



DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

Untersuchung der Zusammenhänge

GEBIRGE - TUNNELBOHRMASCHINE

am Beispiel des Triebwasserstollens des Kraftwerks Hieflau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom- Ingenieurs

unter der Leitung von

ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rainer Poisel

E203

Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Viktoria Ostermann

0325876

1140 Wien, Anzbachgasse 78

Wien, Juni 2009

Danksagung

Mein Dank gilt an dieser Stelle all jenen Personen, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rainer Poisel, der sich stets Zeit genommen hat, mir mit Rat und Tat zur Seite zu stehen und mit fachlicher Unterstützung und zahlreichen Anregungen zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen hat. Weiters geht mein Dank an Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ewald Tentschert und Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Preh.

Ein besonderes Dankeschön geht an die Verbund Austrian Hydro Power AG und die ARGE Erweiterung KW Hieflau (Jäger Bau GmbH, Strabag AG, Frutiger AG) die mir die TBM-Daten zur Verfügung gestellt haben.

Ich bedanke mich bei Herrn Dipl.-Ing. Franz Gappmaier (Verbund Austrian Hydro Power AG), dem Bauleiter Stellvertreter Herrn Dipl.-Ing. Norbert Riedel der ARGE Erweiterung KW Hieflau, Herrn Dipl.-Ing Jung (Pöyry Infra GmbH) und Herrn Dipl.-Ing. Dr. Andreas Budil (Baumanagement Metz & Partner) für die Zurverfügungstellung der Pläne und die Antworten auf meine Fragen während einer Baustellenbesprechung und –besichtigung.

Außerdem möchte ich meinen Dank Herrn Dipl.-Ing. Andreas Bilak (Geologie KW Hieflau) aussprechen, der mir den Längenschnitt mit den Angaben zum Zerlegungsgrad zur Verfügung gestellt hat und außerdem noch zahlreiche Fragen betreffend der Geologie beantwortet hat.

Ich möchte mich auch bei ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Filzmoser bedanken, der mir bei der Erzeugung der dreidimensionalen Diagramme in äußerst effizienter Art, prompt und zuvorkommend geholfen hat.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit ist ein Beitrag zur technisch-wirtschaftlichen Optimierung von Tunnelbauvorhaben, bei welchen ein TBM – Einsatz vorgesehen ist. Am Beispiel des Vortriebes für den neuen Triebwasserstollen des Kraftwerks Hieflau werden die Zusammenhänge zwischen ausgewählten Gebirgsparametern und den automatisch aufgezeichneten Daten der dort eingesetzten Tunnelbohrmaschine analysiert.

Als Maschinendaten wurden die Nettovortriebsgeschwindigkeit in m/h, die Anpresskraft des Bohrkopfes in kN und das Drehmoment in kNm herangezogen. Als Gebirgsparameter dienten die Gesteinsart und der Zerlegungsgrad.

Nach einer Aufbereitung der Daten wurden diese statistisch analysiert.

Es wurde die Korrelation zwischen der Vortriebsgeschwindigkeit und der Anpresskraft, der Vortriebsgeschwindigkeit und dem Drehmoment sowie der Anpresskraft und dem Drehmoment in Abhängigkeit der Gesteinsarten analysiert. Anschließend wurde der dreidimensionale Zusammenhang der drei Maschinenparameter in Abhängigkeit der Gesteinsarten untersucht. Weiters wurde die Vortriebsgeschwindigkeit und die Anpresskraft in Abhängigkeit der Zerlegungsgrade des Gebirges analysiert. Abschließend wurde der Lerneffekt der TBM- Fahrer untersucht.

Es konnte kein signifikanter Zusammenhang der TBM- Daten mit den einzelnen Gesteinsarten ermittelt werden.

Unabhängig von den Gebirgsparametern erreicht die Vortriebsgeschwindigkeit bei einer Anpresskraft von 5.000 kN ein Maximum und fiel bei einer Steigerung der Anpresskraft ab. Die Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nur geringfügig durch einen höheren Zerlegungsgrad bedingt und ist vermutlich auch auf einen Lerneffekt im weitesten Sinn zurückzuführen.

Abstract

This Master Thesis is a contribution to optimize tunnelling projects, which use tunnel boring machines.

The aim of this master thesis was to analyse the interrelationship between the data of a tunnel boring machine and the surrounding rock mass using the example of the headrace tunnel of the power plant Hieflau. The machine data used for the analysis were automatically registered by the TBM.

The TBM data are the net driving speed in meters per hour, the thrust gross in kN and the torque in kNm. These data were used for the analysis of the correlation. After a first editing, they were statistically evaluated. The analysed parameters of the rock mass are the rock type and the degree of separation.

The linear correlations between the driving speed and the thrust gross, the driving speed and the torque and the thrust gross and the torque were made against the different rock types. Subsequently the three-dimensionally interrelationship of the three machine data against the rock types was analysed. Moreover the driving speed and the thrust gross dependent on the degree of separation of the rock mass were investigated. Finally the learning effect of the TBM drivers was examined.

No significant relationship between the TBM data and the different rock types could be determined.

Irrespective of the rock parameters the driving speed attains a maximum at a thrust gross of 5,000 kN. The increase of the tunneling speed is with a high probability only slightly offset by a greater degree of separation, and is probably caused by a learning effect.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Aufgabenstellung | 3 |
| 2 | Allgemeine Beschreibung des Kraftwerks Hieflau..... | 4 |
| 2.1 | Erste Ausbaustufe | 4 |
| 2.2 | Erweiterung des Kraftwerks | 5 |
| 2.3 | Triebwasserstollen | 7 |
| 2.3.1 | Trassierung | 7 |
| 2.3.2 | Baudurchführung | 7 |
| 3 | Geologische Verhältnisse..... | 11 |
| 3.1 | Übersicht..... | 11 |
| 3.2 | Geologisches Stollenband..... | 13 |
| 3.3 | Geotechnische Homogenbereiche..... | 15 |
| 3.3.1 | Nach Gesteinsart..... | 15 |
| 3.3.2 | Nach Zerlegungsgraden..... | 17 |
| 4 | Erhebung der TBM- Daten..... | 19 |
| 4.1 | Datensammlung | 19 |
| 4.2 | Maßgebende Maschinenparameter | 21 |
| 4.2.1 | Anpresskraft [kN]..... | 21 |
| 4.2.2 | Drehmoment [kNm] | 22 |
| 4.2.3 | Vortriebsgeschwindigkeit [m/h]..... | 22 |
| 5 | Untersuchung der Zusammenhänge der Maschinenparameter nach Gesteinsarten..... | 23 |
| 5.1 | Statistische Untersuchung der Daten, Boxplots..... | 23 |
| 5.2 | Korrelation | 28 |
| 5.2.1 | Korrelationskoeffizienten | 28 |
| 5.2.2 | Streudiagramme..... | 31 |
| 5.3 | Dreidimensionale Analyse..... | 42 |
| 5.3.1 | Dreidimensionale Flächen | 42 |

| | | |
|-------|---|------|
| 5.3.2 | Schnitte der Flächen | 51 |
| 5.4 | Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse..... | 60 |
| 6 | Analyse der Vortriebsgeschwindigkeit und der Anpresskraft in Abhängigkeit von der Gebirgszerlegung..... | 61 |
| 6.1 | Statistische Untersuchung, Boxplots | 62 |
| 6.1.1 | Vortriebsgeschwindigkeit..... | 62 |
| 6.1.2 | Anpresskraft | 65 |
| 6.2 | Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit | 70 |
| 6.3 | Analyse der Vortriebsgeschwindigkeit über die Stollenlänge | 74 |
| 6.4 | Analyse der Anpresskraft über die Stollenlänge..... | 76 |
| 6.4 | Dreidimensionale Analyse | 78 |
| 6.5 | Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 82 |
| 7 | Lerneffekt der TBM- Fahrer | 83 |
| 7.1 | Annäherung des Effektes der Eingewöhnung und des Trainings | 83 |
| 8 | Interpretation und Schlussfolgerungen | 86 |
| | Literaturverzeichnis | I |
| | Abbildungsverzeichnis | III |
| | Tabellenverzeichnis | VI |
| | Planverzeichnis | VII |
| | Anhang | VIII |

1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Zusammenhang zwischen den Parametern der Tunnelbohrmaschine und dem umliegenden Gebirge anhand des Triebwasserstollens des Kraftwerks Hieflau zu finden. Gibt es überhaupt einen Zusammenhang oder gibt es nur einen Zusammenhang der Daten untereinander, und ist die Änderung der Daten über die Länge des Stollens ein reiner Lerneffekt des Maschinenfahrers?

Das Erkennen solcher Zusammenhänge kann zur Optimierung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im maschinellen (kontinuierlichen) Tunnelbau dienen.

Die Parameter der TBM, die zur Analyse herangezogen werden, sind die Anpresskraft, das Drehmoment und die Nettovortriebsgeschwindigkeit, als Gebirgsparameter werden die Gesteinsart und der Zerlegungsgrad herangezogen.

2 Allgemeine Beschreibung des Kraftwerks Hieflau

2.1 Erste Ausbaustufe

Seit mehr als 50 Jahren wird an der steirischen Enns Wasserkraft als Energiequelle genutzt. Die Enns tritt im Gesäuse als typischer Gebirgsfluss mit rasch fließendem, sauerstoffreichem Wasser auf. 1956 ging das Kraftwerk Hieflau in Betrieb und liefert seitdem einen gesicherten Beitrag zur Stromversorgung in der Steiermark. Die Abbildung 1 zeigt einen Übersichtsplan des Kraftwerks Hieflau.

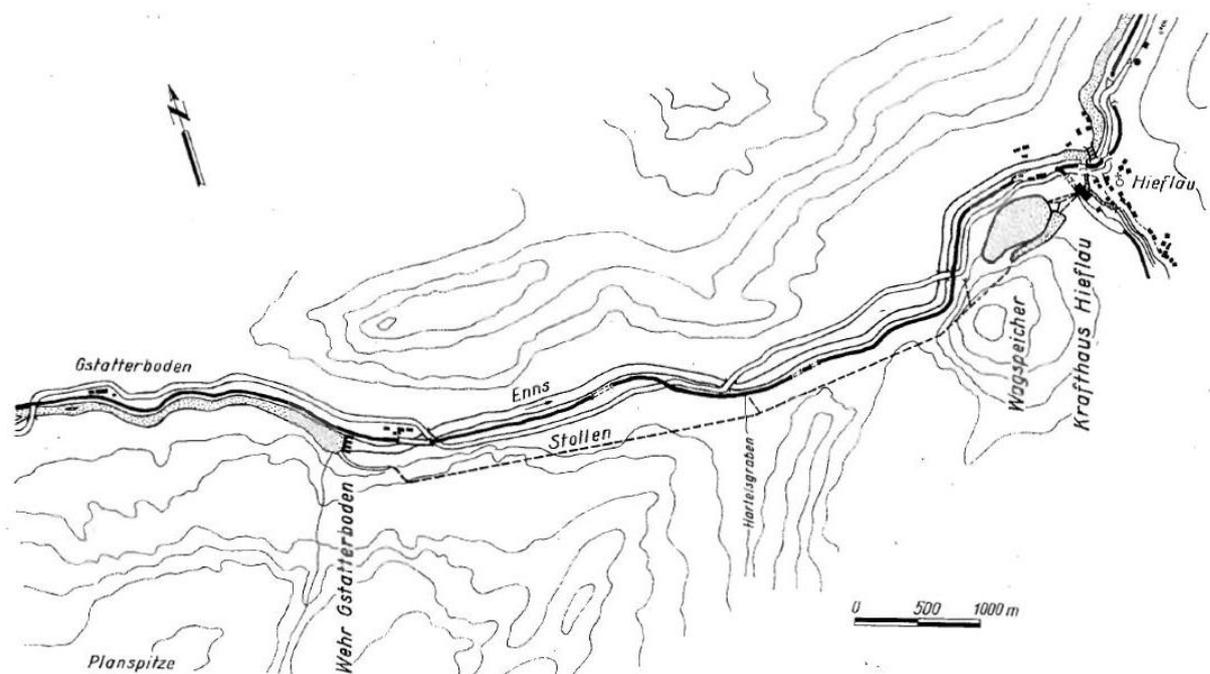


Abbildung 1 Lage des Kraftwerks Hieflau (Selden, 1967)

Bei diesem Kraftwerk handelt es sich um ein Mitteldruck- Ausleitungskraftwerk mit einem Tagesspeicher. Rund sechs Kilometer entfernt vom Krafthaus wird am Wehr Gstatterboden das Wasser mittels eines Einlaufbauwerks aus der Enns entnommen. Durch einen 0,5 km langen offenen Oberwasserkanal und einen 5,6 km langen Triebwasserstollen gelangt das Wasser in das Wasserschlossgerinne. Das Wasserschlossgerinne steht mit dem Tagesspeicher Wag über Pumpen und mit dem Krafthaus über direkte Kraftabstiege in Verbindung. Das ankommende Triebwasser kann daher entweder direkt in das Krafthaus geleitet, oder im Speicher Wag zwischengespeichert werden. Die Speicherkapazität von 1,65 Mio. m³ ermöglicht eine Anpassung des Kraftwerkseinsatzes an den tatsächlichen

Stromverbrauch (Selden, 1967). Die Fallhöhe des Kraftabstiegs beträgt 85 m. Das Krafthaus Hieflau besitzt drei Maschinensätze mit vertikaler Welle. Jeder Maschinensatz ist mit einer Francis- Turbine mit einem Nenndurchfluss von 30 m³/s ausgestattet. Der Zulauf zum ersten Maschinensatz erfolgt direkt aus dem Wasserschloss. Der zweite Maschinensatz wird durch einen Zulauf aus dem Wasserschloss und dem Speicher Wag gespeist. Der dritte Maschinensatz steht in direkter Verbindung mit dem Speicher Wag. Somit können zwei Turbinen direkt aus dem Wasserschloss und damit aus dem Triebwasserstollen voll betrieben werden und die dritte Turbine bei Bedarf durch den Speicher (Tamerl, 2006).

2.2 Erweiterung des Kraftwerks

Aufgrund des steigenden Stromverbrauches wurde es notwendig, das Kraftwerk zu erweitern, da es aus heutiger Sicht unterdimensioniert ist. An 180 Tagen im Jahr könnte mehr Wasser der Enns entnommen werden als bisher und im Krafthaus zur Stromgewinnung genutzt werden. Eine optimale Dimensionierung würde an zirka 20 Tagen im Jahr einen Überlauf vorsehen. Ein Nadelöhr bildete der bestehende Triebwasserstollen, dessen größtmöglicher Durchfluss 60 m³/s betrug. Das Krafthaus hätte jedoch mit den drei vorhandenen Maschinensätzen 90 m³/s verarbeiten können. Um diese Engstelle zu überwinden, sah die Erweiterung des Kraftwerkes im Wesentlichen den Bau eines zweiten Triebwasserstollens vor. Der Wassereinzug zur Stromerzeugung konnte somit um 30 m³/s erhöht werden, womit es zu einer Erhöhung des Regelarbeitsvermögens von 108 Millionen Kilowattstunden pro Jahr kommt. Zusätzlich zum neuen Triebwasserstollen waren folgende Baumaßnahmen vorgesehen:

- Die Adaptierung und Sanierung des Einlaufwehrs Gstatterboden
- Errichtung eines Wehrkraftwerks Gstatterboden, um auch die Restwassermenge zur Stromerzeugung zu nutzen
- Errichtung einer Fischtreppe um das Wehr Gstatterboden
- Asphaltierung des offenen Wasserschlossgerinnes im Bereich Wagterrasse
- Direktverbindung des Wasserschlosses mit dem dritten Maschinensatz im Krafthaus Hieflau, um das Triebwasser aus dem neuen Stollen direkt in einer Turbine verarbeiten zu können.

Abbildung 2 gibt eine schematische Übersicht über das bestehende Kraftwerk (blau) und die geplanten Erweiterungen (türkis).

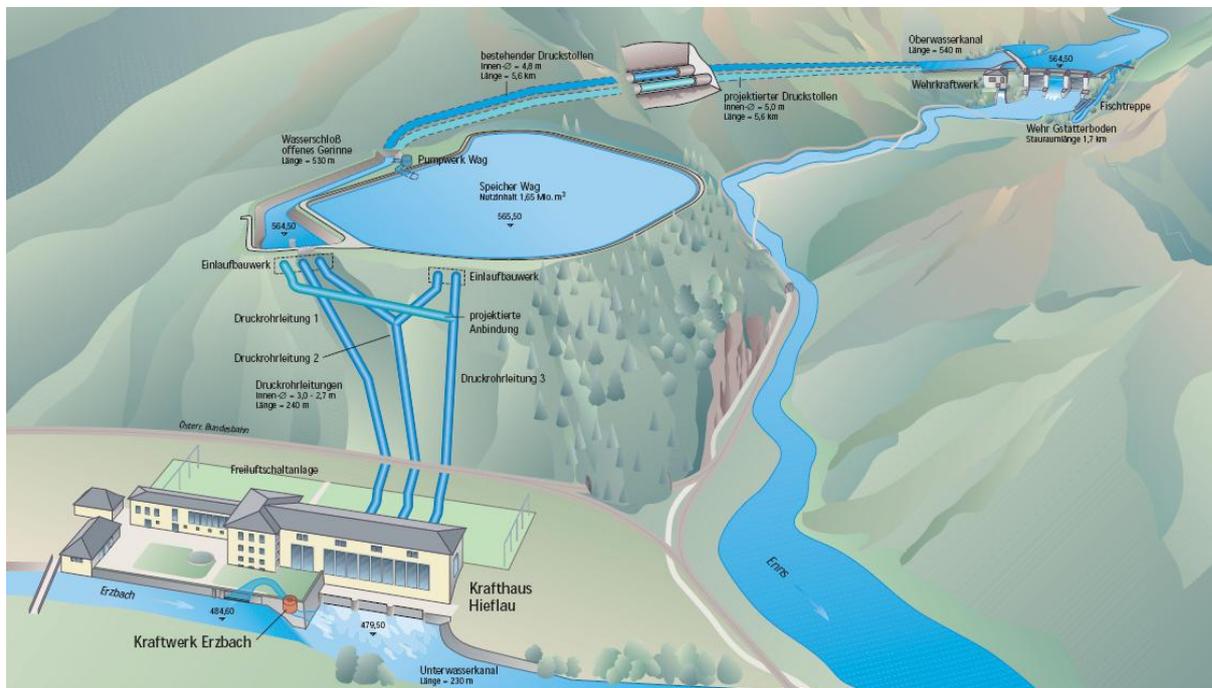


Abbildung 2 Schematische Darstellung Kraftwerk Hieflau (Verbund Austrian Hydro Power, 2009)

Im Frühjahr 2006 begannen die Vorbereitungen zum Wasserrechtsverfahren und wurden im Herbst desselben Jahres abgeschlossen. Die Ausschreibung der Hauptarbeiten erfolgte im Jänner und Februar 2007. Die Vergabe erfolgte im Mai 2008. Im Juli 2008 begann der Vortrieb der Tunnelbohrmaschine vom Fensterstollen Wag aus (Tamerl, 2007).

Der alte Stollen weist ein Hufeisenprofil mit einer Querschnittsfläche von $19,5 \text{ m}^2$ auf. Auch nach 50 Jahren Betrieb befindet sich der Stollen in einem guten Zustand. Der neue Stollen mit einem Innendurchmesser von $5,6 \text{ m}$ wurde kontinuierlich mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) aufgeföhren und mit Tübbingen (Betonfertigteilen) ausgekleidet. Die Bereiche, in denen ein zyklischer Vortrieb vorgesehen war, wurden mittels Sprengvortrieb vorgetrieben und mit einer Ortbetoninnenschale versehen.

Die Trasse des neuen Stollens verläuft weitgehend parallel zum bestehenden Stollen (vgl. Abbildung 2 Schematische Darstellung Kraftwerk Hieflau (Verbund Austrian Hydro Power, 2009)). Die prognostizierten geologischen Verhältnisse wiesen günstige gebirgsmechanische Verhältnisse auf. Nur im Portalbereich Gtatterboden und im Bereich des Hartelsgrabens war mit Lockergesteinen mit schwierigen Verhältnissen zu rechnen. Der Portalbereich Gtatterboden wurde zyklisch aufgeföhren und im Bereich des Hartelsgrabens

wurde der kontinuierliche Vortrieb teilweise mit vorauseilenden Rohrschirmen unterstützt, die die Maschine schützten.

Das Kraftwerk Hieflau blieb während der geplanten Baumaßnahmen in Betrieb. Aufgrund des guten Zustandes des alten Triebwasserstollens waren keine Wasserübertritte zu befürchten.

2.3 Triebwasserstollen

2.3.1 Trassierung

Die Trasse des neuen Triebwasserstollens verläuft nahezu parallel zum alten Stollen. Der Abstand zwischen den beiden Röhren beträgt rund 20 m. Die beiden Stollen sind rund 5,6 km lang und die Neigung der Stollensohle beträgt konstant 1 ‰. Der alte Stollen weist ein Hufeisenprofil mit einer lichten Querschnittsfläche von 19,5 m² auf. Der neue Stollen wurde mit einer TBM aufgeföhren, der Durchflussquerschnitt beträgt rund 30 m². Der Vortrieb mittels TBM erfolgte vom 200 m langen Fensterstollen Wag aus, der konventionell mittels Sprengvortrieb aufgeföhren wurde und als Startpunkt für die TBM diente. Der Vortrieb des neuen Triebwasserstollens erfolgte von dort steigend in Richtung Wehr Gstatterboden. Vom Wehr Gstatterboden aus musste, aufgrund des anstehenden Lockermaterials, ein ca. 160 m langer Stollen, fallend in Richtung Speicher Wag, mit zyklischen Vortrieb aufgeföhren werden (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009).

2.3.2 Baudurchföhren

2.3.2.1 Beschreibung der Tunnelbohrmaschine und des Auskleidungssystems

Die Tunnelbohrmaschine war eine Hartgesteins- Doppelschild- Maschine des Typs ROBBINS DS- TBM Modell 194-272-2 mit einem Ausbruchsdurchmesser von 6,18 m. Die TBM setzt sich aus zwei Teilen zusammen: der eigentlichen TBM und dem Nachläufer. Der Nachläufer hatte eine Länge von rund 187 m. Die gesamte Vortriebseinheit war zirka 220 m lang. Am Bohrkopf befanden sich 43 Diskenmeißeln, die das anstehende Gebirge in sogenannten Chips ablösten. Im Schutz des Schildschwanzes erfolgte die endgültige Tunnelauskleidung mittels Tübbing im Parallellringsystem. Die Ver- und Entsorgung der Maschine erfolgte gleisgebunden. Im Nachläufer wurden Schienen verlegt, um einerseits das anfallende Aushubmaterial abzutransportieren und andererseits die Betonfertigteile an den Einbauort zu bringen. Die Tübbingauskleidung bestand aus vier Tübbingelementen pro Ring. Der trapezförmige Firststein bildete den Schlussstein. Der Sohlübbing verfügte über einen

zentralen Wassergraben und diente im Bauzustand als Auflager für den Gleisbetrieb und im Wartungsfall als Gehweg beziehungsweise Fahrbahn zur Inspektion (vgl. Abbildung 3).

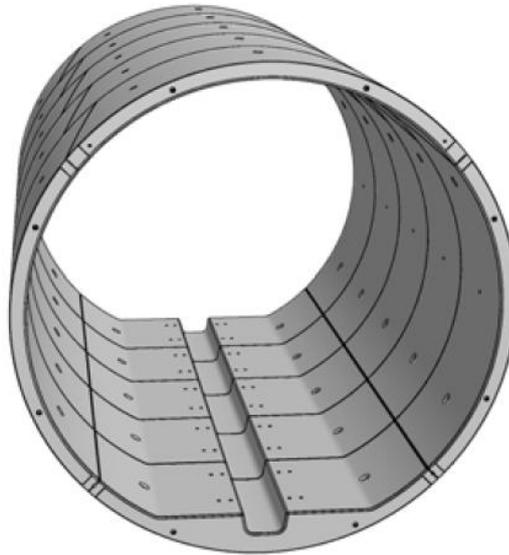


Abbildung 3 3D Ansicht Tübbingauskleidung (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009)

Die Ringbreite beträgt 1,8 m, die Dicke der Tübbinge ist 20 cm und der Innendurchmesser liegt bei 5,6 m. Abbildung 4 zeigt einen Längsschnitt des Tübbingausbaus. Der Ringspalt zwischen den Tübbingen und dem Gestein wurde mittels Perlkies verpresst. Der Perlkies wurde durch Verblasöffnungen in den Betonsegmenten gegen die Vortriebsrichtung eingeblasen. Die Kurvenfahrt wurde durch spezielle Korrekturtübbinge bewerkstelligt. Kleine Richtungsungenauigkeiten konnten mittels Beilagen in den Ringfugen korrigiert werden (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009).

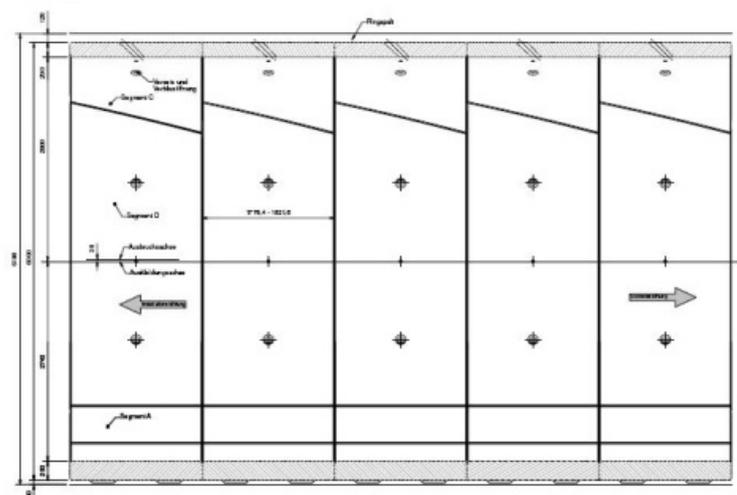


Abbildung 4 Längsschnitt Tübbingausbau (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009)

2.3.2.2 Zusatzmaßnahmen im Abschnitt des Hartelsgrabens

Auf der Strecke des kontinuierlichen Vortriebes kam es zu einem etwa 40 m langen Lockergesteinsabschnitt im Bereich des Hartelsgrabens. Dabei handelt es sich um lokale, kalkalpine Komponenten, die in einer sandig, lehmigen Matrix eingebettet sind. Es sind aber auch einkörnige, rollige Lagen möglich, die zu einem Materialeintrag über die Ortsbrust oder den Schildmantel hätten führen können. Weiters wurden Wasserwegigkeiten mit 1,5- 2 l/s erwartet. Diese Wasserwegigkeiten bilden eine Gefahr des Ausfließens der feinkörnigen, bindigen Matrix und eine daraus resultierenden Auflockerung des Gefüges. Folgende Maßnahmen wurden getroffen:

- Vorentwässerung des Baugrundes
- Voraussicherung mittels Rohrschirm.

Vorentwässerung des Baugrundes

Vorausbohrungen dienen als Vorauserkundungsmaßnahmen, wodurch auch mögliche Wasserwegigkeiten frühzeitig erkannt werden. Es kann somit eine planmäßige Entwässerung erfolgen, bei der das Ausfließen der bindigen Matrix minimiert wird. Bei den Bohrungen handelt es sich um Drehschlagbohrungen, die über sogenannte Bohrgassen im Gripperschild und im Schildschwanz durchgeführt werden. Bei den Bohrgassen handelt es sich um 22 Öffnungen im oberen Teil des Schildschwanzes. Die Bohrungen können mit einem Winkel von 9-15 Grad zur Maschinenachse ausgeführt werden.

Voraussicherung mittels Injektionsrohrschirm

Das Rohrschirmverfahren ist grundsätzlich eine Sicherungsmethode für schwierig aufzufahrendes Gebirge, wird aber auch zur Setzungsminimierung angewendet. Dabei werden ca. 18 m lange Rohre in das Gestein vorausgebohrt und herkömmlich mit Zementmilch verpresst. Diese Rohre bilden eine Art Schirm, unter dem ein sicherer Vortrieb möglich ist. Bei den Bohrungen handelt es sich um sogenannte verrohrte Bohrungen mit einem Durchmesser von 89 mm durch die Bohrgassen des TBM- Schildes (vgl. Abbildung 5). Die Neigung der Bohrungen beträgt 9 Grad zur Maschinenachse. Die Rohre weisen eine hohe Steifigkeit auf. Daher kommt es zu einer guten Bohrgenauigkeit. Mittels Doppelpackern sind gezielte Injektionen möglich.

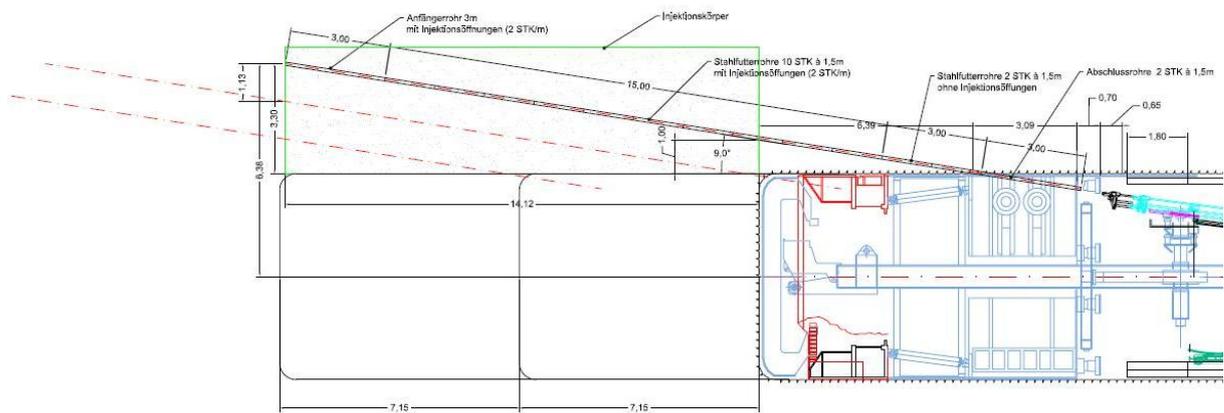


Abbildung 5 Längenschnitt Injektionsrohrschirm (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009)

Aufgrund der lehmigen Matrix ist die Injizierbarkeit beschränkt. Zementgebundene Injektionen lieferten hier nicht den gewünschten Erfolg, daher wurde auf Expansionschäume als Injektionsmittel zurückgegriffen. Diese Schäume haben eine geringe Viskosität und durch den hohen Expansionsdruck ausgezeichnete Penetrationseigenschaften. Dies führt zu einer festen Ver kittung der Festkörper untereinander.

Im Bereich des Hartelsgrabens kamen spezielle Tübbinge mit einem hohen statischen Tragvermögen zum Einsatz. Dies war notwendig, da sich durch die geringe Überlagerung und den Lockergesteinsbereich kein beziehungsweise kein ausreichendes Gesteinsgewölbe ausbilden konnte und somit das gesamte Gewicht der Überlagerung auf die Tübbinge wirkt. Die Umstellung auf die Spezialtübbinge erfolgte zirka 15 m vor dem prognostizierten Lockergesteinsbereich. Ab 50 m vor dem Lockergesteinsbereich wurde mit Tastbohrungen gestartet. Diese lieferten erste Rückschlüsse auf die tatsächliche Beschaffenheit und Verbundfestigkeit des Lockermaterials. Vor dem endgültigen Eintauchen der Tunnelbohrmaschine in den Störbereich wurde der erste Rohrschirm gesetzt, um die Maschine vor Einbrüchen zu schützen (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009).

3 Geologische Verhältnisse

3.1 Übersicht

Südlich des teilweise schluchtartig verengten Ennstals liegt das Kraftwerk Hieflau im Ostteil der kalkalpinen Gesäuseberge. Die Gesteine weisen eine triadische, kalkalpine Schichtfolge von Ramsaudolomit über Raibler Schichten und Dachsteindolomit auf. Darüber liegt Dachsteinkalk.

Dieses Schichtpaket fällt im Bereich des Triebwasserstollens mit etwa 30° nach Osten ein. Die Abbildung 6 zeigt einen geologischen Übersichtsplan der Region um das Kraftwerk Hieflau (Ampferer, 1935).

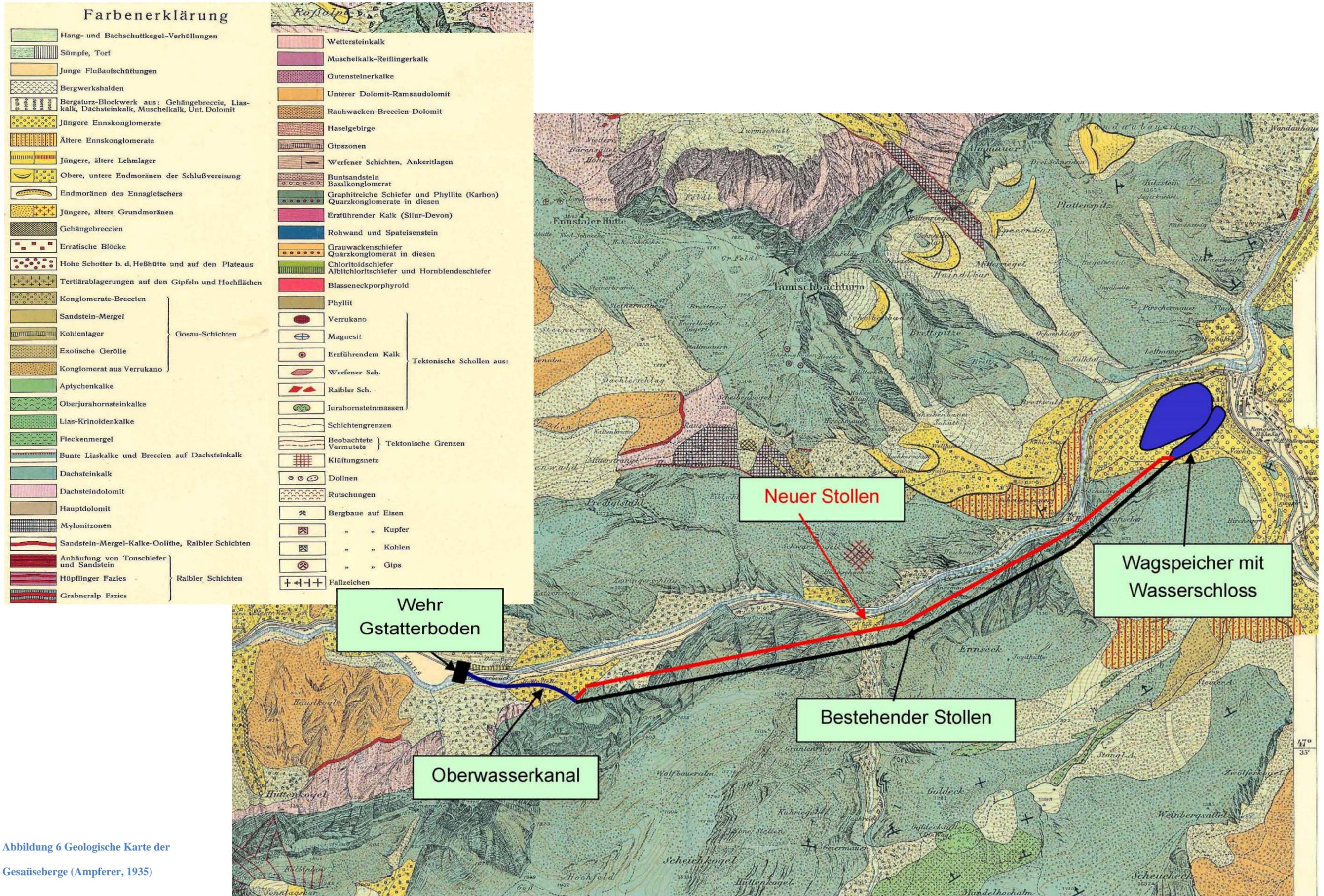
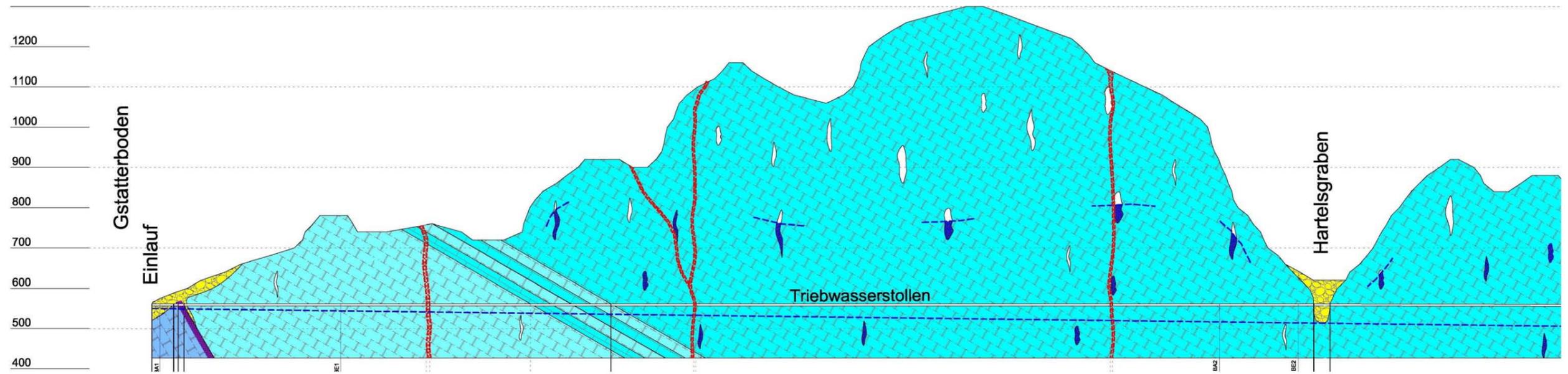


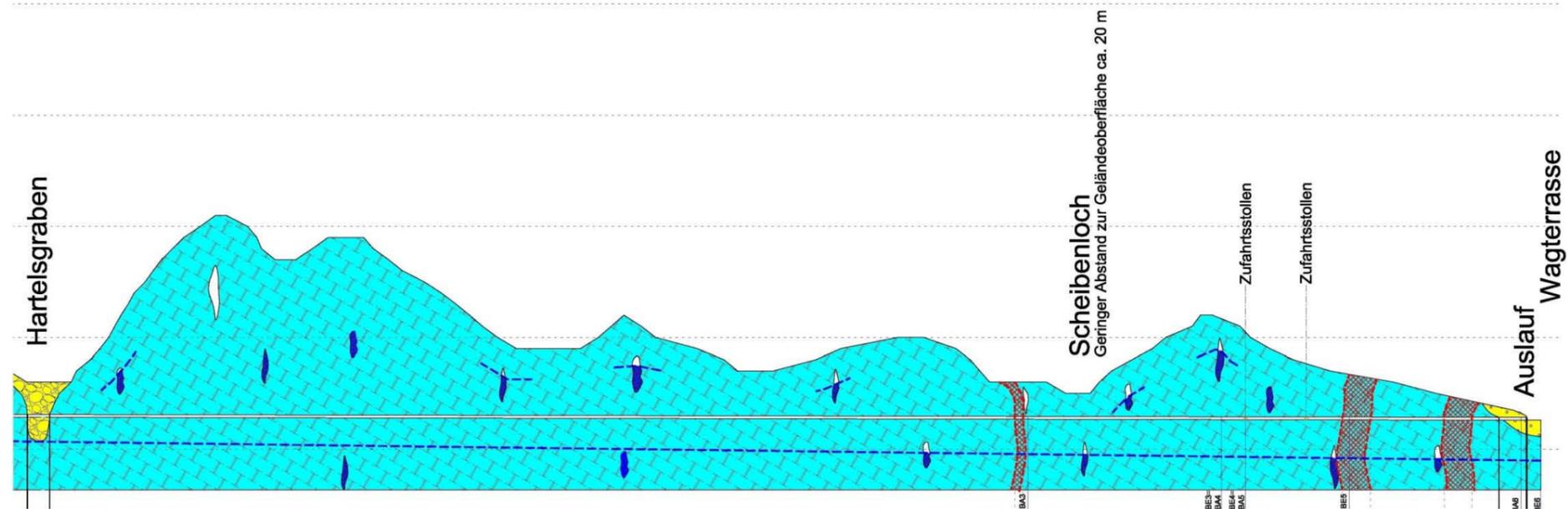
Abbildung 6 Geologische Karte der Gesäuseberge (Ampferer, 1935)

3.2 Geologisches Stollenband

Die Trassen der beiden parallel laufenden Triebwasserstollen durchlaufen die oben angeführte Gewölbestruktur. Der Vortrieb mittels TBM erfolgte von der Wagterrasse in Richtung Wehr Gstatterboden. Bei der Wagterrasse handelt es sich um eine eiszeitliche Terrasse. Die Trasse des Triebwasserstollens führt anfangs durch Dachsteinkalk. Der Dachsteinkalk weist eine sehr gute Qualität auf, da es sich um relativ reinen Kalkstein handelt. Dieser ist ein Sedimentgestein, welches sehr anfällig ist gegen chemische Verwitterung. Durch die Lösungstätigkeit von Sickerwässern entlang von Klüften und Schichtfugen entstehen im Kalkstein Karströhren beziehungsweise Karsthöhlen. Im Bereich des Dachsteinkalkes können daher Karsthöhlen angetroffen werden, die mit Sedimenten verfüllt oder auch mit Wasser gefüllt sein können. Es war daher mit Wasserzutritten an der Ortsbrust zu rechnen. Im Bereich TM 2175-2210 befindet sich der Hartelsgraben. Der Hartelsgraben ist eine tiefe Schlucht im Dachsteinkalk, die zum Teil mit Lockergestein verfüllt ist. Das Lockermaterial ist dicht gelagert und durch schluffig-sandiges Material verfüllt. Im Anschluss an den Hartelsgraben verläuft die Trasse wieder im Dachsteinkalk. In diesem Abschnitt wurden jedoch gegenüber dem Abschnitt des Dachsteinkalkes vor dem Hartelsgraben geringere Kluftabstände prognostiziert. Der Kluftabstand variiert zwischen 2 und 30 cm (Verbund Austrain Hydro Power.; Pöyry Infra GmbH, 2007). Anschließend an den Dachsteinkalk durchläuft die Trasse einen Abschnitt im Dachsteindolomit. Dolomit weist als Gestein zwar eine höhere Druckfestigkeit als Kalkstein auf ist aber ein sehr sprödes Gestein und daher vor allem in den nördlichen Kalkalpen stark zerlegt. Der Dachsteindolomit war daher mit der Tunnelbohrmaschine gut lösbar. Abbildung 7 zeigt den prognostizierten geologischen Längenschnitt, dem die geologischen Aufzeichnungen des ersten Triebwasserstollens zugrunde liegen.



| | |
|--|---|
| | Bergwasserspiegel (vermutet) |
| | Karsthohlräume trocken bzw. eventuell wasserführend |



| Tektonische Einheit | Stratigraphische Gliederung | Gebirgsart | Beschreibung | | |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---|---|--|
| Oberostalpin - Nördliche Kalkalpen | Mürzpalpendecke | GA 1 | Ramsauer Dolomit | hell- weißlicher Dolomit Kleinklüftig intensiv zerlegt (zuckerförmig) | |
| | | GA 2 | Raibler Schichten | dunkle Tonschiefer und Sandsteine stark durchbewegt. | |
| | | GA 3 | Dachsteindolomit und Übergangzone zu Dachsteinkalk | hellgrauer, massig- gebankter Dolomit mit teilweise intensiver Kleinklüftung. | |
| | | GA 4 | Dachsteinkalk | massige, bankige Kalke, kompakt, weitestgehend geklüftet. | |
| | | GA 5 | Störungszonen | stark zerüttete Bereiche oft auch an Verkarstung gebunden, tw. in Vergesellschaftung mit Tonschiefer oder brecciosen, tonmergelig verklüfteten Umgebungsmaterial. | |
| Quartär | GA 6-1 | Schutthalde, Blockschutt | sandig, kiesiger, blockiger Hangschutt mit kantiger Kornform (mehrere m³ große Blöcke) | | |
| | GA 6-2 | Terrassenschotter | sandig- kiesige Flussablagerungen mit vereinzelt Blöcken, gerundete Komponenten, auch konglomeratische Verklüftung möglich. | | |

Abbildung 7 Geologischer Prognoselängenschnitt (Verbund Austrian Hydro Power, 2006)

3.3 Geotechnische Homogenbereiche

3.3.1 Nach Gesteinsart

Zur weiteren Untersuchung wurden die Daten in 5 Bereiche unterteilt (vgl. Abbildung 8).

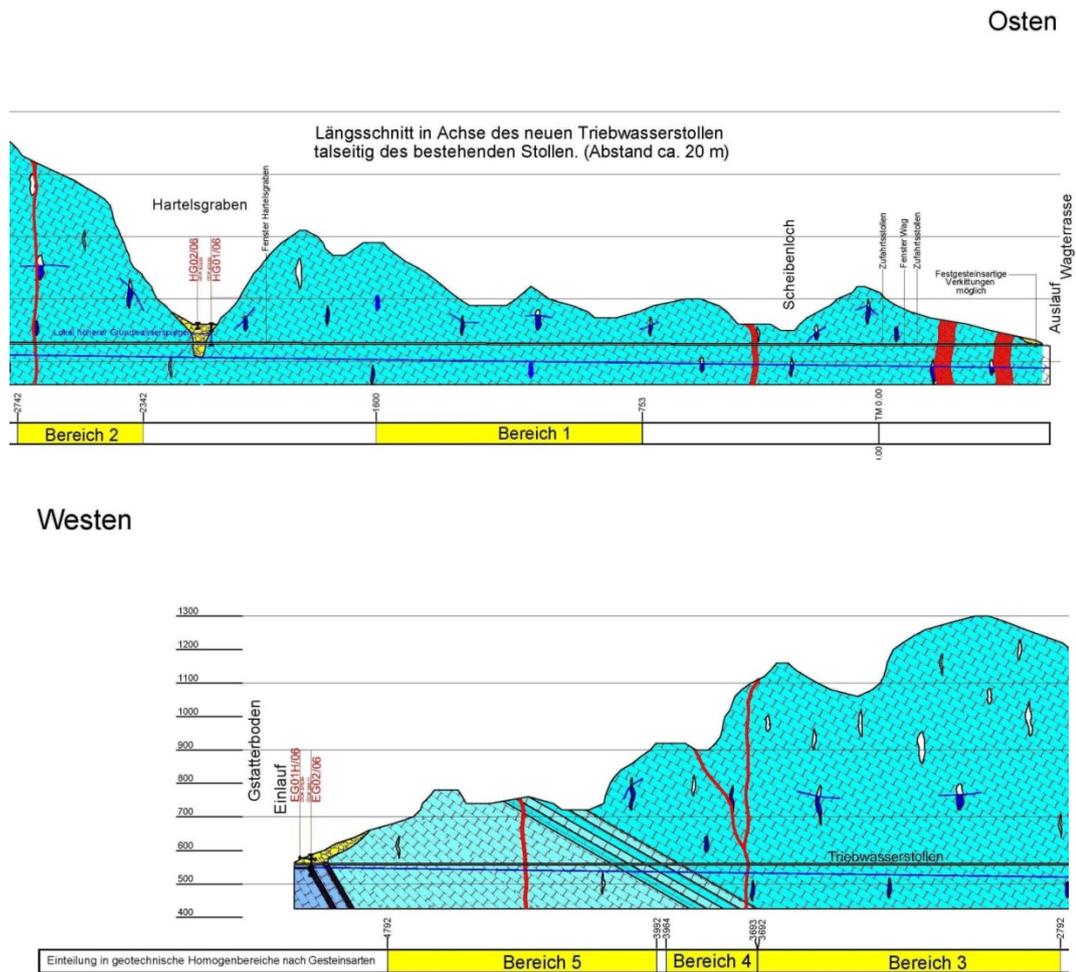


Abbildung 8 Einteilung in geotechnische Homogenbereiche nach Gesteinsart

- Bereich 1 von TM 753 bis 1600
 Der Bereich 1 wurde so gewählt, dass der Anfahrbereich der TBM nicht berücksichtigt wurde, da in diesem Bereich die Daten sehr stark variieren und sich deutlich von denen im weiteren Verlauf unterscheiden. Daraus lässt sich schließen, dass der TBM-Fahrer die Maschine testen musste, um ihr Verhalten im umliegenden Gebirge zu erkennen. Die Länge des Bereiches 1 beträgt 847m. In diesem Bereich wurde weitständig geklüfteter Dachsteinkalk mit tonig belegten Klüften aufgefahren. Der Trennflächenabstand betrug im Wesentlichen 10 bis 30 cm. Es gab nur zwei kurze

Abschnitte von je etwa 30 Metern, in denen der Trennflächenabstand kleiner war und zwischen 2 bis 10 cm lag. Weiters traten gefügebedingte Nachbrüche auf.

Zwischen den Bereichen 1 und 2 kam es aufgrund des Hartelsgraben zu zahlreichen Ausfällen in der Datenaufzeichnung. Dieser Bereich wurde daher nicht weiter betrachtet.

- Bereich 2 von TM 2342 bis 2742

Auch im Bereich 2 mit einer Länge von 400 m wurde Dachsteinkalk angefahren. Die Kluftabstände betrugen zwischen 2 und 30 cm. Außerdem war für diesen Bereich nicht nur gefügebedingt nachbrüchiges Gebirge prognostiziert, sondern es war auch mit Bergschlag zu rechnen.

Um den Einfluss des Überganges zwischen dem Bereich, in dem Bergschlag erwartet wurde, und dem daran anschließenden auszublenden, wurde zwischen den Bereichen 2 und 3 ein Abschnitt von 50 Metern nicht zur weiteren Analyse herangezogen.

- Bereich 3 von TM 2792 bis 3692

Im Bereich 3 trat ebenfalls Dachsteinkalk auf. Die Länge des Abschnittes beträgt 900m. Die Kluftabstände werden jedoch enger und variierten hauptsächlich zwischen 2 und 10 cm. Nur in wenigen kurzen Bereichen traten größere Kluftabstände auf. Es war mit Störungen durch Tonschieferlinsen zu rechnen.

- Bereich 4 von TM 3693 bis 3964

Der Bereich 4 erstreckt sich über eine Länge von 271 m und ist somit der kürzeste Abschnitt. In diesem Teil erfolgt der Übergang von Dachsteinkalk zu Dachsteindolomit. Der Kluftabstand betrug am Anfang 10 bis 30 cm und verkleinerte sich bis zum Ende hin auf 2 bis 10 cm. Es war mit gefügebedingten Nachbrüchen zu rechnen.

Zwischen den Bereichen 4 und 5 wurden keine Daten aufgezeichnet.

- Bereich 5 von TM 3992 bis 4792

Der letzte Bereich ist 800 m lang und erstreckt sich vollständig im Dachsteindolomit. Der Kluftabstand ändert sich anfangs öfters zwischen 2 bis 10 cm und 10 bis 30 cm. Anschließend bleibt der Kluftabstand für etwa 300 Meter im Bereich zwischen 10 bis 30 cm und in den letzten etwa 300 Metern beträgt der Kluftabstand wieder 2 bis 10 cm.

3.3.2 Nach Zerlegungsgraden

Die quantitative Angabe des Zerlegungsgrads eines Gesteins nach Tentschert (1984) setzt sich aus der Schieferung bzw. Schichtung, dem Kluftabstand und der Kluftbeschaffenheit zusammen (vgl. Abbildung 9).

| 1. SCHICHTUNG/ SCHIEFERUNG | | 2. KLÜFTUNG | | 3. KLÜFT- BESCHAFFENHEIT | |
|-------------------------------|---------|---------------------|---------|-----------------------------|----|
| Trennflächenabstand | Punkte | Trennflächenabstand | Punkte | Punkte | |
| >200 cm | 0 | >200 cm | 0 | Glatte Klüfte, Harnisch | 2 |
| 200 – 60 cm | 1 – 3 | 200 – 60 cm | 1 – 3 | Einzelne Klüfte, mm-Belag | 4 |
| 60 – 20 cm | 3 – 7 | 60 – 20 cm | 3 – 7 | Einzelne Klüfte, cm-Belag | 6 |
| 20 – 6 cm | 7 – 11 | 20 – 6 cm | 7 – 11 | Mehrere Klüfte, mm-Belag | 9 |
| 6 – 2 cm | 11 – 14 | 6 – 2 cm | 11 – 14 | Mehrere Klüfte, cm-Belag | 12 |
| < 2 cm | 15 | < 2 cm | 15 | cm-Belag in Abst. < 1 m | 15 |
| | | | | Störungszonen > 50 cm | 20 |

$$\text{Zerlegungsgrad} = \text{Summe 1.} + \text{2.} + \text{3.} \quad [\text{Wert bis 50}]$$

Abbildung 9 Bestimmung des Zerlegungsgrades nach Tentschert (1984) (Bach, 2000)

Da keine Aufzeichnungen über die Schichtung beziehungsweise Schieferung vorliegen, wurde ein Mittelwert für die Schichtung angenommen. Der maximale Wert, den die Schichtung erreichen kann, beträgt 15. Es wurden daher wurden 7,5 Punkte für die Schichtung gewählt. Die Kluftbeschaffenheit variiert laut Prognose zwischen „Mehrere Klüfte, mm-Belag“ und „Mehrere Klüfte, cm-Belag“. Daher wurden 10,5 Punkte für die Bestimmung des Zerlegungsgrades für die Kluftbeschaffenheit angenommen. Der maximale Wert, den der Zerlegungsgrad annehmen kann, beträgt 50.

Die Einteilung des Gesteins nach dem Zerlegungsgrad erfolgt gemäß drei verschiedenen Quellen:

- Laut Prognose: Der prognostizierte Kluftabstand des neuen Stollens basiert auf den Aufzeichnungen über den ersten Stollen. Da die beiden Stollentrassen nur etwa 20 m voneinander entfernt liegen, sollte die Prognose eine gute Annäherung an den tatsächlichen Kluftabstand liefern. Im Prognoselängenschnitt wurde der Kluftabstand in drei Klassen geteilt. Die Klasse 1 weist einen Kluftabstand von 10-30 cm auf, die Klasse 2 einen von 2- 10 cm und die Klasse 3 einen von unter 2 cm. Für die Klasse 1 wurden 8 Punkte für die Klüftung gewählt. Der Zerlegungsgrad ergibt daher 26 Punkte. Nach Abbildung 9 wurden für die Klasse 2 12 Punkte für die Klüftung gewählt. Der Zerlegungsgrad der Klasse 2 beträgt 30. Die Klasse 3 weist einen Zerlegungsgrad von 33 auf. (Verbund Austrain Hydro Power.; Pöyry Infra GmbH, 2007)
- Laut Aufzeichnungen der Geologen: Bei einem maschinellen Vortrieb mit einer Schildmaschine ist es schwierig, den Kluftabstand während des Vortriebes zu bestimmen, da der Einbau der Tübbinge im Schutz des Schildmantels geschieht und das Gestein nie sichtbar ist. Zudem konnten die Geologen nicht täglich vor dem Bohrkopf das Gebirge kartieren und daher nur punktuell Aussagen zum Kluftabstand machen. Die vorliegenden Aufzeichnungen geben nur einen Hinweis auf den Zerlegungsgrad beziehungsweise Karst jedoch keine genauen quantitativen Angaben. Die Größen des Zerlegungsgrades wurden aus der Prognose übernommen. Der Zerlegungsgrad 26 beschreibt die Abschnitte mit einem „normalen“ Kluftabstand und der Zerlegungsgrad 30 beschreibt jene, in welchen die Geologen Hinweise auf starke Zerlegung und Karst gefunden haben. (Bilak, 2009)
- Laut Aufzeichnungen der Arbeitsgemeinschaft (ARGE): Die ARGE hat während des gesamten Vortriebs sogenannte Vortriebsprotokolle geführt. In diesen Protokollen wurden unter anderem Störungszonen beziehungsweise stark zerlegte Bereiche notiert (Bilak, 2009). Diese stark zerlegten Bereiche werden im Zerlegungsgrad 30 zusammengefasst. Die restlichen Bereiche, wo keine Störungen notiert wurden, werden im weiteren mit Zerlegungsgrad 26 beschrieben.

4 Erhebung der TBM- Daten

4.1 Datensammlung

Während des gesamten Vortriebes der TBM wurden folgende Daten automatisch in einer Excel-Tabelle aufgezeichnet:

- Datum (Date) [tt.mm.jjjj]
- Zeit (Time) [hh:mm:ss]
- Stationierung (Approx. Chainage) [m]
- Umdrehungen des Bohrkopfes (CHD Speed) [Rpm]
- Drehmoment (CHD Torque) [kNm]
- Brutto Anpresskraft (CHD Thrust Gross) [kN]
- Penetrationsrate (Penetration Rate) [mm/min]
- Penetration (Penetration) [mm/U]
- Perlkies (Pea gravel) [m³]
- Leistung der TBM (Leistung TBM) [kW].

Die Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Excel- File.

Tabelle 1 Ausschnitt Datalogger

Doppelschild - TBM Robbins 194-272-2, Ø6,18m

Tagesbericht Data Logger Import

| | |
|--------------------|-------------------|
| Datum | 19.10.2008 |
| Bericht Nr. | 188 |

| ÖBA | | | | | | | | | |
|--------------|------------|------------------|-----------|------------|------------------|------------------|-------------|-------------------|--------------|
| Date | Time | Approx. Chainage | TBM | | | | | Perlkies | Leistung TBM |
| | | | CHD Speed | CHD Torque | CHD Thrust Gross | Penetration Rate | Penetration | Pea gravel | |
| [tt.mm.jjjj] | [hh:ss:mm] | [m] | [Rpm] | [kNm] | [kN] | [mm/min] | [mm/U] | [m ³] | [kW] |
| 19.10.2008 | | 35,95 | 6,91 | 1.802 | 10.340 | 114 | 17 | 32,402 | |
| | | 3335,06 | 7,25 | 1.259 | 8.199 | 53 | 7 | [U] | |
| | | 3355,89 | 7,49 | 1.875 | 10.670 | 120 | 18 | 4.696 | |
| | | 3319,94 | 0,58 | 73 | 330 | 6 | 1 | | |
| 19.10.2008 | 08:00:00 | 3.319,94 | 7,29 | 1.699 | 9.460 | | | | |
| 19.10.2008 | 08:00:10 | 3.319,95 | 7,30 | 1.699 | 9.350 | 72,00 | 10 | | |
| 19.10.2008 | 08:00:20 | 3.319,96 | 7,20 | 1.724 | 9.680 | 60,00 | 8 | | |
| 19.10.2008 | 08:00:30 | 3.319,97 | 7,32 | 1.187 | 8.800 | 48,00 | 7 | | |
| 19.10.2008 | 08:00:40 | 3.319,97 | 7,27 | 1.763 | 9.350 | 66,00 | 9 | | |
| 19.10.2008 | 08:00:50 | 3.319,98 | 7,30 | 1.492 | 8.910 | 42,00 | 6 | | |
| 19.10.2008 | 08:01:00 | 3.319,99 | 7,28 | 1.578 | 9.130 | 48,00 | 7 | | |
| 19.10.2008 | 08:01:10 | 3.320,00 | 7,31 | 1.256 | 8.690 | 42,00 | 6 | | |
| 19.10.2008 | 08:01:20 | 3.320,01 | 7,31 | 1.342 | 8.250 | 84,00 | 11 | | |
| 19.10.2008 | 08:01:30 | 3.320,02 | 7,30 | 1.385 | 8.360 | 54,00 | 7 | | |
| 19.10.2008 | 08:01:40 | 3.320,03 | 7,28 | 1.496 | 8.800 | 36,00 | 5 | | |
| 19.10.2008 | 08:01:50 | 3.320,04 | 7,31 | 1.393 | 8.030 | 48,00 | 7 | | |
| 19.10.2008 | 08:02:00 | 3.320,04 | 7,32 | 1.264 | 8.030 | 66,00 | 9 | | |
| 19.10.2008 | 08:02:10 | 3.320,05 | 7,26 | 1.600 | 8.580 | 48,00 | 7 | | |
| 19.10.2008 | 08:02:20 | 3.320,06 | 6,89 | 1.772 | 9.460 | 66,00 | 10 | | |
| 19.10.2008 | 08:02:30 | 3.320,07 | 7,34 | 882 | 7.260 | 36,00 | 5 | | |
| 19.10.2008 | 08:02:40 | 3.320,08 | 7,30 | 937 | 7.150 | 42,00 | 6 | | |
| 19.10.2008 | 08:02:50 | 3.320,09 | 7,30 | 869 | 6.930 | 30,00 | 4 | | |
| 19.10.2008 | 08:03:00 | 3.320,10 | 7,27 | 1.359 | 8.250 | 42,00 | 6 | | |
| 19.10.2008 | 08:03:10 | 3.320,10 | 7,28 | 1.458 | 8.800 | 66,00 | 9 | | |
| 19.10.2008 | 08:03:20 | 3.320,11 | 7,30 | 1.170 | 7.920 | 24,00 | 3 | 0,014 | |
| 19.10.2008 | 08:03:30 | 3.320,12 | 7,32 | 1.320 | 8.140 | 66,00 | 9 | 0,021 | |
| 19.10.2008 | 08:03:40 | 3.320,13 | 7,31 | 1.458 | 8.800 | 60,00 | 8 | 0,014 | |
| 19.10.2008 | 08:03:50 | 3.320,14 | 7,31 | 1.531 | 8.910 | 60,00 | 8 | 0,014 | |
| 19.10.2008 | 08:04:00 | 3.320,15 | 7,32 | 1.548 | 9.020 | 66,00 | 9 | 0,014 | |
| 19.10.2008 | 08:04:10 | 3.320,16 | 7,29 | 1.651 | 9.240 | 54,00 | 7 | 0,021 | |

Die Messung und Aufzeichnung der Daten im 10 Sekunden Intervall (auch bei Stillstand der Maschine) ergab eine sehr große Datenmenge. Zur Verarbeitung dieser Datenmenge wurden die Daten anfangs jeweils auf 1 Vortriebsmeter bezogen und gemittelt. Diese Zuordnung erfolgte mit Hilfe des dokumentierten Zeitpunktes und der Stationierung. Die Leistung der Tunnelbohrmaschine und die verarbeitete Menge Perlkies wurden nur stellenweise aufgezeichnet. Diese Werte fehlen über große Bereiche.

Die Tunnelbohrmaschine wurde, wie bereits gezeigt, am Fensterstollen Wag gestartet und in Richtung Gstatterboden vorgetrieben, entgegen der eigentlichen Stollenkilometrierung. Daher entspricht der TBM- Stollenmeter 0,00 der eigentlichen Stollenstationierung 5.092,12. Die Daten wurden von TBM- Stollenmeter 354 bis Stollenmeter 4.914 aufgezeichnet.

Während der gesamten Bohrzeit kam es nur zu wenigen Ausfällen der automatischen Datenaufzeichnung. An den in Tabelle 2 aufgelisteten Stellen wurden keine Daten registriert.

Tabelle 2 Ausfälle der automatischen Datenaufzeichnung

| Anfang | Ende | Anzahl der fehlenden Datensätze |
|----------|----------|---------------------------------|
| TM 558 | TM 592 | 34 |
| TM 872 | TM 896 | 24 |
| TM 1.626 | TM 1.646 | 20 |
| TM 1.863 | TM 1.881 | 18 |
| TM 1.955 | TM 1.971 | 16 |
| TM 1.992 | TM 2.113 | 121 |
| TM 2.190 | TM 2.199 | 9 |
| TM 2.232 | TM 2.296 | 64 |
| TM 3.965 | TM 3.983 | 18 |

4.2 Maßgebende Maschinenparameter

Folgende Parameter wurden zur weiteren Analyse näher betrachtet:

4.2.1 Anpresskraft [kN]

Die Anpresskraft dient als Regelungsgröße für den Vortrieb und wird vom Maschinenfahrer konstanter Drehzahl manuell eingestellt. Die Anpresskraft ist daher nicht ausschließlich vom umliegenden Gebirge abhängig, sondern auch von den Erfahrungen des TBM-Fahrers. Auch

die als zu erreichendes Arbeitsziel wirkende „Bohrvorgabe“ beeinflusst die Anpresskraft. Daher ist das Drehmoment abhängig von der Anpresskraft.

4.2.2 Drehmoment [kNm]

Als „Drehmoment“ wird das Drehmoment am Bohrkopf bezeichnet. Dieses spielt eine wesentliche Rolle im Zusammenhang zwischen Gebirge und TBM. Laut TBM-Fahrer stellt sich in Abhängigkeit vom Gebirge bei gleicher Anpresskraft ein unterschiedliches Moment ein. Im harten Gestein wird die Anpresskraft gesteigert, das Drehmoment steigt aber nicht, sondern stellt ist eher geringer, da die Meißel am Bohrkopf nicht tief ins Gebirge eindringen. Wegen der relativ geringen Reibkräfte an der Kontaktfläche bleibt daher bei der Rotation des Bohrkopfes der auftretende Widerstand gering. Bei weicherem Gestein dringen die Meißel schon bei geringer Anpresskraft tief in das Gebirge ein. Somit entsteht ein großer Rotationswiderstand am Bohrkopf und somit ein großes Moment (Bach, 2000). Ein weiterer Parameter der das Drehmoment beeinflusst, ist der Füllungsgrad des Bohrkopfes. Desto voller die Räumtaschen des Bohrkopfes mit dem abgefrästen Material sind, desto höher steigt das Drehmoment. Das Drehmoment ist daher nicht allein von der Eindringtiefe ins Gestein abhängig, sondern auch von der Vortriebsgeschwindigkeit. Da die Drehzahl des Bohrkopfes konstant bleibt, füllen sich die Räumtaschen bei hoher Vortriebsgeschwindigkeit schneller und daher steigt das Drehmoment.

4.2.3 Vortriebsgeschwindigkeit [m/h]

Als Vortriebsgeschwindigkeit wird die Nettovortriebsgeschwindigkeit in m/h. Sie entspricht der Penetrationsrate, die in mm/min aufgezeichnet und in m/h umgerechnet wurde. Da die Penetrationsrate zum jeweiligen Zeitpunkt aufgezeichnet wurde, spielen maschinell, geologisch oder betrieblich bedingte Stehzeiten keine Rolle. Die Bruttovortriebsgeschwindigkeit [m/d] lässt sich aus der zum jeweiligen Zeitpunkt aufgezeichneten Stationierung ermitteln. Zur weiteren Betrachtung wurde die Nettovortriebsgeschwindigkeit herangezogen.

5 Untersuchung der Zusammenhänge der Maschinenparameter nach Gesteinsarten

5.1 Statistische Untersuchung der Daten, Boxplots

Der Boxplot gibt eine graphische Darstellung der Verteilung und Lage statistischer Daten wieder. Boxplots liefern einen guten und schnellen Überblick darüber, in welchem Bereich die Daten liegen und auch wie sie über diesen verteilt sind.

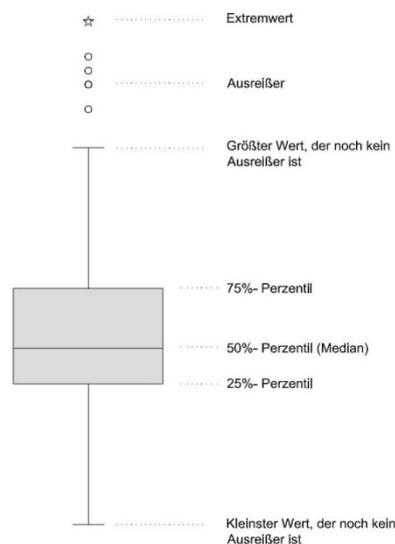


Abbildung 10 Bedeutung der Elemente eines Boxplot- Diagramms

Die ausgefüllte Fläche (die Box) entspricht dem Bereich in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Die obere Grenze bildet das 75%- Perzentil und die untere Grenze das 25%- Perzentil. Die Höhe der Box entspricht dem sogenannten Interquartilsabstand. Dieser wird durch die Differenz zwischen dem 25%- und 75%- Perzentil gebildet und ist ein Maß der Streuung der Daten. Der Median wird als durchgehender Strich in der Box dargestellt. Der Median, oder auch 50%- Perzentil, ist der Wert, der den Gesamtwert der Daten in zwei Hälften teilt. Die Lage der Medianlinie innerhalb der Box liefert einen Eindruck von der Schiefe. Durch die vertikalen Linien ober- und unterhalb der Box werden die Werte, die außerhalb der Box liegen, dargestellt. Nach der Definition von John W. Tukey (1962) entspricht die maximale Länge dieser Linien das 1,5-fache des Interquartilsabstands. Die Linie endet aber nicht zwangsläufig bei dem 1,5-fachen Boxhöhe, sondern bei dem maximalen Wert aus den Daten, falls dieser noch innerhalb dieser Grenze liegt. Daher muss die Länge der vertikalen Linien ober- und unterhalb der Box nicht gleich sein. Das Ende der Linien wird mit einem kurzen

Querstrich markiert. Alle Werte, die außerhalb dieses Bereiches liegen, werden als Ausreißer bezeichnet. Diese Werte sind im Verhältnis zu den übrigen Werten der Variablen extrem klein oder extrem groß. Extremwerte sind Ausreißer, die im Verhältnis zu den übrigen Werten sehr weit abweichen. (Brosius, 2008)

Die Boxplots der Werte der Vortriebsgeschwindigkeit der Anpresskraft und des Drehmoments in allen fünf Bereichen (Abbildung 11, 12, 13, 14, 15) wurden mittels des Statistikprogramms SPSS Statistics 17,0 erzeugt. Die Tabellen mit den Angaben über die Werte der Mediane und Perzentilen der einzelnen Boxplots befinden sich im Anhang (vgl. 1. Boxplots nach Gesteinsarten).

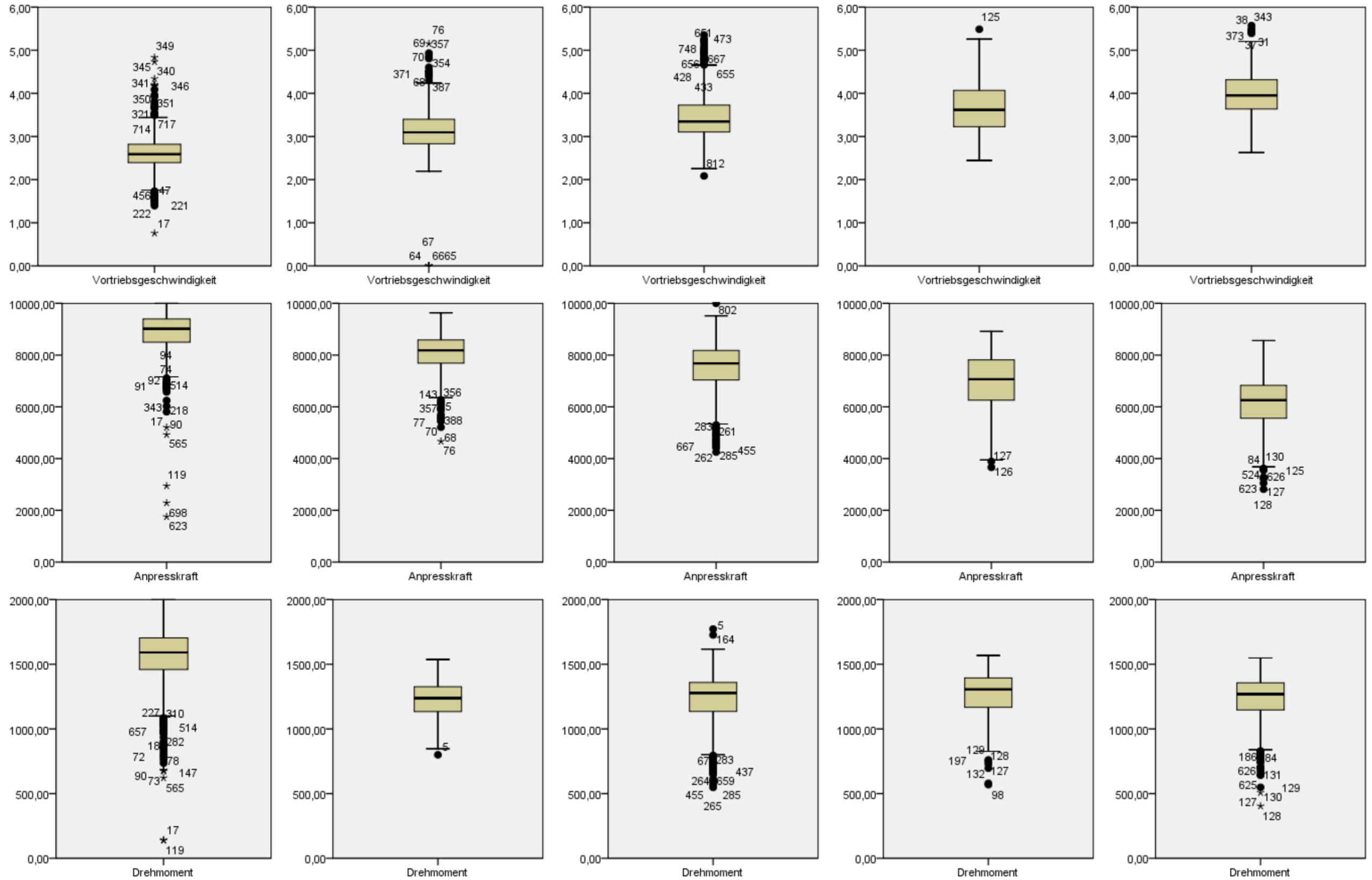


Abbildung 11 Boxplots Bereich 1

Abbildung 12 Boxplots Bereich 2

Abbildung 13 Boxplots Bereich 3

Abbildung 14 Boxplots Bereich 4

Abbildung 15 Boxplots Bereich 5

Bereich1

Bei der Anpresskraft im Bereich 1 ist zu erkennen, dass die Box relativ klein ist. Dies lässt darauf schließen, dass 50% der Daten sehr dicht zusammenliegen. Die eingelesenen Datenpunkte werden vom Statistikprogramm durchnummeriert. Die Werte neben den Ausreißern und Extremfällen sind die Fallnummern (keine Größenwerte). Diese Fallnummer dient dazu, die richtigen Datenpunkte aus der Wertetabelle in den Diagrammen wiederzufinden. Weiters ist zu sehen, dass es nur Ausreißer nach unten gibt und keine nach oben. Bei dem Drehmoment ist die Box auch relativ klein, es gibt jedoch Ausreißer nach oben und unten und zwei Extremwerte nach unten. Diese zwei Extremwerte deuten auf einen Fehler in der Aufzeichnung hin, da sie sich deutlich von dem Rest der Daten abheben und es sich auch nur um zwei Datenpunkte handelt. Auch die Vortriebsgeschwindigkeit weist eine recht kleine Box im Vergleich zu den anderen Bereichen auf. Ausreißer gibt es nach oben und unten, wobei diese relativ dicht beieinander liegen und daher nicht als Fehler in der Aufzeichnung hindeuten.

Bereich2

Im Bereich 2 ist die Box der Anpresskraft größer als im Bereich 1. Daraus lässt sich erkennen, dass 50% der Werte nicht so eng beieinander liegen wie im Bereich 1. Daher verlängern sich auch die vertikalen Linien ober- und unterhalb der Box und es sollten daher weniger Ausreißer auftreten. Die Tatsache, dass im Bereich 2 nicht weniger Ausreißer auftreten, deutet darauf hin, dass die Daten der Anpresskraft im Bereich 2 stärker variieren als im Bereich 1. Beim Drehmoment ist eine deutlich größere Box zu erkennen und nur ein Ausreißer wurde registriert. Dieser deutet aber nicht unbedingt auf einen Fehler in der Datenaufzeichnung hin, da der Datenpunkt relativ nahe an der Grenze zum 1,5fachen Interquartilbereich liegt. Bei der Vortriebsgeschwindigkeit sind die Datenpunkte 64, 65, 66, 67 eindeutige Fehler der Datenaufzeichnung. Die Vortriebsgeschwindigkeit beträgt in diesen Punkten Null. Diese Extremwerte wurden daher bei der weiteren Analyse der Daten nicht berücksichtigt. Ansonsten ist die Verteilung der Daten der Vortriebsgeschwindigkeit relativ eng mit Ausreißern nach oben.

Bereich 3

Im Bereich 3 sind die Boxen der Anpresskraft, des Drehmomentes und der Anpresskraft relativ groß. Auffallend ist, dass die Ausreißer der Anpresskraft und die des Drehmomentes, Ähnlichkeiten aufweisen. Die Ausreißer der Vortriebsgeschwindigkeit verhalten sich genau umgekehrt.

Bereich 4

Im Bereich 4 sind die Boxen der Anpresskraft, des Drehmomentes und der Vortriebsgeschwindigkeit am Größten. Jedoch ist die allgemeine Verteilung sehr gleichmäßig, da es kaum Ausreißer gibt. Der Bereich, in dem die ermittelten Werte liegen, erscheint allerdings extrem groß. Es ist weiters zu erkennen, dass die Box der Vortriebsgeschwindigkeit im Vergleich zum Bereich 1 höher liegt. Daraus ist ablesbar, dass die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit im Bereich 4 höher liegt als im Bereich 1.

Bereich 5

Im Bereich 5 erkennt man, dass die Verteilung der Daten der Vortriebsgeschwindigkeit nur wenige Ausreißer nach oben aufweist. Die Werte des Drehmomentes sind nach unten weitgestreut. Oberhalb der Box liegen die Daten noch im 1,5 Interquartilbereich und nützen diesen nicht vollständig aus. Daher ist die vertikale Linie nach oben kürzer als die nach unten. Bei der Anpresskraft sind die vertikalen Linien nahezu gleichlang. Die untere vertikale Linie erreicht das Maximum des 1,5 Interquartilbereiches. Da es dort noch Ausreißer gibt, lässt sich schließen, dass die maximalen Daten nach oben nur knapp unterhalb des 1,5 Interquartilbereiches liegen, da ansonsten die Linie nach oben kürzer wäre. Daraus ist erkennbar, dass die Werte der Anpresskraft stark nach oben und unten variieren.

Für die weiter Auswertung der Daten werden die Extremwerte nicht berücksichtigt.

5.2 Korrelation

Die Korrelation beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen zwei oder mehr Variablen. Dieser Zusammenhang lässt sich zum Beispiel mittels des Korrelationskoeffizienten nach Pearson beschreiben. Der Korrelationskoeffizient ist ein dimensionsloses Maß für den Grad des linearen Zusammenhanges zwischen zwei Variablen. Der Koeffizient kann einen Wert zwischen +1 und -1 annehmen. Liegt der Wert nahe bei null, besteht nur ein geringer linearer Zusammenhang zwischen den Variablen. Eine positive Korrelation tritt auf, wenn der Korrelationskoeffizient ein positives Vorzeichen hat. Dies geschieht, wenn hohe Werte einer Variablen gemeinsam mit hohen Werten der anderen Variablen auftreten. Die Punkte im Streudiagramm liegen auf einer Geraden, die in einem Koordinatensystem von links unten nach rechts oben verläuft. Dies ist zum Beispiel in Abbildung 16, im Diagramm Anpresskraft zu Drehmoment, zu erkennen. Von einer negativen Korrelation spricht man, wenn der Korrelationskoeffizient unter null liegt. Dies tritt auf, wenn hohe Werte einer Variablen tendenziell gemeinsam mit niedrigen Werten der anderen Variablen auftreten. In einem Streudiagramm weisen die Punkte ein von links oben nach rechts unten laufendes Muster auf. Ein Beispiel dafür ist das erste Diagramm in Abbildung 17. (Brosius, 2008)

5.2.1 Korrelationskoeffizienten

Die folgenden Tabellen wurden mit dem Statistikprogramm SPSS Statistics 17,0 erstellt und zeigen die Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die einzelnen Bereiche. Die Tabelle ist so aufgebaut, dass die Korrelationskoeffizienten zweier Variablen doppelt aufgeführt sind. Es reicht daher die Betrachtung der rechten oberen oder linken unteren Hälfte der Tabelle. Für jedes Variablenpaar werden drei Werte ausgewiesen. Der oberste Wert beschreibt den Korrelationskoeffizienten, der unterste gibt die Anzahl der verarbeiteten Fälle an. Die Fallzahl kann variieren, da einzelne Fälle fehlende Werte aufweisen können.

- Bereich 1

Tabelle 3 Korrelationskoeffizient Bereich 1

| | | Korrelationen | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------------------|
| | | Drehmoment | Anpresskraft | Vortriebsgeschwindigkeit |
| Drehmoment | Korrelation nach Pearson | 1 | ,482** | ,427** |
| | Signifikanz (2-seitig) | | ,000 | ,000 |
| | N | 824 | 824 | 803 |
| Anpresskraft | Korrelation nach Pearson | ,482** | 1 | -,147** |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | | ,000 |
| | N | 824 | 848 | 803 |
| Vortriebsgeschwindigkeit | Korrelation nach Pearson | ,427** | -,147** | 1 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 | |
| | N | 803 | 803 | 803 |

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

- Bereich 2

Tabelle 4 Korrelationskoeffizient Bereich 2

| | | Korrelationen | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------------------|
| | | Drehmoment | Anpresskraft | Vortriebsgeschwindigkeit |
| Drehmoment | Korrelation nach Pearson | 1 | ,394** | ,239** |
| | Signifikanz (2-seitig) | | ,000 | ,000 |
| | N | 397 | 397 | 397 |
| Anpresskraft | Korrelation nach Pearson | ,394** | 1 | -,596** |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | | ,000 |
| | N | 397 | 397 | 397 |
| Vortriebsgeschwindigkeit | Korrelation nach Pearson | ,239** | -,596** | 1 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 | |
| | N | 397 | 397 | 401 |

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

- Bereich 3

Tabelle 5 Korrelationskoeffizient Bereich 3

| | | Korrelationen | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------------------|
| | | Drehmoment | Anpresskraft | Vortriebsgeschwindigkeit |
| Drehmoment | Korrelation nach Pearson | 1 | ,555** | -,191** |
| | Signifikanz (2-seitig) | | ,000 | ,000 |
| | N | 875 | 875 | 875 |
| Anpresskraft | Korrelation nach Pearson | ,555** | 1 | -,665** |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 | ,000 |
| | N | 875 | 875 | 875 |
| Vortriebsgeschwindigkeit | Korrelation nach Pearson | -,191** | -,665** | 1 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 | |
| | N | 875 | 875 | 875 |

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

- Bereich 4

Tabelle 6 Korrelationskoeffizient Bereich 4

| | | Korrelationen | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------------------|
| | | Drehmoment | Anpresskraft | Vortriebsgeschwindigkeit |
| Drehmoment | Korrelation nach Pearson | 1 | ,703** | -,085 |
| | Signifikanz (2-seitig) | | ,000 | ,160 |
| | N | 272 | 272 | 272 |
| Anpresskraft | Korrelation nach Pearson | ,703** | 1 | -,468** |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 | ,000 |
| | N | 272 | 272 | 272 |
| Vortriebsgeschwindigkeit | Korrelation nach Pearson | -,085 | -,468** | 1 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,160 | ,000 | |
| | N | 272 | 272 | 272 |

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

- Bereich 5

Tabelle 7 Korrelationskoeffizient Bereich 5

| | | Korrelationen | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------------------|
| | | Drehmoment | Anpresskraft | Vortriebsgeschwindigkeit |
| Drehmoment | Korrelation nach Pearson | 1 | ,756** | ,011 |
| | Signifikanz (2-seitig) | | ,000 | ,752 |
| | N | 801 | 801 | 801 |
| Anpresskraft | Korrelation nach Pearson | ,756** | 1 | -,432** |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 | | ,000 |
| | N | 801 | 801 | 801 |
| Vortriebsgeschwindigkeit | Korrelation nach Pearson | ,011 | -,432** | 1 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,752 | ,000 | |
| | N | 801 | 801 | 801 |

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

5.2.2 Streudiagramme

Streudiagramme geben eine graphische Darstellung der beobachteten Wertepaare. Die Werte werden in einem kartesischen Koordinatensystem aufgetragen. Jedes Wertepaar wird in einem Punkt abgebildet und somit entsteht eine Punktwolke. Das Muster der Punktwolke gibt Informationen über die Abhängigkeitsstruktur. Für jeden Bereich wurden drei Streudiagramme erzeugt. Im ersten Diagramm stellt die Abszisse die Anpresskraft in kN dar und die Ordinate zeigt die Vortriebsgeschwindigkeit in m/h. Im zweiten Diagramm ist die Abszisse das Drehmoment in kNm und die Ordinate stellt die Vortriebsgeschwindigkeit in m/h dar. Das dritte Diagramm beschreibt den Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Drehmoment. Das Drehmoment ist in kNm auf der Ordinate aufgetragen und die Anpresskraft in kN auf der Abszisse.

Bereich 1

Das erste Diagramm stellt den Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit dar. Die Korrelation zwischen den beiden Variablen zeigt einen negativen Zusammenhang. Man kann erkennen, dass die Vortriebsgeschwindigkeit steigt wenn die Anpresskraft sinkt. Der Korrelationskoeffizient aus Tabelle 3 weist einen sehr kleinen Wert auf, daher ist der Zusammenhang zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Anpresskraft linear relativ gering. Laut Aussage der Tunnelbohrmaschinenfahrer sollte die Trendlinie aber auf jeden Fall eine positive Korrelation aufweisen, da gemäß ihren Erfahrungen die größte Vortriebsgeschwindigkeit bei der größten Anpresskraft erreicht wird (Bach, 2000). Diese Aussage stimmt mit dem ersten Diagramm nicht überein. Eher das Gegenteil ist hier zu erkennen. Die Anpresskraft ist nämlich nicht alleine ausschlaggebend, es ist vielmehr der Zusammenhang mit dem Drehmoment zu beachten. Im zweiten Diagramm erkennt man eine positive Korrelation zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Drehmoment. Bei einem hohen Drehmoment dringen die Rollenmeißel tief in das Gestein ein, wodurch sich der Reibungswiderstand erhöht. Das Diagramm zeigt daher, dass die beste Vortriebsgeschwindigkeit mit einem hohen Drehmoment zu erreichen ist. Diese Tendenz lässt laut Maschinenfahrer auf weiches Gestein schließen (Bach, 2000). Bei weichem Gestein sollte die Anpresskraft allmählich kleiner werden und das Drehmoment steigen. Im dritten Streudiagramm des ersten Bereiches ist der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Anpresskraft dargestellt. Es ist eine eindeutig positive Korrelation zu erkennen. Wird die Anpresskraft gesteigert, so steigt auch das Drehmoment. Laut Aussage der Maschinenfahrer sollte in hartem Gestein bei hoher Anpresskraft das Drehmoment klein sein oder in weichem Gestein sollte das Drehmoment schon bei kleiner Anpresskraft groß werden (Bach, 2000). Beide dieser Aussagen können im Bereich 1 nicht bestätigt werden.

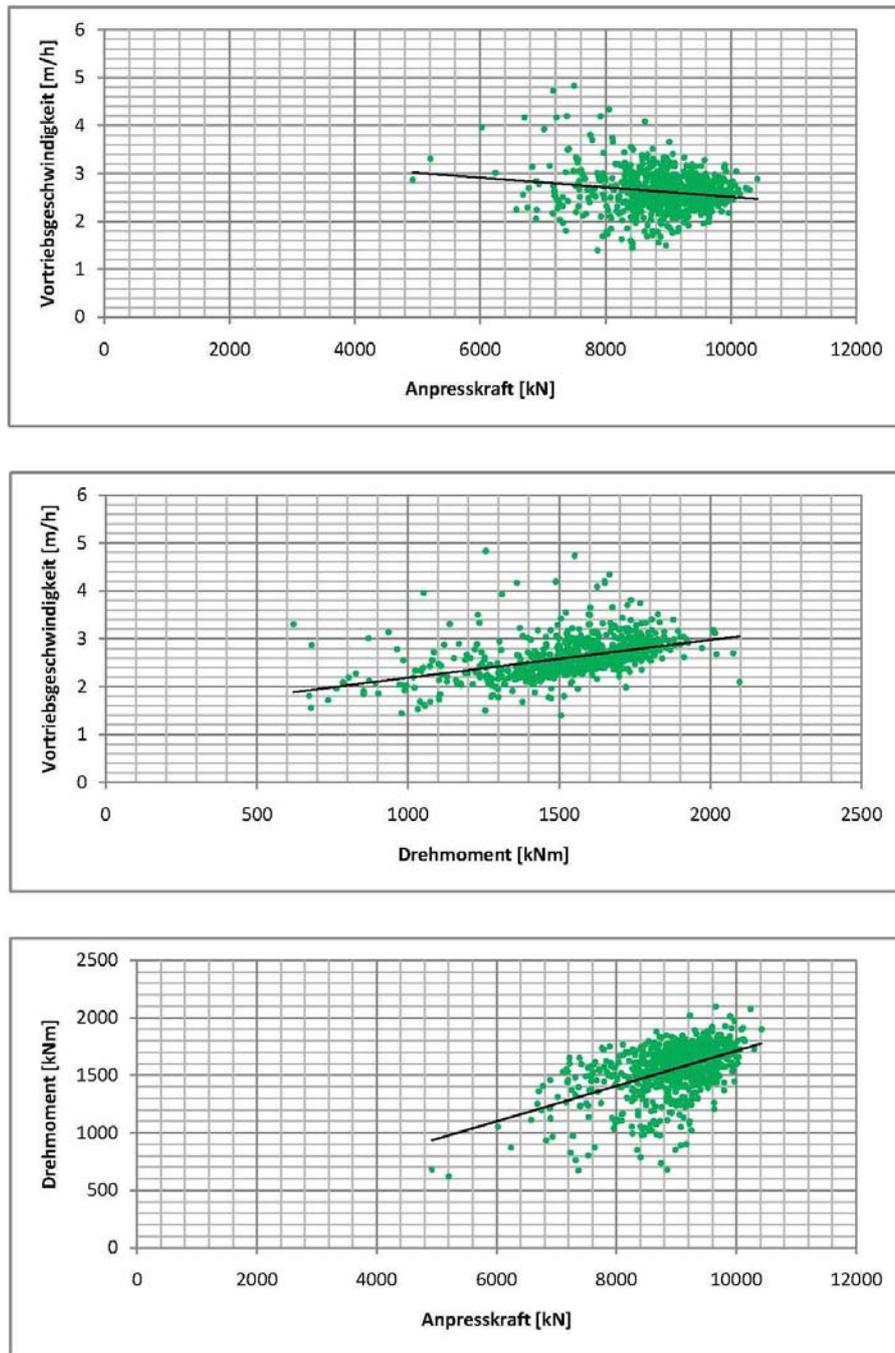


Abbildung 16 Streudiagramme Bereich 1

Bereich 2

Die Abbildung 17 zeigt die Streudiagramme für den Bereich 2. Da der Bereich 2 nur 400 m lang ist, stehen im Vergleich zum Bereich 1 (siehe Abbildung 16) wesentlich weniger Auswertepunkte zur Verfügung. Im ersten Diagramm erkennt man eine negative Korrelation zwischen der Anpresskraft und der Vortriebsgeschwindigkeit. Die Steigung der Trendlinie ist größer als im Bereich 1, das heißt, dass die Anpresskraft mehr Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit hat als im Bereich 1. Im zweiten Diagramm zeigt eine kleinere Spannweite des Drehmomentes im Bereich 2 gegenüber dem Bereich 1. Dies deutet darauf hin, dass der TBM-Fahrer im ersten Bereich die Maschine ausgetestet und im Bereich 2 versucht hat, das Drehmoment möglichst wenig zu variieren. Im zweiten Diagramm steigt die Trendlinie zwar an, aber die Steigung ist nur sehr gering und daher kann nur eine sehr kleine lineare Korrelation erfasst werden. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt 0,239 (vgl. Tabelle 4). Der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Anpresskraft weist auch keine deutliche positive Steigung auf. Im Bereich 2 trat ein stärker zerlegtes Gebirge auf als in Bereich 1, begleitet von kleineren Kluftabständen. Bei einem hohen Zerrlegungsgrad lösen die Rollenmeißel die Chips sehr leicht aus der Ortsbrust. Die Chips gleiten entlang von Störungen oder Klüften heraus, dadurch dringen die Meißel nicht sehr tief in das Gebirge ein, denn bevor sie eine gewisse Eindringtiefe erreicht haben, gibt das Gestein bereits nach und die Chips lösen sich. Deshalb kann sich kein hohes Drehmoment einstellen. Somit steigt das Drehmoment nur gering an, wenn die Anpresskraft erhöht wird (vgl. drittes Diagramm in Abbildung 17).

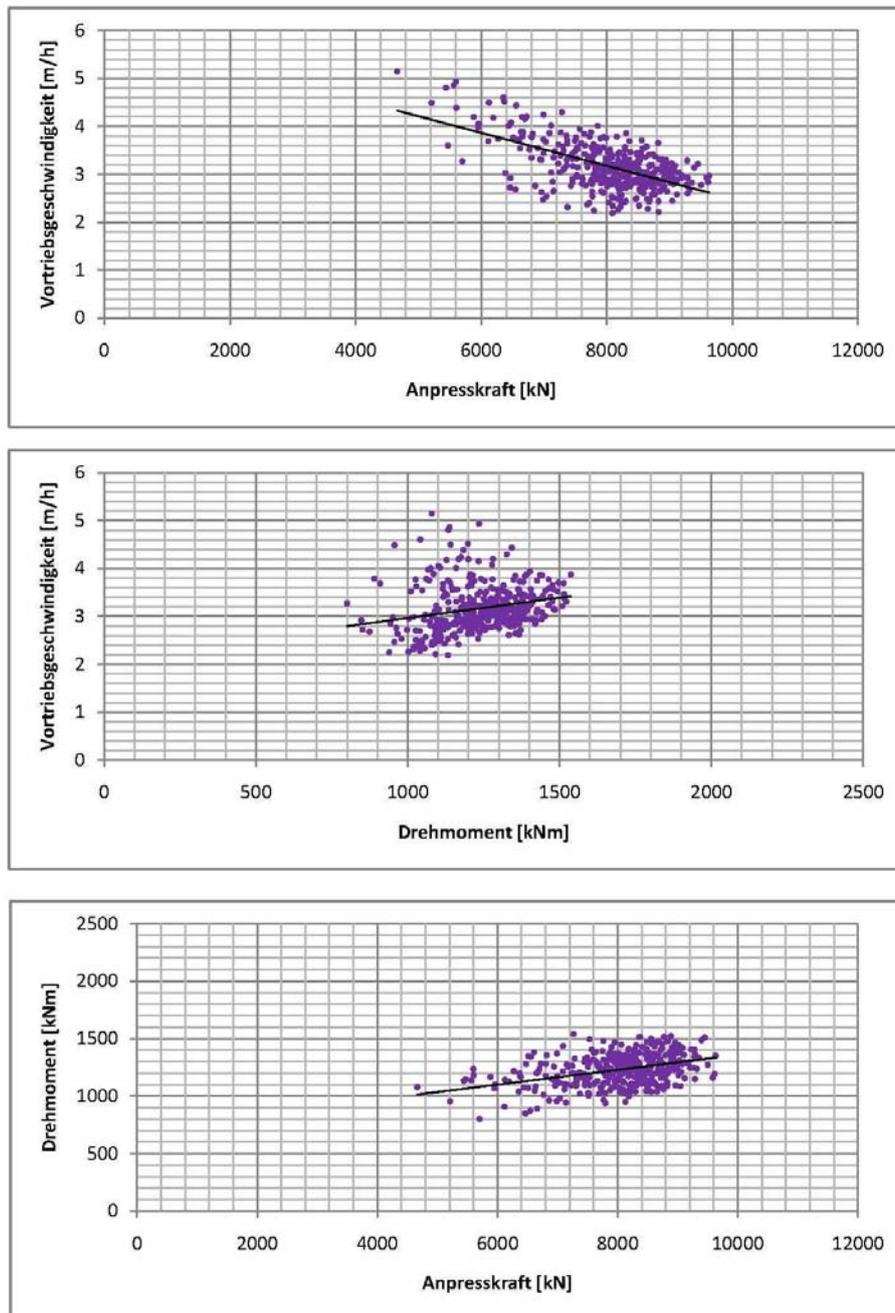


Abbildung 17 Streudiagramme Bereich 2

Bereich 3

Die Abbildung 18 zeigt die drei Streudiagramme des Bereichs 3. Im ersten Diagramm sieht man die negative Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit. In diesem Bereich hat die Anpresskraft einen deutlichen Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit. Da es sich um einen großen Bereich handelt, ist die Menge und daher die Dichte der Punktwolke sehr groß. Sie enthält 875 Datenpunkte bei einem Korrelationskoeffizient von $-0,665$ (vgl. Tabelle 5). Aus dem zweiten Diagramm lässt sich kein deutlicher Zusammenhang zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Drehmoment erkennen. Die Trendlinie verläuft nahezu horizontal. Es gibt Werte, die bei gleicher Vortriebsgeschwindigkeit deutlich unterschiedliche Drehmomente aufweisen. Daraus ist zu schließen, dass das Drehmoment keinen direkten Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit hat. Die Anpresskraft und das Drehmoment weisen eine positive Korrelation auf (vgl. drittes Diagramm Abbildung 18). Der Trend zeigt, dass sich bei kleiner Anpresskraft ein kleines Drehmoment einstellt und bei großer Anpresskraft auch das Drehmoment steigt. Die von den TBM-Fahrern vertretene Theorie besagt, dass, wenn das Gestein durch Zerklüftungen „weicher“ wird, das Drehmoment sofort ansteigt (Bach, 2000). Die Rollenmeißel dringen durch die hohe Anpresskraft und die starke Zerklüftung leicht in das Gebirge ein und der Reibungswiderstand steigt. Die Meißel können größere Chips aus der Ortsbrust lösen und damit steigt die Vortriebsgeschwindigkeit. Wird aufgrund des wachsenden Moments die Anpresskraft zurückgenommen, sinkt das Drehmoment und damit zugleich auch die Vortriebsgeschwindigkeit. Diese Theorie ist in diesem Bereich nicht zu erkennen, da keine Korrelation zwischen Drehmoment und Vortriebsgeschwindigkeit zu erkennen ist. Außerdem zeigt das erste Diagramm, dass die Vortriebsgeschwindigkeit steigt und nicht sinkt wenn die Anpresskraft zurückgenommen wird.

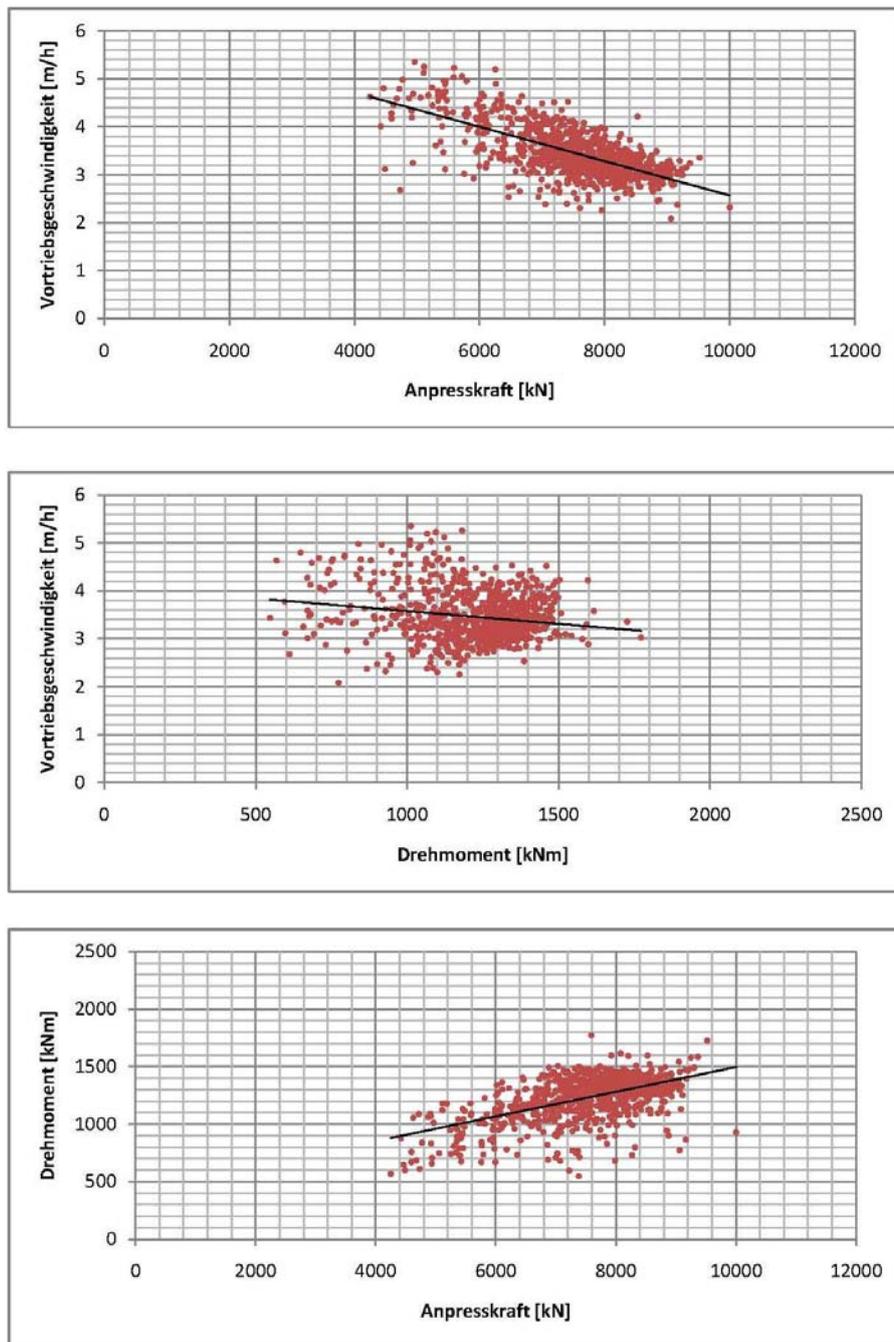


Abbildung 18 Streudiagramme Bereich 3

Bereich 4

Die Abbildung 19 zeigt die Streudiagramme für den Bereich 4. Der Bereich 4 liegt in der Übergangszone zwischen Dachsteinkalk und Dachsteindolomit. Dies ist in den Diagrammen aber nicht zu erkennen. Die Trendlinien unterscheiden sich nur wenig von jenen in der Abbildung 18. Die Anzahl der Datenpunkte ist jedoch viel geringer als im Bereich 3, da der Bereich 4 nur 271 m lang ist. Im ersten Diagramm der Abbildung 18 lässt sich eine deutlich negative Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit ablesen, wie in den anderen Bereichen zuvor auch schon. Somit ist die Annahme, eine große Anpresskraft führe zu einer großen Vortriebsgeschwindigkeit, auch auf diesen Bereich nicht anwendbar. Die ersten Diagramme der verschiedenen Bereiche unterscheiden sich zwar nur geringfügig in der Steigung der Trendlinie, jedoch ist die Lage der Trendlinie nicht gleich. Im Bereich 4 liegt die Trendlinie des ersten Diagrammes deutlich höher als die Trendlinie des ersten Diagrammes im ersten Bereich (Abbildung 16). Es ist zu beobachten, dass die Vortriebsgeschwindigkeit kontinuierlich über die Stollenlänge steigt. Das zweite Diagramm der Abbildung 19 zeigt, wie auch schon in den anderen Bereichen zuvor, keinen echten Einfluss des Drehmomentes auf die Vortriebsgeschwindigkeit. Das dritte Diagramm, enthält den Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Drehmoment. Es lässt sich eine relativ starke positive Korrelation ablesen. Der Korrelationskoeffizient beträgt gemäß Auswertung mit dem Statistikprogramm SPSS 0,703 (vgl. Tabelle 6).

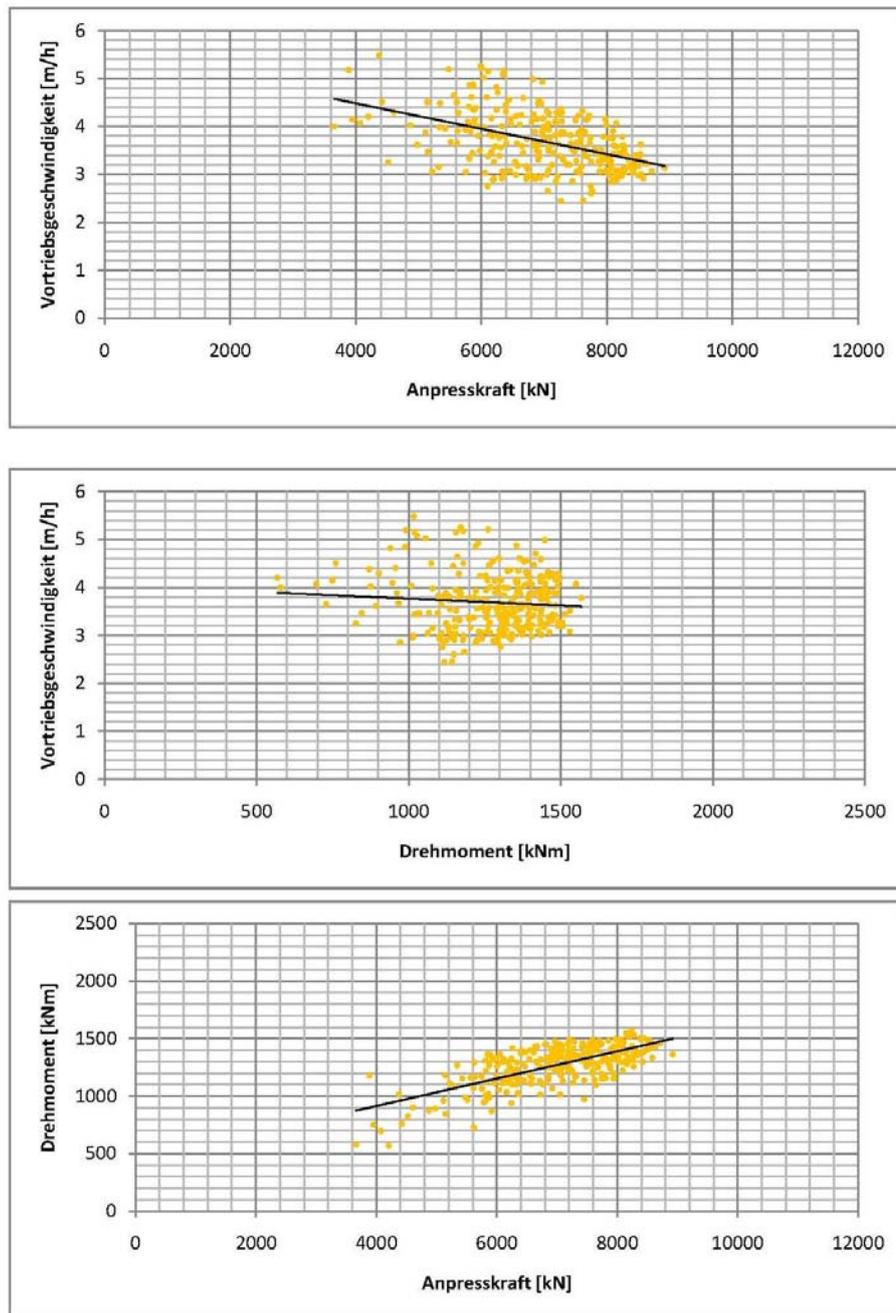


Abbildung 19 Streudiagramme Bereich 4

Bereich 5

Der Bereich 5 umfasst 801 Datenpunkte. Der gesamte Bereich erstreckt sich im Dachsteindolomit. Die Streudiagramme für den Bereich 5 sind in Abbildung 20 zu finden. Das erste Diagramm der Abbildung 20 zeigt wiederum den Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit. Zwischen diesen beiden Parametern stellt sich eine negative Korrelation ein. Das heißt bei hoher Anpresskraft tritt eine kleine Vortriebsgeschwindigkeit auf und bei niedriger Anpresskraft eine hohe Vortriebsgeschwindigkeit. Wie schon in den Bereichen zuvor beschrieben, widerspricht dieser Zusammenhang den Annahmen der Maschinenfahrer. Die Anpresskraft variiert im Bereich 5 hauptsächlich zwischen 4.000 und 8.000 kN. In den Bereichen zuvor nahm die Anpresskraft im Durchschnitt höhere Werte an, die Vortriebsgeschwindigkeit lag daher in den Bereichen 1-4 niedriger als im Bereich 5. Die Vortriebsgeschwindigkeit hat über die gesamte Stollenlänge deutlich zugenommen. Das zweite Diagramm im Bereich 5 weist eine nahezu horizontale Trendlinie auf. Man kann daher davon ausgehen, dass kein linearer Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und der Vortriebsgeschwindigkeit besteht. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,011 (vgl. Tabelle 7). Das Drehmoment ist daher nur von der Anpresskraft abhängig. Es ist somit die Vortriebsgeschwindigkeit nur indirekt abhängig vom Drehmoment. Im dritten Diagramm der Abbildung 20 erkennt man den Zusammenhang zwischen Drehmoment und Anpresskraft. Das Streudiagramm weist eine deutlich positive Korrelation auf. Wie schon in den anderen Bereichen zuvor beschrieben, kann diese Korrelation in keine Annahme der TBM- Fahrer eingeordnet werden.

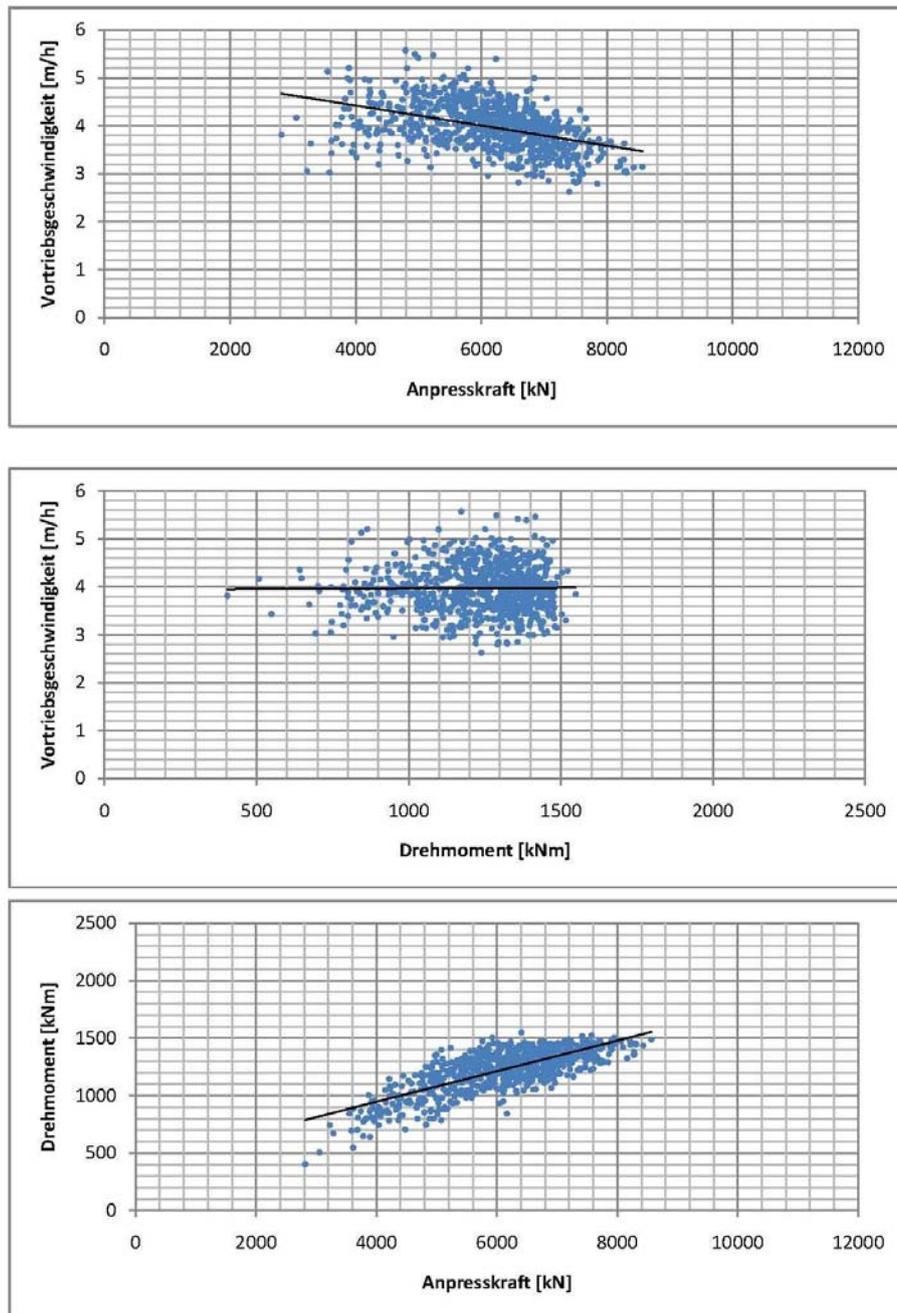


Abbildung 20 Streudiagramme Bereich 5

5.3 Dreidimensionale Analyse

5.3.1 Dreidimensionale Flächen

Um den Zusammenhang zwischen 3 Variablen noch besser zu visualisieren, wurden dreidimensionale Diagramme für die weitere Analyse erstellt. Die Grundfläche des 3D-Diagrammes bilden die Anpresskraft [kN] und das Drehmoment [kNm]. Die vertikale Achse beschreibt die Vortriebsgeschwindigkeit in m/h. Die Diagramme wurden mit dem Statistikprogramm „R“ erzeugt. Die genauen Eingabebefehle in das Programm befinden sich im Anhang (vgl.4.Eingabe in das Statistikprogramm „R“S.29). Die Datenpunkte wurden je Bereich in das Programm eingelesen. Anschließend wurde die Fläche vom Statistikprogramm berechnet. In jenen Bereichen, wo Datenpunkte vorhanden sind, wurden diese gemittelt und daraus eine Fläche erzeugt. In den Bereichen ohne explizite Eingangswerte hat das Statistikprogramm den Trend der nächstgelegenen Punkte verwendet und extrapoliert. Diese Bereiche sind daher mit Vorbehalt zu betrachten.

Bereich 1

In Abbildung 21 fließen alle Datenpunkte des Bereiches 1 ein. Die Vortriebsgeschwindigkeit geht von 1 bis 5 m/h. Die Grundfläche stellt die Anpresskraft von 5.000 bis 10.000 kN und das Drehmoment von 600 bis 2.000 kNm dar. Da im Bereich 1.847 Datenpunkte vorhanden sind, ergibt die Fläche bereichsweise eine gute Darstellung des tatsächlichen Zusammenhanges zwischen Vortriebsgeschwindigkeit, Anpresskraft und Drehmoment. Aufgrund der Dichte der Datenpunkte ist die Fläche unter den Punkten schlecht zu erkennen. Die einzelnen Datenpunkte müssten für eine bessere Ansicht ausgeblendet werden. Allerdings kann man dann zwischen den Bereichen, wo Datenpunkte liegen und den Bereichen, wo die Fläche extrapoliert wurde, nicht mehr unterscheiden.

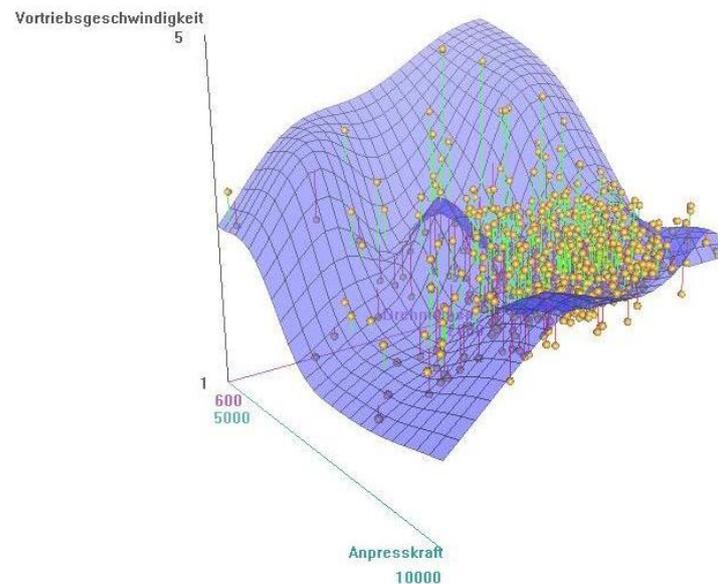


Abbildung 21 3D- Diagramm Bereich 1

Um eine bessere Darstellung der Fläche zu bekommen, wurden die Daten in sogenannte Drehmomentgruppen eingeteilt. Eine Drehmomentgruppe erstreckt sich über 200 kNm. Das heißt, dass zum Beispiel alle Datenpunkte, die ein Drehmoment zwischen 600 und 800 kNm aufweisen, in eine Drehmomentgruppe zusammengefasst wurden und ihnen das Drehmoment 700 kNm zugewiesen wurde.

In Abbildung 22 sind die Datenpunkte daher in Linien dargestellt. Jede Datenpunktlinie stellt eine Drehmomentgruppe dar. Das rechte Diagramm in Abbildung 22 zeigt das gleiche Diagramm wie das linke, jedoch aus einer anderen Perspektive. Im rechten Diagramm ist besser zu erkennen, dass sich die Fläche nur wenig geändert hat im Vergleich zu der Fläche in Abbildung 21, wo noch keine Einteilung in Drehmomentgruppen vorgenommen wurde. Somit können die Flächen als gleichwertig betrachtet werden und die Fläche mit Einteilung in Drehmomentgruppen kann zur weiteren Analyse herangezogen werden.

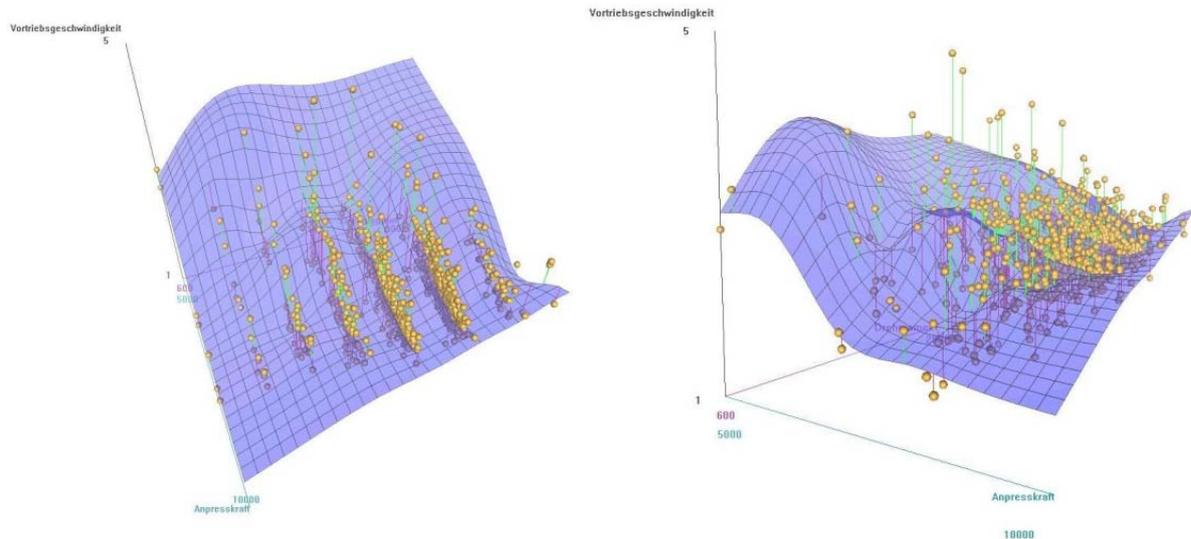


Abbildung 22 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 1

In Abbildung 22 lassen sich jene Bereiche, in denen die Fläche extrapoliert wurde, besonders gut erkennen. Es ist jedoch fraglich, ob wirklich die höchste Vortriebsgeschwindigkeit zu erzielen ist, wenn die Anpresskraft nur 5.000 kN beträgt. Die Fläche weist in den Randbereichen keine große Steigung auf und ist daher in den Randbereichen auf jeden Fall plausibler als zum Beispiel im Bereich 2. Es scheint, als würde sich tatsächlich ein Maximum der Vortriebsgeschwindigkeit bei rund 5.000 kN ausbilden. Gemäß dem dreidimensionalen Diagramm erreicht man die geringste Vortriebsgeschwindigkeit bei einer Anpresskraft von etwa 10.000 kN und einem Drehmoment von 600 kNm. In hartem Gestein sollte laut Annahmen der TBM- Fahrer genau dort ein Maximum auftreten (Bach, 2000).

Bereich 2

Die Abbildung 23 zeigt das dreidimensionale Diagramm für den Bereich 2. Im Bereich 2 wurde dieselbe Gesteinsart wie im Bereich 1 angetroffen. In beiden Bereichen handelt es sich beim durchörterten Gestein um Dachsteinkalk, jedoch mit unterschiedlichen Kluftabständen. Die dreidimensionale Fläche unterscheidet sich aber deutlich von der in Abbildung 21. In den Randbereichen weisen die beiden Flächen deutlich unterschiedliche Tendenzen auf. Die Vortriebsgeschwindigkeit geht in Abbildung 23 von 2 bis 5 m/h, Die Anpresskraft von 5.000 bis 10.000 kN und das Drehmoment von 800 bis 2.000 kNm.

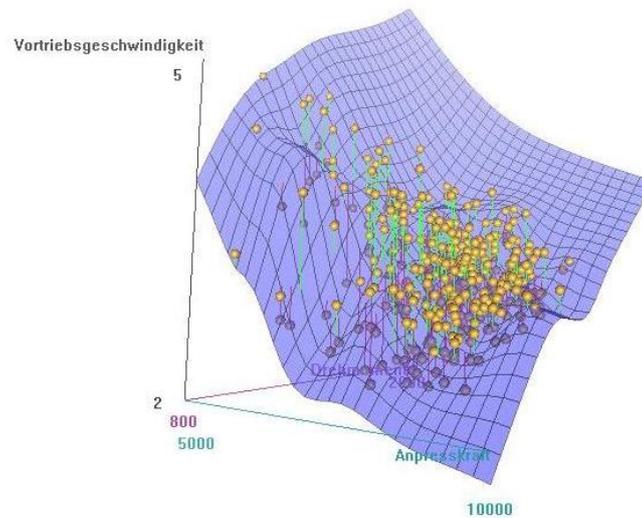


Abbildung 23 3D- Diagramm Bereich 2

Die Abbildung 24 zeigt die 3D- Fläche, die sich nach der Einteilung der Daten in Drehmomentgruppen ausbildet. Die Einteilung in die Gruppen erfolgt wie in Bereich 1 beschrieben. In der linken Abbildung kann man die Drehmomentgruppen gut erkennen und die rechte Abbildung zeigt dasselbe Diagramm aus einer anderen Perspektive.

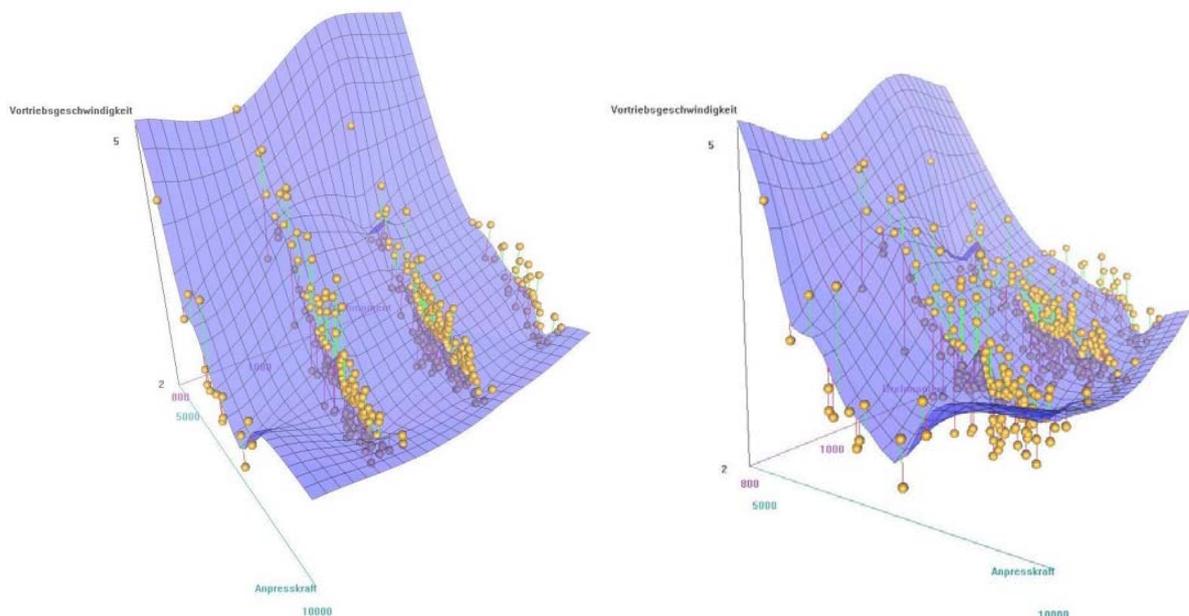


Abbildung 24 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 2

Die Fläche in Abbildung 24 weist am hinteren Rand eine massive Steigung auf. Diese erscheint nicht sehr plausibel, da die Vortriebsgeschwindigkeit in Richtung unendlich steigt, während die Anpresskraft gegen Null geht. Eine Vortriebsgeschwindigkeit ohne Anpresskraft ist aber nicht möglich. In den Diagrammen ist auch zu erkennen, dass das Drehmoment nur

eine geringe Rolle spielt. Die Fläche verändert sich über das Drehmoment kaum. Die Aussage der TBM-Fahrer für weiches Gestein scheint sich hier zu bestätigen. Bei geringer Anpresskraft treten tatsächlich hohe Drehmomente und eine hohe Vortriebsgeschwindigkeit auf (Bach, 2000). Bei genauerer Betrachtung erkennt man aber, dass es keinen einzigen Datenpunkt in dem Bereich hohes Drehmoment, kleine Anpresskraft gibt. Daher bestätigt rein das Statistikprogramm mit den extrapolierten Werten die Aussage der TBM-Fahrer, da in dem Bereich keine Daten der TBM vorliegen.

Bereich 3

Die dreidimensionale Verteilung der Daten im Bereich 3 ist in Abbildung 25 zu sehen. Die Vortriebsgeschwindigkeit betrug im Bereich 3 zwischen 2 und 5 m/h, die Anpresskraft zwischen 4.000 und 10.000 kN und das Drehmoment zwischen 500 und 2.000 kNm. Es ist sofort zu erkennen, dass das Drehmoment eine größere Spannweite hat als im Bereich 2. Die größere Verteilung des Drehmomentes ist auch in den Boxplots in Abbildung 12 und Abbildung 13 (S. 25) zu erkennen. Im Bereich 3 hat sich ein niedrigeres Drehmoment eingestellt als in den Bereichen zuvor.

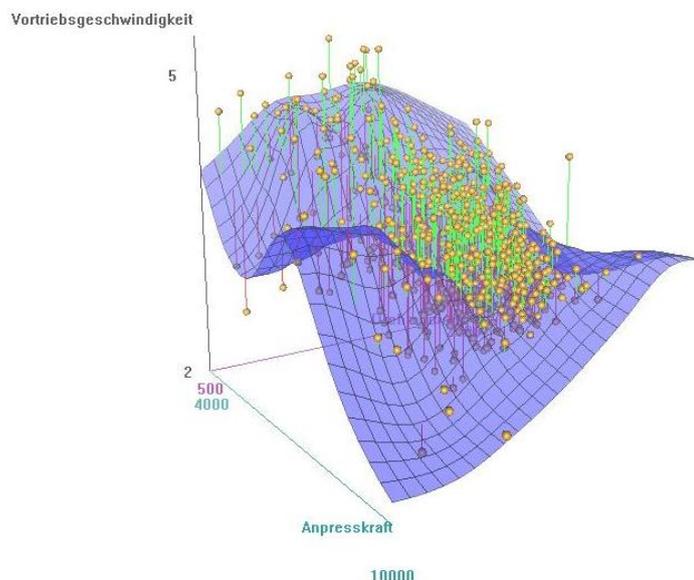


Abbildung 25 3D- Diagramm Bereich 3

Die Randbereiche weisen keine extremen Steigungen auf, das heißt, dass der Verlauf der Fläche an den Randbereichen durchaus realistisch ist. Abbildung 26 zeigt die

dreidimensionale Verteilung der Punkte in Drehmomentgruppen geteilt. Das linke und das rechte Diagramm zeigen die gleiche Fläche aus einer anderen Perspektive. Im linken Diagramm sind die Drehmomentgruppen gut erkennbar. Im rechten Diagramm der Abbildung 26 sieht man, dass die Fläche sich nur in den Randbereichen von der Fläche in Abbildung 25 unterscheidet.

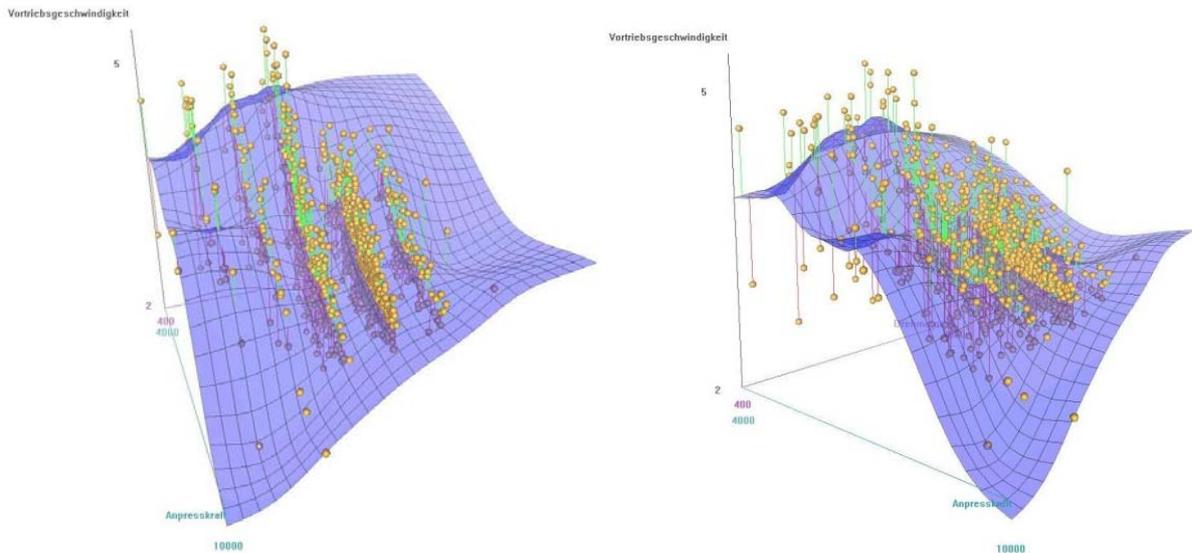


Abbildung 26 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 3

In Abbildung 26 ist weiters zu erkennen, dass die Datenpunkte im Bereich geringes Drehmoment, geringe Anpresskraft (daher in jenem Bereich, in dem die Achse der Vortriebsgeschwindigkeit liegt) sehr stark variieren. Der eine Datenpunkt weist eine Vortriebsgeschwindigkeit von in etwa 4,8 m/h auf, ein anderer, unmittelbar danebenliegend, weist eine Vortriebsgeschwindigkeit von nur 3 m/h auf. Es ist daher zu hinterfragen, ob die Mittelung der Fläche für die Analyse der untersuchten Zusammenhänge im vorliegenden Fall ausreichend geeignet ist. Laut 3D- Fläche gibt es ein absolutes Minimum bei hohen Anpresskräften und einem geringen Drehmoment.

Bereich 4

Der Bereich 4 ist der kürzeste Bereich, daher ist die Punktdichte im Verhältnis zu den anderen Bereichen relativ klein. Die einzelnen Werte haben daher eine größere Auswirkung auf die gesamte Fläche. Die Vortriebsgeschwindigkeit im Diagramm in Abbildung 27 geht von 2 bis zirka 5,5 m/h. Die Anpresskraft geht von 4.000 bis 9.000 kN und das Drehmoment von 600

bis 2.000 kNm. Vernachlässigt man zunächst den unmittelbaren Randbereich, ist bei einer Anpresskraft von etwa 7.000 kN und einem Drehmoment von etwa 800 kNm ein Maximum der Vortriebsgeschwindigkeit zu erkennen. Da bei diesem lokalen Maximum das Drehmoment relativ klein ist, nähert sich dies der Theorie der TBM-Fahrer für hartes Gestein (hartes Gestein= hohe Anpresskraft, kleines Drehmoment). Steigert man die Anpresskraft jedoch bei gleichbleibend geringem Drehmoment sinkt die Vortriebsgeschwindigkeit rapid in Richtung Null.

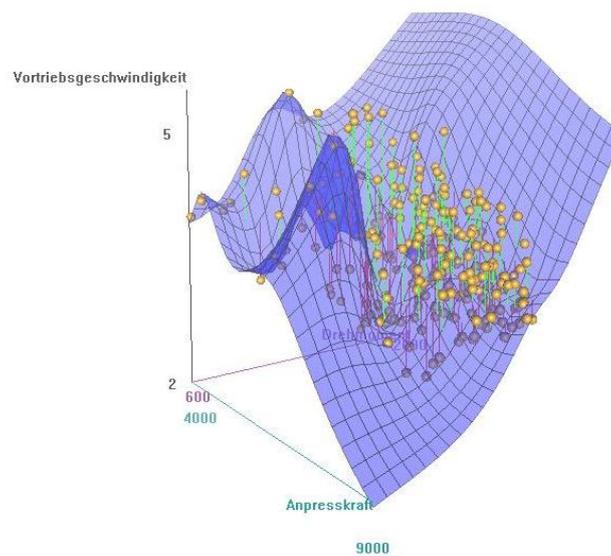


Abbildung 27 3D- Diagramm Bereich 4

Die in Abbildung 28 dargestellten Diagramme zeigen die 3D- Flächen, welche mittels der, in Drehmomentgruppen eingeteilten Daten erzeugt wurden. Hier ist zu bemerken, dass in dem Bereich mit dem lokalen Maximum nur sehr wenige Datenpunkte vorhanden sind. Das Drehmoment geht in diesen Diagrammen von 400 bis 1.500 kNm. Daher ist der Randbereich, in dem die Fläche in Abbildung 27 eine große Steigung besitzt, nicht mit abgebildet. In den Diagrammen der Abbildung 28 bildet sich bei einem Drehmoment von 1.500 kNm und einer geringen Anpresskraft ein lokales Maximum. Dieses Maximum bestätigt die Meinung der TBM- Fahrer für weiches Gestein. Es ist jedoch zu beachten, dass in diesem Maximum keine Datenpunkte liegen, sonder das Maximum rein aus dem Trend der nächstliegenden Datenpunkten erzeugt wurde.

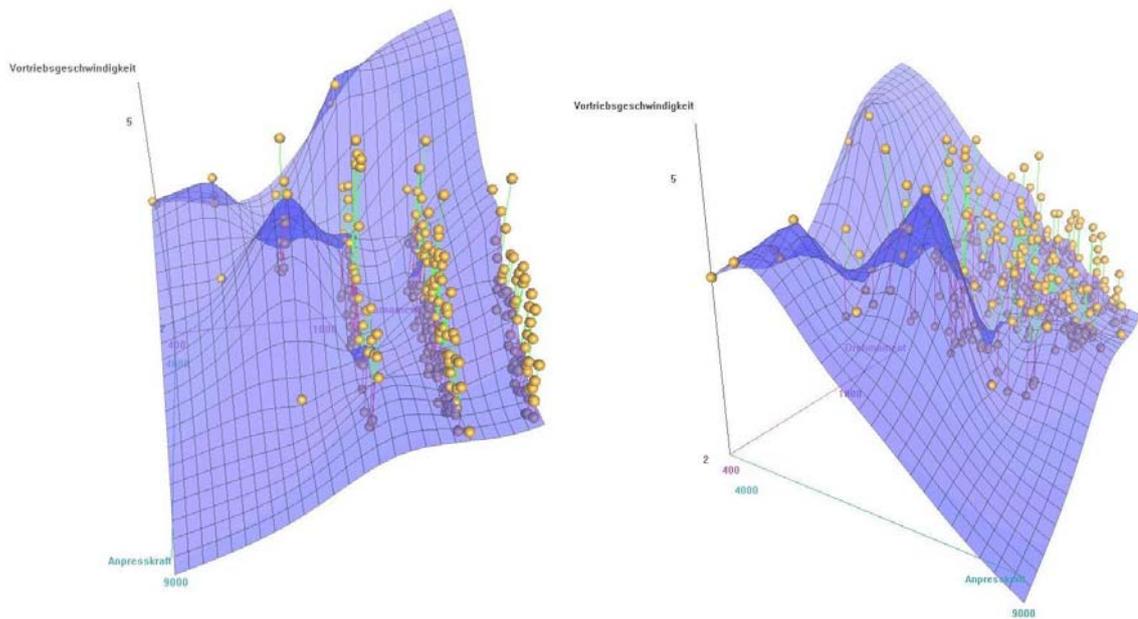


Abbildung 28 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 4

Bereich 5

Die Abbildung 29 zeigt das dreidimensionale Diagramm für den Bereich 5. Die Vortriebsgeschwindigkeit geht in diesem Diagramm von 3 bis 6 m/h und liegt daher höher als in den Bereichen 1 bis 4. Da der Bereich 5 der letzte Vortriebsabschnitt war, ist festzuhalten, dass die Vortriebsgeschwindigkeit über die gesamte Stollenlänge kontinuierlich zugenommen hat. Die Anpresskraft geht in Abbildung 29 von 3.000 bis 9.000kN und liegt daher niedriger als in den Bereichen 1 bis 4. Dies lässt darauf schließen, dass der TBM- Fahrer das Zusammenspiel zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit erkannt hat. Das Drehmoment variiert von 400 bis 2.000 kNm. Der Wertebereich, in dem sich das Drehmoment befindet hat, sich über die Stollenlänge kaum verändert. Das Drehmoment liegt in einem ähnlichen Wertebereich wie in den Bereichen zuvor.

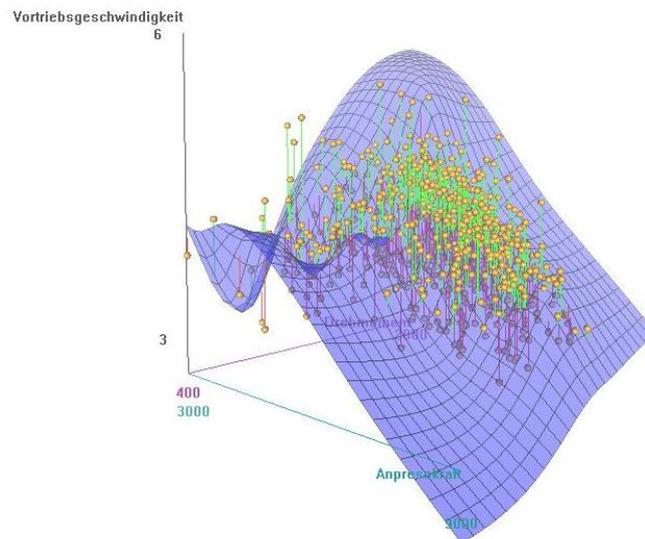


Abbildung 29 3D- Diagramm Bereich 5

Die Diagramme in Abbildung 30 zeigen die dreidimensionale Fläche, die unter den gleichen Voraussetzungen wie zuvor erzeugt wurde. Die Fläche der Abbildung 30 unterscheidet sich nur unwesentlich von der Fläche in Abbildung 29, die mit den Rohdaten erzeugt wurde. Die Diagramme in Abbildung 30 zeigen den identischen Inhalt, jedoch aus zwei verschiedenen Ansichtsrichtungen. Links sind die Linien der Drehmomentgruppen gut erkennbar, Rechts sieht man, dass die erzeugte Fläche mit der Fläche in Abbildung 29 äquivalent ist.

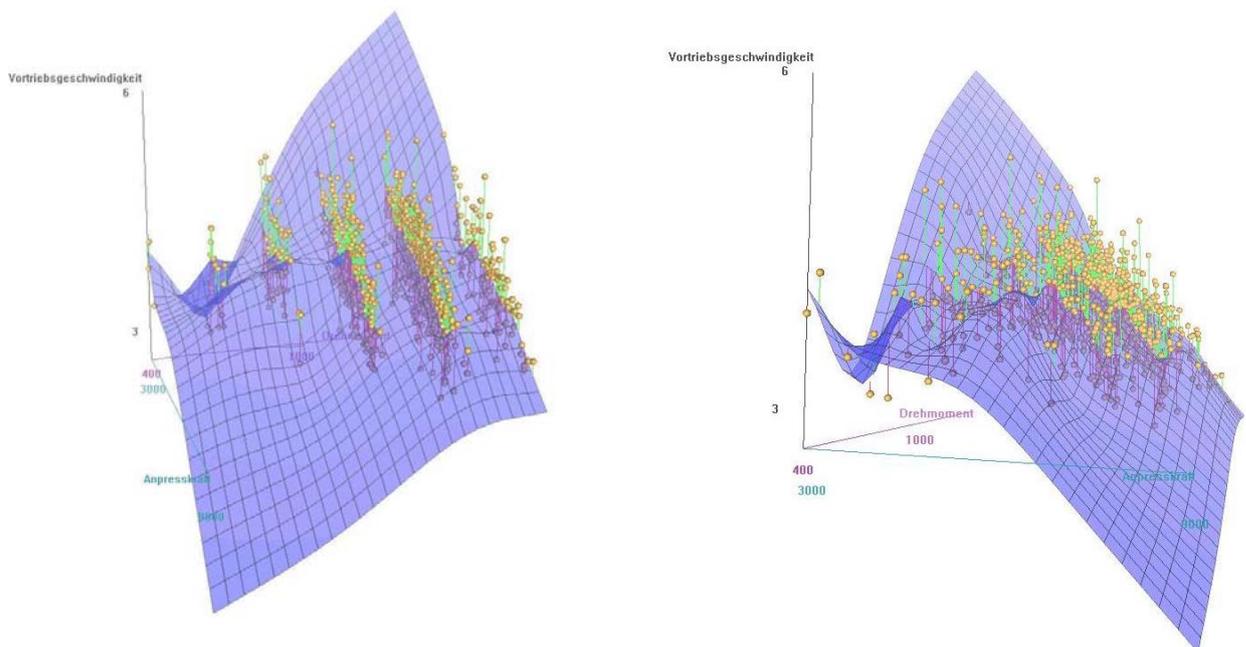


Abbildung 30 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 5

Im Bereich großes Drehmoment, kleine Anpresskraft weist die Fläche einen steilen Trend in Richtung unendlich auf. Dieser Trend ist mit Vorsicht zu betrachten, da erstens in dem Bereich keine Datenpunkte vorliegen und die Fläche rein durch das Statistikprogramm erzeugt wurde und zweitens, -folgte man diesem Trend-, bedeutete dies, dass die Vortriebsgeschwindigkeit ein Maximum erreicht, wenn die Anpresskraft gleich Null ist. Ohne Anpresskraft gibt es jedoch keinen Vortrieb. Im Bereich kleines Drehmoment hohe Anpresskraft sieht es ähnlich aus. In diesem Bereich fällt die Fläche in Richtung Null ab, beziehungsweise weist die Vortriebsgeschwindigkeit im äußersten Punkt sogar einen negativen Wert auf. Eine negative Vortriebsgeschwindigkeit ist jedoch nicht möglich.

5.3.2 Schnitte der Flächen

Um die lokalen Maxima innerhalb der Flächen und den Trend der Flächen noch genauer zu untersuchen, wurden die Flächen der Bereiche 1 bis 5 normal auf die Drehmomentenachse geschnitten. Durch den Schnitt der Fläche entsteht ein zweidimensionales Diagramm mit einer Trendlinie. Die Ordinate zeigt die Vortriebsgeschwindigkeit in m/h, die Anpresskraft ist in kN auf der Abszisse aufgetragen. Die Trendlinie stellt die geschnittene Fläche dar. Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Anpresskraft in genau einem Wert des Drehmomentes. Die Schnitte wurden jeweils mittig durch die Drehmomentgruppe geführt. In Abbildung 31 ist ein Schnitt der Fläche im Bereich 1 zu erkennen. Man erkennt die einzelnen Datenpunkte und die Trendlinie, die den Schnitt der Fläche darstellt.

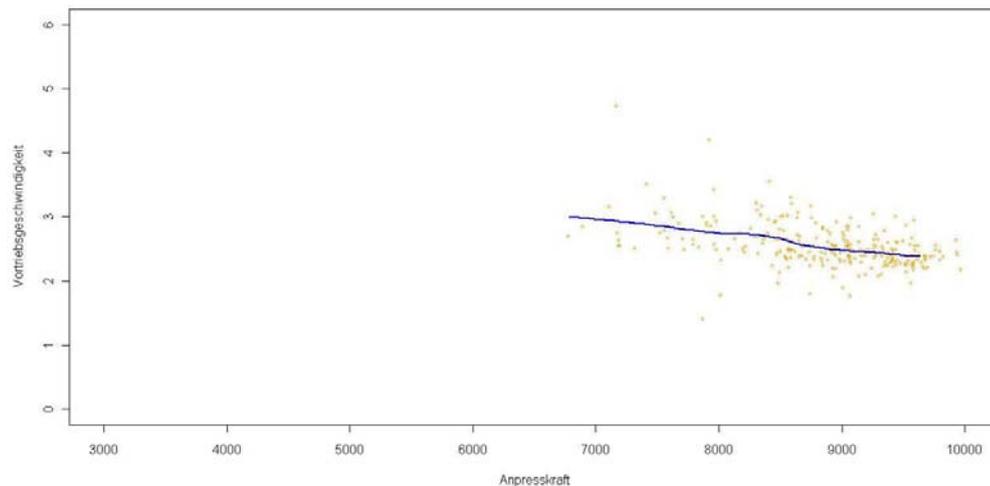


Abbildung 31 Beispiel Schnitt durch die 3D- Fläche

In jedem Bereich wurden fünf bis sechs Schnitte, je nach Anzahl der Drehmomentgruppen, durchgeführt. Zur genaueren Betrachtung wurden aber nur die Schnitte, in denen ein lokales Maximum auftritt, herangezogen. Weiters wurde auch die generelle Tendenz einzelner Flächen weiter untersucht. Aus den Maxima könnte sich eine Optimierung der Vortriebsgeschwindigkeit herauskristallisieren.

Bereich 1

Die Drehmomentgruppe 800 bis 1.000 kNm bedeutet, dass allen Datenpunkten, die ein Drehmoment zwischen 800 und 1.000 kNm aufweisen, für diese Untersuchung das Drehmoment 900 kNm zugewiesen wurde. Die Abbildung 32 zeigt den Schnitt durch das 3D-Diagramm für die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm im Bereich 1. Der Drehmomentgruppenbereich umfasst nur 16 Datenpunkte.

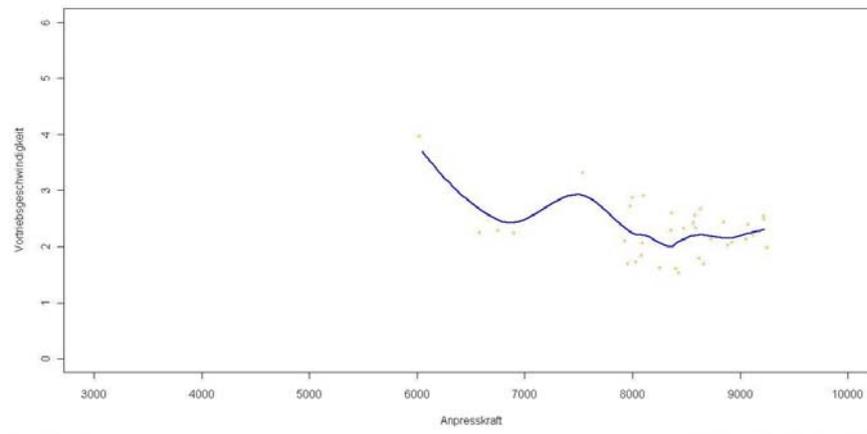


Abbildung 32 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800-1.000 kNm Bereich 1

Bei einer Anpresskraft von rund 7.500 kN bildet sich ein lokales Maximum. Dieses scheinbare Maximum wird durch lediglich einen Datenpunkt erzeugt und ist daher nicht repräsentativ.

In den anderen Schnitten durch die Fläche sind keine Maxima zu erkennen.

Bereich 2

Da im Bereich 2 keine lokalen Maxima zu finden sind, wurde im Bereich 2 der Trend der Fläche nochmals genauer betrachtet.

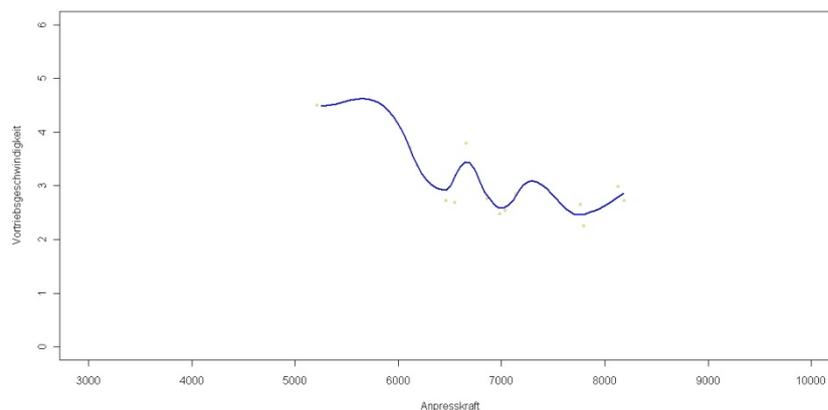


Abbildung 33 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm Bereich 2

Die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm umfasst nur 14 Datenpunkte. Daher ist die Trendlinie in Abbildung 33 nicht repräsentativ. Ein genereller Trend der Datenpunkte ist jedoch zu erkennen.

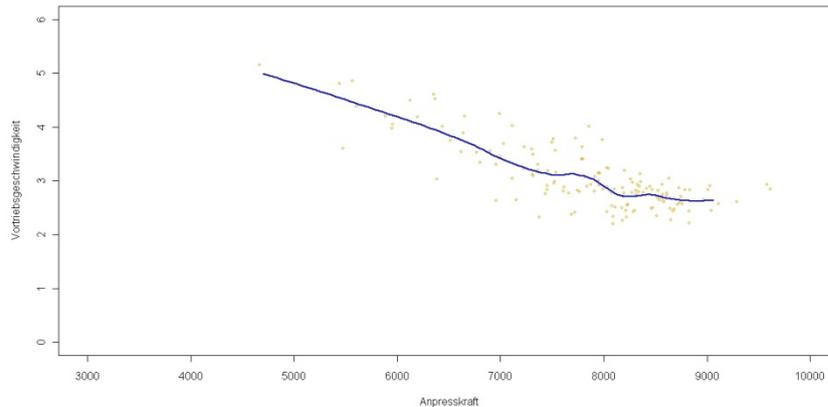


Abbildung 34 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.000- 1.200 kNm Bereich 2

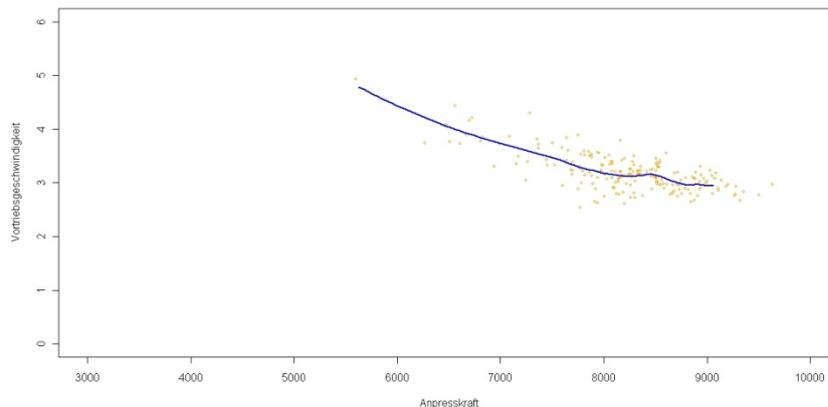


Abbildung 35 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.200- 1.400 kNm Bereich 2

In Abbildung 34 und Abbildung 35 ist der gleiche Trend zu erkennen. Es gibt einzelne Datenpunkte, die eine Vortriebsgeschwindigkeit über 5 m/h aufweisen. Diese Datenpunkte sind der Grund dafür, warum der Trend der 3D- Fläche in Abbildung 23 bei niedriger Anpresskraft stark ansteigt.

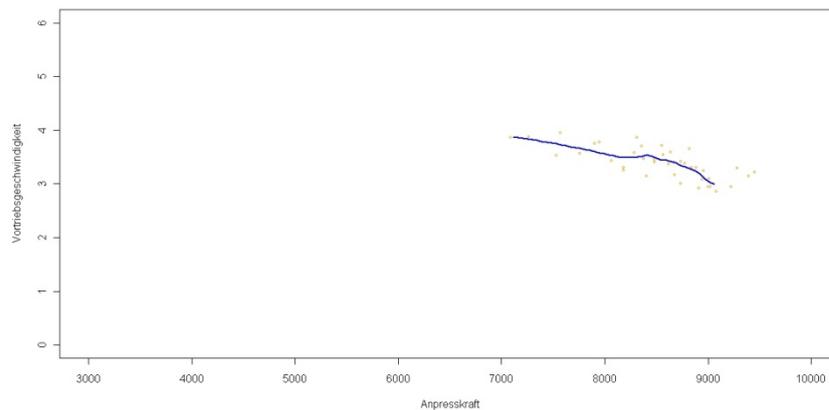


Abbildung 36 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.400- 1.600 kNm Bereich 2

Aus den Schnitten der Fläche im Bereich 2 lässt sich erkennen, dass die höchste Vortriebsgeschwindigkeit mit einem mittleren Drehmoment erreicht wird. Betrachtet man jedoch nur die Lage der Trendlinie und nicht die Länge, so erkennt man, dass im Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.400- 1.600 kNm (vgl. Abbildung 36) die Trendlinie höher liegt als in den Schnitten der kleineren Drehmomente. Es ist daher zu erkennen, dass die Vortriebsgeschwindigkeit mit größerem Drehmoment steigt, jedoch sollte die Anpresskraft konstant gehalten werden. Um diese Aussage noch deutlicher zu zeigen, wurden die gesamten Datenpunkte des Bereiches 2 in den einzelnen Drehmomentgruppen in einem Diagramm (Abbildung 37) zusammengefasst.

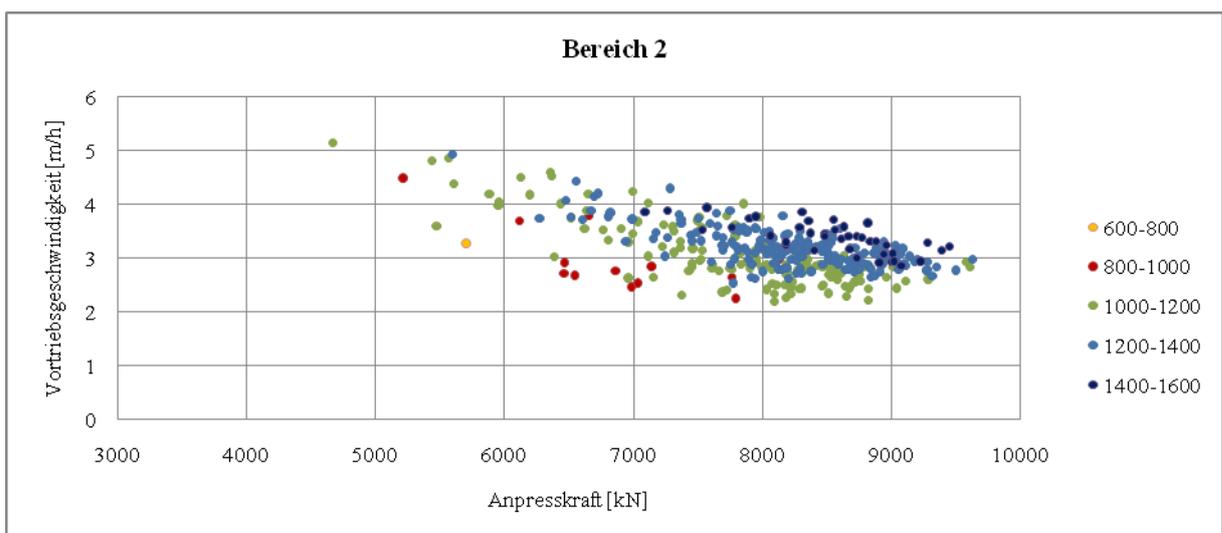


Abbildung 37 Bereich 2 in Drehmomentgruppen geteilt

Bereich 3

Im Bereich 3 werden die Schnitte der Drehmomentgruppe 800 bis 1.000 kNm und der Drehmomentgruppe 1.000 bis 1.200 kNm betrachtet.

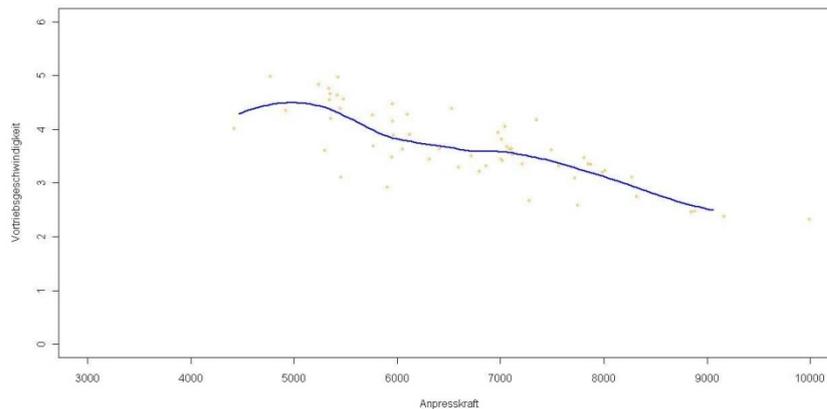


Abbildung 38 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm Bereich 3

In Abbildung 38 stellt sich bei einer Anpresskraft von 5.000 kN ein Maximum ein. Die Trendlinie tendiert dazu, bei einer Anpresskraft unter 5.000kN wieder zu sinken. In Abbildung 39 sieht es ähnlich aus. Die Trendlinie weist bei einer Anpresskraft von 5.000 kN keine Steigung auf. Dies weist auf einen Wendepunkt in der Trendlinie. Dieser Wendepunkt muss existieren da es nicht möglich ist, dass die höchste Vortriebsgeschwindigkeit bei einer Anpresskraft von Null auftritt. Die höchsten Vortriebsgeschwindigkeiten werden in Bereich 3 bei einer Anpresskraft von 5.000 kN und einem Drehmoment im Bereich zwischen 800 und 1.200 kNm erreicht. Der maximale Wert der Vortriebsgeschwindigkeit beträgt etwa 5,3 m/h.

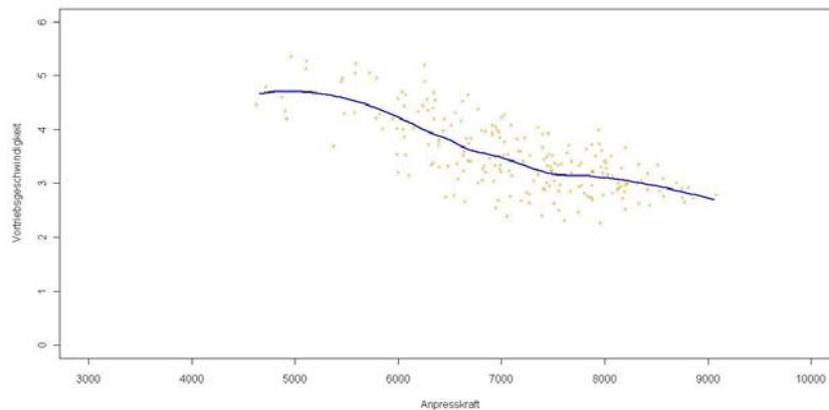


Abbildung 39 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.000- 1.200 kNm Bereich 3

Bereich 4

Für den Bereich 4 wurden zwei Schnitte der Fläche betrachtet. Die Abbildung 40 zeigt den Schnitt der 3D- Fläche durch die Drehmomentgruppe 800 bis 1.000kNm. Die Trendlinie in diesem Diagramm wird durch 14 Datenpunkte erzeugt, daher wurde die Trendlinie nicht für weitere Untersuchungen herangezogen. Die ersten beiden kleinen Maxima werden jeweils nur durch einen Datenpunkt erzeugt und sind daher nicht repräsentativ. Der steigende Trend bis zu einer Anpresskraft von 6.000 kN ist jedoch bedeutend. Der Wendepunkt der Trendlinie liegt bei 6.000 kN. Der Bereich 4 ist der einzige Bereich über die gesamte Vortrieblänge, der eine positive Steigung der Trendlinie aufweist. Diese positive Steigung ist jedoch nur in der Drehmomentgruppe 800 bis 1.000 kNm zu erkennen und bis zu einer Anpresskraft von 6.000 kN.

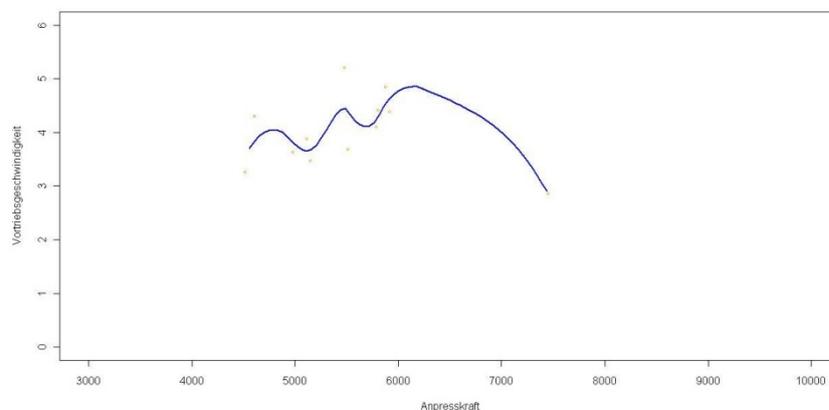


Abbildung 40 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm Bereich 4

Die Abbildung 41 zeigt den nächsten Schnitt der Fläche im Bereich 4 dar. Es ist sofort zu erkennen, dass die positive Steigung bis zu einer Anpresskraft von 6.000 kN in dieser Drehmomentgruppe schon nicht mehr auftritt.

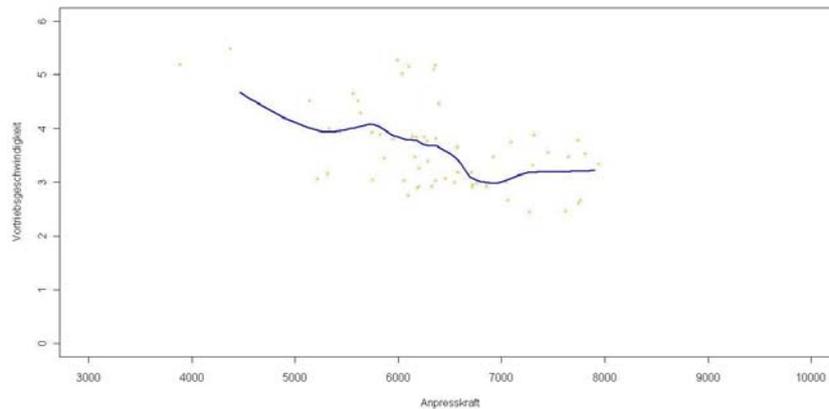


Abbildung 41 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.000- 1.200 kNm Bereich 4

Die weiteren Schnitte im Bereich 4 weisen eine ähnliche Trendlinie wie in Abbildung 41 auf und sind daher nicht mehr wiedergegeben.

Bereich 5

Die Trendlinien der Schnitte durch die Drehmomentgruppen in Bereich 5 sind der Trendlinie der Abbildung 42 sehr ähnlich. Die Steigung der Linien ändert sich kaum. Nur die Lage der Trendlinie wandert von links nach rechts. Es treten aber keine höheren Vortriebsgeschwindigkeiten auf.

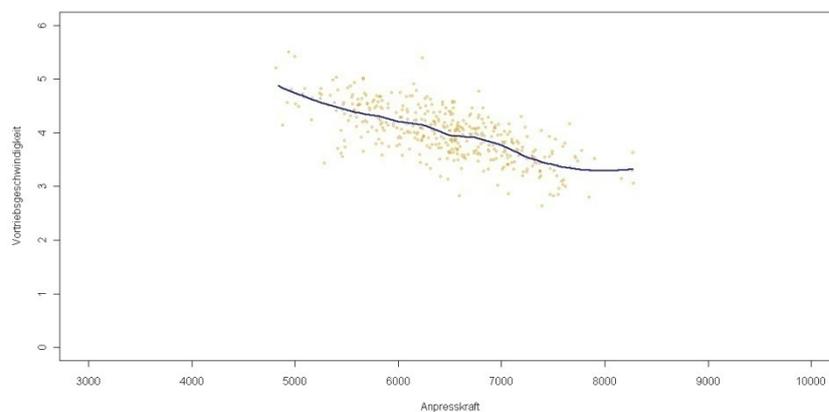


Abbildung 42 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.200- 1.400 kNm Bereich 5

Abbildung 43 zeigt die gesamten Datenpunkte des Bereiches 5 in Drehmomentgruppen geteilt. Mit wachsender Anpresskraft steigt auch das Drehmoment. Der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Anpresskraft im Bereich 5 ist in Abbildung 20 (Seite 41) genauer zu erkennen.

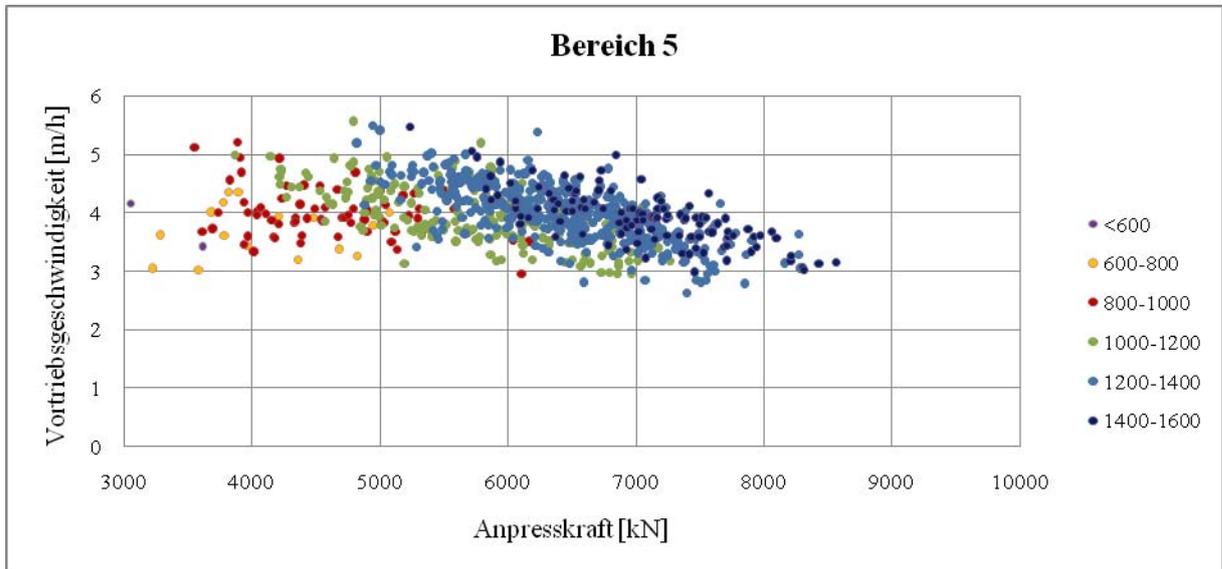


Abbildung 43 Bereich 5 in Drehmomentgruppen geteilt

Die größte Vortriebsgeschwindigkeit wird erreicht, wenn die Anpresskraft im Verhältnis zum Drehmoment klein ist. Die größten Vortriebsgeschwindigkeiten treten, unabhängig davon, welche Drehmomentgruppe betrachtet wird, immer im Bereich kleiner Anpresskräfte auf. Das Drehmoment spielt somit nur eine untergeordnete Rolle im Zusammenhang zwischen den Parametern. Dies wurde auch schon im zweiten Diagramm der Abbildung 20 gezeigt.

5.4 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Die Analyse der Korrelation hat ergeben:

- Die Vortriebsgeschwindigkeit wird mit steigender Stationierung größer (vgl. Abbildung 11)
- Zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Anpresskraft wurde in allen fünf Bereichen eine negative Korrelation festgestellt. Das bedeutet, dass bei kleinen Anpresskräften hohe Vortriebsgeschwindigkeiten erreicht wurden und bei hohen Anpresskräften wurden niedrige Vortriebsgeschwindigkeiten erreicht.
- Die Anpresskraft und das Drehmoment weisen in allen fünf Bereichen eine positive Korrelation auf. Das bedeutet, dass wenn die Anpresskraft steigt auch das Drehmoment sich erhöht und umgekehrt.
- Der Bereich 1 ist der einzige Bereich, in dem eine deutlich positive Korrelation zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Drehmoment auftritt. In den anderen Bereichen ist kein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Parametern feststellbar.

Die dreidimensionale Analyse hat ergeben:

- Es konnten keine aussagekräftigen lokalen Maxima der Vortriebsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Anpresskraft und des Drehmomentes ermittelt werden. Die Maxima, die bei den Schnitten der Flächen zu erkennen waren, wurden meist nur von einzelnen Datenpunkten erzeugt und sind daher nicht repräsentativ.
- Der generelle Trend der Flächen, dass hohe Vortriebsgeschwindigkeiten bei einer niedrigen Anpresskraft erreicht wurden ist in allen Bereichen ähnlich. Das Drehmoment hat keinen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit.

6 Analyse der Vortriebsgeschwindigkeit und der Anpresskraft in Abhängigkeit von der Gebirgszerlegung

Die Penetrationsrate steigt bei zunehmender Klufthäufigkeit, da das Gebirge bereits stärker zerlegt ist und die Meißel tiefer in das zerklüftete Gestein eindringen. Die Penetrationsrate kann jedoch einen kritischen Wert erreichen, sobald es an der Ortsbrust zu einer intensiven Zerklüftung kommt, die zum Loslösen größerer Blöcke führt. Große Blöcke können zu Schäden am Bohrkopf, den Werkzeugen und des Förderbandes führen. Zur Vermeidung solcher Schäden muss im gegebenen Fall die Anpresskraft zurückgenommen werden, damit die Penetrationsrate sinkt und sich keine großen Blöcke mehr lösen. Die Vortriebsgeschwindigkeit steigt kontinuierlich beim Übergang von weniger geklüfteten zu sehr stark geklüfteten Gestein (Büchi, 1984).

Die positive Auswirkung des Zerlegungsgrades auf die Vortriebsgeschwindigkeit einer TBM wurde schon von mehrfach analysiert und bestätigt (Tentschert, Poisel, & Zettler, 2005), (Büchi, 1984). Abbildung 44 zeigt, dass die Vortriebsgeschwindigkeit umso größer ist je stärker das Gebirge zerlegt ist.

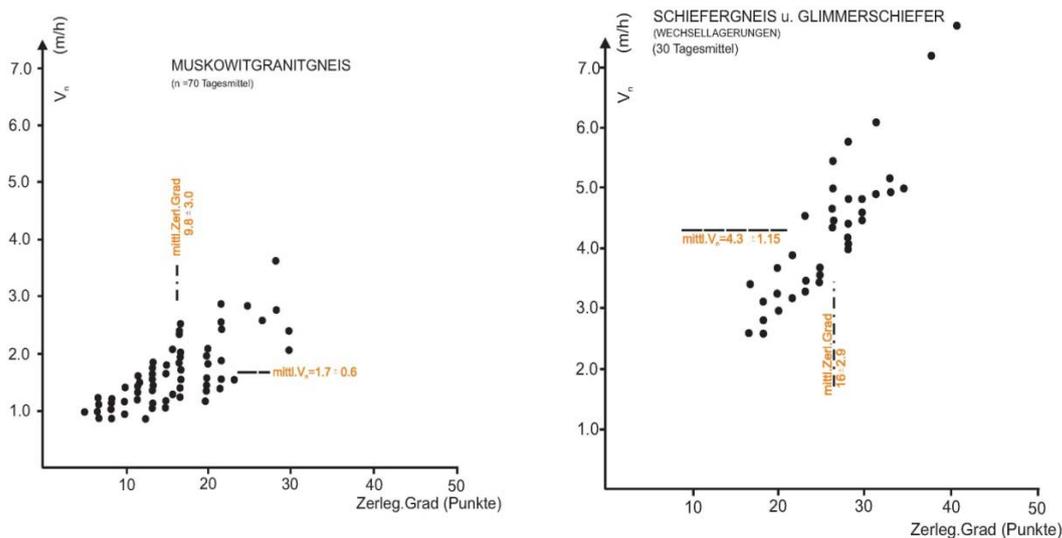


Abbildung 44 Abhängigkeit der Penetration von Gesteinsart und Zerlegungsgrad (Tentschert, Poisel, & Zettler, 2005)

6.1 Statistische Untersuchung, Boxplots

Die Boxplots wurden mittels SPSS Statistics 17,0 erstellt. Die genauen Berechnungswerte befinden sich im Anhang Kapitel 2 (Boxplots der Vortriebsgeschwindigkeit nach Zerlegungsgraden) und Kapitel 3 (Boxplots der Anpresskraft nach Zerlegungsgraden). Die Einteilung in Zerlegungsgrade erfolgte nach Kapitel 3.3.2 (Seite 17). Die Bedeutung der einzelnen Elemente des Boxplots sind in Kapitel 5.1 Seite 23 näher beschrieben.

6.1.1 Vortriebsgeschwindigkeit

Zerlegungsgrad laut Prognose

In Abbildung 45 sind die Boxplots der Vortriebsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Zerlegungsgrades laut Prognose zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit (dicke Linie innerhalb der Box) im Zerlegungsgrad 30 (mittlere Abbildung), daher im stärker zerlegten Gestein, höher liegt als im Zerlegungsgrad 26 (linke Abbildung). Dies stimmt mit den Aussagen in der Literatur überein. Die rechte Abbildung zeigt die Verteilung der Vortriebsgeschwindigkeit im stärksten zerlegten Bereich. Die Median liegt deutlich höher als in den Bereichen mit einem kleineren Zerlegungsgrad. Da der Abschnitt aber nur knapp 40 Meter erfasst, liegen wesentlich weniger Datenpunkte in diesem Bereich. Es fällt aber auf, dass sowohl Ausreißer nach oben als auch der größte Wert der Vortriebsgeschwindigkeit, der laut Definition noch kein Ausreißer ist, beim niedrigsten Zerlegungsgrad (linke Abbildung) höher ist als bei den höheren Zerlegungsgraden

.

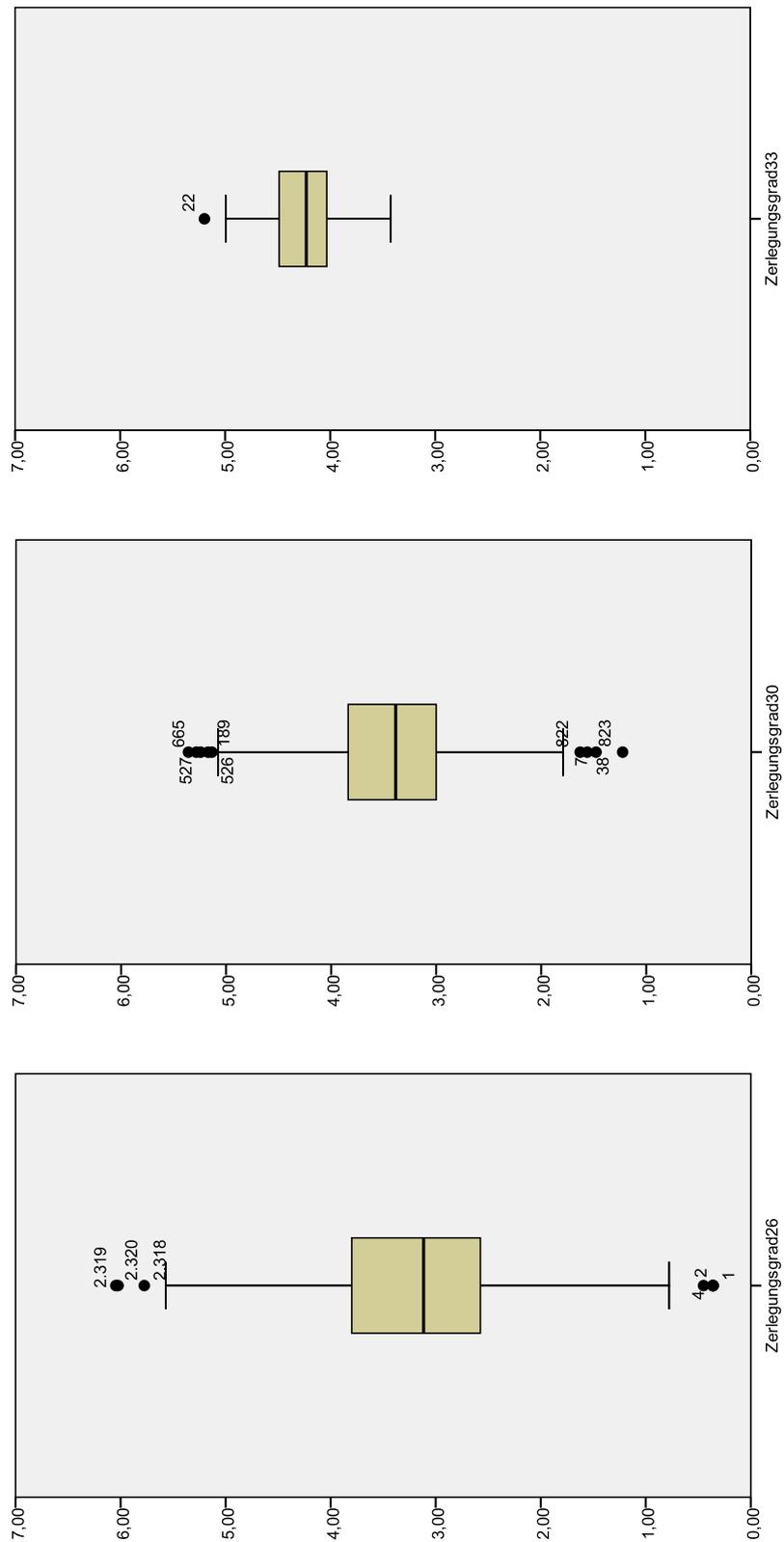


Abbildung 45 Boxplot Vortriebsgeschwindigkeit Zerlegungsgrad 26, 30 und 33 laut Prognose

Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der Geologen

Die mittleren Vortriebsgeschwindigkeiten unterscheiden sich in Abbildung 46 nur wenig voneinander. Der Median im Zerlegungsgrad 26 beträgt 3,1594 m/h, im Zerlegungsgrad 30 3,2517 m/h. Die dort (rechte Abbildung) maximal erreichte Vortriebsgeschwindigkeit liegt höher als im Zerlegungsgrad 26. Obwohl im Zerlegungsgrad 26 wesentlich mehr Datenpunkte zusammengefasst wurden, ähnelt die Verteilung der Vortriebsgeschwindigkeit stark jener im Zerlegungsgrad 30. Auch hier fällt auf, dass sowohl Ausreißer nach oben als auch der größte Wert der Vortriebsgeschwindigkeit, der laut Definition noch kein Ausreißer ist, beim niedrigeren Zerlegungsgrad (linke Abbildung) liegt.

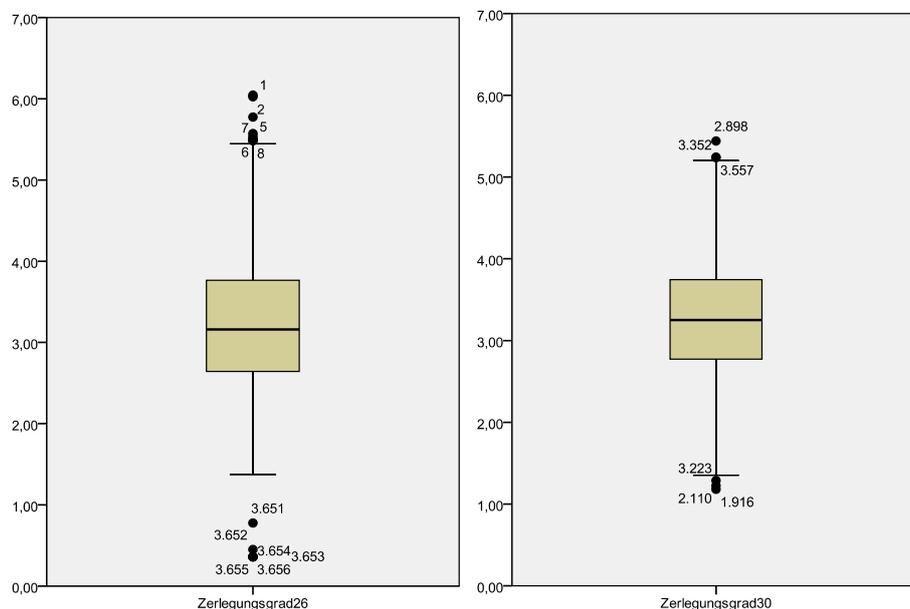


Abbildung 46 Boxplot Vortriebsgeschwindigkeit Zerlegungsgrad 26 und 30 laut Geologen

Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der ARGE

Die Abbildung 47 zeigt die Verteilung der Vortriebsgeschwindigkeit, eingeteilt in Zerlegungsgrad 26 und 30 nach den Protokollen der ARGE. Das linke Diagramm zeigt die Vortriebsgeschwindigkeit, die bei einem schwächeren Zerlegungsgrad aufgetreten ist. Im rechten Diagramm ist zu erkennen, dass die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit (Median) höher liegt als im linken Diagramm. Laut Aufzeichnungen der ARGE handelt es sich beim Zerlegungsgrad 30 um stark zerlegtes Gestein, weshalb sich dieses leichter von der Ortsbrust lösen lässt und eine höhere Vortriebsgeschwindigkeit erreicht werden kann. Es ist zu

erkennen, dass der Maximalwert der Vortriebsgeschwindigkeit auch hier beim geringeren Zerlegungsgrad auftritt.

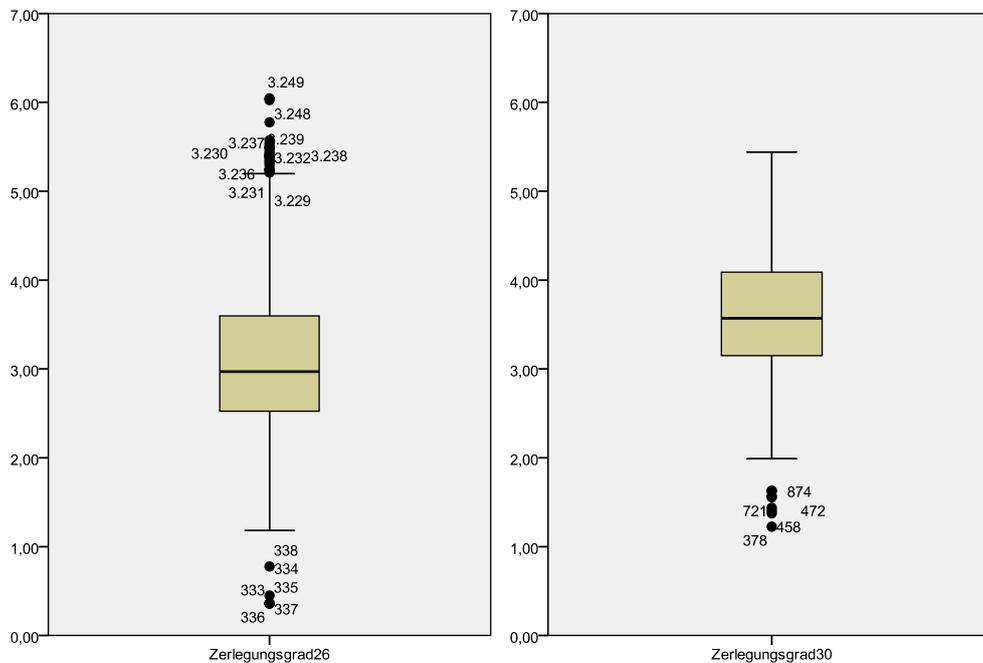


Abbildung 47 Boxplot Vortriebsgeschwindigkeit Zerlegungsgrad 26 und 30 laut ARGE

6.1.2 Anpresskraft

Die negative Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit wurde in Kapitel 5.2 bereits festgestellt. Die Vortriebsgeschwindigkeit steigt mit zunehmendem Zerlegungsgrad, daher müsste die Anpresskraft bei zunehmendem Zerlegungsgrad sinken. Die folgenden Boxplots geben einen Überblick über die mittlere Anpresskraft im Zusammenhang mit dem Zerlegungsgrad. Die Anpresskraft nach Zerlegungsgrad wurde anhand der verschiedenen Quellen (Kapitel 3.3.2) analysiert.

Zerlegungsgrad laut Prognose

Die Abbildung 48 zeigt die Boxplots der Anpresskraft in Abhängigkeit der Zerlegungsgrade 26, 30 und 33. Die mittlere Anpresskraft liegt im linken Diagramm der Abbildung 48 höher als im mittleren Diagramm. Je höher der Zerlegungsgrad steigt, desto niedriger ist die Anpresskraft. Vergleicht man diese Boxplots mit denen der Vortriebsgeschwindigkeit laut

Prognose (vgl. Abbildung 45), erkennt man dort den entgegengesetzten Trend. Das rechte Diagramm in Abbildung 48 zeigt die Verteilung der Anpresskraft im am stärksten zerlegten Bereich. Dieser ist aber nur zirka 40 Meter lang und daher wird der Boxplot nur durch wenige Datenpunkte erzeugt. Die Wahrscheinlichkeit, dass in diesen 40 Metern auch nur ein Datenpunkt weit über dem Niveau der anderen liegt, ist gering. Die mittlere Anpresskraft (dicke Linie in der Box) liegt deutlich tiefer als in allen anderen Boxplots der Anpresskraft, unabhängig von der Quelle der Zerlegungsgrade.

Analyse der Vortriebsgeschwindigkeit und der Anpresskraft in Abhängigkeit von der Gebirgszerlegung

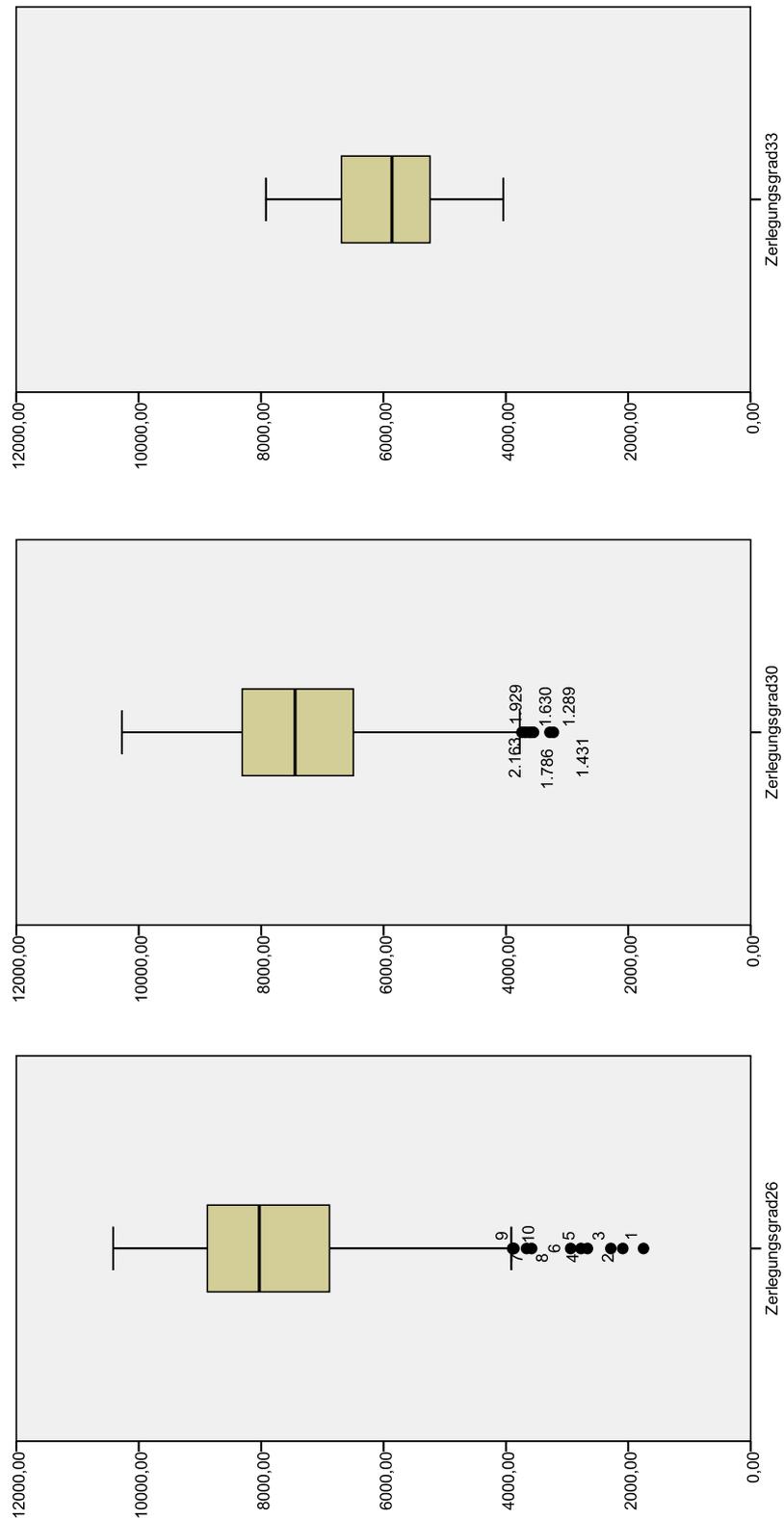


Abbildung 48 Boxplot Anpresskraft nach Zerlegungsgrad 26, 30 und 33 laut Prognose

Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der Geologen

Der Boxplot der Anpresskraft nach dem Zerlegungsgrad 30 (rechtes Diagramm Abbildung 49) weist einen niedrigeren Median (Mittelwert) als der Boxplot nach dem Zerlegungsgrad 26 auf. Die große Boxhöhe beschreibt, dass 50% der Daten nicht eng zusammenliegen und daher eine starke Verteilung aufweisen. Im linken Diagramm kann man einige Ausreißer nach unten erkennen. Diese deuten aber auf keine Fehler in der Aufzeichnung hin, da sie dicht beieinander liegen und auch nicht als Extremwerte definiert wurden.

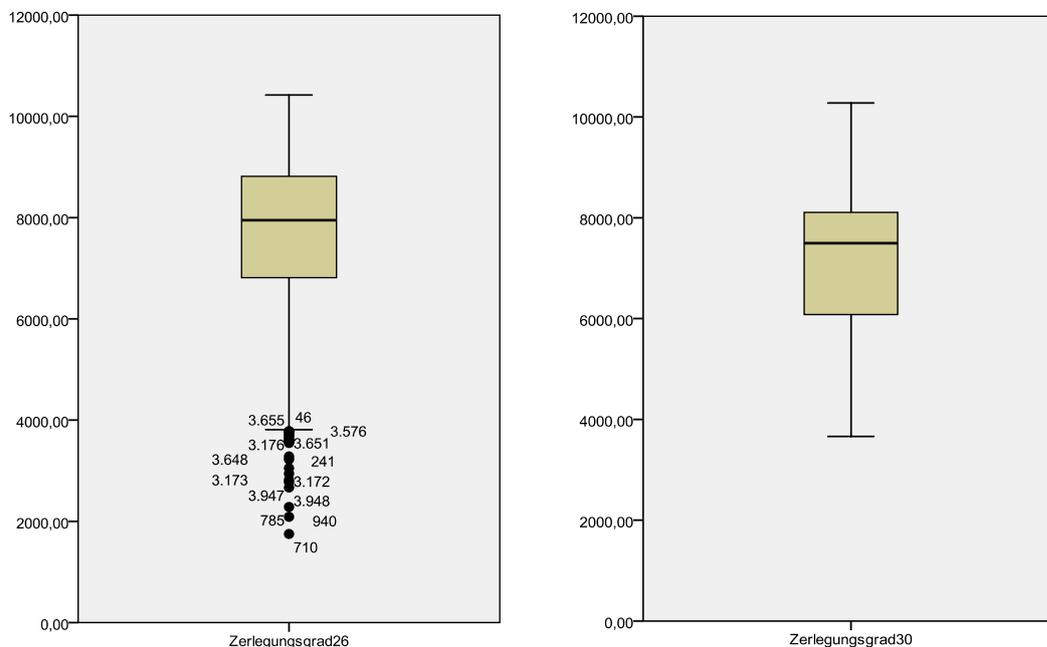


Abbildung 49 Boxplot Anpresskraft nach Zerlegungsgrad 26 und 30 laut Geologen

Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der ARGE

Die Boxplots der Abbildung 50 zeigen einen deutlichen Unterschied in der Lage der Box. Im schwächer zerlegten Bereich liegt die Box und somit auch die mittlere Anpresskraft wesentlich höher als im Diagramm des stärker zerlegten Bereiches (rechtes Diagramm). Die maximal aufgetretene Anpresskraft ist in den Diagrammen allerdings sehr ähnlich.

Analyse der Vortriebsgeschwindigkeit und der Anpresskraft in Abhängigkeit von der Gebirgszerlegung

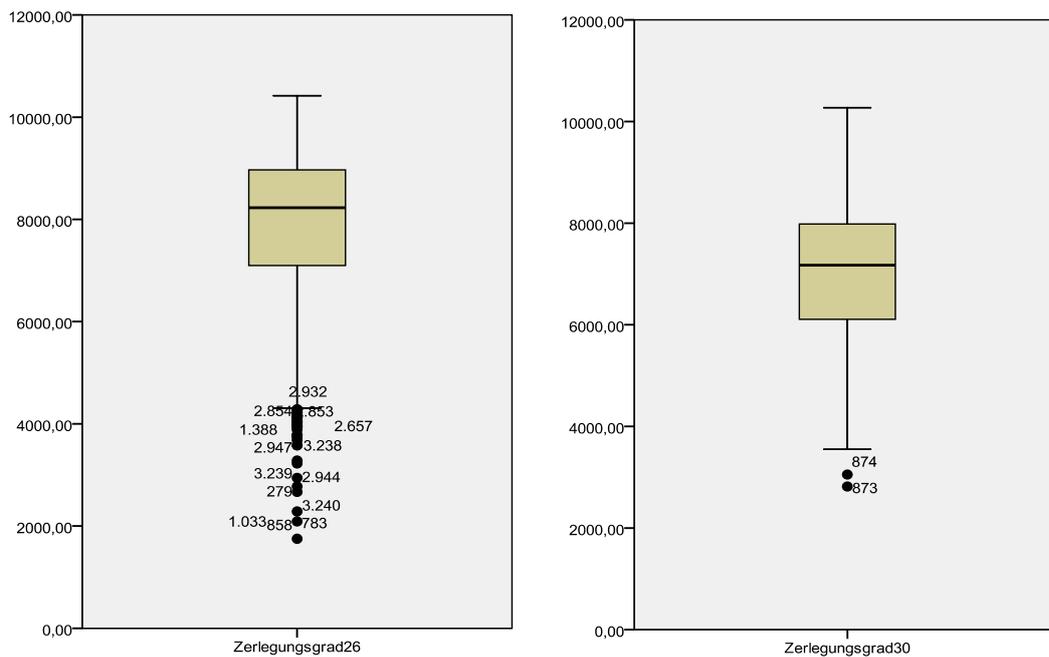


Abbildung 50 Boxplot Anpresskraft nach Zerlegungsgrad 26 und 30 laut ARGE

Der Streubereich der Anpresskraft mit Zerlegungsgrad 30 ist sehr groß. Die Spanne zwischen minimal und maximal auftretender Anpresskraft ist sehr groß. Die Spanne der Vortriebsgeschwindigkeit muss daher auch recht groß sein. In Abbildung 47 ist die Verteilung der Vortriebsgeschwindigkeit zu erkennen.

6.2 Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit

Die Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zerlegungsgrade und der unterschiedlichen Quellen lässt sich am besten anhand von Streudiagrammen erkennen. Die folgenden Streudiagramme zeigen die Verteilung der Datenpunkte der verschiedenen Zerlegungsgrade in Abhängigkeit der Anpresskraft und der Vortriebsgeschwindigkeit. Auf der Ordinate ist die Vortriebsgeschwindigkeit in m/h aufgetragen und die Anpresskraft in kN ist auf der Abszisse abgebildet.

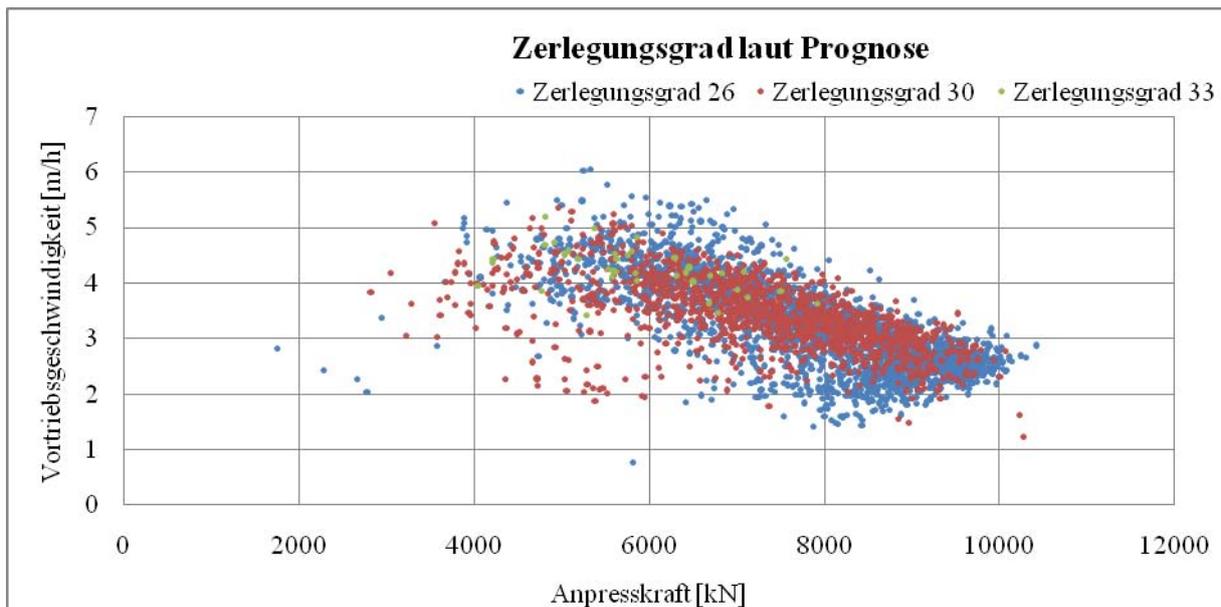


Abbildung 51 Streudiagramm Anpresskraft Vortriebsgeschwindigkeit laut Prognose

Abbildung 51 zeigt die Verteilung der Datenpunkte und die Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit. Die Einteilung der Zerlegungsgrade basiert auf dem Prognoselängenschnitt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die höchste Vortriebsgeschwindigkeit nicht im Zerlegungsgrad 33 aufgetreten ist sondern im Zerlegungsgrad 26. Der Zerlegungsgrad 26 beschreibt die am wenigsten zerklüfteten Bereiche. Der Zerlegungsgrad 30 weist einige einzelne Punkte im Bereich zwischen 3.000 und 6.000 kN auf. Ansonsten liegen die Datenpunkte entlang einer Linie zusammen. Es ist weiters zu erkennen, dass sowohl der Zerlegungsgrad 26 als auch der Zerlegungsgrad 30 große und kleine Vortriebsgeschwindigkeiten aufweisen. In diesem Diagramm kann der positive Einfluss der Zerklüftung auf die Vortriebsgeschwindigkeit nicht verifiziert werden, da die roten Punkt nicht hauptsächlich im oberen Bereich der Vortriebsgeschwindigkeit liegen.

Vergleicht man die Abbildung 51 mit der Abbildung 52 erkennt man sofort, dass laut Aufzeichnung der Geologen während des Vortriebes viel weniger Bereiche mit dem Zerlegungsgrad 30 festgestellt wurden. Die Anzahl der roten Datenpunkte ist wesentlich geringer. Doch auch in Abbildung 52 weisen die Bereiche mit einer höheren Zerlegung keine höheren Vortriebsgeschwindigkeiten auf. Die Datenpunkte der stärker zerklüfteten Bereiche verstreuen sich über das gesamte Diagramm. Die negative Korrelation zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit ist auch hier deutlich zu erkennen.

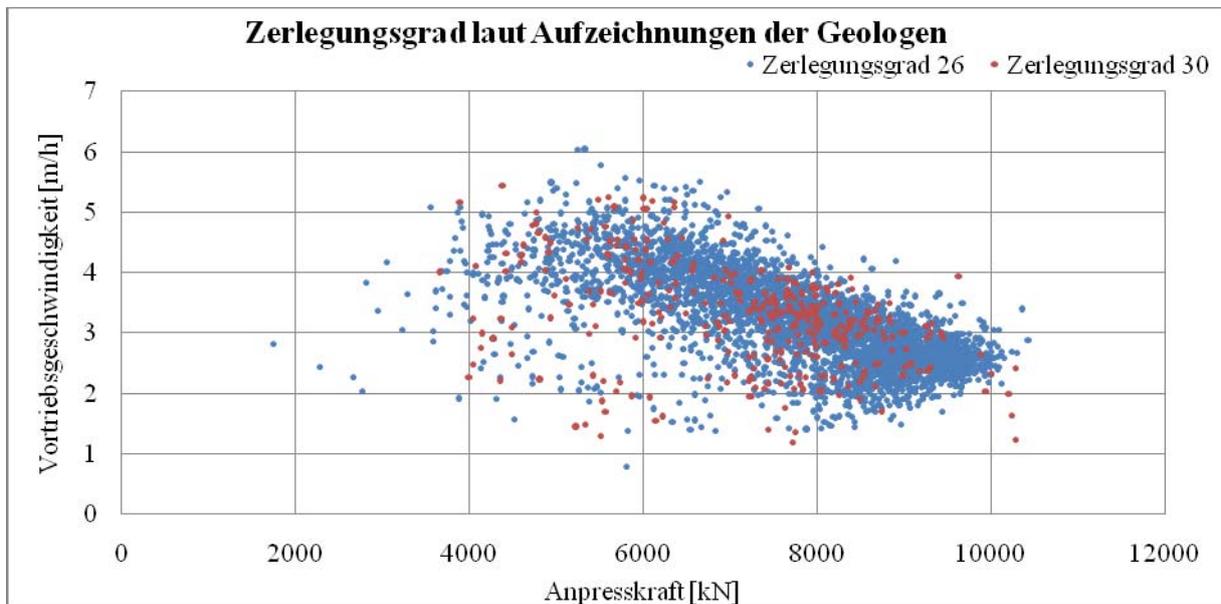


Abbildung 52 Streudiagramm Anpresskraft Vortriebsgeschwindigkeit laut Geologen

Die stärker zerlegten Bereiche, die die ARGE während des Vortriebs protokolliert hat, weisen im Vergleich zu jenen der Prognose und der Aufzeichnungen der Geologen geringfügig höhere Vortriebsgeschwindigkeiten auf. Die höchste Vortriebsgeschwindigkeit liegt aber auch in Abbildung 53 in einem weniger zerlegten Abschnitt.

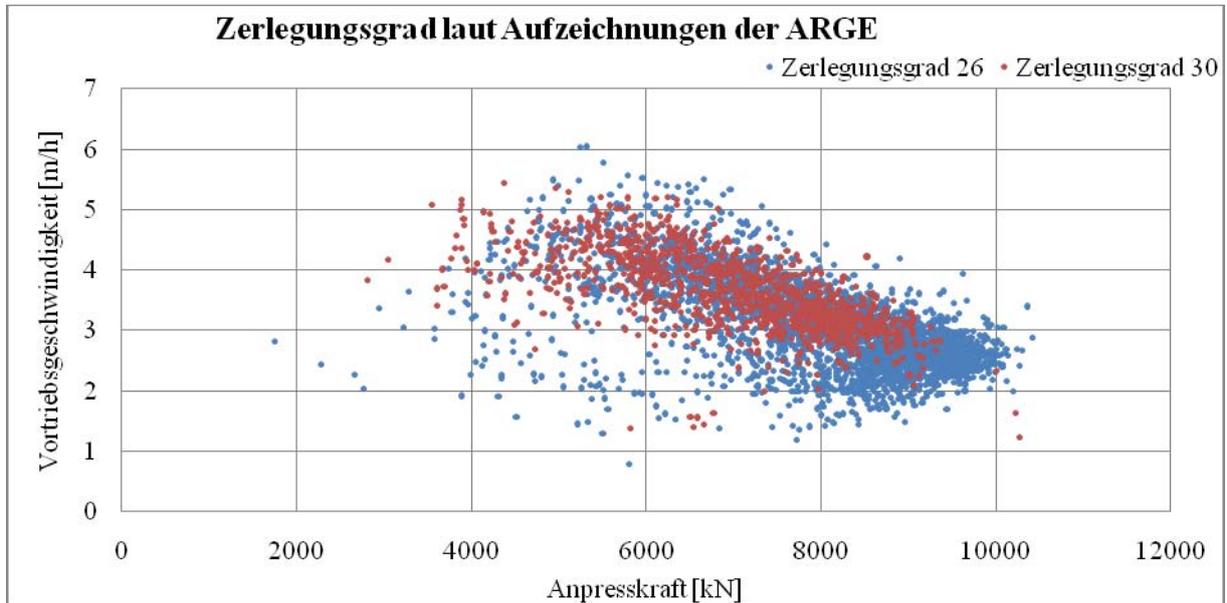


Abbildung 53 Streudiagramm Anpresskraft Vortriebsgeschwindigkeit laut ARGE

6.3 Analyse der Vortriebsgeschwindigkeit über die Stollenlänge

Die Diagramme in Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56 zeigen die über die Stollenlänge aufgetragene Vortriebsgeschwindigkeit. Die rote Linie stellt jeweils die Vortriebsgeschwindigkeit in den gemäß den angegebenen Quellen weniger zerklüfteten Abschnitten dar, die blaue Linie jene in den stärker zerklüfteten Abschnitten.

Laut Prognose ändert sich der Kluftabstand nach TM 2300 recht häufig. Die Spitzen der Vortriebsgeschwindigkeiten liegen meist in stärker zerlegten Abschnitten, aber es gibt auch einigen Spitzen, die laut Prognose in weniger zerlegten Abschnitten liegen.

Laut Aufzeichnungen der Geologen treten immer wieder Hinweise auf eine starke Zerlegung des Gesteins beziehungsweise Karst hin. Betrachtet man die Abbildung 55, erkennt man, dass in jenen Bereichen, wo laut Aufzeichnung eine starke Zerlegung angetroffen wurde, die Vortriebsgeschwindigkeit tatsächlich meist ein Maximum aufweist. Wegen der für diese Zwecke nur unzureichend genauen Stationierung der Geologen ist es jedoch möglich, dass im Diagramm der stark geklüftete Bereich (blaue Linie) kurz vor oder nach einem Maximum liegt. Dennoch ist das örtliche Maximum der Vortriebsgeschwindigkeit auf den angetroffenen Zerlegungsgrad zurückzuführen (vgl. Abbildung 46).

Laut Aufzeichnungen der ARGE ändert sich der Kluftabstand vor TM 2000 nur unwesentlich. Es wurden keine stark zerlegten Bereiche beziehungsweise Störungszonen aufgezeichnet. Die Vortriebsgeschwindigkeit steigt in diesem Abschnitt zwar kontinuierlich, jedoch ist es zu einer geringeren Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit gekommen gegenüber dem Vortrieb nach TM 2000. Im Bereich von TM 3060 bis TM 3671 wurde von der ARGE ein durchgehend stark geklüfteter Bereich festgestellt. Die Vortriebsgeschwindigkeit variiert in diesem Bereich von 2 bis 5 [m/h]. Falls daher wirklich der ganze Bereich stark zerklüftet war, kann kein Zusammenhang zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Zerlegungsgrad festgestellt werden.

Keiner der drei Aufzeichnungen ist jedoch ein stärker zerlegter Bereich am Stollenende zu entnehmen. Trotzdem steigt dort die Vortriebsgeschwindigkeit massiv an. In den letzten 100 Vortriebsmetern steigt die Vortriebsgeschwindigkeit von knapp über 3 [m/h] auf über 6 [m/h].

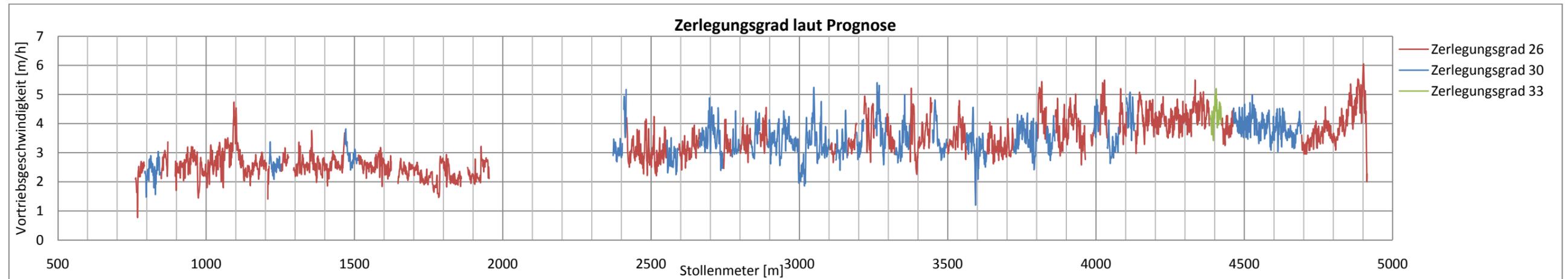


Abbildung 54 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Prognose (Vortriebsgeschwindigkeit)

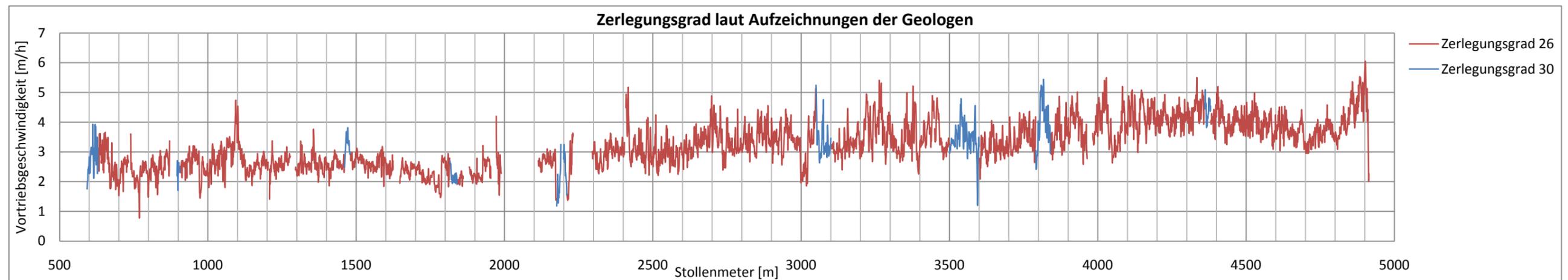


Abbildung 55 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der Geologen (Vortriebsgeschwindigkeit)

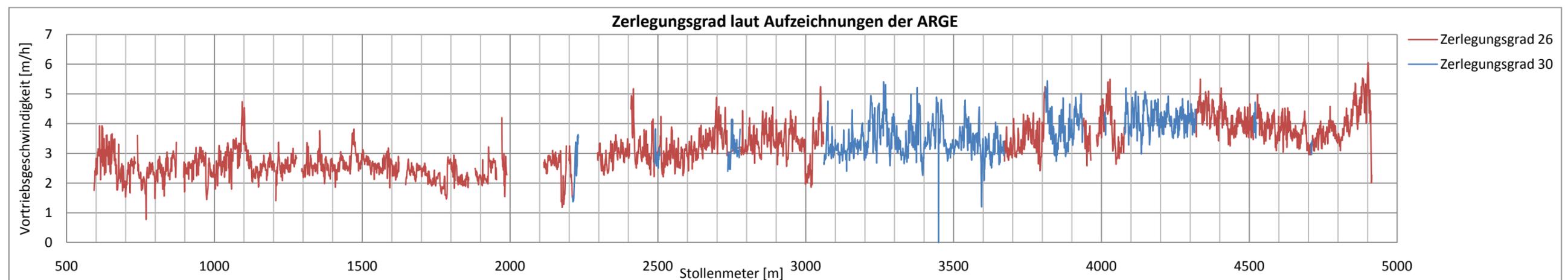


Abbildung 56 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der ARGE (Vortriebsgeschwindigkeit)

6.4 Analyse der Anpresskraft über die Stollenlänge

Wie auch unter 6.3 soll auch in diesem Abschnitt analog eine graphische Übersicht über den Verlauf der Anpresskraft in Abhängigkeit des Zerlegungsgrades entlang der Stollenachse gezeigt werden. Wie aus der negativen Korrelation zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Anpresskraft zu erwarten war, verläuft die Anpresskraft umgekehrt proportional zur Vortriebsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zerlegungsgrade. Die Abbildung 57, Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen den Verlauf der Anpresskraft über die Stollenlänge. Die rote Linie beschreibt die Bereiche mit dem Zerlegungsgrad 26, die blaue Linie entspricht der Anpresskraft in den Bereichen, die eine stärkere Zerklüftung aufweisen. In Abbildung 57 ist weiters eine grüne Linie zu erkennen. Diese entspricht dem Zerlegungsgrad 33.

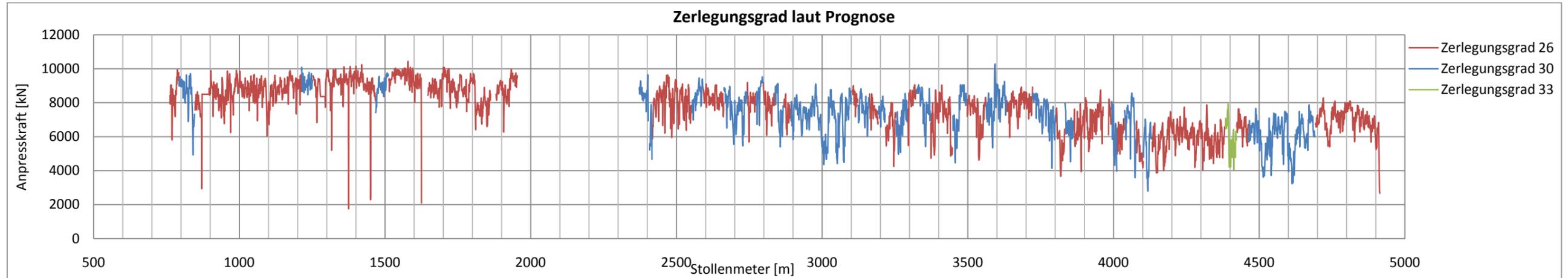


Abbildung 57 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Prognose (Anpresskraft)

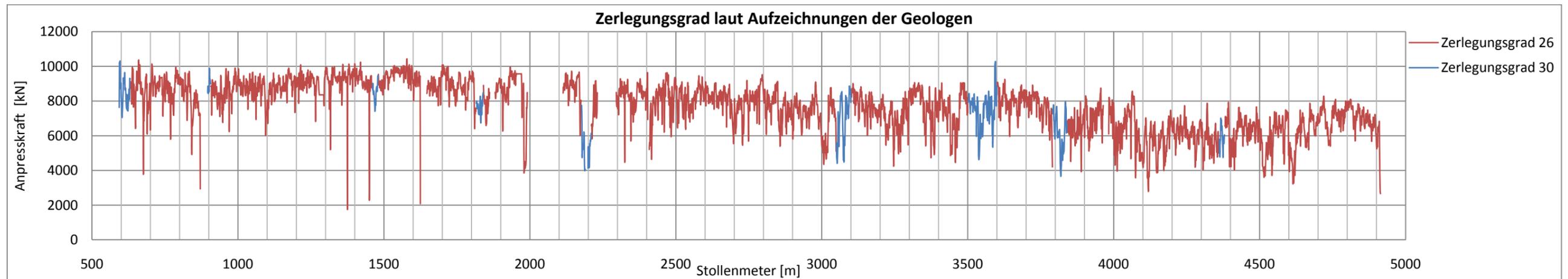


Abbildung 58 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der Geologen (Anpresskraft)

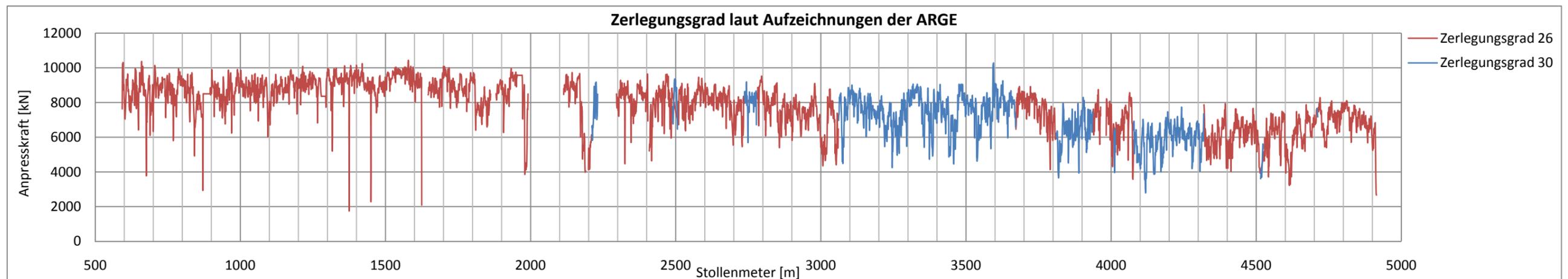


Abbildung 59 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der ARGE (Anpresskraft)

6.4 Dreidimensionale Analyse

Um das dreidimensionale Verhalten der Vortriebsgeschwindigkeit und der Anpresskraft über die Zerlegungsgrade besser zu erkennen, wurden dreidimensionale Diagramm erstellt. Die Diagramme wurden mit dem Statistikprogramm „R“ erzeugt. Die genauen Eingabebefehle befinden sich im Anhang (4 Eingabe in das Statistikprogramm „R“ Seite 29). Aufgrund der drei verschiedenen Quellen der Zerlegungsgrade wurden drei Diagramme erstellt.

Zerlegungsgrad laut Prognose

Die Abbildung 60 stellt die 3D- Fläche nach dem Zerlegungsgrad aus der Prognose dar. Die drei Linien mit den Datenpunkten entsprechen den Zerlegungsgraden 26, 30 und 33. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit über die Zerlegungsgrade in etwa konstant bleibt, aber nach einem Maximum bei etwa 5.000 kN mit steigender Anpresskraft abfällt.

Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der Geologen

In Abbildung 61 sind nur zwei Datenpunktlinien zu erkennen. Die linke entspricht dem Zerlegungsgrad 26 und die rechte dem Zerlegungsgrad 30. Auch in diesem Diagramm fällt die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit vom Zerlegungsgrad 26 zum Zerlegungsgrad 30 ab. Die Abnahme der mittleren Vortriebsgeschwindigkeit mit steigendem Zerlegungsgrad ist jedoch gering. Auch bei Zugrundelegung des Zerlegungsgrades nach den Aufzeichnungen der Geologen hat die Vortriebsgeschwindigkeit bei einer Anpresskraft von 5.000 kN ein Maximum und fällt mit höheren Anpresskräften ab.

Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der ARGE

Die Abbildung 62 zeigt den Zusammenhang zwischen Anpresskraft, Vortriebsgeschwindigkeit und dem Zerlegungsgrad, der während des Vortriebs von der ARGE registriert wurde. Die linke Datenpunktlinie entspricht dem Zerlegungsgrad 26 und die rechte dem Zerlegungsgrad 30. In diesem Diagramm steigt die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit mit steigendem Zerlegungsgrad etwa in dem Maß an, dass auch in Abbildung 44 Abhängigkeit der Penetration von Gesteinsart und Zerlegungsgrad (Tentschert, Poisel, & Zettler, 2005) Abbildung 44 angegeben wird. Auch bei Zugrundelage des

Zerlegungsgrades der ARGE fällt die mittlerer Vortriebsgeschwindigkeit nach einem Maximum bei etwa 5.000 kN mit steigender Anpresskraft ab.

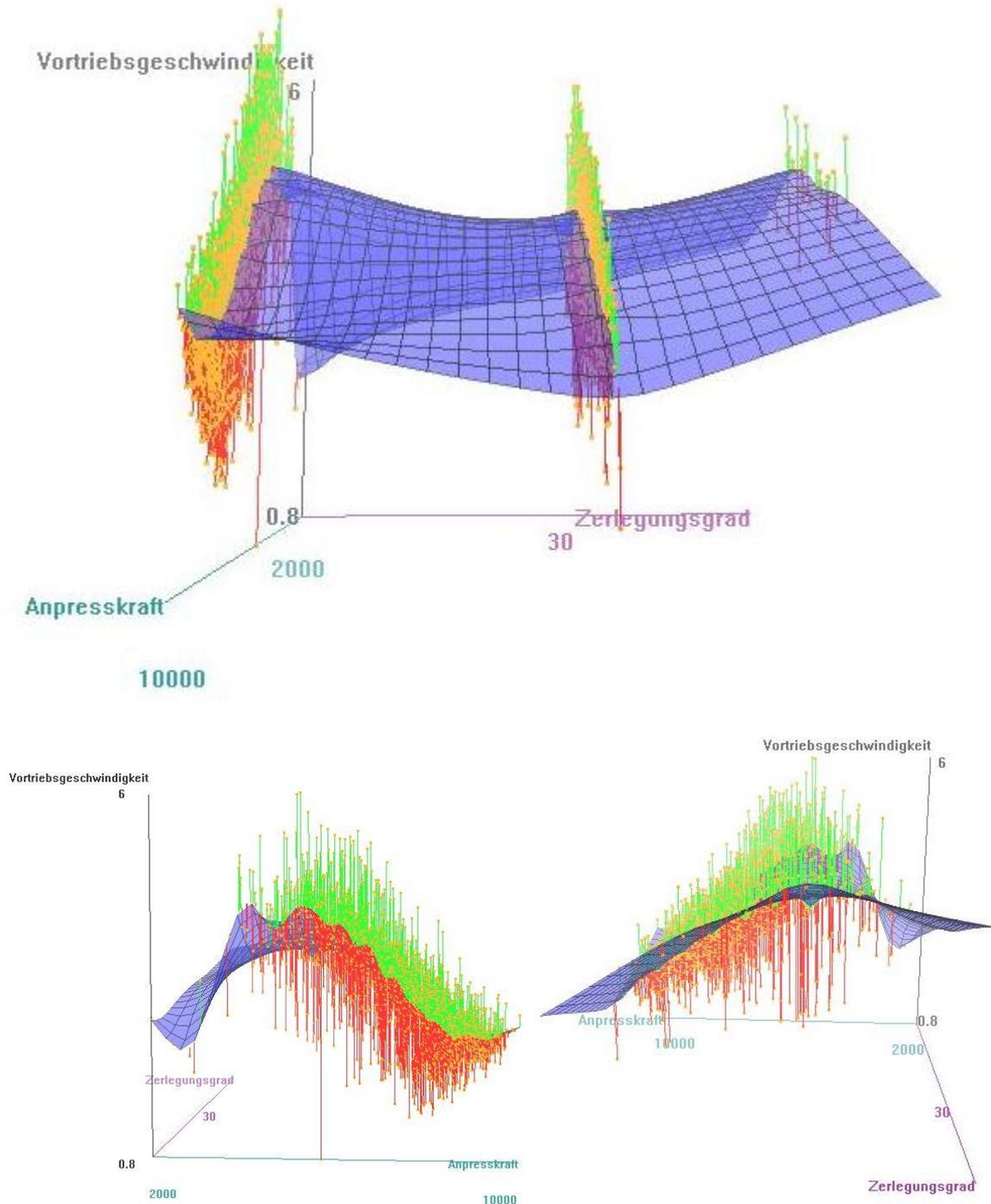


Abbildung 60 3D- Diagramm Zerlegungsgrad laut Prognose

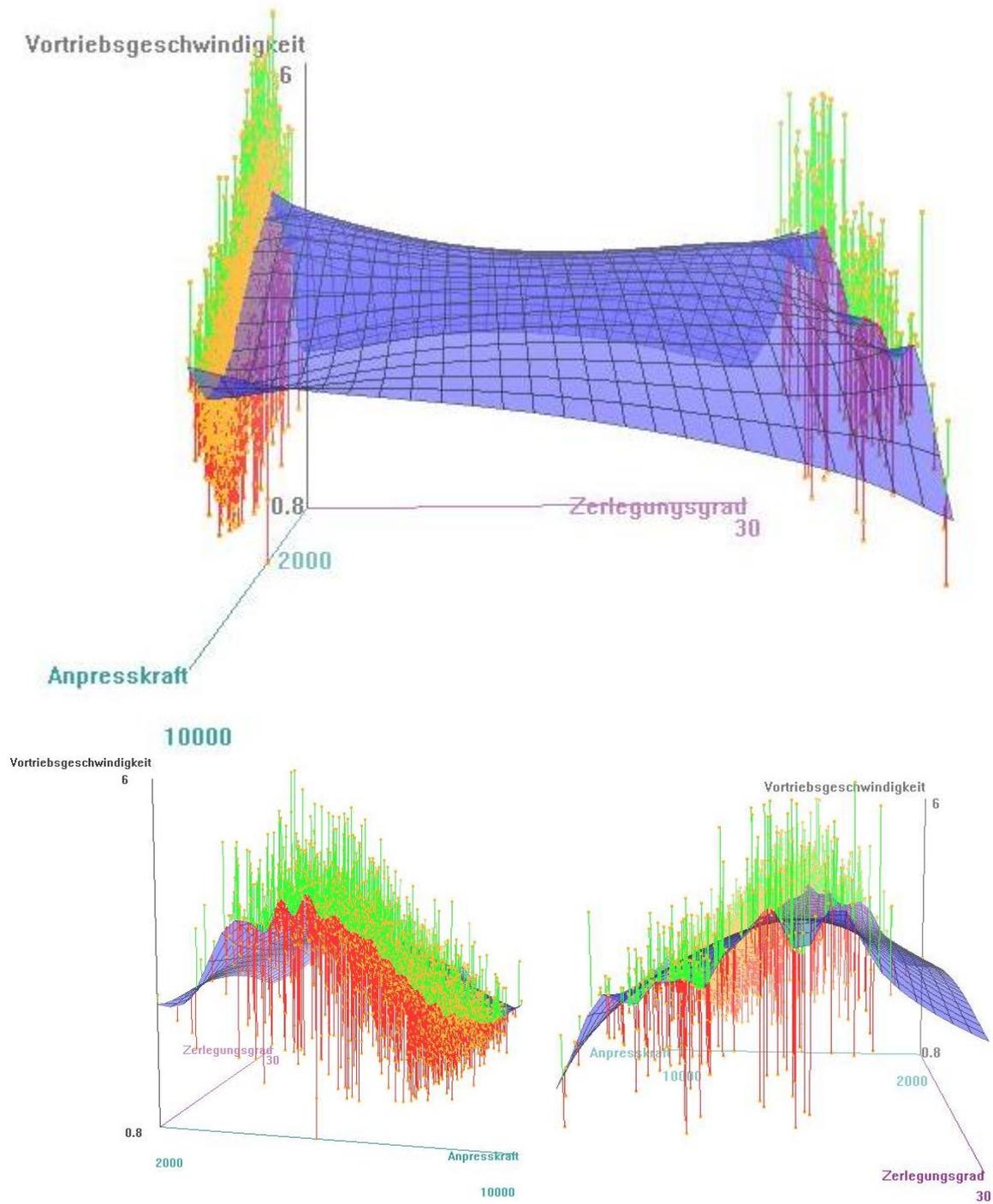


Abbildung 61 3D- Diagramm Zerlegungsgrad laut Geologen

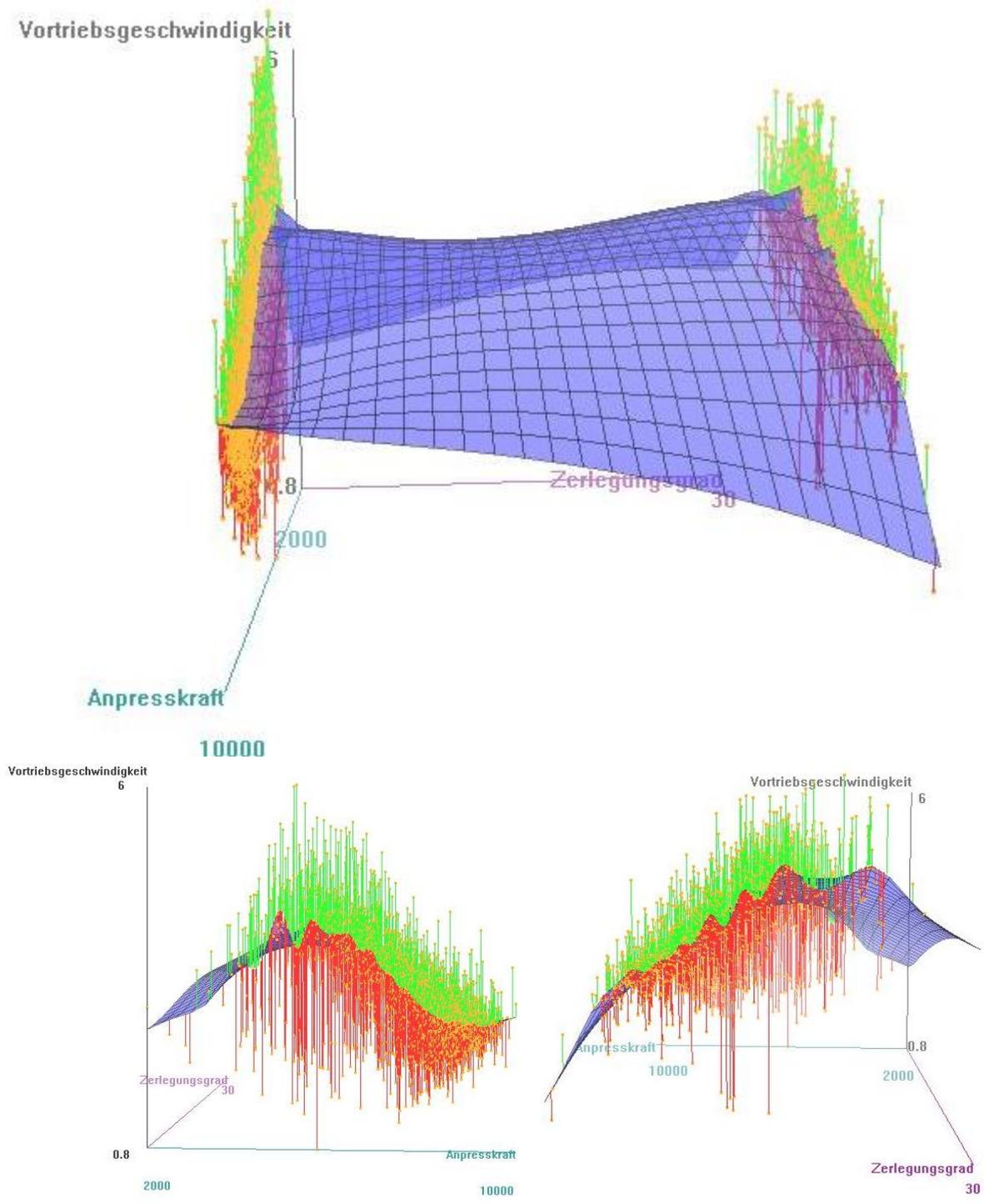


Abbildung 62 3D- Diagramm Zerlegungsgrad laut ARGE

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Weder die Prognose der Kluftabstände noch die Hinweise der Geologen und die Aufzeichnungen der ARGE über stärker zerklüftete Bereiche können die positive Wirkung des Zerlegungsgrades auf die Vortriebsgeschwindigkeit bestätigen. Es lässt sich keine eindeutige Korrelation zwischen einzelnen Spitzen der Vortriebsgeschwindigkeit und den von der ARGE und abschnittswisen von den Geologen dokumentierten Zerlegungsgraden des Gesteins feststellen.

Aus der statistischen Analyse der Vortriebsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Zerlegungsgrad lässt sich ableiten, dass die Vortriebsgeschwindigkeit mit stärkerer Zerlegung steigt. Dies wurde auch bereits in früheren Untersuchungen festgestellt. Da sich stärker zerlegtes Gebirge leichter lösen lässt, sinkt die Anpresskraft mit steigender Zerlegung. Die Streudiagramme der Vortriebsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den Anpresskräften und den Zerlegungsgraden lassen diese Zusammenhänge nicht eindeutig erkennen. Die statistische Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Zerlegungsgrad, Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit hat gezeigt, dass die Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit vom Zerlegungsgrad bei Beachtung des Einflusses von der Anpresskraft gering ist. Die dreidimensionale Analyse hat aber gezeigt, dass es mit hoher Wahrscheinlichkeit eine optimale Anpresskraft von etwa 5.000 kN gibt, bei der die Vortriebsgeschwindigkeit ein Maximum erreicht.

7 Lerneffekt der TBM- Fahrer

Die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine wird im Planungsstadium unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse, des Bohrkopfdurchmessers, der Ausrüstung der TBM und der elektrischen Leistung der TBM abgeschätzt.

In den ersten Monaten der sogenannten Startphase ist die Abschätzung der Vortriebsleistung jedoch schwierig. Die Arbeiter müssen mit dem Arbeitsprozess vertraut werden, die lokalen Verhältnisse kennenlernen und die geforderten Fähigkeiten erlernen. Beobachtet man die Vortriebsleistung einer TBM über die Vortriebslänge, so ist meist eine Steigerung der Vortriebsleistung erkennbar. Als Erklärung für diese Steigerung gilt der Effekt der Eingewöhnung, sofern kein anderer Grund plausibel erscheint, wie zum Beispiel Änderung der geologischen Verhältnisse (Wais & Wachter, 2005).

7.1 Annäherung des Effektes der Eingewöhnung und des Trainings

Zur Analyse dient der klassische Lernkurven Ansatz mit einer Exponentialfunktion. Dieser Ansatz wurde von Wachter (2001) aus einer Reihe von bereits fertiggestellten Projekten entwickelt. Die folgende Formel wurde ermittelt:

$$L(t) = a * (1 - e^{-ct}) * f_1$$

$L(t)$ = Vortriebsgeschwindigkeit pro Tag [m/wd]

t = Dauer des Vortriebs [d]

c = Lernkurvenparameter [-]

$f_1 = I_N/I_B$ Parameter der Filterfunktion

I_N = Nettovortriebsgeschwindigkeit während des Vortriebses [m/h]

I_B = Referenznettovortriebsgeschwindigkeit [m/h]

a = Lernkurvenparameter gewählt von I_B [m/wd]

Alle Randbedingungen der Baustelle, die einen Einfluss auf den Vortrieb haben, wurden von Wachter (2001) in einer Tabelle (vgl. Tabelle 8) erfasst. Die Randbedingungen werden mit 1

bis 5 bewertet (1= gut, 3= Standard, 5= schlecht). Alle Punkte werden am Ende zum Bemessungswert LRH zusammengerechnet (Wais & Wachter, 2005).

Tabelle 8 Evaluation of the project influences on the familiarization and training (Wais & Wachter, 2005)

| Group | Factors | Standard | Good | Poor | Points |
|------------------|----------------------------|---|---|--|--------|
| Human | Personal | permanent staff 40-50 %, familar with tunnelling, enough auxiliary staff avail. flexible working hours, small fluctuation | 100 % permanent staff, very flexible working hours, following an earlier site (from former sites) | low amount of permanent staff, labours from third world countries, high fluctuation rigid working hours rules | |
| | Organisation | Clear allocation of Function and responsibility, to experienced staff | Organisation allready in practice (from former sites) | Unclear Functions and Responsibility | |
| | Communicator | good ability to communicate in one common language for the key positions | Communication allready in practice (from former sites) | no or only minor ability to communicate in one language | |
| Machine | Diameter | Working space and power of the machine match with diameter | Lower planned diameter (performance reserve) | Diameter does not match with machine and trailer concept (too big, too small) | |
| | TBM type and trailersystem | tested and familarised to the key personal, suitable for soil conditions, suitable trailer, good logistics | System allready in practice (from former sites) | System and ist components do not fit together | |
| | Condition | TBM and trailer in a good refurbished condition, standard prone to break down | New system , low prone to break down | TBM and trailer used, high prone to break down | |
| | Support | tested and familarised to the key personal, suitable for TBM type | System allready in practice (from former sites) | unaccustomed, unpractical support system | |
| Surrounding | Infrastructure | Good accesibility, sufficient area, electric power and water | Good accesibility, sufficient area, electric power and water. Already developed site from former construction | poor accesible, poor conditions of area insufficient water and electric power | |
| | Supply | competitive suppliers, enough area for storage, suitable spare stock | allready known suppliers from former sites, no time pressure | new or unsuitable suppliers, lack of storage area, insufficient spare stock | |
| | Starting situation | Filling of key positions allready known minor obstacles by temporary measures low weathder soil and water at the start, secured start position (Abutment Frame, Starting trestle, Start Ring) | complete personal available, no obstacles temporary measures, no weathderd soil and no water at the starting position secured start position (Abutment Frame, Starting trestle, Start Ring) | insufficient staff available, many obstacles by temporary measures, insufficient start position, completely weathderd soil with water during start, high time pressure | |
| Rock | Formation | No gas, loose rocks, drilling possible low water inflow | No gas, stable, good to very good drillable (not too hard), no water inflow | Gas, unstable soil, Water inflow, many changes in soil conditions | |
| Summ LRH: | | | | | |

Der Bemessungswert LRH klassifiziert die Lernsituation auf der Baustelle. Die Klasseneinteilung erfolgt nach Tabelle 9.

Tabelle 9 System of classification for LRH (Wais & Wachter, 2005)

| Good | | Standard | | Poor | |
|------|----|----------|----|------|----|
| 55 | 44 | 43 | 23 | 22 | 11 |

Für die Analyse des Lerneffektes am Beispiel Hieflau wurde ein LRH von 55 gewählt. Für eine Doppelschildmaschine resultiert aus dem LRH der Lernkurvenparameter $c=0,02$ (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10 Learning curve parameter c for both types of TBM (Wais & Wachter, 2005)

| TBM Type | Assesment | Learning Parameter | |
|--------------------|-----------|--------------------|------|
| | | from | to |
| Double Shield TBM | good | 0,02 | < |
| | standard | 0,01 | 0,02 |
| | poor | < | 0,01 |
| Open TBM (Gripper) | good | 0,05 | 0,25 |
| | standard | 0,01 | 0,05 |
| | poor | < | 0,01 |

Tabelle 11 zeigt die verschiedenen Werte, die für den Ansatz nach Wachter (2001) benötigt werden.

Tabelle 11 Berechnungswerte nach Wachter (2001)

| Chainage [m] | Percentage | boring speed [m/h] I_N | daily advance [m/wd] a_i | f_1 [-] |
|--------------|------------|--------------------------|----------------------------|-----------|
| 354- 809 | 10% | 2,56 | 18,94 | 0,83 |
| 809- 2174 | 30% | 2,67 | 19,75 | 0,86 |
| 2174- 4900 | 60% | 3,58 | 26,49 | 1,15 |

23,71

| | | |
|--------------------------|------|-----------|
| $a = 23$ | m/wd | gewählt |
| $I_B = 3,1$ | m/h | gerechnet |
| $a_i = 20h * I_N * 37\%$ | | gerechnet |

Nach Einsetzen der Werte in die Formel:

$$L(t) = a * (1 - e^{-a*t}) * f_1$$

Erhält man die tägliche Vortriebsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Lerneffektes. Abbildung 63 zeigt den Vergleich von der tatsächlich aufgefahrene Stollenlänge über die Vortriebsdauer mit der aus der Formel von Wachter (2001) ermittelten Stollenlänge über die Vortriebsdauer.

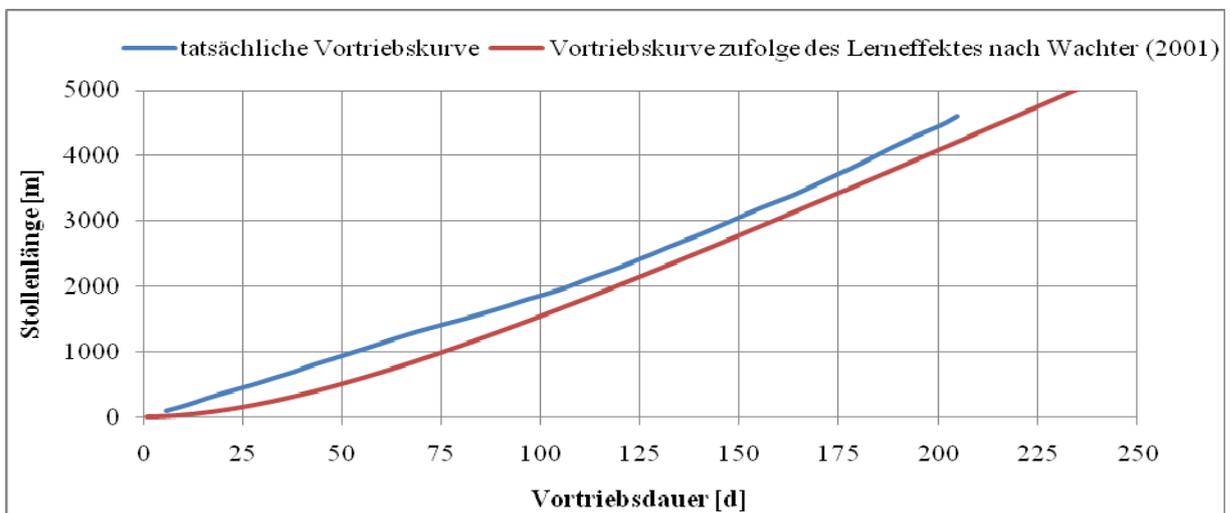


Abbildung 63 Vergleich tatsächliche Kurve- theoretische Kurve Lerneffekt

Die Abszisse zeigt die Dauer des Vortriebs in Tagen und die Ordinate zeigt die aufgefahrene Stollenlänge in Metern. Der Vergleich der tatsächlichen Kurve und der theoretischen Kurve zeigt, dass bei Anwendung von Parametern, die von Wachter (2001) angegeben wurden, die Kurven zwar nicht gleich sind, aber die Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit mit steigender Stationierung auch auf einen Lerneffekt zurückgeführt werden kann.

8 Interpretation und Schlussfolgerungen

Ausgehend von den erhobenen Daten über die geologischen Verhältnisse sowie der im gegenständlichen Projekt verwendeten Tunnelbohrmaschine wurde in dieser Arbeit versucht, mittels statistischer Methoden Zusammenhänge der TBM- Daten untereinander und von TBM- Daten mit bestimmten Gesteinsparametern aufzuzeigen.

Es konnte kein signifikanter Zusammenhang der TBM- Daten mit den einzelnen Gesteinsarten ermittelt werden. Offenbar unterscheiden sich die Gesteine zu wenig untereinander, um deutliche Differenzen zwischen den Bereichen 1 bis 5 in der Datenanalyse erkennbar zu machen. Die Gesteinsart ist im vorliegenden Fall daher mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht der für die Vortriebsgeschwindigkeit maßgebliche Einflussfaktor. Die großen Vortriebsgeschwindigkeiten wurden mit einer geringen Anpresskraft und einem Drehmoment im Bereich zwischen 1.200 und 1.400 kNm erreicht. Zwischen Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit wurde eine deutlich negative Korrelation festgestellt: je niedriger die Anpresskraft war, desto höher stieg die Vortriebsgeschwindigkeit. Das Gebirge ist offensichtlich so sehr verspannt, dass es bei einer hohen Anpresskraft nur schwer lösbar wird. Dies führt zu einer niedrigen Vortriebsgeschwindigkeit. Reduziert man jedoch die Anpresskraft und lässt dem Gebirge die Möglichkeit zur ausreichenden Entspannung, steigt die Lösbarkeit und somit auch die erzielbaren Vortriebsgeschwindigkeiten (Bilak, mündliche Mitteilung, 2009).

Zwischen dem Drehmoment und der Vortriebsgeschwindigkeit konnte kein Zusammenhang gefunden werden, da der diesbezügliche Korrelationskoeffizient nahe Null liegt.

Das Drehmoment und die Anpresskraft weisen eine positive Korrelation auf. Durch die Steigerung der Anpresskraft dringen die Diskenmeißel tief in die Ortsbrust ein, woraus eine Erhöhung des Drehmomentes resultiert.

Weiters erscheint es naheliegend, dass die Förderbandkapazität einen wesentlichen Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit genommen hat. Die maximale maschinentechnisch bedingte Vortriebsgeschwindigkeit lag bei etwa 5 m/h (Riedel, 2009). Betrachtet man die Vortriebsgeschwindigkeit über die gesamte Stollenlänge (vgl. z.B. Abbildung 54), so erkennt man einige Spitzen, bei denen der Wert von 5 m/h überschritten wurden. In den Bereichen danach ist stets ein Einbruch in der Vortriebsgeschwindigkeit zu erkennen. Durch die Überschreitung des maschinentechnischen Maximalwertes wurde mehr Ausbruchsmaterial in

den Schildkopf befördert als abtransportiert werden konnte. Im Schild sammelte sich daher Material an, das händisch auszuschaufeln war, wodurch die Bruttovortriebsgeschwindigkeit wegen kurzzeitigen Stillstands der Maschine gesunken ist. Diese Problematik ist erst im Bereich nach dem Hartelsgraben aufgetreten, wo der sehr gut lösbare Dachsteinkalk anstand. Vor dem Hartelsgraben jedoch konnten im Dachsteinkalk keine derart hohen Vortriebsleistungen erreicht werden. Die geringen Unterschiede des Dachsteinkalks vor und nach dem Hartelsgraben sind keine hinreichenden Erklärungen für die Unterschiedlichkeit der Vortriebsgeschwindigkeiten. Sie dürfte der technisch-wirtschaftlichen Sphäre zuzuschreiben sein.

Aus der statistischen Analyse der Vortriebsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Zerlegungsgrad lässt sich ableiten, dass die Vortriebsgeschwindigkeit mit stärkerer Zerlegung steigt. Die Streudiagramme der Vortriebsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den Anpresskräften und den Zerlegungsgraden lassen diese Zusammenhänge nicht eindeutig erkennen. Die dreidimensionale Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Zerlegungsgrad, Anpresskraft und Vortriebsgeschwindigkeit hat gezeigt, dass die Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit vom Zerlegungsgrad bei Beachtung des Einflusses von der Anpresskraft gering ist. Die dreidimensionale Analyse hat weiter gezeigt, dass es mit hoher Wahrscheinlichkeit eine optimale Anpresskraft von etwa 5.000 kN gibt, bei der die Vortriebsgeschwindigkeit ein Maximum erreicht.

Die Untersuchung des Lerneffektes hat ergeben, dass die Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit mit steigender Stationierung auch auf einen Lerneffekt zurückgeführt werden kann.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass die Steigerung der Vortriebsgeschwindigkeit beim neuen Triebwasserstollen des Kraftwerks Hieflau mit hoher Wahrscheinlichkeit nur geringfügig durch einen höheren Zerlegungsgrad bedingt ist. Die Steigerung ist vermutlich auch auf einen Lerneffekt im weitesten Sinn zurückzuführen. Unabhängig von den Gebirgsparametern erreicht die Vortriebsgeschwindigkeit bei einer Anpresskraft von 5.000 kN ein Maximum und fiel bei einer Steigerung der Anpresskraft ab.

Literaturverzeichnis

Ampferer, O. (1935). Geologische Karte der Gesäuseberge. Geologische Bundesanstalt.

Bach, D. (2000). *Automatische Gebirgsklassifizierung von mechanisch vorgetriebenen Tunneln und automatische Regelung von Tunnelbohrmaschinen mit Hilfe von Fuzzy- Logik Konzepten*. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeologie an der TU Wien.

Bilak, A. (2009). *Längenschnitt in der Achse des neuen Triebwasserstollen talseitig des bestehenden Stollen*. Übersichtsplan.

Bilak, A. (2009). mündliche Mitteilung.

Bitschnau, M., Gappmaier, F., & Weber, W. (2009). Erweiterung Kraftwerk Hieflau-mechanischer Vortrieb mit innovativen Lösungen. *Geomechanics and Tunnelling 2* , S. S. 85-93.

Brosius, F. (2008). *SPSS 16*.

Büchi, E. (1984). *Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine*. Inauguraldissertation, Bern.

Department of Statistics and Mathematics, WU- Wien. (2009). "R". Abgerufen am 2. Mai 2009 von <http://cran.r-project.org>

Riedel. (2009). mündliche Mitteilung.

Selden, K. (1967). Der Wagspeicher oberhalb des Ennskraftwerkes Hieflau. *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* , Heft 3, S. S. 69-108.

Tamerl, H. (2007). Heimische Energie aus Wasser. Strom aus der Enns. Erweiterung Kraftwerk Hieflau.

Tamerl, H. (2006). Strom aus der Enns. Kraftwerk Hieflau.

Tentschert, E., Poisel, R., & Zettler, A. (2005). Gefügeeinfluss auf TBM- Vortriebe. *Felsbau* , S. S. 42-47.

Verbund Austrain Hydro Power.; Pöyry Infra GmbH. (2007). *Erweiterung Hieflau Geologischer Längenschnitt in Stollenachse*. Plan.

Verbund Austrian Hydro Power. *Projekt Erweiterung Hieflau Kurzbeschreibung Geologie*. unveröffentlichter Bericht.

Verbund Austrian Hydro Power. (2009). *Verbund*. Abgerufen am 23. April 2009 von <http://www.verbund.at>

Wais, A., & Wachter, R. (2005). Predicting the Learning Curve in TBM Tunneling. In *Tunnelbau- Beiträge aus der Forschung und Praxis: Festschrift anlässlich des 65. Geburtstags von o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Eckart Schneider* (S. 143- 154). Leiter & Wais.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1 Lage des Kraftwerks Hieflau (Selden, 1967) | 4 |
| Abbildung 2 Schematische Darstellung Kraftwerk Hieflau (Verbund Austrian Hydro Power, 2009)..... | 6 |
| Abbildung 3 3D Ansicht Tübbingauskleidung (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009)..... | 8 |
| Abbildung 4 Längenschnitt Tübbingausbau (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009)..... | 8 |
| Abbildung 5 Längenschnitt Injektionsrohrschirm (Bitschnau, Gappmaier, & Weber, 2009).. | 10 |
| Abbildung 6 Geologischer Übersichtsplan (Ampferer, 1935)..... | 12 |
| Abbildung 7 Geologischer Prognoselängenschnitt (Verbund Austrian Hydro Power)..... | 14 |
| Abbildung 8 Einteilung in geotechnische Homogenbereiche nach Gesteinsart..... | 15 |
| Abbildung 9 Bestimmung des Zerlegungsgrades nach Tentschert (1984) (Bach, 2000)..... | 17 |
| Abbildung 10 Bedeutung der Elemente eines Boxplot- Diagramms | 23 |
| Abbildung 11 Boxplots Bereich 1 | 25 |
| Abbildung 12 Boxplots Bereich 2 | 25 |
| Abbildung 13 Boxplots Bereich 3 | 25 |
| Abbildung 14 Boxplots Bereich 4 | 25 |
| Abbildung 15 Boxplots Bereich 5 | 25 |
| Abbildung 16 Streudiagramme Bereich 1 | 33 |
| Abbildung 17 Streudiagramme Bereich 2 | 35 |
| Abbildung 18 Streudiagramme Bereich 3 | 37 |
| Abbildung 19 Streudiagramme Bereich 4 | 39 |
| Abbildung 20 Streudiagramme Bereich 5 | 41 |
| Abbildung 21 3D- Diagramm Bereich 1 | 43 |
| Abbildung 22 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 1..... | 44 |
| Abbildung 23 3D- Diagramm Bereich 2 | 45 |
| Abbildung 24 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 2..... | 45 |
| Abbildung 25 3D- Diagramm Bereich 3 | 46 |
| Abbildung 26 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 3..... | 47 |
| Abbildung 27 3D- Diagramm Bereich 4 | 48 |
| Abbildung 28 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 4..... | 49 |
| Abbildung 29 3D- Diagramm Bereich 5 | 50 |
| Abbildung 30 3D- Diagramm mit Drehmomentgruppeneinteilung Bereich 5..... | 50 |
| Abbildung 31 Beispiel Schnitt durch die 3D- Fläche..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 32 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800-1.000 kNm Bereich 1..... | 53 |
| Abbildung 33 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm Bereich 2..... | 53 |
| Abbildung 34 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.000- 1.200 kNm Bereich 2..... | 54 |
| Abbildung 35 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.200- 1.400 kNm Bereich 2..... | 54 |
| Abbildung 36 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.400- 1.600 kNm Bereich 2..... | 55 |
| Abbildung 37 Bereich 2 in Drehmomentgruppen geteilt | 55 |
| Abbildung 38 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm Bereich 3..... | 56 |
| Abbildung 39 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.000- 1.200 kNm Bereich 3..... | 57 |
| Abbildung 40 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 800- 1.000 kNm Bereich 4..... | 57 |
| Abbildung 41 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.000- 1.200 kNm Bereich 4..... | 58 |
| Abbildung 42 Schnitt durch die Drehmomentgruppe 1.200- 1.400 kNm Bereich 5..... | 58 |
| Abbildung 43 Bereich 5 in Drehmomentgruppen geteilt | 59 |
| Abbildung 44 Abhängigkeit der Penetration von Gesteinsart und Zerlegungsgrad (Tentschert, Poisel, & Zettler, 2005) | 61 |
| Abbildung 45 Boxplot Vortriebsgeschwindigkeit Zerlegungsgrad 26, 30 und 33 laut Prognose | 63 |
| Abbildung 46 Boxplot Vortriebsgeschwindigkeit Zerlegungsgrad 26 und 30 laut Geologen . | 64 |
| Abbildung 47 Boxplot Vortriebsgeschwindigkeit Zerlegungsgrad 26 und 30 laut ARGE..... | 65 |
| Abbildung 48 Boxplot Anpresskraft nach Zerlegungsgrad 26, 30 und 33 laut Prognose | 67 |
| Abbildung 49 Boxplot Anpresskraft nach Zerlegungsgrad 26 und 30 laut Geologen | 68 |
| Abbildung 50 Boxplot Anpresskraft nach Zerlegungsgrad 26 und 30 laut ARGE..... | 69 |
| Abbildung 51 Streudiagramm Anpresskraft Vortriebsgeschwindigkeit laut Prognose..... | 71 |
| Abbildung 52 Streudiagramm Anpresskraft Vortriebsgeschwindigkeit laut Geologen..... | 72 |
| Abbildung 53 Streudiagramm Anpresskraft Vortriebsgeschwindigkeit laut ARGE..... | 73 |
| Abbildung 54 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Prognose (Vortriebsgeschwindigkeit) . | 75 |
| Abbildung 55 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der Geologen (Vortriebsgeschwindigkeit) | 75 |
| Abbildung 56 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der ARGE (Vortriebsgeschwindigkeit) | 75 |
| Abbildung 57 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Prognose (Anpresskraft)..... | 77 |
| Abbildung 58 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der Geologen (Anpresskraft)..... | 77 |
| Abbildung 59 Zerlegungsgrad über Stollenlänge laut Aufzeichnungen der ARGE (Anpresskraft)..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 60 3D- Diagramm Zerlegungsgrad laut Prognose..... | 79 |
| Abbildung 61 3D- Diagramm Zerlegungsgrad laut Geologen | 80 |
| Abbildung 62 3D- Diagramm Zerlegungsgrad laut ARGE..... | 81 |
| Abbildung 63 Vergleich tatsächliche Kurve- theoretische Kurve Lerneffekt..... | 85 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1 Ausschnitt Datalogger | 20 |
| Tabelle 2 Ausfälle der automatischen Datenaufzeichnung | 21 |
| Tabelle 3 Korrelationskoeffizient Bereich 1 | 29 |
| Tabelle 4 Korrelationskoeffizient Bereich 2 | 29 |
| Tabelle 5 Korrelationskoeffizient Bereich 3 | 30 |
| Tabelle 6 Korrelationskoeffizient Bereich 4 | 30 |
| Tabelle 7 Korrelationskoeffizient Bereich 5 | 31 |
| Tabelle 8 Evaluation of the project influences on the familiarization and training (Wais & Wachter, 2005) | 84 |
| Tabelle 9 System of classification for LRH (Wais & Wachter, 2005)..... | 84 |
| Tabelle 10 Learning curve parameter c for both types of TBM (Wais & Wachter, 2005) | 84 |
| Tabelle 11 Berechnungswerte nach Wachter (2001)..... | 85 |

Planverzeichnis

Plan 01: Übersicht der Maschinenparameter über die Stollenlänge

Plan 02: „Erweiterung Hieflau Geologischer Längenschnitt in Stollenachse.“ Geologisch-geotechnischer Längenschnitt (Verbund Austrain Hydro Power.; Pöyry Infra GmbH, 2007)

Anhang

Anhangverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1. Boxplots nach Gesteinsarten | 1 |
| 1.1. Bereich 1 | 1 |
| 1.2. Bereich 2 | 4 |
| 1.3. Bereich 3 | 7 |
| 1.4. Bereich 4 | 10 |
| 1.5. Bereich 5 | 13 |
| 2. Boxplots der Vortriebsgeschwindigkeit nach Zerlegungsgraden..... | 16 |
| 2.1. Zerlegungsgrad laut Prognose..... | 16 |
| 2.2. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnung der Geologen | 18 |
| 2.3. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der ARGE | 20 |
| 3. Boxplots der Anpresskraft nach Zerlegungsgraden | 22 |
| 3.1. Zerlegungsgrad laut Prognose..... | 22 |
| 3.2. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der Geologen..... | 25 |
| 3.3. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der ARGE | 27 |
| 4. Eingabe in das Statistikprogramm „R“..... | 29 |

1. Boxplots nach Gesteinsarten

Die Boxplots wurden mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Statistics 17.0 erzeugt. Es wurde eine „explorative Datenanalyse“ durchgeführt. Die Diagramme zu den nachfolgenden Tabellen befinden sich im Kapitel 5.1 Statistische Untersuchung der Daten, Boxplots, Seite 23.

1.1. Bereich 1

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Anpresskraft | 848 | 100,0% | 0 | ,0% | 848 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|--------------|--|---|----------------|
| Anpresskraft | Mittelwert | 8884,5765 | 27,82244 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 8829,9675 Obergrenze 8939,1855 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 8949,3144 | |
| | Median | 9019,4954 | |
| | Varianz | 656426,769 | |
| | Standardabweichung | 810,20168 | |
| | Minimum | 1751,14 | |
| | Maximum | 10421,61 | |
| | Spannweite | 8670,47 | |
| | Interquartilbereich | 899,29 | |
| | Schiefe | -2,658 | ,084 |
| | Kurtosis | 16,151 | ,168 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Anpresskraft | 8500,0000 | 9019,4954 | 9399,2857 |
| Tukey-Angelpunkte | Anpresskraft | 8500,0000 | 9019,4954 | 9398,5714 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------|----------------|---|------------|----------|
| Anpresskraft | Größte Werte | 1 | 827 | 10421,61 |
| | | 2 | 826 | 10299,67 |
| | | 3 | 668 | 10239,86 |
| | Kleinste Werte | 1 | 623 | 1751,14 |
| | | 2 | 698 | 2284,88 |
| | | 3 | 119 | 2942,50 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Drehmoment | 824 | 97,2% | 24 | 2,8% | 848 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------|--|--------------------------|----------------|
| Drehmoment | Mittelwert | 1552,7470 | 8,02045 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 1537,0041 | |
| | | Obergrenze 1568,4900 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 1570,2356 | |
| | Median | 1590,9222 | |
| | Varianz | 53005,933 | |
| | Standardabweichung | 230,23017 | |
| | Minimum | 137,38 | |
| | Maximum | 2096,76 | |
| | Spannweite | 1959,38 | |
| | Interquartilbereich | 244,11 | |
| | Schiefte | -1,540 | ,085 |
| | Kurtosis | 4,605 | ,170 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Drehmoment | 1459,2080 | 1590,9222 | 1703,3156 |
| Tukey-Angelpunkte | Drehmoment | 1459,2392 | 1590,9222 | 1703,2554 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------|----------------|---|------------|---------|
| Drehmoment | Größte Werte | 1 | 3 | 2096,76 |
| | | 2 | 668 | 2076,52 |
| | | 3 | 160 | 2020,86 |
| | Kleinste Werte | 1 | 119 | 137,38 |
| | | 2 | 17 | 142,12 |
| | | 3 | 565 | 621,09 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Vortriebsgeschwindigkeit | 803 | 94,7% | 45 | 5,3% | 848 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | | Statistik | Standardfehler |
|--------------------------|--|-------------|-----------|----------------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Mittelwert | | 2,6170 | ,01417 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze | 2,5892 | |
| | | Obergrenze | 2,6448 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | | 2,6066 | |
| | Median | | 2,5888 | |
| | Varianz | | ,161 | |
| | Standardabweichung | | ,40141 | |
| | Minimum | | ,76 | |
| | Maximum | | 4,83 | |
| | Spannweite | | 4,08 | |
| | Interquartilbereich | | ,43 | |
| | Schiefe | | ,737 | ,086 |
| | Kurtosis | | 4,062 | ,172 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Vortriebsgeschwindigkeit | 2,3938 | 2,5888 | 2,8212 |
| Tukey-Angelpunkte | Vortriebsgeschwindigkeit | 2,3948 | 2,5888 | 2,8201 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------------------|----------------|---|------------|------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Größte Werte | 1 | 349 | 4,83 |
| | | 2 | 342 | 4,73 |
| | | 3 | 348 | 4,34 |
| | Kleinste Werte | 1 | 17 | ,76 |
| | | 2 | 456 | 1,40 |
| | | 3 | 222 | 1,45 |

1.2. Bereich 2

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Anpresskraft | 397 | 99,0% | 4 | 1,0% | 401 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|--------------|--|--------------------------|----------------|
| Anpresskraft | Mittelwert | 8044,8440 | 41,17299 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 8125,7889 | |
| | | Obergrenze 7963,8990 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 8094,1712 | |
| | Median | 8182,1495 | |
| | Varianz | 673000,405 | |
| | Standardabweichung | 820,36602 | |
| | Minimum | 4665,00 | |
| | Maximum | 9632,98 | |
| | Spannweite | 4967,98 | |
| | Interquartilbereich | 911,03 | |
| | Schiefe | -1,018 | ,122 |
| | Kurtosis | 1,312 | ,244 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Anpresskraft | 7685,2439 | 8182,1495 | 8596,2727 |
| Tukey-Angelpunkte | Anpresskraft | 7688,3740 | 8182,1495 | 8588,5938 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------|----------------|---|------------|---------|
| Anpresskraft | Größte Werte | 1 | 129 | 9632,98 |
| | | 2 | 125 | 9614,35 |
| | | 3 | 62 | 9585,17 |
| | Kleinste Werte | 1 | 76 | 4665,00 |
| | | 2 | 68 | 5210,93 |
| | | 3 | 70 | 5440,00 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Drehmoment | 397 | 99,0% | 4 | 1,0% | 401 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------|--|-----------|----------------|
| Drehmoment | Mittelwert | 1231,5103 | 6,71766 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 1218,3035 | |
| | Obergrenze | 1244,7170 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 1233,3559 | |
| | Median | 1238,0420 | |
| | Varianz | 17915,400 | |
| | Standardabweichung | 133,84842 | |
| | Minimum | 799,67 | |
| | Maximum | 1536,79 | |
| | Spannweite | 737,12 | |
| | Interquartilbereich | 194,53 | |
| | Schiefte | -,220 | ,122 |
| | Kurtosis | -,110 | ,244 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Drehmoment | 1133,0977 | 1238,0420 | 1327,6261 |
| Tukey-Angelpunkte | Drehmoment | 1133,7339 | 1238,0420 | 1326,4706 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------|----------------|---|------------|---------|
| Drehmoment | Größte Werte | 1 | 352 | 1536,79 |
| | | 2 | 324 | 1521,99 |
| | | 3 | 323 | 1515,29 |
| | Kleinste Werte | 1 | 5 | 799,67 |
| | | 2 | 165 | 846,52 |
| | | 3 | 144 | 850,40 |

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Vortriebsgeschwindigkeit | 401 | 100,0% | 0 | ,0% | 401 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler | |
|--------------------------|--|-------------|----------------|--|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Mittelwert | 3,1297 | ,02834 | |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze | 3,0740 | |
| | | Obergrenze | 3,1854 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 3,1280 | | |
| | Median | 3,0958 | | |
| | Varianz | ,322 | | |
| | Standardabweichung | ,56753 | | |
| | Minimum | ,00 | | |
| | Maximum | 5,15 | | |
| | Spannweite | 5,15 | | |
| | Interquartilbereich | ,57 | | |
| | Schiefe | -1,027 | ,122 | |
| | Kurtosis | 8,740 | ,243 | |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Vortriebsgeschwindigkeit | 2,8311 | 3,0958 | 3,4034 |
| Tukey-Angelpunkte | Vortriebsgeschwindigkeit | 2,8325 | 3,0958 | 3,4002 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------------------|----------------|---|------------|------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Größte Werte | 1 | 76 | 5,15 |
| | | 2 | 69 | 4,93 |
| | | 3 | 357 | 4,86 |
| | Kleinste Werte | 1 | 67 | ,00 |
| | | 2 | 66 | ,00 |
| | | 3 | 65 | ,00 |

1.3. Bereich 3

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Anpresskraft | 875 | 97,1% | 26 | 2,9% | 901 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|--------------|--|---|----------------|
| Anpresskraft | Mittelwert | 7525,5438 | 32,12662 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 7462,4895 Obergrenze 7588,5982 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 7576,2785 | |
| | Median | 7678,7719 | |
| | Varianz | 903104,525 | |
| | Standardabweichung | 950,31812 | |
| | Minimum | 4250,35 | |
| | Maximum | 10001,89 | |
| | Spannweite | 5751,54 | |
| | Interquartilbereich | 1145,06 | |
| | Schiefe | -,817 | ,083 |
| | Kurtosis | ,674 | ,165 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Anpresskraft | 7034,6602 | 7678,7719 | 8179,7222 |
| Tukey-Angelpunkte | Anpresskraft | 7040,1362 | 7678,7719 | 8178,1944 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------|----------------|---|------------|----------|
| Anpresskraft | Größte Werte | 1 | 802 | 10001,89 |
| | | 2 | 5 | 9519,23 |
| | | 3 | 4 | 9364,92 |
| | Kleinste Werte | 1 | 455 | 4250,35 |
| | | 2 | 262 | 4420,10 |
| | | 3 | 283 | 4591,26 |

667 |

4465,05 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Drehmoment | 875 | 97,1% | 26 | 2,9% | 901 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------|--|-----------|----------------|
| Drehmoment | Mittelwert | 1230,7066 | 6,21225 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 1218,5139 | |
| | Obergrenze | 1242,8992 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 1243,1817 | |
| | Median | 1277,8609 | |
| | Varianz | 33768,023 | |
| | Standardabweichung | 183,76078 | |
| | Minimum | 547,45 | |
| | Maximum | 1772,20 | |
| | Spannweite | 1224,74 | |
| | Interquartilbereich | 225,03 | |
| | Schiefe | -1,043 | ,083 |
| | Kurtosis | 1,277 | ,165 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Drehmoment | 1134,8151 | 1277,8609 | 1359,8407 |
| Tukey-Angelpunkte | Drehmoment | 1134,8810 | 1277,8609 | 1359,6981 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------|----------------|---|------------|---------|
| Drehmoment | Größte Werte | 1 | 164 | 1772,20 |
| | | 2 | 5 | 1726,21 |
| | | 3 | 39 | 1616,04 |
| | Kleinste Werte | 1 | 265 | 547,45 |
| | | 2 | 455 | 568,99 |
| | | 3 | 659 | 595,52 |

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Vortriebsgeschwindigkeit | 875 | 97,1% | 26 | 2,9% | 901 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | | Statistik | Standardfehler |
|--------------------------|--|-------------|-----------|----------------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Mittelwert | | 3,4534 | ,01731 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze | 3,4195 | |
| | | Obergrenze | 3,4874 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | | 3,4283 | |
| | Median | | 3,3473 | |
| | Varianz | | ,262 | |
| | Standardabweichung | | ,51203 | |
| | Minimum | | 2,08 | |
| | Maximum | | 5,35 | |
| | Spannweite | | 3,27 | |
| | Interquartilbereich | | ,62 | |
| | Schiefe | | ,821 | ,083 |
| | Kurtosis | | ,773 | ,165 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Vortriebsgeschwindigkeit | 3,1048 | 3,3473 | 3,7279 |
| Tukey-Angelpunkte | Vortriebsgeschwindigkeit | 3,1060 | 3,3473 | 3,7271 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------------------|----------------|---|------------|------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Größte Werte | 1 | 472 | 5,35 |
| | | 2 | 479 | 5,26 |
| | | 3 | 259 | 5,23 |
| | Kleinste Werte | 1 | 812 | 2,08 |
| | | 2 | 605 | 2,26 |
| | | 3 | 604 | 2,30 |

1.4. Bereich 4

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Anpresskraft | 272 | 100,0% | 0 | ,0% | 272 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|--------------|--|-------------|----------------|
| Anpresskraft | Mittelwert | 6987,7217 | 62,62051 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 6864,4372 | |
| | Obergrenze | 7111,0062 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 7039,3359 | |
| | Median | 7068,4453 | |
| | Varianz | 1066601,128 | |
| | Standardabweichung | 1032,76383 | |
| | Minimum | 3662,54 | |
| | Maximum | 8918,61 | |
| | Spannweite | 5256,07 | |
| | Interquartilbereich | 1561,37 | |
| | Schiefe | -,632 | ,148 |
| | Kurtosis | ,174 | ,294 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Anpresskraft | 6255,4375 | 7068,4453 | 7816,8123 |
| Tukey-Angelpunkte | Anpresskraft | 6257,3750 | 7068,4453 | 7813,8226 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------|----------------|---|------------|---------|
| Anpresskraft | Größte Werte | 1 | 30 | 8918,61 |
| | | 2 | 264 | 8712,23 |
| | | 3 | 4 | 8632,57 |
| | Kleinste Werte | 1 | 127 | 3662,54 |
| | | 2 | 126 | 3887,08 |
| | | 3 | 197 | 3948,54 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Drehmoment | 272 | 100,0% | 0 | ,0% | 272 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------|--|---|----------------|
| Drehmoment | Mittelwert | 1270,4582 | 10,56173 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 1249,6647 Obergrenze 1291,2517 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 1283,5493 | |
| | Median | 1305,7957 | |
| | Varianz | 30341,657 | |
| | Standardabweichung | 174,18857 | |
| | Minimum | 568,84 | |
| | Maximum | 1567,54 | |
| | Spannweite | 998,70 | |
| | Interquartilbereich | 228,53 | |
| | Schiefe | -1,192 | ,148 |
| | Kurtosis | 1,856 | ,294 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Drehmoment | 1166,1885 | 1305,7957 | 1394,7146 |
| Tukey-Angelpunkte | Drehmoment | 1166,8028 | 1305,7957 | 1394,5581 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------|----------------|---|------------|---------|
| Drehmoment | Größte Werte | 1 | 71 | 1567,54 |
| | | 2 | 52 | 1550,14 |
| | | 3 | 1 | 1530,89 |
| | Kleinste Werte | 1 | 98 | 568,84 |
| | | 2 | 127 | 579,42 |
| | | 3 | 128 | 696,19 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Vortriebsgeschwindigkeit | 272 | 100,0% | 0 | ,0% | 272 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | | Statistik | Standardfehler |
|--------------------------|--|-------------|-----------|----------------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Mittelwert | | 3,6878 | ,03553 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze | 3,6178 | |
| | | Obergrenze | 3,7577 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | | 3,6620 | |
| | Median | | 3,6182 | |
| | Varianz | | ,343 | |
| | Standardabweichung | | ,58606 | |
| | Minimum | | 2,45 | |
| | Maximum | | 5,49 | |
| | Spannweite | | 3,04 | |
| | Interquartilbereich | | ,85 | |
| | Schiefe | | ,562 | ,148 |
| | Kurtosis | | ,027 | ,294 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Vortriebsgeschwindigkeit | 3,2255 | 3,6182 | 4,0706 |
| Tukey-Angelpunkte | Vortriebsgeschwindigkeit | 3,2275 | 3,6182 | 4,0695 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------------------|----------------|---|------------|------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Größte Werte | 1 | 125 | 5,49 |
| | | 2 | 117 | 5,26 |
| | | 3 | 118 | 5,21 |
| | Kleinste Werte | 1 | 100 | 2,45 |
| | | 2 | 101 | 2,46 |
| | | 3 | 259 | 2,61 |

1.5. Bereich 5

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Anpresskraft | 801 | 100,0% | 0 | ,0% | 801 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|--------------|--|------------|----------------|
| Anpresskraft | Mittelwert | 6138,5862 | 35,30079 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 6069,2931 | |
| | Obergrenze | 6207,8793 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 6167,6003 | |
| | Median | 6257,7778 | |
| | Varianz | 998162,529 | |
| | Standardabweichung | 999,08084 | |
| | Minimum | 2817,07 | |
| | Maximum | 8563,50 | |
| | Spannweite | 5746,43 | |
| | Interquartilbereich | 1274,82 | |
| | Schiefe | -,467 | ,086 |
| | Kurtosis | -,029 | ,173 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Anpresskraft | 5556,9286 | 6257,7778 | 6831,7439 |
| Tukey-Angelpunkte | Anpresskraft | 5558,1609 | 6257,7778 | 6831,7021 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------|----------------|---|------------|---------|
| Anpresskraft | Größte Werte | 1 | 73 | 8563,50 |
| | | 2 | 72 | 8427,52 |
| | | 3 | 75 | 8309,90 |
| | Kleinste Werte | 1 | 128 | 2817,07 |
| | | 2 | 127 | 3051,48 |
| | | 3 | 623 | 3223,85 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Drehmoment | 801 | 100,0% | 0 | ,0% | 801 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------|--|-----------|----------------|
| Drehmoment | Mittelwert | 1231,2802 | 6,21024 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 1219,0900 | |
| | Obergrenze | 1243,4705 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 1243,5315 | |
| | Median | 1268,5135 | |
| | Varianz | 30892,196 | |
| | Standardabweichung | 175,76176 | |
| | Minimum | 403,52 | |
| | Maximum | 1548,02 | |
| | Spannweite | 1144,50 | |
| | Interquartilbereich | 210,39 | |
| | Schiefe | -1,107 | ,086 |
| | Kurtosis | 1,325 | ,173 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Drehmoment | 1146,4697 | 1268,5135 | 1356,8603 |
| Tukey-Angelpunkte | Drehmoment | 1147,1605 | 1268,5135 | 1356,5735 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------|----------------|---|------------|---------|
| Drehmoment | Größte Werte | 1 | 453 | 1548,02 |
| | | 2 | 400 | 1522,27 |
| | | 3 | 731 | 1515,82 |
| | Kleinste Werte | 1 | 128 | 403,52 |
| | | 2 | 127 | 507,63 |
| | | 3 | 130 | 548,23 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Vortriebsgeschwindigkeit | 801 | 100,0% | 0 | ,0% | 801 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | | Statistik | Standardfehler |
|--------------------------|--|-------------|-----------|----------------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Mittelwert | | 3,9759 | ,01710 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze | 3,9424 | |
| | | Obergrenze | 4,0095 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | | 3,9720 | |
| | Median | | 3,9538 | |
| | Varianz | | ,234 | |
| | Standardabweichung | | ,48387 | |
| | Minimum | | 2,63 | |
| | Maximum | | 5,57 | |
| | Spannweite | | 2,94 | |
| | Interquartilbereich | | ,68 | |
| | Schiefe | | ,161 | ,086 |
| | Kurtosis | | -,083 | ,173 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Vortriebsgeschwindigkeit | 3,6376 | 3,9538 | 4,3167 |
| Tukey-Angelpunkte | Vortriebsgeschwindigkeit | 3,6382 | 3,9538 | 4,3152 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|--------------------------|----------------|---|------------|------|
| Vortriebsgeschwindigkeit | Größte Werte | 1 | 373 | 5,57 |
| | | 2 | 343 | 5,49 |
| | | 3 | 38 | 5,47 |
| | Kleinste Werte | 1 | 58 | 2,63 |
| | | 2 | 59 | 2,79 |
| | | 3 | 62 | 2,81 |

2. Boxplots der Vortriebsgeschwindigkeit nach Zerlegungsgraden

Der Zerlegungsgrad 1 in den Tabellen entspricht dem Zerlegungsgrad 26 in der Analyse und der Zerlegungsgrad 2 in den Tabellen entspricht dem Zerlegungsgrad 30.

2.1. Zerlegungsgrad laut Prognose

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad1 | 2320 | 100,0% | 0 | ,0% | 2320 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|-----------------|--|---------------------------|------------------|
| Zerlegungsgrad1 | Mittelwert | 3,2110 | ,01704 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze Obergrenze | 3,1776 3,2444 |
| | 5% getrimmtes Mittel | 3,1899 | |
| | Median | 3,1159 | |
| | Varianz | ,674 | |
| | Standardabweichung | ,82082 | |
| | Minimum | ,36 | |
| | Maximum | 6,05 | |
| | Spannweite | 5,69 | |
| | Interquartilbereich | 1,23 | |
| | Schiefe | ,368 | ,051 |
| | Kurtosis | -,197 | ,102 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad1 | 2,5746 | 3,1159 | 3,7997 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad1 | 2,5749 | 3,1159 | 3,7994 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|-----------------|----------------|---|------------|------|
| Zerlegungsgrad1 | Größte Werte | 1 | 2320 | 6,05 |
| | | 2 | 2319 | 6,03 |
| | | 3 | 2318 | 5,78 |
| | | 4 | 2317 | 5,57 |
| | | 5 | 2316 | 5,53 |
| | Kleinste Werte | 1 | 4 | ,36 |
| | | 2 | 3 | ,36 |
| | | 3 | 2 | ,36 |
| | | 4 | 1 | ,36 |
| | | 5 | 5 | ,45 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad2 | 1271 | 100,0% | 0 | ,0% | 1271 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|-----------------|--|---------------------------|----------------|
| Zerlegungsgrad2 | Mittelwert | 3,4123 | ,01742 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze Obergrenze | |
| | | 3,3781 3,4465 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 3,4092 | |
| | Median | 3,3860 | |
| | Varianz | ,386 | |
| | Standardabweichung | ,62114 | |
| | Minimum | 1,22 | |
| | Maximum | 5,36 | |
| | Spannweite | 4,13 | |
| | Interquartilbereich | ,84 | |
| | Schiefe | ,082 | ,069 |
| | Kurtosis | ,021 | ,137 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad2 | 3,0000 | 3,3860 | 3,8386 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad2 | 3,0006 | 3,3860 | 3,8381 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|-----------------|----------------|---|------------|------|
| Zerlegungsgrad2 | Größte Werte | 1 | 1271 | 5,36 |
| | | 2 | 1270 | 5,28 |
| | | 3 | 1269 | 5,24 |
| | | 4 | 1268 | 5,17 |
| | | 5 | 1267 | 5,14 |
| | Kleinste Werte | 1 | 1 | 1,22 |
| | | 2 | 2 | 1,48 |
| | | 3 | 3 | 1,56 |
| | | 4 | 4 | 1,63 |
| | | 5 | 5 | 1,79 |

2.2. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnung der Geologen

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad1 | 3656 | 92,4% | 300 | 7,6% | 3956 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|-----------------|--|-----------|----------------|
| Zerlegungsgrad1 | Mittelwert | 3,2273 | ,01266 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 3,2025 | |
| | Obergrenze | 3,2522 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 3,2134 | |
| | Median | 3,1594 | |
| | Varianz | ,586 | |
| | Standardabweichung | ,76537 | |
| | Minimum | ,36 | |
| | Maximum | 6,05 | |
| | Spannweite | 5,69 | |
| | Interquartilbereich | 1,12 | |
| | Schiefe | ,265 | ,040 |
| | Kurtosis | -,138 | ,081 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad1 | 2,6421 | 3,1594 | 3,7659 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad1 | 2,6423 | 3,1594 | 3,7657 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|-----------------|----------------|---|------------|------|
| Zerlegungsgrad1 | Größte Werte | 1 | 1 | 6,05 |
| | | 2 | 2 | 6,03 |
| | | 3 | 3 | 5,78 |
| | | 4 | 4 | 5,57 |
| | | 5 | 5 | 5,53 |
| | Kleinste Werte | 1 | 3656 | ,36 |
| | | 2 | 3655 | ,36 |
| | | 3 | 3654 | ,36 |
| | | 4 | 3653 | ,36 |
| | | 5 | 3652 | ,45 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad2 | 342 | 100,0% | 0 | ,0% | 342 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|-----------------|--|-----------|----------------|
| Zerlegungsgrad2 | Mittelwert | 3,2680 | ,04525 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 3,1790 | |
| | Obergrenze | 3,3570 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 3,2612 | |
| | Median | 3,2517 | |
| | Varianz | ,700 | |
| | Standardabweichung | ,83675 | |
| | Minimum | 1,18 | |
| | Maximum | 5,44 | |
| | Spannweite | 4,26 | |
| | Interquartilbereich | ,98 | |
| | Schiefe | ,101 | ,132 |
| | Kurtosis | -,074 | ,263 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad2 | 2,7696 | 3,2517 | 3,7480 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad2 | 2,7724 | 3,2517 | 3,7454 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|-----------------|----------------|---|------------|------|
| Zerlegungsgrad2 | Größte Werte | 1 | 342 | 5,44 |
| | | 2 | 341 | 5,24 |
| | | 3 | 340 | 5,24 |
| | | 4 | 339 | 5,20 |
| | | 5 | 338 | 5,19 |
| | Kleinste Werte | 1 | 1 | 1,18 |
| | | 2 | 2 | 1,22 |
| | | 3 | 3 | 1,29 |
| | | 4 | 4 | 1,35 |
| | | 5 | 5 | 1,40 |

2.3. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der ARGE

Explorative Datenanalyse

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad1 | 2917 | 89,8% | 332 | 10,2% | 3249 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|-----------------|--|-----------|----------------|
| Zerlegungsgrad1 | Mittelwert | 3,0834 | ,01416 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 3,0557 | |
| | Obergrenze | 3,1112 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 3,0595 | |
| | Median | 2,9707 | |
| | Varianz | ,585 | |
| | Standardabweichung | ,76467 | |
| | Minimum | ,36 | |
| | Maximum | 6,05 | |
| | Spannweite | 5,69 | |
| | Interquartilbereich | 1,07 | |
| | Schiefe | ,473 | ,045 |
| | Kurtosis | ,198 | ,091 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad1 | 2,5240 | 2,9707 | 3,5963 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad1 | 2,5250 | 2,9707 | 3,5962 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|-----------------|----------------|---|------------|------|
| Zerlegungsgrad1 | Größte Werte | 1 | 3249 | 6,05 |
| | | 2 | 3248 | 6,03 |
| | | 3 | 3247 | 5,78 |
| | | 4 | 3246 | 5,57 |
| | | 5 | 3245 | 5,53 |
| | Kleinste Werte | 1 | 336 | ,36 |
| | | 2 | 335 | ,36 |
| | | 3 | 334 | ,36 |
| | | 4 | 333 | ,36 |
| | | 5 | 337 | ,45 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad2 | 1081 | 100,0% | 0 | ,0% | 1081 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|-----------------|--|-----------|----------------|
| Zerlegungsgrad2 | Mittelwert | 3,6285 | ,01944 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 3,5903 | |
| | Obergrenze | 3,6666 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 3,6264 | |
| | Median | 3,5700 | |
| | Varianz | ,408 | |
| | Standardabweichung | ,63900 | |
| | Minimum | 1,22 | |
| | Maximum | 5,44 | |
| | Spannweite | 4,22 | |
| | Interquartilbereich | ,94 | |
| | Schiefe | ,042 | ,074 |
| | Kurtosis | ,129 | ,149 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--------|--------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad2 | 3,1490 | 3,5700 | 4,0897 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad2 | 3,1500 | 3,5700 | 4,0882 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|-----------------|----------------|---|------------|------|
| Zerlegungsgrad2 | Größte Werte | 1 | 1081 | 5,44 |
| | | 2 | 1080 | 5,36 |
| | | 3 | 1079 | 5,28 |
| | | 4 | 1078 | 5,21 |
| | | 5 | 1077 | 5,20 |
| | Kleinste Werte | 1 | 1 | 1,22 |
| | | 2 | 2 | 1,38 |
| | | 3 | 3 | 1,40 |
| | | 4 | 4 | 1,44 |
| | | 5 | 5 | 1,56 |

3. Boxplots der Anpresskraft nach Zerlegungsgraden

3.1. Zerlegungsgrad laut Prognose

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad26 | 2363 | 100,0% | 0 | ,0% | 2363 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------------|--|---|----------------|
| Zerlegungsgrad26 | Mittelwert | 7819,9983 | 27,75198 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 7765,5775 Obergrenze 7874,4191 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 7881,8855 | |
| | Median | 8030,9910 | |
| | Varianz | 1819917,828 | |
| | Standardabweichung | 1349,04330 | |
| | Minimum | 1751,14 | |
| | Maximum | 10421,61 | |
| | Spannweite | 8670,47 | |
| | Interquartilbereich | 1996,33 | |
| | Schiefe | -,665 | ,050 |
| | Kurtosis | ,104 | ,101 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad26 | 6881,7978 | 8030,9910 | 8878,1308 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad26 | 6882,2280 | 8030,9910 | 8877,5270 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------------|----------------|---|------------|----------|
| Zerlegungsgrad26 | Größte Werte | 1 | 2363 | 10421,61 |
| | | 2 | 2362 | 10299,67 |
| | | 3 | 2361 | 10239,86 |
| | Kleinste Werte | 1 | 1 | 1751,14 |
| | | 2 | 2 | 2090,00 |
| | | 3 | 3 | 2284,88 |

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad30 | 1154 | 47,3% | 1288 | 52,7% | 2442 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------------|--|-------------|----------------|
| Zerlegungsgrad30 | Mittelwert | 7309,1614 | 39,25995 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 7232,1325 | |
| | Obergrenze | 7386,1904 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 7361,6557 | |
| | Median | 7446,3396 | |
| | Varianz | 1778710,694 | |
| | Standardabweichung | 1333,68313 | |
| | Minimum | 3223,85 | |
| | Maximum | 10275,08 | |
| | Spannweite | 7051,24 | |
| | Interquartilbereich | 1816,16 | |
| | Schiefe | -,529 | ,072 |
| | Kurtosis | -,121 | ,144 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad30 | 6492,3609 | 7446,3396 | 8308,5240 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad30 | 6492,7848 | 7446,3396 | 8308,3478 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------------|----------------|---|------------|----------|
| Zerlegungsgrad30 | Größte Werte | 1 | 2183 | 10275,08 |
| | | 2 | 2312 | 10233,61 |
| | | 3 | 1573 | 10071,11 |
| | | 4 | 1572 | 9930,00 |
| | | 5 | 1769 | 9790,00 |
| | Kleinste Werte | 1 | 1289 | 3223,85 |
| | | 2 | 1431 | 3281,87 |
| | | 3 | 1929 | 3549,16 |
| | | 4 | 1786 | 3580,50 |
| | | 5 | 1630 | 3609,83 |

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad33 | 35 | 1,4% | 2407 | 98,6% | 2442 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------------|--|------------|----------------|
| Zerlegungsgrad33 | Mittelwert | 5951,2895 | 166,80928 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 5612,2923 | |
| | Obergrenze | 6290,2867 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 5952,3092 | |
| | Median | 5860,7527 | |
| | Varianz | 973886,757 | |
| | Standardabweichung | 986,85701 | |
| | Minimum | 4039,61 | |
| | Maximum | 7921,49 | |
| | Spannweite | 3881,88 | |
| | Interquartilbereich | 1504,80 | |
| | Schiefe | -,056 | ,398 |
| | Kurtosis | -,607 | ,778 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad33 | 5187,6000 | 5860,7527 | 6692,4000 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad33 | 5236,7730 | 5860,7527 | 6685,5919 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------------|----------------|---|------------|---------|
| Zerlegungsgrad33 | Größte Werte | 1 | 1789 | 7921,49 |
| | | 2 | 284 | 7569,47 |
| | | 3 | 1550 | 7499,07 |
| | | 4 | 855 | 7120,27 |
| | | 5 | 1181 | 7075,68 |
| | Kleinste Werte | 1 | 2136 | 4039,61 |
| | | 2 | 1367 | 4212,27 |
| | | 3 | 786 | 4217,14 |
| | | 4 | 1255 | 4806,06 |
| | | 5 | 1545 | 4816,22 |

3.2. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der Geologen

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad26 | 3706 | 93,7% | 250 | 6,3% | 3956 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------------|--|---|----------------|
| Zerlegungsgrad26 | Mittelwert | 7724,9473 | 22,56953 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 7680,6974 Obergrenze 7769,1972 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 7791,3066 | |
| | Median | 7948,3670 | |
| | Varianz | 1887775,270 | |
| | Standardabweichung | 1373,96334 | |
| | Minimum | 1751,14 | |
| | Maximum | 10421,61 | |
| | Spannweite | 8670,47 | |
| | Interquartilbereich | 2001,72 | |
| | Schiefe | -,665 | ,040 |
| | Kurtosis | ,068 | ,080 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad26 | 6814,2857 | 7948,3670 | 8816,0010 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad26 | 6815,0000 | 7948,3670 | 8815,7143 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------------|----------------|---|------------|----------|
| Zerlegungsgrad26 | Größte Werte | 1 | 894 | 10421,61 |
| | | 2 | 30 | 10358,21 |
| | | 3 | 893 | 10299,67 |
| | | 4 | 755 | 10239,86 |
| | | 5 | 735 | 10142,45 |
| | Kleinste Werte | 1 | 710 | 1751,14 |
| | | 2 | 940 | 2090,00 |
| | | 3 | 785 | 2284,88 |
| | | 4 | 3948 | 2667,50 |
| | | 5 | 3947 | 2773,96 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad30 | 342 | 8,6% | 3614 | 91,4% | 3956 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------------|--|-------------|----------------|
| Zerlegungsgrad30 | Mittelwert | 7186,2351 | 74,82875 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 7039,0511 | |
| | Obergrenze | 7333,4192 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 7212,8568 | |
| | Median | 7496,8722 | |
| | Varianz | 1914974,767 | |
| | Standardabweichung | 1383,82613 | |
| | Minimum | 3662,54 | |
| | Maximum | 10276,18 | |
| | Spannweite | 6613,65 | |
| | Interquartilbereich | 2032,99 | |
| | Schiefe | -,405 | ,132 |
| | Kurtosis | -,390 | ,263 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad30 | 6077,3814 | 7496,8722 | 8110,3692 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad30 | 6079,7541 | 7496,8722 | 8108,5714 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------------|----------------|---|------------|----------|
| Zerlegungsgrad30 | Größte Werte | 1 | 4 | 10276,18 |
| | | 2 | 281 | 10275,08 |
| | | 3 | 280 | 10233,61 |
| | | 4 | 2 | 10199,92 |
| | | 5 | 279 | 10001,89 |
| | Kleinste Werte | 1 | 316 | 3662,54 |
| | | 2 | 315 | 3887,08 |
| | | 3 | 111 | 3990,48 |
| | | 4 | 113 | 4042,50 |
| | | 5 | 112 | 4046,67 |

3.3. Zerlegungsgrad laut Aufzeichnungen der ARGE

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad26 | 2990 | 92,0% | 259 | 8,0% | 3249 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------------|--|---|----------------|
| Zerlegungsgrad26 | Mittelwert | 7930,7790 | 24,57125 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | Untergrenze 7882,6008 Obergrenze 7978,9573 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 8009,5893 | |
| | Median | 8228,0566 | |
| | Varianz | 1805201,608 | |
| | Standardabweichung | 1343,57791 | |
| | Minimum | 1751,14 | |
| | Maximum | 10421,61 | |
| | Spannweite | 8670,47 | |
| | Interquartilbereich | 1870,90 | |
| | Schiefe | -,851 | ,045 |
| | Kurtosis | ,471 | ,090 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad26 | 7098,5679 | 8228,0566 | 8969,4667 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad26 | 7098,5870 | 8228,0566 | 8969,0000 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------------|----------------|---|------------|----------|
| Zerlegungsgrad26 | Größte Werte | 1 | 987 | 10421,61 |
| | | 2 | 68 | 10358,21 |
| | | 3 | 986 | 10299,67 |
| | | 4 | 4 | 10276,18 |
| | | 5 | 828 | 10239,86 |
| | Kleinste Werte | 1 | 783 | 1751,14 |
| | | 2 | 1033 | 2090,00 |
| | | 3 | 858 | 2284,88 |
| | | 4 | 3240 | 2667,50 |
| | | 5 | 3239 | 2773,96 |

Anhang

Verarbeitete Fälle

| | Fälle | | | | | |
|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | Gültig | | Fehlend | | Gesamt | |
| | N | Prozent | N | Prozent | N | Prozent |
| Zerlegungsgrad30 | 1082 | 33,3% | 2167 | 66,7% | 3249 | 100,0% |

Deskriptive Statistik

| | | Statistik | Standardfehler |
|------------------|--|-------------|----------------|
| Zerlegungsgrad30 | Mittelwert | 7003,0664 | 37,83825 |
| | 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts | | |
| | Untergrenze | 6928,8217 | |
| | Obergrenze | 7077,3111 | |
| | 5% getrimmtes Mittel | 7047,9956 | |
| | Median | 7171,5064 | |
| | Varianz | 1549135,591 | |
| | Standardabweichung | 1244,64276 | |
| | Minimum | 2817,07 | |
| | Maximum | 10275,08 | |
| | Spannweite | 7458,01 | |
| | Interquartilbereich | 1878,63 | |
| | Schiefe | -,483 | ,074 |
| | Kurtosis | -,230 | ,149 |

Perzentile

| | | Perzentile | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 25 | 50 | 75 |
| Gewichtetes Mittel (Definition 1) | Zerlegungsgrad30 | 6106,3904 | 7171,5064 | 7985,0205 |
| Tukey-Angelpunkte | Zerlegungsgrad30 | 6106,8539 | 7171,5064 | 7984,8421 |

Extremwerte

| | | | Fallnummer | Wert |
|------------------|----------------|---|------------|----------|
| Zerlegungsgrad30 | Größte Werte | 1 | 620 | 10275,08 |
| | | 2 | 619 | 10233,61 |
| | | 3 | 618 | 10001,89 |
| | | 4 | 31 | 9351,90 |
| | | 5 | 33 | 9318,71 |
| | Kleinste Werte | 1 | 874 | 2817,07 |
| | | 2 | 873 | 3051,48 |
| | | 3 | 871 | 3549,16 |
| | | 4 | 1076 | 3609,83 |
| | | 5 | 876 | 3612,56 |

4. Eingabe in das Statistikprogramm „R“

Das Statistikprogramm R ist ein umfassendes Freeware-Paket zur Datenanalyse. Das Programm wird weltweit von Statistikern gewartet und erweitert. Mittels Kommandofenster oder Aufruf von bereits existierenden Programmen, bietet es die Möglichkeit schnell und einfach zu arbeiten. Man kann selbst Programme erstellen oder auf bereits existierende aus der Programmbibliothek zurückgreifen. (Department of Statistics and Mathematics, WU-Wien, 2009)

Um einen Überblick über die Berechnung beziehungsweise die Erzeugung der Diagramme zu geben, sind die Eingabebefehle aufgelistet.

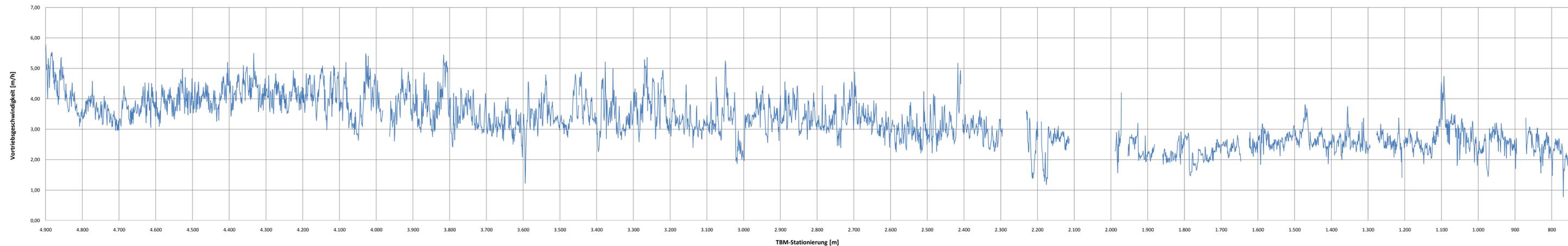
Als erstes wurden die Daten aus einem Excel-File eingelesen:

```
d <- read.csv("~/projekte/ostermann/daten/Beispieldaten.csv",dec=".",sep=";")
attach(d)
library(Rcmdr)
```

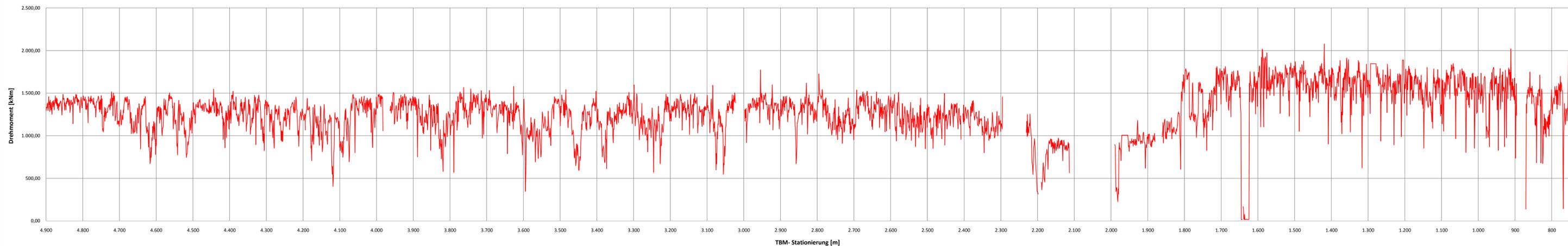
Die 3D- Diagramme wurden wie folgt erzeugt:

```
scatter3d(Drehmoment,Vortriebsgeschwindigkeit,Anpresskraft,
  sphere.size=1.4,threshold=0.01,point.col="orange",
  fit=c("smooth"), df.smooth=50,bg="white", axis.scales=TRUE, grid=TRUE,
  ellipsoid=FALSE,surface.col="blue",residuals=1)
```

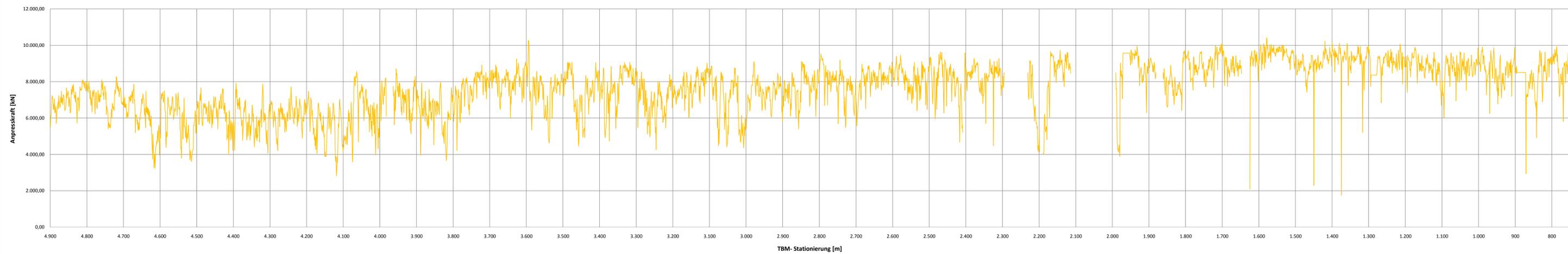
Vortriebsgeschwindigkeit [m/h]



Drehmoment [kNm]



Anpresskraft [kN]



PLAN 01

Übersicht der Maschinenparameter über die
Stollenlänge

Erstellt für die

DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

Untersuchung der Zusammenhänge

GEBIRGE - TUNNELBOHRMASCHINE

am Beispiel des Triebwasserstollens des Kraftwerks Hieflau

von

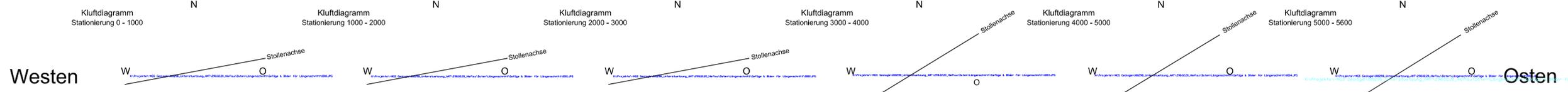
Viktoria Ostermann

0325876

Wien, Juni 2009

ORIGINALPLAN

Mit freundlicher Genehmigung des VERBUND AHP



Legende:

| Gefügediagramme |
|------------------------------|
| 0.00 - 2.00 % Konzentration |
| 2.00 - 3.00 % Konzentration |
| 3.00 - 4.00 % Konzentration |
| 4.00 - 5.00 % Konzentration |
| 5.00 - 6.00 % Konzentration |
| 6.00 - 7.00 % Konzentration |
| 7.00 - 8.00 % Konzentration |
| 8.00 - 9.00 % Konzentration |
| 9.00 - 10.00 % Konzentration |
| > 10.00 % Konzentration |

Gliederung des Gebirges in Gebirgsarten

| Tektonische Einheit | Gebirgsart | Beschreibung |
|---------------------|------------|--|
| Nördliche Kalkalpen | GA 1 | Ramsaudoomit |
| | GA 2 | Rabailer Schichten |
| | GA 3 | Dachsteindolomit und Übergangzone zu Dachsteinkalk |
| | GA 4 | Dachsteinkalk |
| | GA 5 | Südringzonen |
| Quartär | GA 6-1 | Schutthalde, Blockschutt |
| | GA 6-2 | Terrassenschotter |

Homogenbereiche

| Kilometrierung | Beschreibung |
|----------------|--------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 70 |
| 3 | 100 |
| 4 | 1140 |
| 5 | 2885 |
| 6 | 2925 |
| 7 | 5557 |

Bergwasserspiegel (vermutet)

Karsthohlräume trocken bzw. eventuell wasserführend schematische Darstellung in Lage und Dimension

Tonige Klüftfüllungen

keine
schwach (im Mächtigkeit)
stark (im Mächtigkeit)

Störungen (Bestandsstollen)

| Kilometrierung | Alter Stollen | Neuer Stollen | Abstand [m] | Störungen | Anmerkungen |
|----------------|---------------|---------------|-------------|-----------|--|
| 778 | 788 | 682 | 688 | 8 | Störungen mit vertikalen Karsthohlräumen (Blockwerk in langer Mauer) |
| 810 | 815 | - | - | - | Isolierte Karsthohlräume, nur an rechter Ulme |
| 1390 | 1395 | 1346 | 1351 | 5 | Karsthochlauf verläuft mit tonigen Material |
| 2000 | 2005 | 2380 | 2385 | 5 | Störung mit Trennschichten |
| 4735 | 4750 | 4665 | 4660 | 15 | 60° 90' |
| 5300 | 5300 | 5256 | 5306 | 10 | 90° |
| 5470 | 5520 | - | - | 50 | 150° 80' |
| 5470 | 5525 | 5439 | 5489 | 50 | 240° 90' |

Gebirgsverhaltenstypen

| Gebirgsverhaltenstyp | Beschreibung |
|----------------------|---------------------------------|
| 1 | Standfestes Gebirge |
| 2 | Gefügebedingte Nachbrüche |
| 3 | Hohlraumnahe Überbeanspruchung |
| 4 | Tiefreichende Überbeanspruchung |
| 5 | Bergschlag |
| 6 | Rolliges Gebirge |

PROGNOSTISCHE DATEN DES BESTANDSSTOLLEN, BEZÜGLICH PROJEZTIERTER NEUER STÖLLEN

18. Initiale Höhe der Wassersäule über Triebwasserstollen [m]

19. Wasserrückstände im Bestandsstollen während des Vortriebs

20. Erwartete Bergwasserzutritte

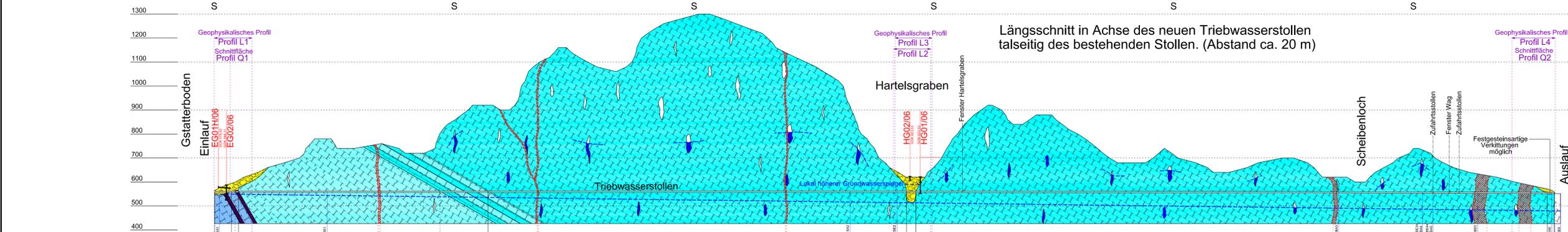
21. Beton oder Stahl aggressive Bergwässer

22. Sohlstollen

23. Ausweitung

GEWISSE VERWEHRSTYPEN

| Standfest | Hohlraumnahe Überbeanspruchung | Tiefreichende Überbeanspruchung | Bergschlag | Rolliges Gebirge |
|-------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|------------------|
| Grünes Feld | Grünes Feld | Grünes Feld | Grünes Feld | Grünes Feld |



GEOMETRIE

| Kilometrierung | Triebwasserweg ALT ca. horizontale Längen [m] | Triebwasserweg NEU ca. horizontale Längen [m] | Bogen/ Gerade Stationierung | Bogen/ Gerade Längen [m] |
|----------------|---|---|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 70 | 30 | 70 | 30 |
| 3 | 1040 | 1040 | 1040 | 1040 |
| 4 | 1745 | 1745 | 1745 | 1745 |
| 5 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| 6 | 2632 | 2632 | 2632 | 2632 |
| 7 | 30 | 30 | 30 | 30 |

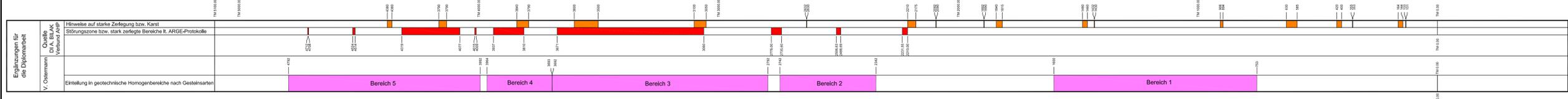
GEOSTRUKTURELLE VERHÄLTNISSE

| Störung | Mächtigkeit | Orientierung (Fallrichtung / Neigung) | Verschnittlänge im Tunnel [m] |
|---------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 8,0 m | 200°/90° | 17,08 m |
| 2 | 5,0 m | 300°/90° | 9,43 m |
| 3 | 5,0 m | 10°/90° | 20,91 m |
| 4 | 15,0 m | 60°/90° | 15,12 m |
| 5 | 50,0 m | 100°/90° | 52,05 m |
| 6 | 50,0 m | 240°/90° | 50,0 m |

BEREICHE

| Bereich | Geologie | Störungen | Stollen |
|---------|------------|-----------|---------|
| 1 | GA 4: 94% | GA 5: 6% | Stollen |
| 2 | GA 4: 97% | GA 5: 3% | Stollen |
| 3 | GA 3: 88% | GA 4: 10% | Stollen |
| 4 | GA 3: 88% | GA 4: 10% | Stollen |
| 5 | GA 1: 100% | GA 2: 50% | Stollen |

ERGÄNZUNG



TU WIEN

PLAN 02

DIPLOMARBEIT

Untersuchung der Zusammenhänge GEBIRGE-TUNNELBOHRMASCHINE am Beispiel des Triebwasserstollens des Kraftwerks Hiefiau

Viktoria Ostermann

Juni, 2009 0325876