Analysen zu Schadensfällen und Risiken bei maschinellen Tunnelvortrieben im Festgestein

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt, Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt, Deutschland
Alexander Kilian, M. Eng., Strabag AG, Frankfurt a. M. Deutschland
Dr.-Ing. Klaus Hönisch, Fichtner GmbH & Co. KG, Stuttgart, Deutschland

An der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt wurden Tunnelbauprojekte analysiert, bei denen es während der Bauausführung zu Schadensfällen kam. Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse dar, die auf Grundlage von 31 Tunnelbauprojekten, die mittels Tunnelbohrmaschine aufgefahren wurden, ermittelt wurden.

Tunnelbau • Maschineller Vortrieb • Festgestein • Risiko • Schadensfälle

1 Einleitung

Während der Herstellung von Tunnelbauwerken birgt der Baugrund ein sehr hohes Risiko für die Bauausführung. Insbesondere im maschinellen Tunnelbau sind Risiken und Schadensfälle erfahrungsgemäß mit sehr hohem Aufwand und sehr hohen Kosten verbunden. Beim Vortrieb des Gotthard-Basistunnels kam es z. B. im Baulos Bodio am 3. März 2006 infolge der hohen Gebirgsdrücke und der daraus resultierenden großen Konvergenzen zu einem Verklemmen der Tunnelbohrmaschine (TBM). Durch eine Überfirstung im Bereich des Bohrkopfs konnte der Vortrieb nach zehn Tagen wiederaufgenommen werden [1].

Die Gefährdungsbilder im Festgestein sind zahlreich und erstrecken sich von niederbrechenden Felsblöcken über extreme Wassereinbrüche bis hin zu Gasaustritten. Vielfältige Wechselwirkungen geologischer Faktoren werden oftmals erst sichtbar, wenn bei der Ausführung von Tunnelbauprojekten negative Ereignisse auftreten. Komplexe geologische Faktoren, wie z. B. die Inhomogenität des Gebirges, Behinderungen durch veränderlich feste Gesteine und die Auswirkungen hoher Primärspannungen sind deshalb stets zu berücksichtigen. Aufgrund der Inhomogenität/Anisotropie des Gebirges müssen dabei lokale Anpassungen durchgeführt werden, um Sicherheits-, Kosten- und baubetrieblichen Faktoren zu genügen.

An der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt wurden Tunnelbauprojekte, bei denen es während der Bauausführung zu Schadensfällen kam, untersucht. Insbesondere wurden hierbei Projekte im maschinellen Tunnelbau analysiert. In [2] bis [4] finden sich hierzu bereits Ergebnisse von maschinellen Tunnelvortrieben im Locker- und Festgestein. Zwischenzeitlich wurden weitere Projekte analysiert und ausgewertet. Der vorliegende Beitrag stellt die neuen Ergebnisse mit dem Schwerpunkt maschinelle Tunnelvortriebe im Festgestein vor.

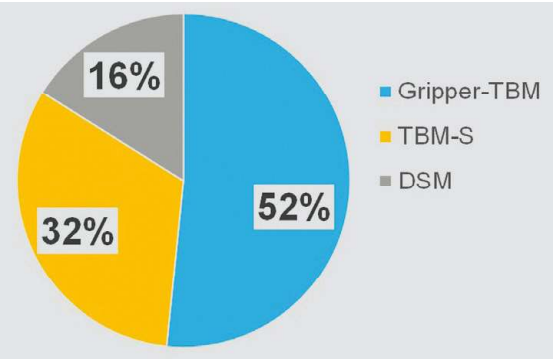


Bild 1: Anteil der verschiedenen Maschinentypen bezogen auf alle Projekte

2 Maschinentypen

Insgesamt wurden 31 Tunnelbauprojekte, bei denen Schäden während des Vortriebs aufgetreten sind, ausgewertet. In den Projekten kamen folgende drei Maschinentypen zum Einsatz:

- Offene Tunnelbohrmaschine (Gripper-TBM) in 16 Projekten
- Tunnelbohrmaschinen mit Schildmantel (TBM-S) in 10 Projekten
- Doppelschildmaschinen (DSM) in 5 Projekten

Mit 52 %, also etwa der Hälfte der Projekte stellt der eingesetzte Maschinentyp Gripper-TBM die Mehrheit dar (Bild 1). Im Vergleich zu einem Vortrieb mit einer TBM-S oder einer DSM, bei denen der Hohlraum unmittelbar mit dem Einbau der Tübbingsicherung gestützt wird, findet die planmäßige Stützung des Gebirges beim Vortrieb mit einer Gripper-TBM erst im Nachläuferbereich der Gripper-TBM mittels einer Spritzbetonsicherung statt. Bei den Vortrieben des Gotthard-Basistunnel hatte dieser Bereich z. B. einen Abstand von 46,5 m zur Ortsbrust [5].

Die Maschinentypen unterscheiden sich im Festgestein nicht nur durch die Art der Sicherung, sondern auch in der Art, wie die notwendigen Vortriebskräfte in das Gebirge eingeleitet werden. Bei der Gripper-TBM

werden sie über die namensgebende Gripperverspannung eingeleitet (Bild 2). Beim Vortrieb mit der TBM-S stützen sich die hydraulischen Vorschubpressen auf die Tübbingsicherung ab und erzeugen somit den erforderlichen Anpressdruck auf die Ortsbrust. Bei der DSM, die einen kontinuierlichen Vortrieb ermöglicht, d. h. dass während des Abbaus an der Ortsbrust gleichzeitig die Tübbingsicherung eingebaut wird, kommen die beiden Systeme Gripperverspannung und hydraulische Vortriebspressen zum Einsatz. Durch die Unterschiede zwischen den Maschinentypen ergeben sich entsprechende typische Schadensbilder.

3 Risikogruppen

Um eine Bewertung der Schadensfälle durchführen zu können bzw. um die Schadensszenarien zu kategorisieren, wurden Risikogruppen (RG) definiert (Tabelle 1). Die Einteilung basiert auf den geologischen Randbedingungen und Ähnlichkeiten in den Schadenssituationen. Die zugehörigen typischen Schadensbilder für die einzelnen Risikogruppen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

4 Ergebnisse

In den Tabellen 3 und 4 sind die Häufigkeiten der einzelnen Risikogruppen als Anzahl der Projekte und prozentual für alle Projekte und nach Maschinen-

Tabelle 1: Definition der Risikogruppen (RG) im Festgestein

RG	Definition Risikogruppe
1	hohe Überdeckungshöhen, hohe Gebirgsdrücke, hohe Konvergenzen
2	hohe Wasserzuflüsse, hohe Wasserdrücke und hohe Wassertemperaturen
3	stark zerklüftetes und nachbrüchiges Gebirge
4	hohe Abrasivität des Gebirges
5	hohlraumartige Öffnungen mit oder ohne Füllung
6	Gasvorkommen und andere Gefahrstoffe

Tabelle 3: Häufigkeit der Risikogruppe (RG) bei Tunnelbaustellen im Festgestein und maschinellem Vortrieb [Anzahl Projekte]

RG	Gesamt	Gripper-TBM	TBM-S	DSM
1	16	11	2	3
2	15	9	4	2
3	16	8	6	2
4	6	4	1	1
5	4	2	1	1
6	3	2	0	1

Tabelle 4: Häufigkeit der Risikogruppe (RG) bei Tunnelbaustellen im Festgestein und maschinellem Vortrieb [%]

RG	Gesamt [% bezogen auf 31 Projekte]	Gripper-TBM [% bezogen auf 16 Projekte]	TBM-S [% bezogen auf 10 Projekte]	DSM [% bezogen auf 5 Projekte]
1	52	69	20	60
2	48	56	40	40
3	52	50	60	40
4	19	25	10	20
5	13	13	10	20
6	10	13	0	20



Bild 2: Bereich der Gripperverspanunng

Tabelle 2: Schadensbilder der einzelnen Risikogruppen (RG)

RG	Schadensbild
1	▸ Deformation des Querschnitts ▸ Abplatzungen ▸ Bergschläge ▸ Schädigung der Sicherung ▸ Verklemmung der TBM ▸ Vortriebsverzug
2	▸ Wassereinbrüche in den Tunnelquerschnitt ▸ Niederbrüche infolge Wasser ▸ Verklemmung der TBM ▸ Setzungen ▸ hohe Temperaturen ▸ Vortriebsverzug
3	▸ Niederbrüche ▸ Nachbrüche ▸ Ortsbrustinstabilitäten ▸ Verklemmen der TBM ▸ Vortriebsverzug
4	▸ erhöhter Meißelverschleiß ▸ Schädigung der Meißel ▸ erhöhte Stillstandszeiten durch Meißelaustausch
5	▸ Störzonen mit Lockergestein, brüchigem Fels oder druckhaft weichem Material ▸ Vortrieb mit TBM ggf. nicht möglich ▸ Ortsbrustinstabilitäten ▸ Vortriebsverzug
6	▸ Vergiftungsgefahr ▸ Erstickungsgefahr ▸ Explosionsgefahr ▸ Vortriebsverzug

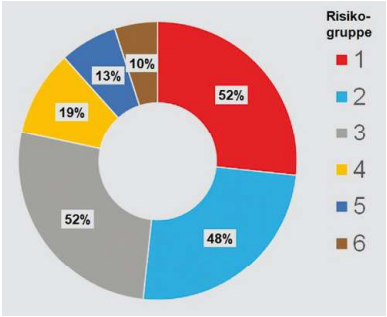


Bild 3: Häufigkeit der Risikogruppe in Anlehnung an Tabelle 4 bezogen auf alle Projekte

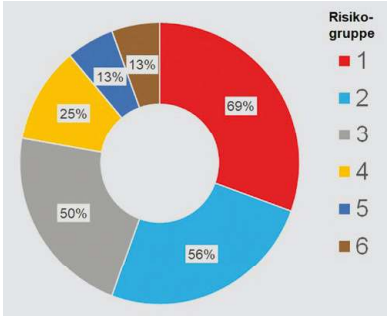


Bild 4: Häufigkeit der Risikogruppe in Anlehnung an Tabelle 4 für Maschinentyp Gripper-TBM

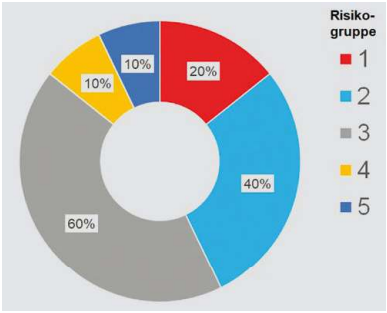


Bild 5: Häufigkeit der Risikogruppe in Anlehnung an Tabelle 4 für Maschinentyp TBM-S

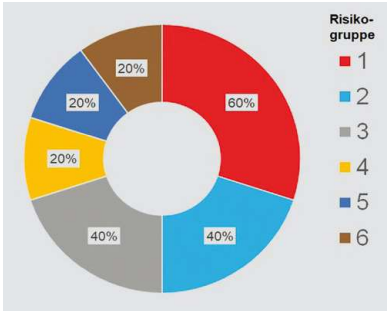


Bild 6: Häufigkeit der Risikogruppe in Anlehnung an Tabelle 4 für Maschinentyp DSM

Tabelle 5: Maßnahmen zur Schadensbehebung bzw. -vermeidung für die einzelnen Risikogruppen (RG)

RG	Ergriffene Maßnahmen
1	▸ intensivierte Tunnelsicherung (kurze Sicherungsintervalle, Einsatz engmaschiger Sicherungssysteme, Stahlbögen zur besseren Kraftübertragung) ▸ Mehrausbruch durch Überschnitt der TBM ▸ Nachprofilierung der beschädigten Sicherung ▸ Befreien der TBM (Mehrausbruch im Firstbereich, schirmartige Stahlbogenkonstruktion um den Bohrkopf, Gegenvortrieb, ggf. Rückbau der TBM und weiter hinten neuer Aufbau)
2	▸ umfangreiche Erkundungsbohrungen ▸ Einsatz von Injektionsmitteln ▸ Dränagesysteme (zur Entwässerung und Wasserdruckreduktion) ▸ Einsatz von Filterrohren, um das Ausspülen von Feinmaterialien und als Folge Scherbewegungen zu vermeiden ▸ Sicherung gegen Niederbrüche (Gitter, Injektionen, Spritzbeton, Anker) ▸ Befreien der TBM (Mehrausbruch im Firstbereich, schirmartige Stahlbogenkonstruktion um den Bohrkopf, Gegenvortrieb, ggf. Rückbau der TBM und weiter hinten neuer Aufbau) ▸ Einsatz einer TBM mit geschlossenem Drucksystem ▸ Einsatz von Kühlungs- und Ventilationssystemen
3	▸ umfangreiche Erkundungsbohrungen ▸ umfangreiche Firstsicherung (Gitter, Spritzbeton, Injektionen) ▸ Befreien der TBM (Mehrausbruch im Firstbereich, schirmartige Stahlbogenkonstruktion um den Bohrkopf, Gegenvortrieb, ggf. Rückbau der TBM und weiter hinten neu Aufsetzen)
4	▸ Betonitsuspensionen an Ortsbrust zur Reduktion der Abrasivität ▸ Einsatz von „Wear Plates" und „Boomerangs" bei Meißeln zur Verschleißreduktion
5	▸ umfangreiche Erkundungsbohrungen ▸ umfangreiche Firstsicherung (Gitter, Spritzbeton, Injektionen, McNally-Verfahren) ▸ Dränagesysteme (zur Entwässerung und Wasserdruckreduktion) ▸ Einsatz einer TBM mit geschlossenem Drucksystem
6	▸ umfangreiche Ventilationsanlagen ▸ Einbringen von Gasdetektoren und Strahlenmessgeräten am Bohrkopf der TBM ▸ langsame Vortriebsarbeiten ▸ Unterbrechung der Stromversorgung im Tunnel bei Gaserkennung

typ getrennt zusammengefasst. Hierbei ist zu beachten, dass für das einzelne Projekt unterschiedliche Risikogruppen zutreffen können. Auf alle Projekte bezogen ergeben sich für die Risikogruppen 1 bis 3 in einer ähnlichen Größenordnung die größten Häufigkeiten (**Bild 3**). Die meisten Schäden entstehen also bei hohen Überdeckungshöhen, hohen Gebirgsdrücken, hohen Konvergenzen, hohen Wasserzuflüssen, hohen Wasserdrücken und vereinzelt Wassertemperaturen sowie stark zerklüftetem und nachbrüchigem Gebirge.

Bei der Betrachtung bezogen auf den einzelnen Maschinentyp zeigen sich zwischen den einzelnen Maschinentypen signifikante Unterschiede. Für die Gripper-TBM stellt die Risikogruppe 1 die Gruppe mit der größten Häufigkeit von 69 % dar (**Bild 4**). Das Haupteinsatzgebiet der Gripper-TBM ist im standfesten und in geringem Umfang im gestörten Gebirge, d. h. als Richtwert sollten ca. 80 bis 90 % der Tunnellänge weitgehend standfest sein. Da bei der Gripper-TBM im Regelvortrieb die Spritzbetonsicherung möglichst sehr spät im Nachläuferbereich und nicht unmittelbar erfolgt, stellen gerade hohe Gebirgsdrücke und hohe Konvergenzen ein gravierendes Risiko dar. Die Risikogruppen 2 bis 6 für die Gripper-TBM weisen sehr ähnliche Häufigkeiten wie bei der Betrachtung aller Projekte auf.

Bei der TBM-S zeigt sich dagegen ein anderes Bild. Hier ist die Risikogruppe 3 (stark zerklüftetes und nachbrüchiges Gebirge) die Gruppe mit der größten Häufigkeit (**Bild 5**). Dies deckt sich mit dem Haupteinsatzgebiet der TBM-S, die i. d. R. hauptsächlich im nachbrüchigen bis gebrächen Gebirge zum Einsatz kommt. Im Vergleich zu den Häufigkeiten der Risikogruppe bei der Gripper-TBM ist deutlich eine andere Ausprägung in der Häufigkeit der einzelnen Risikogruppen zu sehen.

Die Risikohäufigkeiten beim Maschinentyp DSM (**Bild 6**) sind ähnlich wie beim Maschinentyp Gripper-TBM. Die Risikogruppe 1 ist hier wie bei der Gripper-TBM am stärksten vertreten. Danach folgen die Risikogruppen 2 und 3 und im hinteren Drittel die Risikogruppen 4 bis 6. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass bei der Analyse nur fünf Projekte zur Verfügung standen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei den Schadensfällen sind neben den Analysen der Schäden, die Maßnahmen, die ergriffen wurden, um die Schäden zu mindern bzw. um den weiteren Vortrieb zu beschleunigen. In **Tabelle 5** sind die Maßnahmen, die in den einzelnen Projekten ergriffen wurden, zusammengefasst. Generell ist zu erkennen, dass zum einen die Maßnahmen zur Tunnelsicherung verstärkt wurden, d. h. die Sicherungen wurden bei der Gripper-TBM beispielsweise unmittelbar eingebaut. Zum anderen wurden zur Überprüfung der geologischen Verhältnisse umfangreiche Erkundungsbohrungen durchgeführt, damit geeignete Zusatzmaßnahmen ergriffen werden konnten. Ebenso wurden maschinentechnische Veränderungen vorgenommen, z. B. durch die Erzeugung eines größeren Überschnitts. In den Extremfällen musste die TBM durch aufwändige Maßnahmen befreit werden.

5 Fazit

Ein hundertprozentig planmäßiger Tunnelvortrieb kann nie garantiert werden. Selbst umfangreiche und qualitativ hochwertige geotechnische Vorerkundungen sind keine Garantie dafür, dass Schadensfälle ausgeschlossen werden können. Ein Restrisiko bleibt immer bestehen. Jedoch sinkt die Risikoschwere von Schadensfällen, je umfangreicher und qualitativ hochwertiger die geotechnische Vorauserkundung ist. Dabei bleibt aber natürlich trotzdem die Forderung, die Kosten für die Erkundung vor der Bauphase so gering wie möglich zu halten.

Bei den untersuchten Schadensfällen zeigt sich, dass die geologischen Randbedingungen maßgeblich für die Schwere des Schadensfalls sind. Deutlich wird, dass die Geologie bereichsweise gravierend anders war, als sie sich anhand der geotechnischen Vorerkundung darstellte. Das bedeutete bei einigen analysierten Tunnelvortrieben sogar, dass der geplante und eingesetzte Maschinentyp nicht die optimale Lösung war.

Dieser Artikel gibt nur einen Überblick über die umfangreichen Untersuchungen und Analysen. Die Untersuchungen und Analysen sind in [2] und [6] vollständig und ausführlicher dokumentiert.

6 Literatur

[1] Ferrari, A.; Pedrazzini, S.: Experiences with TBM drives in the Gotthard BaseTunnel, Bodio section, 2008.

[2] Bien, S.: Analyse und Bewertung von Schadensfällen während der Bauausführung im maschinellen Tunnelbau, AV Akademikerverlag, 2015.

[3] Bien, S.; Schmitt, J.; Krajewski, W.: Schadensfälle im maschinellen Tunnelbau - Risiko Baugrund, BauPortal, 8/2015, S. 12-15.

[4] Bien, S.; Schmitt, J.; Krajewski, W.: Risikofaktor Baugrund im maschinellen Tunnelbau - Untersuchungen von Schadensfällen während der Bauausführung, 10. Kolloquium ‚Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 19.-20.01.2016, S. 249-255.

[5] Gollegger, J., Priller, A., Rausch, M.: Einsatz von offenen Tunnelbohrmaschinen bei druckhaftem Gebirge im Gotthard Basistunnel, Geomechanics and Tunnelling 2 (2009), No. 5, S. 591-600.

[6] Kilian, A.: Untersuchungen zu Schadensfällen bei maschinellen Tunnelvortrieben im Fels, Masterthesis, Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt, 2018.

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

Alexander Kilian, M. Eng.



hat an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt Bauingenieurwesen studiert und ist derzeit als Trainee für die STRABAG AG tätig.

Kontakt: alexander-kilian@t-online.de

Dr.-Ing. Klaus Hönisch



ist jetzt im Ruhestand als Berater bei der Fichtner GmbH & Co. KG, Erneuerbare Energien, Abteilung Wasserkraft in Stuttgart mit dem Schwerpunkt Felsbau tätig.

Kontakt: klaus.hoenisch@fichtner.de

mago-pack

mago-Tunnelbau-Spezialplatten
Lastverteilungsplatten für den Tunnelbau

mago-tunneling-specialboards
Load distribution plates for tunnel constructions

Erfolgreich eingesetzt:
Successfully used:

- Katzenbergtunnel, NBS Karlsruhe-Basel
- City-Tunnel, Leipzig
- Finnetunnel, Weimar
- Kaiser-Wilhelm-Tunnel, Cochem
- U-Bahn-Linie 4, Hamburg
- Brenner-Zulaufstrecke Nord
- Sluiskiltunnel, Terneuzen (NL)
- Stadtbahntunnel, Karlsruhe
- Boßlertunnel, NBS Wendlingen-Ulm
- Koralmtunnel KAT 3, Steiermark
- Tunnel Rastatt, NBS Karlsruhe-Basel
- Cityringen, Erweiterung Metro Kopenhagen
- Metro Tel Aviv, Israel
- U5 EUROPA-Viertel, Frankfurt/Main

Weitere Informationen, Prüfzertifikate und -zeugnisse: | More details and test certificates:
TU@mago-pack.de ■ T +49 (0) 441 219 855-0 ■ F-29