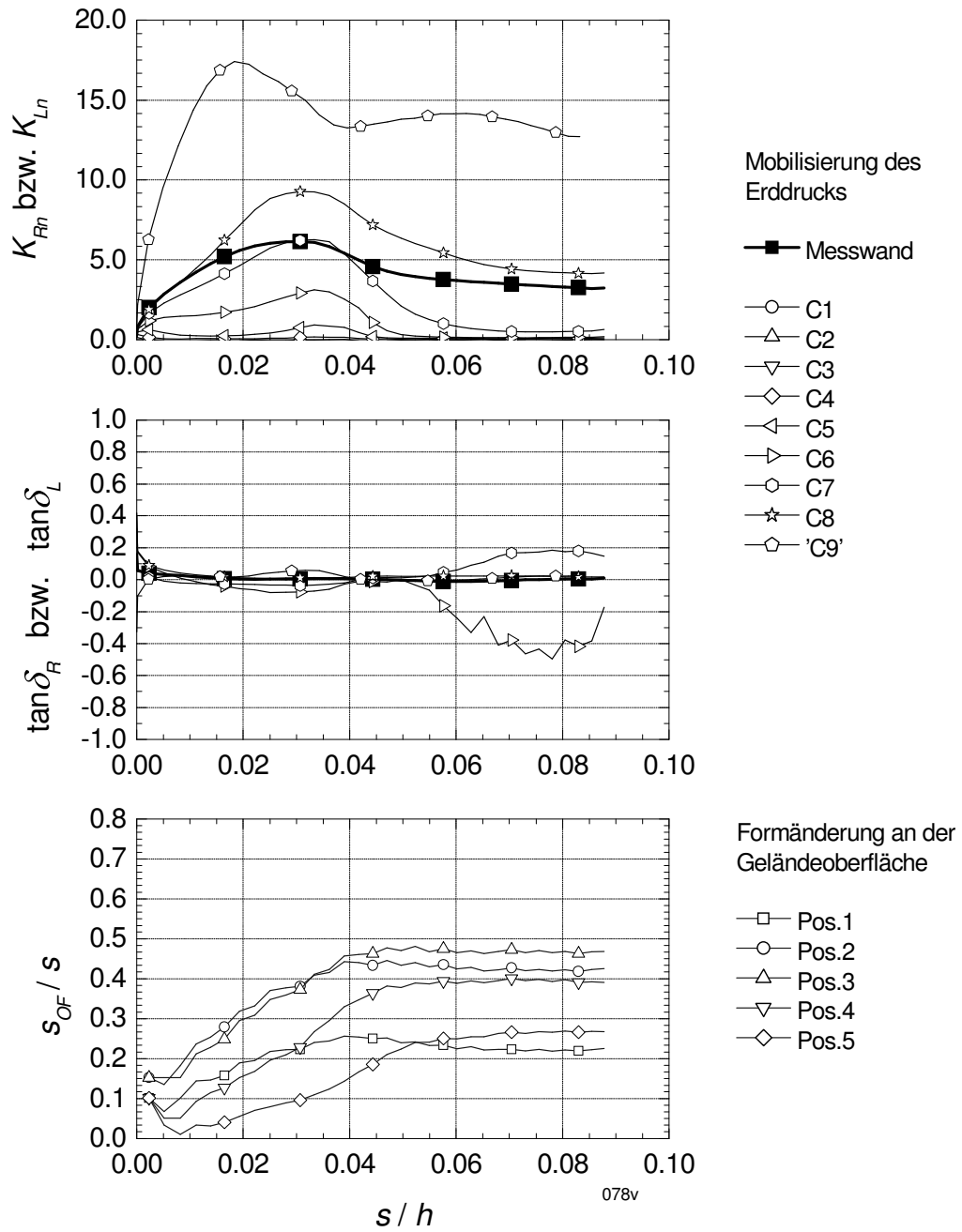


Bild C.52: Versuch 078 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,498$; $I_D = 0,86$) – Wandoberfläche Folie 2 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

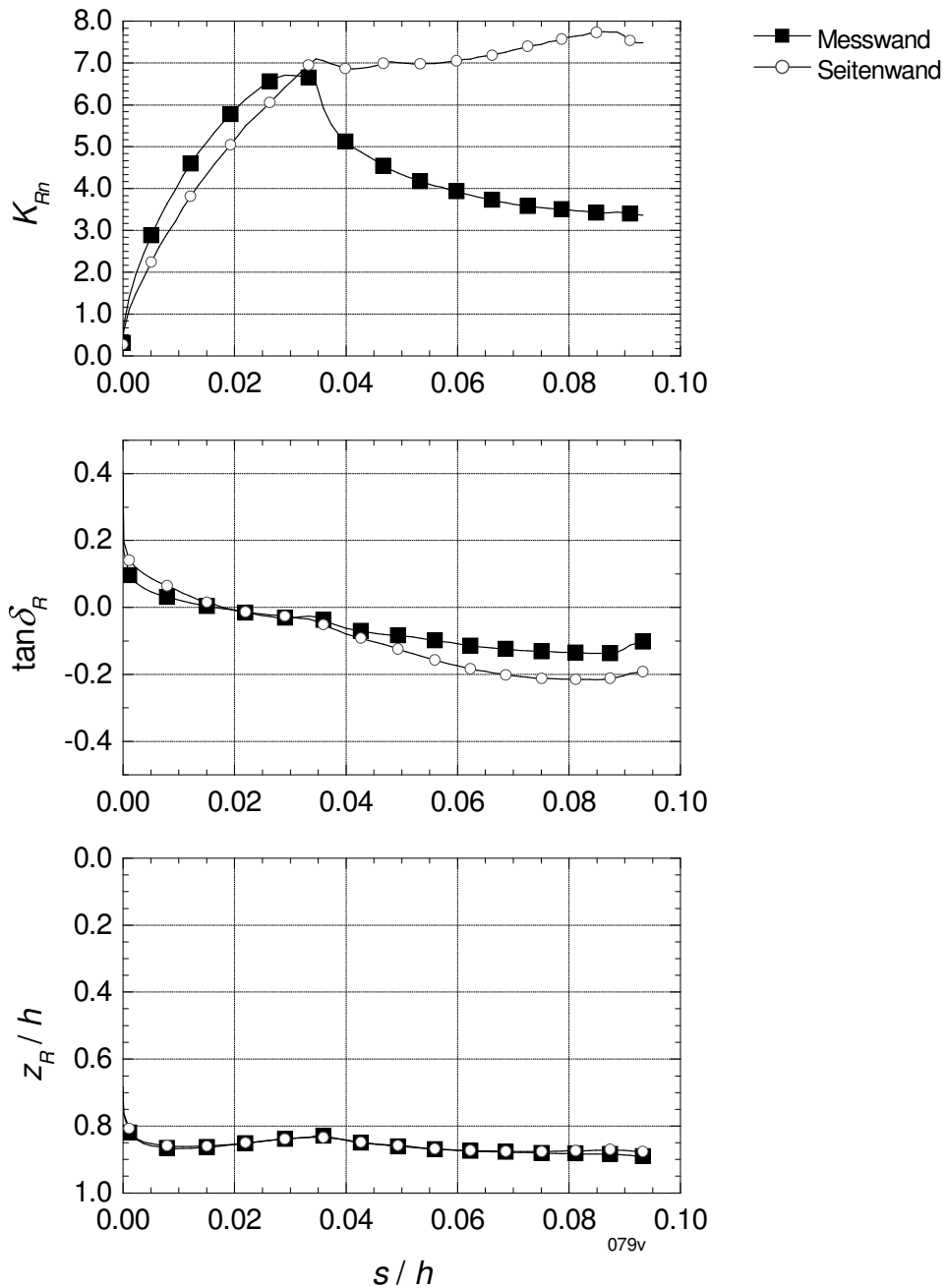


Bild C.53: Versuch 079 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,495$; $I_D = 0,87$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

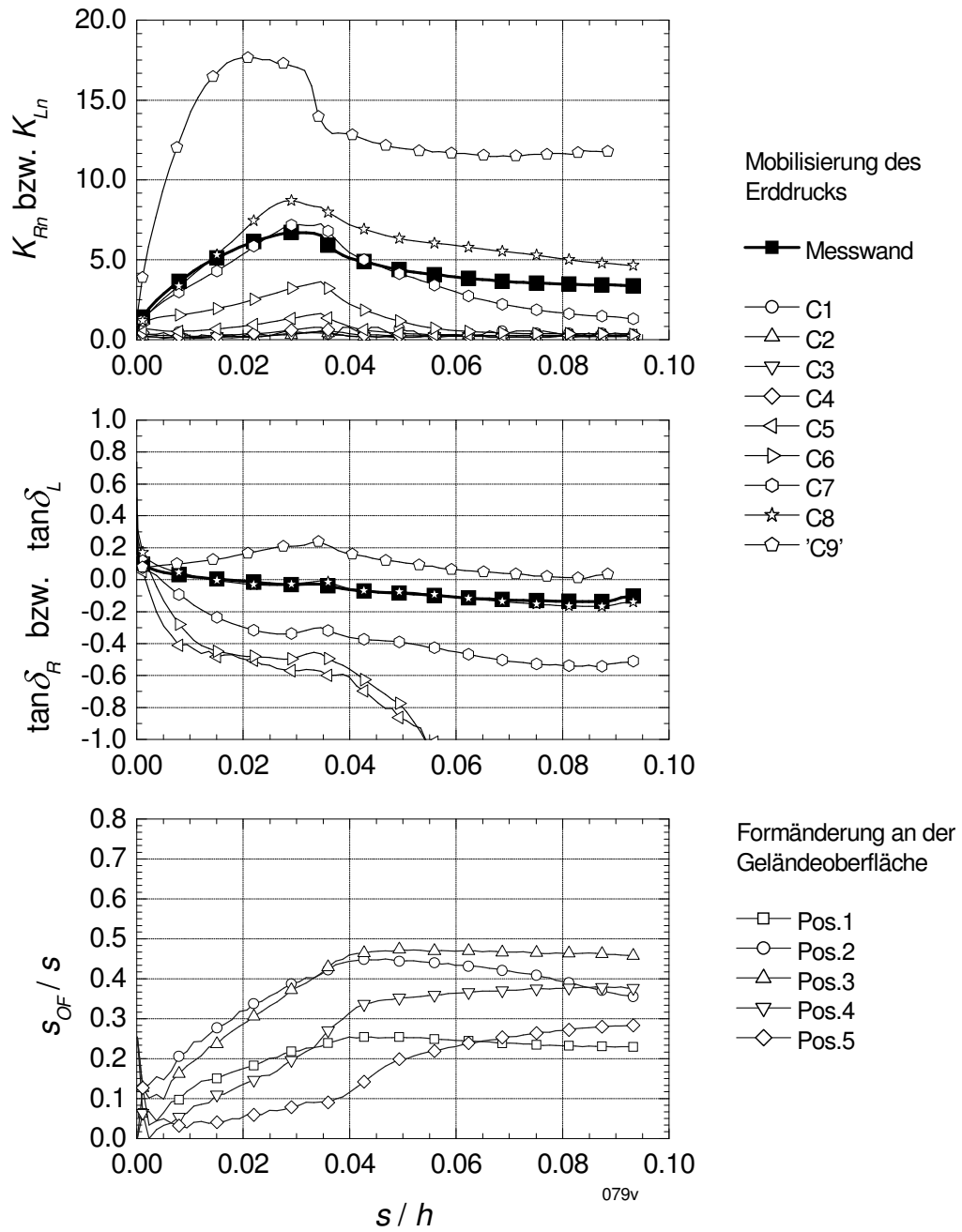


Bild C.54: Versuch 079 – Kopfpunktdrehung ($e_0 = 0,495$; $I_D = 0,87$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

C.3 Fußpunktdrehung

Tabelle C.3: 1g-Versuche mit Fußpunktdrehung ($h_{MW} = 0,564 \text{ m}$) – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	WOF	l_k/h_{MW}	γ	e_0	I_D	φ_1'
[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]
1	039	Alu	3.16	16.4	0.587	0.56	38.5
2	041	Alu	3.16	15.6	0.666	0.28	35.2
3	042	Alu	3.16	15.9	0.631	0.41	36.6
4	043	Alu	3.16	17.1	0.517	0.80	41.9
5	045	S40	3.16	17.2	0.514	0.81	42.0
6	047	Folie1	3.16	17.0	0.532	0.75	41.1
7	058	Alu	3.16	16.5	0.572	0.61	39.2
8	059	Alu	3.16	16.5	0.577	0.59	38.9
9	060	Alu	3.16	16.4	0.590	0.55	38.4
10	061	Alu	3.16	16.2	0.600	0.51	37.9
11	062	Alu	3.16	16.5	0.575	0.60	39.0
12	063	Alu	3.16	17.2	0.510	0.82	42.2
13	069	Alu	3.16	15.6	0.664	0.29	35.2
14	072	Folie2	3.16	17.2	0.507	0.83	42.4
15	073	S40	3.16	17.2	0.508	0.83	42.4
16	075	S40	3.16	16.4	0.588	0.55	38.4
17	076	S40	3.16	15.5	0.678	0.24	34.7

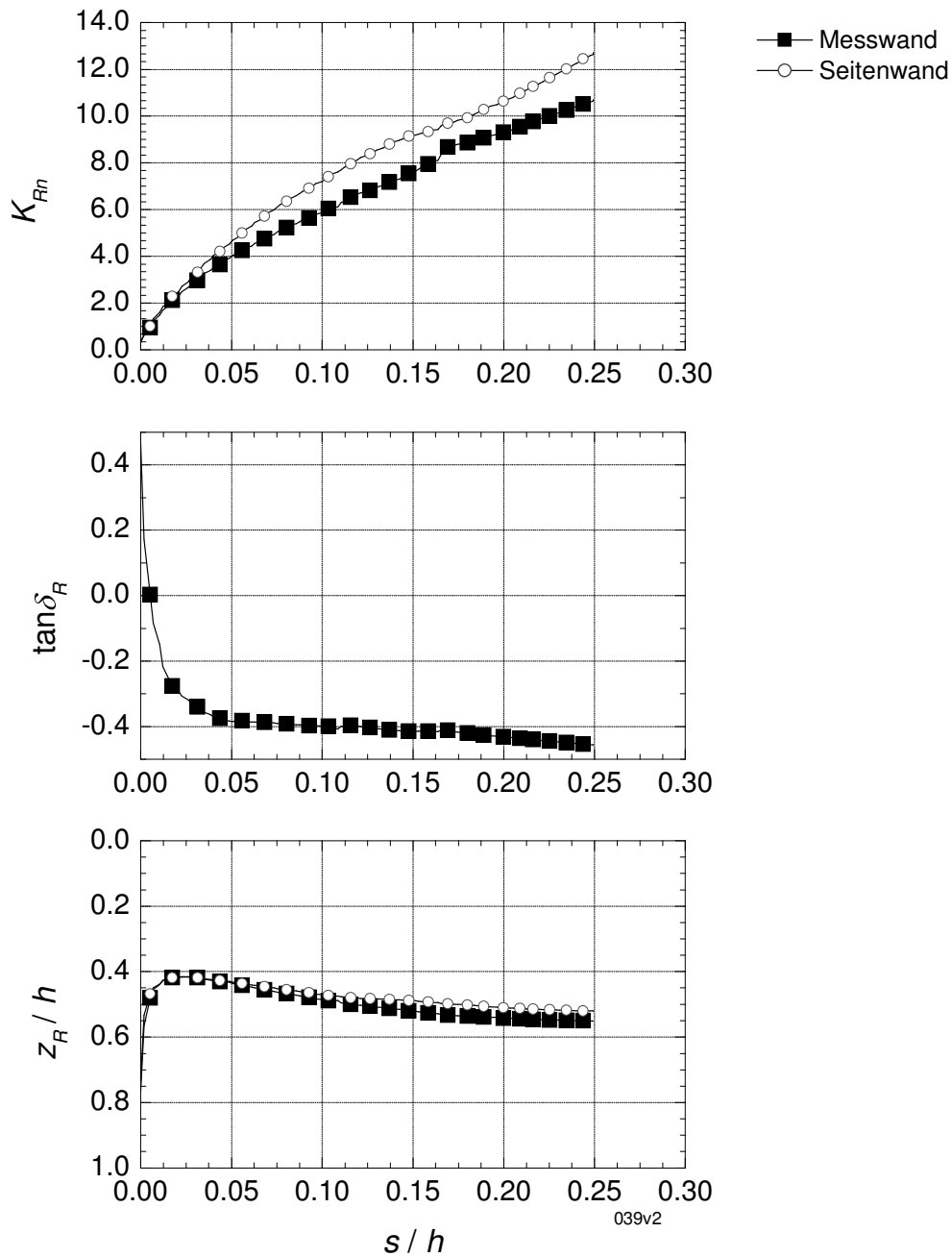


Bild C.55: Versuch 039 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,587$; $I_D = 0,56$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

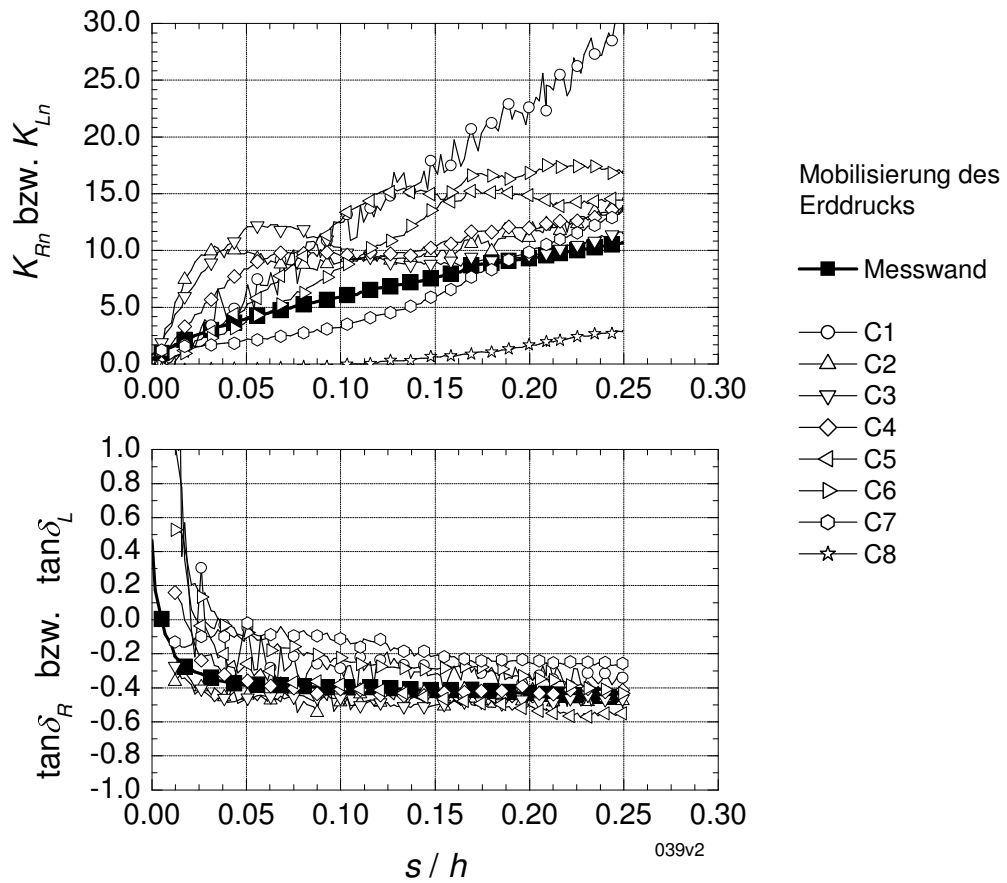


Bild C.56: Versuch 039 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,587$; $I_D = 0,56$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

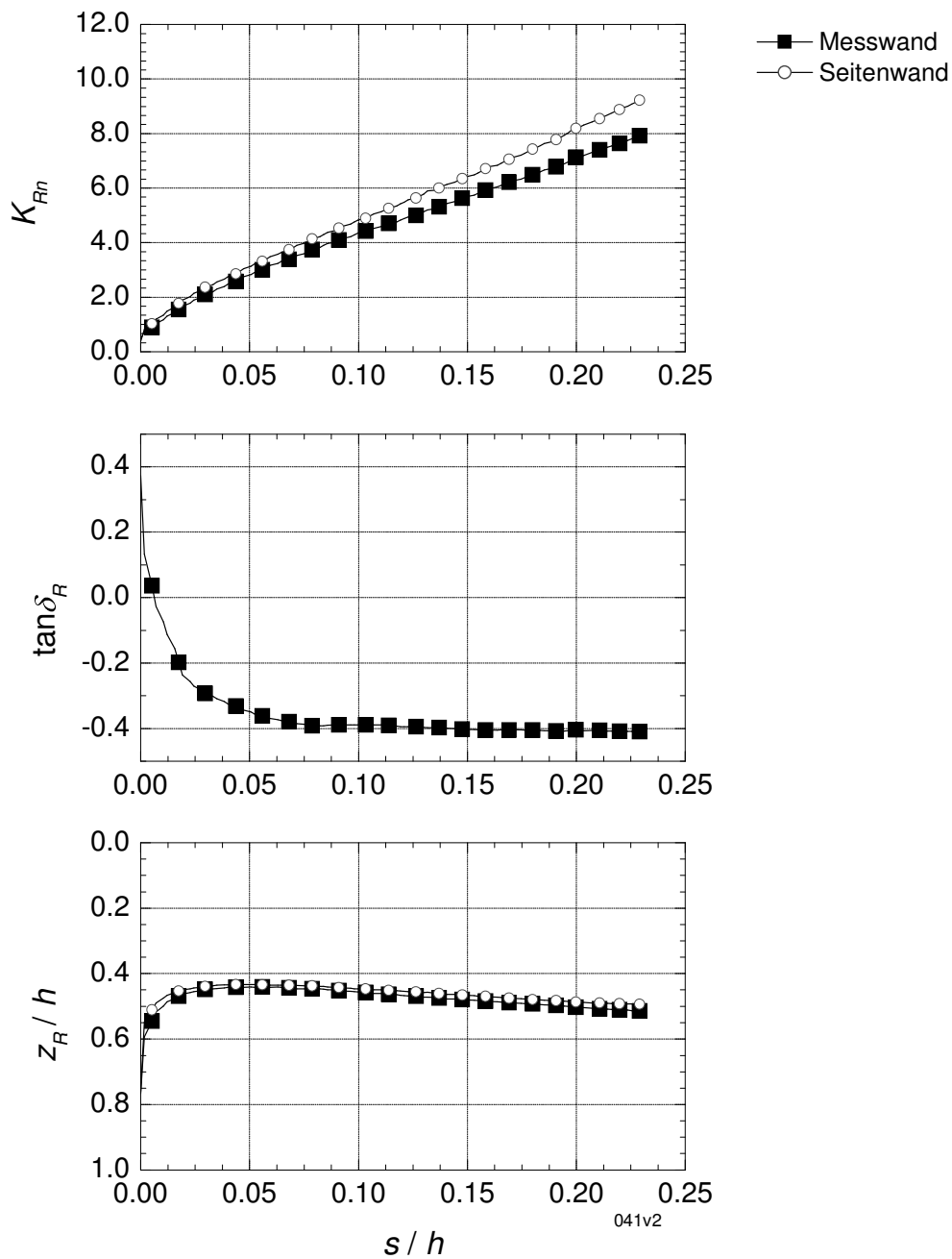


Bild C.57: Versuch 041 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,666$; $I_D = 0,28$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

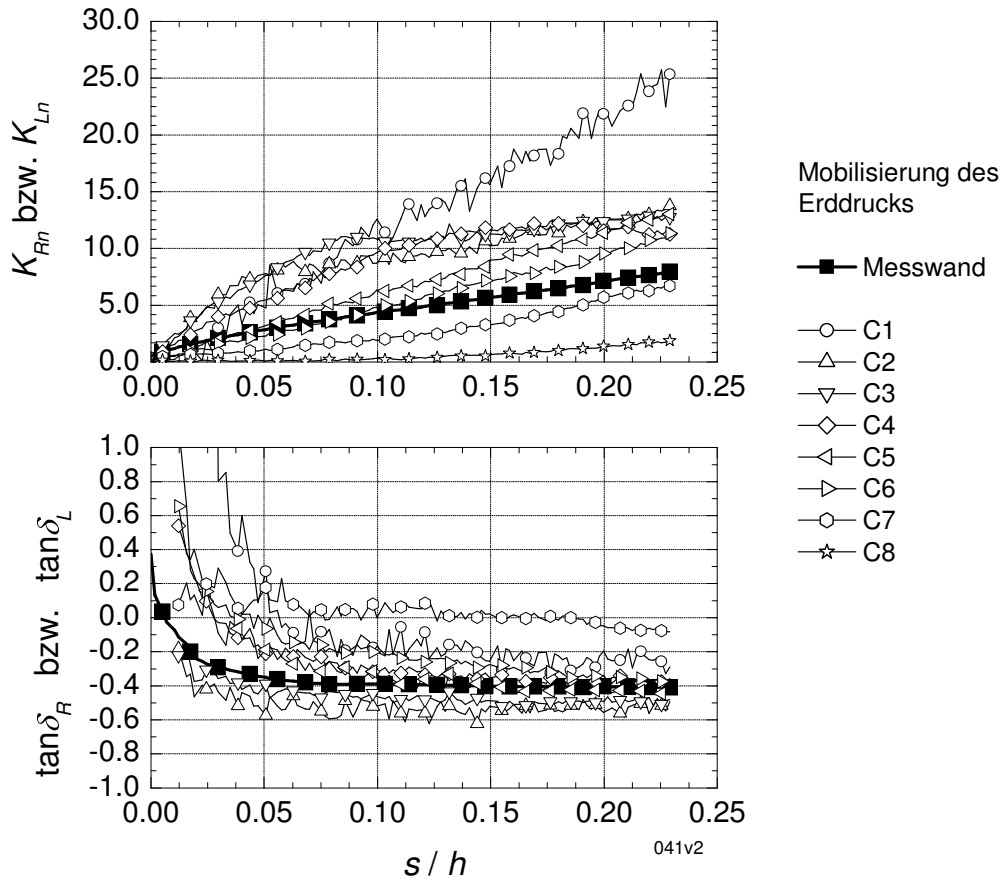


Bild C.58: Versuch 041 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,666$; $I_D = 0,28$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

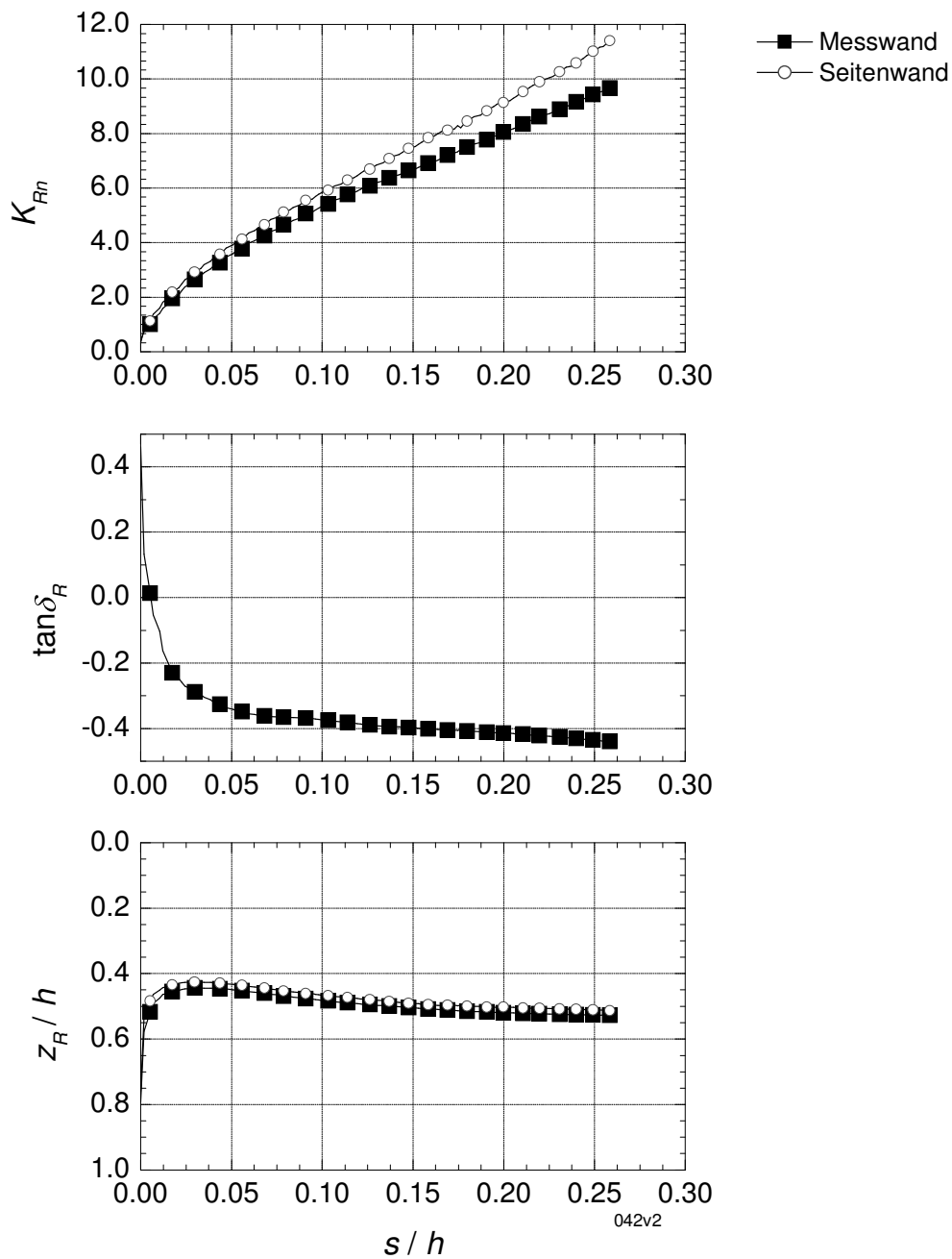


Bild C.59: Versuch 042 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,631$; $I_D = 0,41$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

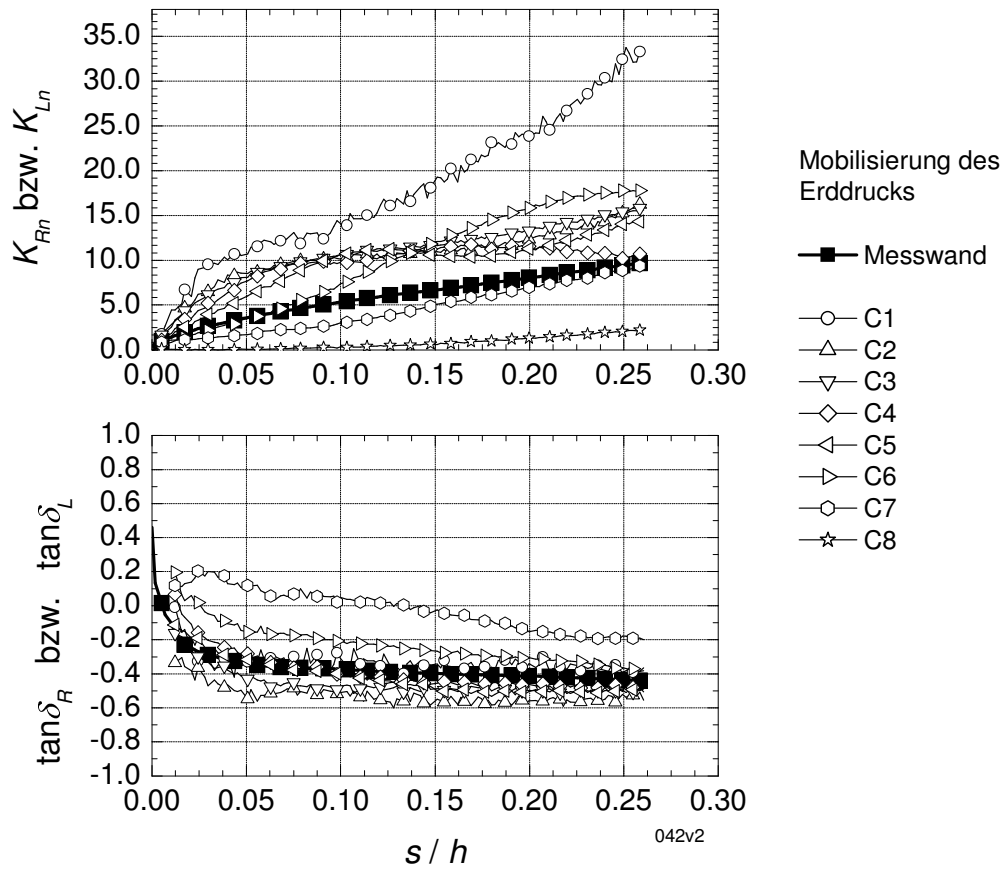


Bild C.60: Versuch 042 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,631$; $I_D = 0,41$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

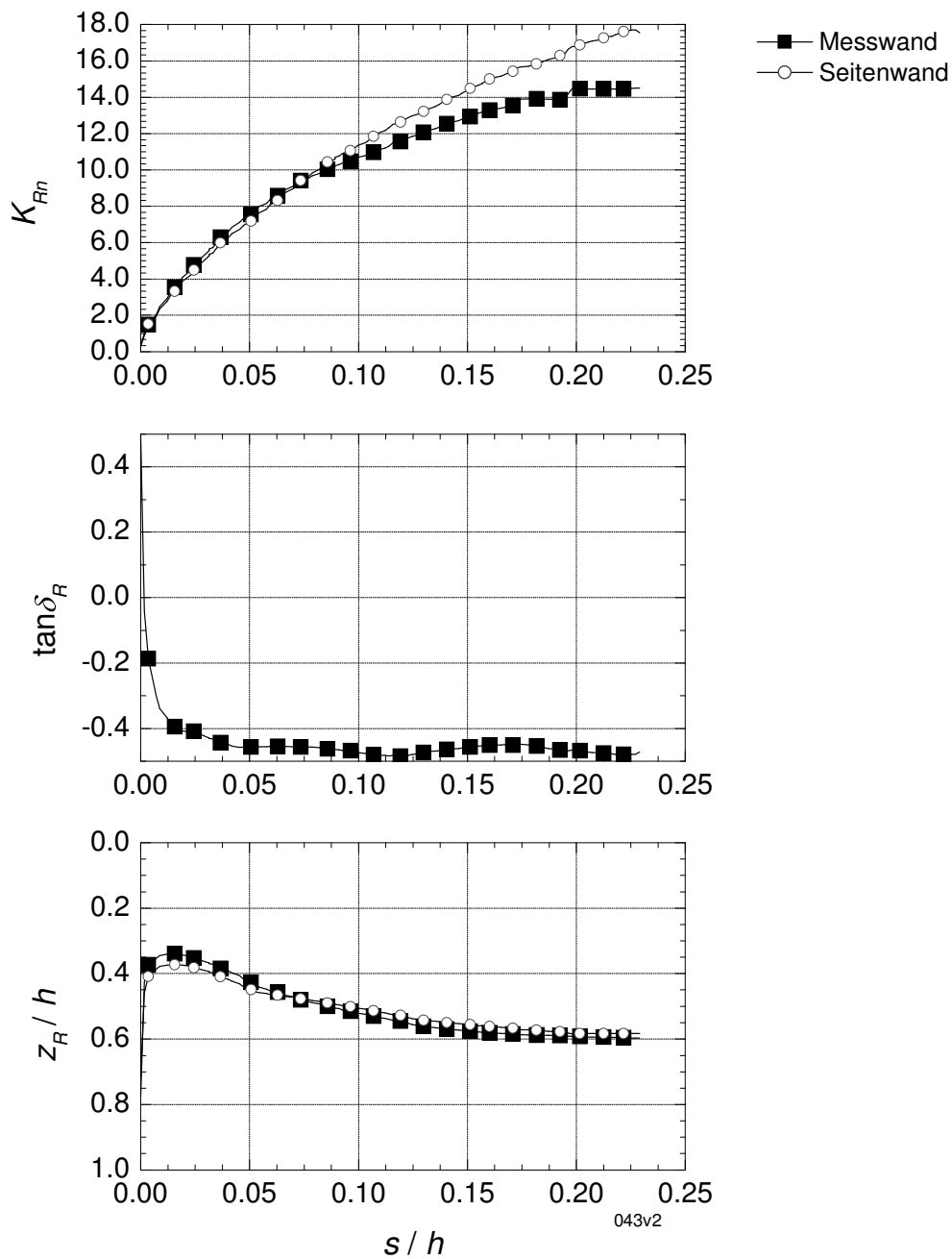


Bild C.61: Versuch 043 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,517$; $I_D = 0,80$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

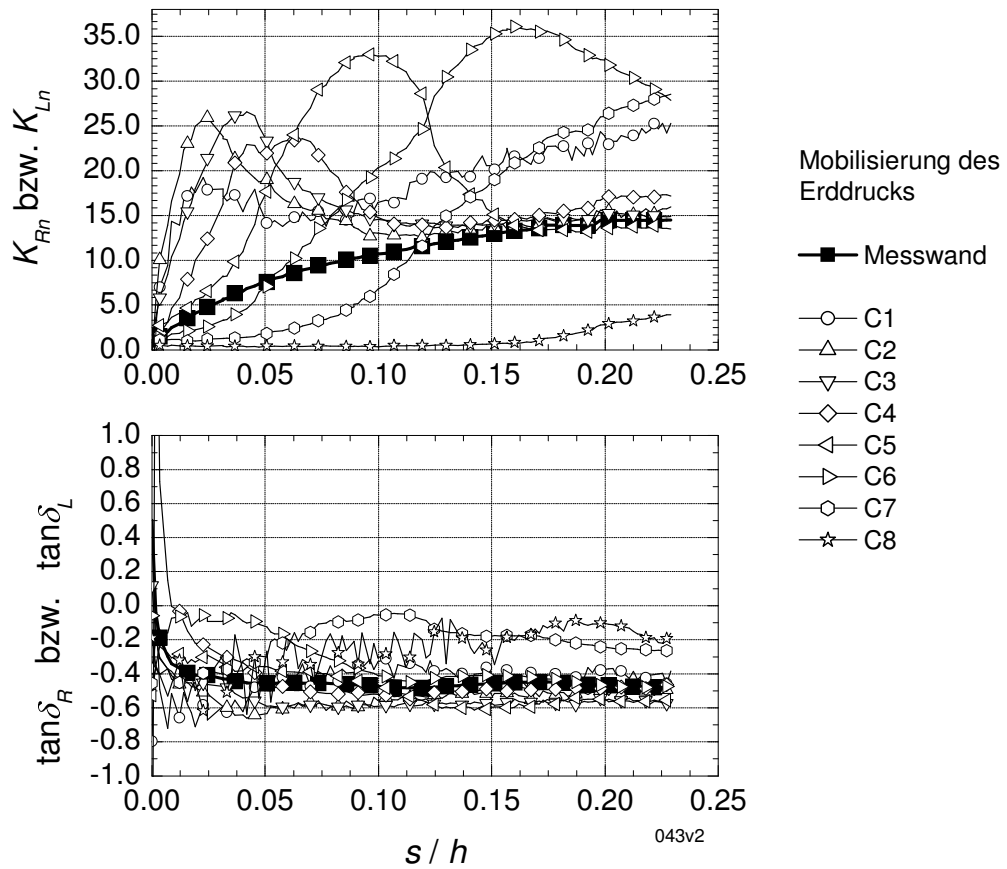


Bild C.62: Versuch 043 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,517$; $I_D = 0,80$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck

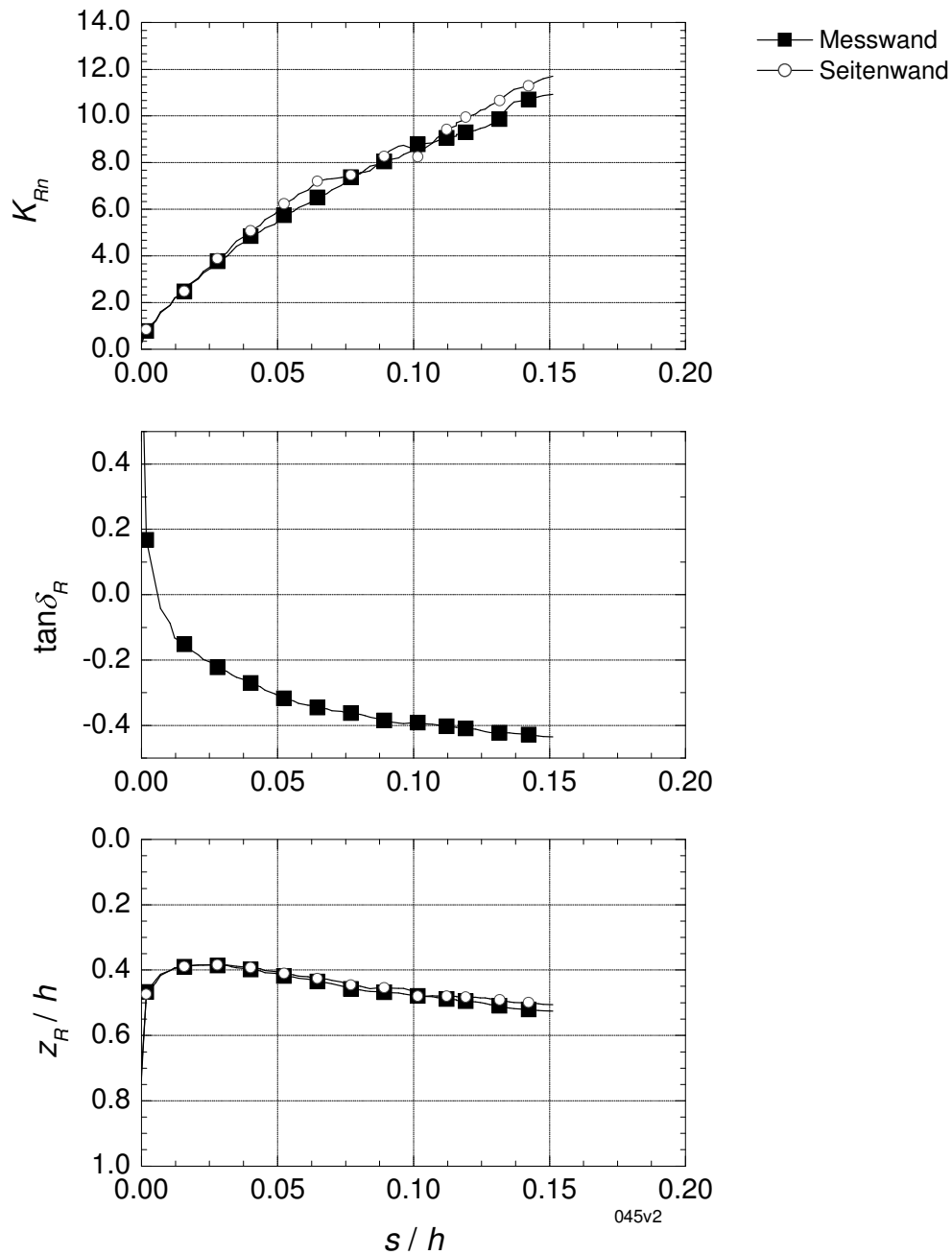


Bild C.63: Versuch 045 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,514$; $I_D = 0,81$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruckkraft

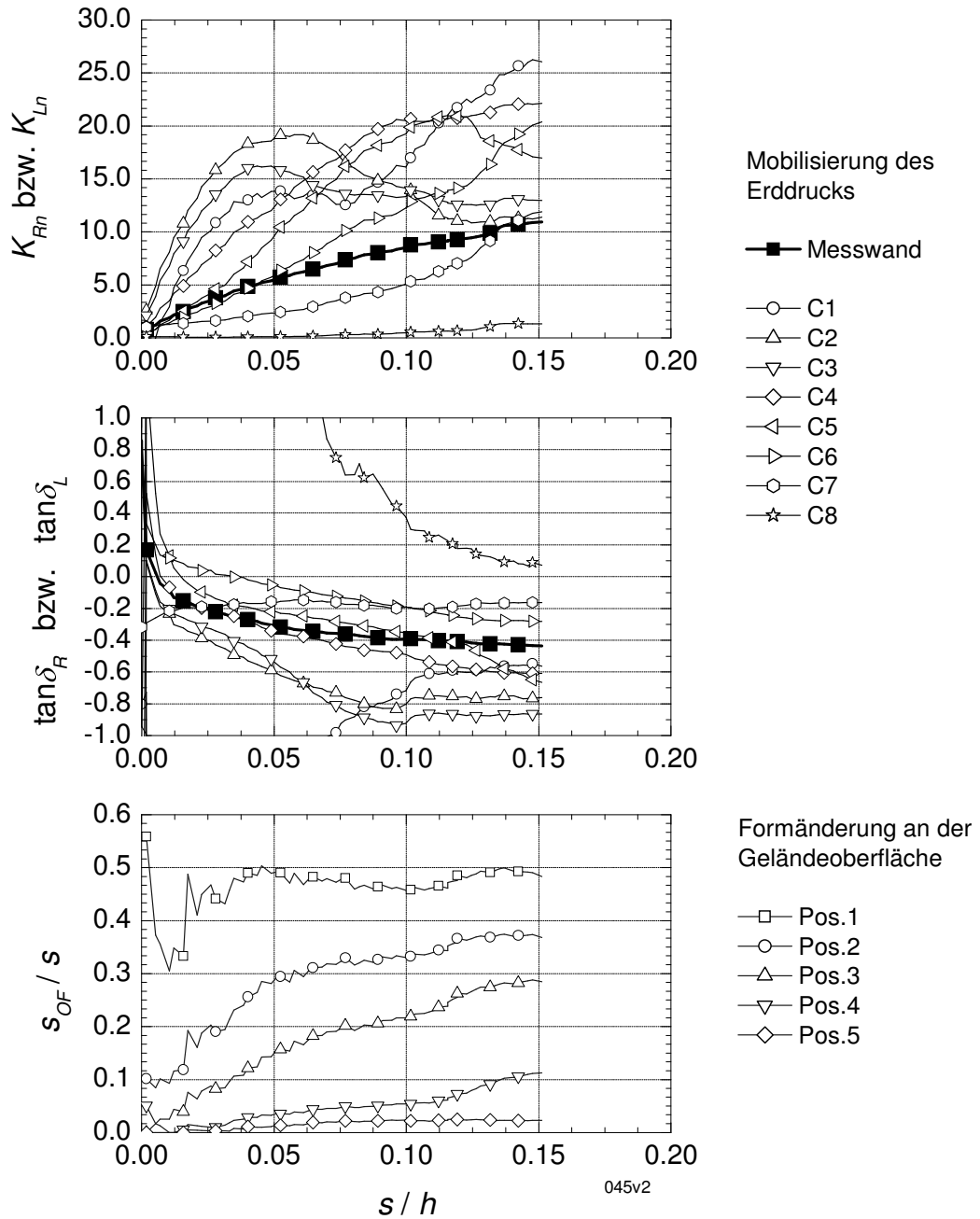


Bild C.64: Versuch 045 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,514$; $I_D = 0,81$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

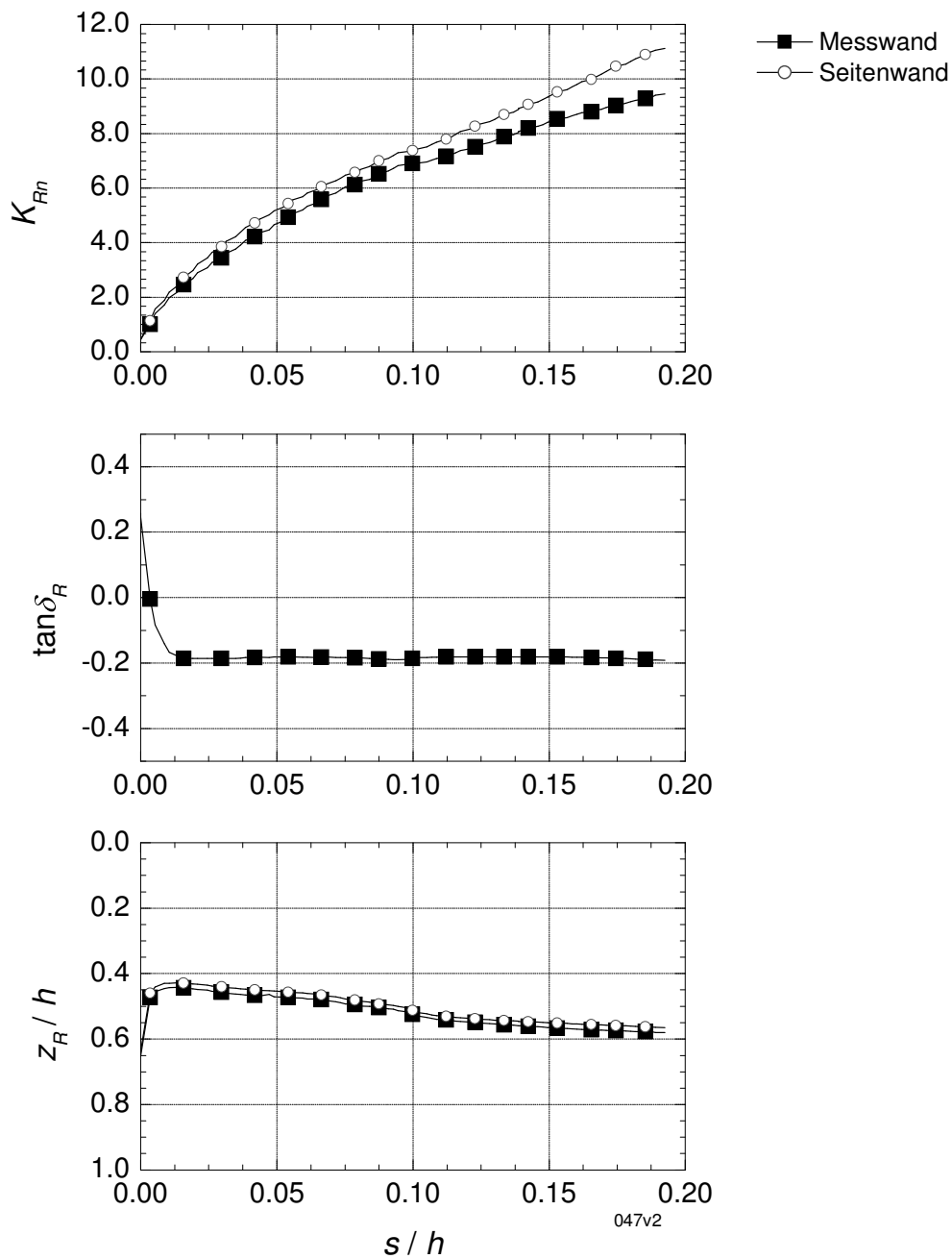


Bild C.65: Versuch 047 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,532$; $I_D = 0,75$) – Wandoberfläche Folie 1 – Mobilisierung Erddruckkraft

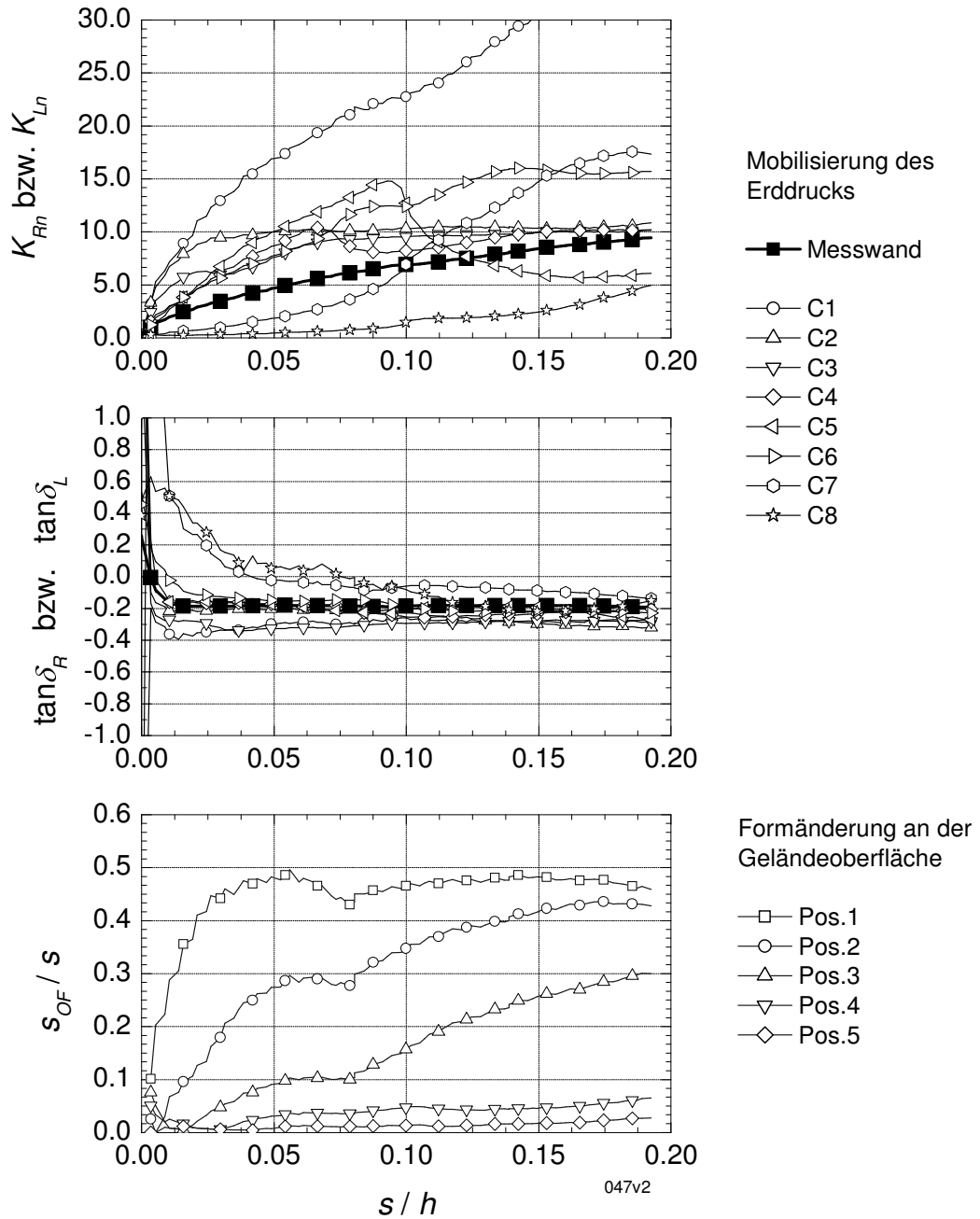


Bild C.66: Versuch 047 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,532$; $I_D = 0,75$) – Wandoberfläche Folie 1 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

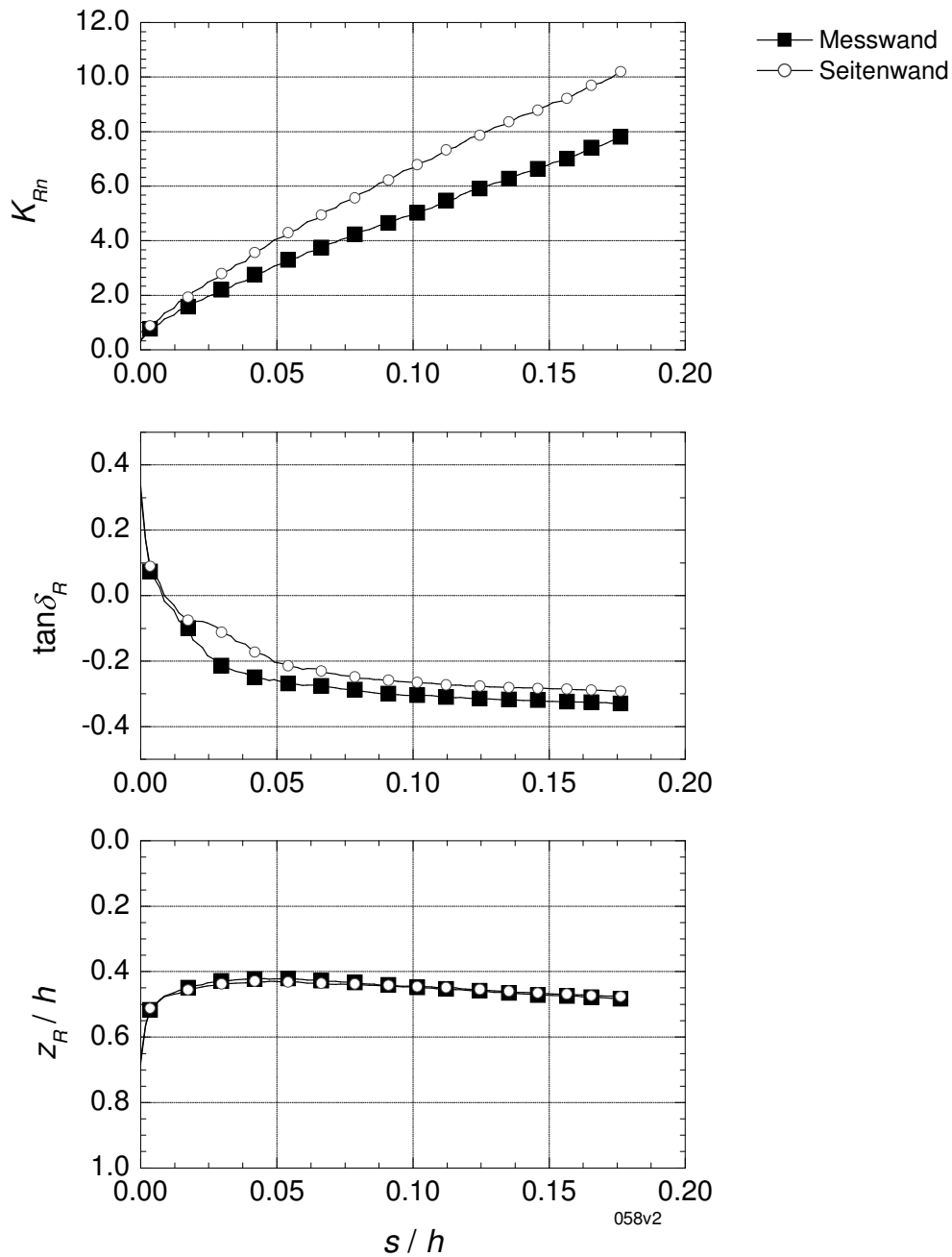


Bild C.67: Versuch 058 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,572$; $I_D = 0,61$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

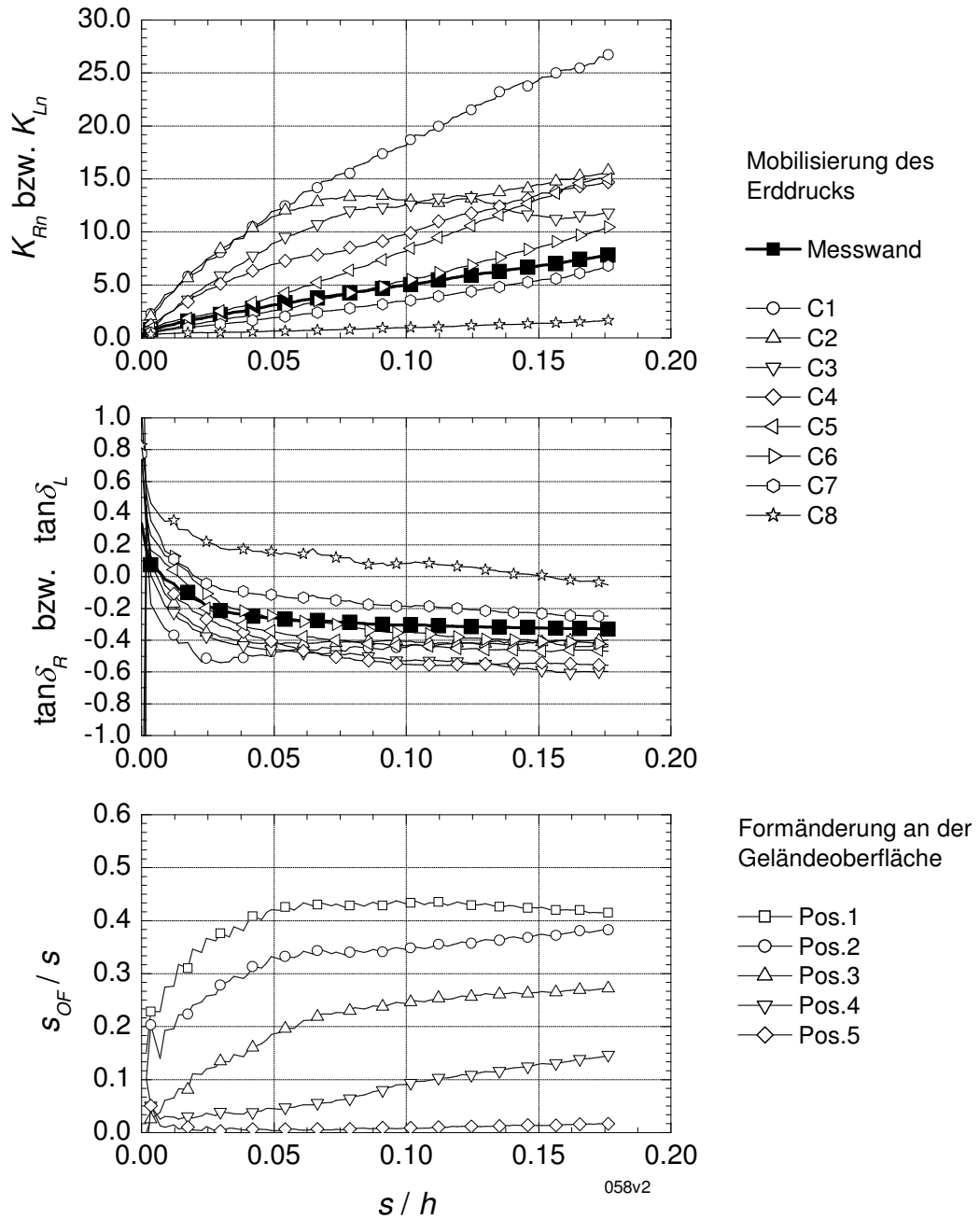


Bild C.68: Versuch 058 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,572$; $I_D = 0,61$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

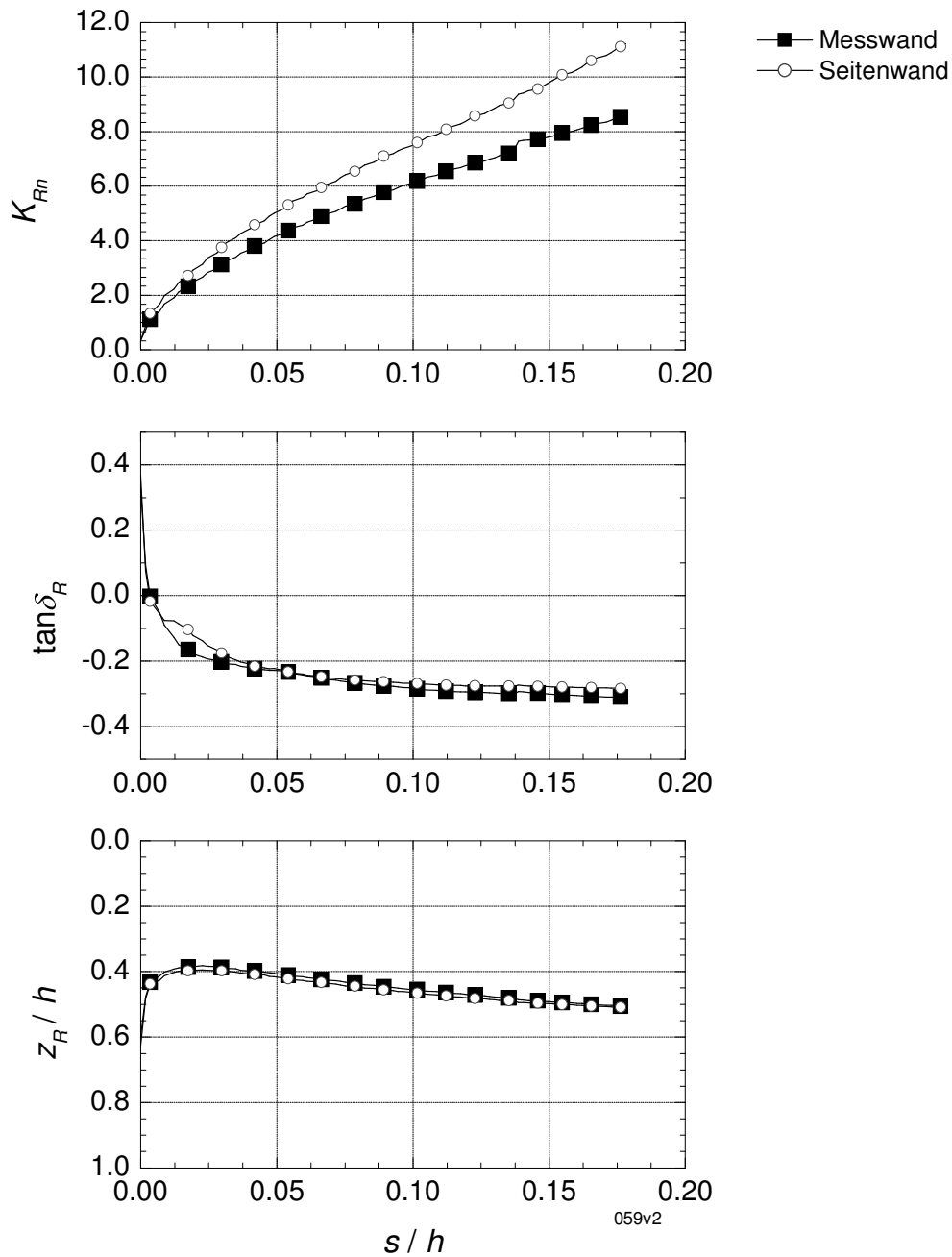


Bild C.69: Versuch 059 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,577$; $I_D = 0,59$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

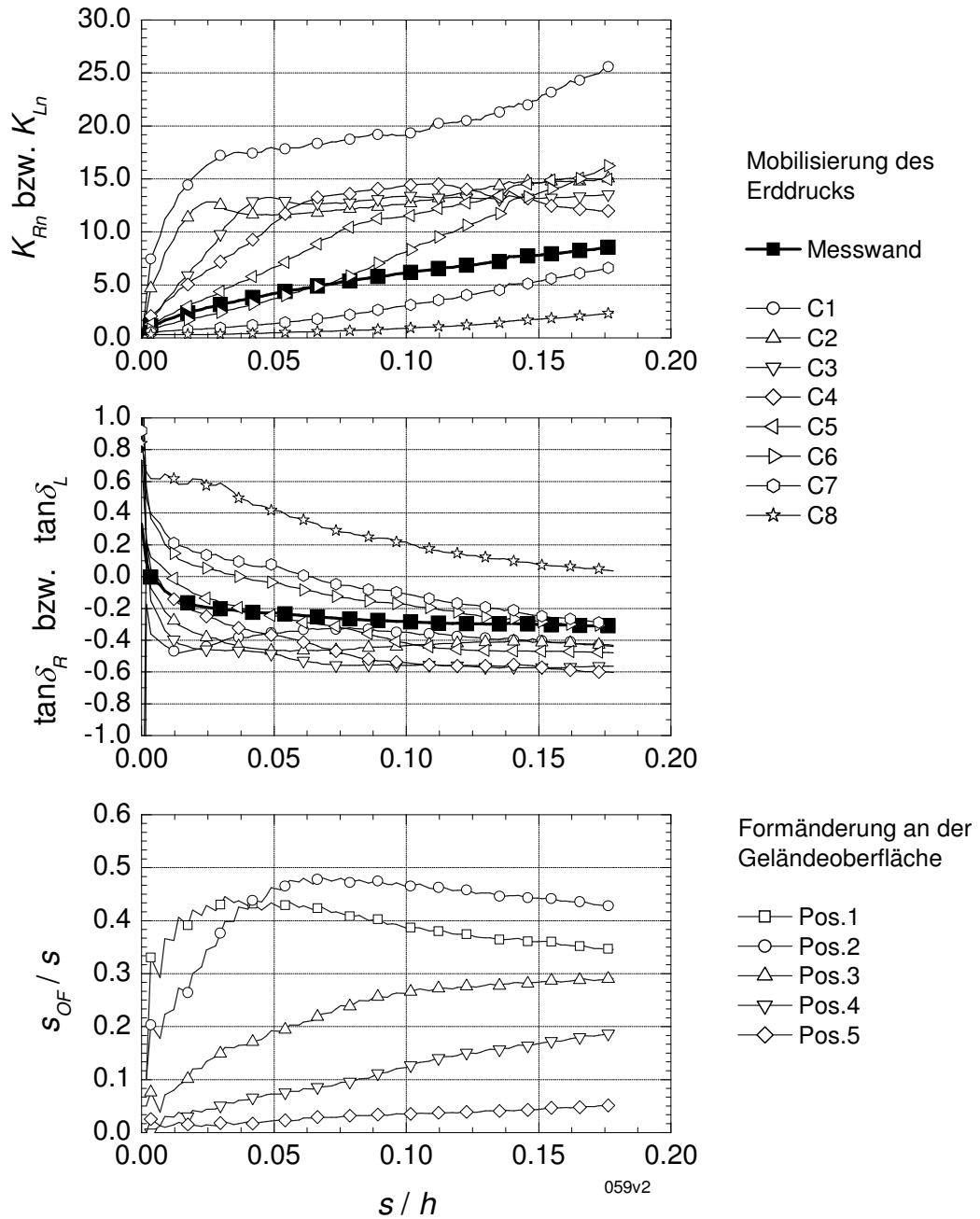


Bild C.70: Versuch 059 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,577$; $I_D = 0,59$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

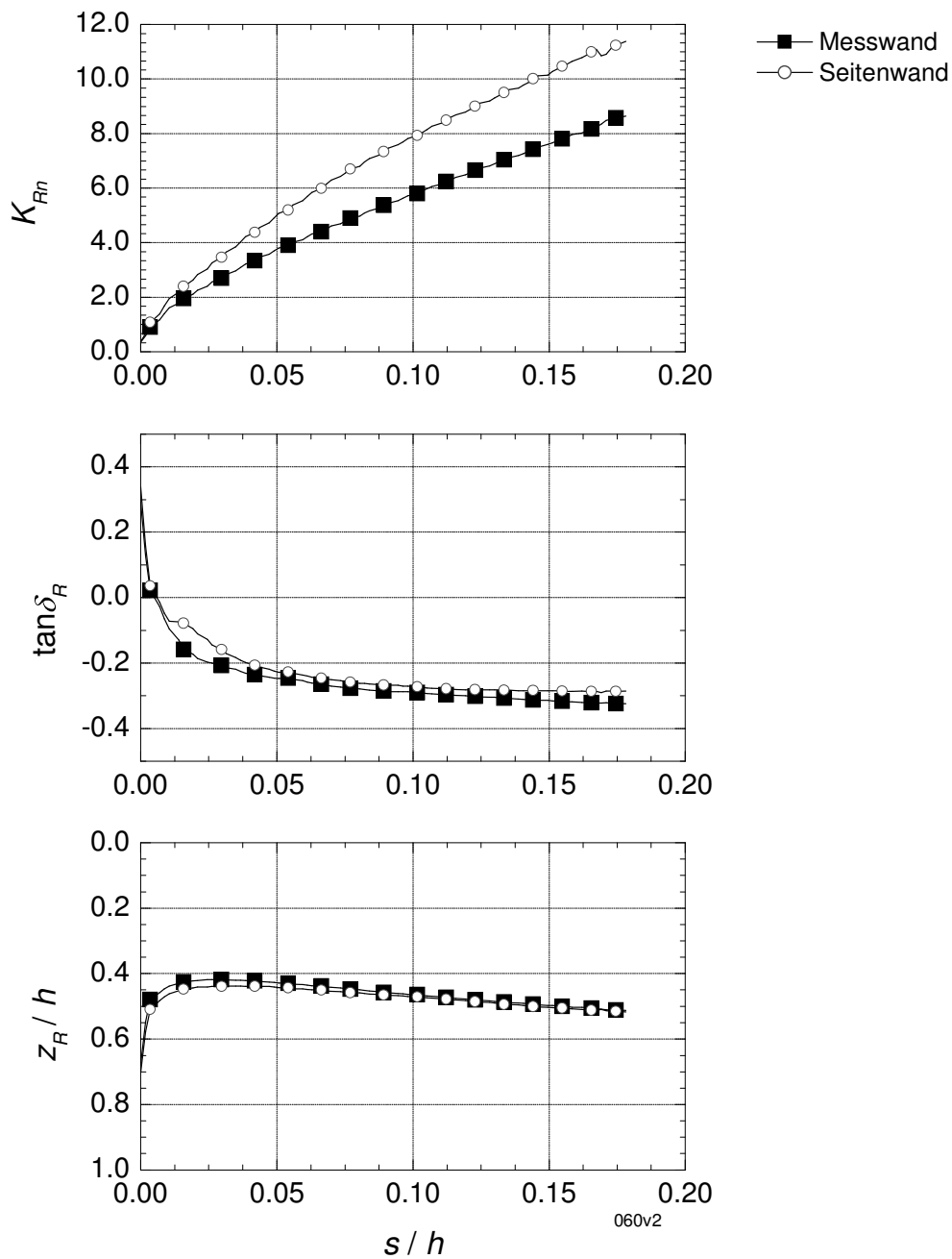


Bild C.71: Versuch 060 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,590$; $I_D = 0,55$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

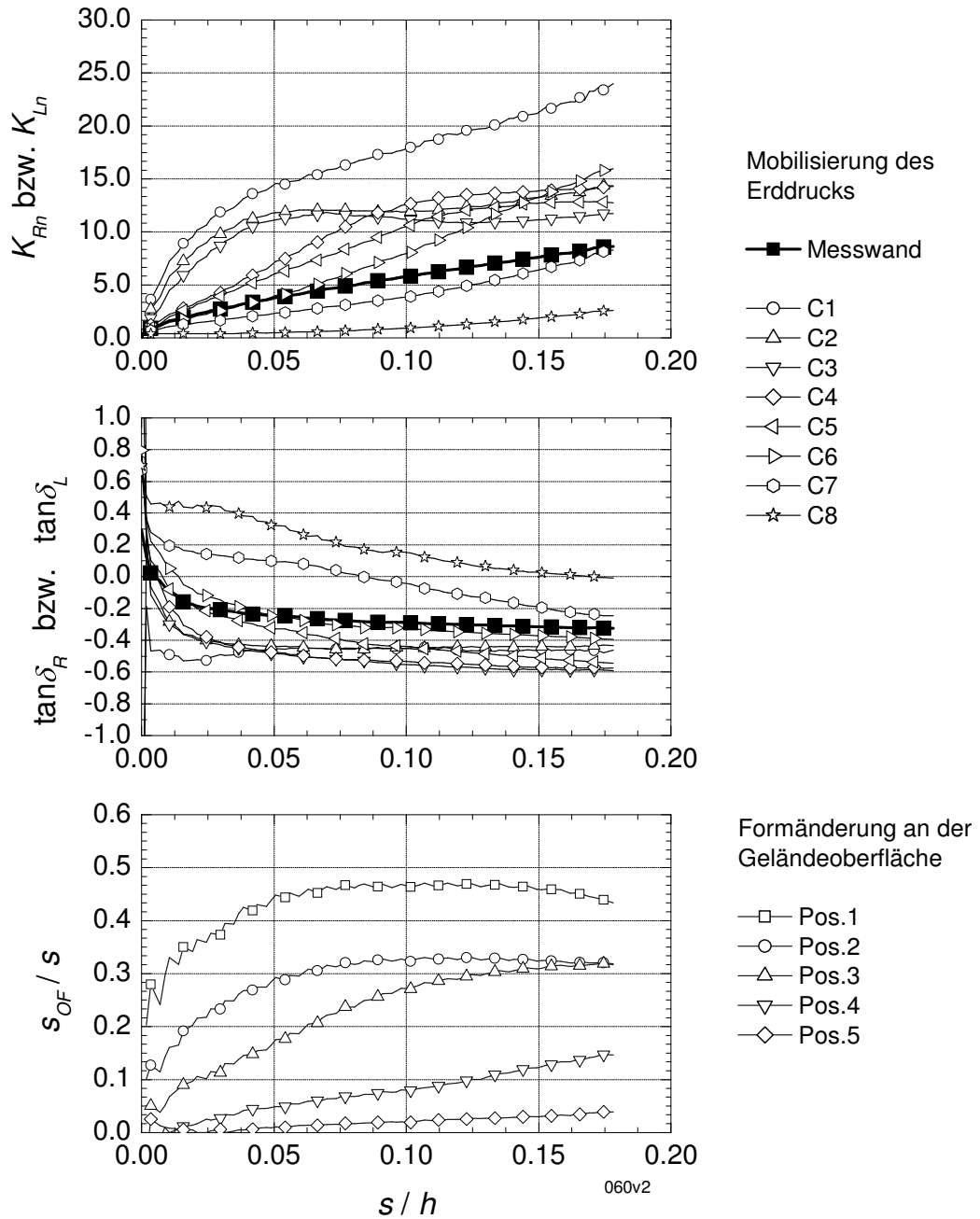


Bild C.72: Versuch 060 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,590$; $I_D = 0,55$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

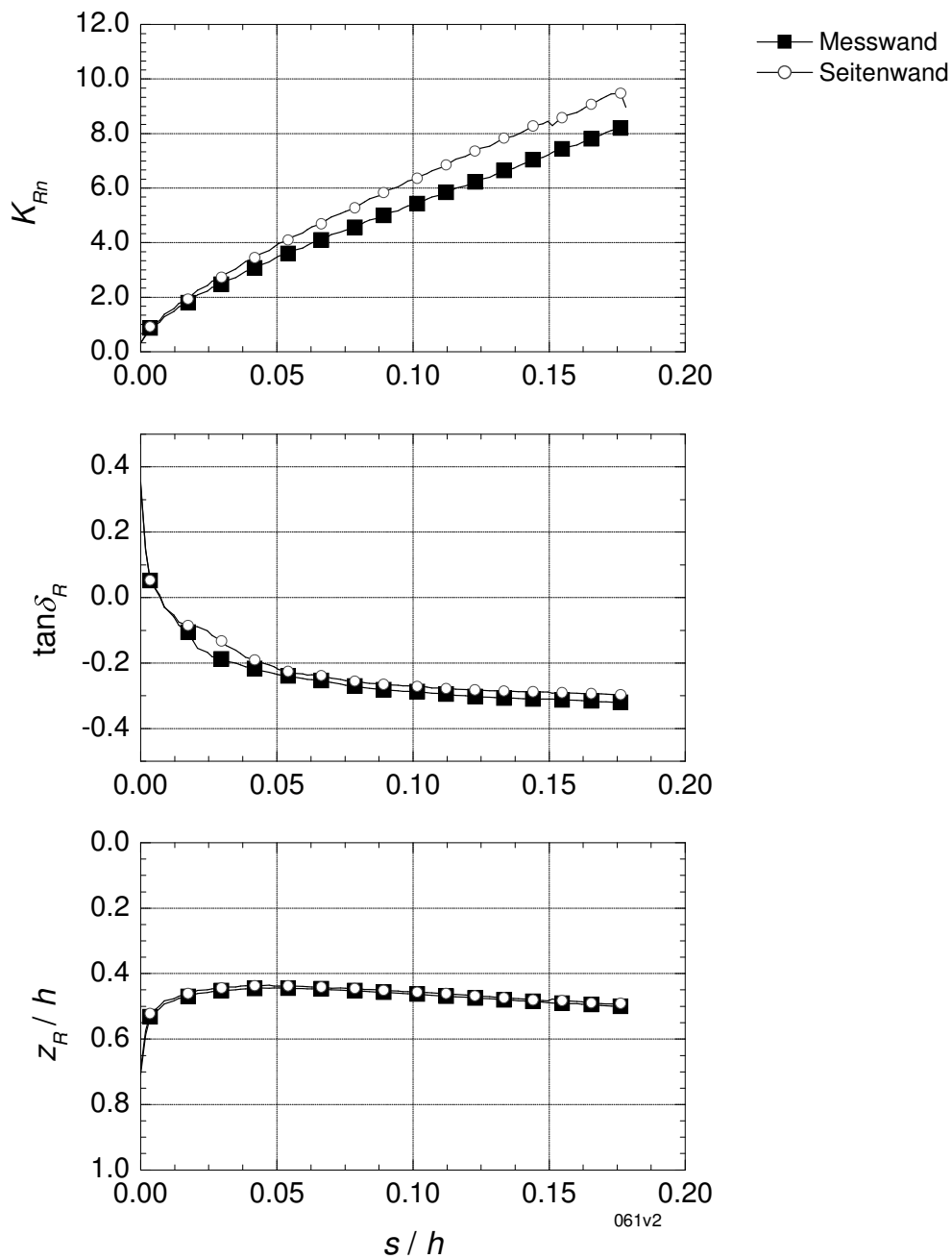


Bild C.73: Versuch 061 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,600$; $I_D = 0,51$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

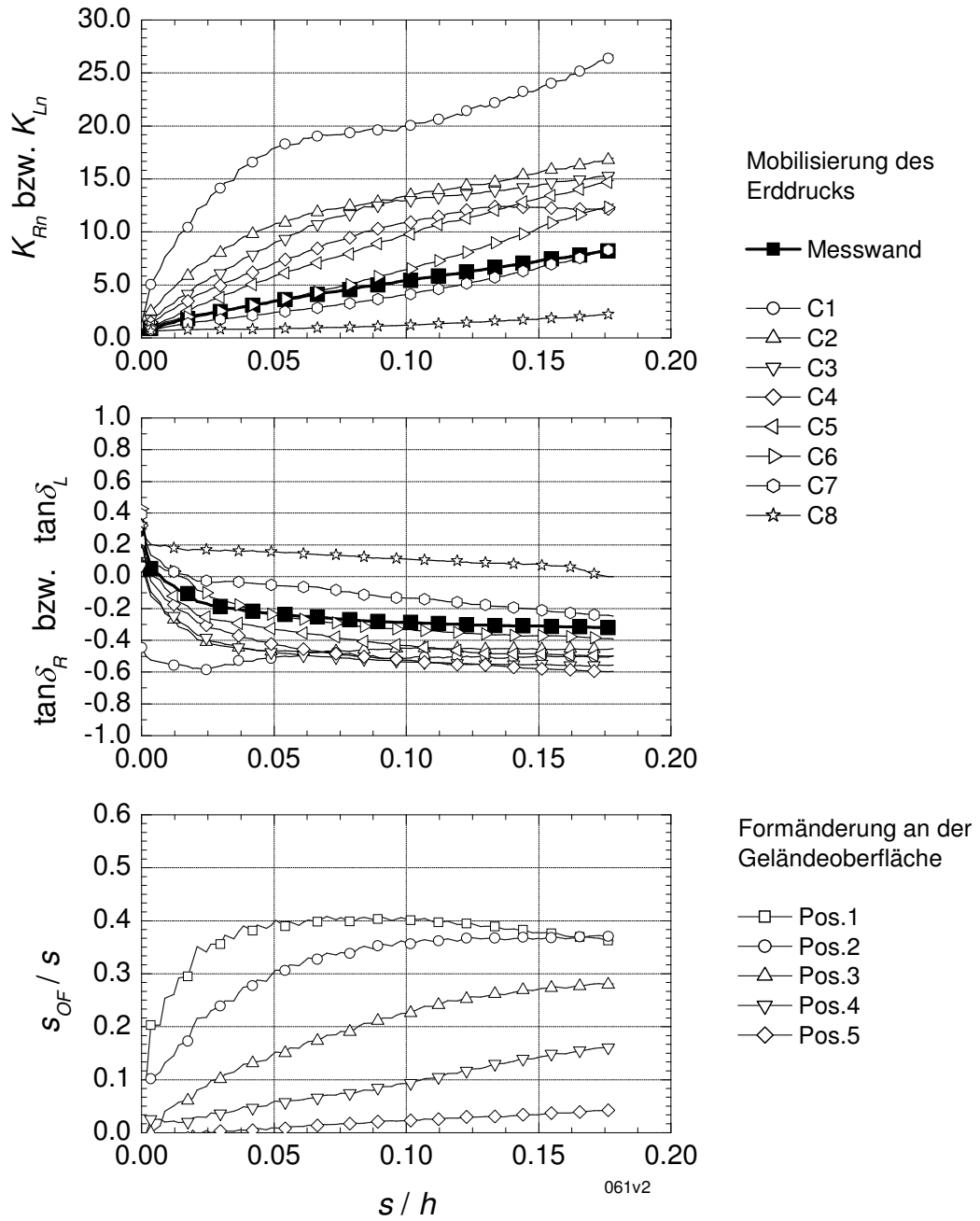


Bild C.74: Versuch 061 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,600$; $I_D = 0,51$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

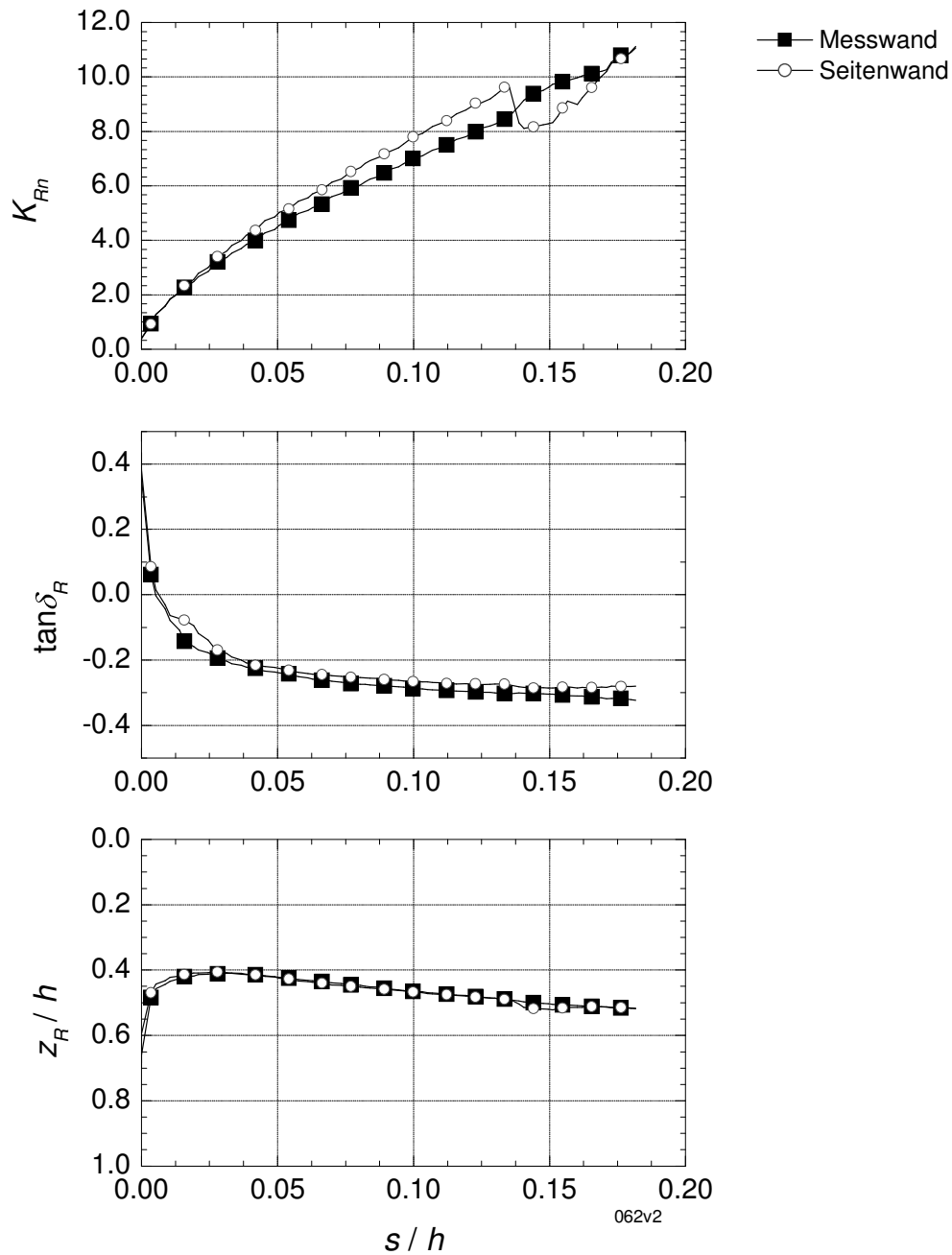


Bild C.75: Versuch 062 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,575$; $I_D = 0,60$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

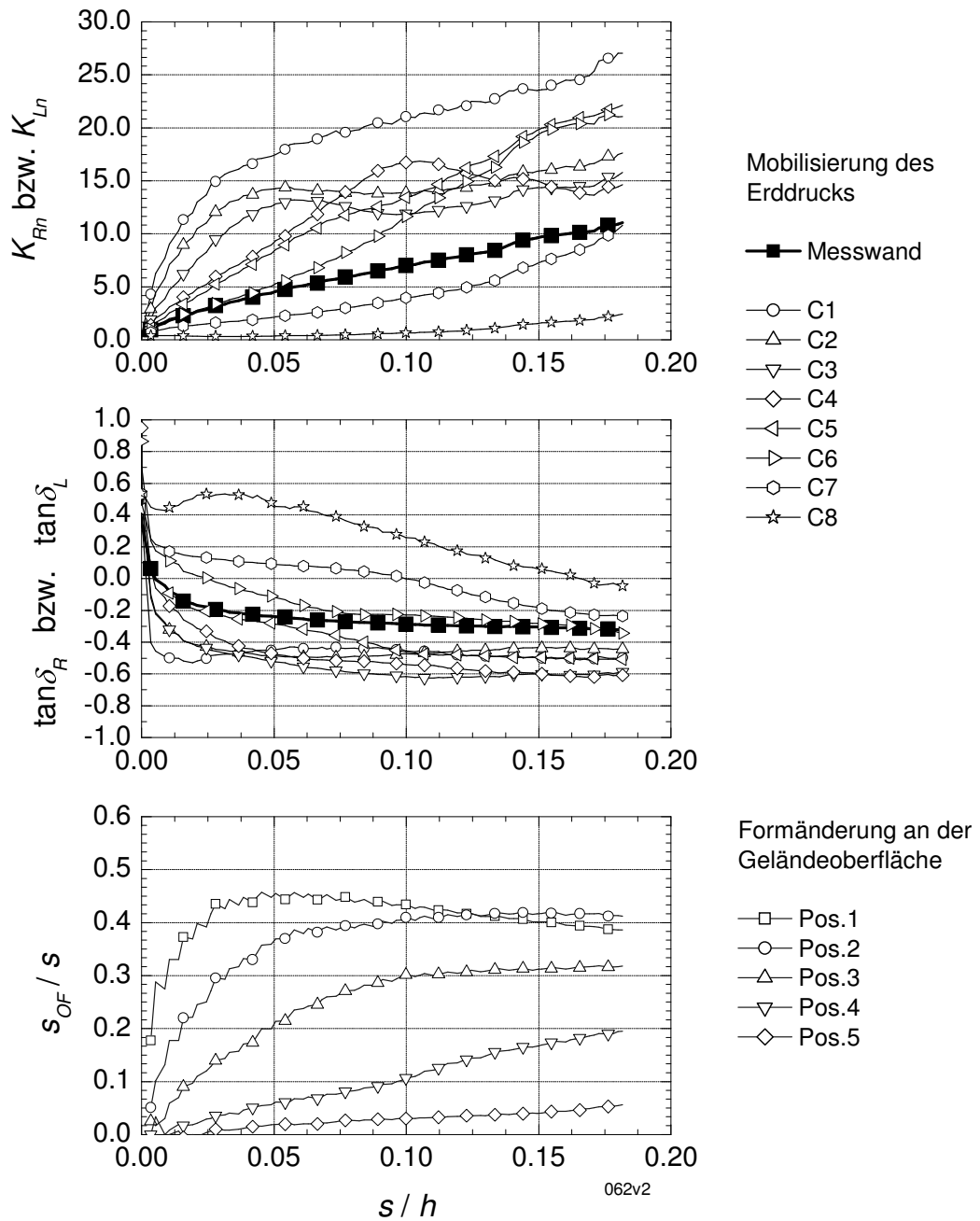


Bild C.76: Versuch 062 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,575$; $I_D = 0,60$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

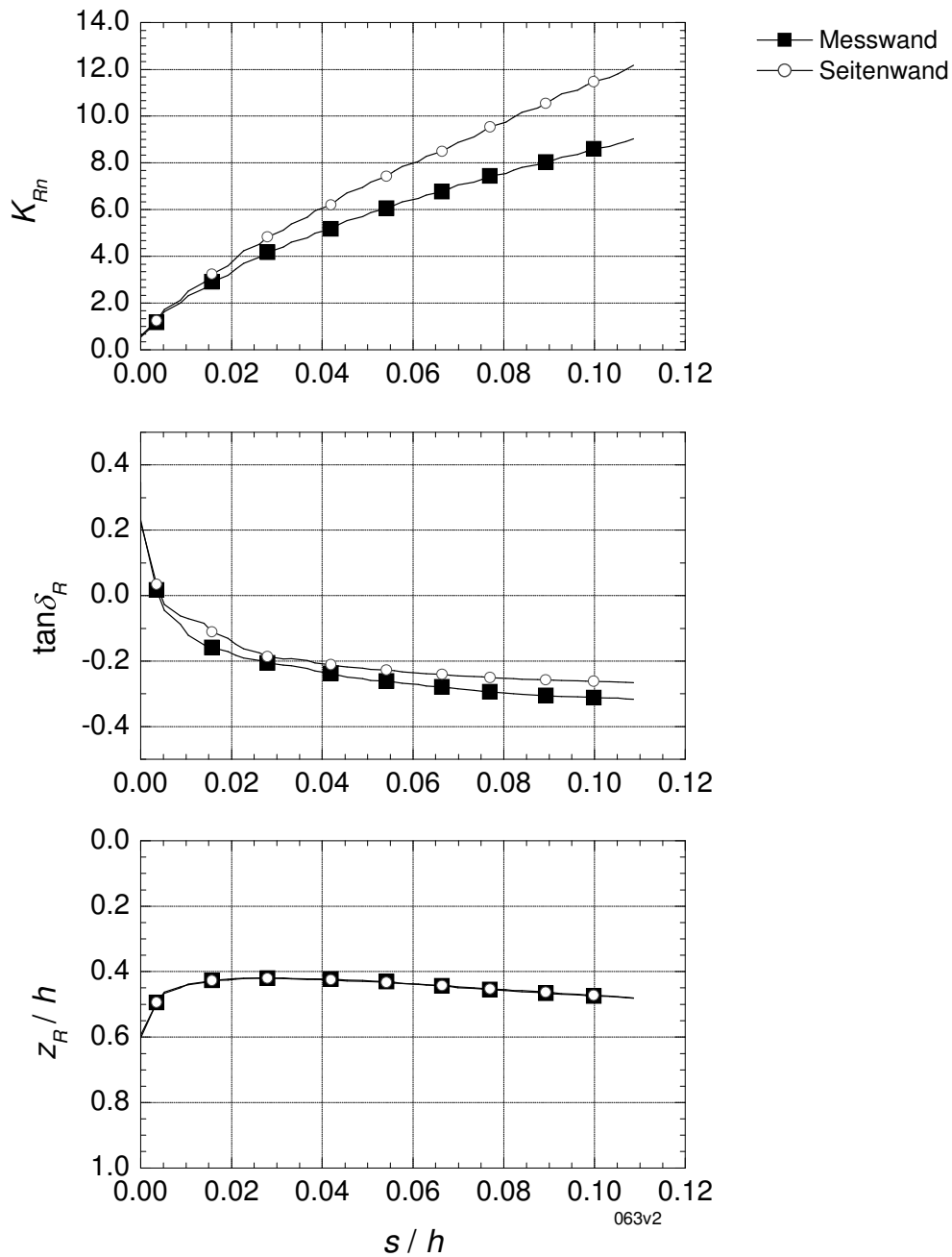


Bild C.77: Versuch 063 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,510$; $I_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

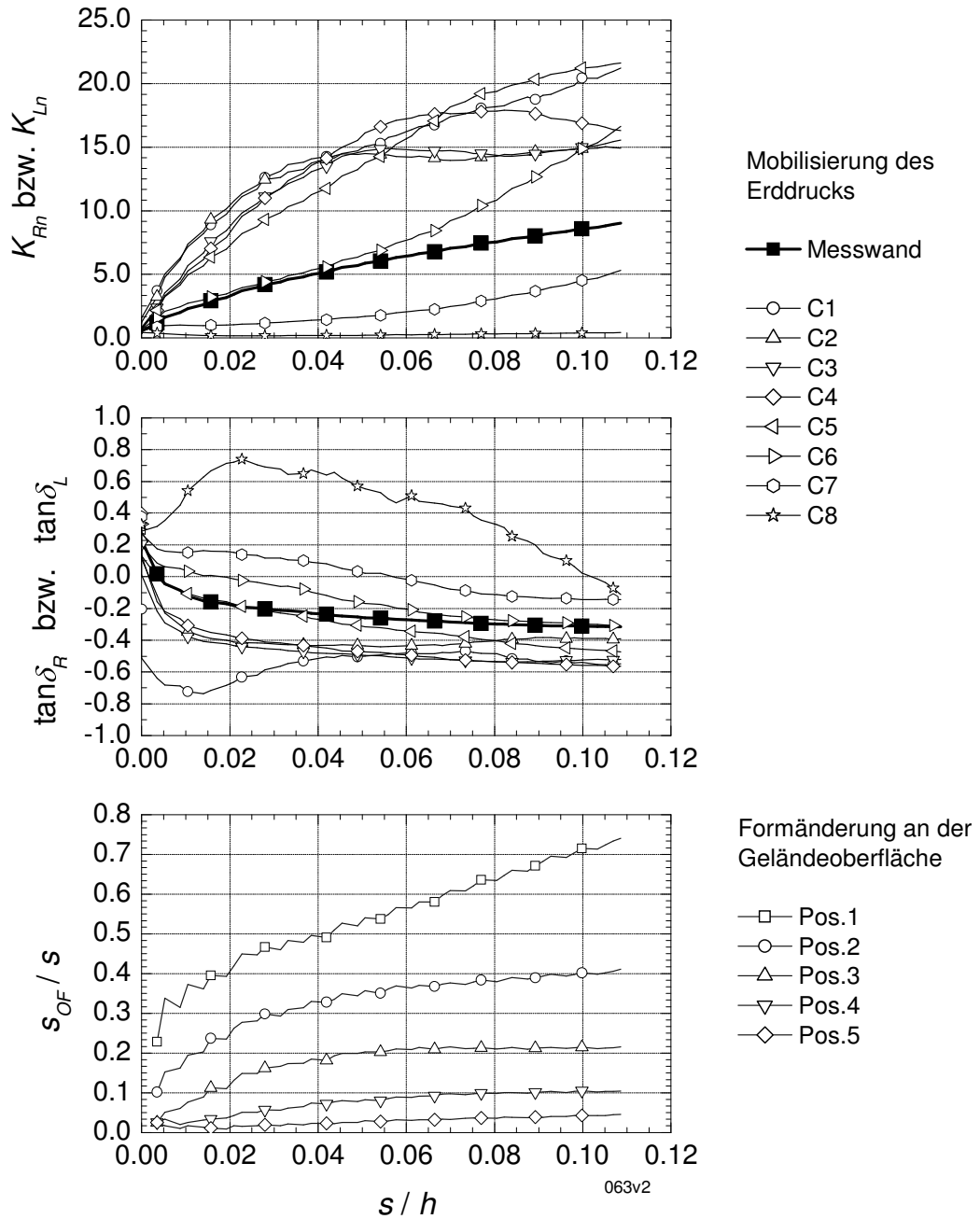


Bild C.78: Versuch 063 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,510$; $I_D = 0,82$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

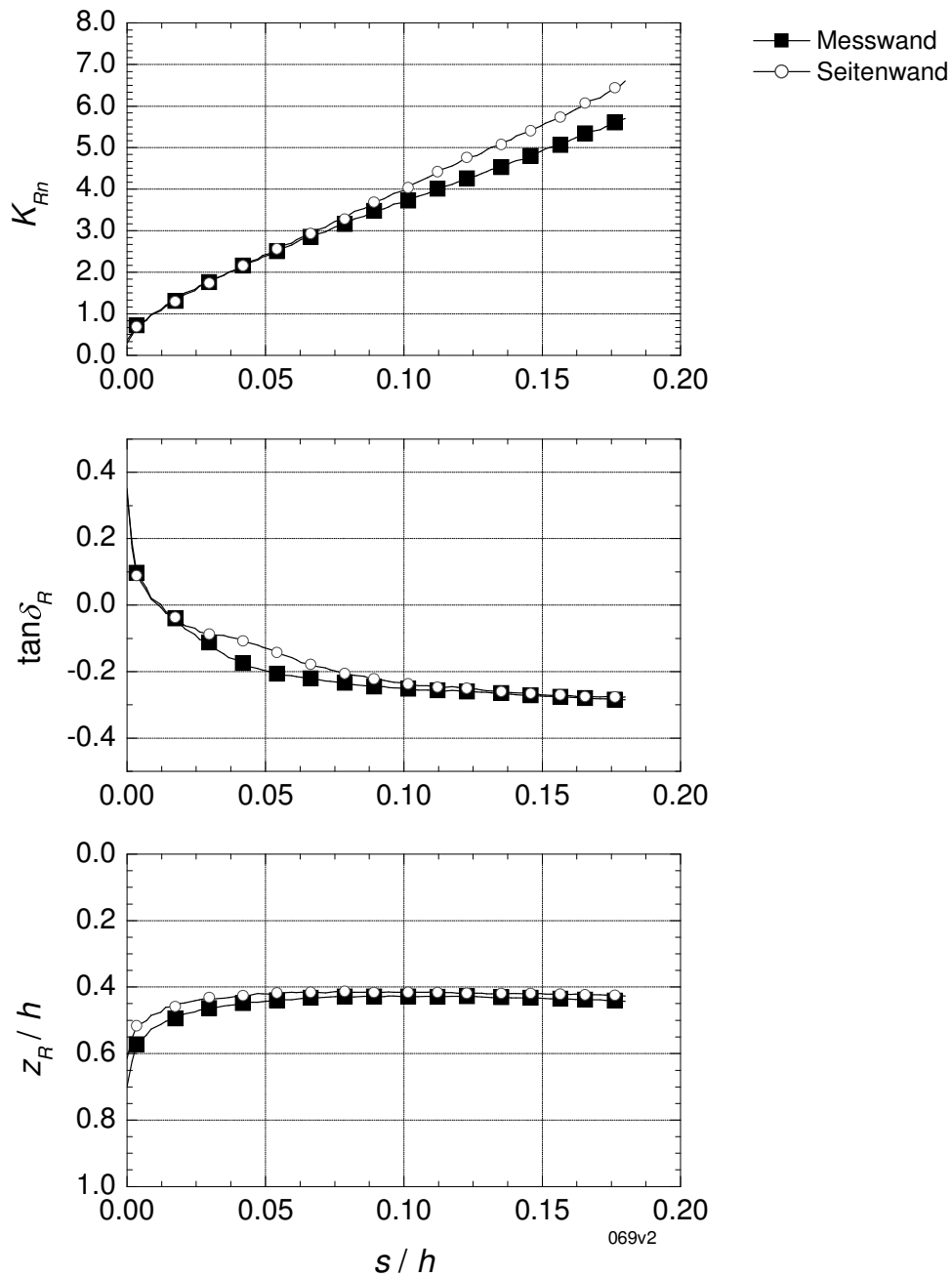


Bild C.79: Versuch 069 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,664$; $I_D = 0,29$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruckkraft

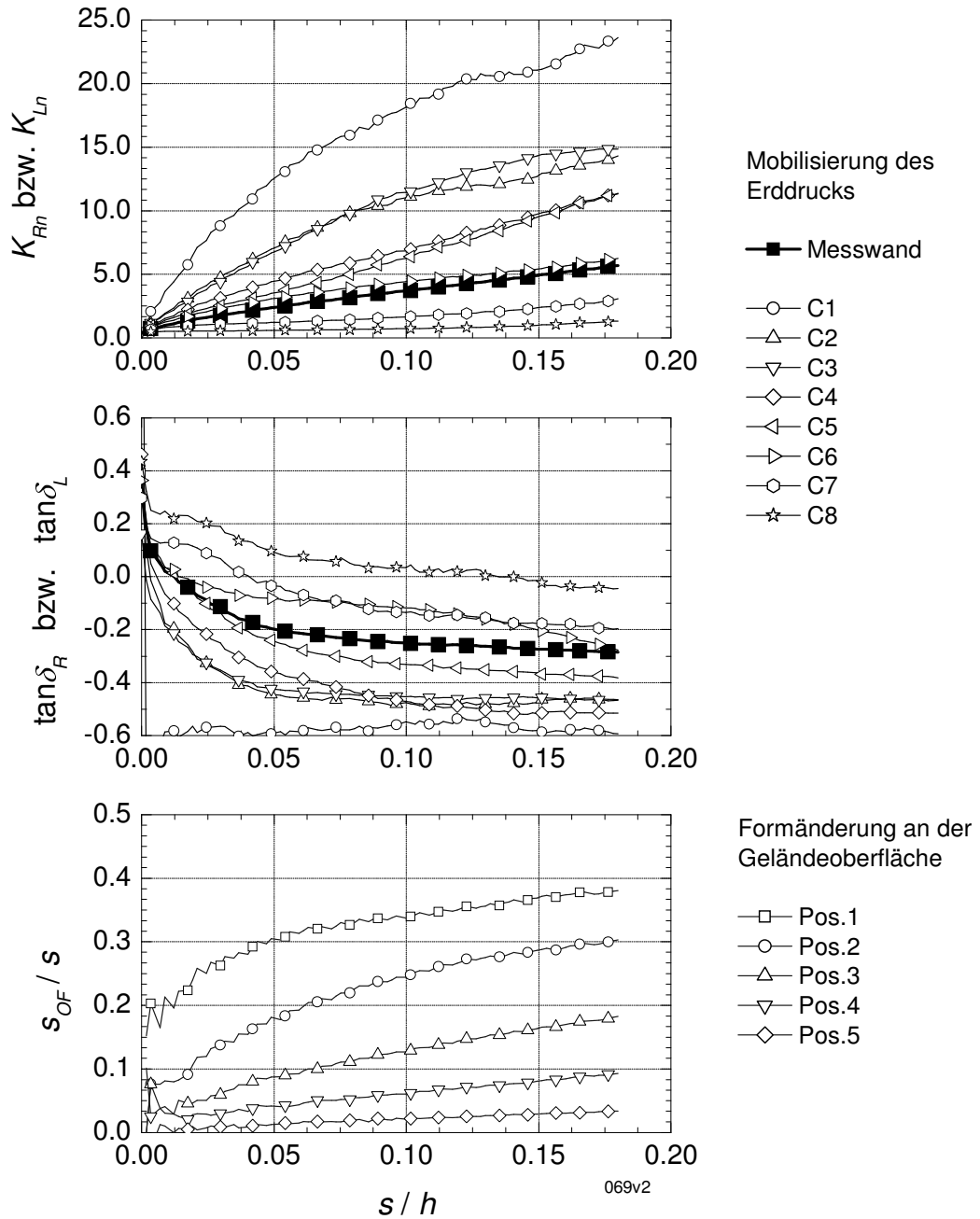


Bild C.80: Versuch 069 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,664$; $I_D = 0,29$) – Wandoberfläche Aluminium – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

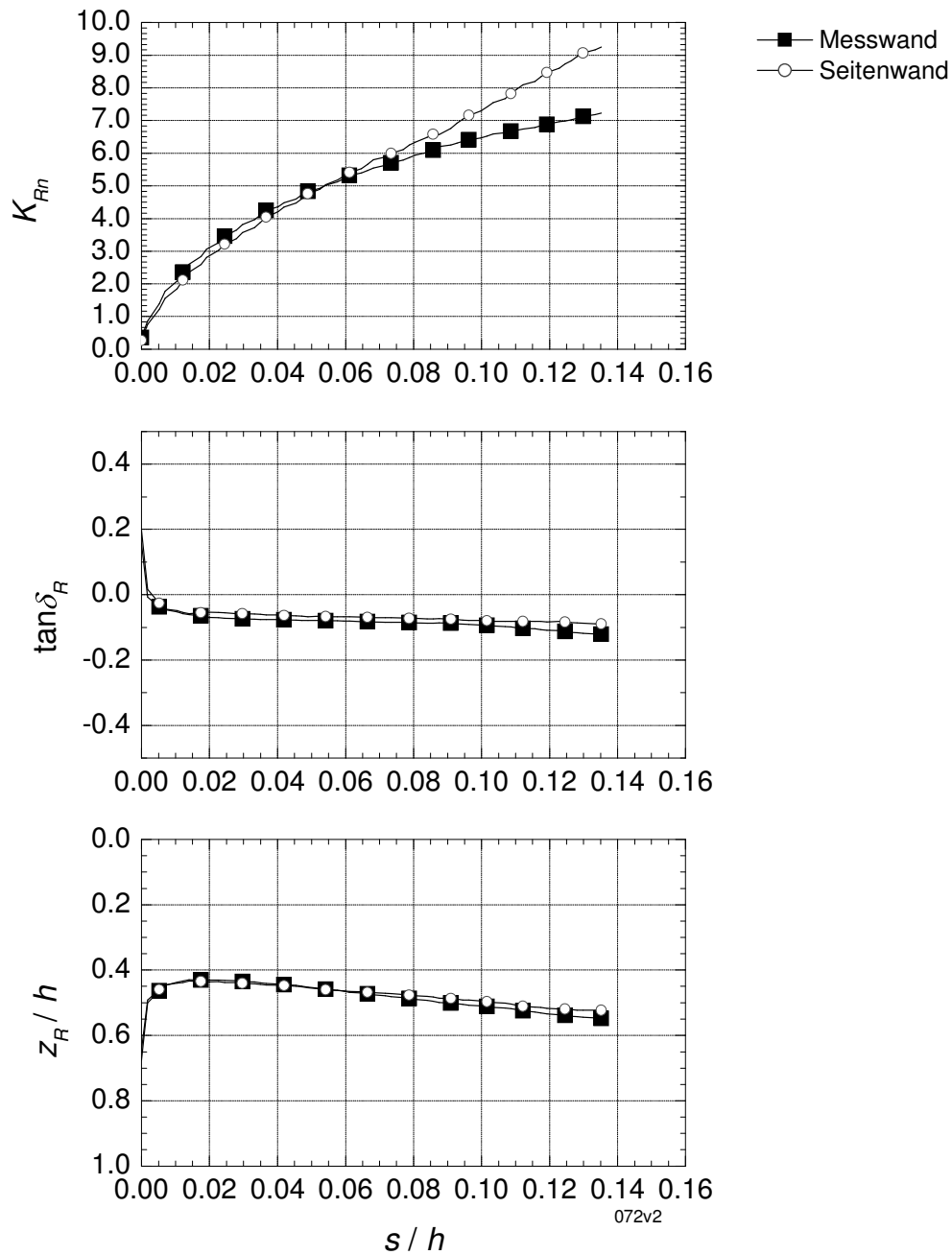


Bild C.81: Versuch 072 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,507$; $I_D = 0,83$) – Wandoberfläche Folie 2 – Mobilisierung Erddruckkraft

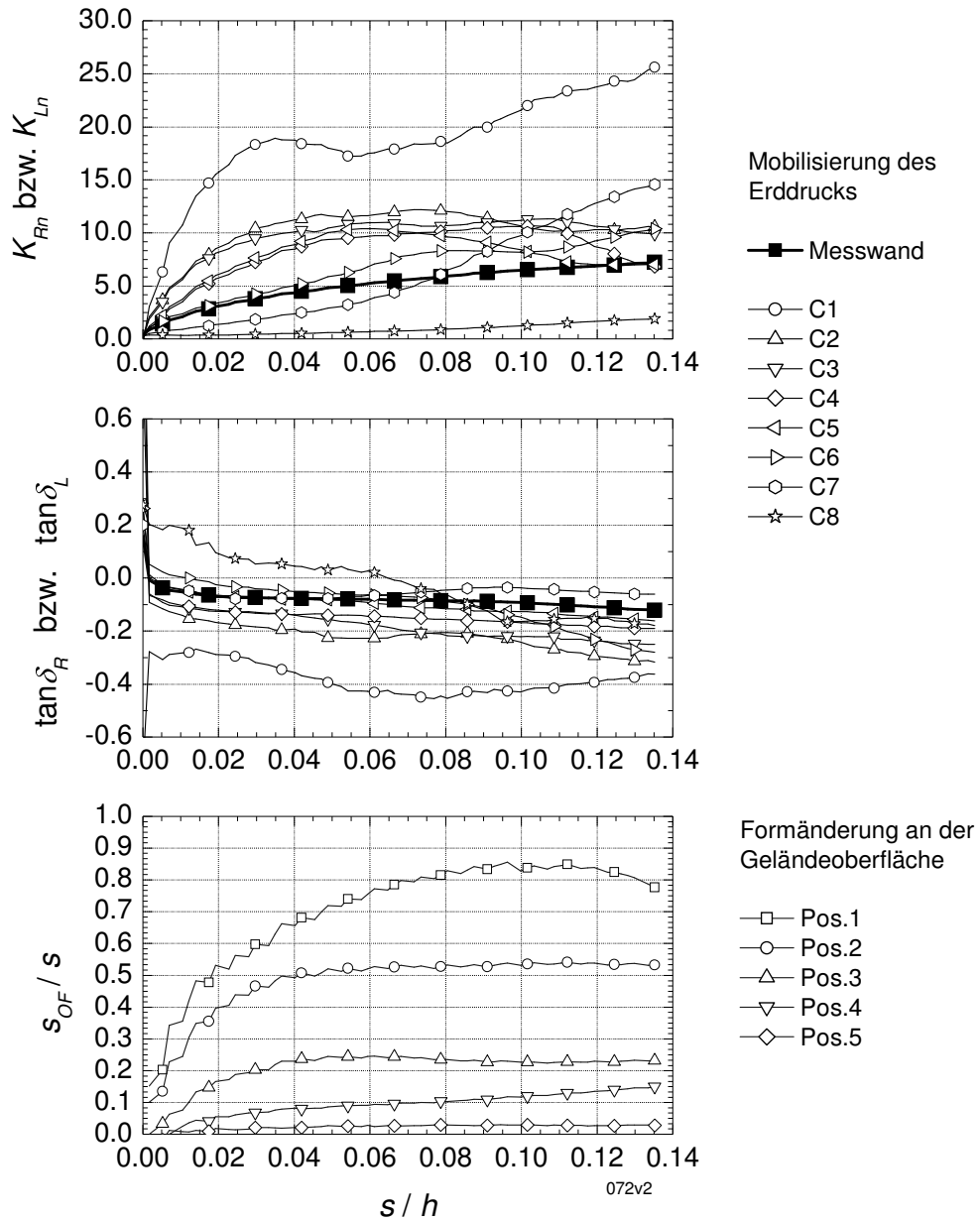


Bild C.82: Versuch 072 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,507$; $I_D = 0,83$) – Wandoberfläche Folie 2 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

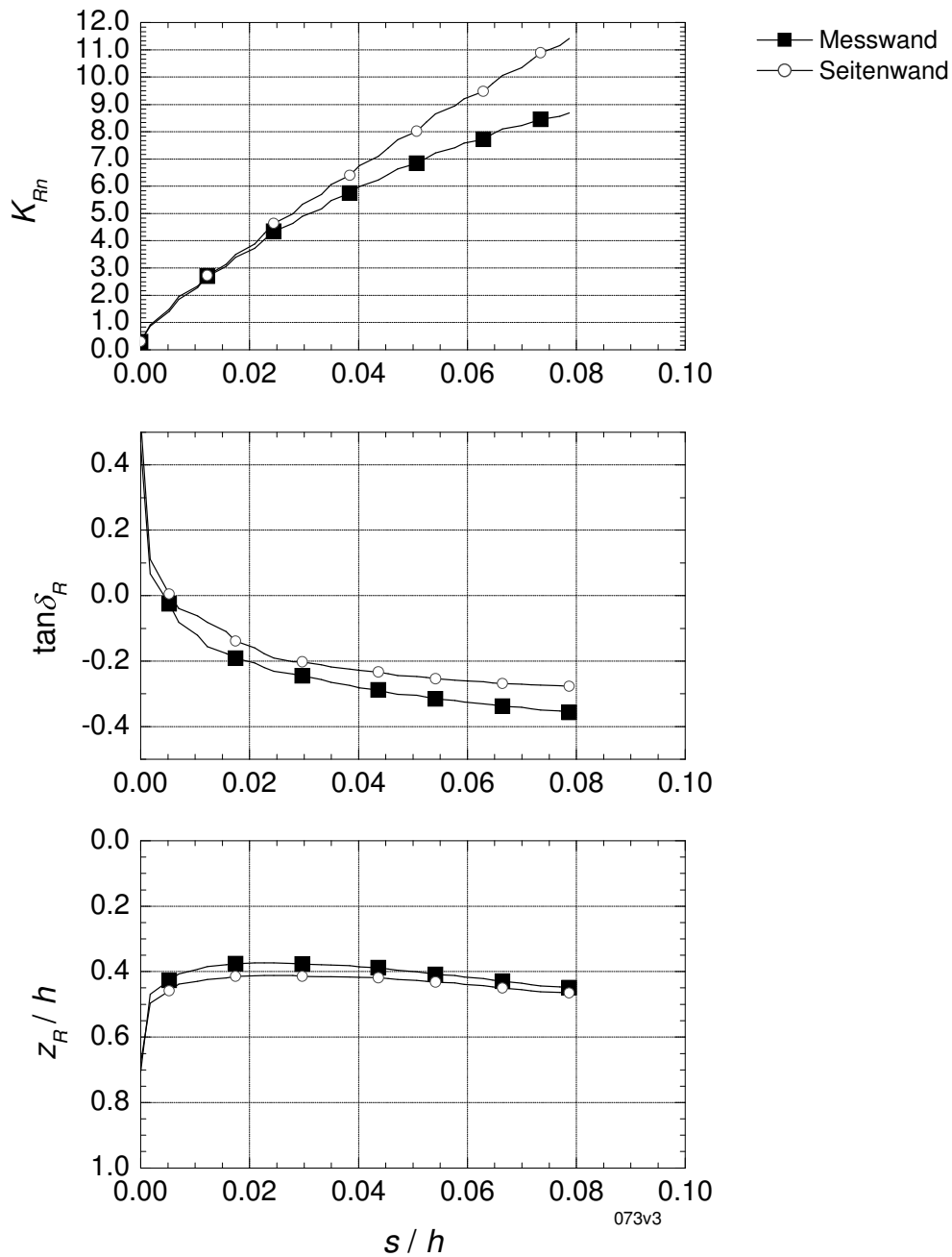


Bild C.83: Versuch 073 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,508$; $I_D = 0,83$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruckkraft

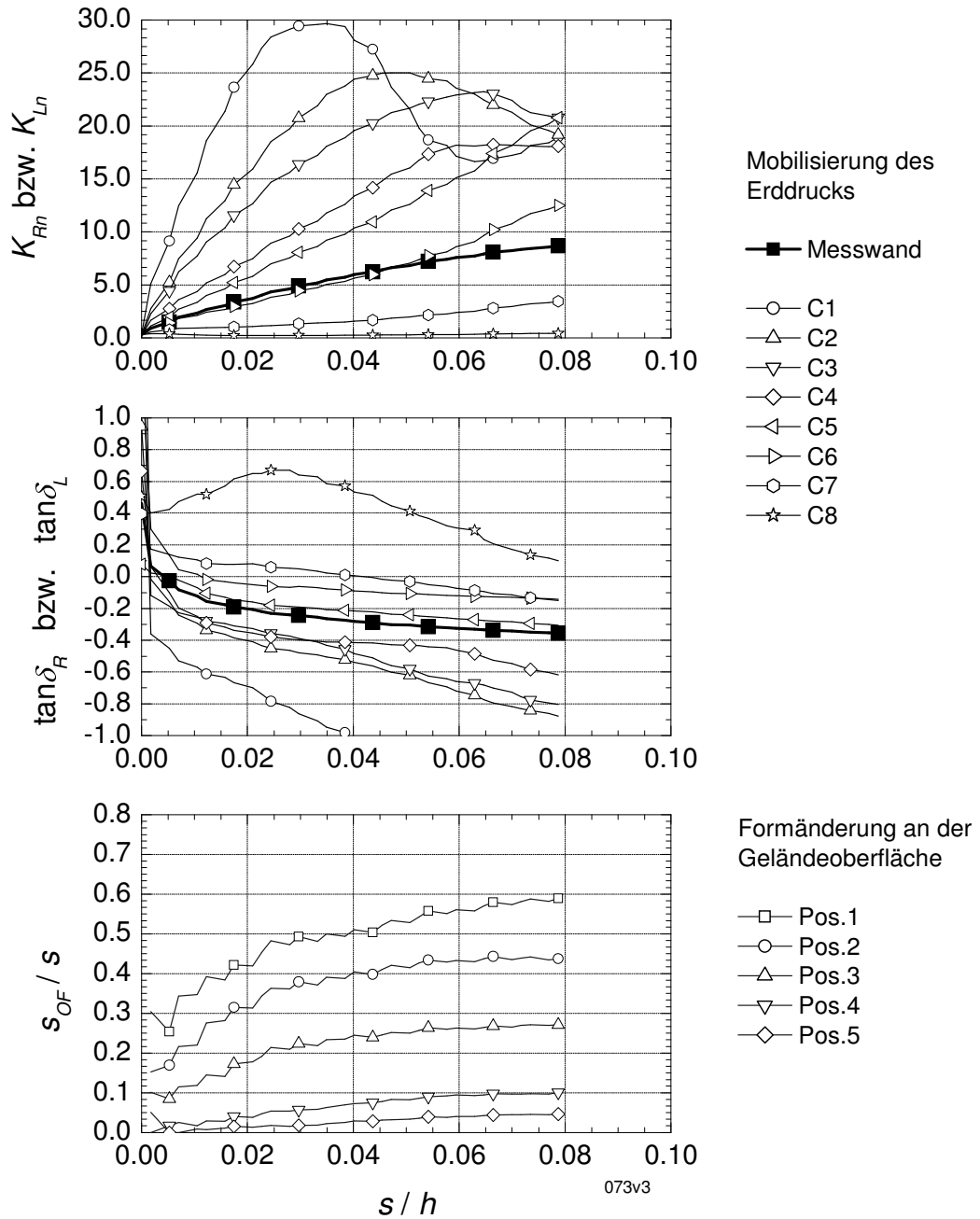


Bild C.84: Versuch 073 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,508$; $I_D = 0,83$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

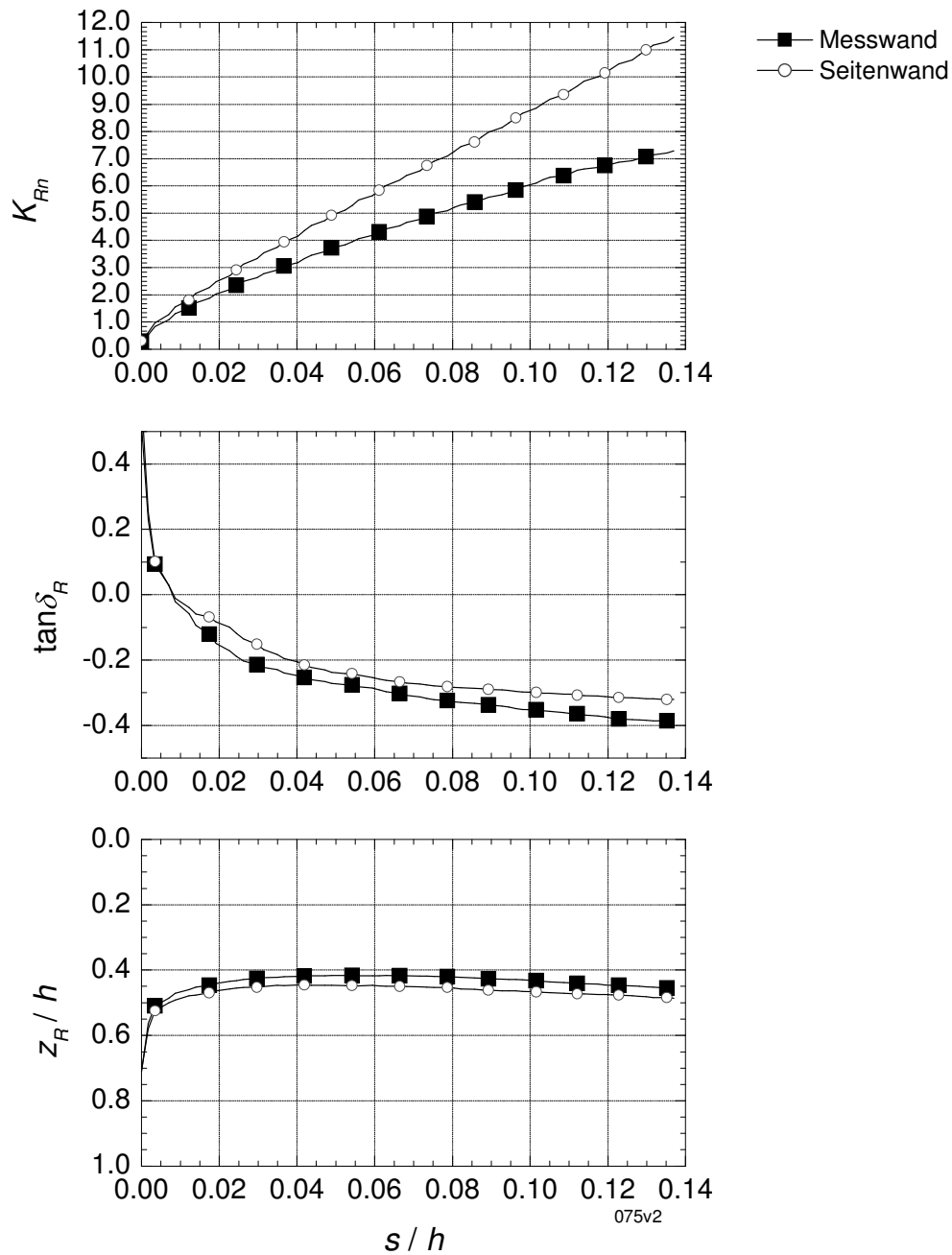


Bild C.85: Versuch 075 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,588$; $I_D = 0,55$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruckkraft

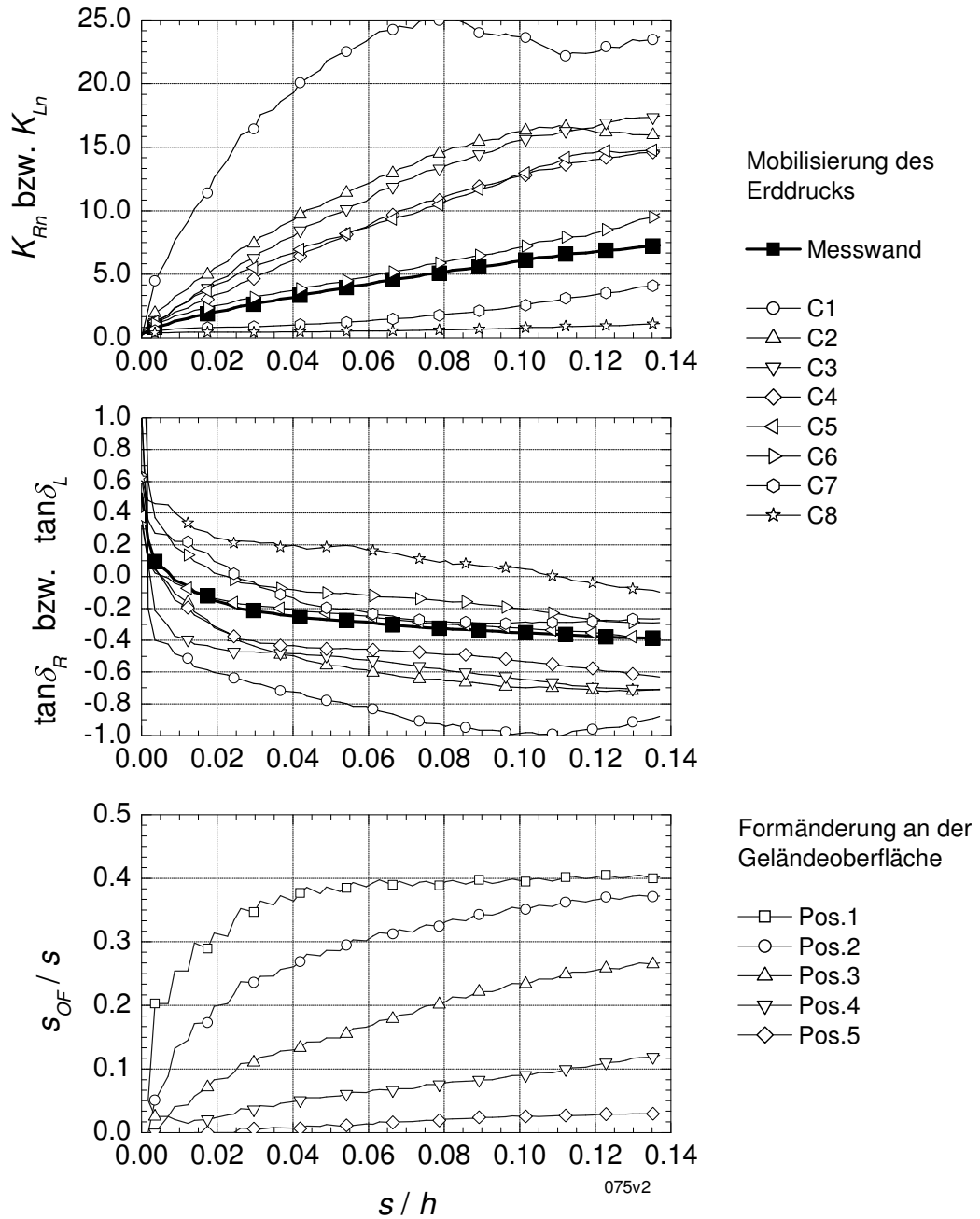


Bild C.86: Versuch 075 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,588$; $I_D = 0,55$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

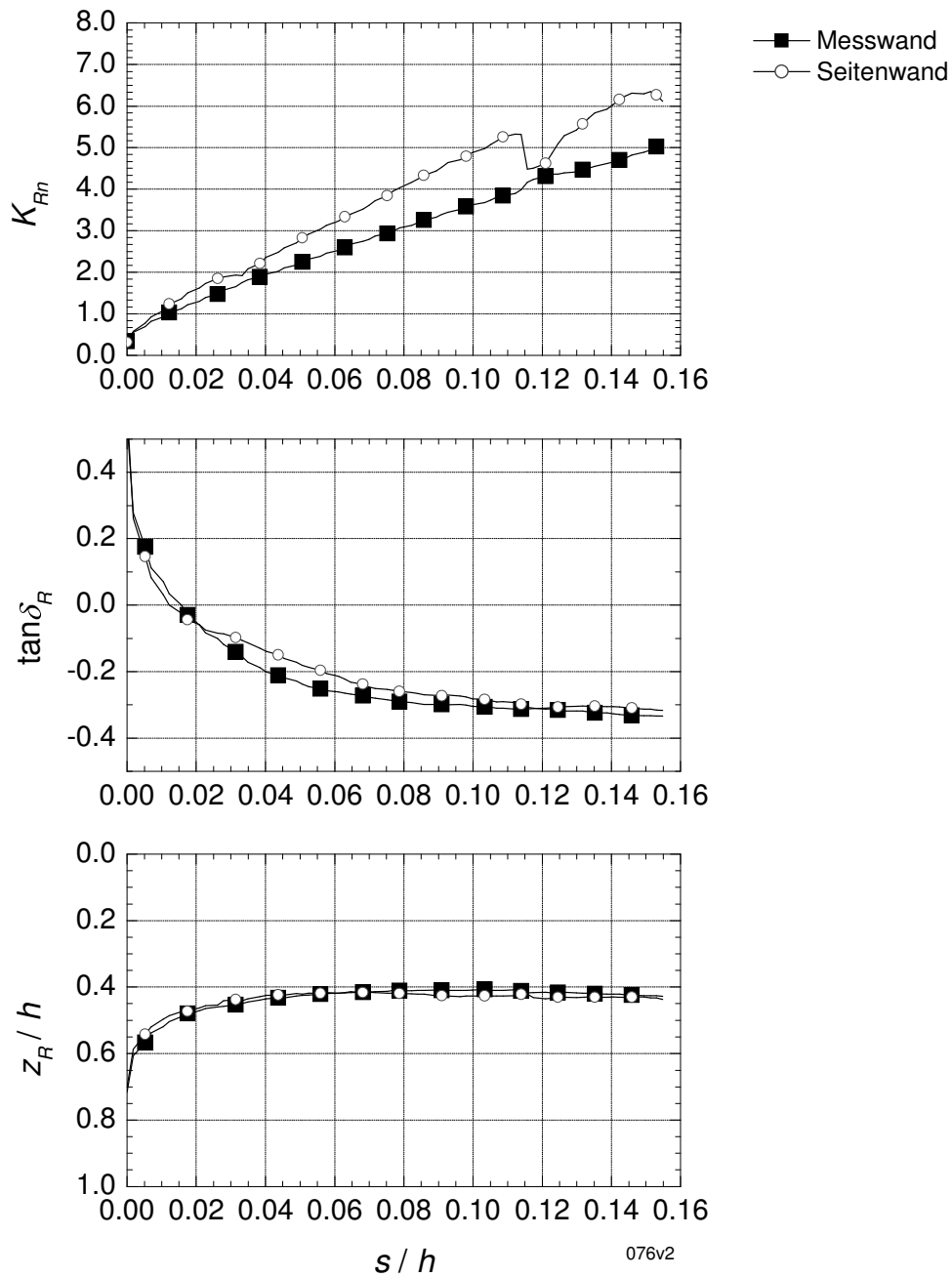


Bild C.87: Versuch 076 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,678$; $I_D = 0,24$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruckkraft

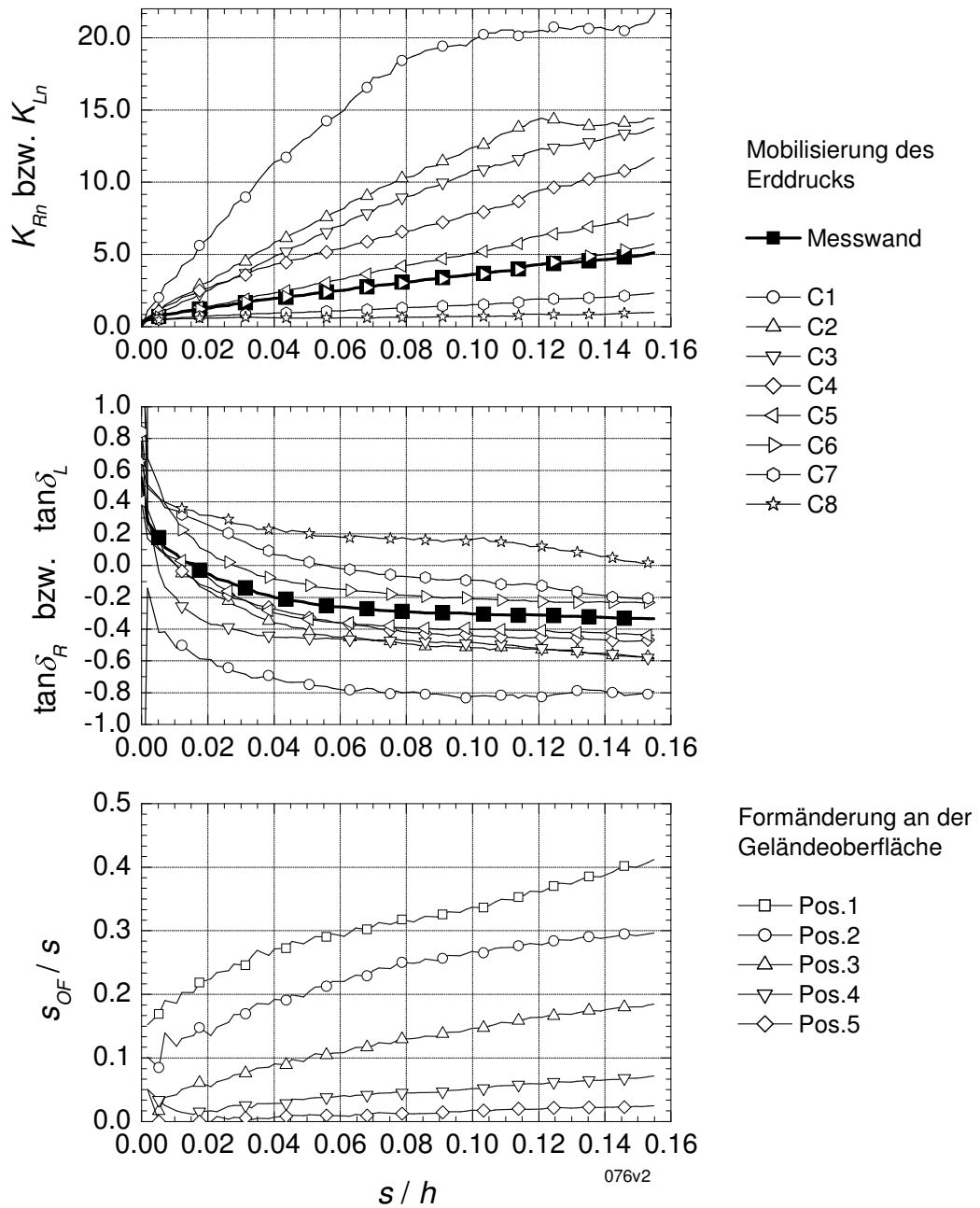


Bild C.88: Versuch 076 – Fußpunktdrehung ($e_0 = 0,678$; $I_D = 0,24$) – Wandoberfläche Schleifpapier S40 – Mobilisierung Erddruck und Oberflächenverformung

D Auswertung 1g-Versuche

D.1 Parallelverschiebung

Tabelle D.1: Parallelverschiebung — passiver Grenzzustand (Versuche mit Maximalwert der Erddruckkraft)

Versuch	WOF	l_D	s_p / h	K_{Rnp}	$\tan \delta_{Rp}$	z_{Rp} / h
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
056	Alu	0.55	0.084	8.53	-0.216	0.65
038	Alu	0.59	0.054	7.92	-0.288	0.66
057	Alu	0.62	0.061	8.92	-0.213	0.64
054	Alu	0.63	0.086	8.45	-0.251	0.68
067	Alu	0.81	0.044	11.12	-0.216	0.63
044	Alu	0.81	0.038	10.26	-0.319	0.63
065	Alu	0.82	0.049	10.87	-0.206	0.64
064	Alu	0.82	0.053	11.80	-0.191	0.65
066	Alu	0.82	0.037	10.31	-0.169	0.66
071	Folie2	0.83	0.044	9.38	-0.159	0.69
046	S40	0.76	0.043	9.81	-0.215	0.62
074	S40	0.81	0.042	11.66	-0.226	0.63

Tabelle D.2: Parallelverschiebung — Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen der Erddruckkraft
(Versuche mit Maximalwert der Erddruckkraft)

Versuch	WOF	I_D	T_1	T_2	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
056	Alu	0.55	0.0560	0.0055	1.19	0.77
038	Alu	0.59	0.0844	0.0024	1.74	0.76
057	Alu	0.62	0.0722	0.0025	1.71	0.77
054	Alu	0.63	0.0800	0.0036	1.57	0.71
067	Alu	0.81	0.0575	0.0015	1.49	0.71
044	Alu	0.81	0.0591	0.0015	1.61	0.78
065	Alu	0.82	0.0539	0.0020	1.33	0.72
064	Alu	0.82	0.0542	0.0017	1.49	0.72
066	Alu	0.82	0.0601	0.0014	1.66	0.77
071	Folie2	0.83	0.0742	0.0015	1.98	0.78
046	S40	0.76	0.0537	0.0022	1.38	0.80
074	S40	0.81	0.0470	0.0017	1.32	0.75

Tabelle D.3: Parallelverschiebung — Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen der Erddruckkraft
(Versuche ohne Maximalwert der Kraft)

Versuch	WOF	I_D	T_1	T_2	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
049	Alu	0.19	0.1324	0.0065	-	-
055	Alu	0.19	0.1357	0.0081	-	-
070	Alu	0.26	0.1277	0.0067	-	-
053	Alu	0.35	0.1024	0.0056	-	-
052	Alu	0.43	0.0925	0.0051	-	-
050	Alu	0.45	0.1033	0.0045	-	-
051	Alu	0.53	0.0910	0.0036	-	-

Grenzverschiebung und Grenzwert bei Versuchen mit Maximalwert

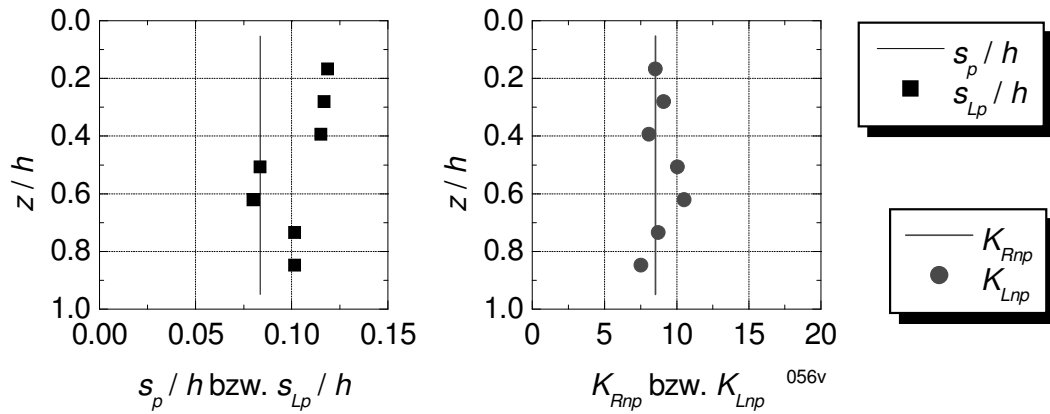


Bild D.1: Versuch 056 – PV ($I_D = 0,55$) – Alu

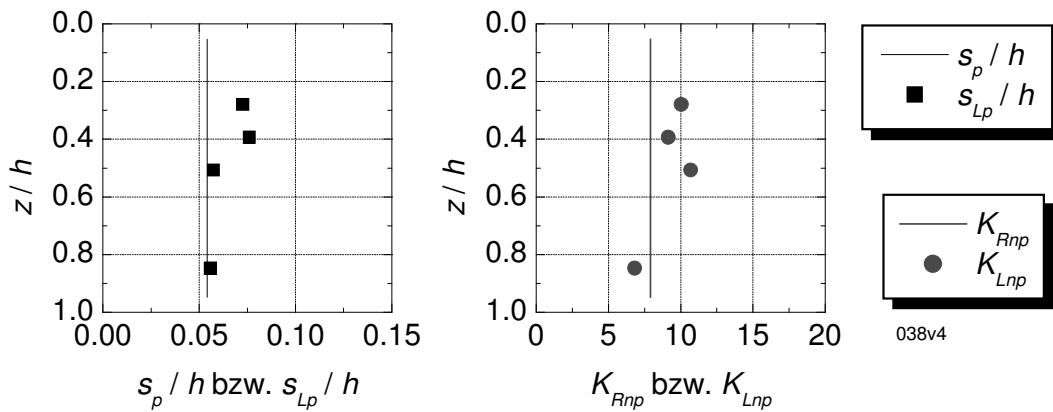


Bild D.2: Versuch 038 – PV ($I_D = 0,59$) – Alu

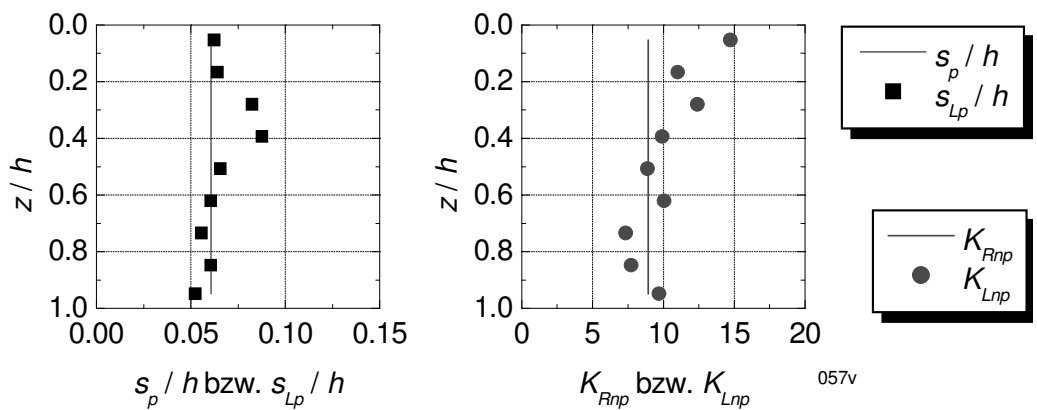


Bild D.3: Versuch 057 – PV ($I_D = 0,62$) – Alu

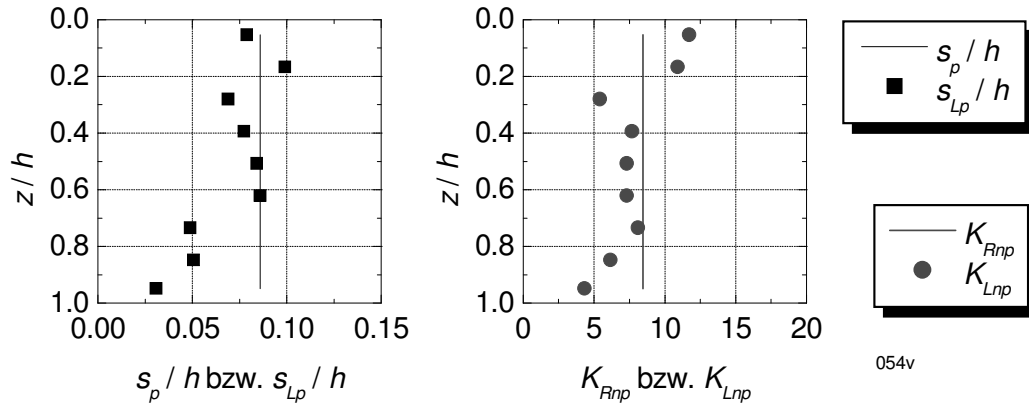


Bild D.4: Versuch 054 – PV ($I_D = 0,63$) – Alu

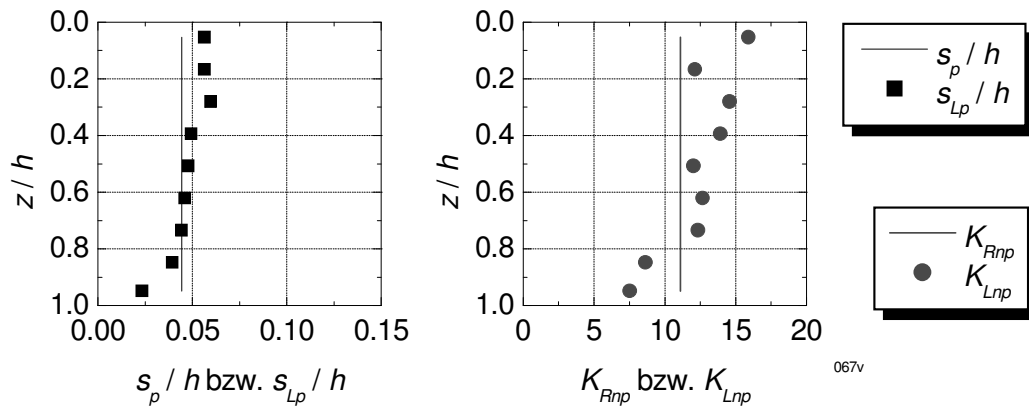


Bild D.5: Versuch 067 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

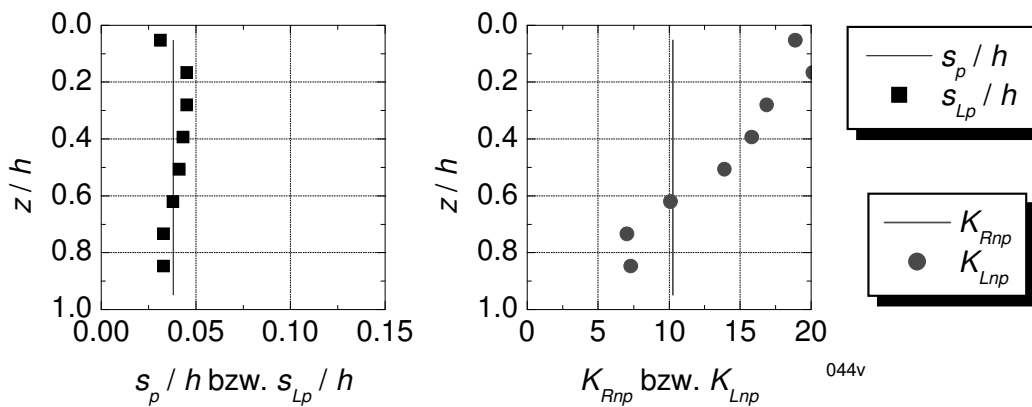


Bild D.6: Versuch 044 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

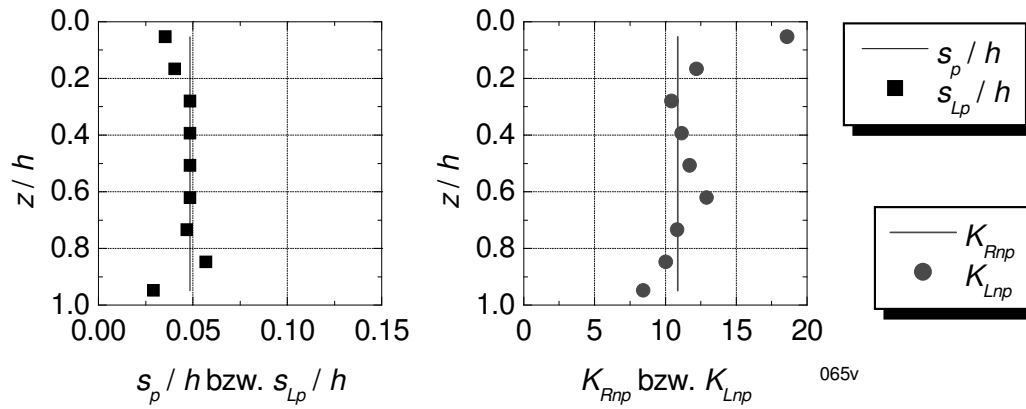


Bild D.7: Versuch 065 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

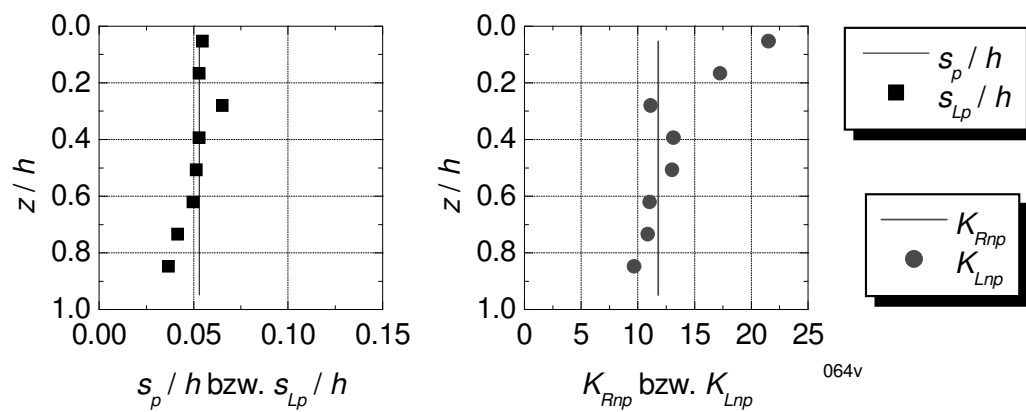


Bild D.8: Versuch 064 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

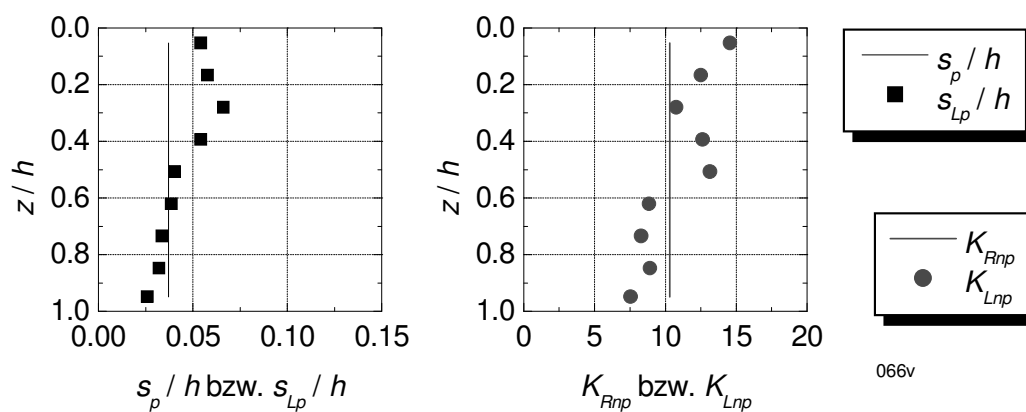


Bild D.9: Versuch 066 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

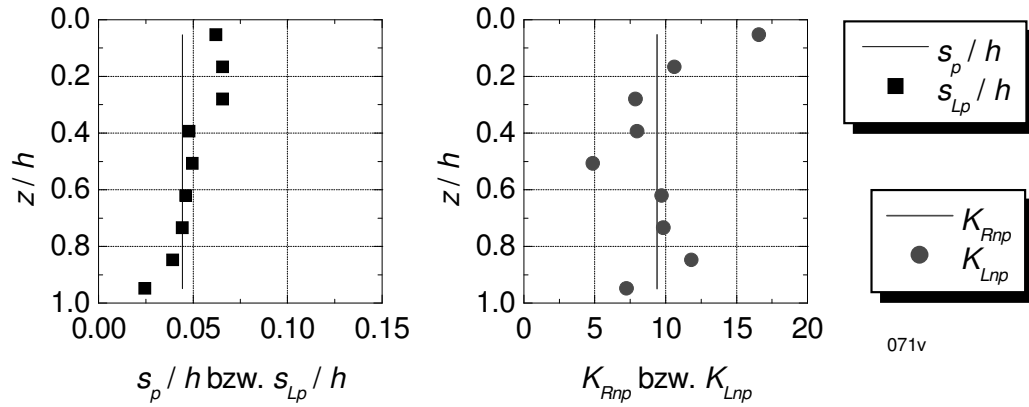


Bild D.10: Versuch 071 – PV ($I_D = 0,82$) – Folie2

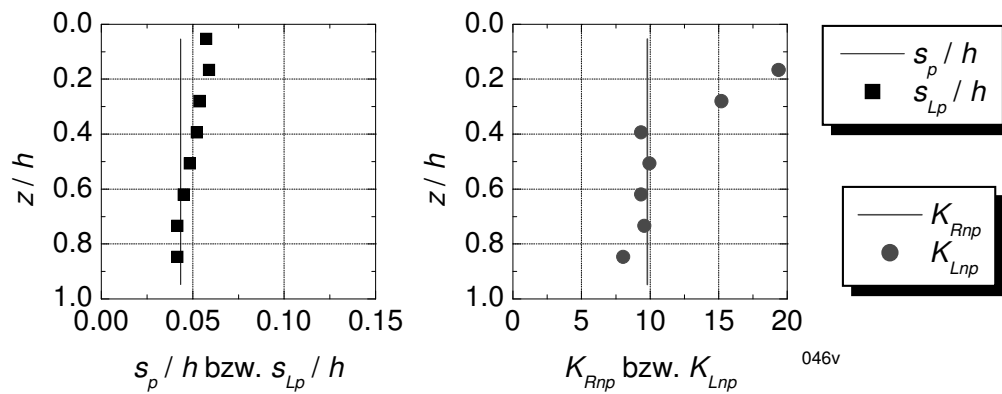


Bild D.11: Versuch 046 – PV ($I_D = 0,76$) – S40

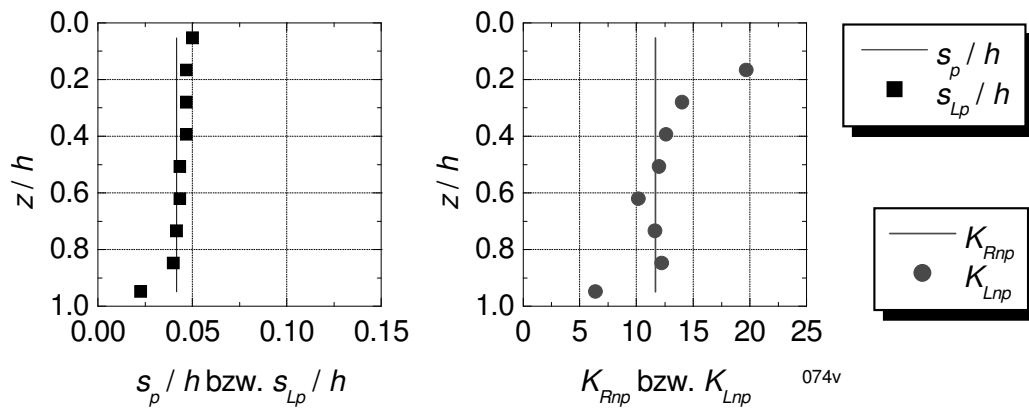


Bild D.12: Versuch 074 – PV ($I_D = 0,82$) – S40

Mobilisierung Erddruckkraft und Erddruck – Versuche mit Maximalwert der Erddruckkraft

Versuch 056 – PV ($I_D = 0,55$) – Alu

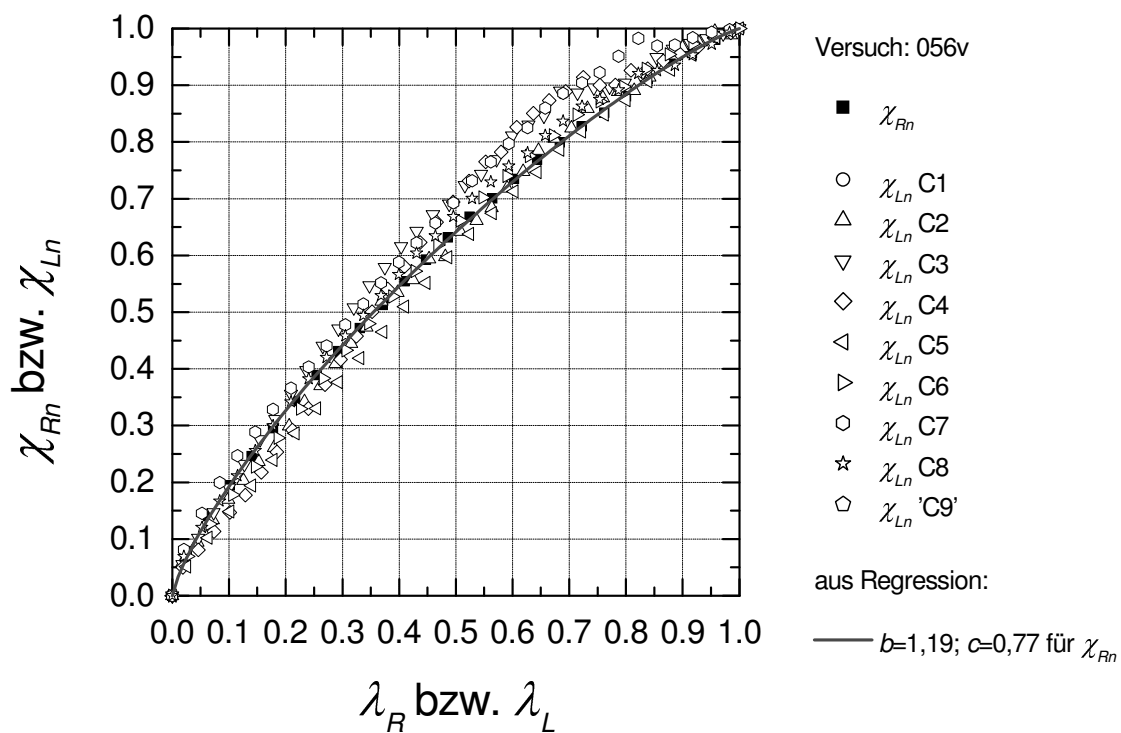


Bild D.13: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

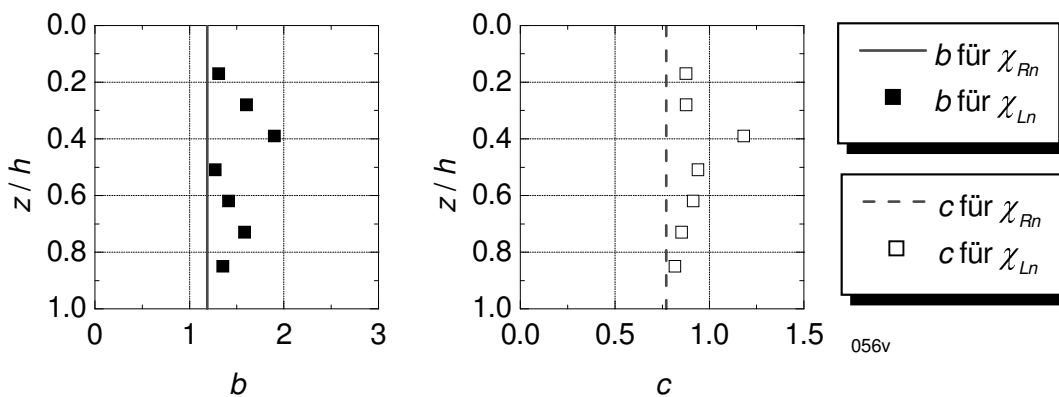


Bild D.14: Beiwerte b und c

Versuch 056 – PV ($I_D = 0,55$) – Alu

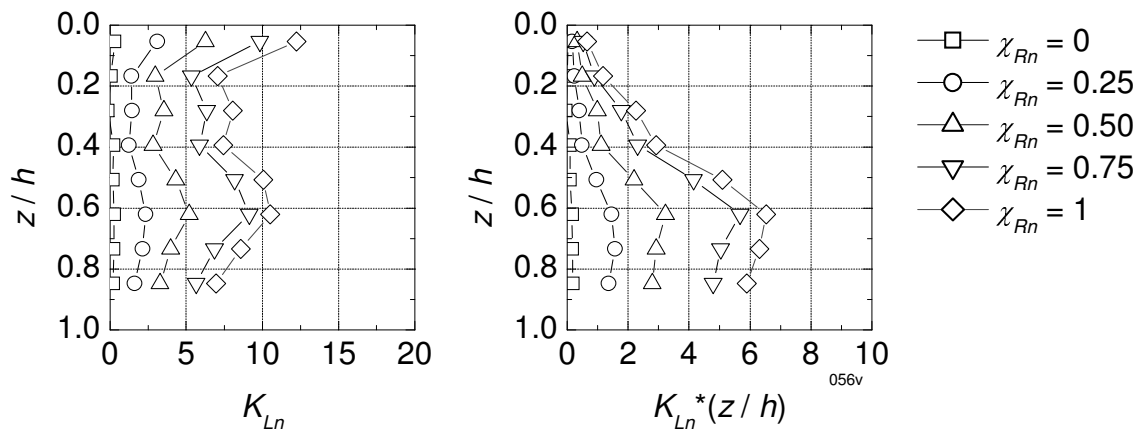


Bild D.15: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

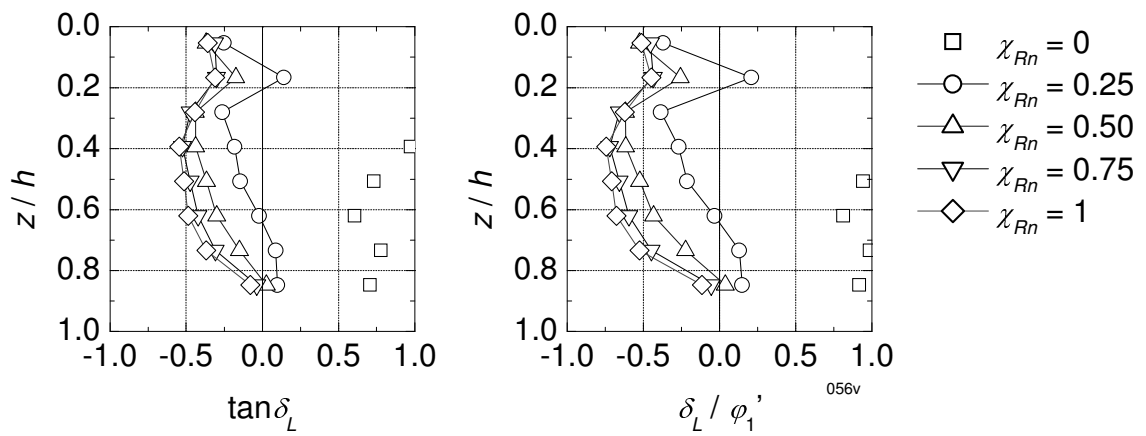


Bild D.16: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 038 – PV ($I_D = 0,59$) – Alu

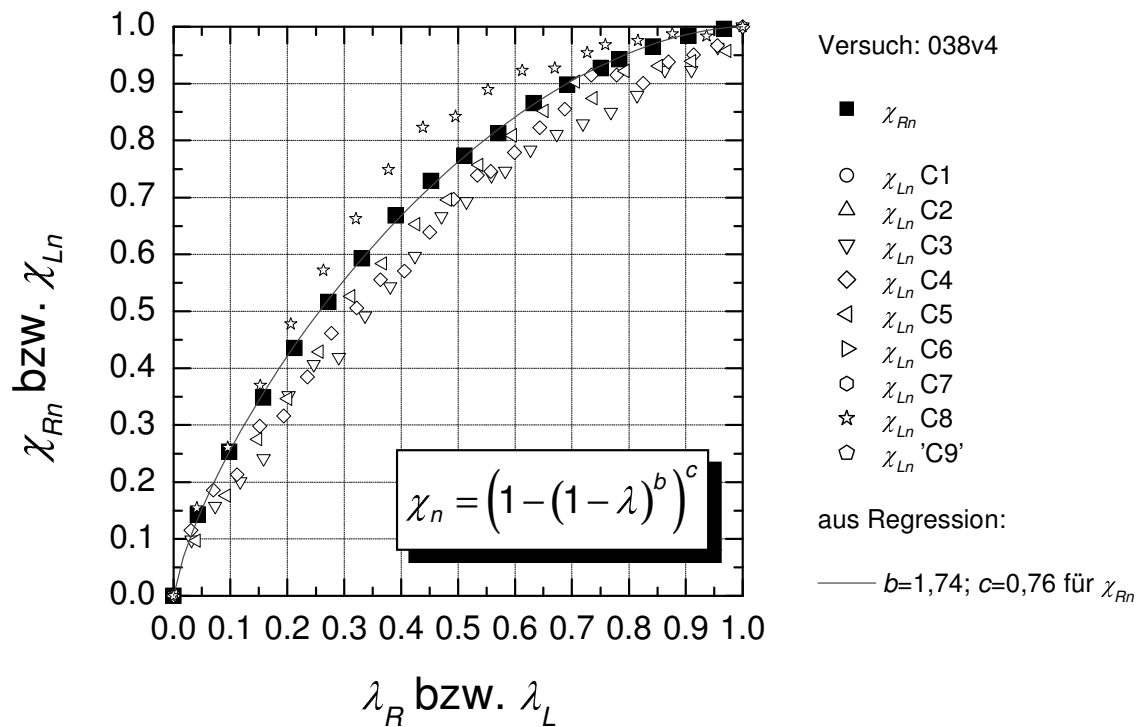


Bild D.17: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

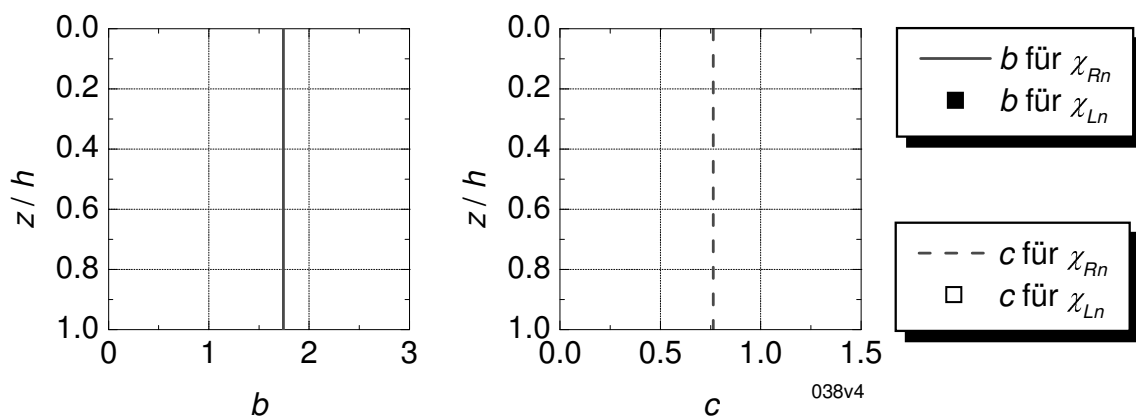


Bild D.18: Beiwerte b und c

Versuch 038 – PV ($I_D = 0,59$) – Alu

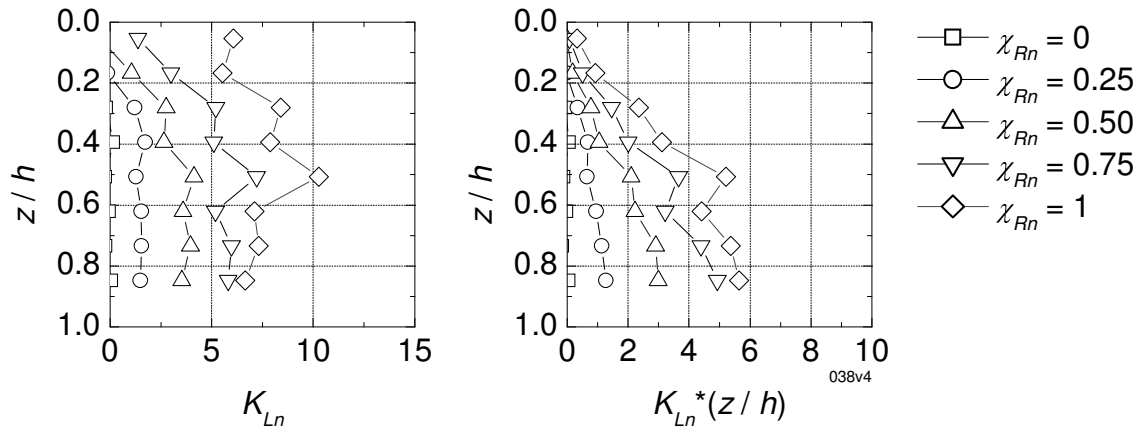


Bild D.19: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

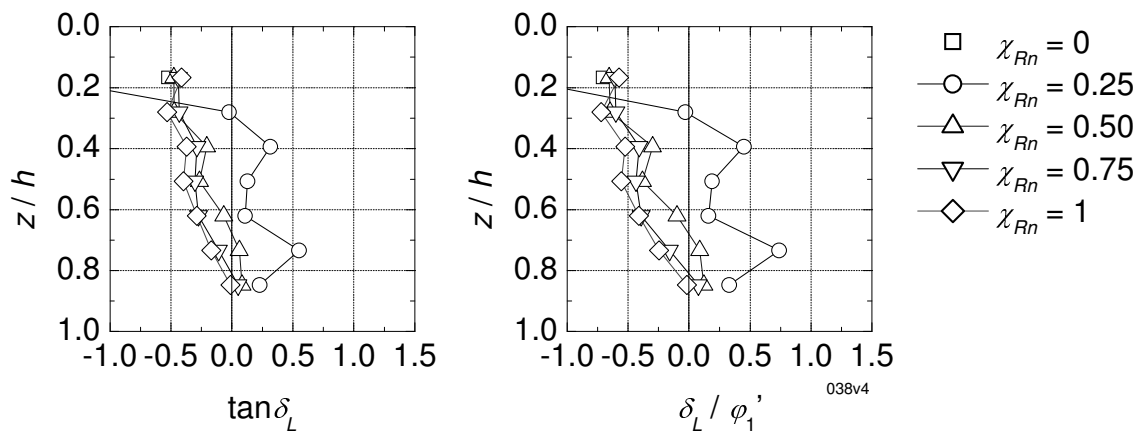


Bild D.20: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 057 – PV ($I_D = 0,62$) – Alu

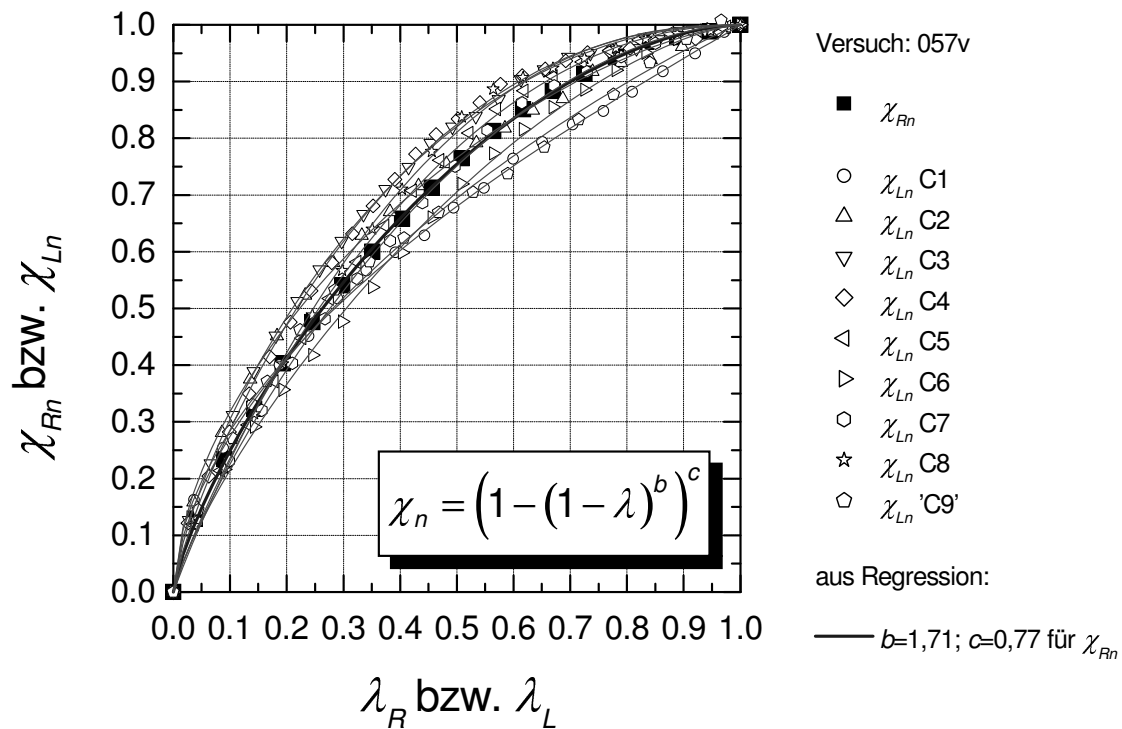


Bild D.21: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

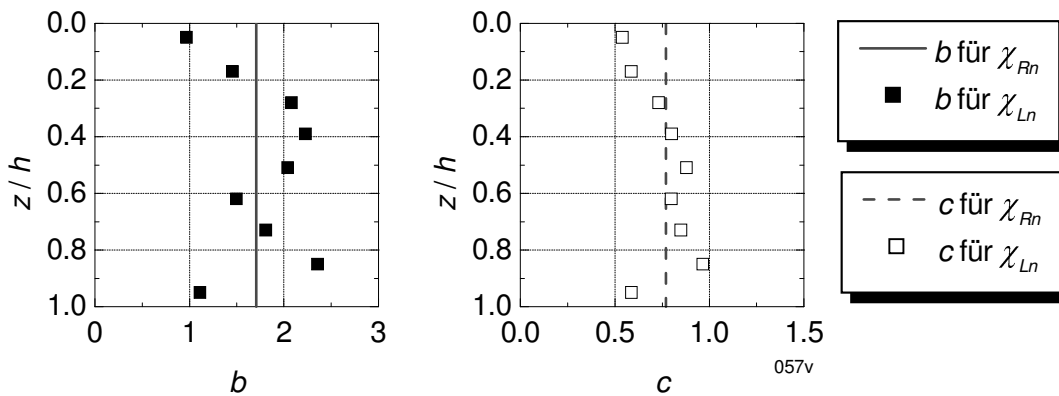


Bild D.22: Beiwerte b und c

Versuch 057 – PV ($I_D = 0,62$) – Alu

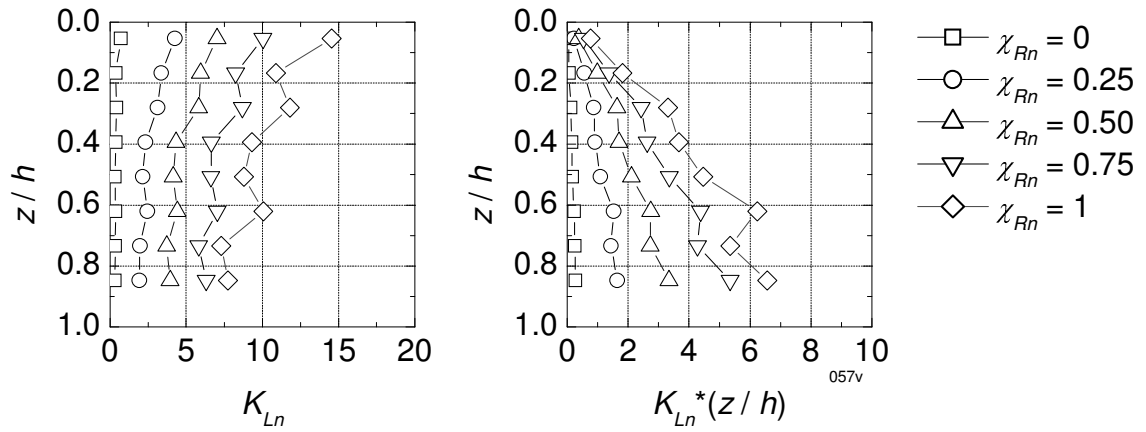


Bild D.23: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

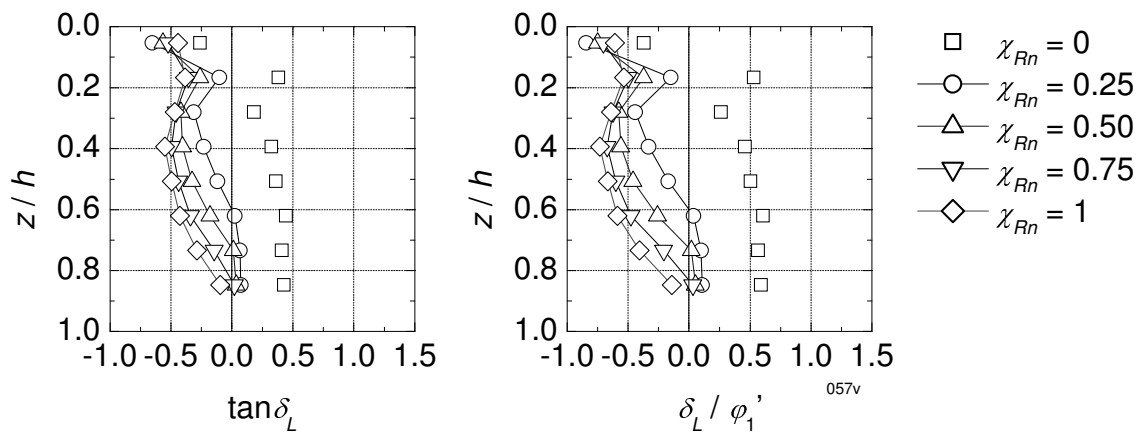


Bild D.24: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 054 – PV ($I_D = 0,63$) – Alu

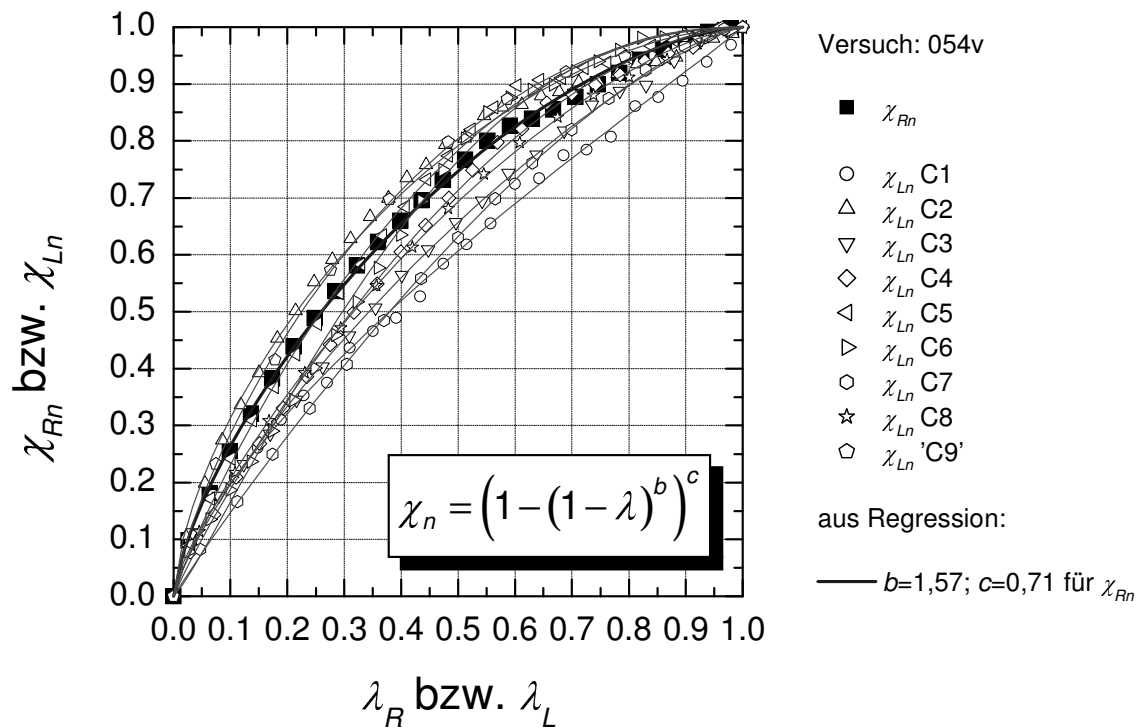


Bild D.25: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

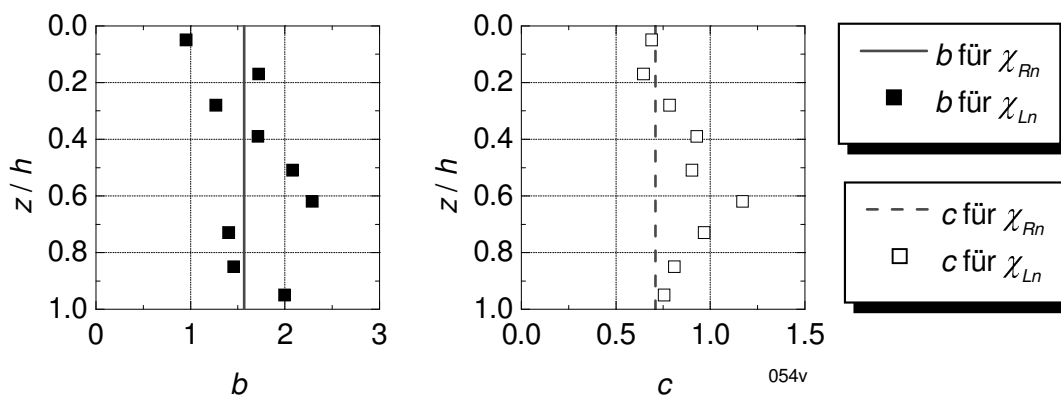


Bild D.26: Beiwerte b und c

Versuch 054 – PV ($I_D = 0,63$) – Alu

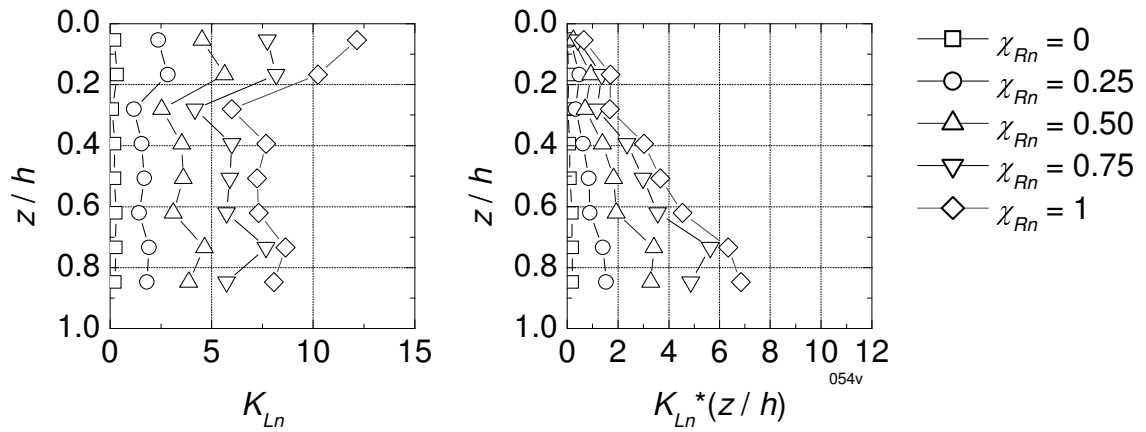


Bild D.27: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

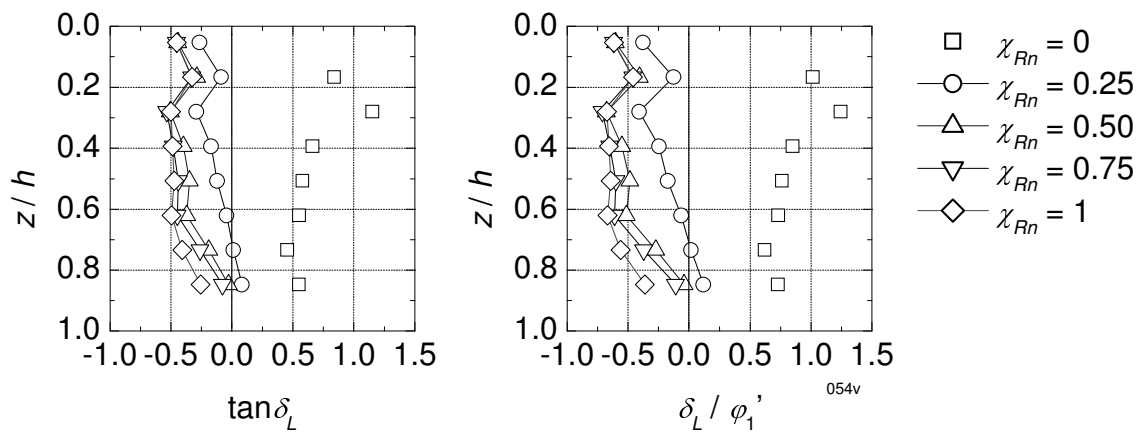


Bild D.28: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 067 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

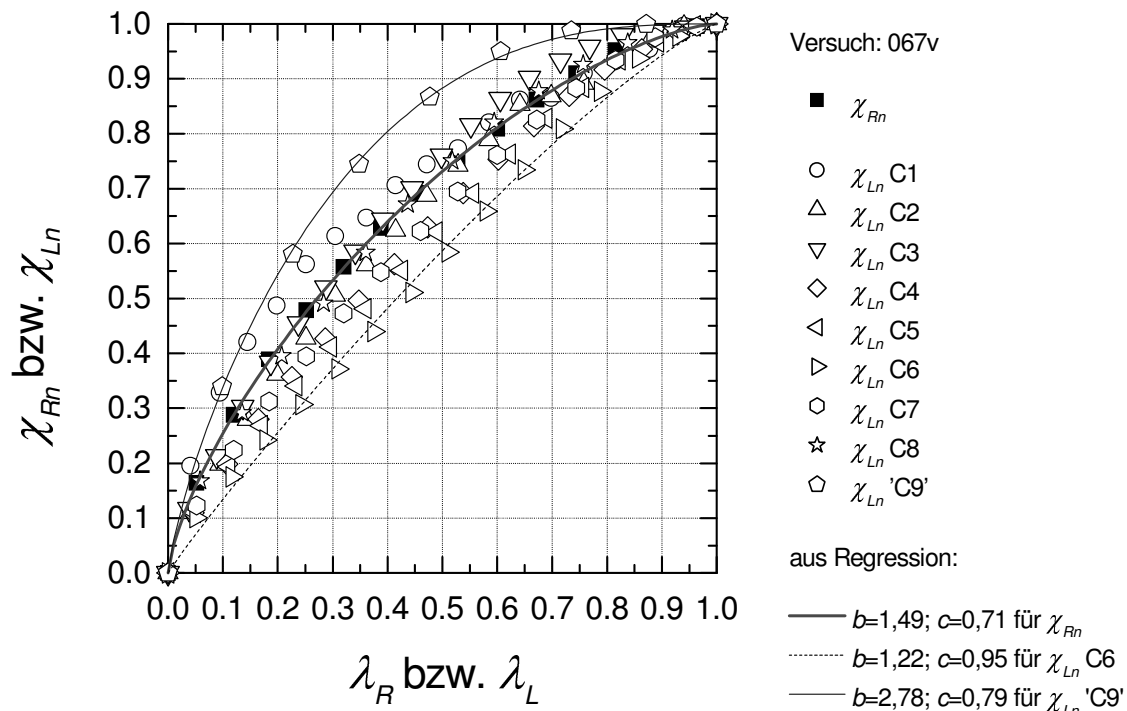


Bild D.29: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

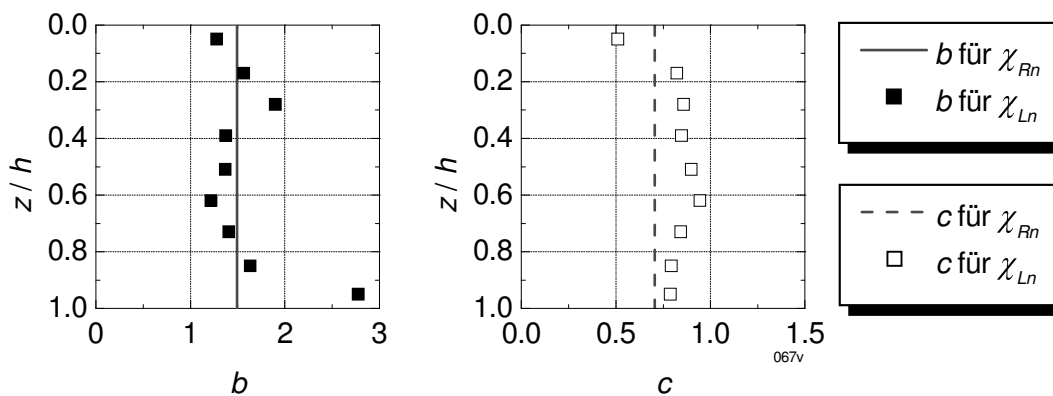


Bild D.30: Beiwerte b und c

Versuch 067 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

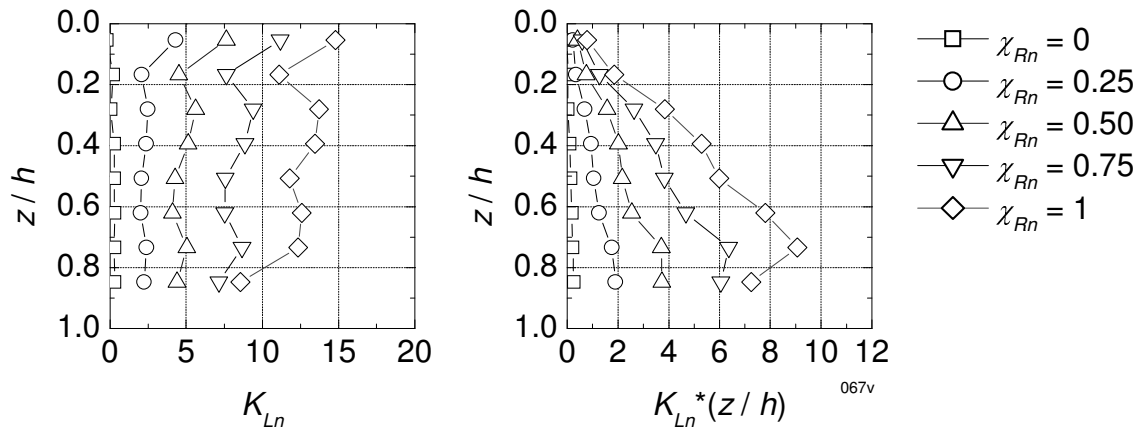


Bild D.31: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

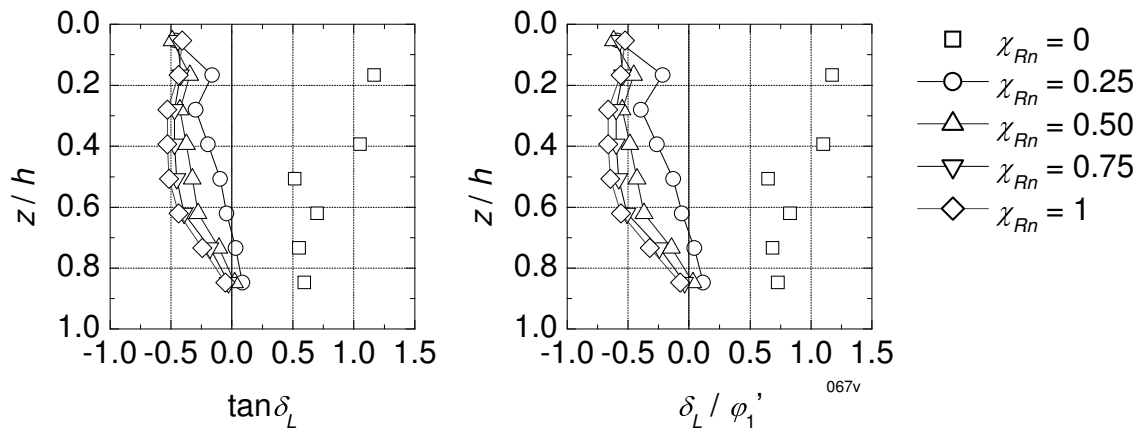


Bild D.32: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 044 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

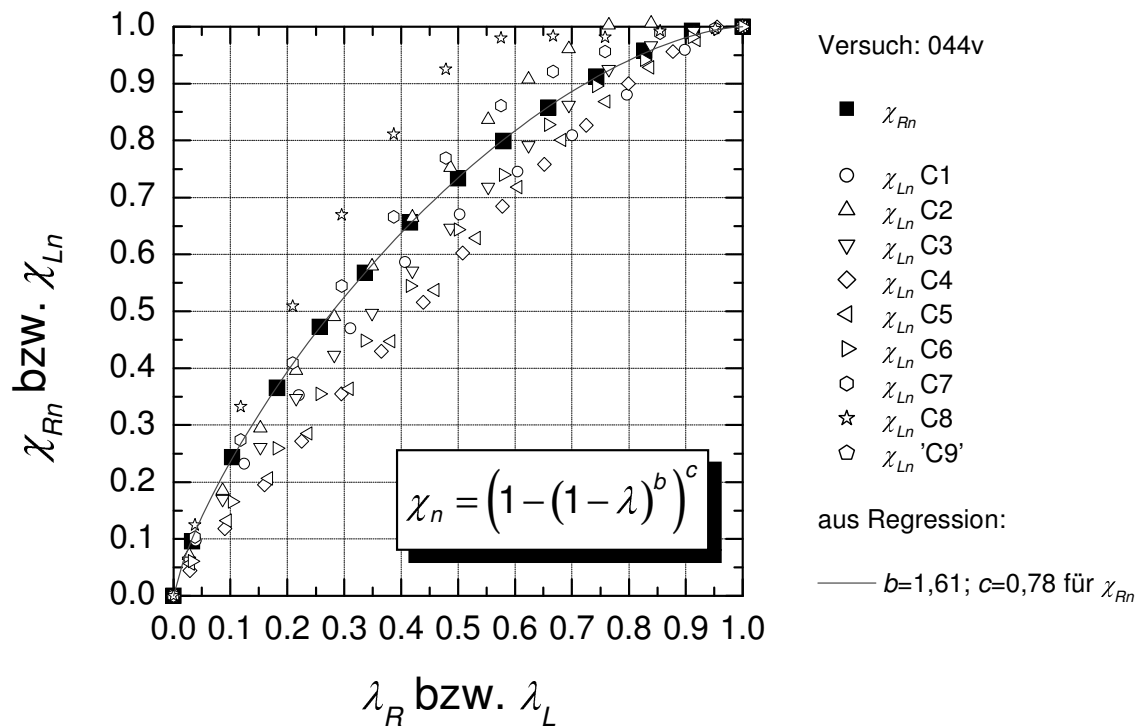


Bild D.33: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

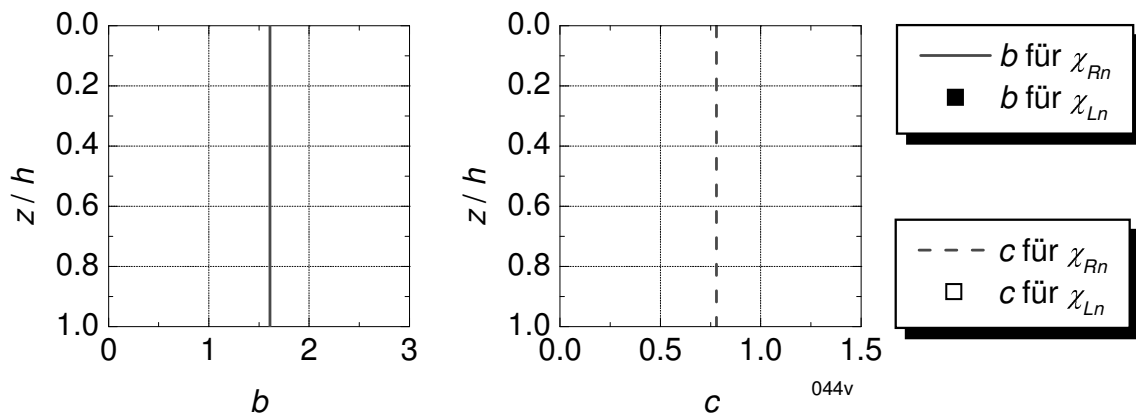


Bild D.34: Beiwerte b und c

Versuch 044 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

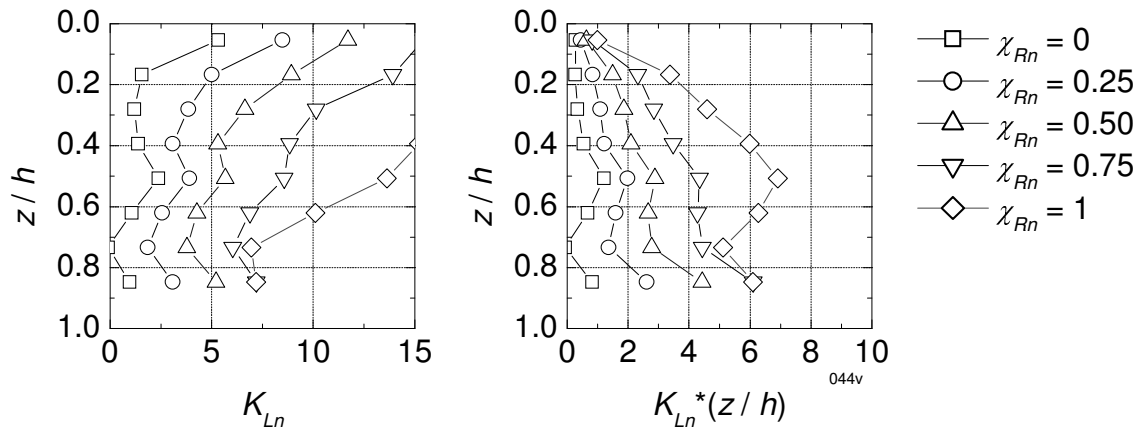


Bild D.35: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

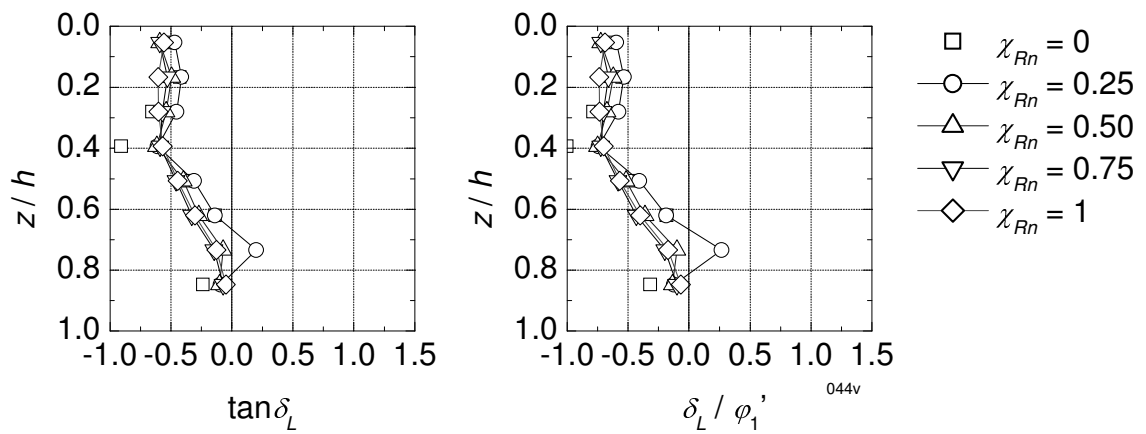


Bild D.36: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 065 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

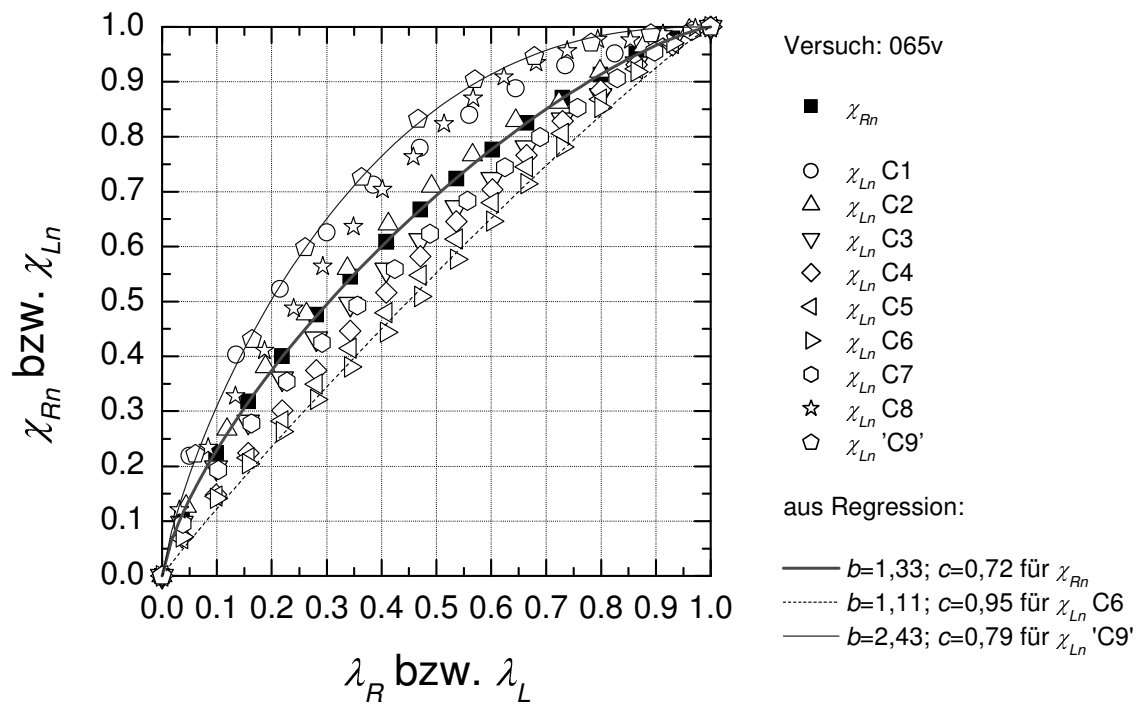


Bild D.37: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

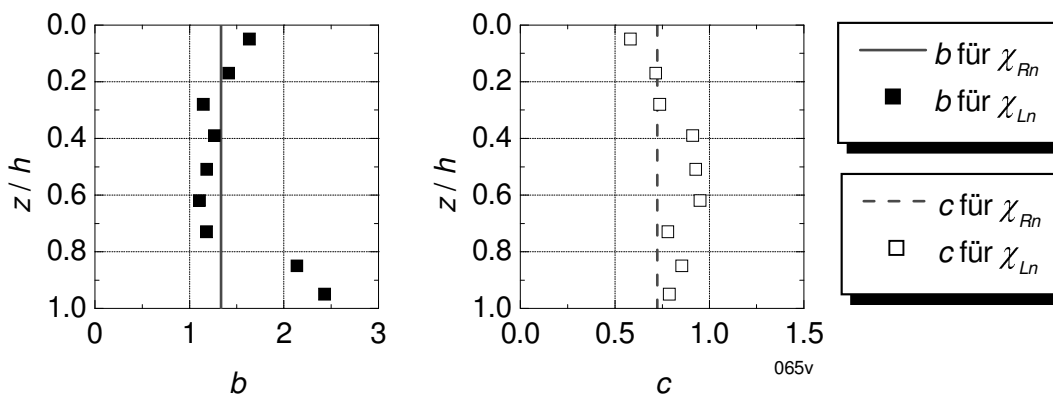


Bild D.38: Beiwerte b und c

Versuch 065 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

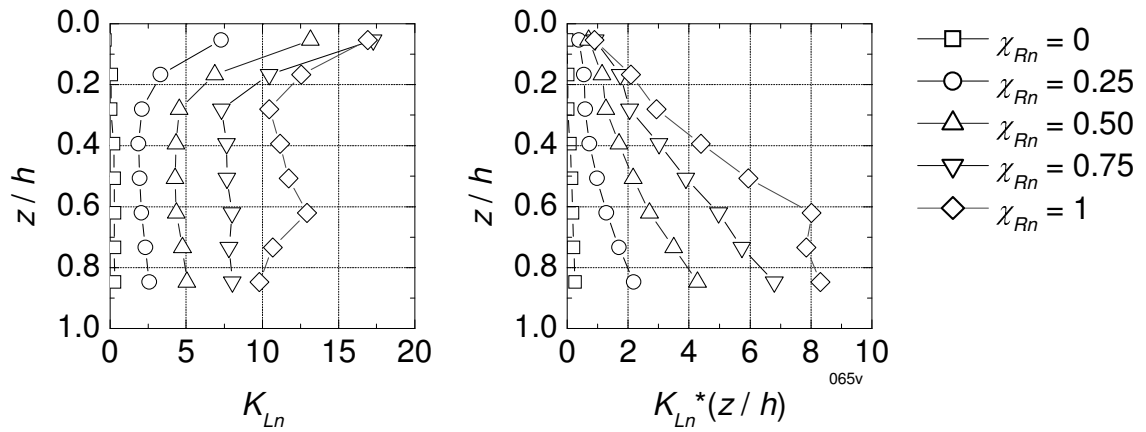


Bild D.39: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

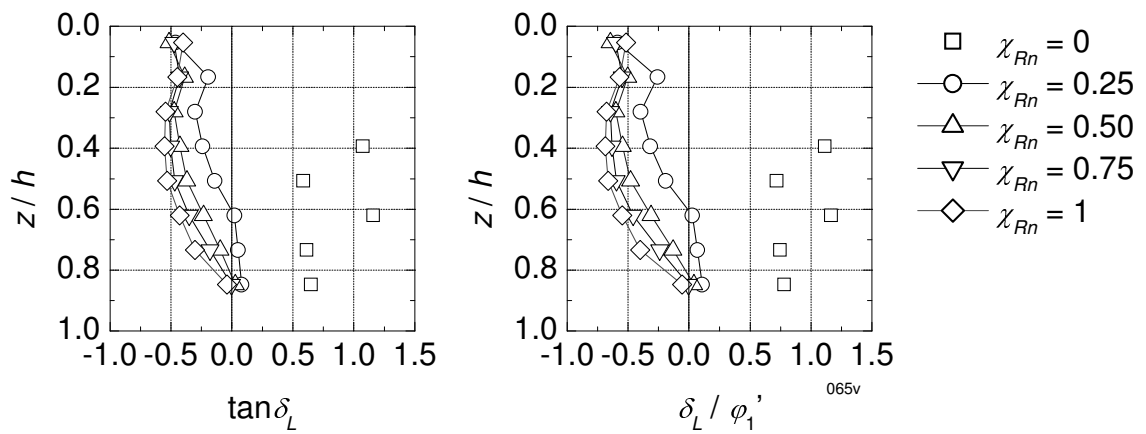


Bild D.40: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 064 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

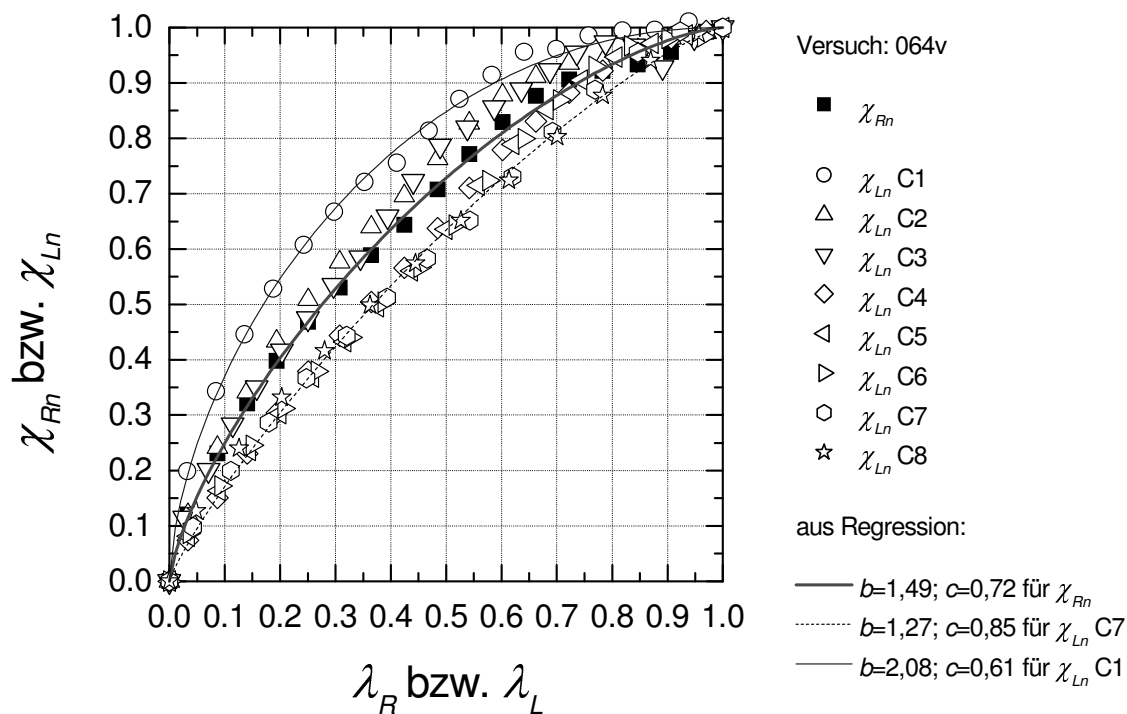


Bild D.41: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

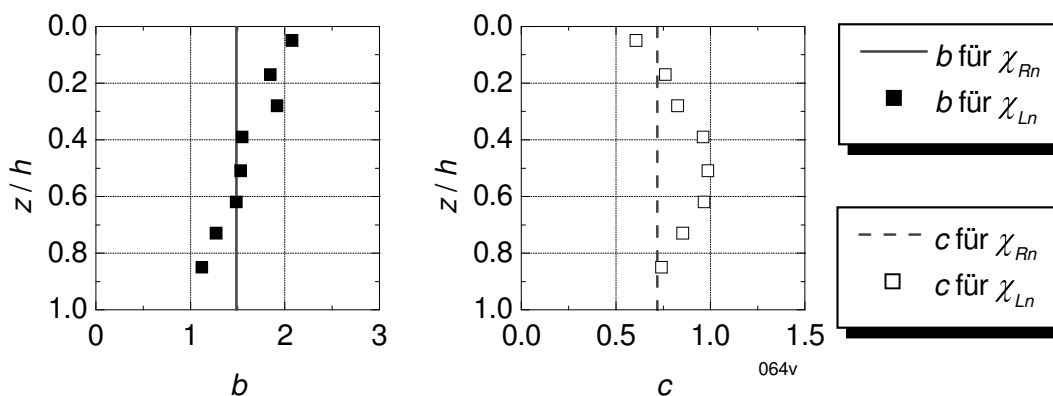


Bild D.42: Beiwerte b und c

Versuch 064 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

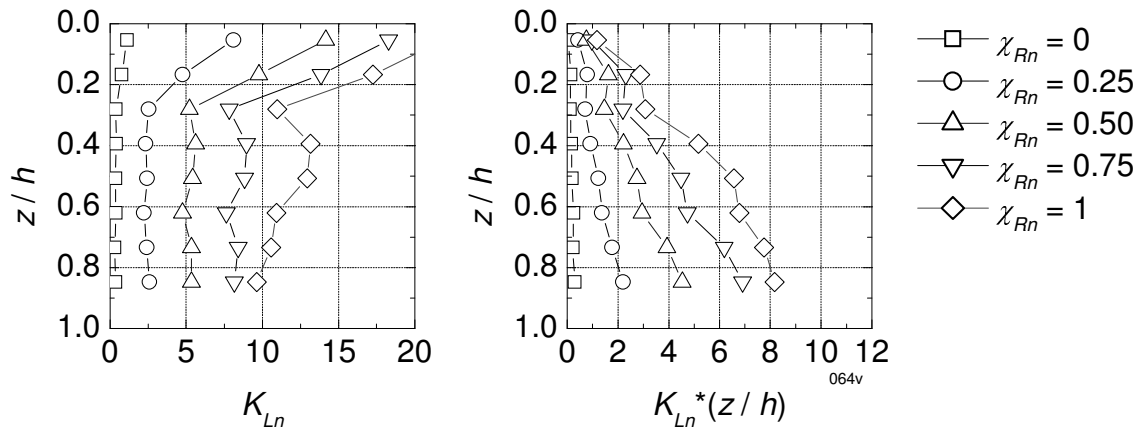


Bild D.43: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

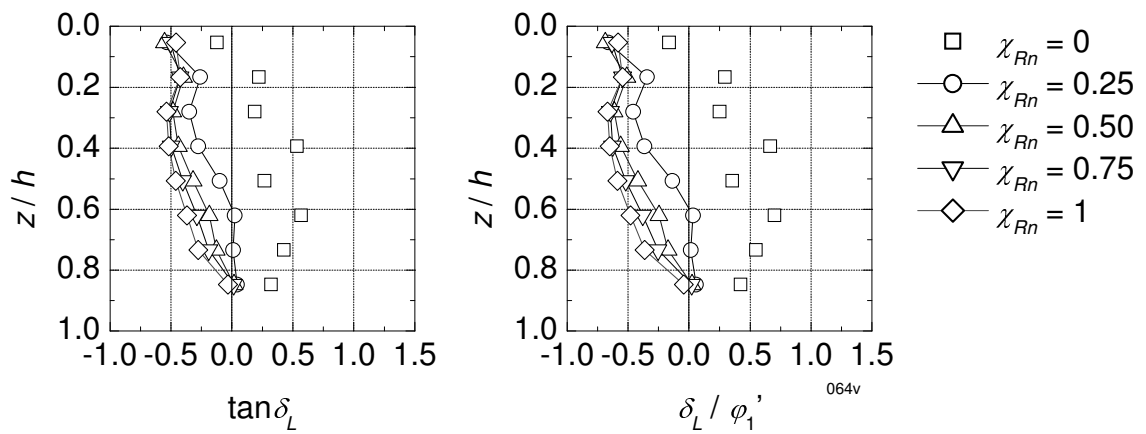


Bild D.44: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 066 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

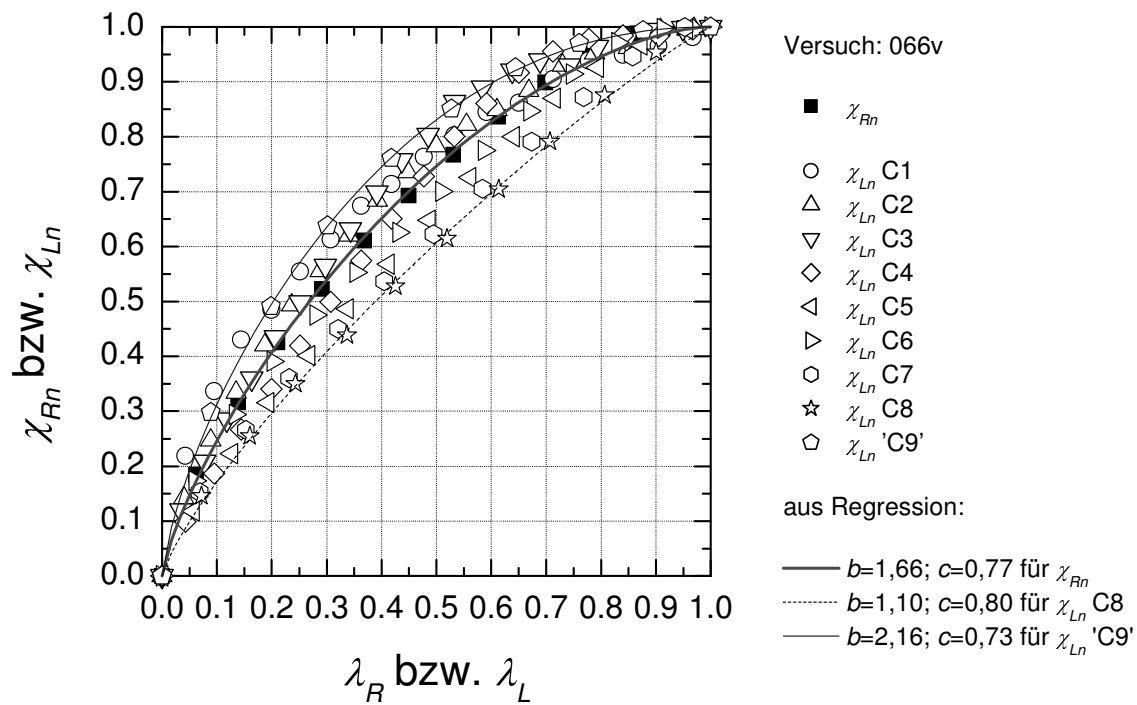


Bild D.45: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

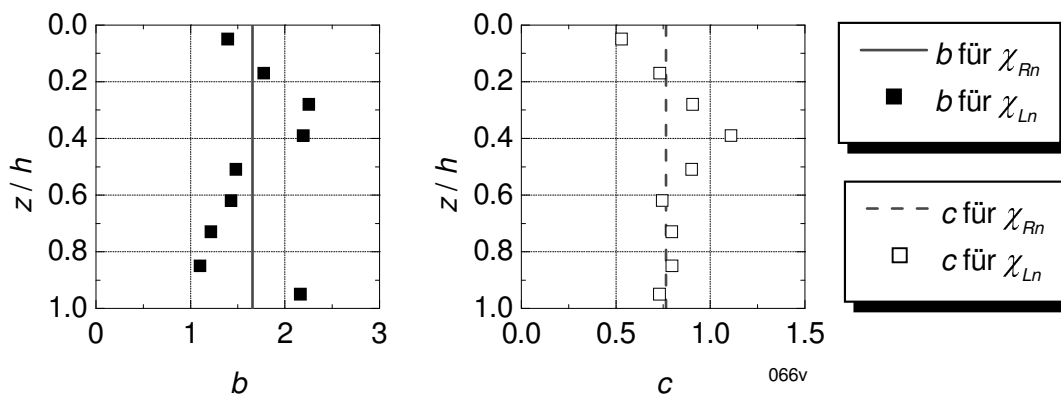


Bild D.46: Beiwerte b und c

Versuch 066 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

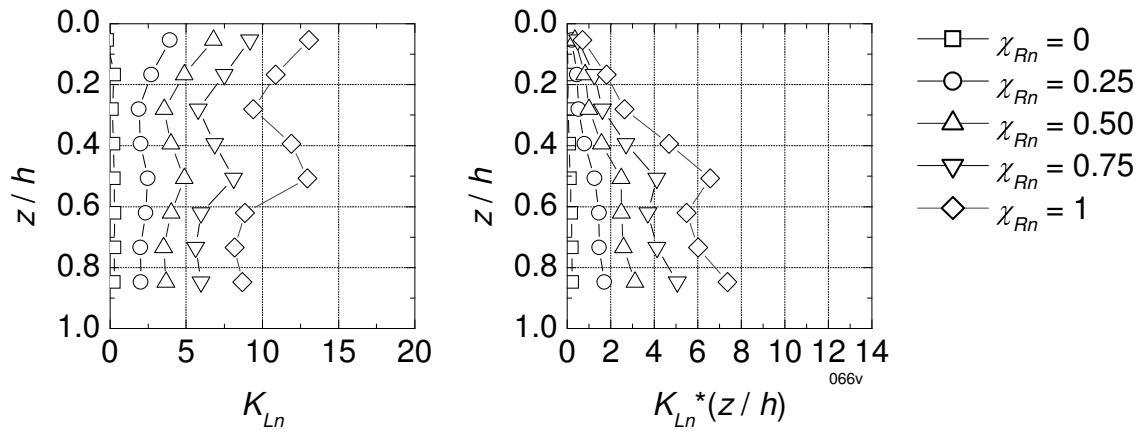


Bild D.47: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

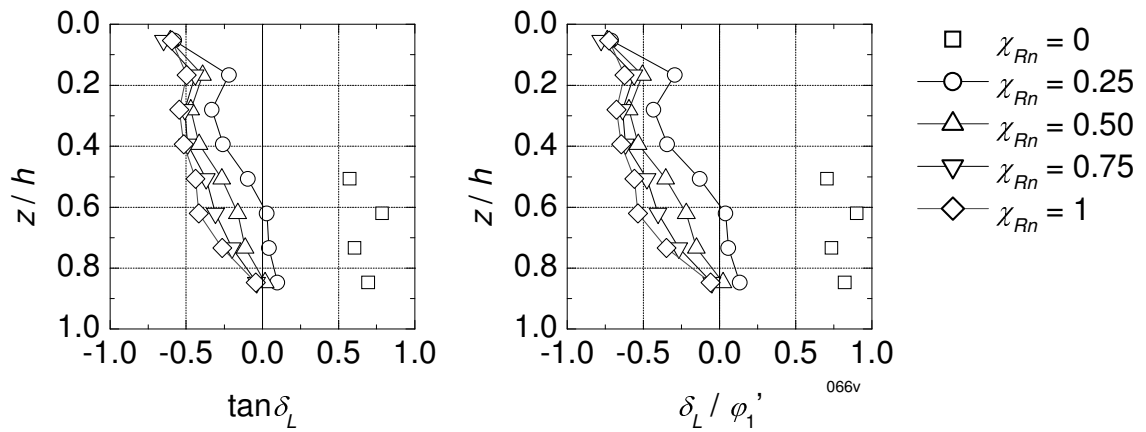


Bild D.48: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 071 – PV ($I_D = 0,83$) – Folie 2

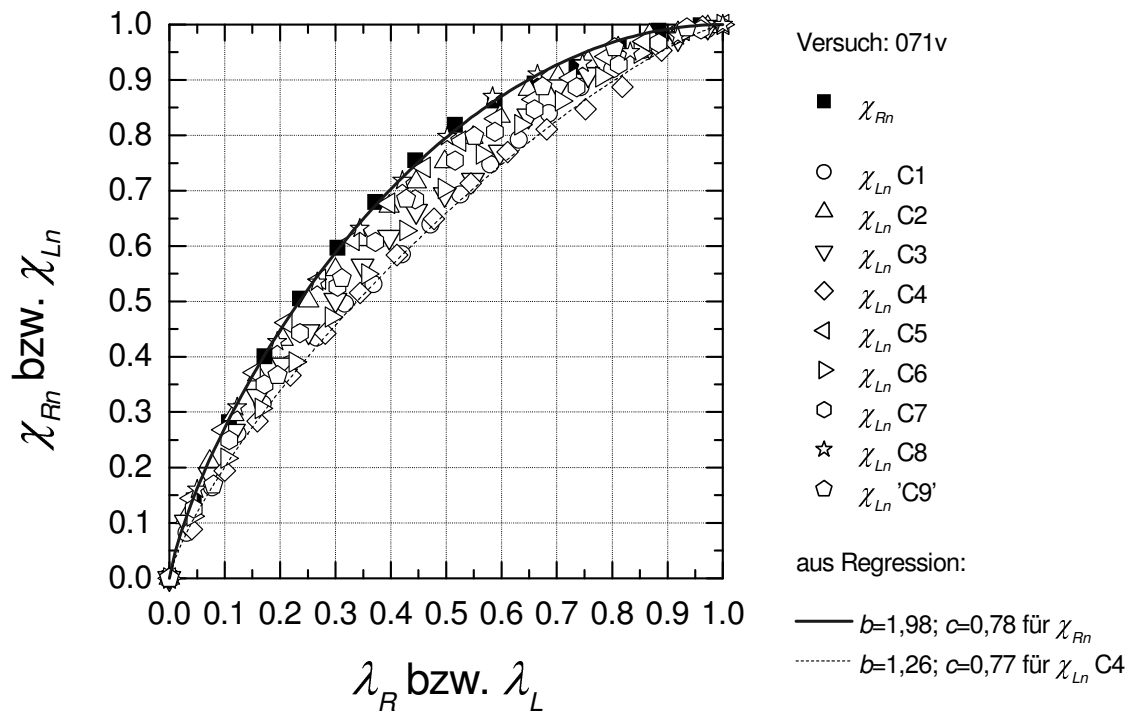


Bild D.49: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

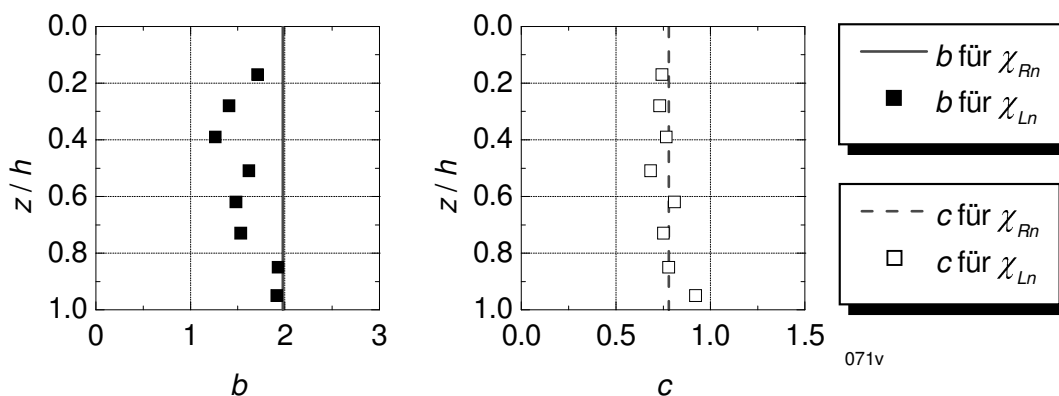


Bild D.50: Beiwerte b und c

Versuch 071 – PV ($I_D = 0,83$) – Folie 2

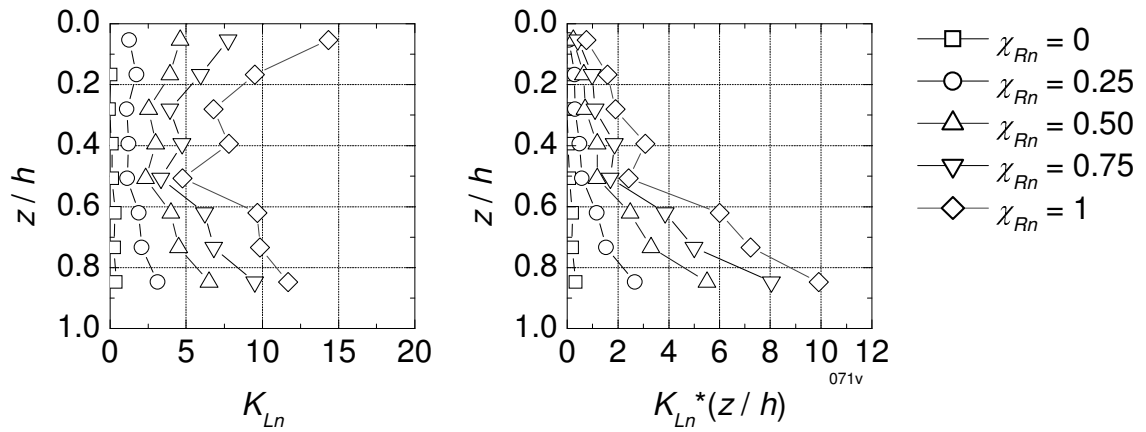


Bild D.51: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

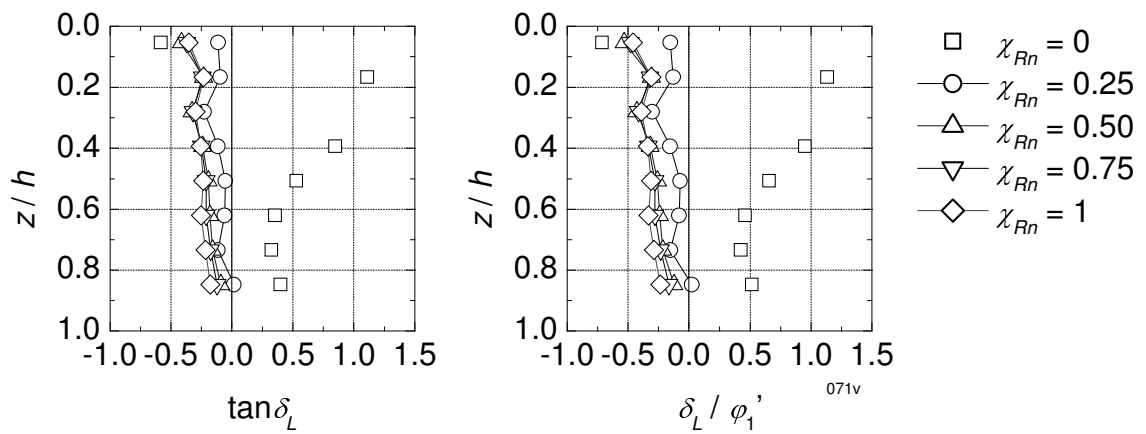


Bild D.52: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 046 – PV ($I_D = 0,76$) – Schleifpapier S40

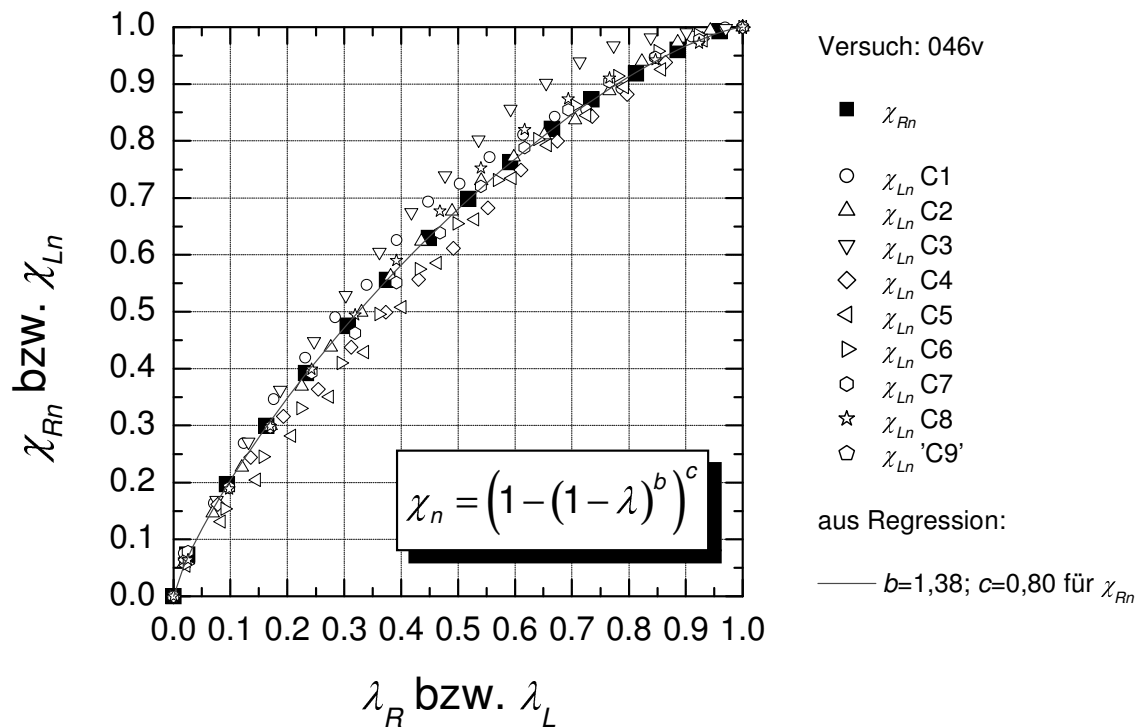


Bild D.53: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

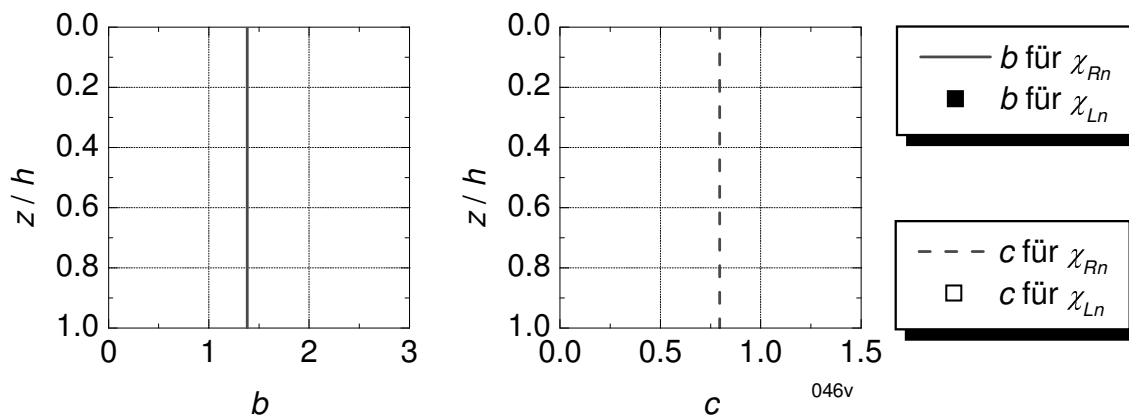


Bild D.54: Beiwerte b und c

Versuch 046 – PV ($I_D = 0,76$) – Schleifpapier S40

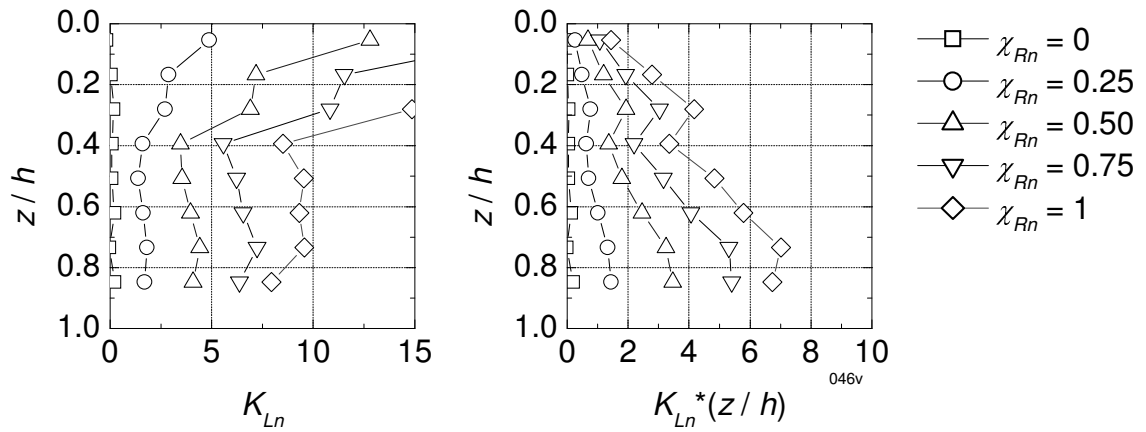


Bild D.55: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

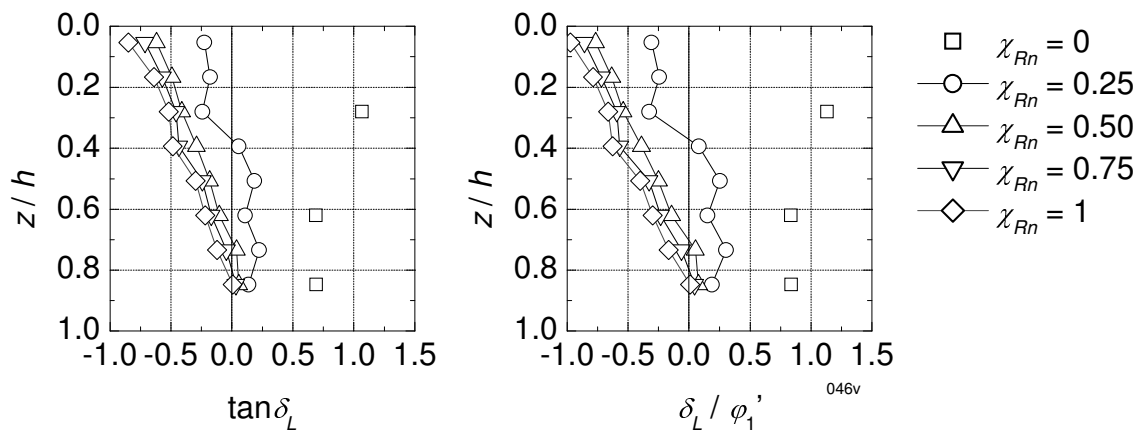


Bild D.56: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 074 – PV ($I_D = 0,81$) – Schleifpapier S40

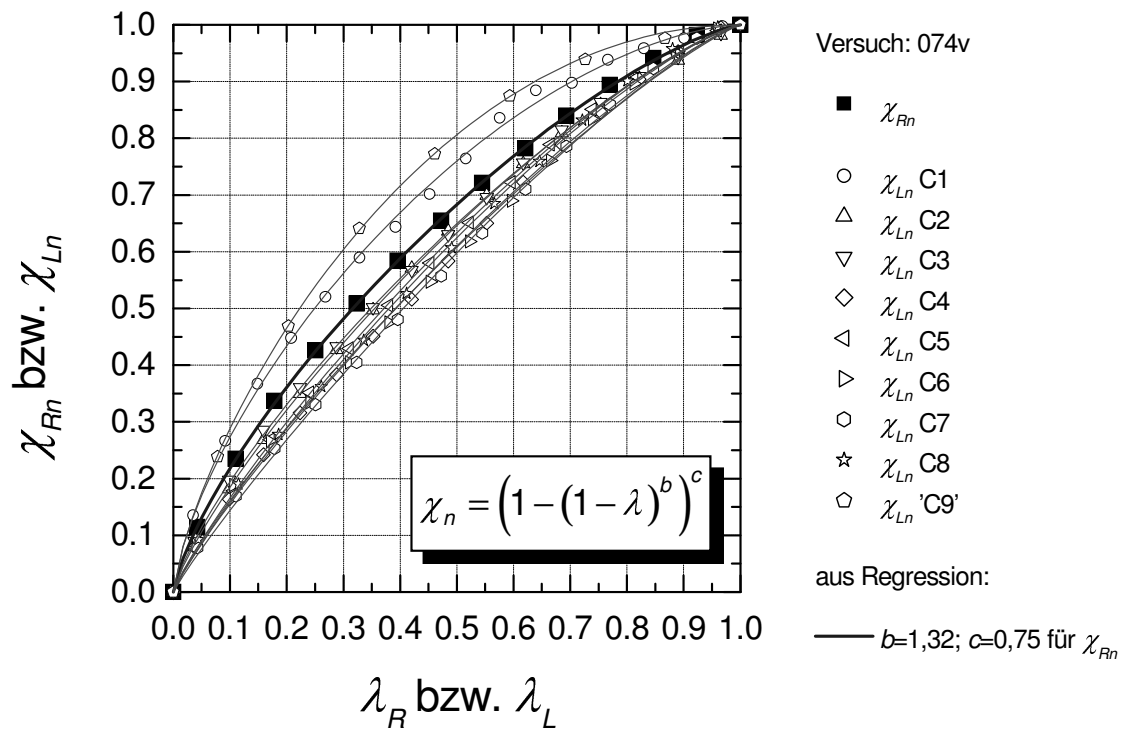


Bild D.57: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

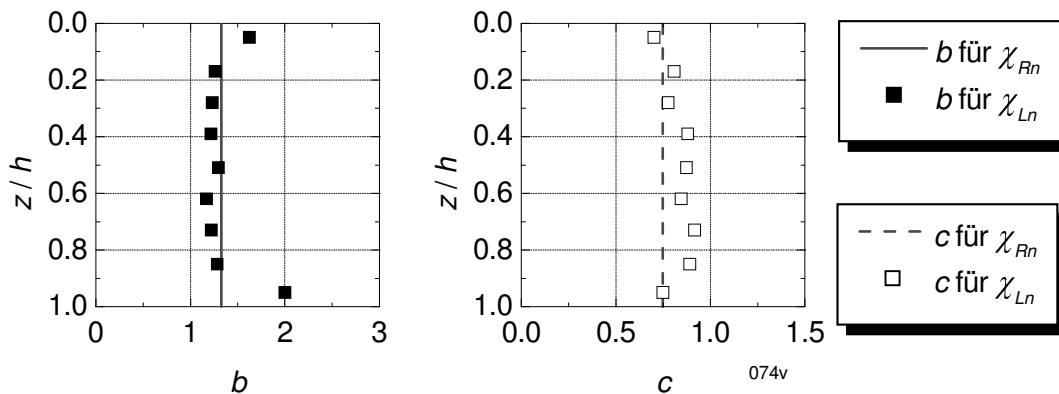


Bild D.58: Beiwerte b und c

Versuch 074 – PV ($I_D = 0,81$) – Schleifpapier S40

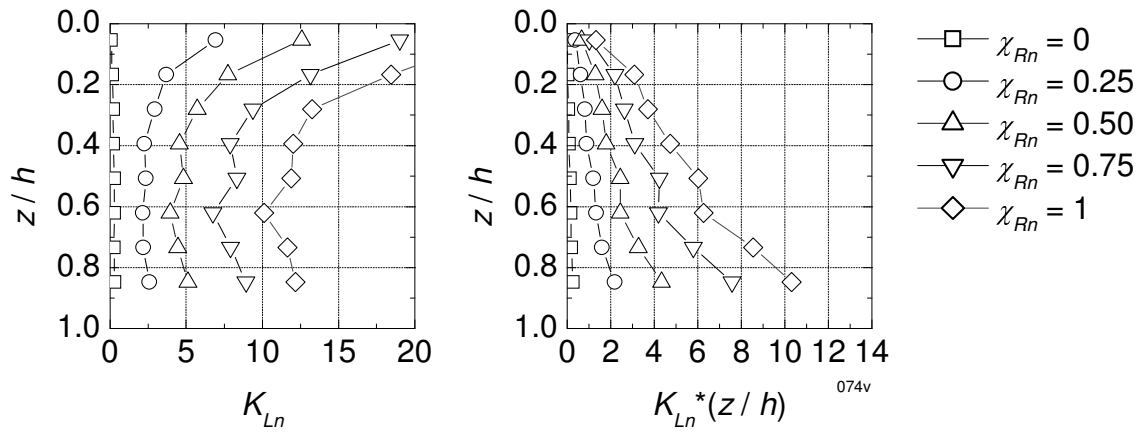


Bild D.59: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

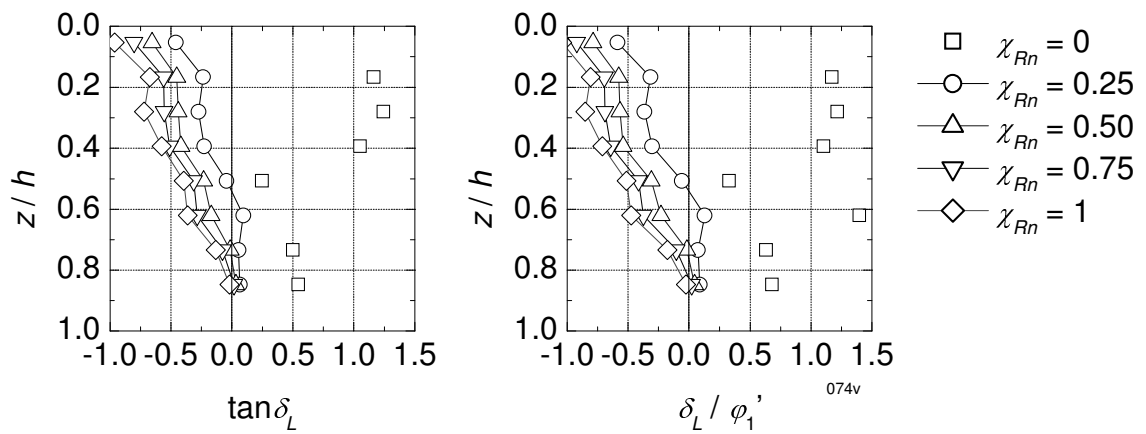


Bild D.60: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 056 – PV ($I_D = 0,55$) – Alu

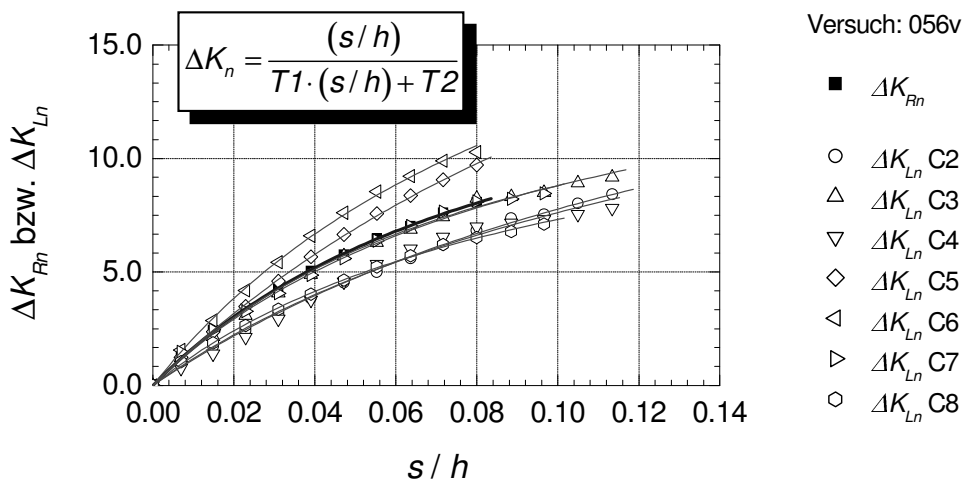


Bild D.61: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

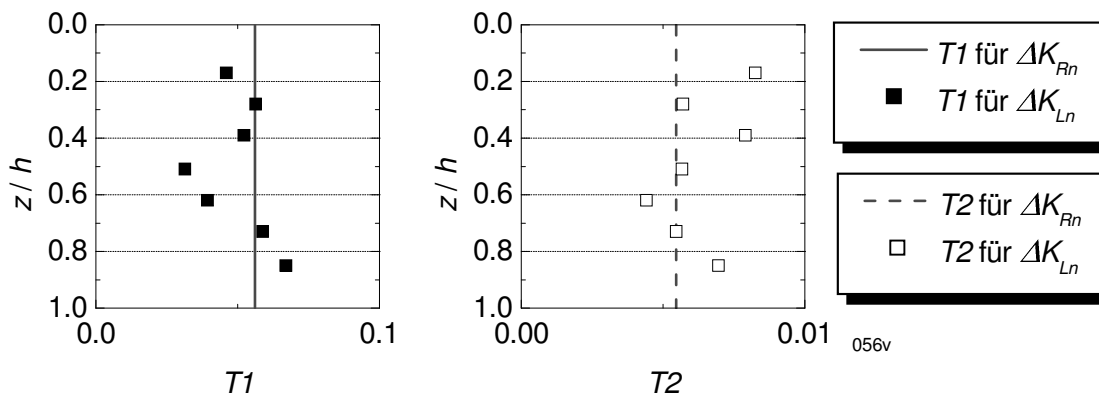


Bild D.62: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 038 – PV ($I_D = 0,59$) – Alu

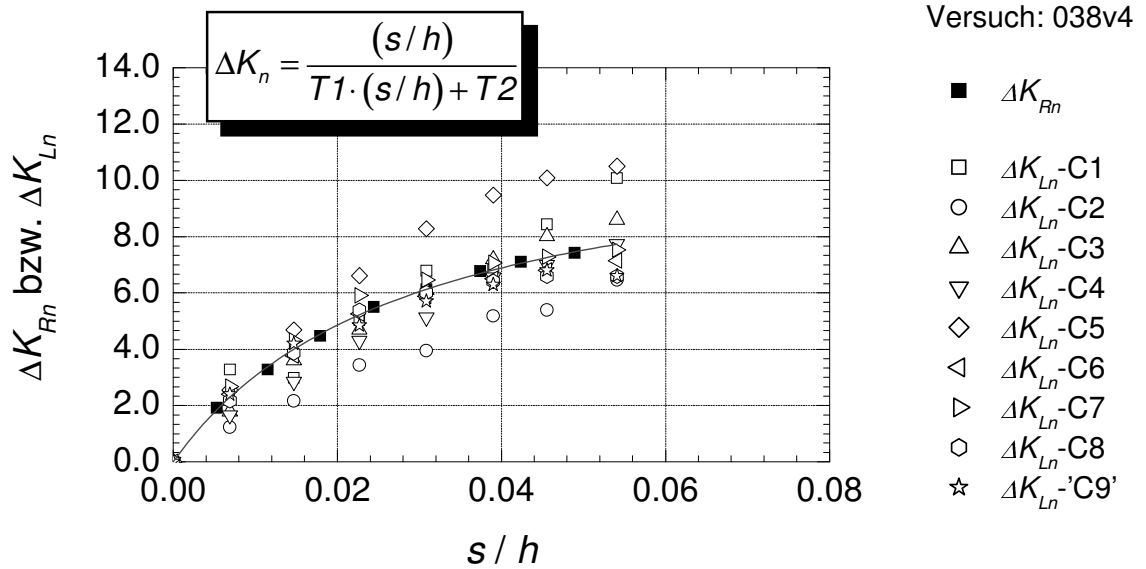


Bild D.63: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

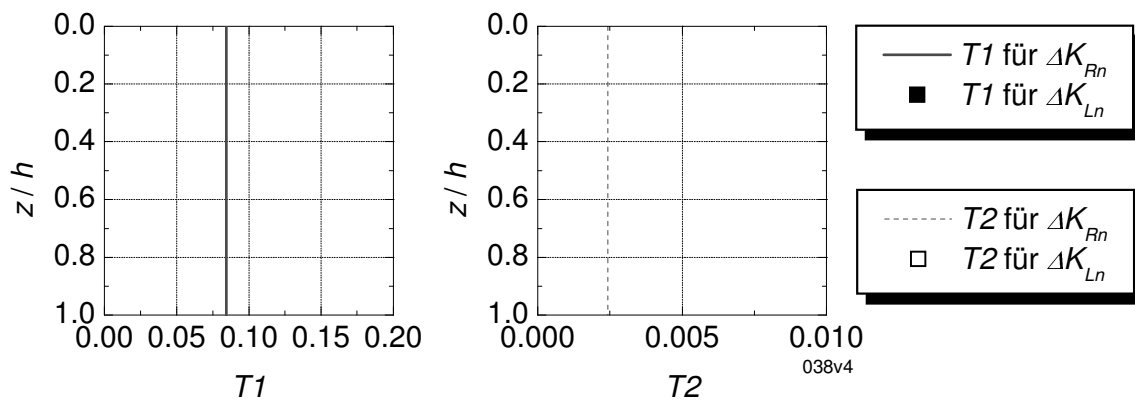


Bild D.64: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 057 – PV ($I_D = 0,62$) – Alu

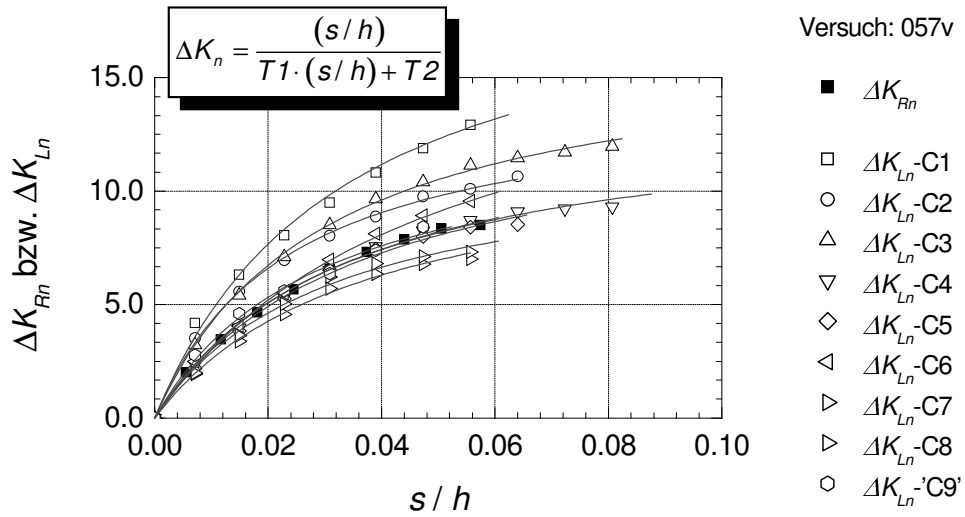


Bild D.65: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

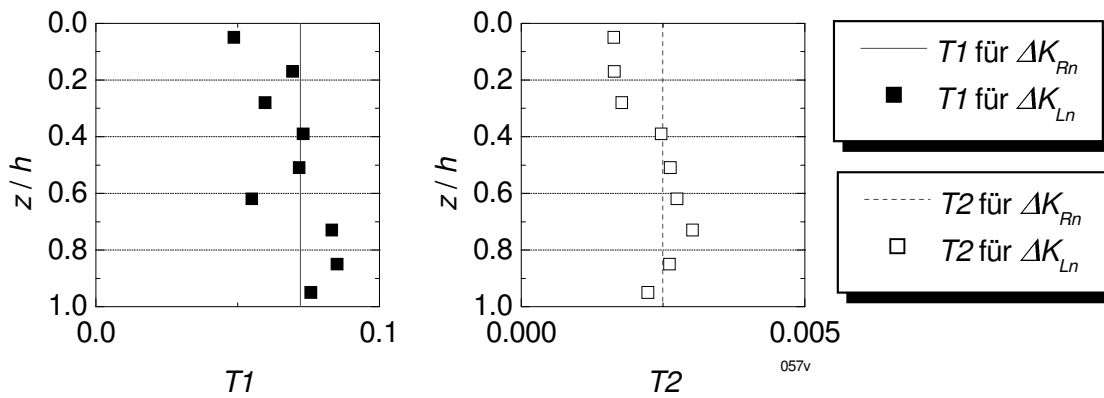


Bild D.66: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 054 – PV ($I_D = 0,63$) – Alu

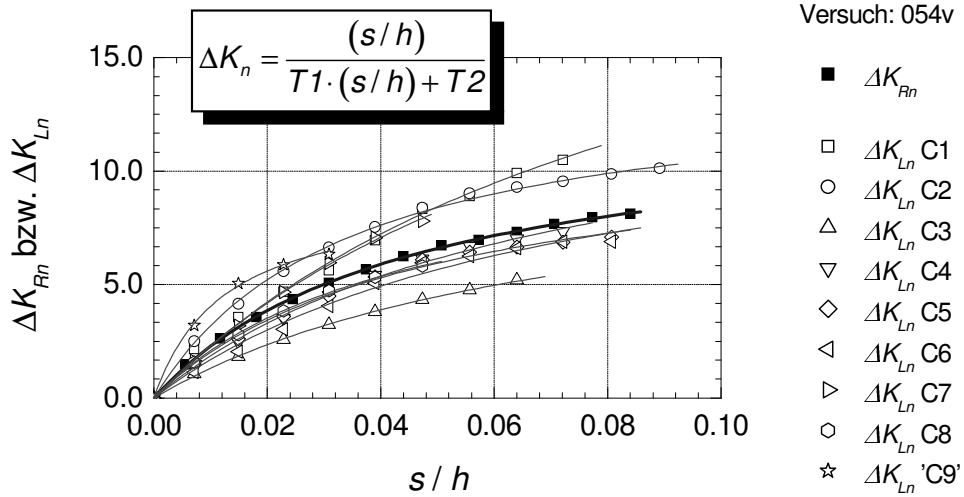


Bild D.67: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

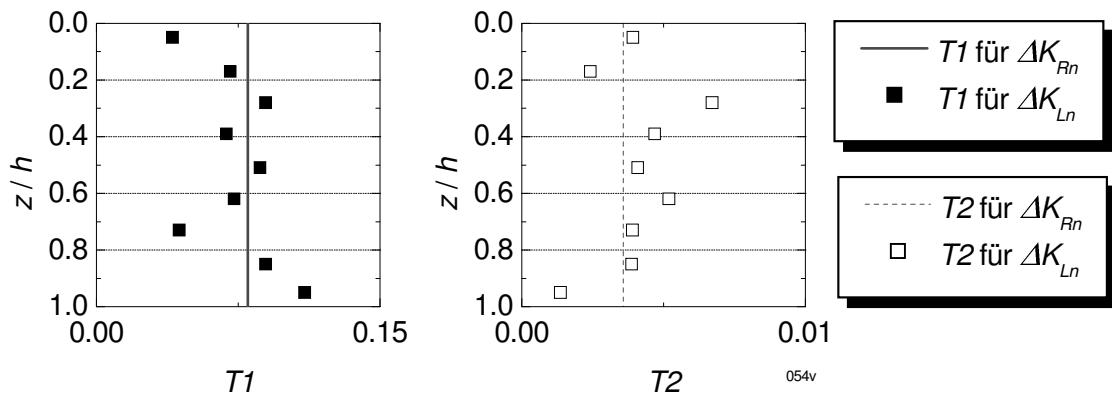


Bild D.68: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 067 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

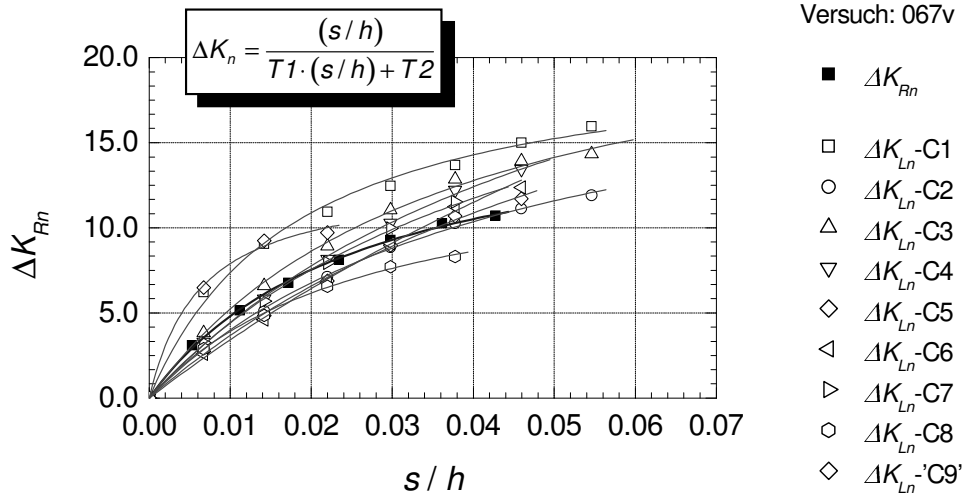


Bild D.69: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

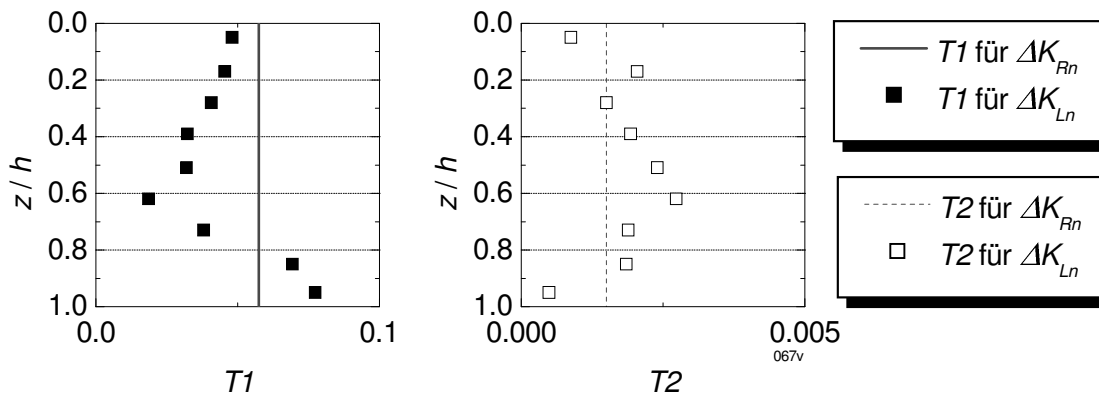


Bild D.70: Beiwerte T1 und T2

Versuch 044 – PV ($I_D = 0,81$) – Alu

Versuch: 044v

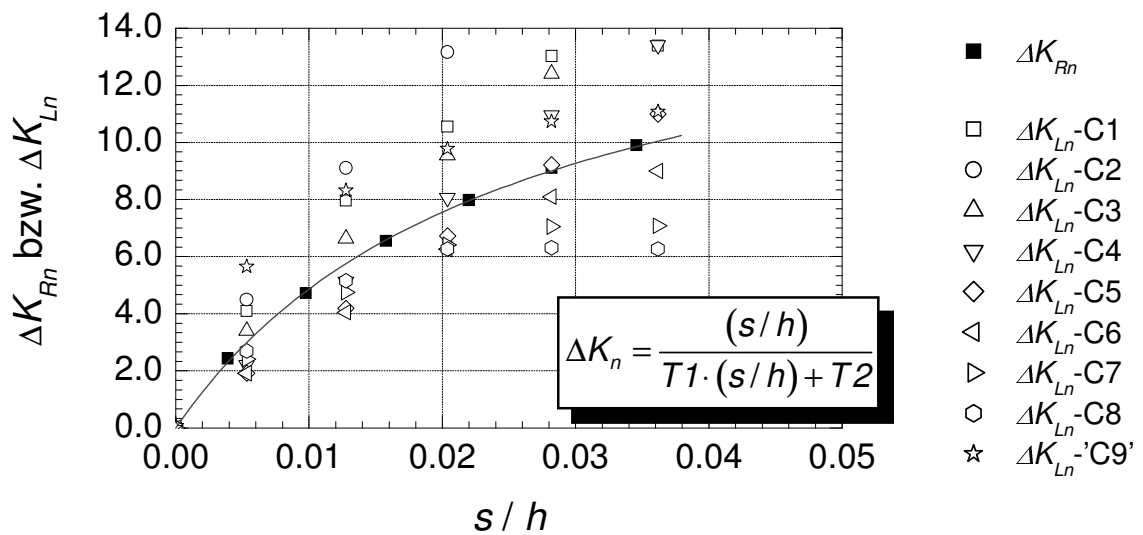


Bild D.71: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

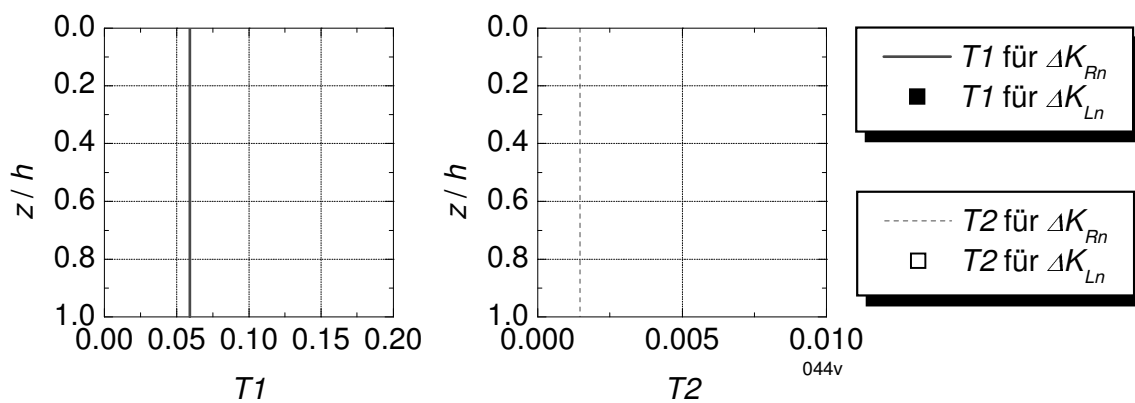


Bild D.72: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 065 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

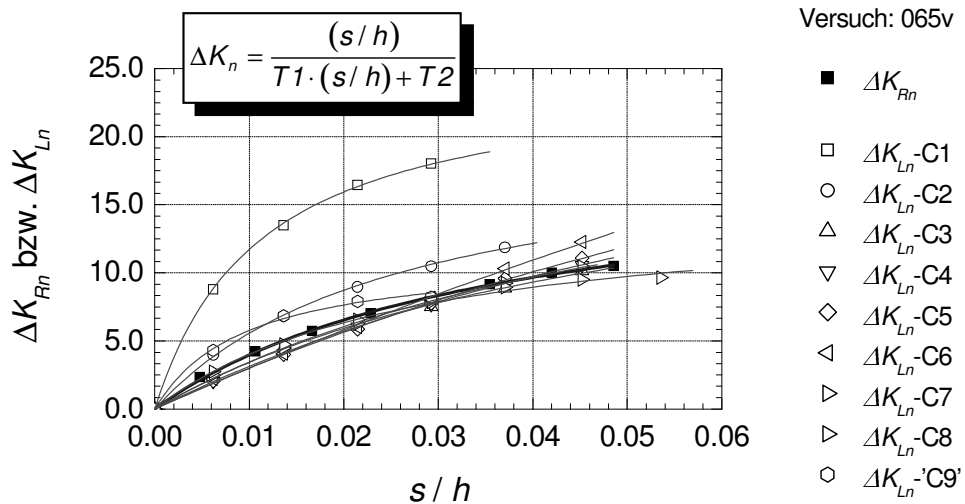


Bild D.73: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

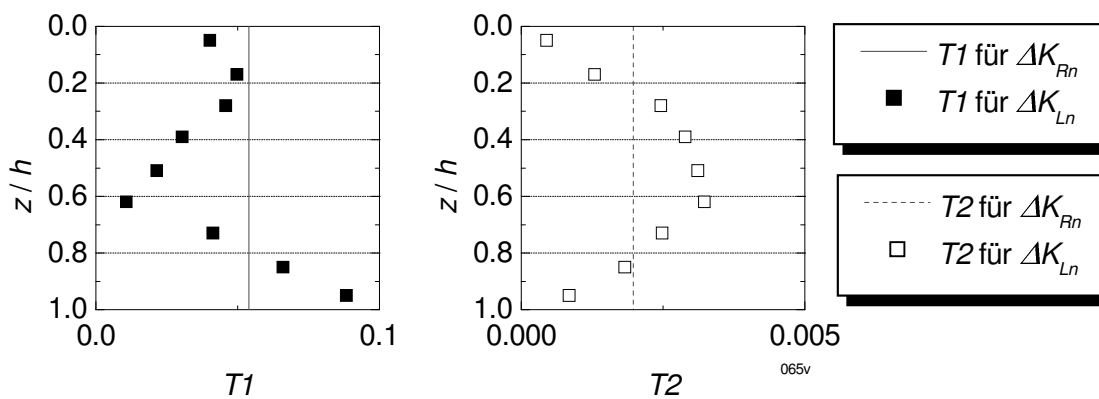


Bild D.74: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 064 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

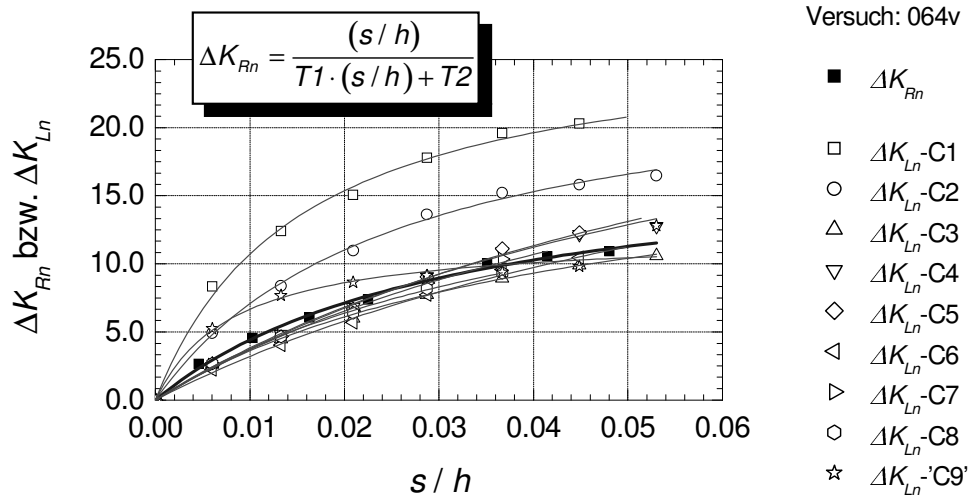


Bild D.75: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

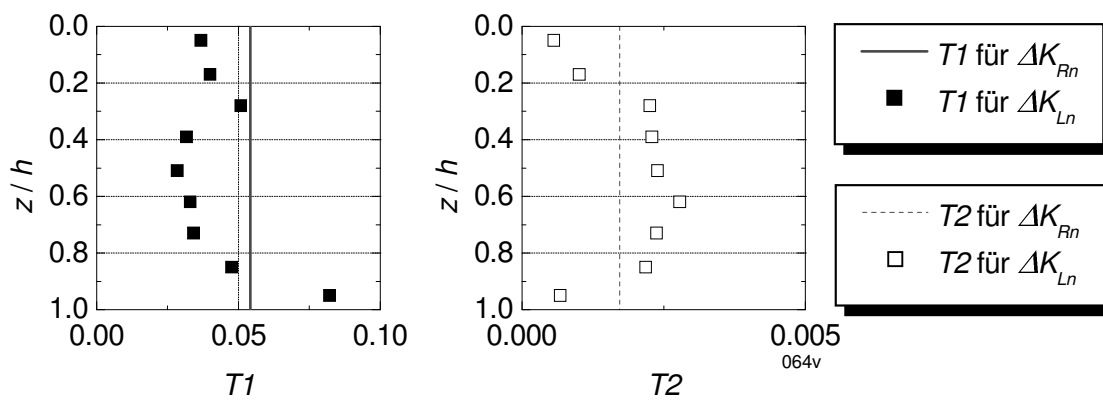


Bild D.76: Beiwerte T1 und T2

Versuch 066 – PV ($I_D = 0,82$) – Alu

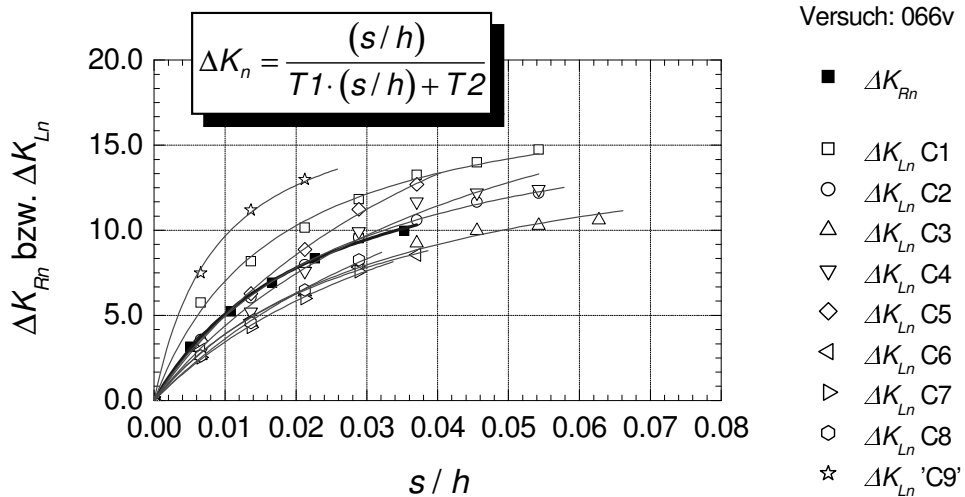


Bild D.77: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

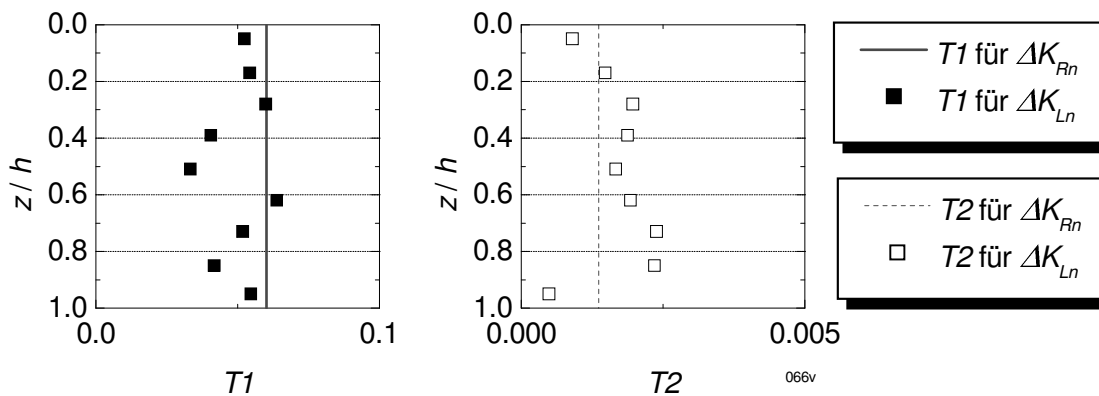


Bild D.78: Beiwerte T1 und T2

Versuch 071 – PV ($I_D = 0,83$) – Folie 2

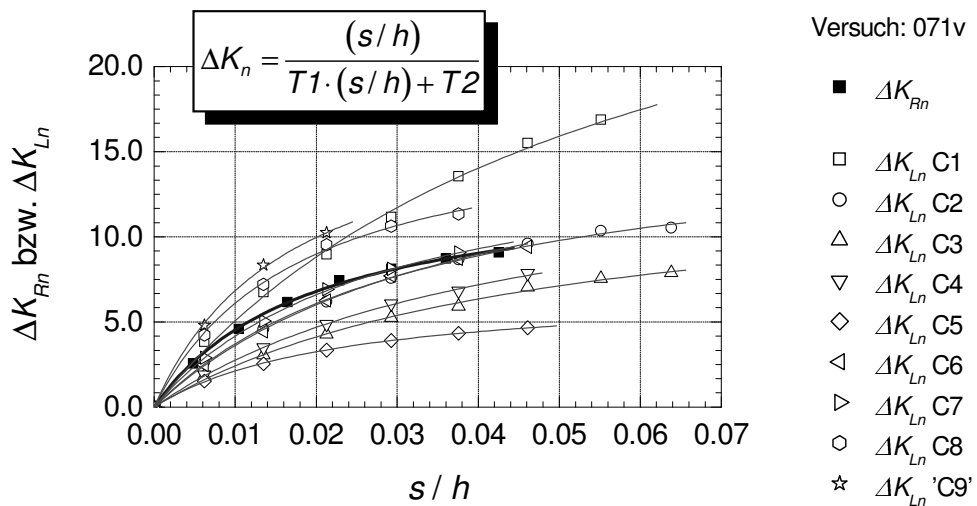


Bild D.79: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

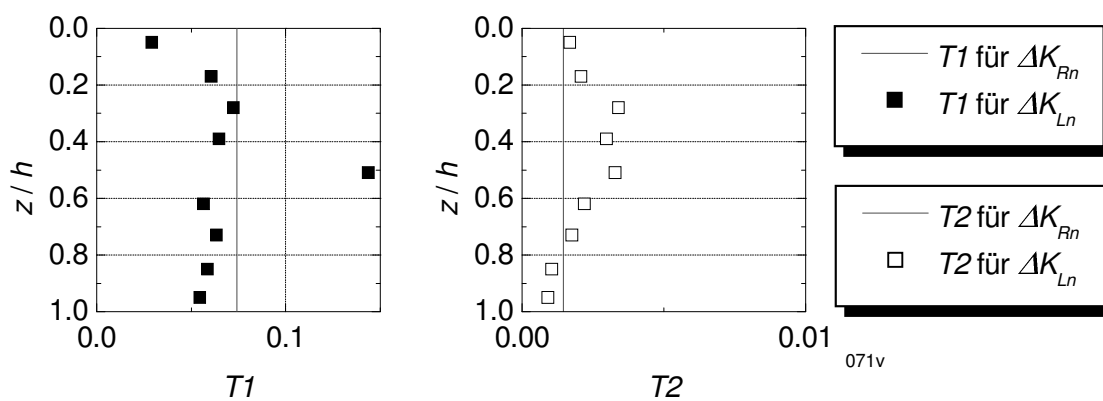


Bild D.80: Beiwerte T1 und T2

Versuch 046 – PV ($I_D = 0,76$) – Schleifpapier S40

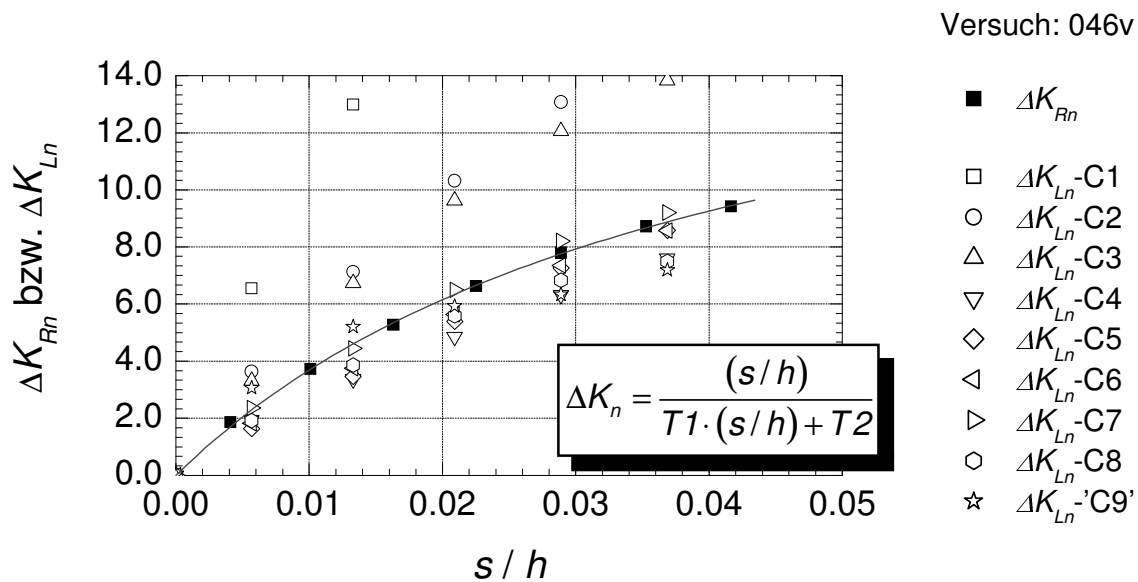


Bild D.81: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

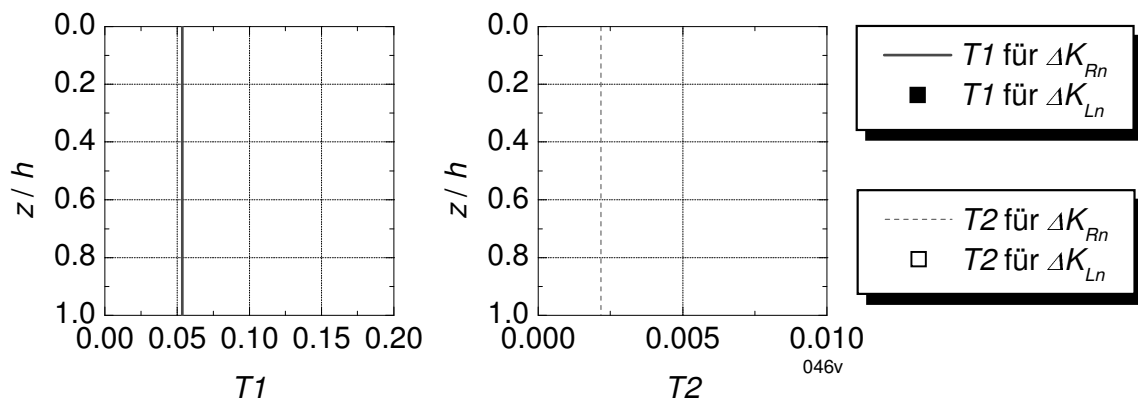


Bild D.82: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 074 – PV ($I_D = 0,81$) – Schleifpapier S40

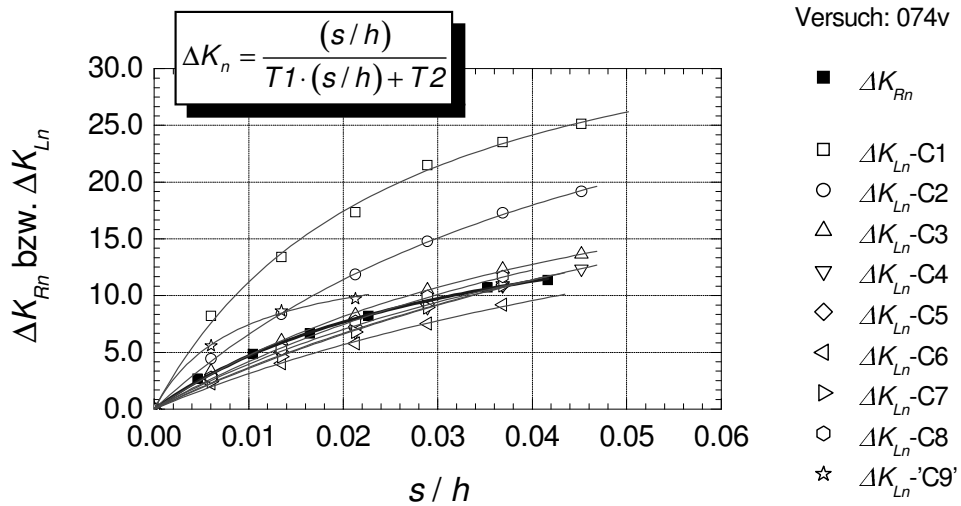


Bild D.83: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

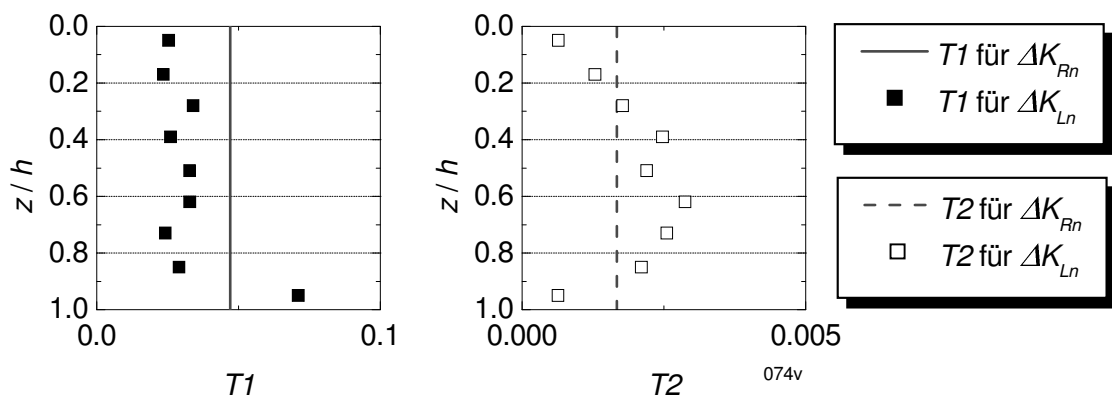


Bild D.84: Beiwerte T1 und T2

Mobilisierung Erddruckkraft und Erddruck – Versuche ohne Maximalwert der Erddruckkraft

Versuch 049 – PV ($I_D = 0,19$) – Alu

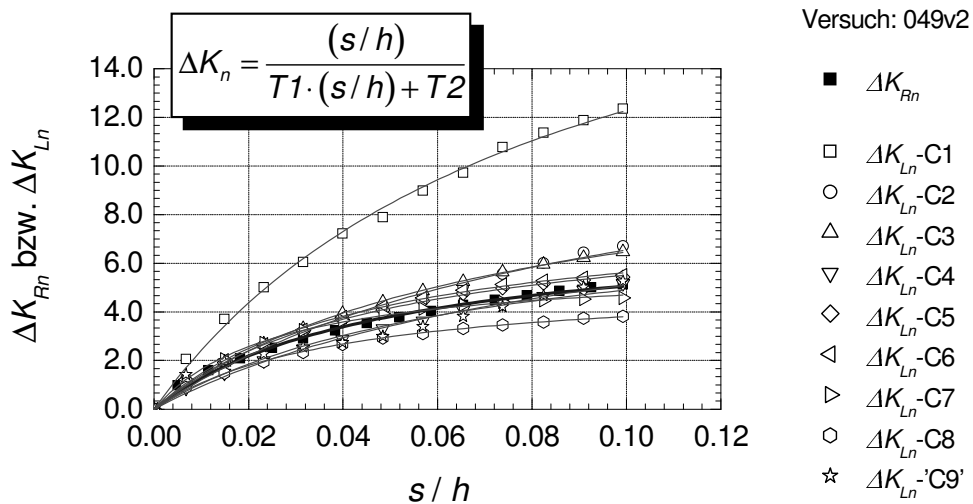


Bild D.85: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

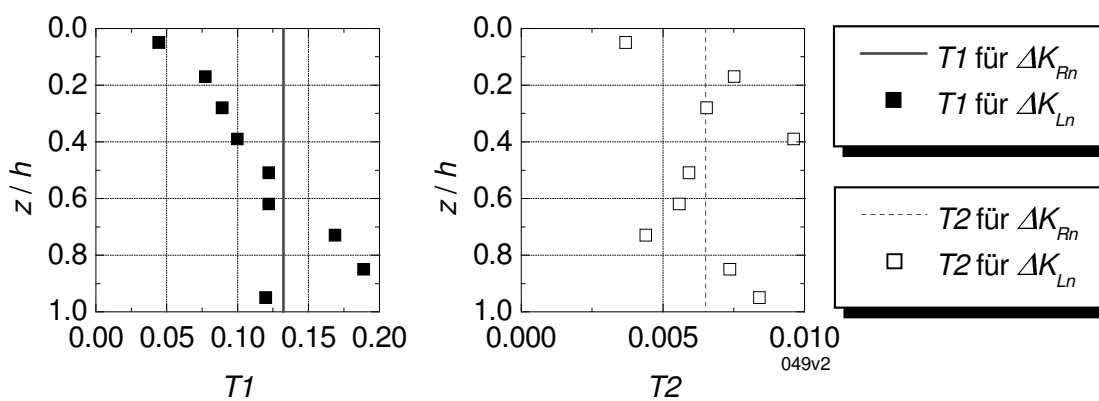


Bild D.86: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 055 – PV ($I_D = 0,19$) – Alu

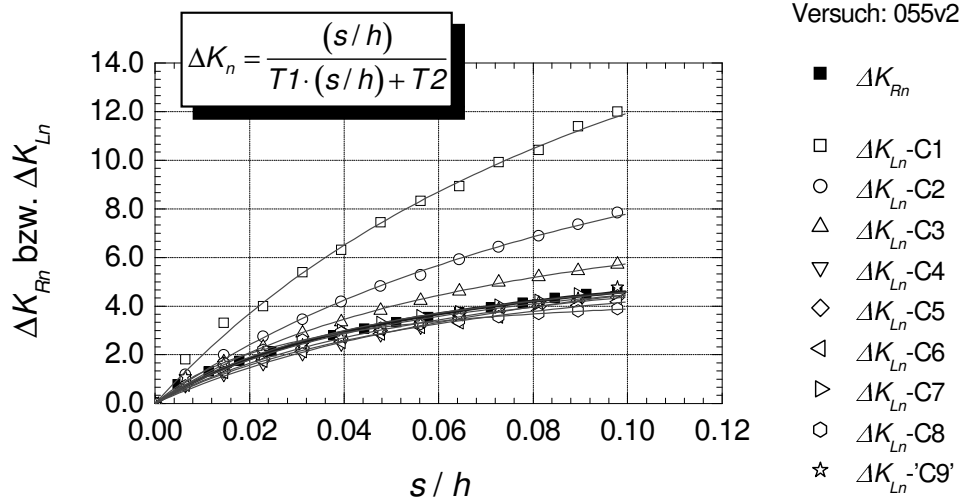


Bild D.87: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

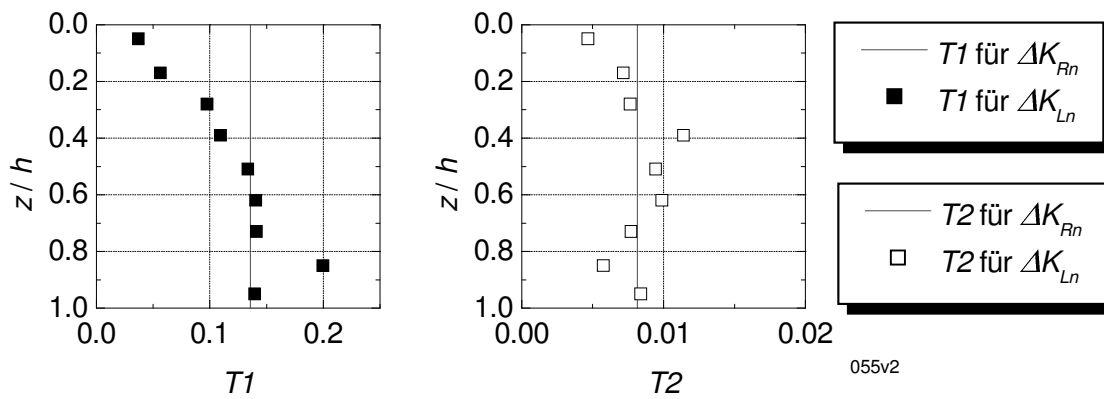


Bild D.88: Beiwerte T1 und T2

Versuch 070 – PV ($I_D = 0,26$) – Alu

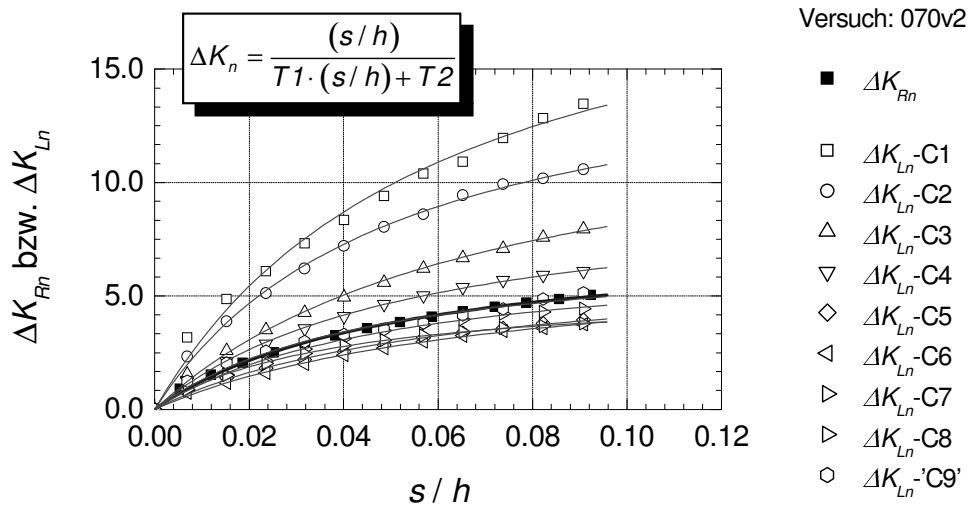


Bild D.89: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

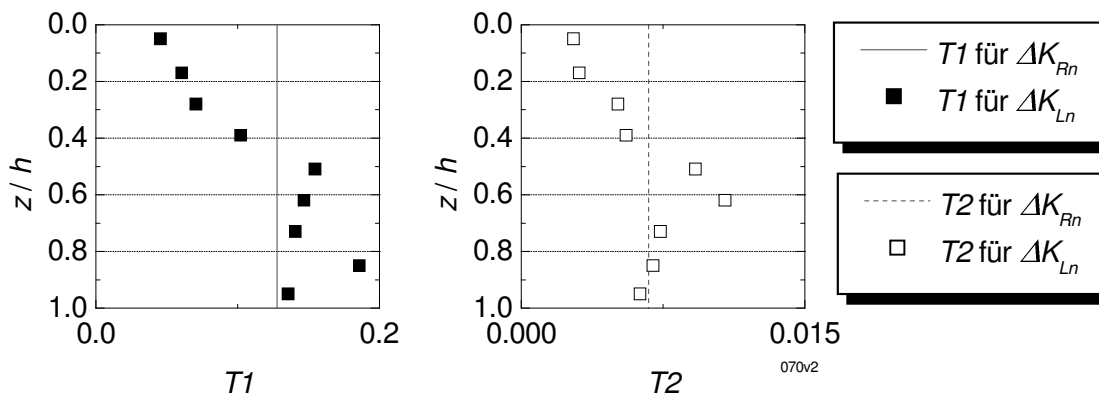


Bild D.90: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 053 – PV ($I_D = 0,35$) – Alu

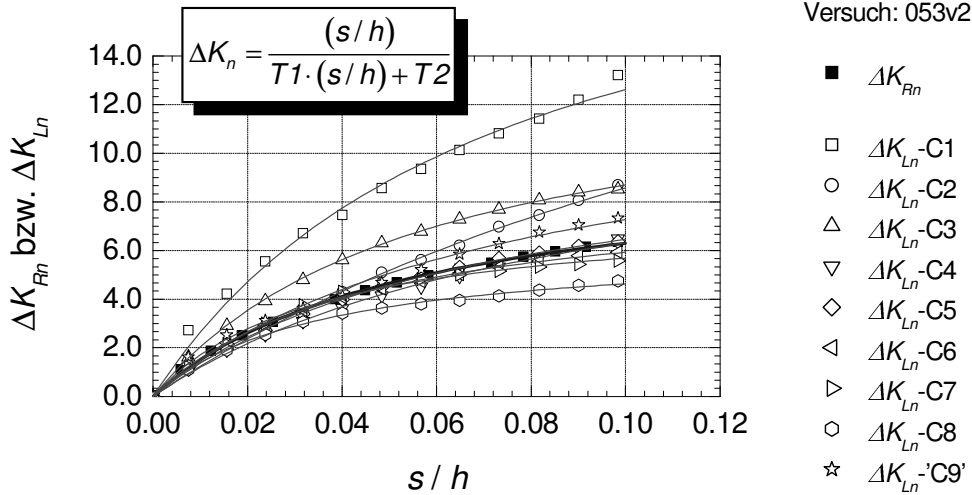


Bild D.91: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

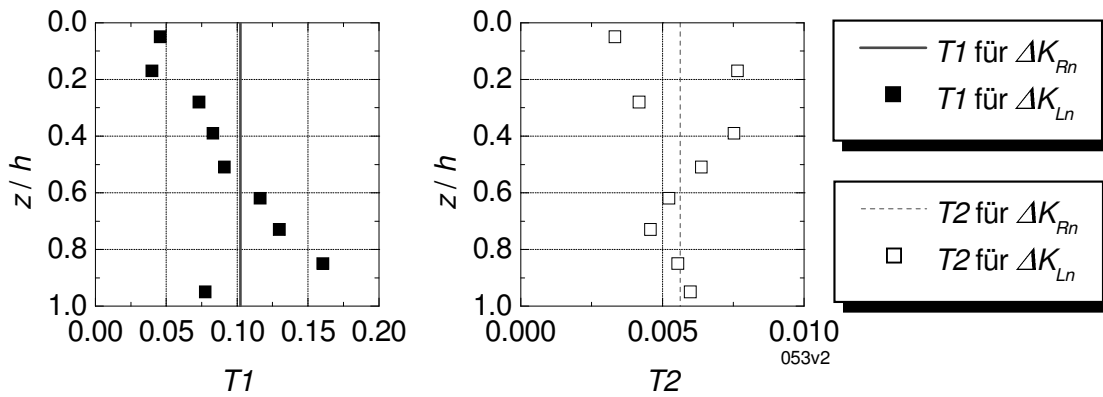


Bild D.92: Beiwerte T1 und T2

Versuch 052 – PV ($I_D = 0,43$) – Alu

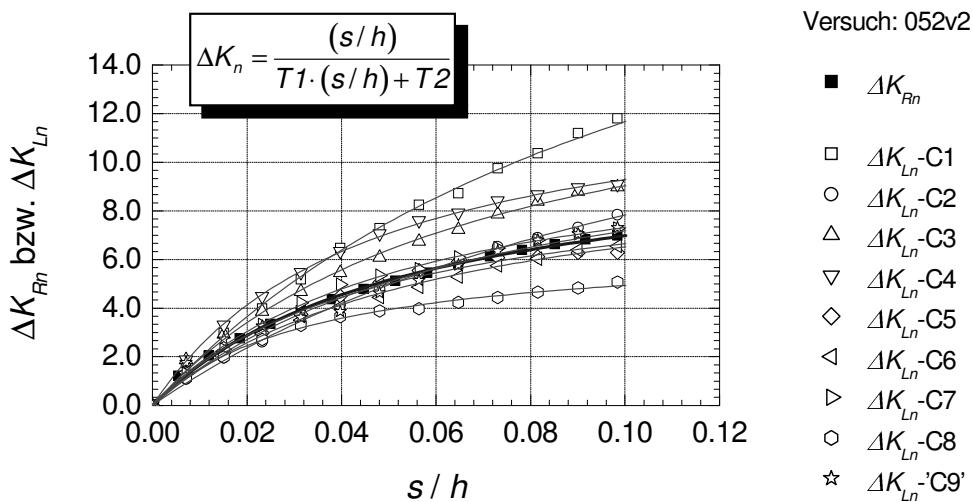


Bild D.93: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

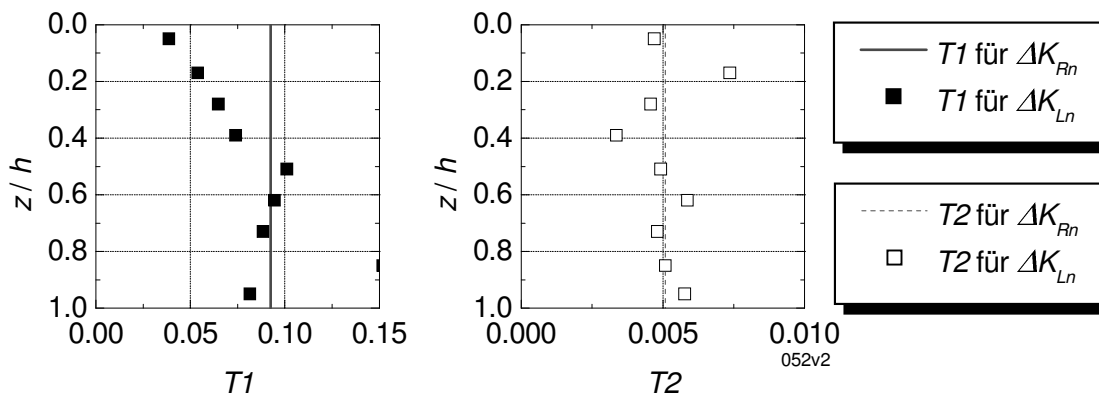


Bild D.94: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 050 – PV ($I_D = 0,45$) – Alu

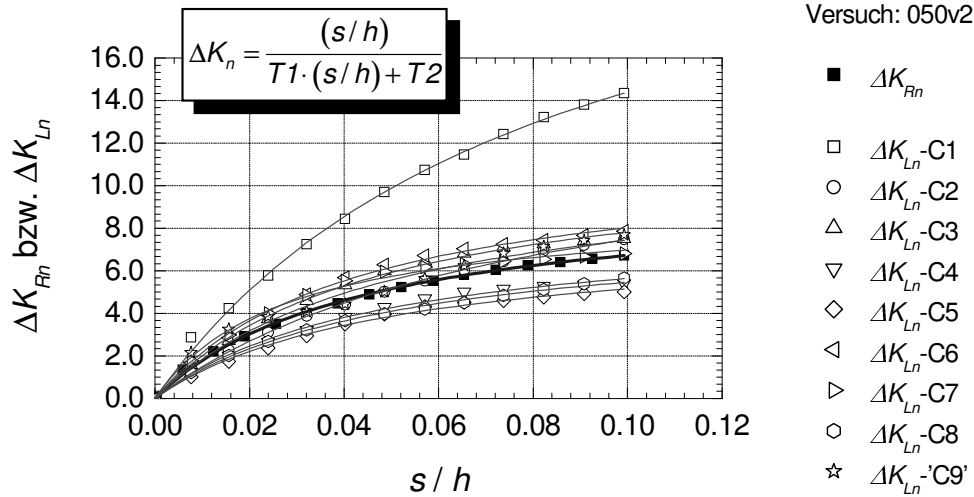


Bild D.95: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

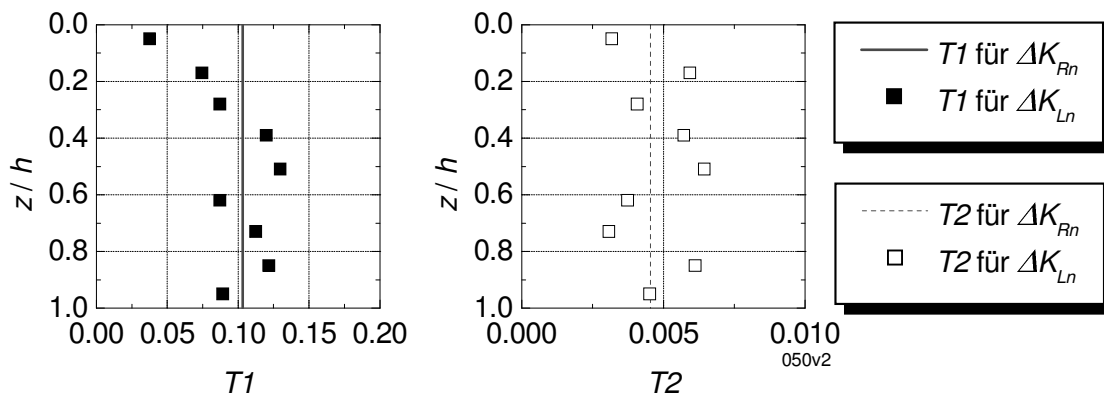


Bild D.96: Beiwerte T1 und T2

Versuch 051 – PV ($I_D = 0,53$) – Alu

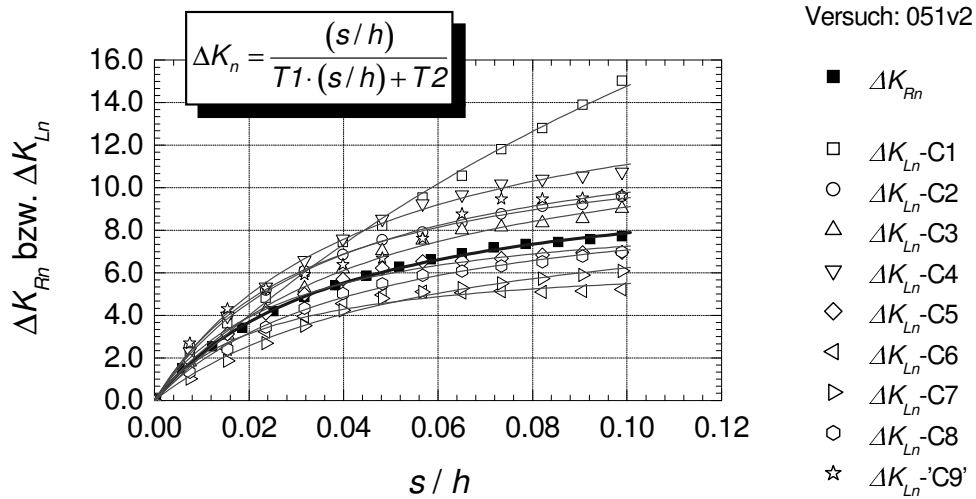


Bild D.97: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

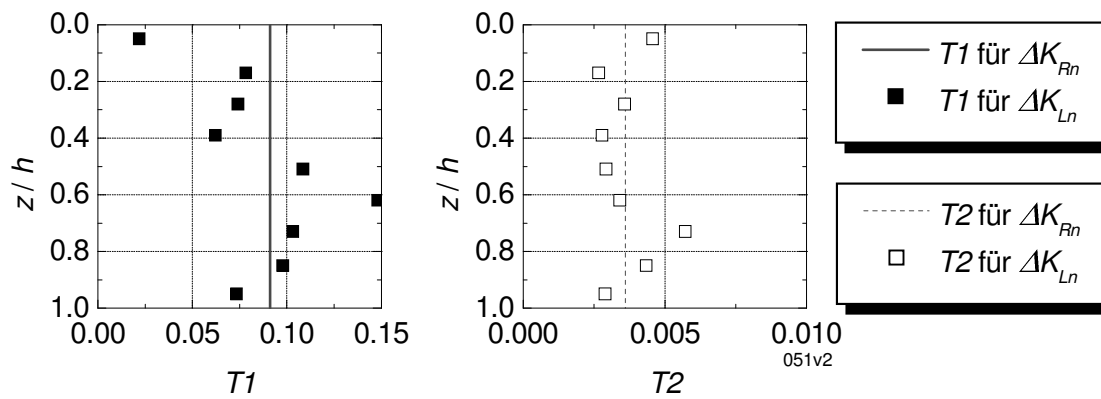


Bild D.98: Beiwerte $T1$ und $T2$

D.2 Kopfpunktdrehung

Tabelle D.4: Kopfpunktdrehung — passiver Grenzzustand

Versuch	WOF	l_D	s_p / h	K_{Rnp}	$\tan \delta_{Rp}$	z_{Rp} / h
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
033	Alu	0.26	0.057	3.02	0.062	0.80
035	Alu	0.47	0.056	3.77	-0.013	0.81
032	Alu	0.65	0.041	4.68	-0.061	0.83
077	Alu	0.75	0.032	5.15	-0.020	0.83
079	Alu	0.87	0.029	6.71	-0.031	0.84
078	Folie2	0.86	0.031	6.14	0.005	0.84
037	S40	0.58	0.038	4.50	0.002	0.82

Tabelle D.5: Kopfpunktdrehung — Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen der Erddruckkraft

Versuch	WOF	l_D	$T1$	$T2$	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
033	Alu	0.26	0.2497	0.0071	1.45	0.66
035	Alu	0.47	0.1961	0.0052	1.84	0.76
032	Alu	0.65	0.1537	0.0026	1.78	0.68
077	Alu	0.75	0.1531	0.0017	1.75	0.61
079	Alu	0.87	0.1057	0.0015	1.33	0.60
078	Folie2	0.86	0.1230	0.0013	1.75	0.62
037	S40	0.58	0.1548	0.0029	2.00	0.83

Grenzverschiebung und Grenzwert

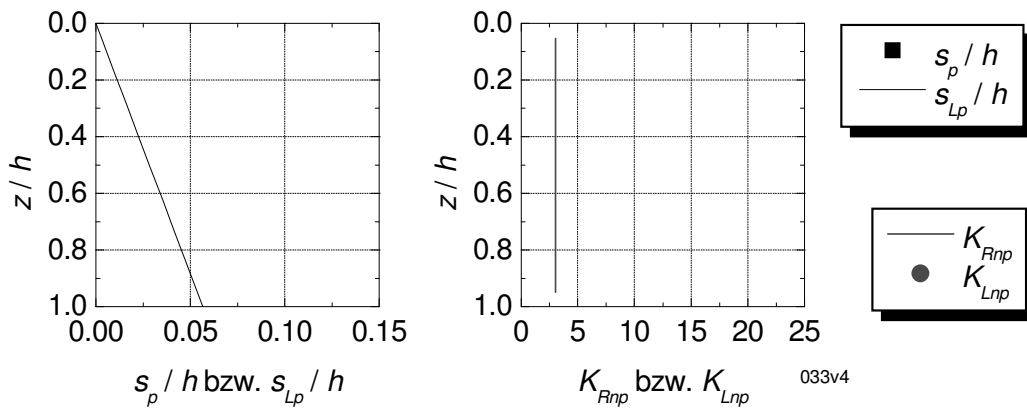


Bild D.99: Versuch 033 – KPD ($I_D = 0,26$) – Alu

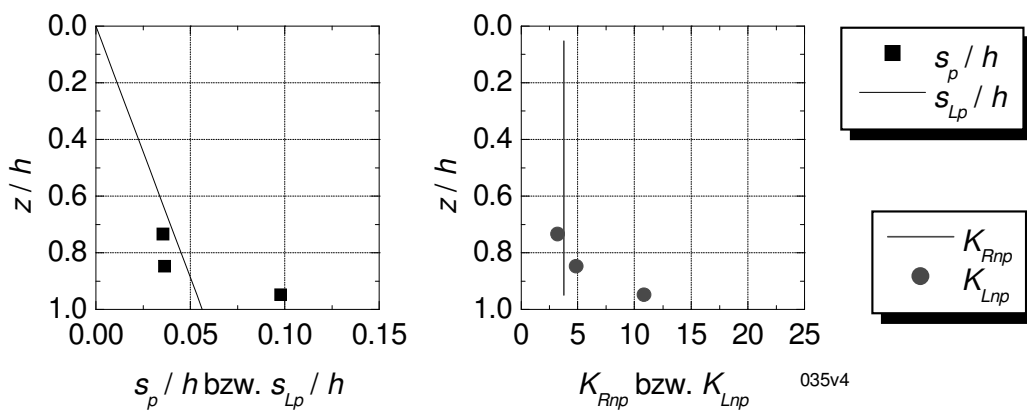


Bild D.100: Versuch 035 – KPD ($I_D = 0,47$) – Alu

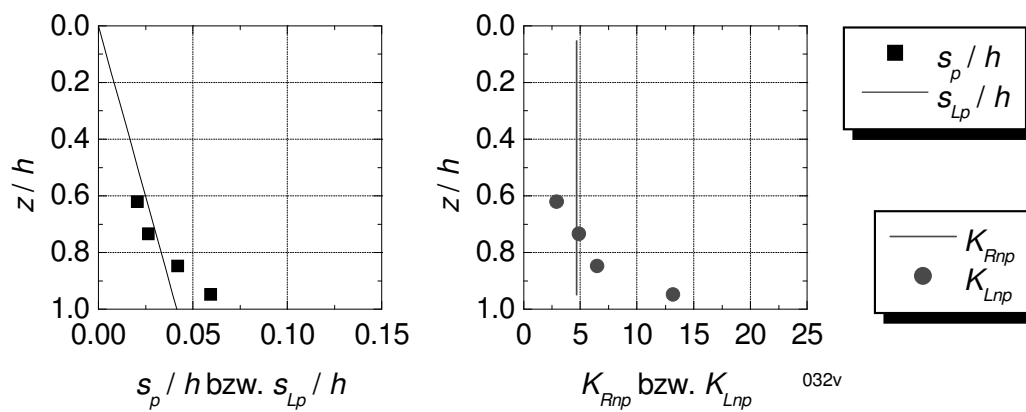


Bild D.101: Versuch 032 – KPD ($I_D = 0,65$) – Alu

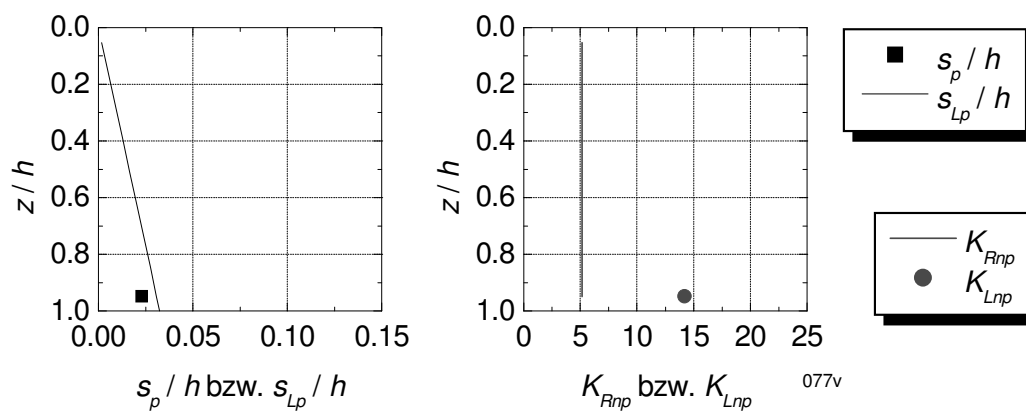


Bild D.102: Versuch 077 – KPD ($I_D = 0,75$) – Alu

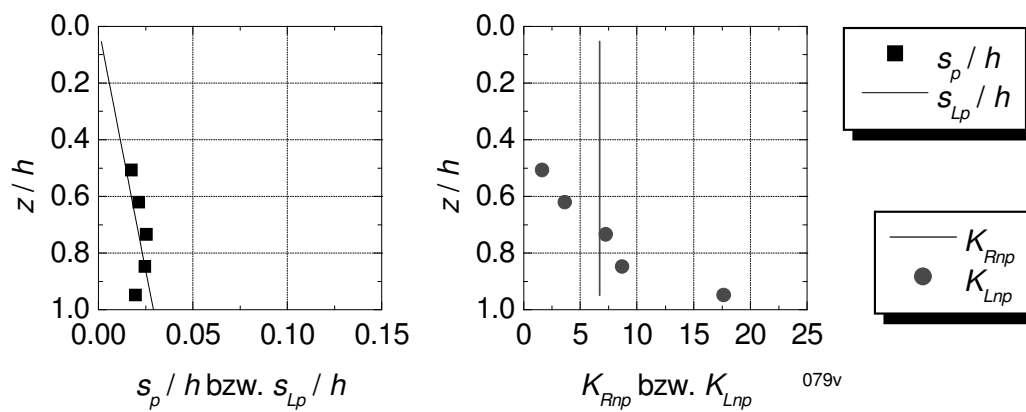


Bild D.103: Versuch 079 – KPD ($I_D = 0,87$) – Alu

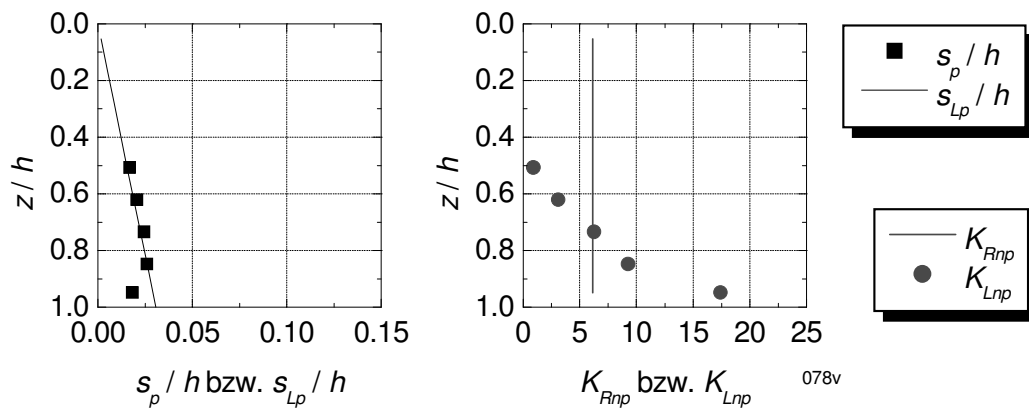


Bild D.104: Versuch 078 – KPD ($I_D = 0,86$) – Folie 2

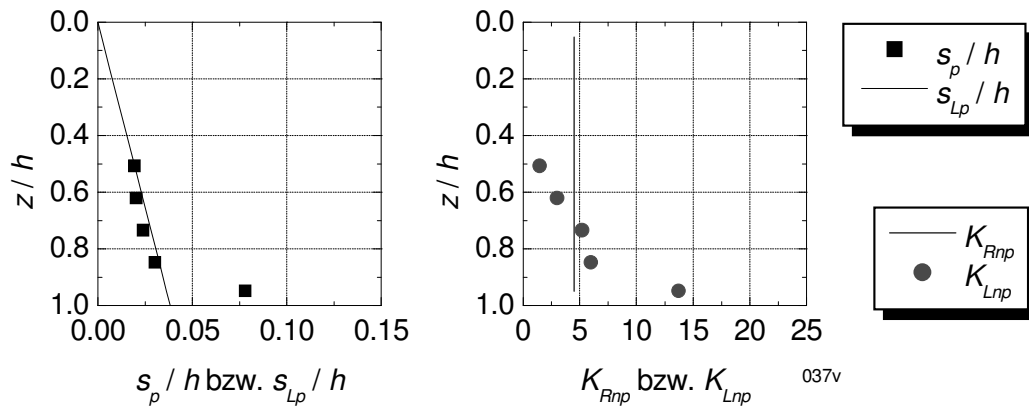


Bild D.105: Versuch 037 – KPD ($I_D = 0,58$) – S40

Mobilisierung Erddruckkraft und Erddruck

Versuch 033 – KPD ($I_D = 0,26$) – Alu

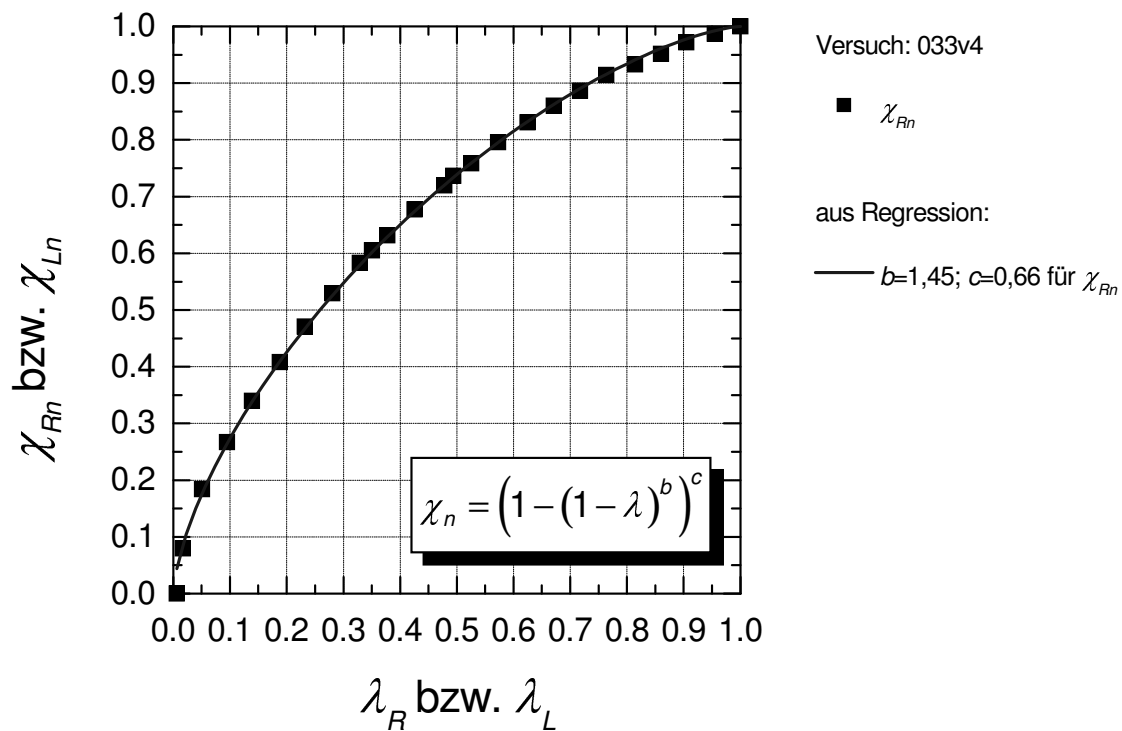


Bild D.106: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

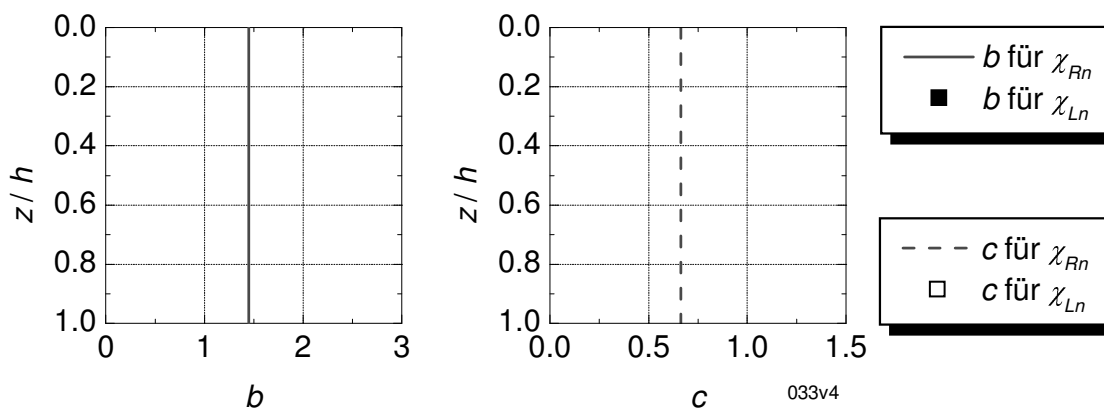


Bild D.107: Beiwerte b und c

Versuch 033 – KPD ($I_D = 0,26$) – Alu

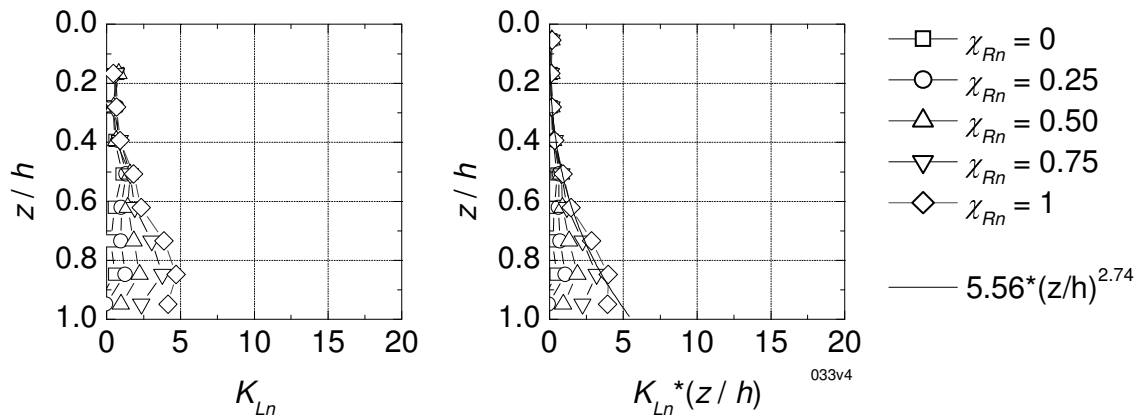


Bild D.108: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

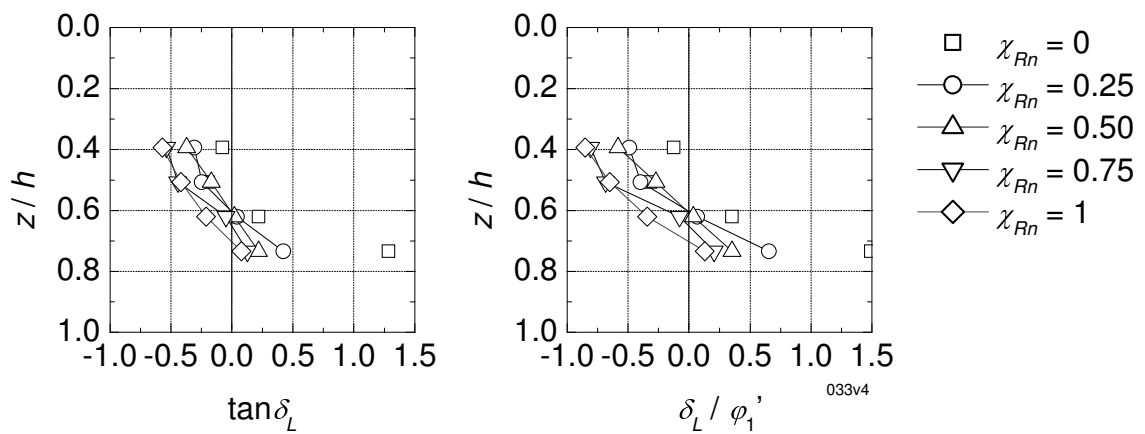


Bild D.109: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 035 – KPD ($I_D = 0,47$) – Alu

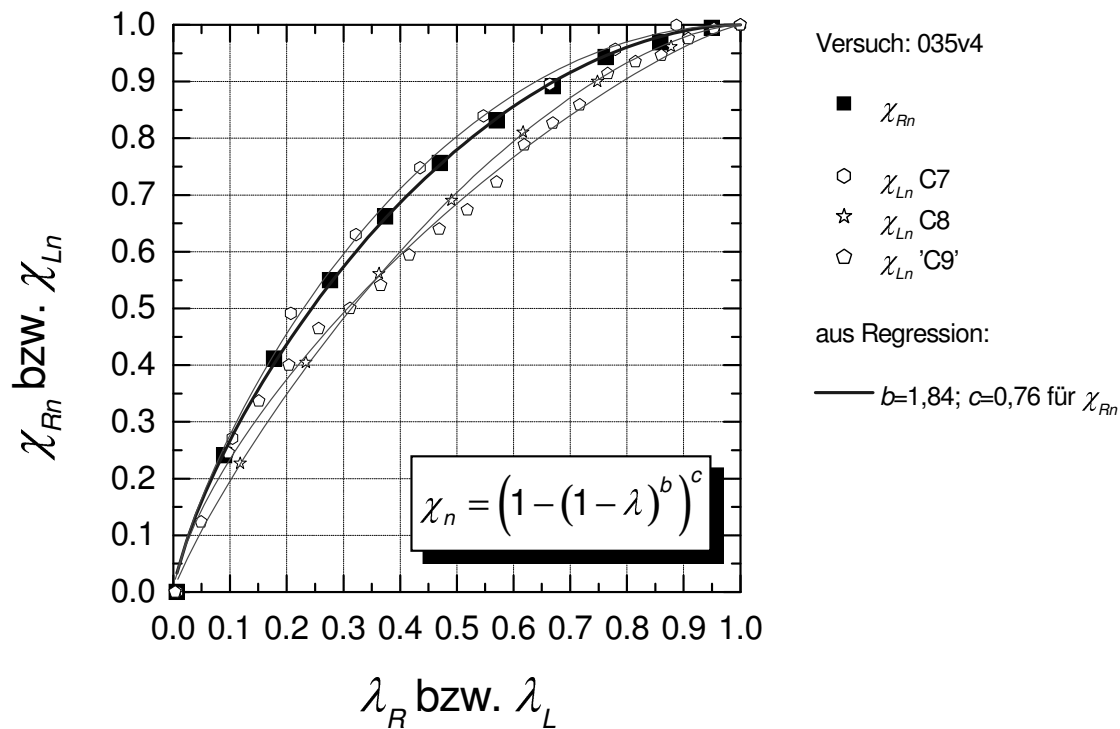


Bild D.110: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

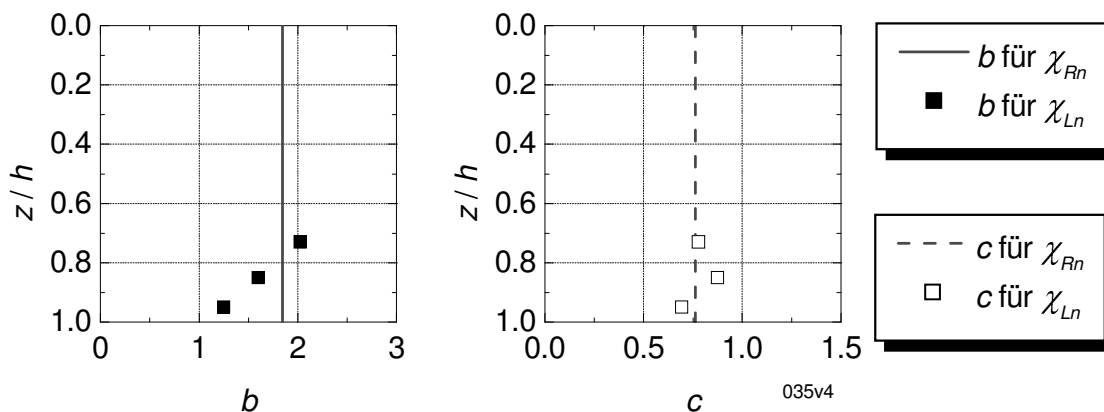


Bild D.111: Beiwerte b und c

Versuch 035 – KPD ($I_D = 0,47$) – Alu

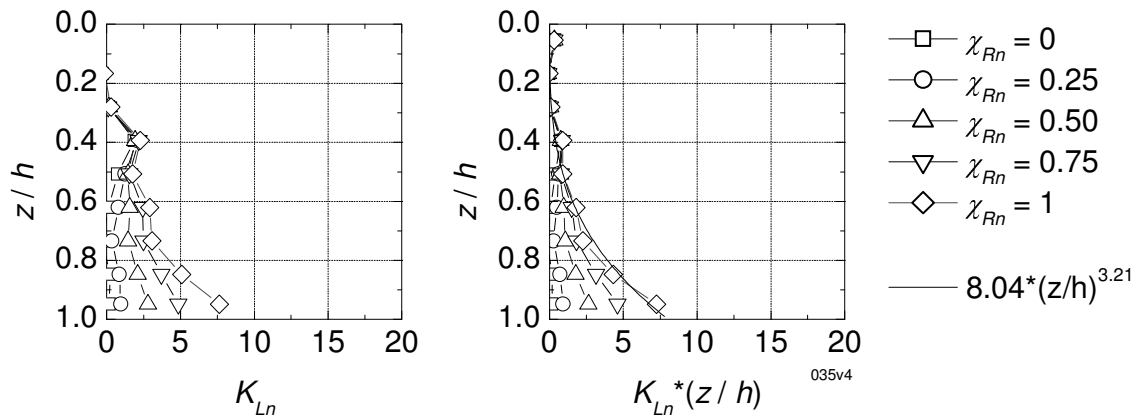


Bild D.112: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

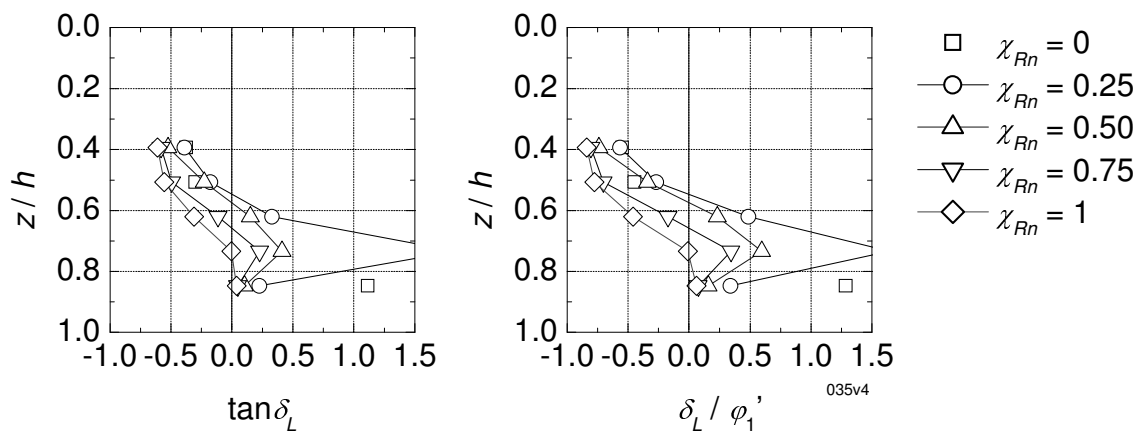


Bild D.113: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 032 – KPD ($I_D = 0,65$) – Alu

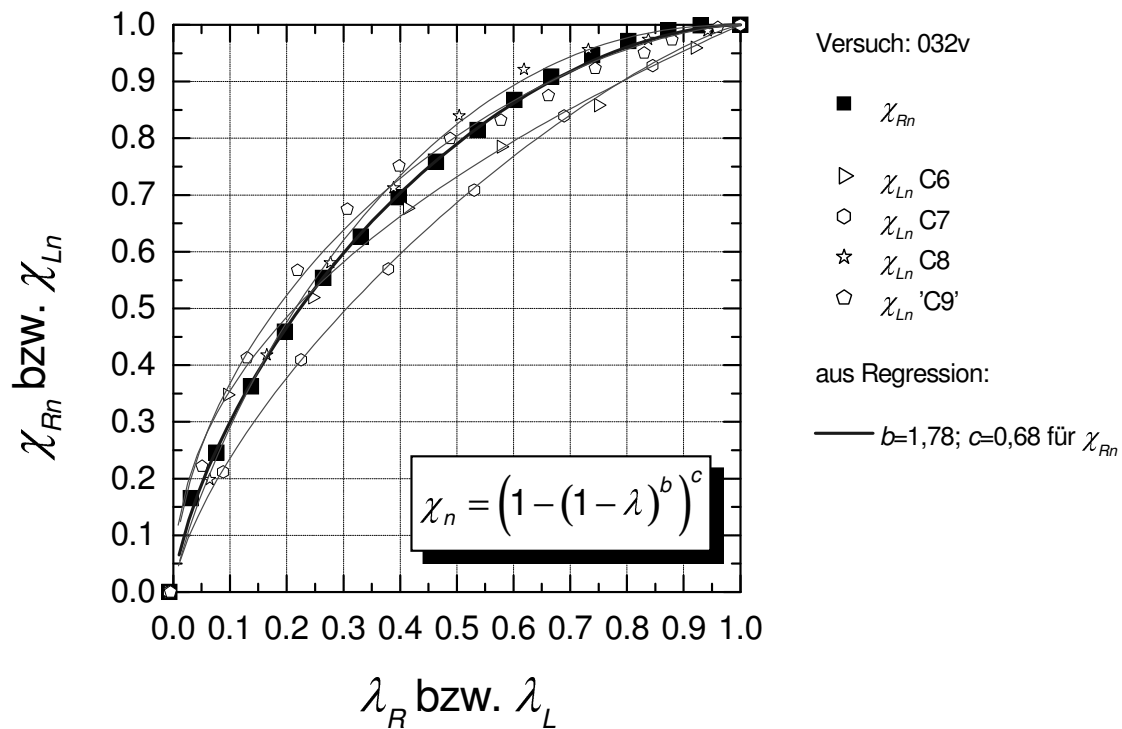


Bild D.114: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

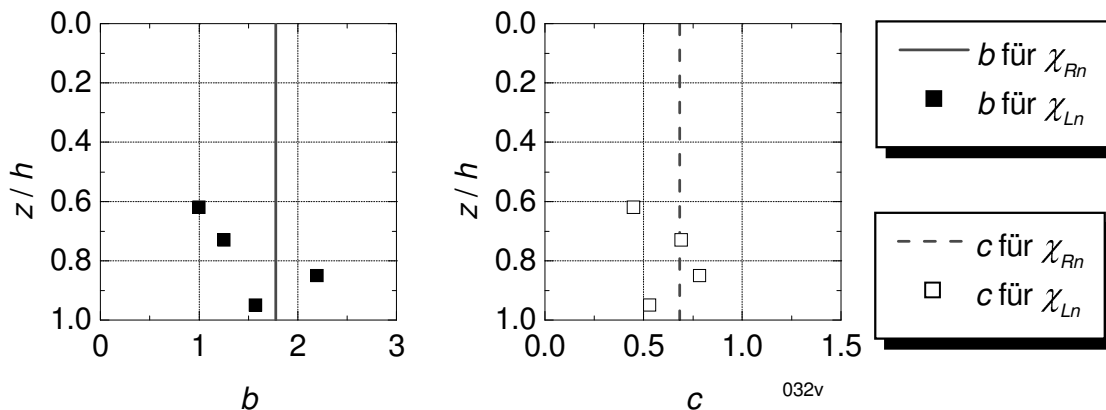


Bild D.115: Beiwerte b und c

Versuch 032 – KPD ($I_D = 0,65$) – Alu

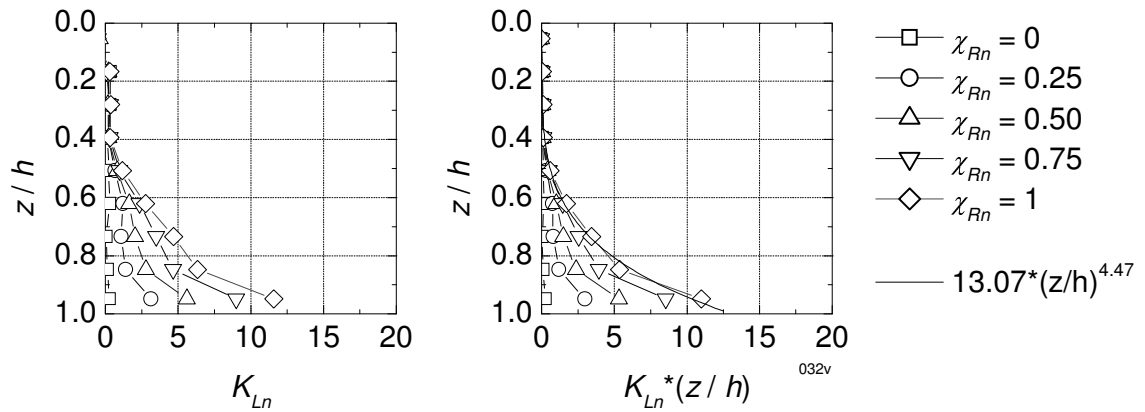


Bild D.116: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

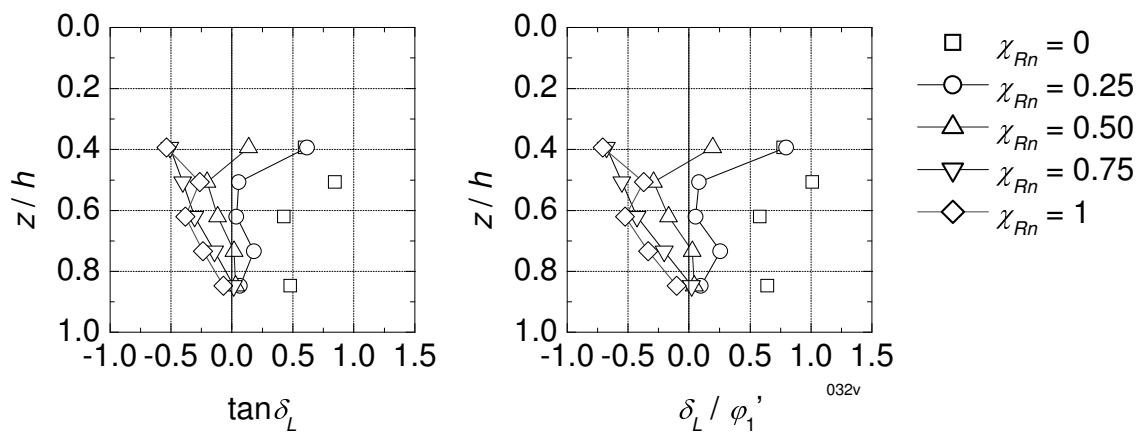


Bild D.117: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 077 – KPD ($I_D = 0,75$) – Alu

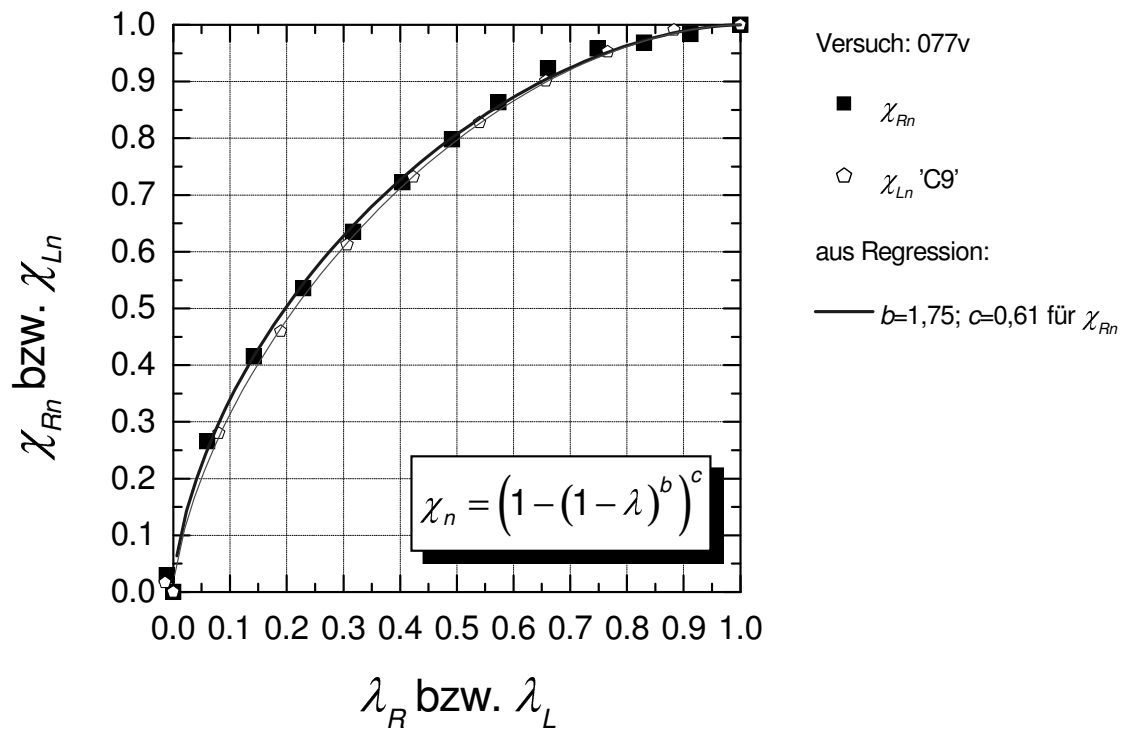


Bild D.118: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

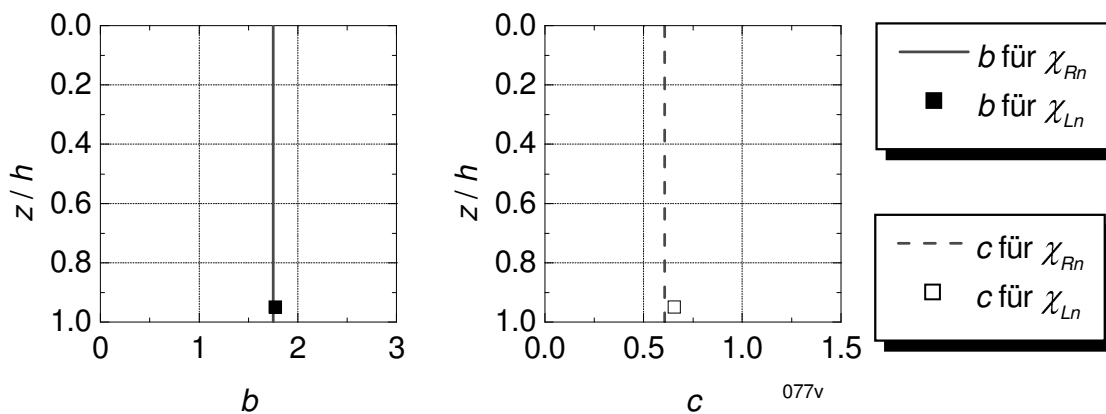


Bild D.119: Beiwerte b und c

Versuch 077 – KPD ($I_D = 0,75$) – Alu

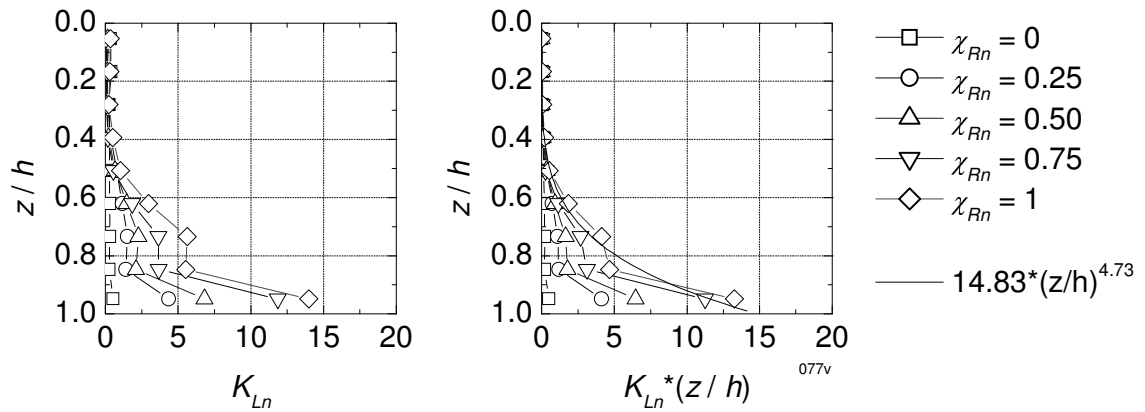


Bild D.120: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

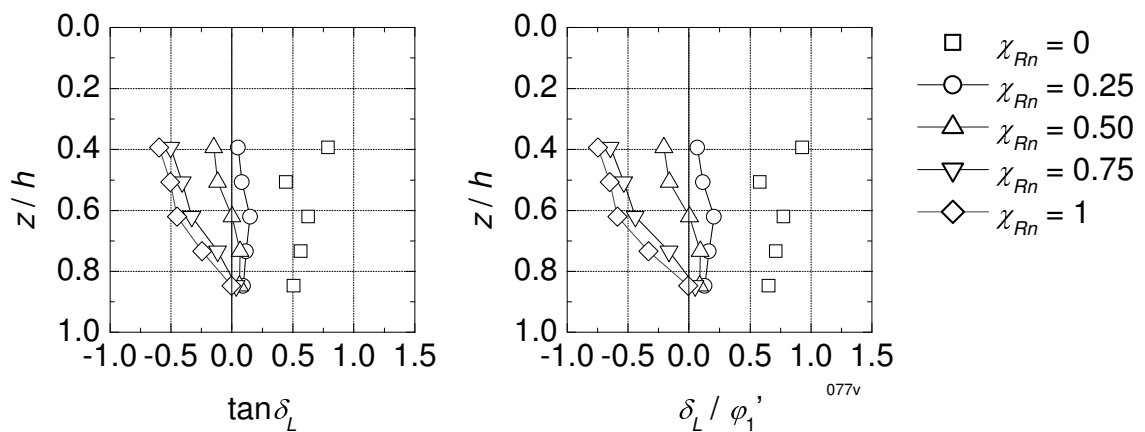


Bild D.121: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 079 – KPD ($I_D = 0,87$) – Alu

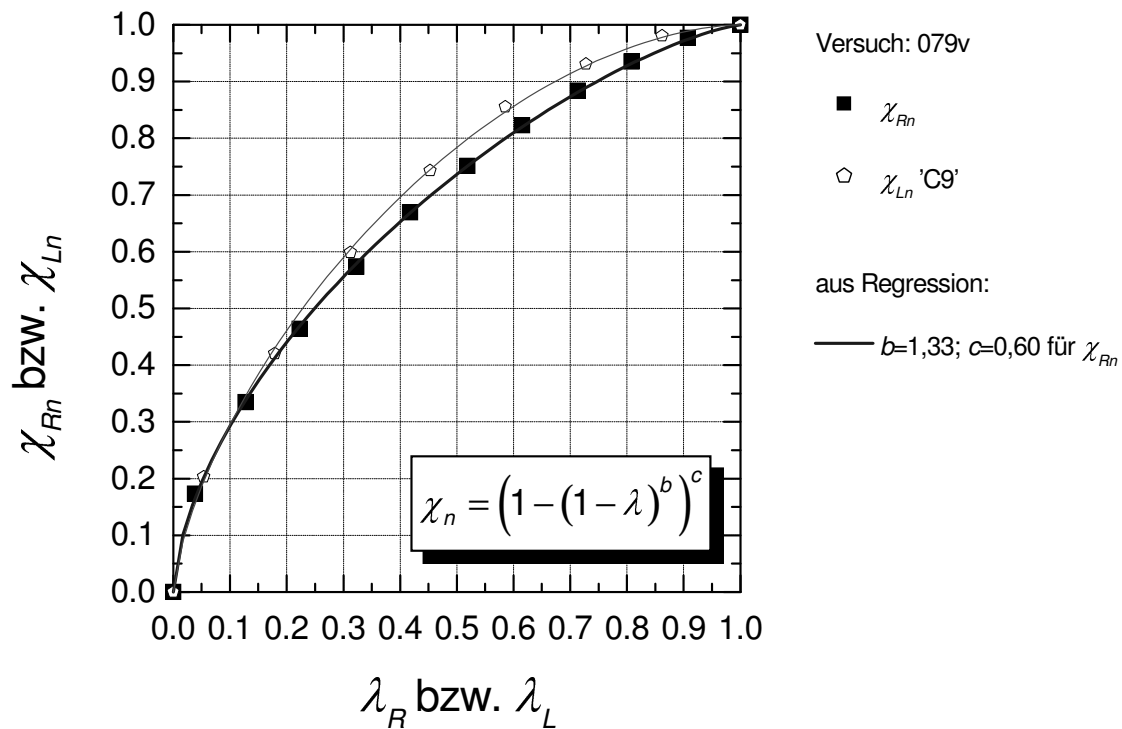


Bild D.122: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

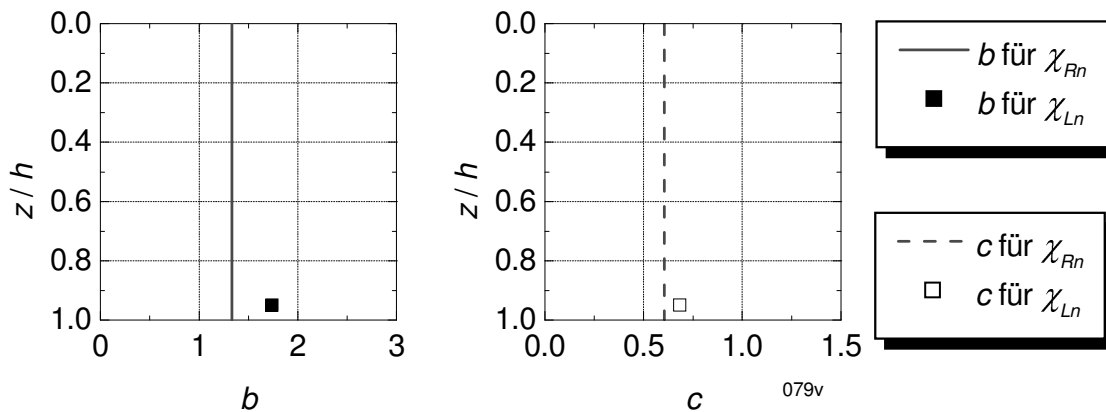


Bild D.123: Beiwerte b und c

Versuch 079 – KPD ($I_D = 0,87$) – Alu

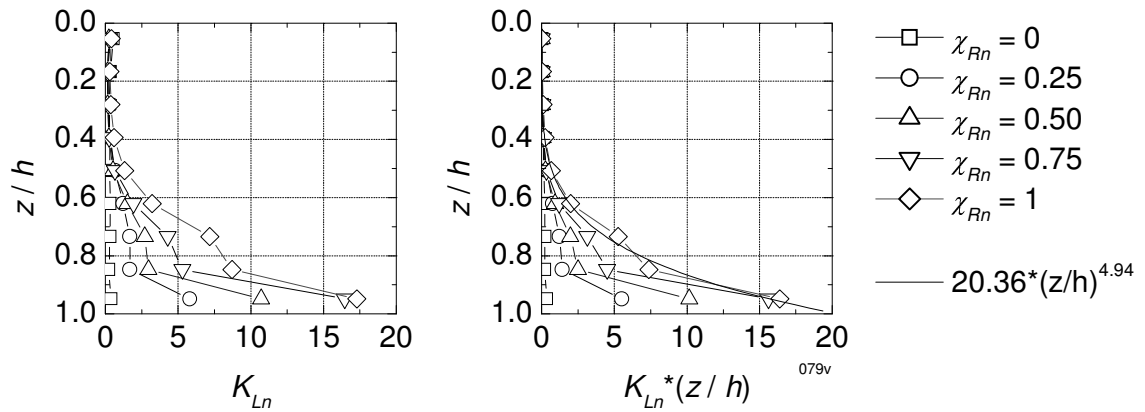


Bild D.124: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

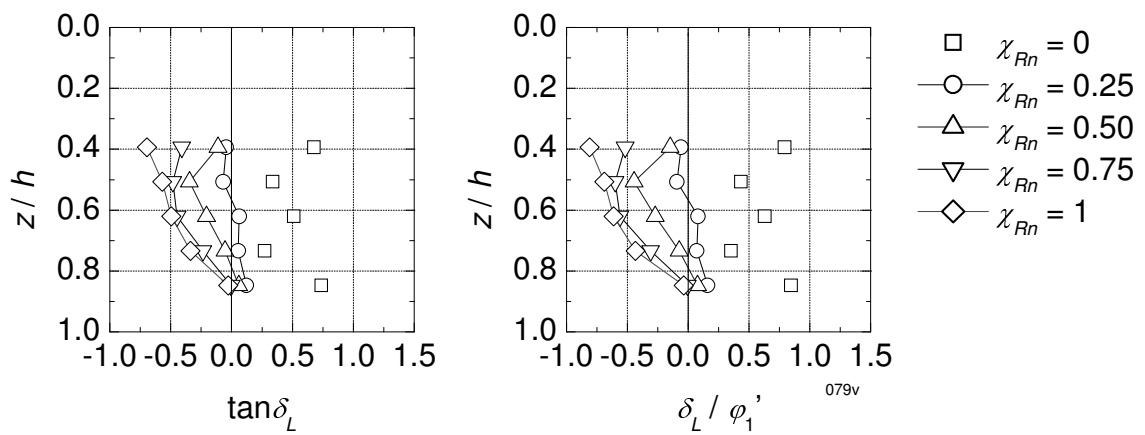


Bild D.125: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 078 – KPD ($I_D = 0,86$) – Folie 2

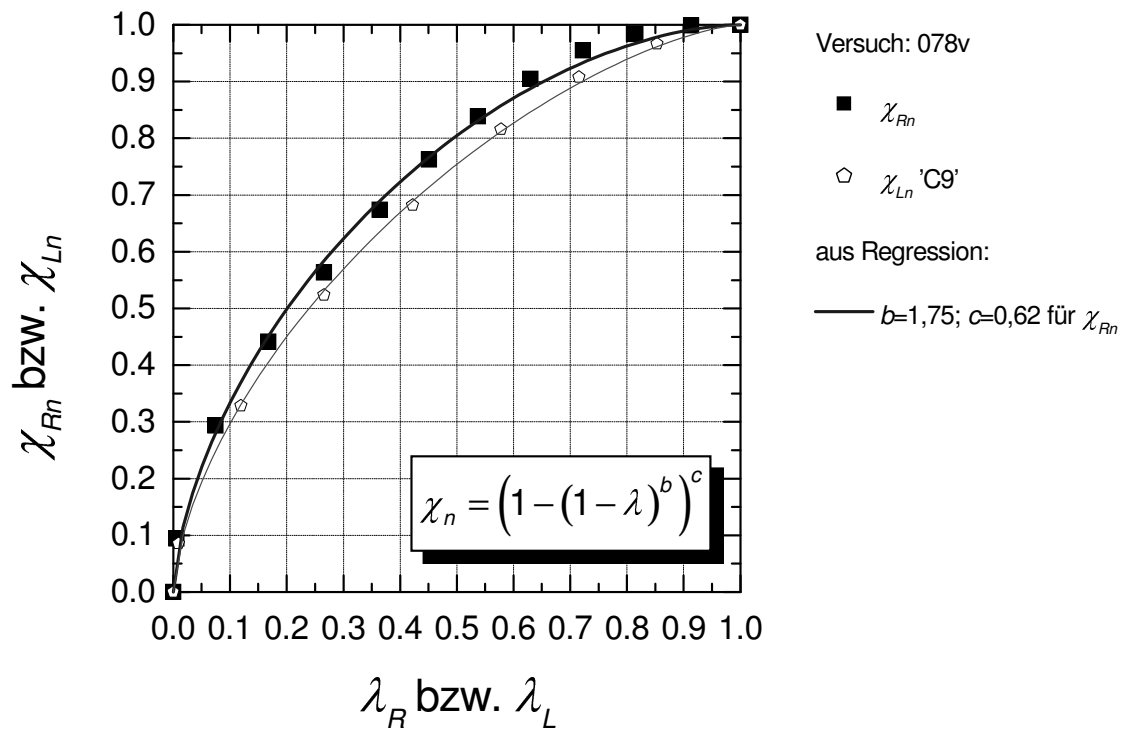


Bild D.126: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

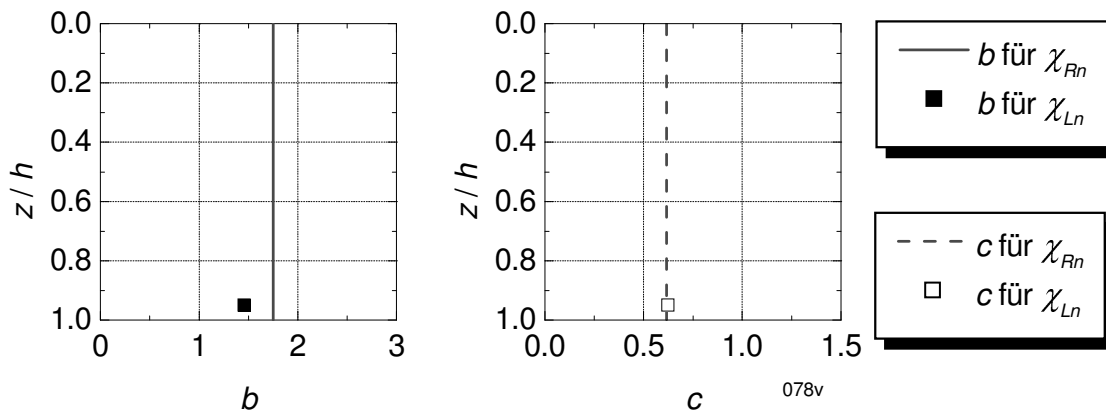


Bild D.127: Beiwerte b und c

Versuch 078 – KPD ($I_D = 0,86$) – Folie 2

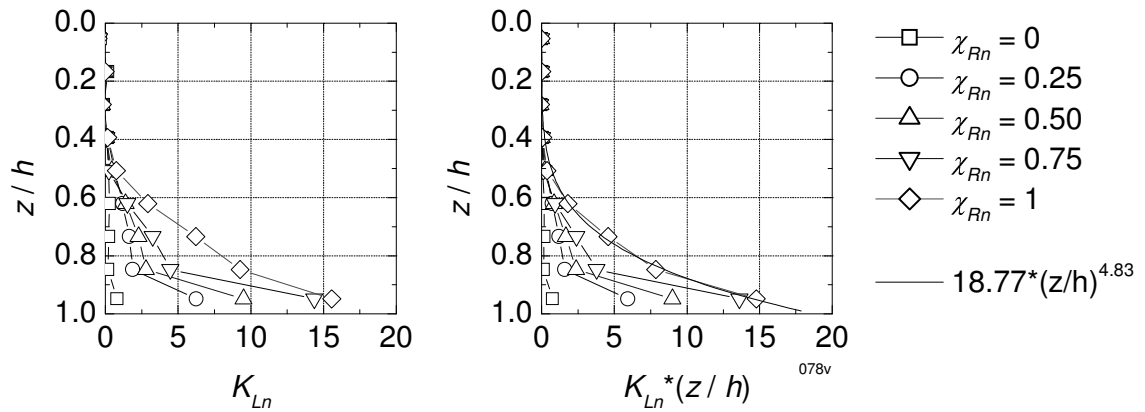


Bild D.128: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

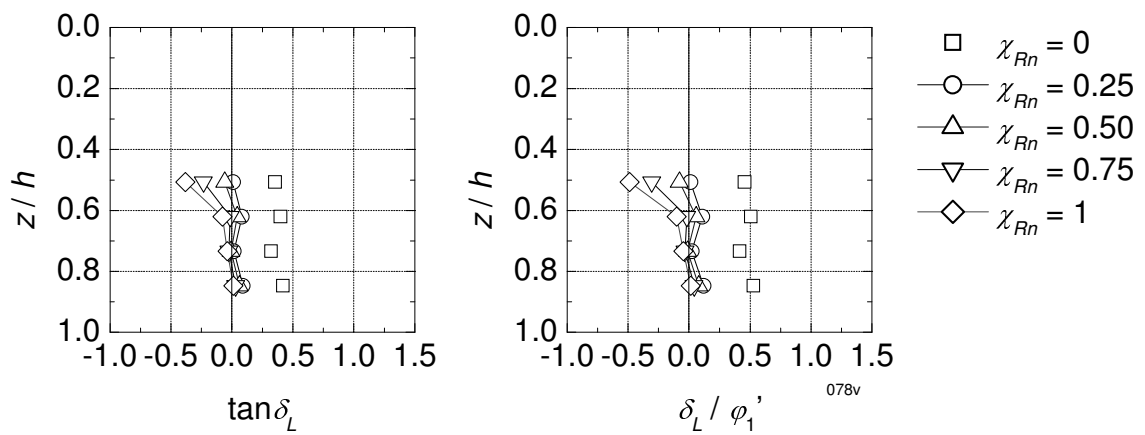


Bild D.129: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 037 – KPD ($I_D = 0,58$) – S40

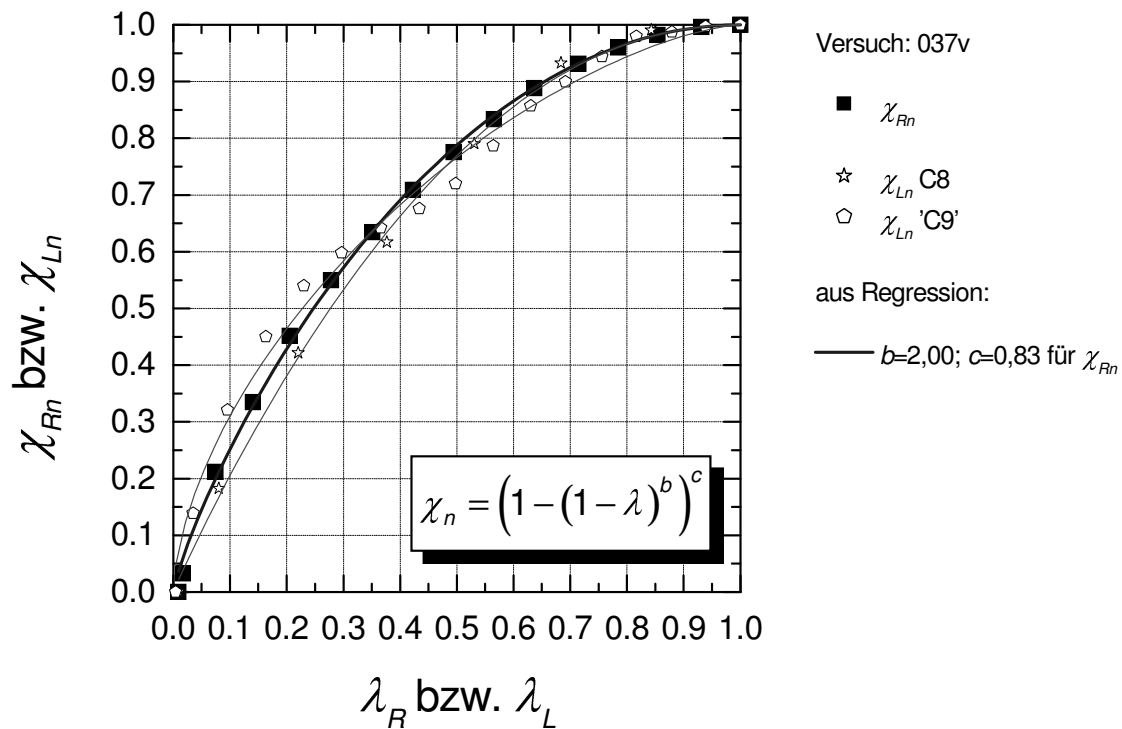


Bild D.130: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

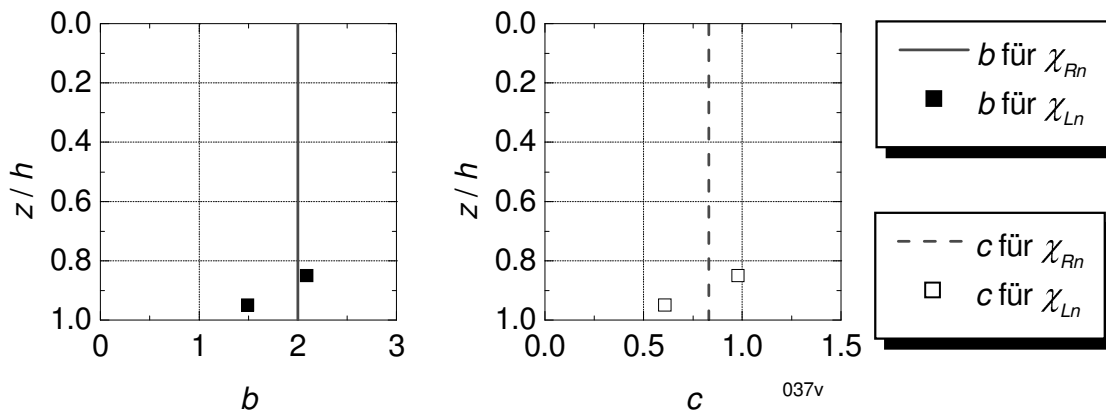


Bild D.131: Beiwerte b und c

Versuch 037 – KPD ($I_D = 0,58$) – S40

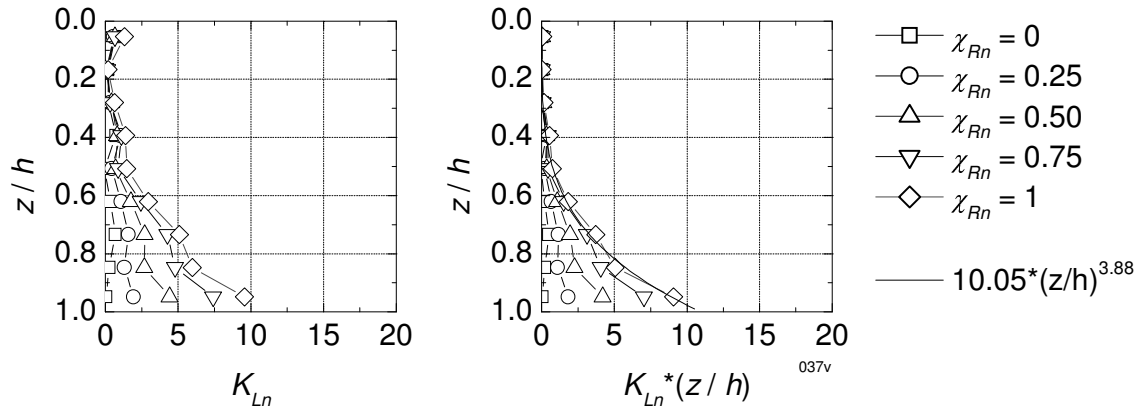


Bild D.132: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

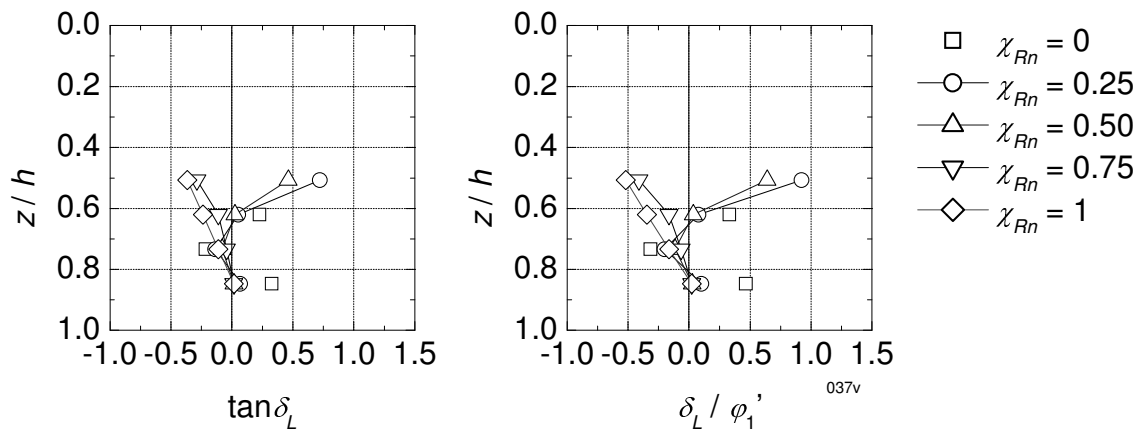


Bild D.133: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 033 – KPD ($I_D = 0,26$) – Alu

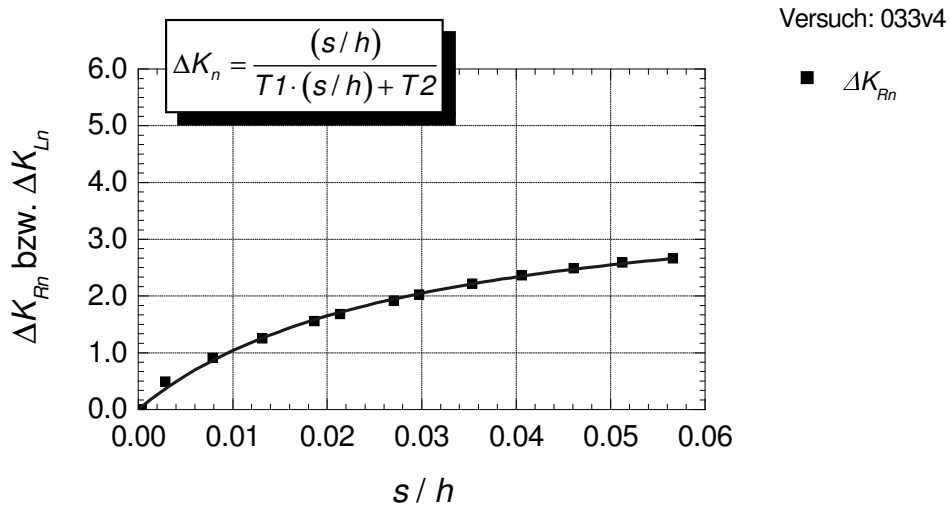


Bild D.134: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

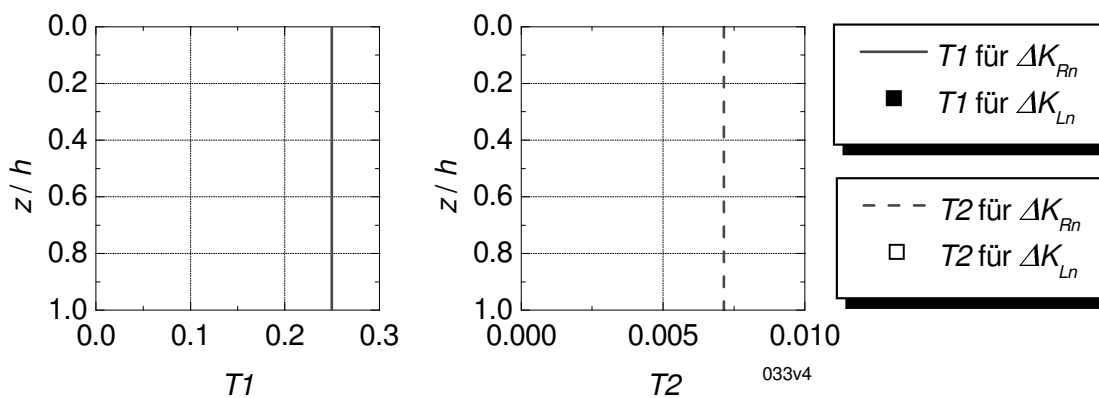


Bild D.135: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 035 – KPD ($I_D = 0,47$) – Alu

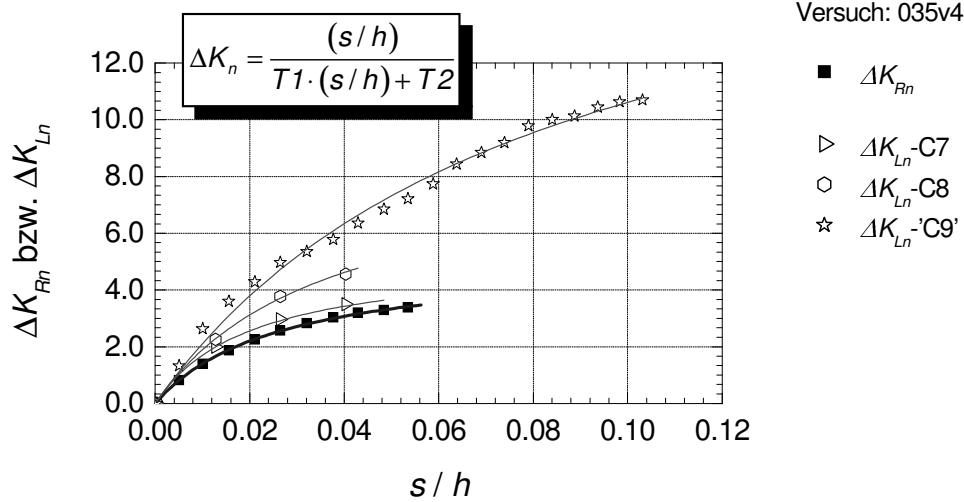


Bild D.136: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

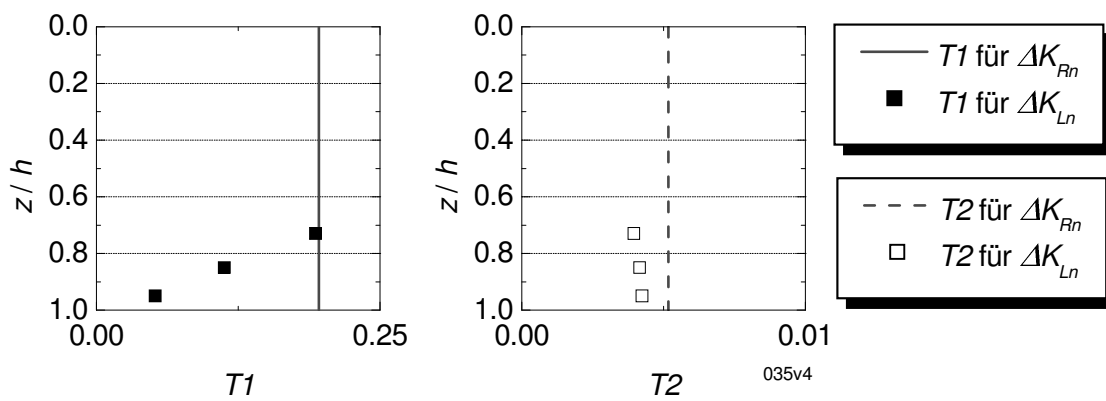


Bild D.137: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 032 – KPD ($I_D = 0,65$) – Alu

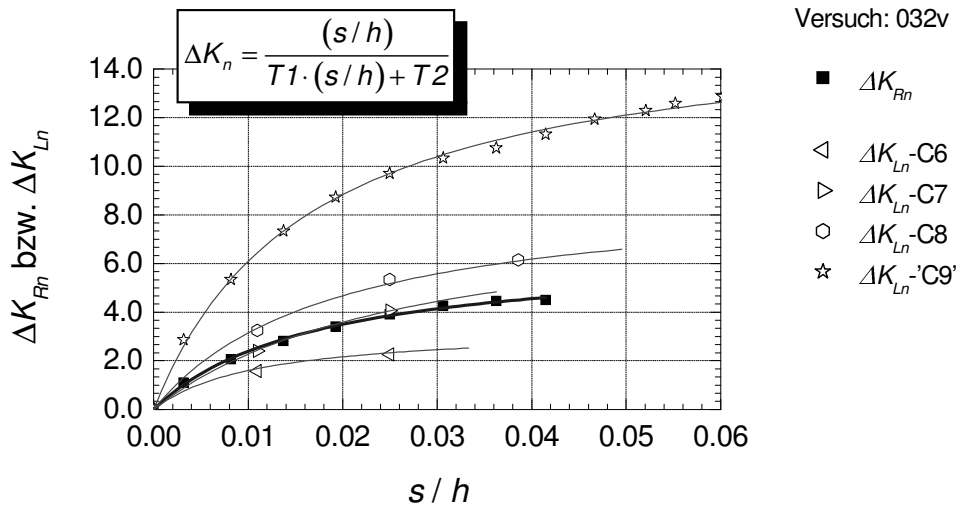


Bild D.138: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

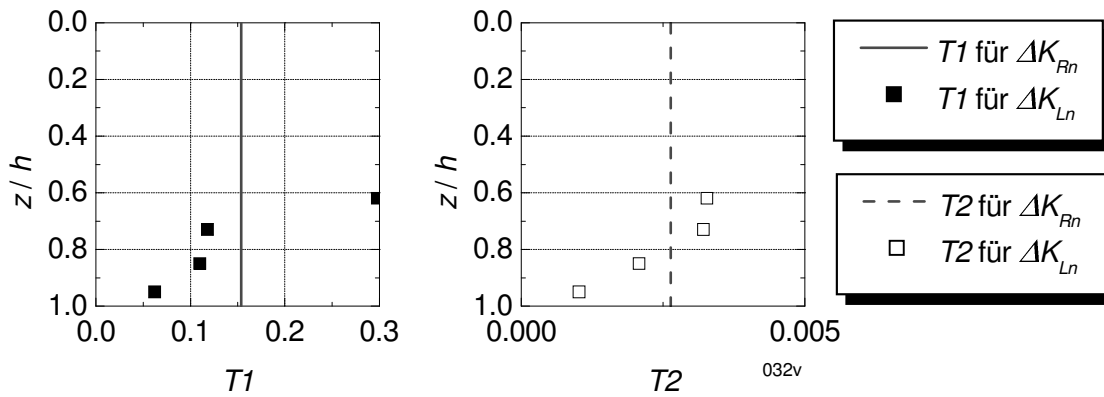


Bild D.139: Beiwerte T1 und T2

Versuch 077 – KPD ($I_D = 0,75$) – Alu

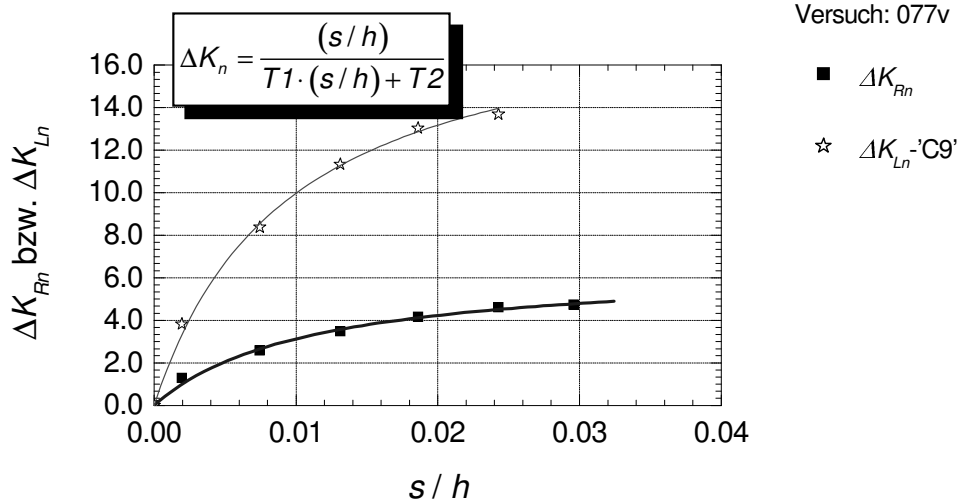


Bild D.140: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

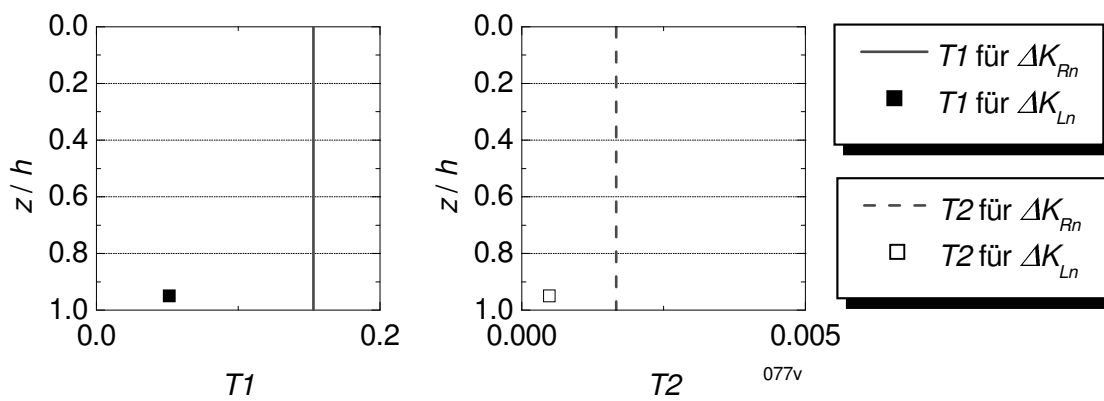


Bild D.141: Beiwerte T1 und T2

Versuch 079 – KPD ($I_D = 0,87$) – Alu

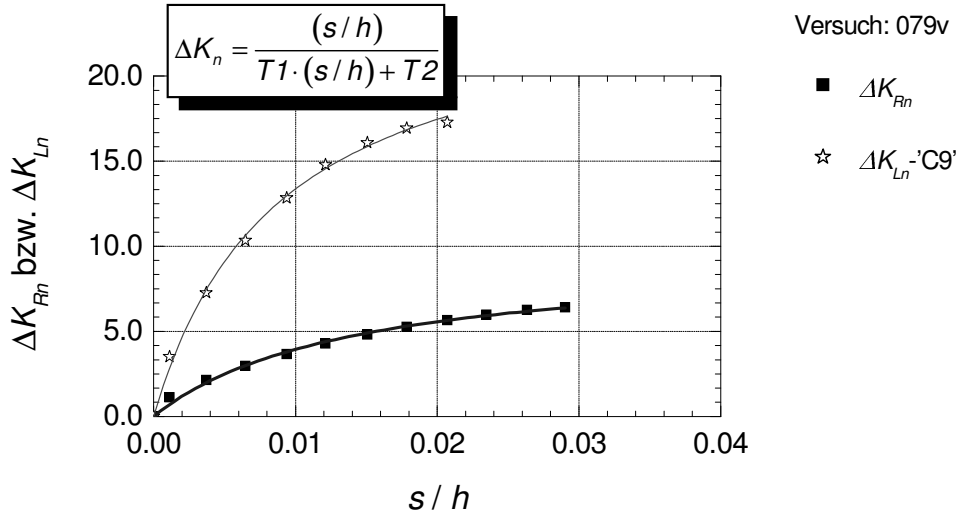


Bild D.142: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

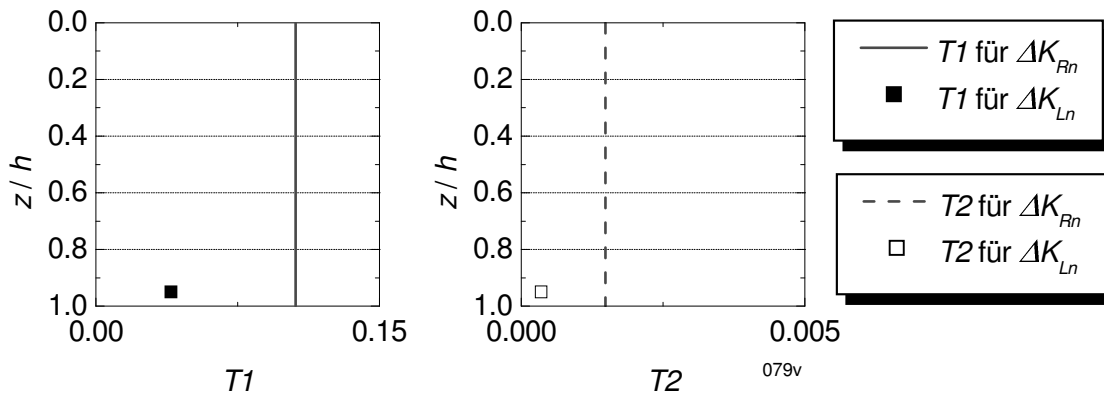


Bild D.143: Beiwerte T1 und T2

Versuch 078 – KPD ($I_D = 0,86$) – Folie 2

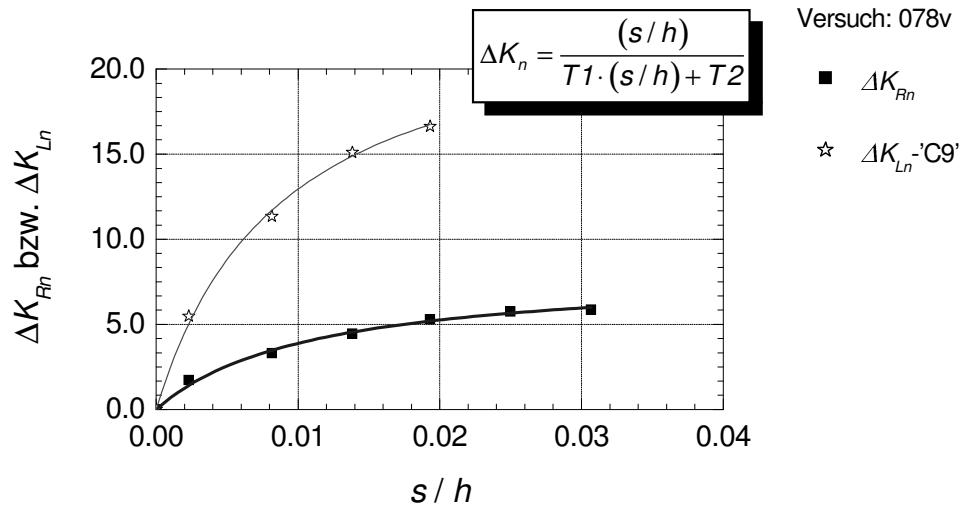


Bild D.144: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

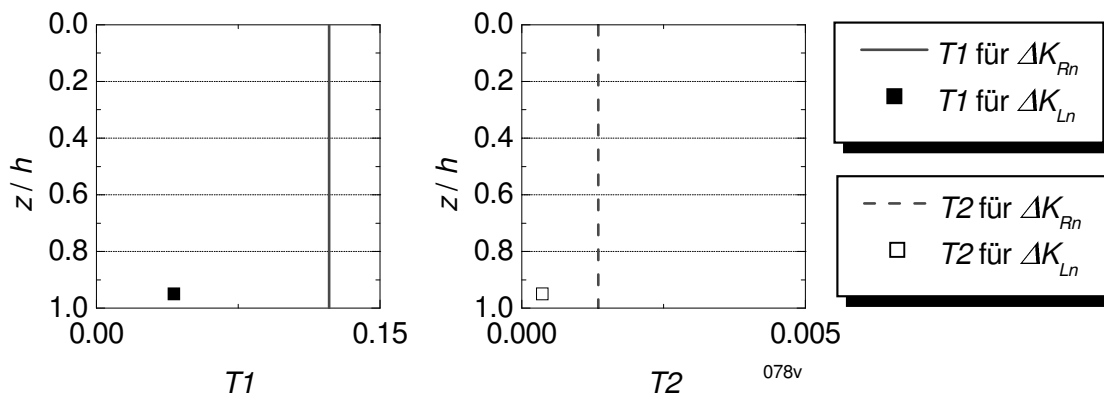


Bild D.145: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 037 – KPD ($I_D = 0,58$) – S40

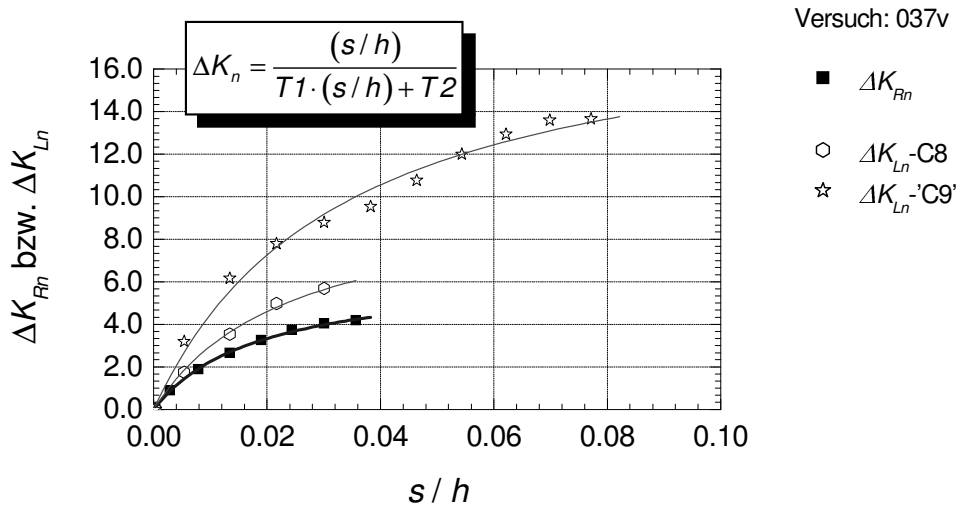


Bild D.146: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

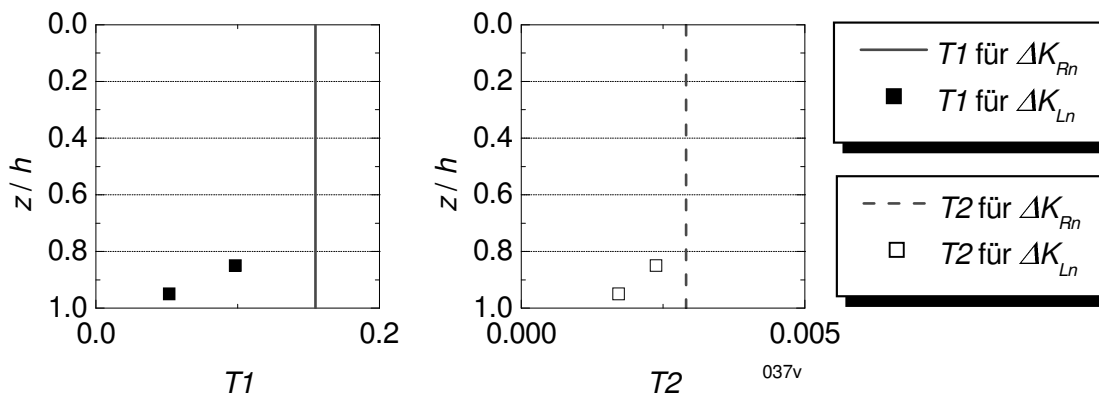


Bild D.147: Beiwerte $T1$ und $T2$

D.3 Fußpunktdrehung

Tabelle D.6: Fußpunktdrehung — Versuche mit Beobachtung des Austritts der 1. Gleitfläche an Sandoberfläche – Definition passiver Grenzzustand

Versuch	WOF	l_D	s_p / h	K_{Rnp}	$\tan \delta_{Rp}$	z_{Rp} / h
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
060	Alu	0.55	0.089	5.37	-0.286	0.46
039	Alu	0.56	0.073	4.94	-0.389	0.46
059	Alu	0.59	0.080	5.45	-0.269	0.44
062	Alu	0.60	0.068	5.50	-0.262	0.44
043	Alu	0.80	0.040	6.58	-0.449	0.39
063	Alu	0.82	0.063	6.63	-0.276	0.44
072	Folie2	0.83	0.091	6.25	-0.088	0.50
075	S40	0.55	0.087	5.49	-0.335	0.43
045	S40	0.81	0.051	5.54	-0.311	0.41

Tabelle D.7: Fußpunktdrehung — Versuche mit Beobachtung des Austritts der 1. Gleitfläche an Sandoberfläche – Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen der Erddruckkraft

Versuch	WOF	l_D	$T1$	$T2$	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
060	Alu	0.55	0.0917	0.0098	0.98	0.67
039	Alu	0.56	0.0943	0.0089	1.17	0.76
059	Alu	0.59	0.1017	0.0076	1.02	0.62
062	Alu	0.60	0.0739	0.0081	1.00	0.69
043	Alu	0.80	0.0552	0.0041	1.03	0.72
063	Alu	0.82	0.0687	0.0056	1.08	0.69
072	Folie2	0.83	0.1153	0.0052	1.23	0.59
075	S40	0.55	0.0727	0.0105	1.01	0.73
045	S40	0.81	0.0573	0.0065	1.06	0.75

Mobilisierung Erddruckkraft und Erddruck – Versuche mit Beobachtung des Austritts der 1. Gleitfläche

Versuch 060 – FPD ($I_D = 0,55$) – Alu

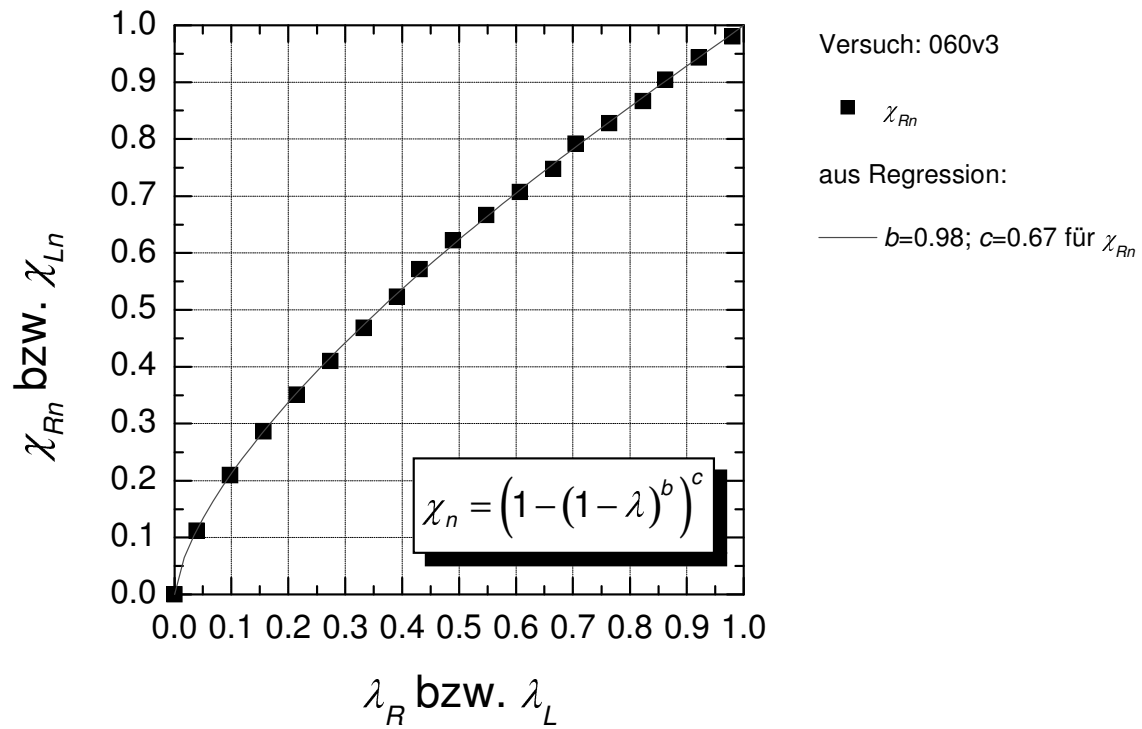


Bild D.148: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 060 – FPD ($I_D = 0,55$) – Alu

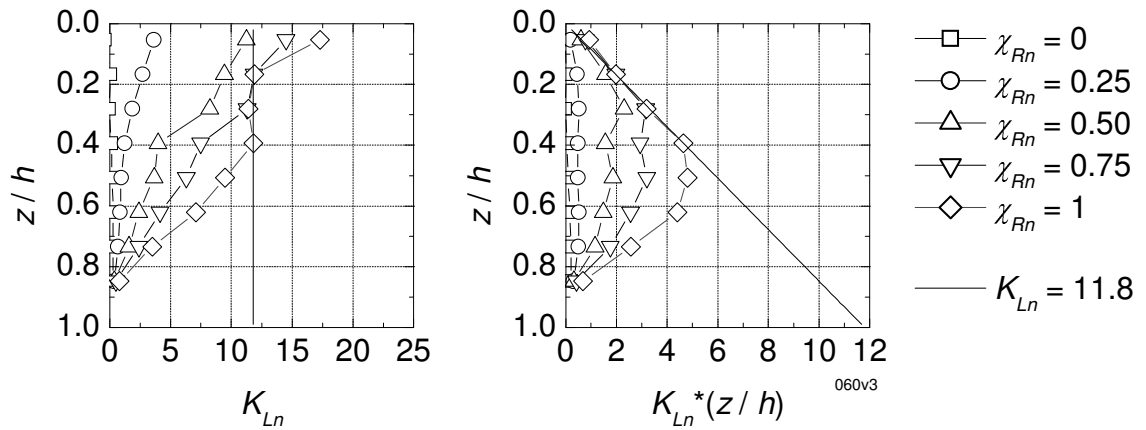


Bild D.149: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

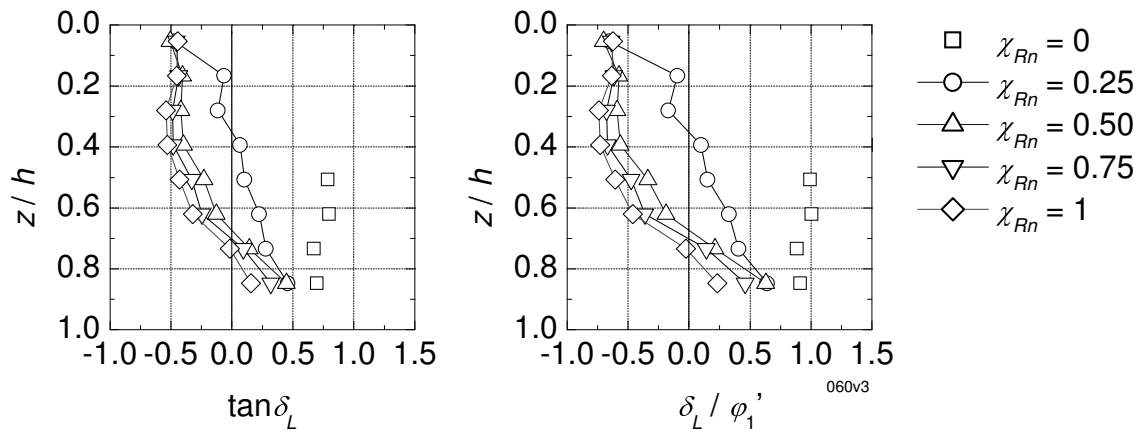


Bild D.150: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 039 – FPD ($I_D = 0,56$) – Alu

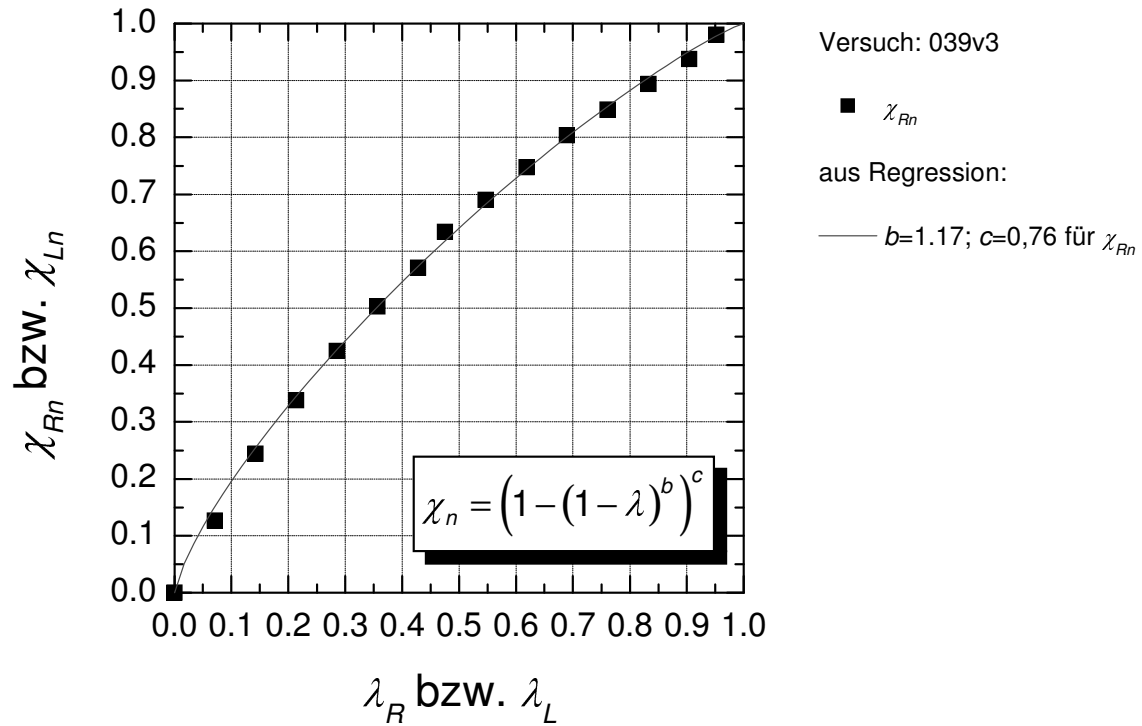


Bild D.151: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 039 – FPD ($I_D = 0,56$) – Alu

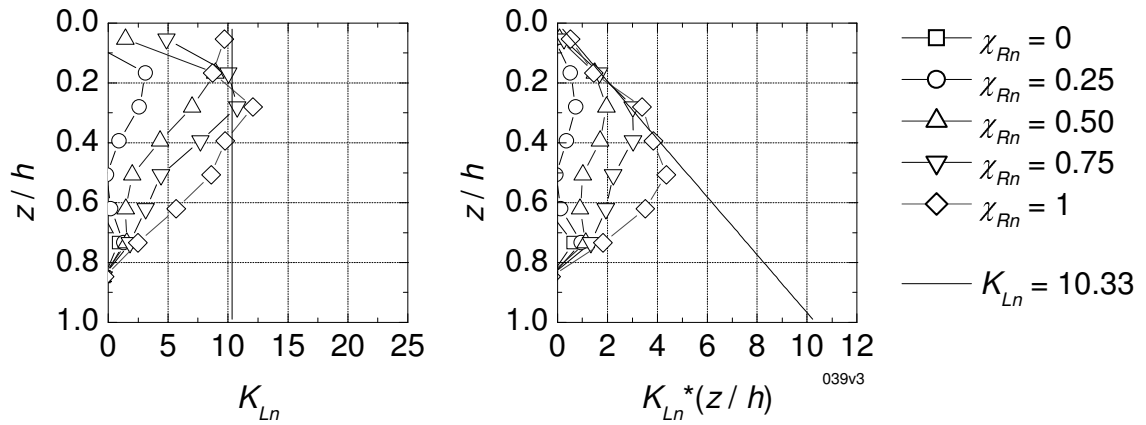


Bild D.152: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

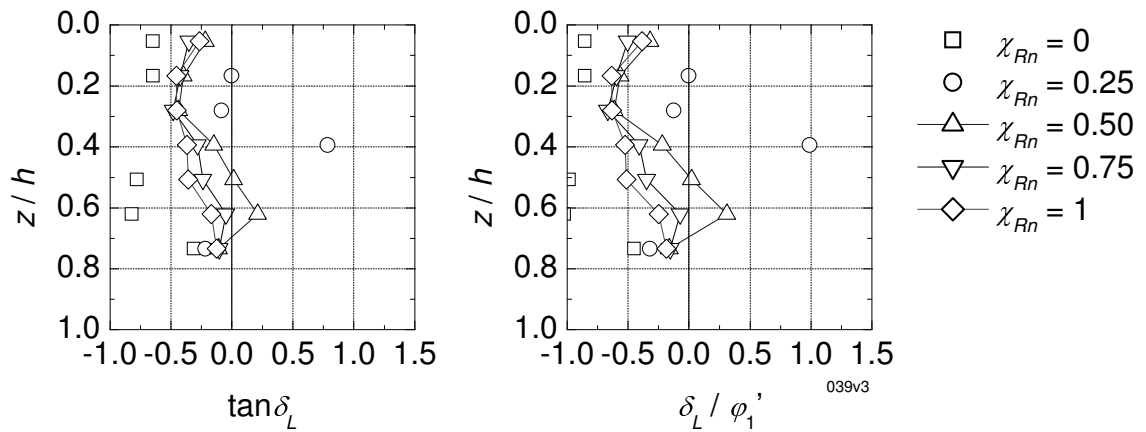


Bild D.153: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 059 – FPD ($I_D = 0,59$) – Alu

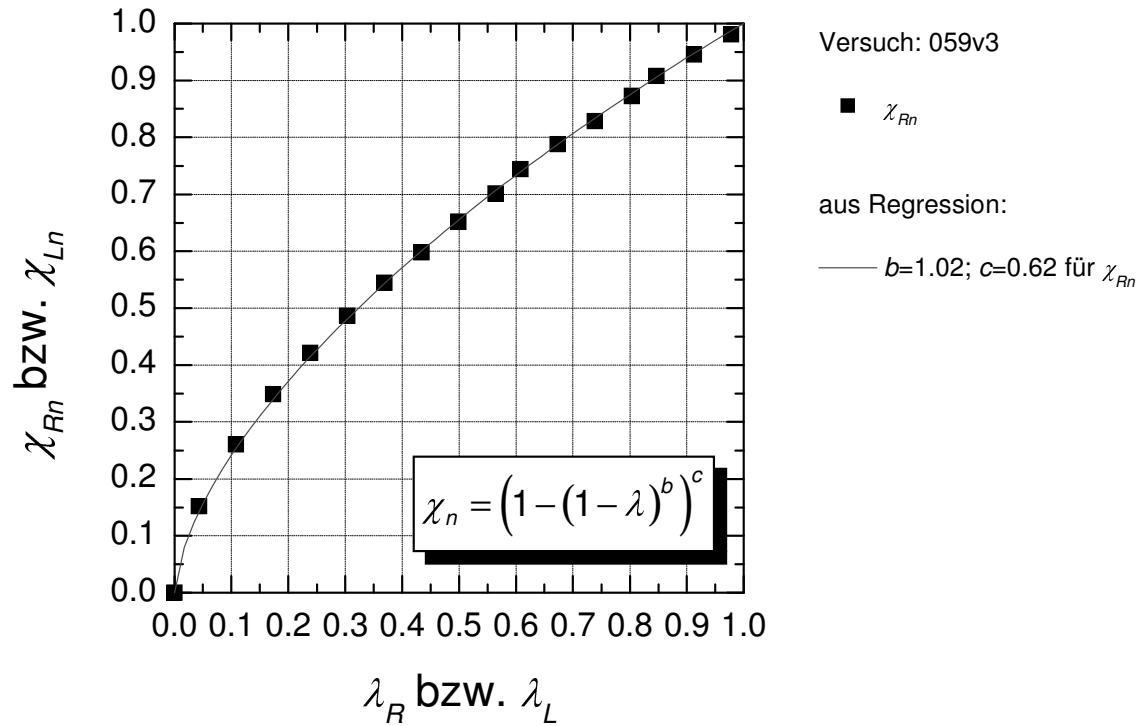


Bild D.154: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 059 – FPD ($I_D = 0,59$) – Alu

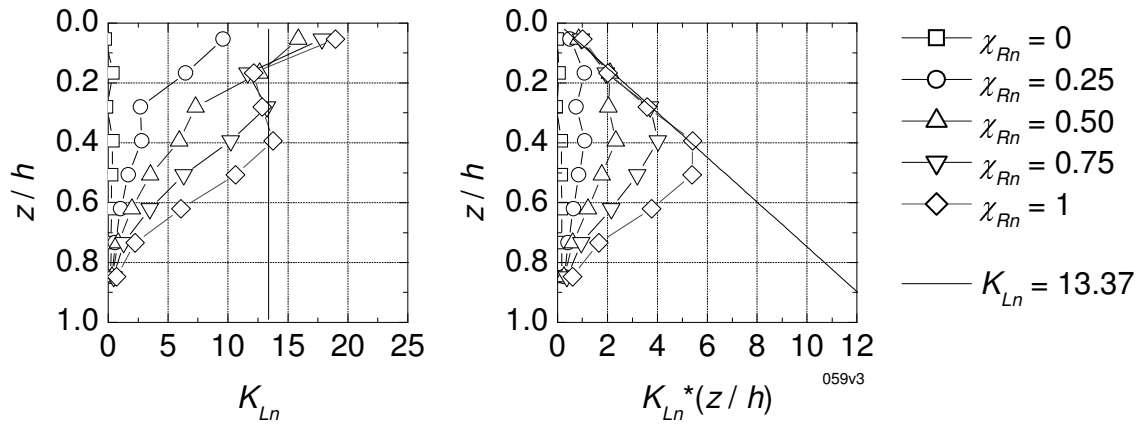


Bild D.155: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

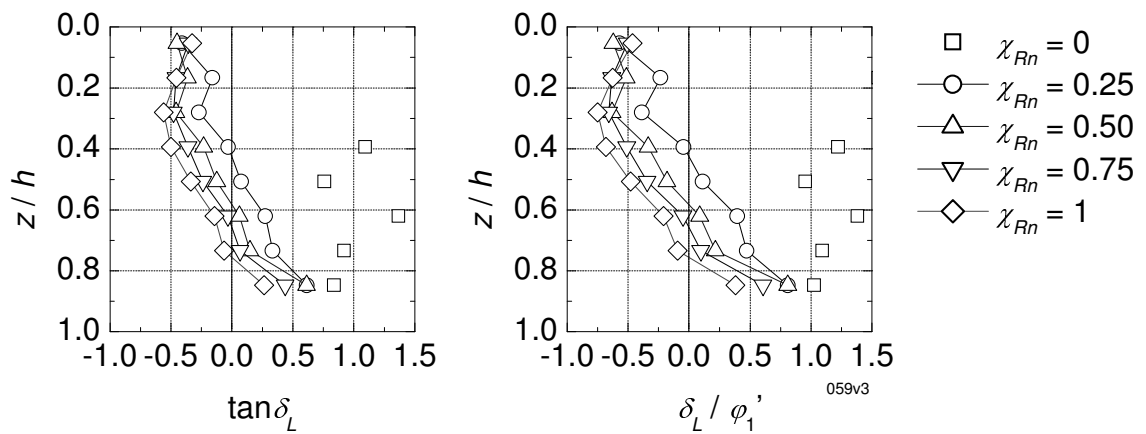


Bild D.156: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 062 – FPD ($I_D = 0,60$) – Alu

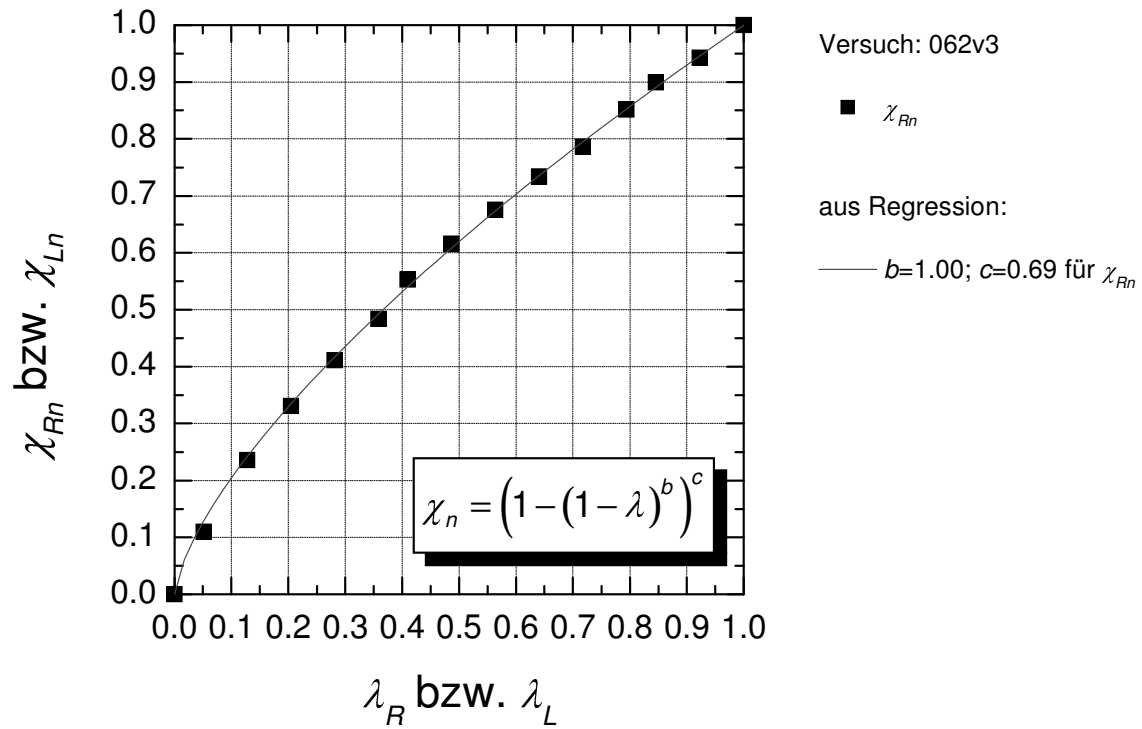


Bild D.157: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 062 – FPD ($I_D = 0,60$) – Alu

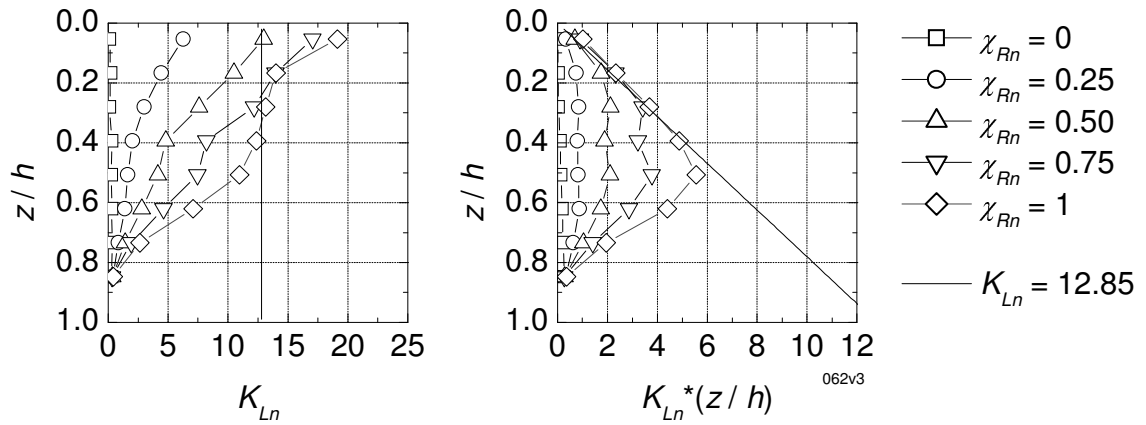


Bild D.158: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

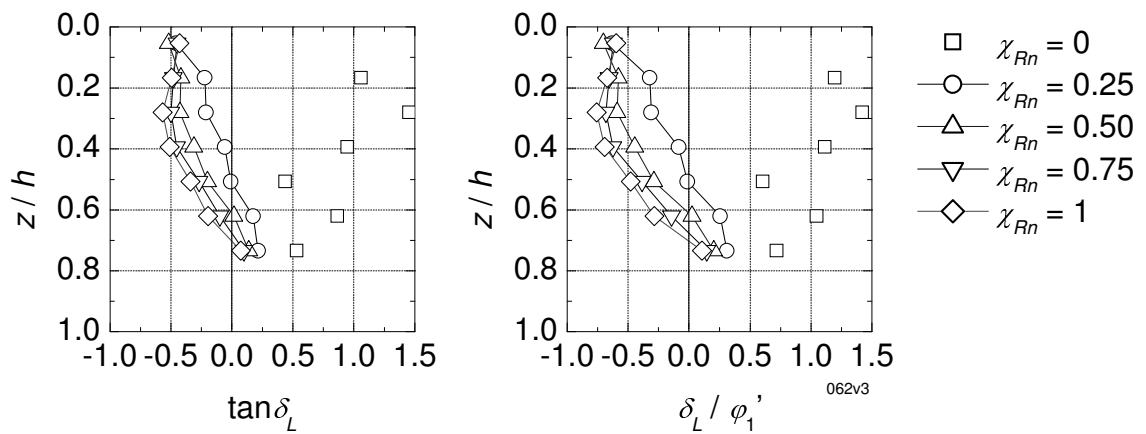


Bild D.159: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 043 – FPD ($I_D = 0,80$) – Alu

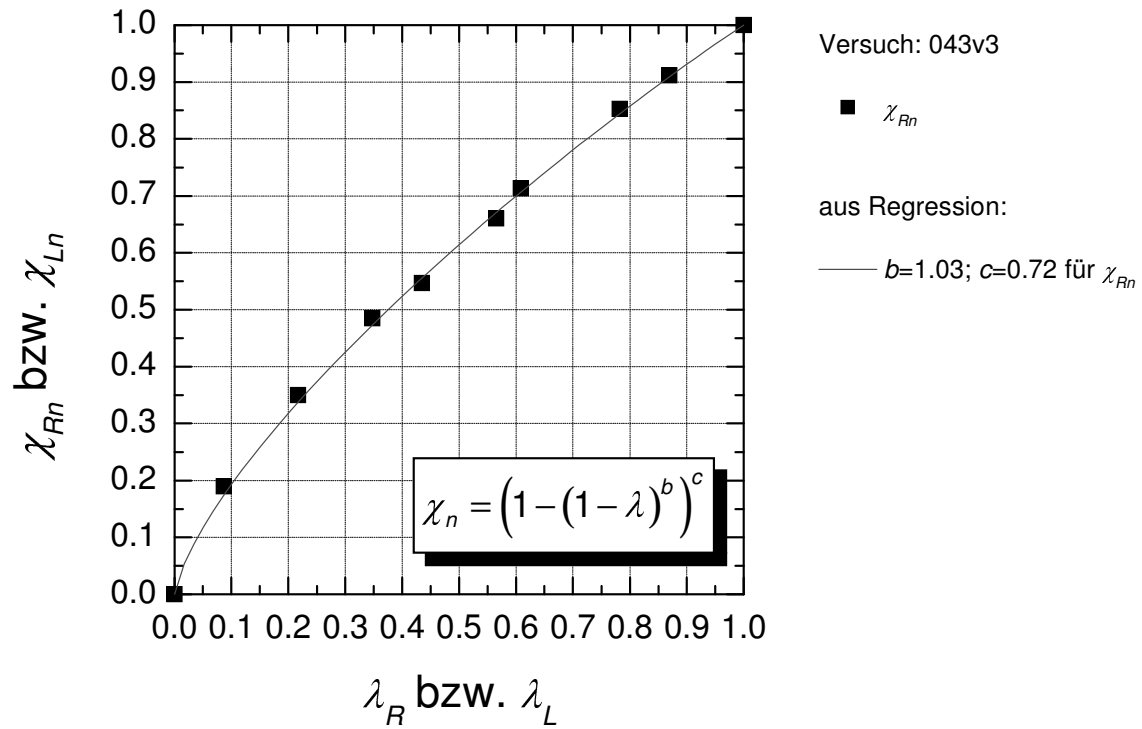


Bild D.160: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 043 – FPD ($I_D = 0,80$) – Alu

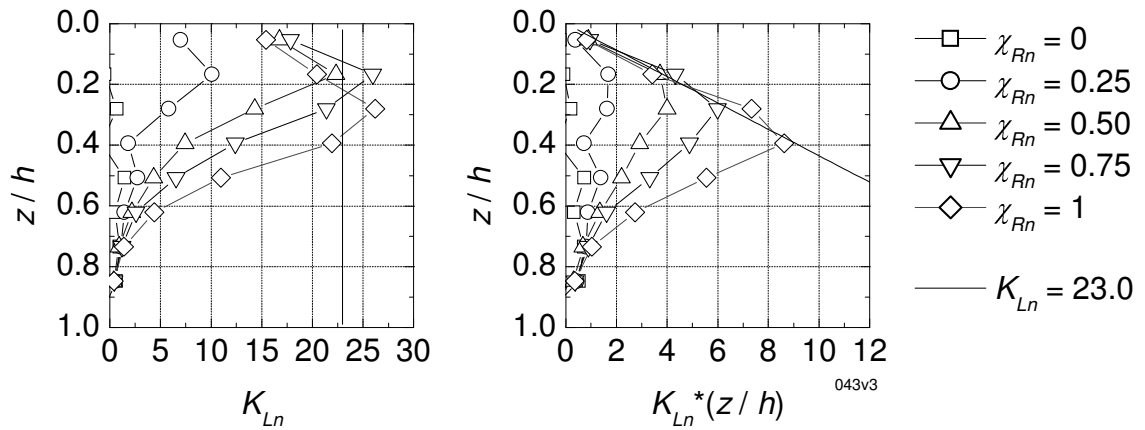


Bild D.161: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

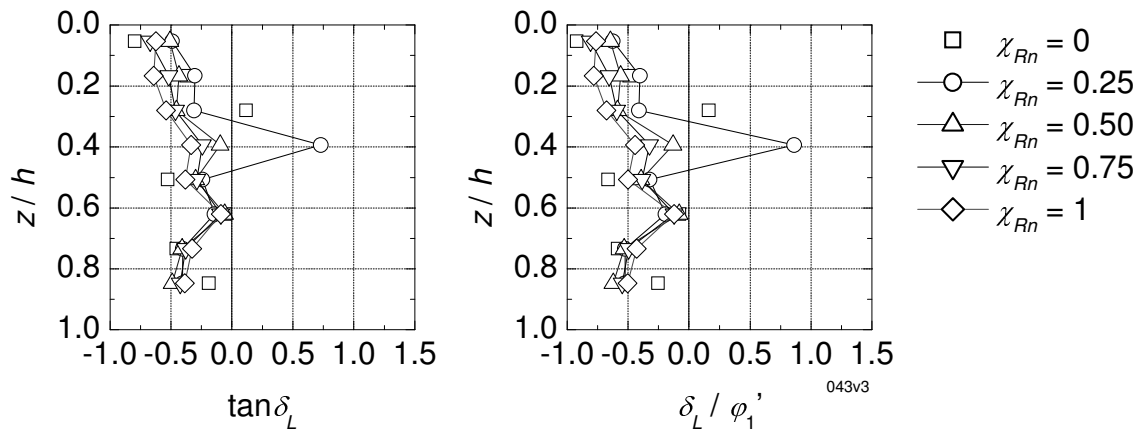


Bild D.162: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 063 – FPD ($I_D = 0,82$) – Alu

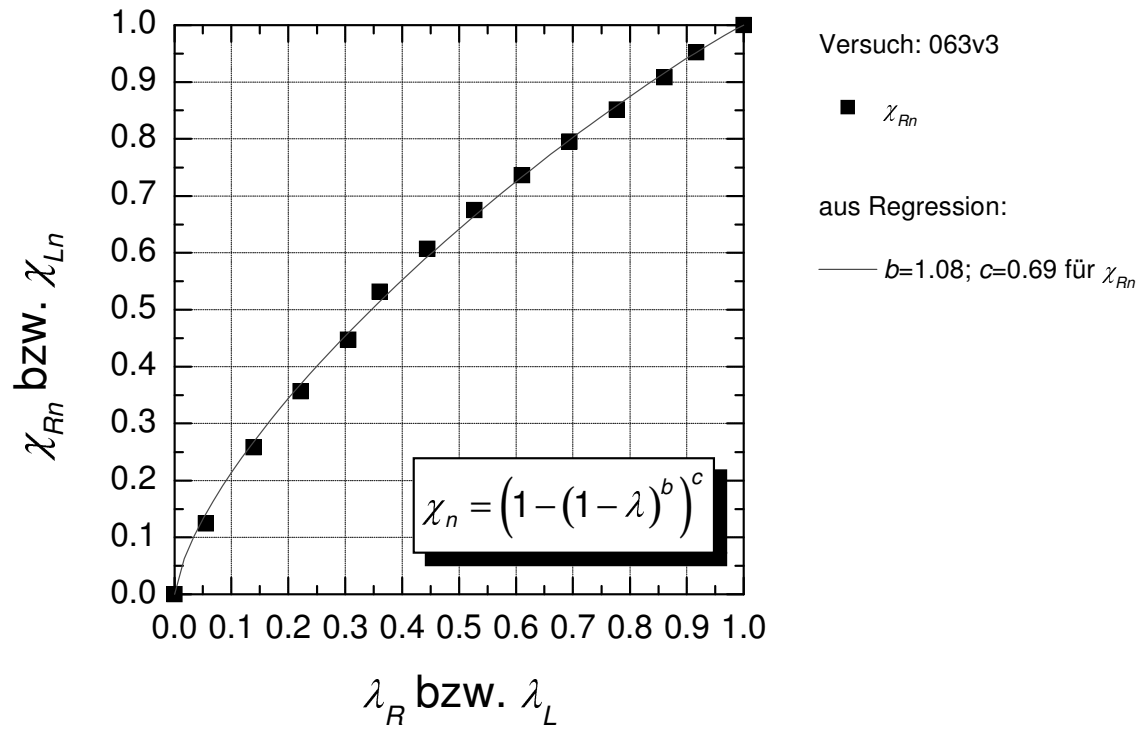


Bild D.163: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 063 – FPD ($I_D = 0,82$) – Alu

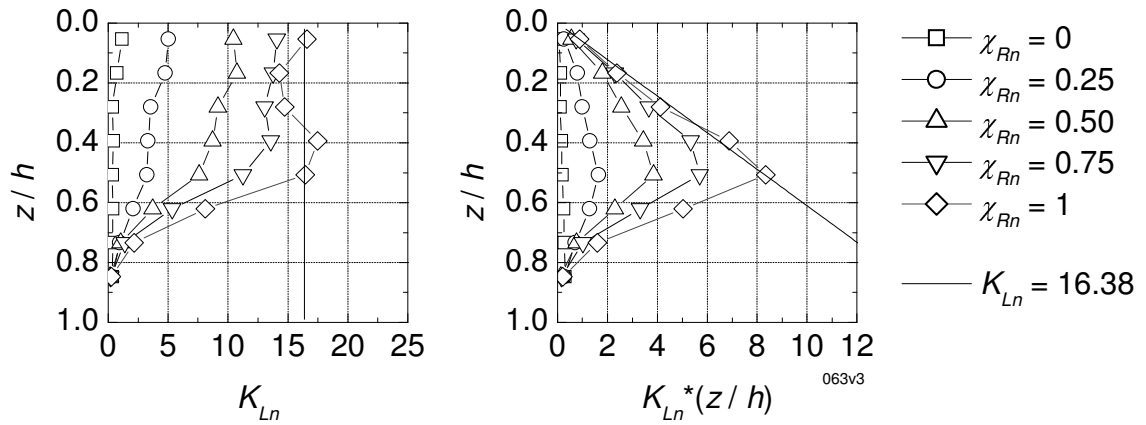


Bild D.164: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

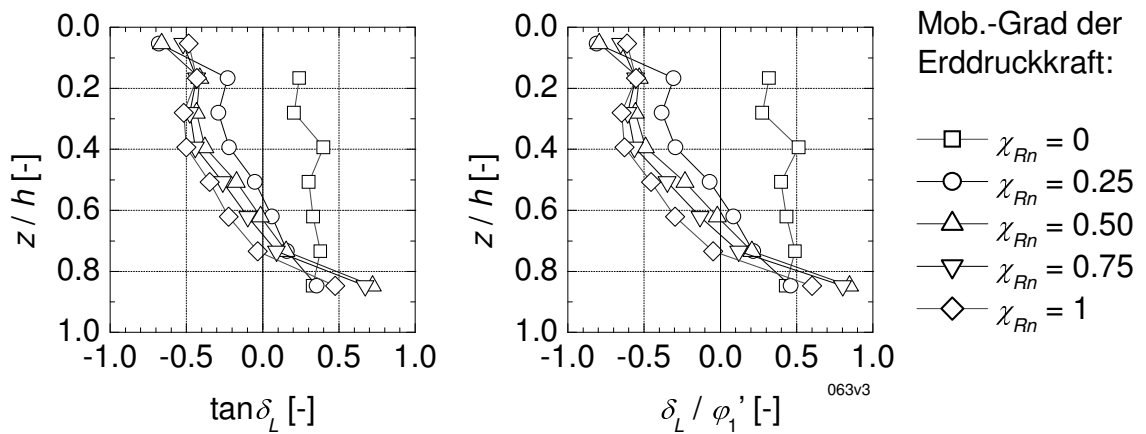


Bild D.165: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 072 – FPD ($I_D = 0,83$) – Folie 2

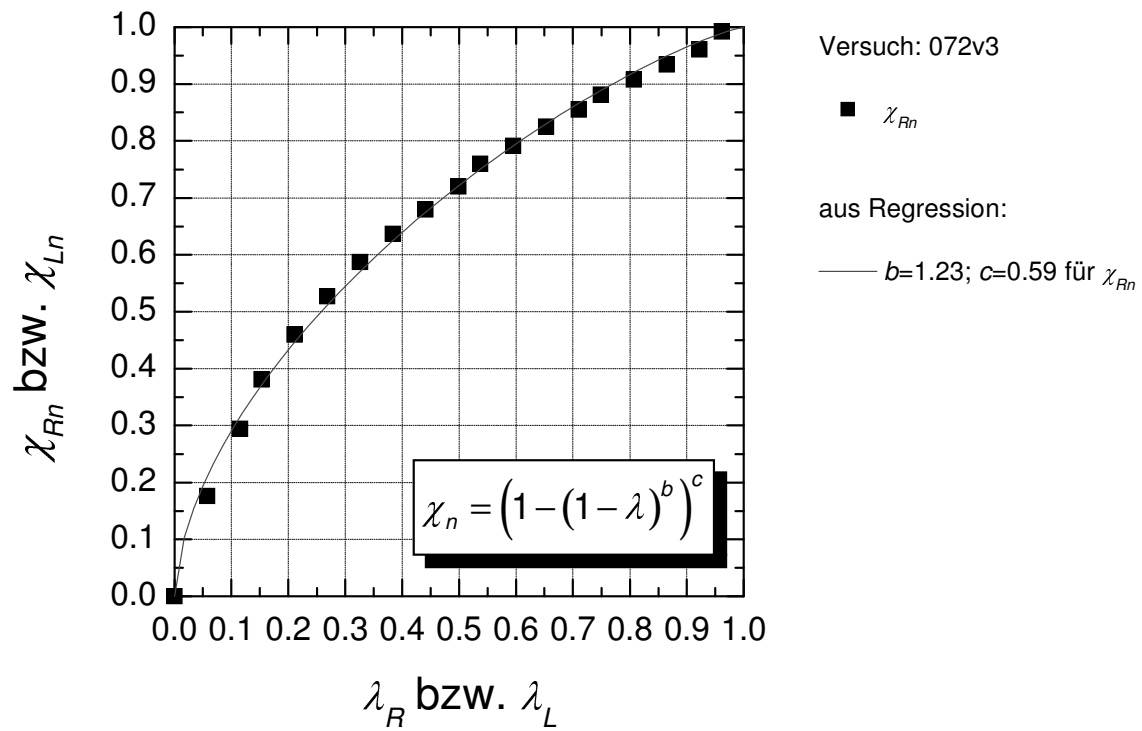


Bild D.166: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 072 – FPD ($I_D = 0,83$) – Folie 2

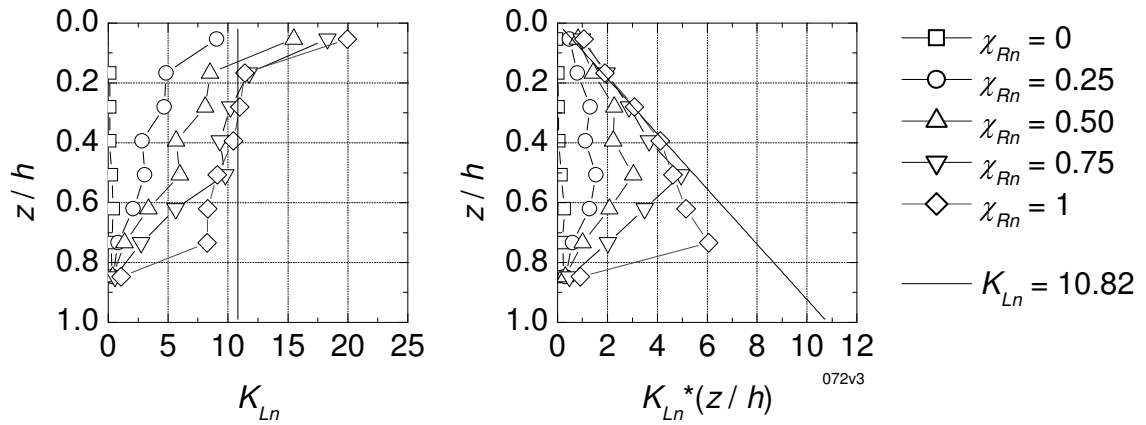


Bild D.167: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

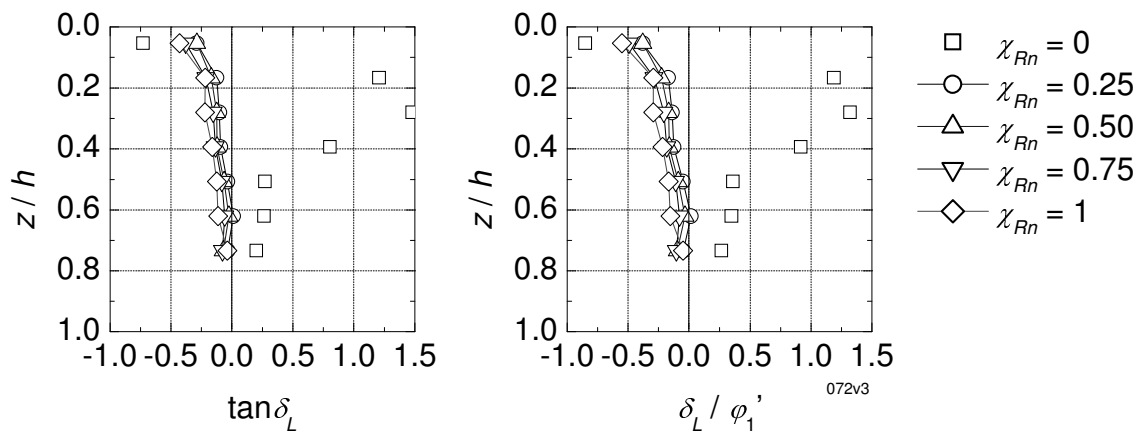


Bild D.168: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 075 – FPD ($I_D = 0,55$) – S40

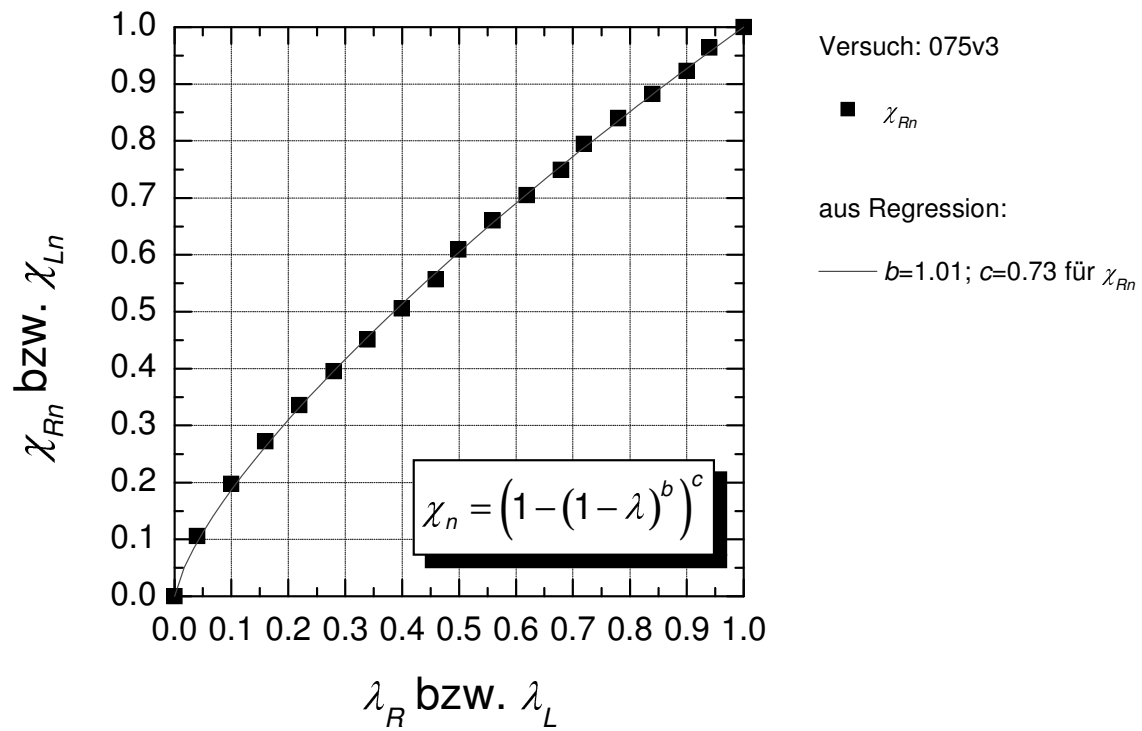


Bild D.169: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 075 – FPD ($I_D = 0,55$) – S40

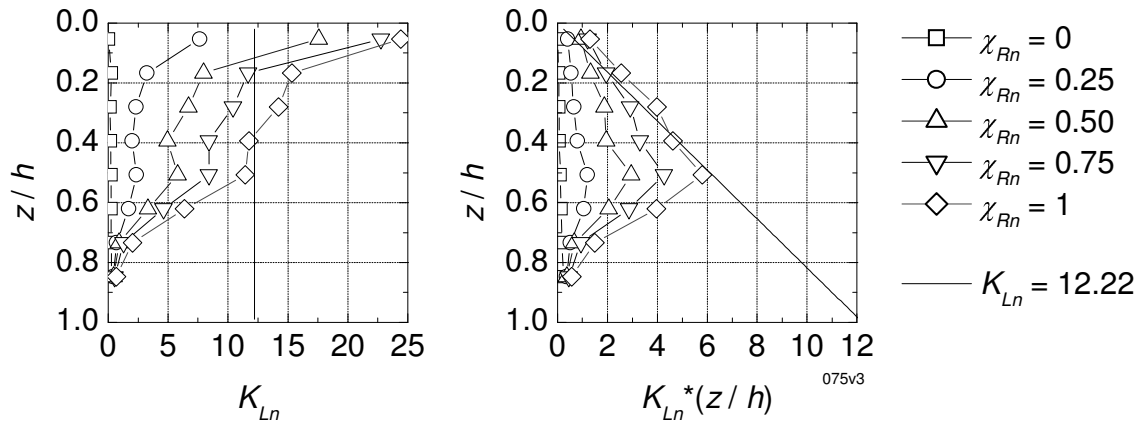


Bild D.170: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

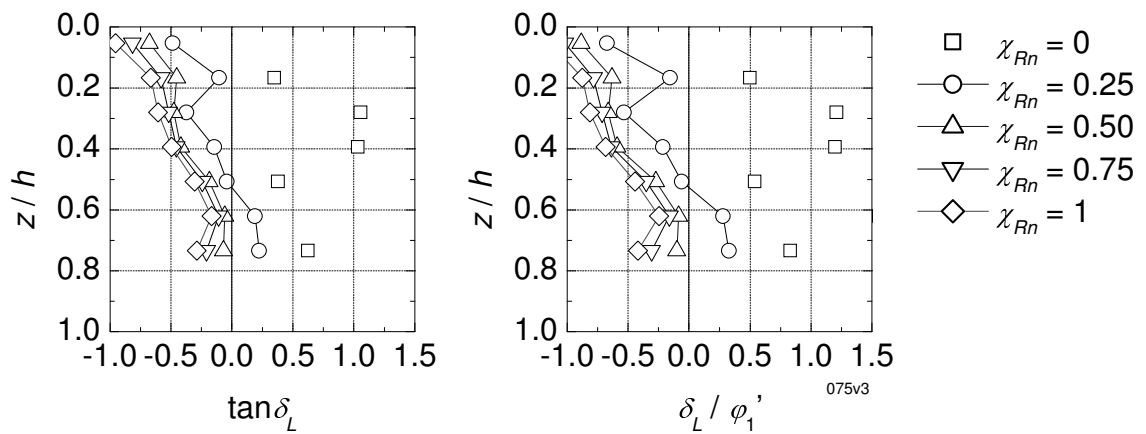


Bild D.171: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 045 – FPD ($I_D = 0,81$) – S40

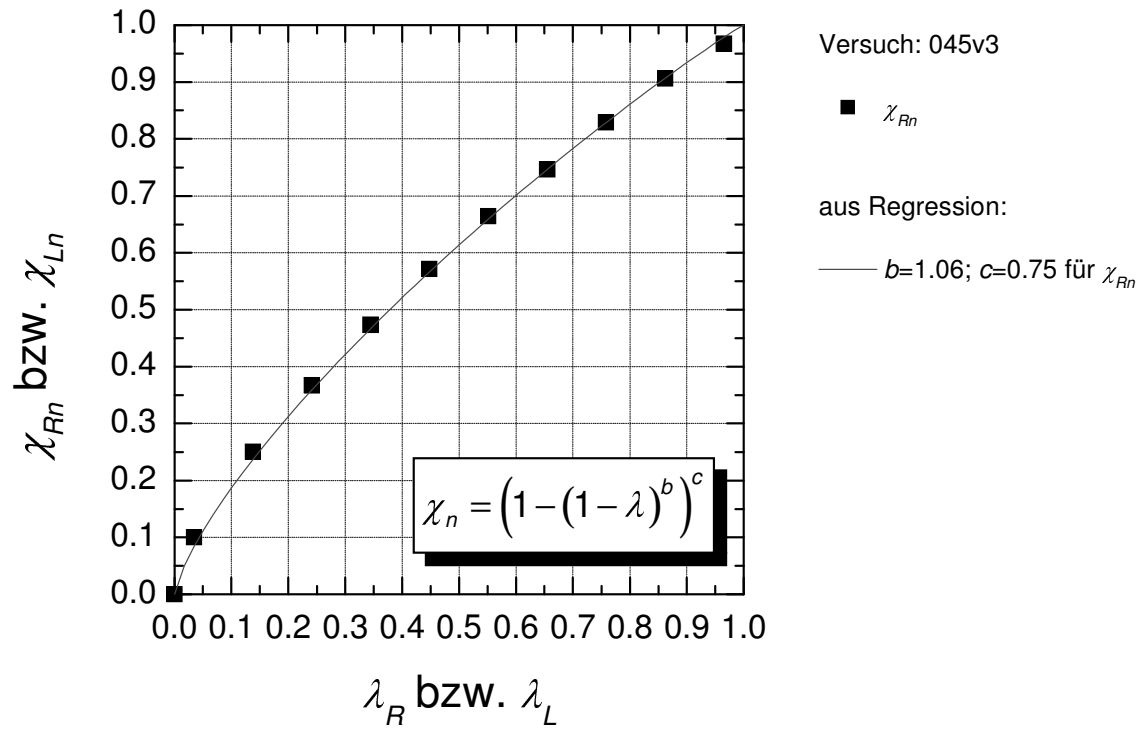


Bild D.172: Mobilisierungskurven mit Ansatz von BARTL, FRANKE

Versuch 045 – FPD ($I_D = 0,81$) – S40

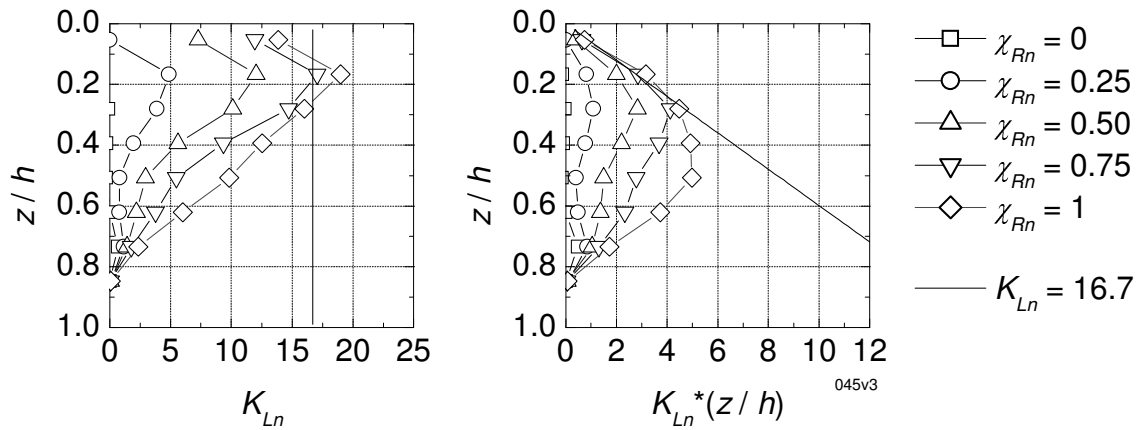


Bild D.173: Mobilisierung Erddruck (Normalanteil)

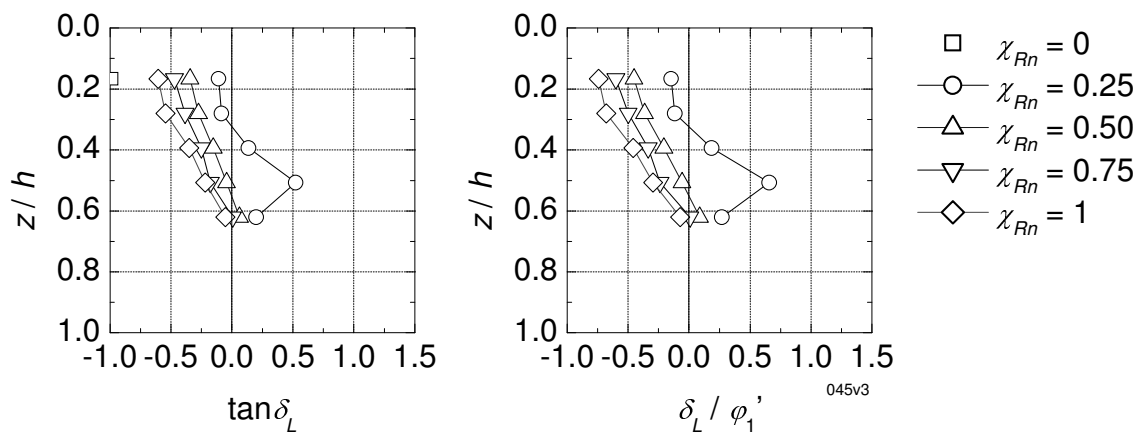


Bild D.174: Mobilisierung lokale Erddruckneigung

Versuch 060 – FPD ($I_D = 0,55$) – Alu

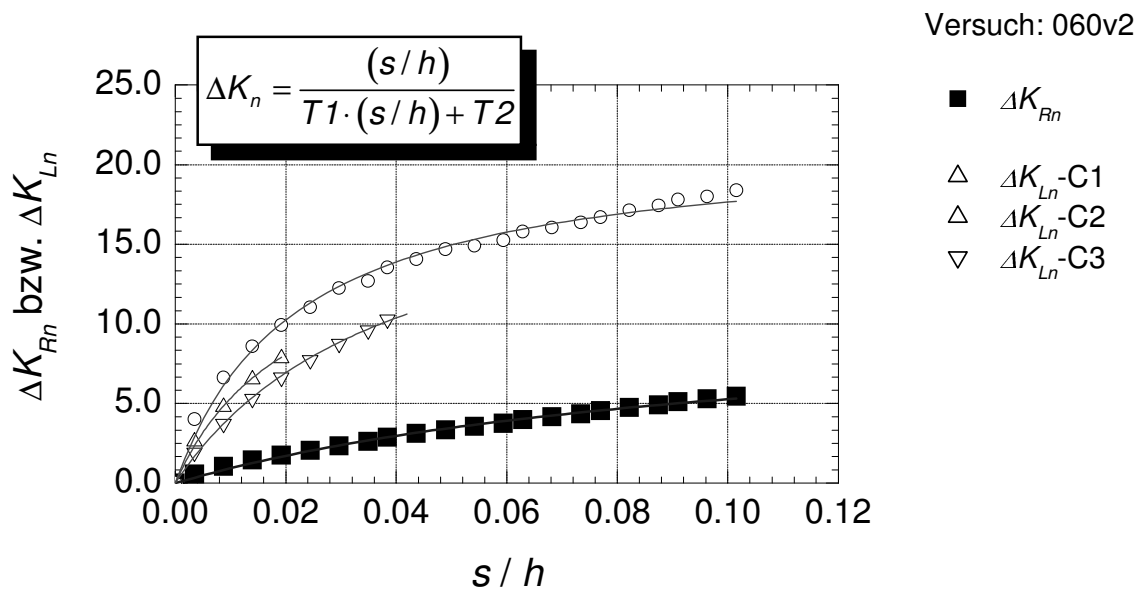


Bild D.175: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

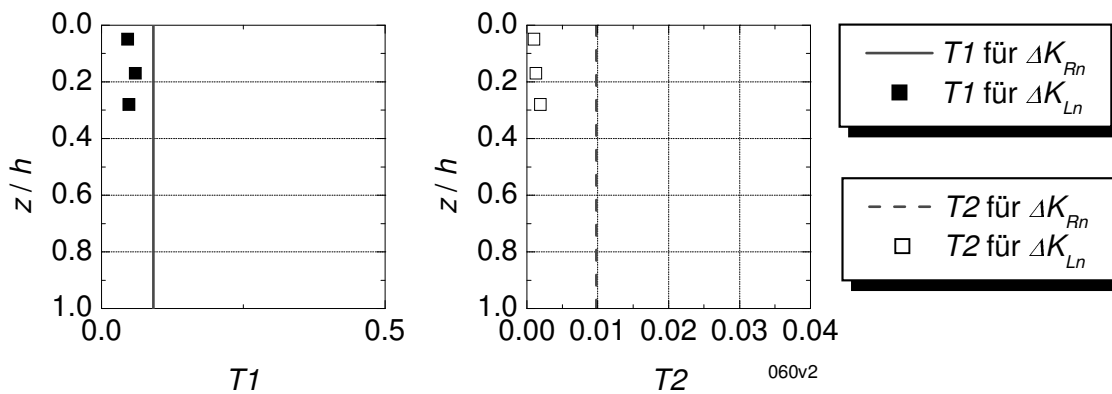


Bild D.176: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 039 – FPD ($I_D = 0,56$) – Alu

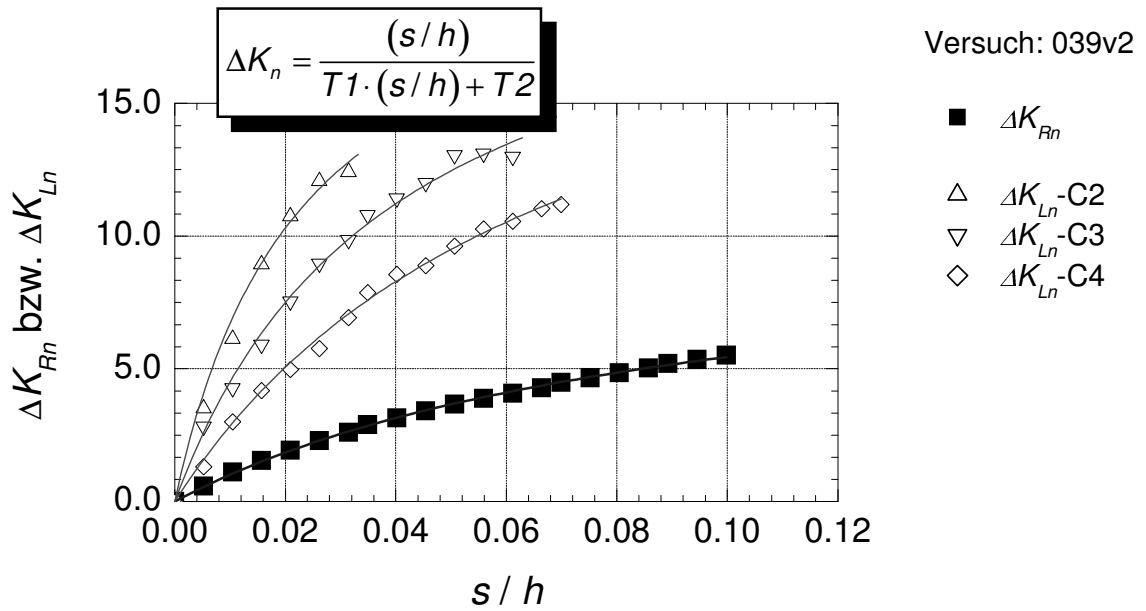


Bild D.177: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

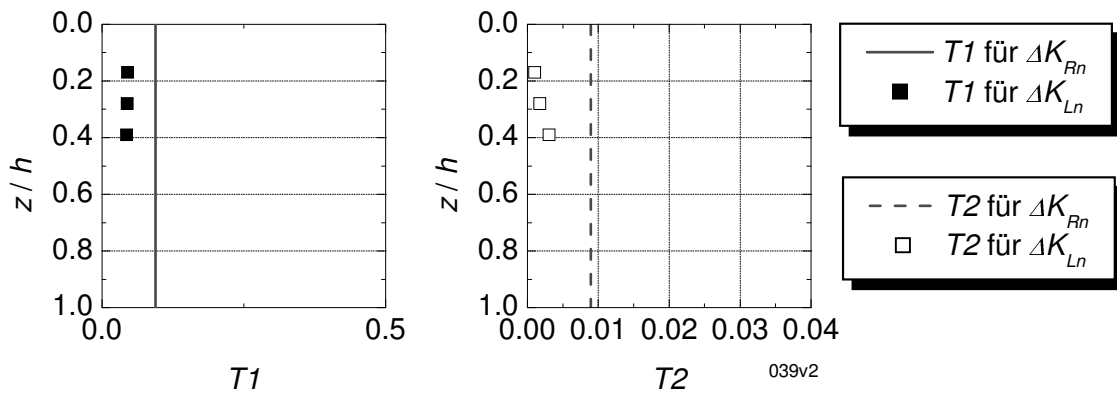


Bild D.178: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 059 – FPD ($I_D = 0,59$) – Alu

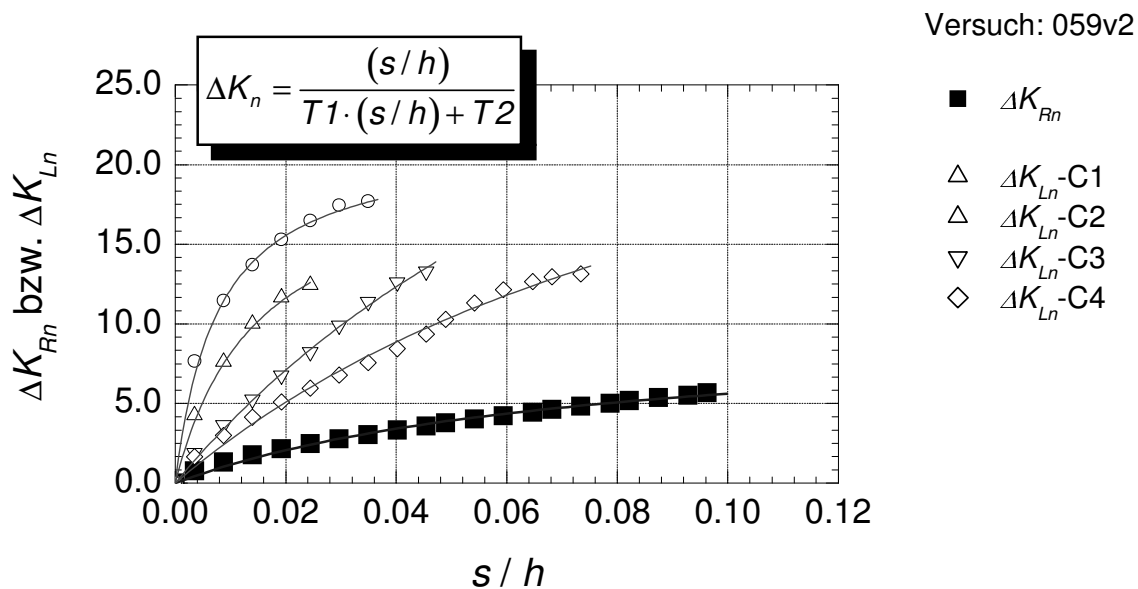


Bild D.179: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

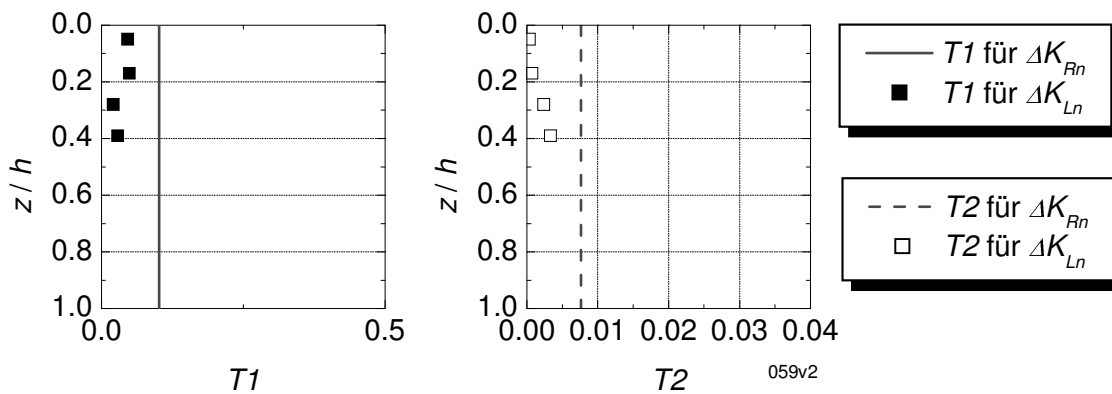


Bild D.180: Beiwerte T1 und T2

Versuch 062 – FPD ($I_D = 0,60$) – Alu

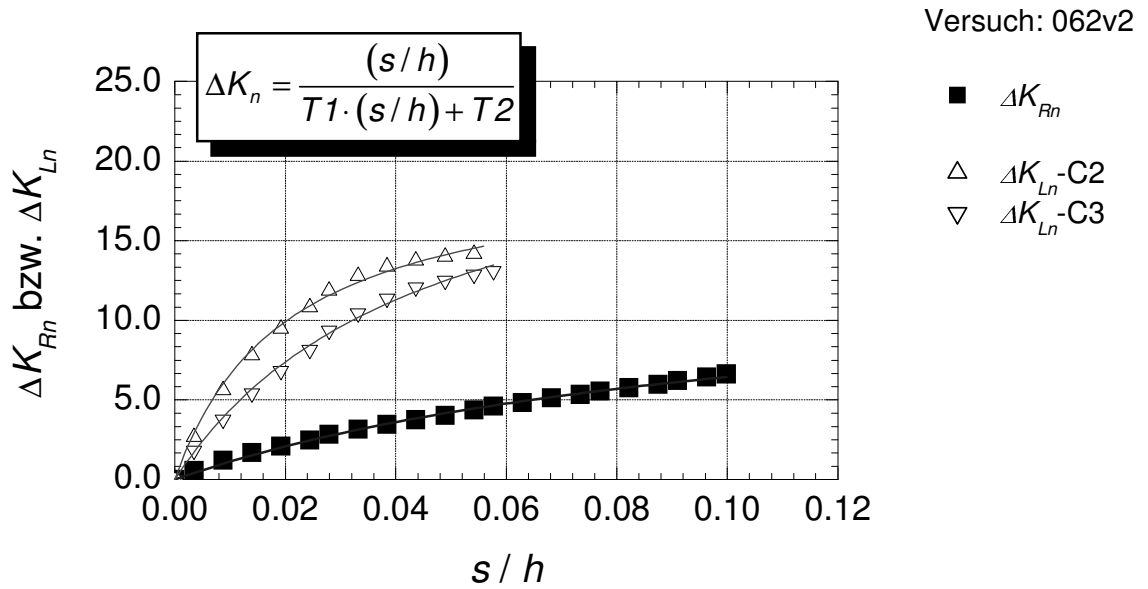


Bild D.181: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

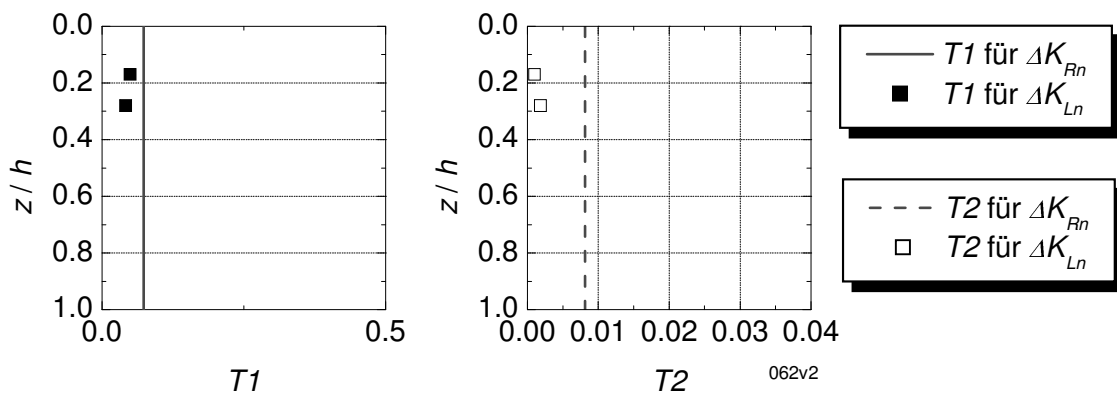


Bild D.182: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 043 – FPD ($I_D = 0,80$) – Alu

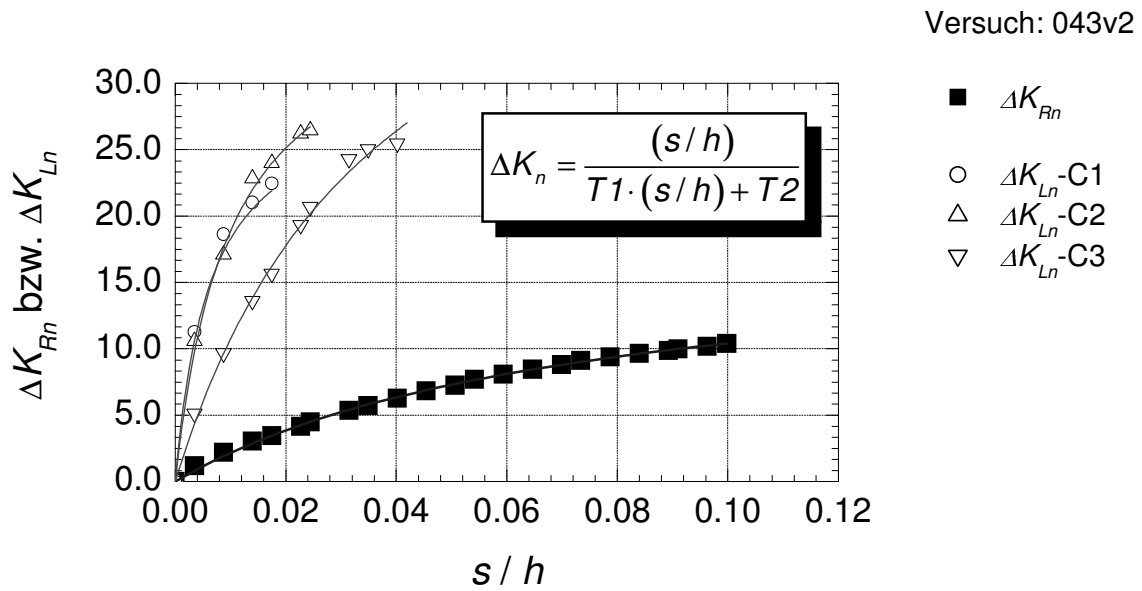


Bild D.183: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

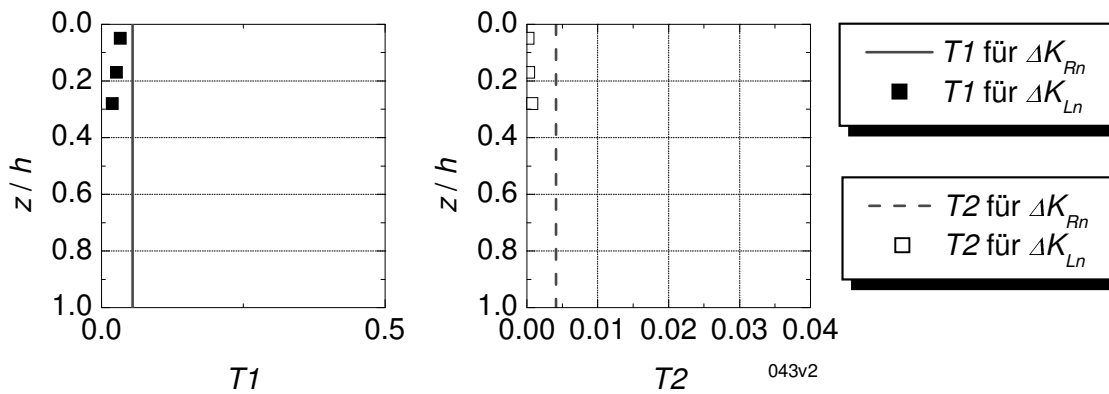


Bild D.184: Beiwerte T1 und T2

Versuch 063 – FPD ($I_D = 0,82$) – Alu

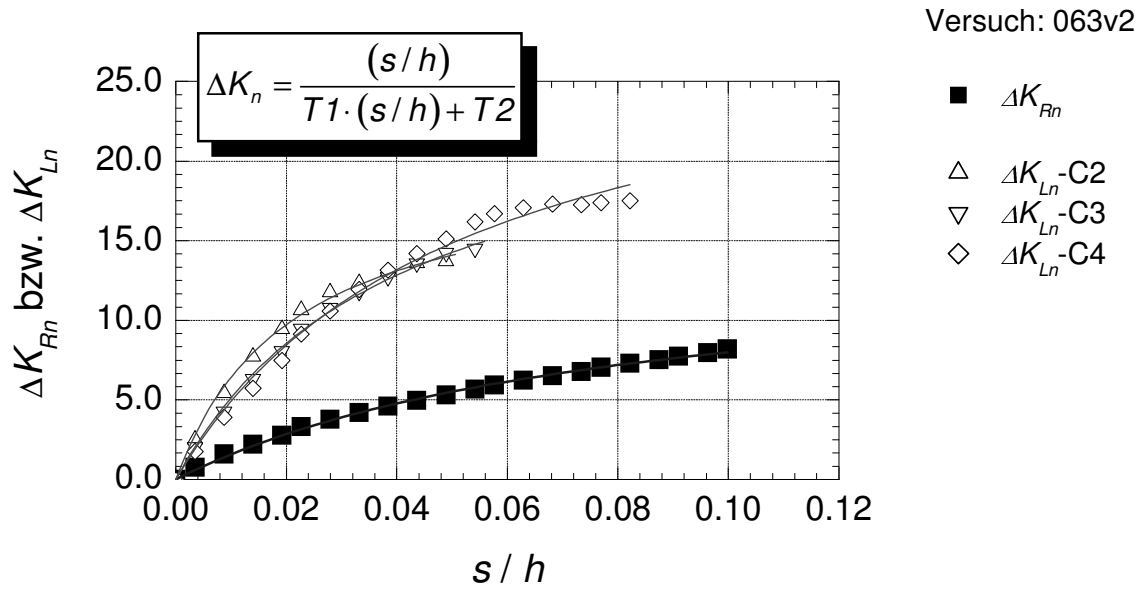


Bild D.185: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

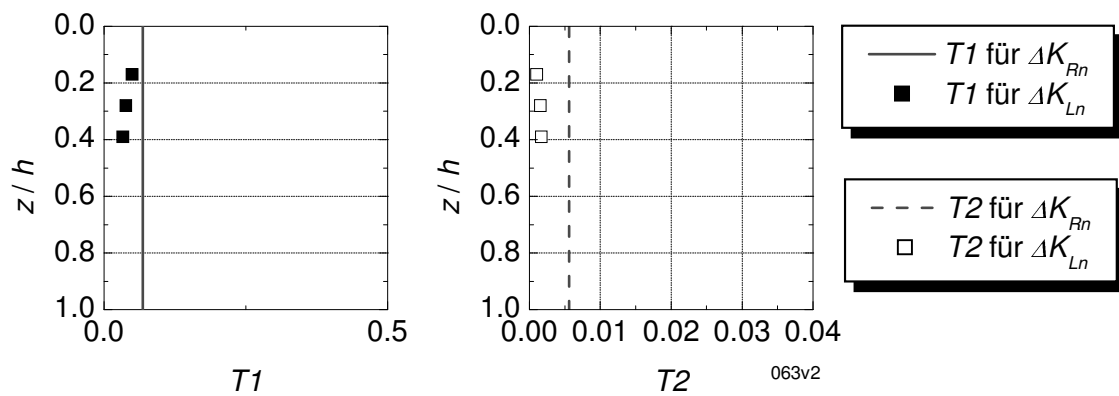


Bild D.186: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 072 – FPD ($I_D = 0,83$) – Folie 2

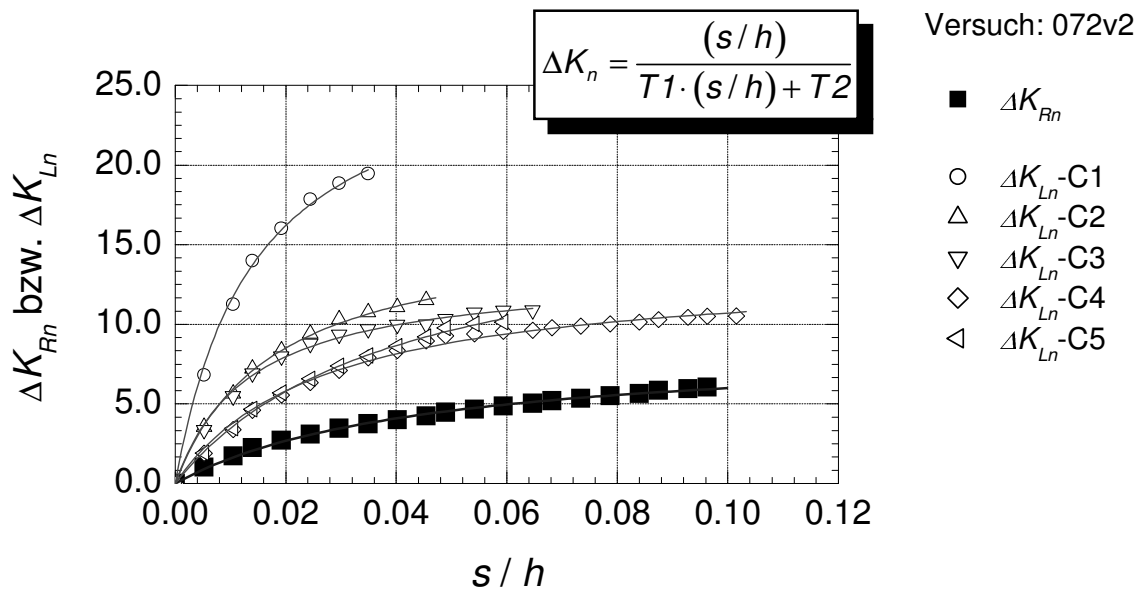


Bild D.187: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

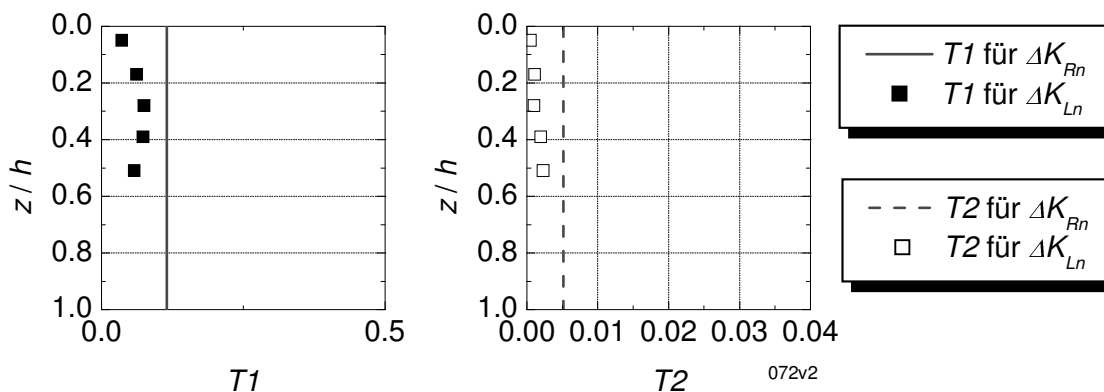


Bild D.188: Beiwerte T1 und T2

Versuch 075 – FPD ($I_D = 0,55$) – S40

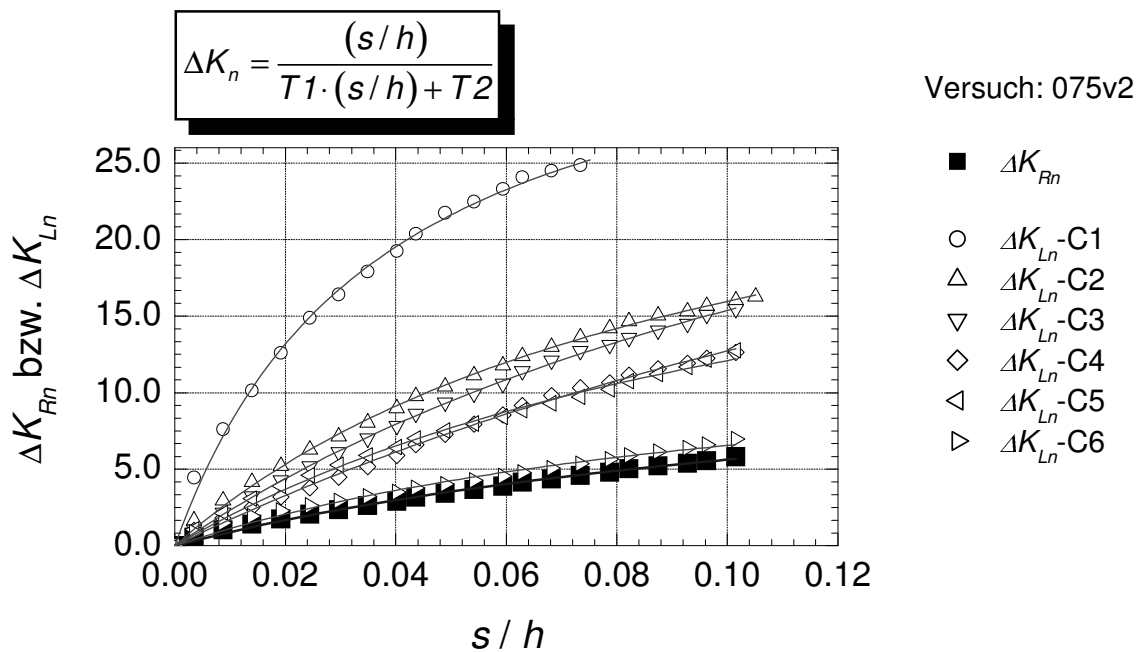


Bild D.189: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

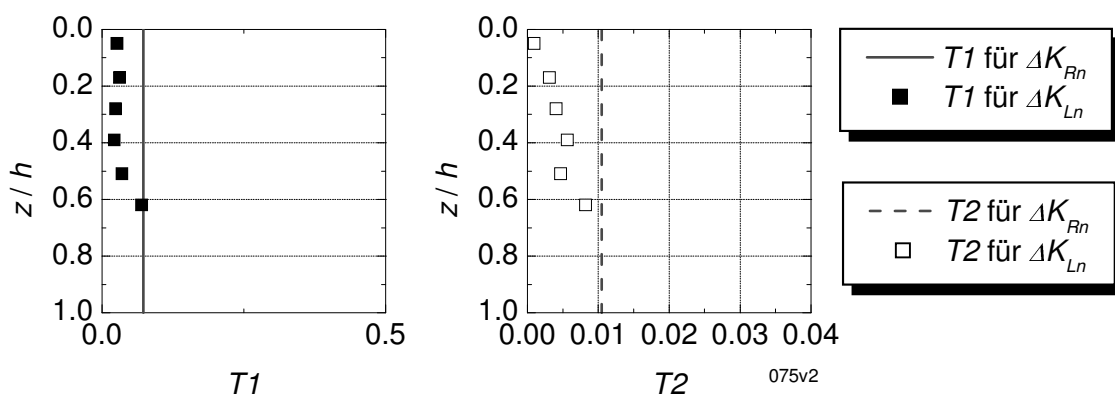


Bild D.190: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 045 – FPD ($I_D = 0,81$) – S40

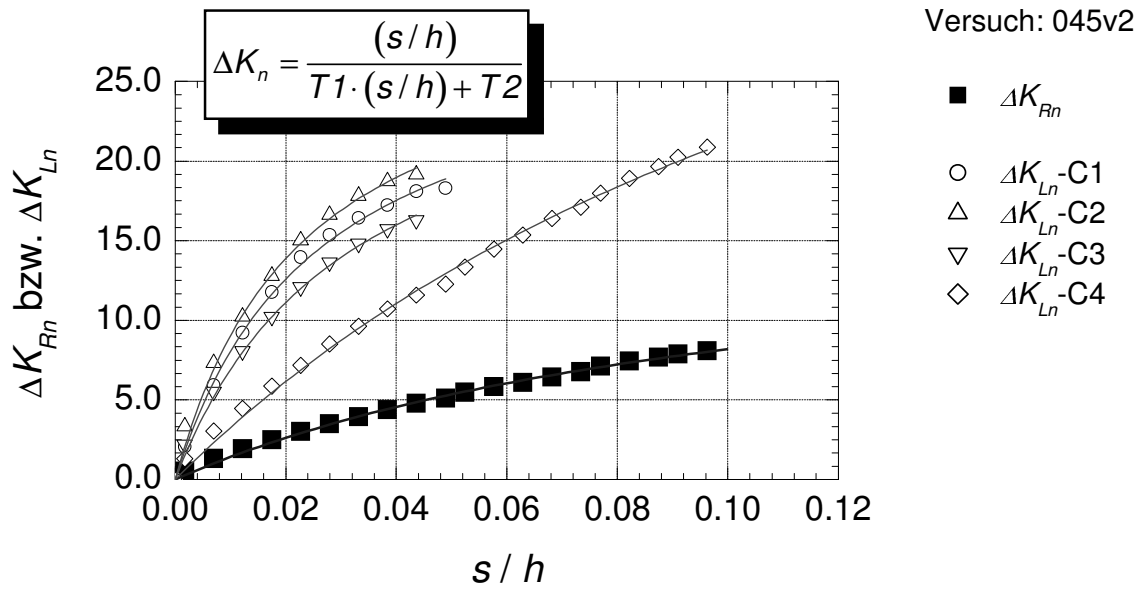


Bild D.191: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

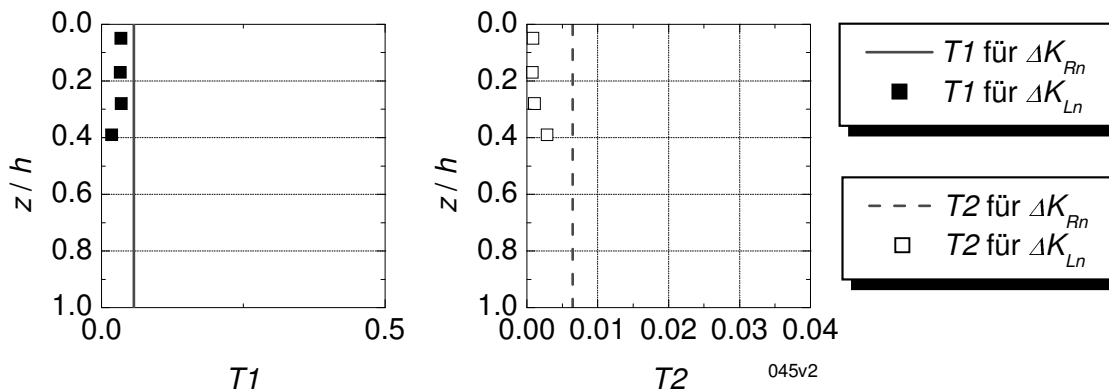


Bild D.192: Beiwerte $T1$ und $T2$

Mobilisierung Erddruckkraft und Erddruck – Versuche ohne Beobachtung des Austritts der 1. Gleitfläche

Tabelle D.8: Fußpunktdrehung – Versuche ohne Beobachtung des Austritts der 1. Gleitfläche an Sandoberfläche – Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen der Erddruckkraft

Versuch	WOF	I_D	T_1	T_2	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
041	Alu	0.28	0.1101	0.0153	-	-
069	Alu	0.29	0.1335	0.0174	-	-
042	Alu	0.41	0.1035	0.0104	-	-
061	Alu	0.51	0.0919	0.0111	-	-
058	Alu	0.61	0.0817	0.0138	-	-
047	Folie1	0.75	0.0825	0.0073	-	-
076	S40	0.24	0.1061	0.0205	-	-
073	S40	0.83	0.0600	0.0046	-	-

Versuch 041 – FPD ($I_D = 0,28$) – Alu

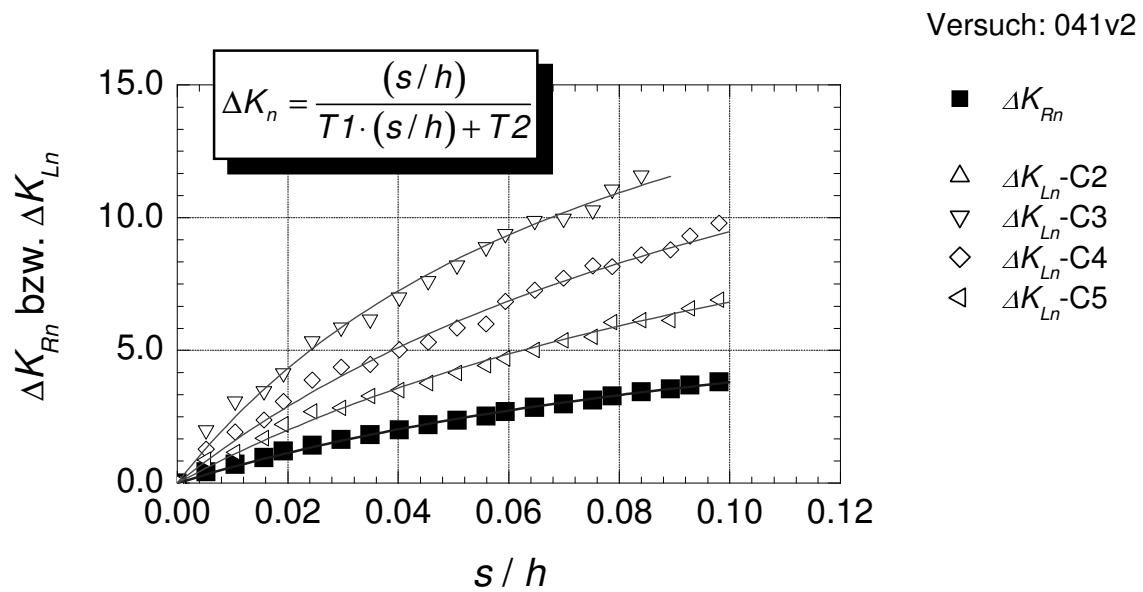


Bild D.193: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

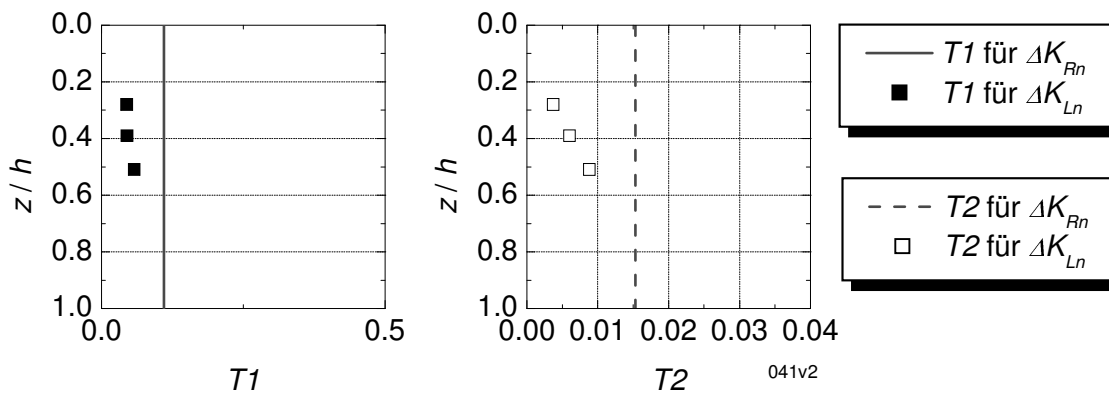


Bild D.194: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 069 – FPD ($I_D = 0,29$) – Alu

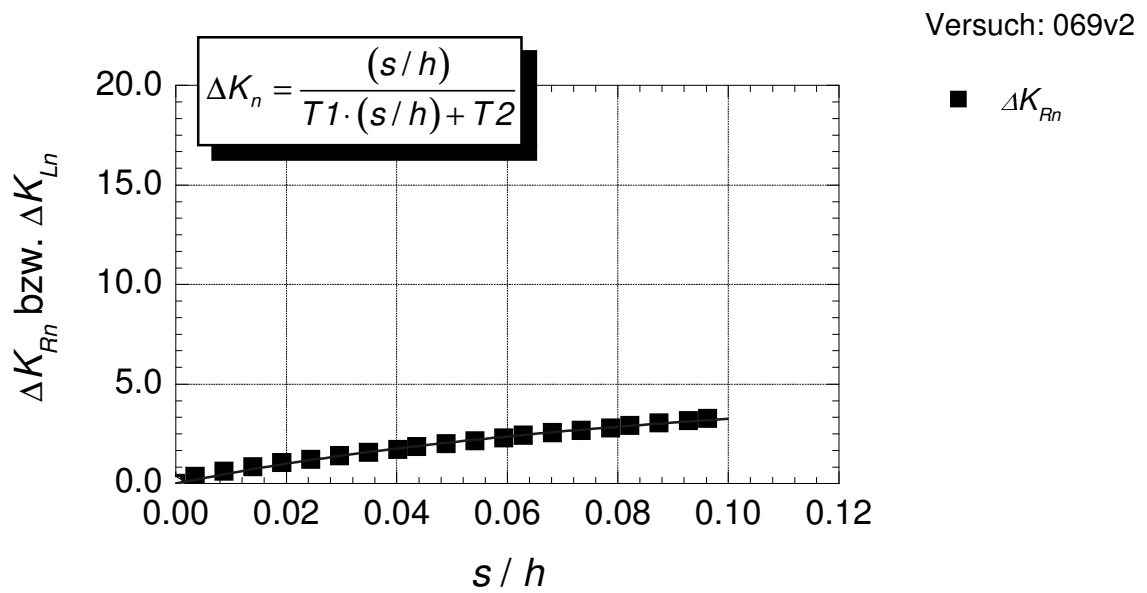


Bild D.195: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

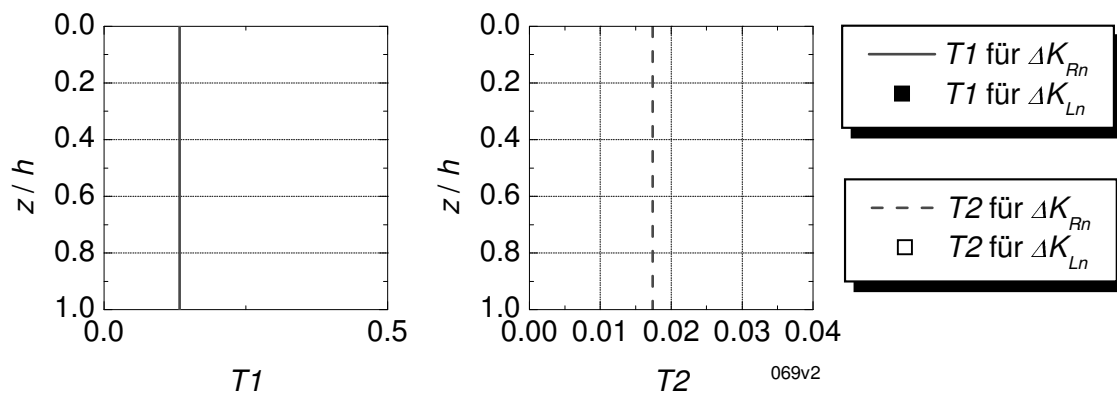


Bild D.196: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 042 – FPD ($I_D = 0,41$) – Alu

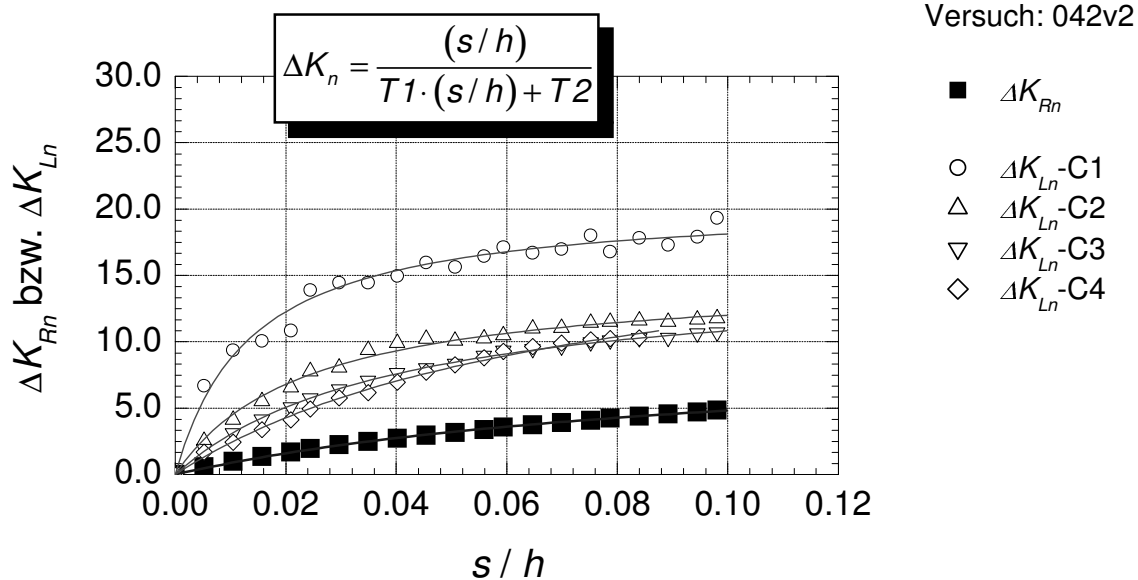


Bild D.197: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

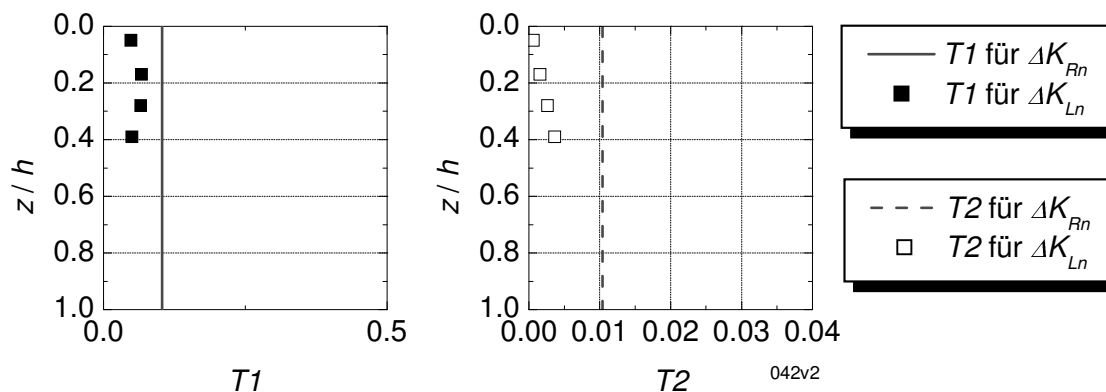


Bild D.198: Beiwerte T1 und T2

Versuch 061 – FPD ($I_D = 0,52$) – Alu

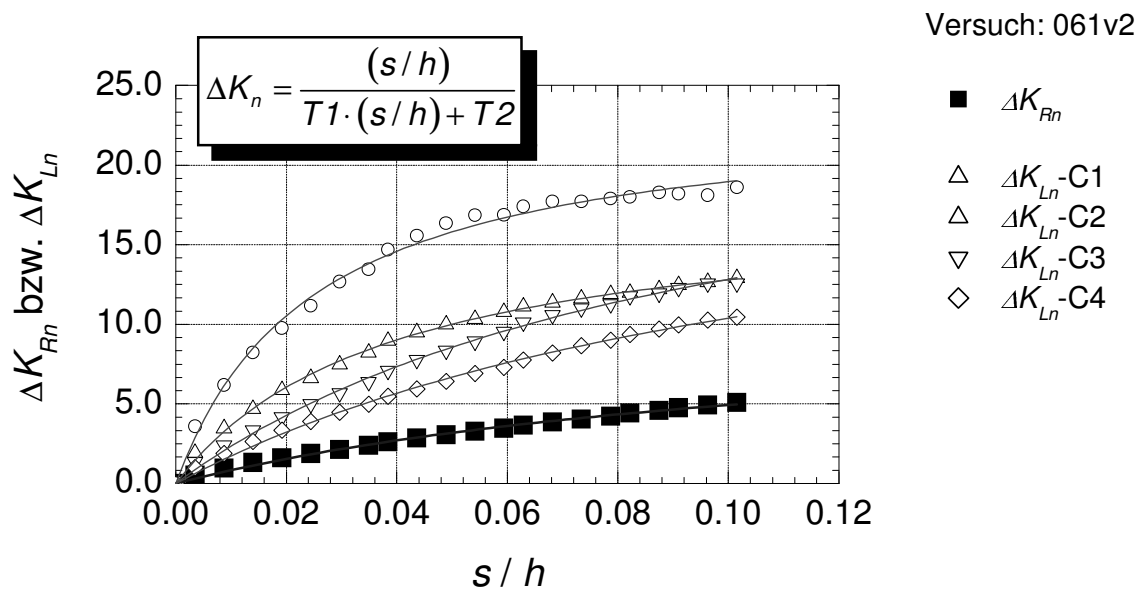


Bild D.199: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

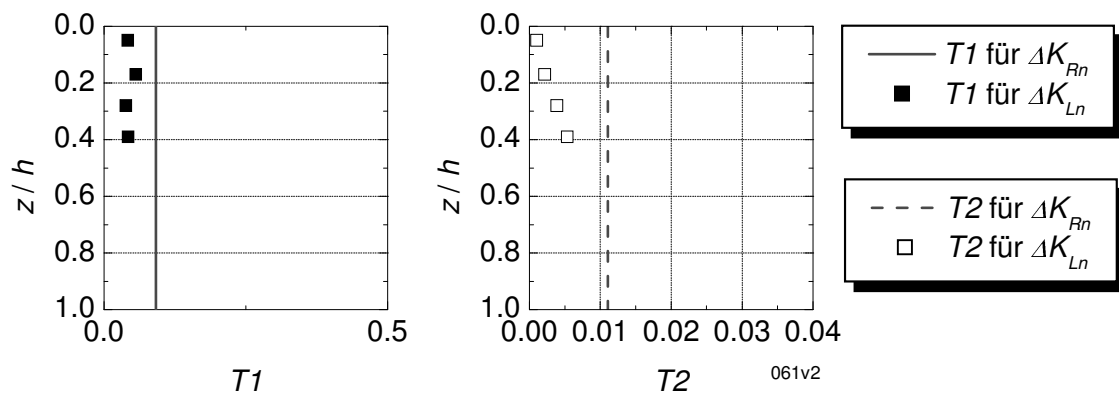


Bild D.200: Beiwerte T1 und T2

Versuch 058 – FPD ($I_D = 0,61$) – Alu

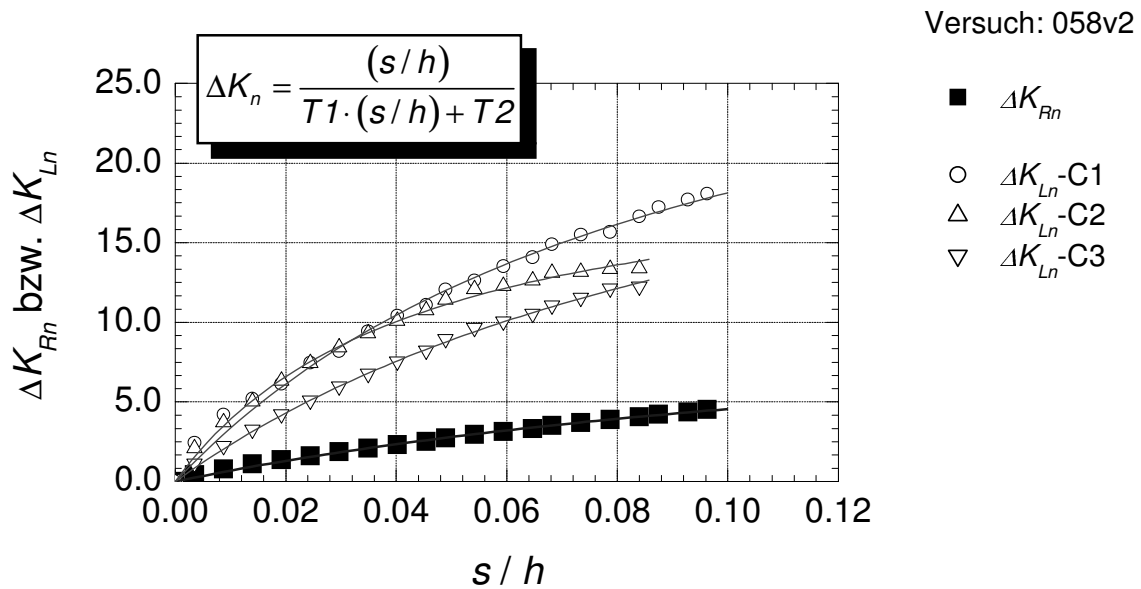


Bild D.201: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

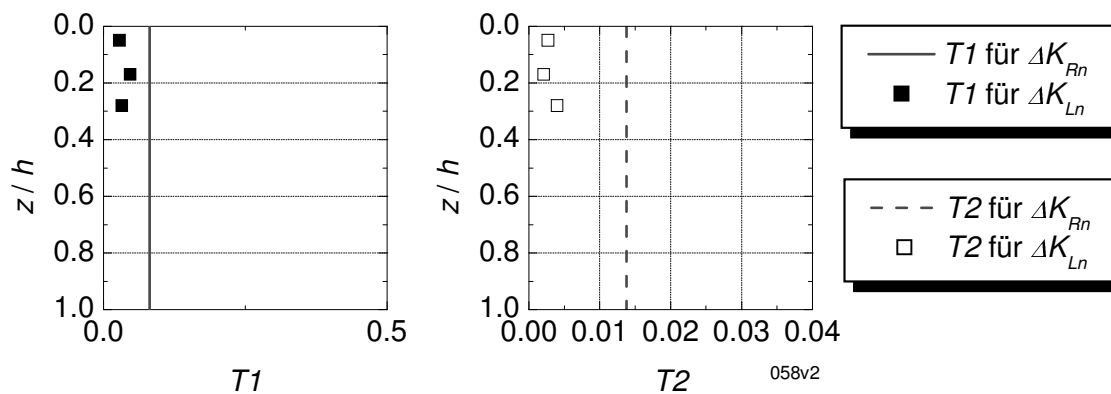


Bild D.202: Beiwerte T1 und T2

Versuch 047 – FPD ($I_D = 0,75$) – Folie 1

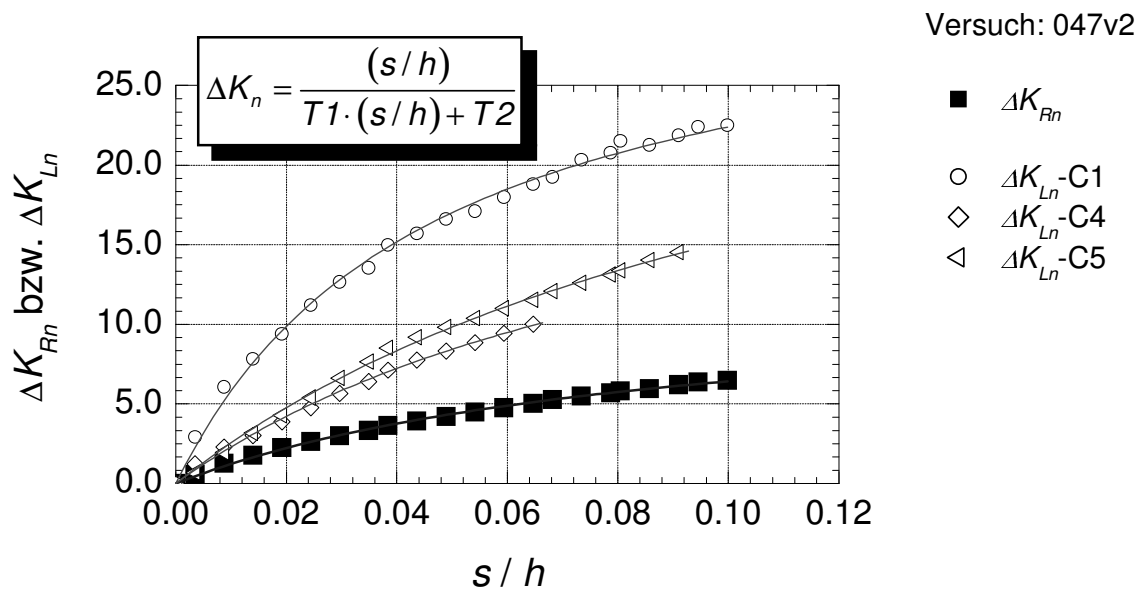


Bild D.203: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

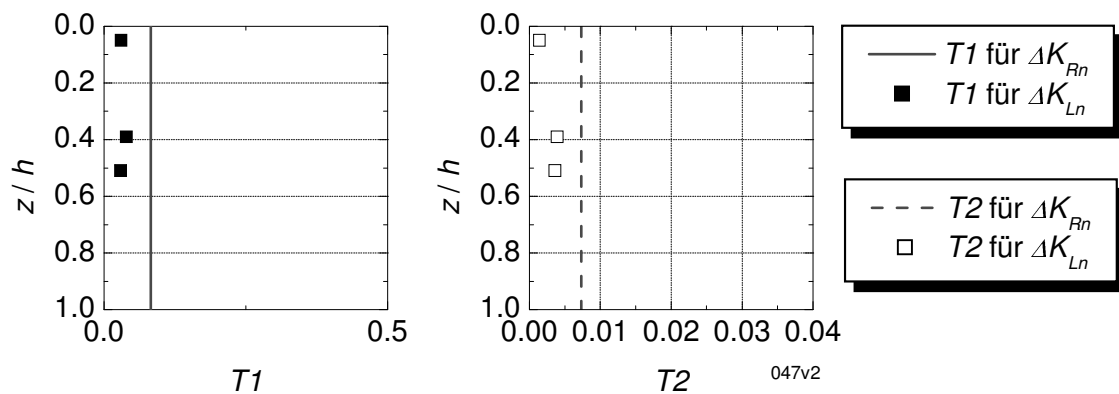


Bild D.204: Beiwerte $T1$ und $T2$

Versuch 076 – FPD ($I_D = 0,24$) – S40

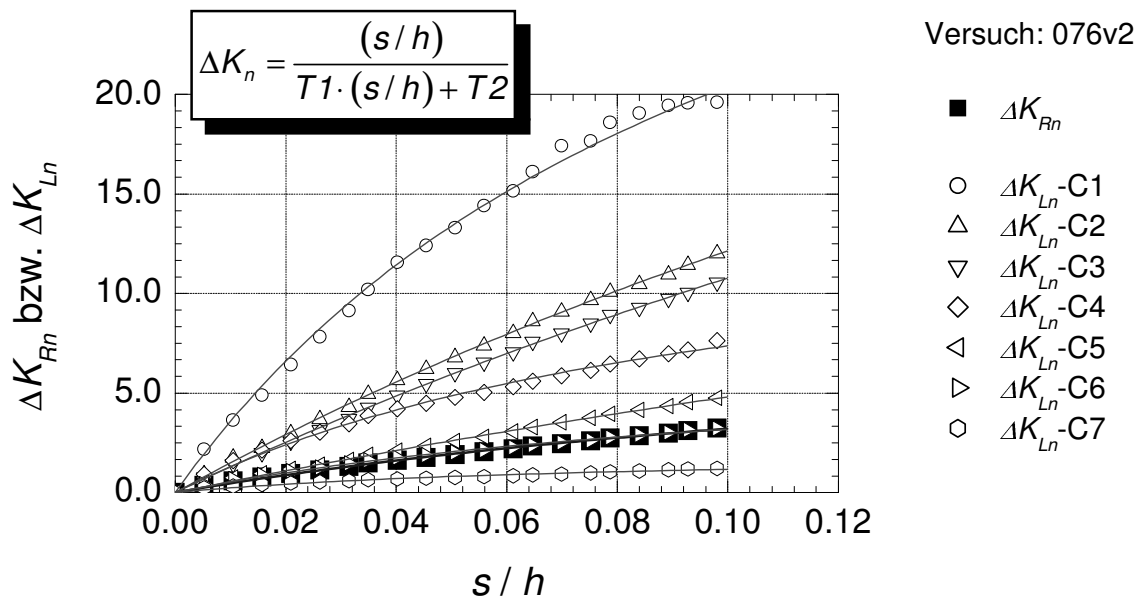


Bild D.205: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

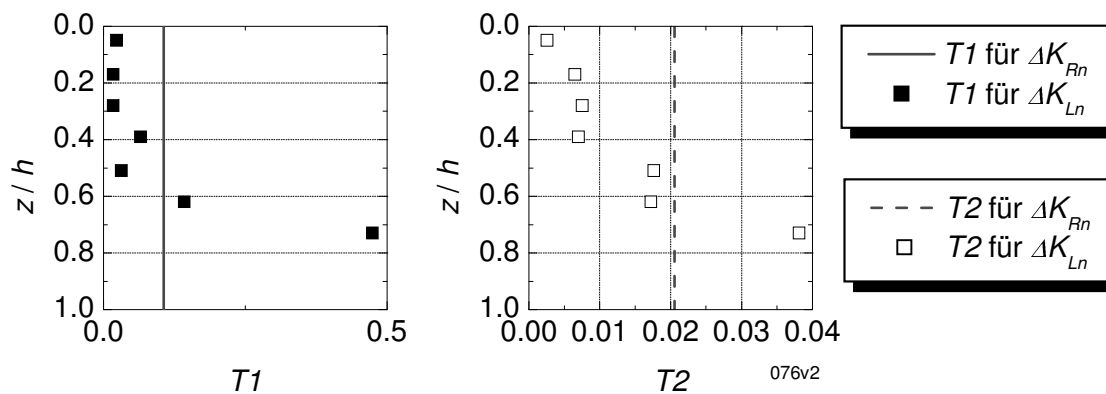


Bild D.206: Beiwerte T1 und T2

Versuch 073 – FPD ($I_D = 0,83$) – S40

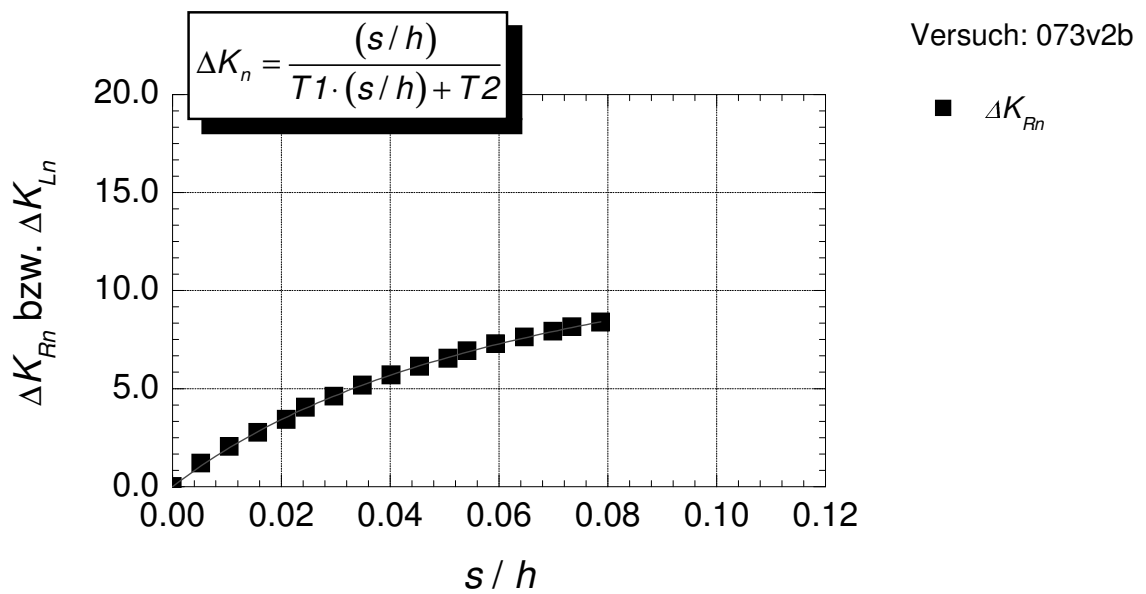


Bild D.207: Mobilisierungskurven mit hyperbolischem Ansatz

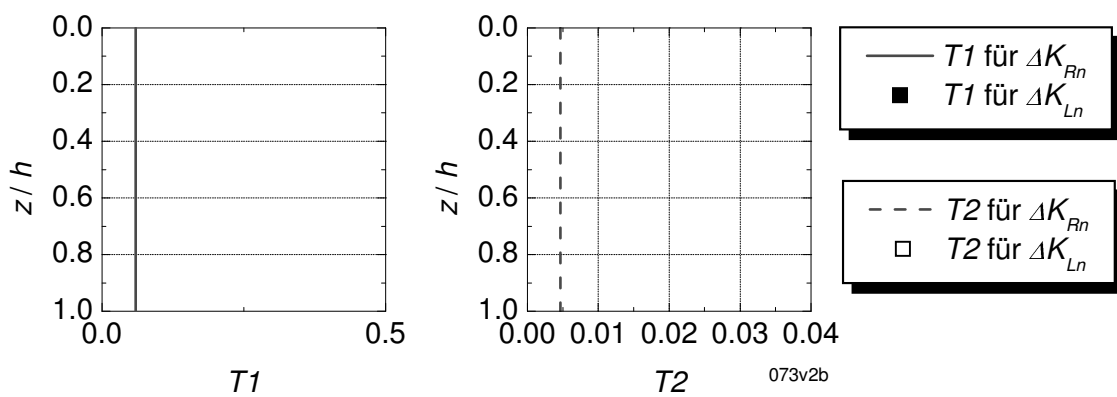


Bild D.208: Beiwerte $T1$ und $T2$

E Ergebnisse Zentrifugenversuche

E.1 Parallelverschiebung

Tabelle E.1: Parallelverschiebung, dichte Lagerung – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	WOF	γ	e_0	l_D	φ_1'	$h \cdot n_g / 1m$
[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]	[-]
1	598	Alu	17.5	0.489	0.89	43.4	0.60
2	515	Alu	17.4	0.497	0.86	42.9	1.20
3	776	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	1.20
4	516	Alu	17.3	0.506	0.83	42.4	1.80
5	518	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	2.40
6	777	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	2.40
7	519	Alu	17.3	0.506	0.83	42.4	3.00
8	778	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	3.60
9	779	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	4.20
10	553	S220	17.3	0.506	0.83	42.4	0.60
11	550	S220	17.1	0.523	0.77	41.5	1.20
12	551	S220	17.1	0.523	0.77	41.5	1.80
13	552	S220	17.3	0.506	0.83	42.4	2.40
14	780	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	3.00
15	781	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	3.60
16	1244	S220	17.3	0.506	0.83	42.4	0.60
17	1249	S220	17.3	0.506	0.83	42.4	3.60
18	1250	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	4.20

Tabelle E.2: Parallelverschiebung, mitteldichte Lagerung – Randbedingungen (Versuche mit Maximalwert der Erddruckkraft)

lfd. Nr.	Versuch	WOF	γ	e_0	l_D	φ_1'	$h \cdot n_g / 1m$
	[-]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]	[-]
1	794	Alu	16.2	0.606	0.49	37.6	1.20
2	795	Alu	16.3	0.596	0.52	38.0	2.40
3	1281	Alu	16.3	0.596	0.52	38.0	0.60
4	1282	Alu	16.3	0.596	0.52	38.0	1.20
5	1283	Alu	16.3	0.596	0.52	38.0	1.80
6	1285	Alu	16.3	0.596	0.52	38.0	3.00
7	1286	Alu	16.3	0.596	0.52	38.0	3.60
8	1267	S220	16.3	0.596	0.52	38.0	0.60
9	1268	S220	16.2	0.606	0.49	37.6	1.20
10	1269	S220	16.3	0.596	0.52	38.0	1.80
11	1270	S220	16.3	0.596	0.52	38.0	2.40
12	1271	S220	16.2	0.606	0.49	37.6	3.00
13	1274	S40	16.3	0.596	0.52	38.0	0.60
14	1275	S40	16.2	0.606	0.49	37.6	1.20
15	1276	S40	16.2	0.606	0.49	37.6	1.80
16	1277	S40	16.3	0.596	0.52	38.0	2.40
17	1278	S40	16.3	0.596	0.52	38.0	3.00
18	1280	S40	16.3	0.596	0.52	38.0	4.20

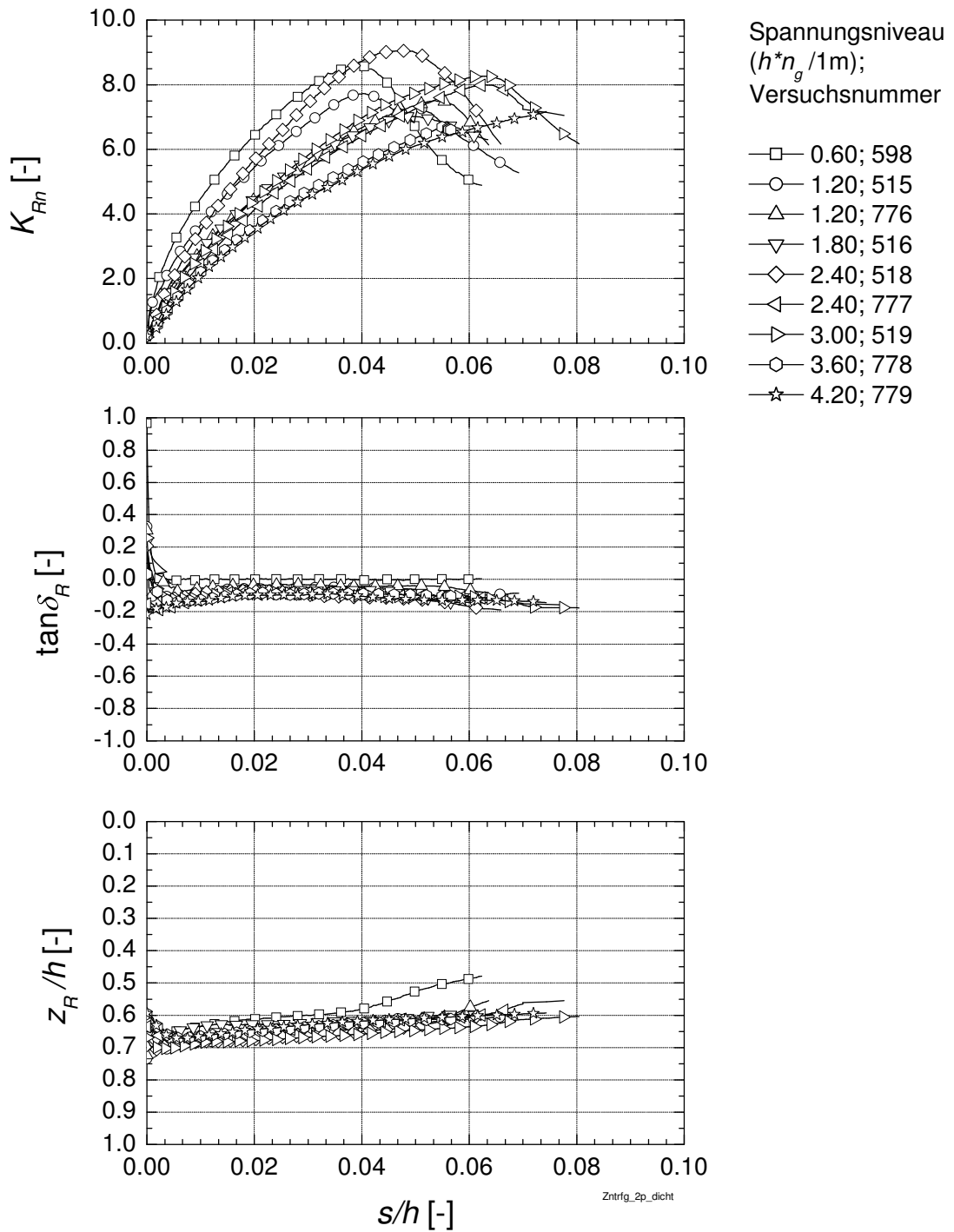


Bild E.1: Parallelvorschubung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Aluminium

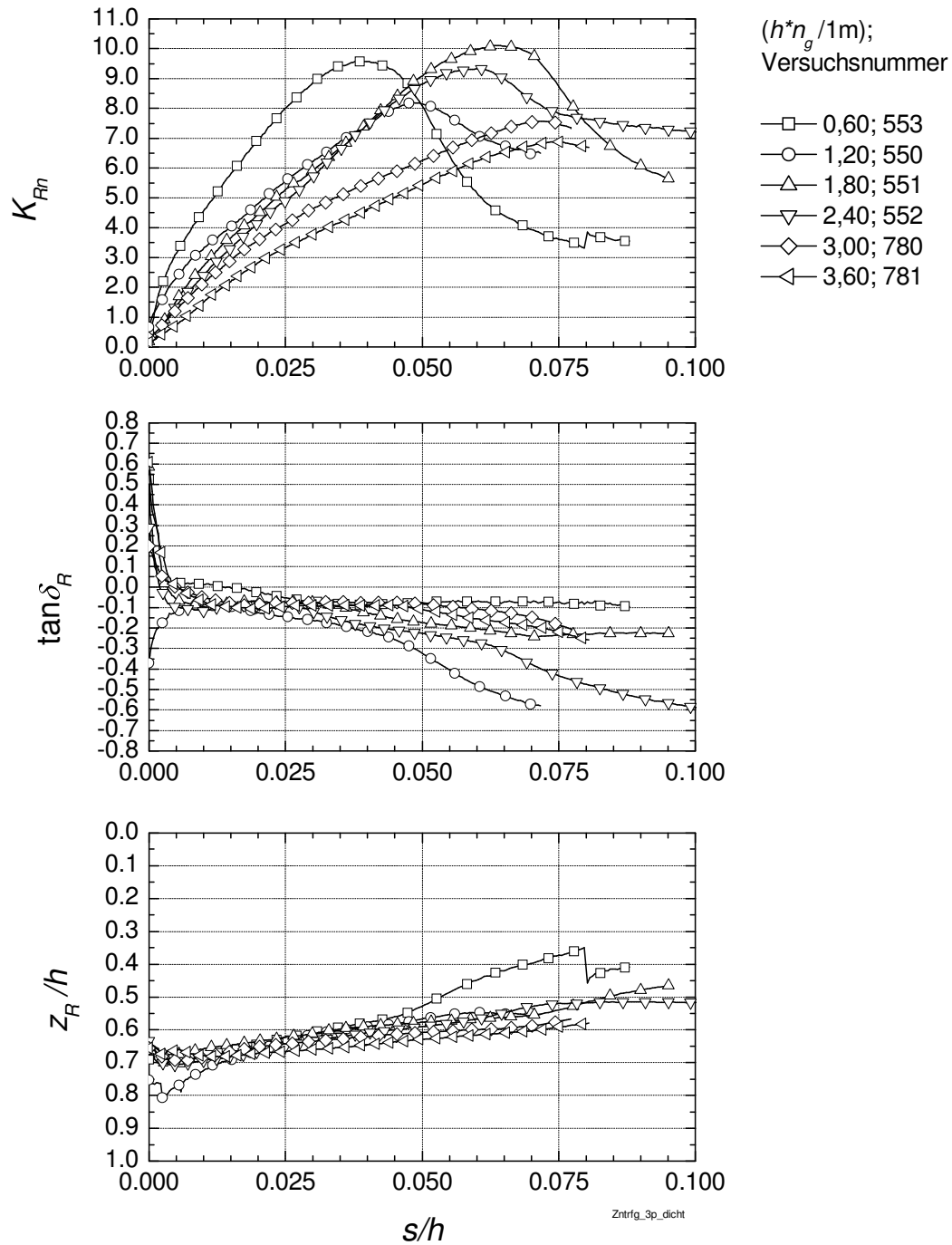


Bild E.2: Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Schleifpapier S220

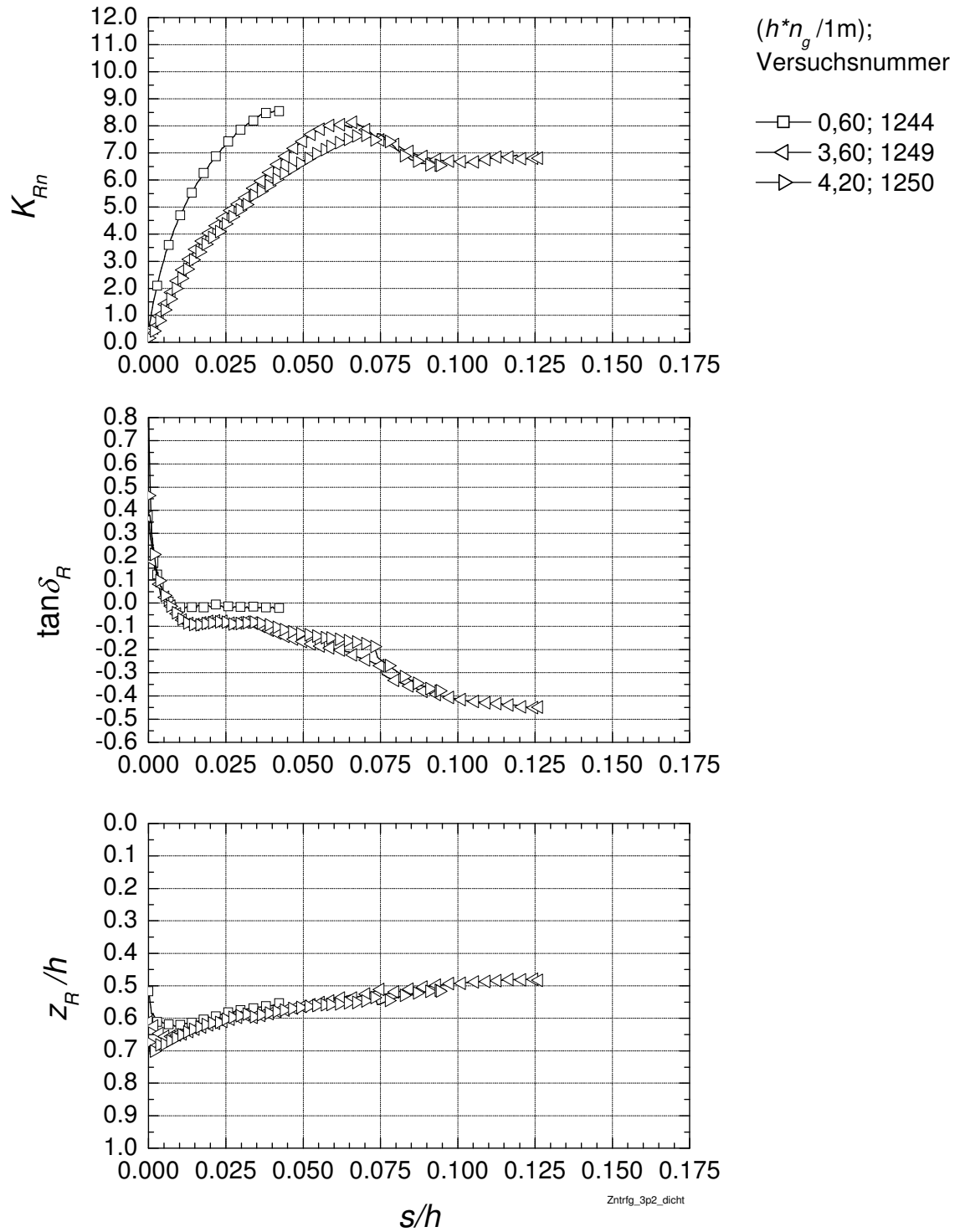


Bild E.3: Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Schleifpapier S220

E.2 Kopfpunktdrehung

Tabelle E.3: Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung – Randbedingungen

lfd. Nr.	Versuch	WOF	γ	e_0	l_D	φ_1'	$h \cdot n_g / 1m$
[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[-]	[°]	[-]
1	530	Alu	17.4	0.497	0.86	42.9	0.60
2	531	Alu	17.4	0.497	0.86	42.9	1.20
3	790	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	1.20
4	532	Alu	17.3	0.506	0.83	42.4	1.80
5	533	Alu	17.4	0.497	0.86	42.9	2.40
6	791	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	2.40
7	534	Alu	17.5	0.489	0.89	43.4	3.00
8	535	Alu	17.3	0.506	0.83	42.4	3.60
9	792	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	3.60
10	793	Alu	17.2	0.514	0.80	42.0	4.20
11	569	S220	17.3	0.506	0.83	42.4	0.60
12	789	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	1.20
13	565	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	1.80
14	566	S220	17.4	0.497	0.86	42.9	2.40
15	788	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	2.40
16	786	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	3.00
17	787	S220	17.2	0.514	0.80	42.0	3.60

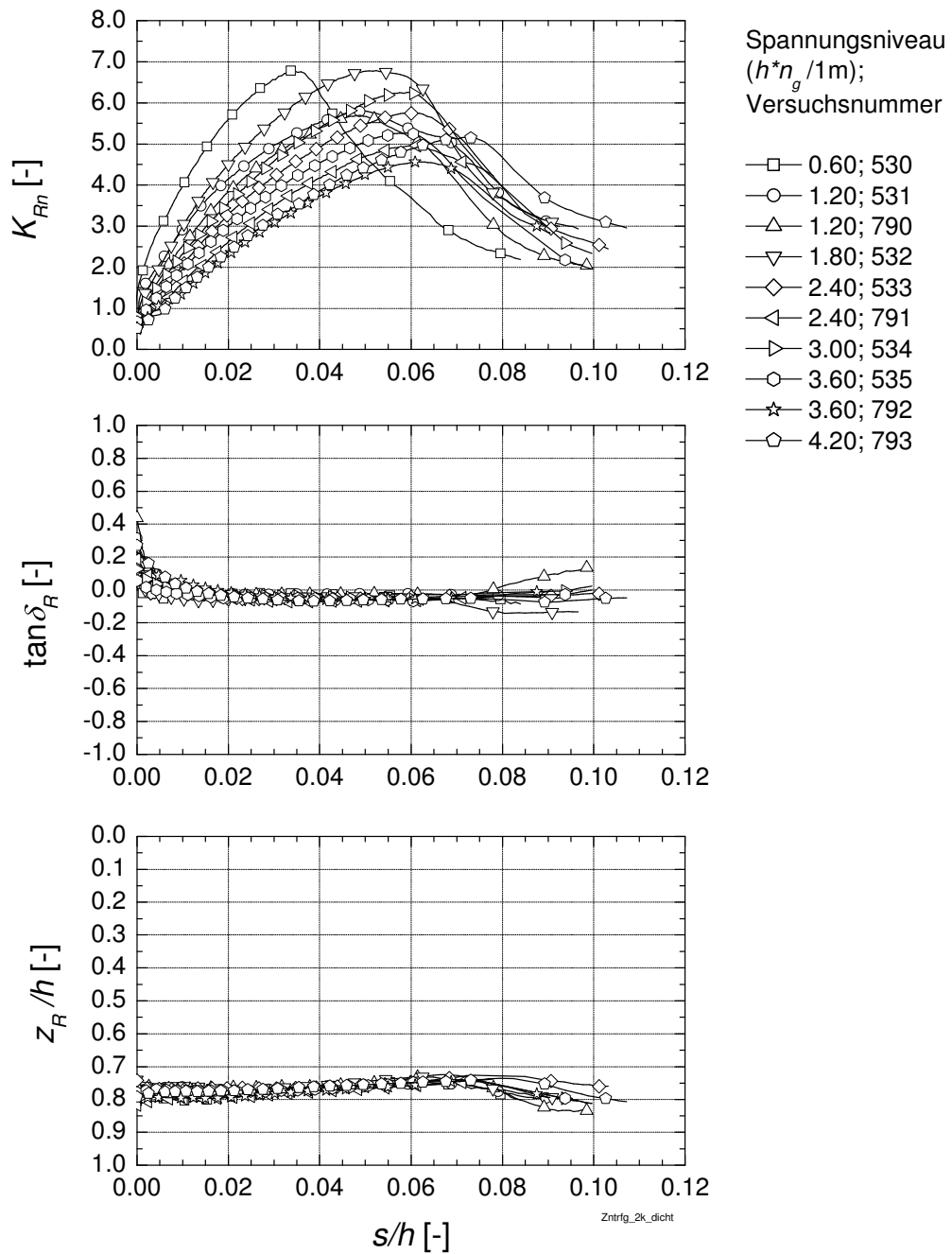


Bild E.4: Versuchsergebnisse; Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Aluminium

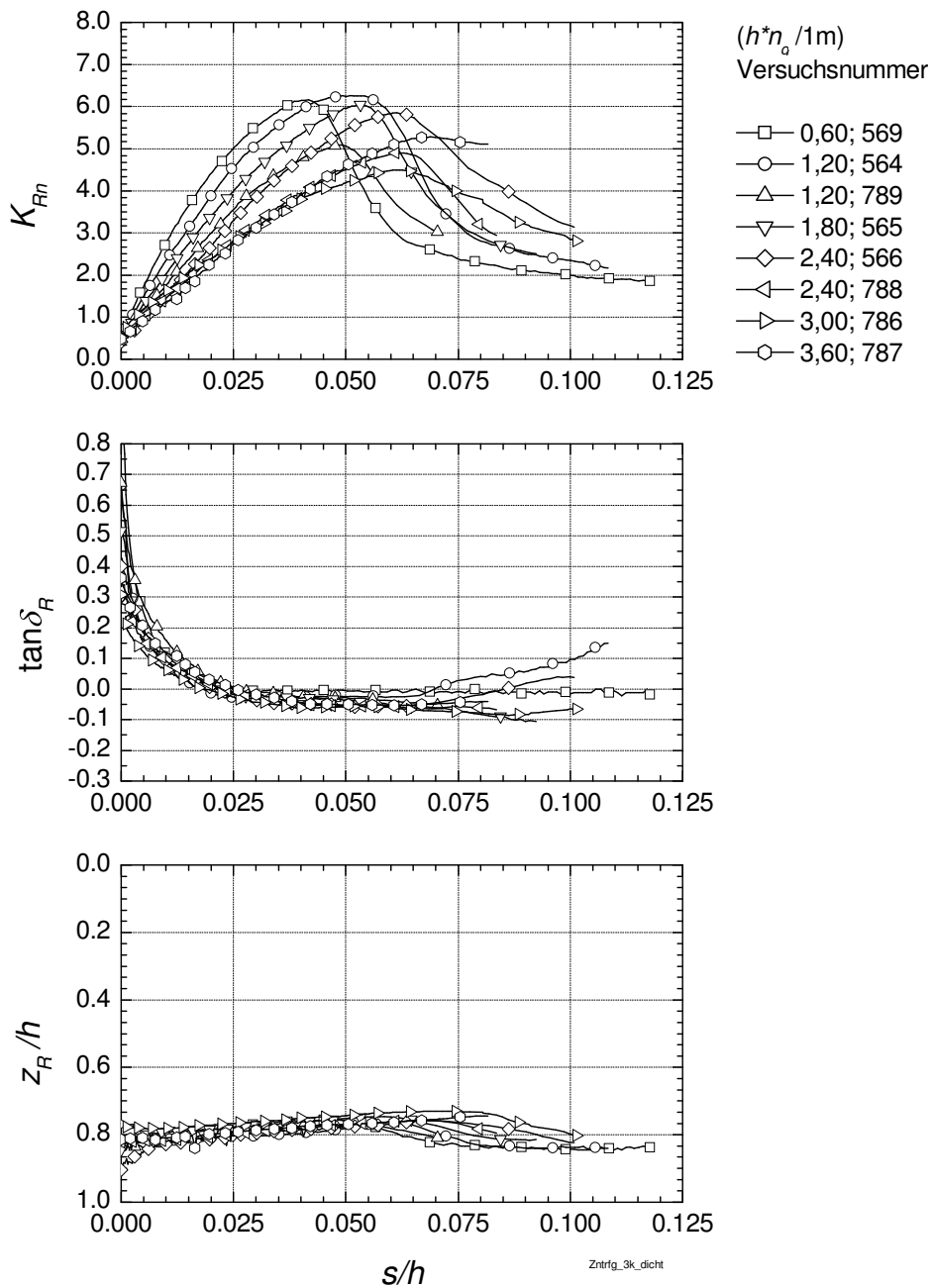


Bild E.5: Versuchsergebnisse; Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Schleifpapier S220

E.3 Fußpunktdrehung

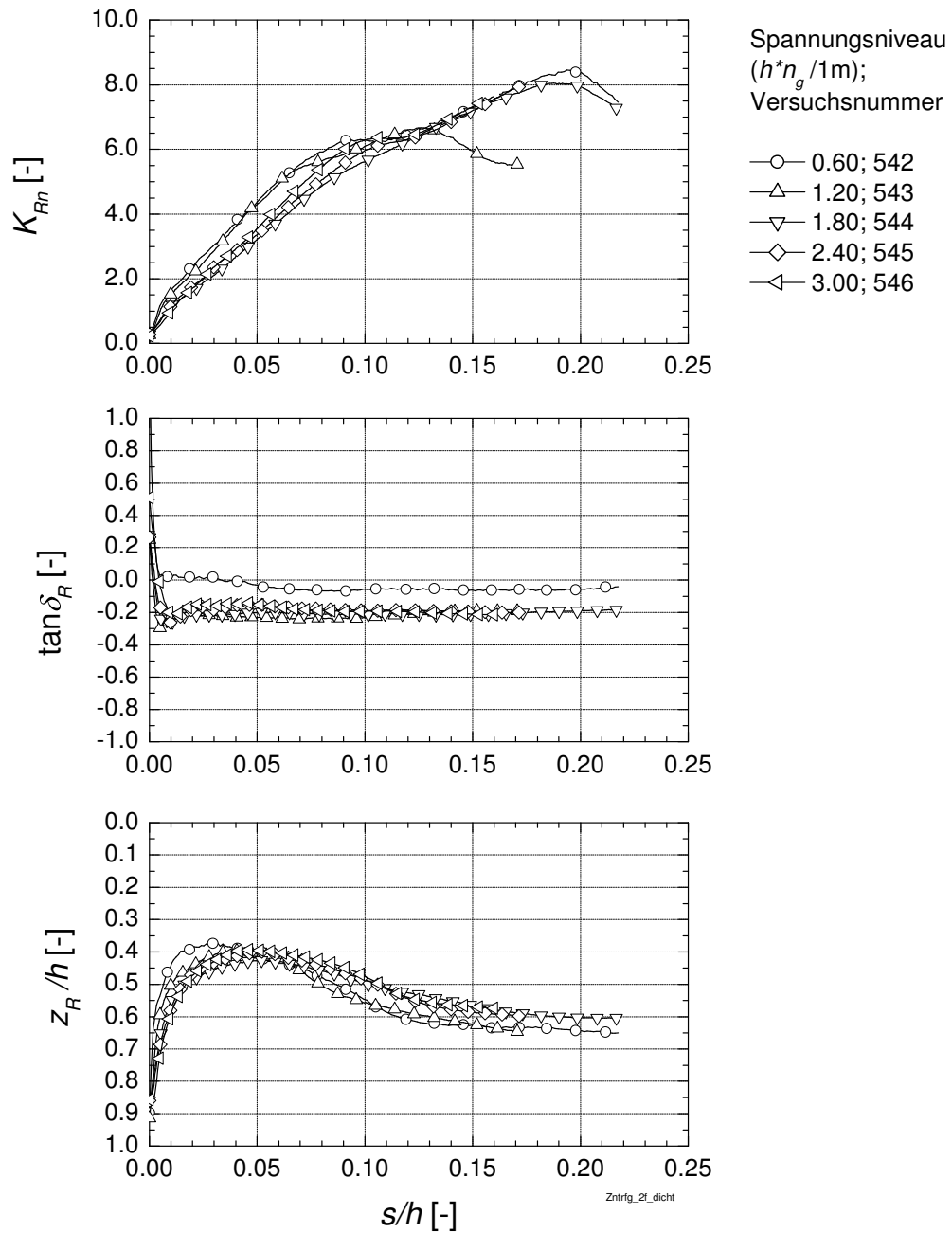


Bild E.6: Versuchsergebnisse; Fußpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Aluminium

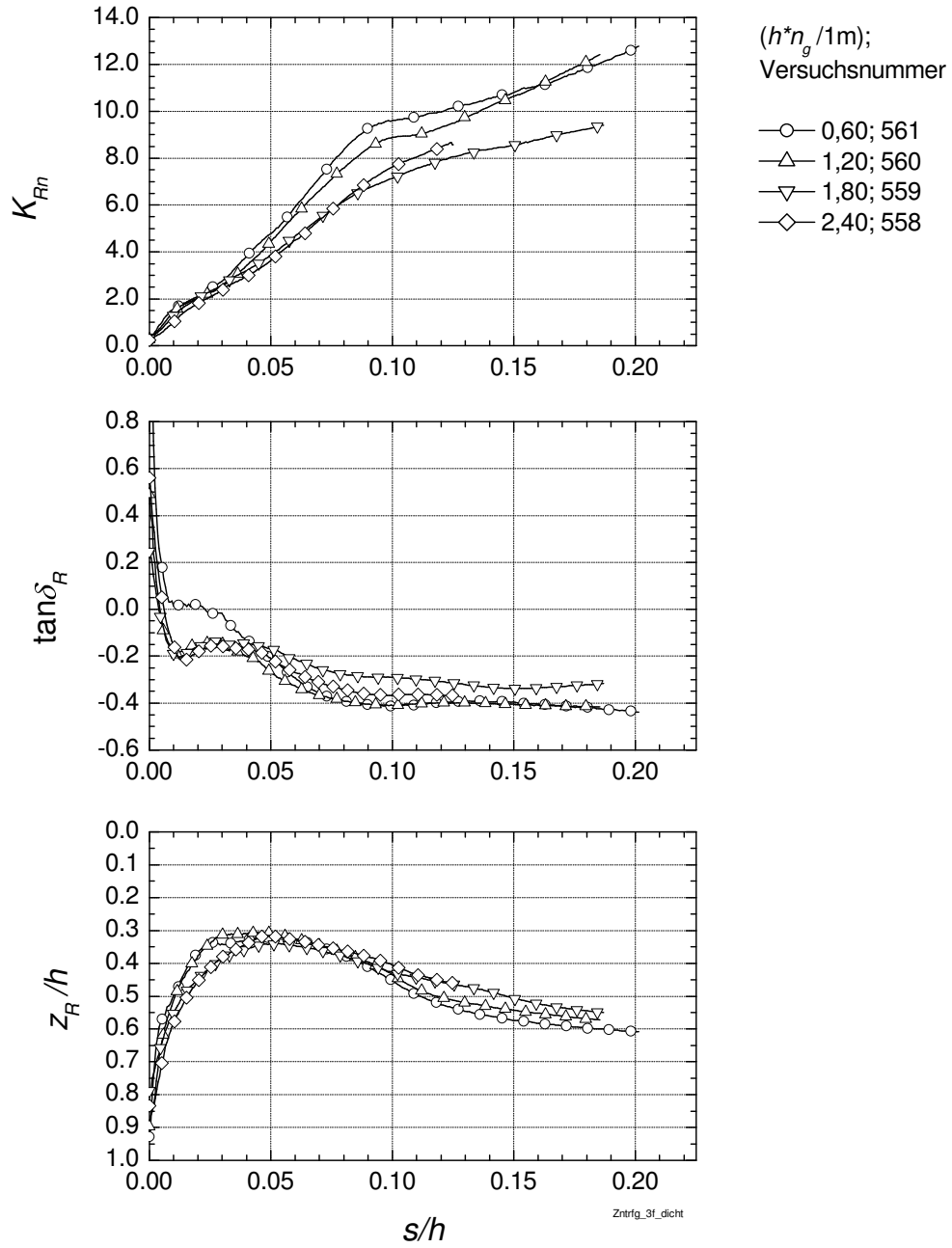


Bild E.7: Versuchsergebnisse; Fußpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Schleifpapier S220

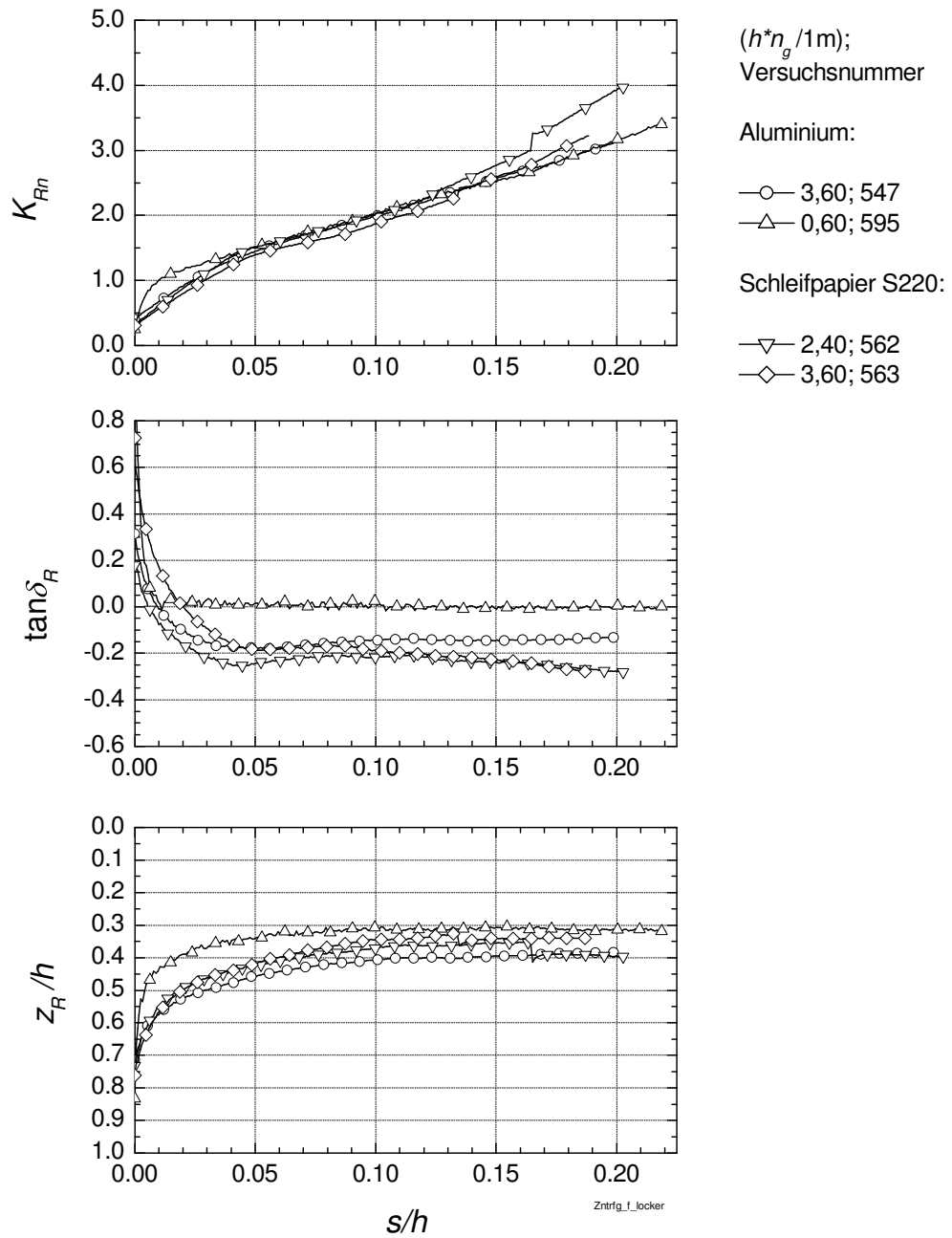


Bild E.8: Versuchsergebnisse; Fußpunktdrehung, lockere Lagerung, Wandoberfläche Aluminium bzw. Schleifpapier S220

F Auswertung Zentrifugenversuche

F.1 Parallelverschiebung

Table F.1: Parallelverschiebung, dichte Lagerung — passiver Grenzzustand

Versuch	WOF	$h \cdot n_g / 1\text{m}$	s_p / h	K_{Rnp}	$\tan \delta_{Rp}$	z_{Rp} / h
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
598	Alu	0.60	0.040	8.58	-0.004	0.58
515	Alu	1.20	0.040	7.73	-0.052	0.64
776	Alu	1.20	0.054	7.51	-0.041	0.61
516	Alu	1.80	0.047	7.01	-0.078	0.61
518	Alu	2.40	0.048	9.06	-0.120	0.64
777	Alu	2.40	0.063	8.00	-0.119	0.60
519	Alu	3.00	0.062	8.27	-0.112	0.63
778	Alu	3.60	0.056	6.74	-0.105	0.61
779	Alu	4.20	0.074	7.16	-0.143	0.59
553	S220	0.60	0.038	9.58	-0.086	0.58
550	S220	1.20	0.048	8.19	-0.299	0.57
551	S220	1.80	0.063	10.10	-0.213	0.56
552	S220	2.40	0.060	9.32	-0.268	0.57
780	S220	3.00	0.071	7.57	-0.157	0.59
781	S220	3.60	0.074	6.87	-0.208	0.60
1244	S220	0.60	0.041	8.57	-0.018	0.56
1249	S220	3.60	0.062	8.06	-0.201	0.54
1250	S220	4.20	0.069	7.65	-0.171	0.55

Tabelle F.2: Parallelverschiebung, dichte Lagerung — Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen

Versuch	WOF	$h \cdot n_g / 1\text{m}$	$T1$	$T2$	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
598	Alu	0.60	0.0813	0.0016	1.41	0.63
515	Alu	1.20	0.0834	0.0021	1.22	0.63
776	Alu	1.20	0.0751	0.0034	1.38	0.78
516	Alu	1.80	0.0855	0.0029	1.30	0.72
518	Alu	2.40	0.0557	0.0026	1.63	0.89
777	Alu	2.40	0.0661	0.0039	1.42	0.82
519	Alu	3.00	0.0670	0.0033	1.64	0.85
778	Alu	3.60	0.0753	0.0044	1.25	0.80
779	Alu	4.20	0.0822	0.0045	1.53	0.81
553	S220	0.60	0.0612	0.0018	1.32	0.72
550	S220	1.20	0.0633	0.0034	1.11	0.72
551	S220	1.80	0.0356	0.0040	1.24	0.86
552	S220	2.40	0.0312	0.0043	1.39	0.99
780	S220	3.00	0.0703	0.0048	1.30	0.78
781	S220	3.60	0.0561	0.0066	1.31	0.90
1244	S220	0.60	0.0839	0.0015	1.67	0.69
1249	S220	3.60	0.0593	0.0040	1.36	0.83
1250	S220	4.20	0.0718	0.0041	1.49	0.83

Tabelle F.3: Parallelverschiebung, mitteldichte Lagerung — passiver Grenzzustand
(Versuche mit Grenzwert der Erddruckkraft)

Versuch	WOF	$h \cdot n_g / 1\text{m}$	s_p / h	K_{Rnp}	$\tan \delta_{Rp}$	z_{Rp} / h
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
794	Alu	1.20	0.076	5.60	-0.066	0.58
795	Alu	2.40	0.061	5.06	-0.078	0.61
1281	Alu	0.60	0.087	6.40	-0.012	0.53
1282	Alu	1.20	0.099	5.52	-0.073	0.51
1283	Alu	1.80	0.084	5.17	-0.074	0.54
1285	Alu	3.00	0.113	5.01	-0.092	0.54
1286	Alu	3.60	0.095	5.03	-0.094	0.51
1267	S220	0.60	0.068	5.67	-0.034	0.49
1268	S220	1.20	0.058	4.75	-0.097	0.52
1269	S220	1.80	0.073	4.53	-0.103	0.53
1270	S220	2.40	0.070	4.59	-0.104	0.53
1271	S220	3.00	0.081	4.95	-0.095	0.55
1274	S40	0.60	0.071	4.97	-0.007	0.49
1275	S40	1.20	0.068	4.46	-0.092	0.51
1276	S40	1.80	0.075	4.66	-0.093	0.52
1277	S40	2.40	0.075	4.57	-0.096	0.53
1278	S40	3.00	0.100	4.96	-0.127	0.48
1280	S40	4.20	0.083	5.03	-0.093	0.53

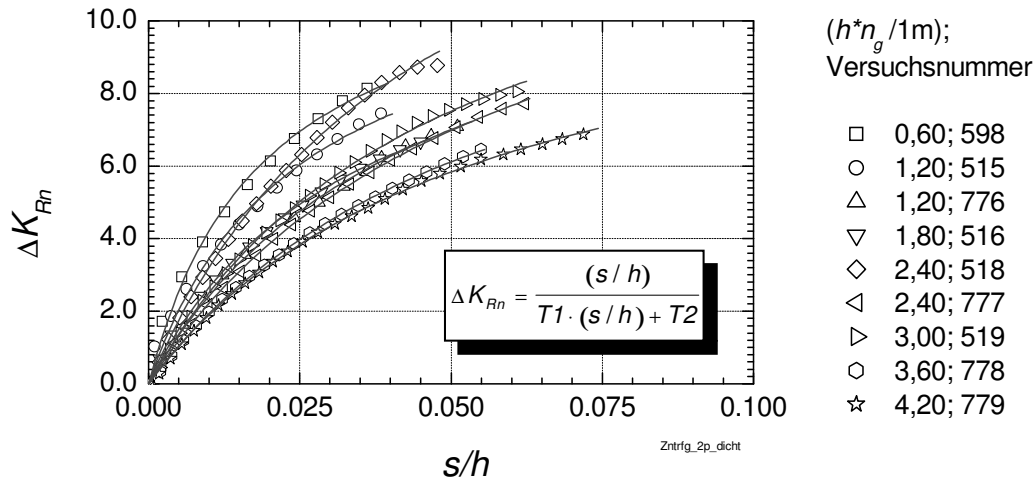


Bild F.1: Mobilisierungskurven; Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Aluminium

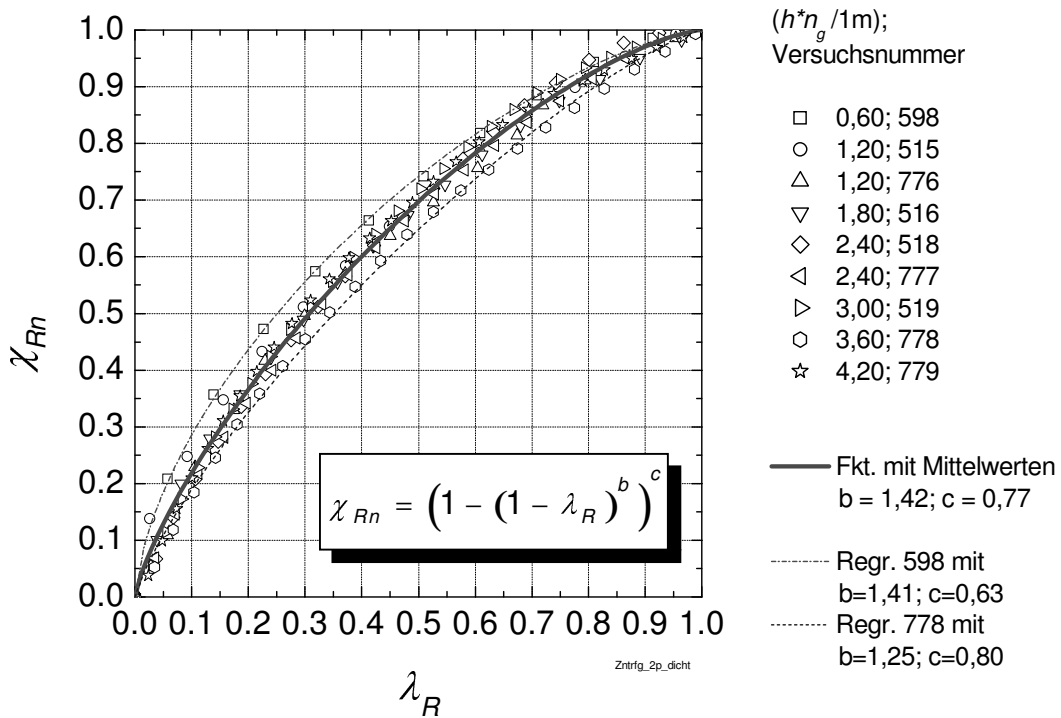


Bild F.2: Mobilisierungskurven; Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Aluminium

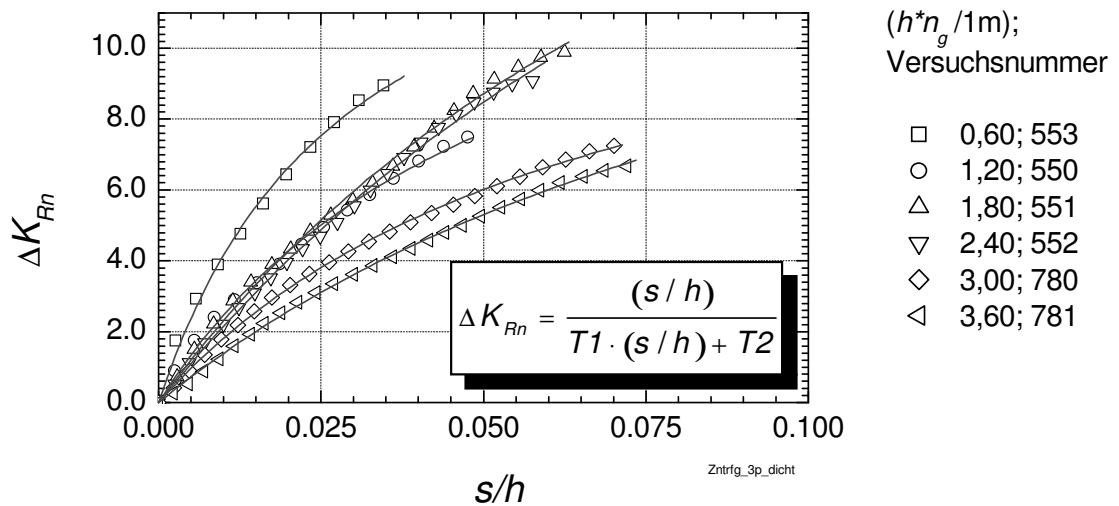


Bild F.3: Mobilisierungskurven; Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche S220

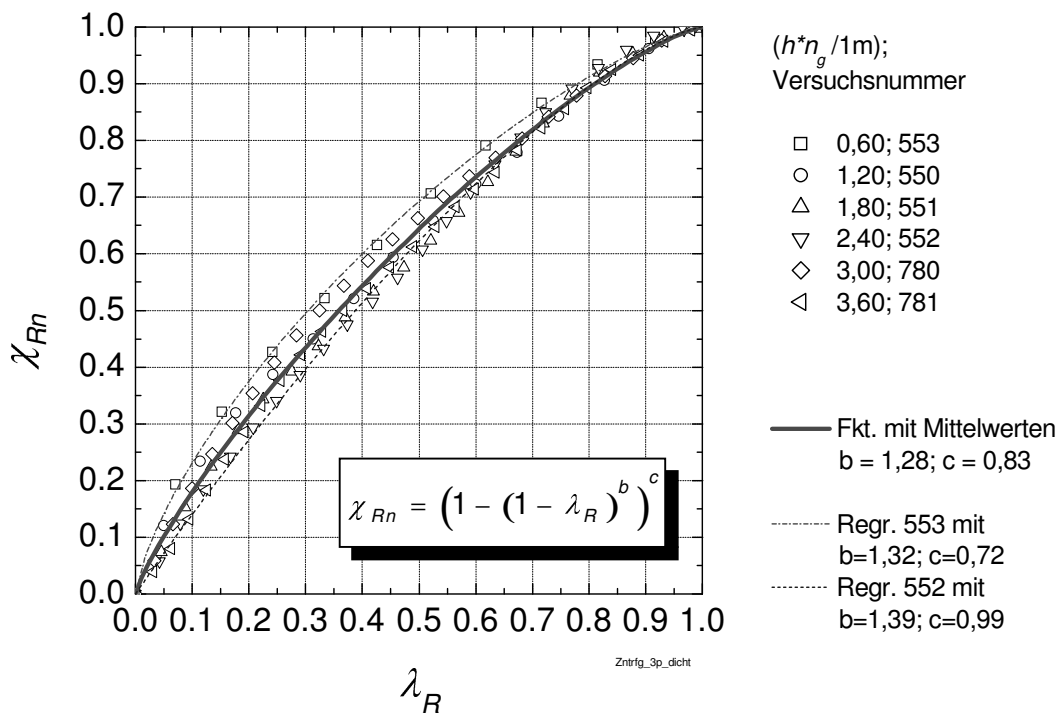


Bild F.4: Mobilisierungskurven; Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche S220

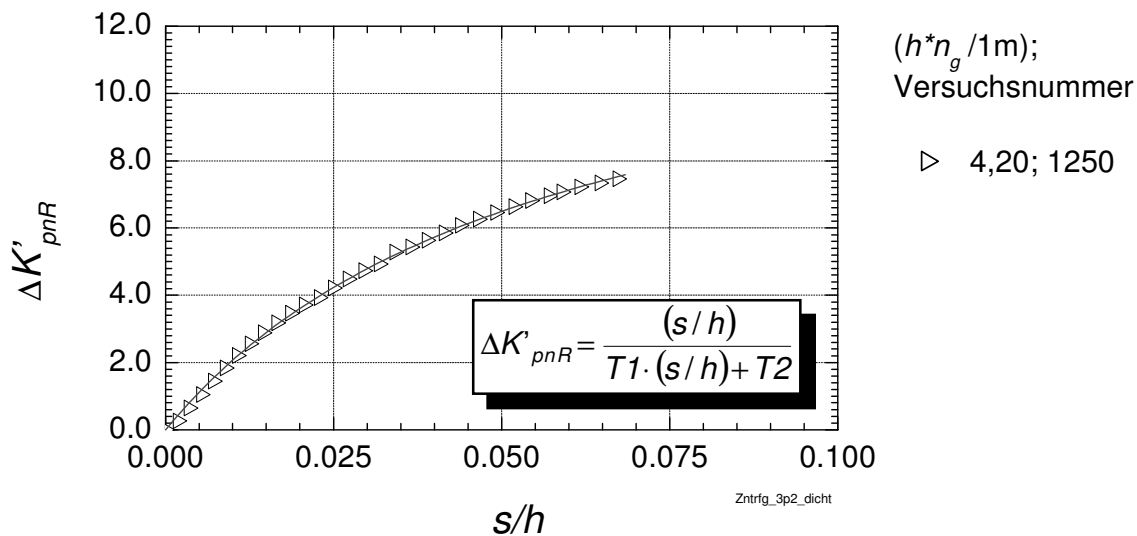


Bild F.5: Mobilisierungskurven; Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Schleifpapier S220

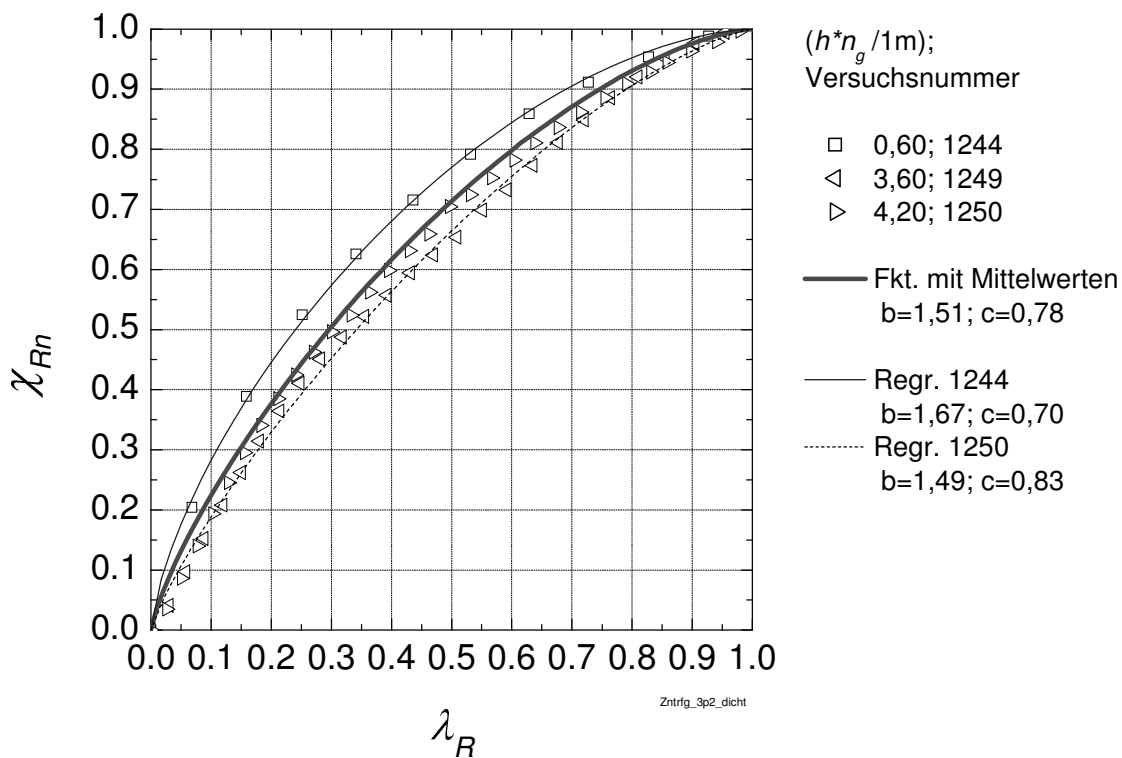


Bild F.6: Mobilisierungsfunktionen für die Versuchsergebnisse; Parallelverschiebung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Schleifpapier S220

F.2 Kopfpunktdrehung

Table F.4: Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung — passiver Grenzzustand

Versuch	WOF	$h \cdot n_g / 1\text{m}$	s_p / h	K_{Rnp}	$\tan \delta_{Rp}$	z_{Rp} / h
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
530	Alu	0.60	0.034	6.78	-0.021	0.77
531	Alu	1.20	0.050	5.81	-0.025	0.75
790	Alu	1.20	0.049	5.69	-0.024	0.75
532	Alu	1.80	0.052	6.79	-0.037	0.74
533	Alu	2.40	0.058	5.75	-0.046	0.75
791	Alu	2.40	0.061	4.96	-0.063	0.76
534	Alu	3.00	0.059	6.26	-0.056	0.75
535	Alu	3.60	0.059	5.27	-0.065	0.75
792	Alu	3.60	0.062	4.57	-0.056	0.76
793	Alu	4.20	0.072	5.16	-0.053	0.74
569	S220	0.60	0.042	6.16	-0.007	0.76
789	S220	1.20	0.048	5.09	-0.030	0.77
565	S220	1.80	0.053	6.04	-0.041	0.75
566	S220	2.40	0.061	5.86	-0.056	0.77
788	S220	2.40	0.061	4.89	-0.058	0.76
786	S220	3.00	0.060	4.49	-0.061	0.73
787	S220	3.60	0.069	5.28	-0.049	0.75

Tabelle F.5: *Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung — Beiwerte für Mobilisierungsfunktionen*

Versuch	WOF	$h \cdot n_g / 1\text{m}$	T_1	T_2	b	c
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
530	Alu	0.60	0.1154	0.0016	1.19	0.53
531	Alu	1.20	0.1325	0.0030	1.50	0.64
790	Alu	1.20	0.1094	0.0041	1.52	0.81
532	Alu	1.80	0.0958	0.0033	1.67	0.79
533	Alu	2.40	0.0922	0.0056	1.56	0.90
791	Alu	2.40	0.0844	0.0078	1.64	1.03
534	Alu	3.00	0.0811	0.0056	1.59	0.94
535	Alu	3.60	0.0962	0.0066	1.62	0.97
792	Alu	3.60	0.0825	0.0095	1.55	1.03
793	Alu	4.20	0.0789	0.0090	1.61	1.05
569	S220	0.60	0.0882	0.0034	1.67	0.92
789	S220	1.20	0.0716	0.0066	1.53	1.04
565	S220	1.80	0.0717	0.0054	1.48	0.96
566	S220	2.40	0.0489	0.0076	1.65	1.18
788	S220	2.40	0.0714	0.0088	1.46	1.02
786	S220	3.00	0.1149	0.0079	1.40	0.85
787	S220	3.60	0.0520	0.0099	1.54	1.12

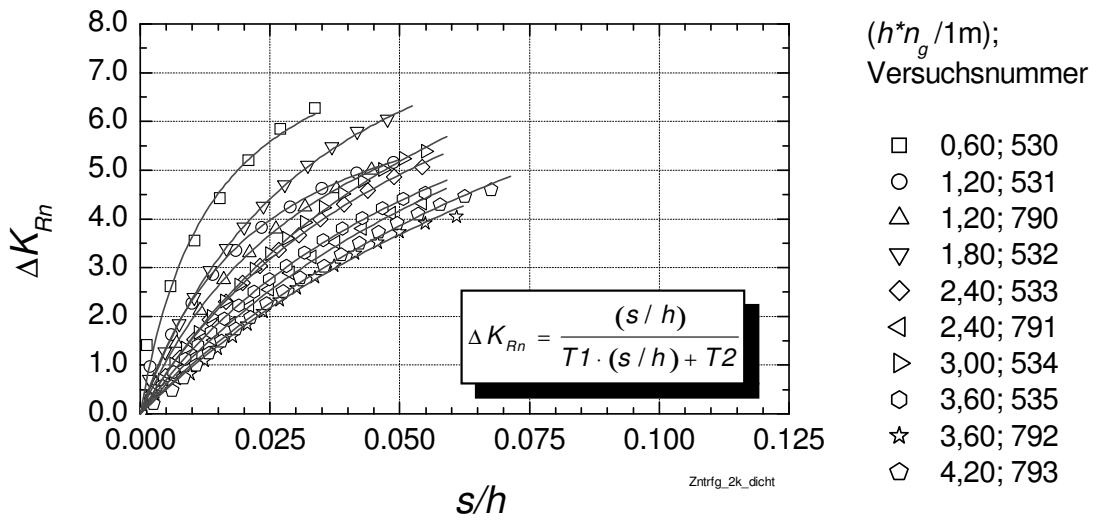


Bild F.7: Mobilisierungskurven; Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Aluminium

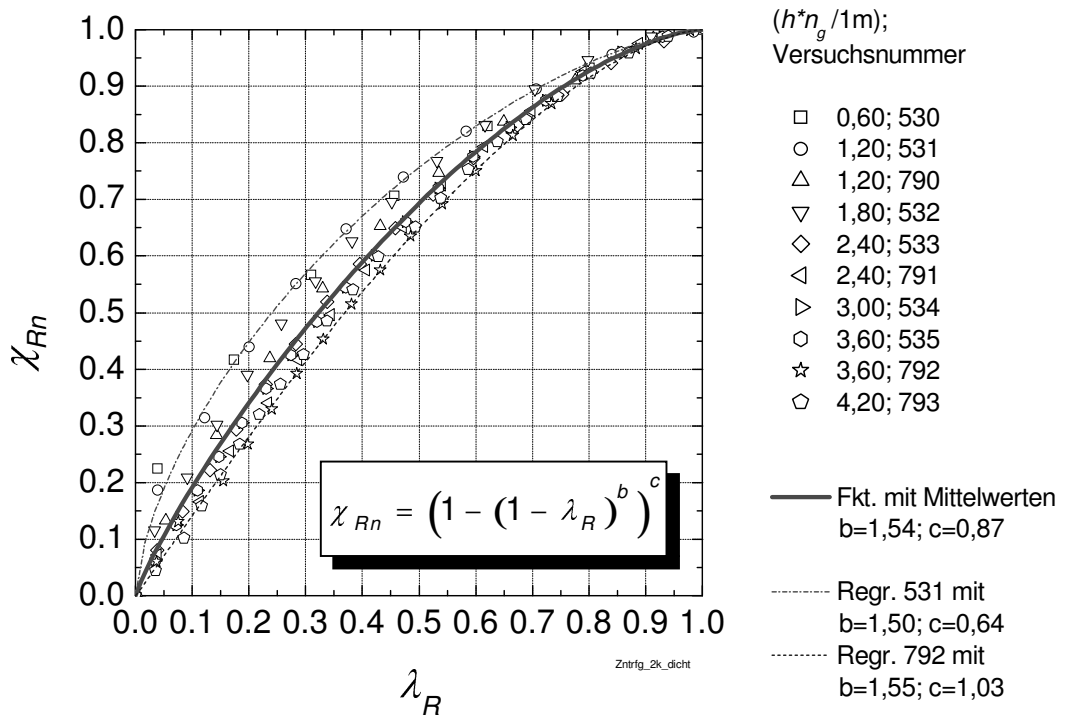


Bild F.8: Mobilisierungskurven; Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Aluminium

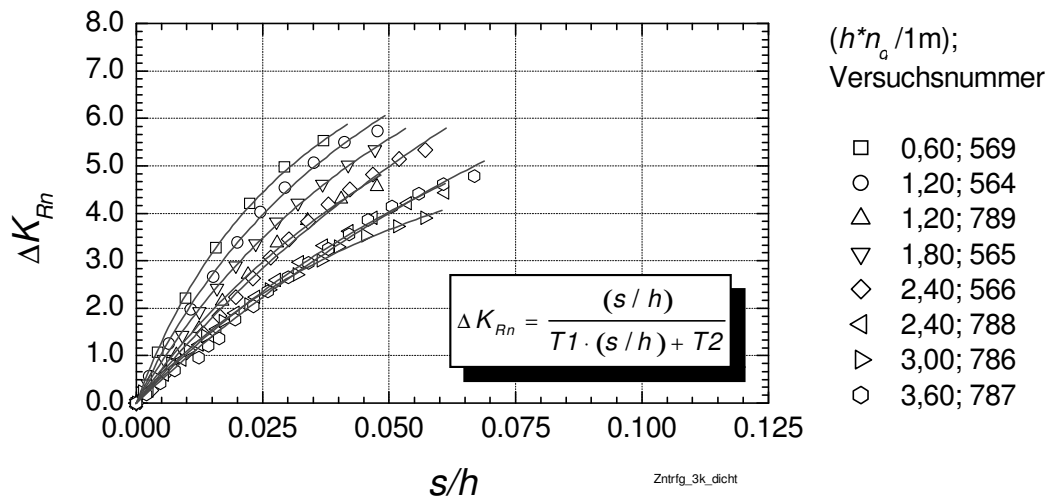


Bild F.9: Mobilisierungskurven; Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche S220

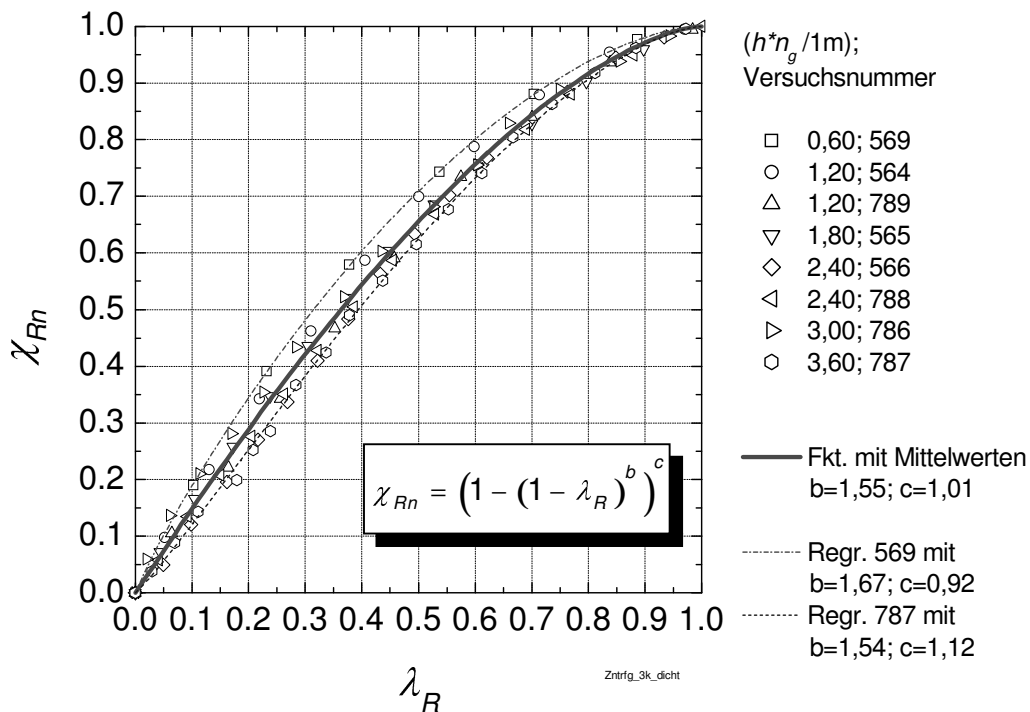


Bild F.10: Mobilisierungskurven; Kopfpunktdrehung, dichte Lagerung, Wandoberfläche Schleifpapier S220