
Untersuchungen zur Staubentwicklung bei der maschinellen Rückholung tiefengelagerter Abfallgebinde

zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktor-Ingenieurin

von der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Nadine Gabor, M.Sc.

aus Böblingen

Tag der mündlichen Prüfung: 07.11.2019

Referent: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

Korreferent: Prof. Dr. Andreas Pautz

Karlsruhe 2019

Kurzfassung

Weltweit werden radioaktive Abfälle in der Tiefe endgelagert. Diese Tiefenlager waren in der Vergangenheit nicht auf eine Rückholbarkeit der Abfälle, sondern auf eine Endlagerung dieser ausgelegt. Sollen die radioaktiven Abfälle zu einem späteren Zeitpunkt trotzdem wieder rückgeholt werden (müssen), stellt das Versatzmaterial, welches zur Stabilisierung des Grubengebäudes in die nach der Einlagerung verbleibenden Hohlräume eingebracht wurde, ein beachtenswertes Problem dar. Da weltweit bislang noch keine Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem Tiefenlager durchgeführt wurde, kann nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Vorversuche am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) konnten bereits einige Probleme aufdecken, welche bei der Bearbeitung von Salzbeton als Versatzmaterial auftreten. Beispielsweise behindert die bei der Bearbeitung dieses Versatzmaterials auftretende Staubentwicklung die Arbeiten nicht nur im Hinblick auf die Fernhantierbarkeit. Auch besteht im höchstwahrscheinlich kontaminierten Bereich unter Tage die große Gefahr einer Kontaminationsverschleppung, sollte dieser Staub nicht direkt am Entstehungsort aufgefangen werden.

Vor dem Hintergrund der Rückholbarkeit von Abfallbinden aus einem Tiefenlager wird in der vorliegenden Arbeit zunächst das Vorgehen zur Auswahl der hierfür geeigneten Maschinenteknik analysiert und diese bewertet. Um Erkenntnisse über die Beeinflussbarkeit der Staubentwicklung bei der Bearbeitung von Salzbeton treffen zu können, werden kleinmaßstäbliche Versuche an nachgebildeten Versatzmaterialien durchgeführt. Aufgrund von verschiedenen Parametereinstellungen der verwendeten Werkzeuge und unterschiedlichen Zusammensetzungen der Probekörper ist eine Aussage über die Staubentwicklung im Hinblick auf die Staubkonzentration in der Luft und die Korngrößenverteilung des abgetragenen Materials möglich. Hieraus wird abschließend eine Empfehlung für die Rezeptur des Versatzmaterials zukünftiger Tiefenlager abgeleitet.

Abstract

To date, radioactive waste is being stored in geological repositories around the globe. The choice of these repositories was dominantly influenced by the concept of final waste storage and not the idea of its recovery. In the case of necessary waste recovery at a later point in time, the stowing material used to stabilize the cavities resulting from the waste storage process will pose significant problems. However, empirical data is not available because radioactive waste recovery has not been undertaken anywhere in the world yet. Preliminary tests with salt concrete at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) have already revealed some of the problems the material poses when used as stowing material. For example, the dust formation resulting from salt concrete treatment inhibits remote-controlled processes as well as other tasks. It is to be expected that the areas below ground are radioactively contaminated and that the dust, if it cannot directly be collected, will disperse contamination.

This work analyses the selection process for suitable machine technology and evaluates the findings with respect to the feasibility of retrieving waste drums from geological repositories. It describes the small-scale tests taken on reproduced stowing material to achieve scientific data and gain practical insight on how to influence dust formation when working with salt concrete. Tests with various parameter settings of the tools and machines used and different test sample compositions allow for a statement on the dust formation with respect to the dust concentration level in the air as well as the grain size distribution of the cut material. Finally, these findings will be summed up in a recommendation for a suitable salt concrete recipe for future application in final repositories.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Danken möchte ich allen, die mich fachlich beim Gelingen dieser Arbeit unterstützt und mir viele hilfreiche Anregungen mit auf den Weg gegeben haben: Danke an Herrn Prof. Dr.-Ing. Gentes, Herrn Prof. Dr. Pautz, Herrn Dr.-Ing. Dedegil, Herrn Prof. Dr.-Ing. Haghsheno, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gehbauer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Nestmann, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ruck und Herrn Prof. Dr. Schäfer.

Weiterhin ein großes Dankeschön an alle, die mich immer wieder motiviert haben und mir mit Ideen, Rat und Tat zur Seite standen: Danke an Sascha, Armin, Jürgen, Torsten, Philipp, Basti, Carla und alle Kollegen am TMB.

Und zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir Zeit für diese Arbeit zugestanden hat und durch die mir immer wieder klar wurde, dass es neben dieser Dissertation andere wichtige(re) Dinge im Leben gibt. Danke an meinen Mann Sebastian und meine Kinder Lara, Emmi und Theo.

Karlsruhe, im November 2019

Nadine Gabor

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract.....	iii
Vorwort.....	iv
Inhaltsverzeichnis.....	v
Abkürzungsverzeichnis	vii
Einheiten- und Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung.....	1
2 Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland	2
2.1 Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland	2
2.2 Endlager in der Bundesrepublik Deutschland	5
2.3 Ausblick Europa.....	9
2.4 Fazit: Endlagerung.....	11
3 Tiefengelagerte Abfallgebinde am Beispiel der Schachtanlage Asse II.....	14
3.1 Abfallgebinde	14
3.2 Versatzmaterial	16
3.3 Rückholung.....	17
3.3.1 Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II.....	18
3.3.2 Theoretische Fälle in den ELK	25
3.3.3 Maschinelle Rückholung	26
4 Maschinenteknik für die Rückholung tiefengelagerter Abfallgebinde	30
4.1 Anforderungen.....	30
4.2 Stand der Technik und Optimierungsbedarf	32
5 Untersuchungen zur Fernhantierbarkeit	36
5.1 Eingesetzte Maschinenteknik.....	36
5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse	37
5.3 Auswertung und Ausblick.....	38
6 Experimentelle Untersuchung einer Beeinflussbarkeit der Staubentwicklung	40
6.1 Exkurs: Staub	43
7 Versuchsaufbau	46
7.1 Abgrenzung	46
7.2 Probekörper	47
7.2.1 Theoretische Betrachtung.....	47
7.2.2 Messungen an Trockensalz-Schüttungen	54
7.2.3 Herstellung der Probekörper	56
7.3 Versuchsstand	60
7.4 Schleifversuche	69
7.4.1 Versuchsdurchführung – Schleifen	69

7.4.2	Ergebnisse der Schleifversuche	72
7.5	Fräsversuche	102
7.5.1	Versuchsdurchführung – Fräsen	102
7.5.2	Ergebnisse der Fräsversuche	104
7.6	Auswertung	115
8	Förderung / Materialabtransport des gelösten Materials	122
8.1	Grundlagen der pneumatischen Förderung	122
8.2	Druckverlust in der Rohrleitung	126
8.3	Beispielhafte Berechnung.....	128
8.4	Fazit: pneumatische Förderung.....	131
9	Zusammenfassung	133
	Glossar	135
	Abbildungsverzeichnis.....	137
	Tabellenverzeichnis.....	140
	Literaturverzeichnis.....	142
	Anhang.....	147

Abkürzungsverzeichnis

AS	Auffangschale
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
B	Breite
BB	Brandenburg
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
DBE	Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
DepV	Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung)
DK 0 - IV	Deponieklasse 0 bis IV gemäß DepV
D1, D2	Versuchsdurchläufe
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle
ELK	Einlagerungskammer
ESK	Entsorgungskommission
GesBergV	Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung)
GESTIS-STAUB-EX	Gefahrstoffdatenbank des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, in der wichtige Brenn- und Explosionskenngrößen von über 6.000 Staubproben aus nahezu allen Branchen zusammengestellt sind.
H	Höhe
HAW	High-level radioactive waste (hochradioaktive Abfälle)
HE	Hessen
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie-Organisation)
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale (Internationale Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse der IAEA)
KHG	Kerntechnische Hilfsdienst GmbH
L	Länge

LAW	Low-level radioactive waste (schwachradioaktive Abfälle)
MAW	Intermediate-level radioactive waste (mittelradioaktive Abfälle)
MgCl ₂	Magnesiumchlorid
MV	Mecklenburg-Vorpommern
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NI	Niedersachsen
NRW	Nordrhein-Westfalen
P1, P2, P3	Kurzbezeichnung der Probekörper
RP	Rheinland-Pfalz
S1, S2, S3	Kurzbezeichnung der Schleifscheiben
SH	Schleswig-Holstein
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
SSM	Swedish Radiation Safety Authority
TMB	Institut für Technologie und Management im Baubetrieb des Karlsruher Instituts für Technologie
v1	Vorschubgeschwindigkeit 1: $0,0031 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
v2	Vorschubgeschwindigkeit 2: $0,0081 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
VBA	Verlorene Betonabschirmung
VS	Verfahrensschritt

Einheiten- und Symbolverzeichnis

\bar{x}, \bar{y}		Arithmetische Mittelwerte
v_M	[m/s]	Mindestluftgeschwindigkeit/mittlere Geschwindigkeit im Rohr
v_{Sch}	[m/s]	Schwebegeschwindigkeit des Einzelkorns
μ		Beladung [\dot{m}_s/\dot{m}_L]
μm		Mikrometer
b		Steigung
cm		Zentimeter
c_w		Spezifischer Luftwiderstandsbeiwert
d		Korndurchmesser
dm^3		Kubikdezimeter (= 1 Liter)
ε		Lückengrad
g		Gramm
g		Erdbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)
kg		Kilogramm
l		Liter (= 1 dm^3)
ma	[kg]	Masse eines Körpers
m		Meter
m		Steigung
m^3		Kubikmeter
Mg SM		Megagramm Schwermetall
min		Minute
\dot{m}_L	[kg/s]	Massenstrom des Gases
mm		Millimeter
MPa		$1 \text{ MPa} = 1 \text{ Million Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$
\dot{m}_s	[kg/s]	Massenstrom des Feststoffes
N		Newton
nm		Nanometer
\varnothing		Durchmesser/Durchschnitt
p	[kgm/s]	Impuls eines Körpers
P_{Atm}	[Pa]	Atmosphärendruck

P_T	[Pa]	Druck im Abscheidetank
s		Sekunde
t		Tonne
v	[m/s]	Geschwindigkeit
Δp		Druckverlust
Δp_B		Druckverlust durch die Beschleunigung der Gesamtströmung von Ruhe auf die Endgeschwindigkeit
Δp_H		Druckverlust durch die Hubleistung der Strömung am Feststoff
Δp_R		Reibungsdruckverlust
λ_{ges}		Druckverlustbeiwert gesamt [-]
λ_S		Druckverlustbeiwert des Feststoffes [-]
λ_L		Druckverlustbeiwert der Luft [-]
ρ_L		Dichte der Förderluft
ρ_S		Korndichte
ρ_{Sch}		Schüttdichte

1 Einleitung

Tiefenlager werden genutzt, um Abfälle zu lagern, bei deren oberirdischer oder oberflächennaher Lagerung sowohl der Überwachungs- als auch der Unterhaltsaufwand für lange Zeit sehr hoch wären. Dies trifft beispielsweise für gefährliche konventionelle Abfälle zu, die gemäß Deponieverordnung (DepV) in einer Untertagedeponie der Deponieklasse IV (DK IV) gelagert werden müssen. Hier werden die Abfälle in einem Bergwerk oder in einer Kaverne – getrennt von einer Mineralgewinnung – vollständig im Gestein eingeschlossen endgelagert.

Zu den konventionellen Abfällen, welche Untertage deponiert werden, gehören beispielsweise Rückstände aus Verbrennungsanlagen, Galvanik, Filtration und chemischer Destillation, Filterstäube aus der Metallindustrie oder auch Rückstände von eingedampftem Deponie-Sickerwasser. [1] Kerntechnische Abfälle hingegen entstehen unter anderem durch die Erzeugung von Kernenergie, beziehungsweise durch den Rückbau kerntechnischer Anlagen. Diese Abfälle werden in speziellen endlagergerechten Behältern verpackt und verbleiben als sogenannte Abfallgebinde im Tiefenlager an der ihnen zugeordneten Stelle. Im Falle einer Endlagerung im Salzgestein, werden die Abfallgebinde, sobald eine Kammer ausreichend mit Abfallgebänden gefüllt wurde, mit Versatzmaterial umschlossen. Idealerweise – im Hinblick auf eine Stabilisierung des Grubengebäudes – wird jede Kammer somit vollständig verfüllt. Je nach Versatzmaterial, dessen eventueller Setzungen, Gesteinsbewegungen etc. kann sich diese die Abfallgebinde umgebende Matrix verändern. Gewünscht ist hier eine Verfestigung des Materials, um eine größtmögliche Stützwirkung zu erzielen.

Für den Fall dass der Zugriff auf die Abfallgebinde zu einem späteren Zeitpunkt wieder notwendig wird, erschwert eben diese Kammerverfüllung die Rückholung. Da die Gebinde dann in einer festen Matrix eingeschlossen sind, ist eine Rückholung aufwändig und maschinell sehr anspruchsvoll. Auch da im Hinblick auf den Strahlenschutz eine Fernhantierung notwendig sein kann, wird der beim Lösen der Abfallgebinde aus dem Versatzmaterial entstehende Staub Probleme mit sich bringen.

Da die maschinelle Rückholung tiefengelagerter Abfallgebinde weltweit bislang noch nicht durchgeführt wurde, steht diesbezüglich keine standardisierte und ausführlich erforschte und entwickelte Maschinenteknik zur Verfügung.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an, indem die hierfür notwendigen maschinellen und verfahrenstechnischen Schritte untersucht und bewertet werden, um dann – insbesondere für den Fall der kerntechnischen Endlagerung – Empfehlungen zu geben, mit welchem Material und welchen Rezepturen die notwendige Verfüllung der Kammern im Hinblick auf eine spätere Rückholung erfolgen kann. Der wissenschaftliche Fokus liegt somit zum einen im Bereich Maschinenteknik, zum anderen im Bereich Verfüllmaterial und Bearbeitung dieses Material unter bestimmten definierten Randbedingungen.

2 Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland

Gemäß dem Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) [2] entstehen

„Radioaktive Abfälle [...] bei der Nutzung ionisierender Strahlung in Kernkraftwerken, in der Forschung, der Industrie und in kleinen Mengen in der Medizin.“

Radioaktive Abfälle sind dabei die laut Atomgesetz (AtG) definierten radioaktiven Stoffe, welche nicht weiterverwendet und somit

„entsprechend den Vorschriften des Atomgesetzes geordnet beseitigt – also endgelagert – werden“ [2]

müssen. Der größte Teil am Gesamtvolumen aller anfallenden radioaktiven Abfälle in Deutschland fällt gemäß Deutschem Atomforum e. V. [3] beim Betrieb und Rückbau von Kernkraftwerken an (Tabelle 2-1). Im weiteren Verlauf des Kapitels (Tabelle 2-4) wird eine Übersicht der Massen aufgeführt.

Tabelle 2-1: Herkunft der radioaktiven Abfälle in Deutschland, nach [3]

Anteil am Gesamtvolumen der radioaktiven Abfälle in Deutschland	Abfallart / Herkunft
etwa 10 %	<ul style="list-style-type: none">• Brennelemente aus Kernkraftwerken• Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
etwa 30 %	<ul style="list-style-type: none">• Forschung• konventionelle Industrie• Medizin
etwa 60 %	<ul style="list-style-type: none">• Betrieb und Rückbau von Kernkraftwerken• kerntechnische Industrie

2.1 Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland

Im Herbst 2010 hatte die damalige Bundesregierung im Rahmen ihres Energiekonzeptes die Laufzeiten der Kernkraftwerke in Deutschland verlängert. Kurz darauf, am 06. Juni 2011 beschloss das Bundeskabinett jedoch die sofortige Abschaltung von acht deutschen Kernkraftwerken und den stufenweisen Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022. Am 30. Juni 2011 leitete der Bundestag daraufhin den vollständigen Abschied von der Nutzung der Kernenergie in Deutschland ein, woraufhin auch der Bundesrat am 08. Juli 2011 dem Gesetzespaket zustimmte.

Auslöser für diese Wende in der deutschen Energiepolitik war die Katastrophe in Fukushima/Japan, bei der am 11. März 2011 ein schweres Erdbeben und ein hierdurch ausgelöster Tsunami zu einer Reaktorkatastrophe im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi führten, welche auf der Internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse (INES) die höchste Stufe erreichte.

Betroffen von der sofortigen Abschaltung im Jahr 2011 waren die folgenden acht Kernkraftwerke:

1. Kernkraftwerk Biblis A
2. Kernkraftwerk Biblis B
3. Kernkraftwerk Brunsbüttel
4. Kernkraftwerk Isar 1
5. Kernkraftwerk Krümmel
6. Kernkraftwerk Neckarwestheim 1
7. Kernkraftwerk Philippsburg 1
8. Kernkraftwerk Unterweser.

Stand Januar 2018 wurden in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt drei Kernkraftwerke stillgelegt, 21 befanden sich in Stilllegung und weitere fünf waren bereits endgültig abgeschaltet, erhielten aber bislang noch keine Stilllegungsgenehmigung (Anhang 1).

Darüber hinaus befinden sich Stand Januar 2018 noch sieben Kernkraftwerke in Betrieb (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: In Betrieb befindliche Kernkraftwerke in Deutschland, nach [4]

Nr.	Name	Kurzbezeichnung	Leistung MW _e (brutto)	Im Leistungsbetrieb seit	Standort
1	Grohnde	KWG	1.430	1985	Grohnde (NI)
2	Gundremmingen C	KRB-II-C	1.344	1985	Gundremmingen (BY)
3	Philippsburg 2	KKP 2	1.468	1985	Philippsburg (BW)
4	Brokdorf	KBR	1.480	1986	Brokdorf (SH)
5	Isar 2	KKI 2	1.485	1988	Essenbach (BY)
6	Emsland	KKE	1.406	1988	Lingen (NI)
7	Neckarwestheim 2	GKN 2	1.400	1989	Neckarwestheim (BW)

Der Großteil der Masse eines Kernkraftwerks kann beim Rückbau konventionell entsorgt, also dem konventionellen Stoffkreislauf zugeführt werden, so dass ca. 3 % der Gesamtmasse des Kontrollbereichs als radioaktiver Abfall endgelagert werden müssen. [5]

Diese radioaktiven Abfälle können beispielsweise anhand der jeweiligen Dosisleistung unterschieden werden in

- schwachradioaktive Abfälle (LAW – low-level radioactive waste),
- mittelradioaktive Abfälle (MAW – intermediate-level radioactive waste) und
- hochradioaktive Abfälle (HAW – high-level radioactive waste).

In Deutschland ist jedoch, unabhängig von der Dosisleistung, für alle radioaktiven Abfälle eine Endlagerung in Tiefenlagern vorgesehen. [6] Hier spielt die entstehende Wärme eine maßgebende Rolle, weshalb in Deutschland unterschieden wird in

- wärmeentwickelnde Abfälle und
- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung,

wobei eine Entsprechung gemäß nachfolgender Tabelle 2-3 vorliegt.

Tabelle 2-3: Entsprechung der Abfallarten, nach [6]

	entspricht
wärmeentwickelnde Abfälle	hochradioaktive Abfälle (HAW) Teil der mittelradioaktiven Abfälle (MAW)
Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung	schwachradioaktive Abfälle (LAW) größter Teil der mittelradioaktiven Abfälle (MAW)

Das damalige Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (zwischenzeitlich Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) veröffentlichte im Rahmen des Nationalen Entsorgungsprogramms [7] eine Prognose der endzulagernden radioaktiven Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Hierin wird unterschieden in ‚Be-strahlte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung‘ und ‚Sonstige radioaktive Ab-fälle (Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung)‘. Die prognostizierten Mengen [7] sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst.

Tabelle 2-4: Abfallart und prognostizierte endzulagernde Menge, nach [7]

Abfallart	Prognostizierte Menge
Bestrahlte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (aus Leistungsreaktoren)	10.500 Mg SM ¹
Bestrahlte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (aus Nicht-Leistungsreaktoren)	10 bis 12 Mg SM
Sonstige radioaktive Abfälle (Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung)	300.000 m ³

2.2 Endlager in der Bundesrepublik Deutschland

Wie bereits erwähnt (Kapitel 2.1) sollen in Deutschland alle radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Schichten endgelagert werden:

„Als geeignete Lösung für die Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle wird in Deutschland die Einlagerung in tiefe Bergwerke und deren nachfolgender dauerhafter Verschluss angesehen.“ [2]

Dabei soll ein Endlager dazu dienen, radioaktive Abfälle sicher, zeitlich unbeschränkt und wartungsfrei aufzubewahren.

Als Sicherheitsanforderung legt § 26 Abs. 2 Satz 1 des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz) unter anderem fest, dass

„die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen [...] in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder [...] bei wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhenden Endlagerkonzepten innerhalb dieser Barrieren mit dem Ziel zu konzentrieren und einzuschließen [sind], diese Stoffe von der Biosphäre fernzuhalten. [...]“

Dabei ist das sogenannte Wirtsgestein – wie die geologische Gesteinumgebung genannt wird, in der radioaktive Abfälle unterirdisch endgelagert werden – Bestandteil eines Barrierensystems, zu welchem auch die Abfallbehälter und weitere Materialien gehören, welche

„den Einschluss der Radionuklide im Endlager sowie die Isolation der radioaktiven Abfälle vom Einfluss von außen wirkender chemische und physikalischer Prozesse“ [8]

zur Aufgabe haben.

Das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit führt als geeignete Wirtsgesteine für die Endlagerung Granit/Kristallingestein, Salzstein und Tongestein auf. [9] Einige Eigenschaften

¹ „Megagramm Schwermetall (Mg SM) ist die Einheit der Schwermetallmasse und damit ein Maß für den Brennstoffgehalt (Uran und Plutonium) eines Brennelements.“ [65]

dieser Gesteine und die damit verbundenen aktuell denkbaren Barrierensysteme werden im Folgenden auszugsweise aufgeführt.

Positiv an **Salzstein** ist beispielsweise, dass es eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Hitzebeständigkeit aufweist. Eine negative Eigenschaft hingegen ist die Wasserlöslichkeit. [10] Als eine der wesentlichen Barrieren (Abbildung 2-1) des für im Salzgestein vorstellbaren Endlagers, führt die Entsorgungskommission [8] auch einen kompaktierenden Streckenversatz auf. Dieser

„Salzgrusversatz der Einlagerungshohlräume, [dient] der Hohlraumverfüllung [...] und [weist] nach seiner Kompaktion nahezu die Einschlusseigenschaften des Steinsalzes auf [...], [womit er] einerseits den vollständigen Einschluss der Abfallbehälter und andererseits eine hydraulische Abschirmung gegen externe Lösungen bewirkt.“ [8]

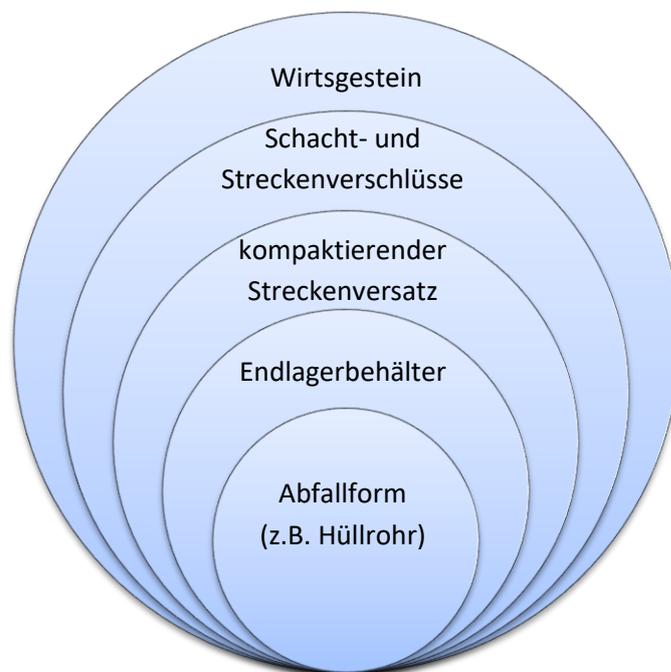


Abbildung 2-1: Wesentliche Barrieren im Salzgestein, nach [8]

Positiv am **Tongestein** ist unter anderem die geringe Durchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen. Negativ zu erwähnen ist beispielsweise, dass es im Vergleich zu Salz sensibler auf Temperaturen über 100°C reagiert. [10] Als eine der wesentlichen Barrieren (Abbildung 2-2) des für im Tongestein vorstellbaren Endlagers, führt die Entsorgungskommission [8] auch eine Bentonitverfüllung auf, welche

„die Hohlräume in den Einlagerungsstrecken ausfüllen, nach einer Aufsättigungszeit für den vollständigen Einschluss der Endlagerbehälter und für eine hydraulische Trennung zwischen den Behältern sorgen, die Wasserzufuhr zu diesen und damit deren Korrosion minimieren, für eine minimale Korrosion des Endlagerbehälters günstige geochemische Verhältnisse schaffen, nach Aufsättigung in Abhängigkeit der eintretenden Verformung einen Quelldruck auf den Gebirgsstoß ausüben und langfristig aus undichten Endlagerbehältern migrierende Radionuklide zurückhalten soll.“ [8]

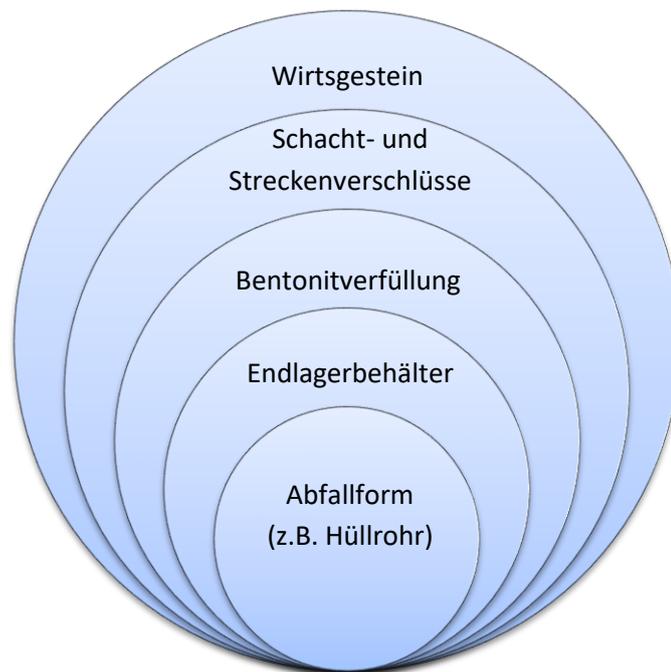


Abbildung 2-2: Wesentliche Barrieren im Tongestein, nach [8]

Hingegen sind beim **Granit** die hohe Hitzebeständigkeit und große Festigkeit als positive Eigenschaften hervorzuheben. Allerdings wirkt sich das Klüftungsverhalten des Granits negativ aus. [10] Als eine der wesentlichen Barrieren (Abbildung 2-3) des für im Granitgestein vorstellbaren Endlagers, führt die Entsorgungskommission [8] auch einen Bentonitmantel auf, welcher

„Hohlräume in den Einlagerungsbohrlöchern ausfüllen, zum sicheren Einschluss der Abfallgebäude beitragen, den Zutritt von Wasser minimieren, günstige hydrogeochemische Verhältnisse für eine möglichst langsame Korrosion der Endlagerbehälter schaffen, mikrobielles Wachstum behindern und langfristig Radionuklide bei beginnender Undichte der Endlagerbehälter zurückhalten soll.“ [8]

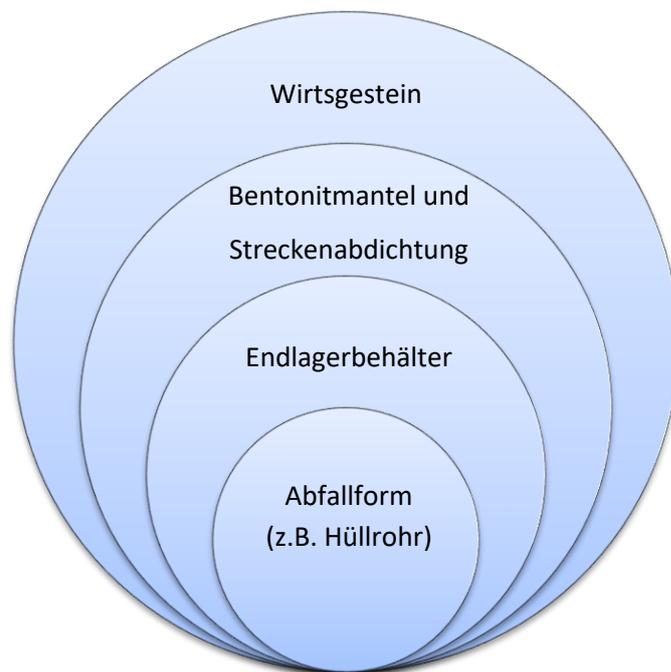


Abbildung 2-3: Wesentliche Barrieren im Kristallingestein, nach [8]

Aktuell ist Schacht Konrad in Niedersachsen das einzige nach Atomrecht genehmigte Endlager in Deutschland [11]. Hier werden aktuell Umrüstmaßnahmen für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vorgenommen, wodurch zukünftig

„laut Genehmigung bis zu 303.000 Kubikmeter radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“ [11]

eingelagert werden sollen.

Weiterhin spielen in Deutschland im Hinblick auf die Endlagerung von radioaktiven Abfällen noch das Endlager Morsleben in Sachsen-Anhalt und die Schachanlage Asse II in Niedersachsen eine Rolle. In diesen Anlagen wurden bereits zwischen 1965 und 1998 radioaktive Abfälle eingelagert – Ziel ist es nun jedoch, beide Anlagen stillzulegen [11].

In Gorleben in Niedersachsen, wo von 1979 bis 2000 geprüft wurde ob sich der Salzstock für ein weiteres Endlager – für hochradioaktive Abfälle – eignet, wurden

„die Erkundungsarbeiten [...] mit In-Kraft-Treten des Standortauswahlgesetzes am 27. Juli 2013 beendet.“ [11]

Unabhängig vom Endlagerort forderte jedoch bereits 2010 das damalige Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [12], dass sowohl

„eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben“

als auch

„in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen [...] eine Rückholung der Abfallbehälter möglich“

sein muss. Diese Forderungen sind seit Mai 2017 im Standortauswahlgesetz (StandAG) gesetzlich verankert: § 26 Abs. 2 Satz 3.

Als häufige Argumente für eine Rückholbarkeit führt die Entsorgungskommission (ESK) auf [13],

„dass technische Maßnahmen für eine spätere Rückholung des Abfalls aus dem Endlager die Sicherheit eines Endlagerkonzepts erhöhen könnten“

und dass

„ggf. zukünftig verfügbare technische Verfahren abzuwarten [seien], um den Abfall besser entsorgen oder als Energiequelle nutzen zu können.“

Diese Vorgabe wird in der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich aufgegriffen und untersucht, um eine mögliche Rückholbarkeit maschinentechnisch und versatzmaterialtechnisch gewährleisten zu können.

2.3 Ausblick Europa

Neben Deutschland gibt es weltweit weitere Nationen, die sich mit der Endlagerung ihrer radioaktiven Abfälle beschäftigen. Der Blick auf Europa zeigt, dass hier – ebenso wie in der Bundesrepublik Deutschland – die Lagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Schichten aus wissenschaftlicher Sicht als die beste Option für eine sichere Endlagerung angesehen wird.

So verfolgt die zuständige Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) der **Schweiz** sowohl für schwach- und mittelradioaktive Abfälle als auch für hochradioaktive Abfälle das Konzept eines Tiefenlagers im Tongestein [14]. Auch in der Schweiz wurde das Thema der Rückholbarkeit tiefengelagerter Abfallgebinde bereits im Jahr 2000 durch die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) zur Sprache gebracht [15]:

„Daher scheint es vorteilhaft, wenn spätere Generationen über längere Zeiträume die Möglichkeit besitzen, eingelagerte radioaktive Abfälle anders zu behandeln, neu zu lagern oder [...] auch wieder zu nutzen.“

In **Finnland** bestehen bereits seit Mitte der 1990er Jahre zwei Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, welche sich in etwa 100 Metern Tiefe in einem kristallinen Gesteinskörper befinden. Das Endlager für hochradioaktive Abfälle, welches 2020 seinen Betrieb aufnehmen soll [16], befindet sich ca. 420 Meter in der Tiefe. Hier hatte das finnische Parlament bereits vor Baubeginn im Jahr 2004 eingeschränkt, dass die Abfälle

„unter der Voraussetzung der Möglichkeit der späteren Öffnung zwecks Rückholung.“
[14]

eingelagert werden können.

Die für die Endlagerung zuständige Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) in **Schweden** und die zuständige Genehmigungsbehörde Swedish Radiation Safety Authority (SSM) entschieden sich nach entsprechenden Untersuchungen für einen Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle in etwa 500 Meter tiefem Granit. Aktuell ist der Verschluss dieses Endlagers für das Jahr 2080 geplant. Kurzlebige radioaktive Abfälle werden in Schweden bislang lediglich in einer Tiefe von etwa 50 Metern gelagert. [14]

Die Rückholbarkeit der Abfallbehälter wird im entsprechenden Regelwerk nicht erwähnt, lediglich, ohne eine Beschreibung der Vorgehensweise oder der einsetzbaren Maschinenteknik, dass

„die Rückholung eines Abfallbehälters prinzipiell [...] technisch möglich ist.“ [14]

Auch in **Großbritannien** verfolgt man eine Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle in Tiefenlagern. [14] Lediglich Schottland hat bekannt gegeben,

„dass hochradioaktiver Abfall langfristig oberflächennah und möglichst dicht an den Standorten, wo dieser Abfall entsteht, gelagert werden soll.“

Hierbei soll der jeweilige Betreiber Auskunft über die Überwachung des Lagers und über die Möglichkeit einer Rückholung der Abfälle geben. [14]

In **Frankreich** gibt es derzeit bereits drei oberflächennahe Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Weiterhin werden aktuell jedoch mehrere Optionen für die Endlagerung, vor allem von hoch- und mittelradioaktiven Abfällen, untersucht: [14]

- *„Machbarkeitsstudie zur Abtrennung und Umwandlung langlebiger Radionuklide im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Kernkraftwerke,*
- *Durchführung von Studien und Festlegung eines Endlagerstandortes mit Rückholoption, so dass die Errichtung des Endlagers im Jahr 2025 beauftragt werden kann,*

- *Schaffung neuer oberirdischer Lagerkapazitäten bis zum Jahr 2015.*“

Eine Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle ist in Frankreich bereits seit 2006 gesetzlich verankert:

„Ein Endlager muss für mindestens 100 Jahre reversibel sein.“ [13]

Somit zeigt auch dieser kleine Exkurs, dass die Thematik der Rückholbarkeit ebenfalls durch die europäischen Nachbarländer umfassend diskutiert wird, es hierzu im Detail bislang jedoch keine wissenschaftlich-technische Betrachtung gibt. Auch dieser Sachverhalt begründet den Ansatz der Arbeit.

2.4 Fazit: Endlagerung

Betrachtet man die Untersuchungen und das Bestreben der europäischen Nationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle, so zeigt sich, dass die Endlagerung in der Tiefe den aktuellen Stand der Technik widerspiegelt. Diese Tiefenlagerung kann auch

„nach Einschätzung vieler deutscher Gremien und Institutionen [...] [die] Anforderungen und Ziele [eines Endlagers] am sichersten erfüllen.“ [13]

Hierfür werden die Abfallgebinde in tiefen geologischen Formationen (beispielsweise in einem ehemaligen Salzbergwerk) eingelagert, die verbleibenden Hohlräume verfüllt (Abbildung 2-4) und die Einlagerungskammern dicht verschlossen. Sowohl Verfüllung als auch Verschluss sind notwendig, da

„für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen [...] eine Mobilisation von Radionukliden nur durch den Zutritt von Grundwasser denkbar“ [13]

ist. Weiterhin spielt die Verfüllung der Einlagerungskammern auch hinsichtlich der Standfestigkeit des Grubengebäudes eine Rolle.



Abbildung 2-4: Einlagerung am Beispiel des Endlagers Morsleben [17]

Die Forderung nach Rückholbarkeit der eingelagerten Abfallgebinde, welche wie bereits dargelegt nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland thematisiert wird, bringt daher mit sich, dass eben dieses, die Gebinde umgebende, Versatz- und Verschlussmaterial wieder entfernt werden muss, um Zugriff auf die Gebinde zu erhalten. Aufgrund der aktuellen Problematik in der Schachanlage Asse II beschränken sich die folgenden Ausführungen auf das Versatzmaterial Salz.

Nach Auffassung der Schwedischen Genehmigungsbehörde (s. o.) ist

„die Rückholung eines Abfallbehälters prinzipiell [...] technisch möglich“ [13]

jedoch wird eine Beschreibung der Vorgehensweise und der einsetzbaren Maschinenteknik an dieser Stelle vermieden. Auch auf mögliche Probleme wird nicht eingegangen.

Die Eignungsfähigkeit und der Entwicklungsbedarf der vorhandenen Maschinenteknik scheinen bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht untersucht worden zu sein. Aus diesem Grund beauftragte das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) das Institut für Technologie und Management im Baubetrieb am KIT im Februar 2012 mit einer Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachanlage Asse II. Teile der nachfolgenden Arbeit zur Maschinenteknik sind im Rahmen meiner Arbeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin entstanden. Dabei konnte im Rahmen der Untersuchungen festgestellt werden, dass bei jeder Bearbeitungsart Staub auftritt, welcher im Hinblick auf Maschinenteknik, Bedienbarkeit und Kontaminationsverschleppung störend ist. Untersuchungen zur Staubentwicklung bei der Bearbeitung von salzhaltigem Versatzmaterial liegen bislang keine vor.

Im Folgenden werden daher auch Auszüge der im Auftrag des BfS erstellten Studie und die hierbei aufgedeckten Probleme dargestellt. Dies ist Teil der Ausarbeitung zum Stand der Technik. Dabei traten immer wieder die Probleme der Staubentwicklung auf. Mit dem Ziel, diese Probleme genauer zu untersuchen und Lösungswege aufzuzeigen, um die Staubentwicklung zu minimieren, entstand die vorliegende Dissertation.

3 Tiefengelagerte Abfallgebinde am Beispiel der Schachtanlage Asse II

Von 1965 bis 1993 wurde die Schachtanlage Asse II als Forschungsbergwerk betrieben [18]. In diesem ehemaligen Kali- und Steinsalzbergwerk im Landkreis Wolfenbüttel wurden seitdem Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle durchgeführt. Dabei wurden in den Jahren 1967 bis 1978 125.787 Gebinde mit schwachradioaktiven (LAW) und mittelradioaktiven (MAW) Abfällen in den Salzformationen eingelagert [19].

Seit 1988 treten Lösungen aus dem Deckgebirge zu, welche auf den hohen Durchbaungsgrad, die Nähe zum Deckgebirge und die lange offene Standzeit zurückzuführen sind, beziehungsweise auf die damit verbundenen Konvergenzbewegungen [18]. Die gefasste Lösungsmenge beträgt derzeit etwa 13,5 m³ pro Tag. [20]

3.1 Abfallgebinde

In der Schachtanlage Asse II wurden in unterschiedlichen Behältern radioaktive Abfälle eingelagert, wobei flüssige Abfälle zuvor in Feststoffen gebunden sein mussten [21].

Die für die Einlagerung zum Einsatz kommenden Behälterarten [22] werden in der nachfolgenden Tabelle 3-1 aufgeführt.



Abbildung 3-1: Liegend gestapelte VBA-Gebinde [20]

Tabelle 3-1: Behälterarten [22]

	Abmessungen	Maximalgewicht (gefüllt)	Bemerkungen
200-l-Fässer	Ø: min. 56 cm bis max. 62,5 cm H: min. 87 cm bis max. 92,5 cm	1,25 t	Diese haben in Bezug auf die eingelagerten Gebinde mit LAW-Abfällen einen Anteil von etwa 75 %.
400-l-Fässer	Ø: min. 76 cm bis max. 77,5 cm H: min. 110 cm bis max. 113,5 cm	1,25 t	---
VBA	Ø: 85 cm H: 137 cm	5 t	Die Gebinde mit radioaktiven Abfällen hoher Dosisleistung erhielten zur Strahlenabschirmung eine Betonummantelung (Abbildung 3-1), welche als Verlorene Betonabschirmung (VBA) bezeichnet wird, da sie während der kompletten Einlagerungsdauer am Fass verbleibt.
Sonderbehälter	L: 2 m B: 1 m H: 3,5 m	9,8 t	Die Abfälle, welche in keine der bislang aufgeführten Behältertypen gepackt werden konnten, wurden in sogenannten Sonderbehältern verpackt.

Die Gebinde wurden teilweise senkrecht aufeinander gestellt (Abbildung 3-2), liegend aufeinander gestapelt (Abbildung 3-3) oder über eine Salzböschung in die jeweilige Einlagerungskammer abgekippt [23].



Abbildung 3-2: Stehend gestapelte LAW-Gebinde [15]



Abbildung 3-3: Liegend gestapelte LAW-Gebinde [15]

3.2 Versatzmaterial

Sowohl als geotechnische Barriere um die radioaktiven Abfälle langfristig abzudichten, als auch zur Stabilisierung der Schachtanlage wurde teilweise in die zugänglichen Hohlräume und in die Einlagerungskammern als Versatzmaterial feinkörniges Salzgesteinsmaterial (Salzgrus, Natriumchlorid) eingebracht. Hierfür wurden die eingebrachten Salzmengen verkippt, verblasen oder verschleudert [24]. Aufgrund des Porenraumes im Salzgrus wird dieser nach wie vor weiter zusammengedrückt. Somit rutscht das Deckgebirge nach und der oben erwähnte Lösungszutritt kann sich sowohl hinsichtlich Lage als auch Menge jederzeit verändern. Um dieses Risiko zu reduzieren, werden aktuell (Stand 2017) die Firstspalte, welche durch die Setzungen des Salzgruses bislang entstanden sind, und teilweise auch die Zugänge zu den Kammern, mit Sorelbeton – ein Beton aus Magnesiumoxid, Magnesiumchloridlösung und Steinsalz, welcher speziell im Bergbau eingesetzt wird – aufgefüllt (Abbildung 3-4) [25].

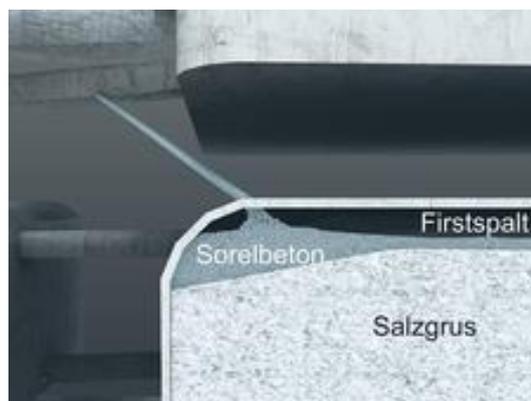


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Firstspaltverfüllung [25]

Der Salzgrus bildet zwischenzeitlich eine feste Matrix. Das Bundesamt für Strahlenschutz geht hierbei von einer Druckfestigkeit von 5 bis 10 MPa aus [26]. Ursächlich für die Verfestigung von Steinsalz-Versatzmaterial können zwei Mechanismen aufgeführt werden [27]:

1. Die Verbindung der einzelnen Salzkörner kann aus der Bildung von Mikrokristallen zwischen eben diesen Salzkörnern resultieren, wobei die Mikrokristalle durch Verdunstung von Wasser aus dem (feuchtem) Salz entstehen.
2. Die Verbindung der einzelnen Salzkörner kann durch Druck von außen, und somit einer Verformung der Salzkörner resultieren.

Im Fall der Schachtanlage Asse spielt sicherlich der zuletzt aufgeführte Mechanismus die größere Rolle, da über die Jahre seit der Einlagerung das umgebende Gebirge einen Druck auf das Versatzmaterial ausgeübt hat [25].

3.3 Rückholung

Bedingt durch die Last des Deckgebirges auf das Grubengebäude und der damit verbundenen Verformungen, ist die Standsicherheit der Schachtanlage bedroht. Darüber hinaus stellt der Lösungszutritt und die damit einhergehende Gefahr der Kontamination der Biosphäre eine weitere Bedrohung dar [18].

Nach einem Vergleich der Optionen [28]

1. Rückholung der radioaktiven Abfälle,
2. Vollverfüllung der Schachtanlage und
3. Umlagerung der Abfälle in tiefere Schichten der Schachtanlage Asse

teilte das Bundesamt für Strahlenschutz im Jahr 2010 mit, dass

„die Rückholung der Abfälle aus der Schachtanlage Asse II [...] nach jetzigem Kenntnisstand die beste Variante beim weiteren Umgang mit den dort eingelagerten radioaktiven Abfällen“

darstellt [29]. 2013 trat mit der Neufassung des § 57b des Atomgesetzes (AtG) das „Gesetz zur Beschleunigung der Rückholung radioaktiver Abfälle und der Stilllegung der Schachtanlage Asse II“ (Lex Asse) in Kraft, welches die Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachtanlage Asse II gesetzlich festschreibt.

Eine Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem Tiefenlager wurde bisher weltweit noch nicht durchgeführt. Dennoch wird zwischenzeitlich gefordert [12], dass

„eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein“

muss. Weiterhin muss hiernach

„in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen [...] eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.“

Dies zeigt, dass sowohl der Fall einer Bergung als auch einer Rückholung von radioaktiven Abfällen aus einem Tiefenlager zwischenzeitlich ins Bewusstsein gerückt sind. Da Geräte und Verfahrenstechniken zu eben dieser Bergung beziehungsweise Rückholung bislang noch nicht wissenschaftlich untersucht wurden, beauftragte das Bundesamt für Strahlenschutz den Fachbereich Rückbau konventioneller und kerntechnischer Anlagen des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb am Karlsruher Institut für Technologie im Jahr 2012 mit der Anfertigung einer „Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften /

Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II“, an welcher die Erstellerin der vorliegenden Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin mitarbeitete.

3.3.1 Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II

3.3.1.1 Marktrecherche

Für die Rückholung der Abfallgebände aus der Schachtanlage Asse II wurde in oben erwähnter Studie [30] die folgende verfahrenstechnische Kette (Abbildung 3-5) entwickelt, welche besagt, dass die maschinentechnische Rückholung in vier Verfahrensschritten (VS) unterteilt werden kann.



Abbildung 3-5: Verfahrenstechnische Kette [27]

Dabei werden die oben aufgeführten Verfahrensschritte (Abbildung 3-5) folgendermaßen beschrieben [30], [31]:

Verfahrensschritt 1 (VS1) - Freilegen und Lösen:

Freilegen und Lösen der Gebinde aus dem umgebenden losen oder verfestigten Versatzmaterial

Verfahrensschritt 2 (VS2) - Greifen, Anheben und Ablegen:

Greifen, Anheben und Ablegen der Gebinde oder Gebindeteile

Verfahrensschritt 3 (VS3) - Verladen:

Verladen der Gebinde oder Gebindeteile in entsprechende Transportbehälter

Verfahrensschritt 4 (VS4) - Transportieren:

Abtransport der radioaktiven Abfälle zu einer Übergabestation

Diese verfahrenstechnische Kette (Abbildung 3-5) wurde speziell für die Freilegung und Rückholung der Gebinde entwickelt. Hierbei müssen aber, im Gegensatz zum konventionellen Bauwesen und Maschineneinsatz, eine Vielzahl an Randbedingungen, Gesetzen und Anforderungen

mitberücksichtigt werden. Hierzu wurden nachfolgend die wichtigsten Anforderungen zusammengetragen, die dann bei der Maschinenauswahl jeweils detailliert betrachtet und bewertet werden müssen.

Diese Ausführungen alleine zeigen, wie umfassend diese maschinentechnische Bewertung sein muss. Anforderungen [31] werden betreffend

- den Antriebskonzepten (Erdgas/Autogas, Diesel, Elektro),
- den Abmessungen (am Einsatzort unter Tage und bezüglich Transport),
- der Wartung, Reparatur und Inspektion,
- der Lieferzeiten, Beschaffung und Ersatzteilbeschaffung,
- dem Einsatz im Salzbergwerk (Korrosion und Staub),
- der Strahlenresistenz,
- dem Bundesberggesetz / der Gesundheitsschutz-Bergverordnung,
- der Strahlenschutzverordnung / dem Atomgesetz,
- der Fernhantierbarkeit,
- der Automatisierung und
- der Einsatzflexibilität

an die Gerätschaften und Werkzeuge gestellt, um anhand derer eine Vorauswahl der am Markt vorhandenen Geräte zu treffen.

Weiterhin muss die Situation der Gebilde detailliert unterschieden werden in Bezug auf den Zustand des Gebildes selbst, auf die Festigkeit des Versatzmaterials und natürlich auch auf den Zustand der Einlagerungskammer insgesamt. Somit sind folgende drei Aspekte [32] zusätzlich zu berücksichtigen bei der Auswahl einer geeigneten Maschinentechnik:

1. Zustand der rückzuholenden Gebilde
2. Zustand des die Gebilde umgebenden Versatzmaterials
3. Zustand der Einlagerungskammern (ELK)

Obwohl der Zustand sowohl innerhalb der ELK als auch der Zustand der ELK selbst zum Zeitpunkt dieser Arbeit weitgehend unbekannt sind, wurden aus wissenschaftlichen Gründen Überlegungen im Hinblick auf eine Rückholung der Abfallgebilde und somit auch im Hinblick auf zu erwartende Gebildezustände und Einlagerungssituationen (Tabelle 3-2) angestellt, damit so übertragbare Ergebnisse entstehen, die allgemein nutzbar sind.

Tabelle 3-2: Denkbare Gebändezustände und Einlagerungssituationen [31]

Gebändezustand	Einlagerungssituation
Gebäude unbeschädigt	Gebäude liegt frei
Gebäude leicht beschädigt	Gebäude liegt locker im Salzgrus
Gebäude mittelmäßig bis stark beschädigt	Gebäude liegt fest eingeschlossen im Salzgrus
Gebäudestruktur zerstört	

Die Kombination aus den einzelnen Verfahrensschritten (Abbildung 3-5), denkbaren Zuständen der Gebäude in den Einlagerungskammern und der möglichen Einlagerungssituationen der Gebäude (Tabelle 3-2) ergibt eine Aktionsmatrix (Tabelle 3-3), welche

„als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Gerätschaften und Werkzeuge dient.“ [31]

Tabelle 3-3: Aktionsmatrix – Auszug [28]

Aktionsmatrix als Entscheidungsgrundlage							
		Gebäude unbeschädigt			Gebäude leicht beschädigt		
		liegt frei	liegt locker im Salzgrus	liegt eingeschlossen im Salzgrus	liegt frei	liegt locker im Salzgrus	liegt eingeschlossen im Salzgrus
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Lösen	[A]	keine Aktion erforderlich	Freilegen der Gebäude durch Freiziehen, Freigraben bzw. Absaugen	Herauslösen der eingeschlossenen Gebäude mittels Stemmen	keine Aktion erforderlich	Freilegen der Gebäude durch Freiziehen, Freigraben bzw. Absaugen	Herauslösen der eingeschlossenen Gebäude mittels Stemmen
Greifen	[B]	Greifen des Gebäudes mit einem geeigneten Greifsystem (mechanisch, magnetisch, pneumatisch)	Greifen des Gebäudes mit einem geeigneten Greifsystem (mechanisch, magnetisch, pneumatisch)	Greifen des Gebäudes mit einem geeigneten Greifsystem (mechanisch, magnetisch, pneumatisch)	Greifen des Gebäudes mit einem geeigneten Greifsystem (mechanisch, magnetisch, pneumatisch) bzw. Aufnehmen des Gebäudes mit einem Ladegerät (Schaufel, Löffel, etc.)	Greifen des Gebäudes mit einem geeigneten Greifsystem (mechanisch, magnetisch, pneumatisch) bzw. Aufnehmen des Gebäudes mit einem Ladegerät (Schaufel, Löffel, etc.)	Greifen des Gebäudes mit einem geeigneten Greifsystem (mechanisch, magnetisch, pneumatisch) bzw. Aufnehmen des Gebäudes mit einem Ladegerät (Schaufel, Löffel, etc.)

Aus dieser Aktionsmatrix sind – entsprechend der Fallkombinationen aus Verfahrensschritt, Gebäudenzustand und Einlagerungssituation – die Aktionen abzulesen, welche die für die Schachanlage Asse II geeigneten Geräte und Werkzeuge ausführen können müssen.

Die Tabelle liefert somit einen ersten wissenschaftlichen Beitrag um die Maschinentechnik für zukünftige Rückholungen zu definieren. Für jeden Schritt der verfahrenstechnischen Kette und jede denkbare Einlagerungssituation wird die baubetriebliche bzw. maschinentechnische Aktion detailliert beschrieben.

Liegt beispielsweise ein unbeschädigtes Gebinde eingeschlossen im Salzgrus und es soll der Schritt Lösen ausgeführt werden (Fallkombination [A3]), so sind in der Aktionsmatrix die maschinentechnischen Aktionen aufgeführt, die nötig sind, um das Ergebnis zu erzielen. In diesem Fall wäre das „Herauslösen der eingeschlossenen Gebinde mittels Stemmen“.

Im nächsten Schritt werden dann die am Markt verfügbaren Geräte und Maschinen diesen einzelnen Fallkombinationen zugeordnet und kompakt (z. B. Abbildung 3-6) vorgestellt.

Fallkombination: [A2]; [A5] Verfahrensschritt: Lösen Gebindezustand: unbeschädigt, leicht beschädigt Einlag.-situation: liegt locker im Salzgrus	
Aktion	Freilegen der Gebinde durch Freiziehen, Freigraben bzw. Absaugen
Geräte	
Saugbaggereinheit	Bagger mit Sieblöffel / Reißzahn / Rechen
	
Anmerkung: Saugbaggereinheit an Baggerausleger montierbar	Anmerkung: Bagger auch mit Elektroantrieb verfügbar

Abbildung 3-6: Beispielhafte Geräteauswahl für Fallkombination [A2] und [A5], [31]

In Summe wurden somit 48 Fallkombinationen detailliert untersucht und beschrieben. Auf eine vollständige Auflistung wird hier verzichtet, da der wissenschaftliche Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Staubreduktion bei der eigentlichen Rückholung liegt.

Es ist somit eine detaillierte wissenschaftliche Arbeit entstanden, die – aufbauend auf den Randbedingungen – mögliche Fallkombinationen betrachtet, hierzu Lösungen beschreibt und aufzählt, welche Maschinentechnik eingesetzt werden kann. Für die Rückholung ist dies eine sehr wichtige Grundlage, die es so bis zu diesem Zeitpunkt nicht gegeben hat und somit einen wissenschaftlichen Fortschritt darstellt.

Bei den ausführlichen und detaillierten Ausführungen der einzelnen Techniken entstand die Idee, die Werkzeuge der verfahrenstechnischen Kette zu kombinieren und in einer Art Tunnelbohrmaschine entsprechend zu konzipieren.

Diese Idee wurde in der Studie in Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit komplett neu entwickelt und wird nachfolgend kurz als Methode „Schildvortrieb mit Teilflächenabbau“ beschrieben, in der

„der Vortrieb im Schutze eines Schildes“ [33]

durchgeführt wird. In der zugehörigen Machbarkeitsstudie [33] wurde eine horizontal arbeitende Schildmaschine (Abbildung 3-7) konzipiert, welche alle vier Verfahrensschritte fernhandelt abdecken kann: Im vorderen Bereich können die Gebinde mit verschiedenen Werkzeugen freigelegt, gelöst, gegriffen oder angehoben und im hinteren Bereich durch entsprechende Transporttunnel abtransportiert werden [33].

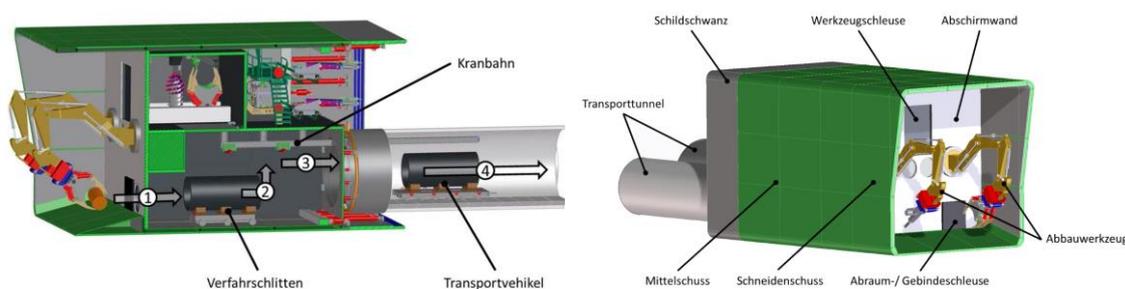


Abbildung 3-7: Schildmaschine mit Teilflächenabbau, Schnitt (links), Frontansicht (rechts) [33]

Besonders vorteilhaft ist bei diesem Vorschlag, dass der hinter dem Schild entstehende Hohlraum direkt verfüllt werden könnte und somit die Problematik des instabilen Grubengebäudes minimiert würde.

Bislang ist die Machbarkeit der Rückholung der Gebinde aus der Schachtanlage Asse II mittels „Schildvortrieb mit Teilflächenabbau“ theoretisch aufgezeigt. [33]

3.3.1.2 Vorversuche

Für eine erste Untersuchung der grundsätzlichen Eignung ausgewählter Gerätetechnik und Werkzeuge wurden im Rahmen der Studie [26] Vorversuche durchgeführt, bei denen die ersten beiden Verfahrensschritte Freilegen und Lösen betrachtet wurden. Hierfür wurde zuerst ein Versatzmaterial nachgebildet, welches die Eigenschaften des Materials in der Schachanlage Asse II möglichst gut abbildete.

Im Rahmen der Studie [26] wird angenommen, dass das Salzgrus in der Asse (Kapitel 3.2) bereits verfestigt ist. Hiernach muss davon ausgegangen werden, dass das verfestigte Salzgrus eine

Druckfestigkeit von 5 - 10 MPa und eine Porosität von 0,15 - 0,23 aufweist [26]. Um dieses Versatzmaterial nachzubilden, wurde feinkörniger Salzgrus gemäß Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5 eingesetzt.

Tabelle 3-4: Zusammensetzung des verwendeten Salzgruses [26]

Natriumchlorid	anhaftende Feuchte		Korngröße		Schüttdichte
ca. 98 %	ca. 0,2 %		0 mm – 5 mm		1,2 g/cm ³
Korngröße und Verteilung in Masseprozent					
< 125 µm	125 µm - 160 µm	160 µm - 800 µm	800 µm - 1,6 mm	1,6 mm - 3,15 mm	3,15 mm - 5 mm
1,6 %	0,6 %	6,4 %	22,9 %	50,7 %	17,8 %

Tabelle 3-5: Sieblinie [mm] und Durchgang [%] des verwendeten Salzgruses [26]

mm	0,18	0,25	0,315	0,4	0,5	1	2	3	5
%	2,3	5,9	9,8	12,9	16,4	35,3	76,8	99	100

In der Schachtanlage Asse II wurde der eingebrachte Salzgrus im Laufe der Zeit durch den Druck des Gebirges verdichtet, wodurch sich Porenraum und somit auch Durchlässigkeit des Versatzmaterials änderten (Kapitel 3.2). Um den verfestigten Salzgrus in der Schachtanlage Asse II nachzubilden wurden Erhärtungsversuche mit unterschiedlichen Wassergehalten, unterschiedlichen Mahlfineinheiten und der Zufuhr von Wärme durchgeführt. Allerdings konnte der Salzgrus hierdurch nicht in ausreichender Menge verfestigt werden, um großmaßstäbliche Versuche durchzuführen. Auch die Möglichkeit, den Druck des Gebirges großmaßstäblich nachzubilden, bestand nicht. Aus diesem Grund wurde dem Salzgrus Zement und Wasser in unterschiedlichen Verhältnissen zugefügt und somit verschiedene „Salzbetone“ hergestellt, bis die Zielwerte hinsichtlich Druckfestigkeit von 5 - 10 MPa und Porosität von 0,15 - 0,23 [26] erreicht wurden, und somit davon ausgegangen werden kann, dass

„die mechanischen Kennwerte des [...] Salzbetons den Zuständen des verfestigten Salzgruses in den Einlagerungskammern der Schachtanlage Asse II entsprechen.“ [26]

Weiterhin wurden mit den in der Schachtanlage Asse II eingelagerten 200-Liter-Gebinden vergleichbare, jedoch neue Fässer vom Typ EB1-A200 des Herstellers Eisenwerk Bassum m. b. H. in einem Versuchscontainer platziert (Abbildung 3-8). Dieser Container wurde daraufhin vollständig mit dem vor Ort hergestellten Salzbeton befüllt (Abbildung 3-9), wodurch die Fässer, welche zuvor mit Sand verfüllt wurden um nicht aufzuschwimmen, vollständig vom nachgebildeten Versatzmaterial umschlossen wurden.



Abbildung 3-8: Versuchscontainer mit aufgelagerten Fässern vor der Betonage [26]



Abbildung 3-9: Versuchscontainer mit aufgelagerten Fässern während der Betonage [26]

Nach Aushärtung des Salzbetons wurden ausgewählte Gerätschaften und Werkzeuge auf ihre grundsätzliche Eignung im Hinblick auf das Freilegen und Lösen der Fässer aus dem Versatzmaterial untersucht. Zum Einsatz kamen hierbei

- ein Hydraulikbagger ZX85US-3 des Herstellers Hitachi Ltd. als Trägergerät,
- ein Baggerlöffel CTL5 des Herstellers Lehnhoff Hartstahl GmbH & Co. KG,
- ein Reißzahn des Herstellers Baumgärtner Stahlbau GmbH,
- eine Hydraulikfräse TF400 des Herstellers Simex s.r.l.,
- ein Hydraulikmeißel MTB 40 des Herstellers Inan Makina Sanayi ve Ticaret A. Ş.,
- ein Spaltgerät C 12 W des Herstellers Darda GmbH und
- ein Nukleargreifer des Herstellers Kinshofer GmbH.

Die Vorversuche ergaben, dass die Bearbeitung des nachgebildeten Versatzmaterials mit den getesteten Gerätschaften und Werkzeugen grundsätzlich möglich war [26]. (Abbildung 3-10) Auch wurde festgestellt, dass sich die Hydraulikfräse

„bedarfsgenau steuern [ließ] und das Freilegen der eingeschlossenen Gebinde [...] gleichermaßen möglich“ [26]

war.



Abbildung 3-10: Versuche am Salzbeton mit Hydraulikfräse (oben links) und Hydraulikmeißel (oben rechts), Nukleargreifer (unten links) und freigelegte Fässer

Jedoch wird im entsprechenden Zwischenbericht [26] auch auf die deutliche Staubentwicklung bei der Bearbeitung des Salzbetons mit einer Fräse hingewiesen. Weitergehende Untersuchungen bezüglich dieser Staubentwicklung waren nicht Bestandteil der genannten Studie [26].

3.3.2 Theoretische Fälle in den ELK

Bezüglich Zustand der rückzuholenden Gebinde und Zustand des die Gebinde umgebenden Versatzmaterials werden die theoretisch auftretenden Fälle als Kombination aus Gebindegewicht, Gebindezustand, Einlagerungssituation, Einlagerungstechnik, Gesamtgewicht inklusive Transportbehälter und Transportstrecke festgelegt (Tabelle 3-6) [30]. Auf den Zustand der ELK an sich wird nicht weiter eingegangen, sondern es wird davon ausgegangen, dass ein Arbeiten in den

einzelnen ELK möglich ist oder durch entsprechende Vorkehrungen ermöglicht wird. Ebenso wenig wird im Folgenden unterschieden nach kontaminiertem und unkontaminiertem Versatzmaterial, da im Praxisfall von einer Kontamination ausgegangen werden muss, bzw. entsprechende Messungen kontinuierlich durchgeführt werden müssen.

Tabelle 3-6: Variablen der theoretisch auftretenden Fälle [30]

Variable	Ausprägung
Gebindegewicht	≤ 1,25 t
	≤ 5 t
	≤ 9,8 t
Gebindezustand	unbeschädigt bis leicht beschädigt
	mittelmäßig bis stark beschädigt
	Struktur zerstört, Gebindeteile liegen in Stücken vor
Einlagerungssituation	Versatzmaterial lose
	Versatzmaterial fest
Einlagerungstechnik	liegend
	stehend
	ungeordnet
Gesamtgewicht (Gebinde & Transportbehälter)	≤ 2 t
	≤ 6 t
	≤ 9,8 t ¹
Transportstrecke	kurze Transportstrecke (50 m)
	lange Transportstrecke (300 m)

3.3.3 Maschinelle Rückholung

Nicht alle Kombinationen der Variablen aus Tabelle 3-6 sind sinnvoll – beispielsweise spielt der Gebindezustand beim Verfahrensschritt Freilegen und Lösen aus festem Versatzmaterial für das eingesetzte Gerät keine Rolle, da sich die Maschinenteknik vorrangig um das Versatzmaterial und nicht um das Gebinde kümmert (Fall 1). Auch spielt der Zustand der Gebinde beim Transport dieser in einem Transportbehälter für die Maschinenteknik keine Rolle (Fall 19 bis Fall 21).

Die für die Maschinenteknik relevanten Fälle in den ELK bei der Rückholung von radioaktiven Abfallgebänden aus der Schachtanlage Asse II ergeben sich nach [30] somit aus den sinnvollen Kombinationen der Variablen (Tabelle 3-6). Sortiert nach den vier Verfahrensschritten ergeben sich hieraus folgende 27 relevante Fälle (Tabelle 3-7 bis Tabelle 3-10).

¹ In [27] wird davon ausgegangen dass die Sonderbehälter aufgrund ihrer Größe und ihres Maximalgewichts ohne Transportbehälter transportiert werden.

Tabelle 3-7: Relevante Fälle für VS1 [30]

Verfahrensschritt	Gebindengewicht	Gebindezustand	Einlagerungssituation	Fall Nr.	
VS1 – Freilegen und Lösen	Keine Unterscheidung erforderlich	unbeschädigt bis leicht beschädigt	Versatzmaterial fest	1	
		mittelmäßig bis stark beschädigt			
		Struktur zerstört, Gebindeteile liegen in Stücken vor			
		unbeschädigt bis leicht beschädigt	Versatzmaterial lose	Gebinde freilegen	2
		mittelmäßig bis stark beschädigt		Gebinde freiziehen	3
Gebinde freilegen	4				

Tabelle 3-8: Relevante Fälle für VS2 [30]

Verfahrensschritt	Gebindengewicht	Gebindezustand	Einlagerungstechnik	Fall Nr.
VS2 – Greifen, Anheben und Ablegen	≤ 1,25 t	unbeschädigt bis leicht beschädigt	stehend	5
			liegend	6
			ungeordnet	7
		mittelmäßig bis stark beschädigt	stehend	8
			liegend	9
			ungeordnet	10
	≤ 5 t	unbeschädigt bis leicht beschädigt	stehend	11
			liegend	12
			ungeordnet	13
		mittelmäßig bis stark beschädigt	stehend	14
			liegend	15
			ungeordnet	16
	≤ 9,8 t	unbeschädigt bis stark beschädigt		17
	Struktur zerstört, Gebindeteile liegen in Stücken vor; kontaminiertes Versatzmaterial mit Gebindeteilen			18

Tabelle 3-9: Relevante Fälle für VS3 [30]

Verfahrensschritt	Gesamtgewicht	Fall Nr.
VS3 – Verladen	≤ 2 t (200 l- und 400 l-Gebinde)	19
	≤ 6 t (VBA-Gebinde)	20
	≤ 9,8 t ² (Sondergebände)	21

Tabelle 3-10: Relevante Fälle für VS4 [30]

Verfahrensschritt	Transportstrecke	Gesamtgewicht	Fall Nr.
VS4 – Transportieren	kurze Transportstrecke (50 m)	≤ 2 t	22
		≤ 6 t	23
		≤ 9,8 t	24
	lange Transportstrecke (300 m)	≤ 2 t	25
		≤ 6 t	26
		≤ 9,8 t ²	27

Die für die Rückholung der Abfallgebände aus der Schachanlage Asse II zum Einsatz kommenden Geräte müssen daher so gewählt werden, dass jeder dieser 27 relevanten Fälle (Tabelle 3-7 bis Tabelle 3-10) bedient werden kann. Darüber hinaus ist es aufgrund der Platzverhältnisse unter Tage sinnvoll, möglichst wenig Maschinenteknik in die Schachanlage einzufahren.

Da die Rückholung von Abfallgebänden aus einem Tiefenlager bisher noch nicht durchgeführt wurde, steht entsprechend auch keine Maschinenteknik zur Verfügung, welche genau für die hierbei anfallenden Aufgaben ausgelegt ist.

Um festzustellen, inwieweit bereits vorhandene Maschinenteknik (Abbildung 3-11) für die Rückholung der Abfallgebände aus der Schachanlage Asse II geeignet ist, wurde ein Anforderungskatalog [30] erstellt. Dieser wird außerdem dem besonderen Fall gerecht, dass für die Schachanlage Asse II sowohl Gesetze und Richtlinien des Bergbaus als auch das Atomrecht gelten.

² In [27] wird davon ausgegangen dass die Sonderbehälter aufgrund ihrer Größe und ihres Maximalgewichts ohne Transportbehälter transportiert werden.

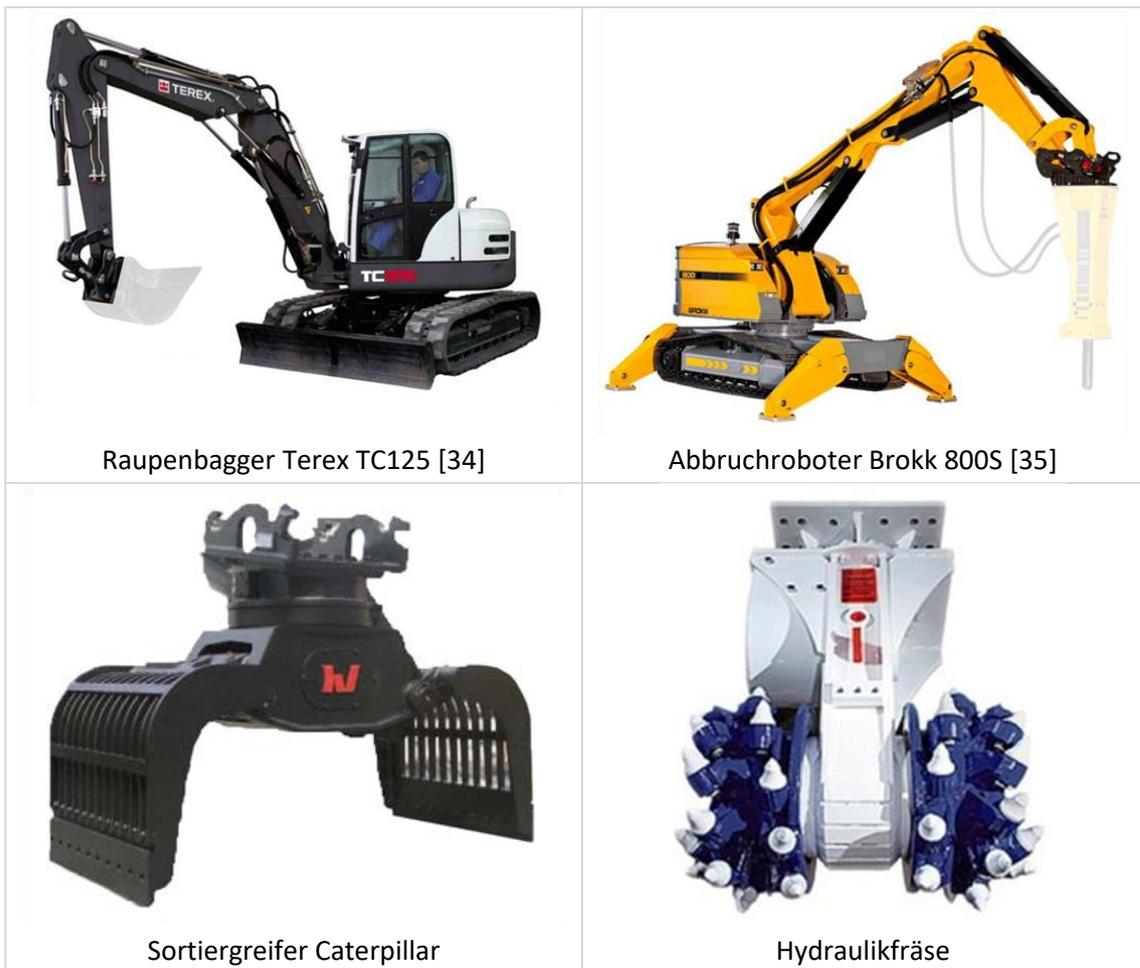


Abbildung 3-11: Auszug aus der betrachteten Maschinenteknik nach [30]

An dieser Stelle kann die Forschungsarbeit insoweit zusammengefasst werden, dass es 27 maßgebende Fälle gibt, die durch die Maschinenteknik abgedeckt werden müssen. Diesen Fällen wurden in der Studie Maschinen zugeordnet, die es am Markt gibt und die geeignet scheinen. Um eine Bewertung vorzunehmen, inwiefern die Maschinen tatsächlich geeignet sind oder ob noch Entwicklungsbedarf besteht, wurden zusätzliche Bewertungskriterien entwickelt, an denen die mögliche Maschinenteknik dann für jeden Einsatzfall gespiegelt und geprüft wurde.

Dies wird nachfolgend in Kapitel 4 nur auszugsweise dargestellt, da meine gesamte Arbeit hierzu an dieser Stelle zu umfangreich wäre. Diesbezüglich wird auf die Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II verwiesen, die ich als wissenschaftliche Mitarbeiterin maßgeblich erstellt habe.

4 Maschinentechnik für die Rückholung tiefengelagerter Abfallgebände

4.1 Anforderungen

Um die Maschinentechnik auf Ihre Eignungsfähigkeit für eine Rückholung zu untersuchen, müssen die entsprechenden, anlagenspezifischen Anforderungen mit den Kenndaten der Technik abgeglichen werden.

In der vorliegenden Arbeit wird dies speziell für die Anforderungen der Schachanlage Asse II gemacht. Die hier geltenden Anforderungen sind natürlich nicht zu 100 % deckungsgleich mit anderen Anlagen, aber die erarbeitete Systematik und wissenschaftliche Ordnung ist übertragbar und erweiterbar.

Das BfS hat bezüglich der Schachanlage Asse II Anforderungen aufgestellt [30], welche dem Fall gerecht werden, dass die Maschinentechnik sowohl bergbauliche Gesetze und Richtlinien als auch das Atomgesetz erfüllen muss. Da nicht alle aufgestellten Anforderungen ohne weiteres bewertbar sind, wurden in einem weiteren Schritt Bewertungskriterien aufgestellt [30], welche die Anforderungen exakter abbilden. Ziel dieses Kriterienkatalogs war es,

„die Eignungsfähigkeit der auf dem Markt vorhandenen Maschinentechnik für den Einsatz in der Schachanlage Asse II“ [30]

bewerten zu können. Diese Bewertungskriterien sind in der nachfolgenden Tabelle 4-1, sortiert nach Beurteilungsfeldern, aufgelistet.

Weiterhin werden in der Studie [36] aus den aufgeführten Kriterien (Tabelle 4-1) technische Anforderungen an die potentiell in der Schachanlage Asse II zum Einsatz kommenden Geräte abgeleitet. Hierbei wird zwischen Trägergeräten und Anbauwerkzeugen unterschieden. Insgesamt werden

- an die Trägergeräte 77 detaillierte technische Anforderungen gestellt und
- an die Anbauwerkzeuge 45 detaillierte technische Anforderungen.

Tabelle 4-1: Beurteilungsfelder und Bewertungskriterien [30]

Beurteilungsfeld	Bewertungskriterium
Strahlenschutz	Staubemission
	Dekontaminierbarkeit
	Fernhantierbarkeit
	Personalaufwand
Antrieb	Schadstoffemission
	Frischwetterbedarf
	Energieversorgung
Betrieb	Arbeitsleistung
	Standzeit
	Wartungsaufwand
	Zerlegbarkeit
	Ersatzteilverfügbarkeit
	Krafteinwirkung
	Funktionelle Arbeitsweise
	Infrastruktur
	Automatisierbarkeit
	Komplexität der Fernhantierung
	Raumbedarf
	Hubkraft/Tragkraft
	Lichtraumprofil
Bewegung/Ortsveränderung	Wirkbereich
	Manövrierfähigkeit
	Mobilität des Trägergerätes
	Beweglichkeit des Auslegers
	Übergabefähigkeit
	Steigfähigkeit
Flexibilität	Werkzeugwechsel
	Verfahrensflexibilität
Ausfall-/Störfallrisiko	Ausfallhäufigkeit/Fehleranfälligkeit
	Widerstandsfähigkeit gegenüber Umgebung
	Korrosionsanfälligkeit
	Staubempfindlichkeit
	Explosionsschutz
Brandlast	

4.2 Stand der Technik und Optimierungsbedarf

Die technischen Anforderungen aus Kapitel 4.1 werden im 5. Zwischenbericht der oben genannten Studie [36] als Soll-Zustand für die – für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II – in Frage kommenden Gerätschaften definiert. Die Geräte weisen somit einen definierten Ist-Zustand auf, so dass mittels Soll-Ist-Vergleich die Entwicklungsbedarfe der am Markt vorhandenen Gerätschaften im Hinblick auf einen Einsatz in der Schachtanlage Asse II ermittelt werden. Die berücksichtigten Geräte stellen

„einen Ausschnitt der am Markt aktuell verfügbaren Geräte“ [36]

dar. Im Einzelnen wurden jeweils Geräte der in Tabelle 4-2 aufgeführten Gerätegruppen diesem Soll-Ist-Vergleich unterzogen.

Tabelle 4-2: Im Rahmen des Soll-Ist-Vergleichs untersuchte Geräte nach [36]

Trägergeräte	Anbauwerkzeuge
Abbruchroboter	Fassgreifer
Fahrerloses Transportsystem	Fasskipplammer
Fahrlader	Gitterlöffel/Gitterschaufel
Kompaktbagger	Hydraulikfräse
Kompaktlader	Hydraulikhammer
Laderaupe	Hydraulikscherer für Stahl und Beton
Minikran	Magnetgreifer
Mobilbagger	Pneumatische Förderanlage
Raupenbagger	Reißzahn
Scaler	Roderechen
Schreitbagger	Sortiergreifer
Schwerlaststapler	Tiefelöffel/Verladeschaufel
Stationäres Fördersystem	Vakuumgreifer
Teilschnittmaschine	Verladegabel
Teleskopbagger	Zweischalengreifer
Teleskoplader	
Tunnelbagger	
Wechselader	

Als Ergebnis des Soll-Ist-Vergleichs wird im Zwischenbericht bezüglich der Identifizierung notwendiger Entwicklungsbedarfe zur Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II [36] erarbeitet, dass die auf dem Markt vorhandenen Trägergeräte bereits viele der technischen Anforderungen erfüllen. Entwicklungsbedarfe bestehen hiernach

1. „in der Überführung bereits auf dem Markt vorhandener Techniken in ein Gesamtsystem“, [36] und
2. in notwendigen Modifizierungen, „die sich aus den Randbedingungen der Fernhantierung und Automatisierung ergeben.“ [36]

Auch die untersuchten Anbauwerkzeuge decken gemäß des 5. Zwischenberichtes zur oben genannten Studie [36] bereits große Bereiche ab und können für verschiedene Randbedingungen eingesetzt werden. Dieser Zwischenbericht [36] führt folgende Entwicklungsbedarfe für die Anbauwerkzeuge auf:

1. zu große Abmessungen einiger Werkzeuge,
2. Bedarf eines Anbauwerkzeuges zur definierten Trennung eines Verbundes zwischen Gebänden, und
3. Modifizierungen zur Verhinderung einer „unkontrollierten Staubbildung.“

Diese drei identifizierten Entwicklungsbedarfe gliedern sich somit in konstruktive Verbesserungen, wie eine verkleinerte Bauweise. Dies ist kein Forschungsbedarf im eigentlichen Sinn, sondern ein Entwicklungs- und Konstruktionsbedarf, der gelöst werden kann.

Die zweite Forderung zielt auf ein neues Anbauwerkzeug, welches die genannten Anforderungen erfüllt. Hierzu wurde mittlerweile ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt „Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetone (DefAhS)“ abgeschlossen, das diesen Anforderungen genügt. In diesem Projekt wurde ein neuartiges Anbauwerkzeug entwickelt, welches hochbewehrte Stahlbetone fernhantiert trennen kann. Das Werkzeug wurde am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelt und ist nachfolgend (Abbildung 4-1) dargestellt.

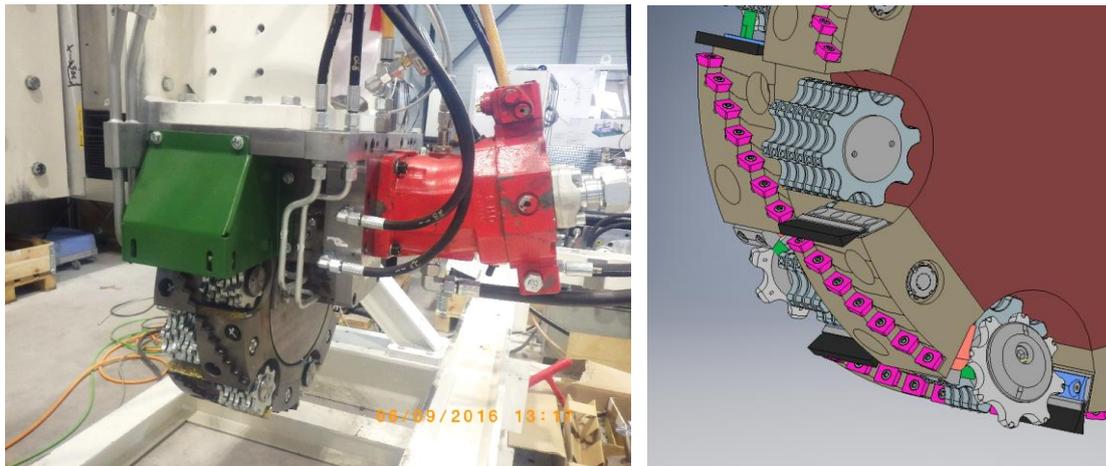


Abbildung 4-1: DefAHS – kombinierte Frästrommel mit Schlaglamellen und Wendeschneidplatten

Somit bleibt noch die dritte Forderung – die Verhinderung einer unkontrollierten Staubbildung. Diese Forderung muss wissenschaftlich untersucht und gelöst werden, worauf im weiteren Verlauf der Arbeit umfassend eingegangen wird. Dabei werden zwei Aspekte untersucht:

- zum einen: wie kann durch die mechanische Arbeit die bei der Bearbeitung eines vorliegenden Salzgruses entstehende Staumentwicklung minimiert werden
- zum anderen: wie sollte ein neues Versatzmaterial hergestellt werden, welches bei mechanischer Bearbeitung wenig Staub produziert.

Diese Fragen bilden den Kern der vorliegenden Arbeit und werden wissenschaftlich untersucht.

Nach Abschluss der Vorversuche und Räumung des Versuchsstandes konnte ein augenscheinlich erhöhtes Korrosionsaufkommen bei den eingesetzten Maschinen und Gerätschaften festgestellt werden. Innerhalb einiger, zur Versuchsdurchführung notwendiger Wochen korrodierten nicht nur die direkt im Versuchsbetrieb befindlichen Objekte schneller als durch vorhergehende Versuchsdurchführungen bekannt, sondern auch die im Umkreis von mehreren Metern gelagerten metallischen Gegenstände, welche sich zwar in derselben Versuchshalle befanden, jedoch an den Versuchen in keiner Weise beteiligt waren. Es ist anzunehmen, dass der Salzgehalt des Staubes, welcher beim Freilegen der einbetonierten Gebinde entstand und sich während der Versuchsdurchführung in der Versuchshalle ausbreitete, die Leitfähigkeit des Wassers in der Luft erhöhte, und somit den Prozess der Korrosion maßgeblich beschleunigte. (Abbildung 4-2)



Abbildung 4-2: Versuchsdurchführung (links und Mitte) und Gebinde nach Abschluss der Versuche (rechts)

Die Versuche im Rahmen der Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II zeigen auf, dass die Staubbildung im Rahmen der Rückholung der Abfallgebände aus der Schachtanlage Asse II ein Problem darstellen wird. Hierfür müssen im Vorfeld Untersuchungen angestellt werden, wie diese Staubbildung minimiert und im besten Fall verhindert werden kann. Derlei Untersuchungen waren nicht Bestandteil der zuvor genannten Studie.

Unabhängig davon, welche Geräte eingesetzt werden, sind diese mit hoher Wahrscheinlichkeit fernzubedienen. Um auch eine fundierte Aussage treffen zu können, wie sich die Leistungswerte dann ändern werden, wurden zusätzlich zur Betrachtung der Staubminimierung in der vorliegenden Arbeit auch Versuche hierzu durchgeführt. Im kommenden Kapitel ist daher dargestellt, wie sich die Leistungswerte bei Einsatz einer Fernbedienung bei großmaßstäblichen Geräten ändern.

5 Untersuchungen zur Fernhantierbarkeit

Im Zusammenhang mit einem jederzeit ausreichenden Abstand des Personals zu Quellen ionisierender Strahlung und dem Schutz des Personals vor radioaktiv kontaminierter Atmosphäre – und somit auch bezüglich der Vermeidung einer Kontaminationsverschleppung – wird bei der Rückholung radioaktiver Abfälle oft von der Relevanz einer Fernhantierbarkeit der Maschinenteknik gesprochen.

Um eine Abschätzung vornehmen zu können, welchen zeitlichen Unterschied eine fernhantierte Bedienung in Bezug auf eine bemannte Bedienung zur Folge hat, wird auf dem Versuchsgelände des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ein Parcours bemannt und fernhantiert durchfahren [37]. Die benötigten Dauern für die einzelnen Arbeitsschritte werden gegenübergestellt.

5.1 Eingesetzte Maschinenteknik

Für die Versuchsdurchführung wird von der Kerntechnischen Hilfsdienst GmbH (KHG) ein Hydraulikbagger Caterpillar 320 CL (Abbildung 5-1) mit einem Gesamtgewicht von 22 t zur Verfügung gestellt, welcher von der KHG sowohl für Erdbewegungs-, Räum- und Bergearbeiten als auch für Dekontaminationen und Demontagen bereitgehalten wird [37]. Der Hydraulikbagger ist mit Hydraulikfräse und Sortiergreifer mit möglicher Funkfernsteuerung ausgestattet und durch ein (ebenfalls fernsteuerbares) Schnellwechselsystem können die einzelnen Werkzeuge bei Bedarf ausgetauscht werden. Dies ist der entwickelten verfahrenstechnischen Kette (Abbildung 3-5) geschuldet, um die Geräte entsprechend einzusetzen.



Abbildung 5-1: Funkgesteuerter Hydraulikbagger Caterpillar 320 CL [37]

Der Steuerstand des Hydraulikbaggers (Abbildung 5-2) befindet sich in der Fahrerkabine des Transportfahrzeugs, von wo aus die Bilder, welche von acht am Bagger angebrachten Kameras übertragen werden, an Monitoren überwacht und die Maschinenteknik entsprechend gesteuert werden kann.



Abbildung 5-2: Steuerstand Hydraulikbagger Caterpillar 320 CL [34]

Da im fernhantierten Betrieb die Erfahrung mit dem Gerät an sich von großer Bedeutung ist, wurde der komplette Versuch von ein- und demselben Mitarbeiter der KHG durchgeführt.

5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Strecke, welche im Rahmen der Versuche zweimal bemannt und dreimal fernhantiert durchfahren wurde, gliedert sich in sechs einzeln erfasste Abschnitte: Fahren, Fräsen, Fahren und Rangieren, Werkzeugwechsel, Fahren und Rangieren und abschließendes Greifen und Ablegen von Fässern [37]. (Abbildung 5-3)

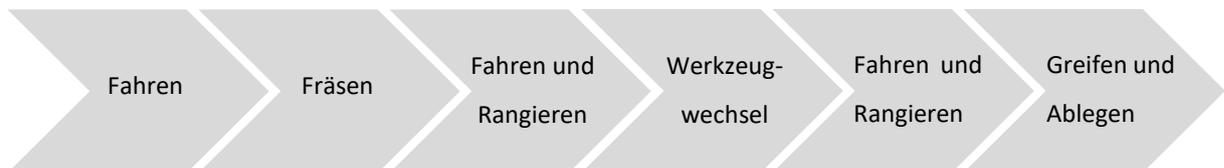


Abbildung 5-3: Abschnitte der Versuchsdurchführung

Die Zeiten für den Schritt „B - Fräsen“ der einzelnen Durchgänge können nicht miteinander verglichen werden. Grund hierfür ist, dass es dem Bediener des Hydraulikbaggers nicht möglich ist, jeweils die gleiche Zustelltiefe im bemannten und unbemannten Betrieb zu gewährleisten [37]. Ermöglichen könnte man dies, indem eine externe (nicht am Bagger montierte) Kamera, bzw.

ein alternatives Überwachungssystem installiert wird, um dem Bediener im Steuerstand das nötige dreidimensionale Sehen zu ermöglichen. Entsprechend werden die Zeiten des Fräsvorgangs aus der weiteren vergleichenden Betrachtung (Tabelle 5-1) ausgeschlossen.

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Mittelwerte aus bemannten und fernhantierten Durchgängen [37]

		erfasste Zeiten [min]		
		Mittelwert bemannt	Mittelwert fernhandiert	Faktor
A	Fahren	00:50,7	02:05,5	2,5
B	Fräsen	Kein Vergleich		
C	Fahren / Rangieren	01:24,0	03:32,5	2,5
D	Werkzeugwechsel	00:50,3	03:52,9	4,6
E	Fahren / Rangieren	00:33,7	01:48,1	3,2
F	Fässer greifen / ablegen	03:03,4	09:44,9	3,8
Summe		06:42,1	21:03,9	3,1

5.3 Auswertung und Ausblick

Im fernhantierten Betrieb nimmt die benötigte Zeit im Schnitt um den Faktor 3,1 zu. Durch die Zeiten in vorhergehender Tabelle 5-1 liegt die Vermutung nahe, dass die benötigte Zeit für einen Arbeitsgang steigt, je mehr Feinfühligkeit eine Tätigkeit erfordert [37]. Der Faktor für reines Fahren mit 2,5 fällt daher deutlich kleiner aus, als der Faktor für den Werkzeugwechsel mit 4,6. Es ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen benötigter Zeit und Genauigkeit für einen Arbeitsgang. Diese Erkenntnis entspricht den allgemeinen Erwartungen.

Die folgenden Problematiken im Zusammenhang mit einer fernhantierten Bedienung können durch die zuvor beschriebenen Versuche abgeleitet werden:

1. Eine für die nötige Präzision der Arbeiten ausreichende Bildgebung benötigt zusätzliche, nicht am Bagger angebrachte, Kameras.
2. Ausfallzeiten können nicht nur durch mechanisches oder menschliches Versagen, sondern auch durch Software-Probleme der Fernsteuerung bedingt sein.
3. Die Staubentwicklung, welche im Rahmen sowohl der bemannten als auch der unbemannten Versuche auftritt, ist im Hinblick auf die nötige Präzision der Arbeiten hinderlich und muss minimiert oder gar verhindert werden.

All diese Ausführungen zeigen, dass – unabhängig von der Art der Rückholung der Gebinde – die Staubentwicklung den zentralen Punkt darstellen wird. Diesen gilt es, durch den Einsatz geeigneter Verfahren und – im Falle eines neuen Endlagers – durch den Einsatz von geeignetem Versatzmaterial, zu vermeiden.

Somit können die Untersuchungen in zwei Richtungen aufgeteilt werden. Einerseits stellt sich die Frage, welche Werkzeuge mit welchen Betriebseinstellungen zum Einsatz kommen können, für den Fall dass bereits ein Versatzmaterial vorliegt. Andererseits stellt sich die Frage, wie ein Versatzmaterial zusammengesetzt werden kann, um bei einer möglichen Rückholung der eingelagerten Abfälle eine möglichst geringe Staubentwicklung zu erzielen.

6 Experimentelle Untersuchung einer Beeinflussbarkeit der Staubentwicklung

Im Rahmen der Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II wurde festgehalten, dass es bereits Gerätschaften gibt, mit welchen tiefengelagerte Abfallgebinde grundsätzlich rückgeholt werden könnten. Auf die über die technischen Problemstellungen hinausgehenden Aufgaben, wie beispielsweise die Genehmigungsplanung, wird im Rahmen des Abschlussberichtes der Studie [38] und der zugehörigen Zwischenberichte nicht eingegangen.

Unter anderem wird jedoch das Problem einer

„unkontrollierten Staubbildung“

im Zwischenbericht, welcher sich mit den notwendigen Entwicklungsbedarfen [36] beschäftigt, genannt. Auf Staub wird bereits im Rahmen der entsprechenden Vorversuche [26] hingewiesen. Hierbei wurden in Praxisversuchen mehrere mit Sand gefüllte 200-l-Fässer in einem Abrollcontainer positioniert und der Container anschließend mit Salzbeton verfüllt. Dieser Salzbeton sollte das Versatzmaterial in der Schachtanlage Asse II möglichst genau im Hinblick auf die erwartete Druckfestigkeit von 5 – 10 MPa und die erwartete Porosität von 0,15 – 0,23 abbilden [26]. Nach Aushärtung des Salzbetons wurden daraufhin

„die ausgewählten Geräte und Werkzeuge auf ihre Eignung hinsichtlich des Freilegens und Lösens von Gebinden untersucht.“ [26]

Unter anderem wurden dabei mittels Hydraulikbagger und Fräse sowohl am Salzbeton als auch an einem Referenzbeton Versuche durchgeführt, bei denen

„eine große Menge an Staub“ [26]

angefallen ist (Abbildung 6-1).



Abbildung 6-1: Staubentwicklung beim Fräsen in Beton (links) und im Salzbeton (rechts) [26]

Für die Fräsversuche war

„eine deutliche Staubentwicklung erkennbar [...], die eine ähnliche Ausprägung zeigte, wie bei der Bearbeitung des Betons.“ [26]

Motiviert durch die oben aufgeführten Feststellungen wurden auf dem Versuchsgelände des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) weitere Fräsversuche in Beton – zunächst ohne Salzgehalt – durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Staubentwicklung durch verschiedene Maschineneinstellungen auffallend stark variiert (Abbildung 6-2).



Abbildung 6-2: Staubentwicklung beim Fräsvorgang

Es stellt sich nun die Frage, ob die Staubentwicklung beim Fräsen durch bestimmte Parametereinstellungen beeinflusst werden kann.

Somit wird die Vermutung angestellt, dass die Staubentwicklung beim Fräsen unter anderem vom Faktor Vorschubgeschwindigkeit der Fräse abhängig ist.

Die **1. Forschungsfrage** lautet somit: Ist die Staubentwicklung abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit?

$$\text{Staubentwicklung} = f(\text{Vorschubgeschwindigkeit}, \dots) \quad (6-1)$$

Diese Vermutung, kombiniert mit den bereits erwähnten Vorversuchen [26], erweitert die Frage dahingehend, ob auch der Salzgehalt im Beton einen Einfluss auf die Staubentwicklung hat.

Somit lautet die **2. Forschungsfrage**: Ist die Staubentwicklung abhängig vom Salzgehalt?

$$\text{Staubentwicklung} = f(\text{Salzgehalt}, \dots) \quad (6-2)$$

Entsprechend soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, ob die Staubentwicklung abhängig ist von Vorschubgeschwindigkeit und Salzgehalt.

Bei der Rückholung tiefengelagerter Abfallgebände spielt (Salz-)Staub eine große Rolle. Dieser Staub hat, insbesondere bei der Rückholung tiefengelagerter Gebände mit radioaktiven Abfällen, auf mehrere Bereiche eine negative Auswirkung, da auch von einer Kontamination des die Abfallgebände umgebenden Versatzmaterials ausgegangen werden muss:

1. Gerätetechnik (Hydraulikleitungen, Gewinde, Filter, Korrosion etc.)
2. Durchführung der ferngesteuerten Arbeiten (Sichteinschränkung und somit Leistungsminderung)
3. Strahlenschutz (Kontaminationsverschleppung)

Für den Fall, dass die Staubentwicklung bei der Bearbeitung von Salzbeton tatsächlich durch die Geräteparameter beeinflussbar ist, könnte die zuvor erwähnte unkontrollierte Staubentwicklung [26] durch eine geeignete Parametereinstellung der Gerätetechnik reduziert werden. In Kombination mit dem eventuellen Einfluss des Salzgehaltes könnte eine Empfehlung für das – im Hinblick auf die Staubentwicklung verbesserte – zukünftig in Tiefenlager einzubringende Versatzmaterial ausgesprochen werden. Beispielsweise werden im Rahmen der Stilllegung des Endlagers Morsleben bereits verschiedene Salzbetone zur Verfüllung der bestehenden Grubenbaue genutzt [39], [40]. (Tabelle 6-1)

Tabelle 6-1: Zwei im Endlager Morsleben zum Einsatz kommende Salzbetone, nach [39], [40]

Betonkomponenten	Salzbeton			
	M2		M3	
	kg/m ³	Massen-%	kg/m ³	Massen-%
Zement	328	16,4	197	9,9
Steinkohlenflugasche	328	16,4	459	23,0
Wasser	267	13,4	252	12,6
Steinsalzzuschlag	1.072	53,8	1.087	54,5
Summe	1.995	100,0	1.995	100,0

Nahe liegt, dass die Versuchsbedingungen aus den im Rahmen der Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachanlage Asse II durchgeführten Vorversuchen [26] übernommen werden, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen. Allerdings wird davon ausgegangen, dass eben diese Vergleichbarkeit in einem großmaßstäblichen Versuchsaufbau nicht gewährleistet werden kann. Aufgrund der Größe des Versuchsaufbaus ist beispielsweise die Luftzirkulation, welche die Ergebnisse im Hinblick auf die Staubkonzentration verfälschen würde, innerhalb des Systems kaum zu unterbinden, da eine Kapselung dieser Anlagengröße (Rollcontainer, Hydraulikbagger, ...) nur äußerst aufwändig realisierbar ist. Darüber hinaus würde sich die Oberfläche des Probekörpers nach jedem Fräsdurchgang ändern, so dass die Ausgangsbedingungen nicht einheitlich wären.

6.1 Exkurs: Staub

Gemäß DIN ISO 4225 [41] ist Staub

„ein allgemeiner Begriff für feste Partikel verschiedener Größe und verschiedenen Ursprungs, die im allgemeinen eine gewisse Zeitdauer in einem Gas suspendiert bleiben.“

Dabei kann Staub sowohl organischen als auch anorganischen Ursprungs sein, und beispielsweise nach der Partikelgröße oder auch nach der Staubart unterschieden werden.

Die Verweildauer eines Partikels in der Atmosphäre ist hauptsächlich von dessen Masse abhängig,

„in guter Annäherung also von [seiner] Größe und weniger von den Aggregatzuständen fest bzw. flüssig oder von der chemischen Zusammensetzung“ [42]

und lässt sich aus folgender Abbildung 6-3 entnehmen.

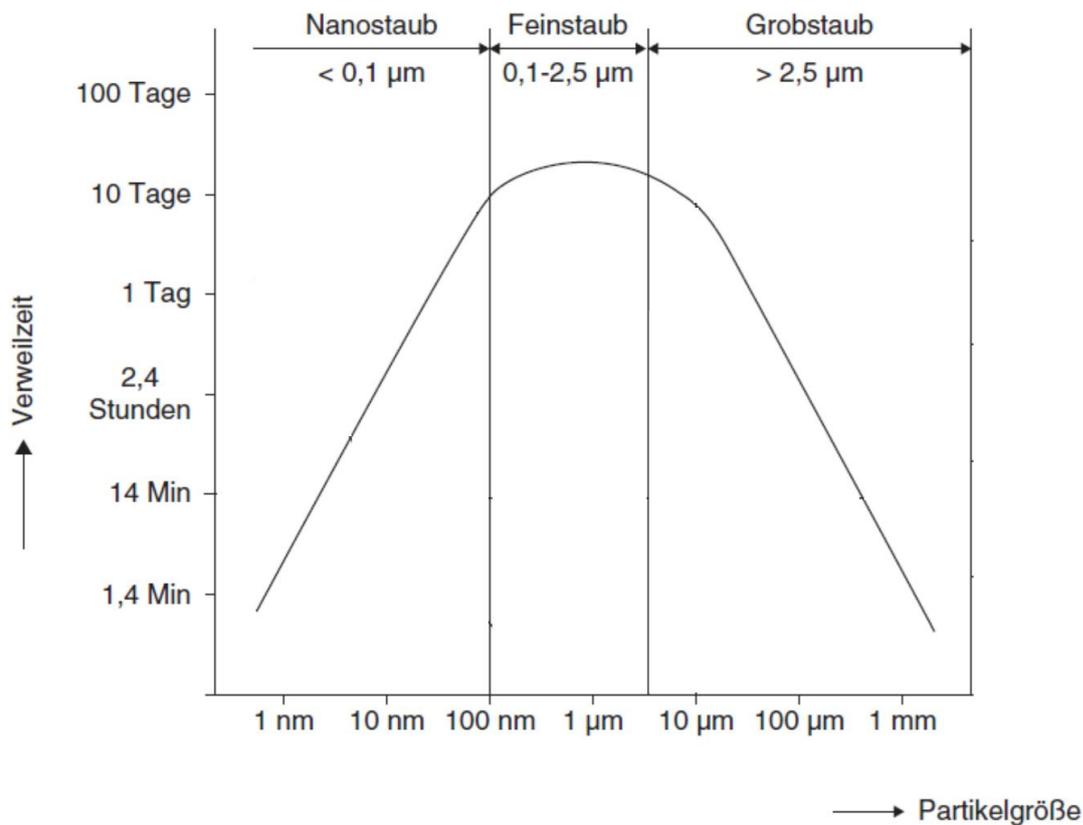


Abbildung 6-3: Verweilzeit von Aerosol in der Atmosphäre, nach [42]

Hieraus (Abbildung 6-3) ist ersichtlich, dass Partikel mit einer Größe von ca. 1 µm etwa 20 Tage in der Luft verweilen. Nach [42] verbliebe dieser Feinstaub

„ohne Regen [...] immer in der Luft.“

Partikel unter 1 µm (Kurve links des Maximums) hingegen haften beim Zusammenstoßen aneinander, so dass die Anzahl der kleinen Partikel ab- und gleichzeitig die Anzahl der großen Partikel zunimmt. Anders bei Partikeln über 1 µm (Kurve rechts des Maximums): diese fallen aufgrund der Schwerkraft mit zunehmender Größe immer schneller zu Boden. [42]

Wünschenswert im Hinblick auf die Rückholung tiefengelagerter Abfallgebinde ist somit, falls die Staubentstehung nicht gänzlich unterbunden werden kann, eine Partikelgröße von deutlich über 1 µm. Für die entsprechenden Untersuchungen sei an dieser Stelle auf die Kapitel 7.4.2.2 und 7.5.2.2 verwiesen.

Im Zusammenhang mit Stäuben taucht in der Fachliteratur auch immer wieder der Begriff Staubexplosion auf. Gemäß der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau) [43] können jedoch lediglich

„brennbare Stäube [...] in aufgewirbeltem Zustand im Gemisch mit Luft explosionsfähige Gemische bilden. Durch eine Zündquelle mit ausreichender Zündenergie kann es zu einer Staubexplosion kommen.“

Weiterhin gibt die BG Bau an:

„Brennbare Stäube sind organische Materialien wie Holz, Mehl, Cellulose und Metallpulver wie Aluminium-, Magnesiumpulver.“

Da weder das in den Tiefenlagern zum Einsatz kommende Salz, noch Zement organischen Ursprungs oder gar Metalle sind, besteht nach heutigem Stand der Wissenschaft keine Gefahr einer Staubexplosion von Salzbeton. Auch in einer Gefahrstoffdatenbank (GESTIS-STAUB-EX) des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) [44] gibt es keinerlei Hinweise auf die Gefahr einer Explosion von Stäuben aus Natriumchlorid oder Zement.

7 Versuchsaufbau

Aus zuvor (Kapitel 5) aufgeführten Gründen werden in der vorliegenden Arbeit keine groß-, sondern kleinmaßstäbliche Versuche durchgeführt. Vorteilhaft ist hierbei die einfach realisierbare Kapselung des Versuchsaufbaus, welche eine Luftzirkulation auf ein Minimum reduziert. Auch die Anfertigung mehrerer vergleichbarer Probekörper ist im kleinen Maßstab von wenigen dm^3 möglich; dies erscheint im großen Maßstab (zweistelliger m^3 -Bereich) nicht sinnvoll.

Da in der Praxis für die Bearbeitung des Versatzmaterials in Tiefenlagern zerspanende Verfahren wie zum Beispiel Fräsen und Schleifen zum Einsatz kommen werden, fällt die Wahl im nachfolgend erläuterten Versuchsaufbau auf einen handelsüblichen Winkelschleifer, welcher ebenfalls den zerspanenden Verfahren zugeordnet ist. Die Vorteile dieser Gerätschaft bestehen darin, dass auf dem Markt diverse Zubehörteile hierfür vorhanden sind. Hierdurch ist es beispielsweise möglich, mit ein- und demselben Gerät einerseits Versuche mit Diamanttopfscheiben (zerspanendes Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide) durchzuführen (Abbildung 7-24 und Abbildung 7-25), und andererseits Fräsversuche mit einem Fugenfräser (zerspanendes Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide) (Abbildung 7-38) im Probekörper durchzuführen.

7.1 Abgrenzung

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen sind durchweg ausgelegt auf die Reduktion einer Staubbildung. Im speziellen Umfeld von tiefengelagerten Abfallgebänden, in welchem sowohl bergbauliche Gesetze als auch das Atomgesetz Anwendung finden (Kapitel 4.1), spielen darüber hinaus viele weitere Faktoren eine Rolle, welche die Rückholung der gelagerten Abfälle und die damit in Zusammenhang stehenden Überlegungen beeinflussen. Die Wahl der zum Einsatz kommenden Werkzeuge kann beispielsweise auch durch

- wirtschaftliche Aspekte,
- bereits vorhandene Gerätschaften und Werkzeuge,
- die Abtragleistung,
- den Raumbedarf und
- den Explosionsschutz

geprägt sein. (Tabelle 4-1) In den nachfolgenden Kapiteln stehen jedoch die Staubbildung und deren Beeinflussbarkeit im Fokus, so dass in dieser Arbeit auf die darüber hinaus zu betrachtenden Aspekte nicht eingegangen wird.

7.2 Probekörper

Das in den Einlagerungskammern der Schachanlage Asse II als Versatzmaterial verwendete Salz wird zwischen der Einlagerung und der Rückholung eine Verfestigung erfahren haben (Kapitel 3.2). Da Erhärtungsversuche im Rahmen der zuvor beschriebenen Vorversuche [26] mit unterschiedlichen Wassergehalten, unterschiedlichen Mahlfineinheiten und der Zufuhr von Wärme nicht die gewünschte Verfestigung des Salzgruses im großen Maßstab herbeiführten, und auch keine Möglichkeit bestand, den Druck des Gebirges großmaßstäblich nachzubilden (Kapitel 3.3.1.2), wird – um die langjährige Verfestigung des Salzgruses in der Schachanlage Asse II in kurzer Zeit simulieren zu können – dem Salz wie in den zuvor bereits beschriebenen Vorversuchen [26] für die Probekörper Zement und Wasser zugemischt. Da das Ziel dieser Arbeit unter anderem der Einfluss des Salzgehaltes im Beton auf die Staumentstehung ist, müssen Probekörper mit verschiedenen Salzgehalten hergestellt werden. In verschiedenen Berichten der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) [39], [40] werden Salzbetonrezepturen angegeben, deren Salzgehalte maximal 54,5 % betragen. (Tabelle 6-1) Da das in der Schachanlage Asse II zum Einsatz gekommene Versatzmaterial zu nahezu 100 % aus Salz besteht, sollten die im Rahmen dieser Arbeit gefertigten Probekörper ebenfalls hohe Salzgehalte aufweisen. Als Referenz soll ein Probekörper ohne Salz, dafür mit Kies und Sand als Zuschlag, Wasser und Zement hergestellt werden. Inwieweit eine Zulassung dieser Salzbetone nach beispielsweise der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung - GesBergV) möglich ist, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

7.2.1 Theoretische Betrachtung

Grundlegend besteht Beton aus der Schüttung eines Zuschlagstoffes, dessen Gesteinskörner mit Zementleim umhüllt, und dessen Hohlräume mit Zementleim als Bindemittel ausgefüllt werden, um, nach Erhärtung des Zementleims, die Partikel des Zuschlagstoffes zu fixieren. Der erhärtete Zementleim wird als Zementstein bezeichnet, dessen Festigkeit maßgebend von der Zementfestigkeit und dem Wasserzementwert abhängig ist. Dieser dimensionslose Wasserzementwert (w/z-Wert) beschreibt das Massenverhältnis von Wasser zu Zement im Zementleim des Frischbetons. Gemäß [45] kann Zement

„eine Wassermenge von rund 40 % seiner Masse ($w/z = 0,40$) binden. Weist ein Zementleim einen höheren Wasserzementwert auf, so bezeichnet man das nicht gebundene Wasser als Überschusswasser. Es hinterlässt verästelte, saugfähige (Kapillar-) Poren.“

Im Folgenden werden dasselbe Salz und derselbe Zement benutzt, wie bereits in den zuvor beschriebenen großmaßstäblichen Versuchen, welche im Rahmen der Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften/Werkzeugen für den Einsatz in der Schachanlage Asse II (Kapitel 3.3.1) durchgeführt wurden.

Dieses Salz weist die folgenden Eigenschaften auf:

Korngröße	0-5 mm [26]
Korndichte ρ_s	2.170 kg/m ³ [46]
Schüttdichte ρ_{Sch}	1.200 kg/m ³ [26]

Weiterhin werden die folgenden Daten für die theoretische Berechnung herangezogen, welche ohne Beachtung des Lufteinschlusses durchgeführt wurde:

Portlandhüttenzement CEM II/B-S 32,5 R	Korndichte ρ_s	3.100 kg/m ³ [47]
	Schüttdichte ρ_{Sch}	1.200 kg/m ³ [47]
	Druckfestigkeit	min. 32,5 N/mm ²

Wasser	Dichte	1.000 kg/m ³
--------	--------	-------------------------

Im Hinblick auf das Ziel, einen möglichst hohen Salzgehalt im Probekörper zu erreichen, muss im Folgenden auf den Lückengrad des für diese Untersuchung zur Verfügung stehenden Salzes eingegangen werden.

Der Lückengrad ε , welcher den Anteil der Hohlräume in der Schüttung (vor Zugabe des Zementleims) beschreibt, ist dabei definiert als 1 minus dem Verhältnis zwischen Schüttdichte ρ_{Sch} und Korndichte ρ_s des jeweiligen (Zuschlag-)Stoffes:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{Sch}}{\rho_s} \quad (7-1)$$

Für das vorhandene Salz ergibt sich damit ein Lückengrad ε von

$$\varepsilon = 1 - \frac{1.200 \text{ kg/m}^3}{2.170 \text{ kg/m}^3} = 1 - 0,55 = 0,45 \quad (7-2)$$

Für den Fall, dass man in ein 1.000 Liter fassendes Gefäß dieses Salz schüttet, würden somit 550 Liter mit Salz ausgefüllt werden und 450 Liter Hohlraum verbleiben (Abbildung 7-1, links).

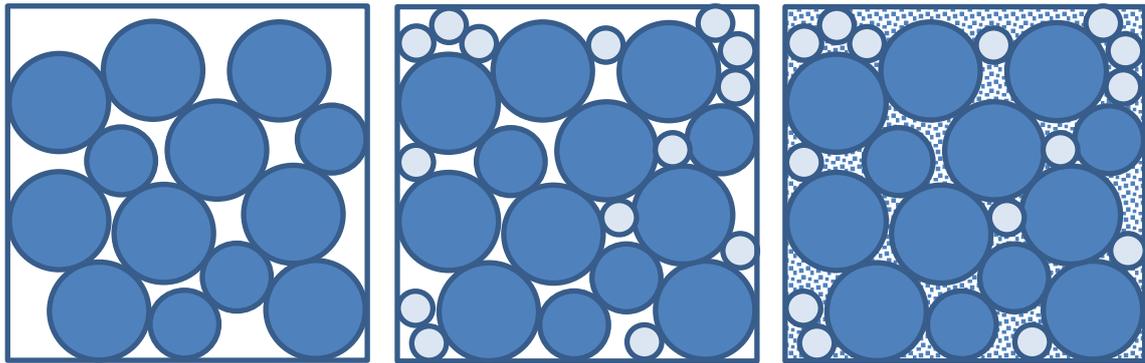


Abbildung 7-1: Beispielhafte Darstellung des Lückengrades
(links: Salz - mittig: Salz und Zement - rechts: Salz, Zement und Wasser)

Diese verbleibenden 450 Liter können nun mit Zement befüllt werden. Da jedoch der Zement einen Lückengrad von

$$\varepsilon = 1 - \frac{1.200 \text{ kg/m}^3}{3.100 \text{ kg/m}^3} = 1 - 0,39 = 0,61 \quad (7-3)$$

aufweist, verbleibt wiederum ein Hohlraum (Abbildung 7-1, mittig) von

$$450 \text{ l} \times 0,61 = 274,5 \text{ l} \quad (7-4)$$

welcher abschließend mit Wasser aufgefüllt wird (Abbildung 7-1, rechts).

Theoretisch, da ohne Beachtung des Lufteinschlusses, ergeben sich somit die folgenden Massen gemäß Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Theoretische Salzbetonrezeptur

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	175,50	3.100,00	544,05
Wasser	274,50	1.000,00	274,50
Gesamt	1.000,00	2.012,05	2.012,05

Der Anteil des Salzes an der Gesamtmasse des Salzbetons beträgt hiernach

$$\frac{1.193,50 \text{ kg}}{2.012,05 \text{ kg}} = 0,59 \quad (7-5)$$

und der w/z-Wert beträgt

$$\frac{274,50 \text{ kg}}{544,05 \text{ kg}} = 0,5 \quad (7-6)$$

Der mit dem vorliegenden Salz theoretisch erreichbare Salzgehalt beträgt somit knapp 60 %.

Eine Möglichkeit, den Salzgehalt im Salzbeton mit dem vorliegenden Salz zu verändern, ist die Variation des w/z-Wertes. Dies bedeutet, dass das Volumen des Salzes konstant bleibt, sich lediglich das Verhältnis von Wasser zu Zement (nicht das Volumen des Zementleims) und dadurch die Massen ändern, folglich ändert sich auch der Anteil des Salzes an der Gesamtmasse. In folgender Tabelle 7-2 und Abbildung 7-2 sind daher der mögliche Salzgehalt wie auch die Rohdichte des Salzbetons in Abhängigkeit des theoretischen w/z-Wertes dargestellt. Für die ausführliche Darstellung sei an dieser Stelle auf Anhang 2 verwiesen.

Tabelle 7-2: Theoretische Daten des Salzbetons als Funktion des w/z-Werts, ohne Lufteinschluss

w/z-Wert [-]	Möglicher Salzgehalt im Salzbeton [Masse-%]	Rohdichte des Salzbetons [kg/m ³]
0,1	50,6	2.357,5
0,2	53,5	2.231,5
0,3	56,0	2.132,8
0,4	57,8	2.063,5
0,5	59,3	2.012,1
0,6	60,5	1.973,2
0,7	61,5	1.941,7
0,8	62,3	1.916,5
0,9	63,0	1.893,4
1,0	63,7	1.874,5

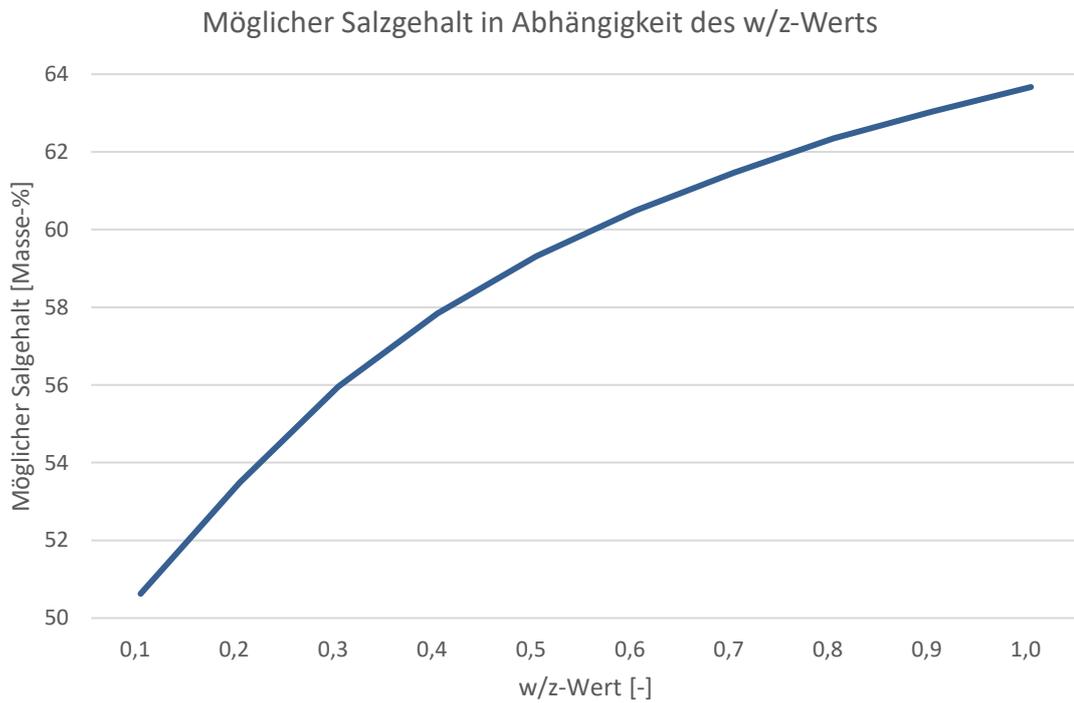


Abbildung 7-2: Möglicher Salzgehalt in Abhängigkeit des w/z-Werts

Aus Tabelle 7-2 und Abbildung 7-2 geht hervor, dass selbst bei einem theoretischen w/z-Wert von 1,0 ein Salzgehalt von lediglich knapp 64 Masse-% erreicht werden kann. Weiterhin nimmt, wie gemäß Abbildung 7-3 zu erwarten, die berechnete Dichte des Salzbetons mit zunehmendem w/z-Wert, und somit auch zunehmendem Salzgehalt ab (Abbildung 7-4).

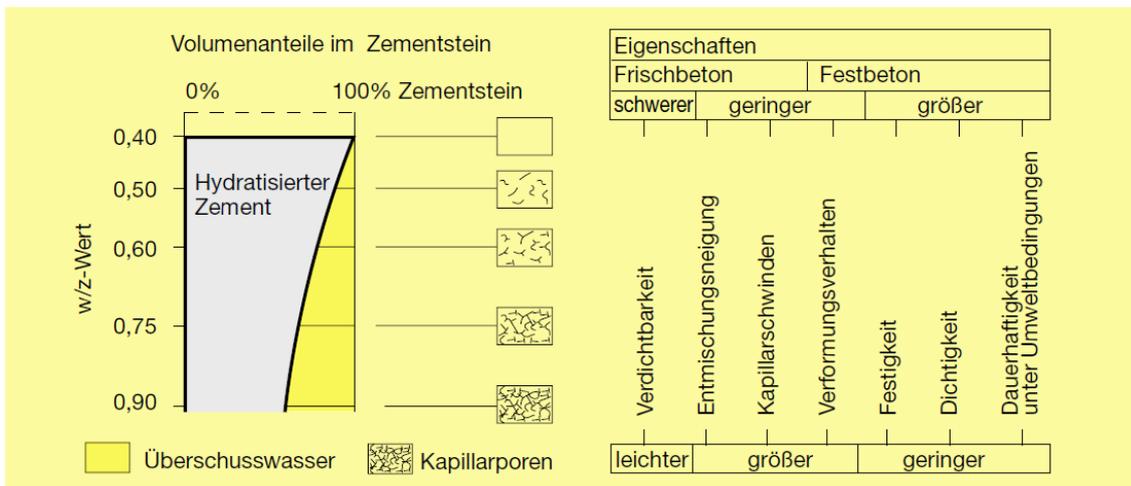


Abbildung 7-3: Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit vom w/z-Wert [45]

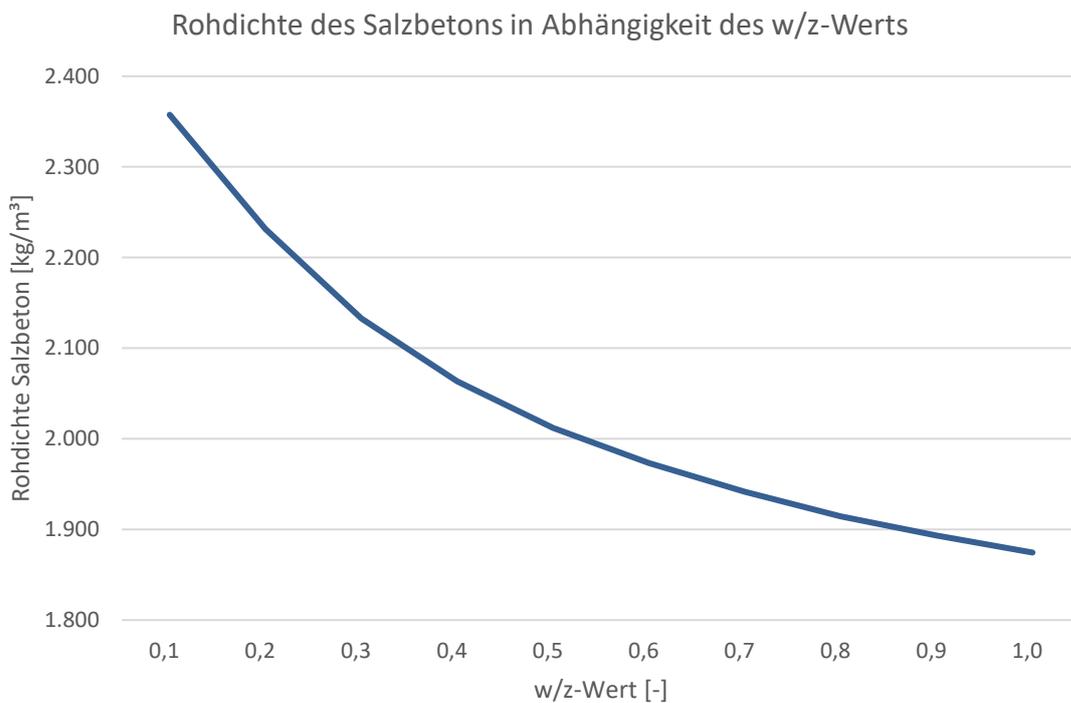


Abbildung 7-4: Rohdichte Salzbeton in Abhängigkeit des w/z-Werts

Da im Hinblick auf die Staubentwicklung bei der Bearbeitung des Salzbetons jedoch auch der Einfluss des Salzgehaltes untersucht werden soll, wird weiterhin angestrebt, Salzgehalte zwischen 70 und 80 Masse-% zu erreichen.

Gemäß H. Brauer „Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen“ [48] hängt die Schüttdichte bei Gleichkorn-Schüttungen, bei denen Form und Größe des Stoffes übereinstimmen, nicht von der Partikelgröße ab, sondern von ihrer Anordnung in der Schüttung. Somit kann eine höhere Schüttdichte beispielsweise durch Rütteln erreicht werden.

Hingegen werden bei Mehrkornschüttungen höhere Schüttdichten erreicht, da die kleineren Partikel die Hohlräume zwischen den großen Partikeln ausfüllen und somit den Lückengrad reduzieren.

Zusammengefasst kann somit festgehalten werden, dass durch gezielte Auswahl von Korngrößen des Zuschlagstoffes der Lückengrad reduziert und somit ein höherer Anteil des Zuschlagstoffes im Beton erreicht werden kann.

Es liegt daher nahe, dass dem bisher betrachteten groben Salzgrus eine zweite Salzfraktion mit einer kleineren Körnung zugemischt werden muss. Somit wird angestrebt, die Hohlräume zwischen den Körnern der ersten groben Salzfraktion anstelle mit Zementlein möglichst mit feinerem Salz zu füllen.

Unter Zugrundelegung der Korndurchmesser der verwendeten groben Salzfraktion ergibt sich die folgende Sieblinie (Abbildung 7-5).

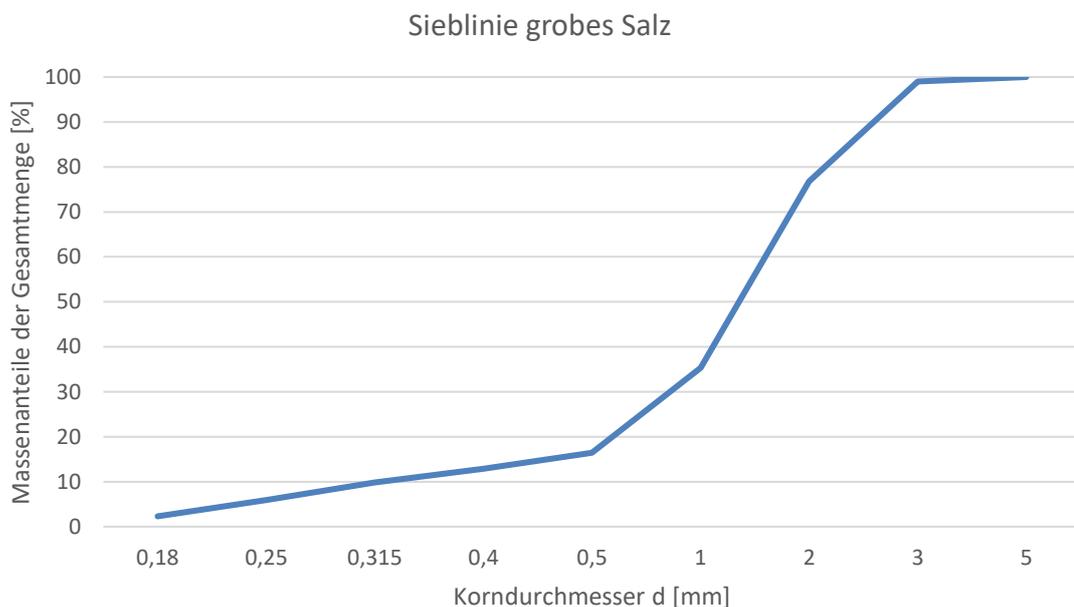


Abbildung 7-5: Sieblinie der groben Salzfraktion gemäß [26]

Ziel ist nun, die Lücken zwischen den Körnern der groben Salzfraktion mit Körnern einer feinen Salzfraktion zu füllen, um somit den Salzgehalt der Betonrezeptur zu erhöhen.

Von der Salzkontor GmbH wurde daraufhin das feinste vorrätige Salz bezogen, welches mit Korngrößen von 0 bis 0,2 mm eine puderähnliche Konsistenz aufweist.

Entsprechend der bereits zuvor beschriebenen Vorgehensweise werden Salzbetonrezepturen erstellt, welche durch die Mischung zweier Kornfraktionen einen höheren Salzgehalt aufweisen als mit lediglich einer Kornfraktion theoretisch möglich (Abbildung 7-6).

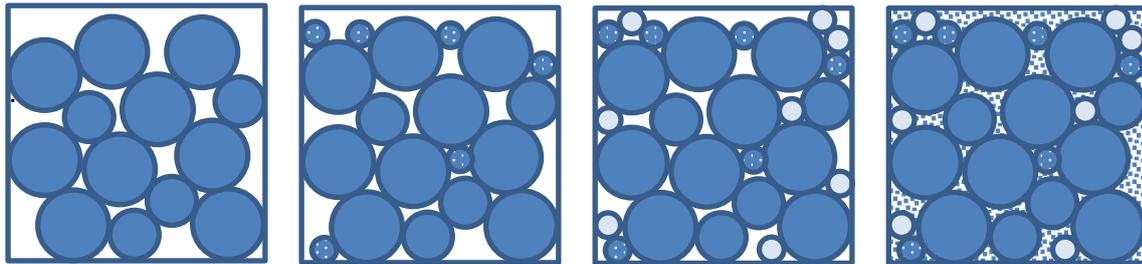


Abbildung 7-6: Beispielhafte Darstellung des Lückengrades (v. l.: Salz grob - Salz grob und fein - Salz und Zement - Salz, Zement und Wasser)

7.2.2 Messungen an Trockensalz-Schüttungen

Vor der erneuten Salzbetonrezepturerstellung mit grobem und feinem Salz, werden die Schüttdichten und die Schüttwinkel (Abbildung 7-7, Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9) der einzelnen Fraktionen und des Gemischs aus beiden untersucht. Hierfür werden für jede Salzfraktion jeweils fünf Formen mit den Abmessungen 200 mm x 200 mm x 200 mm mit Salz gefüllt und anschließend gewogen. Mit einer Korndichte ρ_s von 2.170 kg/m³ [46] können für die Salzfraktionen folgende Ergebnisse festgehalten werden (Tabelle 7-3 und Tabelle 7-4):

Tabelle 7-3: Ergebnisse aus Messungen am Trockensalz, grobe Salzfraktion

Grobe Salzfraktion				
Nr.	Einwaage [kg]	Schüttdichte [kg/m ³]	Abweichung vom Mittelwert [%]	Füllgrad [%]
1	8,60	1.075,00	0,35	49,54
2	8,30	1.037,50	-3,15	47,81
3	8,40	1.050,00	-1,98	48,39
4	9,15	1.143,75	6,77	52,71
5	8,40	1.050,00	-1,98	48,39
Mittelwert:	8,57	1.071,25	-	49,37



Abbildung 7-7: Schüttkegel der groben Salzfraktion, Schüttwinkel $\alpha=41,4^\circ$

Tabelle 7-4: Ergebnisse aus Messungen am Trockensalz, feine Salzfraktion

Feine Salzfraktion				
Nr.	Einwaage [kg]	Schüttdichte [kg/m ³]	Abweichung vom Mittelwert [%]	Füllgrad [%]
1	8,00	1.000,00	0,76	46,08
2	7,95	993,75	0,13	45,79
3	8,10	1.012,50	2,02	46,66
4	7,95	993,75	0,13	45,79
5	7,70	962,50	-3,02	44,35
Mittelwert:	7,94	992,50	-	45,73

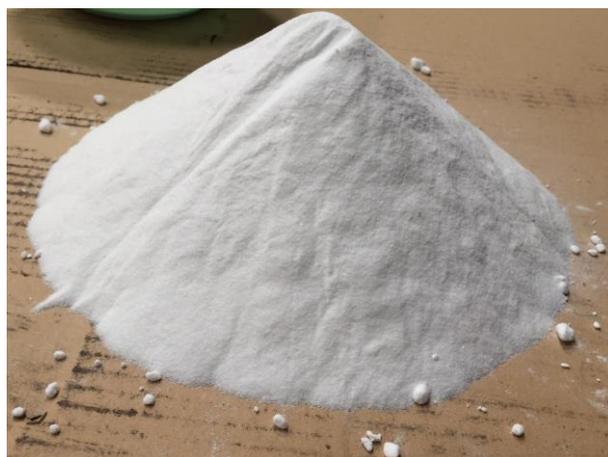


Abbildung 7-8: Schüttkegel der feinen Salzfraktion, Schüttwinkel $\alpha=36,3^\circ$

Parallel hierzu wird probeweise eine Mischung aus Grob- und Feinsalz im Verhältnis von ca. 2:1 hergestellt. Der Schüttwinkel dieser Mischung ist deutlich steiler als der jeweilige Schüttwinkel der einzelnen Fraktionen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass sich die Körner der feinen Fraktion bereits beim Trockenmischen teilweise in die Zwischenräume der groben Salzfraktion eingelagert haben.



Abbildung 7-9: Schüttkegel der Salzmischung, Schüttwinkel $\alpha=44,4^\circ$

Das Ziel, Salzbetone mit einem höheren Salzgehalt herzustellen, kann mit einer zweiten feinen Kornfraktion somit erreicht werden. Ein noch höherer Salzgehalt könnte mit einer dritten, noch feineren Salzfraktion erreicht werden. Da das von der Salzkontor GmbH gelieferte feine Salz mit Korngrößen von 0 bis 0,2 mm zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung jedoch das feinste vorrätige Salz war, werden im Folgenden die beiden beschriebenen Salzfraktionen eingesetzt.

7.2.3 Herstellung der Probekörper

Mit den nun vorhandenen Salzfraktionen

- 1) grob, Korngrößen 0 – 5 mm und
- 2) fein, Korngrößen 0 – 0,2 mm

werden Rezepturen erstellt, womit Salzgehalte in den herzustellenden Salzbetonen von 80 % und 70 % erreicht werden. Speziell die Rezeptur, welche sowohl die grobe als auch die feine Salzfraktion als Zuschlagstoff enthält um einen hohen Salzgehalt zu realisieren, muss mehrmals korrigiert werden. Letztendlich wird eine Rezeptur ermittelt, welche den gewünschten Salzgehalt aufweist und trotzdem für die gewünschte Probekörperherstellung handhabbar ist.

Entsprechend den Abmessungen des Versuchszustandes werden die Rezepturen für Probekörper mit den Abmessungen 12 cm (Höhe) x 55 cm (Breite) x 100 cm (Länge) bemessen (Tabelle 7-5, Tabelle 7-6 und Tabelle 7-7, Abbildung 7-10).

Tabelle 7-5: Rezeptur für einen Salzbeton P1 mit Salzgehalt von ca. 80 Masse-%

P1	Masse [kg]	Volumen [l]
Salz, grob	96,00	44,24
Salz, fein	19,20	8,85
Zement	17,60	5,68
Wasser	12,00	12,00
gesamt	144,80	
		70,76 (theoretisch, ohne Luftporen)
		87,75 (ungerüttelt, mit Luftporen)
		74,30 (gerüttelt, ca. 5 % Luftporen)
Anteil Zuschlagstoffe [Masse-%]		w/z-Wert [-]
79,54		0,68

Tabelle 7-6: Rezeptur für einen Salzbeton P2 mit Salzgehalt von ca. 70 Masse-%

P2	Masse [kg]	Volumen [l]
Salz, grob	100,00	46,08
Zement	30,00	9,68
Wasser	14,00	14,00
gesamt	144,00	
		69,76 (theoretisch, ohne Luftporen)
		86,50 (ungerüttelt, mit Luftporen)
		73,25 (gerüttelt, ca. 5 % Luftporen)
Anteil Zuschlagstoffe [Masse-%]		w/z-Wert [-]
69,44		0,47

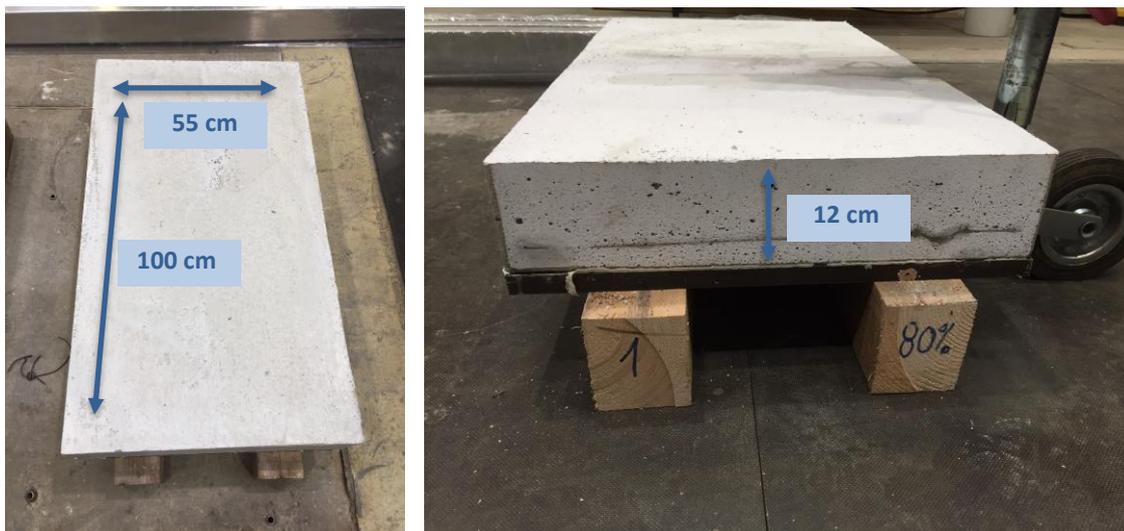


Abbildung 7-10: Abmessungen der Probekörper

Als Referenz wird darüber hinaus eine Rezeptur ohne Salzgehalt erstellt (Tabelle 7-7):

Tabelle 7-7: Rezeptur für einen Referenzbeton P3 ohne Salzgehalt

P3	Masse [kg]	Volumen [l]
Kies, 1 – 8 mm	98,00	40,00
Sand, 0 – 1 mm	24,00	10,00
Zement	36,00	11,00
Wasser	16,00	16,00
	168,00	
gesamt	/	77,00 (theoretisch, ohne Luftporen)
		95,48 (ungerüttelt, mit Luftporen)
		80,85 (gerüttelt, ca. 5 % Luftporen)
Anteil Zuschlagstoffe [Masse-%]	w/z-Wert [-]	
72,62	0,44	

Da alle Chargen die volumetrische Kapazität des zum Einsatz kommenden Betonmischers übersteigen, wird jede Mischung zu zwei gleichgroßen Teilen hergestellt und nacheinander in die Schalung eingegossen. Der Flüssigbeton wird nach jedem Eingießen mit Hilfe einer Rüttelflasche verdichtet.

Parallel hierzu werden von jeder Salzbetonmischung jeweils drei Probewürfel (Abbildung 7-11) mit den Abmessungen 200 mm x 200 mm x 200 mm hergestellt. Vom Referenzbeton konnten zwei Probewürfel hergestellt werden.



Abbildung 7-11: Probewürfel der hergestellten (Salz-)Beton

Nach entsprechender Aushärtungszeit von 28 Tagen werden die elf Probewürfel in der Materialprüfanstalt einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen.

Tabelle 7-8: Ermittelte Druckfestigkeiten der hergestellten Betonmischungen

Probe		Druckfestigkeit		
		N/cm ²	MPa	Ø MPa
Salzbeton P1 (80 % Salzgehalt)	P1-1	832,5	8,33	8,61
	P1-2	887,5	8,88	
	P1-3	862,5	8,63	
Salzbeton P2 (70 % Salzgehalt)	P2-1	1.555,0	15,55	15,02
	P2-2	1.282,5	12,83	
	P2-3	1.667,5	16,68	
Referenzbeton P3 (0 % Salzgehalt)	P3-1	3.757,5	37,58	37,73
	P3-2	3.787,5	37,88	

Hierbei ist festzustellen, dass die Druckfestigkeit mit abnehmendem Salzgehalt zunimmt (Tabelle 7-8), die Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber Druckkräften mit zunehmendem Salzgehalt also abnimmt.

Zusammenfassend konnten – neben einem Referenzbeton mit 0 % Salzgehalt – mithilfe zweier Salzkornfraktionen zwei Salzbetone mit unterschiedlichen Salzgehalten von 70 % und 80 % für die Versuchsdurchführung hergestellt werden. Die an diesen insgesamt drei Probekörpern durchgeführten Versuche werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

7.3 Versuchsstand

Zur Durchführung der Versuche wurde ein neuer Versuchsstand konzipiert und konstruiert. Der Versuchsstand (Abbildung 7-12) besteht aus einer rechteckigen Einhausung, welche sowohl den jeweiligen Probekörper als auch die entsprechenden Bearbeitungswerkzeuge (Winkelschleifer mit Diamanttopfscheibe und Winkelschleifer mit Fugenfräser) umschließt.



Abbildung 7-12: Versuchsstand geschlossen (links) und geöffnet (rechts)

An einem – über zwei Führungsschienen geführten – Querträger (Abbildung 7-13) ist die Werkzeughalterung höhenverstellbar befestigt. Dieser Querträger wird mittels (umhüllter) angetriebener Gewindestange in Längsrichtung des Probekörpers geführt.

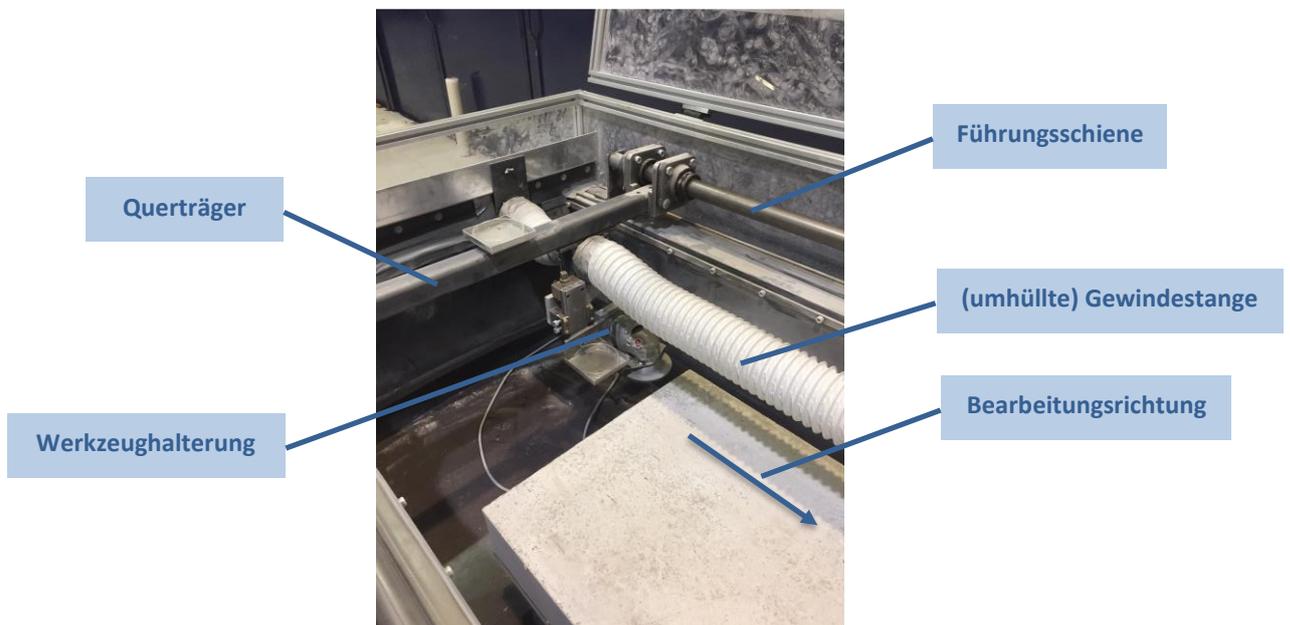


Abbildung 7-13: Versuchsstand, Detail der Werkzeugführung

Der Motor außerhalb der Einhausung führt zu einer Rotation der Gewindestange, was wiederum den Vorschub des Werkzeuges erzeugt.

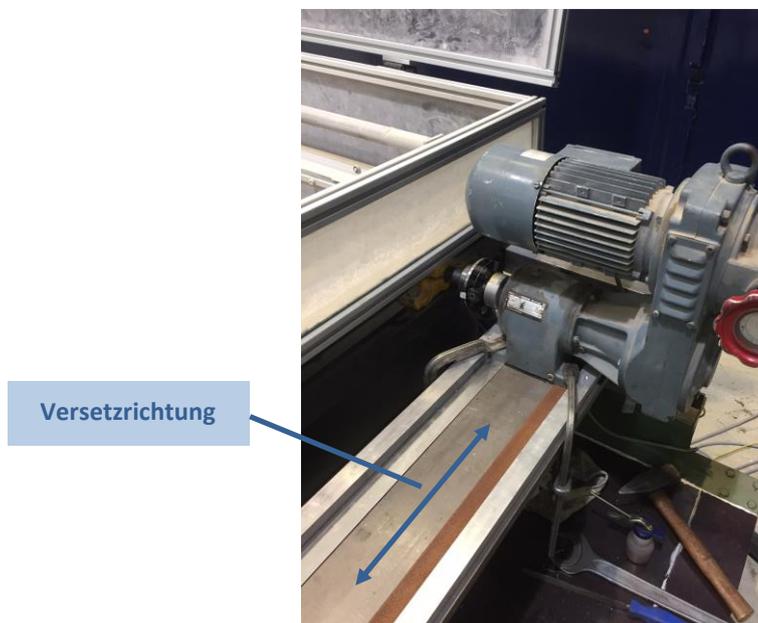


Abbildung 7-14: Versuchsstand, Motor

Motor, Gewindestange und Werkzeughalterung können in Richtung des Querträgers versetzt werden (Abbildung 7-14), was dazu führt, dass – abgänglich von der jeweiligen Werkzeugbreite – jeweils mehrere nebeneinanderliegende Bahnen bearbeitet werden können.

Da eine vollständige Abdichtung der Einhausung aufgrund der aufgeführten Versetzbarkeit von Gewindestange und Motor nicht möglich ist, wird an den Querseiten außerhalb der Einhausung eine Absaugung angebracht, welche den feinen austretenden Staub absaugt (Abbildung 7-15).



Abbildung 7-15: Versuchsstand, Absaugung

Wie bereits zu Beginn von Kapitel 7 aufgeführt, fiel bei der Wahl des zum Einsatz kommenden Werkzeugs die Entscheidung auf einen handelsüblichen Winkelschleifer, da für die Bearbeitung des Versatzmaterials in Tiefenlagern zerspanende Verfahren wie beispielsweise Fräsen und Schleifen zum Einsatz kommen werden (vgl. Kapitel 3.3.1). Die Vorteile eines Winkelschleifers bestehen – wie bereits erwähnt – in der Verfügbarkeit verschiedener Zubehörteile, wodurch mit diesem Gerät

- sowohl, beispielsweise mittels Diamanttopfscheiben, geschliffen (zerspanendes Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide) (Kapitel 7.4)
- als auch, beispielsweise mittels Fugenfräser, gefräst (zerspanendes Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide) werden kann. (Kapitel 7.5)

Explizit handelt es sich hierbei um zwei Geräte der Marke Bosch (Tabelle 7-9).

Tabelle 7-9: Zum Einsatz kommende Winkelschleifer

	Winkelschleifer GWS 11-125 Professional	Winkelschleifer GWS 19-125 CIE Professional
Nennaufnahmeleistung	1.100 W	1.900 W
Scheibendurchmesser	125 mm	125 mm

Mit dem ersten Gerät (GWS 11) werden sämtliche Schleifversuche und die Fräsversuche am Salzbeton mit 80 % Salzgehalt durchgeführt. Für die Fräsversuche in dem Salzbeton mit 70 % Salzgehalt und im Referenzbeton mit 0 % Salzgehalt ist die Leistung des GWS 11 nicht ausreichend, was auf die mit abnehmendem Salzgehalt zunehmende Druckfestigkeit (Tabelle 7-8) zurückzuführen ist. Daher kommt für diese Versuche ein bezüglich Nennaufnahmeleistung stärkerer Winkelschleifer (GWS 19) zum Einsatz.

Der Winkelschleifer wird mittels Welle über den im Versuchsstand fest positionierten Versuchskörper geführt. Hierbei sind sowohl die Vorschubgeschwindigkeit als auch die Zustelltiefe des Winkelschleifers variabel einstellbar.

Sowohl die Minimalgeschwindigkeit (v_1) als auch die Maximalgeschwindigkeit (v_2) des eingesetzten Motors (Abbildung 7-16) werden ermittelt, ohne dass ein Probekörper eingespannt ist, also während sich der Winkelschleifer im Leerlauf befindet. Die Messlänge beträgt 105 cm, wofür der Winkelschleifer bei Geschwindigkeit v_1 340 s benötigt, was einer Geschwindigkeit von

$$\frac{105 \text{ cm}}{340 \text{ s}} = 0,31 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0,0031 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7-7)$$

entspricht. Bei Geschwindigkeit v_2 werden für dieselbe Messlänge lediglich 130 s benötigt, was somit einer Geschwindigkeit von

$$\frac{105 \text{ cm}}{130 \text{ s}} = 0,81 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0,0081 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7-8)$$

entspricht.

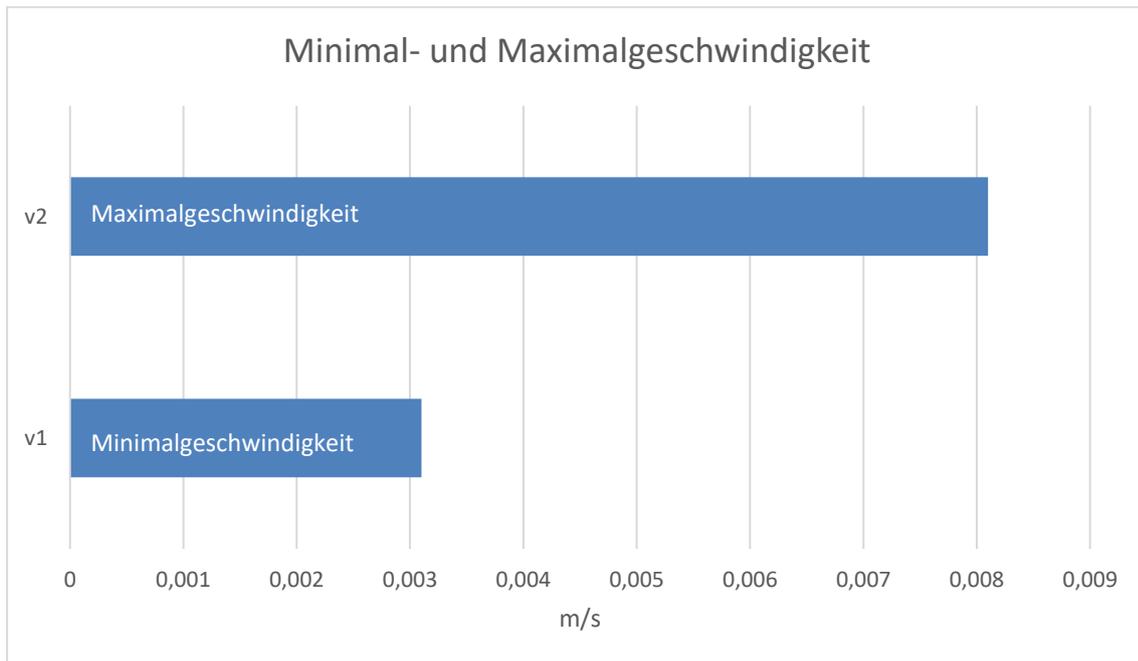


Abbildung 7-16: Minimal (v1) - und Maximalgeschwindigkeit (v2)

Die Differenz von Messlänge (105 cm) zu Länge des Probekörpers (100 cm) rührt daher, dass der Winkelschleifer bereits vor dem Probekörper (Abbildung 7-24 und Abbildung 7-38) anläuft und sich somit erst kurze Zeit im Leerlauf befindet, bevor er auf das zu bearbeitende Material trifft.

Parallel dazu befinden sich innerhalb der Einhausung vier Auffangschalen (AS) mit einem Durchmesser von 95 mm und einer Höhe von 15 mm, welche einen Teil des sich im Versuchsverlauf absetzenden Materials auffangen. Diese Auffangschalen sind jeweils direkt vor der zu bearbeitenden Bahn (AS1), direkt hinter der zu bearbeitenden Bahn (AS2), rechts neben der Schleifscheibe (AS3) und schräg nach hinten versetzt oberhalb der Schleifscheibe (AS4) positioniert (Abbildung 7-17 und Abbildung 7-18).

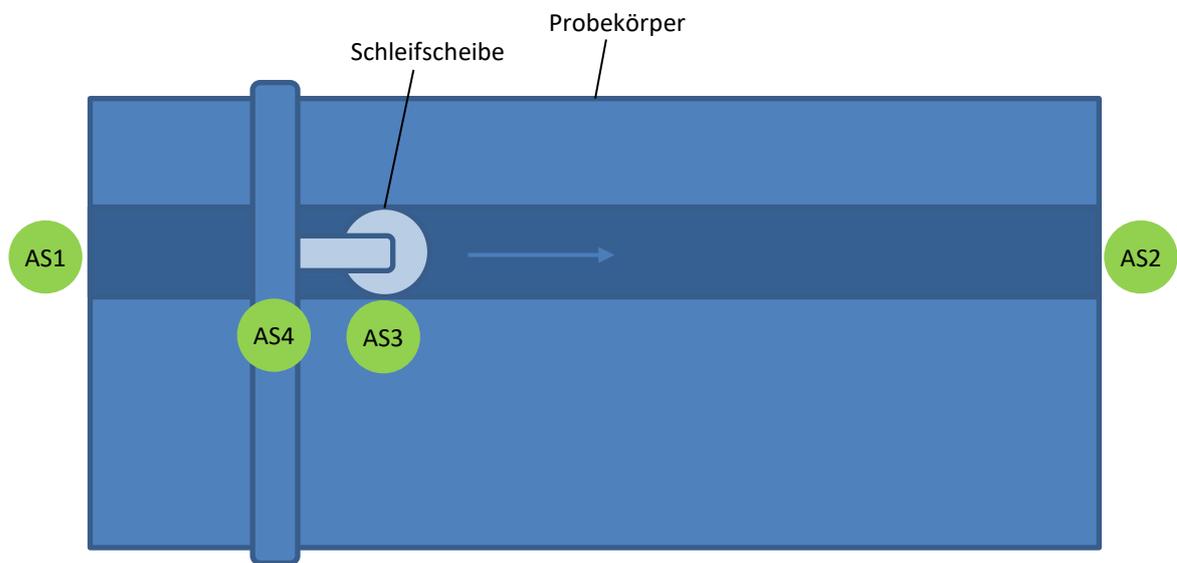


Abbildung 7-17: Positionen der Auffangschalen, Draufsicht

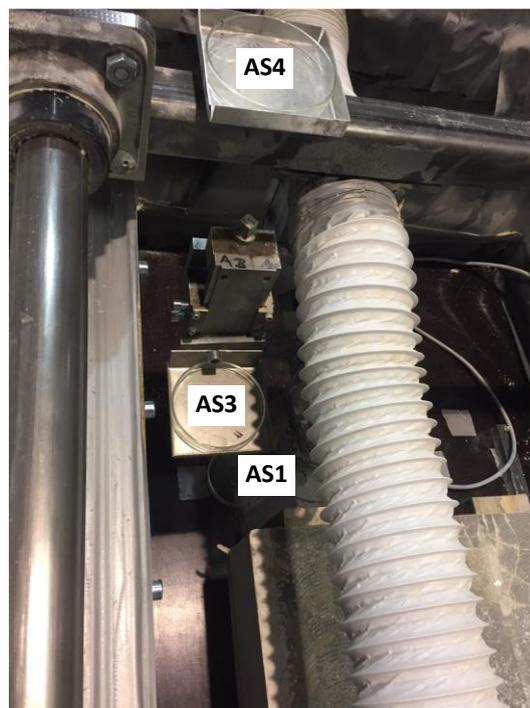


Abbildung 7-18: Positionen der Auffangschalen AS1, AS3 und AS4

Für die Staubmessung wird der CEL-712 Microdust Pro Echtzeit-Staubmonitor des Herstellers CASELLA CEL Inc. verwendet. Dieser misst in Echtzeit die Konzentration der Staubpartikel in der Einheit $[g/m^3]$. Hierfür sind im Deckel der Einhausung vier verschließbare Öffnungen angebracht,

so dass der Staubbmesssensor jeweils über der sich in Bearbeitung befindlichen Bahn montiert werden kann. Die Öffnungen befinden sich in etwa mittig (Abbildung 7-19) über der jeweiligen Bahn.

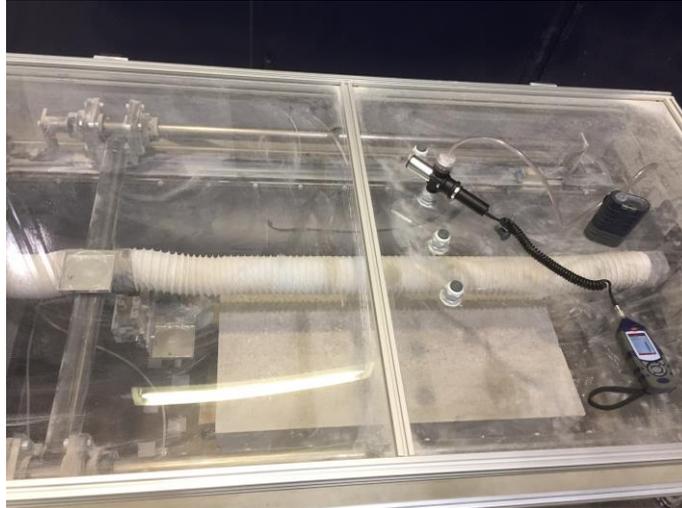


Abbildung 7-19: Versuchsstand inklusive Messgerät

Dieses Messgerät führt Streulichtmessungen durch, wofür der Staubluftstrom mit einem Lichtbündel bestrahlt und dessen Streuwinkel erfasst wird (Abbildung 7-20): Vereinfacht ausgedrückt sendet eine Laserquelle ① Licht in Richtung eines optischen Detektors ③. Bei sauberer Luft verhindert eine Schranke ④, dass das Licht den Weg bis zum Detektor zurücklegt. Befinden sich innerhalb der Probenahmekammer ② jedoch Staubpartikel, führen diese dazu, dass das Licht zerstreut wird, und somit ein Teil des Lichtes über indirekte Wege am Detektor ankommt. [49]

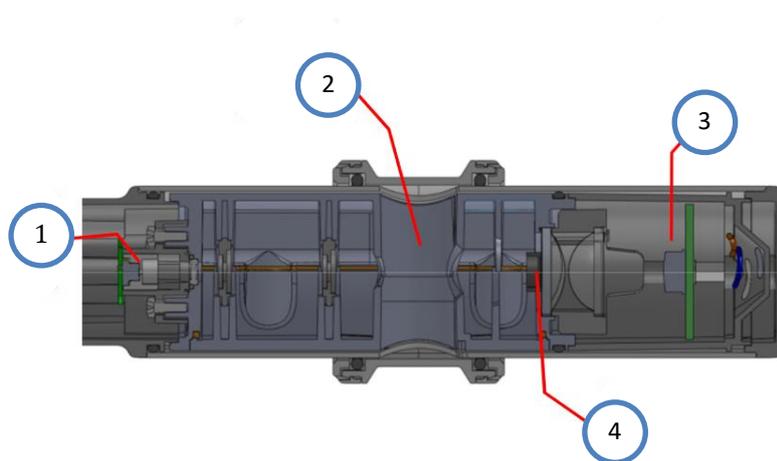


Abbildung 7-20: Schnitt durch die Probenahmesonde [49]

Der CEL-712

„misst [...] alle Partikel, die von einem optischen Detektorsystem ‚gesehen‘ werden können. Dies schließt nicht immer allen Schwebestaub ein, da sehr große und sehr kleine Partikel nicht erkannt werden.“ [49]

Dies entspricht einem Bereich ab ca. 4 μm . Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Messungen zu gewährleisten, kommt zusätzlich noch eine Probenahmepumpe vom Typ Tuff (Hersteller CASELLA CEL Inc.) zum Einsatz (Abbildung 7-21). Diese sorgt für einen kontinuierlich gleichbleibenden Luftstrom von 2 l/min durch die Probenahmekammer ②. (Abbildung 7-20)



Abbildung 7-21: CEL-712 Echtzeit-Staubmonitor mit angeschlossener Probenahmepumpe Tuff

Das Messgerät misst die Staubkonzentration während des gesamten Versuches, also bis das Werkzeug den Probekörper einmal in Längsrichtung bearbeitet hat.

Um eine Aussage über die Partikel treffen zu können, die sich während der Versuchsdurchführung niedergeschlagen haben, wird das in den Auffangschalen aufgefangene Material zuerst gewogen und anschließend mit einem Camsizer XT des Herstellers Retsch Technology GmbH einer Kornanalyse unterzogen. Hierbei handelt es sich um ein optisches Partikelmessgerät für Proben von 1 μm bis 3 mm, welches das Prinzip der digitalen Bildverarbeitung anwendet. [50] Hierfür wird das zu analysierende Probenmaterial über eine Vibrationsrinne in das Innere des Camsizers befördert, wo das Material per Druckluft zur Messeinheit transportiert wird (Abbildung 7-22). Eventuelle Agglomerate aus beispielsweise einzelnen Salzkörnern werden ebenfalls durch die Druckluft getrennt. Allerdings reicht die Druckluft nicht aus, um stark verfestigte Agglomerate aus Salz und Zementstein zu trennen.

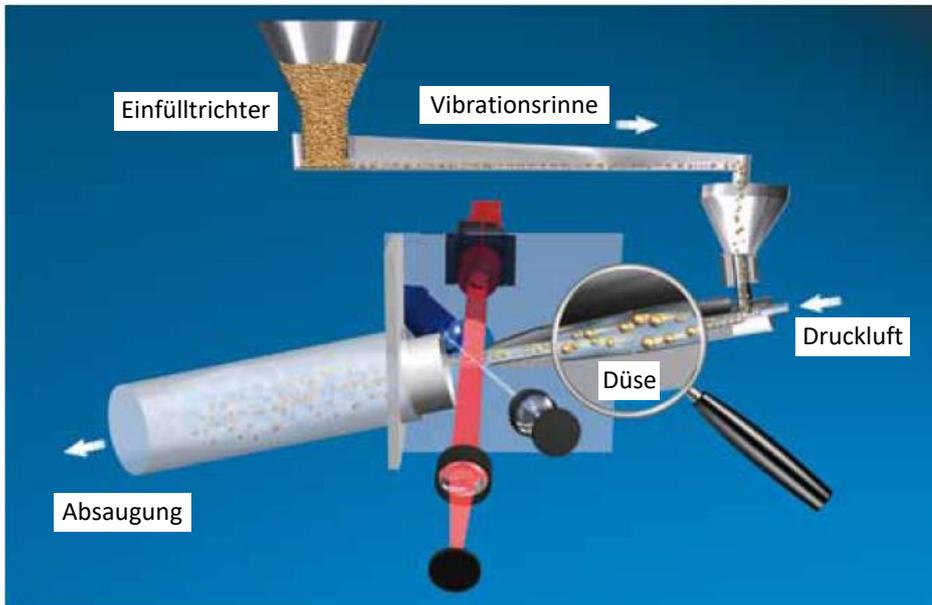


Abbildung 7-22: Prinzipskizze der Druckluftdispergierung des Camsizer XT [50]

Die Partikel passieren anschließend zwei LED Stroboskoplichtquellen. Zwei Kameras, eine für die kleinen und eine für die größeren Partikel, erfassen die Schattenprojektionen der Partikel (Abbildung 7-23). [50]

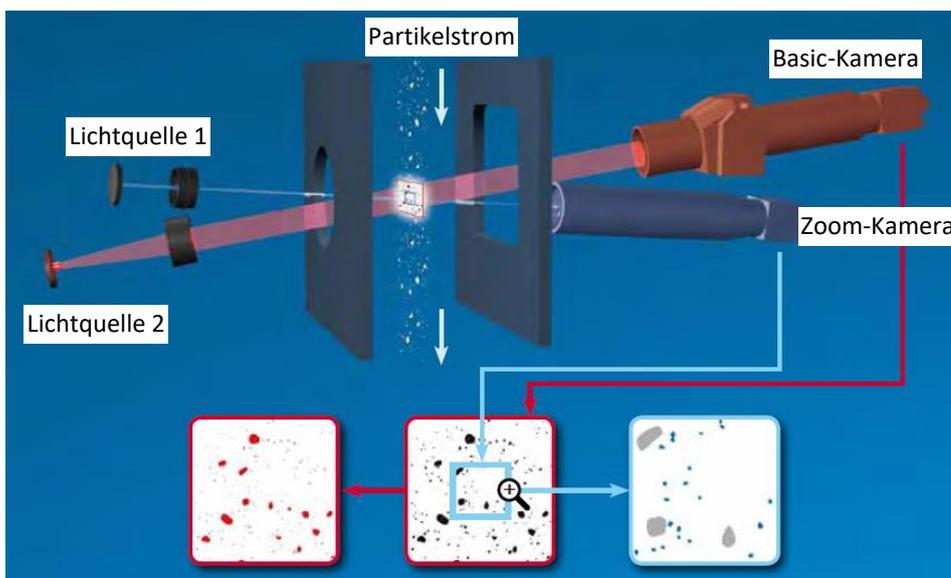


Abbildung 7-23: Prinzipskizze des Messsystems des Camsizer XT [41]

Da es zu Beginn der Messungen immer wieder vorkommt, dass sich – vor allem – Salzpartikel innerhalb der Zuführung miteinander verkeilen, werden Partikel und Agglomerate ab 2 mm Durchmesser vor der Messung abgesiebt. Das abgesiebte Material bzw. Überkorn besteht sowohl aus einzelnen größeren Partikeln als auch aus Agglomeraten, wie beispielsweise Abplatzungen von den Randbereichen der bearbeiteten Fläche.

Theoretisch müssten daher die Massenanteile der Fraktion „0 – 2 mm“ immer 100 % betragen, da sich nach dem Absieben keine Partikel > 2 mm mehr im Probenmaterial befinden dürften. Bedingt durch die Tatsache, dass die Form der Partikel jedoch keiner Kugel entspricht, sondern insbesondere die Salzpartikel kristallförmig ausgebildet sind, kann ein Partikel je nach Abmessungen durch ein Sieb der Maschenweite 2 mm hindurchfallen, vom Messsystem aber, bei entsprechender Position des Partikels, einer Fraktion > 2 mm zugeordnet werden. Aus diesem Grund finden sich in den Ergebnissen (Tabelle 7-20 bis Tabelle 7-22) in der Spalte „0 – 2 mm“ teilweise Werte unter 100 %.

Pro Versuch wird somit die Staubkonzentration gemessen, die in den Auffangschalen aufgefangene Masse gewogen und die Korngrößenverteilung dieser Masse bestimmt.

7.4 Schleifversuche

Die im Folgenden beschriebenen Schleifversuche sind motiviert durch die

1. Ermittlung der Staubkonzentration in Abhängigkeit des Salzgehaltes des Probekörpers
2. Ermittlung der Staubkonzentration in Abhängigkeit der Schleifscheibe
3. Ermittlung der Staubkonzentration in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit
4. Untersuchung der sich niederschlagenden Partikel (Masse, Korngrößenverteilung)

Hiermit können die beiden Forschungsfragen beantwortet werden, zudem kann eine Empfehlung entwickelt werden, die bei beiden Fragestellungen zur Minimierung der Staubentwicklung (Kapitel 4.2) Lösungen gibt.

7.4.1 Versuchsdurchführung – Schleifen

Bei jedem Versuch wird die jeweilige Schleifscheibe mit einer Zustelltiefe von 1 mm und einer über den jeweiligen Versuch konstanten Vorschubgeschwindigkeit, parallel (Abbildung 7-24) und in Längsrichtung über den Probekörper geführt.



Abbildung 7-24: Schleifscheibe in Ausgangsposition

Zum Einsatz kommen pro Probekörper drei verschiedene Schleifscheiben. Diese Schleifscheiben wurden bewusst gewählt, um den Einfluss der angeordneten Segmentreihen auf eine mögliche Staubentwicklung zu untersuchen, insbesondere die Anordnung der Segmente längs oder quer zur Drehrichtung. Die Schleifscheiben haben einen Durchmesser von jeweils 125 mm:



S1

Bosch - Diamanttopfscheibe „Expert for Concrete“ mit zwei längs zur Drehrichtung verlaufenden Segmentreihen



S2

Bosch - Diamanttopfscheibe „Expert for Concrete Extra-Clean“ mit zwei Segmentreihen: eine Reihe verläuft längs, eine Reihe verläuft quer zur Drehrichtung



S3

Bosch - Diamanttopfscheibe „Expert for Abrasive“ mit zwei längs zur Drehrichtung verlaufenden Segmentreihen

Abbildung 7-25: Schleifscheiben

Somit wird bei jedem Schleifversuch ein Volumen von 125 cm³ abgetragen (Tabelle 7-10).

Tabelle 7-10: Abtragsvolumen der einzelnen Schleifversuche

Durchmesser Schleifscheibe	Zustelltiefe	Länge des Probekörpers	Abtragsvolumen
125 mm	x 1 mm	x 100 mm	= 125 cm ³

Die Permutation der Versuchsparameter ergibt sich wie folgt (Tabelle 7-11):

Tabelle 7-11: Permutation der Versuchsparameter, Schleifversuche

	Probekörper (Salzgehalt)	Schleifscheibe	Vorschubgeschwindigkeit [m/s]	Durchlauf	
	P1 (80 %)	S1	0,0031 (v1)	1	
	P2 (70 %)	S2	0,0081 (v2)	2	
	P3 (0 %)	S3			Versuche
Anzahl	3	x 3	x 2	x 2	= 36

Somit werden in Summe 36 Einzelversuche durchgeführt.

Um eine Vergleichbarkeit zu erreichen, wird nach jedem Versuch 120 s gewartet, damit sich die in der Luft befindlichen Partikel absetzen können. Die Partikel, die sich nach diesen 120 s noch in der Luft innerhalb der Einhausung befinden, werden über eine Dauer von 60 s abgesaugt (Abbildung 7-26) bevor die Einhausung geöffnet, und die Auffangschalen entnommen werden.



Abbildung 7-26: Absaugung nach erfolgter Versuchsdurchführung

Im Folgenden wird die Höhe der Staubkonzentration gemessen (Kapitel 7.4.2.1), die Masse der Partikel in den Auffangschalen ermittelt und der Median der aufgefangenen Partikel bestimmt (Kapitel 7.4.2.2).

7.4.2 Ergebnisse der Schleifversuche

7.4.2.1 Staubkonzentration in der Luft beim Schleifen

Ein Auszug der mittels Messgerät ermittelten Staubkonzentrations-Werte in $[g/m^3]$ der jeweiligen Versuche findet sich in Tabelle 7-12, Tabelle 7-14 und Tabelle 7-16. Für die vollständigen Messwerte sei an dieser Stelle auf Anhang Nr. 3 verwiesen.

7.4.2.1.1 Probekörper P3, 0 % Salzgehalt

Beginnend bei Probekörper P3 mit 0 % Salzgehalt werden die in Tabelle 7-12 aufgeführten Werte ermittelt. Dabei bedeutet:

Wert bei 60 s: 60 Sekunden nach Start des jeweiligen Versuchs wird die aktuelle Staubkonzentration am Messgerät (Kapitel 7.3) abgelesen. Hierfür ist der Staubmesssensor jeweils in der Öffnung montiert, welche sich über der zu bearbeitenden Bahn befindet. (Abbildung 7-21)

Wert bei 120 s: 120 Sekunden nach Start des jeweiligen Versuchs wird die aktuelle Staubkonzentration am Messgerät abgelesen. Hierfür ist der Staubmesssensor nach wie vor in der Öffnung montiert, welche sich über der zu bearbeitenden Bahn befindet.

Durchschnitt: Dieser Wert wird vom Messgerät während des Versuchs ermittelt und im Anschluss auch grafisch ausgegeben. (vgl. Anhang 3a)

Maximum: Dieser Wert wird vom Messgerät während des Versuchs ermittelt und im Anschluss auch grafisch ausgegeben. (vgl. Anhang 3a)

Tabelle 7-12: Staubkonzentrationen der Schleifversuche, 0 % Salzgehalt

Referenzbeton P3 mit 0 % Salzgehalt							
Versuchsnummer	Schleifscheibe	Vorschub- geschwindigkeit	Durchlauf	Staubkonzentration [g/m ³]			
				Wert bei 60 s	Wert bei 120 s	Durchschnitt	Maximum
1	S1	v1	D1	2,33	3,05	3,21	4,22
2			D2	2,55	3,32	3,10	3,75
Mittelwerte _{1,2}				2,44	3,19	3,16	3,99
3	S1	v2	D1	3,50	4,69	3,12	5,01
4			D2	4,15	6,62	4,21	6,91
Mittelwerte _{3,4}				3,83	5,66	3,67	5,96
5	S2	v1	D1	3,64	5,21	5,01	6,36
6			D2	2,99	5,21	5,17	6,86
Mittelwerte _{5,6}				3,32	5,21	5,09	6,61
7	S2	v2	D1	4,17	6,78	4,35	7,18
8			D2	4,96	7,57	4,94	8,03
Mittelwerte _{7,8}				4,57	7,18	4,65	7,61
9	S3	v1	D1	2,00	3,36	3,72	5,36
10			D2	1,15	2,60	2,81	4,67
Mittelwerte _{9,10}				1,58	2,98	3,27	5,02
11	S3	v2	D1	4,13	5,74	3,73	5,97
12			D2	3,04	4,83	3,26	5,83
Mittelwerte _{11,12}				3,59	5,29	3,50	5,90

Betrachtet man die Mittelwerte der jeweiligen zusammengehörenden Durchläufe D1 und D2 an Probekörper P3 (0 % Salzgehalt) (Tabelle 7-12), so fällt auf, dass sowohl bei Scheibe S1 wie auch bei Scheibe S3 die durchschnittliche Staubkonzentration bei Vorschubgeschwindigkeit v2 höher ist als bei Vorschubgeschwindigkeit v1. Eine Abweichung liefert Scheibe S2, bei welcher die durchschnittliche Staubkonzentration bei Vorschubgeschwindigkeit v1 höher ist als bei Vorschubgeschwindigkeit v2. Diese Abweichung lässt sich auf Messfehler zurückführen, welche aufgrund eines zugesetzten Filters innerhalb der Probenahmepumpe auftraten.

Anders bei den am selben Probekörper P3 gemessenen Maximalwerten: Hier kann bei allen drei

Scheiben, gemittelt über die jeweiligen zusammengehörenden Durchläufe D1 und D2, eine Erhöhung der Staubkonzentration bei Vorschub v2 im Vergleich zur Staubkonzentration bei Vorschub v1 festgestellt werden. Diese Steigerungen sind in Tabelle 7-13 zusammengefasst.

Tabelle 7-13: Steigerung der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2, 0 % Salzgehalt

	Vorschub- geschwindigkeit	Scheibe		
		S1	S2	S3
Durchschnittliche Staubkonzentration [g/m ³]	v1	3,16	5,09	3,27
	v2	3,67	4,65	3,50
	Steigerung	+ 16,1 %	- 8,6 %	+ 7,0 %
	Ø Steigerung	+ 4,8 %		
Maximale Staubkonzentration [g/m ³]	v1	3,99	6,61	5,02
	v2	5,96	7,61	5,90
	Steigerung	+ 49,4 %	+ 15,1 %	+ 17,5 %
	Ø Steigerung	+ 27,3 %		

Unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit wird darüber hinaus bei den mit Scheibe S2 durchgeführten Versuchen eine – im Vergleich zu Scheibe S1 und Scheibe S3 – deutlich erhöhte durchschnittliche und maximale Staubkonzentration gemessen. (Abbildung 7-27)

Nachfolgend werden diese Ergebnisse zur besseren Ansicht graphisch dargestellt. (Abbildung 7-27)

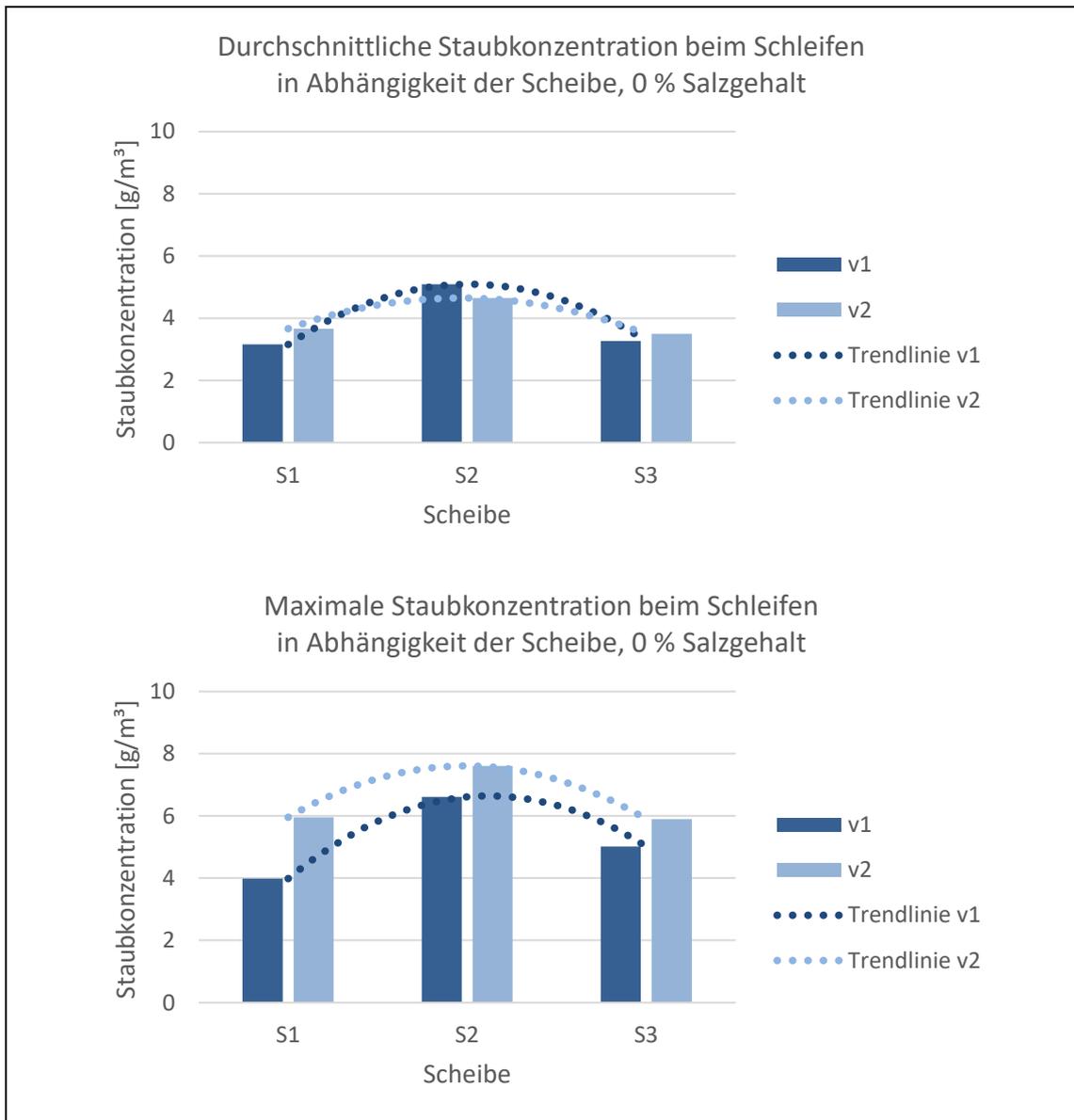


Abbildung 7-27: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe, 0 % Salzgehalt

Als erstes Ergebnis kann somit festgehalten werden, dass eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und damit der Eingreifgeschwindigkeit des Werkzeuges auf das abzutragende Material zu einer deutlichen Erhöhung der Staubkonzentration führt. Dies ist bei einer Rückholung nicht gewünscht.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass die Geometrie der angeordneten Schneidsegmente einen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration hat. Quer zur Drehrichtung angeordnete Segmente führen hier zu einer deutlich höheren Staubkonzentration in der Luft als längs zur Drehrichtung angeordnete Segmente.

7.4.2.1.2 Probekörper P2, 70 % Salzgehalt

In einer zweiten Messreihe werden Versuche am Probekörper P2 mit 70 % Salzgehalt durchgeführt. (Tabelle 7-14) Diese Versuche sind analog zu den Versuchen am Referenzbeton (Kapitel 7.4.2.1.1) aufgebaut. Das heißt die drei Scheiben S1, S2 und S3 werden mit den Vorschubgeschwindigkeiten v1 und v2 mit einer Eingriffstiefe von 1 mm über den Probekörper geführt. Dabei werden wieder die Staubkonzentrationen nach 60 s, nach 120 s, der Durchschnitt und das Maximum gemessen.

Tabelle 7-14: Staubkonzentrationen der Schleifversuche, 70 % Salzgehalt

Salzbeton P2 mit 70 % Salzgehalt							
Versuchsnummer	Schleifscheibe	Vorschubgeschwindigkeit	Durchlauf	Staubkonzentration [g/m ³]			
				Wert bei 60 s	Wert bei 120 s	Durchschnitt	Maximum
13	S1	v1	D1	2,00	2,71	2,98	4,35
14			D2	2,21	2,54	2,88	4,51
Mittelwerte _{13,14}				2,11	2,63	2,93	4,43
15	S1	v2	D1	3,95	6,62	4,21	6,96
16			D2	4,84	6,43	4,62	6,93
Mittelwerte _{15,16}				4,40	6,53	4,42	6,95
17	S2	v1	D1	2,26	4,04	4,14	5,83
18			D2	1,99	3,98	3,98	5,61
Mittelwerte _{17,18}				2,13	4,01	4,06	5,72
19	S2	v2	D1	4,16	5,74	3,99	5,91
20			D2	6,29	9,07	6,05	9,77
Mittelwerte _{19,20}				5,23	7,41	5,02	7,84
21	S3	v1	D1	1,52	3,03	3,42	5,10
22			D2	1,28	2,00	2,06	3,10
Mittelwerte _{21,22}				1,40	2,52	2,74	4,10
23	S3	v2	D1	4,13	6,74	4,25	6,79
24			D2	3,77	5,61	3,68	5,70
Mittelwerte _{23,24}				3,95	6,18	3,97	6,24

Die am Probekörper P2 (70 % Salzgehalt) gemessene (Tabelle 7-14), über die Durchläufe gemittelte, durchschnittlich Staubkonzentration zeigt über alle Scheiben hinweg eine, im Hinblick auf Vorschubgeschwindigkeit v1, Erhöhung der Werte bei Vorschubgeschwindigkeit v2.

Genauso verhält es sich bei den gemessenen Maximalwerten. Auch hier sind die über die Durchläufe gemittelten Staubkonzentrationswerte bei Vorschubgeschwindigkeit v2 höher als bei Vorschubgeschwindigkeit v1 – unabhängig von der eingesetzten Scheibe. Die entsprechenden Steigerungen sind in Tabelle 7-15 zusammengefasst.

Tabelle 7-15: Steigerung der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2, 70 % Salzgehalt

	Vorschub- geschwindigkeit	Scheibe		
		S1	S2	S3
Durchschnittliche Staubkonzentration [g/m ³]	v1	2,93	4,06	2,74
	v2	4,42	5,02	3,97
	Steigerung	+ 50,9 %	+ 23,6 %	+ 44,9 %
	Ø Steigerung	+ 39,8 %		
Maximale Staubkonzentration [g/m ³]	v1	4,43	5,72	4,10
	v2	6,95	7,84	6,24
	Steigerung	+ 56,9 %	+ 37,1 %	+ 52,2 %
	Ø Steigerung	+ 48,7 %		

Ebenso wie bei Probekörper P3 mit 0 % Salzgehalt (Kapitel 7.4.2.1.1) wird bei Probekörper P2 unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit bei den mit Scheibe S2 durchgeführten Versuchen eine – im Vergleich zu Scheibe S1 und Scheibe S3 – erhöhte durchschnittliche und maximale Staubkonzentration gemessen. (Abbildung 7-28)

Hierzu wird wieder eine graphische Darstellung der Werte gewählt. (Abbildung 7-28)

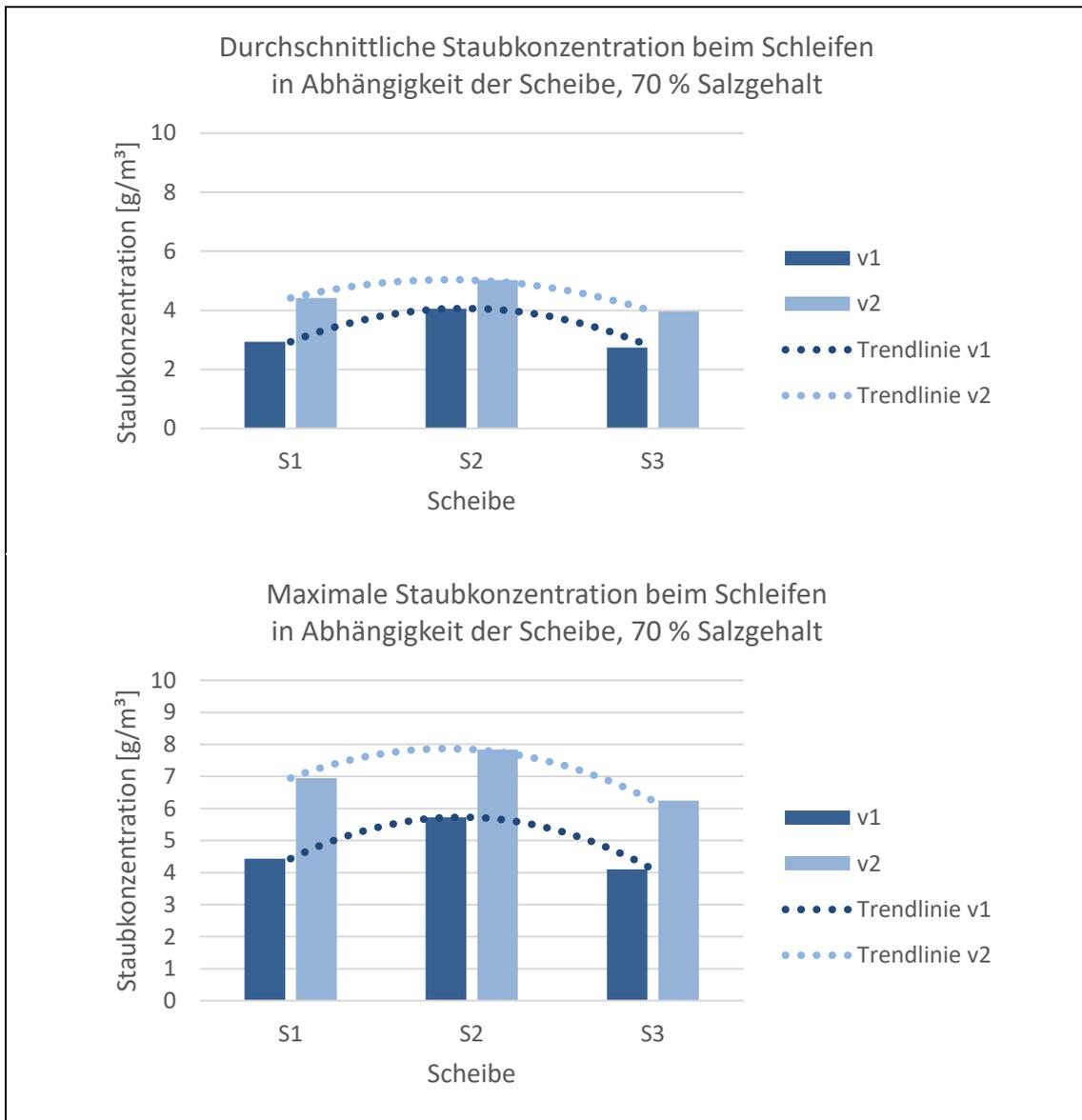


Abbildung 7-28: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe, 70 % Salzgehalt

Als erstes Ergebnis bei diesen Versuchen wird deutlich, dass eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und damit der Eingreifgeschwindigkeit des Werkzeuges auf das abzutragende Material zu einer deutlichen Erhöhung der Staubkonzentration führt. (Tabelle 7-15 und Abbildung 7-28)

Weiterhin kann festgehalten werden, dass die Anordnung der Schneidsegmente einen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration hat. Quer zur Drehrichtung angeordnete Segmente führen hier zu einer deutlich höheren Staubkonzentration in der Luft als längs der Drehrichtung angeordnete Segmente. Auch das ist in Tabelle 7-15 und Abbildung 7-28 erkennbar und tritt analog zu den Ergebnissen beim Referenzbeton (Kapitel 7.4.2.1.1) auf.

Bei der Auswertung der in Tabelle 7-15 aufgetragenen Staubkonzentrationen wird aber auch erkennbar, dass bei der Anordnung der Schneidsegmente quer zur Drehrichtung (Scheibe S2) eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit die Staubkonzentration weniger stark anwachsen lässt als dies bei den beiden anderen Scheiben der Fall ist. Während bei Scheibe S1 und S3 hier Steigerungen von 44,9 % bis 56,9 % auftreten, führt eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von v1 zu v2 bei Scheibe S2 nur zu einer Erhöhung der Staubkonzentration um 23,6 % beziehungsweise 37,1 %.

Dies zeigt auf, dass mit einer Scheibe der Form S2 jederzeit mehr Staub produziert wird als mit Scheiben der Form S1 oder S3, allerdings eine Leistungserhöhung durch eine schnellere Vorschubgeschwindigkeit bei der Scheibe S2 nur zu einer geringeren Staubeentwicklung führt.

7.4.2.1.3 Probekörper P1, 80 % Salzgehalt

Die abschließenden Schleifversuche werden an Probekörper P1 mit 80 % Salzgehalt durchgeführt, wobei folgende Werte ermittelt werden: (Tabelle 7-16)

Tabelle 7-16: Staubkonzentrationen der Schleifversuche, 80 % Salzgehalt

Salzbeton P1 mit 80 % Salzgehalt							
Versuchsnummer	Schleifscheibe	Vorschubgeschwindigkeit	Durchlauf	Staubkonzentration [g/m ³]			
				Wert bei 60 s	Wert bei 120 s	Durchschnitt	Maximum
25	S1	v1	D1	1,52	2,00	2,02	2,76
26			D2	1,77	2,32	2,64	4,10
Mittelwerte _{25, 26}				1,65	2,16	2,33	3,43
27	S1	v2	D1	4,33	7,29	4,53	7,69
28			D2	4,00	6,14	4,08	6,91
Mittelwerte _{27, 28}				4,17	6,72	4,31	7,30
29	S2	v1	D1	1,47	2,59	2,74	4,19
30			D2	2,13	3,49	3,64	5,29
Mittelwerte _{29, 30}				1,80	3,04	3,19	4,74
31	S2	v2	D1	4,29	5,99	4,10	6,12

32			D2	4,43	6,62	4,42	6,95
Mittelwerte _{31, 32}				4,36	6,31	4,26	6,54
33	S3	v1	D1	2,07	2,98	2,99	4,19
34			D2	1,31	2,11	2,19	3,17
Mittelwerte _{33, 34}				1,69	2,55	2,59	3,68
35	S3	v2	D1	4,34	5,89	4,08	6,00
36			D2	5,12	6,06	4,61	6,15
Mittelwerte _{35, 36}				4,73	5,98	4,35	6,08

Identisch wie zuvor verhält es sich bei Probekörper P1 (80 % Salzgehalt): Die Mittelwerte der durchschnittlichen Staubkonzentrationen (Tabelle 7-16) weisen über alle Scheiben hinweg eine, im Hinblick auf Vorschubgeschwindigkeit v1, Erhöhung der Werte bei Vorschubgeschwindigkeit v2 auf.

Und auch die gemessenen Maximalwerte sind – unabhängig von der eingesetzten Scheibe – bei Vorschubgeschwindigkeit v2 höher als bei Vorschubgeschwindigkeit v1. Die entsprechenden Steigerungen sind in Tabelle 7-17 zusammengefasst.

Tabelle 7-17: Steigerung der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2, 80 % Salzgehalt

	Vorschub- geschwindigkeit	Scheibe		
		S1	S2	S3
Durchschnittliche Staubkonzentration [g/m ³]	v1	2,33	3,19	2,59
	v2	4,31	4,26	4,35
	Steigerung	+ 85,0 %	+ 33,5 %	+ 68,0 %
	Ø Steigerung	+ 62,2 %		
Maximale Staubkonzentration [g/m ³]	v1	3,43	4,74	3,68
	v2	7,30	6,54	6,08
	Steigerung	+ 112,8 %	+ 38,0 %	+ 65,2 %
	Ø Steigerung	+ 72,0 %		

Bei Probekörper P1 stechen die Ergebnisse der mit Scheibe S2 durchgeführten Versuche lediglich bei Vorschubgeschwindigkeit v1 hervor, da in diesem Fall sowohl die durchschnittlichen als auch die maximalen Werte, im Vergleich zu den Versuchen mit Scheibe S1 und Scheibe S3, deutlich erhöht sind. (graphische Darstellung siehe Abbildung 7-29)

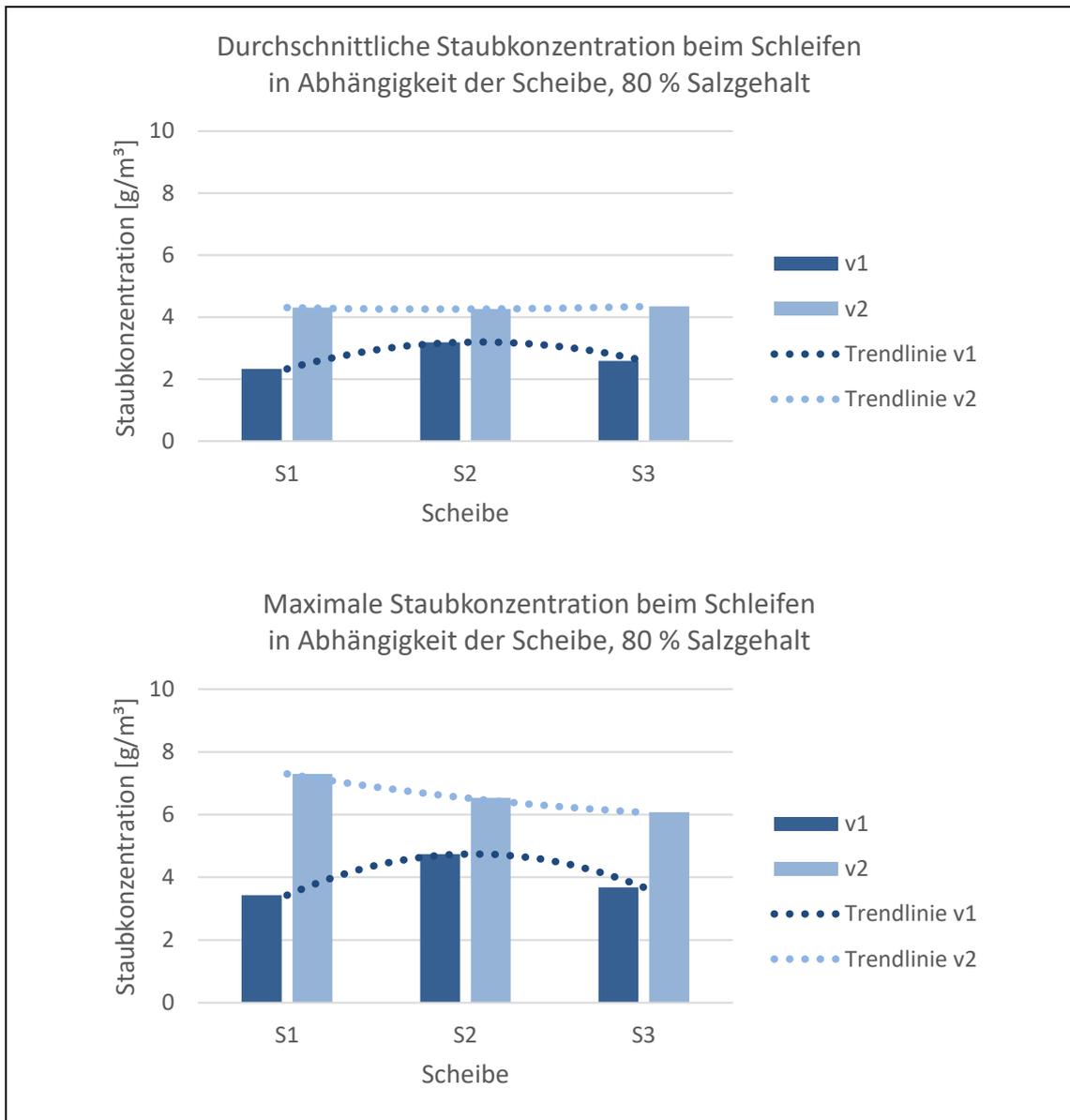


Abbildung 7-29: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe, 80 % Salzgehalt

Analog zu den vorherigen Versuchen zeigt sich, dass eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer deutlichen Erhöhung der Staubkonzentration führt.

Ebenso führt die Scheibe S2 zu einer erhöhten Staubkonzentration gegenüber der Staubkonzentrationen bei der Bearbeitung mit S1 und S3. Allerdings ist der Unterschied nicht so deutlich ausgeprägt wie bei den Versuchen an Probekörper P2 (70 % Salzgehalt) und an Probekörper P3 (0 % Salzgehalt).

In Tabelle 7-17 ist ebenfalls das Ergebnis ersichtlich, dass eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von v1 zu v2 mit Scheibe S2 die Staubkonzentration weit weniger deutlich ansteigen lässt als dies bei der Bearbeitung mit Scheibe S1 und Scheibe S3 der Fall ist.

7.4.2.1.4 Zusammenfassendes Ergebnis

Es wurden somit drei verschiedene Scheiben (S1, S2, S3), jeweils mit zwei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten (v_1 , v_2) an drei verschiedenen Probekörpern (P1, P2, P3) untersucht.

Als Ergebnis kann festgehalten werden:

- Die Segmente der Scheibe haben einen großen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration
- Die Vorschubgeschwindigkeit hat einen großen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration
- Der Anteil des Salzgehaltes bei den Probekörper hat einen großen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse interpretiert und erklärt.

Für die Schleifversuche ist festzustellen, dass bei den mit Scheibe S2 und Vorschubgeschwindigkeit v_1 durchgeführten Versuchen, die durchschnittlichen und maximalen Staubkonzentrationen – im Vergleich zu den mit Scheibe S1 oder Scheibe S3 durchgeführten Versuchen – sichtbar erhöht sind. (Abbildung 7-31) Wie bereits zuvor aufgeführt (Abbildung 7-25) sind die Segmentreihen der Scheibe S2 L-förmig – eine Reihe verläuft längs, eine Reihe verläuft quer zur Drehrichtung – angeordnet. Im Gegensatz hierzu sind bei den Scheiben S1 und S3 jeweils beide Segmentreihen längs zur Drehrichtung angeordnet. (Abbildung 7-30)



Abbildung 7-30: Schleifscheiben S1 (links), S2 (mittig) und S3 (rechts);
mit Drehrichtung (blau) und Spalt ohne Segmente (rot)

Dass die Anordnung der Segmente auf der Scheibe eine Auswirkung auf den durch die Bearbeitung in die Umgebung ‚geschleuderten‘ Staub und somit auch die gemessene Staubkonzentra-

tion hat, lässt sich durch die höhere ‚Räum- und Mahlwirkung‘ erklären: Ein quer zur Drehrichtung verlaufendes Segment schiebt mehr gelöstes Material vor sich her und zermahlt dieses mehrmals, bis es aus dem Wirkungsbereich der Scheibe getragen wird. Im Gegenzug zu einem Segment, welches längs zur Drehrichtung angeordnet ist. Durch die Drehung der Scheibe wird somit durch ein quer zur Drehrichtung verlaufendes Segment mehr zerkleinertes Material aus dem Wirkungsbereich der Scheibe getragen, was zu einer erhöhten Staubkonzentration führt, als durch ein längs zur Drehrichtung angeordnetes.

Zudem entsteht sowohl bei Scheibe S1 als auch bei Scheibe S3 zwischen den beiden Segmentreihen ein freier Spalt (Abbildung 7-30), welcher zu einem „Durchrutschen“ des abgetragenen Materials führen kann. Somit wird das abgetragene Material auf seinem Weg aus dem Wirkungsbereich der Scheibe nicht so lange zermahlen wie bei Scheibe S2. Folglich sind die aus dem Wirkungsbereich der Scheiben S1 und S3 getragenen Partikel gröber, setzen sich schneller ab, und führen zu einer niedrigeren Staubkonzentration als bei Scheibe S2.

Somit sind für die vorliegende Betrachtung Scheiben zu wählen, die keine geschlossenen Quersegmente aufweisen, sondern längs angeordnete Segmente, mit freien Spalten dazwischen.

Weiterhin auffällig ist, dass – bis auf eine Ausnahme (Scheibe S2 bei Probekörper P3 mit 0 % Salzgehalt) – sowohl die durchschnittlichen als auch die maximalen Staubkonzentrationen bei schneller Vorschubgeschwindigkeit v_2 deutlich erhöht sind im Vergleich zu den jeweiligen langsameren Versuchsdurchführungen mit der Vorschubgeschwindigkeit v_1 . (Abbildung 7-31)

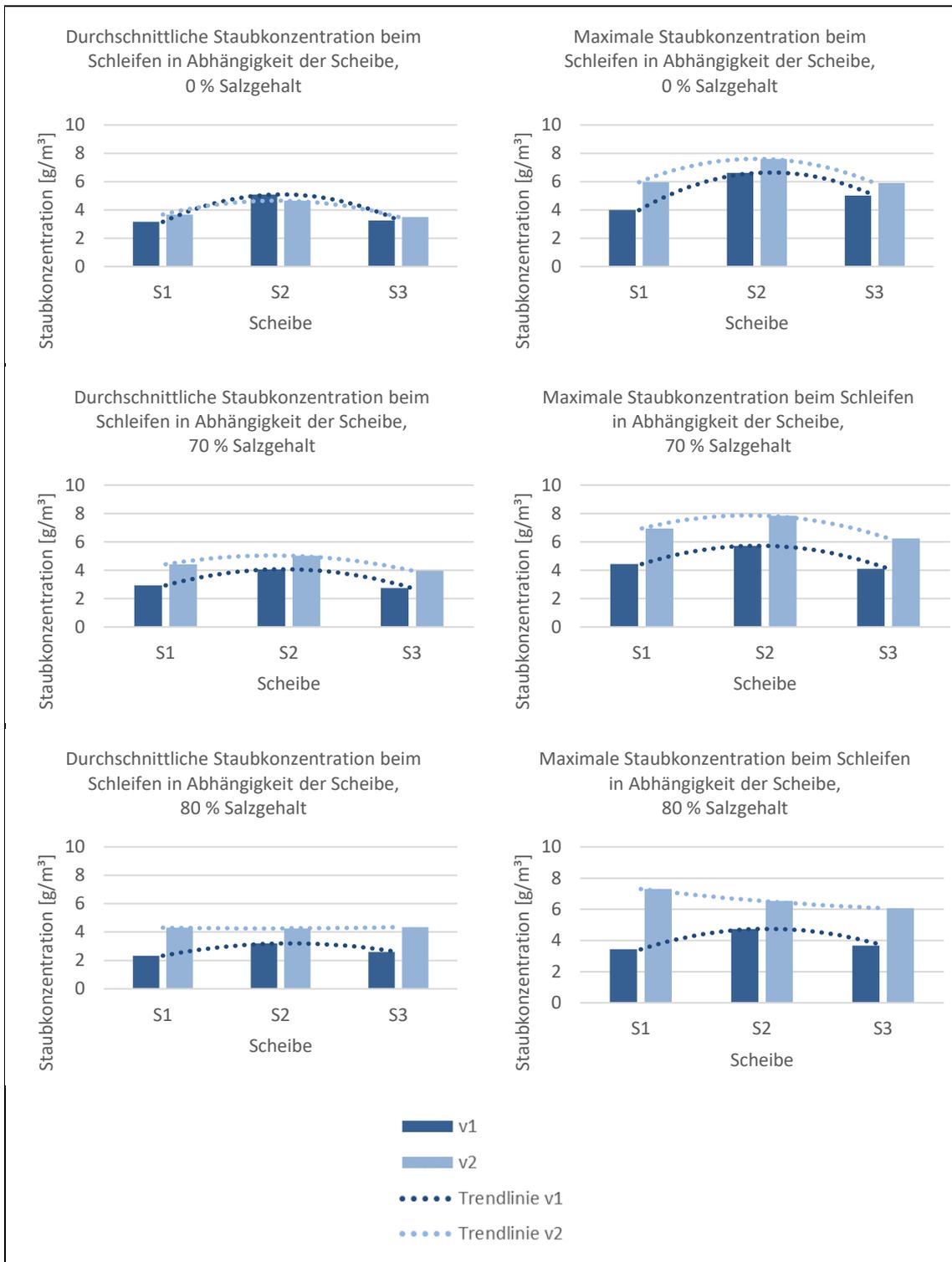


Abbildung 7-31: Gegenüberstellung der Staubkonzentrationen beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe

Auch hier liegt der Erklärung in den wirkenden Kräften, denn je schneller die Scheibe auf die gelösten Materialien trifft, desto schneller werden diese nach außen geschleudert. Ein „Verweilen“ der gelösten Partikel unter der Scheibe wird unwahrscheinlicher, wodurch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer erhöhten Staubkonzentration führt.

Bei der Gegenüberstellung der Steigerungen der Staubkonzentration bei langsamer zu Staubkonzentration bei schneller Vorschubgeschwindigkeit zeichnet sich ab, dass diese Steigerung größer ist, je höher auch der Salzgehalt im (Salz-)Beton (Tabelle 7-18): Ohne Salz im Beton beträgt beispielsweise mit Scheibe S1 die Steigerung der durchschnittlichen Staubkonzentrationen von langsamer zu schneller Versuchsdurchführung lediglich 16,1 % und steigt über 50,9 % (bei 70 % Salzgehalt) bis auf 85,0 % (bei 80 % Salzgehalt) an. Entsprechend bei den maximalen Staubkonzentrationen von 49,4 % (bei 0 % Salzgehalt) über 56,9 % (bei 70 % Salzgehalt) bis auf 112,8 % (bei 80 % Salzgehalt).

Festzustellen bleibt somit: Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von $v_1 = 0,0031$ m/s um 161,3 % auf $v_2 = 0,0081$ m/s führt, abhängig vom Salzgehalt des Probekörpers und der zum Einsatz kommenden Schleifscheibe, zu einer Erhöhung der gemessenen Staubkonzentrationswerte gemäß nachfolgender Tabelle 7-18.

Tabelle 7-18: Gegenüberstellung der Steigerungen der Staubkonzentrationen von v_1 zu v_2 - Schleifen

Salzgehalt		Scheibe		
		S1	S2	S3
0 % (P3)	Steigerung der durchschnittlichen Staubkonzentration von v_1 zu v_2	+ 16,1 %	- 8,6 %	+ 7,0 %
	Steigerung der maximalen Staubkonzentration von v_1 zu v_2	+ 49,4 %	+ 15,1 %	+ 17,5 %
70 % (P2)	Steigerung der durchschnittlichen Staubkonzentration von v_1 zu v_2	+ 50,9 %	+ 23,6 %	+ 44,9 %
	Steigerung der maximalen Staubkonzentration von v_1 zu v_2	+ 56,9 %	+ 37,1 %	+ 52,2 %
80 % (P1)	Steigerung der durchschnittlichen Staubkonzentration von v_1 zu v_2	+ 85,0 %	+ 33,5 %	+ 68,0 %
	Steigerung der maximalen Staubkonzentration von v_1 zu v_2	+ 112,8 %	+ 38,0 %	+ 65,2 %

Auffällig hierbei ist, dass bei Scheibe S2 eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit die Staubkonzentration weniger stark ansteigen ließ, als dies bei Bearbeitung des Materials durch Scheibe S1 oder Scheibe S3 der Fall ist.

Dies liegt wohl daran, dass durch die quer angeordneten Segmente bereits bei der ersten Berührung der Hauptteil der gelösten Materialien nach außen geschleudert wird. Somit hat der Einfluss der Geschwindigkeit hier nur eine untergeordnete Bedeutung.

Fazit ist aber, je langsamer die Vorschubgeschwindigkeit, desto geringer die Staubkonzentration in der Luft.

Da die langsamere Vorschubgeschwindigkeit zu den gewünschten Ergebnissen einer reduzierten Staubkonzentration in der Luft führt, wird nachfolgende Interpretation der Auswirkungen des Salzgehaltes im Detail nur für die Vorschubgeschwindigkeit v1 durchgeführt.

Es ist deutlich erkennbar, dass eine Zunahme des Salzgehaltes zu einer Reduktion der Staubkonzentration führt. Somit kann auch hier als Fazit festgehalten werden, je höher die Salzkonzentration ist, desto geringer ist die Staubkonzentration in der Luft. (Tabelle 7-19)

Tabelle 7-19: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit Vorschubgeschwindigkeit v1

Salzgehalt	Scheibe	Durchschnittliche Staubkonzentration [g/m ³]
0 % (P3)	S1	3,16
	S2	5,09
	S3	3,27
70 % (P2)	S1	2,93
	S2	4,06
	S3	2,74
80 % (P1)	S1	2,33
	S2	3,19
	S3	2,59

Als Fazit lassen sich die anfangs gestellten Fragen wie folgt beantworten:

- Die Anordnung der Segmente auf der Scheibe hat einen großen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration: Es empfiehlt sich Scheiben einzusetzen, die keine quer angeordneten Segmente haben, sondern die längs angeordnete Segmente mit Zwischenräumen aufweisen.
- Die Vorschubgeschwindigkeit hat einen großen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration: Es empfiehlt sich, langsam über die Salzbetone zu fahren, damit das Material weniger stark beschleunigt und entsprechend weniger aufgewirbelt wird.
- Der Anteil des Salzgehaltes der Probekörper hat einen großen Einfluss auf die entstehende Staubkonzentration: Es empfiehlt sich, einen möglichst hohen Salzgehalt zu wählen; je höher der Salzgehalt desto geringer die Staubentwicklung.

Untersucht man alle absoluten Werte (Tabelle 7-19), so lagen bei den drei Probekörpern

- (P3 mit 0 % Salzgehalt) der kleinste durchschnittliche Wert bei 3,16 g/m³ und der größte durchschnittliche Wert bei 5,09 g/m³, was einer Abweichung von 61 % entspricht.
- (P2 mit 70 % Salzgehalt) der kleinste durchschnittliche Wert bei 2,74 g/m³ und der größte durchschnittliche Wert bei 4,06 g/m³, was einer Abweichung von 48 % entspricht.
- (P1 mit 80 % Salzgehalt) der kleinste durchschnittliche Wert bei 2,33 g/m³ und der größte durchschnittliche Wert bei 3,19 g/m³, was einer Abweichung von 37 % entspricht.
- Vergleicht man den kleinsten durchschnittlichen Staubkonzentrationswert in Höhe von 2,33 g/m³ mit dem größten durchschnittlichen Wert in Höhe von 4,06 g/m³ bei Versuchen an Probekörpern P1 (80 %) und P2 (70 %), beträgt die Abweichung 74 %.

Dies zeigt die Bedeutung der durchgeführten Versuche, da alleine durch die Wahl der zum Einsatz kommenden Scheiben bis zu 37 % Staubkonzentration reduziert werden können. Nutzt man darüber hinaus noch den Einfluss des Salzgehaltes, so liegt bei den vorliegenden Bedingungen die Reduktion bei bis zu 74 %.

7.4.2.1.5 Mathematische Auswertung

Beschreiben lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen den Staubkonzentrationen bei den Vorschüben v1 und v2 mittels linearer Regression. Die Gerade

$$y = a + b \cdot x$$

mit Steigung

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7-9)$$

und Schnittpunkt mit der Y-Achse

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (7-10)$$

ergibt für Schleifscheibe S1 (Abbildung 7-32) mit den arithmetischen Mittelwerten \bar{x} und \bar{y}

- für 0 % Salzgehalt $y_{(0\%,S1)} = 2,8388 + 102 \cdot x$ (7-11)

- für 70 % Salzgehalt $y_{(70\%,S1)} = 2,0093 + 297 \cdot x$ (7-12)

- für 80 % Salzgehalt $y_{(80\%,S1)} = 1,1055 + 395 \cdot x$ (7-13)

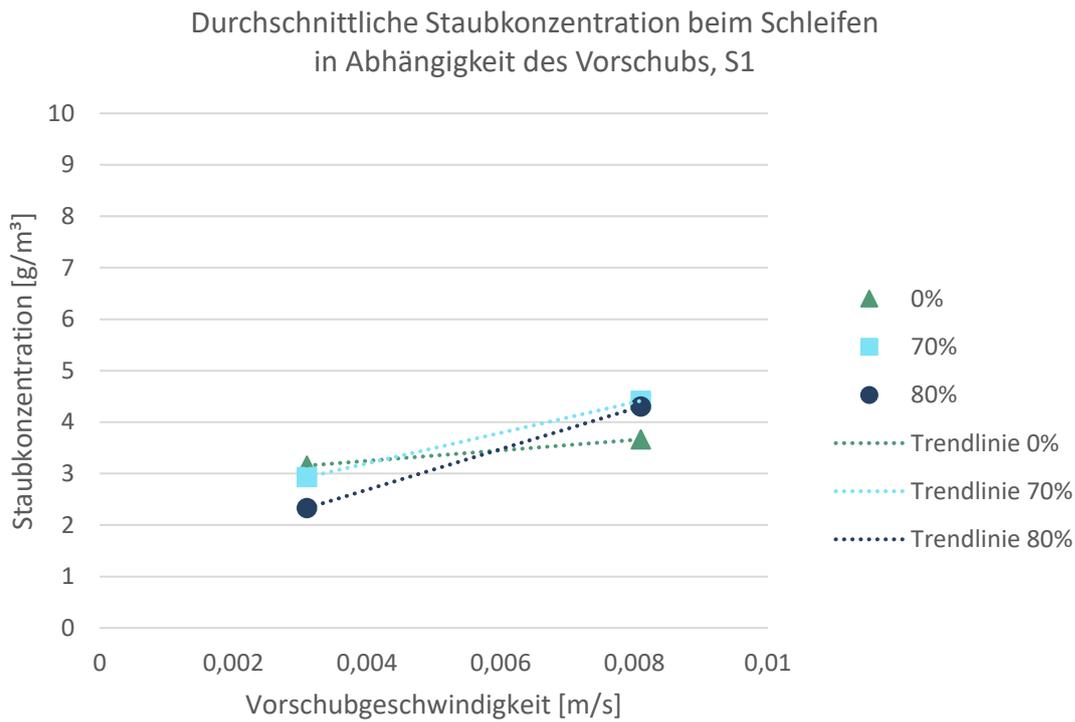


Abbildung 7-32: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit S1 in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie

Für Schleifscheibe S2 (Abbildung 7-33) ergibt die Gerade mit den arithmetischen Mittelwerten \bar{x} und \bar{y}

- für 0 % Salzgehalt $y_{(0\%,S2)} = 5,3659 - 89 \cdot x$ (7-14)

- für 70 % Salzgehalt $y_{(70\%,S2)} = 3,4648 + 192 \cdot x$ (7-15)

- für 80 % Salzgehalt $y_{(80\%,S2)} = 2,5266 + 214 \cdot x$ (7-16)

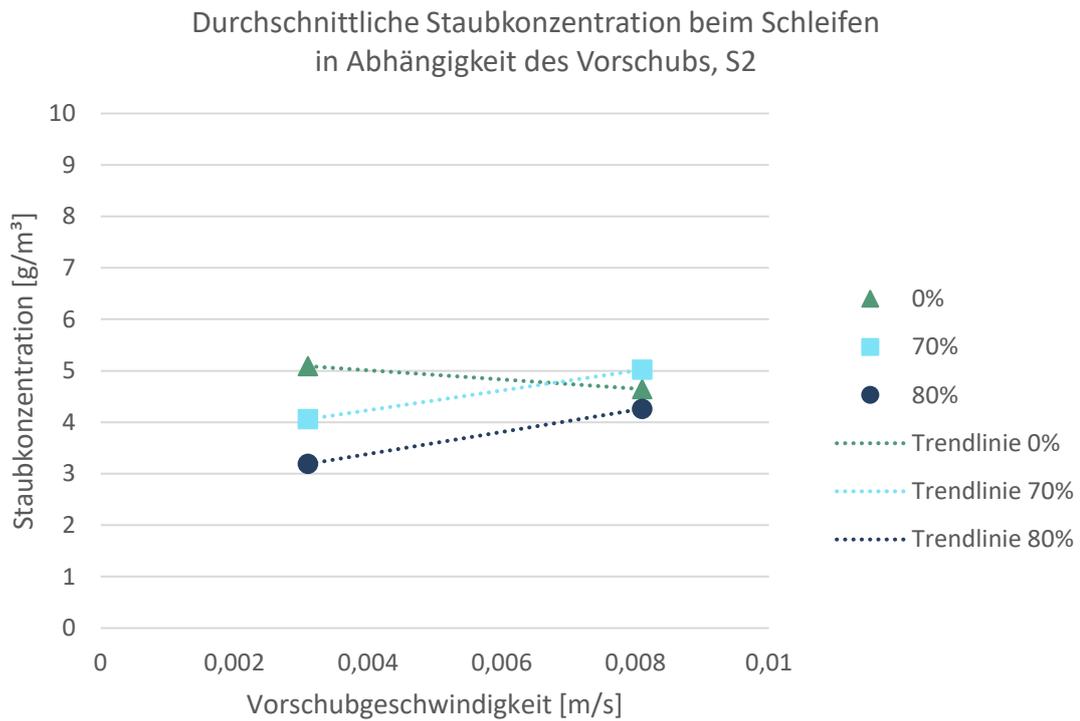


Abbildung 7-33: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit S2 in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie

Für Schleifscheibe S3 (Abbildung 7-34) ergibt die Gerade mit den arithmetischen Mittelwerten \bar{x} und \bar{y}

- für 0 % Salzgehalt $y_{(0\%,S3)} = 3,1224 + 46 \cdot x$ (7-17)

- für 70 % Salzgehalt $y_{(70\%,S3)} = 1,9805 + 245 \cdot x$ (7-18)

- für 80 % Salzgehalt $y_{(80\%,S3)} = 1,5019 + 351 \cdot x$ (7-19)

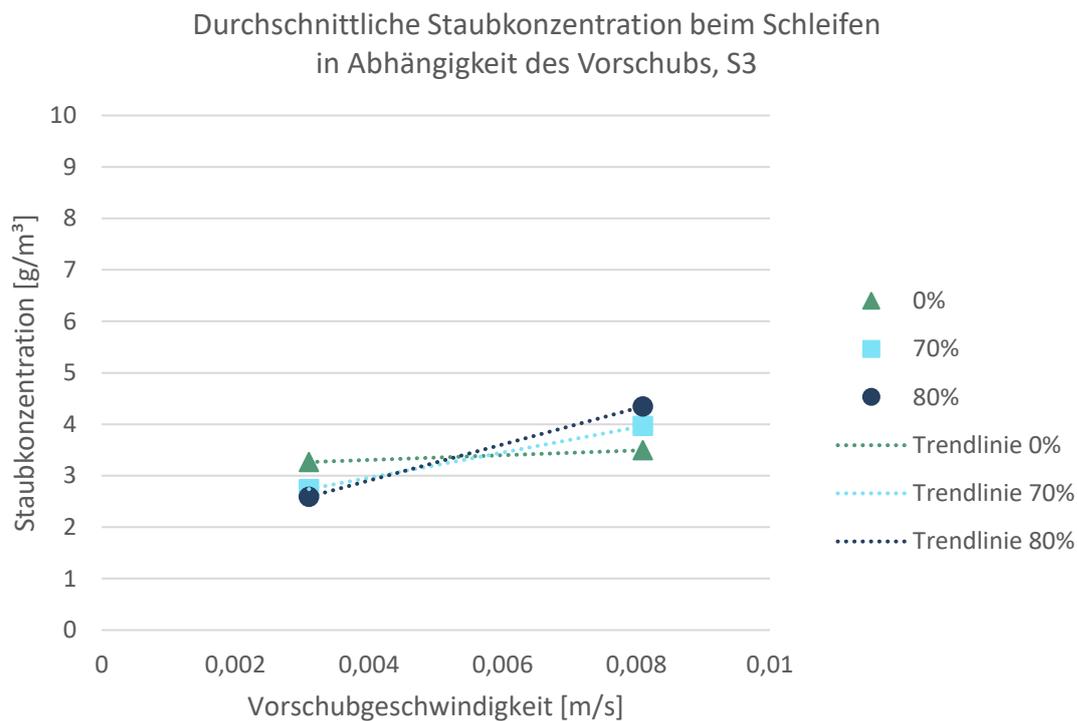


Abbildung 7-34: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit S3 in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie

Wie bei den Steigungen der vorangegangenen Regressionsgeraden (Abbildung 7-32 bis Abbildung 7-34) ersichtlich, hat die Vorschubgeschwindigkeit beim Schleifen – über alle drei Schleifscheiben hinweg – auf den Referenzbeton den geringsten Einfluss. Auf die Salzbetone mit 70 % und 80 % Salzgehalt ist der Einfluss jeweils deutlich höher. (Abbildung 7-41)

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen somit, dass die Staubkonzentration beim Schleifen sowohl von der Vorschubgeschwindigkeit des Bearbeitungswerkzeugs, vom Salzgehalt des zu bearbeitenden Materials als auch von der Anordnung der Segmente auf der Schleifscheibe abhängt.

In Kapitel 6.1 wurde der Zusammenhang von Korngröße und Verweildauer der Partikel in der Luft erläutert. Um neben den zuvor beschriebenen Einflüssen auch die Auswirkungen der Versuchsparameter auf die sich einstellenden Korngrößen zu untersuchen, wird im folgenden Kapitel der jeweils aufgefangene Staub aus den Versuchen ausgewertet und analysiert.

7.4.2.2 Auswertung des beim Schleifen abgetragenen Materials

Bei jedem Versuch wurden im Versuchsstand vier Auffangschalen positioniert, in denen sich – durch die Bearbeitung des Probekörpers – gelöste Partikel absetzen konnte. Der Inhalt der Auffangschalen wurde nach jedem Versuch direkt gewogen, abgefüllt und einer Kornanalyse (Kapitel 7.3) unterzogen.

Auszugsweise sind die gemessenen Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge und die pro Versuch aufgefangene Masse in der folgenden Tabelle 7-20 aufgeführt; für die entsprechenden vollständigen Graphen sei an dieser Stelle auf den Anhang Nr. 3 verwiesen.

7.4.2.2.1 Probekörper P3, 0 % Salzgehalt

Die an Probekörper P3 mit 0 % Salzgehalt durchgeführten Versuche führen zu den in Tabelle 7-20 aufgeführten Werte. Hierbei sind sowohl der Anteil (und der kumulierte Anteil) der jeweiligen Kornfraktion an der aufgefangenen Gesamtmasse, der ermittelte Median, die Masse des Überkorns als auch die aufgefangene Gesamtmasse je Versuch aufgeführt. Dem im Hinblick auf die Rückholung tiefengelagerter Abfallgebilde wünschenswerten Fall, eine Partikelgröße von deutlich über 1 μm zu erreichen, kann somit entsprochen werden, da der größte Anteil des aufgefangenen Materials eine Korngröße von über 0,001 mm = 1 μm aufweist. Diesbezüglich sei an dieser Stelle auf den Anhang 3 verwiesen.

Tabelle 7-20: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Schleifen, 0 % Salzgehalt

Referenzbeton P3 mit 0 % Salzgehalt									
Versuchsnummer	Schleifscheibe	Vorschub- geschwindigkeit	Anteil der Kornfraktion an der aufgefangenen Gesamtmasse pro Versuch [%]				Median [mm]	>2,0 mm [g] (Überkorn)	Aufgefangene Masse [g]
			0,0 - 0,2 mm (kumuliert) [%]	0,21 - 0,5 mm (kumuliert) [%]	0,51 - 1,0 mm (kumuliert) [%]	1,01 - 2,0 mm (kumuliert) [%]			
1 ¹	S1	v1	15,60 (15,60)	5,00 (20,60)	4,80 (25,40)	6,00 (31,40)	*	0,00	1,26
2			45,90 (45,90)	16,60 (62,50)	12,60 (75,10)	24,90 (100,00)	0,2488	0,20	0,84

¹ Bei dieser Messung kam es zu einer Verkeilung der Partikel innerhalb der Zuführung, weshalb lediglich ein kleiner Anteil vom Messsystem des Camsizer XT erfasst werden konnte. Da das Material direkt nach der Messung vom Gerät abgesaugt wurde, steht dieses Material nicht für eine erneute Messung zur Verfügung. Die gemessenen Werte sind somit nicht repräsentativ und gehen nicht in die weitere Betrachtung und den entsprechenden Mittelwert mit ein.

Mittelwerte _{1,2}			45,90 (45,90)	16,60 (62,50)	12,60 (75,10)	24,90 (100,00)	0,2488	0,10	1,05
5	S2	v1	42,10 (42,10)	20,10 (62,20)	13,70 (75,90)	6,10 (82,00)	0,3064	0,19	3,31
6			73,00 (73,00)	22,50 (95,50)	4,50 (100,00)	0,00 (100,00)	0,0717	0,00	2,41
Mittelwerte _{5,6}			57,55 (57,55)	21,30 (78,85)	9,10 (87,95)	3,05 (91,00)	0,1891	0,10	2,86
9	S3	v1	22,20 (22,20)	18,80 (41,00)	29,10 (70,10)	24,00 (94,10)	0,6516	0,44	1,52
10			33,30 (33,30)	25,20 (58,50)	19,70 (78,20)	21,80 (100,00)	0,3817	0,00	0,58
Mittelwerte _{9,10}			27,75 (27,75)	22,00 (49,75)	24,40 (74,15)	22,90 (97,05)	0,5167	0,22	1,05

Der Median, welcher die gemessenen Daten so teilt, dass die Werte in der einen Hälfte alle kleiner und die Werte in der anderen Hälfte alle größer sind als der Medianwert selbst, gibt an dieser Stelle die Möglichkeit, die aufgefundenen Massen der Versuchsreihen hinsichtlich ihrer vorherrschenden Partikelgrößen zu vergleichen. Je größer der Median, desto mehr grobe Partikel befinden sich in der aufgefundenen Masse eines Versuchs und je kleiner der Median, desto mehr feine Partikel. Bezugnehmend auf Kapitel 6.1 wird daher im Folgenden das aufgefangene Material als „grob“ bezeichnet wenn der Median größer 1 µm ist, und als „fein“ wenn der Median kleiner 1 µm ist.

Das bei langsamer Vorschubgeschwindigkeit v1 feinste Material mit einem Median von 0,1891 mm erzeugte am Probekörper P3 mit 0 % Salzgehalt Scheibe S2. (Tabelle 7-20) Dass das Material, welches bei der Bearbeitung mit Scheibe S2 entsteht, feiner ist als bei der Bearbeitung mit den Scheiben S1 oder S3, lässt sich dadurch erklären, dass die Scheibe S2 das abgetragene Material länger unter dem jeweiligen Segment zermahlt. (vgl. Kapitel 7.4.2.1.4)

Bei den Massenanteilen der Kornfraktionen an der aufgefundenen Gesamtmasse ist erkennbar dass durch den Einsatz der Schleifscheibe S2 viel feiner Staub der Kornfraktion 0 – 0,2 mm aufgefangen wurde und die Massenanteile der Kornfraktionen mit zunehmender Größe abnehmen. (Abbildung 7-35)

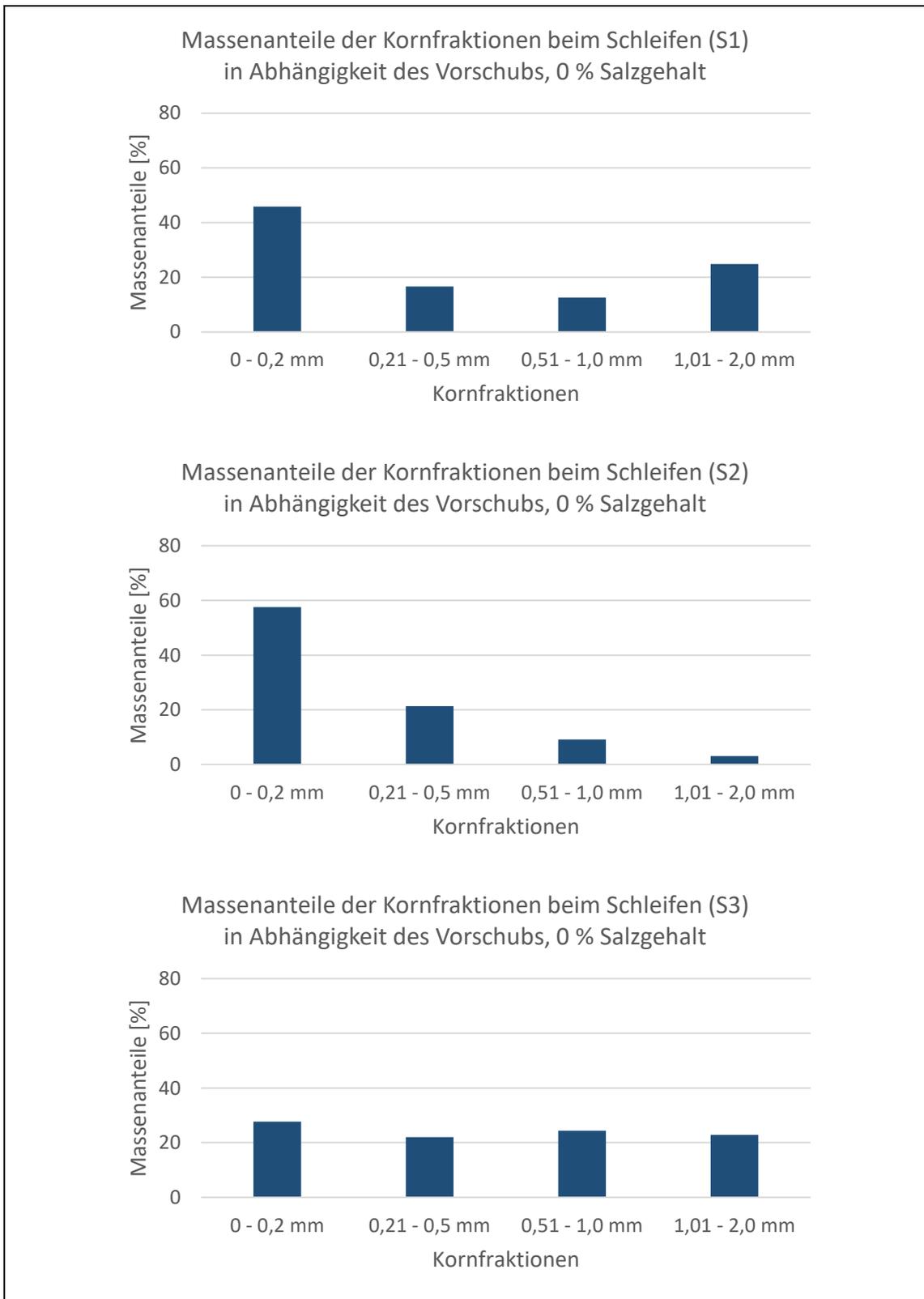


Abbildung 7-35: Massenanteile der Kornfraktionen beim Schleifen in Abhängigkeit des Vorschubs, 0 % Salzgehalt

7.4.2.2.2 Probekörper P2, 70 % Salzgehalt

Bei den an Probekörper P2 mit 70 % Salzgehalt durchgeführten Versuchen werden die folgenden Werte ermittelt. (Tabelle 7-21) Wie zuvor (Kapitel 7.4.2.2.1) sind hier sowohl der Anteil (und der kumulierte Anteil) der jeweiligen Kornfraktion an der aufgefangenen Gesamtmasse, der ermittelte Median, die Masse des Überkorns als auch die aufgefangene Gesamtmasse je Versuch aufgeführt. Und auch bei der Bearbeitung von Probekörper P2 mit 70 % Salzgehalt wird dem Wunsch entsprochen, eine Partikelgröße von deutlich über 1 μm zu erreichen. (Anhang 3)

Tabelle 7-21: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Schleifen, 70 % Salzgehalt

Salzbeton P2 mit 70 % Salzgehalt									
Versuchsnummer	Schleifscheibe	Vorschub- geschwindigkeit	Anteil der Kornfraktion an der aufgefangenen Gesamtmasse pro Versuch [%]				Median [mm]	>2,0 mm [g] (Überkorn)	Aufgefangene Masse [g]
			0,0 - 0,2 mm (kumuliert)	0,21 - 0,5 mm (kumuliert)	0,51 - 1,0 mm (kumuliert)	1,01 - 2,0 mm (kumuliert)			
13	S1	v1	26,10 (26,10)	12,80 (38,90)	26,10 (65,00)	30,30 (95,30)	0,6904	0,50	2,13
14			63,40 (63,40)	18,10 (81,50)	6,90 (88,40)	11,60 (100,00)	0,1246	0,00	1,46
Mittelwerte _{13, 14}			44,75 (44,75)	15,45 (60,20)	16,50 (76,70)	20,95 (97,65)	0,4075	0,25	1,80
17	S2	v1	37,10 (37,10)	19,90 (57,00)	17,60 (74,60)	20,00 (94,60)	0,3857	0,24	2,33
18			41,00 (41,00)	22,00 (63,00)	19,20 (82,20)	17,80 (100,00)	0,3051	0,23	2,32
Mittelwerte _{17, 18}			39,05 (39,05)	20,95 (60,00)	18,40 (78,40)	18,90 (97,30)	0,3454	0,24	2,33
21	S3	v1	21,70 (21,70)	12,80 (34,50)	18,00 (52,50)	34,20 (86,70)	0,9130	0,51	2,73
22			11,00 (11,00)	30,80 (41,80)	35,00 (76,80)	21,90 (98,70)	0,5960	0,25	4,51
Mittelwerte _{21, 22}			16,35 (16,35)	21,80 (38,15)	26,50 (64,65)	28,05 (92,70)	0,7545	0,38	3,62

Wie zuvor (Probekörper P3 mit 0 % Salzgehalt) entsteht das bei langsamer Vorschubgeschwindigkeit v_1 feinste Material mit einem Median von 0,3454 mm am Probekörper P2 mit 70 % Salzgehalt durch die Bearbeitung mit Scheibe S2.

Wie bereits beim Probekörper P3 mit 0 % Salzgehalt ist bei den Massenanteilen der Kornfraktionen an der aufgefangenen Gesamtmasse von Probekörper P2 mit 70 % Salzgehalt erkennbar dass durch den Einsatz der Schleifscheibe S2 die Massenanteile der Kornfraktionen mit zunehmender Größe abnehmen. (Abbildung 7-36)

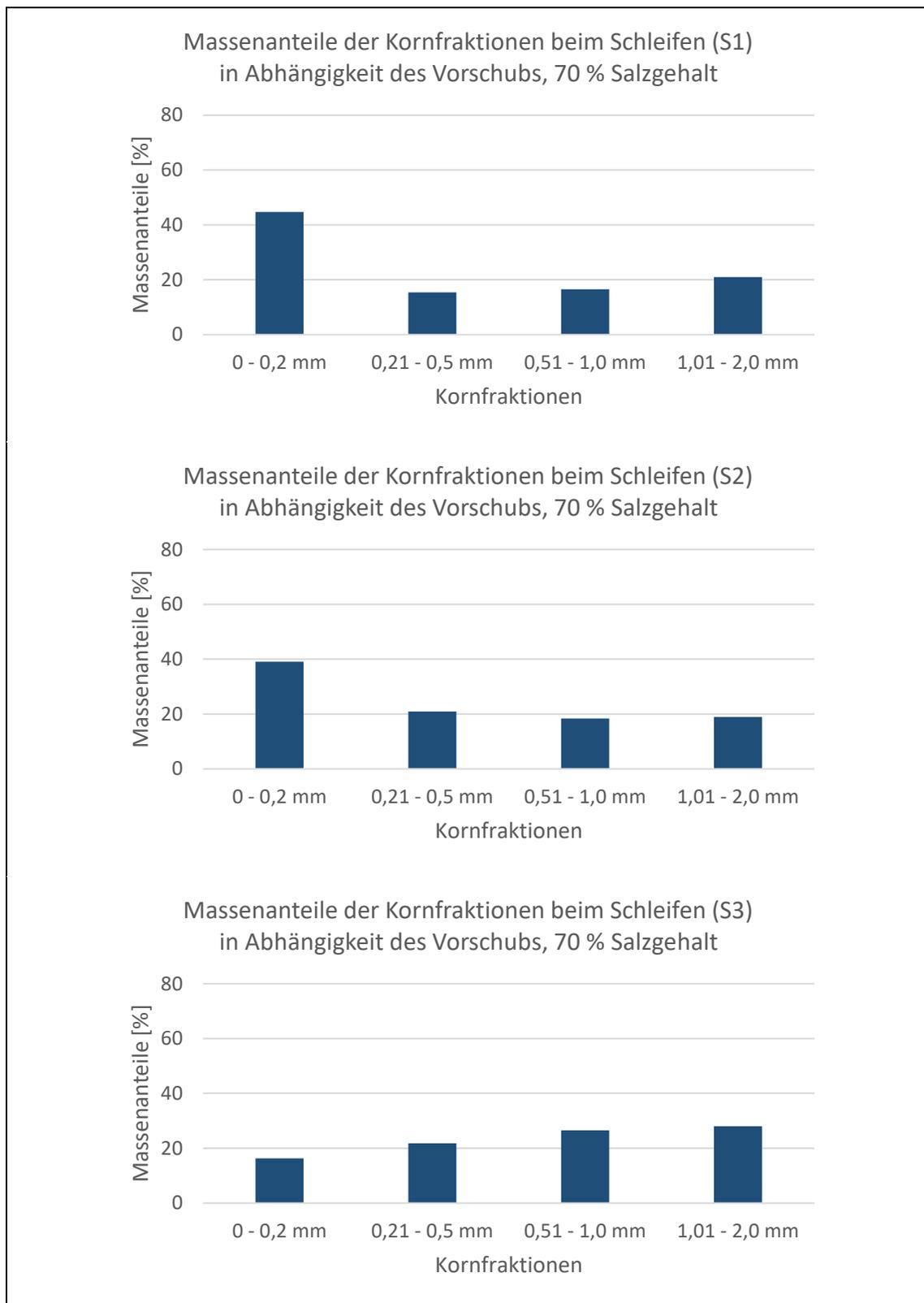


Abbildung 7-36: Massenanteile der Kornfraktionen beim Schleifen
in Abhängigkeit des Vorschubs, 70 % Salzgehalt

7.4.2.2.3 Probekörper P1, 80 % Salzgehalt

Bei den an Probekörper P1 mit 80 % Salzgehalt durchgeführten Versuchen werden die folgenden Massen und Kornfraktionen ermittelt. (Tabelle 7-22) Erneut sind hier sowohl der Anteil (und der kumulierte Anteil) der jeweiligen Kornfraktion an der aufgefangenen Gesamtmasse, der ermittelte Median, die Masse des Überkorns als auch die aufgefangene Gesamtmasse je Versuch aufgeführt. Und auch bei der Bearbeitung von Probekörper P3 mit 80 % Salzgehalt wird dem Wunsch entsprochen, eine Partikelgröße von deutlich über 1 µm zu erreichen. (Anhang 3)

Tabelle 7-22: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Schleifen, 80 % Salzgehalt

Salzbeton P1 mit 80 % Salzgehalt									
Versuchsnummer	Schleifscheibe	Vorschub- geschwindigkeit	Anteil der Kornfraktion an der aufgefangenen Gesamtmasse pro Versuch [%]				Median [mm]	>2,0 mm [g] (Überkorn)	Aufgefangene Masse [g]
			0,0 - 0,2 mm (kumuliert) [%]	0,21 - 0,5 mm (kumuliert) [%]	0,51 - 1,0 mm (kumuliert) [%]	1,01 - 2,0 mm (kumuliert) [%]			
25	S1	v1	5,90 (5,90)	6,70 (12,60)	17,70 (30,30)	46,90 (77,20)	1,4036	2,80	6,36
26			16,40 (16,40)	11,80 (28,20)	19,30 (47,50)	26,40 (73,90)	1,1078	0,57	3,01
Mittelwerte ^{25, 26}			11,15 (11,15)	9,25 (20,40)	18,50 (38,90)	36,65 (75,55)	1,2557	1,69	4,69
29	S2	v1	10,10 (10,10)	18,50 (27,60)	35,80 (63,40)	36,60 (100,00)	0,7897	0,31	1,86
30 ²			*	*	*	*	*	*	3,41
Mittelwerte ^{29, 30}			10,10 (10,10)	18,50 (27,60)	35,80 (63,40)	36,60 (100,00)	0,7897	0,31	2,64

² Bei dieser Messung kam es zu einer Verteilung der Partikel innerhalb der Zuführung, weshalb lediglich ein kleiner Anteil vom Messsystem des Camsizer XT erfasst werden konnte. Da das Material direkt nach der Messung vom Gerät abgesaugt wurde, steht dieses Material nicht für eine erneute Messung zur Verfügung. Die gemessenen Werte sind somit nicht repräsentativ und gehen nicht in die weitere Betrachtung und den entsprechenden Mittelwert mit ein. (vgl. Fußnote 1)

33	S3	v1	8,60 (8,60)	9,30 (17,90)	23,80 (41,70)	48,50 (90,20)	1,1673	0,96	3,61
34			26,10 (26,10)	27,40 (53,50)	31,90 (85,40)	14,60 (100,00)	0,4439	0,00	1,10
Mittelwerte _{33, 34}			17,35 (17,35)	18,35 (35,70)	27,85 (63,55)	31,55 (95,10)	0,8056	0,48	2,36

Wie bereits zuvor wird das bei langsamer Vorschubgeschwindigkeit v1 feinste Material mit einem Median von 0,7897 mm am Probekörper P1 mit 80 % Salzgehalt durch Scheibe S2 erzeugt.

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Probekörpern ist bei den Massenanteilen der Kornfraktionen an der aufgefangenen Gesamtmasse von Probekörper P1 mit 80 % Salzgehalt erkennbar dass durch den Einsatz der Schleifscheibe S2 die Massenanteile der Kornfraktionen mit zunehmender Größe zunehmen. (Abbildung 7-37)

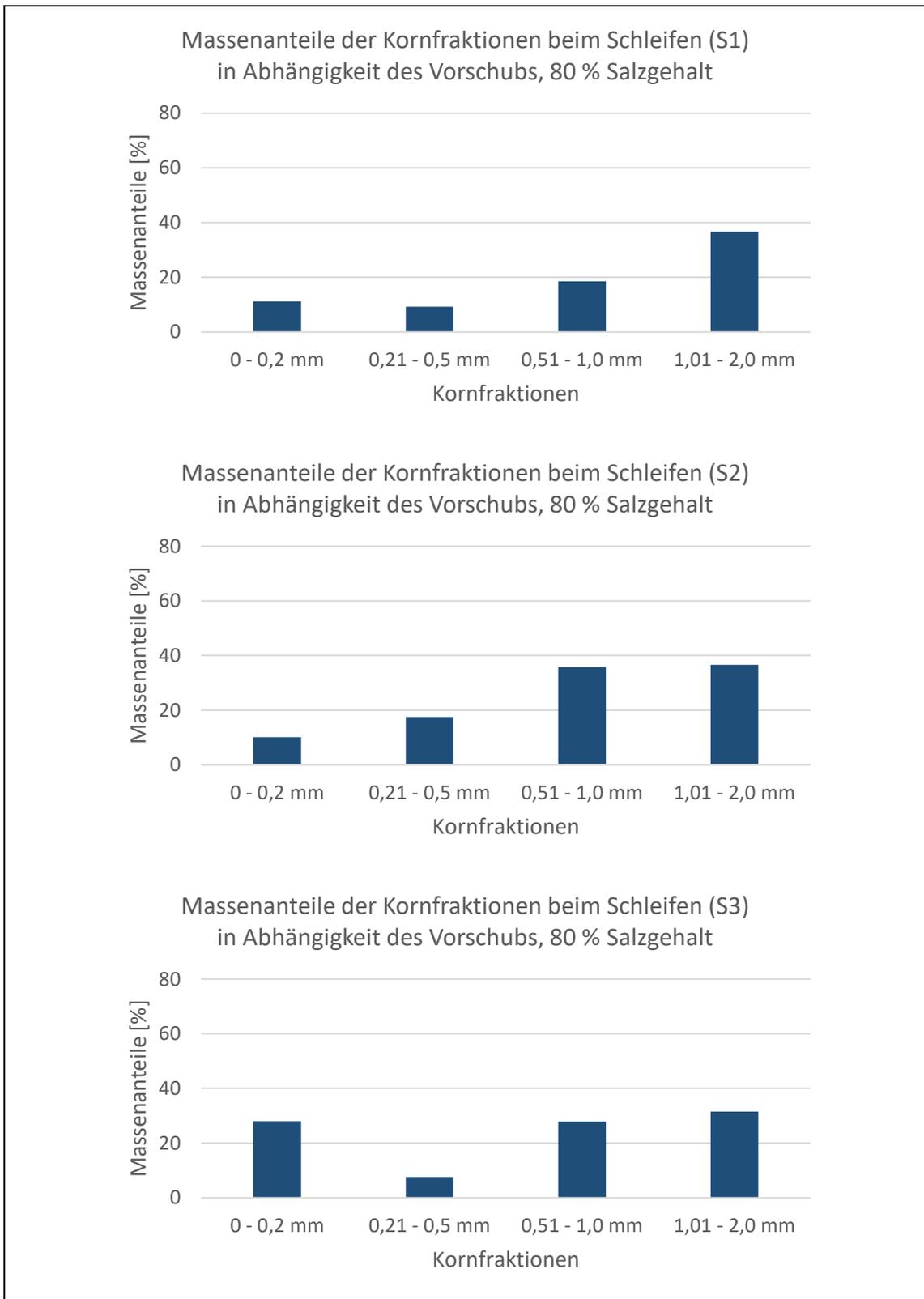


Abbildung 7-37: Massenanteile der Kornfraktionen beim Schleifen in Abhängigkeit des Vorschubs, 80 % Salzgehalt

7.4.2.2.4 Zusammenfassendes Ergebnis

Die vorhergehenden Versuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, eine Aussage über die Korngrößen der abgetragenen Partikel bei der Bearbeitung von unterschiedlichen Probekörpern mit unterschiedlichen Salzgehalten und unterschiedlichen Scheiben treffen zu können.

Da sich anhand der vorhergehenden Versuche gezeigt hat, dass die Vorschubgeschwindigkeit langsam gewählt werden sollte, wurden diese sehr umfangreichen Versuche nur mit der Vorschubgeschwindigkeit v1 durchgeführt.

Nachfolgende Tabelle 7-23 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse, wobei jeweils pro Versuchskörper über alle drei Scheiben S1, S2 und S3 hinweg der Durchschnitt der Staubkonzentration, der Durchschnitt der aufgefangenen Materialmasse und der Median aufgeführt ist.

Hierbei ist ersichtlich, dass die Größe des Medians mit zunehmendem Salzgehalt ebenfalls zunimmt. Dieser Effekt ist wünschenswert, da mit zunehmender Partikelgröße die Verweildauer in der Luft abnimmt und sich somit der Staub schneller niederschlägt.

Zudem wird ersichtlich, dass die Scheibe S2 mit quer angeordneten Segmenten im Mittel den kleinsten Median erzielt. Da jedoch im Hinblick auf die Rückholung von tiefengelagerten Abfallgebänden ein großer Median gewünscht ist, sprechen die hier aufgeführten Ergebnisse für den Einsatz von Scheiben mit längs angeordneten Segmenten.

Dass die Größe des Medians mit zunehmendem Salzgehalt zunimmt, und sich somit mehr Staub schneller absetzt, wird durch die aufgefangene Masse der Versuche deutlich, welche im vorliegenden Fall mit zunehmendem Salzgehalt von 1,65 g auf 3,23 g und somit um knapp 96 % steigt. (Tabelle 7-23)

Tabelle 7-23: Zusammenfassung der Messergebnisse, Schleifen

Versuchsnummer	Salzgehalt des Probekörpers	Schleifscheibe	Vorschubgeschwindigkeit	Ø Staubkonzentration aller Versuche am Probekörper [g/m ³]	Ø aufgefangenes Material aller Versuche am Probekörper [g]	Ø Median des aufgefangenen Materials aller Versuche am Probekörper [mm]
1	0 %	S1	v1	3,84	1,65	0,3320
2						
5		S2	v1			
6						
9		S3	v1			
10						
13	70 %	S1	v1	3,24	2,58	0,5025
14						
17		S2	v1			
18						
21		S3	v1			
22						
25	80 %	S1	v1	2,70	3,23	0,9825
26						
29		S2	v1			
30						
33		S3	v1			
34						

Diese Ergebnisse können daher folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Die gemessene Staubkonzentration beim Schleifen nimmt mit zunehmendem Salzgehalt des Probekörpers ab.
→ dies ist im Hinblick auf die Rückholung von Abfällen aus einem Tiefenlager positiv zu bewerten
- Die sich absetzende Masse nimmt mit zunehmendem Salzgehalt des Probekörpers zu.
→ dies ist im Hinblick auf die Rückholung von Abfällen aus einem Tiefenlager positiv zu bewerten
- Das sich absetzende Material ist gröber, je höher der Salzgehalt des Probekörpers ist.
→ dies ist im Hinblick auf die Rückholung von Abfällen aus einem Tiefenlager positiv zu bewerten

7.5 Fräsversuche

Da die tiefengelagerten Gebinde teilweise aus dem verfestigten Versatzmaterial herausgefräst werden müssen, werden zusätzlich zu den Schleifversuchen auch Fräsversuche durchgeführt.

Diese Versuche werden ebenfalls wie die Schleifversuche zuvor mit einem Winkelschleifer (Kapitel 7.3) durchgeführt, jedoch wird das Gerät nun um 90 Grad gedreht angeordnet und mit einem Fugenfräser (Abbildung 7-39) ausgestattet. Somit wird bei jeder Überfahrt eine senkrechte Nut im Probekörper erzeugt.

Die im Folgenden beschriebenen Fräsversuche sind motiviert durch

1. Ermittlung der Staubkonzentration in Abhängigkeit des Salzgehaltes des Probekörpers
2. Ermittlung der Staubkonzentration in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit
3. Untersuchung der sich niederschlagenden Partikel (Masse, Korngrößenverteilung)
4. Ermittlung der bei Versuchsdurchführung auftretenden Kräfte

7.5.1 Versuchsdurchführung – Fräsen

Bei jedem Versuch wird der Fugenfräser mit einer Zustelltiefe von 19,53 mm (Tabelle 7-24) und einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit ($v_1 = 0,0031$ m/s oder $v_2 = 0,0081$ m/s), orthogonal (Abbildung 7-38) und in Längsrichtung über den Probekörper geführt.

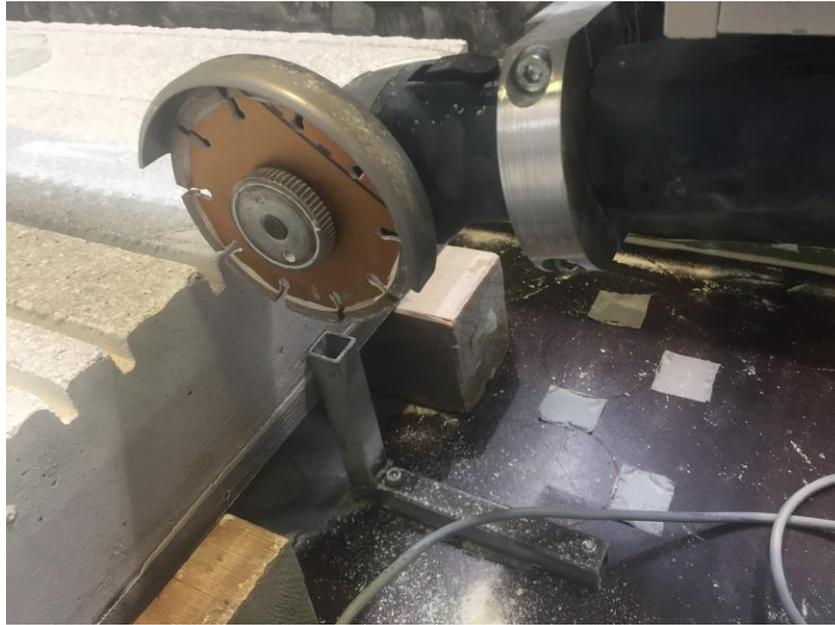


Abbildung 7-38: Fugenfräser in Ausgangsposition

Zum Einsatz kommt ein Diamantfugenfräser der Firma KOPAL mit einem Durchmesser von 125 mm und einer Segmentbreite von 6,4 mm:



F1
KOPAL Diamantfugenfräser



Segment des Diamantfugenfräasers

Abbildung 7-39: Fugenfräser und Detail

Um die Fräsversuche mit den vorhergehend beschriebenen Schleifversuchen (Kapitel 7.4) vergleichen zu können, muss das Abtragsvolumen je Fräsversuch ebenfalls 125 cm^3 betragen, was zu einer benötigten Zustelltiefe von 19,53 mm führt (Tabelle 7-24).

Tabelle 7-24: Abtragsvolumen der einzelnen Fräsversuche

Segmentbreite Fugenfräser	Zustelltiefe	Länge des Probekörpers	Abtragsvolumen
6,4 mm	x 19,53 mm	x 100 mm	= 125 cm ³

Die Permutation der Versuchsparameter ergibt sich daher wie folgt (Tabelle 7-25):

Tabelle 7-25: Permutation der Versuchsparameter, Fräsversuche

	Probekörper (Salzgehalt)	Scheibe/ Fugenfräser	Vorschubgeschwindigkeit [m/s]	Durchlauf	
	P1 (80 %)	F1	0,0031 (v1)	1	Versuche
	P2 (70 %)		0,0081 (v2)	2	
	P3 (0 %)				
Anzahl	3	x 1	x 2	x 2	= 12

Ebenso wie bei den Schleifversuchen setzen sich die nach Versuchsdurchführung in der Luft befindlichen Partikel 120 s ab. Die Partikel, die sich danach noch in der Luft innerhalb der Einhausung befinden, werden über eine Dauer von 60 s abgesaugt (Abbildung 7-26) bevor die Einhausung geöffnet, und die Auffangschalen entnommen werden.

7.5.2 Ergebnisse der Fräsversuche

7.5.2.1 Staubkonzentration in der Luft beim Fräsen

Ein Auszug der mittels Messgerät ermittelten Staubkonzentrations-Werte der jeweiligen Versuche findet sich in der folgenden Tabelle 7-26. Für die vollständigen Messwerte sei an dieser Stelle auf Anhang Nr. 4 verwiesen.

Tabelle 7-26: Staubkonzentrationen der Fräsversuche

	Versuchsnummer	Vorschub- geschwindigkeit	Durchlauf	Staubkonzentration [g/m ³]				
				Wert bei 60 s	Wert bei 120 s	Durchschnitt	Maximum	
Referenzbeton P3 mit 0 % Salzgehalt	F1	v1	D1	3,32	3,12	2,85	3,78	
	F2		D2	3,01	3,05	3,50	4,92	
	Mittelwerte _{F1, F2}				3,17	3,09	3,18	4,35
	F3	v2	D1	4,88	4,91	4,32	5,79	
	F4		D2	4,70	5,53	4,76	6,84	
	Mittelwerte _{F3, F4}				4,79	5,22	4,54	6,32
Salzbeton P2 mit 70 % Salzgehalt	F5	v1	D1	4,38	5,57	5,01	6,21	
	F6			3,44	5,13	4,60	6,18	
	Mittelwerte _{F5, F6}				3,91	5,35	4,81	6,20
	F7	v2	D1	5,82	5,61	4,82	6,91	
	F8			5,76	5,60	4,84	6,39	
	Mittelwerte _{F7, F8}				5,79	5,61	4,83	6,65
Salzbeton P1 mit 80 % Salzgehalt	F9	v1	D1	3,10	4,41	3,91	5,32	
	F10			3,96	5,13	4,39	5,93	
	Mittelwerte _{F9, F10}				3,53	4,77	4,15	5,63
	F11	v2	D1	5,14	6,08	4,43	6,44	
	F12			5,06	5,34	4,20	5,98	
	Mittelwerte _{F11, F12}				5,10	5,71	4,32	6,21

Bei den Fräsversuchen fällt auf, dass – unabhängig vom Salzgehalt des Probekörpers – die durchschnittlichen und maximalen Staubkonzentrationen bei schneller Vorschubgeschwindigkeit v2 im Vergleich zu den jeweiligen langsameren Versuchsdurchführungen mit der Vorschubgeschwindigkeit v1 erhöht sind. Eine Abhängigkeit der Staubkonzentration vom Salzgehalt der Probekörper ist bei der fräsenden Bearbeitung jedoch nicht zu erkennen. (Abbildung 7-40)

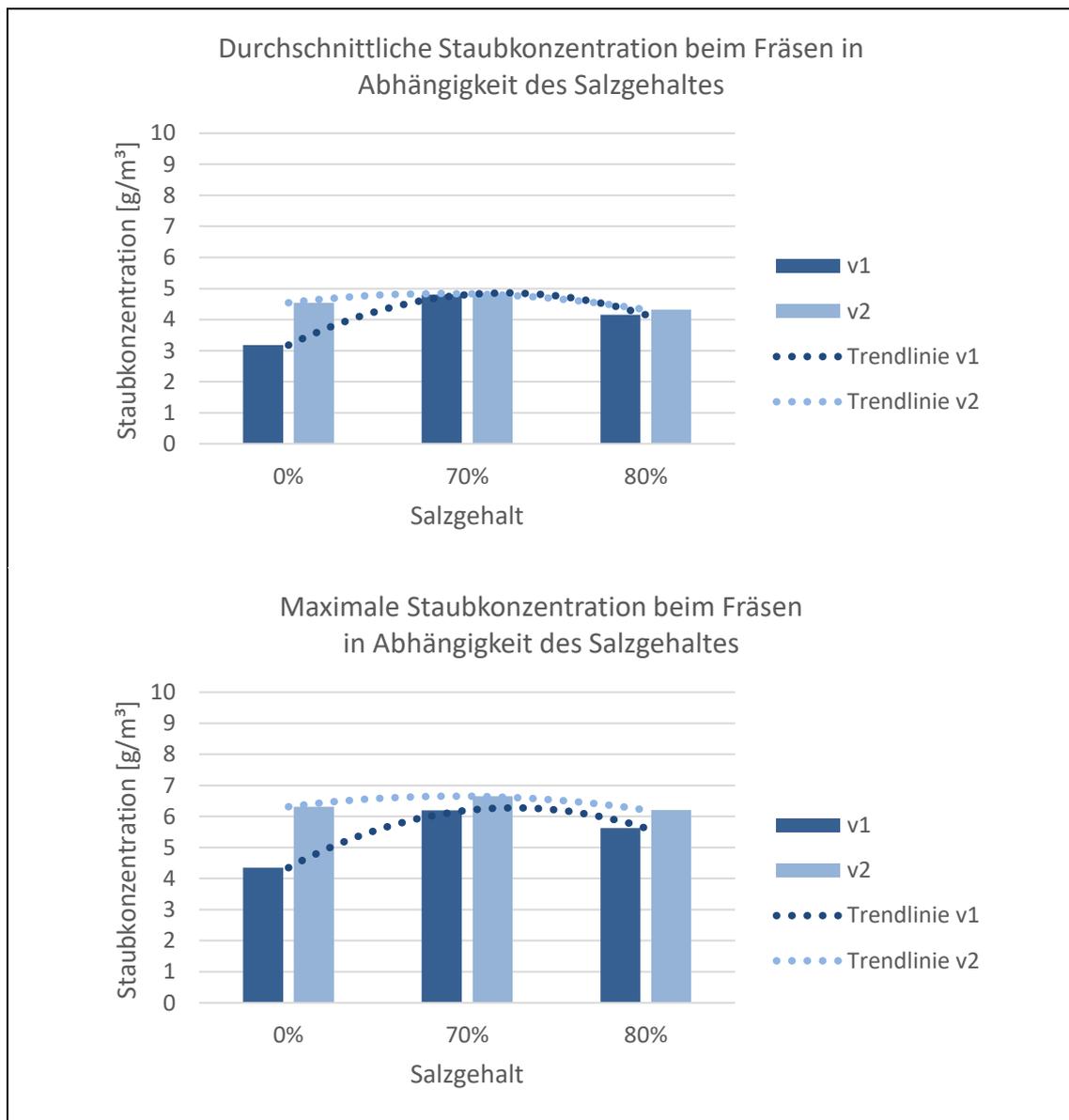


Abbildung 7-40: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes

Bei der Gegenüberstellung der Steigerungen der Staubkonzentration bei langsamer zu Staubkonzentration bei schneller Vorschubgeschwindigkeit zeichnet sich im Fall der fräsenden Versuche keine Abhängigkeit vom Salzgehalt der Probekörper ab. Deutlich ist jedoch, dass beim Probekörper ohne Salzgehalt der Unterschied zwischen den bei Vorschubgeschwindigkeit v1 gemessenen Werten und den bei Vorschubgeschwindigkeit v2 gemessenen Werten am größten ist. Festzustellen bleibt somit, dass eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von $v_1 = 0,0031 \text{ m/s}$ um 161,3 % auf $v_2 = 0,0081 \text{ m/s}$, abhängig vom Salzgehalt des Probekörpers, zu einer Erhöhung der gemessenen Staubkonzentrationswerte gemäß nachfolgender Tabelle 7-27 führt.

Tabelle 7-27: Gegenüberstellung der Steigerungen der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2 - Fräsen

Salzgehalt		Fugenfräser
0 % (P3)	Steigerung der durchschnittlichen Staubkonzentration von v1 zu v2	+ 42,8 %
	Steigerung der maximalen Staubkonzentration von v1 zu v2	+ 45,3 %
70 % (P2)	Steigerung der durchschnittlichen Staubkonzentration von v1 zu v2	+ 0,4 %
	Steigerung der maximalen Staubkonzentration von v1 zu v2	+ 7,3 %
80 % (P1)	Steigerung der durchschnittlichen Staubkonzentration von v1 zu v2	+ 4,1 %
	Steigerung der maximalen Staubkonzentration von v1 zu v2	+ 10,3 %

7.5.2.1.1 Mathematische Auswertung

Beschreiben lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen Staubkonzentrationen bei den Vorschüben v1 und v2 mittels linearer Regression. Gemäß Kapitel 7.4.2.1 ergibt sich mit den arithmetischen Mittelwerten \bar{x} und \bar{y} (Abbildung 7-41)

- für 0 % Salzgehalt $y_{(0\%)} = 2,3287 + 273 \cdot x$ (7-20)

- für 70 % Salzgehalt $y_{(70\%)} = 4,7895 + 5 \cdot x$ (7-21)

- für 80 % Salzgehalt $y_{(80\%)} = 4,0477 + 33 \cdot x$ (7-22)

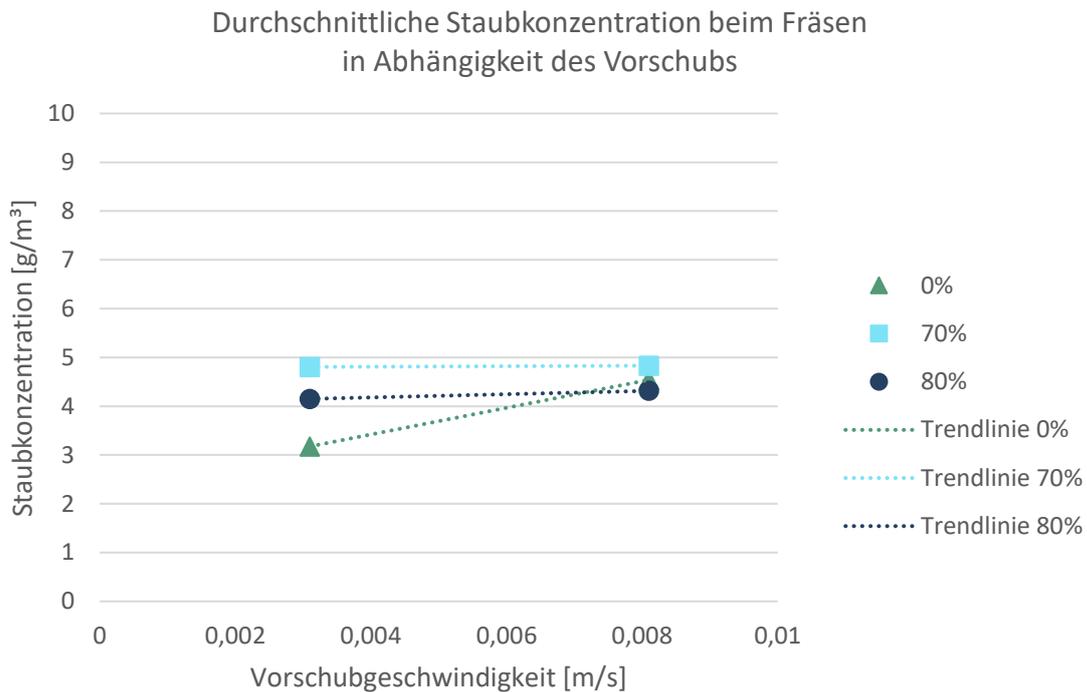


Abbildung 7-41: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Fräsen in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie

Durch die Steigungen der Regressionsgeraden ist ersichtlich, dass – anders als beim Schleifen – die Vorschubgeschwindigkeit beim Fräsen den größten Einfluss auf den Referenzbeton hat, auf die Salzbetone mit 70 % und 80 % Salzgehalt ist der Einfluss geringer. (Abbildung 7-41)

Die Staubkonzentration beim Fräsen scheint somit lediglich von der Vorschubgeschwindigkeit des Bearbeitungswerkzeugs abzuhängen. Dies ist erklärbar durch den Eingriff des Werkzeuges beim Fräsen. Die Scheibe trifft hierbei senkrecht in das Material und schleudert dieses direkt aus dem Schnittkanal nach außen. (Abbildung 7-42)

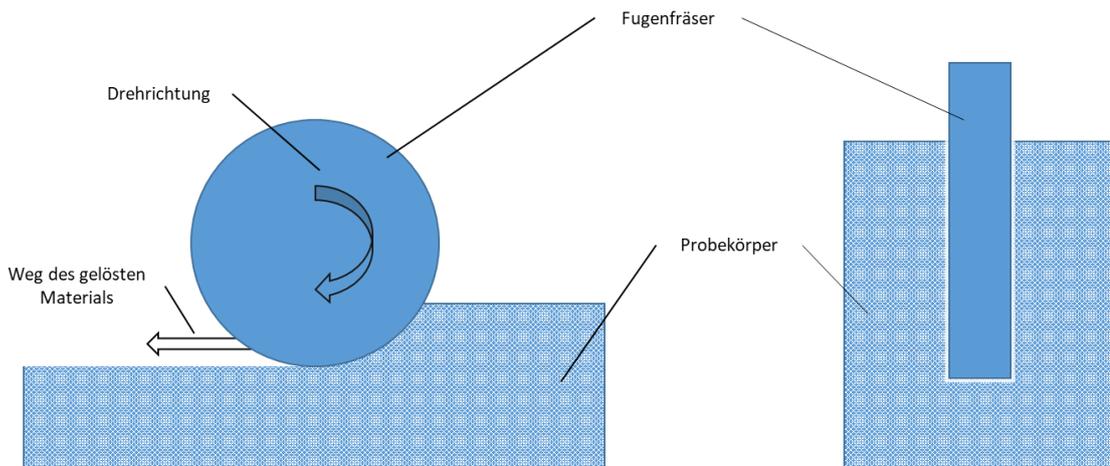


Abbildung 7-42: Seitenansicht (links) und Vorderansicht (rechts) des Fugenfräses im Material

Während beim Schleifen das Material unter der Scheibe verweilt und mechanisch bearbeitet wird, wird beim Fräsen direkt das gesamte Volumen, das gefräst wird, freigesetzt. Daher ist die Abhängigkeit der Staubkonzentration von der Geschwindigkeit viel ausgeprägter.

Auch hier wird im nächsten Schritt untersucht, inwieweit die Materialgröße des in den Auffangschalen aufgefangenen Abtrags in Zusammenhang mit der zuvor gemessenen Staubkonzentration steht.

7.5.2.2 Auswertung des beim Fräsen abgetragenen Materials

Da sich beim Fräsen bisher lediglich eine Abhängigkeit von v_1 und v_2 , nicht aber vom Salzgehalt ergab, werden die mit v_2 ermittelten Daten – im Gegensatz zu den Schleifversuchen – ebenfalls untersucht. Das aufgefangene Material wurde, wie bereits zuvor beschrieben (Kapitel 7.4.2.2), gewogen und einer Kornanalyse unterzogen. Auszugsweise sind die gemessenen Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge und die pro Versuch aufgefangene Masse in der folgenden Tabelle 7-28 aufgeführt; für die entsprechenden vollständigen Graphen sei an dieser Stelle auf den Anhang Nr. 4 verwiesen.

Tabelle 7-28: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Fräsen

	Versuchsnummer	Vorschub- geschwindigkeit	Kornfraktion					>2,0 mm [g] (Überkorn)	Aufgefangene Masse [g]
			0,0 - 0,2 mm (kumuliert) [%]	0,21 - 0,5 mm (kumuliert) [%]	0,51 - 1,0 mm (kumuliert) [%]	1,01 - 2,0 mm (kumuliert) [%]	Median [mm]		
Referenzbeton P3 mit 0 % Salzgehalt	F1	v1	63,10 (63,10)	7,80 (70,90)	9,50 (80,40)	19,60 (100,00)	0,0588	0,83	4,46
	F2		51,90 (51,90)	9,20 (61,10)	10,00 (71,10)	13,70 (84,80)	0,1646	0,82	5,80
	Mittelwerte $F_{1,F2}$		57,50 (57,50)	8,50 (66,00)	9,75 (75,75)	16,65 (92,40)	0,1117	0,83	5,13
	F3	v2	64,20 (64,20)	5,20 (69,40)	8,00 (77,40)	15,20 (92,60)	0,0529	0,45	3,82
	F4		53,60 (53,60)	8,60 (62,20)	9,70 (71,90)	18,30 (90,20)	0,1408	0,96	4,58
	Mittelwerte $F_{3,F4}$		58,90 (58,90)	6,90 (65,80)	8,85 (74,65)	16,75 (91,40)	0,0969	0,71	4,20
Referenzbeton P2 mit 70 % Salzgehalt	F5	v1	63,50 (63,50)	8,80 (72,30)	12,50 (84,80)	12,10 (96,90)	0,0661	0,38	3,94
	F6		37,50 (37,50)	14,30 (51,80)	17,70 (69,50)	25,50 (95,00)	0,4562	0,35	2,37
	Mittelwerte $F_{5,F6}$		50,50 (50,50)	11,55 (62,05)	15,10 (77,15)	18,80 (95,95)	0,2612	0,37	3,16
	F7	v2	72,20 (72,20)	4,70 (76,90)	9,50 (86,40)	13,60 (100,00)	0,0370	0,00	3,16
	F8		65,40 (65,40)	5,40 (70,80)	8,60 (79,40)	20,60 (100,00)	0,0413	0,84	3,35
	Mittelwerte $F_{7,F8}$		68,80 (68,80)	5,05 (73,85)	9,05 (82,90)	17,10 (100,00)	0,0257	0,42	3,26
Referenzbeton P1 mit 80 % Salzgehalt	F9	v1	51,90 (51,90)	12,70 (64,60)	12,90 (77,50)	19,60 (97,10)	0,1806	0,69	4,46
	F10		51,30 (51,30)	13,20 (64,50)	11,20 (75,70)	14,30 (90,00)	0,1849	0,63	4,01
	Mittelwerte $F_{9,F10}$		51,60 (51,60)	12,95 (64,55)	12,05 (76,60)	16,95 (93,55)	0,1828	0,66	4,24
	F11	v2	56,20 (56,20)	10,50 (66,70)	10,30 (77,00)	21,10 (98,10)	0,1439	0,93	5,60

	F12		59,10 (59,10)	11,00 (70,10)	12,40 (82,50)	15,10 (97,60)	0,1279	0,50	4,68
	Mittelwerte F_{11}, F_{12}		57,65 (57,65)	10,75 (68,40)	11,35 (79,75)	18,10 (97,85)	0,1359	0,72	5,14

Da bei den Fräsversuchen lediglich ein Scheibentyp zum Einsatz kommt, kann die Feinheit des aufgefangenen Materials nicht in Abhängigkeit des Fugenfräasers betrachtet werden. Jedoch zeigt sich bei diesen Versuchen, dass das aufgefangene Material bei Versuchen mit Vorschubgeschwindigkeit v_2 – unabhängig vom Salzgehalt des Probekörpers – immer feiner ist als bei den entsprechenden Versuchen mit Vorschubgeschwindigkeit v_1 .

Erklären lässt sich dies durch den Impuls p , der das Material ausbricht.

$$p = ma \cdot v \quad (7-23)$$

Dieser ist bei Geschwindigkeit v_2 größer als bei Geschwindigkeit v_1 , da $v_2 > v_1$. Durch die somit höheren Kräfte wird das Material bei der Bearbeitung mehr getrennt, was kleinere Partikel und somit feineres aufgefangenes Material zur Folge hat.

Die über die jeweiligen Durchläufe gemittelten Werte der einzelnen Fraktionsanteile in Abhängigkeit des Vorschubs lassen keine Schlussfolgerung bezüglich der salzgehaltabhängigen Entwicklung zu. (Abbildung 7-43)

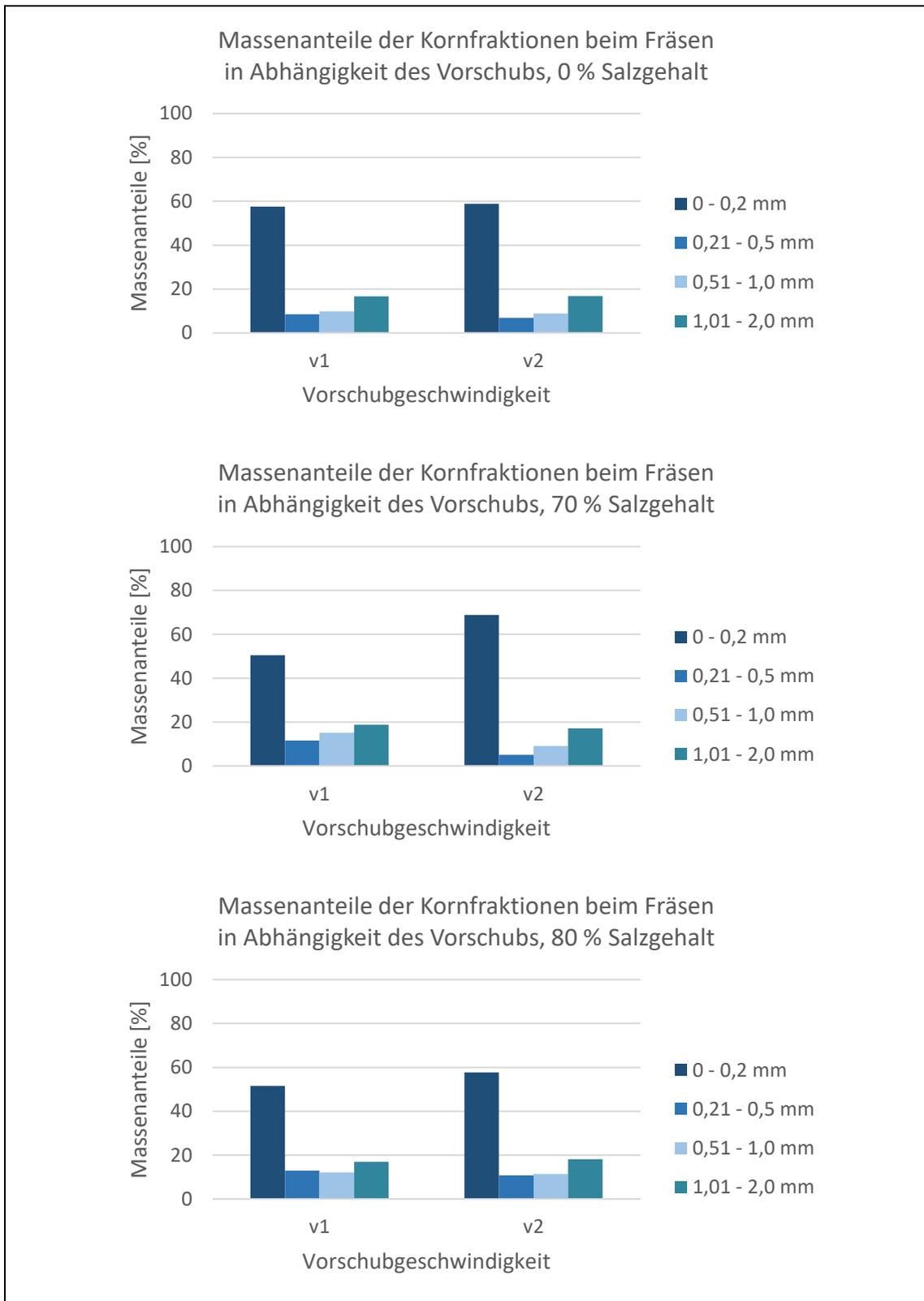


Abbildung 7-43: Massenanteile der Kornfraktionen beim Fräsen in Abhängigkeit des Vorschubs

Um eine eventuelle Abhängigkeit von Salzgehalt, Schleifscheiben oder Geschwindigkeit zu den jeweiligen Messergebnissen aufzuzeigen, werden diese nachfolgend in Tabelle 7-29 zusammengefasst. Bei Mittelung der Werte über die Geschwindigkeiten v1 und v2 kann lediglich abgelesen werden, dass das sich absetzende Material gröber ist, je höher der Salzgehalt des Probekörpers. Da die Mittelung über die Geschwindigkeiten an dieser Stelle jedoch zu einer Verfälschung des Ergebnisses führt, wird festgehalten, dass eine Tendenz der Ergebnisse, abhängig vom Salzgehalt, nicht erkennbar ist.

Tabelle 7-29: Zusammenfassung der Messergebnisse, Fräsen

Versuchsnummer	Salzgehalt des Probekörpers	Vorschubgeschwindigkeit	Ø Staubkonzentration aller Versuche am Probekörper [g/m ³]	Ø aufgefangenes Material aller Versuche am Probekörper [g]	Ø Median des aufgefangenen Materials aller Versuche am Probekörper [mm]
F1	0 %	v1	3,86	4,67	0,1043
F2		v2			
F3					
F4					
F5	70 %	v1	4,82	3,21	0,1502
F6		v2			
F7					
F8					
F9	80 %	v1	4,23	4,69	0,1593
F10		v2			
F11					
F12					

7.5.2.3 Kräfte

Parallel zu Staubkonzentration und aufgefangener Materialmasse werden bei den Fräsversuchen die am Bearbeitungswerkzeug auftretenden Kräfte in horizontaler und in vertikaler Richtung mittels Scherkraftaufnehmer gemessen. Hierzu werden zwei Sensoren ① – mit jeweils gleichem Abstand „L“ – rechts und links oberhalb der Scheibe montiert, um die vertikalen Kräfte aufzunehmen. Zwei weitere Sensoren ② nehmen die horizontalen Kräfte auf. (Abbildung 7-44)

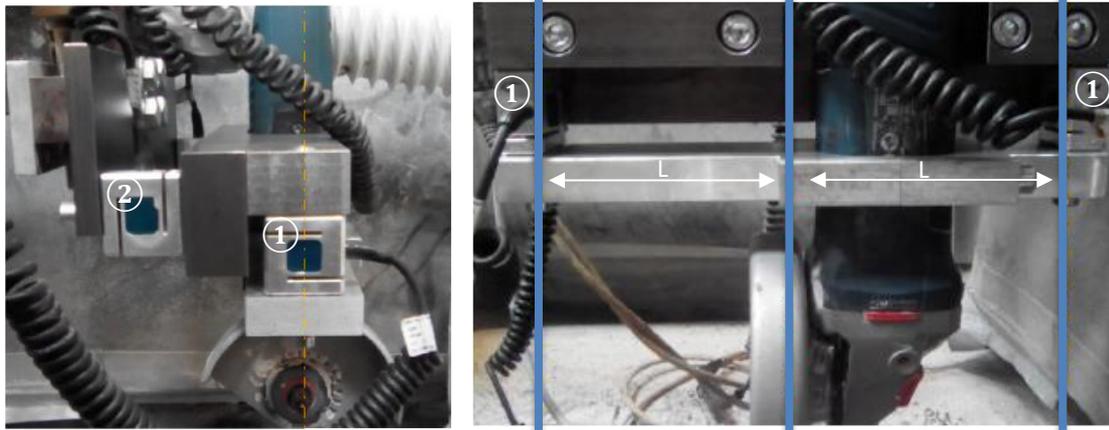


Abbildung 7-44: Anordnung der Scherkraftaufnehmer - seitlich (links) und frontal (rechts) [51]

Die Durchschnittswerte der aufgenommenen Kräfte in vertikaler und horizontaler Richtung sind in der folgenden Tabelle 7-30 aufgeführt.

Tabelle 7-30: Durchschnittlich aufgenommene Kräfte beim Fräsen

Versuchsnummer	Salzgehalt	Vorschub	Durchschnittlich aufgenommene Kraft [N]	
			vertikal	horizontal
Mittelwert $F_{1, F2}$	0 %	v1	21,6	15,7
Mittelwert $F_{3, F4}$		v2	88,6	60,9
Mittelwert $F_{5, F6}$	70 %	v1	13,8	12,4
Mittelwert $F_{7, F8}$		v2	42,6	39,6
Mittelwert $F_{9, F10}$	80 %	v1	9,4	7,2
Mittelwert $F_{11, F12}$		v2	14,8	12,7

Deutlich ist hierbei, dass – sowohl die vertikalen als auch die horizontalen – Kräfte, welche auf das Bearbeitungswerkzeug wirken, bei Versuchsdurchführungen mit schneller Vorschubgeschwindigkeit v2 höher sind als bei Versuchsdurchführungen mit langsamer Vorschubgeschwindigkeit v1. Des Weiteren nehmen die Kräfte ab, je höher der Salzgehalt des Probekörpers.

Festzustellen bleibt somit, dass eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von $v1 = 0,0031 \text{ m/s}$ um 161,3 % auf $v2 = 0,0081 \text{ m/s}$, abhängig vom Salzgehalt des Probekörpers, zu einer Erhöhung der gemessenen Kräfte gemäß nachfolgender Tabelle 7-31 führt.

Tabelle 7-31: Gegenüberstellung der Steigerungen der gemessenen Kräfte von v1 zu v2 - Fräsen

Salzgehalt	Steigerung der vertikalen Kraft von v1 zu v2 [%]	Steigerung der horizontalen Kraft von v1 zu v2 [%]
0 % (P3)	+ 310,2	+ 287,9
70 % (P2)	+ 208,7	+ 219,4
80 % (P1)	+ 57,4	+ 76,4

Die mit steigendem Salzgehalt abnehmenden notwendigen Kräfte (Tabelle 7-30) sprechen für einen – im Hinblick auf die Rückholbarkeit der Abfallgebinde – hohen Salzanteil in Versatzmaterialien zukünftiger Tiefenlager. Die Rückholung kann somit mit kleineren Gerätschaften durchgeführt werden, was im Hinblick auf beispielsweise den logistischen Aufwand der technischen Rückholung wünschenswert ist.

7.6 Auswertung

Durch die in den vorangegangenen Kapiteln 7.4 und 7.5 beschriebenen Versuche können mehrere Abhängigkeiten zwischen den Versuchsparametern und den gemessenen Werten aufgezeigt werden. Einen Überblick, welche Parameter Auswirkungen auf die jeweiligen Messwerte haben, liefert Tabelle 7-32. Die Tabelle ist dabei beispielhaft folgendermaßen zu lesen: Mit hoher Vorschubgeschwindigkeit („+“) steigt die Staubkonzentration beim Schleifen („+“). Und: Bei Einsatz der Scheibe S2 („S2“) ist das abgetragene Material beim Schleifen relativ fein („fein“). Und: Steigt der Salzgehalt („+“), ist das abgetragene Material beim Fräsen relativ grob („grob“).

Tabelle 7-32: Auswirkungen der Versuchsparameter auf die Messwerte

		Versuchsparameter		
		Salzgehalt	Vorschubgeschwindigkeit	Scheibe
Messwerte beim Schleifen	Staubkonzentration	- / +	+ / +	+ / S2
	Aufgefangene Masse	+ / +	+ / +	
	Korngrößenverteilung	grob / +		fein / S2
Messwerte beim Fräsen	Staubkonzentration		+ / +	
	Aufgefangene Masse			
	Korngrößenverteilung	grob / +	fein / +	
	Kräfte	- / +	+ / +	

Die Gemeinsamkeiten bei den Schleif- und den Fräsversuchen liegen darin, dass

- die Vorschubgeschwindigkeit des jeweiligen Werkzeuges eine Rolle bei der Staubkonzentration spielt: Die durchschnittliche und maximale Staubkonzentration bei der Bearbeitung steigt („+“), sobald die Vorschubgeschwindigkeit erhöht („+“) wird – unabhängig davon ob das Material geschliffen oder gefräst wird. Eine Ausnahme hiervon bildet lediglich die Bearbeitung des Referenzbetons P3 mit Scheibe S2. (Abbildung 7-31 und Abbildung 7-40)
 - der Salzgehalt des Probekörpers eine Rolle bei der Korngrößenverteilung spielt: Das aufgefangene Material ist im Mittel gröber („grob“), je höher der Salzgehalt („+“) des Probekörpers. (Tabelle 7-23 und Tabelle 7-29)
- ➔ die beiden Forschungsfragen (Kapitel 6) können somit beantwortet werden

Betrachtet man – bei den Schleifversuchen über die verschiedenen Scheiben gemittelt – die am Messpunkt gemessene Staubkonzentration losgelöst von der jeweils aufgefangenen Materialmasse, so ist erkennbar, dass die durchschnittliche gemessene Staubkonzentration bei Versuchen mit Vorschubgeschwindigkeit v1 geringer ist als bei entsprechenden Versuchen mit Vorschubgeschwindigkeit v2. Diese Differenz nimmt bei Materialabtrag mittels Schleifscheibe mit zunehmendem Salzgehalt zu. (Abbildung 7-45)

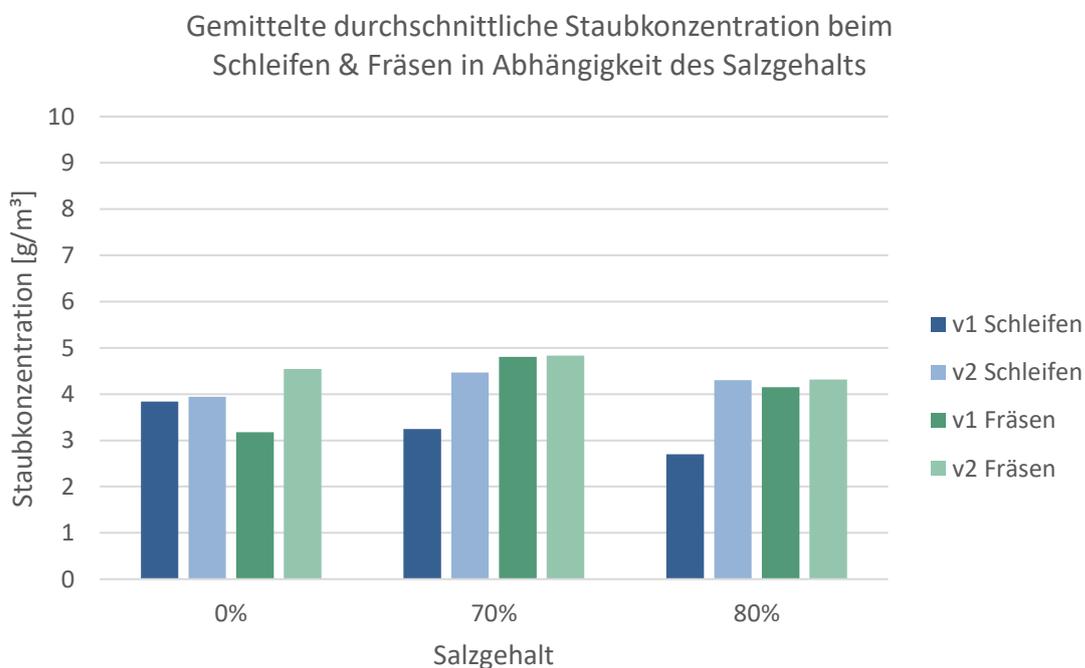


Abbildung 7-45: Gemittelte durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen & Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes

Die in Kapitel 6 aufgestellte **1. Forschungsfrage**, ob die Staubentwicklung unter anderem vom Faktor Vorschubgeschwindigkeit abhängig ist, kann somit bestätigt werden: Das Schleifen und Fräsen von (Salz-) Beton mit geringer Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer geringeren gemessenen Staubkonzentration als die ansonsten gleiche Bearbeitung mit höherer Vorschubgeschwindigkeit.

Die Schlussfolgerung hierauf ist die Empfehlung, dass – im Hinblick auf die Staubentwicklung – die Bearbeitung von Salzbetonen mit geringer Vorschubgeschwindigkeit erfolgen sollte.

Der Blick auf die gemittelten aufgefangenen Materialmassen zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den Schleif- und den Fräsversuchen (Abbildung 7-46).

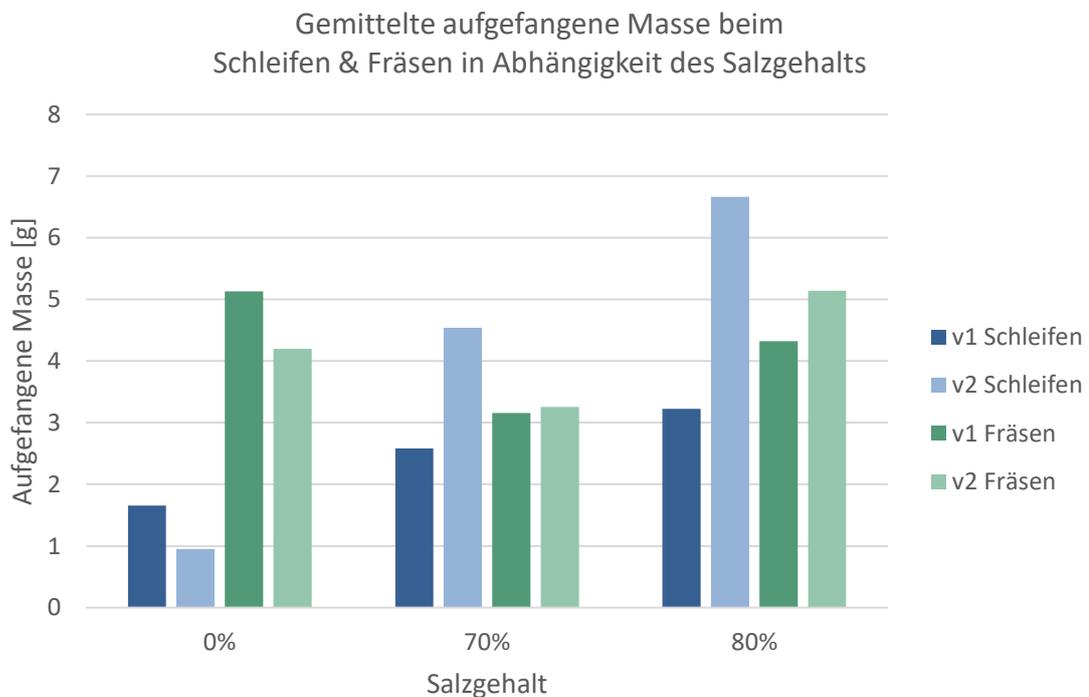


Abbildung 7-46: Gemittelte aufgefangene Masse beim Schleifen & Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes

Beiden Versuchsreihen (Schleifen & Fräsen) ist gemein, dass die prozentuale Steigerung der aufgefangenen Materialmassen von Versuchen mit Vorschubgeschwindigkeit v1 zu denen mit v2 deutlich zunimmt, je höher der Salzgehalt im Beton ist (Tabelle 7-33). Allerdings ist diese prozentuale Steigerung bei den Schleifversuchen deutlich höher als bei den Fräsversuchen.

Tabelle 7-33: Steigerung der aufgefangenen Materialmassen von v1 zu v2

Salzgehalt	Steigerung der aufgefangenen Materialmassen von v1 zu v2 [%]	
	Schleifen	Fräsen
0 %	-42,4	-18,1
70 %	75,9	3,2
80 %	106,7	18,8

Um diesen Unterschied zu verdeutlichen, wird im folgenden Diagramm (Abbildung 7-47) die prozentuale Steigerung – von Vorschubgeschwindigkeit v1 zu Vorschubgeschwindigkeit v2 – der aufgefangenen Materialmassen beim Schleifen und Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes dargestellt.

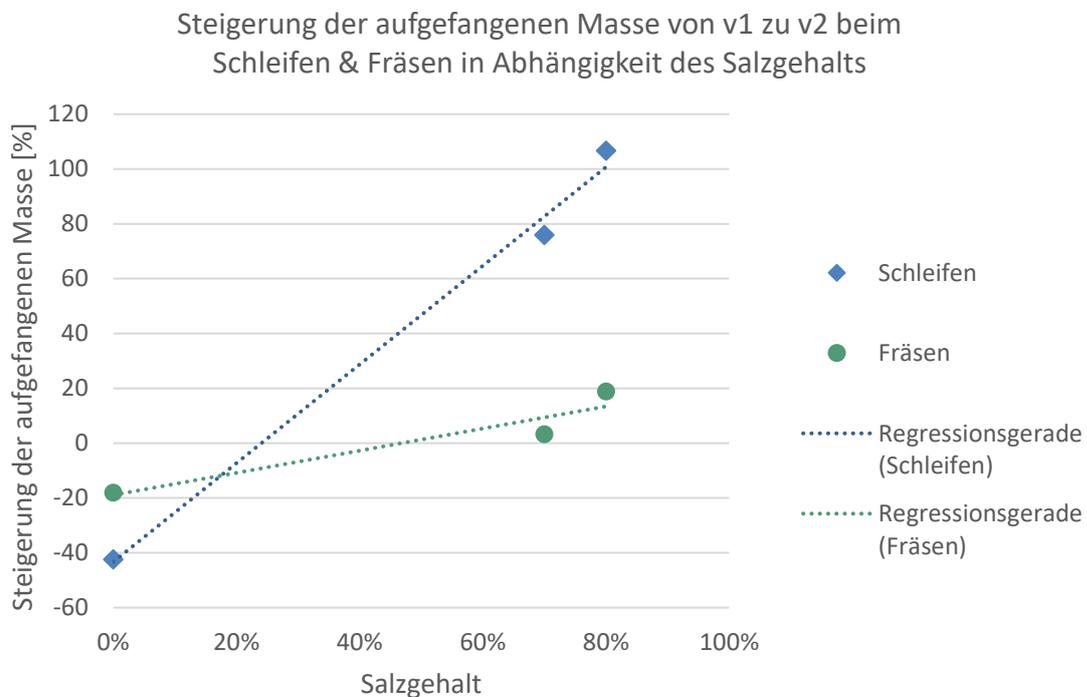


Abbildung 7-47: Steigerung der aufgefangenen Materialmasse von v1 zu v2 beim Schleifen & Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes

Weiterhin ist in diesem Diagramm (Abbildung 7-47) auch die jeweilige Regressionsgerade aufgetragen, welche errechnet wird zu (vergleiche Kapitel 7.4.2.1)

$$y_{\text{Schleif}} = 180 \cdot x - 43,29$$

und

$$y_{Schneid} = 40,398 \cdot x - 18,904$$

Die Steigung der Regressionsgeraden für die Werte bei der schleifenden Bearbeitung ist deutlich steiler als die Steigung der Regressionsgeraden für die Werte bei der fräsenden Bearbeitung. Entsprechend wird an dieser Stelle festgehalten, dass die Vorschubgeschwindigkeit beim Fräsen von Salzbeton nicht die gleiche hohe Auswirkung auf die sich niederschlagende Materialmasse hat, als beim Schleifen von Salzbeton.

Weiterhin zeigt die folgende Tabelle 7-34, dass – absolut gesehen – beim Schleifen weniger Material aufgefangen wird als beim Fräsen.

Tabelle 7-34: Zusammenstellung der Messergebnisse

	Salz- gehalt	Durchschnittliche Staubkonzentration [g/m ³]			Durchschnittlich aufgefangenes Material [g]			Durchschnittlicher Median des aufgefangenen Materials [mm]		
		v1	v2	∅	v1	v2	∅	v1	v2	∅
Schleifen	0 %	3,84	3,94	3,89	1,65	0,95	1,30	0,32	0,10	0,21
	70 %	3,24	4,47	3,86	2,58	4,54	3,56	0,50	0,65	0,58
	80 %	2,70	4,31	3,51	3,23	6,67	4,95	0,95	0,75	0,85
	∅	3,26	4,24	3,75	2,49	4,05	3,27	0,59	0,50	0,55
Fräsen	0 %	3,18	4,54	3,86	5,13	4,20	4,67	0,11	0,10	0,11
	70 %	4,81	4,83	4,82	3,16	3,26	3,21	0,26	0,03	0,15
	80 %	4,15	4,32	4,24	4,24	5,14	4,69	0,18	0,14	0,16
	∅	4,05	4,56	4,31	4,18	4,20	4,19	0,18	0,09	0,14

Die in Kapitel 6 aufgestellte **2. Forschungsfrage**, ob die Staubentwicklung auch vom Salzgehalt abhängig ist, kann somit ebenfalls bestätigt werden. Denn wie aus Tabelle 7-34 hervorgeht, weist die Staubkonzentration beim Schleifen des Salzbetons mit 80 % Salzgehalt und einer Vorschubgeschwindigkeit v1 mit durchschnittlich 2,70 g/m³ den geringsten Wert auf. Betrachtet man die entsprechenden Einzelwerte in Tabelle 7-16, so findet sich bei Versuch Nr. 29 (Schleifscheibe S2, Vorschubgeschwindigkeit v1) mit einer durchschnittlichen Staubkonzentration von 2,74 g/m³ der Wert, der die geringste Abweichung vom Durchschnitt aufweist. (Tabelle 7-35)

Tabelle 7-35: Versuchsnummer 29, Staubkonzentrationen des Schleifversuchs, 80 % Salzgehalt

Salzbeton P1 mit 80 % Salzgehalt							
Versuchsnummer	Schleifscheibe	Vorschub- geschwindigkeit	Durchlauf	Staubkonzentration [g/m ³]			
				Wert bei 60 s	Wert bei 120 s	Durchschnitt	Maximum
29	S2-1	v1	D1	1,47	2,59	2,74	4,19

Am wenigsten Material (bezogen auf die Salzbetonprobekörper) hat sich innerhalb von 120 s beim Schleifen des Salzbetons mit 70 % Salzgehalt und einer Vorschubgeschwindigkeit v1 abgesetzt: im Schnitt 2,58 g. Die optimale Parameterkombination in Bezug auf die Staubkonzentration entspricht also nicht der optimalen Parameterkombination in Bezug auf die abgesetzte Materialmasse. Da im Fall der Arbeiten unter Tage jedoch eine hohe Staubkonzentration in der Luft ungünstiger zu bewerten ist als das Material, welches sich direkt absetzt, werden im Folgenden die Werte aus Versuch Nr. 29 weiter betrachtet.

Die drei Partikel, welche aufgrund ihrer Größe von über 2 mm vor der Korngrößenanalyse abgeseibt wurden, bestehen hauptsächlich aus Salzkristallen mit Zementsteinanhaftungen. (Abbildung 7-48)

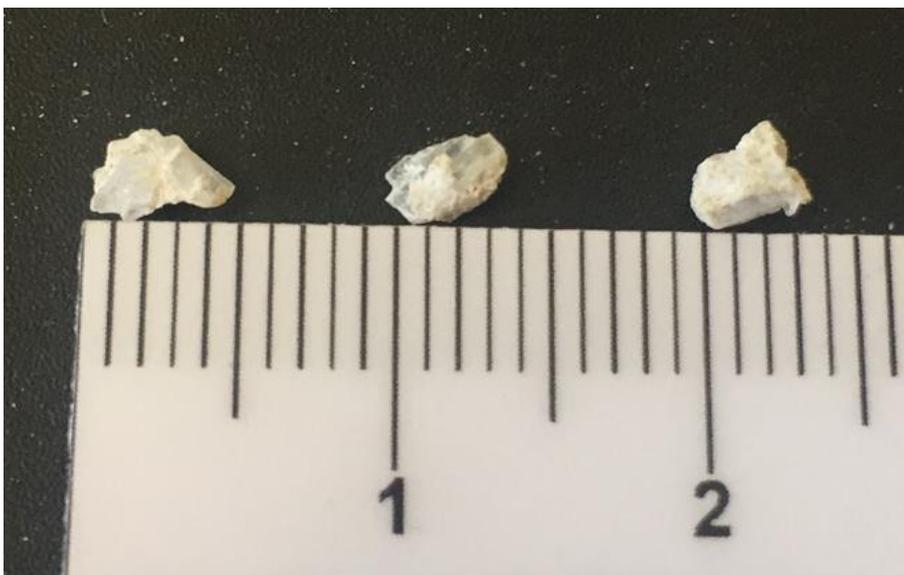


Abbildung 7-48: Überkorn, Versuchsnummer 29

Die Partikelgrößenverteilung der im Versuch Nr. 29 aufgefangenen Materialmasse ist in Abbildung 7-49 dargestellt und umfasst den Bereich von 0,001 mm (Kleinstkorn) bis etwa 1,9 mm (Größtkorn). Lässt man jedoch das abgesiebte Überkorn nicht außer Betracht, so erweitert sich die Spannweite der Partikelgrößen auf etwa 0,001 – 5,0 mm.

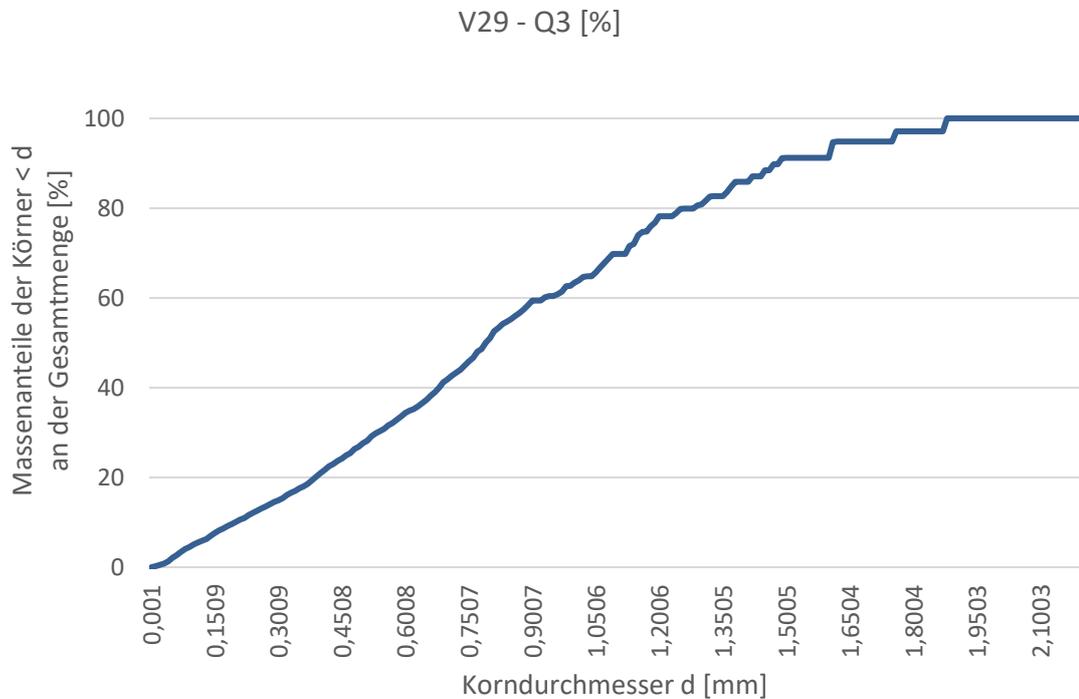


Abbildung 7-49: Partikelgrößenverteilung, Versuchsnummer 29

Als Empfehlung für das Versatzmaterial zukünftiger Tiefenlager kann daher ein relativ hoher Salzgehalt von ca. 80 % angegeben werden, da das Schleifen dieser Versatzmaterialnachbildung (Kapitel 7.2), in Kombination mit einer geringen Vorschubgeschwindigkeit, die geringste Staubkonzentration aufweist. Weiterhin spricht für diese Empfehlung, dass bei einem hohen Salzgehalt weniger Kraft zur Bearbeitung aufgewendet werden muss, als bei einem niedrigen Salzgehalt des zu bearbeitenden Materials. Inwiefern dieses Ergebnis bei der Bearbeitung mit einer Hydraulikfräse oder anderen großen Werkzeugen vergleichbar ist, muss im Rahmen großmaßstäblicher Versuche untersucht und erprobt werden.

8 Förderung / Materialabtransport des gelösten Materials

Obwohl die Staubentstehung durch eine angepasste Parametereinstellung und den Salzgehalt im Beton beeinflusst und reduziert werden kann, konnte sie im Rahmen der oben beschriebenen Versuche wie erwartet nicht vollständig unterbunden werden. Um die negativen Auswirkungen einer Staubentstehung auf die Arbeiten im kerntechnischen untertägigen Bereich weiter zu reduzieren, muss der Staub daher unmittelbar am Entstehungsort möglichst vollständig abgesaugt und abtransportiert werden. Nahe liegt hier die Anwendung einer pneumatischen Förderung.

Zur pneumatischen Förderung liegen unzählige Publikationen vor, zurückgehend bis in das Jahr 1887. [52] Bis heute kann sich die Fachwelt jedoch nicht auf eine einheitliche Vorgehensweise bezüglich der Auslegung pneumatischer Förderanlagen festlegen, so dass diese nach wie vor auf Erfahrungswerten beruht. [53] Gemäß [54] resultieren die Hauptschwierigkeiten bei der Dimensionierung einer pneumatischen Förderanlage aus schwer zu bestimmenden Feststoffeigenschaften (Partikelform und Partikelgrößenverteilung). Weiterhin steht

„im Zentrum aller Berechnungsansätze für eine pneumatische Förderanlage [...] stets die Beziehung zwischen Rohrdurchmesser und Druckverlust Δp .“ [54]

Um zu zeigen, dass das entstehende Material pneumatisch gefördert werden kann, wird in Kapitel 8.3 beispielhaft eine entsprechende Berechnung durchgeführt.

8.1 Grundlagen der pneumatischen Förderung

Die pneumatische Förderung basiert auf einer Zweiphasenströmung: die erste gasförmige Phase strömt hierfür durch eine Rohrleitung, die zweite verteilte, feste Phase (= Fördergut) strömt in der ersten Phase mit. Dies gelingt, wenn das strömende Gas

„Strömungs-, Druck- und Auftriebskräfte auf die Feststoffteilchen“ [55]

überträgt. Sind diese antreibenden Kräfte des Gases größer als die Kräfte,

„die das Fördergut festzuhalten versuchen“, [56]

kann das Fördergut vom Fördermedium transportiert werden. Nach [56] müssen die antreibenden Kräfte des Fördermediums hauptsächlich Gewicht, Reibung und Trägheit des Fördergutes überwinden.

Als Fördermedium werden je nach Bedarf unterschiedliche Gase eingesetzt. Im Folgenden wird lediglich auf Luft als Fördermedium eingegangen. Der Luftstrom, welcher als Fördermedium dient, wird dabei hervorgerufen

„durch einen Druckunterschied zwischen Anfang und Ende der Rohrleitung.“ [56]

Pneumatische Förderanlagen werden unterschieden in Saugförderanlagen (Abbildung 8-1), Druckförderanlagen (Abbildung 8-2) und einer Kombination aus beiden (Saug-Druckförderanlagen, Abbildung 8-3).

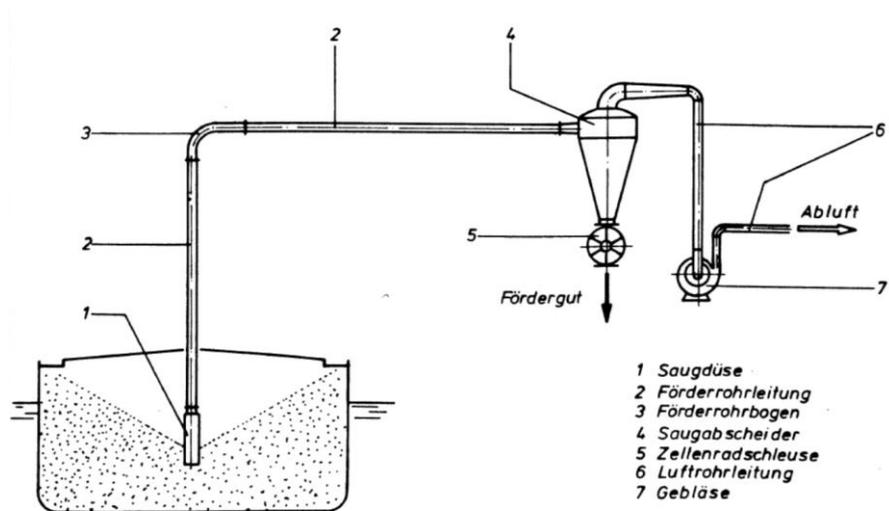


Abbildung 8-1: Schema einer pneumatischen Saugförderanlage [56]

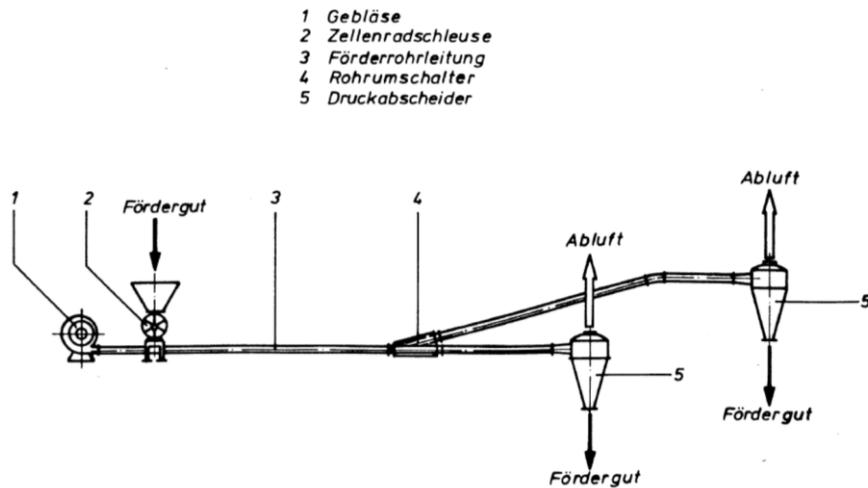


Abbildung 8-2: Schema einer pneumatischen Druckförderanlage [45]

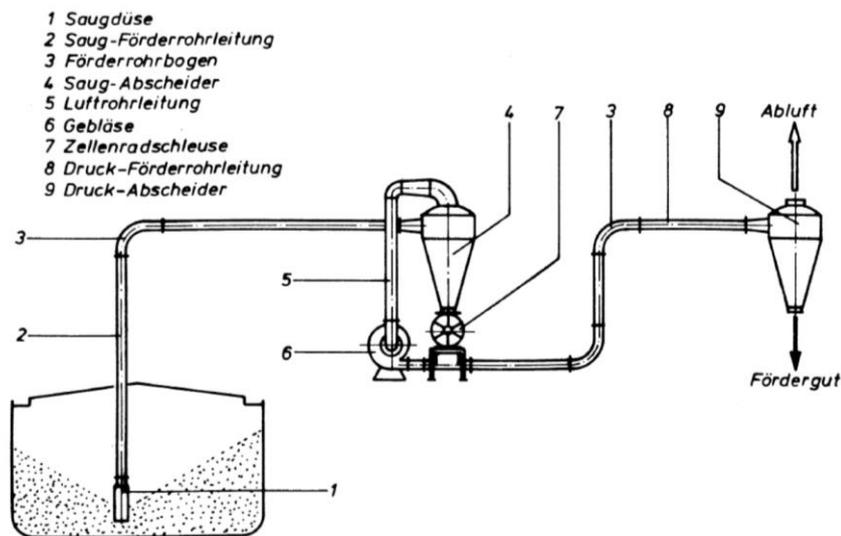


Abbildung 8-3: Schema einer pneumatischen Saug-Druckförderanlage [45]

Nach [57] wird eine Unterteilung der Schüttgüter gemäß folgender Tabelle 8-1 empfohlen:

Tabelle 8-1: Unterteilung der Schüttgüter nach Korndurchmesser, nach [57]

kleinster Korndurchmesser [mm]	größter Korndurchmesser [mm]	Beschreibung
0	0,5	pulverförmig oder staubförmig
0,1	1	grießig
1	10	körnig
10	100	grobkörnig
100	∞	stückig

Bewertet man die Sieblinie aus Versuch Nr. 29 (0,001 mm bis 5,0 mm, s. Kapitel 7.6) mit dieser Unterteilung (Tabelle 8-1), so lässt sich das Material, welches durch die Bearbeitung des Salzbetons mit der aufgeführten Schleifscheibe entsteht, als pulverförmig bis körnig beschreiben. Im Folgenden soll daher abgeschätzt werden, ob dieses Fördergut gemäß der aktuellen Literatur pneumatisch gefördert werden kann.

Gemäß [53] hängt die Förderbarkeit eines Stoffes ab von

- der Korngröße und dem Korngrößenspektrum,
- der Korndichte,
- der Kornform/Sphärizität, und
- der Schwebegeschwindigkeit/Sinkgeschwindigkeit.

Damit das Fördergut in Bewegung versetzt werden kann, bedarf es einer Mindestluftgeschwindigkeit v_M im Förderrohr, für welche [58] empfiehlt:

$$v_M = 1,2 \text{ bis } 1,4 v_{Sch} \quad (8-1)$$

v_{Sch} ist hierbei die Schwebegeschwindigkeit, welche

„die erforderliche Luftgeschwindigkeit [bezeichnet], mit der ein Korn im lotrechten Luftstrom von unten angeblasen werden muss, um in der Schwebelage zu bleiben. Sie ist gleich der freien Fallgeschwindigkeit.“ [57]

Da in diesem Fall ein Kräftegleichgewicht zwischen dem Umströmungswiderstand F_W und dem Gewicht F_G des Korns besteht, kann v_{Sch} gemäß [53] abgeschätzt werden zu

$$v_{Sch} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d (\rho_s - \rho_L)}{3 \cdot c_W \cdot \rho_L}} \quad (8-2)$$

mit c_W = spezifischer Luftwiderstandsbeiwert

d = Korndurchmesser

g = Erdbeschleunigung

ρ_s = Dichte des Fördergutes

ρ_L = Dichte der Förderluft

8.2 Druckverlust in der Rohrleitung

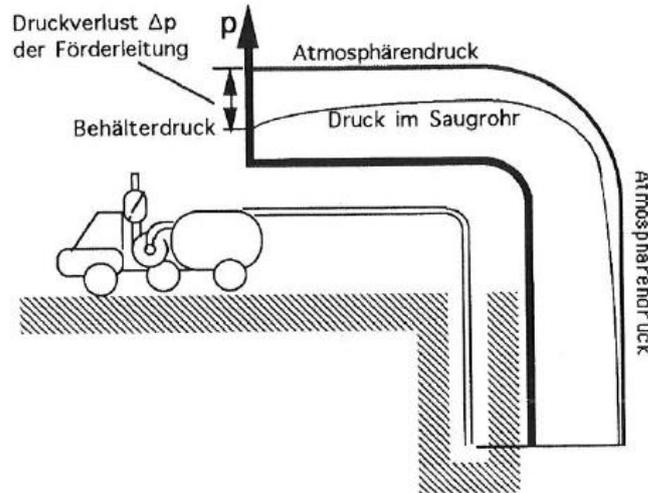


Abbildung 8-4: Druckverlauf entlang der Saugleitung [53]

Gemäß [53] setzt sich der Druckverlust Δp in einer pneumatischen Förderstrecke (Abbildung 8-4) zusammen aus dem Druckverlust Δp_B durch die Beschleunigung der Gesamtströmung von Ruhe auf die Endgeschwindigkeit

$$\Delta p_B = (1 + \mu) \cdot \rho_L \cdot v_m^2 \cdot \frac{p_{\text{Atm}}}{p_T} \quad (8-3)$$

dem Druckverlust Δp_H durch die Hubleistung der Strömung am Feststoff

$$\Delta p_H = \frac{H \cdot g \cdot \dot{m}_S}{A \cdot (v_m - v_{\text{Sch}})} \quad (8-4)$$

und dem Reibungsdruckverlust Δp_R

$$\Delta p_R = \lambda_{\text{ges}} \cdot L \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot \frac{v_m^2}{D} \quad (8-5)$$

wobei

$$A = \text{Rohrquerschnitt [m}^2\text{]}$$

H = Höhe [m]

L = Länge [m]

λ_{ges} = Druckverlustbeiwert [-]

\dot{m}_L = Massenstrom des Gases [$\frac{kg}{s}$]

\dot{m}_S = Massenstrom des Feststoffes [$\frac{kg}{s}$]

μ = Beladung $\frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_L}$ [-]

p_{Atm} = Atmosphärendruck [Pa]

p_T = Druck im Abscheidetank [Pa]

ρ_L = Dichte der Förderluft [$\frac{kg}{m^3}$]

v_m = Mittlere Geschwindigkeit im Rohr [$\frac{m}{s}$]

v_{Sch} = Schwebegeschwindigkeit des Einzelkorns [$\frac{m}{s}$]

Der Druckverlustbeiwert λ_{ges} aus Formel 8-5 beschreibt dabei die feststoffbeladene Strömung insgesamt, und nicht wie in anderen Ansätzen (beispielsweise nach Barth [59]) getrennt nach den einzelnen Strömungskomponenten. Nach [60]

„lässt sich der Druckverlustbeiwert λ_{ges} mit hinreichender Genauigkeit [...] beschreiben“

als

$$\lambda_{ges} = \kappa \cdot Re^\alpha \cdot Fr^\beta \cdot \mu^\phi \cdot \left(\frac{v_{Sch}}{v_m}\right)^\gamma \quad (8-6)$$

mit

$$\text{Reynolds-Zahl: } Re = \frac{v_m \cdot D}{\nu} \quad (8-7)$$

$$\text{Froude-Zahl: } Fr = \frac{v_m^2}{g \cdot D} \quad (8-8)$$

Geschwindigkeitsverhältnis: $\frac{v_{Sch}}{v_m}$

D = Rohrdurchmesser [m]

Fr = Froude-Zahl der Rohrströmung [-]

Re = Reynolds-Zahl der Rohrströmung [–]

ν = kinematische Viskosität [$\frac{m^2}{s}$]

α = Exponent der Beladung μ [–]

β = Exponent der Reynolds-Zahl [–]

γ = Exponent des Geschwindigkeitsverhältnisses [–]

ϕ = Exponent der Froude-Zahl [–]

κ = Konstante [–]

Oder nach [61] Im horizontalen Rohr als

$$\lambda_{ges} = \lambda_L + \mu \cdot \lambda_S \quad (8-9)$$

wobei der Druckverlustbeiwert der Luft gesetzt werden kann zu $\lambda_L = 0,02$. [57]

Nach [61] gilt für die horizontale Förderung

$$\lambda_S = 0,00125 + 0,8 \cdot \frac{\frac{v_{sch}}{\nu m}}{Fr^{1,5}} \quad (8-10)$$

mit

λ_L = Druckverlustbeiwert des Gases [–]

λ_S = Druckverlustbeiwert des Feststoffes [–]

8.3 Beispielhafte Berechnung

Um die pneumatische Förderbarkeit des entstehenden Materials (Kapitel 7.4 und 7.5) nachzuweisen, wird diese im Folgenden beispielhaft berechnet.

Hierzu werden die folgenden Werte herangezogen beziehungsweise angenommen:

- Länge der Förderleitung $L = 200 \text{ m}$
- Höhendifferenz $H = 40 \text{ m}$

- Förderrohrdurchmesser $D = 0,15 \text{ m}$
- Maximale Korngröße $d_s = 0,005 \text{ m}$
- Beladung $\mu = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_L} = 1$
- Druckverlustbeiwert $\lambda_{\text{ges}} = 0,0131 \text{ [62]}$
- Korndichte $\rho_s = 2.356 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ¹
- Luftdichte $\rho_L = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Widerstandsbeiwert $c_w = 0,64 \text{ [63]}$

Sowohl der Druckverlustbeiwert [62] als auch der Widerstandsbeiwert [63] wurden bereits im Rahmen von vorhergehenden Untersuchungen ermittelt, und daher als eine konservative Annahme für die vorliegenden Berechnungen herangezogen.

Nach Gleichung (8-2) ergibt sich die Schwebegeschwindigkeit folgendermaßen

$$v_{Sch} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,005 \text{ m} \left(2356 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{3 \cdot 0,64 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 14,16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

was somit nach Gleichung (8-1) zu folgender mittleren Geschwindigkeit führt

$$v_m = 1,3 \cdot v_{Sch} = 18,41 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Durch mehrere Iterationen wird der Druck im Abscheidetank p_T angenommen zu $p_T = 876 \text{ mbar}$, womit der Beschleunigungsdruckverlust nach Gleichung (8-3) berechnet wird zu

$$\Delta p_B = (1 + 1) \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 18,41^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{1000 \text{ mbar}}{876 \text{ mbar}} = 9,28 \text{ mbar}$$

¹ Bei einem Salzgehalt von 80 Massen-% ergibt sich eine Korndichte von $0,8 \cdot \text{Korndichte Salz} + 0,2 \cdot \text{Korndichte Zement} = 0,8 \cdot 2.170 \text{ kg/m}^3 + 0,2 \cdot 3.100 \text{ kg/m}^3 = 2.356 \text{ kg/m}^3$

Zusammen mit dem Hubverlust nach Gleichung (8-4)

$$\Delta p_H = \frac{40 \text{ m} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,017 \text{ m}^2 \cdot (18,41 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 14,16 \frac{\text{m}}{\text{s}})} = 54,33 \text{ mbar}$$

Und dem Reibungsdruckverlust nach Gleichung (8-5)

$$\Delta p_R = 0,0131 \cdot 200 \text{ m} \cdot \frac{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot \frac{18,41^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,15 \text{ m}} = 35,52 \text{ mbar}$$

Ergibt sich der Gesamtdruckverlust somit zu

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_B + \Delta p_H + \Delta p_R = 9,28 \text{ mbar} + 54,33 \text{ mbar} + 35,52 \text{ mbar} \\ &= 99,13 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Zuzüglich einer Sicherheit von angenommenen 25 mbar für die Verluste in den Krümmungen ergibt sich ein Druckverlust von

$$\Delta p = 124 \text{ mbar}$$

Dieser passt zur Annahme des Drucks im Abscheidetank von 876 mbar, da

$$876 \text{ mbar} + 124 \text{ mbar} = 1.000 \text{ mbar}$$

Weiterhin berechnet sich der Luftvolumenstrom wie folgt

$$\dot{V} = v_m \cdot A = 18,41 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,017 \text{ m}^2 = 1.126,69 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Aus dem sich der Massenstrom der Luft berechnet zu

$$\dot{m}_L = \rho_L \cdot \dot{V} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.126,69 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 1.352,03 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Aufgrund der vorherigen Annahme, dass die Beladung $\mu = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_L} = 1$, ergibt sich in etwa für den Massenstrom des Feststoffes $\dot{m}_S = 1.350 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$, was einem realistischen Massenstrom entspricht.

Der Betriebspunkt des Gebläses ergibt sich in diesem Beispiel somit wie folgt:

$$p_T = 876 \text{ mbar}$$

$$\dot{V} = 1.126,69 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Dieser Betriebspunkt befindet sich im Kennfeld eines handelsüblichen Ventilators (Abbildung 8-5), womit bewiesen wäre, dass das mittels der vorangegangenen Versuche erzeugte Material problemlos pneumatisch förderbar ist.

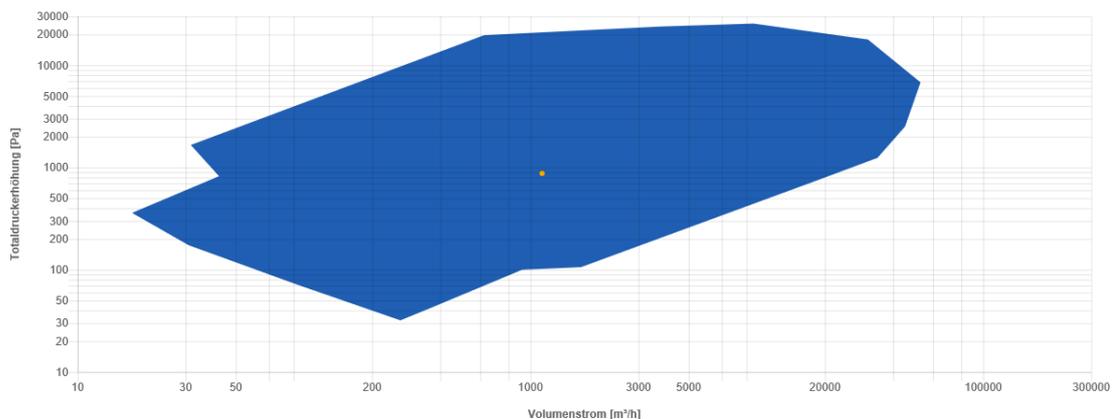


Abbildung 8-5: Betriebspunkt im Kennfeld eines handelsüblichen Ventilators [64]

8.4 Fazit: pneumatische Förderung

Siegel führt in [57] bereits auf, dass mit pneumatischen Förderanlagen sowohl Steinsalz als auch Zement gefördert wurde. Wie in Kapitel 8.3 aufgezeigt, ist es möglich, das bei den vorhergehenden Versuchen erzeugte lose Material, pneumatisch zu fördern.

Weiterhin muss jedoch der Druckverlust, welcher im Wesentlichen am Ende der Saugleitung, also am eventuell zum Einsatz kommenden Abscheider (z. B. Zyklon-Abscheider) und am Filter vor dem Sauggebläse entsteht, näher betrachtet werden. Angesichts der möglicherweise kontaminierten Partikel sollte, zur Vermeidung einer Kontaminationsverschleppung, auch auf der Abluft-Seite des Sauggebläses ein Feinstfilter oder eine Nass-Wäsche vorgesehen werden.

Weiterhin müssen, je nach Werkzeugeinsatz, entsprechende Saugmunde vorgesehen werden, welche das zu fördernde Material zum Förderrohr führen. Der Luftbedarf der Förderung wird in erster Linie hiervon abhängen, da eine Luftströmung aus einer ausgedehnten Umgebung zum Saugmund erzeugt werden muss.

Die pneumatische Förderung des abgetragenen Materials stellt nach den vorangegangenen Überlegungen kein Problem dar. Betrachtenswert wird in diesem Zusammenhang jedoch die

Luftreinigung sein. Hier müssen für den vorstellbaren Fall einer Verbreitung kontaminierter Staubpartikel die Folgen abgeschätzt und Gegenmaßnahmen entwickelt werden. Die Restreinigung der Abluft könnte beispielsweise durch eine Nasswäsche in einer Wasser-Zeolit-Suspension erfolgen.

9 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit sind Untersuchungen zur Staubentwicklung bei der maschinellen Rückholung von tiefengelagerten Abfallgebinden. Hierzu werden nach einer Einleitung in Kapitel 1 in Kapitel 2 die radioaktiven Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland betrachtet. Es wird aufgeführt wo diese Abfälle anfallen, und damit zusammenhängend welche Kernkraftwerke und Endlager in Deutschland existieren. Mit einem Ausblick auf die europäischen Länder und deren Stand beim Thema Endlager und Rückholbarkeit der dort gelagerten Abfallgebinde wird zum Abschluss des 2. Kapitels auf die Endlagerung eingegangen. Kapitel 3 der vorliegenden Arbeit ist der Schachanlage Asse II und den darin gelagerten Abfallgebinden gewidmet. Hier wird detailliert auf die gelagerten Gebinde, das Versatzmaterial und die gesetzlich vorgeschriebene Rückholung der eingelagerten Gebinde aus der Schachanlage eingegangen. Im 4. Kapitel werden die Anforderungen an die für die Rückholung zum Einsatz kommende Maschinenteknik, der Stand der Technik und eventueller Optimierungsbedarf aufgeführt, welcher unter anderem in der Reduktion des entstehenden Staubes besteht. In Kapitel 5 werden Untersuchungen zur Fernhantierbarkeit durchgeführt und entsprechende Ergebnisse vorgestellt. Auch hier wird der bei der Bearbeitung entstehende Staub als hinderlich wahrgenommen. Staub sollte unter Tage aufgrund der Gefahr einer Kontaminationsverschleppung, möglicher Sichtbeeinträchtigung und negativer Auswirkungen auf die Maschinenteknik weitestgehend vermieden werden.

Kapitel 6 befasst sich daher mit Staub an sich und der experimentellen Untersuchung einer Beeinflussbarkeit der Staubentwicklung. Bedingt durch die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln wird die Vermutung angestellt, dass die Staubentwicklung abhängig ist von der Vorschubgeschwindigkeit des bearbeitenden Werkzeuges und dem Salzgehalt des zu bearbeitenden Materials. Hier werden somit die beiden Forschungsfragen definiert. In Kapitel 7 werden daraufhin Versatzmaterialien mit unterschiedlichen Salzgehalten nachgebildet und in Form von Probekörpern für Versuche zur Verfügung gestellt. Auch wird ein Versuchsstand konzipiert und konstruiert, mit welchem diese Probekörper von verschiedenen Schleifscheiben und einem Fugenfräser mit verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten bearbeitet werden. Hierbei wird jeweils dieselbe Menge Material abgetragen, womit lediglich der Salzgehalt des Probekörpers, die Werkzeuge und die Vorschubgeschwindigkeiten variieren.

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass die Staubkonzentration bei der Bearbeitung von Salzbeton maßgeblich vom Salzgehalt und von der Vorschubgeschwindigkeit des eingesetzten Werkzeuges abhängig ist, und gibt daher einerseits eine Empfehlung für die staubreduzierte Rückholung der bereits tiefengelagerten Abfallgebinde, beispielsweise in der Schachanlage Asse II. Andererseits kann durch die Untersuchungen in dieser Arbeit eine Empfehlung – im Hinblick auf die bei der Bearbeitung entstehende Staubentwicklung – für das Versatzmaterial zukünftiger Tiefenlager gegeben werden. Weiterhin führen die in Kapitel 8 dargestellten Überlegungen zu der Annahme, dass das Material, welches – mit im Hinblick auf die Staubentwicklung optimalen Parametereinstellungen – abgetragen wurde, pneumatisch förderbar ist. Es wird angemerkt, dass der molekularen Reinigung der Abluft vertiefte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Die vorliegende Arbeit leistet somit einerseits einen wichtigen Beitrag zur Rückholung bereits tiefengelagerter Abfallgebinde und andererseits gibt sie eine Empfehlung für das Versatzmaterial zukünftiger Tiefenlager ab, damit die hier eingelagerten Abfallgebinde – falls zu einem späteren Zeitpunkt notwendig – staubminimiert rückgeholt werden können. Die beiden Forschungsfragen wurden wissenschaftlich untersucht und beantwortet.

Für die Zukunft ist es jedoch wichtig, dass die Parametereinstellungen im Rahmen großmaßstäblicher Versuche, beispielsweise mit Bagger und Hydraulikfräse, durchgeführt und erprobt werden. Ebenfalls sollten praktikable Lösungen zur Positionierung und eventuellen Mitführung der Absauganlage erarbeitet werden, damit ein behinderungsfreies und fernhantiertes Arbeiten in den eingeschränkten Arbeitsfeldern unter Tage möglich ist.

Glossar

Abfallgebinde	Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
Biosphäre	von sämtlichen Organismen der Erde bewohnbare Raum (Wasser, Land, Luft)
Bergung	Bezeichnung der Notfallmaßnahme, bei welcher radioaktive Abfälle aus einem Endlager rückgeholt werden.
DIN ISO 4225	DIN bezüglich Luftbeschaffenheit - Allgemeine Gesichtspunkte - Begriffe
Dosisleistung	Dosis an ionisierender Strahlung, welche pro Zeiteinheit aufgenommen wird
Durchbauungsgrad	Verhältnis von Grubengebäude zu unmittelbar umgebendem Gesteinsvolumen
Einlagerungskammer	bergmännisch erstellte Hohlräume, in denen radioaktive Abfälle eingelagert sind.
Firstspalte	Hohlräume an den Decken der Einlagerungskammern
GesBergV	Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung)
Größtkorn	größtes in einer Gesteinskörnung enthaltenes Korn
Grubengebäude	Gesamtheit aller unterirdischen Hohlräume eines Bergwerks
Ionisierende Strahlung	Teilchen- oder elektromagnetische Strahlung, welche aus Atomen oder Molekülen Elektronen entfernen kann. Dadurch werden die Atome zu reaktiven Ionen.
Kleinstkorn	kleinstes in einer Gesteinskörnung enthaltenes Korn
Kontamination	Verunreinigung durch radioaktive Stoffe
Kontaminationsverschleppung	„In der Regel ungewollte Ausbreitung von Kontamination in nicht dafür vorgesehene Bereiche.“ [65]
Konvergenzbewegung	„Als Konvergenz bezeichnet man im Bergbau den sich aufgrund des Gebirgsdrucks als Annäherung von Hangendem und Liegendem ergebenden Längenbetrag.“ [66]
Kornfraktion	Gesamtheit aller Teilchen einer bestimmten Korngröße
Leistungsreaktor	Kernreaktor, welcher zur Erzeugung nutzbarer Energie betrieben wird

Lex Asse	Gesetz zur Beschleunigung der Rückholung radioaktiver Abfälle und der Stilllegung der Schachanlage Asse II
Mg SM	„Megagramm Schwermetall (Mg SM) ist die Einheit der Schwermetallmasse und damit ein Maß für den Brennstoffgehalt (Uran, Plutonium und Thorium) eines Brennelements.“ [7]
Permutation	Gesamtheit aller möglichen Kombinationen von Elementen einer gegebenen Menge
Radioaktive Abfälle	beim Umgang mit radioaktiven Stoffen anfallende radioaktive Stoffe, die (bislang) nicht mehr genutzt werden können
Reversibel	Möglichkeit der Umkehrung eines oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagerentwicklung: Endlagerplanung und -auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung. [13]
Salzgrus	feinkörniges Salzgesteinsmaterial
Salzbeton	Beton aus Zement, Salz und Wasser
Sorelbeton	spezieller Bergbaubeton aus Magnesiumoxid, Magnesiumchloridlösung und Steinsalz
Staub	gemäß DIN ISO 4225:1996-08 „ein allgemeiner Begriff für feste Partikel verschiedener Größe und verschiedenen Ursprungs, die im allgemeinen eine gewisse Zeitdauer in einem Gas suspendiert bleiben“
Versatzmaterial	Material, mit welchem die durch Abbau entstandenen Hohlräume unter Tage verfüllt werden. Auch: Verfüllmaterial
Wiederaufarbeitung	Trennung verschiedener Substanzen aus abgebranntem Kernbrennstoff mit dem Ziel der Wiederverwendung und/oder Erleichterung der Endlagerung
Wirtsgestein	geologische Gesteinsumgebung, in der radioaktive Abfälle unterirdisch endgelagert werden
w/z-Wert	gibt das Massenverhältnis von Wasser zu Zement an

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Wesentliche Barrieren im Salzgestein, nach [8]	6
Abbildung 2-2: Wesentliche Barrieren im Tongestein, nach [8]	7
Abbildung 2-3: Wesentliche Barrieren im Kristallingestein, nach [8]	8
Abbildung 2-4: Einlagerung am Beispiel des Endlagers Morsleben [17]	12
Abbildung 3-1: Liegend gestapelte VBA-Gebinde [20]	14
Abbildung 3-2: Stehend gestapelte LAW-Gebinde [15]	15
Abbildung 3-3: Liegend gestapelte LAW-Gebinde [15]	15
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Firstspaltverfüllung [25]	16
Abbildung 3-5: Verfahrenstechnische Kette [27]	18
Abbildung 3-6: Beispielhafte Geräteauswahl für Fallkombination [A2] und [A5], [31]	21
Abbildung 3-7: Schildmaschine mit Teilflächenabbau, Schnitt (links), Frontansicht (rechts) [33]	22
Abbildung 3-8: Versuchscontainer mit aufgelagerten Fässern vor der Betonage [26]	24
Abbildung 3-9: Versuchscontainer mit aufgelagerten Fässern während der Betonage [26]	24
Abbildung 3-10: Versuche am Salzbeton mit Hydraulikfräse (oben links) und Hydraulikmeißel (oben rechts), Nukleargreifer (unten links) und freigelegte Fässer	25
Abbildung 3-11: Auszug aus der betrachteten Maschinenteknik nach [30]	29
Abbildung 4-1: DefAhS – kombinierte Frästrommel mit Schlaglamellen und Wendeschneidplatten	34
Abbildung 4-2: Versuchsdurchführung (links und Mitte) und Gebinde nach Abschluss der Versuche (rechts)	35
Abbildung 5-1: Funkgesteuerter Hydraulikbagger Caterpillar 320 CL [37]	36
Abbildung 5-2: Steuerstand Hydraulikbagger Caterpillar 320 CL [34]	37
Abbildung 5-3: Abschnitte der Versuchsdurchführung	37
Abbildung 6-1: Staubentwicklung beim Fräsen in Beton (links) und im Salzbeton (rechts) [26]	41
Abbildung 6-2: Staubentwicklung beim Fräsvorgang	41
Abbildung 6-3: Verweilzeit von Aerosol in der Atmosphäre, nach [42]	44
Abbildung 7-1: Beispielhafte Darstellung des Lückengrades (links: Salz - mittig: Salz und Zement - rechts: Salz, Zement und Wasser)	49
Abbildung 7-2: Möglicher Salzgehalt in Abhängigkeit des w/z-Werts	51
Abbildung 7-3: Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit vom w/z-Wert [45]	52
Abbildung 7-4: Rohdichte Salzbeton in Abhängigkeit des w/z-Werts	52
Abbildung 7-5: Sieblinie der groben Salzfraktion gemäß [26]	53
Abbildung 7-6: Beispielhafte Darstellung des Lückengrades (v. l.: Salz grob - Salz grob und fein - Salz und Zement - Salz, Zement und Wasser)	54
Abbildung 7-7: Schüttkegel der groben Salzfraktion, Schüttwinkel $\alpha=41,4^\circ$	55
Abbildung 7-8: Schüttkegel der feinen Salzfraktion, Schüttwinkel $\alpha=36,3^\circ$	55
Abbildung 7-9: Schüttkegel der Salzmischung, Schüttwinkel $\alpha=44,4^\circ$	56

Abbildung 7-10: Abmessungen der Probekörper.....	58
Abbildung 7-11: Probewürfel der hergestellten (Salz-)Betone	59
Abbildung 7-12: Versuchsstand geschlossen (links) und geöffnet (rechts)	60
Abbildung 7-13: Versuchsstand, Detail der Werkzeugführung.....	61
Abbildung 7-14: Versuchsstand, Motor	61
Abbildung 7-15: Versuchsstand, Absaugung.....	62
Abbildung 7-16: Minimal (v1) - und Maximalgeschwindigkeit (v2)	64
Abbildung 7-17: Positionen der Auffangschalen, Draufsicht	65
Abbildung 7-18: Positionen der Auffangschalen AS1, AS3 und AS4	65
Abbildung 7-19: Versuchsstand inklusive Messgerät.....	66
Abbildung 7-20: Schnitt durch die Probenahmesonde [49].....	66
Abbildung 7-21: CEL-712 Echtzeit-Staubmonitor mit angeschlossener Probenahmepumpe Tuff	67
Abbildung 7-22: Prinzipskizze der Druckluftdispergierung des Camsizer XT [50]	68
Abbildung 7-23: Prinzipskizze des Messsystems des Camsizer XT [41]	68
Abbildung 7-24: Schleifscheibe in Ausgangsposition	70
Abbildung 7-25: Schleifscheiben	70
Abbildung 7-26: Absaugung nach erfolgter Versuchsdurchführung.....	71
Abbildung 7-27: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe, 0 % Salzgehalt	75
Abbildung 7-28: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe, 70 % Salzgehalt	78
Abbildung 7-29: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe, 80 % Salzgehalt	81
Abbildung 7-30: Schleifscheiben S1 (links), S2 (mittig) und S3 (rechts); mit Drehrichtung (blau) und Spalt ohne Segmente (rot).....	82
Abbildung 7-31: Gegenüberstellung der Staubkonzentrationen beim Schleifen in Abhängigkeit der Scheibe.....	84
Abbildung 7-32: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit S1 in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie.....	88
Abbildung 7-33: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit S2 in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie.....	89
Abbildung 7-34: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit S3 in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie.....	90
Abbildung 7-35: Massenanteile der Kornfraktionen beim Schleifen in Abhängigkeit des Vorschubs, 0 % Salzgehalt	93
Abbildung 7-36: Massenanteile der Kornfraktionen beim Schleifen in Abhängigkeit des Vorschubs, 70 % Salzgehalt	96
Abbildung 7-37: Massenanteile der Kornfraktionen beim Schleifen in Abhängigkeit des Vorschubs, 80 % Salzgehalt	99
Abbildung 7-38: Fugenfräser in Ausgangsposition.....	103

Abbildung 7-39: Fugenfräser und Detail	103
Abbildung 7-40: Mittelwerte der Staubkonzentration beim Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes ..	106
Abbildung 7-41: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Fräsen in Abhängigkeit des Vorschubs, mit linearer Trendlinie	108
Abbildung 7-42: Seitenansicht (links) und Vorderansicht (rechts) des Fugenfräasers im Material.....	109
Abbildung 7-43: Massenanteile der Kornfraktionen beim Fräsen in Abhängigkeit des Vorschubs.....	112
Abbildung 7-44: Anordnung der Scherkraftaufnehmer - seitlich (links) und frontal (rechts) [51]	114
Abbildung 7-45: Gemittelte durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen & Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes.....	116
Abbildung 7-46: Gemittelte aufgefangene Masse beim Schleifen & Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes	117
Abbildung 7-47: Steigerung der aufgefangenen Materialmasse von v1 zu v2 beim Schleifen & Fräsen in Abhängigkeit des Salzgehaltes.....	118
Abbildung 7-48: Überkorn, Versuchsnummer 29	120
Abbildung 7-49: Partikelgrößenverteilung, Versuchsnummer 29	121
Abbildung 8-1: Schema einer pneumatischen Saugförderanlage [56]	123
Abbildung 8-2: Schema einer pneumatischen Druckförderanlage [45].....	123
Abbildung 8-3: Schema einer pneumatischen Saug-Druckförderanlage [45].....	124
Abbildung 8-4: Druckverlauf entlang der Saugleitung [53]	126
Abbildung 8-5: Betriebspunkt im Kennfeld eines handelsüblichen Ventilators [64]	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Herkunft der radioaktiven Abfälle in Deutschland, nach [3].....	2
Tabelle 2-2: In Betrieb befindliche Kernkraftwerke in Deutschland, nach [4]	3
Tabelle 2-3: Entsprechung der Abfallarten, nach [6]	4
Tabelle 2-4: Abfallart und prognostizierte endzulagernde Menge, nach [7]	5
Tabelle 3-1: Behälterarten [22]	15
Tabelle 3-2: Denkbare Gebindezustände und Einlagerungssituationen [31].....	20
Tabelle 3-3: Aktionsmatrix – Auszug [28].....	20
Tabelle 3-4: Zusammensetzung des verwendeten Salzgruses [26].....	23
Tabelle 3-5: Sieblinie [mm] und Durchgang [%] des verwendeten Salzgruses [26]	23
Tabelle 3-6: Variablen der theoretisch auftretenden Fälle [30]	26
Tabelle 3-7: Relevante Fälle für VS1 [30]	27
Tabelle 3-8: Relevante Fälle für VS2 [30]	27
Tabelle 3-9: Relevante Fälle für VS3 [30]	28
Tabelle 3-10: Relevante Fälle für VS4 [30]	28
Tabelle 4-1: Beurteilungsfelder und Bewertungskriterien [30]	31
Tabelle 4-2: Im Rahmen des Soll-Ist-Vergleichs untersuchte Geräte nach [36].....	32
Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Mittelwerte aus bemannten und fernhantierten Durchgängen [37] 38	
Tabelle 6-1: Zwei im Endlager Morsleben zum Einsatz kommende Salzbetone, nach [39], [40].....	42
Tabelle 7-1: Theoretische Salzbetonrezeptur	49
Tabelle 7-2: Theoretische Daten des Salzbetons als Funktion des w/z-Werts, ohne Lufteinschluss	50
Tabelle 7-3: Ergebnisse aus Messungen am Trockensalz, grobe Salzfraktion.....	54
Tabelle 7-4: Ergebnisse aus Messungen am Trockensalz, feine Salzfraktion	55
Tabelle 7-5: Rezeptur für einen Salzbeton P1 mit Salzgehalt von ca. 80 Masse-%.....	57
Tabelle 7-6: Rezeptur für einen Salzbeton P2 mit Salzgehalt von ca. 70 Masse-%.....	57
Tabelle 7-7: Rezeptur für einen Referenzbeton P3 ohne Salzgehalt.....	58
Tabelle 7-8: Ermittelte Druckfestigkeiten der hergestellten Betonmischungen.....	59
Tabelle 7-9: Zum Einsatz kommende Winkelschleifer	63
Tabelle 7-10: Abtragsvolumen der einzelnen Schleifversuche	71
Tabelle 7-11: Permutation der Versuchsparameter, Schleifversuche	71
Tabelle 7-12: Staubkonzentrationen der Schleifversuche, 0 % Salzgehalt.....	73
Tabelle 7-13: Steigerung der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2, 0 % Salzgehalt	74
Tabelle 7-14: Staubkonzentrationen der Schleifversuche, 70 % Salzgehalt	76
Tabelle 7-15: Steigerung der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2, 70 % Salzgehalt	77
Tabelle 7-16: Staubkonzentrationen der Schleifversuche, 80 % Salzgehalt	79

Tabelle 7-17: Steigerung der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2, 80 % Salzgehalt	80
Tabelle 7-18: Gegenüberstellung der Steigerungen der Staubkonzentrationen von v1 zu v2 - Schleifen ..	85
Tabelle 7-19: Durchschnittliche Staubkonzentration beim Schleifen mit Vorschubgeschwindigkeit v1	86
Tabelle 7-20: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Schleifen, 0 % Salzgehalt ..	91
Tabelle 7-21: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Schleifen, 70 % Salzgehalt ..	94
Tabelle 7-22: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Schleifen, 80 % Salzgehalt ..	97
Tabelle 7-23: Zusammenfassung der Messergebnisse, Schleifen.....	101
Tabelle 7-24: Abtragsvolumen der einzelnen Fräsversuche	104
Tabelle 7-25: Permutation der Versuchsparameter, Fräsversuche	104
Tabelle 7-26: Staubkonzentrationen der Fräsversuche	105
Tabelle 7-27: Gegenüberstellung der Steigerungen der Staubkonzentrationen bei Änderung der Geschwindigkeit von v1 zu v2 - Fräsen	107
Tabelle 7-28: Massenanteile der Kornfraktionen an der Gesamtmenge beim Fräsen	110
Tabelle 7-29: Zusammenfassung der Messergebnisse, Fräsen.....	113
Tabelle 7-30: Durchschnittlich aufgenommene Kräfte beim Fräsen	114
Tabelle 7-31: Gegenüberstellung der Steigerungen der gemessenen Kräfte von v1 zu v2 - Fräsen	115
Tabelle 7-32: Auswirkungen der Versuchsparameter auf die Messwerte.....	115
Tabelle 7-33: Steigerung der aufgefangenen Materialmassen von v1 zu v2	118
Tabelle 7-34: Zusammenstellung der Messergebnisse	119
Tabelle 7-35: Versuchsnummer 29, Staubkonzentrationen des Schleifversuchs, 80 % Salzgehalt	120
Tabelle 8-1: Unterteilung der Schüttgüter nach Korndurchmesser, nach [57].....	124

Literaturverzeichnis

- [1] K+S Entsorgung GmbH, „K+S Entsorgung,“ [Online]. Available: <http://www.ks-entsorgung.com/de/geschaeftsfelder/deponie/>. [Zugriff am 27. März 2019].
- [2] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, „BfE,“ 01. Februar 2017. [Online]. Available: <http://www.bfe.bund.de/DE/ne/abfaelle/einfuehrung/einfuehrung.html>. [Zugriff am 07. Mai 2017].
- [3] Deutsches Atomforum e. V., „kernenergie.de,“ Dezember 2015. [Online]. Available: <http://www.kernenergie.de/kernenergie/themen/entsorgung/zwischenlagerung.php>. [Zugriff am 21. April 2017].
- [4] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, „Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland - Anlagen in Betrieb,“ Januar 2018. [Online]. Available: http://www.bfe.bund.de/SharedDocs/Downloads/BfE/DE/berichte/kt/kernanlagenbetrieb.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 31. Januar 2018].
- [5] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, „Stilllegung kerntechnischer Anlagen,“ BMU, 2012.
- [6] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, „BfE,“ 15. August 2016. [Online]. Available: <http://www.bfe.bund.de/DE/ne/abfaelle/arten/arten.html>. [Zugriff am 08. Mai 2017].
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle,“ 2015.
- [8] Entsorgungskommission, „Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit,“ 2019.
- [9] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, „Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit,“ 19. Januar 2018. [Online]. Available: https://www.bfe.bund.de/DE/soa/standortauswahlverfahren/entsorgungsziel/entsorgungsziel_node.html. [Zugriff am 26. Juni 2019].
- [10] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, [Online]. Available: <https://www.grs.de/content/begriff-der-woche-wirtsgestein>. [Zugriff am 28. Juni 2019].
- [11] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, „BfE,“ 25. April 2017. [Online]. Available: <http://www.bfe.bund.de/DE/ne/endlager/einfuehrung/einfuehrung.html>. [Zugriff am 08. Mai 2017].
- [12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle,“ 2010.
- [13] Entsorgungskommission (ESK), „Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier,“ 2011.

- [14] Bundesamt für Strahlenschutz, „Bundesamt für Strahlenschutz,“ 08. November 2016. [Online]. Available: <http://www.bfs.de/DE/themen/ne/endlager/standortauswahl/international/endlagerung-europa.html>. [Zugriff am 23. Juni 2017].
- [15] Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), „Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Schlussbericht vom 31. Januar 2000,“ Bern, 2000.
- [16] Ministerium für auswärtige Angelegenheiten Finnlands, „This is Finland,“ September 2011. [Online]. Available: <https://finland.fi/de/leben-amp-gesellschaft/finland-baut-erstes-atomares-endlager/>. [Zugriff am 17. Dezember 2018].
- [17] Inforum Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH, „Kernenergie.de,“ Juli 2017. [Online]. Available: http://www.kernenergie.de/kernenergie/themen/Entsorgung/Schwach-und-Mittelradioaktive-Abfaelle/06_index.php#anchor_105f13d8_Accordion-Endlagerung:-ERAM--Endlager-fuer-radioaktive-Abfaelle-Morsleben. [Zugriff am 07. August 2017].
- [18] Schmitt, „Sicherungsarbeiten im Salzbergwerk Asse II,“ *Bauportal*, Ausgabe 10 2011.
- [19] DMT GmbH & Co. KG, TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, „Beurteilung der Möglichkeit einer Rückholung der LAW-Abfälle aus der Schachanlage Asse,“ 2009.
- [20] Bundesgesellschaft für Endlagerung, „Bundesgesellschaft für Endlagerung,“ [Online]. Available: <https://www.bge.de/asse/themenschwerpunkte/themenschwerpunkt-das-wasser-in-der-asse/warum-laeuft-wasser-in-die-asse/>. [Zugriff am 03. Juli 2019].
- [21] Helmholtz Zentrum München, „Schachanlage Asse - Befragung früherer Mitarbeiter,“ 2008.
- [22] Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, „Bedingungen für die Lagerung schwachradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse,“ 1975.
- [23] Heydom, Hensel und Bracke, „Beschreibung der Lagerbereiche der Abfälle, Projekt Langzeitsicherheit Asse,“ 2005.
- [24] Asse GmbH, „Beschreibung der Lagerbereiche der Abfälle,“ 2009.
- [25] Bundesamt für Strahlenschutz, „Asse II,“ 27. Februar 2017. [Online]. Available: <http://www.asse.bund.de/Asse/DE/themen/was-ist/bergwerk/bergwerk.html>. [Zugriff am 12. März 2017].
- [26] Bundesamt für Strahlenschutz, „2. Zwischenbericht – Vorversuche mit Versatzmaterial und Versuchsreihen zum Freilegen und Lösen von Gebinden, Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachanlage Asse II,“ 2013.
- [27] C. Tänzer, „Gefüge- und Strukturuntersuchungen an Steinsalz-Versatzmaterial,“ *Erzmetall*, Nr. 3, p. 131 ff, März 2003.
- [28] Bundesamt für Strahlenschutz, „Asse II,“ 12. Juni 2016. [Online]. Available: http://www.asse.bund.de/Asse/DE/themen/was-wird/stilllegungskonzept/optionsvergleich/optionsvergleich_node.html. [Zugriff am 29. Juli 2016].
- [29] Bundesamt für Strahlenschutz, „Asse II,“ 15. Januar 2010. [Online]. Available: <http://www.asse.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/Asse/DE/2010/001.html>. [Zugriff am 11. Mai 2017].

- [30] Bundesamt für Strahlenschutz, „3. Zwischenbericht – Prüfung der Eignungsfähigkeit vorhandener Techniken, Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II,“ 2014.
- [31] Bundesamt für Strahlenschutz, „1. Zwischenbericht – Marktrecherche möglicher Bergungstechnologien, Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II,“ 2012.
- [32] Asse GmbH, „Asse GmbH,“ 12. Juli 2016. [Online]. Available: http://www.asse-gmbh.de/die_schachtanlage_asse_ii/stilllegung.html. [Zugriff am 29. Juli 2016].
- [33] Bundesamt für Strahlenschutz, „4. Zwischenbericht – Machbarkeitsstudie für die Methode „Schildvortrieb mit Teilflächenabbau“, Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II,“ 2015.
- [34] Terex Germany GmbH & Co. KG..
- [35] Darda GmbH (Brokk).
- [36] Bundesamt für Strahlenschutz, „5. Zwischenbericht – Identifizierung notwendiger Entwicklungsbedarfe, Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II,“ 2016.
- [37] Bundesamt für Strahlenschutz, „Zusatz zum Abschlussbericht – Versuch zur Fernhandrierung, Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II,“ 2016.
- [38] Bundesamt für Strahlenschutz, „Abschlussbericht - Studie zur Eignungsfähigkeit und zum Entwicklungsbedarf von Gerätschaften / Werkzeugen für den Einsatz in der Schachtanlage Asse II,“ 2016.
- [39] DBE, „Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen - Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2,“ Bundesamt für Strahlenschutz, 2004.
- [40] DBE, „Salzbeton - Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte (Referenzmaterial M3),“ Bundesamt für Strahlenschutz, 2006.
- [41] Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN ISO 4225 : 1996-08*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1996.
- [42] C. Rüger, *Die Wege von Staub*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016.
- [43] Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, „www.bgbau.de,“ [Online]. Available: <http://www.bgbau.de/gisbau/lehrgang/a-z/staubex.htm>. [Zugriff am 06. Dezember 2017].
- [44] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, „www.dguv.de,“ [Online]. Available: <http://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-staub-ex/index.jsp>. [Zugriff am 06. Dezember 2017].
- [45] Verein Deutscher Zementwerke e.V., *Zement-Merkblatt Betontechnik B.4, Frischbeton, Eigenschaften und Prüfungen*, Düsseldorf, 2013.
- [46] T. Seilnacht, „Seilnacht,“ [Online]. Available: http://www.seilnacht.com/Chemie/ch_nacl.htm. [Zugriff am 27. Dezember 2016].
- [47] Heidelberg Cement, „Betontechnische Daten,“ [Online]. Available: <http://www.betontechnische-daten.de/de/1-5-6-dichte-und-schuettdichte>. [Zugriff am 27. Dezember 2016].

- [48] H. Brauer, „Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen,“ Frankfurt am Main, Verlag Sauerländer, 1971.
- [49] CASELLA CEL Inc., *Benutzerhandbuch CEL-712 Echtzeit-Staubmonitor*.
- [50] Retsch Technology GmbH, *Partikelanalysator CAMSIZER XT - Produktinformation*, Haan, 2012.
- [51] J. Cazzanti, *Entwicklung und Simulierung einer Messmontage beim Fräsen von Verfüllmaterial kerntechnischer Endlager*, Karlsruhe, 2019.
- [52] K.-E. Wirth, „Die Grundlagen der pneumatischen Förderung,“ *Chemie Ingenieur Technik*, pp. 110-122, 1983.
- [53] F. Gehbauer und K. Heppler, „Staub- und wasserfreie Abbruchtechnologie für die Kerntechnik und andere sensitive Bereiche,“ *Bautechnik 78, Heft 3*, pp. 171-179, 2001.
- [54] M. Kraume, *Rohrleitungen*, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [55] G. Niederreiter, „Untersuchung zur Pflropfenentstehung und Pflropfenstabilität bei der pneumatischen Dichtstromförderung, Dissertation,“ München, 2006.
- [56] Hesse, *Theoretische und praktische Grundlagen der pneumatischen Förderung*, Moskau.
- [57] W. Siegel, *Pneumatische Förderung*, Ravensburg: Vogel Verlag und Druck KG, 1991.
- [58] M. Weber, *Strömungsfördertechnik*, Mainz: Krausskopf-Verlag, 1973.
- [59] W. Barth, „Strömungstechnische Probleme der Verfahrenstechnik,“ *Chemie Ingenieur Technik*, pp. 29-34, 1954.
- [60] M. Weber und M. Y. Dedegil, „Datensammlung zur pneumatischen Förderung und Reibungsfunktionen,“ *Schüttgut*, pp. 165-171, 1999.
- [61] Y. Dedegil, 2017.
- [62] S. Gentes, *Weiterentwicklung von Standardbaumaschinen zur Rettung Verschütteter*, Karlsruhe, 2003, p. 116.
- [63] P. D. F. Gehbauer, „Untersuchung und Optimierung der Förderleistung von Saugbaggern,“ Karlsruhe, 2000.
- [64] Zenner Ventilatoren GmbH, „Zenner-Ventilatoren,“ [Online]. Available: <https://www.zenner-ventilatoren.de/aerodynamik>. [Zugriff am 26. April 2019].
- [65] F. Borchers, „Strahlenschutz-Lexikon,“ 2012.
- [66] „Konvergenz (Bergbau),“ Wikipedia, 09. Oktober 2017. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Konvergenz_\(Bergbau\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Konvergenz_(Bergbau)). [Zugriff am 27. Dezember 2018].
- [67] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, „Auflistung kerntechnischer Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland - Anlagen in Stilllegung,“ Januar 2018. [Online]. Available: http://www.bfe.bund.de/SharedDocs/Downloads/BfE/DE/berichte/kt/kernanlagen-stilllegung.pdf?__blob=publicationFile&v=5. [Zugriff am 31. Januar 2018].
- [68] Bundesamt für Strahlenschutz, „Asse II,“ 27. Februar 2017. [Online]. Available: <http://www.asse.bund.de/Asse/DE/themen/was-ist/zutrittswaesser/zutrittswaesser.html>. [Zugriff am 16. März 2017].

- [69] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Verzeichnis radioaktiver Abfälle,“ 2013.

Anhang

- Anhang 1 Kernkraftwerke in Deutschland
- Anhang 2 Berechnung möglicher Salzgehalte in Abhängigkeit des w/z-Werts
- Anhang 3 Messwerte der Schleifversuche
 - 3a Staubkonzentration
 - 3b aufgefangenes Material
- Anhang 4 Messwerte der Fräsversuche
 - 4a Staubkonzentration
 - 4b aufgefangenes Material

Anhang 1 Kernkraftwerke in Deutschland

Stillgelegte Kernkraftwerke in Deutschland, nach [67]

Nr.	Name	Kurzbezeichnung	Leistung MW _e (brutto)	Stilllegung		Standort
				begonnen	beendet	
1	Niederaichbach	KKN	106	1975	1995	Niederaichbach (BY)
2	Heissdampfreaktor Grosswelzheim	HDR	25	1983	1998	Karlstein (BY)
3	Versuchsatomkraftwerk Kahl	VAK	16	1988	2010	Karlstein (BY)

In Stilllegung befindliche Kernkraftwerke in Deutschland, nach [67]

Nr.	Name	Kurzbezeichnung	Leistung MW _e (brutto)	Stilllegung begonnen	Standort
1	Gundremmingen A	KRB A	250	1983	Gundremmingen (BY)
2	Lingen	KWL	252	1985	Lingen (NI)
3	Mehrzweckforschungsreaktor	MZFR	57	1987	Eggenstein-Leopoldshafen (BW)
4	Kompakte natriumgekühlte Kernanlage	KNK II	21	1993	Eggenstein-Leopoldshafen (BW)
5	Thoriumhochtemperaturreaktor	THTR-300	308	1993	Hamm-Uentrop (NRW)
6	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich	AVR	15	1994	Jülich (NRW)
7	Rheinsberg	KKR	70	1995	Rheinsberg (BB)
8	Greifswald 1	KGR 1	440	1995	Lubmin (MV)
9	Greifswald 2	KGR 2	440	1995	Lubmin (MV)
10	Greifswald 3	KGR 3	440	1995	Lubmin (MV)
11	Greifswald 4	KGR 4	440	1995	Lubmin (MV)
12	Greifswald 5	KGR 5	440	1995	Lubmin (MV)
13	Würgassen	KWW	670	1997	Würgassen (NRW)

14	Mülheim-Kärlich	KMK	1.302	2004	Mülheim-Kärlich (RP)
15	Stade	KKS	672	2005	Stade (NI)
16	Obrigheim	KWO	357	2008	Obrigheim (BW)
17	Isar 1	KKI 1	912	2017	Essenbach (BY)
18	Neckarwestheim 1	GKN 1	840	2017	Neckarwestheim (BW)
19	Biblis A	KWB A	1.225	2017	Biblis (HE)
20	Biblis B	KWB B	1.300	2017	Biblis (HE)
21	Philippsburg 1	KKP 1	926	2017	Philippsburg (BW)

Endgültig abgeschaltete Kernkraftwerke in Deutschland ohne Stilllegungsgenehmigung, nach [67]

Nr.	Name	Kurzbezeichnung	Leistung MW _e (brutto)	Stilllegung beantragt	Standort
1	Unterweser	KKU	1.410	2012	Esenshamm (NI)
2	Brunsbüttel	KKB	806	2012	Brunsbüttel (SH)
3	Grafenrheinfeld	KKG	1.345	2014	Grafenrheinfeld (BY)
4	Gundremmingen B	KRB II B	1.344	2014	Gundremmingen (BY)
5	Krümmel	KKK	1.402	2015	Krümmel (SH)

Anhang 2 Berechnung möglicher Salzgehalte in Abhängigkeit des w/z-Werts

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	340,00	3.100,00	1.054,00
Wasser	110,00	1.000,00	110,00
Gesamt	1.000,00	2.357,50	2.357,50

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
50,6	0,1

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	280,00	3.100,00	868,00
Wasser	170,00	1.000,00	170,00
Gesamt	1.000,00	2.231,50	2.231,50

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
53,5	0,2

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	233,00	3.100,00	722,30
Wasser	217,00	1.000,00	217,00
Gesamt	1.000,00	2.132,80	2.132,80

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
56,0	0,3

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	200,00	3.100,00	620,00
Wasser	250,00	1.000,00	250,00
Gesamt	1.000,00	2.063,50	2.063,50

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
57,8	0,4

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	175,50	3.100,00	544,05
Wasser	274,50	1.000,00	274,50
Gesamt	1.000,00	2.012,05	2.012,05

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
59,3	0,5

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	157,00	3.100,00	486,70
Wasser	293,00	1.000,00	293,00
Gesamt	1.000,00	1.973,20	1.973,20

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
60,5	0,6

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	142,00	3.100,00	440,20
Wasser	308,00	1.000,00	308,00
Gesamt	1.000,00	1.941,70	1.941,70

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
61,5	0,7

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	130,00	3.100,00	403,00
Wasser	320,00	1.000,00	320,00
Gesamt	1.000,00	1.916,50	1.916,50

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
62,3	0,8

	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	119,00	3.100,00	368,90
Wasser	331,00	1.000,00	331,00
Gesamt	1.000,00	1.893,40	1.893,40

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
63,0	0,9

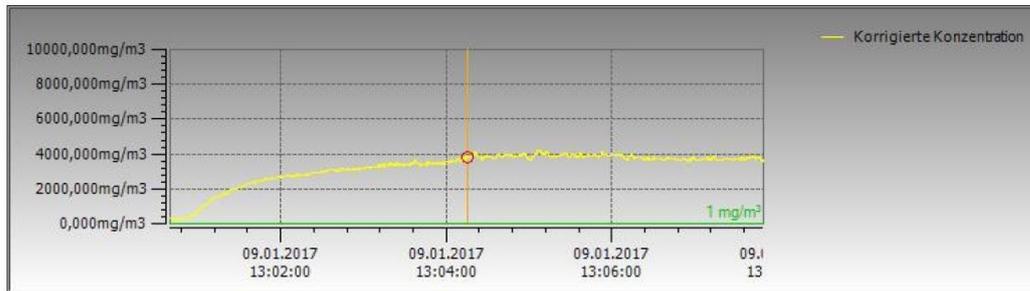
	Volumen [l]	Dichte [kg/m ³]	Masse [kg]
Salz	550,00	2.170,00	1.193,50
Zement	110,00	3.100,00	341,00
Wasser	340,00	1.000,00	340,00
Gesamt	1.000,00	1.874,50	1.874,50

Salzgehalt [Masse-%]	w/z-Wert
63,7	1,0

Anhang 3 Messwerte der Schleifversuche

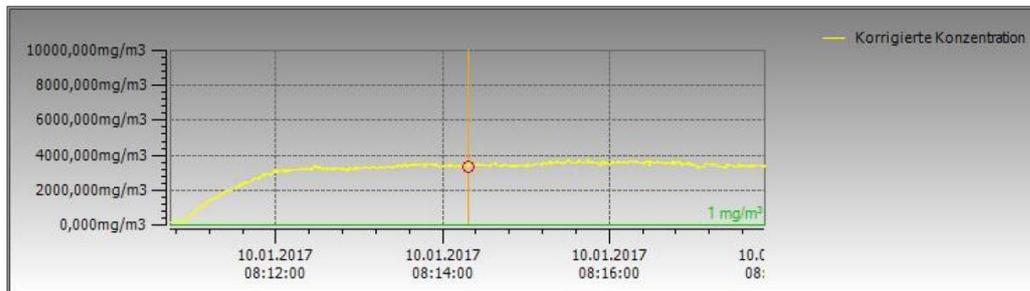
3a Staubkonzentration

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.221 mg/m ³ 09.01.2017 13:05:06
Startdatum und -uhrzeit	09.01.2017 13:00:39	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	274 mg/m ³ 09.01.2017 13:00:41
Dauer	00:07:11 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	431		
Korrigierter Mittelwert	3.216 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 1

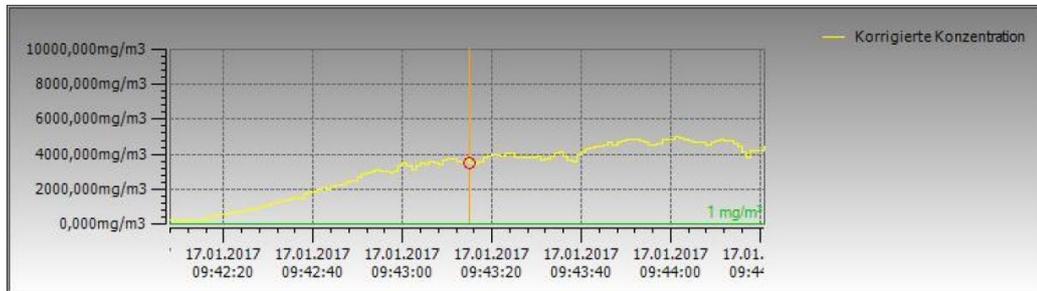
Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	3.756 mg/m ³ 10.01.2017 08:15:30
Startdatum und -uhrzeit	10.01.2017 08:10:43	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	180,8 mg/m ³ 10.01.2017 08:10:50
Dauer	00:07:09 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	429		
Korrigierter Mittelwert	3.107 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 2

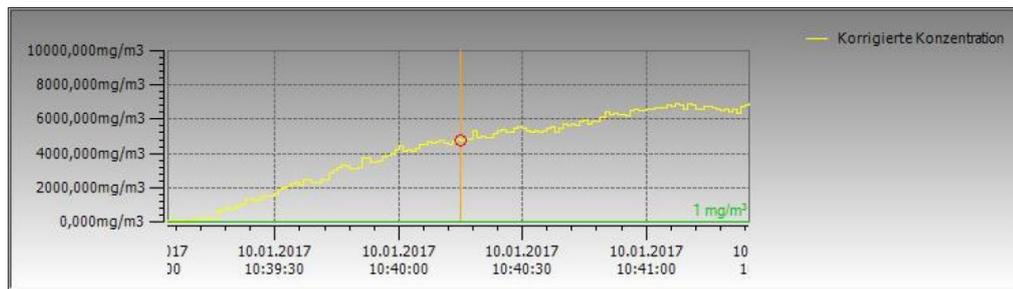
Anhang

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.015 mg/m ³ 17.01.2017 09:44:01
Startdatum und -uhrzeit	17.01.2017 09:42:07	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	231,7 mg/m ³ 17.01.2017 09:42:08
Dauer	00:02:14 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	134		
Korrigierter Mittelwert	3.124 mg/m ³		
Anmerkungen			



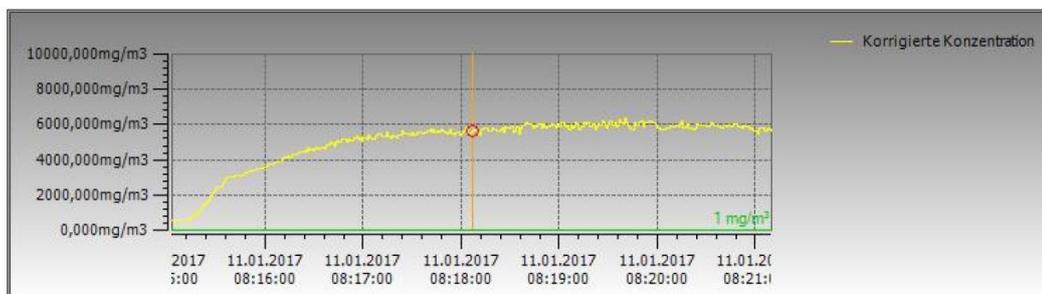
Staubmessung Versuchsnummer 3

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.915 mg/m ³ 10.01.2017 10:41:25
Startdatum und -uhrzeit	10.01.2017 10:39:03	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	79,7 mg/m ³ 10.01.2017 10:39:09
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.216 mg/m ³		
Anmerkungen			



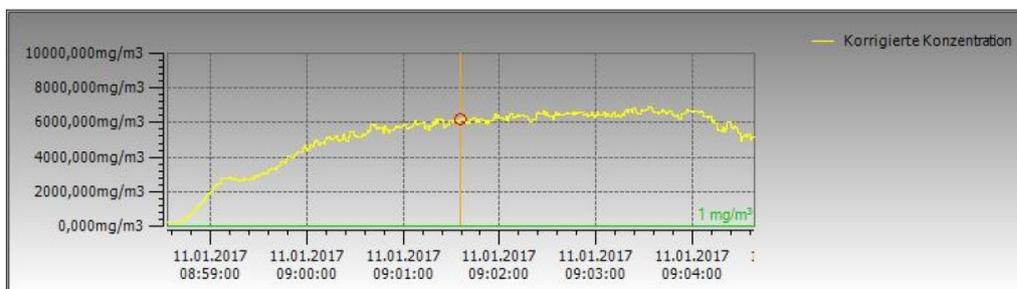
Staubmessung Versuchsnummer 4

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.355 mg/m ³ 11.01.2017 08:19:40
Startdatum und -uhrzeit	11.01.2017 08:15:02	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	545 mg/m ³ 11.01.2017 08:15:06
Dauer	00:06:08 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	368		
Korrigierter Mittelwert	5.014 mg/m ³		
Anmerkungen			



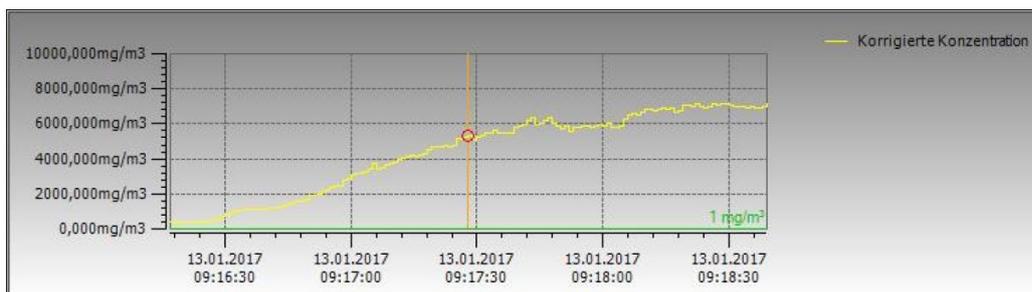
Staubmessung Versuchsnummer 5

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.869 mg/m ³ 11.01.2017 09:03:33
Startdatum und -uhrzeit	11.01.2017 08:58:32	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	251 mg/m ³ 11.01.2017 08:58:33
Dauer	00:06:07 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	367		
Korrigierter Mittelwert	5.175 mg/m ³		
Anmerkungen			



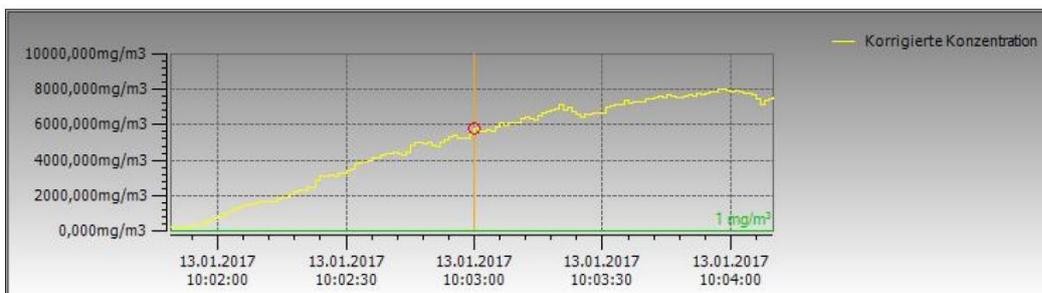
Staubmessung Versuchsnummer 6

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	7.181 mg/m ³ 13.01.2017 09:18:29
Startdatum und -uhrzeit	13.01.2017 09:16:16	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	386 mg/m ³ 13.01.2017 09:16:23
Dauer	00:02:23 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	143		
Korrigierter Mittelwert	4.357 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 7

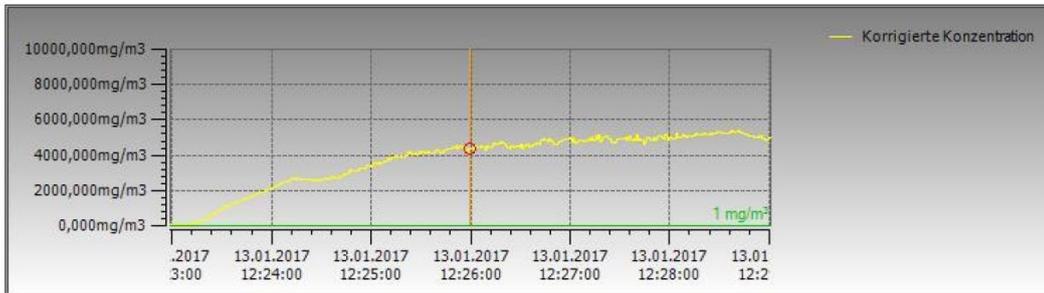
Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	8.033 mg/m ³ 13.01.2017 10:03:57
Startdatum und -uhrzeit	13.01.2017 10:01:48	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	275 mg/m ³ 13.01.2017 10:01:49
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.949 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 8

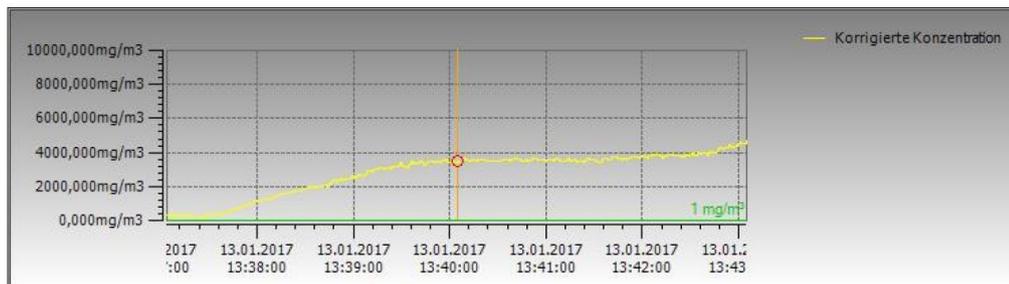
Anhang

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.360 mg/m ³ 13.01.2017 12:28:41
Startdatum und -uhrzeit	13.01.2017 12:22:58	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	82,0 mg/m ³ 13.01.2017 12:23:01
Dauer	00:06:03 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	363		
Korrigierter Mittelwert	3.727 mg/m ³		
Anmerkungen			



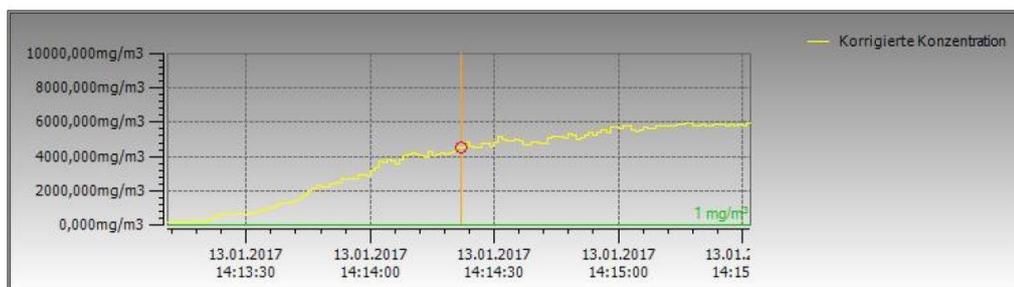
Staubmessung Versuchsnummer 9

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.675 mg/m ³ 13.01.2017 13:43:05
Startdatum und -uhrzeit	13.01.2017 13:37:03	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	265 mg/m ³ 13.01.2017 13:37:25
Dauer	00:06:02 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	362		
Korrigierter Mittelwert	2.812 mg/m ³		
Anmerkungen			



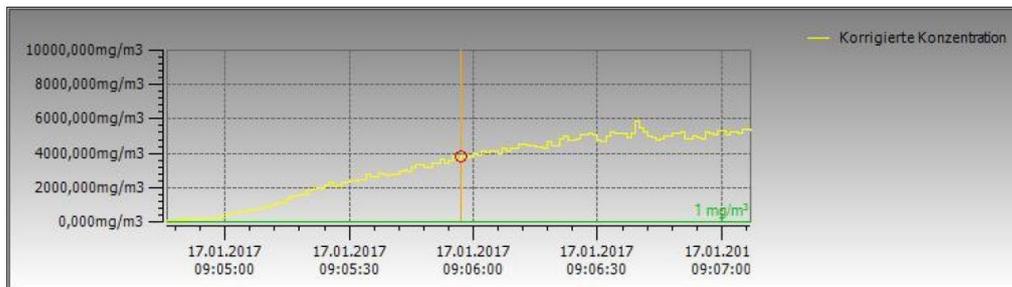
Staubmessung Versuchsnummer 10

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.975 mg/m ³ 13.01.2017 14:15:16
Startdatum und -uhrzeit	13.01.2017 14:13:10	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	136,1 mg/m ³ 13.01.2017 14:13:12
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	3.734 mg/m ³		
Anmerkungen			



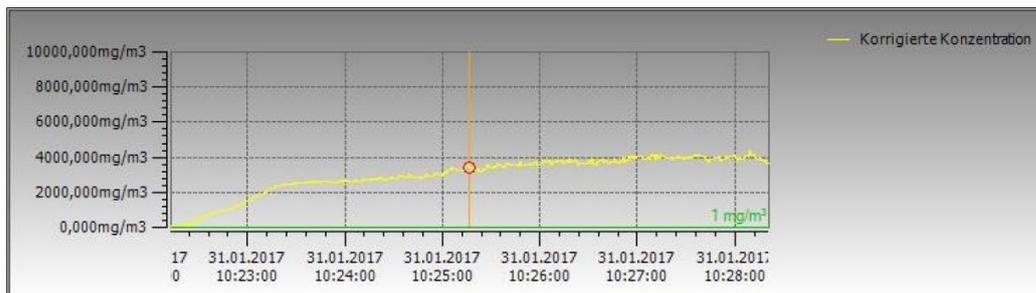
Staubmessung Versuchsnummer 11

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.834 mg/m ³ 17.01.2017 09:06:39
Startdatum und -uhrzeit	17.01.2017 09:04:45	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	115,9 mg/m ³ 17.01.2017 09:04:46
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	3.267 mg/m ³		
Anmerkungen			



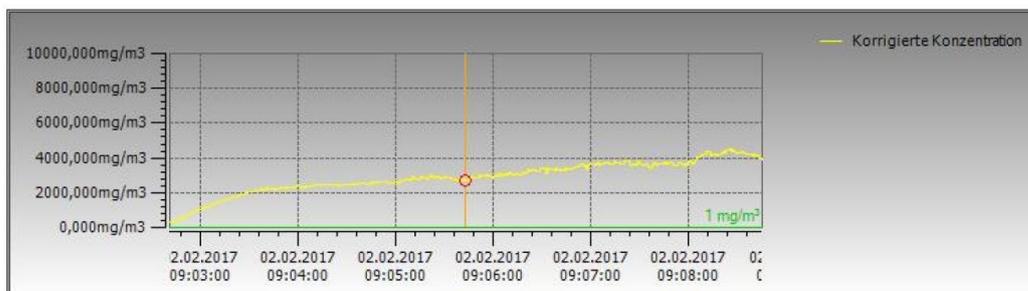
Staubmessung Versuchsnummer 12

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.358 mg/m ³ 31.01.2017 10:28:09
Startdatum und -uhrzeit	31.01.2017 10:22:12	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	94,8 mg/m ³ 31.01.2017 10:22:13
Dauer	00:06:09 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	369		
Korrigierter Mittelwert	2.985 mg/m ³		
Anmerkungen			



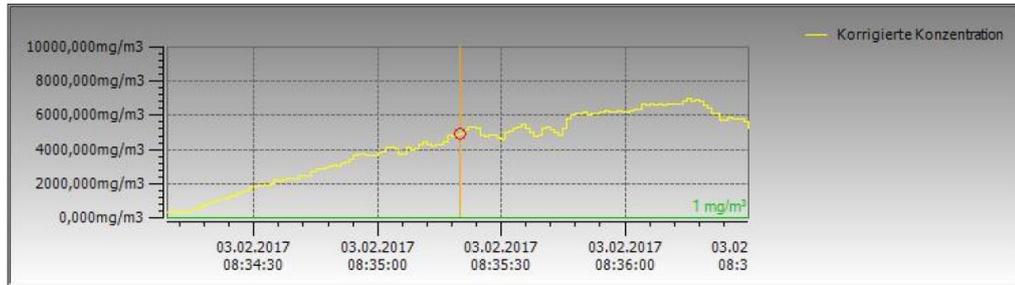
Staubmessung Versuchsnummer 13

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.515 mg/m ³ 02.02.2017 09:08:25
Startdatum und -uhrzeit	02.02.2017 09:02:40	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	337 mg/m ³ 02.02.2017 09:02:41
Dauer	00:06:05 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	365		
Korrigierter Mittelwert	2.883 mg/m ³		
Anmerkungen			



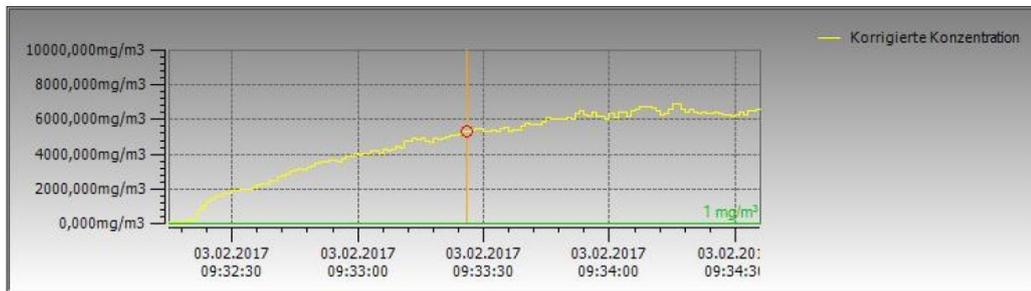
Staubmessung Versuchsnummer 14

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.965 mg/m ³ 03.02.2017 08:36:15
Startdatum und -uhrzeit	03.02.2017 08:34:08	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	296 mg/m ³ 03.02.2017 08:34:11
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.219 mg/m ³		
Anmerkungen			



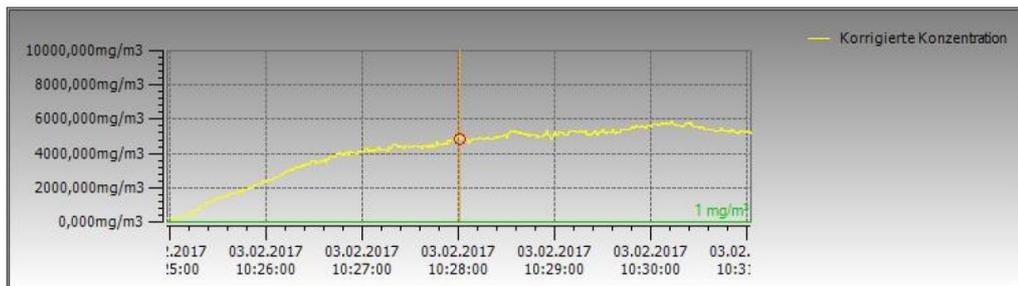
Staubmessung Versuchsnummer 15

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.932 mg/m ³ 03.02.2017 09:34:16
Startdatum und -uhrzeit	03.02.2017 09:32:14	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	71,3 mg/m ³ 03.02.2017 09:32:15
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.622 mg/m ³		
Anmerkungen			



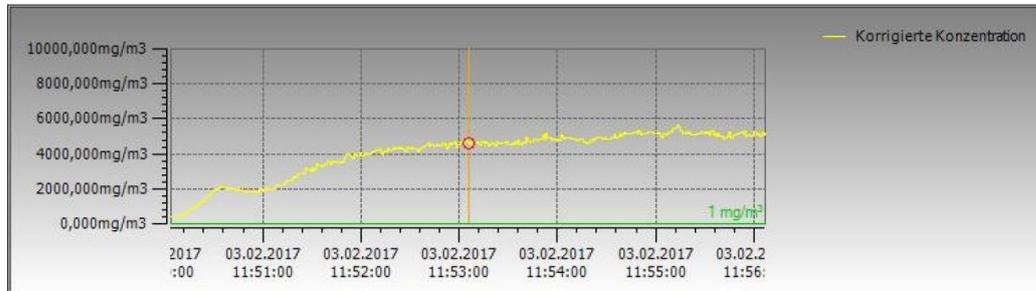
Staubmessung Versuchsnummer 16

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.836 mg/m ³ 03.02.2017 10:30:13
Startdatum und -uhrzeit	03.02.2017 10:24:57	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	243,7 mg/m ³ 03.02.2017 10:25:00
Dauer	00:06:06 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	366		
Korrigierter Mittelwert	4.145 mg/m ³		
Anmerkungen			



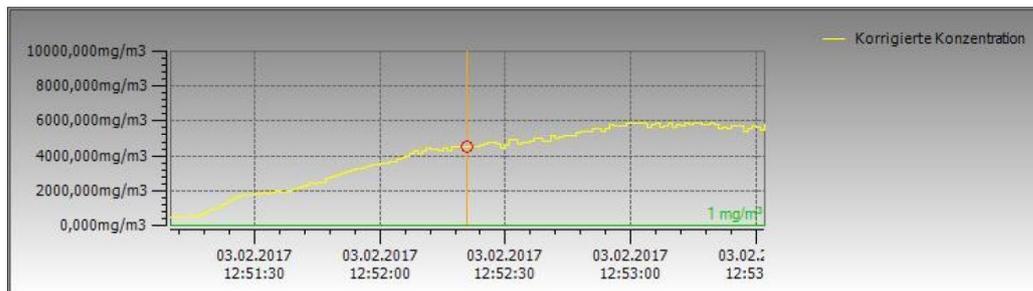
Staubmessung Versuchsnummer 17

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.616 mg/m ³ 03.02.2017 11:55:13
Startdatum und -uhrzeit	03.02.2017 11:50:03	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	419 mg/m ³ 03.02.2017 11:50:07
Dauer	00:06:04 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	364		
Korrigierter Mittelwert	3.988 mg/m ³		
Anmerkungen			



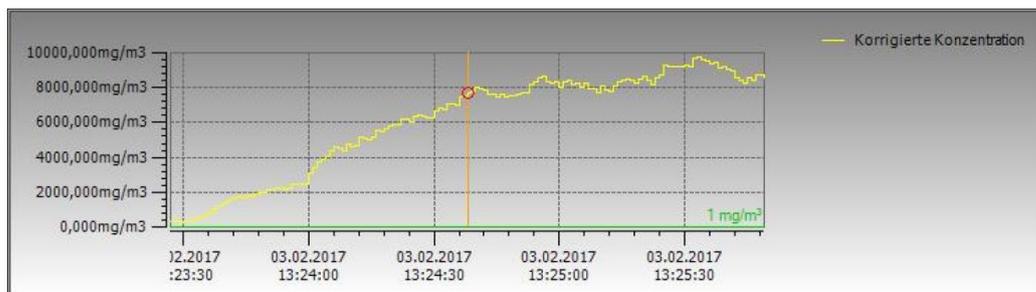
Staubmessung Versuchsnummer 18

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.913 mg/m ³ 03.02.2017 12:53:02
Startdatum und -uhrzeit	03.02.2017 12:51:09	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	444 mg/m ³ 03.02.2017 12:51:11
Dauer	00:02:23 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	143		
Korrigierter Mittelwert	3.991 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 19

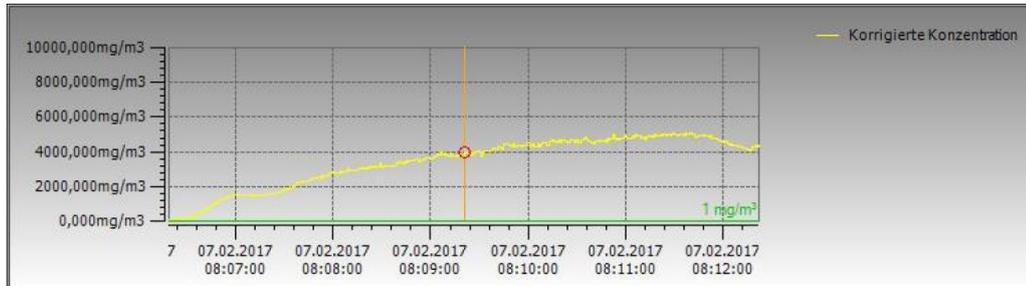
Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	9.771 mg/m ³ 03.02.2017 13:25:33
Startdatum und -uhrzeit	03.02.2017 13:23:26	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	308 mg/m ³ 03.02.2017 13:23:28
Dauer	00:02:23 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	143		
Korrigierter Mittelwert	6.056 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 20

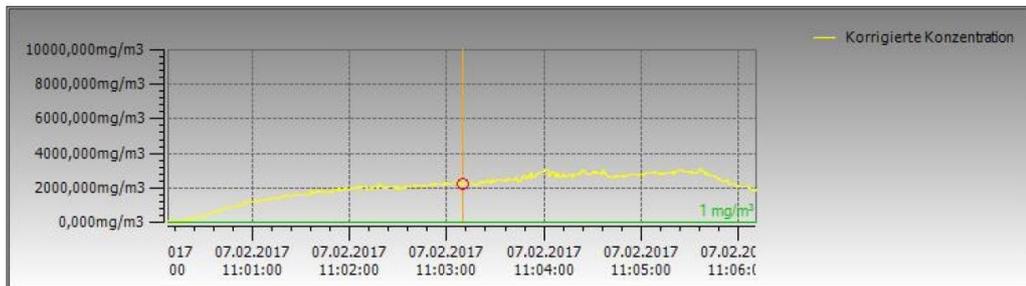
Anhang

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.108 mg/m ³ 07.02.2017 08:11:29
Startdatum und -uhrzeit	07.02.2017 08:06:18	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	105,8 mg/m ³ 07.02.2017 08:06:20
Dauer	00:06:04 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	364		
Korrigierter Mittelwert	3.425 mg/m ³		
Anmerkungen			



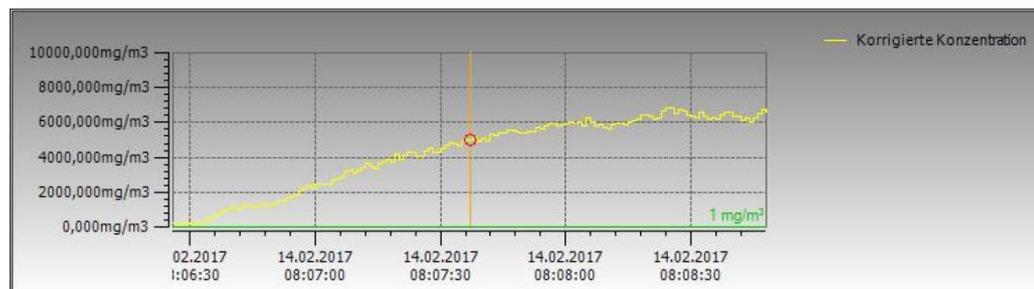
Staubmessung Versuchsnummer 21

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	3.108 mg/m ³ 07.02.2017 11:05:37
Startdatum und -uhrzeit	07.02.2017 11:00:07	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	67,7 mg/m ³ 07.02.2017 11:00:08
Dauer	00:06:04 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	364		
Korrigierter Mittelwert	2.060 mg/m ³		
Anmerkungen			



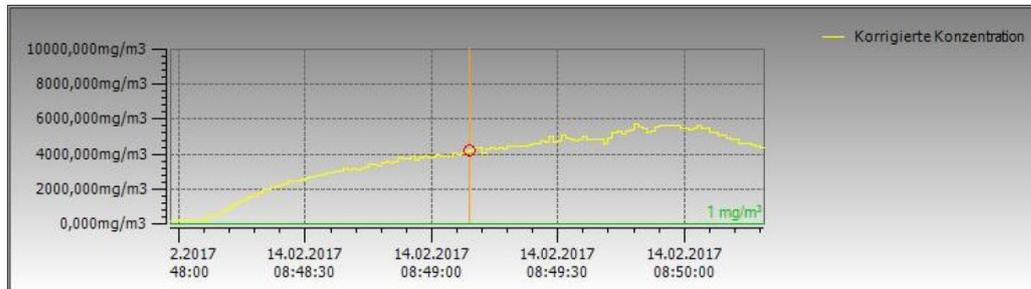
Staubmessung Versuchsnummer 22

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.794 mg/m ³ 14.02.2017 08:08:25
Startdatum und -uhrzeit	14.02.2017 08:06:25	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	177,7 mg/m ³ 14.02.2017 08:06:29
Dauer	00:02:23 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	143		
Korrigierter Mittelwert	4.250 mg/m ³		
Anmerkungen			



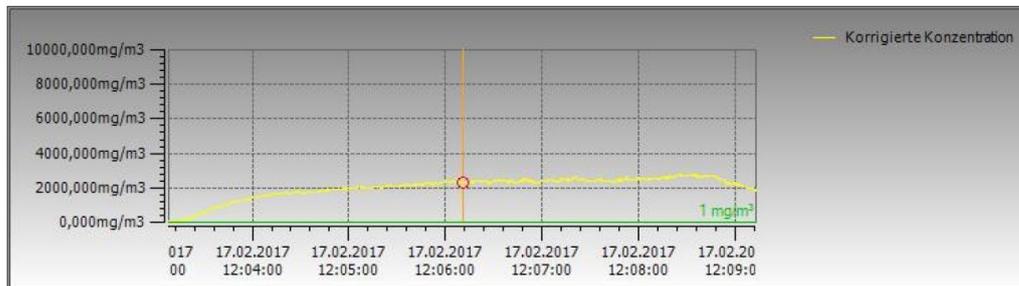
Staubmessung Versuchsnummer 23

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.709 mg/m ³ 14.02.2017 08:49:48
Startdatum und -uhrzeit	14.02.2017 08:47:57	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	129,2 mg/m ³ 14.02.2017 08:48:01
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	3.681 mg/m ³		
Anmerkungen			



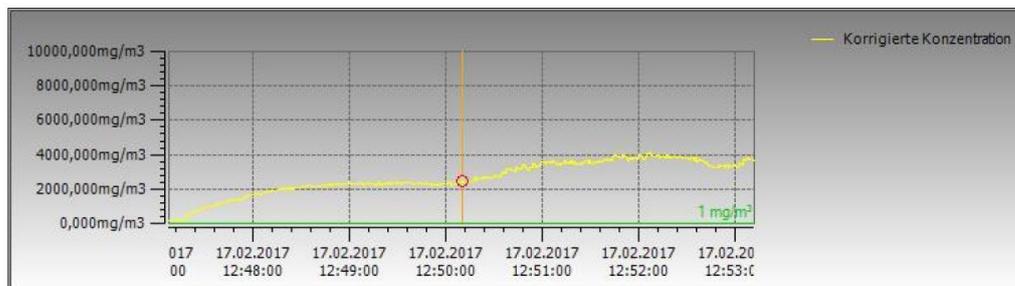
Staubmessung Versuchsnummer 24

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	2.767 mg/m ³ 17.02.2017 12:08:26
Startdatum und -uhrzeit	17.02.2017 12:03:07	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	61,0 mg/m ³ 17.02.2017 12:03:13
Dauer	00:06:06 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	366		
Korrigierter Mittelwert	2.019 mg/m ³		
Anmerkungen			



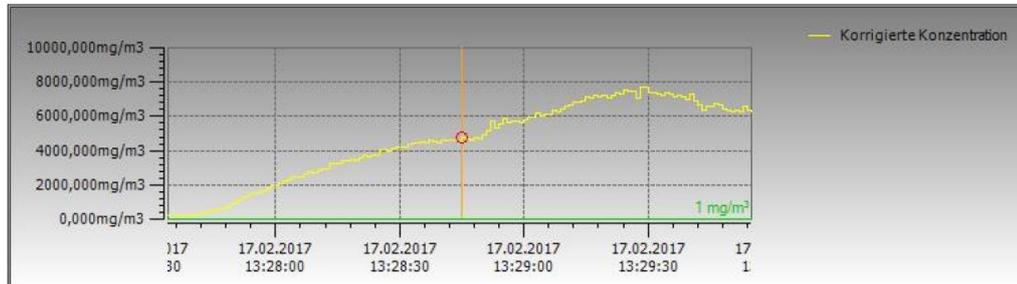
Staubmessung Versuchsnummer 25

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.104 mg/m ³ 17.02.2017 12:52:07
Startdatum und -uhrzeit	17.02.2017 12:47:07	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	122,6 mg/m ³ 17.02.2017 12:47:10
Dauer	00:06:05 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	365		
Korrigierter Mittelwert	2.643 mg/m ³		
Anmerkungen			



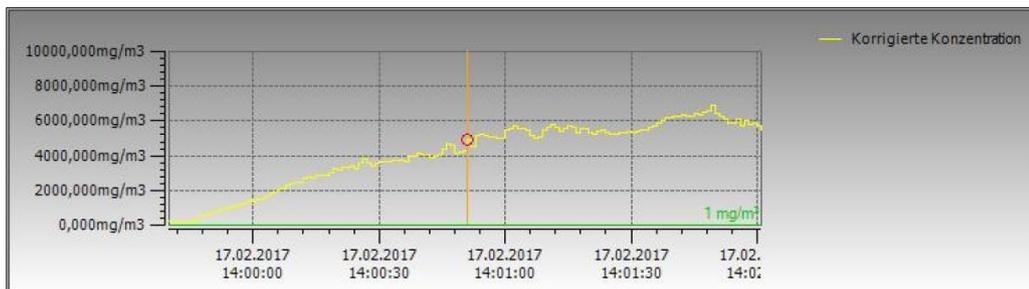
Staubmessung Versuchsnummer 26

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	7.697 mg/m ³ 17.02.2017 13:29:29
Startdatum und -uhrzeit	17.02.2017 13:27:33	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	205,1 mg/m ³ 17.02.2017 13:27:34
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.534 mg/m ³		
Anmerkungen			



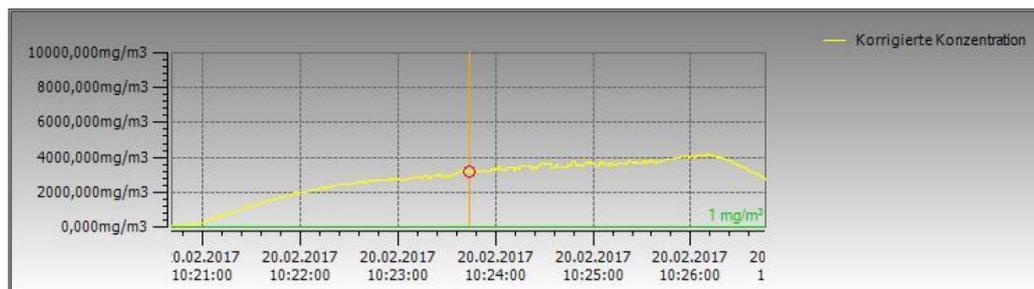
Staubmessung Versuchsnummer 27

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.919 mg/m ³ 17.02.2017 14:01:49
Startdatum und -uhrzeit	17.02.2017 13:59:39	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	209,2 mg/m ³ 17.02.2017 13:59:42
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.086 mg/m ³		
Anmerkungen			



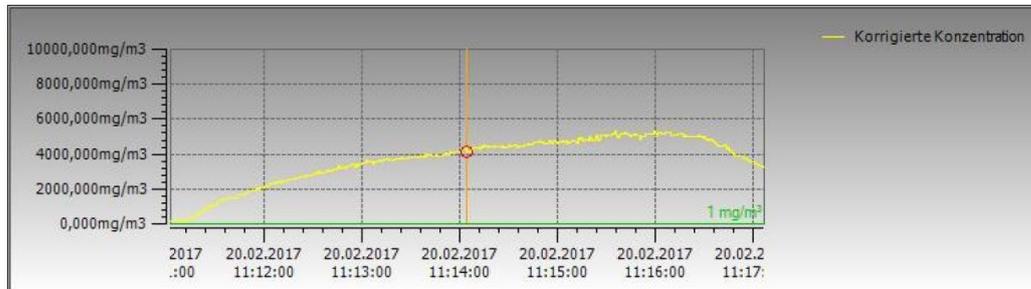
Staubmessung Versuchsnummer 28

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.195 mg/m ³ 20.02.2017 10:26:10
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 10:20:40	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	83,2 mg/m ³ 20.02.2017 10:20:41
Dauer	00:06:06 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	366		
Korrigierter Mittelwert	2.747 mg/m ³		
Anmerkungen			



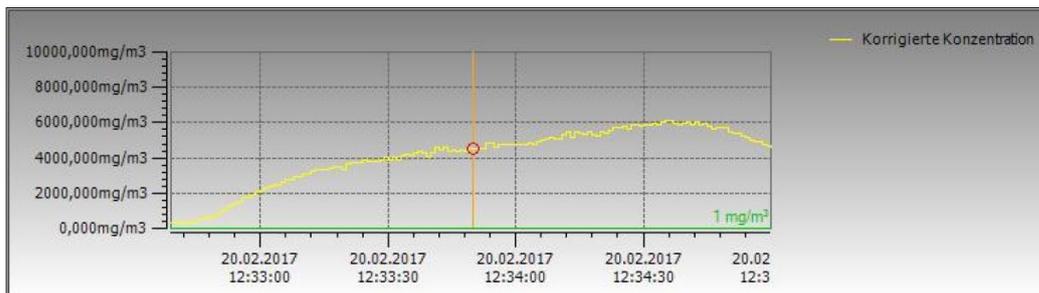
Staubmessung Versuchsnummer 29

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.296 mg/m ³ 20.02.2017 11:15:59
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 11:11:02	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	190,1 mg/m ³ 20.02.2017 11:11:06
Dauer	00:06:05 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	365		
Korrigierter Mittelwert	3.650 mg/m ³		
Anmerkungen			



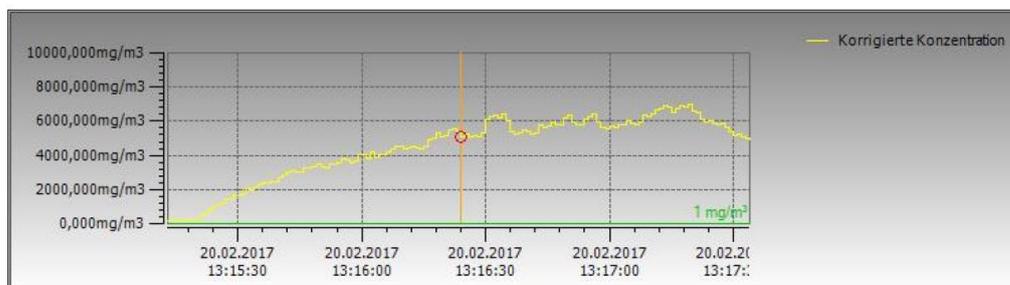
Staubmessung Versuchsnummer 30

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.124 mg/m ³ 20.02.2017 12:34:36
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 12:32:38	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	329 mg/m ³ 20.02.2017 12:32:39
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.104 mg/m ³		
Anmerkungen			



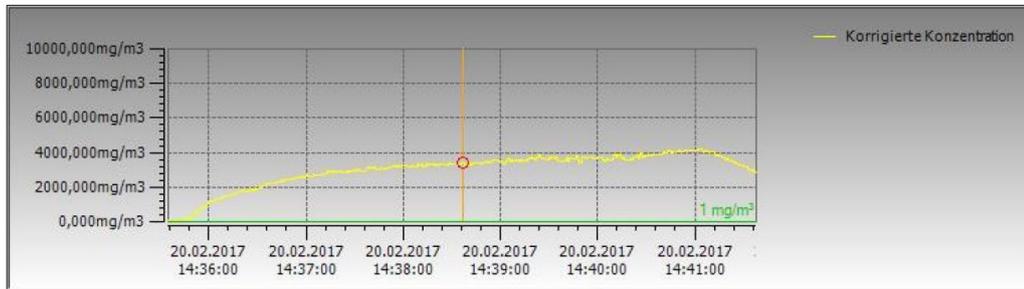
Staubmessung Versuchsnummer 31

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.952 mg/m ³ 20.02.2017 13:17:19
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 13:15:12	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	157,8 mg/m ³ 20.02.2017 13:15:14
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.423 mg/m ³		
Anmerkungen			



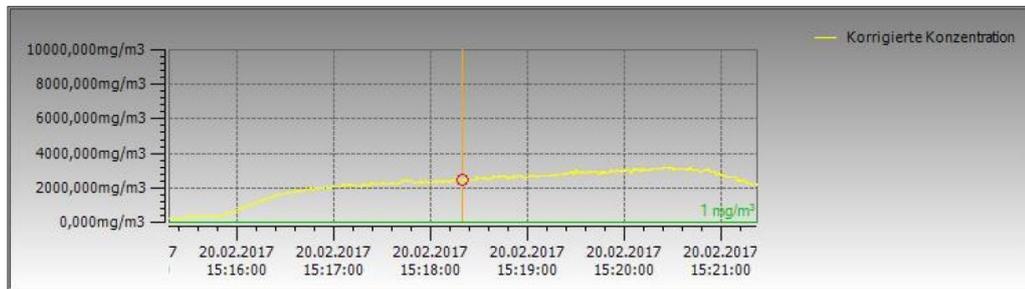
Staubmessung Versuchsnummer 32

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.199 mg/m ³ 20.02.2017 14:41:03
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 14:35:34	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	43,7 mg/m ³ 20.02.2017 14:35:38
Dauer	00:06:04 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	364		
Korrigierter Mittelwert	2.999 mg/m ³		
Anmerkungen			



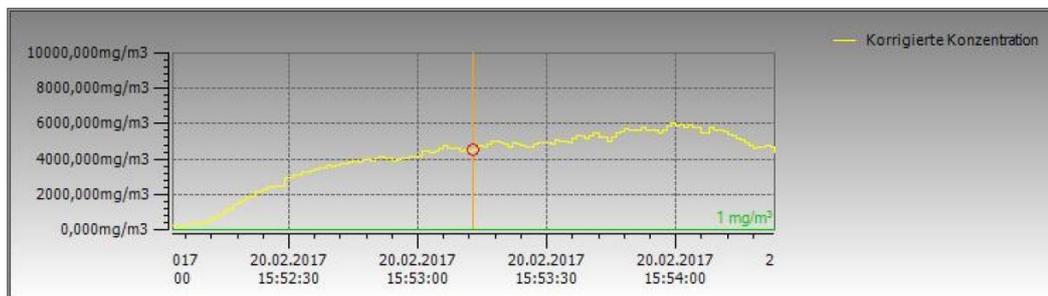
Staubmessung Versuchsnummer 33

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	3.171 mg/m ³ 20.02.2017 15:20:26
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 15:15:17	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	247,9 mg/m ³ 20.02.2017 15:15:18
Dauer	00:06:05 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	365		
Korrigierter Mittelwert	2.191 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 34

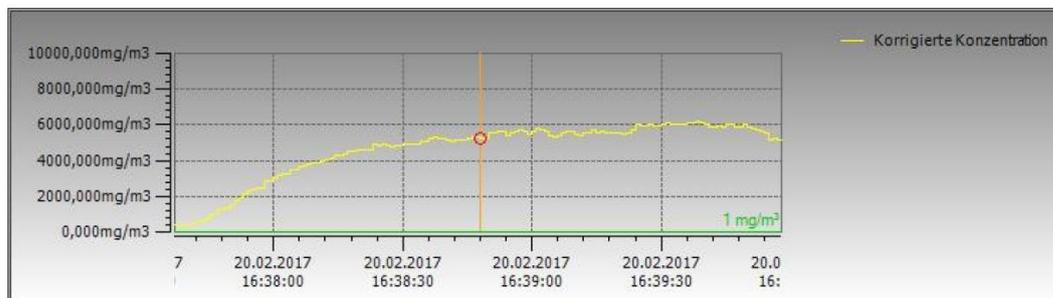
Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.006 mg/m ³ 20.02.2017 15:53:59
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 15:52:02	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	258 mg/m ³ 20.02.2017 15:52:05
Dauer	00:02:21 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	141		
Korrigierter Mittelwert	4.081 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer 35

Anhang

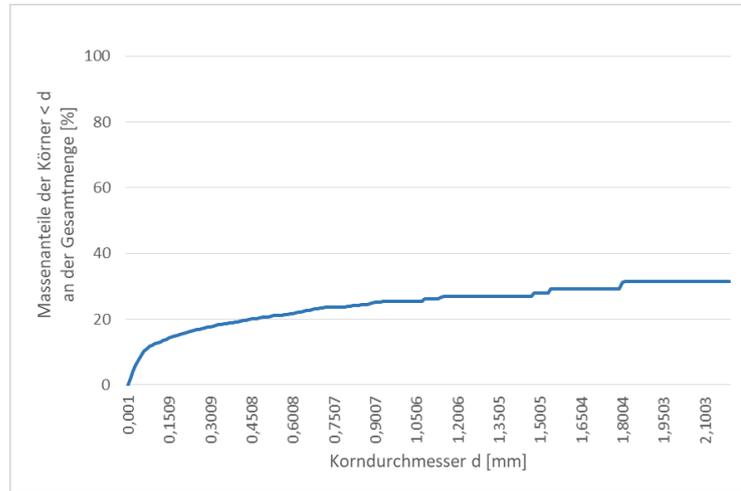
Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.159 mg/m ³ 20.02.2017 16:39:38
Startdatum und -uhrzeit	20.02.2017 16:37:36	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	370 mg/m ³ 20.02.2017 16:37:37
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.615 mg/m ³		
Anmerkungen			



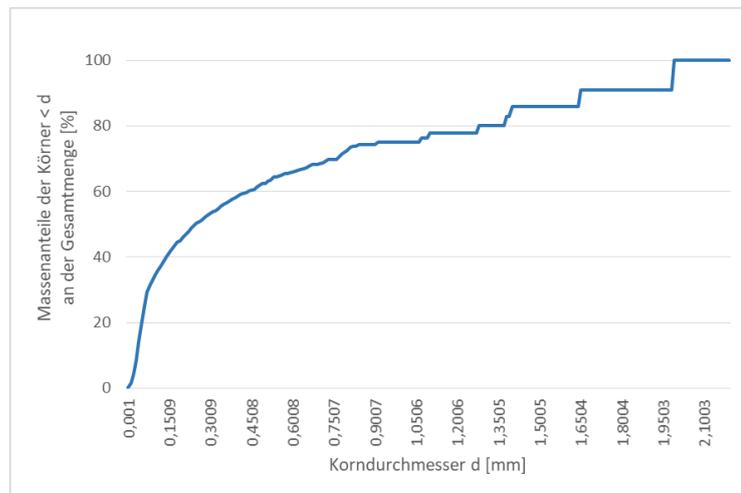
Staubmessung Versuchsnummer 36

Anhang 3 Messwerte der Schleifversuche

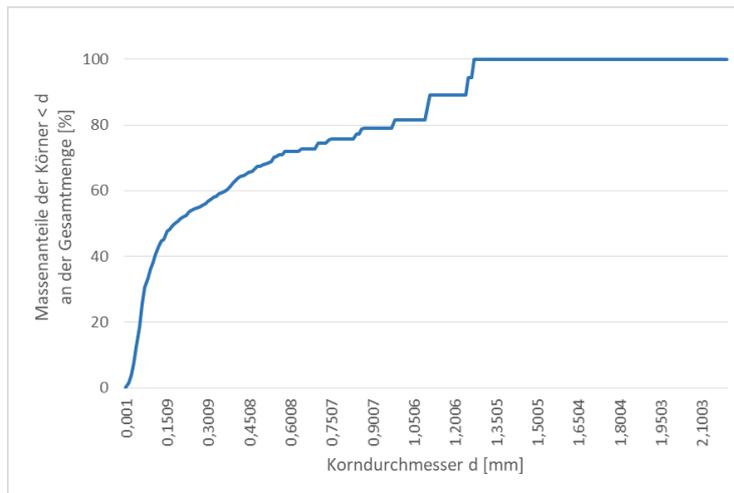
3b aufgefangenes Material



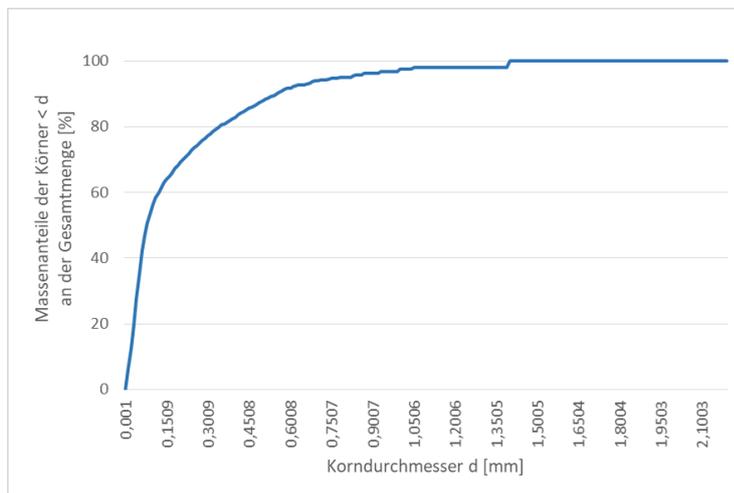
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 1



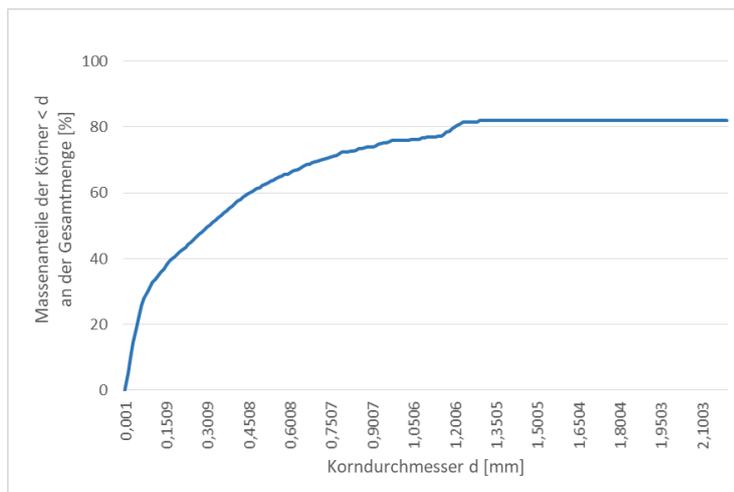
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 2



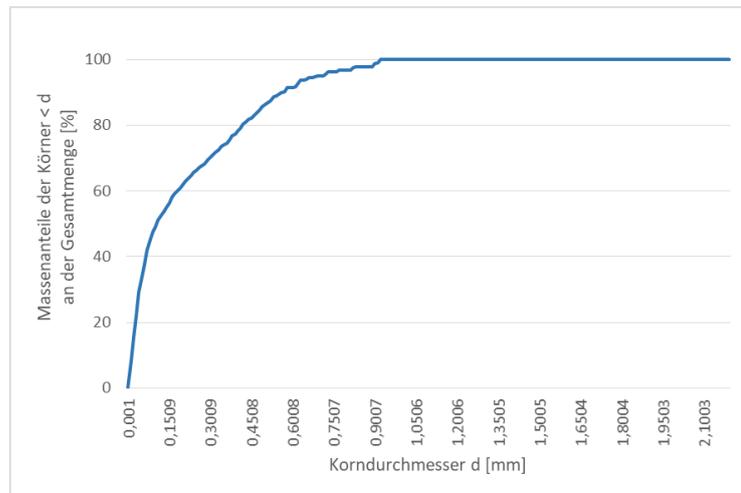
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 3



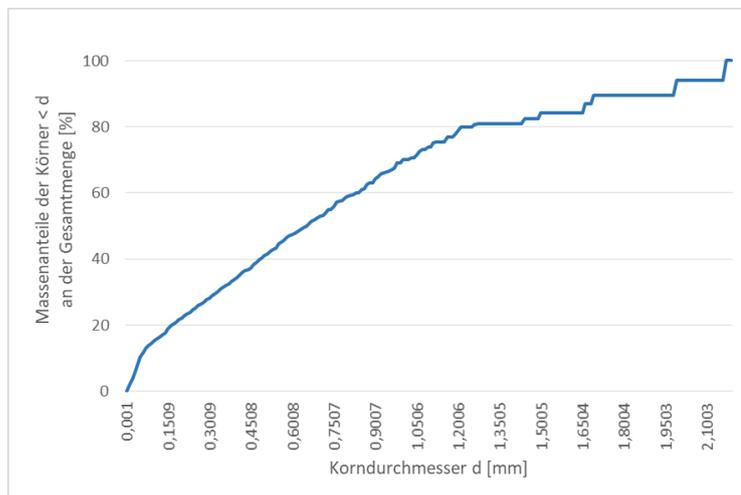
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 4



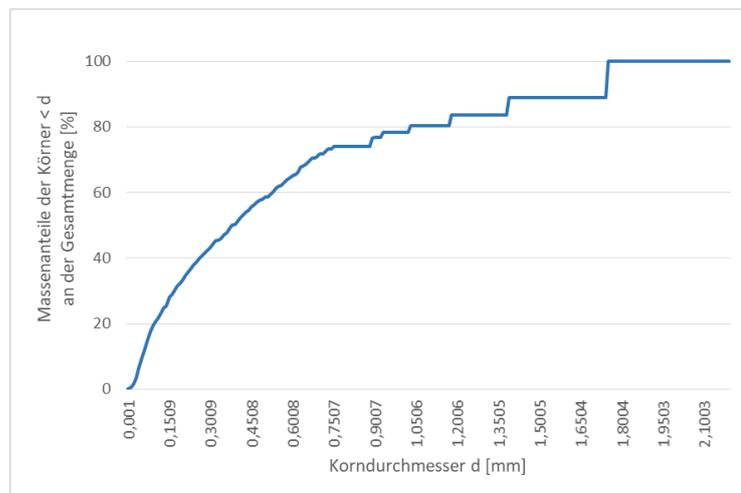
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 5



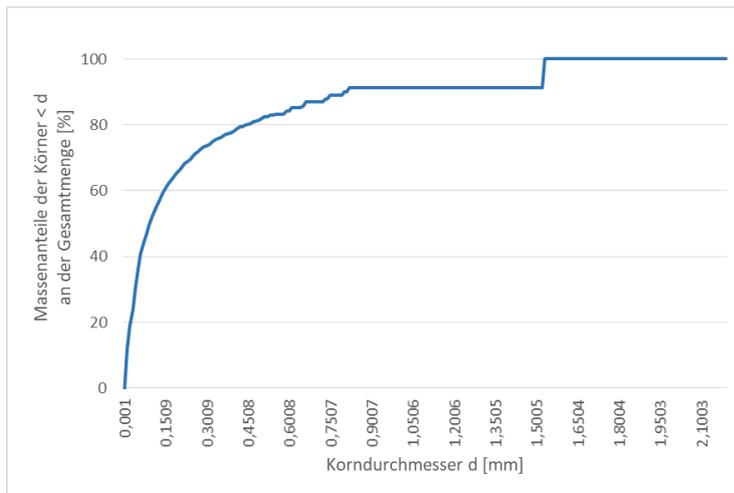
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 6



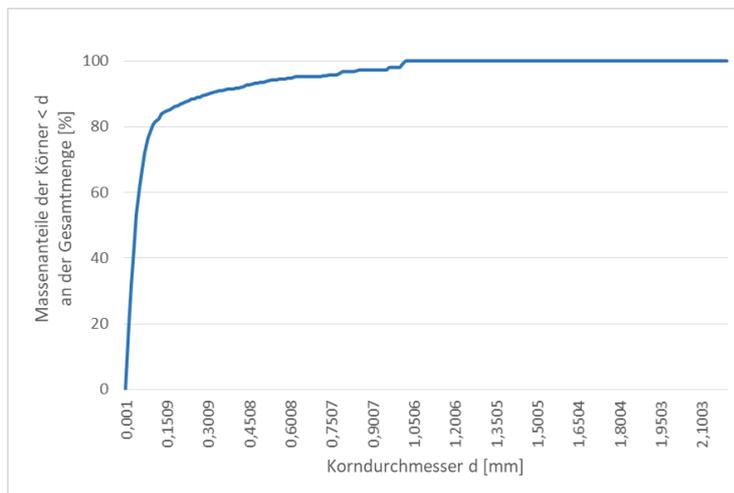
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 9



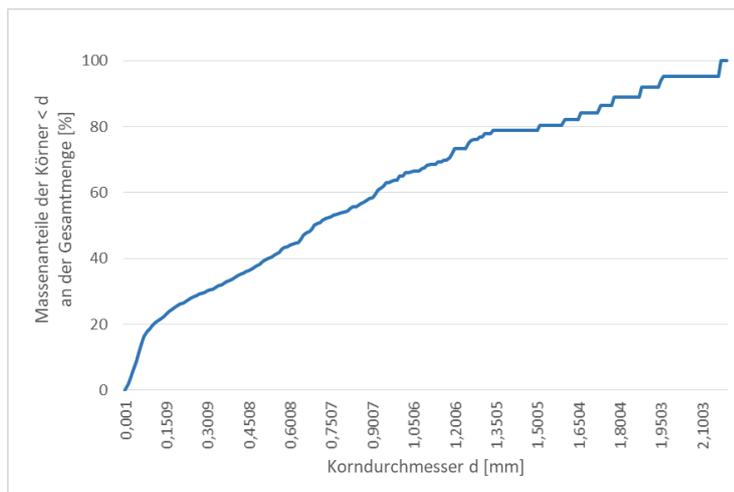
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 10



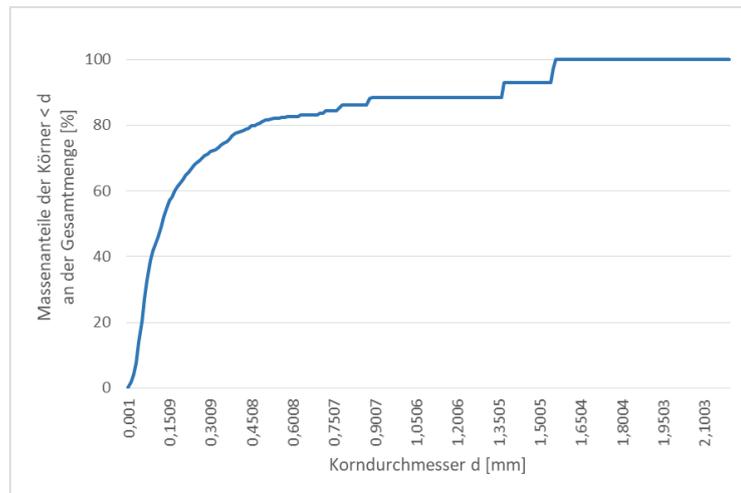
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 11



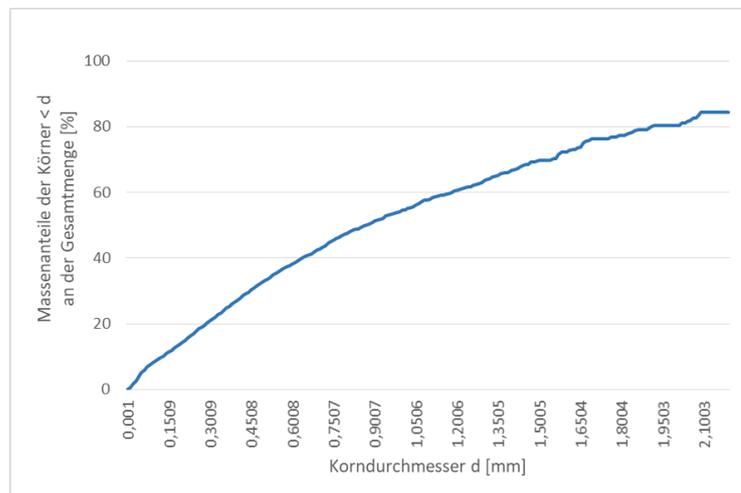
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 12



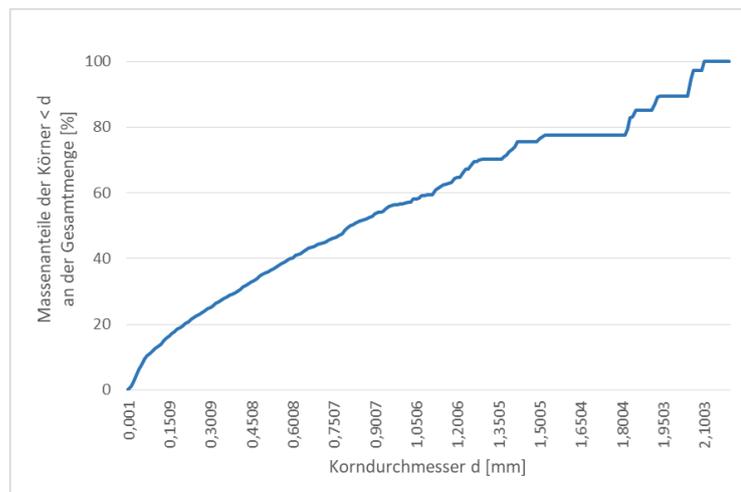
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 13



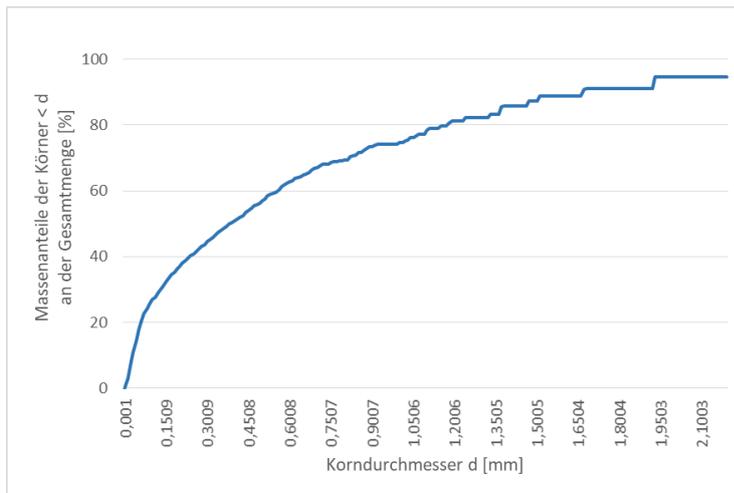
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 14



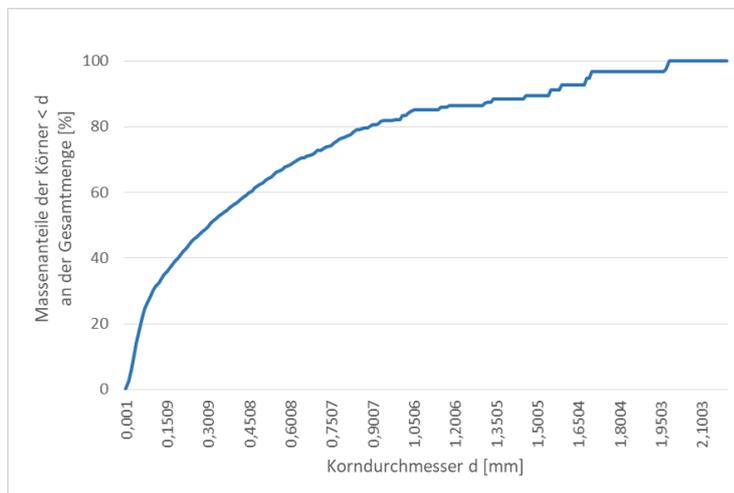
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 15



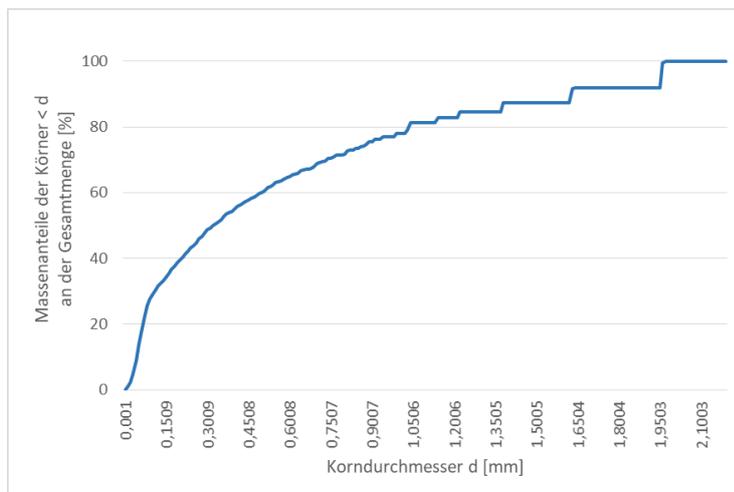
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 16



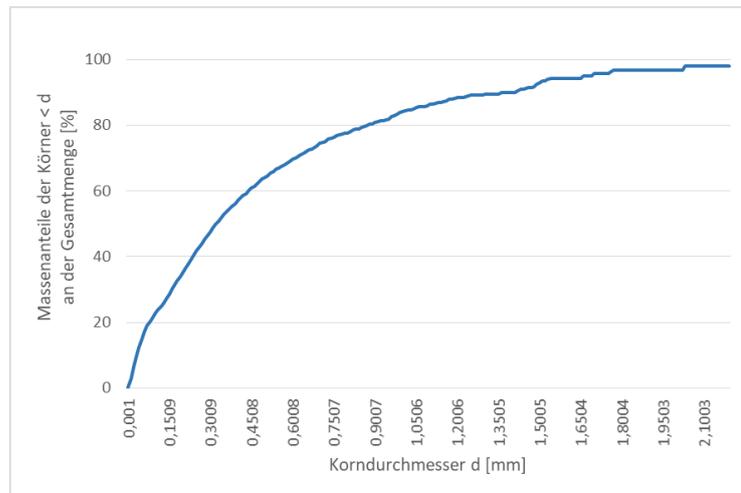
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 17



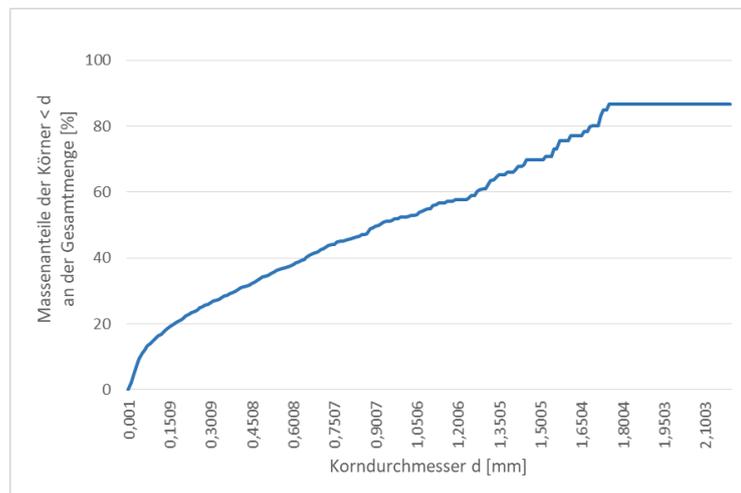
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 18



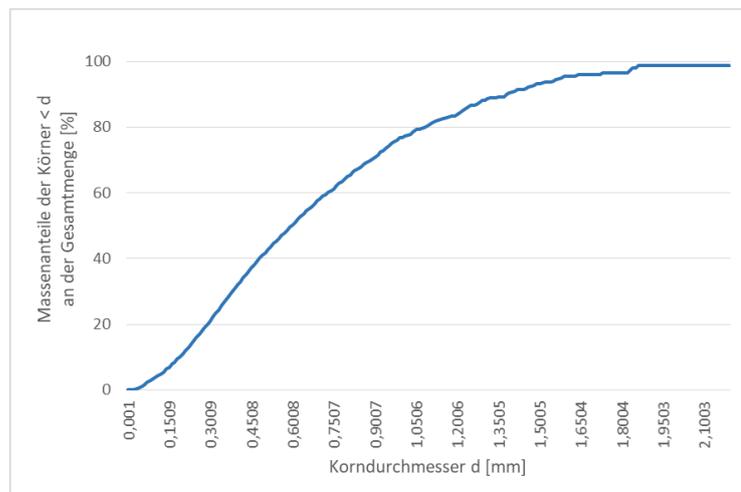
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 19



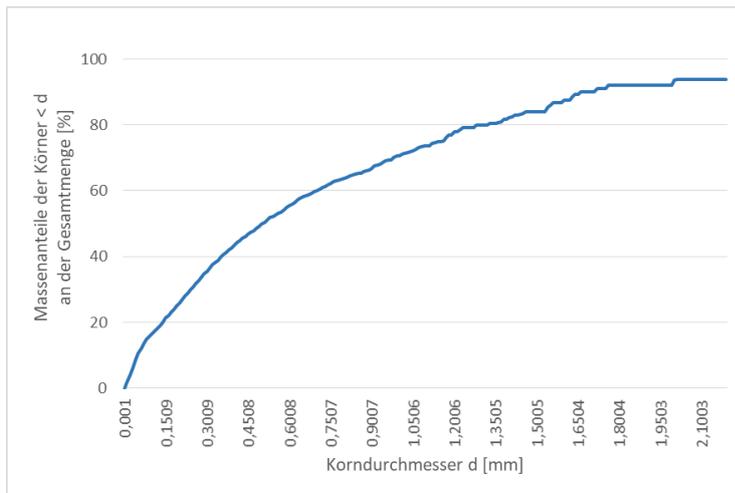
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 20



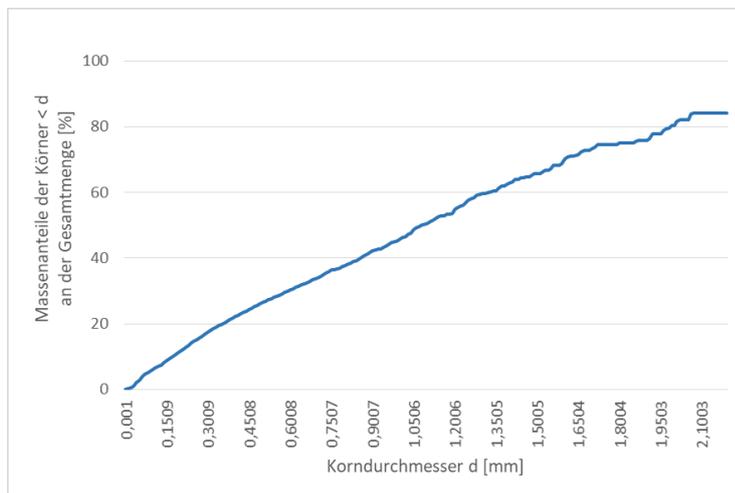
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 21



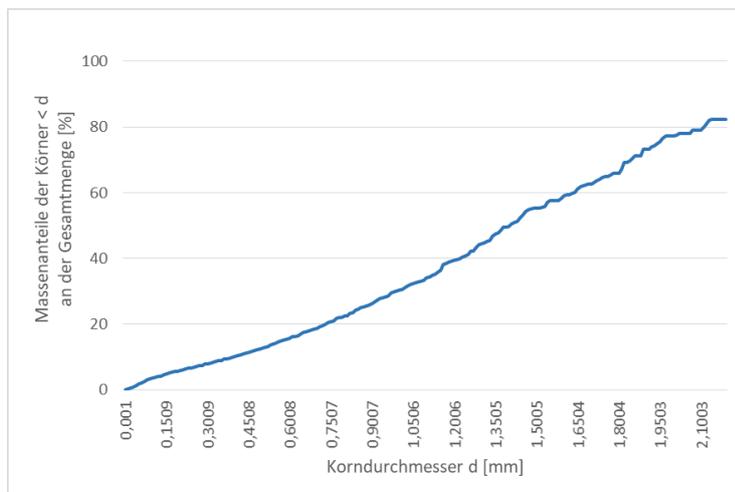
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 22



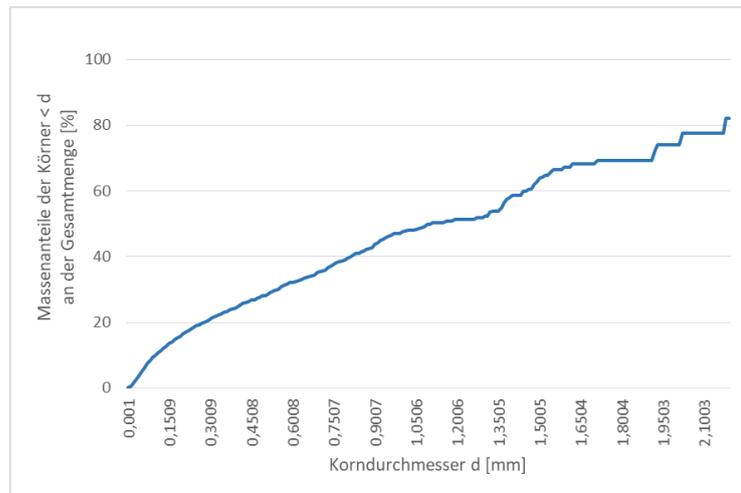
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 23



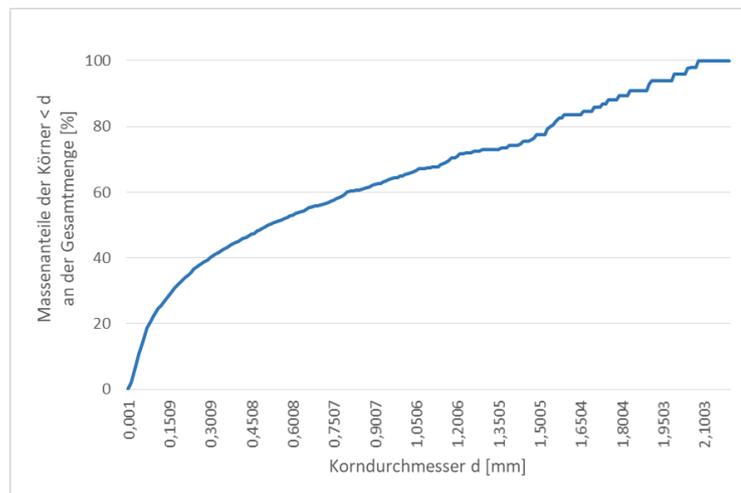
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 24



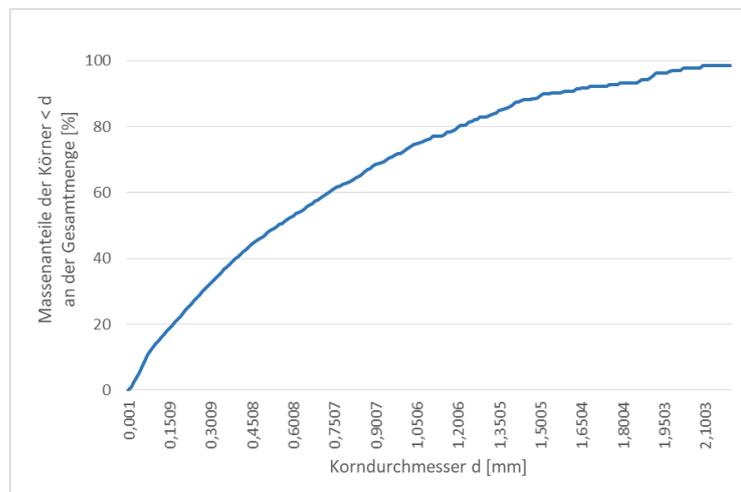
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 25



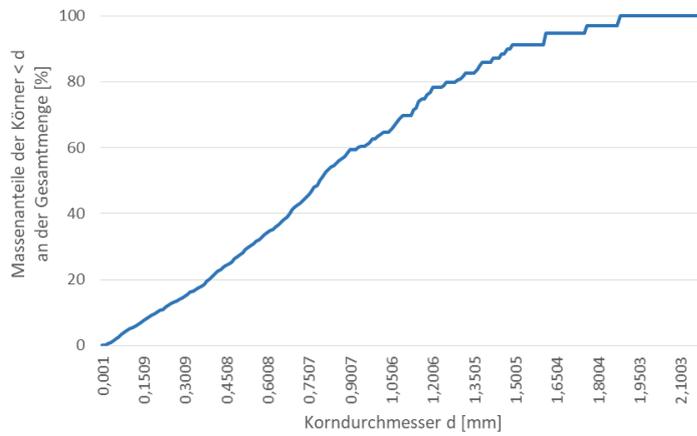
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 26



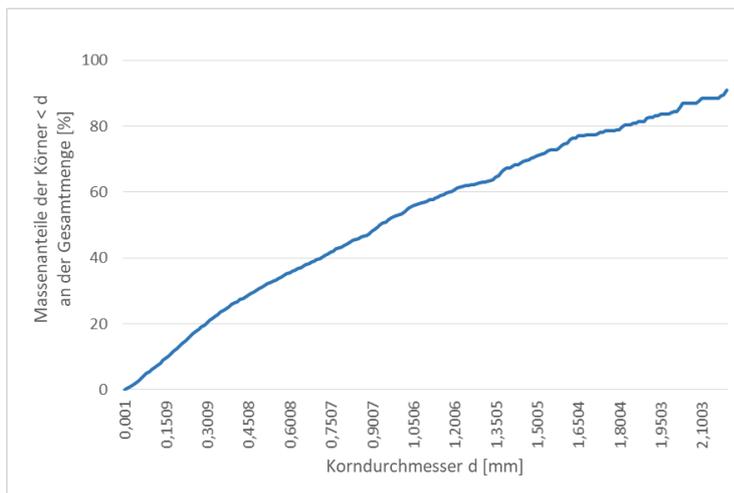
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 27



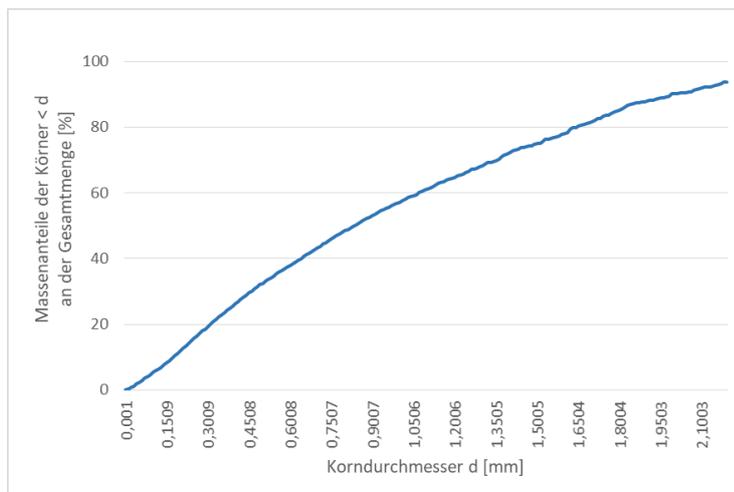
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 28



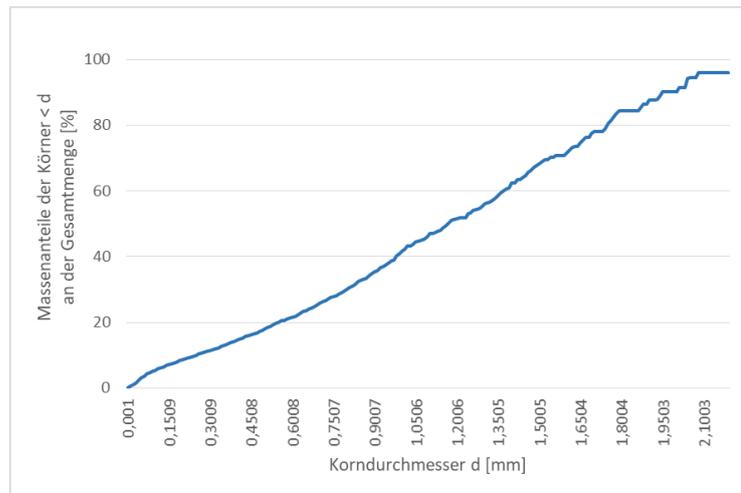
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 29



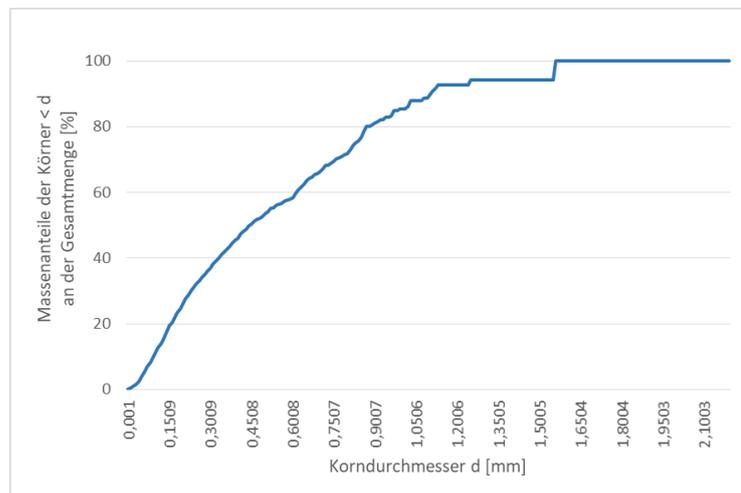
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 31



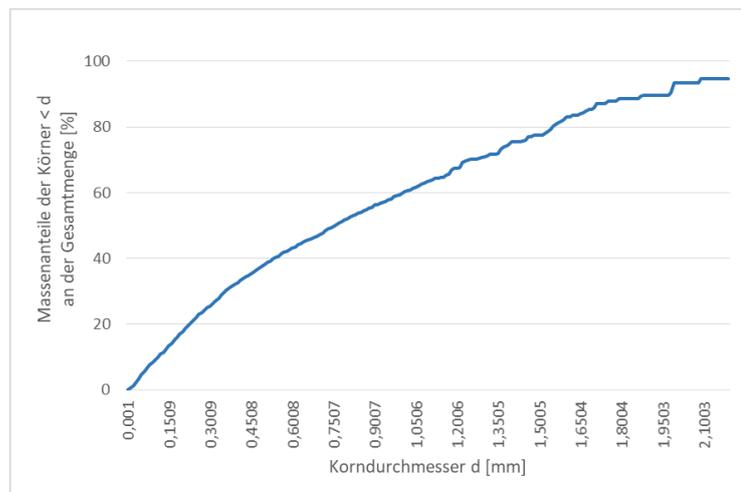
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 32



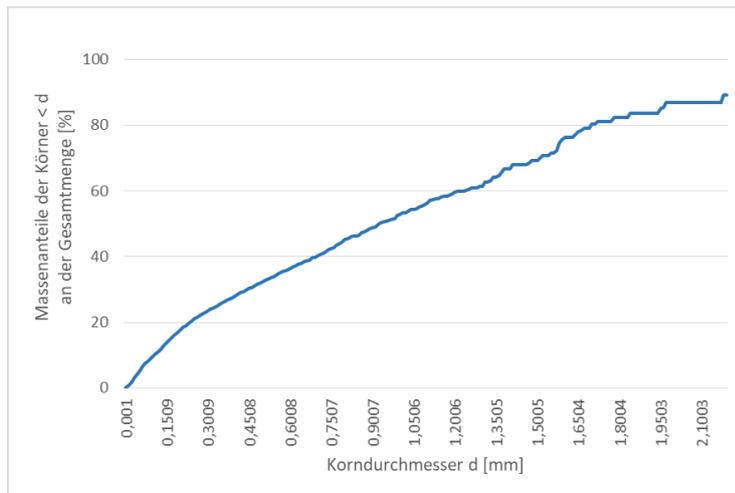
Korngrößenverteilung Versuchsnummer 33



Korngrößenverteilung Versuchsnummer 34



Korngrößenverteilung Versuchsnummer 35

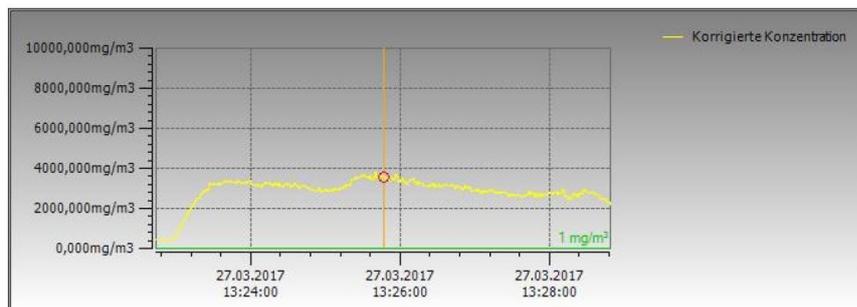


Korngrößenverteilung Versuchsnummer 36

Anhang 4 Messwerte der Fräsversuche

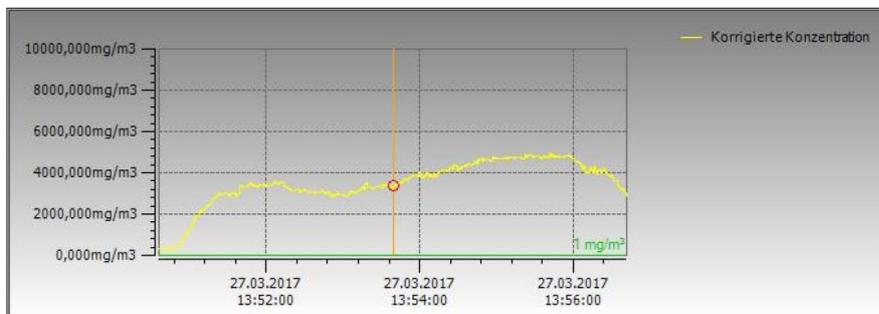
4a Staubkonzentration

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	3.782 mg/m ³ 27.03.2017 13:25:40
Startdatum und -uhrzeit	27.03.2017 13:22:43	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	439 mg/m ³ 27.03.2017 13:22:44
Dauer	00:06:06 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	366		
Korrigierter Mittelwert	2.859 mg/m ³		
Anmerkungen			



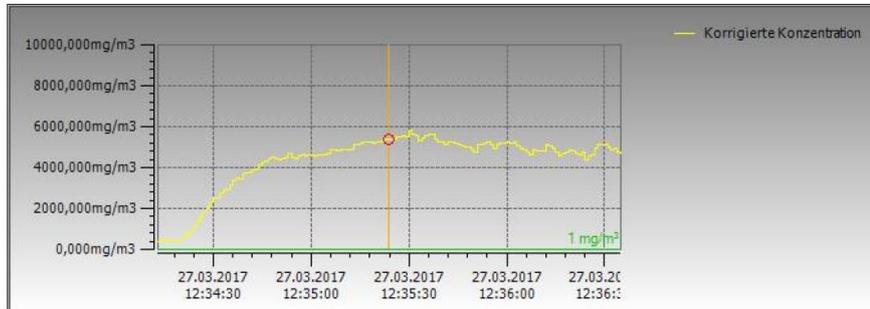
Staubmessung Versuchsnummer F1

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	4.924 mg/m ³ 27.03.2017 13:55:42
Startdatum und -uhrzeit	27.03.2017 13:50:35	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	328 mg/m ³ 27.03.2017 13:50:40
Dauer	00:06:07 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	367		
Korrigierter Mittelwert	3.502 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer F2

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.792 mg/m ³ 27.03.2017 12:35:30
Startdatum und -uhrzeit	27.03.2017 12:34:12	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	391 mg/m ³ 27.03.2017 12:34:13
Dauer	00:02:23 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	143		
Korrigierter Mittelwert	4.324 mg/m ³		
Anmerkungen			



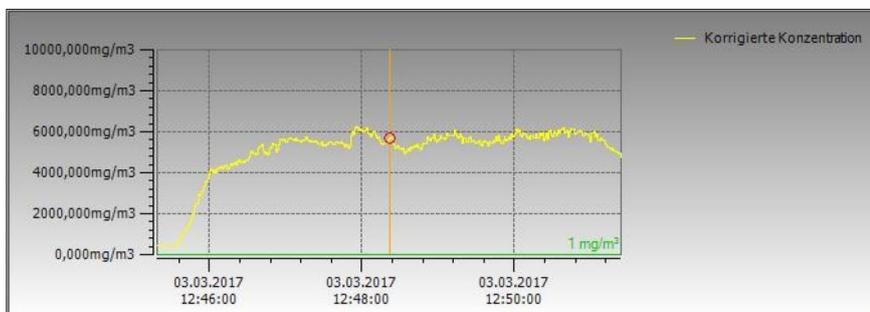
Staubmessung Versuchsnummer F3

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.840 mg/m ³ 27.03.2017 13:00:04
Startdatum und -uhrzeit	27.03.2017 12:58:43	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	305 mg/m ³ 27.03.2017 12:58:44
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.765 mg/m ³		
Anmerkungen			



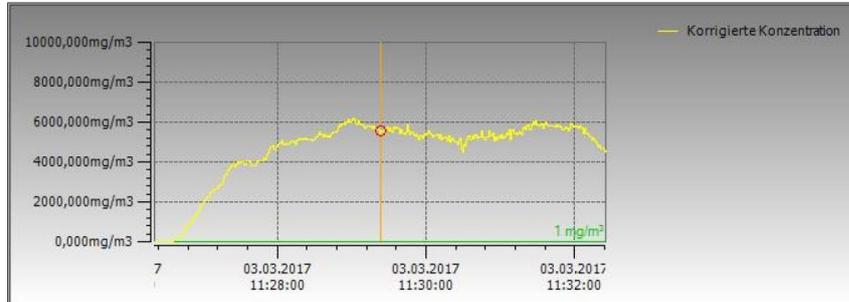
Staubmessung Versuchsnummer F4

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.220 mg/m ³ 03.03.2017 12:47:56
Startdatum und -uhrzeit	03.03.2017 12:45:18	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	420 mg/m ³ 03.03.2017 12:45:23
Dauer	00:06:06 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	366		
Korrigierter Mittelwert	5.010 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer F5

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6,185 mg/m ³ 03.03.2017 11:29:01
Startdatum und -uhrzeit	03.03.2017 11:26:20	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	8,78 mg/m ³ 03.03.2017 11:26:30
Dauer	00:06:05 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	365		
Korrigierter Mittelwert	4,604 mg/m ³		
Anmerkungen			



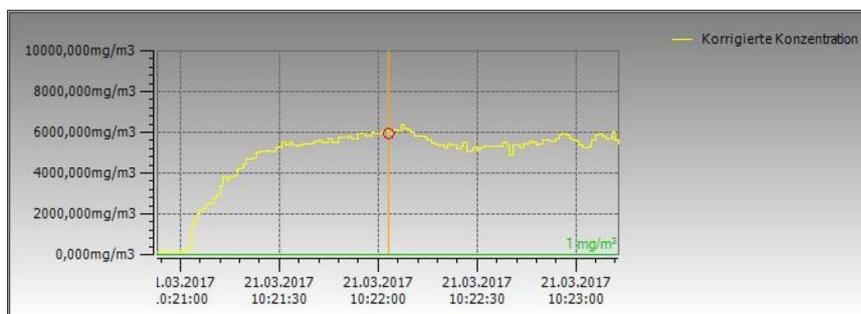
Staubmessung Versuchsnummer F6

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6,911 mg/m ³ 21.03.2017 09:47:43
Startdatum und -uhrzeit	21.03.2017 09:46:37	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	38,1 mg/m ³ 21.03.2017 09:46:38
Dauer	00:02:23 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	143		
Korrigierter Mittelwert	4,824 mg/m ³		
Anmerkungen			



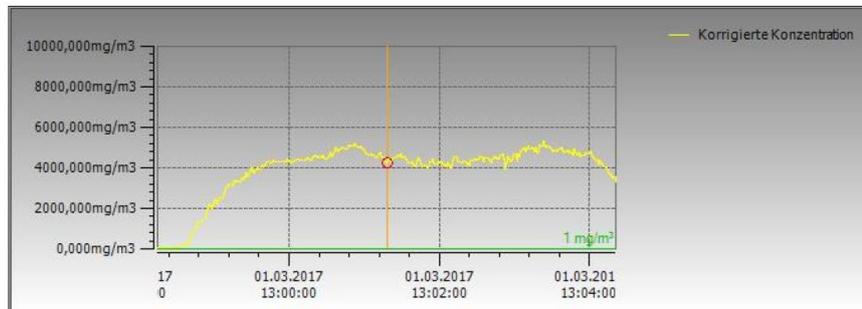
Staubmessung Versuchsnummer F7

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6,393 mg/m ³ 21.03.2017 10:22:07
Startdatum und -uhrzeit	21.03.2017 10:20:52	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	95,7 mg/m ³ 21.03.2017 10:20:58
Dauer	00:02:21 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	141		
Korrigierter Mittelwert	4,848 mg/m ³		
Anmerkungen			



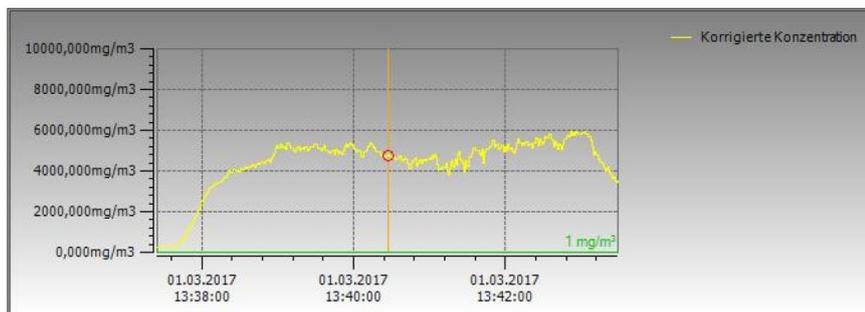
Staubmessung Versuchsnummer F8

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.328 mg/m ³ 01.03.2017 13:03:23
Startdatum und -uhrzeit	01.03.2017 12:58:14	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	31,5 mg/m ³ 01.03.2017 12:58:19
Dauer	00:06:07 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	367		
Korrigierter Mittelwert	3.912 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer F9

Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5.939 mg/m ³ 01.03.2017 13:43:03
Startdatum und -uhrzeit	01.03.2017 13:37:24	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	217,5 mg/m ³ 01.03.2017 13:37:26
Dauer	00:06:05 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	365		
Korrigierter Mittelwert	4.391 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer F10

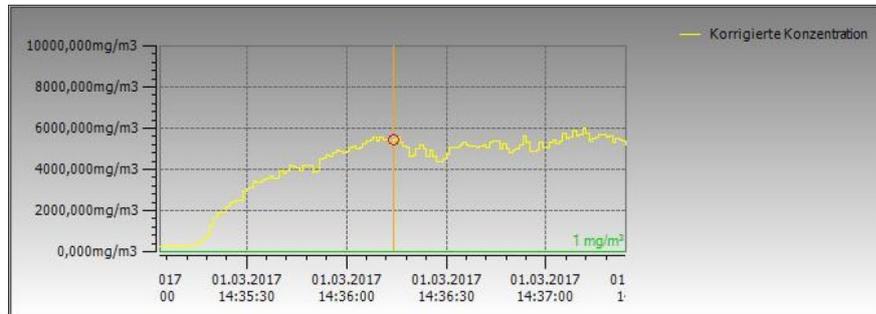
Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	6.447 mg/m ³ 01.03.2017 14:13:30
Startdatum und -uhrzeit	01.03.2017 14:11:21	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	207,9 mg/m ³ 01.03.2017 14:11:24
Dauer	00:02:22 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	142		
Korrigierter Mittelwert	4.439 mg/m ³		
Anmerkungen			



Staubmessung Versuchsnummer F11

Anhang

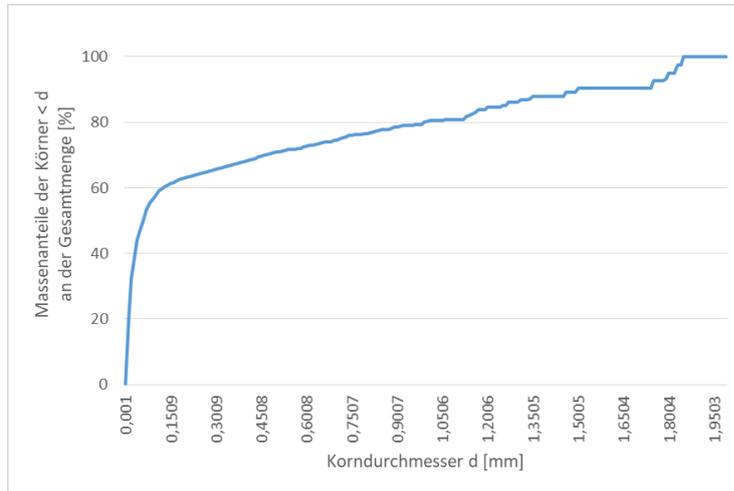
Seriennummer	2239667	Korrigierter Maximalwert (mit Zeit)	5,986 mg/m ³ 01.03.2017 14:37:11
Startdatum und -uhrzeit	01.03.2017 14:35:03	Korrigierter Minimalwert (mit Zeit)	271 mg/m ³ 01.03.2017 14:35:10
Dauer	00:02:21 HH:MM:SS	Korrektur vorgenommen	Nein
Profil	141		
Korrigierter Mittelwert	4.207 mg/m ³		
Anmerkungen			



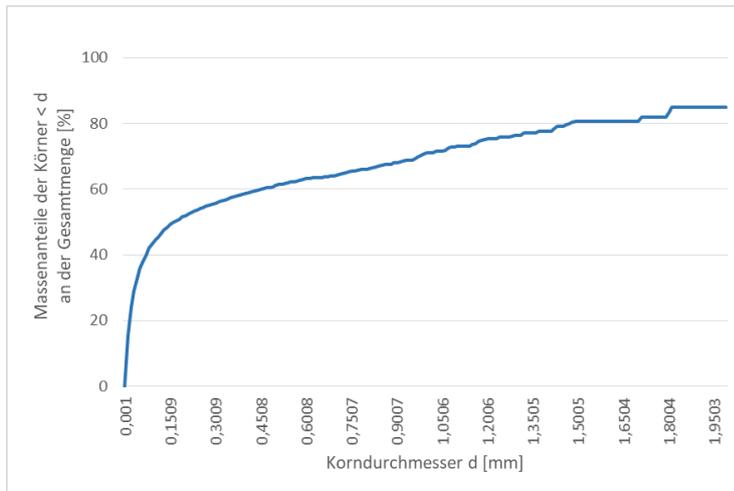
Staubmessung Versuchsnummer F12

Anhang 4 Messwerte der Fräsversuche

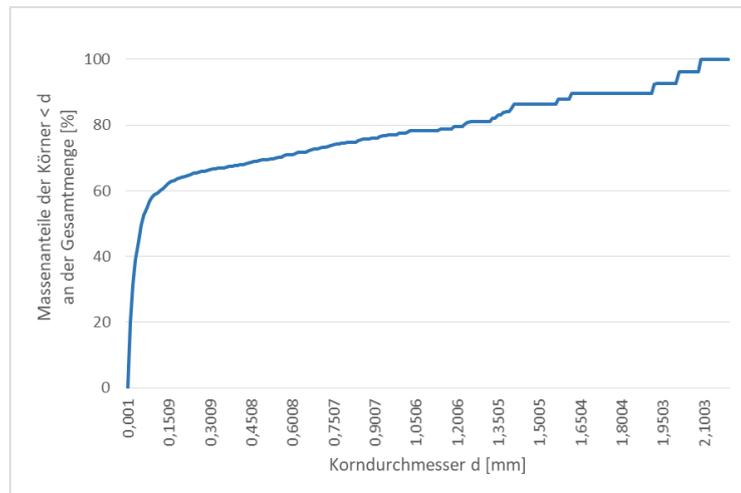
4b aufgefangenes Material



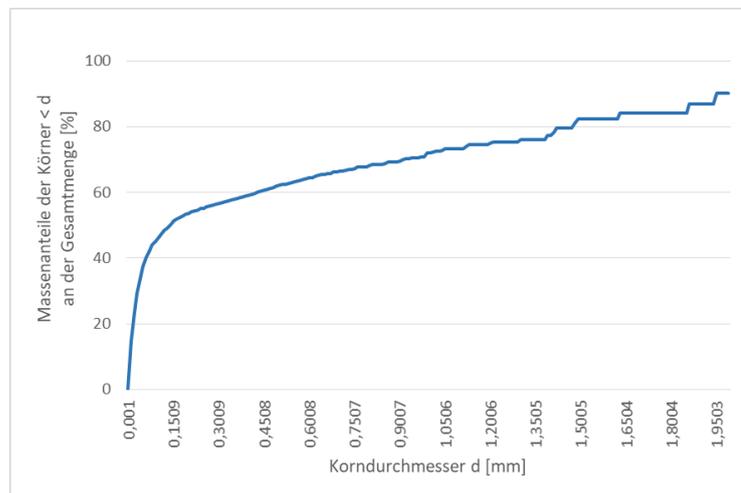
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F1



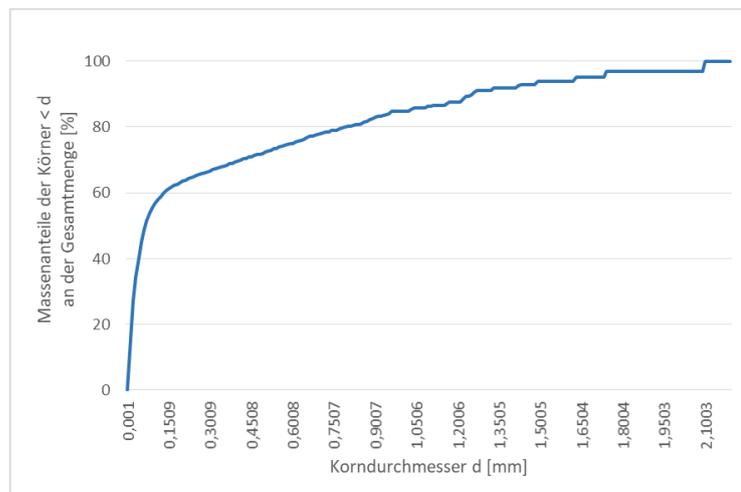
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F2



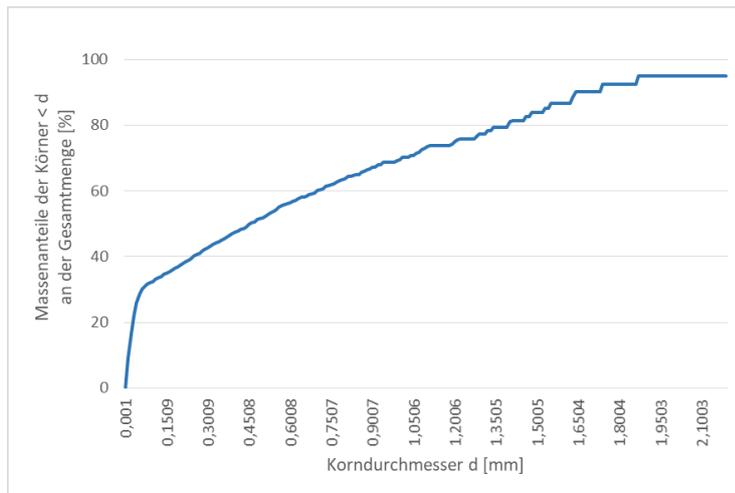
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F3



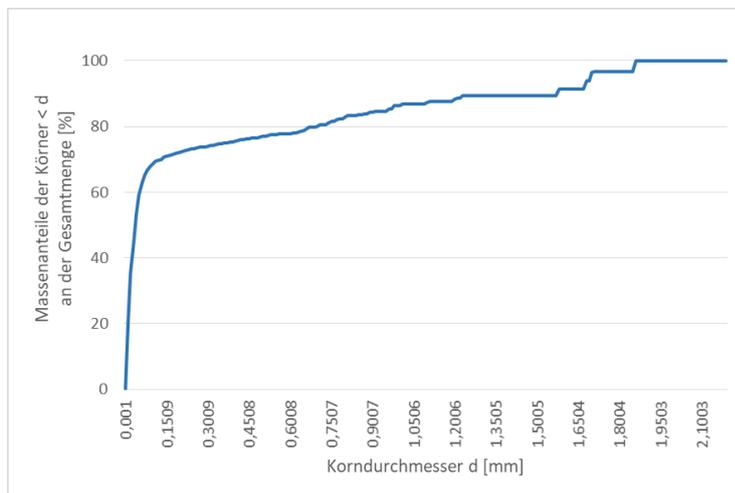
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F4



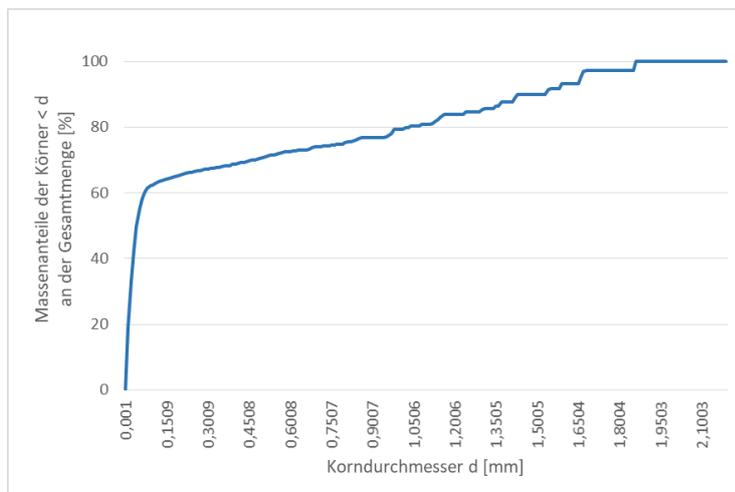
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F5



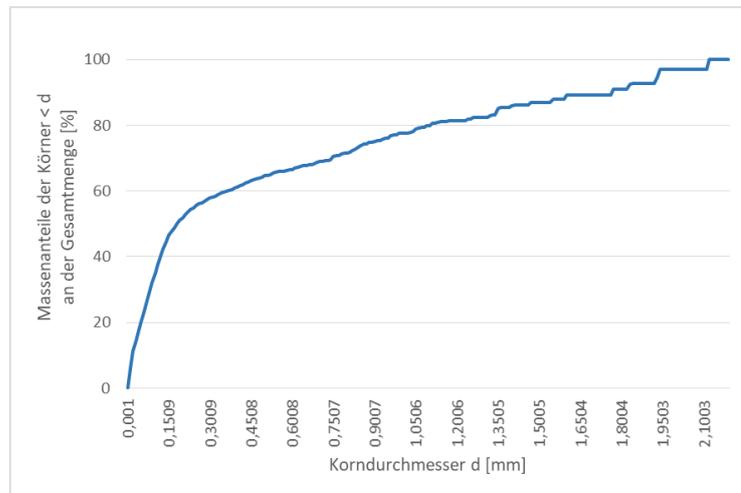
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F6



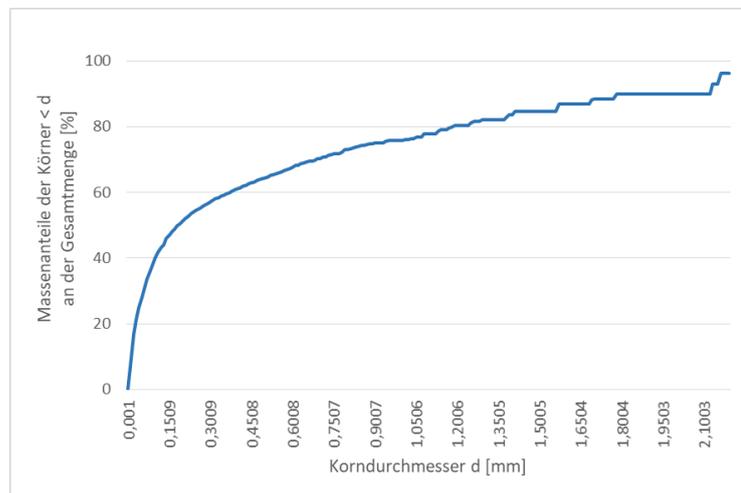
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F7



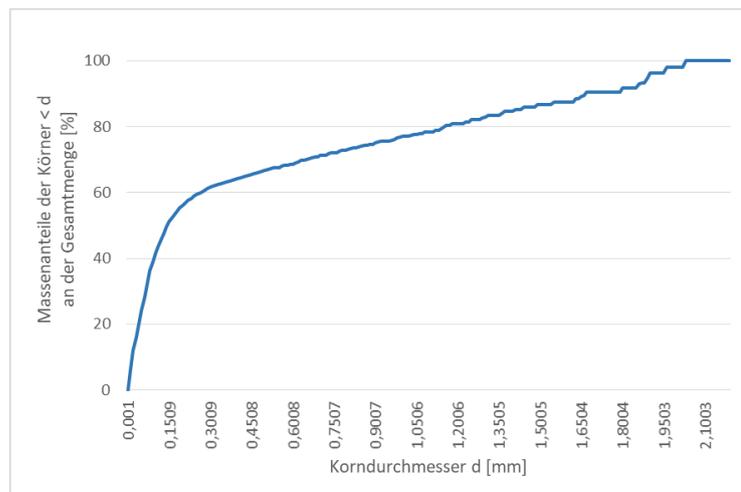
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F8



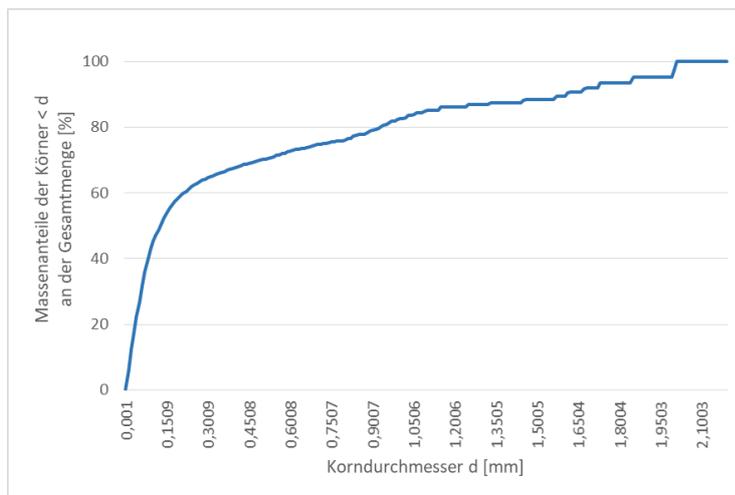
Korngrößenverteilung Versuchsnummer F9



Korngrößenverteilung Versuchsnummer F10



Korngrößenverteilung Versuchsnummer F11



Korngrößenverteilung Versuchsnummer F12