

**Konzeption des Herstellungsverfahrens für die
halbkugelschalenförmige Schlitzfläche unter dem
Kolben eines Stülpmembranspeichers sowie deren
Lagehaltung mit Stützkörpern**

Kurztitel: Spezialtiefbau

Themenfeld: Tiefbau, Energiespeicher

Korrektor: Bastian Kupfer

Jakob Karakuz

Tetzelgasse 25

90403 Nürnberg

Mobil: 0162/9365978

E-Mail: jakob_karakuz@web.de

Inhalt

1 Einleitung	4
2 Grundlagen der Technik	6
3 Stützkörper	8
3.1 Größenordnung der Stützkörper	8
3.2 Art der Halterung	9
3.3 Maximale Belastbarkeit	11
4 Berechnungen	12
4.1 Vorüberlegungen	12
4.2 Kraft des Kolbens	14
4.3 Spannungsaufteilung	15
4.4 Anzahl der Stützkörper	16
5 Fahrweg	17
5.1 Fahrweg 01 bis 09	21
5.2 Fahrweg 10 bis 17	22
5.3 Fahrweg 18 bis 33	27
5.4 Fahrweg 34 bis 65	29
5.5 Fahrweg 66 bis 129	31
6 Ergebnis	32
7 Diskussion und Fazit	33
Anhang	34
Literaturverzeichnis	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung des Stülpmembranspeichers	4
Abbildung 2 Bodenelement mit auftretenden Spannungen	7
Abbildung 3 Gleiche Breite und Länge von Fahrweg und Stützkörper	8
Abbildung 4 Beispiel einer Spindelstütze	9
Abbildung 5 Betonquader mit Spannvorrichtung	10
Abbildung 6 Darstellung des betrachteten Bereiches	18
Abbildung 7 Fahrwege 1 bis 9 mit Stützkörpern	21
Abbildung 8 Unterschied vorher (Kap. 5.1) und nachher (Kap. 5.2)	22
Abbildung 9 Verschiebung der Halter bei Fahrweg Nr. 10	23
Abbildung 10 Umstellungen für Fahrweg 11 auf Fahrweg 12	24
Abbildung 11 Umstellung von Fahrweg 13 auf Fahrweg 14	25
Abbildung 12 Umstellung von Fahrweg 15 auf Fahrweg 16	26
Abbildung 13 Umstellung von Fahrweg 17 auf Fahrweg 18	27
Abbildung 14 Nach Beendigung des Fahrweges 18	28
Abbildung 15 Umstellung Fahrweg 33 auf Fahrweg 34	29
Abbildung 16 Umstellung von Fahrweg 35 auf Fahrweg 36	29
Abbildung 17 Umstellung von Fahrweg 37 auf Fahrweg 38	30
Abbildung 18 Nach Beendigung des Fahrweges 38	30
Abbildung 19 Umstellung von Fahrweg 65 auf Fahrweg 66	31
Abbildung 20 Umstellung von Fahrweg 67 auf Fahrweg 68	31
Abbildung 21 Gesamte Halbkugel mit Stützhaltern	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Abmessungen und Parameter für weitere Berechnungen	13
Tabelle 2 Verdeutlichung der Fahrwege	20

1 Einleitung

Dieser Endbericht behandelt die Thematik der Freilegung der Kolbenunterseite sowie dessen Abstützung. Dies bezieht sich dabei auf einen Stülpmembranspeicher.

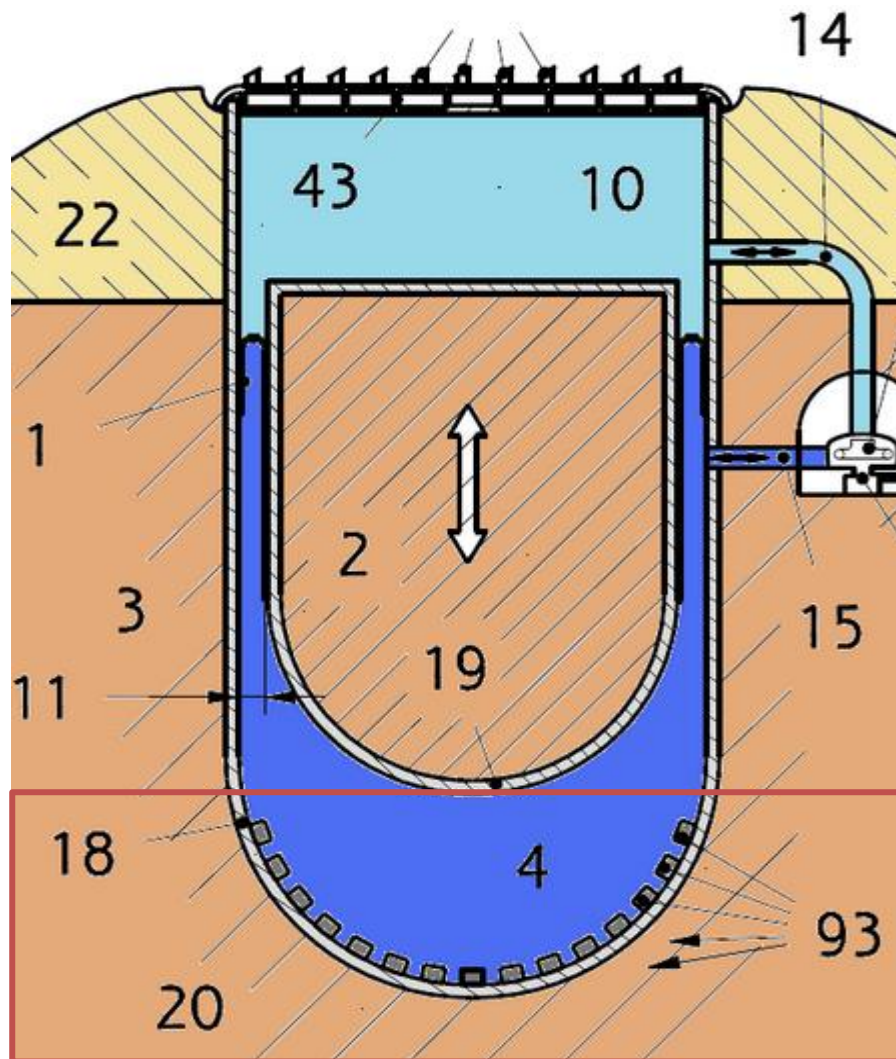


Abbildung 1 Darstellung des Stülpmembranspeichers

© Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg[6]

In Abbildung 1 ist der behandelte Stülpmembranspeicher dargestellt. Der komplette Bericht bezieht sich dabei auf die dargestellte Bauweise. Dieser dient als Energiespeicher. Der große betonummantelte Erdkörper (Nr. 2 in der Abbildung 1) trennt zwei Wasserbereiche (Nr. 4 und Nr. 10 in der Abbildung 1) mittels einer angebrachten Stülpmembran (Nr. 1 in der Abbildung 1). Bei Stromüberschuss, wird die Pumpe aktiviert und pumpt von dem oberen Bereich Wasser in den unteren Bereich. Dadurch erhebt sich der Kolben und speichert die Energie. Ist Strombedarf vorhanden, kann die Turbine geöffnet werden und das Wasser beginnt, aufgrund der Gewichtskraft des Kolbens, durch diese zu strömen.

Beim Bau des Stülpmembranspeichers entsteht der Erdkolben schon bei der Ausgrabung. Mit Hilfe einer Fräsbetoniereinheit wird der Spalt (Nr. 11 in der Abbildung 1) ausgegraben und ab einer bestimmten Tiefe wird aufgehört die Erdmasse aus der Mitte abzutragen und als zusätzliche Höhe (Nr. 22 in der Abbildung 1) auszulegen. Folgend betoniert die Maschine sowohl die Außenwand des kompletten Gebildes (Nr. 18 in der Abbildung 1) sowie die des Erdkolbens (Nr. 19 in der Abbildung 1).

Bei der Ausgrabung der Kolbenunterseite werden nach jedem Fahrweg einige Stützhalter (Nr. 93 in der Abbildung 1) angebracht. Diese müssen sowohl während der Ausgrabung als Stützen dienen, sowie wenn der Speicher für Reparaturen geleert wird oder er seine vollständig gespeicherte Energie abgegeben hat.

Im Bericht werden nun drei hauptsächliche Punkte betrachtet:

1. Voraussetzungen und Beispiele von möglichen Stützhalter die angewendet werden könnten um das Gewicht des Erdkolbens (Nr. 2 in der Abbildung 1) aushalten zu können
2. Eine Festigkeitsbetrachtung von den Druckkräften die auf die Stützhalter ausgeübt werden und folgend eine Berechnung der notwendigen Anzahl dieser
3. Die Darstellung von Fahrwegen sowie der Einbringung der Stützhalter in diese. Zusätzlich werden alle Umstellungen betrachtet und beschrieben um eine geringe Anzahl dieser zu erhalten

2 Grundlagen der Technik

Die Betrachtung der Grundlagen für die Freilegung der Kolbenunterseite beläuft sich rein auf die Grundlagen der auftretenden Spannungen. Dies deckt den Bereich der Festigkeitsüberlegung ab.

Die Stützhalter in ihrer Art existieren derzeit entweder nicht oder nicht in den notwendigen Dimensionen. Es wird in dem Kapitel der Stützhalterbetrachtung näher darauf eingegangen.

Die einfachste Form der Betrachtung einer Spannung ist im 2-Dimensionalen Raum. Eine gewisse Kraft tritt auf eine festgelegte Fläche auf. Weiter wird diese in die möglichen Fälle aufgeteilt, welche auftreten können. Tritt die Spannung senkrecht auf den Körper, so spricht man von einer Druck- oder Zugbeanspruchung. Treten sie tangential zur Fläche auf werden sie als Schub- oder Scherbeanspruchung bezeichnet. Normalerweise haben Zugbeanspruchungen ein positives und Druckspannungen ein negatives Vorzeichen. Da im Baugrund hauptsächlich Druckkräfte auftreten, haben sie in diesem Bereich ein positives Vorzeichen.¹

¹ Vgl. Boley (Hrsg.) (2012), 139f. [4]

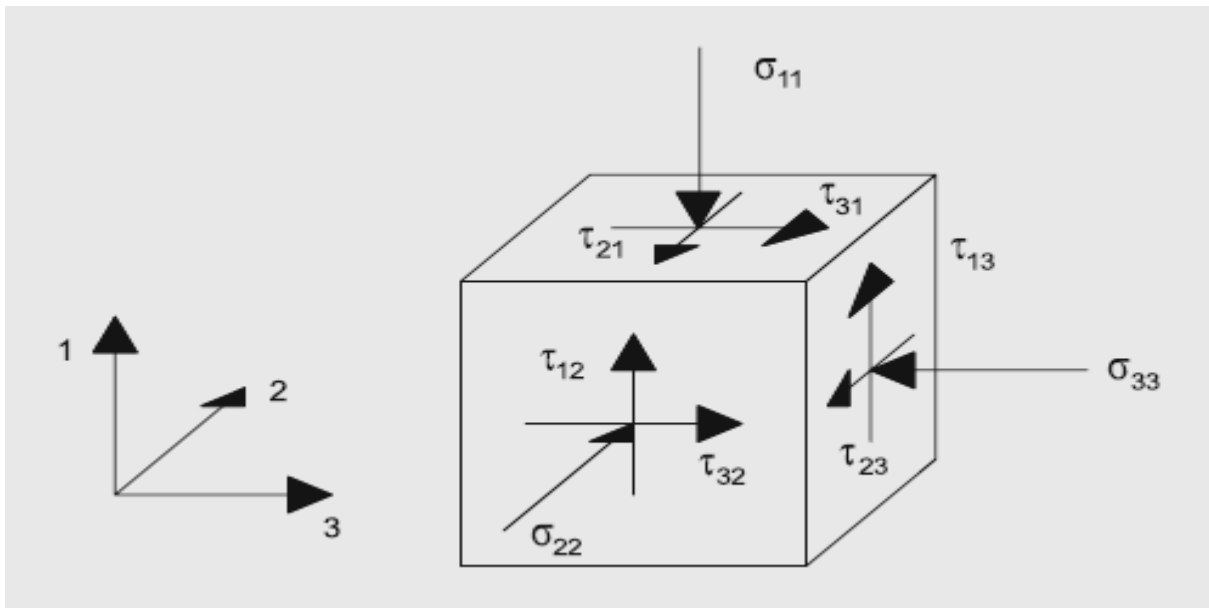


Abbildung 2 Bodenelement mit auftretenden Spannungen

Quelle: K. Kuntsche, Geotechnik (2016), Springer Vieweg [2]

Im realen Fall treten diese jedoch 3-Dimensional auf (Abb. 2). Nun hängt die Größe der Spannung noch stärker von der Orientierung der Fläche, sowie der Größe und der Richtung der Kraft ab. Dadurch stellt sie eine funktionale Verknüpfung zwischen den Vektoren und der Kraft her. Sie hat damit Tensoreigenschaften und wird als Spannungstensor bezeichnet.² Eine genauere Betrachtung für größere, komplexere Bauarten ist dadurch meist kompliziert. Solche Nichtlinearen Probleme werden heutzutage vermehrt durch die Finite-Elemente-Methode (FEM) simuliert.

Jedoch können sich viele bodenmechanische Probleme mit dem ebenen Spannungszustand vereinfachen lassen. Dabei geht man davon aus, dass alle zu dieser Schnittebene parallelen Ebenen den gleichen Spannungszustand aufweisen. Dadurch wird der eigentlich real vorhandene räumliche Zustand in ein zweidimensionales Problem vereinfacht.³

² Vgl. Schmidt, Buchmaier, Vogt-Breyer (2017), S. 110.[1]

³ Vgl. Schmidt, Buchmaier, Vogt-Breyer (2017), S. 109f.[1]

3 Stützkörper

Bei der Betrachtung und der Auswahl eines idealen Stützkörpers, müssen einige Aspekte berücksichtigt werden. Die wichtigsten drei, welche im Folgenden erläutert werden, lauten:

- Größenordnung der Stützkörper
- Art der Halterung
- Reale Maximale Belastbarkeit

3.1 Größenordnung der Stützkörper

Um komplexe Umstellungen der Halter zu minimieren oder gänzlich zu verhindern, müssen diese leicht zugänglich, sowie einfach umstellbar sein. Somit kann bei der Ausgrabung mit der Fräsbetoniereinheit eine Kollision ohne größeren Aufwand vermieden werden.

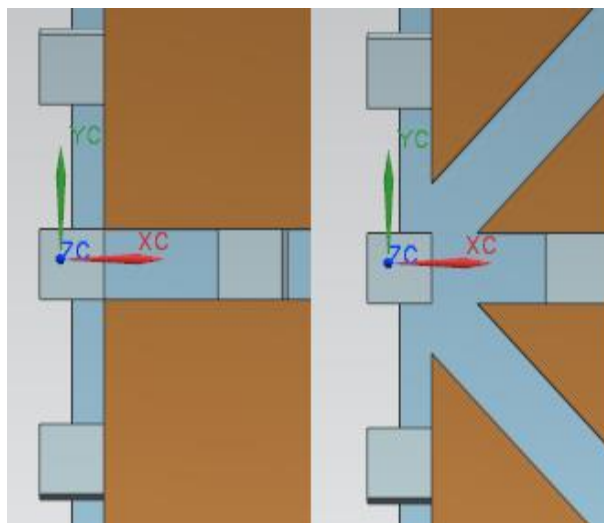


Abbildung 3 Gleiche Breite und Länge von Fahrweg und Stützkörper

In Abb. 3 ist ein Ausschnitt der tiefsten Stelle der Halbkugel mit jeweils vier Stützkörpern verdeutlicht. Vom linken zum rechten Bereich werden zwei weitere Fahrwege im 45° Winkel, wie es später erfolgen wird, angebracht. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass der mittlere Stützkörper umgestellt werden müsste, wenn sie eine gewisse Breite überschreitet. Diese Umstellungen sind notwendig um einen geschlossenen Behälter betonieren zu können, da ansonsten die Fräsbetoniereinheit nicht gänzlich an alle Stellen gelangen kann. Jedoch wäre eine Umstellung dieses Körpers komplizierter als notwendig. Es müssten alle vorherigen Stützkörper entfernt werden um den, in diesem Beispiel, Mittleren verschieben zu können. Es muss

genug Platzbedarf vorhanden sein, dass ein Arbeiter, plus sein Werkzeug, jeden Stützkörper einfach erreichen kann. Jegliche Möglichkeit der Verschiebung wäre ein komplexer Aufwand, welcher mit geringeren Maßen des Stützhalters verhindert werden könnte.

3.2 Art der Halterung

Folgend muss entschieden werden, welche Art von Halterung gewählt wird. Eine rein mechanische Funktion wird dabei bevorzugt. Dies hat den Grund, dass wenn sie einmal richtig montiert, eingestellt und gesichert sind, sie eine längere Haltbarkeit als Hydrauliksysteme aufweisen und zusätzlich soll Hydraulikflüssigkeitsaustritt vermieden werden. Nun werden zwei verschiedene Möglichkeiten betrachtet.

1. Spindelstütze:

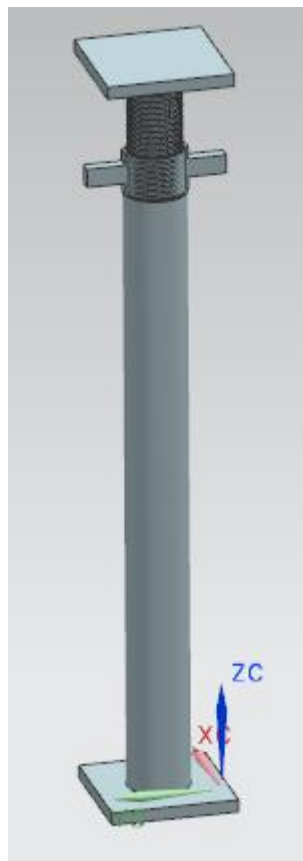


Abbildung 4 Beispiel einer Spindelstütze

Eine derzeit schon vorhandene Lösung wäre die Spindelstütze. Diese Art von Stützen findet in der Geotechnik heutzutage schon ihre Verwendung. Jedoch wird sie nicht in der Größenordnung dargeboten, welche in diesem Falle benötigt wird. Im Grunde handelt es sich hierbei, wie in Abb. 4 zu erkennen ist um ein Außenrohr, meist aus Aluminium, und einer Stahlspindel. Über eine Wirbelmutter kann die

Spindel ausgefahren werden und gegen den Betonkörper gedrückt werden. Derzeitige Varianten dieser Bauart halten z.B.: bei einem Spindeldurchmesser von 60 mm Druckkräfte bis zu 128 kN aus⁴. Für dieses Bauvorhaben reicht das nicht aus. Bei einer größeren Bauweise könnte eine deutlich größere Belastbarkeit erreicht werden. Die Problematik dabei ist zum einen ein komplexerer Berechnungsaufwand, da eine Knickung unbedingt vermieden werden muss und zum anderen ein sehr großer Kostenaufwand eine Spindel in der notwendigen Größenordnung zu erstellen.

2. Betonquader mit Spannvorrichtung:

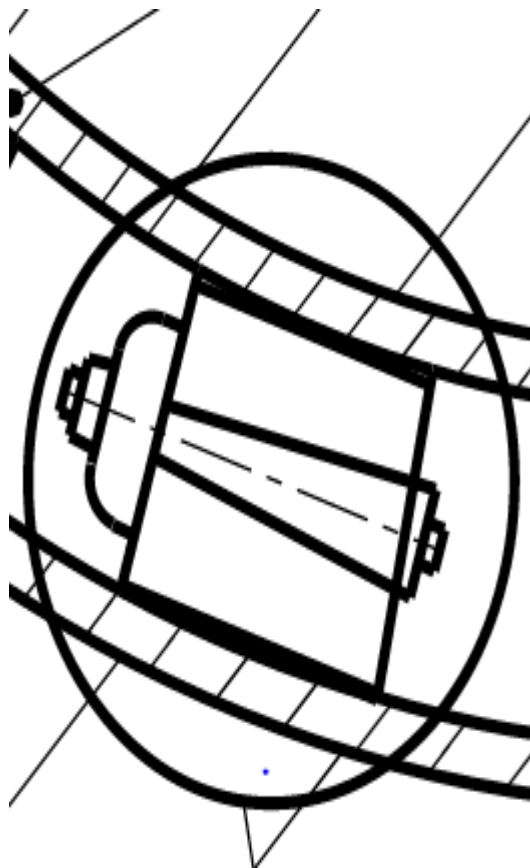


Abbildung 5 Betonquader mit Spannvorrichtung

© Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg[9]

Eine weitere, im Folgenden betrachtete, Möglichkeit ist der Betonquader mit Spannvorrichtung (Schematischer Aufbau: Abbildung 5). Der Betonquader wird in die Fahrwege eingebracht und mittels einer eingebauten Spannvorrichtung gedehnt. Dabei drückt er dann sowohl auf die Kolbenaußenseite als auch die Außenschale des Stülpmembranspeichers. Wird eine Umstellung benötigt, so wird die Spannvorrichtung entspannt und der Körper ist wieder frei beweglich. Nun müssen

⁴ <http://elv2015.elvermann.de/Dateien/PG/00002346/Doc/AluSpindelstuetze.pdf> [7]

diese eine extrem hohe Belastung aushalten und dadurch kann Beton aufgrund seiner extrem guten Druckbelastbarkeit punkten.

Speziell wird hierbei hochfester Beton mit einer Festigkeit von $\sigma_{\max, \text{stütz}} = 100 \text{ MN/m}^2$ betrachtet. Durch eine hohe Belastbarkeit, werden weniger Halter benötigt und spart damit Kosten. Zusätzlich verdichtet sich das Gebilde unterhalb des Kolbens bei Erhöhung der Anzahl von Haltern und damit müssten mehr Umstellungen vollführt werden.

3.3 Maximale Belastbarkeit

Ein Weiterer wichtiger Aspekt ist die Belastbarkeit. Je mehr Kraft auf den Stützkörper ausgeübt werden kann, desto geringer wird die benötigte Anzahl dieser. Dabei gibt es eine Problematik der zwei, in Kapitel 3.2, vorgestellten Möglichkeiten. Da beide Arten in dieser Art oder Größenordnung so noch nicht existieren, kann nur eine Schätzung der maximalen Belastbarkeit erfolgen. Diese müsste durch Druckversuche erst bestätigt oder berichtigt werden.

4 Berechnungen

Nun wird beispielhaft die von den Stützkörpern aufzunehmende Kraft des Kolbens berechnet und dadurch die notwendige Anzahl exemplarisch ermittelt. Dabei wird die aufgenommene Druckkraft des Stülpmembrans nicht mit berücksichtigt. Dies geschieht aufgrund dessen, dass die Membran erst am Schluss angebracht wird. Die Stützhalter müssen somit die gesamte Belastung des Erdkörpers mit Betonummantelung aushalten. Als Stützkörper wird der vorher beschriebene Betonkörper mit Federeinbau gewählt, da dieser die höchste Druckspannung aushält. Folglich wird die geringere Anzahl an Stützkörpern benötigt. Weiterhin wird eine Maximale Druckaufnahme des Halters exemplarisch gegeben.

4.1 Vorüberlegungen

Um die Stadt Forchheim 10 Tage versorgen zu können, wurde eine Speicherkapazität von 5,5 GWh ermittelt. Aus dieser folgte eine erste Bemaßung des Speichers. Dieser wurde jedoch, aufgrund der Größe auf zwei Speichersysteme mit je 2,75 GWh reduziert. Aus den daraus resultierenden Maßen, sind die für die Beispielrechnung relevanten Größen in der folgenden Tabelle angegeben.

Für die Dichte des Erdbodens wurde die Dichte vom häufigsten auftretenden Mineral in Mineralböden verwendet. Dabei handelt es sich um Quarz mit einer Dichte von $2,65 \text{ g/cm}^3$.⁵

Für die Belastbarkeit des Betons wurde wie im Kapitel 3.2. beschrieben ein hochfester Beton mit 100 MN/m^2 angenommen.

Die Spaltbreite (Fahrwegsbreite) wurde auf 2 Meter festgelegt.

⁵ <http://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/01.htm> [8]

<u>Abmessungen</u>	
Zylinder vom Kolben	
Außendurchmesser	$d_{\text{kolben,außen}} = 130 \text{ m}$
Innendurchmesser	$d_{\text{kolben,innen}} = 129 \text{ m}$
Höhe	$h_{\text{Kolben}} = 215 \text{ m}$
Wandstärke	$s_{\text{Kolben}} = 0,5 \text{ m}$
Spaltbreite	$b_{\text{Spalt}} = 2,0 \text{ m}$
Halbkugel vom Kolben	
Außenradius	$r_{\text{kugel,außen}} = 65,0 \text{ m}$
Innenradius	$r_{\text{kugel,innen}} = 64,5 \text{ m}$
Stützhalter	
Höhe	$h_{\text{Stützhalter}} = 2,0 \text{ m}$
Breite	$b_{\text{Stützhalter}} = 1,0 \text{ m}$
Länge	$l_{\text{Stützhalter}} = 2,0 \text{ m}$
Maximale zulässige Druckspannung des Stützhalters	$\sigma_{\text{max,stütz}} = 100 \text{ MN/m}^2$
<u>Parameter</u>	
Erddichte	$\rho_{\text{Erde}} = 2650 \text{ kg/m}^3$
Betondichte	$\rho_{\text{Beton}} = 2410 \text{ kg/m}^3$
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Sicherheitszuschlag	$S = 2$

Tabelle 1 Abmessungen und Parameter für weitere Berechnungen

Folgend wird mit den Werten aus Tabelle 1 die Gewichtskraft, die Aufteilung der Spannung sowie die notwendige Anzahl der Stützhalter ermittelt. Für andere Auslegungen, kann die im Anhang zu Findende, Excel Datei verwendet werden.

4.2 Kraft des Kolbens

Als erstes wird die Gesamtgewichtskraft des Kolbens berechnet. Dies ist notwendig um die drückende Kraft zu benennen, welche die Stützkörper später kompensieren müssen.

Zunächst muss das Volumen der Betonummantelung des Erdkörpers berechnet werden. Dabei wird die Ummantelung des Zylinders, der unteren Halbkugel sowie die obere kreisförmige Platte summiert.

$$V_{\text{Betonschale}} = \pi * \left(\frac{(d_{\text{kolben,au\ss en}}^2 - d_{\text{kolben,innen}}^2) * h_{\text{kolben}}}{4} + \frac{d_{\text{kolben,au\ss en}}^3 - d_{\text{kolben,innen}}^3}{12} + \frac{d_{\text{kolben,au\ss en}}^2 * s_{\text{kolben}}}{4} \right)$$

$$V_{\text{Betonschale}} = 63.543 \text{ m}^3$$

Simultan wird das Volumen der eingeschlossenen Erde berechnet. Hierbei fällt die obere kreisförmige Platte weg. Bei der Berechnung der Zylinderform muss die Wandstärke einmal von der Höhe abgezogen.

$$V_{\text{Erde,eing.}} = \pi \left(\left(\frac{d_{\text{kolben,innen}}}{2} \right)^2 * (h_{\text{kolben}} - s_{\text{kolben}}) + \frac{2 * r_{\text{kugel,innen}}^3}{3} \right)$$

$$V_{\text{Erde,eing.}} = 3.365.476 \text{ m}^3$$

Die Volumina werden mit der jeweiligen Dichte multipliziert um das Gesamtgewicht zu ermittelt. Aus dem Gesetz des freien Falls, wird die endgültige Gewichtskraft ermittelt.

$$m_{\text{gesamt}} = V_{\text{Betonschale}} * \rho_{\text{Beton}} + V_{\text{Erde,eing.}} * \rho_{\text{Erde}}$$

$$m_{\text{gesamt}} = 9.071.650.559 \text{ kg} = 9.071.650 \text{ t}$$

$$F_{G,\text{kolben}} = m_{\text{gesamt}} * g$$

$$F_{G,\text{kolben}} = 88.992.892 \text{ kN} = 88.993 \text{ MN}$$

Der gesamte Kolben drückt folglich mit fast 89.000 MN auf die untere Halbkugelschale. Nun werden im folgenden Schritt die Stützhalter ausgelegt, die dieser immensen Kraft standhalten müssen.

4.3 Spannungsaufteilung

Aufgrund des Halbkreisförmigen Aufbaus, teilt sich die nun auftretende Kraft von 89.000 MN nicht gleichmäßig auf. Bei einem höheren Neigungswinkel ($>45^\circ$) wirkt sich die Kraft stetig mehr in Richtung des Zentrums zu. Daher fällt eine Betrachtung des ebenen Spannungszustandes erstmals weg.

Jedoch, wird die gesamte Gewichtskraft des Kolbens auf die Fläche des Kugelsegmentes ($\leq 45^\circ$) berechnet und ein Sicherheitszuschlag aufgeschlagen, so kann ein ebener Spannungszustand betrachtet werden. Aufgrund dessen, dass die Stützhalter mit einem Neigungswinkel über 45° dennoch eine gewisse Kraft aufnehmen und durch die doppelte Anzahl der Stützhalter, müsste das System mit dieser Auslegung stabil sein.

Mit dieser Überlegung folgt die kurze Berechnung der Maße und folglich der Fläche des Kugelsegments. Sind diese Daten berechnet, lässt sich mit der in Kapitel 4.2 berechneten Gesamtlast die Druckspannung berechnen. Dabei ist a der Radius, h die Höhe und β ($= 45^\circ$) der Winkel des Kugelsegmentausschnittes.

$$a_{segment} = (r_{kugel,au\beta en} + b_{spalt}) * \sin\left(2 * \frac{\pi}{360} * \beta\right) \quad a_{segment} = 47,38 \text{ m}$$

$$h_{segment} = (r_{kugel,au\beta en} + b_{spalt}) * \left(1 - \cos\left(2 * \frac{\pi}{360} * \beta\right)\right) \quad h_{segment} = 19,62 \text{ m}$$

$$A_{segment} = \pi * (a_{segment}^2 + h_{segment}^2) \quad A_{segment} = 8261 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{segment} = \frac{F_{G.kolben}}{A_{segment}} = 11 \text{ MN/m}^2$$

Auf einem Quadratmeter Fläche des Kreissegments herrscht folglich eine Kraft von 11 MN.

4.4 Anzahl der Stützkörper

Bei Betrachtung dieses Wertes und der Maximalbelastung des Stützhalters aus Tabelle 1, so fällt auf, dass dieser Wert ungefähr 9 Mal so klein ist. Folglich muss mindestens 1/9 der Fläche des Kreissegmentes mit Stützkörpern versehen werden um die aufliegende Kraft zu halten. Dadurch wären die Halter jedoch bei ihrem Maximum. Dies muss verhindert werden. Ein, in der Tabelle 1, genannter Sicherheitszuschlag kommt mit in die Berechnung. Dadurch wird jeder Körper zu 50% seines maximalen Vermögens belastet. Zusätzlich erfahren die Halter, wie vorher beschrieben, nicht die volle Kraft des darüber liegenden Körpers.

Folgend wird die Anzahl der Stützkörper bestimmt. Dies geschieht zunächst mit der genauen Bestimmung des oben genannten Verhältnisses, hier benannt als p für Proportion. Teilt man danach die zu stützende Fläche mit diesem Faktor, sowie dem Sicherheitszuschlag, so erhält man die Anzahl der notwendigen Stützkörper.

$$p = \frac{\sigma_{max,stütz}}{\sigma_{segment}}$$

$$p = 9,283$$

$$A_{\sigma,stütz} = \frac{A_{segment}}{p} * S$$

$$A_{\sigma,stütz} = 1780 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl der Stützhalter} = \frac{A_{\sigma,stütz}}{b_{stützhalter} * l_{stützhalter}}$$

$$\text{Anzahl der Stützhalter} = 890 \text{ Stück}$$

Es müssen somit 890 Stützhalter in dem Flächenbereich des Kugelsegments eingebracht werden, damit das System stabil ist. Zusätzlich werden an der restlichen Fläche ebenfalls Stützkörper benötigt. Die Einbringung der berechneten Körper, sowie die Erläuterung zur restlichen Stützfläche, folgen im nächsten Kapitel.

5 Fahrweg

Zunächst wird berechnet wie viele Stützkörper an jedem Fahrweg ungefähr angebracht werden müssen um eine gute Aufteilung zu erhalten. Dazu wird zunächst die Stückzahl auf die Fläche eines Fahrweges aufgeteilt. Weitere Betrachtungen ergeben sich mit Hilfe des Konstruktionsprogramms. Wichtige Maße dafür sind:

- Bogenlänge l_{bogen} [m]
- Fläche eines Fahrweges $A_{Fahrweg}$
- Breite des Fahrweges $b_{fahrweg} = 2$ Meter
- Maximaler Abstand der Stützhalter voneinander $V_{stütz}$ [m²/Stück]

$$l_{bogen} = 2 * (r_{kugel,außen} + b_{spalt}) * \arcsin\left(\frac{a_{segment}}{(r_{kugel,außen} + b_{spalt})}\right)$$

$$l_{bogen} = 105,2 \text{ m}$$

Die Berechnung der Bogenlänge wird benötigt um nun die Fläche eines Fahrweges ausrechnen zu können.

$$A_{Fahrweg} = \frac{l_{bogen}}{2} * b_{fahrweg}$$

$$A_{Fahrweg} = 105,2 \text{ m}^2$$

Auf diese Fläche werden die Stützhalter gleichmäßig verteilt. Zur Bestimmung der Verteilung wird als nächstes der maximale zulässige Abstand zweier Stützkörper ermittelt.

$$V_{stütz} = \frac{A_{segment}}{\text{Anzahl der Stützhalter}}$$

$$V_{stütz} = 9 \frac{\text{m}^2}{\text{Stück}}$$

Nun kann als letztes dieses Ergebnis mit der Fahrwegsfläche verbunden werden um die Anzahl erhalten.

$$\text{Stützhalter pro Fahrweg} = \frac{A_{\text{Fahrweg}}}{V_{\text{Stütz}}}$$

$$\text{Stützhalter pro Fahrweg} \approx 11 \text{ Stück}$$

Diese 11 Stück werden als Richtwert angenommen und je nach Situation angepasst. Da diese Anpassung rechnerisch einen zu großen Aufwand darstellt, wird mit Hilfe des Konstruktionsprogrammes diese durchgeführt.

Bei diesen 11 Stützhaltern ist der Körper im Zentrum miteinkalkuliert, da dieser in jedem Fahrweg vorhanden ist. Dadurch wird von nun an ohne den Körper im Zentrum die Anzahl der Stützhalter beschrieben.

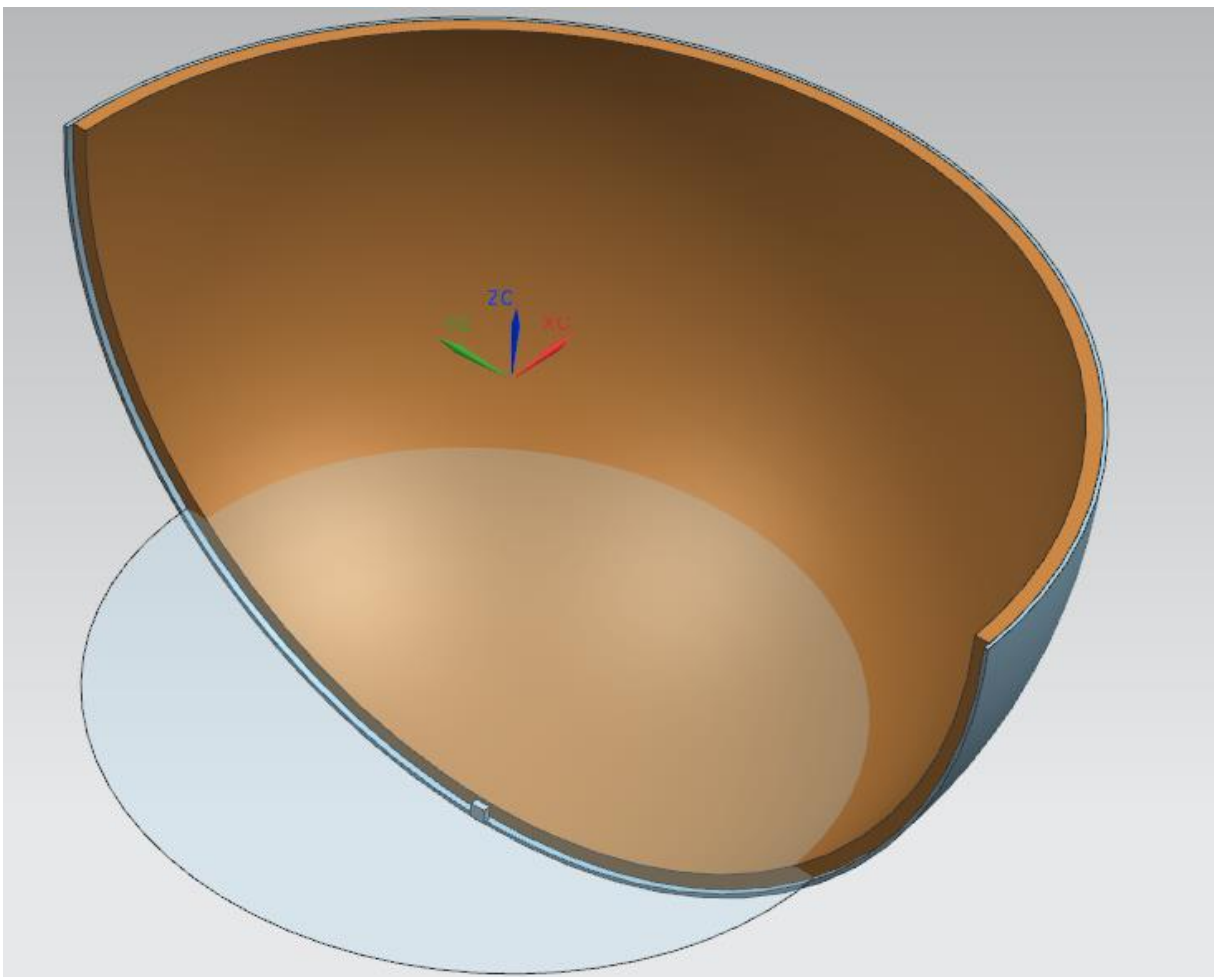


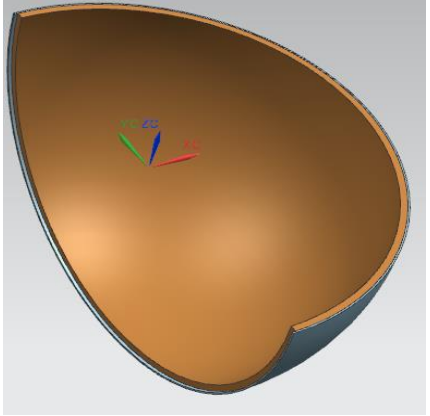
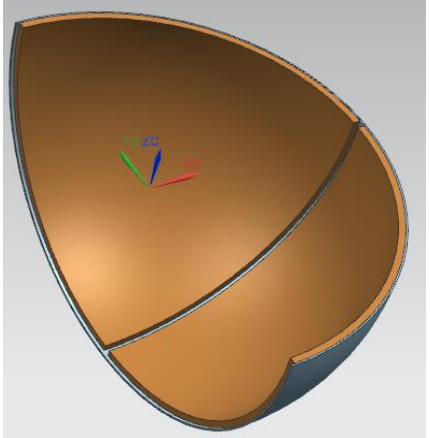
Abbildung 6 Darstellung des betrachteten Bereiches

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, wird nur die Hälfte der Kugel betrachtet. Dies geschieht aufgrund der Symmetrie beider Hälften. Die Fahrwege, Lage der Stützkörper sowie die notwendigen Verschiebungen können identisch auf die andere Seite übertragen werden. Zusätzlich kann man einen transparenten Kreis erkennen. Dieser verdeutlicht den Bereich des, in den vorherigen Kapiteln, berechneten

Kugelsegments. Zunächst wird nämlich nur die Fläche unterhalb dieses Kreises betrachtet, da nur/hauptsächlich dort die Verschiebungen der Halter stattfinden werden. Zusätzlich handelt es sich dabei um die wichtige, mit Stützkörpern zu versehende, Fläche.

Die braune Fläche stellt hierbei den Erdboden dar, die graue Außenschale die äußere 0,5 Meter dicke Betonwand der Außenwand. Für einen deutlicheren Einblick der Geschehnisse wird der aufliegen Körper weggelassen.

Die Betrachtung kann zusätzlich weiter vereinfacht werden. Die effizienteste Weise die Fahrwege der Fräsbetoniereinheit festzulegen ist die stetige Teilung des Winkels. Das Ganze wird anhand der folgenden Tabelle verdeutlicht.

Nr.	Winkel	Ausschnitt
<p>1 bis 2:</p> <p>Der erste Fahrweg im angegebenen Winkel</p> <p>Der zweite Fahrweg ist direkt gegenüber von dem Ersten</p>	<p>180°</p>	
<p>3:</p> <p>Von den Ersten beiden Fahrwegen, wird als nächstes der Fahrweg um 90° versetzt stattfinden.</p>	<p>90°</p>	

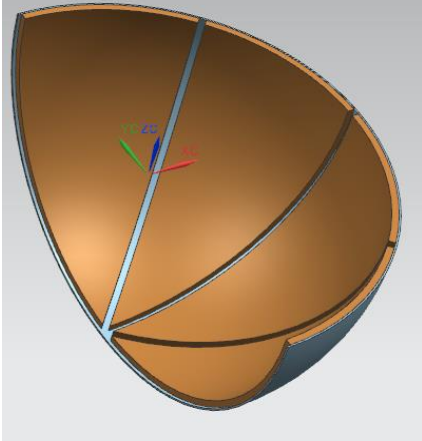
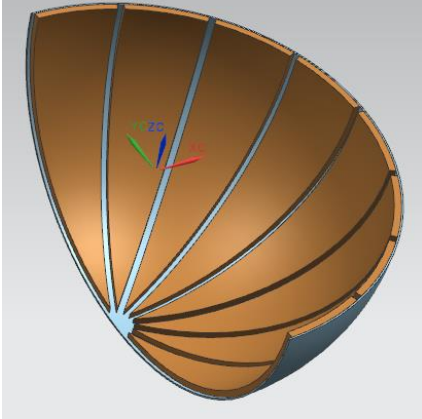
<p>4 bis 5:</p> <p>Nun wird vom 90° Winkel, die Hälfte davon in beide Richtungen aufgetragen</p>	<p>45°</p>	
<p>6 bis 9:</p> <p>Wieder wird der vorherige Winkel geteilt und von den vorherigen abgezogen oder dazu addiert</p>	<p>22,5°</p>	

Tabelle 2 Verdeutlichung der Fahrwege

Wie in Tabelle 2 deutlich erkennbar ist, geschieht das komplette Verfahren symmetrisch. Zusätzlich werden die Stützhalter komplett identisch, zum jeweiligen Fahrweg, eingestellt. Dies ermöglicht die Betrachtung eines Fahrweges für den jeweiligen Fall einer Winkelhalbierung.

5.1 Fahrweg 01 bis 09

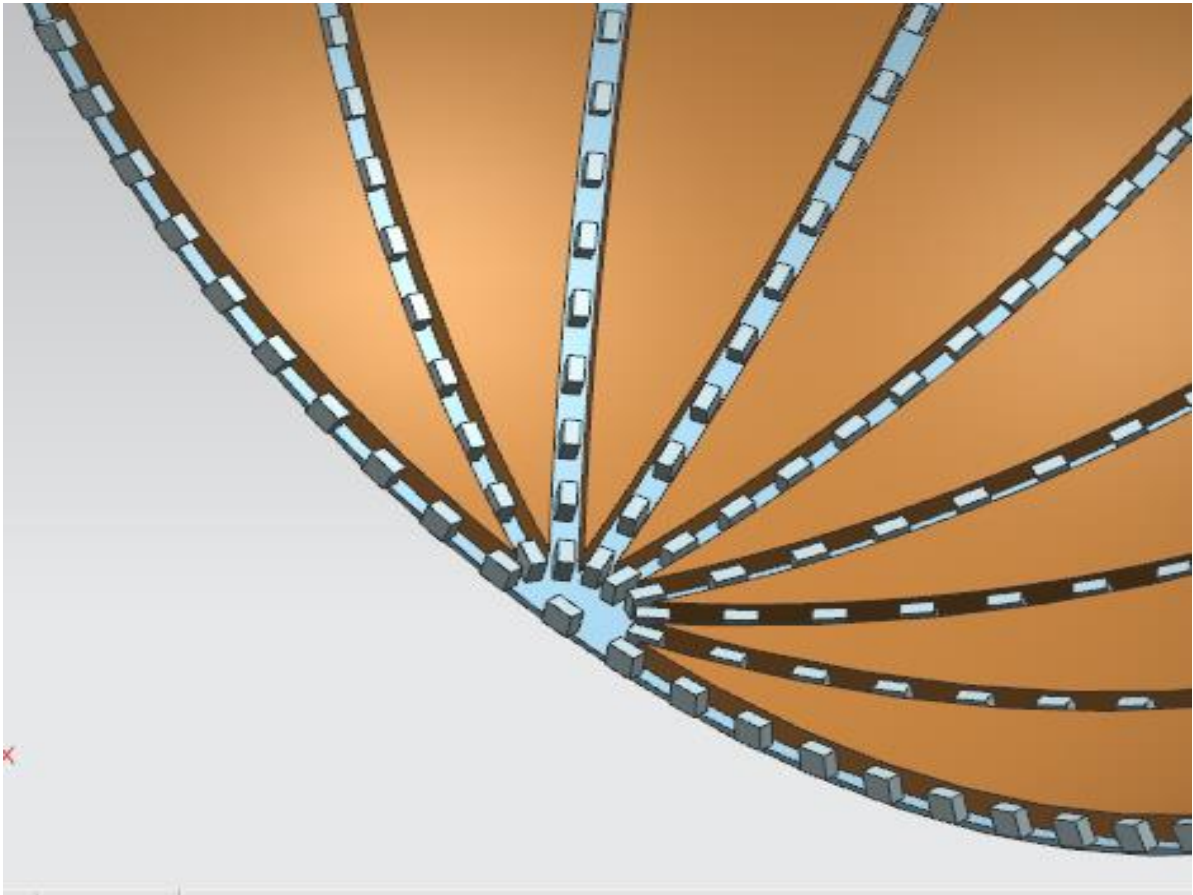


Abbildung 7 Fahrwege 1 bis 9 mit Stützkörpern

Mit den im Kapitel 4.1 angegebenen Maßen (Breite: 1 Meter; Länge: 2 Meter) gibt es bislang keine Kollisionsschwierigkeiten. Dies kann anhand der Abbildung 7 erkannt werden. Bei breiteren Stützkörpern könnte schon beim dritten Fahrweg eine Kollision mit dem Stützkörper im Zentrum der Kugel entstehen. Dagegen würde aber ein breiterer Fahrweg der Fräsbetoniereinheit dieser Kollision entgegenwirken.

Auf die Aufzählung der eingesetzten Stützhalter wird an dieser Stelle verzichtet, da es in diesem und den folgenden Kapiteln um mögliche Kollisionsmöglichkeiten handelt. Am Ende dieses Kapitels wird auf die genaue Anzahl der, pro Fahrweg, einzusetzenden Haltern eingegangen.

5.2 Fahrweg 10 bis 17

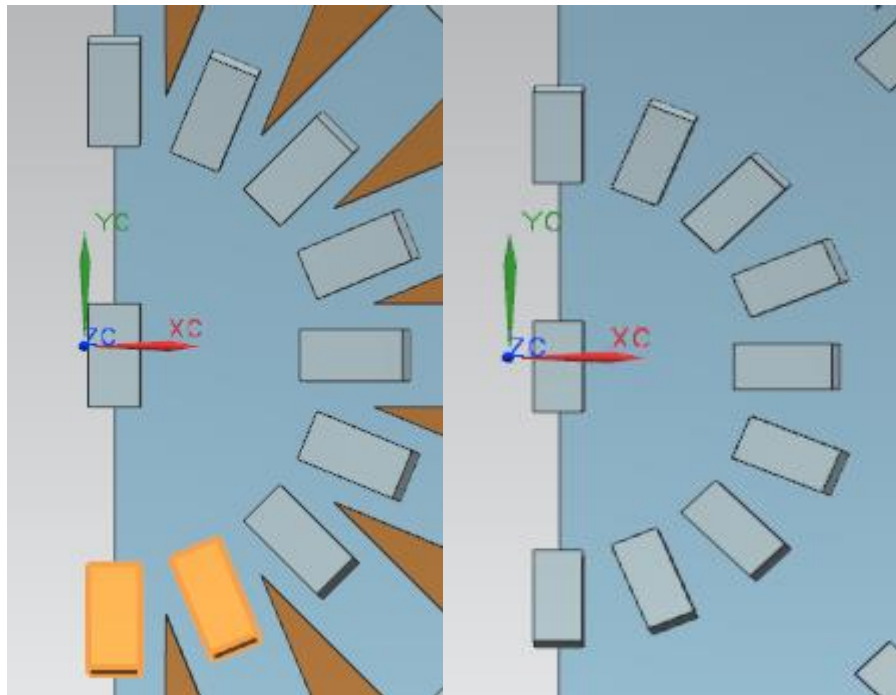


Abbildung 8 Unterschied vorher (Kap. 5.1) und nachher (Kap. 5.2)

In jedem, der Fahrwege 10 bis 17 kommt es nun zu einer Umstellungsmaßnahme der Stützkörper. Dabei müssen pro Fahrweg immer 2 Körper umgestellt werden. Diese sind auf dem linken Teil der Abbildung 8 die orange gekennzeichneten Flächen. Diese müssen bewegt werden um auf den rechten Teil der Abbildung 8 zu gelangen.

Die simpelste Lösung dabei wäre den, in Abbildung 8 links, ersten Körper nach hinten bis an den vorherigen Halter und circa 0.5 Meter nach links zu versetzen. Der Zweite müsste um die Hälfte seiner Länge (1 Meter) nach vorne umgestellt werden. Nachdem die Fräsbetoniereinheit den Fahrweg abgefahren ist, werden diese wieder an ihre ursprüngliche Position gebracht. Diese Umstellungsmöglichkeit kann auf alle Fahrwege von 10 bis 17 so ausgeübt werden.

Im Folgenden wird der markierte linke Körper, der vorangegangenen Abbildung, immer als Nr. 1 (links) bezeichnet und der rechte als Nr. 2 (rechts). Dies dient der einfacheren Lesbarkeit.

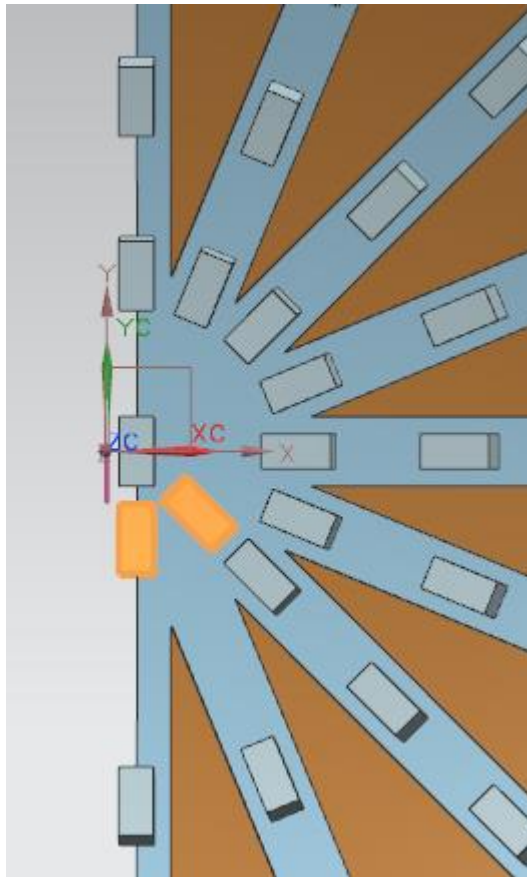


Abbildung 9 Verschiebung der Halter bei Fahrweg Nr. 10

Nun gäbe es jedoch die ansprechendere Lösung, welche in Abbildung 9 zu erkennen ist. Da in den inneren Bereich noch Stützkörper eingebracht werden müssen, kann Nr. 1 (links) sowie Nr. 2 (rechts) der Abbildung 8 nun in die abgebildete Position gebracht werden. Diese Position liegt genau in dem Winkel der vorherig ausgegrabenen Fahrwege. Dieser Vorgang erspart viel Arbeit im Vergleich zu der einfachen Lösung. Auf die ursprüngliche Stelle von Nr. 1 (links) und Nr. 2 (rechts) wird nach Beendigung des Fahrweges zwei neue eingebracht.

Der folgende Fahrweg 11 auf der gegenüberliegenden Seite geschieht nach derselben Methode. Es wird immer der gegenüberliegende (von der Mittellinie, welche der dritte Fahrweg darstellt, gespiegelte) Fahrweg als nächstes abgefahren um eine Gleichmäßige Verteilung der Kräfte zu erhalten.

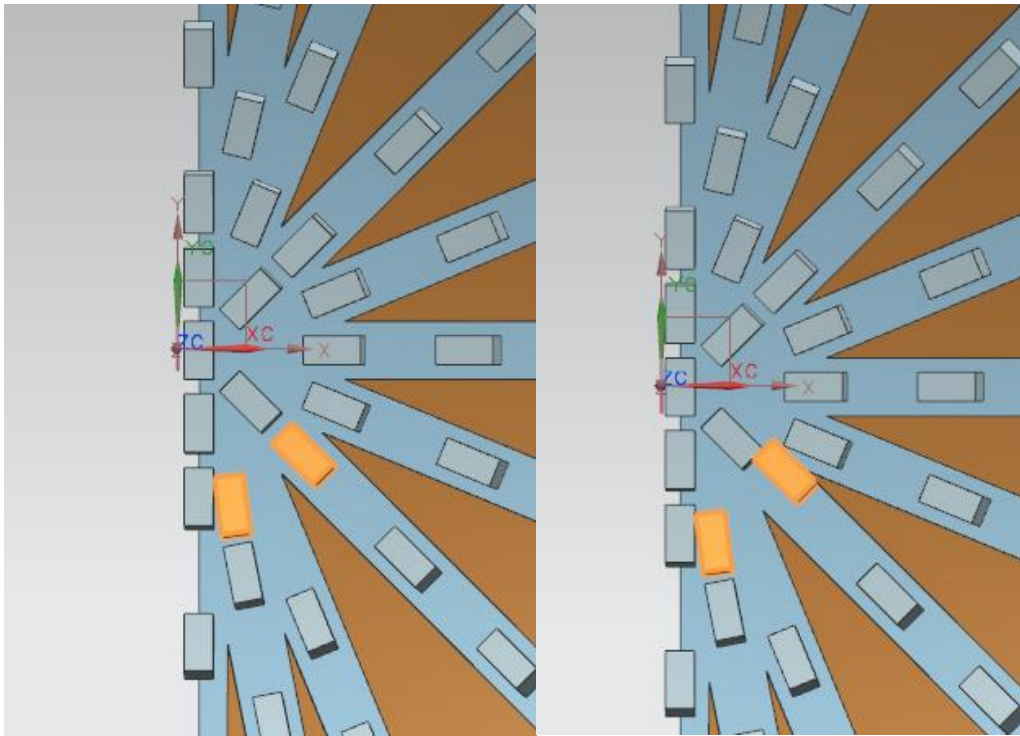


Abbildung 10 Umstellungen für Fahrweg 11 auf Fahrweg 12

Nun könnte Nr. 1 (links) wieder in seine ursprüngliche Position gestellt werden. Da dieser jedoch gleich wieder umgestellt werden muss, kann er, wie in Abbildung 10 verdeutlicht wurde, sofort an die Position um 0,5 Meter parallel zur Ursprünglichen Position versetzt werden. Nr. 2 (rechts) wird identisch dazu in die andere Richtung verschoben.

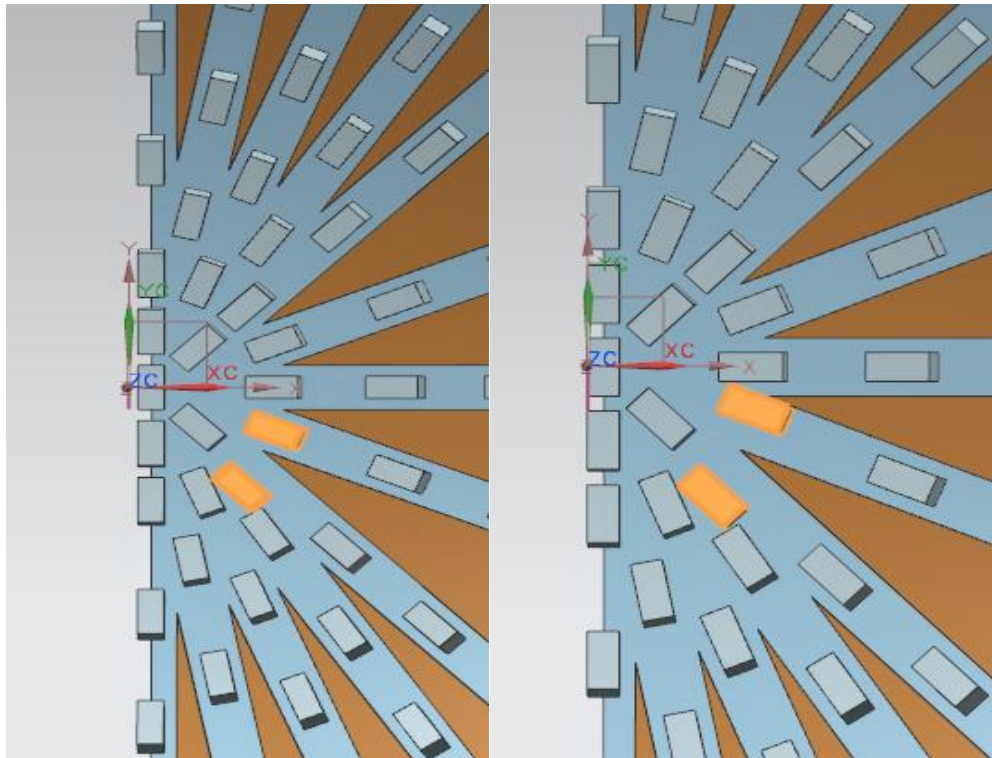


Abbildung 11 Umstellung von Fahrweg 13 auf Fahrweg 14

Hier bleibt wieder keine andere Wahl als sowohl Nr. 1 (links) als auch Nr. 2 (rechts) zur Seite zu schieben (siehe Abbildung 11). Dadurch wird der notwendige Platz erreicht. Nach Beendigung von Fahrweg 14, kann Nr.1 (links) wieder an seinen normalen Platz gestellt werden. Nr. 2 (rechts) dagegen kann direkt von seiner zugehörigen Position nach links verschoben werden um den notwendigen Platz für den nächsten Fahrweg zu schaffen.

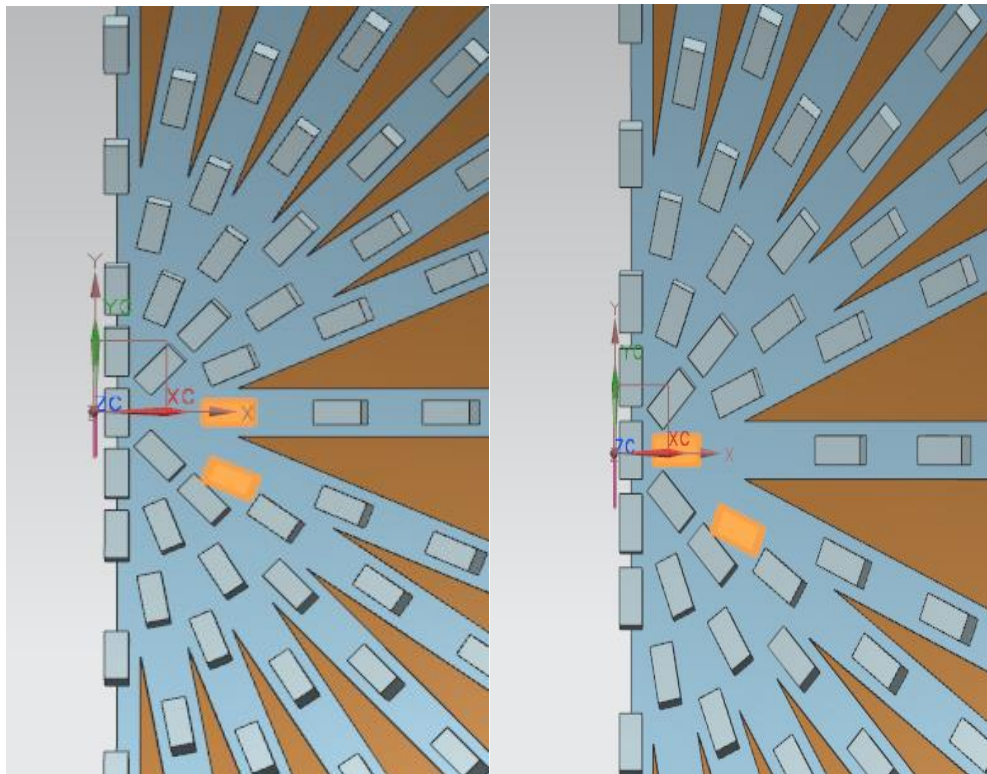


Abbildung 12 Umstellung von Fahrweg 15 auf Fahrweg 16

Nun kann der letzte fehlende Stützhalter in die Mitte miteingebracht werden. Wie in Abbildung 12 erkennbar ist, wird der untere Stützhalter nur verschoben, der obere jedoch in die Mitte verlagert. Bevor dieser entstehende Fehlplatz wieder besetzt wird, können beide Fahrwege abgefahren werden. Es müsste nur noch 1 weiterer Stützhalter verschoben werden und so spart man sich eine unnötige Umstellung.

Die Stützhalter in der Mitte wurden erst zu diesem Zeitpunkt eingebracht, da sie ansonsten schon früher zu Kollisionen geführt hätten. In den behandelten Fahrwegen dieses Kapitels, mussten die Stützhalter nun verschoben werden und damit können diese sofort eingebracht werden. Dies ist der optimalste Weg der Einbringung.

Es mussten in diesem Kapitel 13 Umstellungen durchgeführt werden.

5.3 Fahrweg 18 bis 33

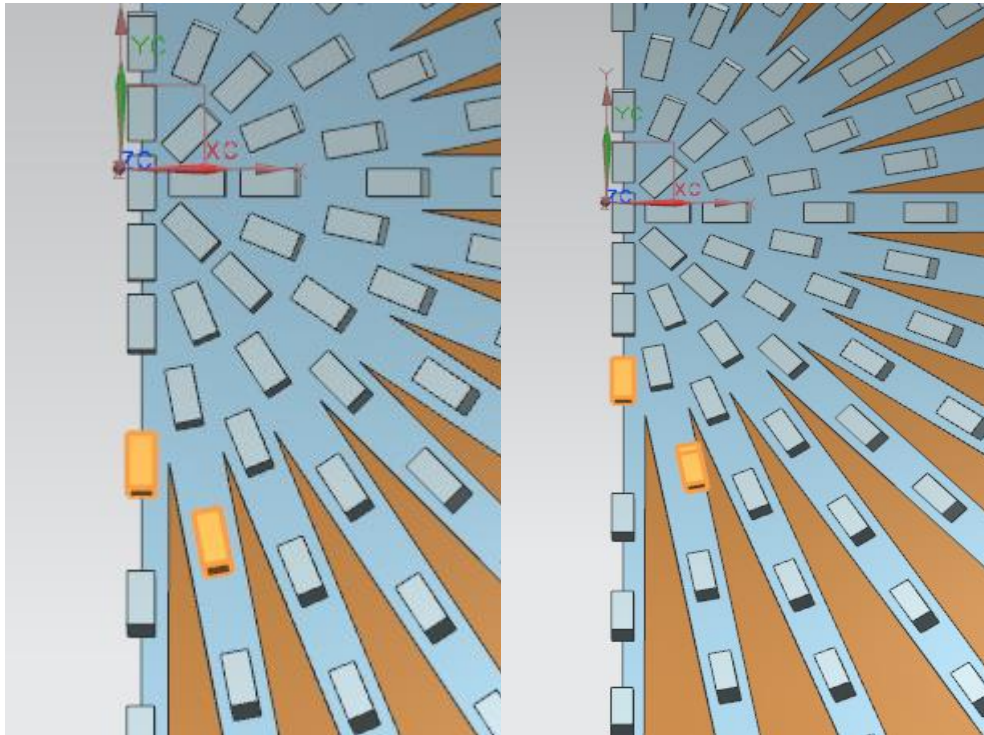


Abbildung 13 Umstellung von Fahrweg 17 auf Fahrweg 18

Wie im linken Bereich der Abbildung 13 erkennbar ist, beinhaltet der Fahrweg nun zwei Stützkörper welche im Weg der Fräsbetoniereinheit stehen. In diesem Fall bleibt keine andere Wahl, als die Stützhalter umzustellen und bei Beendigung von, in diesem Beispiel, Fahrweg 18, diese wieder in ihre vorherige Position zu bringen. Dies ist im rechten Bereich der Abbildung 13 verdeutlicht.

Bei der Umstellung kann Nr. 1 (links), in Abbildung 13 erkennbar, weiter nach vorne verschoben werden. Nr. 2 (rechts) muss folgend nur noch zur Seite versetzt werden und damit ist der Fahrweg freigeräumt.

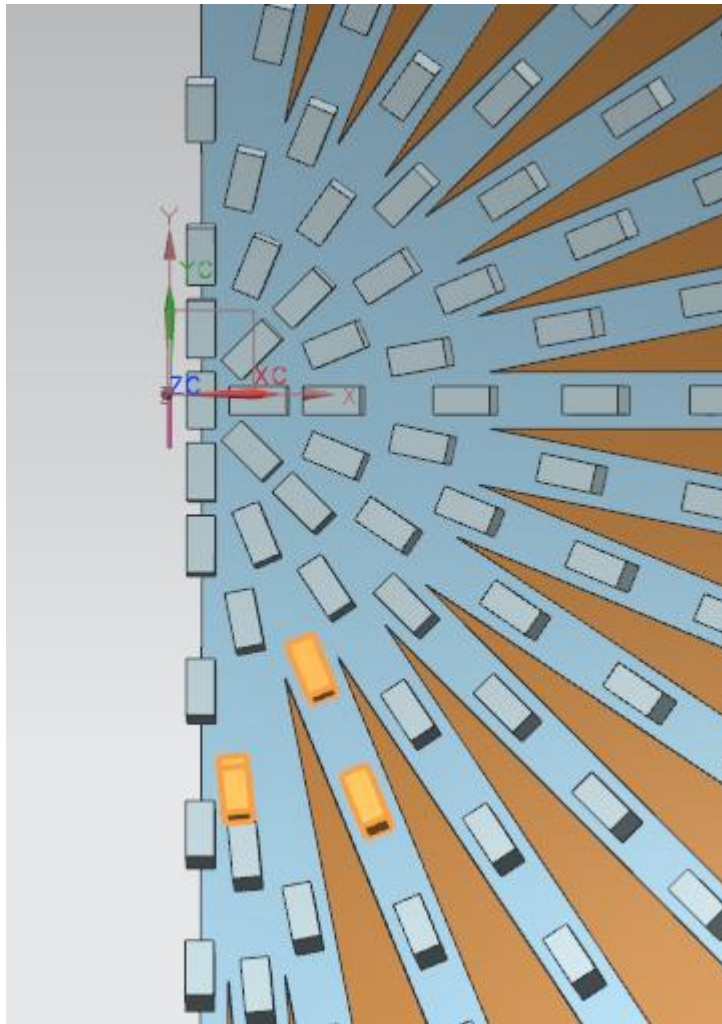


Abbildung 14 Nach Beendigung des Fahrweges 18

Anhand der Abbildung 14 wird die Möglichkeit des gleichen Verfahrens verdeutlicht. Dadurch, dass der vorherige Fahrweg freigeräumt ist, kann der linke Stützkörper (Abbildung 14) direkt weiter verschoben werden. Dies verringert eine, sonst, unnütze zusätzliche Umstellung. Dieses Verfahren wird auf alle weiteren Fahrwege übertragen, da bei jedem folgenden Fahrweg nun drei Umstellungen geschehen.

Es mussten in diesem Kapitel 86 Umstellungen durchgeführt werden.

5.4 Fahrweg 34 bis 65

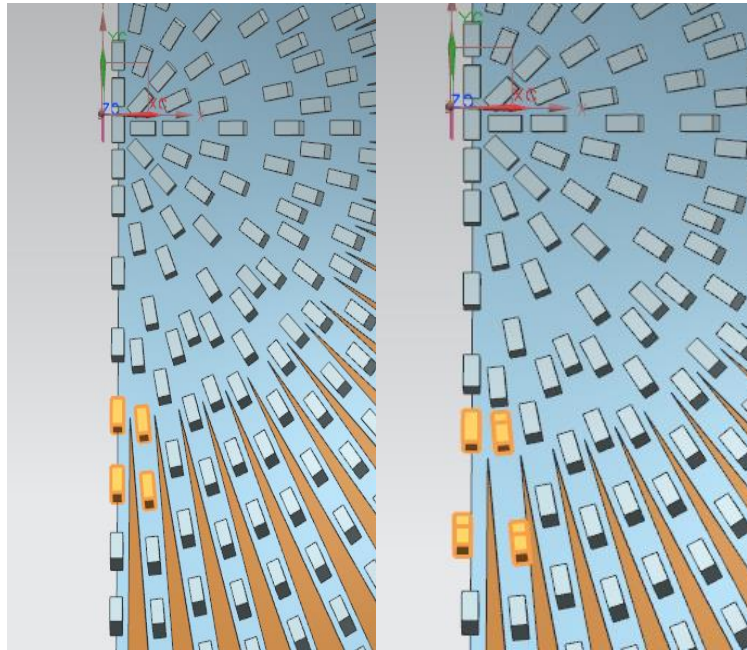


Abbildung 15 Umstellung Fahrweg 33 auf Fahrweg 34

Es müssen zunächst vier Stützhalter umgestellt werden. Dies ist in Abbildung 15 verdeutlicht.

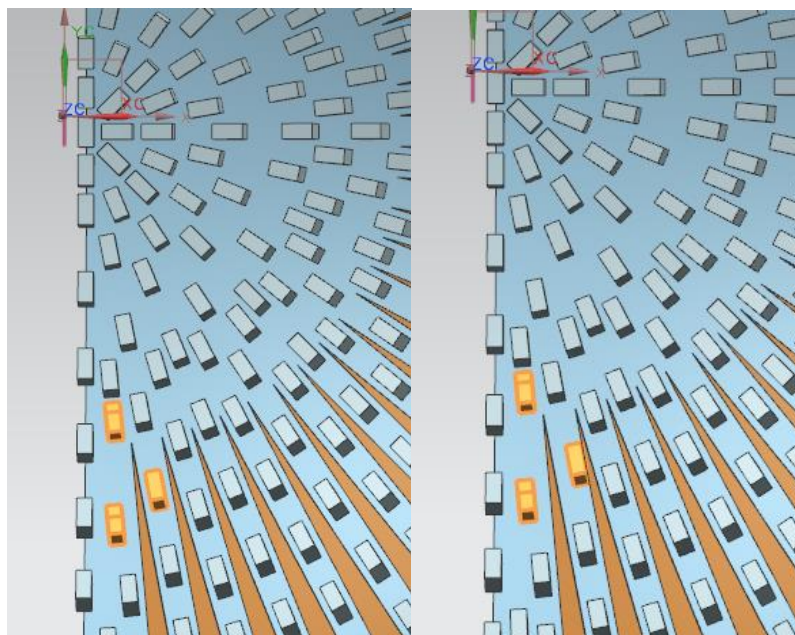


Abbildung 16 Umstellung von Fahrweg 35 auf Fahrweg 36

Wie in Abbildung 16, zu erkennen ist folgen daraufhin drei Halter die versetzt werden müssen.

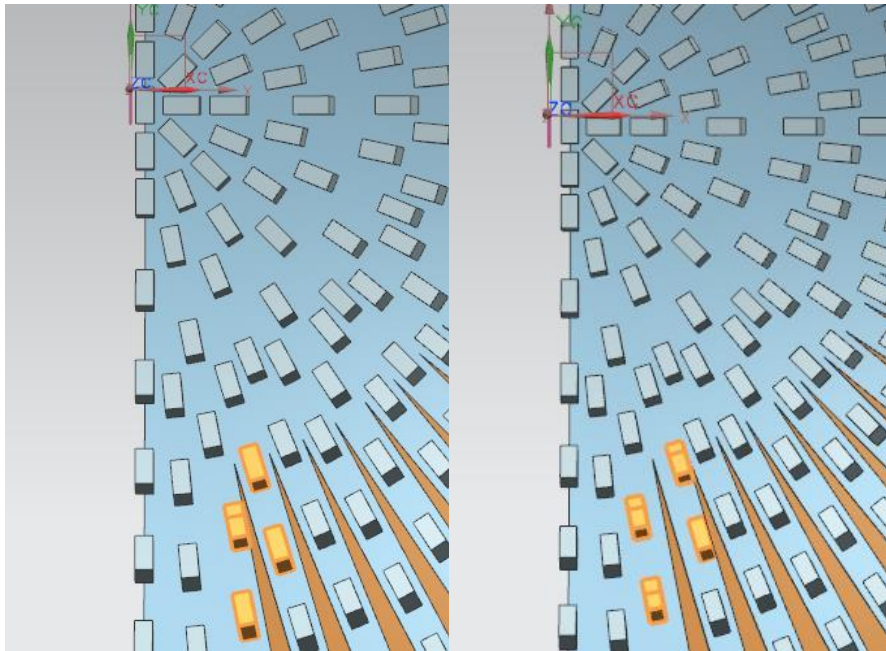


Abbildung 17 Umstellung von Fahrweg 37 auf Fahrweg 38

Daraufhin werden wieder vier Körper verstellt, was in Abbildung 17 erkennbar ist. Es wird stetig nach einer Symmetrie gesucht. Diese wurde bei Beendigung dieses Fahrweges erkannt.

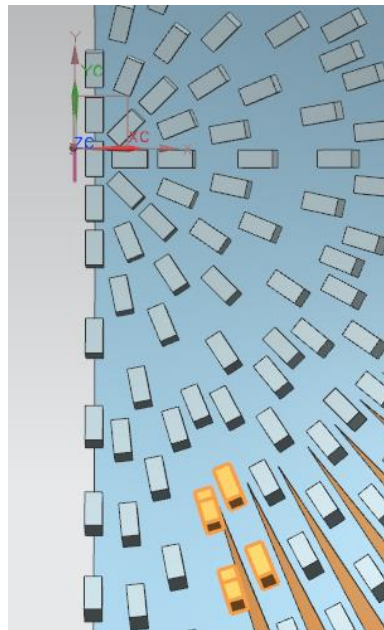


Abbildung 18 Nach Beendigung des Fahrweges 38

Wie in Abbildung 18 erkennbar ist, fehlt nur noch das Verschieben von vier Stützhaltern und dann beginnt ein Muster. Ab diesem Punkt wird das vorherige Verfahren identisch weitergeführt, quasi wie ein Schleifenprogramm.

Es mussten in diesem Kapitel 176 Umstellungen durchgeführt werden.

5.5 Fahrweg 66 bis 129

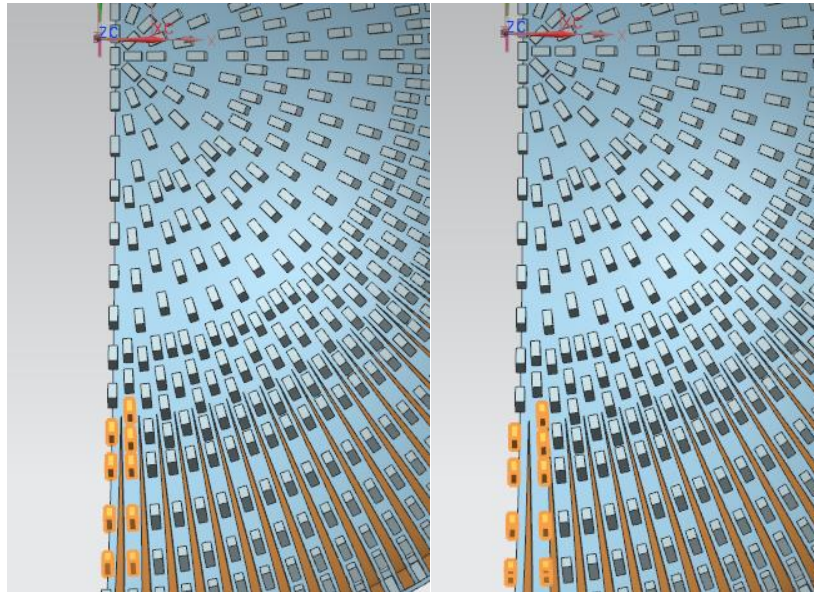


Abbildung 19 Umstellung von Fahrweg 65 auf Fahrweg 66

Zunächst muss, wie in Abbildung 19 verdeutlicht, neun Körper versetzt werden um der Fräsbetoniereinheit erfolgreich keine Kollisionsmöglichkeit zu bieten.

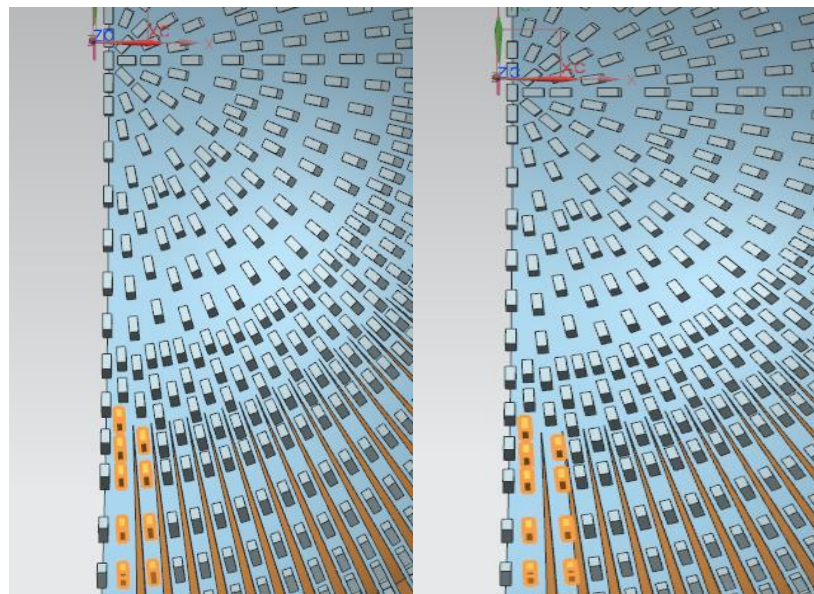


Abbildung 20 Umstellung von Fahrweg 67 auf Fahrweg 68

In Abbildung 20 kann eine Symmetrie erkannt werden. Bei der Beendigung des Fahrweges mit der Nr. 68, müssen wieder vier Stützhalter links vom Fahrweg und fünf rechts vom Fahrweg versetzt werden. Dies zieht sich nun bis zum Ende so symmetrisch durch. Ist Fahrweg 129 geschafft, so ist die Halbkugel freigegeben und sie steht erfolgreich alleine auf den eingebrachten Stützhaltern.

Es mussten in diesem Kapitel 864 Umstellungen durchgeführt werden.

6 Ergebnis

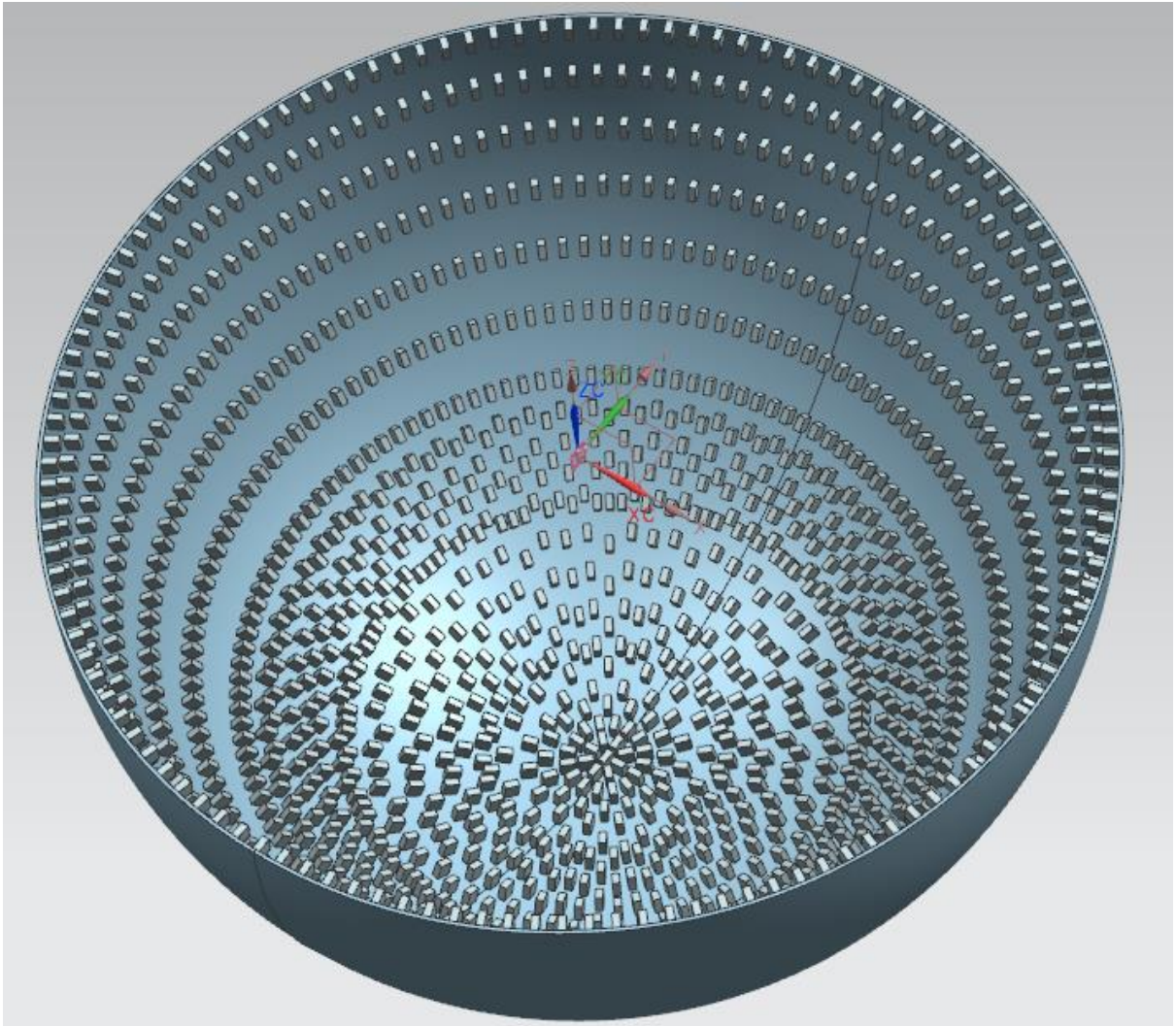


Abbildung 21 Gesamte Halbkugel mit Stützhaltern

In Abbildung 21 ist das Ergebnis verdeutlicht. Es sind dabei alle Stützhalter angebracht und jegliche Erde abgetragen. Der aufliegende Kolben steht nun quasi auf diesen Haltern. Dies kann nun leider nicht verdeutlicht werden aufgrund der kleinen Spaltbreite. Der Kolben würde alles herum verdecken.

Alles zusammengetragen kommt man nun auf das folgende Ergebnis von:

258 Fahrwegen

1806 Stützkörpern

2278 Umstellungen

7 Diskussion und Fazit

Nun werden noch die Ergebnisse kurz diskutiert und mögliche Vorgehen für Veränderung bzw. Verringerung dieser beschrieben.

Mit den Maßen von der hier angesetzten Fahrbreite, kann die Anzahl der Fahrwege nicht verringert werden. 258 ist schon die geringstmögliche Zahl und somit vollkommen in Rahmen der Projektarbeit und einer möglichen Ausführung.

Die Anzahl der Stützkörper kann rapide schwanken in Anbetracht dessen welches Material oder im generellen welche Stützhaltermöglichkeit verwendet werden. Auch eine genauere Betrachtung der Kraftverteilung durch die Schiefelage der Stützhalter können zu neuen Erkenntnissen führen und damit eventuell zu einer Verringerung diese. Dies müsste dann am besten mit einer FEM-Simulation bewältigt werden. Diese würde deutlicher aufzeigen wie sich die Spannung aufteilen und in jeweiligen Bereichen auftreten.

Für eine erfolgreiche Simulation muss jedoch der Baugrund zusätzlich genauer untersucht werden. Hauptsächlich eine genauere Bestimmung der Dichte (z.B.: durch verschiedene Verfahren z.B.: nach DIN 18125-2) des Bodens, sowie der Bodenschichten zu erhalten. Damit könnte ein genaueres Ergebnis erreicht werden.

Ein weiteres Problem der Stützhalter ist die exakte Befestigung dieser. Sie halten die Druckkraft aus und befestigen den Kolben in seiner Position, jedoch müssen diese Einbetoniert oder in einer anderen Art am Unterboden befestigt werden. Ansonsten würden sie bei einer Befüllung mit Wasser und folgender Erhebung des Kolbens ihren Halt verlieren und somit Richtung Zentrum „fallen“.

Um die Anzahl der Umstellungen reduzieren zu können, könnte mit verschiedenen Größen von Stützhaltern gearbeitet werden. Meistens sind es geringe Längen, welche die Stützhalter umgestellt werden. Würde eine zweite Variante betrachtet werden, so könnten die an den Entscheidenden Stellen angebracht werden und es würden sich einige Fahrwege ersparen. Dadurch könnte ein großer Kosten- und Zeitersparnis resultieren.

Anhang

Excel Berechnungsdatei:



Berechnungen.xlsx

NX-Format:



Konstruktionszeichnu
ng.prt

STP-Format:



Konstruktionszeichnu
ng.stp

DWG-Datei:



Konstruktionszeichnu
ng.dwg

CATPart-Format:



Konstruktionszeichnu
ng.CATPart

Literaturverzeichnis

- [1] Schmidt, H. H., Buchmaier, R. F. & Vogt-Breyer, C. (2017). *Grundlagen der Geotechnik* (5. Aufl.). Stuttgart: Springer Vieweg.
- [2] Knutsche, K. (2016). *Geotechnik* (2. Aufl.). Bensheim: Springer Vieweg.
- [3] Maybaum, G., Mieth, P., Oltmanns, W. & Vahland, R. (2011). *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau* (2. Aufl.). Vieweg + Teubner.
- [4] Boley, C. (Hrsg.) (2012). *Handbuch Geotechnik* (1. Aufl.). Vieweg + Teubner.
- [5] Heindel, M. & Richter, D. (2011). *Straßen- und Tiefbau* (11. Aufl.). Vieweg + Teubner.
- [6] Popp, M. (2013). *Stülpmembranspeicher Aufbau*. Abgerufen am 01.Juli.2017 von <http://www.poppware.de/Stuelpmembranspeicher/index.htm>
- [7] Elvermann GmbH. (2017). *Alu Spindelstuetze*. Abgerufen am 01.Juli.2017 von <http://elv2015.elvermann.de/Dateien/PG/00002346/Doc/AluSpindelstuetze.pdf>
- [8] Hellberg-Rode, G. (2004). *Bodendichte*. Abgerufen am 01.Juli.2017 von <http://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/01.htm>
- [9] Popp, M. (2013). *Patentskizzen des Stülpmembranspeichers*. Abgerufen am 01.Juli.2017 von http://www.poppware.de/Stuelpmembranspeicher/Patentskizzen_ueberarbeitet.pdf