
Befreiung blockierter Vortriebsmaschinen

Tim Babendererde, Dipl.-Ing., Geschäftsführer, Babendererde Engineers, Bad Schwartau (D)

Techniken zur Befreiung blockierter Vortriebsmaschinen aus der Abbaukammer heraus: Erfahrungen mit dem Einsatz von Kunstböden und sprühbaren Membranen

Ausbläser und OrtsbrustEinsturz zerstören das Gefüge der Ortsbrust und reduzieren damit die Möglichkeit der Stützmedien, den notwendigen Stützdruck auf den Boden zu übertragen. Oftmals kommt es zu weiteren Nachbrüchen bis hin zum Tagbruch. Versuche, den Druck der Bentonitsuspension durch Zugabe von konventionellen Additiven aufzubringen, sind immer wieder gescheitert. Auch die Versuche, die gestörten Bereiche der Ortsbrust mittels Injektionen aus der TBM heraus oder von der Geländeoberkante zu verfestigen haben meist ihr Ziel verfehlt.

Die zuverlässigste Art einem Teil- oder Gesamteinsturz der Ortsbrust zu begegnen, ist aus der Abbaukammer selbst heraus. Hierfür stehen neben der Zugabe von grobstückigen Polymeren auch selbst erhärtende Kunstböden zur Verfügung, die das gestörte Bodengefüge ausreichend stabilisieren und eventuelle Hohlräume zuverlässig ausfüllen. Hohe Luftverluste bei Druckluftarbeiten können mittels einer sprühbaren Membran wirksam reduziert werden. Die widerstandsfähigen Membranen sind langfristig haltbar und ermöglichen, dass viele Tage unter Druckluft gearbeitet werden kann, ohne den Filterkuchen in der Abbaukammer erneuern zu müssen

1. Einleitung

Ausbläser oder OrtsbrustEinsturz – beide Phänomene führen zum Teilverschütten des Schneidrads einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) und dadurch meist auch zum Verlust der Vortriebsbereitschaft. Kann sich die TVM nicht selbst befreien, zum Beispiel durch Freispülen bzw. Freifördern der Abbaukammer bei gleichzeitigem Aufbringen des Stützdrucks, so ist eine Begehung der Abbaukammer unter Druckluft unumgänglich.

Aber insbesondere wegen des Ortsbrustversagens ist oftmals der notwendige Stützdruck nicht aufzubringen, weil das Stützmedium an der Geländeoberkante austritt. Zum Erreichen der Vortriebsbereitschaft sind dann erst eine Stabilisierung der Ortsbrust mit Verschluss der Durchlässigkeiten zur Geländeoberkante und anschließend das Freiräumen der Abbaukammer notwendig.

2. Ausbläser

Ein Ausbläser beschreibt bei Druckluftstützung den plötzlichen oder den langsam ansteigenden Verlust der Druckluft in einem Maße, dass die Stützwirkung nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Erkennbar ist ein Ausbläser an einem Anstieg des Druckluftverbrauchs über das übliche bzw. vorausberechnete Maß hinaus. Dabei wird in Gasometer- und in Erosionsausbläser unterschieden. Während der Gasometerausbläser hauptsächlich geologische Ursachen hat, ist der Erosionsausbläser baubetrieblich bedingt.

Bei flüssigkeitsgestützten Vortrieben ist bei Drucklufteinstiegen die Qualität der eingesetzten Suspension für den Druckluftbedarf entscheidend. Zum Einsatz kommen üblicherweise Bentonitsuspensionen, die, je nach Notwendigkeit, mittels Polymeren oder anderen Füllstoffen an die Durchlässigkeit des zu stützenden Bodens angepasst werden. Die Polymere bzw. Füllstoffe sollen die Durchlässigkeit des Bodens reduzieren und der Bentonitsuspension eine Oberfläche generieren, auf der die Bentonitsuspension ihre thixotrope Wirkung entfalten kann, indem sie zur Ruhe kommt und damit die Ortsbrust stabil stützt. Aufgrund der oftmals sehr inhomogenen Ortsbrustverhältnisse kann der erforderliche Bedarf des Volumenstroms für die Druckluftstützung nur grob vorausberechnet werden. Daher ist die Drucklufterzeugungsanlage großzügig auszulegen. Unmittelbaren Einfluss auf den Volumenstrom hat die Durchlässigkeit der Membran (Filterkuchen) direkt an der Ortsbrust. Um Ausbläsern vorzubeugen, ist eine Minimierung der Membrandurchlässigkeit entscheidend.

2.1 Gasometerausbläser

Durch eine überlagernde, nahezu undurchlässige Schicht staut sich die in den Untergrund entweichende Druckluft unterhalb der undurchlässigen Schicht. Die sich aufstauende Luft bewirkt eine Erhöhung des Drucks direkt unterhalb der stauenden Schicht. Bei Überschreiten der hauptsächlich auf der Gewichtskraft basierenden, haltenden Kräfte, bricht der Boden plötzlich auf und das angestaute Volumen entlädt sich schlagartig. Dadurch kommt es zu einem plötzlichen Abfall der Bodenauflast und die zur Stabilisierung der Ortsbrust eingesetzte Druckluft entweicht, was unmittelbar einen Ortsbrusteinbruch zur Folge hat.

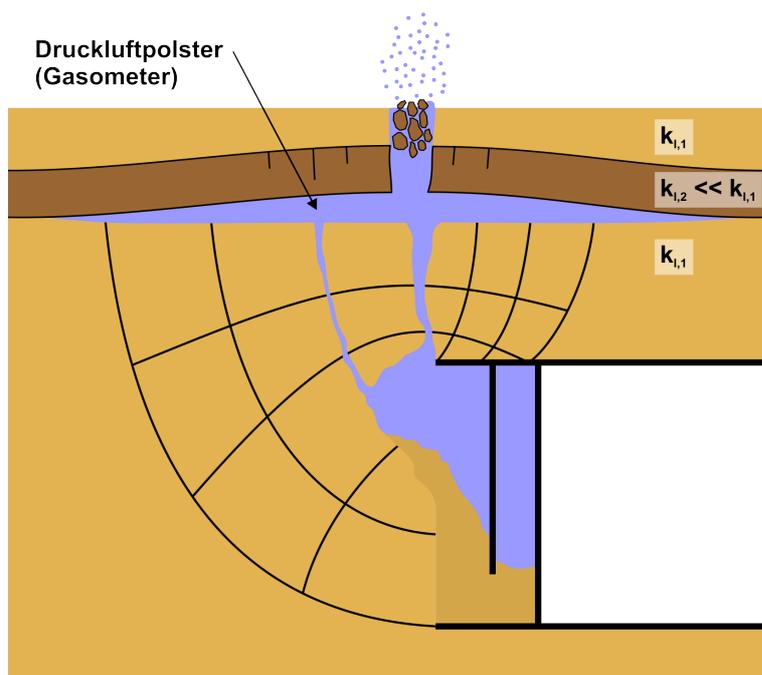


Bild 1 – Gasometerausbläser

Der Entstehung eines Gasometerausbläses kann mit sogenannten Luftbrunnen entgegen gewirkt werden. Dabei werden fein geschlitzte Rohre durch die undurchlässige Schicht in die überdeckte durchlässigere Schicht getrieben, um dort die Luft zu sammeln und einen Aufbau eines Staudrucks zu verhindern. Über Ventile und Manometer am Brunnenkopf lässt sich die Abführung der in den Baugrund entwichenen Druckluft kontrollieren und steuern.



Bild 2 – Luftbrunnen unter dünner Asphaltdecke in China

2.2 Erosionsausbläser

Ein Erosionsausbläser ist die häufigste Art der Ausbläser des aktuellen Vortriebszeitalters.

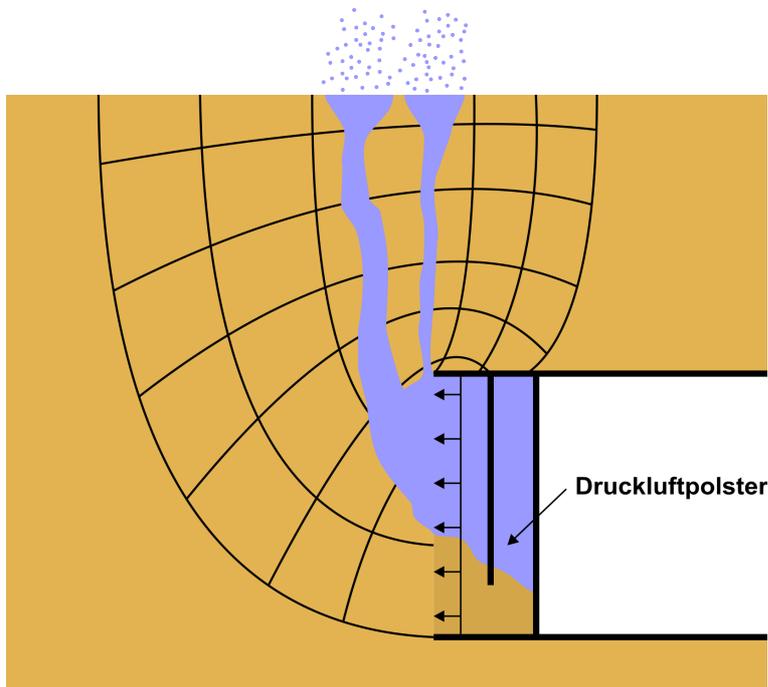


Bild 3 – Erosionsausbläser

Weil die Beanspruchung des in der Druckluft eingesetzten Personals bei reinen Druckluftvortrieben sehr groß ist, werden zunehmend Vollschnittmaschinen mit Erddruck- bzw. Flüssigkeitsstützung eingesetzt. Bei notwendigen Werkzeugkontrollen am Schneidrad wird das Stützmedium (Slurry oder Erdbrei) durch Druckluft ersetzt. Wenn die Stützwirkung der Druckluft stabil aufgebaut wird, betritt das Personal durch die Druckluftscheunen den Abbauraum und kann die Werkzeuge des Schneidrads kontrollieren.

Beim Ersatz des eigentlichen Stützmediums durch Druckluft vergrößert sich die Viskosität des Mediums zur Ortsbruststützung, was eine größere Durchströmung des Bodens zur Folge hat. Als Beispiel sei der Unterschied zwischen Wasser und Luft benannt. Luft strömt 70fach schneller durch den Boden als Wasser. Ein Erdbrei- oder auch eine gute angepasste Bentonitsuspension haben eine nochmals um ein Vielfaches niedrigere Viskosität als Wasser. Dieser Unterschied in der Viskosität ist der kritische Faktor jeglicher Arbeiten unter Druckluft.

Durch die Durchströmung mit Luft in granularem Boden trocknet dieser aus und verliert seine scheinbare Kohäsion. Der trockene Boden wird vom Luftstrom mitgerissen. Dadurch vergrößert sich die Luftdurchlässigkeit, und immer mehr Luft muss zur Aufrechterhaltung des Stützdrucks an der Ortsbrust in die Abbaukammer gepumpt werden. Dadurch erhöht sich die austrocknende Wirkung und ein sich selbst beschleunigender Kreislauf beginnt. Zur Begrenzung dieses Phänomens werden die Druckluftarbeiten von Zeit zu Zeit unterbrochen und der Abbauraum wieder mit einer Bentonitsuspension gefüllt.

3. Bodenaufbruch – Austritt von Stützsuspension

Ein Austritt der Stützsuspension an der Oberfläche, hat in der Regel auch den Verlust der ausreichenden Ortsbruststützung zur Folge und ist deshalb gleichfalls kritisch für den sicheren Vortrieb.



Bild 4 – Bentonitaustritt

Um an der Geländeoberfläche auszutreten, durchdringt die Bentonitsuspension den Baugrund durch Bodenspalten oder künstlich geschaffene Kanäle wie Brunnenbohrung oder nicht verfüllte Aufschlussbohrungen. Durch den Austritt an der Oberfläche lässt sich nur ein begrenzter hydrostatischer Druck der Suspension an der Ortsbrust aufbauen, was jedoch bei hohen Grundwasserständen nicht zur Ortsbruststabilität ausreicht. Häufig kommt es deshalb nach einem Bentonitsuspensionsaustritt zu einem Einbruch der Ortsbrust.

4. Maßnahmen nach Ausbläser und Ortsbrusteinbruch

Nachdem es zu einem Ausbläser gekommen ist, lässt sich die Ortsbrust nicht mehr zuverlässig durch Druckluft oder die übliche Bentonitsuspension stützen. Die Ortsbrust kollabiert und der Baugrund fällt durch das Schneidrad unkontrolliert in den Abbauraum. Bei Druckluftarbeiten mit Teilfüllung hat dies den schlagartigen Anstieg der Stützsuspension im Arbeitsbereich des Personals zur Folge. Es gibt Beispiele, bei denen sich das Personal nur noch mit Not und in der Flüssigkeit sitzend in die Druckluftschleuse retten konnten.

Durch den Bodeneinbruch kommt es oftmals zur Blockade des Schneidrads, was eine Beräumung des Abbauraums erfordert. Meist sind auch die für eine Wiederaufnahme des Vortriebs notwendigen Arbeiten nicht abgeschlossen und der Abbauraum muss unbedingt stabilisiert werden, um die minimal erforderlichen Arbeiten beenden zu können. Die Situation ist eine der kritischsten, in der sich ein maschineller Vortrieb befinden kann.

Im Folgenden werden einige in der Praxis eingesetzten Versuche bzw. Methoden zur Wiederherstellung der Ortsbruststabilität beschrieben. Allen gemein ist, dass die Störung des Baugrundes und die Erhöhung der Durchlässigkeit des Baugrundes mittels Zugabe von Hilfsstoffen bzw. Verschluss von der Ortsbrustoberfläche erzielt werden soll.

4.1 ZUGABE VON Sägespäne

Die Zugabe von Sägespänen soll die Bodenporen verschließen und die Suspension an der neuen Oberfläche der Ortsbrust stabilisieren.

Nach der Durchströmung des Bodens von erheblichen Mengen an Druckluft ist der Boden derart gestört, dass die kleinen Sägespäne die Störung nicht wirksam verschließen können und deshalb keine sichere Arbeitsumgebung hergestellt werden kann. Außerdem haben Sägespäne negativen Einfluss auf die Stabilität von Bentonitsuspensionen und sind deshalb eher kritisch zu betrachten.

4.2 Zugabe von Styroporkugeln

Das Einmischen von Styroporkugeln in die Suspension soll gleichfalls die Poren bzw. Wegigkeiten im Boden verstopfen.

Durch den Druck in der Suspension reduzieren die Styroporkugeln jedoch sehr stark ihr Volumen und können deshalb die Poren und Wegigkeiten in den meisten Fällen nicht ausreichend blockieren. Zusätzlich neigen die Styroporkugeln zum Aufschwimmen in „dünnen“ Bentonitsuspensionen, was die erhoffte Wirkung stark einschränkt.



Bild 5 – Styroporkugeln in der Suspension

4.3 Zugabe von Polyurethanen und Silikonen

Die Zugabe von Polyurethanen oder Silikonen in den Bentonit- bzw. Luftstrom führt zu einer unkontrollierten Anlagerung dieser Materialien am Schneidrad oder in Teilbereichen der Ortsbrust. Die Möglichkeit der Veränderung des Erhärtungszeitpunktes der Urethane lässt sich leider in einer derart unkontrollierbaren Verfahrensweise nicht nutzen. Viele Praxisbeispiele zeigten erhebliche Störungen bzw. Erschwernisse durch den Einsatz dieser unkontrollierten und nur oberflächlich wirkenden Abdichtungsmittel. Der Nutzen dieser Mittel ist fraglich.

4.4 Zugabe von Plastikfolien

Die Zugabe von Plastikfolien in unterschiedlichen Größen wurde sowohl im Luftstrom als auch in der Stützflüssigkeit versucht.

Die ausgeführten Beispiele hatten keinen Erfolg, da die Zugfestigkeit der Folie nicht ausreicht, um Wegigkeiten im gestörten Boden zu überbrücken oder auch die Pumpen die Folie schon zerstören.

4.5 Zugabe von Tongranulat

Tongranulat ist in unterschiedlicher Größe und Rundung beziehbar. Je nach Größe der Bodenporen kommt es bei der Ansammlung der Granulatkörper in den Wegigkeiten zu einer Reduktion der Durchlässigkeit. Eine sehr hochviskose Bentonitsuspension ist dann in der Lage sich zu stabilisieren und die Ortsbruststabilität wiederherzustellen. Jedoch sind bei einer Wiederaufnahme von Druckluftarbeiten zusätzliche Maßnahmen zur Sicherung der Ortsbrust erforderlich.

4.6 Injektion aus der Maschine heraus

Die Herstellung eines Dichtkörpers in einem gestörten, wassergesättigten Boden aus der Maschine heraus ist eher theoretischer Natur. Zum einen sind die Arbeiten in den beengten Verhältnissen einer Tunnelvortriebsmaschine sehr schwierig, zum anderen muss gegen den Wasserdruck und in einem engen Bohrmuster gearbeitet werden. Stabilisierende Injektionen von Fächern oder Schleiern oberhalb der TBM sind schon mehrfach erzielt worden, jedoch ist damit die sichere Wiederherstellung der Bodenstruktur an der Ortsbrust, also vor der TBM, als Voraussetzung für Druckluftarbeiten nicht generell zu erzielen.

4.7 Injektionen von der Geländeoberfläche

Arbeiten von der Geländeoberfläche sind oftmals durch die zerstörte Bodenstruktur bzw. Verformung an der Oberfläche eingeschränkt. Sollte trotzdem die Geländeoberfläche mit einem Bohrgerät erreichbar sein, so ist die Herstellung eines druckdichten und homogenen Injektionskörper sehr schwierig und gelang sehr selten. Meist wurden die Wegigkeiten durch die Injektionen nicht erreicht oder die Injektion wurde durch Fließbewegungen im Untergrund bewegt, wodurch Homogenität und Dichtigkeit verloren gingen.

4.8 Zugabe von grobstückigen Polymeren

Als sehr effizient im Verstopfen von offenporigen Böden mit einer Wasserdurchlässigkeit größer als 10^{-3} m/s haben sich grobstückige Polymere gezeigt. Diese werden der Bentonitsuspension beigemischt.



Bild 6 – Grobstückige Polymere im Stützdrucktest bei einer Durchlässigkeit von 10-2 m/s

Durch ihre nahezu identische Wichte verteilen sie sich gleichmäßig in der gesamten Abbaukammer und verschließen somit offene Poren über den gesamten Querschnitt. Polymere mit einer Kantenlänge bis zu 25 mm haben sich in der Praxis bewährt. Dadurch lässt sich die Durchlässigkeit der Ortsbrust sehr stark reduzieren und der Stützdruck wird direkt an der Ortsbrustoberfläche übertragen. Dadurch entsteht eine sichere Ortsbruststützung auch während Druckluft einsätzen in der Abbaukammer. Bei Wiederaufnahme des Vortriebs werden diese Polymere als Beimengung zum normalen Abraum entsorgt.

4.9 Einpressen von Kunstboden aus der Maschine heraus

Das Injizieren von einem selbst erhärtenden Kunstboden aus der Maschine heraus zum Auffüllen von Hohlräumen „von unten“ hat sich mehrfach in der Praxis bewährt. Dabei wird eine Suspension mit einer höheren Dichte als Wasser oder Bentonit langsam aus der Maschine heraus in die Schadstelle gepumpt. Dieser Kunstboden verdrängt Bentonitsuspension und Wasser und füllt die Hohlräume auf. Er lässt sich nach einem ersten Erhärten nochmals Nachverpressen. Die Hohlräume können dadurch sicher verfüllt werden und Druckluft einstiege sind anschließend möglich. Bei den Verfüllarbeiten wird auch die Abbaukammer mit dem Kunstboden gefüllt, der dann zumeist händisch ausgeräumt werden muss. Durch diese Methodik wurden viele TBMs auf allen Kontinenten nach eingebrochener Ortsbrust wieder reaktiviert bzw. konnten ihre notwendigen Werkzeugwechsel in sicheren Umgebungsbedingungen durchführen. Der Kunstboden wird jeweils auf die Aufgabenstellung und die verfügbaren Rohstoffe angepasst.



Bild 7 – Mit Kunstboden stabilisierte Kaverne vor einem Schneidrad

4.10 Spritzbare Membranen

Als neuestes Stützelement haben sich spritzbare Membranen hervorgetan.



Bild 8 – Spritzbare Membran

Diese können auf verschiedene Medien aufgespritzt werden, härten auch unter Bedingungen in einer Abbaukammer aus und machen das wiederholte Auffüllen mit Bentonitsuspension überflüssig, da sie nicht rissig werden. Dadurch können während der Druckluftarbeiten instabile Bereiche oder Bereiche mit einer hohen Durchlässigkeit für die Dauer der Arbeiten dauerhaft verschlossen werden. Dieses Verfahren wurde in Singapur 2013 weltweit erstmals in einer TBM angewendet. Nach einem Ortsbrusteinbruch wurde der gestörte Boden erfolgreich gesichert und die Abbaukammer der TBM komplett beräumt und so die Vortriebsbereitschaft wiederhergestellt.