

Bodenhauwerksbehandlung mit Bindemitteln durch Schaufelseparatoren

1. Einführung

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz steht für die Pflege und Erhaltung der Rohstoffressourcen unseres Lebensraums. Die Auswirkungen dieses Gesetzes haben sich in zunehmenden Maße in den Ausschreibungen des Erdbaus niedergeschlagen. Aber es sind nicht nur die Gesetzesvorgaben sondern auch klare Kostenvorteile, die schon viele Bauunternehmen von der Bodenbehandlung überzeugt haben. Dabei unterscheidet man im Erdbau zwischen Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen [1]

Als Bodenverfestigungen werden Verfahren definiert, bei denen die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegen Beanspruchung durch Verkehr und Klima durch die Zugabe von Bindemitteln erhöht und der Boden dauerhaft tragfähig und frostbeständig wird. In der Praxis des Erdbaus wird für Bodenverfestigung oft auch der Begriff Bodenstabilisierung benutzt.

Ausgeführt werden Bodenverfestigungen in der oberen Zone des Unterbaus oder Untergrunds von Straßen und Verkehrsflächen, wo sie die Tragfähigkeit und damit die Befahrbarkeit erhöhen und zur Frostsicherheit des Straßenaufbaus beitragen [1]. Wegen der flächigen Bodenbehandlung sind es vorwiegend Bodenfräsen, die zum Einsatz kommen und flächig den anstehenden Boden auflockern und mit Bindemitteln vermischen. Demzufolge entspricht das einer Bodenflächenbehandlung.

Darüber hinaus sind Bodenverfestigungen aber auch in Bezug auf gründungsfähige Auffüllungen für Industrie-, Wohnungs- und Ingenieurbauten bekannt. Bei diesen Anwendungsfällen handelt es sich i.d.R. nicht um Bodenflächenbehandlungen, sondern um Auffüllungen lokal begrenzter Baubereiche. Dafür wird i.A. der anstehende Boden aufgenommen und so behandelt, dass dieser nach Wiedereinbau die spezifisch vorgeschriebenen Festigkeitswerte erzielt. Deshalb kann man von einer Bodenhauwerksbehandlung sprechen.

Für diese Art der Bodenbehandlung ist die o.g. Maschinenteknik weniger geeignet. Dafür sind in der Praxis Schaufelseparatoren als Anbaugeräte für Bagger und Radlader oder mobile Bodenaufbereitungsanlagen bekannt.

Bodenverbesserungen sind im Gegensatz dazu Verfahren zur Verbesserung der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden und zur Erleichterung der Ausführung von Bauarbeiten, was durch Zugabe von Bindemitteln, durch Einbringung anderer geeigneter Baustoffe oder durch andere Maßnahmen erzielt wird [1].

Bodenverbesserungen werden bei Erdarbeiten für Straßen- und Verkehrsflächen im Unterbau oder Untergrund, z.B. bei der Herstellung von Dämmen, Böschungen, Hinterfüllungen, Verfüllungen (z.B. im Leitungsbau) und Baustellentransportwegen angewendet. Nasse nicht ausreichend verdichtbare Böden können hierdurch einbau- und verdichtungsfähig werden, die Tragfähigkeit kann erhöht und die Witterungsempfindlichkeit vermindert werden [1]. Da solche Anwendungen auch Bodenhafwerksbehandlungen sind, kommen hierfür primär Schaufelseparatoren in Frage.

Vor Beginn jeder Bodenbehandlung sollte zunächst erst deren Ziel definiert und geprüft werden, welche Bindemittel in welchem Maß die gegebenen Bodeneigenschaften und Bodenkenngößen verbessern. Im Rahmen dieser Prüfung müssen zunächst die mechanischen Eigenschaften des stabilisierten Bodens, wie Scherfestigkeit, Steifigkeit, die Quell- oder Schrumpfeigenschaften sowie die Beständigkeit definiert und festgelegt werden. Danach gilt es den anstehenden Boden bodenmechanisch und mineralogisch zu untersuchen und zu bewerten. Erst dann können Technik, Bindemittel und Rezeptur der Bodenbehandlung festgelegt werden [2].

Im Folgenden soll die Bodenhafwerksbehandlung bindiger (kohäsiver) und gemischtkörniger Böden am Leitungsraben und für gründungsfähige Auffüllungen im Industrie- Wohnungs- und Ingenieurbau mit Kalk oder Mischbinder durch Schaufelseparatoren behandelt werden.

2. Bindemittel

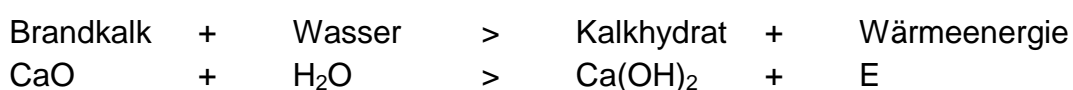
Als Bindemittel zur Verbesserung bindiger Böden sind Brandkalk (Weißfeinkalk) = CaO , Kalkhydrat (Kalziumhydroxid) = Ca(OH)_2 , hydraulischer Kalk (primär Kalziumsilikat und Kalziumaluminat) oder die Mischbindervariationen Kalk/Zement bekannt. Damit werden in Bezug auf die Bodenverbesserung Prozesse wie Bodenentwässerung, Aggregatbildung bindiger Bodenpartikel, Ionenaustausch, Puzzolanreaktionen und die Karbonatisierung aktiviert [2]. Am Beispiel des Weißfeinkalks soll im Folgenden aufgezeigt werden, wie diese chemischen Reaktionen im Einzelnen unter besonderer Berücksichtigung des Schaufelseparators ablaufen.

3. Chemische Reaktionen zur Bodenbehandlung

Beim Einmischen von Weißfeinkalk/Brandkalk in bindige Böden sind folgende chemischen Reaktionen bekannt, die in vier Phasen eingeteilt werden können, wobei die Übergänge fließend sind und sich auch überlagern können.

3.1 Löschen (Sofortreaktion)

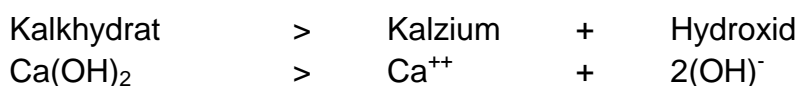
Als erste Reaktion spricht man vom Löschen des Kalkes, wenn wie oben bereits erwähnt, der Kalk mit dem Bodenwasser zusammenkommt und dabei Kalziumhydroxid bzw. Kalkhydrat unter Abgabe von Wärmeenergie entsteht:



Diese Sofortreaktion bewirkt eine Krümelbildung des Bodens. Dabei wird ca. 300 g Porenwasser je kg Kalk gebunden. Zudem erfolgt die Verdunstung des Porenwassers infolge Reaktionswärme und Belüften beim Einmischen, was noch größeren Einfluss auf die Entwässerung hat [2].

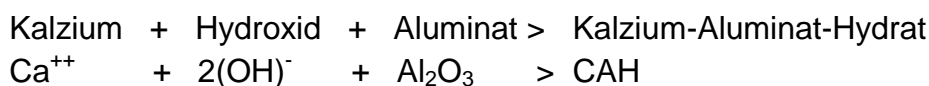
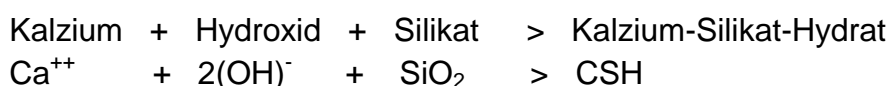
3.2 Gelstadium (Hydratation)

Das Kalziumhydroxid dissoziiert im Porenwasser und erhöht den pH-Wert des Porenwassers.



Damit lösen sich die Silikate und Aluminate aus den Tonpartikeln und aus den Materialien der amorphen Oberfläche. Es findet ein Ionenaustausch statt, wobei Natrium und andere Kationen durch Kalzium ersetzt werden.

Darüber hinaus reagieren Silikate und Aluminate mit Kalzium zu neuen Hydratphasen (Wasserstoffbrücken) wie z.B. Kalzium-Silikat-Hydrate und Kalzium-Aluminat-Hydrate.



Man spricht in dieser Phase auch vom Gelstadium, weil die Kalzium-Silikat- und Kalzium-Aluminium-Hydrate gelartig den Porenraum der Bodenteilchen ausfüllen und beginnen, die Bodenteilchen miteinander zu verbacken[1] [3]. Infolge von Saugspannungen und geänderten Partikelbildungen ergibt sich eine Strukturänderung, wobei Schluff- und Tonpartikel zu größeren Körnern aggregieren.

Der Boden bekommt bei geringerer Plastizität eine höhere Konsistenz. Die Proktorkurve verschiebt sich zur nassen Seite, womit die Trockendichte ab- und der optimale Wassergehalt zunimmt.

3.3 Neolithstadium (Puzzolanische Reaktion)

Aus dem Gel kristallisieren allmählich kleine Kristalle (Neolithe) heraus, was zu einer Zementierung oder Verkittung der Bodenpartikel und damit zu einer Erhöhung der Festigkeitseigenschaften des Bodens führt [3]. Damit beginnt die puzzolanische Reaktion. Der Erfolg der Zementierung hängt im Wesentlichen von der Kalkzugabe und der mineralogischen Zusammensetzung der Feinteile des Bodens ab. Demnach wird die puzzolanische Reaktion nicht in Gang kommen, wenn der Boden zu wenig Tonminerale (Puzzolane) hat.

Tonminerale sind schichtweise aufgebaute, plättchenartige Minerale, die überwiegend kleiner als 0,002 Millimeter sind. Die Schichten der Tonminerale setzen sich aus einer Kombination von Silizium-, Sauerstoff-, Aluminium- und Wasserstoffatomen zusammen[4].

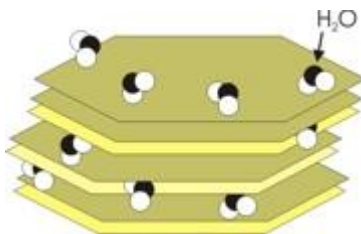


Bild: Alexander Stahr

In jedem Fall ist es deshalb vor jeder Bodenbehandlung wichtig zu wissen, ob überhaupt genügend Feinteile vorhanden sind und wenn ja, wie deren Mineralzusammensetzung und der Wassergehalt des Bodens beschaffen ist.

Danach werden die Bindemittel ausgesucht. Bei hohem Wassergehalt und ausreichend vorhandenen Puzzolanen wird Weißfeinkalk beigemischt.

Sind diese aber nicht im ausreichenden Maße vorhanden, muss Mischbinder zugegeben werden. Das sind Mischungen aus Zement und Kalk, mit denen die Puzzolane durch den Zementanteil künstlich in den Boden eingebracht werden, um so die puzzolanische Reaktion gewährleisten zu können. So setzt sich z.B. der Mischbinder C70 mit 70 % Kalk und 30 % Zement zusammen.

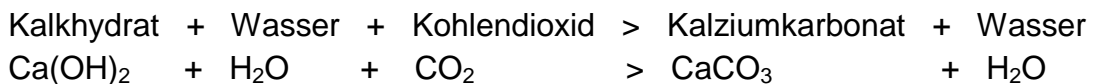
Entsprechend der Ausgangseigenschaften des Bodens können verschiedene Kalk-Zementmischungen bei den Herstellern abgerufen werden.

Die puzzolanischen Reaktionen dauern je nach Bodenbeschaffenheit und Bindemittelzugabe zwischen 1 und 5 Jahren [2] und erfolgen in aller Regel bei geringen Bodenluftkonzentrationen. Dabei handelt es sich um die eingangs beschriebenen Bodenverfestigungen, wie sie im Straßen-, Industrie-, Wohnungs- und Ingenieurbau gebraucht werden.

3.4 Karbonatisierung

Bei erhöhten Bodenluftkonzentrationen kommt es aber zu Reaktionen zwischen dem Kalkhydrat und dem Kohlendioxid aus der Bodenluft und führt in den Bereichen mit hoher Bodenluftkonzentration zur Entfestigung der bereits stabilisierten Schichten [2]. Die sogenannte Karbonatisierung erfolgt in aller Regel primär an den Oberflächen der stabilisierten Flächen, weil dort die Konzentration der Bodenluft immer am Größten ist. Was für die Bodenverfestigungsmaßnahmen im Straßen-, Industrie-, Wohnungs- und Ingenieurbau eher nachteilig ist, wird für den Leitungsbau mit dafür geeigneter Technik aber zum großen Vorteil.

Wenn also Luft in den zu behandelnden Boden eingebracht werden kann, wird die Karbonatisierung gezielt für den gesamten Boden umgesetzt werden können. Das kann wie eingangs geschrieben mit einer Hafwerksbodenbehandlung durch Schaufelseparatoren erfolgen. Mit dem so aufbereiteten Material wird die Karbonatisierung künstlich erzeugt.



Mit der Karbonatisierung wird die puzzolanische Reaktion gewissermaßen gestoppt. Das ist immer der Fall, wenn der Anteil von ungebundenem Kalk so gering ist, dass keine Hydratphasen mehr gebildet werden können und die puzzolanische Reaktion nicht fortgesetzt werden kann. Mit dem Konzept Kronenberger der Kronenberger oecotec GmbH [5] wird dieses Ergebnis in sieben Folgeschritten am Leitungsraben erreicht.

Eine Messgröße für den Erfolg ist der pH-Wert, der infolge der Karbonatisierung sinkt. Untersuchungen der Kronenberger oecotec GmbH und der Rheinkalk GmbH haben gezeigt, dass ein nach dem Konzept Kronenberger verbesserter Boden mit einem PH-Wert unter 11 nur noch weniger als 0,2 % ungebundenen Kalk beinhaltet. Dieser Anteil ist aber zu gering, um die puzzolanische Reaktion fortsetzen zu können.

Dieser Nachweis für den Erfolg der Bodenverbesserung ist auf der Baustelle mit einer in Wasser gelösten Bodenprobe und Lackmus-Papier leicht zu erbringen.

4 Schaufelseparatoren zur Bodenhauwerksbehandlung

Wie eingangs geschrieben, sind Schaufelseparatoren zur Bodenhauwerksbehandlung in der Praxis des Erdbaus bereits bekannt. Vor dem beschriebenen Hintergrund der chemischen Reaktionsfolge im Rahmen der Bodenbehandlung können die Vorgaben zur technischen Ausprägung der Schaufelseparatoren am Besten aufgezeigt werden.

4.1 Schaufelseparatoren zur Bodenverbesserung

Ziel der Bodenverbesserung im Leitungsbau ist ein elastisches Leitungsbett mit den vorgeschriebenen Festigkeitswerten nach der ZTVA-StB-97 [6]. Demnach sollten alle vier Phasen der chemischen Reaktionsfolge im Rahmen der Bodenbehandlung ausgeführt werden. Besondere Berücksichtigung gilt dabei der gezielten Karbonatisierung mit optimalem Materialaufschluss und Mischungsmöglichkeit von Bindemitteln und Bodenluft

Eine Voraussetzung dafür sind Schaufelseparatoren mit Scheibenwellen nach dem Scheibe-in-Scheibe-Prinzip, wie sie von der Kronenberger oecotec GmbH angeboten werden, womit durch das Ineinandergreifen der Scheiben und Meißel das Bodenmaterial bestmöglich aufgeschlossen, mit den Bindemitteln vermischt und vergleichmäßig werden kann. Darüber hinaus können sich die Scheibenzwischenräume auch bei sehr feucht-bindigen bzw. pampigen Böden nie zusetzen, weil diese ständig von den jeweils gegenüberliegenden Scheiben freigeschnitten werden.

Demzufolge sind nur relativ geringe Mengen von Bindemitteln notwendig und damit geringere Kosten für Bindemittel die Folge. Nach den Erfahrungen der Kronenberger oecotec GmbH mit ihrem Terra-Star® Schaufelseparator werden i.d.R. nur 0,5 bis 1 % Bindemittel verbraucht.

So kann die Karbonatisierung optimal angeregt werden, was letztlich zum Stop der Puzzolanreaktion im Boden führt und über die beschriebenen pH-Wert-Veränderungen leicht nachzuweisen ist. Je nach Bindemittelzugabe können so bestimmte Festigkeitswerte erzielt werden, die für den Leitungsbau nach der ZTVA-StB 97 mit 45 MN/m^2 festgeschrieben ist [6].

Zusätzlich hat der Schaufelseparator auch eine Siebfunktion, damit die im Leitungsbau vorgeschriebenen Körnungen in Verbindung mit dem Mischvorgang erzeugt werden können. Nach DIN EN 1610 sollte für die Bettung von Rohren mit Durchmessern (DN) ≤ 200 mm die Körnung von 0-22 mm und für DN > 200 bis ≤ 600 mm die Körnung von 0-40 mm nicht überschreiten [7]. Diese Körnungen werden in Abhängigkeit der individuellen Scheibenabstände der Separatorwellen ermöglicht.

4.2 Schaufelseparatoren zur Bodenverfestigung

Zur Bodenverfestigung für gründungsfähige Auffüllungen im Industrie-Wohnungs- und Ingenieurbau bedarf es vergleichsweise höherer Festigkeitswerte, die im Bereich bis zu 120 MN/m^2 und mehr liegen [6].

Auch diese Festigkeitswerte sind mit einem Schaufelseparator realisierbar. Es muss lediglich die Bindemittelkonzentration in Abhängigkeit der Bodenverfestigungsziele erhöht werden. Dann lassen sich Puzzolanreaktion und Karbonatisierung genauso kontrollieren wie zuvor beschrieben.

Demnach wird auch bei der Bodenverfestigung nur so viel Kalk oder Mischbinder verbraucht, wie für die Zielvorgabe notwendig ist. Die Puzzolanreaktion wird durch die Karbonatisierung nur auf einem vergleichsweise höheren Festigkeitsniveau gestoppt.

Neben dem Einsparpotential durch unnötige Bindemittel ist auch eine definierte Festigkeit gewährleistet, was den so geschaffenen Erdbau für die Folgenutzung planungssicher macht.

Damit sind für die Bodenverfestigung die oben beschriebenen Vorteile des Scheibe-in-Scheibe-Prinzips mit den Scheibenwellen des Terra-Star® gleichermaßen relevant.

Die eingangs beschriebenen Zielvorgaben zur Bodenbehandlung haben somit nicht nur Einfluss auf die Auswahl und Konzentration des Kalks bzw. der Kalkmischungen, sondern auch auf die Auswahl der Maschinenteknik. Letzteres war bisher im Vergleich zur Bodenflächen- und Bodenhafwerksbehandlung ganz offensichtlich.

Doch auch im Bereich der Bodenhafwerksbehandlung sind dem Betreiber in Bezug auf Schaufelseparatoren durch den Abgleich von Zielvorgaben und den chemischen Reaktionen im Rahmen der Bodenbehandlung Variationsmöglichkeiten gegeben.

Literaturverzeichnis

- [1] FGSV Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln
Forschungsanstalt für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2004
- [2].Witt, K.J. Zement-Kalk-Stabilisierung von Böden
Geotechnik Seminar 2002 - Weimar-Bauhaus-Universität - Weimar-Schriftenreihe Geotechnik Heft 5
- [3] Dachroth W.R. Handbuch der Baugeologie und der Geotechnik
Dritte erweiterte und überarbeitete Auflage 2002, Springer Verlag
- [4] Stahr, A. Das Bodenmagazin“ Agentur für Mediendienstleistungen
www.ahabc.de/entwicklung/stoffneubildung/tonminerale
- [5] KOEG Konzept Kronenberger® Kronenberger oecotec GmbH (KOEG)
www.kronenberger.org
- [6] ZTVA-StB 97 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ausgrabungen in Verkehrsflächen (Ausgabe 1997)
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- [7] DIN EN 1610 Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen
DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2002)