

Lehrstuhl und Prüfam
für Grundbau, Bodenmechanik,
Felsmechanik und Tunnelbau
der Technischen Universität München

Schriftenreihe

Herausgeber: N. Vogt

Heft 44

**Beiträge zum
8. Geotechnik-Tag in München
Nachhaltigkeit
in der Geotechnik**

13.02.2009

München 2009

ISBN: 978-3-940476-28-9

Technische Universität München - Zentrum Geotechnik
Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

Herausgegeben von N. Vogt

Druck und Einband: Meissnerdruck GmbH, Oberaudorf

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	1
Nachhaltige Materialverwendung im Erdbau <i>Dipl.-Ing. Tobias Baumgärtel, Dr.-Ing. Dirk Heyer, Zentrum Geotechnik, Technische Universität München</i>	3
Autobahnneubau in Brandenburg: Nachhaltige Maßnahmen zur Entwässerung und Grundwasserbeeinflussung <i>Dipl.-Ing. Maik Schüßler, Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg</i>	17
Flächenrecycling im Kontext Flächenkreislaufwirtschaft - Brachen & Nutzungsszenarien <i>Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich, TU Bergakademie Freiberg, CiF e. V., Freiberg</i>	29
Das Tiefengeothermie Projekt in Unterhaching <i>Dr. Erwin Knappek, Bürgermeister a.D.</i>	49
Nutzung von Geothermie in TBM vorgetriebenen Tunneln <i>Dr.-Ing. Norbert Pralle, Dr. Jan-Niklas Franzius, Züblin AG, Stuttgart Dipl.-Ing Volker Liebel, Rehau AG & Co, Erlangen</i>	63
Die Wasserleitung des Eupalinos auf Samos Ein Meisterwerk archaischer Ingenieurskunst <i>Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Hermann Kienast, Ludwig-Maximilian-Universität</i>	69
Wiederverwendung von Spundwänden <i>Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe, Dipl.-Ing. Sascha Henke, Institut für Geotechnik und Baubetrieb, Universität Hamburg- Harburg Dipl.-Ing. Hans-Uwe Kalle, AcelorMittal Commercial RPS Deutschland, Hagen</i>	79
Nachhaltigkeit bei Baumaschinen am Beispiel einer Tiefbohranlage <i>Dr.-Ing. Ulrich Westenthanner, Dipl.-Ing. (FH) Leonhard Weixler, Bauer Maschinen GmbH, Schrobenshausen</i>	99

Gründungsarbeiten des Golden Ears Projektes in Vancouver, Bohrpfahlherstellung in ungewohnten Dimensionen	107
<i>Dipl.-Ing. Andreas Heizmann, Bilfinger Berger Ingenieurbau GmbH Dipl.-Ing. Dirk Deigmöller Bilfinger Berger AG, Vancouver Dipl.-Ing. Ralf Hebecker Bilfinger Berger AG, Mannheim</i>	
Nachhaltigkeit und Ökobilanzen im Spezialtiefbau	121
<i>Dipl.-Ing. Manuel Stelte, Keller Grundbau GmbH, Offenbach Dr.-Ing. Ulrich Trunk, Keller Holding GmbH, Offenbach</i>	
Ökologische Bewertung von Verfahren im Spezialtiefbau - Veränderungsmöglichkeiten zur Ressourcenschonung	131
<i>Dipl.-Ing. Lars Liersch, BAUER Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhausen</i>	
Verzeichnis der Autoren	139
Verzeichnis der Schriftenreihe	141

Vorwort des Herausgebers

Als Thema des Geotechniktages 2009 am 13. Februar haben wir "Nachhaltigkeit in der Geotechnik" gewählt.

Der Begriff der Nachhaltigkeit hat im Wasserbau eine besondere Tradition insofern, als dort der Umgang mit dem natürlichen Kreislauf des Wassers in der technischen Gestaltung unserer Umwelt sehr hohe Bedeutung hat. Wir wollen aber nicht nur dort Systeme schaffen, die zentrale Ressourcen dauerhaft nutzbar machen. Wir sollten grundsätzlich anstreben, über viele Generationen hinweg Zugewinne und Verbrauch in ein Gleichgewicht zu stellen. Vielfach sind wir in unserer Welt weit davon entfernt, Energie und Material kreislaufgerecht einzusetzen. Wir verbrauchen fossile Brennstoffe anstelle langfristig nachströmender Energie und schaffen Strukturen, die weder dauerhaft nutzbar sind noch schadlos wieder in natürliche Kreisläufe zurückfallen. Aber das Bewusstsein in unserer Gesellschaft zugunsten des Gedankens der Nachhaltigkeit steigt. Wir tun gut daran, ihn auch in der Geotechnik zu fördern, selbst wenn wir zumeist allenfalls ganz am Anfang stehen. Der aktuelle Geotechniktag soll hier einen Beitrag liefern.

Wir müssen uns bewusst machen, diskutieren und voranbringen, dass die Zukunft der Geotechnik sich in den Dienst der Nachhaltigkeit stellen kann und muss. In den eingeworbenen Vorträgen sollen derartige Aspekte in den Fokus gestellt werden. Wir alle sind aufgefordert, in der Zukunft diesen Gedanken weiter voranzubringen und hier soll ein Anfang gemacht werden.

Dazu haben sich betroffene und nachdenkende Referenten gefunden, die die angesprochene Thematik erörtert und in attraktiven Beiträgen dargestellt haben, die hiermit auch in schriftlicher Form vorliegen. Sie mögen den Teilnehmern und Lesern die eigene Reflexion darauf ermöglichen.

München, im Sommer 2009, Norbert Vogt

Nachhaltige Materialverwendung im Erdbau

Dipl.-Ing. Tobias Baumgärtel

Zentrum Geotechnik, Technische Universität München

Dr.-Ing. Dirk Heyer

Zentrum Geotechnik, Technische Universität München

1 Einleitung

"Nachhaltigkeit" entwickelt sich zu einem der bestimmenden Leitbildern der politischen und gesellschaftlichen Diskussion des 21. Jahrhunderts. Eine nachhaltige Entwicklung betrifft alle Wirtschaftszweige und stellt das Bauwesen vor große und komplexe Herausforderungen. So muss das bei jeder Baumaßnahme unausweichliche Eingreifen in die Umwelt hinsichtlich der ökologischen, ökonomischen und sozialen Wirkungen beurteilt werden. Das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung ist nur dann erreichbar, wenn diese drei Aspekte in ein Gleichgewicht gebracht werden. Mit dem Leitbild der Nachhaltigkeit ist aber lediglich der Rahmen für die zukünftige Entwicklung abgesteckt. Es bedarf branchen- und fachspezifischer Strategien um diese Entwicklung mit tragfähigen Inhalten zu füllen.

Eine dieser fachspezifischen Strategien entwickelt sich im Erdbau hinsichtlich der Auswahl und Verwendung von Erdbaustoffen. Bedingt durch sich ändernde gesetzliche Randbedingungen und Anforderungen des allgemeinen Umweltschutzes wird es zunehmend notwendig, möglichst alle verfügbaren lokal anstehenden Böden, aber auch Recycling-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte im Erdbau zu verwenden. Unter diesen Gesichtspunkten ist eine fachspezifische Strategie zur nachhaltigen Entwicklung im Erdbau unter dem Leitmotiv der "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" zu konkretisieren.

2 Materialeffizienz und Ressourcenschonung – Gestaltung der nachhaltigen Materialverwendung im Erdbau

2.1 Ausgangssituation

Dem Ziel der Schonung der Ressourcen ist mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [6] ein gesetzlicher Rahmen gegeben. Für eine nachhaltige Materialverwendung ist insbesondere die darin definierte 3-stufige Hierarchie grundlegend. Demnach sind Abfälle grundsätzlich zu vermeiden. Sofern dies nicht möglich ist, ist eine Verwertung anzustreben und erst als letzte Möglichkeit ist eine Beseitigung im Sinne einer Deponierung vorgesehen. Da bei Erdbauarbeiten häufig Massenüberschüsse anfallen, rückt die im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz formulierte Grundpflicht in den Mittelpunkt, die den Besitzer von Stoffen zur Verwertung verpflichtet, solange dies technisch und wirtschaftlich zumutbar ist.

Die Relevanz einer effizienteren Materialnutzung und Ressourcenschonung im Erdbau wird durch die Betrachtung der im Erd- und Grundbau bewegten Stoffströme bei der üblichen

Materialverwendung offensichtlich. So weist die statistische Erfassung mineralischer Bauabfälle [1] für 2004 einen Abfallanteil an Bodenaushub von ca. 130 Mio. t. aus, der tatsächliche Anteil dürfte aufgrund einer zu vermutenden hohen Dunkelziffer der nicht erfassten Massen noch weitaus größer sein. Dem Anfall an Abfällen steht eine Menge von ca. 350 Mio. t. an Produkten der Stein- und Erdenindustrie gegenüber, die schätzungsweise jährlich im Tiefbau erforderlich werden. In Summe werden somit ca. 500 Mio. t. Bau- und Baureststoffe mit Bezug zum Erd- und Grundbau in Deutschland jährlich bewegt.

Dieser Massenstrom aus Erdstoffabfällen und der Anlieferungen von mineralischen Erdbaustoffen wird durch die in der Praxis häufig zu beobachtende Materialverwendung maßgeblich bestimmt. Nach wie vor werden so weit möglich qualitativ hochwertige, insbesondere ungebrauchte, mineralische Baustoffe im Erdbau verwendet. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen (z.B. Recycling-Baustoffe, industrielle Nebenprodukte) erfolgt nur zögerlich. Auch vor dem Einsatz vor Ort anstehender Böden und Baustoffe, die scheinbar wenig geeignet sind, oder die als unbrauchbar eingeschätzt werden (z.B. organische Böden, veränderlich feste Gesteine), wird vielfach zurückgeschreckt. Natürlich ist bei solchen Baustoffen mit komplexen bodenmechanischen Eigenschaften von höheren bautechnischen Anforderungen auszugehen. Sie lassen sich auch nicht immer pauschal mit Regelwerken abdecken, so dass eventuell im Vorfeld von Maßnahmen ein höherer Aufwand an Untersuchungen erforderlich wird. Grundsätzlich lässt sich aber fast immer eine technische Lösung finden.

Gerade vor dem Hintergrund zukünftiger Entwicklungen wird es erforderlich werden, möglichst alle verfügbaren Baustoffe zu verwenden. Denn es ist absehbar, dass es zu restriktiveren Auflagen bei der Genehmigung von Gewinnungsstätten mineralischer Baustoffe kommen wird, was dann zu einer Verknappung dieser Produkte führt. Auch wird es durch umweltpolitische Vorgaben zu einer Verknappung von Deponieraum kommen. Dies führt dann zwangsläufig zu einer qualifizierten Weiterverwertung zahlreicher Erdbaustoffe, die bisher noch als Abfall behandelt werden. Unabhängig von diesen Zwängen muss es im Interesse aller Baubeteiligten sein, für eine nachhaltige Materialverwendung ökologische und ökonomische Aspekte zu vereinbaren. Denn der in Deutschland häufig praktizierte "Abfall-tourismus", der es mit sich bringt, dass beispielsweise Bodenaushub aus München in Braunkohletagebauten verbracht und damit einer Verwertung zugeführt wird, darf unter Umweltgesichtspunkten nicht sein. Ein entsprechendes Vorgehen ist sicherlich keine Beitrag zur CO₂-Einsparung sowie zum erforderlichen Klimaschutz und wird auch der Zielstellung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes nicht gerecht.

2.2 Ziele

Resultierend aus diesen Überlegungen sind die Inhalte der für die nachhaltige Materialverwendung im Erdbau erforderlichen Materialeffizienz und Ressourcenschonung wie folgt zu gestalten:

– Materialeffizienz

- Natürliche Erdbaustoffe sind optimal einzusetzen.
- Lokal verfügbare bzw. anstehende Baustoffe sind möglichst umfänglich zu verwenden.
- Sekundärrohstoffe sind zu verwenden und gleichrangig zu natürlichen Erdbaustoffen zu stellen.
- Deponierung von Erdbaustoffen ist zu vermeiden.
- Bauweisen sind zu optimieren, um möglichst viele Erdbaustoffe zu verwenden.

– Ressourcenschonung

- Gewinnungsstätten natürlicher mineralischer Erdbaustoffe sind unter Beachtung des Wasser-, Boden-, Natur- und Immissionsschutzes zu betreiben. Eine möglichst hochwertige Anwendung dieser Erdbaustoffe ist vorzusehen.
- Flächenbedarf für Bautätigkeiten und Materialgewinnung ist zu minimieren.
- Transportwege von Erdbaustoffen sind zu minimieren und zu optimieren.
- Dauerhaftigkeit von Bauwerken ist zu optimieren.

Die Umsetzung bautechnischer Aspekte der Materialeffizienz und Ressourcenschonung in der Erdbaupraxis bedarf zunächst einer fachtechnischen Zusammenführung bautechnischer und umweltbezogener Beläge. Gerade bei Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltstoffen sind umweltbezogene Anforderungen noch dominierend und behindern daher häufig den bautechnischen Einsatz. Es ist anzustreben, in maßgeblichen Regelwerken die Erfordernisse des Umweltschutzes und die Möglichkeiten einer bautechnischen Anwendung gleichrangig zu behandeln und aufeinander abzustimmen. In gleichem Maße ist es erforderlich, sämtliche Aspekte der Materialeffizienz und Ressourcenschonung in allen Phasen eines Projektes und von allen Projektbeteiligten zu berücksichtigen und umzusetzen.

Neben einer Berücksichtigung in bautechnischen Regelwerken ist für eine Etablierung der nachhaltigen Materialverwendung in der Baupraxis deren Machbarkeit zu belegen. Hierzu sind ausgewählte Referenzvorhaben, in denen bautechnische und umweltbezogene Besonderheiten besonders beachtet werden, umzusetzen und idealer Weise auch wissenschaftlich zu begleiten.

Eine weitere Voraussetzung zur Umsetzung liegt in der Entwicklung eines Stoffstrommanagements. Die nachhaltige Materialverwendung bedingt eine gezielte Steuerung und Verfolgung der zu transportierenden Erdstoffe unter Berücksichtigung ihrer technischen Eigenschaften.

3 Regelwerke

3.1 Bautechnische Regelwerke

Im erdbautechnischen Regelwerk wurde die Notwendigkeit der Verknüpfung bautechnischer und umweltbezogener Anforderungen erkannt und mit der Umsetzung begonnen.

So wurden die ZTV E-StB 94/97 auch mit dem Ziel überarbeitet, die Wiederverwendung nahezu aller Böden zu ermöglichen. In den nun aktuellen ZTV E-StB 09 [13] wurden die im Erdbau des Straßenbaus einsetzbaren Böden und Baustoffe unter anderem um erdbautechnisch relevante rezyklierte sowie industriell hergestellte Gesteinskörnungen erweitert.

Als neuer Bestandteil des erdbautechnischen Regelwerks sind die TL BuB E-StB 09 [9] (Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus) entstanden.

Als Pendant zu den aus dem ungebundenen Straßenoberbau bekannten TL Gestein-StB 04 [10], werden die TL BuB E-StB 09 [9] zukünftig den Erdbau des Straßenbaus abdecken und bautechnische und umweltbezogene Anforderungen an zu liefernde Böden und Baustoffe

definieren. Hinsichtlich umweltrelevanter Anforderungen verweisen die TL BuB E-StB 09 [9] auf den Anhang D der TL Gestein-StB 04 [10]. So werden keine weiteren Anforderungen definiert und stattdessen auf bereits gebräuchliche Regelungen zurückgegriffen. Mit den TL BuB E-StB 09 [9] soll somit auch bauvertraglich eine Klarheit für den Umgang mit Böden und Baustoffen im Erdbau des Straßenbaus geschaffen werden.

Aber auch hinsichtlich der im Erdbau des Straßenbaus einsetzbaren Baustoffe werden mit den TL BuB E-StB 09 [9] Neuerungen eintreten, die der Umsetzung einer nachhaltigen Materialverwendung in der Praxis dienen werden. Neben den bereits in die ZTV E-StB 09 [13] aufgenommenen industriell hergestellten Gesteinskörnungen und rezyklierten Baustoffen werden als neuer Baustoff „Böden mit Fremdbestandteilen“ definiert. Darunter fallen Gemische aus Böden und Fremdbestandteilen mineralischen Ursprungs (z.B. hydraulisch gebundene Stoffe, mit Bitumen gebundene Stoffe oder Produktionsrückstände aus thermischen Prozessen). Gewöhnlich fallen mit Fremdbestandteilen versetzte Böden als Bodenaushub bei Bautätigkeiten in ehemals bebauten oder rekultivierten Gebieten an. Als typische Beispiele sind innerstädtischer Bodenaushub oder der Rückbau künstlicher Verfüllungen zu nennen. Weiterhin können Böden mit Fremdbestandteilen auch gezielt hergestellt werden, z.B. im Rahmen einer mechanischen Bodenverbesserung feinkörniger Böden mit grobkörnigen rezyklierten Baustoffen oder ähnlichem. Eine Abgrenzung zu Böden bzw. rezyklierten Baustoffen wird in den TL BuB E-StB 09 [9] anhand des Anteils an Fremdbestandteilen, wie in Abbildung 1 dargestellt, vorgenommen.

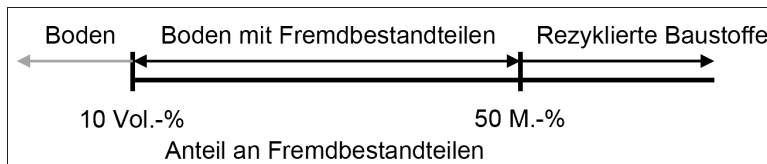


Abbildung 1 Abgrenzung zwischen Boden, Boden mit Fremdbestandteilen und rezyklierten Baustoffen nach den TL BuB E-StB 09 [9]

Insbesondere die Verwendung von Baustoffen, die nun als Böden mit Fremdbestandteilen zu bezeichnen sind, war in der Erdbaupraxis bisher schwierig. Aufgrund fehlender erdbautechnischer Richtlinien wurden sie häufig nach den LAGA M 20 [8] als Bauschutt deklariert, was der Akzeptanz, selbst bei einer Unbedenklichkeit gegenüber umweltrelevanten Inhaltsstoffen, zum Einsatz in einem Erdbauwerk nicht dienlich war. Sie wurden daher häufig deponiert und standen dem Stoffkreislauf und damit einer nachhaltigen Verwendung nicht mehr zur Verfügung.

Weiteres und wesentliches Bindeglied zwischen bautechnischen und umweltbezogenen Anforderungen im Erdbau ist das seit Anfang 2009 vorliegende "Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit Umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau" (M TS E) [7]. Die im M TS E [7] anhand von sechs Bauweisen vorgeschlagenen konstruktiven und bautechnischen Maßnahmen für Dämme und Wälle, die bei Verwendung von Erdbaustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen den Schutz von Boden, Grundwasser und Oberflächenwasser gewährleisten, werden

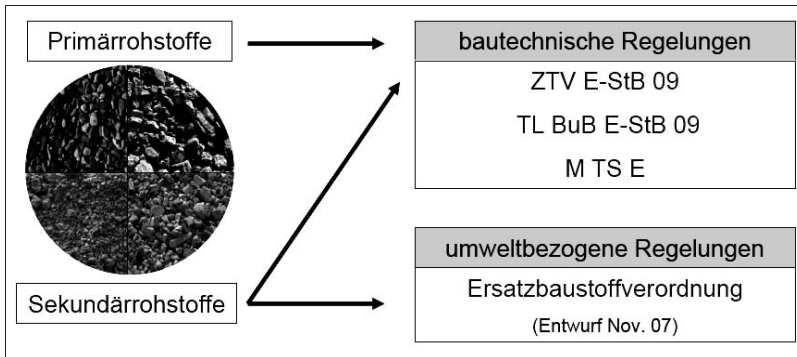


Abbildung 3 Zusammenwirken bautechnischer und umweltbezogener Regelungen bei der Verwendung von Böden und Baustoffen im Erdbau des Straßenbaus

3.3 Anwendungsszenarien im Erdbau des Straßenbaus

Mit dem Zusammenwirken bautechnischer und umweltbezogener Regelungen ist seitens der Aufsteller bautechnischer Regelwerke ein wichtiger Schritt zur Verwirklichung einer nachhaltigen Materialverwendung im Erdbau des Straßenbaus gemacht. Für zwei wesentlichen Szenarien des Erdbaus im Straßenbau, Materialabgabe und Materialanlieferung, bei denen Böden und Baustoffe transferiert werden, ist demnach in der Praxis wie folgt zu differenzieren:

– Materialabgabe

Bei einer Materialabgabe aus Bautätigkeiten im Straßenbau, z.B. aus Massenüberschüssen im Erdbau, und einer vorgesehenen technischen Verwertung, sind die umweltbezogenen Regelungen und somit zukünftig die Anforderungen der Ersatzbaustoffverordnung [12] zu beachten.

– Materialanlieferung

Werden Böden und Baustoffe für Erdbauarbeiten im Straßenbau benötigt, müssen diese gelieferten Böden und Baustoffe neben den bautechnischen Anforderungen der ZTV E-StB 09 [13] auch die Anforderungen der TL BuB E-StB 09 [9] erfüllen.

Aus den bisherigen Regelwerken geht jedoch noch nicht eindeutig hervor, welche Regelungen bei einem Materialtransfer zwischen verschiedenen Baumaßnahmen innerhalb der Zuständigkeit eines einzelnen Bauherrn einzuhalten sind.

4 Beispiele aus Forschung und Praxis

4.1 Allgemeines

Resultierend aus den Neuerungen im straßenbautechnischen Regelwerk und aus zusammen mit Partnern der Baupraxis bearbeiteten Spezialfragestellungen sowie in innovativen Forschungsprojekten werden Themen mit Bezug zur nachhaltigen Materialverwendung im

Erdbau am Zentrum Geotechnik wissenschaftlich bearbeitet. Nachfolgend werden Ergebnisse und Inhalte von kürzlich abgeschlossenen sowie noch laufenden Forschungsprojekten dargelegt, die die Erfordernis und die Möglichkeiten einer nachhaltigen Materialverwendung im Erdbau aufzeigen.

4.2 Einsatz veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff

Veränderlich feste Gesteine bilden in den Mittelgebirgen in Süd- und Mitteldeutschland große Teile der oberflächennah anstehenden Gesteine. Entsprechend häufig werden sie daher bei Straßenbaumaßnahmen in diesen Gegenden angetroffen und stehen prinzipiell als Baustoff zur Verfügung.

Die erdbautechnische Verwendung von veränderlich festen Gesteinen stellt erhöhte Anforderungen an die Erdbautechnik. Aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen zerfallen sie in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung, der inneren Bindung und dem jeweils angetroffenen Verwitterungsgrad unterschiedlich stark und schnell in kleinere Kornfraktionen mit veränderlicher Kornfestigkeit.

Diese Prozesse können bei ungünstigen Einbaubedingungen auch im verdichteten Zustand auftreten, was häufig negative Festigkeits- und Tragfähigkeitsveränderungen zur Folge hat. Zudem weisen aus veränderlich festen Gesteinen geschüttete Dämme Anteile feinkörniger, bindiger Kornfraktionen auf, deren Konsistenz bei Wassereinwirkung abnimmt, was ebenfalls zu Tragfähigkeitsverminderungen führen kann.

Aufgrund dieser Materialeigenschaften bestehen häufig Vorbehalte gegen die Verwendung veränderlich fester Gesteine in Erdbauwerken. Hinzu kam bisher, dass das straßenbautechnische Regelwerk nur wenige konkrete Vorgaben und Hinweise zur Eignung und Verwendung veränderlich fester Gesteine aufwies. Vor diesem Hintergrund und der Überarbeitung der ZTV E-StB wurde in den Jahren 2002 bis 2004 am Zentrum Geotechnik ein Forschungsvorhaben zu "Aufbereitung und Einbau veränderlich fester Gesteine" [3] bearbeitet. Ergebnisse dieser Forschungsarbeit fanden Eingang in die ZTV E-StB 09 [13].

So wurde der Siebtrommelversuch nach TP BF-StB Teil C 20 [11] als geeigneter Versuch zum Erkennen einer veränderlichen Festigkeit in die ZTV E-StB 09 [13] aufgenommen. In [3] wurde aufgezeigt, dass die bisher vorgesehene Beurteilung veränderlich fester Gesteine nach DIN 4022 eine veränderliche Festigkeit nicht sicher aufzeigen kann. Das sichere Erkennen veränderlich fester Eigenschaften von Baustoffen bildet jedoch die Grundlage für deren qualifizierte Verwendung im Erdbau.

Als weiteres Ergebnis wurde in [3] die Verschärfung von Verdichtungsanforderungen empfohlen. War bisher für veränderlich feste Gesteine, die bei einer Verwendung im Erdbau häufig als gemischtkörnige Böden vorliegen, ein Verdichtungsgrad $D_{pr} = 95 \%$ und ein Luftporenanteil $n_a \leq 12 \%$ gefordert, wird nach den ZTV E-StB 09 [13] zumindest ein Verdichtungsgrad $D_{pr} = 97 \%$ erforderlich. Die Anforderungen an die Luftporenanteile bleiben bestehen, jedoch wird darauf hingewiesen, dass bei veränderlich festen Gesteinen auch Luftporenanteile $n_a \leq 6 \%$ erforderlich werden können, was dann durch gesonderte Untersuchungen festzulegen ist.

In [3] wurde aufgezeigt, dass in diesen gesonderten erdbautechnischen Untersuchungen das spannungsabhängige Verformungsverhalten bei Wassersättigung in unterschiedlichen

Verdichtungszuständen untersucht werden sollte. So lassen sich qualifizierte Einbaubedingungen ableiten, mit denen Verformungen, bedingt durch Aufsättigung des Dammbauwerks während der Nutzungsdauer, minimiert werden und die die Gebrauchstauglichkeit während der Nutzungsdauer gewährleisten. Weitergehende Untersuchungen sollten auch eine Beurteilung der Tragfähigkeit durch Wassersättigung und Verwitterung beinhalten.

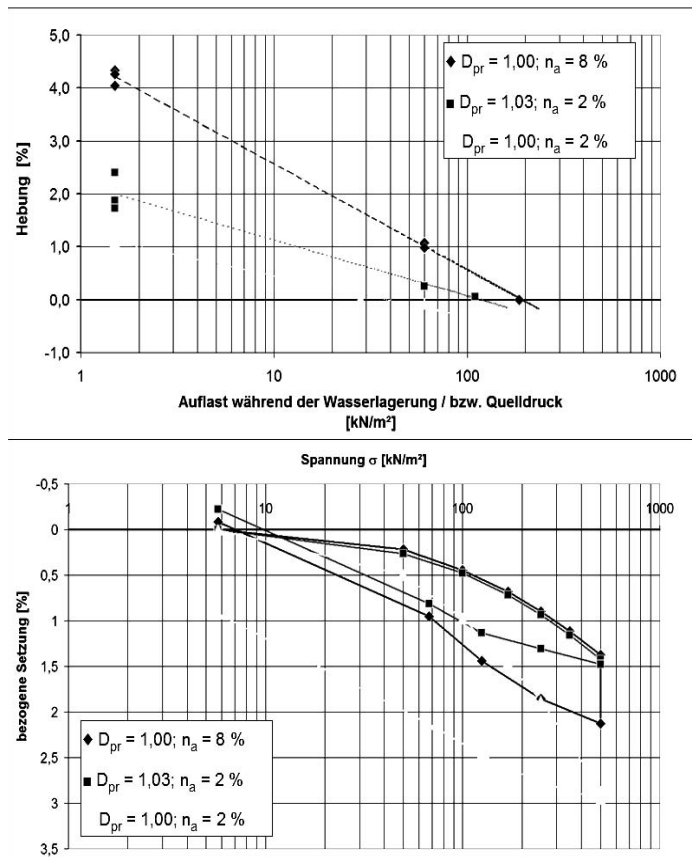


Abbildung 4 Roter Letten Tonstein: Spannungsabhängiges Verformungsverhalten bei Wassersättigung in unterschiedlichen Einbauszuständen; Quellpotential (oben) und Setzungen bei Aufsättigung (unten), Graphiken aus [3]

In Abbildung 4 sind exemplarisch für einen veränderlich festen Roten Letten Tonstein Ergebnisse entsprechender Untersuchungen aus [3] dargestellt. Das obere Diagramm der Abbildung 4 zeigt das Quellpotential und die Quelldrücke des verdichteten veränderlich festen Gesteins bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden und Luftporenanteilen unter oedometrischer Belastung. Für die selben Einbaubedingungen zeigt das untere Diagramm

der Abbildung 4 das in Großoedometerversuchen (Probendurchmesser 30 cm) untersuchte Verformungsverhalten bei der Belastung teilgesättigter Proben bis zu einer Vertikalspannung $\sigma = 500 \text{ kN/m}^2$ und anschließender Wassersättigung. Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse zeigt exemplarisch, dass insbesondere bei hohen Verdichtungsgraden und geringen Luftporenanteilen (entsprechende Einbauzustände liegen meist im Optimum oder der nassen Seite der Proctorkurve) geringe Veränderungen der geotechnischen Eigenschaften nach Verdichtung und somit während der Nutzungsdauer zu erwarten sind. Hingegen zeigt sich der Boden bei einem höheren Luftporenanteil von $n_a = 8 \%$, trotz hohem Verdichtungsgrad, deutlich verformungsempfindlicher bei Wassereinwirkung.

Mit den neuen Vorgaben in den ZTV E-StB 09 [13] sowie anforderungsgerechten Voruntersuchungen und entsprechender Berücksichtigung der Materialeigenschaften in Planung und Konstruktion können veränderlich feste Gesteine als Erdbaustoff eingesetzt werden.

4.3 Erdbautechnische Eignung von Böden mit Fremdbestandteilen, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten

Mit den ZTV E-StB 09 [13] und den TL BuB E-StB 09 [9] ist die Verwendung von Recycling-Baustoffen, industriell hergestellten Gesteinskörnungen und Böden mit Fremdbestandteilen bauvertraglich geregelt. Entsprechende Baustoffe werden daher im Erdbau an Bedeutung gewinnen.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, stehen mit Böden mit Fremdbestandteilen ein Baustoff zur Verfügung, der bisher keine regelmäßige Verwendung im Erdbau fand. Entsprechend schwierig gestaltete sich die Beurteilung der erdbautechnischen Eigenschaften entsprechender Baustoffe. Daher wurden parallel zur Erarbeitung der TL BuB E-StB 09 [9] im Forschungsvorhaben "Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden und Fremdbestandteilen und von Bauschutt" [2] die erdbautechnischen Eigenschaften entsprechender Baustoffe untersucht.

Im Erdbau des Straßenbaus ist die Erstellung dauerhaft gebrauchstauglicher Erdbauwerke von grundlegender Bedeutung. Wesentlicher Bestandteil ist dabei die Dauerhaftigkeit bzw. der Widerstand gegen Verwitterung der eingesetzten Baustoffe. Da anzunehmen ist, dass zukünftig im Erdbau industrielle Nebenprodukte, RC-Baustoffe und Böden mit Fremdbestandteilen zum Einsatz kommen, die den strengen Anforderungen des Straßenoberbaus nicht genügen, wurde in [2] zunächst die Möglichkeiten der Beurteilung der Dauerhaftigkeit von mineralischen Bestandteilen untersucht.

Als Analogiemodell wurde hierfür das Verwitterungsverhalten veränderlich fester Gesteine herangezogen. Wie zur Untersuchung natürlicher mineralischer Baustoffe wurde eine evtl. vorhandene Verwitterungsneigung durch Siebtrommelversuche in Anlehnung an die TP BF-StB Teil C 20 [11] durchgeführt. Es zeigte sich, dass diese Versuchstechnik prinzipiell auch zur Klassifikation mineralischer Fremdbestandteile geeignet ist. Es ist jedoch erforderlich, das in der Prüfvorschrift vorgegebene Auswerteschema zu erweitern. Hierzu wurde ein Vorschlag in [2] dargelegt. Im Ergebnis zeigte sich, dass die überwiegende Anzahl der untersuchten mineralischen Fremdbestandteile keine für den Erdbau des Straßenbaus relevante veränderliche Festigkeit aufweisen. Lediglich an einigen Proben mineralischer Fremdbestandteile, die den Mörteln und Putzen zuzurechnen waren, konnte eine veränderliche Festigkeit nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen zu den erdbautechnischen Eigenschaften zeigten, dass bei den genannten Baustoffen, aufgrund ihrer granularen Eigenschaften und ihrer stofflichen Kennzeichnung, eine Benennung nach DIN EN ISO 14688-1 und eine Klassifikation nach DIN 18196 möglich und sinnvoll ist. Somit ist eine Eingruppierung in das straßenbautechnische Regelwerk möglich. Dennoch sind einige grundsätzliche Unterschiede zu den üblichen erdbautechnischen Eigenschaften natürlicher Böden festzustellen.

Die Untersuchungen zu den Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften zeigten deutliche Unterschiede zwischen Baustoffen, die als grobkörnige Böden sowie gemischtkörnige Böden mit Feinkornanteilen ≤ 15 M.-% eingruppiert werden und Baustoffen, die als gemischtkörnige Böden mit Feinkornanteilen > 15 M.-% sowie als feinkörnige Böden eingruppiert werden.

Insbesondere bei grob- und gemischtkörnigen (Feinkornanteil ≤ 15 %) Böden (siehe Abbildung 5) mit hohen Anteilen an Fremdbestandteilen sind die durch Verdichtung erreichbaren Trockendichten nicht immer Funktionen des Wassergehaltes. Hier beeinflussen insbesondere poröse, wassersaugende Fremdbestandteile die Verdichtungseigenschaften. Die Kenntnis entsprechender Materialeigenschaft ist daher vor Verwendung entsprechender Baustoffe für die Festlegung von Verdichtungsanforderungen nach ZTV E-StB 09 [13] erforderlich. Auch die Tragfähigkeit dieser überwiegend grobkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen wird maßgeblich von den Eigenschaften und dem Anteil der Fremdbestandteile bestimmt. Dies heißt jedoch nicht, dass ihre Tragfähigkeit bei ausreichender Verdichtung als ungenügend zu beurteilen wäre, sondern vielmehr, dass ihre geotechnischen Eigenschaften eben nicht immer mit denen natürlicher Böden vergleichbar sind.

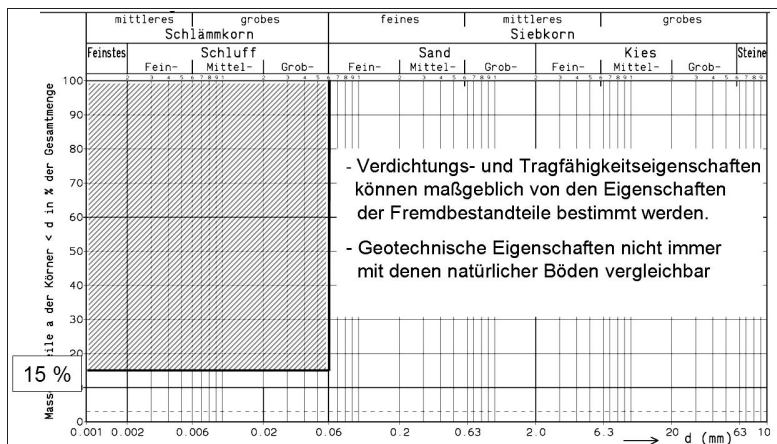


Abbildung 5 Zusammenfassung geotechnischer Eigenschaften grob- und gemischtkörniger (Feinkornanteil ≤ 15 %) Böden mit Fremdbestandteilen, nach [2]

Nach den Ergebnissen in [2] weisen Böden mit Fremdbestandteilen mit einem Feinkornanteil > 15 M.-% (siehe Abbildung 6) bezüglich ihrer Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaf-

ten zunehmend die Charakteristik natürlicher Böden vergleichbarer Bodengruppen auf. Das Vorhandensein von Fremdbestandteilen bleibt aber erkennbar, z.B. anhand geringerer erreichbarer Proctordichten bei Fremdbestandteilen geringer Dichte. Andererseits können die Fremdbestandteile auch die Wirkung einer mechanischen Bodenverbesserung haben, wenn z.B. Betonreste in einem feinkörnigen Boden eingebunden sind. Zu beachten sind vor dem Hintergrund der Verdichtungsanforderungen der ZTV E-StB 09 [13] Böden mit hohen Anteilen an porösen Fremdbestandteilen. Diese können teils hohe Luftporenanteile des verdichteten Baustoffs verursachen. Bestehen neben Anforderungen an den Verdichtungsgrad auch Anforderungen an den Luftporenanteil, sind entsprechend Böden nicht immer pauschal nach den Vorgaben der ZTV E-StB 09 [13] zu beurteilen. Die Anforderungen sollten dann vor Einbau gesondert festgelegt werden. In der Regel können die Verdichtungsanforderungen der ZTV E-StB 09 [13] aber auch mit diesen Baustoffen erfüllt werden.

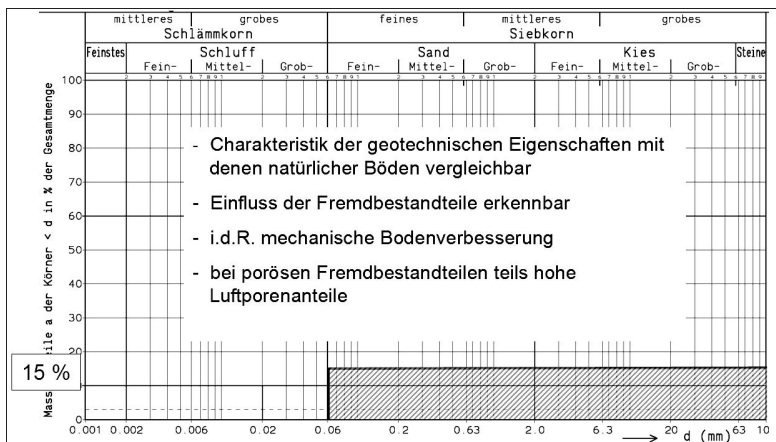


Abbildung 6 Zusammenfassung geotechnischer Eigenschaften gemischtkörniger (Feinkornanteil > 15 %) und feinkörniger Böden mit Fremdbestandteilen; nach [2]

Aufgrund der oben beschriebenen Einflüsse von Fremdbestandteilen in Böden und Baustoffen sollte die stoffliche Zusammensetzung von Böden mit Fremdbestandteilen und RC-Baustoffen vor Einbau bekannt sein, um die erdbautechnischen Eigenschaften beurteilen zu können.

4.4 Gebrauchstauglichkeit von organischen Böden in Geländeaufschüttungen

Am Flughafen München wird aktuell eine dritten Start- und Landebahn geplant. Im projektierten Erweiterungsbereich stehen große Volumina an organischen Oberböden an. Es ist beabsichtigt, eine Deponierung dieser organischen Oberböden zu vermeiden. Stattdessen ist eine Verwendung in erforderlichen, untergeordneten Erdbauwerken, wie Lärmschutzwällen, Sichtschutzwällen und Besucherhügeln, geplant.

Aufgrund wenig vorhandener Erfahrungswerte zur erdbautechnischen Eignung und Verwendung organischer Böden wurde im Jahr 2008 mit fachlicher Begleitung durch das Zentrum

Geotechnik eine Versuchsschüttung zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Geländeaufschüttungen aus organischen Böden auf einem Testfeld am Flughafen München umgesetzt. Die Versuchsschüttung wurde mit Abmessungen von Länge : Breite : Höhe = 30 m : 25 m : 5 m hergestellt. Die Schüttung wurde hälftig mit "trockenen" (Einbauwassergehalte ca. $w < 60 \%$) und hälftig mit "nassen" (Einbauwassergehalte ca. $w > 70 \%$) organischen Böden aufgebaut (Grundriss siehe Abbildung 7).

Neben der Optimierung der Einbautechnologie ist es Ziel, mit der Versuchsschüttung einen Praxisbeleg für die Eignung und Machbarkeit der vorgesehenen Materialverwendung am Flughafen München zu erbringen. Hierzu wurde die Versuchsschüttung umfangreich mit Messinstrumenten, z.B. TDR-Sonden, Tensiometer sowie einer Sickerwasserfassung, bestückt. Die seit 2008 laufende wissenschaftliche Begleitung des Projektes soll auch den Kenntnisstand zu mechanischen und hydraulischen Eigenschaften organischer Böden erweitern und somit einen verallgemeinerbarer Praxisnachweis zur erdbautechnischen Einsetzbarkeit organischer Böden liefern (siehe [4]).

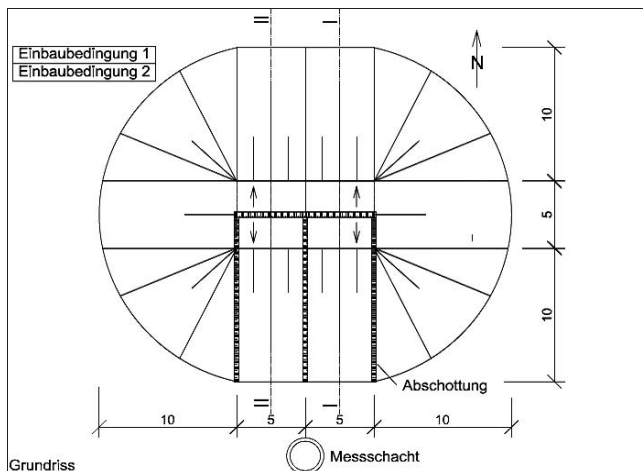


Abbildung 7 Grundriss der Versuchsschüttung am Flughafen München, Graphik aus [4]

4.5 Entwicklung und Umsetzung eines Stoffstrommanagements

Im Zusammenhang mit der nachhaltigen Materialverwendung im Erdbau werden zukünftig die Planung, Steuerung und Kontrolle von Erdbewegungen wesentliche Aspekte darstellen. Insbesondere vor dem Hintergrund der Verknappung von Deponierungsmöglichkeiten von Restmassen und Bauabfällen werden schon verstärkt in der Planungsphase von Projekten Konzepte zur Materialverwendung entwickelt werden müssen. Idealerweise münden diese Überlegungen in die gezielte Steuerung und Kontrolle der Erdmassenbewegungen während der Ausführungsphase. Nicht zuletzt erfordern auch die Neuerungen im straßenbautechnischen Regelwerk für den Erdbau verstärkte Nachweis- und Dokumentationspflichten der transportierten und gelieferten Böden und Baustoffe.

Für die erdbautechnische Umsetzung ist hierfür die Entwicklung eines Stoffstrommanagements das Ziel. Am Zentrum Geotechnik haben wir den Inhalt dieses zu entwickelnden Stoffstrommanagements wie folgt definiert:

Entwicklung von ganzheitlichen materialspezifischen Konzepten (qualitativ stoffliche Aspekte) zur Verwendung und Verwertung von Erdbaustoffen und granularen (Bau-) Stoffen im Erd- und Grundbau unter der Maßgabe einer Ressourcen schonenden geotechnischen Planung, Konstruktion und Ausführung.

Die Entwicklung und Umsetzung eines Stoffstrommanagements im Erdbau wird aktuell als Teilaspekt im Forschungsverbund "Virtuelle Baustelle - Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung" (ForBAU) [5] umgesetzt. Der Forschungsverbund ForBAU hat das Ziel, komplexe Bauvorhaben, von der Planungs- bis hin zur Ausführungsphase in einem digitalen Baustellenmodell abzubilden.

In ForBAU wird die Entwicklung eines Stoffstrommanagements in Kooperation vom Zentrum Geotechnik der TU München und dem Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Logistik der Universität Erlangen-Nürnberg umgesetzt. Im Rahmen von ForBAU fließen in das Stoffstrommanagementkonzept Kompetenzen der

- Geotechnik, zur Beurteilung und Vorgabe der bautechnischen Verwendbarkeit von Aushubmassen,
 - Betriebswirtschaftslehre, zur Erarbeitung und vergleichenden Bewertung von Verwendungsalternativen und
 - IuK-Technologien, zur Gestaltung, Planung und Kontrolle von Ausführungsprozessen ein.
- Im Rahmen der Projektdauerzeit von ForBAU (bis Ende 2010) sollen die entwickelten Konzepte in einem Beispielprojekt umgesetzt werden.

5 Zusammenfassung

Die nachhaltige Materialverwendung im Erdbau wird durch die Verknüpfung von Materialeffizienz und Ressourcenschonung gestaltet. Wesentliche Ziele sind die optimale Nutzung natürlicher Erdbaustoffe, was den möglichst umfänglichen Einsatz lokal verfügbarer Böden bedingt. Gleichzeitig ist die Deponierung von Erdbaustoffen weitest möglich zu vermeiden und die Verwendung von Sekundärrohstoffen (Ersatzbaustoffen) zu etablieren.

Diese Verwendung möglichst aller verfügbarer Böden und Baustoffe bedingt aber auch eine Berücksichtigung in den Regelwerken, die sowohl die bautechnischen als auch die umweltbezogenen Anforderungen aufeinander abgestimmt enthalten. Die aktuell erfolgten Neuerungen des straßenbautechnischen Regelwerks bilden hierfür erstmals einen Ansatz. Mit den überarbeiteten ZTV E-StB 09, den neu entstandenen TL BuB E-StB 09 und dem vorliegenden M TS E wurden hierzu wesentliche Voraussetzungen geschaffen.

Die Erfordernis und die Möglichkeiten einer nachhaltigen Materialverwendung im Erdbau werden am Zentrum Geotechnik in Forschungsarbeiten und Bauprojekten untersucht und umgesetzt. Aktuell wird die erdbautechnische Verwendung von organischen Böden in einer Versuchsschüttung beurteilt sowie ein Stoffstrommanagement zur Planung, Steuerung und Kontrolle von Erdbewegungen entwickelt.

6 Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: 5. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2004), Berlin, 28.02.2007, www.arge-kwtb.de
- [2] BAUMGÄRTEL, T.; HEYER, D.: Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.145 des BMVBS, September 2008
- [3] BAUMGÄRTEL, T.; HEYER, D.; STIEGELER, R.: Aufbereitung und Einbau veränderlich fester Gesteine, In: Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FGSV), Heft Nr. 931, Februar 2006 / Forschungsbericht
- [4] BIRLE, E.; HEYER, D.; BOSO, M.: Earth Works with Contaminated Soils and Recycled Materials of Low Permeability: Principles of Construction and Large Scale Field Test, eingereicht für: Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, 5 - 9 October 2009, S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy
- [5] Forschungsverbund ForBAU: Virtuelle Baustelle – Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung, www.forbau.de
- [6] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG]), vom 27. September 1994, Zuletzt geändert durch Art.2 G v. 21.06.2005
- [7] Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (M TS E), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Ausgabe 2008
- [8] Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regel – Stand: 5. September 1995, Erich Schmidt Verlag
- [9] TL BuB E-StB 09: Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe für den Erdbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Ausgabe 2009
- [10] TL Gestein-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, Ausgabe 2004
- [11] TP BF-StB Teil C 20: Zerfallsbeständigkeit von Gestein-Siebtrommelversuch, Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Ausgabe 2002
- [12] Verordnung über den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV), Entwurf vom 13. November 2007
- [13] ZTV E-StB 09: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Ausgabe 2009

Autobahnneubau in Brandenburg: Nachhaltige Maßnahmen zur Entwässerung und Grundwasserbeeinflussung

Dipl.-Ing. Maik Schüßler
Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, Hoppegarten

1 Einleitung

Am 23. Mai 2008 erfolgte die Verkehrsfreigabe der neuen Autobahn A 113. Die A 113 stellt die wichtigste straßenseitige Anbindung für den neuen Airport Berlin-Brandenburg International (BBI) dar. Um die erwartete Verkehrsbelastung von bis zu 130.000 Kfz./24h bewältigen zu können, wurde im Land Brandenburg für rund 112 Mio. EUR eine sechsstreifige Autobahn auf einer Länge von 6,7 km neu gebaut (Bild 1).

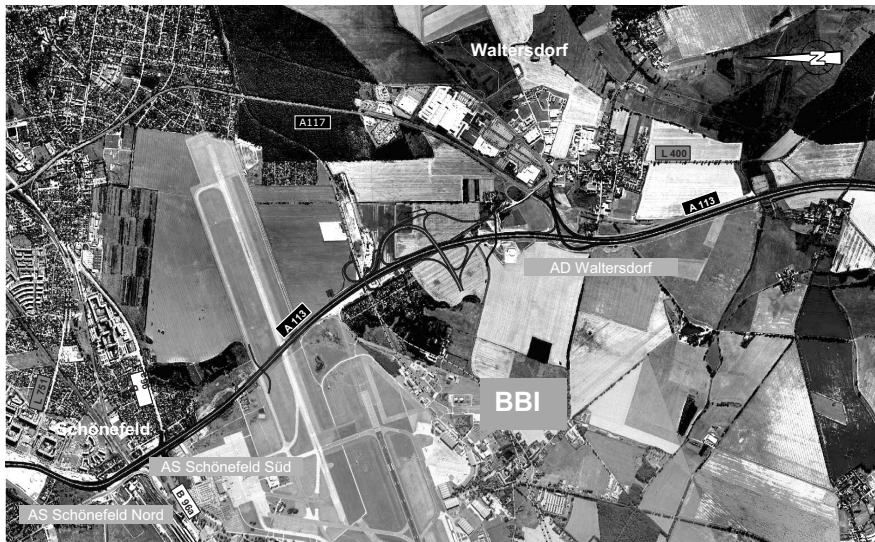


Bild 1: Übersicht Neubau A 113

Aus Berlin kommend verläuft die A 113 in Dammlage durch die Ortslage Schönefeld. An den Anschlussstellen Schönefeld Nord und Süd erfolgt der Anschluss an die jeweils vierstreifigen Bundesstraßen B 179 und B 96a. Im Anschluss quert die A 113 die nördliche Start- und Landebahn des Flughafens Berlin Schönefeld, welche im Dezember 2007 außer Betrieb genommen wurde. Der Anschluss für den Airport BBI erfolgt über die 2011 fertigzustellende Anschlussstelle. Diese liegt unmittelbar vor dem Autobahndreieck Waltersdorf (Bild 1).

2 Geologische Situation

Die oberflächennahe Geologie des Landes Brandenburg ist eiszeitlich geprägt. Dadurch stehen bis in größere Tiefen fast ausschließlich quartäre Lockergesteine an. Im Wesentlichen werden zwei regionalgeologische Einheiten unterschieden: Hochflächenbereiche mit Geschiebelehm- und –mergelablagerungen und Urstromtäler mit Sandablagerungen.

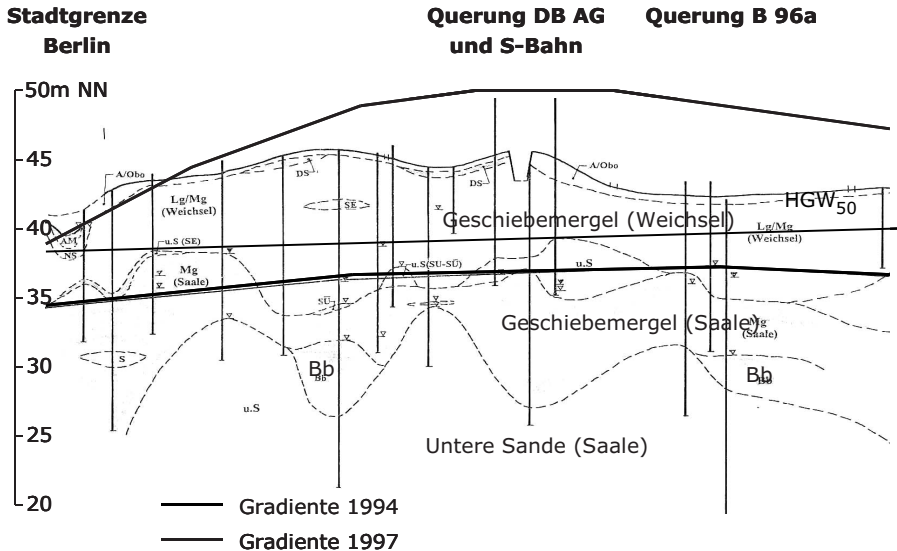


Bild 2: Geologischer Schnitt Ortslage Schönefeld /1/

Die A 113 liegt im Bereich der Teltowhochfläche. In der Ortslage Schönefeld stehen unter bebauungsbedingter oberflächiger Aufschüttung und geringmächtigen Decksanden zwei Geschiebemergelkomplexe an. Der obere Komplex ist der Weichseleiszeit, der untere Komplex der Saaleeiszeit zu zuordnen. Die Geschiebemergelablagerungen können Mächtigkeiten von 10 m bis über 25 m erreichen. Unterlagert werden die vorgenannten Schichten durch saalealtzeitliche Schmelzwassersande (Untere Sande). An deren Oberfläche können unregelmäßig Beckenbildungen (Bb in Bild 2) vorkommen.

Die unteren Sande bilden den 1. Hauptgrundwasserleiter. Das Grundwasser steht hier an der Unterkante des praktisch wasserundurchlässigen Geschiebemergels ($k_f < 4 \cdot 10^{-8}$ m/s) gespannt an und erreicht Druckhöhen von 3 bis 5 m unter Oberkante Gelände.

Die ursprüngliche Planung der A 113 sah 1994 eine Trog- und Tunnellage vor. Aus Kostengründen wurde diese ab 1997 in eine Hochlage geändert (Bild 2).

3 Entwässerung A 113

3.1 Allgemeines

Grundsätzlich sollte das an Straßen anfallende Niederschlagswasser an Ort und Stelle des Anfalls auch wieder zur Versickerung gebracht werden. Bei ausreichend durchlässigem Untergrund und entsprechenden Platzverhältnissen kann dies z. B. über begrünte Böschungen und Straßenmulden erfolgen. Besteht diese Möglichkeit nicht, so kann das Oberflächenwasser der Straße gesammelt und über Zuleitungen Versickerbecken mit vorgeschalteten Absetzbecken mit Tauchwand zugeführt werden. Mit der Versickerung wird eine Grundwasserneubildung ermöglicht. Über bewachsene Bodenzonen kann das Oberflächenwasser weitgehend gereinigt werden. Oberirdische Gewässer werden dadurch nicht in Anspruch genommen und auch nicht beeinflusst. Weitere Grundsätze können den Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew) /2/ entnommen werden.

Aufgrund der Untergrundverhältnisse im Bereich der A 113 war mit dem Anstehen von praktisch undurchlässigen Geschiebemergel keine oberflächennahe Versickerung möglich.

3.2 Geplante Entwässerung

Das ursprüngliche Entwässerungskonzept für die A 113 ist in Bild 3 dargestellt. Es war vorgesehen, das gesamte Oberflächenwasser in Rückhaltebecken zu sammeln und mittels Pumpenanlagen und Druckrohrleitungen in ein 2 km entferntes Versickerbecken abzuleiten.



Bild 3: Geplante Entwässerung A 113, B 179 und B 96a

Die Planung für die Bundesstraße B 179 wurde zusätzlich zur A 113 übernommen. Aufgrund der Untergrundverhältnisse war die Funktion der vorgesehenen Versickerbecken in Frage gestellt.

Mit dem Neubau der A 113 erfolgt in der Ortslage Schönefeld auf ca. 1 km Länge und bereichsweise bis zu 55 m Breite eine erhebliche Flächenversiegelung. Mit Sammlung und Ableitung des anfallenden Niederschlagswassers wäre dem gesamten Gebiet dauerhaft eine große Menge Wasser entzogen worden.

Für die Herstellung von 2 Pumpwerken, 2000 m Druckrohrleitung und einer 70 m langen Unterquerung der Bahnanlagen bei ungünstigen Untergrundverhältnissen für einen unterirdischen Rohrvortrieb (Hindernisse infolge größerer Geschiebe) wären Baukosten in Höhe von ca. 450.000,- EUR angefallen. Hinzu kämen jährliche Betriebskosten von ca. 19.000,- EUR für Energie und Wartung der Pumpenanlagen, Reinigung und Inspektion der Druckrohrleitung sowie vorbeugende Instandhaltung. Ein ähnliches Kostenvolumen wäre auch für Anlagen an der B 179 notwendig gewesen.

3.3 Alternativlösung

Obwohl die jährlichen Niederschläge in Brandenburg mit ca. 560 mm in den letzten 100 Jahren etwa konstant geblieben sind, ist für das Hauptgrundwasser im Bereich der Teltowhochfläche im Raum Schönefeld eine abnehmende Tendenz erkennbar (Bild 4).

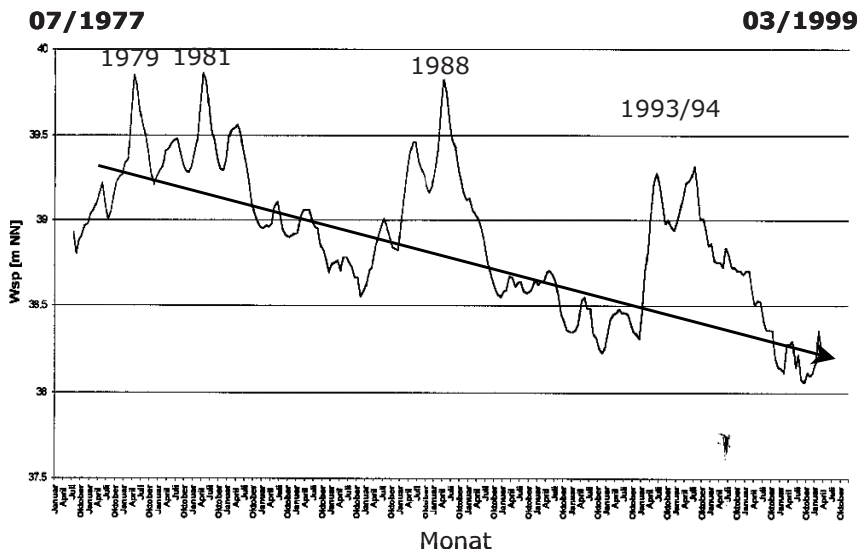


Bild 4: Grundwasserganglinie Messstelle 3646 1149 (Quelle LUA Brandenburg)

Die Ursachen für den Rückgang des Grundwasserspiegels liegen in einer zunehmenden Flächenversiegelung mit Ableitung des Niederschlagswassers in Vorfluten und in der Einstellung des Betriebes von Rieselfeldern zur Wiederversickerung von geklärtem Abwasser in stadtnahen Randbereichen von Berlin.

Unter den Gesichtspunkten der Versiegelungsproblematik des Straßenbaus und der aufgezeigten Tendenz im Grundwasserhaushalt wurde für die A 113 und die Bundesstraßen B 179 und B 96a in Schönefeld nach umweltverträglichen und damit nachhaltigen Lösungen für eine Regenwasserversickerung gesucht. Da eine direkte Versickerung nicht möglich war, wurde die in Bild 5 dargestellte Entwässerungslösung mit Versickerbrunnen entwickelt.

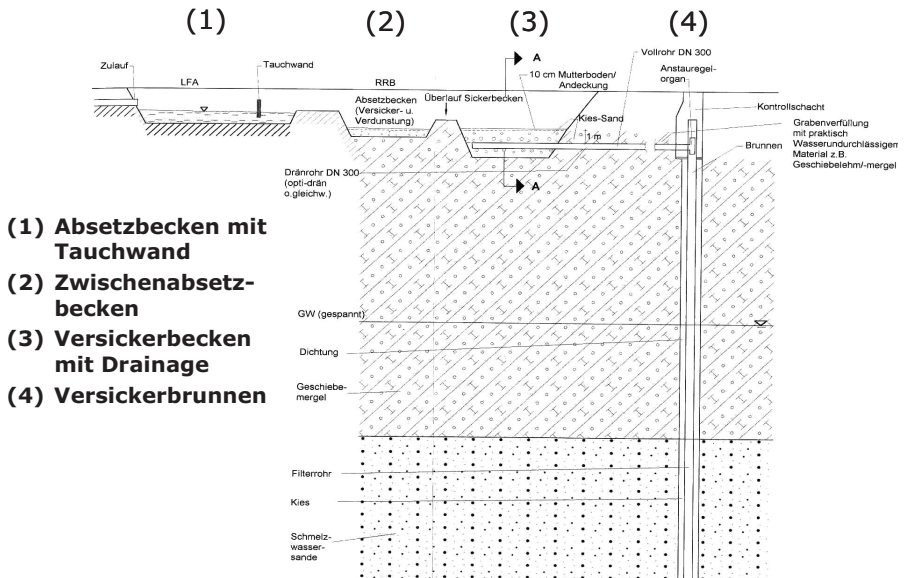


Bild 5: Prinzipskizze alternative Entwässerungslösung

Das gefasste Oberflächenwasser von der Verkehrsanlage wird über einen Zulauf einem Absetzbecken mit Tauchwand zugeführt. Im Absetzbecken werden Feststoffpartikel als Träger von Schadstoffen sedimentiert. Weiterhin dient das Absetzbecken zur Rückhaltung von Leichtflüssigkeiten. Anschließend gelangt das Wasser in ein Zwischenabsetzbecken. Dieses hat die Funktion der Aufnahme kleinerer Regenereignisse und wirkt als Verdunstungs- und teilweise als Versickerbecken im Bereich der Decksande. Im folgenden Versickerbecken mit flächenhaft verlegten Drainageleitungen unterhalb einer 1 m mächtigen Kiessandschicht mit Oberbodenandeckung erfolgt die Reinigung des Wassers vorwiegend über die belebte Bodenzone. Die Drainageleitung muss hierbei oberhalb des maßgeblich höchsten Grundwasserstandes (hier GW_{10}) abgesetzt werden. Damit wird dem Grundsatz der Versickerung nach RAS-Ew Rechnung getragen, dass der Grundwasserflurabstand beim mittleren Höchststand des Grundwasserspiegels mindestens 1 m betragen soll. Die Drainageleitungen werden dann an die Versickerbrunnen angeschlossen. Mit den Versickerbrunnen wird der undurchlässige Geschiebemergel durchbohrt. Im Bereich der unterlagernden Sande wird eine entsprechend den örtlichen Verhältnissen ausgebaute Filterstrecke zur Infiltration in das Grundwasser ausgebaut.

4 Planung und Bau der Versickerbrunnen

4.1 Vorgehensweise

Aufgrund der bekannten geologischen Verhältnisse (stark schwankende Mächtigkeit des Geschiebemergels, wechselnde kornanalytische Zusammensetzung der unteren Sande; siehe Bild 2 und 6) kam der Standortwahl und der Ausbautiefe der Brunnen eine besondere Bedeutung zu.

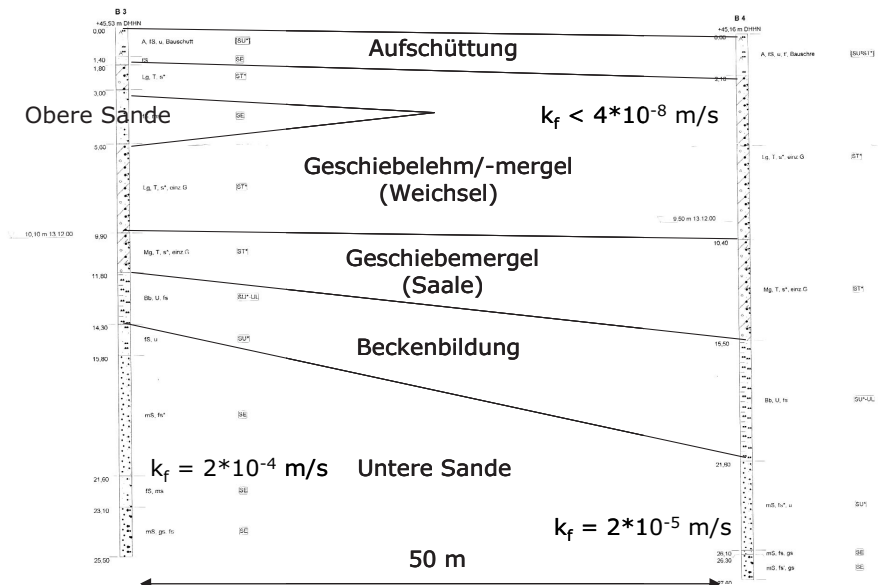


Bild 6: Bohrprofile

Im Bild 6 sind exemplarisch zwei benachbarte Bohrprofile dargestellt. Die Unterkante des Geschiebemergels einschließlich der schwach wasserdurchlässigen Beckenbildung (stark schluffige Sande) schwankt hier auf einer Entfernung von 50 m um ca. 7 m. Die für die Infiltration vorgesehenen Sande weisen nach der kornanalytischen Ermittlung Durchlässigkeitsunterschiede im Bereich einer Zehnerpotenz auf. Für die Brunnendimensionierung kamen prinzipiell 3 Vorgehensweisen in Betracht:

- (1) Nutzung vorhandener Baugrunddaten
- (2) Baugrundaufschlüsse an geplanten Brunnenstandorten einschließlich Feld- und Laboruntersuchungen oder
- (3) Ausbau der endgültigen Brunnen in der Planungsphase

Der Vorteil der Vorgehensweise nach (3) liegt darin, dass die Leistungsfähigkeit der Brunnen direkt überprüft werden kann und die Kosten für herkömmliche Baugrundaufschlüsse mit der Brunnenherstellung kompensiert werden. Bei Nichtgenehmigung der vorgesehenen Entwäs-

serungslösung hätte hier jedoch ein Rückbau der Brunnen erfolgen müssen. Der Bauherr hat sich für die Vorgehensweise nach (3) wie folgt entschieden:

- Ausbau der Brunnen mit Bohrdurchmesser 400 mm; Filterrohr DN 200
- Anpassung der Filterlängen, des Filtermaterials und der Bohrtiefen vor Ort an die angetroffenen Bodenverhältnisse
- Ausführung von Pump- und Versickerversuchen entsprechend der späteren Funktion der Brunnen
- Probenahme und Laboruntersuchungen an Boden- und Wasserproben

4.2 Ergebnisse der Versickerversuche an den ausgebauten Brunnen

Zum Anschluss der Versickerbecken wurden insgesamt 10 Brunnen ausgebaut. Die Brunnentiefen liegen zwischen 21 m und maximal 30 m. Die Filterstrecken im Bereich der unteren Sande weisen Filterlängen (FL) zwischen 5 m und 10 m auf.

Zur wirklichkeitsnahen Simulation der späteren Funktion der Brunnen wurden Versickerversuche mit konstanter Druckhöhe über jeweils 3 Stunden ausgeführt. Zur Überprüfung der Versuchsergebnisse wurden die Versuche nach einem Jahr wiederholt.

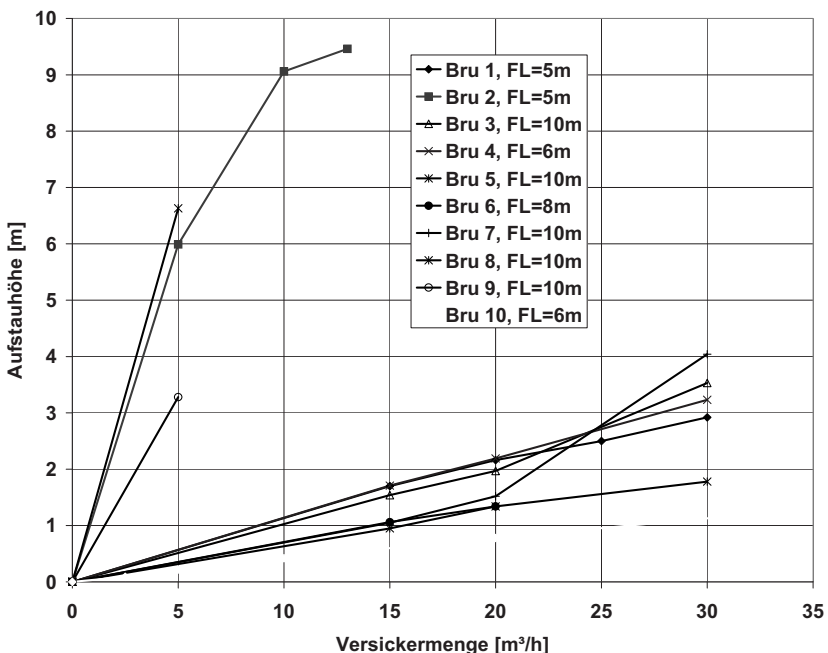
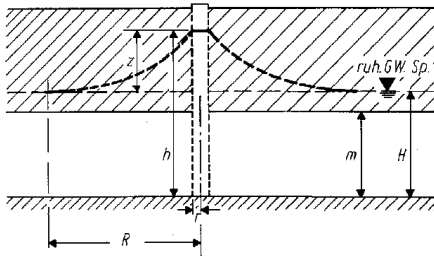


Bild 7: Ergebnisse der Versickerversuche mit konstanter Druckhöhe und verschiedener Filterlängen (FL)

Bei Überstauhöhen von 1 bis 4 m über dem aktuellen Grundwasserspiegel konnten bei 7 von 10 Brunnen Versickermengen von 30 m³/h nachgewiesen werden. Nur 3 Brunnen brachten

erheblich geringere Versickerraten. Zwischen den Versickerraten und der Überstauhöhe besteht eine lineare Abhängigkeit. Mit den Versuchsergebnissen konnten insgesamt ausreichende Ergebnisse für die spätere Beckenentleerung erzielt werden.

Die Berechnung einer Tiefeninfiltration erfolgt in Analogie zur Grundwasserabsenkung und ist in Bild 8 dargestellt.



Versickermenge Q_s :

$$Q_s = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot m \cdot z / (\ln R - \ln r)$$

$$R = 3000 \cdot z \cdot k^{0,5}$$

Bild 8: Berechnung Tiefeninfiltration bei Grundwasser mit gespannter Oberfläche /3/

Mit den in Bild 8 angegebenen Formeln ist iterativ eine Bestimmung eines mittleren Durchlässigkeitsbeiwertes k für die ausgeführten Brunnen möglich. Neben den Versickerungsversuchen mit konstanter Druckhöhe wurden weiterhin noch Versuche mit absinkendem Wasserspiegel (Absinkversuche) und Pumpversuche an den Brunnen ausgeführt. Auch aus diesen Versuchen lassen sich mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte für die Brunnen ermitteln. Aus den gewonnenen Bodenproben wurde zusätzlich eine kornanalytische Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte nach BEYER vorgenommen. Eine vergleichende Zusammenstellung der Verhältniswerte der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte jeweils zum Wert des Versickerversuchs mit konstanter Druckhöhe ist in Bild 9 gegeben.

In 75% der durchgeführten Untersuchungen lieferten die Pumpversuche ähnliche Durchlässigkeitsbeiwerte wie die Versickerversuche. Tendenziell sind die Werte der Pumpversuche etwas größer, teilweise erreichen diese jedoch das 4 bis 8-fache. Demgegenüber führt eine Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte mittels Absinkversuch bzw. aus der Kornverteilung im vorliegenden Fall überwiegend zu wesentlich geringeren Werten. Diese betragen teilweise nur 20 bis 40% der Werte der Versickerversuche. Ein Ansatz letztgenannter Werte für eine Brunnendimensionierung würde zu einer vielfachen Anzahl der Brunnen führen. Die Vorgehensweise einer zutreffenden Versuchsdurchführung entsprechend der späteren Funktion der Brunnen ist daher zielführend und kostensparend.

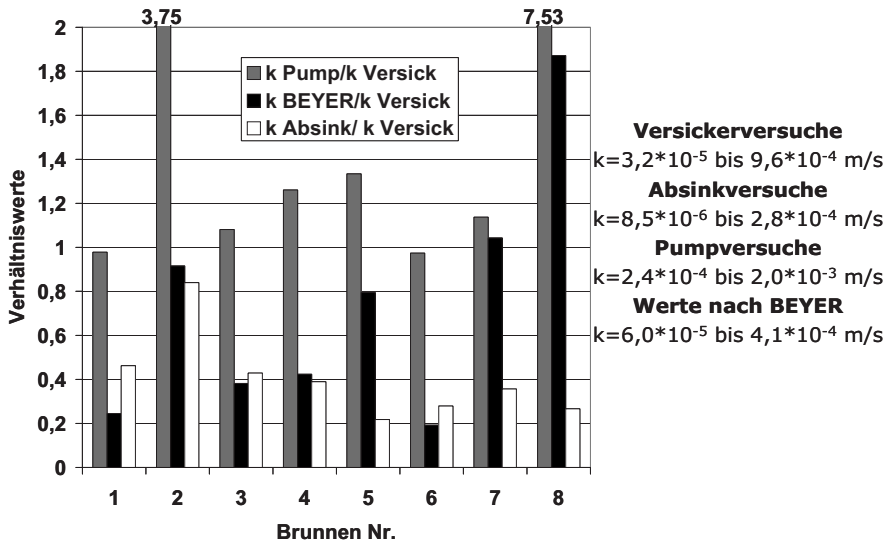


Bild 9: Vergleich der Durchlässigkeitsbeiwerte ermittelt nach verschiedenen Verfahren

4.3 Versickerbecken 2

Der Nachweis der Funktion der Entwässerungsanlage soll nachfolgend am Beispiel des Versickerbeckens 2 (Bild 10) beschrieben werden. Das Versickerbecken 2 liegt an der Kreuzungsstelle der B 96a mit der A 113 (siehe Bild 3) und damit an einem Geländetiefpunkt (siehe Bild 2). Die Einzugsfläche für das Becken beträgt ca. 7000 m² versiegelte Fläche. Der HWG₁₀ liegt hier bei 37,5 m NN, die Oberkante der Drainageschicht bei 38,8 m NN. Für eine Regenhäufigkeit von $n = 1$ (Regenereignis, welches im Mittel 1mal pro Jahr auftritt) ergibt sich ein Füllstand im Becken bei 39,2 m NN, für eine Regenhäufigkeit von $n = 0,1$ (Regenereignis, welches im Mittel 1mal in 10 Jahren auftritt) ergibt sich ein Füllstand im Becken bei 39,77 m NN. Daraus ergeben sich Aufstauhöhen über dem HWG₁₀ von 1,7 m bzw. 2,27 m.

Die für das Becken ausgebauten Brunnen sind jeweils 30 m tief und liegen 45 m auseinander. Die Filterlänge beträgt 10 m für Brunnen 9 und 6 m für Brunnen 10. Die Versickerleistung ist sehr unterschiedlich und liegt zwischen 2 m³/h und 32 m³/h bei Aufstauhöhen von 1,2 m (Bild 7). Die beiden Extreme kennzeichnen die sehr wechselhaften Untergrundverhältnisse bezüglich der Durchlässigkeit der unteren Sande an den Brunnenstandorten.

Die Entleerung des Versickerbeckens sollte innerhalb von 12 Stunden erfolgen. Für das einjährige Regenereignis ergab sich eine Füllmenge von 188 m³, für das 10-jährige Regenereignis eine Füllmenge von 534 m³. Zur Sicherstellung der gewünschten Beckenentleerung in 12 Stunden ergeben sich hier mittlere Versickerraten von 16 m³/h bzw. 44,5 m³/h. Die erstgenannte Versickerrate konnte mit den Versickerversuchen nachgewiesen werden (Bild 7). Nach Extrapolation der Ergebnisse der Versickerversuche konnte auch die Versickerrate von 44,5 m³/h nachgewiesen werden. Zusätzlich wurde am Brunnen 10 noch ein Pumpversuch ausgeführt. Mit diesem wurde bei einer Absenkung von 2,65 m eine Förder-

leistung von $72 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Setzt man die 2,65 m als Überstauhöhe an, so entspricht der ermittelte Wert hier einer extrapolierten Versickermenge.



Bild 10: Versickerbecken 2 A 113 / B 96a

4.4 Wartung der Brunnen

Zur Überprüfung der Versickerleistung und zur Reinigung der Brunnen sind alle 3 Jahre Pumpversuche an den einzelnen Brunnen auszuführen. Sollte die Leistung der Brunnen in diesem Zeitraum extrem nachlassen, ist ein Neubau einzelner Brunnen möglich. Diese Aufwendungen stellen immer noch eine kostengünstige Alternative zum ursprünglich geplanten Entwässerungskonzept dar.

5 Fazit

Mit der gewählten Variante der Versickerbrunnen, welche bereits im Zuge der Planung ausgebaut und in ihrer Funktion nachgewiesen wurden, konnte eine kostengünstige Variante für die Verbringung des anfallenden Regenwassers ausgeführt werden. Gegenüber der ursprünglichen Planung konnte auf 2 Pumpwerke, 2 km Druckrohrleitung und eine Unterquerung der Bahnanlagen verzichtet werden. Durch den Wegfall dieser Anlagen wurden weiterhin die betriebsbedingten Aufwendungen (Energiebedarf, Auswechseln von Pumpen) für mehrere Jahrzehnte stark reduziert. Aus Umweltsicht wurde im Hinblick auf die im Land Brandenburg problematische Grundwasserneubildung nachhaltig etwas getan. Diese

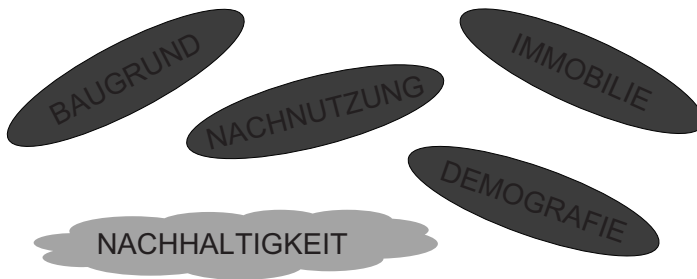
Feststellung wurde durch die für die Genehmigung der Anlagen zuständige untere Wasserbehörde bestätigt.

6 Literatur

- /1/ Zech, A.; Schüßler, M. „Vorgutachten BAB A 113 – Neubau, Stadtgrenze Berlin bis km 3,150 der BAB A 113 (alt)“, Baugrund Berlin Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin, 1994 (unveröffentlicht)
- /2/ Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2005
- /3/ Rieß, R. „Grundwasserströmung – Grundwasserhaltung“ in Grundbautaschenbuch, 5. Auflage, Teil 2, Ernst & Sohn, Berlin, 1996

Flächenrecycling im Kontext Flächenkreislaufwirtschaft - Brachen & Nutzungsszenarien

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich
TU Bergakademie Freiberg, CiF e.V., Freiberg



*... es geht nun eine nachhaltige Flächennutzung als Beitrag zum Flächenmanagement ...
sowohl in Stadtentwicklung wie auch Bergbaufolgelandschaft*

Vorbemerkung zur "Nachhaltigkeit in der Geotechnik"

Ich begrüße die THEMEN-Initiative des diesjährigen Geotechnik Tags hier an der TU München

GEOTECHNIK heißt Ingenieurkunst ins Wirtschaftsleben einspeisen



in der Bauwelt & Bergbauwelt

INFRASTRUKTUR-Projekte ob große Tunnelbauwerke, Staumauern/Dämme
oder Schutz vor GEOHAZARDS'

stehen unter dem Aspekt Nachhaltigkeit oft im FOKUSS'

Heute möchte ich Ihnen etwas mehr alltägliches - sprich etwas aus der Nachbarschaft aufzeigen. (siehe Begriffe)

- in meinem Vortrag → Beispiele in PLANUNG & AUSFÜHRUNG - best practice Bsp. - zur "gelebten" Nachhaltigkeit aufzeigen
- auch im Kontext KOMMUNIKATION & Sensibilisierung - eine wichtige Rolle unseres Berufsstandes
- das Alles natürliche im interdisziplinären Umfeld ...

Einbettung

Das Thema Wiedernutzung von Flächen und deren Konzeption - häufig genannt: Brachen, nichtbetriebsnotwendige Flächen, Stillstandsbereiche, Kippengelände, Halden, ehemalige Betriebsflächen usw. - in den Industriebereichen Bergbau, Veredlungsindustrie, Stahl, Chemie sowie Konversionsflächen, Liegenschaften von Sondervermögensträger wie Post, Telekom, Deutsche Bahn, aber auch Kommunen stellt eine komplexe Aufgabe dar.

Der Beitrag behandelt den Schwerpunkt "Nutzungsstrategien", Pflichten ehemaliger Betreiber bzw. der Folgeeigentümer, eingebettet in regionale Planungskonzeptionen sowie Chancen, auch unter Würdigung der kommunalen Planungshoheit in Deutschland.

Die Rolle des Investors und/oder die Umsetzung einer neuen Nutzungsidee ist hierbei von zentraler Bedeutung.

Die Einbeziehung der stetig wachsenden Rolle der "erneuerbaren Energien" im Prozess der Strategien zum Klimawandel rückt die Flächenpotentiale der Brachen in eine neue, positive Dimension, ähnlich dem Stimmungswechsel in der Landwirtschaft.

Nachwachsende Rohstoffe oder ein "Solar-Feld" sind prominente Beispiele - bei belasteten Brachen auch unter den Gesichtspunkten der Schadstoffaufnahme respektive der Optimierung i. S. Minimierung des Sanierungsaufwandes.

"Brownfields" ist der eingebürgerte Begriff.

Bild 2 führt näher in die Thematik ein - vom Baugrund bis zur Stadtentwicklungsplanung mit Verweis auf die interdisziplinären Themenfelder des CiF e. V. (Kompetenzzentrum für interdisziplinäres Flächenrecycling, www.cif-ev.de) mit Technik/Ökonomie/Ökologie/Recht.

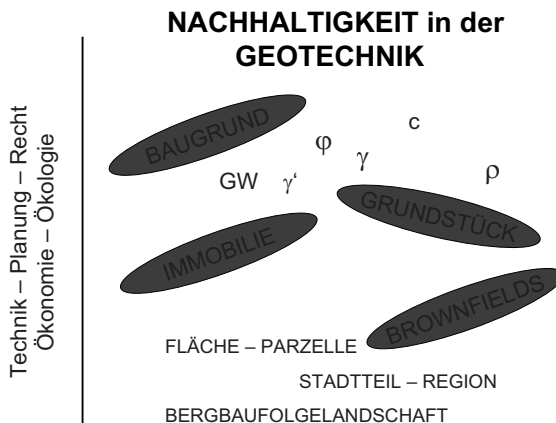


Bild 2

Die "Bezugsgröße" Klimawandel wirkt natürlich auch in unsere Bauwelt, Stichwort "Nachhaltiges Bauen". Bild 3 zeigt ein Beispiel aus Freiberg.

Wettbewerb „Ab in die Mitte“

Erster Preis für Freiberg

„Schlossplatz im Klimawandel“ überzeugt



Überreichen Oberbürgermeister Bernd-Erwin Schramm (2.v.l.) und dem Stadtentwicklungsdezernenten Holger Reuter (2.v.r.) die Urkunde als Preisträger des fünften Wettbewerbs „Ab in die Mitte - Prima-Stadt-Klima“ 2008: Wirtschaftsminister Thomas Jurk (r.) und Hans-Joachim Wunderlich, Hauptgeschäftsführer der IHK Südwestsachsen. Foto: PS

Die Stadt Freiberg hat mit ihrem Beitrag zum jährlichen Wettbewerb „Ab in die Mitte“, gepunktet. Die City-Offensive Sachsen stand 2008 unter dem Motto „Prima-Stadt-Klima“. Freiberg erhielt für seine Ideen zur Umgestaltung des Schlossplatzes „Schlossplatz im Klimawandel“ mit Integration einer „Erlebnis-Tiefgarage“ den ersten Preis. Diesen konnten Oberbürgermeister Bernd-Erwin Schramm und Stadtentwicklungsdezernent Holger Reuter in der vergangenen Woche gemeinsam von Wirtschaftsminister Thomas Jurk und Hans-Joachim Wunderlich, Hauptgeschäftsführer der IHK Südwestsachsen, in Empfang nehmen.

Bereits 2004 hatte Freiberg mit seinem Wettbewerbsbeitrag „Ab in die Mitte - ab ins Schloss“ überzeugt und einen dritten Platz errungen.

In diesem Jahr waren 20 Projekte eingereicht worden, die alle Ideen aufzeigten, wie Energie- und Klimabewusstsein nicht nur verbessert, sondern in eine moderne Stadtgestaltung eingebunden werden kann. Die Abschlussveranstaltung des diesjährigen Wettbewerbs findet während der Euregia auf der Leipziger Messe am 28. Oktober statt.

Ab in die Mitte ist eine Initiative der privaten Wirtschaft mit dem Freistaat Sachsen im Zusammenhang mit PPP. Ziel ist es, Impulse für die städtebauliche Erneuerung zu geben sowie mehr Besucher ins Zentrum zu ziehen und die Innenstadt zu stärken.

www.abindiemitte-sachsen.de

Bild 3



Bild 4

Der Begriff der Nachhaltigkeit ist heute im öffentlichen Bewusstsein, und er wird auf viele Bereiche unseres täglichen Lebens angewendet. Beim Bauen, in der Architektur, noch recht unpräzise und schwer definierbar.

Der Begriff kommt ursprünglich aus dem Forstbau und bedeutet erst ein mal nichts, anderes als dass nicht mehr Holz geschlagen werden sollte, als im gleichen Zeitraum nachwächst. Somit ist im übertragenen Sinne zu deuten, dass wir nicht mehr Ressourcen verbrauchen sollten, als unser Planet im gleichen Zeitraum produziert.

Der Begriff Nachhaltigkeit wurde erstmals im 18. Jahrhundert vom Freiburger Berghauptmann Hans von Carlowitz (1713) geprägt und erwähnt (Bild 4). Obwohl die Begriffsbestimmung hierbei auf die Forstwirtschaft zurück geht, ist das erste Mal von einer Art Flächenmanagement die Rede. Holz war zum damaligen Zeitpunkt einer der wichtigsten Rohstoffe für den Bergbau. Ziel der Nachhaltigkeit ist es, ökologische, ökonomische und soziale Bedürfnisse zu vereinigen und dadurch für zukünftige Generationen nutzbar zu machen.

Das notwendige interdisziplinäre Wechselspiel zur Gestaltung der Nachhaltigkeit ist im Bild 5 erfasst.

Sustainability

- **Sustainability:**  The ability to meet present needs without compromising those of future generations

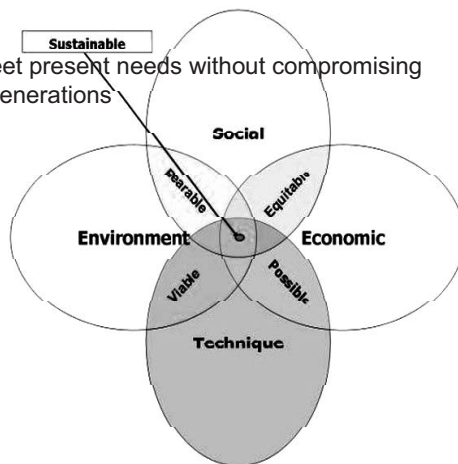


Bild 5

FLÄCHENRECYCLING - FLÄCHENMANAGEMENT

Nutzungs- und Aktivierungsstrategien

Zur Aktivierung und Entwicklung von Flächenpotenzialen ist eine Kooperation von privaten und öffentlichen Planungen und Umsetzungsstrategien notwendig, da eine einseitige Strategie nicht immer den gewünschten Effekt bietet. Dies eingebettet in die Landes- und Raumplanung eröffnet neue und zielführende Lösungen.

Durch Sanierungstechnologien können „genutzte“ Flächen wieder z.B. in „Grün-Flächen“ umgewandelt werden. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk von solchen Recyclingprozessen in der Kombination von Dekontaminationsprozessen mit der Wiedereingliederung der Fläche in die Umgebung.

Um Freiflächenpotenziale zu schaffen bzw. zu erhalten, sind oft Zwischennutzungen, Umnutzungen u. ä. von bebauten Flächen notwendig. Eine Möglichkeit für den Eigentümer sind Gestattungsvereinbarungen, d. h., Flächen werden mit kommunalen Mitteln mobilisiert und für die Allgemeinheit zugänglich gemacht, der Eigentümer kann die Fläche aber dennoch vermarkten. Grob können aber bei der Revitalisierung von Flächen drei Strategien unterschieden werden:

- Aktivierung (Entwicklung).
- Bewahrung.
- Renaturierung.

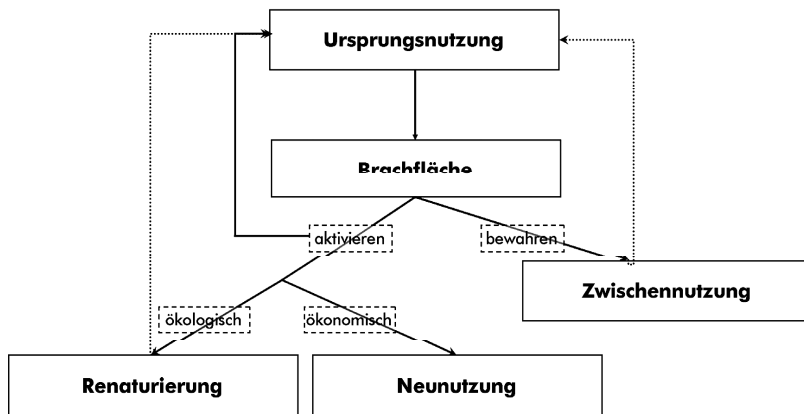


Bild 6

Welche dieser drei Entwicklungsmöglichkeiten dabei angewandt wird hängt jeweils von der Ursprungsnutzung ab. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass Flächen immer im Sinne eines Flächenkreislaufes betrachtet und somit auch genutzt werden können (Bild 2). Diese drei Arten können nun weiter feiner untergliedert werden in:

- Aktivierung (Neunutzung, Ursprungsnutzung)
Unter dem Begriff Aktivierung werden Prozesse verstanden, die längere Zeit (mehrere Jahrzehnte) Gültigkeit haben sollen. Es werden hierbei zwei Strategien unterschieden:

- Unter dem Begriff „*Neunutzung*“ werden Aktivitäten zusammengefasst, wenn eine Fläche einer völlig neuen Nutzung (gewerbliche Nutzung) zugeführt wird. Dieser Prozess dauert jedoch oft mehrere Jahre und verursacht Vorinvestitionen, was zu einem Planungs- und Marktrisiko des Investors führt. Hemmend können hierbei z.B. Nutzersuche, Planungsverfahren oder die Projektierung wirken. Eine Umwandlung in Land- und forstwirtschaftliche Fläche wird als Renaturierung bezeichnet und ist als separater Punkt aufgeführt.
- Der Begriff „*Ursprungsnutzung*“ impliziert bereits, dass darunter die letzte industrielle oder gewerbliche und somit ursprüngliche Nutzung verstanden wird. Nicht mehr benötigte Areale werden meist als nicht betriebsnotwendig bezeichnet und abgerissen. Die Fläche kann aber auch als Lager und Bürogebäude genutzt werden.

- *Bewahren (Umnutzung, Zwischennutzung)*

Unter dem Begriff Bewahren kann die Strategie der Umnutzung verstanden werden. Hierunter werden Nutzungsänderungen zusammengefasst, die sich von der vorgenannten ursprünglichen Nutzung wegbewegen. Das heißt die Fläche wird entweder anderweitig nachgenutzt oder teilweise bzw. temporär umgenutzt.

Zwischennutzung fasst hiermit alle Zustände zusammen die temporärer Natur sind. Oft besetzen sie Terrains in einer Umgebung, die primär nicht als geeignet für Umnutzungen erscheint. Ihr Merkmal sind ein niedriger Nutzungsgrad, niedrige Mieterträge und hohe Unterhaltskosten. Zwischennutzungen bleiben oft jahrelang bestehen, bis der Eigentümer eine ertragssteigernde Umnutzung vornimmt.

- *Renaturierung*

Eine dauerhafte ökologische Umnutzung brachliegender Standorte zu Grün- bzw. Freiflächen wird als Renaturierung verstanden. Insbesondere im suburbanen Raum stellt die Nachnutzung von Brachenflächen vor dem Hintergrund fehlender Nachfragen und auf Grund der Lage benachteiligenden Standortbedingungen ein wesentliches Hemmnis dar. Erschient auf Grund der derzeitigen finanziellen Situation oder zukünftiger demographischer Entwicklungen eine Nutzung als nicht sinnvoll, wird Renaturierung als Alternative des Brachliegens näher betrachtet. Zur Beseitigung der vorhandenen ökologischen Missstände kommt es daher zur Renaturierung.

Bergbaufolgelandschaften werden meist vollkommen neu gestaltet, so dass ein Großteil der oben genannten Unterteilungen hier nicht anwendbar ist. Hauptziel der Renaturierung von Bergbauflächen ist die Langzeitsicherung und Stabilisierung der Flächen. Somit entsteht meist eine neue und innovative Nachnutzung, z.B. Erholung, Sicherung oder Naturschutz. Da bei Bergbaufolgelandschaften jedoch als Ursprungsnutzung die natürlich entstandene Landschaft verstanden werden kann, ist in diesem Fall die Renaturierung auch eine Art Ursprungsnutzung (siehe Abbildung 2).

Dennoch stellt sich oft die Frage wie nachhaltig sind die einzelnen Nutzungsszenarien? Denn betrachtet man den Lebenszyklus Fläche, so werden zukünftigen Generationen nun in Nutzung befindliche Flächen als Brachflächen hinterlassen.

Beispiele für internationale Aktivitäten zur Thematik - von Konferenzen und Forschungsprojekten (Bilder 7 - 12):

*Machen wir
was draus!*

*Let's extract
the Value!*



Bild 7

International Conferences - organisation by ECI, New York -

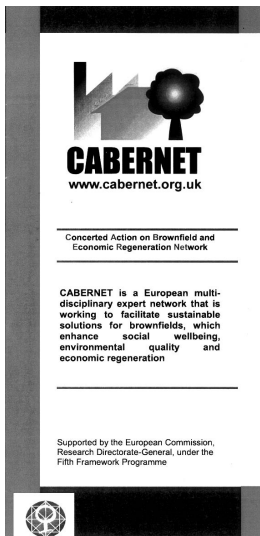
"Green Brownfields"

US-EPA, UBA, CiF

- | | | |
|--------|------|---------------------|
| No I | 2000 | Salt Lake City, USA |
| No II | 2003 | Dresden, Germany |
| No III | 2006 | Lerici, Italy |



Bild 8



CABERNET

*Concerted Action on Brownfield
and Economic Regeneration
NETwork*

EC - 5th framework program coordination:
University of Nottingham, UK
UBA, Germany

-21 europäische Länder-

Bild 9

Challenges and Opportunities for Sustainability

Environmental Technologies in the Context of Climate Change
Renewables Land Resources Financial Tools
US EPA UBA CiF e. V.

November 7-9, 2007

Naples, Florida, USA

Conference Chairs

Prof. Dr. **Herbert Klapperich**, CiF e. V., Germany

Dr. **Alan Hecht**, Director for Sustainable Development, US EPA, USA

Honorary Chair

Prof. Dr. **Klaus Töpfer**, Former Under Secretary General, United Nations

ECI Engineering Conferences International

6 MetroTech Center - Brooklyn, NY 11201, USA

Phone: 1-718-260-3743 - Fax: 1-718-260-3754

www.engconfintl.org - info@eci.poly.edu

Bild 10

Challenges and Opportunities for Sustainability

Environmental Technologies in the Context of Climate Change
Renewables Land Resources Financial Tools
US EPA UBA CiF e. V.

November 7-9, 2007
Naples, Florida, USA

Session I: Urban sustainability

Session II: Energy / Renewables

Session III: Geohazards

Bild 11

Mary Lou „Sustainability“, 1998

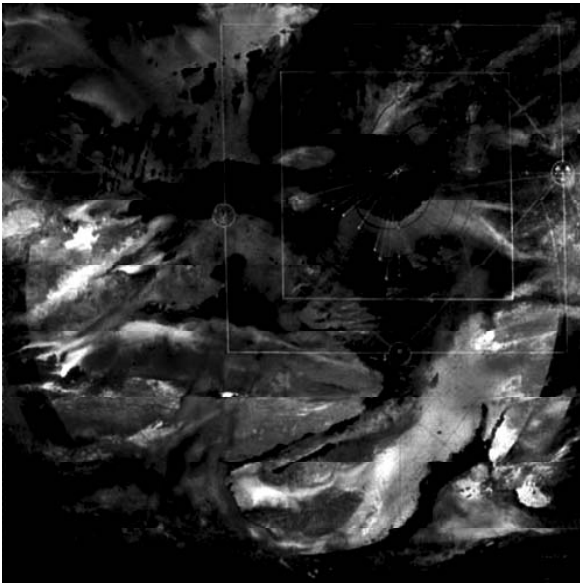


Bild 12

Der Begriff Altlasten impliziert Kontaminationen von Boden und Grundwasser. Ich erinnere an die immer intensivere Befassung mit Sanierungs-respektive Sicherungsverfahren im Rahmen unserer Umweltgeotechnik - heute eine Fachsektion in der DGGT. Neben Impulsfragen wie "how clean is clean" und Diskussionen zu Sanierungszielen entwickelten sich technisch machbare Sanierungstechniken - auch unter ökonomischen Gesichtspunkten.

Die Bilder 13 und 14 dienen der Illustration hierzu.



Bild 13

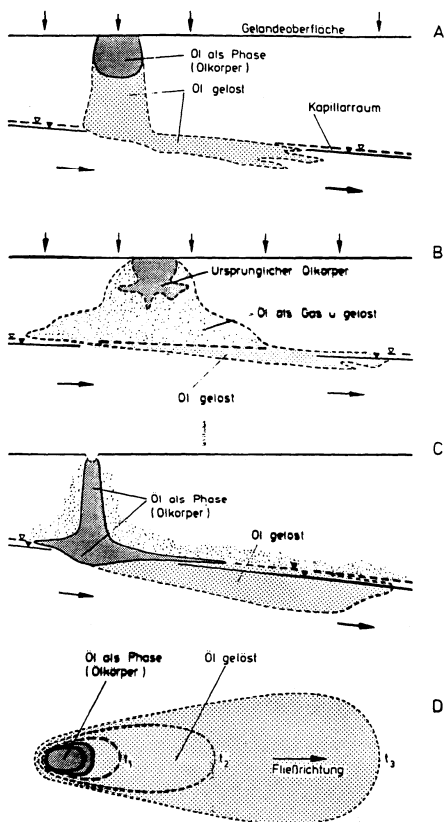


Bild 14

Das wichtige Bundesbodenschutzgesetz (1998) würdigt die Bedeutung des Bodens und damit unseren Baugrund. Beim Schutzgut "Grundwasser" wird die Bedeutung der Nachhaltigkeit offensichtlich.

Bild 15 verbindet die beiden Medien zur Flächenkreislaufwirtschaft.

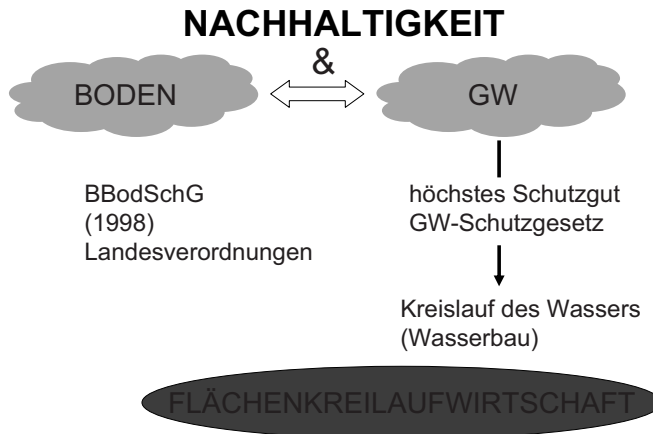


Bild 15

Bauen im Grundwasser stellt eine interessante Aufgabe dar, eine interdisziplinäre mit der zentralen Rolle der Geotechnik.

Bild 16 erläutert als gutes Beispiel die "Grundwasserschonende Bauweise" mit der Wand-Sohle-Methode zur Schaffung einer tiefen Baugrube im Aquifer.

Geotechnik-Rolle

auch **BAUEN in GW**

Bsp. **grundwasserschonende Bauweise**

BERLIN
Potsdamer Platz
Infrastruktur – VZB –
= Tunnel - Bahn/Straße =
Regierungsviertel

Hauptbahnhof

Reichstag

Tiefe Baugruben

*WAND-SOEHLE
Bauweise*

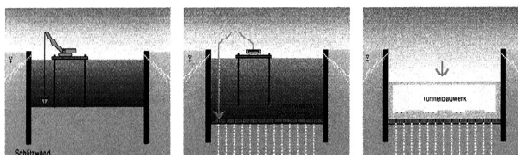


Bild 16

Flächenkreislauf

Ziel einer Nachnutzung von Flächen ist die Betrachtung der Fläche als Kreislauf (Flächenkreislauf). Hierbei spielt es prinzipiell keine Rolle ob es sich um innerstädtische bzw. suburbane Flächen oder um Bergbaufolgeflächen handelt. Die Nutzung von Flächen ist nicht auf eine Funktion beschränkt, was gerade bei der Nachnutzung von Bergbaufolgelandschaften zum Ausdruck kommt. Vielmehr müssen bei Flächennetzentwicklungsplanungen eine Vielzahl von potenziellen und tatsächlichen paralleler Nachnutzungen für Flächen und Regionen betrachtet werden. Erst bei der Umsetzung kann dann entschieden werden, welche Nutzungen konkurrieren bzw. störend fungieren. Aufgrund von Vermarktungs- oder Entwicklungsproblemen können viele Flächen jedoch keinen geschlossenen Kreislauf aufweisen und somit nicht zu einer nachhaltigen Nutzung beitragen.

Heute ist das Wort Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung nicht nur im Rahmen der Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und der Entwicklung von Brachen und Bergbaufolgelandschaften in aller Munde, sondern gewinnt auch bei der Klimadiskussion und konkreten Maßnahmen an Bedeutung.

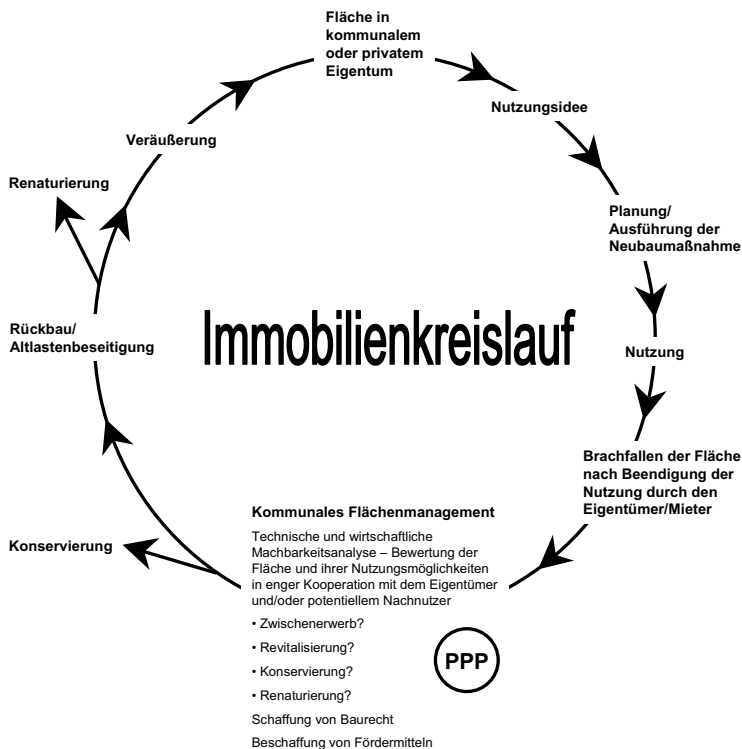


Bild 17

Nachhaltige Nutzung

Erfassungs- und Bewertungssysteme von innerstädtischen Brachen

Eine Vielzahl von „Best-Practice“-Beispielen haben gezeigt, dass Erfolge erreicht werden können, wenn neben den ursprünglichen drei Nachhaltigkeitsgedanken (sozial-ökonomisch-ökologisch) auch die demographische Entwicklung und die umweltrechtliche Betrachtungsweise mit integriert werden. Dies erweist sich derzeit jedoch als schwierig, vor allem vor dem Hintergrund des städtischen Rückbaus. Hierbei werden teilweise kostenintensive Gebäude (i. S. Unterhalt und Betrieb) unter dem Vorwand des demographischen Wandels mit Hilfe von Fördermitteln abgerissen, eine sinnvolle nachhaltige Nutzung fehlt jedoch oft völlig. Positive Beispiele sind die vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung initiierten Programme „Stadtumbau Ost“ und „Stadtumbau West“.

Es gibt eine Vielzahl von Schritten, die bei der Entwicklung von Brachflächen eine Rolle spielen. Fast alle Flächen sind bereits in Katastern, wie Brachflächenkatastern oder Altlastenkatastern, oder sonstigen Datenbanken erfasst. In solchen Katastern sind meist die Grundinformationen dargestellt und aufgelistet. Aber nicht alle erfassten Flächen sind als prioritäre Entwicklungsfelder im Sinne der Stadtentwicklung zu sehen. Vier Flächentypen A, B, C, D, von "Selbstvermarkter" bis "Nichtveräußerbarer" können zu einer erfolgreichen Entwicklung im Rahmen der Stadt- oder Landschaftsentwicklung beitragen. Hierbei ist eine Filterung der Flächen zielführend, was jedoch mit einem erhöhten Informationsbedarf bezüglich der Einzelflächen verbunden ist.

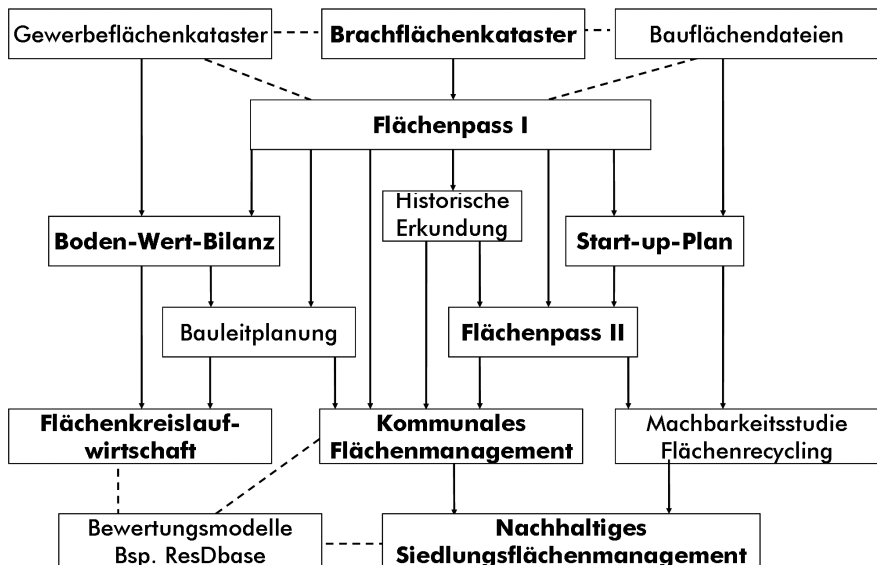


Bild 18

Schema Nachhaltiges Siedlungsmanagement

Bei politischen Entscheidungen und Diskussionen wird Nachhaltigkeit und Brachflächenentwicklung oft im selben Zusammenhang genannt. Internationale Netzwerke wie CLARINET (Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies in Europe) oder CABERNET zeigen, dass bereits verschiedenste Konzepte für eine Entwicklung von Brachflächen existieren. Bei der Entwicklung von Flächen sind oft Zwischenschritte notwendig um den gewünschten und geplanten Erfolg zu erhalten. Dennoch fehlt oft eine Strategie für ein erfolgreiches Flächenmanagement. Entwicklungskonzepte zeigen, dass mit der Entwicklung der Brachfläche zum einen aktuelle Probleme gelöst werden können und andererseits auch eine sozioökonomische Aufwertung der Fläche bzw. eines Quartiers stattfindet.

NACHHALTIGKEIT - SUSTAINABILITY

Bild 19 zeigt Beispiele für die Verwendung des Begriffs, auch in der Flächenpolitik.

Das CiF e. V.-Engagement dient auch der Initiative zur Reduktion des Flächenverbrauchs, in Deutschland z. Zt. über 100 ha pro Tag.



Bild 19

INITIATIVE Flächenverbrauch reduzieren → jetzt!

Der Rat für NACHHALTIGE Entwicklung unterstrich in seiner Stellungnahme vom 22.04.2008

"Welche Ampeln stehen auf ROT?"

den Stand der 21 Indikatoren der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (Rat für nachhaltige Entwicklung)

hier: FLÄCHENINANSPRUCHNAHME
Siedlungs- und Verkehrsfläche

- ❖ Die Ampel zeigt ROT für die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen
- ❖ Ziel: 30 ha pro Tag im Jahr 2002 formuliert
- ❖ Erreichte Werte:

2000	131	}	ha pro Tag
2005	118		
2006	113		

IST-Situation

- ❖ Sachsen 2007 ca. 11 ha pro Tag
- ❖ NRW 2007 ca. 15 ha pro Tag
– NRW-Ziel: 5 ha/d in 2020 –
- ❖ Hamburg 30 ha-Ziel in der Real-Politik/Umsetzung des schwarz-grünen Senats angekommen
"Flächenpfand" und Abgaben auf Neuverbrauch sollen Raubbau stoppen im Kontext "Bewahrung der Schöpfung - Klima-, Umwelt-, Verbraucherschutz"
- ❖ Bayern 2008 16,1 ha pro Tag

Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung bedarf der Umsetzung in Ländern und Kommunen!

Zielführend:

Brachen, Bergbaufolgefleichen & Großflächen mit schädlicher Bodenveränderung für NaWaRo – unkritische Erzeugung von Biomasse – nutzen!

Die Kopplung von FLÄCHE & ERNEUERBARE Energie ist ein Weg mit Potential zum Erreichen des

Ziels 30 ha/Tag

mit interkommunaler Kommunikation/Kooperation.



Verstetigung in der Praxis durch
LÄNDER & REGIONEN & KOMMUNEN

Ziel → Symbol für Erfolg/Misserfolg
der Nachhaltigkeit 30 ha/Tag

www.cif-ev.de

Bild 20

CiF-Engagement

- Interdisziplinärer Ansatz
- Nachhaltige Flächenentwicklung
auch temporäre Zwischennutzung

INNENENTWICKLUNG Städte

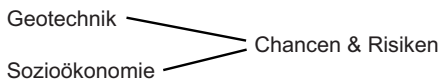


Bild 21

FORSCHUNG & WISSENSTRANSFER

Die Bilder 22, 23, 24, 25, 26 beziehen sich auf ein BMBF-Forschungsvorhaben REFINA zum Thema, sowie "Nachhaltiges Landesmanagement".

Wissenstransfer

Projekt-/Umfeld – Beteiligte stakeholders

- Kommunen
 - Planungshoheit in Deutschland
- Eigentümer/Investoren
- Banken/Versicherungen
 - Risiko-Versicherung
 - Beteiligung „Dritter“
- PLANER
- GEOTECHNIKER

BMBF-Forschungsprojekt REFINA

- Projekte
 - WISSTRANS
 - Präsenzveranstaltungen
 - ELNAB

www.flaechen-bilden.de
www.refina-info.de

Bild 22

WissTrans → Blended Learning

REFINA-Projekt

VEGAS – CiF e. V. – RUB – Dr. Ertel

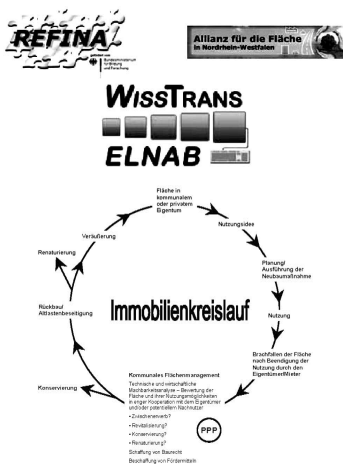
Flächen- management	2008		Freiberg	(CiF e.V.)
Gewerbegebiete	2008		Esslingen	(VEGAS)
	2009	20. Januar	Ruhr Universität Bochum	(CiF e.V./RUB)
	2009	22. Januar	Leonberg	(VEGAS)
Stadtumbau	2009	14. März 05. Mai	Freiberg Görlitz	(CiF e.V.) (CiF e.V.)

Bild 23

Gewerbegebiete

Eine der knappen Ressourcen im dicht besiedelten Nordrhein-Westfalen sind Flächen. Die bundespolitische Vorgabe respektive Zielsetzung von 30 ha/d an Flächenverbrauch bis 2020 - auch eine Empfehlung für die Nachhaltigkeit in Stadt & Land - kann nur "vor Ort", sprich in den Kommunen mit ihrer Planungshoheit, umgesetzt werden. Der häuslicherische Umgang mit Freiflächen - innerstädtisch und den Bergbaufolgelandschaften - führt zur Wiedernutzung von Brachflächen, auch mit interkommunaler Kommunikation & Kooperation. Um ältere Gewerbegebiete auch zukünftig effizient zu nutzen, sind Konzepte für deren Modernisierung oder Anpassung an die aktuellen Ansprüche von Unternehmen, aber auch Kommunen erforderlich - ein komplexes Unterfangen.

WISS Trans - Wissenstransfer durch innovative Fortbildungskonzepte beim Flächenmanagement/Flächenrecycling: Ziel dieses Vorhabens ist die Vermittlung von praxis-orientierten Erkenntnissen und Vorgehensweisen durch eine Fortbildungskonzept, das Präsenzveranstaltungen und E-Learning (zeitlich und räumlich unabhängiges Lernen am Computer) kombiniert.



Neue Ansprüche an Gewerbegebiete – Effiziente Flächennutzung im Kontext Stadtteilentwicklung

REFINA-Seminar

20. Januar 2009
Ruhr-Universität Bochum



unterstützt durch Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen & Allianz für die Fläche NRW



Bild 24

Aktuelle Forschung (Folge REFINA)

„Nachhaltiges Landmanagement“ - BMBF -

Modul A:

„Wechselwirkungen zwischen Landmanagement, Klimawandel und Ökosystemdienstleistungen“

Zwischen Landmanagement und Klimawandel besteht ein komplexes und mehrdimensionales Geflecht von Wechselwirkungen und Rückkopplungsmechanismen.

Modul B:

„Innovative Systemlösungen für ein nachhaltiges Landmanagement“

Regionale Wertschöpfungsnetze sind eine Grundlage für eine integrierte Stadt-Land-Entwicklung. Globale Veränderungen, vor allem die Entwicklungen auf den globalisierten Agrar- und Rohstoffmärkten aber auch Phänomene wie Landflucht-/ Fleischkonsum oder regionale Auswirkungen des Klimawandels erfordern eine flexible und vorausschauende Anpassung von Landnutzungssystemen.

Bild 25

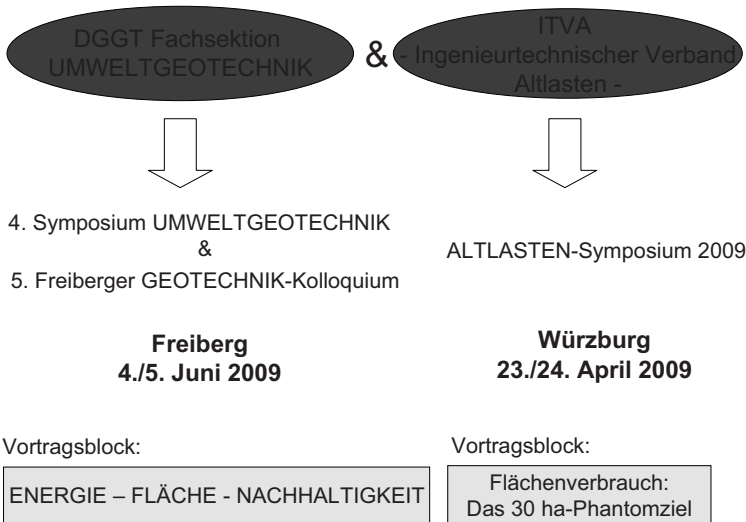


Bild 26

SCHLUSSBEMERKUNG

Das "PISA-Ensemble" ist unter dem Aspekt "Nachhaltigkeit" ein hervorragendes Beispiel für die Nahtstelle von Baukunst & Geotechnik - nicht nur für die Vermittlung der Konsolidierungstheorie.

GEOTECHNIK for ever

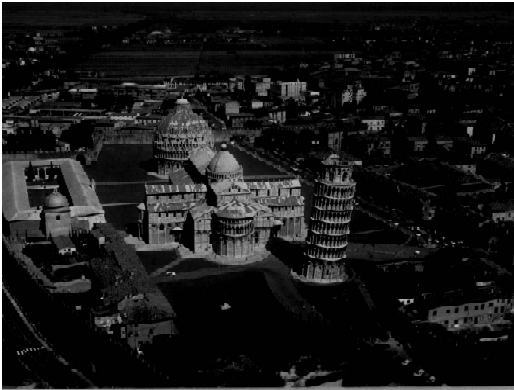


Bild 28



„... und wir können 700 Lira sparen, wenn wir keine Bodenproben nehmen!“
Bild 29

Zur Umsetzung der Ingenieurkunst in der Geotechnik hilft das Schlussbild



Schlussbild

Literatur

- Aigner, B.; Klapperich, H.; Jacob, D.: Public Private Partnerships for Brownfields. ECI International Conference on Green Brownfields II - Volume 2, Dresden, 15. - 19. Juni 2003, CiF e. V. publication 1 - 2003, S. 217 - 219, ISBN 1613-4753
- Klapperich, H.; Hanke, M.: Konzept - Interdisziplinäres Flächenrecycling - Nutzung von Chancen in der Planung, Sanierung, Finanzierung und Vermarktung. in: Neue Landschaften, Bergbauregionen im Wandel - Dokumentation des Fachkongressen auf der Euregia, Leipzig, 27. - 30.10.2004, Hrg. Sächsisches Staatsministerium des Innern, S. 23 - 26
- Klapperich, H.; Jacob, D.; Azzam, R.; Wolf, R.: Der Interdisziplinäre Ansatz für ein erfolgreiches Flächenmanagement - ein Markt! Tagungsband zum Altlastensymposium 2005, Köln, 17./18.03.2005, ITVA und AAV, S. 94 - 109
- Klapperich, H.; Hanke, M.; Azzam, R.; Jacob, D.: Von der Altlastensanierung zum Flächenmanagement - der interdisziplinäre Ansatz. Geotechnik 28 (2005) Nr. 3, S. 171 - 180, ISSN0172-6145
- Hanke, M.; Klapperich, H.: Passierschein für die Wiedernutzung - Der Flächenpass. In: MehrWert für Mensch und Stadt : Flächenrecycling in Stadtumbauregionen. Dokumentation des 1. Workshops "Flächenrecycling in Stadtumbauregionen" 20./21. September 2005, Freiberg/Sachsen, ISBN 3-934409-29-6, S. 125 - 128
- Otparlik, R.; Klapperich, H.; Fritz, E.; Eisenblätter, A.; Hanke, M.: "Green Brownfield Approach" Aspekte der Nutzung von Brachflächen. In: Klapperich, H.; Konietzky, H. (Hrsg.): Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2007-2, Geotechnik-Kolloquium "Geotechnik im Verkehrsbau/Infrastrukturmaßnahmen – national & international –" am 30. März 2007 an der TU Bergakademie Freiberg, ISSN 1611-1605, S. 365 - 370
- Klapperich, H.; Franzius, V.; Medearis, D.; Shackelford, C. D. (Hrsg.): International Conference on Green Brownfields II - From Cleanup to Redevelopment. Schloss Pillnitz, Dresden, 15. - 19. Juni 2003, Verlag Glückauf, Essen, 392 S., ISBN 3-7739-5987-7
- H. Klapperich, D. Jacob, R. Azzam, R. Wolf (Hrsg.): CiF e. V. publication 5, 2007 (erschienen 2008), ISBN 1613-4753, 280 S. (Tagungsband 2007 Energie Fläche)

Das Tiefengeothermie Projekt Unterhaching

Dr. Dipl. Phys. Erwin Knappek

1. Vorsitzender des Wirtschaftsforum Geothermie e. V.

1 Allgemeines

Im Frühjahr 2002 wurde von der Gemeinde Unterhaching das kommunale Unternehmen Geothermie Unterhaching GmbH & Co. KG. Aufgabe und Ziel dieses Unternehmens ist es der in der Bayerischen Verfassung, Artikel 83 verankerten Verpflichtung zur Erfüllung der Daseinsvorsorge für die Bürgerschaft einer Kommune nachzukommen und eine zukünftige Versorgung der Ortschaft mit leitungsgebundener Energie sicher zu stellen. Darüber hinaus erkannte die Gemeinde Unterhaching frühzeitig im Rahmen des Klimawandels die Notwendigkeit des kommunalen Klimaschutzes. Um dieses Thema gezielt verfolgen zu können, wurde im Jahr 1997 ein kommunaler Energieatlas erstellt. Dieser Atlas beinhaltet eine Gesamtschau des Wärmebedarfs und des Bedarfs an elektrischer Energie auf Einzelhaus - Genauigkeit. Dieser Atlas enthält auch Vorschläge für strategische Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs sowie der Emissionen klimarelevanter Gase. Die ehrgeizigen Ziele der vorgeschlagenen Maßnahmen sind bis 2015 eine Energieeinsparung um 50% und eine Reduktion der CO₂ Emissionen von bis zu 80% zu erreichen.

Bereits im Herbst 2001 entschied sich die Gemeinde Unterhaching zur frühzeitigen Erfüllung des angestrebten Klimaschutzzieles den in etwa 3000 m Tiefe liegenden Heißwasserspeicher, den aus der geologischen Struktur bekannten Malm Karst, in der südbayerischen Molasse zur Wärmeversorgung und zur Erzeugung elektrischen Stroms zu nutzen und ein Geothermiekraftwerk zu errichten.

Nach Gründung der o. g. Gesellschaft wurde mit der Planung und Umsetzung des Projektes begonnen. Die Fertigstellung des Kraftwerks erfolgte im Jahr 2007. Während dessen Realisierungsphase stellte sich heraus, dass das Unterhachinger Projekt, Stromerzeugung durch Umwandlung geothermaler Energie in elektrische Energie, ein Pilotprojekt für die gesamte Branche ist und insbesondere auch für die Verwaltung neue Herausforderungen stellt.

2 Voraussetzungen: Das Potenzial der Tiefengeothermie in Deutschland

Mit Hilfe der tiefen geothermischen Lagerstätten in Deutschland, die mit heutiger Technik zugänglich sind, kann prinzipiell mehr als das 30-fache des jährlichen Bedarfs an elektrischer Energie abgedeckt werden. Bei der Wärmeversorgung ist es etwa das 600-fache.

Die ertragreichen hydrothermalen Gebiete in Deutschland befinden sich in der Norddeutschen Tiefebene, im Oberrheingraben und in der süddeutschen Alpenmolasse. In all diesen Lagerstätten gibt es Gebiete mit Wassertemperaturen über 100° C hinaus bis etwa 160° C. Dieser Temperaturbereich (Niederenthalpie) ist mit speziellen Dampfkreisläufen, wie z. B. Organic Rankine Cycle (das Dampfmedium ist ein organisches Fluid) oder Kalina Cycle (das

Dampfmedium ist ein binäres Gemisch aus ca. 85% Ammoniak und 15% Wasser) zum Betrieb von Dampfturbinen und damit zur Umwandlung der geothermischen Energie in elektrische Energie geeignet. Risiken sind bei der Erschließung dieser Ressourcen vor allem die Fündigkeit von ausreichenden und nachhaltigen Thermalwasservorkommen, die Durchlässigkeit der Lagerstätte, sowie die Hydrochemie des Thermalwassers insbesondere wegen hoher Salzgehalte und damit verbundener Probleme der Korrosion an oberirdischen Anlagen.

Aussichtsreichste Ressourcen



Region	Reservoir	Maximaler Volumenstrom [m³/h]	Elektrische Energie [EJ]	Installierb. Leistung [GW _{el}]	Produktion für 360 m³/h
Oberheingraben	Kristallin	100	62	20	hoch
Oberheingraben	Muschelkalk	300	0,2	0,07	mittel - hoch
Oberheingraben	Buntsandstein	200	2	0,7	mittel
Süddeutsches Molassebecken	Malmkarst	> 300	0,5	0,2	hoch

Jahresstrombedarf in Deutschland: 2 EJ

Quelle: Inst. f. Energetik, Leipzig 2005

Unter der Temperatur von 100° C bis etwa 65° C eignen sich die hydrothermalen Lagerstätten zur Nutzung für eine Fernwärmeversorgung. Beispiele dafür sind in Südbayern die Anlagen von Simbach-Braunau, Erding, Unterschleißheim, München-Riem und Pullach. In Mecklenburg-Vorpommern Waren und Neustadt-Glewe, die bereits vor der politischen Wende in Europa gebaut wurden.

Geothermische Kraftwerke im hydrothermalen Bereich sind: Neustadt-Glewe (seit 2004 mit einer ORC Anlage), Landau in der Pfalz (ORC), Unterhaching (Kalina) und Bruchsal (Kalina) sowie in Oberösterreich die Anlage in Altheim (ORC).

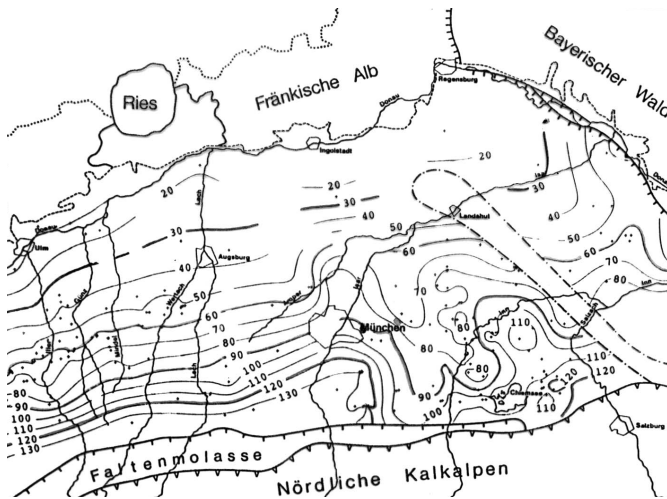
Ein noch größeres nutzbares energetisches Potenzial ist das gegenüber den Aquiferen tiefer liegende (ab 3000 bis etwa 7000 m) kristalline Gestein (Granit). Hier sind Temperaturen im Oberrheingraben bis zu 220° C zu erwarten. Das gesamte Reservoir liegt im Wesentlichen im Norddeutschen Becken, in Nordbayern, den deutschen Mittelgebirgen und im Oberrheingraben. Die Risiken der Nutzung dieser Ressource liegen in den längeren Bohrstrecken und im notwendigen Bau eines unterirdischen Wärmetauschers. Dazu erzeugt man unter sehr hohem Wasserdruck im kristallinen Gestein ein kilometerlanges Rissssystem. Andererseits ist man hier ortsunabhängiger als bei Aquiferen, hat kein auf Thermalwasser bezogenes Fündigkeitsproblem und keine Schwierigkeiten mit der Hydrochemie des Wassers. Die Erschließung ist als Hot Dry Rock Verfahren oder auch als Enhanced Geothermal System bekannt. Eine Pilotanlage, die mit dieser Technik errichtet wurde, befindet sich nördlich der Vogesen in Soultz-sous-Forêts und ist mit einem ORC Kraftwerk ausgerüstet. In Deutsch-

land ist man gerade dabei, in Groß Schönebeck (Brandenburg) eine Versuchsanlage zu bauen.

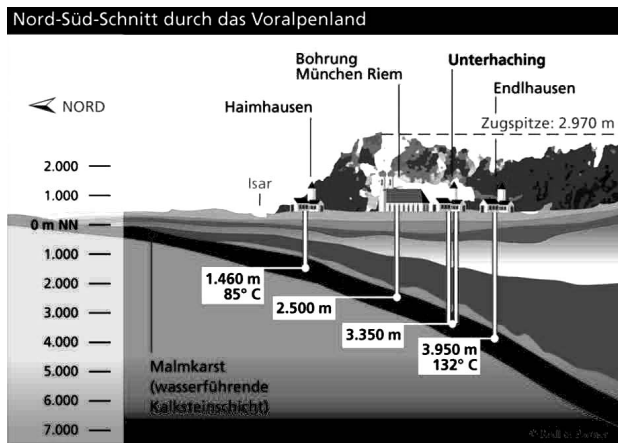
2.1 Das Projekt Unterhaching in der südbayrischen Molasse

2.1.1 Die Voraussetzungen für das Projekt

Der Thermalwasser führende Horizont in der südbayrischen Molasse ist ein Karst, der sogenannte Malm. Dieses geothermische Reservoir entstand als Meer zur Zeit der Alpenfaltung und erstreckt sich vom Fuß der Alpen bis zur Donau. Infolge zahlreicher Erdgas- und Erdölerkundungsbohrungen gibt es für diese Region eine sehr gute Datenbasis zur Bewertung der Temperaturen und zur Lokalisierung von großen Klüften und Störungen im Karst. Die Lokalisierung dieser Störungen im Karst ist unabdingbar für die erfolgreiche Erbohrung ergiebiger Thermalwasserhorizonte. Das Instrument für diese Lokalisierung ist ein Reprocessing von seismischen Daten, die durch gezielte 2D - oder 3D - Seismik in den meisten Fällen aufgrund der Erkundung von Kohlenwasserstoff Vorkommen von der Erdölindustrie bereits in früheren Zeiten durchgeführt wurde. Der für Unterhaching gültige Datensatz konnte von der DEA erworben werden. Das Reprocessing für den Malm wurde vom Institut für Geophysikalische-Gemeinschafts-Aufgaben (GGA) in Hannover (heute LIAG) bearbeitet. Ebenso lagen vom GGA nachvollziehbare Temperaturberechnungen für das Reservoir aus den vorhandenen Temperaturdatensätzen der Kohlenwasserstofferkundungsbohrungen vor. Aus diesen Voruntersuchungen entstand eine Machbarkeitsstudie mit vorläufigen Betriebsplänen durch den Hydrogeologen Johannes Ruhland, die Grundlage für die Beantragung einer bergrechtlichen Erlaubnis war. Die Eckwerte dieser Studie waren eine Temperatur des Thermalwassers von 115° C und eine Förderrate (Schüttung) von 150 l/s. Beide Daten wurden von der Behörde im bayrischen Wirtschaftsministerium stark in Zweifel gezogen. Dieser Zweifel fand auch einen entsprechenden Niederschlag im Bescheid für die Nutzung von nur etwa 20 km² als Erlaubnisfeld. Bergrechtliche Erlaubnisfelder sind nicht am Grundbesitz oder an Gemarkungsgrenzen gebunden, so dass die Fläche dieses Feldes größer war als die Fläche der Gemeinde Unterhaching, aber leider nicht so groß, dass nach unseren aus der Auswertung der Daten gewonnenen Erkenntnissen das Reservoir optimal hätte genutzt werden können.



Isothermen am Top Malm (Quelle R. Schulz; GGA (heute LIAG) Hannover)



Vereinfachter geologischer Querschnitt durch die südbayerische Alpenmolasse

Unser Planziel stand aufgrund der Machbarkeitsstudie fest. Es war vorgesehen mit Hilfe des Heißwasserspeichers in der Tiefe zum einen elektrischen Strom mit dem Kalina Verfahren zu erzeugen und zum anderen Wärme für die Wärmeversorgung Unterhachings bereit zu stellen, was uns zu dieser Zeit im Frühjahr 2002 bei Erdölpreisen um 20\$ pro barrel als nicht bald erfolgversprechend zu sein schien.

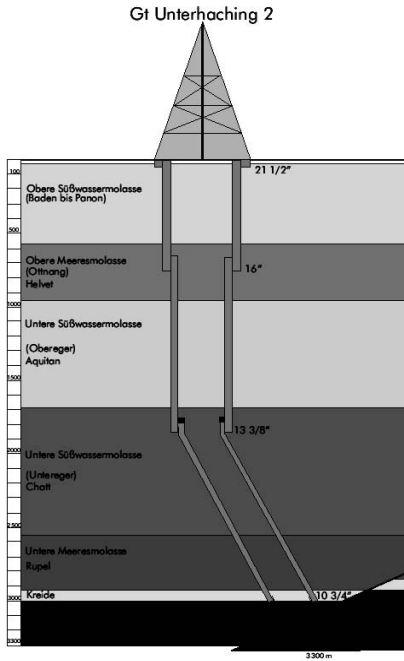
Für die Nutzung von Thermalwasser aus der Tiefen Geothermie sind prinzipiell zwei Bohrungen in den gleichen Tiefenhorizont notwendig, denn das Thermalwasser darf stofflich nicht verwendet werden, sondern ist nur als Energieträger zu nutzen. Dessen Energie

entzieht man über geschlossene Wärmetauscher - Kreisläufe. Das Thermalwasser wird dadurch auf etwa 60° C bis 55° C abgekühlt und an anderer Stelle, aber in den gleichen Horizont wieder injiziert. Die beiden Bohrauftreffpunkte sollten dabei 2,5 km auseinander liegen, um einen thermischen Kurzschluss zu vermeiden. Das System der beiden Bohrungen wird hydrothermale Dublette genannt. Die Rückführung des Thermalwassers ist wichtig, damit zum einen das Reservoir zukünftig nicht leer gepumpt wird und zum anderen die hydraulischen Verhältnisse im Malm nicht wesentlich verändert werden.

Wichtigste Voraussetzung vor Beginn der Tiefenbohrungen war ein vom Gemeinderat beschlossener Abschluss einer Fündigkeitsversicherung, die es bis dato auf dem Versicherungsmarkt nicht gab. Hier war insbesondere die negative Bewertung unserer Machbarkeitsstudie durch das Ministerium sehr hinderlich, da die Versicherungswirtschaft wegen der behördlichen Infragestellung der geothermischen Eckwerte ein erhöhtes Risiko annehmen musste. In acht Monate dauernden Verhandlungen wurde schließlich in letztlich guter Zusammenarbeit mit der Münchner Rück und dem Wirtschaftsministerium durch Gutachten des GGA unterstützt eine entsprechende Versicherung abgeschlossen werden, so dass 2003 die bereits für 2002 geplante europaweite Ausschreibung der erste Tiefenbohrung erfolgen konnte.

2.1.2 Bohrungen und Fündigkeit

Die Bohrplanung wurde von der Geothermie Neubrandenburg (GTN) durchgeführt, einem Ingenieurbüro, das vor der Wende in Mecklenburg - Vorpommern bereits Geothermieprojekte realisierte. Die Planung ging davon aus, dass bei späterer Nutzung der geothermischen Energie für die Stromerzeugung eine entsprechende Schüttung nur durch eine Bohrung erzielt werden kann, die in der Endstufe im Malm einen Durchmesser von 8 5/8" hat. Reine Wärmeprojekte, die im Wesentlichen Schüttungen von ca. 60 l/s benötigen, enden bei 6 1/4". Um den angepeilten Enddurchmesser zu erreichen, muss von einem angemessenen Durchmesser für die erste Bohrstufe ausgegangen werden. Für diese erste Bohrstrecke war eine Verrohrung mit einem Innendurchmesser von 16" geplant. Um Bohrvolumen zu sparen, wollte man hinter der 16" Verrohrung mit einem Bicentermeißel, der infolge seiner nicht axialen Aufhängung hinterscheiden kann, weiterarbeiten. Dieser Meißel wurde jedoch bereits mit Vorankündigung durch die Bergbehörde im Wirtschaftsministerium vom Bergamt Süd mit der Begründung, dass dieser Meißel in Bayern bisher nicht verwendet wurde, nicht erlaubt. Folglich mussten wir –verbunden mit Mehrkosten - mit einem wesentlich größeren Durchmesser beginnen, um nach der ersten Rohrtour mit einem entsprechenden konventionellen Rollenmeißel letztlich so bohren zu können, dass auch der angestrebte Enddurchmesser erreicht werden kann. Durch fehlerhafte Ausführung der Muffengewinde der ersten Rohrtour war jedoch die erste Bohrstrecke nicht gasdicht zu bekommen, so dass zum Abdichten in diese Tour ein weiteres Stahlrohr eingebaut werden musste. Das hatte zur Folge, dass unabdingbar im weiteren Verlauf mit einem Bicentermeißel weiter gebohrt werden musste, um den vorgesehenen Enddurchmesser und damit die Voraussetzung für die erwartete Wirtschaftlichkeit der Bohrung zu erzielen. Wir konnten zeigen, dass mit dem Bicentermeißel hervorragende Bohrergebnisse zu erzielen sind. Durch den technischen Ausfall der ersten Rohrtour wurde der Zeitplan sehr verzögert. Zu diesem Problem kam noch im weiteren Verlauf der Verlust der Schwerstange mit Bohrkopf durch Festsitzen bei etwa 2920 m Bohrstrecke dazu. Die Bohrung dauerte somit statt 80 Tage 240 Tage.



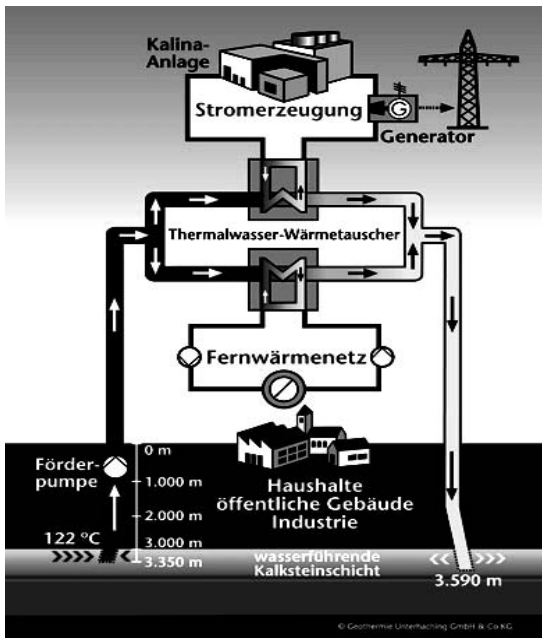
Bohrplan der Bohrung Gt2

Wichtig war aber der Erfolg mit einem zudem noch außergewöhnlichen Bohrturm, dessen Aufbau aus der horizontalen Bohrtechnik stammte, aber in Speyer vor seinem Einsatz in Unterhaching erfolgreich bis etwa 2800 m Teufe erprobt war. Ende September 2004 war es soweit. Das gefundene Thermalwasser hatte eine Temperatur von 122,8° C. Die Schüttung ergab nach einer Stimulation mit 100 t verdünnter Salzsäure einen Wert von bis zu 230 l/s. Dieses Ergebnis übertraf die Annahmen der Machbarkeitsstudie.

Wegen der ab 2004 sich abzeichnenden Engpässe am Markt für Hochleistungsbohrgeräte und der in Bayern damals nicht anerkannten internationalen Zertifizierungen von Bohrgeräten, die nicht im Besitz deutscher Unternehmen standen, hatten wir einen Stillstand von 18 Monaten bis endlich die britische Bohrfirma EDECO in Zusammenarbeit mit Anger's Söhne in Bayern ihre Anlage einsetzen konnte. Die polnische Bohrfirma Nafta, von der die Geothermie Unterhaching eine Zusage für 2005 hatte, konnte trotz vorliegender API (American Petroleum Institute) Normierung für ein neues amerikanisches Standardprodukt infolge eines mit etwa neun Monate dauernden bayrischen Zertifizierungsverfahrens, die Zusage wegen eines Nachfolgeauftrags nicht halten. Wie wir feststellen konnten wird nur in Bayern so streng mit der Zertifizierung verfahren. In anderen Bundesländern und in der EU wird die API Norm für Bohrgeräte anerkannt.

Mitte Januar 2007 war auch die zweite Bohrung Gt 2 erfolgreich getestet. Mit einer Temperatur von 133° C und einer Schüttung von bis zu 300 l/s erbrachte diese Bohrung ein Ergebnis, das auch von kühnsten Experten in der Vorschau nicht erwartet wurde. Zumindest nahm man eine geringere Thermalwassertemperatur um 105° C an.

Die thermische Leistung der Gt1 liegt bei knapp 38 MW, in der Gt2 sind es 45 MW. Bei Nutzung der Gt1 für die Förderung des Thermalwassers würde dies ausreichen um eine Kalina Anlage mit einer elektrischen Leistung von 4,1 MW betreiben zu können, bei Gt2 mit etwa 4,9 MW.



Blockschaltbild für ein wärmegeführtes Geothermiekraftwerk

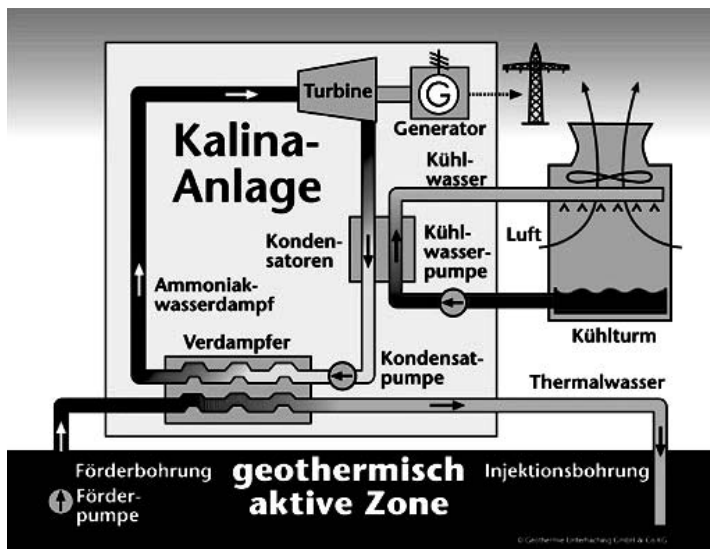
Nachdem durch die zeitlichen Verzögerungen der Bohrungen die wirtschaftliche Lage der Geothermiegesellschaft bei weiterem Abwarten für die Umsetzung des Kraftwerkskonzeptes prekär geworden wäre, musste noch vor Beendigung der zweiten Bohrung entschieden werden, welches Bohrloch zur Produktion und welches zur Injektion genommen werden muss. Man rückte nicht vom ursprünglichen Plan ab. Gt 1 blieb Produktionsbohrung und Gt 2 Injektionsbohrung, da man ja dort niedrigere Wassertemperaturen erwartete.

2.1.3 Konstruktion des Kraftwerks

Nach dem Anstieg des Rohölpreises ergab sich eine sehr gute Vermarktungssituation für die Fernwärme aus Geothermie. Es zeichnete sich sehr rasch ab, dass in Unterhaching die gesamte thermische Leistung aus der Geothermie in der Heizperiode für die Fernwärme benötigt werden wird. Aus diesem Grund wurde der Betrieb des Kraftwerks so umgestellt,

dass es Wärme geführt betrieben werden kann. Bei dieser Betriebsart sind die Wärmetauscher Kreisläufe für die Fernwärme und für die Stromerzeugung parallel geschaltet. Der Fernwärme steht im Jahresmittel eine Fördermenge aus den angestrebten 150 l/s von 25 l/s Thermalwasser als Grundlast zur Verfügung, so dass für die Stromerzeugung nur noch 125 l/s nutzbar sind. Das bedeutet eine Reduzierung der elektrischen Leistung auf ca. 3,4 MW. Über ein Dreiwegeventil kann der Zufluss des Thermalwassers für die beiden Energiekreisläufe gesteuert werden. Dies führt dazu, dass in der Heizperiode je nach Außentemperatur vorrangig der Bedarf für die Fernwärme gedeckt wird und somit für die Stromerzeugung bei fallenden Temperaturen immer weniger Thermalwasser verfügbar ist. Im Bedarfsfall kann die Stromerzeugung sogar ganz still gelegt werden. Dieses Verfahren ist wirtschaftlicher als ein stromgeführter Betrieb. Denn bei Niedertemperaturprozessen um die 100° C ist der Wirkungsgrad einer Energieumwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie nur etwa 10% bis 12%, sodass für 1MWh Strom in der Heizperiode mindestens 8 MWh Wärmeenergie vermarktet werden können. Das Geothermie Kraftwerk Unterhaching ist damit ein Beispiel dafür, dass die Umwandlung der geothermischen Energie in Nutzwärme und elektrischen Strom im Parallelbetrieb wärmegeführt gesteuert werden kann. In Gebieten mit hohem Wärmebedarf während der Heizperiode ist dies das wirtschaftlichere System als der serielle Betrieb, der bisher bei geothermischen Kraftwerken üblich war. Dies würde bei hohem Wärmebedarf zu einem zusätzlichen unwirtschaftlichen Aufheizen des Heizwassers mit fossilen Brennstoffen oder Wärmepumpen führen. Gute Kraftwerke mit ORC Technik bzw. Kalinatechnik kühlen das Thermalwasser beim Prozess der Stromerzeugung auf mindestens 70° C bis unter 60° C ab.

2. 1. 4. Die Kalina Technik



Vereinfachtes Schema eines Kalina Kraftwerks

Wie bereits erwähnt, liegt der Wirkungsgrad im sogenannten Niederenthalpiebereich für die Umwandlung der Energie aus dem Thermalwasser um die 10%. Das ist verglichen mit anderen Dampfkraftwerken, die bei hohen Temperaturen (ab 300° C) mit Wasserdampf arbeiten, um mehr als das Drei – bis nahezu Fünffache niedriger. Der Grund für diesen schlechten Wirkungsgrad liegt darin, dass man bei Niederenthalpie nicht mit Wasserdampf arbeiten kann und auch sonst mit Hilfe andere Medien bei weitem nicht die Drücke erzeugen kann, mit der Turbinen in konventionellen Dampfkraftwerken betrieben werden. Im Niederenthalpiebereich müssen Medien benutzt werden, die eine niedrige Siedetemperatur weit unter 100° C haben. Im Fall des Organic Rankine Cycle Prozesses benutzt man ein organisches Fluid. ähnlich der Kältemittel in Kühlschränken. Dieses Fluid verhält sich beim Verdampfen ähnlich wie Wasser, d. h. die Verdampfung geschieht isotherm und geht ab da in die Sättigung, um einen entsprechenden Dampfdruck aufzubauen. Beim Kalina Verfahren (benannt nach Alexander Kalina) nutzt man ein binäres Gemisch aus ca. 85% Ammoniak und 15% Wasser, dessen Zusammensetzung aber je nach Außen- und Thermalwassertemperatur im Bereich dieser Eckwerte optimiert werden kann. Ammoniak hat dabei den Vorteil, dass es nicht über eine isotherme Verdampfung in die Dampfsättigung geht, sondern dies stetig geschieht. Dadurch entsteht im binären Flüssigkeitsgemisch ein Unterdruck, durch den die Siedetemperatur des Wassers erniedrigt wird. Mit dieser Technik ist theoretisch eine Steigerung des Wirkungsgrades um 25% gegenüber dem ORC - Prozess möglich. Das Problem bei der Installation dieser Kraftanlage war nicht der Kalina – Prozess selbst, dessen Verdampfung problemlos funktionierte, sondern die technische Ausführung der Wärmetauscher sowie Abdichtungsprobleme bei der Turbine. All diese technischen Probleme bezogen sich auf den bisher nicht üblichen Umgang mit heißem Ammoniak und dessen Auswirkung auf Dichtungsmaterialien bei Hochdruck. Diese Probleme sind aber mittlerweile gelöst und die gesamte Anlage funktioniert innerhalb ihrer theoretischen Spezifikationen.

2. 1. 5. Aufbau der Fernwärme Unterhaching

Das wirtschaftliche Problem bei der Errichtung einer Wärmeversorgung mit Hilfe der Geothermie ist dadurch gegeben, dass nach Fertigstellung der beiden Bohrungen die gesamte verfügbare Energie zur Vermarktung bereitgestellt ist. Im Vergleich dazu können z. B. konventionell beheizte Heizwerke je nach Anschlussgrad auf- und ausgebaut werden. Bei Nutzung der Geothermie steht jedoch die zu vermarktende Energie von Anfang an fest und ist unveränderlich. Damit steht fest, dass Geothermiewärme für eine wirtschaftliche Vermarktung sofort nach Aufnahme der Lieferfähigkeit hohe Anschlussleistungen bedienen muss. Damit ist es unabdingbar auch für die entsprechende Infrastruktur der Fernwärmeleitungen hohe Investitionsmittel bereit zu stellen, um den notwendigen hohen Anschlussgrad in möglichst kurzer Zeit zu erreichen. Ein Problem dabei ist jedoch, dass man mit der konkreten Planung der Fernwärmeversorgung erst dann beginnen kann, wenn man das Ergebnis der Geothermiebohrungen kennt. Eine vorauseilende Planung wäre fatal, insbesondere dann, wenn die erwartete Fündigkeit nicht eintritt. Hilfreich für die gesamte Planung der Fernwärme ist jedoch, wenn die Planer sehr gut über die Verteilung des gesamten Bedarfs an Wärme innerhalb einer Ortschaft Bescheid wissen, um bereits im Vorfeld der Planung auf potentielle Kunden mit hoher Wärmeabnahme zugehen zu können und damit bereits zu wissen, wo der Hauptstrang der Fernwärmeleitung liegen sollte. Der Wärmetlas, der für Unterhaching 1997

Einzugsbereich des Fernwärmenetzes

- Fernwärmeverorgung I. Bauabschnitt ab Frühjahr 2007
- Ausbau des I. Bauabschnitts Fernwärmeverorgung ab 2007 je nach Kundeninteresse
- Fernwärmeverorgung II. Bauabschnitt ab Oktober 2007 je nach Kundeninteresse

— Hauptleitung I. Bauabschnitt

— Hauptleitung II. Bauabschnitt Ringchluss

Förderbohrung und Stromerzeugungsanlage

Heizwerk

Injektionsbohrung

The map shows a detailed street network in Leipzig, Germany, with various districts labeled. The legend indicates three phases of district heating expansion: Phase I (dark grey), Phase II (medium grey), and Phase III (light grey). It also identifies key infrastructure like the main heating lines, injection wells, and power generation plants.

Zusätzlich zum Anschluss der Wärmeabnehmer musste ein konventionell beheiztes Spitzenlast- und Redundanzheizwerk aufgebaut werden, welches im Bedarfsfall zuheizt oder bei Ausfall der Geothermie die Leistung für das Fernwärmenetz vollständig übernehmen kann.

Im ersten vollständigen Betriebsjahr 2008 konnten insbesondere Erfahrungen im Bezug auf die Lieferung von Fernwärme gemacht werden. Innerhalb der letzten Betriebsmonate liefen auch erste Feldtests bezüglich der parallelen Steuerung von Wärme und Stromerzeugung. Die Versorgung mit Fernwärme durch die Geothermie war bezogen auf den geothermischen

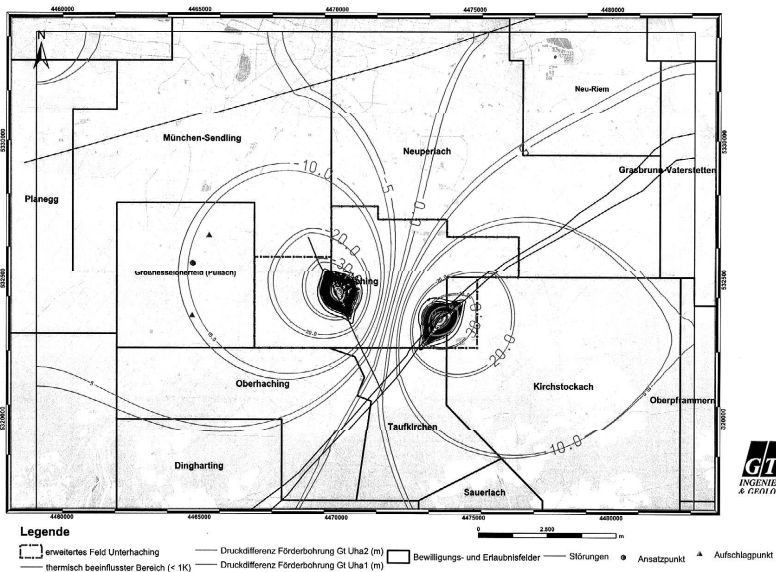
Teil problemlos bis auf einen 16-tägigen Ausfall der Förderpumpe. Aber auch hier war dies nicht gleichbedeutend mit einem Ausfall der Heizung, da das Redundanzheizwerk die Wärmelieferung voll ersetzen konnte. Insgesamt waren in der Heizperiode Ende des Jahres 2008 insgesamt 30,4 MW thermische Leistung an die Fernwärme angeschlossen. Die maximale Leistungsabfrage bei gleichzeitigem Wärmebedarf lag bei 14,5 MW. Es stellte sich im Betrieb des Kraftwerks auch heraus, dass die wärmegeführte Steuerung der Stromerzeugung automatisch funktioniert, d. h. die Aufteilung des Thermalwasserstroms im Parallelbetrieb beider Energiearten unter dem Vorrang der Wärmeerzeugung auch bestens funktioniert. Damit konnte auch nachgewiesen werden, dass die Umkonstruktion der Wärmetauscher im Dampfkreislauf des Kalina Prozesses das erwartete Ergebnis gebracht hat.

3. Probleme der Geothermie in Bayern

Das südbayrische Voralpenland ist bezogen auf den heutigen Stand der Erschließungstechniken in Deutschland das idealste Gebiet zur vergleichsweise mit anderen geothermischen Vorkommen risikoarmen Erschließung der Geothermie. Die zu erwartenden Temperaturen sind insbesondere durch die in der GGA (heute LIAG) durchgeführten Extrapolation von Messdaten aus der Exploration von Kohlenwasserstoffen als sehr gesichert zu bezeichnen. Die bisher durchgeführten Tiefenbohrungen im Malmkarst haben dies durchwegs bestätigt. Die Temperaturen, die aus irgendwelchen Gründen - abweichend sogar von den Ergebnissen der kontinentalen Tiefbohrung in Windischeschenbach – insbesondere in den stromerzeugungsfähigen Gebieten in stetiger Weise um etwa 30° C zu tief angegeben wurden, müssen hier eine entsprechende Korrektur erfahren, um zu vermeiden, dass Investoren in die Irre geführt werden. Diese nicht richtigen Informationen, wie man sie auch der Geothermie Unterhaching in den Bescheid des Erlaubnisfeldes hineingeschrieben hat, ziehen nur nachträglichen, insbesondere auch politischen Ärger nach sich, da sie dazu führten Investitionsmittel unwirtschaftlich einzusetzen. Auf lange Sicht ließe sich damit die Umwandlung der geothermischen Energie in elektrische Energie nicht verhindern, höchstens verzögern. Dies wäre aber sehr zum Schaden des im Standort Deutschland und auch Bayern vorhandenen Ingenieurwissens. Dies wäre auch ein Nachteil für den Export von neuer Energietechnologie, die auf dem Gebiet der Niederenthalpie derzeit im Wesentlichen noch nicht vom deutschen Markt bedient werden kann.

Ein weiteres großes Problem sind die überaus strengen Zertifizierungsmethoden von Bohrgeräten ausländischer Bohrfirmen. Es soll hier nicht kritisiert werden, wenn darauf geachtet wird, dass ein Bohrgerät aus Gründen der Sicherheit statisch und maschinell in Ordnung sein muss. Man kann aber nicht erwarten, dass Hersteller von Bohrgeräten ihre Statikunterlagen aus der Hand geben, denn dies könnte im schlimmsten Fall zum Nachbau des Bohrgerätes führen. Normalerweise werden aber Bauserien geprüft und bekommen daraufhin ihre Zulassung. Das ist bei den meisten technischen Geräten so und liegt auch ganz im Interesse des Herstellers. Zulassungen innerhalb der EU sollten dann aber grundsätzlich überall gelten. Andere Zertifizierungen wie z. B. die US-amerikanische API Norm, die weltweit als eine der strengsten Normierungen angesehen wird, sollten auch mehr als ausreichend sein, um ein Bohrgerät in Bayern einsetzen zu lassen. Das Projekt Unterhaching ist unter diesem bayrischen Sonderweg, jedes Bohrgerät, das keine Statikunterlagen nachweisen kann und sich im Besitz einer ausländischen Bohrfirma befindet, in seiner Statik

nachzurechnen, zeitlich sehr gelitten und wäre dadurch wirtschaftlich fast zugrunde gegangen.



Einteilung der Erlaubnisfelder südlich von München. Das Erlaubnisfeld Unterhaching ist rot umrandet. Die blauen Flächen zeigen die Ausbreitung des injizierten Wassers nach 50 Jahren an. Diese Fläche wurde für beide Fälle der möglichen Injektion in Gt1 oder Gt2 berechnet. Die mit Zahlen belegten Kurven sind isobare Kurven gleicher Absenkung des Thermalwasserspiegels - angegeben im Meter – bei errechneter jeweiliger Förderung des Thermalwassers aus Gt1 bzw. Gt2. An diesen Kurven sieht man bereits die Beeinflussung der Nachbarfelder. Die zwei nebeneinander verlaufenden schwarzen Kurven und die eine schwarze Gerade, die die beiden anderen Kurven schneidet sind durch Seismik festgestellte ertragreiche Kluftsysteme oder stark Wasser führende Störungen. Anhand deren Verlauf erkennt man die Möglichkeiten der gegenseitigen Beeinflussung falls vom Nachbarfeld aus in das gleiche Kluftsystem gebohrt wird.

Zu einer dramatischen Situation kann die Einteilung der vergebenen bergrechtlichen Erlaubnisfelder führen. Da es sich hier um den Abbau von Energie handelt, deren Träger jedoch Wasser ist, ist eine Beeinflussung benachbarter Bohrungen, insbesondere wenn sie zu dicht aufeinander folgen und eventuell aus gleichen Kluftsystemen fördern, eintreten, die zu einer Unwirtschaftlichkeit beider Projekte führen wird. Eine weitere Möglichkeit der Beeinflussung besteht darin, dass benachbarte Projekte durch die Injektion von abgekühltem Thermalwasser bei zu dichter Situation von Bohrlöchern bei Förderbohrungen zum thermischen Kurzschluss und somit zur drastischen Abkühlung einer benachbarten Förderbohrung führen können. Die staatliche Behörde, die diese Erlaubnisfelder hoheitlich vergibt, darf sich

eben wegen dieses hoheitlichen Aktes nicht auf den Standpunkt stellen, dass man dieses Risiko als Feldesinhaber kennen müsse. Da demnach der Behörde dieses Risiko bekannt ist, müsste zumindest bei der Vergabe der Erlaubnisfelder bereits darauf geachtet werden. Dies ist aber nie geschehen. Von der Mehrzahl der Fachleute wird somit angezweifelt, dass das bayrische Verfahren zur Feldeinteilung wirtschaftlich funktionieren kann.

4. Literatur

TAB Studie 2003: Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung (TAB Arbeitsbericht Nr. 84

Geothermie Atlas Bayern; Herausgeber: Bayrisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Bundes Berg Gesetz

Analysis and Design of Energy Systems: Analysis of Industrial Processes, AES-Vol. 10-3, pp. 73-77, ASME, 1989: Göran Wall, Chia-Chin Chuang, Masaru Ishida: Energy Study of the Kalina Cycle

Silke Köhler; Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse: Thesis, Fakultät III, Technische Universität Berlin, 23.08.2005

M. Wolfram, J. Bartels, G. Kittl, P. Seibt, R. Schulz, R. Thomas, H.J. Unger: Nutzung der Ergebnisse des Stromerzeugungsprojektes in Unterhaching für die bessere Prognose von Zuflussraten und Temperaturen im Malm des Molassebeckens; Der Geothermiekongress 2007; Bochum 29. – 31. Oktober 2007

M. Wolfram, J. Bartels, F. Hoffmann, G. Kittl, G. Lenz, P. Seibt, R. Schulz, R. Thomas, H.J. Unger; Unterhaching Geothermal Well Doublet: Structural and Hydrodynamic Reservoir Characteristic; Tagungsband der EGC Tagung Unterhaching 30.05 – 01.06.2007, 47; 1-6.

R. Schulz; Geothermische Wärme – und Stromerzeugung: Von der Idee bis zum Probetrieb – Die Etappen eines geothermischen Projektes: BMU Vortragsveranstaltung, 18.10.2007, Potsdam

M. O. Häring; Geothermal Explorers Ltd. Geothermie – Warum?; 33 oft gestellte Fragen zur Erdwärme

Nutzung von Geothermie in TBM vorgetriebenen Tunneln

Dr. Norbert Pralle, Dr. Jan-Niklas Franzius

Ed. Züblin AG

Dipl.-Ing Volker Liebel

Rehau AG & Co, Erlangen

1 Allgemeines

Der Erdwärme wird eine bedeutende Rolle zur nachhaltigen Deckung des Energiebedarfs zugeschrieben. Aus geringen Tiefen gewonnene Wärme wird zunehmend zu Heiz- und Kühlzwecken von Gebäuden, Anlagen und Verkehrsstrukturen verwendet. Erdberührte Ingenieurbauwerke im Tiefbau besitzen große Flächen, die sich für den Entzug von Wärme eignen (Brandl, 2006; Wittke & Schmitt, 2005). Dieser Ansatz wird bereits bei Tunnelbaumaßnahmen umgesetzt (Adam & Markiewicz, 2003), derart dass die Schale konventionell vorgetriebener Tunnel mit einem sog. Energievlies versehen wird. Erste Ausführungen zeigen ermutigende Ergebnisse (Markiewicz et al., 2005).

Tunnel werden heutzutage jedoch vermehrt mit Tunnelbohrmaschinen vorgetrieben (im Gegensatz zum konventionellen Ausbruch), da diese Bauweise speziell in oberflächennahen Lockergesteinen eine höhere Sicherheit gerade in Bezug auf benachbarte Bebauung bietet. Für den Ausbau von maschinell vorgetriebenen Tunneln sind die Rahmenbedingungen für eine geothermische Nutzung schwieriger, da diese Tunnel meist mit Betonfertigteilen, sog. Tübbings, ausgerüstet werden. Üblicherweise ergänzen sich eine Anzahl von Steinen (abhängig vom Tunneldurchmesser) zu einem Ring von ca. 1 bis 2 m Breite. Um diesen Ausbau geothermisch zu nutzen, muss ein Absorberleitungssystem integriert werden, welches die Kopplung der einzelnen Betonsteine untereinander zulässt und gleichzeitig die niedrigen geometrischen Toleranzen beim Einbau erfüllt.

Ein solches System wurde in Kooperation der Firmen Rehau AG + Co und Ed. Züblin AG (Zentrale Technik) entwickelt. Der Energietübbing wurde bereits in zwei Tunnelbauwerke eingebaut und wurde zusätzlich in einem Laborversuch untersucht. Ein umfangreiches Messprogramm soll weitere Erkenntnisse liefern, um das Bauteil weiter zu optimieren.

2 Funktionsweise und Aufbau des Energietübbings

Um dem Boden Wärme zu entziehen oder in diesen einzuleiten, sind im Energietübbing Absorberrohre in Schlaufen verlegt. Dabei wird für die Herstellung des Energietübbings die gleichen Bewehrungskörbe und Schalsätze benutzt wie für gewöhnliche Tübbings. Damit ist gewährleistet, dass sich die Herstellung der Energietübbings effizient in die Standardproduktion integrieren lässt.

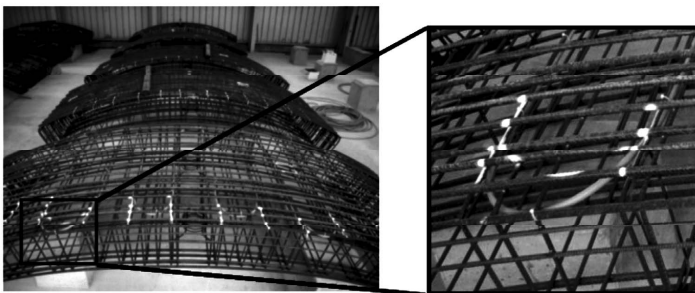


Bild 1: Installation von Absorberrohren im Energietübbing

Bild 1 zeigt die Lage der Absorberrohre im Bewehrungskorb. In Bild 2 ist ein mit Absorberrohren ausgerüsteter Bewehrungskorb in die Schalung gesetzt. Die Betonüberdeckung wird durch die Anbringung der Absorberleitungen an der Innenseite der äußeren Bewehrung nicht beeinflusst.



Bild 2: Absorberrohre mit Bewehrungskorb in einer Stahlschalung für die Tübbingbetonage.

Als Absorber werden in den Tübbings Leitungen aus vernetztem Polyethylen (PE-X) verlegt. Der Außendurchmesser der Leitungen beträgt 20 mm und der mittlere Abstand zwischen Absorbern liegt zwischen 25 und 30 cm. Die Absorberleitungen jedes Tübbings münden in Aussparungen; in diesen Nischen werden die Leitungen benachbarter Tübbings gekoppelt, um die Überleitung der Absorberflüssigkeit zu ermöglichen.

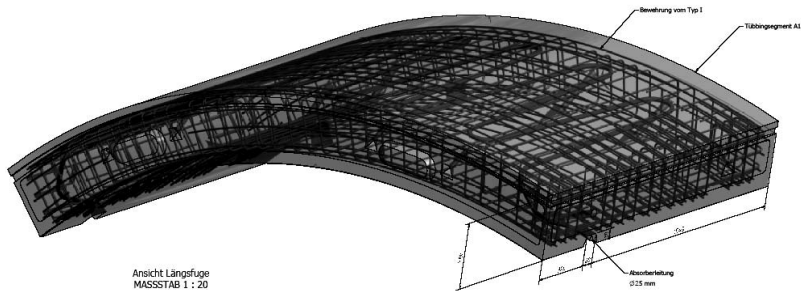


Bild 3: Schematische Darstellung des Energietübbings

Die Kopplungsstelle für die Absorberleitungen benachbarter Tübbinge ist in das Betonfertigteil integriert. Dazu wurde ein Aussparungskörper in die Schalung eingebaut über den die Absorberleitung in den Betonkörper ein- und ausgeführt wird. Sobald der Tübbing betoniert und ausgeschalt ist, sind die beiden Enden des Absorberrohres über die Aussparungen zugänglich (s. Bild 3 und Bild 4). Die Aussparungen befinden sich an den Längsfugen an der Tübbinginnenseite. Dadurch wird die in der Nähe der Außenseite liegende Dichtungsfuge nicht beeinträchtigt.

Um die Verbindung mit dem benachbarten Tübbing zu gewährleisten bedarf es bei ihrer Herstellung einer sehr hohen geometrischen Genauigkeit. Sobald die Tübbinge eingebaut sind, werden diese im Nachlauf mit Hilfe eines von Rehau entwickelten Kupplungssystems verbunden. Bild 4 zeigt hergestellte Energietübbinge bevor sie in den Tunnel eingebaut wurden. Die Kupplungsstelle an der Längsfuge ist deutlich zu sehen. Bild 5 zeigt die Kupplungsstelle nach Verbindung der Absorberrohre.

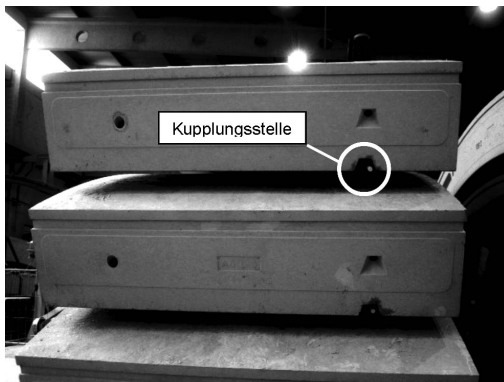


Bild 4: Energietübbing vor Einbau in den Tunnel. Deutlich sind die Kupplungsstellen für die Verbindung der Absorberrohre zu erkennen.

3 Demonstratorstrecke

Auf der Bahnstrecke München-Verona ist für das Ausschreibungslos H8, „Hauptbaumaßnahmen Jenbach“, der Neubau eines zweigleisigen Eisenbahntunnels geplant. Er dient als Zulaufstrecke Nord des künftigen Brennertunnels. Der Ausbau besteht aus Stahlbetontübbings mit einer innen liegenden Brandschutzschale. Der Tunnel liegt in grundwasserführenden Sand- und Kieslagen und verläuft ungefähr parallel zum Fluss Inn. Die Überlagerung im Bereich Jenbach liegt bei ca. 16 m.

Ein 54 m langer Teilabschnitt des Tunnels wird in Zusammenarbeit mit der ÖBB mit Energietübbings ausgebaut. Gekoppelt werden die Absorberleitungen der Zu- und Ablaufleitungen nach Einbau der Tübbings, jedoch vor der Betonierung der Brandschutzschale (Innenschale), s. Bild 5. Zwei bis drei Ringe werden zu einem Kreislauf zusammengeschlossen (s. Bild 6) und über in den Banketten liegende Sammelleitungen zum nächstliegenden Schacht geführt.



Bild 5: Kopplung von Absorberrohre

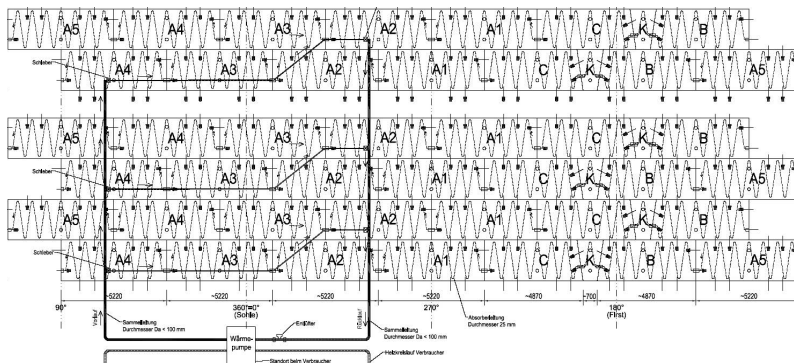


Bild 6: Schaltplan von Absorberleitungen

Die ausgewählte Strecke unterquert die Gemeinde Jenbach. Über einen (ohnehin benötigten) Rettungsschacht werden die Absorberleitungen an die Oberfläche geführt und an eine Wärmepumpe angeschlossen, die den Bauhof der Gemeinde mit Heizenergie versorgt. Die Geothermieanlage ist so ausgelegt, dass der Grundbedarf gedeckt wird. Die gasbetriebene Wärmepumpe wird je nach Bedarf auch für typische Spitzenlasten ausgelegt.

Um die Ergiebigkeit der Anlage abzuschätzen, wurde eine numerische Simulation mit Hilfe der Finiten Differenzen Methode (FDM) durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde vereinfachend der Dauerbetrieb der Anlage angenommen. Diese Simulation zeigt zunächst einen hohen Spitzenentzugswert, der allerdings schnell abfällt, s. Bild 7. Auf niedrigerem Niveau sinkt dann die Entzugsleistung dauerhaft – der Boden kühlt also aus. Dieses Szenario ist jedoch unrealistisch, da erstens die Grundwasserströmung nicht beachtet wurde und zweitens eine Heizanlage nicht im Dauerbetrieb läuft. Daher wurde in einer zweiten Simulation ein Intervallbetrieb der Wärmepumpe simuliert. Dabei wurde die Anlage an jedem Tag für eine monatlich abhängige Stundenzahl aktiviert. Die Entzugsleistung oszilliert entsprechend (Bild 7). Der Auskühleffekt ist geringer, da sich der Boden in den Zwischenzeiten (in denen nicht geheizt wird) regenerieren kann.

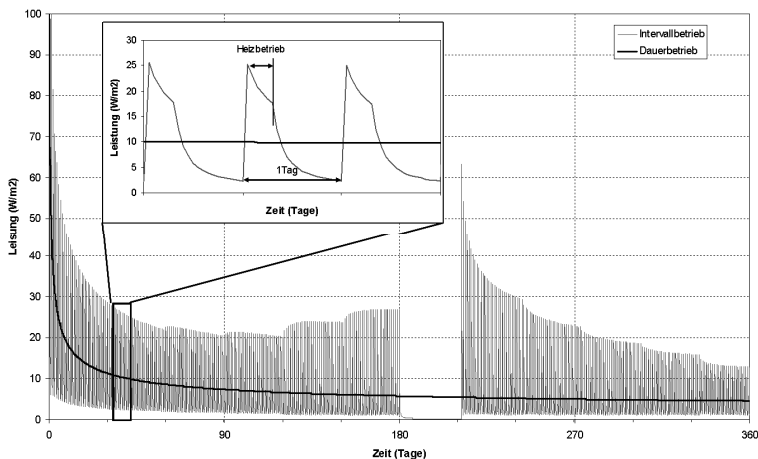


Bild 7: Entzugsleistung (pro Tunnelmantelfläche) im Intervall und Dauerbetrieb der Wärmepumpe.

Die Leitungen, Wärmepumpe und die Tunnelschale werden in diesem Projekt mit einem umfangreichen Messprogramm ausgerüstet, um den Betrieb mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen und um Erkenntnisse für weitere Projekte mit dieser innovativen Energieversorgung zu gewinnen. Die Installation der Verbindungsrohre und der Anschluss der Wärmepumpe hängt vom komplexen Bauablauf der Tunnelbaustelle ab und soll über die kommenden Monate realisiert werden.

Dieses Projekt wird einen entscheidenden Beitrag zu der Fragestellung liefern, wie sich geothermisches Potenzial, aus technischer wie auch aus wirtschaftlicher Sicht, bei ohnehin benötigten Infrastrukturprojekten nutzen lässt.

4 Literatur

- Adam D, Markiewicz, R. (2003). Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile – Teil 3. Ausführungsbeispiele und Neuentwicklungen. Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 2003. 148 (1), 2-12
- Brandl H. (2006): Energy foundations and other thermo-active ground structures. Rankine lecture. Géotechnique, 2006. 56 (2): p.81-122.
- Markiewicz, R., Adam. D., Hofinger, J. & Unterberger (2005): Extraction of geothermal energy from tunnels. In: Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, 2005, Rotterdam: Millpress Science Publ., 2005: 1629-1632.
- Wittke, W. & Schmitt, D. (2005): Nutzung der Geothermie im Tunnelbau. Geotechnik 28, Nr. 4., 256-262

Die Wasserleitung des Eupalinos auf Samos

Ein Meisterwerk archaischer Ingenieurskunst

Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Hermann J. Kienast

Ludwig-Maximilian-Universität München

Die Insel Samos liegt in der östlichen Ägäis, unmittelbar vor der Westküste Kleinasiens. Zusammen mit den Städten Milet und Ephesos bildet die Insel den Kernbereich Ioniens, jener griechischen Provinz, die in der Antike als herausragende Kulturlandschaft berühmt war. Die Besiedlung der Insel konzentrierte sich auf den Südosten, wo sich die Hauptstadt rings um ein natürliches Hafenbecken entwickelte. Dank seiner geopolitischen Lage hat Samos sehr bald eine führende Rolle gespielt und im 6. vorchristlichen Jahrhundert den Hochpunkt seiner Bedeutung erreicht. Sowohl historische Quellen als auch archäologische Untersuchungen legen reiches Zeugnis davon ab. Um das Ausmaß dieser Bedeutung zu erfassen, genügt es, Herodot, den Vater der Geschichtsschreibung, zu zitieren, der Samos im 5. Jh. besucht hat und voller Bewunderung berichtet, dass die Samier die drei größten Bauwerke in ganz Hellas geschaffen hätten - einen Tunnel für die Wasserversorgung der Stadt, eine Mole zur Sicherung des Hafenbeckens und einen Tempel für die Hauptgöttin der Insel (III 60).

Wohl nicht zufällig erwähnt Herodot als erstes in seiner Aufzählung den Tunnel der Wasserleitung. Er beschreibt ihn kurz und nennt auch den Namen des Baumeisters, nämlich Eupalinos, Sohn des Naustrophos aus Megara. Ohne diesen Bericht - es ist tatsächlich der einzige aus der Antike - wäre der Tunnel mit Sicherheit unbekannt geblieben. Nach der Auflassung der Leitung waren oberirdische Spuren davon im Laufe der Geschichte völlig verschwunden; es war ausschließlich dieses Herodotzitat, das die Forscher in der Neuzeit nach dem Tunnel suchen ließ, bis die Wiederentdeckung glückte. Im Jahre 1882 wurden erste Anstrengungen unternommen, die gesamte Leitung erneut in Gang zu setzen. Die Wasserleitung des Eupalinos - insbesondere die Durchtunnelung des Berges - wurde in der Folge berühmt und forderte zu Überlegungen heraus, wie wohl die Planung einer solchen Anlage bewerkstelligt wurde.

Alle Erklärungsversuche mussten jedoch scheitern, solange die Leitung nicht in ihrer vollen Länge untersucht werden konnte. Es bleibt das Verdienst von Ulf Jantzen, die Bedeutung dieses Monumentes erkannt und seine Freiräumung bewirkt zu haben. Die Untersuchung des Tunnels gehört ohne Zweifel zu den spektakulärsten Projekten des Deutschen Archäologischen Instituts. Mit beispiellosem Einsatz wurde die Anlage in den Jahren 1971-73 freigelegt und einer Erforschung zugänglich gemacht. Die daran anschließende Dokumentation der Gesamtanlage dauerte bis in die 80er Jahre, die Auswertung der zahlreichen Unterlagen nahm ein weiteres Jahrzehnt in Anspruch, bis die abschließende Würdigung dieses Werkes in einer umfangreichen Publikation vorgelegt werden konnte (Hermann J. Kienast, Die Wasserleitung des Eupalinos auf Samos, Samos XIX, Bonn 1995).

Wie in anderen Städten Griechenlands reichte im 6. Jh. v. Chr. auch in Samos die Wasserversorgung aus kleineren Quellen im Stadtgebiet sowie aus Brunnen und Zisternen nicht mehr aus, um den Bedarf der Bevölkerung zu decken. Die einzige Quelle aber, die mit einer Schüttungsmenge von rund 400 m³ pro Tag ergiebig genug war, um das Problem zu lösen, lag nicht nur außerhalb des Befestigungsringes sondern auch jenseits des Höhenrückens, der die Stadt nach Norden abschirmt. Das Wasser konnte folglich nur um diesen Berg herum in die Stadt gebracht werden oder eben durch ihn hindurch. Die entstandene Wasserleitung hat eine Länge von rund 3 km und gliedert sich in drei Abschnitte - die Zuleitung von der Quelle bis zum Nordhang des Berges, die Durchtunnelung dieses Berges und die Stadtleitung an seinem Südbang.

Die Quelle entspringt beim heutigen Dorf Ajades in einer massiv gebauten und auch noch weitgehend erhaltenen Brunnenkammer, über der später eine Johanneskapelle errichtet wurde. Das Wasser wurde dort rund 60 cm hoch angestaut und von diesem Pegel aus in die Leitung eingespeist. Die Trasse der Zuleitung folgt auf einer Länge von rund 900 m einfach der Geländekontur und wurde auf dieser Strecke auch als Graben in offener Bauweise ausgehoben. Für die restlichen 150 m bis zum Berghang musste dagegen ein kleiner Hügel unterquert werden. Zu diesem Zweck wurden vier Schächte abgeteuft - der tiefste mit beachtlichen 19 m - und auf dem angestrebten Niveau unterirdisch miteinander verbunden.

Der Tunnel, als Mittelstück der Leitung, durchquert den Stadtmauerberg auf einer Höhe von rund 55 m über dem Meeresspiegel. Er hat eine Länge von 1036 m und durchschnittliche Querschnittsmaße von 1,70 m auf 1,70 m. Abgesehen von bestimmten Ausnahmen durchfährt der Tunnel den Berg waagrecht; der Kanal der Wasserleitung, der auch das notwendige Gefälle aufweist, ist entlang seiner Ostwand ausgehoben und nimmt knapp die Hälfte der Tunnelbreite ein (Abb. 1, 2). Dieser Kanal ist am Nordeingang des Tunnels fast 4 m tief, am Südausgang sogar über 8 m. Auffallend ist, dass der Kanal nur stellenweise in seiner vollen Tiefe ausgehoben ist, in der Regel aber einen zweistöckigen Querschnitt aufweist, zusammengesetzt aus einem von der Tunnelsohle aus eingetieften Graben und einem darunterliegenden, abschnittsweise gestollten Kanal.

Am Südausgang des Tunnels verselbständigt sich die Leitung wieder; sie ist von da an parallel zum Hang geführt und reicht bis zum Zentrum der Stadt am Hafen. Die Stadtleitung ist durchweg unterirdisch vorgetrieben über Schächte, die in Abständen von 11 bis 25 m abgeteuft und unter Tage miteinander verbunden worden sind. Entlang dieses Leitungsstranges wurden in sinnvollen Abständen Brunnenhäuser mit Schöpfbecken angeordnet, aus denen sich die Einwohner der Stadt mit Wasser versorgen konnten.

Ein erster Blick auf die ganze Anlage zeigt eine zweckmäßige und den topographischen Gegebenheiten angepasste Wasserleitung, bei genauerer Betrachtung fallen jedoch Eigenheiten auf, die eine besondere Erklärung verlangen. Verwirrend ist zunächst, dass beim Übergang von der Zuleitung zum Tunnel der Kanal eine Tiefe von rund 4 m aufweist, obwohl doch bei sachgerechter Planung der Kanal einfach auf Höhe der Tunnelsohle ankommen und von dort mit normalem Gefälle weiterführen müsste.

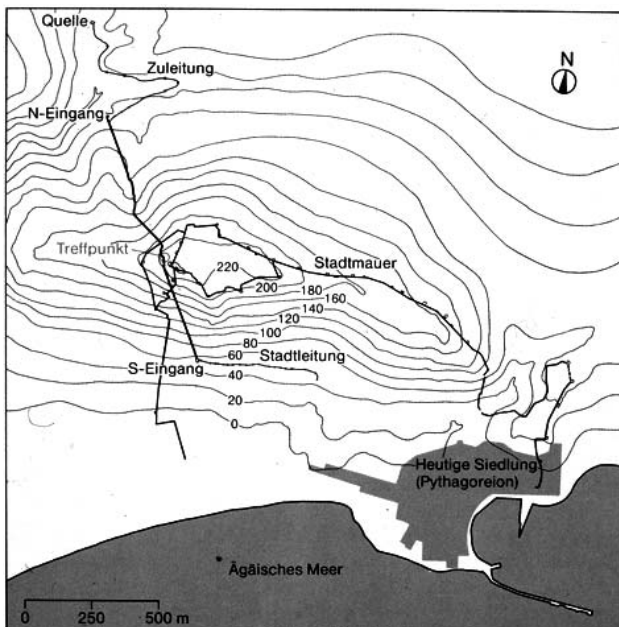


Abb. 1 Gesamtplan der Wasserleitung mit Hafen und Befestigungsmauer der antiken Stadt Samos.

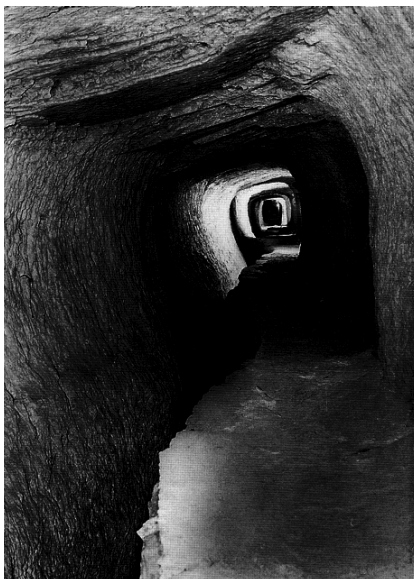


Abb. 2 Blick in den Südstollen des Tunnels von Nord

Der Tunnel liegt - mit anderen Worten - mehr als 3 m über dem Quellpegel und damit entschieden zu hoch. Der Sachverhalt ist derart schwerwiegend, dass Zufall oder auch Nachlässigkeit ausscheiden: Eine ausführliche Untersuchung des Quellbereichs führte vielmehr zu dem Schluss, dass die Quelle ursprünglich auf höherem Niveau entsprang, dass dort der erste Versuch gemacht wurde, das Wasser aufzustauen, um einen möglichst hohen Pegelstand zu erzielen, und dass dabei die Quelle durch den Staudruck verlagert wurde - an die Stelle, an der sie auch heute noch entspringt.

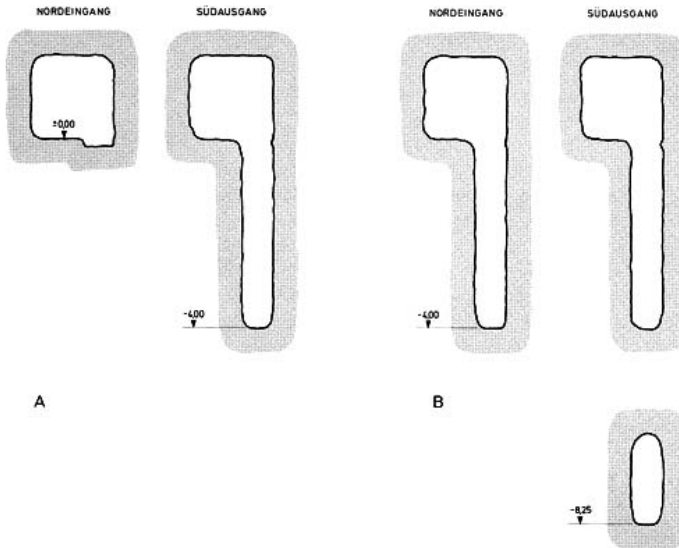


Abb. 28. Schematische Darstellung der Tunnelquerschnitte vor und nach der Änderung des Quellpegels

Abb. 3 Schematische Darstellung der Tunnelquerschnitte vor und nach der Änderung des Quellpegels.

Die Aufdeckung dieser Zusammenhänge erbrachte eine überzeugende Erklärung für das "falsche" Tunnelniveau, für die Tiefe des Grabens am Nordeingang des Tunnels und für den merkwürdigen zweistöckigen Kanalquerschnitt im weiteren Verlauf (Abb. 3). Alle diese Phänomene zusammen geben aufschlussreichen Einblick in die Projektierung der Anlage: Der Bau der Wasserleitung war offensichtlich von Beginn an in zwei getrennten Baulosen geplant - zuerst sollte der Tunnel mit dem Graben für die Wasserleitung entstehen, erst dann sollte die verbindende Zuleitung sowie die ergänzende Stadtleitung gebaut werden. Ein solches Vorgehen erweist sich als äußerst sinnvoll: Der am meisten zeitraubende und auch risikoreichste Abschnitt war zweifelsohne die Durchtunnelung des Berges. Ohne Gelingen dieser Teilstrecke war die Leitung nicht zu erstellen. So war es nur konsequent, dort den Anfang zu machen. Die Ergänzung nach vorwärts und nach rückwärts war dann Routinearbeit und wurde folglich auch erst nach Fertigstellung des Tunnels in Angriff genommen.

Das Missgeschick mit der Quelle erforderte eine beträchtliche Mehrarbeit, konnte das Unternehmen aber nicht mehr zum Scheitern bringen. Die Zuleitung wurde den neuen Gegebenheiten angepasst, der bereits vorhandene Graben im Tunnel musste nachgetieft werden, und die Stadtleitung folgte einfach dem neuen Niveau. Nach Abschluss dieser Rohbauarbeiten mussten im Tunnel drei Abschnitte von insgesamt 150 m Länge ausgebaut werden (Abb. 4), weil dort der Fels gefährlich locker war. Selbst im engen Kanal bedurften mehrere Abschnitte einer zusätzlichen Stabilisierung. Auf der Kanalsohle wurde schließlich eine Bettung mit kontinuierlichem Gefälle hergestellt - gestaffelt nach den drei Leitungsabschnitten -, auf der sorgfältig gearbeitete Tonrohre verlegt wurden. Erst dann war die Leitung betriebsfertig und das frische Quellwasser für die Stadtbevölkerung verfügbar .

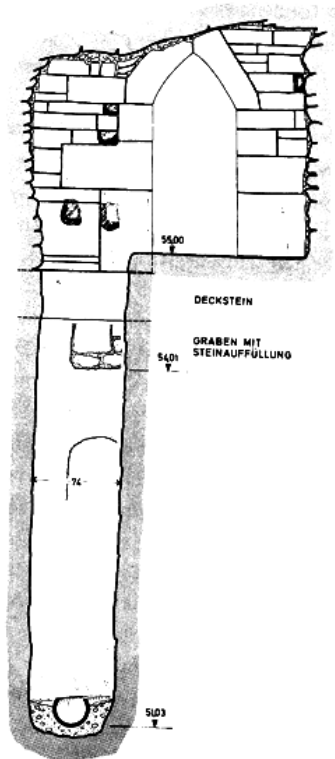


Abb. 4 Tunnelausbau im Nordstollen. Hervorzuheben ist die erstaunliche Qualität des Mauerwerks und vor allem die gegeneinander gelehnten Decksteine, die einen sorgfältig bearbeiteten Spitzbogen bilden.

Die ungeheure Leistung, die der Bau dieser Wasserleitung bedeutet, lässt sich am ehesten mit statistischen Zahlen würdigen: Für die Zuleitung mussten rund 1500 m³ gewachsener Fels ausgehoben werden, für den Tunnel mit Graben und endgültigem Kanal fast 5000 m³ und für die Stadtleitung weitere 1000 m³. Alle diese Arbeiten wurden mit Hammer und Meißel durchgeführt. Wie lange die Bauzeit währte, lässt sich nur mit Einschränkung ermitteln. Allein für die Durchtunnelung des Berges, bei der vor Ort nur jeweils zwei Hauer arbeiten konnten, müssen jedoch wenigstens acht Jahre angenommen werden, so dass für die gesamten Rohbauarbeiten wohl gut 10 Jahre anzusetzen sind. Für die Ausbauten, die mit größter Sorgfalt errichtet sind, wurden rund 300 m³ Steinmaterial - darunter Blöcke von über 1 t Gewicht - wieder in den Tunnel geschleppt. Die Leitung schließlich ist aus knapp 5000 Tonrohren zusammengesetzt, die auf der Töpferscheibe hergestellt, gebrannt, transportiert und auf der Kanalsohle verlegt werden mussten.

Mit der Fertigstellung dieser Arbeiten war das Projekt abgeschlossen und die Anlage auch funktionsfähig, ein sicherer Betrieb aber nur für wenige Jahre gewährleistet. Das Wasser der Quelle ist stark kalkhaltig, die daraus resultierenden Sinterablagerungen sind beträchtlich. Der Befund im Kanal zeigt, dass bereits nach einem Jahrzehnt erste Schwierigkeiten aufgetreten sein dürften; nach wenigen weiteren Jahren waren die Rohre so zugesintert, dass kein Wasser mehr fließen konnte. Die Funktion der Leitung wurde mit einer rigorosen Maßnahme wieder sichergestellt. Auf der gesamten Länge wurden die Rohre aufgeschlitzt, so dass nur mehr ein rinnenförmiger Dreiviertelquerschnitt in situ blieb, der fortan von Zeit zu Zeit gereinigt werden musste. Darüber hinaus stellte sich ein zusätzliches Problem ein: An der Zuleitung gab es eine Schwachstelle, deren Firste immer wieder einbrach, und an der immer wieder Massen von Schlamm und Lehm eingeschwemmt wurden. Sowohl an den beiden Mundlöchern, noch mehr aber im Tunnel selbst führen Berge von gestapeltem Material - Sinter und Lehm - vor Augen, mit welchem Aufwand der Betrieb der Leitung verbunden war.

Unabhängig von diesen Anstrengungen, die Bau und Betrieb der Wasserleitung verlangten, erregte am meisten Aufmerksamkeit aber die Frage nach ihrer Planung und Vermessung. Wie hat Eupalinos die Leitung konzipiert, wie hat er vor allem die Trasse des Tunnels bestimmt und den Vortrieb kontrolliert? Es war besonders diese Frage, die von der Fachwelt aufgegriffen und diskutiert wurde: Der Tunnel ist immerhin mehr als 1000 m lang und wurde eindeutig im Gehenort, also von zwei Seiten gleichzeitig vorgetrieben.

Das prinzipielle Verfahren ist schnell erklärt. Eupalinos hat mit Fluchtstangen eine Gerade über den Berg abgesteckt und eine Waagerechte um den Berg herum gezogen. Damit waren sowohl die Vortriebsrichtung als auch ein gemeinsames Niveau gewonnen. Diese Ausgangswerte wurden durch einfaches Peilen in der Senkrechten und in der Waagerechten ermittelt und konnten auch mit der gleichen Methode kontrolliert werden. So simpel sich dieses Messschema ausnimmt, so wenig reichte es aber aus, um ein derart riskantes Unterfangen auch sicher zu meistern. Zusätzliche Vorkehrungen waren nötig, um einerseits der Gefahr des Auseinanderdriftens und andererseits eventuellen bergtechnischen Problemen begegnen zu können. Die entstandene Trasse zeigt, dass Eupalinos beide Schwierigkeiten zu berücksichtigen wusste; sie zeigt vor allem, dass er auch unvorhersehbare Komplikationen gewachsen war.

Die Planung des Tunnels war so ausgelegt, dass jede der beiden Vortriebsstrecken nach der Länge des jeweiligen Berghanges bemessen wurde; der Treffpunkt wurde absichtlich unter dem Scheitel des Rückens angeordnet. Die beiden Stollen wurden dadurch zwar ungleich lang, die Auswirkungen eventueller Vortriebsfehler blieben somit aber kalkulierbar. Im Bereich des vorgesehenen Durchschlagspunktes wurde dann die ideale Vortriebsrichtung verlassen; beide Tunneltrassen wurden im gleichen Winkel abgelenkt und nach Osten geführt. Auf diese Weise wurde ein Kreuzungspunkt geschaffen und der Treffpunkt gewissermaßen erzwungen; bei gleichem Niveau mussten sich die beiden Stollen überschneiden.

Der Plan erweist sich als ebenso einfach wie logisch, und wie ausgereift die gesamte Projektierung war, lässt sich vor allem zeigen an den Änderungen, die im Nordstollen notwendig wurden. Der Nordstollen durchquerte offensichtlich von Beginn an lockeres Gestein, das abschließend auch eine entsprechende Verbauung verlangte. Allem Anschein nach hatte sich die Gefahr eines Bergsturzes nach 260 m Vortrieb aber so zugespitzt, dass man sich gezwungen sah, die ursprüngliche Tunnelrichtung aufzugeben und in geologisch sicherere Bereiche auszuweichen. Die oberirdische Begutachtung empfahl ein Ausscheren nach Westen; die vom Gelände als notwendig vorgegebene Umfahrung wurde in einer geometrisch klaren Figur idealisiert und in der Form eines gleichschenkeligen Dreiecks ausgeführt.

Dass diese Umgehung nicht perfekt gelungen ist, liegt an Nachlässigkeiten und vor allem an einem minimalen Vortriebsfehler von $0,64^\circ$, der beim Nordstollen von Beginn an unterlaufen und für die Bauleute nicht verifizierbar war, aus dem aber nach einer Vortriebsstrecke von 500 m eine beträchtliche Divergenz erwuchs. Es ist deshalb umso erstaunlicher, mit welcher Sicherheit in der Schlussphase des Vortriebs eine letzte Kontrolle vorgenommen und mit welchem Erfolg die Korrektur vollzogen wurde. Der Nordstollen wurde nach Westen zurück- und dann nach dem ursprünglich vorgesehenen Schema auf den Südstollen zugeführt. Entstanden ist auf diese Weise eine äußerst komplizierte Linienführung, deren Interpretation erst anhand der detaillierten Bauaufnahme gelingen konnte (Abb. 5).

Entscheidend für die Entschlüsselung der Trassenführung waren originale Messmarken, die in großer Zahl auf der Tunnelwand aufgemalt sind, und von denen eine Gruppe als zum Vortrieb gehörig erkannt wurde. Die gewissenhafte Auswertung dieser Markierungen erbrachte nicht nur wichtige Erkenntnisse über einzelne Arbeitsschritte, entsprechende Übereinstimmungen mit der Tunneltrasse machen dieses Messsystem zum Beleg für die Rekonstruktion der gesamten Planungsvorganges.

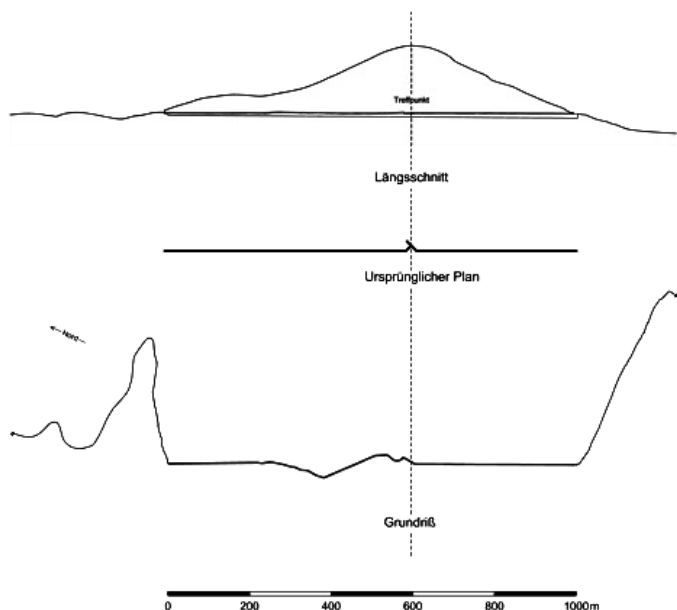


Abb. 5 Längsschnitt durch den Berg mit dem ursprünglichen Planungsgrundriss und dem tatsächlich ausgeführten Tunnel.

In einer zusammenfassenden Beurteilung des Projektes sind folgende Merkmale hervorzuheben: Der Tunnelplan zeugt von hohem Wagemut - das Unternehmen beanspruchte immerhin Jahre, während die Richtigkeit der Planungen sich erst nach erfolgtem Durchbruch zeigte. Er zeugt darüber hinaus von erstaunlichem Wissen über geometrische Gesetzmäßigkeiten und ebenso von praktischem Problembewusstsein. Eupalinos hat sein Projekt ganz sicher durch ausführliche Geländebegehungen vorbereitet, die eigentliche Planung aber basiert auf theoretischen Überlegungen, die nur am "Reißbrett" zu leisten waren. Der Tunnel ist ganz offensichtlich auf einem Zeichentisch - welcher Form auch immer - entworfen worden; dort sind auch alle Arbeitsschritte und insbesondere alle Planänderungen entwickelt worden. Das Zusammentreffen der beiden Stollen nach einem Vortrieb von 420 m bzw. 620 m war nicht glückliche Fügung, sondern Ergebnis eines wohlüberlegten Kalküls.

Bleibt die Frage nach der Entstehungszeit der Wasserleitung. Schon bald nach Bekanntwerden des Monumentes war es communis opinio, dass eine solche Anlage nur von dem Tyrannen Polykrates initiiert worden sein könnte. Die rühmenden Worte Herodots (III 60) wurden ohne Bedenken mit den von Aristoteles (Pol 1313 b) erwähnten Tyrannenwerken in Verbindung gebracht. Ein solcher Zusammenhang ist jedoch allenfalls Hypothese, die Urheberschaft des Polykrates lässt sich nicht belegen. Die verwertbaren Datierungskriterien, die Tonrohre, die Ausbauten und vor allem die wenigen, aber aussagekräftigen archäologi-

schen Funde sprechen eher für eine Entstehung um 550 v. Chr., also vor seiner Machtübernahme. Für eine frühe Datierung sprechen auch konzeptionelle Unzulänglichkeiten der Leitung, die nur auf Unerfahrenheit im Umgang mit Wasser zurückzuführen sind. Über die Person des Baumeisters Eupalinos sind leider keine weiterführenden Erkenntnisse in Erfahrung zu bringen, sein Werk fügt sich jedoch eher in die Aufbruchstimmung, die für die Mitte des 6. Jhs. so kennzeichnend ist, als in die Zeit kurz vor den Perserkriegen.

Die Leitung des Eupalinos hat über einen Zeitraum von mehr als tausend Jahren die Stadt Samos mit frischem Quellwasser versorgt, bis der Tunnel in byzantinischer Zeit von der Bevölkerung der Not gehorchend als Fluchtversteck benutzt wurde. Samos lag am Wege der expandierenden Völker, die damals erobernd gen Konstantinopel zogen. Die Kriegswirren führten dazu, dass die ständig notwendige Wartung der Leitung vernachlässigt blieb, bis schließlich die Sinterablagerungen so angewachsen waren, dass das Gefälle im Kanal für ein Fließen des Wassers nicht mehr ausreichte - vielleicht war auch der Zufluss unterbrochen worden. Ein Neuanfang war nach dieser Periode offenbar nicht mehr möglich. Die Anlage blieb sich selbst überlassen, bis im Laufe der Zeit keinerlei oberirdische Hinweise mehr von ihr auszumachen waren.

Wiederverwendung von Spundwänden

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe, Dr.-Ing. Sascha Henke
Institut für Geotechnik und Baubetrieb, TU Hamburg-Harburg
Dipl.-Ing. Hans-Uwe Kalle
AcelorMittal Commercial RPS Deutschland, Hagen

1 Einleitung

Mit Ressourcen und unserer Umwelt so umzugehen, dass sie für zukünftige Generationen bewahrt werden, sollte eine grundsätzlich geltende Forderung für uns alle sein, selbstverständlich auch für den in der Geotechnik tätigen Ingenieur. Bei dieser Forderung nach Nachhaltigkeit unseres Handelns wird in der Geotechnik sofort an den Schutz und die Sanierung des Grundwassers und des Bodens, den schonenden Materialeinsatz sowie die zunehmende Nutzung der Geothermie als ressourcenschonende Energie gedacht. Bei vielen anderen Anwendungen, wie beispielsweise der Gründung von Windkraft- oder Wasserkraftanlagen, ist die Geotechnik eher Mittel zum Zweck. Darüber hinaus ist der Gedanke an Nachhaltigkeit in der Geotechnik eher untergeordnet. Es sollte jedoch zukünftig im geotechnischen Design stärker berücksichtigt werden, wie die geotechnischen Konstruktionen ressourcenschonend rückgebaut, weiter- oder wiederverwendet werden können. Des weiteren sind die Konstruktionen möglichst so zu entwerfen, dass sie unter Nutzung der modernen Geotechnik, möglichst material- und für die Umwelt eingriffsschonend ausgeführt werden. Um das zu erreichen, sind in Zukunft erhebliche Forschungsanstrengungen zum besseren Verständnis der geotechnischen Grundlagen und Verfahren erforderlich. Ein Beitrag dazu kann auch die numerische multikriterielle Optimierung leisten, wie bei Kinzler und Grabe (2006) gezeigt wird.

Als ein Beispiel für die sinnvolle Weiterverwendung vorhandener Gründungen sei der zur Zeit stattfindende Neubau der Elbphilharmonie in der HafenCity Hamburg auf der alten Gründung des ehemaligen Kaispeichers aus dem Jahr 1965 genannt, siehe Grabe und König (2006). Die bestehenden 1111 Pfähle werden dabei zur Abtragung der Bauwerkslasten sogar 40 % höher ausgenutzt als 1965. Das Zusammenspiel dieser alten Pfähle mit den zusätzlichen ca. 500 neuen Schraubpfählen erfordert allerdings ein hohes Maß an geotechnischem Sachverstand (König, 2008). Dieses Bauwerk ist auch ein Beispiel dafür, dass die Forderung nach Nachhaltigkeit nicht im Widerspruch zu ökonomischen Aspekten steht.

Als weiteres Beispiel wird nachfolgend ausführlich auf die in der Praxis gängige Wiederverwendung von Spundwänden eingegangen. Die Möglichkeiten hinsichtlich einer Wiederverwendung richten sich wesentlich nach dem Zweck und damit der Verweildauer der Spundwände im Baugrund.

So dienen Spundwände beispielsweise dauerhaft als Ufereinfassung, Böschungssicherung oder als Teil eines Trogbauwerks, siehe Bild 1. Sie lassen sich nach der Nutzzeit des

Bauwerks wiedergewinnen und gehen im Allgemeinen als Stahlschrott zurück in den Stahlkreislauf. Eventuell können sie natürlich auch in ein nachfolgendes Bauwerk integriert werden, wie zum Beispiel bei der Ertüchtigung des 6. Liegeplatzes des Predöhlkais in Hamburg geschehen.



Bild 1: Beispiele für die dauerhafte Verwendung von Spundwänden als Trogwand und als Ufereinfassung

Häufig dienen Spundwände lediglich temporär als Bauhilfsmaßnahme zur Baugrubensicherung, wie in Bild 2 dargestellt wird.

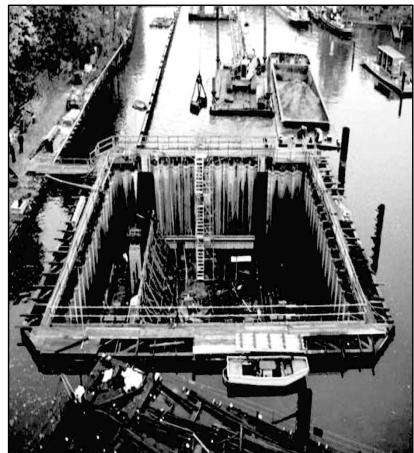


Bild 2: Spundwandeinsatz als temporäre Bauhilfsmaßnahme zur Baugrubensicherung

Das heißt nach Fertigstellung des eigentlichen Bauwerks werden die Spundwände gezogen, bei Bedarf gerichtet und bei der nächsten Baustelle erneut eingesetzt, bis sie als Stahlschrott wieder in den Recycling-Kreislauf zurückgeführt werden.

Seit gut einem Jahrzehnt basiert die Träger- und Stahlpundwandproduktion der westeuropäischen Hersteller zu fast 100 % auf dem „Rohstoff“ Stahlschrott. Träger und Stahlpundwände werden aus sogenannten *Beam Blanks*, dem Endprodukt der zum Elektrostahlwerk gehörenden Stranggussanlage im Warmwalzprozess gefertigt, siehe Bild 3.

Elektrostahlwerk: Belval

ArcelorMittal

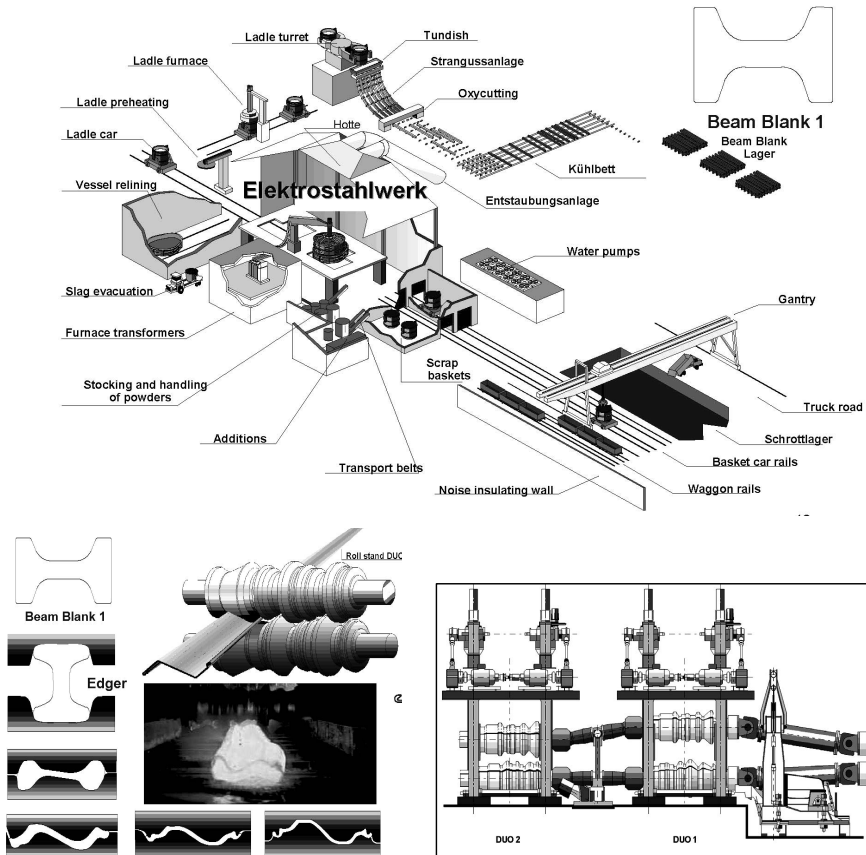


Bild 3: Aufbau des Elektrostahlwerks „Belval“ (oben) und Darstellung der Stahlpundwandfertigung aus Beam Blanks (unten)

Für den Energieverbrauch (PEV) pro Tonne Stahl werden die benötigten Energien in Primärenergie (fossile Brennstoffe) umgerechnet. Gemäß Stahlinstitut VDEh (2008) konnte in der deutschen Stahlindustrie der durchschnittliche Primärenergieverbrauch bis hin zum fertigen Stahllieferprodukt (inkl. Walzen) in den vergangenen vierzig Jahren um ca. 43% gesenkt werden; was in einem noch größeren Maß auch für die CO₂ Emissionen gilt, siehe

Bild 4. Die im diesem Schaubild aufgeführten durchschnittlichen Bedarfsenergien sind als Mittelwert über alle Stahlherstellungsverfahren (Hochofen und Elektrostahl) zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass die Elektrostahlherstellung (EST) weniger als die Hälfte der Energien benötigt, die für die Rohstahlerzeugung (RSt) im Hochofen (Qxygenstahlwerk) benötigt wird. Die meisten westeuropäischen Spundwandhersteller (z.B. ArcelorMittal) beziehen ihr Vormaterial aus Elektrostahlwerken.

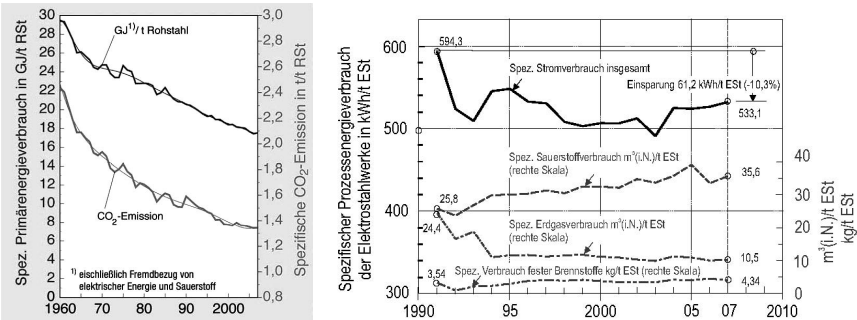


Bild 4: Entwicklung des Energieverbrauchs bei der Stahlproduktion in den letzten Jahrzehnten, siehe Stahlinstitut VDEh, 2008

In der mittlerweile 100-jährigen Geschichte der Spundwand wurden die Profile und deren Stahlsorten den Anforderungen der Böden, der Rammfirmen und der Walztechnik fortlaufend angepasst. Ein Tragfähigkeitsvergleich mit Profilen, die noch bis weit in die 70er Jahre eingesetzt wurden und den heutigen weist eine Verringerung der Masse pro Nutzfläche von über 40-50 % aus, was auf die stete Optimierung des Stahls und insbesondere der Spundwandprofile Rückschlüsse ziehen lässt, siehe Bild 5.

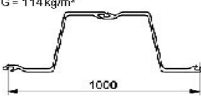
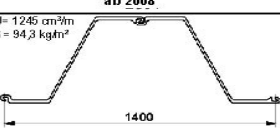
Type	BZ 12 ab 1933	AZ 12 - 770 ab 2008	Tragfähigkeitsverhältnis $W \cdot f_{y,max} / G \equiv Mpl / G$
Z	$W = 1200 \text{ cm}^3/\text{m}$ $G = 114 \text{ kg}/\text{m}^2$ 	$W = 1245 \text{ cm}^3/\text{m}$ $G = 94.3 \text{ kg}/\text{m}^2$ 	BZ 12 = 373,7 12 - 770 = 607,3 AU Materialeinsparung bei gleicher Tragfähigkeit 1 - 373,7/607,3 = <u>38,5%</u>
Type	Larssen III ab 1914	AU 14 ab 2000	
U	$W = 1350 \text{ cm}^3/\text{m}$ $G = 155 \text{ kg}/\text{m}^2$ 	$W = 1405 \text{ cm}^3/\text{m}$ $G = 103,8 \text{ kg}/\text{m}^2$ 	Larssen III = 309,2 AU 14 = 622,6 Materialeinsparung bei gleicher Tragfähigkeit 1 309,2/622,6 = <u>50,3%</u>
	max.Stahlgüte: StSpS, $f_{y,(1990)} = 355 \text{ MN}/\text{m}^2$	max.Stahlgüte: S460 GP, $f_{y,(2010)} = 460 \text{ MN}/\text{m}^2$	

Bild 5: Materialeinsparung bei Spundwänden infolge verbesserter Walztechnik und optimierter Materialausnutzung

Nachfolgend werden kurz einige Merkmale der Stahlspundwand zusammengefasst:

- Die Stahlspundwand unterliegt einer Qualitätskontrolle gemäß ISO 9001 Zertifizierung.
- Durch Stahlgüten von bis zu $f_y \leq 460 \text{ MN/m}^2$ und aufgrund der umfangreichen Produktionspalette kann die Stahlspundwand für Geländesprünge bis zu 30 m für hochbelastete Wände eingesetzt werden.
- Sie wird als „Fertigteil“ auf die Baustelle geliefert.
- Durch Ineinanderstapeln lässt sich ein optimal genutztes Ladevolumen erreichen.
- Die Anlieferung erfolgt hauptsächlich über umweltfreundliche Transportwege (Bahn und Wasserstraßen).
- Im Vergleich zu anderen Wettbewerbsbauweisen werden kürzere Bauzeiten erzielt.
- Einbau erfolgt über Bodenverdrängung ohne Bodenaushub.
- Nachgewiesene Nutzungsdauer > 50 Jahre und Lebensdauer > 80 Jahre
- Die Spundwand kann durch Aufschweißen von Verstärkungslamellen geänderten Lasteinwirkungen angepasst werden.
- Sie ist 100 % recyclebar und kann nach Erstgebrauch wieder verwendet werden.

Diese Zusammenstellung zeigt deutlich, dass durch die Verwendung von Stahlspundwänden in der Geotechnik der Nachhaltigkeitsgedanke verfolgt wird. Insbesondere deswegen, da Stahlspundwände bereits ein recyceltes Produkt darstellen, welches leicht wieder recycelt werden kann.

Die Wiederverwendbarkeit der Spundbohlen ist wesentlich abhängig von der Art des Einbringverfahrens (allg. Rammung). Nach Auskunft der Baufirmen kann bei leichten Rammungen von einer durchschnittlich 6 bis 8-fachen Wiederverwendung der Bohlen ausgegangen werden. Die Spundbohlen werden im Allgemeinen über ca. 4 Baustelleneinsätze abgeschrieben oder für den Bedarfszeitraum von der Rammfirma angemietet. Mitunter wird gern eine Spülhilfe eingesetzt, die den Reibungswiderstand des Bodens und dessen Spitzenwiderstand am Fußbereich der Bohle während des Einbringens erheblich verringert. Hiermit werden geringere Einbringzeiten, d.h. höhere Tagesleistungen und geringere Lärm- und Erschütterungsbelastungen erzielt, siehe Bild 6.

Es ist jedoch zu beachten, dass hiermit möglicherweise eine Reduktion der Mantelreibung bzw. des anzusetzenden Erddruckneigungswinkels (siehe EAU, 8.2.4) einhergeht. Zur Vermeidung von schweren Rammungen kann es auch sinnvoll sein, Rammverfahren wie das staffel- oder fachweise Rammen zu wählen (Bild 7) oder bei fortlaufender Rammung den Boden zuvor mittels Bohrungen oder gar Lockerungssprengungen (s. EAU 8.1.10) aufzulockern (Bild 8).

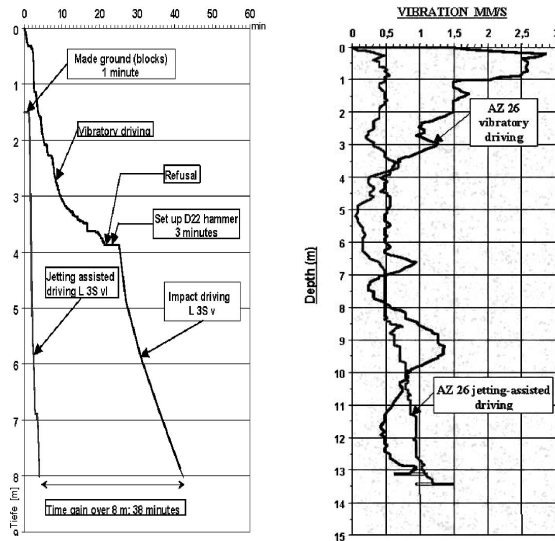


Bild 6: Vergleich des Rammfortschritts einer Spundbohle mit und ohne Spülhilfe, siehe Arcelor RPS (2002)

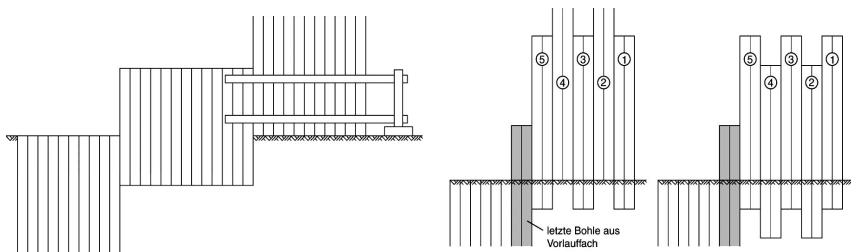


Bild 7: Staffel- (links) und fachweises (rechts) Rammen einer Spundwand

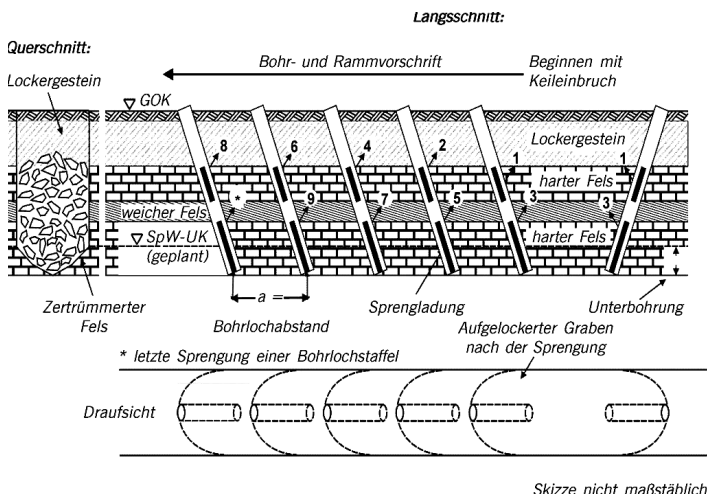


Bild 8: Prinzip der Durchführung von Lockerungssprengungen, siehe EAU (2004)

Bei Ausführung einer schweren Rammung ohne die zuvor genannten Rammhilfsmaßnahmen und unter Missachtung der Abbruchkriterien für Vibration (0,5 m/min) oder bei schlagender Rammung (2 cm/Hitze) (s. EAU 8.1.22.5) kann die Bohle im Fuß- und Kopfbereich so stark beschädigt werden, dass diese Bereiche vor einer Wiederverwendung entweder abgetrennt werden müssen (s. EAU 8.1.19) oder im schlimmsten Fall die Bohlen nicht mehr genutzt werden können, siehe Bild 9.



Bild 9: Beschädigungen am Kopf- bzw. Fußbereich der Spundbohlen infolge der Rammung

Auch können die Schlösser durch Wärmeentwicklung infolge der Rammung (insbesondere beim Einvibrieren der Bohlen) sogar verschweißen, wenn nicht für eine ausreichende Kühlung mittels Wasserzufuhr im Fädelschlossbereich gesorgt wird, sodass die schadhafte Rückgewinnung der Bohlen stark eingeschränkt wird. Zudem ist die Gefahr der Schlosssprengung bei schweren Rammungen besonders hoch. Bei Verwendung in mittelschwer und schwer rammbaren Böden wird in der Praxis meist ein stärkeres Profil als statisch erforderlich ist, gewählt. Der Aspekt der Wiederverwendbarkeit ist folglich, genauso wie die Art der Einbringung, bei der Wahl des Profils zu berücksichtigen.

Die Wiederverwendung von Spundwänden ist jedoch wesentlich davon abhängig, ob es nach der Nutzzeit gelingt, die Bohlen zurückzugewinnen. Manchmal erscheint es nämlich als seien die Bohlen im Baugrund festgewachsen, sodass sie sich nicht ohne Beschädigung ziehen lassen, siehe Bild 10.

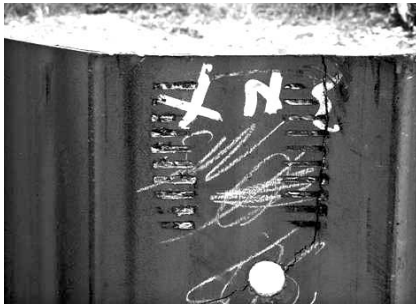


Bild 10: Schäden am Bohlenkopf infolge des Ziehens der Spundwand

Als Ursachen für dieses Anwachsen kommen in Bezug auf die Bohlen folgende Ursachen in Frage:

- Abbau des herstellungsbedingten Porenwasserüberdrucks,
- Relaxation der herstellungsbedingten Spannungen im Boden,
- Spundwandverformungen während der Nutzzeit,
- Physikalisch/chemischer Verbund des Stahlprofils mit dem anstehenden Boden

In Bezug auf die Schlösser lassen sich folgende Ursachen vermuten:

- Erhöhte Schlossreibung bedingt durch Hitzeentwicklung bei der Rammung,
- Zwängungen infolge Herstellimperfectionen und Durchbiegung der Bohle während der Nutzung,
- Eintrieb von Feinsand infolge Grundwasserströmung und Stahlkorrosion

Nachfolgend wird auf die Ursachen für das Anwachsen der Bohlen im Baugrund eingegangen. Relativ wenig wurde bisher zu den vorgenannten schlossbedingten Ursachen geforscht. Dabei erscheinen diese durchaus maßgebend.

Die Ursache des physikalisch/chemischen Verbundes des Profils mit dem anstehenden Baugrund scheint eine eher untergeordnete Rolle zu spielen. Wenn sich nämlich in der Scherfuge zwischen Bohle und Boden ein tragfähiger Verbund ausbildet, was an der gezogenen Bohle oft festgestellt wird, bedeutet das noch lange nicht, dass dadurch der Herausziehwiderstand anwächst. Beim Herausziehen kann und wird sich in diesem Fall eine maßgebende Scherfuge im Boden ausbilden. Dieser Effekt ist nicht ausreichend, die teilweise in der Praxis festgestellten Herausziehwiderstände zu erklären.

Das Lösen der Bohlen erfolgt wie das Einbringen mit handelsüblichen Vibratoren. Deren Ziehkraft ist begrenzt durch die am Spundwandkopf maximal aufnehmbare Verankerungskraft. Die Möglichkeit, die angewachsenen Bohlen frei zu schlagen, ist begrenzt. Im schlimmsten Fall verbleibt die Bohle im Baugrund oder wird, wenn sie stört, aufwendig freigelegt.

Untersuchungen an der Universität Kaiserslautern in Kooperation mit der Firma BAUER Spezialtiefbau GmbH (Pankraz, 1999) zeigen, dass bei bindigen Böden mittels Elektroosmose der Herausziehwiderstand reduziert werden kann. Dabei wird durch Anlegen einer Spannung an der Bohle eine gewisse Strömung im Grundwasser verursacht, die zu einem Ablösen des Bodens von der Bohle führt. Erste Laboruntersuchungen zeigen, dass der Herausziehwiderstand in bindigen Böden durch Anwendung des Elektro-Osmose Verfahrens beträchtlich verringert werden kann. In einem nun beginnenden RCFS (Research Fund for Coal and Steel) EU-Forschungsprojekt sollen unter Beteiligung der TU Kaiserslautern, der Geotechnical Consulting Group (UK), der Rammfirma Dew Piling (UK), der Software-schmiede ELSYCA (B), dem Spezialisten für Elektro-Chemische Simulationen und der ArcelorMittal RPS technische Richtlinien erarbeitet werden, die zur industriellen Anwendung dieses Verfahrens führen.

2 Erhöhung des Herausziehwiderstandes infolge Abbau des herstellungsbedingten Porenwasserüberdrucks

Beim Einbringen der Spundwände in den Untergrund bilden sich Porenwasserüberdrücke an der Grenzschicht von Profil und Boden. Diese Porenwasserüberdrücke bauen sich in Abhängigkeit der Drainagebedingungen insbesondere in der Kontaktzone und im angrenzenden Boden mit der Zeit ab. König (2008) hat dazu numerische Untersuchungen zur Entwicklung des Porenwasserüberdrucks nach Herstellung eines Pfahls in Abhängigkeit der Einbringart durchgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass seine für Profile erhaltenen Ergebnisse auf Spundwände übertragbar sind. In Bild 11 ist das verwendete Finite-Elemente-Modell dargestellt.

Es wird an einem axialsymmetrischen Modell das Eindringen eines Pfahls unterschiedlichen Durchmessers in ein Bodenkontinuum durchgeführt. Hierzu wird eine Reißverschluss-technik verwendet, die ausführlich bei Cudmani (2001), Mahutka et al. (2006) oder König (2008) beschrieben wird.

Die Simulation erfolgt als gekoppelte Strömungs- und Spannungsanalyse, sodass die Wechselwirkungen zwischen Spannungs- und Dichtezustand des Bodens mit dem Porenwasser direkt berücksichtigt werden können. Die Betrachtung einer teilgesättigten Phase erfolgt nicht. Für die Fließbewegung des Wassers wird das Filtergesetz nach Darcy zugrunde gelegt.

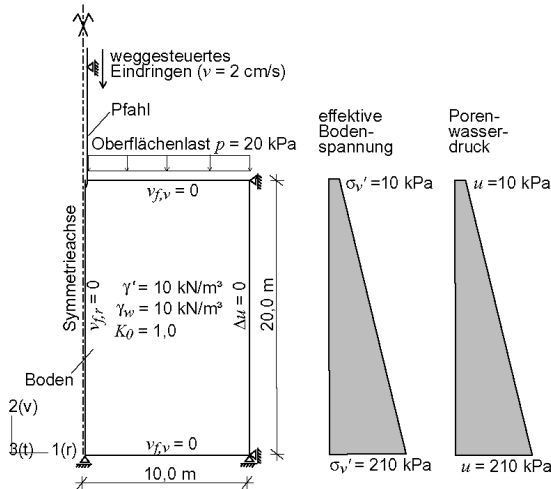


Bild 11: Finite-Elemente-Modell zur gekoppelten Strömungs- und Spannungsanalyse der Pfahleindringung (König, 2008)

Die Berechnungen werden für Sand und Klei durchgeführt. Hierbei wird das hypoplastische Stoffgesetz nach von Wolffersdorff (1996) unter Berücksichtigung der intergranularen Dehnungen nach Niemunis und Herle (1997) für den Sand bzw. das visko-hypoplastische Stoffgesetz nach Niemunis (2003) für den Klei verwendet. Die Stoffparameter sind bei König (2008) dargestellt.

Es muss erwähnt werden, dass dynamische Effekte nicht berücksichtigt werden, die Porenwasserüberdrücke ergeben sich ausschließlich aus Kompressions- und Scherverformungen des Bodens.

In Bild 12 sind die Porenwasserüberdrücke direkt nach dem Eindringen für den Klei und den Sand dargestellt. Es zeigt sich bei beiden Böden deutlich, dass sich direkt am Pfahlmantel Porenwasserüberdrücke ausbilden.

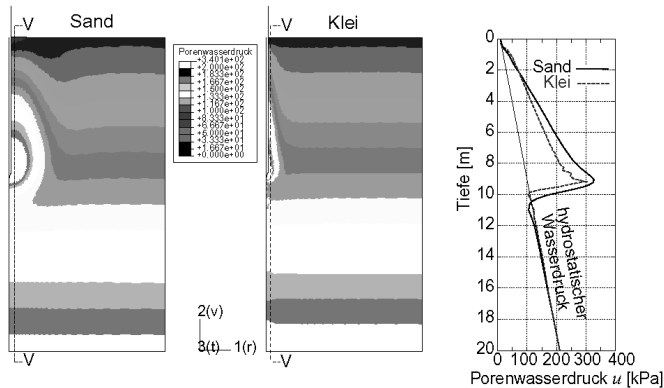


Bild 12: Porenwasserdruckverteilung nach Pfahleindringung als Konturplot (links) und im Vertikalschnitt am Pfahlmantel (rechts) (König, 2008)

Nach der Einbringung wird von König (2008) untersucht, wie sich die Porenwasserüberdrücke mit der Zeit entwickeln. Es zeigt sich in allen Berechnungen, dass sich die Porenwasserüberdrücke mit der Zeit je nach Bodendurchlässigkeit abbauen, siehe Bild 13.

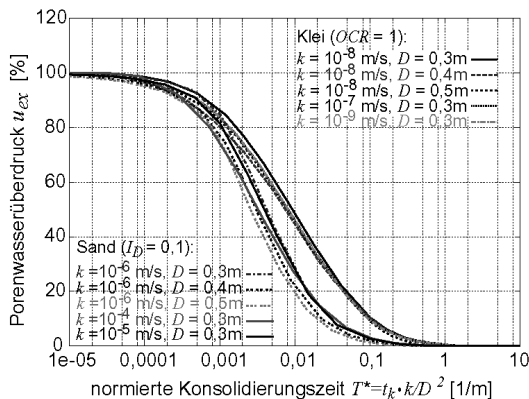


Bild 13: Konsolidierungsfortschritt am Pfahlmantel nach Bodendurchlässigkeit und Pfahldurchmesser normiert (König, 2008)

Die Ergebnisse von König (2008) zeigen weiterhin, dass infolge der Konsolidierung die radialen Spannungen direkt am Pfahlmantel deutlich ansteigen, siehe Bild 14. Diese Spannungszunahme infolge Konsolidierung ist eine mögliche Ursache für die erhöhten Herauszieh Widerstände, d.h. für das Anwachsen der Bohle im Untergrund.

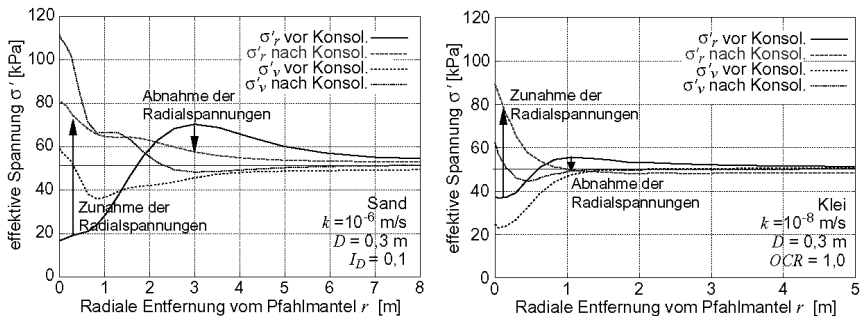


Bild 14: Radiale Spannungsverteilung nach Pfahleindringung und nach Konsolidierung in 4 m Tiefe für Sand (links) bzw. Klei (rechts) (König, 2008)

3 Erhöhung des Herausziehwiderstandes infolge Relaxation der herstellungsbedingten Spannungen im Boden

Beim Einvibrieren von Spundwänden verdichtet sich locker und mitteldicht gelagerter Sand infolge Scherung. Zudem reduzieren sich die Horizontalspannungen an der Bohle, siehe Henke (2008), Mahutka (2007) oder White und Bolton (2004). Mit der Zeit steigt die Horizontalspannung infolge Relaxation wieder an. Beim Eindringen ergibt sich hingegen zunächst eine erhöhte Horizontalspannung, die mit der Zeit wieder abfällt.

Dies soll nachfolgend an den Untersuchungen von König (2008) veranschaulicht werden. Er untersucht das Relaxationsverhalten des Bodens nach dem Eindringen einer Drucksonde. Die erhaltenen Ergebnisse sind qualitativ, wie zuvor auch auf die Installation von Pfählen oder eben Spundwände zu übertragen.

Es wird von König (2008) das Eindringen einer typischen Drucksonde in den Untergrund untersucht. Hierbei werden sowohl der Sand als auch der Klei mit dem visko-hypoplastischen Stoffgesetz nach Niemunis (2003) beschrieben, da hiermit auch das zeitabhängige Tragverhalten abgebildet werden kann. Da das visko-hypoplastische Stoffgesetz eigentlich für weiche Böden konzipiert wurde, können die Eigenschaften des Sandes nur näherungsweise erfasst werden.

In Bild 15 ist ein exemplarischer Konturplot der horizontalen Spannungen um die Sonde direkt nach der Installation und nach einem Jahr Standzeit dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach einem Jahr ein Relaxationsprozess stattgefunden hat. Hierdurch wurden die hohen Spannungsgradienten abgebaut. Insbesondere am Sondenmantel hat ein Ausgleich der Spannungen stattgefunden, d.h. Spannungsspitzen werden abgebaut und Spannungstäler steigen entsprechend an.

Dieses Verhalten kann auch in Bild 16 erkannt werden, in der die radialen und tangentialen Spannungen am Gestänge und der Reibungshülse dargestellt sind. Insbesondere am Pfahlmantel fällt hierbei auf, dass die radialen Spannungen nach einem Jahr Standzeit deutlich ansteigen.

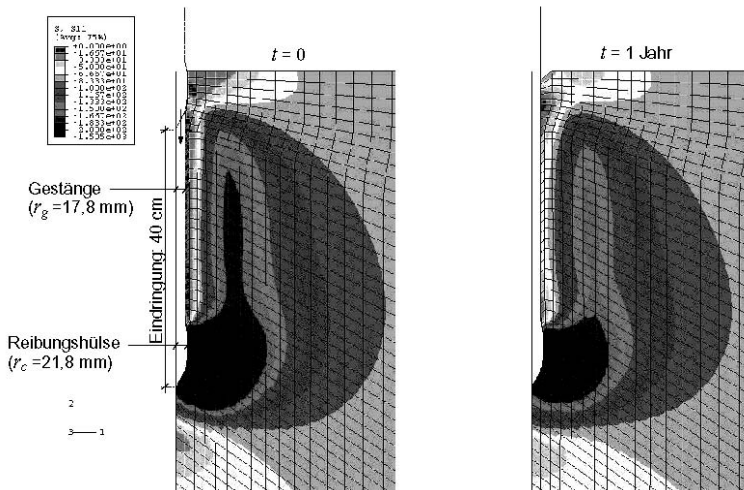


Bild 15: Konturplot der Radialspannungen direkt nach Sondeneindringung (links) und nach einem Jahr Standzeit (rechts), (König, 2008)

Somit kann aus dieser Untersuchung geschlossen werden, dass neben dem Abbau von Porenwasserüberdrücken mit einhergehenden Verspannungen auch die Relaxation im Boden eine wesentliche Rolle dabei spielt, dass sich nach einer gewissen Standzeit der Herauszieh Widerstand der Spundbohlen teilweise deutlich erhöht.

4 Erhöhung des Herauszieh Widerstandes infolge Spundwanddurchbiegung im Gebrauchszustand

Ziel der nachfolgenden numerischen Untersuchungen ist es, die Erhöhung des Herauszieh Widerstandes infolge Spundwanddurchbiegung im Gebrauchszustand zu modellieren. Insbesondere ist es interessant, inwieweit die Durchbiegung der Bohle im Gebrauchszustand die Rückgewinnung der Bohle beeinflusst. Zur numerischen Simulation der Einbringung von Profilen gibt es umfangreiche Untersuchungen, wie z.B. das Einbringen von kreisrunden Vollprofilen am axialsymmetrischen Modell von Mabsout und Tassoulas (1994), Cudmani (2001) oder Mahutka et al. (2006), die Simulation des Einbringens von offenen Rohrquerschnitten von Liyanapathirana et al. (1998, 2000) oder Henke und Grabe (2008) und zum Einbringen von Profilen mit beliebigem Querschnitt am räumlichen Modell, von Henke (2008).

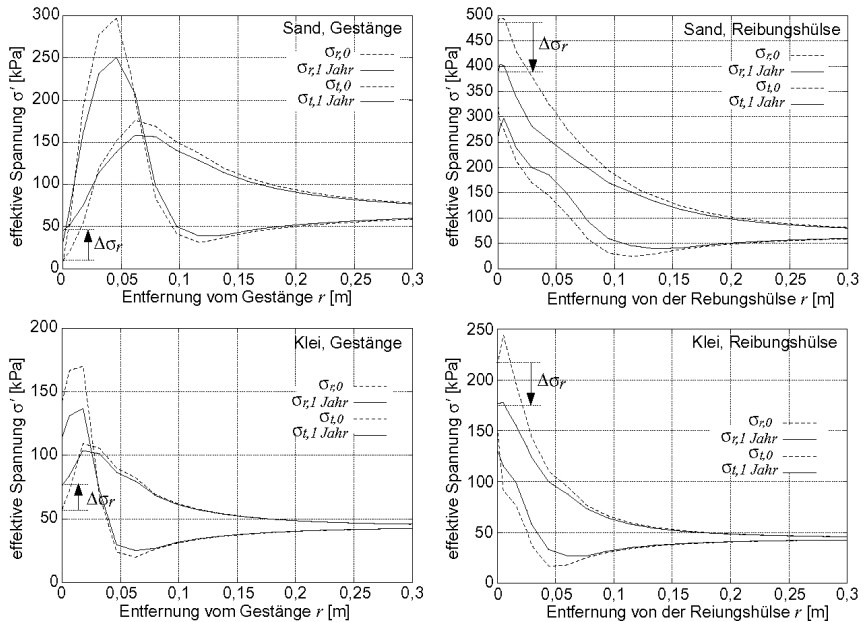


Bild 16: Spannungen entlang eines Radialschnitts direkt nach Sondeeindringung und nach einem Jahr Standzeit im Sand (oben) und in Klei (unten) am Gestänge(links) und an der Reibungshülse (rechts), (König, 2008)

Schwieriger ist die Simulation des Herausziehens von Profilen. Hierbei treten Bodenverformungen auf, die mit der verwendeten Reißverschluss-technik bisher nicht stabil simuliert werden können. Besser werden dazu netzfreie Verfahren (z.B. Lucy, 1977) oder gekoppelte Euler-Lagrange-Verfahren geeignet (Noh, 1964 oder Aubram, 2006) sein. Letzteres wird nachfolgend zur vorgenannten Simulation des Herausziehens einer durchgebogenen Bohle verwendet. Dabei ist einschränkend zu erwähnen, dass als Stoffgesetz für den Boden derzeit lediglich das Drucker-Prager Stoffgesetz von Abaqus zur Verfügung gestellt wird.

4.1 Modellbildung mit Abaqus/CEL

4.1.1 System

Das untersuchte System mit allen maßgebenden Abmessungen ist in Bild 17 dargestellt.

Die Spundwand vom Typ AU 21 wird als verformbare Spundwand mit lagrangischen Enden mit linearem Ansatz für die Verschiebungen und reduzierter Integration diskretisiert. Sie hat eine Länge von 10,50 m, wobei 10 m in den Untergrund einbinden und eine Länge von 0,50 m aus dem Untergrund herausragt. Zudem kann Bild 17 entnommen werden, dass der gesamte Bodenkörper mit Hilfe einer Euler-Diskretisierung abgebildet wird. Hierbei ist der Bodenbereich zu Beginn der Berechnung vollständig mit Bodenmaterial gefüllt, während der Bereich oberhalb der Geländeoberkante materialfrei ist. Dieser Bereich

ist jedoch ebenfalls mit Euler-Elementen versehen, um einen Materialtransport dorthin zu ermöglichen.

Die Spundwand befindet sich zu Beginn der Berechnung bereits wished-in-place im Untergrund und wird an ihrem Kopf durch eine horizontale Randbedingung gehalten, wodurch eine Rückverankerung der Spundwand idealisiert wird.

4.1.2 Randbedingungen

Euler-Elemente besitzen die Eigenschaft, dass ohne entsprechende Randbedingungen Material aus dem Modell herausfließen kann, sodass dieses danach nicht wieder in die Berechnung zurückgeführt werden kann. An den Außenflächen des in Bild 17 dargestellten Modells sind die Randbedingungen derart gewählt, dass die Geschwindigkeit orthogonal zu den Außenflächen auf Null begrenzt wird. Dies bedeutet, dass kein Material aus dem Modell heraus oder aber in das Modell hineinfließen kann.

Zudem wird eine Verformungsrandbedingung am Bohlenkopf definiert. Diese Randbedingung wirkt in horizontaler Richtung und stellt somit eine starre horizontale Verankerung am Bohlenkopf dar.

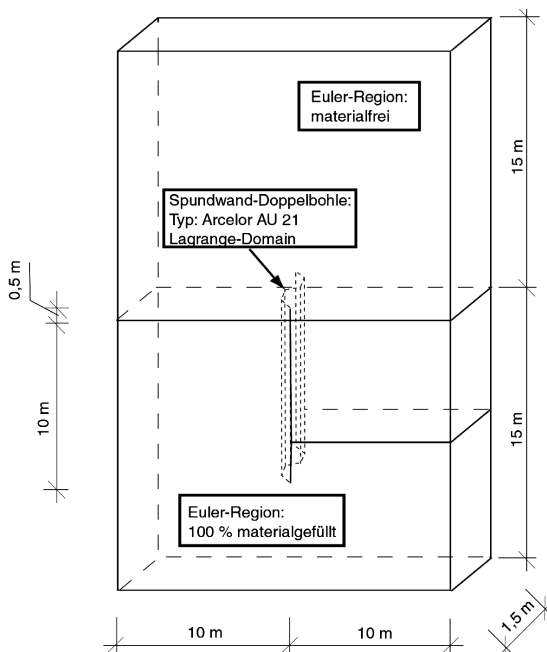


Bild 17: Untersuchtes System zum Ziehen einer Spundwand des Typs AU 21

4.1.3 Verwendetes Netz

Für die Spundbohle werden in Abaqus implementierte Lagrange-Elemente mit linearem Ansatz für die Verschiebungen und reduzierter Ingeration verwendet.

Für die Euler-Bereiche werden von Abaqus/CEL bereitgestellte Euler-Elemente verwendet. Hierbei kann den Berechnungen ein regelmäßiges Netz mit vorwiegend rechteckigen Elementen zugrundegelegt werden, siehe Bild 18.

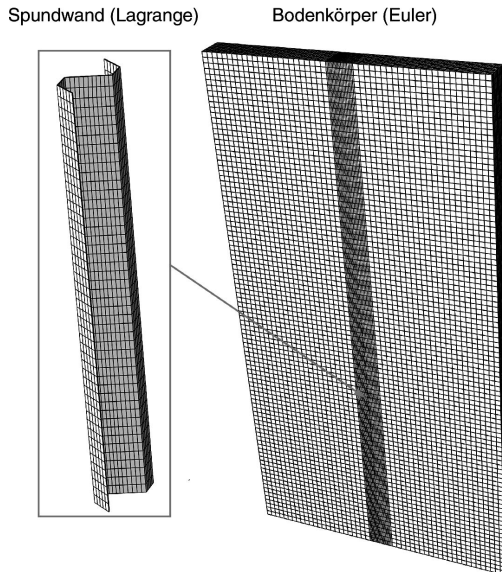


Bild 18: Verwendete Netze für die Spundbohle (Lagrange-Elemente) und den Bodenkörper (Euler-Elemente)

4.1.4 Stoffgesetz und -parameter

Die Spundbohle wird linear elastisch mit den Materialeigenschaften von Stahl diskretisiert. Der Boden wird mit einem elasto-plastischen Kappenmodell mit Fließfläche nach Drucker-Prager beschrieben. Allen hier dargestellten Berechnungen liegen folgende in Tabelle 1 zusammengefasste Parameter zugrunde.

Tabelle 1: Verwendete Stoffparameter für den verwendeten Boden, siehe HKS INC. (2008)

d [kN/m ²]	β [°]	E [kN/m ²]	ν [-]	R [-]	$\mathcal{E}_{vol}^{in}$ [-]	K [-]
0,01	50,7	30.000	0,3	0,01	0,0009	0,9

4.1.5 Kontakt

Für alle Kontaktflächen wird das Reibungsgesetz nach Coulomb gewählt. Der Reibungsbeiwert zwischen Spundbohle und umgebenden Boden ist in allen Berechnungen festgelegt zu $\tan \delta = 0,05$.

4.1.6 Lastgeschichte

Es werden zwei unterschiedliche Berechnungen durchgeführt. Zum einen das Ziehen einer unverformten Spundbohle. Hierfür ist die Lastgeschichte wie folgt definiert:

1. Aufbringen eines unverformten K_0 -Zustandes mit wished-in-place eingebauter Spundwand,
2. fünf Meter Ziehen der Spundbohle.

Dem gegenüber steht eine Berechnung, bei der zusätzlich der Aushub und die Wiederverfüllung einer Baugrube berücksichtigt werden. Die Lastgeschichte erweitert sich entsprechend zu:

1. Aufbringen eines unverformten K_0 -Initialzustandes mit wished-in-place eingebauter Spundwand,
2. Simulation von 7 m Bodenaushub durch Reduktion der Erdbeschleunigung in dem auszuhebenden Bereich,
3. Simulation der Wiederverfüllung durch Erhöhung der Erdbeschleunigung in dem zu verfüllenden Bereich,
4. fünf Meter Ziehen der Spundbohle.

Es ist zu beachten, dass die Simulation des Bodenaushubs und der Wiederverfüllung durch Anpassung der Erdbeschleunigung lediglich eine Näherung darstellt. Das Ziehen der Spundbohle wird jeweils ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte als quasi-statisches Ziehen weggesteuert simuliert.

4.2 Ergebnisse

Der berechnete Herauszieh Widerstand der AU 21 Doppelbohle ist in Bild 19 dargestellt. Wie zu erwarten war, ist die Zugkraft für die verformte Bohle größer als bei der unverformten Bohle.

Die Tendenz wird damit plausibel wiedergegeben. Die absoluten Werte sind aufgrund des verwendeten Stoffgesetzes nicht belastbar. Hierzu sollen zukünftig weitere Untersuchungen folgen.

Dies zeigt, dass neben den zuvor genannten Effekten auch eine Verformung der Spundbohle infolge des Bauprozesses zu einem Anstieg des Herauszieh Widerstandes der Spundbohle führt, der nicht vernachlässigt werden sollte.

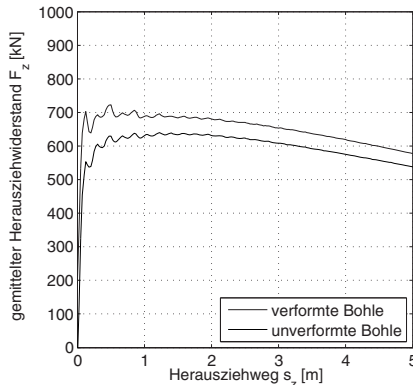


Bild 19: Vergleich des Verlaufs des gemittelten Herausziehewiderstandes für die beiden betrachteten Fälle

5 Zusammenfassung

Der Grundsatz der Nachhaltigkeit gilt insbesondere für die Geotechnik, da geotechnische Konstruktionen in der Regel Einfluss auf die Schutzgüter Boden und Grundwasser nehmen. Darüber hinaus sind alle verpflichtet, Material- und Energieressourcen so zu verwenden, dass sie nachfolgenden Generationen erhalten bleiben. Der Gedanke, geotechnische Materialien und Konstruktionen mehrfach zu verwenden, sollte daher zukünftig stärker in dem Entwurf des geotechnischen Ingenieurs Berücksichtigung finden.

Am Beispiel der Wiederverwendung von Spundwänden zeigt sich, dass mit der Forderung nach Nachhaltigkeit eine ganze Reihe von interessanten Fragestellungen aufgeworfen werden. Die mehrfache Verwendung von Spundwänden scheitert nämlich manchmal daran, dass die Bohlen scheinbar am Baugrund an- oder festwachsen. Hierfür werden mögliche Ursachen aufgezeigt. Näher untersucht wird der Effekt des Anwachsens infolge des Abbaus des herstellungsbedingten Porenwasserüberdrucks, der Relaxation herstellungsbedingter Horizontalspannungen sowie der Einfluss einer Bauteildurchbiegung:

- Es zeigt sich, dass der herstellungsbedingte Porenwasserüberdruck in durchlässigen Böden bereits nach kurzer Zeit abgebaut wird. Daraus folgt, dass bereits nach wenigen Minuten bzw. Stunden, je nach Durchlässigkeit des Bodens, der Herausziehewiderstand deutlich anwächst. In gering durchlässigen, bindigen Böden kann sich dieser Vorgang über mehrere Monate erstrecken.
- Beim Einpressen von Bohlen werden deutlich erhöhte Horizontalspannungen im Boden verursacht. Zur Unterstützung des Einpressens wird daher gern zusätzlich eine Spülhilfe genutzt. Mit der Zeit reduzieren sich die herstellungsbedingt erhöhten Horizontalspannungen infolge Relaxation. Der Effekt der Relaxation ist besonders ausgeprägt in viskosen Böden. Er tritt aber auch in Sand auf, allerdings in viel größeren

Zeiträumen. Beim Einvibrieren werden bedingt durch Scherverdichtung die Horizontalspannungen im Boden im Nahbereich der Bohle reduziert. Im Gegensatz zum Einpressen ist hier mit der Zeit mit einem Anwachsen der Bohle infolge Relaxation der Spannungen im Boden zu rechnen. Das Einrammen bewirkt einen Zustand im Boden, der zwischen dem des Eindrückens und des Vibrierens liegt.

- Die Durchbiegung der Bohlen im Gebrauchszustand führt zu einer weiteren Erhöhung des Herausziehwiderstandes. Der Versuch auch diesen Effekt mit der Finite-Elemente-Methode zu simulieren, gelingt erstmals mit der von Abaqus zur Verfügung gestellten Coupled-Euler-Lagrange-Methode. Das bisher von Abaqus zur Verfügung gestellte Stoffgesetz nach Drucker-Prager ist jedoch nicht geeignet, quantitative Aussagen abzuleiten.

Die ganzheitliche Simulation des Zyklus einer Bohle gelingt bisher noch nicht zufriedenstellend. Besonders nachteilig ist hierbei die Einschränkung hinsichtlich des verwendbaren Stoffgesetzes, aber auch der fehlenden gleichzeitigen Modellierung der vorgenannten Konsolidierungs- und Relaxationsvorgänge zu bewerten. Zudem fehlt die Möglichkeit einer Modellierung der vorgenannten physikalisch/chemischen Vorgänge zwischen Bohle und Boden sowie die vermutlich wichtigen Effekte in den Schlössern. Dies zeigt deutlich, dass auch in Zukunft ein erheblicher Forschungsbedarf in der Geotechnik im Bereich der ganzheitlichen Modellierung von Herstellungsvorgängen und der Nachhaltigkeit vorhanden ist.

6 Literatur

- Arcelor RPS (2002): Stahlspundwände: Rüttelspülverfahren beim Einbringen von Spundbohlen. Firmenprospekt.
- Aubram, D., 2006: Arbitraty Lagrangian-Eulerian Finite Elemente Formulierung für Eindringvorgänge in Sandböden. 29. Baugrundtagung, Spezialsitzung „Forum für junge Geotechnik-Ingenieure“, 10-13.
- Cudmani R.O. (2001): Statische, alternierende und dynamische Penetration in nichtbindigen Böden. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Friderici-ana in Karlsruhe, Heft 152.
- EAU (2004): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassung“ – Häfen und Wasserstraßen. 10. Auflage, herausgegeben von der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Grabe J. und König F. (2006): Zeitabhängige Traglaststeigerung von Pfählen am Beispiel der Elbphilharmonie. Bautechnik, 83(3):167-175.
- Henke, S. (2008): Herstellungseinflüsse aus Pfahlrammung im Kaimauerbau. Dissertation. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 18.
- Henke S. und Grabe J. (2008): Numerical Investigation of Soil Plugging Inside Open-ended Piles With Respect to the Installation Method. Acta Geotechnica, 3(3):215-223
- HKS Inc. (2008): Abaqus documentation, Version 6.8, Hibbit & Carlsson.
- Kinzler S. und Grabe J. (2006): Wirtschaftliche Optimierung rückverankerter Spundwandkonstruktionen. Tagungsband zum Workshop Optimierung in der Geotechnik - Strategien und Fallbeispiele in Hamburg 2006, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 12, S. 61-86.

- König, F. (2008): Zur zeitlichen Traglastentwicklung von Pfählen und der nachträglichen Erweiterung bestehender Pfahlgründungen. Dissertation. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 17.
- Liyanapathirana D.S., Deeks A.J., Randolph M.F. (1998): Numerical analysis of soil plug behaviour in open-ended piles during driving. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 22, 303-322.
- Liyanapathirana D.S., Deeks A.J., Randolph M.F. (2000): Numerical modelling of large deformations associated with driving of open-ended piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 24, 1079-1101.
- Mabsout M.E. und Tassoulas J.L. (1994): A finite element model for the simulation of pile driving. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37, 257-278.
- Mahutka K.-P., König F., Grabe J. (2006): Numerical modeling of pile jacking, driving and vibro driving. *Proceedings of International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment (NSC06)*, Bochum, ed. by T. Trinatafyllidis, Balkema, Rotterdam, 235-246.
- Niemunis, A. und Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Frictional and Cohesive Materials*, No. 2, pp. 279-299.
- Niemunis, A. (2003): Extended hypoplastic models for soils. *Habilitation. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik*, Ruhr-Universität Bochum, Heft 34.
- Noh, W.F. (1964): CEL: A Time-Dependent, Two-Space-Dimensional, Coupled Eulerian-Lagrangian Code. *Methods in Computational Physics*, 3, *Fundamental Methods in Hydrodynamics*, Academic Press, NY, pp. 117-179.
- Pankraz, K. (1999): Zugversuche an Stahlspundbohlen unter Berücksichtigung verschiedener Einbringverfahren. Diplomarbeit. Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau, Universität Kaiserslautern.
- Stahlinstitut VDEH (2008): CO₂-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland, Berichtsjahre 2005 bis 2007; Düsseldorf, April 2008 (http://www.stahl-online.de/wirtschaft_und_politik/Umwelt_und_Energiepolitik/Energiepolitik).
- von Wolffersdorff, P.-A. (1996): A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, No. 1, pp. 251-271.
- White, D.J., Bolton, M.D. (2004): Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand. *Géotechnique* 54, No. 6, 375-397.

Nachhaltigkeit bei Baumaschinen am Beispiel einer Tiefbohranlage

Dr.-Ing. Ulrich Westenthanner, Dipl.-Ing. (FH) Leonhard Weixler,
BAUER Maschinen GmbH, Schrobenhausen

1 Einleitung

Klimaschutzbestreбungen und die zunehmende Verknappung der (bisher erschlossenen) fossilen Energieträger lassen die Nachfrage nach Tiefbohrmaschinen stark ansteigen. Für diesen Markt hat auch die BAUER Maschinen GmbH aufbauend auf Ihrem riesigen Erfahrungsschatz aus dem Spezialtiefbau eine solche Anlage entwickelt. Die Tiefbohranlage wird im Frühjahr 2009 den Probetrieb aufnehmen. Mit 540 t für den in **Bild 1** dargestellten Kernbereich ist diese Anlage ca. viermal so schwer wie das größte Serienbohrgerät von BAUER Maschinen.

Bei der Entwicklung dieser Tiefbohranlage wurde besonders darauf geachtet, eine gute Umweltbilanz zu erreichen. Entsprechende Maßnahmen auf den drei Feldern

- Herstellung
- Transport
- Betrieb (Antriebskonzept)

stehen ganz im Sinne des Nachhaltigkeitsgedankens.

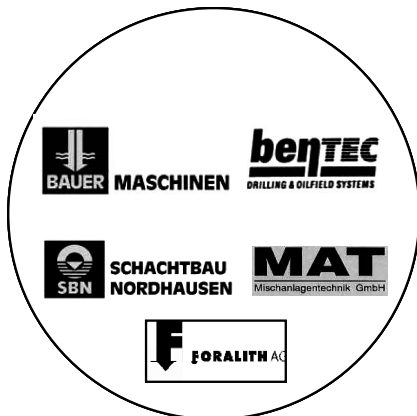


Bild 1: Tiefbohranlage BAUER TBA 300

2 Die Tiefbohranlage BAUER TBA 300

An Entwicklung, Fertigung und Betrieb sind mehrere Partner beteiligt, **Bild 2**. Bis auf die Fa. Bentec sind alle in der BAUER AG beheimatet.

Die technischen Daten sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Mit diesen Leistungsdaten kann die TBA 300 sowohl für Bohrungen nach Erdöl/Erdgas als auch für Geothermiebohrungen verwendet werden. Sie ist für Bohrungen bis gut 3000 m geeignet.



Max. Zugkraft :	280 t
Max. Druckkraft:	30 t
Gesamthöhe:	40,83 m
Gewicht:	540 t
Freier Hub / Gestängeeinbau:	14,0 m
/ Casingeinbau:	20,0 m
Max. Drehmoment Kraftdrehkopf:	65 kNm
Max. Drehzahl Kraftdrehkopf:	180 U/min
Installierte Leistung Grundgerät:	800 kW
installierte Leistung Gesamtanlage:	4 MW
Größe innerer Bohrplatz:	31 x 46 m

Bild 2: Partner im Projekt Tiefbohranlage Tabelle 1: Technische Daten der TBA 300
TBA 300

Zusätzlich zu dieser Kernanlage, die den Bohrturm, das Gestängehandling, die Antriebstechnik und die Spülpumpen enthält, werden eine Separationsanlage, eine Mischstation, Spül- und Vorrattanks für die Stützflüssigkeit auf dem inneren Bohrplatz benötigt. Ebenso sind hier die Dieselgeneratoren aufgestellt, wenn kein direkter Anschluss an das Stromnetz möglich ist.

3 Nachhaltigkeit bei der Herstellung

Blickt man auf den Herstellungsprozess, können ganz besonders drei Aspekte für nachhaltiges Denken hervorgehoben werden – die Nähe der Zulieferer und die fortschrittlichen Produktionsanlagen mit einer hochmodernen Lackieranlage und energiesparender Hallentechnik.

Bei der Auswahl der Zulieferer wurde auf geringe Entfernung vom Produktionsstandort Schrobenhausen geachtet. Wie auch bei den im Folgenden noch aufgeführten Aspekten für Nachhaltigkeit, ist auch bei diesem Punkt nachhaltiges Wirtschaften eine zentrale Triebfeder. Nur damit können langfristig geringe Herstellungskosten erzielt werden, was sich natürlich günstig auf die Kalkulation des Verkaufspreises auswirkt. Wie **Bild 3** zeigt, werden mehr als 80 % der Zulieferteile der Kernanlage in einem Umkreis von weniger als 800 km produziert.

Diese geringe Distanz führt natürlich in erster Linie zu geringen Transportkosten. Wesentlich schwerer zu quantifizieren ist der Effekt, während der Entwicklungsphase der Tiefbohranlage aufgrund der kurzen Reisewege direkten, persönlichen Kontakt zu den Zulieferern halten zu können. Damit ist eine sehr eng abgestimmte Entwicklung gewährleistet, die wenig Raum für Missverständnisse zwischen den Partnern lässt und schnellen Fortschritt ermöglicht.

Um die stark gestiegene Nachfrage nach ihren Produkten befriedigen zu können, hat die BAUER Maschinen GmbH in umfangreiche Erweiterungen der Produktionsstandorte am Stammsitz in Schrobenuhausen investiert. Jede einzelne Maßnahme zeigt ein starkes Bewusstsein für nachhaltiges Wirtschaften. Als Beispiele sollen hier die neue Lackiererei und die Logistikhalle vorgestellt werden:

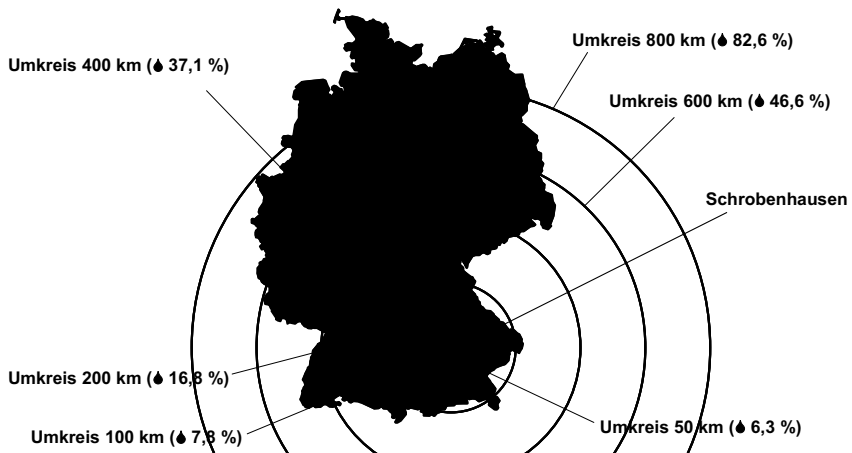


Bild 3: Nähe der Zulieferer – Anteile kumuliertes Einkaufsvolumen Kernanlage

Durch die Entscheidung, die neue Lackiererei mit einem sehr investitionsintensiven, aber nahezu lösungsmittelfreien Verfahren auszurüsten, konnte der Verbrauch an umweltschädlichen Lösemitteln enorm reduziert werden. Natürlich spielt hier auch die Höhe der Entsorgungskosten eine Rolle. Die Lackiererei ist ungefähr Mitte 2008 in Betrieb gegangen. Trotz einer Steigerung der Geräteproduktion um fast 80 % gegenüber dem Bezugsjahr 2007 sinkt der Lösemittelverbrauch um mehr als 70 % im Jahr 2009, in dem die Lackiererei das erste komplette Jahr arbeitet, **Tabelle 2**.

Tabelle 2: Lösungsmittelreduzierung für Reinigungs- und Lackierprozess

Produktionsjahr	Geräteproduktion [Stück]	Steigerung, Basis 2007 [%]	Gesamtverbrauch Lösemittel [Liter]	Reduzierung, Basis 2007 [%]
2007	190	- - -	12.500	- - -
2008	270	+ 42	9.625	- 23
2009	340	+ 78	3.250	- 74

Die Logistikhalle ist ein gutes Beispiel dafür, wie schnell sich Zusatzinvestitionen in energie-sparende Hallentechnik bezahlt machen. Der sehr niedrige Energieverbrauch der Heizungs-anlage durch die Nutzung der warmen Gebäudeabluft für die Vorwärmung der Frischluft ist natürlich auch Ressourcen schonend und entspricht damit dem Nachhaltigkeitsgedanken, Bild 4.

- **Wärmerad zum Lüftungsaggregat Freiflächenlackieranlage**
Investition 25 T€ / Wirkungsgrad ca. 70 % / 2,5 Jahre Amortisationszeit / 50.000 m³/h bei 22 °C
- **Wärmerad zum Lüftungsaggregat Lackierkabine**
Investition 30 T€ / Wirkungsgrad ca. 70 % / 1,5 Jahre Amortisationszeit / 70.000 m³/h bei 22 °C
- **Kreuzstromwärmetauscher zum Lüftungsaggregat "Sozial- und Lagerbereich"**
Investition 15 T€ / Wirkungsgrad 50 % / 10,0 Jahre Amortisationszeit / 2750 m³/h bei 20 °C
- **Plattenwärmetauscher zum "Wärmerückgewinnungssystem Hallenheizung"**
Investition 120 T€ / Wirkungsgrad 60 % / 6,5 Jahre Amortisationszeit / 40000 m³/h bei 20 °C
- **Zu- und Abluftgeräte Kompressorenanlage als Hallenheizung Logistikhalle**
Investition 50 T€ / Wirkungsgrad 100 % / 0,0 Jahre Amortisationszeit / 35000 m³/h bei 45 °C

Σ Investitionen 240 T€ / Wirkungsgrad ca. 65 % / ca. 5,0 Amortisationszeit
(auf Gas- und Strompreisniveau Stand Oktober 2007)

Bild 4: Wärmerückgewinnung durch energetisch regenerative Anlagensysteme am Beispiel der Logistikhalle

4 Nachhaltigkeit beim Transport

Eine derart große Anlage wie die TBA 300 verursacht natürlich auch einen enormen Transportaufwand, bis sie am Einsatzort angekommen ist. Damit sind diese Kosten ein signifikanter Posten für den Betreiber. Ziel muss also sein, diese möglichst gering zu halten. Transportkosten setzen sich hauptsächlich aus den Kraftstoffkosten der Transportmittel und dem Aufwand für den Umschlag zusammen. Um dem Betreiber in diesen Punkten optimale

Voraussetzungen bieten zu können, ist die TBA 300 so konstruiert, dass sie ausschließlich in Containern nach internationaler Norm Platz findet. Für die Kernanlage sind beispielsweise drei Stück 20 ft- und 16 Stück 40 ft-Container (davon die Hälfte Hochcontainer mit einer um 300 mm größeren Höhe) erforderlich. Somit sind die Umschlagkosten gering und der Betreiber hat die Möglichkeit, für jeden Wegabschnitt das jeweils optimale, energiesparendste Transportmittel zu wählen.

Am Bohrplatz angekommen, ist geringer Aufwand an zusätzlich benötigten Hilfsgeräten ebenfalls ein wichtiger Aspekt. Deshalb ist die Kernanlage der TBA 300 so konstruiert, dass sie weitgehend selbst errichtend ist. Im Sinne von Nachhaltigkeit wird hier Energie durch den stark reduzierten Transport der Hilfsgeräte eingespart.

5 Nachhaltigkeit im Betrieb

Hier stehen drei Aspekte im Vordergrund:

- Geringer Energieverbrauch
- Niedrige installierte Leistung
- Niedriger Verschleiß

Werden diese Punkte bei der Auslegung berücksichtigt, ist ein Ressourcen schonender Betrieb sichergestellt. Der Betreiber hat dadurch natürlich auch Kostenvorteile.

5.1 Geringer Energieverbrauch

Das Antriebskonzept der Kernanlage selbst ist hydraulisch. Damit werden der Bohrantrieb, die Vorschubsysteme und das Gestängehandling versorgt. Es zeichnet sich durch eine hohe Energieeffizienz aus – sehr großzügig dimensionierte Hydraulikleitungen und eine wirkungsgradoptimale Pumpensteuerung. Die Anlage ist mit biologisch schnell abbaubarem Hydrauliköl befüllt. Bei der Konstruktion des Ein-/Ausbausystems für das Bohrgestänge wurde auf besonders niedrige tote Massen der bewegten Teile geachtet. Dadurch werden schnelle Taktzeiten erreicht, ohne die installierte Antriebsleistung überdimensionieren zu müssen. Ursprünglich waren zwei Konzepte für das Gestängehandling in Diskussion – Konzept 1 auf Basis eines Schwenkarms und Konzept 2 unter Verwendung eines Masts mit Schlitten, **Bild 5**.

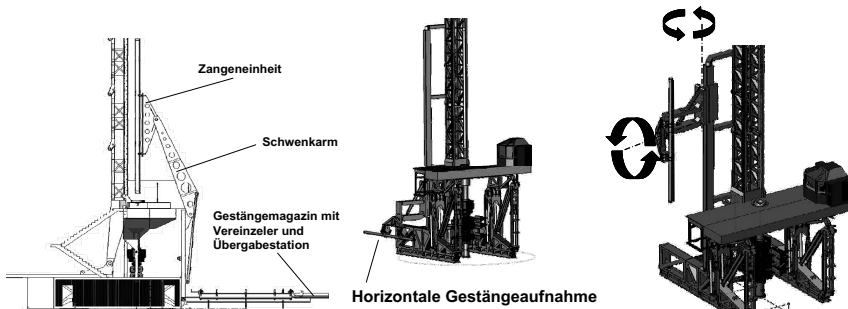


Bild 5: Gestängehandhabungssystem mit Schwenkarm (Konzept 1, links im Bild) oder auf Basis eines mastgeführten Schlittens (Konzept 2, Mitte und rechts)

Da unter dem Bohrtisch der Blow-out-Preventer installiert ist, muss das Gestänge um 17 m in die Höhe gehoben werden. Grundsätzlich müssen die in **Tabelle 3** aufgeführten Forderungen erfüllt werden. Sie ergeben sich aus den gewünschten Bohrtiefen und der vom Betreiber geforderten Bohrgeschwindigkeit.

Tabelle 3: Geforderte Leistungsfähigkeit des Gestängehandhabungssystems

- **Gestänge von 2 3/8" bis 6 5/8"**
- **Futterrohre (Casings) bis 18 5/8"**
- **Schwerstangen bis 9 5/8"**
- **Masse bis 3,5 t**
- **erreichbare Ein-/Ausbaugeschwindigkeiten bei 12,7 m-Gestängen: ca. 370 m/h**

Bei Konzept 1 wird das horizontal vor dem Bohrtisch bereitgelegte Gestänge von der Zangeneinheit aufgenommen und durch Schwenken des Armes und der Zange um ihre horizontale Achsen in die Bohrachse gefördert. Der Schwenkarm hat eine Totmasse von 17 t (im Vergleich dazu hat das geförderte Bohrrohr eine Masse von nur 3,5 t); sein Schwerpunkt muss jedes Mal um 8 m angehoben werden. Zusammen mit der geforderten Taktzeit ergibt sich daraus ein enormer Leistungsbedarf für den Hubvorgang. Da die beim Senken des Armes freiwerdende Energie aufgrund des für die Hubzylinder optimalen offenen hydraulischen Kreislaufs nicht zurückgespeichert werden kann (derartige Systeme sind bei den führenden Herstellern hydraulischer Komponenten zwar in Entwicklung, aber noch weit von einer Serienreife entfernt), wird hier sehr viel Totleistung benötigt: Unter Berücksichtigung der wichtigsten Wirkungsgrade ergibt sich ein Leistungsbedarf von ca. 160 kW für dieses Gestängehandhabungskonzept.

Im Vergleich dazu zeichnet sich Konzept 2 durch sehr viel geringere bewegte tote Massen (ca. 7 t) aus. Deshalb genügen hier ca. 100 kW, um geforderte Geschwindigkeit für den Gestängeein- bzw. -ausbau zu erreichen. Der Energieverbrauch von Konzept 2 beträgt also nur 62,5 % bei gleicher Leistung.

Aufgrund dieser Betrachtung wurde Konzept 1 verworfen.

5.2 Niedrige installierte Leistung

Nicht nur beim Gestängehandhabungssystem wird nur wenig Leistung benötigt, auch das Vorschubsystem wurde ganz unter diesem Gesichtspunkt konzipiert: Es ist doppelt ausgeführt, um für jeden der beiden gegensätzlichen Einsatzfälle, Standrohr einheben und Gestänge ein-/ausbauen, den optimalen Antrieb einsetzen zu können, **Bild 6**: Für das (seltene) Einbauen der langen und schweren Standrohre ist eine Winde mit großer Hubkraft (280 t) und Hubhöhe (20 m), aber nur niedriger Hubgeschwindigkeit (max. 0,25 m/s) installiert. Das schnelle Auf- und Abfahren des Bohrantriebs beim Ein- bzw. Ausbauen des bis zu 12 m langen Bohrgestänges geschieht über ein Vorschubzylindersystem, das zwar weniger Hubkraft (125 t) und Hubhöhe (14 m) hat, aber eine erheblich größere Geschwindigkeit (max. 0,5 m/s) erreicht. Damit kann die installierte Antriebsleistung stark begrenzt werden, ohne an Performance einzubüßen. Es werden weniger als 700 kW für jede der beiden Vorschubarten benötigt. Würde hingegen nur ein Vorschubsystem vorhanden sein, müsste es auf Eckleistung ausgelegt sein, was fast 1400 kW bedeuten würde. Damit würden

sich auch die Kosten für die Antriebsstation einschl. der Dieselgeneratoren verdoppeln. Der Vorschubzylinder dient zudem der Bohrvorschubsteuerung, da er im Gegensatz zu den Axialkolbenmaschinen der Winde praktisch leakagefrei arbeitet und damit leicht zu steuern ist. Darüber hinaus bietet er die Möglichkeit, Druckkräfte auf den Bohrstrang auszuüben, was gerade auf den ersten Metern der Bohrung einen großen Zeitgewinn bedeutet.

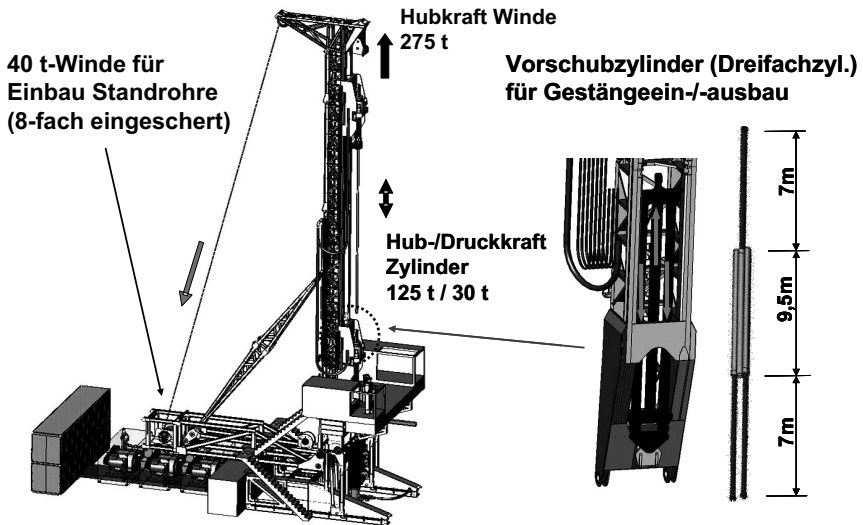


Bild 6: Hybrides Vorschubsystem der Tiefbohranlage TBA 300

5.3 Niedriger Verschleiß

Ein weiterer Aspekt für Nachhaltigkeit ist, einem niedrigen Verschleiß Beachtung zu schenken. Gerade Drahtseile unterliegen strengen Vorschriften bezüglich einer maximal zulässigen Lebensdauer. Das Seil im Hebewerk darf demzufolge eine maximale Arbeit von 3724 tokm leisten. Dann muss es ausgetauscht werden. Wäre das Seil nun das einzige Vorschubsystem, wäre diese Arbeit nach etwa 3000 m Bohrtiefe aufgebraucht. Die Kosten für den Austausch betragen ca. 20000 €. Bei der TBA 300 wird das Seil aber nur beim Einbau der Standrohre verwendet. Nach 3000 m Bohrtiefe musste das Seil dann nur noch weniger als 800 tokm Arbeit leisten. Das bedeutet, dass durch Einsatz des nahezu verschleißfrei arbeitenden Vorschubzylinders die Kosten für das Seil auf weniger als 25 % sinken. Besonders Ressourcen schonend ist hier, dass über die gesamte Lebensdauer den Seilverbrauch entsprechend sinkt.

6 Zusammenfassung

Anhand der neuen Tiefbohranlage TBA 300 der BAUER Maschinen GmbH wurden einige Aspekte für Nachhaltigkeit gerade in Bezug Herstellung, Transport und Betrieb von Baumaschinen beleuchtet. Es konnte gezeigt werden, dass hier sehr viel Potential vorhanden ist, Ressourcen schonende und Energie sparende Lösungen zu verwirklichen, **Bild 7**.

Es wurde ebenso dargelegt, dass Nachhaltigkeit auf lange Frist Kosten reduzierend wirkt.

Nachhaltigkeit wird erreicht

- ...durch Einsatzzweck: Geothermiebohrungen
- ...im Einkauf: Regionale Zulieferer → kurze Wege
- ...in Produktion: Umweltfreundliche und energiesparende Produktionsmittel
- ...beim Transport: Normbehälter begünstigen Wahl des energieoptimalen Transportwegs/-mittels
- ...im Betrieb: Bioöl, hoher Wirkungsgrad (geringe hydraulische Verluste, geringe Totmassen), niedrige installierte Leistung, geringer Verschleiß

Bild 7: Aspekte für Nachhaltigkeit im Lebenszyklus einer Baumaschine

Gründungsarbeiten des Golden Ears Projektes in Vancouver, Bohrpfahlherstellung in ungewohnten Dimensionen

Dipl.-Ing. Andreas Heizmann
Bilfinger Berger AG, Mannheim
Dipl.-Ing. Dirk Deigmöller
Bilfinger Berger AG, Vancouver
Dipl.-Ing. Ralf Hebecker
Bilfinger Berger AG, Mannheim

Kurzfassung

Im Rahmen des Ausbaus der Verkehrsinfrastruktur im Großraum Vancouver entsteht eine sechsspurige Brücke über den Fraser River mit diversen Anbindungsbauwerken. Die Gründung der Hauptbrücke besteht aus Großbohrpfählen, Durchmesser 2500 mm, mit einer maximalen Tiefe von 105 m. In diesem Durchmesser ist auch ein Großteil der Rampenbauwerke durch so genannte Monopfähle mit Einzellängen bis zu 80 m gegründet. Insgesamt wurden 171 Bohrpfähle mit einer Gesamtlänge von über 12.000 m hergestellt. Die anstehende Geologie sowie die extremen Bohrtiefen erforderten den Einsatz einer polymeren Stützflüssigkeit zur Stabilisierung des Bohrlochs. Daneben war den konstruktiven Erfordernissen eines extrem hohen Bewehrungsgehaltes resultierend aus dem Erdbebenlastfall Rechnung zu tragen.

1 Vorstellung des Projekts

1.1 Allgemeines

Die Stadt Vancouver gilt als eine der attraktivsten Städte der Welt. Die Lage am Meer umgeben von Bergen und der Fraser River mit den weltweit größten Lachsbeständen tragen hierzu wesentlich bei. Entsprechend hoch sind die Zuwanderungsraten in der Bevölkerung. In den Vororten liegen sie bei bis zu 20 % im Jahr. Das in der Folge ständig wachsende Verkehrsaufkommen führt zu erheblichen Problemen. Die im Großraum Vancouver zuständige Straßenbaubehörde hat daher ein Projekt für eine sechsspurige Brücke über den Fraser River mit einem Netzwerk von Anbindungsstraßen entwickelt. Das Projekt befindet sich etwa 30 Kilometer östlich des Stadtzentrums.

Im März 2006 erhielt das Golden Crossing General Partnership, eine 100 % Tochter der Bilfinger Berger Project Investments GmbH, den Auftrag für die Finanzierung, den Bau, den Betrieb und die Instandhaltung über einen Zeitraum von 35,5 Jahren. Die Planung und die Durchführung der Bauarbeiten wurde an das Golden Crossing Constructors Joint Venture vergeben. An diesem Joint Venture ist der Bilfinger Berger Ingenieurbau mit 2/3 beteiligt.

Der Auftrag mit einem Volumen von ca. 480 Mio. € umfasst die Planung und den Neubau von 13,3 km mehrspurigen Straßen, die Wiederherstellung von 11,5 km lokalen Straßen, den Bau der 968 m langen Hauptbrücke, die Erstellung von 16 Vorlandbrücken und eine Unterquerung des Highway 1.



Bild 1: Projektübersicht



Bild 2: Fotomontage der fertiggestellten Brücke

1.2 Hauptbrücke

Bei der Hauptbrücke handelt es sich um eine Schrägseilbrücke mit einer Länge von 968 m. Auf der Fotomontage, die die fertige Brücke zeigt, sind im Hintergrund die Golden Ears Berge zu sehen, die dem Bauwerk seinen Namen geben.

Die Brücke besitzt vier Pfeiler im Fluss. Die Bauhöhe ist damit relativ gering. Die Gründung der Pfeiler erfolgte über jeweils 12 Großbohrpfähle mit einer Länge von bis zu 105 m und einem Durchmesser von 2,50 m.

1.3 Landbrücken

Die Landbrücken werden aus Fertigteilträgern hergestellt. Die Spannweiten liegen zwischen 30 und 70 m. Die Ableitung der Kräfte erfolgt über zwei Stützen, die ursprünglich auf einer Platte mit Ramppfahlgruppen gegründet werden sollten. Die Brücken führen größtenteils durch bebautes Gebiet. Sie verlaufen teilweise über bestehende Straßen, und Eisenbahnlinien sind zu queren. Die Ausführung von solch großflächigen Gründungen hätte aufgrund der beengten Platzverhältnisse bereichsweise zu erheblichen Problemen geführt.

Es wurde daher für die kritischen Bereiche ein alternatives Gründungskonzept mit so genannten Monopfählen entwickelt. Jede Brückenstütze geht dabei direkt in einen Einzelfahl über. Die Pfähle besitzen einen Durchmesser von 2,50 m und Längen von 40 bis 80 m. Die Bewehrung der Stütze wird nach dem Herrichten des Pfahlkopfes direkt in die überstehende Pfahlbewehrung eingeführt. Die Übergreifungslänge der Bewehrung beträgt etwa 4 m.

Um einen Bodeneintrieb aufgrund des relativ oberflächennahen Grundwassers zu vermeiden, wurde die Pfahlbewehrung im oberen Segment zusätzlich mit einem bis zu 6 m langen verbleibenden Stahlrohr versehen.

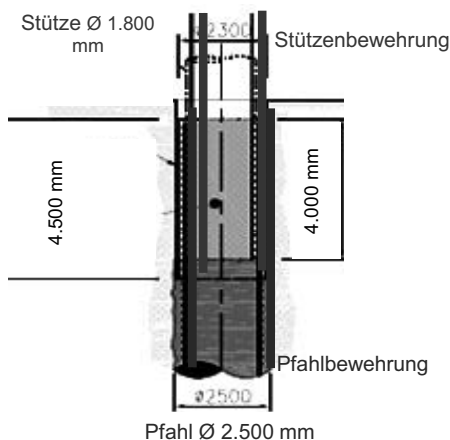


Bild 3: Systemschnitt Übergang Monopfahl - Stütze

2 Geologie

Bis zu einer Tiefe von 35 m stehen Sande an, die teilweise locker gelagert sind. Darunter folgt ein weicher bis steifer Ton, der bei Kontakt mit Wasser im Bohrloch zum Aufweichen neigt. In der Übergangszone zum Ton wurden teilweise grobe Kiese und Blöcke angetroffen. In den Ton sind Sandschichten eingelagert, in denen gespanntes Grundwasser ansteht. Der Überdruck kann bis zu 10 m betragen. An Land wurde das Grundwasser in einer Tiefe von etwa drei Metern unter Gelände angetroffen.

3 Probepfahl

In den anstehenden Böden lagen keine Erfahrungen mit Großbohrpfählen ähnlichen Durchmessers oder vergleichbarer Bohrtiefe vor. Im Vorlauf zu der Pfeilergründung wurde an Land deshalb eine Probelastung mit einer Prüflast von 70 MN durchgeführt.

Bei sehr hoch belasteten Großbohrpfählen ist die Schaffung eines Widerlagers für das Aufbringen der Vertikallasten nahezu unmöglich. Im vorliegenden Fall wurden daher nach dem Osterberg-Verfahren in zwei Ebenen jeweils drei Hydraulikpressen zwischen den Schüssen des Bewehrungskorbes eingebaut. Beim Ausfahren der Pressen wurden die auftretenden Kräfte und Verformungen gemessen. So war es möglich, die Pfahltragfähigkeit für zwei Pfahlsegmente und den Pfahlfuß zu bestimmen.

4 Besonderheiten bei der Technischen Bearbeitung

4.1 Erdbeben und Bodenverflüssigung

Für die Bemessung der Pfähle waren die Erdbebenbeanspruchungen maßgebend. Im Bereich der Vorlandbrücken zur Hauptbrücke über den Fraser River war dazu ein 3-stufiges Nachweisverfahren gefordert. Für die Erdbebenbeanspruchung wurden bodennahe Antwortspektren für zwei Szenarien ermittelt: 475 und 1000-jährige Wiederkehrperiode. Für die so genannten „Life Line“ Bauwerke kam noch ein dritter Erdbebenfall mit 2500-jähriger Wiederkehrperiode hinzu. Zusätzlich wurden diese Bauwerke noch einer „Time-History“ Analyse unterzogen.

Auf Grund von Bodenverflüssigungseffekten waren in Teilbereichen im ursprünglichen Planungskonzept umfangreiche Bodenverbesserungsmaßnahmen vorgesehen. Bodenverdichtungen und vertikale Erdbebendrainagen sollten den erhöhten Porenwasserdruck während der seismischen Beanspruchung auf ein ungefährliches Maß minimieren. Alternativ wurde die Bodenverflüssigung in der statischen Berechnung berücksichtigt. Damit wurde die „freie“ Kraglänge der Pfähle deutlich erhöht, was wiederum zu einer Erhöhung der Momentenbeanspruchung und damit der Pfahlbewehrung führte. Diese Variante kam aufgrund der beengten Platzverhältnisse und der vorhandenen Versorgungsleitungen schließlich zur Ausführung. Der Verzicht auf die Bodenverbesserungsmaßnahmen machte eine zusätzliche dritte Bewehrungslage von 36 x Ø 50 mm erforderlich. Im Normalfall wären 2 Lagen mit jeweils 36 x Ø 50 mm ausreichend gewesen.

4.2 Differenzsetzungen

Aufgrund der vorliegenden Bodenverhältnisse aus weichen bis festen Tönen mit Sandschichten ohne feste Gründungssohle, mussten insbesondere die möglichen Differenzsetzungen aus der Gründung als Einwirkung auf die weiteren Tragwerkselemente berücksichtigt werden. Das Durchlaufsystem des Brückenüberbaus wurde auf eine aufnehmbare Differenzsetzung von 20 mm ausgelegt. Die Setzungen werden während der Bauphase und der Betriebsphase in regelmäßigen Abständen gemessen. Überschreitet die Differenzsetzung den angegebenen Grenzwert sind die Überbauten über Pressen entsprechend anzuheben.

4.3 Lagerungssystem

Der Überbau der südlichen Vorlandrampe hat eine Gesamtlänge von 1227 m. Er ist unterteilt in 2 Abschnitte von 733 m (17 Felder) und 494 m (12 Felder). Insbesondere der Abschnitt 1 über 17 Felder beinhaltet in der Mehrzahl kurze Stützen mit entsprechend hohen Steifigkeiten. Um den Nachteil der hohen Steifigkeiten bei der Erdbebenbemessung auszugleichen, wurden für diesen Abschnitt Gleitpendellager eingesetzt. Diese Lager isolieren den Überbau vom Unterbau und sorgen aufgrund der besonderen Bauart für eine Energiedissipation, so dass die Beanspruchungen der Unterbauten aus dem Überbau reduziert werden.

5 Herstellung der Flusspfähle

5.1 Geräte

Die Herstellung der Pfähle war mit schwimmendem Gerät auszuführen. Der Aushub erfolgte mit einem Seilbagger Liebherr HS 883 im Greiferbetrieb. Ein verbleibendes Stahlrohr von bis zu 40 m Länge hat die Aufgabe, die Strecke vom Pfeilerfundament bis zur Flusssohle zu überbrücken und das Bohrloch in den oberen, feinsandigen Bodenschichten zu stützen. Unterhalb des Stahlrohrs übernahm eine polymere Stützflüssigkeit die Stabilisierung der Bohrlochwandung. Parallel zum Aushub wurde an einem anderen Pfahl mit einem Liebherr HS 895 die Bewehrung eingebaut und anschließend betoniert.



Bild 5: Betonfertigteil als Bohrschablone

5.3 Aushub

Sobald sich das Betonfertigteil in seiner endgültigen Lage befand, wurden die verbleibenden Stahlrohre in die Aussparungen eingestellt und mit einem leistungsstarken Rüttler eingebracht. Hierfür war es erforderlich, das Erdreich innerhalb des Rohres auszugreifen, um die Reibung zu reduzieren. Auf Grund ihrer Länge und des hohen Gewichts der Rohre war es nicht möglich, diese in einem Stück einzuheben. Die Rohre mussten deshalb über der Einbaustelle aus zwei Segmenten zusammengeschweißt werden.



Bild 6: Herstellung der Flusspfähle

Der Aushub erfolgte mit speziellen Greifern. Für härtere Bodenschichten oder Hindernisse stand ein Kugelgreifer zur Verfügung. Seine Schalen sind mit Zähnen besetzt und er verfügt über hohe Schließkräfte. Die Schalen des Kalibriergreifers besitzen im geöffneten Zustand Kreisform. Mit ihm wurde die profilgerechte Herstellung des Pfahlquerschnittes im unverrohrten Bereich sichergestellt.

Mit den Greifern wurde zunächst der Boden innerhalb der verbleibenden Stahlrohre entfernt. Danach wurde in den bindigen Bodenschichten bis auf Endtiefe unverrohrt ausgehoben und das Bohrloch durch eine polymere Stützflüssigkeit stabilisiert. In den bindigen Böden stehen Sandschichten mit gespanntem Grundwasser an. Der Flüssigkeitsspiegel innerhalb der Bohrung musste daher einige Meter über dem Wasserspiegel des Flusses gehalten werden. Hierfür diente eine erhöhte Arbeitsplattform, die auf das Stahlrohr aufgesetzt wurde.

Zur Aufbereitung der Stützflüssigkeit wurden die Polymere über eine Venturidüse einem Wasserstrahl beigemischt. Je nach Dosierung besaß die entstehende Stützflüssigkeit eine sehr hohe Viskosität. Die Molekülketten sorgten außerdem für eine Versiegelung der Bohrlochwandung, wodurch die Wasseraufnahme des Bodens deutlich reduziert wurde. Insbesondere diese Eigenschaft war für die Stabilisierung der anstehenden bindigen Böden, die sehr wasserempfindlich sind, zwingend erforderlich.

Die polymere Stützflüssigkeit in der verwendeten Zusammensetzung sorgte außerdem für ein schnelles Absetzen von Feinteilen.



Bild 7: Aushub mit Arbeitsplattform

5.4 Bewehrungseinbau

Nach Abschluss des Aushubs erfolgte der Einbau der Bewehrung mit bis zu drei Lagen und sieben Stößen. Daher war eine maßgenaue Fertigung mit sehr geringen Toleranzen erforderlich. Es ergaben sich Gesamtgewichte der Bewehrungskörbe von bis zu 90 t je Pfahl.

Mit der Herstellung und Lieferung der Bewehrungskörbe wurde die BB Bar Co.Ltd. in Thailand, eine Tochtergesellschaft der BBV Vorspanntechnik GmbH, beauftragt. Die Verwendung von Montageschablonen und eines Fertigungsrahmens gewährleistete die Einhaltung der hohen Maßgenauigkeit. Nach der Fertigstellung wurden die Körbe in 40" Container verladen und mit dem Schiff nach Vancouver transportiert. Aufgrund des Containertransports ergab sich eine maximale Länge von 11,85 m je Einzelkorb.

Die Materialgüte der Längsbewehrung war im allgemeinen mit f_y/f_u 500/550 MPa angegeben. Für die potentiellen Fließbereiche unter Erdbebenbeanspruchungen wurde ein speziell hergestellter Bewehrungsstahl mit dem Verhältnis f_y/f_u gleich 480/630 MPa geliefert, der die besonderen Anforderungen an die erforderliche Duktilität erfüllte.

Die gesamte Längsbewehrung bestand aus Terex®-Stäben mit einem Durchmesser von 50 mm. Diese Stäbe werden wie ein Bewehrungsstahl mit Gewinderippen gewalzt. Erst in einem zweiten Arbeitsgang wird durch einen Kaltverformungsprozess das Grobgewinde an den Stabenden aufgebracht. Die Wendel aus Terex®-Stäben besaß im oberen Bereich einen Durchmesser von 25 mm. Bei der Ausführung des Stoßes wurden zunächst die zugehörigen Längseisen übereinander gebracht.

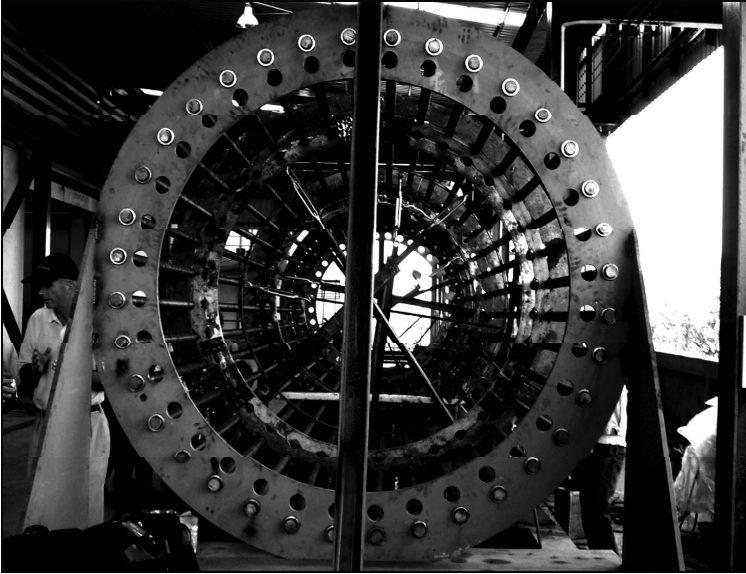


Bild 8: Montageschablone zur Fertigung der Bewehrungskörbe



Bild 9: Bewehrungsstoß - dreilagig



Bild 10: Kupplung zum Stoßen der Längsbewehrung

Die Verbindung der Längsbewehrung erfolgte mittels einer speziell entwickelten Kupplung, die sowohl einen Versatz in Längs- und Querrichtung als auch eine Winkelverdrehung der Längsbewehrung ausgleichen kann. Dafür wurden zunächst zwei Halbschalen über den Stoß gelegt und mittels innerer und äußerer Muttern fixiert. Diese Kupplungen ließen sich sehr schnell und unkompliziert anbringen. Im Anschluss wurde die Wendel im Stoßbereich montiert.

Die speziell entwickelte Kupplung sowie der Bewehrungsstahl Terex® wurden durch das Europäische Patentamt als neu und erfinderisch anerkannt und befinden sich in den Phasen der nationalen Patentierung.

5.5 Betonage

Nach dem Einbau der Bewehrung erfolgte das Ablassen der Betonierleitung im Innern des Bewehrungskorbes. Der Beton wurde dann im Kontraktorverfahren von unten nach oben eingebaut. Der aufsteigende Beton verdrängte die Stützflüssigkeit, die in spezielle Tanks gepumpt wurde. Je Pfahl wurden bis zu 450 m³ Beton verarbeitet. Sonic Messungen dienten als Nachweis für die Betonqualität des fertigen Pfahls.

6 Herstellung der Landpfähle

6.1 Geräte, Aushub

Bei den Landpfählen war kein dauerhaftes Stahlrohr im oberen Bereich erforderlich. Es wurde daher bis zu einer Tiefe von 40 m mit einer temporären Verrohrung gearbeitet. Die

Verrohrung besaß einen Außendurchmesser von 2,50 m. Eine Leffer Verrohrungsmaschine brachte die Rohre mit einer oszillierenden Drehbewegung ein.

Im Gegensatz zu den Flusspfählen wurde mit nur einer Kolonne gearbeitet, die die Arbeitsgänge Aushub, Bewehrungseinbau und Betonage nacheinander ausführte. Der Seilbagger musste in der Lage sein, Bewehrungen mit einem Gesamtgewicht von bis zu 90 t einzuheben. Es war daher ein Liebherr HS 895 erforderlich. Bagger und Verrohrungsmaschine besaßen ein Gesamtgewicht von 220 t. Durch den Einsatz der gewählten Verrohrungsmaschine stand eine maximale Zugkraft von ca. 750 t für den Ausbau der temporären Verrohrung zur Verfügung.

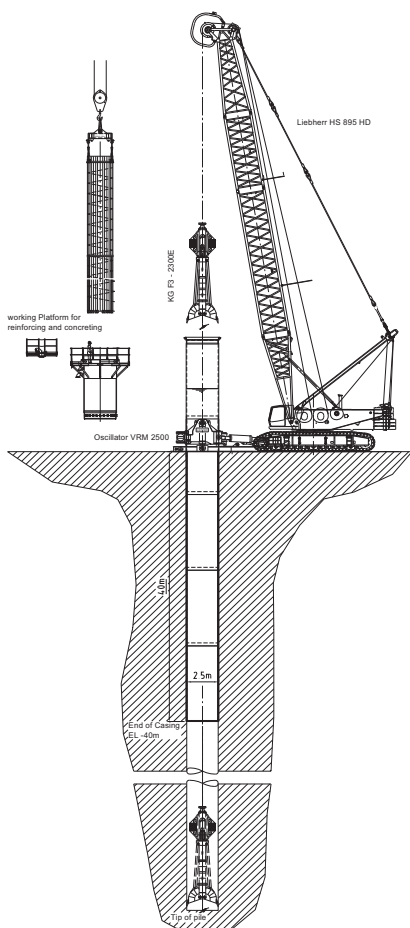


Bild 11: Gerätekonfiguration zur Herstellung der Landpfähle



Bild 12: Aushub der Landpfähle



Bild 13: Einbau der Bewehrung

6.2 Bewehrung

Die Bewehrung der Brückenstützen wurde direkt in die Anschlussbewehrung der Monopfähle eingeführt. An die Lage des Pfahlkopfes und insbesondere der Pfahlbewehrung wurden erhöhte Anforderungen gestellt. Zur Sicherstellung einer horizontalen Toleranz von 5 cm erfolgte vorab der Einbau einer Bohrschablone aus Betonfertigteilen.

Der Einbau der Bewehrung entsprach dem Ablauf bei den Wasserpfählen.

6.3 Betonage

Im Unterschied zu den Wasserpfählen wurde die Verrohrung zur Stützung der Bohrlochwandung bei der Betonage gezogen. Beim Lösen der Verschraubungen und dem Ausbau der einzelnen Rohrstöße kam es dadurch ablaufbedingt zu Unterbrechungen. An die Verarbeitbarkeit des Betons wurden daher erhöhte Anforderungen gestellt.

7 Ausblick

Die Gründungsarbeiten konnten termingerecht im November 2007 abgeschlossen werden. Auch die anschließenden Arbeiten laufen planmäßig. Die Brücke soll im Sommer 2009 dem Verkehr übergeben werden.

Im Großraum Vancouver befinden sich zur Zeit weitere umfangreiche Infrastrukturprojekte in Ausschreibung und Planung.



Bild 14: Aktueller Stand der Arbeiten

Nachhaltigkeit und Ökobilanzen im Spezialtiefbau

Dipl.-Ing. Manuel Stelte

Keller Grundbau GmbH

Dr. Ing. Ulrich Trunk

Keller Holding GmbH

1 Einleitung

In den Medien und der öffentlichen Diskussion findet das Thema Nachhaltigkeit zunehmend Beachtung. Beispiele für Schlagzeilen zu diesem Thema sind:

- „Deutschland wrackt ab, ich mache mit“
- „Koalition streitet über Spritfresser“,
- „Vorfahrt für Nachhaltigkeit – Deutsche Bauherrenpreise zeichnen Wohnprojekte aus, die Qualität am Bau verkörpern und die Ressourcen schonen“,
- „Grün wie die Hoffnung, die ansteckende Begeisterung für eine Klimarevolution“,
- „Grün ist schick - Unternehmen interessieren sich für nachhaltige Veranstaltungen“.

Investitionen und gesellschaftliches Handeln werden immer mehr auf ihre Nachhaltigkeit hin überprüft und bewertet.

Bei allem öffentlichen Interesse sind die Grundzüge nachhaltigen Handelns bisher nicht präzise gefasst. Die beiden nachfolgenden Begriffsklärungen zeigen die Bandbreite verwendeter Begriffserklärungen:

- „Die Umweltschützer verstehen darunter die Versöhnung mit der Natur, die Demokraten die Durchsetzung der Civil-Society, die Ökonomen sehen ihren Glauben an das ewige Wachstum bestätigt, die Menschenfreunde erhoffen sich eine bessere Verteilungsgerechtigkeit und die Abkehr vom Konsumwahn und der Amerikanisierung aller Kulturen“ (Schuhmacher, L. 1997).
- „Eine nachhaltige Entwicklung ist dann erreicht, wenn die heute lebenden Menschen ihre Bedürfnisse in einer Weise befriedigen, die auch künftigen Generationen die Chance lässt, ihrerseits ihre Bedürfnisse – zumindest auf dem heutigen Niveau – zu befrieden (Zukunftssicherung für künftige Generationen)“ (Schröter, F., 2009).

Nach den o. g. Begriffsklärungen beinhaltet oder umfasst Nachhaltigkeit Ökonomie, Soziales und Ökologie. Der Beitrag legt nachfolgend den Schwerpunkt auf die ökologischen Aspekte bei der Planung und Ausführung von Spezialtiefbauleistungen.

Deutschland hatte im Jahr 2006 mit 865 Millionen Tonnen CO₂ –Ausstoß einen Anteil von 4,5 % des weltweiten Ausstoßes an CO₂. Die Anteile haben sich bis 2009 nur geringfügig verändert. Abb. 1 zeigt den Pro-Kopf-Ausstoß verschiedener Länder für das Jahr 2006. In

Deutschland lag dieser bei ca. 10,5 to je Einwohner. Der weltweit größte CO₂ –Ausstoß je Einwohner erfolgt in den USA mit ca. 20 to pro Jahr und Einwohner, gefolgt von Canada mit 17,2 to. Russland rangiert in dieser Aufstellung knapp vor Deutschland. Zum besseren Verständnis der Größenordnung dieser Werte diene nachfolgende überschlägige Berechnung. Ein Mittelklassewagen mit 30.000 km Laufleistung im Jahr emittiert ca. 4 to CO₂ pro Jahr, durch Heizen und Warmwasserbereitung einer 100 m²-Wohnung mit einem spezifischen Energieverbrauch von 70 kW oder ca. 7 l Heizöl pro m² Wohnfläche und Jahr entstehen ca. 1,3 to CO₂.

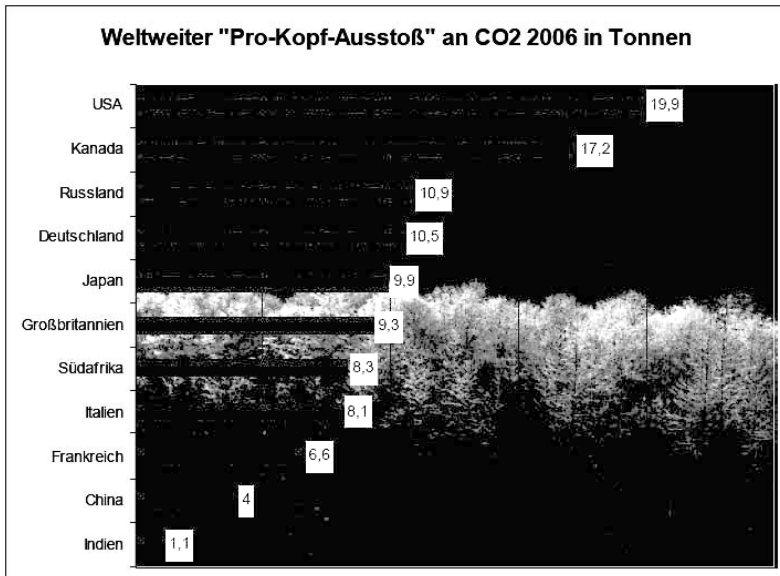


Abb. 1: Jahres-Pro-Kopf-Ausstoß an CO₂ in verschiedenen Ländern

Die Bauwirtschaft und Bautätigkeit hat einen großen Anteil an dem entstehenden CO₂ – Ausstoß, so dass eine eingehende Beschäftigung mit Einsparpotentialen erforderlich ist und sich lohnt, um die weltweit vereinbarten Ziele einer Reduzierung klimaschädlicher Gase erreichen zu können.

Die Baubranche erwirtschaftet fast 10 % des jeweiligen Bruttoinlandsproduktes in den europäischen Ländern, sie ist mit 14 Mio. Mitarbeitern bzw. 7,2 % aller Beschäftigten in Europa der größte Wirtschaftszweig. Die gebaute Umwelt produziert ca. ein Drittel aller Treibhausgasemissionen und die globale Bautätigkeit verbraucht 50 % aller Rohstoffe, die der Erdkruste entnommen werden [3]. Dies unterstreicht einmal mehr, welche Reduzierungen von Emissionen sich aus einer veränderten Bewertung der Bautätigkeit erreicht werden können.

Für die Bauwirtschaft existieren als verbindliche Regularien bisher nur CEN/DC 350 (Sustainability of construction works). Darüber hinaus gibt es nachfolgende Normen und Regelwerke, deren Anwendung jedoch nicht bindend ist:

- EMAS (Eco-Management und Audits Scheme)
- DIN EN ISO 14001 – Anforderung an ein Umweltmanagement-System
- DIN EN ISO 14044, behandelt das Thema Ökobilanz

Der Verband Europäischer Spezialtiefbauunternehmen EFFC hat im Jahr 2007 seine Nachhaltigkeits-Charta verabschiedet (EFFC, 2007).

In Abb. 2 sind die nach ISO 14001 vergebene Umweltzertifikate nach Branchen sortiert dargestellt. Unternehmen der Bauindustrie sind hierbei nicht aufgeführt. Vorreiter ist die Chemische Industrie mit einem Anteil von 22 % gefolgt von der Elektro- und der Metall-Industrie mit jeweils 13 %.

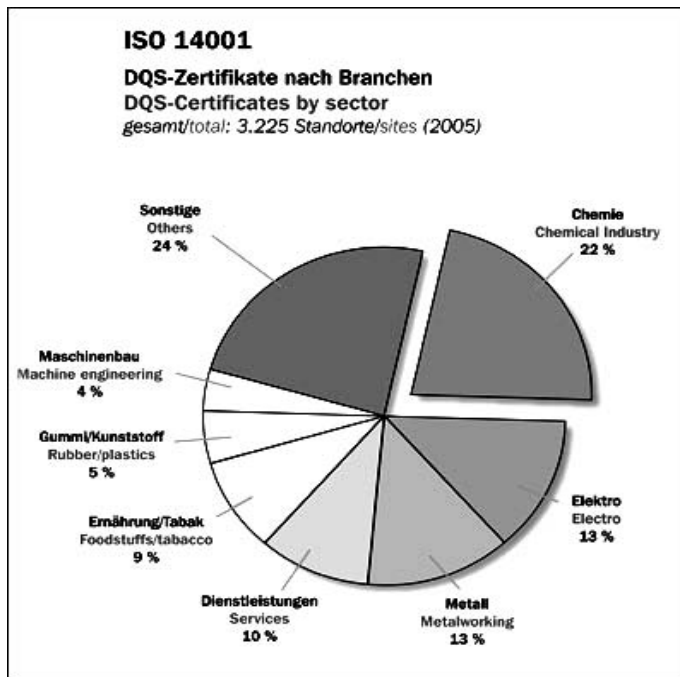


Abb. 2: Nach ISO 14001 vergebene Umweltzertifikate, sortiert nach Branchen

2 Energie und Stoffeinsatz für Spezialtiefbauleistungen

Der Energie- und Stoffeinsatz für die Erstellung einer Baugrube ist in Abb. 3 dargestellt. Für alle Produkte und Leistungen des Spezialtiefbaus wie Bohrspfähle, Schlitzwände, Spundwände, Anker oder Düsenstrahlsohlen werden Stoffe und Energie, wie Stahl, Beton, Diesel, Strom, Bodenaushub, verbraucht. Hinzu kommen die Energieverbräuche für die Herstellung der Baustoffe, für ihren Transport auf die Baustelle sowie ggf. Entsorgung von Reststoffen und Baugrubenaushub.

Auch die Herstellung von Bodenverbesserungen und Tiefgründungen ist mit Energie- und Stoffverbräuchen verbunden. Hier müssen Materialien wie Kies oder Bindemittel zunächst gewonnen oder hergestellt, transportiert und auf der Baustelle durch Einsatz von diesel- bzw. elektrobetriebenen Geräten eingebaut werden.

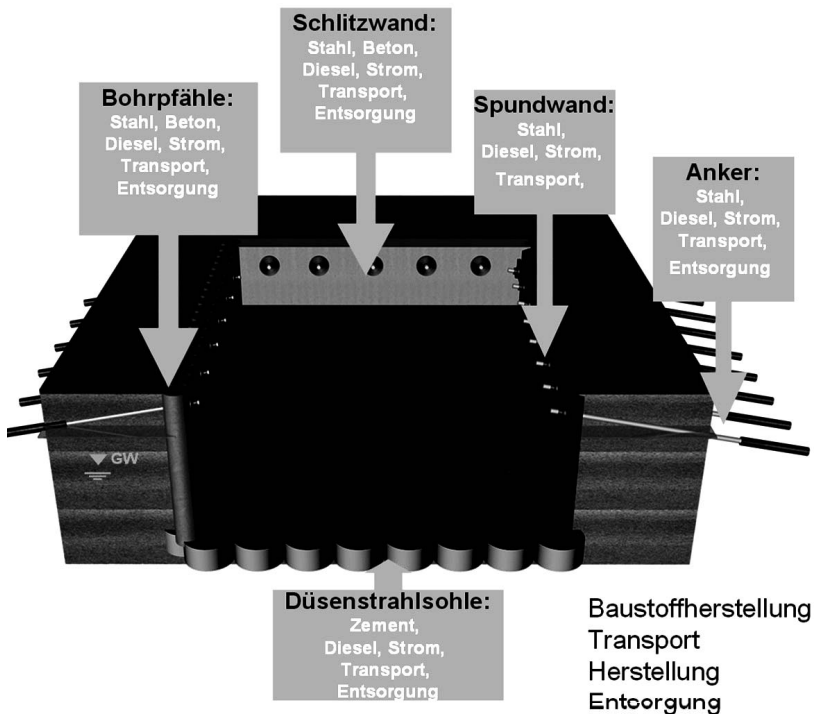


Abb. 3: Beispiel für eine Baugrube und dem dabei erforderlichen Energie- und Stoffeinsatz

3 Energie- und Schadstoff-Bilanzierung

Die unter Kapitel 2 angesprochen Energieverbräuche und Schadstoffemissionen können für die einzelnen Spezialtiefbauverfahren bzw. -produkte bilanziert werden. Hierbei werden der Primärenergieverbrauch sowie sogenannte CO₂-Äquivalente und SO₂-Äquivalente wie nachfolgend erläutert ermittelt.

- Primärenergieverbrauch

Die Primärenergie ist die Energie, die infolge natürlich vorkommender Energieträger, wie z.B. Kohle, Erdgas, Erdöl, Kernbrennstoffe und regenerative Energiequellen, wie Sonne, Wind und Biomasse, zur Verfügung steht. Bei Ermittlung des Primärenergieverbrauchs werden alle direkten Verbräuche sowie die Verluste, die bei der Erzeugung der verwendeten Endenergie aus der Primärenergie auftreten bilanziert. Hierbei wird auch der Energieverbrauch für die Umwandlung oder Aufbereitung von Stoffen, z.B. in Beton, Strom oder Kraft- und Schmierstoffe erfasst.

- CO₂-Äquivalente

Das relative Treibhauspotenzial - im englischen Global Warming Potential, Greenhouse Warming Potential oder GWP - oder CO₂-Äquivalent gibt an, wie viel eine festgelegte Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt beiträgt. Dieses Potenzial wird relativ zu dem von Kohlendioxid quantifiziert, so z.B. für Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Die CO₂-Äquivalente entstehen durch direkte Energieverbräuche und die Baustoffherstellung. Dabei wird der Treibhauseffekt als Summe aller Emissionen in $\sum (\ddot{A}_{\text{Treibhauspotenzial}} \times \text{Emission})$ in der Einheit kg berechnet.

- SO₂-Äquivalente

Mit dem SO₂-Äquivalent wird das Versauerungspotential von Stoffen, wie z. B. SO₂, NO_x, HCl, HF, NH₃ und H₂S quantifiziert, Stichwort saurer Regen. Dieser Wert wird mit dem Wert des Versauerungspotentials von SO₂ in Relation gesetzt. Die SO₂-Äquivalente entstehen durch die Verbrennungsprozesse in der Industrie, in Kraftwerken und Haushalten. Die Versauerung wird dabei wie folgt berechnet: $\sum (\ddot{A}_{\text{Versauerungspotenzial}} \times \text{Emission})$ in der Einheit g.

Die Äquivalent-Beiwerte für CO₂ und SO₂ sind hierbei jeweils 1.

3.1 Primärenergieverbrauch für Bodenverbesserungen und Tiefgründungen

Abbildung 4 zeigt den Primärenergieverbrauch verschiedener Produkte für Bodenverbesserungen bzw. Tiefgründungen.

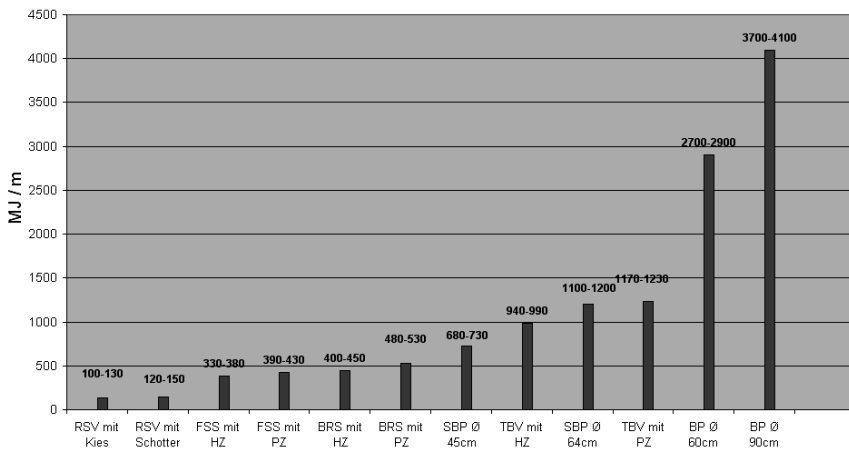


Abb. 4: Primärenergiebedarf für Bodenverbesserungen und Tiefgründungen

Für die Berechnung des Primärenergieverbrauchs in der Einheit MJ pro lfdm wurden hierbei Transportentfernungen für Kies, Schotter und Beton von 20 bis 40 km angesetzt, für Zement oder Stahl von 100 bis 200 km. Die Abbildung verdeutlicht, dass Bodenverbesserungsmaßnahmen ohne Einsatz von Stahl und Zement, wie z.B. das Rüttelstopfverfahren, den geringsten Primärenergieverbrauch haben. Verfahren mit Einsatz von Beton und Stahl bzw. mit einer erforderlichen Entsorgung von Bodenaushub weisen den größten Primärenergieverbrauch auf. Die Verbräuche sind in Abb. 4 je lfdm Säule bzw. Pfahl angegeben.

3.2 CO₂-Äquivalente für Bodenverbesserungen und Tiefgründungen

In Abbildung 5 sind die berechneten CO₂-Äquivalente in der Einheit kg je lfdm für die oben genannten verschiedenen Spezialtiefbauverfahren aufgeführt. Die Transportentfernungen wurden wie oben für Kies, Schotter und Beton mit 20 bis 40 km angesetzt, für Zement und Stahl von 100 bis 200 km. Vergleichbar dem in 3.1 dargestellten Primärenergieverbrauch erhält man für Rüttelstopfverdichtungen mit Kies die kleinsten CO₂-Äquivalente je lfdm Gründungselement, gefolgt von Fertigmörtel- oder Betonstopfsäulen. Bei Gründungs- oder Baugrundverbesserungselementen, bei denen Bindemitteln eingesetzt werden, führt die Verwendung von Portlandzement gegenüber Hochofenzement zu einem um ca. 60% bis 70% höheren CO₂-Ausstoß bei den o.g. Ansätzen zu den Transportentfernungen.

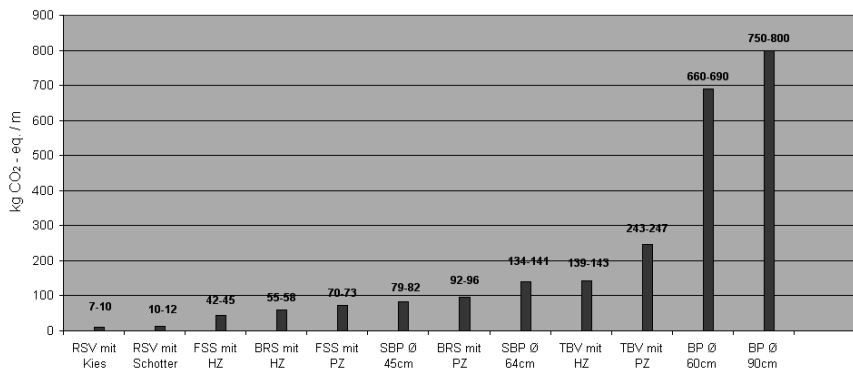


Abb. 5: CO₂-Äquivalente bei Bodenverbesserungen und Tiefgründungen

3.3 SO₂-Äquivalente bei Bodenverbesserung und Tiefgründung

Abbildung 6 zeigt die SO₂-Äquivalenten von den unter 3.1 und 3.2 genannten Produkten in der Einheit Gramm SO₂-Äquivalente je lfdm. Auch hier sind die Transportentfernungen wie o.g. 3.1 angenommen. Für die SO₂-Äquivalente zeigt auch bei dieser Berechnung den geringsten Anstoß für die Rüttelstopfverfahren mit Kies bzw. Schotter, gefolgt von Fertigmörtelstopfsäulen mit Hochofenzement, Betonrüttelsäulen mit Hochofenzement, Fertigmörtelstopfsäulen mit Portlandzement, Betonrüttelsäulen mit Portlandzement, Schraubbohrpfählen und tiefe Bodenvermörtelungen. Der höchste Ausstoß je lfdm Meter ergibt sich auch hier für Bohrpfähle. In Abhängigkeit der projektspezifischen Baugrundverhältnisse und sich daraus ergebenden zulässigen Lasten für die aufgeführten Verfahren könnten Primärenergieverbrauch, CO₂-Äquivalente und SO₂-Äquivalente auch z.B. je kN Lastabtragung ermittelt und dargestellt werden.

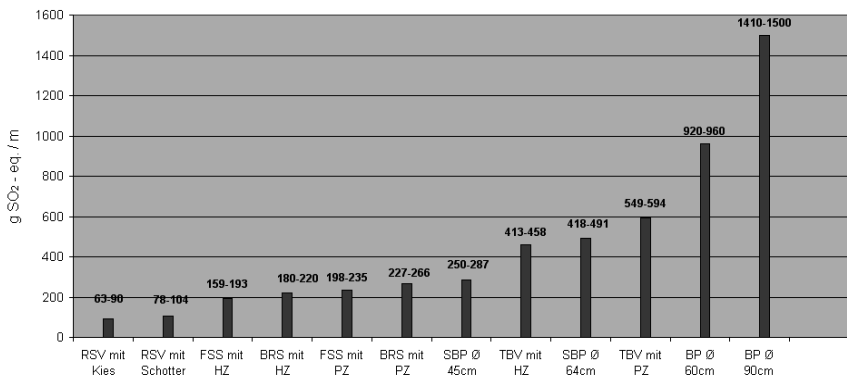


Abb. 6: SO₂-Äquivalente bei Bodenverbesserungen und Tiefgründungen

3.4 Bewertung der Ergebnisse

Aus den unter Punkt 3.1 bis 3.3 dargestellten Bilanzierungen für Primärenergieverbrauch sowie CO₂- und SO₂-Äquivalenten für verschiedene Produkten des Spezialtiefbaus kann man erkennen, dass durch die Verwendung von Hochofenzement mit hohem Hüttensandgehalt anstelle von Portlandzement Primärenergieeinsparungen und Reduzierung der o.g. Emissionen von bis zu 60 % möglich sind. Ferner haben die Transportenergieaufwendungen mit 30% einen erheblichen Anteil am ermittelten Gesamtprimärenergieverbrauch. Eine Minimierung der Transportwege kann somit zu einer Reduzierung des Primärenergieverbrauchs beitragen. Außerdem ist zu beachten, dass aus energetischer Sicht Recycling-Material nicht günstiger zu bewerten ist als natürliche Zuschlagsstoffe oder Schotter. Allerdings sollte Recycling-Material im Interesse der Schonung begrenzter natürlicher Ressourcen eingesetzt werden.

4 Bilanzierung für komplette Baumaßnahmen

Ein Produkt oder ein Bauwerk des Spezialtiefbaus kann für sich allein betrachtet nicht als nachhaltig bewertet werden, da hierbei immer, wie oben ausgeführt, Energie und Stoffe verbraucht werden sowie Emissionen von Schadstoffen erfolgen. Aus diesem Grund müssen verschiedene Varianten für ein zu erstellendes Bauwerk miteinander verglichen und bewertet werden. Bei Infrastrukturmaßnahmen, wie z.B. bei Tunnelbaumaßnahmen für den öffentlichen Personennahverkehr mit den zugehörigen Baugruben für Bahnhöfe und Startschächte, muss eine Bilanzierung Aufwendungen für das Bauwerk den dadurch möglich werdenden Einsparungen an Primärenergieverbrauch und Schadstoffemissionen gegenüberstellen. Eine isolierte Betrachtung einzelner Bauteile, Verfahren oder Gewerke ist für eine Beurteilung der Nachhaltigkeit nicht zielführend.

Für Gebäude sind aus diesem Grund verschiedene Gründungsvarianten zusammen mit den sich daraus im aufgehenden Rohbau sowie Ausbau bzw. der Gebäudeausrüstung ergebenden Einsparungen bzw. Mehraufwendungen zu bewerten. Eine getrennte Betrachtung von Hochbau und Tiefbau ist im Hinblick auf die möglichen Einsparpotentiale bei Energieverbrauch und Schadstoffemissionen und somit Verbesserung der Nachhaltigkeit unzureichend. Dies erfordert jedoch in vielen Fällen Änderungen im Planungs- und Genehmigungsablauf.

Auch im Interesse der Nachhaltigkeit ist eine ausreichende Baugrunderkundung zwingend erforderlich. Wie immer wieder festzustellen ist, führen unzureichende Baugrundaufschlüsse zu Schwierigkeiten und Verzögerungen in der Ausführung sowie ggf. aufwendigen Zusatz- oder Nacharbeiten, die als Konsequenz neben höheren Kosten und den damit verbundenen Streitigkeiten auch einen höheren Schadstoffausstoß zur Folge haben. Ebenso ist eine ausreichende und konsequente Qualitätssicherung bei der Ausführung der Spezialtiefbaumaßnahmen vonnöten, um die Leistungen sofort richtig ausführen zu können, und dadurch Nacharbeiten zu vermeiden. Die hierfür erforderlichen Kosten müssen auch seitens der Bauherren in ihren Budgetplanungen berücksichtigt werden.

In eine nachhaltige Planung für eine Gründung bzw. ein Bauwerk sind auch Energiepfähle einzubeziehen, für die z.B. bei Bodenverbesserungen Energiesonden für eine geothermische Nutzung in Mikropfählen, Betonrüttelsäulen oder Düsenstrahlsäulen bereits erfolgreich eingebaut wurden. Auch Maßnahmen zur Baugrundverbesserung oder Gründung für Windenergieanlagen tragen – langfristig betrachtet – zu einer Schonung natürlicher Ressourcen bei, wobei bei der Herstellung der Gründung oder Baugrundverbesserung an sich zunächst einmal Primärenergie verbraucht bzw. CO₂ und SO₂-Ausstöße verursacht werden.

5 Ausblick

Wie oben ausgeführt, können für Produkte und Verfahren im Spezialtiefbau Energie- und Schadstoffbilanzen erstellt werden und diese auch bei der Beurteilung von Ausführungsalternativen verwendet werden. Solche Bilanzierungen sind heute noch nicht Teil der Bewertungskriterien für die Vergabe von Bauleistungen oder Aufträgen. Hier stellt – zumindest in Deutschland - die Angebotssumme meist das alleinige Entscheidungskriterium dar. Erste Tendenzen, in die Vergabeentscheidung für Bauleistungen auch Bewertungen der Nachhaltigkeit der angebotenen Lösungen und Varianten zu berücksichtigen, sind zurzeit in den Vereinigten Arabischen Emiraten zu erkennen. Nachhaltiges Handeln und Wirtschaften gewinnt auch angesichts der aktuellen Finanz- und Wirtschaftskrise wieder zunehmend an Bedeutung.

Eine weitere und sofort wirksame Möglichkeit zur Energieeinsparung besteht darin, Mitarbeiter in Unternehmen hierfür zu sensibilisieren, Abläufe und Prozesse in Unternehmen daraufhin zu untersuchen und zu optimieren, um der Frage „Wie handle ich nachhaltig?“ mit dem entsprechenden Nachdruck nachzugehen, siehe Abb.7 (UNESCO).

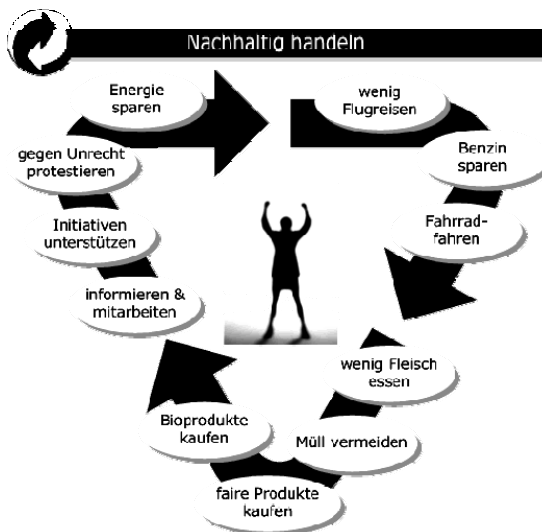


Abb. 7: Beispiele und Vielfalt nachhaltigen Handelns

Nachhaltiges Handeln kann in Spezialtiefbauunternehmen auf vielfältige Weise umgesetzt werden, indem z.B. die Notwendigkeit von Reisen nach zu vereinbarenden Kriterien geprüft wird, Fahrgemeinschaften gebildet werden, um den Kraftstoffverbrauch zu senken, auf Baustellen die Vermeidung und Trennung von Müll sowie das Vermeiden unnötigen Primärenergieverbrauchs stärkere Beachtung findet. Neben der hierfür notwendigen Kommunikation des Themas sind auch konkrete Hilfestellungen und Zielvorgaben in Unternehmen erforderlich. Dies kann in Büros durch einfach umzusetzende Maßnahmen wie Beleuchtung, Heizung oder auch Verringerung des Papierverbrauchs erreicht werden. Auf den Baustellen werden die Mitarbeiter dazu verpflichtet, Baugeräte in Produktionspausen konsequent abzuschalten. Diese Maßnahmen wirken sich nicht nur positiv auf die Nachhaltigkeit aus, sondern sparen nebenbei noch Kosten in Unternehmen.

Wie oben erläutert, können Energiesonden zur geothermischen Nutzung von Gründungen mit geringem Aufwand in Spezialtiefbauprodukte eingebaut werden.

Nachhaltiges Handeln im Spezialtiefbau erfordert auch eine Vermeidung von Überbemessungen oder Herstellung von Produkten oder Bauwerken mit technisch nicht erforderlichem und dadurch überhöhtem Sicherheitsniveau, das jedoch aufgrund bestehender Vorschriften oder Regularien eingehalten werden muss. Vergleicht man Normen und Regularien für Spezialtiefbauprodukte in Deutschland mit solchen im benachbarten Ausland, so stellt man fest, dass hier für einige Produkte oder Leistungen in Deutschland höhere Sicherheitsfaktoren als im Ausland nachzuweisen sind, ohne dass dies mit höheren Schadenshäufigkeiten oder anderen technischen Rahmenbedingungen zu begründen wäre. Diese technisch an sich nicht erforderliche Überdimensionierung von Spezialtiefbauprodukten führt zu einem höheren Primärenergieverbrauch und Schadstoffausstoß. Dies ist auch bei Festschreibung von Qualitätsanforderungen an Baustoffe im Zuge von Zulassungsverfahren zu beachten.

Darüber hinaus ist eine Weiterentwicklung von Bauverfahren und Baustoffen mit dem Ziel, natürlichen Ressourcen zu schonen, zwingend erforderlich. Dies erfordert auch seitens der Genehmigungsbehörden eine entsprechende Bereitschaft, eine Weiterentwicklung des Stands der Technik über die vorhandenen Erfahrungen hinaus zu unterstützen.

6 Literatur

Schuhmacher, L.: "Geschichte und neuere Entwicklung des Begriffs der Nachhaltigkeit", Pädagogische Hochschule Freiburg, 1997

Schröter, F.: "Aspekte ökologischer Bauleitplanung" im Internet: "Homepage Dr. Schröter", 2009 (URL: <http://www.dr-frank-schroeter.de>)

EFFC Nachhaltigkeits-Charta, 2007

Deutschen Teil des internationalen UNESCO Bildungsservers D@dalos, www.dadalos-d.org

Ökologische Bewertung von Verfahren im Spezialtiefbau Veränderungsmöglichkeiten zur Ressourcenschonung

Dipl.-Ing. Lars Liersch
Bauer Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhausen

Definition Ökologie

Ökologie ist ein Teilgebiet der Biologie, welches sich mit den Wechselbeziehungen der Organismen untereinander und mit ihrer abiotischen Umwelt beschäftigt.

Mit einem wachsenden Umweltbewusstsein in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte sich der Begriff weit über den engen naturwissenschaftlichen Rahmen der Biologie hinaus. Der Begriff hat dadurch in vieler Hinsicht eine Bedeutungserweiterung erfahren und bezeichnet häufig auch die Lehre bzw. Handlungsweisen, die dem Umweltschutz oder einem nachhaltigen Wirtschaften dienen.

Eine Frage der Betrachtungsweise und den individuellen Anforderungen

Vergleich Smart mit VW Bully

HEUTE	FRÜHER
VERBRAUCH 3,2 L 100 KM	VERBRAUCH 9.8 L/100 KM
	
Und besseren Sex hat man auch drin. Der Transponder dankt für den netten Werbespot.	
 VW Volkswagen	

Eine Frage der Nutzungsdauer

VW Golf III



* Quelle Wikipedia, doccheck.de

Produktion: existiert bereits (0 t CO₂)
Betrieb: 190 g CO₂/km (Benzin)

VW Golf VI



** Quelle: Volkswagen AG

ca. 6 t CO₂
157 g CO₂/km (Benzin)

Differenz 33 g/km reicht aus, um 180.000 km mit dem Altwagen zurück zu legen



**8 g CO₂/km * beim Fahrradfahren:
1.000.000 km setzen 6 t zusätzliches CO₂ frei**

Bisherige Bewertung der Umweltverträglichkeit

Wasserbehörden, DIBt:

- ausschließlich Bewertung von toxisch verdächtigen Stoffen und deren Abgabe in Boden o. Wasser
- keine Betrachtung von Luftemissionen u. Energieaufwand

→ Forderung auf Nachweis der Unbedenklichkeit bei Weichgel

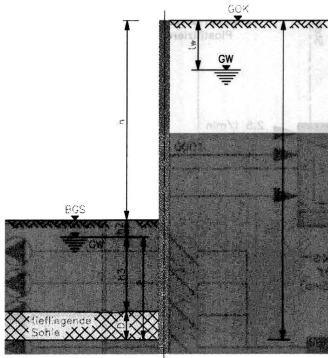
→ Ersatz durch Hochdruckinjektion

→ Cr(VI)-Reduzierung bei Einsatz von Suspensionen im Raum München

→ bei Injektionen oder Mixed-in-Place

Ausgangsbasis für Vergleich Hochdruck-Injektion und Weichgel-Injektion

- gleiche Bohr- bzw. Rüttelgeräte mittlerer Größe, dieselbetrieben
- gleiche Mischanlage, elektrobetrieben
- Tiefenlage der Sohle vernachlässigt, da Aufwand für Bohren / Rütteln projektabhängig (Vereinfachung)



- nur direkte Verbrauchsmaterialien bilanziert
(keine Geräteproduktion, kein Verschleiß, kein Öl)
- alle Materialien auf der Baustelle vorhanden
(kein Transport v. Baumaterial / Rückfluss etc.)
- berücksichtigte Differenzen in den Verfahren:

HDI	Weichgel Injektion
dieselbetriebene	elektrische
HDI-Pumpe	ND-Pumpen
CEM I	CEM III

Leistungsansätze

Mischungs- und Verfahrensparameter

Parameter	HDI	Weichgel
Stärke	1200	800,0
Strom	50,0	59,0
Leistung	200	800,0
Leistung	430	59,0
Leistung	14	290
Leistung	750,0	2,00
Durchmesser	2,8	400
		215,0
		27,6

Emissionen der eingesetzten Ausgangsstoffe

Parameter	CO ₂ -Freisetzung	Energiebedarf	Staub
Stärke	710 (kWh/t)	972	710 (kWh/t)
Strom	2650 (kWh/t)	9,8	2650 (kWh/t)
Strom	580,0 (kWh/t)	1,0	580,0 (kWh/t)
Strom	194 (kWh/t)	628	194 (kWh/t)
Strom	800 (kWh/t)	400	800 (kWh/t)

Berechnung der Verbräuche / Emissionen bei einer Schichtdicke von 1 m:

Leistungsansätze / Verbräuche

Parameter	Verbrauch
Stärke	6,00
Strom	2,50
Strom	0,92

Ressourcenverbrauch aus Materialeinsatz je Produkt-m³

Parameter	Verbrauch
Stärke	0,5
Strom	0,3
Strom	0,03
Strom	86,0
Strom	10,8

Emissionen der verbrauchten Ausgangsstoffe		Energieverbrauch				
Zement	[kg CO ₂ /m³]	653	(kWh/m³)	584		
Diesel	[kg CO ₂ /m³]	16	(kWh/m³)	58,8		
Strom	[kg CO ₂ /m³]	1,5	(kWh/m³)	2,5		

Zement		Diesel		Strom		Wasserglas		Häuter	
[kg CO ₂ /m³]	18	[kWh/m³]	24	[kg CO ₂ /m³]	1	[kWh/m³]	4,9	[kg CO ₂ /m³]	0,2
[kg CO ₂ /m³]	0,2	[kWh/m³]	0,3	[kg CO ₂ /m³]	15,7	[kWh/m³]	45,4	[kg CO ₂ /m³]	9,7
									5,0

Gesamt	[kg CO ₂ /m³]	670	(kWh/m³)	886
Bet	5000,00 m³ HDI- bzw. Weichgelsotte (Starke 1,0 m) werden folgende Mengen an CO ₂ bzw. Energie freigesetzt.			
Gesamt	[t CO ₂]	3352,2	[MWh]	4778,2

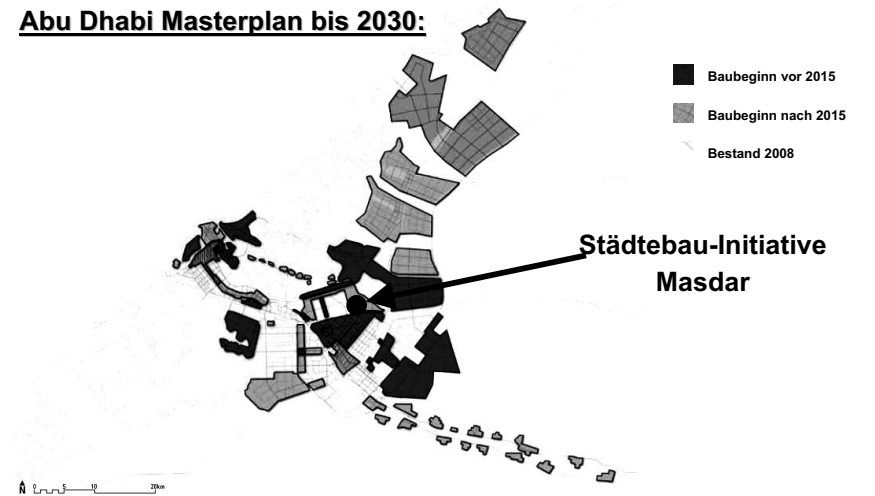
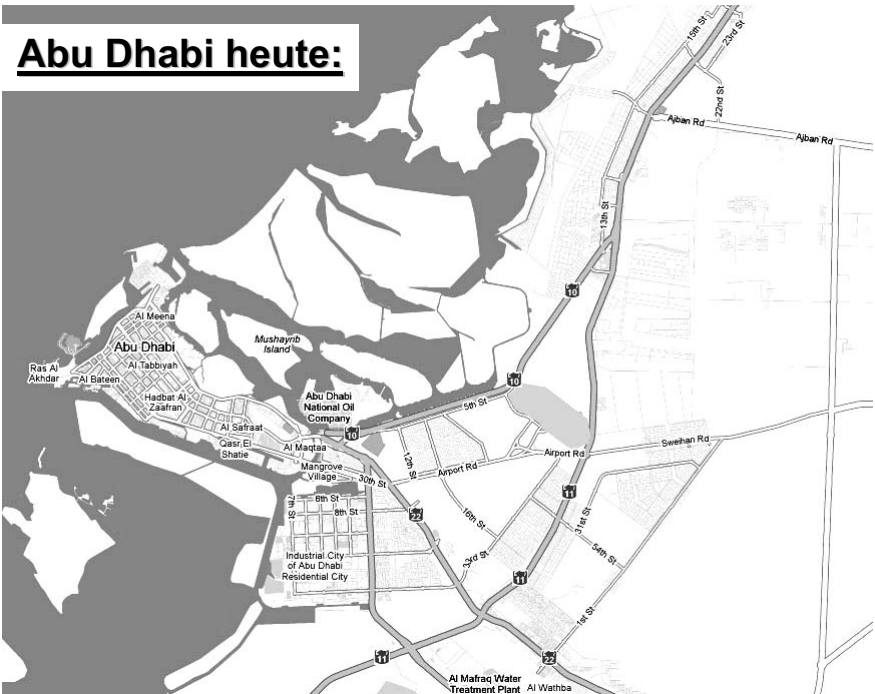
Gesamt	[t CO ₂]	228,9	[MWh]	382,1
Vergleich	km-Fahrtleistung PKW mit 150g CO ₂ /km	22.948.322		

Vergleich	km-Fahrtleistung PKW mit 150g CO ₂ /km	1.522.217
diesem Fahrzeug	28	
0,303 km pro Jahr	76	
2 Energie pro Jahr	94	

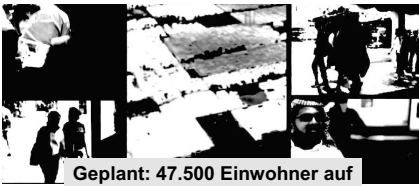
Differenzbetrachtung	
km-Fahrtleistung PKW mit 150g CO ₂ /km	20.825,105
Erdumrundungen mit diesem Fahrzeug	521
Kfz mit Fahrtleistung von 20.000 km pro Jahr	1041
4-Personen-Haushalte Energie pro Jahr	1085

Jahres Energiebedarf einer Kleinstadt

Vorstellung Initiative Masdar und Anpassung der Verfahren und Geräte nach Kundenanforderungen



Städtebau-Initiative Masdar in Abu Dhabi:



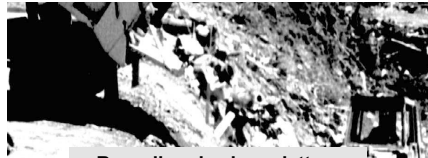
Geplant: 47.500 Einwohner auf
6 km²



Kein CO₂ Ausstoß

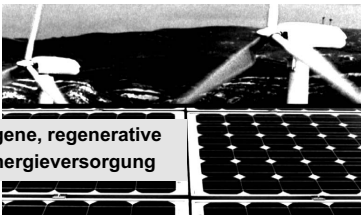


Keine Verwendung von
fossilen Brennstoffen



Recycling des kompletten,
anfallenden Mülls

Städtebau-Initiative Masdar:



Eigene, regenerative
Energieversorgung

Modernstes, öffentliches
Beförderungssystem



Niedrige und enge Bauweise für angenehme Temperaturen
=> Einsparung der Energie für Klimatisierung



→ Berücksichtigung bei Planung Gebäude und Gründung



Umbau / Neue Gerätetechnik

Betrieb mit Biodiesel → 5 % CO₂-Reduktion

Umbau auf Elektroantriebe → mind. 4 % CO₂-Reduktion möglich (Versorgung über PV)

Anwendung von Bodenmisch-Verfahren für Tiefen >19 m



Geothermieranlagen zur Klimatisierung von Gebäuden

Wasserbehandlungsanlagen für Wasserkreislauf

Wasseraufbereitung über Pflanzenkläranlagen

→ CO₂-Aufnahme = bis zu 90 t/ha*a kompensiert

über 50 Stck. MIP-Säulen mit Ø 880 mm 15 m Tiefe (2,5 MN Last) oder
etwa 15 Stck. Bohrpfählen mit Ø 880 mm 15 m Tiefe (2,5 MN Last)



Verzeichnis der Autoren

Dipl.-Ing. Tobias Baumgärtel	Technische Universität München - Zentrum Geotechnik	Baumbachstr. 7 81245 München t.baumgaertel@bv.tum.de
Dr. Jan-Niklas Franzius	Ed. Züblin AG Zentrale Technik	Albstadtweg 5 70567 Stuttgart Jan.Franzius@zueblin.de
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe	Technische Universität Ham- burg-Harburg Institut für Geotechnik und Baubetrieb	Postfach 90 10 52 21079 Hamburg grabe@tu-harburg.de
Dipl.-Ing. Sascha Henke	Technische Universität Ham- burg-Harburg Institut für Geotechnik und Baubetrieb	Postfach 90 10 52 21079 Hamburg
Dipl.-Ing. Andreas Heizmann	Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH	Diffenétr. 14 68169 Mannheim ahez@bilfinger.de
Dr.-Ing. Dirk Heyer	Technische Universität München - Zentrum Geotechnik	Baumbachstr. 7 81245 München d.heyer@bv.tum.de
Dipl.-Ing. Hans-Uwe Kalle	Arcelor Commercial Spundwand Deutschland GmbH	Eilper Str. 71 - 75 58091 Hagen hans- uwe.kalle@arcelormittal.com
Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Hermann J. Kienast		Arcisstraße 50 80799 München h-kienast@t-online.de
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich	Technische Universität Berg- akademie Freiberg Institut für Geotechnik	Gustav-Zeuner-Straße 1 09596 Freiberg herbert.klapperich@ifgt.tu- freiberg.de

Dr. Dipl. Phys. Erwin Knappek	Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG Aufsichtsratsvorsitzender	Rathausplatz 7 82008 Unterhaching erwin.knappek@gmx.de
Dipl.-Ing. Volker Liebel	Rehau AG & Co.	Ytterbium 4 91058 Erlangen
Dipl.-Ing. Lars Liersch	Bauer Spezialtiefbau GmbH	Wittelsbacherstraße 5 86529 Schrobenhausen Lars.Liersch@bauer.de
Dr.-Ing. Norbert Pralle	Ed. Züblin AG Zentrale Technik	Albstadtweg 5 70567 Stuttgart norbert.pralle@zueblin.de
Dipl.-Ing. Maik Schüssler	Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg NL Autobahn	Lindenallee 51 15366 Hoppegarten maik.schuessler@ls.brandenb urg.de
Dipl.-Ing. Manuel Stelte	Keller Grundbau GmbH	Kaiserleistraße 44 63067 Offenbach m.stelte@kellergrundbau.com
Dr.-Ing. Ulrich Trunk	Keller Holding GmbH	Kaiserleistraße 44 63067 Offenbach U.Trunk@Kellerholding.com
Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt	Technische Universität München - Zentrum Geotechnik	Baumbachstr. 7 81245 München Vogt@bv.tum.de
Dr.-Ing. Ulrich Westenthanner	Bauer Maschinen GmbH	Postfach 1260 86522 Schrobenhausen ulrich.westenthanner@bauer.de

Lehrstuhl und Prüfamnt
für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau
der Technischen Universität München

Schriftenreihe

Heft 1	Scheele, F.	Tragfähigkeit von Verpressankern in nichtbindigem Boden	1982 vergriffen
Heft 2		Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik	1983 vergriffen
Heft 3	Kempfert, H.-G., Schwarz, P.	In-situ Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach	1984 vergriffen
Heft 4	Schubert, A.	Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikatgel-injizierter Sande	1985 vergriffen
Heft 5	Gruber, N., Koreck, H.-W., Schwarz, P.	Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle	1985
Heft 6		Forschungsbeiträge zum mechanischen Verhalten von Geotextilien	1986 vergriffen
Heft 7	Alber, D., Reitmeier, W.	Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse	1986 vergriffen
Heft 8	Alber, D.	Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben	1986
Heft 9	Maini, K. S.	Testing of bentonite suspensions	1987
Heft 10		Beiträge zur Felsmechanik	1987
Heft 11	Kröber, W.	Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden	1988 vergriffen
Heft 12	Baumann, H.-J.	Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge	1988
Heft 13	Reitmeier, W.	Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise	1989
Heft 14	Vega Mayer, S.	Ein Beitrag zur Vorhersage von Verformungen und Spannungen des Baugrundes und des Ausbaues bei Hohlraumbauten	1989
Heft 15	Bauer, A.	Beitrag zur Analyse des Tragverhaltens von einfach bewehrten Zweischichtensystemen	1989
Heft 16	Kudla, W.	Beitrag zur statistischen Qualitätskontrolle im Erdbau	1990

Heft 17	Floss, R., Reuther, A.	Vergleichsuntersuchungen über die Wirkung von vibrierend und oszillierend arbeitender Verdichtungswalze	1990
Heft 18	Trunk, U.	Probabilistische Standsicherheitsanalyse für tetraedrische Felskeile	1993
Heft 19	Gold, G.	Untersuchungen zur Wirksamkeit einer Bewehrung im Zweischichtensystem	1993
Heft 20	Hönisch, K.	Zur Strategie der Gestaltung großer Krafthauskavernen	1994 vergriffen
Heft 21		Beiträge aus der Geotechnik (Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss)	1995
Heft 22	Berner, U.	Ein Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit mit Infiltrationsversuchen	1995
Heft 23	Huber, H.	Untersuchungen zur Materialdämpfung in der Bodendynamik	1996
Heft 24	Schulze, A.	Beitrag zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen unter besonderer Berücksichtigung des ebenen Verzerrungszustandes	1996
Heft 25	Ascherl, R.	Risikobetrachtungen zur Planung von Maßnahmen zum Grundwasserschutz im Einflussbereich von Straßen	1997
Heft 26	Bauer, A.	Der Einfluss der Verbundwirkung zwischen Boden und Geotextil auf das Verformungsverhalten von bewehrten Steilböschungen	1997
Heft 27	Nimmesgern, M.	Untersuchungen über das Spannungs- Verformungs-Verhalten von mehrlagigen Kunststoffbewehrungen in Sand	1998
Heft 28	Fillibeck, J.	Beitrag zum Verhalten mehrschichtiger Dichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahnen unter Scherbeanspruchung	1999
Heft 29	Floss, R.	Geotechnik Forschung und Entwicklung über zwei Jahrzehnte – 1980 bis 2000	2000
Heft 30	Heyer, D.	Die Durchlässigkeit mineralischer Dichtungsstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Sättigungsvorganges	2001
Heft 31	Bauer, J.	Ein Teilsicherheitsmodell für die Bemessung einer verankerten Baugrubenwand im Bruchgrenzzustand	2002
Heft 32		Beiträge zum 1. Geotechnik-Tag in München, Unterfangungen	2002

Heft 33	Schwarz, P.	Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung	2002
Heft 34	Hartmann, K.	Untersuchung zur Prognose von Anforderungswerten an die Beschleunigungsmesswerte der FDVK-Methode	2002
Heft 35		Beiträge zum 2. Geotechnik-Tag in München, Bauen im Grundwasser	2003
Heft 36		Beiträge zum 3. Geotechnik-Tag in München, Tunnel in offener Bauweise / spezielle Baugruben	2004
Heft 37		50 Jahre Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik an der TU München <i>und</i> Beiträge zum 4. Geotechnik-Tag in München, Verfestigungskörper im Boden und Untergrundverbesserung	2005
Heft 38		Beiträge zum 5. Geotechnik-Tag in München, Geotechnik beim Verkehrswegebau	2006
Heft 39		Beiträge zum 6. Geotechnik-Tag in München, Geotechnik - aus Schäden lernen	2007
Heft 40	Eber, W.	Measurements on the Structural Contribution to Friction in Granular Media	2007
Heft 41	Irngartinger, S.	Strömungsverhalten thermoplastischer Schmelzen in klüftigem Festgestein	2007
Heft 42	Kellner, C.	Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper	2008
Heft 43		Beiträge zum 7. Geotechnik-Tag in München, Risiko und Sicherheit in der Geotechnik	2008
Heft 44		Beiträge zum 8. Geotechnik-Tag in München, Nachhaltigkeit in der Geotechnik	2009

