

# Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 285

**bast**

# Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

von

Andre Kamptner  
Silke Thümmler  
Wolfgang Ohmann

UVR-FIA Verfahrensentwicklung-  
Umweltschutztechnik-Recycling GmbH  
Freiberg/Sachsen

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 285

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

#### **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt: FE 04.0274/2013/KRB:**  
Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

**Fachbetreuung**  
Horst Badelt

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-306-0

Bergisch Gladbach, April 2017

## Kurzfassung – Abstract

### Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

Zur Glättebekämpfung werden im Winter mit Streufahrzeugen Tausalze auf die Straßen gestreut. Hierzu muss das Salz rieselfähig sein. Nach längerer Lagerung verringert sich die Rieselfähigkeit je nach deren Herkunft und Art der Lagerung mehr oder weniger stark. In der TL-Streu und in der in Bearbeitung befindlichen DIN EN 16811-1 ist bisher keine Methode zur Bestimmung der Rieselfähigkeit von Enteisungsmitteln angegeben.

Mit den Untersuchungen wurden mehrere in der Literatur aufgeführte Verfahren zur Bestimmung der Rieselfähigkeit miteinander verglichen und davon die Auslaufmethode nach Alfred SONNTAG für die tägliche Routine ausgewählt.

Mit dieser Methode wurden 46 Tausalzproben aus verschiedenen Lagern unterschiedlicher Hersteller untersucht und die Ergebnisse mit weiteren physikalischen Parametern wie Korngrößenverteilung, Feuchtegehalt, Schüttdichte, Rütteldichte, spezifische Oberfläche, pH-Wert und dem Gehalt an Antibackmitteln verglichen. Dabei wurden größere Korrelationen zwischen Korngrößenverteilung und Feuchtegehalt mit der Rieselfähigkeit gefunden. Es stellte sich heraus, dass es noch weitere, bisher nicht untersuchte Einflussgrößen geben muss, die sich auf die Zeitverfestigung der Salze auswirken.

Für verfestigtes Salz ist die Auslaufmethode nicht mehr anwendbar. Hierzu kann der einachsige Drucktest eingesetzt werden. Mit beiden Methoden wurde Salz untersucht, das sich für vier Wochen in einer Klimakammer mit der Simulation des Wetters eines Jahres befand.

Zur weiteren Entwicklung einer Methode zum frühzeitigen Erkennen der Neigung von Salzen zur Zeitverfestigung wird vorgeschlagen, die Fragen zur Gehaltsbestimmung des Antibackmittels Ferrocyanid zu klären, sich der Ermittlung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit auf die Rieselfähigkeit zu widmen und die vorgeschlagene Nadeldruckmethode zur Bestimmung der Verfestigungen in der Salzschüttung weiter zu entwickeln.

### Practice-oriented requirements for de-icing salt

In winter, de-icing salt is spread on the roads using gritting vehicles to fight icy conditions. To this end, the salt must be pourable. After longer periods of storage, the pourability of salt decreases more or less significantly, depending on its origin and type of storage. No methods for determination of the pourability of de-icing agents have been specified to date, neither in the Technical Delivery Terms for Grits for the Winter Road Clearing and Gritting Service (TL-Streu), nor in the currently elaborated standard DIN EN 16811-1.

During the course of the studies, several methods for determination of the pourability specified in the literature were compared to each other; the flow method acc. to Alfred SONNTAG was chosen for daily routine application.

This method was used to examine 46 de-icing salt samples from different storage facilities and different manufacturers, and the results were compared to further physical parameters, such as grain size distribution, moisture content, bulk density, tapped density, specific surface area, pH value and content of anticaking agents. It was revealed, however, that there are still further influencing factors, in particular those relating to the caking of the salts.

The flow method can no longer be applied for already solidified salt. To this end, the uniaxial compression test can be used. These two methods were used to examine salt that had been stored in a climate-controlled chamber for four weeks with simulation of the seasonal weather of a typical year.

For further development of a method for early identification of the tendency of salts to caking, it is suggested to clarify issues regarding determination of the content of the anticaking agent ferrocyanide, to examine the influence of the surface quality on the pourability and to further develop the suggested needle insertion method for determination of the solidification of bulk salt.

## Summary

### Practice-oriented requirements for de-icing salt

#### 1 Introduction

One of the fundamental requirements for the spreading of de-icing salts to fight icy roads using gritting vehicles is the good pourability of the grit. Knowledge of the salt or grit structure is imperative to assess its storage life and to adjust the spreaders.

De-icing salt containing more than 90% sodium chloride is manufactured by different companies in different countries; in Germany, it is often stored over several years for subsequent winter seasons. Some of these salts solidify over this time such that discharge by the spreader is no longer possible without additional efforts.

The quality requirements for de-icing salts have to date been established in the Technical Delivery Terms for Grits for the Winter Road Clearing and Gritting Service (Technische Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenwinterdienstes – TL-Streu). The standard DIN EN 16811-1 „Winter service equipment – De-icing agents – Part 1: Sodium chloride – Requirements and test methods“ has been published as a draft. Neither document, however, specifies test methods permitting an assessment of the pourability.

The objective of the studies was to test various methods for determination of the pourability of the grit on the basis of the flow method according to Alfred SONNTAG for the testing of de-icing salts and to choose one of them for daily routine application.

In addition, various physical parameters, such as grain size distribution, moisture content, bulk density, tapped density, specific surface area, pH value, and the content of anticaking agents, were examined for 46 de-icing salt samples from different manufacturers and different countries, and the results were verified for correlation with the pourability (see Table in the Annex). The tests and studies were supplemented by tests regarding the storability of the salts with the objective of developing a method for early detection of salts with a strong tendency to caking.

#### 2 Testing and selection of methods for testing the pourability

Measuring of the pourability refers to the degree of free mobility of bulk goods. It provides information about their flow properties. The flow properties can be influenced by the following parameters: Grain size, grain size distribution, packing density, grain surface quality, water or moisture content, temperature, chemical composition of the particles, additions of separating agents and foreign substances, formation of salt bridges between the grains during storage.

Some of the available measuring methods to determine the pourability (Jenike shear tester, ring shear tester, shear box, uniaxial compression test, funnel technique, combination box according to SONNTAG, and the IMSE test) were already in advance deemed to be unsuitable for daily use in salt storage facilities due to the high costs.

The remaining test methods were subjected to various examinations with test sand and de-icing salts displaying good and bad pourability for comparison of the individual methods. The results are shown in Table 1.

<b>Uniaxial compression test method</b>	
Evaluation	Differentiation possible into „flowable“ and „non-flowable“; flowability not quantifiable in the case of flowable salt samples; sample preparation requires experience
Selection	Yes; for comparative analyses
<b>Flow box acc. to SONNTAG</b>	
Evaluation	Suitable for determination of the pourability as a state variable; both „flowable“ and „non-flowable“ salts can be quantified with reference to their flowability
Selection	Yes
<b>Funnel test method</b>	
Evaluation	Suitable for flowable products; moist products involve the risk of bridge formation → width of funnel opening, inclination and thus funnel size must be adapted → large sample volumes required (unpractical)
Selection	No
<b>Flowability acc. to IMSE</b>	
Evaluation	Not suitable due to different grain sizes
Selection	No

Tab. 1: Overview of the suitability of the selected methods



Fig. 1: Flow box according to SONNTAG



Fig. 2: Flow box with funnel tube

The flow box as part of the combination box according to SONNTAG was shown to be best suited.

It possesses a hatch on the face end which allows the content of the box to flow out to a certain degree when the box is suddenly opened (Figure 1).

To improve the reproducibility of the filling, the box is filled by way of a defined funnel tube (Figure 2).

After filling, smoothing of the protruding grains by way of a scraper and sudden opening of the side flap, a part of the filling will fall into the tray placed beneath (Figure 3).

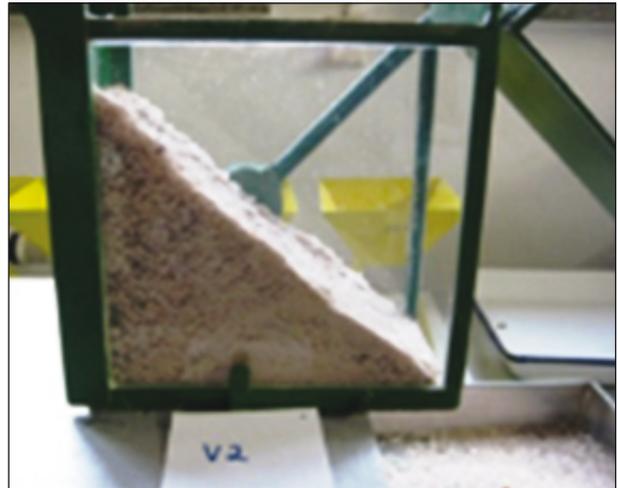


Fig. 3: Flow box with filling after opening the side hatch

The discharge rate is determined on the basis of the ratio of the released and originally filled volumes. It is a measure for the pourability of the bulk.

The apparent density can be calculated from the volume of the flow box and the filled volume.

The resulting values are averaged from at least three measurement values.

### 3 Examination of the influence of various parameters on the pourability

A standard operating procedure was elaborated for the method for use of the flow box; this method was used for all salt samples and further tests.

No significant influence on the results of the tests for determination of the discharge rate using the flow box was determined with reference to the sampling method. The tests have shown that it is possible to take samples using a shovel.

To determine the moisture content of the salts, the method using an absolute moisture meter was compared to the method involving drying in a drying chamber. The comparison revealed no significant differences. A few samples tested by way of the absolute moisture meter displayed a higher moisture content compared to those tested using the drying chamber method. This is attributed to the loss of moisture when dividing the samples for the drying chamber test.

The examination of the influence of the moisture content on the pourability revealed a high discharge rate of 54% ... 60% in three samples with very low

moisture. When water was added up to a content of 3%, the discharge rate decreased asymptotically to approx. 24 ... 30%. The pourability decreased at different rates, depending on the salt type. The discharge rate of the Moroccan salt, which is widely used in practice, but is often susceptible to caking, already decreased to close to the final value at a water content of 0.3% whereas this was only the case at a moisture content of 2% with the other two salts.

The grain size distribution after drying and sample division by way of screening was determined as a further possible influencing factor for all de-icing salt samples and compared to the division into grain classes. Four samples were to be classified into grain class EF (extra-fine salt), another four samples into grain class F (fine salt) and 26 samples into grain class M (medium-grain salt). No sample corresponded to the criteria of grain class C (coarse salt). 12 samples could not be assigned to any grain class, primarily due to excessive fine grain content. The fine grain content  $< 0.125$  mm varied over the range between 0.2% and 11.9% between samples

The pourability of the salt appeared to be poor from observation of the pourability tests with discharge rates  $< 30\%$  (e.g. truncation edges, smearing on the walls due to the water content). The flow appeared „very flowing“ from a discharge rate of 45%. As a result, for better understanding, a suggestion was made for verbal classification of the pourability relative to the discharge rate. Salts with a discharge rate of  $< 30\%$  were to be classified as „poorly pourable“, with 30 ... 45% as „pourable“ and salts with a discharge rate of  $> 45\%$  as „well pourable“.

After moistening of three dried samples, the apparent density decreased by more than 10% from  $1.18 \text{ g/cm}^3$  ...  $1.28 \text{ g/cm}^3$  to approx.  $1.05 \text{ g/cm}^3$ . A possible explanation is that the internal friction increases and the optimum packing density is no longer achieved.

For comparison of the pouring properties of different salts independently of the grain size distribution, a fraction of 0.5 to 4 mm was produced from three samples by screening out oversize and undersize grain. This procedure was used to determine the discharge rates as a function of the moisture; the rates were then compared to the material which was not screened. As expected, the

discharge rates of the screened samples were slightly higher than those of the screened samples because of the missing fine grain. This difference is relatively small in the case of both low and high moisture ( $\geq 2\%$ ) and is highest with a moisture content of 0.6%. The discharge rates of the screened samples were similar to each other, but not identical. The results were generally confirmed by tests with finer and coarser mixtures produced from different grain fractions. It can be concluded that, in addition to grain size distribution and moisture, there is at least a third factor influencing the pourability. It could be the grain shape or the grain surface quality. Further studies are required here.

For statistical confirmation of this finding, these investigations should be continued with further salt samples to study the dependency of the pourability on the shape and surface quality of the grain.

To check the initial solidification of the salt in storage, three different salt types were stored in the flow box – one after the other – in three different places in the building for one week each. At the same time, the humidity in the room and the weight of the samples were measured to verify the moisture uptake. The humidity varied between min. 32% and max. 64% relative humidity, i.e. it never exceeded the point of deliquescence. Correspondingly, no significant differences were found during storage when determining the moisture by weighing. While the discharge rate changed only relatively slightly in the range between 50 and 60% during storage, there was a sharp decrease in all rooms from 60% to values between 9 and 23% with the third sample (sample no. 35). A correlation to the different storage conditions in the individual rooms could not be verified.

The noticeable reduction of the discharge rate with sample 35 (big-bag sample from Grevenbroich, country of origin Morocco) indicates that a concrete statement on the pourability behaviour of a certain salt is already possible after one week of storage in the flow box.

To check the influence of storing on the pourability further, three different salt samples were stored in an accessible climate-controlled chamber for four weeks. Each week, a season with adapted temperature ( $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  ...  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) and atmospheric humidity (70% ... 90% RH) was

simulated. The samples were stored in open culture dishes, the flow box and pressurised pots. As expected, due to the significantly exceeded point of deliquescence, the samples in the culture dishes absorbed up to 26% water and liquified. It was surprising that the samples in the culture dishes released moisture into the environment in the second week which simulated “winter“ with a relative humidity of 90% and a temperature of -5 °C. In the flow boxes, the discharge rates of all samples declined from 53% ... 60% to less than 3% ... 10%. After a storage time of 24h, sample 35 solidified to such an extent that the uniaxial compression test yielded a value of 0.7 kPa. This confirmed the preceding measurement results obtained in one-week storage. After four weeks of storage in the climate-controlled chamber, two samples yielded compression strengths of 1.2 kPa and 1.9 kPa, respectively, and with sample 35, these values were significantly exceeded with 3.6 kPa.

The bulk densities of all samples were measured during a single, standardised filling process and in the flow box by adding salt shovel by shovel. With standardised filling, the measurement yielded results in the range between 1.13 g/cm<sup>3</sup> and 1.31 g/cm<sup>3</sup>, and with determination by way of the flow box generally lower, in the range between 0.99 g/cm<sup>3</sup> and 1.27 g/cm<sup>3</sup>.

The tapped density determined with 10 samples was approx. 13.5% higher than the standardised bulk density. The presumed correlation between density behaviour and pourability was not confirmed.

The content of anticaking agent was determined in all samples. The values were found to lie in the range between 15.9 mg Fe(CN)<sub>6</sub>/kg and 173 mg Fe(CN)<sub>6</sub>/kg. Repeat measurements revealed a high dependency on the type of sampling. This indicates inhomogenities in the salt concentration. Ambiguities were also revealed in the analytic determination of the content and should be clarified before any further studies relating to long-term storage are performed.

The determination of the pH value for a 10% salt solution yielded values between 6.0 and 9.5. No systematic correlation between pH value and pourability could be derived.

The specific surface area (BET method) was analysed for various salt samples and found to lie in the range between 0.02 m<sup>2</sup>/g and 0.65 m<sup>2</sup>/g. No correlation to the pourability could be verified. This,

Parameter	Influence on the pourability
Grain size distribution	Reduced pourability due to fine grain content
Moisture content	Reduced pourability due to moisture
Specific surface area (BET method)	Could not be verified
Bulk density	Could not be verified
Tapped density	Could not be verified
pH value	Could not be verified
Content of anticaking agents	No evaluation possible
Storage conditions and duration	Strong influence due to the absorption of moisture and recrystallisation (caking)

**Tab. 2:** Parameters examined and their influence on the pourability

however, may be attributable to the interference of other influencing factors. In addition to the fine-grain content, the specific surface area is a measure for the fracturing of the crystal surface. This parameter may become more important for long-term storage. The specific surface area should therefore also be determined more precisely in further tests.

The parameters examined and their influence on the pourability are summarised in Table 2.

Storage conditions and duration  
Strong influence due to the absorption of moisture and recrystallisation (caking)

To enable specific examination of the caking in bulk salt, an idea for a method to measure the solidification with different bulk heights and after different times was presented. To this end, the salt was stored in a perforated box, and the solidification of the salt was measured on the basis of the force required to press a needle into the salt at different heights (needle insertion method).

It will be possible, by way of many long-term tests under defined climatic conditions, to determine exactly the parameters that, in interaction with the storage conditions, result in solidification of the salt after a longer period of storage. Only if these conditions are known and can be measured, will it be possible to develop an analysis method for determination of the long-term stability upon delivery of the salt.

In view of this long-term objective, the following work steps were derived on the basis of the knowledge gained:

- Clarification of the influence of  $\text{Fe}^{3+}$  ions on the effectiveness of  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  ions as anticaking agent, as dependent on the pH value.
- Clarification of inconsistencies found when determining the content of ferrocyanide.
- Examinations regarding the influence of the structure and surface quality of the individual crystals on the caking; determination of a method for quantification of this parameter.
- Continuation of the tests for determination of changes in the pourability after approx. one week of flow box storage with the objective of developing a measuring method for identification of salts with the tendency to very fast solidification.
- Development of the needle insertion method from the idea to a ready-to use measuring method.

## Annex

Herkunft	Probe	Probenbezeichnung	Feuchte	Sieb-fraktion	BET	Schüttdichte		Rüttel-dichte	Trichter	pH-Wert	Antibackmittel-gehalt	Auslauf-rate
						Standard	Kombibox					
(Lieferant)	Nr.		Trocken-schrank	< 0,125 mm		[kg/l]	[kg/l]	[kg/l]	[g/s]		$\text{Fe}(\text{CN})_6$	
			[%]	[%]	[m <sup>2</sup> /g]	[kg/l]	[kg/l]	[kg/l]	[g/s]		[mg/kg OS]	[%]
UVRFIA	Quarz-sand	Quarzsand	0,14			1,52		1,74	877,0			64,1
BAST	4	AM Kaarst - DSD Borth mit kleiner Schaufel gesammelt	0,31	2,8	0,04	1,20	1,11	0,0	461,9	9,4	173,0	36,3
	5	AM Kaarst - DSD Borth mit Probesteher	0,19	3,0	0,21	1,22	1,14	0,0	492,8	9,2	130,0	39,8
	13	Grevenbroich - DSD-Salz oberer Bereich, 1m-Schicht mit großer Schaufel gesammelt	0,01	2,3	0,03	1,29	1,22		589,7	8,9	105,0	54,7
	12	Grevenbroich - DSD-Salz oberer Bereich, 1m-Schicht mit Probesteher gesammelt	0,03	2,5	0,04	1,31	1,24		614,2	9,0	106,0	59,2
	7	Grevenbroich - Marokkosalz aus sehr harter Wand	0,26	4,0	0,09	1,27	1,15		459,6	8,7	41,3	27,2
	11	Grevenbroich aus weniger harter aber fester Wand (Salz aus Marokko)	0,11	5,3	0,07	1,27	1,16		456,2	8,5	45,6	27,9
	6	Salzhalle Holzheim AM Kaarst - Marokkosalz mit großer Schaufel	1,12	3,0	0,21	1,19	1,06		0,0	8,1	41,3	29,4
	16	Salzhalle Holzheim AM Kaarst - Marokkosalz mit kleiner Schaufel gesammelt	0,96	3,2	0,20	1,19	1,06		0,0	6,9	48,8	29,6
	10	Salzhalle Gerlingen - AM Freudenberg - Marokkosalz mit kleiner Schaufel gesammelt	1,07	3,2	0,24	1,17	1,05		0,0	8,7	65,7	27,5
	15	SM Wiinsdorf DSD-Lieferung 2013/14 - große Schaufel	1,44	1,6	0,08	1,14	0,99		0,0	9,2	88,6	26,5
	9	Tunnel Gerlingen Marokkosalz mit großer Schaufel	1,61	3,8	0,33	1,16	1,03		0,0	8,0	32,9	25,2
	17	Tunnel Gerlingen Marokkosalz mit Probesteher	1,62	3,5	0,38	1,16	1,04		0,0	7,7	36,0	25,8
	8	Salzhalle Vettelhoven - AM Mendig - 2011? Hinterste Lage mit großer Schaufel gesammelt	1,76	4,9	0,18	1,14	1,04		0,0	7,4	64,0	30,3
	14	Salzhalle Vettelhoven - AM Mendig - Marokkosalz mit kleiner Schaufel gesammelt	0,66	4,6	0,22	1,19	1,08		0,0	8,9	55,1	29,7
	3	Vettelhoven - 2. älteste Lage	1,33	3,8	0,35	1,17	1,06		0,0	8,6	31,8	32,0
	1	Vettelhoven - 3. älteste Lage	0,97	6,6	0,18	1,19	1,10		0,0	8,9	92,0	28,3
	2	Vettelhoven - vordere 2. Lage	0,59	7,5	0,13	1,24	1,16		463,3	8,9	117,0	31,3
Südsalz	21	0,16 - 2 mm mit Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)	0,08	2,3	0,14	1,21	1,15	1,42	659,0	8,5	71,4	47,2
	22	0,16 - 2 mm ohne Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)	0,14	11,9	0,12	1,30	1,24	1,52	592,7	8,2	42,4	20,3
	23	0,16 - 3 mm mit Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)	0,23	1,9	0,17	1,21	1,19	1,39	587,0	8,6	58,8	46,1
	24	0,16 - 3 mm ohne Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)	0,06	1,4	0,12	1,29	1,27	1,47	675,0	8,2	46,6	61,3
	25	0,16 - 5 mm mit Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)	0,16	0,7	0,17	1,15	1,16	1,32	550,0	6,9	71,4	56,5
	26	0,16 - 5 mm ohne Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)	0,09	0,6	0,17	1,13	1,16	1,27	542,0	7,3	15,9	61,5
	20	Tempotau (SÜDSALZ GmbH)	0,04	0,2	0,02	1,29	1,28	1,44	867,0	7,1	64,7	68,0
Salz-lager Stollberg	27	Salz-lager Stollberg Probenahme UVRFIA (Probesteher senkrecht)	0,29	4,2	0,06	1,24	1,16		472,8	6,6	101,0	35,1
	28	Salz-lager Stollberg Probenahme BAST (Probesteher waagrecht)	0,19	3,2	0,04	1,25	1,16		510,7	6,6	103,0	43,6
	29	Salz-lager Stollberg Probenahme UVRFIA (Schaufel)	0,43	7,4	0,09	1,26	1,16		441,2	6,5	65,6	31,0
	32	Salz-lager Stollberg Probenahme UVRFIA (Schaufel)	0,07	3,2	0,06	1,23	1,13		490,2	6,0	72,1	40,5
	33	Salz-lager Stollberg Salz-lager "alt" (DSD-Material vom Vorjahr) Probenahme UVRFIA (Schaufel)	0,01	2,3	0,03	1,20	1,13		495,5	6,1	53,0	45,9
AM Siebenlehn	30	AM Siebenlehn Probenahme UVRFIA (Probesteher senkrecht)	0,17	2,2	0,04	1,22	1,17		504,8	6,8	58,3	47,5
	31	AM Siebenlehn Probenahme UVRFIA (Schaufel)	0,10	2,3	0,03	1,23	1,15		526,8	6,2	53,0	51,0
	34	AM Siebenlehn Probenahme BAST (Schaufel)	0,02	2,1	0,02	1,21	1,15		519,1	6,1	63,6	48,1
BigBag-Proben	18	Heilbronner Auftausalz 0-3 mm (BigBag)	0,09	1,1	0,16	1,22	1,17	1,38	549,8	7,7	78,5	54,6
	19	französisches Meersalz (aus BigBag)	2,54	3,4	0,05	1,17	1,03	1,31	-	9,3	30,7	30,3
	35	BigBag Grevenbroich (Marokkosalz)	0,33	3,9	0,09	1,27	1,17	1,37	488,3	6,3	21,2	26,9
AM Mendig	36	AM Mendig (Silo)	0,11	2,2	0,05	1,21	1,14			6,2	97,5	43,6
	37	AM Mendig (Halle)	0,38	3,0	0,05	1,22	1,12			6,2	82,7	35,9
AM Schüttorf	38	Probe 1-AM Lathen Salzhalle	0,73	3,3	0,19	1,21	1,10			9,2	27,6	21,2
	39	Probe 2-AM Schüttorf Salzhalle	0,13	2,0	0,10	1,16	1,09			9,2	53,0	45,6
	40	Probe 3-AM Schüttorf Salzhalle, braun gefärbt	0,18	5,3	0,10	1,28	1,18			9,1	29,7	32,4
Schottland / Irland	41	White Salt, Supplier -Peacocks, Marine Salt von BEAR	0,25	1,6	0,05	1,17	1,15			9,5	27,6	54,4
	42	Ireland von BEAR	0,32	5,8	0,65	1,32	1,27			9,1	48,8	51,3
	43	Brown Salt, Cleveland Potash England von BEAR	0,14	5,0	0,07	1,28	1,22			8,8	42,4	58,1
	44	Depot Amey (Salt Union)	2,56	2,5	0,34	1,22	1,06			8,4	31,8	26,0
	45	Depot Amey (Salz für Soleherstellung)	0,07	3,3	0,15	1,29	-			8,6	23,3	-
	46	Peacock Salzhalle BEAR	0,32	5,7	0,06	1,29	1,18			8,7	44,5	35,5

The sample numbers highlighted in grey indicate the country of origin Morocco.

Tab. 3: Overview of samples and results

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	<b>5</b>	<b>Probenahme und Bewertung der Verfahren zur Probenahme in Bezug auf das Verfahren zur Prüfung der Rieselfähigkeit (AP 4)</b> .....	27
<b>2</b>	<b>Literatur- und Marktanalyse, Probenauswahl (AP 1)</b> .....	11	5.1	Ziel der Arbeiten in AP 4 .....	27
2.1	Ziel der Arbeiten in AP 1 .....	11	5.2	Methoden der Probenahme .....	28
2.2	Ergebnisse der Literaturrecherche .....	11	5.2.1	Probenahme mittels Probestecher .....	28
2.2.1	Methoden zur Bestimmung der Rieselfähigkeit .....	11	5.2.2	Probenahme mittels Schaufel .....	28
2.2.2	Auswahl der Messverfahren .....	14	5.2.3	Weitere Methoden .....	28
2.2.3	Physikochemische Grundlagen .....	14	5.3	Ergebnisse der Arbeiten in AP 4 .....	28
2.3	Proben .....	16	<b>6</b>	<b>Messreihen zur Bestimmung von Eigenschaften für Natrium- chlorid zu betriebssicheren Ausbringung mit Streumaschinen nach DIN EN 15597-1 (AP 5)</b> .....	31
2.4	Ergebnis der Arbeiten in AP 1 .....	16	6.1	Ziel der Arbeiten in AP 5 .....	31
<b>3</b>	<b>Auswahl und Erprobung von Verfahren zur Prüfung der Rieselfähigkeit (AP 2)</b> .....	17	6.2	Einachsige Druckversuche .....	32
3.1	Ziel der Arbeiten in AP 2 .....	17	6.2.1	Methode .....	32
3.2	Prüfmethoden zur Bestimmung der Rieselfähigkeit .....	17	6.2.2	Ergebnisse .....	33
3.2.1	Einachsige Drucktestmethode .....	17	6.3	Bestimmung des Feuchtegehaltes .....	33
3.2.2	Prüfmethode mittels Kombibox nach SONNTAG .....	18	6.3.1	Methode .....	33
3.2.3	Trichterprüfmethode .....	22	6.3.2	Ergebnisse .....	33
3.2.4	IMSE-Test .....	25	6.4	Bestimmung der Korngrößen- verteilungen .....	33
3.3	Ergebnisse der Arbeiten in AP 2 .....	25	6.4.1	Methode .....	33
<b>4</b>	<b>Verfahren zur Bestimmung der Rieselfähigkeit</b> .....	26	6.4.2	Ergebnisse .....	34
4.1	Allgemeines .....	26	6.5	Bestimmung der Rieselfähigkeit mittels Kombi-/Auslaufbox .....	35
4.2	Kurzbeschreibung .....	26	6.5.1	Methode .....	35
4.3	Geräte .....	26	6.5.2	Untersuchungen der Proben .....	35
4.4	Durchführung .....	27			
4.5	Auswertung .....	27			

6.5.3	Untersuchungen zum Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Rieselfähigkeit .....	37
6.5.4	Untersuchungen zum Einfluss von Feuchtegehalt und Korn- größenverteilung auf die Rieselfähigkeit .....	39
6.5.5	Untersuchungen zum Lagerverhalten .....	42
6.6	Bestimmung der Schüttdichte .....	45
6.6.1	Methode .....	45
6.6.2	Ergebnisse .....	46
6.7	Bestimmung der Rütteldichte .....	46
6.7.1	Methode .....	46
6.7.2	Ergebnisse .....	46
6.8	Gehalt an Antibackmittel Ferrocyanid .....	47
6.9	Weitere Prüfmethode .....	48
6.9.1	Bestimmung des pH-Wertes .....	48
6.9.2	Bestimmung der spezifischen Oberfläche .....	48
6.10	Ergebnisse der Arbeiten in AP 5 .....	48
<b>7</b>	<b>Herleiten von Eigenschaften für Natriumchlorid zur betriebs- sicheren Ausbringung unter Berücksichtigung der Wirksamkeit (AP 6) .....</b>	<b>49</b>
7.1	Ziel der Arbeiten in AP 6 .....	49
7.2	Ergebnisse der Arbeiten in AP 6 .....	49
<b>8</b>	<b>Vorschlag einer Methode zur Messung der Zeitverfestigung während der Lagerung von Tausalz im Lager .....</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>50</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>54</b>
<b>Anlagen</b>	<b>.....</b>	<b>57</b>

## 1 Einleitung

Für das Ausbringen von Tausalzen zur Glättebekämpfung mit Streufahrzeugen ist die Rieselfähigkeit des Streugutes eine grundsätzliche Voraussetzung. Zur Beurteilung der Lagerfähigkeit und für die Justierung der Streumaschinen ist die Kenntnis über den Grad ihrer Ausprägung von Bedeutung.

Das zu mehr als 90 % aus Natriumchlorid bestehende Tausalz wird von unterschiedlichen Firmen in verschiedenen Ländern hergestellt und in Deutschland mitunter über mehrere Jahre bis zur nächsten Wintersaison gelagert. Einige dieser Salze verfestigen sich in dieser Zeit soweit, dass ein Austrag mit dem Streufahrzeug nicht mehr ohne zusätzlichen Aufwand möglich ist.

Die Qualitätsanforderungen an Streusalze sind bisher in den Technischen Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenwinterdienstes – TL-Streu verzeichnet. Die DIN EN 16811-1 „Winterdienstausrüstung – Enteisungsmittel – Teil 1: Natriumchlorid – Anforderungen und Prüfmethoden“ liegt im Entwurf vor. Beide Dokumente enthalten bisher keine Prüfverfahren, die eine Beurteilung des Fließverhaltens zulassen.

Aufgabe der Arbeiten war es, verschiedene Methoden zur Bestimmung der Rieselfähigkeit unter Einbeziehung der Auslaufmethode nach Alfred SONNTAG für die Prüfung von Streusalzen zu testen und davon eine für die tägliche Routine auszuwählen.

Darüber hinaus wurden verschiedene physikalische Parameter wie Korngrößenverteilung, Feuchtegehalt, Schüttdichte, Rütteldichte, spezifische Oberfläche, pH-Wert und der Gehalt an Antbackmitteln an 46 Tausalzproben verschiedener Hersteller und aus verschiedenen Lagern untersucht und die Ergebnisse auf Korrelation zur Rieselfähigkeit überprüft. Versuche zum Lagerverhalten der Salze ergänzen die Untersuchungen und wurden mit dem Ziel der Entwicklung einer Methode zum frühzeitigen Erkennen von Salzen mit starker Neigung zur Zeitverfestigung durchgeführt.

## 2 Literatur- und Marktanalyse, Probenauswahl (AP 1)

### 2.1 Ziel der Arbeiten in AP 1

Anhand einer Literatur- und Marktanalyse sollten Möglichkeiten zur Messung der Rieselfähigkeit von Tausalz unter Einbeziehung des Verfahrens von SONNTAG eruiert werden. Geeignete Verfahren zur Prüfung der Rieselfähigkeit in Bezug auf Vergleich- und Wiederholbarkeit sowie einfache und schnelle Handhabung bei der Eingangskontrolle vor Ort waren zu recherchieren. Weiterhin waren chemischphysikalische und technische Parameter zu prüfen, die die Fließfähigkeit von Salzen beeinflussen. Davon ausgehend sollten Erklärungsansätze für die mangelnde Rieselfähigkeit einiger Tausalze formuliert werden, die die Bedingungen der TL-Streu zwar anfänglich erfüllen, bei der Lagerung aber nach kurzer Zeit zu Verfestigung neigen. Einen Schwerpunkt bilden daher Forschungsarbeiten, in denen der Zusammenhang zwischen der Lagerfähigkeit von Salzen und ihren Eigenschaften untersucht wurde.

Zu Beginn des Projektes war die deutschlandweite Kontaktierung von Tausalzlieferanten geplant, um aus den Rückmeldungen eine Auswahl an Proben zu treffen, die von den Lieferanten als „gut“ bzw. „schlecht“ rieselfähig eingestuft werden. Anhand der erwarteten Rückmeldungen sollte es möglich sein, Proben von mindestens zehn verschiedenen Lieferanten zu Testzwecken zu erhalten. Ein gut rieselfähiges Tausalz soll zu Vergleichszwecken als Modellsalz verwendet werden.

### 2.2 Ergebnisse der Literaturrecherche

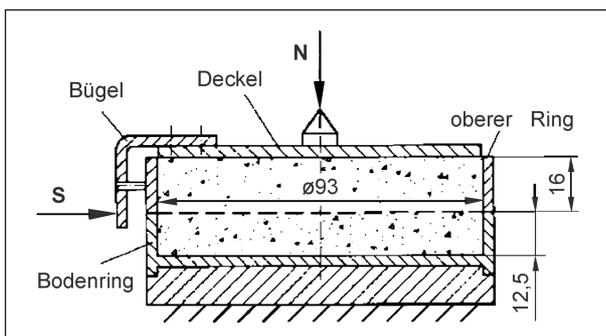
#### 2.2.1 Methoden zur Bestimmung der Rieselfähigkeit

Als Rieselfähigkeit wird das Ausmaß der freien Beweglichkeit von Schüttgütern bezeichnet. Die Riesel- bzw. Fließigenschaften von Schüttgütern hängen von vielen Parametern ab. Einige mögliche Einflussgrößen sind: Korngröße, Korngrößenverteilung, Packungsdichte, Oberflächenbeschaffenheit der Körner, Wassergehalt bzw. Feuchte, Temperatur, chemische Zusammensetzung der Partikel, Beimengungen von Trennmitteln und Fremdstoffen (Wikipedia, 2015).

Eine quantitative Aussage zur Rieselfähigkeit ist über die Kenngröße der Fließfähigkeit möglich. Damit wird ein objektiver Kennwert genutzt, der diejenigen physikalischen Eigenschaften des Schüttgutes beinhaltet, die für das Fließverhalten verantwortlich sind (SCHWEDES et al., 2001). Die Fließ- und somit auch die Rieselfähigkeit ist jedoch keine Materialkonstante sondern in Abhängigkeit vom Beanspruchungszustand zu betrachten, welcher auf das Schüttgut wirkt. Bei der Lagerung von Schüttgütern haben die Lagerbedingungen (Lagertemperatur, Luftfeuchte) ebenfalls einen Einfluss auf die Fließfähigkeit (SCHULZE, 2. bearb. Aufl., 2009). Die Fließfähigkeit von Schüttgütern ist als das Verhältnis von Verfestigungsspannung zu Schüttgutfestigkeit definiert. Umso größer die Fließfähigkeit ist, d. h. umso kleiner die Schüttgutfestigkeit im Verhältnis zur Verfestigungsspannung ist, desto leichter ist ein Schüttgut aus der Ruhe zum Fließen zu bringen. Als wissenschaftlich fundierte Methode zur Bestimmung der Fließfähigkeit sind Scherversuche anerkannt (JENIKE, 1964). Für feinkörnige Schüttgüter werden sogenannte Schergeräte benutzt.

Bild 1 zeigt das von JENIKE eingeführte Schergerät (JENIKE, 1964; SCHWEDES, 1976).

Die Schüttgutprobe wird zur Messung in eine Scherzelle eingefüllt. Die Scherzelle besteht aus einem unten geschlossenen Bodenring, einem darüber liegenden „oberen Ring“ gleichen Durchmessers und einem Deckel. Der Deckel wird zentrisch mit einer Normalkraft  $N$  beaufschlagt. Weiterhin ist ein Bügel fest mit dem Deckel verbunden. Durch das Verschieben des oberen Ringes und des Deckels gegenüber dem Bodenring wird die Schüttgutprobe einer Scherverformung unterworfen. Die zum Verschieben notwendige Kraft  $S$  wird über den Bügel aufgebracht und gleichzeitig gemessen. Aus der Normalkraft  $N$  und der Scherkraft  $S$  werden

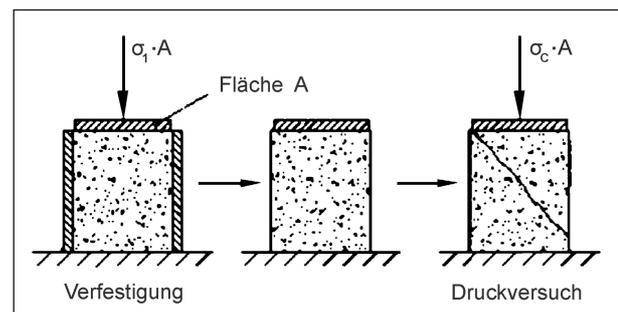


**Bild 1:** Scherzelle (Jenike-Schergerät)

durch Division durch die Querschnittsfläche  $A$  der Scherzelle die Normalspannung  $s$  und die Schubspannung  $t$  berechnet (SCHULZE, 2011).

Für das in diesem Forschungsvorhaben verwendete Tausalz müsste aufgrund der Korngrößenverteilung, d. h. der im Salz vorhandenen groben Partikel, ein Großschergerät verwendet werden. Derartige Versuche sind zeitaufwändig und sollten nur von erfahrenen Laboranten durchgeführt werden. Wegen des vorhandenen Budgets und der fehlenden projektspezifischen Praxisrelevanz wurde von derartigen Tests Abstand genommen. An der TU Bergakademie Freiberg wurden vergleichende Untersuchungen zum einachsigen Drucktest und Ringschergerät durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass der einachsige Drucktest als Schnelltest zur Ermittlung von schüttguttechnischen Kenngrößen geeignet ist (RENTSCH, 2015). Da sich einachsige Druckversuche auch zur Untersuchung von grobkörnigen, zur Zeitverfestigung neigenden Schüttgütern bewährt haben (RÖCK, 2006; WEIGEL, 2006; SCHULZE, 2011; CALVERT, 2013; RENTSCH, 2015) sollen diese für vergleichende Betrachtungen gewählt werden. Ein Gedankenmodell zu einachsigen Druckversuchen ist in Bild 2 dargestellt. Es zeigt einen mit einem feinkörnigen, kohäsiven Schüttgut gefüllten Hohlzylinder (Fläche  $A$ ; Innenwand des Hohlzylinders als reibungsfrei angenommen).

Das Schüttgut wird durch die Spannung  $\sigma_1$  in vertikaler Richtung belastet. Dadurch wird die Schüttgutprobe verfestigt und verdichtet. Anschließend wird der Hohlzylinder nach Wegnahme der Verfestigungsspannung entfernt, sodass die Schüttgutprobe in Form eines Zylinders stehenbleibt. Setzt man die vorverfestigte Schüttgutprobe nun einer zunehmenden vertikalen Druckspannung aus, so wird es bei einer bestimmten Spannung, die als Druckfestigkeit bzw. Schüttgutfestigkeit  $\sigma_c$  (auch:  $f_c$ )



**Bild 2:** Einachsiger Druckversuch (SCHULZE, 2. bearb. Aufl., 2009)

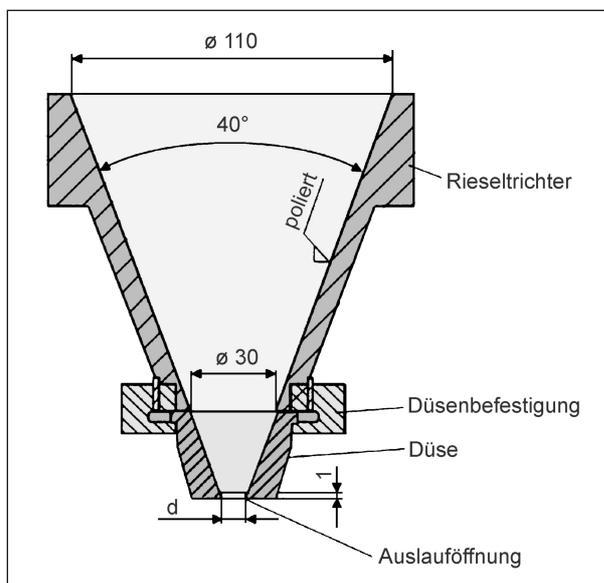
bezeichnet wird, zum Bruch der Probe, d. h. zum Fließen, kommen. Es existiert also eine material-spezifische Fließgrenze, die erreicht werden muss, um das Schüttgut zum Fließen zu bringen.

Die Rieselfähigkeit von körnigen Kunststoffen wird nach DIN EN ISO 6186 (DIN EN ISO 6186, 1998) mittels Trichtermethode bestimmt (Bild 3). In Streufahrzeugen werden ebenfalls Trichter verwendet, sodass grundsätzlich eine gute Vergleichbarkeit der gemessenen mit der praktischen Rieselfähigkeit erwartet werden kann.

Es werden zwei Messverfahren beschrieben. Nach Verfahren A (Massegleichheit) wird das Probematerial in den Trichter gegeben, wobei die untere Öffnung durch die Schiebeöffnung geschlossen ist. Nach Verfahren B (Volumengleichheit) wird der Trichter überfüllt und der Überschuss mit einem geradkantigen Stab vom Trichter abgestreift. Der Schieber wird dann schnell geöffnet, sodass die Probe abfließt. Gemessen wird die Rieselzeit, d. h. die Durchflusszeit durch den Trichter. Im Prüfbericht wird der Mittelwert von drei Prüfungen gemäß DIN angegeben (DIN EN ISO 6186, 1998).

Die Probe ist jeweils so über die Innenseite des Trichters) einzufüllen, dass keine Verdichtung stattfindet.

KRETZLER hat bei seinen Versuchen zum Auslaufverhalten von Lactose aus einem Trichter einen deutlichen Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Auslaufgeschwindigkeit festgestellt (KRETZLER, 2002,



**Bild 3:** Auslauftrichter zur Bestimmung der Rieselfähigkeit nach DIN EN ISO 6186 (KRETZLER, 2002)

S. 73-74). Betrug die relative Luftfeuchtigkeit 27 bis 37 % lief das Pulver am schnellsten aus. Die Verringerung der Fließgeschwindigkeit bei niedriger Luftfeuchte (15-25 %) wurde mit einer starken Erhöhung der elektrostatischen Aufladung begründet und oberhalb von 50 % beobachtete er ein starkes Zusammenklumpen. Für die Untersuchungen wurde die Luftfeuchtigkeit im Messraum auf die gewünschten Werte aufwendig eingestellt.

Aus den Angaben zur Versuchsdurchführung wird abgeleitet, dass die relativ geringe Probenmenge von 50 g vor der Messung genügend Zeit für die Einstellung eines Gleichgewichts zwischen Luftfeuchte und Materialfeuchte hatte. Für die Untersuchung von Tausalzen ist das nicht praxisrelevant. Aus diesem Grund wurde die aktuelle Feuchte des Salzes im Lieferzustand berücksichtigt und auf eine Gleichgewichtseinstellung mit der Umgebungsluft bis auf beschriebene Ausnahmen verzichtet.

Eine weitere Möglichkeit zum Test der Rieselfähigkeit ist die Bestimmung der Auslaufrate mittels der in Bild 4 dargestellten Auslaufbox (SONNTAG & BOSEWITZ; SONNTAG, 2014).

Mit der Auslauf- bzw. deren Erweiterung, der Kombibox, wird die Auslaufrate bestimmt. Die Auslaufrate ist ein stoffspezifisches Maß, das die innere Reibung von Schüttgütern beschreibt. Es konnte anhand vieler und gänzlich verschiedener Schüttgüter gezeigt werden, dass die Auslaufrate dem Volumendurchsatz eines Maschinentrichters meist proportional ist (SONNTAG, 2014). Sie wird als Verhältnis von Auslaufmasse zu Gesamtmasse definiert und ist ein sinnvoller Ausdruck für die Rieselfähigkeit. Um Schüttgüter mit unterschiedlicher Korngröße zu vergleichen, kann zusätzlich die Bestimmung der Öffnungshöhe durch die Kombibox sinnvoll sein (Bild 4, rechts).



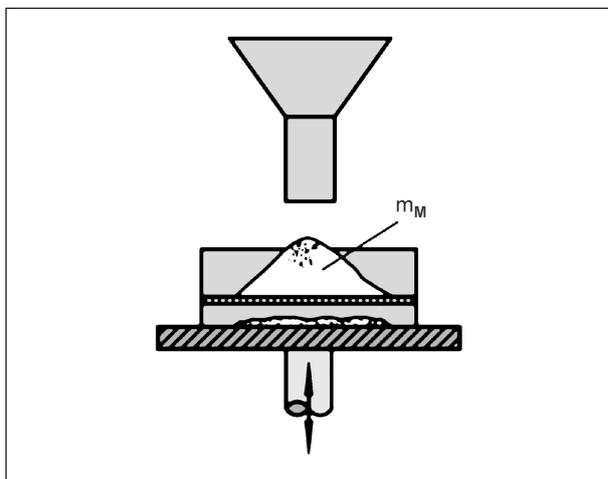
**Bild 4:** Links: Auslaufbox; rechts: Kombibox nach SONNTAG

Die Öffnungshöhe gibt Aufschluss über die innere Reibung und den Korngrößenfaktor von verschiedenen Materialien. Um die Öffnungshöhe zu bestimmen, wird der auf der Rückseite befindliche Schieber nach oben aufgeföhren. Wenn die kritische Höhe (Öffnungshöhe) erreicht wird, fließt das dahinter befindliche Schüttgut aus. Die Boxen sind jedoch nicht für kohäsive Materialien geeignet (SONNTAG).

Als weiteres einfaches Verfahren zur Bestimmung der Fließfähigkeit kann die Methode nach IMSE, (1972) betrachtet werden (UVR-FIA GmbH). Diese Methode wird für die Bestimmung der Fließfähigkeit pulver- bis feinkörniger Schüttgüter angewendet und ist ohne großen gerätetechnischen Aufwand durchführbar (Bild 5).

Das Schüttgut wird in einen auf ein Sieb aufgesetzten Trichter gegeben, welcher im Anschluss langsam angehoben wird. Anschließend wird das Sieb mittels Rütteltisch in vorgegebener Weise angeregt. Als Maß für die Fließfähigkeit dient die Menge  $m_M$  des auf dem Sieb verbleibenden Schüttgutes (SCHULZE, 2. bearb. Aufl., 2009; IMSE, 1972).

Weitere Messverfahren zur Bestimmung der Fließfähigkeit sind in (SCHULZE, 2. bearb. Aufl., 2009) beschrieben. Am Markt erhältlich sind auch verschiedene Geräte, die einfache Handhabung und komplexe Auswertung versprechen. Von Stable Micro Systems wird beispielsweise den Powder Flow Analyser zur Charakterisierung der physikalischen Fließeigenschaften von Pulvern und pulverförmigen Produkten angeboten. Dabei können sowohl Kohäsions- als auch Verbackungstests durchgeführt werden. Derartige Untersuchungen sind je-



**Bild 5:** Prinzip des IMSE-Tests (SCHULZE, 2. bearb. Aufl., 2009)

doch ausschließlich an feinkörnigen Schüttgütern möglich ([www.winopal.de](http://www.winopal.de)). Ähnliche Möglichkeiten verspricht das FT4 Powder Rheometer der Firma Freeman ([www.freemantech.co.uk/](http://www.freemantech.co.uk/)). Vorteile gegenüber der konventionellen Scherzelle liegen in der sehr einfachen Bedienbarkeit. Es ist jedoch schwierig, flexibel auf komplexe Messaufgaben zu reagieren. Weitere am Markt erhältliche Geräte zur Messung von Fließeigenschaften sind der Powder Flow Tester der Firma Brookfield Engineering Laboratories sowie der Evolution Powder-Tester von PS Prozesstechnik ([www.brookfieldengineering.com](http://www.brookfieldengineering.com), 2014); ([www.process.vogel.de](http://www.process.vogel.de)). Die belgische Firma Aptis bietet mit dem GranuHeaP eine Möglichkeit zur vollautomatischen Messung des Böschungswinkels sowohl von feinen als auch von grobkörnigen Pulvern an. Es besteht die Möglichkeit, einen Kohäsionsindex zu messen, der Informationen über die Fließeigenschaften des jeweils untersuchten Pulvers gibt ([www.aptis.be](http://www.aptis.be)). Aus den bisherigen Recherchen war nicht ersichtlich, welche wissenschaftlich anerkannten Methoden diesen Methoden zugrunde liegen und ob es sich um quantitativ anwendbare, physikalisch definierte und reproduzierbare Messgrößen handelt.

### 2.2.2 Auswahl der Messverfahren

Um eine Auswahl bezüglich der Messverfahren zur Bestimmung der Rieselfähigkeit für Tausalze zu treffen, wurden Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren zusammengestellt (Tabelle 1).

Die Trichtermethode, Untersuchungen mit der Kombibox nach Sonntag sowie der IMSE-Test wurden für die Untersuchungen ausgewählt, vergleichende Untersuchungen mit der einachsigen Drucktestmethode wurden in Auftrag gegeben.

### 2.2.3 Physikochemische Grundlagen

Bei der Charakterisierung von Salzen spielen die chemischen Eigenschaften ebenfalls eine Rolle. Das übliche Streusalz besteht zu über 95 % aus Natriumchlorid (NaCl). Als natürliche Begleitstoffe können bis zu einige Prozent unlösliche Bestandteile (im Wesentlichen Ton) und andere Salze (z. B. Anhydrit) enthalten sein. Das natürliche Mineral wird als Halit bezeichnet. Die gute Wasserlöslichkeit ist nur in geringem Maße von der Temperatur abhängig. Chemisch reines NaCl ist bei der in trockenen Räumen üblichen relativ geringen Luft-

Messung mit dem Jenike-Schergerät	
Vorteile	genaue Ergebnisse
Nachteile	kosten- und zeitaufwändig, nur für feine Pulver geeignet
Auswahl	nein
Messung mit dem Ringschergerät	
Vorteile	genaue Ergebnisse
Nachteile	hohe Kosten, nur für feine Pulver geeignet
Auswahl	nein
Messung mit dem Großschergerät	
Vorteile	genaue Ergebnisse, auch für grobkörnige Güter geeignet
Nachteile	sehr kosten- und zeitintensiv
Auswahl	nein
Einachsiger Drucktest	
Vorteile	Pulver wird definiert verfestigt und anschließend wird Festigkeit gemessen
Nachteile	Ermittlung der Fließgrenze schwierig, wenig Kontakt zwischen Material und Umgebungseinflüssen
Auswahl	ja
Trichtermethode	
Vorteile	einfach, robust
Nachteile	bei kohäsiven Schüttgütern keine quantitative Bewertung möglich; Normtrichter erforderlich; Einfluss klimatischer Bedingungen
Auswahl	ja
Kombibox nach SONNTAG	
Vorteile	einfach, robust
Nachteile	begrenzter Einsatz bei kohäsiven Schüttgütern
Auswahl	ja
IMSE-Test	
Vorteile	einfach, ursprünglich für Zement
Nachteile	ohne quantitative Aussage hinsichtlich Verhalten unter Spannungen
Auswahl	ja

Tab. 1: Übersicht über Vor- und Nachteile der Messverfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften

0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
75,9 %	75,6 %	75,4 %	75,2 %	75,0 %	74,8 %

Tab. 2: Deliqueszenzfeuchte von Natriumchlorid in Temperaturabhängigkeit (STEIGER et al., 2011)

feuchtigkeit nicht hygroskopisch. Beimengungen können das Feuchtwerden begünstigen (HOLLEMANN & WIBERG, 1995). Steigt die relative Luftfeuchtigkeit über ca. 75 % an (Tabelle 2, Bild 6), wird solange Wasser aus der Luft am Salz abge-

Lagerungsfeuchte/Salzphase	NaCl
79 % r. F.	7
81 % r. F.	22
87 % r. F.	153

Tab. 3: Feuchtesorption in g/kg nach 56 Tagen (VOGT et al., 1994)

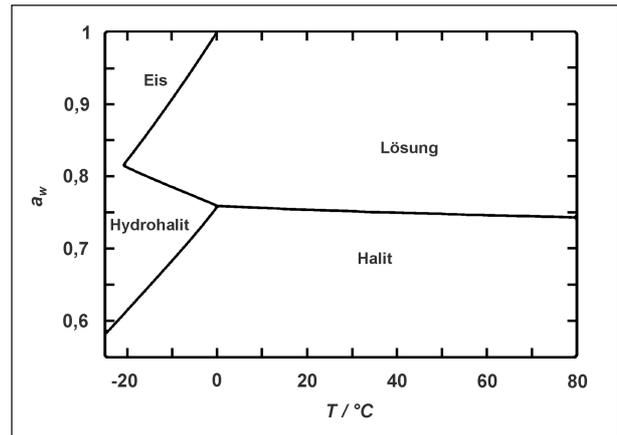


Bild 6: Deliqueszenzverhalten von Natriumchlorid in Abhängigkeit der Temperatur (HOLLEMANN & WIBERG, 1995)

schieden, bis die relative Luftfeuchtigkeit in der Umgebung wieder bis auf diesen Wert gesunken ist. Das Salz wird feucht, bzw. es bildet sich eine Salzlösung. Unterhalb dieser als Deliqueszenzfeuchte bezeichneten relativen Luftfeuchtigkeit trocknet die Salzlösung wieder aus und es bilden sich erneut Salzkristalle. Verbinden sich diese mit den vorhandenen Kristallen, führt das zur Verfestigung des Salzes.

In (VOGT et al., 1994) wurden u. a. die Gleichgewichtsfeuchte sowie die Feuchtesorption von NaCl bestimmt (Tabelle 3).

Bild 6 zeigt das Deliqueszenzverhalten von Natriumchlorid in Abhängigkeit der Temperatur. Aufgetragen ist die Wasseraktivität  $a_w$  (= relative Luftfeuchte/100 %) gegen die Temperatur.

Es liegt nahe, dass diese Vorgänge einen großen Einfluss auf die gelagerten Salze haben.

Konkrete Anforderungen an die Qualität der Tausalze werden u. a. in den „Technischen Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenwintendienstes“ – TL-Streu, dem Kommentar zur TL-Streu (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2003) sowie dem Entwurf einer europäischen Norm (E DIN EN 16811-1:2015-02, 2014) benannt.

## 2.3 Proben

Die Beschaffung der Proben sollte gemäß Angebot durch Abfrage verschiedenen Lieferanten/Anwender von Tausalzen erfolgen, um aus zu erwartenden Rückmeldungen sowohl „gute“ als auch „schlechte“ Proben auszuwählen.

Dieser Punkt wurde um die Durchführung eigener Probenahmen durch die Bundesanstalt für Straßenwesen erweitert.

Probenmaterial wurde von der Südsalz GmbH und der BAST zur Verfügung gestellt. Am 20. Januar 2015 fand eine gemeinsame Probenahme von Mitarbeitern der BAST und der UVR-FIA GmbH statt. Dabei erfolgte die Probenahme sowohl durch die BAST (Probestecher) als auch durch die UVR-FIA GmbH (Probestecher, Schaufel).

Die Anzahl der untersuchten Proben (46 Proben) hat sich im Vergleich zum Angebot (ca. 10 Proben) deutlich erhöht. Eine Übersicht über die Herkunft der Proben befindet sich in Tabelle 4, der Bericht enthält im Weiteren lediglich die Probennummern. Eine komplette Übersicht befindet sich in Anlage I.

Gegenstand der Untersuchungen sollten sowohl „gut rieselfähige“ als auch „schlecht rieselfähige“ Salze sein. Als Beispiel für „schlecht rieselfähiges“ Salz wurde Salz marokkanischer Herkunft benannt, da es in der Vergangenheit zu Problemen der Lagerstabilität kam. Dieses Salz wurde in verschiedenen Lagerstätten beprobt, da die Ursachen für die schlechte Rieselfähigkeit bislang noch nicht hinreichend geklärt werden konnten. Die untersuchten Proben des Marokkosalzes sind in Tabelle 4 in der dritten Spalte mit einem Punkt markiert. Die Proben 18, 19 und 35 (**fett gedruckt**) wurden in Big-Bags angeliefert. Untersuchungen an diesen Salzen bildeten den Hauptanteil durchgeführter Versuche. Diese Proben wurden nach der Anlieferung in einem Haufen aufgeschüttet und dieser zunächst durch Umschaukeln gründlich gemischt. Das Verjüngen der Probe erfolgte im Rotationsprinzip durch Umschaukeln in die entsprechende Anzahl an Kunststoffässer, sodass jedes Fass mit ca. 30 kg Salz gefüllt wurde.

## 2.4 Ergebnis der Arbeiten in AP 1

Die Auswertung von Fachliteratur ist erfolgt, mögliche Prüfmethode wurden recherchiert und anhand der Praxistauglichkeit ausgewählt. Die

Nr.	Herkunft	Ursprung Marokko
1	Vettelhoven	●
2	Vettelhoven	●
3	Vettelhoven	●
4	AM Kaarst	
5	AM Kaarst	
6	Salzhalle Holzheim AM Kaarst	●
7	Grevenbroich	●
8	Salzhalle Vettelhoven	
9	Tunnel Gerlingen	●
10	Salzhalle Gerlingen	●
11	Grevenbroich	●
12	Grevenbroich	
13	Grevenbroich	
14	Salzhalle Vettelhoven	●
15	SM Wilnsdorf	
16	Salzhalle Holzheim AM Kaarst	●
17	Tunnel Gerlingen	●
<b>18</b>	<b>Heilbronner Auftausalz</b>	
<b>19</b>	<b>französisches Meersalz</b>	
20	Tempotau	
21	0,16-2 mm mit Trennmittel	
22	0,16-2 mm ohne Trennmittel	
23	0,16-3 mm mit Trennmittel	
24	0,16-3 mm ohne Trennmittel	
25	0,16-5 mm mit Trennmittel	
26	0,16-5 mm ohne Trennmittel	
27	Salzlager Stollberg	
28	Salzlager Stollberg	
29	Salzlager Stollberg	
30	AM Siebenlehn	
31	AM Siebenlehn	
32	Salzlager Stollberg	
33	Salzlager Stollberg	
34	AM Siebenlehn	
<b>35</b>	<b>Grevenbroich (Big-Bag)</b>	●
36	AM Mendig	
37	AM Mendig (Halle)	
38	AM Lathen Salzhalle	
39	AM Schüttdorf Salzhalle	
40	AM Schüttdorf Salzhalle	
41	White Salt -Peacocks	
42	Irland von BEAR	
43	Brown Salt von BEAR	
44	Depot Amey (Salt Union)	
45	Depot Amey (Salz für Soleherstellung)	
44	Peacock Salzhalle BEAR	

Tab. 4: Probenübersicht

Beschaffung von Proben wurde im Rahmen des Auftakttreffens am 20.10.2014 konkretisiert und wie folgt beschlossen:

- BAST führt Probenahmen durch und schickt diese Proben an die UVR-FIA GmbH,
- UVR-FIA GmbH kontaktiert sächsische Salzlagerstätten, ebenfalls zur Probenbeschaffung,
- Südsalz AG stellt größere Menge Tausalz (Big-Bag) zur Verfügung.

Die Zahl der Proben hat sich von ursprünglich 10 geplanten auf insgesamt 46 Proben erhöht. Damit haben sich Arbeiten innerhalb des Projektes hinsichtlich eines deutlich erhöhten Analysenaufwandes verschoben.

### 3 Auswahl und Erprobung von Verfahren zur Prüfung der Rieselfähigkeit (AP 2)

#### 3.1 Ziel der Arbeiten in AP 2

Im Ergebnis der Literatur- und Marktanalyse waren mehrere Prüfverfahren auszuwählen, die für die Spezifik der Tausalze gut geeignet erscheinen und vor Ort mit einem vertretbaren technischen und zeitlichen Aufwand durchzuführen sind. Die Eignung der verschiedenen Prüfverfahren war anhand von Versuchsreihen mit unterschiedlichen Tausalzqualitäten zu vergleichen, zumindest sollte ein gut fließendes Salz und ein weniger gut fließendes, aber noch rieselfähiges Salz einbezogen werden. Als erstes wurden die Modellsalze hinsichtlich Ihrer Fließfähigkeit mit einer wissenschaftlich anerkannten Methode charakterisiert. Präzise Messungen mit systematischer Erfassung unterschiedlicher Belastungszustände würden Großschergeräte erlauben, darauf musste jedoch angesichts des zur Verfügung stehenden Zeit- und Kostenrahmens verzichtet werden. Um dennoch Aussagen zu den Lagerbedingungen in Haufwerken bzw. Silos treffen zu können, sollte eine vereinfachte Methode zur Bestimmung der Schüttgutfestigkeit, der einaxiale Drucktest, dienen. Damit ist es möglich, Spannungszustände zu simulieren und somit einen Zusammenhang zwischen Schüttgutfestigkeit und Verfestigungsspannung zu bestimmen. Danach wurden die ausgewählten Prüfmethoden für die Rieselfähigkeit hinsichtlich ihrer Wiederholbarkeit bewertet, indem

man die zufällige Messabweichung bei wiederholten Messungen unter sonst gleichen Bedingungen bestimmte. Danach sollte die Vergleichbarkeit untersucht werden. Dazu waren die Versuche von verschiedenen Personen durchzuführen, Versuche zu einem späteren Zeitpunkt zu wiederholen und gezielt Versuchsbedingungen zu variieren, z. B. die Art und Weise, wie das Versuchsmaterial in die Prüfapparatur eingefüllt wird. Bei den Messungen waren gleichzeitig auch die Handhabung sowie der technische und zeitliche Aufwand zu bewerten. Die untersuchten Prüfverfahren waren hinsichtlich Wiederhol- und Vergleichbarkeit, Handhabung und Aufwand zu vergleichen, um letztendlich das am besten geeignete Verfahren auszuwählen.

#### 3.2 Prüfmethode zur Bestimmung der Rieselfähigkeit

##### 3.2.1 Einachsige Drucktestmethode

Die Grundlagen der einaxialen bzw. einachsigen Drucktestmethode wurden im Kapitel 1.2 beschrieben (Bild 2). Die Untersuchungen wurden als Unterauftrag an das Institut für Mechanische Verfahrenstechnik/Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg vergeben, da dieses Institut über die entsprechende Ausrüstung sowie die Möglichkeit der Klimatisierung verfügt.

Zur Prüfung der Methode wurden in 18 Vorversuchen (mit jeweiliger Doppelbestimmung) verschiedene Proben bei einer Lagertemperatur von  $T = 20\text{ °C}$ , einer relativen Luftfeuchte von 50 % bzw. 80 % und einer Lagerzeit von 24 bzw. 72 h getestet. Die Materialfeuchte wurde variiert. Ein Nachteil der Methode ist, dass das Material in den Drucktöpfen nur in geringem Maß in Kontakt mit den Umgebungsbedingungen (Luftfeuchte, Temperatur) kommt. Aus diesem Grund erfolgte die Lagerung der Proben sowohl unter Last (Aufbringen von Gewichten während der Lagerung) als auch ohne Last (Verfestigungsspannung 0 kPa). Mit Ausnahme von Probe 35 war es bei nahezu allen Tests unmöglich, die Schüttgutprobe in Form eines Zylinders (Prüfkörper) zu erzeugen. Das bedeutet, dass die untersuchten Proben (18, 19, 20, 35) mit Ausnahme von Probe 35 gut fließfähig waren und sofort nach Öffnung der Drucktöpfe auseinander rieselten, sodass kein messbarer Prüfkörper entstand. Eine Übersicht der Ergebnisse befindet sich in Anlage V.

Bild 7 zeigt die einachsige Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Materialfeuchte bei Probe 35. Erkennbar ist die erwartete Tendenz, dass die Druckfestigkeit bei eingestellter Verfestigungsspannung von 20 kPa (blau) höher ist als bei den Proben, die ohne Last gelagert wurden (grün). Bei den Versuchen, die ohne Last durchgeführt wurden, erkennt man dass der Einfluss der Materialfeuchte im Bereich von 1 % bis 2 % sehr gering ist.

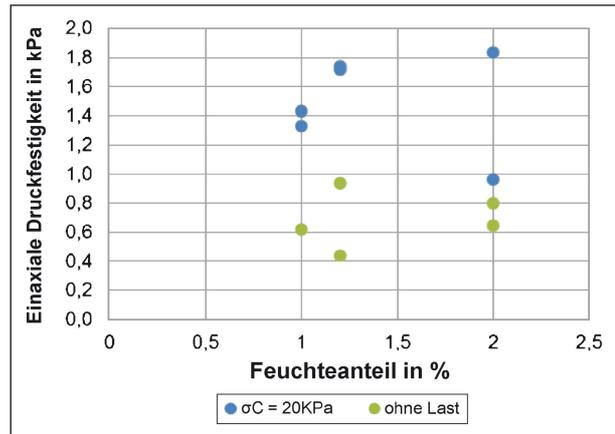
Die einachsige Drucktestmethode ist bei Tausalzen vorwiegend für die Quantifizierung schlecht fließfähiger Salze geeignet. Gut fließfähige Salze werden dadurch charakterisiert, dass kein Prüfkörper erzeugt werden kann. Problematisch erscheinen die z. T. hohen Abweichungen der Doppelbestimmungen. Diese treten insbesondere bei hohen Feuchtegehalten auf und deuten darauf hin, dass die Messungen im Übergangsbereich zwischen schlecht fließfähigem Material und Verbackungen stattgefunden haben, wobei Ort und Stärke der Bindungen zufällig sein könnten. Feststoffbrücken könnten sich an einem Ort ausbilden oder im gesamten Probekörper gleichmäßig vorliegen. Für die Bewertung der Methode liegen nicht genügend Ergebnisse zugrunde. Das ist darauf zurückzuführen, dass viele der im Zeit- und Budgetplan untersuchten Salze fließfähig waren. Zur Methodendvalidierung der einachsigen Drucktests müssten eine höhere Anzahl an messbaren Proben untersucht sowie vergleichende Scherversuche durchgeführt werden.

**3.2.2 Prüfmethode mittels Kombibox nach SONNTAG**

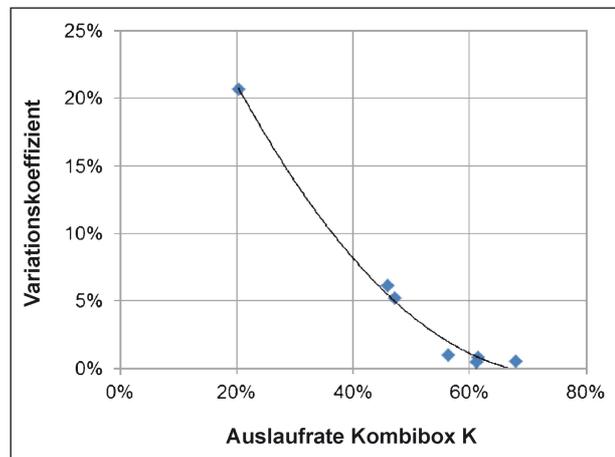
Auftragsgemäß wurde das Verfahren zur Bestimmung der Rieselfähigkeit nach SONNTAG (2014) getestet. Dazu waren zunächst eine Kombibox sowie in späteren Versuchen drei Auslaufboxen mit einem Volumen von je 4 l in Nutzung. Hinsichtlich der Eignungsprüfung als Prüfmethode wurden Wiederholungsmessungen mit der Kombibox durchgeführt. Die dazu verwendeten Salzproben (Proben 20-26) entstammten einer im November 2014 von der Südsalz GmbH zur Verfügung gestellten Lieferung.

**Bewertung der Streuung der Ergebnisse**

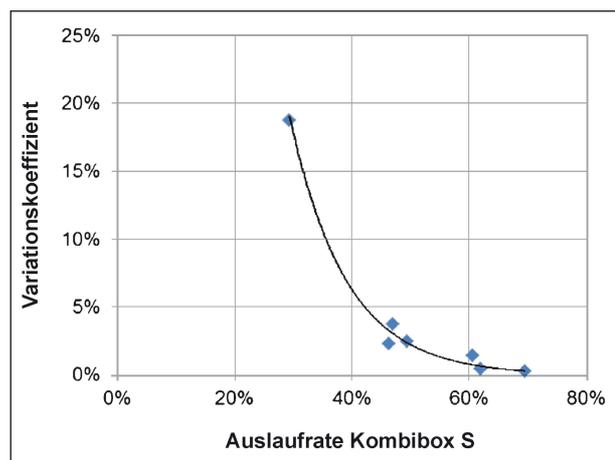
Zur Bewertung der Streuung wurde der Variationskoeffizient  $c_{var}$  gewählt. Der Variationskoeffizient ist eine Maßzahl, mit der man die Streuung eines Merkmals unabhängig von ihrer Skalierung bewerten kann.



**Bild 7:** Einachsige Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (Probe 35)



**Bild 8:** Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Auslaufrate (Kombibox-Klappe, Proben 20-26)



**Bild 9:** Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Auslaufrate (Kombibox-Schieber, Proben 20-26)

Bild 8 und Bild 9 zeigen, dass der Variationskoeffizient bei geringen Auslaufraten deutlich höhere Werte ergibt als bei höheren Auslaufraten. Das bedeutet, je besser ein Salz fließt, umso geringer streuen die Messwerte für die Auslaufrate. Die Ten-

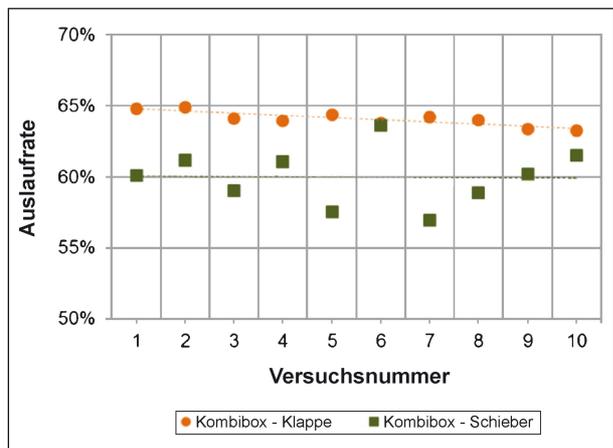
denzen für den Einsatz der Kombibox mit Klappe bzw. Schieber sind dabei sehr ähnlich.

**Untersuchungen zur Wiederholbarkeit**

Bei der Bewertung der Wiederholpräzision wird die Schwankungsbreite unter Wiederholbedingungen gemessen, d. h. Messverfahren, Bearbeiter und Messbedingungen werden nicht verändert und die Messungen finden innerhalb kurzer Zeitintervalle statt.

Die Untersuchungen wurden zunächst an Quarzsand als Modellsubstanz durchgeführt, da zu Projektbeginn noch keine Tausalzproben vorhanden waren. Es wurden zunächst Versuche mit Frischgut (10 Proben, Bild 10) durchgeführt. Dazu wurde für jeden Versuch eine neue Probe verwendet. Bild 10 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wiederholbarkeit an Versuchssand. Es wurden sowohl Auslaufversuche mittels Klappe als auch mittels Schieber durchgeführt.

Die Mittelwerte der Auslaufzeiten sowie die jeweiligen Variationskoeffizienten sind in Tabelle 5 dargestellt. Der höhere Variationskoeffizient bei Messungen mittels Schieber ist wahrscheinlich durch das



**Bild 10:** Untersuchungen zur Wiederholbarkeit (Messungen an Versuchssand, 10 Proben Frischgut)

Versuchssand	10 Proben	1 Probe
Mittelwert der Auslaufrate (Klappe)	64,1 %	63,5 %
Variationskoeffizient	0,8 %	2,0 %
Mittelwert der Auslaufrate (Schieber)	60,0 %	59,6 %
Variationskoeffizient	3,3 %	3,8 %

**Tab. 5:** Ergebnisse der Wiederholbarkeit (Klappe-Schieber sowie 10 Proben – 1 Probe)

subjektive Empfinden des Laboranten begründet, da die erforderliche Öffnungshöhe manuell eingestellt wird.

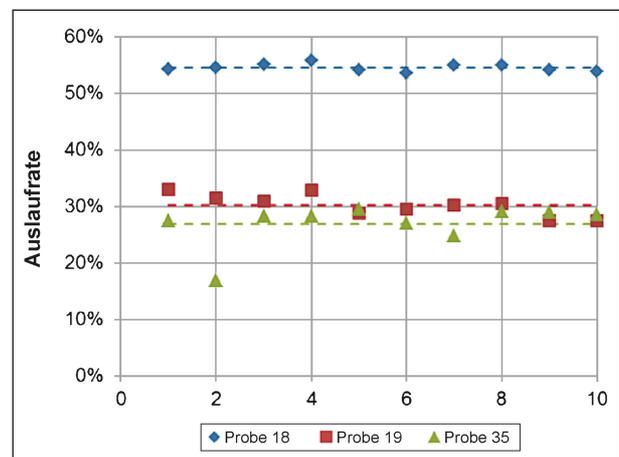
Zur Verifizierung dieser Ergebnisse wurden weitere Messungen der Auslaufrate sowohl mittels Kombibox-Klappe als auch mittels Kombibox-Schieber an den Tausalzproben 18, 19 und 35 durchgeführt. Von diesen Proben war genügend Probenmaterial vorhanden (Anlieferung im Big-Bag), sodass alle Versuche mit Frischgut durchgeführt werden konnten. Die jeweils 10 Wiederholungsmessungen wurden an Proben im Anlieferungszustand gemessen. Tabelle 6 und Bild 11 zeigen die Ergebnisse der Versuche zur Wiederholungsmessung an den drei verschiedenen Salzproben anhand der Versuche mit der Klappenseite der Kombibox.

Ergebnisse der Untersuchungen der Auslaufrate mittels Kombibox-Schieber sind in Tabelle 7 und Bild 12 dargestellt.

Es zeigt sich zunächst, dass man mit der Schiebermethode etwas geringere Auslaufzeiten bestimmt werden, was besonders bei der gut fließfähigen Probe 18 auffällt. Das ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Auslaufen des Salzes durch die manuelle Öffnung des Schiebers behindert wird. Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen mit Quarzsand haben sich diesbezüglich bestätigt.

Probe	18	19	35
Feuchtegehalt	0,2 %	2,7 %	0,3 %
Auslaufrate	54,6 %	30,3 %	26,9 %
Variationskoeffizient	1,2 %	6,5 %	13,9 %

**Tab. 6:** Ergebnisse der Versuche zur Wiederholungsmessung (Kombibox-Klappe)



**Bild 11:** Untersuchungen zur Wiederholbarkeit mittels Kombibox-Klappe

Probe	18	19	35
Feuchtegehalt	0,2 %	2,9 %	0,2 %
Auslaufrate	47,9 %	27,8 %	26,3 %
Variationskoeffizient	7,8 %	6,5 %	8,4 %
Öffnungshöhe	13 mm	90 mm	34 mm
Variationskoeffizient	0 %	8,2 %	51,5 %

Tab. 7: Ergebnisse der Versuche zur Wiederholungsmessung (Kombibox-Schieber)

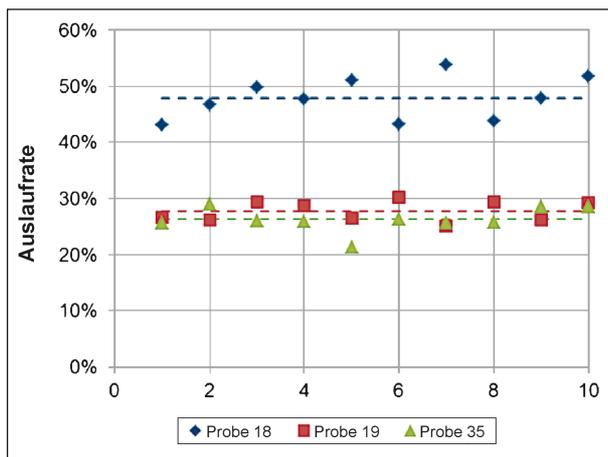


Bild 12: Untersuchungen zur Wiederholbarkeit mittels Kombibox-Schieber

Beim Vergleich der mit den beiden Methoden erzielten Variationskoeffizienten erkennt man dagegen unterschiedliche Tendenzen. Die Klappenmethode zeigt mit dem „gut fließenden“ Salz (Probe 18) mit einem Variationskoeffizienten von nur 1,2 % eine sehr gute Wiederholbarkeit, dagegen sind die Werte bei der Schiebermethode hier wesentlich schlechter. Bei den Proben mit geringer Fließfähigkeit (Proben 19 und 35) steigt der Variationskoeffizient in den Klappenversuchen allerdings stark an. In einigen Versuchen kommt es zu lawinenartigem Abrutschen größerer Volumina, in einem anderen Versuch ist diese Erscheinung weniger ausgeprägt. Im Schieberversuch scheint sich zum einen die Neigung zum Abrutschen etwas zu verringern, zu anderen wird einmal abgerutschtes Material an der schmalen Schieberöffnung gebremst und kann sich wieder absetzen. Das „schlecht fließende“ Salz (Probe 35) zeigt hier entsprechend einen geringeren Variationskoeffizient als im Klappenversuch, obwohl die einzelnen Fließvorgänge bei sehr unterschiedlicher Schieberhöhe ausgelöst wurden, worauf der Variationskoeffizient von 51,5 % verweist (Tabelle 7, letzte Zeile).

Anlage VIII (Versuche mit Kombibox-Klappe) und Anlage IX (Versuche mit Kombibox-Schieber) enthalten die Fotos der jeweiligen Versuche.

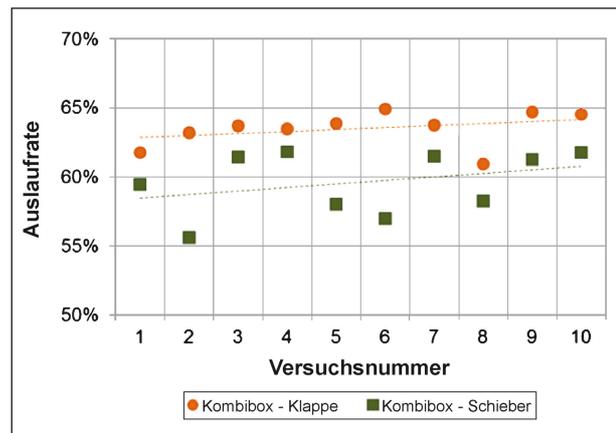


Bild 13: Untersuchungen zur Wiederholbarkeit mittels Kombibox-Schieber

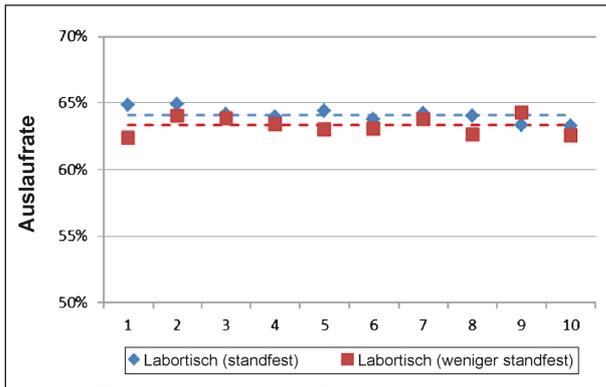
### Bewertung Frischgut – Verwendung desselben Materials

Die mit Frischgut (10 Proben, Bild 10) untersuchte Auslaufrate von Sand wurde noch einmal unter Verwendung jeweils desselben Materials (1 Probe) geprüft. Es wurde bereits verwendetes Material (Quarzsand) genutzt, wobei ein- dieselbe Probe zehn Mal nacheinander gemessen wurde. Bild 13 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Die erkennbare Tendenz einer steigenden Auslaufrate bei zunehmender Anzahl von Versuchen lässt sich dadurch erklären, dass es bei zunehmender Beanspruchung des Materials zu Abrieb kommt. Dadurch kann die Rieselfähigkeit des Materials scheinbar verbessert werden. Für die Bestimmung der Rieselfähigkeit mittels Auslaufrate wird deshalb die Verwendung von Frischgut empfohlen.

### Untersuchungen zur Vergleichbarkeit

Die Vergleichbarkeit ist als Präzision (oder Messgenauigkeit) unter Vergleichsbedingungen definiert. Messungen werden unter unterschiedlichen Bedingungen unter Anwendung desselben Verfahrens durchgeführt. Für die Versuche mit der Auslaufbox wurden der Ort der Messung sowie die messende Person variiert.

Die Messungen wurden zunächst ebenfalls mit Quarzsand durchgeführt. Dazu wurde auf unterschiedlichen Labortischen und mit z. T. mit „kippligen“ Aufbauten gearbeitet, um praxisnahe Messbedingungen unter Einschluss ungünstiger Bedingungen zu simulieren. Ein signifikanter Einfluss der Standfestigkeit der Kombibox konnte im untersuchten Rahmen nicht nachgewiesen werden (Bild 14), die Methode ist also ziemlich robust.



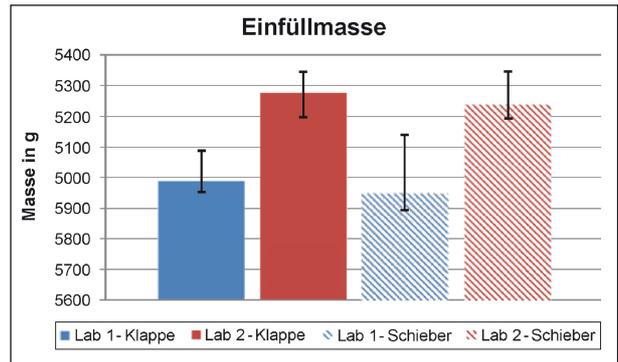
**Bild 14:** Untersuchungen zur Vergleichbarkeit (unterschiedlich standfeste Labortische)

Beim Einsatz verschiedenen Laboranten wurden Unterschiede sichtbar. Bild 15 bis Bild 17 zeigen den Einfluss des Laboranten auf die eingefüllte Masse (Bild 15), die ausgelafene Masse (Bild 16) und die Auslaufrate (Bild 17) mit Angabe der jeweiligen Minima und Maxima. Den Ergebnissen liegen jeweils zehn Wiederholungsmessungen zugrunde. Die Unterschiede zeigten sich besonders bei Versuchen mit der Schieberseite der Kombibox, in geringerem Maße aber auch bei Versuchen mit der Klappenseite der Auslaufbox.

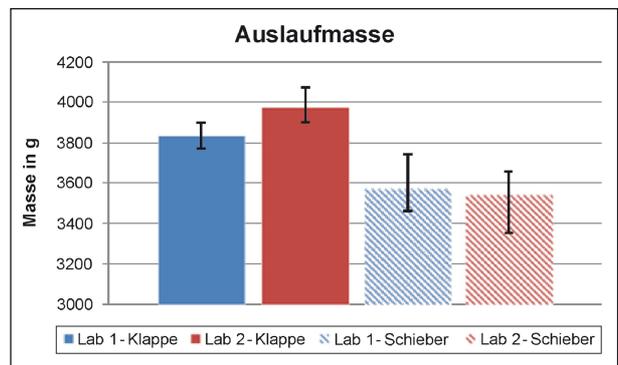
Anlage VII enthält die Übersicht der einzelnen Messwerte.

Die Art des Einfüllens („langsam“-Lab 1 bzw. „schnell“-Lab 2) hat dabei einen deutlichen Einfluss auf die Einfüllmenge. Die Unterschiede in der Einfüllmasse  $m_E$  betragen ca. 5 % und bei der Auslaufmenge  $m_A$  ca. 4 %. Bei der Auslaufrate liegt der dadurch bedingte Einfluss bei ca. 2 % (Kombibox-Klappe) bzw. 5 % (Kombibox-Schieber). Tabelle 8 zeigt die jeweiligen Mittelwerte aus 10 Wiederholungsmessungen sowie den Variationskoeffizienten  $c_{Var}$  der Auslaufrate.

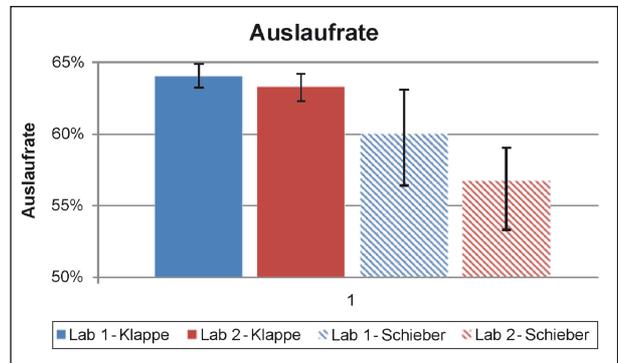
Der Einfluss des Laboranten wurde beim Test der drei im Rahmen des Projektes bezogenen Auslaufboxen auch anhand der Salzprobe 35 untersucht. Dazu wurden je Box und je Laborant fünf bzw. sechs Wiederholungsmessungen durchgeführt. Laborant 1 (L1-„langsam“) füllte die Proben langsamer ein als Laborant 2 (L2-„schnell“), die Ergebnisse sind in Bild 18 mit Angabe von Minimum und Maximum der Einzelwerte (Schwankungsbreite) dargestellt. Analog zu den mit Quarzsand durchgeführten Versuchen ist erkennbar, dass langsames Einfüllen zu geringeren Schwankungen innerhalb der Messwerte führt.



**Bild 15:** Einfluss des Laboranten auf die Einfüllmasse



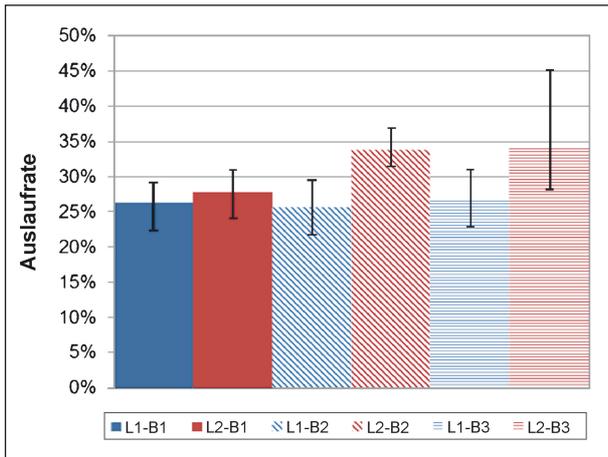
**Bild 16:** Einfluss auf die Auslaufmasse



**Bild 17:** Einfluss des Laboranten auf die Auslaufrate

Versuche mit Frischgut (Quarzsand)			
		Laborant 1	Laborant 2
Klappe	$m_E$ in g	5.988,6	6.278,3
	$m_A$ in g	3.837,5	3.974,2
	Auslaufrate in %	64,1	63,3
	$c_{Var}$ in %	0,8	1,0
Schieber	$m_E$ in g	5.951,8	6.241,2
	$m_A$ in g	3.571,1	3.542,1
	Auslaufrate in %	60,0	56,8
	$c_{Var}$ in %	3,3	3,3

**Tab. 8:** Einfluss des Laboranten bei der Bestimmung der Auslaufrate (Quarzsand)



**Bild 18:** Einfluss des Laboranten auf die Auslaufrate (Probe 35)

Versuche mit Frischgut (Probe 35)			
		Laborant 1	Laborant 2
Box 1 (B1)	$m_E$ in g	4.741,3	4.750,0
	$m_A$ in g	1.249,0	1.321,2
	Auslaufrate in %	26,3	27,8
	$c_{Var}$ in %	9,7	11,6
Box 2 (B2)	$m_E$ in g	4.697,7	4.795,9
	$m_A$ in g	1.207,6	1.620,0
	Auslaufrate in %	25,7	33,8
	$c_{Var}$ in %	10,1	7,2
Box 3 (B3)	$m_E$ in g	4.736,2	4.816,6
	$m_A$ in g	1.306,3	1.645,7
	Auslaufrate in %	27,6	34,2
	$c_{Var}$ in %	13,8	19,6

**Tab. 9:** Einfluss des Laboranten bei der Bestimmung der Auslaufrate (Probe 35)

Tabelle 9 zeigt die Mittelwerte der Einfüllmasse  $m_E$ , der ausgelaufenen Masse  $m_A$  sowie der Auslaufrate mit Angabe des Variationskoeffizienten  $c_{Var}$  der Auslaufrate.

### Bewertung Klappe – Schieber

Bei der Kombibox wurden sowohl die klappen- als auch die schieberseitige Auslaufrate untersucht. Eine zusätzliche Messung der Öffnungshöhe (Schieberseite Kombibox) ist dann sinnvoll, wenn sich die zu vergleichenden Schüttgüter hinsichtlich ihrer Korngröße unterscheiden.

Für die Proben 18, 19 und 35 wurden jeweils 10 Wiederholungsversuche zur Bestimmung der Aus-

	AR in %	$c_{var, AR}$ in %	$h_{öff}$ in mm	$c_{var, h}$ in %
<b>Probe 18</b> (F = 0,16 %)				
Klappe	54,6	1,2	-	-
Schieber	47,9	7,8	13	0
<b>Probe 19</b> (F = 2,8 %)				
Klappe	30,3	6,5	-	-
Schieber	27,8	6,5	90	8,2
<b>Probe 35</b> (F = 0,3 %)				
Klappe	26,9	13,9	-	-
Schieber	26,3	8,4	34,5	51,1

AR Auslaufrate,  
 $c_{var}$  Variationskoeffizient,  
 $h_{öff}$  Öffnungshöhe;  
 F Feuchtegehalt

**Tab. 10:** Übersicht der Ergebnisse der Auslaufrate (Vergleich Klappe-Schieber)

laufrate durchgeführt. Anlage VIII visualisiert die Übersicht über 10 Wiederholungsversuche mit der Klappenseite der Kombibox, Anlage IX zeigt die Übersicht über 10 Wiederholungsversuche mit der Schieberseite der Kombibox. Die Proben wurden im Anlieferungszustand untersucht. Aus Tabelle 10 wird ersichtlich, dass bei einem gut fließfähigen Salz (Probe 18) die Ergebnisse der Untersuchungen zur Rieselfähigkeit mittels Kombibox-Klappe geringer streuen als Versuche mit dem Schieber. Das scheint durch den Einfluss des Laboranten bei der Öffnung der Schieberseite begründbar zu sein. Bei einem eher schlecht fließenden Salz (Probe 35) bestätigt sich dieser Trend nicht. Eine mögliche Ursache kann die plötzliche Öffnung der Klappe sein, die unterschiedlichen Abbruchkanten verursacht. Bei der Meersalzprobe (Probe 19) handelt es sich um ein Salz, welches trotz eines sehr hohen Wassergehaltes noch besser fließfähig ist als Probe 35.

Die Untersuchungen mit den Tausalzproben bestätigten die anhand von Quarzsand gewonnenen Erkenntnisse (Tabelle 8). Der Einfluss des Laboranten wird bei Anwendung der Schieberseite der Kombibox im Vergleich zur Klappenseite als deutlich höher eingeschätzt, sodass die Versuchsreihen an den weiteren Salzproben mit der Klappenseite bzw. mit der Auslaufbox durchzuführen sind.

### 3.2.3 Trichterprüfmethode

Bei der traditionellen Prüfung von Kunststoffgranulaten kommt ein Rieselfähigkeitstrichter nach

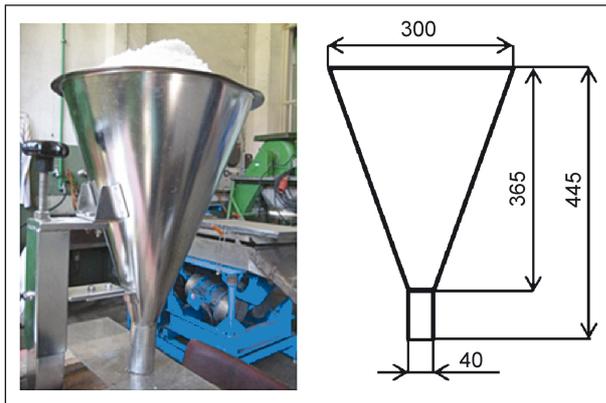


Bild 19: Verwendeter Trichter (UVR-FIA GmbH)

EN ISO 6186 (DIN EN ISO 6186, 1998) zum Einsatz. Gemessen wird die Rieselzeit bei vorgegebener Masse oder vorgegebenem Volumen.

Vorversuche wurden zunächst ebenfalls mit Versuchssand durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die gemäß DIN 6186 (DIN EN ISO 6186, 1998) verwendbaren Trichter für Tausalze ungeeignet sind. Aufgrund der geringen Größe fließt das Material zu schnell aus, sodass die gemessene Zeit zu stark fehlerbehaftet ist. Weiterhin ist die Öffnungsweite zu gering für Tausalzproben im größeren Bereich, sodass es zu Brückenbildung kommen kann. Vorversuche ergaben, dass der Trichter eine Öffnungsweite von mindestens 40 mm haben muss, um eine körnungsbedingte Brückenbildung zu vermeiden. Zur Erzielung einer manuell messbaren Auslaufzeit wurde ein Trichter mit einem Volumen von 10 l gewählt (Bild 19). Das bedeutet, dass für Wiederholungsmessungen mit Frischgut eine größere Menge an Material vorhanden sein muss.

Es wurden sowohl das Messverfahren der Massegleichheit als auch der Volumengleichheit getestet.

**Bewertung von Wiederhol- und Vergleichbarkeit**

Versuche zur Wiederholbarkeit wurden mit zwei Laboranten durchgeführt. Bei Verwendung desselben Materials ergaben sich die in Bild 21 und Bild 20 dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 11 zeigt, dass der Einfluss des Laboranten bei Trichtertests mit Volumengleichheit deutlich höher ist als bei dem massegleichen Verfahren. Aus diesem Grund wurde im weiteren Verlauf der Versuche das massegleiche Verfahren angewendet.

Tabelle 12 zeigt, dass es sich bei dem Trichterverfahren im Fall von leicht fließenden Materialien um

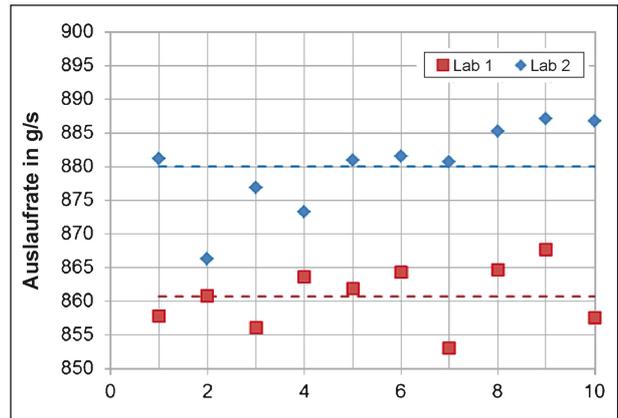


Bild 20: Untersuchungen zur Wiederholbarkeit der Trichterversuche (volumengleiches Einfüllen; zwei Laboranten, Versuchssand, 1 Probe)

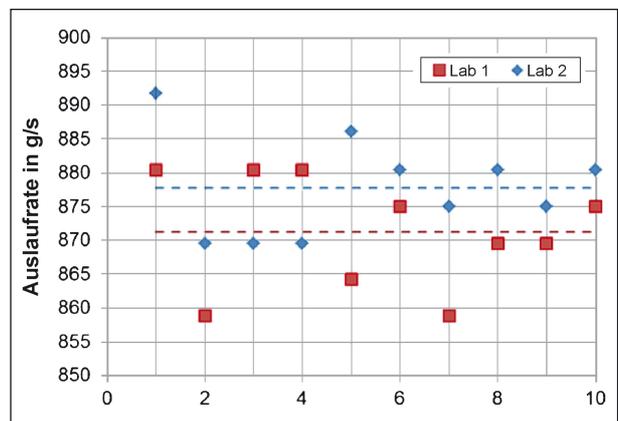


Bild 21: Untersuchungen zur Wiederholbarkeit der Trichterversuche (massegleiches Einfüllen; zwei Laboranten, Versuchssand, 1 Probe)

		MW der Auslaufrate in g/s	c <sub>Var</sub> in %
massegleich	Lab 1	871,3	1,0
	Lab 2	877,8	0,9
volumengleich	Lab 1	860,7	0,5
	Lab 2	880,0	0,7

Tab. 11: Übersicht über Mittelwerte (MW) und Variationskoeffizienten (c<sub>var</sub>) bei masse- und volumengleichen Tests mit der Trichtermethode (Versuchssand, ein Material)

	MW der Auslaufrate in g/s	c <sub>Var</sub> in %
Lab 1	877,8	0,9
Lab 2	876,7	0,7

Tab. 12: Übersicht über Mittelwerte und Variationskoeffizienten mit der Trichtermethode (Massegleichheit, Versuchssand, Frischgut)

eine zuverlässige und vom Einfluss des Laboranten weitestgehend unabhängige Methode handelt.

In Bild 22 sind die Ergebnisse der Wiederholungsversuche des massegleichen Trichterverfahrens bei der Verwendung von Frischgut ersichtlich. Diese zeigen deutlich geringere Abweichungen als die mit derselben Probe durchgeführten Versuche (vgl. Bild 21).

Für Tausalzproben erfolgte die Prüfung der Methode anhand der Proben 18 und 35, von denen genügend Material für Wiederholungsversuche von zwei Laboranten mit Frischgut zur Verfügung stand. Es wurde das massegleiche Verfahren angewendet, Bild 23 zeigt die Ergebnisse.

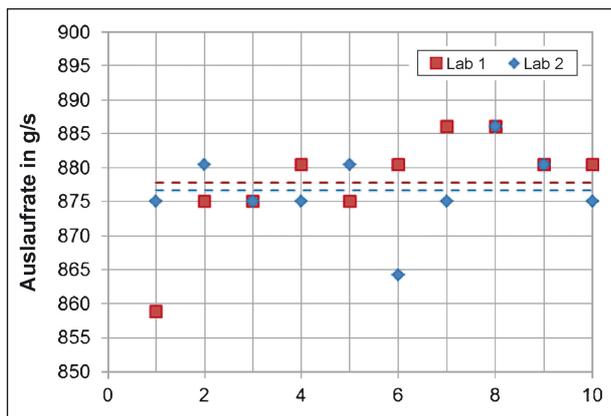
Die Trichtermethode ist eine prinzipiell geeignete Methode für die Prüfung der Rieselfähigkeit anhand der Auslaufrate. Da schlecht fließfähige Tausalze jedoch zu Brückenbildung neigen, müsste man

sehr große Trichter mit großen Öffnungsweiten verwenden. Die dafür benötigten Probemengen und der damit verbundene Aufwand für die Messungen wären dann sehr hoch.

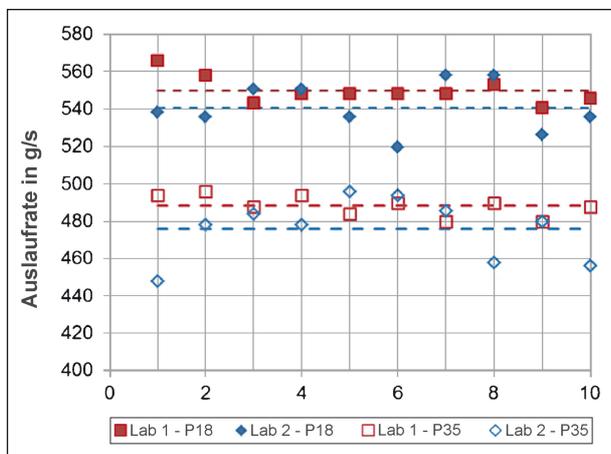
### Vergleichende Untersuchungen Klappe – Trichter

Vergleichende Untersuchungen zwischen der Auslaufrate und dem Auslauf aus einem Trichter wurden von SONNTAG (2014) durchgeführt. Diese haben gezeigt dass es im Extremfall möglich sein kann, dass ein Schüttgut mit geringer innerer Reibung, also hoher Auslaufrate, aus einem Maschinentrichter nicht mehr ausläuft, weil die Korngröße zu einer Brückenbildung im Trichter führt.

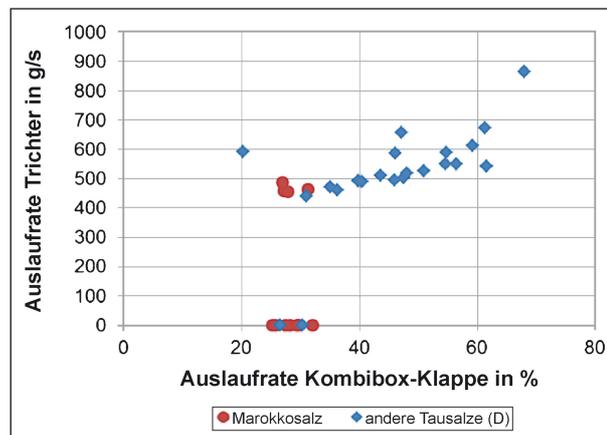
Die Ergebnisse vergleichender Untersuchungen von Trichtermethode und Kombibox anhand von Tausalz sind in Bild 24 dargestellt. Gezeigt wird die Korrelation der Auslaufrate von Trichterversuchen und der Auslaufrate der Kombibox. Die Tendenz, dass eine höhere Auslaufrate bei den Trichterversuchen ebenso eine höhere Auslaufrate der Kombibox bedeutet, ist deutlich erkennbar. Bei der Probe, die einen „Ausreißer“ am x-y-Punkt 20,3 %/592,7 g/s darstellt, handelt es sich um eine Probe ohne Trennmittelzusatz (Probe 22). Bei den beiden anderen „Ausreißer-Proben“ (Probe 8 und Probe 15) kam es vermutlich wegen des hohen Feuchtegehaltes (1,4 % bzw. 1,8 % Materialfeuchte) zu Brückenbildung. Die Proben des marokkanischen Salzes stammen von verschiedenen Lagerorten. Hinsichtlich der Prüfung mittels Trichtermethode erwiesen sie sich als fließfähig oder nicht, bei der Prüfung der Auslaufrate mit der Kombibox lagen die Auslaufzeiten in ähnlichen Bereichen (25,8-32 %), d. h. im Grenzbereich der Fließfähigkeit.



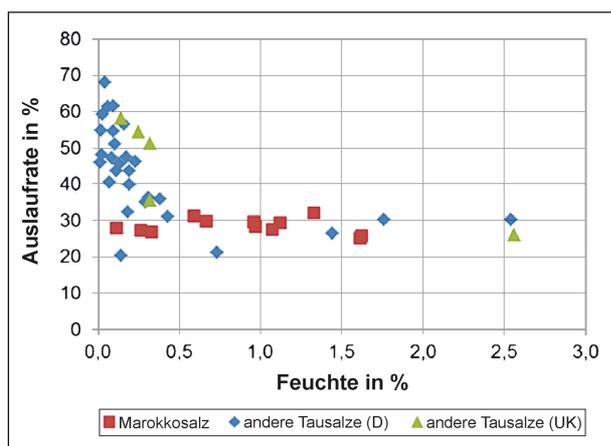
**Bild 22:** Untersuchungen zur Wiederholbarkeit der Trichterversuche (massegleiches Einfüllen; zwei Laboranten, Versuchssand, Frischgut)



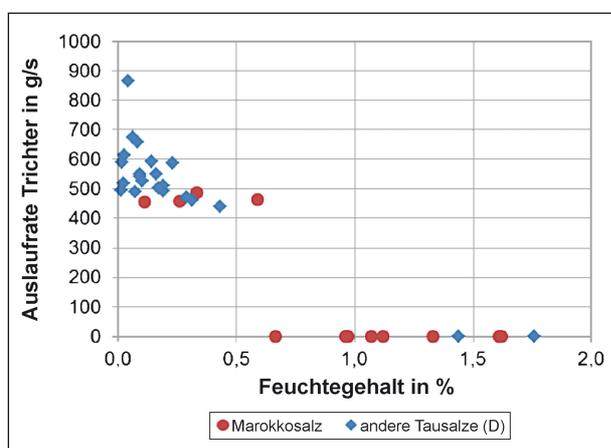
**Bild 23:** Untersuchungen zur Wiederholbarkeit der Trichterversuche (massegleiches Einfüllen; zwei Laboranten, Proben 18 und 35, Frischgut)



**Bild 24:** Auslaufrate von Trichterversuchen vs. Auslaufrate Kombibox



**Bild 25:** Auslaufrate der Kombibox in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt



**Bild 26:** Auslaufrate des Trichters in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt

Ein erheblicher Einfluss auf die Rieselfähigkeit kann der Feuchte des Salzes zugeordnet werden. Bild 25 und Bild 26 zeigen die Auslaufraten von Kombibox und Trichter in Abhängigkeit von der Feuchte der Salzproben. Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Rieselfähigkeit der Salze bereits ab einem Feuchtegehalt von ca. 0,6 % deutlich verschlechtert.

### 3.2.4 IMSE-Test

Die einfache Methode, die ohne großen gerätetechnischen Aufwand durchgeführt werden kann, wird bei der UVR-FIA GmbH standardmäßig durchgeführt, jedoch nur bei sehr feinen Pulvern. Erste Tests ergaben, dass eine Übertragung auf grobkörnige Salze nicht möglich ist, da die Salze unterschiedliche Körnungen aufweisen und es somit nicht möglich ist, eine für alle Salze einheitliche Verfahrensweise zu wählen.

## 3.3 Ergebnisse der Arbeiten in AP 2

Bei der Auswahl der Methoden zur Bestimmung der Fließfähigkeit wurden Untersuchungen zur Bestimmung der Rieselfähigkeit mittels Kombibox (Klappe und Schieber), die Bestimmung der Rieselfähigkeit mittels Trichtermethode und der IMSE-Test erprobt sowie vergleichende Untersuchungen zum einachsigen Drucktest durchgeführt. Die Eignung der Methoden ist in Tabelle 13 zusammengefasst.

Direkt ausgeschlossen werden konnten Messungen der Fließfähigkeit nach IMSE. Aussagen zur Rieselfähigkeit mit der einachsigen Drucktestmethode haben gezeigt, dass gut fließfähige Proben mit dieser Methode nicht quantifizierbar sind.

Auf die Anwendung der Kombi- bzw. Auslaufbox nach SONNTAG wurde in der Ausschreibung ausdrücklich verwiesen. Diese Methode hat sich als robuste und praktische Methode erwiesen. Es sind somit Aussagen über die Rieselfähigkeit möglich, die Rückschlüsse über das Verhalten der Salze bei Ausbringung im Streufahrzeug simulieren können. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass nur der jeweils aktuelle Zustand der Fließfähigkeit gemessen werden kann. Für die Beschreibung der Zustandsgröße Fließ- bzw. Rieselfähigkeit erscheint die Box insgesamt gut geeignet und wurde deshalb für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Mit der Trichtermethode ist es ebenfalls möglich, Aussagen über die Rieselfähigkeit von Tausalzen zu erlangen. Es ist jedoch nach bisherigem Kenntnisstand nicht sinnvoll, den minimalen Auslaufdurchmesser zur Vermeidung von Brückenbildung (und somit die Größe des Trichters) für schlecht fließfähige Tausalzproben zu definieren, da dann für die jeweiligen Messungen sehr große Probenmengen erforderlich wären. Deshalb wurde diese Methode nicht für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Vergleichende Untersuchungen mit der einachsigen Drucktestmethode wurden für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, insbesondere für gezielte Untersuchungen unter definierten klimatischen Bedingungen. Da diese Methode einen hohen gerätetechnischen Aufwand erfordert, ist sie für vergleichende Betrachtungen geeignet, nicht jedoch als einfache und robuste Praxismethode.

Einachsige Drucktestmethode	
Bewertung	Unterscheidung in „fließfähig“ und „nicht fließfähig“ möglich, Fließfähigkeit bei fließfähigen Salzproben nicht quantifizierbar, Probenpräparation erfordert Erfahrung
Auswahl	ja, für vergleichende Betrachtungen
Kombibox nach SONNTAG	
Bewertung	für die Bestimmung der Rieselfähigkeit als Zustandsgröße geeignet, sowohl „fließfähige“ als auch „nicht fließfähige“ Salze sind hinsichtlich der Fließfähigkeit quantifizierbar
Auswahl	ja
Trichterprüfmethode	
Bewertung	bei fließfähigen Proben geeignet, bei feuchten Proben besteht Gefahr der Brückenbildung → Anpassung der Trichteröffnungsweite, der Trichterneigung und somit der Trichtergröße erforderlich → große Probenmengen (unpraktisch)
Auswahl	nein
Fließfähigkeit nach IMSE	
Bewertung	aufgrund der unterschiedlichen Körnungen ungeeignet
Auswahl	nein

Tab. 13: Übersicht über die Eignung der gewählten Methoden

## 4 Verfahren zur Bestimmung der Rieselfähigkeit

### 4.1 Allgemeines

Für die Vor-Ort-Bewertung der Rieselfähigkeit hat sich die Bestimmung der Auslaufrate mittels Auslaufbox nach SONNTAG (2014) als einfache und robuste Methode erwiesen.

### 4.2 Kurzbeschreibung

Zur Quantifizierung der Rieselfähigkeit wird die mittels Auslauf- bzw. Kombibox bestimmte Auslaufrate verwendet. Sie ist als Verhältnis von ausgelaufener Masse zu Gesamtmasse definiert.

### 4.3 Geräte

- Auslaufbox (Bild 27)

Die Auslaufbox besitzt an der Stirnseite eine Klappe, die bei einer plötzlichen Öffnung den



Bild 27: Auslaufbox



Bild 28: Auslaufbox mit Einfülltrichter

Boxinhalt bis zu einem bestimmten Grad auslaufen lässt.

- Einfülltrichter (Bild 28),
- Waage, auf 1 g genau,
- Laborschaukel,
- Pinsel,
- Schalen,
- Abstreifer.

#### 4.4 Durchführung

Zur Befüllung der Box wird der zugehörige aufsetzbare Einfülltrichter genutzt. Die Befüllung mit dem zu prüfenden Tausalz sollte mittig bis zum Überlaufen erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass die Befüllung langsam und gleichmäßig erfolgt, um die Bildung von Lufteinschlüssen zu verhindern.

Nach Abnahme des Einfülltrichters wird das Prüfgut mit einem Abstreifer glatt abgezogen. Dabei ist eine Verdichtung des Materials zu vermeiden. Übergelaufenes und an der Box anhaftendes Material wird abgepinselt. Die Ermittlung der Einwaage  $m_e$  erfolgt über vorheriges Austarieren der Box und über die Bestimmung der Masse der gefüllten Box.

$$m_e = m_g - Ta$$

mit:

$m_e$  Einwaage in g oder kg

$m_g$  Gesamtmasse

$Ta$  Tara der Box

Die Box wird – mit der Klappenseite etwas über eine Kante stehend – auf eine waagerechte und erschütterungsfreie Fläche gestellt. Durch die Betätigung eines Hebels öffnet sich bei der Auslaufbox die Klappe und das Prüfgut fließt in eine Schale. Das ausgelaufene Prüfgut ist zu wiegen.

#### 4.5 Auswertung

Die ausgelaufene Masse wird zu der ursprünglich eingefüllten Gesamtmasse ins Verhältnis gesetzt und als Auslaufrate definiert.

$$A = \frac{m_a}{m_e} \times 100 \%$$

mit:

$A$  Auslaufrate in %

$m_a$  ausgelaufene Masse in g oder kg

$m_e$  Einwaage in g oder kg

Anhand der eingefüllten Gesamtmasse und dem bekannten Volumen der Box kann die Füllichte bestimmt werden, die Rückschlüsse auf die Schüttdichte ermöglicht.

Die Versuche zur Bestimmung der Auslaufrate sind bei gut fließfähigen Salzen dreimal zu wiederholen,

bei kohäsiven Salzen werden fünf Wiederholungsmessungen empfohlen. Bei starken Abweichungen ist eine weitere Wiederholungsmessung durchzuführen. Die Auslaufrate wird aus dem Mittelwert der Wiederholungsversuche bestimmt.

## 5 Probenahme und Bewertung der Verfahren zur Probenahme in Bezug auf das Verfahren zur Prüfung der Rieselfähigkeit (AP 4)

### 5.1 Ziel der Arbeiten in AP 4

Ziel des AP 4 war die Bewertung der in der TL-Streu (Anhang A1) beschriebenen Verfahren zur Probenahme in Bezug auf das Verfahren zur Prüfung der Rieselfähigkeit. Die Probenahme erfolgte analog zu DIN EN 932-1 und war mittels Probenahmebericht zu protokollieren. Der Kommentar zur TL-Streu enthält im Anhang 2 ein Beispiel für einen Probenahmebericht. Dieser beinhaltet u. a. Angaben zum Lieferanten, zur Probengröße (Sammel- und Einzelprobenmenge); der Probenahmestelle sowie den zur Probenahme verwendeten Geräten und diente als Grundlage für auszuwählende Proben. Aus den Rückmeldungen der zu Beginn kontaktierten Lieferanten war eine Auswahl an Proben zu treffen, die die Lieferanten als „gut“ bzw. „schlecht“ rieselfähig eingestuft hatten. Hersteller, Lagerdauern und Probenahmeverfahren sollten bekannt sein und sich unterscheiden. Es waren Proben von Tausalzen zu gewinnen, die ein möglichst breites Qualitäts- und Eigenschaftsniveau abdecken sowie unterschiedliche Lagerdauern bis zu drei Jahren aufweisen. Anhand der erwarteten Rückmeldungen sollte es möglich sein, Proben von mindestens zehn verschiedenen Lieferanten zu Testzwecken zu erhalten. Alle Proben waren hinsichtlich der in AP 2 ausgewählten Verfahren zur Prüfung der Rieselfähigkeit zu untersuchen. Basierend auf dem Stand der Technik waren spezifisch für Tausalzkörnungen die Sammel- und Einzelprobenmasse festzulegen. Unter Berücksichtigung allgemein verfügbarer und derzeit verwendeter Probenahmeverfahren war ein auf die Probenahmepraxis angepasster Beprobungsplan zu erstellen. Dieser sollte mit den praktischen Gegebenheiten bei kritisch und unkritisch rieselfähigem Tausalz verglichen werden. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Repräsentativität

der gewonnen Proben, da durch unterschiedliche Lagerbedingungen (z. B. Luftfeuchte, Temperatur, Haufwerkshöhe) ein deutlicher Einfluss auf die Langzeit-Rieselfähigkeit erwartet wurde.

## 5.2 Methoden der Probenahme

Eine sachgemäße Probenahme ist eine Grundvoraussetzung für ein aussagekräftiges Untersuchungsergebnis, wobei für die Durchführung unterschiedliche Verfahren zur Anwendung kommen können. Für Streusalze werden Verfahren zur Probenahme analog der DIN EN 932-1 (DIN EN 932-1, 1996) in der TL-Streu (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2003) (DIN EN 932-1, 1996) in der TL-Streu beschrieben. Für die Bearbeitung der Aufgabenstellung ist die Probenahme vom aufgeschütteten Haufen (Anhang A 1.3 der TL-Streu) von besonderem Interesse.

### 5.2.1 Probenahme mittels Probestecher

Die TL-Streu geht von einer Probenahme mittels Probenstecher aus. Dabei werden an neun Probenahmestellen Teilproben von jeweils (mindestens) 1 kg Probe entnommen und zu einer Sammelprobe von ca. 10 kg vereinigt. Sollte eine zweite Sammelprobe erforderlich sein, wird dieser Vorgang wiederholt. Dieses Probenahmeverfahren erweist sich bei verhärteten bzw. verkrusteten Haufwerken als schwierig bzw. nicht anwendbar, da zunächst die Verkrustungen der Oberfläche entfernt werden müssen. Ebenso wird die Probenahme durch Feuchtigkeit des Salzes erschwert, da das Material dann zu Verklebungen des Probenstechers neigt.

### 5.2.2 Probenahme mittels Schaufel

Nach DIN EN 932-1 (DIN EN 932-1, 1996) ist auch die Verwendung einer Probenahmeschaufel möglich. Dabei darf die Weite  $w$  der Öffnung von Geräten für die Probenahme nicht weniger als den dreifachen Durchmesser des Größtkorns des Loses betragen und in keinem Falle weniger als 10 mm (DIN EN 932-1, 1996).

### 5.2.3 Weitere Methoden

Weitere Methoden zur Probenahme (insbesondere bei verkrusteten Haufwerken) können geotechnischen Verfahren zur Entnahme von Bodenproben

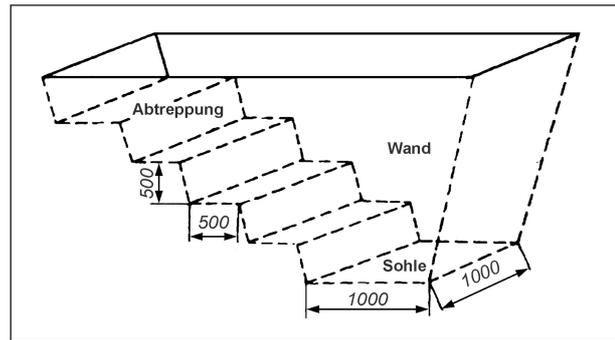


Bild 29: Prinzipskizze Schurf nach (RICHTER, 2009)

entlehnt werden. Eine Übersicht über die Verfahren findet sich in (RICHTER, 2009). Es wird in Schürfe und Bohrungen unterschieden. Schürfe sind künstliche, kostengünstige Aufschlüsse zur erdoberflächennahen Erkundung. Die Entnahme der Proben geschieht auf der Sohle, der Abtreppung oder aus der Wand (Bild 29).

Bohrungen werden nach Bohrverfahren in Trocken- und Spülverfahren unterschieden (DIN EN ISO 22475-1, 2007). Diese Verfahren spielen jedoch für die Probenahme von Tausalz keine Rolle, da sie aufwändig und kostenintensiv sind.

## 5.3 Ergebnisse der Arbeiten in AP 4

Durch die BAST erfolgten Probenahmen mittels Probenstecher (Bild 30) und mittels (kleiner) Schaufel. Bei der gemeinsamen Probenahme von BAST und UVR-FIA GmbH am 20.1.2015 wurden der Probestecher der BAST, der Probestecher der UVR-FIA GmbH (Bild 34) sowie Probeschaukeln der UVR-FIA GmbH (Bild 33) eingesetzt.

Eine gemeinsame Probenahme erfolgte in der Salzhalle Stollberg (Bild 31). Dort lagerte Salz aus Polen (Polkowice) und Deutschland (Sangerhausen), welches im Zeitraum Juli bis September 2014 durch die ASBIT Service & Produkte GmbH angeliefert wurde. Da das Salz als Schüttung in einer Halle lagert, erfolgt keine direkte Trennung. Die Salze lagen gemischt vor. Am anderen Ende der Halle befand sich noch Salz vom Vorjahr, welches von DSD aus dem Bernburger Bergwerk bezogen und ebenfalls beprobt wurde.

Die zweite gemeinsame Beprobung fand in der Salzhalle der Autobahnmeisterei Siebenlehn statt (Bild 32). Das dort lagernde Salz wurde 2014 von der Deutschen Straßen-Dienst GmbH (DSD) geliefert.



**Bild 30:** Probestecher (BAST); Probenahme Salzhalle Stollberg



**Bild 33:** Probenahme mittels Schaufel (UVR-FIA GmbH); Probenahme AM Siebenlehn



**Bild 31:** Salzhalle Stollberg



**Bild 34:** Probenahme mittels Probesteher (UVR-FIA GmbH); AM Siebenlehn



**Bild 32:** Salzhalle der AM Siebenlehn

Die Bewertung des Einflusses der Probenahme erfolgte anhand ausgewählter Korngrößenverteilungen mit den zugehörigen Auslaufraten. Tabelle 14 enthält die Zuordnungen der Proben zur Art der Probenahme.

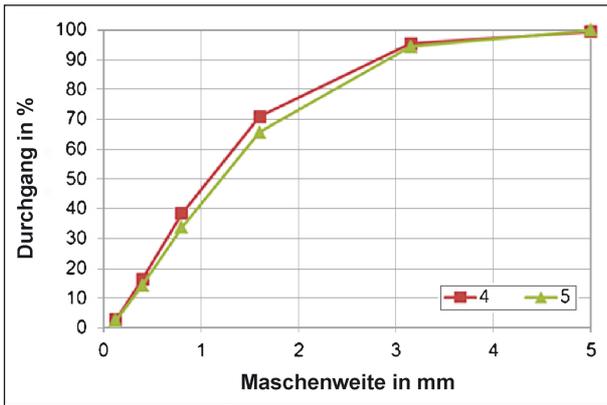
Bei der Probenahme am 7.1.2015 wurden durch die BAST Proben mit einer kleinen Schaufel und mit Probesteher genommen. Die Ergebnisse sind in Bild 35 (Korngrößenverteilung) und Bild 36 (Rieselfähigkeit anhand der Auslaufrate; jeweils 6 Einzelmessungen) dargestellt. Bei der Darstellung der Auslaufrate in Abhängigkeit von der Art der Probenahme wurde in den Diagrammen, Bilder 36, 38, 40 und 42 der Mittelwert eingetragen und der größte

Probe	Art der Probnahme
4	BAST (kleine Schaufel)
5	BAST (Probesteher)
1	3. älteste Lage (Probenahme BAST)
2	vordere 2. Lage (Probenahme BAST)
3	2. älteste Lage (Probenahme BAST)
27	UVRFIA (Probesteher senkrecht)
28	BAST (Probesteher waagrecht)
29	UVRFIA (Schaufel)
32	UVRFIA (Schaufel)
33	UVRFIA (Schaufel); (DSD-Material vom Vorjahr)
30	UVRFIA (Probesteher senkrecht)
31	UVRFIA (Schaufel)
34	BAST (Schaufel)

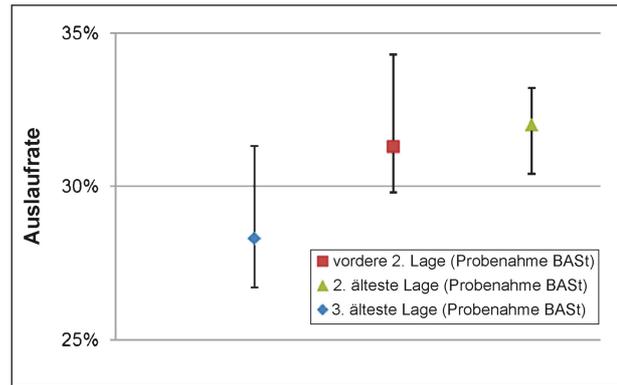
**Tab. 14:** Zuordnung der Proben zur Art der Probenahme

und kleinste Messwert anhand der Enden der Fehlerindikatoren sichtbar gemacht.

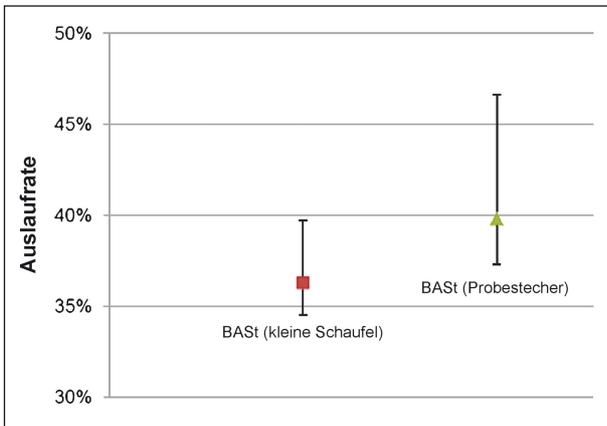
Am 14.1.2015 wurden durch die BAST in Vettelhoven Proben von verbackenen Salzen in verschiedenen Schichten genommen. Diese Proben wurden an verschiedenen Stellen herausge-



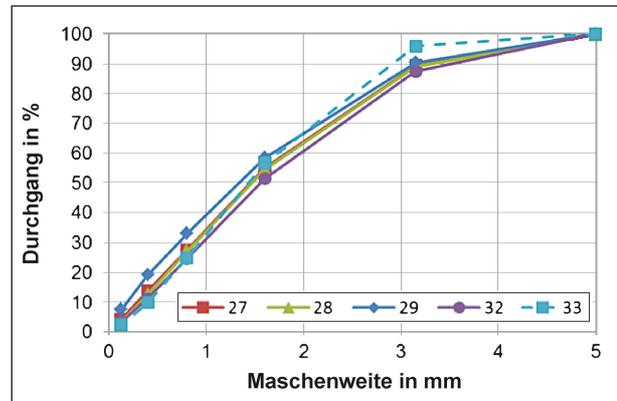
**Bild 35:** Korngrößenverteilung Probe 4 und 5 (Probenahme 7.1.2015, AM Kaarst)



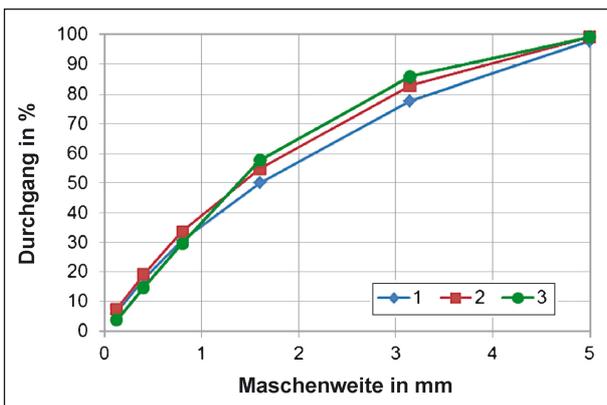
**Bild 38:** Auslaufrate-Kombibox (Probenahme 14.1.2015, Vettelhoven)



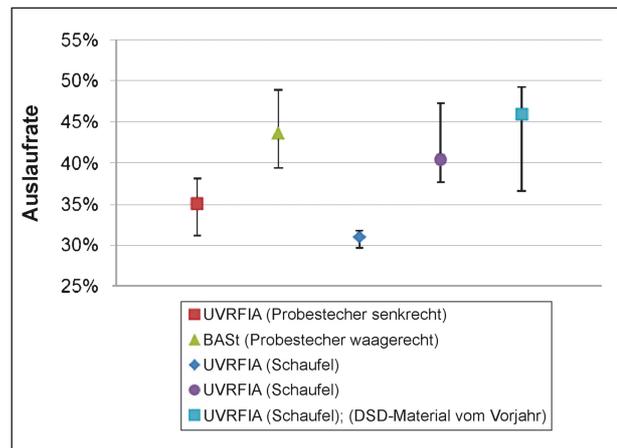
**Bild 36:** Auslaufrate-Kombibox (Probenahme 7.1.2015, AM Kaarst)



**Bild 39:** Korngrößenverteilung (Probenahme 20.1.2015, Salzhalle Stollberg)



**Bild 37:** Korngrößenverteilung (Probenahme 14.1.2015, Vettelhoven)



**Bild 40:** Auslaufrate-Kombibox (Probenahme 20.1.2015, Salzhalle Stollberg)

brochen und dabei manuell desagglomeriert. Bild 37 (Korngrößenverteilung) und Bild 38 (Rieselfähigkeit anhand der Auslaufrate; jeweils 6 Einzelmessungen) enthalten die Ergebnisse.

Die Ergebnisse der am 20.1.2015 in der Salzhalle Stollberg genommenen Proben zeigen Bild 39 (Korngrößenverteilung) und Bild 40 (Rieselfähigkeit anhand der Auslaufrate).

Bild 41 (Korngrößenverteilung) und Bild 42 (Rieselfähigkeit anhand der Auslaufrate) beinhalten die Ergebnisse der AM Siebenlehn, die ebenfalls am 20.1.2015 beprobt wurde.

Unbedingt zu beachten ist bei der Probenahme, dass an einem Lagerort oft unterschiedliche Salzlieferungen nebeneinander gelagert werden. Hier

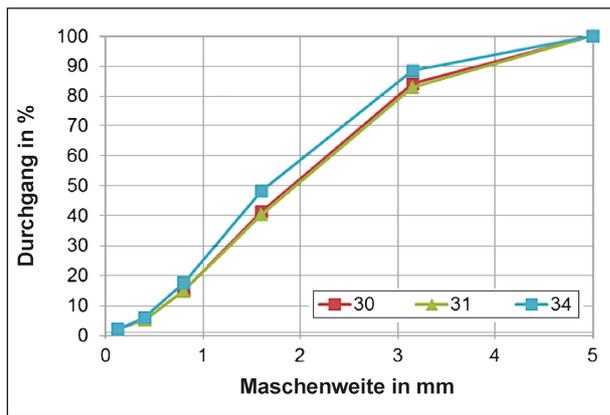


Bild 41: Korngrößenverteilung (Probenahme 20.1.2015, AM Siebenlehn)

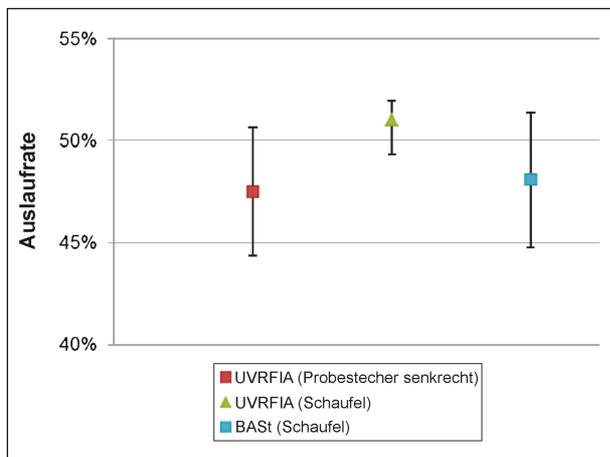


Bild 42: Auslaufrate-Kombibox (Probenahme 20.1.2015, AM Siebenlehn)

können sich naturgemäß deutlich Qualitätsunterschiede zeigen, siehe z. B. Bild 40 „DSD-Material vom Vorjahr“.

Vergleicht man die mittleren Auslaufraten für verschiedene Probenahmeverfahren, so liegen diese für ein- und dasselbe Material weitestgehend im Bereich der Messwertschwankungen (jeweils 6 Einzelmessungen). Insgesamt weisen diese Ergebnisse darauf hin, dass die Probenahme keinen signifikanten Einfluss auf das Prüfergebn hat.

Für die Probenahme von Tausalz wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Probenahme mittels Schaufel, da der Probeteiler insbesondere bei feuchten Proben aufgrund von Verklebungen weder sinnvoll befüllt noch entleert werden kann.
- Bei Aufnahme von Untersuchungen zur Rieselfähigkeit als Standardanalytik ist ein deutlich höherer Probenumfang (ca. 50 kg) nötig, sodass

auch aufgrund des Probenumfangs die Probenahme mittels Schaufel empfohlen wird. Mit dem Probeteiler gewinnt man nur kleine Einzelproben, sodass große Probemengen einen erheblichen Zeitaufwand erfordern.

Die Thematik der Probenahme wurde aufgrund einer sehr hohen Probenanzahl zugunsten der Analytik der vorhandenen Proben (AP 5) nicht vordergründig betrachtet, es wird eingeschätzt, dass weitere Untersuchungen, insbesondere für Probenahmen bei Tausalzen mit Verbackungen, sinnvoll wären.

## 6 Messreihen zur Bestimmung von Eigenschaften für Natriumchlorid zu betriebssicheren Ausbringung mit Streumaschinen nach DIN EN 15597-1 (AP 5)

### 6.1 Ziel der Arbeiten in AP 5

Tausalz muss auch nach mehreren Jahren Lagerung noch rieselfähig sein, um es mit Streumaschinen ausbringen zu können. Daraus ergibt sich die Anforderung, nicht nur die Eigenschaften von Tausalzen zum Zeitpunkt der Anlieferung zu bestimmen, sondern auch die Lagerfähigkeit zu bewerten. Derzeit fordert die TL-Streu zwar, dass Tausalz rieselfähig sein muss, ein dafür anzuwendendes Prüfverfahren ist jedoch nicht enthalten. Darüber hinaus reichen die bestehenden Anforderungen an Rieselfähigkeit, Korngröße, Feuchtegehalt und Zusatz von Antbackmittel offenbar nicht aus, um negative Veränderungen im Verlaufe der Lagerung auszuschließen. Daher sollen zusätzliche Parameter untersucht werden, die sich möglicherweise negativ auf die Lagerfähigkeit und die spätere Verarbeitung mit Streumaschinen auswirken, eine Abschätzung dieser Problematik aber bereits zum Zeitpunkt der Lieferung erlauben. Im Rahmen der Literaturanalyse sollen hierzu grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden. Infrage kommt als erstes eine nähere Charakterisierung der Korngrößenverteilung und damit im Zusammenhang stehender Größen, die über die bisherigen Anforderungen der TL-Streu hinausgeht. Neben der klassischen Siebanalyse und daraus abzuleitender Verteilungsparameter wie z. B. Mittelwert und Anstieg bieten sich hier integrale Para-

meter an, die direkt oder indirekt mit der Korngrößenverteilung im Zusammenhang stehen. Die Packungsdichte eines Schüttgutes kann als Schüttdichte und/oder Rütteldichte bestimmt werden. Dichte Packungen besitzen mehr Stützstellen zwischen den einzelnen Körnern, was sich sowohl auf die innere Reibung der Schüttung und damit die Rieselfähigkeit als auch auf eine mögliche Zeitverfestigung auswirkt. Ein weiterer Parameter könnte die spezifische Oberfläche sein. Diese steht einerseits in direktem Zusammenhang mit der z. B. durch Siebanalyse bestimmten Korngrößenverteilung, wird aber auch mehr oder weniger stark von der Kornform, von der Oberflächenrauigkeit und von anhaftenden Feinkorn beeinflusst. All diese Phänomene wirken sich wiederum auf das Fließverhalten der Körnerschüttung, auf die mögliche Bildung von Festkörperbrücken zwischen den Partikeln und damit auf die Rieselfähigkeit im Anlieferzustand und nach einer gewissen Lagerzeit aus. Neben diesen physikalischen Eigenschaften könnten aber auch im Tausalz enthaltene chemische Komponenten eine Rolle spielen, die sich bereits in geringen Mengen auf die Lagerfähigkeit von NaCl-Körnungen auswirken. Im Folgenden werden analytische Methoden zur Bestimmung und Bewertung von Tausalzeigenschaften sowie die im Rahmen der Untersuchungen erzielten Ergebnisse dargestellt.

## 6.2 Einachsige Druckversuche

### 6.2.1 Methode

Der einachsige Druckversuch wurde als vergleichende wissenschaftliche Untersuchung in das Versuchsprogramm aufgenommen (siehe auch Kapitel 2.2.1). Die Versuchsdurchführung erfolgt mittels einer bei der TU Bergakademie Freiberg standardisierten Methode. Dazu wird das Material in einen aus zwei Halbschalen bestehenden Hohlzylinder (Drucktopf) eingefüllt (Bild 43). Um die Wandreibung möglichst gering zu halten bzw. Anbackungen zu vermeiden, wird dieser Topf mit einem in Vorversuchen ermittelten Material ausgekleidet. Im Fall von Tausalzen hat sich verstärkte Aluminiumfolie als geeignet erwiesen.

Das Schüttgut wird in vertikaler Richtung belastet (Verfestigungsspannung). Durch die Wirkung der Verfestigungsspannung wird das Material sowohl verdichtet als auch verfestigt, sodass nach Ent-

fernung der beiden Halbschalen bei zu Verfestigung neigenden Materialien ein zylindrischer Prüfkörper entsteht.

Dieser Prüfkörper wird mittels Drucktest bis zum Bruch belastet (Bild 44). Dabei wird die einachsige Druckfestigkeit bei konstanter Stauchungsgeschwindigkeit und ungehinderter Seitendehnung ermittelt. Während eines Versuches ist darauf zu achten, dass der Wassergehalt des Probenkörpers möglichst unverändert bleibt. Der Versuch ist beendet, wenn der Bruch eingetreten ist, d. h. die gemessene Axialkraft nicht weiter ansteigt.



Bild 43: Drucktopf (in vertikaler Richtung belastet)



Bild 44: Prüfkörper zu Beginn des Drucktestes

## 6.2.2 Ergebnisse

Die Übersicht der Ergebnisse sind in den Anhängen V und VI enthalten. Auch hier zeigt sich, dass die Lagerung des Materials eine Veränderung der Rieselfähigkeit bewirkt. Bei den Proben 18 und 19 war eine Messung der Druckfestigkeit nach einer Lagerzeit von 24 h bei einem Großteil der Versuche weder bei gezielter Befeuchtung noch bei Änderung der Korngrößenverteilung möglich. Nach vierwöchiger Lagerung in der Klimazelle hatten sich bei allen Proben messbare Prüfkörper gebildet.

## 6.3 Bestimmung des Feuchtegehaltes

### 6.3.1 Methode

Die Bestimmung des Feuchtegehaltes wurde im Anlieferungszustand der Proben (nach Probeteilung) mittels Trockenschrankmethode entsprechend (ISO 2483:1973-01, 1973) durchgeführt. Das Prüfverfahren wurde gemäß Normentwurf (E DIN EN 16811-1:2015-02, 2014) hinsichtlich der Masse der Analysenprobe (100 g Einwaage anstelle von 10 g) modifiziert.

An ausgewählten Proben wurde der Feuchtegehalt zusätzlich mit dem Feuchtebestimmer MA 30 der Firma Sartorius ermittelt. Analog zur Trockenschrankmethode wurden die Proben bei einer Temperatur von 110 °C bis zu Massekonstanz getrocknet. Diese Schnellbestimmung wurde gleichfalls zur Messung des Feuchtegehaltes während der Bestimmungen anderer Parameter (z. B. Rieselfähigkeit, Korngrößenverteilung) angewendet. Die Werte wurden als Mittelwert aus einer Doppelbestimmung (Trockenschrankmethode) bzw. Dreifachbestimmung (Feuchtebestimmer MA 30) gebildet.

### 6.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Messwerte sind in der Übersicht in Anlage II enthalten. Anhand der Salzproben marokkanischer Herkunft ist erkennbar, dass die Lagerung des Salzes einen großen Einfluss auf den Feuchtegehalt hat. Es hat sich gezeigt, dass die Methoden der Bestimmung des Feuchtegehaltes mittels Trockenschrankmethode nach (ISO 2483:1973-01, 1973) bzw. mittels Feuchtebestimmer MA 30 vergleichbar sind (Bild 45). Die Proben, deren Feuchtegehalt mit der

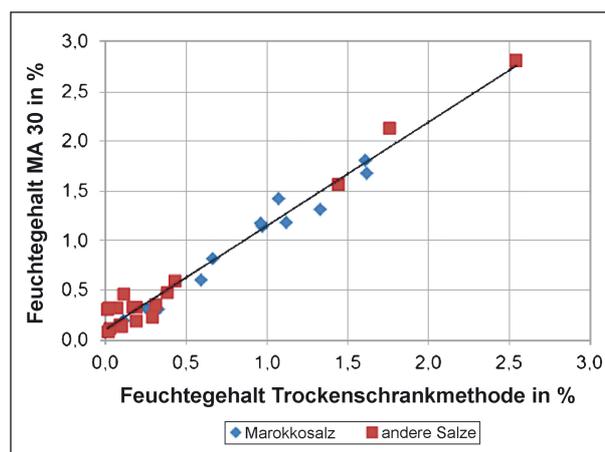


Bild 45: Vergleich der Methoden zur Bestimmung des Feuchtegehaltes

Trockenschrankmethode bestimmt wurde, wurden vor der Bestimmung des Feuchtegehaltes mittels Riffelteiler geteilt. Die Bewegung der Salze bei Raumtemperatur kann bereits zu einer Verringerung des Feuchtegehaltes (Verdunstung) führen. Damit wäre erklärbar, dass die mit dem Feuchtebestimmer MA 30 bestimmten Feuchten tendenziell über den mit der Trockenschrankmethode gemessenen liegen.

## 6.4 Bestimmung der Korngrößenverteilungen

### 6.4.1 Methode

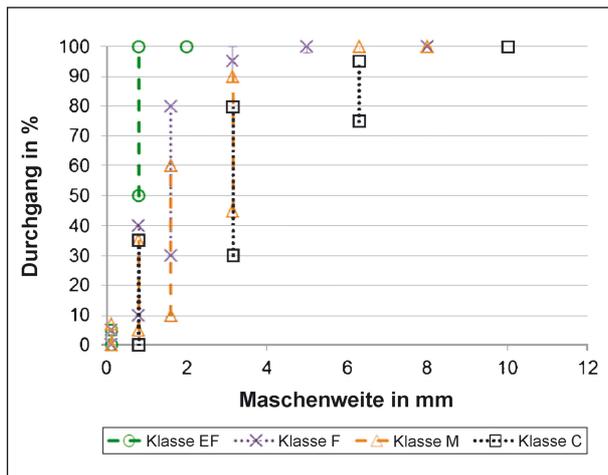
Die Korngrößenverteilungen wurden gemäß DIN 66165 Teil 1 (DIN 66165, 1987) bestimmt. Die Siebungen wurden gemäß (E DIN EN 16811-1:2015-02, 2014) an getrockneten Proben durchgeführt. Die Probenahme erfolgte durch Probeteilung mittels Riffelteiler. Für die Analysen wurde die Siebmaschine AS 200 tap der Firma Retsch verwendet (Bild 46). Es wurde mit Prüfsieben der Maschenweite 0,125 mm; 0,4 mm; 0,8 mm; 1,6 mm; 3,15 mm und 5 mm gearbeitet.

Der Normentwurf (E DIN EN 16811-1:2015-02, 2014) sieht eine Einteilung von Tausalzen in vier Kornklassen (Bild 47) vor:

- Kornklasse EF (extrafeines Salz),
- Kornklasse F (feines Salz),
- Kornklasse M (mittelgrobes Salz),
- Kornklasse C (grobes Salz).



**Bild 46:** Siebmaschine AS 200 tap der Firma Retsch (Quelle: [www.retsch.de](http://www.retsch.de))



**Bild 47:** Einteilung in Kornklassen nach (E DIN EN 16811-1:2015-02, 2014)

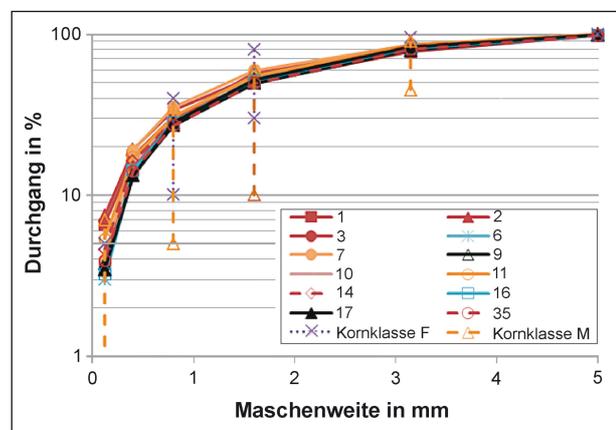
### 6.4.2 Ergebnisse

Eine Übersicht über alle Korngrößenverteilungen befindet sich in Anlage III. Die im Rahmen des Projektes untersuchten Proben entsprechen den in Tabelle 15 dargestellten Kornklassen. Vier Proben entsprachen der Kornklasse EF (extrafeines Salz), vier Proben Kornklasse F (feines Salz) und 26 Proben Kornklasse M (mittelgrobes Salz). Den Kriterien für Kornklasse C (grobes Salz) entsprach keine Probe. 12 Proben konnten keiner Kornklasse eindeutig zugeordnet werden, was vor allem auf einen zu hohen Feinkornanteil zurückzuführen ist.

Bild 48 zeigt die Korngrößenverteilungen der Salze marokkanischer Herkunft und vergleicht diese mit den Vorgaben der Kornklassen F und M. Gleiche Farben entsprechen gleichen Probenahmeorten. Um die Unterschiede im Feinkornbereich zu

Kornklasse	Proben
Kornklasse EF (extrafeines Salz)	20; 21; 22; 39
Kornklasse F (feines Salz)	4; 23; 24; 33
Kornklasse M (mittelgrobes Salz)	1; 3; 6; 8; 9; 10; 11; 13; 14; 16; 17; 19; 25; 27; 28; 30; 31; 32; 34; 35; 38; 40; 41; 42; 44; 45
Kornklasse C (grobes Salz)	-
abweichend von Klassifizierungsvorgaben	2; 5; 7; 12; 15; 18; 26; 29; 36; 37; 43; 46

**Tab. 15:** Klassifizierung der untersuchten Tausalzproben



**Bild 48:** Korngrößenverteilungen der Salze marokkanischer Herkunft

verdeutlichen, wurde die logarithmische Darstellung gewählt. Zusätzlich wurde der Durchgang bei 5 % gekennzeichnet (in Bild 48 am linken Rand erkennbar), da dieser als Grenzwert im Feinkornbereich ( $< 0,125$  mm) gilt. Die Darstellung verdeutlicht, dass sich die Proben insgesamt nur wenig unterscheiden. Unbedingt zu beachten ist allerdings der unterschiedliche Feinkornanteil, der die Rieselfähigkeit beeinflussen dürfte und bei den Proben 1, 2 und 11 auch die zulässige Grenze von 5 % überschreitet.

Die Korngrößenverteilungen der bei Probenahmen durch die BAST und die UVR-FIA GmbH genommenen Tausalzproben sind in Bild 49 bis Bild 52 dargestellt. Auch hier entsprechen gleiche Farben dem gleichen Probenahmeort. In alle Diagramme wurden die Grenzwerte für Kornklassen F und M eingetragen. Bild 49 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilungen der am 7.1.2015 im Salzlager in Grevenbroich (Proben 7, 11, 12 und 13) sowie der Salzhalle Holzheim der Autobahnmeisterei Kaarst (Proben 4, 5, 6 und 16) durchgeführten Probenahme. Bei den Proben 6, 7,

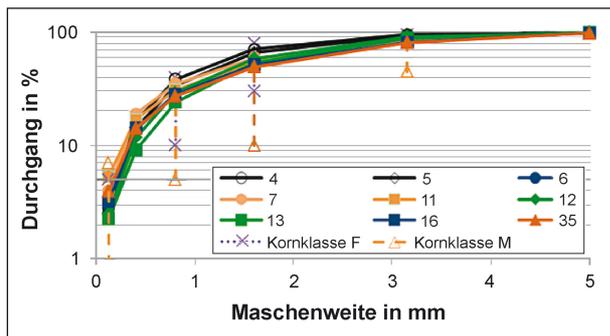


Bild 49: Korngrößenverteilungen Tausalz (Probenahme vom 7.1.2015)

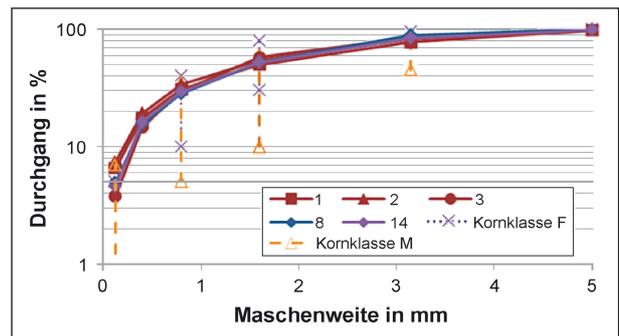


Bild 51: Korngrößenverteilungen Tausalz (Probenahme vom 9.1.2015)

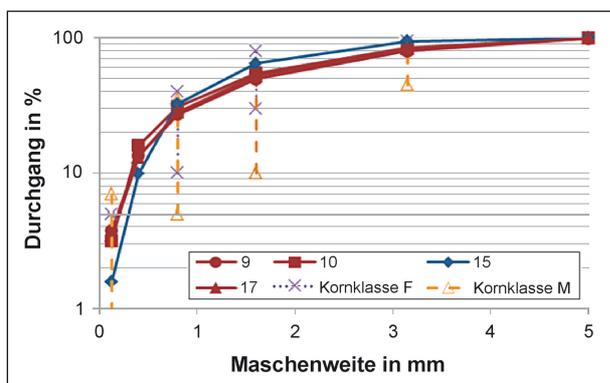


Bild 50: Korngrößenverteilungen Tausalz (Probenahme vom 14.1.2015)

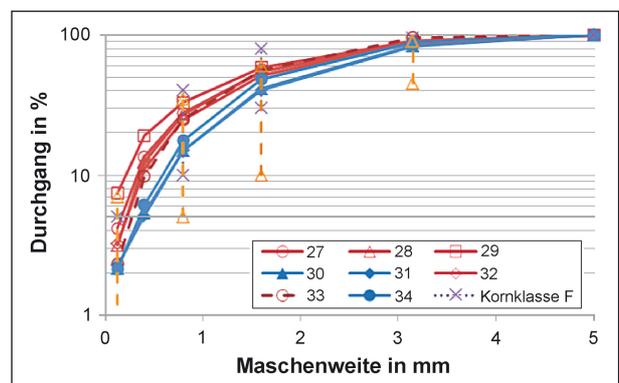


Bild 52: Korngrößenverteilungen Tausalz (Probenahme vom 20.1.2015)

11 und 16 handelt es sich um Salze marokkanischer Herkunft, die Proben 4, 5, 12 und 13 entstammen einer DSD-Lieferung. Die Korngrößenverteilung von Probe 35 wurde ebenfalls in dieses Diagramm aufgenommen. Dabei handelt es sich um eine am 3.2.2015 in Grevenbroich entnommene größere Big-Bag-Probe (ca. 750 kg) von marokkanischem Salz.

Bei den Probenahmen am 9.1.2015 wurden verschiedene Proben von Tausalz marokkanischer Herkunft (Proben 9, 10 und 17) sowie eine Probe aus einer DSD-Lieferung (Probe 15) genommen. Die Korngrößenverteilungen der Proben sind in Bild 50 dargestellt.

Am 14.1.2015 wurden die Salzhalle Vettelhoven (Proben 1, 2 und 3) sowie die AM Mendig (Proben 8 und 14), die mit Salz der Salzhalle Vettelhoven beliefert wurde, beprobt (Bild 51). Bei Probe 8 handelt es sich um vermutlich seit 2011 gelagertes Material, dessen Herkunft nicht eindeutig geklärt ist, die anderen Proben sind Tausalze marokkanischer Herkunft.

Am 20.1.2015 erfolgte eine gemeinsame Probenahme durch die BAST und die UVR-FIA GmbH.

Dabei wurden die Salzhalle Stollberg und die AM Siebenlehn beprobt (Bild 52). In der Salzhalle Stollberg lagerten Salze aus Polkowice und Sangerhausen, eine eindeutige Zuordnung war nicht mehr möglich. Vermutlich enthält Probe 29 einen hohen Anteil an Polkowicer Salz, da dieses als „sehr feines“ Salz beschrieben wurde. In der AM Siebenlehn lagerte Tausalz, welches aus einer DSD-Lieferung stammt.

## 6.5 Bestimmung der Rieselfähigkeit mittels Kombi-/Auslaufbox

### 6.5.1 Methode

Die Rieselfähigkeit wurde mittels Kombibox-Klappe bestimmt nach dem in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren durchgeführt.

### 6.5.2 Untersuchungen der Proben

Die Bestimmung der Rieselfähigkeit wurde an 45 der 46 angelieferten Proben durchgeführt. Je nach Probenmenge fanden drei bis fünf Wiederholungsmessungen statt. Von Probe 45 stand nicht

Probe	Auslaufrate in %	Feuchtegehalt in Ma.-%	Anteil < 0,125 mm in %
1	28,3	1,1	6,6
2	31,3	0,6	7,5
3	32,0	1,3	3,8
6	29,4	1,2	3,0
7	27,2	0,3	4,0
9	25,2	1,8	3,8
10	27,5	1,4	3,2
11	27,9	0,2	5,3
14	29,7	0,8	4,6
16	29,6	1,2	3,2
17	25,8	1,7	3,5
35	26,9	0,3	3,9

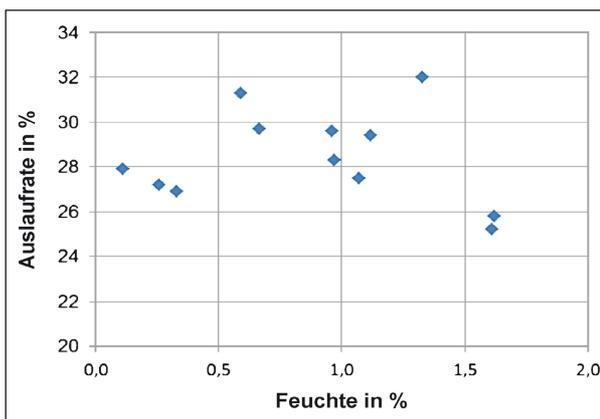
**Tab. 16:** Auslaufrate, Feuchtegehalt und Anteil < 0,125 mm der Salzproben marokkanischer Herkunft

genügend Material für diese Untersuchung zur Verfügung. Die Ergebnisübersicht befindet sich in Anlage II.

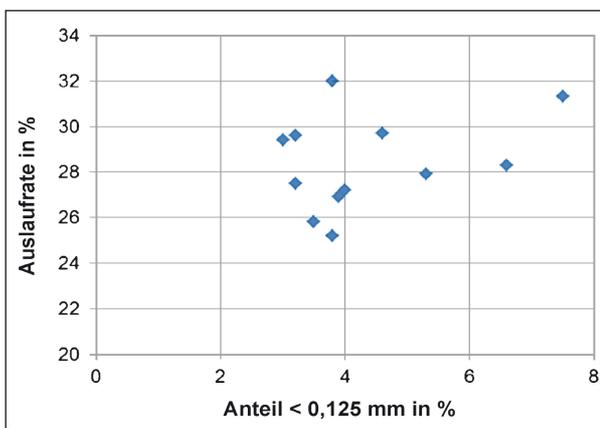
Das Salz marokkanischer Herkunft wurde an verschiedenen Stellen beprobt. Diese Proben zeigen auch bei der Bestimmung der Rieselfähigkeit unterschiedliche Ergebnisse.

Tabelle 16 liefert eine Übersicht über die mittels Kombibox bestimmte Auslaufrate für die Salzproben marokkanischer Herkunft sowie die entsprechenden Feuchtegehalte im Anlieferungszustand und den mittels Siebanalyse bestimmten Anteil kleiner 0,125 mm.

Die Ursache für die Unterschiede in den Ergebnissen wurde in den Abhängigkeiten vom Feuchtegehalt (Bild 53) oder vom Feinanteil (Bild 54) vermutet, konnte jedoch im Fall der marokkanischen Salzproben nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise kommen hier noch zusätzliche Einflüsse wie die Oberflächenbeschaffenheit der Salzpartikel und/oder der Antbackmittelgehalt zum Tragen.



**Bild 53:** Untersuchung der Abhängigkeit der Auslaufrate vom Feuchtegehalt bei Salzproben marokkanischer Herkunft



**Bild 54:** Untersuchung der Abhängigkeit der Auslaufrate vom Feinanteil (< 0,125 mm) bei Salzproben marokkanischer Herkunft

Die Übersicht in Tabelle 17 zeigt Auslaufraten, Feuchtegehalte und Feinkornanteile < 0,125 mm für die Salzproben nicht-marokkanischer Herkunft.

Bei diesen Proben ist die erwartete Abhängigkeit der Auslaufrate vom Feuchtegehalt (Bild 55) und dem Feinkornanteil (Bild 56) ersichtlich. Bei der Probe, die mit roter Markierung in Bild 55 dargestellt ist, handelt es sich nicht um ein handelsübliches Salz sondern um ein projektspezifisch präpariertes „schlecht fließendes“ Salz mit hohem Feinkornanteil und ohne Trennmittel (Probe 22).

Die Auslaufraten von Salz marokkanischer und nichtmarokkanischer Herkunft sind in Bild 25 in einem Diagramm gemeinsam dargestellt.

Probe	Auslaufrate in %	Feuchtegehalt in Ma.-%	Anteil < 0,125 mm in %
4	36,3	0,31	2,8
5	39,8	0,19	2,5
8	30,3	1,76	4,9
12	59,2	0,03	2,5
13	54,7	0,01	2,3
15	26,5	1,44	1,6
18	54,6	0,09	1,1
19	30,3	2,54	3,4
20	68,0	0,04	0,2
21	47,2	0,08	2,3
22	20,3	0,14	11,9
23	46,1	0,23	1,9
24	61,3	0,06	1,4
25	56,5	0,16	0,7
26	61,5	0,09	0,6
27	35,1	0,29	4,2
28	43,6	0,19	3,2
29	31,0	0,43	7,4
30	47,5	0,17	2,2
31	51,0	0,10	2,3
32	40,5	0,07	3,2
33	45,9	0,01	2,3
34	48,1	0,02	2,1
36	43,6	0,11	2,2
37	35,9	0,38	3,0
38	21,2	0,73	3,3
39	45,6	0,13	2,0
40	32,4	0,18	5,3
41	54,4	0,25	1,6
42	51,3	0,32	5,8
43	58,1	0,14	5,0
44	26,0	2,56	2,5
45	-	0,07	3,3
46	35,5	0,32	5,7

Tab. 17: Auslaufrate, Feuchtegehalte und Anteil < 0,125 mm der Salzproben nicht-marokkanischer Herkunft

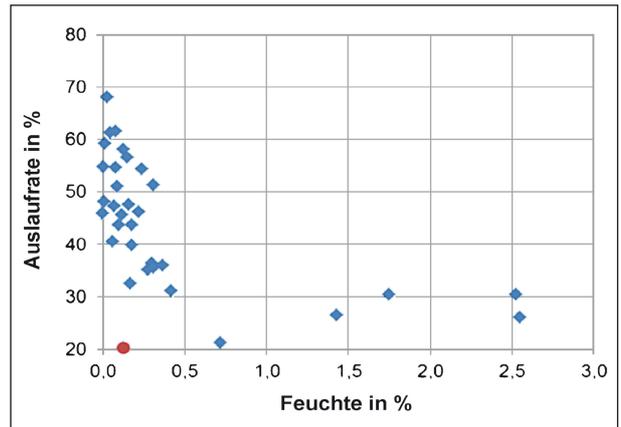


Bild 55: Untersuchung der Abhängigkeit der Auslaufrate vom Feuchtegehalt bei Salzproben nicht-marokkanischer Herkunft

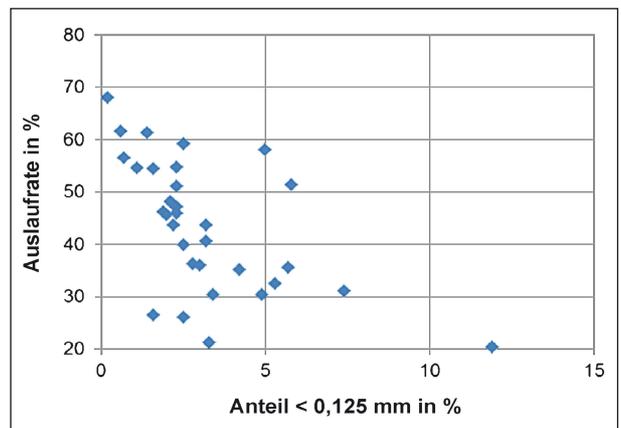


Bild 56: Untersuchung der Abhängigkeit der Auslaufrate vom Feinanteil (< 0,125 mm) bei Salzproben nicht-marokkanischer Herkunft

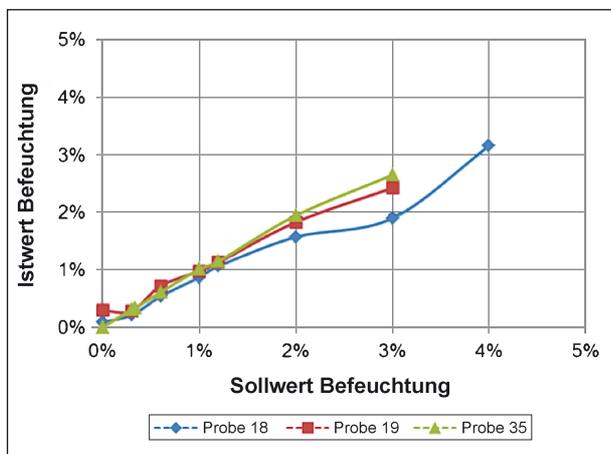
### 6.5.3 Untersuchungen zum Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Rieselfähigkeit

Um den Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Rieselfähigkeit zu untersuchen, wurde ein Teil der Proben 18, 19 und 35 getrocknet und anschließend gezielt befeuchtet. Die Probentrocknung fand im Trockenschrank bei einer Temperatur von 110 °C statt. Anschließend wurde das getrocknete Salz in ein Kunststofffass gefüllt. In das Kunststofffass wurde die der Zielfeuchte entsprechende Menge Wasser gegeben. Anschließend wurden Salz und Wasser 10 min mittels Rollbock in 10 kg Chargen vermischt und mindestens 16 h im verschlossenen Fass belassen, da dadurch die beste Homogenisierung erzielt werden konnte. Der Feuchtegehalt wurde im Bereich bis 3 % variiert (4 % bei Probe 18).

Bild 57 zeigt den Vergleich der berechneten und der gemessenen Zielfeuchten. Mit steigenden Wassergehalten weichen die berechneten und die gemessenen Zielfeuchten voneinander ab. Das gilt insbesondere für Probe 18, die eine geringere Wasseraufnahmefähigkeit als die beiden anderen Proben zeigt. Die Ursache hierfür konnte bislang noch nicht hinreichend geklärt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte am Material im Anlieferzustand sind in Tabelle 18 bis Tabelle 20 sowie Bild 58 dargestellt. Jeder Messpunkt stellt den Mittelwert aus 10 Wiederholungsmessungen dar. Eine Abbildung von je einem Versuch pro Messreihe ist in Anlage XI zu sehen. Die Auslaufraten sind im getrockneten Zustand des Salzes nahezu identisch. Erwartungsgemäß verschlechtert sich die Rieselfähigkeit der Salze mit zunehmendem Wassergehalt. Es erfolgt eine asymptotische Annäherung an einen Endwert der Auslaufrate. Bei Probe 18, einem „gut fließenden“ Salz, liegt dieser bei einer Auslaufrate von ca. 30 %, ebenso bei Probe 19 (Meersalz). Bei Probe 35, einem „schlecht fließenden“ Salz, verschlechtert sich die Auslaufrate bereits bei deutlich geringeren Feuchtegehalten und sinkt auf eine Auslaufrate unter 25 %.

Um zu prüfen, ob sich das Salz während des Trocknungs- und Befeuchtungsprozesses verändert, wurden die mit 2 % befeuchteten Proben 18 und 35 im Anschluss an die Bestimmung der Rieselfähigkeit mittels Auslaufbox erneut getrocknet. Von diesen Proben wurde ebenfalls die Auslaufrate bestimmt, die Ergebnisse sind in den jeweiligen Tabellen kursiv geschrieben und grau hinterlegt.



**Bild 57:** Vergleich der berechneten (Sollwert) und gemessenen (Istwert) Zielfeuchten

Probe 18			
Feuchtegehalt		Auslaufrate	Fülldichte
berechnet	gemessen	in %	in kg/l
0,0 %	0,1 %	60,2	1,20
0,3 %	0,2 %	53,9	1,15
0,6 %	0,5 %	37,2	1,07
1,0 %	0,9 %	34,8	1,05
1,2 %	1,1 %	33,9	1,04
2,0 %	1,6 %	30,8	1,04
3,0 %	1,9 %	30,7	1,05
4,0 %	3,2 %	30,7	1,06
0,0 %	0,2 %	59,7	1,11

**Tab. 18:** Ergebnisse der Befeuchtungsversuche (Probe 18, angelieferte Probe)

Probe 19			
Feuchtegehalt		Auslaufrate	Fülldichte
berechnet	gemessen	in %	in kg/l
0,0 %	0,2 %	53,5	1,14
0,3 %	0,3 %	46,7	1,18
0,6 %	0,7 %	40,7	1,15
1,0 %	1,0 %	37,2	1,13
1,2 %	1,1 %	37,5	1,10
2,0 %	1,8 %	32,1	1,05
3,0 %	2,4 %	32,1	1,03

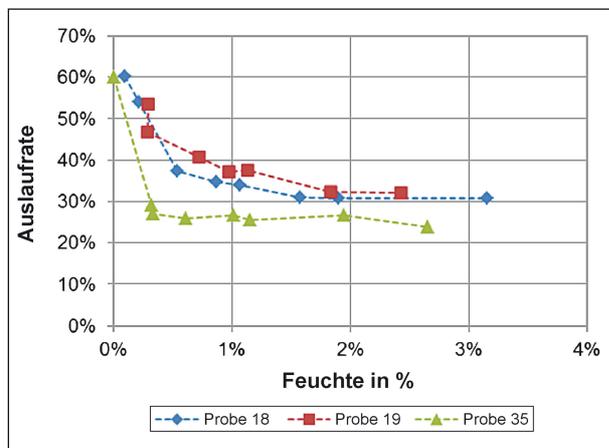
**Tab. 19:** Ergebnisse der Befeuchtungsversuche (Probe 19, angelieferte Probe)

Probe 35			
Feuchtegehalt		Auslaufrate	Fülldichte
berechnet	gemessen	in %	in kg/l
0,0 %	0,0 %	60,0	1,27
0,3 %	0,3 %	29,0	1,18
0,6 %	0,6 %	25,8	1,13
1,0 %	1,0 %	26,6	1,09
1,2 %	1,2 %	25,5	1,08
2,0 %	1,9 %	26,6	1,06
3,0 %	2,7 %	23,9	1,03
0,0 %	0,2 %	60,8	1,11

**Tab. 20:** Ergebnisse der Befeuchtungsversuche (Probe 35, angelieferte Probe)

Während die Auslaufrate ungefähr mit dem Ausgangswert übereinstimmt, hat sich die Fülldichte in beiden Fällen verringert. Vermutlich wurden nicht alle Agglomerate, die bei der erneuten Trocknung entstanden sind, komplett aufgelöst.

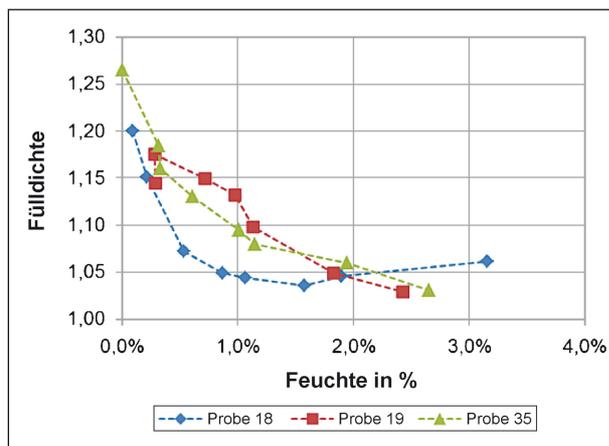
Bei der Beobachtung der Versuche zur Rieselfähigkeit erschien das Salz bei Auslaufraten < 30 % als schlecht rieselfähig (z. B. mit Abbruchkanten, verschmieren an den Wänden wegen des Wassergehalts). Ab einer Auslaufrate von 45 % wirkte das Fließen „sehr fließend“. Für eine bessere verbale Verständigung wird deshalb eine Einteilung der



**Bild 58:** Auslaufrate in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei Proben 18-19-35 (nicht fraktioniert)

Rieselfähigkeit	Auslaufrate
schlecht rieselfähig	< 30 %
rieselfähig	30-45 %
gut rieselfähig	> 45 %

**Tab. 21:** Einteilung der Rieselfähigkeit von Tausalz



**Bild 59:** Fülldichten in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei Proben 18-19-35 (nicht fraktioniert)

Salze nach ihrer Rieselfähigkeit in „schlecht rieselfähig“, „rieselfähig“ und „gut rieselfähig“ entsprechend Tabelle 21 vorgeschlagen. Die dort angegebenen Bereiche für die Auslaufraten sollten noch in der Praxis überprüft und auf das Ausbringen der Tausalze mit unterschiedlichen Streufahrzeugen angepasst werden.

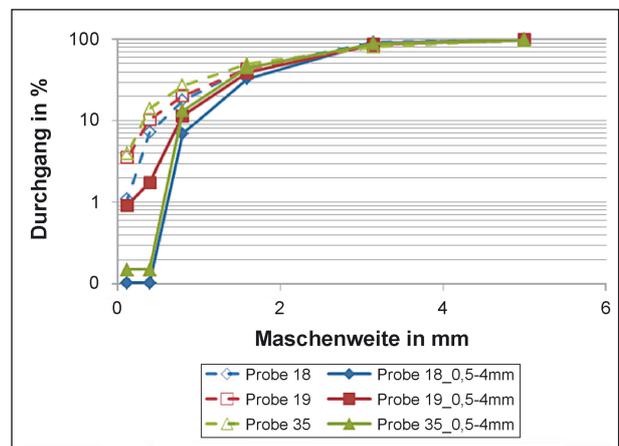
Die Betrachtung der Fülldichten in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (Bild 59) zeigt, dass sich die Fülldichten mit zunehmendem Wassergehalt verringern. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich die innere Reibung erhöht und die optimale Packungsdichte nicht mehr erreicht wird.

### 6.5.4 Untersuchungen zum Einfluss von Feuchtegehalt und Korngrößenverteilung auf die Rieselfähigkeit

Für Untersuchungen zum Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Rieselfähigkeit wurden an den Proben 18, 19 und 35 Versuche mit definierten Körnungen durchgeführt. Zunächst wurden die Proben getrocknet, anschließend durch Fraktionierung mittels Kastensiebmaschine der Fein- und der Grobanteil abgetrennt. Damit wurden Salze mit einer Körnung 0,5-4,0 mm hergestellt.

Bild 60 zeigt die Korngrößenverteilungen der durch Fraktionierung 0,5-4 mm entstandenen Salze im Vergleich zu den Ausgangsproben. Es wurde ebenfalls die logarithmische Darstellung gewählt, um insbesondere die Unterschiede im Feinkornbereich verstärkt sichtbar zu machen.

Die fraktionierten Proben wurden in getrocknetem Zustand sowie nach gezielter Befeuchtung (0,6 % und 2 %) mittels Kombibox-Klappe hinsichtlich der

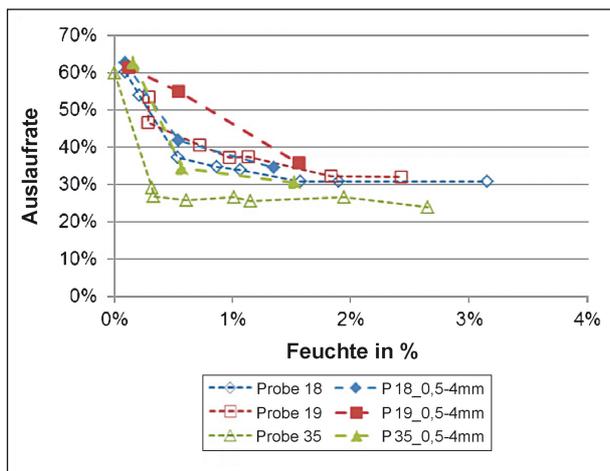


**Bild 60:** Korngrößenverteilungen der fraktionierten Proben (0,5-4 mm) im Vergleich zu den Ausgangsproben

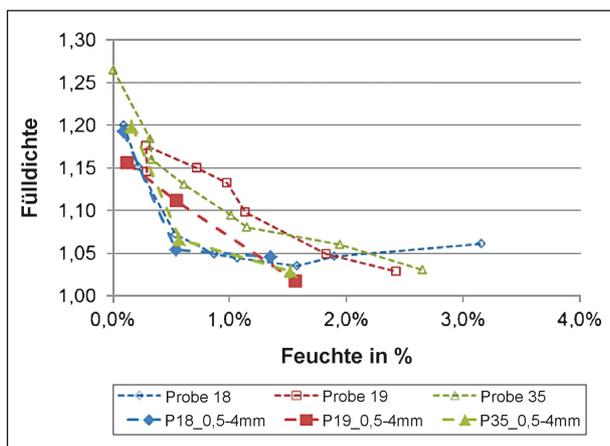
Auslaufrate untersucht. Die in Bild 61 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die um Feingut (< 0,5 mm) und Grobgut (> 4 mm) reduzierten Proben bei gleichen Feuchten erwartungsgemäß eine höhere Auslaufrate haben. Die Messergebnisse aller drei Proben fallen insgesamt sehr ähnlich aus, außer im Übergangsbereich um 0,6 % Feuchtegehalt, wo sich offenbar geringe andere Ursachen stark auf den Messwert der Auslaufrate auswirken. Da innerhalb dieses Projektes nur drei Feuchten untersucht wurden, lassen sich keine gesicherten Rückschlüsse auf mögliche Einflüsse ziehen.

Gleichzeitig bewirkt der fehlende Feinkornanteil eine Verringerung der Fülldichte der Salzproben (Bild 62).

In weiteren Untersuchungen wurden Mischungen aus einzelnen Fraktionen hergestellt. Dazu erfolgten Fraktionierungen mittels Kastensiebmaschine mit Sieben der Maschenweiten 0,5 mm; 1 mm;



**Bild 61:** Auslaufrate der fraktionierten Proben (0,5-4 mm) im Vergleich zu den Ausgangsproben



**Bild 62:** Fülldichten der fraktionierten Proben (0,5-4 mm) im Vergleich zu den Ausgangsproben

2 mm, 3,15 mm und 4 mm. Mischung 1 enthält einen hohen Feingutanteil < 0,5 mm, bei Mischung 2 wurde dieser Feingutanteil entfernt. Die Zusammensetzungen der Mischungen sind in Tabelle 22 enthalten.

Bild 63 zeigt die Korngrößenverteilung von Mischung 1, die im Vergleich zur Ausgangsprobe feiner ist.

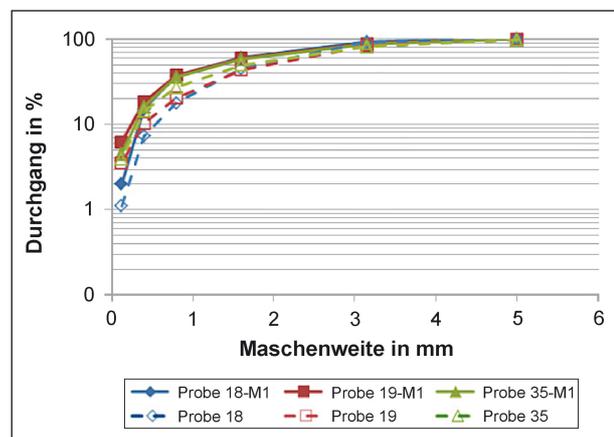
Bild 64 zeigt die im Vergleich zur Ausgangsprobe gröbere Korngrößenverteilung von Mischung 2.

An den Mischungen 1 und 2 der Proben 18, 19 und 35 wurden die Auslaufraten sowohl am getrockneten Material als auch bei einem Feuchtegehalt von 0,6 % bestimmt.

Tabelle 23 (Probe 18), Tabelle 24 (Probe 19) und Tabelle 25 (Probe 35) enthalten die Ergebnisse der Untersuchungen der Auslaufrate zum Einfluss der Feuchte an den fraktionierten Proben 0,5-4 mm sowie an Mischung 1 und Mischung 2. In den Tabellen sind auch die Differenzen der Auslaufrate im Vergleich zum Ausgangsmaterial angegeben. Anlage XII enthält jeweils ein Versuchsfoto.

Maschenweite in mm	Mischung 1	Mischung 2
< 0,5	20 %	-
0,5-1	20 %	5 %
1-2	20 %	30 %
2-3,15	20 %	35 %
3,15-4	20 %	20 %
> 4	-	10 %
gesamt	100 %	100 %

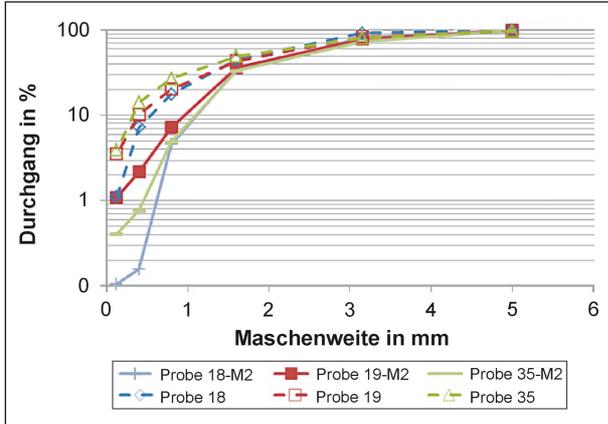
**Tab. 22:** Zusammensetzung der Mischungen 1 und 2



**Bild 63:** Korngrößenverteilungen der fraktionierten Proben (Mischung 1) im Vergleich zu den Ausgangsproben

Bei der fraktionierten Probe (0,5-4 mm) zeigt sich, dass im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen die Veränderung bei einem Feuchtegehalt von

0,6 % die größte Differenz im Vergleich zur Ausgangsprobe auftritt. Für die Mischungen 1 und 2 liegen keine Messwerte mit einem Feuchtegehalt > 0,6 % vor.



**Bild 64:** Korngrößenverteilungen der fraktionierten Proben (Mischung 2) im Vergleich zu den Ausgangsproben

Bild 65 (Probe 18), Bild 66 (Probe 19) und Bild 67 (Probe 35) zeigen die Auslaufrate bei unterschiedlichen Korngrößenverteilungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Für alle Proben gilt, dass sich die Auslaufrate verbessert, wenn der Feinkornanteil reduziert wird. Ein erhöhter Feinkornanteil führt zu einer Verschlechterung der Auslaufrate. Bei den untersuchten Proben wirkte sich der Feuchtegehalt auch bei nahezu identischer Korngrößenverteilung in unterschiedlichem Maß aus.

Bei Probe 18 (Bild 65, Tabelle 18) traten im Rahmen der Untersuchungen die geringsten Änderungen der Auslaufrate bei Variation von Korngrößenverteilung und Feuchte auf. Die Auslaufrate des

KGV	Probe 18 (0,5-4 mm)			
	Feuchtegehalt		Auslaufrate	
	berechnet	gemessen		Differenz*
0,5-4 mm	0,0 %	0,1 %	62,7 %	+2,5 %
	0,6 %	0,5 %	41,9 %	+4,7 %
	2,0 %	1,4 %	34,6 %	+3,8 %
Mischung 1	0,0 %	0,0 %	58,6 %	-1,6 %
	0,6 %	0,6 %	32,5 %	-4,7 %
Mischung 2	0,0 %	0,0 %	62,1 %	+1,9 %
	0,6 %	0,5 %	40,5 %	+3,3 %

\* Gemeint ist die Differenz zur Auslaufrate der jeweiligen ungesiebten Probe

**Tab. 23:** Ergebnisse der Befeuchtungsversuche (Probe 18)

KGV	Probe 35 (0,5-4 mm)			
	Feuchtegehalt		Auslaufrate	
	berechnet	gemessen		Differenz*
0,5-4 mm	0,0 %	0,2 %	62,8 %	+2,7 %
	0,6 %	0,6 %	34,4 %	+8,6 %
	2,0 %	1,5 %	30,6 %	+4,0 %
Mischung 1	0,0 %	0,0 %	54,8 %	-5,2 %
	0,6 %	0,6 %	23,0 %	-2,8 %
Mischung 2	0,0 %	0,0 %	61,2 %	+1,2 %
	0,6 %	0,6 %	39,0 %	+13,2 %

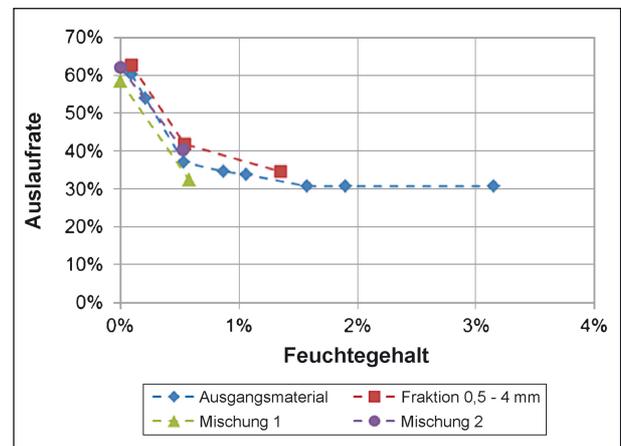
\* Gemeint ist die Differenz zur Auslaufrate der jeweiligen ungesiebten Probe

**Tab. 25:** Ergebnisse der Befeuchtungsversuche (Probe 35)

KGV	Probe 19 (0,5-4 mm)			
	Feuchtegehalt		Auslaufrate	
	berechnet	gemessen		Differenz*
0,5-4 mm	0,0 %	0,1 %	61,4 %	+8,0 %
	0,6 %	0,5 %	55,0 %	+14,4 %
	2,0 %	1,6 %	35,7 %	+3,6 %
Mischung 1	0,0 %	0,0 %	49,6 %	-3,9 %
	0,6 %	0,6 %	30,1 %	-10,6 %
Mischung 2	0,0 %	0,0 %	59,7 %	+6,2 %
	0,6 %	0,6 %	55,2 %	+14,5 %

\* Gemeint ist die Differenz zur Auslaufrate der jeweiligen ungesiebten Probe

**Tab. 24:** Ergebnisse der Befeuchtungsversuche (Probe 19)

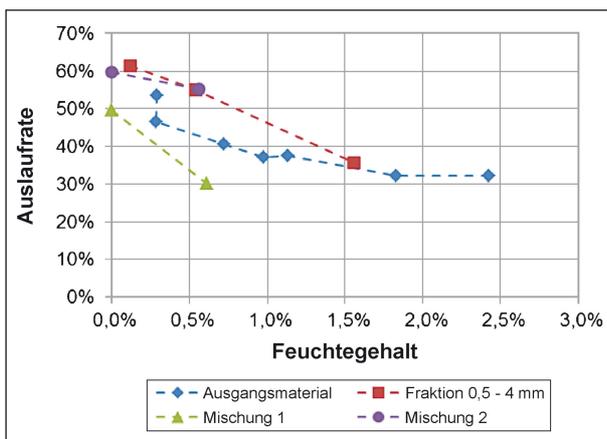


**Bild 65:** Übersicht Befeuchtungsversuche und Variation der Korngrößenverteilung bei Probe 18

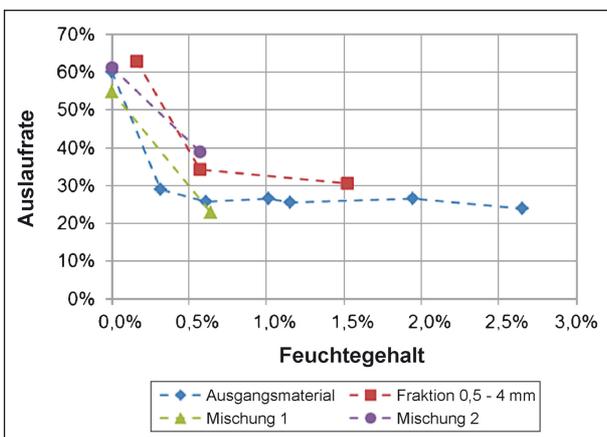
Ausgangsmaterials nähert sich exponentiell einem Wert von 30 % an, bei theoretischen Feuchtegehalten ab 2 % ist keine Änderung mehr zu verzeichnen.

Probe 19 (Bild 66, Tabelle 24) zeigt die größten Änderungen der Auslaufrate bei Variation von Korngrößenverteilung und Feuchte. Bei dieser Probe handelt es sich um Meersalz, welches im Anlieferungszustand auch bei einem Feuchtegehalt von ca. 2 % noch rieselfähig war. Das ist möglicherweise auf die Kornform und/oder Oberflächenbeschaffenheit des Meersalzes zurückzuführen.

Probe 35 (Bild 67, Tabelle 25) zeigt im Anlieferungszustand die größten Auswirkungen des Feuchtegehaltes auf die Rieselfähigkeit. Bereits bei einem Feuchtegehalt von 0,3 % verringert sich die Auslaufrate von 60 % (gemessen in getrocknetem Zustand) auf unter 30 %. Die Entfernung des Feingutanteils bewirkt eine deutliche Verbesserung der Auslaufrate.



**Bild 66:** Übersicht Befeuchtungsversuche und Variation der Korngrößenverteilung bei Probe 19



**Bild 67:** Übersicht Befeuchtungsversuche und Variation der Korngrößenverteilung bei Probe 35

Sowohl Feuchtegehalt als auch die Korngrößenverteilung haben einen entscheidenden Einfluss auf die Rieselfähigkeit. Es hat sich jedoch gezeigt, dass es nicht die einzigen Einflussgrößen sind. Naheliegender ist, dass auch die Kornform einen wesentlichen Einfluss auf die Rieselfähigkeit hat (Robert Michels, ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf, 2014). Anlage X enthält mikroskopische Aufnahmen von Ausgangsmaterial und fraktioniertem Material. Probe 18 und Probe 35 enthalten kantige Partikel, während Probe 19 (Meersalz) eher glatte, abgerundete Partikel zeigt. In der Fraktion 1-2 mm ist erkennbar, dass Probe 18 im Vergleich zu Probe 35 klarere Salzkristalle enthält.

Es wird unbedingt empfohlen, die Form und Oberflächenbeschaffenheit der Salzkörner in zukünftige Untersuchungen einzubeziehen. Dafür dürften sich insbesondere fotooptische Methoden eignen, z. B. der Partikelanalysator CPA von Haver & Boeker.

### 6.5.5 Untersuchungen zum Lagerverhalten

Zum Nachweis des Lagerverhaltens wurden verschiedene Versuche gemacht.

Zunächst wurden für die Proben 18, 19 und 35 drei Auslaufboxen für jeweils eine Woche an unterschiedlichen Orten innerhalb der UVR-FIA GmbH gelagert. Bei „Raum 1“ handelt es sich um ein helles Labor in der 2. Etage der UVR-FIA GmbH, „Raum 2“ ist ein Labor im Erdgeschoss mit wenig Sonneneinstrahlung und „Raum 3“ ist ein geschlossener Kellerraum ohne Tageslicht. Während der Lagerung wurde die Luftfeuchte an den Werktagen jeweils vormittags und nachmittags gemessen. Nach einer Woche wurde die Rieselfähigkeit mittels Auslaufbox bestimmt.

Bild 68 zeigt die Ergebnisse des Einflusses unterschiedlicher Lagerbedingungen auf die Rieselfähigkeit der untersuchten Tausalzproben. Deutlich erkennbar ist, dass unterschiedliche Lagerbedingungen bereits innerhalb einer Woche einen großen Einfluss auf Probe 35 haben.

Da die Proben kapazitätsbedingt nacheinander (in drei aufeinanderfolgenden Wochen) gemessen wurden, ist eine direkte Vergleichbarkeit nicht möglich. Tabelle 26 zeigt die innerhalb der jeweiligen Lagerung mit einem digitalen Hygrometer gemessenen Minimal- und Maximalwerte der Luftfeuchte.

Für eine direkte Vergleichbarkeit und für einen Test der Hygroskopizität wurden deshalb jeweils 100 g

Probenmaterial über einen Zeitraum von vier Wochen unter identischen Bedingungen (Raumklima) gelagert. Das Probenmaterial wurde auf offenen Schalen gelagert; Masse, Temperatur und Luftfeuchte wurden an den Werktagen protokolliert. Die in Anlage XIII enthaltene Übersicht zeigt, dass die klimatischen Bedingungen im untersuchten Zeitraum (06/2015) nicht zu einer nennenswerten Änderung des Feuchtegehaltes geführt haben.

Tausalze neigen dazu, sich unter den Spannungen, wie sie im Haufwerk und ggf. auch im Silo herrschen, mit zunehmender Lagerzeit in Ruhe zu verfestigen. Die Zeitverfestigung entsteht durch allmähliches Anwachsen der Haftkräfte zwischen benachbarten Partikeln. Die Ursachen können auf unterschiedliche physikalische bzw. chemische Effekte, wie Kristallbildung zwischen den Partikeln (Festkörperbrücken), Vergrößerung der Kontaktflächen durch plastisches Fließen der Partikel oder Kapillarkondensation beruhen (SCHULZE, 2.

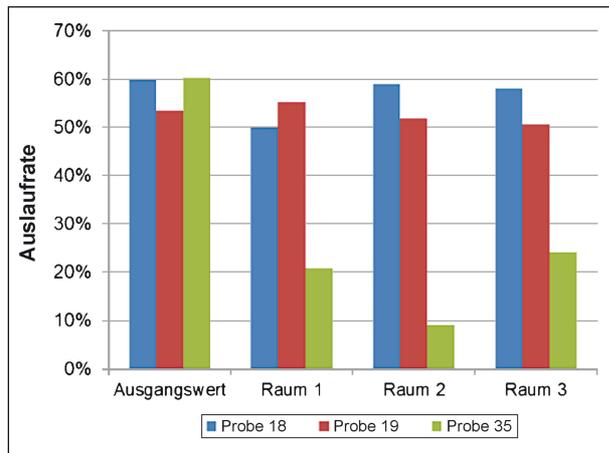


Bild 68: Einfluss der Lagerbedingungen

Probe	Raum	Luftfeuchte	
		min	max
18	1	36 %	46 %
	2	43 %	56 %
	3	37 %	55 %
19	1	28 %	44 %
	2	52 %	60 %
	3	46 %	57 %
35	1	32 %	53 %
	2	56 %	61 %
	3	51 %	64 %

Tab. 26: Lagerbedingungen (Minimal- und Maximalwerte der Luftfeuchte)

bearb. Aufl., 2009). Bewegt man die Partikel gegeneinander, verschwinden diese Haftkräfte wieder und bilden sich bei weiterer Lagerung in Ruhe neu. Die Auslaufmethode ist bei fest verbackenen Proben nicht mehr geeignet, die weitere Verfestigung zu messen. Mithilfe der einachsigen Druckversuche nach Lagerung in Drucktöpfen sind weitere Messungen möglich.

Zur Simulation des Lagerverhaltens über den Zeitraum eines Jahres wurden Untersuchungen zur Zeitverfestigung in der begehbaren Klimazelle, Typ NCZ 3025 N (Fa. NEMA Industrietechnik) des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Dazu wurden die getrockneten Proben 18, 19 und 35 vier Wochen unter definierten Bedingungen in Auslaufboxen sowie in Drucktöpfen gelagert. In diesen vier Wochen wurden die Luftfeuchtigkeit (LF) und die Temperatur (T) der vier Jahreszeiten jeweils für eine Woche simuliert.

Die Bedingungen wurden gemäß Tabelle 27 vorgegeben. Die Basis der meteorologischen Berechnungen wurde aus den Klima-Durchschnittswerten der letzten 20 Jahren gebildet (Geo Reisecommunity, aufgerufen am 2.6.2015) und für die Vorgaben genutzt.

Bild 69 zeigt das Innere der Klimazelle zu Versuchsbeginn. Erkennbar sind die Drucktöpfe, die Auslaufboxen sowie die in Petrischalen enthaltenen Proben für die Bestimmung des Feuchtegehaltes beim Wechsel der Lagerbedingungen nach je einer Woche.

Bereits nach einer Woche zeigte sich, dass die Salze aufgrund der Überschreitung der Deliqueszenzfeuchtigkeit Wasserdampf aufgenommen hatten und in Lösung übergegangen waren (Übersicht in Bild 70).

Woche		1	2	3	4
Herbst	LF	85 %			
	T	10 °C			
Winter	LF		90 %		
	T		-5 °C		
Frühling	LF			75 %	
	T			15 °C	
Sommer	LF				70 %
	T				25 °C

Tab. 27: Einstellungen der Klimakammer

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Proben in den Petrischalen nahezu vollständigen Kontakt mit der umgebenden, konstant feuchten Atmosphäre hatten. In Haufwerken (Auslaufbox, Salzlagerhallen) haben nur die oberflächennahen Schichten Kontakt zur Umgebungsluft. In Lagerhallen wird im Gegensatz zu diesem Modellversuch nur nach und nach frische, wasserdampfhaltige Luft zugeführt. Die über die Luftfeuchte zugeführte Wassermenge ist somit begrenzt. In großen Salzhäufen bilden sich



Bild 69: Versuchsbeginn in der Klimazelle

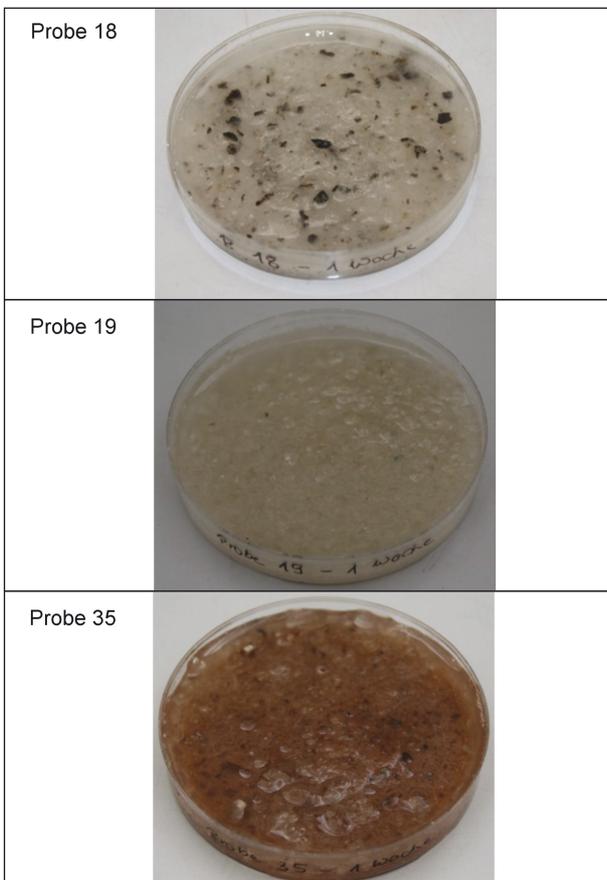


Bild 70: Versuchsbeginn in der Klimazelle

an der Oberfläche Krusten, die das weitere Eindringen des Wassers verhindern. Insofern sind diese Ergebnisse für die Praxis nur wenig relevant.

Tabelle 28 enthält die Übersicht der in den Petrischalen enthaltenen Teilproben. Diese wurden nach jeweils einer Woche (beim Wechsel der Einstellungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit) aus der Klimazelle entnommen. An der TU Bergakademie wurden mittels Moisture Analyzer HR 73 die Feuchtegehalte gemessenen (Mittelwert einer Doppelbestimmung). Die unterschiedliche Verhalten verschiedener Salze bei der Wasseraufnahme unter bestimmten klimatischen Bedingungen ist bei der Lagerung der Salze zu berücksichtigen. Es wird daher empfohlen, dieses Verhalten in einem zukünftigen Forschungsprojekt unter praxisrelevanten Bedingungen systematisch zu untersuchen.

Bei den Auslaufboxen sowie Drucktöpfen zeigten sich diese Erscheinungen an der Oberfläche und führten innerhalb des Untersuchungszeitraumes zu Verfestigungen des an der Oberfläche gelagerten Materials.

Die Folgen der Lagerung auf die Rieselfähigkeit sind in Bild 71 dargestellt. Die Auslaufrate (als

	Probe 18	Probe 19	Probe 35
Start	0,1 %	0,1 %	0,1 %
1 Woche	24,4 %	24,4 %	19,5 %
2 Wochen	15,6 %	17,2 %	13,4 %
3 Wochen	17,2 %	15,4 %	17,2 %
4 Wochen	26,4 %	25,2 %	21,1 %

Tab. 28: Bestimmung der Feuchtegehalte (Teilproben der Petrischalen)

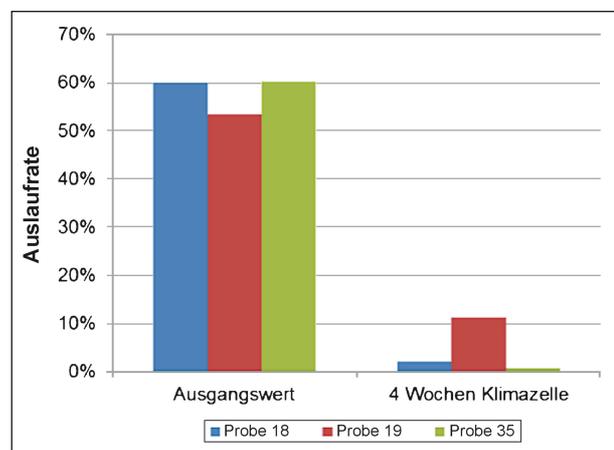
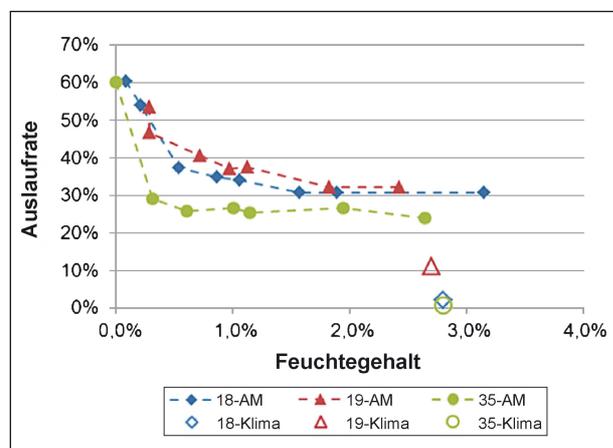


Bild 71: Einfluss der Lagerbedingungen (vierwöchige Lagerung in der Klimazelle)

Maß für die Rieselfähigkeit) der untersuchten Tausalze ist von ca. 60 % (Probe 18 und Probe 35) auf weniger als 3 % gesunken, bei Probe 19 verringerte sich die Auslaufrate von 53,5 % im Ausgangszustand auf ca. 11 % nach vierwöchiger Lagerung unter wechselnden klimatischen Bedingungen. Die Werte für die Auslaufrate wurden kapazitätsbedingt jeweils an nur einer Probe gemessen.

Bild 72 verdeutlicht noch einmal, dass die Lagerung einen wesentlichen Einfluss auf die Rieselfähigkeit hat. Während bei dem Ausgangsmaterial (AM) die Auslaufrate bei ca. 2,9 % Wassergehalt um 30 % liegt (obere Kurven), hat sie sich bei den gelagerten Proben (Klima) bei der gleichen Feuchtigkeit auf 3 % bis 11 % verringert (einzelne Punkte).

Untersuchungen mit der Methode des einachsigen Drucktests bestätigten die Ergebnisse. Nach vierwöchiger Lagerung gemäß Tabelle 27 erhielt man von allen Proben feste Probekörper, an denen Druckspannungen gemessen werden konnten (siehe Tabelle 29 und Anlage VI).



**Bild 72:** Auslaufraten in Abhängigkeit von Feuchtegehalt und Zeit

Probe	Druckfestigkeit Prüfkörper in kPa	
	nach 24 Std.	4 Wochen Klima
18	0	1,2
19	0	1,9
35	0,7	3,6

**Tab. 29:** Mittlere Druckfestigkeiten der Prüfkörper im Drucktest nach 24 Std. sowie nach 4 Wochen Klimatisierung. Messwerte ohne zusätzliche Verfestigungsspannung

## 6.6 Bestimmung der Schüttdichte

### 6.6.1 Methode

Die Bestimmung der Schüttdichte dient Aussagen über die Packungsdichte. Sie ist nicht in der Analytik gemäß TL-Streu enthalten, soll jedoch Bestandteil der geplanten Norm zur Prüfung von NaCl als Enteisungsmittel (E DIN EN 16811-1:2015-02, 2014) sein. In dieser Norm ist die Bestimmung der Schüttdichte nach (DIN EN 1236, 1995) vorgesehen, deren Ursprung in der Analytik von Düngemitteln liegt. Abweichend hiervon wurde die Schüttdichte nach (DIN EN 459-2, 2010) bestimmt, die sich auf Baukalk bezieht. Die Unterschiede beider Prüfverfahren liegen in erster Linie im verwendeten Trichter. Als Vorteil des in (DIN EN 459-2, 2010) verwendeten Gerätes wird die im Vergleich zu (DIN EN 1236, 1995) deutlich größere Öffnung des Einfüllgefäßes gesehen.

Bild 73 zeigt das bei der UVR-FIA GmbH verwendete Gerät zur Bestimmung der Schüttdichte. Dieses Gerät besteht aus einem zylindrischen Litergefäß mit einem Volumen von 1 l (im Bild links) und einem Füllaufsatz mit gefedertem Verschlusshebel, der zum Festhalten und Lösen der Verschlusskappe dient (im Bild rechts). Durch Betätigen des Hebels öffnet sich die Verschlusskappe und lässt das in den Füllaufsatz eingefüllte Material in das Litergefäß fallen.

Die Befüllung der Auslauf- bzw. Kombibox folgt einem ähnlichen Prinzip wie das Gerät zur Bestimmung der Schüttdichte. Aus der Einfüllmasse und dem bekannten Volumen der verwendeten Boxen (4 l) kann ebenfalls die Schüttdichte ermittelt



**Bild 73:** Gerät zur Bestimmung der Schüttdichte der UVR-FIA GmbH (links: 1 l Messgefäß; rechts Einfülltrichter mit Klappe)

werden. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird die aus der Befüllung der Auslauf- bzw. Kombibox ermittelte Schüttdichte als Fülldichte bezeichnet.

### 6.6.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die ermittelten Schütt- bzw. Füll-dichten befinden sich in der Übersicht in Anlage II. Bild 74 zeigt den anhand der vorhandenen Proben ermittelten Zusammenhang zwischen Schütt- und Füll-dichte. Dieser zeigt, dass die mittels Kombi- bzw. Auslaufbox bestimmte Füll-dichte etwas geringer ist als die Schüttdichte. Das ist auf den Einfüllvorgang zurückzuführen. Während bei der Bestimmung der Schüttdichte das Material in kürzester Zeit und auf einmal in das Messgefäß gefüllt wird, erfolgt die Befüllung der Auslauf- bzw. Kombibox schaufelweise, d. h. in einem vergleichsweise längeren Zeitraum.

## 6.7 Bestimmung der Rütteldichte

### 6.7.1 Methode

Die Rütteldichte entsteht, wenn das Material mechanisch gerüttelt wird. Dabei „rutschen“ die einzelnen Körner weiter zusammen und füllen in Abhängigkeit von der entstehenden Packung mehr Hohlräume als bei der reinen Schüttdichte aus. Die Ergebnisse der Bestimmung der Rütteldichte liefern somit Aussagen zur Packungsdichte im verdichteten Zustand.

Die Rütteldichte wurde an ausgewählten Proben nach (EN ISO 787-11, 1995) mit einem Stampfvolumeter Typ STAV II der J. Engelsmann AG, Ludwigshafen (Bild 66) bestimmt.

### 6.7.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die ermittelten Rütteldichten sind in der Übersicht in Anlage II enthalten. Erwartungsgemäß sind die Rütteldichten höher als die Schüttdichten. Bild 76 zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen Schütt- und Rütteldichten. Abweichungen von einem linearen Zusammenhang sind durch die Entstehung unterschiedlicher Packungen erklärbar, die vor allem durch die Kornform begründbar sind. Im Durchschnitt war die Rütteldichte um 13,5 % höher als die Schüttdichte.

Es war vermutet worden, dass zwischen der Schüttdichte und/oder dem Verdichtungsverhalten

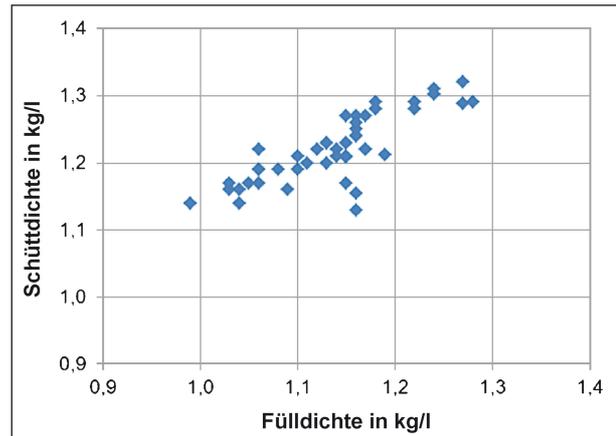


Bild 74: Zusammenhang zwischen Schütt- und Füll-dichte



Bild 75: Stampfvolumeter Typ STAV II, (Quelle: [www.engelsmann.de](http://www.engelsmann.de))

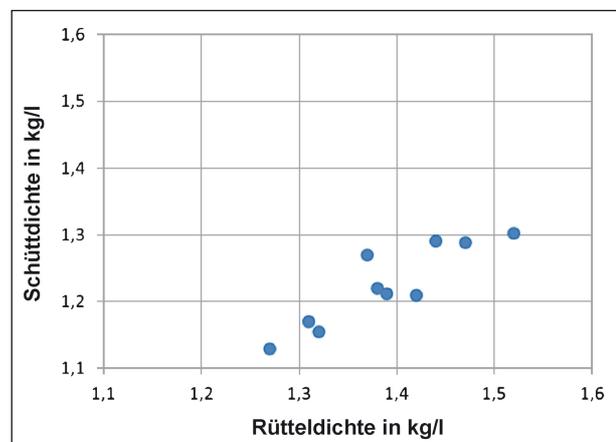


Bild 76: Zusammenhang zwischen Schütt- und Rütteldichte

(Verhältnis Rütteldichte zu Schüttdichte) der Salze ein Zusammenhang zur Rieselfähigkeit besteht. Dies muss nach den vorliegenden Ergebnissen

verneint werden. So zeigen die Proben 18 (Heilbronner Auftausalz) und 35 (Marokkosalz) im Anlieferzustand sehr ähnliche Schütt- und Rütteldichten, während die Auslaufrate bei Probe 18 mit 54,6 doppelt so hoch ist wie bei Probe 35 mit 26,9.

## 6.8 Gehalt an Antibackmittel Ferrocyanid

Nach TL-Streu (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2003) Punkt 2.1.1, S. 6 werden dem Tausalz zur Sicherstellung der Rieselfähigkeit während der Anlieferung und nach Lagerung Antibackmittel in nicht umweltgefährdender Menge zugegeben. Für  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ -Ionen (Ferrocyanid-Ionen) darf der Gehalt 200 mg/kg nicht überschreiten.

Die Zugabe von Ferrocyaniden in Form des Kalium- oder Natriumsalzes mit den chemischen Formeln  $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$  oder  $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$  verringert schon in sehr geringen Konzentrationen die Neigung des Natriumchlorides zum Zusammenbacken während der Lagerung. Für eine Wirkung auf das Kristallwachstum genügt schon weniger als eine monomolekulare Schicht auf der Oberfläche der Kristalle. Die genannten Ferrocyanide sind nicht giftig und werden auch Speisesalz als Antibackmittel zugesetzt (WOTSCHKE, 1965; KIERS & NICOLAI, 1956; WINZER et al., 1979; GÖTZFRIED, 1995; MANSFELDT et al., 2011; BODE, 2013).

In Anlage A3 zur TL-Streu wird ein Analyseverfahren zur Bestimmung des Gehalts an Ferrocyanid im Tausalz angegeben, mit dem bei der Eurofins Umwelt Ost GmbH, Niederlassung Freiberg (EUROFINS) die verfügbaren Tausalzproben untersucht wurden. Dabei wurden Konzentrationen im Bereich von 15,9 bis 173 mg/kg gefunden (siehe Tabelle in Anlage II, Spalte „Antibackmittelgehalt“).

Die Proben 22, 24 und 26 wurden vom Hersteller als frei von Antibackmittel deklariert. Gefunden wurden von EUROFINS jedoch Ferrocyanidgehalte von 42,4 mg/kg, 46,6 mg/kg und 15,9 mg/kg. Die Vermutung, dass freie Eisen-(II)-Ionen das Analyseergebnis verfälscht haben könnten, wurde von der EUROFINS nicht bestätigt.

Unter Beachtung der dargestellten Problematik kann anhand der Proben 21 bis 26 (Südsalz in verschiedenen Körnungen, deklariert als „mit“ bzw. „ohne“ Antibackmittel) im Rahmen dieses Berichtes keine Aussage zur Abhängigkeit der Rieselfähigkeit

Probe	1. Messung 500 g nach Probenteilung	2. Messung 20 g von beliebiger Entnahmestelle
Nr.	Ferrocyanid in [mg/kg]	Ferrocyanid in [mg/kg]
18	78,5	45,8
19	30,7	17,8
35	21,2	52,6

Tab. 30: Messergebnisse der Ferrocyanidgehalte der Proben 18, 19, 35 (Doppelbestimmungen)

vom Gehalt an Ferrocyanid getroffen werden (siehe Anlage II).

Für die Proben 18, 19 und 35 wurde der Ferrocyanidgehalt zweimal gemessen (siehe Anlage II und IV). Für die Proben der ersten Messung (Analytik gemäß TL-Streu) wurden Teilproben von ca. 500 g durch Probeteilung erzeugt. Zur zweiten Messung wurden jeweils etwa 20 g von einer beliebigen Stelle des Materials mit einem Löffel entnommen.

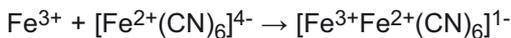
Die Messergebnisse waren sehr unterschiedlich (Tabelle 30). Das deutet auf größere Konzentrationsschwankungen innerhalb des Salzes hin.

Für die Wirksamkeit des Ferrocyanids als Antibackmittel ist es wichtig, dass es sich an der Oberfläche des Salzes befindet. Ist es im Kristall eingewachsen, kann es nicht in ausreichender Menge am Rekristallisationsprozess teilnehmen und ein Zusammenbacken verhindern.

Dieser Unterschied wird bei der Analyse nach TL-Streu nicht erfasst. Hierbei soll das zu untersuchende Salz solange mit Wasser gespült werden, bis es ausgewaschen ist. Rückfragen bei EUROFINS haben ergeben, dass hierfür unterschiedliche Wassermengen erforderlich waren.

Solange das Ferrocyanid durch Aufsprühen einer Lösung auf das trockene Salz und anschließendem Mischen zugeführt wird, sollte es sich an der Kristalloberfläche befinden (KIERS & NICOLAI, 1956). Eine andere Zugabemethode oder häufiges Feuchtwerden und wieder Trocknen des Salzes könnte zu einem Einwachsen in den Kristall und damit zu einer Verminderung der gewünschten Antibackmittelwirkung führen. Dieses Thema sollte bei weiterführenden Arbeiten näher untersucht werden.

Befinden sich freie Fe-(III)-Ionen im Tausalz, können sie mit dem Ferrocyanid zum Komplex des „Berliner Blaus“ reagieren.



Die Verbindung ist in Wasser und verdünnten Säuren mit Ausnahme von Oxalsäure unlöslich (REMY, 1973). Aus diesem Grund erscheint es unwahrscheinlich, dass es in fester Form als Antibackmittel wirken kann. Bereits in schwach alkalischer Lösung kann es sich jedoch durch Bildung unlöslichen Eisen(III)-oxidgels und Rückbildung des Ferrocyanidions zersetzen (REMY, 1973). Diese beiden Reaktionen werden auch während der Gehaltsbestimmung von Ferrocyanidionen nach TL-Streu angewendet (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2003). Nach MANSFELD et al. (S. 389., 2011) wird manchmal auch Berliner Blau als Antibackmittel eingesetzt. Sollte das Salz schwach alkalisch reagieren, würde sich der Komplex zersetzen und in der Form des Ferrocyanidions als Antibackmittel wirksam werden können.

Da es sich hier nur um Vermutungen handeln kann, sollte die Thematik in einem Folgeprojekt näher untersucht werden.

## 6.9 Weitere Prüfmethoden

### 6.9.1 Bestimmung des pH-Wertes

Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte nach DIN EN 1262 (DIN EN 1262, 2003) und ist Bestandteil der chemischen Analyse nach TL-Streu (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2003) sowie des europäischen Normentwurfes (E DIN EN 16811-1:2015-02, 2014). Eine Übersicht der Ergebnisse befindet sich in Anlage II. Im pH-Bereich von 5-10 (gemessen an 10%iger Lösung) gelten Tausalze als spezifikationsgerecht. Es ist erkennbar, dass alle untersuchten Salze hinsichtlich des pH-Wertes innerhalb dieses Bereiches liegen. Ein systematischer Zusammenhang zwischen pH-Wert und Rieselfähigkeit lässt sich aus den vorliegenden Messergebnissen nicht ableiten, auch hinsichtlich der Salze marokkanischer Herkunft nicht.

### 6.9.2 Bestimmung der spezifischen Oberfläche

Der Bestimmung der spezifischen Oberfläche nach der BET-Methode (DIN 66 132, 1975-07) lag die Annahme zugrunde, dass raue Körner schlechter fließen als glatte und dass sich die Oberflächenrauigkeit in einer höheren spezifischen Oberfläche

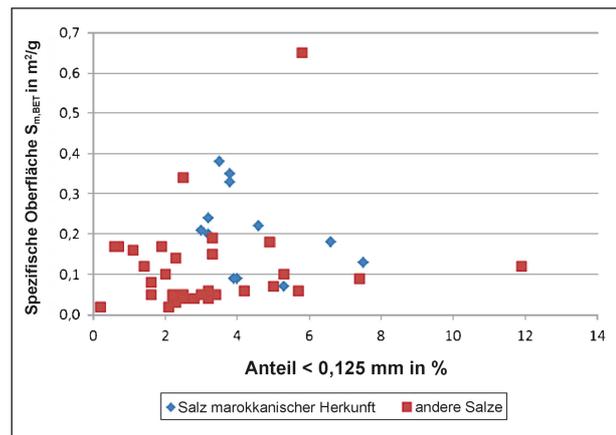


Bild 77: Zusammenhang zwischen spezifischer Oberfläche und Feingutanteil

niederschlägt. Die spezifische Oberfläche eines (kugelförmigen) Partikels verhält sich aber auch umgekehrt proportional zu seinem Durchmesser. In Bild 77 wurde daher die gemessene spezifische Oberfläche in Abhängigkeit vom Anteil an feinen Körnern dargestellt.

Bei gleichem Feingutanteil variiert die Oberfläche in einem weiten Bereich, z. B. bei 3,4-3,5 % <math>< 125 \mu\text{m}</math> zwischen 0,05  $\text{m}^2/\text{g}$  (Probe 19) und 0,38  $\text{m}^2/\text{g}$  (Probe 17), ohne dass dabei ein systematischer Einfluss auf die Rieselfähigkeit zu erkennen wäre (Messwerte siehe Anlage II).

Möglicherweise ist die zum Teil sehr hohe spezifische Oberflächen weniger auf die äußere Partikeloberfläche zurückzuführen, sondern auf Klüfte und offene Poren im Partikelinneren. In diesem Fall scheidet die spezifische Oberfläche als Maß für die Oberflächenrauigkeit aus und es kann kein Zusammenhang zur Rieselfähigkeit hergestellt werden

## 6.10 Ergebnisse der Arbeiten in AP 5

Die ersten Salzproben für Tastversuche wurden im November 2014 angeliefert, anschließend stieg der Probenumfang innerhalb eines halben Jahres auf einen Probenumfang von 46 Proben. Damit hat sich der analytische Aufwand mehr als vervierfacht. Die während der Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse fließen in die aktuellen Arbeiten ein.

Der kostenneutrale Aufwandsausgleich konnte durch eine teilweise Nichtbeauftragung von Unteraufträgen und Verschiebungen innerhalb des Projektes realisiert werden.

Parameter	Auswirkung
Korngrößenverteilung	Feinkornanteil verringert Rieselfähigkeit
Feuchtegehalt	Feuchte vermindert Rieselfähigkeit
spezifische Oberfläche nach der BET-Methode	nicht nachweisbar
Schüttdichte	nicht nachweisbar
Rütteldichte	nicht nachweisbar
pH-Wert	nicht nachweisbar
Antibackmittelgehalt	keine Auswertung möglich
Lagerbedingungen und -dauer	starke Auswirkungen durch Feuchtigkeitsaufnahme und Rekristallisation (Zeitverfestigung)

Tab. 31: Untersuchte Parameter und ihre Auswirkung auf die Rieselfähigkeit

An allen 46 Proben wurde die Rieselfähigkeit mit der Auslaufbox bestimmt. Weiterhin wurden die in Tabelle 31 enthaltenen Parameter bestimmt und auf einen Zusammenhang mit der Rieselfähigkeit untersucht. Materialfeuchte und Feinkornanteil wirken sich stark auf die Rieselfähigkeit aus, was in Versuchen mit gezielter Variation dieser Parameter systematisch bestätigt wurde. Dabei zeigten sich allerdings auch deutliche Unterschiede zwischen Proben unterschiedlicher Herkunft, deren Ursache in Unterschieden in der Kornform und Oberflächenrauigkeit vermutet wird.

## 7 Herleiten von Eigenschaften für Natriumchlorid zur betriebssicheren Ausbringung unter Berücksichtigung der Wirksamkeit (AP 6)

### 7.1 Ziel der Arbeiten in AP 6

Alle Messreihen waren so auszuwerten, dass mögliche Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Tausalzproben und deren Rieselfähigkeit identifiziert und quantifiziert werden können. Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für die im AP 3 zu erstellende Prüfvorschrift.

### 7.2 Ergebnisse der Arbeiten in AP 6

Die Herleitung von Eigenschaften für Natriumchlorid zur betriebssicheren Ausbringung unter Berücksichtigung der Wirksamkeit konnte aufgrund

der Komplexität der Einflüsse und der dadurch bedingten hohen Variationsmöglichkeiten innerhalb der Projektlaufzeit nur teilweise abgearbeitet werden.

Grundsätzlich erscheint die Bestimmung der Rieselfähigkeit mittels Auslaufbox als geeignetes Maß für die betriebssichere Ausbringung von Tausalzen zum Zeitpunkt der Messung. Die Eigenschaften von Tausalzen und ihre unmittelbaren Auswirkungen auf die Rieselfähigkeit wurden im Kapitel 6 dargestellt.

Tabelle 21 (Seite 39) schlägt eine grobe Einteilung der Tausalze nach ihrer Rieselfähigkeit vor. Davon ausgehend sind Salze mit Feuchtegehalten über 0,5 % in der Regel schlecht rieselfähig, gleiches gilt für Salze mit Feinkorngehalten < 125 µm von mehr als 5 %.

Entscheidend sind jedoch die Lagerbedingungen und die damit verbundene Problematik der Zeitverfestigung (zeitliche Zunahme der Druckverfestigung mit der Verfestigungsspannung) als Folge von Prozessen des Lösens (bei Lagerung oberhalb der Deliqueszenzfeuchte) und der Kristallisation (unterhalb der Deliqueszenzfeuchte). Die sich zwischen den einzelnen Partikeln bildenden Festkörperbrücken führen an den Oberflächen zu Verbackungen. Antibackmittel sollen diese Prozesse so beeinflussen, dass sich nur schwache Festkörperbrücken ausbilden, die bei geringer mechanischer Beanspruchung wieder aufbrechen.

Zwar neigten alle untersuchten Proben unter den vorgegeben klimatischen Bedingungen zur Zeitverfestigung (siehe Kapitel 6.5.5), das Marokkosalz schnitt jedoch eindeutig am schlechtesten ab.

Als eine mögliche Ursache wurden im Salz enthaltene Eisen-Ionen diskutiert, die die Wirksamkeit des Antibackmittels beeinträchtigen könnten. In diesem Zusammenhang ist zu klären, ob bei dem standardisierten Analysenverfahren zur Bestimmung des Antibackmittelgehaltes nachgewiesen werden kann, in welcher Form die Eisen-Ionen vorliegen (vollständig als Ferrocyanid  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  vorliegend oder im Berliner-Blau-Komplex gebunden).

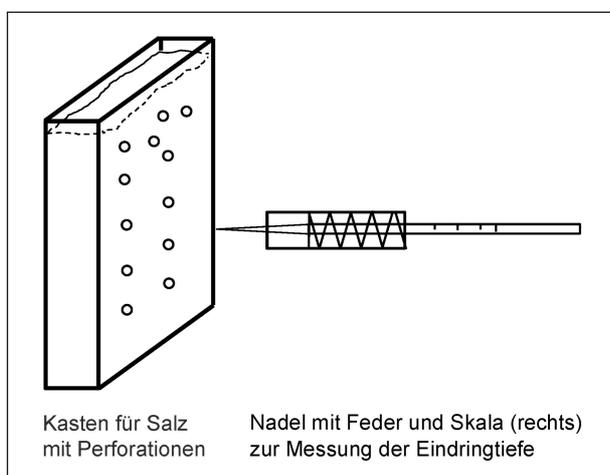
## 8 Vorschlag einer Methode zur Messung der Zeitverfestigung während der Lagerung von Tausalz im Lager

Für die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Neigung eines Salzes zur Langzeitverfestigung zum Anlieferungszustand ist es für den Nachweis der Richtigkeit der Angaben notwendig über eine Methode zu verfügen, mit der die Verfestigung des Salzes im Lager über einen längeren Zeitraum gemessen werden kann.

Um die Verfestigung in verschiedenen Höhen einer Salzschüttung messen zu können, müssten sowohl für die Auslaufbox als auch für den einachsigen Drucktest Proben genommen werden. Dabei würde die Struktur des gelagerten Salzes zerstört werden. Würde das Salz in den Messgeräten unter den gleichen Bedingungen wie im Lager gelagert werden, erhält man jeweils immer nur einen Messwert je Gerät. Der Aufwand wäre enorm groß.

Ziel der folgenden Überlegungen war es deshalb eine Methode zu entwickeln, mit der auf einfachere Art und Weise eine Langzeitverfestigung gemessen werden kann.

In einem gelagerten Salz reagiert die Grenzschicht mit der Umgebungsluft indem Wasser abgegeben oder aufgenommen wird. Der letztere Fall führt zur Krustenbildung an der Oberfläche des Salzes. Es wird erwartet, dass diese aufgrund der damit verbundenen Verringerung des Gasaustausches mit der Raumluft einen wesentlichen Einfluss auf die Lagerstabilität des darunter befindlichen Salzes hat. Bei Lagerung in einer Luftfeuchtigkeit oberhalb des



**Bild 78:** Prinzipieller Versuchsaufbau zur Messung der Verfestigung in einer senkrechten Salzschicht

Deliquescenzpunktes verhindert sie das Zerfließen des Salzes. Gleichzeitig bedeutet ihr Vorhandensein eine Inhomogenität der oberen Salzschicht hinsichtlich Feuchtigkeit und Fließverhalten. Das Salz wird innerhalb des oberen Teils der Salzschüttung sehr unterschiedlich rieselfähig sein. Die neue Messmethode sollte deshalb die Möglichkeit bieten, die Verfestigung des Salzes in verschiedenen Höhen der Schüttung messen zu können.

Folgende Idee einer Nadeldruckmethode wird zur Weiterentwicklung vorgeschlagen.

Zur Simulierung eines senkrechten Ausschnitts aus der Salzschüttung wird ein oben offener schmaler Kasten mit den möglichen Abmessungen von 12 cm breit, 60 cm lang und 100 cm hoch mit Salz befüllt. Die eine Seitenwand erhält eine Perforation, die zunächst mit einer feuchtigkeitsundurchlässigen Folie überklebt ist. Dieser „Ausschnitt aus der Salzschüttung“ kann unter definierten Laborbedingungen gelagert und untersucht werden.

Die Messung der Verfestigung erfolgt mit einem nadelähnlichen Stift, der von der Seite durch die Perforation der Seitenwand in das Salz gedrückt wird. Die dazu notwendige Kraft ist ein Maß für den Grad der Verfestigung des Salzes. Entweder man misst die Kraft direkt oder die Nadel wird mit einer definierten Spiralfeder in das Salz gedrückt und die damit erreichte Einstichtiefe gemessen. Die Messungen werden in verschiedenen Höhen zu Beginn der Lagerung durchgeführt und nach verschiedenen Zeiten wiederholt. Die gemessenen Veränderungen spiegeln die Verhältnisse in der Salzschüttung wider.

Bei der Prüfung der Festigkeit mit der Nadel wird die Struktur des Salzes so verändert, dass eine zweite Messung an genau dieser Stelle keine korrekte Aussage mehr zulässt. Der Kasten muss deshalb genügend lang sein, damit die Messungen an verschiedenen Stellen bei gleicher Höhe nach unterschiedlichen Lagerzeiten wiederholt werden können (Bild 78).

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die „praxisgerechten Anforderungen an Tausalze“ wurden auftragsgemäß hinsichtlich der Rieselfähigkeit abgearbeitet. Während der Bearbeitung zeigte sich, dass dem Thema der Zeitverfestigung bislang

noch zu wenig Beachtung gewidmet wurde. Da diese aber einen entscheidenden Einfluss auf die Vorhersage der Lagerfähigkeit hat, wurden Untersuchungen diesbezüglich innerhalb des Budgets angepasst.

Für die Tests standen 46 Proben Tausalz zur Verfügung. Sie unterschieden sich nach dem Lagerort, der ursprünglichen Herkunft des Tausalzes, der Art und des Ortes der Probenahme und dem Zusatz von Antibackmittel.

Für die Auswahl einer Methode zur Bestimmung der Rieselfähigkeit von Tausalz wurden folgende Methoden mit unterschiedlichen Messgeräten untersucht:

- Einachsige Drucktestmethode,
- Trichtermethode,
- IMSE-Test,
- Kombibox Schieber,
- Auslaufbox nach SONNTAG.

Dabei wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

- Einachsige Drucktestmethode  
Schlecht fließfähige Proben bilden einen Prüfkörper aus, dessen Festigkeit gemessen werden kann. Gut fließfähige Salze bilden keinen Prüfkörper. Eine Differenzierung durch Messung des Druckverhaltens ist hier nicht möglich. Die Methode liefert deshalb nur für durch längere Lagerung verfestigte Proben Messwerte.
- Trichtermethode  
Ziel war die Nachbildung des Verhaltens des Salzes bei Ausbringung aus Streufahrzeugen. Die Methode erwies sich als prinzipiell geeignet zur Prüfung der Rieselfähigkeit anhand der Auslaufrate. Schlecht fließfähige Tausalze neigen jedoch zur Brückenbildung und lassen sich erst mit Trichtern großer Öffnungsweiten und großen Probemengen messen. Der Aufwand für die Messungen wäre dann sehr hoch.
- IMSE-Test  
Die Prüfung der Rieselfähigkeit mithilfe eines gerüttelten Siebs ist relativ einfach. Sie ist jedoch nur bei feineren Körnungen anwendbar. Bei den Tests war eine Übertragung auf grobkörnige Salze nicht möglich. Aufgrund der

bei Tausalzen vorliegenden großen Unterschieden hinsichtlich der Korngrößenverteilungen bildet die Methode keine Grundlage für den Vergleich der Rieselfähigkeit unterschiedlicher Tausalze.

- Kombibox Schieber  
Die Bestimmung der Rieselfähigkeit mithilfe der über die Schieberhöhe definierten Auslaufrate ist prinzipiell möglich. Es zeigte sich jedoch eine höhere Varianz als bei der Verwendung der Auslaufseite der Kombibox bzw. der damit identischen Methode mit der Auslaufbox.
- Auslaufbox nach SONNTAG  
Diese Methode ermöglichte bei gut und bei schlecht fließfähigen Proben eine gute und einfache Bewertung der Rieselfähigkeit auf Basis der gemessenen Auslaufrate. Sie hat sich als geeignete Variante für die Bestimmung der Rieselfähigkeit von Tausalz erwiesen.

Die Methode für die Verwendung der Auslaufbox wurde beschrieben und für alle Salzproben und für weitere Tests angewendet.

Bezüglich der Art der Probenahme wurde kein signifikanter Einfluss auf das Prüfergebnis der Bestimmung der Auslaufrate mit der Auslaufbox gefunden. Die einfache Probenahme mit der Schaufel ist also möglich.

Zur Bestimmung der Feuchte der Salze wurde die Methode mit Feuchtwage mit der der Trocknung im Trockenschrank verglichen. Es wurde weitgehend Übereinstimmung gefunden. Bei einigen Proben wurde mit der Feuchtwage eine höhere Feuchte als mit der Trockenschrankmethode gemessen. Die Ursache wird auf den Verlust an Feuchtigkeit während der Probeteilung für die Trockenschrankproben zurückgeführt.

Mit der Untersuchung des Einflusses des Feuchtegehaltes auf die Rieselfähigkeit wurde bei drei Proben bei sehr geringer Feuchtigkeit eine hohe Auslaufrate von 54 % bis 60 % gefunden. Mit steigendem Wassergehalt von 0 % bis 3 % sank die Auslaufrate asymptotisch auf etwa 24 bis 30 % ab. Die Rieselfähigkeit verringerte sich je nach Salztyp mit zunehmender Feuchtigkeit unterschiedlich schnell. Die Auslaufrate des marokkanischen Salzes war schon bei einem Wassergehalt von 0,3 % fast auf den Endwert abgesunken, während das bei den beiden anderen Salzen erst bei 2 % Feuchte der Fall war.

Als weitere mögliche Einflussgröße wurde die Korngrößenverteilung nach Trocknung und Proben-  
teilung mit einer Siebmaschine für alle Tausalz-  
proben bestimmt und mit der Einteilung in  
Kornklassen verglichen. Der Gehalt an Feinkorn  
< 0,125 mm schwankte zwischen den Proben im  
Bereich von 0,2 % bis 11,9 %.

Auf Grundlage der bei den Untersuchungen zur  
Rieselfähigkeit gewonnenen Erfahrungen wurde  
zur besseren Verständigung ein Vorschlag zur ver-  
balen Einteilung der Rieselfähigkeit im Vergleich  
zur Auslaufrate unterbreitet. Danach soll ein Salz  
mit der Auslaufrate < 30 % als „schlecht riesel-  
fähig“, mit 30-45 % als „rieselfähig“ und > 45 % als  
„gut rieselfähig“ bezeichnet werden.

Der Einfluss der Feuchte auf die Rieselfähigkeit  
wurde an drei Proben untersucht, die nach Trock-  
nung bei 110 °C definiert angefeuchtet wurden. Die  
trockenen Proben zeigten unabhängig vom Salz  
sehr ähnliche, bzw. fast identische Auslaufraten bei  
54 % bis 60 %. Nach dem Anfeuchten sank die Aus-  
laufrate asymptotisch bis auf Werte von 30 % bis  
25 % ab. Auffallend war, dass sich bei einem  
„schlecht fließenden Salz“ die Auslaufrate mit  
zunehmender Feuchtigkeit deutlich schneller ver-  
ringerte als bei den anderen beiden Proben.

Nach Anfeuchten von drei getrockneten Proben  
verringerte sich die Füllichte von 1,18 g/cm<sup>3</sup> bis  
1,28 g/cm<sup>3</sup> um mehr als 10 % auf etwa 1,05 g/cm<sup>3</sup>.  
Eine mögliche Erklärung ist, dass sich die innere  
Reibung erhöht und die optimale Packungsdichte  
nicht mehr erreicht wird.

Zum Vergleich des Rieselverhaltens verschiedener  
Salze unabhängig von der Korngrößenverteilung  
wurde von drei Proben durch Absieben des Über-  
und Unterkorns jeweils eine Fraktion 0,5 mm bis  
4 mm hergestellt. Hiermit wurden die Auslaufraten  
in Abhängigkeit von der Feuchte bestimmt und mit  
dem ungesiebten Material verglichen. Erwartungs-  
gemäß waren die Auslaufraten der gesiebten  
Proben aufgrund fehlenden Feinkorns etwas  
höher als die ungesiebten. Diese Differenz ist bei  
niedriger und hoher Feuchte ( $\geq 2$  %) relativ klein  
und bei 0,6 % Feuchte am größten. Die Auslaufraten  
der gesiebten Proben waren untereinander  
ähnlich aber nicht gleich. Daraus kann geschluss-  
folgert werden, dass es neben Korngrößenvertei-  
lung und Feuchte mindestens eine dritte Einfluss-  
größe auf die Rieselfähigkeit gibt. Das könnte die  
Kornform bzw. die Oberflächenbeschaffenheit der

Körner sein. Hierzu sind weitere Untersuchungen  
erforderlich.

Die Ergebnisse wurden mit aus verschiedenen  
Kornfraktionen hergestellten feineren und grö-  
bereren Mischungen grundsätzlich bestätigt.

Zur statistischen Sicherung dieser Erkenntnisse  
sollten die Untersuchungen mit weiteren Salz-  
proben durchgeführt und die Abhängigkeit der  
Rieselfähigkeit von der Form und Oberflächen-  
beschaffenheit der Körner mit untersucht werden.

Zur Prüfung der Erstverfestigung des Salzes wäh-  
rend der Lagerung wurden drei verschiedene Salz-  
proben in der Auslaufbox nacheinander an drei ver-  
schiedenen Stellen im Haus für jeweils eine Woche  
gelagert. Parallel wurden die Luftfeuchtigkeit im  
Raum und das Gewicht der Proben zum Nachweis  
der Feuchtigkeitsaufnahme gemessen. Die Luft-  
feuchtigkeit schwankte zwischen min. 32 % und  
max. 64 % rel. Feuchte, lag also nie über der Deli-  
queszenzfeuchte. Dementsprechend wurden bei  
der Wägung zur Feuchtigkeitsbestimmung der Pro-  
ben keine signifikanten Unterschiede während der  
Lagerung gefunden. Während bei zwei Proben die  
Auslaufrate sich während der Lagerung im Bereich  
von 50 % bis 60 % nur relativ geringfügig änderte,  
verringerte sich bei der dritten Probe (Probe Nr. 35)  
die Auslaufrate in jedem Raum drastisch von 60 %  
auf Werte zwischen 9 % und 23 %. Ein Zusam-  
menhang mit den unterschiedlichen Lagerbedin-  
gungen in den verschiedenen Räumen konnte  
nicht nachgewiesen werden.

Die starke Verringerung der Auslaufrate der Probe  
35 (Big-Bag-Probe aus Grevenbroich, Ursprungs-  
land Marokko) ist ein Hinweis dafür, dass schon  
nach einer Woche Lagerung in der Auslaufbox  
eine konkrete Aussage über das Verhalten der  
Rieselfähigkeit eines bestimmten Salzes nach  
längerer Lagerung möglich ist.

Zur weiteren Prüfung des Einflusses der Lagerung  
auf die Rieselfähigkeit wurden drei verschiedene  
Salzproben in einer begehbaren Klimakammer  
über vier Wochen gelagert. In jeder Woche wurde  
eine Jahreszeit mit angepasster Temperatur (-5 °C  
bis 25 °C) und Luftfeuchte (70 % bis 90 % rel. LF)  
simuliert. Die Proben wurden in offenen Petri-  
schalen, in der Auslaufbox und in Drucktöpfen  
gelagert. Erwartungsgemäß nahmen aufgrund der  
deutlich überschrittenen Deliqueszenzfeuchtig-  
keit die Proben in den Petrischalen bis zu 26 %  
Wasser auf und verflüssigten sich dabei. Über-

raschend war, dass die Proben in den Petrischalen in der zweiten Woche, „Winter“ mit 90 % rel. LF und  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  wieder Wasser an die Umgebung abgaben. Bei den Auslaufboxen verringerten sich die Auslaufraten bei allen drei Proben von 53 % bis 60 % auf weniger als 3 % bis 10 %. Nach 24 h Lagerzeit hatte sich nur Probe 35 soweit verfestigt, dass mit dem einachsigen Drucktest ein Wert von 0,7 kPa gemessen werden konnte. Das bestätigt die vorangegangenen Messergebnisse bei einwöchiger Lagerung. Nach vier Wochen Klimalagerung ergaben zwei Proben Druckfestigkeiten von 1,2 kPa und 1,9 kPa und bei Probe 35 wurden diese Werte mit 3,6 kPa deutlich überschritten.

Die Schüttdichten aller Proben wurden mit einmaligem normierten Füllvorgang und in der Auslaufbox mit schaufelweisem Zuschütten gemessen. Die Messergebnisse lagen bei der normierten Befüllung zwischen  $1,13\text{ g/cm}^3$  und  $1,31\text{ g/cm}^3$  und mit der Bestimmung mit der Auslaufbox bei  $0,99\text{ g/cm}^3$  bis  $1,27\text{ g/cm}^3$  tendenziell etwas niedriger.

Mit der Bestimmung der Rütteldichte an 10 Proben wurde eine um etwa 13,5 % höhere Dichte als mit der normierten Schüttdichte gefunden. Der vermutete Zusammenhang zwischen Verdichtungsverhalten und Rieselfähigkeit hatte sich nicht bestätigt.

Der Gehalt des Antbackmittels Ferrocyanid wurde bei allen Proben bestimmt. Die Werte lagen im Bereich von  $15,9\text{ Fe(CN)}_6/\text{kg}$  bis  $173\text{ mg Fe(CN)}_6/\text{kg}$ . Doppelbestimmungen zeigten eine hohe Abhängigkeit von der Art der Probenahme. Das deutet auf Inhomogenitäten der Konzentration im Salz hin. Bezüglich der analytischen Gehaltsbestimmung tauchten Unklarheiten auf, die vor weiteren Untersuchungen zur Langzeitlagerung der Salze geklärt werden müssen.

Die Bestimmung des pH-Wertes einer 10%igen Salzlösung ergab Werte zwischen 6,0 und 9,5. Ein systematischer Zusammenhang zwischen pH-Wert und Rieselfähigkeit ließ sich nicht ableiten.

Die spezifische Oberfläche nach BET wurde bei den verschiedenen Salzproben im Bereich von  $0,02\text{ m}^2/\text{g}$  bis  $0,65\text{ m}^2/\text{g}$  bestimmt. Ein Zusammenhang mit der Rieselfähigkeit konnte nicht nachgewiesen werden. Das kann jedoch an einer Überlagerung mit anderen Einflussgrößen gelegen haben. Die spezifische Oberfläche ist neben dem

Gehalt an Feinkorn ein Maß für die Zerklüftung der Oberfläche der Kristalle. Dieser Parameter kann bei Langzeitlagerungen größeres Gewicht erlangen. Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche sollte deshalb bei weiteren Versuchen beibehalten und präzisiert werden.

Für die spezifische Untersuchung der Zeitverfestigung in einer Salzschüttung wurde die Idee einer Methode vorgestellt, mit der die Verfestigung des Salzes in verschiedener Höhe der Schüttung nach unterschiedlichen Zeiten gemessen werden kann. Hierzu wird das Salz in einem perforierten Kasten gelagert und die Verfestigung des Salzes anhand der Messung der Kraft, die zum Eindringen einer Nadel in das Salz in verschiedenen Höhen erforderlich ist bestimmt (Nadeldruckmethode).

Mit einer Reihe von Langzeitversuchen unter definierten klimatischen Bedingungen wird es möglich sein, genau die Parameter zu ermitteln, die im Zusammenspiel mit den Lagerbedingungen die Verfestigung des Salzes nach längerer Lagerung herbeiführen. Erst nach deren genauer Kenntnis und Messbarkeit wird eine Analyse-methode zur Ermittlung der Langzeitlagerstabilität bei Anlieferung des Salzes entwickelt werden können.

In Hinblick auf die Erreichung dieses Langzeitziels wurde auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse die Bearbeitung der folgenden Arbeitsschritte abgeleitet:

- Klärung des Einflusses von  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen auf die Wirksamkeit der  $\text{Fe(CN)}_6^{4-}$ -Ionen als Antbackmittel in Abhängigkeit vom pH-Wert.
- Klärung der gefundenen Unstimmigkeiten bei der Bestimmung des Gehalts an Ferrocyanid.
- Untersuchungen zum Einfluss der Struktur und Oberflächenbeschaffenheit der Einzelkristalle auf die Zeitverfestigung. Ermittlung einer Methode zur Quantifizierung dieses Parameters.
- Fortführung der Versuche zur Bestimmung der Veränderung der Rieselfähigkeit nach etwa einer Woche Lagerung in der Auslaufbox mit dem Ziel, daraus eine Messmethode zum Erkennen von Salzen mit der Neigung zu sehr schneller Verfestigung zu entwickeln.
- Entwicklung der Nadeldruckmethode von der Idee zum einsatzfähigen Messverfahren.

## 10 Literatur

- BODE, A. A. C. (2013): The Mechanism of Anticaking Agents – Proefschrift. Enschede: Arno A. C. Bode
- CALVERT, G. et al. (2013): A new environmental bulk powder caking tester. *Powder Technology* 249, pp. 323-329
- DIN 51718 (2002): Bestimmung des Wassergehaltes und der Analysenfeuchtigkeit. s. l.: s. n.
- DIN 66 132 (1975-07): Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Stickstoffadsorption. s. l.: s. n.
- DIN 66165 (1987): Teil 1: Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse; Grundlagen. s. l.: s. n.
- DIN EN 1236, 1995. Bestimmung der Schüttdichte. s. l.: s. n.
- DIN EN 1262 (2003): Grenzflächenaktive Stoffe – Messung des pH-Wertes von Lösungen oder Dispersionen. s. l.: s. n.
- DIN EN 459-2 (2010): Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren. s. l.: s. n.
- DIN EN 932-1, 1996. Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen. s. l.: s. n.
- DIN EN ISO 22475-1 (2007): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1. s. l.: s. n.
- DIN EN ISO 6186 (1998): Bestimmung der Rieselfähigkeit. s. l.: s. n.
- E DIN EN 16811-1:2015-02 (2014): Winterdienstausrüstung – Enteisungsmittel – Teil 1: Natriumchlorid – Anforderungen und Prüfmethoden; Deutsche Fassung. s. l.: s. n.
- EN ISO 787-11 (1995): Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe. s. l.: s. n.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2003): Technische Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenwinterdienstes. s. l.: s. n.
- Geo Reisecommunity, Deutschland: Klima. <http://www.geo.de/reisen/community/reisen/deutschland/klima>: s. n. [Zugriff am 02.06.2015]
- GÖTZFRIED, F. (1995): Ferrocyanide als Anticakingmittel im Auftausalz, s. l.: Verein Deutsche Salzindustrie
- HOLLEMANN, A.; WIBERG, E. (1995): Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 34 Hrsg. Berlin; New York: de-Gruyter-Verlag
- IMSE, W. (1972): Messung der Fließfähigkeit von Zement. *Zement-Kalk-Gips*, Band 25
- ISO 2483:1973-01 (1973): Natriumchlorid für Industriezwecke; Bestimmung des Masseverlustes bei 110 °C. s. l.: s. n.
- JENIKE, A. (1964): Storage and flow of bulk solids. Engng. Exp. Station., Issue Bull. No. 123, University of Utah
- KIERS, P. J. H.; NICOLAI, H. W. (1956): Verfahren zur Verminderung des Zusammenbackens von Natriumchlorid, Patentschrift DE954691. s. l.: s. n.
- KRETZLER, K. (2002): Eine neue Methode zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Schüttgütern. Würzburg: s. n.
- Lüneburg, V. b. d. B., 5.12.2013. VgK-39/2013. s. l.: s. n.
- MANSFELDT, T.; RENNERT, T.; GÖTZFRIED, F. (2011): Eisencyankomplex-Gehalte in nordrhein-westfälischen Straßenrandböden nach dem schneereichen Winter 2009/10. *Straße und Autobahn* 6, pp. 389-393
- Polymer Service GmbH Merseburg (kein Datum): Rieselfähigkeit. [Online] Available at: <http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Rieself%C3%A4higkeit> [Zugriff am 22.1.2015]
- REMY, H. (1973): Lehrbuch der Anorganischen Chemie, Band II, S. 375. 12./13. Hrsg. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.

- RENTSCH, M. (2015): Vergleichende Untersuchungen zum Einaxialen Drucktest und Ringschergerät. TU Bergakademie Freiberg: Masterarbeit
- RICHTER, F. (2009): Überblick über repräsentative Probennahmeverfahren in der Geotechnik für bautechnische Zwecke, TU Bergakademie Freiberg: Hauptseminar Geotechnik
- MICHELS, R.; ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf (2014): [http://www.eta-kunststofftechnologie.de/pdf-Dateien/Downloads/06\\_Verfahrensvarianten...\\_VDI.pdf](http://www.eta-kunststofftechnologie.de/pdf-Dateien/Downloads/06_Verfahrensvarianten..._VDI.pdf). [Online] [Zugriff am 25.11.2014]
- RÖCK, M. et al. (2006): Development of an uniaxial baking tester. *Chemie-Ingenieur-Technik* 78, pp. 6, 739-741
- SCHULZE, D. (2009): *Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung*. 2. bearb. Aufl. s. l.: Springer
- SCHULZE, D. (2011): Fließverhalten von Pulvern und Schüttgütern. [Online] Available at: <http://www.dietmar-schulze.de/grdd1.html> [Zugriff am 17.02.2015]
- SCHWEDES, J. et al. (2001): *Lagern und Fließen von Schüttgütern*. Braunschweig: Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Braunschweig
- SCHWEDES, J. (1976): Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. *Chem.-Ing.-Tech.*, 4 (48)
- SCHWEDES, J. (2001): *Lagern und Fließen von Schüttgütern*. Braunschweig: s. n.
- SONNTAG, A. (2014): *Auslaufbox und Kombibox – zwei Prüfgeräte zur Bestimmung der Rieselfähigkeit von groben Schüttgütern*, Informationsblatt : Alfred Sonntag Kunststoffe
- SONNTAG, A. (kein Datum): *Alfred Sonntag Kunststoffe*. [Online] Available at: <http://www.sonntag-kunststoffe.de> [Zugriff am 25. 03.2015]
- SONNTAG, A.; BOSEWITZ, S. (kein Datum): *Die Bestimmung der Rieselfähigkeit von Agglomeraten mit einer Auslaufbox*. [Online] Available at: <http://www.recyclingportal.eu/pdf/VeroeffentlichungAuslaufbox7.pdf> [Zugriff am 13.10.2014]
- STEIGER, M.; ELENA, C. A.; STERFLINGER, K. (2011): *Weathering and Deterioration*. Springer Berlin Heidelberg (Hrsg.) Berlin;Heidelberg: Springer
- UVR-FIA GmbH (kein Datum): *Bestimmung der Fließfähigkeit nach der Siebmethode – Arbeitsanleitung*. s. l.: s. n.
- VOGT, R.; GORETZKI, L.; HENNING, O. (1994): *Zum Einfluss von Salzen auf das hygrische Verhalten von Baustoffen. Teil 2 – Sorptionsverhalten salzbelasteter Baustoffe*. *Bautenschutz + Bausanierung*, Jg. 17 (Nr. 3)
- WEBER, H. (2009): *Mikrobiologie der Lebensmittel*. Band 1: Grundlagen. 9. Auflage Hrsg. s. l.: Behr
- WEIGEL, B. et al. (2006): Comparative testing of powder caking. *Chem. Eng. Technol.* 29, pp. 6, 686-690
- WIKIPEDIA, S. R. (2015): *Rieselfähigkeit*. [Online] Available at: <http://https://de.wikipedia.org/wiki/Rieselfähigkeit> [Zugriff am 17.02.2015]
- WINZER, A.; EMONS, H.-H.; OHMANN, W. (1979): *Zum Einfluss von Fremdstoffen auf die Geschwindigkeit der Stoffübertragungsprozesse während der Ostwald-Reifung des KCl und NaCl*. *Freiberger Forschungshefte A 600*, pp. 45-60
- WOTSCHKE, R. (1965): *Untersuchungen zur Verhinderung des Zusammenbackens von Kochsalz, insbesondere Raffinade-Vakuum-Siedesalz, bei der Lagerung*, Diss. TH Braunschweig. Braunschweig: s. n.

**Internetquellen**

www.aptis.be (kein Datum): www.aptis.be. [Online]  
Available at: [http://www.aptis.be/our\\_products/granuheap\\_repose\\_angle\\_instrument\\_cohesion\\_powder\\_heap/?lang=en](http://www.aptis.be/our_products/granuheap_repose_angle_instrument_cohesion_powder_heap/?lang=en) [Zugriff am 13.03.2015]

www.brookfieldengineering.com (2014): [Online]  
Available at: <http://www.brookfieldengineering.com>

www.freemantech.co.uk/(kein Datum): Freeman Technology. [Online] Available at: <http://www.freemantech.co.uk/>[Zugriff am 12.03.2015]

www.process.vogel.de (kein Datum): [Online]  
Available at: [http://www.process.vogel.de/automatisierung\\_prozessmesstechnik/articles/329960/](http://www.process.vogel.de/automatisierung_prozessmesstechnik/articles/329960/)[Zugriff am 02.03.2015]

www.winopal.de (kein Datum): Winopal. [Online]  
Available at: <http://www.winopal.com/laborbedarf/produkte/pulver-eigenschaften/powder-flow-analyser.html> [Zugriff am 09.03.2015]

## Anlagen

- I Probenübersicht
- II Ergebnisübersicht
- III Übersicht Korngrößenverteilungen
- IV Prüfbericht TL Streu
- V Ergebnisse der Voruntersuchungen der einachsigen Druckfestigkeit
- VI Ergebnisse weiterer Untersuchungen der einachsigen Druckfestigkeit
- VII Fotos der Wiederholungsversuche zur Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox-Klappe
- VIII Fotos der Wiederholungsversuche zur Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox-Schieber
- IX Mikroskopische Aufnahmen von Ausgangsmaterial und fraktioniertem Material
- X Mikroskopische Aufnahmen von Ausgangsmaterial und fraktioniertem Material
- XI Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox (Klappe) – Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte
- XII Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox (Klappe) – Untersuchungen zum Einfluss von Korngrößenverteilung und Feuchte – Fraktion 0,5 – 4 mm
- XIII Änderung des Feuchtegehaltes bei vierwöchiger Lagerung (Raumklima)

## I Probenübersicht

Herkunft	Probe		Probenbezeichnung
(Lieferant)	Nr.		
UVRFIA	Quarzsand		Quarzsand
BAST	4	07.01.2015	AM Kaarst - DSD Borth mit kleiner Schaufel gesammelt
	5	07.01.2015	AM Kaarst - DSD Borth mit Probesteher
	13	07.01.2015	Grevenbroich - DSD-Salz oberer Bereich, 1m-Schicht mit großer Schaufel gesammelt
	12	07.01.2015	Grevenbroich - DSD-Salz oberer Bereich, 1m-Schicht mit Probenstecher gesammelt
	7	07.01.2015	Grevenbroich - Marokkosalz aus sehr harter Wand
	11	07.01.2015	Grevenbroich aus weniger harter aber fester Wand (Salz aus Marokko)
	6	07.01.2015	Salzhalle Holzheim AM Kaarst - Marokkosalz mit großer Schaufel
	16	07.01.2015	Salzhalle Holzheim AM Kaarst - Marokkosalz mit kleiner Schaufel gesammelt
	10	09.01.2015	Salzhalle Gerlingen - AM Freudenberg - Marokkosalz mit kleiner Schaufel gesammelt
	15	09.01.2015	SM Wilsdorf DSD-Lieferung 2013/14 - große Schaufel
	9	09.01.2015	Tunnel Gerlingen Marokkosalz mit großer Schaufel
	17	09.01.2015	Tunnel Gerlingen Marokkosalz mit Probesteher
	8	14.01.2015	Salzhalle Vettelhoven - AM Mendig - 2011? Hinterste Lage mit großer Schaufel gesammelt
	14	14.01.2015	Salzhalle Vettelhoven - AM Mendig - Marokkosalz mit kleiner Schaufel gesammelt
Südsalz	3	14.01.2015	Vettelhoven - 2. älteste Lage
	1	14.01.2015	Vettelhoven - 3. älteste Lage
	2	14.01.2015	Vettelhoven - vordere 2. Lage
	21	Lieferung 11/2014	0,16 - 2 mm mit Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)
	22	Lieferung 11/2014	0,16 - 2 mm ohne Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)
	23	Lieferung 11/2014	0,16 - 3 mm mit Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)
	24	Lieferung 11/2014	0,16 - 3 mm ohne Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)
Salzlager Stollberg	25	Lieferung 11/2014	0,16 - 5 mm mit Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)
	26	Lieferung 11/2014	0,16 - 5 mm ohne Trennmittel (SÜDSALZ GmbH)
	20	Lieferung 11/2014	Tempotau (SÜDSALZ GmbH)
	27	20.01.2015	Salzlager Stollberg Probenahme UVRFIA (Probesteher senkrecht)
AM Siebenlehn	28	20.01.2015	Salzlager Stollberg Probenahme BAST (Probesteher waagrecht)
	29	20.01.2015	Salzlager Stollberg Probenahme UVRFIA (Schaufel)
	32	20.01.2015	Salzlager Stollberg Probenahme UVRFIA (Schaufel)
BigBag-Proben	33	20.01.2015	Salzlager Stollberg Salzlager "alt" (DSD-Material vom Vorjahr) Probenahme UVRFIA (Schaufel)
	30	20.01.2015	AM Siebenlehn Probenahme UVRFIA (Probesteher senkrecht)
AM Mendig	31	20.01.2015	AM Siebenlehn Probenahme UVRFIA (Schaufel)
	34	20.01.2015	AM Siebenlehn Probenahme BAST (Schaufel)
AM Schüttorf	18	Lieferung 02/2015	Heilbronner Aufausalz 0-3 mm (BigBag)
	19	Lieferung 02/2015	französisches Meersalz (aus BigBag)
	35	03.02.2015	BigBag Grevenbroich (Marokkosalz)
Schottland / Irland	36	KW 11/2015	AM Mendig (Silo)
	37	KW 11/2015	AM Mendig (Halle)
Schottland / Irland	38	Lieferung KW 20/2015	Probe 1-AM Lathen Salzhalle
	39	Lieferung KW 20/2015	Probe 2-AM Schüttorf Salzhalle
	40	Lieferung KW 20/2015	Probe 3-AM Schüttorf Salzhalle, braun gefärbt
	41	Lieferung KW 20/2015	White Salt, Supplier -Peacocks, Marine Salt von BEAR
	42	Lieferung KW 20/2015	Irland von BEAR
	43	Lieferung KW 20/2015	Brown Salt, Cleveland Potash England von BEAR
Schottland / Irland	44	Lieferung KW 20/2015	Depot Amey (Salt Union)
	45	Lieferung KW 20/2015	Depot Amey (Salz für Soleherstellung)
	46	Lieferung KW 20/2015	Peacock Salzhalle BEAR

## II Ergebnisübersicht

Herkunft	Probe	Ursprung	Feuchte	KGV Anteil	BET	Kombibox		Schüttdichte		Rüttel-	Trichter	pH-	Antibackmittel-	
(Lieferant)	Nr.	Marokko	Trockenschrank	< 0,125 mm		Klappe	Schieber	Standard	Kombibox	dichte		Wert	Fe(CN) <sub>6</sub>	
			[%]	[%]	[m <sup>2</sup> /g]	[%]	[%]	[kg/l]	[kg/l]	[kg/l]	[g/s]		[mg/kg OS]	
UVRFIA	Quarz-sand		0,14			64,1	60,0	1,52		1,74	877,0			
BAST	4		0,31	2,8	0,04	36,3		1,20	1,11	0,0	461,9	9,4	173,0	
	5		0,19	3,0	0,21	39,8		1,22	1,14	0,0	492,8	9,2	130,0	
	13		0,01	2,3	0,03	54,7		1,29	1,22		589,7	8,9	105,0	
	12		0,03	2,5	0,04	59,2		1,31	1,24		614,2	9,0	106,0	
	7	●	0,26	4,0	0,09	27,2		1,27	1,15		459,6	8,7	41,3	
	11	●	0,11	5,3	0,07	27,9		1,27	1,16		456,2	8,5	45,6	
	6	●	1,12	3,0	0,21	29,4		1,19	1,06		0,0	0,0	8,1	41,3
	16	●	0,96	3,2	0,20	29,6		1,19	1,06		0,0	0,0	6,9	48,8
	10	●	1,07	3,2	0,24	27,5		1,17	1,05		0,0	0,0	8,7	65,7
	15		1,44	1,6	0,08	26,5		1,14	0,99		0,0	0,0	9,2	88,6
	9	●	1,61	3,8	0,33	25,2		1,16	1,03		0,0	0,0	8,0	32,9
	17	●	1,62	3,5	0,38	25,8		1,16	1,04		0,0	0,0	7,7	36,0
	8		1,76	4,9	0,18	30,3		1,14	1,04		0,0	0,0	7,4	64,0
	14	●	0,66	4,6	0,22	29,7		1,19	1,08		0,0	0,0	8,9	55,1
	3	●	1,33	3,8	0,35	32,0		1,17	1,06		0,0	0,0	8,6	31,8
1	●	0,97	6,6	0,18	28,3		1,19	1,10		0,0	0,0	8,9	92,0	
2	●	0,59	7,5	0,13	31,3		1,24	1,16		463,3	8,9	117,0		
Südsalz	21		0,08	2,3	0,14	47,2	47,0	1,21	1,15	1,42	659,0	8,5	71,4	
	22		0,14	11,9	0,12	20,3	29,4	1,30	1,24	1,52	592,7	8,2	42,4	
	23		0,23	1,9	0,17	46,1	46,3	1,21	1,19	1,39	587,0	8,6	58,8	
	24		0,06	1,4	0,12	61,3	60,6	1,29	1,27	1,47	675,0	8,2	46,6	
	25		0,16	0,7	0,17	56,5	49,4	1,15	1,16	1,32	550,0	6,9	71,4	
	26		0,09	0,6	0,17	61,5	62,0	1,13	1,16	1,27	542,0	7,3	15,9	
	20		0,04	0,2	0,02	68,0	69,5	1,29	1,28	1,44	867,0	7,1	64,7	
Salzlager Stollberg	27		0,29	4,2	0,06	35,1		1,24	1,16		472,8	6,6	101,0	
	28		0,19	3,2	0,04	43,6		1,25	1,16		510,7	6,6	103,0	
	29		0,43	7,4	0,09	31,0		1,26	1,16		441,2	6,5	65,6	
	32		0,07	3,2	0,06	40,5		1,23	1,13		490,2	6,0	72,1	
	33		0,01	2,3	0,03	45,9		1,20	1,13		495,5	6,1	53,0	
AM Siebenlehn	30		0,17	2,2	0,04	47,5		1,22	1,17		504,8	6,8	58,3	
	31		0,10	2,3	0,03	51,0		1,23	1,15		526,8	6,2	53,0	
	34		0,02	2,1	0,02	48,1		1,21	1,15		519,1	6,1	63,6	
BigBag-Proben	18		0,09	1,1	0,16	54,6		1,22	1,17	1,38	549,8	7,7	78,5	
	19		2,54	3,4	0,05	30,3	-	1,17	1,03	1,31	-	9,3	30,7	
	35	●	0,33	3,9	0,09	26,9		1,27	1,17	1,37	488,3	6,3	21,2	
AM Mendig	36		0,11	2,2	0,05	43,6		1,21	1,14			6,2	97,5	
	37		0,38	3,0	0,05	35,9		1,22	1,12			6,2	82,7	
AM Schüttorf	38		0,73	3,3	0,19	21,2		1,21	1,10			9,2	27,6	
	39		0,13	2,0	0,10	45,6		1,16	1,09			9,2	53,0	
	40		0,18	5,3	0,10	32,4		1,28	1,18			9,1	29,7	
Schottland / Irland	41		0,25	1,6	0,05	54,4		1,17	1,15			9,5	27,6	
	42		0,32	5,8	0,65	51,3		1,32	1,27			9,1	48,8	
	43		0,14	5,0	0,07	58,1		1,28	1,22			8,8	42,4	
	44		2,56	2,5	0,34	26,0		1,22	1,06			8,4	31,8	
	45		0,07	3,3	0,15	-		1,29	-			8,6	23,3	
	46		0,32	5,7	0,06	35,5		1,29	1,18			8,7	44,5	

## III Übersicht Korngrößenverteilungen

Maschenweite in mm	Probe									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	97,7	99,1	99,1	99,3	99,9	98,7	99,0	99,9	99,1	99,6
3,15	77,6	82,9	85,9	95,4	94,4	82,6	86,3	89,7	79,7	84,5
1,6	50,1	54,8	57,7	70,9	65,6	52,6	59,5	52,2	49,4	54,9
0,8	30,8	33,7	29,6	38,4	33,8	28,4	35,2	28,0	27,1	31,0
0,4	17,5	19,2	14,7	16,4	14,3	13,8	19,0	15,6	13,4	15,9
0,125	6,6	7,5	3,8	2,8	2,5	3,0	4,0	4,9	3,8	3,2

Maschenweite in mm	Probe									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
5	99,8	99,3	99,4	99,6	99,3	98,3	99,4	100,0	98,7	100,0
3,15	85,9	91,8	88,8	84,6	94,4	81,5	82,9	92,1	83,4	100,0
1,6	54,7	58,4	53,6	52,1	64,6	51,6	52,2	44,9	43,8	100,0
0,8	31,0	29,4	24,1	29,2	32,4	28,2	28,2	17,7	20,4	98,7
0,4	17,1	11,7	9,1	16,2	9,9	14,3	13,2	7,2	10,3	23,3
0,125	5,3	2,5	2,3	4,6	1,6	3,2	3,5	1,1	3,5	0,2

Maschenweite in mm	Probe									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,8	99,7	100,0	100,0
3,15	100,0	100,0	95,6	98,2	81,8	82,7	89,3	89,1	90,3	84,1
1,6	98,2	98,8	63,3	68,8	28,5	27,3	54,9	54,4	58,3	41,3
0,8	57,9	66,4	32,7	37,1	6,3	2,1	27,5	27,0	33,0	14,9
0,4	25,0	37,6	13,6	15,2	2,9	0,9	13,6	12,4	19,0	5,4
0,125	2,3	11,9	1,9	1,4	0,7	0,6	4,2	3,2	7,4	2,2

Maschenweite in mm	Probe									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
5	100,0	99,8	100,0	100,0	98,4	99,8	98,9	97,2	100,0	99,2
3,15	82,8	87,5	95,9	88,5	80,8	93,4	92,4	78,7	100,0	81,5
1,6	40,3	51,9	56,5	48,3	49,5	65,3	60,8	49,9	98,1	50,8
0,8	14,9	25,0	24,9	17,5	27,1	34,4	32,6	28,5	61,5	28,4
0,4	5,1	11,3	9,8	6,1	14,2	13,8	14,8	15,3	27,2	15,8
0,125	2,3	3,0	2,3	2,1	3,9	2,2	3,0	3,3	2,0	5,3

Maschenweite in mm	Probe					
	41	42	43	44	45	46
5	95,3	95,1	97,9	88,8	98,2	97,3
3,15	68,0	73,0	87,2	68,2	60,7	86,0
1,6	28,5	46,0	61,8	42,1	29,2	61,0
0,8	10,4	28,1	36,6	22,6	15,4	37,6
0,4	4,6	16,8	19,7	10,3	8,9	21,4
0,125	1,6	5,8	5,0	2,5	3,3	5,7

## IV Prüfberichte TL Streu (3 Seiten)

## EUROFINS Umwelt Ost GmbH

Ndl. Freiberg

## Produktbeschreibung für tauende Stoffe nach den TL-Streu

## Probenbezeichnung Auftraggeber

Tausalz (Probe 18)

## Probnummer Eurofins

115010696

## Hauptbestandteile

chemische Bezeichnung der Bestandteile mit Angabe der Formel:

NaCl

## Anlieferung als fester Taustoff

-Anteil tauwirksamer Substanz:

Istwert: 98,9 Ma -%

Sollwert für:

NaCl  $\geq 96$  Ma -% (chloridische Salze berechnet als NaCl)CaCl<sub>2</sub>  $\geq 77$  Ma -% (chloridische Salze berechnet als CaCl<sub>2</sub>)MgCl<sub>2</sub>  $\geq 47$  Ma -% (chloridische Salze berechnet als MgCl<sub>2</sub>)

-anhaftende Feuchte

Istwert: 0,07 Ma -%

Sollwert für:

Hallenlagerung:

Sollwert:  $\leq 2$  Ma -%

Sillagerung:

Sollwert:  $\leq 0,6$  Ma -%

-hydrophobierende Bestandteile

 ja  nein-Sulfat (Anion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)Istwert: 0,10 Ma -% Sollwert:  $\leq 2$  Ma -%

-Antibackmittel

Istwert: 45,8 mg/kg Sollwert für Fe(CN)<sub>6</sub>  $\leq 200$  mg/kg

-pH-Wert

Istwert: 5,4 Sollwert:  $5 \leq \text{pH} \leq 10$ 

-Korngrößenverteilung (nach DIN 66165-1/2)

zutreffend / ~~nicht zutreffend~~

NaCl	Durchgang in Ma.-% durch das Prüfsieb					
	0,16 mm	0,8 mm	1,6 mm	3,15 mm	5 mm	8 mm
Istwert	1,7	15,6	45,7	92,9	100	100
Sollwert	$\leq 5$				= 100	= 100
Toleranz	+ 2				-2	0

zutreffend / nicht zutreffend

CaCl <sub>2</sub> und MgCl <sub>2</sub>	Durchgang in Ma.-% durch das Prüfsieb		
	2 mm	10 mm	20 mm
Istwert			
Sollwert	$\leq 25$	$\geq 95$	= 100

Gehalt an wasserlöslichen Schwermetallen

ermittelt in einer 10 Ma.-%igen Lösung bei pH 4

		Istwert (mg/l)	Sollwert (mg/l)
Arsen	(As)	< 0,05	$\leq 0,25$
Blei	(Pb)	< 0,05	$\leq 0,5$
Cadmium	(Cd)	< 0,01	$\leq 0,2$
Chrom, gesamt	(Cr)	< 0,05	$\leq 0,5$
Kupfer	(Cu)	< 0,05	$\leq 0,5$
Nickel	(Ni)	< 0,05	$\leq 0,5$
Quecksilber	(Hg)	< 0,002	$\leq 0,05$
Zink	(Zn)	0,1	$\leq 2$

## EUROFINS Umwelt Ost GmbH

Ndl. Freiberg

### Produktbeschreibung für tauende Stoffe nach den TL-Streu

#### Probenbezeichnung Auftraggeber

Tausalz Probe 19 (NaCl)

#### Probennummer Eurofins

115033530

#### Hauptbestandteile

chemische Bezeichnung der Bestandteile mit Angabe der Formel:

NaCl

#### Anlieferung als fester Taustoff

-Anteil tauwirksamer Substanz:

Istwert: 96,0 Ma.-%

Sollwert für:

NaCl  $\geq$  96 Ma.-% (chloridische Salze berechnet als NaCl)

CaCl<sub>2</sub>  $\geq$  77 Ma.-% (chloridische Salze berechnet als CaCl<sub>2</sub>)

MgCl<sub>2</sub>  $\geq$  47 Ma.-% (chloridische Salze berechnet als MgCl<sub>2</sub>)

-anhaftende Feuchte

Istwert: 2,5 Ma.-%

Sollwert für:

Hallenlagerung: Sollwert:  $\leq$  2 Ma.-%

Silolagerung: Sollwert:  $\leq$  0,6 Ma.-%

-hydrophobierende Bestandteile

ja  nein

-Sulfat (Anion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

Istwert: 0,33 Ma.-% Sollwert:  $\leq$  2 Ma.-%

-Antibackmittel

Istwert: 17,8 mg/kg Sollwert für Fe(CN)<sub>6</sub>:  $\leq$  200 mg/kg

-pH-Wert

Istwert: 8,5 Sollwert:  $5 \leq$  pH  $\leq$  10

-Korngrößenverteilung (nach DIN 66165-1/2)

zutreffend / nicht zutreffend

NaCl	Durchgang in Ma.-% durch das Prüfsieb					
	0,16 mm	0,8 mm	1,6 mm	3,15 mm	5 mm	8 mm
Istwert	2,4	16,3	38,2	67,2	97,7	100
Sollwert	$\leq$ 5				= 100	= 100
Toleranz	+ 2				-2	0

zutreffend / nicht zutreffend

CaCl <sub>2</sub> und MgCl <sub>2</sub>	Durchgang in Ma.-% durch das Prüfsieb		
	2 mm	10 mm	20 mm
Istwert			
Sollwert	$\leq$ 25	$\geq$ 95	= 100

Gehalt an wasserlöslichen Schwermetallen

ermittelt in einer 10 Ma.-%igen Lösung bei pH 4

		Istwert (mg/l)	Sollwert (mg/l)
Arsen	(As)	0,004	$\leq$ 0,25
Blei	(Pb)	< 0,001	$\leq$ 0,5
Cadmium	(Cd)	< 0,0002	$\leq$ 0,2
Chrom, gesamt	(Cr)	0,0009	$\leq$ 0,5
Kupfer	(Cu)	0,041	$\leq$ 0,5
Nickel	(Ni)	< 0,001	$\leq$ 0,5
Quecksilber	(Hg)	0,0003	$\leq$ 0,05
Zink	(Zn)	0,006	$\leq$ 2

## EUROFINS Umwelt Ost GmbH

Ndl. Freiberg

### Produktbeschreibung für tauende Stoffe nach den TL-Streu

#### Probenbezeichnung Auftraggeber

Tausalz (Probe 35)

#### Probennummer Eurofins

115010697

#### Hauptbestandteile

chemische Bezeichnung der Bestandteile mit Angabe der Formel:

NaCl

#### Anlieferung als fester Taustoff

-Anteil tauwirksamer Substanz:

Istwert: 99,7 Ma.-%

Sollwert für:

NaCl  $\geq 96$  Ma.-% (chloridische Salze berechnet als NaCl)

CaCl<sub>2</sub>  $\geq 77$  Ma.-% (chloridische Salze berechnet als CaCl<sub>2</sub>)

MgCl<sub>2</sub>  $\geq 47$  Ma.-% (chloridische Salze berechnet als MgCl<sub>2</sub>)

-anhaftende Feuchte

Istwert: 0,21 Ma.-%

Sollwert für:

Hallenlagerung:

Sollwert:  $\leq 2$  Ma.-%

Silolagerung:

Sollwert:  $\leq 0,6$  Ma.-%

-hydrophobierende Bestandteile

ja  nein

-Sulfat (Anion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

Istwert: 0,40 Ma.-% Sollwert:  $\leq 2$  Ma.-%

-Antibackmittel

Istwert: 52,6 mg/kg Sollwert für Fe(CN)<sub>6</sub>:  $\leq 200$  mg/kg

-pH-Wert

Istwert: 5,0 Sollwert:  $5 \leq \text{pH} \leq 10$

-Korngrößenverteilung (nach DIN 66165-1/2)

zutreffend / nicht zutreffend

NaCl	Durchgang in Ma.-% durch das Prüfsieb					
	0,16 mm	0,8 mm	1,6 mm	3,15 mm	5 mm	8 mm
Istwert	4,2	22,8	43,9	76,6	96,8	100
Sollwert	$\leq 5$				= 100	= 100
Toleranz	+ 2				-2	0

zutreffend / nicht zutreffend

CaCl <sub>2</sub> und MgCl <sub>2</sub>	Durchgang in Ma.-% durch das Prüfsieb		
	2 mm	10 mm	20 mm
Istwert			
Sollwert	$\leq 25$	$\geq 95$	= 100

Gehalt an wasserlöslichen Schwermetallen

ermittelt in einer 10 Ma.-%igen Lösung bei pH 4

		Istwert (mg/l)	Sollwert (mg/l)
Arsen	(As)	< 0,05	$\leq 0,25$
Blei	(Pb)	0,05	$\leq 0,5$
Cadmium	(Cd)	< 0,01	$\leq 0,2$
Chrom, gesamt	(Cr)	< 0,05	$\leq 0,5$
Kupfer	(Cu)	0,06	$\leq 0,5$
Nickel	(Ni)	< 0,05	$\leq 0,5$
Quecksilber	(Hg)	< 0,002	$\leq 0,05$
Zink	(Zn)	0,1	$\leq 2$

## V Ergebnisse der Voruntersuchungen der einachsigen Druckfestigkeit

Datum	Nr.	Probe	Zielfeuchte in Ma-%	Feuchte vor Messung	Feuchte nach Messung	rel. Luftfeuchte	Lager- temperatur in °C	Lagerzeit in h	Verfestigungs- spannung in kPa	Kraft in kN	Kraft in N	Spannung in Pa	Spannung in kPa
16.03.2015	1	35	1	1,06		50	20	24	20	0,0	3,7	1432,6	1,4
16.03.2015	2	35	0,5	0,43		50	20	24	20	-		0,0	0,0
20.03.2015	1	35	0,5	0,48		50	20	72	20	-		0,0	0,0
20.03.2015	2	35	0,5	0,52		50	20	72	0	-		0,0	0,0
20.03.2015	3	20	0,5	0,43		50	20	72	20	0,0	1,2	456,5	0,5
24.03.2015	1	18	1	0,78	0,94	80	20	24	20	-		0,0	0,0
24.03.2015	2	18	1	0,96	1,08	80	20	24	0	-		0,0	0,0
24.03.2015	3	20	1	0,96	0,93	80	20	24	20	0,0	3,6	1395,3	1,4
24.03.2015	4	20	1	0,83	0,8	80	20	24	0	0,0	1,3	485,9	0,5
24.03.2015	5	35	1	1,04	0,81	80	20	24	20			0,0	0,0
24.03.2015	6	35	1	1,01	1,09	80	20	24	0	0,0	1,6	618,7	0,6
26.03.2015	1	18	1	1,12	0,89	80	20	24	20	-		0,0	0,0
26.03.2015	2	18	1	0,92		80	20	24	0	-		0,0	0,0
26.03.2015	3	20	1	1,11	0,88	80	20	24	20	0,0	1,2	450,1	0,5
26.03.2015	4	20	1	0,81	0,76	80	20	24	0	0,0	1,2	453,8	0,5
26.03.2015	5	35	1	1,23	1,04	80	20	24	20	0,0	3,4	1327,6	1,3
26.03.2015	6	35	1	1,04	1	80	20	24	0			0,0	0,0
09.04.2015	1	35	1,2	1,31	1,22	80	20	24	20	0,0	4,5	1720,3	1,7
09.04.2015	2	35	1,2	1,31	1,21	80	20	24	0	0,0	2,4	935,7	0,9
09.04.2015	3	35	1,2	1,18	1,2	80	20	24	20	0,0	4,5	1739,4	1,7
09.04.2015	4	35	1,2	1,18	1,21	80	20	24	0	0,0	1,1	437,9	0,4
09.04.2015	5	35	2	1,99	2,05	80	20	24	20	0,0	2,5	963,6	1,0
09.04.2015	6	35	2	2,15	2,1	80	20	24	0	0,0	1,7	643,1	0,6
14.04.2015	1	18	1,2	1,21	1,16	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
14.04.2015	2	18	1,2	1,21	1,27	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
14.04.2015	3	18	1,2	1,21	1,13	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
14.04.2015	4	18	1,2	1,21	1,29	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
14.04.2015	5	18	2	1,84	1,91	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
14.04.2015	6	18	2	1,84	1,92	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
16.04.2015	1	35	2	2,02	1,97	80	20	24	20	0,0	4,8	1836,6	1,8
16.04.2015	2	35	2	2,02	2,23	80	20	24	0	0,0	2,1	796,5	0,8
16.04.2015	3	18	2	1,99	1,87	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
16.04.2015	4	18	2	1,99	2,2	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
11.05.2015	1	19	Anlieferungszustand		2,51	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
11.05.2015	2	19			3,19	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
11.05.2015	3	19			2,71	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
11.05.2015	4	19			2,49	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0

## VI Ergebnisse weiterer Untersuchungen der einachsigen Druckfestigkeit

11.06.2015	1	18	2	1,89	1,99	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
11.06.2015	2	18	2	1,89	2,04	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
11.06.2015	3	18	2	1,89	1,89	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
11.06.2015	4	18	2	1,89	2,31	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
11.06.2015	5	19	2	1,87	1,93	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
11.06.2015	6	19	2	1,87	2,35	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
15.06.2015	1	19	2	2,07	2,01	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
15.06.2015	2	19	2	2,07	2,22	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
15.06.2015	3	35	2	1,88	1,99	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
15.06.2015	4	35	2	1,88	2,21	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
15.06.2015	5	35	2	1,88	1,93	80	20	24	20	-	0,0	0,0	0,0
15.06.2015	6	35	2	1,88	2,25	80	20	24	0	-	0,0	0,0	0,0
17.06.2015	1	18	Anlieferungszustand		2,61	-	-	672	0	0,0	3,5	1347,7	1,3
17.06.2015	2	18			3,15	-	-	672	0	0,0	2,9	1099,9	1,1
17.06.2015	3	19			2,66	-	-	672	0	0,0	5,8	2244,1	2,2
17.06.2015	4	19			2,90	-	-	672	0	0,0	3,9	1491,6	1,5
17.06.2015	5	35			2,56	-	-	672	0	0,0	8,8	3407,8	3,4
17.06.2015	6	35			2,87	-	-	672	0	0,0	9,6	3695,7	3,7

11.6.2015: Untersuchung fraktionierter Proben

15.6.2015: Untersuchung fraktionierter Proben

17.6.2015: Untersuchung der Proben nach vierwöchiger Lagerung unter klimatisierten Bedingungen in der Klimazelle

## VII Vergleich zweier Laboranten – Kombibox

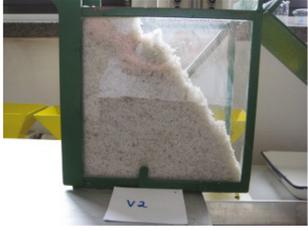
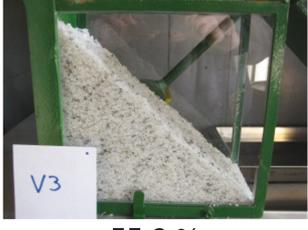
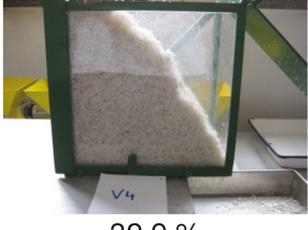
Laborant 1, Material: Versuchssand, Kombibox (Klappe)			
Versuch	Einwaage	ausgelaufene Masse	Auslaufrate
	in g	in g	
1	6023,5	3904,2	64,8 %
2	5927,8	3847,3	64,9 %
3	5890,6	3777,0	64,1 %
4	5919,2	3786,4	64,0 %
5	6044,1	3891,3	64,4 %
6	6007,7	3832,6	63,8 %
7	6007,7	3858,9	64,2 %
8	6024,5	3856,0	64,0 %
9	6016,1	3811,7	63,4 %
10	6024,5	3809,6	63,2 %
Mittelwert			<b>64,1 %</b>
Variationskoeffizient			<b>0,8 %</b>

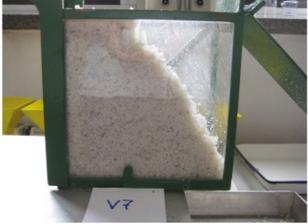
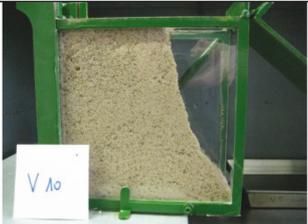
Laborant 2, Material: Versuchssand, Kombibox (Klappe)			
	Einwaage	ausgelaufene Masse	Auslaufrate
	in g	in g	
1	6209,5	3875,2	62,4 %
2	6316,5	4043,8	64,0 %
3	6329,2	4038,6	63,8 %
4	6358,0	4028,4	63,4 %
5	6235,4	3929,3	63,0 %
6	6249,1	3940,7	63,1 %
7	6299,5	4018,7	63,8 %
8	6302,1	3949,0	62,7 %
9	6246,4	4013,8	64,3 %
10	6237,1	3904,8	62,6 %
Mittelwert			<b>63,3 %</b>
Variationskoeffizient			<b>1,0 %</b>

Laborant 1, Material: Versuchssand, Kombibox (Schieber)			
	Einwaage	ausgelaufene Masse	Auslaufrate
	in g	in g	
1	5996,8	3605,5	60,1 %
2	6011,9	3678,7	61,2 %
3	6007,8	3547,1	59,0 %
4	6006,1	3667,3	61,1 %
5	5960,5	3429,2	57,5 %
6	5763,4	3667,6	63,6 %
7	5961,9	3395,5	57,0 %
8	5957,4	3507,4	58,9 %
9	5933,2	3571,7	60,2 %
10	5918,9	3640,6	61,5 %
Mittelwert			<b>60,0 %</b>
Variationskoeffizient			<b>3,3 %</b>

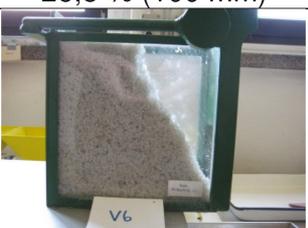
Laborant 2, Material: Versuchssand, Kombibox (Schieber)			
	Einwaage	ausgelaufene Masse	Auslaufrate
	in g	in g	
1	6238,4	3448,3	55,3 %
2	6135,9	3465,1	56,5 %
3	6190,1	3726,4	60,2 %
4	6277,0	3668,1	58,4 %
5	6272,5	3688,1	58,8 %
6	6239,5	3583,6	57,4 %
7	6250,8	3429,6	54,9 %
8	6232,0	3481,9	55,9 %
9	6285,4	3502,9	55,7 %
10	6290,6	3427,4	54,5 %
Mittelwert			<b>56,8 %</b>
Variationskoeffizient			<b>3,3 %</b>

## VIII Wiederholungsversuche zur Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox-Klappe (2 Seiten)

Messung	Probe 18	Probe 19	Probe 35
1	 54,3 %	 33,1 %	 27,5 %
2	 54,6 %	 31,5 %	 17,0 %
3	 55,2 %	 31,0 %	 28,2 %
4	 55,8 %	 32,9 %	 28,3 %
5	 54,2 %	 28,9 %	 29,5 %
6	 53,6 %	 29,6 %	 27,1 %

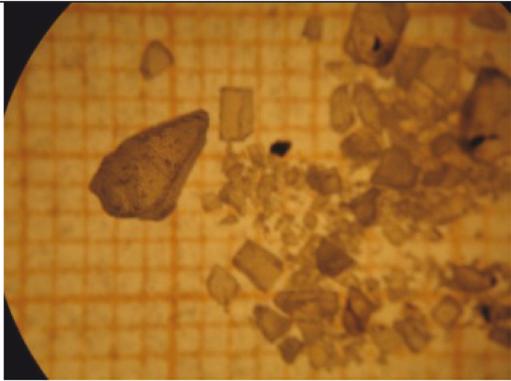
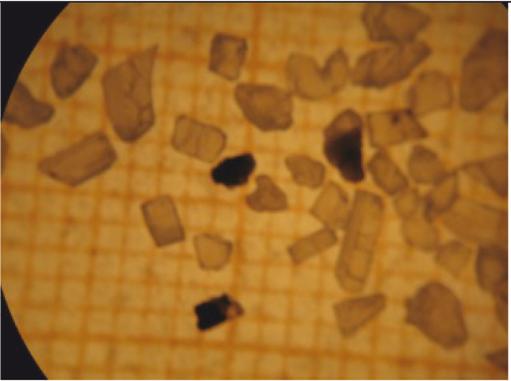
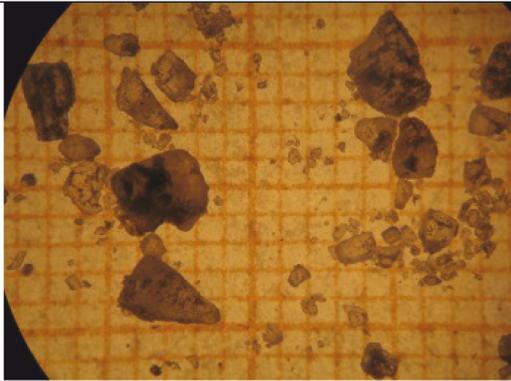
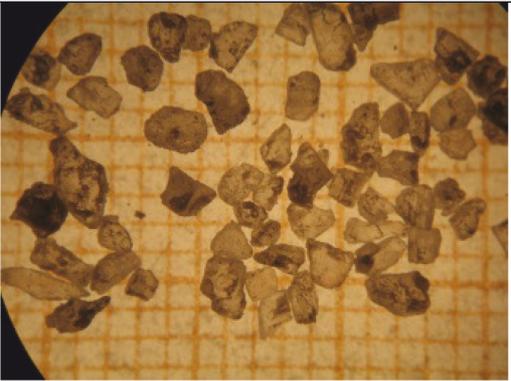
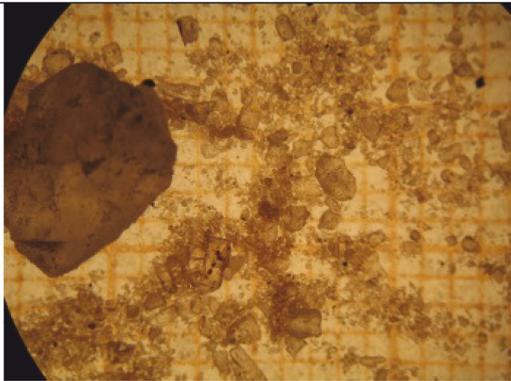
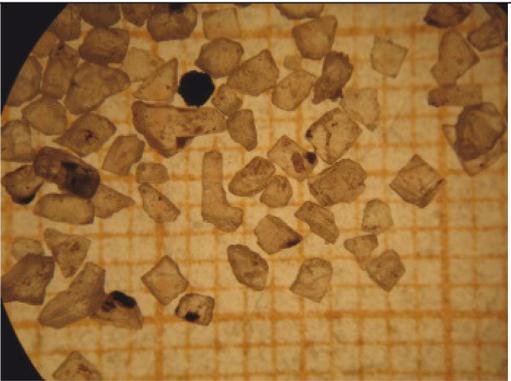
7	 V7 55,0 %	 V7 30,2 %	 V7 24,8 %
8	 V8 55,0 %	 V8 30,5 %	 V8 29,2 %
9	 V9 54,2 %	 V9 27,5 %	 V9 29,0 %
10	 V10 53,8 %	 V10 27,5 %	 V10 28,6 %

IX Fotos der Wiederholungsversuche zur Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox-Schieber  
(2 Seiten)

Messung	Probe 18	Probe 19	Probe 35
1	 43,1 % (13 mm)	 26,7 % (80 mm)	 25,7 % (24 mm)
2	 46,7 % (13 mm)	 26,3 % (89 mm)	 29,0 % (26 mm)
3	 49,7 % (13 mm)	 29,5 % (80 mm)	 26,1 % (23 mm)
4	 47,7 % (13 mm)	 28,8 % (82 mm)	 25,9 % (23 mm)
5	 51,0 % (13 mm)	 26,5 % (100 mm)	 21,3 % (75 mm)
6	 43,2 % (13 mm)	 30,3 % (97 mm)	 26,4 % (51 mm)

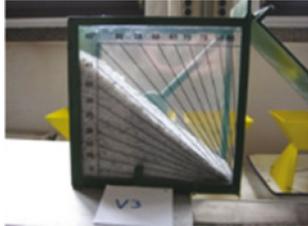
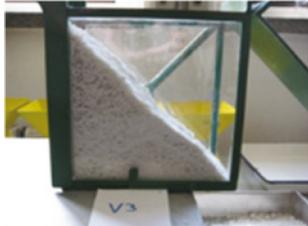
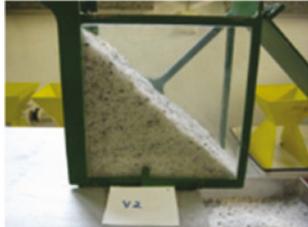
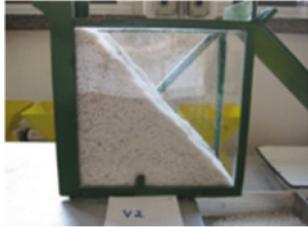
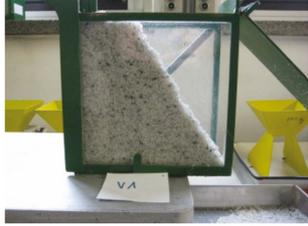
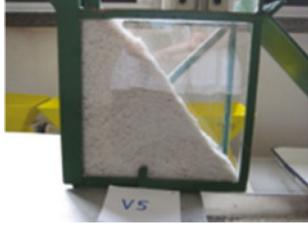
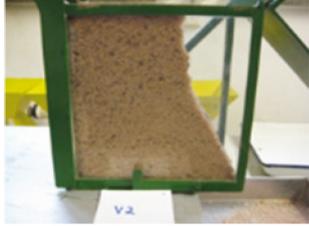
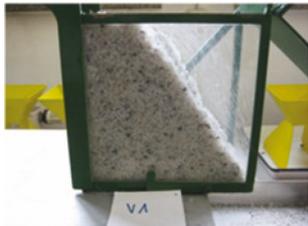
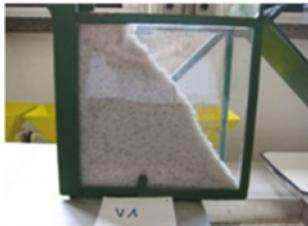
7	 <p>V7</p> <p>53,9 % (13 mm)</p>	 <p>V7</p> <p>25,1 % (90 mm)</p>	 <p>V7</p> <p>25,7 % (23 mm)</p>
8	 <p>V8</p> <p>43,8 % (13 mm)</p>	 <p>V8</p> <p>29,4 % (95 mm)</p>	 <p>V8</p> <p>25,8 % (27 mm)</p>
9	 <p>V9</p> <p>47,8 % (13 mm)</p>	 <p>V9</p> <p>26,2 % (90 mm)</p>	 <p>V9</p> <p>28,5 % (25 mm)</p>
10	 <p>V10</p> <p>51,7 % (13 mm)</p>	 <p>V10</p> <p>29,3 % (97 mm)</p>	<p>ohne Foto</p> <p>28,6 % (38 mm)</p>

## X Mikroskopische Aufnahmen von Ausgangsmaterial und fraktioniertem Material

	Ausgangsmaterial	Fraktion 1 – 2 mm
Probe 18		
Probe 19		
Probe 35		

XI Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox (Klappe) – Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte (2 Seiten)

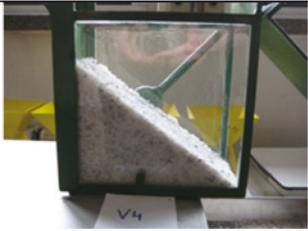
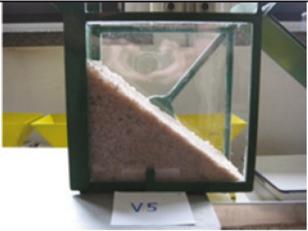
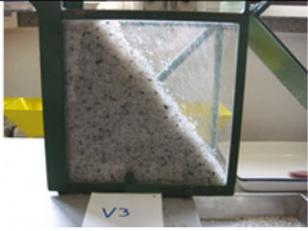
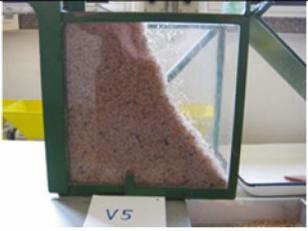
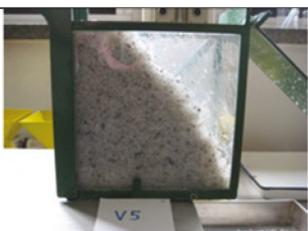
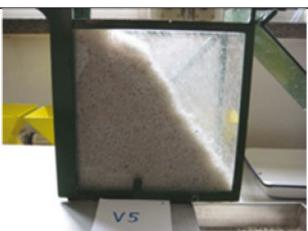
Die Auslaufrate ist ein Mittelwert, der aus fünf Einzelmessungen gebildet wurde. Die Abbildung entspricht dem Wert, der sich am dichtesten am Mittelwert befindet. Fotos aller Versuche befinden sich auf der CD mit den Rohdaten.

Feuchte	Probe 18	Probe 19	Probe 35
0 %	 60,2 %	 53,5 %	 60,0 %
0,3 %	 53,9 %	 46,7 %	 29,0 %
0,6 %	 37,2 %	 40,7 %	 25,8 %
1,0 %	 34,8 %	 37,2 %	 26,6 %

1,2 %	 33,9 %	 37,5 %	 25,5 %
2,0 %	 30,8 %	 32,1 %	 26,6 %
3,0 %	 30,7 %	 32,1 %	 23,9 %
4,0 %	 30,7 %		

XII Bestimmung der Auslaufrate mittels Kombibox (Klappe) – Untersuchungen zum Einfluss von Korngrößenverteilung und Feuchte – Fraktion 0,5 – 4 mm (2 Seiten)

Die Auslaufrate ist ein Mittelwert, der aus fünf Einzelmessungen gebildet wurde. Die Abbildung entspricht dem Wert, der sich am dichtesten am Mittelwert befindet. Fotos aller Versuche befinden sich auf der CD mit den Rohdaten.

Feuchte	Probe 18_0,5-4mm	Probe 19_0,5-4mm	Probe 35_0,5-4mm
0 %	 62,7 %	 61,4 %	 62,8 %
0,6 %	 41,9 %	 55,8 %	 34,4 %
2,0 %	 34,6 %	 35,7 %	 30,6 %

## XIII Änderung des Feuchtegehaltes bei vierwöchiger Lagerung (Raumklima)

	Probe 18		Probe 19		Probe 35		Luftfeuchte	Temperatur
Tara	462,1		491,9		399,7			
Einwaage	100,0	MA 30	100,0	MA 30	100,0	MA 30	42%	
1.6.2015	562,1	0,08%	591,8	0,09%	499,7	0,18%	45%	22,9
2.6.2015	562,1		591,8		499,7		46%	20,6
3.6.2015	562,1		591,7		499,6		43%	21,5
4.6.2015	562,1		591,8		499,6		43%	22,1
5.6.2015	562,1		591,7		499,7		35%	25,9
8.6.2015	562,1		591,8		499,7		42%	23,9
9.6.2015	562,2		591,8		499,7		45%	22,1
10.6.2015	562,2		591,8		499,7		46%	20,7
11.6.2015	562,2		591,8		499,7		44%	21,4
12.6.2015	562,2		591,8		499,7		47%	21,6
15.6.2015	-		-		-		-	-
16.6.2015	562,3		591,9		499,7		46%	21,5
17.6.2015	562,2		591,8		499,7		42%	20,6
18.6.2015	562,1		591,7		499,7		47%	18,6
19.6.2015	562,1		591,7		499,7		50%	20,1
22.6.2015	562,1		591,7		499,7		48%	19,5
23.6.2015	562,1		591,8		499,7		51%	18,8
24.6.2015	562,2		591,7		499,7		50%	19,0
25.6.2015	562,2		591,8		499,7		50%	19,1
26.6.2015	562,1		591,7		499,6		46%	20,3
29.6.2015	562,1		591,8		499,6		49%	21,0
30.6.2015	562,1		591,7		499,6		49%	22,1
1.7.2015	562,1		591,7		499,7		50%	23,0
2.7.2015	562,1		591,7		499,6		47%	23,9
3.7.2015	562,2	0,11%	591,8	0,10%	499,6	0,16%	42%	25,2

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2014

V 235: **Dynamische Messung der Nachtsichtbarkeit von Fahr-  
bahnmarkierungen bei Nässe**

Drewes, Laumer, Sick, Auer, Zehntner € 16,00

V 236: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012**

Fitschen, Nordmann € 28,50

Die Ergebnisdateien sind auch als CD erhältlich oder können außerdem als kostenpflichtiger Download unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.

V 237: **Monitoring von Grünbrücken – Arbeitshilfe für den Nach-  
weis der Wirksamkeit von Grünbrücken für die Wiedervernetzung  
im Rahmen der KP II – Maßnahmen**

Bund-Länder Arbeitskreis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden. Der Anhang ist interaktiv. Das heißt er kann ausgefüllt und gespeichert werden.

V 238: **Optimierung der Arbeitsprozesse im Straßenbetriebs-  
dienst – Sommerdienst**

Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 239: **Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmar-  
kierungen**

Steinauer, Oeser, Kemper, Schacht, Klein € 16,00

V 240: **Minikreisverkehre – Ableitung ihrer Einsatzbereiche und  
Einsatzgrenzen**

Baier, Leu, Klemps-Kohnen, Reinartz, Maier, Schmotz € 23,50

V 241: **Rastanlagen an BAB – Verbesserung der Auslastung und  
Erhöhung der Kapazität durch Telematiksysteme**

Kleine, Lehmann, Lohoff, Rittershaus € 16,50

V 242: **Bordsteinkanten mit einheitlicher Bordhöhe und Bodenin-  
dikatoren an Überquerungsstellen**

Boenke, Grossmann, Piazzolla, Rebstock, Herrnsdorf, Pfeil € 20,00

V 243: **Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen  
über den gesamten Lebenszyklus**

BalMBERGER, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50

V 244: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013**

Fitschen, Nordmann € 28,50

V 245: **Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunk-  
te mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs**

Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 246: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in  
Einfahrten auf Autobahnen**

Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 247: **Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw**

Lippold, Schemmel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 248: **Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlage-  
ermittlung**

Burg, Röhling

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

V 249: **Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längs-  
gerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Land-  
straßen**

Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 250: **Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen  
mit Lang-Lkw**

Lippold, Schemmel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 251: **Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumge-  
staltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken**

Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50

V 252: **Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose  
für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen**

Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx,

Peters, Reimer, Zipf € 15,00

V 253: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den  
Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen**

Baier, Kemper

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 254: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-  
Lkw**

Wellner, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 255: **Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssi-  
cherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw**

Zimmermann, Riffel, Roos

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 256: **Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagen-  
teile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Vor-  
aussetzung eines umfassenden Asset Managements**

Zander, Birbaum, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 257: **Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtli-  
chen Hauptverkehrsstraßen**

Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier

Hantschel, Otto € 18,00

V 258: **Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten**

Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufole € 18,00

V 259: **Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellie-  
rung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten**

Geistefeldt, Sievers

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 260: **Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinter-  
dienst**

Hausmann

€ 15,50

V 261: Nutzung von Radwegen  
in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen  
Alrutz, Bohle, Busek € 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens  
vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung  
von Falschfahrten  
Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung  
der Verfahren  
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung  
des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen  
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken  
Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität  
von Hauptverkehrsstraßen  
Baier, Hartkopf € 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich  
von Streckenbeeinflussungsanlagen  
Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur  
Hegewald, Fürneisen, Tautz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter  
Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften  
Pohle, Maier € 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den  
Straßenbetriebsdienst (KliBet)  
Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien  
bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur  
Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen  
Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser, Geistefeldt, Hohmann € 16,00

V 273: Autobahnverzeichnis 2016  
Kühnen € 25,50

V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen  
Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf  
Bundesautobahnen  
Grahl, Skottke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die  
Verkehrsteilnehmer  
Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50

V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen  
Kathmann, Roggendorf, Scotti  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014  
Fitschen, Nordmann € 30,50

V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf  
Autobahnen  
Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug, Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00

## 2017

V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse  
der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien  
Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen –  
Weiterentwicklung der Verfahren  
Maier, Berger, Kollmus € 17,50

V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen  
Lippold, Veters, Steinert € 19,50

V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von  
Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten  
Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung  
des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten  
Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz  
Kamptner, Thümmeler, Ohmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen  
und Entwicklung  
Kleine, Lehmann € 16,50

---

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller  
lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe  
können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer  
Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)