TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Dissertation

Untersuchung thermo-mechanischer Spannungen in den Schüttungen und an Behälterwänden von Festbett-Wärmespeichern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der technischen Wissenschaften

von

Dipl.-Ing. Thomas MITTERLEHNER

1225643

[redacted]

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Kartnig

(Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, E307)

begutachtet von

Univ.-Prof. DI Dr. techn. Markus Haider
Technische Universität Wien
Institut für Energietechnik
und Thermodynamik

FH-Prof. PD DI Dr. techn. Martin Egger
Technische Universität Wien
Institut für Konstruktionswissenschaften
und Produktentwicklung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.
Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im April 2021

Thomas Mitterlehner

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Mein Dank geht an meine Frau Iris, die mir stets zur Seite stand und immer eine große Stütze war.

Auch meinen Eltern Anna und Thomas und meiner Schwester Julia möchte ich für die Ermöglichung des Maschinenbaustudiums und die ständige Unterstützung während meiner Zeit in Wien danken.

Nicht zuletzt möchte ich Prof. Dr. Georg Kartnig danken, der meine Dissertation betreute und stets für Fragen und Anregungen zur Verfügung stand. Auch die sehr gute Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Energietechnik und Thermodynamik unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Haider und dem Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung soll an dieser Stelle erwähnt sein. Ein herzlicher Dank gilt auch meinen Arbeitskollegen für diese schöne gemeinsame Zeit in Wien.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kurzfassung

Aufgabenstellung:

Erwärmungsvorgänge in Festbett-Wärmespeichern führen zu einer Ausdehnung des wärmespeichernden Mediums (Schüttgut). Diese Wärmeausdehnungen bewirken einen Spannungsanstieg in der Schüttung und zwischen Schüttung und Behälterwand. Das Ausmaß dieser Spannungszunahme (Pressung zwischen den Materialien) soll mit numerischen Simulationen ermittelt werden. Auch der Einfluss mehrerer thermischer Wechselbeanspruchungen – auch als „Thermal-Ratcheting-Phänomen“ bekannt – soll in Berechnungen untersucht werden. Bevor diese Berechnungen stattfinden, müssen die Materialkennwerte des zu verwendenden Schüttguts bestimmt werden. Abschließend folgen DEM-Simulationen mit unterschiedlichen Wärmespeicher-Geometrien.

Ergebnis:

Zur Darstellung der Erwärmungs- bzw. Abkühlvorgänge wurde ein DEM-Simulationsmodel in EDEM entworfen. Dieses Berechnungsmodell dient als Grundlage für die Untersuchung thermischer Wechselbeanspruchungen in Festbett-Wärmespeichern. Die Bestimmung der Materialkennwerte erfolgte über den Draw-Down-Versuch. Unter Berücksichtigung der Durchströmungsrichtung (vertikale und horizontale Durchströmung) werden unterschiedliche Wärmespeicher-Geometrien untersucht, um möglichst günstige Spannungszustände in der Schüttung bzw. in den Wänden des Wärmespeichers zu erzielen. Unter Berücksichtigung der thermodynamischen Funktionalität und der Baukosten kann aus festigkeitstechnischer Sicht eine Lösung mit geneigten Außenwänden im Bereich von 10° bis 20° für den vertikal bzw. horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeicher abgeleitet werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abstract

Scope of work:

Heating processes in packed bed thermal energy storages lead to an expansion of the heat storing medium (bulk material). These thermal expansions cause an increase in stress in the bulk material and between the bulk material and the energy storage wall. The magnitude of these stress increases (compression between materials) shall be determined with numerical simulations. The influence of several thermal alternating stresses – also known as "thermal ratcheting phenomenon" – shall also be investigated by calculations. Before these calculations are performed, the material characteristics of the bulk material to be used must be determined. Finally, DEM simulations with different energy storage geometries are performed.

Result:

A DEM simulation model was designed in EDEM to represent the heating and cooling processes. This calculation model serves as a basis for the investigation of thermal alternating stresses in packed bed energy storages. The material properties were determined by using the draw-down test. Depending on the flow direction (vertical and horizontal flow), different heat storage geometries can be analysed in order to achieve the most favourable stress conditions in the bulk material or in the walls of the energy storage. By comparing these thermo-mechanical stresses with the permissible stresses of the bulk material and the energy storage wall, a statement about possible damages can be made. Considering thermodynamic functionality and construction costs, a solution with inclined outer walls in the range of 10° to 20° can be derived for the vertically or horizontally packed bed thermal energy storage from a mechanical point of view.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Publikation im Zuge dieser Dissertation

Im Rahmen dieser Dissertation wurden folgende Publikationen veröffentlicht:

- Mitterlehner, T.; Kartnig, G.; Haider, M.: *DEM-Modellierung von Be- und Entladezyklen in Festbett-Wärmespeichern, solution day - „update“ Logistikwerkstatt Graz 2019*. Bd. „solution day-"update“. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2019 — ISBN 978-3-85125-673-4

- Mitterlehner, T.; Kartnig, G.; Haider, M.: *Analysis of the thermal ratcheting phenomenon in packed-bed thermal energy storage using Discrete Element Method, MHCL 2019*. Bd. XXIII International conference on material handling, constructions and logistics. Wien, 2019 — ISBN 978-86-6060-020-4

- Mitterlehner, T.; Kartnig, G.; Haider, M.: Effiziente Festbett-Wärmespeicher - Analyse von thermischen Spannungen mit Hilfe von DEM-Simulationen. In: *Technische Logistik* Bd. 1 (2020), Nr. 2, S. 42–44

- Mitterlehner, T.; Kartnig, G.; Haider, M.: Analysis of the thermal ratcheting phenomenon in packed-bed thermal energy storage using Discrete Element Method. In: *FME Transactions* Bd. 48 (2020), Nr. 2, S. 427–431

- Mitterlehner, T.; Kartnig, G.; Haider, M.: Schüttgut-Kalibrierung für die Berechnung thermo-mechanischer Belastungen in Festbett-Wärmespeichern. In: *16. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V., WGTL Hamburg*. Bd. 16. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. Hamburg, 2020 — ISBN 978-3-00-066746-6, S. 171–179

- Mitterlehner, T.; Kartnig, G.; Haider, M.: Schüttgut-Kalibrierung für die Berechnung thermo-mechanischer Belastungen in Festbett-Wärmespeichern. In: *Logistics Journal: Proceedings 2020*. Bd. Nr. 12, 2020

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Motivation 1
1.2 Stand der Wissenschaft - Forschungslücke 2
1.3 Aufbau der Arbeit 4
2 Forschungsfragen 6
3 Grundlagen zu thermischen Wärmespeichern 7
3.1 Einteilung und Aufbau 7
3.2 Beladung und Entladung eines Wärmespeichers 9
3.3 Speichervarianten 10
3.4 Fließschema des Gesamtsystems 12
3.5 Spannungsberechnung in der Behälterwand 13
4 Grundlagen zur Schüttguttechnik 15
4.1 Definition von Schüttgut 15
4.2 Schüttguteigenschaften in einem Bunker 16
5 Analytische Spannungsberechnung 19
5.1 Flüssigkeiten – hydrostatischer Druck 19
5.2 Schüttgüter – Schüttdruck nach Janssen 19
5.3 Thermisch induzierte Spannungen 22
6 Grundlagen zur Diskrete-Elemente-Methode 23
6.1 Allgemeines 23
6.2 Funktionsweise und Berechnungsprinzip 24
6.3 Hertz-Mindlin-Kontaktmodell 25
6.4 Berechnung der Kontaktkräfte 26

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.5 Zeitschritt der Simulation 27
7 Entwickeltes DEM-Modell zur Berechnung thermomechanischer Spannungen 28
7.1 Ausgangszustand vor thermischer Belastung 29
7.2 Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge 31
7.3 Ausgabe der Ergebnisse 34
8 Verifikation und Validierung des DEM-Berechnungsmodells 37
8.1 Verifikation des DEM-Berechnungsmodells 37
8.2 Validierung des DEM-Berechnungsmodells 40
8.2.1 Eindimensionale Validierung 41
8.2.2 Mehrdimensionale Validierung 42
9 Bestimmung der Schüttgut-Materialkennwerte 45
9.1 Materialkennwerte aus der Literatur 46
9.2 Rutsch- und Rollversuch 47
9.3 Draw-Down-Versuch 48
9.4 Schüttgut-Kalibrierung 52
9.5 Druckversuche zur Ermittlung des Zeitschritts und des E-Moduls 56
9.6 Anpassung des Zeitschritts 57
9.7 Anpassung des Elastizitätsmoduls 59
9.8 Setzverhalten des Schotterbetts 60
9.9 Zusammenfassung der Ergebnisse 61
10 Vereinfachtes Simulationsmodell für den Wärmespeicher 64
10.1 Partikelreduktion durch vergrößerte Partikel 65
10.2 Partikelreduktion durch Nutzung von Symmetrien 67
10.3 Partikelreduktion durch Aufbringen von Ballastkörpern 70
10.4 Einfluss des Elastizitätsmoduls der Partikel 72
11 Parameterstudie unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien 73
11.1 Vertikal durchströmte Wärmespeicher mit Wandneigungen 77

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.1.1 VW00 - Vertikaler WS 78
11.1.2 VW05 - Vertikaler WS 5° Wandneigung 79
11.1.3 VW10 - Vertikaler WS 10° Wandneigung 80
11.1.4 VW15 - Vertikaler WS 15° Wandneigung 81
11.1.5 VW20 - Vertikaler WS 20° Wandneigung 82
11.1.6 VW25 - Vertikaler WS 25° Wandneigung 83
11.1.7 VW30 - Vertikaler WS 30° Wandneigung 84
11.1.8 VW35 - Vertikaler WS 35° Wandneigung 85
11.2 Vertikal durchströmte Wärmespeicher Wandneigungen, Innenkegel 86
11.2.1 VIW00 - Vertikaler WS mit Innenkegel 87
11.2.2 VIW05 - Vertikaler WS, Innenkegel 5° Wandneigung 88
11.2.3 VIW10 - Vertikaler WS Innenkegel 10° Wandneigung 89
11.2.4 VIW15 - Vertikaler WS Innenkegel 15° Wandneigung 90
11.2.5 VIW20 - Vertikaler WS Innenkegel 20° Wandneigung 91
11.2.6 VIW25 - Vertikaler WS Innenkegel 25° Wandneigung 92
11.2.7 VIW30 - Vertikaler WS Innenkegel 30° Wandneigung 93
11.2.8 VIW35 - Vertikaler WS Innenkegel 35° Wandneigung 94
11.3 Vertikal durchströmte Wärmespeicher mit Innenkegelneigungen 95
11.3.1 VII20 - Vertikaler WS 20° Innenkegelneigung 95
11.3.2 VII30 - Vertikaler WS 30° Innenkegelneigung 96
11.3.3 VII40 - Vertikaler WS 40° Innenkegelneigung 97
11.3.4 VII50 - Vertikaler WS 50° Innenkegelneigung 98
11.3.5 VII60 - Vertikaler WS 60° Innenkegelneigung 99
11.3.6 VII70 - Vertikaler WS 70° Innenkegelneigung 100
11.3.7 VII80 - Vertikaler WS 80° Innenkegelneigung 101
11.3.8 VII90 - Vertikaler WS 90° Innenkegelneigung 102
11.4 Horizontal durchströmter Wärmespeicher 103

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.4.1 H05 - Horizontaler WS 5° Wandneigung 104
11.4.2 H10 - Horizontaler WS 10° Wandneigung 107
11.4.3 H15 - Horizontaler WS 15° Wandneigung 110
11.4.4 H20 - Horizontaler WS 20° Wandneigung 113
12 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse 116
12.1 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse vertikaler WS 116
12.2 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse horizontaler WS 120
13 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Arbeiten 122
14 Resümee und Ausblick 125
15 Literaturverzeichnis 130
16 Abbildungsverzeichnis 137
17 Formelverzeichnis 143
18 Tabellenverzeichnis 145
19 Lebenslauf 147

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Nomenklatur

Abkürzungen

AoR	Angle of repose
DDV	Draw-Down-Versuch
DEM	Diskrete-Elemente-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
IET	Institut für Energietechnik und Thermodynamik
IKP	Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung
MW	Messwert
NEFI	New Energy for Industry
RK	Rundkorn
TU	Technische Universität
WS	Wärmespeicher

Lateinische Formelzeichen

A	Querschnitt des Behälters	m²
A_W	Beanspruchter Querschnitt	m²
C_1	Zuschlag für Wanddickenunterschreitung	m
C_2	Zuschlag für Abnutzungen	m
D	Durchmesser des Wärmespeichers	m
d_i	Innendurchmesser	m
D_a	Außendurchmesser	m

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

d_m	Mittlerer Durchmesser	m
D_p	Partikeldurchmesser	m
$D_{p(T)}$	Veränderlicher Partikeldurchmesser	m
$D_{p_{(\Delta T_{max})}}$	Maximaler Partikeldurchmesser	m
D_{p_x}	Vergrößerter Partikeldurchmesser	m
dz	Höhe von einem Volumenelement	m
E	Elastizitätsmodul	Pa
F	Kraft	N
F_n	Normale Kraftkomponente	N
F_t	Tangentiale Kraftkomponente	N
F_W	Thermisch induzierte Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
G	Schubmodul	Pa
H	Höhe des Wärmespeichers	m
h_B	Höhe für die Berechnung der Ballastschicht	m
k	Partikelsteifigkeit	N/m
k_n	Normalsteifigkeit	N/m
k_t	Tangentialsteifigkeit	N/m
$\dot{m}$	Massefluss	kg/s
$m_{Ballast}$	Gewicht der Ballastschicht	kg
m_p	Partikelmasse	kg
m_P	Gesamtmasse der Partikel	kg
m_S	Schüttgutmasse	kg
n	Anzahl der aufgeschütteten Schichten	-
n_P	Anzahl der Partikel	-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

n_{sym}	Anteil des Segments	-
p_i	Innendruck	Pa
p_0	Umgebungsdruck	Pa
$p_{(z)}$	Hydrostatischer Druck	Pa
$\vec{r}$	Beobachtungsradius	m
R_p	Partikelradius	m
$R_{p0,2}$	Festigkeitswert	Pa
s	Wandstärke	m
S	Sicherheitswert	-
t_{krit}	Kritischer Zeitschritt	s
t_n	Belade- und Entladebeginn	s
t_R	Rayleigh-Zeit	s
U	Umfang des Behälters	m
v	Poissonzahl	-
v_A	Ausnutzungsfaktor für Spannung	-
$V_{Hohlraum}$	Hohlraumvolumen zwischen den Partikeln	m³
V_p	Partikelvolumen	m³
V_P	Gesamtvolumen der Partikel	m³
V_{p_x}	Vergrößertes Partikelvolumen	m³
$v_{rel} \cdot n_{ij}$	Normale Relativgeschwindigkeit	m/s
$v_{rel} \cdot t_{ij}$	Tangentiale Relativgeschwindigkeit	m/s
v_G	Geschwindigkeit der Größenänderung	1/s
V_S	Schüttgutvolumen	m³
x	Vergrößerungsfaktor	-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

z	Höhe von der Oberkante einer Flüssigkeit/Schüttung nach unten	m

Griechische Formelzeichen

α	Scherwinkel	°
α_P	Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
β	Böschungswinkel	°
γ_n	Viskoelast. Normaldämpfungskonstante	kg/s
γ_t	Viskoelast. Tangentialdämpfungskonstante	kg/s
δn_{ij}	Normale Überlappung zweier Partikel	m
δt_{ij}	Tangentialer Verschiebungsvektor zweier Partikel	m
Δm_K	Änderung der Masse (DDV)	kg
Δs	Setzung des Schotterbetts (Druckversuch)	m
Δt	Zeitschritt	s
Δt_K	Änderung der Zeit (DDV)	s
ΔT	Temperaturänderung	K
ΔT_{max}	Maximale Temperaturänderung	K
ΔV_p	Änderung des Partikelvolumens	m³
ε	Porosität	-
ε_G	Änderung des Partikelvolumens im Verhältnis zum Schüttvolumen	%
ε_{mech}	Mechanische Verformung	-
ε_{th}	Thermische Ausdehnung	-
λ	Horizontallastverhältnis	-
μ	Coulomb'scher Reibungskoeffizient	-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

μ_H	Haftreibungskoeffizient	-
μ_R	Rollreibungskoeffizient	-
φ_R	Reibwinkel	°
φ_x	Wandreibungswinkel	°
$\psi_{G(\Delta t)}$	Größenänderungsfaktor	-
ρ_{Fl}	Flüssigkeitsdichte	kg/m³
ρ_p	Feststoffdichte des Partikels	kg/m³
ρ_S	Schüttgutdichte	kg/m³
σ_a	Axialspannung in der Behälterwand	Pa
$\sigma_{h(z)}$	Horizontalspannung in der Behälterwand	Pa
$\sigma_{h_{sym}}$	Horizontalspannung in der Behälterwand bezogen auf den Anteil des Segments	Pa
σ_n	Normalspannung	Pa
σ_t	Tangentialspannung	Pa
$\sigma_{v(z)}$	Vertikalspannung	Pa
$d\sigma_v$	Änderung der Vertikalspannung	Pa
σ_w	Wärmespannung	Pa
τ_w	Wandschubspannung	Pa
ω	Winkel des Segments	°

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Klimaschutz und Energieeffizienz spielen in Zeiten des Klimawandels [47] eine bedeutende Rolle. Energieeffizienz ist nicht nur in Gebäuden oder privaten Haushalten von Bedeutung, sondern auch in der Industrie. Abwärme fällt in nahezu allen industriellen Prozessen an (z.B. Abgase im Zuge von Herstellungsprozessen). Diese wärmeführenden Abgase tragen nach den Herstellungsprozessen einen zum Teil erheblichen Anteil der Wärme noch in sich. Diese kann für weitere Anwendungen genutzt werden – sonst geht sie als Abwärme verloren. Die Abwärme kann entweder im selben Betrieb für einen weiteren Prozess verwendet werden oder an einen externen Abnehmer weitergereicht werden.

Im Zuge eines New Energy for Industry (NEFI) Projektes zur Verbesserung der Energieeffizienz soll die Möglichkeit der Nutzung von Abwärme eines Zementwerks ① mit einer Temperatur von 300-400 °C über eine industrielle Abwärme-Auskopplung genutzt werden (siehe Abbildung 1-1). Bei diesen hohen Temperaturen ist eine konventionelle Wärmespeicherung mit Wasser nicht mehr möglich. Daher soll eine Speicherung in Form eines luftdurchströmten Festbettregenerator-Wärmespeichers ② implementiert werden. Die gespeicherte Wärme soll benachbarte Betriebe mit Prozessenergie ③ für Warmwasseraufbereitung, Herstellungsprozesse etc. versorgen. Aus diesem Grund wurde 2018 an der Technischen Universität Wien ein Gemeinschaftsprojekt vom Institut für Energietechnik und Thermodynamik (IET) und dem Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung (IKP) gestartet.

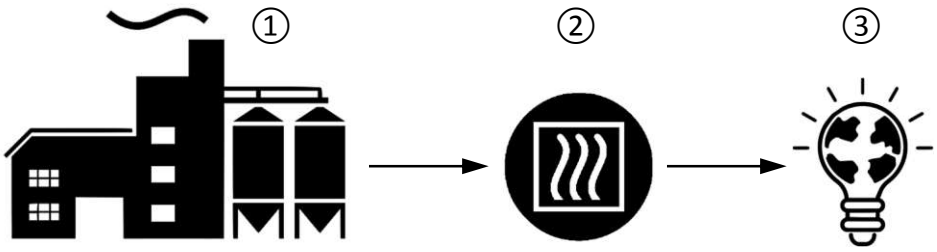


Abbildung 1-1 ① Zementwerk mit Abwärme - ② Festbett-Wärmespeicher und ③ Prozessenergie

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1.2 Stand der Wissenschaft - Forschungslücke

Festbett-Wärmespeicher spielen in der Energietechnik eine wichtige Rolle. Vereinfacht betrachtet handelt es sich dabei um Behälter, die mit Schüttgut (Schotter, Kies etc.) gefüllt sind. Das Schüttgut dient dabei als wärmespeicherndes Medium. Bei der Energieaufnahme wird der Inhalt des Festbett-Wärmespeichers mit heißer Luft durchströmt. Beim Erwärmungsvorgang kommt es zu einer Ausdehnung des wärmespeichernden Mediums (Schüttgut). Frühere Ergebnisse zeigten, dass steigende Kontaktkräfte in der Schüttung und ein damit verbundener Druckanstieg auf die Wärmespeicherwände [3], [35], [72] zu Schädigungen führen können [20], [52], [53], [58]. In diesen Arbeiten handelte es sich aber um kleinere Wärmespeicher-Anlagen mit vergleichsweise wenig Partikeln. Genauere Untersuchungen wurden im Jahre 1996 gestartet, als es in den USA lediglich durch tageszeitliche Temperaturänderungen zur Schädigung eines Silos kam [7], [19] (siehe Abbildung 1-2). Nur zwei Wochen nach vollständiger Inbetriebnahme zerbrach das 25 m Durchmesser Silo [8].

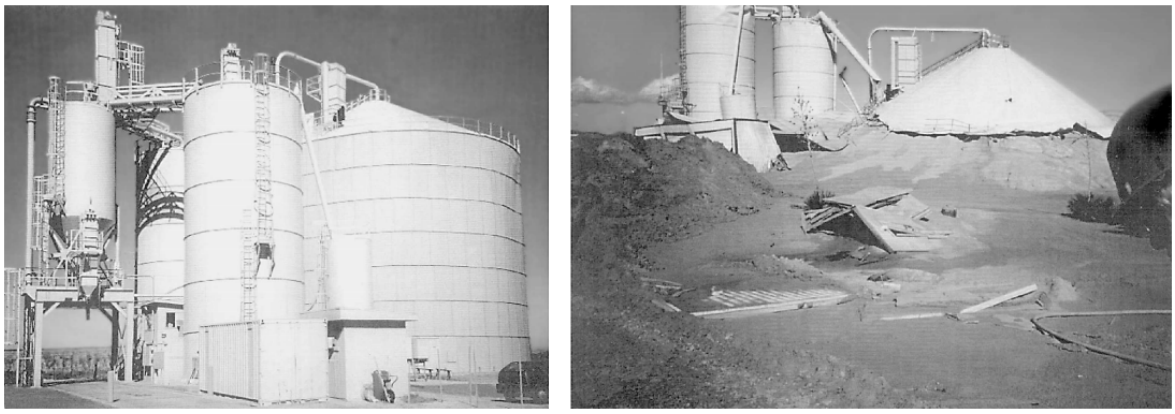


Abbildung 1-2 Geborstenes 9000 Tonnen Stahl-Silo,
Ursache: tageszeitliche Temperaturschwankungen [8]

Gegenwärtig gibt es keine analytische Berechnungsmethode, die das Ausmaß des Druckanstiegs abschätzen kann. Auch Messungen an realen Wärmespeicher-Geometrien stellen sich als schwierig heraus. Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf der Erstellung eines DEM-Berechnungsmodells, mit dem sich Wärmeausdehnungen des Schüttgutes und ein damit verbundener Spannungsanstieg in der Schüttung bzw. Behälterwand für vorliegende Wärmespeicher-Geometrien ermitteln lassen (Forschungsfrage 1). Das entworfene DEM-Modell soll als Grundlage für die Untersuchung thermischer Wechselbeanspruchungen – auch als „Thermal-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ratcheting-Phänomen“ bekannt – dienen. Mehrmaliges Erwärmen und Abkühlen führt zu einer Verdichtung der Schüttung [10–12], [18], [63]. Um die Gültig- bzw. Richtigkeit dieses in EDEM erstellten DEM-Berechnungsmodells zu überprüfen, muss eine passende Verifikation und Validierung erfolgen (Forschungsfrage 2).

Diese Spannungsanstiege zufolge der Wärmeausdehnung des Schüttgutes können zu folgenden unerwünschten Effekten führen:

- Die Kontaktkräfte zwischen den einzelnen Partikeln steigen mit zunehmender Temperatur. Dabei kann es zu einer Schädigung der Schüttung kommen (siehe Abbildung 1-3, links).
- Die Kontaktkräfte zwischen den Partikeln und der Behälterwand des Wärmespeichers steigen ebenfalls mit zunehmender Temperatur. Dabei kann eine Schädigung der Behälterwand auftreten (siehe Abbildung 1-3, rechts).

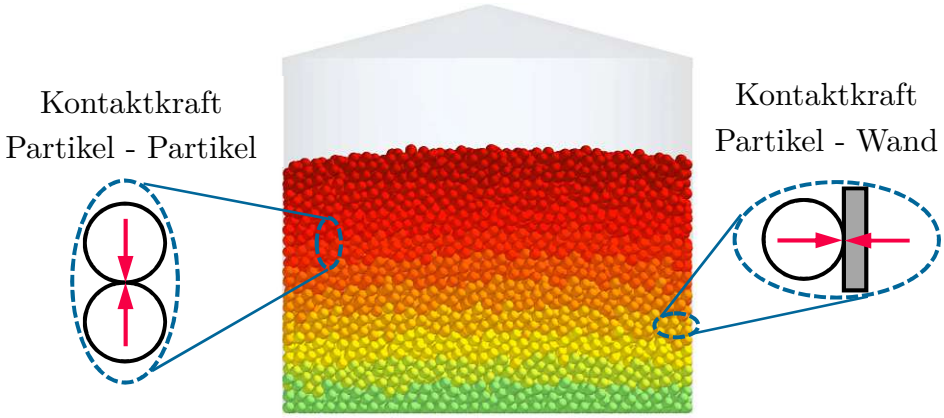


Abbildung 1-3 Kontaktkraft Partikel-Partikel bzw. Partikel-Wand in einem starren Festbett-Wärmespeicher

Genaue Vorhersagen zum Spannungsanstieg sind jedoch nur möglich, wenn die Werte der Eingangsparameter sorgfältig ausgewählt werden. Damit das DEM-Berechnungsmodell angewendet werden kann, müssen die Materialkennwerte für das zu verwendende Schüttgut zunächst bekannt sein. Aus anderen Arbeiten sind die Materialkennwerte der Schüttung von beispielsweise Keramik oder Schlacke bereits bekannt [20], [38]. In diesem Projekt soll eine Schotter-Schüttung zur Anwendung kommen. Dazu ist ein vollständiger Prozess für die Ermittlung sämtlicher Materialkennwerte, die für die Spannungsberechnung in der DEM-Simulation erforderlich sind, entscheidend (Forschungsfrage 3).

Eine weitere Herausforderung stellen die durchaus großen Wärmespeicher-Geometrien dar. Damit verbunden ergibt sich im DEM-Berechnungsmodell eine

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

hohe Zahl an zu verwendenden Partikeln. Diese hohe Zahl an Partikel würde jedoch jeden Rahmen einer mit realistischen Rechenzeiten durchzuführenden Simulation sprengen. Aus diesem Grund ist es notwendig verschiedene Ansätze mit Vereinfachungsmethoden zu betrachten (Forschungsfrage 4).

Mit diesen vorangegangenen Schritten soll schließlich untersucht werden mit welchen Spannungsanstiegen an der Wärmespeicher-Geometrie zu rechnen ist. Unter Berücksichtigung der Durchströmungsrichtung (vertikale/horizontale Durchströmung) des Festbett-Wärmespeichers sollen unterschiedliche Wärmespeicher-Geometrien untersucht und verglichen werden. Das Ziel ist, möglichst günstige Spannungszustände in und an den Wänden des Wärmespeichers zu erreichen (Forschungsfrage 5 und 6).

Aus dem derzeitigen Stand der Wissenschaft und den aufgezeigten Forschungslücken lassen sich insgesamt sechs Forschungsfragen ableiten. Einen Überblick dazu liefert die Grafik aus Abbildung 1-4. Die ausformulierten Forschungsfragen finden sich in Kapitel 2.

1.3 Aufbau der Arbeit

Abgeleitet von dieser Problemstellung und dem Stand der Wissenschaft ergibt sich folgender zeitliche und logische Ablauf der Kernthemen, die in dieser Arbeit in Form von Forschungsfragen (siehe Kapitel 2) betrachtet werden (Abbildung 1-4).

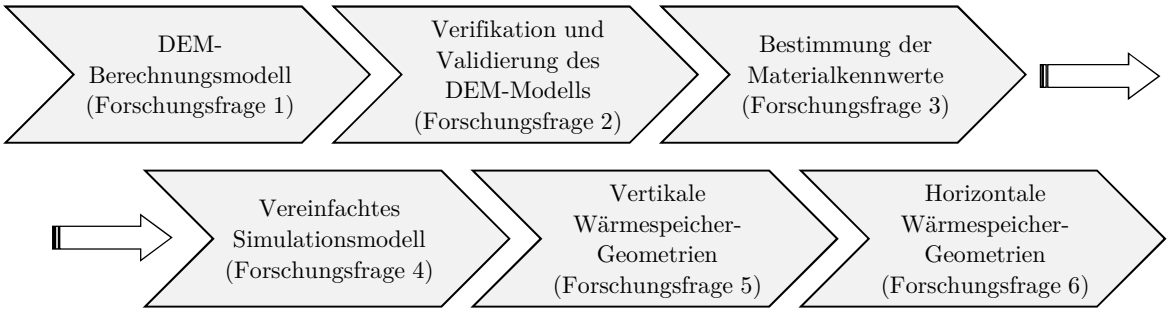


Abbildung 1-4 Kernthemen der Arbeit

Kapitel 1 widmet sich einleitend der Motivation und der Forschungslücke, woraus sich die Forschungsfragen in Kapitel 2 ableiten. Die Grundlagen zu thermischen Wärmespeichern, zur Schüttguttechnik und zur Diskreten-Elemente-Methode werden in Kapitel 3, 4 und 6 behandelt. Die analytische Spannungsberechnung wird in Kapitel 5 und das DEM-Modell zur Berechnung thermo-mechanischer

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Spannungen in Kapitel 7 betrachtet. Kapitel 8 beschäftigt sich mit der Verifikation/Validierung des DEM-Berechnungsmodells und Kapitel 10 mit einem vereinfachten Simulationsmodell für den Wärmespeicher. In Kapitel 9 werden die Schüttgut-Materialkennwerte bestimmt, die in Kapitel 11 (Parameterstudie unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien) benötigt werden. Schließlich werden die Ergebnisse in den Kapiteln 12 bis 14 zusammengefasst.

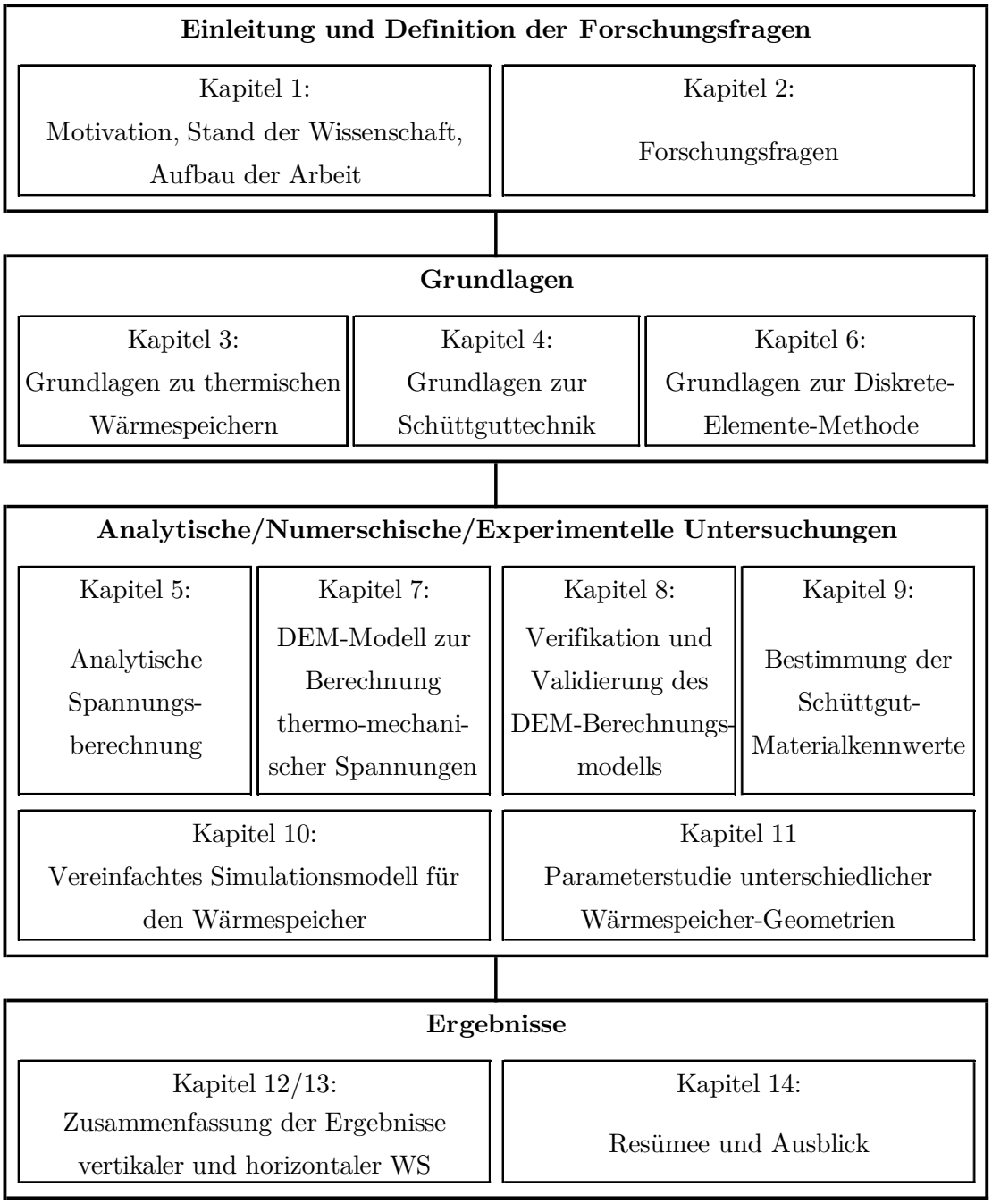


Abbildung 1-5 Aufbau der Arbeit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2 Forschungsfragen

Aus der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Förschungslücke lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

1) Wie lassen sich die in Festbett-Wärmespeichern prozessbedingten Ausdehnungen der Schüttung und der damit verbundene Spannungsanstieg mittels DEM-Simulation modellieren?

2) Wie lässt sich das DEM-Berechnungsmodell verifizieren und validieren?

3) Mit welchem Prozess lassen sich sämtliche Materialkennwerte, die für die Spannungsberechnung in der DEM-Simulation erforderlich sind, ermitteln?

4) Mit welchen Ansätzen lässt sich die hohe Anzahl an Partikel signifikant verringern (ohne dass sich die Ergebnisse der ursprünglichen Simulation wesentlich verändern) damit realitätsnahe Festbett-Wärmespeicher untersucht werden können?

5) Welchen Einfluss haben unterschiedlich gewählte Wärmespeicher-Geometrien unter Annahme einer vertikalen Durchströmungsrichtung auf den Spannungsanstieg im Behälter?

6) Welchen Einfluss haben unterschiedlich gewählte Wärmespeicher-Geometrien unter Annahme einer horizontalen Durchströmungsrichtung auf den Spannungsanstieg im Behälter?

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3 Grundlagen zu thermischen Wärmespeichern

3.1 Einteilung und Aufbau

Thermische Wärmespeicher können auf dem Weg zu einer regenerativen und effizienten Energieversorgung von großer Bedeutung sein. Bei Wärmespeichern wird zwischen thermischer und chemischer Speicherung unterschieden [57]. Die thermische Speicherung kann dabei, wie in Abbildung 3-1 ersichtlich, in drei grundlegende Systeme unterteilt werden [59].

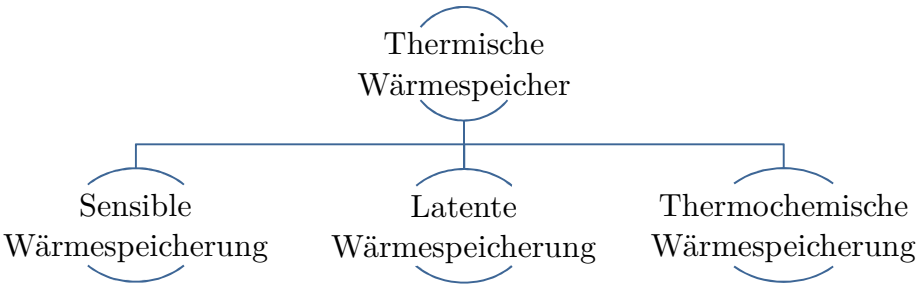


Abbildung 3-1 Einteilung der Speichertechnologien

Aktuell finden thermische Wärmespeicher weltweit in etwa der Hälfte der gebauten Wärmespeicher-Anlagen Anwendung [61]. In Zukunft wird erwartet, dass sie noch weiter an Bedeutung gewinnen [28].

Sensible Wärmespeicher verändern beim Beladevorgang oder Entladevorgang ihre (fühlbare) Temperatur. Da diese Art der Wärmespeicherung keine Phasenumwandlungen durchläuft, kann sie über einen breiten Temperaturbereich, insbesondere im Hochtemperaturbereich, eingesetzt werden. Latentwärmespeicher verändern beim Beladevorgang oder Entladevorgang nicht ihre (fühlbare) Temperatur, sondern das Wärmespeichermedium ändert seinen Aggregatzustand. In den meisten Fällen ist das der Übergang von fest zu flüssig oder umgekehrt. Thermochemische Wärmespeicher nehmen die Wärme mit Hilfe von endothermen und exothermen Reaktionen auf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

In diesem Projekt erfolgt die Nutzung der thermischen Energie über eine sensible Wärmespeicherung. Dabei wird ein Speichermedium erhitzt oder abgekühlt. Da bei sensiblen Energiespeichern die Temperaturdifferenzen zwischen Speichermedium und Umgebung vorwiegend größer sind als bei den anderen Speicherarten, spielt hier die Wärmedämmung eine wichtige Rolle. Viele sensible Wärmespeicher werden mit Wasser betrieben, da es neben geringen Kosten auch über eine hohe spezifische Wärmekapazität, gute Umweltverträglichkeit und hohe Verfügbarkeit besitzt. Es finden aber auch Feststoffe wie Kies oder Eisenoxidsteine in der Speicherung Verwendung, da sie, verglichen mit anderen Speichermedien (z.B. Salze), eine kostengünstige Variante darstellen [5], [36]. Die Verwendung des Feststoffs Magnetit wurde in [24] geprüft. Auch Schlacke, als Nebenprodukt der Eisen- und Stahlherstellung, kann ein kostengünstiges Material für die Wärmespeicherung darstellen [42]. In all diesen Fällen spricht man von Festbett-Wärmespeichern. In Marokko werden von Zanganeh [70] seit 2014 Untersuchungen an einem mit Steinen gefüllten Festbett-Wärmespeicher durchgeführt (siehe Abbildung 3-2).

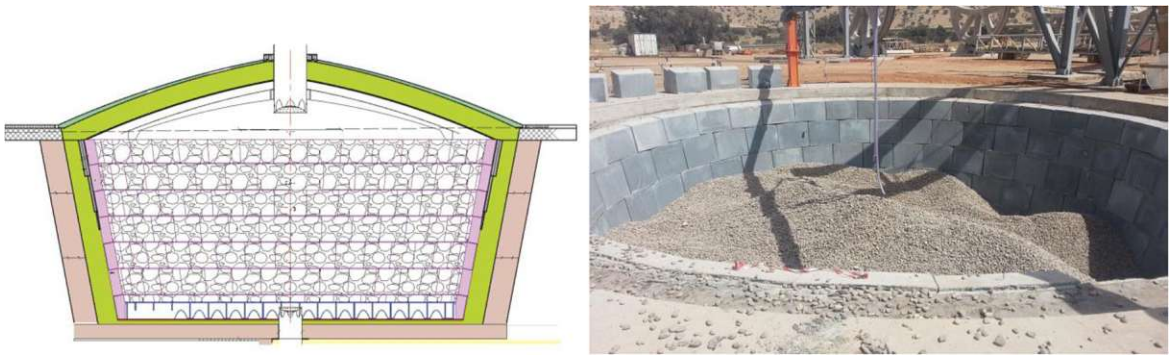


Abbildung 3-2 Schema und Foto eines in Bau befindlichen Festbett-Wärmespeichers in Marokko [70]

Brunch et al. [6] erreichte in Festbett-Wärmespeichern mit einem Öl-Gestein Wirkungsgrade von 88% und 92%. Zavattoni et al. [71] zeigte, dass die Energieeffizienz eines industriellen luftdurchströmten Festbett-Wärmespeichers bei 92% liegt. Weitere numerische bzw. experimentelle Untersuchungen kamen zu gleichen Ergebnissen [22], [36], [62], [67], [69]. Verglichen mit latenten oder thermochemischen Wärmespeichern weisen sensible Wärmespeicher zwar niedrigere Energiedichten auf, dafür verfügen sie jedoch über eine ausgereifte Technik und sind heute kostengünstig verfügbar. Festbett-Wärmespeicher sind Kurzzeitspeicher, bei denen diskontinuierlich Wärme anfällt, die gespeichert und wieder abgegeben wird.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Diese Speicher werden häufig in industriellen Anwendungen verwendet wo sehr große Abwärmemengen anfallen.

Aufgrund der geplanten Größe der Speicheranlage soll ein Festbett-Wärmespeicher mit einer Schotter-Schüttung (siehe Abbildung 9-1) zur Energiespeicherung verwendet werden. Festbett-Wärmespeicher sind vereinfacht gesehen Behälter, die mit Schüttgut gefüllt sind. Wie bereits erwähnt, dient das Schüttgut dabei als wärmespeicherndes Medium. Festbett-Wärmespeicher können grundsätzlich in vertikaler oder horizontaler Bauweise ausgeführt werden (siehe Abbildung 3-3, nähere Untersuchungen siehe Kapitel 11). Die Vor- und Nachteile der Wärmespeicher-Anordnungen sind nach [38] in Tabelle 3-1 aufgelistet.

Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile vertikaler/horizontaler Festbett-Wärmespeicher

Anordnung	Vorteile	Nachteile
Vertikal	– Leicht zu befüllen – Leichte Montage der Isolierung – Platzsparend – Die meiste Erfahrung mit dieser Variante	– Komplexe Verrohrung am Boden
Horizontal	– Geringere Höhen – Armaturen einfacher zu montieren – Rechteckige Form (anstatt zylindrisch), daher leichtere Abstützung der Speicher-Wände	- Komplizierter zu befüllen - Benötigt mehr Grundfläche

3.2 Beladung und Entladung eines Wärmespeichers

In der Energietechnik spricht man von Beladung und Entladung eines Wärmespeichers, was für den Aufwärm- bzw. Abkühlvorgang steht. Die Beladungs- und Entladungsrichtung ist grundsätzlich frei wählbar. Man unterscheidet dabei zwischen direkter und indirekter Beladung bzw. Entladung. Bei der Direktbeladung wird das erwärmende bzw. heizende Medium direkt in den Speicher eingespeist. In gleicher Weise funktioniert die Direktentladung. Eventuelle Verunreinigungen durch das Speichermaterial (z.B. Kies, Staub) könnten Verstopfungen der Rohrleitungen verursachen, denen mittels Filter vorgebeugt werden muss. Indirekt beladene Speicher sind von Rohrleitungen durchzogen, welche die Wärme an das Speichermaterial abgeben. Der zuführende Wasserkreislauf kommt also nicht mit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

dem Speichermaterial in Berührung. Die indirekte Entladung erfolgt ebenfalls über die wasserdurchflossenen Rohrleitungen jedoch mit dem Unterschied, dass das Speichermaterial die Wärme an das Wärmeträger-Medium abgibt. Bei indirekter Beladung und Entladung ist mit zusätzlichen Wärmeverlusten durch den Prozess der Wärmeübertragung zu rechnen.

In diesem Projekt wird eine Direktbeladung angewendet. Das Schüttgut des vertikalen Festbett-Wärmespeichers wird bei Beladung von oben nach unten durchströmt, bei Entladung von unten nach oben (siehe Abbildung 3-3 a)). Beim horizontalen Festbett-Wärmespeicher erfolgt die Beladung von rechts nach links, die Entladung von links nach rechts (siehe Abbildung 3-3 b)).

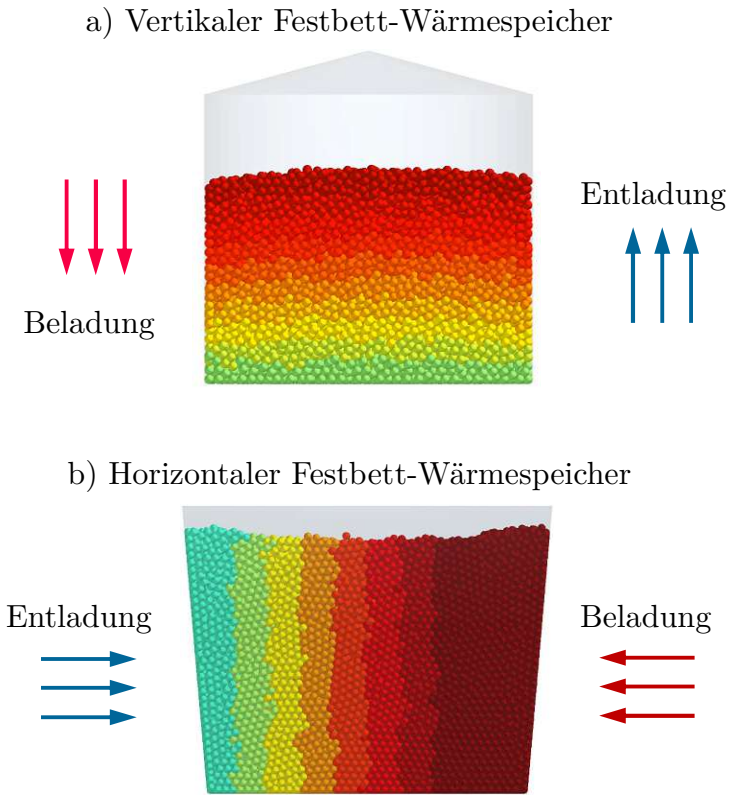


Abbildung 3-3 Richtung des Aufwärm- bzw. Abkühlvorgangs beim a) vertikalen Festbett-Wärmespeicher und b) horizontalen Festbett-Wärmespeicher

3.3 Speichervarianten

Wie bereits eingangs erwähnt, wird zwischen vertikal und horizontal durchströmte Speichervarianten unterschieden. Vertikal durchströmte Festbett-Wärmespeicher sind in Form eines Zylinders (Durchmesser D, Höhe H) ausgeführt (siehe Abbildung 10-1 a)). Hingegen haben horizontal durchströmte Festbett-Wärmespeicher die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Form eines Troges (Länge L, Breite B, Höhe H) mit geneigten Seitenwänden (siehe Abbildung 10-1 b)). Tabelle 3-2 gibt einen Überblick zu den in diesem Projekt relevanten Speichervarianten. Eingeteilt in vertikale und horizontale Speicheranordnung wird zwischen Speichergrößen von 70 MWh, 330 MWh und 5500 MWh unterschieden. Bei der horizontalen Speicheranordnung gibt es die 70 MWh-Variante nicht. Um die gewünschte Speichergröße zu erreichen, sind die Speichervarianten mit mehreren Modulen ausgeführt. Der vertikale bzw. horizontale 330 MWh-Speicher besteht beispielsweise aus zwei Modulen mit den jeweils angeführten Abmessungen (siehe Tabelle 3-2). Die Modulabmessungen finden sich in der dritten und die Mengenangabe der im Wärmespeicher (Modul) befindlichen Schüttung in der vierten Tabellenspalte. Je nachdem, wie groß der Wärmebedarf des angrenzenden Betriebes ist, der als Wärmeabnehmer fungiert, ergibt sich die Größe des zu verwendenden Speichers. Natürlich sind auch die Baukosten ein entscheidender Faktor für die Auswahl der Wärmespeicher-Variante. Spätere Ergebnisse beziehen sich auf die einzelnen Module der jeweiligen Speicher-Variante (siehe Kapitel 11).

Tabelle 3-2 Speichervarianten im Überblick

Speicher-anordnung	Speichervariante	Modul-abmessungen	Schüttung (pro Modul)
Vertikal	– 70 MWh-Speicher (Modul-Anzahl 2)	D = 11 m H = 7 m	1.000 t
	– 330 MWh-Speicher (Modul-Anzahl 2)	D = 17 m H = 15 m	5.100 t
	– 5500 MWh-Speicher (Modul-Anzahl 18)	D = 14 m H = 40 m	9.300 t
Horizontal	– ~~70 MWh-Speicher~~	-	-
	– 330 MWh-Speicher (Modul-Anzahl 2)	L = 20 m B = 14 m H = 13 m	5.500 t
	– 5500 MWh-Speicher (Modul-Anzahl 8)	L = 30 m B = 23 m H = 20 m	21.000 t

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.4 Fließschema des Gesamtsystems

Unabhängig von der Größe des Speichers bietet das Fließschema für den Belade- bzw. Entladevorgang einen guten Überblick über die Anlagenbestandteile und den gesamten Prozessablauf. Das Gesamtsystem dieser Wärmerückgewinnungsanlage beinhaltet drei Übertragungsmedien in Form von Rauchgas, Dampf/Wasser und Luft. Abbildung 3-4 zeigt das Fließschema für den Beladungsvorgang des Speichers.

Das vom Zementwerk kommende Rauchgas wird zur Wärmerückgewinnung über einen Wärmeüberträger (Eco) geleitet und erhitzt dabei das darin fließende Wasser. Bei ausreichend hoher Temperatur wird das Wasser in Dampf umgewandelt und in der Dampftrommel erfolgt anschließend die Trennung zwischen flüssigem und dampfförmigem Medium. Der abgeschiedene Dampf erhitzt nun den dritten, mit Luft befüllten, Kreislauf über einen weiteren Wärmetauscher. Diese heiße Luft wird zur Durchströmung und Erhitzung des Wärmespeicher-Inhalts verwendet. Diesen Vorgang nennt man die Beladung des Wärmespeichers. Diese Energiespeicherung bietet den Vorteil, dass, je nach Bedarf, zeitlich unabhängig auf die aufgesparte Energie zugegriffen werden kann.

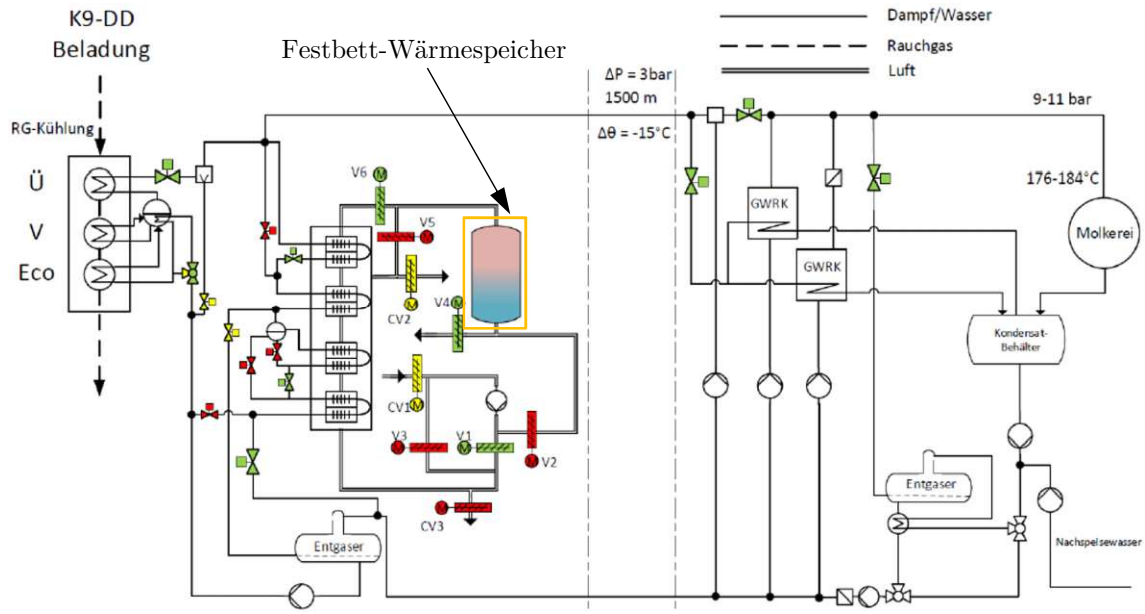


Abbildung 3-4 Fließschema beim Beladungsvorgang des Wärmespeichers [25]

Wird nun Energie für den Herstellungsprozess benötigt, so kommt es zum Entladevorgang des Wärmespeichers. Kalte Luft strömt hierbei in den aufgeheizten Festbett-Speicher. Die Energie der dabei erhitzten Luft wird über einen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Wärmetauscher auf einen Wasser/Dampf-Kreislauf übertragen, der zu einer Molkerei führt. Abbildung 3-5 zeigt das Fließschema für diesen Ablauf.

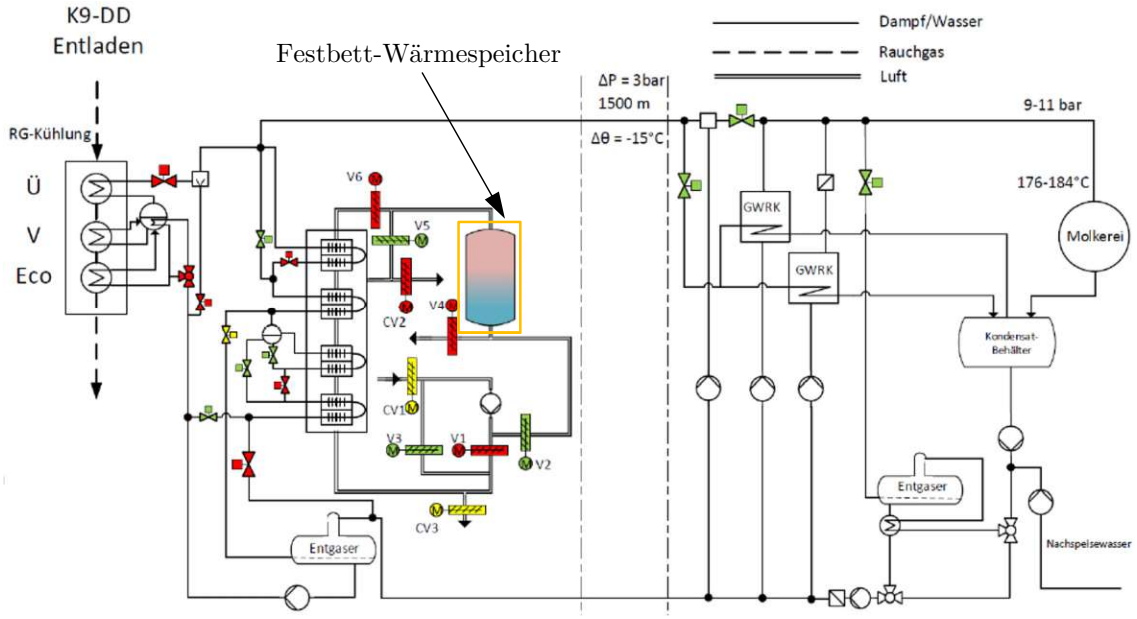


Abbildung 3-5 Fließschema beim Entladevorgang des Wärmespeichers [25]

3.5 Spannungsberechnung in der Behälterwand

Die Spannungsberechnung in der Behälterwand wird für die Ermittlung der Behälterwandstärke benötigt. Dies geschieht am Ende der Arbeit in Kapitel 12 auf Seite 120, nachdem die Ergebnisse der Parameterstudie unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien (siehe Kapitel 11) vorliegen. Nach DIN 2413 [16] lassen sich die mechanischen Spannungen in einem druckbelasteten rotationssymmetrischen Körper mit der Kesselformel berechnen [33]. Diese gilt unter anderem für dünnwandige Druckbehälter. Die Tangential- und Axialspannung σ_t und σ_a in der Behälterwand (siehe Abbildung 3-6) lassen sich mit dem Innendruck p_i, dem mittleren Durchmesser d_m und der Wandstärke s über (3-1) und (3-2) ermitteln. Anzumerken ist, dass vorhandene Schubkräfte an der Behälterwand – wie es bei einem mit Schüttgut befüllten Behälter der Fall ist – in diesen Berechnungsansätzen nicht berücksichtigt sind (näheres siehe Kapitel 4).

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot d_m}{2 \cdot s} \tag{3-1}$$

$$\sigma_a = \frac{p_i \cdot d_m}{4 \cdot s} \tag{3-2}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Der mittlere Durchmesser d_m lässt sich mit dem Innendurchmesser d_i und der Wandstärke s oder dem Außendurchmesser D_a des Wärmespeichers nach (3-3) berechnen.

$$d_m = d_i + s = \frac{D_a + d_i}{2} \tag{3-3}$$

Über diese analytischen Ansätze lässt sich bei bekanntem Innendruck p_i auf die vorhandenen Tangential- und Axialspannungen schließen. Diese Spannungen können anschließend mit den zulässigen Werten verglichen werden und es kann eine Aussage über die richtige Dimensionierung getroffen werden.

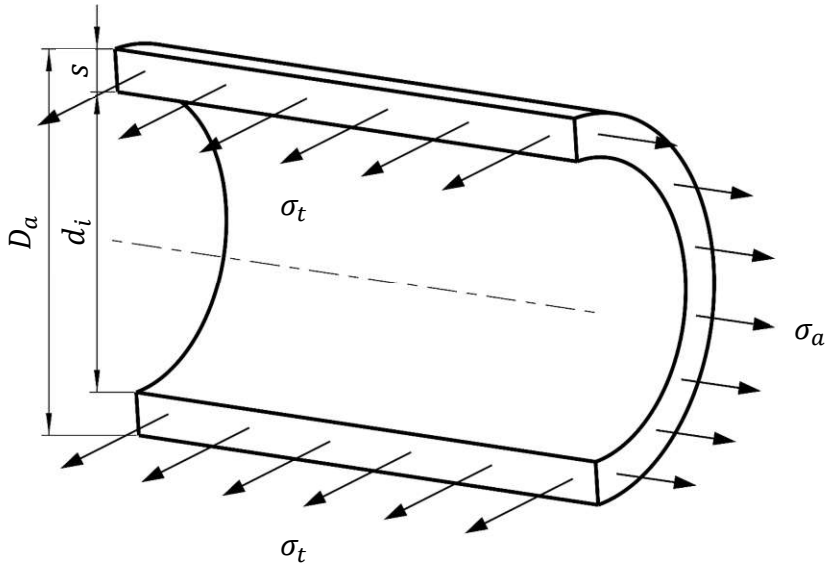


Abbildung 3-6 Tangential- und Axialspannung in einem druckbelasteten Behälter

Eine weitere nützliche Berechnungsmethode stellt die Wanddickenberechnung von zylindrischen Behältern nach AD 2000 [65] dar. Bei gegebenem Innendruck p_i (in bar) und Außendurchmesser D_a (in mm) lässt sich die erforderliche Wandstärke s nach (3-4) berechnen (Schubkräfte an der Behälterwand nicht berücksichtigt).

$$s = \frac{D_a \cdot p_i}{20 \cdot \frac{R_{p0,2}}{S} \cdot v_A + p_i} + C_1 + C_2 \tag{3-4}$$

Neben dem Festigkeitswert $R_{p0,2}$ (in N/mm²) geht auch der Ausnutzungsfaktor für Spannung v_A (-) in (3-4) ein. S gibt den Sicherheitswert, der im Druckbehälterbau üblicherweise mit 1,5 festgelegt ist. Die Faktoren C_1 und C_2 berücksichtigen einen Zuschlag für Wanddickenunterschreitung und Abnutzungen (beide Werte in mm). Die Abschätzung der Wandstärke s erfolgt in Kapitel 12.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4 Grundlagen zur Schüttguttechnik

4.1 Definition von Schüttgut

Ein Schüttgut setzt sich wie in [56] beschrieben aus einzelnen Partikeln zusammen und ist nach [60] ein Haufwerk aus körnigen oder pulverförmigen Feststoffen. Laut DIN 1055-6 [17] ist ein Schüttgut wie folgt definiert: *„Ein staubförmiges bis grobkörniges granulares Material mit und ohne Kohäsion, das neben einzelnen Feststoffteilchen (Partikel) auch Hohlräume zwischen diesen enthält, die evtl. mit Luft oder Feuchtigkeit gefüllt sind“*[1]

Daher besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln zur Beschreibung des Schüttgutverhaltens zu betrachten. Die Charakterisierung des Schüttgutverhaltens ist ein schwieriges und aufwendiges Unterfangen, da es sich zumeist um eine sehr große Anzahl an Partikeln handelt. Jedoch ist die Rechenleistung entsprechender Berechnungsmethoden (Diskrete-Elemente-Methode [14] oder Erweiterte Diskrete-Elemente-Methode [15]) hinsichtlich Partikelanzahl, Partikelfestigkeit und der Darstellung komplexer und vielfältiger Partikelformen begrenzt. Die Diskrete-Elemente-Methode, die in dieser Arbeit Anwendung findet, wird in Kapitel 6 näher beschrieben.

Betrachtet man das Schüttgut als Kontinuum, werden nicht die Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln betrachtet, sondern die Kräfte auf die Begrenzungsflächen einzelner Volumenelemente (näheres siehe Kapitel 4.2 und 5.2). Schüttgüter können als kohäsionslos (freifließend) oder kohäsiv (zusammenhaltend) eingeteilt werden.

Festkörper oder Stückgüter und Fluide lassen sich vergleichsweise einfach handhaben. Das mechanische Verhalten eines Pulvers oder eines Granulates hingegen hängt unmittelbar von seiner Beanspruchungsvorgeschichte ab [50], [54]. Diese Vorgeschichte lässt sich beispielsweise einfach mit einem Neigungsversuch eines Transportbehälters verdeutlichen. Je nachdem, ob das Schüttgut in den

[1] Auszug DIN 1055-6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Behälter eingefüllt, geneigt und wieder zurückbewegt wurde, ergibt sich eine jeweils andere Form der Schüttoberfläche (siehe Abbildung 4-1).

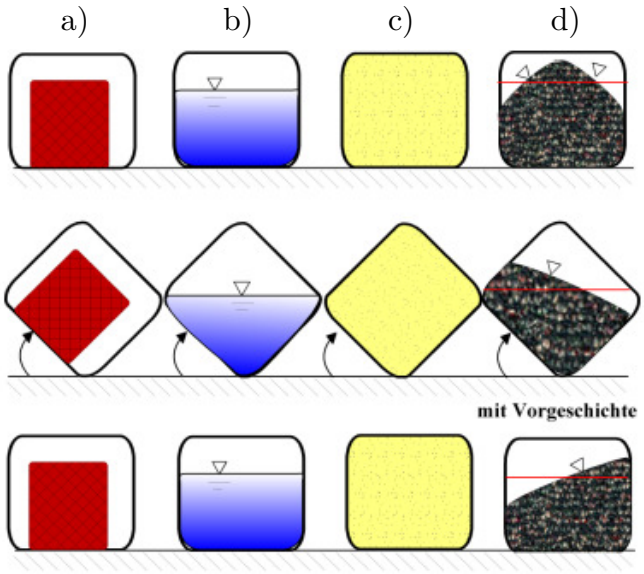


Abbildung 4-1 Lagerung in Behältern - Mechanisches Verhalten von a) Feststoff, b) Flüssigkeit, c) Gas und d) Schüttgut [30]

Schüttgüter verhalten sich wie unvollkommene Festkörper, fließen manchmal wie eine Flüssigkeit oder können wie ein Gas verdichtet werden.

4.2 Schüttguteigenschaften in einem Bunker

In diesem Teil werden die wichtigsten mathematischen Zusammenhänge von Schüttguteigenschaften beschrieben, die in den weiteren Auswertungen Anwendung finden. Die nachkommenden analytisch beschriebenen Schüttguteigenschaften werden alle aus kontinuumsmechanischer Sicht gezeigt. Nähere Untersuchungen zu analytischen Auslegungsverfahren sind in [21] zu finden.

Ausgehend von einem Partikel mit dem Durchmesser D_p bzw. dem Radius R_p, ist die Feststoffdichte ρ_p als Verhältnis der Masse m_p eines Partikels zum eingenommenen Volumen V_p definiert (4-1). Das Partikelvolumen V_p lässt sich nach (4-2) ermitteln.

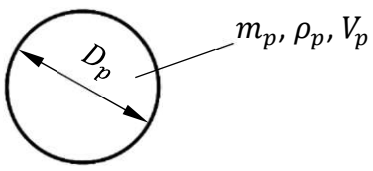


Abbildung 4-2 Partikel mit dessen beschreibenden Größen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \tag{4-1}$$

$$V_p = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot {R_p}^3 \tag{4-2}$$

Die Porosität ε ist als Verhältnis der Volumina der Hohlräume $V_{Hohlraum}$ zwischen den Partikeln zum gesamten von der Partikelschüttung eingenommenen Schüttgutvolumen V_S festgelegt (4-3). $V_{Hohlraum}$ lässt sich über die Differenz von V_S und dem Gesamtvolumen der Partikel V_P berechnen. Typische Werte für Schüttgut liegen im Bereich von 0,1 bis 0,9.

$$\varepsilon = \frac{V_{Hohlraum}}{V_S} = \frac{V_S - V_P}{V_S} = 1 - \frac{V_P}{V_S} \tag{4-3}$$

Die vereinfachte Schüttgutdichte ρ_S wird als Verhältnis der Masse $m_P = m_S$ einer Schüttgutmenge zum eingenommenen Schüttgutvolumen V_S bezeichnet (4-4). Im Unterschied zur exakten Berechnung wird hier das Fluid in den Hohlräumen vernachlässigt.

$$\rho_S = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_P \tag{4-4}$$

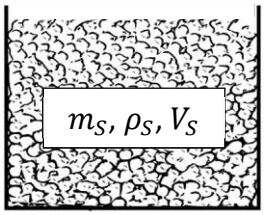


Abbildung 4-3 Partikelschüttung mit ihren beschreibenden Größen

Folglich lässt sich das eingenommene Schüttgutvolumen V_S über die Schüttgutmasse m_S nach (4-5) und die Anzahl der Partikel n_P nach (4-6) berechnen.

$$V_S = \frac{m_S}{\rho_S} = \frac{m_S}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_P} \tag{4-5}$$

$$n_P = \frac{m_S}{m_p} = \frac{V_S \cdot (1 - \varepsilon)}{V_p} \tag{4-6}$$

Das Verhältnis der Wandschubspannung τ_w zur Normalspannung σ_n wird über den Wandreibungswinkel φ_x (4-7) ausgedrückt (siehe Abbildung 4-4 a)).

$$tan\, \varphi_x = \mu = \frac{\tau_w}{\sigma_n} \tag{4-7}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

In Schüttgütern stellt sich aufgrund der Schwerkraft eine vertikale Belastung bzw. eine Vertikalspannung σ_v ein. In weiterer Folge stellt sich auch in der horizontalen Richtung eine Horizontalspannung σ_h ein, die kleiner ist als die Vertikalspannung. Das Verhältnis (4-8) dieser beiden Spannungen bezeichnet man als Horizontallastverhältnis λ (siehe Abbildung 4-4 b)). Typische Werte für Schüttgut liegen im Bereich von 0,3 bis 0,6 ($\lambda = 1$ für Flüssigkeiten, $\lambda = 0$ bei freistehenden Festkörpern).

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \tag{4-8}$$

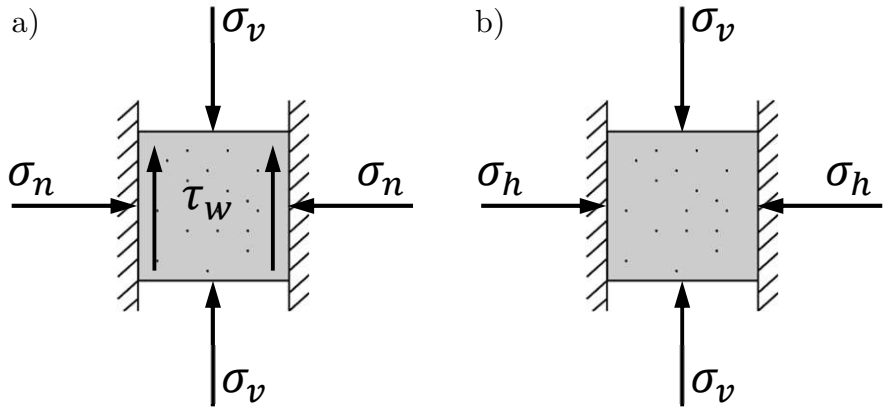


Abbildung 4-4 a) Wandreibungswinkel φ_x b) Horizontallastverhältnis λ

Ein Schüttgut kann im Gegensatz zu einer Flüssigkeit im Ruhezustand Schubspannungen übertragen [55]. Während sich bei einem Schüttgut z.B. eine geneigte Oberfläche in Form eines Schüttkegels ausbilden kann, hat eine Flüssigkeit daher – abgesehen von den Effekten der Oberflächenspannung – stets eine waagrechte Oberfläche (siehe Abbildung 4-1). In einem mit Schüttgut befüllten Behälter nimmt außerdem der Druck nicht wie bei einer Flüssigkeit linear mit der Tiefe zu (siehe Abbildung 5-2). Der Grund liegt darin, dass die vom Schüttgut auf die Behälterwand ausgeübte Schubspannung (Reibung auf die Behälterwand) einen Teil des Gewichtes der Schüttgutsäule trägt [40], [41]. Die Berechnung dieser Spannungen ist in Kapitel 5 näher angeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5 Analytische Spannungsberechnung

Für Flüssigkeiten bzw. Schüttgüter in Behältern lassen sich die Druck- bzw. Spannungsverläufe analytisch nach (5-1) bzw. nach (5-4) und (5-5) berechnen. Im Gegensatz zur Flüssigkeit nimmt der Schüttdruck nicht linear mit der Tiefe zu. Gleichung (5-10) zeigt die Ermittlung thermisch induzierter Spannungen.

5.1 Flüssigkeiten – hydrostatischer Druck

Die Berechnung des hydrostatischen Drucks ist in Gleichung (5-1) angeführt. Wie in Abbildung 5-2 ersichtlich, verläuft die Höhe z von der Oberkante des Flüssigkeitsspiegels nach unten. Zusammen mit dem einwirkenden Umgebungsdruck p_0 lässt sich der hydrostatische Druck $p_{(z)}$ mit der Dichte der Flüssigkeit ρ_{Fl} und der Erdbeschleunigung g berechnen.

$$p_{(z)} = p_0 + \rho_{Fl} \cdot g \cdot z \tag{5-1}$$

5.2 Schüttgüter – Schüttdruck nach Janssen

Die Berechnung der Spannungen in einem Siloschaft geht auf Janssen [29] zurück. Er betrachtet ein scheibenförmiges Volumenelement der Höhe dz, das über den ganzen Querschnitt geht (siehe Abbildung 5-1). Unter der Annahme einer konstanten Vertikalspannung σ_v über dem Querschnitt und einer konstanten Schüttgutdichte ρ_S im Volumenelement lässt sich folgendes Kräftegleichgewicht in z-Richtung aufstellen:

$$A \cdot \sigma_v + \rho_S \cdot g \cdot A \cdot dz = A \cdot (\sigma_v + d\sigma_v) + \tau_w \cdot U \cdot dz \tag{5-2}$$

Mit dem Wandreibungswinkel $tan\,\varphi_x$ aus (4-7) und dem Horizontallastverhältnis λ aus (4-8) ergibt sich eine gewöhnliche Differentialgleichung (5-3) für die Vertikalspannung σ_v.

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \sigma_v \cdot \lambda \cdot \frac{U}{A} \cdot tan\varphi_x = \rho_S \cdot g \tag{5-3}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

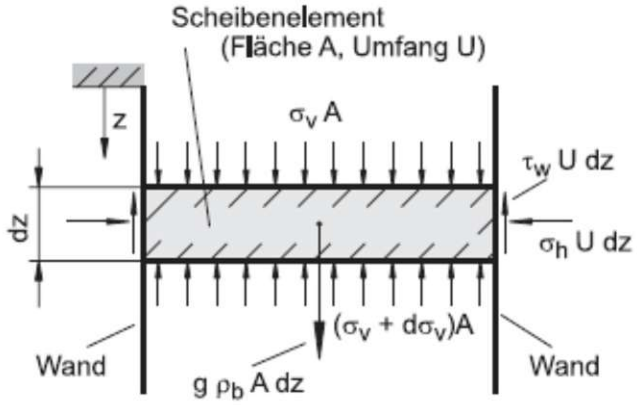


Abbildung 5-1 Scheibenelement in einem Siloschaft [56]

Aus der Integration von (5-3) unter der Annahme konstanter Parameter ρ_S, φ_x, λ und für die Randbedingung, dass die Spannung an der Schüttgutoberfläche Null ist ($z = 0$), ergibt sich der vertikale Schüttdruck. Dieser lässt sich mit den in Formel (4-4) bis (4-8) beschriebenen Größen über folgenden Zusammenhang berechnen:

$$\sigma_{v_{(z)}} = \frac{\rho_S \cdot g \cdot A}{\lambda \cdot tan\varphi_x \cdot U} \cdot [1 - e^{-\frac{\lambda \cdot tan\varphi_x \cdot U \cdot z}{A}}] \tag{5-4}$$

So kann der Schüttdruck in Abhängigkeit von der Höhe z ermittelt werden. Die Höhe z verläuft wie schon beim hydrostatischen Druck von der Oberkante der Schüttung nach unten (siehe Abbildung 5-2). Mit der vereinfachten Schüttgutdichte ρ_S, der Erdbeschleunigung g, dem Querschnitt des Behälters A, dem Horizontallastverhältnis λ, dem Wandreibungswinkel φ_x, dem Umfang des Behälters U lässt sich der vertikale Schüttdruck $\sigma_{v_{(z)}}$ analytisch ermitteln (5-4).

Über das in Gleichung (4-8) definierte Horizontallastverhältnis ergibt sich der horizontale Schüttdruck nach Janssen wie folgt:

$$\sigma_{h_{(z)}} = \frac{\rho_S \cdot g \cdot A}{tan\varphi_x \cdot U} \cdot [1 - e^{-\frac{\lambda \cdot tan\varphi_x \cdot U \cdot z}{A}}] \tag{5-5}$$

Abbildung 5-2 zeigt den Vergleich zwischen dem hydrostatischen Druck und dem Schüttdruck nach Janssen. Wird derselbe Behälter mit einer Flüssigkeit bzw. einem Schüttgut befüllt, stellen sich nachfolgend beschriebene Druckverläufe ein.

Der hydrostatische Druck nach (5-1) stellt den höchst möglichen Druck für den Füllzustand in einem Behälter dar. Dies trifft für jenen Fall zu, wenn der Behälter mit Wasser oder einem Schüttgut mit einem Horizontallastverhältnis von $\lambda = 1$ befüllt ist (blaue Vollline in Abbildung 5-2, mit $p_0 = 0$). Typische Werte für

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Schüttgut liegen wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben im Bereich von 0,3 bis 0,6. Dadurch ergibt sich nach (5-4) bzw. (5-5) der schwarz strichlierte Verlauf, der den Schüttdruck nach Janssen darstellt.

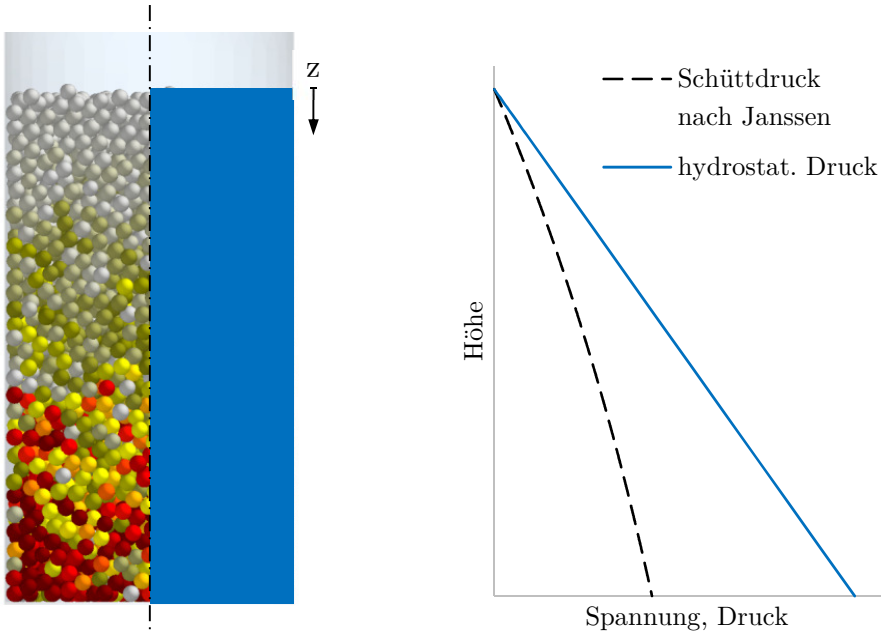


Abbildung 5-2 Vergleich Schüttdruck, hydrostatischer Druck in einem Behälter

Abbildung 5-3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Schüttdruck, der in einem Behälter vorliegt, und dem Höhen-Durchmesser Verhältnis (H/D) des Behälters. In Hinblick auf die zu wählende Wärmespeicher-Geometrie sollte das Verhältnis von H zu D möglichst niedrig gehalten werden.

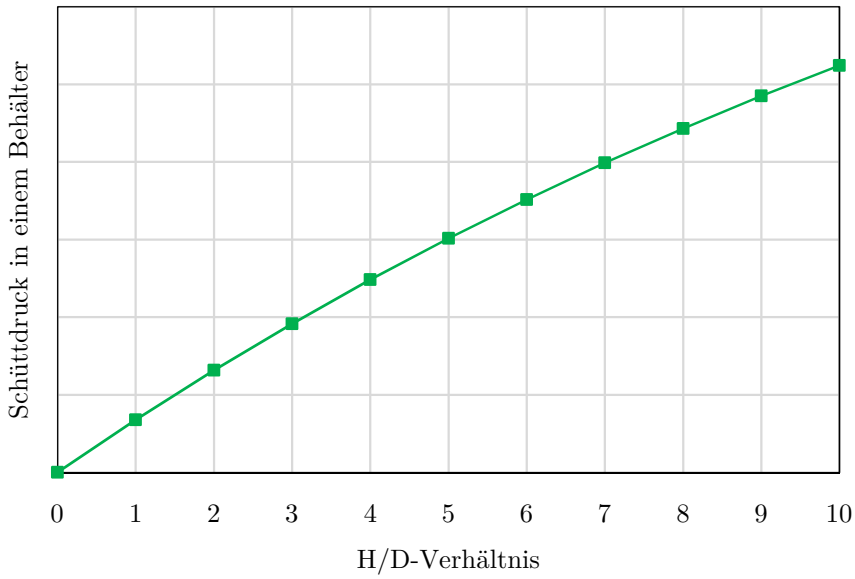


Abbildung 5-3 Schüttdruck in Abhängigkeit des H/D-Verhältnis

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5.3 Thermisch induzierte Spannungen

Thermisch Spannungen sind mechanische Spannungen, die ohne äußeren Krafteinfluss entstehen. In Abhängigkeit von der Temperaturänderung ΔT und dem Wärmeausdehnungskoeffizienten α_P lässt sich die thermische Ausdehnung ε_{th} nach (5-6) berechnen.

$$\varepsilon_{th} = \Delta T \cdot \alpha_P \tag{5-6}$$

Können sich thermische Ausdehnungen nicht ungehindert ausdehnen, rufen sie thermisch induzierte Spannungen (= Wärmespannungen) hervor. Diese verursachen mechanische Verformungen. Wird die Wärmedehnung von außen behindert, spricht man von einer erzwungenen Wärmedehnungsbehinderung. Die mechanische Verformung ε_{mech} lässt sich mit Gleichung (5-7) ermitteln.

$$\varepsilon_{mech} = \frac{\sigma_W}{E} \tag{5-7}$$

Liegt eine vollständige Behinderung der Dehnung in einer Richtung vor, so muss sich die thermische Ausdehnung ε_{th} und die mechanische Verformung ε_{mech} in Summe aufheben (5-8).

$$\varepsilon_{th} + \varepsilon_{mech} = 0 \tag{5-8}$$

Setzt man in (5-8) ε_{th} (5-6) und ε_{mech} (5-7) ein, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta T \cdot \alpha_P + \frac{\sigma_W}{E} = 0 \tag{5-9}$$

Die Wärmespannung σ_W bzw. die induzierte Kraft F_W kann folglich über (5-10) bzw. (5-11) berechnet werden. A_W stellt dabei den beanspruchten Querschnitt dar.

$$\sigma_W = -E \cdot \Delta T \cdot \alpha_P \tag{5-10}$$

$$F_W = -A_W \cdot E \cdot \Delta T \cdot \alpha_P \tag{5-11}$$

Die in (5-6) beschriebene thermische Ausdehnung ε_{th} findet im in Kapitel 7 entwickelten DEM-Modell zur Berechnung thermomechanischer Spannungen Anwendung. Gleichung (5-11) wird in Kapitel 8.2.1 zum analytischen Vergleich der Simulationsergebnisse hergezogen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6 Grundlagen zur Diskrete-Elemente-Methode

6.1 Allgemeines

Einen guten Überblick über die Einteilung computergestützter Rechenmethoden (kontinuierliche bzw. diskrete Betrachtungsweise) liefert Gibaud [23]. Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) findet in der Forschung zunehmend Anwendung. Das zeigt auch die Statistik von Katterfeld und Wensrich [32], die die Zunahme der Publikationen seit den Anfängen der DEM in 1979 präsentiert.

Die Diskrete-Elemente-Methode liefert eine kosteneffiziente und intuitive Möglichkeit, Aussagen über Schüttgutbewegungen, Geschwindigkeitsfelder, Spannungen im Inneren des Schüttguts und Wandspannungen zu treffen. Sie wurde 1979 von Cundall und Strack entwickelt [15]. Die Simulation bestimmter physikalischer Prozesse (Mischen, Entmischen, Heizen, Kühlen, etc.) ermöglicht die genaue Kontrolle von Problemzonen. Dies gestattet die Überprüfung einer Anlage, noch bevor sie gebaut wird. Die DEM ist eine sehr rechenintensive Berechnungsart und im Gegensatz zur FEM eine gitterlose Methode. Sie ist daher durch die Anzahl der Partikel (< 5 Millionen) begrenzt. Die sphärische Abbildung der Partikel ist die effizienteste Variante. Um die Rechenzeit zu dezimieren werden häufig folgende Vereinfachungen getroffen:

- sphärische Abbildung der Kornform
- Erhöhung der Partikelgröße
- Verringerung der Partikelsteifigkeit

Granulare Medien sind diskontinuierliche Medien, weshalb eine Verwendung von klassischen kontinuumsmechanischen Theorien begrenzt ist. Dazu braucht es eine Lösung des Newtonschen Gesetzes für alle diskreten Elemente des physischen Mehrkörpersystems (=DEM). Der Einfluss der Schüttguteigenschaften muss unter Berücksichtigung spezifischer Kontaktmodelle (s. Kapitel 6.3) berücksichtigt werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.2 Funktionsweise und Berechnungsprinzip

Die Partikel werden als starre nicht deformierbare Körper mit sechs Freiheitsgraden behandelt. Die Kontakte zwischen den Partikeln finden auf einer verschwindend kleinen Fläche statt. Dieser Kontakt wird aber mit einem weichen Kontaktansatz berechnet (Feder-, Dämpfer-, Reibungselemente). D. h. starre Partikel, aber weiche Kontakte [44].

Die Größe der Überlappung steht im Zusammenhang mit der auftretenden Kontaktkraft über ein Kraft-Weg-Gesetz (siehe Kapitel 6.4). Die Berechnung erfolgt in Zeitschritten (siehe Kapitel 6.5). Die Überlappungen sind im Verhältnis zu den Partikelgrößen gering. Wände interagieren mit Partikeln, aber nicht mit anderen Wänden. Partikel sind normalerweise kugelförmig es gibt aber auch Ansätze für nicht runde Partikelformen [43].

Der Berechnungsprozess der DEM ist prinzipiell einfach und besteht aus zwei Schritten, die in jedem Zeitschritt wiederholt werden. Er beruht auf dem Newton'schen Bewegungsgesetz und Kraft-Verschiebungsgesetz bei den Kontakten. Abbildung 6-1 zeigt den zweistufigen DEM-Berechnungszyklus.

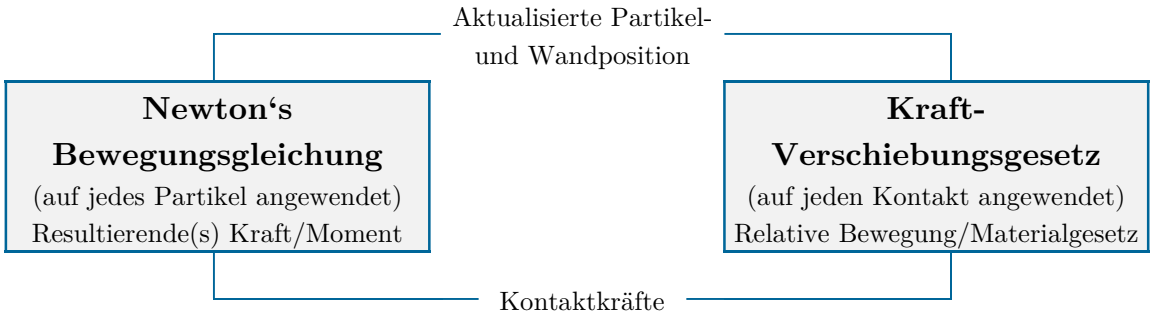


Abbildung 6-1 DEM Berechnungsprinzip

Über das zweite Newton'sche Bewegungsgesetz wird die Beschleunigung der Partikel aus den resultierenden Kräften und Momenten berechnet. Die Position jedes Partikels wird durch die Integration der Beschleunigung über einen kurzen Zeitschritt (näheres siehe Kapitel 6.5) aktualisiert. Diese neuen Positionen ergeben neue Kontaktpunkte, die zu neuen Kontaktkräften und Momenten führen. Diese werden wiederum neu berechnet. Die Berechnungszyklen wiederholen sich solange bis die gewünschte Simulationszeit erreicht ist.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Dennoch bleibt die Erkennung von Kontakten quasi ein „Flaschenhals“ der DEM. Methoden zur Reduzierung der Suchzeit stellen die einzelne oder kombinierte Verwendung von Zellzuordnung [4] oder Nachbarlisten [64] dar (siehe Abbildung 6-2). Die Methode der Zellzuordnung teilt das Modell in kleinere Zellen auf, die parallel zu den Raumachsen sind (siehe Abbildung 6-2, links). Meistens wird beim Initialisieren eines Modells die optimale Zellengröße durch ein heuristisches Verfahren abgeschätzt, um den Rechenaufwand gering zu halten. Bei der Methode der Nachbarlisten wird jedem Partikel ein Beobachtungsradius $\vec{r}$ zugeordnet, in dem alle möglichen Kontakte gefunden werden(siehe Abbildung 6-2, rechts).

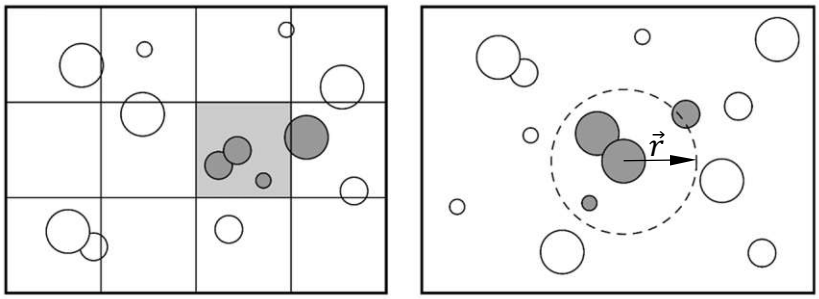


Abbildung 6-2 Zellzuordnung (links) und Nachbarlisten (rechts)

Der Kontakt zwischen den Partikeln wird durch die Überlappung beider Partikel bestimmt. Um die Interaktion der Partikel zu beschreiben, gibt es eine Reihe von Kontaktmodellen (näheres siehe Kapitel 6.3).

6.3 Hertz-Mindlin-Kontaktmodell

Die gängigsten Kontaktmodelle stellen das Hertz-Mindlin-Kontaktmodell [27], [39] und das Linear-Spring-Kontaktmodell dar. Weitere Kontaktmodelle zur Berücksichtigung verschiedener Systemcharakteristiken stellen Bindungsmodelle, Kohäsionsmodelle etc. dar. Diese finden in dieser Arbeit aber keine Anwendung und werden daher nicht näher beschrieben.

Das Hertz-Mindlin-Kontaktmodell findet in der DEM-Berechnung am häufigsten Anwendung. Das Kontaktmodell ist nichtlinear und der Kontakt zwischen den Partikeln wird mit einem Feder-Dämpfer-System modelliert (tangentiale und normale Steifigkeits- und Dämpfungskomponenten k_t, k_n und c_t, c_n), das auch Reibungskräfte berücksichtigt. Die Kontaktkräfte ergeben sich aus der normalen Kraftkomponente F_n und der tangentialen Kraftkomponente F_t von zwei sich

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

berührenden Partikeln (siehe Abbildung 6-3). Für die Berechnung von F_t wird der Coulomb'sche Reibungskoeffizient μ verwendet. Je nach Anwendungsbedarf kann das Kontaktmodell noch um Rollreibungs- oder Kohäsionsmodelle erweitert werden.

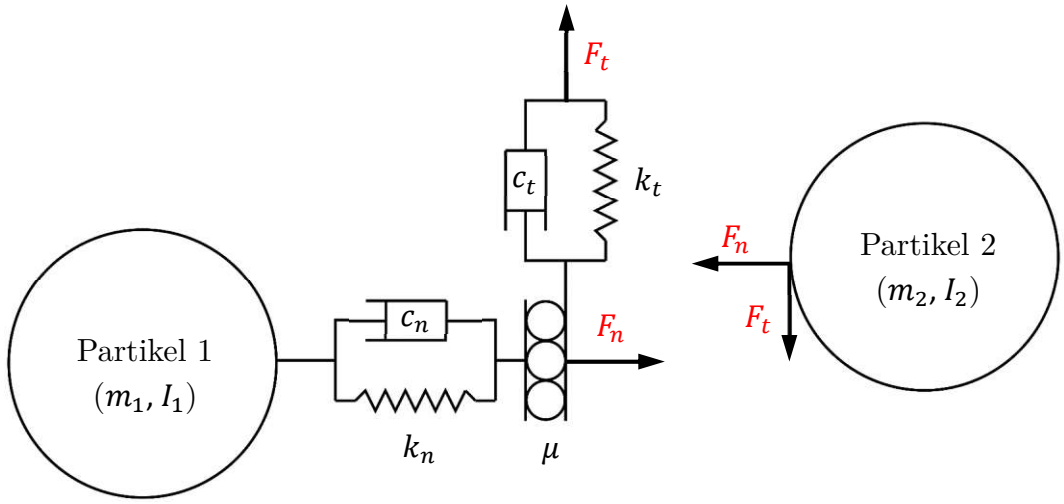


Abbildung 6-3 Schematische Darstellung des Hertz-Mindlin-Kontaktmodells [46]

Als eine Erweiterung des Hertz-Modells durch Cundall [15] kann das Linear-Spring-Modell gesehen werden. Es ist einfacher in der Lösungsmethode und bringt eine schnellere Ergebnisfindung. Zum Teil basiert es auf nichtphysikalischen Grundlagen (Federsteifigkeit).

6.4 Berechnung der Kontaktkräfte

Beim Hertz-Mindlin-Kontaktmodell werden die Kontaktkräfte zwischen zwei Partikeln nach (6-1) berechnet. Die Kontaktkraft setzt sich aus einem normalen und tangentialen Kraftanteil zusammen (siehe Abbildung 6-3).

$$F_{Hertz} = \underbrace{k_n \cdot \delta n_{ij} - \gamma_n \cdot v_{rel} n_{ij}}_{\text{Anteil Normalkraft}} + \underbrace{k_t \cdot \delta t_{ij} - \gamma_t \cdot v_{rel} t_{ij}}_{\text{Anteil Tangentialkraft}} \tag{6-1}$$

Die Normalkraft setzt sich aus einer Federkraft $k_n \cdot \delta n_{ij}$ und einer Dämpfungskraft $\gamma_n \cdot v_{rel} n_{ij}$, die Tangentialkraft aus einer Scherkraft $k_t \cdot \delta t_{ij}$ und einer Dämpfungskraft $\gamma_t \cdot v_{rel} t_{ij}$ zusammen. Die Normal- und Tangentialsteifigkeit k_n und k_t lassen sich nach (6-2) und (6-3) ermitteln. δn_{ij} bzw. δt_{ij} beschreiben die normale Überlappung bzw. den tangentialen Verschiebungsvektor zweier Partikel, γ_n und γ_t die viskoelastische Dämpfungskonstante des Normal- und Tangentialkontakts und $v_{rel} n_{ij}$ und $v_{rel} t_{ij}$ die normale und tangentiale Relativgeschwindigkeit.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$k_n = \frac{4}{3} \cdot E \cdot \sqrt{R_P \cdot \delta n_{ij}} \tag{6-2}$$

$$k_t = 8 \cdot G \cdot \sqrt{R_P \cdot \delta n_{ij}} \tag{6-3}$$

6.5 Zeitschritt der Simulation

Zur Berechnung der neuen Position eines Partikels wird ein Zeitschritt Δt benötigt. Zur Lösung der Newton'schen Bewegungsgleichungen wird oft der Verlet-Algorithmus verwendet. Die Größe des Zeitschritts ist so zu wählen, dass sich eine stabile numerische Lösung ergibt. Dazu muss der Zeitschritt Δt unter dem kritischen Zeitschritt t_{krit} bleiben (6-4).

$$\Delta t < t_{krit} \tag{6-4}$$

Der kritische Zeitschritt lässt sich näherungsweise über den in (6-5) vereinfachten Zusammenhang mit der Partikelmasse m_p und der Partikelsteifigkeit k ermitteln.

$$t_{krit} = \sqrt{\frac{m_p}{k}} \tag{6-5}$$

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des kritischen Zeitschritts stellt der Ansatz über die Rayleigh-Zeit t_R dar (6-6). Dieser wird vom DEM-Simulationsprogramm EDEM verwendet. Neben dem Partikelradius R_p geht auch die Partikeldichte ρ_p, das Schubmodul G und die Poissonzahl v in die Berechnung von t_R ein.

$$t_R = \frac{\pi \cdot R_p \cdot \sqrt{\frac{\rho_p}{G}}}{0{,}8766 + 0{,}1631 \cdot v} \tag{6-6}$$

Je nach Anwendung kann die Größe des kritischen Zeitschritts daher auch mit (6-7) abgeschätzt werden, um ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten [66].

$$t_{krit} = 10\% - 30\% \cdot t_R \tag{6-7}$$

Wie sich zeigt, ist der kritische Zeitschritt t_{krit} und die Rayleigh-Zeit t_R von der Partikelsteifigkeit k und dem Schubmodul G abhängig. Diese Abhängigkeit geht später in den Überlegungen zu einem vereinfachten Simulationsmodell (näheres siehe Kapitel 10) ein. Kapitel 10.4 widmet sich dabei der Verringerung des Elastizitätsmoduls der Partikel zur Reduktion der Rechenzeit.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

7 Entwickeltes DEM-Modell zur Berechnung thermomechanischer Spannungen

Damit die Berechnung thermo-mechanischer Spannungen möglich wird, muss das bestehende klassische Hertz-Mindlin-Kontaktmodell (siehe Kapitel 6.3) und das Rollreibungs-Modell [2] mit einem Modell für Größenänderungen der Partikel erweitert werden. Dieses in diesem Kapitel entwickelte und beschriebene DEM-Berechnungsmodell dient als Grundlage für die Ermittlung der Belastungszunahme zwischen Schüttung und Behälterwand. Das DEM-Berechnungsmodell findet bei den Untersuchungen an unterschiedlichen Wärmespeicher-Geometrien in Kapitel 11 (Parameterstudie unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien) Anwendung.

Kapitel 7 behandelt den Aufbau des DEM-Berechnungsmodells beginnend mit dem Ausgangszustand vor der thermischen Belastung über das Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge bis hin zur Ausgabe der Ergebnisse. Im Allgemeinen kann das entwickelte DEM-Berechnungsmodell zur Ermittlung der thermo-mechanischen Spannungen in drei Bereiche gegliedert werden (siehe Abbildung 7-1).

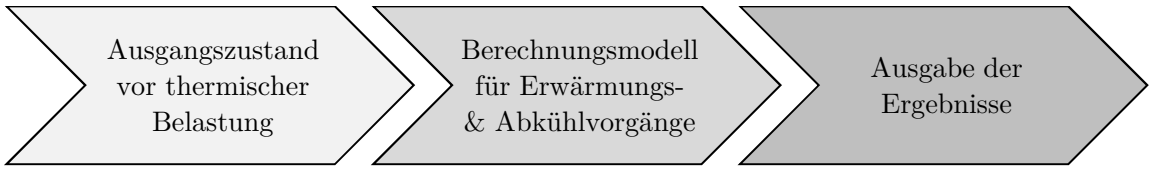


Abbildung 7-1 Aufbau des DEM-Berechnungsmodells

Diese in Abbildung 7-1 gezeigten Bereiche können abermals feiner untergliedert werden. Dazu liefern die Blockschaltbilder in den nachfolgenden Kapiteln 7.1 bis 7.3 einen guten Überblick (Abbildung 7-2, Abbildung 7-5 und Abbildung 7-8). Einen Gesamtüberblick liefert das vollständige Blockschaltbild des DEM-Berechnungsmodells in Abbildung 7-10.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

7.1 Ausgangszustand vor thermischer Belastung

Der Ausgangszustand vor der thermischen Belastung stellt den ersten von insgesamt drei Bereichen des DEM-Berechnungsmodells dar (siehe Abbildung 7-1). Den Ausgangspunkt bildet die in Abbildung 7-2 angeführte Wärmespeicher-Geometrie.

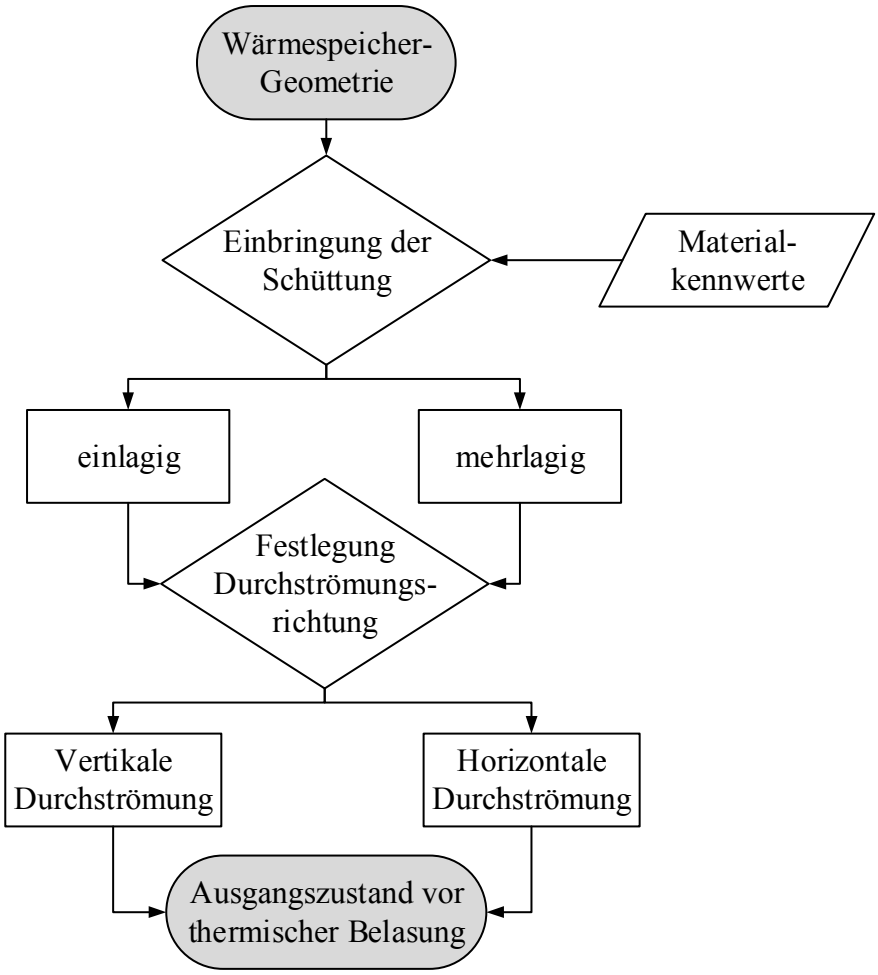


Abbildung 7-2 Ausgangszustand vor thermischer Belastung

Bevor die Schüttung thermisch beaufschlagt wird, muss diese in den Wärmespeicher-Behälter eingebracht werden (siehe Abbildung 7-3). Dies kann in einer Lage (siehe Abbildung 7-3 a)) oder in mehreren Lagen (siehe Abbildung 7-3 b)) geschehen. Die einlagige Variante führt dazu, dass sich die gesamte Schüttung innerhalb des Behälters gleichmäßig und unabhängig von der Füllhöhe erwärmt bzw. abkühlt. Um die thermische Durchströmung (näheres siehe Kapitel 3.2) des Festbett-Wärmespeichers realitätsnah abzubilden, kann die Schüttung in mehreren Schichten in den Wärmespeicher eingebracht werden. Dadurch wird der Erwärmungs- bzw. Abkühlvorgang schichtweise abgebildet. Hinsichtlich Belastungen an der Behälterwand hat diese Unterscheidung aber keinen großen Einfluss (näheres s. Kapitel 10.3).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

a) einlagig b) mehrlagig

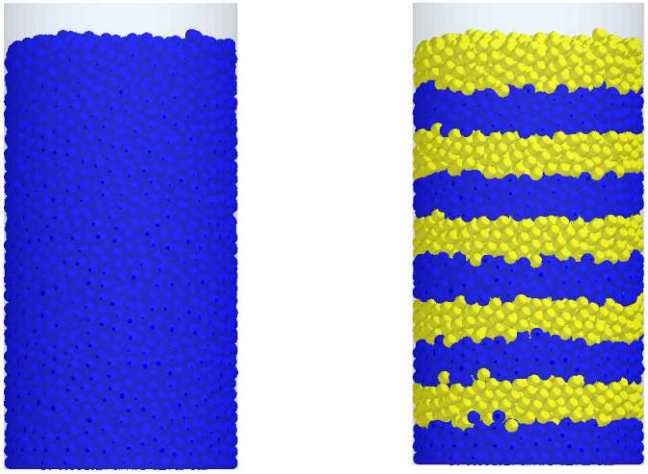


Abbildung 7-3 Aufbringen der Schüttung a) einlagig b) mehrlagig

Die Daten der Materialkennwerte, die beim Einbringen der Schüttung bereits vorliegen müssen, spielen für die Beschreibung des DEM-Berechnungsmodells keine Rolle. Diese müssen erst für die Parameterstudie unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien vorliegen (siehe Kapitel 11). Die Bestimmung der Materialkennwerte erfolgt in Kapitel 9. Je nach Durchströmungsrichtung (siehe Kapitel 3.2) kann die Schüttung in horizontalen oder vertikalen Lagen eingebracht werden. Abbildung 7-4 zeigt diese eingebrachten Schichten. Bei den vertikal ausgerichteten Schichten erfolgt die Einbringung der Partikel zeitgleich in nebeneinander angeordneten Erzeugungsflächen. Nach dem Füllvorgang muss das Gesamtsystem wieder in Ruhe sein, bevor die Erwärmungs- und Abkühlvorgänge in Kapitel 7.2 starten können.

a) vertikal b) horizontal

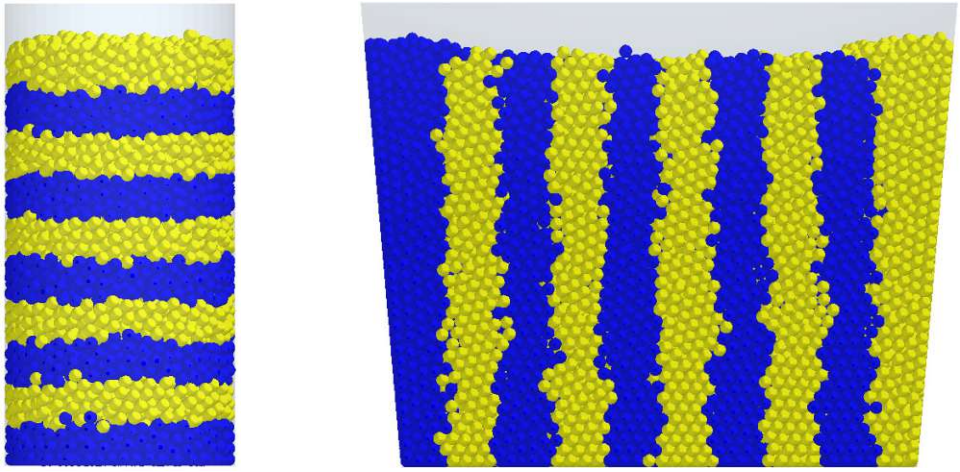


Abbildung 7-4 Schichtweiser Füllvorgang des a) vertikal und des b) horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeichers

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

7.2 Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge

Das Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge stellt den zweiten von insgesamt drei Bereichen des DEM-Berechnungsmodells dar (siehe Abbildung 7-1). Den Ausgangspunkt stellt der in Kapitel 7.1 beschriebene Ausgangszustand vor der thermischen Belastung dar (siehe Abbildung 7-5).

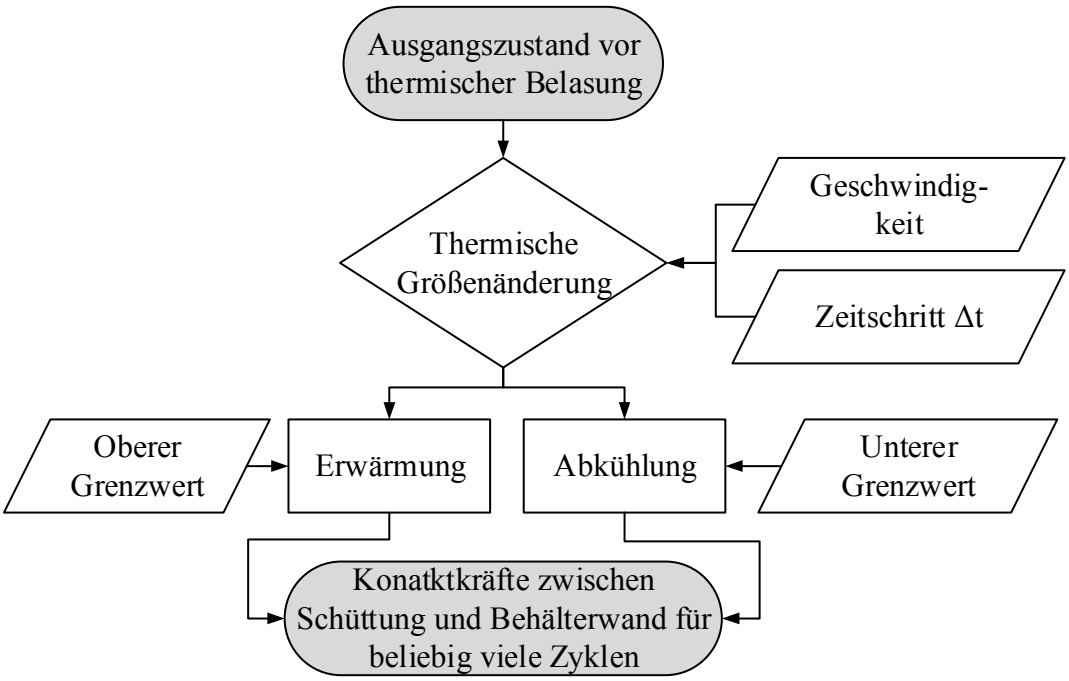


Abbildung 7-5 Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge

Ziel dieses Berechnungsmodells ist, die Beladung und Entladung des Wärmespeichers abzubilden, um den Spannungsanstieg zwischen Schüttung und Behälterwand (näheres siehe Kapitel 1.2) ermitteln zu können. Damit verbunden findet eine Größenänderung der Partikel statt. Die Größenänderung der Partikel kann grundsätzlich sprunghaft (particle replacement) oder kontinuierlich (particle grow) erfolgen. Im vorliegenden DEM-Berechnungsmodell wird eine kontinuierliche Größenänderung der Partikel verwendet. Beim Erwärmungsvorgang vergrößern sich die Partikel ausgehend vom ursprünglichen Partikeldurchmesser D_p bis zu einem maximalen Partikeldurchmesser $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$. Beim Abkühlvorgang verkleinern sich die vergrößerten Partikel mit Durchmesser $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ wieder auf den ursprünglichen Partikeldurchmesser D_p. Da eine kontinuierliche Größenänderung der Partikel stattfindet, liegt zwischen dem ursprünglichen Partikeldurchmesser D_p und dem

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

maximalen Partikeldurchmesser $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ sowohl beim Erwärmungs-, als auch beim Abkühlvorgang der veränderliche Partikeldurchmesser $D_{p_{(T)}}$ (Abbildung 7-6).

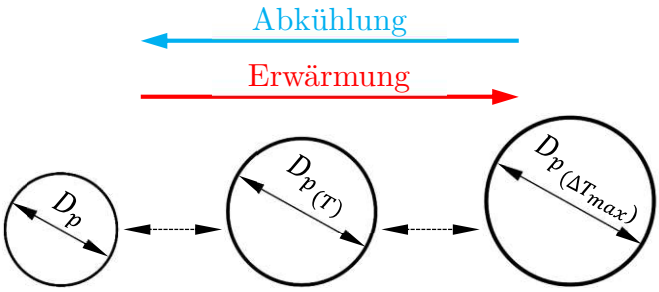


Abbildung 7-6 Partikelgrößenänderung beim Erwärmungs- bzw. Abkühlvorgang

D_p ist der ursprüngliche Partikeldurchmesser und wird mittels Sieblinie bestimmt (siehe Kapitel 9). Der maximale Partikeldurchmesser $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ lässt sich mit den bekannten Eingangsgrößen (ursprünglicher Partikeldurchmesser D_p, Wärmeausdehnungskoeffizient α_P, maximale Temperaturänderung ΔT_{max}) nach (7-1) berechnen.

$$D_{p_{(\Delta T_{max})}} = D_p \cdot (1 + \Delta T_{max} \cdot \alpha_P) \tag{7-1}$$

$D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ stellt somit den Grenzwert für das Ende des Erwärmungsvorgangs und den Beginn des Abkühlvorgangs dar. Der veränderliche Partikeldurchmesser $D_{p_{(T)}}$ wird durch Multiplikation von D_p mit einem Größenänderungsfaktor $\psi_{G\,(\Delta t)}$ nach (7-2) berechnet. Dadurch kann der Vergrößerungsvorgang $(\psi_{G\,(\Delta t)} > 1)$ bzw. Verkleinerungsvorgang $(\psi_{G\,(\Delta t)} < 1)$ der Partikel dargestellt werden.

$$D_{p_{(T)}} = D_p \cdot \psi_{G\,(\Delta t)} \tag{7-2}$$

Der Größenänderungsfaktor $\psi_{G\,(\Delta t)}$ ist von der Geschwindigkeit der Größenänderung v_G und dem Zeitschritt Δt abhängig (siehe Formel (7-3)). Die Geschwindigkeit der Größenänderung v_G ist dabei eine vorab gewählte Größe, über die die „Schnelligkeit“ der Partikelausdehnung- bzw. Partikelschrumpfung eingestellt wird. Sie wird vor Beginn der Simulation eingestellt und bleibt bis zum Ende unverändert. Weiters darf sie nicht zu hoch angesetzt werden, damit keine Instabilitäten in der Simulation auftreten. Über den Zeitschritt Δt (näheres siehe Kapitel 6.5) wird die eigentliche Größenänderung der Partikel gesteuert. Pro fortgeschrittenen Zeitschritt ändert sich die Größe des Partikels. $\psi_{G\,(\Delta t)}$ wird also mit jedem Zeitschritt Δt schrittweise

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

verändert, bis die maximale bzw. minimale Partikelgröße $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ bzw. D_p erreicht wird (siehe Abbildung 7-6). Dort stoppt die kontinuierliche Größenänderung. Die Berechnung von $\psi_{G_{(\Delta t)}}$ erfolgt nach (7-3).

$$\psi_{G_{(\Delta t)}} = 1 \pm v_G \cdot \Delta t \tag{7-3}$$

Bei Erwärmung geht der Term $v_G \cdot \Delta t$ positiv, bei Abkühlung negativ in die Gleichung ein. Die Geschwindigkeit der Größenänderung v_G hat die Einheit s^{-1}, der Zeitschritt Δt die Einheit s. Durch Multiplikation dieser beiden Größen ergibt sich ein einheitenloser Term und damit verbunden ein einheitenloser Faktor $\psi_{G_{(\Delta t)}}$ (7-3). Die genauen Werte von v_G und Δt der später folgenden Simulationen sind in Kapitel 11 angeführt.

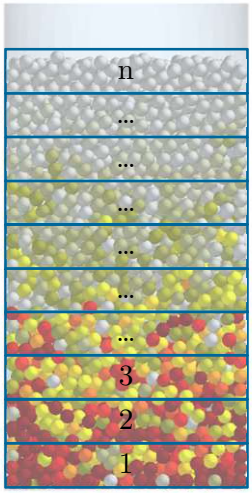
Der veränderliche Partikeldurchmesser $D_{p_{(T)}}$ ist also nicht direkt von ΔT abhängig, da die Größenänderung über den Zeitschritt Δt passiert. Um den Vergrößerungs- bzw. Verkleinerungsprozess der Partikel darzustellen, werden diese über den fortlaufenden Zeitschritt Δt verändert. Mit $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ bzw. D_p gibt es einen oberen bzw. unteren Grenzwert, der von der maximalen Temperaturänderung ΔT_{max} abhängt und festlegt, wo der der Vergrößerungs- bzw. Verkleinerungsprozess stoppt. Der oberer und untere Grenzwert für das Ende des Vergrößerungs- und Verkleinerungsprozesses ist in (7-4) und (7-5) angeführt.

$$D_{p_{(T)}} \leq D_{p_{(\Delta T_{max})}} \tag{7-4}$$

$$D_{p_{(T)}} \geq D_p \tag{7-5}$$

Im Gegensatz zu [38] kann der Inhalt des Wärmespeichers schichtweise vergrößert oder verkleinert werden. Der Inhalt des Wärmespeichers kann in beliebig vielen Schichten n aufgeschüttet werden (siehe Abbildung 7-7). Die Wahl von n (Anzahl der Schichten) bei den später folgenden Berechnungen (siehe Kapitel 11) ist in Kapitel 10.3 beschrieben. Zusätzlich kann jeder Schicht ein Zeitpunkt t_n zugewiesen werden, über den der Belade- und Entladebeginn festgelegt wird. Dadurch kann eine beliebige Temperaturverteilung bei Beladung und Entladung des Wärmespeichers dargestellt werden. Über die Anzahl der Belade- und Entladezyklen können mehrere Durchläufe simuliert werden um zu untersuchen, wie sich mehrmaliges Erwärmen und Abkühlen auf die Ergebnisse auswirkt (näheres siehe Kapitel 11).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



Einstellbare Parameter:

- Thermische Ausdehnung

  $D_{p_{(T)}} = D_p \cdot \psi_{G_{(\Delta t)}}\ mit$

  $\psi_{G_{(\Delta t)}} = 1 \pm v_G \cdot \Delta t$

- Anzahl der Schichten n
- Belade- und Entladebeginn t_n
- Anzahl der Belade- und Entladezyklen

Abbildung 7-7 Aufbau des DEM-Berechnungsmodells

7.3 Ausgabe der Ergebnisse

Das Ausgabe der Ergebnisse stellt den dritten und letzten Bereich des DEM-Berechnungsmodells dar (siehe Abbildung 7-1). Den Ausgangspunkt stellt das in Kapitel 7.2 beschriebene Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge dar (siehe Abbildung 7-8).

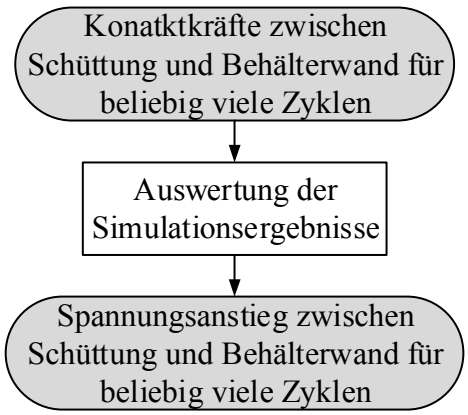


Abbildung 7-8 Ausgabe der Ergebnisse

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt in EDEM über die Ausgabe der Kontakte zwischen Partikel und Behälterwand. Zu jeder ausgegebenen Kontaktkraft wird die zugehörige Kontaktposition erfasst. Die Behälterhöhe wird in mehrere Abschnitte eingeteilt (siehe Abbildung 7-9). Die erfassten Kontaktkräfte werden im jeweiligen Abschnitt über die Abschnittsfläche zu einem Druck umgerechnet. So lässt sich die Druckverteilung über die Behälterhöhe darstellen (siehe Abbildung 8-1 bzw. Ergebnisse in Kapitel 11). Bei der Auswahl der Kontaktkräfte muss darauf geachtet werden, dass nur die Kontaktkräfte an der Behälterwand miteinbezogen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

werden (nicht die Kontaktkräfte am Behälterboden). Die Reibung am Boden bewirkt eine Verminderung der Belastung auf die Zylinderwand. Das führt zu kleiner werdenden Drücken in der untersten Schicht. Die Auswertung der Kontaktkräfte muss daher knapp über dem Boden erfolgen (siehe Abbildung 7-9).

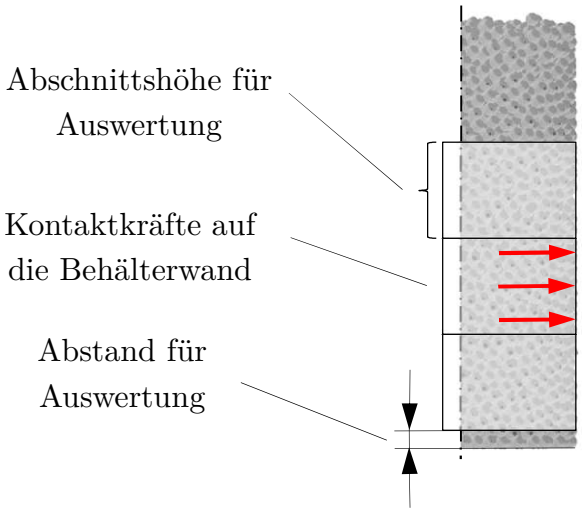


Abbildung 7-9 Ausgabe der Simulationsergebnisse in EDEM

Die Behälterwände werden in den Simulationen als starr angenommen. Das heißt es kommt zu keiner thermischen Ausdehnung der Behälterwand im Zuge der Erwärmungsvorgänge. Die Begründung liegt darin, dass diese Ausdehnungen seitens IET durch geeignete Isolation bzw. Dehnfugen in der Behälterwand abgefangen werden.

Einen Gesamtüberblick des entwickelten DEM-Berechnungsmodells liefert das Blockschaltbild auf der nächsten Seite in Abbildung 7-10. Dort sind die bereits gezeigten und beschriebenen Bereiche (Ausgangszustand vor thermischer Belastung / Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge / Ausgabe der Ergebnisse) nochmal in einem Ablaufdiagramm zusammengefasst.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

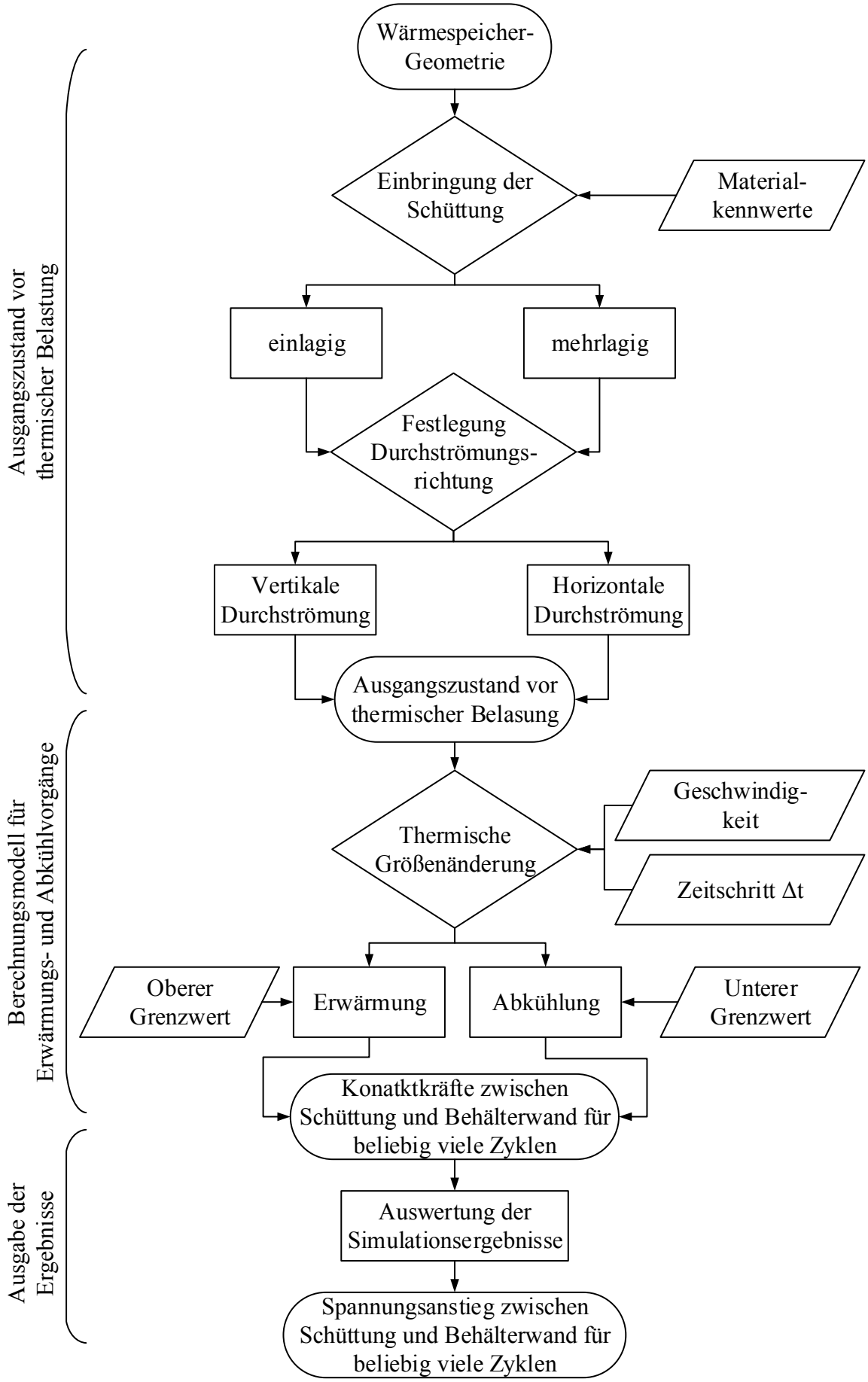


Abbildung 7-10 Vollständiges Blockschaltbild des DEM-Berechnungsmodells

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

8 Verifikation und Validierung des DEM-Berechnungsmodells

8.1 Verifikation des DEM-Berechnungsmodells

Bevor es zur Validierung des DEM-Berechnungsmodells in Kapitel 8.2 kommt, wird das DEM-Modell aus Kapitel 7 einer Verifikation unterzogen. Dabei wird getestet, ob es grundsätzlich ein plausibles Verhalten zeigt bzw. zu plausiblen Ergebnissen führt. Vereinfacht betrachtet soll die Verifikation des DEM-Berechnungsmodells prüfen, ob das Modell macht was es soll. Im Gegensatz zur Verifikation soll die anschließend folgende Validierung (s. Kapitel 8.2) prüfen, ob das Modell neben dem richtigen Verhalten auch zahlenmäßig richtige Ergebnisse liefert. Dazu wurde eine nach obenhin offene, verkleinerte Wärmespeicher-Geometrie mit zehn horizontal angeordneten Schichten befüllt (s. Abbildung 8-1). Der Behälter erfährt keine thermische Ausdehnung. Eine Übersicht zu dieser Konfiguration liefert Tabelle 8-1.

Tabelle 8-1 Materialkennwerte zur Verifikation des DEM-Berechnungsmodells

Geometrie	Partikelradius	Partikeldichte	Packungsdichte
D = 1,7 m, H = 1,1 m	0,050 m	2400 kg/m³	0,61
E-Modul Partikel	E-Modul Wand	Temperatur-änderung	Wärmeausdehn-ungskoeffizient
130 MPa	210 GPa	300 °C	$4 \cdot 10^{-6}$ 1/K
Reibkoeffizient Partikel-Wand		Reibkoeffizient Partikel-Partikel	
Statische Reibung	Rollreibung	Statische Reibung	Rollreibung
0,43	0,63	0,55	0,1

Die grüne Linie in Abbildung 8-1 zeigt die mittels DEM-Simulation berechnete Spannung im Ausgangszustand (bei Umgebungstemperatur) vor der thermischen Belastung (näheres siehe Kapitel 7.1). Wie zu erkennen ist, stimmt die errechnete Spannung der DEM-Simulation – basierend auf dem klassischen Hertz-Mindlin-Kontaktmodell (siehe Kapitel 6.3) – gut mit dem analytisch nach (5-5) ermittelten Schüttdruck nach Janssen überein (schwarz strichlierte Linie in Abbildung 8-1).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

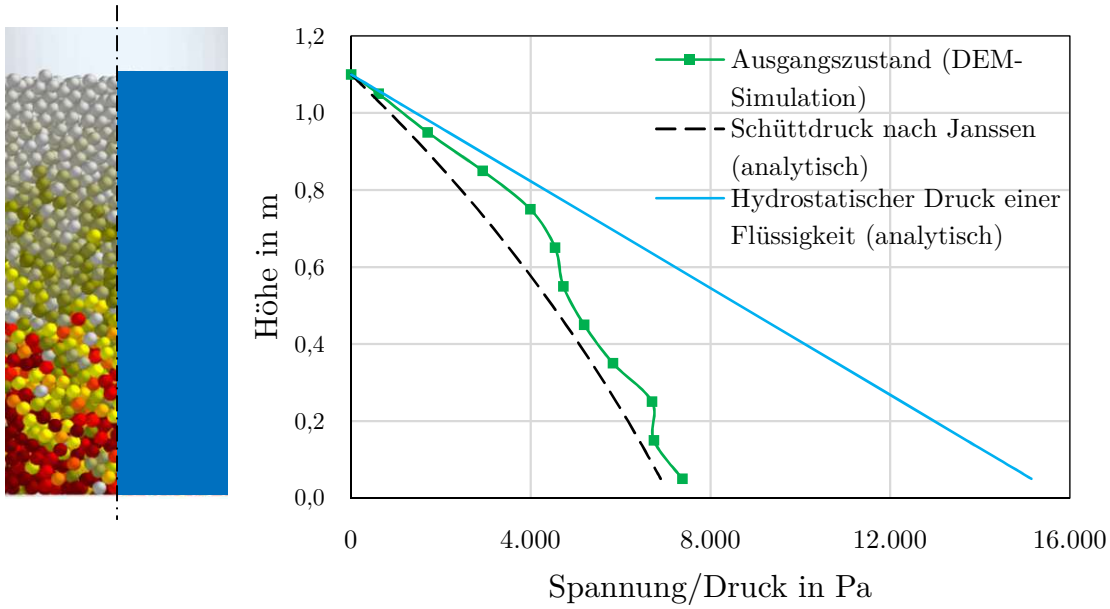


Abbildung 8-1 Spannungs-/Druckverlauf für Schüttgut und eine Flüssigkeit (analytisch und DEM-Simulation)

Die durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Spannungen auf die Behälterwand werden auf den am Boden vorliegenden horizontalen Schüttdruck nach Janssen (siehe Kapitel 5.2) bezogen und auf der Abszisse aufgetragen (siehe Abbildung 8-2). Der Grund hierfür liegt in einer besseren Vergleichbarkeit der Spannungserhöhungen (siehe Ergebnisse in Kapitel 11). Ausgehend vom Ausgangszustand (Umgebungstemperatur) in Abbildung 8-2 a), führt die Erwärmung des Schüttguts zu den Ergebnissen im Beladungszustand 1 und 2 (gelbe Linien) (siehe Abbildung 8-2 b)). Die ursprüngliche Linie des Ausgangszustandes (grün) verschiebt sich mit zunehmender Beladung (= Erwärmung) nach rechts und nimmt in jeder Höhenlage höhere Drücke an. Im Beladungszustand 1 hat das Schüttgut im oberen Teil bereits eine Temperaturänderung erfahren. In der untersten Schicht hat sich die Temperatur gering geändert. Daher hat die Spannung im Vergleich zum Ausgangszustand im unteren Bereich nur leicht zugenommen. Im Beladungszustand 2 hat die Temperaturänderung bereits über die gesamte Höhe stattgefunden, die Endtemperatur wurde in den untersten Schichten aber noch nicht erreicht. Im Endzustand (beladen) hat die Belastung auf die Behälterwand ihr Maximum (rote Linie), da der gesamte Inhalt die Endtemperatur erreicht hat (rote Linie in Abbildung 8-2 c)). Auf den Erwärmungsprozess folgt der Abkühlprozess. Im Endzustand (entladen) verschiebt sich die Spannung im Laufe des Entladevorganges (= Abkühlung) wieder zu niedrigeren Belastungen (blaue Linie). Dabei ist

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

erkennbar, dass nach Beendigung des Entladevorganges die maximale Belastung an der Behälterwand in Bodennähe nun geringfügig höher ist als zu Beginn des Ausgangszustandes (grüne Linie).

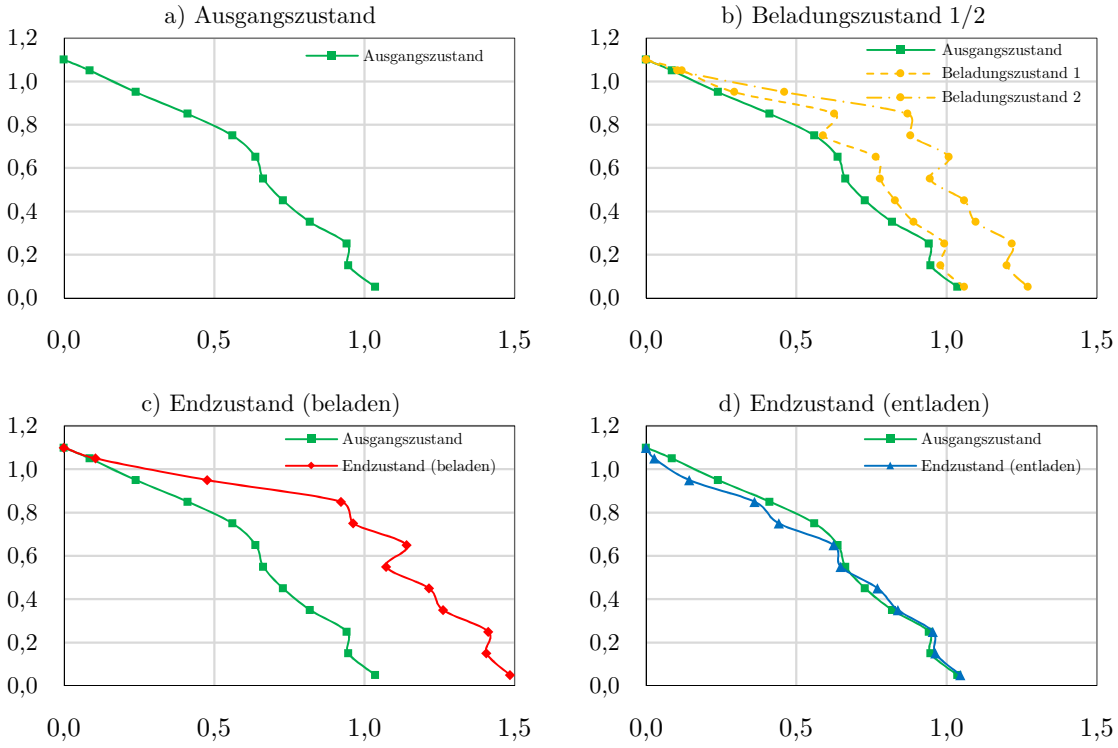


Abbildung 8-2 Normierte Spannung des Belade- und Entladevorganges

Fasst man diese vier Zustände in ein Diagramm zusammen, erhält man die Graphensammlung in Abbildung 8-3.

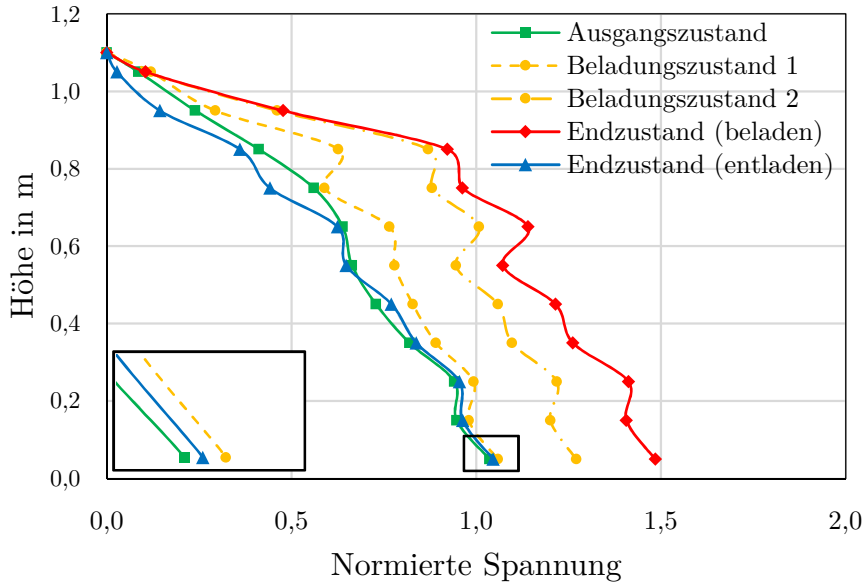


Abbildung 8-3 Normierte Spannung des Belade- und Entladevorganges

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Bisher wurde nur ein Belade- und ein Entladevorgang betrachtet (siehe Abbildung 8-3). Im realen Betrieb ist es von Interesse, ob sich die Belastung auf die Behälterwand im Laufe mehrerer Zyklen verändert. Wie die Ergebnisse in Abbildung 8-4 zeigen, steigt die Belastung bei der ersten Beladung auf den 1,5-fachen Horizontaldruck nach Janssen an. Bei jeder weiteren Beladung erhöht sich der Druck nur noch wenig. Je nach Schüttgutsteifigkeit (näheres siehe Kapitel 6.4) können die Belastungen auf den Behälter aber auch in weitaus höherem Maße zunehmen. Dies ist auch deshalb zu erwarten, weil in der Phase der Modellbildung mit einer geringeren Schüttgutsteifigkeit gerechnet wurde.

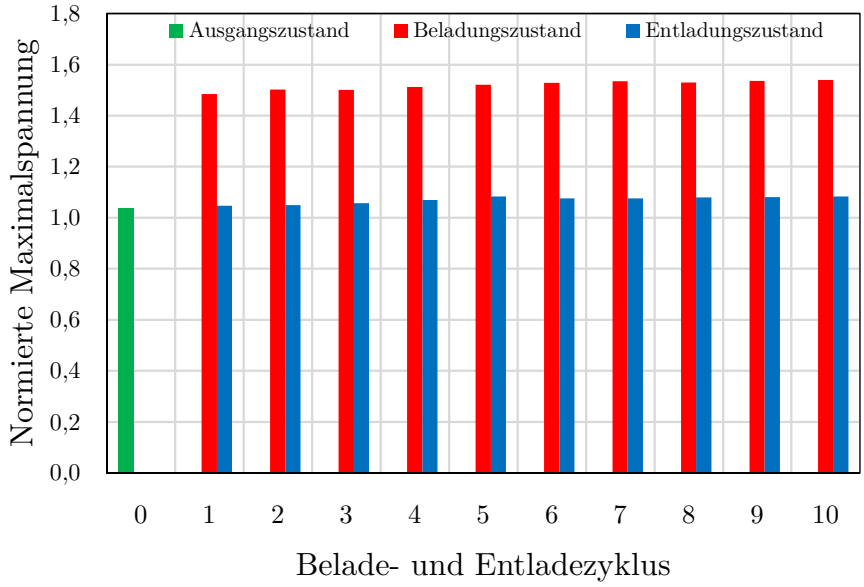


Abbildung 8-4 Einfluss mehrerer Erwärmungs- und Abkühlvorgänge auf die Maximalspannung der Behälterwand

Das DEM-Modell liefert plausible Ergebnisse und kann somit als verifiziert bezeichnet werden. Im nachfolgenden Kapitel 8.2 erfolgt die ausstehende Validierung des DEM-Berechnungsmodells um zu prüfen, ob das Modell auch richtige Ergebnisse in Form von Zahlenwerten liefert.

8.2 Validierung des DEM-Berechnungsmodells

Das im Simulationsprogramm EDEM erstellte DEM-Berechnungsmodell muss noch einer Validierung unterzogen werden, bei der die Gültigkeit des Berechnungsmodells überprüft wird. Nach ISO 9000 versteht man unter Validierung die *„Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.“[2]

Dies geschieht mit ein- und mehrdimensionalen Validierungsversuchen (siehe Kapitel 8.2.1 und 8.2.2). Zum Vergleich werden die Ergebnisse der Arbeit Sassine [51] verwendet. Dort wurden ähnliche Untersuchungen mit einem DEM-Simulationsprogramm (YADE) durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation wurden experimentell überprüft und können als validiert angesehen werden (näheres siehe [51]). Als Kontaktmodell kommt das Linear-Spring-Modell (siehe Kapitel 6.3) zur Anwendung.

8.2.1 Eindimensionale Validierung

Bei der eindimensionalen Validierung wird überprüft, ob die Wärmeausdehnung zu den erwarteten Normalkräften zwischen den jeweiligen Partikeln führt. Dazu werden fünf Partikel horizontal nebeneinander angeordnet (siehe Abbildung 8-5). Die den Partikeln zugeordneten Materialkennwerte sind in Tabelle 8-2 angeführt.

Tabelle 8-2 Materialkennwerte nach [51] für die eindimensionale Validierung

Partikelradius	E-Modul	Temperaturänderung	Wärmeausdehnungskoeff.
0,1 m	$1 \cdot 10^8$ Pa	2 °C	$4 \cdot 10^{-6}$ 1/°C

Die beiden äußeren Partikel (blau) sind wie in [51] fix angeordnet und erfahren keine Wärmeausdehnung. Die drei in der Mitte befindlichen Partikel (rot) werden mit einer Temperaturänderung ΔT beaufschlagt. Die Erdbeschleunigung in z-Richtung (siehe Abbildung 8-5) wird vernachlässigt.

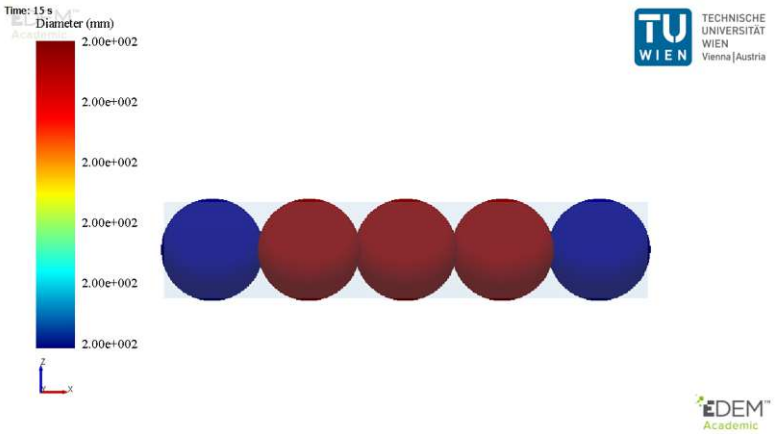


Abbildung 8-5 Anordnung der Partikel in der DEM-Simulation

[2] Auszug ISO 9000

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die rote Linie in Abbildung 8-6 zeigt die Vergrößerung des ursprünglichen Partikeldurchmessers nach (7-2). Mit den Materialkennwerten aus Tabelle 8-2 ergibt sich nach (7-1) ein Enddurchmesser von 200,0016 mm. Die blaue Linie in Abbildung 8-6 zeigt den Anstieg der Normalkraft, der durch den Vergrößerungsvorgang hervorgerufen wird. Die Simulation liefert eine Normalkraft von 0,792 N zwischen den Partikeln (siehe Abbildung 8-6). Die Gesamtbeanspruchung des Partikels liegt somit bei 1,584 N (Kontakt auf der linken und rechten Seite). Mit den Materialkennwerten aus Tabelle 8-2 ergibt sich nach (5-10) ein $\sigma_W = 800\,Pa$. Mit dem Zusammenhang aus (8-3) liefert der äquivalente Radius r_P einen Wert von 0,005 m. Der kreisförmig beanspruchte Querschnitt A_W ergibt somit 0,002 m². Setzt man dieses A_W in Gleichung (5-11) ein, erhält man für F_W einen Wert von 1,571 N, der sehr gut mit dem Ergebnis der Simulation übereinstimmt. Die Abweichung beträgt nur 0,83%.

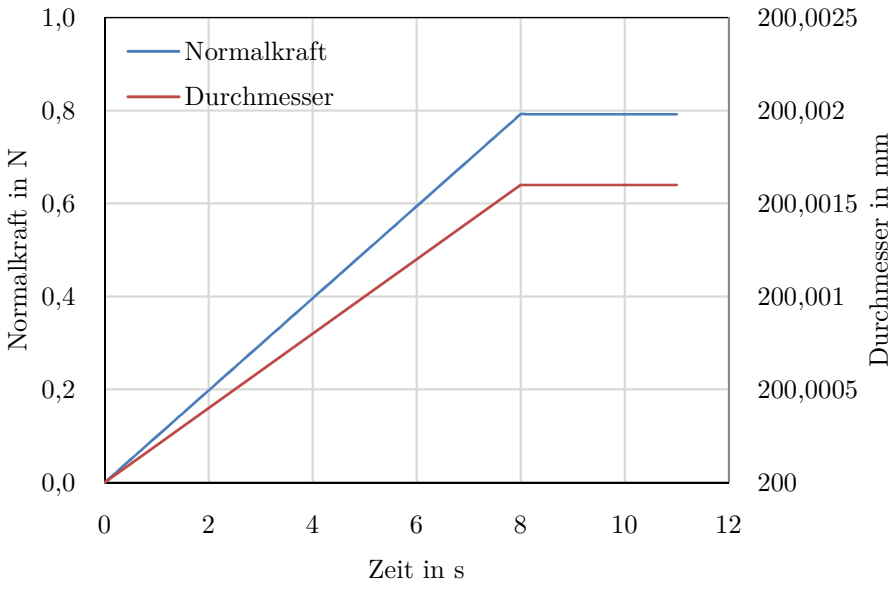


Abbildung 8-6 Anstieg der Normalkraft zufolge Temperaturänderung

8.2.2 Mehrdimensionale Validierung

Bei der mehrdimensionalen Validierung des DEM-Berechnungsmodells wird analog zu [51] ein Zylinder (Durchmesser 1 m, Füllhöhe 2 m) mit Partikeln befüllt (mit zehn Partikel-Schichten). Diese Partikel werden einer Temperaturänderung ΔT von 300 °C ausgesetzt. Dieses ΔT führt nach (7-2) zu einer Vergrößerung der Partikel. Damit verbunden steigt auch die Belastung auf die Zylinderwand. Nach dem Abkühlen des Behälterinhalts folgen mehrerer Erwärmungs- und Abkühlvorgänge, die mit den Ergebnissen aus [51] verglichen werden. Die hierfür verwendeten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Materialkennwerte sind in Tabelle 8-3 angeführt. In [51] wurde die Entscheidung getroffen, dass bei den Reibwinkeln zwischen Füll- und Erwärmungsvorgang unterschieden wird. Konkret bedeutet das, dass die Reibwinkel nach dem Füllvorgang (= vor dem Erwärmungsvorgang) von 5° auf 45° erhöht werden.

Tabelle 8-3 Materialkennwerte nach [51] für die mehrdimensionale Validierung

Partikelradius	Partikeldichte	Packungsdichte	Dämpfung
0,029 m	2750 kg/m³	0,61	0,4
E-Modul Partikel	E-Modul Wand	Temperatur-änderung	Wärmeausdehn-ungskoeffizient
207 MPa	210 GPa	300 °C	$4 \cdot 10^{-6}$ 1/K
Reibwinkel Partikel-Wand (Füll-/Erwärmungsvorgang) 5°/45°		Reibwinkel Partikel-Partikel (Füll-/Erwärmungsvorgang) 5°/45°	

Die Umrechnung der in [51] angegebenen Steifigkeiten von Partikel und Wand auf den E-Modul E erfolgt mit Hilfe des Zusammenhangs aus [9]. Der in Tabelle 8-3 angeführte E-Modul von Partikel und Wand lässt sich nach (8-1) berechnen. Neben der Normalsteifigkeit k_n (näheres siehe Kapitel 6) fließt auch der äquivalente Radius r_P ein. Dieser äquivalente Radius r_P lässt sich nach (8-2) ermitteln.

$$E = \frac{k_n}{r_P} \tag{8-1}$$

$$\frac{1}{r_P} = \frac{1}{r_{P_1}} + \frac{1}{r_{P_2}} \tag{8-2}$$

Für den E-Modul des Partikels muss für r_P die Kombination zwischen Partikel/ Partikel betrachtet werden. r_{P_1} und r_{P_2} entsprechen beide dem Partikelradius R_P. Setzt man diese beiden Werte in (8-2) ein, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\frac{1}{r_P} = \frac{1}{R_P} + \frac{1}{R_P} = \frac{2}{R_P} \tag{8-3}$$

Für den E-Modul der Wand muss für r_P die Paarung zwischen Partikel/Wand betrachtet werden. r_{P_1} entspricht dabei dem Partikelradius R_P und r_{P_2} dem Wandradius R_W, der als unendlich angesehen werden kann. Setzt man diese beiden Werte in (8-2) ein, ergibt sich folgender Zusammenhang:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$\frac{1}{r_P} = \frac{1}{R_P} + \frac{1}{R_W \to \infty} \tag{8-4}$$

Folglich ergibt die Berechnung des E-Moduls der Wand mit $r_P = R_P$ nach (8-1) einen Wert von 210 GPa, der jenem von Stahl entspricht. Für den E-Modul des Partikels erhält man mit $r_P = R_P/2$ nach (8-1) einen Wert von 207 MPa. Der Vergleich zwischen den beiden Berechnungsmodellen (EDEM und YADE) erfolgt anhand der Gegenüberstellung der Behälterbelastungen (Pressung zwischen Schüttung und Behälterwand) im Ausgangs-, Beladungs- und Entladungszustand (näheres siehe Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3). Diese Spannungen werden auf den hydrostatischen Druck am Boden nach (5-1) bezogen ($p_{(z=2m)} = 32.913\,Pa$). Zusätzlich werden die Belastungen auf den Behälter im Verlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen gegenübergestellt (näheres siehe Abbildung 8-4). Die Verläufe des in YADE erstellten DEM-Modells sind in Abbildung 8-7 in Form von Balken zu sehen. Die Ergebnisse der Simulation mit EDEM sind die eingetragenen Punkte in Abbildung 8-7. Wie sich zeigt, stimmen die Ergebnisse gut überein. Die Vergleiche zeigen, dass das entwickelte DEM-Modell zur Berechnung der thermo-mechanischen Spannungen somit korrekt ist.

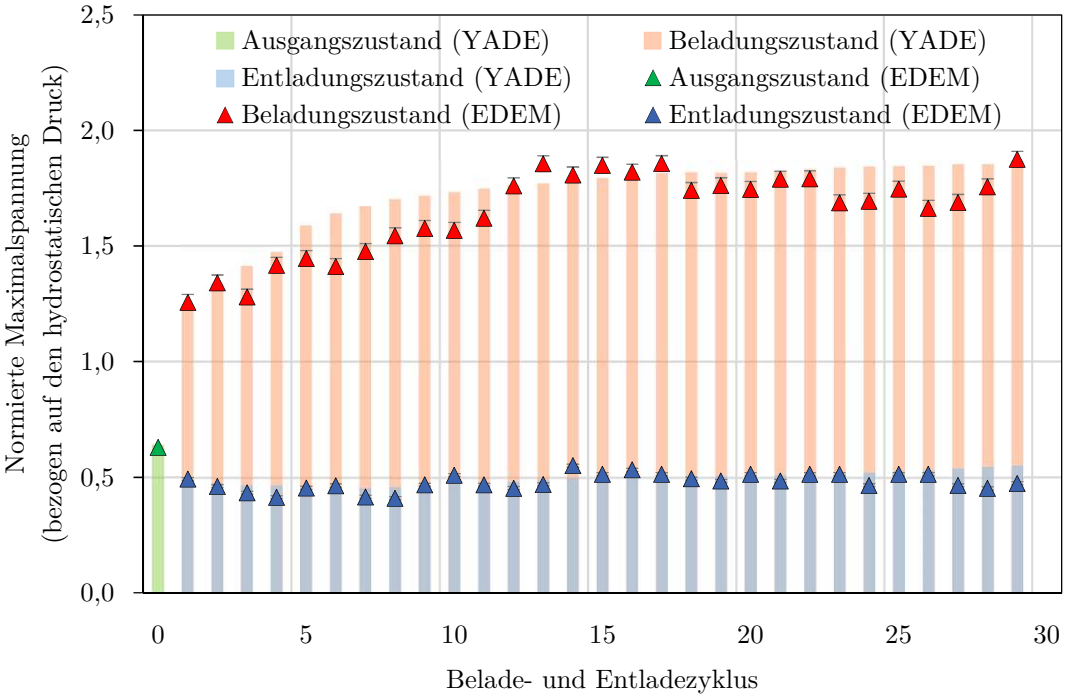


Abbildung 8-7 Vergleich der Ergebnisse zur Validierung des in EDEM erstellten DEM-Modells zur Berechnung thermo-mechanischer Spannungen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

9 Bestimmung der Schüttgut-Materialkennwerte

Die Diskrete-Element-Methode wird zur Modellierung von körnigen Materialien (näheres siehe Kapitel 6) und zur Analyse einer Vielzahl von verwandten Anwendungen eingesetzt. Genaue Vorhersagen zum Spannungsanstieg sind jedoch nur möglich, wenn die Werte der Eingangsparameter richtig ausgewählt werden. Damit das in Kapitel 7 entworfene DEM-Berechnungsmodell in Kapitel 11 für Parameterstudien angewendet werden kann, müssen die Materialkennwerte für das verwendete Schüttgut bestimmt werden.

Um trotz der für die DEM-Simulation erforderlichen Vereinfachungen das Schüttgutverhalten richtig abbilden zu können, ist eine Kalibrierung des Haft- und Rollreibungskoeffizienten zwischen den Partikeln notwendig. Diese Vereinfachungen sind im speziellen die sphärische Abbildung der Kornform sowie die Erhöhung der Partikelgröße. Eine Verringerung der Partikelsteifigkeit darf nicht erfolgen (näheres siehe Kapitel 10.4). Dadurch kann die Rechenzeit erheblich reduziert werden. Für die Kalibrierung des Haft- und Rollreibungskoeffizienten zwischen den Partikeln gibt es mehrere Ansätze [13].

Als Kalibrier-Methode kommt der Draw-Down-Versuch nach [49] zur Anwendung, der den Wert für die Haft- und Rollreibung der Partikel liefert (siehe Kapitel 9.3). Bei dieser Kalibriermethode wird neben dem Böschungs- und Scherwinkel in ° (siehe Abbildung 9-11) auch der Massefluss in kg/s und der verbliebene Masseanteil in % gemessen (siehe Abbildung 9-6). Diese vier Größen werden als Vergleichsgrößen bezeichnet (siehe Tabelle 9-3).

Weitere Materialkennwerte werden in Kapitel 9.2 über Rutsch- und Rollversuche ermittelt. Auch die richtige Wahl des E-Moduls ist von Bedeutung, um die Spannungen in der Schüttung und zwischen Schüttung und Behälterwand korrekt ermitteln zu können. Dazu werden Druckversuche mit Schüttgut in einem Behälter durchgeführt und mit DEM-Simulationen verglichen (siehe Kapitel 9.5). Dieser

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Vergleich liefert den gesuchten E-Modul. Der Zeitschritt muss ebenfalls geeignet gewählt werden. Wird er zu groß angesetzt, kann es zu Instabilitäten der Simulation kommen (näheres siehe Kapitel 9.6). Wird er hingegen zu klein gewählt, ergeben sich lange Rechenzeiten. Bei kohäsionslosen, freifließenden Schüttgütern spielen folgende Parameter eine wichtige Rolle:

- Elastizitätsmodul (Young's Modulus)
- Restitutionskoeffizient (CoR)
- Haftreibung Partikel-Stahl (P-S)
- Rollreibung Partikel-Stahl (P-S)
- Haftreibung Partikel-Plexiglas (P-PG)
- Rollreibung Partikel-Plexiglas (P-PG)
- Korngrößenverteilung (PSD)
- Schüttgutdichte
- Porosität
- Zeitschritt
- Haftreibung Partikel-Partikel (P-P)
- Rollreibung Partikel-Partikel (P-P)

Als Schüttgut wird ein von einem Kies- und Betonwerk bereitgestellter Schotter mit einer Korngröße von 8 bis 16 mm (Bezeichnung: RK 8/16) verwendet (siehe Abbildung 9-1). Dieser kann als kohäsionslos angesehen werden.

Abbildung 9-1 Zu kalibrierendes Schüttgut (Schotter – RK 8/16)

9.1 Materialkennwerte aus der Literatur

Der mittlere Partikeldurchmesser und die Korngrößenverteilung lassen sich aus der vom Kies- und Betonwerk übermittelten Sieblinie in Tabelle 9-1 berechnen. Um den für die DEM-Simulation notwendigen mittleren Partikeldurchmesser zu bekommen, wird der Partikeldurchmesser der Sieblinie bei einem Siebdurchgang von 50% genommen. Dieser ergibt einen Wert von 12,158 mm. Der gewählte mittlere Partikeldurchmesser wird mit 12 mm festgelegt. Die Partikeldichte des Schotters beträgt 2750 kg/m³, die Schüttgutdichte ca. 1500 kg/m³ bei einer Porosität von 0,45.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Tabelle 9-1 Ergebnistabelle der Sieblinie

Ergebnisse der Sieblinie														
Siebweite (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2	16	22,4	31,5	45	63
Siebdurchgang (%)	0,1						0,1	2,2	39,0	94,1	100	100	100	100

Der aus der Literatur vorgeschlagene Wertebereich für den E-Modul des Schotters ist sehr groß. Dieser kann nach [73] bei 13 GPa bis 50 GPa [68] oder 70 GPa [74] liegen. Zu Beginn wurde ein Wert von 90 GPa verwendet. Zur richtigen Wahl des E-Moduls folgen Druckversuche (siehe Kapitel 9.5). Dort hat sich die Annahme von 90 GPa als zu hoch herausgestellt. Beim Restitutionskoeffizient sowie bei den Poissonzahlen kann auf Erfahrungswerte von 0,275 und 0,3 zurückgegriffen werden [31].

9.2 Rutsch- und Rollversuch

Wichtige DEM-Parameter sind der Haft- und Rollreibungskoeffizient μ_H und μ_R zwischen den Partikeln und der Behälterwand (Partikel-Stahl (P-S) und Partikel-Plexiglas (P-PG)). Diese müssen für den Draw-Down-Versuch vorab bekannt sein. Diese Reibwerte, die der Geometrie der Kalibriervorrichtung (siehe Abbildung 9-3) zugewiesen werden müssen, werden über einen Rutsch- bzw. Rollversuch bestimmt. Abbildung 9-2 zeigt in a) bzw. b) die Ermittlung der Haftreibung zwischen Schotter und Stahl bzw. Schotter und Plexiglas mittels Rutschversuch. Zur Ermittlung der Rollreibung wird eine Gummiunterlage verwendet (siehe Abbildung 9-2 c)). Damit wird sichergestellt, dass das Schüttgut nicht rutscht, sondern rollt.

a) b) c)

Abbildung 9-2 Experimentelle Durchführung der Rutsch- bzw. Rollversuche

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Sobald das Schüttgut zu rutschen bzw. rollen beginnt, wird der Reibwinkel φ_R des Winkelmessers notiert (siehe Abbildung 9-2). Über (9-1) lassen sich somit die gemittelten Reibwerte des Haftreibungskoeffizienten μ_H und Rollreibungskoeffizienten μ_R ermitteln, welche in Tabelle 9-2 zusammengefasst sind.

$$\mu_H, \mu_R = \tan(\varphi_R) \tag{9-1}$$

Tabelle 9-2 Materialkennwerte Rutsch- und Rollversuch

Experimentell bestimmte Materialkennwerte						
Kennwert	Methode	MW 1 φ_{R1} (°)	MW 2 φ_{R2} (°)	MW 3 φ_{R3} (°)	Mittelwert φ_R (°)	Errechneter Reibwert $\tan(\varphi_R)$
Haftreibung P-S	Rutsch-Versuch	20,4	20,2	21,1	20,6	0,375
Rollreibung P-S	Roll-Versuch	29,0	34,3	30,7	31,3	0,609
Haftreibung P-PG	Rutsch-Versuch	26,5	23,1	24	24,5	0,456
Rollreibung P-PG	Roll-Versuch	29,0	34,3	30,7	31,3	0,609

9.3 Draw-Down-Versuch

Obwohl die eingangs erwähnten Vereinfachungen bei fast jeder DEM-Simulation angewendet werden, gibt es aktuell keine Standard-Kalibriermethode. In den meisten Fällen wird über den Böschungswinkel (Angle of repose = AoR) kalibriert. Dabei wird aber nur eine Größe in Form des Böschungswinkels betrachtet, um die Haft- und Rollreibung zwischen den einzelnen Partikeln zu kalibrieren.

Um mehrere unabhängige Größen für die Ermittlung dieser beiden Reibparameter zu erhalten, wird der Draw-Down-Versuch verwendet. Hier wird neben dem Böschungs- und Scherwinkel (°) auch der Massefluss (kg/s) und der verbliebene Masseanteil (%) in der oberen Kammer gemessen (siehe Abbildung 9-11). Für diesen Versuch wurde eine Kalibriervorrichtung am IKP der TU Wien angefertigt (siehe Abbildung 9-3 und Abbildung 9-4).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

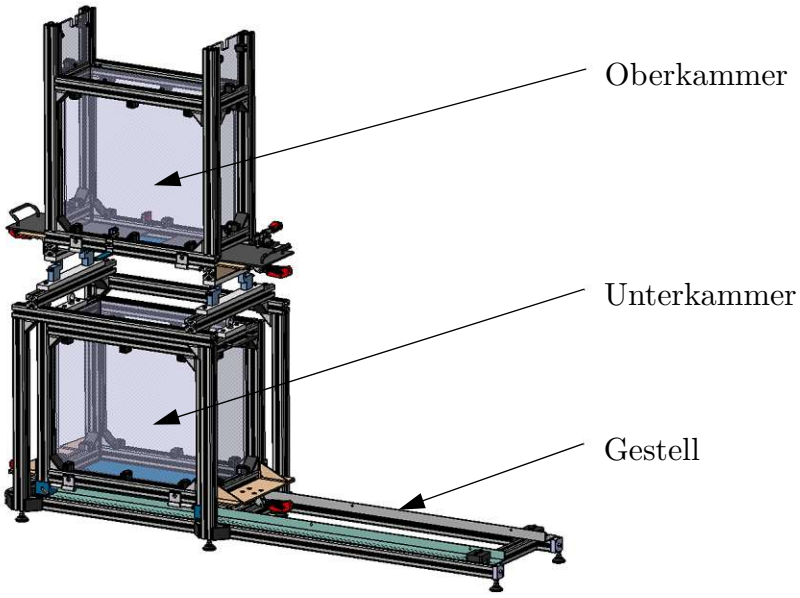


Abbildung 9-3 Kalibriervorrichtung für Schüttgüter (CAD-Modell)

Der im Zuge dieses Projektes entworfene Prüfstand für Schüttgutkalibrierungen nach [49] besteht aus drei Hauptkomponenten (siehe Abbildung 9-3). Diese Hauptkomponenten sind eine Oberkammer, eine Unterkammer und ein Gestell. Die Oberkammer ist im Sinne der statischen Bestimmtheit über drei Kraftmessdosen (S2M, Genauigkeitsklasse 0.02, Nennkraft 500 N) mit der Oberseite des Gestells verbunden.

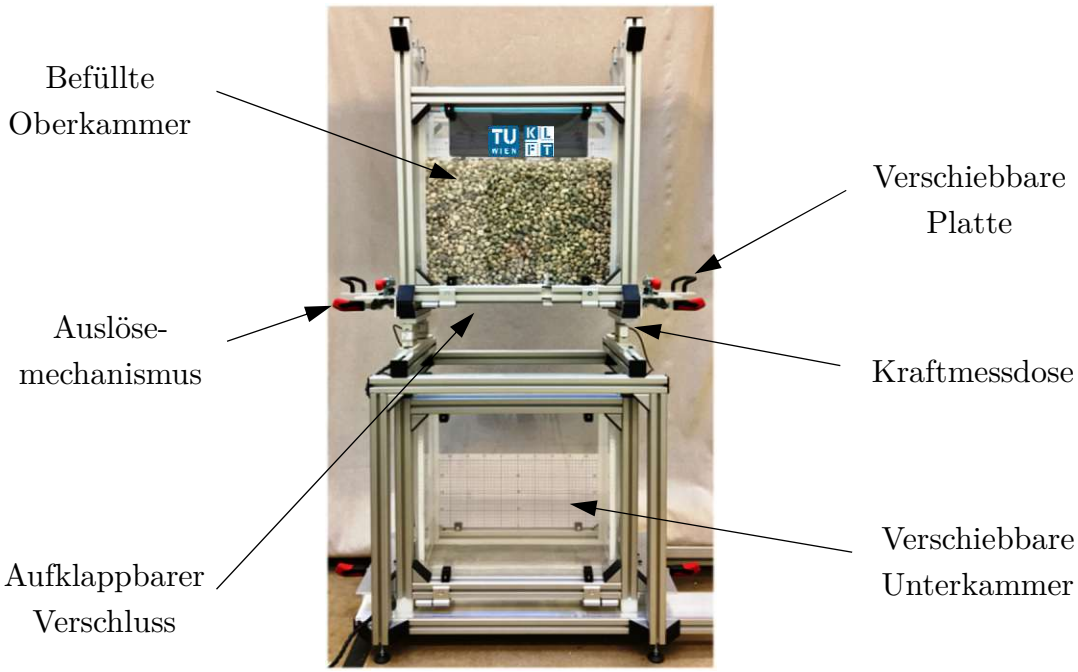


Abbildung 9-4 Kalibriervorrichtung am IKP, TU Wien

Die Ober- bzw. Unterkammer ist jeweils mit vier Plexiglasscheiben eingefasst und am Boden befinden sich zwei aufklappbare Verschlüsse. Damit erfolgt die Entleerung der Kammern. Die Oberkammer umfasst zusätzlich zwei verschiebbare Platten, über

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

die ein variabler Spalt eingestellt wird (siehe Abbildung 9-4). Die Unterkammer kann wie in Abbildung 9-5 dargestellt in drei unterschiedliche Positionen gebracht werden. Position 1 stellt die Anordnung zur Versuchsdurchführung dar. In der 2. Position wird die Unterkammer vor bzw. nach dem Kalibriervorgang in Stellung gebracht, um entweder für den Füllvorgang in Position 3 oder für den Entleervorgang nach Versuchsende zu dienen.

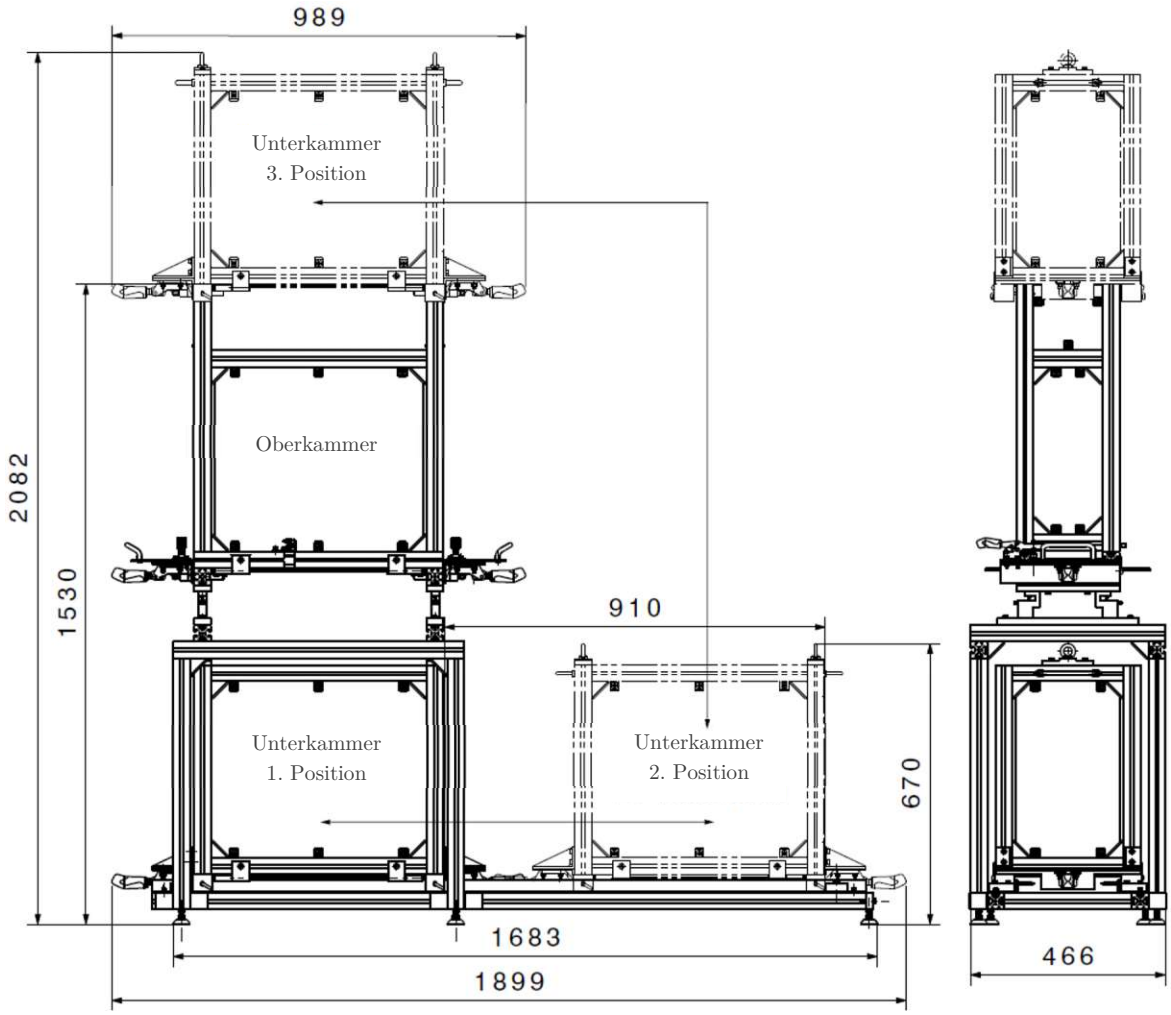


Abbildung 9-5 Kalibriervorrichtung - Aufbau und Funktionsweise

Zu Beginn der Kalibrierung erfolgt die Befüllung der Unterkammer mit einer gewissen Menge des gewünschten Schüttguts – in unserem Fall RK 8/16 Schotter – in der 2. Position (siehe Abbildung 9-5). Davor muss bereits der gewünschte Spalt über die zwei verschiebbaren Platten eingestellt sein. Mittels Kran kann die Unterkammer für den Füllvorgang auf die Oberkammer in Position 3 aufgesetzt werden. Mit den auf der linken und rechten Seite vorhandenen Schiebern werden die auf der Unterseite der Unterkammer befindlichen Klappen geöffnet und das

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Schüttgut fällt in die Oberkammer. Nach dem Füllvorgang wird die verriegelte Unterkammer in die 1. Position gebracht, um den Versuch zu starten.

Wie bereits erwähnt, werden der Böschungs- und Scherwinkel (°), der Massefluss (kg/s) und der verbliebene Masseanteil (%) gemessen. Der Draw-Down-Versuch wird gestartet, indem die Klappen der Oberkammer über einen Auslösemechanismus geöffnet werden. Die Klappen schnappen dabei in zwei Fangvorrichtungen ein, damit der Massefluss des Schüttguts durch mögliches Rückpendeln nicht beeinträchtigt wird. Das Schüttgut beginnt über die nun vorhandene Auslauföffnung (Spaltbreite: 100 mm, Spalttiefe: 152 mm) in die Unterkammer zu rieseln. Die Kraftmessdosen zeichnen die Änderung der Masse Δm_K in Abhängigkeit von der Zeit Δt_K auf (kg/s). Nach Versuchsende lässt sich neben dem Massefluss (kg/s) auch der verbliebene Masseanteil (%) feststellen (siehe Abbildung 9-6). Im Bereich des näherungsweise linearen Masseflusses (siehe Abbildung 9-6) kann $\dot{m}_K$ nach (9-2) berechnet werden.

$$\dot{m}_K = \frac{\Delta m_K}{\Delta t_K} \tag{9-2}$$

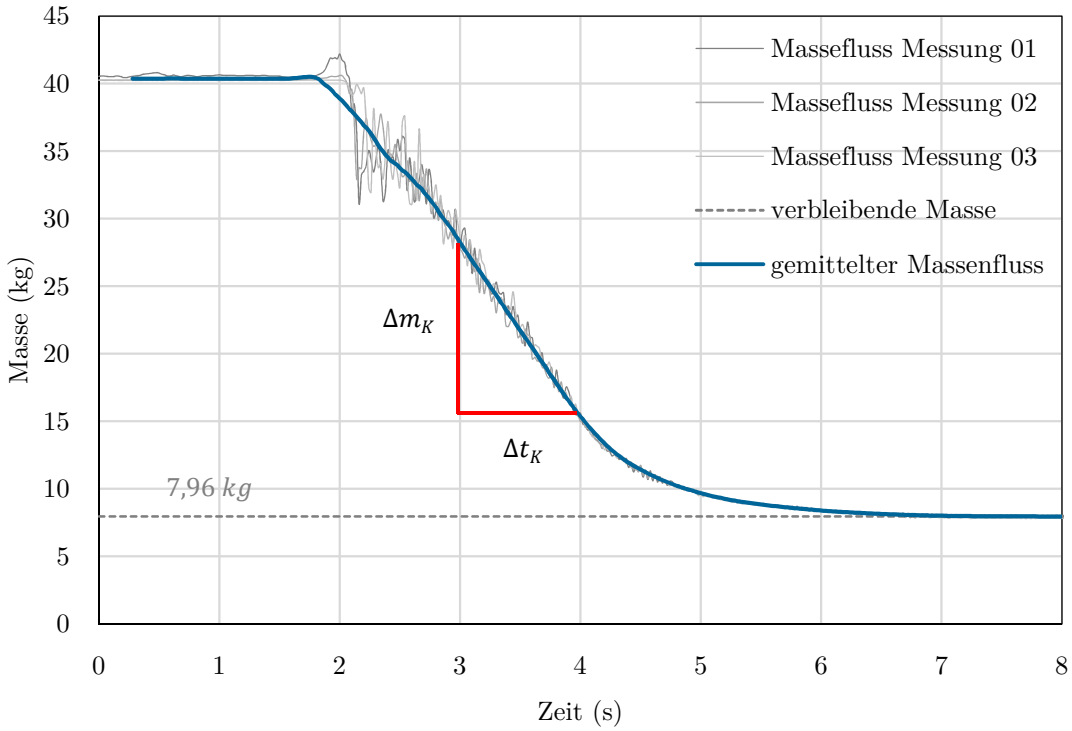


Abbildung 9-6 Gemessener und gemittelter Massefluss

Den verbliebenen Masseanteil zeigt die Kennlinie in Abbildung 9-6 als konstanten Wert auf der rechten Seite. Von der ursprünglichen Schüttgutmasse von 40 kg verblieben im Mittel 7,96 kg in der Oberkammer. Das entspricht einem Masseanteil

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

von 19,9%. In der Unterkammer stellt sich ein Böschungswinkel β ein und in der Oberkammer bildet sich ein Scherwinkel α auf der linken und rechten Seite (siehe Abbildung 9-11). Das Kalibrierexperiment wird mehrmals durchgeführt und die gemittelten Messergebnisse zusammengefasst (siehe Tabelle 9-3).

Tabelle 9-3 Materialkennwerte Draw-Down-Versuch (DDV)

Experimentell bestimmte Materialkennwerte							
Kennwert	Methode	MW 1	MW 2	MW 3	gemittelter Wert	Standard-abweichung	Einheit
Verbleibender Masseanteil	DDV	20,1	20,0	19,6	19,9	± 0,3	%
Massefluss $\dot{m}_K$	DDV	12,9	13,0	12,7	12,9	± 0,1	kg/s
Böschungswinkel β (Unterkammer)	DDV	24,5	26,5	26,8	25,9	± 1,2	°
Gemittelter Scherwinkel α (Oberkammer)	DDV	40,0	40,5	39,0	39,8	± 0,7	°

9.4 Schüttgut-Kalibrierung

Um den richtigen Haft- und Rollreibungskoeffizienten zwischen den Partikeln für die DEM-Simulation zu erhalten, müssen diese über einen Kalibriervorgang mit Hilfe des Draw-Down-Versuchs ermittelt werden (siehe Abbildung 9-8).

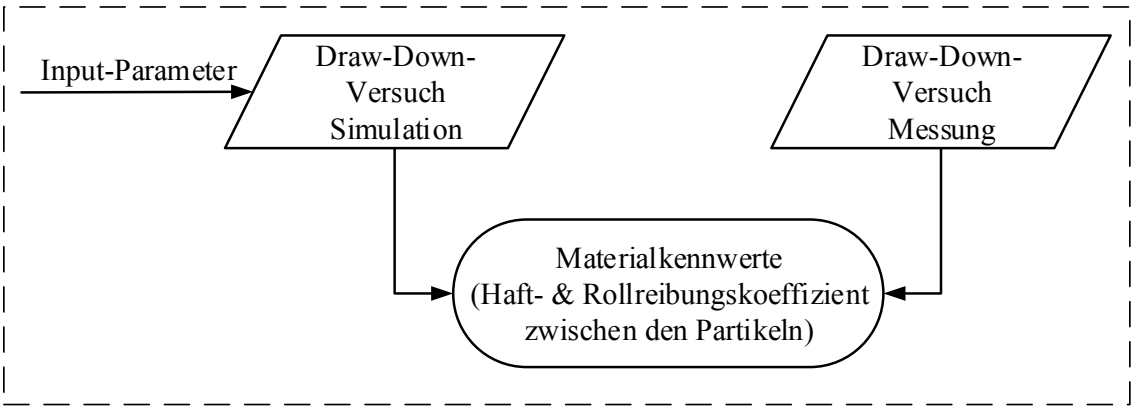


Abbildung 9-7 Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Materialkennwerte über den Draw-Down-Versuch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Das Ablaufdiagramm in Abbildung 9-7 zeigt den Prozess zur Bestimmung der Materialkennwerte mittels Draw-Down-Versuch. Die Input-Parameter für die Simulation stellen die in den Kapiteln 9.1 und 9.2 ermittelten Materialkennwerte dar. Die in Kapitel 9.3 ermittelten Messwerte (siehe Tabelle 9-3) werden nun mit einer DEM-Simulation verglichen, um mittels Kalibrierung den richtigen Haft- und Rollreibungskoeffizienten zwischen den Partikeln zu erhalten. Dazu wird ein DEM-Modell des Draw-Down-Versuchs erstellt (siehe Abbildung 9-8).

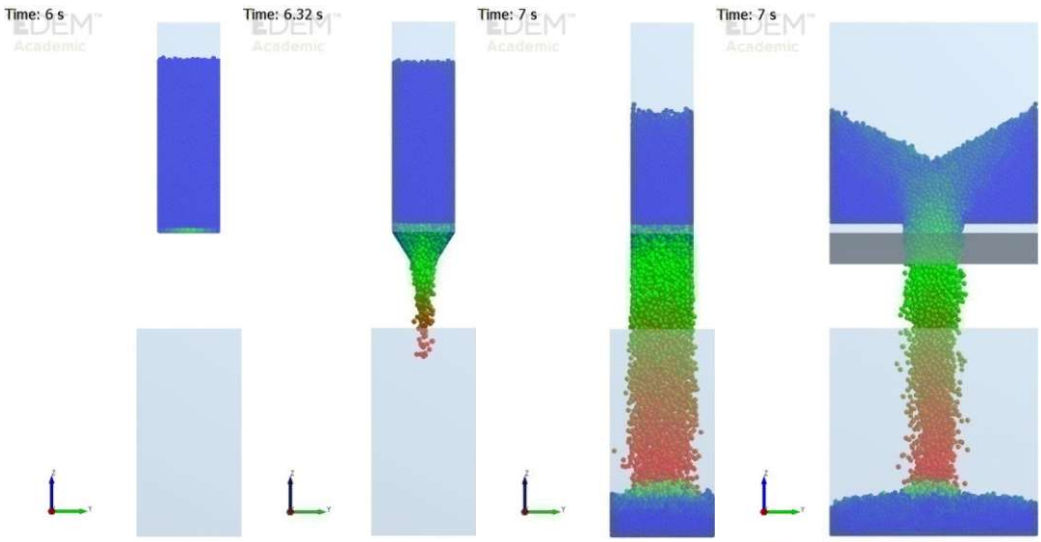


Abbildung 9-8 Kalibrierung mittels DEM-Simulation

Der erste Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die gewählten Reibparameter zwischen den Partikeln zu gering gewählt sind, da das Schüttgut bereits vor Beginn des Versuches unter die beiden Schiebeplatten rollt (siehe Abbildung 9-9, links).

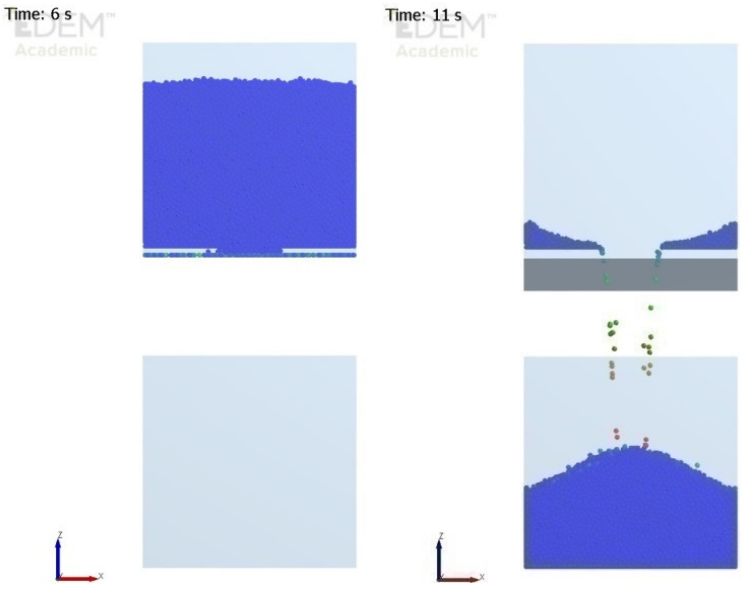


Abbildung 9-9 Kalibrierung – Reibparameter zu gering

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Nach Versuchsende rieselt das Schüttgut auch noch zu lange nach und die verbliebene Masse in der Oberkammer ist zu gering (siehe Abbildung 9-9, rechts). Auch der Böschungswinkel (Unterkammer) und die Scherwinkel (Oberkammer) lieferten keine richtigen Ergebnisse.

Die Haft- und Rollreibung wird nun so lange angepasst, bis die Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen des experimentell durchgeführten Draw-Down-Versuches übereinstimmen. Die Reibparameter werden zu Beginn mit dem Wert 0,1 festgelegt und in Schritten von 0,1 erhöht. Die Anpassung der Porosität erfolgt über die Partikeldichte. Damit kann die Schüttdichte in der Oberkammer eingehalten werden (Zusammenhang siehe Kapitel 4). Abbildung 9-10 zeigt den Vergleich zwischen Experiment und DEM-Simulation. In Abbildung a) sieht man die mit 40 kg Schotter gefüllte Oberkammer vor Versuchsbeginn, in Abbildung b) den Ablauf des Versuches, während der Massefluss $\dot{m}_K$ (kg/s) aufgezeichnet wird.

a) b)

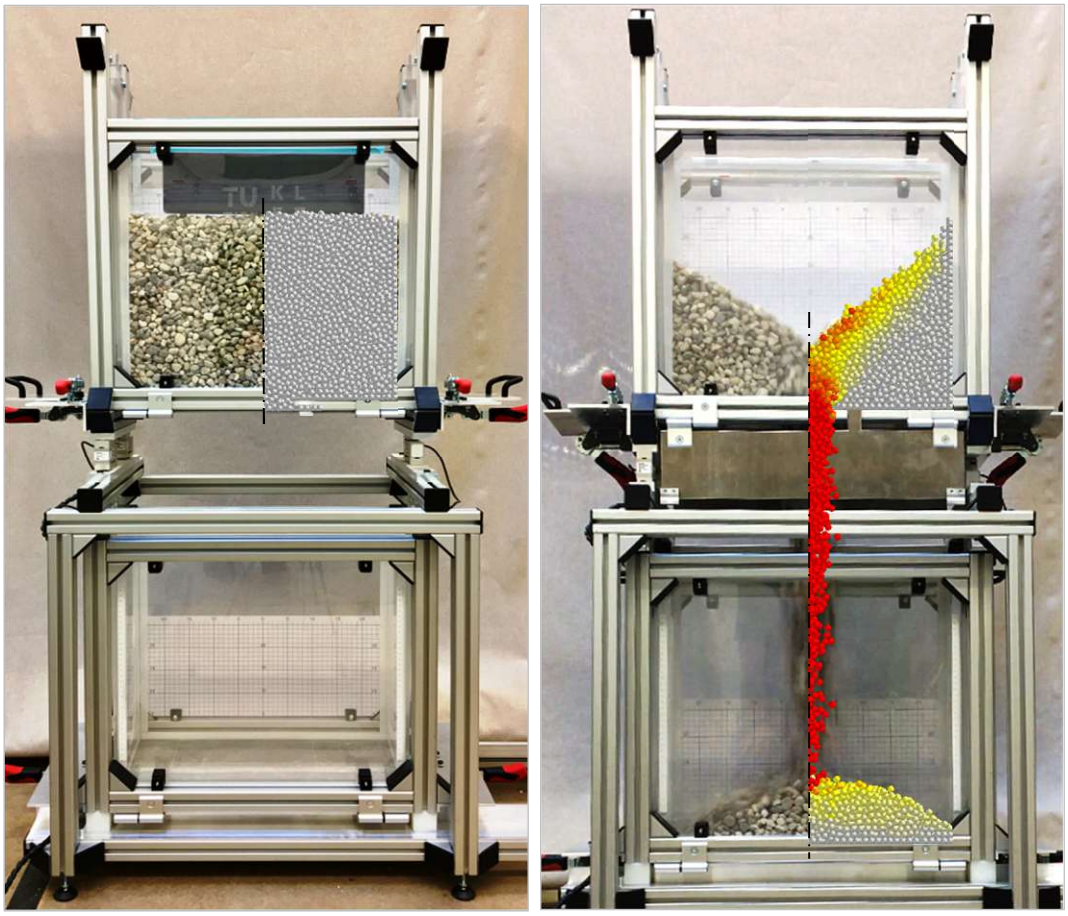


Abbildung 9-10 Vergleich des Draw-Down-Versuchs a) Oberkammer vor Versuchsbeginn, b) Versuchsablauf
(linke Bildhälfte: Experiment im IKP-Labor, rechte Bildhälfte: DEM-Simulation)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Folgende Werte der DEM-Simulation werden mit den Werten der Messung (Tabelle 9-3) abgeglichen:

- verbleibender Masseanteil in %
- Massefluss $\dot{m}_K$ in kg/s
- Böschungswinkel β (Unterkammer) in °
- Scherwinkel α (Oberkammer) in °

In Abbildung 9-11 ist der Vergleich zwischen Experiment und DEM-Simulation bei Versuchsende zu sehen. Die Oberkammer zeigt den verbliebenen Masseanteil (%) und den Scherwinkel α auf der linken und rechten Seite der Kammer. In der Unterkammer ist der Böschungswinkel β zu erkennen.

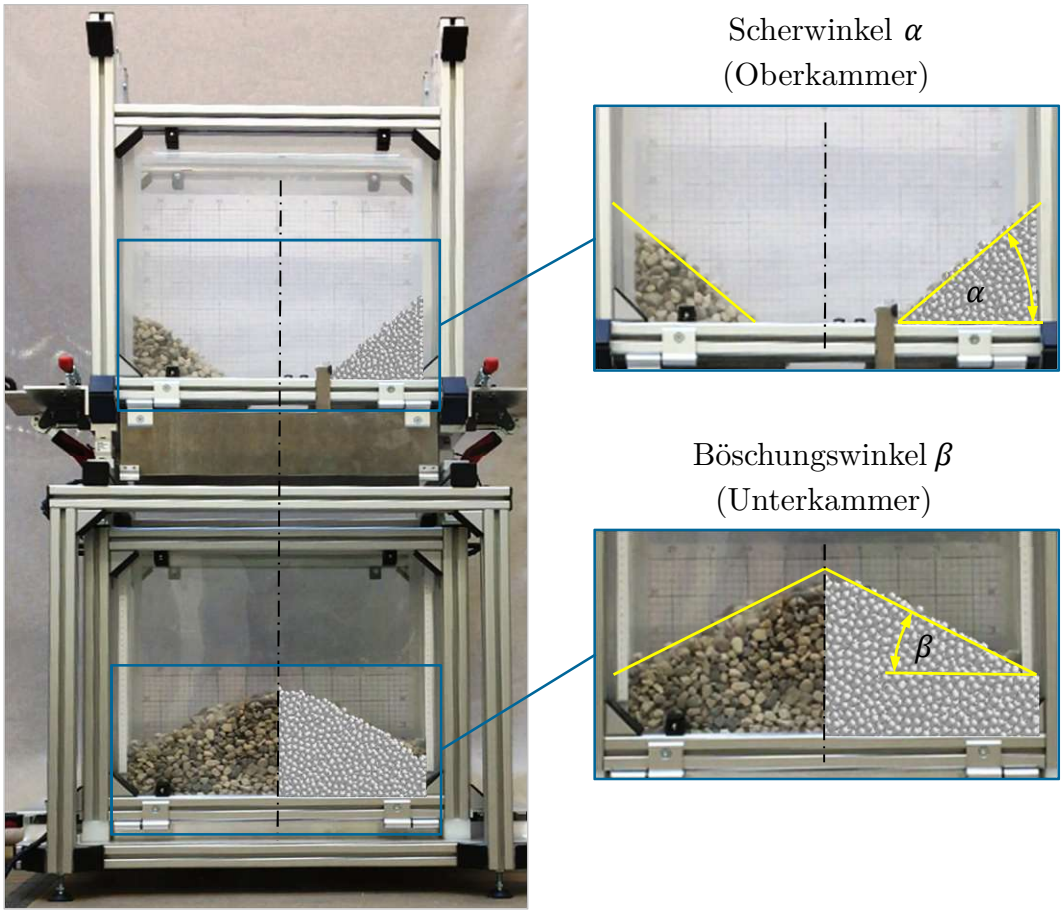


Abbildung 9-11 Scher- und Böschungswinkel in der Ober- und Unterkammer (linke Bildhälfte: Experiment im IKP-Labor, rechte Bildhälfte: DEM-Simulation)

In der Simulation wurde der Zeitschritt Δt beim Kalibriervorgang nach (6-7) mit 20% von der Rayleigh-Zeit t_R festgelegt. Das entspricht einem Wert von

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$\Delta t = 10 \cdot 10^{-7}$ s. Die Materialkennwerte der Kalibrierung sind in Tabelle 9-4 zusammengefasst. Die fertige Kalibrierung ergibt nachstehende Werte für den Haft- und Rollreibungskoeffizienten zwischen den Partikeln (P-P). Diese unterscheiden sich von den Reibungskoeffizienten des Partikel-Wand-Kontaktes.

Haftreibungskoeffizient: 0,2	Rollreibungskoeffizient: 0,8

9.5 Druckversuche zur Ermittlung des Zeitschritts und des E-Moduls

Bei vielen DEM-Anwendungen spielt der E-Modul eine untergeordnete Rolle. Oft erfolgt auch in der Simulation eine Reduktion des E-Moduls, um Rechenzeiten gering zu halten. In diesem konkreten Anwendungsfall muss der korrekte E-Modul und ein entsprechender Zeitschritt in der DEM-Simulation verwendet werden, da sie ausschlaggebend für den Spannungsanstieg in der Schüttung bzw. der Behälterwand sind (näheres siehe Kapitel 10.4). Wie bereits in Kapitel 9.1 erwähnt, ist der in der Literatur vorgeschlagene Wertebereich für den E-Modul von Schotter sehr groß. Zur Bestimmung des E-Moduls werden daher experimentelle Druckversuche durchgeführt. Bei diesen in der Universal-Zug/Druck-Prüfmaschine (siehe Abbildung 9-12) durchgeführten Versuchen werden Kraft-Weg-Diagramme aufgenommenen (siehe schwarze Volllinie in Abbildung 9-15). Der in Abbildung 9-12 gezeigte Behälter ist bereits für die an späterer Stelle folgenden thermischen Versuche isoliert (näheres siehe Kapitel 9.8). Diese Kraft-Weg-Kennlinien werden anschließend mit entsprechenden DEM-Simulationen (siehe Abbildung 9-14) verglichen.

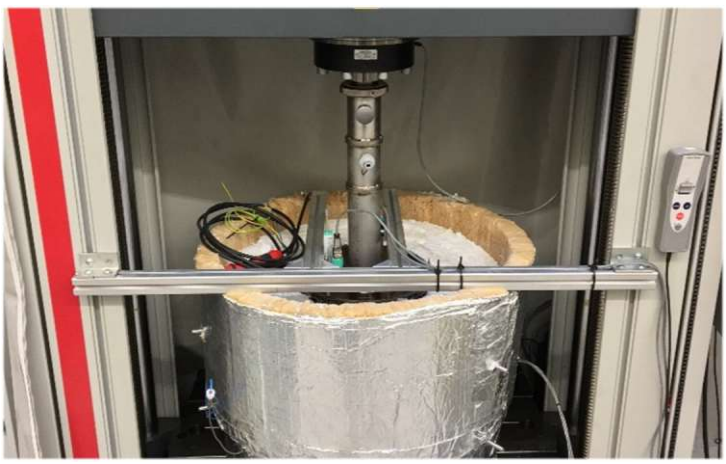


Abbildung 9-12 Druckversuch in der Universal-Zug/Druck-Prüfmaschine

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Bei den Druckversuchen wird ein mit Schotter befüllter Behälter (Durchmesser: 300 mm, Höhe 300 mm) in einer Universal-Zug/Druck-Prüfmaschine (max. Prüfkraft Zug/Druck 250 kN) mit einer Druckkraft F belastet, bis sich das Schotterbett um einen Weg Δs verdichtet (siehe Abbildung 9-13). Konkret wurde der im Behälter befindliche Schotter kraftgesteuert bis zu einem Wert von 36 kN belastet. Dabei setzte sich das Schotterbett um etwa 4,2 mm (siehe schwarze Linie in Abbildung 9-15, Abbildung 9-16 und Abbildung 9-17). Das so gewonnene Kraft-Weg-Diagramm dient als Referenz für die nachfolgenden Untersuchungen in diesem Kapitel. In der Schüttung traten keine Schäden oder dergleichen auf, die zulässige Spannung des Schotters wird also nicht überschritten.

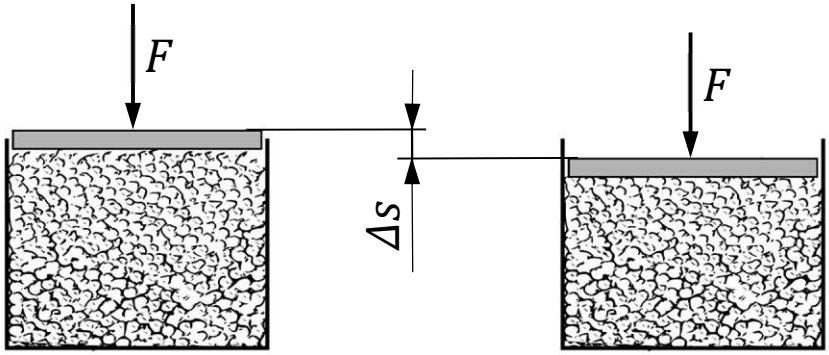


Abbildung 9-13 Schematischer Ablauf des Druckversuchs

Die Ergebnisse der Messung werden in weiterer Folge mit den Ergebnissen der DEM-Simulation verglichen. Dazu wird eine DEM-Simulation des Druckversuchs aufgebaut (siehe Abbildung 9-14).

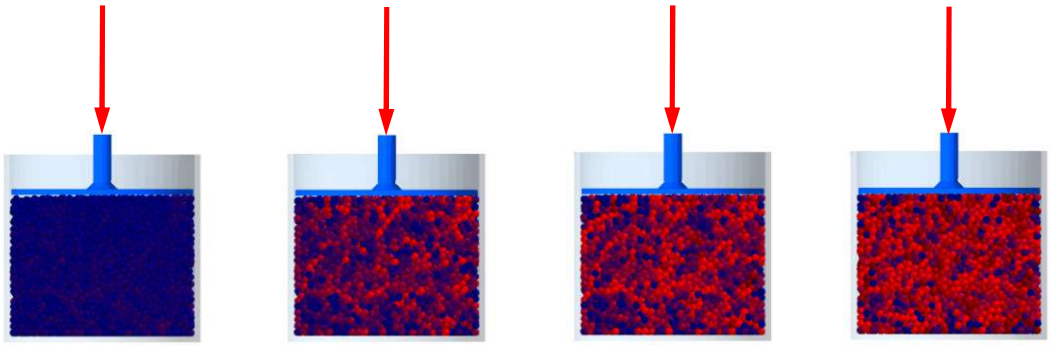


Abbildung 9-14 Druckversuch mittels DEM-Simulation

9.6 Anpassung des Zeitschritts

Der für die Simulation des Draw-Down-Versuchs verwendete Zeitschritt Δt von 20% von der Rayleigh-Zeit ($\Delta t = 10 \cdot 10^{-7}$ s) war für die korrekte Abbildung des Masseflusses, des verbliebenen Masseanteils und des Böschungs- und Scherwinkels

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

hinreichend klein gewählt (siehe Kapitel 9.4). Dennoch musste an dieser Stelle für die weiteren Simulationen eine Korrektur des Zeitschritts vorgenommen werden. Der Grund dafür liegt im hohen Elastizitätsmodul der verwendeten Schotter-Partikel.

Wie das Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 9-15 zeigt, weicht die Kurve mit einem Zeitschritt von 20% von der Rayleigh-Zeit ($10 \cdot 10^{-7}$ s) erheblich von jener der Referenzmessung ab (grau strichlierte Linie). Eine Verringerung des Zeitschritts von den ursprünglichen 20% von der Rayleigh-Zeit ($10 \cdot 10^{-7}$ s) auf 10% von der Rayleigh-Zeit ($5 \cdot 10^{-7}$ s) bringt eine erwartete Verbesserung, aber noch keine hinreichend genaue Übereinstimmung (blau strichlierte Linie). Zwar hat sich die Kurve besser an die aufgezeichnete Messkurve angenähert, jedoch stimmt der Gradient der Simulation im rechten Teil des Diagramms nicht mit den Werten der Messung überein. Eine weitere Verringerung des Zeitschritts auf 5% von der Rayleigh-Zeit ($2{,}5 \cdot 10^{-7}$ s) verstärkt diesen Effekt und liefert einen noch steileren Gradienten der Kurve (gelb strichlierte Linie). Für all diese Simulationen wurde ein E-Modul der Partikel von 90 GPa verwendet. Die zwischen 3 und 3,5 mm auftretenden Schwankungen der Simulations-Kurve (Abbildung 9-15) sind auf Umordnungsprozesse der Partikel während des Druckversuchs zurückzuführen. Diese zu hohen Gradienten deuten auf einen zu hoch gewählten E-Modul hin. Dessen Korrektur wird in Kapitel 9.7 behandelt. Die weiteren Simulationen werden mit einem Zeitschritt von 5% von der Rayleigh-Zeit durchgeführt.

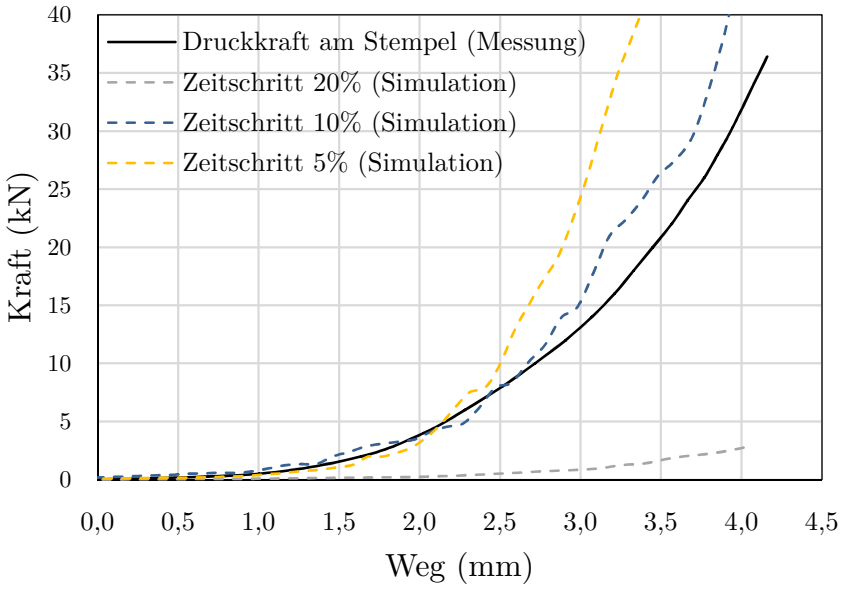


Abbildung 9-15 Kraft-Weg-Diagramm für unterschiedlich groß gewählte Zeitschritte (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

9.7 Anpassung des Elastizitätsmoduls

Neben dem Zeitschritt musste auch der Elastizitätsmodul der Partikel angepasst werden. Der Gradient der beiden Kurven (Zeitschritt von 10% bzw. 5% von der Rayleigh-Zeit) ist wie in Abbildung 9-15 ersichtlich zu hoch, was – wie bereits in Kapitel 9.6 angemerkt – auf einen zu hohen Elastizitätsmodul hindeutet. Der ursprüngliche Wert des Elastizitätsmoduls wurde daher schrittweise reduziert.

Ausgangspunkt ist der Elastizitätsmodul von 90 GPa (gelb strichlierte Linie in Abbildung 9-15 bzw. Abbildung 9-16). Im Anschluss wird der Elastizitätsmodul auf 50 GPa (grau strichlierte Linie) bzw. 20 GPa (blau strichlierte Linie) reduziert. Vergleicht man diese beiden Kurven mit der Messkurve (schwarze Volllinie), so ist zu sehen, dass diese noch immer einen zu hohen Gradienten aufweisen. Legt man den Elastizitätsmodul mit 15 GPa fest, erreicht man eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messkurve (rot strichlierte Linie). Zur Kontrolle wurde auch noch ein Wert von 10 GPa simuliert. Wie erwartet, lieferte diese Kurve einen zu flachen Gradienten (hellgrün strichlierte Linie). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kraft-Weg-Kurve mit einem Elastizitätsmodul von 15 GPa und einem Zeitschritt von 5% von der Rayleigh-Zeit ($7 \cdot 10^{-6}$ s) eine sehr gute Übereinstimmung liefert.

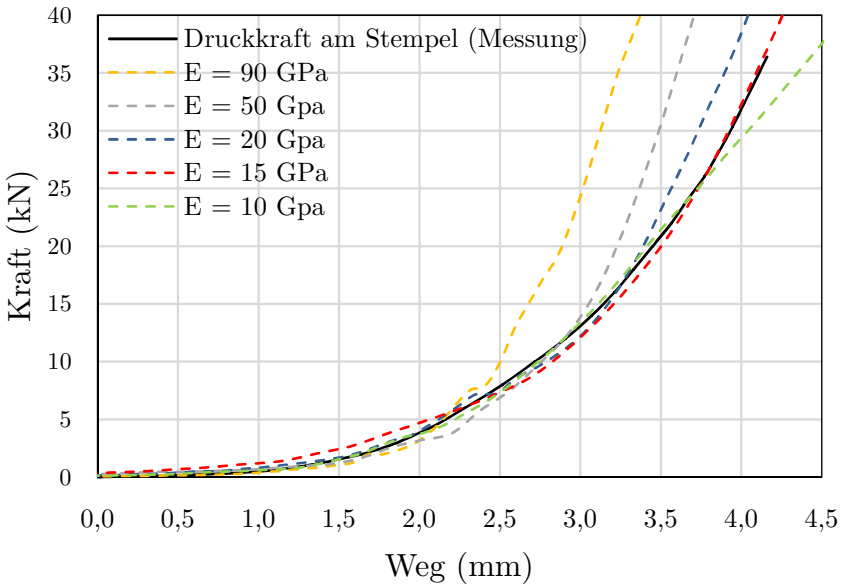


Abbildung 9-16 Kraft-Weg-Diagramm mit angepasstem E-Modul (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch)

Danach war wiederum zu untersuchen, ob für diesen verringerten Elastizitätsmodul nicht auch ein größer gewählter Zeitschritt richtige Ergebnisse liefert. Deshalb wurde

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

dieselbe Simulation nochmal mit einem Zeitschritt von 10% von der Rayleigh-Zeit ($14 \cdot 10^{-6}$ s) und 20% von der Rayleigh-Zeit ($28 \cdot 10^{-6}$ s) ausgeführt (siehe Abbildung 9-17). Die Ergebnisse in Abbildung 9-17 zeigen, dass diese größer gewählten Zeitschritte mit 20% bzw. 10% von der Rayleigh-Zeit wieder zu unzureichend genauen Ergebnissen führen. Auch war es von Interesse wie sich ein geringerer Zeitschritt von 1% von der Rayleigh-Zeit ($1{,}4 \cdot 10^{-6}$ s) auf die Kraft-Weg-Kurve auswirkt. Wie man sieht, ergibt ein Zeitschritt von 1% (gelb strichlierte Linie) den selben Gradienten wie ein Zeitschritt von 5% von der Rayleigh-Zeit (rot strichlierte Linie). Für die weiteren Simulationen wurde daher der Zeitschritt von 5% von der Rayleigh-Zeit ($7 \cdot 10^{-6}$ s) gewählt.

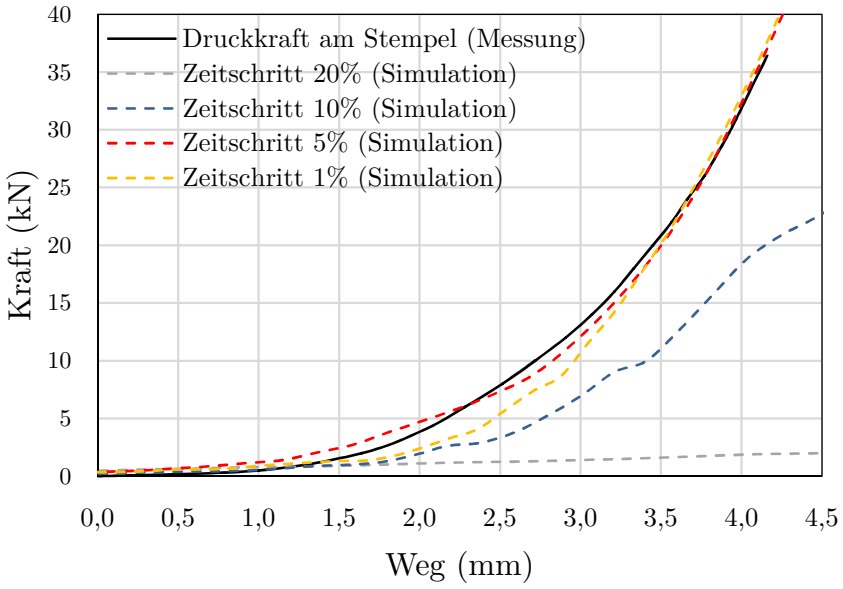


Abbildung 9-17 Kraft-Weg-Diagramm mit angepasstem E-Modul und Zeitschrittüberprüfung (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch)

9.8 Setzverhalten des Schotterbetts

Um das Setzverhalten des zu verwendenden Schotters zu ermitteln, wurde auch ein zyklischer Druckversuch durchgeführt. Die durch die Änderung der Temperatur hervorgerufene Setzung des Schotterbetts sollte auf diese Art widergegeben werden. Dazu wurde das Schotterbett in der Universal-Zug/Druck-Prüfmaschine mit 500 kraftgesteuerten Druckbelastungen von 22 kN zyklisch belastet (siehe Abbildung 9-12). Dafür wurde der bereits in Kapitel 9.5 beschriebene Behälter verwendet. Der 300 mm hohe Behälter war 255 mm hoch mit Schotter befüllt. Zu Beginn wurde ein kalter Druckversuch gestartet (Schottertemperatur von 20 °C). Nach Ende der 500

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zyklen lag die Verdichtung bei 2,4 mm, auf die Füllhöhe bezogen also bei 0,9% (siehe Abbildung 9-18 a)). Beim heißen Druckversuch (Schottertemperatur von 400 °C) lag die Verdichtung bei 5,1 mm, also bei 2 % (siehe Abbildung 9-18 b)). Der relative Unterschied zwischen kalt und heiß liegt demnach in etwa bei einem Prozent. Ob dieser geringe Unterschied rein durch den Temperaturunterschied auftritt, ist zu hinterfragen. Beispielsweise spielt der Ausgangszustand nach dem Füllvorgang eine große Rolle (Kornverteilung, Packungsdichte etc.). Weiters ist auch die Ebenheit der Schotterfläche, auf welche der Druckstempel presst, von Bedeutung. Zusammenfassend lässt sich folglich kein signifikanter Unterschied hinsichtlich Setzverhalten zwischen Druckversuch „kalt“ und Druckversuch „warm“ erkennen.

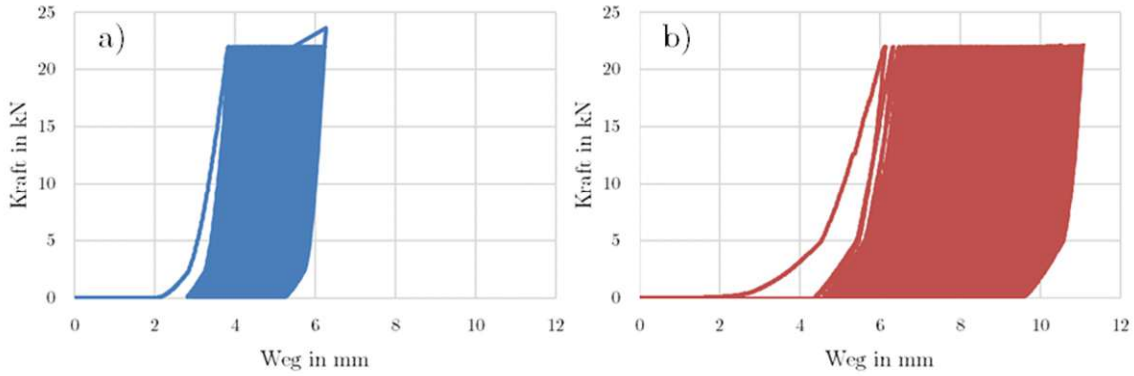


Abbildung 9-18 Kraft-Weg-Diagramm zyklischer Druckversuche kalt/heiß
a) 500 Zyklen bei 20 °C, b) 500 Zyklen bei 400 °C

9.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Um die geplante Spannungsberechnung in der Schüttung und zwischen Schüttung und Behälterwand durchführen zu können, müssen die Materialkennwerte des Schüttguts bekannt sein. Diese werden aus Erfahrungswerten der Literatur oder experimentellen Versuchen gewonnen. Die Werte für den Haft- und Rollreibungskoeffizienten zwischen den Partikeln wurden mittels Kalibrierung ermittelt (siehe Kapitel 9.4). Die Bestimmung der Reibkoeffizienten erfolgte über den Abgleich zwischen DEM-Simulation und Messung (Draw-Down-Versuch). Dazu wurden der Böschungswinkel, der Scherwinkel, der Massefluss und der verbliebene Massenanteil verglichen (siehe Abbildung 9-10 und Abbildung 9-11).

Der E-Modul und der für die Simulation zu verwendende Zeitschritt wurden mittels Druckversuch mit Schüttgut in einem Behälter ermittelt (siehe Kapitel Abbildung 9-5). Bei vielen DEM-Anwendungen spielt der E-Modul eine untergeordnete Rolle.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Häufig wird er auch reduziert, um die Rechenzeit zu senken. In diesem konkreten Anwendungsfall muss der korrekte E-Modul in der DEM-Simulation verwendet werden, da er ausschlaggebend für den Spannungsanstieg in der Schüttung bzw. der Behälterwand ist (näheres siehe Kapitel 10.4). Eine passende Wahl des Zeitschritts und des Elastizitätsmoduls sind entscheidend für die korrekte Berechnung der Spannungen. Die für die Simulation ermittelten und zu verwendenden Materialkennwerte sind in Tabelle 9-4 zusammengefasst.

Tabelle 9-4 Materialkennwerte für die Simulation

Materialkennwerte RK 8/16			
Kennwert	Methode	Wert	Einheit
Mittlerer Partikeldurchmesser	Sieblinie Asamer Kieswerk	12	mm
Elastizitätsmodul Partikel	Literatur/Druckversuch	15	GPa
Partikeldichte	Asamer Kieswerk	2750	kg/m³
Schüttgutdichte	Asamer Kieswerk	1500	kg/m³
Partikeldichte für Simulation	Kalibrierung	2500	kg/m³
Wärmeausdehnungskoeff.	Literatur	$7{,}3 \cdot 10^{-6}$	1/K
Restitutionskoeff. P-P	Erfahrungswert	0,275	-
Haftreibung P-P	Kalibrierung	0,2	-
Rollreibung P-P	Kalibrierung	0,8	-
Restitutionskoeffizient P-S	Erfahrungswert	0,275	-
Haftreibung P-S	Rutschversuch	0,375	-
Rollreibung P-S	Rutschversuch	0,609	-
Poissonzahl Partikel	Erfahrungswert	0,3	-
Porosität	Nach Formel (4-4) mit $\rho_P = 2750\ \mathrm{kg/m^3}$	0,45	-
Porosität für Simulation	Nach Formel (4-4) mit $\rho_P = 2500\ \mathrm{kg/m^3}$	0,4	-
Zeitschritt in % Zeitschritt in s	Druckversuch	5 $7 \cdot 10^{-6}$	% s

Damit ergibt sich der folgend dargestellte vollständige Prozess zur Ermittlung sämtlicher Parameter, die für die Spannungsberechnung erforderlich sind (siehe Abbildung 9-19). Das in Abbildung 9-7 gezeigte Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Materialkennwerte mittels Draw-Down-Versuch wird auf die Form in Abbildung 9-19 erweitert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

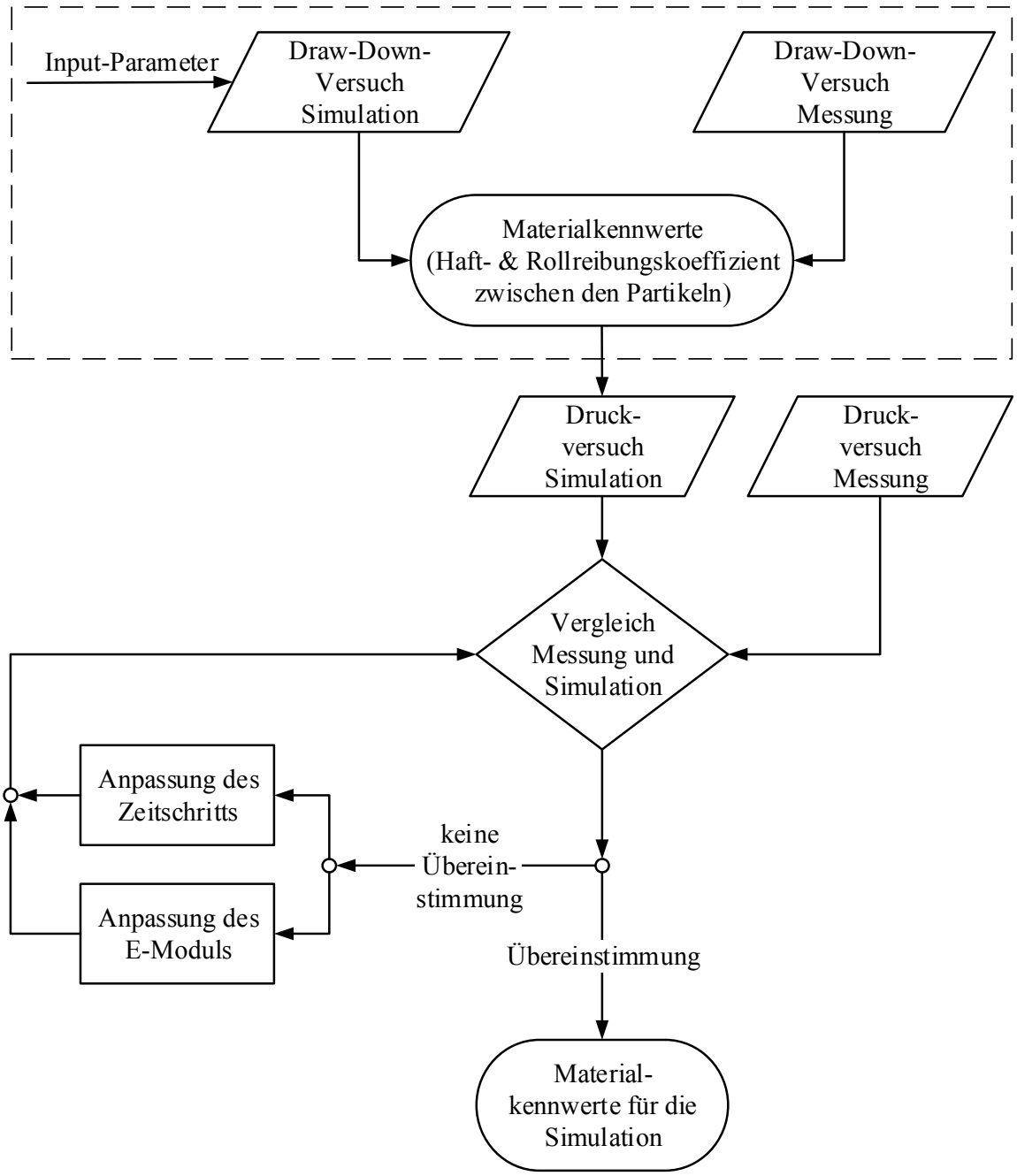


Abbildung 9-19 Erweitertes Ablaufdiagramm zur Ermittlung sämtlicher Parameter für die Spannungsberechnung

Mit den gezeigten Ergebnissen liegen nun alle erforderlichen Eingangsgrößen für die folgende Spannungsberechnung (Kapitel 11) vor. Mit dem in Kapitel 7 erstellten DEM-Berechnungsmodell und den nun bestimmten Materialkennwerten sollen in weiterer Folge die thermo-mechanischen Spannungen unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien berechnet werden. Durch den Vergleich dieser thermo-mechanischen Spannungen mit den zulässigen Spannungen von Schüttung und Behälterwand kann in weiterer Folge eine Aussage über eventuelle Schädigungen von Schüttungen bzw. Behälterwänden gemacht werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

10 Vereinfachtes Simulationsmodell für den Wärmespeicher

Die geplanten Berechnungen an den Wärmespeicher-Geometrien sollen mit den in Kapitel 9 bestimmten Schüttgut-Materialkennwerten erfolgen. Bei dieser Korngröße (Partikeldurchmesser: 12 mm, Packungsdichte: 0,6) kommen nach (4-6) auf 1 m³ Schüttung ca. 600.000 Partikel. Beim vertikalen 330 MWh-Speicher (Speichervarianten siehe Kapitel 3.3) mit einem Durchmesser von 17 m und einer Höhe von 15 m (s. Abbildung 10-1 a)) würde das eine Zahl von ca. 2 Milliarden Partikeln ergeben. Der horizontale 330 MWh-Speicher beinhaltet bei seiner Baugröße von 20 x 14 x 13 m (s. Abbildung 10-1 b)) knapp über 2 Milliarden Partikel. Anschaulicher beschrieben, entspricht die Füllung des Wärmspeichers 306 LKW-Fuhren (mit einem 4-Achs-Kipper und einer Nutzlast von 18 t). Die Simulation mehrerer Belade- und Entladezyklen mit diesen Speichergrößen würde Rechenzeiten von mehreren 100 Jahren pro Wärmespeicher ergeben (EDEM-Lizenz für Rechner mit 8 Kernen).

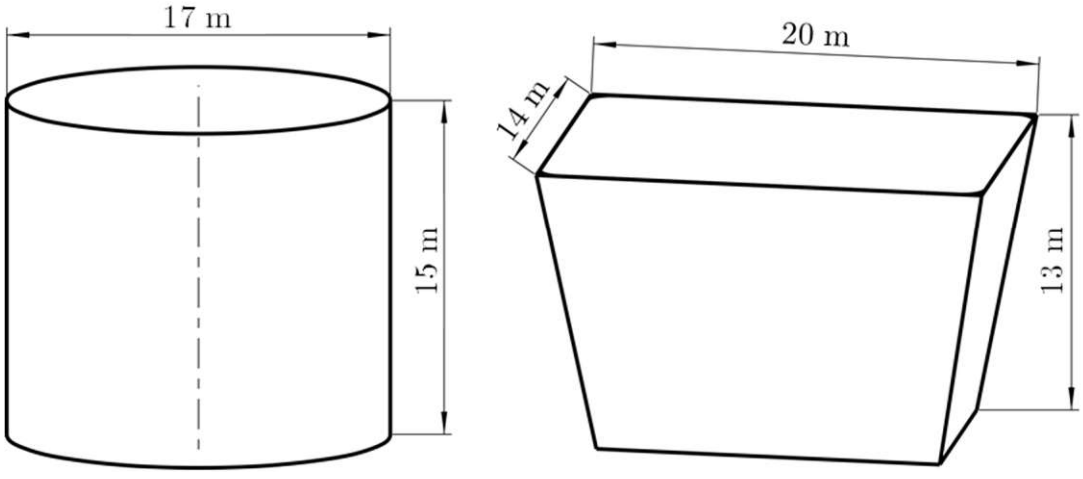


Abbildung 10-1 Hauptabmessungen des a) vertikalen b) horizontalen Festbett-Wärmespeichers

Da diese hohe Zahl an Partikeln jeden Rahmen einer mit realistischen Rechenzeiten durchzuführenden Simulation sprengt, werden folgende Vereinfachungsmethoden betrachtet:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Partikelreduktion durch vergrößerte Partikel (siehe Kapitel 10.1)
- Partikelreduktion durch Nutzung von Symmetrien (siehe Kapitel 10.2)
- Partikelreduktion durch Aufbringen von Ballastkörpern (siehe Kapitel 10.3)
- Einfluss des Elastizitätsmoduls der Partikel (siehe Kapitel 10.4)

Die in der DEM-Simulation schlussendlich angewandten Vereinfachungen sind am Beginn von Kapitel 11 (Parameterstudie unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien) beschrieben und in Abbildung 11-1 und Abbildung 11-2 zu sehen.

10.1 Partikelreduktion durch vergrößerte Partikel

Die Skalierung der Partikelgröße ist eine in der Schüttgut-Simulation gängige Maßnahme, bei der die ursprünglichen Partikel durch größere ersetzt werden. Der Vorteil liegt in der Reduktion der Partikelanzahl, die wiederum die Rechenzeit senkt. Die gröbere Körnung ermöglicht somit eine Simulation für größere Geometrien. Zur Reduktion der Partikelzahl durch Vergrößerung (engl. Bezeichnung: coarse graining/particle upscaling) finden sich bereits einige Arbeiten [1], [37], [45], [48]. Den Zusammenhang zwischen Partikeldurchmesser und Anzahl der Partikel ist in Abbildung 10-2 zu sehen. Die Anzahl der Partikel für den vertikalen bzw. horizontalen 330 MWh-Speicher (Partikeldurchmesser 12 mm) beträgt nach (4-6) in etwa 2 Milliarden (siehe Abbildung 10-2).

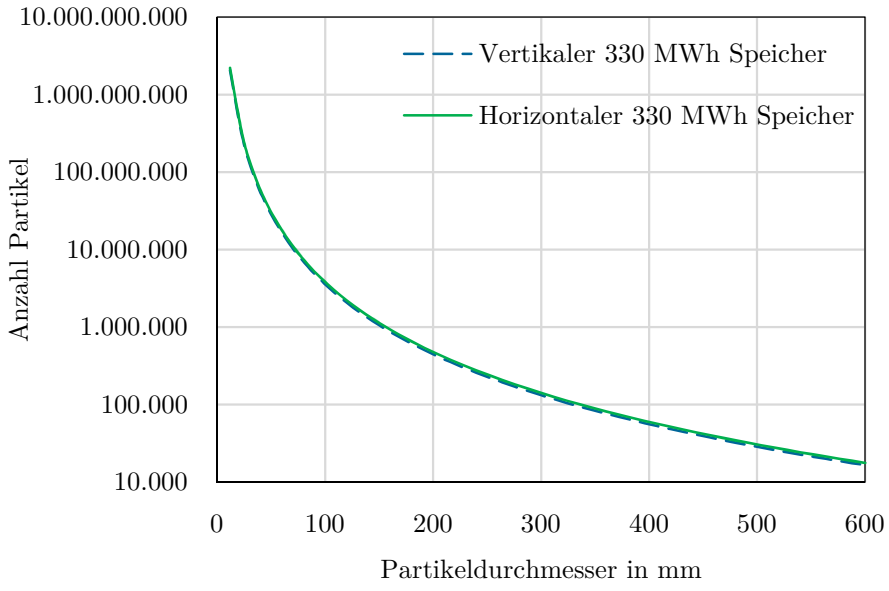


Abbildung 10-2 Zusammenhang Partikeldurchmesser und Anzahl Partikel

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Der Partikeldurchmesser geht in (4-6) mit der dritten Potenz ein. Das heißt eine Verdoppelung des Durchmessers führt zu einem Achtel der Partikelzahl. Allgemein lässt sich dieser Zusammenhang über einen Vergrößerungsfaktor x ausdrücken. Der vergrößerte Partikeldurchmesser D_{p_x} ergibt sich nach (10-1). Das damit folgende vergrößerte Partikelvolumen V_{p_x} lässt sich mit V_p (4-2) und x mit (10-2) berechnen.

$$D_{p_x} = x \cdot D_p \tag{10-1}$$

$$V_{p_x} = V_p \cdot x^3 \tag{10-2}$$

Bei der Partikelreduktion durch vergrößerte Partikel darf nicht nur die Änderung des Partikelvolumens betrachtet werden. Eine wichtige Rolle spielt die Dimension des Behälters bzw. dessen Schüttvolumen. Es macht einen Unterschied ob eine Verdoppelung des Partikeldurchmessers bei geringem oder hohem Schüttvolumen geschieht. Dazu wird die Änderung des Partikelvolumens ΔV_p mit dem Schüttvolumen V_S (4-5) ins Verhältnis gesetzt, um die Größenänderung in Abhängigkeit von der Schüttgutmenge zu bekommen. Der Zusammenhang ist in (10-3) angeführt.

$$\varepsilon_G = \frac{\Delta V_p}{V_S} = \frac{V_{p_x} - V_p}{V_S} \tag{10-3}$$

Die folgenden Berechnungen in Kapitel 11 werden mit einer Vergrößerung $x = 10$ vorgenommen. Bei einem Partikeldurchmesser von 12 mm beträgt V_p nach (4-2) 0,905 cm³. Nach (10-2) ergibt das ein $V_{p_x} = 905\ cm^3$. Das Schüttvolumen V_S des vertikalen 330 MWh-Speicher beträgt 3405 m³. Setzt man diese Werte in (10-3) ein, ergibt sich ein ε_G =0,000027%. Welchen Einfluss diese Erhöhung von ε_G bewirkt, wird in Form eines erneuten Druckversuch kontrolliert (Aufbau siehe Abbildung 9-14). Dieser wird mit der prozentmäßigen Vergrößerung von ε_G analog zu Kapitel 9.5 durchgeführt (siehe Abbildung 9-13 und Abbildung 9-14). Neben der gemessenen Druckkraft am Stempel (schwarze Linie) findet sich in Abbildung 10-3 auch die Kennlinie aus der Simulation für den ursprünglichen Partikeldurchmesser (blau strichlierte Linie). Die grün strichlierte Linie zeigt das Ergebnis der Simulation für den vergrößerten Partikeldurchmesser bei gleicher Behältergröße. Wie sich zeigt, hat diese Größenänderung in Abhängigkeit von der Schüttgutmenge keinen erkennbaren Einfluss auf das Ergebnis. Auch die Ergebnisse von [34] zeigten, dass die Spannungen von der Größe der Partikel nicht beeinflusst werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

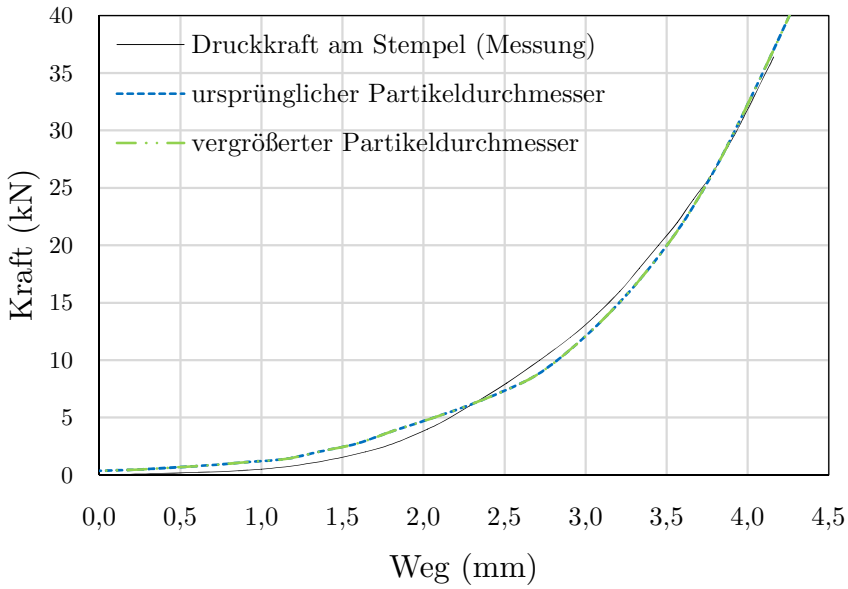


Abbildung 10-3 Druckversuch mit vergrößertem Partikeldurchmesser

10.2 Partikelreduktion durch Nutzung von Symmetrien

Ein weiteres Mittel, um die Partikelzahl zu senken, stellt die Nutzung von Symmetrien dar. EDEM bietet in diesem Fall die Möglichkeit, zylindrische oder lineare Randbedingungen (engl. Bezeichnung: Boundary Conditions) zu setzen. Bei zylindrischen Randbedingungen wird eine Symmetrieachse ausgewählt, um die ein beliebig großes Segment angelegt wird (siehe Abbildung 10-4). Der Winkel kann dabei nach Belieben gewählt werden.

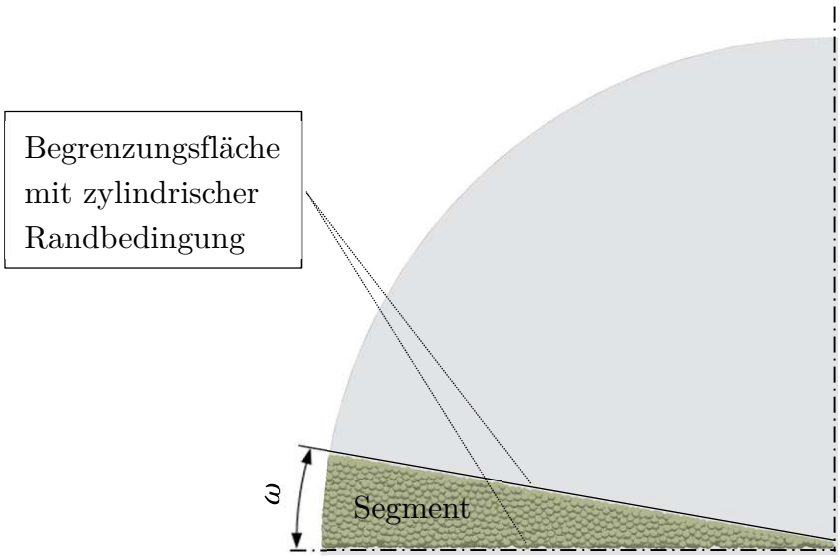


Abbildung 10-4 Zylindrische Randbedingung zur Reduktion der Rechenzeit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die im Winkel ω zueinanderstehenden Begrenzungsflächen bilden die angesprochene Randbedingung des Segments. Das heißt, der Kontakt zwischen den Partikeln mit den Begrenzungsflächen erfolgt so, als ob es ein Kontakt zwischen Partikel-Partikel ist. Der Anteil des Segments n_{sym} lässt sich mit ω über (10-4) berechnen.

$$n_{sym} = \frac{\omega}{360°} \tag{10-4}$$

Zur Kontrolle dieser Vereinfachung (zylindrische Randbedingung) in der Simulation wird der horizontale Schüttdruck mit dem analytischen Schüttdruck nach Janssen (näheres siehe Kapitel 5) überprüft. Der horizontale Schüttdruck nach Janssen muss jedoch auf den Anteil des Segments bezogen werden, um einen Vergleich zuzulassen. Dazu wird $\sigma_{h_{(z)}}$ aus (5-5) mit n_{sym} aus (10-4) multipliziert.

Der nach (10-5) berechnete Schüttdruck liefert eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulation (siehe Abbildung 10-5). In der Simulation wurde der vertikale 330 MWh-Wärmespeicher mit einer Füllhöhe von 15 m und einem Winkel von $\omega = 10°$ verwendet (näheres siehe Kapitel 3.3). Demzufolge wurde in Kapitel 11 ein Winkel von $\omega = 10°$ bei den vertikal durchströmten Wärmespeichern verwendet.

$$\sigma_{h_{sym}} = \sigma_{h_{(z)}} \cdot n_{sym} \tag{10-5}$$

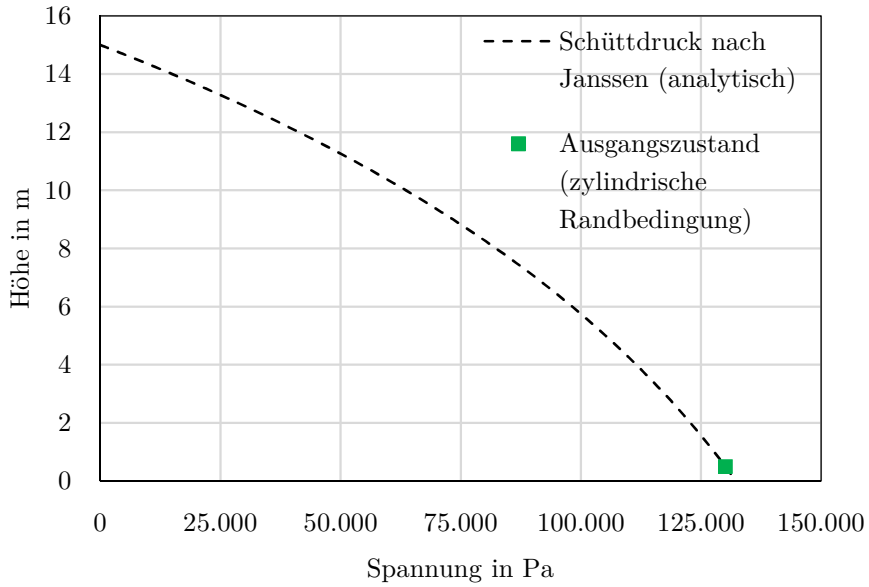


Abbildung 10-5 Kontrolle des Schüttdrucks bei der Nutzung zylindrischer Randbedingungen (Vergleich Simulation/analytische Berechnung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die lineare Randbedingung hingegen spiegelt das Verhalten um eine ausgewählte Symmetrieebene (siehe Abbildung 10-6). Die entstehende Begrenzungsfläche sorgt wiederum für die Darstellung eines Kontaktes zwischen Partikel-Partikel.

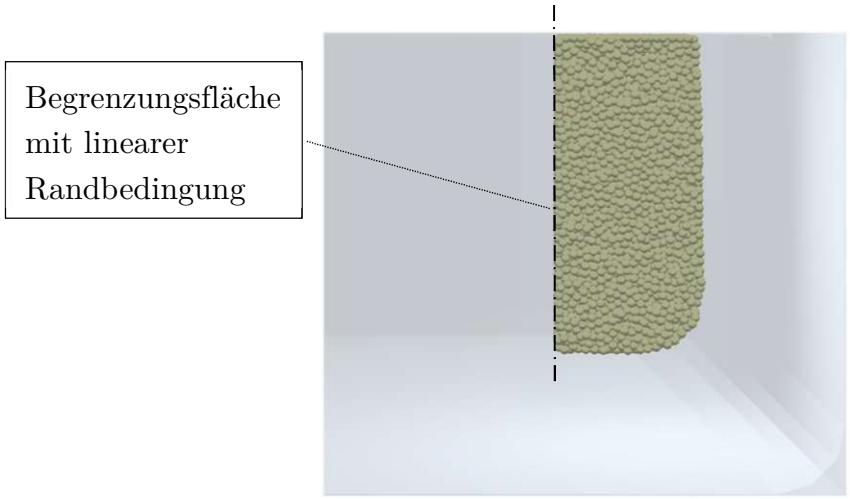


Abbildung 10-6 Lineare Randbedingung zur Reduktion der Rechenzeit

Zur Kontrolle dieser Vereinfachung (lineare Randbedingung) in der Simulation wird wieder der horizontale Schüttdruck mit dem analytischen Schüttdruck nach Janssen überprüft. Der nach (10-5) berechnete Schüttdruck liefert ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulation (siehe Abbildung 10-7). In dieser Simulation wurde der horizontale 330 MWh-Wärmespeicher mit einer Füllhöhe von 13 m verwendet (näheres s. Kapitel 3.3). Demzufolge wurde diese Vereinfachung in Kapitel 11 bei den horizontal durchströmten Wärmespeichern verwendet.

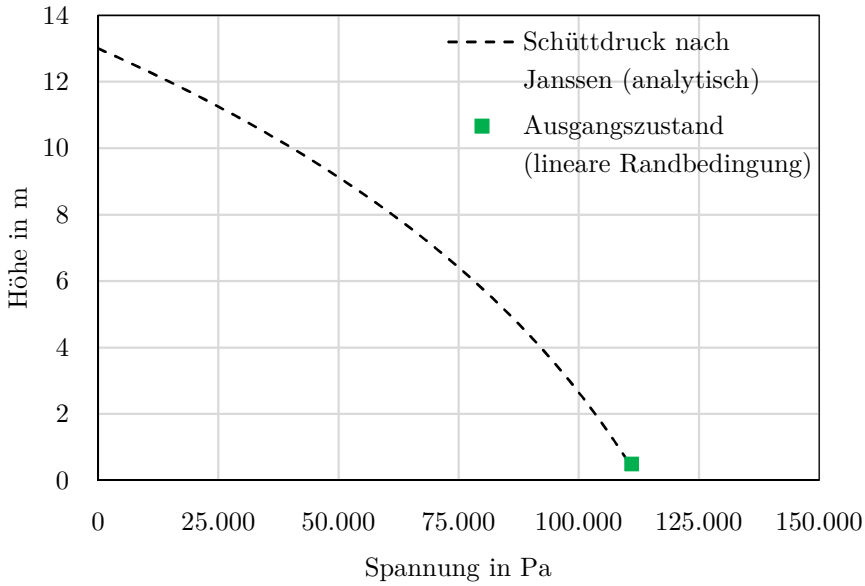


Abbildung 10-7 Kontrolle des Schüttdrucks bei der Nutzung linearer Randbedingungen (Vergleich Simulation/analytische Berechnung)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

10.3 Partikelreduktion durch Aufbringen von Ballastkörpern

Eine bereits zum Teil in anderen Projekten angewendete Methode zur Reduktion der Rechenzeit stellt das Aufbringen von Ballastkörpern dar. Wie die Ergebnisse aus Kapitel 8 zeigen, herrscht im unteren Bereich des Wärmespeichers der größte Druck (siehe Abbildung 8-1). Das gilt sowohl für den Ausgangszustand, als auch für den Beladungs- und Entladungszustand am Ende des Erwärmungs- bzw. Abkühlvorgangs des Wärmespeichers (siehe Abbildung 8-3). Auch bei mehreren Belade- und Entladezyklen tritt das Maximum immer im untersten Bereich des Wärmespeichers auf (siehe Abbildung 8-4). Für die Betrachtung und Ermittlung der maximalen Spannungen, die auf die Behälterwand des Wärmespeichers wirken, ist allein der unterste Bereich von Bedeutung. Das gilt sowohl für den vertikalen als auch für den horizontalen Festbett-Wärmespeicher.

Bei dieser Vereinfachungs-Methode wird die Schüttung im unteren Teil des Behälters aufgebracht. Damit ist der Bereich des erwarteten Spannungsmaximums abgedeckt (siehe Abbildung 10-8). Die aufgebrachte Schüttung wird anschließend mit einer nach (10-6) berechneten Ballastschicht beschwert, damit der Druck der Schüttung dem des vollständig gefüllten Behälters entspricht (siehe Abbildung 10-8).

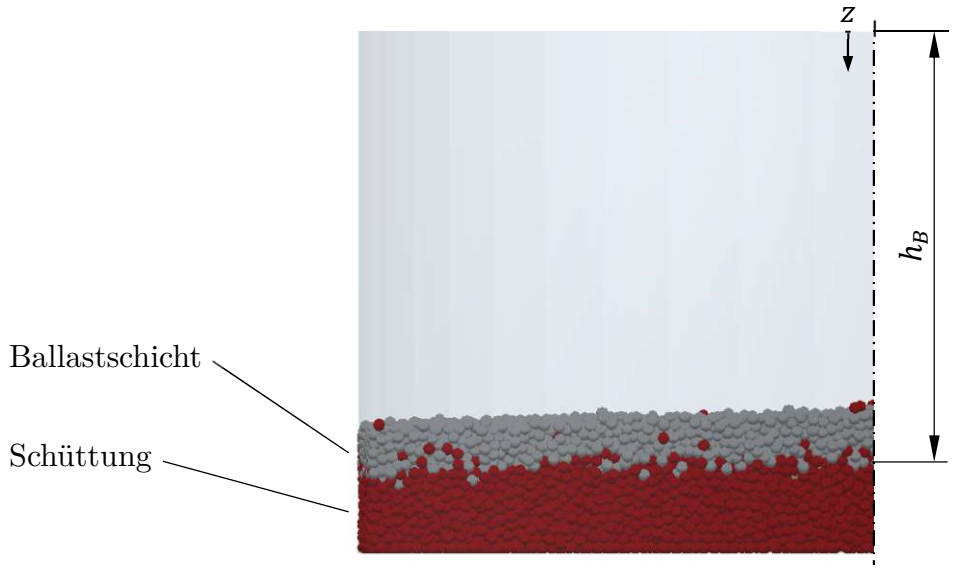


Abbildung 10-8 Aufbringen von Ballastkörper auf die Schüttung zur Reduktion der Rechenzeit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Der orange Punkt in Abbildung 10-9 entspricht dem Druck der Schüttung am Boden ohne Ballastschicht. Wird nun die angesprochene Ballastschicht auf die Schüttung aufgebracht, verschiebt sich der Druck der Schüttung am Boden zu höheren Werten (siehe Abbildung 10-9). Damit dieser Wert mit dem tatsächlichen Schüttdruck nach Janssen – wie der grüne Punkt in Abbildung 10-9 – übereinstimmt, muss das erforderliche Gewicht der Ballastschicht $m_{Ballast}$ berechnet werden. Dies geschieht nach Gleichung (10-6). Neben dem Querschnitt des Behälters A muss auch der vertikale Schüttdruck nach Janssen $\sigma_{v_{(z)}}$ (5-4) an der Stelle $z = h_B$ bekannt sein, der dem Druck des vollständig befüllten Wärmespeichers entspricht. Mit λ (4-8) kann daraus der horizontale Schüttdruck nach Janssen berechnet werden. Die Höhe h_B ist der Abstand zwischen der Oberkante des gefüllten Wärmespeichers und der Oberkante der untersten Schüttung (siehe Abbildung 10-8).

$$m_{Ballast} = \frac{\sigma_{v_{(z=h_B)}} \cdot A}{g} \tag{10-6}$$

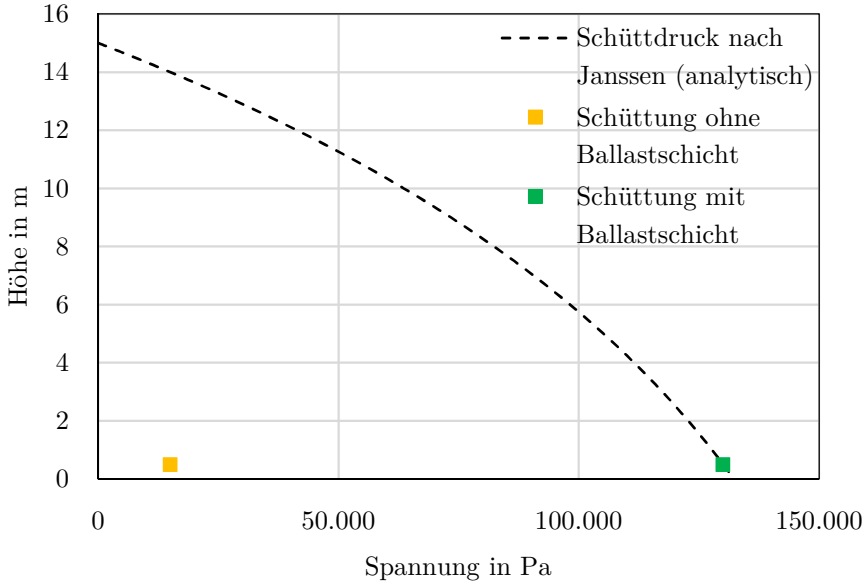


Abbildung 10-9 Kontrolle des Schüttdrucks bei der Nutzung von Ballastkörpern (Vergleich Simulation/analytische Berechnung)

Die Materialkennwerte der Ballastschicht entsprechen mit Ausnahme der Partikeldichte und Partikelsteifigkeit exakt jenen der Schüttung (Tabelle 9-4). Dadurch ist sichergestellt, dass es im Übergang zwischen Schüttung und Ballastschicht zu keinem geänderten Verhalten kommt. Selbiges gilt für den Kontakt zwischen Ballastschicht und Behälterwand.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

In der Simulation wird für die Ballastschicht eine Partikeldichte von 50.000 kg/m³ verwendet. Der E-Modul der Partikel in der Ballastschicht wurde von 15 GPa auf 3 MPa reduziert. Die ursprünglich festgelegte Anzahl der Schichten von 15 (vertikal durchströmter 330 MWh-Wärmespeicher mit 15 m Höhe) bzw. 13 (horizontal durchströmter 330 MWh-Wärmespeicher mit 13 m Höhe) wird in den in Kapitel 11 folgenden Simulationen auf eine verringert. Die Schütthöhe der unteren Schüttung ist daher 1 m. Die Höhe der Ballastschicht beträgt 0,5 m (siehe Abbildung 10-8).

10.4 Einfluss des Elastizitätsmoduls der Partikel

Bei vielen DEM-Anwendungen kann der E-Modul der Partikel reduziert werden, um die Rechenzeit zu senken (Zusammenhang siehe Kapitel 6.5). Beispielsweise kann bei dynamischen Vorgängen der E-Modul herabgesetzt werden, da hier die Massenkräfte entscheidend für die Kräfte sind. Bei statischen Vorgängen hingegen – wie in diesem Projekt die Ausdehnung von Partikeln in einem Behälter – muss mit dem tatsächlichen E-Modul gerechnet werden. Der Elastizitätsmodul der Partikel ist ausschlaggebend für den Spannungsanstieg in der Schüttung bzw. der Behälterwand (siehe Kapitel 6.4). Die Ergebnisse in Kapitel 9.5 (Druckversuche zur Ermittlung des Zeitschritts und des E-Moduls) zeigen auch, welch großen Einfluss der E-Modul auf die Ergebnisse hat. Bei dieser aufwendigen Bestimmung des E-Moduls mittels Druckversuch ist der Einfluss des E-Moduls besonders in Abbildung 9-16 zu sehen. Aus diesem Grund darf eine einfache Reduktion des E-Moduls nicht erfolgen und stellt somit für diese Problemstellung keine geeignete Methode zur Reduktion der Rechenzeit dar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11 Parameterstudie unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien

In diesen Parameterstudien werden unterschiedliche Wärmespeicher-Geometrien untersucht. Diese Untersuchungen beruhen auf dem in Kapitel 7 entwickelten DEM-Berechnungsmodell in Verbindung mit den Vereinfachungen aus Kapitel 10.

In den folgenden Simulationen wird zwischen vertikaler und horizontaler Luft-Durchströmung (näheres siehe Kapitel 3.2) unterschieden und mit einer maximalen Temperaturdifferenz $\Delta T = 350°C$ gerechnet. Dieses ΔT findet in allen folgenden Berechnungen Anwendung. Damit die Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Wärmespeicher-Geometrien gegeben ist, wird in der Simulation immer von einem einheitlichen Schüttdruck im Ausgangszustand ausgegangen (auch wenn sich der Schüttdruck im Ausgangszustand bei Geometrien mit geneigten Wänden von jenem ohne Wandneigung unterscheidet). Die Ausdehnung der Partikel ergibt sich über den Zusammenhang $\Delta T \cdot \alpha_P$ (siehe Kapitel 7.2). Setzt man die aus Tabelle 9-4 ermittelten Materialkennwerte in $\Delta T \cdot \alpha_P$ ein, ergibt sich für die Partikel eine Ausdehnung von 0,26%. Diese Ausdehnung ergibt gemeinsam mit dem Partikeldurchmesser von 12 mm nach (7-1) einen maximalen Partikeldurchmesser $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ von 12,0312 mm. Die in (7-3) angeführte Geschwindigkeit der Größenänderung v_G und der Zeitschritt Δt wurden mit $0{,}0035\, s^{-1}$ und $7 \cdot 10^{-6}\, s$ (Bestimmung des Zeitschritts siehe Kapitel 9) festgelegt, um stabile Simulationen zu erreichen. Die in den Simulationen berechneten Maximalspannungen werden in kPa über mehrere Belade- und Entladezyklen in Diagrammen dargestellt (siehe Abbildung 11-4). Zusätzlich werden diese Maximalspannungen auf den analytischen Schüttdruck nach Janssen bezogen (= normiert) und auf einer zweiten vertikalen Achse aufgetragen (siehe Abbildung 11-4). Dieser analytische Schüttdruck, auf den alle Ergebnisse der Simulation einheitlich bezogen werden, liefert nach (5-5) für den vertikal durchströmten Wärmespeicher mit einer Füllhöhe von 15 m einen Wert von $\sigma_{h_{(z=15\,m)}} = 132.276\, Pa$. Für den horizontal durchströmten Wärmespeicher ergibt sich für eine Füllhöhe von 13 m nach (5-5) ein Wert von $\sigma_{h_{(z=13\,m)}} = 112.644\, Pa$.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Da die in Kapitel 10.1 (Partikelreduktion durch vergrößerte Partikel) beschriebene Vereinfachung zur Reduktion der Rechenzeit angewendet wird, ändert sich auch der Wert von $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$. In den anschließenden Simulationen wird der ursprüngliche Partikeldurchmesser von 12 mm um Faktor 10 erhöht. Daraus ergibt sich nach (7-1) ein $D_{p_{(\Delta T_{max})}}$ von 120,312 mm, das in der Simulation verwendet wird. Durch diese Maßnahme lässt sich die anfängliche Gesamtanzahl von etwa 2 Milliarden Partikel (näheres siehe Kapitel 10) auf ca. 2 Millionen verringern. Dieser Zusammenhang zwischen Partikeldurchmesser und Anzahl der Partikel ist auch in Abbildung 10-2 zu sehen. Die Simulationsdauer von mehreren 100 Jahren pro Wärmespeicher (näheres siehe Kapitel 10) könnte somit auf ein Zehntel gesenkt werden. Das würde aber immer noch Rechenzeiten von mehreren Jahrzehnten ergeben.

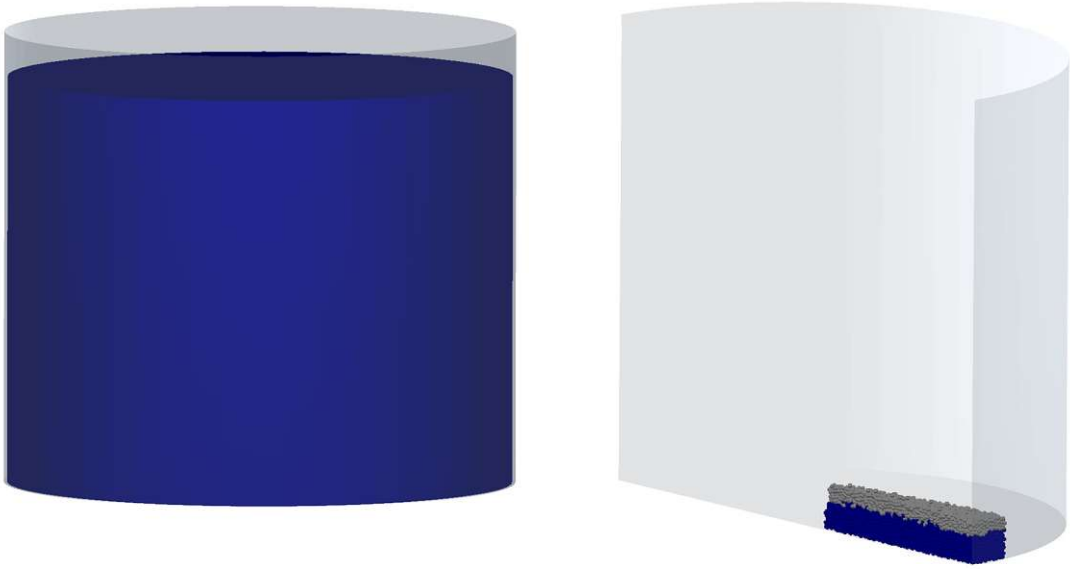
Folglich wird für die Simulationen in Kapitel 11 auch die in Kapitel 10.2 vorgestellte Vereinfachung (Partikelreduktion durch Nutzung von Symmetrien) angewendet. Bei Nutzung zylindrischer bzw. linearer Randbedingungen (siehe Abbildung 10-4 und Abbildung 10-6) kann die Partikelzahl nochmals erheblich reduziert werden. Mit $\omega = 10°$ (näheres siehe Kapitel 10.2) können die Partikel beim vertikal durchströmten 330 MWh-Speicher auf 60.000 herabgesetzt werden. Dies würde zu Rechenzeiten von etwa 400 Stunden pro Wärmespeicher-Geometrie führen.

Mit der in Kapitel 10.3 (Partikelreduktion durch Aufbringen von Ballastkörpern) beschriebenen Vereinfachung konnte die Partikelzahl erneut reduziert werden. Mit einer Schütthöhe der unteren Schüttung von 1 m und einer Ballastschicht mit 0,5 m Höhe (Prinzip siehe Abbildung 10-8) konnte die Partikelzahl auf ca. 7000 gesenkt werden. Die untere Schüttung wurde in einer Schicht in den Wärmespeicher eingebracht. Bei dieser Anzahl ergeben sich für die Simulation des vertikal bzw. horizontal durchströmten Wärmespeichers annehmbare Rechenzeiten von ca. 48 Stunden pro Geometrie bei 20 Belade- und Entladezyklen.

Die eben beschriebenen Vereinfachungen, die folgend zur Anwendung kommen, sind für den vertikal bzw. horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeicher in Abbildung 11-1 bzw. Abbildung 11-2 zu sehen. Abbildung 11-1 zeigt in der linken Bildhälfte das Ursprungsmodell (1) für den vertikal durchströmten Festbett-Wärmespeicher. Mit diesem Modell würden sich aber die eben beschriebenen Rechenzeiten von mehreren hundert Jahren ergeben. In der rechten Bildhälfte von

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

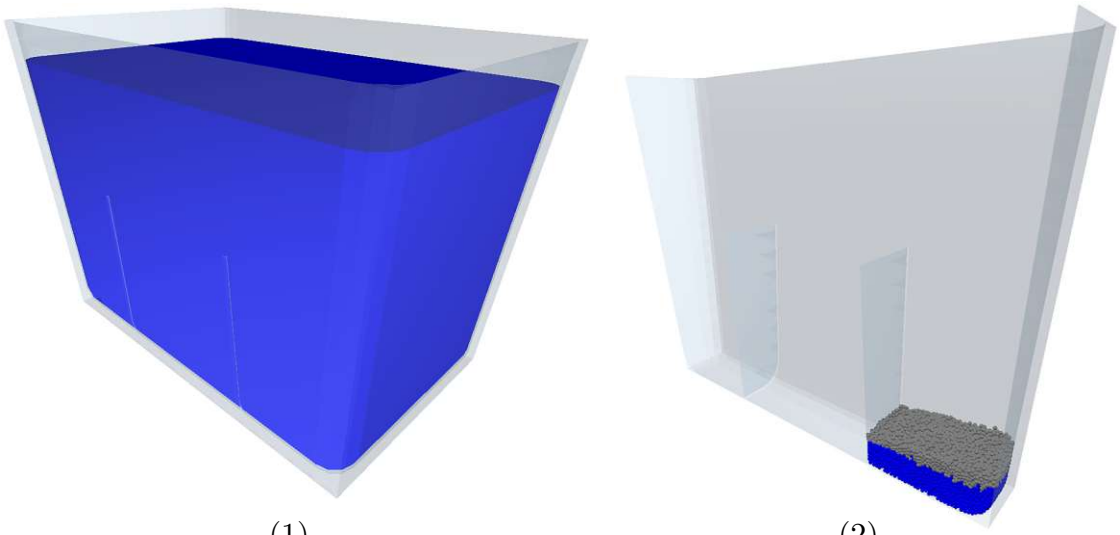
Abbildung 11-1 sind die vorhin beschriebenen und in den Simulationen angewandten Vereinfachungen (2) am geschnittenen Modell zu sehen. In Abbildung 11-2 findet sich für den horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeicher in der linken Bildhälfte ebenfalls das Ursprungsmodell (1) und in der rechten Bildhälfte das geschnittene Vereinfachungsmodell (2).



(1)
Anzahl Partikel: ~ 2 Mrd.
Durchmesser Partikel: 12 mm

(2)
Anzahl Partikel: ~ 7000
Durchmesser Partikel: 120 mm

Abbildung 11-1 Simulationsmodell für den vertikal durchströmten Festbett-Wärmespeicher mit dem (1) Ursprungsmodell und (2) Vereinfachungsmodell



(1)
Anzahl Partikel: ~ 2 Mrd.
Durchmesser Partikel: 12 mm

(2)
Anzahl Partikel: ~ 7000
Durchmesser Partikel: 120 mm

Abbildung 11-2 Simulationsmodell für den horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeicher mit dem (1) Ursprungsmodell und (2) Vereinfachungsmodell

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Bei der Wahl des auszuwertenden Bereichs der Spannungsänderung zwischen Schüttung und Behälterwand muss zwischen vertikaler und horizontaler Wärmespeicher-Geometrie (näheres zu den Speichervarianten siehe Kapitel 3.3) unterschieden werden. Dadurch, dass es sich bei der vertikal durchströmten Wärmespeicher-Geometrie um einen rotationssymmetrischen Körper handelt, kann der Auswertungsbereich am Umfang an einer beliebigen Stelle gewählt werden (siehe Abbildung 11-3, links). Diese Stelle entspricht dem Segment aus Abbildung 11-1. Die horizontal durchströmte Wärmespeicher-Geometrie erfordert eine differenzierte Betrachtung. Für die Auswertungen der Spannungsänderungen zwischen Schüttung und Behälterwand werden daher mehrere Stellen ausgewählt (siehe Abbildung 11-3, rechts), da es sich um keinen rotationssymmetrischen Körper handelt. Dieser Bereich der Auswertung entspricht jenem aus Abbildung 11-2, in dem sich die Partikelschüttung befindet. Die Auswertungspunkte eins bis vier sind so gewählt, dass zum einen die Belastungen der Behälterwand an den beiden Längsseiten (Punkte 1, 2 und 4) und zum anderen am Eck der Wärmespeicherwand (Punkt 3) betrachtet werden. Die in der Mitte befindlichen Einbauten dienen für eine schlangenförmige Durchströmung des Wärmespeichers, die von links nach rechts verläuft.

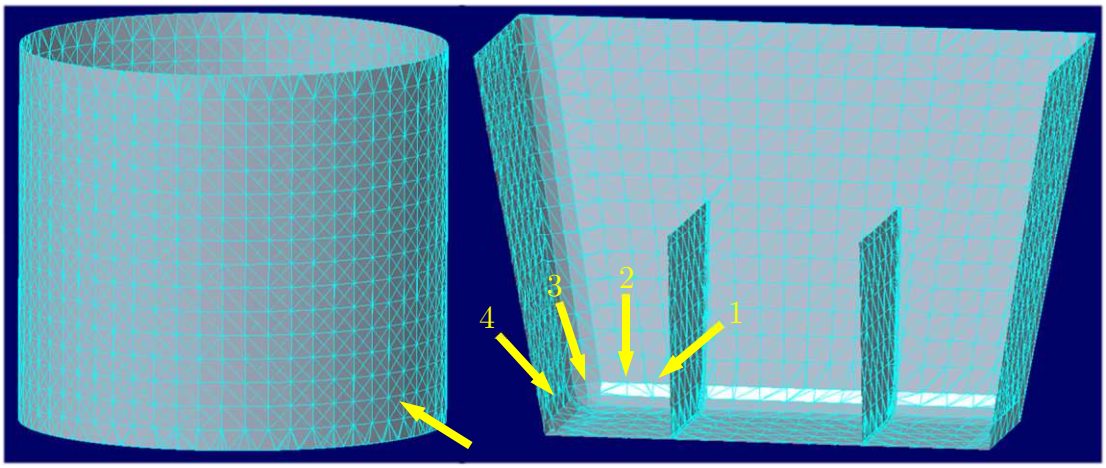


Abbildung 11-3 Betrachteter Bereich für die Spannungsänderungen
(linke Bildhälfte: vertikale Geometrie, rechte Bildhälfte: horizontale Geometrie)

Die vertikal durchströmten Wärmespeicher (WS) werden im Allgemeinen mit der Abkürzung VW in Kombination mit dem Wandneigungswinkel versehen. Die vertikalen Wärmespeicher mit einer Wandneigung von 5°, 10° etc. werden daher in Kapitel 11.1 mit der Abkürzung VW05, VW10 etc. bezeichnet (siehe Tabelle 11-1). Dasselbe Prinzip gilt für die in Kapitel 11.2 (VIW05, VIW10, …) und 11.3 (VII20, VII30, …) betrachteten Wärmespeicher mit unterschiedlichen Wandneigungen und

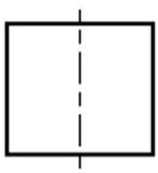
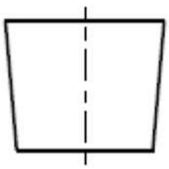
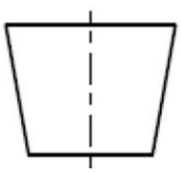
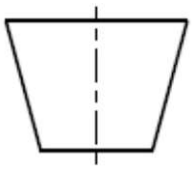
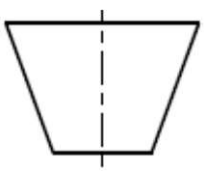
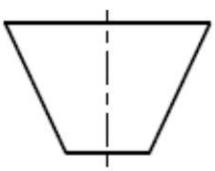
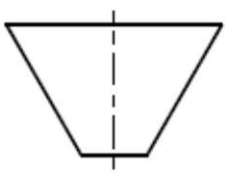
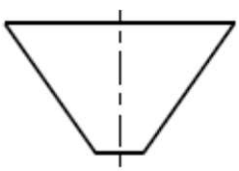
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Innenkegeln (siehe Tabelle 11-10 und Tabelle 11-19). Die horizontal durchströmten Wärmespeicher (WS) werden im Allgemeinen mit der Abkürzung H in Kombination mit dem Wandneigungswinkel versehen. Die horizontalen Wärmespeicher mit einer Wandneigung von 5°, 10° etc. werden daher in Kapitel 11.4 mit der Abkürzung H05, H10 etc. bezeichnet (siehe Tabelle 11-28). Die Wahl der Wärmespeicher-Geometrien (Kapitel 11.1 bis 11.4) erfolgte in Abstimmung mit den Projektpartnern. Die Wandneigung wird in 5°-Schritten erhöht, wobei das Wärmespeichervolumen konstant gehalten wird. Mehrere Durchläufe der Simulationen zeigten, dass sich nach einer Anzahl von 20 Belade- und Entladezyklen ein stabiler Verlauf einstellt und die Kurve annähernd in einen horizontalen Verlauf übergeht (siehe Abbildung 11-4, Abbildung 11-13 und Abbildung 11-21). Aus diesem Grund werden die Ergebnisse in den folgenden Kapiteln für 20 Zyklen dargestellt.

11.1 Vertikal durchströmte Wärmespeicher mit Wandneigungen

Tabelle 11-1 gibt einen Überblick zu den hier folgenden Simulationsergebnissen unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien. In diesem Kapitel wird die Neigung der Wand – ausgehend von einer zylindrischen Geometrie (Durchmesser 17 m, Höhe 15 m – näheres zu den Speichervarianten siehe Tabelle 3-2) – stetig erhöht. In den Simulationen wird immer von einem einheitlichen Schüttdruck im Ausgangszustand ausgegangen. Die Abmessungen der Geometrien und Wandneigungen finden sich in den technischen Daten der jeweiligen Simulation (Tabelle 11-2 bis Tabelle 11-9).

Tabelle 11-1 Übersicht zu den vertikal durchströmten Wärmespeichern mit Wandneigungen (Kurzbezeichnung: VW)

VW00	VW05	VW10	VW15
			
VW20	VW25	VW30	VW35
			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.1.1 VW00 - Vertikaler WS

Tabelle 11-2 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-4 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-2 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW00

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW00
Wandneigung: –
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

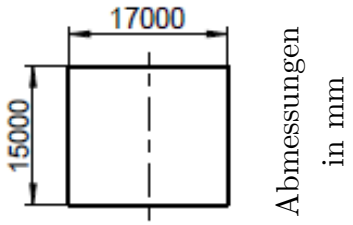


Abbildung 11-4 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 414 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,13, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,13. Der Wert des Entladezustands pendelt sich auf einen Wert von 100 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,82.

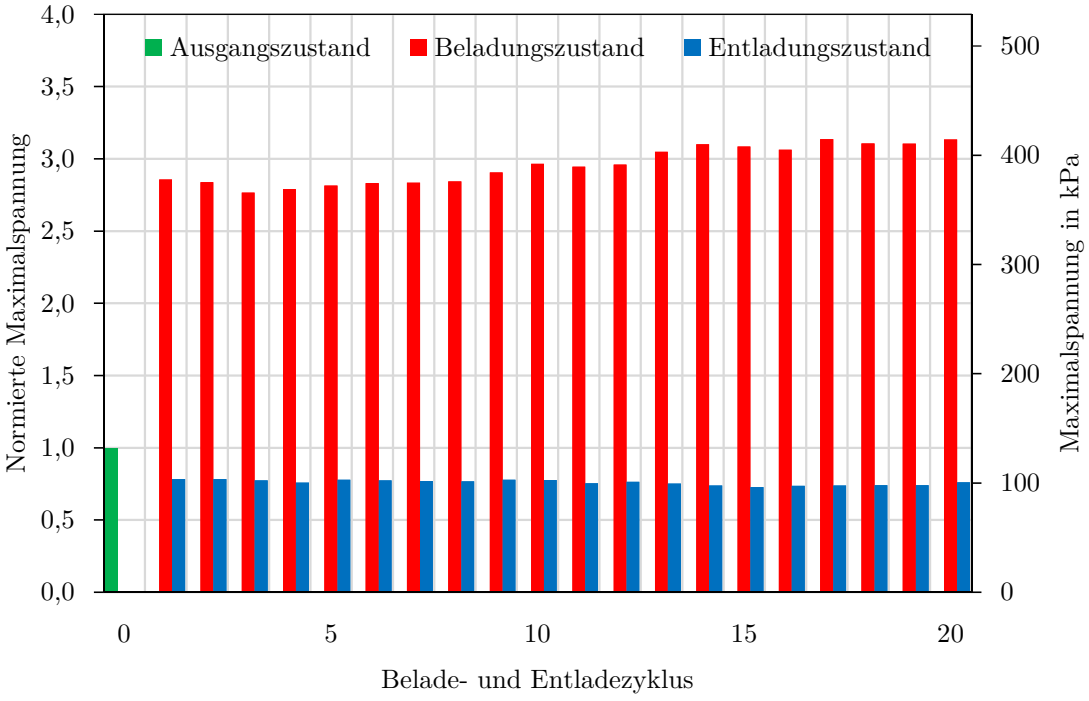


Abbildung 11-4 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW00

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.1.2 VW05 - Vertikaler WS 5° Wandneigung

Tabelle 11-3 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-5 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-3 Technische Daten vertikaler 330-MWh Wärmespeicher VW05

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW05
Wandneigung: 5°
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

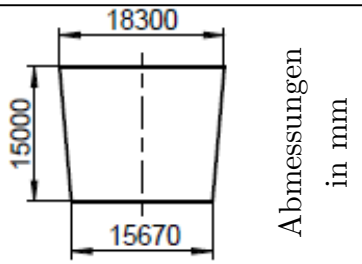


Abbildung 11-5 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich eine Maximalspannung von 461 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,49, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen um den Faktor 3,49. Verglichen mit dem Ergebnis von VW00 ist die Maximalspannung um 8% größer. Das kann am Ausgangszustand (Normierte Maximalspannung bei VW00 leicht unter und bei VW05 leicht über 1) liegen. Der Wert des Entladezustands liegt bei 125 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,99.

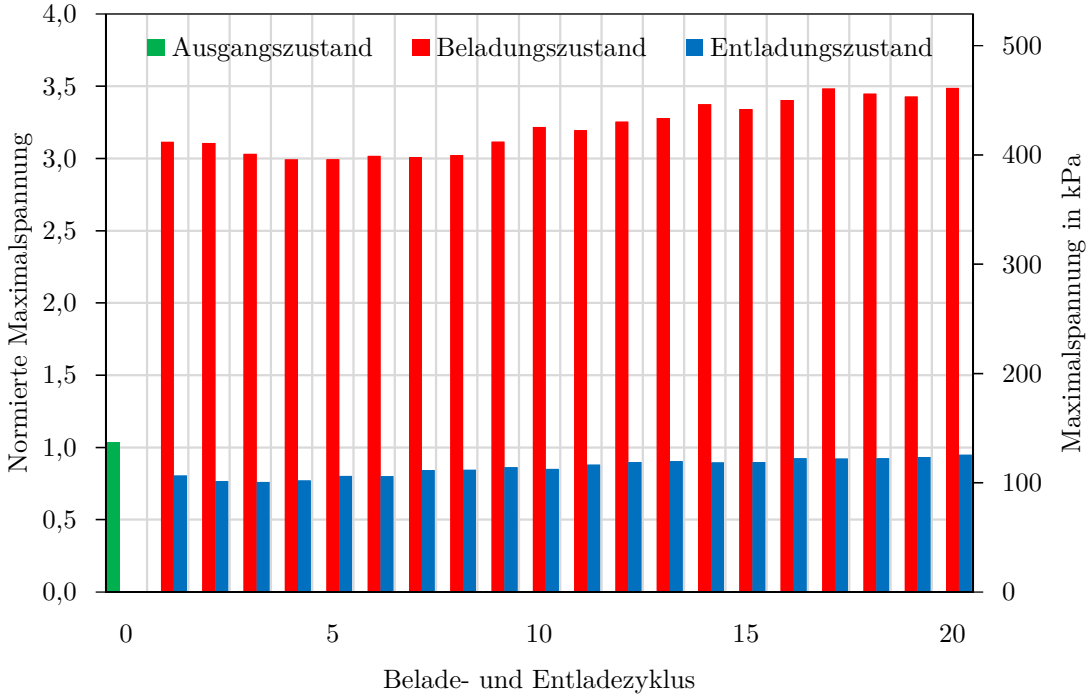


Abbildung 11-5 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW05

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.1.3 VW10 - Vertikaler WS 10° Wandneigung

Tabelle 11-4 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-6 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-4 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW10

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW10
Wandneigung: 10°
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

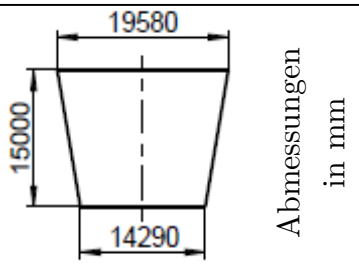


Abbildung 11-6 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich eine Maximalspannung von 348 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,63, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,63. Verglichen mit dem Ergebnis von VW00 bzw. VW05 führt eine Wandneigung von 10° zu einer Reduktion von 16% bzw. 22%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 102 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,77.

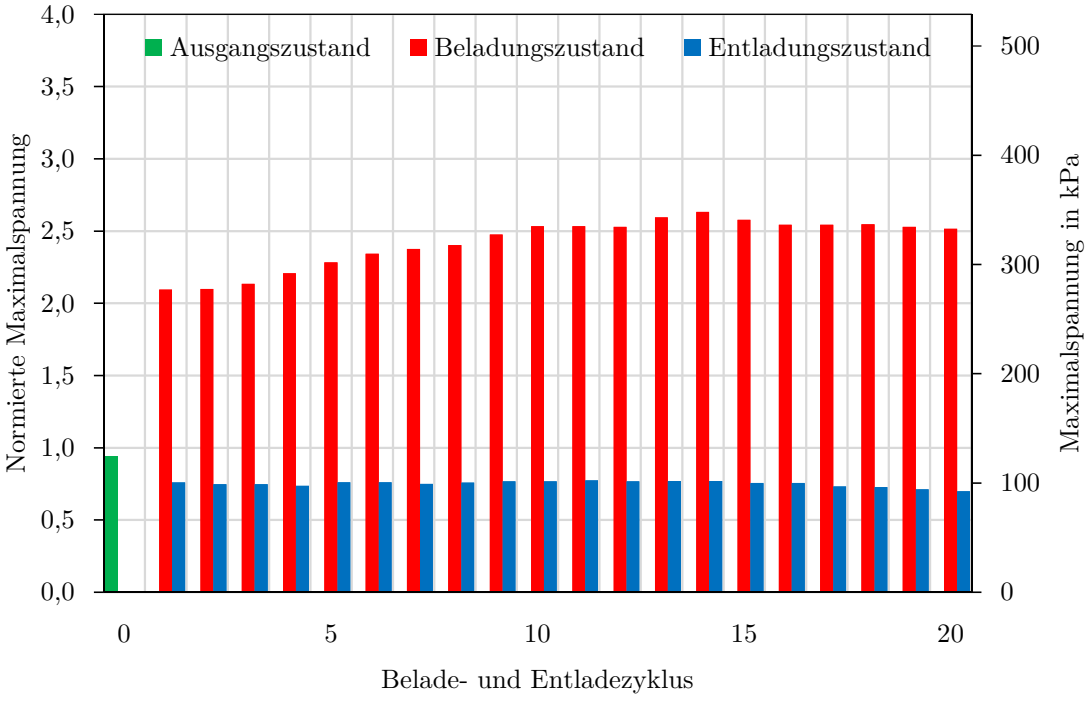


Abbildung 11-6 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW10

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.1.4 VW15 - Vertikaler WS 15° Wandneigung

Tabelle 11-5 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-7 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-5 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW15

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW15
Wandneigung: 15°
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

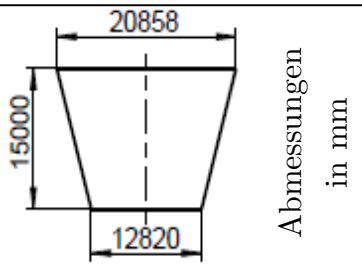


Abbildung 11-7 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich eine Maximalspannung von 362 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,73, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,73. Verglichen mit dem Ergebnis von VW00 bzw. VW10 führt eine Wandneigung von 15° zu einer Reduktion von 13% bzw. einer Erhöhung von 4%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 139 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,07.

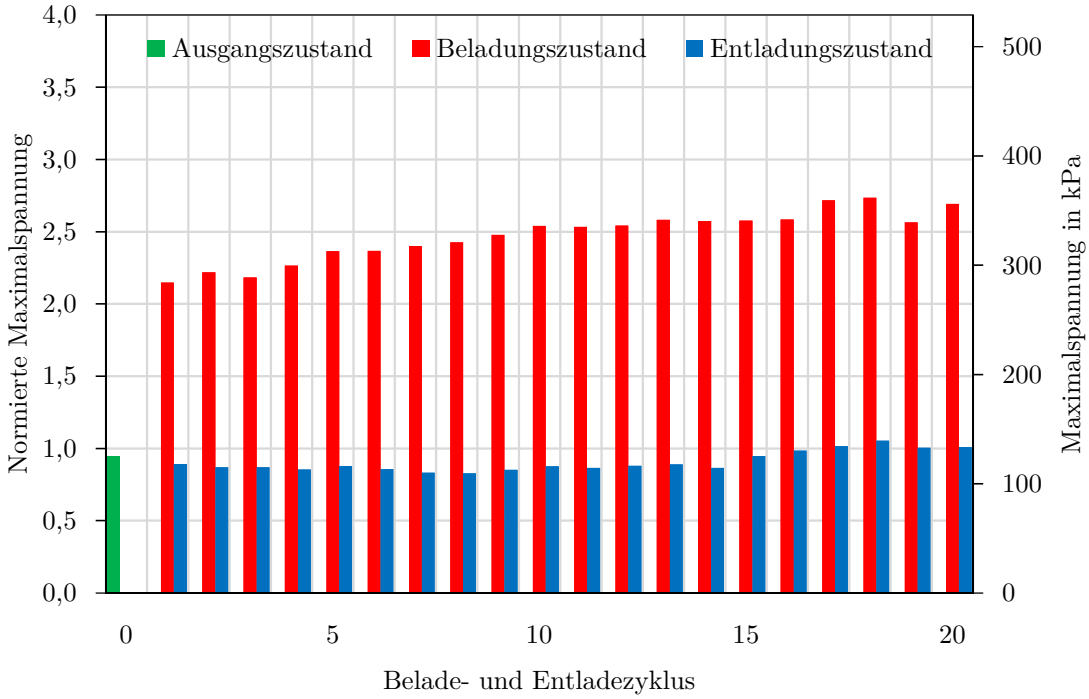


Abbildung 11-7 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW15

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.1.5 VW20 - Vertikaler WS 20° Wandneigung

Tabelle 11-6 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-8 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-6 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW20

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW20
Wandneigung: 20°
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

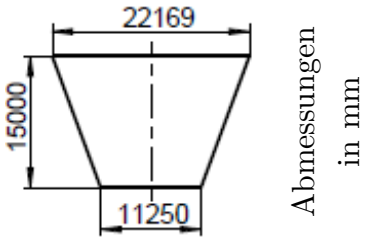


Abbildung 11-8 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich eine Maximalspannung von 359 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,71, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,71. Verglichen mit dem Ergebnis von VW00 bzw. VW15 führt eine Wandneigung von 20° zu einer Reduktion von 14% bzw. 1%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 146 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,10.

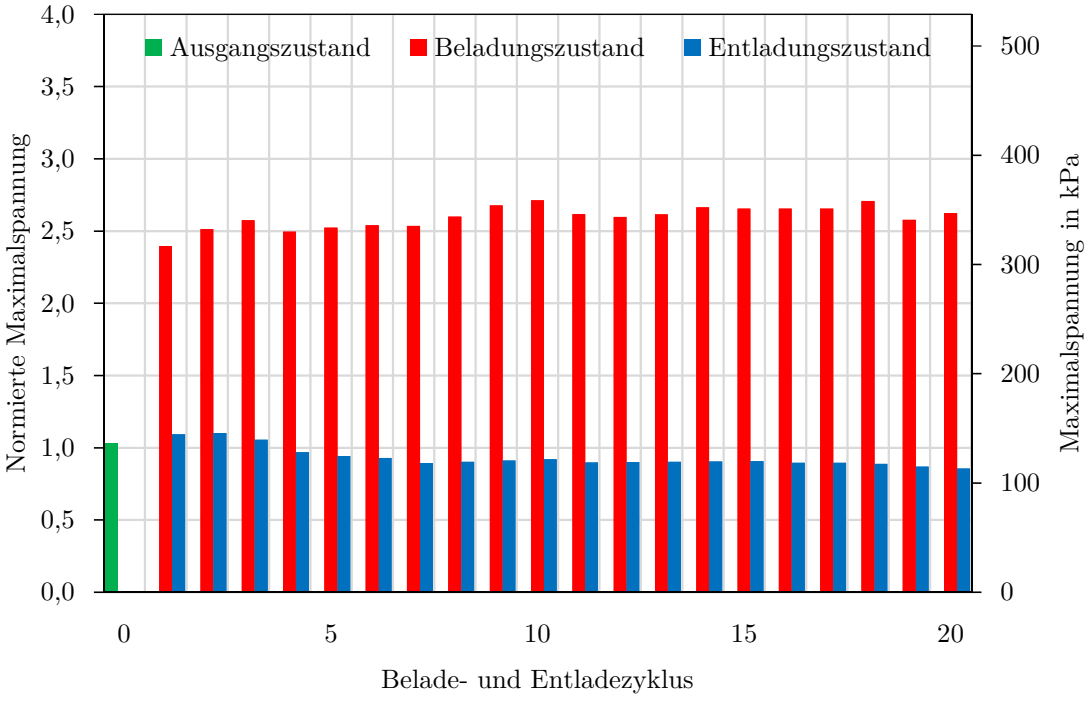


Abbildung 11-8 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW20

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.1.6 VW25 - Vertikaler WS 25° Wandneigung

Tabelle 11-7 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-9 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-7 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW25

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW25
Wandneigung: 25°
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

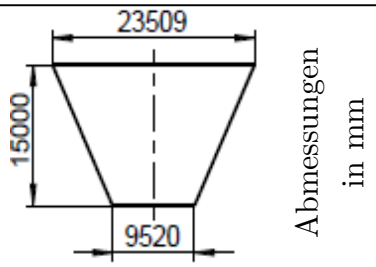


Abbildung 11-9 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich eine Maximalspannung von 274 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,07, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,07. Verglichen mit dem Ergebnis von VW00 bzw. VW20 führt eine Wandneigung von 25° zu einer Reduktion von 34% bzw. 24%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 118 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,89.

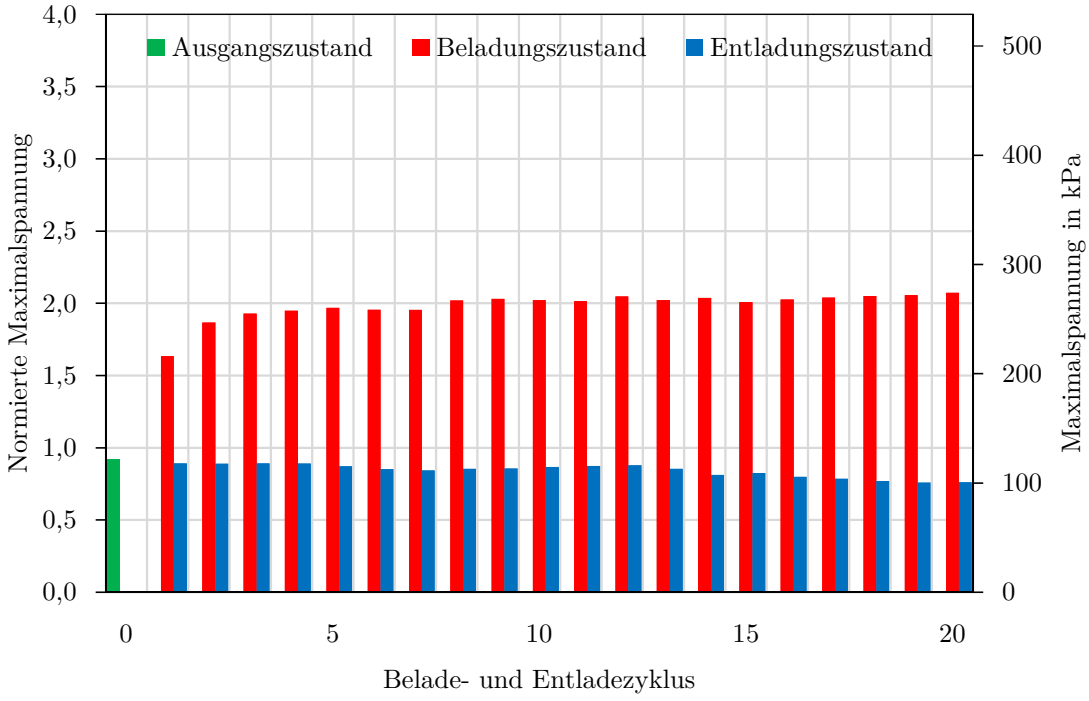


Abbildung 11-9 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW25

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.1.7 VW30 - Vertikaler WS 30° Wandneigung

Tabelle 11-8 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-10 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-8 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW30

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW30
Wandneigung: 30°
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

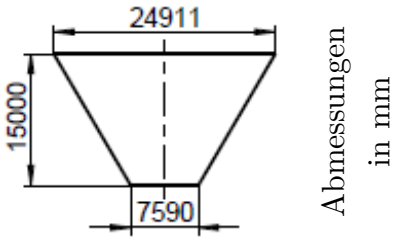


Abbildung 11-10 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich eine Maximalspannung von 247 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,87, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 1,87. Verglichen mit dem Ergebnis von VW00 bzw. VW25 führt eine Wandneigung von 30° zu einer Reduktion von 40% bzw. 10%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 114 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,86.

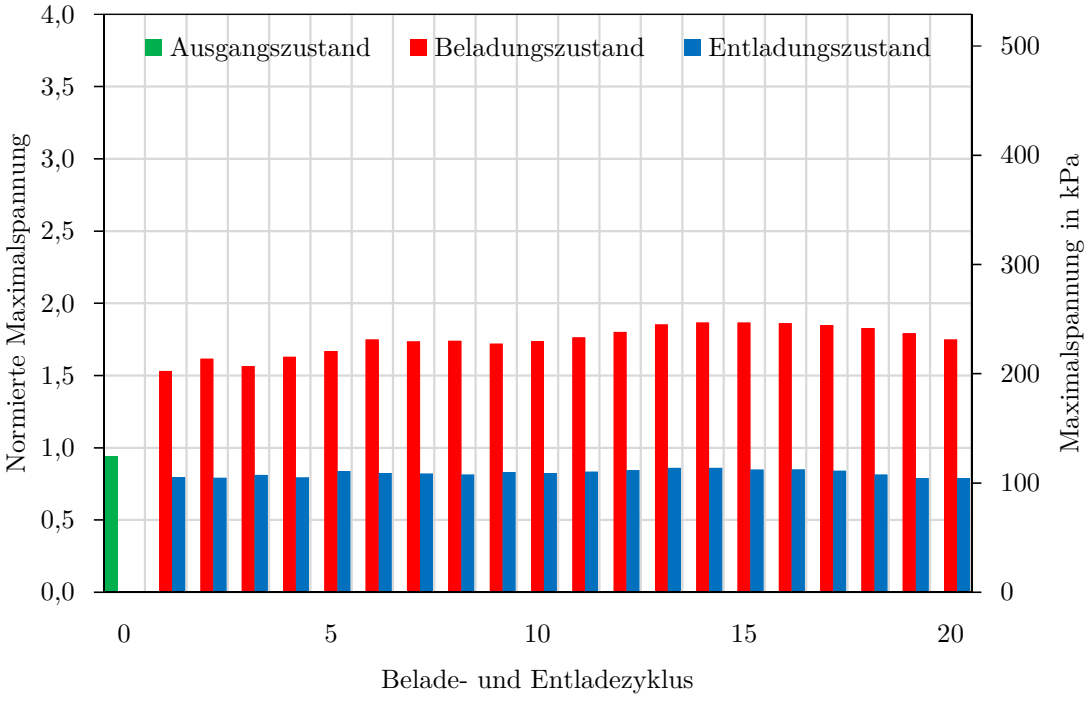


Abbildung 11-10 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW30

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.1.8 VW35 - Vertikaler WS 35° Wandneigung

Tabelle 11-9 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-11 verwendeten Geometrie.

Tabelle 11-9 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW35

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VW35
Wandneigung: 35°
Winkel Innenkegel: –
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

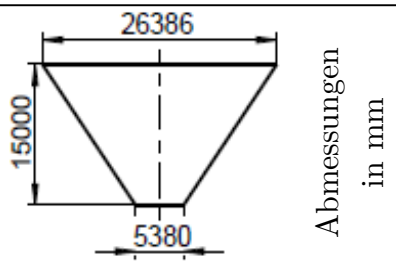


Abbildung 11-11 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich eine Maximalspannung von 227 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,73, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 1,73. Verglichen mit dem Ergebnis von VW00 bzw. VW30 führt eine Wandneigung von 35° zu einer Reduktion von 45% bzw. 11%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 137 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,04.

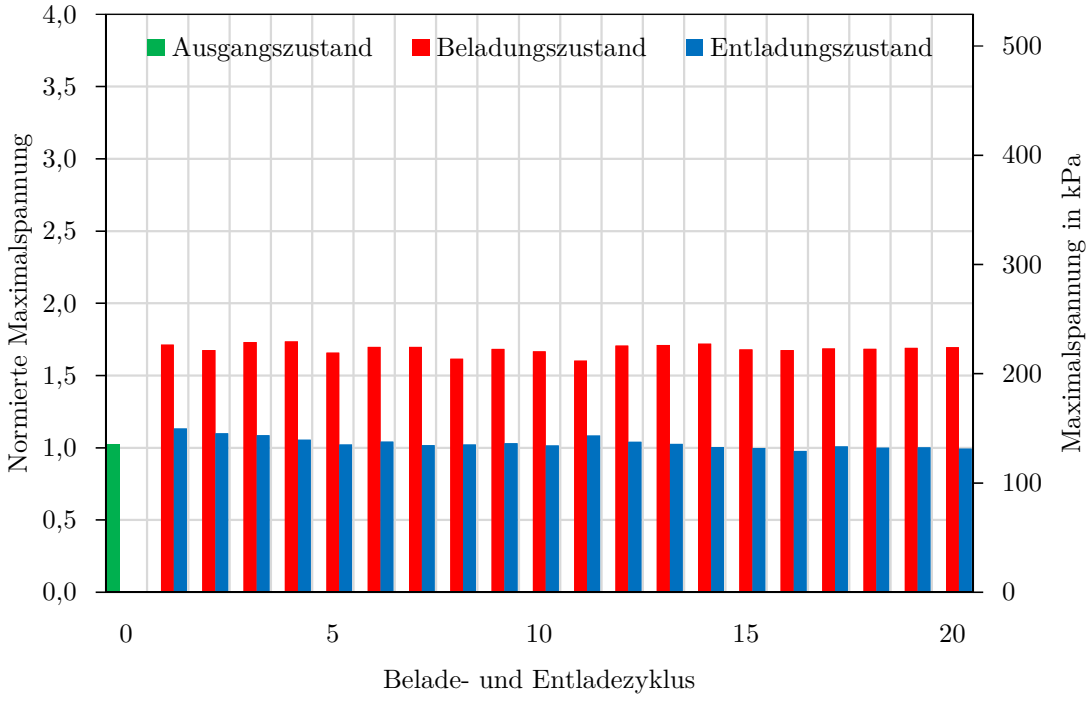


Abbildung 11-11 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW35

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.2 Vertikal durchströmte Wärmespeicher Wandneigungen, Innenkegel

Tabelle 11-10 gibt einen Überblick zu den hier folgenden Simulationsergebnissen der unterschiedlichen Wärmespeicher-Geometrien. In diesem Kapitel wird die Neigung der Wand – ausgehend von einer zylindrischen Geometrie (Durchmesser 17 m, Höhe 15 m) – stetig erhöht. Im Unterschied zu den durchgeführten Simulationen in Kapitel 11.1 enthalten alle Wärmespeicher-Geometrien einen Innenkegel (siehe Abbildung 11-12). Es wird untersucht, ob sich Einbauten in Form von Innenkegeln günstig auf die Belastungen auswirken. Die Geometrie des Innenkegels (Spitzenwinkel 20°, Durchmesser am Boden 2 m) wurde in Abstimmung mit dem IET festgelegt. In den Simulationen wird immer von einem einheitlichen Schüttdruck im Ausgangszustand ausgegangen. Die Abmessungen der Geometrien und Wandneigungen finden sich in den technischen Daten der jeweiligen Simulation (Tabelle 11-11 bis Tabelle 11-18).

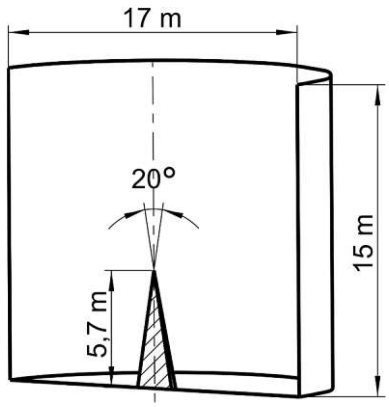
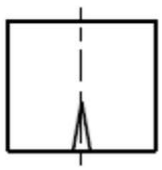
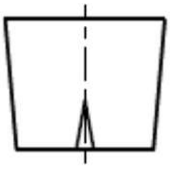
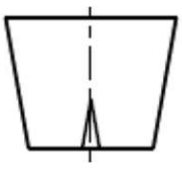
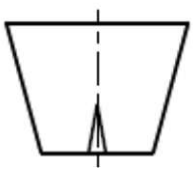
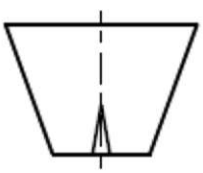
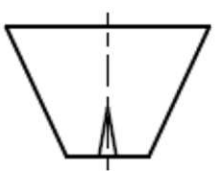
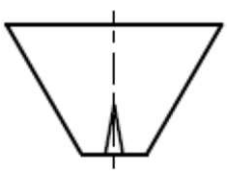
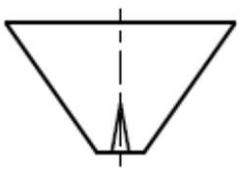


Abbildung 11-12 Abmessungen - Wärmespeicher-Geometrie mit Innenkegel

Tabelle 11-10 Übersicht zu den vertikal durchströmten Wärmespeichern mit Wandneigungen und Innenkegel (Kurzbezeichnung: VIW)

VIW00	VIW05	VIW10	VIW15
			
VIW20	**VIW25**	**VIW30**	**VIW35**
			

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.2.1 VIW00 - Vertikaler WS mit Innenkegel

Tabelle 11-11 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-13 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-11 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW00

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VIW00
Wandneigung: 0°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

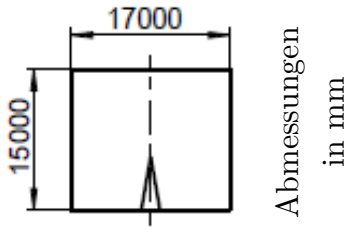


Abbildung 11-13 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 441 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,34, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,34. Der Wert des Entladezustands pendelt sich auf einen Wert von 93 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,77.

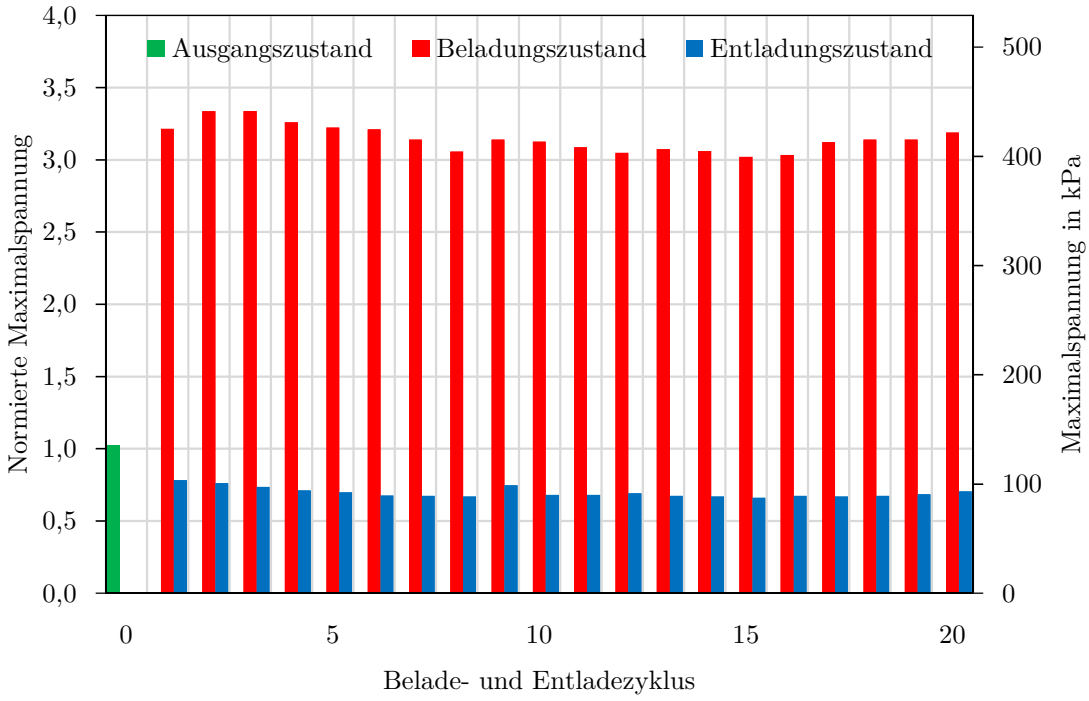


Abbildung 11-13 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW00

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.2.2 VIW05 - Vertikaler WS, Innenkegel 5° Wandneigung

Tabelle 11-12 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-14 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-12 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW05

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VIW05
Wandneigung: 5°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

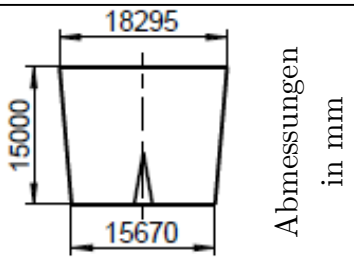


Abbildung 11-14 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 433 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,27, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,27. Verglichen mit dem Ergebnis von VIW00 führt eine Wandneigung von 5° zu einer Reduktion von 2%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 110 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,90.

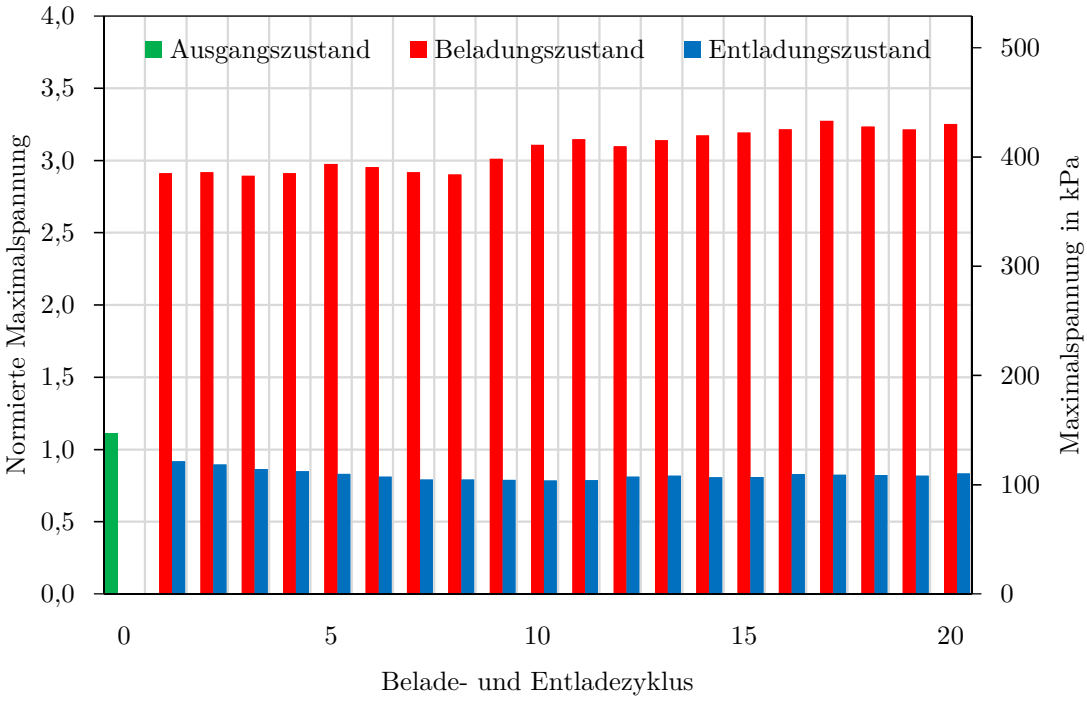


Abbildung 11-14 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u Entladezyklen bei VIW05

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.2.3 VIW10 - Vertikaler WS Innenkegel 10° Wandneigung

Tabelle 11-13 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-15 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-13 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW10

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VIW10
Wandneigung: 10°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

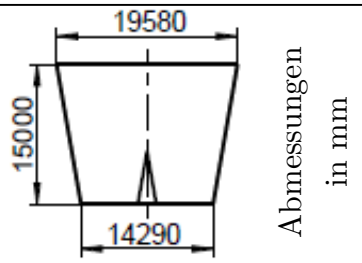


Abbildung 11-15 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 338 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,56, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,56. Verglichen mit dem Ergebnis von VIW00 bzw. VIW05 führt eine Wandneigung von 10° zu einer Reduktion von 23% bzw. 22%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 92 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,77.

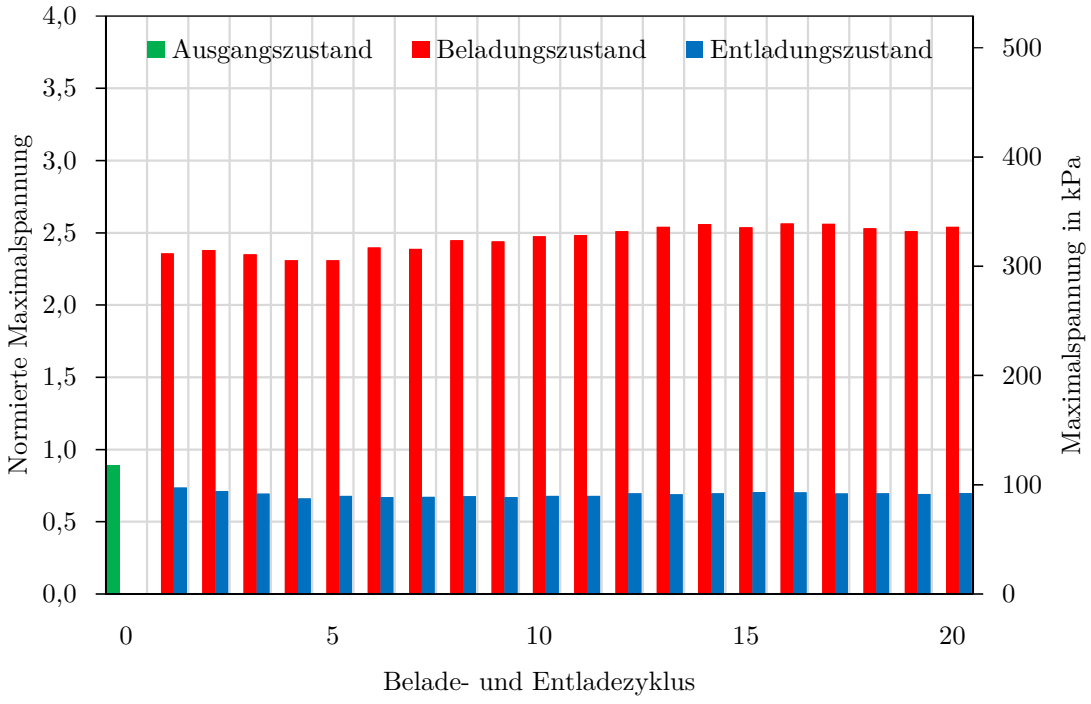


Abbildung 11-15 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW10

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.2.4 VIW15 - Vertikaler WS Innenkegel 15° Wandneigung

Tabelle 11-14 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-16 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-14 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW15

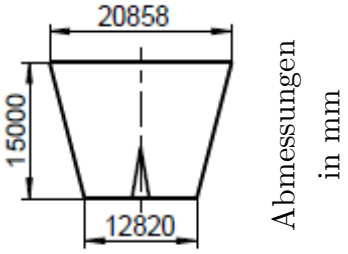
Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher Kurzbezeichnung: VIW15 Wandneigung: 15° Winkel Innenkegel: 20° Wärmespeichervolumen: 3400 m³ Schüttung: 5.100 t	

Abbildung 11-16 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 333 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,52, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,52. Verglichen mit dem Ergebnis von VIW00 bzw. VIW10 führt eine Wandneigung von 15° zu einer Reduktion von 24% bzw. 2%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 120 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,91.

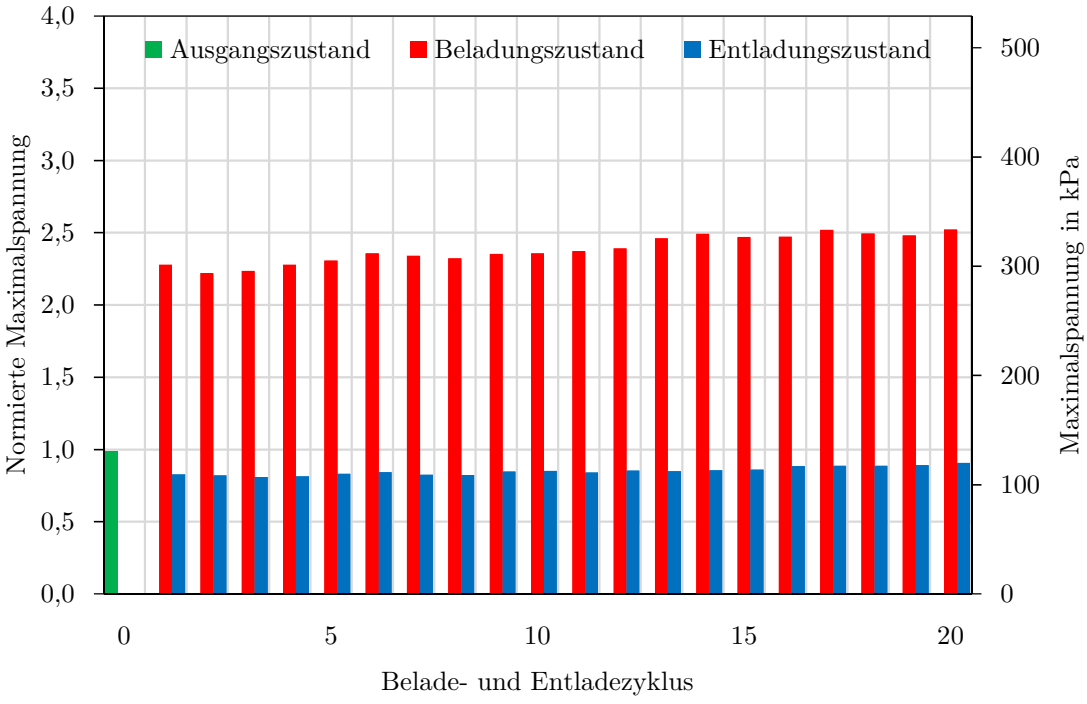


Abbildung 11-16 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW15

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.2.5 VIW20 - Vertikaler WS Innenkegel 20° Wandneigung

Tabelle 11-15 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-17 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-15 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW20

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VIW20
Wandneigung: 20°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

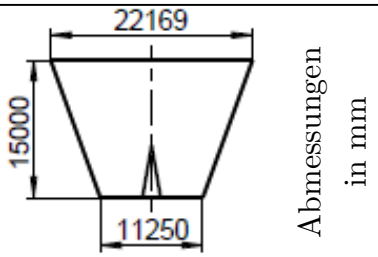


Abbildung 11-17 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 327 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,47, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,47. Verglichen mit dem Ergebnis von VIW00 bzw. VIW15 führt eine Wandneigung von 20° zu einer Reduktion von 26% bzw. 2%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 139 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,05.

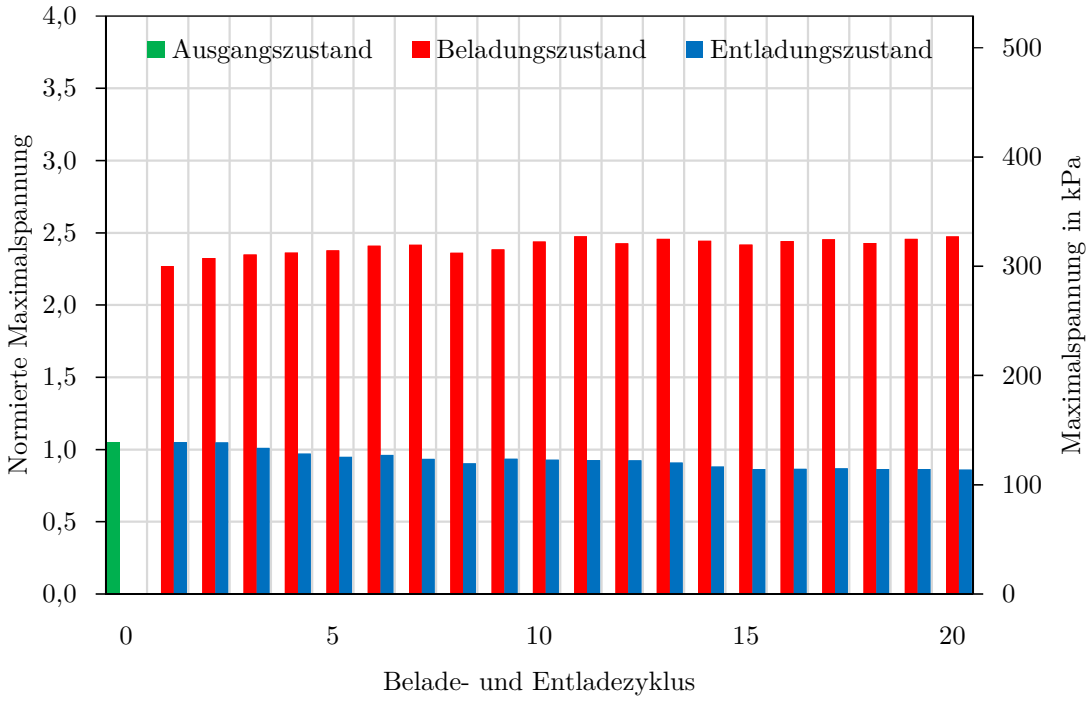


Abbildung 11-17 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW20

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.2.6 VIW25 - Vertikaler WS Innenkegel 25° Wandneigung

Tabelle 11-16 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-18 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-16 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW25

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VIW25
Wandneigung: 25°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

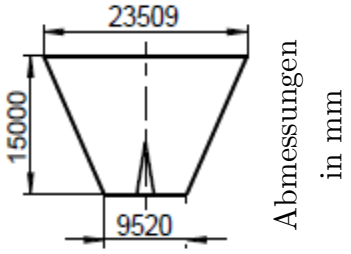


Abbildung 11-18 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 311 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,35, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,35. Verglichen mit dem Ergebnis von VIW00 bzw. VIW20 führt eine Wandneigung von 25° zu einer Reduktion von 29% bzw. 5%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 110 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,83.

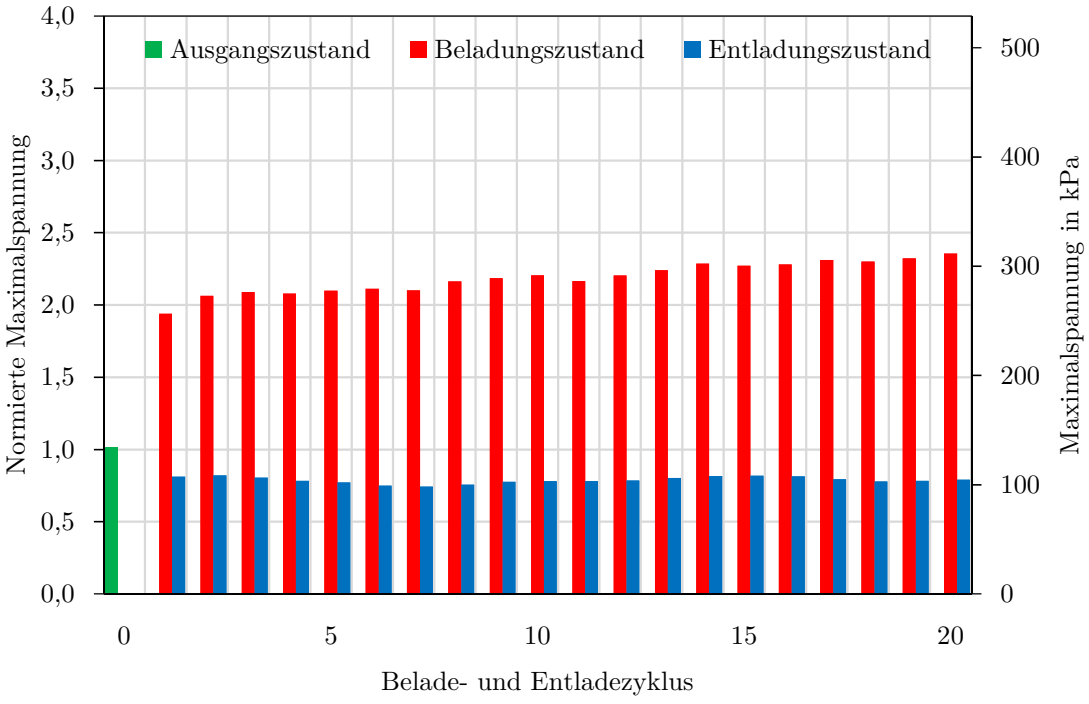


Abbildung 11-18 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW25

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.2.7 VIW30 - Vertikaler WS Innenkegel 30° Wandneigung

Tabelle 11-17 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-19 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-17 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW30

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VIW30
Wandneigung: 30°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

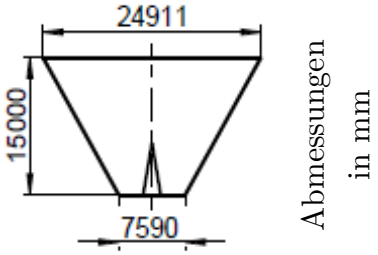


Abbildung 11-19 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 283 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,14, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,14. Verglichen mit dem Ergebnis von VIW00 bzw. VIW25 führt eine Wandneigung von 30° zu einer Reduktion von 36% bzw. 9%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 122 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,92.

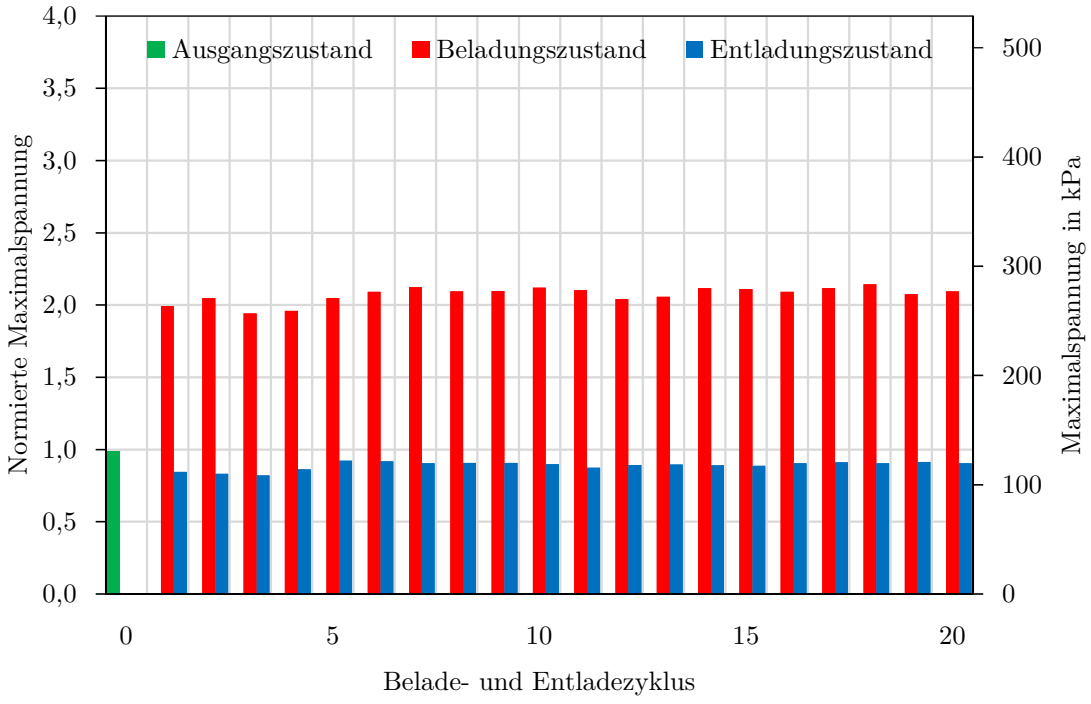


Abbildung 11-19 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW30

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.2.8 VIW35 - Vertikaler WS Innenkegel 35° Wandneigung

Tabelle 11-18 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-20 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-18 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW35

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VIW35
Wandneigung: 35°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

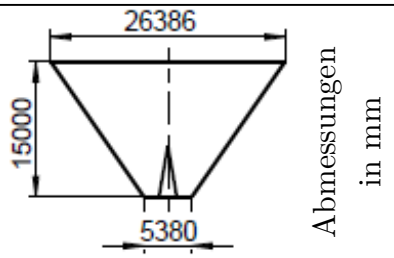


Abbildung 11-20 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 231 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,75, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 1,75. Verglichen mit dem Ergebnis von VIW00 bzw. VIW30 führt eine Wandneigung von 35° zu einer Reduktion von 48% bzw. 18%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 145 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,09.

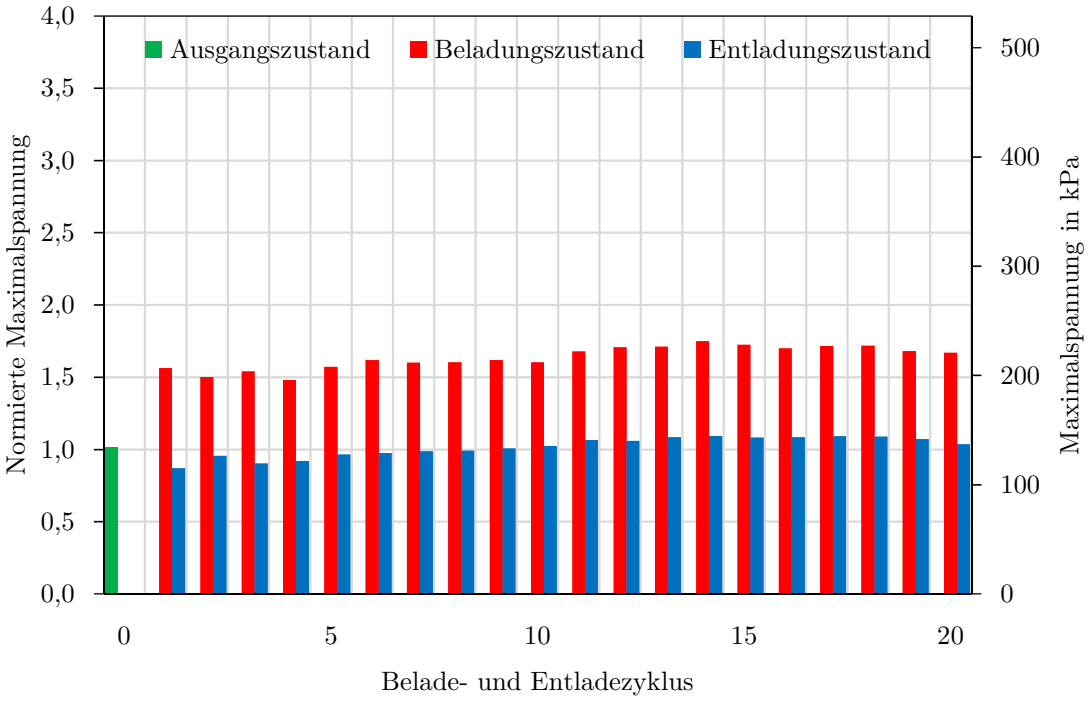


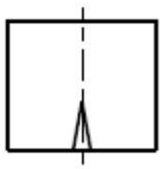
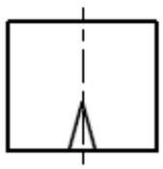
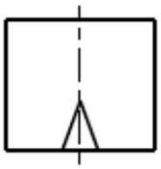
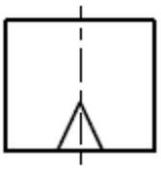
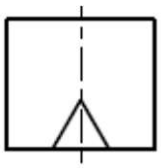
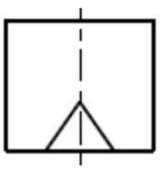
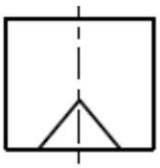
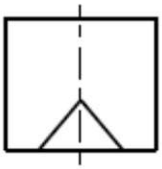
Abbildung 11-20 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW35

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3 Vertikal durchströmte Wärmespeicher mit Innenkegelneigungen

Tabelle 11-19 gibt einen Überblick zu den hier folgenden Simulationsergebnissen unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien. In diesem Kapitel wird die Neigung des Innenkegels – ausgehend von einem 20° Spitzenwinkel – stetig erhöht (Abbildung 11-12). Die Kegelhöhe bleibt bei allen Simulationen unverändert (Kegelhöhe = 5,67 m). Die genauen Abmessungen der Geometrien und Innenkegelneigungen finden sich in den technischen Daten der jeweiligen Simulation (Tabelle 11-20 bis Tabelle 11-27).

Tabelle 11-19 Übersicht zu den vertikal durchströmten Wärmespeichern mit Innenkegelneigungen (Kurzbezeichnung: VII)

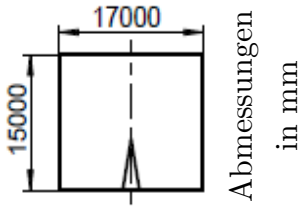
VII20	VII30	VII40	VII50
			
VII60	**VII70**	**VII80**	**VII90**
			

11.3.1 VII20 - Vertikaler WS 20° Innenkegelneigung

Tabelle 11-20 liefert einen Überblick zur verwendeten Geometrie. Das Ergebnis von VII20 entspricht jenem von VIW00, da es sich um dieselbe Geometrie handelt (Ergebnis siehe Kapitel 11.2.1 VIW00 - Vertikaler WS mit Innenkegel, Kegelvolumen vernachlässigt).

Tabelle 11-20 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII20

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VII20
Wandneigung: 0°
Winkel Innenkegel: 20°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3.2 VII30 - Vertikaler WS 30° Innenkegelneigung

Tabelle 11-21 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-21 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-21 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII30

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VII30
Wandneigung: 0°
Winkel Innenkegel: 30°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

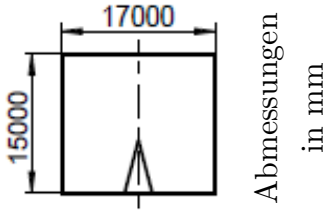


Abbildung 11-21 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 422 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,19, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,19. Verglichen mit dem Ergebnis von VII20 führt eine Innenkegelneigung von 30° zu einer Reduktion von 4%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 114 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,88.

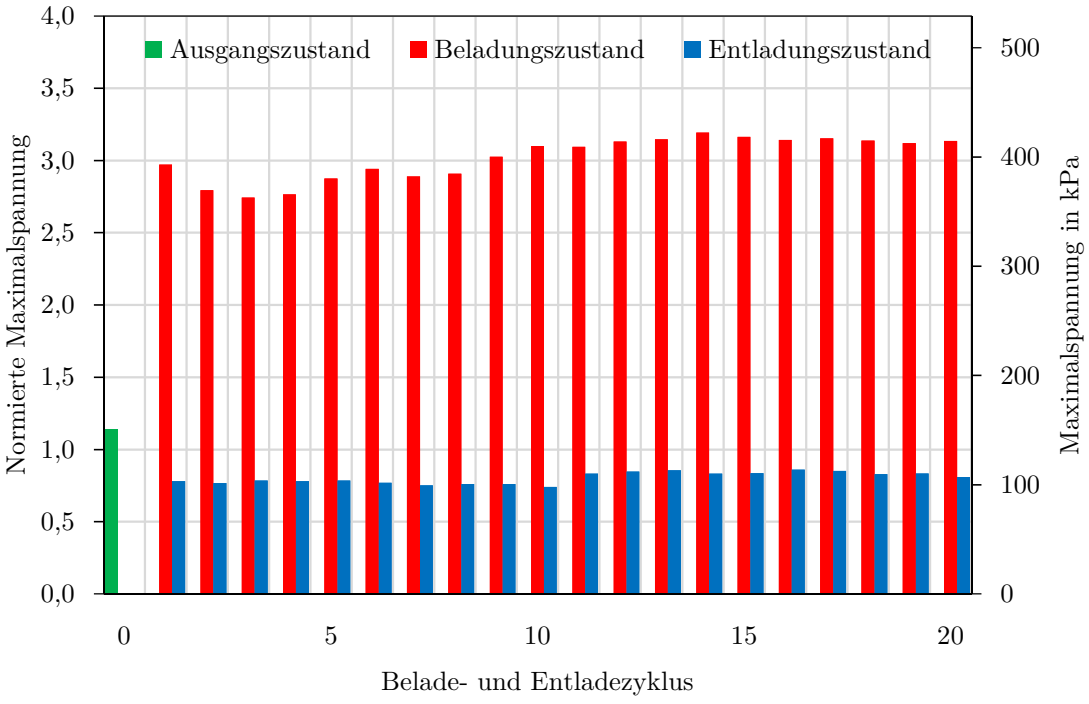


Abbildung 11-21 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII30

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3.3 VII40 - Vertikaler WS 40° Innenkegelneigung

Tabelle 11-22 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-22 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-22 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII40

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VII40
Wandneigung: 0°
Winkel Innenkegel: 40°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

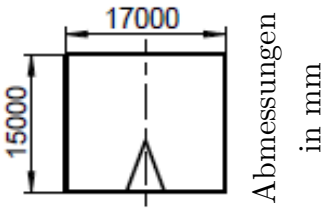


Abbildung 11-22 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 427 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,23, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,23. Verglichen mit dem Ergebnis von VII20 bzw. VII30 führt eine Innenkegelneigung von 40° zu einer Reduktion von 3% bzw. Erhöhung von 1%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 129 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,97.

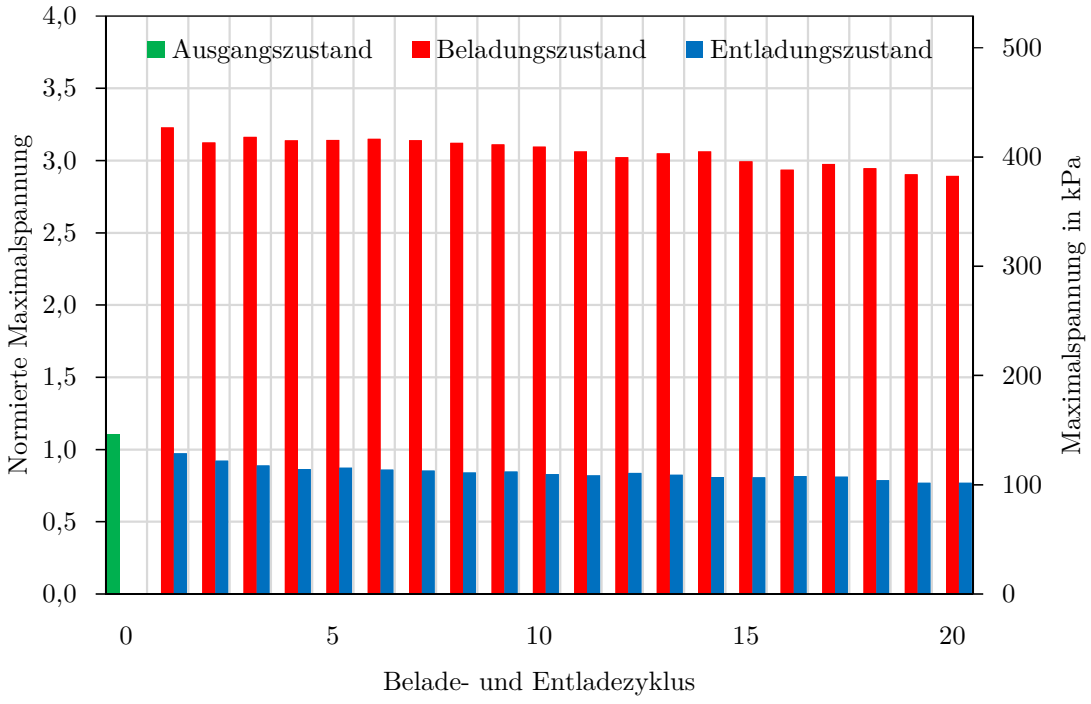


Abbildung 11-22 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII40

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3.4 VII50 - Vertikaler WS 50° Innenkegelneigung

Tabelle 11-23 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-23 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-23 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII50

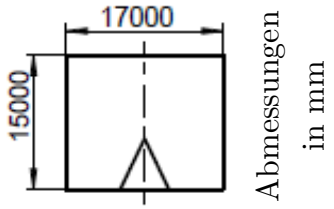
Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher	
Kurzbezeichnung: VII50	
Wandneigung: 0°	
Winkel Innenkegel: 50°	
Wärmespeichervolumen: 3400 m³	
Schüttung: 5.100 t	

Abbildung 11-23 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 415 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,14, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,14. Verglichen mit dem Ergebnis von VII20 bzw. VII40 führt eine Innenkegelneigung von 50° zu einer Reduktion von 6% bzw. 3%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 109 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,82.

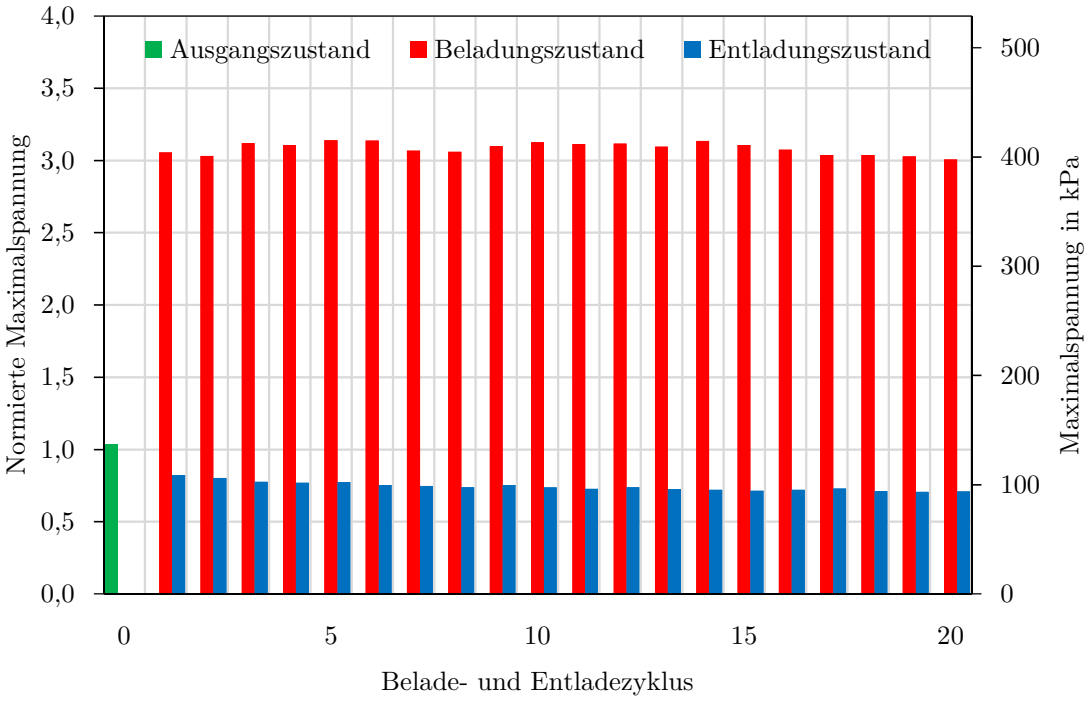


Abbildung 11-23 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII50

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3.5 VII60 - Vertikaler WS 60° Innenkegelneigung

Tabelle 11-24 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-24 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-24 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII60

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VII60
Wandneigung: 0°
Winkel Innenkegel: 60°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

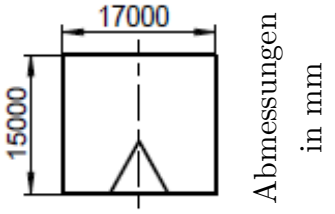


Abbildung 11-24 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 401 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,03, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,03. Verglichen mit dem Ergebnis von VII20 bzw. VII50 führt eine Innenkegelneigung von 60° zu einer Reduktion von 9% bzw. 3%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 103 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,78.

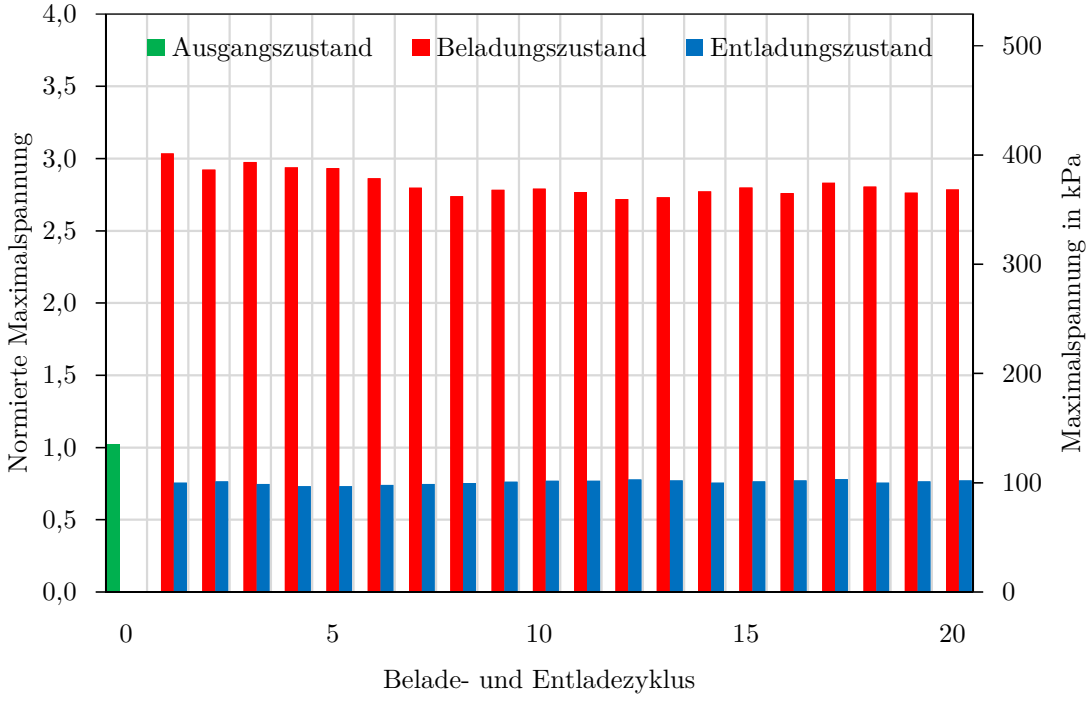


Abbildung 11-24 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII60

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3.6 VII70 - Vertikaler WS 70° Innenkegelneigung

Tabelle 11-25 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-25 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-25 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII70

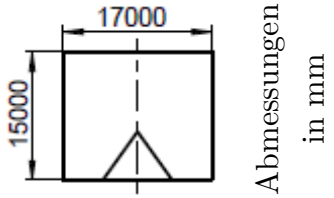
Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher	
Kurzbezeichnung: VII70 Wandneigung: 0° Winkel Innenkegel: 70° Wärmespeichervolumen: 3400 m³ Schüttung: 5.100 t	

Abbildung 11-25 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 425 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,21, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,21. Verglichen mit dem Ergebnis von VII20 bzw. VII60 führt eine Innenkegelneigung von 70° zu einer Reduktion von 4% bzw. Zunahme von 5%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 113 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,86.

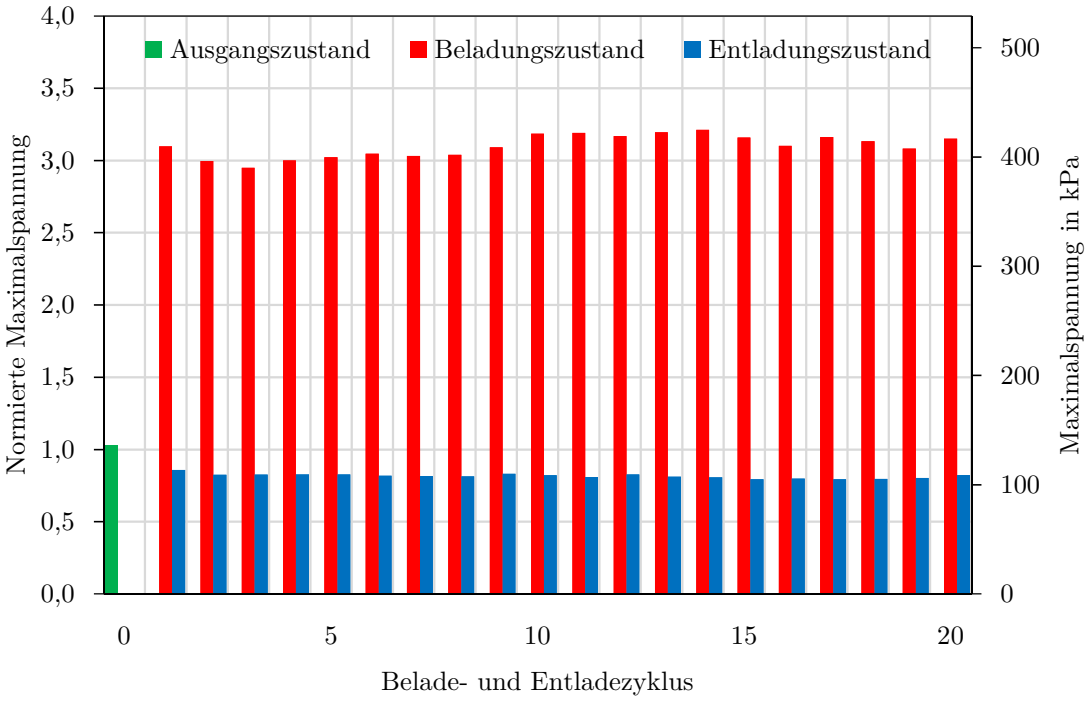


Abbildung 11-25 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII70

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3.7 VII80 - Vertikaler WS 80° Innenkegelneigung

Tabelle 11-26 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-26 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-26 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII80

Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: VII80
Wandneigung: 0°
Winkel Innenkegel: 80°
Wärmespeichervolumen: 3400 m³
Schüttung: 5.100 t

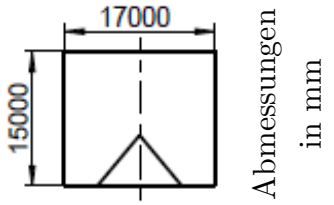


Abbildung 11-26 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 419 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,17, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,17. Verglichen mit dem Ergebnis von VII20 bzw. VII70 führt eine Innenkegelneigung von 80° zu einer Reduktion von 5% bzw. 1%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 123 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,93.

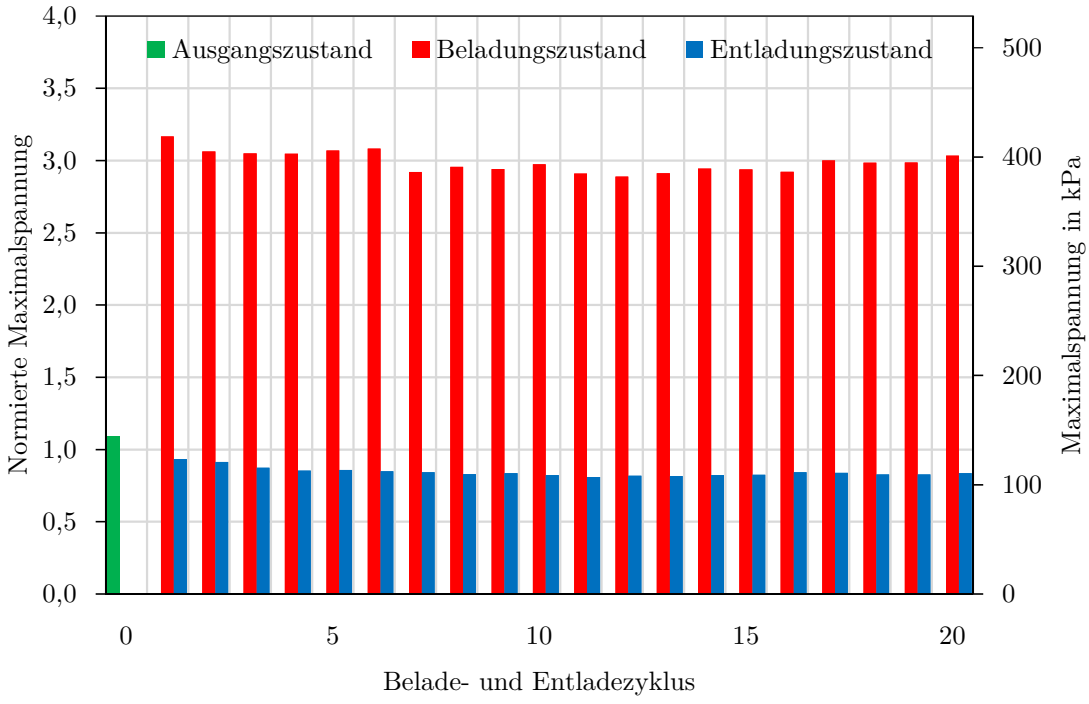


Abbildung 11-26 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII80

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.3.8 VII90 - Vertikaler WS 90° Innenkegelneigung

Tabelle 11-27 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-27 verwendeten Geometrie (unter Vernachlässigung des Kegelvolumens).

Tabelle 11-27 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII90

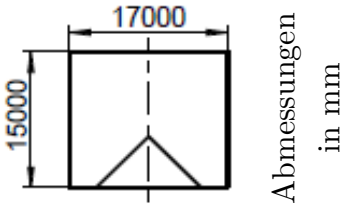
Vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher	
Kurzbezeichnung: VII90 Wandneigung: 0° Winkel Innenkegel: 90° Wärmespeichervolumen: 3400 m³ Schüttung: 5.100 t	

Abbildung 11-27 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Nach 20 Zyklen stellt sich beim Beladungszustand eine Maximalspannung von 428 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 3,23, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 3,23. Verglichen mit dem Ergebnis von VII20 bzw. VII80 führt eine Innenkegelneigung von 90° zu einer Reduktion von 3% bzw. Zunahme von 2%. Der Wert des Entladezustands liegt bei 108 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,81.

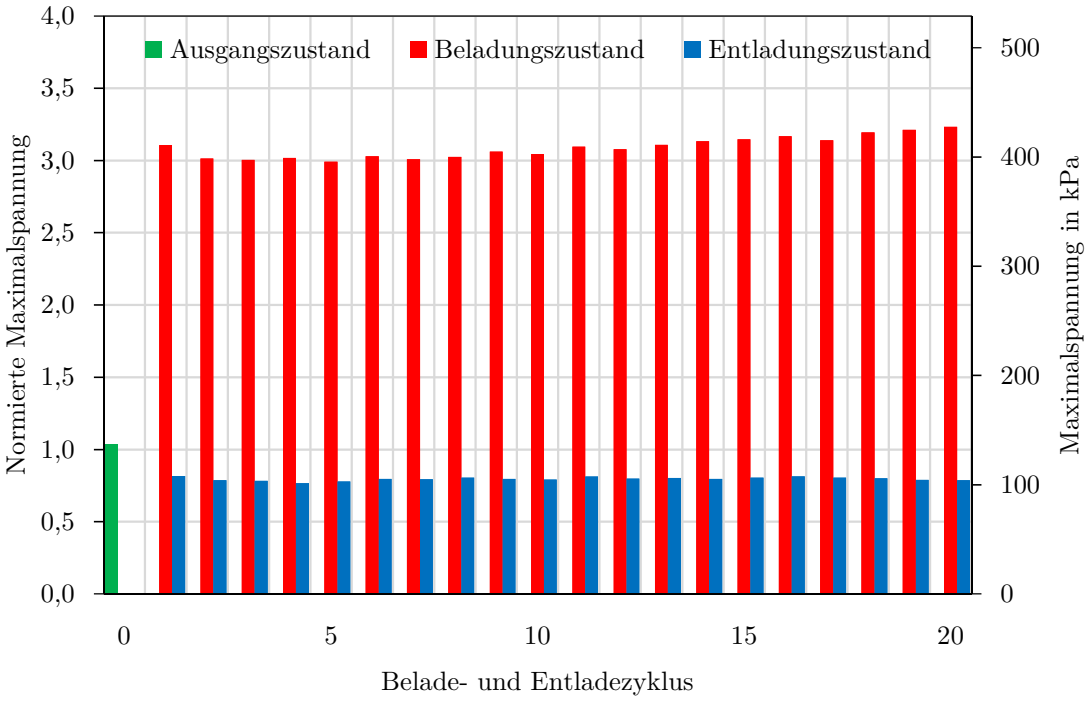


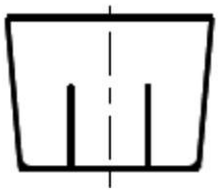
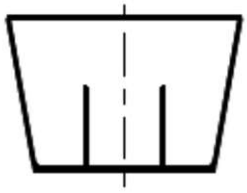
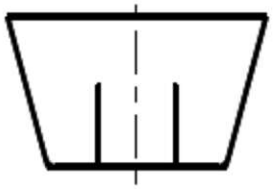
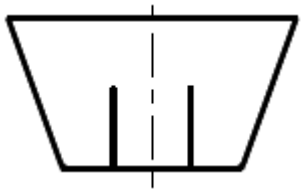
Abbildung 11-27 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII90

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.4 Horizontal durchströmter Wärmespeicher

Tabelle 11-28 gibt einen Überblick zu den hier folgenden Simulationsergebnissen unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien. In diesem Kapitel wird die Neigung der Wand – ausgehend von mit 5° geneigten Außenwänden (Hauptabmessungen 20 x 14 x 13 m (L x B x H) – näheres zu den Speichervarianten siehe Tabelle 3-2) – stetig erhöht. Die Geometrie des Wärmespeichers wurde in Abstimmung mit dem IET festgelegt. In den Simulationen wird immer von einem einheitlichen Schüttdruck im Ausgangszustand ausgegangen. Die exakten Abmessungen der Geometrien und Wandneigungen finden sich in den technischen Daten der jeweiligen Simulation (Tabelle 11-29 bis Tabelle 11-32).

Tabelle 11-28 Übersicht zu den horizontal durchströmten Wärmespeichern mit Wandneigungen (Kurzbezeichnung: H)

H05	H10
	
H15	**H20**
	

Wie bereits eingangs in Kapitel 11 erwähnt, werden bei den horizontal durchströmten Wärmespeicher-Geometrien mehrere Stellen für den Spannungsanstieg betrachtet (siehe rechte Bildhälfte von Abbildung 11-3). Daher finden sich im Gegensatz zu den Ergebnissen des vertikal durchströmten Wärmespeichers (siehe Kapitel 11.1 bis 11.3) pro simulierter Geometrie vier Diagramme mit Spannungsverläufen. Die Ergebnisse der Simulation werden im Sinne der Vergleichbarkeit auf den analytischen Spannungswert nach Janssen (5-5) bezogen, auch wenn es sich hier um keine zylindrische Geometrie handelt. In der in Kapitel 12.2 folgenden Zusammenfassung der Ergebnisse wird schließlich der Maximalwert der jeweiligen Wärmespeicher-Geometrie dargestellt (siehe Abbildung 12-4).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

11.4.1 H05 - Horizontaler WS 5° Wandneigung

Tabelle 11-29 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-28 bis Abbildung 11-31 verwendeten Geometrie. Die aus diesen vier Diagrammen resultierenden Maximalwerte werden in Abbildung 12-4 zusammengefasst.

Tabelle 11-29 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H05

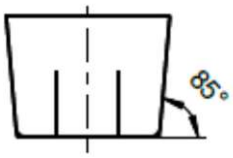
Horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher	
Kurzbezeichnung: H05	
Wandneigung: 5°	
Winkel Innenkegel: -	
Wärmespeichervolumen: 3670 m³	
Schüttung: 5.500 t	

Abbildung 11-28 bis Abbildung 11-31 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Diese vier Abbildungen entsprechen den Ergebnissen für die Positionen eins bis vier aus Abbildung 11-3.

Bei Abbildung 11-28 stellt sich beim Beladungszustand nach 20 Zyklen eine Maximalspannung von 249 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,21, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,21. Der Maximalwert des Entladezustands liegt bei 142 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,26. Abbildung 11-29 liefert eine Maximalspannung von 269 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 2,39 (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 111 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 0,98. In Abbildung 11-30 beträgt die Maximalspannung 302 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 2,68 (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 141 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 1,25. In Abbildung 11-31 beträgt der Wert der Maximalspannung 237 kPa. Das entspricht einer Spannungserhöhung um Faktor 2,11. Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 109 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 0,96.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

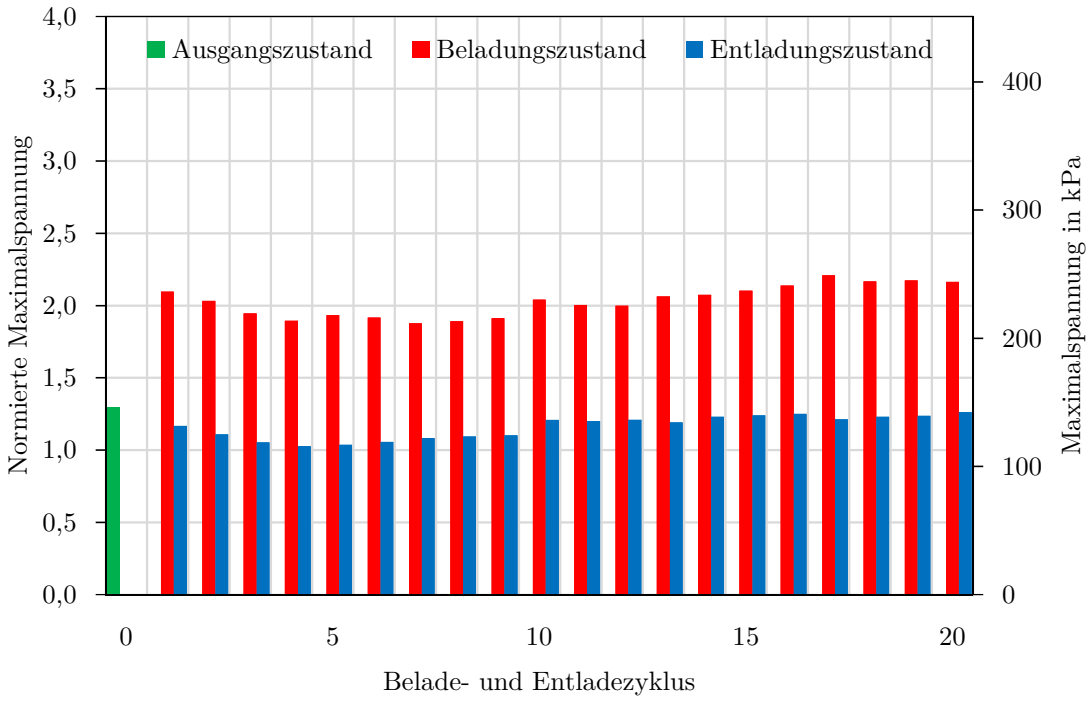


Abbildung 11-28 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-1

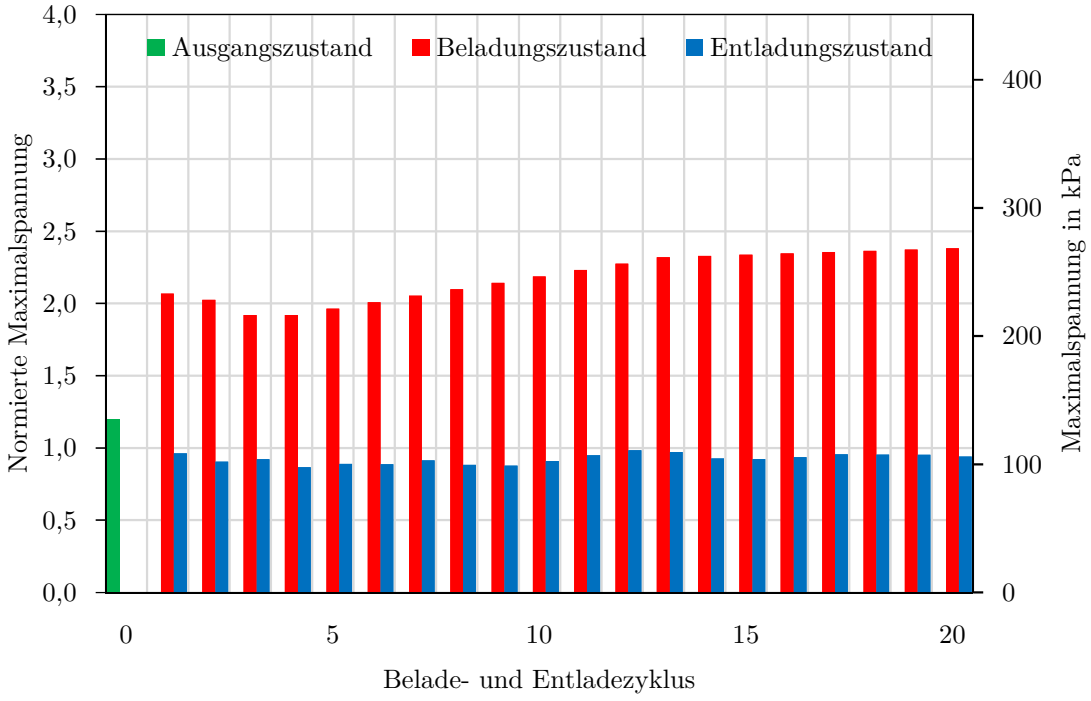


Abbildung 11-29 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

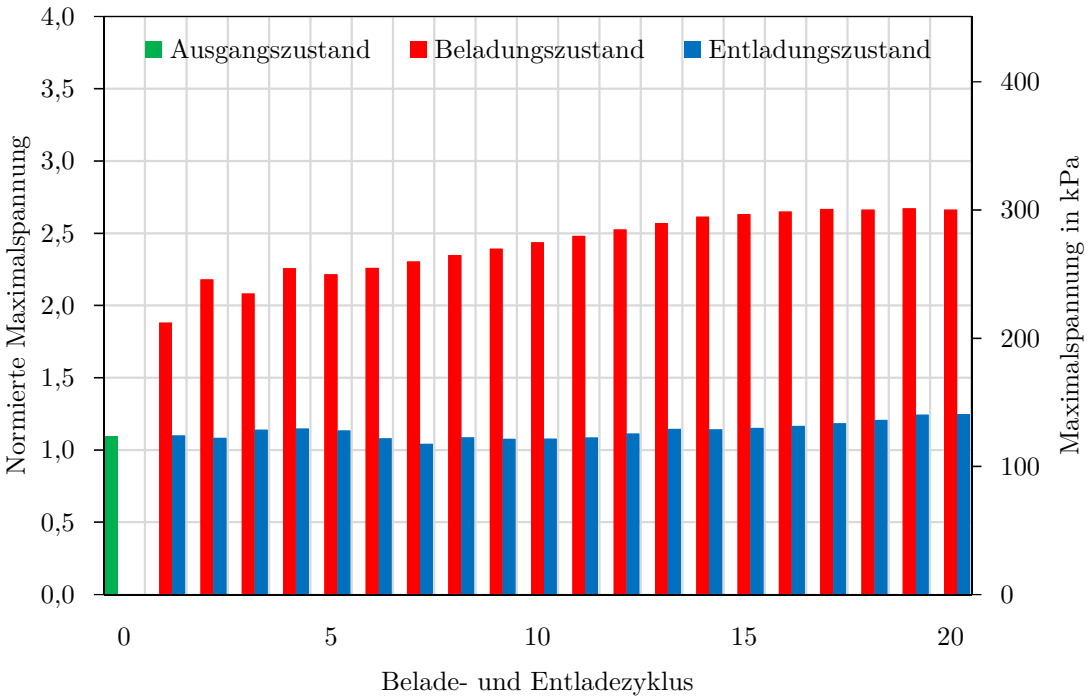


Abbildung 11-30 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-3

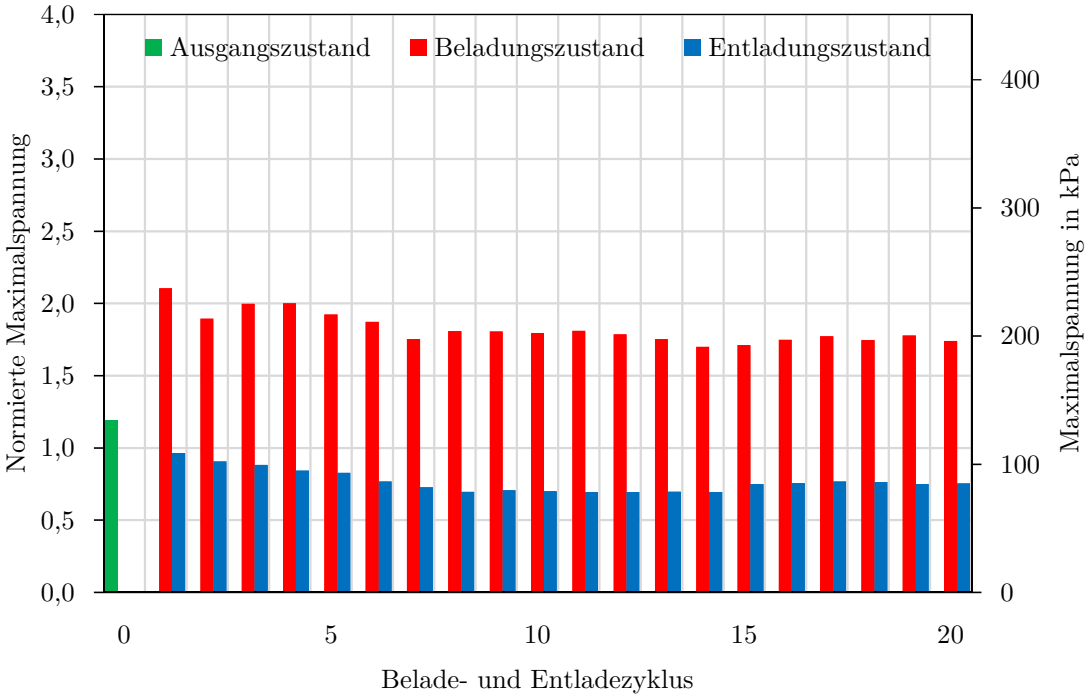


Abbildung 11-31 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.4.2 H10 - Horizontaler WS 10° Wandneigung

Tabelle 11-30 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-32 bis Abbildung 11-35 verwendeten Geometrie. Die aus diesen vier Diagrammen resultierenden Maximalwerte werden in Abbildung 12-4 zusammengefasst.

Tabelle 11-30 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H10

Horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: H10
Wandneigung: 10°
Winkel Innenkegel: -
Wärmespeichervolumen: 3670 m³
Schüttung: 5.500 t

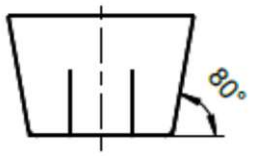


Abbildung 11-32 bis Abbildung 11-35 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Diese vier Abbildungen entsprechen den Ergebnissen für die Positionen eins bis vier aus Abbildung 11-3.

Bei Abbildung 11-32 stellt sich beim Beladungszustand nach 20 Zyklen eine Maximalspannung von 256 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,27, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,27. Der Maximalwert des Entladezustands liegt bei 94 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 0,83. Abbildung 11-33 liefert eine Maximalspannung von 224 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 1,99 (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 135 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 1,20. In Abbildung 11-34 beträgt die Maximalspannung 318 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 2,82. Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 106 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 0,94. In Abbildung 11-35 beträgt der Wert der Maximalspannung 232 kPa (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Das entspricht einer Spannungserhöhung um Faktor 2,06. Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 114 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 1,01.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Verglichen mit dem Maximalwert aus den Ergebnissen von H05-1 bis H05-4 lässt sich ein Anstieg der Spannungen um 5% feststellen.

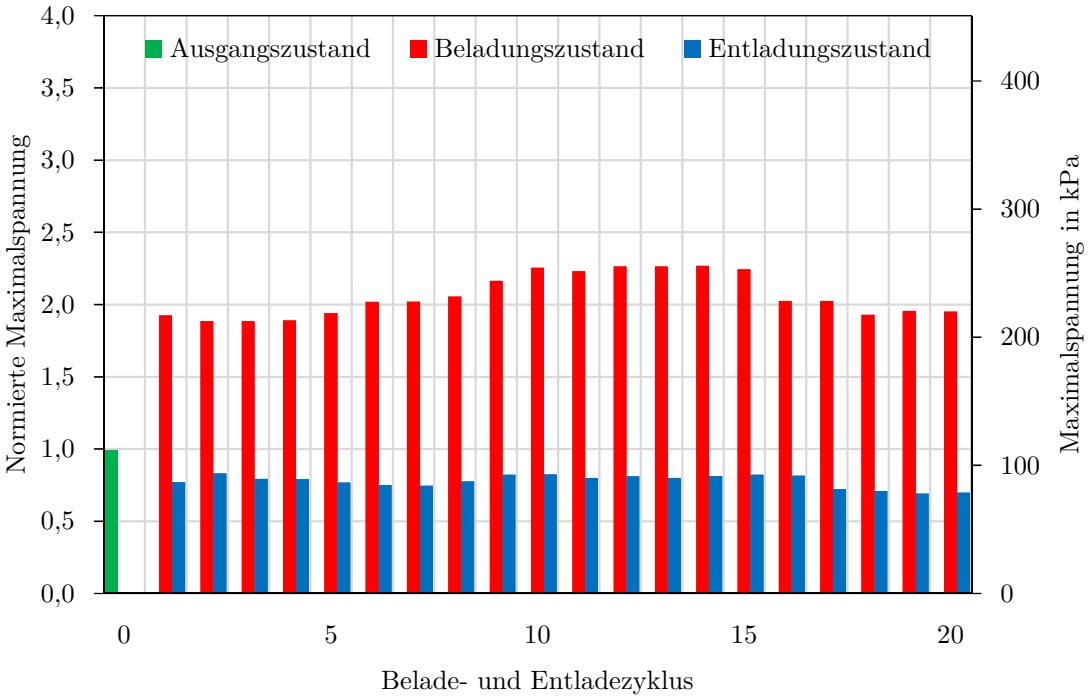


Abbildung 11-32 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-1

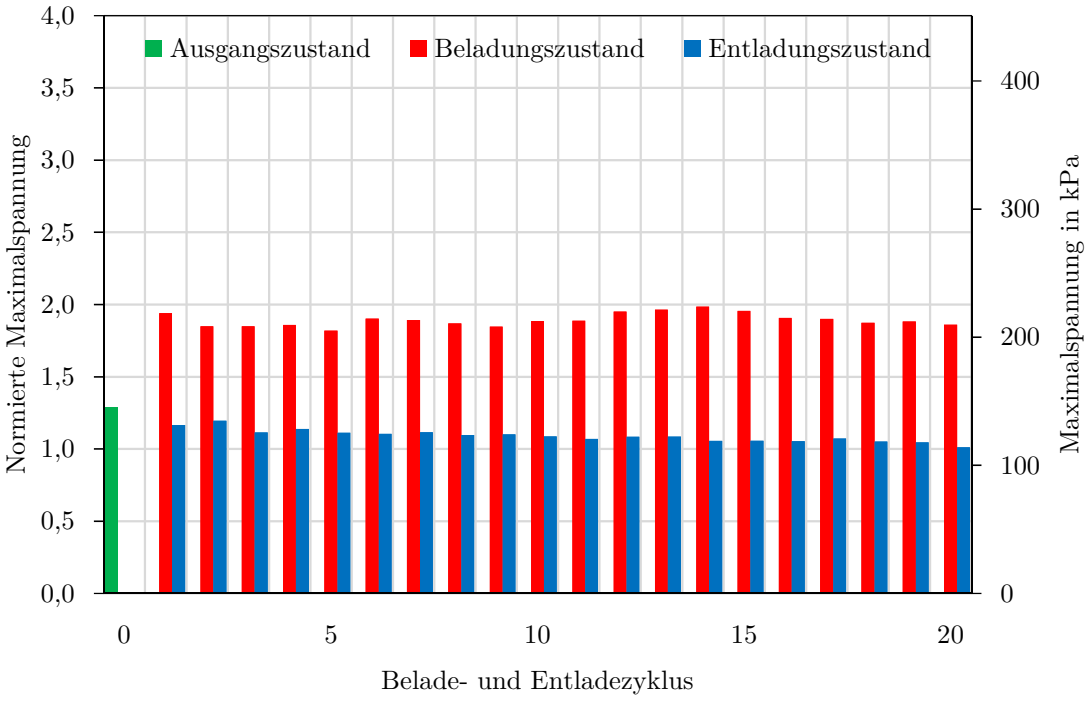


Abbildung 11-33 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

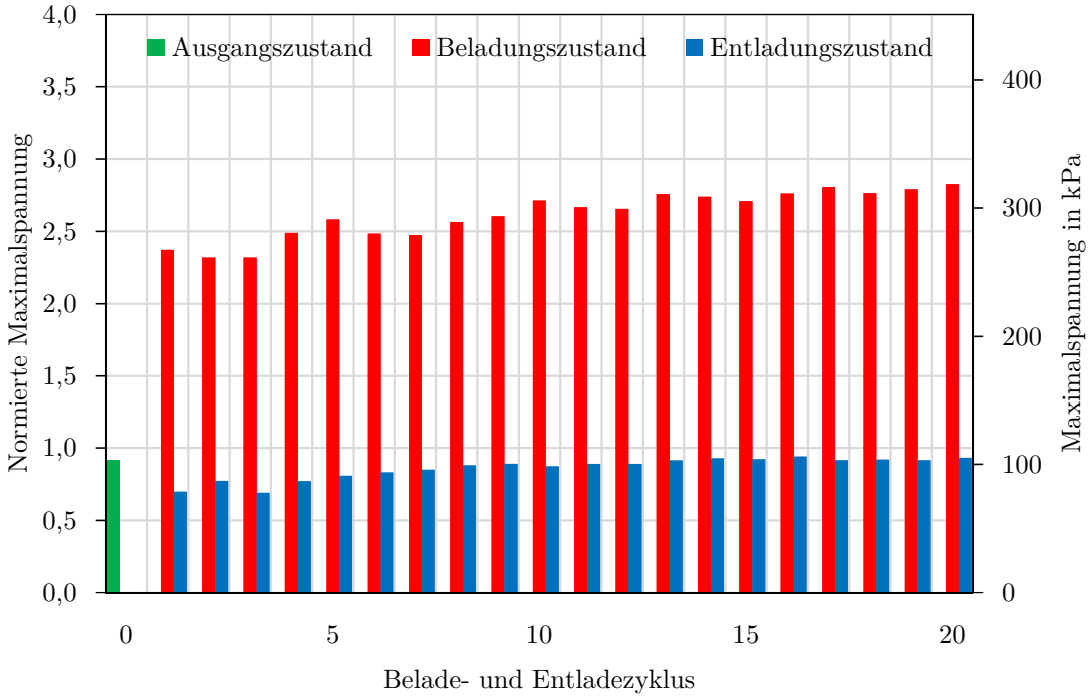


Abbildung 11-34 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-3

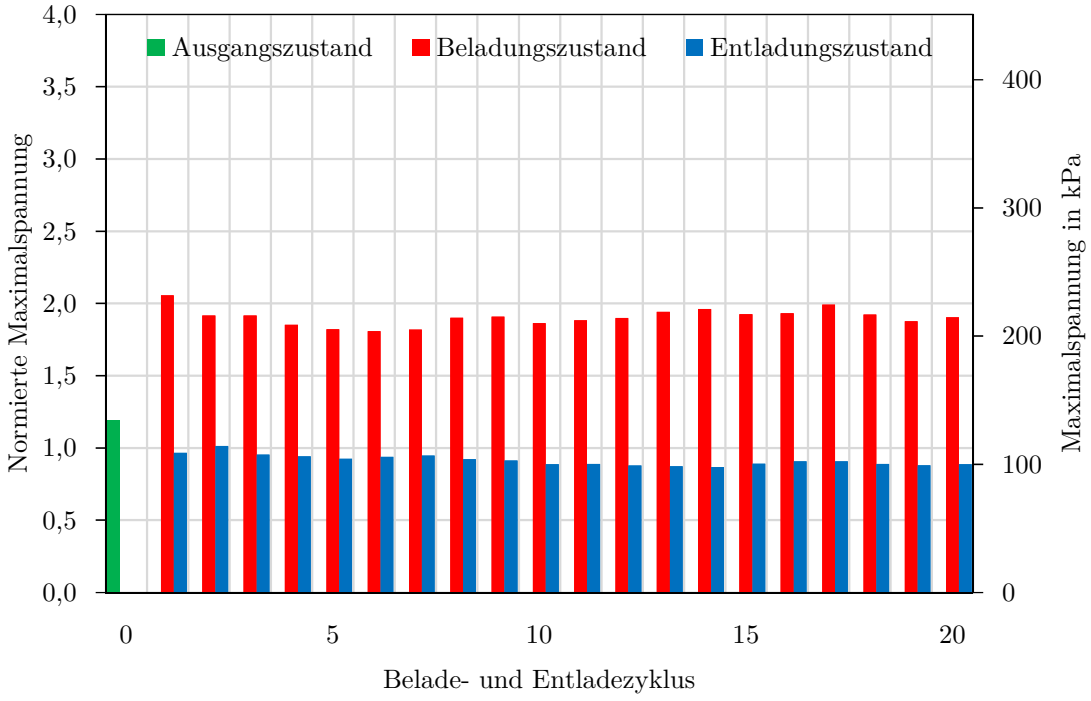


Abbildung 11-35 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.4.3 H15 - Horizontaler WS 15° Wandneigung

Tabelle 11-31 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-36 bis Abbildung 11-39 verwendeten Geometrie. Die aus diesen vier Diagrammen resultierenden Maximalwerte werden in Abbildung 12-4 zusammengefasst.

Tabelle 11-31 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H15

Horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: H15
Wandneigung: 15°
Winkel Innenkegel: -
Wärmespeichervolumen: 3670 m³
Schüttung: 5.500 t

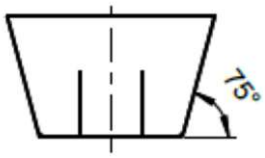


Abbildung 11-36 bis Abbildung 11-39 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Diese vier Abbildungen entsprechen den Ergebnissen für die Positionen eins bis vier aus Abbildung 11-3.

Bei Abbildung 11-36 stellt sich beim Beladungszustand nach 20 Zyklen eine Maximalspannung von 228 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 2,03, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 2,03. Der Maximalwert des Entladezustands liegt bei 123 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,11. Abbildung 11-37 liefert eine Maximalspannung von 237 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 2,11 (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 115 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 1,02. In Abbildung 11-38 beträgt die Maximalspannung 237 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 2,10 (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 104 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 0,92. In Abbildung 11-39 beträgt der Wert der Maximalspannung 244 kPa. Das entspricht einer Spannungserhöhung um Faktor 2,16. Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 102 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 0,90.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Verglichen mit dem Maximalwert aus den Ergebnissen von H05-1 bis H05-4 lässt sich ein Abfall der Spannungen um 22% feststellen. Gegenübergestellt mit den Ergebnissen aus H10-1 bis H10-4 ergibt sich eine Reduktion von 26%.

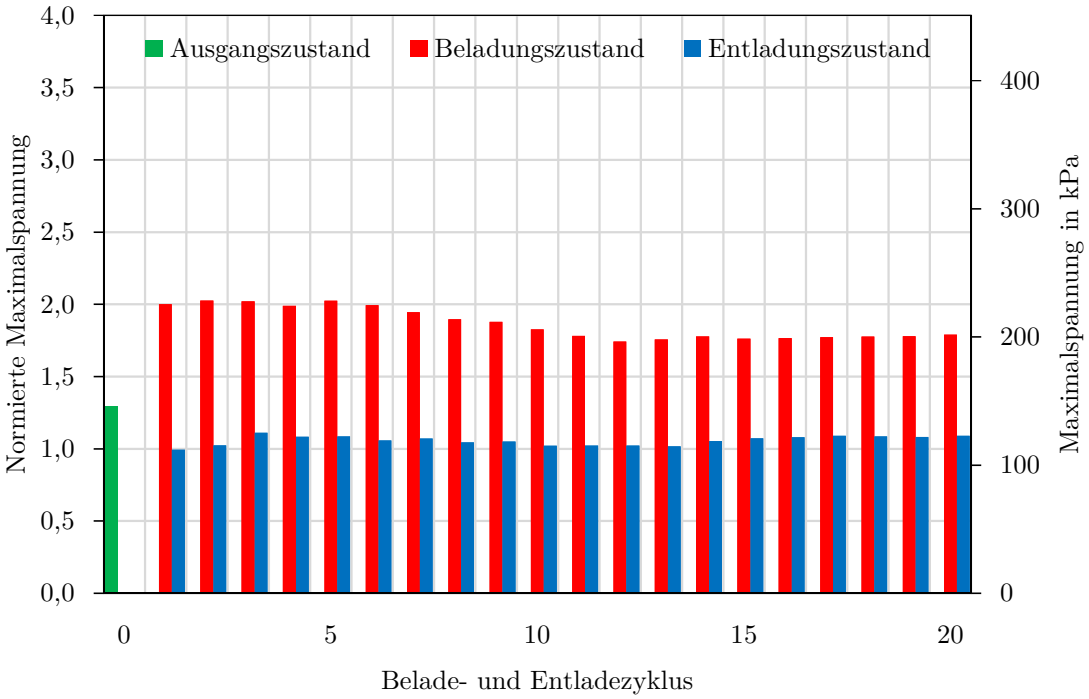


Abbildung 11-36 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-1

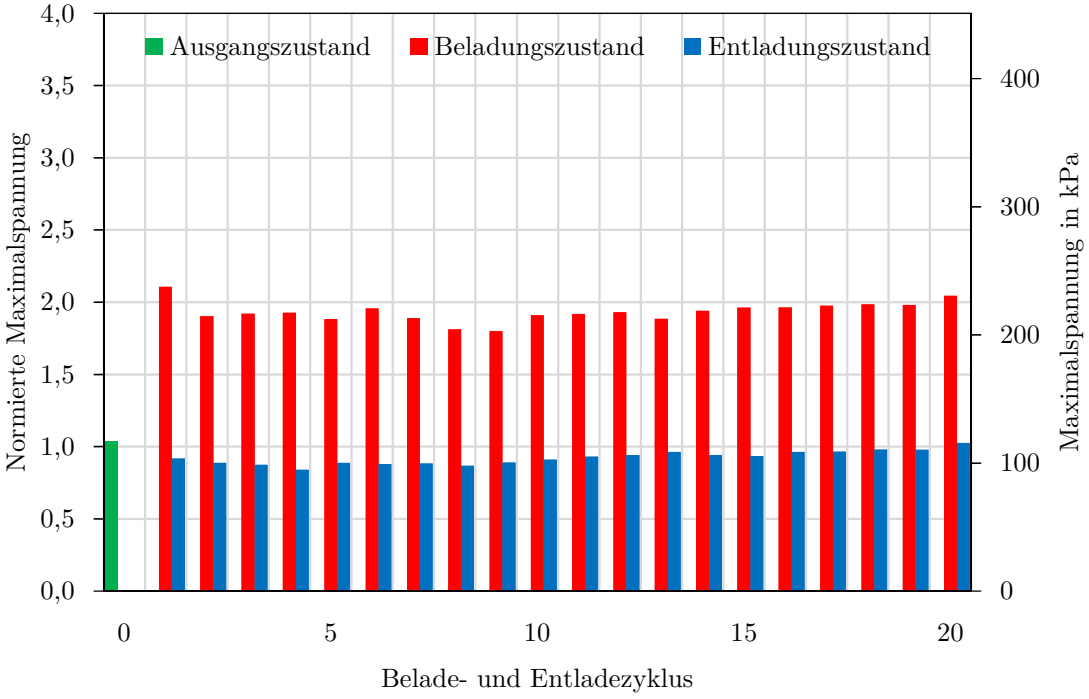


Abbildung 11-37 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

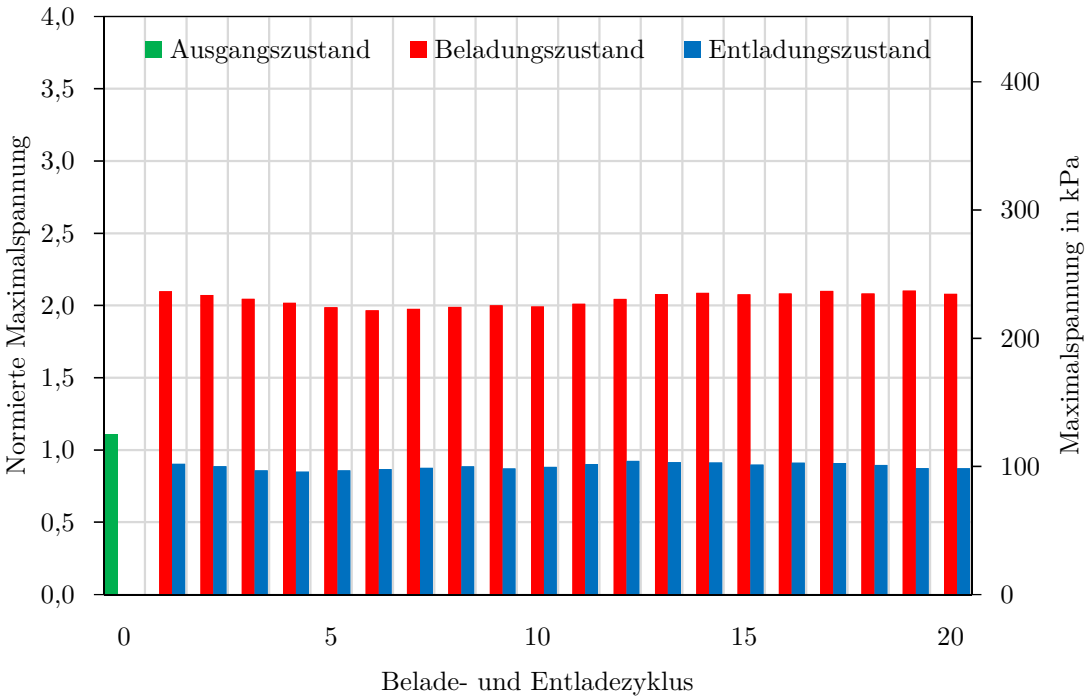


Abbildung 11-38 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-3

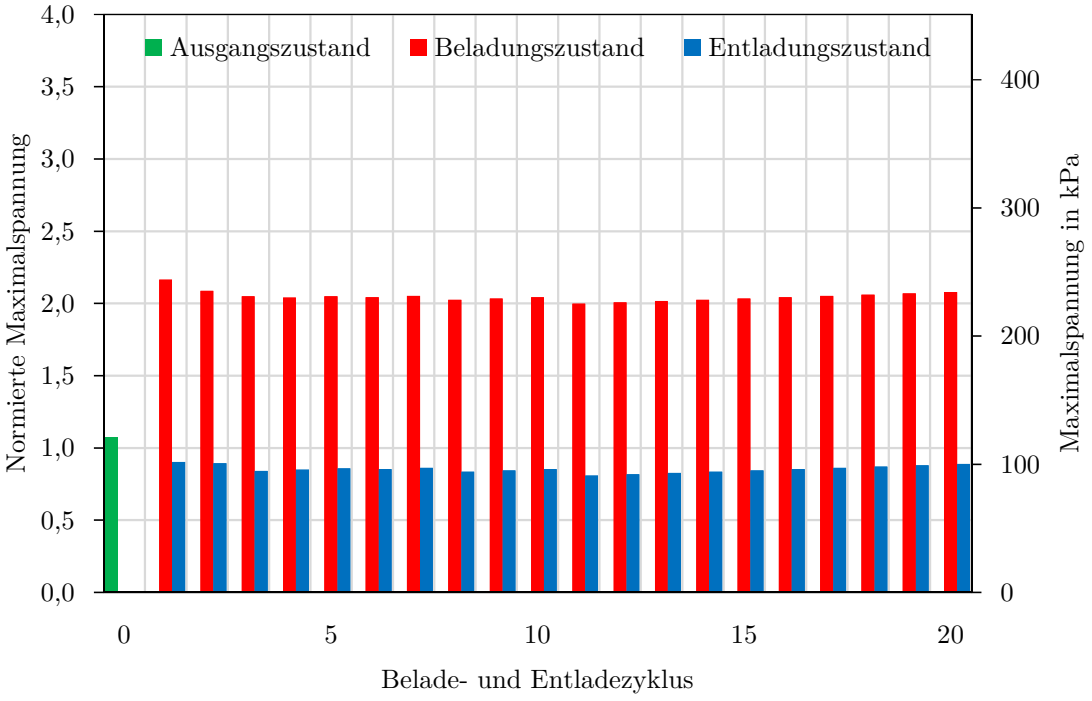


Abbildung 11-39 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11.4.4 H20 - Horizontaler WS 20° Wandneigung

Tabelle 11-32 liefert einen Überblick zur in Abbildung 11-40 bis Abbildung 11-43 verwendeten Geometrie. Die aus diesen vier Diagrammen resultierenden Maximalwerte werden in Abbildung 12-4 zusammengefasst.

Tabelle 11-32 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H20

Horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher
Kurzbezeichnung: H20
Wandneigung: 20°
Winkel Innenkegel: -
Wärmespeichervolumen: 3670 m³
Schüttung: 5.500 t

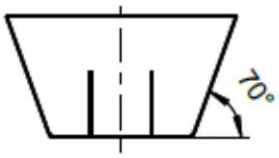


Abbildung 11-40 bis Abbildung 11-43 zeigt die Belastungsänderung in Abhängigkeit von mehreren Belade- und Entladezyklen. Diese vier Abbildungen entsprechen den Ergebnissen für die Positionen eins bis vier aus Abbildung 11-3.

Bei Abbildung 11-40 stellt sich beim Beladungszustand nach 20 Zyklen eine Maximalspannung von 213 kPa ein. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,89, also einer Erhöhung des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5) um den Faktor 1,89. Der Maximalwert des Entladezustands liegt bei 120 kPa. Das entspricht einer normierten Maximalspannung von 1,06. Abbildung 11-41 liefert eine Maximalspannung von 230 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 2,04 (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 104 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 0,93. In Abbildung 11-42 beträgt die Maximalspannung 242 kPa. Das entspricht einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor 2,14. Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 128 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 1,14. In Abbildung 11-43 beträgt der Wert der Maximalspannung 221 kPa. Das entspricht einer Spannungserhöhung um Faktor 1,96 (gegenüber des analytischen Spannungswertes nach Janssen (5-5)). Der Maximalwert des Entladezustands beträgt 105 kPa und entspricht einer normierten Spannung von 0,93.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Verglichen mit dem Maximalwert aus den Ergebnissen von H05-1 bis H05-4 lässt sich ein Abfall der Spannungen um 20% feststellen. Gegenübergestellt mit den Ergebnissen aus H15-1 bis H15-4 ergibt sich einen leichten Anstieg von 2%.

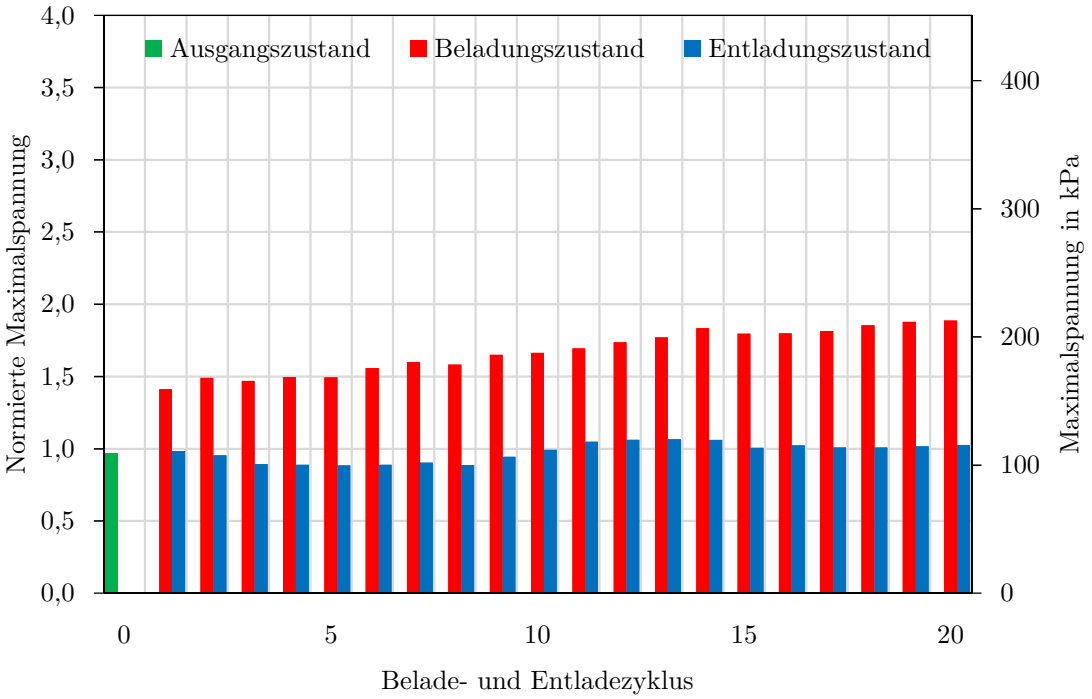


Abbildung 11-40 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-1

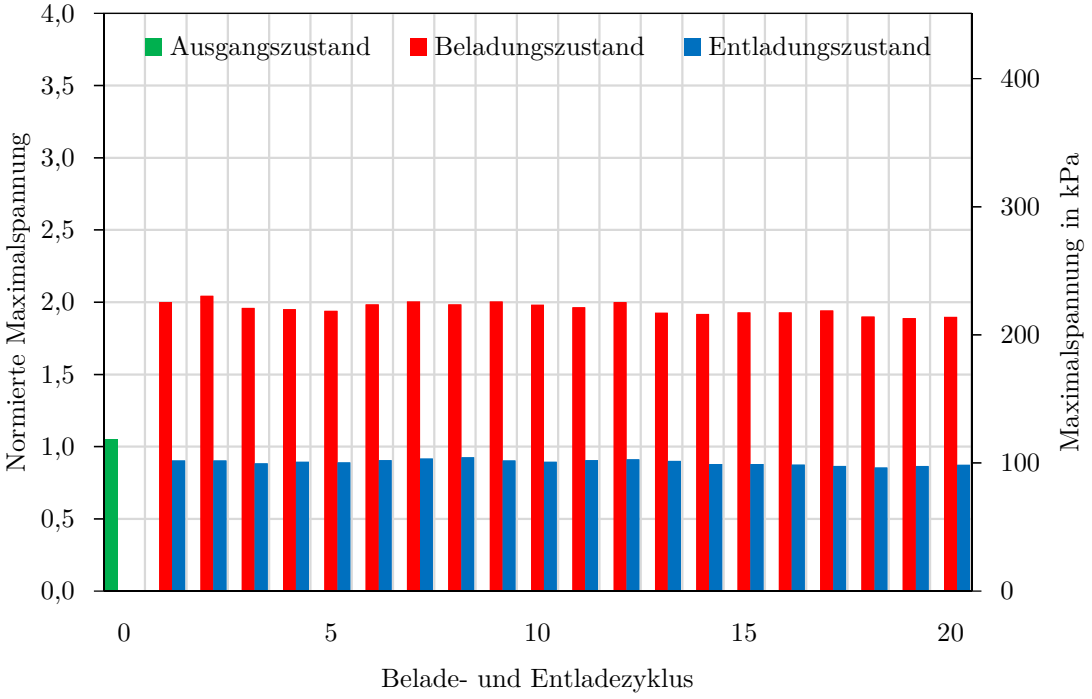


Abbildung 11-41 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

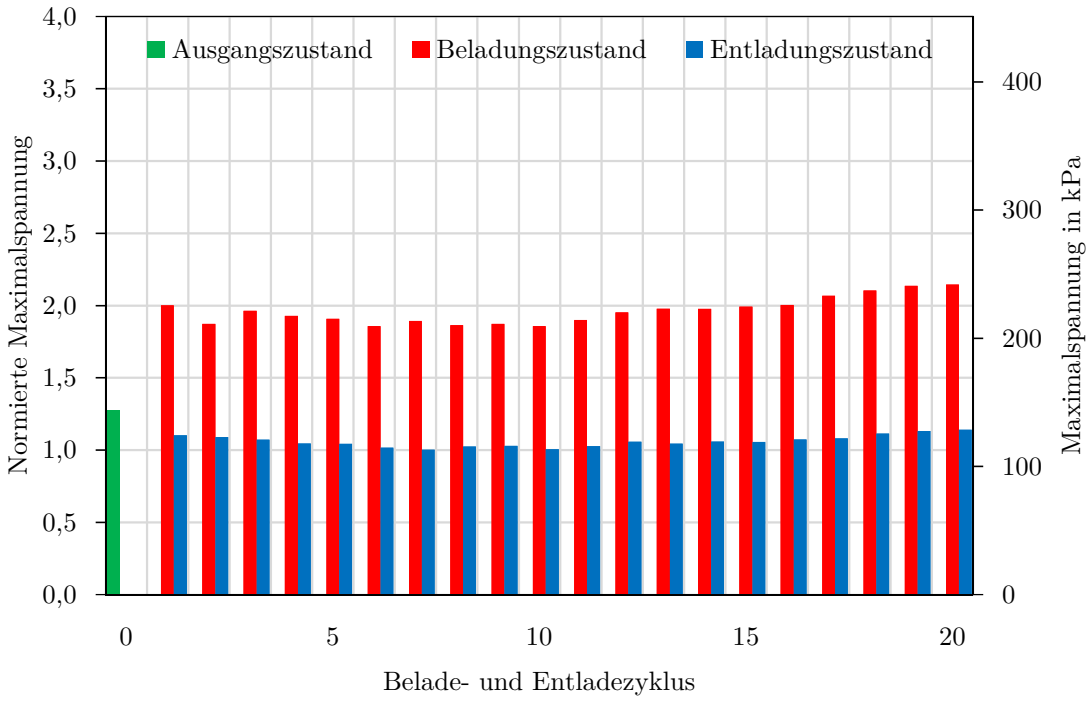


Abbildung 11-42 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-3

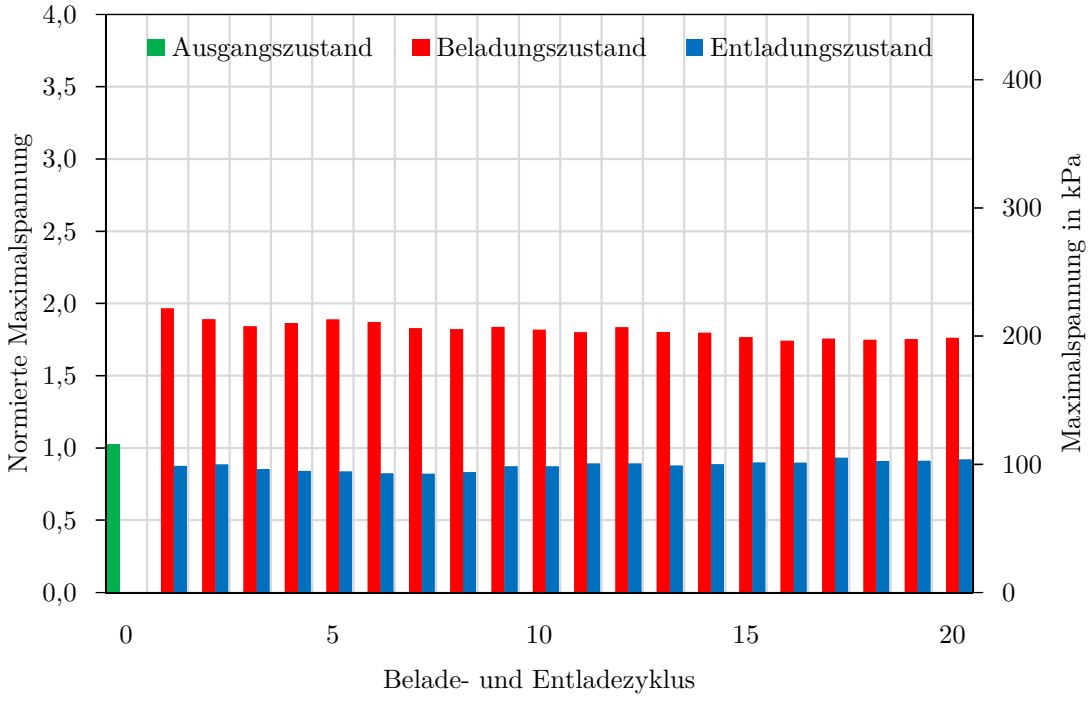


Abbildung 11-43 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

12 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

12.1 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse vertikaler WS

Um die Einflüsse unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien aus Kapitel 11.1 bis 11.3 übersichtlich vergleichen zu können, werden diese in den folgenden Diagrammen gegenübergestellt. Dies geschieht, indem die jeweiligen Maximalspannungen in einem Diagramm zusammengefasst werden (Abbildung 12-1 - Abbildung 12-3). Diese Spitzenwerte werden zusätzlich mit Fehlerindikatoren versehen, die die Standardabweichung der Ergebnisse wiedergeben (graue Linien in den Diagrammen). Die eingezeichneten Trendlinien geben Aufschluss über die Charakteristik der Geometrieeinflüsse.

Abbildung 12-1 zeigt die Maximalspannung zwischen Schüttung und Behälterwand (normiert und in kPa) in Abhängigkeit von der Wandneigung. Ausgehend von einer zylindrischen Geometrie mit einem Durchmesser von 17 m und einer Höhe von 15 m (detaillierte Ergebnisse siehe Kapitel 11.1) wird die Neigung der Wand zunehmend erhöht. Diese Zunahme der Wandneigung erfolgte schrittweise mit 5° bis zu einem Winkel von 35°. Die eingezeichnete Trendlinie (schwarz) in Abbildung 12-1 zeigt grundsätzlich einen abfallenden Verlauf der Maximalspannung mit zunehmender Wandneigung. Die Wandneigung von 5° zeigt ein Ergebnis das 8% höher liegt, als jenes der zylindrischen Geometrie. Wandneigungen von 10° bis 20° erzielten Reduktionen von 13% bis 16%. Die Verminderung der Maximalspannung bei Geometrien mit 25° bzw. 30° Wandneigung lag bei 34% bzw. 40%. Bei Wärmspeicher-Geometrien mit einer Wandneigung von 35° konnten sogar Belastungsreduktionen von bis zu 45% erreicht werden. Die Ergebnisse der Simulation streuen in einem gewissen Bereich. Verschiedenste Faktoren wie der Ausgangszustand nach dem Füllprozess (s. Kapitel 7.1), die Platzierung der Partikel etc. spielen hier eine Rolle. Auch die Kennlinie des Ausgangszustandes (siehe grüne

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Linie in Abbildung 8-1) liefert keinen gleichmäßigen Verlauf so wie das bei der analytischen Berechnung der Falls ist (siehe schwarze Linie in Abbildung 8-1).

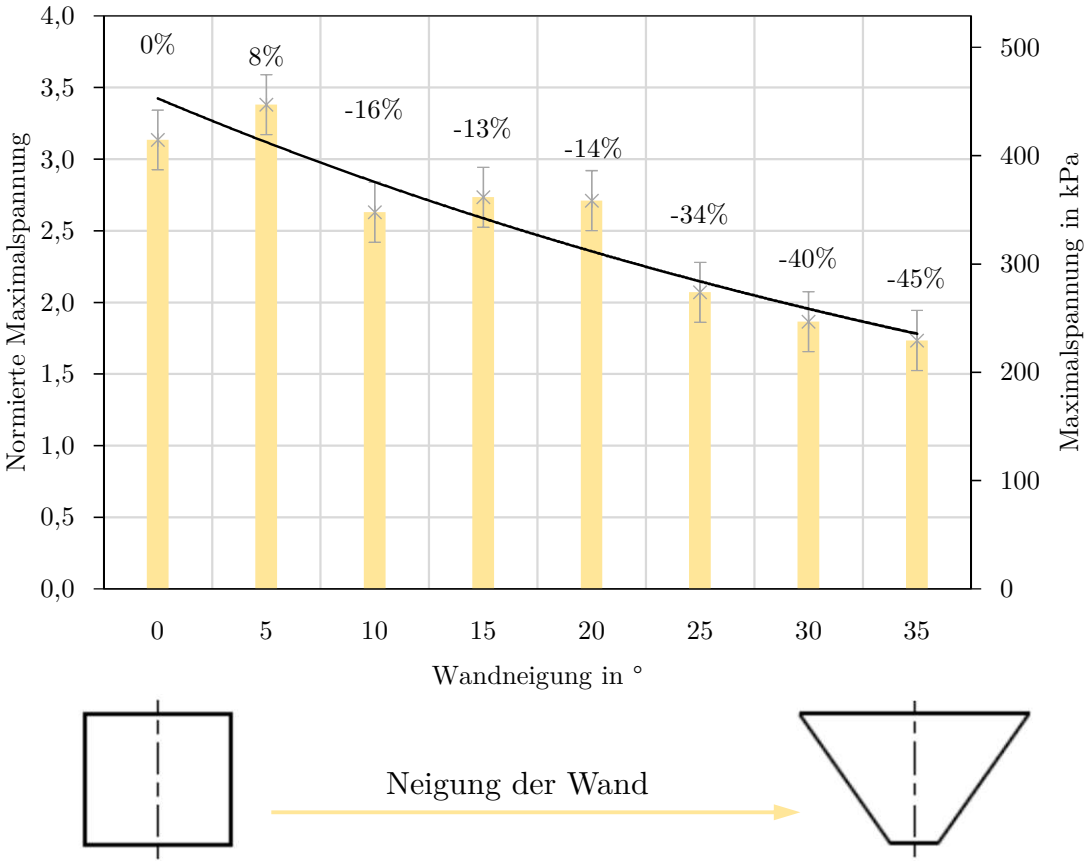


Abbildung 12-1 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Wandneigung (Geometrien ohne Innenkegel)

Abbildung 12-2 zeigt die Maximalspannung in Abhängigkeit von der Wandneigung zu den Ergebnissen aus Kapitel 11.2. Ausgehend von einer zylindrischen Geometrie (Durchmesser 17 m, Höhe 15 m) mit einem Innenkegel (20° Spitzenwinkel) wird die Neigung der Wand wieder schrittweise mit 5° bis zu einem Winkel von 35° erhöht.

Die in Abbildung 12-2 eingezeichnete Trendlinie (schwarz) zeigt einen abfallenden Verlauf der Maximalspannung mit zunehmender Wandneigung. Die Wandneigung von 5° zeigt ein Ergebnis das 2% niedriger liegt, als jenes der zylindrischen Geometrie. Wandneigungen von 10° bis 20° erzielten Reduktionen von 23% bis 26%. Die Verminderung der Maximalspannung bei Geometrien von 25° bzw. 30° lag bei 29% bzw. 36%. Bei Wärmspeicher-Geometrien mit einer Wandneigung von 35° konnten Belastungsreduktionen von bis zu 48% erreicht werden. Verglichen mit den in Abbildung 12-1 gezeigten Ergebnissen lässt sich grundsätzlich die gleiche Tendenz zu fallenden Maximalspannungen mit zunehmender Neigung der Wand erkennen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Prozentangaben in den Diagrammen beziehen sich immer auf die erste, nicht geneigte Wärmespeicher-Geometrie. Um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen aus Abbildung 12-1 und Abbildung 12-2 zu schaffen, müssen die absoluten Werte gegenübergestellt werden. Bei den beiden Wärmespeicher-Geometrien mit 0° Wandneigung liegen die Maximalwerte bei 3,13 und 3,34. Das heißt das Ergebnis bei der Geometrie mit Innenkegel liegt etwas höher, als bei jener ohne Innenkegel. Dies kann aber durch die Streuung der Ergebnisse verursacht sein. Vergleicht man nämlich die weiteren Ergebnisse, so ist zu erkennen, dass die Werte der Wärmespeicher-Geometrien mit Innenkegel zum Teil etwas niedriger liegen. In Abbildung 12-1 liegt die normierte Maximalspannung bei einer Wandneigung von 10° bei 2,63, in Abbildung 12-2 bei 2,56. Bei einer Wandneigung von 20° kann ein Unterschied von 0,24 (=9%) zugunsten der Geometrie mit Innenkegel festgestellt werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Wärmespeicher-Geometrien mit Innenkegel (siehe Abbildung 12-2) keine gravierende Änderung bewirken. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist in Abbildung 14-3 zu sehen. Welchen Einfluss verschiedene Winkel des Innenkegels haben, wird in Abbildung 12-3 betrachtet.

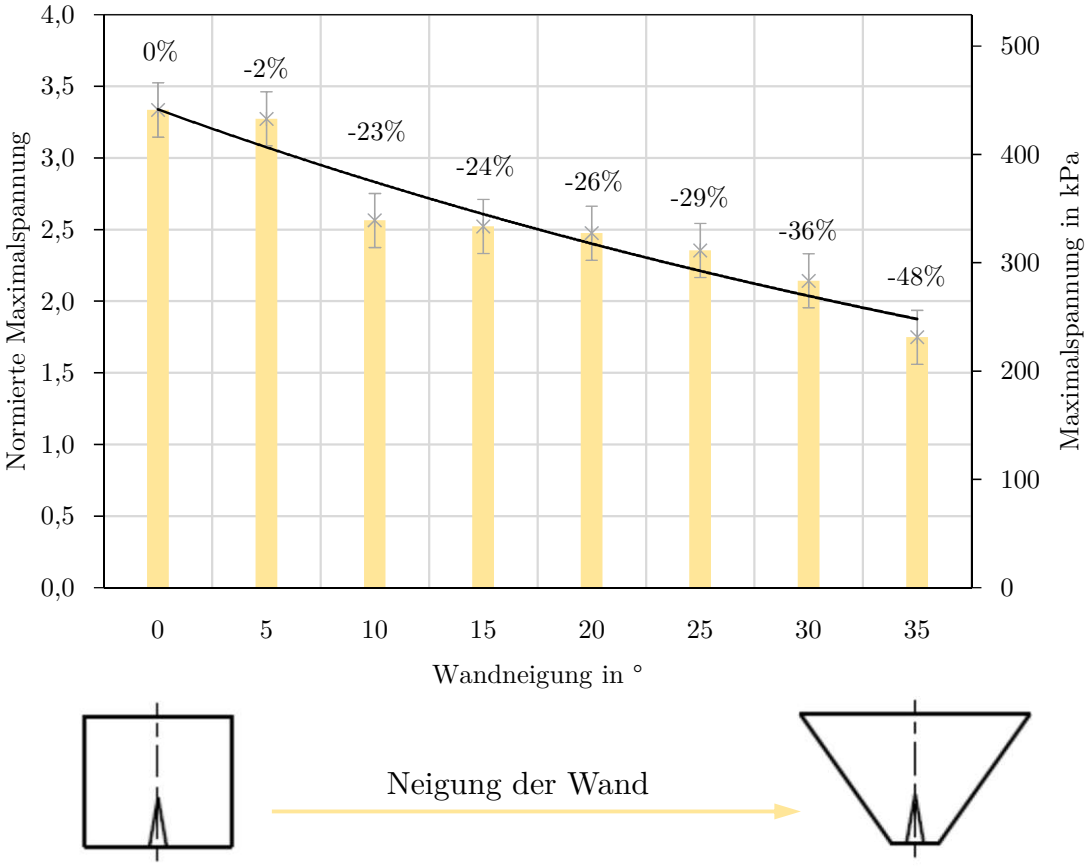


Abbildung 12-2 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Wandneigung (Geometrien mit gleichbleibendem Innenkegel)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 12-3 zeigt die Maximalspannung zwischen Schüttung und Behälterwand in Abhängigkeit von der Innenkegelneigung. Ausgehend von einer zylindrischen Geometrie (Durchmesser 17 m, Höhe 15 m) mit einem Innenkegel mit 20° Spitzenwinkel (detaillierte Ergebnisse siehe Kapitel 11.3) wird der Spitzenwinkel des Innenkegels schrittweise mit 10° bis zu einem Winkel von 90° erhöht. Die in Abbildung 12-3 eingezeichnete Trendlinie (schwarz) zeigt einen geringfügig abfallenden Verlauf der Maximalspannung mit zunehmender Innenkegelneigung. Die Innenkegelneigung von 30° zeigt ein Ergebnis das 4% niedriger liegt, als jenes der 20° Innenkegelneigung. Innenkegelneigungen von 40° bis 60° erzielten Reduktionen von 3% bis 9%. Eine Innenkegelneigung von 90° führte zu einer Abnahme der Spannungen von 3% gegenüber der 20° Innenkegelneigung. Verglichen mit den in Abbildung 12-1 bzw. Abbildung 12-2 gezeigten Ergebnissen lässt sich eine leichte Tendenz zu abnehmenden Maximalspannungen mit zunehmender Neigung des Innenkegels erkennen. Die Prozentangaben in den Diagrammen beziehen sich wieder auf die ursprüngliche Wärmespeicher-Geometrie.

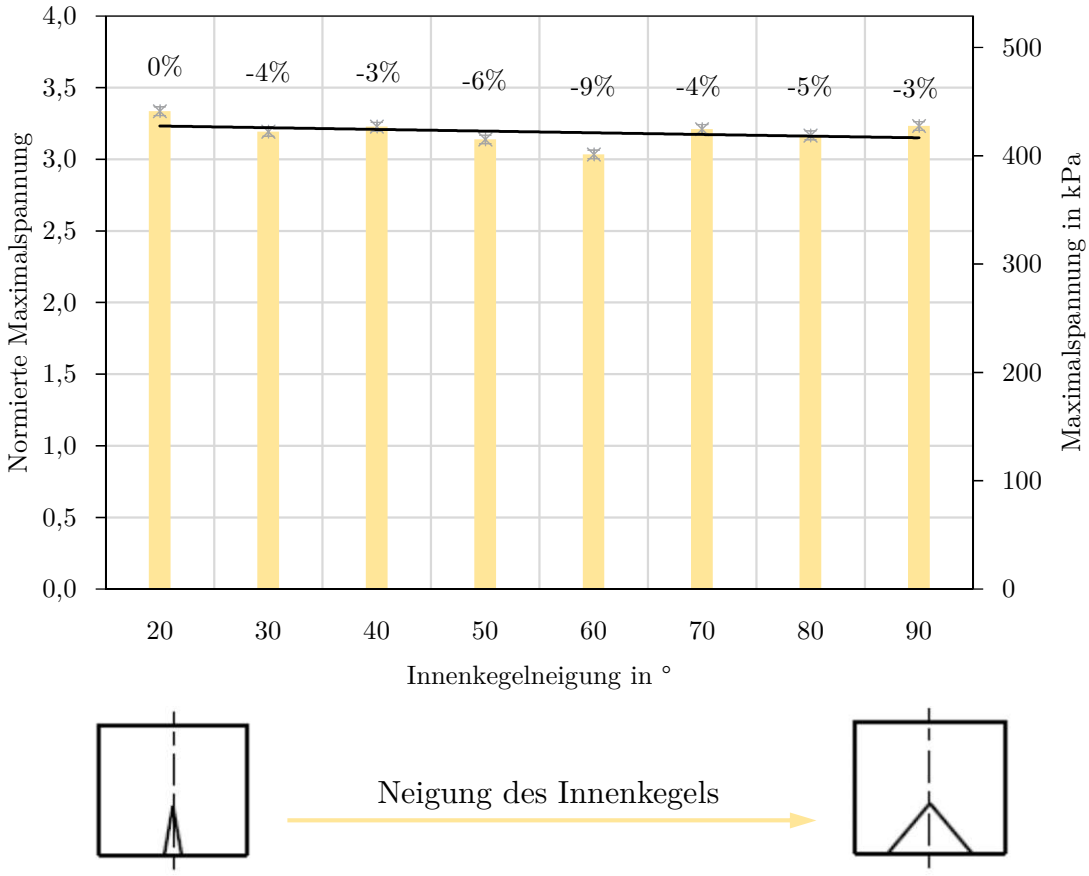


Abbildung 12-3 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Innenkegelneigung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Summa summarum lässt sich für die ersten beiden Diagramme (Abbildung 12-1 und Abbildung 12-2) ein klarer Trend erkennen, dass geneigte Wände einen abmindernden Einfluss auf den Spannungsanstieg haben können. Die Neigung des Innenkegels (Abbildung 12-3) bewirkt nur eine minimale Verbesserung. Eine Empfehlung für eine vertikal durchströmte Wärmespeicher-Geometrien wird in Kapitel 14 abgegeben. Bei allen durchgeführten Simulationen vertikaler Festbett-Wärmespeicher lag der absolute Maximalwert in etwa bei 450 kPa. Kalkuliert man die in den Diagrammen gezeigte Standardabweichung mit ein, muss man mit Spitzenwerten von knapp 500 kPa rechnen. Diese Spannung zwischen Schüttung und Behälterwand würde nach Gleichung (3-4) dem Innendruck p_i entsprechen. Mit einem Festigkeitswert $R_{p0,2} = 140\ N/mm^2$ (Werkstoff P265GH, Betriebstemperatur: 350 °C) und einem Außendurchmesser $D_a = 17.000\ mm$ ergibt sich für die erforderliche Wandstärke s nach (3-4) ein Wert von 46,4 mm (mit $v_A = 1$, $C_1 = 0$ und $C_2 = 1\ mm$, Schubkräfte an der Behälterwand sind hierbei nicht berücksichtigt).

12.2 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse horizontaler WS

Um die Einflüsse unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien aus Kapitel 11.4 übersichtlich vergleichen zu können, werden diese im folgenden Diagramm gegenübergestellt (Abbildung 12-4). Dies geschieht, indem die jeweiligen Spitzenwerte der einzelnen Ergebnisse in einem Diagramm zusammengefasst werden. Anders als in der Zusammenfassung der Ergebnisse vertikal durchströmter Wärmespeicher (Kapitel 12.1) werden beim horizontal durchströmten mehrere Positionen an der Behälterwand ausgewertet (siehe Abbildung 11-3 auf Seite 76).

Abbildung 12-4 zeigt die Maximalspannung zwischen Schüttung und Behälterwand (normiert und in kPa) in Abhängigkeit von der Wandneigung. Ausgehend von einer horizontalen Geometrie mit den Hauptabmessungen von 20 x 14 x 13 m (detaillierte Ergebnisse siehe Kapitel 11.4) wird die Neigung der Wand zunehmend erhöht. Diese Zunahme der Wandneigung erfolgte schrittweise mit 5°, beginnend mit 5° bis zu einem Winkel von 20°. Diese dargestellten Spitzenwerte werden zusätzlich mit Fehlerindikatoren versehen, die die Standardabweichung der Ergebnisse wiedergeben (graue Linien in den Diagrammen). Durch die Spitzenwerte eingezeichnete

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Trendlinien geben Aufschluss über den grundsätzlichen Verlauf der Ergebnisse. Die in Abbildung 12-4 zu sehenden Positionen eins bis vier entsprechen jenen aus Abbildung 11-3. Wie sich zeigt, führt die Erhöhung der Wandneigung zu verringerten Maximalspannungen für alle betrachteten Punkte. Position 3, die sich in der Ecke des Festbett-Wärmespeichers befindet (siehe Abbildung 11-3), ist am höchsten beansprucht. Die für diese Position eingezeichnete Trendlinie (hervorgehobene schwarze Volllinie) in Abbildung 12-4 zeigt den abfallenden Verlauf der Maximalspannung mit zunehmender Wandneigung. Die Wandneigung von 10° zeigt ein Ergebnis das 5% höher liegt, als jenes der Geometrie mit 5° Wandneigung. Wandneigungen von 15° und 20° erzielten Reduktionen von 22% und 20%. Die Ergebnisse der Simulation streuen – wie aus den Ergebnissen der vertikal durchströmten Wärmespeicher bereits bekannt – wiederum in einem gewissen Bereich (näheres siehe Kapitel 12.1). Eine Empfehlung für eine horizontal durchströmte Wärmespeicher-Geometrien wird in Kapitel 14 abgegeben. Der absolute Maximalwert der Simulation horizontal durchströmter Festbett-Wärmespeicher lag in etwa bei 400 kPa (unter Berücksichtigung der Standardabweichung).

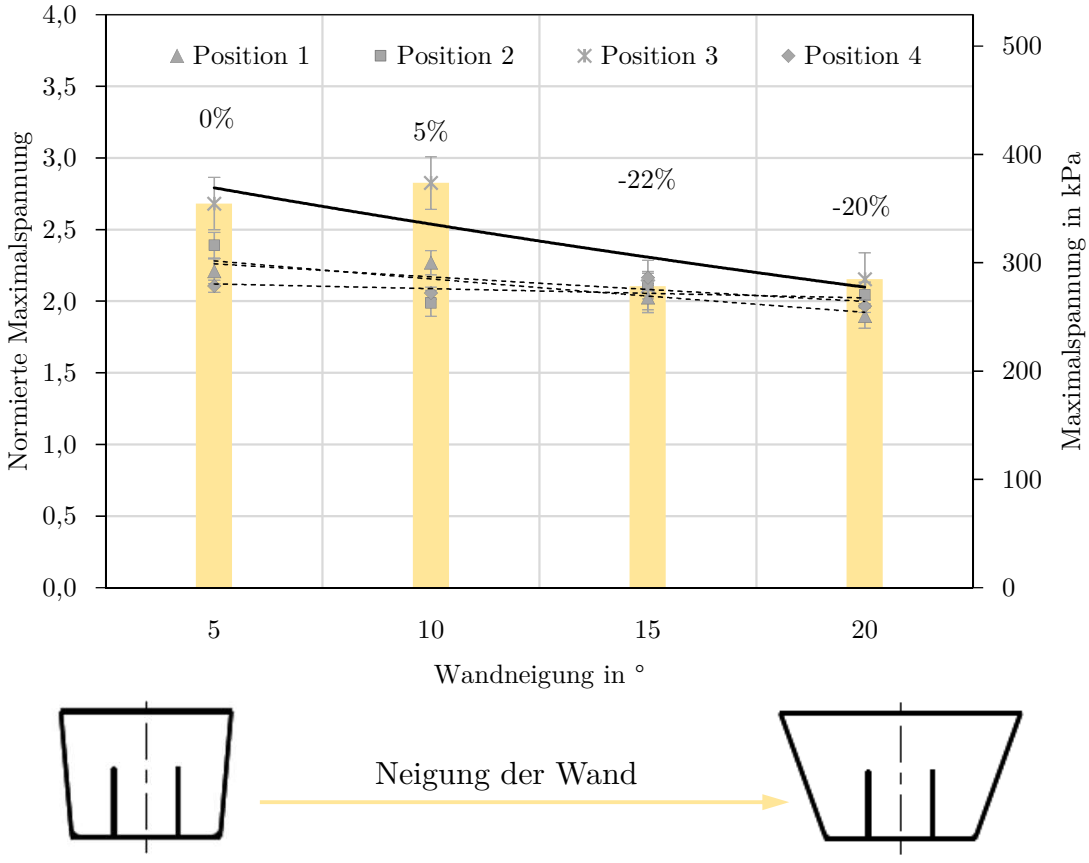


Abbildung 12-4 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Wandneigung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

13 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Arbeiten

Die in Kapitel 12.1 und 12.2 gezeigten Ergebnisse werden mit anderen Arbeiten verglichen. Eine Validierung des DEM-Berechnungsmodells erfolgte schon an früherer Stelle in Kapitel 8. Hier erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit, indem sie mit Arbeiten von Dreißigacker [20], Krüger [34] und Sassine [51] verglichen werden.

Neben der Berechnung der Spannungsanstiege bei mehreren Erwärmungsvorgängen lag der Fokus von [20] in der Reduktion der Rechenzeiten. Wie auch in dieser Arbeit würden die Simulationszeiten für große Industrieanlagen jeden vernünftigen Rahmen sprengen. Diese Verringerung wurde über eine „Time-step control“ erreicht (näheres siehe [20]). In [20] konnten Spannungsanstiege durch Erwärmen von bis zu Faktor 5 festgestellt werden (siehe Abbildung 13-1).

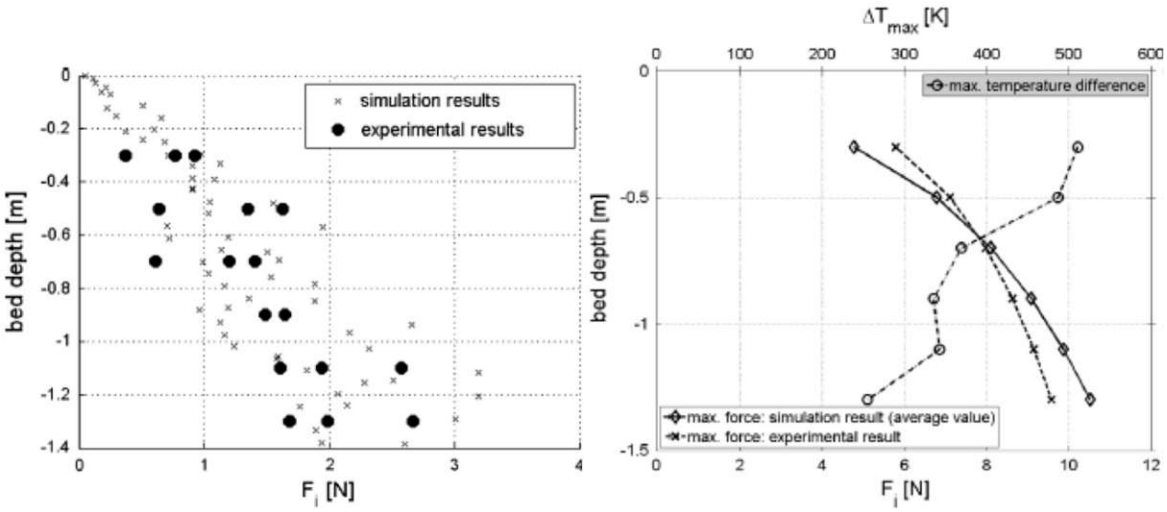


Abbildung 13-1 Spannungsanstieg aus der Arbeit von [20]

Für die Berechnungen wurde ein Wärmespeicher mit einer Grundfläche von 600 x 800 mm und einem Füllvolumen von 0,9 m³ verwendet. Als Schüttgut kamen Keramik-Partikel mit einem mittleren Durchmesser von 17 mm und einer Dichte von 2400 kg/m³ zur Anwendung. Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt $5 \cdot 10^{-6}\, K^{-1}$, die Temperaturdifferenz 530 °C. Vergleicht man jene Ergebnisse mit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen (Maximalwerte von Faktor 3,5 gegenüber dem analytischen Schüttdruck nach Janssen) ist zu erkennen, dass deshalb höhere Werte vorliegen. Dies scheint zum einen plausibel, da Keramik-Partikel einen um etwa 20 mal höheren E-Modul als Schotter besitzen (Keramik: $E = 3 \cdot 10^{11}\ Pa$, Schotter: $E = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ Pa$). Zum anderen liegt in [20] eine um 180 °C höhere Temperaturdifferenz vor.

Die Arbeit von [34] ergab Spannungsanstiege durch Erwärmen auf das bis zu 7-fache. Für diese Berechnungen wurde ein zylindrischer Wärmespeicher (Durchmesser 16 m, Höhe 12 m) verwendet, der in etwa die gleiche Größe wie der vertikal durchströmte 330 MWh-Speicher (näheres siehe Kapitel 3.3) aufweist. Als Schüttung wurde gepresste Stahl-Schlacke mit einem Partikeldurchmesser von 35 mm und einer Dichte von 3650 kg/m³ verwendet. Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt $1{,}54 \cdot 10^{-5}\ K^{-1}$, die Temperaturdifferenz 580 °C. Der statische Reibungskoeffizient hat einen Wert von 0,7.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen (Maximalwerte von Faktor 3,5 gegenüber dem analytischen Schüttdruck nach Janssen) ist zu erkennen, dass doppelt so hohe Werte vorliegen. Dieser Umstand ist gleich mehreren Ursachen geschuldet. Stahl-Schlacke besitzt einen um ca. 50% höheren E-Modul (Stahl-Schlacke: $E = 2{,}3 \cdot 10^{10}\ Pa$, Schotter: $E = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ Pa$) als Schotter. Ein mehr als doppelt so großer Wärmeausdehnungskoeffizient (Stahl-Schlacke: $\alpha = 15{,}4 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$, Schotter: $\alpha = 7 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$) verstärkt die Spannungszunahme ebenfalls stark. Bei den Temperaturdifferenzen liegt zudem ein Unterschied von 230 °C zugunsten von [34] vor. Zusätzliche Ergebnisse dieser Arbeit finden sich in [26] und [38].

Bei den Berechnungen von [51] ergab sich für starre Wärmespeicher eine maximale Spannungserhöhung des 2-fachen hydrostatischen Drucks (siehe Abbildung 13-2). Umgerechnet entspricht das in etwa dem 3,5-fachen Schüttdruck. Neben dem Einfluss mehrerer Belade- und Entladezyklen wurden in dieser Arbeit unterschiedlich große Wärmeausdehnungen des Mantels untersucht. Dort konnten Spannungserhöhungen von bis zu Faktor 7 festgestellt werden (bezogen auf den Schüttdruck).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

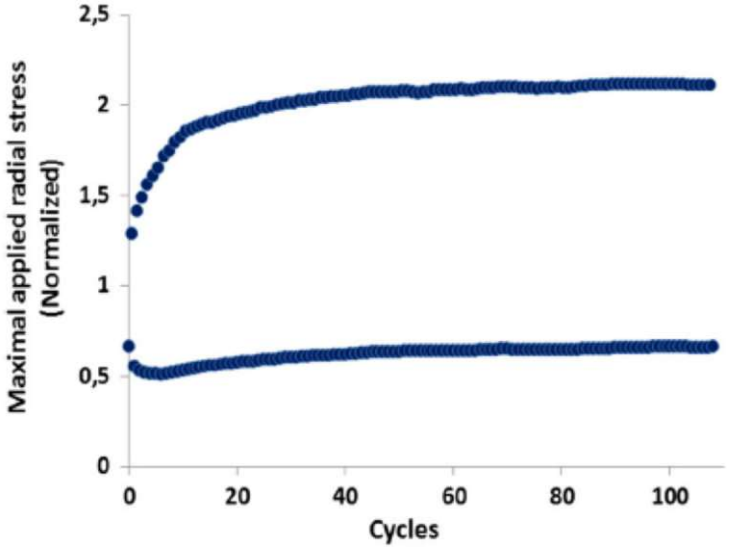


Abbildung 13-2 Spannungsanstieg aus der Arbeit von [51]

Für diese Simulationen wurde ein zylindrischer Wärmespeicher mit einem Durchmesser von 1 m und einer Höhe von 2 m verwendet (näheres siehe Kapitel 8.2). Als Schüttgut dienten Partikel mit einem mittleren Durchmesser von 58 mm und einer Dichte von 2750 kg/m³. Die Reibwerte zwischen den Partikeln und zwischen Partikel und Wand wurden mit dem Wert 1 festgelegt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt $4 \cdot 10^{-6}\, K^{-1}$, die Temperaturdifferenz 300 °C. Die weiteren Materialkennwerte können Tabelle 8-3 entnommen werden.

Vergleicht man die Ergebnisse von [51] mit denen in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen (Maximalwerte von Faktor 3,5 gegenüber dem analytischen Schüttdruck nach Janssen) ist zu erkennen, dass in etwa gleiche Werte vorliegen. Die in Abbildung 13-2 auf den hydrostatischen Druck bezogene Maximalspannung von Faktor 2 entspricht in etwa dem 3,5-fachen Schüttdruck nach Janssen. Die Partikel von [51] weisen sehr hohe Reibwerte zwischen den Partikeln und zwischen Partikel und Wand auf. Die Partikelsteifigkeit fällt hingegen geringer aus. Die bei den Berechnungen verwendete Temperaturdifferenz von 300 °C liegt auch im Bereich von den in dieser Arbeit verwendeten 350 °C. Aus diesen Gründen scheint es durchaus plausibel, dass die Ergebnisse dieser beiden Arbeiten gleiche Größenordnungen aufweisen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

14 Resümee und Ausblick

Die Vergangenheit zeigte, dass nicht berücksichtigte Ausdehnungen des Schüttguts zu Schäden an der Schüttung oder Behälterwand führen können (siehe Abbildung 1-2 auf Seite 2). Manchmal reichten wie in [8] sogar tageszeitliche Temperaturschwankungen. Für die bis zu mehreren hundert Grad erwärmten und anschließend abgekühlten Festbett-Wärmespeicher ist es daher unumgänglich, die durch die Temperaturdifferenzen hervorgerufenen Größenänderungen des Schüttguts zu berücksichtigen. Zu große Verformungen der Behälterwand, die in weiterer Folge zu einem Brechen des Wärmespeichers (siehe Abbildung 14-1) führen können, müssen vermieden werden.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten DEM-Berechnungsmodell (siehe Kapitel 7) lassen sich die thermo-mechanischen Spannungen in den Schüttungen bzw. Behälterwänden von Festbett-Wärmespeichern ermitteln. Diese Berechnungen können für verschiedenste Wärmespeicher-Geometrien in Abhängigkeit von der Durchströmungsrichtung (vertikal/horizontal) erfolgen (siehe Kapitel 11). Somit lässt sich der prozessbedingte Spannungsanstieg berechnen und Aussagen über die Dimensionierung von Festbett-Wärmespeicher treffen (siehe Kapitel 12).

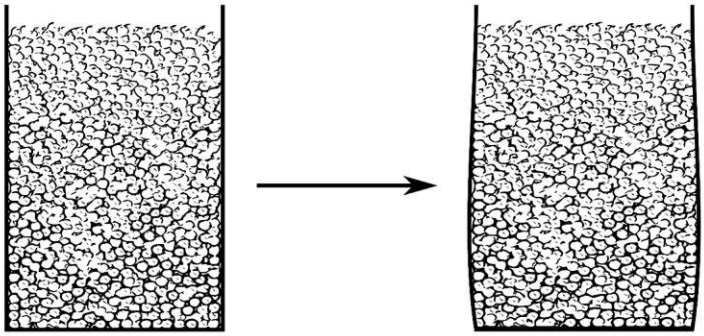


Abbildung 14-1 Schädigung eines Festbett-Wärmespeichers durch zu hohe Verformungen der Behälterwand

Damit die Berechnung der Spannungen zwischen Schüttung und Behälterwand durchgeführt werden kann, müssen alle Materialkennwerte, die für die Spannungsberechnung in der DEM-Simulation erforderlich sind, ermittelt werden (siehe Kapitel 9). Hierzu wurde eine eigene Kalibriervorrichtung für Schüttgüter am

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

IKP der TU Wien gebaut. Zusätzlich lieferten Druckversuche Aufschluss über die Festigkeit der verwendeten Partikel. Dieser Prozess führte zu einem erweiterten Ablaufdiagramm zur Ermittlung sämtlicher Parameter.

Da es sich in diesem Projekt um relativ große Wärmespeicher-Anlagen (Vertikaler Wärmespeicher: Durchmesser 17 m, Höhe 15 m / Horizontaler Wärmespeicher 20 x 14 x 13 m) handelte (siehe Abbildung 14-2), mussten Lösungen gefunden werden, um die hohe Anzahl der Partikel signifikant zu verringern (siehe Kapitel 10). Diese Lösungsansätze beinhalten Partikelreduktionen durch die Verwendung von vergrößerten Partikeln, die Nutzung von Symmetrien und das Aufbringen von Ballastkörpern. Dabei durfte sich das Ergebnis der ursprünglichen Simulation aber nicht verändern.

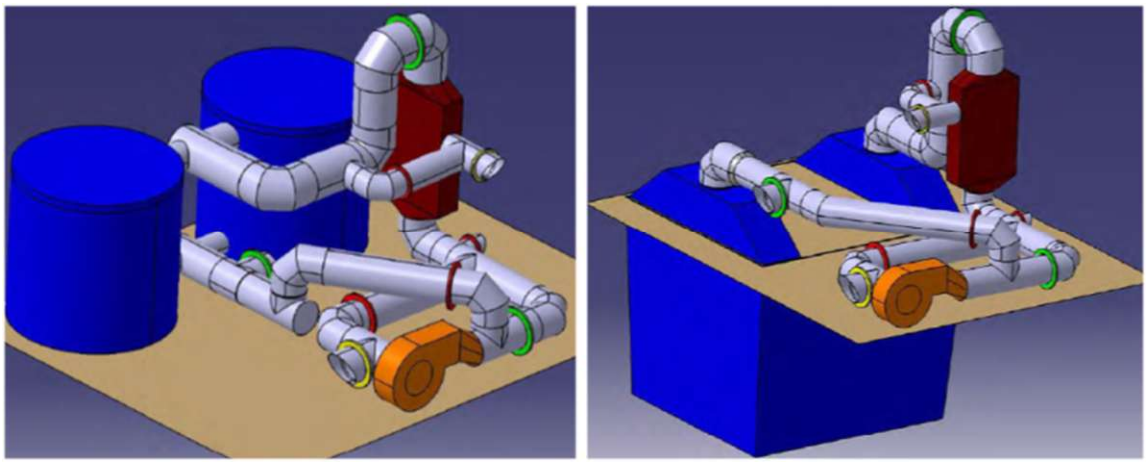


Abbildung 14-2 Vertikale (linke Bildhälfte) und horizontale (rechte Bildhälfte) Variante des Festbett-Wärmespeichers [25]

Schließlich wurden unterschiedliche Wärmespeicher-Geometrien unter Berücksichtigung der Durchströmungsrichtung simuliert (siehe Kapitel 11). Auch der Einfluss mehrerer Belade-und Entladezyklen wurde berücksichtigt. Die dabei ermittelten Spannungen können mit den zulässigen Werten verglichen werden und als Dimensionierungskriterium dienen. Besonderes Augenmerk wurde auf den Einfluss von geneigten Wänden bzw. auf die Verwendung von Innenkegeln gelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Neigung der Behälterwand zur Verbesserung der Spannungssituation führen kann.

Abbildung 14-3 gibt einen Überblick zu diesen Ergebnissen. Hier werden die Maximalspannungen der jeweiligen Wärmespeicher-Geometrien gegenübergestellt. Sowohl die Ergebnisse der vertikal, als auch die der horizontal durchströmten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Wärmespeicher finden sich in diesem Diagramm. Wie auch in Kapitel 12 finden sich in Abbildung 14-3 neben den Spitzenwerten samt dargestellter Standardabweichung die jeweiligen Trendlinien (strichlierte Linien) dieser Punkte. Die roten Markierungen entsprechen den Ergebnissen aus Kapitel 11.1, die blauen den aus Kapitel 11.2 und die orangen den aus Kapitel 11.3 für die vertikal durchströmte Wärmespeicher-Geometrie. Die grünen Punkte zeigen das Ergebnis der horizontal durchströmten Wärmespeicher-Geometrien aus Kapitel 11.4.

Aus konstruktiver Sicht stellt der vertikal durchströmte Wärmespeicher mit Innenkegel (gelbe Kennlinie in Abbildung 14-3) die einfachste Variante dar. Die Belastungsreduktion hält sich aber sehr in Grenzen. Daher ist diese Variante den Aufwand wohl nicht wert. Zwischen den vertikal durchströmten Wärmespeichern mit und ohne Innenkegel (blaue und rote Kennlinie in Abbildung 14-3) kann kein gravierender Unterschied festgestellt werden. Folglich stellt die Wärmespeicher-Geometrie ohne Innenkegel die einfachere und damit kostengünstigere Lösung dar. Mit dem horizontal durchströmten Wärmespeicher konnten nochmals niedrigere Ergebnisse erzielt werden (grüne Kennlinie in Abbildung 14-3). Die grüne Kennlinie zeigt, dass die Maximalspannungen der horizontal durchströmten Wärmespeicher im Bereich von 5° bis 20° Wandneigung niedriger liegen, als jene der vertikal durchströmten. Dies liegt zum einen daran, dass eine geringere Füllhöhe (13 m gegenüber 15 m beim vertikal durchströmten Wärmespeicher) vorliegt. Der bauliche Aufwand ist beim horizontalen Wärmespeicher jedoch höher als beim vertikalen (näheres siehe Tabelle 3-1 – Vor- und Nachteile vertikaler/horizontaler Festbett-Wärmespeicher). Mit Wandneigungen zwischen 20° und 35° konnten allerdings die vertikal durchströmten Wärmespeicher bessere Ergebnisse erzielen (rote Kennlinie in Abbildung 14-3).

Für die endgültige Entscheidung zwischen vertikaler und horizontaler Wärmespeicher-Variante werden auch die Baukosten eine entscheidende Rolle spielen. Unter Berücksichtigung der thermodynamischen Funktionalität und der Kosten kann aus festigkeitstechnischer Sicht eine Lösung mit geneigten Außenwänden im Bereich von 10° bis 20° für den vertikal bzw. horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeicher abgeleitet werden (rote und grüne Kennlinie in Abbildung 14-3).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

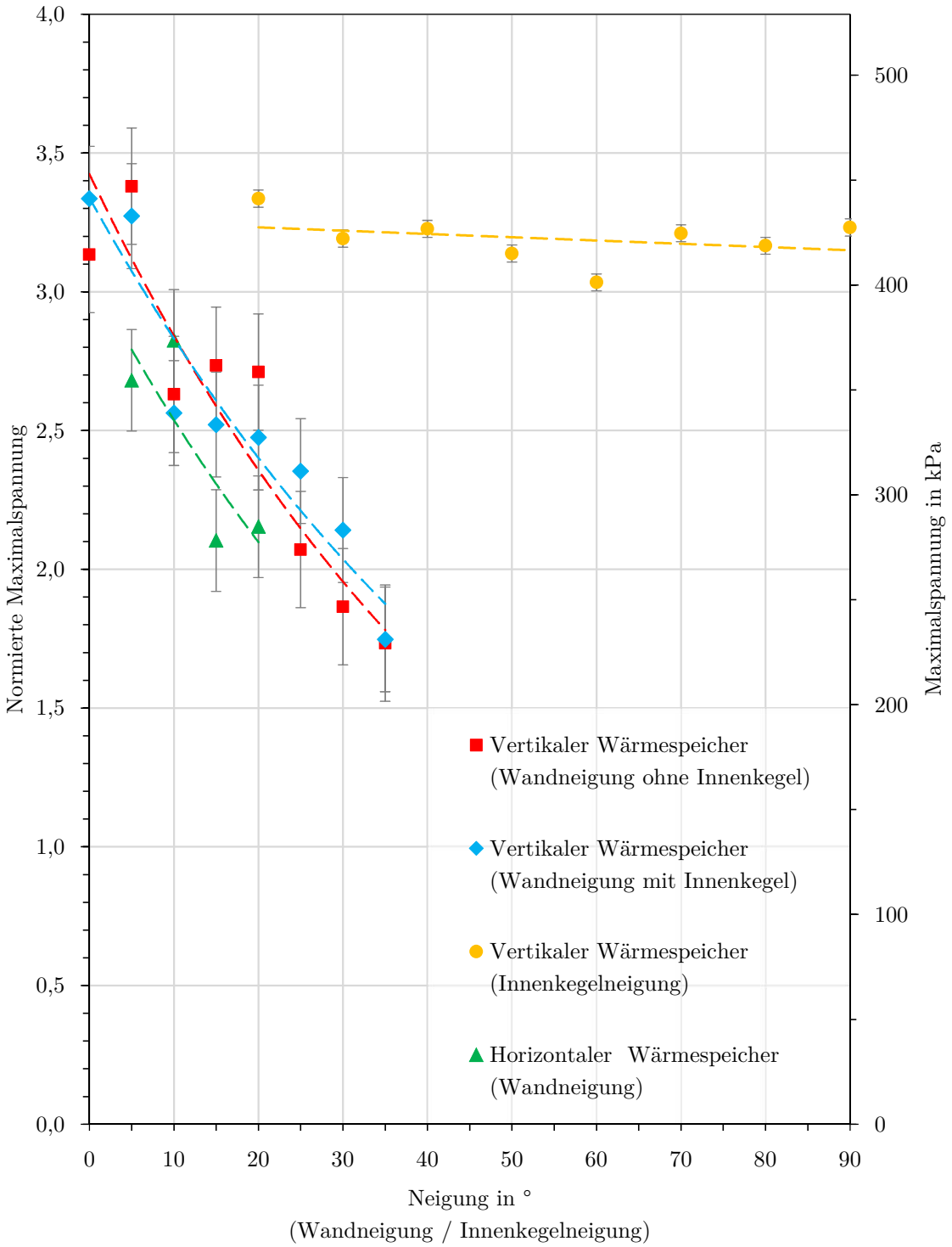


Abbildung 14-3 Gegenüberstellung der Maximalspannungen

Neben der optimalen Wahl der Wärmespeicher-Geometrie bezüglich Minimierung der thermo-mechanischen Spannungen zwischen Schüttung und Behälterwand muss natürlich auch die thermodynamische Funktionalität gewahrt werden. Eine für möglichst geringe Spannungen sorgende Wärmespeicher-Geometrie ist aus thermodynamischer Sicht nicht immer das Optimum. Aus diesem Grund wurden

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

neben den mittels DEM-Methode durchgeführten Spannungsberechnungen am IKP Untersuchungen hinsichtlich thermodynamischer Eignung am IET (CFD-Methode) vollzogen [25]. Abbildung 14-4 zeigt eine CFD-Analyse des horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeichers. Es muss ein Gesamtoptimum zwischen festigkeitstechnischer und thermodynamischer Betrachtungsweise unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Lösung gefunden werden.

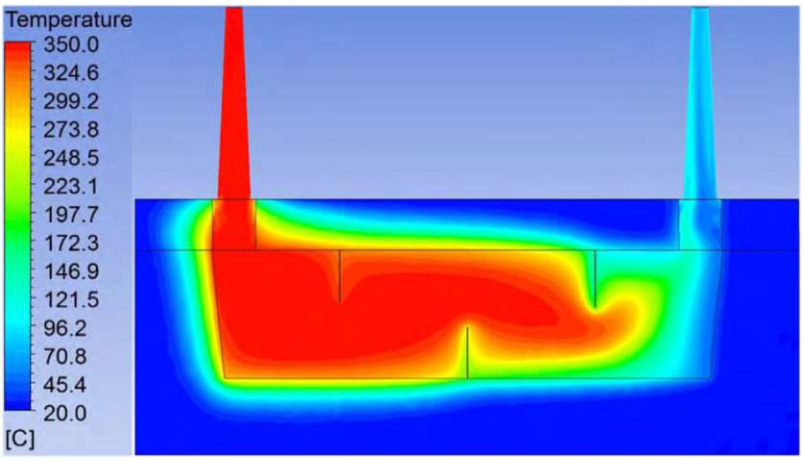


Abbildung 14-4 CFD-Analyse des horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeichers [25]

Es können auch noch weitere Geometrien simuliert und hinsichtlich Spannungsoptimierung untersucht werden (Höhe zu Durchmesser Verhältnis, Verrundungen im Inneren des Wärmespeichers etc.). Durch den Vergleich dieser thermo-mechanischen Spannungen mit den zulässigen Spannungen von Schüttung und Behälterwand kann eine Aussage über eventuelle Schädigungen gemacht werden. Noch genauere Aussagen bezüglich thermodynamischen Verhaltens der Anlage, aber auch hinsichtlich Spannungen in der Behälterwand lassen sich treffen, wenn die hier beschriebene DEM-Berechnung mit einer CFD-Berechnung gekoppelt wird. Eventuell lässt sich die für wärmebedingte Ausdehnungen erstellte Berechnung auch in anderen Bereichen anwenden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

15 Literaturverzeichnis

[1] Achmus, M. ; Abdel-Rahman, K.: The influence of “up-scaling” on the results of particle method calculations of non-cohesive soils. In: Konietzky, H. ; Konietzky, H. (Hrsg.): *Proceedings of 1st International PFC Symposium on Numerical Modelling in Micromechanics via Particle Methods*. 1. Aufl. : Routledge, 2017 — ISBN 978-0-203-74533-5, S. 183–187

[2] Ai, Jun ; Chen, Jian-Fei ; Rotter, J. Michael ; Ooi, Jin Y.: Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. In: *Powder Technology* Bd. 206 (2011), Nr. 3, S. 269–282

[3] Blight, G. E.: Temperature changes affect pressures in steel bins. In: *International Journal Bulk Solids Storage in Silos* Bd. 1 (1985), Nr. 3

[4] Brosh, Tamir ; Kalman, Haim ; Levy, Avi ; Peyron, Isabelle ; Ricard, Francois: DEM–CFD simulation of particle comminution in jet-mill. In: *Powder Technology* Bd. 257 (2014), S. 104–112

[5] Brosseau, Doug ; Kelton, John W. ; Ray, Daniel ; Edgar, Mike ; Chisman, Kye ; Emms, Blaine: Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants. In: *J. Sol. Energy Eng.* Bd. 127 (2005), Nr. 1, S. 109–116

[6] Bruch, A. ; Molina, S. ; Esence, T. ; Fourmigué, J. F. ; Couturier, R.: Experimental investigation of cycling behaviour of pilot-scale thermal oil packed-bed thermal storage system. In: *Renewable energy* Bd. 103 (2017), S. 277–285

[7] Carson, John W.: Silo failures: Case histories and lessons learned. In: *Handbook of Powder Technology* Bd. 10 (2001), S. 153–166

[8] Carson, John W. ; Holmes, Tracy: Silo failures: why do they happen. In: *TASK quarterly* Bd. 7 (2003), Nr. 4, S. 499–512

[9] Červenka, Vladimír ; Libor, Jendele ; Červenka, J: ATENA Program Documentation Part Bd. Cervenka Consulting sro (2000), S. 334

[10] Chen, K. ; Cole, J. ; Conger, C. ; Draskovic, J. ; Lohr, M. ; Klein, K. ; Scheidemantel, T. ; Schiffer, P.: Packing grains by thermal cycling. In: *Nature* Bd. 442 (2006), Nr. 7100, S. 257–257

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[11] Chen, K. ; Harris, A. ; Draskovic, J. ; Schiffer, P.: Granular fragility under thermal cycles. In: *Granular Matter* Bd. 11 (2009), Nr. 4, S. 237–242

[12] Chen, Ke: Granular materials under vibration and thermal cycles (2008)

[13] Coetzee, C. J.: Calibration of the discrete element method. In: *Powder Technology* Bd. 310 (2017), S. 104–142

[14] Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. In: *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics* (1971)

[15] Cundall, P. A. ; Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies. In: *geotechnique 29.1* Bd. 29 (1979), Nr. 1, S. 47–65

[16] Deutsches Institut für Normung: DIN 2413 - Nahtlose Stahlrohre für öl- und wasserhydraulische Anlagen – Berechnungsgrundlage für Rohre und Rohrbögen bei schwellender Beanspruchung (2020)

[17] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 1055-6 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter (2005)

[18] Divoux, Thibaut ; Gayvallet, Hervé ; Géminard, Jean-Christophe: Creep motion of a granular pile induced by thermal cycling. In: *Physical review letters* Bd. 101 (2008), Nr. 14, S. 148303

[19] Dogangun, Adem ; Karaca, Zeki ; Durmus, Ahmet ; Sezen, Halil: Cause of damage and failures in silo structures. In: *Journal of performance of constructed facilities* Bd. 23 (2009), Nr. 2, S. 65–71

[20] Dreissigacker, V. ; Zunft, S. ; Müller-Steinhagen, H.: A thermo-mechanical model of packed-bed storage and experimental validation. In: *Applied Energy* Bd. 111 (2013), S. 1120–1125

[21] Egger, Martin ; Haber, Alexander ; Decker, Klaus: Entwicklungswerkzeuge in der Schüttguttechnik - Klassische Analyse versus numerische Simulation. In: *Schüttgut* Bd. 5/2016 (2016), Nr. Vol. 22, S. 52–56

[22] Faas, S. E.: *10-mwe solar-thermal central-receiver pilot plant: thermal-storage-subsystem evaluation-subsystem activation and controls testing phase* : Sandia National Labs., Livermore, CA (USA), 1983

[23] Gibaud, Robin: *Application of the Discrete Element Method to Finite Inelastic Strain in Multi-Materials*, PhD Thesis, 2017

[24] Grosu, Yaroslav ; Faik, Abdessamad ; Ortega-Fernández, Iñigo ; D'Aguanno, Bruno: Natural Magnetite for thermal energy storage: Excellent thermophysical properties, reversible latent heat transition and

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

controlled thermal conductivity. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* Bd. 161 (2017), S. 170–176

[25] Haider, Markus: Gmunden High Temperature Heat Link.

[26] Haunstetter, Jürgen ; Krüger, Michael ; Zunft, Stefan: Experimental Studies on Thermal Performance and Thermo-Structural Stability of Steelmaking Slag as Inventory Material for Thermal Energy Storage. In: *Applied Sciences* Bd. 10 (2020), Nr. 3, S. 931

[27] Hertz, H.: Ueber die Berührung fester elastischer Körper. In: . Bd. 92 : Journal für die reine und angewandte Mathematik, 1882, S. 56–171

[28] IEA.: *Technology roadmap solar thermal electricity* : OECD Publishing, 2015

[29] Janssen, H. A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. In: , *35.* Bd. 39 : Verein Deutscher Ingenieure, 1895, S. 1045–1049

[30] Kalman, H.: Particle Technology in the Chemical Industry. In: *Vortrag, Verfahrenstechnisches Kolloquium, Magdeburg*, 2002

[31] Katterfeld, André: Calibration of DEM Parameters for Cohesionless Bulk Materials under Rapid Flow Conditions and Low Consolidation. In: *ResearchGate*

[32] Katterfeld, André ; Wensrich, Christopher: Understanding granular media: from fundamentals and simulations to industrial application. In: *Granular Matter* Bd. 19 (2017), Nr. 4, S. 83

[33] Knappstein, Gerhard: *Statik, insbesondere Schnittprinzip*. 2., überarb. und erw. Aufl. Frankfurt am Main : Deutsch, 2007 — ISBN 978-3-8171-1763-5

[34] Krüger, Michael ; Haunstetter, Jürgen ; Knödler, Philipp ; Zunft, Stefan: Slag as Inventory Material for a Thermal Energy Storage (TES): Material investigation and thermo-mechanical consideration. In: *Energy Procedia* Bd. 155 (2018), S. 454–463

[35] Lapko, A. ; Prusiel, J. A.: Analysis of thermal effects in grouped silos of grain elevators. In: *International agrophysics* Bd. 20 (2006), Nr. 4, S. 301–307

[36] Libby, C.: Solar thermocline storage systems: preliminary design study. In: *EPRI, Palo Alto, CA* Bd. 1019581 (2010)

[37] Lommen, Stef ; Mohajeri, Mohammadjavad ; Lodewijks, Gabriel ; Schott, Dingena: DEM particle upscaling for large-scale bulk handling equipment and material interaction. In: *Powder Technology* Bd. 352 (2019), S. 273–282

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[38] Michael Krüger ; Jürgen Haunstetter ; Philipp Knödler ; Stefan Zunft: Slag as an Inventory Material for Heat Storage in a Concentrated Solar Tower Power Plant: Design Studies and Systematic Comparative Assessment. In: *Applied Sciences* Bd. 9 (2019), Nr. 9, S. 1833

[39] Mindlin, Raymond D: Elastic spheres in contact under varying oblique forces. In: . Bd. 20 : Journal of Applied Mechanics, 1953, S. 327–344

[40] Molerus, Otto: *Schüttgutmechanik: Grundlagen und Anwendungen in der Verfahrenstechnik*. Berlin [u.a.] : Springer, 1985 — ISBN 978-3-540-15428-0

[41] Motzkus, Ulrich: *Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter* : Technischer Universität Carolo-Wilhelmina, 1974

[42] Ortega-Fernández, Iñigo ; Calvet, Nicolas ; Gil, Antoni ; Rodríguez-Aseguinolaza, Javier ; Faik, Abdessamad ; D'Aguanno, Bruno: Thermophysical characterization of a by-product from the steel industry to be used as a sustainable and low-cost thermal energy storage material. In: *Energy* Bd. 89 (2015), S. 601–609

[43] Podlozhnyuk, Alexander ; Pirker, Stefan ; Kloss, Christoph: Efficient implementation of superquadric particles in Discrete Element Method within an open-source framework. In: *Computational Particle Mechanics* Bd. 4 (2017), Nr. 1, S. 101–118

[44] Queteschiner, Daniel ; Kloss, Christoph: Introduction to dynamical particle simulations. In: , S. 3

[45] Queteschiner, Daniel ; Lichtenegger, Thomas ; Pirker, Stefan ; Schneiderbauer, Simon: Multi-level coarse-grain model of the DEM. In: *Powder Technology* Bd. 338 (2018), S. 614–624

[46] Rackl, Michael ; Top, F ; Molhoek, CP ; Schott, Diana: Feeding system for wood chips: A DEM study to improve equipment performance. In: . Bd. 98, 2017, S. 43–52

[47] Rahmstorf, Stefan ; Schellnhuber, Hans Joachim: *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*. Bd. 2366 : CH Beck, 2012

[48] Roessler, Thomas ; Katterfeld, André: Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using upscaled particles. In: *Powder Technology* Bd. 330 (2018), S. 58–66

[49] Roessler, Thomas ; Richter, Christian ; Katterfeld, André ; Will, Frank: Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials–part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations. In: *Powder Technology* Bd. 343 (2019), S. 803–812

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[50] Rumpf, Hans: Die Wissenschaft des agglomerierens. In: *Chemie Ingenieur Technik* Bd. 46 (1974), Nr. 1, S. 1–11

[51] Sassine, Nahia: *Study of the thermo-mechanical behavior of granular media and interactions medium-tank*, UniversitéGrenobleAlpes, PhD Thesis, 2018

[52] Sassine, Nahia ; Donzé, Frédéric-Victor ; Bruch, Arnaud ; Harthong, Barthélémy: Numerical analysis of granular bed behavior in thermocline storage tank and bed/wall interactions. In: . Bd. 2033 : AIP Publishing LLC, 2018 — ISBN 978-0-7354-1757-1

[53] Sassine, Nahia ; Donzé, Frédéric-Victor ; Harthong, Barthélémy ; Bruch, Arnaud: Thermal stress numerical study in granular packed bed storage tank. In: *Granular Matter* Bd. 20 (2018), Nr. 3, S. 44

[54] Schubert, Helmar: Grundlagen des agglomerierens. In: *Chemie Ingenieur Technik* Bd. 51 (1979), Nr. 4, S. 266–277

[55] Schulze, Dietmar: *Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragorgan* : Diss. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1991

[56] Schulze, Dietmar: *Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung*. 3. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2015 — ISBN 978-3-642-53884-1

[57] Sharma, Atul ; Tyagi, V. V. ; Chen, C. R. ; Buddhi, D.: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 13 (2009), Nr. 2, S. 318–345

[58] Singh, Harmeet ; Saini, R. P. ; Saini, J. S.: A review on packed bed solar energy storage systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 14 (2010), Nr. 3, S. 1059–1069

[59] Sterner, Michael ; Stadler, Ingo: *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. 2. korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017 — ISBN 978-3-662-48892-8

[60] Stieß, Matthias: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1, Spinger-Lehrbuch*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009 — ISBN 978-3-540-32551-2

[61] Tian, Yuan ; Zhao, Chang-Ying: A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. In: *Applied energy* Bd. 104 (2013), S. 538–553

[62] Van Lew, Jon T. ; Li, Peiwen ; Chan, Cho Lik ; Karaki, Wafaa ; Stephens, Jake: Analysis of heat storage and delivery of a thermocline tank

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

having solid filler material. In: *Journal of solar energy engineering* Bd. 133 (2011), Nr. 2

[63] Vargas, Watson L. ; McCarthy, Joseph J.: Thermal expansion effects and heat conduction in granular materials. In: *Physical Review E* Bd. 76 (2007), Nr. 4, S. 041301

[64] Vedachalam, Vinodh ; Virdee, Davy: Discrete element modelling of granular snow particles using LIGGGHTS. In: *M. Sc., University of Edinburgh* (2011)

[65] Verband der TÜV e. V.: AD 2000 - Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung - Berstsicherungen (2006)

[66] Weiler, Rouven ; Ripp, M ; Dau, G ; Ripperger S: Weiler, Rouven, et al. "Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode zur Simulation des Verhaltens von Schüttgütern. In: *Chemie Ingenieur Technik*, *6*. Bd. 81, 2009, S. 749–757

[67] Xu, Chao ; Wang, Zhifeng ; He, Yaling ; Li, Xin ; Bai, Fengwu: Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system. In: *Applied Energy* Bd. 92 (2012), S. 65–75

[68] Yagiz, Saffet: Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. In: *Bulletin of engineering geology and the environment* Bd. 68 (2009), Nr. 1, S. 55–63

[69] Yang, Zhen ; Garimella, Suresh V.: Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline. In: *Solar energy* Bd. 84 (2010), Nr. 6, S. 974–985

[70] Zanganeh, Giw ; Pedretti, Andrea ; Zavattoni, S. A. ; Barbato, M. C. ; Haselbacher, Andreas ; Steinfeld, Aldo: Design of a 100 MWhth packed-bed thermal energy storage. In: *Energy Procedia* Bd. 49 (2014), S. 1071–1077

[71] Zavattoni, Simone ; Barbato, Maurizio ; Pedretti, Andrea ; Zanganeh, Giw ; Steinfeld, Aldo: High temperature rock-bed TES system suitable for industrial-scale CSP plant–CFD analysis under charge/discharge cyclic conditions. In: *Energy Procedia* Bd. 46 (2014), S. 124–133

[72] Zhang, Q. ; Britton, M. G. ; Leitgeb, J. M.: Thermally induced pressures in an on-farm grain storage bin. In: *Canadian Agricultural Engineering* Bd. 35 (1993), Nr. 1, S. 51–56

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[73] ZHANG, XIAO-PING ; WONG, LOUIS NGAI YUEN ; WANG, SI-JING ; HAN, GENG-YOU: Engineering properties of quartz mica schist. In: *Engineering geology* Bd. 121 (2011), Nr. 3–4, S. 135–149

[74] ZHU, TIEYUAN: Some useful numbers on the engineering properties of materials (geologic and otherwise). In: *Retrieved July* Bd. 23 (2010), S. 2012

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

16 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 ① Zementwerk mit Abwärme - ② Festbett-Wärmespeicher und ③ Prozessenergie 1
Abbildung 1-2 Geborstenes 9000 Tonnen Stahl-Silo, Ursache: tageszeitliche Temperaturschwankungen [8] 2
Abbildung 1-3 Kontaktkraft Partikel-Partikel bzw. Partikel-Wand in einem starren Festbett-Wärmespeicher 3
Abbildung 1-4 Kernthemen der Arbeit 4
Abbildung 1-5 Aufbau der Arbeit 5
Abbildung 3-1 Einteilung der Speichertechnologien 7
Abbildung 3-2 Schema und Foto eines in Bau befindlichen Festbett-Wärmespeichers in Marokko [70] 8
Abbildung 3-3 Richtung des Aufwärm- bzw. Abkühlvorgangs beim a) vertikalen Festbett-Wärmespeicher und b) horizontalen Festbett-Wärmespeicher 10
Abbildung 3-4 Fließschema beim Beladungsvorgang des Wärmespeichers [25] 12
Abbildung 3-5 Fließschema beim Entladevorgang des Wärmespeichers [25] 13
Abbildung 3-6 Tangential- und Axialspannung in einem druckbelasteten Behälter 14
Abbildung 4-1 Lagerung in Behältern - Mechanisches Verhalten von a) Feststoff, b) Flüssigkeit, c) Gas und d) Schüttgut [30] 16
Abbildung 4-2 Partikel mit dessen beschreibenden Größen 16
Abbildung 4-3 Partikelschüttung mit ihren beschreibenden Größen 17
Abbildung 4-4 a) Wandreibungswinkel φx b) Horizontallastverhältnis λ 18
Abbildung 5-1 Scheibenelement in einem Siloschaft [56] 20
Abbildung 5-2 Vergleich Schüttdruck, hydrostatischer Druck in einem Behälter 21
Abbildung 5-3 Schüttdruck in Abhängigkeit des H/D-Verhältnis 21
Abbildung 6-1 DEM Berechnungsprinzip 24
Abbildung 6-2 Zellzuordnung (links) und Nachbarlisten (rechts) 25
Abbildung 6-3 Schematische Darstellung des Hertz-Mindlin-Kontaktmodells [46] 26
Abbildung 7-1 Aufbau des DEM-Berechnungsmodells 28

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 7-2 Ausgangszustand vor thermischer Belastung.....29
Abbildung 7-3 Aufbringen der Schüttung a) einlagig b) mehrlagig 30
Abbildung 7-4 Schichtweiser Füllvorgang des a) vertikal und des b) horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeichers.....30
Abbildung 7-5 Berechnungsmodell für Erwärmungs- und Abkühlvorgänge 31
Abbildung 7-6 Partikelgrößenänderung beim Erwärmungs- bzw. Abkühlvorgang .32
Abbildung 7-7 Aufbau des DEM-Berechnungsmodells.....34
Abbildung 7-8 Ausgabe der Ergebnisse.....34
Abbildung 7-9 Ausgabe der Simulationsergebnisse in EDEM 35
Abbildung 7-10 Vollständiges Blockschaltbild des DEM-Berechnungsmodells.....36
Abbildung 8-1 Spannungs-/Druckverlauf für Schüttgut und eine Flüssigkeit (analytisch und DEM-Simulation) 38
Abbildung 8-2 Normierte Spannung des Belade- und Entladevorganges.....39
Abbildung 8-3 Normierte Spannung des Belade- und Entladevorganges.....39
Abbildung 8-4 Einfluss mehrerer Erwärmungs- und Abkühlvorgänge auf die Maximalspannung der Behälterwand.....40
Abbildung 8-5 Anordnung der Partikel in der DEM-Simulation 41
Abbildung 8-6 Anstieg der Normalkraft zufolge Temperaturänderung 42
Abbildung 8-7 Vergleich der Ergebnisse zur Validierung des in EDEM erstellten DEM-Modells zur Berechnung thermo-mechanischer Spannungen 44
Abbildung 9-1 Zu kalibrierendes Schüttgut (Schotter – RK 8/16) 46
Abbildung 9-2 Experimentelle Durchführung der Rutsch- bzw. Rollversuche.....47
Abbildung 9-3 Kalibriervorrichtung für Schüttgüter (CAD-Modell).....49
Abbildung 9-4 Kalibriervorrichtung am IKP, TU Wien 49
Abbildung 9-5 Kalibriervorrichtung - Aufbau und Funktionsweise 50
Abbildung 9-6 Gemessener und gemittelter Massefluss.....51
Abbildung 9-7 Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Materialkennwerte über den Draw-Down-Versuch.....52
Abbildung 9-8 Kalibrierung mittels DEM-Simulation.....53
Abbildung 9-9 Kalibrierung – Reibparameter zu gering 53
Abbildung 9-10 Vergleich des Draw-Down-Versuchs a) Oberkammer vor Versuchsbeginn, b) Versuchsablauf (linke Bildhälfte: Experiment im IKP-Labor, rechte Bildhälfte: DEM-Simulation) 54

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 9-11 Scher- und Böschungswinkel in der Ober- und Unterkammer (linke Bildhälfte: Experiment im IKP-Labor, rechte Bildhälfte: DEM-Simulation) 55
Abbildung 9-12 Druckversuch in der Universal-Zug/Druck-Prüfmaschine 56
Abbildung 9-13 Schematischer Ablauf des Druckversuchs 57
Abbildung 9-14 Druckversuch mittels DEM-Simulation 57
Abbildung 9-15 Kraft-Weg-Diagramm für unterschiedlich groß gewählte Zeitschritte (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch) 58
Abbildung 9-16 Kraft-Weg-Diagramm mit angepasstem E-Modul (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch) 59
Abbildung 9-17 Kraft-Weg-Diagramm mit angepasstem E-Modul und Zeitschrittüberprüfung (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch) 60
Abbildung 9-18 Kraft-Weg-Diagramm zyklischer Druckversuche kalt/heiß a) 500 Zyklen bei 20 °C, b) 500 Zyklen bei 400 °C 61
Abbildung 9-19 Erweitertes Ablaufdiagramm zur Ermittlung sämtlicher Parameter für die Spannungsberechnung 63
Abbildung 10-1 Hauptabmessungen des a) vertikalen b) horizontalen Festbett-Wärmespeichers 64
Abbildung 10-2 Zusammenhang Partikeldurchmesser und Anzahl Partikel 65
Abbildung 10-3 Druckversuch mit vergrößertem Partikeldurchmesser 67
Abbildung 10-4 Zylindrische Randbedingung zur Reduktion der Rechenzeit 67
Abbildung 10-5 Kontrolle des Schüttdrucks bei der Nutzung zylindrischer Randbedingungen (Vergleich Simulation/analytische Berechnung) 68
Abbildung 10-6 Lineare Randbedingung zur Reduktion der Rechenzeit 69
Abbildung 10-7 Kontrolle des Schüttdrucks bei der Nutzung linearer Randbedingungen (Vergleich Simulation/analytische Berechnung) 69
Abbildung 10-8 Aufbringen von Ballastkörper auf die Schüttung zur Reduktion der Rechenzeit 70
Abbildung 10-9 Kontrolle des Schüttdrucks bei der Nutzung von Ballastkörpern (Vergleich Simulation/analytische Berechnung) 71
Abbildung 11-1 Simulationsmodell für den vertikal durchströmten Festbett-Wärmespeicher mit dem (1) Ursprungsmodell und (2) Vereinfachungsmodell 75
Abbildung 11-2 Simulationsmodell für den horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeicher mit dem (1) Ursprungsmodell und (2) Vereinfachungsmodell 75

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 11-3 Betrachteter Bereich für die Spannungsänderungen (linke Bildhälfte: vertikale Geometrie, rechte Bildhälfte: horizontale Geometrie).....76
Abbildung 11-4 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW00 78
Abbildung 11-5 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW05 79
Abbildung 11-6 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW10 80
Abbildung 11-7 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW15 81
Abbildung 11-8 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW20 82
Abbildung 11-9 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW25 83
Abbildung 11-10 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW30 84
Abbildung 11-11 Spannungsverlauf mehrerer Belade- und Entladezyklen bei VW35 85
Abbildung 11-12 Abmessungen - Wärmespeicher-Geometrie mit Innenkegel.....86
Abbildung 11-13 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW00 87
Abbildung 11-14 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u Entladezyklen bei VIW05 88
Abbildung 11-15 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW10 89
Abbildung 11-16 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW15 90
Abbildung 11-17 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW20 91
Abbildung 11-18 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW25 92
Abbildung 11-19 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW30 93

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 11-20 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VIW35 94
Abbildung 11-21 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII30 96
Abbildung 11-22 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII40 97
Abbildung 11-23 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII50 98
Abbildung 11-24 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII60 99
Abbildung 11-25 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII70 100
Abbildung 11-26 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII80 101
Abbildung 11-27 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei VII90 102
Abbildung 11-28 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-1 105
Abbildung 11-29 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-2 105
Abbildung 11-30 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-3 106
Abbildung 11-31 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-4 106
Abbildung 11-32 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-1 108
Abbildung 11-33 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-2 108
Abbildung 11-34 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-3 109
Abbildung 11-35 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H10-4 109
Abbildung 11-36 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-1 111
Abbildung 11-37 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-2 111
Abbildung 11-38 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-3 112

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 11-39 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H15-4 112
Abbildung 11-40 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-1 114
Abbildung 11-41 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-2 114
Abbildung 11-42 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-3 115
Abbildung 11-43 Spannungsverlauf mehrerer Belade- u. Entladezyklen bei H05-4 115
Abbildung 12-1 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Wandneigung (Geometrien ohne Innenkegel) 117
Abbildung 12-2 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Wandneigung (Geometrien mit gleichbleibendem Innenkegel) 118
Abbildung 12-3 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Innenkegelneigung 119
Abbildung 12-4 Kennlinie der auftretenden Maximalspannungen in Abhängigkeit von der Wandneigung 121
Abbildung 13-1 Spannungsanstieg aus der Arbeit von [20] 122
Abbildung 13-2 Spannungsanstieg aus der Arbeit von [51] 124
Abbildung 14-1 Schädigung eines Festbett-Wärmespeichers durch zu hohe Verformungen der Behälterwand 125
Abbildung 14-2 Vertikale (linke Bildhälfte) und horizontale (rechte Bildhälfte) Variante des Festbett-Wärmespeichers [25] 126
Abbildung 14-3 Gegenüberstellung der Maximalspannungen 128
Abbildung 14-4 CFD-Analyse des horizontal durchströmten Festbett-Wärmespeichers [25] 129

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

17 Formelverzeichnis

(3-1) 13
(3-2) 13
(3-3) 14
(3-4) 14
(4-1) 17
(4-2) 17
(4-3) 17
(4-4) 17
(4-5) 17
(4-6) 17
(4-7) 17
(4-8) 18
(5-1) 19
(5-2) 19
(5-3) 19
(5-4) 20
(5-5) 20
(5-6) 22
(5-7) 22
(5-8) 22
(5-9) 22
(5-10) 22
(5-11) 22
(6-1) 26
(6-2) 27
(6-3) 27
(6-4) 27
(6-5) 27
(6-6) 27

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

(6-7) 27
(7-1) 32
(7-2) 32
(7-3) 33
(7-4) 33
(7-5) 33
(8-1) 43
(8-2) 43
(8-3) 43
(8-4) 44
(9-1) 48
(9-2) 51
(10-1) 66
(10-2) 66
(10-3) 66
(10-4) 68
(10-5) 68
(10-6) 71

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

18 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile vertikaler/horizontaler Festbett-Wärmespeicher....9
Tabelle 3-2 Speichervarianten im Überblick....11
Tabelle 8-1 Materialkennwerte zur Verifikation des DEM-Berechnungsmodells....37
Tabelle 8-2 Materialkennwerte nach [51] für die eindimensionale Validierung....41
Tabelle 8-3 Materialkennwerte nach [51] für die mehrdimensionale Validierung...43
Tabelle 9-1 Ergebnistabelle der Sieblinie....47
Tabelle 9-2 Materialkennwerte Rutsch- und Rollversuch....48
Tabelle 9-3 Materialkennwerte Draw-Down-Versuch (DDV)....52
Tabelle 9-4 Materialkennwerte für die Simulation....62
Tabelle 11-1 Übersicht zu den vertikal durchströmten Wärmespeichern mit Wandneigungen (Kurzbezeichnung: VW)....77
Tabelle 11-2 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW00....78
Tabelle 11-3 Technische Daten vertikaler 330-MWh Wärmespeicher VW05....79
Tabelle 11-4 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW10....80
Tabelle 11-5 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW15....81
Tabelle 11-6 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW20....82
Tabelle 11-7 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW25....83
Tabelle 11-8 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW30....84
Tabelle 11-9 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VW35....85
Tabelle 11-10 Übersicht zu den vertikal durchströmten Wärmespeichern mit Wandneigungen und Innenkegel (Kurzbezeichnung: VIW)....86
Tabelle 11-11 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW00....87
Tabelle 11-12 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW05....88
Tabelle 11-13 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW10....89
Tabelle 11-14 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW15....90
Tabelle 11-15 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW20....91
Tabelle 11-16 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW25....92
Tabelle 11-17 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW30....93
Tabelle 11-18 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VIW35....94

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabelle 11-19 Übersicht zu den vertikal durchströmten Wärmespeichern mit Innenkegelneigungen (Kurzbezeichnung: VII) 95
Tabelle 11-20 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII20 95
Tabelle 11-21 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII30 96
Tabelle 11-22 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII40 97
Tabelle 11-23 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII50 98
Tabelle 11-24 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII60 99
Tabelle 11-25 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII70 100
Tabelle 11-26 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII80 101
Tabelle 11-27 Technische Daten vertikaler 330 MWh-Wärmespeicher VII90 102
Tabelle 11-28 Übersicht zu den horizontal durchströmten Wärmespeichern mit Wandneigungen (Kurzbezeichnung: H) 103
Tabelle 11-29 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H05 104
Tabelle 11-30 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H10 107
Tabelle 11-31 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H15 110
Tabelle 11-32 Technische Daten horizontaler 330 MWh-Wärmespeicher H20 113

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Dipl.-Ing.
Thomas Mitterlehner

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Lebenslauf

Bildungsweg

07/2017 – 07/2021 **Dr.-Studium der techn. Wissenschaften**

Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung, Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

Dissertationsthema: Untersuchung thermo-mechanischer Spannungen in den Schüttungen und an Behälterwänden von Festbett-Wärmespeichern

02/2016 – 06/2017 **Masterstudium Maschinenbau an der Technischen Universität Wien**

Vertiefungen: Fertigungssysteme I und II, Fördertechnik I und II

Diplomarbeit: Hubwerke in der Bühnentechnik - Spezielle Untersuchungen an „Not-Aus der Stoppkategorie 0“

10/2012 – 01/2016 **Bachelorstudium Maschinenbau an der Technischen Universität Wien**

Vertiefungen: Angewandte Maschinenelemente, Kraftfahrzeugtechnik I

Bachelorarbeit: Konstruktion und Auslegung eines Beweglichkeitstrainers

09/2006 – 06/2011 **Höhere Lehranstalt für Maschineningenieurwesen am Linzer Technikum (HTL Paul-Hahn-Straße)**

Ausrichtungsschwerpunkt Maschinen- und Anlagentechnik

09/1998 – 06/2006 **Volks- und Hauptschule Mauthausen**

Kenntnisse und Qualifikationen

Ehrenamt	Zugskommandant bei der Freiwilligen Feuerwehr Mauthausen, zahlreiche Aus- und Weiterbildungen darunter Führungslehrgänge und Seminare
Führerscheine	Klasse AM, B, C1, C, BE, C1E, CE, F, Kranschein >30 mt, nationales und internationales Schiffsführerpatent 10 m

Lebenslauf

Berufserfahrung

Seit 09/2020 **Professor am Linzer Technikum - HTL Paul-Hahn-Straße**

Unterrichtsgegenstand: Fördertechnik und technische Logistik, Ausbildungszweig Maschinenbau und Anlagentechnik

Seit 01/2020 **Lektor an der FH Technikum Wien**

Betreuung und Bewertung von studentischen Abschlussarbeiten

Seit 07/2017 **Universitätsassistent an der Technischen Universität Wien**

Institut für Konstruktionswissenschaften & Produktentwicklung, Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

Forschungsschwerpunkte: Fördertechnik, mechanische Problemstellungen, Technisches Zeichnen/CAD, Schüttguttechnik, Diskrete-Elemente-Methode

2016 – 2017 **Tutor für Technisches Zeichnen an der TU Wien**

Korrektur und Bewertung von technischen Zeichnungen

2011 – 2015 **Technischer Angestellter bei BMW Motoren GmbH in Steyr**

Bereich: Dieselmotorenentwicklung

2011 **Technischer Angestellter bei Tenova Re Energy GmbH in Düsseldorf**

Wärmerückgewinnungsanlagen für Industrieöfen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.