
MINIMIERUNG DES LOGISTISCHEN AUFWANDES IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TUNNELLÄNGE

MINIMIZATION OF THE LOGISTIC EFFORT DEPENDING ON THE LENGTH OF A TUNNEL

Dirk **Fischer**, Lenzburg, Schweiz

Tunnel- oder Schachtbaustellen, die Spritzbeton verarbeiten, sind in baustelleninterne und baustellenexterne Wertschöpfungsketten eingebettet. Die Industrieunternehmen und die baustelleninternen Werke, welche die Rohstoffe für die Spritzbetonproduktion herstellen und die untertägigen mobilen Baustellen als Endabnehmer des Produkts, sind in Form von Leistungsstellen in diese Wertschöpfungsketten integriert. Aufgrund des technologisch bedingten Rückpralls, der bei der Verarbeitung des Spritzbetons anfällt, entsteht ein komplexes Netzwerk aus Versorgung und Entsorgung. Logistiknetzwerke ermöglichen eine strukturierte Analyse der Wege zur Ver- und Entsorgung der Baustelle. Mittels Summenkurve soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen Projektanpassungen auf die Logistik haben.

Tunneling or manhole sites processing shotcrete are embedded in a value-added chain regarding site internal and external means. Industrial companies and production plants on site providing raw materials for the shotcrete production as well as the mobile underground sites acting as end-user of the product are integrated in this value-added chain via service facilities. The shotcrete rebound due to technology reasons creates a complex network consisting of supply and disposal management. Logistical networks offer structural analyses of different supply and disposal paths on the site. Via cumulative graph it shall be shown how location decisions impact on logistics.

1. Einleitung

Die Logistik zählt zu den Selbstverständlichkeiten einer Spritzbetonbaustelle, wird aber kaum wahrgenommen. Zur Versorgung der Spritzbetonbaustellen im Tunnel kommen verschiedene Transportlösungen zum Einsatz, welche entweder Nassspritzbeton oder getrocknete Mischungen als Sack- oder Siloware zur Einbaustelle liefern. Die Belieferung einer Mischanlage im Tunnel mit erdfeuchter Gesteinskörnung und Bindemittel ist ebenfalls möglich. Die damit verbundenen Logistikleistungen verblieben bisher nur am Rande baubetrieblicher Betrachtungen. Im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Forschungsarbeit an der TU Berlin [1] wurden die logistischen Eigenschaften von Tunnelbaustellen untersucht. Die im Folgenden beschriebene Analyse und die Darstellung dreier Szenarien vermitteln Ansätze über die Möglichkeiten zur Berechnung und Minimierung des logistischen Aufwands einer Spritzbetonbaustelle. Ziel ist die Optimierung der Baustelle aus der Perspektive der Logistik.

2. Grundlagen

Wenn mobile Baumaschinen an verschiedenen Orten Baustoffe verarbeiten, müssen diese bauwerksinternen Standorte in ein Logistiknetzwerk überführt werden. Diese Layoutplanun-

gen für die Logistik können mittels Graphen erfolgen. Die Graphentheorie macht eine Tunnelbaustelle nicht nur für den Logistiker beherrschbarer.

Für die Logistikplanungen werden das Bauwerksmodell und ein daraus abgelegtes Logistikmodell benötigt. Der Spritzbeton wird im nachfolgenden Beispiel von einem externen Lieferanten bezogen, der Rückprall vom Unternehmer entsorgt. Die Entsorgung und der Transport des Rückpralls ist nicht Bestandteil der nachfolgenden Betrachtung. Andere Logistikprozesse entlang der Wertschöpfungskette werden ebenfalls nicht betrachtet.

Im Bereich des Zugangsschachts erfolgt eine Umladung in Baustellenfahrzeuge. Im Bild 1 ist das baustellenexterne Logistiknetz dargestellt. Es können beide Zugangsschächte von Lieferanten ohne Einschränkungen angefahren werden. Die Betonmischanlage des Lieferanten und die Zugangsschächte sind als Knoten modelliert. Über Straßen, welche als Kanten modelliert wurden, sind sie miteinander verbunden. Zwischen den beiden Zugangsschächten befindet sich das Tunnelbauwerk. In diesem Beispiel hat es eine Länge von 1000 m.

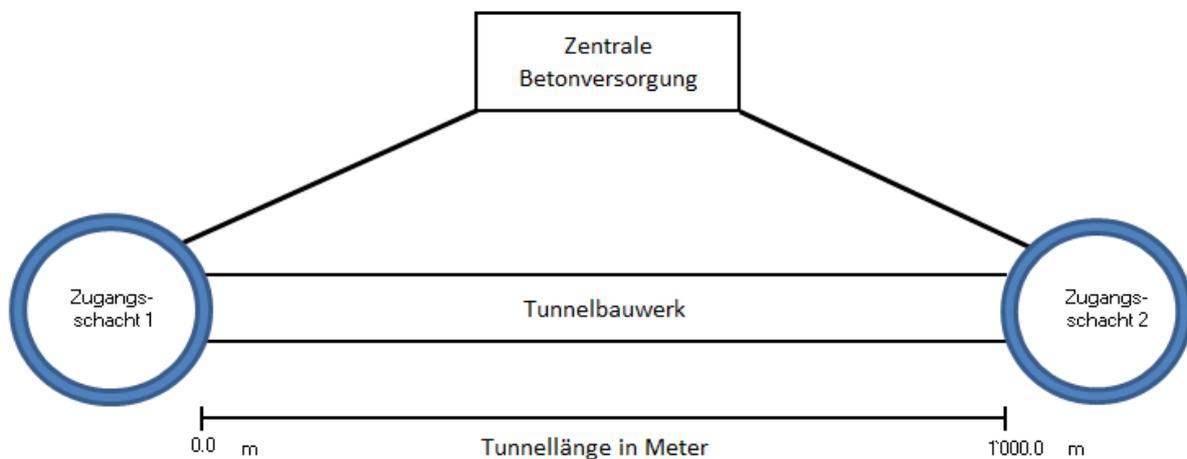


Bild 1: Schematische Darstellung des baustellenexternen Logistiknetzes zur Versorgung der Baustelle mit Spritzbeton

Für die baustelleninterne Logistik wird der gesamte Tunnel zuerst parzelliert. Die Einteilung in 500 gleich große Abschnitte a 2,0 m Länge ergibt in Summe wieder die 1000,0 m lange Linienbaustelle. Die Mitte jedes Abschnitts wird als Knoten modelliert. In Analogie zur Graphentheorie haben diese Knoten selbst keine Ausdehnung. Diese Knoten sind über Kanten verbunden. Als Kanten werden die Abstände zwischen den Knoten bezeichnet. In Anlehnung an Gudehus wird die Menge aller Knoten und Kanten als Transportwegenetz bezeichnet [2].

Aufgrund der identischen Abschnittslänge haben alle Kanten, die zwischen zwei Knoten liegen, eine Länge von 2,0 m, außer der Kante mit der Nummer null, welche die Umladestelle im Zugangsschacht (Knoten 0) mit dem Knoten im ersten Abschnitt (Knoten 1) verbindet. Einen Spritzbetonauftrag in jedem Abschnitt vorausgesetzt, entsteht so ein Logistiknetzwerk mit 500 Knoten ($K = 1$ bis 500), plus dem Knoten mit der Nummer null. Dieses Netzwerk besitzt 499 ($k = 1$ bis 499) identische Kanten mit der Länge $l_i = 2,0$ m ($i = 1$ bis 499), plus einer Kante ($k = 0$) für die nachfolgend eine Länge von $l_0 = 21,0$ m angenommen wurde. Die Knoten werden parallel zum Baufortschritt nacheinander mit Spritzbeton beliefert.

Für die Berechnung des vorliegenden Transportproblems sind zwei numerische Verfahren möglich:

- Berechnung der Verkehrsleistung in Tonnenkilometer (tkm)
- Berechnung der gesamten Fahrweglänge in Kilometer (km).

Die Vorteile des zweiten Verfahrens gegenüber der ersten Methode ist, dass das Transportgewicht und Fahrzeuggewicht außer Acht gelassen werden können. Nachteilig ist die fehlende Optimierungsmöglichkeit bezüglich der Fahrzeugnutzlast. Bei der Bewertung dieses Nachteils ist jedoch zu beachten, dass die Auswahl des Fahrzeugs sehr von den Platzverhältnissen im Tunnel abhängt, hier dieser Einfluss aber ausgeschlossen werden soll. Vor dem Hintergrund der nachfolgenden Rechnungen wurde die Größe des Fahrzeugs so gewählt, dass der gesamte Spritzbeton pro Abschnitt in einem Fahrzeug transportiert und mit einem Umlauf angeliefert werden kann. Pro Knoten ist ein Fahrzeugumlauf notwendig, insgesamt also 500 Umläufe. Für die Bestimmung der Transportleistung in Kilometer wird die zurückgelegte Wegstrecke pro Umlauf erfasst.

Beginnend mit der Belieferung von Knoten 1 ergibt sich die Strecke pro Umlauf (L_G) zu:

$$L_G = 2 \times l_i + 2 \times l_0 \quad (1)$$

Zur Vereinfachung wird der Term $2 \times l_0$ zu Δl_0 zusammengefasst. Analog wird der Term $2 \times l_i$ zu Δl_i zusammengefasst. Dadurch vereinfacht sich die Formel (1) zu:

$$L_G = \Delta l_i + \Delta l_0 \quad (2)$$

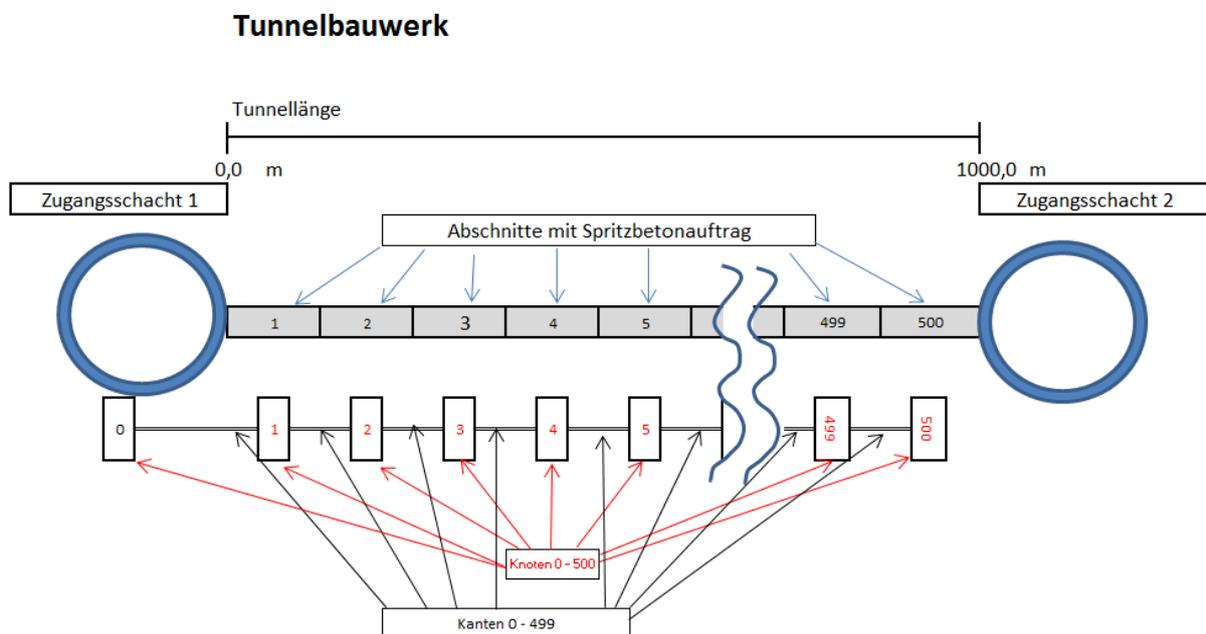


Bild 2: Schematische Darstellung des Bauwerkmodells und des Logistiknetzes. 500 Abschnitte ($a = 500$) erzeugen 500 Knoten ($K = 500$) innerhalb des Bauwerks, welche durch 499 identische Kanten ($k = 499$) verbunden sind. Über die Kante mit der Nummer null ist das Netzwerk mit der Umladeanlage im Zugangsschacht verbunden.

Die baustelleninternen Logistikprozesse vollziehen sich in dem in Bild 2 dargestellten internen Logistiknetz der Baustelle. Das Logistiknetz kann als dimensionsreduziertes Bauwerksmodell aufgefasst werden. Dieses Modell lässt sich leicht auf eine beliebige aber abzählbare Anzahl Knoten (Lieferstellen) erweitern. Erfolgt der Tunnelvortrieb in Teilquerschnitten ist pro Teilquerschnitt eine Netzstruktur mit Knoten und Kanten zu modellieren. Die Kanten des Logistiknetzes bilden eine Zahlenfolge a_k , welche leicht mathematisch manipuliert werden kann.

Bild 3 zeigt in idealisierter Form die Entwicklung der Transportstrecke für die Knoten des Logistiknetzes. In der oberen Hälfte ist das in Bild 2 eingeführte Logistiknetzwerk mit den Kantenlängen dargestellt. Eine Auswahl der Transportentfernungen ist im unteren Teil des Bildes zu sehen.

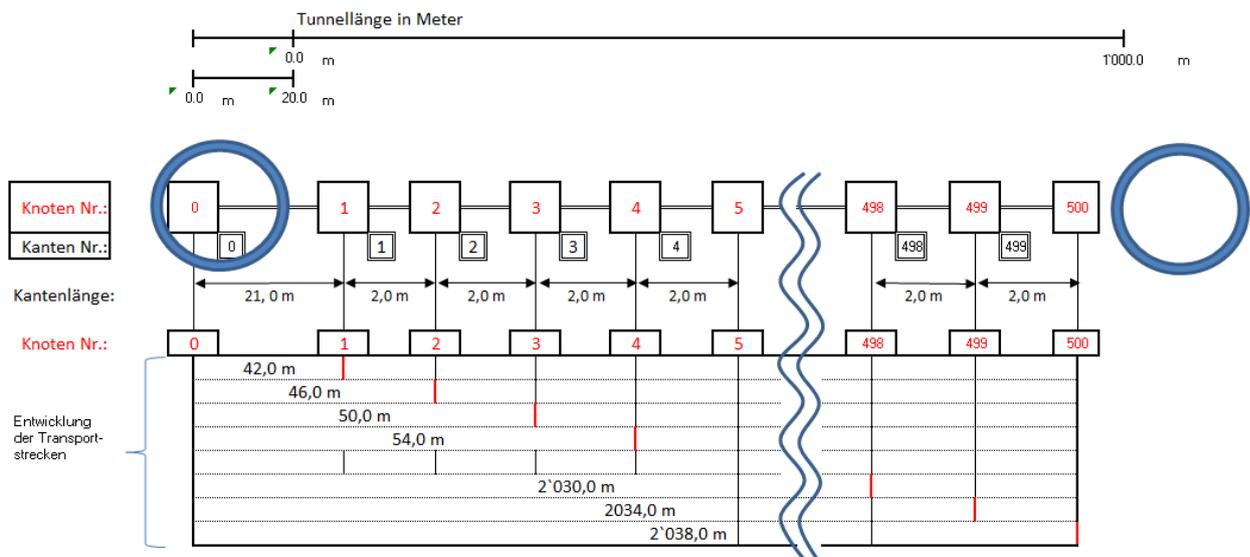


Bild 3: Schematische Darstellung der Entwicklung der Transportstrecke im baustelleninternen Logistiknetz (Szenario 1)

3. Analyse der Transportstrecken

Den nachfolgenden Rechnungen liegen drei Szenarien zu Grunde. Es sind dies:

Szenario 1:

Der Tunnel wird nur vom linken Zugangsschacht vorgetrieben. Die Versorgung der Baustelle erfolgt nur vom linken Zugangsschacht aus (Bild 3).

Szenario 2:

Der Tunnel wird von beiden Zugangsschächten je zur Hälfte vorgetrieben. Die Versorgung der Baustelle erfolgt vom linken und rechten Zugangsschacht aus (Bild 4).

Szenario 3:

70% des Tunnels werden vom linken Schacht, 30% des Tunnels vom rechten Schacht aufgeföhren (Bild 5).

In Bild 4 und 5 ist die Entwicklung der Transportstrecke für die Szenarien 2 und 3 dargestellt.

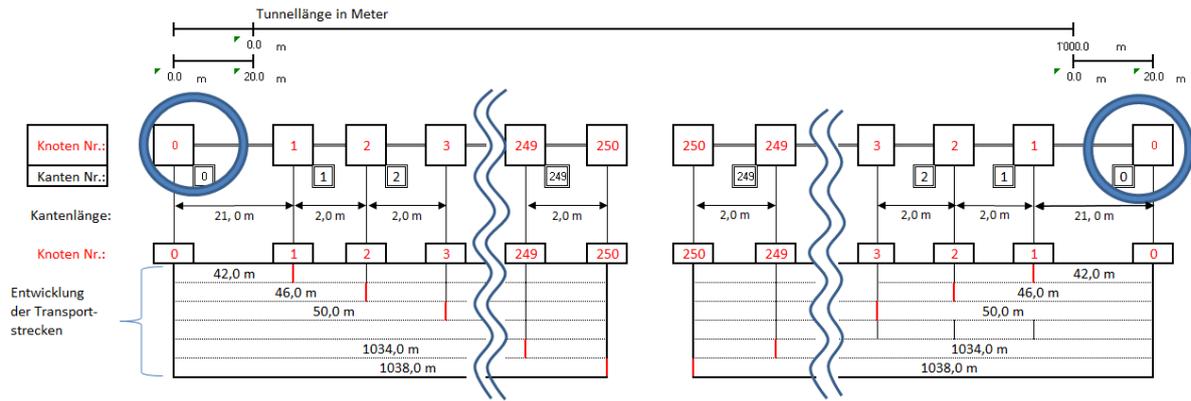


Bild 4: Schematische Darstellung der Entwicklung der Transportstrecke im baustelleninternen Logistiknetz (Szenario 2)

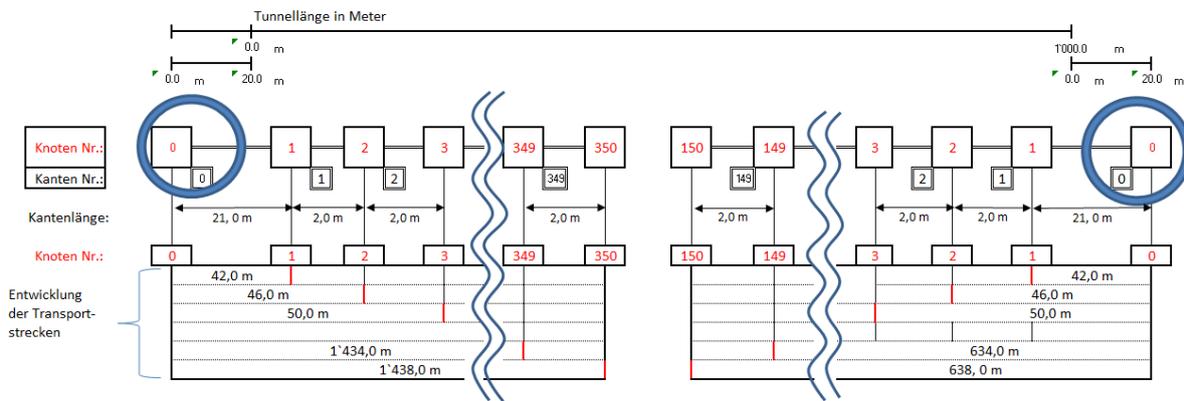


Bild 5: Schematische Darstellung der Entwicklung der Transportstrecke im baustelleninternen Logistiknetz (Szenario 3)

Die Fahrweglänge des jeweils einen Versorgungsfahrzeugs pro Abschnitt ist durch folgende Formel gegeben:

$$L_{\text{Gesamt}} = \left[\Delta l_i * \sum_{k=1}^n k = \frac{n^2 + n}{2} \right] + \left[K * \Delta l_0 \right] \tag{3}$$

Die Formel besteht aus zwei Teilen. Teil eins summiert die aus den gleichlangen Kanten resultierende Fahrstrecke. Die Kantenlänge Δl_i wird als Konstante vor die Summenformel gestellt. Nur bei identischer Länge der Kanten kann die Berechnung mit dieser Summenformel erfolgen. Die, durch die Kante Null induzierte Fahrstrecke wird als Produkt aus der Anzahl Knoten und der Länge Δl_0 zum ersten Term addiert. Alternativ kann die Berechnung auch tabellarisch erfolgen. Dies ist insbesondere erforderlich, wenn die mit Spritzbeton zu sichernden Abschlagslängen nicht identisch sind oder sich stets ändern.

Bei Einsatz von $N > 1$ Fahrzeugen pro Abschnitt ist der Gesamtfahrweg das N-fache der durch die Formel (3) gegebenen Fahrweglänge für $N = 1$ Fahrzeug pro Abschnitt.

Die Berechnungen ergeben für Szenario 1 die in Bild 6 graphisch dargestellten Ergebnisse. Die blaue Kurve illustriert die Entwicklung der gesamten Fahrweglänge. Die Winkelhalbierende ist zur Orientierung in den Grafiken enthalten.

Für die Berechnung der kumulierten Fahrweglänge (L_{Gesamt}) ergibt sich aus Gleichung 3:

$$L_{\text{Gesamt}} = 4.0 \text{ m} * \sum_{k=1}^{499} k = \frac{499^2 + 499}{2} + 500 * 42.0 \text{ m} = 520'000.00 \text{ m} \quad (4)$$

Das Ergebnis entspricht einer Fahrweglänge von 520 km.

Es zeigt sich, dass ca. 50% der zu fahrenden Strecke auf die Bedienung des letzten Drittels oder der Knoten 350 bis 500 entfallen. Befindet sich die Spritzbetonbaustelle in Knoten 250, also in der Mitte des Tunnels, hat das eingesetzte Fahrzeug erst 26% der gesamten zu fahrenden Strecke zurückgelegt.

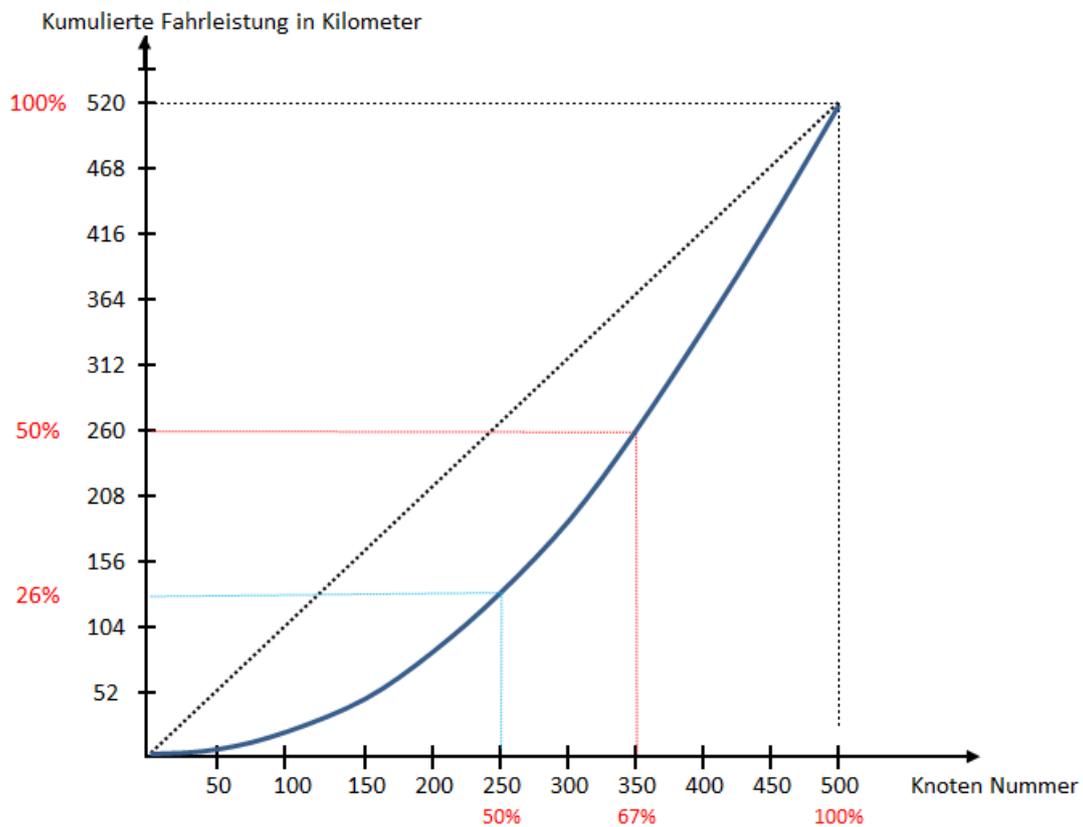


Bild 6: Summenkurve der kumulierten Fahrstrecke für Szenario 1

Das Bild für Szenario 2 ist qualitativ identisch mit dem von Szenario 1. In Bild 7 ist repräsentativ für beide Schächte die kumulierte Fahrweglänge des linken Schachtes dargestellt.

Für die Berechnung der kumulierten Fahrweglänge (L_{Gesamt}) ergibt sich aus Gleichung 3:

$$L_{\text{Gesamt}} = 4.0 \text{ m} * \sum_{k=1}^{249} k = \frac{249^2 + 249}{2} + 250 * 42.0 \text{ m} = 135'000.00 \text{ m} \quad (5)$$

Dies entspricht einer Fahrweglänge pro Schacht von 135 km, wenn pro Abschnitt 1 Fahrzeug eingesetzt wird. Zusammen sind für beide Vortriebe 270 km zu fahren. In Bezug zu Szenario 1 entspricht dies einer Reduktion der Fahrweglänge um 48 %.

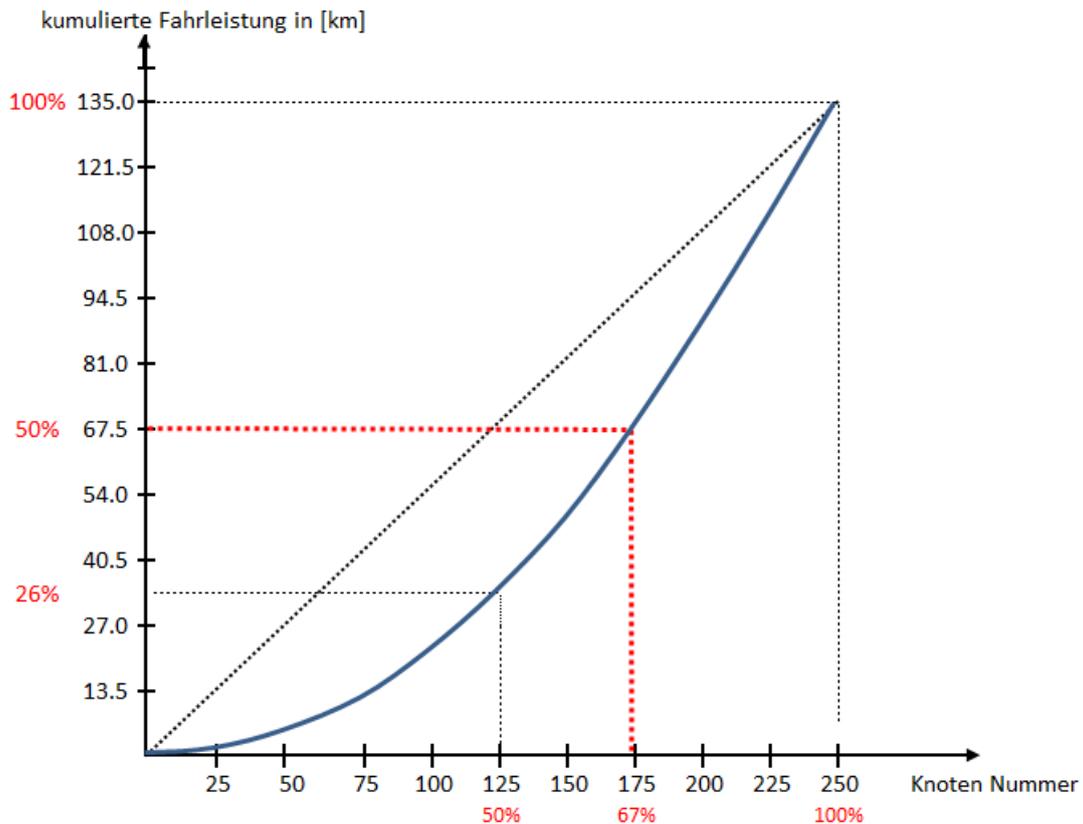


Bild 7: Summenkurve der kumulierten Fahrstrecke für Szenario 2 linker Schacht

Im Szenario 3 entstehen im linken Schacht 259 km und im rechten Schacht 51 km Fahrweglänge. Insgesamt sind dies 310 km Fahrweglänge. Im Vergleich zu Szenario 1 sind hier 40% weniger zu fahren. In den Bildern 8 und 9 sind die Summenkurven dieses Szenarios dargestellt.

Für die Berechnung der kumulierten Fahrweglänge für den linken Tunnelzugang (L_{Gesamt}) ergibt sich aus Gleichung 3:

$$L_{\text{Gesamt}} = 4,0 \text{ m} * \sum_{k=1}^{349} k = \frac{349^2 + 349}{2} + 350 * 42,0 \text{ m} = 259'000,00 \text{ m} \quad (6)$$

Für die Berechnung der kumulierten Fahrweglänge für den rechten Tunnelzugang (L_{Gesamt}) ergibt sich aus Gleichung 3:

$$L_{\text{Gesamt}} = 4,0 \text{ m} * \sum_{k=1}^{149} k = \frac{149^2 + 149}{2} + 150 * 42,0 \text{ m} = 51'000,00 \text{ m} \quad (7)$$

In jedem der berechneten Szenarien fallen 50% der Fahrweglänge im letzten Drittel des Tunnelbauwerks an.

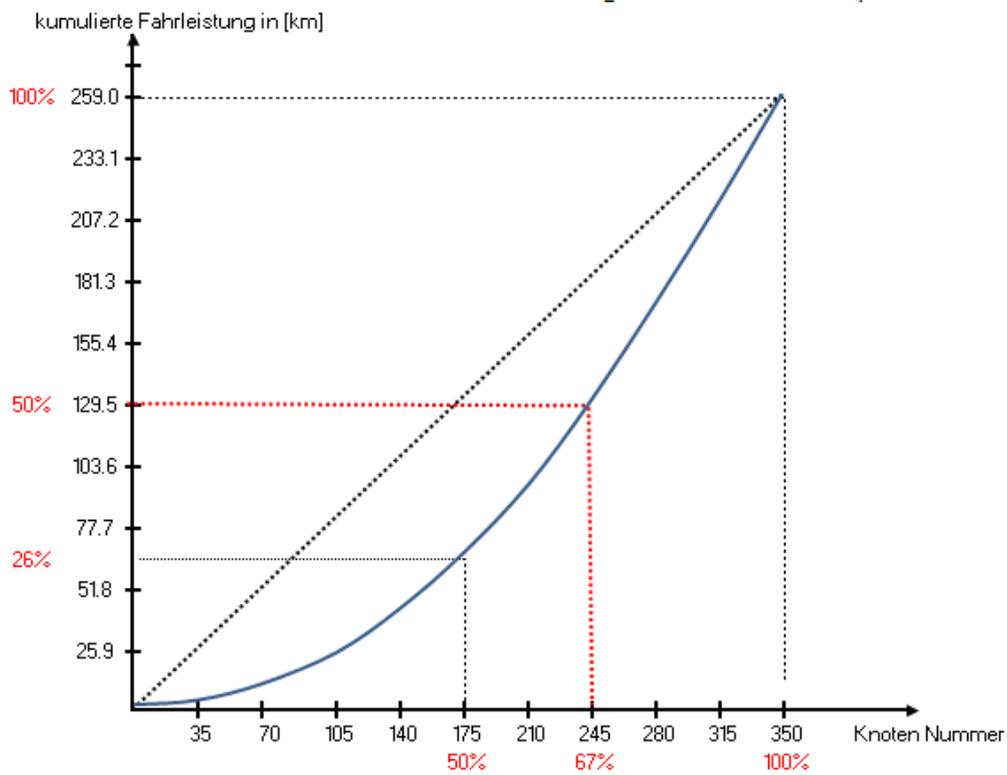


Bild 8: Summenkurve der kumulierten Fahrstrecke für Szenario 3 linker Schacht

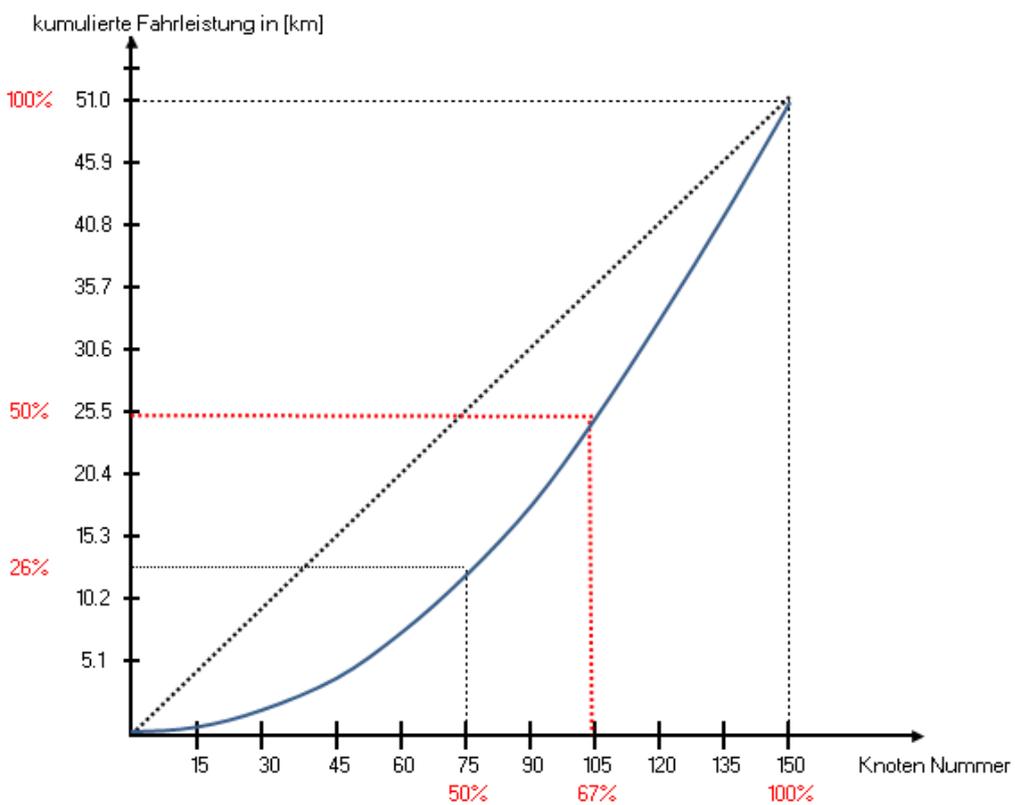


Bild 9: Summenkurve der kumulierten Fahrstrecke für Szenario 3 rechter Schacht

4. Auswirkungen

Für die Prognose der Fahrweglänge für die Spritzbetonversorgung einer Baustelle bietet sich das oben vorgestellte numerische Berechnungsverfahren an. Identische Kantenlängen entsprechen identischen Abschlaglängen oder Abschnitten mit Spritzbetonsicherung. Um die Fahrstrecke bei variablen Abschlaglängen abzuschätzen, bietet sich eine Berechnung mit Tabellenkalkulation an. Das Vorgehen ist für beide Verfahren gleich und beinhaltet die folgenden drei Schritte:

1. Unterteilung des aufzufahrenden Tunnels in Abschnitte
2. Umwandlung in ein Logistiknetz bestehend aus Knoten und Kanten
3. Berechnung der Fahrweglänge

Diese Berechnung hat direkte Auswirkungen auf die Disposition. So kann anhand der in den Bildern 6 - 9 gezeigten Kurven:

- die Beschaffung von Kraftstoff koordiniert,
- der Ausstoß an Abgasen reduziert,
- der Fahrzeugunterhalt gesteuert,
- die Belieferungsstrategie festgelegt werden.

Außerdem können die Auswirkungen von Projektänderungen auf die Logistik mit dieser Methode schnell nachvollzogen werden. Insbesondere die vorgestellte Summenformel ergibt schnell einen Überblick, welche Auswirkungen eine kürzere oder längere Abschnittslänge auf die Fahrweglänge hat.

Reicht die Nutzlast eines Fahrzeuges nicht aus, um die gesamte Menge Spritzbeton pro Abschnitt anzuliefern, sind mehrere Umläufe pro Abschnitt nötig. Aufgabe der Transportplanung ist es die Anzahl Umläufe und die Anzahl an Fahrzeugen zu bestimmen [3]. In diesen Fällen ist in der Formel (3) der Faktor n zu ergänzen. Für die Berechnung der kumulierten Fahrweglänge ab dem Tunnelzugang (L_{Gesamt}) wird in diesen Fällen folgende Formel genutzt:

$$L_{\text{Gesamt}} = \left[n * \Delta l_i * \sum_{k=1}^n k = \frac{n^2 + n}{2} \right] + \left[n * K * \Delta l_o \right] \quad (8)$$

5. Zusammenfassung

Die Logistik spielt auch in der Bauausführung im Tunnelbau eine entscheidende Rolle. Wie die drei dargestellten Szenarien zeigen, summiert sich die Fahrstrecke bereits bei kurzen Bauwerken zu nicht zu vernachlässigen Werten. Die Auswirkungen projektbezogener Änderungen auf die Logistikkosten müssen immer auch mit der Stationierung der mobilen Baustelle im Tunnel betrachtet werden. Insbesondere im letzten Drittel eines Tunnelvortriebs fallen unter üblichen Umständen immer noch 50% der gesamten Fahrweglänge für die Anlieferung des Spritzbetons an. Eine transparente Darstellung der Auswirkungen von Projektänderungen sollte immer auf einer numerischen Berechnung beruhen. Bei identischen Abschnittslängen kann die Transportstrecke mittels Summenformel berechnet werden, und mit Zuhilfenahme von entsprechenden Kalkulationsprogrammen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Reduktion der von der Baustelle ausgehenden Abgasemissionen.

Mit der vorgestellten Lösungsmethode sollte es in Zukunft einfacher sein, auf Spritzbetonbaustellen Entscheidungen zu treffen, welche die Logistikkosten betreffen. Eine Standardlösung gibt es auch hier nicht. Die Kalkulation der Logistikkosten wird durch die vorgestellte Lösung unterstützt. Weitere Formeln zu diesem Thema finden sich in einer gemeinsamen Veröffentlichung von Gudehus und Fischer, welche im Dezember 2017 zur Veröffentlichung eingereicht wurde [3].

6. Literatur

- [1] Fischer, D.:
Optimierung von Vortrieb und Logistik im Tunnelbau. Dissertation TU Berlin (in Arbeit), voraussichtlich 2018.
- [2] Gudehus, T.:
Logistik 2, Netzwerke, Systeme und Lieferketten. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2010.
- [3] Gudehus, T., Fischer, D.:
Masterformeln und Grundregeln für die Tunnelbaulogistik. (2017 zur Veröffentlichung eingereicht), 2018.

Zum Autor

Diplomingenieur Wirtschaftsingenieurwesen Dirk Fischer
Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Berlin, Projektleiter Bereich Rohbauausrüstung und in der Bauüberwachung (GBT Süd TA Faido) am Gotthard Basistunnel bei verschiedenen Firmen, Wissenschaftliche Forschung im Bereich Baustellenlogistik
dirkfischerwiing@yahoo.de