

14 Kalkulation der Vortriebsgeschwindigkeit für TBM Vortriebe im Festgestein

Von Wolfgang Leitner

14.1 Der „kontinuierliche“ Vortrieb

Der Ausdruck „kontinuierlicher Vortrieb“, welcher im Zusammenhang mit Tunnelvortriebsmaschinen häufig verwendet wird und das Gegenstück zum „zyklischen Vortrieb“ mit Spreng- oder Baggerausbruch (Neue Österreichische Tunnelbaumethode) darstellt wird bei genauer Betrachtung den eigentlichen Arbeitsabläufen nicht gerecht. Streng genommen muss man auch beim maschinellen Vortrieb von Vortriebszyklen sprechen. Das einzige Maschinensystem, welches einem kontinuierlichen Durchörterern des Gebirges entspricht, ist das walking blade shield. Dieses kam jedoch bisher nur als Prototyp zur Anwendung.

Wissenschaftlich gesehen sind die oben genannten Bezeichnungen nicht korrekt. In der Baubetriebslehre werden die analogen Prozesse als intermittierende und stetige bezeichnet. Die in der ÖNORM B 2203 - Teil 1: Zyklischer Vortrieb, Teil 2: kontinuierlicher Vortrieb mit Tunnelvortriebsmaschinen – verwendeten Bezeichnungen müssen in diesem Zusammenhang ebenfalls kritisch betrachtet werden. Im Normalfall entspricht der Vortrieb mit Tunnelvortriebsmaschinen nämlich bestenfalls einem semi-kontinuierlichen Prozess.

Im Laufe der Zeit sind auch die Begriffe „maschineller Vortrieb“ für Tunnelvortriebe mit Tunnelvortriebsmaschinen und „konventioneller Vortrieb“ für Tunnelvortriebe mit Spreng- oder Baggerausbruch entstanden. Der Begriff „maschinell“ wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts auch für Sprengvortriebe verwendet, da zu dieser Zeit eine starke Mechanisierung (vor allem die Bohrarbeiten betreffend) zu verzeichnen war. Aus heutiger Sicht ist diese Bezeichnung jedoch für TVM-Vortriebe sinnvoll, da hier die Vortriebsleistung und somit der Erfolg des Bauvorhabens eng mit der (einzigen) Vortriebsmaschine zusammenhängen und diese kaum zu ersetzen ist. Im Vergleich dazu ist der konventionelle Vortrieb nicht an eine Baumaschine gebunden. Werden Reparaturen an einzelnen Leistungsgeräten (Bohrwagen, Muldenkipper etc.) notwendig können diese leicht durch andere vorgehaltene ersetzt werden.

14.2 Übliche Vorgangsweise zur Ermittlung der Vortriebsgeschwindigkeit

Vortriebe mit Tunnelvortriebsmaschinen erfordern eine lange vorausseilende Planung und sind daher in der Ausführung nicht sehr flexibel. Um die dennoch vorhandenen Optimierungspotenziale nutzen zu können ist es erforderlich, die Prozesse des maschinellen Vortriebs genau zu analysieren und ebenso genau zu kalkulieren. Aus dem Vergleich mit einer detaillierten Prognose können während der Ausführung die Schwachstellen des Vortriebssystems leichter erkannt, quantifiziert und zumindest teilweise behoben werden.

Derzeit wird beim konventionellen zyklischen Tunnelvortrieb die Leistungsermittlung durch Zyklusberechnung relativ exakt durchgeführt und das Ergebnis in einem so genannten Minutendiagramm dargestellt. Im Gegensatz dazu werden beim maschinellen Vortrieb mit Tunnelvortriebsmaschinen nur selten die Arbeitszyklen betrachtet, Nettoleistungen werden mit Hilfe von Ausnutzungsgraden zu Bruttoleistungen übergeführt, obwohl doch beide Bauverfahren grundsätzlich einem intermittierenden Prozess entsprechen. Zunächst wird also über Penetration und Bohrkopfdrehzahl die so genannte Nettovortriebsleistung [m/h] ermittelt:

$$I_n = \frac{p \times n_B \times 60}{1000}$$

mit I_n Nettovortriebsleistung [m/h]
 p Penetration [mm/rev]
 n_B Bohrkopfdrehzahl [rev/min]

Die Bruttovortriebsleistung, oder im Wortlaut der ÖNORM B 2203-2 Vortriebsgeschwindigkeit [m/d] wird mithilfe des Ausnutzungsgrades ermittelt. Unter Ausnutzungsgrad wird hier das Verhältnis aus reiner Bohr-

zeit zur Arbeitszeit verstanden. Die Ermittlung der täglichen Vortriebsleistung kann dann mittels folgender Formel erfolgen:

$$Q = u \times I_n \times t_{VS}$$

mit Q Vortriebsgeschwindigkeit [m/d]
u Ausnutzungsgrad [%]
t_{VS} effektive Tagesarbeitszeit [h/d]

Durch eine Kalkulation mit Hilfe von Ausnutzungsgraden sind Optimierungsansätzen Grenzen gesetzt, da der Detaillierungsgrad zu gering ist, um einen tiefgehenden Vergleich zwischen Prognose und Ausführung anzustellen. Der Ausnutzungsgrad stellt angesichts der Vielfalt an Einflussparametern auf die Vortriebsgeschwindigkeit eine große Ungenauigkeit in der Berechnung dar. Er kann zwar aus Nachkalkulationen ähnlicher Projekte abgeleitet und durch erfahrene Ingenieure auf neue Projekte übertragen werden, lässt jedoch eine genauere Betrachtung der einzelnen Vorgänge beim Vortrieb außer Acht. Für weiterführende Betrachtungen wie zum Beispiel Parameterstudien oder ein in die Tiefe gehendes Baustellen-Controlling bietet diese Methode der Leistungsermittlung jedenfalls keine geeignete Basis.

14.3 Vorschlag eines neuen Berechnungsmodells zur Ermittlung der Vortriebsgeschwindigkeit

Die im Beitrag beschriebene baubetriebliche Modellierung soll dem oben genannten Mangel abhelfen und eine genauere und transparentere Leistungsermittlung für den maschinellen Vortrieb ermöglichen. Es werden zunächst die Prozesse getrennt nach Maschinentyp (TBM-O, TBM-S und TBM-DS) analysiert, anschließend Formeln für den Regelvortrieb entwickelt. Ausgangspunkt für die anzustellenden Berechnungen sind neben den Maschinendaten die Penetration und der Meißelverschleiß.

Zur Leistungsberechnung ist es notwendig, den Vortriebsprozess über die Teilprozesse Vortrieb und Sicherungseinbau hinaus in seine weiteren Produktionsschritte zu unterteilen und aus ihnen ein Produktionsmodell zu entwickeln. Dieses Modell muss ein nachvollziehbares und wiederholbares Abbild des Produktionsprozesses geben, in dem die Beziehungen zwischen den Teilprozessen definiert sind.

Je nach Maschinentyp kann es sich beim Vortrieb um einen zyklischen oder (nahezu) kontinuierlichen Prozess handeln. Es wird im Folgenden unterschieden zwischen den Teilprozessen des Vortriebs und des Sicherungseinbaues, in einem weiteren Schritt werden Ver- und Entsorgung sowie Nachbau der Versorgungseinrichtungen und Vortriebsunterbrechungen aus anderen Gründen einbezogen.

14.3.1 Teilprozess Vortrieb

Der Teilprozess Vortrieb beginnt mit den Vorbereitungs- und Bereitstellungsarbeiten für den darauf folgenden Bohrhub. Darunter fallen Tätigkeiten wie das Einrichten der TBM, das Verspannen der Gripper, die Anlaufzeit der Vortriebsmaschine etc. Danach beginnt der eigentliche Gesteinslösevorgang. Sobald ein Hub abgebohrt ist folgen die Abschluss- und Nacharbeiten, hierunter fallen das Lösen der Gripperverspannung sowie das Nachziehen der TBM samt Nachläufereinheit. Der Teilprozess Vortrieb wird für alle drei Maschinentypen hinsichtlich der Arbeitsschritte gleich modelliert. Für Schildmaschinen sind bei den Vorbereitungsarbeiten die Positionsbestimmung des Schildes gegenüber der Soll-Lage und eventuell notwendige Korrekturen durch Veränderung der Stellung von Schildgelenk, Bohrkopf oder Pressenstellring vor Beginn des Lösevorganges [1] zu nennen.

Der Gesteinslösevorgang sollte im Regelfall nicht unterbrochen werden, der baubetriebliche Ablauf vor Ort ein unterbrechungsfreies Gesteinslösen ermöglichen. Es können jedoch planmäßige Unterbrechungen auftreten, wenn die Förderkapazität begrenzt ist oder wenn die Förderung intermittierend erfolgt (z.B. Wechsel der Transporteinheiten).

Der Teilprozess Vortrieb genügt ohne planmäßige Unterbrechungen folgender Beziehung [1, verändert]:

$$t_V = t_{V,v} + t_{V,l} + t_{V,a}$$

mit	t_V	Zeitbedarf für den Teilprozess Vortrieb [min/Hub]
	$t_{V,v}$	Zeitbedarf für Vorbereitungs- und Bereitstellungsarbeiten [min/Hub]
	$t_{V,l}$	Zeitbedarf für den Gesteinslösevorgang [min/Hub]
	$t_{V,a}$	Zeitbedarf für Abschluss- und Nacharbeiten [min/Hub]

$$t_{V,l} = \frac{h \times 1000}{p \times n_B}$$

mit	h	Hublänge [m/Hub]
	p	Penetration [mm/rev]
	n_B	Bohrkopfdrehzahl [rev/min]

Es ist zu beachten, dass die theoretische Vortriebsleistung (Gesteinslösevorgang) in der Praxis von folgenden Parametern eingeschränkt werden kann:

- Förderkapazität
- Maschinensystemgeschwindigkeit
- Bohrkopfdrehungsgeschwindigkeit
- Penetration

Für den Vortrieb mit Schild – TBM ist außerdem von Bedeutung, dass die Ringspaltverpressung keine Verzögerung des Vortriebsprozesses verursacht.

14.3.2 Teilprozess Sicherung

Der Teilprozess Sicherung gestaltet sich für die verschiedenen Maschinensysteme auf unterschiedliche Art und Weise. Im vorliegenden Beitrag wird der einfachste Fall, nämlich der Tübbingeinbau bei Schild – TBM beschrieben. Die entsprechenden Betrachtungen für TBM-O und TBM-DS sind in [2] nachzuschlagen.

Die Sicherung des ausgebrochenen Hohlraumes erfolgt bei Schild – Tunnelbohrmaschinen ausschließlich durch Tübbingeinbau. Die Wahl des Tübbingsystems bestimmt wesentlich den für den Teilprozess Sicherung benötigten Zeitaufwand. Der Teilprozess Sicherung einer TBM-S entspricht folgender Beziehung:

$$t_{S,TBM-S} = t_{S,v} + t_{S,s} + t_{S,ab}$$

mit	$t_{S,TBM-S}$	Zeitbedarf für den Teilprozess Sicherung (TBM-S) [min/Hub]
	$t_{S,v}$	Zeitbedarf für Vorbereitungs- und Bereitstellungsarbeiten [min/Hub]
	$t_{S,s}$	Zeitbedarf für den Sicherungseinbau [min/Hub]
	$t_{S,ab}$	Zeitbedarf für Abschluss- und Nacharbeiten [min/Hub]

Dabei umfassen die Vorbereitungs- und Bereitstellungsarbeiten die Herstellung der Betriebsbereitschaft des Tübbingerektors, das Bereitstellen der notwendigen Werkzeuge und Verschraubung und das Säubern der Einbaustelle. Der Sicherungseinbau ist eine Abfolge von sich wiederholenden Spielabschnitten für jeden Tübbing. Er wird unterteilt in [1]:

- Einfahren der Vortriebspresen im Einbaubereich
- Bereitstellen des Tübbings an der Übergabestelle
- Aufnahme des Tübbings
- Positionieren des Tübbings
- Lagesicherung des Tübbings mit Hilfe der Vortriebspresen
- Abschlagen des Tübbings
- Rückfahrt des Erektors zur Aufnahmestelle

Die Abschlussarbeiten beinhalten das Platzieren des Erektors in der dafür vorgesehenen Parkposition und das Abschalten des Erektors.

Sofern die Vorbereitungs- und Abschlussarbeiten parallel zu anderen Vorgängen getätigt werden können ergibt sich die maßgebende Dauer des Teilprozesses Sicherungseinbau aus der Multiplikation der Tübbinganzahl mit der Spieldauer der einzelnen Tübbingversetzvorgänge.

$$t_{S,s} = t_{S,t} \times a$$

mit $t_{S,s}$ Zeitbedarf für den Sicherungseinbau [min/Hub]
 $t_{S,t}$ Zeitbedarf für den Versetzvorgang eines Tübbings [min/Tübbing]
 a Anzahl der Tübbinge je Ring [Tübbing/Ring (=Hub)]

14.3.3 Zyklusdauer

Die Zyklusdauer ergibt sich bei der Schild – Tunnelbohrmaschine zu:

$$t_{Z,TBM-S} = t_V + t_{S,TBM-S}$$

mit $t_{Z,TBM-S}$ Zyklusdauer TBM-S [min/Hub]

Sie stellt als Kombination der Teilprozesse Vortrieb und Sicherung den Leitprozess „Vortriebszyklus“ dar.

14.3.4 Prozesse, die den Leitprozess stören

Neben dem Leitprozess „Vortriebszyklus“ müssen nun auch die Umstände, welche die theoretische Aufeinanderfolge von Leitprozess n auf Leitprozess m unterbrechen betrachtet werden. Darunter fallen u.a.:

- Das Arbeitszeitmodell (die Wartungsschicht unterbricht – planmäßig - die Aufeinanderfolge der Vortriebszyklen)
- Der Werkzeugverschleiß (resultiert in einem Zeitbedarf für die Werkzeugkontrolle und den -wechsel)
- Evtl. Erkundungsmaßnahmen
- Stillstände (logistisch bedingt, geologisch bedingt, sonstige)

Für die Integration der Stillstandszeiten in das Prognosemodell stehen nach Meinung des Verfassers zwei grundsätzliche Verfahren zur Verfügung:

- Addition der einzelnen Stillstandszeiten
- Umlage der Stillstände auf die Vortriebszyklen

Bei erstgenanntem Verfahren wird, auf einen Tag bezogen, die Revisionszeit von den täglichen 24 Stunden abgezogen, daraufhin die zur Verfügung stehende Vortriebszeit um die Ausfallzeiten abgemindert. Somit ergibt sich eine tägliche effektive Arbeitszeit, welche über die Bohrzeit zu einem Ergebnis der Vortriebsgeschwindigkeit führt. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass die Daten für einen Soll-Ist Vergleich ohne weiteren Berechnungsschritt vorliegen.

Bei der zweiten Methode werden die oben angeführten Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf die Vortriebsleistung auf die Zyklusdauer umgelegt. Es wird ein so genannter fiktiver Hub berechnet, in den alle täglichen Stillstandszeiten integriert werden.

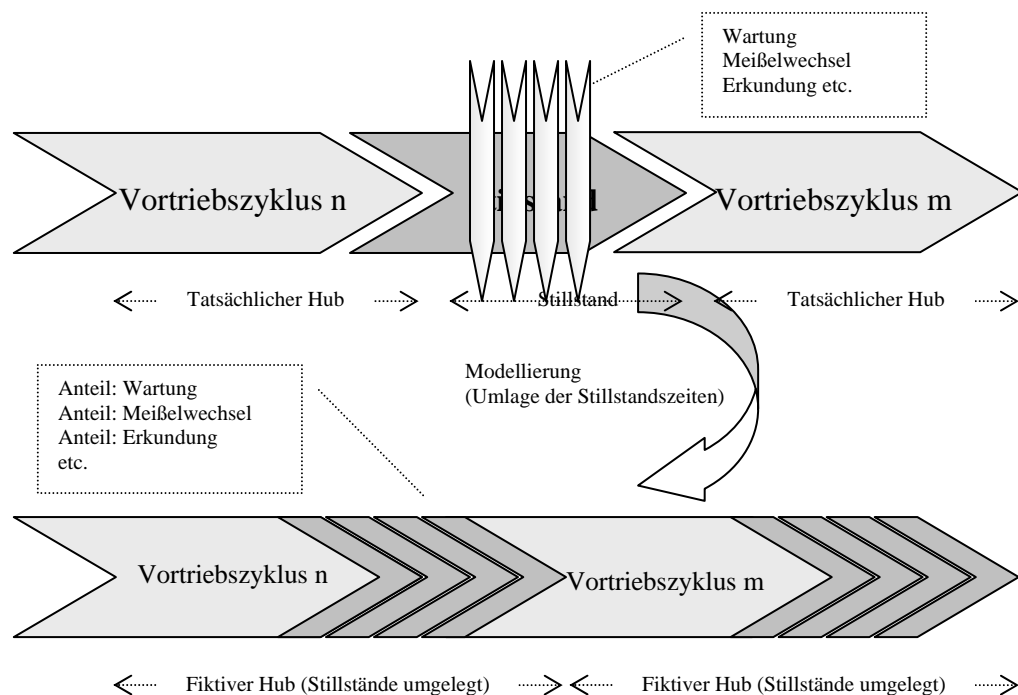


Abbildung 109: Umlage der Stillstandszeiten auf einen fiktiven Durchlaufbetrieb [2]

Der Vorteil dieser Betrachtungsweise liegt in der Möglichkeit, leichter die notwendigen iterativen Berechnungen durchführen zu können, die sich dadurch ergeben, dass sich alle Zeitanteile auf das Endergebnis beziehen müssen. Auf diese Weise sind Parameterstudien möglich, da das Modell auf Veränderungen der Eingabewerte reagieren kann und nicht an starre Einschränkungen gebunden ist. Aus diesem Grund wird die unten dargestellte Modellierung gewählt. Für einen Soll-Ist Vergleich werden die einzelnen Zeitanteile [min/Hub] wieder auf die üblicherweise verwendeten Zeiteinheiten ([h/d] oder [%]) umgerechnet. In weiterer Folge werden die Auswirkungen der einzelnen Stillstandsursachen auf die Vortriebsgeschwindigkeit und die entsprechende Einbindung in das Produktionsmodell beschrieben.

Zur Erläuterung der Vorgangsweise wird hier die Integration des **Werkzeugverbrauchs** in das Modell betrachtet:

Üblicherweise findet zumindest einmal täglich eine Meißelkontrolle statt, dies geschieht sinnvollerweise während der Revisionsarbeiten. Sind einzelne Schneidrollen auszutauschen, so werden diese Tätigkeiten ebenfalls während der planmäßigen Stillstandszeit durchgeführt.

Als Eingangswert für das Produktionsmodell wird die Meißelringstandzeit H_m (Bezeichnung nach [3]) in Tunnelmeter je Meißel gewählt, da mithilfe dieser die Anzahl der zu wechselnden Meißel über die Vortriebsgeschwindigkeit einfach berechnet werden kann. Die pro Tag zu wechselnden Meißelringe ergeben sich zu:

$$M = \frac{Q}{H_m}$$

mit

M	Anzahl der täglich zu wechselnden Meißel [c/d]
Q	Vortriebsgeschwindigkeit (Tagesleistung unter Berücksichtigung aller leistungsbeeinflussenden Umstände) [m/d]
H_m	Meißelringstandzeit (gem. [3]) [m/c] ³

³ es kann auch die von [4] entwickelte Formel verwendet werden; der somit errechnete Wert in [fm³/Ring] muss über den Querschnitt auf den Tunnelmeter bezogenen Rechenwert umgeformt werden.

Diese Anzahl der zu wechselnden Meißel multipliziert mit der Meißelringwechselldauer ergibt die tägliche Gesamtdauer für den Prozess Meißelwechsel.

$$t_M = M \times t_{M,m}$$

mit t_M Zeitbedarf für den Teilprozess Meißelwechsel pro Tag [min/d]
 $t_{M,m}$ Zeitbedarf für einen Meißelwechsel [min/c]

Dauert der Werkzeugwechsel länger als die Revisionsschicht, so ist die Differenz der beiden Vorgänge zur betrieblichen Pause zuzugeben. Können die Tätigkeiten während der Revisionsschicht erledigt werden, so liegen sie nicht auf dem kritischen Weg und sind für die Leistungsermittlung nicht von Bedeutung. Die oben angeführte Differenz wird nun wieder umgelegt auf die einzelnen Hübe.

$$z_M = \frac{(t_M - t_P)}{n}$$

mit z_M Zuschlag auf die Zyklusdauer aufgrund der Meißelwechsel [min/Hub]
 n Anzahl der Hübe pro Tag, iterativ neu berechnet [Hub/d]

Es ergibt sich eine neue Zyklusdauer zu:

$$t_{\text{Zyklus}(m)} = t_Z + z_M \quad \text{für} \quad t_M - t_P > 0$$

$$t_{\text{Zyklus}(m)} = t_Z \quad \text{für} \quad t_M - t_P \leq 0$$

mit $t_{\text{Zyklus}(m)}$ Zyklusdauer bei fiktivem Durchlaufbetrieb (24 h je Tag) unter zusätzlicher Berücksichtigung der Meißelwechsel [min/Hub]
 t_Z Zyklusdauer bei fiktivem Durchlaufbetrieb (24 h je Tag) [min/Hub]

Die angeführten Formeln gehen von einem starren Schichtsystem aus, wobei jede Revisionsschicht gleich lang andauert, es sei denn sie wird durch die Meißelwechsel verlängert. Für den Fall, dass die Leistung des Gesamtsystems optimiert werden soll, sind die Wartungsschichten den Zeiten für Meißelwechsel anzupassen und etwaige durch kürzere Wechselzeiten bedingte Einsparungen der Arbeitszeit zuzuschlagen. In diesem Fall ist die erste Formel allgemein gültig, die zweite Formel somit hinfällig und die Dauer der Wartungsschicht variabel; diese wird somit ebenfalls iterativ berechnet [2].

Neben den kalkulierbaren Unterbrechungen müssen auch die zufällig auftretenden **Stillstände** berücksichtigt werden. Diese werden in Gruppen zusammengefasst und es wird ihnen ein täglicher Zeitaufwand (am einfachsten über einen Prozentsatz) zugeordnet. Folgende Hauptgruppen werden vorgeschlagen:

- Stillstand Reparatur TBM
- Stillstand Reparatur NLE (Nachläufereinheit)
- Stillstand Tunneltransport
- Sonstige

Die angeführten Stillstände können nun entweder im Teilprozess Vortrieb oder im Teilprozess Sicherung oder im gesamten Leitprozess wirksam werden.

Die Vorgangsweise des iterativen Zuschlagens der Zeitanteile der einzelnen Stillstände auf die bis dahin errechnete fiktive Zyklusdauer ist mit der oben beschriebenen (Werkzeugverbrauch) identisch.

Der Regelvortrieb eines Vortriebs mit TBM, TBM-S und TBM-DS kann mit den aufgezeigten Formeln beschrieben werden. Die so ermittelte Zyklusdauer stellt den Zeitbedarf für einen fiktiven Hub, der bereits alle Vortriebs- und Stillstandszeiten berücksichtigt, dar. Es wird also in der Formulierung vom eigentlich intermittierenden Prozess (x Hübe - Stillstände - y Hübe) auf einen kontinuierlichen Prozess übergegangen. Die Integration der einzelnen berücksichtigten Stillstandsanteile erfordert mehrere Iterationsschritte.

Die Dauer des fiktiven Hubs wird mit den angegebenen Formeln berechnet. Dieser fiktive Zyklus wird nun 24 Stunden pro Tag wiederholt, woraus sich die tägliche Anzahl an Hüben je Tag ergibt, diese multipliziert mit der Hublänge ergibt die Vortriebsgeschwindigkeit je Tag.

$$n = \frac{24 \times 60}{t_{\text{Zyklus(fiktiv)}}}$$

Die Vortriebsgeschwindigkeit Q [m/d] ergibt sich zu:

$$Q = n \times h$$

14.4 Zusammenfassung

Das beschriebene Produktionsmodell stellt einen Algorithmus dar, welcher den Weg von der Ermittlung der Penetration bis hin zur Prognose der Vortriebsgeschwindigkeit für TBM-O, TBM-S und TBM-DS transparent und schlüssig beschreibt. Dabei wurde darauf geachtet, dass lediglich die unbedingt notwendigen Parameter in das Modell einfließen, um nicht aufgrund zu vieler Eingabewerte die praktische Anwendbarkeit zu gefährden. Die grundsätzliche Vorgangsweise ist in nachfolgender Abbildung ersichtlich (am Beispiel einer offenen TBM).

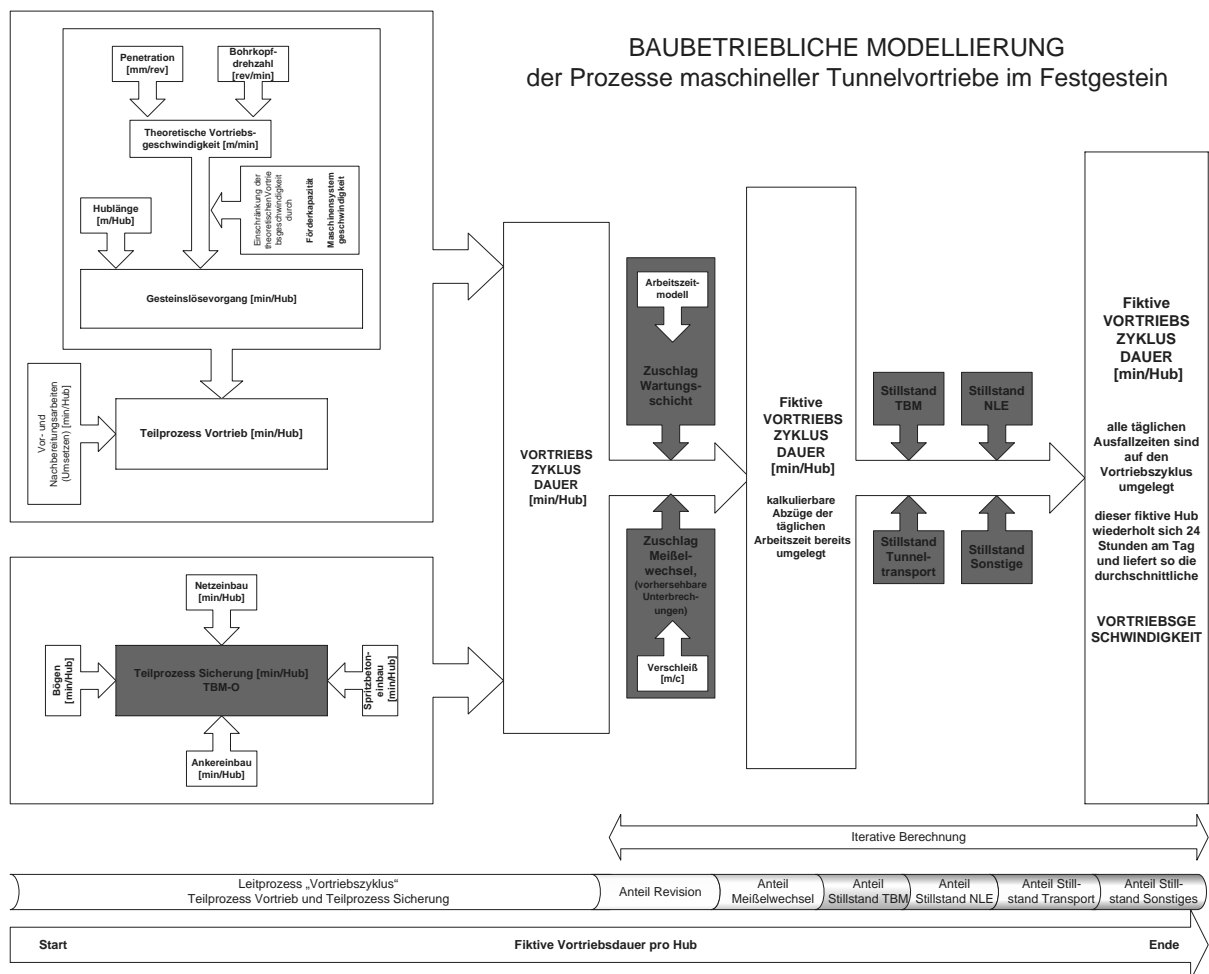


Abbildung 110: Vorgangsweise der baubetrieblichen Modellierung

Mit der vorgestellten Vorgehensweise ist es möglich, Prognosen über die Vortriebsgeschwindigkeit anzustellen, Parameterstudien durchzuführen, detaillierte Soll-Ist-Vergleiche anzustellen und somit gezielt Verbesserungsmaßnahmen durchzuführen sowie die Restbauzeit abzuschätzen.

Mein besonderer Dank gilt Professor Schneider für die Betreuung der Dissertation, welche diesem Beitrag zugrunde liegt. Ihm ist es ferner zu danken, dass die beschriebene Modellierung auch in der Praxis angewandt und dadurch verbessert wurde. Zurzeit wird am Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement an einer Vereinfachung der Anwendung des Modells gearbeitet – diese soll durch eine Benutzerfreundliche Software gelingen.

14.5 Literaturnachweise

- [1] Weigl, W.: Leistungsprognosen beim Schildvortrieb durch Simulation. Dissertation, TU München, 1993
- [2] Leitner, W.: Baubetriebliche Modellierung der Prozesse maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein – Von der Penetration zur Vortriebsgeschwindigkeit
Books on Demand Verlag Norderstedt, 2004 ISBN 3-8334-1844-3
- [3] Bruland, A.: Hard Rock Tunnel Boring – Advance Rate and Cutter Wear
Dissertation, NTNU Trondheim, 1998
- [4] Gehring, K.H.: Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau
Felsbau 13 (6), 1995

14.6 Autor

Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Leitner

Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement
Universität Innsbruck
Technikerstr. 13
A-6020 Innsbruck
Österreich

Email: w.leitner@uibk.ac.at