Maschinentechnische Entwicklungstendenzen im maschinellen Tunnelbau im Lockergestein

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt, Bayar Bayrakci, B. Eng. und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Burbaum,
Fachbereich Bauingenieurwesen, Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt, Deutschland

Insbesondere seit den 1970er-Jahren sind die Marktanteile des maschinellen Tunnelbaus gegenüber dem konventionellen Tunnelbau gewachsen. Immer größere Schildmaschinen werden realisiert. Auf der Grundlage von bis zu 274 Projekten wurden die Parameter Schilddurchmesser, Antriebsleistung, Drehmoment und Vortriebsleistung von Schildmaschinen ausgewertet. Dieser Artikel zeigt die zeitliche Entwicklung dieser Parameter auf.

Tunnelbau • Maschineller Tunnelbau • Lockergestein • Entwicklung

1 Einleitung

Sir Marc Isambard Brunel entwickelte 1806 die Idee einer Schildmaschine. Der Schild wies einen rechteckigen Querschnitt auf und setzte sich aus zwölf nebeneinanderstehenden Rahmen zusammen, die in jeweils drei Kammern unterteilt waren [1]. In jeder dieser Kammern wurde das Bodenmaterial an der Ortsbrust durch einen Mineur gelöst. Die Vortriebsgeschwindigkeit lag in diesem Projekt bei ca. 3 bis 4 m Tunnelvortrieb in der Woche [2].

Rund 200 Jahre nach dem ersten Einsatz einer Schildmaschine hat sich der maschinelle Tunnelbau beeindruckend fortentwickelt. Der Boden an der Ortsbrust wird im Vollschnitt mittels eines Schneidrads gelöst. Die Stützung der Ortsbrust kann mittels eines Erdbreis, einer Flüssigkeit oder Druckluft erfolgen. Die Sicherung des Tunnels erfolgt mit Stahlbetontübbingen. Die Spitzengeschwindigkeit des Vortriebs kann wie z. B. beim Bau der Barcelona Metro Line 9 360 m in der Woche betragen [3].

Um die maschinentechnischen Entwicklungstendenzen im maschinellen Tunnelbau zu analysieren, wurden bis zu 274 Projekte ausgewertet, bei denen Schildmaschinen verschiedener Maschinenhersteller zum Einsatz kamen. Dabei wurden folgende Parameter analysiert:

- Schilddurchmesser
- Antriebsleistung
- Drehmoment
- Vortriebsleistung

Die Daten wurden dabei in Abhängigkeit von der zeitlichen Entwicklung aufgetragen. Bei der Auswertung erfolgte zum einen eine Betrachtung der Projekte ohne Berücksichtigung des Schildmaschinentyps und zum anderen wurden Teile der Projekte separat analysiert, wobei in die beiden Gruppen flüssigkeitsgestützte Schildmaschinen/Mixschilde und erddruckgestützte Schildmaschinen differenziert werden konnte.

2 Schilddurchmesser

Im **Bild 1** ist eine Gesamtdarstellung der Entwicklung des Schilddurchmessers über einen Zeitraum von 1869 bis 2019 für verschiedene Typen von Schildmaschinen abgebildet. Grundlage für die Darstellung sind 271 Projekte. Deutlich zu erkennen ist, dass seit den 1990er-Jahren die Schilddurchmesser immer größer werden. Hervorzuheben sind hier die Projekte Tuen Mun - Chek Lap Kok Link

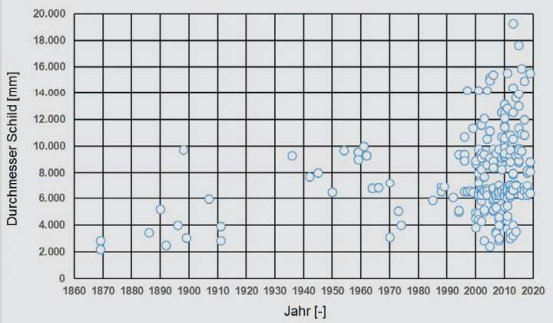


Bild 1: Zeitliche Entwicklung des Schilddurchmessers (271 Projekte)

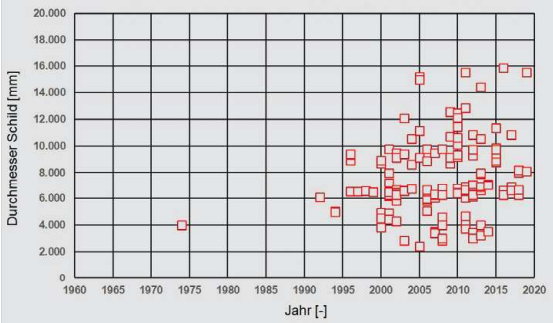


Bild 2: Entwicklung des Schilddurchmessers von erddruckgestützten Schildmaschinen (166 Projekte)

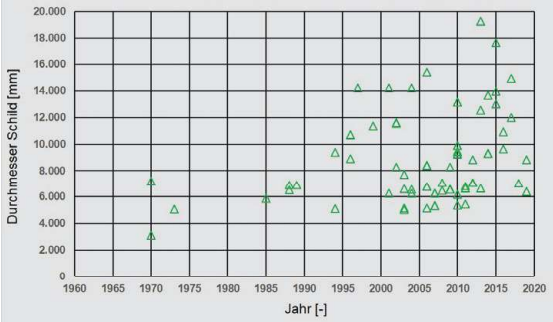


Bild 3: Entwicklung des Schilddurchmessers flüssigkeitsgestützter Schildmaschinen/Mixschilde (75 Projekte)

in Hongkong mit 17.630 mm Schilddurchmesser oder der Orlovskij-Tunnel in St. Petersburg mit 19.250 mm Schilddurchmesser. **Bild 2** zeigt die Entwicklung des Schilddurchmessers über einen Zeitraum von 1974 bis 2019 für erddruckgestützte Schildmaschinen und **Bild 3** über einen Zeitraum von 1970 bis 2019 für flüssigkeitsgestützte Schildmaschinen/Mixschilde. Zurückzuführen ist die Vergrößerung des Schilddurchmessers auf die Anforderungen, z. B. mehrspurige Straßentunnel oder die Anordnung mehrstöckiger Fahrebenen. Aus den größer werdenden Schilddurchmessern resultieren größere Antriebsleistungen und Drehmomente für das Schneidrad, wie die nachfolgenden Auswertungen bestätigen.

3 Antriebsleistung

Die Antriebsleistung einer Schildvortriebsmaschine ist als die vom Schneidradantrieb beim Bodenabbau erzeugte Gesamtleistung definiert. Bei der Betrachtung der Entwicklung der Antriebsleistung für den Zeitraum von 1986 bis 2019 (**Bilder 4 und 5**) ist ein einheitliches Bild zu erkennen. So bewegt sich beim Großteil der Projekte die Antriebsleistung bis ca. 4.000 kW. Darüber hinaus gibt es vereinzelte Projekte z. B. M-30 By-Pass Sur Túnel Norte in Madrid oder Galleria Sparvo zwischen Bologna und Florenz mit einer Antriebsleistung von 12.000 kW.

4 Drehmoment

Um das Bodenmaterial an der Ortsbrust zu lösen, ist ein passendes Drehmoment für das Schneidrad erforderlich. Das Schneidraddesign bzw. die Abbauwerkzeuge haben dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Größe des erforderlichen Drehmoments. Bei der Betrachtung der Entwicklung des Drehmoments zeichnet sich ein ähnliches Bild wie bei der Antriebsleistung ab. Auch hier liegt der Großteil der Projekte in einem Bereich bis ca. 40.000 kNm (**Bilder 6 und 7**). Darüber hinaus gibt es Projekte, z. B. M-30 By-Pass Sur Túnel Norte in Madrid und Santa Lucia bei Florenz, mit einem Drehmoment von 95.923 kNm bzw. 101.296 kNm.

5 Vortriebsleistung

Die Angabe der Vortriebsleistung bzw. der aufgefahrenen Meter Tunnel am Tag gestaltet sich sehr komplex, da hier verschiedene Faktoren zu berücksichtigen sind. Zum Beispiel ist zu berücksichtigen, ob im Projekt der Vortrieb in einer 8-Stunden-Schicht oder im Durchlaufbetrieb 24 Stunden stattgefunden hat. Ebenso spielt die Geologie eine entscheidende Rolle. Je nach Verschleiß der Abbauwerkzeuge sind diese zu wechseln und verursachen dadurch planmäßig Stillstandszeiten. Des Weiteren kann es zu Störfällen mit unvorhersehbaren Stillstandszeiten kommen.

In den **Bildern 8 bis 10** sind sowohl Mittelwerte als auch Extremwerte dargestellt. Die mittleren Vortriebsleistungen wurden anhand von Vortriebsabschnitten ohne Störfälle bzw. unvorhersehbare Stillstandszeiten ermittelt. Bei den Extremwerten handelt es sich um kurze Vortriebsabschnitte, in denen Spitzenwerte erreicht wurden. Bei den Werten wurde nicht berücksichtigt

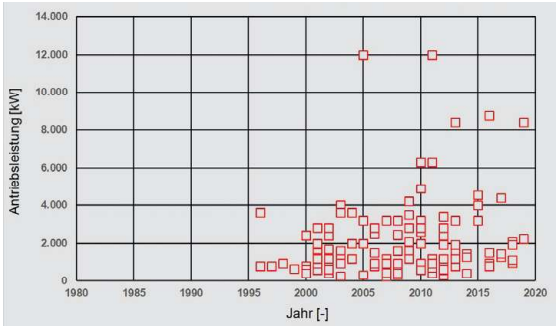


Bild 4: Entwicklung der Antriebsleistung erddruckgestützter Schildmaschinen (147 Projekte)

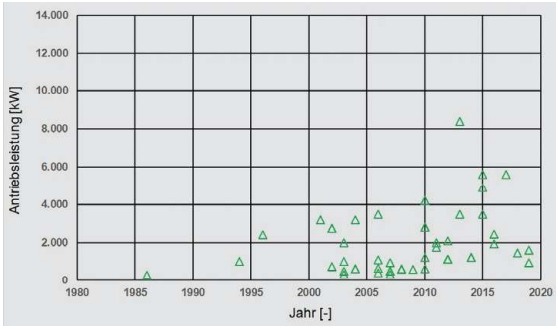


Bild 5: Entwicklung der Antriebsleistung flüssigkeitsgestützter Schildmaschinen/Mixschilde (51 Projekte)

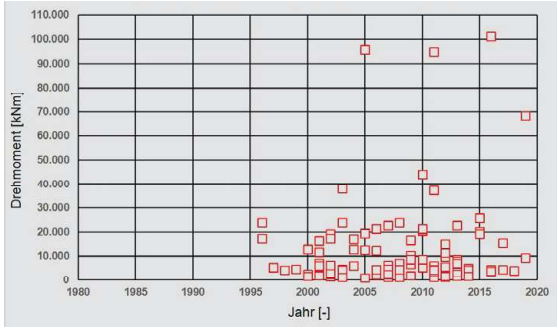


Bild 6: Entwicklung des Drehmoments erddruckgestützter Schildmaschinen (139 Projekte)

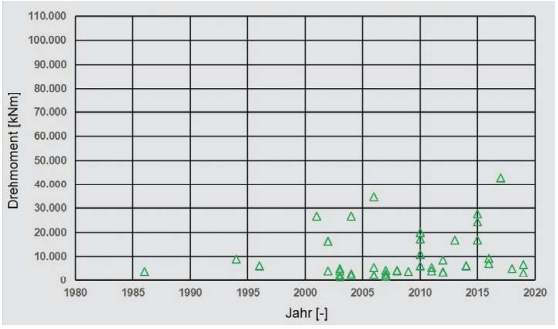


Bild 7: Entwicklung des Drehmoments flüssigkeitsgestützter Schildmaschinen/Mixschilde (49 Projekte)

bzw. umgerechnet, ob die Tagesleistung innerhalb einer 8-Stunden-Schicht oder im Durchlaufbetrieb aufgefahren wurde. Die dargestellten Werte sollen nicht als Grundlage einer Bauzeitenkalkulation dienen, sondern vielmehr die Bandbreite aufzeigen.

In den Pionierjahren des maschinellen Tunnelvortriebs ist deutlich zu erkennen, dass nur geringe Vortriebsleistungen erzielt wurden (**Bild 8**). Ab den 1950er-Jahren steigen die Vortriebsleistungen an und ab 1995 sind sehr deutlich sehr hohe Vortriebsleistungen als Spitzenwerte zu verzeichnen. Beim Vergleich der erddruckgestützten Schildmaschinen mit den flüssigkeitsgestützten Schildmaschinen/Mixschilden scheinen mit den erddruckgestützten Schildmaschinen höhere Spitzenvortriebsleistungen möglich zu sein (**Bilder 9 und 10**).

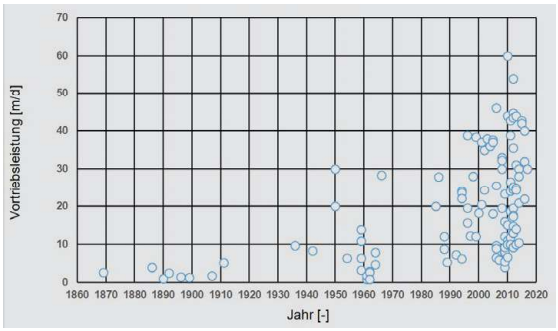


Bild 8: Entwicklung der Vortriebsleistung (115 Projekte)

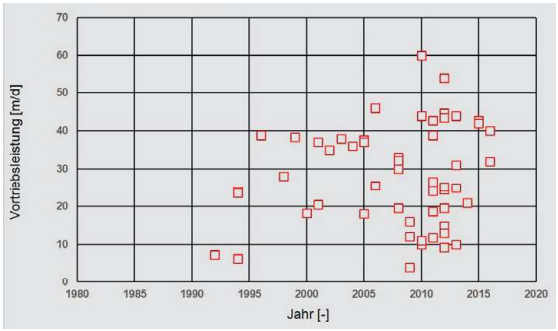


Bild 9: Entwicklung der Vortriebsleistung erddruckgestützter Schildmaschinen (55 Projekte)

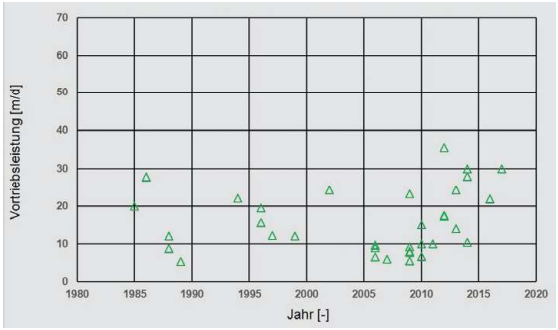


Bild 10: Entwicklung der Vortriebsleistung flüssigkeitsgestützter Schildmaschinen/ Mixschilde (34 Projekte)

6 Abhängigkeiten

Wie im Kap. 2 ausgeführt, resultieren aus den größer werdenden Schilddurchmessern größere Antriebsleistungen und Drehmomente für das Schneidrad. In den **Bildern 11 und 12** ist die Abhängigkeit der Antriebsleistung vom Durchmesser des Schildes für erddruckgestützte Schildmaschinen bzw. flüssigkeitsgestützte Schildmaschinen/Mixschilde dargestellt. Die Abhängigkeit des Drehmoments des Schneidrads vom Durchmesser des Schildes ist in den **Bildern 13 und 14** für erddruckgestützte Schildmaschinen bzw. flüssigkeitsgestützte Schildmaschinen/Mixschilde abgebildet. In den **Bildern 11 bis 14** zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Größe des Schilddurchmessers und der Antriebsleistung bzw. dem Drehmoment des Schneidrads.

Die Abhängigkeiten lassen sich durch verschiedene Regressionsfunktionen beschreiben, die in den **Bildern 11 bis 14** dargestellt sind. Ebenso ist in den **Bildern 11 bis 14** das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben, das ein Gütemaß für die Regressionsfunktion ist.

7 Fazit

In den letzten 25 Jahren ist eine sehr starke Weiterentwicklung der technischen Leistungsfähigkeit der Schildmaschinen zu verzeichnen. Die Auswertungen zeigen, dass die Entwicklungen nicht gegen einen Ma-

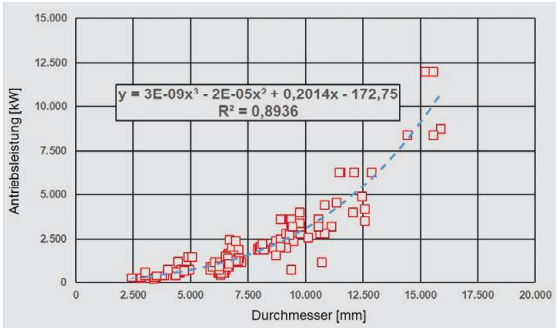


Bild 11: Antriebsleistung erddruckgestützter Schildmaschinen abhängig vom Schilddurchmesser (147 Projekte)

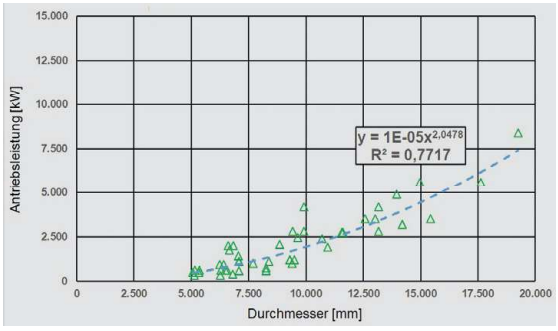


Bild 12: Antriebsleistung flüssigkeitsgestützter Schildmaschinen/Mixschilde abhängig vom Schilddurchmesser (50 Projekte)

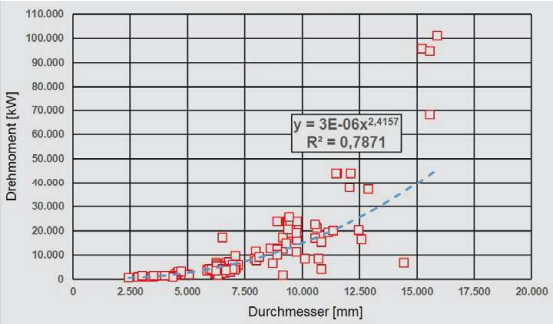


Bild 13: Drehmoment erddruckgestützter Schildmaschinen abhängig vom Schilddurchmesser (139 Projekte)

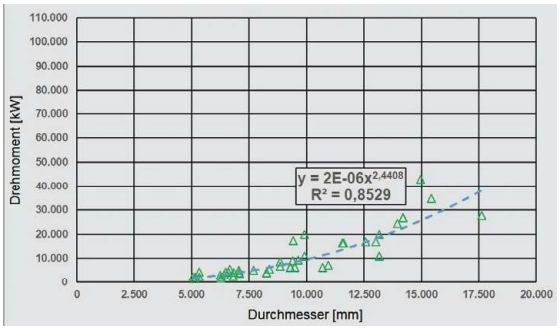


Bild 14: Drehmoment flüssigkeitsgestützter Schildmaschinen/Mixschilde abhängig vom Schilddurchmesser (48 Projekte)

ximalwert zu konvergieren scheinen. Eine technische Grenze scheint daher noch nicht erreicht zu sein. Die Fachwelt darf daher gespannt auf die Entwicklungen der nächsten Jahre blicken.

8 Literatur

[1] Maidl, B.; Herrenknecht, M.; Maidl, U.; Wehmeyer, G.: Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2011.

[2] Maidl, B.: Faszination Tunnelbau: Geschichte und Geschichten - ein Sachbuch, Ernst & Sohn Verlag, 2018.

[3] Herrenknecht AG: Barcelona Metro Line 9, https://www.herrenknecht.com/de/referenzen/referenzendetail/barcelona-metro-line-9/, Abfragedatum: 28.05.2019.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt



vertritt im Fachbereich Bauingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt die Forschungs- und Lehrgebiete Geotechnik und Tunnelbau.

Kontakt: juergen.schmitt@h-da.de

Bayar Bayrakci, B. Eng.



studiert im Masterstudiengang Bauingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt.

Kontakt: bayar.bayrakci@stud.h-da.de

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Burbaum



vertritt im Fachbereich Bauingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt die Forschungs- und Lehrgebiete Geotechnik und Tunnelbau.

Kontakt: ulrich.burbaum@h-da.de