

Klärschlamm in getrockneter Form

Trocknen, Lagern, Ausbringen und Zerfallseigenschaften

Urs Meier, MERITEC GmbH, CH-8356 Ettenhausen

Rainer Frick und Martin Schlatter, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT),

CH-8356 Tänikon

Michael Kasper und Peter Hunziker, Gebrüder Hunziker AG, CH-8400 Winterthur

Gregor Affolter, LBBZ Arenenberg, CH-8268 Mannenbach-Salenstein

Im Rahmen eines Klärschlammkonzepts, das auf einer Rückführung der Nährstoffe in den natürlichen Kreislauf beruht, wurden die Trocknungsverfahren, die Eigenschaften der Trockenprodukte und deren Eignung zu Düngungszwecken untersucht. Das Trocknungsverfahren mit einem Trommeltrockner, das ein ausreichend gleichmässig granuliertes Produkt erzielt, erreichte die besten Resultate. Die Herstellung eines Grunddüngers durch Beimischung von Zuschlagstoffen ist

ohne grosse Schwierigkeiten möglich. Die Lagerstabilität der getrockneten Produkte ist bei einem TS-Gehalt von mehr als 85 % gewährleistet. Geringere TS-Gehalte führen zu einer teilweise starken Verpilzung des Materials. Ausbringversuche mit drei unterschiedlichen Geräten – einem Schleuderdüngerstreuer, einem Grossflächenstreuer und einem Kompoststreuer – zeigen, dass alle Produkte aus dem Trommeltrockner sowie die meisten Trockenprodukte aus dem Spiral-

trockner mit dem Schleuderdünger- und Grossflächenstreuer befriedigende Verteilgenauigkeiten erzielen. Die Produkte aus dem Dünnschichtverdampfer fliessen schlecht aus dem Streubehälter aus und bewirken ein unregelmässiges Streubild. Der Kompoststreuer eignet sich für die Ausbringung der untersuchten Produkte nicht. Mit Ausnahme der Pellets aus dem Dünnschichtverdampfer entwickeln alle Produkte erhebliche Staubemissionen. Deutlich geringere Emissionen treten beim Einsatz der Frontstreuerschnecke des Grossflächenstreuers auf. Bezüglich der Zerfallseigenschaften der Produkte sind die drei Trocknungsverfahren als ebenbürtig zu beurteilen. Der getrocknete Klärschlamm sollte aufgrund des langsamen Kornzerfalls oberflächlich in den Boden eingearbeitet werden.



Abb. 1. Versuchsanordnung für die Ermittlung des Streubildes. Das ausgebrachte Material wird in Schalen aufgefangen, und somit kann die Mengenverteilung bestimmt werden. Rechts neben dem Traktor wird gleichzeitig der Staubgehalt in der Luft gemessen.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Versuchsanordnung	2
Resultate	3
Trocknungsversuche	3
Streuversuche	6
Staubentwicklung	8
Zerfallseigenschaften	8
Schlussfolgerungen	9
Literatur	10

Problemstellung

Klärschlamm ist ein Wertstoff. Die Nährstoffe sind sinnvollerweise statt zu entsorgen in den natürlichen Kreislauf zurückzuführen. Daraus entstehen einerseits Fragen der technischen Aufbereitung und andererseits der Verwertbarkeit des Endproduktes innerhalb und ausserhalb der Landwirtschaft. Besonderes Interesse gilt dabei Anwendungsbereichen, für welche sich nasser oder entwässerter Klärschlamm nicht eignet (Spezialkulturen wie Obst-, Wein-, Gemüse- oder Gartenbau, aber auch Wiesen, Weiden, Baumschulen, öffentliche Grünflächen, Hausgärten usw.). Die Verwendung als Komponente von aufgedüngten Erdmischungen oder von Handelsdüngern wird ebenfalls untersucht.

Versuchsordnung

Die Trocknungsprodukte stammen aus drei unterschiedlichen Trocknungsverfahren. Es handelt sich dabei um einen **Trommeltrockner**, eine **Spiraltrocknungsanlage** und einen **Dünnschichtverdampfer**. Die wichtigsten verfahrenstechnischen Kenndaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die **Trocknungsprodukte** der Anlagen sind unterschiedlich in Form und Grösse (Abb. 2). Die Trocknung von gekalktem oder mit Steinmehl stabilisiertem Klärschlamm ergab bei allen drei Versuchsanlagen keine Probleme. Die Trocknungsprodukte von gekalktem oder mit Steinmehl versetztem Schlamm wiesen einen deutlich höheren Feinanteil und eine beige Farbe auf. Die **Lagerfähigkeit** der Klärschlammprodukte wurde anhand von Temperaturmessungen und visueller Begutachtung des Materials abgeklärt. Die **Streueigenschaften** wurden mit drei unterschiedlichen Ausbringgeräten ermittelt. Die technischen Daten sind in Tabelle 2 erwähnt. Die Messung des Streubildes erfolgte mittels zweier

Bahnen mit Auffangschalen in einem Abstand von 2 m, die auf dem Boden quer zur Fahrtrichtung des Traktors ausgelegt waren (Abb. 1). Bei 38 Schalen kann eine Streubreite von total 20 m erfasst werden. Die an den Streugeräten eingestellten Arbeitsbreiten lagen für den Schleuderdünger- und den Grossflächenstreuer bei 15 m. Beim Kompoststreuer ist die Arbeitsbreite nicht einstellbar. Nach jedem Durchgang sind die Schalen einzeln in 100-ml-Messbecher umgeleert und die jeweilige Menge erfasst worden. Aus versuchstechnischen Gründen musste relativ langsam über die Schalen gefahren werden (um 3,5 km/h). Das Ziel war, eine ausgebrachte Menge von etwa 2 t/ha zu erreichen. Dies entspricht einer P-Düngung von 100 kg P₂O₅/ha bei 50 kg P₂O₅ pro t TS. Üblicherweise wird in der Praxis mit höheren Geschwindigkeiten gefahren. Für die Messung des **Staubgehalts** diente ein Staubmessgerät TM digital µP. Das Messprinzip beruht auf der Streulichtmessung, wobei der lungengängige Feinstaubanteil erfasst wird. Der Messbereich liegt zwischen 0,01 mg/m³ und 99,99 mg/m³ Luft. Die Messung selbst erfolgte im Abstand

Tabelle 1. Verfahrenstechnischer Vergleich der drei Trocknungsverfahren

Verfahren	Trommeltrockner	Spiraltrockner	Dünnschicht-Verdampfer
Prinzip	Trocknung in beheizter Trommel	Kontaktrockner mit beheizten Schnecken und Schneckenrögen	Voreindampfung mit anschliessender Pressung zu Strängen und Endtrocknung im Bandrockner
Trockner	Trommeltrockner	Modul mit 8 Schneckenrögen in Kaskade	Dünnschicht-Verdampfer und Bandrockner
Kapazität in kg TS/h*	1000	300	40
Heizleistung in kW	4744	max. 1500	Keine Angaben
Verdampfungsleistung in m ³ /h	3	0,8–1,5	0,13
Thermische Energie in kWh/t TS	2050	4500	1900
Pro kg Wasserverdampfung in kWh	0,8	1,3	0,6
Elektrische Energie in kWh/t TS	250	Keine Angaben	260
Aussehen und Form der getrockneten Endprodukte	Gleichmässiges rundes Granulat	Ungleichmässiges, pulveriges Konglomerat mit Klumpen versetzt	Gleichmässige Stäbchen von definierter Länge und Durchmesser
Farbe der Endprodukte	Anthrazit	Anthrazit	Anthrazit
Grösse der Endprodukte	Ø 1–6 mm	Pulver und Klumpen <1–10 mm	Länge 5–20 mm, Ø 4 mm
Schüttgewicht in kg/m ³	730–870	450–600	540

* Durchschnittlicher TS-Gehalt im entwässerten Klärschlamm 25%

Resultate

Trocknungsversuche

Bei der Trommeltrocknungsanlage traten während der Versuchsphase keine gravierenden Ausfälle auf. Die Spiraltrocknungsanlage wies eine zu knapp bemessene Anlagenleistung auf. Ein zusätzliches Trocknungsmodul ergab ausreichende Durchsatzleistungen. Mit der Anlage war ein einwandfreier Betrieb möglich. Von der Dünnschicht-Verdampfungsanlage wurde nur Trockenmaterial für weitere Versuchszwecke bereitgestellt. Eigentliche Versuche mit dieser Anlage erfolgten nicht.

Die Dünnschichtverdampfer-Anlage benötigt mit 1900 kWh/t TS thermischer Energie und 260 kWh/t TS elektrischer Energie am wenigsten Energie für die Trocknung, dicht gefolgt von der Trommeltrockner-Anlage, welche ähnliche Werte aufweist (Tab. 1). Die Spiraltrockner-Anlage benötigt doppelt so viel Energie.

Gemäss den Emissionsmessdaten lassen sich alle Anlagen einen umweltgerechten Betrieb zu. Die Temperaturen und Aufenthaltszeiten in den drei Anlagen sind zur Abtötung von Krankheitskeimen (Salmonellen und Enterobacteriaceen) ausreichend hoch bzw. genügend lang.

Eine Herstellung von einem Grunddünger durch Beimischung von Zuschlagsstoffen wie Kalisulfat vor dem Trocknungsprozess ist grundsätzlich ohne grosse Schwierigkeiten bei den

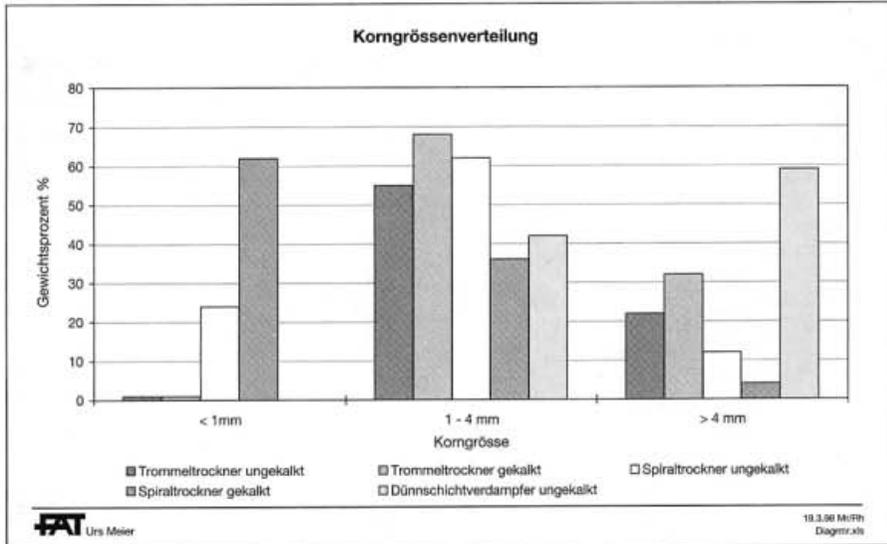


Abb. 2. Durchschnittliche Korngrößenverteilung aller Produkte aus den drei verschiedenen Trocknungsverfahren. Beim Trommeltrockner liegen etwa 60% der Körner zwischen 1 bis 4 mm Korngrösse. Die Produkte aus dem Spiraltrockner weisen mit einem Feinkornanteil (< 1 mm) von etwa 25 bis 60% einen hohen Anteil auf. Dies bewirkt hohe Staubemissionen während des Ausbringens. Die Korngrößenverteilung bei den Produkten aus dem Dünnschichtverdampfer zeigt keinen Feinkornanteil, was geringe Staubemissionen bei der Ausbringung zur Folge hat.

von 2 m seitlich vom Streugerät (Abb. 1). Bei jeder Durchfahrt wurde der höchste abgelesene Wert festgehalten.

Um Hinweise auf unterschiedliche **Zerfalleigenschaften** der Granulatvarianten zu erhalten, wurde je eine Schicht Granulate auf ein wassergesättigtes Filterpapier in eine Petrischale gegeben und nach zwei Tagen der Wassergehalt ermittelt. Zusätzlich sind je 20 g Granulate in ein Becherglas gegeben und mit 150 ml Wasser versetzt worden. Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte nach ein und sieben

Tagen. Um die Granulate unter Feldbedingungen beobachten zu können, wurden Ende Februar 1997 zu Beginn der Vegetationsperiode mit den 13 Granulatvarianten sowie vier Handelsdüngern Beobachtungsflächen angelegt (von Hand je 1 l Granulate auf 1 m² gestreut; Kultur: Winterweizen). Zu verschiedenen Zeitpunkten wurden die Granulate betreffend ihrer Zerfallsgeschwindigkeit visuell beurteilt.

Tabelle 2. Technische Daten der drei eingesetzten Ausbringgeräte

Bezeichnung	Schleuderdüngerstreuer	Grossflächenstreuer		Kompoststreuer
Fabrikat	Vicon (Abb. 1)	Amazone (Abb. 4)		Heywang (Abb. 5)
Typ	Duoflow DS 751	ZGB B 16000 TR		Miro ABH 41
Streuwerk	2-Scheiben	2-Scheiben	Frontstreuerschnecke	Tellerstreuwerk (4 Teller)
Arbeitsbreite	10-15 m	bis 24 m	12 m	6-12 m
Mengendosierung	2 Auslaufschieber	Hydr. gesteuertes Förderband		Hydr. gesteuerter Kratzboden
Anbauart	3-Punkt	Gezogen		Gezogen
Fassungsvermögen	750 l	9000 l		5000 l
Preis (ungefähr) 1997	Fr. 4100.-	Fr. 81000.-		Fr. 16000.-

Tabelle 3. Gehalte im entwässerten Klärschlamm und in den verschiedenen Trockenprodukten

Parameter	Einheit	Entwässertes Klärschlamm	Trommeltrockner			Spiraltrockner		Dünnschicht-Verdampfer
			ungekalkt	gekalkt	mit Kali	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt
TS	%	21–28	73–96	62–92	94–97	70–90	65–93	70–96
OS	% der TS	48	39	39	42	46	30	43
NH ₄	g N/kg TS	6,6	3,1	0,6	0,3	2,2	0,3	1,9
N _{gesamt}	g N/kg TS	–	33	31	29	–	–	28
P ₂ O ₅	g P ₂ O ₅ /kg TS	51,3	–	–	–	–	–	50,4

TS = Trockensubstanz; OS = Organische Substanz; – = nicht analysiert

Anlagen mit dem Trommeltrockner und dem Dünnschichtverdampfer möglich. Eine Entmischung während der Lagerung findet nicht statt. Versuche mit Zuschlagstoffen konnten bei der Anlage mit dem Spiraltrockner nicht gefahren werden.

Ausgangsmaterial

Die angelieferten Klärschlämme weisen sehr unterschiedliche Qualitäten auf (Tab. 3). Die TS-Gehalte schwankten zwischen 21 bis 28%. Dies ist auf die unterschiedlichen Entwässerungsverfahren, die an die jeweilige Kläranlage angeschlossenen Industrien und die Lagerung (gedeckt, ungedeckt und Lagerdauer) zurückzuführen. Entwässertes Klärschlamm, welcher länger gelagert werden muss, wird mit Kalk oder Steinmehl stabilisiert. Der TS-Gehalt dieser Schlämme lag bei 27 bis 28%.

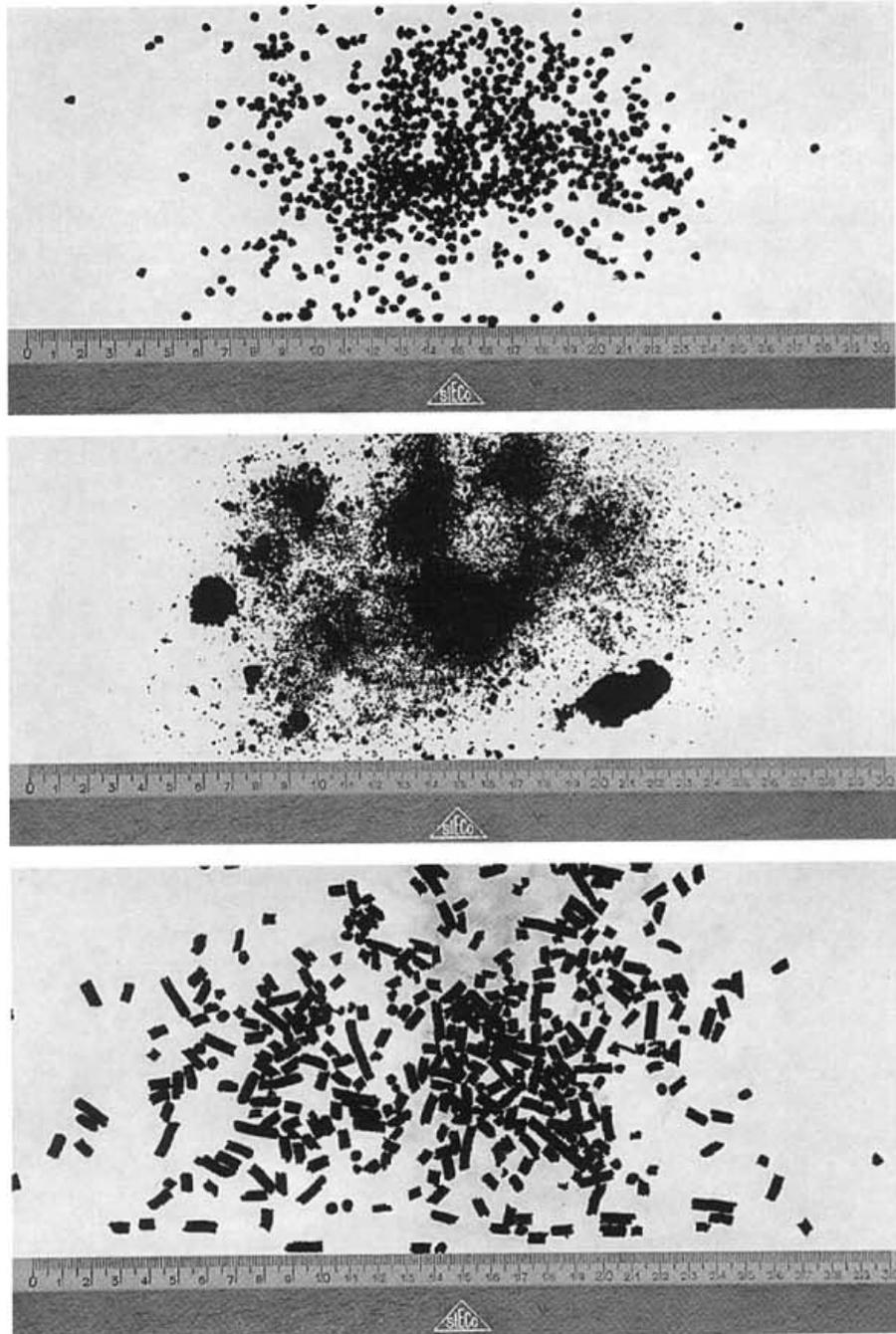


Abb. 3. Gleichmässig gekörntes Granulat aus der Trommeltrocknungsanlage (oben). Es sind keine Körner mit weniger als 1 mm sichtbar. Das Produkt aus dem Spiraltrockner (Bildmitte) zeigt eine unregelmässige Korngrößenverteilung mit einem hohen Anteil an feinen Körnern mit weniger als 1 mm. Die Klumpen führen während der Lagerung zu Pilzbildung und verschlechtern das Streubild bei der Ausbringung. Das Produkt aus dem Dünnschichtverdampfer (Bild unten) sind gleichmässig geformte Pellets. Diese Pellets fließen bei der Ausbringung schlecht aus dem Ausbringer aus.



Abb. 4. Grossflächenstreuer im Einsatz. Mit diesem Gerät konnten gute Streubilder erzielt werden. Der Einsatz dieser Streuer erfolgt meist durch Lohnunternehmer.



Abb. 5. Der Kompoststreuer ist für das Ausbringen der untersuchten Klärschlammprodukte ungeeignet. Zudem sind mit diesem Gerät die höchsten Staubemissionen zu verzeichnen.

Endprodukte

Die Zusammensetzung der Endprodukte aus den drei Trocknungsverfahren ist vergleichbar (Tab. 3). Der TS-Gehalt der Endprodukte beeinflusst praktisch nicht die Gehaltswerte. Der organische Anteil der Trocknungsprodukte nimmt gegenüber dem entwässerten

Klärschlamm um zirka 20% ab. Zwischen 50% und 70% des $\text{NH}_4\text{-N}$ gehen durch den Trocknungsprozess verloren (Abluft, Kondensat). Bei gekalktem Schlamm liegt der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt zwischen 0,3 und 0,6 g N/kg TS, weil durch die Kalkzugabe der pH auf über 9 erhöht und dadurch Ammoniak (NH_3) ausgetrieben wird. Der

Gesamtstickstoff-Gehalt beträgt im Endprodukt etwa 30 g N/kg TS, unabhängig ob gekalkter oder ungekalkter Schlamm getrocknet wurde.

Die Siebanalysen der Endprodukte (Abb. 2 und 3) direkt ab Anlageaustritt zeigen, dass die Trommeltrocknungsanlage Körner mit einer engen Korngrößenverteilung erzeugt. Je höher der TS-Gehalt ist, desto einheitlicher ist die Korngrösse. Das Produkt hat praktisch keinen Feinkornanteil mit weniger als 1 mm. Die Produkte des Spiraltrockners zeigen eine breite Korngrößenverteilung mit einem sehr hohen Feinanteil. Beim Dünnschichtverdampfer weisen die Pellets eine Korngrösse von mehrheitlich über 4 mm auf. Die Pellets haben praktisch keinen Feinkornanteil.

Lagerfähigkeit

Die Lagerung der Produkte im Freien ist in der Praxis nicht verbreitet, weshalb keine diesbezüglichen Abklärungen erfolgten. Bei der Lagerung in Big Bags unter Dach war während 18 Tagen keine Erwärmung der Produkte feststellbar.

Sämtliche Produkte mit mehr als 85% TS wiesen keine Verpilzungen auf. Produkte mit einem TS-Gehalt von 80% zeigen eine Pilzbildung im Bereich klumpiger Bruchstücke auf (Abb. 6), wobei dies auf ungekalkte und gekalk-



Abb. 6. Verpilzungen bei gelagerten Produkten treten insbesondere an klumpigen Teilen auf. Solche Klumpen lassen sich schlecht ausbringen und bewirken ein ungenügendes Streubild.

te Proben zutrifft. Produkte mit einem TS-Gehalt von weniger als 80% TS sind teilweise stark verpilzt. Stark verpilzte Produkte eignen sich für die Ausbringung schlecht, weil die Gefahr von Verstopfungen und Brückenbildung besteht.

Verpilztes Material dürfte sich nach dem Ausbringen kaum negativ auf die Bodenfauna und -flora auswirken. Beim Abfüllen, Umladen und dergleichen ist aber das Tragen einer Staubmaske notwendig, da Pilzsporen die menschliche Gesundheit beeinträchtigen können.

Streuversuche

Schleuderdüngerstreuer

Das beste Streubild vermittelt das Produkt aus dem Trommeltrockner mit 90% TS ohne Kalk (Abb. 7). Die gekalkten Proben bewirken im Vergleich zu den nicht gekalkten einen etwas höheren Materialaustrag in der Mitte (Abb. 8). Wegen des höheren Staubanteils bewirkt der Kalkzusatz eine Verschlechterung des Streubildes. Die Arbeitsbreiten liegen bei 10 m.

Generell wird bei den Spiraltrockner-Produkten im inneren Streubereich viel feinkörniges Material und im äusseren Bereich klumpiges, grobkörniges Material ausgebracht. Bei den Produkten ohne Kalk lief das Material beim Ausbringen im Streubehälter aufgrund von Brückenbildungen nicht nach. Das Material mit 70% TS entwickelte nach dem Ausbringen deutlichen Geruch. Obwohl die Arbeitsbreite beim Streugerät auf 15 m eingestellt war, konnten effektiv nur Arbeitsbreiten von 8 bis 10 m erreicht werden. Die Arbeitsbreiten sind noch kleiner als bei den Trommeltrockner-Produkten.

Alle Produkte des Dünnschicht-Verdampfungsverfahrens weisen eine grosse Arbeitsbreite von 12 bis 14 m auf. Es wird immer zuviel Material in der Mitte ausgebracht, was zu einer unregelmässigen und somit ungünstigen Verteilung auf dem Feld führt. Hingegen ist die Windanfälligkeit dieser Produkte geringer als bei den beiden anderen Produkten. Da aber alle Produkte des Dünnschicht-Verdampfungsverfahrens schlecht aus dem Streuer ausfliessen – es musste jeweils immer zweimal durchgefahren werden, damit genügend Menge aus-

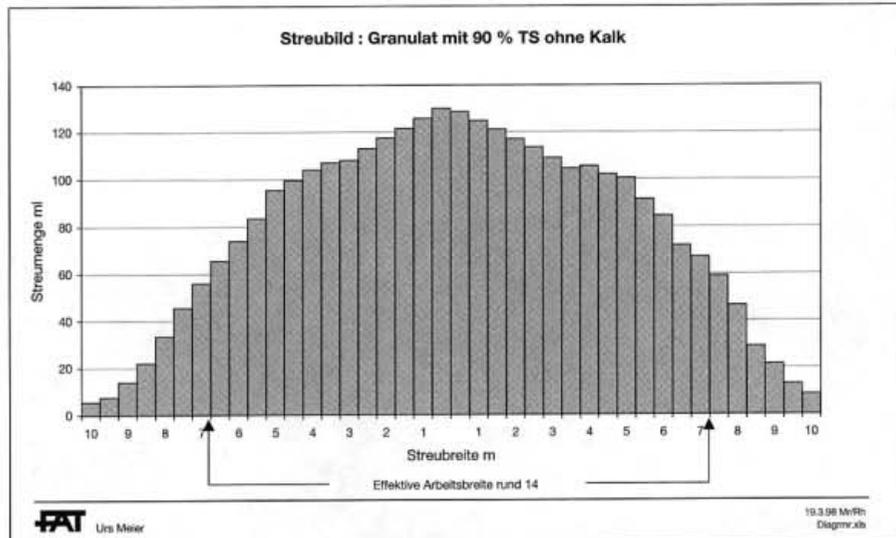


Abb. 7. Streubild des Schleuderdüngerstreuers mit dem Produkt aus dem Trommeltrockner mit 90% TS ohne Kalkzusatz. Gute Mengenverteilung mit gleichmässig abfallenden Streukurven.

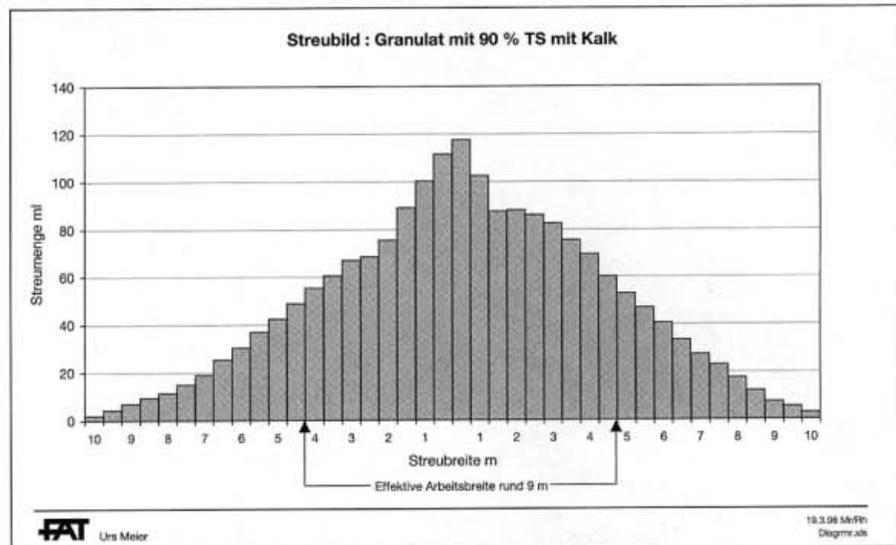


Abb. 8. Streubild des Schleuderdüngerstreuers mit dem Produkt aus dem Trommeltrockner mit 90% TS mit Kalkzusatz. Viel Material wird in der Mitte ausgebracht.

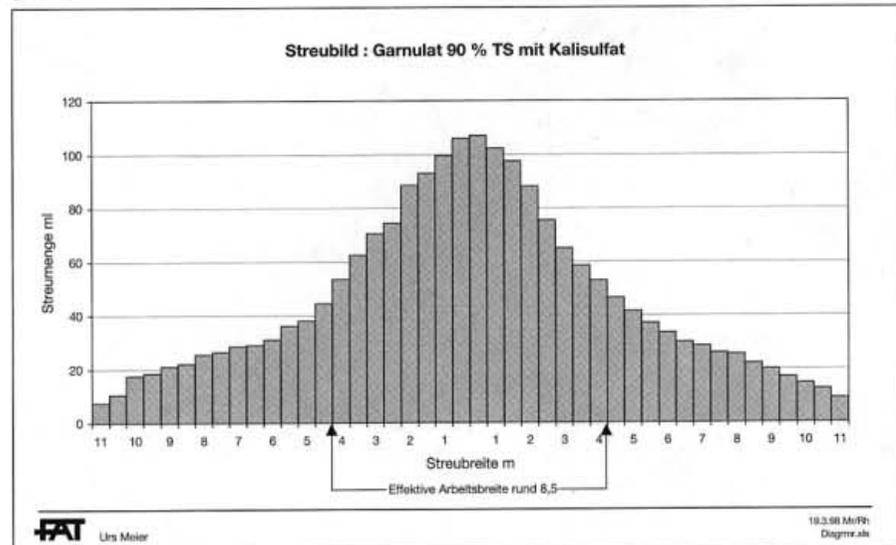


Abb. 9. Streubild des Grossflächenstreuers mit dem Produkt aus dem Trommeltrockner mit 90% TS mit Kalisulfatzusatz. Das Streubild ist mit den Produkten mit Kalk vergleichbar.

Streubild : Granulat 90 % TS ohne Kalk

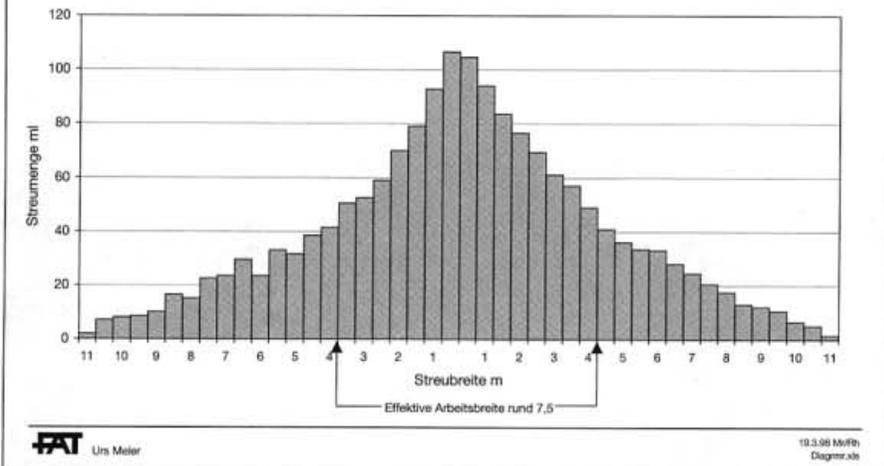


Abb. 10. Streubild des Grossflächenstreuers mit dem Produkt aus dem Spiraltrockner mit 90 % TS ohne Kalkzusatz. Zuviel Material wird in der Mitte ausgebracht und bewirkt eine unregelmässige Verteilung auf dem Feld.

Streubild : Pellet 90 % TS ohne Kalk

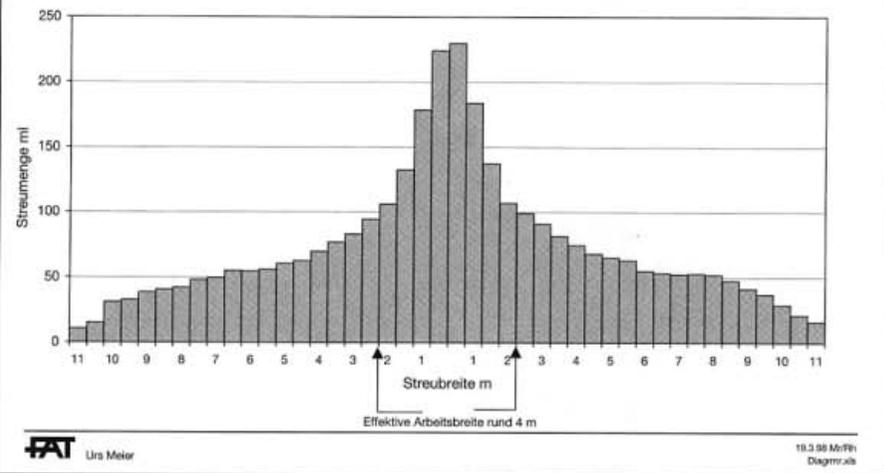


Abb. 11. Streubild des Grossflächenstreuers mit dem Produkt aus dem Dünnschichtverdampfer mit 90% TS ohne Kalkzusatz. Zuviel Material wird in der Mitte ausgeworfen.

gebracht wurde – eignen sich diese Produkte für die Ausbringung mit dem Schleuderdüngerstreuer nicht.

Grossflächenstreuer

Befriedigende Streubilder sind bei allen Trommeltrocknungs-Produkten mit dem Grossflächenstreuer erzielt worden (Abb. 9). Bei den gekalkten Proben wird etwas mehr Material in der Mitte ausgebracht. Wie beim Schleuderdüngerstreuer liegen die Arbeitsbreiten bei nur etwa 10 m, obwohl der Streuer auf 15 m eingestellt war.

Vergleichbare Streubilder waren mit den Produkten des Spiraltrocknungsverfahrens zu verzeichnen (Abb. 10). Bei den Proben 80% TS mit und ohne Kalkzugabe blieben klumpige Materialteile auf dem Siebeinsatz im Behälter während des Ausbringens liegen. In der Praxis müssen diese Produkte ohne Siebeinsatz eingesetzt werden. Bei den gekalkten Produkten wurde mehr Material in der Mitte ausgebracht. Die Arbeitsbreiten betragen 8 bis 10 m.

Die Produkte aus dem Dünnschichtverdampfer mit 90 und 80% TS (Abb. 11) erzielen grosse Arbeitsbreiten von rund 16 m. In der Mitte des Streuers aber wird wesentlich mehr Material ausgeworfen als an den Flanken, was zu einer unregelmässigen Materialverteilung auf dem Feld führt. Das Produkt mit 80% TS bleibt während des Ausbringens teilweise auf dem Siebeinsatz liegen. Die Streubilder zeigen eine mässige Verteilungsgenauigkeit.

Der Grossflächenstreuer verfügt zusätzlich zum 2-Scheibenstreuwerk über eine Frontstreuschnecke (Abb. 12). Die Versuche mit der Frontstreuschnecke dienten vor allem zur Messung der Staubeentwicklung. Bei allen Produkten waren geringere Staubemissionen zu beobachten (vgl. Tab. 4). Aus verfahrenstechnischen Gründen konnten keine Streubilder erhoben werden. Rein optisch ist die Verteilung sehr gleichmässig (Abb. 12). Beim Produkt aus dem Spiraltrockner mit 80% TS ohne Kalk traten Verstopfungen in der Streuschnecke auf. Die Produkte des Dünnschichtverdampfers sind mit der Frontstreuschnecke nicht streubar.

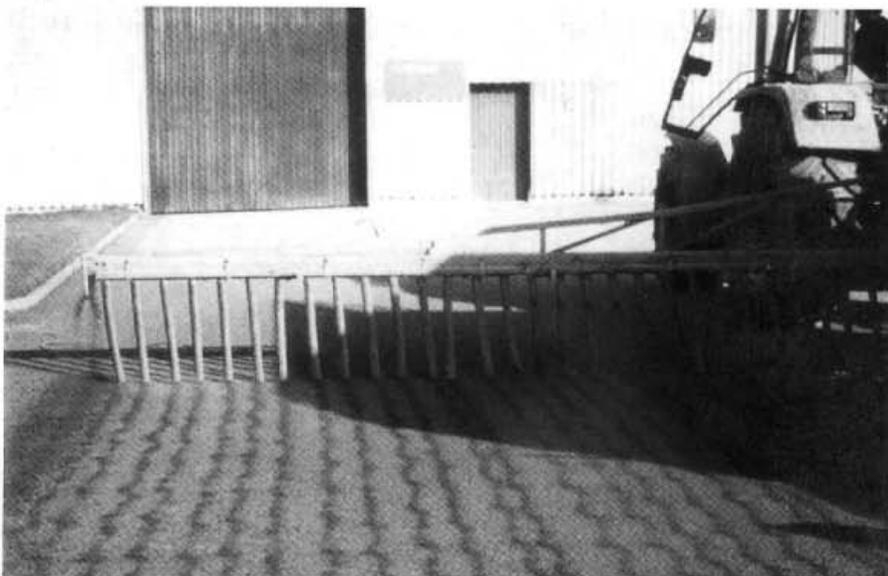


Abb. 12. Ausbringen mit der Frontstreuschnecke des Grossflächenstreuers. Diese Ausbringungsweise verursacht die geringsten Staubemissionen.

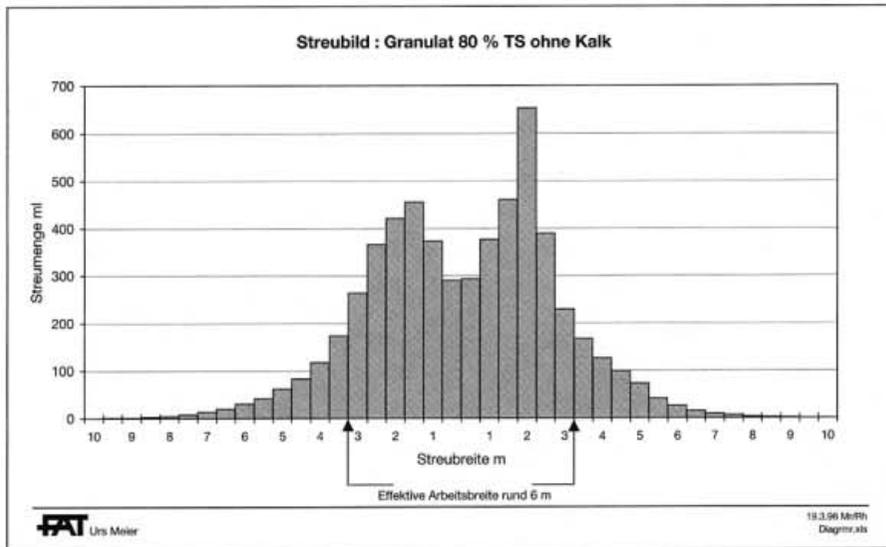


Abb. 13. Streubild des Kompoststreuers mit dem Produkt aus dem Trommel-trockner mit 80% TS ohne Kalkzusatz. Markant sind die beiden Spitzen, die zu einer unregelmässigen Verteilung auf dem Feld führen.

Kompoststreuer

Die Streubilder mit dem Kompoststreuer zeigen deutlich, dass sich kein Produkt zur Ausbringung mit diesem Gerät eignet (Abb. 13). Zudem sind die Arbeitsbreiten mit etwa 6 m gering.

Staubentwicklung während des Ausbringens

Zusätzlich zur Erfassung des Streubildes wurden Staubemissionen gemessen (Tab. 4).

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass alle Produkte, die einen hohen Feinkornanteil haben, wesentlich mehr Staubemissionen verursachen als Produkte mit einem geringeren Feinkornanteil (Vergleich mit Triplesuperphosphat). Eine Kalkzugabe führt zu eher höheren Staubemissionen als Produk-

te ohne Kalk. Beim Einsatz der Frontstreuschnecke des Grossflächenstreuers werden die Staubemissionen erheblich reduziert.

Für Staubemissionen besteht ein Grenzwert von 6 mg/m³ Luft. Dieser Grenzwert bezieht sich auf inerte Stäube, das heisst Stäube, die kein toxisches und kein allergenes Potential aufweisen. Aufgrund der zum Teil sehr hohen Staubemissionen müssen Massnahmen zur Minderung ergriffen werden. Dazu zählen das Tragen von Feinstaubmasken für Personen, die beim Umschlag und Ausbringen des Materials von den Emissionen betroffen sind, sowie das Schliessen sämtlicher Öffnungen bei der Traktorkabine. Für die Feinstaubmasken müssen Masken mit der Schutzstufe P 2, für stark verpilztes Material Masken mit der Schutzstufe P 3 getragen werden (telefonische Auskunft SUVA, Luzern). Bei der Staubentwicklung besteht die Gefahr, dass auch bei geringen Windgeschwindigkeiten Düngemittel verfrachtet werden. Entlang von Waldrändern oder Bachufern ist mit Beeinträchtigungen der Umwelt zu rechnen. Positiv fielen die gekalkten Proben dadurch auf, dass bei der Ausbringung geringere Geruchsemissionen als bei den ungekalkten Proben zu verzeichnen waren. Die Proben mit 70% TS fielen mit deutlichem Faulgeruch negativ auf.

Tabelle 4. Staubemissionen beim Ausbringen (alle Angaben in mg/m³ Luft)

Streugerät	Vicon		Amazone		Heywang
	2-Scheiben	2-Scheiben	Frontschnecke	Tellerstreuwerk	
Produkt	Staubgehalt	Staubgehalt	Staubgehalt	Staubgehalt	
Trommel-trockner					
Ohne Kalk	23	23	11	39	
Mit Kalk	82	71	19	-	
Mit Kalisulfat	34	26	9	-	
Spiral-trockner					
Ohne Kalk	9	8	4	19	
Mit Kalk	72	41	6	99	
Dünnschicht-Verdampfer					
Ohne Kalk	5	12	4	32	
Vergleichsvariante					
Triplesuperphosphat	4,9	-	-	-	

Bemerkungen: - = keine Werte gemessen

Zerfallseigenschaften von Klärschlamm-Granulaten («Bodenverfügbarkeit»)

Nach Chassot (1992) sind Klärschlamm-Granulate in der Regel nicht härter als Granulate herkömmlicher Mineraldünger, aber der Zerfall ist oftmals gleichwohl langsamer. Damit können Nachteile verbunden sein, wie eine längere Abschwemmgefahr, die eine Einarbeitung in Boden notwendig macht, oder auch die Aufnahme der Granulate durch Weidetiere bzw. Verschmutzung des Futters. Schliesslich ist auch eine verzögerte Nährstoffabgabe zu befürchten. Folglich sind Granulate, die problemlos gelagert und ausgebracht werden können, aber auf Äcker und Wiesen trotzdem rasch zerfallen, vorteilhafter.

**Beobachtungen im Labor:
Wasseraufnahme und Zerfall
in Wasser**

Die Granulate in den Petrischalen hatten nach zwei Tagen ebenso viel Wasser aufgenommen wie nach sieben Tagen. Die Granulate aus dem Trocknungsverfahren «Dünnschichtverdampfer» wiesen danach einen Wassergehalt von 45 bis 47% auf, jene aus dem Trommeltrockner 42 bis 44% und jene aus dem Spiraltrockner 48 bis 57%. Obschon beim Verfahren mit dem Spiraltrockner offenbar geringfügig porösere Granulate entstehen, ergab die Beurteilung des Zerfalls im Wasser keine Hinweise auf unterschiedliche Zerfallseigenschaften zwischen Granulaten der drei Trocknungsverfahren. Bereits nach einem Tag im Wasser waren alle Granulate weich und relativ leicht zwischen Daumen und Zeigefinger verreibbar. Auch nach sieben Tagen war die Granulatstruktur immer noch erkennbar.

**Beobachtung der Granulate im Feld
auf der Bodenoberfläche**

Bezüglich der Zerfallsgeschwindigkeit zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Klärschlamm-Granulaten (Tab. 5). Sie konnten drei Monate nach der Ausbringung noch grösstenteils ohne wesentlichen Zerfall auf dem Boden lie-

gend gefunden werden. Sie zerfallen sehr langsam. Vermutlich hält die organische Struktur die Granulate zusammen, so dass sie zwar feucht und weich werden können, dann aber wieder austrocknen, ohne zu zerfallen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Pflanzenwurzeln die Nährstoffe nicht aufnehmen könnten. Der Anteil der sehr feinen Granulate aus dem Spiraltrocknungsverfahren vermischte sich nach dem Regen mit Erde.

Schlussfolgerungen

Trocknungsverfahren

Es wurden drei unterschiedliche Verfahren zur Trocknung von Klärschlamm untersucht. Bei den Verfahren handelt es sich um einen Trommeltrockner, einen Spiraltrockner mit beheizten Schnecken und Schneckenrögen sowie um einen Dünnschichtverdampfer mit Bandrockner. Der Dünnschichtverdampfer wie auch der Trommeltrockner benötigen mit rund 2000 kWh/t TS thermischer und 250 kWh/t TS elektrischer Energie am wenigsten Energie für die Trocknung. Der Spiraltrockner benötigt im Vergleich dazu doppelt soviel Energie.

Endprodukte

Die Endprodukte aus dem Trommeltrockner können als gleichmässiges rundes Granulat mit einem Durchmesser zwischen 1 und 6 mm bezeichnet werden. Das Produkt hat praktisch keinen Feinkornanteil mit weniger als 1 mm. Das Spiraltrocknungsverfahren ergibt ein ungleichmässiges, eher feines Granulat mit einem sehr hohen Feinkornanteil, das Klumpen enthält. Der Durchmesser beträgt 1 bis 10 mm. Der Dünnschichtverdampfer erzeugt gleichmässige Pellets von einer Länge zwischen 5 und 20 mm und einem Durchmesser von 4 mm mit praktisch keinem Feinkornanteil. Die Zusammensetzung der Endprodukte aus den drei verschiedenen Trocknungsverfahren ist vergleichbar. Der NH₄-N-Gehalt liegt bei ungekalktem Schlamm zwischen 2 und 3 g N/kg TS und bei gekalktem Schlamm zwischen 0,3 und 0,6 g N/kg TS. Der Gesamtstickstoff-Gehalt beträgt jeweils ungefähr 30 g N/kg TS. Bei den untersuchten Verfahren sind die Temperaturen und Aufenthaltszeiten im System hoch genug, damit die Krankheitskeime (Salmonellen und Enterobacteriaceen) abgetötet werden. Die Herstellung eines Grunddüngers durch Beimischung von Zuschlagstoffen vor dem Trocknungsprozess ist grundsätzlich beim Trommeltrocknungsverfahren ohne grosse Schwierigkeiten möglich. Eine Entmischung des Trockenprodukts während der Lagerung findet nicht statt.

**Lagerstabilität
und Streueigenschaften**

Wird getrockneter Klärschlamm zur Lagerung hergestellt, sollte der TS-Gehalt nicht unter 85% TS liegen, da sonst eine Verpilzung stattfindet. Getrockneter Klärschlamm mit weniger als 85% TS eignet sich nur für die sofortige Verwertung in der Landwirtschaft. Die Ausbringversuche ergaben für alle Produkte aus dem Trommeltrockner und Spiraltrockner mit dem Schleuderdüngerstreuer und mit dem Grossflächenstreuer befriedigende Streubilder. Generell weisen die Pellets aus dem Dünnschichtverdampfer unbe-

Tabelle 5. Zerfallsgeschwindigkeit des getrockneten Klärschlammes auf der Bodenoberfläche

Beobachtung	Sichtbare Klärschlamm-Granulate?	Härte/Festigkeit der Klärschlamm-Granulate («Fühlprobe»)
Nach 1 Woche (März)	ja	Hart und trocken Zerreibbar → bröcklig-mehlig
Nach 3 Wochen (März)	ja	Weich und feucht Sehr leicht verreibbar (ähnlich nasser Kompost) [Handelsdünger cremig weich]
Nach 5 Wochen (April)	ja Ausnahme: Spiraltrockner, da ganz fein (fast staubförmig) und durch Regenspritzer mit Erde überdeckt	Hart und trocken Zerreibbar → bröcklig-mehlig (trocken) [2 Handelsdünger sehr weich und porös, 2 aufgelöst]
Nach 12 Wochen (Mai)	ja	Mittelhart und wenig feucht Zerreibbar → bröcklig-mehlig [2 Handelsdünger sehr weich und porös, 2 aufgelöst]

riedigende Streueigenschaften auf. Für die Ausbringung der untersuchten getrockneten Klärschlammprodukte ist der Kompoststreuer ungeeignet. Am besten geeignet ist der Grossflächenstreuer mit Schnecke.

Mit Ausnahme der Pellets aus dem Dünnschichtverdampfer, die nur geringe Staubemissionen verursachen, entwickeln alle übrigen Produkte erhebliche Staubemissionen. Produkte ohne Kalk verursachen etwas geringere Staubemissionen als jene mit Kalkzusatz. Hohe Staubentwicklungen treten beim Ausbringen mit dem Schleuderdüngerstreuer und dem Kompoststreuer auf. Deutlich geringer fallen diese beim Ausbringen mit der Frontstreuschnecke des Grossflächenstreuers aus.

Aufgrund der Staubentwicklung beim Ausbringen müssen Personen, die beim Umschlag und bei der Ausbringung mit dem Material in Kontakt kommen, Feinstaubmasken mit mindestens Schutzstufe P 2 tragen. Alle Öffnungen der Traktorkabine sind

während des Ausbringens zu schliessen.

Für eine hohe Verteilgenauigkeit während des Ausbringens ist ein gleichmässiges Produkt mit einem TS-Gehalt von mindestens 85% unerlässlich. Mit einem geringeren Feinkornanteil von weniger als 1% sollte auch das Staubproblem begrenzt werden können. Zudem sind mit gleichmässig granulierten Produkten gute Streueigenschaften und eine hohe Streugenauigkeit erreichbar.

Zerfallseigenschaften

Bezüglich der Zerfallseigenschaften der Klärschlammgranulate sind die drei Trocknungsverfahren als ebenbürtig zu beurteilen. Alle untersuchten Klärschlammprodukte sollten infolge ihres langsamen Kornzerfalls oberflächlich in den Boden eingearbeitet werden (Saatbettbereitung), um Abschwemmungen vorzubeugen.

Literatur

Chassot G., 1992. Agronomische und ökologische Beurteilung von Trockenklärschlamm, praxisnahe Anwendungsempfehlungen, FAC.