

Praktische Hinweise für den Bau von Bodenzementverfestigungen mit Mehrgangmischern

Von Rupert Springenschmid, Düsseldorf

Übersicht

Bauleiter von Behörden oder Unternehmen, die vor der Aufgabe stehen, den Bau von Bodenverfestigungen mit Zement auf Straßen oder Wegen leiten oder beaufsichtigen zu müssen, haben heute oft weder Zeit noch Möglichkeit, das Fachschrifttum durchzusehen und andere Baustellen kennenzulernen, auf denen diese Bauweise ausgeführt wird. Aus diesem Grunde soll der Bau von Bodenverfestigungen mit Mehrgangmischern (z. B. Seaman Pulvi-Mixer oder Ringhofer-Mischer) in dieser Arbeit beschrieben werden, wobei alle für Planung und Bauausführung wichtigen Überlegungen und technischen Berechnungen zusammengefaßt worden sind.

Bei der Verfestigung (früher „Vermörtelung“) von Kiessanden auf Autobahnen und Flugplätzen gelten ähnliche Gesichtspunkte. Die dort entwickelte Arbeitstechnik ist lediglich auf die besonderen Gegebenheiten von Großbaustellen abgestimmt und unterscheidet sich im Wesen von der hier beschriebenen nicht.

Diese Zusammenfassung stützt sich sowohl auf praktische Erfahrungen bei der Bauausführung als auch auf die theoretischen Grundlagen der Bodenverfestigung [1, 2, 3, 5] und im besonderen auf Untersuchungen von einzelnen Fehlern und Schadensfällen, die bei Bodenzementverfestigungen aufgetreten sind.

1. Einleitung

Bodenarten, die für eine Verfestigung mit Zement verwendet werden, reichen vom Kiessand bis zum Ton oder gleichkörnigen Sand. Ähnlich wie beim Einbau nicht verfestigten Schüttmaterials müssen auch hier die Baumaßnahmen auf die jeweiligen Erfordernisse des verwendeten Bodens abgestimmt werden. Außerdem ist der Arbeitsvorgang den örtlichen Platzverhältnissen (Wendemöglichkeiten, Wasserversorgung, Zufahrt usw.) sowie der Anzahl, der Bauart und den Einsatzmöglichkeiten der verfügbaren Baumaschinen anzupassen.

Die wichtigste Voraussetzung für den Erfolg des Verfahrens ist jedoch, daß ein Ingenieur mit Sorgfalt, Sachkenntnis und Organisationsgabe die Arbeiten leitet. Dies ist wichtiger als der Einsatz teurer Großgeräte, die freilich bei größeren Bauvorhaben nicht zu entbehren sind.

2. Mischgeräte

Mehrgangmischer sind Bodenmischmaschinen (Bodenvermörtelungsmaschinen), die Boden, Bindemittel und Wasser in meh-

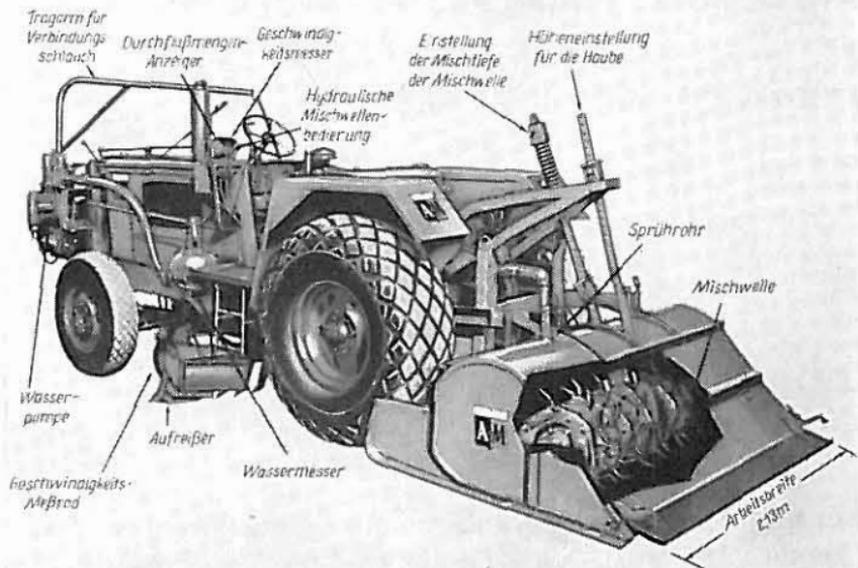


Bild 1 Seaman Pulvi-Mixer als selbstfahrender Mehrgangmischer

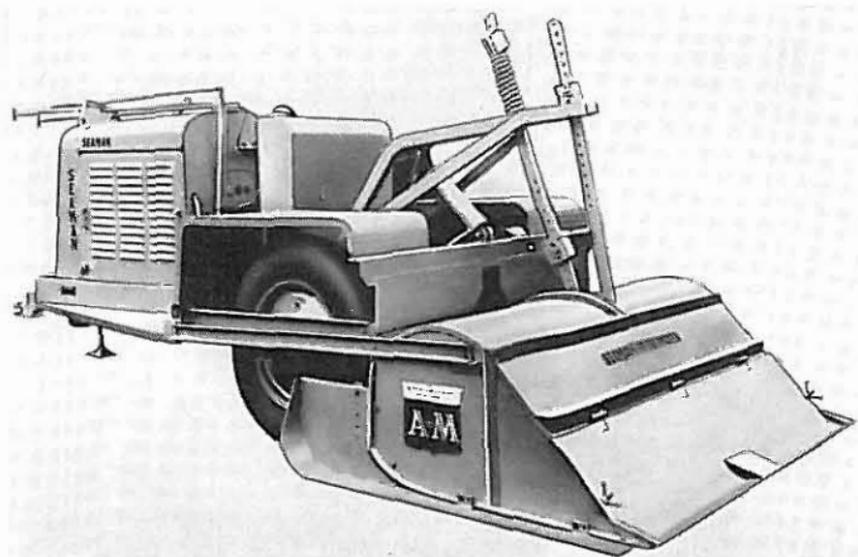


Bild 2 Seaman Pulvi-Mixer als Anhängemaschine. Die Bedienung kann vom Fahrersitz der Zugmaschine aus erfolgen

reren Mischdurchgängen an Ort und Stelle mischen, ohne den Boden aufzunehmen. Im Vergleich zu den in der Stunde nur 100 bis 500 lfm bearbeitenden Eingangsmischern (z. B. Bauart Vögele, Harnischfeger, Howard, Linnhoff), die nur einen Übergang ausführen müssen [6], und zu den Aufnahmemischern mit einer besonderen Mischtrommel (z. B. Pettibone-Wood Roadmixer, Motor-Paver) haben Mehrgangmischer eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit (2,0 bis 6,0 km je h) und erzielen eine ausreichende Durchmischung erst nach mehreren Mischdurchgängen [16]. In Deutschland sind zur Zeit nur Mehrgangmischer im Einsatz, die ähnlich einer landwirtschaftlichen Bodenfräse mit einer horizontal liegenden Mischwelle arbeiten (wenn man vom Motorgrader als Mischgerät absieht). Es sind dies der Seaman



Bild 3 Ringhoffer-Maschine, ein Anhänger-Mehrgangmischer

Pulvi-Mixer (Bilder 1 und 2), die Ringhoffer-Bodenvermörtelungsmaschine (Bild 3) und die Skoda-Bodenvermörtelungsmaschine (vgl. auch Tafel 1).

Während Ringhoffer- und Skoda-Maschinen nur als Anhänger-mischer gebaut werden, sind die in Deutschland laufenden Seaman Pulvi-Mixer zum Großteil selbstfahrend.

3. Leistung und Ausrüstung der Bauzüge

3.1 Leistung der Bauzüge

Die für die Ausführung von Bodenverfestigungen erforderlichen Maschinen (Mischmaschinen, Wasserwagen, Verdichtungsgeräte, Motorgrader und Zementfahrzeuge) werden in Bauzügen zusammengefaßt. Die Leistung solcher Bauzüge ist ziemlich groß. Bei ausreichender Auftragslage können damit beispielsweise im Jahr 30 bis 40 km Forststraßen oder landwirtschaftliche Wege verfestigt werden. Wird der Bauzug durch ein Zementverteilergerät, zusätzliche Wasserwagen und weitere Verdichtungsgeräte verstärkt, dann kann die Leistungsfähigkeit bei Verwendung einer einzigen Mischmaschine noch weiter gesteigert werden. Voraussetzungen hierzu sind

eine sehr gute Baustellenorganisation (die organisatorischen Aufgaben, die bei der vollen Ausnutzung des Bauzuges auftreten, sind so groß, daß sie auch von einem fähigen Ingenieur nur bewältigt werden können, wenn ein erfahrener Schachtmeister und gut eingearbeitetes Maschinenpersonal ihn unterstützen);

große Baustrecken;

leicht zu zerkleinernde und gut mischbare Böden, wie Sande, lehmige Sande oder entsprechende Schluffböden;

geringe Störungsanfälligkeit der Geräte.

3.2 Mindestausrüstung der Bauzüge

Bauzüge werden vielfach von kleineren Unternehmen eingesetzt, die bemüht sind, mit möglichst niedrigen Investitionen

Tafel 1 Angaben über Mehrgang-Bodenmischgeräte

	Anhängegeräte			selbstfahrende Geräte	
Hersteller	Ringhoffer	Seaman Andwall Co. (American Marietta Co.) ¹⁾			
Typenbezeichnung	R 100	D 47	DMS-67	DS 47	DTM 47
Motorleistung PS	100 oder 132	138	200	138	138
Arbeitsbreite m	1,90	2,13	2,13	2,13	2,13
Mischwellendurchmesser cm	88	68,6	83,8	68,6	68,6
Mischwellendrehzahl je min	160 bis 320	180 bis 282	4. Gang 488 3. Gang 278 2. Gang 148 1. Gang 75	215 bis 350	215 bis 350
Befestigung der Mischmesser	angeklemmt, verstellbar	Rutschkupplung	Rutschkupplung	Rutschkupplung	Rutschkupplung
Arbeitsgeschwindigkeit km/h	2 bis 6 ²⁾	2 bis 6 ²⁾	2 bis 6 ²⁾	1,4 bis 8,0	0,9 bis 6,4
Länge L bzw. Wendekreis-Halbmesser R m	L = 4,91 oder 5,27	L = 5,93	L = 7,70	R = 6,10	R = 6,10
Gewicht t	3,6	3,4	4,2	4,7	6,0
Anschaffungsrichtpreis DM	48 000	53 000	92 050	83 700	116 900
Zusätzliche Ausrüstung	Zwillingsbereifung	Wassermessanlage mit Sprühbalken	Betriebsstundenzähler	Wasserpumpe und -messer, hydr. Lenkbeistand und hydr. Aufreißer ³⁾	

¹⁾ Die Herstellerfirma der Seaman-Geräte wurde in American Marietta Co. umbenannt. ²⁾ Vom Zuggerät abhängig. ³⁾ Gehört bei DTM 47 zur Standardausrüstung.

auszukommen. Mit einer bestimmten Mindestausrüstung kann gearbeitet werden, wenn der Bauablauf gut vorbereitet und durchorganisiert wird.

Zur Mindestausrüstung gehören:

1. eine Mischmaschine (Anhängemischer mit Zugmaschine);
2. Wasserwagen mit Verteilrohr (Lkw-Anhänger mit Wasserbehälter), Anzahl und Fassungsraum siehe 5.5;
3. eine Zugmaschine für jeden Wasserwagen (in flachem Gelände z. B. Unimog);
4. ein Motorgrader;
5. Verdichtungsgeräte mit ausreichender Leistung je nach Bodenart, z. B. eine Glattwalze oder Rüttelwalze mit mindestens 4 bis 6 t Gewicht und eine Gummivielradwalze;
6. ein Lkw-Anhänger für Zementtransport (hierfür Zugmaschine der Mischmaschine);
7. Geräte zum Aufspritzen der Bitumenemulsion;
8. Prüfgeräte;
9. verschiedene Kleingeräte.

Ist ein Unternehmen nicht in der Lage, diese Mindestausrüstung anzuschaffen bzw. zu mieten, dann wird besser in einer ortsfesten Anlage (Betonzwangsmischer) gemischt und das Boden-Zement-Gemisch mit Beton- oder Schwarzdeckenfertigern eingebaut.

Wasserwagen müssen mit einem Sprührohr ausgerüstet sein, das vorteilhaft über zwei Arbeitsbreiten der Mischmaschine reicht. Die seitlich überstehenden Rohrteile müssen abschwenkbar oder abnehmbar sein, damit der Verkehr nicht behindert wird. Auf eine gleichmäßige Anordnung der Sprühlöcher ist besonders zu achten. Sprührohre mit verstellbarer Sprühbreite sind vorteilhaft. Der Absperrhahn soll möglichst knapp am Sprührohr liegen (vgl. 6.4). Einige Seaman-Mischer sind mit einer Einrichtung zur Wasserförderung und Mengemessung und einem Sprührohr ausgerüstet. Bei diesen Maschinen wird der Wasserwagen mit einer Schlauchleitung an den Mischer angeschlossen. Wasserleitungen anstelle von Wasserwagen haben sich nur auf Großbaustellen (z. B. auf Autobahnen oder Flugplätzen) bewährt.

Für die Auswahl der *Verdichtungsgeräte* gelten die gleichen Gesichtspunkte wie bei der Verdichtung von Böden.

Zum *Verteilen des Zements* werden Schaufeln, Rechen oder Schaber benutzt (Bild 4). Leichte landwirtschaftliche Eggen mit ausreichender Arbeitsbreite können zum Verteilen des Zements, zum Aufreißen der Fahrspuren des Wasserwagens und zum Aufräumen glatter Verdichtungsflächen verwendet werden.

Folgende *Prüfgeräte* sind erforderlich:

1. Gerät zur Bestimmung des Wassergehaltes, z. B. CM-Gerät oder Luftpyknometer;
2. Geräte zur Dichtepfung; bei Böden ohne Kies: Stechzylinder zur Entnahme ungestörter Proben, bei Böden mit Kies: Geräte für das Sand-, Gips-, Öl- oder Wasserersatzverfahren;



Bild 4
Einfaches Holzgerät (Schaber)
zum Verteilen des Zements

3. Proctorgerät [12];
4. Prüfsiebe mit 5,0 und 20,0 mm Maschenweite;
5. Waage mit mindestens 5 kg Höchstlast und 5 g Ableseeinheit.

3.3 Bedarf an Arbeitskräften

Neben dem Bedienungspersonal für die Geräte müssen 2 bis 3 Hilfsarbeiter sowie ein Hilfslaborant vorhanden sein. Für das Abladen der Zementsäcke, Öffnen der Säcke und Verteilen des Zements kann eine Leistung von 25 bis 30 Sack je Stunde und Arbeiter angesetzt werden. Zum Verteilen des Zements sind daher bei Arbeitsabschnitten von 1000 m² mindestens 6 bis 8 Arbeitskräfte (Hilfsarbeiter und Maschinenpersonal) erforderlich.

3.4 Zementverteilgeräte

Zementverteilgeräte haben den Vorteil, daß loser Zement verwendet werden kann, der billiger ist, und daß außerdem beim Verladen und Verteilen des Zements Arbeitskräfte und Zeit eingespart werden. Sie sind nur bei großen Baustrecken wirtschaftlich. Bei richtiger Einstellung und sorgfältiger Arbeit ist die Verteilung des Zements mit Verteilgeräten auch gleichmäßiger als bei Handarbeit. Es wäre jedoch falsch, Zementverteilgeräte schon beim ersten Einsatz eines Bauzuges vorzusehen. Der Umschlag von losem Zement und die richtige Einstellung des Gerätes bringen anfänglich eine Reihe von Schwierigkeiten mit sich, wogegen das Verteilen von Sackzement von Hand einfacher ist und weniger Aufmerksamkeit des Bauleiters verlangt. Zementverteilgeräte werden daher erst eingesetzt, wenn sich der übrige Bauablauf gut eingespielt und der Arbeitszug schon ein gewisses Maß an Erfahrungen gesammelt hat.

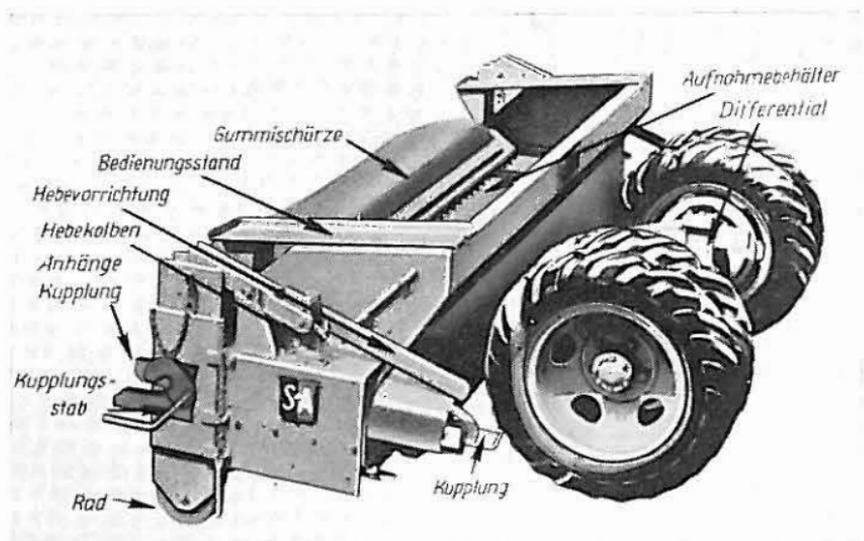


Bild 5 Hercules-Zement-Streugerät zum Anhängen an einen Lastkraftwagen, von dem es mit losem Zement beschickt wird



Bild 6 Regulus-Zement-Verteiler

In Betracht kommen das Zementstreugerät von Vögele, das Hercules-Gerät von Seaman (American Marietta Co.) (Bild 5) oder das Regulus-Gerät von Ringhoffer (Bild 6). Daneben haben mehrere Baufirmen Eigenkonstruktionen entwickelt, die sich zum Teil recht gut bewähren.

4. Entwurfsgrundlagen

4.1 Regelquerschnitt (Bild 7)

Bodenzementverfestigungen werden als Tragschicht von Straßen meist 15 cm dick (im verdichteten Zustand) ausgeführt. Schichtdicken von 18 bis 22 cm vermeidet man tunlichst, weil

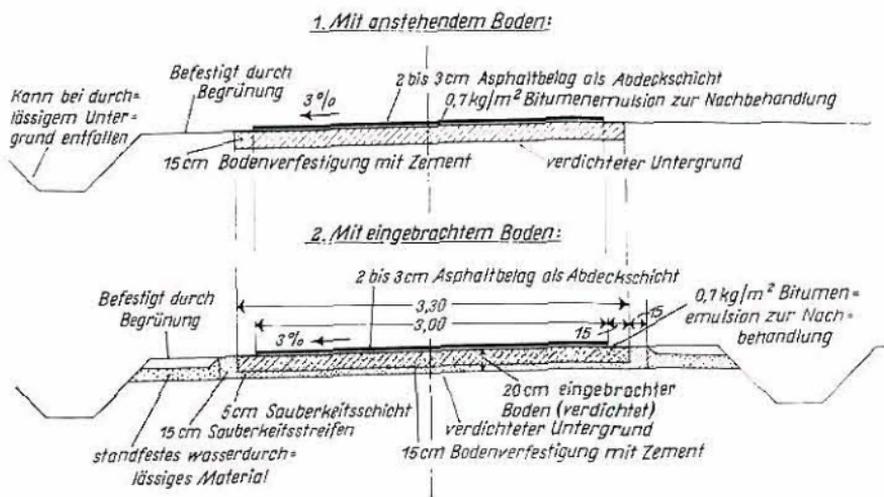


Bild 7 Regelquerschnitt für Straßen mit zementverfestigter Tragschicht bei geringer Verkehrsdichte

solche Mischtiefen einschichtig schwer zu erreichen sind. Stattdessen bleibt man entweder bei 15 cm und erhöht die Dicke der darüberliegenden Schicht oder verfestigt in zwei Schichten eine Gesamtdicke von 24 cm. Im letzten Fall ist der Arbeitsaufwand nicht größer als bei einer zweiseichtigen Bauweise von 18 bis 22 cm Dicke, lediglich der Bedarf an Zement ist geringfügig höher. Die Tragfähigkeit ist bei einer Schichtdicke von 24 cm jedoch wesentlich größer als bei 18 cm.

Eine Randeinfassung wird bei zementverfestigten Tragschichten im allgemeinen nicht vorgesehen, stattdessen macht man die verfestigte Schicht beidseitig um 15 bis 20 cm – etwa um Schichtdicke – breiter als den Fahrbahnbelag. Einspurige Straßen und Wege mit 3,00 m bis 3,20 m Fahrbahnbreite werden darum meist 3,50 m breit verfestigt. Die Arbeitsbreite der Mischmaschinen ist so groß, daß bei zwei Mischbreiten in der Mitte ein genügend breiter Übergriff entsteht.

Bodenverfestigungen werden fast immer mit einseitigem Quergerfälle von 2 bis 3% ausgeführt. Sie erhalten einen oberen Abschluß, dessen Dicke sich nach der zu erwartenden Verkehrsbelastung und der Bedeutung der Straße richtet. Bei Landstraßen und Bundesstraßen werden bituminöse Decken bzw. obere Tragschichten von 5 bis 15 cm Dicke und mehr angeordnet. Bei Autobahnen und schwer belasteten Flugplätzen kommt auf die verfestigte Schicht als untere Tragschicht oder Untergrundverbesserung eine schwere bituminöse Decke oder eine Betondecke. Auf ländlichen Wegen, Forst- und Siedlungsstraßen reichen bituminöse Beläge mit 40 bis 50 kg/m² (etwa 2 bis 3 cm) aus. Auf Forstwegen werden in vereinfachter Ausführung auch 3 bis 5 cm dicke, mechanisch stabilisierte Abdeckschichten (Splitt-Sand- oder Kies-Sand-Gemische mit 8 bis 19% Schluff und Ton) aufgebracht [11]. Frostschutzschichten werden bei diesen wenig beanspruchten Straßen nicht angeordnet, doch wird für eine ausreichende Entwässerung gesorgt. Bei wenig wasserdurchlässigem Untergrund sind daher Wassergräben erforderlich. Zementverfestigte Schichten, die nur vorübergehend benutzt werden, wie z. B. Baustellenstraßen, erhalten keine obere Abdeckschicht, sondern werden direkt befahren.

Wird Fremdmaterial (sandiger Boden, z. B. aus Gruben oder Seitenentnahmen) eingebracht, dann muß dieses mindestens 5 cm (gemessen im verdichteten Zustand) dicker als die Dicke der zu verfestigenden Schicht und beidseitig mindestens 15 bis 20 cm breiter als die vorgesehene Mischbreite geschüttet werden. Die 5 cm dicke Schicht unter der Bodenverfestigung dient als Sauberkeitsschicht und verhindert bei der Bauausführung ein etwaiges Miteinmischen des Untergrundbodens. Ist der Untergrund wenig tragfähig oder sehr frostempfindlich, dann wird Fremdmaterial oft in größerer Dicke eingebracht als zur Verfestigung erforderlich wäre.

4.2 Anstehender oder eingebrachter Boden (Fremdmaterial)

Schon vor der Ausschreibung einer neuen Strecke ist zu untersuchen, ob der anstehende Boden verwendet werden kann. Wenn er schwer zu bearbeiten ist, kann es zweckmäßiger sein, besser geeigneten Boden seitlich oder in Gruben zu gewinnen, einzubringen und diesen Boden (Fremdmaterial) zu verfestigen. Ist das anstehende Erdplanum zu niedrig oder oben durch Humusanteile verunreinigt, kann mit dem Motorgrader (vor allem bei

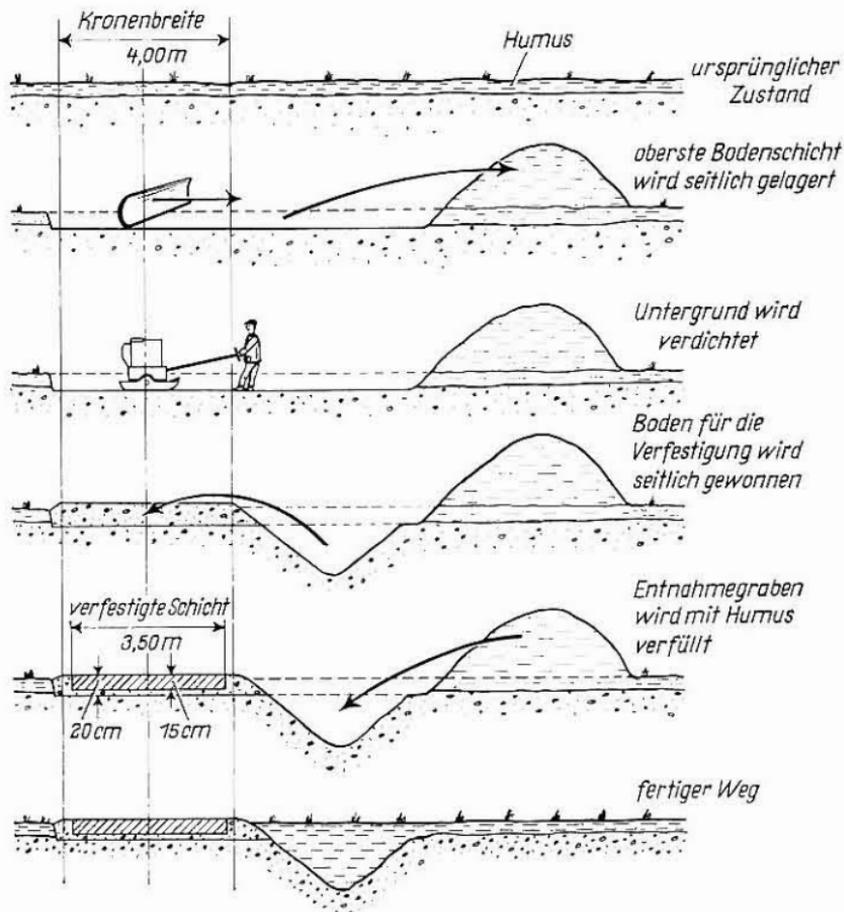


Bild 8 Beseitigung einer humosen Bodenschicht: Mit dem Motorgrader wird die oberste humose Bodenschicht seitlich gelagert; nach Verdichten des Untergrundes wird geeigneter Boden für die Verfestigung aus einem seitlichen Graben genommen; bei größerer Kronenbreite kann ein beidseitiger Entnahmegraben zweckmäßig sein

schmalen Straßen) seitlich Boden aus tieferen Schichten entnommen und aufgebracht werden (Bild 8).

Böden, wie Lehm- oder Tonböden, die schlecht zu zerkleinern und zu mischen sind, werden ungern für Verfestigungen mit Zement verwendet. Sie erfordern meist auch mehr Zement und werden durch sandige Böden ersetzt, wenn solche in geringer Entfernung zur Verfügung stehen.

Entscheidend für die Frage, welcher Boden verwendet werden soll, ist ein Vergleich der Kosten. Bei schweren bindigen Böden müssen dabei der in der Eignungsprüfung festgestellte — meist höhere — Zementbedarf und die größere Mischarbeit berücksichtigt werden. Es gibt Tonböden, die sich so schlecht zerkleinern lassen, daß die Tagesleistung des Bauzuges nur 20 bis 30 % jener bei sandigen Böden beträgt.

Verbesserungen der Kornabstufung durch Zusatz von fehlenden Korngruppen können vorgenommen werden, um die erforderliche Zementbeigabe zu vermindern. Sie sind nur zweckmäßig, wenn ein gleichmäßiges Einmischen gewährleistet ist. In der Praxis hat sich gezeigt, daß die Einsparungen an Zement durch Verbesserungen des Kornaufbaues im Vergleich zum Mehraufwand an Misch- und Transportarbeit nicht groß sind. Verbesserungen des Kornaufbaues werden deshalb nur selten ausgeführt. Die Nachteile der ungünstigen Kornabstufung im ursprünglichen Boden lassen sich durch eine etwas höhere Zementbeigabe ausgleichen, so daß sachgerecht gebaute Bodenverfestigungen aus schlecht abgestuften Böden solchen aus gut abgestuften Böden dann gleichwertig sind.

4.3 Eignungsprüfung des Bodens [7, 8]

Zementbedarf und Eignung des Bodens sind durch eine Eignungsprüfung festzustellen. Gleichzeitig erhält man daraus den beim Bau erforderlichen Wassergehalt und die Mindestdichte. Eine behelfsweise Untersuchung der Eignung eines Bodens und die Anschriften von Prüfinstituten, die Eignungsprüfungen durchführen, sind im Zementmerkleblatt 14 [9] angegeben.

Einige Unternehmer sind nach anfänglich sorgfältiger Prüfung der Böden aus Zeitmangel und Ersparnisgründen dazu übergegangen, die Eignungsprüfung durch augenscheinliche Beurteilung des Ausgangsbodens zu „ersetzen“. Fehlschläge haben sehr rasch eine Abkehr von derartigen Sparmaßnahmen gebracht. Die Reaktion eines Bodens mit Zement kann durch Augenschein auch von Fachleuten nicht mit der erforderlichen Sicherheit vorausgesagt werden, weil beispielsweise organische Stoffe oft mit dem Auge auch dann nicht zu erkennen sind, wenn ihre Menge so groß ist, daß sie die Hydratation des Zements vollständig verhindern. Auf die Eignungsprüfung kann nur verzichtet werden, wenn ein Boden der gleichen Art schon für ein früheres Bauvorhaben untersucht wurde.

In der Regel sind organische Stoffe nur in den obersten Bodenschichten (A- und B-Horizont) enthalten, so daß der darunterliegende Boden einwandfrei mit Zement erhärtet. Anhaltspunkte für das Vorhandensein organischer Stoffe erhält man durch den Versuch mit Natronlauge nach DIN 4226, § 5, Absatz 2, oder — einfacher und verlässlicher — durch Probe-



Bild 9 Aufstreuen von Calciumchlorid auf Böden mit störenden organischen Stoffen vor der Zementbeigabe

mischungen nach Zementmerkblatt 14. Erhärten Böden mit organischen Beimengungen einwandfrei oder nur wenig verspätet, so sind keine weiteren nachteiligen Wirkungen zu erwarten.

Muß ausnahmsweise ein Boden mit geringen organischen Beimengungen für die Verfestigung verwendet werden, dann kann man diese u. U. durch eine Beigabe von Calciumchlorid (0,6 bis 1,0%, bezogen auf das Bodengewicht) neutralisieren [10]. Das Calciumchlorid soll möglichst feinkörnig sein (höchstens Grießgröße) und vor dem Verteilen des Zements eingemischt werden (Bild 9); es kann auch in wässriger Lösung mit dem Mischwasser beigegeben werden. Bei der Entscheidung, ob die vorgesehenen Maßnahmen ausreichen, ist das Erhärten von Probemischungen maßgebend.

5. Vorbereitende Arbeiten

5.1 Verwendung des anstehenden Bodens

Wird der anstehende Boden verwendet, dann ist besondere Sorgfalt nötig, um zu verhindern, daß Böden, die nicht in der Eignungsprüfung untersucht wurden (z. B. Humus oder Lehmlinsen in sandigen Böden), mit eingemischt werden. Selbstverständlich müssen vorher auch Wurzeln, große Steine und andere Fremdkörper entfernt worden sein.

Meist wird mit dem Aufreißer eines Graders, einer Raupe oder eines selbstfahrenden Seaman-Mischers mehrmals die Strecke aufgerissen, um den Boden zu lockern und größere Steine und Fremdkörper zu entfernen. Steine kleiner als $\frac{2}{3}$ der Schichtdicke verursachen kaum mehr Schäden an der Mischmaschine und dürfen liegen bleiben. In der Regel entfernt man daher alle Steine über 80 bis 100 mm Durchmesser. Werden bindige Böden verfestigt, dann müssen sie nötigenfalls vorher zerkleinert werden. Die Zerkleinerung reicht aus, wenn durch die Vor-

zerkleinerung und späteren Mischgänge die bindigen Bodenanteile soweit zerteilt werden, daß keine Brocken über 20 mm Durchmesser mehr vorhanden sind und nicht mehr als ein Viertel dieser Brocken auf dem 5-mm-Maschensieb zurückbleibt. Alle noch vorhandenen Brocken müssen gut durchfeuchtet sein.

Dichte und Standfestigkeit des Untergrundes, also des Bodens, der unter der später verfestigten Schicht liegt, sind zu prüfen. Werden keine strengeren Prüfungen vorgeschrieben, so wird die Strecke mit einem schweren Fahrzeug, z. B. einem beladenen Zementfahrzeug, abgefahren und dabei beobachtet, ob sich der Boden unter der Last merkbar einsenkt. Nötigenfalls muß der Untergrund ausgetrocknet bzw. nachverdichtet werden. Es kommt immer wieder vor, daß diese Prüfung unterlassen wird. Die Folge davon ist, daß in nassen oder nachgiebigen Bereichen die darüberliegende, mit Zement gemischte Schicht bei der Verdichtung nicht genügend fest wird und sich dabei zahlreiche, eng aneinanderliegende Risse bilden. Nach Fertigstellung können stärkere Nachsetzungen des Untergrundes zu Schräg- und Längsrissen führen.

Besonders wichtig ist die gleichmäßige Dichte des Untergrundes, wenn ein Teil der Strecke auf einem Damm, der andere Teil im Einschnitt, oder wenn die Strecke zum Teil auf einem alten Straßenkörper liegt. In solchen Fällen ist es angebracht, auch den Untergrund aufzureißen, mit einigen Durchgängen des Mischgerätes zu homogenisieren und erst dann gut zu verdichten. Eine mangelhafte Tragfähigkeit des Untergrundes kann durch den Einsatz auch schwerer Geräte bei der Verdichtung der zu verfestigenden Schicht nicht behoben werden.

Bei Verwendung des anstehenden Bodens schert man daher das zu verfestigende Material mit dem Grader auf eine Längsmahd, um den Untergrund für die Verdichtung freizulegen. Nötigenfalls kann hierbei der Wassergehalt des Untergrundes durch Austrocknen an der Luft oder mit Hilfe von Feinkalk- bzw. durch Wasserbeigabe verbessert werden.

5.2 Verwendung von Fremdmaterial

Noch vor dem Einbringen des Fremdmaterials wird der Untergrund mit leichtem Quergefälle nach den gleichen Gesichtspunkten wie bei Verwendung des anstehenden Bodens gut verdichtet. Die Schüttdicke des Fremdmaterials beträgt (im aufgelockerten Zustand) bei einer Dicke der zu verfestigenden Schicht von 15 cm (+ 5 cm Sauberkeitsschicht) mindestens 27 cm. Wie unter 4.1 bereits erläutert, muß das Fremdmaterial beidseitig um 15 bis 20 cm breiter als die Mischbreite geschüttet werden.

5.3 Länge und Reihenfolge der Arbeitsstrecken

Bei Verwendung von Mehrgangmischern werden in einem Zug Strecken von 100 bis 300 m Länge verfestigt. Das Bauvolumen ist daher in Arbeitsstrecken zu unterteilen, die nacheinander verfestigt werden. Maßgebend bei der Festlegung der Arbeitsstrecken sind: die Leistung des Bauzuges, die ausreichen muß, um alle Arbeiten zwischen Verteilen des Zements und Beendigung der Verdichtung in etwa 4 Stunden (bei bindigen Böden und warmem Wetter in etwa 3 Stunden) abzuschließen;

die *Wendemöglichkeiten* für die Geräte (vor allem bei Anhängegeräten). Bei schmalen Wegen kommt es immer wieder vor, daß zum Wenden der Anhängegeräte (Mischmaschinen, Wasserwagen, Gummivielradwalzen) 2- bis 3mal so viel Zeit aufgewendet werden muß wie zum Arbeitsgang selbst;

die *Ladung der Zementfahrzeuge*, die für ganze Arbeitsstrecken reichen soll, damit Zwischenlagerungen möglichst vermieden werden;

die *Zufahrten zu den Baustrecken*, weil schwere Baumaschinen und Zementfahrzeuge nicht über frisch verfestigte Arbeitsstrecken fahren dürfen (vgl. 6.6). Bei Baulosen mit nur einer Zufahrt muß daher mit der hintersten Strecke begonnen werden.

Anfangs werden die Arbeitsstrecken meist 100 bis 150 m lang gemacht. Wenn der Baubetrieb glatt abläuft, können später ohne weiteres täglich auch zwei Teilstrecken von 150 bis 300 m Länge verfestigt werden. Nur bei kühlem Wetter, Verwendung sandiger Böden und einer besonders guten Verdichtung (nachgewiesene Überschreitung von 100% der einfachen Proctordichte) darf die Frist von 4 Stunden auf 5 bis 6 Stunden ausgedehnt werden, so daß die gesamte Tagesleistung in einer Arbeitsstrecke bewältigt wird.

5.4 Vorberechnung des Zementbedarfes und der Zementverteilung

Der zu verwendende Zementgehalt wird in der Eignungsprüfung festgestellt. Ein angemessener Sicherheitsfaktor ist im Ergebnis der Eignungsprüfung bereits enthalten. Der Zementbedarf wird nun für die einzelnen Teilstrecken berechnet. Hierzu muß der Zementgehalt z in % auf Zementgehalt Z in kg/m^3 (verdichtete Bodenverfestigung) unter Berücksichtigung der Proctordichte γ_{\dagger} (Trockenraumgewicht des verdichteten Boden-Zement-Gemisches) nach dem Diagramm (Bild 10) oder der Formel (1) umgerechnet werden.

$$Z = \frac{1000 \gamma_{\dagger} \times z}{100 + z} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

Dieser Zementgehalt wird unter Berücksichtigung der Schichtdicke im verdichteten Zustand d in m auf \bar{Z} in kg/m^2 umgerechnet:

$$\bar{Z} = d \times Z \quad [\text{kg/m}^2] \quad (2)$$

Ist b die Mischbreite in m und s die Länge der Arbeitsstrecke in m, dann müssen $\frac{b \times s \times \bar{Z}}{1000}$ Tonnen Zement bereitgestellt werden.

Bei Verwendung von Sackzement sind nun die Abstände zu berechnen, in denen die Zementsäcke auf der Strecke aufgelegt werden. Es werden Längs- und Querreihen angeordnet, deren Abstand annähernd gleich groß sein soll. Auf einspurigen Wegen (3,30 bis 3,50 m breit) werden meist zwei Längsreihen, bei Straßen mit mehr als 6 m Breite meist drei oder vier Längsreihen vorgesehen.

Wenn b die Mischbreite in m, n die Anzahl der Längsreihen und Z der Zementanteil in kg/m^2 ist, berechnet man den Abstand der Querreihen q nach

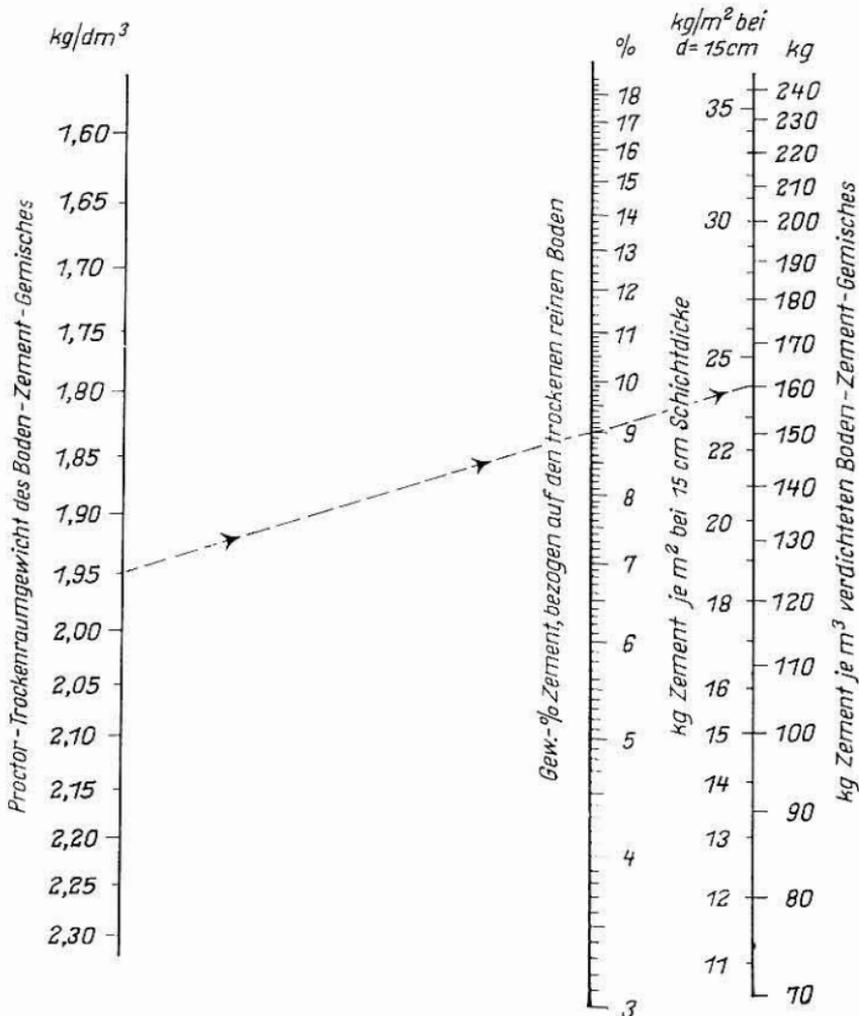


Bild 10 Nomogramm zum Umrechnen des Zementgehaltes von Gew.-% auf kg/m^2 bzw. kg/m^3

$$q = \frac{n \times 50}{\bar{Z} \times b} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Der Abstand r der Längsreihen vom Rand m beträgt

$$r = \frac{b}{2n} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

Der Abstand d der Längsreihen voneinander beträgt

$$d = \frac{b}{n} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

Beispiel 1:

Wirtschaftsweg mit

Fahrbahnbreite 3,20 m

Zementgehalt 140 kg/m^3

Schichtdicke 0,15 m

Die Mischbreite beträgt $3,20 + 2 \times 0,15 = 3,50$ m.

Zementbedarf je m^2 nach (2)

$$\bar{Z} = 140 \times 0,15 = 21 \text{ kg/m}^2$$

Es werden zwei Längsreihen angeordnet.

Der Abstand der Querreihen beträgt nach (3)

$$q = \frac{2 \times 50}{21,0 \times 3,50} = 1,36 \text{ m}$$

Der Abstand der Längsreihen vom Rand beträgt nach (4)

$$r = \frac{3,50}{2 \times 2} = 0,88 \text{ m}$$

Den Verteilungsplan für die Zementsäcke zeigt Bild 11 links.

Beispiel 2:

Landstraße mit 6,50 m Fahrbahnbreite

Zementgehalt 5 %

Trockenraumgewicht 2,10 kg/dm³

Schichtdicke 0,16 m

Die Mischbreite beträgt 6,50 + 2 x 0,20 = 6,90 m.

Zementgehalt je m³ rechnet sich nach (1)

$$Z = \frac{1000 \times 2,10 \times 5}{100 + 5} = 100 \text{ kg/m}^3$$

Zementbedarf je m² nach (2)

$$\bar{Z} = 100 \times 0,16 = 16 \text{ kg/m}^2$$

Es werden vier Längsreihen angeordnet.

Der Abstand der Querreihen beträgt nach (3)

$$q = \frac{4 \times 50}{16,0 \times 6,90} = 1,81 \text{ m}$$

Der Abstand der Längsreihen vom Rand beträgt nach (4)

$$r = \frac{6,90}{2 \times 4} = 0,86 \text{ m}$$

Der Abstand der Längsreihen voneinander beträgt nach (5)

$$d = \frac{6,90}{4} = 1,72$$

Den Verteilungsplan für die Zementsäcke zeigt Bild 11, rechts.

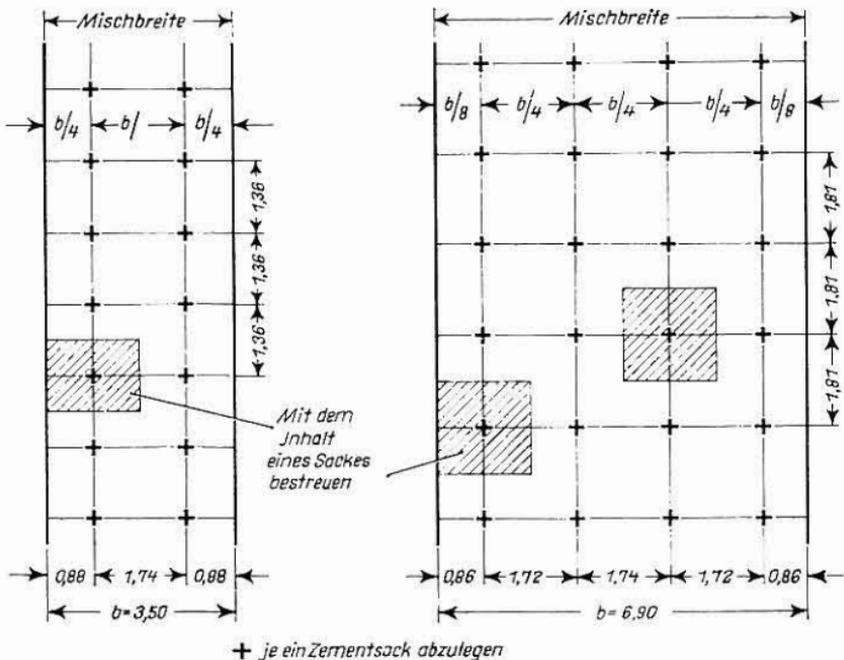


Bild 11 Verteilungsplan für Zementsäcke bei einem Weg mit 3,50 m Mischbreite (links) und einer Straße mit 6,90 m Mischbreite (rechts)

5.5. Wasserbedarf und Fassungsraum der Wasserwagen

Jedes Wasser, das nicht stark verunreinigt ist, kann verwendet werden. Um festzustellen, wie viele Wasserwagen für die Wasserbeigabe erforderlich sind und ob Wasserbeigaben vor der Zementbeigabe nötig sind, muß der Wasserbedarf vorausberechnet werden. Außerdem ist festzustellen, ob die Ergiebigkeit der Wasserquelle ausreicht. Bei der Bauausführung genügt es, den geforderten (optimalen) Wassergehalt auf $\pm 1\%$ einzuhalten, wozu in der Regel auf $\pm 0,2\%$ gerechnet wird.

Als erstes rechnet man aus, um wieviel die Füllung eines Wasserwagens den Wassergehalt der Strecke erhöht. Dieser Rechnungsgang hat den Vorteil, daß man bei der Bauausführung mit einem Richtwert arbeiten kann, mit dem aufgrund der Wassergehaltsbestimmung die erforderliche Wasserbeigabe nach ganzen, halben oder viertel Wasserwagenfüllungen angegeben werden kann. Eine genauere Bemessung der Wasserbeigabe ist nicht nötig und meist auch nicht möglich, zumal allein schon durch Verdunsten erhebliche Wasserverluste und Ungenauigkeiten eintreten können.

Ist b die Mischbreite in m , d die Schichtdicke (verdichtet) in m , s die Länge der Arbeitsstrecke in m und γ_t die zu erreichende Proctordichte (Trockenraumgewicht) in kg/dm^3 , dann reicht eine Füllung F in m^3 des Wasserwagens aus, um den Wassergehalt auf der Strecke um den folgenden Betrag ΔW zu erhöhen:

$$\Delta W = \frac{F \times 100}{b \times d \times s \times \gamma_t} \quad [\%]$$

(vergleiche auch Tafel 2).

Tafel 2 Erhöhung des Wassergehaltes in % beim Verteilen der Füllung eines Wasserwagens (F) in Abhängigkeit von Mischbreite und Streckenlänge. Schichtdicke 15 cm (verdichtet), Proctordichte 1,90 kg/dm^3

Mischbreite b in m	Streckenlänge s in m	Erhöhung des Wassergehaltes in % *) bei einem Fassungsraum F des Wasserwagens in l				
		1000	2000	2500	3000	4000
3,50	100	1,0	2,0	2,5	3,0	4,0
	150	0,7	1,3	1,7	2,0	2,7
	200	0,5	1,0	1,2	1,5	2,0
6,00	100	0,6	1,2	1,5	1,8	2,3
	150		0,9	1,1	1,3	1,8
	200		0,6	0,7	0,9	1,2
8,00	100		0,9	1,1	1,3	1,7
	150			0,7	0,9	1,2
	200				0,7	0,9

*) Wassergehalt in % des Gewichtes der trockenen Feststoffe (Boden und Zement)

Beispiel:

Ein Wasserwagen hat eine Füllung F von 4000 l. Die Arbeitsstrecke ist 190 m lang; die Mischbreite beträgt 6,90 m, die Mischtiefe 0,15 m, die zu erreichende Proctordichte 1,82 kg/dm³.

Es ergibt sich nach (6)

$$\Delta W = \frac{4,0 \times 100}{190 \times 6,90 \times 0,15 \times 1,82} = 1,1 \%$$

Eine Füllung des Wasserwagens erhöht den Wassergehalt bei gleichmäßiger Verteilung des Wassers auf die gesamte Strecke um 1,1 %.

Der Wassergehalt in der Strecke wird nun zum erstenmal bestimmt (CM-Gerät, Luftpyknometer). Um einen Durchschnittswert zu erhalten, macht man Wassergehaltsprüfungen mit mehreren Proben, die in 5 bis 10 cm Tiefe entnommen werden.

Wenn mit der Verdichtung begonnen wird, soll bei Böden ohne bindige Anteile ein Wassergehalt von 0 bis 2 % unter dem günstigsten Wassergehalt nach Proctor erreicht sein; bei bindigen Böden darf der günstigste Wassergehalt nach Proctor nicht unterschritten werden, sondern soll um 1 bis 2 % darüber liegen. Bei der Bestimmung der noch erforderlichen Wasserbeigabe ist zu beachten:

durch das Einmischen trockenen Zements wird der Wassergehalt des Boden-Zement-Gemisches gegenüber jenem des ursprünglichen Bodens um etwa 1 % vermindert;

bei sonnigem, windigem Wetter können die Verdunstungsverluste bei 15 cm Schichtdicke bis zu 1 % je Stunde betragen;

wird bei leichten Niederschlägen weitergearbeitet, dann muß diese natürliche Befeuchtung berücksichtigt werden.

Um eine gute Verteilung des Wassers zu erreichen, was insbesondere bei Böden mit kleinen bindigen Brocken wichtig ist, und um bei der Bauausführung Zeit zu sparen, erhöht man nötigenfalls den Wassergehalt auf der Strecke schon vor der Zementbeigabe so weit, daß später nurmehr eine Wasserbeigabe von 4 bis 5 % erforderlich ist.

Man rechnet nun aus, ob die Anzahl der vorhandenen Wasserwagen genügt, um die Wasserbeigabe bei der Bauausführung innerhalb von 1 bis 1½ Stunden durchzuführen. Stellt man die Zeit fest, die ein Wasserwagen zum Füllen, zur Hin- und Rückfahrt und zum Entleeren braucht, dann ergibt sich daraus, wie viele Füllungen innerhalb der vorgesehenen Zeit aufgebracht werden können.

Beispiel:

Ein Wasserwagen hat 4000 l Fassungsraum. Eine Pumpe mit einer Fördermenge von 5 l/sec steht an einem Bach, der 5 min von der Baustrecke entfernt ist.

Es ergibt sich folgender Zeitaufwand:

Fahrt zur Pumpe	5	Minuten
Füllzeit $\frac{4000}{5}$ —Sekunden	rd.	13½ Minuten
Fahrt zur Baustrecke (bergauf)	7	Minuten
Füll- und Fahrzeit		<hr/> 25½ Minuten

Entleeren (zwei Übergänge, je 8 Minuten)	16 Minuten
Wenden und Wartezeit bis zum 2. Übergang	5½ Minuten
zusammen	21½ Minuten

Steht der Wasserwagen vor der ersten Wasserbeigabe schon gefüllt bereit, dann benötigt man zum Aufbringen von 2 Füllungen:

eine Füll- und Fahrzeit	25½ Minuten
zwei Entleerzeiten je 21½ Minuten	43 Minuten
	68½ Minuten

Es sei nun weiter angenommen, daß auf der Strecke ein Wassergehalt des Bodens von 5,4 % festgestellt wurde. Der günstigste Wassergehalt des Boden-Zement-Gemisches betrage 14,2 %. Daraus berechnet sich die erforderliche Wasserbeigabe:

Differenz der Wassergehalte 14,2 — 5,4	= 8,8 %
Befeuchtung des beizugebenden Zements	etwa 1,0 %
Verdunstungsverluste	etwa 1,5 %
gesamte erforderliche Beigabe	etwa 11,3 %

Sieht man vor, daß nach der Zementbeigabe noch 4 % Wasser eingemischt werden, dann ist bei der Vorbefeuchtung eine Erhöhung des Wassergehaltes um 11,3 — 4,0 = 7,3 %, d. h. vom festgestellten Wassergehalt (5,4 %) auf 5,4 + 7,3 = 12,7 % erforderlich.

Nach der Zementbeigabe sind für die Erhöhung des Wassergehaltes um 4,0 % unter den zuvor gemachten Voraussetzungen (eine Wasserwagenfüllung erhöht den Wassergehalt auf der Strecke um 1,1 %) 4,1 : 1,1 = 3,7 Füllungen

nötig.

Da das Aufbringen von zwei Füllungen 68½ Minuten erfordert, ergibt sich, daß zwei Wasserwagen mit je 4000 l Fassungsraum vorhanden sein müssen, um die erforderliche Wassermenge innerhalb von 1½ Stunden aufzubringen.

5.6 Vorbefeuchtung

Die Vorbefeuchtung führt man am Nachmittag vor den Verfestigungsarbeiten aus oder – wenn die Gefahr eines Nachtregens besteht – besser erst wenige Stunden vor dem Verteilen des Zements. Vor dem Aufsprühen des Wassers muß die Oberfläche leicht aufgelockert werden, damit das Wasser gut eindringt und nicht abfließt. Das Auflockern geschieht mit einer am Wasserwagen angehängten Egge oder durch leichtes Auffräsen mit der Mischmaschine. Um eine gleichmäßige Verteilung des Wassers zu sichern, ist bei der Wasserzugabe folgendes zu beachten:

der Wasserwagen muß mit konstanter Geschwindigkeit über die Strecke fahren (etwa mit 2 bis 3 km je Stunde);

noch vor jedem Anhalten des Wasserwagens auf der Strecke muß der Abflußhahn geschlossen werden, damit der Boden unter dem Sprührohr nicht zu naß wird;

das Wasser darf nicht in den Fahrspuren des Wasserwagens abfließen und sich in deren tiefsten Punkten sammeln; auch bei ebenen Strecken sind Vorkehrungen nötig, um dies zu verhindern.



Bild 12 Das Mischgerät fährt knapp hinter dem Wasserwagen, um zu verhindern, daß das Wasser unmittelbar nach der Beigabe in den Fahrspuren zusammenfließt



Bild 13 Fahrspuren eines Wasserwagens werden sofort zugeschüttet, um ein Abfließen des Wassers zu verhindern

Folgende Verfahren haben zum Erfolg geführt:

am Wasserwagen wird eine Egge angehängt, die die Fahrspuren sofort aufreißt bzw. zuschüttet;

das Mischgerät fährt unmittelbar hinter dem Wasserwagen (Bild 12);

die Fahrspuren werden unmittelbar hinter dem Wasserwagen zugeschaufelt (Bild 13).

Das Wasser wird in Teilmengen von 0,5 bis 0,8% (das sind rd. 15 bis 25 l je m²) aufgesprüht und nach jeder Beigabe in voller Mischtiefe eingemischt. Bei Wasserwagen, die in einem Durchgang nur einen Teil der Breite der Strecke bestreichen, ist be-



Bild 14 Motorgrader zum Profilieren des Planums



Bild 15 Überprüfen der Schüttdicke des aufgetragenen Fremdmaterials mit Hilfe eines Probeloches

sonders darauf zu achten, daß sich an der Nahtstelle die Sprühbahnen gerade nur berühren, so daß kein zu trockener oder zu nasser Streifen entsteht. Wenn das Sprührohr zu lang ist und sich die seitlichen Sprühlöcher nicht verschließen lassen, soll der Randstreifen mit besprüht werden.

Anhand von Messungen wird das Ansteigen des Wassergehaltes laufend geprüft und mit den für die einzelnen Übergänge berechneten Teilgehalten verglichen.

5.7 Profilieren und Vorverdichten

Der für die Verfestigung vorbereitete Boden muß vorverdichtet und sorgfältig planiert werden. Beim Vorverdichten ist beson-

ders darauf zu achten, daß auf volle Breite und Länge der Strecke eine gleichmäßige Dichte erreicht wird; ein hohes Raumgewicht ist hierbei noch nicht erforderlich, da das Vorverdichten nur dazu dient, eine genaue Einhaltung der Mischtiefe und der im fertigen Zustand erforderlichen Höhenlage und Ebenheit des Planums zu ermöglichen und das gleichmäßige Verteilen des Zements zu erleichtern (in Fahrspuren könnte sich sonst mehr Zement ansammeln).

Zum Planieren ist der Einsatz eines Graders unerlässlich (Bild 14). Muß vor dem Verteilen des Zements noch starker Regen befürchtet werden, dann wird die Oberfläche der Strecke mit leichtem Quergefälle profiliert, mit Wasser besprengt und leicht abgewalzt. Das Regenwasser fließt dann besser ab, so daß die Strecke nach dem Regen für die Bauausführung nicht zu naß ist oder zumindest schon nach kürzeren Austrocknungszeiten mit dem Bau begonnen werden kann.

Bei Verwendung von Fremdmaterial muß nach dem Vorverdichten und Planieren nochmals anhand eines Probeloches geprüft werden, ob die Schichtdicke des eingebrachten Bodens ausreicht (Bild 15).

5.8 Abstecken der Mischbreite und der Abstände der Zementsäcke

Vor dem Verteilen des Zements muß die Mischbreite des Gerätes mit Fluchtstäben oder Pflöcken abgesteckt werden. Da das Mischgerät beidseitig um rd. 25 cm über die Mischbreite hinausragt, sind die Fluchtstäbe 30 oder 40 cm vom Rand der zu mischenden Fläche abzurücken.

Die Quer- und Längsreihen, in denen die Zementsäcke abgelegt werden, kennzeichnet man durch Striche in der Bodenoberfläche oder durch kleine Pflöcke.

Statt der Kennzeichnung der Stellen, wo ein Zementsack abzuliegen ist, kann man auch mit Längs- und Querstrichen die Flächen abgrenzen, auf die der Inhalt eines Zementsackes verteilt werden muß (Bild 11).

6. Bauausführung

6.1 Wetter

Die Verfestigungsarbeiten können bei jedem Wetter ausgeführt werden, außer bei starkem Regen oder bei Temperaturen unter 5 °C. Liegt der Wassergehalt des zu verfestigenden Bodens um mehr als 2% über dem anzustrebenden Wassergehalt oder kann durch Niederschläge vor Beendigung der Verdichtung eine Erhöhung des Wassergehaltes auf diesen Wert eintreten, dann darf nicht mit den Arbeiten begonnen werden. Bei warmem oder windigem Wetter läßt sich feuchter Boden rasch trocknen, wenn man mit dem Mischgerät bei offener Mischwellenhaube über die Strecke fährt und den Boden durch die Luft schleudert (Vorsicht ist hinter dem Mischgerät geboten, weil der Boden weit hinausgeschleudert wird).

Bodenzementverfestigungen, die erst im Spätherbst gebaut werden, sind durch den möglicherweise bald auftretenden Frost



Bild 16 Abwerfen der Zementsäcke auf die vorher gekennzeichneten Stellen

stärker gefährdet, da der Zement bis dahin weniger Zeit zum Hydratisieren haben kann und die Hydratation außerdem bei niedrigen Temperaturen langsamer abläuft.

Bei Ausführungen in dieser Jahreszeit ist zu beachten:

bei sandigen Böden darf der günstigste Wassergehalt keinesfalls überschritten werden;

bei Frostgefahr ist die Strecke sofort nach Fertigstellung mit Strohmatte oder ähnlichem abzudecken;

die verfestigte Tragschicht ist möglichst noch vor dem Winter durch Aufbringen einer Abdeckschicht zu schützen;

an der Oberfläche der Zementverfestigung gelockerte Teilchen sind vor Aufbringen des Belages durch kräftiges Abkehren zu entfernen.

Die häufigste Ursache von Schäden an Zementverfestigungen sind Frosteinwirkungen. Solche Schäden wurden bisher ausschließlich auf Strecken festgestellt, die unmittelbar vor Frosteinbruch bei sehr niedrigen Temperaturen und oft mit zu hohem Wassergehalt gebaut wurden sowie ohne Abdeckung blieben, oder auf Strecken, bei denen der Mindestzementgehalt unterschritten wurde oder bei denen man den Zement sehr ungleichmäßig eingemischt oder das Gemisch mangelhaft verdichtet hatte.

Kommt während des Mischvorganges unerwartet starker Regen, dann muß rasch fertiggemischt und verdichtet werden. Verbesserungen der Ebenheit der Strecke können in diesem Falle erst am nächsten Tag vor sich gehen; es kann dann aber nur mit dem Grader gearbeitet werden. Abgezogenes Material darf nicht mehr aufgebracht werden und ist zu entfernen, weil es an der Oberfläche nicht mehr haften würde. Vertiefungen sind mit bituminösem Mischgut aufzufüllen.

6.2 Verteilen des Zements

Die Zementsäcke werden vom Zementfahrzeug auf die im Planum gekennzeichneten Stellen abgelegt oder abgeworfen (Bild 16). Stehen Zementfahrzeuge in ausreichendem Maße nicht zur



Bild 17 Einmischen des bereits verteilten Zements. (Danoben wird weiter Zement verteilt)



Bild 18 Verteilen des Zements mit der Haube des Mischgerätes auf die volle Breite. (Das Planum muß hierbei sehr eben sein, um eine gleichmäßig dicke Schicht zu erhalten)

Verfügung, kann Sackzement vor dem Verteilen neben der Strecke zwischengelagert werden. Solange die verteilten Zementsäcke geschlossen sind, darf noch eine Arbeitspause eingeschaltet werden.

Die eigentlichen Verfestigungsarbeiten beginnen mit dem Aufreißen der Säcke. Der Zement wird mit Schaufeln, Rechen oder Schabern auf die einem Sack zukommende Fläche sorgfältig verteilt. Hierzu werden alle verfügbaren Arbeitskräfte eingesetzt (Bild 17). Auch Eggen oder Hauben der Mischgeräte sind hierbei zu gebrauchen (Bild 18). Ein ungleichmäßiges Verteilen des Zements verursacht starke Schwankungen der Güte der verfestigten Schicht; da die Stellen mit dem geringsten Zementge-

halt für die Brauchbarkeit der gesamten Ausführungen entscheiden, muß einer gleichmäßigen Zementverteilung besondere Sorgfalt gewidmet werden.

Werden Zementverteilergeräte eingesetzt, dann muß die Streumenge vorher richtig eingestellt werden, und zwar am besten auf Grund von Streu-Versuchen über kleinen Zeltplanen oder flachen Blechen mit aufgebogenem Rand von 0,2 bis 0,5 m² Fläche. Die auf die Zeltplane oder das Blech gestreute Zementmenge wird gewogen und mit der Soll-Streumenge verglichen. Ein Rutschen der Räder (Schlupf) des Verteilergerätes muß berücksichtigt werden, Zemente verschiedener Art und Herkunft fließen nicht immer in gleicher Weise durch das Verteilergerät. Es empfiehlt sich auch, sofort nach dem Verteilen der ersten Füllung des Silowagens die bestreute Fläche nachzumessen und so die tatsächlich verteilte Zementmenge je m² nachzuprüfen.

Das Verteilergerät streut den Zement in nebeneinanderliegende Längsstreifen. Dabei muß auch an der Nahtstelle zweier Längsstreifen die richtige Streumenge eingehalten werden, worauf besonders in engen Kurven zu achten ist. Um sich vor Fehlstellen zu schützen, darf der in einer Längsbahn gestreute Zement erst eingemischt werden, wenn auf der Nachbarbahn der Zement verteilt und an der Nahtstelle die erforderliche Zementmenge überprüft wurde.

6.3 Mischen

Sobald der Zement auf mindestens etwas mehr als eine Arbeitsbreite des Mischgerätes verteilt ist, wird er eingemischt (Bild 17). Zement, der länger auf feuchtem Planum liegen bleibt, nimmt Wasser auf (dunklere Färbung) und bildet Knollen, die beim Mischvorgang nicht mehr fein genug zerteilt werden können (Bilder 19 und 20).



Bild 19 Knollen feuchten Zements. (Liegt der Zement länger am feuchten Boden, dann saugt er Wasser auf und bildet Knollen, die mit dem Schaber zerschlagen werden müssen)

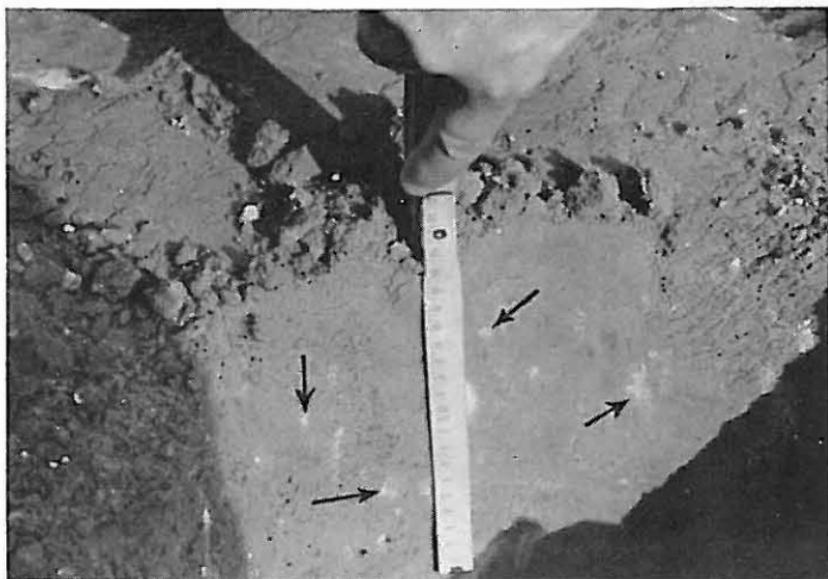


Bild 20 Feuchte Zementbrocken kleben auch bei guter Mischarbeit zusammen. Sie bilden in der fertigen Schicht einzelne wertlose Zementsteinknollen

Ist der Boden fest gelagert, dann ist es möglich, daß das Mischgerät die volle Mischtiefe erst beim zweiten Durchgang erreicht. In der Regel ist für eine Schichtdicke von 15 cm im verdichteten Zustand vorher — unverdichtet — eine Mischtiefe von 19 bis 21 cm erforderlich.

Im Zweifelsfalle kann die notwendige Mischtiefe auch vorausbestimmt werden: man stellt mit Hilfe eines Probeloches (etwa 30 x 30 cm) das Feuchtraumgewicht der lockeren Schüttung fest, rechnet daraus auf Grund des Wassergehaltes das Trockenraumgewicht $\gamma_{t\ lose}$ und bestimmt nach Formel (7) die Soll-Mischtiefe d_M :

$$d_M = d \frac{\gamma_t}{\gamma_{t\ lose}} \quad (7)$$

d = Schichtdicke im fertigen Zustand,

γ_t = Proctordichte.

Der verantwortliche Schachtmeister prüft laufend Mischtiefe und Güte der Durchmischung an Probelöchern, die mit einer Schaufel ausgehoben werden (Bild 21).

Wird die vorgesehene Mischtiefe mit dem Gerät bei entsprechender Einstellung nicht erreicht, dann muß das schon durchgemischte, zementreiche Gemisch mit dem darunterliegenden ungemischten Boden in der vorgesehenen Dicke mit dem Motorgrader auf eine Langmahd gebracht und wieder verteilt werden, bevor das Mischgerät erneut durchmischt.

Fällt das Mischgerät während des Mischvorganges aus, kann mit einer landwirtschaftlichen Bodenfräse (Bild 22) oder bei sandigen Böden mit dem Motorgrader (Bild 23) gemischt werden. Mit solchen Geräten läßt sich im Notfall eine ausreichende Mischwirkung erzielen. Bleibt das Boden-Zement-Gemisch vor der Verdichtung mehrere Stunden auf der Strecke liegen, dann



Bild 21 Nachprüfen der Mischtiefe und Gleichmäßigkeit der Durchmischung in einem Probeloch

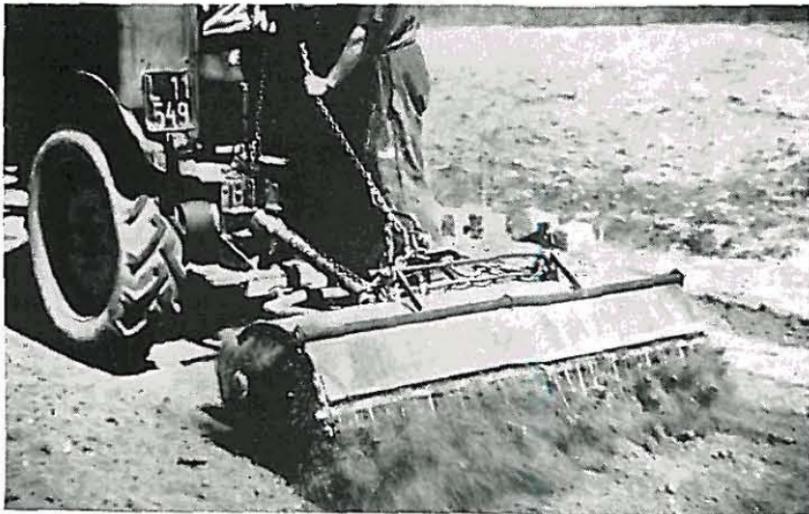


Bild 22 Landwirtschaftliche Bodenfräse als Mischer bei Ausfall der großen Mischmaschine

läßt es sich viel schwerer verdichten. Vergleichende Versuche haben gezeigt (Bild 24), daß der **nachteilige** Einfluß längerer Bearbeitungsfristen gering bleibt, wenn **alle** 20 Minuten durchgemischt und das Boden-Zement-Gemisch **anschließend** bei günstigstem Wassergehalt so stark **verdichtet** wird, daß die für kurze Mischzeit festgestellte Proctordichte erreicht wird.

Das feuchte Boden-Zement-Gemisch soll daher auch auf der Baustelle bis zum Beginn der Verdichtung mindestens alle 20 Minuten durchgemischt werden.

6.4 Wasserbeigabe und Einmischen

Wenn der Zement auf der ganzen Fläche durch den ersten Mischdurchgang eingearbeitet ist, wird **unmittelbar** anschließend



Bild 23 Behelfswises Mischen sandiger Böden mittels Motorgrader. (Der Grader arbeitet dabei nach dem Prinzip eines Freifallmischers)

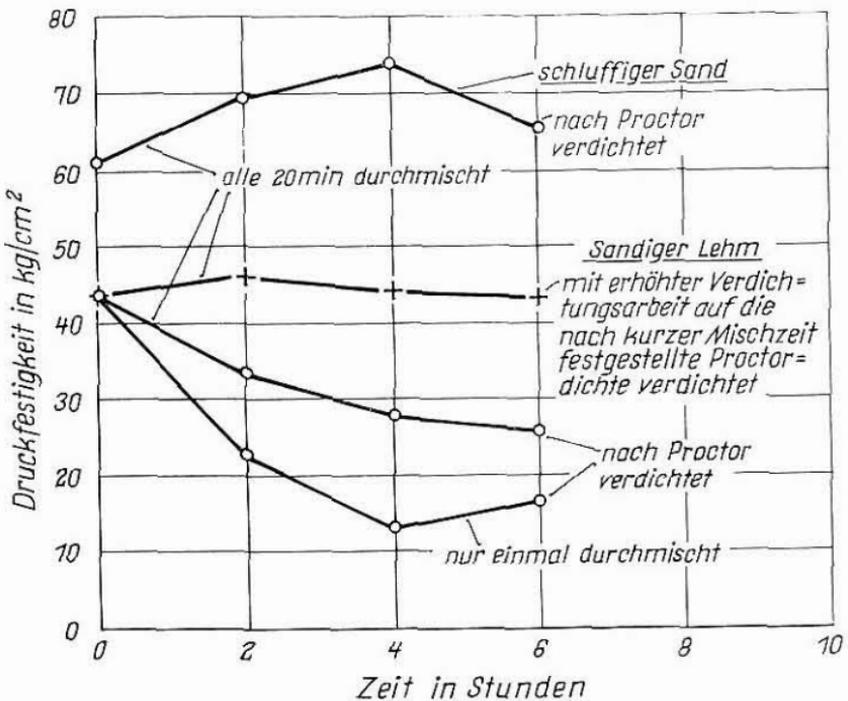


Bild 24 Günstiger Einfluß wiederholten Durchmischens und erhöhter Verdichtung auf die Festigkeit von Boden-Zement-Gemischen, die erst nach mehreren Stunden verdichtet wurden

das noch erforderliche Wasser beigegeben. Bei der weiteren Wasserbeigabe sind die gleichen Gesichtspunkte wie bei der Vorbefeuchtung zu beachten, um ein sehr gleichmäßiges Verteilen zu sichern (vgl. 5.6). Nach jedem Übergang des Wasserwagens wird durchgemischt.

Mit dem CM-Gerät oder dem Luftpyknometer wird der Wassergehalt immer wieder festgestellt und je nach dem Ergebnis dieser Prüfung die letzte Wasserbeigabe angeordnet (vgl. Tafel 2). Bei Böden ohne bindige Anteile soll ein Wassergehalt erreicht werden, der bis zu 2% unter dem günstigsten Wassergehalt liegen darf. Wird der günstigste Wassergehalt überschritten, besteht die Gefahr, daß Glatwalzen beim Verdichten die oberste Bodenschicht aufnehmen oder daß das Gemisch beim Verdichten nachgibt. Bei bindigen Böden führt ein Wassergehalt, der etwa 1 bis 2% über dem günstigsten Wassergehalt liegt, zu höherer Frostbeständigkeit und geringerer kapillarer Saugfähigkeit.

Der Mischvorgang darf nicht unterbrochen werden. Leere Wasserwagen müssen rasch gefüllt werden. Das Wasser wird ohne Pause verteilt, bis der erforderliche Wassergehalt erreicht ist. Die ausreichende Mischtiefe muß spätestens nach dem dritten Durchgang erreicht sein. Reißt das Gerät bei einem späteren Mischdurchgang tiefer liegenden, noch nicht gemischten Boden mit auf, dann sind zusätzliche Mischdurchgänge erforderlich, um auch diesen Boden zu zerkleinern und einzumischen.

Die Durchmischung reicht aus, wenn das feuchte Gemisch auf der ganzen Strecke eine einheitliche Färbung aufweist. An Probelöchern wird dies ebenso wie die Mischtiefe laufend geprüft. Bei sandigen Böden sind meistens 4 bis 8 Mischdurchgänge auf jedem Arbeitsstreifen erforderlich, bei bindigen Böden bis zu 16 Mischdurchgänge und mehr. Entscheidend ist aber nicht die Zahl der Mischdurchgänge, sondern das Aussehen des Gemisches. Nachträglich kann die Güte der Durchmischung durch Bestimmung des Zementgehaltes an kleinen Einzelproben, durch Druckfestigkeitsprüfungen von Aufbruchstücken oder mit auf der Baustelle hergestellten Probezylindern aus Gemischen, die an verschiedenen Stellen entnommen wurden, geprüft werden. Mischfehler, die durch unsorgfältige Arbeit oder fehlende oder stark abgenutzte Mischmesser verursacht wurden, sind an den fertigen Strecken meist bald zu erkennen.

6.5 Verdichten und Nachplanieren

Sobald das Boden-Zement-Gemisch gleichmäßig aussieht und den erforderlichen Wassergehalt aufweist, wird mit dem Verdichten begonnen. In der Regel muß mit einem leichten Gerät (Gummiradwalze) vorverdichtet werden, um dann mit einem schwereren Verdichtungsgerät das erforderliche Trockenraumgewicht zu erzielen. Die Randstreifen sind zuerst zu verdichten, damit das Gemisch nicht seitlich ausweichen kann. Auf beiden Seiten soll dabei um mindestens 30 cm über die Mischbreite hinaus verdichtet werden.

Vor Abschluß der Verdichtung wird mit dem Grader nachplaniert, um eine ebene Oberfläche zu erhalten. Noch bevor der Grader eingesetzt wird, muß die durch den Walzvorgang geglättete Oberfläche leicht aufgerissen werden (z. B. mit einer Egge oder Besenschlepppe, Bild 25). Dies ist unbedingt notwendig, da auf glatten Oberflächen ein aufgebrachtes Gemisch nicht mehr haften und daher früher oder später abbröckeln würde. (Auch Probezylinder, die in drei Schichten im Proctorgerät hergestellt werden, brechen an den Schichtgrenzen auseinander, wenn dort

nicht aufgerauht worden ist.) Wird das Aufrauen unterlassen, dann darf zum Ausgleich der Unebenheiten beim Nachplanieren nur Gemisch abgezogen werden, das dann weggeworfen wird. Zur letzten Glättung der Oberfläche kann man auch eine Besenschleppe und eine leichte Glättwalze verwenden. Nötigenfalls muß vor dem letzten Verdichten noch etwas Wasser aufgespritzt werden, damit auch die oberste Schicht ausreichend feucht ist. An Stellen, an denen die oberste Schicht nicht genügend verdichtet ist, würde ein dünner Belag nicht haften.



Bild 25
Besenschleppe zum
Aufreißen der
Oberfläche der
verfestigten Schicht
vor dem
Nachplanieren

Verdichten und Nachplanieren können beendet werden, wenn 100 % der einfachen Proctordichte auch in der obersten Schicht erreicht sind und die Oberfläche eben, glatt und frei von Rissen ist.

War der Untergrund nicht ausreichend tragfähig und fest oder wurde an einzelnen Stellen zuviel Wasser beigegeben, dann zeigt sich dies während des Verdichtens in Form von Rissen und nachgiebigen Bereichen in der Tragschicht. Nötigenfalls müssen solche Stellen entfernt werden. Den Untergrund trocknet man dann aus, verdichtet ihn und bringt frisches Boden-Zement-Gemisch ein.

Prüfung der Dichte der verfestigten Schicht

Bei allen Böden, die keine oder nur vereinzelt Steine und Kieskörner (größer als etwa 4 mm) enthalten, kann der Grad der Verdichtung mit dem Stechzylinder geprüft werden (vgl. Bild 26). Enthält der Boden Kies, dann ist die Dichte zu bestimmen, indem man den Rauminhalt einer entnommenen Probe durch Füllen des Entnahmeloches in der verdichteten Schicht mit einem Stoff bekannter Dichte mißt. Hierzu dient das Sand-, Gips-, Öl- oder Wasserersatzverfahren (Bild 27). Die festgestellte Dichte muß mit der Proctordichte verglichen werden. Hierzu kann mit der entnommenen Probe ein Proctorversuch durchgeführt werden.

Wenn die Kornzusammensetzung des Bodens auf der Strecke wenig schwankt, kann statt dessen auch die Proctordichte aus der Eignungsprüfung verwendet werden.

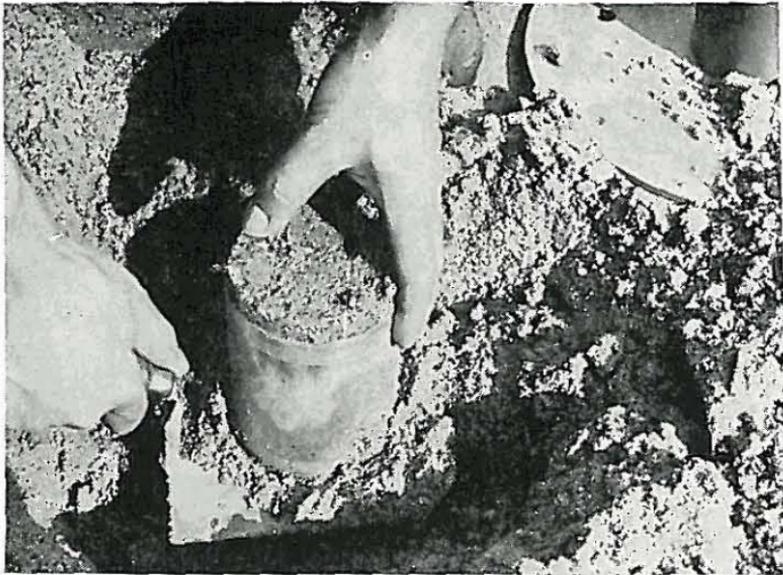


Bild 26 Dichtebestimmung einer verfestigten Schicht mit einem Stechzylinder, der in die Schicht eingedrückt und dann ausgegraben wird

6.6 Nachbehandlung und Schutz der Strecke

Die frisch verfestigte Schicht muß gegen Austrocknen geschützt werden. In der Regel wird unmittelbar nach Beendigung der Verdichtung oder an einem der nächsten Tage zur Nachbehandlung Bitumenemulsion (etwa $0,7$ bis $0,8$ kg/m^2 un stabile Emulsion) aufgespritzt. Bis zum Aufbringen der Bitumenemulsion muß die Oberfläche gut feucht gehalten werden. Wichtig ist, daß die Oberfläche vor dem Aufspritzen noch mattheucht ist. Nötigenfalls muß Wasser vorher aufgespritzt werden.

Schwere Arbeitsgeräte (Wasserwagen, Bitumenspritzgeräte) dürfen auf der frischen Strecke nur unmittelbar nach Beendigung der Verdichtung und nur, wenn dadurch keine Verdrückungen der Oberfläche entstehen, fahren. Am Tage nach der Fertigstellung darf die Strecke nur durch leichte gummibereifte Geräte befahren werden, die die Oberfläche feucht halten oder mit bituminösen Bindemitteln abspritzen. Wenn auch solche Geräte noch Beschädigungen an der Oberfläche hervorrufen (z. B. bei gleichkörnigen Sanden), müssen die Arbeiten von der Seite her ohne Befahren der Strecke ausgeführt werden.

Beim Bau der Anschlußstrecken ist nicht zu umgehen, daß Grader und alle Anhängegeräte auf der bereits fertiggestellten Strecke wenden. Um diese zu schützen, ist als Wendefläche auf den ersten 10 bis 15 m der fertigen Strecke eine Bodenschüttung von 15 cm Dicke aufzubringen. Steine über 70 mm Durchmesser sind aus dem Schüttgut zu entfernen. Zementfahrzeuge dürfen nur in leerem Zustand auf der Wendefläche fahren. Liegt die fertige Strecke bereits mindestens 4 bis 6 Tage und werden nur gummibereifte Geräte verwendet, dann braucht auf die Wendefläche keine Schutzschicht geschüttet zu werden.

Bei warmem Wetter dürfen einzelne schwere Fahrzeuge (z. B. Zementfahrzeuge) frühestens 1 Woche nach Ausführung der



Bild 27
 Sandersatzverfahren
 zur Bestimmung der
 Dichte eines Bodens
 mit Kies

Verfestigungsarbeiten über die Strecke fahren. Bei kühler Witterung und wenig standfesten Böden (z. B. Flugsanden) ist diese Frist auf 10 Tage zu verlängern, weil bei niedrigen Temperaturen die Hydratation langsamer vor sich geht und bei wenig standfesten Böden leichter Beschädigungen entstehen.

6.7 Arbeitsfugen

Der schlecht oder mit wenig Zement gemischte Boden am Ende jeder Arbeitsstrecke muß soweit entfernt werden, bis die gut durchmischte verfestigte Schicht in voller Dicke und Breite ansteht. Frisches Gemisch der Anschlußstrecke wird an der Arbeitsfuge so hoch geschüttet, daß nach Verdichtung ein glatter oder eher etwas höherer Anschluß entsteht, der nach dem Verdichten abgetragen wird. In einem Bereich von 0,5 bis 1 m ist hier meist Handarbeit erforderlich.

6.8 Einbau der Abdeckschicht

Abdeckschichten sollen frühestens 3 bis 4 Tage nach dem Bau der Verfestigung, spätestens vor Einbruch des Winters, aufgebracht werden. Vor dem Einbau bituminöser Decken ist die Oberfläche der verfestigten Schicht in jedem Falle kräftig abzukehren, um alle etwa durch Pferdehufe oder ähnliches gelockerten Teilchen zu entfernen.



Bild 28
Ortsverbindungs-
straße mit zement-
verfestigter Trag-
schicht im Kreis
Wesermünde aus
dem Jahre 1957

7. Kosten

Die Kosten einer Bodenverfestigung mit Zement sind von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Sie sind bei Verwendung sandiger Böden, die sich leicht mischen lassen und vielfach nur 15 kg Zement je m^2 verdichtete Schicht erfordern, niedriger als bei bindigen Böden. Selbstverständlich wird der Unternehmer Bodenverfestigungen zu niedrigeren Selbstkosten herstellen können, wenn er über erfahrene Arbeitskräfte verfügt und ein glatter Ablauf aller Arbeiten bei hohen Tagesleistungen möglich ist. Die für eine Kalkulation der Selbstkosten erforderlichen Angaben gehen aus den vorhergehenden Abschnitten hervor.

In der Regel liegen die Kosten für die Verfestigung eines anstehenden Bodens oder bereits eingebrachten Fremdmaterials ohne Abdeckschicht, jedoch einschließlich Zement und Nachbehandlung, zwischen DM 2,50 und DM 4,50 je m^2 .

8. Zusammenfassung

Moderne Bauverfahren und leistungsfähige Geräte machen den Straßenbau immer mehr zu einem Fließbandverfahren mit stehendem Band und fahrenden Arbeitsmaschinen. Der Erfolg solcher Verfahren, die wie jede Fließbandfertigung erhebliche Kostensenkungen ermöglichen, hängt von einer guten Bauvorbereitung und sorgfältigen Ausführung ab. In der vorliegenden Arbeit wurden für den Bau von Bodenverfestigungen mit Zement wesentliche und vom traditionellen Straßenbau abwei-

chende Maßnahmen zusammengefaßt und begründet. Mit dem Verfahren der Bodenverfestigung kann danach auf gut tragfähigem Untergrund eine dauerhafte und frostbeständige Tragschicht gebaut werden, deren Tragfähigkeit bei mittlerer Verkehrsdichte und Belastung ausreicht. Die Baukosten der zementverfestigten Decke liegen dabei wegen der Verwendung vorhandener Baustoffe verhältnismäßig niedrig.

SCHRIFTTUM :

- [1] Catton, M. D.: Research on the physical relations of soil and soil-cement mixtures. Proc. Highway Res. Board. Washington 1940, S. 821/855.
- [2] Felt, E. J.: Factors influencing physical properties of soil-cement. Highway Res. Board. Bull. 108. Washington 1955.
- [3] Billfinger, R.: Bodenvermörtelung mit bituminösen Bindemitteln und Zement. Volk- und Reich-Verlag, Berlin 1943.
- [4] Reinhold, F.: Mißerfolge der Bodenvermörtelung? Straßen-Asphalt- und Tiefbau-Technik (jetzt Straßenbau-Technik) 8 (1955) H. 2, S. 39/43.
- [5] Springenschmid, R.: Beanspruchung und Prüfung von Bodenverfestigungen mit Zement. Straßen- und Tiefbau 14 (1960) H. 3, S. 163/175.
- [6] Springenschmid, R.: Die Verfestigung von Flugsanden mit Zement für Straßen und Wege in Norddeutschland. Straßenbau-Technik 13 (1960) H. 4, S. 115/120.
- [7] Springenschmid, R.: Die Bodenverfestigung mit Zement — Rückblick und Ausblick. Schriftenreihe Unterbau, Heft 1, Forschungsgesellschaft für das Straßenbauwesen e. V., Köln 1960, S. 121/139, und Straßenbau-Technik 14 (1961) H. 2, S. 47/50, und H. 3, S. 96/100.
- [8] Soil-Cement Laboratory Handbook. Portland Cement Ass., Chicago 1956 (Deutsche Übersetzung beim Fachverband Zement, Köln).
- [9] Bodenverfestigung mit Zement für Straßen und Wege. Zementmerkblatt 14, Fachverband Zement, Köln 1959.
- [10] Catton, M. D., und E. J. Felt: Effect on soil and calcium chloride admixtures on soil cement mixtures. Proc. Highway Res. Board, Washington 1943, S. 497/529.
- [11] Anleitung für den Bau und die Unterhaltung mechanisch verfestigter Trag- und Verschleißschichten. 2. Auflage, Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1957.
- [12] Merkblatt für bodenphysikalische Prüfverfahren. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1956.
- [13] Soil-Cement Construction Handbook. Portland Cement Ass., Chicago 1956 (Deutsche Übersetzung beim Fachverband Zement, Köln).
- [14] Befestigung ländlicher Wege. Teil 2: Merkblatt für die Bodenverfestigung ländlicher Wege. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1960.
- [15] Springenschmid, R.: Bau und Bewährung einer Bodenverfestigung mit Zement. Straße und Autobahn 11 (1960) H. 3, S. 95/99.
- [16] Buchholz, H.: Maschinelle Hilfsmittel für die Herstellung bodenverfestigten Unterbaues. Der Straßenbau 52 (1961) H. 2, S. 72/82.