

Die technisch-wirtschaftliche Baugrenze der Untergrundverbesserung mit säulenartigen Tragelementen bei Straßenbrücken

Dr.-Ing. Ulf Köhler

vgs Ingenieure Dr. Köhler & Kirschstein GmbH & Co. KG, Magdeburg-Köthen, Hubertus 1a, 06366 Köthen Tel.: ++49.3496-415-473, Fax: ++49.3496-415-474, E-Mail: vgs@vgs-ing.de

Dr.-Ing. Sven Schwerdt

vgs Ingenieure Dr. Köhler & Kirschstein GmbH & Co. KG, Magdeburg-Köthen, Hubertus 1a, 06366 Köthen Tel.: ++49.3496-415-473, Fax: ++49.3496-415-474, E-Mail: vgs.lsa@vgs-ing.de,

KURZFASSUNG: Beim Neubau von Straßenbrücken auf gering tragfähigen Untergründen besteht die Gefahr, dass zwischen dem Widerlager und anschließenden Damm Setzungsdifferenzen auftreten. Um die Setzungsmulde auszugleichen, sind Untergrundverbesserungen im Anschlussbereich an das Widerlager notwendig. Der vorgelegte Beitrag beschäftigt sich mit dem Stand der Technik derartiger Untergrundverbesserungen und stellt mit den Geopier® Bohr-Rammsäulen ein neuartiges Verfahren der Untergrundverbesserung vor, mit dem gegenüber den bisherigen Verfahren teils beträchtliche Kostenreduzierungen möglich sind.

Keywords: Brücke, Widerlager, Untergrundverbesserung, Geopier

1 Einleitung

In der Planungs- und Ausführungspraxis hat sich im Brückenbau im wesentlichen eine isolierte Betrachtung von Brücke und angrenzendem Erdbauwerk (Widerlagerhinterfüllung, Damm) etabliert. Auch die Vergabep Praxis und die Planung von Bauabläufen im Streckenbau folgt in den meisten Fällen diesem Schema, wonach die Brücke als vorgezogene Bauleistung noch vor Ausschreibung und Vergabe des anschließenden Erdbauwerkes ausgeschrieben und errichtet wird. Planerisch wird diese Trennung aber häufig auch dann vollzogen, wenn Strecke und Brücke in gemeinsamen Losen vergeben werden. Die Planungs- und Baugrenze liegt dann meist auf der Erdseite des Widerlagers. Dabei wird in manchen Fällen nicht bedacht, dass der Lastausbreitungsbereich der angrenzenden Erdbauwerke wegen der großen Flächenausdehnung den Lastausbreitungsbereich der Brücke vollständig überschneidet. Auch kann sich die Setzungsmulde des angrenzenden Straßendamms bis unter das Brückenwiderlager ausdehnen. Aus diesen Gründen werden die Gründungskonstruktionen der Brücken häufig so ausgelegt, dass sie die schädlichen Wirkungen der Last- und Verformungsausbreitung der angrenzenden Dämme aufnehmen können. Für die Dämme selbst wird aber wegen der vermeintlichen Nichtbeeinflussung der Brücke bei

schlechten Baugrundverhältnissen keine gesonderte Gründung vorgenommen und damit deutlich größere Setzungen als die der Brücke selbst in Kauf genommen. Dies führt dazu, dass in manchen Fällen nach Inbetriebnahme der Strecke, erhebliche Setzungsdifferenzen zu Muldenbildungen der Straßenoberfläche unmittelbar vor dem Widerlager führen. Da Dämme in vielen Fällen unmittelbar angrenzend an die Brückenbauwerke die größte Höhe haben, besteht hier auch die Gefahr des Dammspreizens, verbunden mit Böschungsrutschungen unmittelbar hinter der Brücke. Unabhängig von der bekannten Größenordnung der Dammeigenschaften in Höhe von ca. 0,5 ... 1 % der Dammhöhe, die weitestgehend während der Bauzeit abklingen, wird der Effekt der Muldenbildung hinter dem Widerlager durch die Konsolidierungsvorgänge im Untergrund des Damms ausgelöst, die je nach Baugrundeigenschaft auch mehrere Jahre lang anhalten können.

Eine regelgerechte geotechnische Grundlagenermittlung für Brücke und Damm vorausgesetzt, ist es mit den heutigen planerischen und technischen Möglichkeiten geradezu exakt möglich, die Setzungsprozesse von Brücke und Damm so aufeinander abzustimmen, dass nach Inbetriebnahme der Strecke keine weiteren Setzungen auftreten und der Fahrbahnübergang eben bleibt. Hierfür werden im Um-

feld des Brückenwiderlagers bis hinein in die Dammgründung je nach Baugrundsituation unterschiedliche Verfahren der Untergrundverbesserung ausgeführt, deren Aufgabe die Versteifung und/oder die Beschleunigung der Konsolidation zur Aufgabe haben. In manchen Fällen kann die ohnehin erforderliche Untergrundverbesserung unter dem angrenzenden Damm in einer verstärkten Version auch unter die Brücke ausgedehnt werden und dadurch die Bauwerksgründung kostengünstiger und gleichzeitig der Setzungsprozess von Damm und Brücke aufeinander abgestimmt werden. Eine solche Betrachtung setzt aber voraus, dass bei Brückenstandorten in weichen Böden der zur Brücke gehörende planerische Raum ausgedehnt wird. In diesem Sinne liegt die planerische Grenze für Brücken- und Dammgründung je nach Dammhöhe ca. 20 ... 40 m hinter der Erdseite des Widerlagers.

Der Beitrag befasst sich mit einer vergleichenden Darstellung unterschiedlicher Verfahren der Untergrundverbesserung, die sich für die Gründung angrenzender Dämme oder auch die gemeinsame Gründung von Brücke und Damm auf einer verbesserten Baugrundschiecht eignen. Es werden die wichtigsten planerischen Grundsätze gezeigt, nach denen die Entwürfe der Untergrundverbesserung im Kontext mit dem Gründungsentwurf der Brücke ebenso wie in Abhängigkeit von den bauzeitlichen Abläufen ausgewählt werden. Er soll Anregungen geben für Brückenplaner und den geotechnisch spezialisierten Tiefbauplaner, technisch-wirtschaftlich optimierte Entwürfen für Brücken- und Dammgründung aufzustellen.

2 Stand der Technik bei der Untergrundverbesserung

Im weiteren werden nur die Verfahren, die säulenartige Elemente der Untergrundverbesserung herstellen, betrachtet. Nicht betrachtet werden Bodenaustausch und schlitzartige Formen der Untergrundvergütung (wie z. B. Fräsmischinjektionen), da diese bei den hier betrachteten Anwendungen keine wesentliche Rolle spielen. Zum Bodenaustausch ist anzumerken, dass sich je nach Baugrund- und Grundwasserverhältnisse und der Preissituation der Mineralstoffe eine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber allen bekannten Arten der Untergrundverbesserung bis ca. 2 ... 3 m Bodenaustauschdicke gegeben ist. Sind Untergrundverbesserungen nur bis in solche Tiefen erforderlich, sind unbedingt technisch-wirtschaftliche Vergleiche zwischen Bodenaustausch und den relevanten Verfahren der Untergrundverbesserung anzuraten.

Nach der Art der Einbringung sind zu unterscheiden:

- Vollverdrängung (z.B. Rüttelstopfverdichtung)
- Teilverdrängung (z. B. CSV-Verfahren)
- Bodenentnahmeverfahren (z. B. Geopier[®]-Bohrramsäulen BRS)
- Verfahren mit Bodenaufbereitung (Fräsmischinjektion oder Hochdruckinjektion HDI)

Nach der Art der verwendeten Stoffe wird unterschieden in

- Mineralstoffe, Kiese, Schotter (natürliche Mineralstoffe oder Recyclingbaustoffe). Mineralstoffe werden ausschließlich bei allen Stopfverfahren und bei BRS verwendet).
- Bindemittel werden bei den Verfahren der Bodenaufbereitung (HDI, FMI) Bindemittel-Sandgemische beim CSV-Verfahren eingesetzt.
- Beton (z. B. bei Rüttelortbetonsäulen, auch bei Geopier[®] BRS)
- Geokunststoffe werden verwendet in Form von bandförmigen Vertikaldräns oder auch für die Ummantelung und/bzw. Bewehrung von Schotter- oder Sandsäulen bei Vollverdrängungs- und Bodenentnahmeverfahren.

Nach der Art der Verdichtungswirkung werden unterschieden

- Stopfverdichtung
- Stampfverdichtung

Bei der **Stopfverdichtung** wird im wesentlichen unterschieden in Verfahren mit Aufsatz-Rüttler und versenktem Rüttler.

Versenkte Rüttler werden am Arbeitsgerät/Vortriebsrohr unten angebracht (sogenannte Schleusenrüttler, z.B. System Keller oder Bauer). Der Schleusenrüttler ist mit einer Materialschleuse verbunden, durch die das Mineralgemisch in den Baugrund eingebracht wird. Die Verbesserungswirkung besteht aus den Elementen

- Vollverdrängung (Reduzierung des Porenvolumens um die Säule herum)
- Stopfverdichtung durch Auf- und Abwärtsbewegung des Schleusenrüttlers innerhalb der bereits materialgefüllten Säule
- Laterale Verdichtung durch die horizontale Verdichtungswirkung des Schleusenrüttlers.

Diese Technik kann faktisch in allen weichen Böden bis zur undrainierten Kohäsion $c_u \geq 10$ kN/m² eingesetzt werden.

Beim Aufsatzrüttler (z.B. System Bauer; Geopier-IMPACT) wird ein offenes Vortriebsrohr mit einer verlorenen Spitze verschlossen und dann mit dem oben angreifenden Aufsatzrüttler eingebracht. Die Verbesserungswirkung besteht aus den Elementen

- Vollverdrängung (Reduzierung des Porenvolumens um die Säule herum)
- Nicht bei allen Anwendungen: Verdichtung durch Auf- und Abwärtsbewegung des Vortriebsrohres innerhalb der bereits materialgefüllten Säule. Je nach Art Ausbildung der Spitze des Vortriebsrohres wird hier eine mehr stampfende und/oder stopfende Verdichtung ausgeführt.

Bei der **Stampfverdichtung** (nur Geopier) wird die Verdichtung durch den vertikal im Bohrloch geführten tellerartigen Stampfer vergleichbar der Wirkung eines Vibrationsstampfers eingebracht. Der Vibrationshammer sitzt oben am Gestänge. Die Ausbildung des Stampftellers bewirkt eine Verdichtungskomponente vertikal nach unten und schräg nach außen. Gegenüber der Stopfverdichtung entsteht so eine im gesamten Querschnitt gleichmäßig und extrem hoch verdichtete Schotter säule, die über einen sehr hohen Mantelreibungverbund mit dem Baugrund verfügt.

Da die anderen Verfahren in der Fachliteratur bereits hinreichend beschrieben wurden, kann auf eine ausführliche darstellung verzichtet werden. Daher wird im Folgenden auf das Geopier® - Verfahren eingegangen.

3. Vorstellung Geopier®

Herstellung

Geopier-Elemente werden hergestellt, indem zunächst eine einfache Drehbohrung mit 0,75 m Durchmesser im standfesten Boden bzw. im Schutze einer Verrohrung abgeteuft wird (Bild 1 a). Anschließend wird Grobschotter rammend, mit einem patentierten Verfahren lagenweise verdichtet eingebaut (Bilder 1 b und c). Die Bodenverbesserung durch rasterförmig angeordnete Säulen wird somit primär durch den anteilmäßigen Bodenaustausch gegen Pfeilerartige, sehr steife und tragfähige Elemente erreicht.

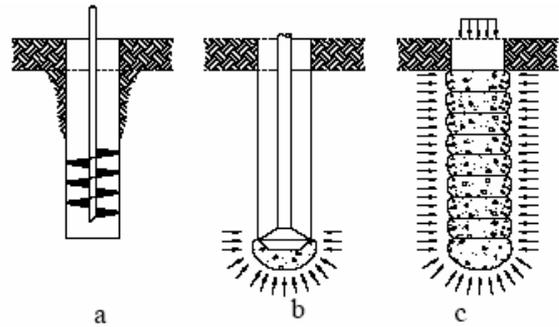


Bild 1: Schritte zur Herstellung der Geopier®-Säulen

Eigenschaften

Durch den Einbau der Geopier-Elemente wird die Tragfähigkeit des verbesserten Baugrundes erhöht und gleichzeitig die Zusammendrückung bei Belastung erheblich reduziert.

- Der erreichbare Bettungsmodul der Geopier-Elemente hängt vom umgebenden Boden ab und liegt in einer Größenordnung von 30 – 60 MN/m³ Gegenüber dem Bettungsmodul der anstehenden Böden (meist zwischen 1 und 5) ergibt sich damit ein deutlicher Verbesserungsfaktor. Bei tiefreichenden gering tragfähigen Schichten wird die Geopier-Verbesserung als Teilbodenaustausch bemessen, d.h. die Kräfte werden über Mantelreibung in den umgebenden Boden abgetragen.
- Das Ausbohren hat den Vorteil, dass keine signifikanten Porenwasserdrücke entstehen, und somit bereits kurz nach der Herstellung die volle Tragwirkung zur Verfügung steht.

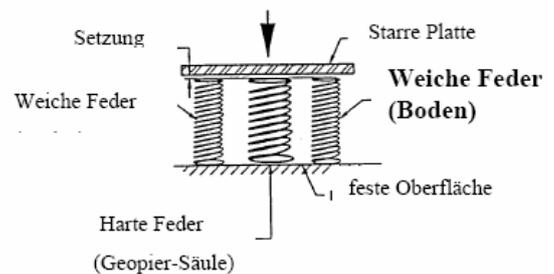


Bild 2: Modell zur Berechnung der Setzungen

Für die Berechnung der Setzungen aus dem verbesserten Bereich werden die Geopier-Elemente als steife Federn und der umgebende Boden als weiche Feder beschrieben (s. Bild 2). Die Federsteifigkeiten werden fallspezifisch aus den Angaben im Bodengutachten, bzw. für die Geopier-Elemente anhand einer Datenbank mit ca. 1000 Probelastungen bestimmt.

- Aus den Kennwerten der Geopierelemente (Scherfestigkeit, Elastizitätsmodul) und denen des umgebenden Bodens (Scherfestigkeit, Steifemodul) werden entsprechend dem Verhältnis der Bodenverbesserung Verbesserungsfaktoren und verbesserte Berechnungskennwerte für die geopiervverbesserte Schicht ermittelt. Mit diesen Kennwerten sind anschließend die üblichen erdstatischen Nachweise für die Gründungselemente möglich.
- Durch die hohe Dichte des eingebauten Schotters werden abhängig von der Kornverteilung innere Scherfestigkeiten von 48° bis 52 ° und damit sehr hohe Scherfestigkeiten der Säulen erreicht.
- Die Säulen haben einen Bohrdurchmesser von 0,75m und, je nach Konsistenz des umliegenden Bodens, einen Enddurchmesser von ca. 0,85m bis 0,95m.

4. Bemessungskonzept für Anschlussbereich an WL

Für die Untergrundverbesserung im Anschlussbereich von Widerlagern werden je nach Aufgabenstellung meist folgende Bereiche unterschieden.

1. Den Bereich unmittelbar unter den Widerlagern (Widerlagerbereich), die zumeist durch eine Pfahlgründung gestützt werden. Durch die Geopier® - Säulen wird in diesem Bereich die Scherfestigkeit des Bodens erhöht. Somit kann verhindert werden, dass Spannungen aus dem Lastausbreitungsbereich des Dammes auf die Pfähle übertragen werden und eine negative Mantelreibung entsteht.
2. Den Bereich, der unmittelbar an die Widerlager anschließt (Anschlussbereich). Neben der Erhöhung der Scherfestigkeit tragen die Geopier Elemente hier auch zur Erhöhung des Steifemoduls und somit zur Verringerung der Setzungen bei.
3. Einen daran anschließenden Verziehbereich. Im Verziehbereich werden die Säulenabstände deutlich vergrößert. Aufgabe des Verziehbereiches ist es, einen allmählichen Übergang

zwischen dem Dammbereich und dem Bereich mit Untergrundverbesserung herzustellen.

Die Abmessungen und Säulenraster für den Anschluss- und Verziehbereich hängen von den Randbedingungen, wie Dammhöhe, Verkehrsbelastung, Steifemodul des Untergrundes, Konsolidationszeit und gewählte Brückengründung ab. Sie werden in Variationsberechnungen ermittelt.

5. Beispiel

An einem Beispiel soll das Bemessungskonzept der Untergrundverbesserung nachfolgend dargestellt werden.

Im Anschluss eines Brückenbauwerkes folgen 6-11 m hohe Dämme. Der Untergrund besteht aus mehrere Meter mächtigen kompressiblen Schichten (Hanglehm, Es ca. 3-12 MN/m²). Das Bauwerk soll auf Pfählen gegründet werden; die aufnehmbare Mantelreibung ist sehr gering.

Folgende Setzungsbeträge lagen der Bemessung zugrunde:

- Widerlager $s \leq 1 \text{ cm}$
- Dämme (unverbessert) $s \text{ ca. } 5 - 7 \text{ cm}$

Im Bild 3 ist die prinzipielle Rasteranordnung für ein Widerlager erkennbar.



Bild 3: Prinzipielle Rasteranordnung der Untergrundverbesserung

Mit den beschriebenen Rastern ergaben sich folgende berechnete Setzungen:

- Anschlussbereich: $s = 2 - 3 \text{ cm}$
- Verziehbereich: $s = 3 - 5 \text{ cm}$

Damit wird eine allmähliche Verringerung der Setzungen vom unverbesserten Bereich zum Widerlager erreicht. Unter dem Widerlager betragen die Setzungen aus den Dammspannungen noch 1,5 cm, so dass im Vergleich zu den prognostizierten Widerlager-setzungen von 1 cm verträgliche Setzungsdifferenzen auftreten.

6. Technisch – wirtschaftlicher Vergleich

Geopier Bohrrammsäulen verfügen wegen der herstellungsbedingt sehr hohen Rammenergie, die zentrisch in den Säulenschaft eingeführt wird, über sehr hohe Materialdichten und einen sehr wirksamen Mantelreibungsverbund mit dem anstehenden Baugrund. Diese Besonderheit unterscheidet dieses Verfahren von den Stopfverfahren. Aus diesem Grunde kann die Bemessung auch über das oben vorgestellte Federmodell (gewisse Analogie zur kombinierten Pfahl-Plattengründung) vorgenommen werden, während Stopfverdichtungen über die aus dem Fachschrifttum hinlänglich bekannten Verfahren zur Ermittlung eines Verbesserungsfaktors bemessen werden. Das Bemessungsverfahren für Bohrrammsäulen gestattet wegen der Verwendung von Säulentragfähigkeiten und Säulenbettungsmoduln auch die unmittelbare Ermittlung von zulässigen Bodenpressungen für Einzel- oder Flächenfundamente bzw. auf dem gleichen Bemessungsweg auch den Nachweis eines Verbesserungsfaktors (vor allem bei Dammgründungen). Da, wo die geotechnischen Verhältnisse die Ausführung von Bohr Rammsäulen gestatten – Ausnahmen bilden Standorte mit fließfähigen Böden- bietet dieses Verfahren technisch wirtschaftliche Vorteile durch deutlich größere Verbesserungsfaktoren gegenüber den Stopfverfahren. Die Bemessungspraxis zeigt, daß beim Nachweis der erforderlichen Säulenanzahl und der Säulenlänge die Anwendung von Bohrrammsäulen systematisch zu deutlich größeren Säulenabständen und häufig auch zu kürzeren Säulen führt. Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß bei den Stopfverfahren die Menge des einzubauenden Mineralgemisches im Vorfeld nicht hinreichend genau bekannt ist, da das Ausmaß der Verdrängung nicht genau prognostiziert werden kann. Bei Bohr-Ramm-Schotter-Säulen wird die Säulenspur vorgebohrt, weshalb die Mineralstoffmenge auf den Bohrdurchmesser abgestimmt wird; eine Mengenkalkulation kann daher schon im Vorfeld genau vorgenommen werden.

Jedes Baugrundverbesserungsverfahren hat ein technisch – wirtschaftliches Optimum, welches sich einerseits durch die baugrundtechni-

schen Randbedingungen und andererseits durch die systemimmanenten Besonderheiten der Verfahren (Herstellung, Tragkraft, Geometrie) verwirklicht.

Die von den Autoren untersuchten vielfältigen Anwendungen haben gezeigt, daß Bohr-Ramm-Schotter-Säulen fallweise nur 30...50 % der erforderlichen Säulenlänge/-anzahl gegenüber Stopfverfahren benötigen. Entsprechende Kostenvergleiche zeigen, dass je nach geotechnischer Situation die Untergrundverbesserung mit Geopier® - Bohrrammsäulen bis zu ca. 20 –25 % günstiger ist als beispielsweise eine alternative Verbesserung mit Rüttelstopfsäulen. In diesen Fällen sind sie wirtschaftlich zu bevorzugen.

Andererseits sind die Verfahren der Stopfverdichtung bei großen Verbesserungstiefen (über 10 m) und beim Einsatz unter Grundwasser technisch überlegen.

Es ist deshalb für die am häufigsten gebräuchlichen Methoden der Untergrundverbesserung in jedem Falle sinnvoll, technisch- wirtschaftliche Vergleichsverfahren zu führen.

7. Ausblick

Nach den Kriterien des regelmäßigen Gebrauchs und der positiven Bau erfahrung kann die Anwendung von Bohr-Ramm-Schotter-Säulen im allgemeinen Hochbau inzwischen als anerkannte Regel der Technik bei der Untergrundverbesserung angesehen werden. Die Stützung von Fundamenten und Fußböden auch bei sehr hohen Flächenlasten ist ein häufiges Anwendungsgebiet.

Daher war es naheliegend, Untergrundverbesserungen mit Bohr-Ramm-Schotter-Säulen auch unter Brückenwiderlagern anzuordnen, um Tiefgründungen mit Pfählen zu ersetzen. Brückengründung und Untergrundverbesserung von Hinterfüllung und angrenzendem Damm können mit differenzierten Säulenrastern in einem Zuge hergestellt werden. Derzeit befindet sich ein erstes Projekt in der Umsetzung, weitere sind geplant. Wegen der hohen Scherfestigkeit der Bohr-Ramm-Schotter-Säulen sind sie für die Stabilisierung von rutschgefährdeten Dämmen besonders effektiv. Insgesamt stellen sie eine technisch und wirtschaftlich bedeutsame Ergänzung der bekannten Verfahren der Untergrundverbesserung dar.