

Masterformeln und Grundregeln der Tunnelbaulogistik

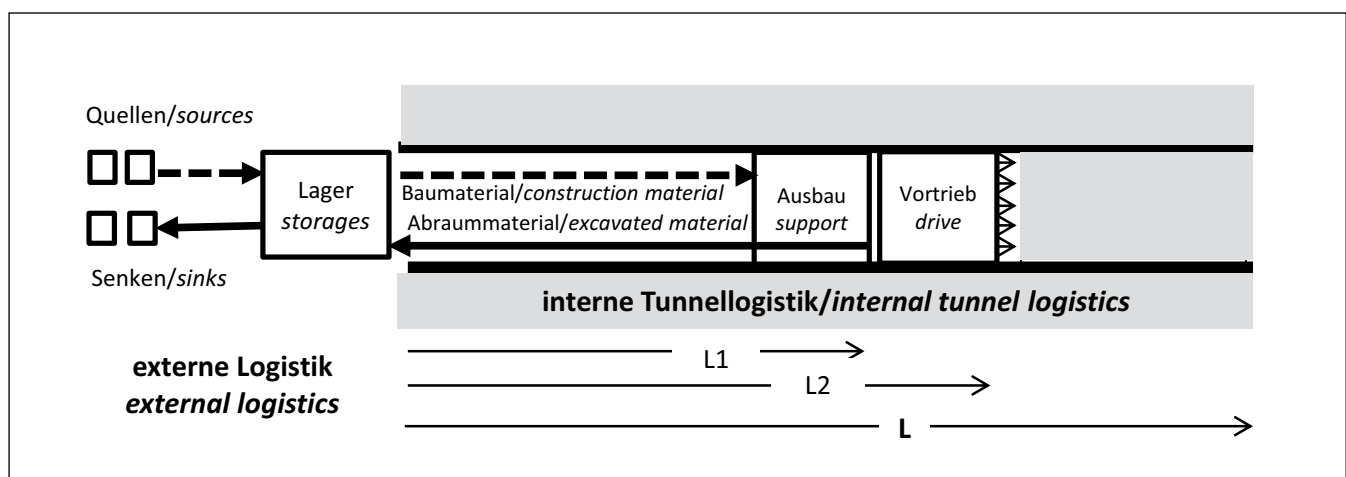
Zentrale Aufgaben der Tunnelbaulogistik sind das unverzügliche Entsorgen des beim Vortrieb anfallenden Abraummaterials und das rechtzeitige Bereitstellen des zum Vortrieb und Ausbau benötigten Baumaterials. Das gilt für die externe Tunnelbaulogistik, die sich von den Quellen der Baumaterialien über Zwischenlager bis zum Tunneleingang und von dort zu den Senken des Abraummaterials erstreckt, wie auch für die interne Tunnelbaulogistik, die das Be- und Entladen der Transportfahrzeuge und die Transportfahrten im Tunnel umfasst (**Bild 1**). Die Kosten der externen Logistik steigen mit den zunehmenden Gütermengen proportional zur Tunnellänge. Die kumulierten Kosten der internen Transporte nehmen hingegen, wie die Erfahrung zeigt, überproportional mit der Tunnellänge zu.

Master Formulas and basic Rules for Tunnelling Logistics

The main tasks of tunnelling logistics are the immediate disposal of the material accrued during excavation and the appropriate provision of the construction material required for driving and supporting. This applies to the external tunnelling logistics, ranging from the sources of the construction materials by way of intermediate storage to the tunnel entrance and from there to the sinks for the excavated material, as well as to the internal tunnelling logistics, embracing loading and unloading transport vehicles and transportation within the tunnel (**Fig. 1**). The costs for the external logistics grow with the increasing volume of materials in proportion to the length of the tunnel. On the other hand, the accumulated costs for the internal transportation, as experience shows, increase overproportionally with the length of the tunnel.

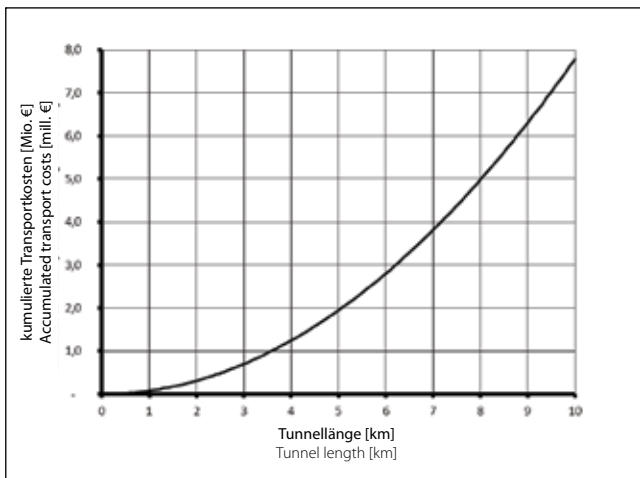
Dipl.-Phys. Dr. rer. nat. Dr. Ing.-habil. Timm Gudehus, Berater für Strategie und Logistik/
Consultant for Strategy and Logistics, Hamburg, Deutschland/Germany

Dipl.-Wi.-Ing. Dirk Fischer, Site Management Gotthard-Basistunnel South, Lenzburg, Schweiz/Switzerland



Quelle/credit (3): Gudehus, Fischer

1 Strukturdiagramm der Tunnelbaulogistik
Structural diagram for tunnelling logistics



- 2 Kumulierter Transportaufwand als Funktion der ausgebauten Tunnellänge. Projekt: Zweispuriger Straßentunnel in Sand- und Kiesboden (siehe Anwendungsbeispiel im Text); Parameter: Abtransport von $m_A = 156$ t Abraum pro Vortriebsmeter

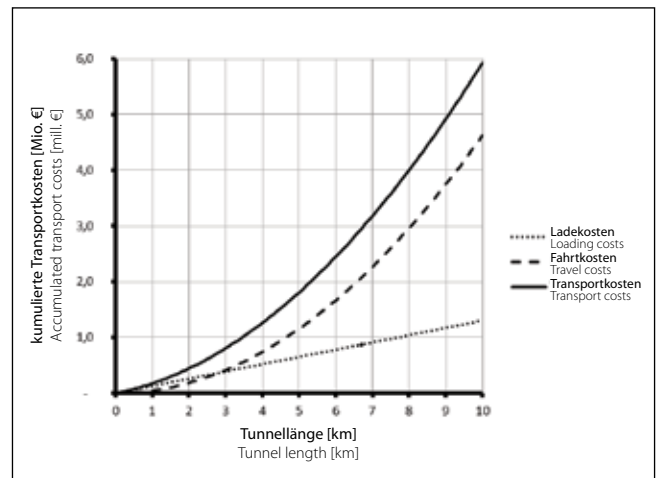
Accumulated transport requirement as function of the lined tunnel length. Project: Two-lane road tunnel in sand and gravel soil (see application example in the text); parameters: removal of $m_A = 156$ t of muck per driven metre

Im vorliegenden Beitrag werden allgemeingültige Berechnungsformeln für die Längenabhängigkeit des internen Transportaufwands und der daraus resultierenden Transportkosten hergeleitet. Sie sind hilfreich für die Planung und den Bau von Straßen-, Bahn- und Rohrleitungstunneln. Aus diesen Masterformeln der Tunnelbaulogistik ergibt sich eine Reihe allgemeingültiger Grundregeln für den Tunnelbau, die im Anschluss an die Herleitung der Formeln dargestellt und ergänzend erläutert werden. Den Abschluss des Beitrags bildet ein Anwendungsbeispiel, das die Erkenntnisse, die sich aus den Masterformeln gewinnen lassen, und ihre Auswirkungen für den praktischen Einsatz anschaulich zusammenfasst.

Transportaufwand

Beim Vortrieb eines Tunnels fällt laufend in großer Menge Abraummaterial an, das von der Vortriebsstelle zum Tunneleingang abtransportiert wird. Beim konventionellen ebenso wie beim maschinellen Tunnelvortrieb werden zudem laufend Verschleißteile und Betriebsstoffe benötigt, wie Kraftstoffe und Wasser, die vom Eingang herantransportiert werden müssen. Zum Ausbau und zur Fertigstellung der Tunnelröhre sind Baustoffe erforderlich, wie Schotter, Beton und Asphalt, sowie vorgefertigte Bauteile, wie Tübbinge, Rohrsegmente, Schienen, Bandförderabschnitte und Leitungen. Diese müssen laufend vom Tunneleingang zur Ausbaustelle transportiert werden. Außerdem müssen die im Tunnel tätigen Personen zu- und abtransportiert werden.

Die beim Vortrieb und anschließendem Ausbau um eine Längeneinheit ($LE = m, km, \dots$) anfallenden, verbrauchten und benötigten Gütermengen m_i [ME_i/LE] sind abhängig vom Tunnelquerschnitt, von der Bodenbeschaffenheit sowie von der Vortriebs- und Ausbautechnik. Die Mengeneinheit ME_i zur Messung der Menge des Gutes G_i hängt vom Transportgut und vom eingesetzten Transportsystem



- 3 Kumulierte Transportkosten als Funktion der Tunnellänge für einen zweispurigen Straßentunnel (Transportgut: Sand- und Kies; Transportfahrzeuge: Muldenkipper; Transportwegkostensatz $k_T = 0,59$ €/tkm; Ladekostensatz $k_L = 0,84$ €/t)

Accumulated transport costs as function of the tunnel length for a two-lane road tunnel (transport material: sand and gravel; transport vehicles: dumpers; transport route cost rate $k_T = 0.59$ €/tkm; loading cost rate $k_L = 0.84$ €/t)

In this report general calculation formulas are derived for the length-dependence of the internal transport requirements and the resultant transport costs. They are useful for planning and constructing road, rail and pipeline tunnels. These master formulas for tunnelling logistics provide a series of generally valid basic rules for tunnelling, which are presented and explained following the derivation of the formulas. The report is rounded off with an application example, which demonstrates the general rules won from the master formulas, and their implications for practical use.

Transport Requirements

When a tunnel is driven, huge amounts of material are excavated, which must be carried from the face to the tunnel entrance. Furthermore, operating materials are continuously needed such as fuels and water, which must be brought from the entrance. This applies both to conventional as well as mechanised tunnelling. Construction materials are used for supporting and completing the tunnel tube such as gravel, concrete and asphalt as well as precast elements like segments, pipe sections, rails, belt conveyor sections and pipelines. These have to be continuously transported from the tunnel entrance to the point of installation. In addition, the persons working in the tunnel must be carried to and from their workplaces. The quantities m_i [ME_i/LE] of different goods G_i accumulating, utilised or required per unit of tunnel length ($LE = m, km, \dots$) during excavation depend on the tunnel cross-section, the nature of the soil as well as the driving and lining technology. The unit ME_i for measuring the quantity of goods G_i depends on the transport material and the transport system applied. In the case of weight-determined transport material, it is measured by kg, t (or another unit of weight), in the case of volume-determined transport material by m^3 (or another unit of volume) and in the case of discrete goods by the item of freight, e.g. a segment, a section of rail or a pipe segment.

ab. Sie ist bei gewichtsbestimmtem Transportgut kg, t (oder eine andere Gewichtseinheit), bei volumenbestimmtem Gut m^3 (oder eine andere Volumeneinheit) und bei Stückgut das Frachtstück, z. B. ein Tübbing, ein Schienenabschnitt oder ein Rohrstück.

Während des Vortriebs und Ausbaus des Tunnels über eine Länge $l_{1-2} = L_2 - L_1$ [LE] vom Punkt L_1 bis zum Punkt L_2 sind die Transportmengen $m_i \cdot (L_2 - L_1)$ [ME_i] über eine mittlere Transportweglänge $(L_2 + L_1) / 2$ [LE] vom bzw. zum Tunneleingang zu befördern. Der Transportaufwand A_{Tr} [ME_i·LE], d. h. die zu leistende Transportarbeit für das im Tunnelabschnitt (L_1, L_2) anfallende Gut G_i ist das Produkt der Transportmenge $m_i \cdot (L_2 - L_1)$ mit der mittleren Transportweglänge $(L_2 + L_1) / 2$:

$$A_{Tr}(L_1, L_2) = m_i \cdot (L_2 - L_1) \cdot (L_2 + L_1) / 2 = m_i \cdot (L_2^2 - L_1^2) / 2 \quad [ME_i \cdot LE] \quad (1)$$

Für den stetigen Ausbau eines Tunnels der Gesamtlänge L vom Anfang $L_1 = 0$ bis zum Ende $L_2 = L$ folgt daraus für das Tunnelbaugut G_i die **Masterformel für den kumulierten Transportaufwand des Tunnelbaus (Bild 2)**:

$$A_{Tr}(L) = m_i \cdot L^2 / 2 \quad [ME_i \cdot LE] \quad (2)$$

Bei einem unstetigen Ausbau in N gleich langen Abschnitten der Länge $l_A = L / N$ ergibt sich aus der Beziehung (1) mit $L_k = k \cdot l_A$ für die aufeinander folgenden Abschnitte $k = 1, 2, \dots, N$ der Transportbedarf $M_i(L_k) = m_i \cdot (k + 1/2) \cdot l_A^2$. Summiert über alle N Abschnitte folgt daraus mit der Gauß'schen Summenformel

$$\sum_{k=1}^N k = N \cdot (N + 1) / 2 \quad (3)$$

die **Masterformel für den kumulierten Transportaufwand des abschnittweisen Tunnelbaus** (siehe Fischer 2018 [1]):

$$A_{Tr}(L; N) = m_i \cdot (1 + 1 / N) \cdot L^2 / 2 \quad [ME_i \cdot LE] \quad (4)$$

Wenn die Tunnellänge groß ist in Relation zur Abschnittlänge, d. h. für $N \gg 1$, geht die Formel (4) in die Formel (2) über.

Aus den Masterformeln (2) und (4) ist das **Quadratgesetz der Tunnelbaulogistik** ablesbar (Bild 2):

- Der kumulierte interne Transportaufwand für die beim Tunnelbau anfallenden und benötigten Güter steigt mit dem Quadrat der Tunnellänge.

Wegen der unterschiedlichen Mengeneinheiten und Transportsysteme dürfen die güterspezifischen Transportbedarfe (2) bzw. (4) nicht addiert werden.

Transportkosten

Für die verschiedenen Tunnelbaugüter G_i werden abhängig von ihrer Beschaffenheit unterschiedliche Transportfahrzeuge eingesetzt, wie Lastwagen, Radlader, Muldenkipper, Betonmischfahrzeuge,

When driving and supporting the tunnel advance over a length $l_{1-2} = L_2 - L_1$ [LE] from point L_1 to point L_2 , the quantities $m_i \cdot (L_2 - L_1)$ [ME_i] must be carried over an average transport length $(L_2 + L_1) / 2$ [LE] from or to the tunnel entrance. The transport requirement A_{Tr} [ME_i·LE], i.e. the transport task required to cope with the goods G_i accruing in the tunnel section (L_1, L_2) , is the product of the transport quantity $m_i \cdot (L_2 - L_1)$ with the average transport length $(L_2 + L_1) / 2$:

$$A_{Tr}(L_1, L_2) = m_i \cdot (L_2 - L_1) \cdot (L_2 + L_1) / 2 = m_i \cdot (L_2^2 - L_1^2) / 2 \quad [ME_i \cdot LE] \quad (1)$$

For a continuous tunnel advance over a total length L , beginning at $L_1 = 0$ and ending at $L_2 = L$, results the **master formula for the accumulated tunnelling transport requirement (Fig. 2)**:

$$A_{Tr}(L) = m_i \cdot L^2 / 2 \quad [ME_i \cdot LE] \quad (2)$$

For a discontinuous tunnel advance in N equally long sections of length $l_A = L / N$, the relation (1) with $L_k = k \cdot l_A$ provides the transport requirement $M_i(L_k) = m_i \cdot (k + 1/2) \cdot l_A^2$ for the successive sections $k = 1, 2, \dots, N$. Added up over all N sections, using the Gaussian sum-formula

$$\sum_{k=1}^N k = N \cdot (N + 1) / 2 \quad (3)$$

provides the **master formula for the accumulated tunnelling transport requirement for discontinuous tunnelling** (see Fischer 2018 [1]):

$$A_{Tr}(L; N) = m_i \cdot (1 + 1 / N) \cdot L^2 / 2 \quad [ME_i \cdot LE] \quad (4)$$

If the total tunnel length is large in relation to the section length, i.e. for $N \gg 1$, formula (4) evolves into formula (2).

From the formulas (2) and (4) follows the general **square law of tunnelling logistics (Fig. 2)**:

- The accumulated internal transport requirement for the accruing and needed goods for tunnelling increases with the square of the tunnel length.

The material-specific transport requirements (2) and (4) cannot be added for goods with different quantity units and transport systems.

Transport Costs

Different transport vehicles such as lorries, wheel loaders, dumper trucks, concrete mixing trucks, tractor trailer trains, service trains or transport trains are used for the various tunnelling goods G_i depending on the conditions. The transport costs comprise the loading costs, which are the product of the specific loading cost rate k_{Li} [GE/ME; GE = monetary unit] with the conveyed transport quantity $m_i \cdot (L_2 - L_1)$ for a tunnel section (L_1, L_2) , and the transport route costs, which are the product of the specific transport route cost rate k_{Ti} [GE/ME_i·LE] with the transport requirement given by formula (1).¹⁾ This results in the transport costs for the goods G_i within the tunnel section (L_1, L_2) :

Schleppzüge, Stollenbahnen oder Transportzüge. Die Transportkosten setzen sich zusammen aus den Ladekosten, die für einen Streckenabschnitt (L_1, L_2) das Produkt des spezifischen Ladekostensatzes k_{Li} [GE/ME; (GE = Geldeinheit)] mit der beförderten Transportmenge $m_i \cdot (L_2 - L_1)$ sind, und den Transportwegkosten, die das Produkt des spezifischen Transportwegkostensatzes k_{Ti} [GE/ME $_i$ · LE] mit dem durch Beziehung (1) gegebenen Transportaufwand sind.¹⁾ Für den Streckenabschnitt (L_1, L_2) und das Gut G_i ergeben sich damit die Transportkosten:

$$K_{Ti}(L_1, L_2) = k_{Li} \cdot m_i \cdot (L_2 - L_1) + k_{Ti} \cdot m_i \cdot (L_2^2 - L_1^2) / 2 \quad [\text{GE}] (5)$$

Entsprechend folgt analog zu Beziehung (2) für einen Tunnel der Gesamtlänge L die **Masterformel für die kumulierten internen Transportkosten des Tunnelbaus**:

$$K_{Ti}(L) = K_{Li} + K_{Wegi} = k_{Li} \cdot m_i \cdot L + k_{Ti} \cdot m_i \cdot L^2 / 2 \quad [\text{GE}] (6)$$

Durch Summation der Transportkosten (6) über alle beförderte Güter G_i ergeben sich die gesamten internen Transportkosten des Tunnelbaus. Daraus ist das erste **Transportkostengesetz des Tunnelbaus** ablesbar:

- Die kumulierten internen Transportkosten für alle beim Tunnelbau anfallenden und benötigten Güter steigen teils linear und teils mit dem Quadrat der Tunnellänge (**Bild 3**).

Abschnittsweiser Tunnelbau

Durch Multiplikation mit den Transportwegkostensätzen k_{Ti} und Summation über alle Transportgüter folgen aus Beziehung (1) die Transportwegkosten für den Bau eines Tunnelabschnitts (L_1, L_2):

$$K_{TWegN}(L_1, L_2) = (\sum k_{Ti} \cdot m_i / 2) \cdot (L_2^2 - L_1^2) = c_T \cdot (L_2^2 - L_1^2) \quad [\text{GE}] (7)$$

Für den ersten von insgesamt N gleichen Bauabschnitten der Länge $l_N = L / N$ sind $L_1 = 0$ und $L_2 = L / N$. Damit ergeben sich aus Beziehung (7) für den 1. Abschnitt die Transportwegkosten $K_{TWeg1} = c_T \cdot (L / N)^2$. Für den letzten, d. h. den N . Bauabschnitt sind $L_{N-1} = L \cdot (1 - 1 / N)$ und $L_N = L$ und die Transportwegkosten $K_{TWegN} = c_T \cdot (L / N)^2 \cdot (2N - 1)$. Das Verhältnis der Transportwegkosten des N . zum 1. Abschnitt ist also

$$K_{TWegN} / K_{TWeg1} = 2 \cdot N - 1 \quad (8)$$

Daraus ist das **Transportwegkostengesetz für Tunnelabschnitte** ablesbar:

- Die Transportwegkosten sind für die zweite Hälfte des Tunnels dreimal so hoch wie für die erste Hälfte, für das letzte Viertel siebenmal so hoch wie für das erste Viertel und für den N -ten Abschnitt $(2N - 1)$ -mal so hoch wie für den ersten von N gleichen Abschnitten.

$$K_{Ti}(L_1, L_2) = k_{Li} \cdot m_i \cdot (L_2 - L_1) + k_{Ti} \cdot m_i \cdot (L_2^2 - L_1^2) / 2 \quad [\text{GE}] (5)$$

Correspondingly, the **master formula for the accumulated internal transport costs of tunnelling** follows analogous to relation (2) for a tunnel with total length L :

$$K_{Ti}(L) = K_{Li} + K_{Wegi} = k_{Li} \cdot m_i \cdot L + k_{Ti} \cdot m_i \cdot L^2 / 2 \quad [\text{GE}] (6)$$

By adding up the transport costs (6) for all conveyed goods G_i the total internal transport costs of tunnelling result. From this the following **cost law of tunnelling logistics** is derived (**see Fig. 3**):

- The accumulated internal transport costs for all accruing and required goods for tunnelling increase partly linearly and partly with the square of the tunnel length.

Sectoral Tunnelling

From relation (1) the transport route costs for producing a tunnel section (L_1, L_2) are derived by multiplication with the transport route cost rates k_n and summation of all tunnelling goods:

$$K_{TWeg}(L_1, L_2) = (\sum k_{Ti} \cdot m_i / 2) \cdot (L_2^2 - L_1^2) = c_T \cdot (L_2^2 - L_1^2) \quad [\text{GE}] (7)$$

For the first of a total of N equal tunnel sections with a length of $l_N = L / N$ holds $L_1 = 0$ and $L_2 = L / N$. Consequently, for the 1st section the transport route costs $K_{TWeg1} = c_T \cdot (L / N)^2$ result from relation (7). For the last, i.e. the N^{th} construction section holds $L_{N-1} = L \cdot (1 - 1 / N)$ and $L_N = L$ and result the transport route costs $K_{TWegN} = c_T \cdot (L / N)^2 \cdot (2N - 1)$. Thus the ratio of the transport route costs of the N^{th} to the 1st section is

$$K_{TWegN} / K_{TWeg1} = 2 \cdot N - 1 \quad (8)$$

This provides the **transport route cost law for tunnel sections**:

- The transport route costs are three times as high for the second half of the tunnel as for the first half, for the final quarter seven times as high as for the first quarter and for the N^{th} section $(2N - 1)$ -times as high as for the first of N equal sections.

Tunnelling can be executed from two sides or even from four, six or N_z sides in order to shorten the tunnelling time as well as reduce transport requirements and transport costs. This depends on whether it is possible to supply the tunnel tube and cater for disposal via one, two or several intermediate shafts. In order to execute the tunnelling from two sides, starting from the two ends and the intermediate shafts, the tunnel with the total length L is divided up into N part tunnels of equal length L / N , which are executed simultaneously. The internal transport route costs of the N part tunnels follow from relation (7):

$$N \cdot K_{TWeg}(L / N) = N \cdot c_T \cdot (L / N)^2 = (1 / N) \cdot c_T \cdot (L / N) = (1 / N) \cdot K_{TWeg}(N) \quad (9)$$

¹⁾ Bei europäischen Tunnelbauprojekten wird i. d. R. mit der Mengeneinheit t , der Längeneinheit km und im Euroraum mit der Geldeinheit € gerechnet. Dann ist die Maßeinheit der Transportarbeit $t \cdot km$ und die Maßeinheit des Transportwegkostensatzes $\text{€} / t \cdot km$.

¹⁾ For European tunnelling projects generally speaking the unit of quantity t , the unit of length km and the monetary unit € (in Eurozone) are applied. The unit of measure for transport work is then $t \cdot km$ and the unit of measure for the transport route cost rate $\text{€} / t \cdot km$.

Nicht nur um die Bauzeit zu verkürzen, sondern auch um den Transportaufwand und die Transportkosten zu reduzieren, kann der Tunnelbau statt nur von einer Seite auch von zwei Seiten oder von vier, sechs oder N_z Seiten durchgeführt werden, wenn es möglich ist, die Tunnelröhre über einen, zwei oder mehr Zwischenschächte zu ver- und entsorgen. Durch den jeweils zweiseitigen Ausbau, ausgehend von den beiden Enden und den Zwischenschächten, wird der Tunnel mit der Gesamtlänge L in N Teiltunnel gleicher Länge L/N aufgeteilt, die gleichzeitig vorgetrieben werden. Die internen Transportwegkosten der N Teiltunnel sind nach Beziehung (7):

$$N \cdot K_{\text{TWeg}}(L/N) = N \cdot c_T \cdot (L/N)^2 = (1/N) \cdot c_T \cdot (L/N) = (1/N) \cdot K_{\text{TWeg}}(N) \quad (9)$$

Damit folgt das **Teilungsgesetz für den Tunnelbau**:

- Die Bauzeit, der Transportaufwand und die internen Transportwegkosten lassen sich durch den Bau in N gleich langen Teiltunneln, die von $2N$ Öffnungen ausgehend gleichzeitig vorgetrieben werden, um den Faktor $1/N$ senken.

Bauzeit und interne Transportwegkosten sind also bei einem beidseitigen Vortrieb in zwei gleich langen Abschnitten halb so hoch und bei einem Vortrieb in vier gleich langen Abschnitten, ausgehend von zwei Seiten und einem Zwischenschacht, $1/4$ so hoch wie beim Vortrieb nur eines Tunnels von einer Seite. Den Transportkosteneinsparungen stehen die Mehrkosten für die zusätzliche externe Tunnellogistik und für den Bau der Zwischenschächte gegenüber, die beim Tunnelbau im Gebirge erheblich sein können.

Entsprechend folgt aus der Masterformel (7) für die Summe **ungleichlanger Teiltunnel**:

- Wenn die Teiltunnel unterschiedliche Längen haben, sind die Bauzeit, der Transportaufwand und die internen Transportwegkosten höher als für gleichlange Tunnelabschnitte.

Danach sind, soweit es die örtlichen Gegebenheiten zulassen, die Zwischenschächte mit gleichem Abstand und Teiltunnel mit gleicher Länge anzustreben.

Transportplanung

Aufgaben der Transportplanung für Tunnelbauprojekte sind die Auswahl und Dimensionierung geeigneter Fahrzeugsysteme und Fördersysteme, die Einsatzplanung der Transportfahrzeuge sowie die Kalkulation der Transportkosten. Zur Einsatzplanung gehören die Strategien der Transportdisposition für den laufenden Betrieb und die Berechnung des Fahrzeugbedarfs (s. Gudehus 2012, Abschnitte 18.12 und 20.14).

Von zentraler Bedeutung für den effizienten Einsatz von Transportfahrzeugen, wie Lastkraftwagen, Radlader oder Muldenkipper, sind die Strategien der Transportdisposition. Eine wichtige Strategie ist die Transportbündelung: Alle zur Beförderung durch das dasselbe Fahrzeug geeigneten Güter werden zusammengefasst und gemeinsam befördert. Der Transportaufwand ist dann gleich der Summe des Transportaufwands für die gebündelten Güter, die dazu in derselben Mengeneinheit gemessen werden

This results in the **law of sectoral tunnelling**:

- The tunnelling time, the transport requirement and the internal transport route costs can be reduced by the factor $1/N$ by producing N equally long part tunnels, which are driven simultaneously from $2N$ accesses, in comparison to executing the whole tunnel from only one access.

The tunnelling time and internal transport route costs are thus half as high when the tunnelling is executed from two sides in two equally long sections and only $1/4$ as high when executed from two sides and an intermediate shaft in four equally long sections as when executed only from one side. However, the transport cost savings by sectoral tunnelling are partly compensated by the extra costs for the additional external tunnel logistics and for the production of the intermediate shafts, which can be considerable when tunnelling in rock.

Accordingly, from the master formula (7) follows for the sum of **unequally long part tunnels**:

- If the part tunnels are of different lengths, the tunnelling time, the transport requirement and the internal transport route costs are higher than for equally long tunnel sections.

Therefore, it should be attempted to cater for intermediate shafts with the same gap and part tunnels with the same length, providing this is permitted by local conditions.

Transport Planning

The main tasks of transport planning for tunnelling projects are the selection and dimensioning of suitable vehicle systems and conveyors, planning the deployment of transport vehicles as well as calculating the transport costs. Operational planning includes strategies for allocating vehicles for ongoing operations and calculation of the number of vehicles needed (see Gudehus 2012, Sections 18.12 and 20.14).

Transport scheduling strategies are of central importance for efficiently deploying transport vehicles such as lorries, wheel loaders or dumpers. For example, transport bundling represents an important strategy: All goods suitable for transportation by the same vehicle are assembled and carried jointly. The transport requirement is then equal to the sum of the transport requirement for the bundled goods, which must be measured in the same unit of quantity. Goods with different units of quantity or of different nature can be unified and made transportable through deploying transport aids such as pallets, frames or hinged containers.

Another important transport strategy is exploiting empty vehicles en route. In this way, the otherwise empty outward journey undertaken by a waste disposal vehicle can be used for conveying bundled construction material and other supply materials, providing it is suitable for this purpose. In this way, transport costs for the materials carried in the otherwise empty space are avoided. Generally, the **basic rule of transportation planning** applies:

- Transport costs can be reduced substantially by bundling transports and exploiting empty route capacities.

müssen. Güter mit verschiedenen Mengeneinheiten oder unterschiedlicher Beschaffenheit können durch den Einsatz von Transporthilfsmitteln, wie Paletten, Gestellen oder Klappbehälter, vereinheitlicht und transportfähig gemacht werden.

Eine weitere Transportstrategie ist die Leerstreckennutzung. So kann die ansonsten leere Hin-fahrt eines Entsorgungsfahrzeugs für die gebündelte Beförderung von Baumaterial und anderen Versorgungsgütern genutzt werden, wenn diese dafür geeignet sind. Dadurch entfallen die Transportkosten für die im Leerraum beförderten Güter. Allgemein gilt die **Grundregel der Transportdisposition:**

- Durch Transportbündelung und Leerstreckennutzung lassen sich die Transportkosten erheblich senken.

Weitere Einsparungsmöglichkeiten bestehen in der Auswahl

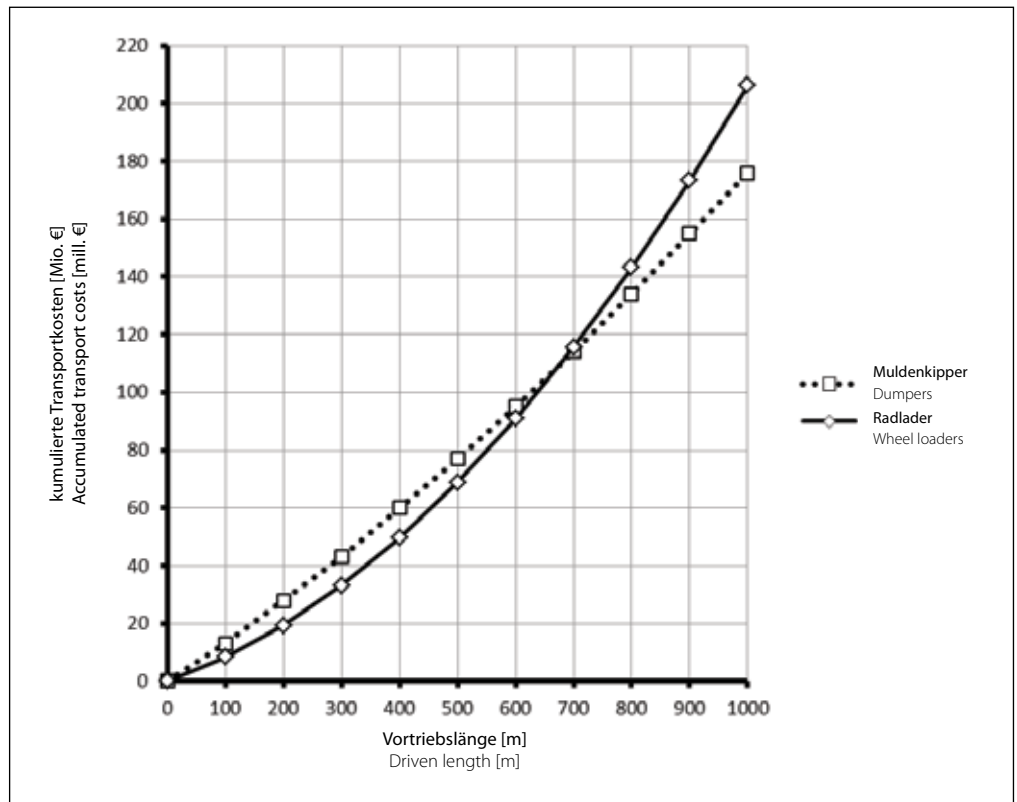
geeigneter Transportfahrzeuge [Fz] und der Bestimmung der kostenoptimalen Fahrzeugkapazität. So zeigt **Bild 4** dass die Transportkosten für den nachfolgend betrachteten Anwendungsfall beim Einsatz von Radladern für Vortriebslängen bis 700 m geringer sind als beim Einsatz von Muldenkippern. Ab dieser Einsatzgrenze steigen die Transportkosten für Radlader weitaus schneller mit der Vortriebslänge als für Muldenkipper. Generell gilt die **Grundregel für die Transportmittelauswahl:**

- Die internen Transportkosten lassen sich bei ansteigender Vortriebslänge durch den Einsatz schnellerer Transportfahrzeuge mit größerer Kapazität erheblich senken.

Die Einsatzgrenzen zwischen den geeigneten Transportfahrzeugen hängen von den Kenndaten der Fahrzeuge sowie von den Parametern des Projektes ab. Sie lassen sich nach dem entwickelten Verfahren für den konkreten Einzelfall berechnen.

Fahrzeugbedarf

Der Fahrzeugbedarf lässt sich nach dem Rundfahrtverfahren berechnen (Gudehus 2012, S. 864). Wenn der Tunnelvortrieb die Ausbaulänge x erreicht hat, benötigt ein Fahrzeug mit einer Ladezeit t_L [ZE (= Zeiteinheit)] und einer mittleren Fahrgeschwindigkeit v_{Fz} für eine Rundfahrt vom Tunneleingang zur Vortriebsstelle und zurück die Rundfahrtzeit $T_R = t_L + 2x / v_{Fz}$ [ZE]. Daraus



4 Kumulierte Transportkosten in Abhängigkeit von der Vortriebslänge für den Abraumtransport durch Muldenkipper oder Radlader

Accumulated transport costs relating to the driven length for transporting muck by dumpers or wheel loaders

Further strategies for cost savings are selecting suitable transport vehicles [Fz] and determining the cost-optimised vehicle capacity. Thus, **Fig. 4** shows for the following example that the transport costs with wheel loaders are for tunnel lengths of up to 700 m lower than with dumpers. From this application limit the transport costs for wheel loaders rise far more rapidly with the driven length than for dumpers. Generally, the **basic rule for selecting the means of transportation** is:

- With increasing tunnel length, the internal transport costs can be considerably reduced through faster transport vehicles with larger capacity.

The application limits between the suitable means of transport depend on the key data of the vehicles as well as on the project parameters. They can be worked out for the concrete case with the formula and methods developed here.

Vehicle Requirement

The vehicle requirement can be calculated in accordance with the round-trip method (Gudehus 2012, p. 864). At a tunnel length x , a vehicle with a loading time t_L [ZE (= unit of time)] and an average travelling speed of v_{Fz} requires the round-trip time $T_R = t_L + 2x/v_{Fz}$ [ZE] for a round trip from the tunnel entrance to the excavation point and back again. This results in the transport rate per vehicle

resultiert mit einer Fahrzeugkapazität C_{Fz} [ME/Fz (Fz= Fahrzeug)] die Transportleistung pro Fahrzeug $C_{Fz}/T_R = C_{Fz}/(t_L + 2x/v_{Fz})$ [ME/ZE/Fz]. Bei einer mittleren Vortriebsgeschwindigkeit v_V und einer anfallenden Abraummenge m_A [ME/LE] ist pro Zeiteinheit der Mengenstrom $m_A \cdot v_V$ [ME/ZE] abzutransportieren. Für einen zum Vortrieb synchronen Abtransport ist daher die bei der Vortriebslänge x benötigte Fahrzeuganzahl:

$$N_{Fz}(x) = \text{AUFRUNDEN} (m_A \cdot v_V \cdot (t_L + 2x/v_{Fz}) / C_{Fz}) \quad [Fz] \quad (10)$$

Das Aufrunden berücksichtigt die Ganzzahligkeit der Fahrzeuge. Aus der Formel (10) sind die Grundregeln für den Fahrzeugbedarf ablesbar (**Bild 5**):

- Der Fahrzeugbedarf für den Tunnelbau steigt in ganzzahligen Sprüngen linear mit der Vortriebslänge und der Vortriebsgeschwindigkeit.
- Der Fahrzeugbedarf fällt umgekehrt proportional mit der Geschwindigkeit und der Kapazität der Fahrzeuge.

Die Formel (10) ergibt nur die Anzahl der Fahrzeuge im Einsatz. Hinzu kommen die Fahrzeuge im Ruhezustand wegen Stau, zum Auftanken und als Ausfallreserve. Deren Anzahl kann analytisch z. B. nach Verfahren der Warteschlangentheorie berechnet oder durch Simulation ermittelt werden.

Gesamtfahrstrecke und Kostensätze

Wenn der Tunnel am Ort x um eine differentielle Länge dx vorgefahren wird, ist bei einer pro Längeneinheit anfallenden Menge m_A [ME/LE] die Menge $m_A \cdot dx$ [ME] zu transportieren. Bei einer Fahrzeugkapazität C_{Fz} sind dazu $(m_A/C_{Fz}) \cdot dx$ Rundfahrten der Länge $2x$ erforderlich, auf denen insgesamt eine Fahrstrecke $2x \cdot (m_A/C_{Fz}) \cdot dx$ zurückgelegt wird. Durch Integration von $x = 0$ bis $x = L$ ergibt sich daraus die Gesamtfahrstrecke der Transportfahrzeuge im Tunnel:

$$S_{Fahr}(L) = (m_A / C_{Fz}) \cdot L^2 \quad [Fz-LE] \quad (11)$$

Aus dieser Beziehung sowie aus den Beziehungen (2) und (6) ist ablesbar:

- Gesamtfahrstrecke, Transportaufwand und Transportkosten sind unabhängig von der Vortriebsgeschwindigkeit.

Multipliziert mit dem Fahrwegkostensatz k_{Weg} [€/Fz-LE] des Fahrzeugs resultieren aus Beziehung (11) die **kumulierten Fahrzeugkosten**:

$$K_{Weg}(L) = k_{Weg} \cdot (m_A / C_{Fz}) \cdot L^2 \quad [€] \quad (12)$$

Der Fahrwegkostensatz k_{Weg} [€/Fz-LE] der eingesetzten Fahrzeuge ist gleich der Summe der pro Längeneinheit LE (m oder km) anfallenden Kosten für Treibstoff und Schmiermittel, für Reifenverschleiß, Wartung und Instandhaltung, für das Fahrpersonal sowie für die Fahrzeugabnutzung.

$C_{Fz}/T_R = C_{Fz}/(t_L + 2x/v_{Fz})$ for a vehicle with capacity C_{Fz} [ME/Fz (Fz = Vehicle)]. Given an average tunnelling speed of v_V and an accruing quantity of excavated material m_A [ME/LE] the quantity flow $m_A \cdot v_V$ [ME/ZE] must be removed per unit of time.

Thus, the number of vehicles required at the tunnel length x for an excavation with synchronous removal is:

$$N_{Fz}(x) = \text{ROUND UP} (m_A \cdot v_V \cdot (t_L + 2x/v_{Fz}) / C_{Fz}) \quad [Fz] \quad (10)$$

The rounding up operation takes into account the integrality of the vehicle number. From formula (10) the **basic rules for the vehicle requirement** can be derived (**Fig. 5**):

- The vehicle requirement for tunnelling increases linearly in integral steps with the tunnelling length and the tunnelling speed.
- The vehicle requirement decreases inversely proportionally with the speed and the capacity of the vehicles.

The formula (10) gives only the number of vehicles in operation. In addition, there are the vehicles which are non-operational on account of congestion, refuelling and those kept in reserve. Their number can be established analytically e. g. in accordance with the queuing theory or by means of simulation.

Accumulated Transport Route and Transport Costs

When the tunnelling advances at location x by a differential length dx , the quantity $m_A dx$ [ME] is to be transported, given an accruing quantity m_A [ME/LE] per unit of tunnel-length. For this purpose a vehicle with capacity C_{Fz} needs $(m_A/C_{Fz}) dx$ round trips of the length $2x$. Hence, in total a route length $2x \cdot (m_A/C_{Fz})$ is driven. By integrating from $x = 0$ to $x = L$, the **accumulated route length** driven by the transport vehicles in the tunnel results:

$$S_{Fahr}(L) = (m_A / C_{Fz}) \cdot L^2 \quad [Fz-LE] \quad (11)$$

From this relation as well as from relations (2) and (6) the following rule can be read of:

- The accumulated transport route length as well as the transport requirement and the transport costs are independent of the tunnelling speed.

Relation (11) multiplied by the route cost rate k_{Weg} [€/Fz-LE] gives the **accumulated transport route costs**:

$$K_{Weg}(L) = k_{Weg} \cdot (m_A / C_{Fz}) \cdot L^2 \quad [€] \quad (12)$$

The route cost rate k_{Weg} [€/Fz-LE] of the deployed vehicles is equal to the sum of the accruing costs for fuel and lubricant, for tyre wear, service and maintenance, for driving staff as well as vehicle wear per unit of length LE (m or km).

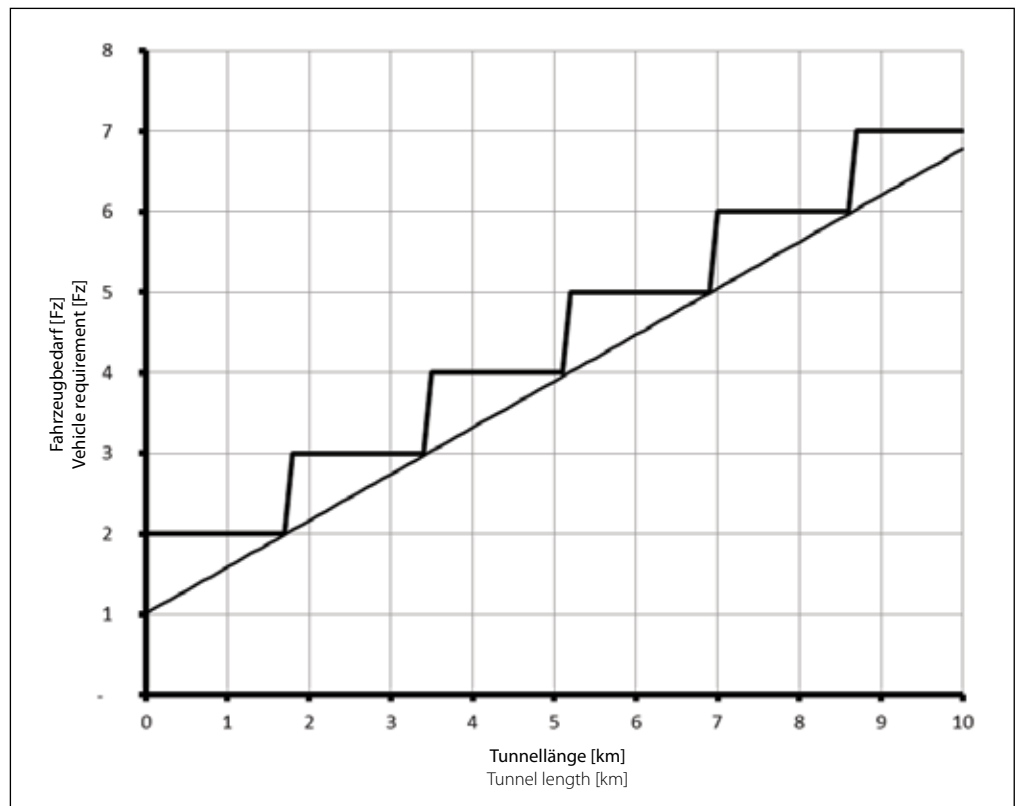
The specific transport route cost rates k_{Ti} [€/LEME] for the various tunnelling goods G_i result from the route cost rate k_{Weg} [€/Fz-LE] of the vehicles. The transport route cost rate for conveyed goods G_i equals $k_{Ti}(\rho_L) = k_{Weg} / C_i / (1 - \rho_L)$ given an empty route share ρ_L [%]

Aus dem Fahrwegkostensatz k_{Weg} [€/Fz-LE] ergeben sich die spezifischen Transportwegkostensätze k_{Ti} [€/LE · ME] für die verschiedenen Güter G_i . Der Transportwegkostensatz für ein befördertes Gut G_i ist bei einem Leerstreckenanteil ρ_L [%] und einer Fahrzeugkapazität C_i für das betreffende Gut gleich $k_{\text{Ti}}(\rho_L) = k_{\text{Weg}} / C_i / (1 - \rho_L)$. Bei 50 % Leerfahrstrecke, wie bei den Rundfahrten im Tunnel, ist $k_{\text{Ti}} = k_{\text{Ti}}(100\%) = 2k_{\text{Weg}} / C_i$, also doppelt so groß wie ohne Leerstreckenanteil.

Der Ladekostensatz des Fahrzeugs ist das Produkt $k_{\text{FzL}} = t_L \cdot k_{\text{Nutz}}$ der Ladezeit t_L mit dem Nutzungskostensatz k_{Nutz} [€/ZE] des Fahrzeugs. Die Ladezeit umfasst die Zeiten für das Be- und Entladen, für Rangieren und Positionieren sowie für Brems- und Beschleunigungsvorgänge. Wenn zum Beladen zusätzlich ein spezielles Ladegerät benötigt wird, z. B. zum Beladen eines Muldenkippers, erhöhen sich die Ladekosten des Fahrzeugs um das Produkt der Beladezeit mit dem Nutzungskostensatz des Ladegerätes. Geteilt durch die Fahrzeugkapazität C_{Fz} [ME/Fz] ergibt sich aus dem Ladekostensatz des Fahrzeugs der mengenbezogene Ladekostensatz $k_L = k_{\text{FzL}} / C_{\text{Fz}}$ [€/ME].

Anwendungsbeispiel ²⁾

Die vorangehenden Ausführungen sollen abschließend am Beispiel eines 10 km langen zweispurigen Straßentunnels erläutert werden, der im Schildvortrieb durch weichen Baugrund gebaut wird. Das Abraummaterial ist Kies und Sand mit einem spezifischen Gewicht von $1,5 \text{ t/m}^3$. Der Tunneldurchmesser beträgt 11,5 m. Daraus errechnet sich eine Tunnelquerschnittsfläche von 104 m^2 und eine Abraummenge von $m_A = 104 \text{ m}^3$ oder 156 t pro Vortriebsmeter. Mit diesen Kennwerten ergibt sich mit Hilfe der Masterformel (2) der in **Bild 2** dargestellte Verlauf des kumulierten Transportaufwands als Funktion der Tunnelausbaulänge. Daraus ist ersichtlich, dass die erbrachte Transportarbeit bei der halben Länge erst ein Viertel des Endwertes von 7,8 Millionen Tonnenkilometer (t-km) erreicht. Zum Abtransport der beim Tunnelvortrieb anfallenden Abraum-mengen werden Muldenkipper eingesetzt. Deren Volumenkapazität



5 Abhängigkeit des Fahrzeugbedarfs (Muldenkipper) von der Tunnellänge

Required vehicles (dumpers) dependent on the tunnel length

Quelle/Credit: Gudehus, Fischer

and a vehicle capacity C_i . For a 50 % empty route share as is the case with round trips in a tunnel, $k_{\text{Ti}} = k_{\text{Ti}}(100\%) = 2k_{\text{Weg}} / C_i$. It is twice as large as with an empty route share of 0 %.

The loading cost rate of the vehicle is the product $k_{\text{FzL}} = t_L \cdot k_{\text{Nutz}}$ of the loading time t_L with the operating cost rate k_{Nutz} [€/ZE] of the transport vehicle. The loading time includes the times for loading and unloading, manoeuvring and positioning as well as for braking and accelerating. Should a special device be required for loading, e.g. to load a dumper, the transport vehicle's loading costs increase by the product of the loading time with the operating cost rate of the loading device. The quantity-related loading cost rate $k_L = k_{\text{FzL}} / C_{\text{Fz}}$ [€/ME] is equal to the loading cost rate of the vehicle divided by the vehicle capacity C_{Fz} [ME/Fz].

Application Example ²⁾

The preceding explanations will now be elucidated taking the example of a 10 km long two-lane road tunnel, produced with a shield in soft ground. The excavated material constitutes gravel and sand with a specific weight of 1.5 t/m^3 . The tunnel diameter amounts to 11.5 m. This results in a tunnel cross-sectional area of 104 m^2 and a quantity of excavated material of $m_A = 104 \text{ m}^3$ or 156 t per metre of advance.

²⁾ Das Anwendungsbeispiel, die Transportfahrzeuge und die Kenndaten sind so gewählt, dass sich damit die Zusammenhänge und Abhängigkeiten demonstrieren lassen. Für ein konkretes Tunnelbauprojekt ist mit den tatsächlichen Werten der dort zur Auswahl stehenden Transportmittel zu kalkulieren.

²⁾ The application example, the transport vehicles and the key data are selected in such a way that they enable interrelationships and dependencies to be demonstrated. The actual values of the available means of transport represent the basis for calculation in a concrete tunnelling project.

beträgt $10 \text{ m}^3/\text{Fz}$. Die Gewichtskapazität ist $20 \text{ t}/\text{Fz}$. Da 20 t Abraum mit dem spezifischen Gewicht $1,5 \text{ t}/\text{m}^3$ ein Volumen von $13,3 \text{ m}^3$ haben und damit die Volumenkapazität überschreiten, handelt es sich um volumenbestimmtes Transportgut, für das die Volumenkapazität maßgebend ist, aus der eine effektive Gewichtskapazität von $C_{\text{Fz eff}} = 15 \text{ t}/\text{Fz}$ resultiert.

Damit folgt aus Beziehung (11) bei einseitigem Tunnelvortrieb eine Gesamtfahrstrecke für den Abraumtransport im Tunnel von $1\,040\,000 \text{ km}$. Das ist das 26-fache des Erdumfangs, der rund $40\,000 \text{ km}$ beträgt. Die Gesamtfahrstrecke reduziert sich bei einem gleichzeitigen Vortrieb von zwei Seiten auf die Hälfte, d. h. auf $520\,000 \text{ km}$.

Eine Transportkostenkalkulation ergibt für die Muldenkipper einen Fahrwegkostensatz von $k_{\text{Weg}} = 4,45 \text{ €/Fz-km}$. Dazu trägt der Kraftstoffverbrauch von $0,60 \text{ €/Fz-km}$ (für 50 l/h bei 30 km/h und $1,20 \text{ €/l}$) bei. Wartung und Reifenverschleiß verursachen $1,60 \text{ €/Fz-km}$, das Fahrpersonal $1,00 \text{ €/Fz-km}$ (Stundensatz 30 €/h) und die nutzungsnahe Abschreibung $1,25 \text{ €/Fz-km}$ (Fahrzeugpreis $150\,000 \text{ €}$; max. Nutzfahrtweg $100\,000 \text{ km}$). Aus dem Fahrwegkostensatz ergibt sich mit der Kapazität $15 \text{ t}/\text{Fz}$ bei einem Leerstreckenanteil von 50% der Transportkostensatz $k_{\text{t}} = 4,45 / 15 / (1 - 0,5) = 0,59 \text{ €/t-km}$ für den Abtransport des Abraums mit einem Muldenkipper.

Der kalkulierte Fahrzeug-Ladekostensatz für den Muldenkipper ist $k_{\text{FzL}} = 12,54 \text{ €}$. Darin sind die Kosten für einen Radlader zum Beladen enthalten. Für den mengenspezifischen Ladekostensatz resultiert daraus $k_{\text{L}} = k_{\text{FzL}} / C_{\text{Fz}} = 0,84 \text{ €/t}$.

Mit diesen Kostensätzen ergibt sich aus der Masterformel (6) die in **Bild 3** dargestellte Längenabhängigkeit der internen Transportkosten für den Abraum bei einseitigem Tunnelvortrieb. Die kumulierten internen Transportkosten betragen $5,9 \text{ Millionen Euro}$. Sie lassen sich durch beidseitigen Tunnelvortrieb um $2,3 \text{ Millionen Euro}$, d. h. um 39% auf $3,6 \text{ Millionen Euro}$ senken.

Wenn statt der schweren Muldenkipper leichte Radlader mit einer Kapazität von $3 \text{ t}/\text{Fz}$ eingesetzt werden, deren Transportwegkostensatz $1,76 \text{ €/t-km}$ und Be- und Entladekostensatz $0,44 \text{ €/t}$ sind, werden bis zu 34 Radlader statt bis zu 7 Muldenkipper benötigt. Diese legen für den gleichen Transportbedarf eine Gesamtfahrstrecke von $5,2 \text{ Millionen km}$ zurück, die fünfmal so lang ist wie die Gesamtfahrstrecke der Muldenkipper. Für die kumulierten Transportkosten resultieren mit Radladern $14,4 \text{ Millionen Euro}$ statt $5,9 \text{ Millionen Euro}$ mit Muldenkippern. Wie aus **Bild 4** ablesbar, sind diese Radlader nur für Tunnelvortriebslängen bis 700 m kostengünstiger als die hier betrachteten Muldenkipper. Bei großen Tunneln ist für den Abraumtransport der Einsatz von Spezialfahrzeugen mit deutlich größerer Kapazität, von Transportzügen oder von Förderbandanlagen wirtschaftlicher als die Muldenkipper. Die internen Transportkosten für Baumaterial, Betriebsstoffe, Bauteile und Personal sind entsprechend den Transportkosten für das Abbaumaterial zu kalkulieren. Sie steigen ebenfalls mit dem Quadrat der Tunnellänge und können die Höhe der Abraumtransportkosten erreichen oder u. U. auch überschreiten. Die Summe der internen Transportkosten und der externen Transport-

For these key values, the accumulated transport requirement as function of the tunnel length is calculated with the master formula (2) and shown in **Fig. 2**. This reveals that the transport requirement for the first half of the tunnel length reaches only a quarter of the final value of 7.8 Mio. t-km .

Dumper trucks are deployed to remove the excavated material accumulated while driving the tunnel. They have a volume capacity of $10 \text{ m}^3/\text{Fz}$. The weight capacity is $20 \text{ t}/\text{Fz}$. As 20 t of excavated material with the specific weight $1.5 \text{ t}/\text{m}^3$ has a volume of 13.3 m^3 , thus exceeding the volume capacity, this is a volume-governing transport material resulting in an effective weight capacity of $C_{\text{Fz eff}} = 15 \text{ t}/\text{Fz}$. With these data the relation (11) gives a total route length of $1\,040\,000 \text{ km}$ for transporting the excavated material in the tunnel if the tunnel is driven from one side. This amounts to 26 times the earth's circumference. The total route length decreases roughly by half when the tunnel is driven simultaneously from two sides, in other words to $520\,000 \text{ km}$.

A transport cost calculation comes up with a route cost rate of $k_{\text{Weg}} = 4.45 \text{ €/Fz-km}$ for the dumpers. This includes fuel consumption of 0.60 €/Fz-km (for 50 l/h , assuming an average driving speed of 30 km/h and a fuel price of 1.20 €/l). Maintenance and tyre wear account for 1.60 €/Fz-km , the driving staff 1.00 €/Fz-km (hourly rate 30 €/h) and use-dependent depreciation 1.25 €/Fz-km (vehicle price $150\,000 \text{ €}$; max. service route $100\,000 \text{ km}$). The transport cost rate $k_{\text{t}} = 4.45 / 15 / (1 - 0.5) = 0.59 \text{ €/t-km}$ for removing the excavated material with a dumper is obtained from the route cost rate with the capacity $15 \text{ t}/\text{Fz}$ given an empty route share of 50% .


The calculated vehicle-loading cost rate for the dumper is $k_{\text{FzL}} = 12.54 \text{ €}$. This includes the costs for a wheel loader used for the loading. This results in $k_{\text{L}} = k_{\text{FzL}} / C_{\text{Fz}} = 0.84 \text{ €/t}$ for the quantity-specific loading cost rate.


With these cost rates, the master formula (6) provides the length dependence of the internal transport costs for the excavated material in the case of tunnelling from one side as presented in **Fig. 3**. The accumulated internal transport costs amount to $5.9 \text{ million euros}$. They can be reduced by $2.3 \text{ million euros}$, i. e. by 39% to $3.6 \text{ million euros}$ when tunnelling is undertaken from both sides.

If light wheel loaders with a capacity of $3 \text{ t}/\text{Fz}$, with a transport route cost rate of 1.76 €/t-km and loading and unloading costs of 0.44 €/t , are deployed instead of heavy dumpers, then up to 34 wheel loaders are required instead of up to 7 dumpers. The loaders drive a total route length of 5.2 million km , which is five times as long as the total route driven by the dumpers for the same transport requirement. Wheel loaders cause $14.4 \text{ million euros}$ of accumulated transport costs instead of 5.9 million resulting for the dumpers. As can be discerned from **Fig. 4** these wheel loaders are only more cost-effective for tunnelled lengths of up to 700 m than the dumpers taken into account here. In the event of major tunnel lengths, the deployment of special vehicles with substantially larger capacity, transport trains or belt conveyor systems is more economic than the dumpers.

The internal transport costs for construction material, operating materials, components and staff have to be calculated in analogy to the transport costs for the excavated material. They also increase by

Lager- und Umschlagkosten ergibt die Gesamtkosten der Tunnelbaulogistik. Diese liegen für das betrachtete Anwendungsbeispiel im Bereich von 15 bis 20 Millionen Euro. Ihr Anteil an den Gesamtbaukosten steigt mit dem Quadrat der Tunnellänge und kann bei sehr langen Tunneln 15 % und mehr betragen. Die Logistik ist also nicht nur unerlässlich für einen unterbrechungsfreien Tunnelbau sondern auch ein erheblicher Kostenfaktor. Trotz ihrer großen Bedeutung wird die Tunnelbaulogistik bis heute nicht angemessen beachtet und nur unzureichend erforscht.

Die Masterformeln und Grundregeln der Tunnelbaulogistik gelten unabhängig von den speziellen Gegebenheiten, nicht nur für den Tunnelbau, sondern – mit entsprechenden Anpassungen – auch für Vertikalbauten, wie Hochhäuser oder Türme. Mit ihrer Hilfe lassen unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten kalkulieren, Optimierungsrechnungen durchführen und die verschiedenen Einflussfaktoren untersuchen. 

the square of the tunnel length and can reach or even exceed the transport costs for the excavated material. The sum of the internal transport costs and the external transport, storage and handling costs provides the total costs of the tunnelling logistics. These range from 15 to 20 million euros for the application example in question. Their share of the total construction costs increases with the square of the tunnel length and can amount to 15 % or more for very long tunnels. Thus, logistics is not simply essential for uninterrupted tunnelling, it also represents a considerable cost factor. In spite of its great importance tunnelling logistics has so far not been accorded the recognition it deserves nor has it been adequately researched. The master formulas and basic rules of tunnelling logistics apply regardless of the special circumstances for tunnelling as well as – with corresponding adjustments – for vertical structures such as high-risers or towers. With their help various possible solutions can be calculated, optimisation calculations executed and various factors of influence investigated. 

Literatur/References

- [1] Fischer, D. (2018); Minimierung des logistischen Aufwands in Abhängigkeit von der Tunnellänge, Vortrag, Spritzbetontagung, Alpbach, Januar 2018
- [2] Gudehus, T., (2012), Logistik 2, Netzwerke, Systeme und Lieferketten, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg (English edition (2011): Comprehensive Logistics, Gudehus T., Kotzab, H., 2nd edition, Springer



Fotos: ATG

NEUERSCHEINUNG NEW RELEASE

Bestellen Sie jetzt bei Profil
Order now at Profil

DEUTSCH:
ISBN 978-3-033-05485-1
EUR 80,00 zzgl. Versand

ENGLISCH:
ISBN 978-3-033-05803-3
EUR 80,00 zzgl. Versand



 **PROFIL**

BUCHHANDLUNG IM BAUVERLAG

Tel.: 05241 80 88957 • profil@bauverlag.de
www.profil-buchhandlung.de