

Die perfekte Sandburg

Felix-Ramón Sindermann, Rasmus Stegelmann, Lara Hermes

28.0.4.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretischer Ansatz	2
2.1	Kapillarbrücken	2
2.2	Modell	2
2.3	Volumen einer Kapillarbrücke	3
3	Berechnungen und Limitationen	3
3.1	Kapillarkraft F_K	3
3.2	Zentripetalkraft F_Z	4
3.3	Kritische Winkelgeschwindigkeit ω	5
3.4	Limitationen des Modells	5
4	Sandarten	5
4.1	Durchschnittlicher Radius	6
4.1.1	Messart	6
4.1.2	Ergebnis	7
4.2	Sand - Schlamm Grenzfall	8
4.2.1	Messart	8
4.2.2	Ergebnisse	8
5	Aufbau 1 - Marmeladenglas	8
5.1	Aufbau	8
6	Aufbau 2 - Drehplatte	9
6.1	Aufbau	9
6.2	Durchführung	9
6.3	Beobachtung	9
6.4	Auswertung	9
6.5	Vergleich mit der Theorie	11
6.6	Probleme und Fehleranalyse	11
7	Fazit	12
8	Danksagung	12
9	Quellenverzeichnis	12

1 Einleitung

Folgende Aufgabenstellung haben wir behandelt: "Beim Bauen einer Sandskulptur hängt die Stabilität unter anderem vom Feuchtigkeitsgehalt des Sandes ab. Ermittle das perfekte Verhältnis von Sand und Wasser und untersuche, welche anderen Faktoren die Stabilität des Sandes bestimmen.“ Das Phänomen des Projektes lässt sich auf den Kapillareffekt zurückführen, welcher Kapillarbrücken bildet. Im wesentlichen untersuchen wir also den Parameter "Wassergehalt". Andere Faktoren konnten wir leider nicht bestimmen, da uns die Zeit fehlte.

2 Theoretischer Ansatz

2.1 Kapillarbrücken

Der Kapillareffekt beschreibt, wenn sich Kapillarbrücken, also Flüssigkeitsbrücken, in kleinen Hohlräumen oder innerhalb eines Granulates bilden. (Spektrum – Lexikon der Physik) Der Effekt tritt zum Beispiel bei brennenden Kerzen auf, wenn der Docht flüssiges Wachs „hochsaugt“. Kapillarbrücken bilden sich aus, wenn in den Hohlräumen oder in dem Granulat, die Adhäsion (Grenzflächenspannung), also die Kraft, mit der sich zwei Phasen anziehen, zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff höher ist als die zwischen Flüssigkeit und umliegenden Gas. Das liegt daran, dass Flüssigkeiten, genau wie alle Stoffe, versuchen den energetisch günstigsten Zustand zu erreichen, also eine möglichst geringe Oberflächenenergie. (Spektrum – Lexikon der Geografie).

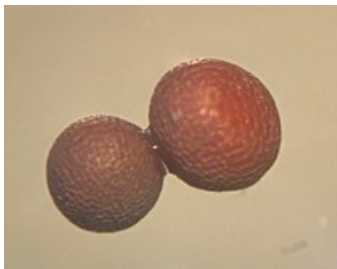


Abbildung 1: Eine Kapillarbrücke anhand von 2 Senfkörnern



Abbildung 2: Links unten, mehrere Kapillarbrücken an einzelnen Senfkörnern, rechts Wassernester

Während die Adhäsion dafür verantwortlich ist, dass die Flüssigkeit an dem Festkörper haftet, ist die Kohäsion dafür verantwortlich, dass die Flüssigkeit konkave Brücken bildet. (Spektrum – Lexikon der Biologie) Die Kohäsion ist die Ursache für die Oberflächenspannung und die Oberflächenenergie ist von der Oberflächenspannung abhängig. Da ein Stoff immer den energetisch günstigsten Zustand erreichen will, der in Form der Flüssigkeitsbrücken erreicht ist, werden die Partikel zusammengehalten. Für eine Bindung zwischen Sand und Wasser wird weniger Grenzflächenenergie benötigt, als für eine Oberfläche zwischen Wasser und Luft. (Schlichting, 2017) Wenn Sand mit Wasser gemischt wird, bildet das Wasser Kapillarbrücken zwischen den Sandkörnern, was dazu führt, dass der Sand stabiler wird. Wenn genug Wasser vorhanden ist, schließen sich die Kapillarbrücken zwischen den Partikeln außerdem zu Nestern zusammen. Dann verbindet eine Kapillarbrücke nicht mehr nur zwei, sondern viele Sandkörner miteinander. (Scheel M. u.a., 2008)

2.2 Modell

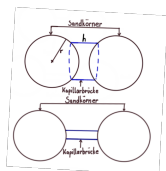


Abbildung 3: Modell Kapillarbrücken als Zylinder

Für die folgenden Berechnungen wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Sandkörner perfekte und gleichgroße Kugeln sind. Die Kapillarbrücken werden zu Zylindern vereinfacht. Die Grundflächen der Zylinder sind eigentlich eingebuchtet, aber außer bei dem Grenzfall, dass sich die Sandkörner berühren, wird das ignoriert. Außerdem ist das Volumen der Kapillarbrücken konstant, da sich beim Zusammen- und Auseinanderziehen der Sandkörner nur die genaue Form der Körner ändert.

2.3 Volumen einer Kapillarbrücke

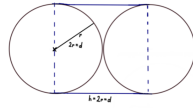


Abbildung 4: Grenzfall sich berührende Sandkörner

Für die weiteren Berechnungen kann das konstante Volumen von Kapillarbrücke und Sand über den Grenzfall berechnet werden. Bei diesem Grenzfall wird die Höhe des Zylinders h genauso groß wie der Durchmesser der Sandkörner, also den doppelten Radius r . Über den Radius der Sandkörner kann so über das M4: Grenzfall sich berührende Volumen der einzelnen Sandkörner gesagt werden:

$$V_{\text{Sandkorn}} = \frac{4}{3}\pi \cdot r_s^3 = \frac{1}{6}\pi \cdot 2r_s^3 = \frac{1}{6}\pi d^3$$

Beim Grenzfall gehen wird nicht einfach von einer Zylinderform als Kapillarbrücke ausgegangen, sondern von einem Zylinder mit Aufgeschnittenen Halbkugeln an den Grundflächen. Über das Volumen der Wasserbrücken kann dementsprechend gesagt werden:

$$V_w = (\pi r_s^2 \cdot 2r_s) - \left(\frac{4}{3}\pi \cdot r_s^3\right) = \frac{2}{3}\pi \cdot r_s^3 = \frac{1}{12}\pi d^3$$

3 Berechnungen und Limitationen

3.1 Kapillarkraft F_K

Die Kapillarkraft F_K ist die Kraft, mit der die Kapillarbrücken die Sandkörner zusammenhalten.

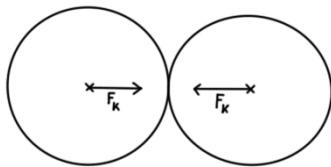


Abbildung 5: Wirkungsrichtung der Kapillarkraft

$$E_O = A_O \cdot \sigma$$

Die Formel für die Oberflächenenergie E_O in Abhängigkeit der Oberfläche A_O und der Oberflächenenergie σ

$$F_K = \frac{\delta E_O}{\delta h} = \frac{\delta A_O \cdot \sigma}{\delta h}$$

Die Kapillarkraft in Abhängigkeit der Steigung der Oberflächenenergie

Solange die Sandkörner sich nicht berühren, sind die Kapillarbrücken zu Zylindern vereinfacht. Außerdem ist das Volumen der Kapillarbrücken konstant, deshalb kann das Volumen der Brücke auch mit der Formel zur Berechnung des Zylindervolumens beschrieben werden.

$$V_w = \pi r^2 h \rightarrow r_s = \sqrt{\frac{V_w}{\pi h}}$$

Aus der Formel für das Volumen V_w kann außerdem der Radius des Sandes r_s in Abhängigkeit der Höhe des Zylinders h bestimmt werden.

$$A_O = 2\pi r_s h$$

Die Formel für die Mantelfläche eines Zylinders in Abhängigkeit des Radius r_s d der Höhe h und damit auch die Fläche die für die Oberflächenenergie wichtig ist

$$A_O = 2\pi \sqrt{\frac{V_w}{\pi h}} h = 2\sqrt{\pi V_w} \cdot \sqrt{h}$$

Der Radius r_s wird in die Formel für A_O eingesetzt.

$$F_k = \frac{d(2\sqrt{\pi V_w} \cdot \sqrt{h} \cdot \sigma)}{d(h)}$$

Die Oberfläche A_O wird in die Formel für die Kapillarkraft F_k eingesetzt, um diese zu berechnen.

$$F_k = 2\sqrt{\pi V_W} \cdot \frac{d\sqrt{h}}{dh} \cdot \sigma$$

$$F_k = 2\sqrt{\pi V_W} \cdot \frac{1}{2\sqrt{h}} \cdot \sigma = \sqrt{\frac{\pi V_W \sigma}{h}}$$

$$F_k = \sqrt{\frac{\frac{1}{12}\pi \cdot (2r_s)^2 \cdot \sigma}{h}}$$

3.2 Zentripetalkraft F_Z

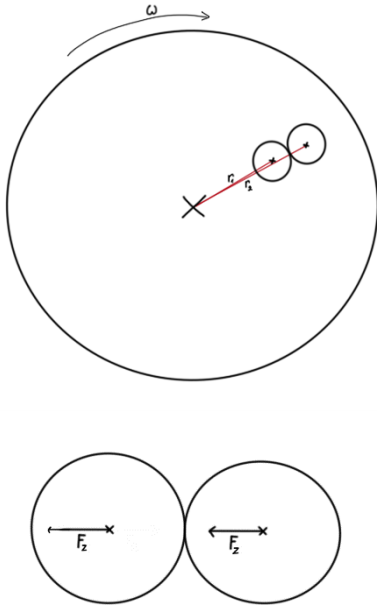


Abbildung 6: Wirkung der Zentripetalkraft

$$F_Z = m\omega^2 r$$

$$\Delta F_Z = m\omega^2 h = m\omega^2 d$$

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r_s^3}$$

$$m = \rho \frac{4}{3}\pi r_s^3$$

$$\Delta F_Z = \frac{4}{3}\pi \cdot \rho \cdot r_s^3 \cdot \omega^2 \cdot 2r_s$$

$$\Delta F_Z = \frac{8}{3}\omega^2 \cdot \rho \cdot \pi r_s^4$$

$2\sqrt{\pi V_W}$ ist eine Konstante. Deshalb kann es nach der Faktorregel aus der Ableitung rausgeschrieben werden.

Der Rest der Gleichung kann abgeleitet und vereinfacht werden

Nun kann die Formel für das Volumen V_W das über den Grenzfall ermittelt wurde für V_W eingesetzt werden

Die Formel für die Zentripetalkraft F_Z , die auf die einzelnen Sandkörner wirkt.

Die Kraft, die die Sandkörner auseinanderzieht, ist die Differenz der Zentripetalkraft F_Z , da die Radien r_1 und r_2 der Sandkörner unterschiedlich sind und deshalb die auf die Sandkörner wirkende Zentripetalkraft auch unterschiedlich ist.

Die Differenz der Radien r_1 und r_2 kann auch als Höhe h bzw. Durchmesser d geschrieben werden.

In die Formel für die Dichte des Sandes ρ wird die Formel für das Volumen eines Sandkorns $V_{Sandkorn}$ eingesetzt.

So kann die Masse des Sandkorns m in Abhängigkeit des Radius r_s bestimmt werden.

Die Formel für die Masse wird in die Formel für die Differenz der Zentripetalkraft ΔF_Z eingesetzt.

Der Rest der Gleichung wird vereinfacht

3.3 Kritische Winkelgeschwindigkeit ω

Die kritische Winkelgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit direkt bevor die Sandkörner auseinandergerissen werden.

$$\Delta F_Z = F_k$$

$$\frac{8}{3}\omega^2 \cdot \rho \cdot \pi r_s^4 = \sqrt{\frac{\pi^2 r_s^3}{6h}} \cdot \sigma = \frac{\pi r_s}{\sqrt{12} \cdot \sigma}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{r_s^3} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{\sqrt{12}} \cdot \sigma = r_s^{-3} \cdot \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{3}{8\sqrt{12}}$$

$$\omega = r_s^{-\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{3}{8\sqrt{12}}}$$

Zur Berechnung der kritischen Winkelgeschwindigkeit ω wird die Differenz der Zentripetalkraft ΔF_Z mit der Kapillarkraft F_K gleichgesetzt, da sobald die Differenz der Zentripetalkraft ΔF_Z größer ist als die Kapillarkraft F_K der Sand auseinandergerissen wird.

Dann werden die Formeln eingesetzt und vereinfacht.

Zum Schluss wird die Formel nach der Winkelgeschwindigkeit ω umgeformt.

3.4 Limitationen des Modells

Bei dem Modell wird davon ausgegangen, dass der Sand aus perfekten Kugeln besteht, was in Realität nicht der Fall ist. Außerdem wird die Form der Kapillarbrücken zu Zylindern vereinfacht, obwohl die Brücken in Wirklichkeit Konkav sind und außerdem ausgebeult sind. Diese Umstände machen das Modell ungenauer, der größte Fehlerfaktor ist allerdings die Tatsache, dass sich die Kapillarbrücken ab einem bestimmten Wassergehalt zu Nestern zusammenschließen. Sobald sie das tun, ist das Modell nur noch begrenzt anwendbar. Der genaue Fehlerfaktor ist allerdings unbekannt. Der letzte Punkt ist, dass Fremdkörper im Sand ignoriert werden.

4 Sandarten

Um die Theorie zu bestätigen, wurden in diesem Projekt vier verschiedene Sandarten untersucht. Die Sandarten sind Vogelsand, gelber (manchmal auch roter Sand genannt), Spielplatzsand aus dem Bauhaus (Bauhaussand) und märkischer Sandboden aus Oranienburg (Sand aus der Region).

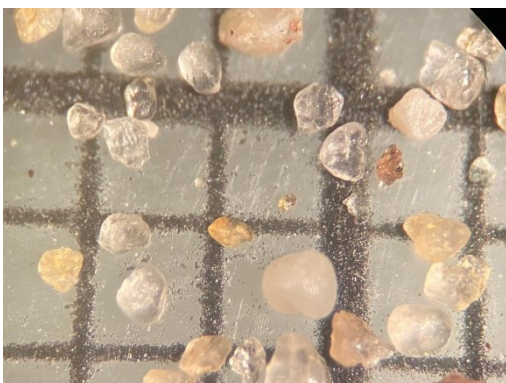


Abbildung 7: Mikroskopische Aufnahme Bauhaussand

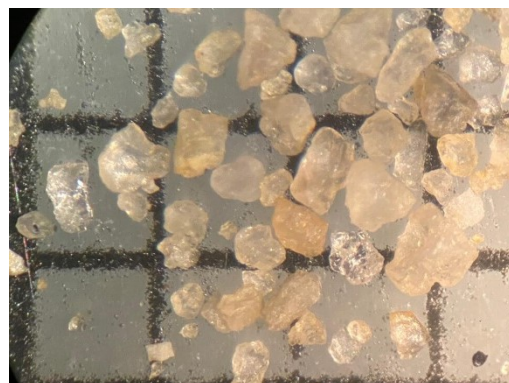


Abbildung 8: Mikroskopische Aufnahme gelber Sand

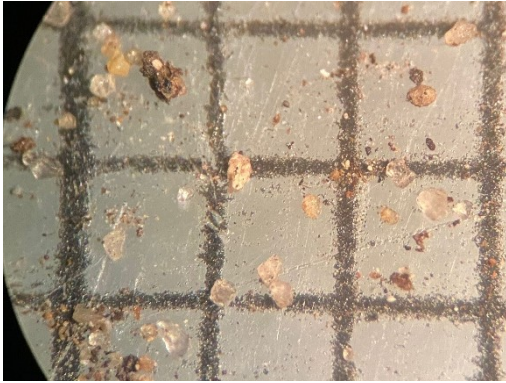


Abbildung 9: Mikroskopische Aufnahme Sand aus der Region

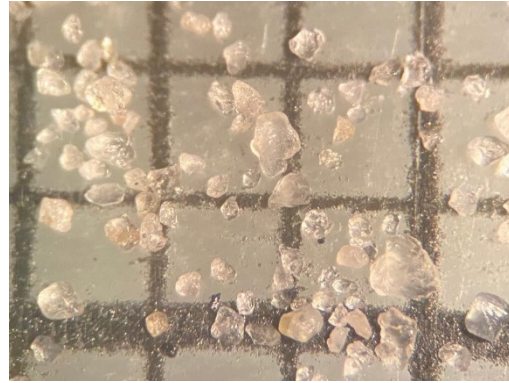


Abbildung 10: Mikroskopische Aufnahme Vogelsand

4.1 Durchschnittlicher Radius

Zur Berechnung der Kapillarkraft in dem vereinfachten Modell, wird der Radius der Sandkörner benötigt, da die Sandkörner vereinfacht als perfekte Kugeln dargestellt werden.

4.1.1 Messart

Zur Messung des Radius wurden Stichproben der verschiedenen Sandarten auf Millimeterfolie unter ein Mikroskop gelegt. Dann wurde mithilfe der Millimeterfolie die x - und die y -Ausdehnung jedes Sandkorns bestimmt. Von diesen beiden Werten wurde daraufhin für jedes Sandkorn das geometrische Mittel bestimmt. ($r_{\text{geoMittel}} = \sqrt{x\text{Länge} \cdot y\text{Länge}}$) Danach wurden die Sandkörner in Größen-Intervalle eingeteilt und der Anteil der Sandkörner dieser Größe bestimmt.

4.1.2 Ergebnis

Sand aus der Region

Radius in mm	gerundeter Prozentsatz an Sandkörnern
0,025	33%
0,075	18%
0,125	24%
0,175	12%
0,225	10%
0,275	2%
0,325	2%

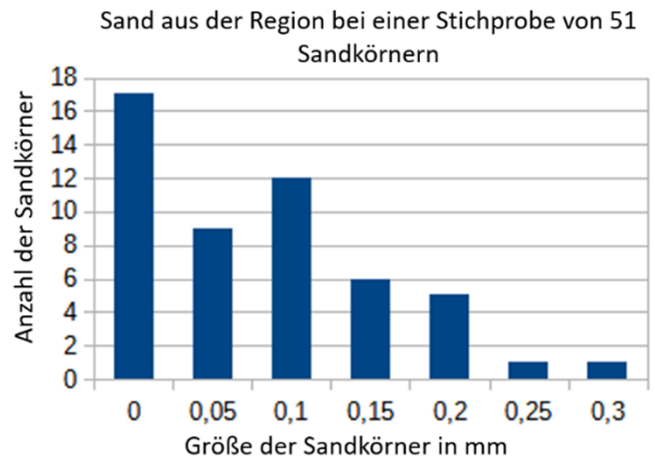


Abbildung 11

Gelber Sand

Radius in mm	gerundeter Prozentsatz an Sandkörnern
0,025	2%
0,075	4%
0,125	10%
0,175	6%
0,225	19%
0,275	25%
0,325	6%
0,375	10%
0,425	6%
0,475	4%
0,525	4%
0,575	0%
0,625	2%

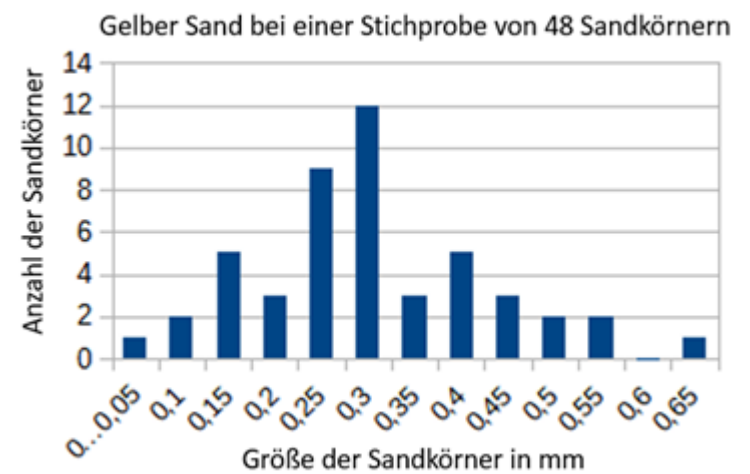


Abbildung 12

Bauhaussand

Radius in mm	gerundeter Prozentsatz an Sandkörnern
0,05	4%
0,125	0%
0,175	8%
0,225	4%
0,275	21%
0,325	21%
0,375	12%
0,425	12%
0,475	8%
0,525	4%
0,575	4%

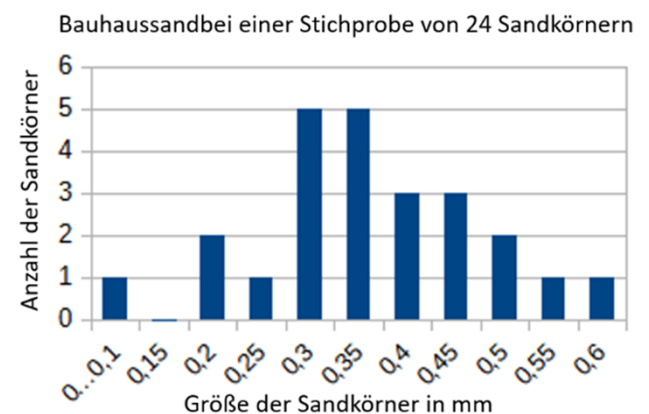


Abbildung 13

Vogelsand

Radius in mm	gerundeter Prozentsatz an Sandkörnern
0,025	0%
0,075	1%
0,125	18%
0,175	40%
0,225	16%
0,275	13%
0,325	7%
0,375	1%
0,425	0%
0,475	1%

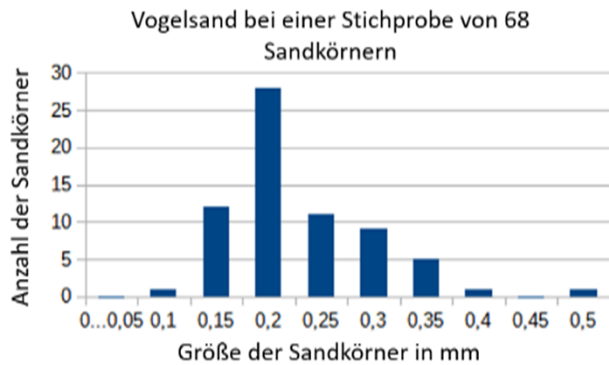


Abbildung 14

Messungenauigkeiten entstehen aus vor allem zwei Gründen, erstens aufgrund von Ungenauigkeiten beim Millimeterpapier und beim Ablesen und zweitens da es sein könnte das der Sand vor allem bei den Sandarten mit großen Größenunterschieden bei den Sandkörnern wie Bauhaussand nicht so gut durchmischt gewesen sein könnten.

4.2 Sand - Schlamm Grenzfall

4.2.1 Messart

In dieser Messreihe wurde der Grenzfall bestimmt, bei dem der Sand mit Wasser gesättigt wird und zu Schlamm wird. Da Sand eine höhere Dichte als Wasser hat, steht ab einer bestimmten Wassermenge eine Schicht Wasser über dem Sand-Wasser Gemisch. Wenn Wasser auf dem Sand steht, ist das Gemisch übersättigt. In dem Versuchsaufbau wird Wasser zu einer festgelegten Menge Sand hinzugefügt, um die Menge Wasser zu bestimmen, die es braucht, das Gemisch zu sättigen. Wenn es übersättigt ist, wird überschüssiges Wasser abgeschöpft und die verbleibende Menge berechnet.

4.2.2 Ergebnisse

Sandart	Wassermenge in ml
Vogelsand	29
Gelber Sand	27
Bauhaussand	25
Sand aus der Region	31

Die links zu sehenden Werte wurden mit der oben beschriebenen Methode gemessen. Messfehler treten dabei hauptsächlich nur durch ungenaues Messen auf.

5 Aufbau 1 - Marmeladenglas

5.1 Aufbau

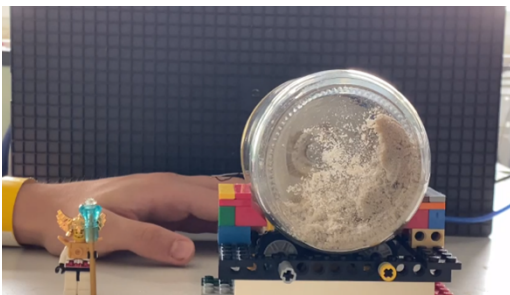


Abbildung 15: Frontansicht Aufbau 1, Felix' Hand und Projekt-Maskottchen Einherja

Dieser Aufbau hat keine auswertbaren Messdaten geliefert, da der Sand am Marmeladenglas bei einer schon geringen Wassermenge festklebte.

6 Aufbau 2 - Drehplatte

6.1 Aufbau



Abbildung 16: Aufbau der Drehplatte

Der zweite Aufbau ist eine Art Drehplatte. Eine Drehplatte wurde auch von Stephan Herminghaus und seinem Team verwendet (Scheel M. u.a., 2008). Das Bohrgerät wird mit einer externen Spannungsquelle verbunden und betrieben. Wenn die Spannung hochgeregelt wird, fängt der Mülleimer an, sich um sich selbst zu drehen. In die Mitte des Tellers wird das Sand-Wasser-Gemisch mithilfe einer Zylinder-Sandkastenform platziert. Außerdem ist am Rand des Mülleimers ein Klebebandstück als Blende befestigt. Ein Lasertachometer wird so ausgerichtet, dass der Laserstrahl, wenn der Mülleimer sich dreht, einmal pro Drehung das Klebebandstück trifft und zurückreflektiert wird. Das Tachometer erfasst wie häufig das Licht zurückreflektiert wird und zeigt so die Drehfrequenz des Mülleimers an. (Skizze) Für den Versuch sind zwei Spannungsquellen à 30V in Reihe geschaltet, um eine Spannung von 60V zu erreichen, da 30V zur Beschleunigung des Sandes nicht ausreichend waren. Um die Gesamtspannung besser zu regulieren ist zusätzlich ein Spannungsmessgerät angeschlossen.

6.2 Durchführung

100g Sand werden für die Messreihen mit verschiedenen Mengen Wasser (in gleichmäßigen Schritten steigend) gemischt und jeweils in einer Zylinderform auf den Teller der Drehscheibe platziert. Die Spannungsquelle beschleunigt die Drehscheibe, bis der Sand vom Teller geschleudert wird. Die Drehfrequenz, die mit dem Lasertachometer gemessen wird, wird benutzt, um die Resistenz des Sandes gegenüber Trägheitskräften bei einer Kreisbewegung zu messen. So ist es möglich, eine Aussage über die Stabilität des Sandes zu treffen. Die Drehfrequenz kann dann später mit der berechneten kritischen Winkelgeschwindigkeit verglichen werden.

6.3 Beobachtung

Während der Durchführung ist zu beobachten, dass sich die verschiedenen Sandarten unterschiedlich verhalten, wenn man Wasser beigibt. Sand aus der Region verhält sich im Gegensatz zu den anderen Sandarten hydrophob, das Wasser sickert nicht ein, sondern perlt vom Sand ab und bildet Rinnsale. Die Messungen mussten allerdings abgebrochen werden bevor der Sand zu Schlamm geworden ist, da der Sandzylinder als Ganzes vom Teller gerutscht ist.

6.4 Auswertung

Das der Sandzylinder als Ganzes vom Teller geflogen ist bedeutet, dass die Kohäsions- und Adhäsionskräfte, die den Sand am Teller halten kleiner sind als die, die innerhalb des Sandes wirken, was bedeutet, dass die Messreihe nicht auswertbar ist. Zur Auswertung der restlichen Messreihen, bietet es sich an, eine Ausgleichsgerade anzulegen, um den Trend der Messungen zu erkennen. Ausreißer verschieben allerdings die Ausgleichsgerade ungünstig, weshalb die größten Ausreißer in den Diagrammen rot markiert sind.

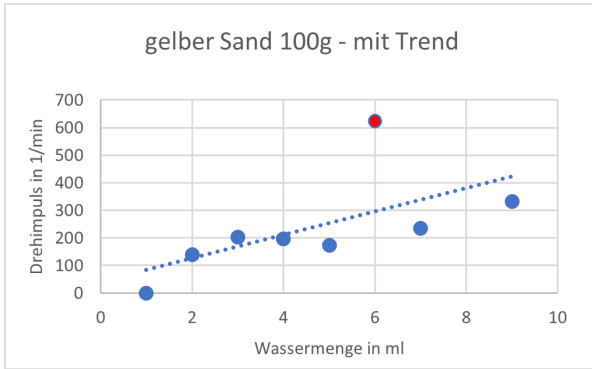


Abbildung 17

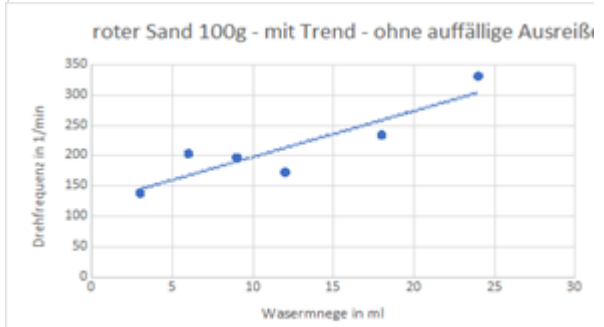


Abbildung 18

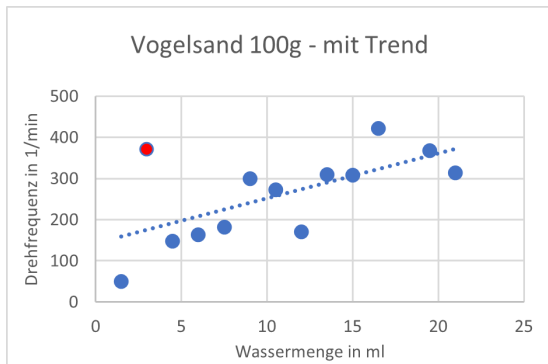


Abbildung 19

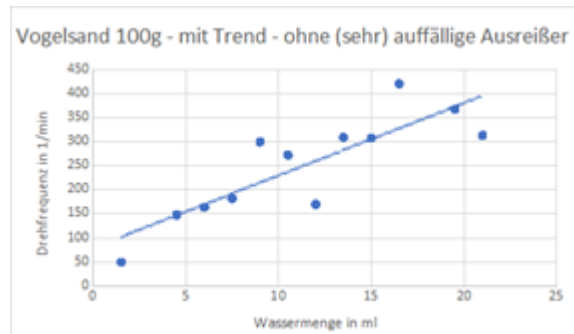


Abbildung 20

Damit die starken Ausreißer weniger Einfluss auf die Trendlinie haben wurden die Ausreißer aus den zwei Diagrammen mit größten Ausreißer gelöscht.

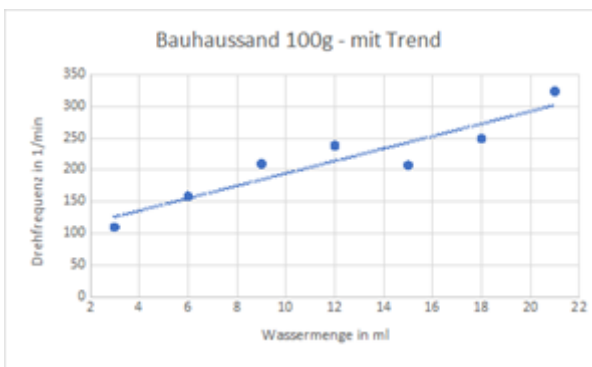


Abbildung 21

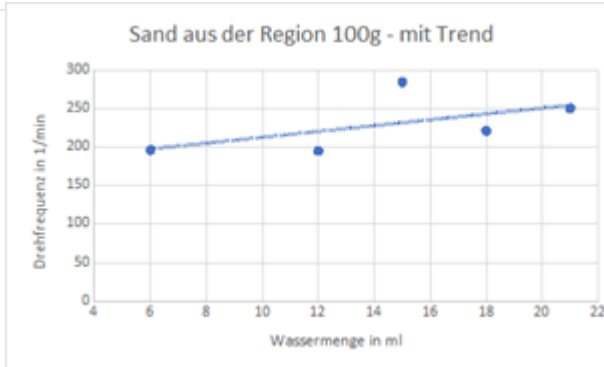


Abbildung 22

Das Ergebnis aller Graphen ist ein linearer streng monoton steigender Verlauf. Daraus würde folgen, dass der optimale Wassergehalt genau der ist, bevor er sich verflüssigt.

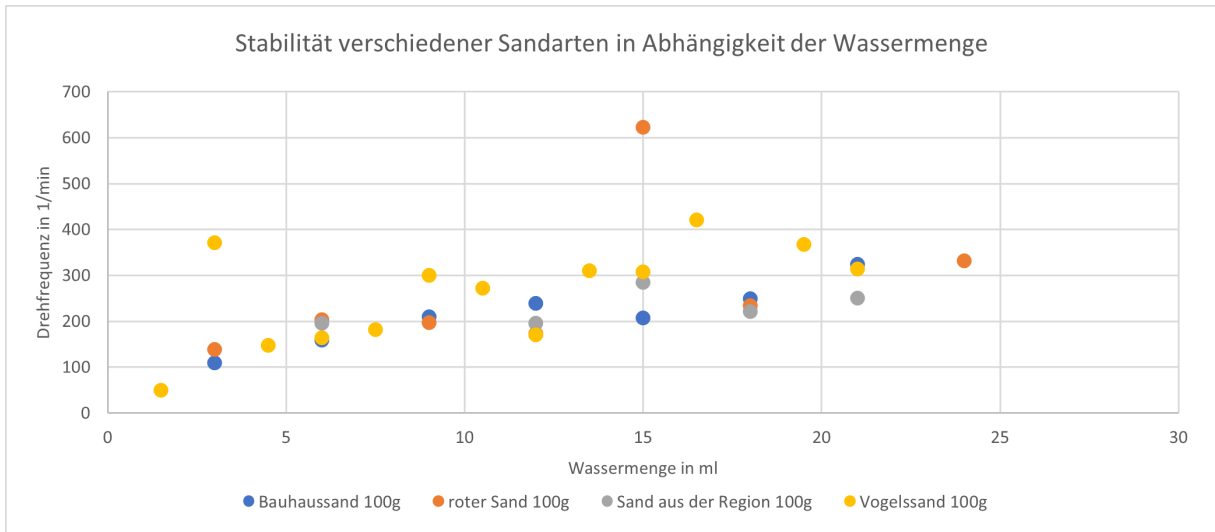


Abbildung 23

Wie man in dem Diagramm sieht, gibt es entgegen unserer Erwartung nur sehr kleine Unterschiede zwischen den verschiedenen Sandarten. Die einzige Sandart die ein wenig bessere Ergebnisse als die anderen Sandarten zeigt ist Vogelsand, das könnte aber auch an Messfehlern liegen. Die Sandart die am stabilsten wird wäre also dementsprechend die Sandart die das meiste Wasser fassen kann, bevor sie zu Schlamm wird.

6.5 Vergleich mit der Theorie

Um die Messergebnisse mit der Theorie zu vergleichen, wurden die Werte für den Radius der Sandkörner verwendet, um die kritische Winkelgeschwindigkeit zu berechnen. Da die Sandkörner nicht alle die gleiche Größe haben wurde genauer gesagt die gewichtete kritische Winkelgeschwindigkeit berechnet. Das heißt die Winkelgeschwindigkeiten für die einzelnen Radien in der Sandart wurden im Durchschnitt der Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit der relativen Häufigkeit des jeweiligen Radius gewichtet.

Sandart	Gewichtete berechnete kritische Winkelgeschwindigkeit	Letzter gemessener Wert	Letzte verwendete Wassermenge	Grenzfall
Bauhaussand	1079 $\frac{1}{s}$	323,6 $\frac{1}{s}$	21 ml	29 ml
Gelber Sand	1428 $\frac{1}{s}$	330 $\frac{1}{s}$	24 ml	23,75 ml
Sand aus der Region	6156 $\frac{1}{s}$	250,5 $\frac{1}{s}$	21 ml	28,75 ml
Vogelsand	2271 $\frac{1}{s}$	313,6 $\frac{1}{s}$	21 ml	21,5 ml

Die letzten gemessenen Werte entscheiden sich hierbei, wie man sieht um ungefähr Faktor 10-20 von der Theorie.

6.6 Probleme und Fehleranalyse

Es gibt mehrere Probleme, die zu den noch relativ starken Unterschieden zwischen den Theoretischen und Praktischen Ergebnissen führen könnten. Erstens gehen unsere Messergebnisse nicht bis zu dem Punkt, an dem der Sand zu Schlamm wird. Um dieses Problem zu lösen, soll der Teller im Aufbau durch eine Holzplatte ersetzt werden, in deren Mitte 3 Nägel sind. Der Sandzylinder wird dann auf die Nägel platziert damit er nicht mehr als ganzes wegrutscht. Die Nägel könnten allerdings einen ähnlichen Effekt haben wie Risse im Sand.



Abbildung 24: Hydrophober Sand aus der Region

Zweitens ignoriert die Theorie Nester-Bildung und andere Faktoren, die schon unter dem Unterpunkt 2.7. Limitationen des Modells erwähnt wurden. Das fällt besonders beim Sand aus der Region und beim Bauhaussand auf. Der Sand aus der Region ist entweder wegen der Korngröße oder wegen Fremdkörpern im Sand hydrophob und ist auch deutlich weniger stabil als nach unseren Berechnungen vermutet.

Eine Fehlerquelle, die unsere eigentlichen Messergebnisse ungenauer macht und deren Größenordnung nicht bekannt ist, ist das Tachometer. Es zeigt zu manchen Zeitpunkten 0 Umdrehungen pro Minute an, obwohl sich die Drehplatte offensichtlich dreht. An anderen Stellen zeigt es extrem unrealistische Werte, zum Beispiel die plötzlichen 600 Umdrehungen pro Minute bei der Messreihe gelber Sand. Letzteres kann potentiell allerdings an der Ausrichtung des Tachometers und nicht am Tachometer selbst liegen. Die anderen Fehler beim zweiten Aufbau kann man grob in zwei Kategorien unterteilen: erstens, Fehler, die über die Versuchsreihen ungefähr konstant bleiben und zweitens, Fehler, die sich innerhalb der Versuchsreihen verändern. In die erste Kategorie gehören mechanische Probleme des Aufbaus. Dazu gehört, dass die Drehachse des Mülleimers nicht perfekt senkrecht zum Boden ist und dass der Mülleimer sich nicht vollständig gleichmäßig dreht. Der zweite Messfehler kann minimiert werden, wenn die Drehscheibe gut geölt ist. In der zweiten Kategorie sind deutlich mehr Messfehler. Erstens hat der Teller nicht den gleichen Durchmesser wie der Mülleimerboden, weshalb er nicht automatisch mit dem Mittelpunkt auf dem Drehzentrum sitzt. Auch der Sandhaufen wird nicht genau auf der Drehachse platziert. Während der Sand auf den Teller platziert wird, rutscht er häufig schlecht aus der Form, weshalb der Sandhaufen manchmal Risse kriegt. Diese führen dazu, dass der Zusammenhalt des Sandes schlechter wird. Ein im Verhältnis dazu kleiner Messfehler ist, dass in die Form nicht immer exakt 100g gefüllt wird, da die steigende Wassermenge auch ein größeres Volumen der Sand-Wasser-Mischung bedeutet. Da Sand und Wasser aber vermischt werden, bleibt das Verhältnis von Sand und Wasser trotzdem gleich.

7 Fazit

Unsere bisherigen Messergebnisse lassen auf einen linearen Trend schließen. Da Messergebnisse in dem Bereich fehlen, in dem die Stabilität des Sandes wieder abnimmt, kann man über das Fallen der Stabilität auch nichts sagen. Im Wesentlichen decken sich allerdings unsere bisherigen Messergebnisse mit unserer Hypothese. Die verschiedenen Sandarten hatten allerdings weniger Einfluss auf die Stabilität als erwartet. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass es sich bei dem höchsten Wert in den Graphen auch einfach um den höchsten Wert handelt. In den Messreihen tauchen immer wieder Werte auf, die in keinem Zusammenhang mit den anderen Werten der jeweiligen Messreihe zu stehen scheinen und mit den bisherigen Theorien nicht erklärt werden können. Unter diesen sind auch einige die Maximalwerte, die in der jeweiligen Messreihe gemessen wurden. Obwohl unsere Messergebnisse unsere Hypothese nicht vollständig bestätigen, bestätigt unsere Theorie das die Größe der Körner eigentlich einen größeren Einfluss haben sollten.

8 Danksagung

Wir bedanken uns bei Dr. Falk Ebert, Anja Dücker und Timo Huber für Anregungen und Unterstützung.

9 Quellenverzeichnis

Spektrum – Lexikon der Physik; Kapillarität; [Kapillarität - Lexikon der Physik \(spektrum.de\)](https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kapillaritaet) zuletzt aufgerufen: 26.02.2022

Spektrum – Lexikon der Geowissenschaften; Kapillarität;[Kapillarität - Lexikon der Geowissenschaften \(spektrum.de\)](#) zuletzt aufgerufen: 26.02.2022

Spektrum – Lexikon der Biologie; Adhäsion;[Adhäsion - Lexikon der Biologie \(spektrum.de\)](#) zuletzt aufgerufen: 26.02.2022

Spektrum – Lexikon der Biologie; Kohäsion;[Kohäsion - Lexikon der Biologie \(spektrum.de\)](#) zuletzt aufgerufen: 26.02.2022

Schlichting, Hans Joachim (2017); Wie Sand am Strand; in Naturwissenschaften im Unterricht Physik; Naturphänomene im digitalen Zeitalter, Ausgabe Nr. 159/60, [Wie Sand am Strand - \(friedrich-verlag.de\)](#) zuletzt aufgerufen: 26.02.2022

Scheel M., Seemann R., Brinkmann M., Di Michiel M., Sheppard A., Breidenbach B., Herminghaus S. (10.02.2008); Morphological clues to wet granular pile stability; [Morphological clues to wet granular pile stability | Nature Materials](#) zuletzt aufgerufen 26.02.2022

Eppelin, Dörte (o.D.). Wenn die Profis Sandburgen bauen. [Wenn die Profis Sandburgen bauen - \[GEO-LINO\]](#) zuletzt aufgerufen: 26.02.2022