ex. A

Diss. ETH Nr. 11721

Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen

CatE

Abhandlung zur Erlangung des Titels
Doktor der Naturwissenschaften
der
Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von
Cédric Thalmann
Dipl. Geologe Uni Bern

geboren am 18.05.61
von Neuchâtel, Mattwil, Wiezikon

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. C. Schindler, Referent
Prof. Dr. H. Böhni, Korreferent
Dr. E. Büchi, Korreferent
W. Studer, Korreferent

1996

ETHICS ETH-BIB
00100003216429

ZUSAMMENFASSUNG

In der Schweiz sind abbaubare Sand- und Kiesreserven nicht unerschöpflich. Kiesführende Regionen sind auf Grund unterschiedlicher Nutzungsansprüche zu Konfliktzonen geworden, wo Kiesabbau nur noch unter erschwerten Bedingungen möglich ist. Als Substitution hochwertiger Alluvialkiese kommen in den letzten Jahren vermehrt Alternativrohstoffe in Form von Splittprodukten oder Recycling-Materialien aus Bauabfällen auf den Markt. Auf der anderen Seite werden zahlreiche Untertagebauten sowohl mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) als auch in der konventionellen Sprengtechnik vorangetrieben, die ein beachtliches Volumen an mineralischen Rohstoffen zutage fördern. Diese wurden bis anhin aber eher wie lästiges Entsorgungsmaterial behandelt. Die Wiederverwertung des Haufwerkes – insbesondere für die Tunnelbauwerke selbst – ist sowohl aus umweltpolitischen wie auch aus wirtschaftlichen Gründen von Interesse.

Ziel dieser Dissertation ist es aufzuzeigen, ob sich Bohrgut aus dem maschinellen TBM-Vortrieb zur Aggregat-Herstellung für die Betonproduktion eignet. Hierzu wurden diverse Fräsmaterialien aus kristallinen Gesteinen und Sedimenten, welche von rund einem Dutzend Untertagebauten stammen, granulometrisch und morphometrisch erfasst. Charakteristisch für TBM-Material ist die plattig-stengelige Kornform seiner Gesteinskomponenten, welche dem Habitus eines üblichen Betonkieses völlig fremd sind. Die Besonderheit des Bohrgutes stellt sein hoher Anteil von rund 8 Gew.-% an Feinstsand dar (abschlämmbare Teile <0.063 mm). Die Sandmenge (0–4 mm) beträgt für kristalline Gesteine durchschnittlich 35 Gew.-% und für Kalke 25 Gew.-%. Entsprechend bescheiden ist der Anteil an groben Komponenten mit einem Korndurchmesser >32 mm (rund 20 Gew.-%), aus denen die für die Betonherstellung wichtige Kornfraktion 16–32 mm produziert wird.

Um gröbere Gesteinsfragmente zu erhalten, sind auch geeignete Massnahmen von Seiten der TBM aufgezeigt, welche die Grösse der anfallenden Fräsmaterialien positiv beeinflussen. Dabei hat sich gezeigt, dass Dicke und Länge der sogenannten Chips proportional zur Verbreiterung des Schneidrollenabstandes zunehmen. Fräsversuche mit Diskenabständen ausgehend von 86 mm nach 129 mm, respektive 172 mm haben vermehrt gröbere Komponenten ergeben.

Im mittleren Teil dieser Arbeit werden Prüfkriterien und Prüfverfahren entwickelt, die eine zeitsparende Beurteilung von TBM-Ausbruchmaterial im Hinblick auf eine Verwertung zu Betonzuschlägen ermöglichen. Um Ausbruchmaterial – sowohl aus dem TBM-Vortrieb wie auch aus dem konventionellen Sprengvortrieb – zu Betonaggregaten verarbeiten zu können, muss einerseits die petrographische Eignung bestätigt und andererseits eine minimale Gesteinshärte nachgewiesen werden. Hierbei haben sich die Prüfverfahren nach dem sogenannten Brechbarkeitsindex, dem Punktlastindex und dem Los Angelesindex als geeignet erwiesen, um Qualitätsbestimmungen durchzuführen.

Im Rahmen dieser Prüfverfahren konnte aufgezeigt werden, dass der Kornformeinfluss der plattig-stengeligen TBM-Rohmaterialien auf das Versuchsergebnis zu gravierend ist und somit eine Testdurchführung nach Norm nicht zulässt. Mittels geeigneter Probenzubereitung (Aussiebung mit Spaltsieben) und modifizierten Auswertungsformeln für den Punktlastversuch (massgebende Bruchfläche für TBM-Chips), konnte der Einfluss des Formfaktors minimiert und konstant gehalten werden. Diese Anpassungen erlauben eine repräsentative Beurteilung sowohl des Ausbruchmaterials aus dem TBM- respektive Sprengvortrieb als auch der aufbereiteten, gebrochenen Splittprodukte.

Die Zubereitung der Betonzuschläge aus Fräsmaterial lässt sich nicht auf Standard-Aufbereitungsanlagen durchführen. Das Bohrgut muss zunächst intensiv in Waschtrommeln vom Feinstanteil gereinigt werden, da sonst die Siebe verstopfen. Dies bedingt eine leistungsfähige Schlammpressanlage. Weiter gilt es, die a priori kleinen TBM-Gesteinsbruchstücke mittels geeigneter Verfahren schonend zu brechen, damit kein Sandüberschuss anfällt. Hierbei hat sich das sogenannte Vertikalbrechersystem als geeignet erwiesen, in welchem die Komponenten durch Korn-Korn-Kontakt gebrochen werden. Die Versuche haben auch gezeigt, dass das Rohmaterial erst ab einer Korngrösse von etwa 8 mm und teilweise noch grösser gebrochen werden muss, da die ungebrochenen Körner im Bereich 0–8 mm die Anforderungen an Betonzuschläge oftmals bereits erfüllen.

Die ungebrochenen Komponenten lassen sich mit jenen aus gebrochenen Fraktionen vermischen. Bei den verfahrenstechnischen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Wiederverwertungsrate der TBM-Materialien in Bezug auf die Zuschlagstoffproduktion um einiges höher liegt als angenommen. So können aus aufbereiteten Fräsmaterialien (Vertikalbrecher) durchschnittlich 35% eines Betongemisches 0–26 mm und 45% eines Spritzbetogemisches 0–8 mm produziert werden. Der «Überschuss» beträgt somit im Mittel nur 20%.

Der letzte Teil schliesslich zeigt, dass es – gestützt auf über 150 an der EMPA durchgeführte Laborversuche, diverse Baustellenversuche und Spritzbetonversuche – möglich ist, mit geeigneten Fräsmaterialien einen hochwertigen Beton zu produzieren, der unter anderem für Betonkonstruktionen im Untertagebau eingesetzt werden kann. Geeignetes Ausbruchmaterial kann somit den Sand- und Splittbedarf für Tunnelbauten abdecken (je nach Bauart rund 10 bis 25% der anfallenden Gesamtmenge) und wird auf diesem Weg wieder an seinen ursprünglichen Ort zurückgeführt.

ABSTRACT

Characterisation and possibilities of the utilisation of excavated rock material by tunnelling boring machines as concrete and shotcrete aggregates.

Resources of alluvial sand and gravel for construction purposes are becoming increasingly scarce in Switzerland. In recent years, recycled materials from demolitions or crushed aggregates from hard rock quarries have proven to be good alternatives to natural sand and gravel. By-products of tunnel construction may offer a further alternative source, as several new tunnel projects are under construction or are planned in the region of the Alps. A considerable part of these underground projects are being excavated by tunnelling boring machines (TBM), so that an important volume of mineral resources will potentially be available. Until recently, TBM by-products were considered as waste products and often presented disposal problems. The direct re-utilisation of excavated debris during tunnel construction may not only prove to be a viable alternative to the diminishing natural reserves of sand and gravel, but is also of environmental and economical interest.

The aim of this study was to determine if TBM rock material could be upgraded to concrete and shotcrete aggregates. Various samples of igneous, metamorphic and sedimentary rocks, collected from a dozen TBM-projects, were characterised with the help of sieve and shape analyses. Typical for such debris is a flat and elongated particle shape, which is in strong contrast to the regular shapes of sand and gravel particles conventionally used in the cement industry. The results of these analyses showed a high content of 8 mass-% of fines (<0.063 mm), an average sand (0–4 mm) content of 35 mass-% for igneous and metamorphic rocks, and 25 mass-% for sedimentary rocks. The amount of coarser components (>32 mm), from which the aggregate group with 16–32 mm size fractions are produced, comprises only 20 mass-%.

TBM boreability tests were conducted to increase the amount of coarser rock fragments by changing the cutter spacings. The tests, run with spacings from 86 mm to 129 mm and spacings of 172 mm, indicated that the length and thickness of the rock chips increased in proportion to the enlarged cutter spacings.

In Chapter 4 to 8 of this study, recommendations for minimally time-consuming laboratory tests are given to assess the use of excavated rock material as aggregates for concrete and shotcrete production. The qualification tests are based on the petrography and rock hardness and can be applied on excavated rock material from TBM or debris from drilling and blasting. For the test procedures, a so-called «Breakability» test, Point-Load, and Los-Angeles-Test are proposed. It could be shown that the influence of the particle shape was so important that the standard test procedures could not be applied to TBM rock material. However, by preparing the samples using rod sieves (for the «Breakability» test and Los-Angeles-Index) and an adapted evaluation formula for the Point-Load-Index, the influence of the shape factor could be minimised and maintained constant.

Crushing tests showed that standard crushing plants are unable to prepare concrete aggregates out of TBM excavated rocks. To prevent the screening process from being blocked by the large amount of very fine material, the rock must first be washed in washer barrels. This, in turn, requires powerful dewatering presses which allow reasonable handling of the mud. The choice of adequate crusher systems which do not overbreak the «small» TBM rock particles – and thus produce too much sand – is most important. So-called vertical shaft impactors as crusher systems yield the best results for breaking this kind of material; the rock is broken carefully by inter-particulate collision. These investigations also showed that the washed but uncrushed TBM debris (sand and aggregates 0 to 8 mm or even up to 16 mm) can be directly used together with the same aggregate group from the crushing process. This leads to a much higher recycling rate. For example, it is possible to make an average of 35% of a 0–32 mm concrete and of 45% of a shotcrete aggregate mixture (0–8 mm). The surplus (mainly sand 0-4 mm) amounts to 20%.

In the last part of this study the results of more than 150 laboratory and field tests for concrete and shotcrete are presented. The investigations indicate that it is possible to make high quality concrete and shotcrete for tunnelling and other construction purposes out of suitable and upgraded aggregates from TBM excavated rock materials. Depending on the final tunnel lining, 10 to 25% of the TBM rock material can be recycled on site.

RÉSUMÉ

Les réserves de sable et de gravier de la Suisse ne sont pas inépuisables. Dans les régions productrices de gravier, de nouvelles exigences en matière d'aménagement du territoire sont à l'origine de conflits qui rendent plus difficile l'exploitation des gravières. Depuis quelques années, on voit apparaître sur le marché des produits de substitution aux précieux granulats alluviaux: produits concassés et matériaux recyclés provenant de chantiers de démolition. Par ailleurs, de nombreux ouvrages souterrains sont en cours de construction de par le pays, qui produisent d'importantes quantités de matière première minérale. Indépendamment de la méthode d'excavation choisie, abattage conventionnel à l'explosif ou creusement mécanisé par tunnelier (machine foreuse), les déblais sont considérés à ce jour comme des déchetes dont l'élimination pose souvent problème. Aussi, leur recyclage – notamment dans les ouvrages souterrains eux-mêmes – constitue une perspective intéressante tant sur le plan écologique qu'économique.

L'objet de cette dissertation est d'étudier s'il est possible d'utiliser les déblais produits par les tunneliers pour la production de granulats entrant dans la composition du béton. A cet effet, des échantillons de matériaux de fraisage provenant de roches cristallines et sédimentaires ont été prélevés auprès d'une douzaine de chantiers souterrains, et soumis à une analyse granulométrique et morphométrique. Les déblais de tunnelier se caractérisent par la forme aplatie et allongée de leurs composants, totalement différente de l'aspect des granulats habituellement employés dans la production de béton. Les déblais de tunnelier présentent en outre une teneur élevée en limons (sables très fins, diamètre <0,063 mm) : environ 8 % en poids. La fraction granulométrique grossière, dont les particules ont un diamètre supérieur à 32 mm, est par conséquent faiblement représentée (environ 20% en poids). C'est de cette dernière fraction que l'on tire les granulats de 16–32 mm, importants pour la fabrication du béton.

Cette étude montre les mesures pouvant être appliquées au niveau des tunneliers pour obtenir des particules plus grossières. Ainsi, l'analyse granulométrique des déblais produits au cours d'essais comparatifs réalisés avec différents écartements de molettes – écartements de 86 mm, de 129 mm et de 172 mm – a révélé que l'épaisseur et la longueur des copeaux augmentent proportionnellement à l'écartement des molettes.

La seconde partie de la dissertation est consacrée aux critères et procédures de contrôle visant à analyser rapidement les déblais de tunnelier dans l'optique de leur utilisation dans la fabrication du béton. Indépendamment de leur provenance – forage par tunnelier ou abattage à l'explosif – les déblais destinés à être traités pour obtenir des agrégats utilisables dans la production de béton doivent remplir des conditions précises en matière de propriétés pétrographiques et de dureté de la roche. Les études ont montré que les procédures de mesure des indices dits de broyabilité, de charge ponctuelle et de Los Angeles permettent de contrôler efficacement l'adéquation des matériaux excavés à ces exigences.

En outre, ces essais ont fait apparaître que les résultats des tests varient fortement en fonction de la forme des particules aplaties et allongées contenues dans les déblais de tunnelier; il faut donc adapter la procédure de test en conséquence. Le tamisage des échantillons au moyen de grilles à fentes et la modification des formules utilisées pour le dépouillement des essais de charge ponctuelle (au niveau du coefficient de la surface de l'empreinte) a permis de réduire durablement l'influence du facteur «forme». On peut alors effectuer un contrôle représentatif des déblais provenant des tunneliers et de l'abattage à l'explosif, mais aussi des agrégats concassés.

Les matières premières produites par les machines foreuses ne peuvent être traitées directement sur les installations conventionnelles de concassage des agrégats pour la production de béton. Elles doivent d'abord subir un lavage intensif en tambour afin de supprimer la fraction très fine qui risquerait de colmater les tamis, ce qui implique de disposer d'une presse à boues performante. Il faut ensuite concasser les débris de roche; ceux-ci étant d'assez petite taille, le traitement doit être « doux » pour éviter de produire du sable. A cet égard, le système de concassage vertical, dans lequel les éléments sont brisés par entrechoquement, a fait preuve d'une bonne efficacité. Les essais ont par ailleurs montré que seule la fraction égale ou supérieure à 8 mm (voire plus) nécessite un traitement par concassage; dans la plupart des cas, les particules plus fines présentent déjà les qualités requises pour la fabrication du béton.

On peut mélanger éléments concassés et non concassés. Différents procédés techniques ont été mis à l'essai; les taux de recyclage des déblais de tunnelier atteints lors de ces essais étaient sensiblement supérieurs aux prévisions. Ainsi, 35% des agrégats produits par concassage vertical conviennent à un recyclage en mélange pour béton d'une granulométrie de 0–32 mm, et 45% conviennent à un

recyclage en mélange pour béton projeté d'une granulométrie de 0–8 mm. La fraction en excédent s'élève donc à 20% en moyenne.

La dernière partie de ce travail apporte la démonstration - appuyée par plus de 150 expériences effectuées dans les laboratoires de l'EMPA ainsi que différents essais réalisés sur les chantiers ou avec du béton projeté – qu'il est possible de produire un béton de qualité supérieure, convenant notamment aux constructions souterraines, à partir de déblais provenant de machienes foreuses, d'origine pétrographique appropriée. Les déblais d'excavation peuvent ainsi couvrir les besoins en sables et en gravillons des chantiers de tunnels. En fonction de l'architecture de tunnel choisie, ce sont entre 10 et 25% des déblais qui peuvent alors revenir à leur site d'origine.