

Struktur als Parameter zur ganzheitlichen Beschreibung des Materialverhaltens fließfähiger Baustoffe

Marcel Ramler
ramler@hs-koblenz.de

Hochschule Koblenz, University of Applied Science

Kurzfassung

Zeitweise fließfähige und selbstverdichtende Verfüllbaustoffe, kurz ZFSV, gewinnen zunehmend an baupraktischer Bedeutung. Durch den Einsatz des Materials, insbesondere im innerstädtischen Leitungsbau, ergeben sich sowohl im noch fließfähigen als auch im verfestigten Zustand zahlreiche, teilweise auch konkurrierende Anforderungen. Die exakte und praktikable Parametrisierung zur eindeutigen Beschreibung des Materials gestaltet sich aufgrund seiner komplexen Struktur vergleichsweise schwierig. In diesem Beitrag soll ein generelles Modell zur Abbildung des Materialverhaltens, unabhängig vom fließfähigen oder verfestigten Zustand, vorgeschlagen werden.

Einleitung

Zeitweise fließfähige und selbstverdichtende Verfüllbaustoffe, kurz ZFSV, die oftmals auch als Flüssigböden bezeichnet werden, bilden eine relativ junge Gruppe von Baustoffen, welche vorwiegend zur Verfüllung von Arbeitsräumen, insbesondere von Leitungsgräben im innerstädtischen Bereich verwendet werden (vgl. H ZFSV, 2012).

Bei den ZFSV handelt es sich aus Sicht der Rheologie um hochkonzentrierte feststoffreiche Suspensionen (vgl. Elghobashi, 1994), analog zu Betonen wie unter Fleischmann (2014) oder Wüstholtz (2005) beschrieben. Dabei wird die flüssige Phase i.A. aus Suspensionen von Tonmineralen sowie einem hydraulischen Bindemittel gebildet und hat im Wesentlichen zwei konkurrierende Aufgaben. Zum einen muss sie das Korngefüge stabil in seiner relativen Lage im Kontinuum halten, was durch eine entsprechend hohe Fließgrenze (statisch) oder eine niedrige Viskosität (dynamisch) erreicht wird. Zum anderen muss die flüssige Phase den Fließwiderstand der Suspension so weit reduzieren, dass für die baupraktische Verwendung vorteilhafte Fließeigenschaften, wie die vollständige Umschließung der Rohrleitungen bis in kleinste Zwickelbereiche hinein, erreicht werden. Im verfestigten Zustand soll das Material eine dem Umgebungsboden angemessene Verformungseigenschaft und leichte Wiederaushubfähigkeit besitzen (vgl. Sosinka, 2020).

Der allgemeinen Akzeptanz von ZFSV stehen einige Besonderheiten des Materials entgegen. So liegt Flüssigboden in zwei komplexen Zustandsformen vor. Im flüssigen Zustand, kurz nach Herstellung, kann das Materialverhalten den nicht-newton'schen Fluiden zugeordnet werden. Im verfestigten Zustand lässt sich das Material als gemischtkörniger Boden beschreiben, wobei die vom Wassergehalt abhängigen Eigenschaften der tonigen Bestandteile durch die Hydratation der Bindemittel zeitlich veränderlich sind (vgl. Sosinka, 2020).

Aus der bislang unzureichenden bodenmechanischen Beschreibung des Materialverhaltens im Übergangsbereich zwischen Flüssigkeit und Feststoff ergeben sich, besonders im Hinblick auf die Definition messbarer Parameter, Unsicherheiten bei der Verwendung von ZFSV. Damit verbunden ist eine u.U. nicht ausreichend vorhersagbare Eignung des Materials hinsichtlich statischer oder baubetrieblicher Anforderungen (vgl. IKT, 2020).

Kreislaufwirtschaft / Nachhaltigkeit

Aus ökologischer Sicht ergibt sich die Notwendigkeit, von der konventionellen Grabenverfüllung neben der Nutzung von Rezyklat als Verfüllmaterial auf die Verwendung von ZFSV zu wechseln. So wurde im November 2019 in einer Pressemitteilung der Bauindustrie und des Bundesverbands Mineralische Rohstoffe e.V. folgende Feststellung getroffen, dass die Versorgung von Baustellen mit Kies, Sand, Schotter und Splitt ins Stocken gerät und dringender Handlungsbedarf besteht (Bundesverband Mineralische Rohstoffe e.V., 2019).

Diese Feststellung hat einen unmittelbaren Bezug zur Herstellung und Instandhaltung der innerstädtischen Infrastruktur und es muss zwangsläufig die Frage gestellt werden, wie sinnvoll und nachhaltig die konventionelle Verfüllung von Leitungsgräben mit Sand/Kies natürlichen Ursprungs ist, wenn hierbei wertvoller und finiter Rohstoff, der gleichsam die Grundlage für die Betonherstellung bildet, als Verfüllmaterial vergraben wird. Diesem Problem wird mit dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz 2020 begegnet. Die Hierarchie, in der Maßnahmen zur Abfallbewirtschaftung angeordnet werden, ist wie folgt dargestellt:

Vermeidung – Wiederverwendung – Recycling – Beseitigung

Der im Leitungsbau anfallende Erdaushub ist nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz als Abfall anzusehen, sobald er aufgrund von mangelnder Verdichtbarkeit oder unzureichenden Bettungseigenschaften nur eingeschränkt oder gar nicht wiedereinbaubar ist. Dies bedingt sich aus §1 BBodSchG, wodurch eine Beeinträchtigung der natürlichen Funktionen vermieden werden sollen, wozu auch die Auflockerung durch den Aushub, welche nachträglich nicht wieder zurückgestellt werden zählt. Ohne weiteres würde dieser so gewonnene Erdaushub der Beseitigung zugeführt.

Mit dem Aufkommen von ZFSV entstand eine effektive Methode, den anfallenden Aushub aufzubereiten und als geeignetes Verfüllmaterial wieder in den Graben einzubauen. Die ökologische Relevanz dieses Verfahrens ergibt sich aus der Tatsache, dass Bodenaushub einen Anteil von annähernd 60 % an den rd. 215 Millionen Tonnen Abfall hat, die insgesamt pro Jahr in der Bauindustrie anfallen (Kreislaufwirtschaft Bau, 2018). Ohne die Wiederaufbereitung als ZFSV und anschließendem Wiedereinbau oder anderweitiger Weiterverwendung als mineralischer Baustoff wird entsprechendes Potential verschenkt. Dies stellt vor allem im Hinblick auf die bevorstehende Verknappung einen schwer hinzunehmenden Missstand dar.

Ausgangssituation und Fragestellung

Den Vorteilen, sei es in der Verfahrenstechnik des Einbaus (z.B. Wegfallen externer Verdichtungsarbeit in der Verfüllzone) oder dem großen ökologischen Nutzen, stehen Unsicherheiten in der bisherigen Beschreibung der Eigenschaften und des Materialverhaltens gegenüber.

Das rheologische Verhalten von Baustoffen, wie Stahl und Beton kann näherungsweise durch sogenannte Strukturmodelle abgebildet werden. Sie beschreiben das rheologische Verhalten des Materials mit Hilfe von drei rheologischen Grundelementen (Abb. 1), die entweder hintereinander und/oder parallel zu Strukturmodellen kombiniert werden können. Als einfache Strukturmodelle können beispielsweise das Prandtl-Strukturmodell für elasto-plastische Festkörper oder das Bingham-Modell für visko-plastische Fluide genannt werden (Metzger, 2016). Sowohl Grundelement als auch zusammengesetzte Strukturen lassen nur eine phänomenologische Beschreibung des makroskopischen Stoffverhaltens zu, welche eng an die zur Ermittlung der Parameter herangezogenen Versuche gekoppelt ist. Eine Beschreibung auf der Grundlage messbarer Parameter der Stoffstruktur ist trotz der Bezeichnung dieser Ansätze als ‚Strukturmodelle‘ nicht möglich.

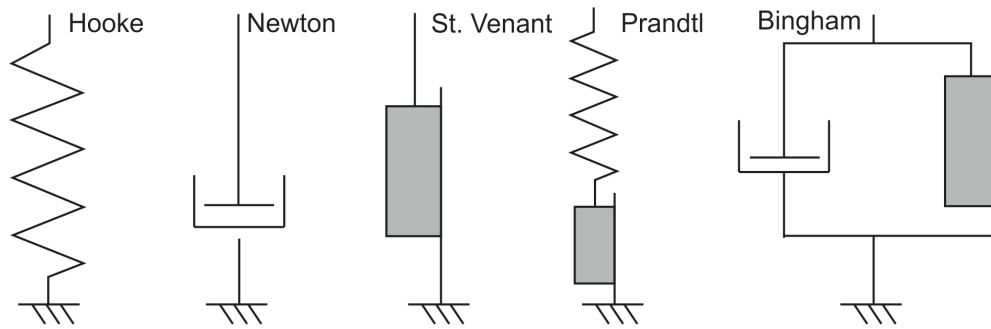


Abb. 1: Rheologische Grundmodelle v.l.n.r.: Hook, Newton, St. Venant, Prandtl-Modell, Bingham-Modell

Gerade Flüssigboden als komplexer Baustoff stellt hierbei eine Herausforderung dar. Ähnlich wie Boden oder Frischbeton bilden ZFSV ein Dreiphasensystem mit der Gesteinskörnung als Haufwerk und einer Ton-Zementsuspension als flüssige Phase, die je nach Rezeptur einen mehr oder weniger großen Anteil des Gesamtvolumens ausfüllt. Hinzu kommt, dass die Fließeigenschaften, bedingt durch den Anteil an hydraulischem Bindemittel, zeitabhängig sind. Daraus resultiert ein komplexes Materialverhalten der ZFSV, deren wissenschaftliche Beschreibung noch weitgehend unvollständig ist. Die rheologischen Modelle für fließfähige Baustoffe beschreiben zumeist nur einzelne Aspekte des Materialverhaltens, also entweder das Fließverhalten oder das Feststoffverhalten. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise hat sich bisher nicht etablieren können. Der ansteigende Aufwand zur Identifikation der Parameter und deren erschwerte physikalische Interpretation stellen gleichsam Motivation als auch Erfordernis für eine tiefere Betrachtung dar.

Hierbei könnte eine Weiterentwicklung der Strukturmodelle unter Berücksichtigung der Gefügestruktur und deren Änderung infolge Belastung ein vielversprechender Ansatz sein. So kann die Fließfähigkeit innerhalb der allgemeinen Strömungsmechanik als erhöhter oder verminderter Impulsaustausch im Gefüge oder als Kontinuum als Folge der inneren Struktur im Sinne der geometrischen Anordnung und dem expliziten Interaktionspotential der einzelnen Phasen mehrphasiger Werkstoffe aufgefasst werden. Im verfestigten Zustand kann die Struktur herangezogen werden, um den zur Aufrechterhaltung eines stabilen Gefüges notwendigen Kraftfluss im Kontinuum zu ermitteln.

Vereinfachend soll dieser Ansatz zunächst als ‚Modell der inneren Struktur‘ (MIS) bezeichnet werden und für die Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von feststoffreichen Suspensionen modifiziert werden.

Struktur als neuer Parameter

Für die Erläuterung des Modells soll eine Analogie zum Ansatz der Spannungsausbreitung nach Fröhlich (1934) dienen. Gemäß Fröhlich erfolgt die Verteilung der Vertikalspannungen im elastisch-isotropen Halbraum unter einer Einzellast P entsprechend dem Ansatz:

$$\sigma_z = \frac{\nu_k \cdot P \cdot z^{\nu_k \cdot 2 + 2}}{2 \cdot \pi \cdot (x^2 + z^2)^{\frac{\nu_k + 2}{2}}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Hierbei beschreibt die Größe ν_k den Konzentrationsfaktor und drückt aus, wie stark die vertikalen σ_z -Spannungen um die Lastachse konzentriert werden (Abb. 2).

Im Zusammenhang mit dem Ansatz von Fröhlich wird in der Bodenmechanik allgemein davon ausgegangen, dass je kohärenter ein Erdstoff ist, desto mehr werden sich die Spannungen ausbreiten ($\nu_k \geq 3$).

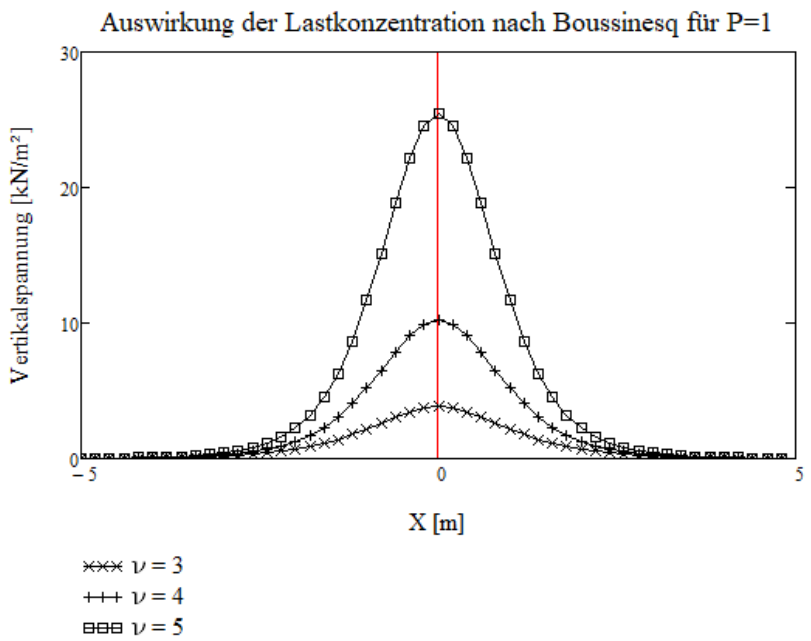


Abb. 2: Spannungskonzentration angelehnt an Fröhlich, variabler Konzentrationsfaktor

Im Zusammenhang mit dem Ansatz von Fröhlich wird in der Bodenmechanik allgemein davon ausgegangen, dass je kohärenter ein Erdstoff ist, desto mehr werden sich die Spannungen ausbreiten ($\nu_k \geq 3$). Je rolliger der Boden ist, umso mehr werden sich die σ_z -Spannungen um die Lastachse konzentrieren. Erklären lässt sich dies durch die bessere Aufnahme der Spannungen, ohne Stützspannungen zur Aufrechterhaltung zu mobilisieren. Somit wird ein geringeres Bodenvolumen am Lastabtrag beteiligt und die Spannungen konzentrieren sich um den Lasteinleitungspunkt. Diese zunächst empirisch basierende Erkenntnis soll im Weiteren mit der Struktur des Bodens begründet werden. Ausgehend von der Annahme, dass stark kohärente Böden zumeist feinkörnige Böden sind, die einen geringen Porenanteil und eine auf das Volumen bezogen hohe Anzahl von Korn-zu-Korn-Kontakten aufweisen, ergibt sich für diese Böden ein annähernd isotropes Materialverhalten.

Struktur ist somit u.a. abhängig vom Porenanteil im Boden. Hierbei gilt: je größer der Porenanteil, umso ausgeprägter ist die Struktur des Materials. Die ideale Struktur ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Kornkontakte in Krafrichtung oder orthogonal dazu angeordnet sind. Hier ergibt sich der theoretisch größte Porenanteil im Material (Abb. 3). Die ideale Struktur eines Materials erlaubt eine Spannungsweiterleitung ohne Lastausbreitung, zeigt sich aber entsprechend instabil, so dass in diesem Zustand bereits kleinere Einwirkungen zu einer maßgeblichen Umlagerung der Struktur und damit einhergehender Verformung des Gefüges führen. Die Struktur kann sich durch eine seitliche Lastausbreitung stabilisieren, die durch den angrenzenden Boden oder die innere Zugfestigkeit behindert wird.

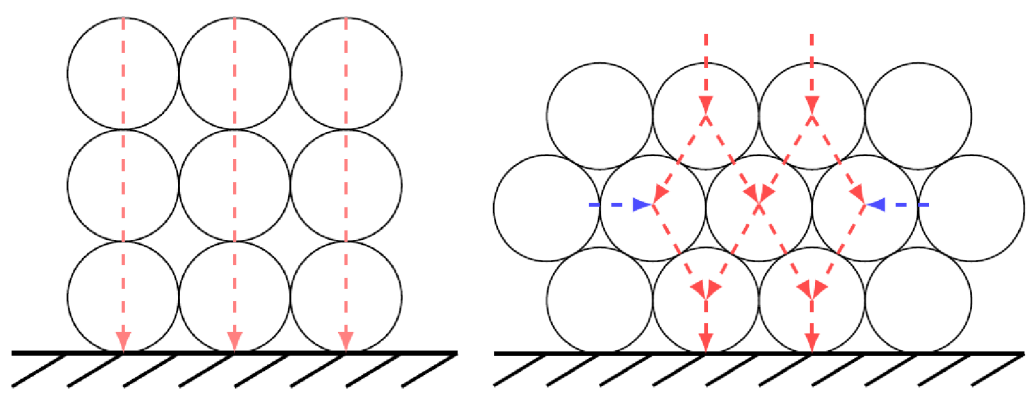


Abb. 3: Links: instabile Idealstruktur $\omega = 0^\circ$, rechts: stabile Struktur $0^\circ < \omega < 45^\circ$

Die Auswirkungen der Struktur und ihre Änderung werden im Laborversuch beobachtet. Dazu wurde ein Versuchsgerät, ähnlich einer Ödometerzelle, entwickelt, das die Messung der radialen Spannungen (Abb. 4) ermöglicht. Wie folgt lässt sich, aus der schematischen Darstellung in Abb. 5, aus der gemessenen Kraft F_{wz} auf die wirkende Radialspannung σ_r schließen:

$$\sigma_r = \frac{F_{wz} \cdot e_2}{h \cdot (r \cdot e_1 + r^2) \cdot 2} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die verwendeten Parameter bei der Bestimmung der Radialspannung σ_r bedingen sich aus der gegebenen Geometrie der Ödometerzelle. Bei einer Steigerung der innen wirkenden Radialspannung ist die Ödometerzelle bestrebt der Belastung durch eine Öffnung der Zelle zu entgehen, behindert wird dies über eine am äußeren Rand angebrachte Wägezelle, welche die öffnende Kraft infolge der Radialspannung ermittelt. Über die dargestellte Geometrie lässt sich aus der Messung an der Wägezelle auf die mobilisierten Radialspannungen schließen. Hierbei ist:

$F_{wz} =$	Gemessene Kraft an der Wägezelle	[N]
$e_1 =$	Hebelarm Drehgelenk – Innezylinder	[mm]
$e_2 =$	Hebelarm Wägezelle – Drehgelenk	[mm]
$r =$	Innenradius der mod. Ödometerzelle	[mm]
$h =$	Höhe der mod. Ödometerzelle	[mm]
$\sigma_r =$	Radialspannung	[N/mm ²]

In Abb. 6 ist die in der modifizierten Ödometerzelle gemessene radiale Stützspannung in Abhängigkeit der Porenzahl eines trockenen granularen Materials (Strahlmittel aus Glasgranulat 0,1-0,2 mm) dargestellt. Zum einen lässt sich eindeutig die Auswirkung des hohen Porenanteils auf die Mobilisierung der radialen Stützspannungen erkennen. Zum anderen zeigt sich auch die Instabilität, die mit einer annähernd idealen Struktur verbunden ist. Ab einem für das Material charakteristischen Spannungsniveau treten spontan Strukturänderungen ein, die zur Mobilisierung entsprechender Stützspannungen führen. Der Versuch wurde als Belastungshysterese durchgeführt. Nach Rücknahme der aufgelegten Belastung stellte sich eine für granuläre Medien bekannte bedingt elastische Rückstellung der Verformung ein.

Die räumliche Anordnung der Kornkontakte im Material, neben Einflüssen der Kornoberfläche, bestimmen den Winkel der inneren Struktur (Abb. 7). Eine nichtgerichtete Spannungsweiterleitung durch eine Vielzahl isotroper Kornkontakte oder auch innerhalb von Flüssigkeiten hat eine hydrostatische Spannungsverteilung mit einem Strukturwinkel von 45 Grad zur Folge. Die Lastausbreitung nach Fröhlich kann somit als Auswirkung einer Strukturausbildung im Material angesehen werden. Das ausgesprochen inelastische Verformungsverhalten von Böden kann durch Strukturänderungen infolge Belastung erklärt werden.

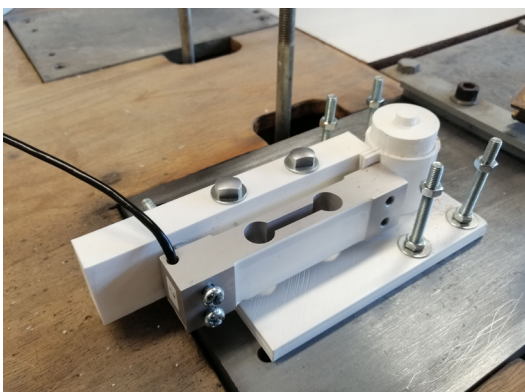


Abb.4: Modifizierte Ödometerzelle

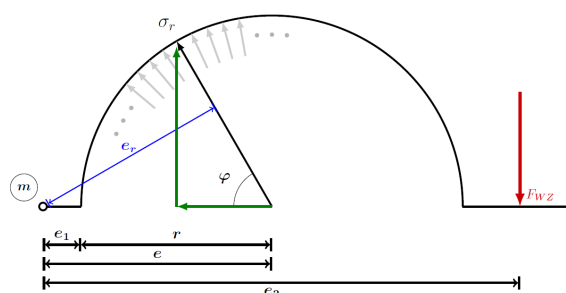


Abb.5: Schematische Darstellung der inneren Spannungen in der mod. Ödometerzelle

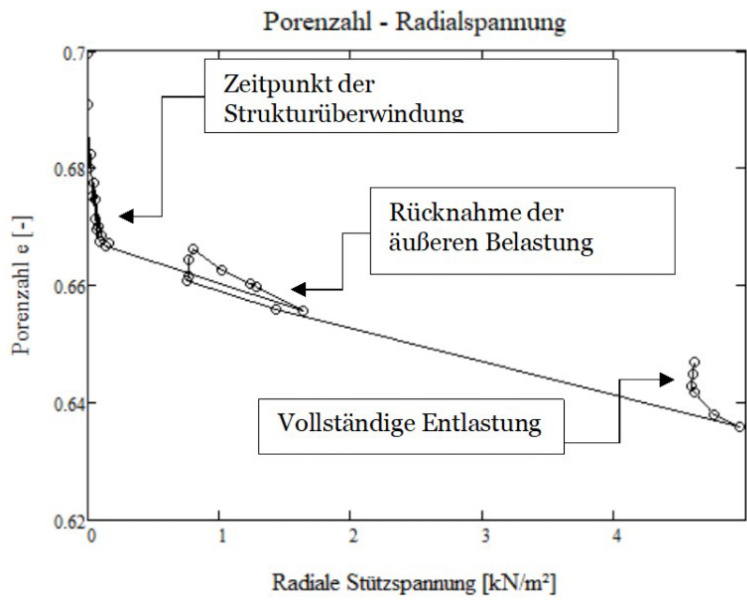


Abb.6: Einfluss der Porenzahl auf die zu mobilisierenden radiale Stützspannung

Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass jeder Stoff eine Art der inneren Zugfestigkeit besitzt, welche das Material bis zu einer definierten Krafteinwirkung stabilisiert und Fließen verhindert. Diese innere Zugfestigkeit und der dazugehörige Strukturwinkel sind die allgemeingültigen Eigenschaften eines jeden Stoffes. Wie sich diese Zugfestigkeit ausprägt, hängt besonders am Beispiel des ZFSV maßgeblich von der Art der Bindemittel, den Oberflächenkräften im Tonmineral oder auch vom Alter ab.

Diese, wenn auch oberflächlichen, Ausführungen, sollen einen kurzen Einblick in das Potential und die Relevanz eines neuen, ganzheitlichen Ansatzes zur Beschreibung des Materialverhaltens liefern. Formuliert soll der Ansatz dann Einzug z.B. in die FVM innerhalb der CFD erhalten.

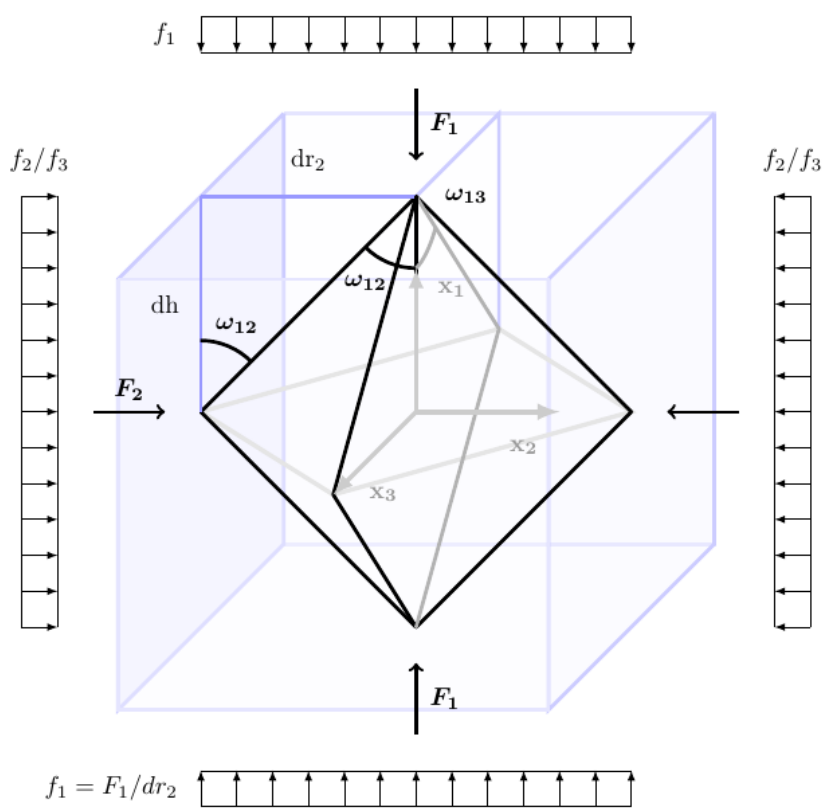


Abb.7: Das "Modell der inneren Struktur" im dreidimensionalen Spannungsraum

Literatur

Kreislaufwirtschaft Bau. (2021). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018. Berlin: Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.

Elghobashi, S (1994). On predicting particle-laden turbulent flows. Applied Scientific Research, S. 309-329.

Fleischmann, F. (06.01.2015). Ein Beitrag zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem Kugel-Messsystem. Bochum: urn:nbn:de:hbz:294-42565.

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG. Berlin: Bundesamt für Justiz.

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Berlin: Bundesamt für Justiz.

H ZFSV - Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau. (2012). Köln: FGSV Verlag.

IKT-Warentest: Flüssigböden (ZFSV) im Kanalbau. (2020). Gelsenkirchen: IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur.

Johann Ohde. (25. August 1939). Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Der Bauingenieur, S. 451 - 459.

*Sosinka, K. (2021). Entlüftungsverhalten zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffen. Koblenz: Shaker Verlag.
ISBN: 978-3-8440-7818-3*

Wüstholtz, T. (2005). Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Stuttgart: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-213>.