

Entwicklung eines Berechnungsansatzes zur Abschätzung der Andruckkraft für die Verspannung einer Gripper-TBM

Jürgen Schmitt¹ und Wahid Khadr²
Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt
University of Applied Sciences Darmstadt
Fachbereich Bauingenieurwesen
Haardtring 100
64295 Darmstadt
DEUTSCHLAND

1 EINLEITUNG

Die Gripper-TBM ist für den Einsatz im Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit geeignet. Aufgrund der höheren Planungs- und Produktionskosten im Vergleich zur konventionellen Spritzbetonbauweise lässt sich diese Differenz nur durch entsprechende Vortriebsleistungen ausgleichen bzw. lassen sich die wirtschaftlichen Vorteile darstellen. Die Vortriebsleistung ist dabei von mehreren Faktoren abhängig. Im Bereich des Bohrkopfs ist die Abbauleistung abhängig von der Festigkeit des Gebirges. Je größer die Festigkeit des Gebirges ist, desto höhere Kräfte müssen im Bereich des Bohrkopfes aufgebracht werden und entsprechend groß ist der Verschleiß der Hartgesteinsdisken. Je geringer die Festigkeit des Gebirges ist, desto geringer sind die Kräfte, die im Bereich des Bohrkopfes wirken und desto geringer ist der Verschleiß der Hartgesteinsdisken und desto höher ist auch die Vortriebsleistung. Um die Kräfte im Bereich des Bohrkopfes aufbringen zu können, verspannen sich die Gripperpratzen im Gebirge und leiten die Reaktionskräfte in das Gebirge ein. Je geringer die Festigkeit des Gebirges ist, desto größer ist die Gefahr, dass die Reaktionskräfte nicht ins Gebirge abgeleitet werden können und die Gebirgsfestigkeit des Gebirges nicht mehr ausreichend vorhanden ist und das Gebirge verbricht. Dabei ist allerdings zu beachten, dass mit geringer Gebirgsfestigkeit auch geringere Reaktionskräfte einhergehen, da die Kräfte, die an der Ortsbrust benötigt werden, um das Gebirge zu lösen, entsprechend geringer sind. Die Gebirgsfestigkeit hat auch eine entscheidende Rolle bei der Installation der Sicherungsmittel im ungestützten Gebirgsbereich. Bei einem Gebirge mit geringerer Gebirgsfestigkeit sind aufwendigere Sicherungsmittel notwendig als bei einem Gebirge mit hoher Gebirgsfestigkeit. Im Idealfall sind bei einem Gebirge mit hoher Festigkeit keine Sicherungsmittel erforderlich und entsprechend höher ist wiederum die Vortriebsleistung bzw. Wirtschaftlichkeit.

An der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt wird zurzeit ein Forschungsprojekt „Analyse und Definition der Einsatzgrenzen von Gripper-TBM (AdegTBM)“ durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen die Ergebnisse aus diversen publizierten Forschungsarbeiten analysiert und

¹ E-Mail-Adresse: juergen.schmitt@h-da.de

² E-Mail-Adresse: wahid.khadr@stud.h-da.de

bewertet werden. Ziel ist es, durch eine gesamtheitliche Betrachtung dieser Ergebnisse Ansätze zu entwickeln mit denen es möglich ist, eine Einsatzgrenze zu definieren, um die Entscheidung treffen zu können, ob der sichere und wirtschaftliche Tunnelvortrieb beim Einsatz einer Gripper-TBM für ein Projekt realisiert werden kann

Ein wichtiger Parameter, um eine Entscheidung bzgl. des Einsatzes einer Gripper-TBM treffen zu können, ist die Andruckkraft F_{Ni} für die Gripper-
verspannung (s. Bild 1). Im Rahmen des Forschungsprojektes AdegTBM wurde ein Berechnungsansatz entwickelt, mit dem es möglich ist, die Andruckkraft für die Verspannung einer Gripper-TBM vereinfacht abschätzen zu können. Der entwickelte Berechnungsansatz wird im Rahmen des vorliegenden Beitrages auszugweise vorgestellt.

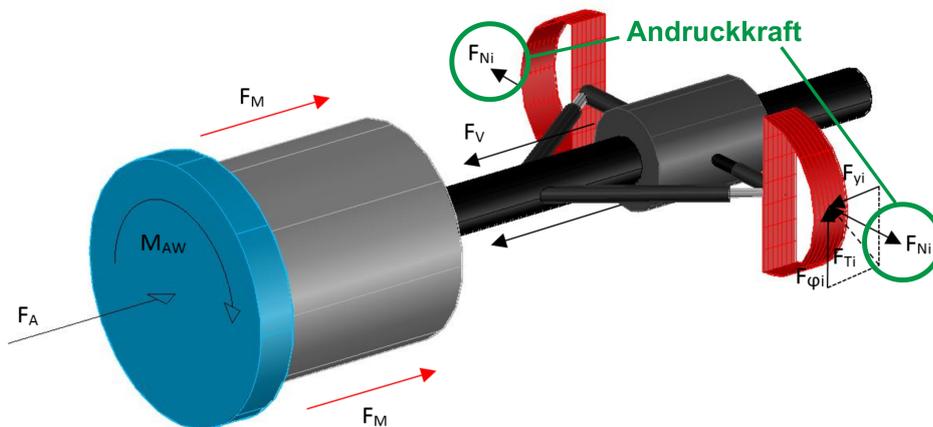


Bild 1: Schematische Darstellung der Vortriebskräfte und Antriebsdrehmomente einer Gripper-TBM [2]

2 BERECHNUNGSANSATZ ZUR ABSCHÄTZUNG DER ANDRUCKKRAFT NACH WITTKER [3]

Wittke publizierte 2006 einen Berechnungsansatz zur Abschätzung der Andruckkraft F_{Ni} (vgl. [3]). Die Tangentialkraft F_{Ti} wird über die Andruckkraft F_{Ni} einer Gripper-Platte i als Reibungskraft aktiviert (s. Bild 1). Daraus ergibt sich, bei gleichmäßiger Verspannung aller Gripper-Platten, folgender Berechnungsansatz (vgl. [3]):

$$F_{Ni} = \frac{\eta_P * F_{Ti}}{\mu_H} \quad (1)$$

In dieser Gleichung ist η_P ein Sicherheitsbeiwert. Der Haftreibungsbeiwert μ_H zwischen Gripper-Platten und Gebirge wird mit dem Wandreibungswinkel δ , wie folgt, ermittelt (vgl. [3]):

$$\mu_H = \tan \delta \quad (2)$$

Dabei wird der Wandreibungswinkel δ in der Regel mit $2/3$ des Reibungswinkels des Gebirges φ berücksichtigt.

Die Tangentialkraft einer Gripper Pratte F_{Ti} ergibt sich als Resultierende aus der Tangentialkraft einer Gripper-Platte infolge der Vortriebspresenkraft F_{yi} und der Tangentialkraft einer Gripper-Platte infolge des Antriebsdrehmomentes $F_{\phi i}$ (s. Bild 1).

$$F_{Ti} = \sqrt{F_{yi}^2 + F_{\phi i}^2} \quad (3)$$

Für die Berechnung der Tangentialkraft einer Gripper-Platte infolge der Vortriebspresenkraft F_{yi} wird der Quotient aus der erforderlichen Vortriebskraft F_{Th} und der Anzahl der Gripperplatten bzw. -pratzen k gebildet.

$$F_{yi} = \frac{F_{Th}}{k} \quad (4)$$

Die erforderliche Vortriebskraft F_{Th} setzt sich zusammen aus der Summe der Anpresskraft aller Disken F_c , der Widerstandskraft aus der Sohlenschuhreibung F_R und einem Sicherheitszuschlag ΔF (vgl. [3]).

$$F_{Th} = F_c + F_R + \Delta F \quad (5)$$

Die Bestimmung der Tangentialkraft einer Gripper-Platte infolge des Antriebsdrehmomentes $F_{\phi i}$ erfolgt über die nachfolgende Gleichung:

$$F_{\phi i} = \frac{M_D}{2D} \quad (6)$$

In der Gleichung ist M_D das erforderliche Antriebsdrehmoment und D der Bohrdurchmesser. Das erforderliche Antriebsdrehmoment M_D wird berechnet über die Summe aus dem Widerstandsmoment der Disken und der Räumer M_c sowie einem Sicherheitszuschlag ΔM .

$$M_D = M_c + \Delta M \quad (7)$$

Damit sind zur Bestimmung der Andruckkraft F_{Ni} neun Parameter erforderlich und führen bei der Abschätzung zu einem entsprechend hohen Aufwand.

3 ENTWICKELTER BERECHNUNGSANSATZ ZUR ABSCHÄTZUNG DER ANDRUCKKRAFT

Im Rahmen des Forschungsprojektes AdegTBM wurde eine große Anzahl von publizierten Forschungsergebnisse sowie Daten aus Vortrieben mit einer Gripper-TBM ausgewertet. Mittels Regressionsanalysen wurde z. B. folgende mögliche Zusammenhänge analysiert:

- Vergleich der installierten Antriebsleistung mit dem dazugehörigen Bohrdurchmesser
- Einfluss der Penetrationsrate auf die erforderliche Gripperverspannkraft
- Einfluss der Diskenandruckkraft auf die erforderliche Gripperverspannkraft

- Einfluss des Bohrdurchmessers auf die erforderliche Gripper-Verspannkraft bei unterschiedlicher Diskenandruckkraft

Aus den durchgeführten Analysen lässt sich insgesamt schlussfolgern, dass für eine Vorabschätzung der erforderlichen Gripper-verspannkraft, ohne den ausführlichen Berechnungsansatz nach Wittke (2006) durchführen zu müssen, sowohl die Anzahl der Disken als auch die gewählte bzw. die erforderliche Diskenandruckkraft benötigt wird. Beide Parameter können zu Beginn eines Tunnelprojektes z. B. über den Bohrdurchmesser bzw. dem optimalen Einsatzbereich der Disken angenommen werden. Hierfür wurden für den in Tabelle 1 aufgeführten Parameterbereich die dazugehörigen tangentialen Gripper-verspannkraften F_{Ti} nach dem Ansatz von Wittke (2006) ermittelt. Die Werte aus diesen Berechnungen können Tabelle 2 entnommen werden. Als Sicherheitsbeiwert wurde $\eta_P = 1,2$ berücksichtigt.

Tabelle 1: Parameterbereich

KenngroÙe	Einheit	Werte
Bohrdurchmesser D_{TBM}	[m]	3,5 - 13
Penetrationsrate p	[mm/U]	6 - 18
DiskengroÙe d_c	[mm]	432
Diskenandruckkraft F_{ci}	[kN]	150 - 350
Anzahl Pratzten	[-]	2

Für die Untersuchungen wurden der Quotient Q_{FF} aus Diskenandruckkraft F_{ci} und der resultierenden Tangentialkraft einer Pratzte F_{Ti} , mit der Diskenanzahl n_c verglichen. Das Ergebnis aus diesem Vergleich ist in Tabelle 2 dargestellt. In Bild 2 sind die ermittelten Werte aufgetragen. Die sich daraus ergebene Regressionskurve nimmt dabei deutlich den Verlauf einer Potentialfunktion an.

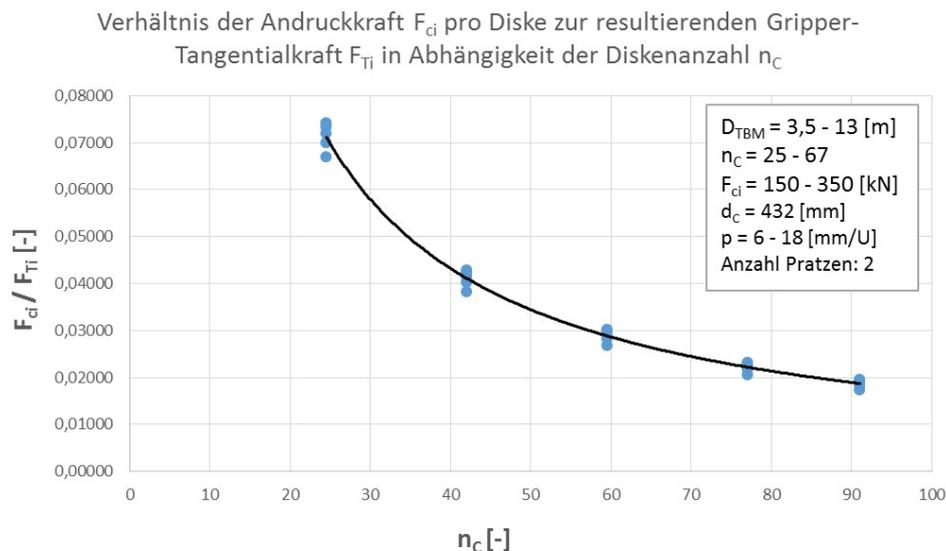


Bild 2: Vergleich des Quotienten Q_{FF} aus Tangentialkraft einer Pratzte und der Diskenandruckkraft mit der Anzahl der Disken

Die Potentialfunktion der ermittelten Regressionskurve ist in Gleichung (8) angegeben.

$$Q_{FF} = 1,8488 * n_c^{-1,018} \quad (8)$$

Das dazugehörige Bestimmtheitsmaß liegt für die Regressionskurve bei $R^2 = 0,993$.

Daraus ergibt sich die folgende Gleichung (9) zur Vorabschätzung der erforderlichen Andruckkraft der Gripperverspannung:

$$F_{NK} = \frac{F_{ci}}{1,8488 * n_c^{-1,018}} * \frac{\eta_P}{\mu_H} * \beta_K \quad (9)$$

Dabei lässt sich die Diskenanzahl n_c nach dem folgenden Ansatz von Leitner (2014) über den Bohrkopfdurchmesser D_{TBM} bestimmen:

$$n_c \approx 7 D_{TBM} \quad (10)$$

Der Korrekturbeiwert β_K dient dazu Abweichungen aus der Regressionsanalyse zur Gleichung (9) zu korrigieren. Dieser kann ebenfalls über eine Potentialfunktion ermittelt werden. Dafür werden die einzelnen Korrekturbeiwerte aus der Regressionsanalyse zu Q_{FF} im Zusammenhang zur Diskenandruckkraft F_{ci} gesetzt und ausgewertet (vgl. Bild 3).

Tabelle 2: Tangentiale Gripperverspannkraften (F_{Ti}) nach [3] bzw. über Regressionsfunktion und die dazugehörigen Korrekturbeiwerte

D_{TBM} [m]	n_c	F_{ci} [kN]	$Q_{FF} = F_{ci} / F_{Ti}$	F_{Ti} [kN] (Witke 2006)	F_{Ti} [kN] (Regressionsfunktion)	Korrekturbeiwert β_K
3,50	25	150	0,06706	2236,71	2105,58	1,062
6,00	42	150	0,03834	3911,87	3644,76	1,073
8,50	60	150	0,02685	5587,51	5195,89	1,075
11,00	77	150	0,02065	7262,26	6755,37	1,075
13,00	91	150	0,01744	8603,04	8007,66	1,074
3,50	25	200	0,07011	2852,79	2807,44	1,016
6,00	42	200	0,04026	4967,30	4859,68	1,022
8,50	60	200	0,02824	7082,81	6927,85	1,022
11,00	77	200	0,02175	9196,44	9007,15	1,021
13,00	91	200	0,01837	10889,40	10676,88	1,020
3,50	25	250	0,07204	3470,25	3509,31	0,989
6,00	42	250	0,04149	6024,83	6074,60	0,992
8,50	60	250	0,02913	8581,14	8659,81	0,991
11,00	77	250	0,02245	11134,19	11258,94	0,989
13,00	91	250	0,01897	13180,19	13346,10	0,988
3,50	25	300	0,07337	4089,12	4211,17	0,971
6,00	42	300	0,04235	7084,51	7289,52	0,972
8,50	60	300	0,02975	10082,59	10391,77	0,970
11,00	77	300	0,02294	13075,62	13510,73	0,968
13,00	91	300	0,01939	15475,54	16015,31	0,966
3,50	25	350	0,07432	4709,42	4913,03	0,959
6,00	42	350	0,04296	8146,40	8504,44	0,958
8,50	60	350	0,03021	11587,22	12123,73	0,956
11,00	77	350	0,02330	15020,81	15762,52	0,953
13,00	91	350	0,01969	17775,55	18684,53	0,951

Korrekturbeiwert β_K in Abhängigkeit der Disken-
Andruckkraft F_{ci}

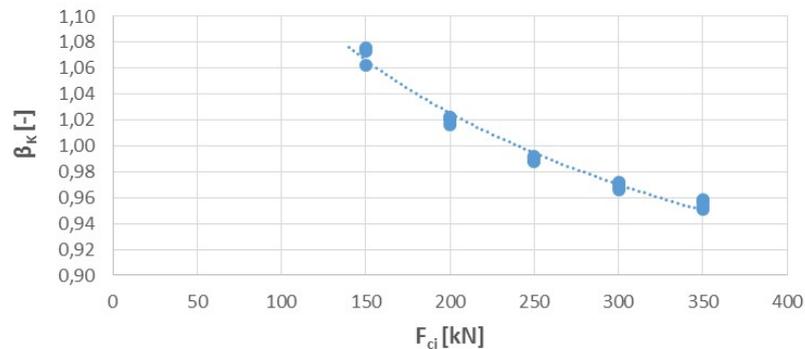


Bild 3: Verlauf der Regressionsfunktion für den Korrekturbeiwert β_K

Die Abhängigkeit des Korrekturbeiwertes β_K von der Disken-Andruckkraft lässt sich dabei durch folgende potentielle Regressionsfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,982$ beschreiben:

$$\beta_K = 2,1089 * F_{ci}^{-0,136} \quad (11)$$

Tabelle 3: Abweichung der abgeschätzten tangentialen Verspannkraft von der nach Wittke (2006) ermittelten Verspannkraft

D_{TBM} [m]	n_c	F_{ci} [kN]	F_{Ti} [kN] (Wittke 2006)	Korrigiertes F_{Ti} [kN] (Regressionsfunktion)	Abweichung [%]
3,50	25	150	2237	2246	-0,43
6,00	42	150	3912	3888	0,60
8,50	60	150	5588	5543	0,79
11,00	77	150	7262	7207	0,76
13,00	91	150	8603	8543	0,70
3,50	25	200	2853	2880	-0,96
6,00	42	200	4967	4986	-0,37
8,50	60	200	7083	7107	-0,35
11,00	77	200	9196	9241	-0,48
13,00	91	200	10889	10954	-0,59
3,50	25	250	3470	3493	-0,65
6,00	42	250	6025	6046	-0,35
8,50	60	250	8581	8619	-0,44
11,00	77	250	11134	11206	-0,64
13,00	91	250	13180	13283	-0,78
3,50	25	300	4089	4089	0,01
6,00	42	300	7085	7077	0,10
8,50	60	300	10083	10089	-0,07
11,00	77	300	13076	13117	-0,32
13,00	91	300	15476	15549	-0,47
3,50	25	350	4709	4671	0,82
6,00	42	350	8146	8086	0,75
8,50	60	350	11587	11527	0,52
11,00	77	350	15021	14986	0,23
13,00	91	350	17776	17764	0,06

Durch den Korrekturbeiwert liegt die Abweichung der abgeschätzten Gripper-Verspannkräfte von den aus der ausführlichen Berechnung nach Wittke (2006) ermittelten Werten durchgehend unterhalb von $\pm 1 \%$ (vgl. Tabelle 3).

Im Vergleich des neu entwickelten Berechnungsansatzes zu dem ausführlichen Berechnungsansatz nach Wittke (2006) sind anstatt neun Parameter nur noch vier Parameter erforderlich und erleichtern somit wesentlich die Abschätzung der Andruckkraft für die Verspannung einer Gripper-TBM.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Um die erforderlichen Vortriebskräfte auf den Bohrkopf bei einer Gripper-TBM erzeugen zu können, ist es erforderlich, eine Andruckkraft auf die Gripper-verspannung aufzubringen. Um die erforderliche Andruck abschätzen zu können, existiert ein ausführlicher Berechnungsansatz nach Wittke (2006). Für die Berechnung der erforderlichen Andruckkraft für die Verspannung einer Gripper-TBM wurde im Forschungsprojekt AdegTBM anhand von Regressionsanalysen ein weiterer Berechnungsansatz entwickelt. Bei diesem Berechnungsansatz kann die Andruckkraft mit den Parametern der Diskenandruckkraft F_{ci} , der Anzahl der Disken n_c sowie dem Reibungswinkel φ des Gebirges vereinfacht abgeschätzt werden.

5 LITERATUR / QUELLEN

- [1] W. Leitner, Baubetriebliche Modellierung der Prozesse maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein, Von der Penetration zur Vortriebsgeschwindigkeit. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck Baufakultät - Architektur und Bauingenieurwesen, (2004).
- [2] W. Khadr, Analysen zu den Einsatzgrenzen von Gripper-TBM, Masterarbeit an der Hochschule Darmstadt, unveröffentlicht, (2017).
- [3] W. Wittke, Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe, WBI-PRINT 6, VGE-Verlag Glückauf GmbH, Essen, (2006).