

**Bewertung von Boden und Fels
auf Verklebungen und Feinkornfreisetzung
beim maschinellen Tunnelvortrieb**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

**Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften**

der

Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von

Dipl.-Geol. Fritz Stefan Hollmann

Referenten: Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Ruhr-Universität Bochum
Prof. Dr.-Ing. M. Alber, Ruhr-Universität Bochum
Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort, Bergische Universität Wuppertal

Eingereicht am: 08.04. 2014
Tag der mündlichen Prüfung: 21.07. 2014

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes für die intensive Förderung und wissenschaftliche Begleitung der Promotion, die stete Unterstützung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Alber und Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Pulsfort danke ich für das wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Frau Prof. Dr. Anette Hafner danke ich für ihre freundliche Bereitschaft zur Übernahme der Aufgaben des fachfremden Prüfers.

Für die finanzielle Förderung durch die Firma Herrenknecht AG, die diese Arbeit erst möglich gemacht hat, bedanke ich mich sehr. Im Besonderen danke ich Herrn Dipl.-Ing. Thomas Edlmann und Herrn Dipl.-Geol. André Heim der Abteilung Forschung und Entwicklung der Herrenknecht AG für die intensive Zusammenarbeit.

Bei Herrn Dr.-Ing. Klaus Axhausen bedanke ich mich für die die übernommenen Korrekturarbeiten und insbesondere für die Diskussionsbereitschaft in Hinblick auf alle fachlichen Fragestellungen im Rahmen dieser Arbeit.

Meinen Eltern, die mir das Studium der Geologie ermöglicht haben, möchte ich an dieser Stelle besonders danken. Die in diesem Studium erworbenen Kenntnisse bilden die Grundlage meiner beruflichen Laufbahn und dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Freundin Katrin Brauckmann, die trotz der zahlreichen Einsätze auf Tunnelbaustellen und der daraus folgenden negativen Auswirkungen auf das Privatleben, immer zu mir gehalten und mich unterstützt hat.

Dortmund, im Juli 2014

Fritz Hollmann

Kurzfassung

Beim maschinellen Tunnelbau im Schildvortrieb hat die Neigung des Baugrunds zur Ausbildung von Verklebungen und zur Freisetzung von Feinkorn (Ton und Schluff) weitreichende verfahrenstechnische und leistungsbestimmende Konsequenzen. Eine entsprechende Bewertung muss daher Teil der tunnelbautechnischen Baugrundbewertung für maschinelle Tunnelvortriebe sein. Bisherige Bewertungsmöglichkeiten erlauben Aussagen zur Verklebungsneigung eines natürlichen Bodens für flüssigkeitsgestützte (Hydro-) Schildvortriebe, sind jedoch nicht auf andere Schildvortriebsverfahren übertragbar. Da Verklebungen und eine erhöhte Feinkornfreisetzung typisch für feinkörnigen Baugrund sind und häufig gleichzeitig vorkommen, empfiehlt sich die parallele Bewertung beider Erschwernisse. Ob ein tonhaltiges Lockergestein kritisch werden kann, hängt neben den Bodeneigenschaften von den hydrogeologischen und baubetrieblichen Randbedingungen ab. In Abhängigkeit vom frei verfügbaren Wasser (Bergwasser, Stützflüssigkeit) können, im natürlichen Zustand unkritische Böden, in kritische Konsistenzbereiche überführt werden. Eine gleichzeitige Berücksichtigung aller Randbedingungen erfordert daher eine Bewertungsmethode mit Einbeziehung wechselnder Wasserverfügbarkeit. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte allgemeine Bewertungsdiagramm berücksichtigt Wassergehaltsänderungen und erlaubt die Abschätzung daraus folgender Überführungen in eine andere Konsistenz. Dabei wird erkennbar bei welcher Wasserzunahme ein Boden eine kritische Konsistenz erhält (z.B. von Verklebungsmaterial oder von freigesetztem Feinkorn). Es ist also einerseits die Bewertung einer unterschiedlichen Wasserverfügbarkeit möglich und andererseits kann abgeschätzt werden, ob der Boden eher zu Verklebungen oder zur Freisetzung von Feinkorn neigt.

Die erwähnten Erschwernisse sind nicht nur in Böden, sondern auch im Fels möglich, sofern feinkörnige veränderlich feste Festgesteine unter dem Einfluss von Wasser zerfallen. Da die zur Bewertung erforderlichen Bodenkennwerte an Festgesteinen nicht bestimmt werden können, ist eine zum Lockergestein vergleichbare Bewertung nicht unmittelbar möglich. Die Bestimmung der Zerfallsneigung von Fels mittels Siebtrommelversuch (Slake-Durability-Test) reicht im Hinblick auf maschinelle Vortriebe nicht aus, da die Zerfallsprodukte nicht weiter untersucht werden. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Modifikation des Siebtrommelversuchs mit systematischen bodenmechanischen Untersuchungen der Zerfallsprodukte entwickelt, die eine zum Lockergestein vergleichbare Beurteilung ermöglicht.

Da Verklebungen Betriebsdatenänderungen hervorrufen, sind Datenanalysen zur Bewertung entsprechender Erschwernisse geeignet. Diese erfordern allerdings Aufbereitungen im Hinblick auf abbauspezifische und abbauunabhängige Datenanteile. An Beispielen mit in der Praxis dokumentierten Verklebungen können typische Anstiege von Schneidradkontaktkraft und Schneidraddrehmoment bzw. eine abfallende spezifische Penetration, gegenüber Vortriebsabschnitten ohne Verklebungen, aufgezeigt werden. Dabei wird auch nachgewiesen, dass andere Einflüsse, wie beispielsweise Zunahmen des Abbauwiderstands des Baugrunds, zu ähnlichen Datenänderungen führen. Dementsprechend werden Betriebsdatenanalysen durch sich überlagernde Einflüsse erschwert.

Abstract

Fine grained soils and rocks can trigger clogging effects as well as disintegration of fines. Due to its considerable impacts on shield tunneling performance, it is very important to take the relevant properties into consideration in the geotechnical investigation report. Until now, indication of the clogging risk in practice frequently is based on the combination of the plasticity and the consistency index and the clogging potentials introduced by Thewes [108]. The limits of the clogging potentials in the diagram refer to the natural soil conditions prior the excavation by hydro-shield tunneling machines. Adaptations to other shield types are not possible. Clogging as well as the disintegration of fines are commonly connected to the same subsoil conditions and therefore might occur at the same time and should be considered. Both risks depend on the properties of the soils as well as the hydrogeological and operational conditions. Soils can be transformed to critical consistencies depending on the extent of water being available in the excavation process (ground water or support slurry). An assessment method must consider the different availability of water. The developed new classification diagram allows the quantification of changes in the water content and thus, estimating changes of fine-grained soils under different boundary conditions. The change from the natural soil to a critical consistency (e.g. clogging material or disintegrated fines), triggered by an increasing water content can be estimated. Therefore estimations of different water availabilities are possible, beside that it can be assumed if the soil disintegrates in the water or if it would become sticky.

Both risks occur not only in soils but also in soft rocks, if there is low resistance to disintegration by water prevails. Due to the missing soil parameters, the assessment methods used for soils, cannot applied to rocks. The disintegration of soft rocks due to hydro-mechanical exposure may be assessed by the slake-durability-test. The results are not applicable to estimate clogging risks, as the disintegration products are not observed. The developed so called modified Slake-durability-test is connected to systematical soil mechanical investigations of the disintegration products. The new method allows classifications of soft rocks similar to the classification approach of soils.

Clogging can trigger changes of the TBM-machine data. Therefore data analysis can be used to assess the impacts of clogging. Therefore processing with extraction of the excavation-independent and excavation-specific data is necessary. Comparing sections influenced by clogging to other parts of the tunnel profile, analyses show increasing contact forces and torques of the cutting wheel as well as decreasing specific penetrations. The analyses confirm several additional influences (e.g. an increasing excavation resistance of the subsoil), causing comparable changes of the TBM-machine data. Therefore TBM-machine data analyses are complicated by different influences.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XXIV
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	XXVI
1. Einleitung	1
1.1. Einführung	1
1.2. Problemstellung.....	2
1.3. Zielsetzung und Gliederung.....	3
2. Einführung in die maschinelle Vortriebstechnik	4
2.1. Einteilung von Tunnelvortriebsmaschinen	4
2.2. Schildmaschinen mit Vollschnittabbau	5
2.2.1. Schildmaschinen ohne Stützung	6
2.2.2. Schildmaschinen mit Druckluftstützung.....	6
2.2.3. Schildmaschinen mit Flüssigkeitsstützung.....	6
2.2.4. Schildmaschinen mit Erddruckstützung.....	10
2.2.5. Vortriebe außerhalb des Haupteinsatzbereichs des Schildtyps	12
3. Verklebungen: Grundlagen und Erfahrungen	13
3.1. Verklebungsmaterial und Feinkornfreisetzung	13
3.1.1. Kritische Konsistenzbereiche	13
3.1.2. Umwandlung des Ausbruchsmaterials und Auswirkungen	14
3.2. Relevante Baugrundeigenschaften	16
3.2.1. Vorgaben in Normen, Richtlinien und Empfehlungen	16
3.2.1.1. Normen	16
3.2.1.2. Richtlinien und Empfehlungen	17
3.2.2. Geotechnische Unterscheidung von Boden und Fels	18
3.2.3. Lockergestein	19
3.2.3.1. Kornverteilung.....	19
3.2.3.2. Mineralogische Zusammensetzung	20
3.2.3.3. Konsistenz- und Plastizitätszahl	22

3.2.3.4. Gefüge	23
3.2.4. Festgestein	24
3.2.4.1. Bindungstypen bei Festgestein	24
3.2.4.2. Festgestein ohne Zerfallsneigung	25
3.2.4.3. Veränderlich festes Festgestein	27
3.2.4.4. Potenzielle Zerfallsprodukte: Gesteinsart und Korngröße	28
3.2.4.5. Potenzielle Zerfallsprodukte: Mineralogische Zusammensetzung	29
3.2.4.6. Festigkeit	29
3.2.4.7. Gefüge	30
3.2.5. Wasser: Verfügbarkeit und Auswirkungen	30
3.2.5.1. Schildvortriebe ohne Ortsbruststützung	30
3.2.5.2. Schildvortriebe mit Flüssigkeitsstützung	31
3.2.5.3. Erddruckschildvortriebe	32
3.3. Verklebungsspezifische Sonderversuche	32
3.3.1. Versuche mit spezieller Vorbehandlung der Gesteine	32
3.3.2. Adhäsionsversuche	33
3.3.3. Versuche mit Berücksichtigung von anhaftendem Verklebungsmaterial	34
3.3.4. Technikumsversuche	37
3.3.5. Hydraulische Zerfallsversuche	37
3.4. Betriebsdatenanalysen	37
3.4.1. Betriebsdatenanalysen in der Praxis	37
3.4.2. Interaktion Baugrund-Maschine	38
3.4.2.1. Relevante Betriebsdaten	38
3.4.2.2. Baugrundmodell	38
3.4.3. Betriebsdatenänderungen infolge Verklebungen	39
4. Allgemeines Verklebungsdiagramm für Lockergesteine	41
4.1. Verklebungsdiagramme mit vorgegebener Wasserverfügbarkeit	41
4.2. Entwicklung der Grundform des neuen Verklebungsdiagramms	43
4.3. Abgrenzungen der Konsistenz innerhalb des Diagramms	49
4.4. Aussagekraft des allgemeinen Bewertungsdiagramms	52
4.5. Vergleich mit bisherigen Bewertungsdiagrammen	54
4.5.1. Randbedingung: hohe Verfügbarkeit von Wasser	54
4.5.1.1. Hohes Verklebungspotenzial nach Thewes	55
4.5.1.2. Mittleres bis hohes Verklebungspotenzial nach Thewes	55
4.5.1.3. Mittleres Verklebungspotenzial nach Thewes	56
4.5.1.4. Niedriges Verklebungspotenzial nach Thewes	56
4.5.1.5. Vergleich der Aussagekraft	56
4.5.2. Randbedingung: keine Verfügbarkeit von Wasser	57
5. Modifikation des Siebtrommelversuchs im Hinblick auf Verklebungen	60
5.1. Problematik derzeitiger Bewertungen von Festgestein	60
5.1.1. Klassifizierung bindiger Böden als Fels	60
5.1.2. Veränderlich fester Fels	61
5.2. Aussagekraft der Zerfallsversuche im Hinblick auf Schildvortriebe	63

5.2.1.	Wasserlagerungsversuch	63
5.2.1.1.	Verfahren.....	63
5.2.1.2.	Aussagekraft	65
5.2.2.	Siebtrommelversuch.....	66
5.2.2.1.	Verfahren.....	66
5.2.2.2.	Aussagekraft	67
5.2.2.3.	Kombination mit bodenmechanischen Untersuchungen	70
5.3.	Modifizierter Siebtrommelversuch	72
5.3.1.	Versuchskonzept.....	73
5.3.2.	Versuchsergebnisse	74
5.3.2.1.	Zerfallsbeständigkeitsindex	75
5.3.2.2.	Atterberggrenzen	76
5.3.2.3.	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse	78
5.3.3.	Bewertungsmöglichkeiten.....	79
5.3.3.1.	Vergleich der Einzelversuche.....	79
5.3.3.2.	Plastizität-Zerfalls-Diagramm	81
5.3.3.3.	Verklebungsdiagramme für Lockergesteine	82
5.4.	Fazit zum neuen Untersuchungskonzept.....	84
6.	Verklebungen und Feinkornanfall in der Praxis.....	85
6.1.	Ingenieurgeologische Dokumentationen der Schildvortriebe.....	85
6.1.1.	Ortsbrust und Probennahmen.....	85
6.1.2.	Quantifizierung von Verklebungen	89
6.2.	Praxisprojekte	93
6.2.1.	Erddruckschildvortrieb (Projekt A).....	93
6.2.1.1.	Baugrundverhältnisse.....	93
6.2.1.2.	Vortriebsverfahren	95
6.2.1.3.	Verklebungen und Feinkornanfall.....	96
6.2.1.4.	Geschlossener Vortriebsmodus mit Erdbreistützung	101
6.2.1.5.	Offener und halboffener Vortriebsmodus	110
6.2.1.6.	Erkenntnisse	115
6.2.2.	Hydroschildvortrieb/Offener Schildvortrieb (Projekt B).....	116
6.2.2.1.	Baugrundverhältnisse.....	116
6.2.2.2.	Vortriebsverfahren	117
6.2.2.3.	Verklebungen und Feinkornanfall.....	118
6.2.2.4.	Hydroschildvortrieb (TM 0 bis ca. 1530).....	118
6.2.2.5.	Offen gefahrener Schildvortrieb (TM 1530 bis 6970)	124
6.2.2.6.	Erkenntnisse	128
6.2.3.	Hydroschildvortrieb (Projekt C)	129
6.2.3.1.	Baugrundverhältnisse.....	129
6.2.3.2.	Vortriebsverfahren	131
6.2.3.3.	Verklebungen und Feinkornanfall.....	131
6.2.3.4.	TM 0 bis 1000 (Verklebungen und Feinkornanfall).....	138
6.2.3.5.	TM 2000 bis 2500 (Verklebungen)	139
6.2.3.6.	TM 3800 bis 5300 (Verklebungen und Feinkornanfall)	140

6.2.3.7. Erkenntnisse.....	146
6.3. Ausbildung und Auswirkung von Verklebungen	147
6.3.1. Verklebungen im Bereich der Abbaukammer	147
6.3.1.1. Schneidrad und Schneidradaufhängung	147
6.3.1.2. Druckwand und Schnittstelle zu Fördereinrichtungen	151
6.3.2. Verklebungen außerhalb der Abbaukammer	153
6.3.2.1. Förderbänder	153
6.3.2.2. Separationsanlage	154
6.3.2.3. Transport.....	156
6.3.3. Verklebungen und Verschleiß	157
6.3.3.1. Werkzeugkontrolle und- wechsel.....	157
6.3.3.2. Abrasive Gesteine als Teil von Verklebungen	158
6.3.3.3. Verklebungstypischer Verschleiß.....	159
6.3.3.4. Verlängerte Werkzeugwege	161
6.3.3.5. Erkenntnisse zur Wechselwirkung zwischen Verklebungen und Verschleiß.....	162
7. Betriebsdatenanalysen im Hinblick auf Verklebungen	163
7.1. Messung und Berechnung von Betriebsdaten.....	163
7.2. Aktiv- und Passivparameter.....	166
7.3. Einflüsse auf Betriebsdaten	166
7.3.1. Abbauunabhängige Einflüsse.....	167
7.3.1.1. Abbauunabhängige Einflüsse auf die Schneidradanpresskraft	167
7.3.1.2. Abbauunabhängige Einflüsse auf die Gesamtvortriebskraft.....	169
7.3.1.3. Abbauunabhängige Einflüsse auf das Schneidraddrehmoment.....	173
7.3.1.4. Abbauunabhängige Einflüsse auf die Penetration	174
7.3.2. Abbauspezifische Einflüsse	175
7.3.2.1. Schneidraddesign und Werkzeugbesatz	175
7.3.2.2. Schneidradzustand: Verschleiß und Verklebungen	177
7.3.2.3. Direkter Einfluss Baugrund: Abbauwiderstand	181
7.3.2.4. Indirekter Einfluss Baugrund: Abrasivität und Verklebungsneigung	185
7.3.2.5. Bohrhindernisse.....	186
7.3.2.6. Fallbeispiel: Aussagekraft der Rohdaten im Hinblick auf den Baugrund.....	187
7.3.2.7. Auswertungen von Paxis-Betriebsdaten im Hinblick auf Verklebungen	189
7.3.2.8. Fazit.....	193
8. Empfehlungen für die Praxis.....	195
8.1. Empfehlungen für Baugrundgutachten	195
8.2. Empfehlungen im Hinblick auf Betriebsdaten	198
9. Zusammenfassung und Ausblick.....	200
10. Literaturverzeichnis.....	202
11. Anlagen.....	212
Anlage 1: Betriebsdatenkorrekturen bei Projekt C	212

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [19]	4
Abbildung 2.2:	Funktionsprinzip eines Hydroschildes [54]	5
Abbildung 2.3:	Funktionsprinzip einer Separationsanlage	8
Abbildung 2.4:	Einsatzbereiche von Hydroschildvortrieben [112]	9
Abbildung 2.5:	Funktionsprinzip eines Erddruckschildes [54]	10
Abbildung 2.6:	Einsatzbereich von Erddruckschildvortrieben [83, farblich modifiziert]	11
Abbildung 2.7:	Erweiterter Einsatzbereich von Erddruckschildvortrieben für mittel- und grobkörnige Böden [11]	12
Abbildung 3.1:	Unterschiedliches Ausbruchsmaterial bei Schildvortrieben [61] a) Tonklumpen (Pfeile) in trockenem Ausbruchsmaterial b) Zerteilter Tonklumpen mit unverändertem Kern (Doppelpfeil) und aufgeweichter, klebriger Rinde c) Verklebungsmaterial (V) an der Rückseite des Schneidrads (SR) d) Förderung von feinkornreichem Schlamm (S) am Schneckenabwurf (SA)	14
Abbildung 3.2:	Verklebungsmaterial auf der Separation [61] a) Grobsieb mit Kugeln aus Verklebungsmaterial b) Sekundäre Verklebungen des Grobsiebs durch Zusammenballungen klebriger Kugeln	15
Abbildung 3.3:	a) Ortsbrust im Tonstein: (1) Diskenspuren mit zermalmtem Gesteinsmehl und abgesprengtem Chip (C) b) Ortsbrust im Ton: (1) Tief in den Boden gepresste Diskenspur und (2) Schälmesserspur (SM: Schälmesser) [61]	18
Abbildung 3.4:	a) Verklebungspotenzial-Diagramm nach Thewes [109] b) Verklebungspotenzial-Diagramm mit Kennwerten eines kritischen Hydroschildvortriebs, modifiziert von Hollmann & Thewes [61]	22
Abbildung 3.5:	Bindungstypen von sedimentären Locker- und Festgesteinen [87, farblich modifiziert]	25
Abbildung 3.6:	Vortriebsleistung eines Hydroschildvortriebs mit Leistungszunahme innerhalb der Tonsteine [80, farblich modifiziert]	26
Abbildung 3.7:	Kornverteilungen von Ausbruchsmaterial von TBM-Vortrieben im Fels nach Literaturangaben	27
Abbildung 3.8:	Verklebungsindex-Versuch [56, modifiziert] b) Abhängigkeit des Verklebungsindex von der Konsistenz (Konsistenzbereich mit maximaler Anhaftung blau hinterlegt) [56, modifiziert]	34
Abbildung 3.9:	a) Stahlkonus mit Verklebungsresten [41] b) Klassifikationsdiagramm mit Abhängigkeiten zwischen Verklebungsmenge und Konsistenz (Konsistenzbereich mit maximalen Anhaftungen blau hinterlegt) [43, modifiziert]	35
Abbildung 3.10:	a) Rührwerkzeug mit Verklebungsresten [127] b) Vergleich des Diagramms von Thewes [108] mit der Auswertung des Verklebungs-	

	index λ in Abhängigkeit der Konsistenz (Konsistenzbereich mit maximalen Anhaftungen blau) [127, modifiziert]	36
Abbildung 3.11:	Vergleich der Konsistenz der Verklebungsmaxima aus Abb. 3.8-b, 3.9-b und 3.10-b	36
Abbildung 3.12:	Übersicht zur Erfassung der für die Interaktion Baugrund-Maschine relevanten Maschinendaten nach Maidl & Nellessen (nur Teil der Tabelle) [81]	38
Abbildung 4.1:	a) Verklebungsdiagramm für Hydroschildvortriebe [64, modifiziert] b) Verklebungsdiagramm für offen gefahrene Schildvortriebe ohne Wasserzutritte nach [64, modifiziert] In beiden Diagramme sind Wertepaare von Tonen eines offen gefahrenen Schildvortriebs dargestellt	42
Abbildung 4.2:	Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Beispielboden A (große Raute) und Verschiebung mit ansteigendem Wassergehalt (kleine Rauten)	43
Abbildung 4.3:	Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Isolinien der Plastizitätszahl (schwarze Linien)	44
Abbildung 4.4:	Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Isolinien der Konsistenzzahl (rote Linien)	46
Abbildung 4.5:	Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Skala zur Abschätzung von Wassergehaltsänderungen (Abstand zwischen blauen gestrichelten Linien: Änderung von 5%)	47
Abbildung 4.6:	Grundform des neuen Diagramms mit 460 Wertepaaren, die in Plastizitätszahl-Gruppen sortiert sind	47
Abbildung 4.7:	Grundform des neuen Diagramms mit 460 Wertepaaren, die in Konsistenzzahl-Gruppen sortiert sind	48
Abbildung 4.8:	Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden [64, modifiziert]	49
Abbildung 4.9:	Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden mit Plastizitätszahlen bis 160% [64, modifiziert]	50
Abbildung 4.10:	Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher Umwandlungen von Böden [64, modifiziert] mit Abgrenzung der Erdbreikonsistenz nach Maidl et al. [83]	51
Abbildung 4.11:	Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Böden unterschiedlicher Konsistenz	52
Abbildung 4.12:	Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Böden unterschiedlicher Plastizität	53
Abbildung 4.13:	Verklebungsdiagramm für Hydroschildvortriebe [61] mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale sortiert sind	54

Abbildung 4.14:	Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale in Abbildung 4.13 sortiert sind	55
Abbildung 4.15:	Verklebungsdiagramm für offen gefahrene Schildvortriebe [61] mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale sortiert sind	57
Abbildung 4.16:	Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale in Abbildung 4.15 sortiert sind	58
Abbildung 5.1:	Verklebungsdiagramm nach Thewes mit Darstellung bindiger Böden unterschiedlicher Baustellen	61
Abbildung 5.2:	Apparatur zum Siebtrommelversuch nach Durchführung eines Versuchs mit deutlicher Verfärbung des Wassers innerhalb der Tröge infolge des Zerfalls (Foto aus Masterarbeit von Weiz [122])	66
Abbildung 5.3:	Einsatzbereich von Hydroschilden in Abhängigkeit der Kornverteilung nach Maidl et al. [83] (modifiziert: mit Angabe der Siebtrommelfraktionen und theoretischen Körnungskurven des Siebdurchgangs)	69
Abbildung 5.4:	Getrocknete Zerfallsrückstände des Siebtrommelversuchs [62] a) splittrige Gesteinsfragmente b) Tonfetzen (vor Trocknung mit klebriger Konsistenz)	69
Abbildung 5.5:	Bewertungsdiagramm mit Kombination aus Slake-Durability-Index und Plastizitätszahl des Siebdurchgangs nach Franklin & Chandra [48]	70
Abbildung 5.6:	Allgemeines Bewertungsdiagramm mit entsprechend des Slake-Durability-Indexes sortierten Wertepaaren des Siebtrommel-durchgangs (Fließ- und Ausrollgrenze: Siebtrommeldurchgang; Wassergehalt: Ausgangsgestein) nach Deere & Chandra [21]	71
Abbildung 5.7:	Untersuchungsschema zur Beurteilung der Verklebungsneigung und des Feinkornanfalls bei feinkörnigen Festgesteinen [61, modifiziert] (grün: unkritisch, rot kritisch)	72
Abbildung 5.8:	Versuchskonzept des modifizierten Siebtrommelversuchs [65, 122]	74
Abbildung 5.9:	Ergebnisse des Siebtrommelversuchs von Weiz [122] mit Bewertung der Zerfallsbeständigkeit im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben	75
Abbildung 5.10:	Kornverteilungen der Zerfallsprodukte des Siebtrommelversuchs und von Verklebungsproben von Weiz [122]	78
Abbildung 5.11:	Diagramm zur Bewertung der Verklebungsneigung auf Basis des modifizierten Siebtrommelversuchs [65]. Der Verklebungsgrad des Schneidrads ist in Form der blauen Prozentzahlen angegeben	81
Abbildung 5.12:	Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Wertepaaren der Zerfallsprodukte veränderlich fester Gesteine (Fließ- und	

	Ausrollgrenze: Mittelwerte aus Siebtrommelrückstand und -durchgang; Wassergehalt: Ausgangsgestein)	83
Abbildung 6.1:	Laibung eines mit Gripper-TBM aufgefahrenen Tunnels (Foto: Markus Weh)	85
Abbildung 6.2:	a) Blick auf die Ortsbrust durch eine Schneiradöffnung b) Schneiradöffnungen als potenzielle Zugangsmöglichkeit an die Ortsbrust	86
Abbildung 6.3:	a) Ingenieurgeologische Dokumentation bei einem Hydroschildvortrieb in Kiesen a) Abschälen des Filterkuchens b) Dokumentation und Beprobung c) Erneutes Versiegeln des freigelegten Ortsbrustbereichs zur Minimierung von Druckluftverlusten	86
Abbildung 6.4:	Unterschiedliche Einsicht der Ortsbrust bei einem zweigleisigen Eisenbahntunnel. a) Sprengvortrieb im Fels mit vollständig einsehbarer Ortsbrust (Abbildung aus einzelnen Fotos von Kalotte, Strosse und Sohle zusammengesetzt). b) Schneirad eines Hydroschildvortriebs mit geringer Ortsbrusteinsicht (Pfeil: graues Feld). Bei diesem Beispiel wäre die untere Ortsbrusthälfte aufgrund des teilabgesenkten Suspensionsspiegels nicht zugänglich (blau). Im Bereich der oberen Ortsbrusthälfte müsste zunächst der Filterkuchen (gelb) entfernt werden. c) Blick durch die Schneiradöffnung auf einen Teil des freigelegten Ortsbrustbereichs	87
Abbildung 6.5:	a) Störung (Pfeil) zwischen zwei unterschiedlichen Gesteinen b) Linsenförmiger Härtling (Pfeil) als Einlagerung in Gesteinen mit geringer Festigkeit [119] c) Karstspalte (Pfeil)	87
Abbildung 6.6:	Blick aus der Abbaukammer durch die beiden äußeren Schneiradöffnungen mit Angabe des Verklebungsgrades in % (Abbildungen jeweils aus zwei einzelnen Fotos zusammengesetzt) [65] a) Vergleichsfoto ohne Verklebungen vor Vortriebsbeginn b) und c) Verlebte Schneiradöffnungen mit unterschiedlichem Verklebungsgrad	89
Abbildung 6.7:	Herleitung des Schneiradverklebungsgrads aus Einzelaufnahmen (grau: Schneiradrückseite, weiß: Schneiradöffnung, rote Zahlen: Verklebungsgrad einzelner Öffnungen, gelb und grün: Werkzeugkästen, rot umrandet: Schneiradöffnungen aus Abbildung 6.6-a und 6.6-b) [65]	90
Abbildung 6.8:	Material auf den Grobsieben eines Hydroschildvortriebs a) Überwiegend Gesteinsbruchstücke b) Überwiegend bindige Kugeln als sekundäres Verklebungsmaterial (vgl. Kap. 3.1.2)	91
Abbildung 6.9:	Quantifizierung der Verklebungen eines Hydroschildvortriebs anhand des Verklebungsgrads der Schneiradöffnungen, der Werkzeugkästen und des Anteils bindiger Kugeln auf den Grobsieben	91
Abbildung 6.10:	Geologischer Längsschnitt TM 0 bis 5000 [3, modifiziert: nur Hälfte des Längsschnitts]	94
Abbildung 6.11:	Geologischer Längsschnitt TM 5000 bis 9000 (Legende: vgl. Abb. 6.10) [3, modifiziert: nur Hälfte des Längsschnitts]	94

Abbildung 6.12:	a) Schneidrad vor Vortriebsbeginn. b) Schneidrad nach Vortriebsende	95
Abbildung 6.13:	Vortriebsmodi [3] a) Offen/atmosphärisch b) Halboffen/Erdbrei-Druckluft c) Geschlossen/Erdbrei	95
Abbildung 6.14:	a) Ortsbrust im Foraminiferenmergel mit in den Boden gepressten Diskenspuren (1) und Schälmesserspur (2) c) Ortsbrust in den Melettaschichten mit in den Boden gepressten Diskenspuren (1)	97
Abbildung 6.15:	a) Strosse eines Querschlags mit Tonen der Roten Leitschicht im Hangenden des Planorbenkalks (Grenze gelbe Linie) b) Strosse eines Querschlags mit Tonen der Roten Leitschicht (Schälspuren der Baggerzähne: grüne Pfeile)	97
Abbildung 6.16:	Einstufung der bindigen Böden anhand der Atterberggrenzen	98
Abbildung 6.17:	Störung zwischen Melettaschichten (MS) und Lymnäenmergeln (tLM) (Störungsränder: rot gestrichelt) a) In den Mergelsteinen der Lymnäenmergel sind die Schneidspuren mit Gesteinspulver belegt (1) und es kommt zum Absprengen von Chips. Im schwarzen Ton der Störungsfüllung wurden die Disken in den Boden gedrückt (2) b) Detail der Störungsfüllung mit tief in den Boden gedrückten Diskenspuren (2)	99
Abbildung 6.18:	Ergebnisse der Siebtrommelversuche mit großer Bandbreite der Zerfallsbeständigkeit	99
Abbildung 6.19:	Häufigkeit der Zerfallsbeständigkeitsklassen auf Basis der Siebtrommelversuche	100
Abbildung 6.20:	Wasserzutritte in die Abbaukammer im Bereich beider Vortriebsmaschinen	100
Abbildung 6.21:	a) Wasserzutritte aus Sandsteinen an der Ortsbrust b) Wasserzutritt aus einer offenen Kluft der Fischechiefer im Firstbereich	101
Abbildung 6.22:	Verteilung der Vortriebsmodi der TVM-West (weiß: offen/atmosphärisch, gelb: halboffen/Teilfüllung und Druckluftstützung, grün: geschlossen/Erddruckstützung) in Abhängigkeit von Überlagerung und Wasserzutritten	101
Abbildung 6.23:	Darstellung der tertiären Tone und Mergel im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10.	
Abbildung 6.24:	Vergleich von nicht konditioniertem Ausbruchsmaterial mit Erdbrei a) Förderband mit trockenem Ausbruchsmaterial im offenen Modus. b) Förderband mit Erdbrei im geschlossenen Modus	103
Abbildung 6.25:	a) Erdbreiprobe b) Nicht konditionierbare Gesteinsbruchstücke (Kalk- und Sandstein) des Erdbreis, nachdem die feinkörnige Matrix ausgewaschen wurde	104
Abbildung 6.26:	Wassergehalte der Erdbreiprüfungen im Vergleich zum natürlichen Boden [61, modifiziert]	104
Abbildung 6.27:	Verschiebung der tertiären Tone und Mergel im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10 infolge der aus den Erdbreiprüfungen abgeleiteten Wassergehaltserhöhungen	105
Abbildung 6.28:	Gegenüberstellung der tatsächlichen und theoretischen Wasserzugaben pro Tunnelmeter	107

Abbildung 6.29:	Firstbereich innerhalb der Störzone nach Teilabsenkung des Erdbreis a) Nachbrüche innerhalb der Melettaschichten und Wasserzutritt über den Schild (Pfeil) b) Stark zerrüttete Fischeschiefer mit Wasserzutritten	Erd- 107
Abbildung 6.30:	Teilabsenkung des Erdbreis a) Wasseranstieg in der Abbaukammer durch massiven Wasserzufluss (Pfeil) von der Ortsbrust durch eine Schneiradöffnung b) Wasserzutritte über den Schild mit Anstieg des Wasserspiegels in der Abbaukammer	108
Abbildung 6.31:	a) Blick durch die Luke der Druckluftschleuse in die Abbaukammer: Werkzeugkontrolle innerhalb der Störzone b) Überlauf der Wasseraufbereitungsanlage in ein Pufferbecken. Das überlaufende Wasser entspricht etwa dem gleichzeitig auf der TVM beim Einstieg zulaufenden Bergwasser	108
Abbildung 6.32:	a) Messbare Wasserzutritte aus den Bohrungen eines Injektionschotts b) Messung des Überlaufs der Abbaukammer während der Teilabsenkung des Erdbreis. „Auslitern“ mit einem 200-Liter-Fass	109
Abbildung 6.33:	Gegenüberstellung der Bergwasserzutritte (oben) und der Wasserzugaben zur Konditionierung des Erdbreis (unten). In den blau hinterlegten Vortriebsbereichen ist ein Zulauf von Bergwasser zu erwarten, so dass entsprechend weniger Wasser zugegeben werden musste [121]	109
Abbildung 6.34:	Einstufung der Böden im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10	110
Abbildung 6.35:	oberes Diagramm: Abhängigkeit zwischen Bergwasserzutritten (blau) in die Abbaukammer und Verklebungsgrad des Schneirads (grüne Linie) am Beispiel der TVM-Ost [3, modifiziert]; unteres Diagramm: Rücknahme der Vortriebsgeschwindigkeit (schwarze Linie) in Abhängigkeit der Bergwasserzutritte (blau). Definition kritischer Bereiche mit deutlicher Reduzierung der Vortriebsgeschwindigkeit (pinkfarbene Kästchen) und kritischer Grenzwassermenge von 1 l/s (rote Linie) [3, modifiziert]	111
Abbildung 6.36:	a) Wasseransammlung in der Abbaukammer infolge von Bergwasserzutritten während des Ringbaus (Oberkannte Förderschnecke: roter Pfeil) b) Blick durch die Schneiradöffnung auf die Ortsbrust	112
Abbildung 6.37:	Unterschiedliche Konsistenzbereiche des Ausbruchsmaterials infolge Bergwassers	112
Abbildung 6.38:	Konsistenzänderung des Ausbruchsmaterials infolge Bergwassers und Verschiebung der Wertepaare im neuen Bewertungsdiagramm [67]	113
Abbildung 6.39:	Entwicklung der Konsistenz mit der Vortriebszeit („wirksame“ Konsistenzbereiche des neuen Bewertungsdiagramms). Jede Datenreihe entspricht den Wassergehalten eines Hubs	113
Abbildung 6.40:	a) Schälspur des Agitators in einer relativ trockenen Verbackung b) Schichtartiger Aufbau einer Verklebung/Verbackung an der	

	Druckwand nach Baugrundwechsel (außen: schwarzes, trockenes Material, Mitte: hellbraunes, trockenes Material, innen braunes, steifes Material) c) Probe einer festen Verbackung [67]	114
Abbildung 6.41:	Verteilung der stratigraphischen Einheiten und der einzelnen Gesteinsarten	116
Abbildung 6.42:	a) Schneidrad vor Vortriebsbeginn b) Schneidrad nach Vortriebsende	117
Abbildung 6.43:	Verteilung der Vortriebsmodi	117
Abbildung 6.44:	Einstufung der Gesteine des Keupers und des Buntsandsteins anhand der Atterberggrenzen	119
Abbildung 6.45:	Tone des Projektes A [60] a) Tone des Keupers an der Ortsbrust. b) Feinschichtung von Sandsteinen mit Tonlagen (graugrün) c) Massige Tone des Buntsandsteins an der Ortsbrust	119
Abbildung 6.46:	Verklebungspotenziale der Gesteine des Keupers und des Buntsandsteins	120
Abbildung 6.47:	Tone des Keupers und des Buntsandsteins im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10	120
Abbildung 6.48:	Wassergehalte der feinkörnigen Gesteine und des Verklebungsmaterials im Bereich des Hydroschildvortriebs	121
Abbildung 6.49:	Erhöhung der Wassergehalte um 10% und Verschiebung der Wertepaare neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10	122
Abbildung 6.50:	Verklebungsmaterial aus dem Bereich des Hydroschildvortriebs a) Im Bereich einer Schneidradöffnung. b) Probe von weichem Verklebungsmaterial	122
Abbildung 6.51:	Verklebungsmaterial auf den Grobsieben des Hydroschildvortriebs a) Förderung bindiger Kugeln mit Verklebung der Siebmaschen b) Verklebungsaggregat durch Zusammenballung vieler bindiger Kugeln	123
Abbildung 6.52:	Intensität der Verklebungen in Abhängigkeit vom Vortriebsmodus im Bereich des Hydroschildvortriebs	124
Abbildung 6.53:	Tone des Buntsandsteins im allgemeinen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10	125
Abbildung 6.54:	Intensität der Verklebungen in Abhängigkeit der Wasserzutritte im Bereich des offen gefahrenen Schildvortriebs (höhere Wasserzutritte und höherer Verklebungsgrad rötlich hinterlegt)	125
Abbildung 6.55:	Wassergehalte der feinkörnigen Gesteine und der Bandproben im Bereich des offen Schildvortriebs	126
Abbildung 6.56:	Vergleich der Böden von Projekt A und B im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10	127
Abbildung 6.57:	Vereinfachter Geologischer Längsschnitt mit Verteilung der Bodenarten innerhalb des Querschnitts (Basis: Erkundungsbohrungen der Ausschreibung von Projekt C)	129

Abbildung 6.58:	Ortsbrustanteile der einzelnen Bodenarten [59, modifiziert]	130
Abbildung 6.59:	Über Ortsbrust gemittelter Anteil der Kornfraktionen (Blöcke und Schluff-Sandlagen im Schwemmfächer nicht berücksichtigt)	130
Abbildung 6.60	Anteile der Bodenarten am Ausbruchsvolumen	130
Abbildung 6.61	a) Schneidrad vor Vortriebsbeginn b) Schneidrad nach Vortriebsende	131
Abbildung 6.62:	a) Tonige Schluffe (Seeton) b) Lehmlage innerhalb der Flusskiese (Filterkuchen an dieser Stelle der Ortsbrust zuvor entfernt)	132
Abbildung 6.63:	Einstufung der Schluffe (Seetone und Deltasedimente) und der Lehmlagen anhand der Atterberggrenzen	132
Abbildung 6.64:	Verklebungspotenziale der Schluffe (Seetone und Deltasedimente) und der Lehmlagen	133
Abbildung 6.65:	Schluffe (Seetone und Deltasedimente) und Lehmlagen im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10	134
Abbildung 6.66:	Verschiebung der Ausgangsböden bei 10% Wassergehaltszunahme	134
Abbildung 6.67:	a) Blick aus der Schleuse in die Abbaukammer: Verklebungspasten an der Schneidradrückseite [59] b) Probe einer breiigen Verklebungspaste [67]	135
Abbildung 6.68:	a) Verstopfungen der Maschen durch Verklebungspasten und Fladen auf den Grobsieben [59] b) Breiige Verklebungspaste auf dem Grobsieb [59]	135
Abbildung 6.69:	„Verklebungsstrecken“ auf Basis der Verklebungen (Separationsanlage und TVM)	136
Abbildung 6.70:	Suspensionsdichte der Speiseleitung mit Definition der „Feinkornanfall-Strecken“	136
Abbildung 6.71:	Differenz der Suspensionsdichte der Speiseleitung von einem Vortriebszyklus zum nächsten (Werte $<0,05 \text{ t/m}^3$ eliminiert) als Maß der "Austauschhäufigkeit" der Suspension mit Definition der „Feinkornanfall-Strecken“	136
Abbildung 6.72:	Stillstände der Separationsanlage mit Definition der „Feinkornanfall-Strecken“	137
Abbildung 6.73:	Geologischer Längsschnitt nach Abbildung 6.57 und Angabe der Vortriebsbereiche mit Erschwernissen durch Verklebungen (V1 bis V4) oder erhöhten Feinkornanfall (F1 und F2)	137
Abbildung 6.74:	Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall	138
Abbildung 6.75:	Mittlere Kornfraktionen mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall	139
Abbildung 6.76:	Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen	139
Abbildung 6.77:	Mittlere Kornfraktionen mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen	140
Abbildung 6.78:	Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall	140

Abbildung 6.79:	Mittlere Kornfraktionen mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall	141
Abbildung 6.80:	a) Vorgebrochene Ortsbrust im Bereich einer Block-Steinlage mit schluffiger Matrix b) Probe aus der Block-Steinlage mit Stein- und Kieskomponenten und breiiger Schluffmatrix	142
Abbildung 6.81:	Ortsbrust in weitgestuften Kiesen nach bereichsweiser Entfernung des Filterkuchens a) Mitteldichte bis dichte Lagerung mit intakten Körnern an der Abbaufont direkt unter dem Filterkuchen b) Sehr dichte Lagerung mit "abgeriebenen" Kornresten direkt unter dem Filterkuchen (Peile)	142
Abbildung 6.82:	Ortsbrust in weitgestuften Kiesen nach bereichsweiser Entfernung des Filterkuchens. Vor der Abbaufont (in Vortriebsrichtung) steht der Kies mit intakten Körnern an (violett umrandet) [59, modifiziert]	143
Abbildung 6.83:	a) Intaktes Korn eines veraschten Dolomits aus einer Kiesprobe b) Mit leichtem Fingerdruck zerriebener Dolomit [59]	144
Abbildung 6.84:	a) Anhaftungen von Gesteinspulver an Kieskörnern einer Ortsbrustprobe [59] b) Verklebungsmaterial von der Schneidradvorderkante mit weißlichen Lagen aus Gesteinspulver. Der Stift ist parallel zur Ortsbrust ausgerichtet, so dass sich die einzelnen Lagen senkrecht dazu angelagert haben [59, modifiziert]	144
Abbildung 6.85:	Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Vortriebsbereiche mit Erschwernissen durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanteil. Außerdem sind auf der Ortsbrustdokumentation basierende geologische Besonderheiten, die als Ursache der Erschwernisse möglich sind, dargestellt	145
Abbildung 6.86:	Verklebungsmaterial zwischen zurückgezogenem Schneidrad und Ortsbrust a) Verklebungsmaterial an der Schneidradvorderseite (SM: verschlissene Schälmesser) [60, 61] b) Von der Schneidradvorderkante abgelöste Verklebungsscheibe (R: Ripper) [59]	147
Abbildung 6.87:	Schematische Darstellung der Auswirkung der Verklebungsscheibe auf die Effektivität der Werkzeuge a) schematische Darstellung des Eindringvorgangs an der Ortsbrust mit Chipbildung durch Rollenmeißel (orange: Gebirge, vereinfacht: Zugrisse und Zermalmungszone vor Schneidring nicht dargestellt) b) Durch Verklebungsscheibe behinderter Abbauprozess (orange: Gebirge; rot: Verklebungsscheibe)	148
Abbildung 6.88:	a) Werkzeugkasten mit Rollenmeißel ohne Verklebungen (Vergleichsfoto) b) Durch Verklebungen verstopfter Werkzeugkasten	149
Abbildung 6.89:	Schneidradöffnungen mit unterschiedlichem Verklebungsgrad a) Schneidradöffnung ohne Verklebungen (Vergleichsfoto) b) Schneidradöffnung zu etwa 80% verklebt c) Schneidradöffnung zu 100% verklebt	149
Abbildung 6.90:	a) Schneidradrückseite mit wenig Verklebungen (Vergleichsfoto) b) Komplet bis über die Rückseite des Schneidrads angewachsene Verklebungen ("Töpferscheibe") [3]	150

Abbildung 6.91:	a) Schneidradaufhängung ohne Verklebungen nach Reinigungsarbeiten (Vergleichsfoto) [57] b) Vollständig verklebte Schneidradaufhängung [57]	150
Abbildung 6.92:	a) Verklebungen an der Druckwand mit Kontakten zur Schneidradrückseite (rote Pfeile) b) Infolge Reinigungsarbeiten von der Druckwand abgelöstes Verklebungsmaterial	151
Abbildung 6.93:	Verbackungen im Bereich der Förderschnecke [67] a) Mauerartige Verbackung zwischen vollständig ausgefahrener Förderschnecke und Schneidrad b) Blick von der Ortsbrust durch Schneidradöffnung auf Verbackungsmauer als „Hindernis“ vor Förderschneckenöffnung c) Vergleichsfoto vor Vortriebsbeginn mit Blick durch Schneidradöffnung Richtung Förderschnecke	152
Abbildung 6.94:	a) Übergabetrichter innerhalb des Muckrings mit Verbackungsmauern auf dem Rand b) Vergleichsfoto mit Blick in den gereinigten Übergabetrichter	152
Abbildung 6.95:	Abbaukammer bei Drucklufteinstieg mit Vollabsenkung der Suspension a) Verklebungsmauer vor Tauchwandöffnung und dahinter angestautes Ausbruchsmaterial mit Restsuspension b) Blick aus der Arbeitskammer durch die Tauchwandöffnung auf einen Teil der Verklebungsmauer mit Kieskomponenten in einer steifen Verklebungsmatrix	153
Abbildung 6.96:	a) Materialstaus (Pfeil) auf Förderband infolge von Zusammenballungen aus steifem Ausbruchsmaterial b) In Form von großen Kugeln (Pfeil) zurückrollendes Verklebungsmaterial auf Steigband [3] c) Durch weiches Ausbruchsmaterial verstopfte Bandübergabe	154
Abbildung 6.97:	a) Überlauf des Grobsiebs infolge verklebter Siebmaschen [59] b) Überschwemmung der Separationsanlage infolge übergelaufener Grobsiebe [59]	154
Abbildung 6.98:	a) Verklebung der Siebrutschen [60] b) Ableitung des Ausbruchsmaterials auf ein Förderband über eine Rutsche (Transportweg: grüner Pfeil) Ein Teil des Ausbruchsmaterials wird infolge bereichsweise verklebter Rutschen nicht auf das Förderband, sondern in den unteren Bereich der Separationsanlage abgeleitet (roter Pfeil) [60]	155
Abbildung 6.99:	a) Bedüsung des oberen Grobsiebs [60] b) Schmierschicht mit flüssig bis breiiger Konsistenz (roter Pfeil) an der Unterseite einer Verklebungskugel [60]	155
Abbildung 6.100:	a) Verklebungen im Bereich einer Laderschaufel [60] b) Verklebungen der Ladefläche eines LKWs [60]	156
Abbildung 6.101:	a) Blick von oben auf die vollständig verbackene Schneidradaufhängung b) Wechsel eines Rollenmeißels im Zentrumsbereich nach vorheriger Reinigung der Schneidradaufhängung	157
Abbildung 6.102:	a) Reinigung von Verklebungen b) Vorbruch eines Tons infolge Reinigungsarbeiten	157
Abbildung 6.103:	a) Reste der Verklebungsscheibe am Schneidrad (Verklebung SR) und an der Ortsbrust (Verklebung OB) [60] b) Reste der Verklebungsscheibe an der Ortsbrust [60]	158

Abbildung 6.104:	a) Verklebungen an der Schildschneide mit grobkörnigen Bestandteilen (Kies und Steine) b) Kieskörner innerhalb einer Verklebungsmatrix c) Mittel- bis grobkörnige, gebrochene Körner aus einer Probe der Verklebungsscheibe, nachdem die feinkörnige Matrix ausgewaschen wurde	159
Abbildung 6.105:	a) Einseitiger Abschleiß (Pfeile) des Schneidrings eines blockierten Rollenmeißels b) Blick auf die abgeschliffene Schnittkante des Schneidrings eines Rollenmeißels	159
Abbildung 6.106:	Vergleich von Meißelverbrauch pro Tunnelmeter und Verklebungsgrad des Schneidrads für Projekt A	160
Abbildung 6.107:	a) Durch Verschleiß eingekerbter Agitator (ehemalige Metallkante: rote Linie) b) Rest einer Verklebungsmauer an der Schildschneide als Ursache für den Verschleiß des Agitators (entfernter Agitator gedanklich als Fotomontage wieder angefügt; Kontur der Verklebungsmauer vor Reinigung: gelbe Linie)	160
Abbildung 6.108:	Vergleich von Werkzeugweg pro Vortriebsmeter und Verklebungsgrad des Schneidrads für Projekt A	161
Abbildung 7.1:	Schneidradantrieb: farblich modifizierte Ausschnitte aus Konstruktionsplänen der Firma Herrenknecht a) Schnitt recht zur Tunnelachse (Schneidradverschiebezylinder: hinterlegt) b) Schnitt parallel zur Tunnelachse mit einer vollständigen Zylindergruppe (blau umrandet, Schnittebene Abbildung 7.1-a: grüne Linie)	Kon- senk- rot 164
Abbildung 7.2:	Schematische Prinzipskizze eines Schneidradverschiebezylinders mit unterschiedlichen wirksamen Flächen	165
Abbildung 7.3:	Aus den Öldrücken berechnete Kräfte einzelner Schneidradverschiebezylinder (nicht auf ganze Gruppe umgerechnet) im Vergleich des Betriebsdatenparameters Schneidradanpresskraft	165
Abbildung 7.4:	Schematische Darstellung der wirksamen Kräfte im Hinblick auf die Schneidradanpresskraft [37, modifiziert]	167
Abbildung 7.5:	a) Vergleich Schneidradanpresskraft (schwarze Linie) als Anzeigewert der Betriebsdatenaufzeichnung mit der auf den Schneidradantrieb wirkenden Stützkraft (blaue Linie) und b) mit der um den Stützkraftanteil reduzierten Schneidradanpresskraft (grüne Linie)	168
Abbildung 7.6:	Verschiebung des Schneidrads bei unterschiedlichen Kräften a) Bewegung zwischen 550 und 700 kN b) Bewegung zwischen 1400 und 1600 kN [38, modifiziert]	169
Abbildung 7.7:	Schematische Darstellung der wirksamen Kräfte im Hinblick auf die Gesamtvortriebskraft [37, modifiziert]	170
Abbildung 7.8:	a) Vergleich Gesamtvortriebskraft (schwarze Linie) als Anzeigewert der Betriebsdatenaufzeichnung mit der Stützkraft (blaue Linie) und b) mit der um den Stützkraftanteil reduzierten Gesamtvortriebskraft (grüne Linie)	171
Abbildung 7.9:	a) Kraft und Bewegung eines Vortriebszylinders während des Ringbaus b) Rot umrandeter Bereich aus 7.9-a	Ring- 171
Abbildung 7.10:	Kraft und Bewegung eines Vortriebszylinders während des Ringbaus	172

Abbildung 7.11:	Gesamtvortriebskraft mit unterschiedlichen Teilkomponenten	173
Abbildung 7.12:	Leerdrehmoment bei Schneidraddrehung ohne Ortsbrustkontakt [38, modifiziert]	173
Abbildung 7.13:	Einflüsse auf die abbauspezifischen Betriebsdatenanteile	175
Abbildung 7.14:	a) 1-gleisiger U-Bahntunnel (Schneidrad: Durchmesser 7,35 m; Öffnungsgrad 85%) b) 2-igleisiger Eisenbahntunnel (Schneidrad: Durchmesser 13 m; Öffnungsgrad 30%) [66]	175
Abbildung 7.15:	a) Schneidradbesatz mit Schälmessern und Rollenmeißeln b) Schneidradbesatz mit Schälmessern und Rippern [66]	176
Abbildung 7.16:	a) Einbau eines neuen Rollenmeißels b) Bis auf den Kern verschlissener Rollenmeißel [66]	177
Abbildung 7.17:	Gestörter Abbauprozess durch lokal begrenzten Verschleiß von Räubern, Schälmessern und Stahlbau des Schneidrads [59, modifiziert] a) Lokal begrenzter Verschleiß im Übergang zwischen Räuber (1) und äußerstem Schälmesser (2) b) Einkerbung bis in den Stahlbau des Schneidrads (rote Linie) c) „Wulstartige“ Vorwölbung der Ortsbrust durch behinderten Abbauprozess infolge des Schneidradverschleißes	177
Abbildung 7.18:	Anstieg der Schneidradkontaktkraft mit zunehmendem Verschleiß (Randbedingungen: Schneidrad: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper, Kiese mit hoher Lagerungsdichte) [66, modifiziert]	178
Abbildung 7.19:	Anstieg des Schneidraddrehmoments mit zunehmendem Verschleiß	178
Abbildung 7.20:	Abfall der spezifischen Penetration mit zunehmendem Verschleiß [66, modifiziert]	179
Abbildung 7.21:	Anstieg der Schneidradkontaktkraft durch Verklebungen (rote Pfeile). Im Anschluss an den zweiten Reinigungsstillstand, steigt die Schneidradkontaktkraft ohne bindige Böden nicht mehr an (grüner Doppelpfeil) (Randbedingungen: Schneidrad: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Ripper, Ortsbrustanteile: 30% Kiese, 65% Sand, 5% Schluff und Ton) [66, modifiziert]	179
Abbildung 7.22:	Anstieg des Schneidraddrehmoments durch Verklebungen (rote Pfeile). Im Anschluss an den zweiten Reinigungsstillstand, steigt das Drehmoment ohne bindige Böden nicht mehr an (grüner Doppelpfeil)	180
Abbildung 7.23:	Abfall der spezifischen Penetration mit zunehmenden Verklebungen (rote Pfeile). Im Anschluss an den zweiten Reinigungsstillstand, sinkt die spezifische Penetration ohne bindige Böden nicht mehr stark ab (grüner Doppelpfeil) [66, modifiziert]	180
Abbildung 7.24:	Abhängigkeit des Abbauwiderstands von Konsistenz und Lagerungsdichte und Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten [66, modifiziert]	182
Abbildung 7.25:	Schneidradkontaktkraft bei Kiesen unterschiedlicher Lagerungsdichte (Randbedingungen: Schneidrad: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper) [66, modifiziert] a) Werkzeugbesatz: 5% Disken/95% Ripper b) Werkzeugbesatz: 70% Disken/30% Ripper c) Werkzeug-	

	besatz: 97% Disken/3% Ripper (grüne Linie: theoretische Schneidradanpresskraft, ohne Verschleiß)	182
Abbildung 7.26:	Schneidraddrehmoment bei Kiesen unterschiedlicher Lagerungsdichte (die Randbedingungen entsprechen Abbildung 7.25)	183
Abbildung 7.27:	Spezifische Penetration bei Kiesen unterschiedlicher Lagerungsdichte (die Randbedingungen entsprechen Abbildung 7.25)	183
Abbildung 7.28:	Abbauspezifischen Betriebsdaten in Boden und Fels (Randbedingungen: Schneidraddurchmesser 13m, Schneidradöffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper) [66, modifiziert]	184
Abbildung 7.29:	Auswirkungen eines Bohrhindernisses (Dichtblock) auf die abbauspezifischen Betriebsdaten (Schneidrad: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper)	186
Abbildung 7.30:	Bei einem Hydroschild unerwartet angetroffene Verrohrung einer Erkundungsbohrung [59, modifiziert] a) Bergung der Verrohrung mit Werkzeugspuren (Pfeil) b) Teil einer Verrohrung mit Werkzeugspuren (Pfeile)	186
Abbildung 7.31:	Gegenüberstellung der Mittelwerte der Schneidradanpresskraft zur Überlagerung für einzelne Vortriebsbereiche [123 Fig. 62, modifiziert]. Gegenüber dem Original wurden die Datenpunkte des kiesbetonten Bereichs eines der beiden Vortriebe (TM 500-3200), der im Folgenden näher betrachtet wird, blau markiert	187
Abbildung 7.32:	a) Anstieg der Schneidradanpresskraft (Rohdaten) mit der Überlagerung b) Abhängigkeit zwischen Stützdruck und Überlagerung sowie Grundwasserstand über Firste	188
Abbildung 7.33:	a) Vergleich der auf den Schneidradantrieb wirkenden Stützkraft mit der Überlagerung b) Vergleich der abbauspezifischen Schneidradkontaktkraft und der Überlagerung (ohne Korrelation)	188
Abbildung 7.34:	Vergleich von Schneidradkontaktkraft und Verklebungsgrad des Schneidrads	190
Abbildung 7.35:	Vergleich von spezifischer Penetration und Verklebungsgrad des Schneidrads	190
Abbildung 7.36:	Vergleich des Schneidradverklebungsgrades mit a) Schneidradkontaktkraft und b) spezifischer Penetration	191
Abbildung 7.37:	Vergleich von Schneidraddrehmoment und Verklebungsgrad des Schneidrads	191
Abbildung 7.38:	Vergleich der Kraftanteile der Schneidradanpresskraft	192
Abbildung 7.39:	Verklebungsanteil der spezifischen Penetration	193
Abbildung 8.1:	Empfohlene Untersuchungen zur Bewertung der Verklebungsneigung von Lockergesteinen	195
Abbildung 8.2:	Bewertungsdiagramm zur Bewertung der Neigung von Böden zur Ausbildung von Verklebungen und zur Feinkornfreisetzung	196
Abbildung 8.3:	Bestimmung der Bodenkennwerte der Zerfallsprodukte des modifizierten Siebtrommelversuchs zur Bewertung der Verklebungsneigung von veränderlich festen Festgesteinen	197

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Bewertungsmatrix zur Beurteilung der Verklebungsgefahr und des Feinkornanfalls im Fels mit Beispielen (rot: kritische Randbedingungen, grün: unkritische Randbedingungen)	62
Tabelle 5.2:	Gegenüberstellung der Veränderlichkeitsklassen zwischen DIN 4022-1 und DIN EN ISO 14689-1 nach Nickmann [87]	64
Tabelle 5.3:	Ausschnitt der Tabelle 5 zur Benennung und Beschreibung wichtigster Gesteinsarten nach DIN 4022-1 [26] (modifiziert: feinkörnige Gesteine und deren Veränderlichkeit farblich umrandet)	64
Tabelle 5.4:	Gegenüberstellung der Zerfallsbeständigkeit auf Basis des Siebtrommelindex unterschiedlicher Autoren [87]	67
Tabelle 5.5:	Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse des Siebtrommel- und Wasserlagerungsversuchs von Weiz [122]	68
Tabelle 5.6:	Übersichtstabelle der mittels modifiziertem Siebtrommelversuch untersuchten Proben	75
Tabelle 5.7:	Ergebnisse der Atterberggrenzen des Siebtrommelrückstands von Weiz [122] mit Bewertung im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben	76
Tabelle 5.8:	Ergebnisse der Atterberggrenzen des Siebtrommeldurchgangs von Weiz [122] mit Bewertung im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben	77
Tabelle 5.9:	Feinkornanteil der Zerfallsprodukte des Siebtrommelversuchs von Weiz [122] mit Bewertung im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben	79
Tabelle 5.10:	Vergleichende Auswertung des Zerfallsbeständigkeitsindex mit Bewertung der Zerfallsprodukte im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben (rot: kritisch, grün: unkritisch, gelb: nicht eindeutig zu bewerten)	80
Tabelle 6.1:	Stratigraphische Einheiten mit Zuordnung der Gesteinstypen	93
Tabelle 6.2:	Zusammenstellung der vortriebsbegleitenden Dokumentationen der Schildvortriebe	96
Tabelle 6.3:	Vortrieb der TVM-West mit Erddruckstützung und Begründung der Wahl des Vortriebsmodus	102
Tabelle 6.4:	Ermittlung der notwendigen Wasserzugabe bei vorgegebener Wassergehaltserhöhung des Bodens im Rahmen der Kon- nierung. Die Randbedingungen aus Baugrund und Vortrieb gelb und das Ergebnis ist grün hinterlegt	ditio- sind 106
Tabelle 6.5:	Stratigraphische Einheiten mit Zuordnung der Gesteinstypen	116
Tabelle 6.6:	Zusammenstellung der vortriebsbegleitenden Dokumentationen der Schildvortriebe	118

Tabelle 6.7:	Faziesbereiche und Bodenarten mit Angabe der mittleren Korngrößenanteilen	129
Tabelle 6.8:	Vortriebsbereiche mit Erschwernissen mit Zuordnung der Hauptbodenarten und des mittleren Feinkornanteils	138
Tabelle 7.1:	Einflüsse auf die Betriebsdaten einer Tunnelvortriebsmaschine	166
Tabelle 7.2:	Einflüsse von Verklebungen auf die Schneidradkontaktkraft unterschiedlicher Projekte	194
Tabelle 8.1:	Betriebsdaten mit jeweiligen abbau- und baugrundspezifischen Datenanteilen	198

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

A	Querschnittsfläche, gesamt (Druck- bzw. Tauchwand) [m ²]
A _{CWD}	Fläche Schneidradantrieb [m ²]
A.F.T.E.S.	Francaise des Tunnels et de l'Souterrain
ASTM	American Society for Testing and Materials
bar	Bar
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
EPB	Earth Pressure Balance
F1	Feinkornstrecke 1 Projekt C
F2	Feinkornstrecke 2 Projekt C
F _B	Reibungskraft Lager Schneidradverschiebung [kN]
F _{C, CWD}	Reibungskraft Schneidradverschiebezylinder [kN]
F _{Con}	Schneidradkontaktkraft [kN]
F _{C, TJ}	Reibungskraft Vortriebspresen [kN]
FGSV	Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen
FGU	Fachgruppe Untertagebau des Schweizer Ingenieur- und Architektenvereins
F _P	Schleppkraft Nachläufer [kN]
F _S	Resultierende Stützkraft auf Tauch- bzw. Druckwand [kN]
F _{S, CWD}	Resultierende Stützkraft auf Schneidradantrieb [kN]
F _{Sh}	Kraft aus Schildmantelreibung [kN]
F _{Th, CW}	Schneidradanpresskraft (Anzeigewert Betriebsdatenaufzeichnung) [kN]
F _{Th, total}	Gesamtvortriebskraft (Anzeigewert Betriebsdatenaufzeichnung) [kN]
g	Gramm
I _C	Konsistenzzahl [-]
I _d	Siebtrommelindex nach einem Zyklus [%]
I _{d2}	Siebtrommelindex nach zwei Zyklen [%]
I _P	Plastizitätszahl [%]
ISRM	International Society for Rock Mechanics
ITA	International Tunnelling Association
kN	Kilonewton
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
M _{CW}	Leerdrehmoment (Schneidrad ohne Ortsbrustkontakt) [MNm]
m _d	Trockenmasse [t]
M _{eff}	Effektives Schneidraddrehmoment [MNm]

min	Minute
MNm	Meganewtonmeter
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
M_{raw}	Schneidraddrehmoment (Anzeigewert Betriebsdatenaufzeichnung) [MNm]
m_w	Masse Wasser [t]
ÖGG	Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
OT	Organogene Tone
OU	Organogene Schluffe
Pen_{raw}	Penetration (Anzeigewert Betriebsdatenaufzeichnung) [mm/U]
Pen_{spec}	Spezifische Penetration [(mm/U)/kN]
s	Sekunde
SM	Schildmaschine
SPT	Standard Penetration Test
SR	Schneidrad
ST	Sand-Ton-Gemische
SU	Sand-Schluff-Gemische
t	Tonne
T	Ton
TA	Ausgeprägt plastische Tone
TBM	Tunnelbohrmaschine
TL	Leicht plastische Tone
TM	Mittelplastische Ton
TM	Tunnelmeter
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
U	Schluff
U	Umdrehung Schneidrad
UL	Leicht plastische Schluffe
UM	Mittelplastische Schluffe
V	Volumen [m ³]
V1	Verklebungsstrecke 1 Projekt C
V2	Verklebungsstrecke 2 Projekt C
V3	Verklebungsstrecke 3 Projekt C
V4	Verklebungsstrecke 4 Projekt C
W_L	Fließgrenze [%]
W_n	Wassergehalt [%]
W_P	Ausrollgrenze [%]
ρ	Feuchtdichte [t/m ³]
ρ_d	Trockendichte [t/m ³]

1. Einleitung

1.1. Einführung

Tunnelvortriebe erfolgen zunehmend unter schwierigeren Randbedingungen. Dabei ermöglicht der Einsatz von Schildvortriebsmaschinen die Herstellung von Tunnelbauwerken, die mit konventionellen Vortriebsverfahren aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbar wären. Im Vergleich zum konventionellen Vortrieb können mit Tunnelvortriebsmaschinen viel extremere Baugrundverhältnisse beherrscht werden. Der Einsatzbereich deckt dabei die gesamte Bandbreite von nicht standfesten Lockergesteinen mit hohem Grundwasserdruck bis hin zu Festgesteinen ab. Obwohl die Tunnelvortriebsmaschinen inzwischen aufgrund neuer technischer Entwicklungen und möglicher Zusatzmaßnahmen (z.B. Konditionierung) immer flexibler einsetzbar sind, ist der optimale Einsatzbereich eines bestimmten Maschinentyps auf typische Baugrundverhältnisse begrenzt (vgl. Kap. 2). Da Vortriebs- und Fördertechnik meist genau auf die prognostizierten Gebirgsverhältnisse abgestimmt sind, hängen Bauverfahren und Baugrund in hohem Maße voneinander ab. Dabei führen auch unerwartete Baugrundwechsel in der Regel nicht dazu, dass ein Vortrieb mit dem gewählten Maschinenkonzept nicht mehr weitergeführt werden kann. Trotzdem sind vielfach massive Leistungseinbußen die Folge. Das Leistungsrisiko bei wechselndem Boden wird von Maidl et al. als einer der wichtigsten Nachteile des maschinellen Tunnelvortriebs gegenüber anderen Bauverfahren aufgeführt [83]. Thewes hebt die Berücksichtigung von leistungsreduzierenden Erschwernissen bei der Planung und Vorauserkundung maschineller Vortriebe hervor [116a].

Als besonders problematisch im Hinblick auf den Vortrieb sind Verklebungen und die Freisetzung von Feinkorn (Ton und Schluff) in die Stützflüssigkeit oder angesammeltes Bergwasser zu nennen (vgl. Kap. 6). Verklebungen bei Schildvortrieben wirken sich in der Regel mehr oder weniger stark auf die Vortriebsleistung aus. Bei Flüssigkeitsschilden kann die Vortriebsleistung auf unter 30% abfallen [108]. Dabei gibt es an unterschiedlichen Stellen des Vortriebssystems viele Gründe für die Leistungseinbußen. Verklebungen führen unter anderem zu einer Reduzierung der Vortriebsgeschwindigkeit, höherem Spül- oder Reinigungsaufwand und - bei Kombination mit abrasivem Baugrund - erhöhtem Verschleiß [83]. Aber auch Ausfälle von Förderschnecke oder Bandanlagen können das Vortriebssystem zeitweise lahmlegen [120]. Bei hoher Freisetzung von Feinkorn kann die Kapazitätsüberschreitung von Separations- und Wasseraufbereitungsanlagen zu Stillständen und damit zu Leistungsreduzierungen führen. Beide Erschwernisse treten, die entsprechenden Randbedingungen vorausgesetzt, in feinkörnigem Baugrund auf. Da weltweit etwa 80% aller Sedimente aus Tonen oder Tonsteinen bestehen [74], werden relativ häufig potenziell kritische Gesteine angetroffen.

Eine verlässliche Prognose der Neigung des Baugrunds zur Ausbildung von Verklebungen und zur Freisetzung von Feinkorn stellt daher einen wichtigen Aspekt im Vorfeld eines Schildvortriebs dar. Sie ist unter anderem Grundlage verfahrenstechnischer Entscheidungen und der Vortriebsleistungskalkulation.

1.2. Problemstellung

Zahlreiche Erschwernisse bei maschinellen Tunnelvortrieben in der jüngeren Vergangenheit führten dazu, dass der Themenkomplex „Verklebungen“ bereits umfangreich erforscht wurde. Die Thematik wurde seit 1999 in Form von mehreren Forschungsarbeiten mit zum Teil ganz unterschiedlichen Ansätzen bearbeitet. Außerdem wurden kritische Schildvortriebe in letzter Zeit in zunehmendem Maße ingenieurgeologisch dokumentiert, was zu zusätzlichen Erkenntnissen hinsichtlich relevanter Baugrundeigenschaften in Bezug auf Verklebungen führte.

Inzwischen wird die Prognose und Bewertung der Verklebungsneigung des Baugrunds im deutschsprachigen Raum in einigen Normen, Richtlinien und Empfehlungen als wichtiger Aspekt der tunnelbautechnischen Planung empfohlen bzw. gar gefordert (vgl. Kap. 3.1.1). Der Baugrund muss daher bereits im Vorfeld eines Vortriebs im Hinblick auf die Verklebungsneigung bewertet werden können. Der Schwerpunkt bisheriger Arbeiten lag in der Verklebungsneigung von Lockergesteinen, so dass diese inzwischen auf Basis bodenmechanischer Kennwerte und der mineralogischen Zusammensetzung relativ gut beurteilt werden können (vgl. Kap. 3.1.3). Allerdings kann eine wechselnde Verfügbarkeit von Wasser noch nicht ausreichend bewertet werden, obwohl gerade bei Anwesenheit von Wasser im natürlichen Zustand unkritische Gesteine in Verklebungsmaterial umgewandelt werden können (vgl. Kap. 3.3). Wenige Erkenntnisse liegen außerdem zu der möglichen Freisetzung von Feinkorn in Flüssigkeiten vor, obwohl diese ebenfalls im feinkörnigen Baugrund Ursache von Erschwernissen im Vortrieb sein kann (vgl. Kap. 3.1 und 3.3). Obwohl auch bei Festgesteinen einige felsmechanische Kennwerte als relevant erkannt wurden, kann die Verklebungsneigung von Fels bisher nicht eindeutig bewertet werden (vgl. Kap. 3.1.4). Dabei ist vor allem die fehlende Übertragbarkeit der Erkenntnisse über Lockergesteine auf Festgesteine problematisch, da die relevanten bodenmechanischen Kennwerte am Fels nicht normkonform ermittelt werden können. Die in einigen Forschungsarbeiten entwickelten verklebungsspezifischen Sonderversuche führen teilweise zu untereinander nicht vergleichbaren Ergebnissen und bedürfen noch größtenteils einer Überprüfung in der Tunnelbaupraxis (vgl. Kap. 3.2). Sie sind demnach zumindest nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zur Bewertung der Verklebungsneigung in der Planungs- oder Kalkulationsphase geeignet. Die bisher fehlende eindeutige Quantifizierbarkeit der Auswirkungen von Verklebungen erschwert die Übertragbarkeit labortechnischer Ergebnisse auf die Praxis und Prognosen für zukünftige Vortriebe.

Zusammenfassend können folgende Aspekte im Hinblick auf Schildvortriebe in verklebungsanfälligem Baugrund noch nicht eindeutig bewertet werden:

- Bewertung der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Wasser
- parallele Bewertung von Verklebungen und der Freisetzung von Feinkorn
- Bewertung der Verklebungsneigung von Fels
- Quantifizierbarkeit von Verklebungen bzw. deren Auswirkungen.

1.3. Zielsetzung und Gliederung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Möglichkeiten aufgezeigt, die Neigung des Baugrunds zur Ausbildung von Verklebungen und zur Freisetzung von Feinkorn bereits im Vorfeld eines maschinellen Tunnelvortriebs eindeutiger als bisher bewerten zu können. Dabei werden die in Kapitel 1.2 aufgeführten Aspekte berücksichtigt. Die Arbeit gliedert sich wie folgt:

- In Kapitel 2 erfolgt ein kurzer Überblick über den maschinellen Tunnelbau, wobei der Schwerpunkt auf Schildvortriebe und ihre typischen Einsatzbereiche gelegt wird.
- In Kapitel 3 werden die publizierten Grundlagen und Erfahrungen im Hinblick auf Verklebungen und die Freisetzung von Feinkorn dargelegt. Dabei wird auch aufgezeigt, wie der Baugrund nach derzeitigem Kenntnisstand, ohne die Ergebnisse dieser Dissertation, bewertet werden kann. Die im Kapitel 1.2 aufgeführten Punkte werden in diesem Kapitel offensichtlich.
- In Kapitel 4 wird ein neues Verklebungsdiagramm hergeleitet. Das allgemeine Bewertungsdiagramm erlaubt die Quantifizierung von Wassergehaltsänderungen und somit auch die Bewertung von frei verfügbarem Wasser. Das Diagramm lässt außerdem auch Einschätzungen zur Freisetzung von Feinkorn zu.
- In Kapitel 5 wird in einem labortechnischen Teil die Durchführung des bekannten Siebtrommelversuchs zur Beurteilung der Zerfallsbeständigkeit von Festgesteinen modifiziert, so dass die Zerfallsprodukte bodenmechanisch untersucht und hinsichtlich der Verklebungsneigung analog zum Lockergestein bewertet werden können.
- In Kapitel 6 werden in einem Praxisteil umfangreiche eigene Erfahrungen aus Schildvortrieben mit Erschwernissen durch Verklebungen aufgezeigt. Hierbei stehen erweiterte Analysemöglichkeiten durch die praktische Anwendung des allgemeinen Bewertungsdiagramms aus Kapitel 4 im Vordergrund.
- In Kapitel 7 werden Betriebsdatenanalysen im Hinblick auf die Interaktion Baugrund – Maschine durchgeführt. Dabei werden unterschiedliche Einflüsse auf die Betriebsdaten aufgezeigt und Datenaufbereitungen im Hinblick auf die abbauunabhängigen Einflüsse vorgeschlagen. Um Verklebungen bzw. deren Auswirkungen in Zukunft besser quantifizieren zu können, werden Betriebsdaten von Vortriebsabschnitten mit und ohne Erschwernisse durch Verklebungen miteinander verglichen
- In Kapitel 8 werden auf Basis der Ergebnisse dieser Dissertation Empfehlungen für die Praxis gegeben. Dabei wird sowohl auf Baugrundgutachten als auch auf Betriebsdatenanalysen eingegangen.
- In Kapitel 9 erfolgt eine kurze Zusammenfassung der Arbeit mit Ausblick.

2. Einführung in die maschinelle Vortriebstechnik

Die vorliegende Arbeit behandelt mit Verklebungen und der Feinkornfreisetzung zwei häufig vorkommende Erschwernisse bei maschinellen Tunnelvortrieben. In diesem Kapitel wird zunächst ein kurzer Überblick zum maschinellen Tunnelbau gegeben. Dabei werden als Schwerpunkt die Verfahrenselemente behandelt, die einen direkten Bezug zu Verklebungen und Feinkornanfall stehen.

2.1. Einteilung von Tunnelvortriebsmaschinen

Der maschinelle Tunnelbau deckt derzeit mit seinen unterschiedlichen Maschinentypen und speziellen Verfahrenstechniken eine große Bandbreite an Baugrundverhältnissen ab. Dabei wird bei Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) zwischen Tunnelbohrmaschinen (TBM), Doppelschildmaschinen (DSM), Kombinationsschildmaschinen (KSM) und Schildmaschinen (SM) unterschieden [19]. Im weiteren Verlauf folgt diese Arbeit der entsprechenden Nomenklatur (Abb. 2.1). Außerdem werden die dort aufgeführten Abkürzungen sinngleich verwendet.



Abbildung 2.1: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [19]

Auch wenn Verklebungen und die Freisetzung von Feinkorn bei entsprechenden Baugrundverhältnissen bei allen in Abbildung 2.1 aufgeführten Tunnelvortriebsmaschinen möglich sind, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Schildvortrieben mit Vollschnittabbau. Im Hinblick auf detailliertere Ausführungen zum maschinellen Tunnelbau wird auf die Empfehlung des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) von 2010 [19] und aktuelle Fachbücher verwiesen [83, 115].

2.2. Schildmaschinen mit Vollschnittabbau

Das Vortriebsprinzip von Schildmaschinen mit Vollschnittabbau wird am Beispiel eines Hydroschildvortriebs in Abbildung 2.2 erläutert. Auf die in der Abbildung dargestellten Besonderheiten eines Hydroschildes wird in Kapitel 2.2.4 eingegangen. Bei Schildvortrieben mit Vollschnittabbau erfolgt der Gesteinsabbau mittels werkzeugbestücktem Schneidrad (1). Der Vortrieb ist zyklisch. Dem Ausbruch des Hohlraums folgt der Ausbau im Schutz des Schildmantels (2). Dazu wird am Ende des Schildes ein Ring aus Tübbingsegmenten (9) eingebaut. Während des Ringbaus mit einem Drehkrahnen, dem sogenannten Erektor (10), steht der Vortrieb. Im Anschluss an den Ringbau wird in einem neuen Vortriebszyklus wieder Gestein an der Ortsbrust gelöst und der Schild mittels Vortriebspresen (11), denen der letzte gebaute Ring als Widerlager dient, in Vortriebsrichtung geschoben. Parallel dazu wird das Ausbruchsmaterial gefördert und der zwischen Tübbingring und Gebirge verbliebene Spalt am Schildschwanz mit Mörtel verpresst.

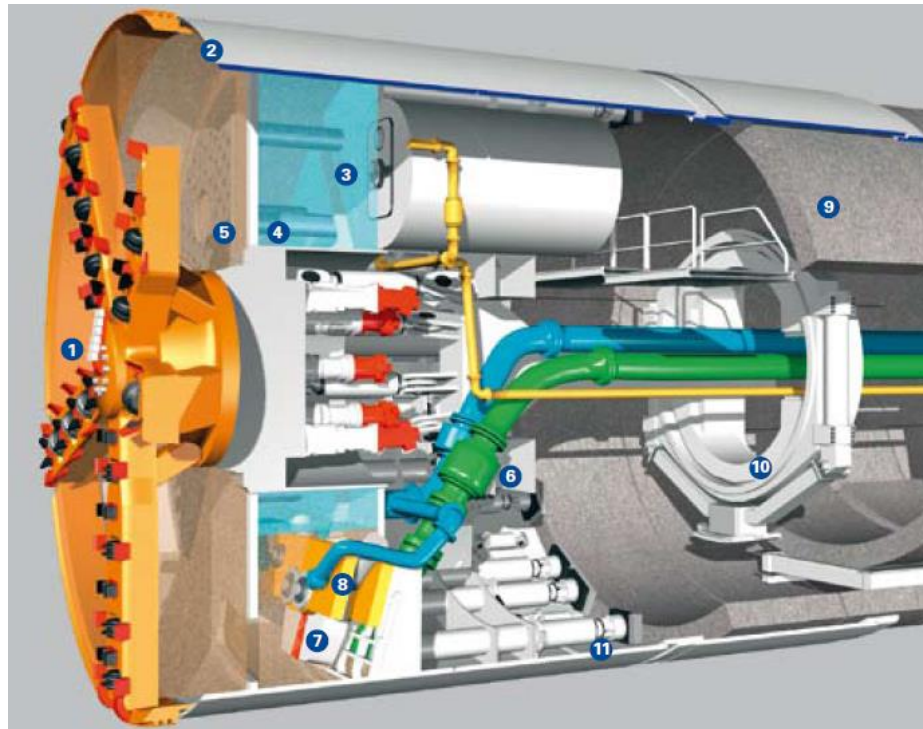


Abbildung 2.2: Funktionsprinzip eines Hydroschildes [54]

Der Vortriebszyklus gliedert sich somit in eine Vortriebsphase (Gesteinsabbau an der Ortsbrust, Förderung des Ausbruchsmaterials, Vorschub mittels Vortriebspresen und Verpressung des Ringspalts) und eine Ringbauphase (Einbau des Tübbingrings).

Da in nicht ausreichend standfestem Baugrund und/oder unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzte Vortriebe eine Ortsbruststützung erfordern, erfolgt die weitere Unterteilung der Schildmaschinen auf Basis der eingesetzten Stützmedien [19]. Bei Schildmaschinen mit Vollschnittabbau wird neben Vortrieben ohne Stützung zwischen mechanischer, Druckluft-, Flüssigkeits- und Erddruck-Stützung unterschieden (Abb. 2.1). Auf die unterschiedlichen Schildvortriebsverfahren und die Haupteinsatzbereiche wird im Folgenden näher eingegangen.

2.2.1. Schildmaschinen ohne Stützung

Schildvortriebe ohne Ortsbruststützung erfordern standfeste Baugrundverhältnisse. Der typische Einsatzbereich der so genannten „offenen Schilde“ liegt in bindigen Böden mit halbfeiter bis fester Konsistenz und Festgesteinen, wobei mit weitestgehend geschlossenen Schneidrädern auch nachbrüchige Felsbereiche durchfahren werden können [19]. Entsprechend der DAUB-Empfehlung von 2010 werden auch dicht gelagerte nichtbindige Böden dem Haupteinsatzbereich zugeordnet und somit als ausreichend standfest eingestuft. Die Förderung des Ausbruchsmaterials erfolgt über Förderbänder. Dazu wird das an der Ortsbrust gelöste Gestein über den sogenannten Muckring an der Schneidradrückseite auf die Förderbänder geworfen.

Ohne Ortsbruststützung kann Bergwasser ungehindert in die Abbaukammer zufließen. Der Zulauf von Bergwasser ist bei diesem Schildtyp im Hinblick auf die Erschwernisse durch Verklebungen oder Feinkornfreisetzungen von besonderem Interesse und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit an verschiedenen Stellen aufgegriffen. Die DAUB-Empfehlung von 2010 gibt für den Haupteinsatzbereich im Fels maximal Wasserzutritte von 25 l/min (\rightarrow ca. 0,4 l/s) je 10 m Tunnel vor [19].

Das Vortriebsverfahren erfordert über die gesamte Vortriebsstrecke relativ standfeste Bedingungen. Wenn unerwartet stark nachbrüchige bis gebräuche Gebirgsverhältnisse oder sehr hohe Bergwasserzutritte angetroffen werden (z.B. in einer nicht prognostizierten Störzone), sind aufgrund der fehlenden Ortsbruststützung oft aufwendige Zusatzmaßnahmen erforderlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zusätzliche Sicherungsmittel oder Gebirgsverbesserungsmaßnahmen bei maschinellen Tunnelvortrieben nur bedingt eingesetzt werden können.

2.2.2. Schildmaschinen mit Druckluftstützung

Der typische Einsatzbereich von Schildmaschinen mit Druckluftstützung liegt in bindigen Böden mit steifer bis fester Konsistenz und dicht gelagerten nichtbindigen Böden und kann auch unterhalb des Grundwasserspiegels erfolgen [19]. Obwohl Vortriebe im Fels möglich sind, sind Festgesteine nicht als Haupteinsatzbereich anzusehen.

Bei diesem Vortriebsverfahren wird das Wasser durch die Druckluft zurückgehalten, wohingegen die Stützung gegen den Erddruck in der Regel nicht möglich ist [83, 19]. Während flächige Wasserzutritte aus Porengrundwasserleitern mit Druckluftstützung beherrschbar sind, können stärkere, punktuelle Bergwasserzutritte aus offenen Klüften im Fels in der Regel nicht beherrscht werden (vgl. Kap. 6.2.1.).

2.2.3. Schildmaschinen mit Flüssigkeitsstützung

Beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb wird eine unter Druck stehende Flüssigkeit als Stützmedium eingesetzt. Mit der Flüssigkeitsstützung wird sowohl dem Grundwasser- als auch dem Erddruck entgegen gewirkt [83]. Dabei fungiert die Stützflüssigkeit nicht nur als Stütz- sondern auch als Transportmedium. Im Hinblick auf weitere Details wird auf Abbildung 2.2 verwiesen. Die Stützflüssigkeit wird zusammen mit dem abgebauten Gesteinskomponen-

ten durch die Förderleitung (Abb. 2.2: 6, grün) aus dem Tunnel transportiert und nach der Abtrennung des Ausbruchsmaterials durch die Speiseleitung (Abb. 2.2: 8, blau) in die Abbaukammer zurückgeführt. Als Stützflüssigkeit werden meist Bentonit-Suspensionen verwendet. Bei den flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben wird vorrangig zwischen der deutschen Entwicklungsreihe der Hydroschildvortriebe und der japanischen Entwicklungsreihe der Slurryschildvortriebe differenziert [83]. Diese unterscheiden sich vor allem in der verfahrenstechnischen Steuerung und Kontrolle des Stützdrucks.

Während der Stützdruck bei Slurryschilden durch das kontrollierte Zu- und Abpumpen der Stützflüssigkeit in die Abbaukammer geregelt wird, sind Stützdrucksteuerung und Suspensionskreislauf bei Hydroschilden entkoppelt [83]. Die Regelung des Stützdrucks erfolgt bei Hydroschilden durch ein Zweikammersystem, das durch die Druckwand (Abb. 2.2: 3) vom restlichen Tunnel mit atmosphärischen Bedingungen getrennt ist. Dabei ist die vollständig mit Stützflüssigkeit gefüllte Abbaukammer durch die Tauchwand (Abb. 2.2: 5) von der etwa bis zur Achse mit Druckluft gefüllten Arbeitskammer getrennt. Da beide Kammern durch die Tauchwandöffnung verbunden sind, kann der Druck der Stützflüssigkeit durch den Luftdruck in der Arbeitskammer gesteuert werden. Die Stützdruckregelung ist somit unabhängig von Schwankungen im Förderkreislauf.

Das gelöste Ausbruchsmaterial gelangt durch die Tauchwandöffnung in den unteren Bereich der Arbeitskammer, wo in der Regel der Ansaugstutzen als Einlass der Förderleitung angebracht ist. Größere Steine und Blöcke (Lockergestein) oder größere Kluffkörper (Festgestein) werden durch Brecher (Abb. 2.2: 7) vor dem Ansaugrohr gebrochen, sofern sie nicht bereits durch die Rollenmeißel des Schneidrads ausreichend zerkleinert wurden.

Die Trennung des in der Förderleitung mitgeführten Gemisches aus Ausbruchsmaterial und Suspension erfolgt in Separationsanlagen, die in der Regel außerhalb des Tunnels aufgebaut sind. Beim Durchgang durch die Separationsanlage werden bei jedem Trennvorgang kleinere Korndurchmesser aus der Suspension abgetrennt, wobei prinzipiell drei Trennbereiche unterschieden werden können. Das Funktionsprinzip einer Separationsanlage ist Abbildung 2.3 zu entnehmen.

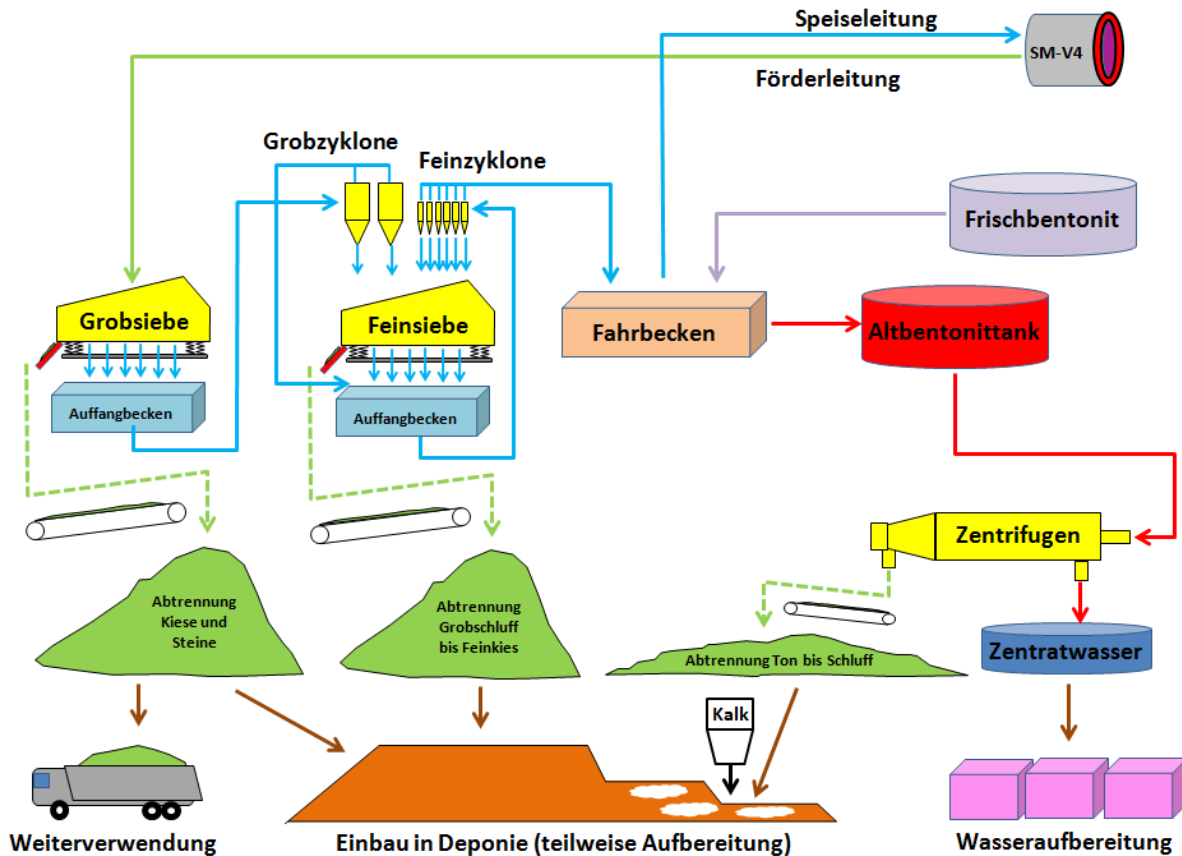


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip einer Separationsanlage

Zunächst werden grobkörnige Bestandteile mittels Vorsieben, den sogenannten Grobsieben, abgetrennt. Im nächsten Schritt erfolgt die Abtrennung der vorwiegend mittelkörnigen Komponenten durch Hydrozyklone, denen Entwässerungssiebe, sogenannte Feinsiebe, nachgeschaltet sind. Die aufbereitete Suspension wird dann über das sogenannte Fahrbecken wieder der Speiseleitung zugeführt. Da Feinzyklone Kornpartikel bis zu einer minimalen Korngröße von etwa $35\ \mu\text{m}$ abtrennen können [83], wird der Teil der Feinkornfraktion $<0,035\ \text{mm}$ in der Suspension angereichert und führt zu Anstiegen der Suspensionsdichte. Um dem entgegenzuwirken wird die Suspension regelmäßig ausgetauscht. Dazu wird sie aus dem Fahrbecken in den sogenannten Altbentonittank geleitet und dem Suspensionskreislauf Frischbentonit zugeführt. Der Feinkornanteil der aus dem Kreislauf entnommenen Suspension wird durch Zentrifugen oder Filterpressen abgetrennt. Das Zentratwasser der Zentrifugen ist nicht zur Herstellung von Frischsuspension geeignet, da die Qualität der Stützflüssigkeit infolge eingesetzter Flockungsmittel negativ beeinflusst würde. Es wird daher, nach entsprechender Aufbereitung, entsorgt. Die abgetrennten Gesteinskomponenten können zum Teil weiterverwendet werden. In den meisten Fällen müssen sie allerdings deponiert und teilweise aufbereitet werden.

Der technische und wirtschaftliche Aufwand der Trennverfahren nimmt mit kleiner werdendem Korndurchmesser zu. Insbesondere Aufbereitungen der aus dem Kreislauf entnommenen Altsuspensionen sind aufwendig und teuer. Außerdem sind der Dimensionierung der Anlagen aufgrund des meist geringen Platzangebots im Baustellenbereich Grenzen gesetzt. Dies gilt vor allem für innerstädtische Baustellen.

Der typische Einsatzbereich von Hydroschilden liegt in mittel- und grobkörnigen Lockergesteinen und wird aufgrund von Praxiserfahrungen in Form eines Körnungsbandes eingegrenzt. Die Einsatzbereiche in Abhängigkeit der Kornverteilung mit Darstellung der auftretenden Probleme und die zur Beherrschung notwendigen Maßnahmen wurden von Thewes [112] in einem Diagramm zusammengefasst (Abb. 2.4). Demzufolge ist bei zu grobkörnigen Böden (C) außerhalb des Haupteinsatzbereichs die Ortsbruststützung schwierig. Feinkörnige Böden (B) lassen hingegen Verklebungen und einen hohen Separieraufwand erwarten. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird vor allem auf die Erschwernisse im Korngrößenbereich (B) eingegangen.

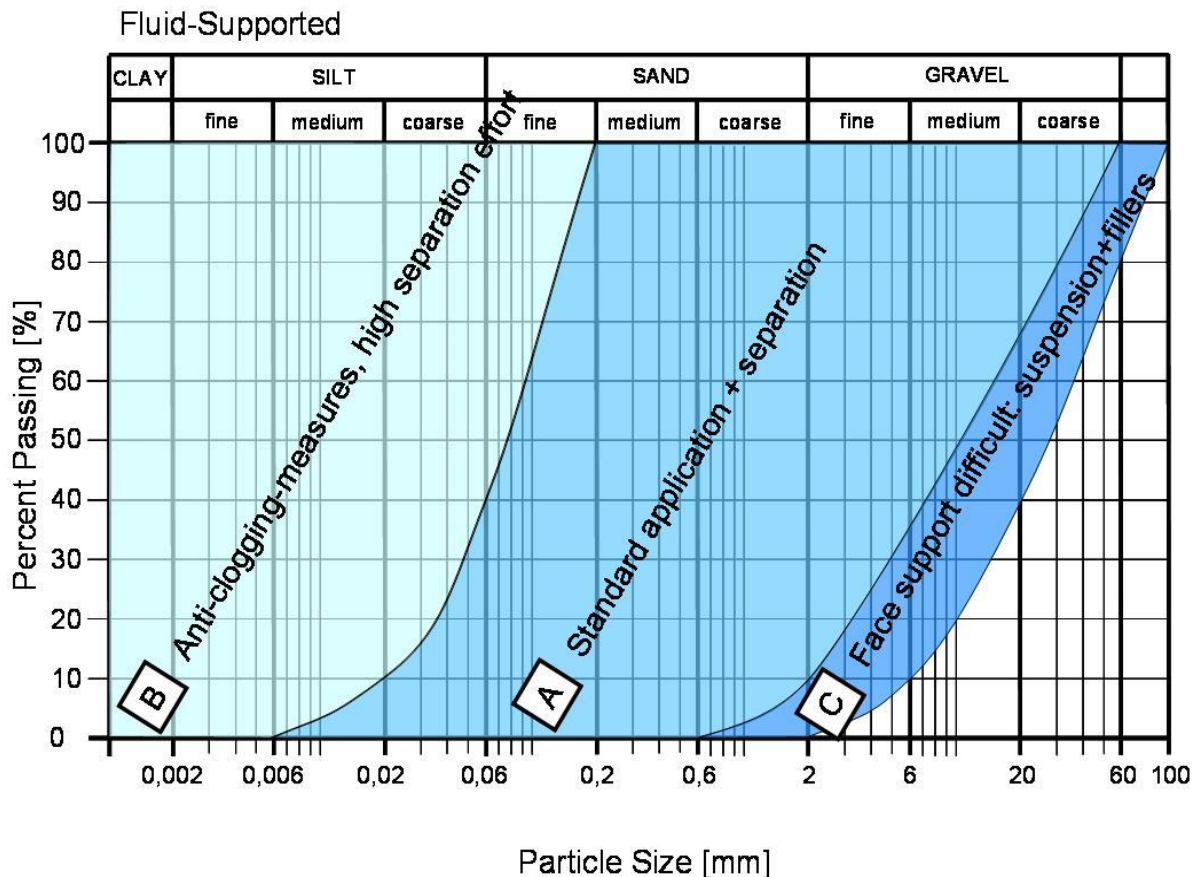


Abbildung 2.4: Einsatzbereich von Hydroschildvortrieben [112]

Obwohl Vortriebe im Fels entsprechend der DAUB-Empfehlungen von 2010 möglich sind, sind Festgesteine nicht als Haupteinsatzbereich anzusehen [19].

Der Vortrieb kann auch bei standfesten Ortsbrustverhältnissen nicht ohne Stützflüssigkeit ausgeführt werden, da diese gleichzeitig als Fördermedium fungiert. Auch wenn in diesen Fällen besondere Vortriebsmodi angewendet werden, bei denen die Abbaukammer nur teilweise gefüllt ist (vgl. Kap. 6.2.2.2), ist das Ausbruchsmaterial systembedingt immer mit großen Flüssigkeitsmengen (Wasser) in Kontakt. Dementsprechend ist dieser Schildtyp im Hinblick auf die Erschwernisse durch Verklebungen oder Feinkornfreisetzungen besonders anfällig. Darauf wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit an verschiedenen Stellen eingegangen.

2.2.4. Schildmaschinen mit Erddruckstützung

Erddruckschilde werden synonym auch als EPB-Schilde (Earth Pressure Balance Shield) bezeichnet. Die Ortsbruststützung erfolgt durch einen aus dem abgebauten Gestein generierten Erdbrei. Mit der Erddruckstützung wird sowohl dem Grundwasser- als auch dem Erddruck entgegen gewirkt [83]. Im Hinblick auf die Funktionsweise eines Erddruckschildes wird auf Abbildung 2.5 verwiesen. Dabei wird das vom Schneidrad (1) abgebaute Gestein in der Abbaukammer (2) in einen geeigneten Erdbrei umgewandelt. Die Abbaukammer ist durch die Druckwand (3) vom atmosphärischen Tunnelbereich abgetrennt. Die Förderung erfolgt über eine druckdichte Förderschnecke (5), von der das Material in der Regel auf Förderbänder geworfen wird. Der Stützdruck wird infolge der Vortriebspresen (4) über die Druckwand (3) erzeugt und durch das Zusammenspiel von Vortriebsgeschwindigkeit und Schneckendrehzahl reguliert. Die Abbildung zeigt außerdem den bereits beschriebenen Tübbingeinbau (7) mittels Errektor (6).

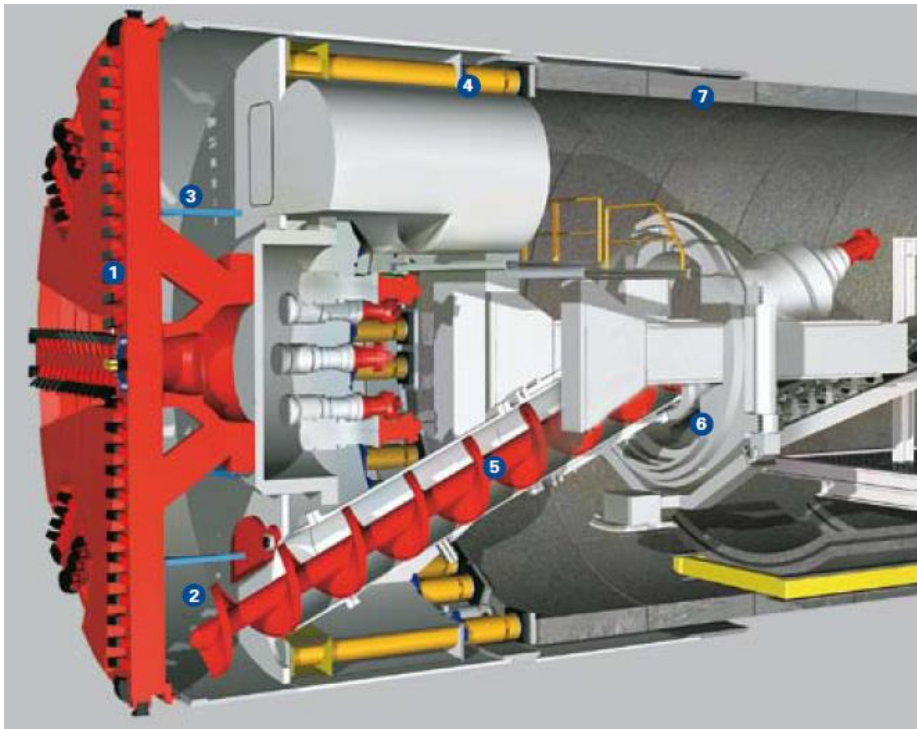


Abbildung 2.5: Funktionsprinzip eines Erddruckschildes [54]

Um als Stützmedium geeignet zu sein muss das abgebaute Ausbruchsmaterial bestimmte Eigenschaften aufweisen. Neben dem Feinkornanteil ist vor allem die Konsistenz des Erdbreies entscheidend. Dabei empfehlen Maidl et al. eine breiig bis weiche Konsistenz mit Konsistenzzahlen zwischen 0,4 und 0,75 [83]. Eine steifere Konsistenz verhindert demnach eine gleichmäßige Stützdruckübertragung und einen kontinuierlichen Materialfluss zur Schnecke, während eine zu flüssige Konsistenz Probleme auf den Förderbändern verursacht. Außerdem kann die Förderschnecke nach Thewes & Budach bei zu geringer Konsistenz nicht mehr ausreichend druckdicht sein [113]. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Druckabbau zum atmosphärischen Tunnelbereich über die Reibung in der Schnecke durchgeführt wird [19]. Bei Böden mit entsprechend hoher Konsistenz muss dem Ausbruchsmaterial eine definierte Flüssigkeitsmenge (Wasser, Suspensionen, Schaum) zugegeben werden, um es in

einen Erdbrei zu konditionieren [83]. Eine entsprechende Konditionierung ist vor allem bei Vortrieben im Fels entscheidend. Im Hinblick auf die Verbreitbarkeit von Festgesteinen wird auf Wittke-Schmitt & Schmitt und die dort aufgeführte Literatur verwiesen [126]. Zugaben von Konditionierungsmitteln und Wasser können sowohl in die Abbaukammer als auch in der Förderschnecke erfolgen.

Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Schildtypen kann der Erddruckschild bei standfesten Ortsbrustverhältnissen auch offen gefahren werden. Auch Vortriebe mit Teilfüllung der Abbaukammer und Druckluftstützung sind möglich (vgl. Kap. 6.2.1). Erddruckschilde sind somit im Hinblick auf wechselnde Baugrundverhältnisse besonders flexibel.

Der Haupteinsatzbereich von Erddruckschilden liegt in feinkörnigen Lockergesteinen mit Feinkornanteilen $> 30\%$ und wird von Maidl et al. [83] aufgrund von Praxiserfahrungen in Form eines Körnungsbandes eingegrenzt (Abb. 2.6).

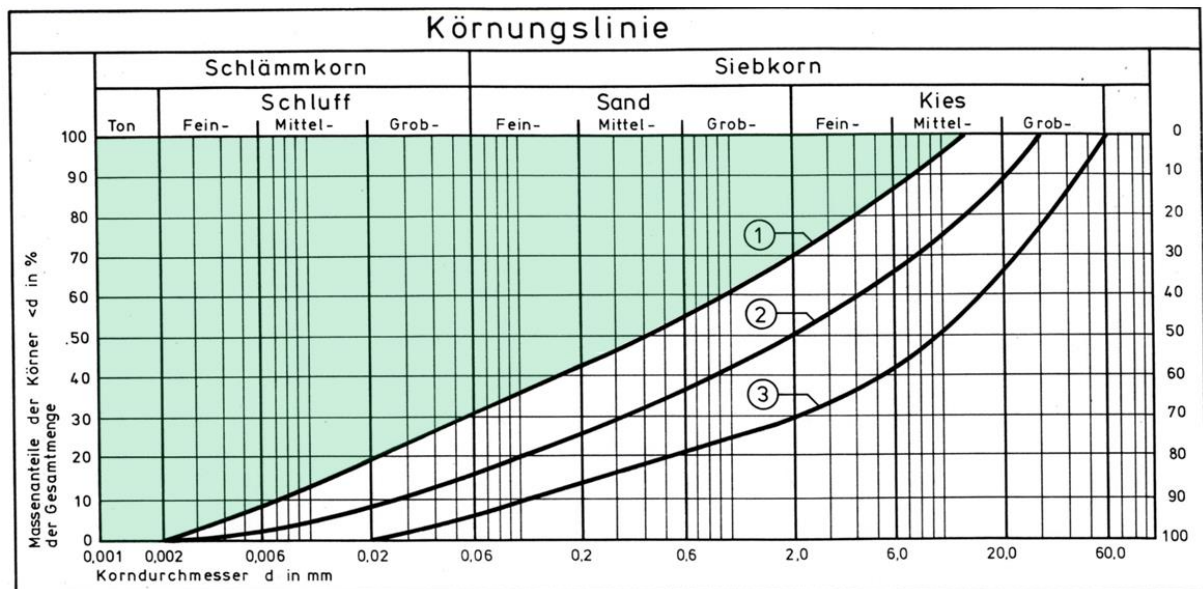


Abbildung 2.6: Einsatzbereich von Erddruckschildvortrieben [83, farblich modifiziert]

Der Haupteinsatzbereich kann in Abhängigkeit des Grundwasserdrucks durch die Zugabe von Konditionierungsmitteln erweitert werden (Abb. 2.6: Kurve 2 und 3).

Neuere Erkenntnisse dazu stammen von Budach [10, 113, 11]. Demnach sind, eine entsprechende Konditionierung vorausgesetzt, auch mittel- bis grobkörnige Böden mit geringem Feinkornanteil beherrschbar (Abb. 2.7). Ohne Grundwasserdruck sind mit dem Bereich III in Abbildung 2.7 sogar Erddruckschildvortriebe in Böden ohne Feinkornanteil möglich. Der mögliche Einsatzbereich von EPB-Schilden wurde somit in den Haupteinsatzbereich von Hydroschildvortrieben erweitert (vgl. Abb. 2.4).

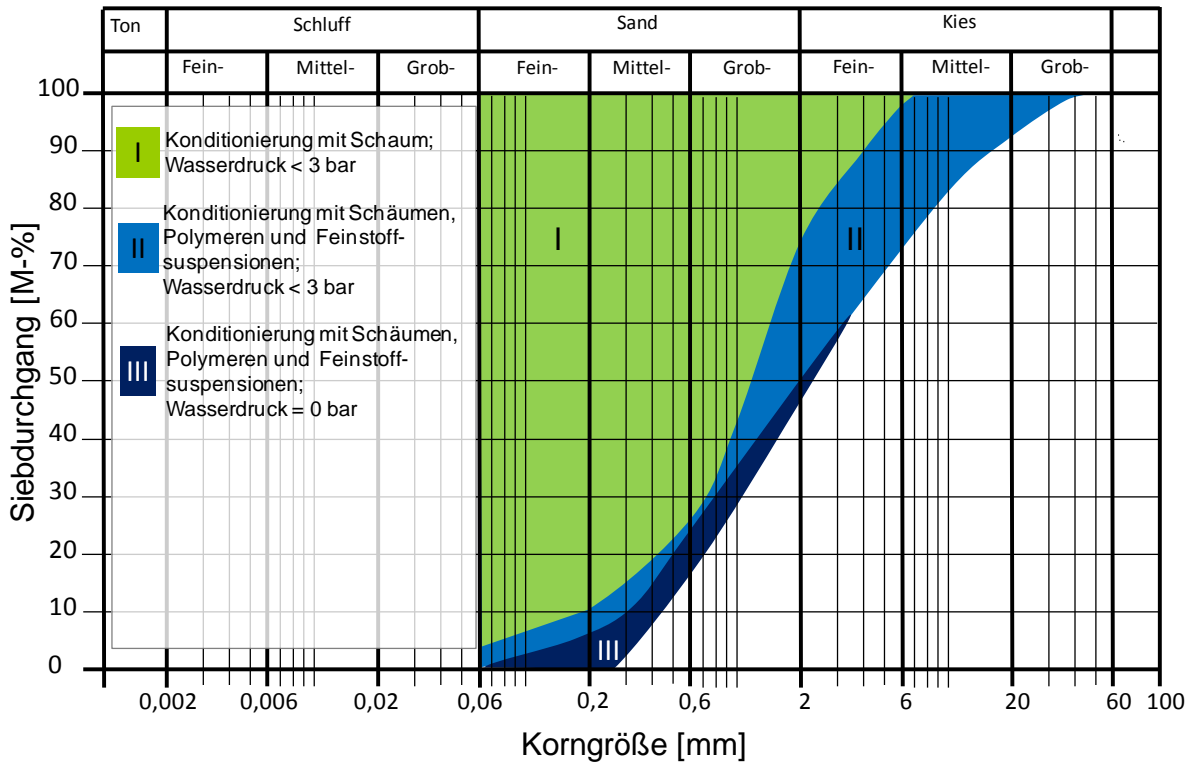


Abbildung 2.7: Erweiterter Einsatzbereich von Erddruckschildvortrieben für mittel- und grobkörnige Böden [11]

2.2.5. Vortriebe außerhalb des Haupteinsatzbereichs des Schildtyps

Festzuhalten bleibt, dass der Haupteinsatzbereich von Erddruckschilden in feinkörnigen Böden (vgl. Abb. 2.6) und der von Hydroschilden in mittel- bis grobkörnigen Böden (vgl. Abb. 2.4) liegt.

Wechselhaften Baugrundverhältnisse erfordern oftmals Vortriebe außerhalb der typischen Einsatzbereiche des jeweiligen Schildtyps, da bei einem Projekt sowohl feinkörnige als auch mittel- bis grobkörnige Böden angetroffen werden können. Die Entscheidung zwischen Hydro- und Erddruckschild erfolgt dann in der Regel nach den überwiegend prognostizierten Bodenarten:

- Bei überwiegend mittel- bis grobkörnigen und untergeordnet feinkörnigen Böden: Einsatz von Hydroschilden mit Erschwernissen durch Verklebungen und bei der Separierung, sobald feinkörnige Böden angetroffen werden.
- Bei überwiegend feinkörnigen und untergeordnet mittel- bis grobkörnigen Böden: Einsatz von Erddruckschilden mit entsprechendem Konditionierungsaufwand, sobald mittel- grobkörnige Böden angetroffen werden.

Die Konditionierung mittel- bis grobkörniger Böden und dadurch mögliche Erweiterungen des Einsatzbereichs von Erddruckschildvortrieben werden in dieser Arbeit nicht behandelt. In dieser Hinsicht wird auf die Forschungsarbeit von Budach [11] und die dort aufgeführte Literatur verwiesen.

3. Verklebungen: Grundlagen und Erfahrungen

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung im Hinblick auf Verklebungen bei maschinellen Tunnelvortrieben aufgezeigt. Da im verklebungsanfälligen Baugrund auch häufig eine Freisetzung von Feinkorn in Flüssigkeiten (Berg- oder Prozesswasser) auftritt, werden auch diese Phänomene mit behandelt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt aber auf Verklebungen. Zunächst wird auf das während des Vortriebs kritische Ausbruchsmaterial (Verklebungsmaterial und freigesetztes Feinkorn) und anschließend auf die relevanten Baugrundeigenschaften des natürlichen, noch nicht veränderten Gesteins eingegangen. Danach werden über die bodenmechanischen Standardversuche hinausgehende experimentelle Grundlagen zur Bewertung der Verklebungsanfälligkeit behandelt. Außerdem werden in der Literatur beschriebene Erfahrungen mit Betriebsdatenanalysen dargelegt, wobei vor allem der Einfluss von Verklebungen bei Schildvortrieben berücksichtigt wird.

3.1. Verklebungsmaterial und Feinkornfreisetzung

Zunächst wird auf das im Vortrieb kritische Ausbruchsmaterial, nämlich Verklebungsmaterial und freigesetztes Feinkorn, eingegangen. Im Abbauprozess wird das an der Ortsbrust gelöste Ausbruchsmaterial weiter verändert. Dabei kommt es vornehmlich zu einer Wasseraufnahme, also zur Änderung der Ausgangskonsistenz, wobei unterschiedliche Klassen von Ausbruchsmaterial mit dafür typischen Konsistenzbereichen typisch sind [61].

3.1.1. Kritische Konsistenzbereiche

Bei 150 Verklebungsproben ist, unabhängig vom Schildvortriebsverfahren, die weiche Konsistenz vorherrschend (58%: weich, 23%: breiig, 19%: steif) [61]. Demnach ist bei steifer Konsistenz meist nicht ausreichend Feuchtigkeit zum Kleben vorhanden, während bei breiiger Konsistenz eine zu geringe Scherfestigkeit vorliegt, um während des Vortriebs erhalten zu bleiben. Feinkörniges Material im Konsistenzbereich zwischen breiig und steif neigt also mehr oder weniger stark dazu zu kleben. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Konsistenzbereich vereinfacht als "klebrige Konsistenz" bezeichnet, sofern diese nicht näher spezifiziert wird.

Praxiserfahrungen von Weh et al. zeigen, dass Ausbruchsmaterial mit weicher bis steifer Konsistenz besonders kritisch hinsichtlich von Verklebungen bei Schildvortrieben mit Schneckenförderung ist [119, 121]. Hat Ausbruchsmaterial erst einmal den kritischen weichen bis steifen Konsistenzbereich erreicht, muss es zur Förderung durch die Schnecke in eine breiige Konsistenz überführt werden [121]. Im Gegensatz dazu wird der flüssige Konsistenzbereich als problematisch hinsichtlich anfallender Suspensionen und der Steigbandförderung beschrieben. Auch Maidl et al. beschreiben die Verflüssigung des Ausbruchsmaterials bei Schildverfahren ohne aktive Ortsbruststützung als besonders problematisch [83].

3.1.2. Umwandlung des Ausbruchsmaterials und Auswirkungen

Bindige Böden können bereits im natürlichen Zustand eine klebrige Konsistenz aufweisen [61]. Auf den Einfluss der Konsistenz des noch nicht veränderten Baugrunds wird in Kapitel 3.2.3.2 näher eingegangen. Häufig wird der Boden allerdings zunächst in Form von Klumpen mit unkritischer Konsistenz an der Ortsbrust gelöst. Bei Anwesenheit von Wasser können diese eine klebrige Konsistenz erhalten. Der Boden wird somit in Verklebungsmaterial umgewandelt. Zusätzlich kann ein Teil der Körner an der Ortsbrust oder aus den Klumpen als Feinkorn in Suspension gehen. Neben unkritischen Klumpen, Verklebungsmaterial und in Suspension gegangenem Feinkorn sind auch Mischungen in Form von Klumpen mit aufgeweichten klebrigen Oberflächen möglich (Abb. 3.1).

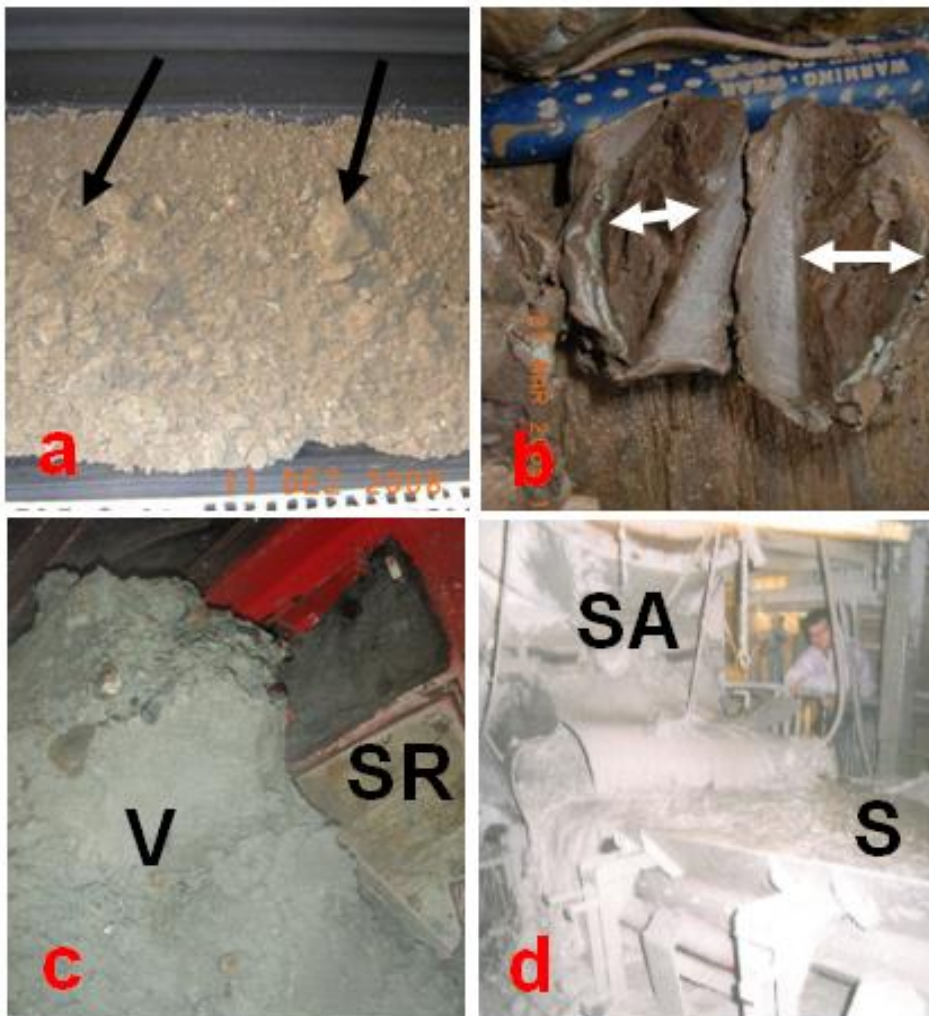


Abbildung 3.1: Unterschiedliches Ausbruchsmaterial bei Schildvortrieben [61]. a) Tonklumpen (Pfeile) in trockenem Ausbruchsmaterial b) Zerteilter Tonklumpen mit unverändertem Kern (Doppelpfeil) und aufgeweichter, klebriger Rinde c) Verklebungsmaterial (V) an der Rückseite des Schneidrads (SR) d) Förderung von feinkornreichem Schlamm (S) am Schneckenabwurf (SA)

Die lockergesteinsartigen Zerfallsprodukte veränderlich fester Gesteine können vergleichbar kritische Zustandsformen erreichen [62]. Dementsprechend sind im Fels neben unkritischen Chips auch Chips mit klebriger Rinde, Verklebungsmaterial und in Suspension gegangenem Feinkorn möglich.

Verklebungen können den gesamten Vortrieb vom Abbauprozess bis hin zur Deponierung beeinflussen. Dabei kann das gleiche Verklebungsmaterial zu verschiedenen Zeitpunkten an unterschiedlichen Stellen zu Behinderungen führen. Hollmann & Thewes unterscheiden zwischen primären Verklebungen im Bereich der Abbaukammer und sekundären Verklebungen im weiteren Verlauf der Systemkette (z.B. Separation oder Bandübergabe) [61]. Beispielsweise wird bei Hydroschildvortrieben aus primären Verklebungen gelöstes Material in Form von bindigen Kugeln durch die Förderleitungen transportiert, wobei diese zu sekundären Verklebungen auf den Grobsieben führen können (Abb. 3.2).



Abbildung 3.2: Verklebungsmaterial auf der Separation [61] a) Grobsieb mit Kugeln aus Verklebungsmaterial b) Sekundäre Verklebungen des Grobsiebs durch Zusammenballungen klebriger Kugeln

Wendl bezeichnet in Förderleitungen gerolltes bindiges Material als „*Pseudogerölle*“ [123]. Der bei Hydroschildvortrieben im Lockergestein geprägte Begriff wurde als Abgrenzung gegenüber Geröllen aus Festgesteinen (Kies, Steine) innerhalb der Böden gewählt. Um auch Verklebungen im Fels zu berücksichtigen, wird rollend gefördertes Verklebungsmaterial im Rahmen dieser Arbeit als „*bindige Kugeln*“ oder „*Verklebungskugeln*“ bezeichnet. Die baubetrieblichen Auswirkungen, bedingt durch die Wechselwirkungen zwischen primären und sekundären Verklebungen, bei offen gefahrenen Schildvortrieben, zeigen Weh et al. besonders deutlich [119, 120, 121].

In der Regel führen alle durch Verklebungen verursachten Auswirkungen zu mehr oder weniger starken Einbußen der Vortriebsleistung. Beispielsweise weist Thewes auf Leistungsreduzierungen von 30% bei flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben mit Verklebungen hin [108]. Suquet beschreibt eine 5 bis 10fach längere Bohrzeit infolge Verklebungen bei einem Hydroschildvortrieb [106]. Auf die zahlreichen publizierten Vortriebserschwernisse infolge Verklebungen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. In dieser Hinsicht wird bezüglich flüssigkeitsgestützter Schildvortriebe auf Thewes und die dort aufgeführte Literatur verwiesen [108, 110]. Weitere Praxiserfahrungen von durch Verklebungen beeinflussten Hydroschildvortrieben können Jancsecz und Suquet entnommen werden [73, 106]. Im Hinblick auf offen gefahrene und EPB-Schilde wird auf Weh et al. verwiesen [119, 120, 121]. Eigene Erfahrungen im Hinblick auf die Auswirkungen von Verklebungen werden in Kapitel 6 aufgezeigt.

3.2. Relevante Baugrundeigenschaften

In diesem Abschnitt wird auf die relevanten Eigenschaften des verklebungsanfälligen Baugrunds eingegangen. Vorab wird dargelegt, wie Normen und Regelwerke die Verklebungser-schwernisse behandeln. Bevor auf die relevanten boden- und felsmechanischen Parameter eingegangen wird, ist zunächst eine definierte Unterscheidung zwischen Boden und Fels notwendig. Abschließend wird auf die Verfügbarkeit von Wasser eingegangen, wobei hier neben Bergwasser auch Prozesswasser mit behandelt wird.

3.2.1. Vorgaben in Normen, Richtlinien und Empfehlungen

Die Behinderung von Schildvortrieben durch Verklebungen oder eine erhöhte Freisetzung von Feinkorn wird in Normen, Richtlinien und Empfehlungen nur vereinzelt behandelt.

3.2.1.1. Normen

In Deutschland wird weder das Risiko zur Verklebungsneigung noch zur Feinkornfreisetzung in Normen behandelt. Allerdings wird in der DIN 18312 für die Leistungsbeschreibung von Untertagebauarbeiten unter anderem gefordert, „*Die Eigenschaften und Zustände von Boden und Fels und deren wesentliche Änderung nach dem Lösen im Hinblick auf das Bauverfahren*“ anzugeben [34]. Da Verklebungen und die Freisetzung von Feinkorn eng mit dem Löseprozess verbunden sind oder im Anschluss an den Abbau entstehen, gibt die Norm indirekt vor, diese Risiken in der Leistungsbeschreibung aufzuführen, auch wenn sie nicht namentlich genannt werden.

Im Gegensatz dazu wird die „*Klebrigkeit*“ des Baugrunds in Österreich in der ÖNORM B 2203-2 als Erschwernis definiert [88]. Sie ist in der Ausschreibung bei der „*Gebirgscharakterisierung*“ zu prognostizieren. Außerdem ist auch der „*Einfluss des Wassers auf Gestein und Gebirge*“ anzugeben. Dies umfasst somit auch die Neigung zum Zerfall und zur Feinkornfreisetzung. Weiterhin sind Regelungen anzugeben, wenn Klebrigkeit als Erschwernis erwartet wird. Dementsprechend sind „*Maßnahmen zur Vermeidung oder zur Reduktion von Verklebungerscheinungen*“ zu beschreiben und gesonderte Positionen für Leistungen zur Beseitigung von Verklebungen vorzusehen.

Auch in der Schweiz wird die Klebrigkeit in den Normen behandelt. Dabei geht die SIA 198 allerdings lediglich informativ auf „*Verklebungs-/Verstopfungsprobleme*“ bei Schildvortrieben mit Flüssigkeitsstützung ein [102]. Die außerdem geltende SIA 118/198 ordnet „*Störungen im Lade- oder Fördersystem, z.B. infolge Klebrigkeit des gelösten Materials*“ bei Tunnelvortriebs- und Schildmaschinenvortrieben dem Risikobereich des Unternehmers zu [101]. An anderer Stelle wird allerdings „*eine von den Ausschreibungsunterlagen abweichende Beschaffenheit des Gebirges...*“ dem Risikobereich des Bauherrn zugewiesen. Wie in den folgenden Kapiteln gezeigt wird, hängt die Verklebungsneigung von bestimmten Baugrundeigenschaften ab. Dementsprechend wird die Klebrigkeit auch als „*maßgebende Eigenschaft des Baugrunds*“ definiert, wobei diese vom Bauherrn in den Ausschreibungsunterlagen anzugeben ist.

3.2.1.2. Richtlinien und Empfehlungen

Zusätzlich zu den genannten Normen befassen sich einige Richtlinien und Empfehlungen mit Tunnelvortriebsmaschinen.

Vom Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) stammen mehrere Empfehlungen hinsichtlich von maschinellen Vortrieben. Bereits 1993 wird empfohlen, die „*Neigung zur Klebrigkeit*“ und „*die Feinstkornbildung infolge der mechanischen Beanspruchung*“ zu untersuchen [16]. Auch in einer gemeinsamen Empfehlung mit Beteiligung der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG), der Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen (FGSV) und der Fachgruppe für Untertagebau des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (FGU) werden Verklebungen und Feinstkornanfall als „...*besondere geotechnische und bautechnische Bedingungen*“ definiert [17]. In der aktuellen DAUB-Empfehlung werden „*prozessbezogen geotechnische Kenngrößen*“ in Bezug auf Verklebungen sowohl für Locker- als auch für Festgestein angegeben [19]. Auf die dort aufgeführten Baugrundeigenschaften wird in den folgenden Kapiteln an der entsprechenden Stelle verwiesen.

Eine Empfehlung der International Tunnelling Association (ITA) fasst vier Empfehlungen bzw. Richtlinien zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen der Verbände und Arbeitsgruppen mehrerer Staaten zusammen [72]. Diese sind:

- Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (A.F.T.E.S)
- Italian Tunnelling Association
- DAUB, ÖGG, FGSV und FGU
- Japanische und norwegische ITA-Arbeitsgruppen

In der dort aufgeführten Empfehlung der Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (A.F.T.E.S) werden typische Erschwernisse durch Verklebungen und Feinkornfreisetzungen aufgeführt [2]. Außerdem wird empfohlen die Plastizität und das Verklebungspotenzial des Baugrunds zu untersuchen. Für den Fall, dass der Baugrund eine potenzielle Verklebungsneigung aufweist, wird ein Einsatz von Additiven empfohlen. In der Richtlinie der Italian Tunnelling Association wird die Klassifizierung des Verklebungsverhaltens für die Planungsphase als erforderlich eingestuft. Dazu werden mineralogische Analysen und die Bestimmung der Atterberggrenzen empfohlen [70]. Die ebenfalls aufgeführte gemeinsame Empfehlung von DAUB, FGSV, ÖGG und FGU [18] enthält zu den bereits oben erwähnten DAUB-Empfehlungen vergleichbare Aussagen. Die gemeinsam von einer japanischen und einer norwegischen Arbeitsgruppe erarbeitete Richtlinie [71] enthält weder Angaben zu Verklebungen noch in Hinblick auf die Feinkornfreisetzung.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen gibt in einer Richtlinie vor, dass „*Verklebungsprobleme*“ als „...*verfahrens- und maschinenrelevante Baugrundeinflüsse zu benennen und ... mögliche Konsequenzen für die Maschinenauslegung anzugeben...*“ sind [12].

Die Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik geht ebenfalls in Form einer Richtlinie auf Verklebungen und dafür verantwortlichen Bodenkennwerte ein [90]. Außerdem wird die „*Klebrigkeit*“ als „*zu erkundende Baugrundeigenschaft*“ im Lockergestein aufgeführt und empfohlen „...*ihre Einflüsse auf den Schildvortrieb...*“ anzugeben.

3.2.2. Geotechnische Unterscheidung von Boden und Fels

Da Verklebungen bei Schildvortrieben unter den entsprechenden Randbedingungen sowohl in Locker- als auch Festgesteinen auftreten können, wird zunächst eine Unterscheidung aus bautechnischer Sicht erforderlich. Die deutschsprachigen geotechnischen Normen differenzieren zwischen Boden (=Lockergestein) und Fels (=Festgestein). Diese zeigen in der Regel ein unterschiedliches geotechnisches Verhalten und werden meist auch in unterschiedlichen Feld- und Laborversuchen untersucht. Die Differenzierung wird dabei in der geotechnischen Fachliteratur in der Regel von der mineralischen Bindung abhängig gemacht. Entsprechende Definitionen für Fels und/oder Boden finden sich in der ÖNORM B 2203-2 [88], während deutsche Normen nicht auf die Bindungstypen eingehen. Ähnliche Unterscheidungen in Abhängigkeit der mineralischen Bindung können aber den Merkblättern und Richtlinien verschiedener Verbände sowie einzelnen Fachbüchern entnommen werden [47, 20, 125, 82]. Demnach weist Festgestein eine mineralische Bindung bzw. Verkittung auf, wohingegen diese beim Lockergestein fehlt.

Nach Weh et al. bestimmt unter anderem die Art der Bindung den Abbauprozess [119], wobei eine mineralische Bindung für die Chipbildung im Fels verantwortlich ist. Festgesteine werden somit in der Regel als Gesteinschips gelöst, wobei das Gestein in der Schneidspur zermalmt und der Chip infolge von Zugrissen gelöst wird [49]. Abbildung 3.3-a zeigt die Chipbildung in einem Tonstein. Aufgrund der fehlenden mineralischen Bindung kann es im Lockergestein nicht zu einer Chipbildung kommen. Da in nichtbindigen Böden (Sand, Kies) keine Anziehungskräfte zwischen den Einzelkörnern wirken [94], werden diese in der Regel einzeln aus dem Gebirgsverband gelöst [61]. Im Gegensatz dazu wirken in bindigen Böden (Ton, Schluff, Mergel) Haftkräfte in Form von Kohäsion zwischen den Körnern [94]. Daher werden die Schneidringe der Rollenmeissel in die Ortsbrust gepresst, der plastisch verformbare Boden zur Seite gedrückt und vorrangig von den Schälmeßern abgeschält [61]. Abbildung 3.3-b zeigt Schälspuren in einem Ton.

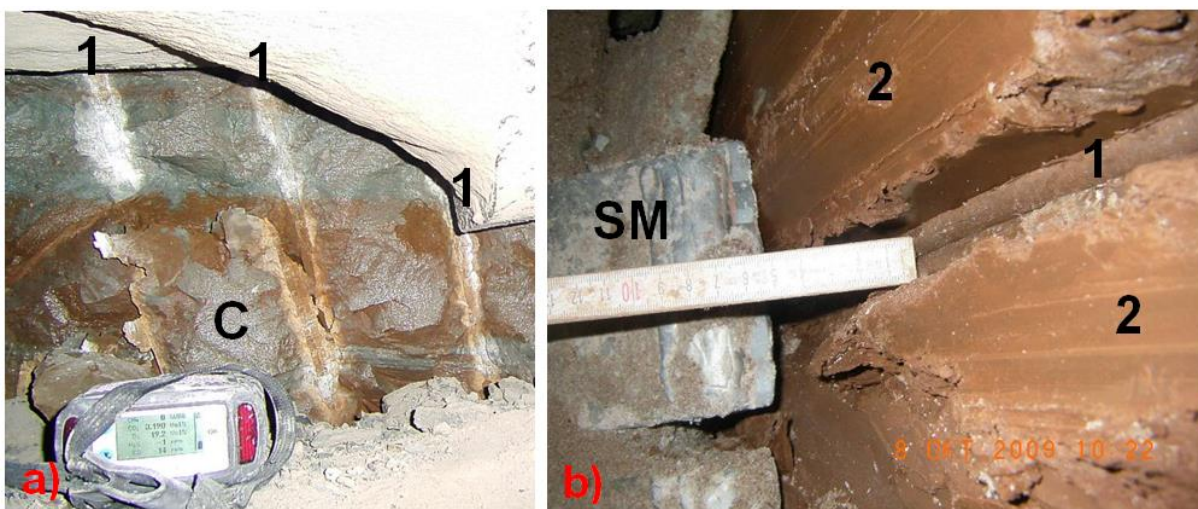


Abbildung 3.3: a) Ortsbrust im Tonstein: (1) Diskenspuren mit zermalmtem Gesteinsmehl und abgesprengtem Chip (C) b) Ortsbrust im Ton: (1) Tief in den Boden gepresste Diskenspur und (2) Schälmeßerspur (SM: Schälmeßer) [61]

Trotz der Definition über die mineralische Bindung ist eine eindeutige Zuordnung im Grenzbereich zwischen Boden und Fels nicht immer möglich und in der Fachliteratur uneinheitlich. Dies gilt auch für die deutschen Normen zur Klassifikation von Gesteinen. In DIN EN ISO 14689-1 wird empfohlen, Festgestein mit außerordentlich geringer Festigkeit (einaxiale Druckfestigkeit <1 MPa) gegebenenfalls entsprechend DIN EN ISO 14688-1 als Lockergestein zu beschreiben [29, 27]. Im Gegensatz dazu wird in DIN EN ISO 14688-2 empfohlen, Lockergestein mit äußerst hoher Festigkeit (undrainierte Scherfestigkeit >300 kPa) gegebenenfalls nach DIN EN ISO 14688-1 als Festgestein zu beschreiben [28]. Dementsprechend definiert die Normen-Gruppe indirekt einen Übergangsbereich der Festigkeit zwischen 0,3 und 1,0 MPa, in dem Gesteine sowohl als Boden als auch als Fels beschrieben werden sollten. In DIN 4020 von 1990 wird aufgezeigt, dass Boden „*Felseigenschaften*“ und Fels „*Bodeneigenschaften*“ aufweisen können und die Zuordnung durch die „*bautechnische Fragestellung*“ erfolgen soll [24]. Demzufolge kann es z.B. sinnvoll sein, ein feinkörniges Gestein im Grenzbereich zwischen Boden und Fels hinsichtlich eines Hydroschildvortriebs als Lockergestein zu bewerten, während es möglicherweise im Hinblick auf eine Erdbaumaßnahme eher als Fels klassifiziert werden sollte. Diese Empfehlung wurde nicht in die nachfolgende DIN 4020 von 2003 übernommen [25].

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Unterscheidung zwischen Fest- und Lockergestein in Anlehnung an die alte Ausgabe der DIN 4020 von 1990 [24] nach der bautechnischen Fragestellung eines Schildvortriebs.

3.2.3. Lockergestein

Das Verklebungsverhalten von Lockergesteinen bei Schildvortrieben wurde unter anderem von Thewes und von Burbaum untersucht [108, 14]. Im Folgenden wird auf die wichtigsten Eigenschaften eingegangen, wobei im Detail auf die beiden Forschungsarbeiten und die dort aufgeführte Literatur verwiesen wird. Im Gegensatz zur Verklebungsneigung wurden Untersuchungen zum Anfall von freigesetztem Feinkorn bei Schildvortrieben bisher kaum durchgeführt. Erkenntnisse zum Zerfall von Tonklumpen im Leitungssystem von Schwimmbaggern und damit indirekt zur Feinkornfreisetzung stammen von Leshchinski et al. [79]. Weitere Untersuchungsmethoden zur Zerfallsneigung von Tonen wurden im Hinblick auf Fragestellungen des Verkehrswasserbaus entwickelt [13]. Untersuchungen in Bezug auf Schildvortriebe stammen von Baumgärtel et al. [7].

3.2.3.1. Kornverteilung

Sowohl die Verklebungsneigung als auch die Neigung zur Feinkornfreisetzung eines Bodens werden maßgeblich durch dessen Kornverteilung bestimmt. Die DAUB-Empfehlung von 2010 sieht im Hinblick auf Verklebungen, bei Schildvortrieben im Lockergestein die Bestimmung des Feinstkornanteils (Ton $<0,002$ mm) und hinsichtlich von Bodenseparierungen des gesamten Feinkornanteils (Ton und Schluff $<0,06$ mm) vor [19].

Die Kornverteilung von Lockergesteinen wird mittels kombinierter Sieb- und Sedimentationsanalyse entsprechend DIN 18123 ermittelt [32].

Die Abhängigkeit der Verklebungsneigung vom Tongehalt wird von Thewes aufgezeigt [108]. Demnach ist oberhalb von 10% Tongehalt eine mittlere Verklebungsneigung zu erwarten, die ab 25% stark ansteigt. Aber auch Schluffe können entsprechend kritisch sein, was inzwischen in Laborversuchen nachgewiesen wurde [6, 44]. Allerdings ist im Hinblick auf Verklebungen statt einer Einstufung bindiger Böden anhand der Kornverteilung eher eine Klassifikation auf Basis des Plastizitätsdiagramms empfehlenswert. In diesem Zusammenhang wird auf Böden mit dominierender Schlufffraktion verwiesen, die aufgrund ihrer Zustandsgrenzen als leicht bis mittelplastische Tone klassifiziert werden können (vgl. Kap. 6.2.3.3.). Die fehlende Verklebungsneigung nichtbindiger Böden ist trivial und wird in der Literatur selten beschrieben. Bei nichtbindigen Böden, ohne entsprechenden Tonanteil, kann es nicht zu Verklebungen kommen, da die Anziehungskräfte zwischen den Einzelkörnern fehlen [61]. Laut Feinendegen et al. geht ein höherer Sandanteil in der Praxis dann auch mit geringeren Verklebungen einher [42]. Oftmals reichen schon geringe Ortsbrustanteile feinkörniger Lagen innerhalb ansonsten unkritischer grobkörniger Böden aus, um Verklebungen auszulösen [61]. Der kritische Ortsbrustanteil hängt dabei sowohl von den Eigenschaften der bindigen Böden als auch von den Randbedingungen des Vortriebs ab.

Der mögliche Anfall an freigesetztem Feinkorn bei Vortrieben in nichtbindigen Böden kann anhand des Feinkornanteils abgeschätzt werden [61]. Tonhaltige bindige Böden können aber sowohl hinsichtlich von Verklebungen als auch einer Freisetzung von Feinkorn kritisch sein.

3.2.3.2. Mineralogische Zusammensetzung

Die mineralogische Kornzusammensetzung hat wesentlichen Einfluss auf die Verklebungsneigung eines Lockergesteins. Die mineralogische Zusammensetzung ist entsprechend der DAUB-Empfehlung von 2010 im Hinblick auf Verklebungen bei Lockergesteinen zu ermitteln [19].

Die mineralogische Zusammensetzung eines feinkörnigen Lockergesteins kann nur mittels röntgenographischer Methoden bestimmt werden. Einen indirekten Hinweis auf die mineralogischen Bestandteile kann der Kalkgehalt nach DIN 18129 [33] geben. Ein hoher Kalkgehalt weist auf einen hohen Anteil unkritischer Karbonate und somit einen geringeren Anteil potenziell kritischer Tonminerale hin. Eindeutige Aussagen zur mineralogischen Zusammensetzung sind aber nicht möglich.

Zu beachten ist, dass der Tonanteil ($<0,002$ mm) der Körnungskurve eines Bodens nicht mit den Tonmineralen gleichzusetzen ist; man unterscheidet hier Minerale mit und ohne Ladungen auf den Oberflächen.

Minerale ohne Ladungen auf den Oberflächen können selbst bei kleinster Korngröße nicht kritisch hinsichtlich von Verklebungen werden. Hier ist nach vor allem Quarz zu erwähnen [108]. Neuere Untersuchungen von weisen darauf hin, dass Böden mit $>40\%$ Quarzanteil

keine Verklebungen zeigen [6, 44]. Weitere gesteinsbildende Minerale ohne Oberflächenladung, wie Feldspäte und Karbonate, sind ebenfalls unkritisch [61].

Nach Jasmund & Lagaly weisen Tonminerale, neben der geringen Korngröße, eine plättchenförmige Ausbildung und Ladungen auf [74]. Wechselwirkungen zwischen den Tonmineralen bestimmen das bodenmechanische Verhalten und dabei vor allem das Quellverhalten. Es wird zwischen intrakristalliner und osmotischer Quellung unterschieden. Bei der intrakristallinen Quellung werden die Zwischenschichtkationen hydratisiert und damit durch Wassereinlagerung eine Schichtaufweitung ausgelöst, wohingegen bei der osmotischen Quellung Wasser an die Tonmineraloberflächen angelagert wird [74]. Dabei kommt es zu einem Konzentrationsausgleich der Kationenkonzentration zwischen Mineraloberfläche und umgebener Flüssigkeit.

In der Fachliteratur werden Tonminerale, die keine intrakristalline Quellneigung aufweisen, oftmals als nicht quellfähig bezeichnet. Jasmund & Lagaly stellen aber gerade die osmotische Quellung als für den Tunnelbau relevant heraus [74]; auch Einstein hebt den Einfluss sowohl der intrakristallinen als auch der osmotischen Quellung für den Tunnelbau hervor [40]. Laut Pimentel sind bei der intrakristallinen gegenüber der osmotischen Quellung allerdings deutlich höhere Quellspannungen und –dehnungen typisch [91]. Im Hinblick auf die Grundlagen zur Tonmineralogie und zu Quellvorgängen wird auf Jasmund & Lagaly [74] verwiesen.

Laut Thewes ist ab einem Anteil von mehr als 10% an quellfähigen Tonmineralen mit verstärkter Adhäsion zu rechnen [108]. Laborversuche zeigen, dass hier insbesondere die Minerale Montmorillonit (intrakristalline Quellung) und Illit (osmotische Quellung) kritisch sind. Es können also Materialanteile mit intrakristalliner, aber auch mit osmotischer Quellung für eine verstärkte Adhäsion verantwortlich sein. Dabei kann Illit (trotz im Vergleich zum Montmorillonit geringerer Quelldehnung) bei entsprechend hohem Anteil ebenso kritisch sein.

Neuere Untersuchungen von 15 ergeben allerdings, dass Tone mit geringen Anteilen quellfähiger Tonminerale höhere Adhäsionsspannungen aufweisen als Tone mit hohen Anteilen quellfähiger Tonminerale [15]. Außerdem können selbst kaolinitische Tone kritisch sein [61]. Das Verklebungsrisiko kann somit auf Basis der Tonmineralogie nicht immer eindeutig bewertet werden. Das kann dadurch begründet sein, dass nicht nur das adhäsive Anhaften an Metall sondern beispielsweise auch das kohäsive Zusammenhaften von Ausbruchsmaterial Verklebungen bewirkt.

Da das mechanische Verhalten bindiger Böden vor allem von den Wechselwirkungen der Tonminerale untereinander und mit der umgebenen Flüssigkeit abhängt, lässt sich das Verklebungsverhalten manipulieren. Die Wirkung elektrokinetischer und chemischer Manipulationsverfahren hinsichtlich der Verklebungsneigung wurde von einigen Autoren untersucht [6, 42, 78, 103, 127]. Im Hinblick auf die Manipulation der Verklebungsneigung unter Berücksichtigung der Tonmineralogie wird vor allem auf die Forschungsarbeiten von Spagnoli [103] und Zumsteg [127] sowie einen Forschungsbericht der RWTH Aachen [6] verwiesen.

Inwieweit die mineralische Zusammensetzung einen Einfluss auf die Feinkornfreisetzung bei Schildvortrieben hat, wurde bisher nicht untersucht. Untersuchungen von Leshchinski ergeben, dass Tone mit höheren Anteilen an Kaolinit gegenüber Bentonit leichter zerfallen und

damit Feinkorn abgeben [79]. Das deutet zumindest darauf hin, dass ein Boden mit abnehmendem Anteil an quellfähigen Tonmineralen leichter zerfällt, bei gleichzeitig abnehmender Verklebungsneigung.

3.2.3.3. Konsistenz- und Plastizitätszahl

Die Zustandsgrenzen und der Wassergehalt sind entscheidende Parameter zur Bewertung der Verklebungsneigung eines Bodens. Die DAUB-Empfehlung von 2010 sieht vor im Hinblick auf Verklebungen, bei Schildvortrieben im Lockergestein, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Wassergehalt, Plastizitäts- und Konsistenzzahl zu ermitteln [19].

Fließ- und Ausrollgrenze von Böden werden entsprechend der DIN 18122-1 [30] ermittelt.

Die Plastizitätszahl (I_P) ist dabei der Unterschied zwischen Fließgrenze (W_L) und Ausrollgrenze (W_P):

$$I_P = W_L - W_P \quad (1)$$

In die Berechnung der Konsistenzzahl (I_C) geht zusätzlich auch der Wassergehalt (W_n) ein:

$$I_C = (W_L - W_n) / I_P \quad (2)$$

Die Verklebungsneigung eines bindigen Bodens kann mittels Kombination aus Plastizitäts- und Konsistenzzahl abgeschätzt werden. Dazu wurde auf Basis empirischer Untersuchungen von 108 [108, 109] ein Diagramm zur Abschätzung des Verklebungspotenzials entwickelt (Abb. 3.4-a).

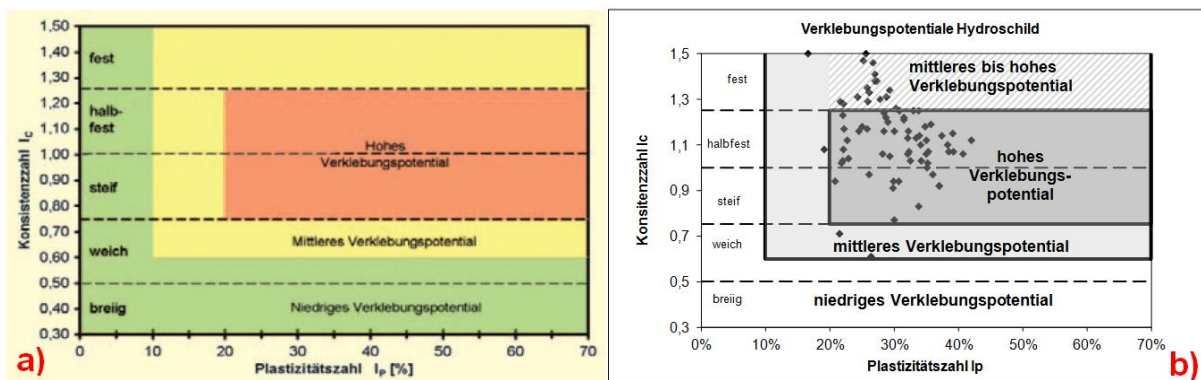


Abbildung 3.4: a) Verklebungspotenzial-Diagramm nach Thewes [109] b) Verklebungspotenzial-Diagramm mit Kennwerten eines kritischen Hydroschildvortriebs, modifiziert von Hollmann & Thewes [61]

Dabei weisen Böden mit einer Plastizitätszahl kleiner 10% und /oder einer Konsistenzzahl kleiner 0,6 nur ein geringes Verklebungspotenzial auf. Das höchste Verklebungspotential ist bei steifen bis halbfesten Böden mit Plastizitätszahlen größer 20% zu erwarten. In einer von Hollmann & Thewes 2011 modifizierten Version [61], wird berücksichtigt, dass auch bei festen Tonen massive Verklebungen auftreten können (Abb. 3.1-b). Die Ursache dafür ist, dass auch feste zunächst nicht klebrige Tone durch systembedingten Wasserkontakt beim Hydroschildvortrieb in eine stark klebende Konsistenz überführt werden können

Mit Hilfe des Diagramms können bindige Böden anhand gängiger Bodenkennwerte relativ einfach im Hinblick auf Verklebungen bewertet werden. Die Verklebungspotenziale werden dabei auf den Erfahrungen mehrerer flüssigkeitsgestützter Schildvortriebe und den Bodenkennwerten der dort anstehenden Böden abgegrenzt. Anzumerken ist hier, dass sich das Diagramm auf die Konsistenz des natürlichen Bodens an der Ortsbrust vor dem Abbauprozess und dem systembedingten Wasserkontakt bezieht. Eine Auswertung von Verklebungsmaterial oder Ausbruchsmaterial mit gegenüber dem anstehenden Boden veränderter Konsistenz (vgl. Kap. 3.1) ist nicht empfehlenswert. Außerdem ist es deshalb nur zur Bewertung flüssigkeitsgestützter Schildvortriebe gedacht und sollte nicht, wie von einzelnen Autoren [55, 127, 117], auf andere Schildvortriebsverfahren übertragen werden.

Inwieweit Plastizität und Konsistenz einen Einfluss auf die Feinkornfreisetzung bei Schildvortrieben haben, wurde bisher kaum untersucht. Erkenntnisse von Baumgärtel et al. 2012 deuten darauf hin, dass mit steigender Plastizität ein geringerer Zerfall bei Tonen auftritt und demnach weniger Feinkorn freigesetzt wird [7]. Mit zunehmender Plastizitätszahl steigt die Verklebungsneigung, bei gleichzeitig sinkender Neigung zur Feinkornfreisetzung.

3.2.3.4. Gefüge

Im Gegensatz zu Festgesteinen sind Lockergesteine meist weniger deutlich durch Trennflächengefüge geprägt. Trotzdem weisen vor allem bindige Böden häufig Trennflächen auf [95]. Dabei beeinflussen nach Baumgärtel et al. sogenannte Bröckelstrukturen in Münchner Tonen das Zerfallsverhalten negativ [7]. Hollmann & Weh beschreiben die Verklebungsanfälligkeit von Tonen mit Harnischgefügen und Bröckelstruktur [57]. Insbesondere pedogene Harnische, die durch Wechsel aus Quellen und Schrumpfen entstehen, können demnach indirekt auch auf quellfähige Tonminerale hinweisen.

3.2.4. Festgestein

Die Verklebungsproblematik bei Schildvortrieben im Fels ist - im Gegensatz zu Schildvortrieben im Lockergestein - weniger gut untersucht. Zum Lockergestein analoge Bewertungen auf Basis bodenmechanischer Kennwerte sind nicht auf den Fels übertragbar. Untersuchungen an feinkörnigen Festgesteinen verschiedener Autoren [6, 15, 43, 51] wurden an mechanisch zu Boden aufbereiteten Proben durchgeführt und lassen somit keine Aussagen hinsichtlich der felsmechanischen Kennwerte zu.

Das Problem liegt darin, dass das Gestein beim Abbau und beim Transport

- starken mechanischen Beanspruchungen unterliegt und gleichzeitig
- mit Wasser (Bergwasser, Prozesswasser) in Kontakt kommt.

Diese Vorgänge können die Materialeigenschaften grundlegend ändern.

Im Folgenden wird dargestellt,

- welche Bindungen zwischen den Einzelkörnern bei Festgestein vorkommen,
- weshalb keine Verklebungsgefahr besteht, wenn die mineralische Bindung des Gesteins diese Einflüsse überdauert, das Gestein also „dauerhaft festes Festgestein“ ist,
- wie sich „veränderlich festes Gestein“ verhalten kann,
- mit welchen Versuchen die Zerfallsneigung bestimmt wird und,
- (falls eine Zerfallsneigung vorliegt), nach welchen weiteren Gesteinseigenschaften die Neigung der Zerfallsprodukte zu Verklebungen abgeschätzt werden kann.

3.2.4.1. Bindungstypen bei Festgestein

Die Zerfallsneigung eines Festgesteins ist abhängig von der Bindung der Einzelkörner aneinander. Man unterscheidet zunächst zwischen verschiedenen Bindungsarten. Dabei steigt die Veränderlichkeit und damit das Risiko von Verklebungen bzw. eines erhöhten Feinkornanfalls bei Schildvortrieben in der Reihenfolge der Bindungsarten: quarzitisches → karbonatisches → ferritisches → toniges [62]. In Bezug auf die Dauerhaftigkeit stellt Nickmann eine Reihung der Bindungsqualität auf, bei der die silikatische, gefolgt von der karbonatischen, Zementbindung am stärksten und die Tonmineralbindung am schwächsten ist [87].

Dabei spielt aber nicht nur die Art der mineralischen Bindung eine Rolle, sondern auch der Bindemittelanteil. Von Placzek & Bretz wurde nachgewiesen, dass der Tonsteinzerfall bei einem Schildvortrieb auftrat, weil nur ein geringer Anteil einer mineralischen Bindung vorlag [92]. Die Tonsteine mit nur geringen Tonmineralanteilen in Form von Chlorit, hohem Glimmergehalt und ansonsten unkritischem Quarz, Feldspat und Karbonat waren dabei aber nicht durch Verklebungen, sondern durch Feinkornanreicherungen im Abwasser beeinflusst. Von Hollmann und Thewes wurde eine sinkende Zerfallsneigung mit steigendem Kalkgehalt bei Mergelmischgesteinen nachgewiesen [62], wobei der Kalkgehalt in diesem Fall offensichtlich ein indirektes Maß für den Anteil der karbonatischen Bindung war. Auch bei Untersuchungen von Baumgärtel et al. sank die Zerfallsneigung mit steigendem Kalkgehalt [7]. Im Hinblick auf Verklebungen kann ein hoher Kalkgehalt bei Festgesteinen mehrfach positiv

sein, da dementsprechend potentiell weniger kritische Tonminerale vorhanden sind und ein karbonatisches Bindemittel die Zerfallsneigung senkt sowie die Zugangsmöglichkeit von Wasser an kritische Tonminerale einschränkt [62].

Nach Nickmann [87] entstehen im Rahmen der Diagenese

- bei Tonschluff- und Sandsteinen Mineralzemente und
- bei Tonsteinen Tonmineralbindungen in Form von Van der Waals-Kräften (Abb. 3.5).

Die Tonmineralbindung kann dabei aber nur bei feinkörnigen Gesteinen mit hohen Tonmineralanteilen auftreten. Diese Bindungsart ist allerdings ein Sonderfall, wobei es sich bei den Kontakten der Tonminerale untereinander aus bodenmechanischer Sicht eigentlich um eine kohäsive Bindung handelt [62]. Im Vergleich zur Kartenhausstruktur (Abb. 3.5, rot umrandet) im Ton ist diese im Tonstein mit eingeregelteten Tonmineralen (Abb. 3.5, blau umrandet) aufgrund der größeren Kontakte der Mineraloberflächen allerdings stärker. Hollmann & Thewes empfehlen daher, kohäsiv gebundene Tonsteine ohne echte mineralische Bindung im Hinblick auf Schildvortriebe als Lockergestein zu bewerten [62].

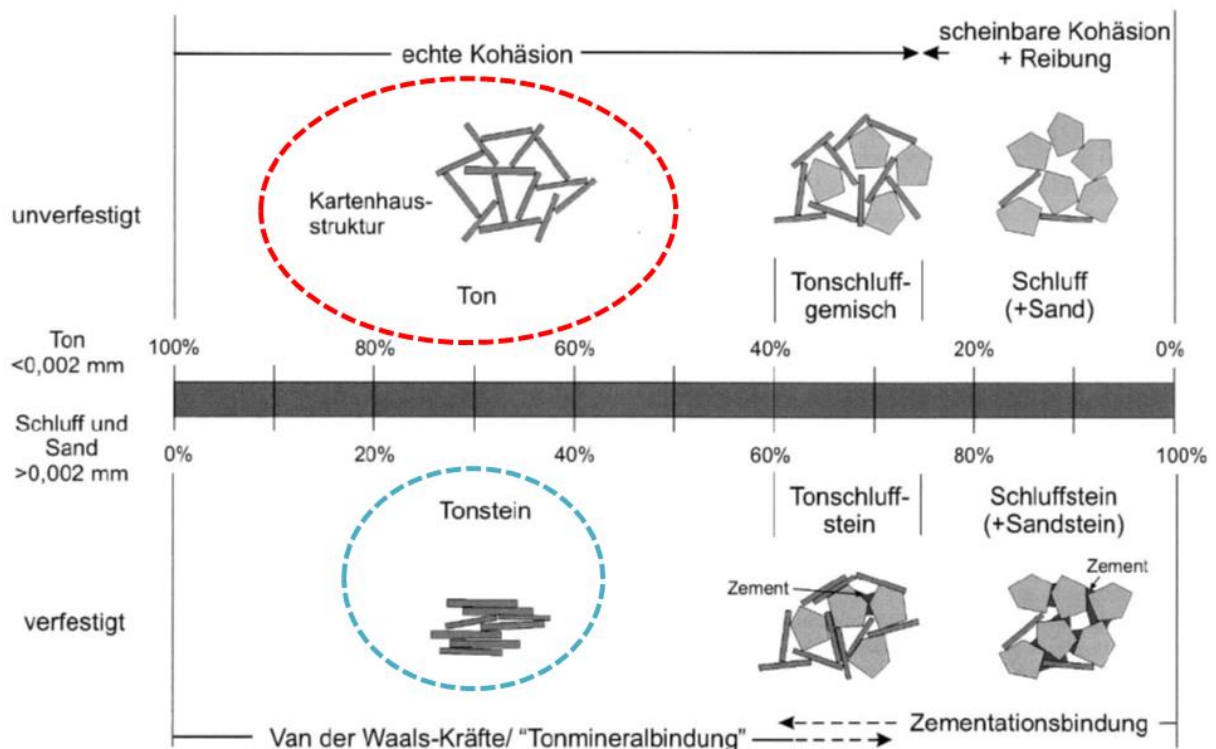


Abbildung 3.5: Bindungstypen von sedimentären Locker- und Festgesteinen [87, farblich modifiziert]

3.2.4.2. Festgestein ohne Zerfallsneigung

Festgesteine ohne Zerfallsneigung werden von Nickmann als „dauerhaft fest“ bezeichnet [87]. In diesen Fällen verhindert die mineralische Kornbindung den Zerfall in seine Einzelkörner und damit die Freisetzung von Feinkorn [62]. Ein feinkörniges Festgestein kann aber nur dann kritisch werden, wenn es zerfällt.

So schildern Maidl et al. für einen Hydroschildvortrieb in Wechsellagerungen aus Sand- und Tonsteinen des Karbon zwar einen starken Verschleiß, nicht aber Verklebungserscheinungen [80]. Die höchsten Vortriebsleistungen stammen dabei aus dem Bereich der Tonsteine (Abb. 3.6). Der beschriebene Schildvortrieb dürfte somit vorwiegend dauerhaft feste Tonsteine angeschnitten haben, die nicht zu nennenswerten Leistungsreduzierungen durch Verklebungen führten.

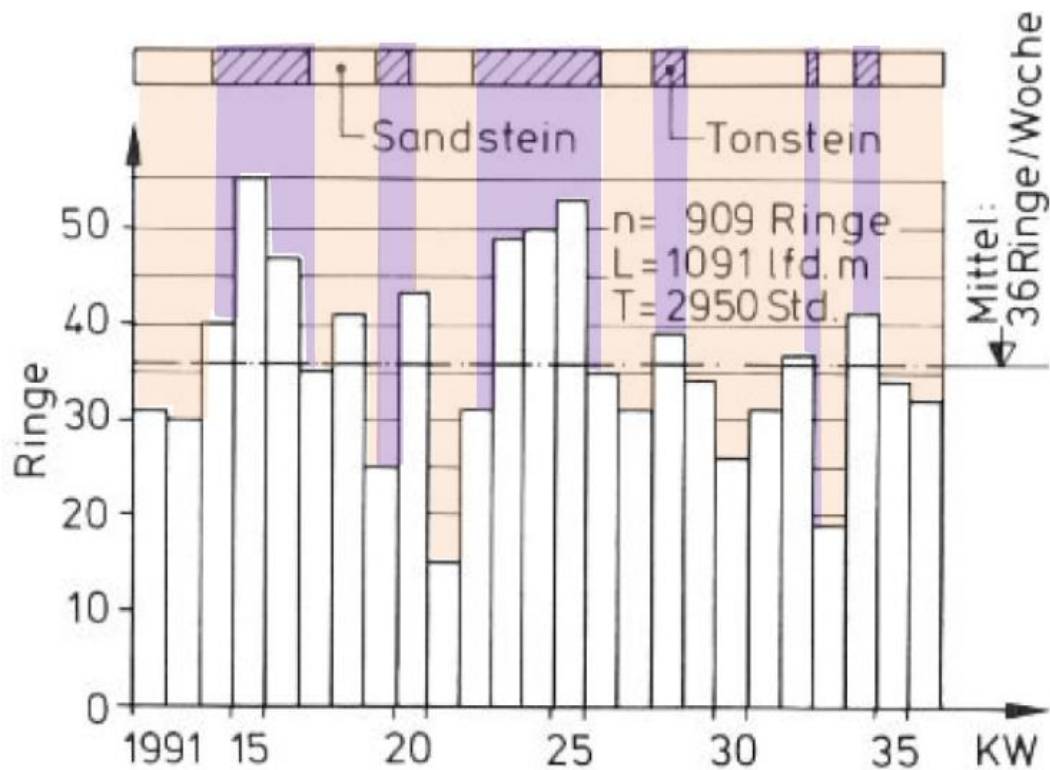


Abbildung 3.6: Vortriebsleistung eines Hydroschildvortriebs mit Leistungszunahme innerhalb der Tonsteine [80, farblich modifiziert]

Die Korngrößenverteilung der Einzelkörner von dauerhaft festen Festgesteinen ist somit hinsichtlich von Verklebungen bzw. der Freisetzung von Feinkorn nicht relevant, da diese nicht nennenswert aus dem mineralischen Verband freigesetzt werden. Allerdings kann Feinkorn laut Weh et al. auch aus dem Gesteinsmehl der Diskenspuren freigesetzt werden (vgl. auch Abb. 3.3-a), wobei der Anteil mit abnehmendem Werkzeugspurabstand ansteigt [119]. Von unterschiedlichen Autoren publizierte Kornverteilungskurven des Ausbruchsmaterials von Tunnelbohrmaschinen lassen allerdings bei einer Kornfraktion $<0,06$ mm von maximal 11% keine mengenmäßig relevanten Freisetzungen von Feinkorn aus dem Gesteinsmehl der Diskenspuren erwarten [9, 77, 118] (Abb. 3.7). Weitere Untersuchungen zur Feinkornfreisetzung aus dem Gesteinsmehl der Diskenspuren bei TBM-Vortrieben in dauerhaft festen Festgesteinen sind sinnvoll.

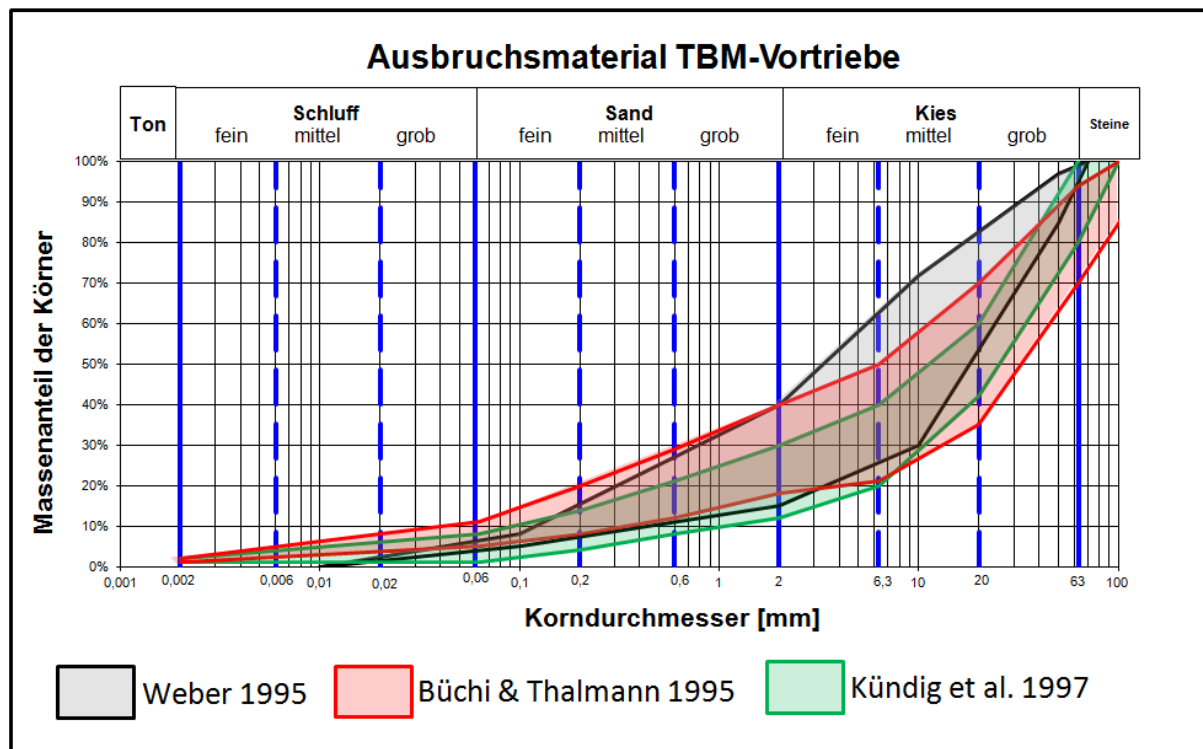


Abbildung 3.7: Kornverteilungen von Ausbruchsmaterial von TBM-Vortrieben im Fels nach Literaturangaben

3.2.4.3. Veränderlich festes Festgestein

Zur Bildung von Verklebungen und zur Freisetzung von Feinkorn muss Festgestein zumindest teilweise in seine Einzelkörner zerfallen und somit veränderlich sein [62]. Nickmann definiert veränderliche Gesteine als Festgesteine, die bei Exposition gegenüber den „*Atmosphärien*“ ihren Zusammenhalt verlieren [87]. In der geotechnischen Fachliteratur werden veränderlich feste Gesteine allerdings zum Teil sehr unterschiedlich klassifiziert. Während Heitfeld [53] auch Wechsellagerungen aus Fest- und Lockergesteinen zu den veränderlich festen Gesteinen zählt, weisen Prinz & Strauß [94] ihnen mit den „*Halbfestgesteinen*“ eine eigene Gruppe zwischen Boden und Fels zu. Dagegen werden veränderliche Gesteine in der DIN 4022-1 [26] bzw. in der diese ersetzenden DIN EN ISO 14689-1 [29] ausschließlich zu den Festgesteinen gezählt. In den Normen Österreichs und der Schweiz wird genauso verfahren [87]. In Anlehnung an die deutschsprachigen Normen werden die veränderlich festen Gesteine in dieser Arbeit ebenfalls als Untergruppe der Festgesteine eingestuft. Im Hinblick auf veränderlich feste Gesteine wird auf die intensive Bearbeitung dieses Themas von Nickmann [87] verwiesen.

Die Veränderlichkeit eines Festgesteins wird DIN 4022-1 [26] bzw. DIN EN ISO 14689-1 [29] mittels Wasserlagerungsversuch bestimmt. Aussagen zur Zerfallsbeständigkeit liefert der Siebtrommelversuch bzw. der Slake-Durability-Test [4, 23, 69]. Auf die entsprechenden Versuche wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

Die mögliche Abhängigkeit zwischen Verklebungs- und Zerfallsneigung eines Festgesteins wird von mehreren Autoren aufgezeigt [6, 43, 62]. Demnach ist mit Zunahme der Zerfallsneigung eher mit Verklebungen zu rechnen. Burbaum et al. empfehlen, ein veränderliches Gestein hinsichtlich seines Adhäsionsverhaltens ähnlich einem Lockergestein zu betrachten [15]. Dies ist allerdings nur im Hinblick auf die dort vorgeschlagenen Adhäsionsversuche denkbar, bei denen die Felsproben zuvor zu Boden aufbereitet wurden. Die in Kapitel 3.2.3.1 und 3.2.3.3 aufgeführten relevanten Bodenkennwerte können nicht normkonform ermittelt und damit auch nicht bewertet werden.

Der Zusammenhang zwischen Feinkornfreisetzung und Zerfallsneigung ist bei feinkörnigen Festgesteinen trivial. Dabei führt eine hohe Zerfallsneigung zu einem hohen Separationsaufwand [7]. Placzek & Beitz beschreiben Feinkornanreicherungen in zugelaufenem Bergwasser beim Schildvortrieb in zu Zerfall neigendem Fels [92]. Wann bei einem Festgestein mit entsprechendem Zerfall eher Verklebungen entstehen oder Feinkorn in Suspension angereichert wird, wurde bislang noch nicht untersucht.

3.2.4.4. Potenzielle Zerfallsprodukte: Gesteinsart und Korngröße

Wenn entsprechende Laborversuche darauf hindeuten, dass im Vortrieb ein Zerfall des Festgesteins zu erwarten ist, sollten die potenziellen Zerfallsprodukte daraufhin bewertet werden, ob sie zu Verklebungen führen können. Das kann derzeit nur auf Basis der Eigenschaften des Ausgangsgesteins erfolgen. Im Hinblick auf Verklebungen sind dabei die Korngrößen des Gesteins entscheidend, da diese bei einem Zerfall freigesetzt würden.

Die Korngrößenverteilung der mineralisch in einem Festgestein gebundenen Einzelkörner kann nur mittels Dünnschliffanalysen bestimmt werden.

Mittel- bis grobkörnige Festgesteine (Sandsteine und Konglomerate) können selbst bei vollständigem Zerfall nicht problematisch werden, da sie in nichtkohäsive Einzelkörner (Sand, Kies) zerfallen [62]. Aufgrund der fehlenden Haftkräfte der so entstandenen Lockergesteine können diese in der Regel nicht kleben. In der DAUB-Empfehlung von 2010 wird allerdings darauf hingewiesen, dass auch tonmineralhaltige Konglomerate und Brekzien zu Verklebungen führen können [19]. Außerdem sind Verklebungen auch in unkritischen Sandsteinen mit geringmächtigen, feinkörnigen Lagen möglich [62].

Bei Vortrieben in feinkörnigen, veränderlich festen Festgesteinen wurden hingegen häufig Probleme mit Verklebungen beschrieben. Das liegt daran, dass sie in ein bindiges Lockergestein (Ton, Schluff, Mergel) zerfallen können [62]. Besonders verklebungsanfällig sind dabei Tonsteine [5, 15, 43]. Allerdings können auch Schluffsteine entsprechend kritisch sein [19]. Ilci et al. beschreiben gar Probleme bei Vortrieben in mergelig-tonigen Kalksteinen [68]. Allerdings handelt es sich hierbei um verkarstete Kalksteine, die mit Ton gefüllte Karsthohlräume aufweisen. Aus der Publikation ist nicht eindeutig erkennbar, ob die Verklebungen nicht auch auf diesen Tonen basieren. Verklebungen in Kalksteinen, die nicht auf den Fels, sondern auf die Tone in den Karstspalten zurückzuführen sind, werden bei einem andern Projekt beschrieben [3].

3.2.4.5. Potenzielle Zerfallsprodukte: Mineralogische Zusammensetzung

Eine weitere Möglichkeit potenzielle Zerfallsprodukte zu bewerten, ist die mineralogische Zusammensetzung des Ausgangsgesteins zu ermitteln, da kritische Minerale beim Zerfall freigesetzt werden dürften. Analog zum Lockergestein wird in der DAUB-Empfehlung von 2010 empfohlen, diese im Hinblick auf Verklebungen bei Schildvortrieben auch im Festgestein zu ermitteln [19].

Die mineralogische Zusammensetzung eines Festgesteins kann mittels röntgenographischer Methoden bestimmt werden. Einen indirekten Hinweis auf die mineralogischen Bestandteile kann der Kalkgehalt nach DIN 18129 [33] geben, der auch im Festgestein zumindest Aussagen zum Anteil unkritischer Karbonate erlaubt (vgl. Kap. 3.2.3.2). Da bei beiden Methoden nicht zwischen Einzelkorn und Bindemittel differenziert wird, werden keine eindeutigen Informationen zur mineralischen Bindung ermittelt. Eine genaue Bestimmung der mineralischen Zusammensetzung mit Berücksichtigung der Bindemittel ist nur mittels Dünnschliffanalysen möglich

Dabei können quellfähige Tonminerale auch bei Vortrieben im Festgestein kritisch werden [62]. Voraussetzung ist dann aber, dass diese aufgrund einer entsprechenden Zerfallsneigung auch freigesetzt werden können. Dabei berichten Atkinson et al. von Verklebungen bei Schildvortrieben in Illit und Smektit enthaltenden Tonsteinen [5]. Auch ein von Feinendegen et al. untersuchter Tonstein mit wesentlichen Anteilen an Illit und Smektit war entsprechend kritisch [42]. Allerdings führten auch Festgesteine mit Kaolinit bei einer Hartgesteins-TBM zu Verklebungen [68]. Somit ist die Art der Tonminerale auch bei den veränderlichen Festgesteinen im Hinblick auf Verklebungen schwer zu bewerten, da nicht nur das adhäsive Anhaften zu Verklebungen führt (vgl. Kap. 3.2.3.2).

3.2.4.6. Festigkeit

Nickmann beschreibt eine Zunahme der Veränderlichkeit eines Festgesteins mit abnehmender Gesteinsfestigkeit [87]. Dabei wurde die Zerfallsneigung sowohl mit der einaxialen Druckfestigkeit als auch mit den Punktlastindices verglichen. Nach Placzek & Bietz wird die Druckfestigkeit eines Festgesteins neben den enthaltenen Mineralkörnern auch von der Art und der Verteilung des mineralischen Bindemittels bestimmt [92]. Da die Zerfallsneigung aber von der Stärke der mineralischen Bindung anstatt der Festigkeit der Einzelkörner abhängt, spiegelt die Gesteinsfestigkeit eine potentielle Zerfallsneigung nur näherungsweise wieder. Trotzdem kann bei feinkörnigen Festgesteinen mit abnehmender Festigkeit eine Zunahme der Zerfallsneigung abgeleitet werden. Bei entsprechend geringer Festigkeit kann es zu Feinkornanreicherungen in Suspensionen kommen [92]. Abhängigkeiten zwischen der Gesteinsfestigkeit und einer potenziellen Verklebungsneigung wurden bisher noch nicht untersucht.

3.2.4.7. Gefüge

Nickmann beschreibt eine Zunahme der Veränderlichkeit eines Festgesteins mit steigender Anzahl an Trennflächen [87]. Hierbei sind vor allem Gesteine mit gestörtem Mikrogefüge zerfallsanfällig. Ein entsprechend einer engständigen Durchtrennung kleinstückig abgebauten Gestein hat im Vergleich zu größeren Gesteinschips auch eine höhere spezifische Oberfläche, auf die Wasser einwirken kann. Festgesteine mit sehr starker Zerlegung, z.B. in Störzonen, dürften somit auch kritischer hinsichtlich von Verklebungen oder einer Feinkornfreisetzung sein. Außerdem begünstigt ein enges Trennflächengefüge den Zulauf von Bergwasser und ist demnach besonders kritisch hinsichtlich von Verklebungen [119]. Hollmann & Weh beschreiben Probleme mit Verklebungen bei Schildvortrieben in Tonsteinen mit Harischgefügen [57].

3.2.5. Wasser: Verfügbarkeit und Auswirkungen

Zusätzlich zu dem im Porenraum gebundenen Wasser (ausgedrückt durch Wassergehalt oder Konsistenzzahl) muss bei Schildvortrieben auch das frei verfügbare Wasser berücksichtigt werden [61]. Dies gilt gleichermaßen für Boden und Fels. Im Festgestein ist die Verfügbarkeit von freiem Wasser – zur Entstehung von Verklebungen – sogar zwingend erforderlich, da die mineralische Bindung infolge Wassereinwirkung und insbesondere mechanischer Belastung aufgebrochen werden muss [62]. Demnach kann selbst ein veränderliches Festgestein ohne Zutritt von Wasser in Bezug auf Verklebungen oder Feinkornfreisetzungen nicht kritisch werden. Mehrere Publikationen beschreiben Bergwasserzuflüsse als Ursache von Problemen mit Verklebungen und/oder Freisetzungen von Feinkorn bei Schildvortrieben [5, 43, 68, 92, 120, 121]. Entsprechend wird in der DAUB-Empfehlung von 2010 empfohlen, den Gebirgswasserzufluss im Hinblick auf Verklebungen bei Schildvortrieben im Fels anzugeben [19].

Wasser kann dabei aber nicht nur als Bergwasser zulaufen, sondern auch in Form von Prozesswasser (Stützflüssigkeit, Reinigungswasser, Wasserzugaben zur Konditionierung) zugegeben werden. Die verfügbare Wassermenge hängt deshalb nicht nur von den hydrogeologischen, sondern auch von den baubetrieblichen Randbedingungen und somit besonders vom Schildvortriebsverfahren ab [61].

3.2.5.1. Schildvortriebe ohne Ortsbruststützung

Bei Schildvortrieben ohne Ortsbruststützung kann Bergwasser ungehindert aus dem Baugrund zulaufen (vgl. Kap 2.2.1). Dementsprechend hängt die für kritische Umwandlungen verfügbare Wassermenge vor allem von den hydrogeologischen Randbedingungen ab. Einzelne Autoren zeigen bei offenen Schildvortrieben in veränderlich festen Gesteinen direkte Korrelationen zwischen Bergwasserzutritten und dem Verklebungsgrad des Schneidrads [3, 120]. Eigene Erfahrungen werden in Kapitel 6 dargelegt.

Wasser fließt bei Schildvortrieben in bindigen Böden meist aus benachbarten mittel- bis grobkörnigen Sedimenten zu [119]. Allerdings sind Wasserzutritte in die Abbaukammer auch

aus Trennflächen innerhalb von Tonen mit fester Konsistenz möglich [57]. Bei Schildvortrieben im Fels tritt Bergwasser aus Klüften, Karststrukturen, Störzonen oder Poren angrenzender Gesteine zu [119]. Die verfügbare Wassermenge hängt dabei nicht nur von der Stärke des Wasserzutritts, sondern auch von der Dauer der Stillstände (z.B. Werkzeugwechsel, Wartungsschichten, Ringbau) ab [61]: Ein Wasserzufluss, der während des Schneidvorgangs problemlos vom Ausbruchsmaterial aufgenommen wird, kann sich während eines Stillstands ansammeln und die latente Verklebungsneigung wecken. Dabei ist auch die Querschnittsgröße relevant, wobei mit steigendem Durchmesser die Chance von potentiell klebenden und wasserführenden Schichten an der gleichen Ortsbrust größer wird.

Das Verhältnis zwischen dem während des Stillstands zugelaufenem Wasser und dem Ausbruchsmaterial ändert sich meist während des weiteren Vortriebs, wobei die Konsistenz des Ausbruchsmaterials nach Weh et al. stark schwanken kann [119]. Letztendlich können in Abhängigkeit der Wasserzuflüsse und der Stillstandsdauer alle kritischen und unkritischen Konsistenzbereiche (zunächst Schlamm → dann klebriges Material → letztendlich trockenes Material) in einem Vortriebszyklus auftreten. Deshalb sind bei Schildvortrieben ohne Ortsbruststützung auch so genannte Verbackungen möglich [120]. Die relativ festen Verbackungen entstehen dann, wenn unkritisches, trockenes Ausbruchsmaterial in die Verklebungen gepresst wird. Dabei kommt es fortlaufend zum lagenweisen Wechsel von feuchtem Verklebungs- (Vortriebsbeginn nach Stillstand) und trockenem Ausbruchsmaterial (Vortriebsende vor nächstem Stillstand).

3.2.5.2. Schildvortriebe mit Flüssigkeitsstützung

Beim Schildvortrieben mit Flüssigkeitsstützung ist aufgrund der Stützflüssigkeit im Verhältnis zum Ausbruchsmaterial eine sehr hohe Menge an Wasser vorhanden [61]. Die für kritische Konsistenzumwandlungen zur Verfügung stehende Wassermenge ist demnach quasi „*unendlich*“. Da der Stützdruck dem Grundwasserdruck entgegenwirkt (vgl. Kap. 2.2.4), kann bei diesem Verfahren während des Vortriebs kein Bergwasser in die Abbaukammer zufließen. Die hydrogeologischen Randbedingungen sind daher im Hinblick auf Verklebungen bei diesem Vortriebsverfahren nicht entscheidend. Aufgrund der sehr hohen verfügbaren Wassermenge sind besonders starke Konsistenzänderungen möglich, so dass der flüssigkeitsgestützte Schildvortrieb besonders kritisch hinsichtlich von Verklebungen ist [61]. Da die Stützflüssigkeit auch als Fördermedium fungiert (vgl. Kap. 2.2.4), ist bei diesem Schildtyp, neben den Verklebungen, vor allem auch die Freisetzung von Feinkorn in die Stützflüssigkeit relevant. Diese wird als „*Dispersität*“ definiert und führt in der Regel zu Zunahmen der Suspensionsdichte [98]. Da Feinzyklone den Trennschnitt nur in einen Bereich von 0,035 mm herabsetzen [83], werden bei der im Vortriebsystem verbleibenden Suspension die gesamte Ton- und der Hauptteil der Schluff-Fraktion angereichert. Zentrifugen oder Filterpressen, die auch Feinkorn abtrennen, werden nur bei aus dem Kreislauf entnommener Suspension eingesetzt (vgl. Kap. 2.2.4).

3.2.5.3. Erddruckschildvortriebe

Bei Erddruckschildvortrieben im geschlossenen Modus muss der Boden durch Zugabe einer definierten Flüssigkeitsmenge (Wasser, Suspensionen, Schaum) konditioniert werden, um als Erdbrei verwendet werden zu können (vgl. Kap. 2.2.5). Die verfügbare Menge an Wasser wird somit vorgegeben.

Da der Stützdruck auch bei diesem Schildvortriebsverfahren dem Grundwasserdruck entgegenwirkt, kann während des Vortriebs im Normalfall kein Bergwasser in die Abbaukammer zufließen. Die hydrogeologischen Randbedingungen sind daher im Hinblick auf Verklebungen auch bei EPB-Schildvortrieben im geschlossenen Modus nicht entscheidend.

3.3. Verklebungsspezifische Sonderversuche

Im Folgenden wird auf Laborversuche eingegangen, die Hinweise auf die Verklebungsanfälligkeit, Adhäsionsneigung oder Feinkornfreisetzung bei Schildvortrieben geben. Dabei handelt es sich um Versuche, die im Gegensatz zu den klassischen boden- und felsmechanischen Laborversuchen bisher nicht genormt sind oder bei denen die Proben eine spezielle Vorbehandlung erhalten.

3.3.1. Versuche mit spezieller Vorbehandlung der Gesteine

Auch die klassischen boden- und felsmechanischen Laborversuche erfordern Formatierungen bzw. Vorbehandlungen der jeweiligen Gesteine. Diese sind in den Versuchsnormen definiert. Obwohl die Vorgaben der Normen meist eine gewisse Bandbreite der Probenbehandlung erlauben, ist diese im Hinblick auf die Versuchsergebnisse entsprechend gering, so dass repräsentative Kennwerte ermittelt werden können. Eine entsprechend sorgfältige Umsetzung der Normen gewährleistet somit, unabhängig vom Labor, vergleichbare Ergebnisse.

Um die Beanspruchung bei Schildvortrieben versuchstechnisch zu simulieren, werden die Gesteine häufig mechanisch vorbehandelt. Im Anschluss werden dann boden- und felsmechanische Versuche an den aufbereiteten Proben durchgeführt.

Häufig werden dabei Kornverteilungen und Zustandsgrenzen an zuvor mechanisch zerkleinerten Festgesteinen bestimmt. Letztendlich hängen die Versuchsergebnisse in starkem Maße von der mechanischen Vorbehandlung ab. Insbesondere die Durchführung von kombinierten Sieb- und Sedimentationsanalysen an feinkörnigen Festgesteinen wird von Prinz & Strauß kritisch gesehen, da nicht vollständig zerlegte Tonaggregate eine zu grobkörnige bzw. zerstörte Tonmineralplättchen eine zu feinkörnige Kornverteilung vortäuschen können [94]. Wenn bodenmechanische Kennwerte an Festgesteinen, nach vorheriger Zerstörung der mineralischen Bindung, ermittelt werden, sind diese nur bedingt mit den gleichen, entsprechend der Norm ermittelten Parametern, von Lockergesteinen vergleichbar.

Im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Versuche ist eine präzise Beschreibung der Vorbehandlung notwendig. Außerdem sollte diese bei unterschiedlichen Projekten gleich gehalten werden.

3.3.2. Adhäsionsversuche

Adhäsion wird als die Anziehung zwischen den Molekülen zweier unterschiedlicher Stoffe bezeichnet [14]. Im Hinblick auf Verklebungen bei maschinellen Tunnelvortrieben wirkt die Adhäsion dabei durch Anhaften von Verklebungsmaterial, also von entsprechend aufgearbeitetem Boden oder Fels, an den Werkstoffoberflächen des Vortriebssystems. Bei Adhäsionsversuchen werden die Kräfte zum Lösen des vorab angedrückten Prüfkörpers und der Probe ermittelt. Entsprechende Versuche wurden dabei entsprechend der Literaturrecherchen von Thewes [108] und von Burbaum [14] zunächst hinsichtlich anderer Fragestellungen, z.B. im Bereich der Landwirtschaft oder des Erdbaus, entwickelt. Im Hinblick auf eine umfangreiche Recherche zu Adhäsionsversuchen wird auf die beiden Forschungsarbeiten verwiesen [14, 108]. Im Folgenden wird ausschließlich auf Adhäsionsversuche eingegangen, die in Bezug auf Schildvortriebe entwickelt wurden.

Dabei wird zwischen Trenn-, Scher- und Indexversuchen unterschieden [108]. Erste einfache Untersuchungen mittels Gleit- und Scherversuchen, um die Klebrigkeit bei Schildvortrieben zu erklären, stammen von Jancsecz [73]. Um verschiedene Böden vergleichen zu können und möglichst reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen, empfiehlt Thewes Trennversuche, bei denen die Adhäsion in normaler Richtung ermittelt wird [109]. Eine zunehmende Trennkraft entspricht dabei einem Anstieg der Adhäsionsneigung. Sowohl bei den Trennversuchen nach Thewes als auch nach Burbaum wurde ein Stahlstempel aus der zuvor aufbereiteten Probe gezogen [14, 108]. In beiden Fällen wurde die Grenzfläche zwischen Stempel und der Probe benetzt. Diese Benetzung repräsentiert dabei den Einfluss der Stützflüssigkeit, so dass die Untersuchungsergebnisse ausschließlich auf flüssigkeitsgestützte Schildvortriebe angewendet werden können. Insgesamt konnten Korrelationen zwischen Adhäsion und verschiedenen Bodenkennwerten nachgewiesen werden. Thewes konnte so sein Verklebungspotenzial-Diagramm (Abb. 3.4), das auf der empirischen Auswertung zahlreicher Praxisprojekte basiert, mittels Adhäsionsversuchen validieren [108].

Ein weiterer Adhäsionsversuch, bei dem auch die an dem Prüfkörper kleben bleibende Masse berücksichtigt wird, wurde an der RWTH Aachen entwickelt [6, 41, 103]. Bei dem sogenannten Konuszugversuch wird ein Metallkonus in eine entsprechend aufbereitete Probe gedrückt und anschließend herausgezogen. Im Gegensatz zu den Versuchen von Thewes [108] und von Burbaum [14] wird die Kontaktfläche zwischen Probe und Konus nicht benetzt. Dementsprechend beziehen sich die Versuchsergebnisse immer auf die Konsistenz des eingebauten Probenmaterials und repräsentieren Material ohne Flüssigkeitseinfluss. Der Versuch wurde im Hinblick auf Erddruckschildvortriebe entwickelt, so dass die flexible Vorgabe der Konsistenz des Probenmaterials den Praxisbedingungen entspricht. Die Anwendung in Bezug auf flüssigkeitsgestützte Schildvortriebe ist nicht möglich.

Nachteilig an Adhäsionsversuchen ist, dass zahlreiche versuchstechnische Randbedingungen, neben bestimmten Bodeneigenschaften, die Adhäsion beeinflussen [108]. Eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Versuchstypen, ohne vorherige Normung der versuchstechnischen Randbedingungen, ist bisher nicht gegeben. Weiterhin weisen Feinendegen et al. darauf hin, dass aufgrund von an den Prüfkörpern haftenden Bodenresten selten die exakte Adhäsionsspannung ermittelt wird [41]. Außerdem erlaubt die

den Adhäsionsversuchen zugrunde liegende mechanische Aufbereitung bzw. Zerkleinerung der Proben vor der Versuchsdurchführung nur eingeschränkte Übertragungen auf den natürlichen Baugrund. Mit Ausnahme von Thewes [108] und einzelnen Gesteinen von Feinendegen et al. [6, 41] wurden bisher keine Proben aus kritischen Schildvortriebsprojekten untersucht. Eine entsprechend umfangreiche Überprüfung der Versuchsergebnisse in der Praxis steht somit noch aus.

3.3.3. Versuche mit Berücksichtigung von anhaftendem Verklebungsmaterial

Eine weitere Möglichkeit, das Verklebungsverhalten zu untersuchen, sind Indexversuche, bei denen die Verklebungsmenge an einem Prüfkörper ermittelt wird. Diese wird entweder auf die Fläche des Prüfkörpers oder die Ausgangsprobenmenge bezogen und dann als Indexwert für die Verklebungsneigung gewertet. Auf diesem Prinzip basierende Verklebungsindexversuche im Hinblick auf Schildvortriebe stammen von Hollmann [56], Feinendegen [41] und Zumsteg [127]. Umfangreiche Untersuchungen dazu wurden an der RWTH Aachen durchgeführt [6].

Hollmann [56] schlägt einen Versuch vor, bei dem eine Stahlkugel zusammen mit einer pulverisierten Probe in einer Gummitrommel rotiert wird (Abb. 3.8-a). Dabei wurden Proben der tertiären Melettaschichten verwendet, die bei einem Schildvortrieb zu Verklebungen führten (vgl. Kap. 6.2.1).

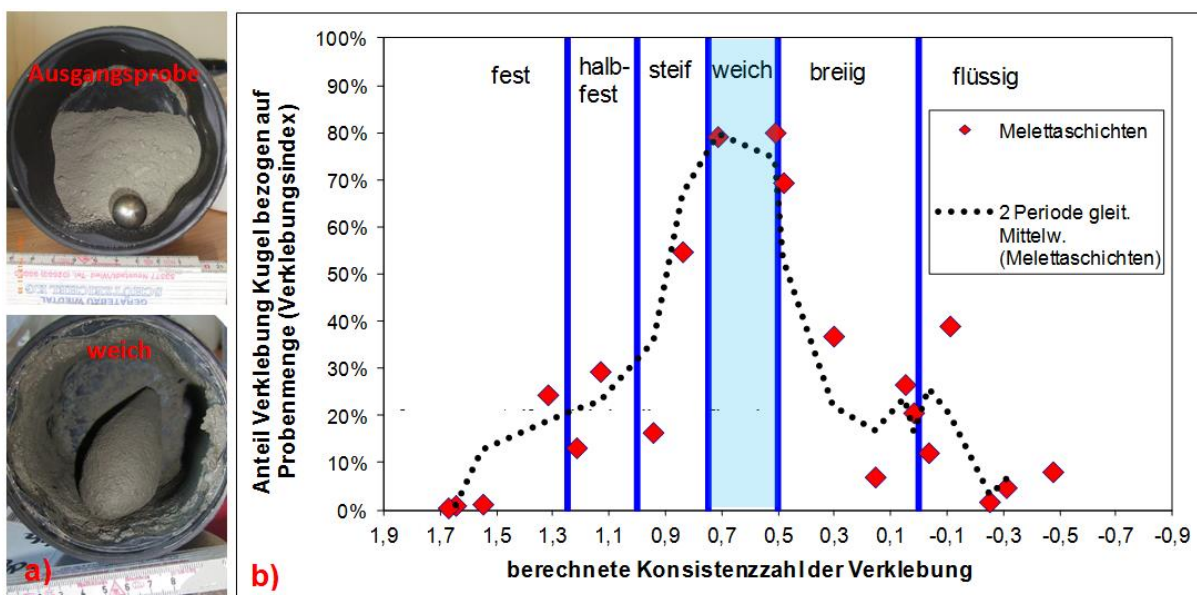


Abbildung 3.8: Verklebungsindex-Versuch [56, modifiziert] b) Abhängigkeit des Verklebungsindex von der Konsistenz (Konsistenzbereich mit maximaler Anhaftung blau hinterlegt) [56, modifiziert]

Zur Bestimmung des Verklebungsindex wird die Masse der im Anschluss an den Versuch an der Kugel haftenden Verklebung auf die Ausgangsprobenmasse bezogen. Wechselnde Wasserzugaben bei immer gleicher Ausgangsprobenmenge ermöglichen die Bestimmung des Verklebungsindex als Reihenversuch bei unterschiedlicher Konsistenz. Die Stahlkugel repräsentiert somit die Metalloberflächen des Vortriebssystems und die Rotation die mechanische Belastung beim Vortrieb. Dabei ist der Verklebungsindex im plastischen und dabei vor

allem im weichen Konsistenzbereich am höchsten (Abb.3.8-b). Der Abfall von diesem Maximum in Richtung der höheren Konsistenz erklärt sich dadurch, dass unter den trockeneren Bedingungen geringere Adhäsionskräfte auftreten [56]. Der Abfall in Richtung der geringeren Konsistenz beruht auf der geringeren Scherfestigkeit der Anhaftungen, die bei der mechanischen Beanspruchung (im Versuch: Rotation der Stahlkugel) weniger gut erhalten bleiben. Der auf einer Baustelle erarbeitete Versuch wurde im Anschluss an das Projekt nicht weiterentwickelt und ist aufgrund der geringen Datenmenge nur bedingt aussagekräftig. Trotzdem passen die Ergebnisse gut zu den Praxiserfahrungen der entsprechenden Baustelle, bei der Verklebungen vorrangig bei weichem bis steifem Ausbruchsmaterial auftraten [3, 121].

Von Feinendegen et al. [41] wurden in einem Forschungsvorhaben mehrere Möglichkeiten eines Verklebungsversuchs untersucht. Bei dem in diesem Zusammenhang als Adhäsionsversuch entwickelten Konuszugversuch werden am Konus anhaftenden Probenreste (Abb. 3.9-a) gewogen und auf die Konusfläche bezogen als Maß der Verklebung angegeben. Die Kombination aus Anhaftung und Konsistenzzahl wird als Klassifikationsschema vorgeschlagen, das inzwischen modifiziert wurde [43] (Abb. 3.9-b).

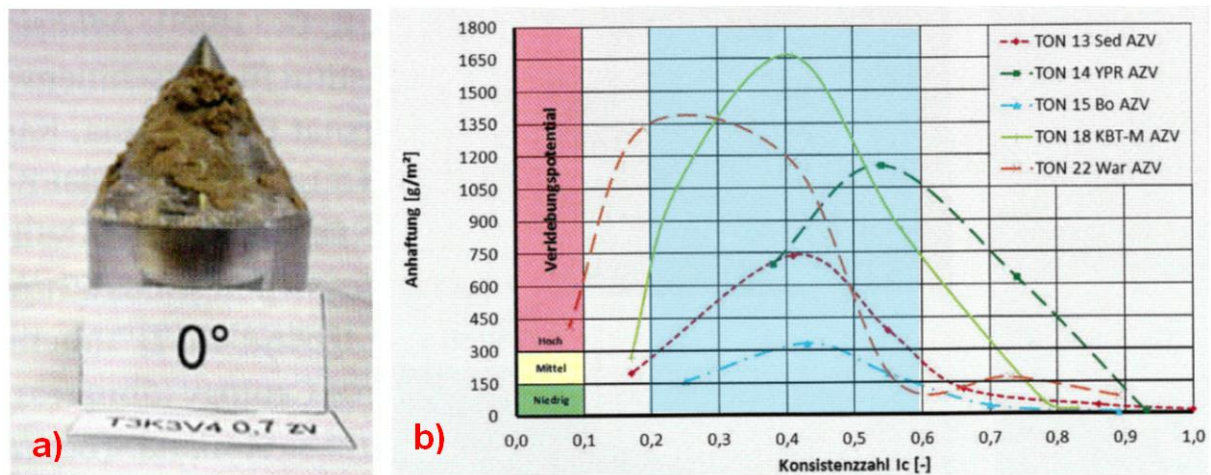


Abbildung 3.9: a) Stahlkonus mit Verklebungsresten [41] b) Klassifikationsdiagramm mit Abhängigkeiten zwischen Verklebungsmenge und Konsistenz (Konsistenzbereich mit maximalen Anhaftungen blau hinterlegt) [43, modifiziert]

Den Untersuchungen zufolge nehmen die Verklebungen am Konus bei weicher Konsistenz am stärksten zu [41], was gut zu den Laborergebnissen von Hollmann [56] und den Praxiserfahrungen von Weh et al. [121] passt. Neueren Untersuchungen [6, 43] zufolge treten beim Konuszugversuch bei bestimmten Böden Verklebungsmaxima auch bei breiiger Konsistenz auf (Abb. 3.9-b). Dabei sind die Grenzen der verschiedenen Verklebungspotenziale in dem Diagramm geschätzt und bedürfen noch einer Überprüfung durch die Tunnelbaupraxis [42].

Zumsteg hat einen weiteren Versuch zur Abschätzung der Verklebungseignung entwickelt [127]. Dabei wird die Probe in einer Mischmaschine unter definierten Bedingungen durchmischt und die Masse des an dem Rührwerkzeug haftenden Materials (G_{MT}) bestimmt (Abb. 3.10-a). Diese Masse wird auf die Ausgangsprobenmasse (G_{TOT}) bezogen und ist somit ein Maß für die Klebrigkeit (λ). Auch Zumsteg [127] vergleicht den Klebrigkeits-Indexwert λ mit

der Konsistenz, wobei entsprechenden Kurven dem Verklebungspotenzial-Diagramm nach Thewes [108] gegenüber gestellt werden (Abb. 3.10-b)

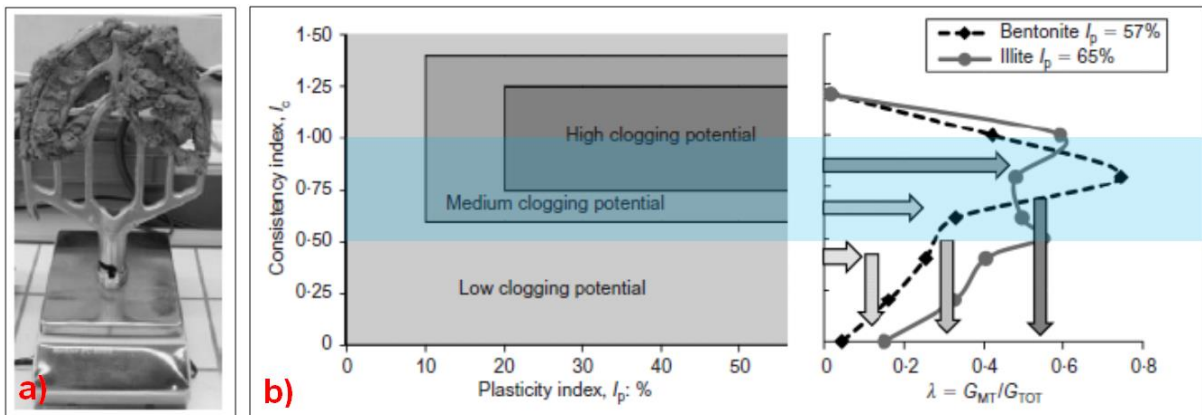


Abbildung 3.10: a) Rührwerkzeug mit Verklebungsresten [127] b) Vergleich des Diagramms von Thewes [108] mit der Auswertung des Verklebungsindex λ in Abhängigkeit der Konsistenz (Konsistenzbereich mit maximalen Anhaftungen blau) [127, modifiziert]

Die höchsten Verklebungsmengen entstehen bei dem Versuch im weichen bis steifen Konsistenzbereich und treten somit gegenüber dem hohen Verklebungspotenzial im Diagramm nach Thewes [108] tendenziell bei geringeren Wassergehalten auf. Da das Diagramm nach Thewes [108] auf der empirischen Auswertung der natürlichen Bodenkennwerte von Hydro-schildvortrieben beruht (vgl. Kap. 3.2.3.3), dürfte auch gar keine Korrelation mit den Versuchsergebnissen von Zumsteg vorliegen.

Auch wenn die jeweiligen Verklebungsindizes aufgrund unterschiedlicher Versuchsrandbedingungen nicht direkt miteinander verglichen werden können, beziehen sich alle auf die Masse der am Prüfkörper haftenden Verklebung und sollten daher hinsichtlich der Konsistenz ähnliche Ergebnisse liefern. Da die Konsistenzbereiche mit den höchsten Anhaftungen am Prüfkörper zum Teil deutlich variieren (Abb. 3.11), ist die Aussagekraft der beschriebenen Versuche im Hinblick auf die kritische Konsistenz zum Teil widersprüchlich.

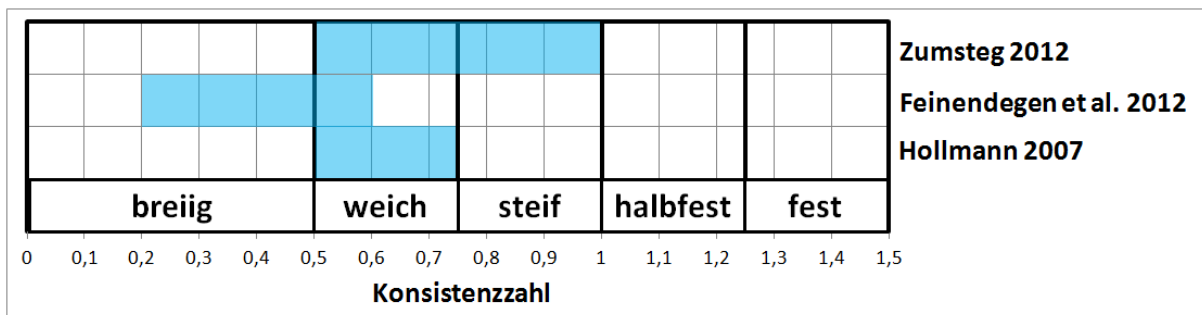


Abbildung 3.11: Vergleich der Konsistenz der Verklebungsmaxima aus Abb. 3.8-b, 3.9-b und 3.10-b

Zumindest das zur geringeren Konsistenz verschobene Verklebungsmaximum beim Konus-zugversuch kann durch die fehlende mechanische Beanspruchung. Sowohl der Versuch von Feinendegen et al. [43] als auch von Zumsteg [127] eignet sich dazu, die Verklebungsneigung einzelner Böden relativ zueinander zu vergleichen. Unabhängig von der bei den Versuchen wenig aussagekräftigen Konsistenz ist ein Boden mit höherer maximaler Anhaftung

demnach umso kritischer. Außerdem erlauben sowohl die Versuche nach [43] als auch nach [127] Aussagen zur Wirkungsweise chemischer Manipulationsverfahren.

3.3.4. Technikumsversuche

Feinendegen et al. beschreiben einen Versuchsaufbau der Herrenknecht AG, bei dem Proben mit einer Art „*Mini-Schneidrad*“ gebohrt werden, um die Verklebungsneigung zu ermitteln [42]. Der Versuchsstand erlaubt u. a. die Aufzeichnung von Anpresskraft, Drehmoment und Vortriebsgeschwindigkeit. Dabei sind Untersuchungen mit variierenden „*Maschinendaten*“ und Zugaben unterschiedlicher Konditionierungsmitteln geplant. Untersuchungsergebnisse dazu wurden bisher nicht publiziert.

3.3.5. Hydraulische Zerfallsversuche

Baumgärtel et al. haben in Anlehnung an den Siebtrommelversuch einen Zerfallsversuch entwickelt, der neben Aussagen zur Zerfallsneigung auch die Freisetzung von Feinkorn bewertet [7]. Im Gegensatz zum genormten Siebtrommelversuch (vgl. Kapitel 5.2.2), der zur Untersuchung von Felsproben angewendet wird, werden beim so genannten Zerfallsindexversuch neben Tonsteinen auch Tone untersucht. Außerdem wird die Probe nicht in einer Siebtrommel, sondern in einem flüssigkeitsgefüllten, geschlossenen Kunststoffzylinder rotiert. Auch der so genannte Radreifenversuch nach Baumgärtel et al. [7], bei dem die Proben in einem flüssigkeitsgefüllten kreisförmig geschlossenen Förderschlauch rotiert werden, erlaubt Aussagen zum Zerfall und zur Freisetzung von Feinkorn. Bei beiden Versuchen wird anschließend die Kornverteilung ermittelt, wobei mit zunehmender Rotationsdauer eine steigende Feinkornfreisetzung verbunden ist.

3.4. Betriebsdatenanalysen

Das folgende Kapitel behandelt Betriebsdatenanalysen im Hinblick auf die Interaktion zwischen Baugrund und Vortriebsmaschine. Dabei liegt der Schwerpunkt auf potenziellen Änderungen von Betriebsdaten infolge Verklebungen.

3.4.1. Betriebsdatenanalysen in der Praxis

Beim maschinellen Tunnelvortrieb werden fortlaufend große Betriebsdatenmengen aufgezeichnet. Dabei fallen im Abstand von 1 bis 10 Sekunden zwischen 200 und 400 Maschinendaten an [83]. Die sogenannten Momentanwerte werden zusätzlich als Mittel- und Extremwertdateien für jeden Vortriebszyklus zusammengefasst. Zur Verwaltung bzw. Überwachung der zum Teil sehr großen Datenmengen stehen den Projektbeteiligten vortriebsbegleitend Tunnelinformationssysteme (z.B. 2doc, PROCON, SISO, TPC, IRIS) zur Verfügung [83]. Ein Teil der Maschinendaten wird dabei in Echtzeit im Steuerstand visualisiert. Maidl et al. [83] empfehlen den als Prozess-Controlling bezeichneten Soll-Ist-Vergleich der maßgebenden Prozessparameter. Stahl & Babendererde empfehlen [104] vortriebsbegleitend ausgesuchte

Betriebsdaten automatisch mit vor Projektbeginn definierten Grenzwerten zu vergleichen. Allerdings können auch nachträgliche Betriebsdatenanalysen zum besseren Verständnis des Vortriebsgeschehens sinnvoll sein. Dabei kann der Versuch der Ursachenforschung unerwarteter Ereignisse, wie z.B. von Verbrüchen, im Fokus stehen [81]. Die Klärung der Risikosphäre und die Hilfe bei der Bewertung von Nachträgen kann eine weitere Anwendung sein [52, 83]. Im Hinblick auf das Prozess-Controlling und das Datenmanagement bei maschinellen Vortrieben wird auf Maidl et al. [83] und die dort aufgeführte Literatur verwiesen.

3.4.2. Interaktion Baugrund-Maschine

Nach Maidl et al. hat das Process-Controlling der Betriebsdaten das Ziel, die Interaktion zwischen Baugrund und der Schildvortriebsmaschine zu analysieren. Dabei werden die Betriebsdaten den Baugrundverhältnissen bzw. dem Baugrundmodell gegenübergestellt.

3.4.2.1. Relevante Betriebsdaten

Einige Maschinendaten sind bei Schildvortrieben nach Maidl & Nellessen [81] zur Erfassung der Interaktion Baugrund-Maschine besonders geeignet (Abb. 3.12). Dabei sind vor allem die den Baufortschritt betreffenden Maschinendaten, wie Vortriebsgeschwindigkeit, Penetration, Schneidradanpresskraft, Schneidraddrehzahl und Schneidraddrehmoment, relevant. Diese Maschinendaten sind direkt oder indirekt vom Baugrund abhängig.

Bei Schildvortrieben wird vielfach versucht, Wechsel der Baugrundverhältnisse mit Änderungen dieser Maschinendaten zu belegen. Mehrere Autoren haben entsprechende Beispiele publiziert [81, 22, 50, 121, 75, 123, 124].

Maschinendaten				
Baufortschritt	Ortsbruststützung	Materialförderung	Ringspaltverpressung	Betriebszustand
<ul style="list-style-type: none"> - Vortriebsgeschwindigkeit - Penetration - Überschnitt, Konizität - Pressenkräfte - Schneidrad: Drehzahl, Drehmoment und Drehrichtung - Stromaufnahme der Motoren 	<ul style="list-style-type: none"> - Verteilung des Stützdruckes in der Abbaukammer und am Schneidrad - Dichte in der Abbaukammer - Hydroschild: Luftpolsterdruck und Bentonitpiegel - EPB-Schild: Druck und Durchfluss in den Leitungen des Konditionierungsmittels 	<ul style="list-style-type: none"> - EPB-Schild: Druck, Drehzahl und Drehmoment der Schnecke - Hydroschild: Druck, Durchfluss und Dichte in den Förderleitungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Verpressdruck - Verpressmenge 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydraulikkreisläufe: Temperatur und Druck - Kühlwasserkreisläufe: Temperatur und Druck

Abbildung 3.12: Übersicht zur Erfassung der für die Interaktion Baugrund-Maschine relevanten Maschinendaten nach Maidl & Nellessen (nur Teil der Tabelle) [81]

3.4.2.2. Baugrundmodell

Die Aussagekraft solcher Analysen hängt dabei nicht nur von den Betriebsdaten selbst ab, sondern auch von dem zugrunde gelegten Baugrundmodell. Ein Baugrundmodell kann sich mit fortlaufendem Vortrieb ändern, wobei das auf der Erkundung basierende Gebirgsmodell vortriebsbegleitend aktualisiert und auf Abweichungen gegenüber der Prognose überprüft werden muss [94]. Auch in der ÖNORM B 4402 [89] wird vorgegeben, die tatsächlichen mit

den im geotechnischen Gutachten beschriebenen Baugrundverhältnissen zu vergleichen. Ein Baugrundmodell wird dementsprechend im Zuge des Tunnelvortriebs aufgrund zusätzlicher Aufschlüsse immer genauer und kann sogar bereichsweise mit bautechnischer Relevanz von der Prognose abweichen. Im Folgenden wird daher zwischen „Bau-Soll“ (=Prognose der Baugrundverhältnisse vor Vortriebsbeginn, basierend auf dem Baugrundgutachten) und „Bau-Ist“ (=tatsächlich beim Vortrieb angetroffene Baugrundverhältnisse) unterschieden.

Häufig werden bei Schildvortrieben die „Ist“-Betriebsdaten in der Praxis den geologischen Längsschnitten der Baugrundgutachten, also dem „Bau-Soll“, gegenübergestellt. Eine Dokumentation der tatsächlich angetroffenen Baugrundverhältnisse, wie sie z.B. im konventionellen Tunnelbau üblich ist, ist im Schildvortrieb nicht die Regel, wobei hierfür die genannte schwierige Zugänglichkeit der Ortsbrust verantwortlich sein dürfte [124]. Ein Soll-Ist-Vergleich im Rahmen des Prozess-Controllings nach Maidl et al. [83] erfolgt dann nur anhand von Maschinendaten (Vergleich vorgegebene mit tatsächlichen Betriebsdaten) und nicht auf Grundlage der tatsächlich angetroffenen Baugrundverhältnisse. Dies ist besonders dann relevant, wenn Betriebsdatenanalysen zur Bewertung von Nachträgen herangezogen werden sollen (vgl. Kapitel 3.4.1). Inzwischen wird aber immer öfter versucht, systematische ingenieurgeologische Dokumentationen auch bei Schildvortrieben durchzuführen, was mit einem hohem Aufwand verbunden und vielfach nur sehr begrenzt möglich ist [58]. Im Hinblick auf die Dokumentation von Schildvortrieben wird auf Kapitel 6.1 verwiesen.

Bei Analysen einzelner Autoren [50, 81] wurden zumindest Anhaltspunkte für die tatsächlichen Baugrundverhältnisse in Form von Separationsproben berücksichtigt. Auch Wendl und Wendl et al. [123, 124] belegen ihre Datenanalysen von Hydroschildvortrieben vorrangig mit Dokumentationen der Separation, wobei diese aber noch zusätzlich durch Teil-Ortsbrustaufnahmen bei Drucklufteinstiegen untermauert werden. Die Analysen von Weh et al. [121] basieren auf regelmäßigen Ortsbrustkartierungen.

Wendl et al. [124] weisen explizit darauf hin, dass die nach Maidl et al. [84] besonders für Hydroschildvortriebe im Lockergestein geeignete Beobachtungsmethode zwingend eine intensive ingenieurgeologische Vortriebsdokumentation erfordert.

3.4.3. Betriebsdatenänderungen infolge Verklebungen

Durch Verklebungen und Verschleiß wird der Abbauprozess bei Schildvortrieben gestört [84]. Demzufolge müssen Verklebungen zwangsläufig auch Einfluss auf die den Baufortschritt betreffenden Maschinendaten haben. Maidl et al. weisen dabei vor allem auf geringe Penetrationswerte, hohe Andruckkräfte und hohe Schneidraddrehmomente infolge von Verklebungen bei Hydroschildvortrieben hin [81, 84]. Bei einem Hydroschildprojekt (4. Röhre Elbtunnel) nahm die Vortriebsgeschwindigkeit vom Sand mit 25 mm/min auf 5 mm/min im Ton mit Verklebungen ab [83]. Wendl gibt an, dass Verklebungen bei einem Hydroschildvortrieb insgesamt zu Anstiegen des Schneidraddrehmoments um das drei- bis vierfache führten [123]. Auch hier kam es zu Anstiegen von Schneiradanpresskraft und Vortriebskraft. Dabei sind aber auch Überlagerungen anderer Einflüsse, wie z.B. Verschleiß, möglich [123].

In einem unveröffentlichten Baustellenbericht [59] wurden für den gleichen Hydroschildvortrieb folgende Änderungen der Betriebsdaten infolge Verklebungen hergeleitet:

- Erhöhung der Schneidradanpresskraft um 39%
- Verringerung der Vortriebsgeschwindigkeit um 41%
- Verringerung der Penetration um 40%
- Erhöhung des Schneidraddrehmoments um 97%
- Erhöhung der Schneidradstromaufnahme um 44%

Vergleichbare Einflüsse sind auch bei anderen Schildvortriebsverfahren dokumentiert. So steigt die Schneidradanpresskraft bei Erddruckschildvortrieben mit dem Verklebungsgrad des Schneidrads [41]. Illci et al. beschreiben starke Anstiege von Schneidraddrehmoment und Pressenkräften bei einer Tunnelbohrmaschine in Vortriebsbereichen mit Verklebungen [68].

Da auch sekundäre Verklebungen im weiteren Verlauf der Systemkette eines Vortriebs möglich sind (vgl. Kap. 3.1.2), können diese auch Änderungen der die Materialförderung betreffenden Maschinendaten (Abb. 3.12) auslösen. Dabei sind vor allem das Schneckendrehmoment bei EPB-Vortrieben und die Suspensionsdichte bei Hydroschildvortrieben relevant. Dabei führen nach Weh et al. Verklebungen bei der Schneckenförderung zu Anstiegen von Schneckendrehmoment und Schneckenstromaufnahme [121]. Von Schretter et al. konnte eine Korrelation zwischen steigendem Schneidraddrehmoment und steigenden Suspensionsdichten nachgewiesen werden [100]. Diese zunächst überraschende Korrelation kann eigentlich nur auf Verklebungen beruhen, da diese in der Literatur verschiedentlich mit hohen Suspensionsdichten in Verbindung gebracht werden. Dabei sind hohe Suspensionsdichten, je nach Autor, Ursache oder Folge von Verklebungen. So werden z.B. laut Köhler et al. *„durch hohe Suspensionsdichten Verklebungen begünstigt“* [76]. Im Gegensatz dazu beschreibt Stein die *„Zunahme der Suspensionsdichte“* als eine *„baubetriebliche Folge von Verklebungen“* [105]. Aufgrund eigener Erfahrungen kommen Zunahmen der Suspensionsdichte und Erschwernisse durch Verklebungen häufig bei feinkörnigen Baugrundverhältnissen gleichzeitig vor. Ein Teil des Feinkorns wird dabei in die Stützflüssigkeit freigesetzt und führt zu Anstiegen der Suspensionsdichte, während ein anderer Teil des Bodens mit entsprechend kritischer Konsistenz zu Verklebungen führt. Beide Erschwernisse treten dann unabhängig voneinander auf und sind nicht als jeweilige Ursache zu sehen. Wenn der Vortrieb plötzlich feinkörnige Böden anschneidet, können Verklebungen des Schneidrads zu Drehmomentanstiegen führen, während gleichzeitig freigesetztes Feinkorn zu Anstiegen der Suspensionsdichte führt. In diesem Zusammenhang wird auf Kapitel 6.2.3.3 verwiesen.

4. Allgemeines Verklebungsdiagramm für Lockergesteine

Im folgenden Kapitel wird ein allgemeines Verklebungsdiagramm entwickelt. Das Bewertungsdiagramm wurde bereits von Hollmann & Thewes 2011 [61] vorgestellt und während der wissenschaftlichen Arbeit weiter modifiziert [Im Rahmen dieses Kapitels werden einzelne Formulierungen der Publikationen übernommen und eine gegenüber [61] revidierte Version des Diagramms entwickelt, wie sie auch von Hollmann & Thewes bzw. Thewes & Hollmann zuletzt veröffentlicht wurde [63, 64, 114, 116].

4.1. Verklebungsdiagramme mit vorgegebener Wasserverfügbarkeit

Das Bewertungsdiagramm nach Thewes [108] und die entsprechend modifizierte Version (Abb. 3.4) erlauben eine einfache Beurteilung der Verklebungsneigung bindiger Böden. Dabei basiert das Diagramm auf Bodenkennwerten (Plastizitätszahl, Konsistenzzahl → Fließgrenze, Ausrollgrenze, Wassergehalt), die im Normalfall als Standard zur Beurteilung bindiger Böden in Baugrundgutachten angegeben sind (vgl. Kap. 3.2.3). Allerdings ist das Diagramm ausschließlich zur Bewertung von flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben geeignet. Aufgrund des Einflusses der Stützflüssigkeit liegt dem Diagramm von Thewes [108] die klar definierte Randbedingung einer besonders hohen Verfügbarkeit von freiem Wasser zugrunde (vgl. Kap. 2.2.4 und 3.2.5.2).

Zunächst wird das bestehende Verklebungsdiagramm nach Thewes [108] auf seine Anwendbarkeit zur Bewertung von Erddruck- oder offen gefahrenen Schildvortrieben überprüft. Dazu sind die Beurteilung einer wechselnden Verfügbarkeit von freiem Wasser und die dadurch hervorgerufene Wassergehaltsänderung notwendig. Da die Plastizitätszahl auf den Materialparametern Fließ- und Ausrollgrenze beruht und somit nicht durch Wassergehaltsänderungen beeinflusst wird (vgl. Gleichung (1) in Kap. 3.2.3.3), können die Abgrenzungen unterschiedlicher Felder innerhalb des Diagramms mit gleicher Aussagekraft auf andere Schildvortriebsverfahren übertragen werden. Im Gegensatz dazu hängt die Konsistenzzahl zusätzlich noch vom Wassergehalt ab (vgl. Gleichung (2) in Kap. 3.2.3.3). Die Konsistenzzahl kann sich somit in Abhängigkeit vom systembedingten Wasserdargebot ändern (vgl. Kap. 3.2.5), so dass die Abgrenzungen unterschiedlicher Felder innerhalb des Diagramms nicht mit gleicher Aussagekraft auf andere Schildvortriebsverfahren übertragen werden können.

Eindeutig definierte Randbedingungen liegen auch bei offen gefahrenen Schildvortrieben ohne Bergwasserzutritte oder Prozesswasserzugaben (z.B. zur Staubreduzierung) vor. Dieser Fall bildet dabei das Extrem ohne frei verfügbares Wasser ab. Verklebungen können in diesem Fall nur auftreten, wenn die Böden bereits im natürlichen Zustand eine klebrige Konsistenz haben. Verklebungsmaterial mit weicher Konsistenz ist aufgrund von Praxiserfahrungen besonders kritisch (vgl. Kap. 3.1). Das Verklebungsdiagramm von Thewes [108] kann dann in sofern modifiziert werden: Die Abgrenzungen der unterschiedlich kritischen Konsistenzfelder des Diagramms werden verschoben bis das hohe Verklebungspotenzial mit der

besonders klebrigen, weichen Konsistenz deckungsgleich ist (Abb. 4.1.). Dabei können die Abgrenzungen der Plastizitätszahl unverändert übernommen werden. Zur Veranschaulichung sind die Wertepaare von Böden eines offen gefahrenen Schildvortriebs dargestellt.

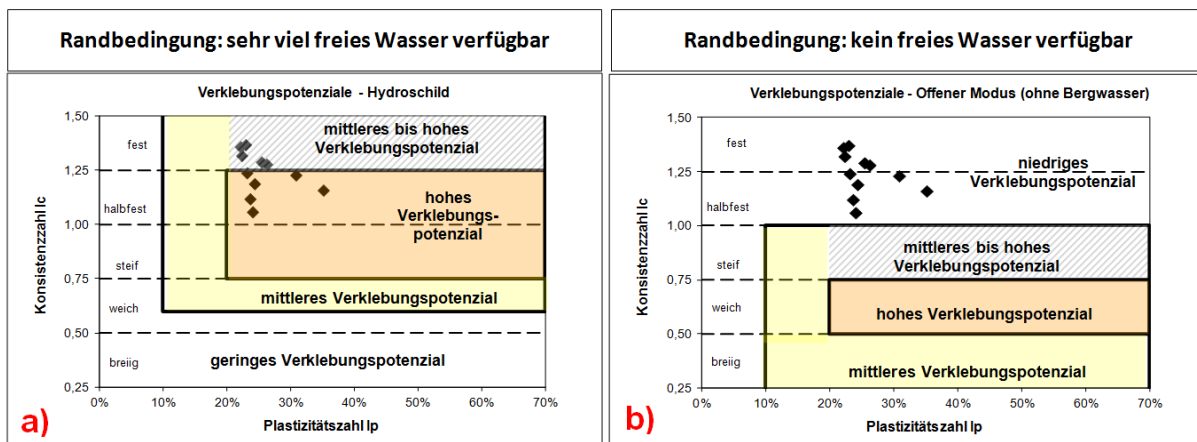


Abbildung 4.1: a) Verklebungsdiagramm für Hydroschildvortriebe [64, modifiziert] b) Verklebungsdiagramm für offen gefahrene Schildvortriebe ohne Wasserzutritte nach [64, modifiziert] In beiden Diagramme sind Wertepaare von Tonen eines offen gefahrenen Schildvortriebs dargestellt

Das Praxisbeispiel zeigt, dass die angetroffenen halbfesten bis festen Böden mit dem neuen Verklebungsdiagramm als relativ unkritisch eingestuft werden können (Abb. 4.1-b), während sie im Hinblick auf Hydroschildvortriebe ein mittleres bis hohes Verlebungspotenzial hätten (Abb. 4.1-a). Bei dem betreffenden Vortrieb traten in Abschnitten ohne Wasserzutritte auch keine Verklebungen auf. Außerdem zeigt das Diagramm eine gute Übereinstimmung mit der Zoneneinteilung des Diagramms von Schlick [99], das zur Bewertung der Verlebungseigung bei Erdbaueingriffen verwendet werden kann. Im Hinblick auf Verklebungen ist eine Erdbaumaßnahme bei trockenen Witterungsverhältnissen mit einem offen gefahrenen Schildvortrieb ohne Wasserzutritte vergleichbar.

Allerdings kann das so modifizierte Verklebungsdiagramm nicht mehr angewendet werden, sobald bei offen gefahrenen Schildvortrieben Bergwasser zuläuft. Ein zunächst unkritischer Boden würde durch die Wasseraufnahme in den kritischen Konsistenzbereich der Verklebungen verschoben. Somit würde auch der in Abbildung 4.1 dargestellte Boden bei Wasserzutritten zu Verklebungen führen. Dabei wäre aufgrund der Vielzahl an Randbedingungen mit unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit zwischen den beiden durch Verlebungspotenzial-Diagramme abgedeckten Extremfällen (Abb. 4.1-a und 4.1-b) jeder Zwischenzustand möglich. Letztendlich ist nicht praktikabel, für jede mögliche Wasserverfügbarkeit ein entsprechendes Diagramm zu entwickeln. Die Kombination beider Diagramme, bei der dann jede Konsistenz zwischen breiig und fest in irgendeiner Form kritisch zu bewerten wäre, wird als nicht sinnvoll erachtet.

Die Neigung zur Feinkornfreisetzung kann auf Basis der Diagramme nicht eindeutig bewertet werden.

4.2. Entwicklung der Grundform des neuen Verklebungsdiagramms

Um für alle Schildvortriebsverfahren einsetzbar zu sein, müssen unterschiedliche Randbedingungen innerhalb eines Diagramms abgeschätzt werden können. Dazu ist eine Abgrenzung der im Vortrieb wirksamen kritischen Konsistenzbereiche (Verklebungen: breiig-weichsteif, Feinkornfreisetzung: flüssig) sinnvoll (vgl. Kap. 3.1). Hinsichtlich einer Bewertung muss dann aber beurteilt werden können, wie leicht ein Boden mit entsprechender Ausgangskonsistenz bei einer zu erwartenden Wasserverfügbarkeit in kritisches Material umgewandelt wird. Dementsprechend muss die Änderung des Wassergehalts bewertet werden können. Auch wenn der Wassergehalt bei den Diagrammen in Abbildung 4.1 indirekt durch die Konsistenzzahl berücksichtigt wird, können Änderungen nicht skaliert dargestellt werden. Dabei erfordern gleiche Verschiebungen der Konsistenz innerhalb der Diagramme in Abhängigkeit der Kombination aus Fließ- und Ausrollgrenze unterschiedliche Wassergehaltsänderungen.

Im Folgenden wird daher ein neues Verklebungsdiagramm, das die Bewertung von Wassergehaltsänderungen erlaubt, entwickelt. Da Böden im plastischen Konsistenzbereich klebrig werden, ist die Differenz zwischen der Fließ- bzw. der Ausrollgrenze und dem natürlichen Wassergehalt entscheidend. Diese Differenz entspricht der notwendigen Wassergehaltsänderung eines Bodens, um den klebrigen Konsistenzbereich zu erreichen oder zu verlassen. Dementsprechend bilden diese Differenzen die Basis des Bewertungsdiagramms:

- x-Achse: Ausrollgrenze – Wassergehalt [$W_P - W_n$]
- y-Achse: Fließgrenze – Wassergehalt [$W_L - W_n$]

Zur Erläuterung wird ein ausgeprägt plastischer Ton mit halbfester Konsistenz dargestellt (Abb. 4.2).

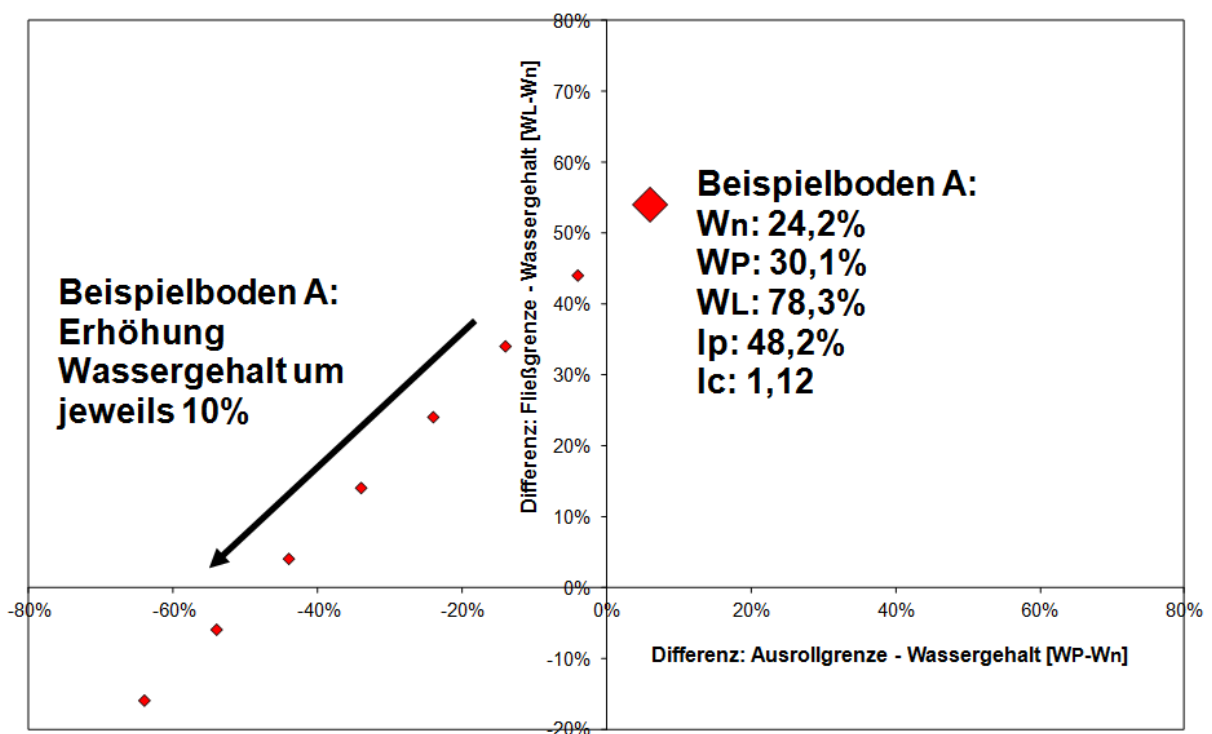


Abbildung 4.2: Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Beispielboden A (große Raute) und Verschiebung mit ansteigendem Wassergehalt (kleine Raute)

Bei einer Erhöhung des Wassergehalts verschiebt sich das Wertepaar innerhalb des Diagramms auf einer Geraden.

Da sich die Plastizitätszahl eines bindigen Bodens mit steigendem Wassergehalt nicht ändert, entspricht die Verbindung der Wertepaare in Abbildung 4.2 der Isolinie der Plastizitätszahl des Beispielbodens. Wenn man auf der rechten Seite der Gleichung (1) den natürlichen Wassergehalt W_n positiv und negativ hinzufügt und den Term umformt, ist die Darstellung definierter Plastizitätszahlen im Diagramm möglich (Abb. 4.3):

$$I_P = W_L - W_P \quad (1)$$

$$I_P = W_L - W_P + W_n - W_n \quad (3)$$

$$I_P = W_L - W_n - W_P + W_n \quad (4)$$

$$I_P = [W_L - W_n] - [W_P - W_n] \quad (5)$$

$$[W_L - W_n] = I_P + [W_P - W_n] \quad (6)$$

Man erhält eine Kurvenschar vom Typ

$$y = x + I_P \quad (7)$$

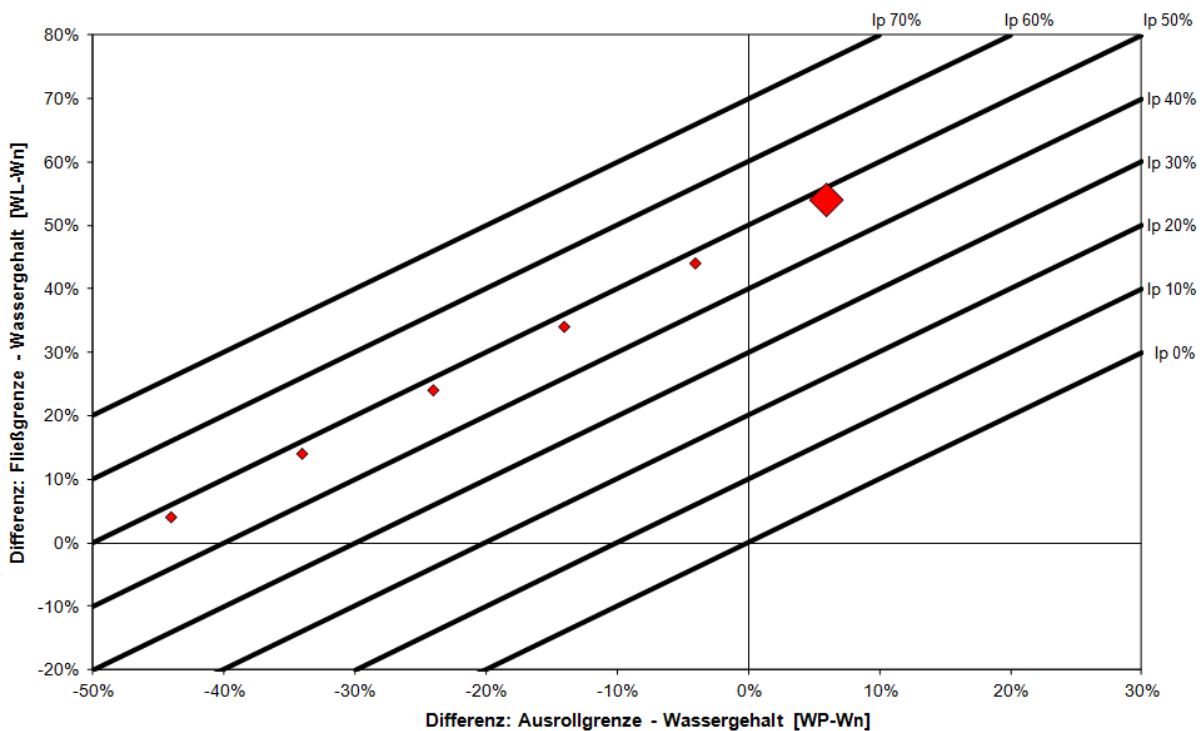


Abbildung 4.3: Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Isolinien der Plastizitätszahl (schwarze Linien)

Für jeden Bodentyp gilt, dass die Verbindungslinien der Wertepaare unterschiedlicher Wassergehalte

- Geraden sind,
- die Steigung „1“ haben, also parallel sind und
- die y-Achse bei der Größe ihrer Plastizitätszahl schneiden

Da definitionsgemäß nur positive Plastizitätszahlen möglich sind, können sinnvolle Wertepaare nur im Bereich $I_P > 0$ auftreten, also oberhalb einer Linie durch das Koordinatenkreuz. Die Differenz $[W_P - W_n]$ ist meist nicht besonders groß, da der Wassergehalt an der Ausrollgrenze im Regelfall niedrig ist. Somit ist eine Verschiebung der Skalierung in den negativen Bereich der x-Achse sinnvoll. Zusätzlich wird die Achsbeschriftung an den Rand des Diagramms verschoben und der Maßstab der x-Achse gegenüber der y-Achse verzerrt.

Definitionsgemäß liegt die Fließgrenze auf der x-Achse ($W_L = W_n$) und die Ausrollgrenze auf der y-Achse ($W_P = W_n$). Dabei kann in der Formel der Konsistenzzahl (2) die Plastizitätszahl durch den entsprechenden Term in Gleichung (5) ersetzt werden:

$$I_C = (W_L - W_n) / I_P \quad (2)$$

$$I_C = (W_L - W_n) / [(W_L - W_n) - (W_P - W_n)] \quad (8)$$

Anschließend werden Umformungen in Richtung des Terms $[W_L - W_n]$ durchgeführt; dieser bildet die Basis der y-Achse:

$$(W_L - W_n) = I_C * [(W_L - W_n) - (W_P - W_n)] \quad (9)$$

$$(W_L - W_n) = I_C * (W_L - W_n) - I_C * (W_P - W_n) \quad (10)$$

$$(W_L - W_n) - I_C * (W_L - W_n) = - I_C * (W_P - W_n) \quad (11)$$

$$(W_L - W_n) * (1 - I_C) = - I_C * (W_P - W_n) \quad (12)$$

$$(W_L - W_n) * (-I_C + I_C^2) = I_C^2 * (W_P - W_n) \quad (13)$$

$$(W_L - W_n) = (W_P - W_n) * [I_C / (I_C - 1)] \quad (14)$$

Die Eingabe bestimmter Konsistenzzahlen in Gleichung (14) führt zu Gleichungen der entsprechenden Isolinien. Dementsprechend sind die Konsistenzgrenzen nach Atterberg durch folgende Gleichungen definiert:

- Grenze flüssig zu breiig

$$I_C = 0,00 \rightarrow [W_L - W_n] = 0 \quad (\rightarrow \text{Fließgrenze}) \quad (15)$$

- Grenze breiig zu weich

$$I_C = 0,50 \rightarrow [W_L - W_n] = - [W_P - W_n] \quad (16)$$

- Grenze weich zu steif

$$I_C = 0,75 \rightarrow [W_L - W_n] = - 3 * [W_P - W_n] \quad (17)$$

- Grenze steif zu halbfest

$$I_C = 1,00 \rightarrow [W_P - W_n] = 0 \quad (\rightarrow \text{Ausrollgrenze}) \quad (18)$$

- Grenze halbfest zu fest

$$I_C = 1,25 \rightarrow [W_L - W_n] = 5 * [W_P - W_n] \quad (19)$$

Anzumerken ist, dass die Grenze zwischen halbfest und fest nach DIN 18122-T2 [31] an der Schrumpfgrenze liegt, in der geotechnischen Fachliteratur aber häufig vereinfacht die Konsistenzzahl von 1,25 angenommen wird.

Die Gleichungen (15) bis (19) ermöglichen die Einführung der Konsistenzbereiche in das neu entwickelte Diagramm (Abb. 4.4).

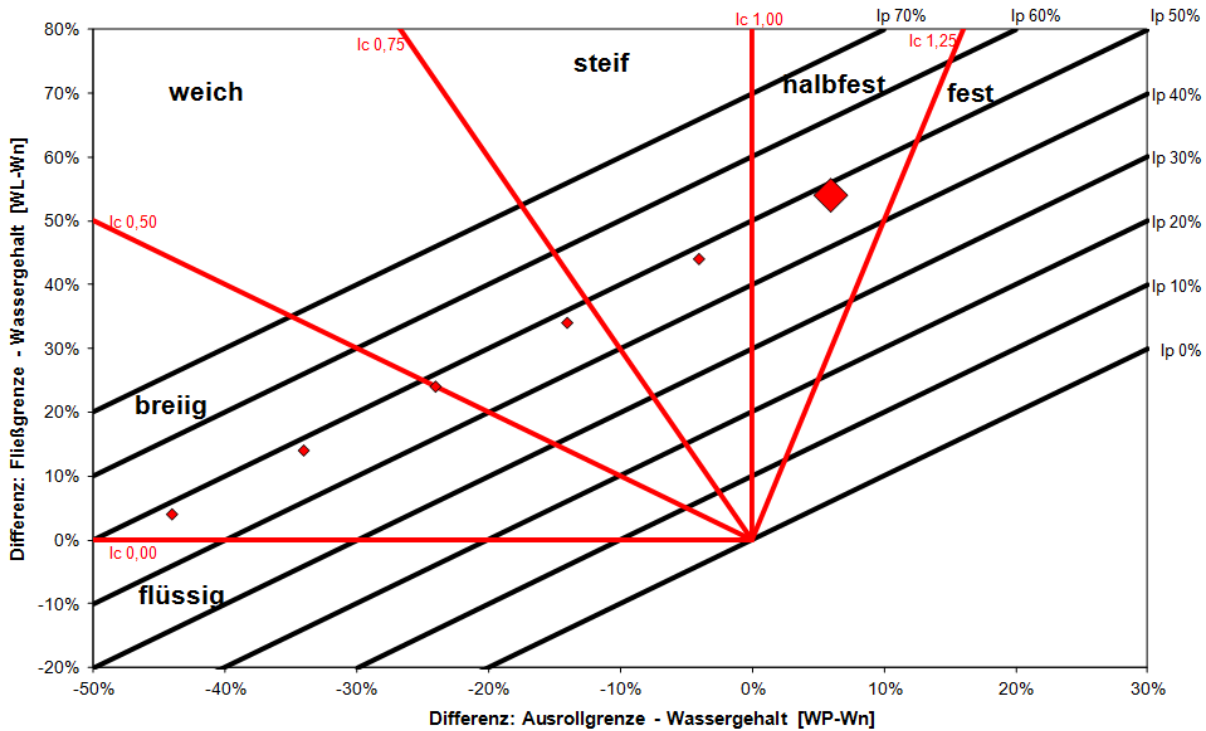


Abbildung 4.4: Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Isolinien der Konsistenzzahl (rote Linien)

Innerhalb des Diagramms existieren somit sowohl für jede Plastizitätszahl als auch für jede Konsistenzzahl Isolinien. Dementsprechend liegen Böden gleicher Konsistenzzahl oder gleicher Plastizitätszahl immer auf einer definierten Linie. Im Gegensatz dazu können Böden mit gleichem Wassergehalt, je nach Kombination von Fließ- und Ausrollgrenze, an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Diagramms liegen. Isolinien gleicher Wassergehalte sind somit nicht möglich. Allerdings ist der Betrag einer definierten Wassergehaltsänderung bei jedem beliebigen Boden innerhalb des Diagramms gleich groß, was anhand eines weiteren Beispielbodens veranschaulicht wird.

Dementsprechend kann eine Skala zur Wassergehaltsänderung eingefügt werden (Abb. 4.5)

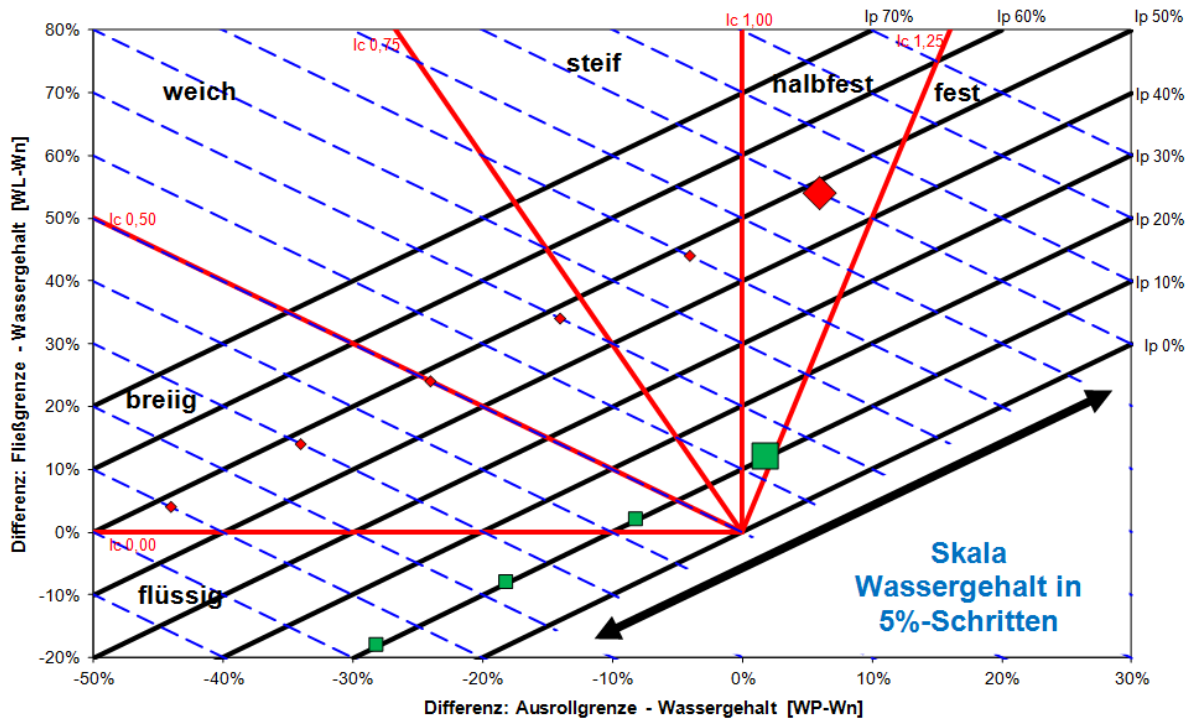


Abbildung 4.5: Grundform des neuen Diagramms [64, modifiziert] mit Skala zur Abschätzung von Wassergehaltsänderungen (Abstand zwischen blauen gestrichelten Linien: Änderung von 5%)

460 Wertepaare von Böden aus 17 Vortrieben veranschaulichen die unterschiedlichen Plastizitätsbereiche (Abb. 4.6).

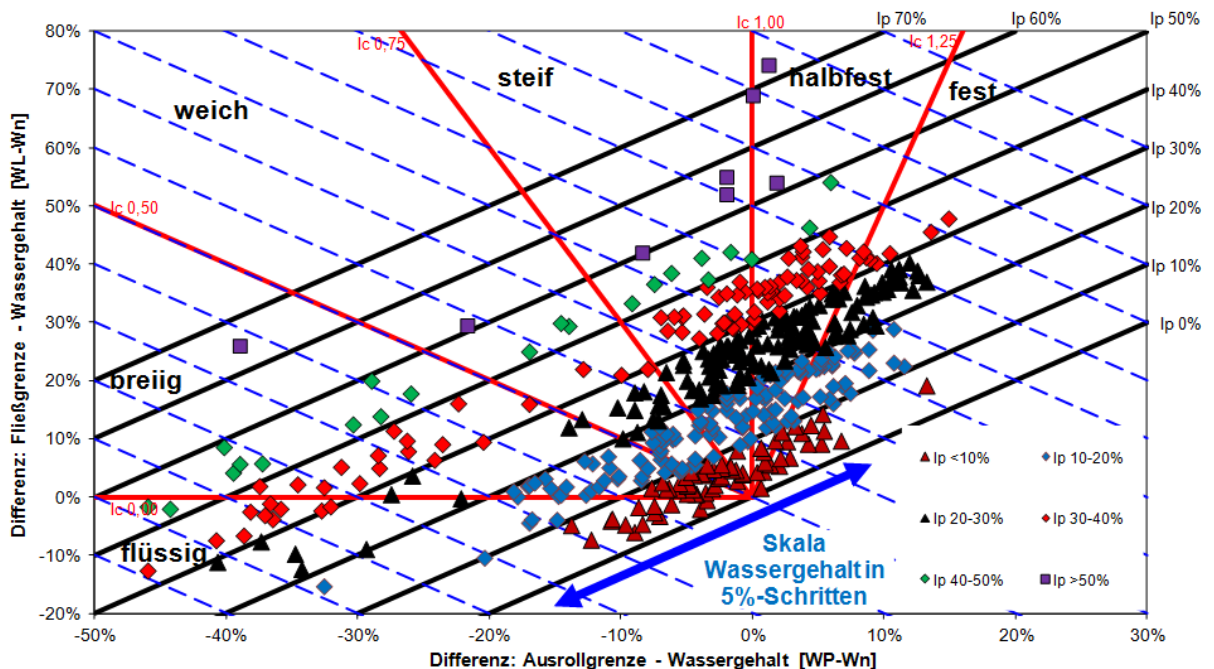


Abbildung 4.6: Grundform des neuen Diagramms mit 460 Wertepaaren, die in Plastizitätszahl-Gruppen sortiert sind

Die gleichen Böden veranschaulichen auch die unterschiedlichen Konsistenzbereiche (Abb. 4.7).

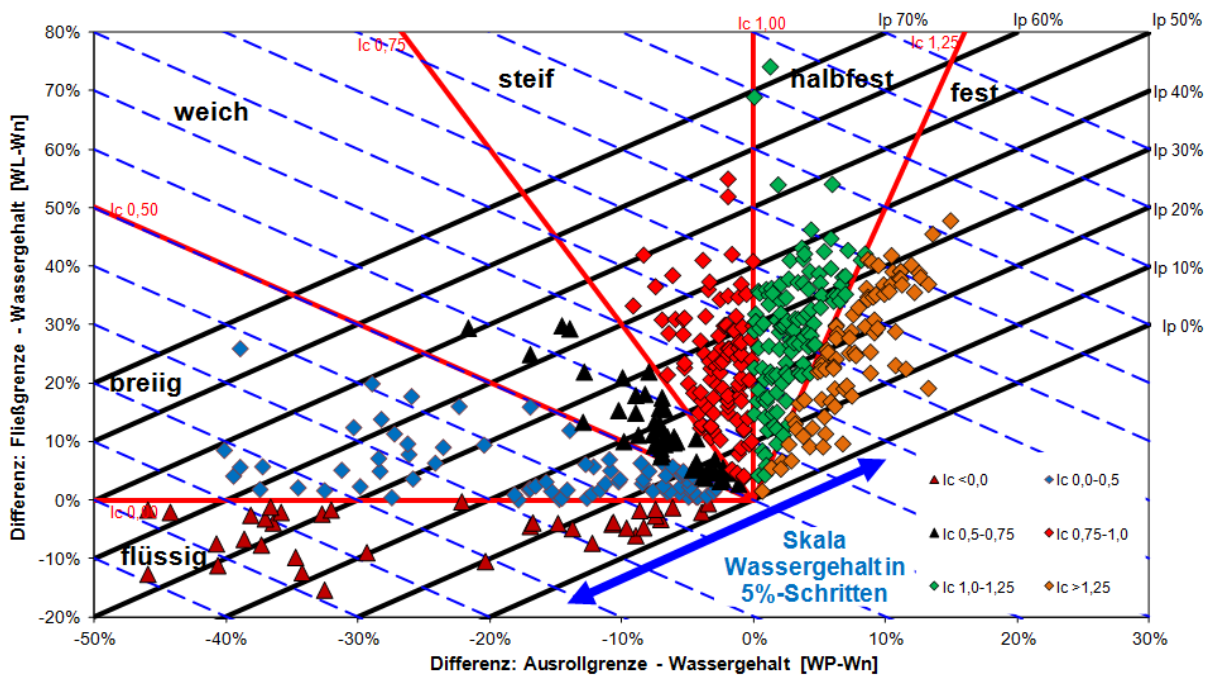


Abbildung 4.7: Grundform des neuen Diagramms mit 460 Wertepaaren, die in Konsistenzgruppen sortiert sind

Zur praktischen Anwendung empfiehlt sich, das Diagramm in einem Tabellenkalkulationsprogramm herzuleiten. Dabei können die Isolinien der Plastizitätszahl und die Konsistenzgrenzen entsprechend der Gleichungen (6) bzw. (15) bis (19) automatisch generiert werden. Im Hinblick auf das Skalennetz der Wassergehalte ist nur der Betrag der Änderung, also der Abstand zwischen den einzelnen Linien parallel zur Isohypse der Plastizitätszahl, relevant. Dementsprechend ist die Steigung variabel wählbar, wobei die negative Steigung der Isohypsen der Plastizitätszahl als besonders praktikabel empfohlen wird.

4.3. Abgrenzungen der Konsistenz innerhalb des Diagramms

Um Bewertungen zu ermöglichen, werden die im Vortrieb (Abbauprozess und Förderung) wirksamen kritischen und unkritischen Konsistenzbereiche in der Grundform des Diagramms gekennzeichnet (Abb. 4.8).

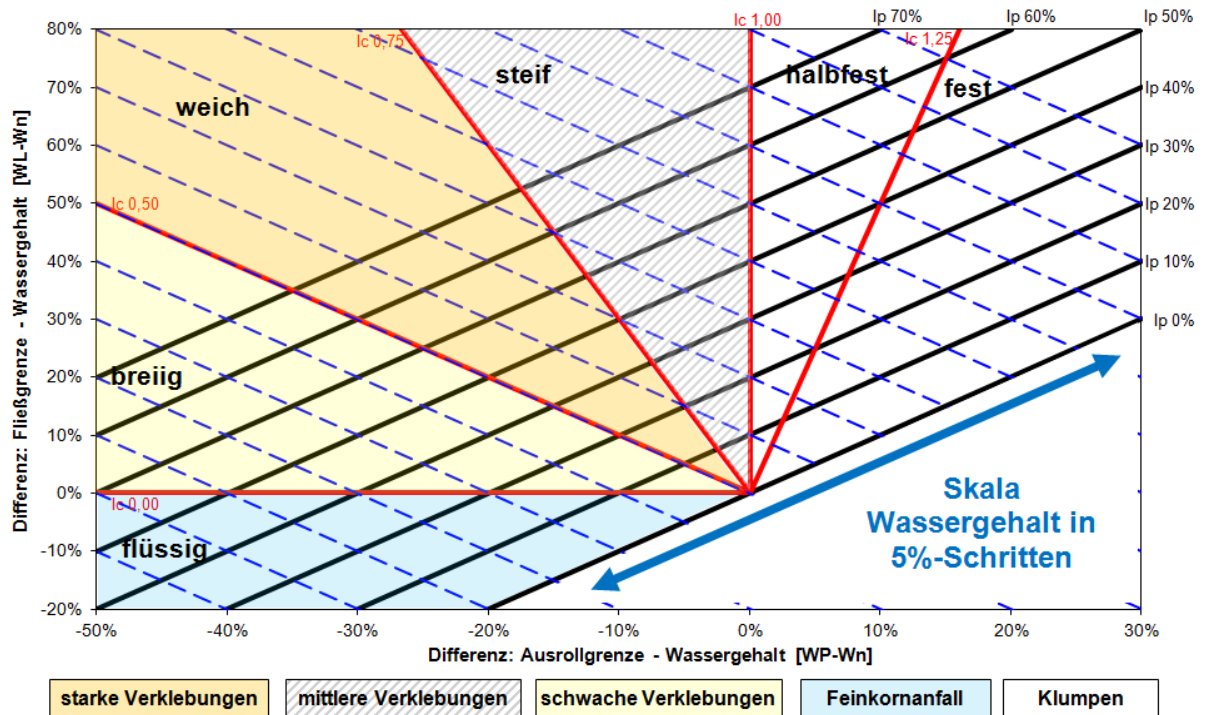


Abbildung 4.8: Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden [64, modifiziert]

In dem so modifizierten Diagramm kann abgeschätzt werden,

- ob ein Boden bereits im natürlichen Zustand kritisch ist
- oder welche Wassergehaltsänderung zur Umwandlung in eine kritische Konsistenz notwendig ist.

Die Festlegungen der entsprechenden Konsistenzbereiche basieren auf Praxiserfahrungen verschiedener Schildvortriebe (vgl. Kap. 3.1) und Laboruntersuchungen von Verklebungsmaterial (vgl. Kap. 3.3.3). Die Felder werden wie folgt festgelegt:

- halbfest bis fest: Förderung von unkritischen Klumpen
- breiig bis steif: klebrige Konsistenz mit Bildung von Verklebungen
 - steif: mittelstarke Verklebungen (teilweise klebrig, teilweise als Klumpen)
 - weich: starke Verklebungen (besonders klebrig)
 - breiig: geringe Verklebungen (Material ist klebrig, bleibt aufgrund der mechanischen Beanspruchung im Vortrieb aber nur in relativ geringem Maße erhalten)
- flüssig: Feinkornanfall in Flüssigkeit

Dabei sind die klar definierten Grenzlinien zwischen den unterschiedlich kritischen Feldern im Diagramm der Darstellung geschuldet. Beispielsweise dürfte sich ein Boden mit gleicher Plastizitätszahl und einer Konsistenzzahl von 0,51 oder 0,49 ähnlich kritisch verhalten, obwohl beide Böden in einem unterschiedlich kritischen Feld liegen würden. Die Grenzlinien trennen vielmehr Konsistenzbereiche voneinander ab, bei denen aufgrund der bisherigen Praxiserfahrungen überwiegend ein jeweils anders Verhalten des gelösten Bodens zu erwarten ist.

Die Skalierung der Diagrammachsen in Abbildung 4.8 wurde auf Basis der bisher bewerteten Böden festgelegt. Um auch Böden mit Plastizitätszahlen größer 70 % bewerten zu können, kann die Skalierung der Achsen entsprechend erweitert werden (Abb. 4.9). Zur Veranschaulichung ist der hochplastische Albeke Clay nach Marcke & Laenen [85] mit entsprechenden Wassergehaltserhöhungen dargestellt.

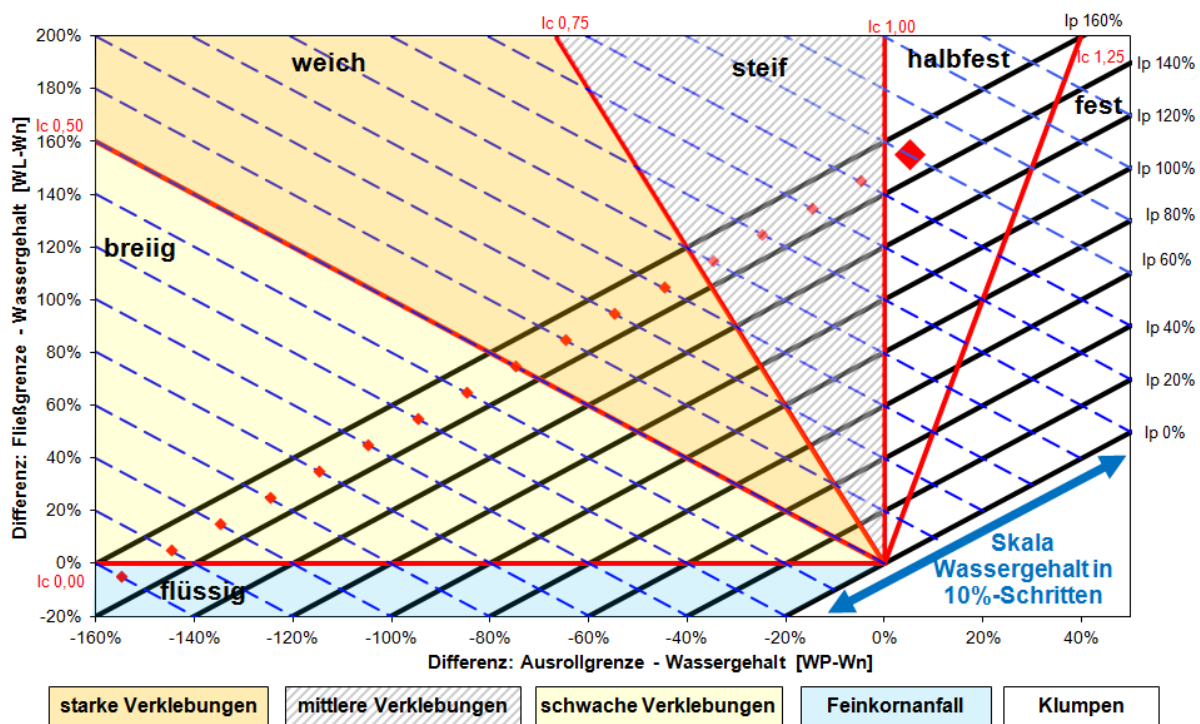


Abbildung 4.9: Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden mit Plastizitätszahlen bis 160% [64, modifiziert]

Anzumerken ist, dass der hinsichtlich höherer Plastizitätszahlen erweiterte Diagrammbereich in Abbildung 4.9 bisher nicht durch eigene Praxiserfahrungen belegt ist. Außerdem sind Wassergehaltsänderungen von Böden mit niedriger Plastizitätszahl in diesem Maßstab schwer zu erkennen, da entsprechende Wertepaare sehr dicht beieinander liegen. Die Skalierung der Achsen sollte daher projektspezifisch ausgewählt werden.

Analog dazu können auch im Vortrieb angestrebte Konsistenzbereiche, wie beispielsweise des konditionierten Erdbreis, im Diagramm angegeben werden (Abb. 4.10).

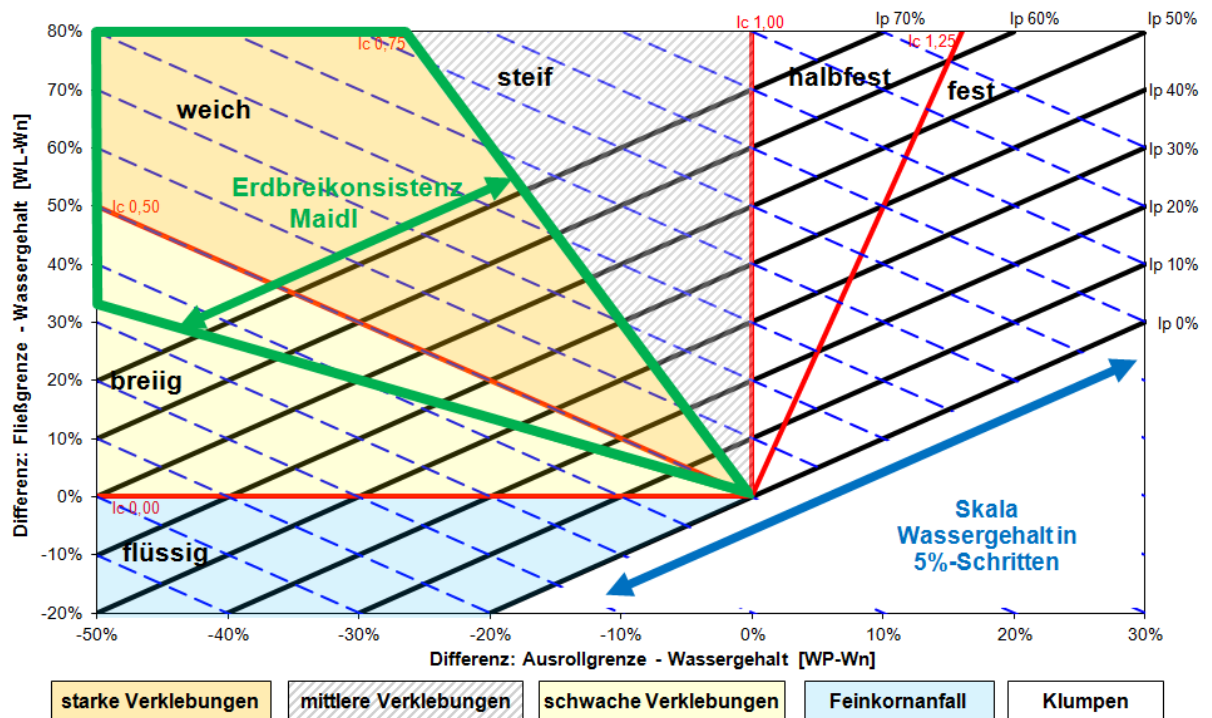


Abbildung 4.10: Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher Umwandlungen von Böden [64, modifiziert] mit Abgrenzung der Erdbreikonsistenz nach Maidl et al. [83]

In dem so modifizierten Diagramm kann abgeschätzt werden,

- ob ein Boden bereits im natürlichen Zustand als Erdbrei geeignet ist
- oder welche Wassergehaltsänderung zur Umwandlung in eine bevorzugte Erdbreikonsistenz notwendig ist.

Die Festlegungen der entsprechenden Konsistenzbereiche basieren dabei auf den Vorgaben von Maidl et al. 2011 [83]. Die Obergrenze hinsichtlich des Erdbreis entspricht dabei der Konsistenzgrenze zwischen weich und steif (vgl. Kap. 2.2.5). Sie kann daher mit Gleichung (17) dargestellt werden. Die entsprechende Untergrenze ist durch folgende Gleichung definiert:

$$I_c = 0,40 \rightarrow [W_L - W_n] = -0,66 * [W_P - W_n] \quad (20)$$

4.4. Aussagekraft des allgemeinen Bewertungsdiagramms

Die Aussagekraft des Diagramms wird im Folgenden anhand von theoretischen Beispielen aufgezeigt. Zunächst werden vier Böden mit gleicher Plastizitätszahl und unterschiedlicher Konsistenz miteinander verglichen (Abb. 4.11).

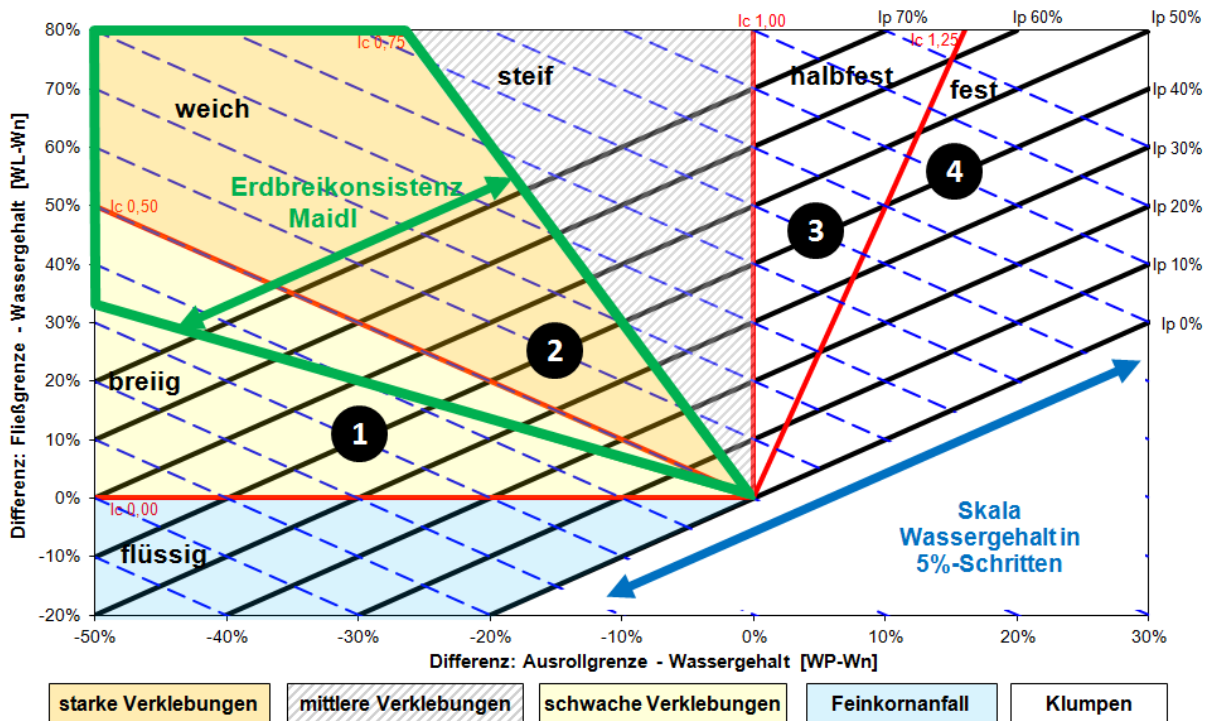


Abbildung 4.11: Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Böden unterschiedlicher Konsistenz

Dabei haben die Böden ① und ② bereits im natürlichen Zustand eine klebrige Konsistenz, während ③ und ④ zunächst unkritisch sind. Bei gleicher Verfügbarkeit von Wasser führt eine Wassergehaltserhöhung um beispielsweise 10 % bereits zu einer neuen Beurteilung, wobei Boden ① als Feinkorn in Lösung zu gehen beginnt, während ② noch im klebrigen Konsistenzbereich bleibt. In dem Fall wird Boden ③ klebrig, während ④ noch im unkritischen Konsistenzbereich liegt. Allgemein sind im Hinblick auf die Konsistenz folgende Aussagen möglich:

- Bei Konsistenzzahlen $> 0,75$ nimmt die Verklebungsfahr mit abnehmender Konsistenzzahl zu: je näher der Boden im Diagramm an den kritischen Konsistenzfeldern liegt, desto weniger Wasser ist zur kritischen Umwandlung erforderlich.
- Bei Konsistenzzahlen $< 0,50$ nimmt die Neigung zur Feinkornfreisetzung mit abnehmender Konsistenzzahl zu: je näher der Boden im Diagramm am flüssigen Konsistenzfeld liegt, desto weniger Wasser ist zur Feinkornfreisetzung erforderlich.

Im Hinblick auf den von [83] angegebenen Erdbrei-Konsistenzbereich gilt:

- Bei Konsistenzzahlen $> 0,75$ nimmt der Konditionierungsaufwand mit zunehmender Konsistenzzahl zu: je näher der Boden im Diagramm am Konsistenzfeld des Erdbreis liegt, desto weniger Wasser ist zur Konditionierung erforderlich.

Anschließend werden drei Böden mit gleicher Konsistenz und unterschiedlicher Plastizität miteinander verglichen (Abb. 4.12).

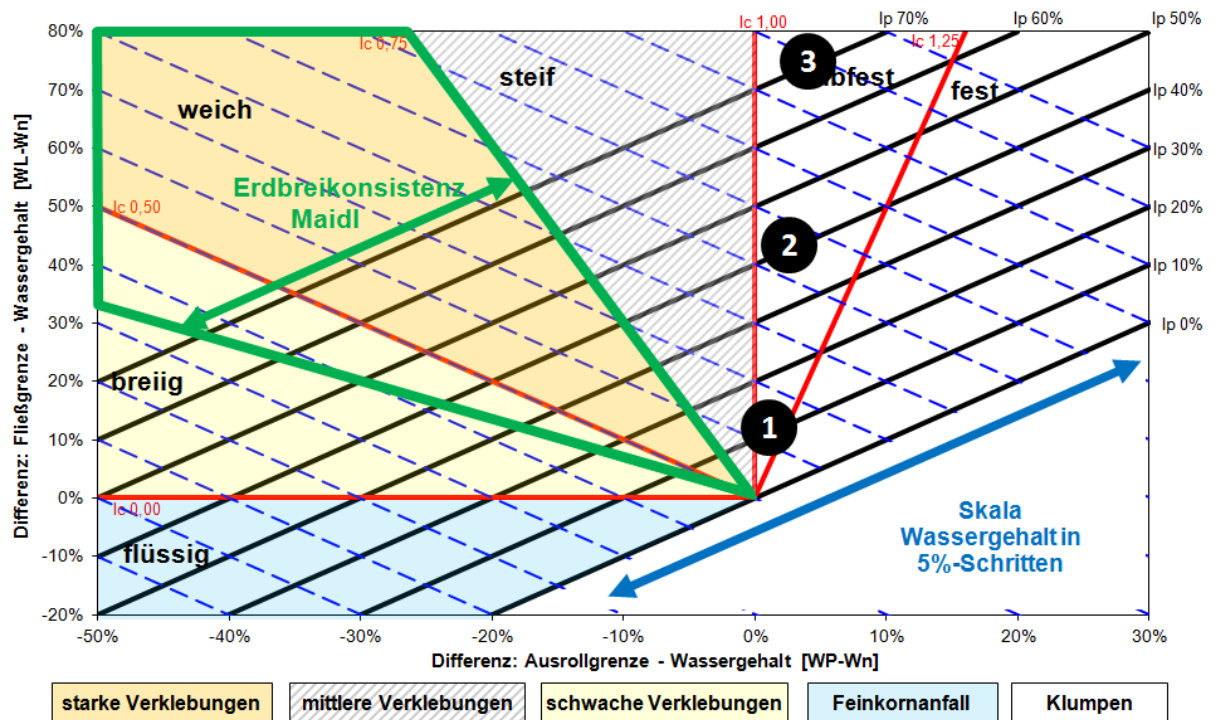


Abbildung 4.12: Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Böden unterschiedlicher Plastizität

Dabei haben alle Böden im natürlichen Zustand eine unkritische Konsistenz. Bei gleicher Verfügbarkeit von Wasser führt eine Wassergehaltserhöhung um beispielsweise 10 % bereits zu einer neuen Beurteilung, wobei Boden ① als Feinkorn in Lösung zu gehen beginnt, während ② und ③ in einen klebrigen Konsistenzbereich verschoben werden. Dabei ist ③ kritischer als ② zu werten, da eine deutlich größere Wassergehaltsänderung notwendig wäre, um den klebrigen Konsistenzbereich wieder zu verlassen. Allgemein sind im Hinblick auf die Plastizität folgende Aussagen möglich:

- je höher die Plastizität, desto größere Wassergehalts-Bandbreiten innerhalb der klebrigen Konsistenzbereiche sind möglich; somit nimmt die Verklebungsneigung mit zunehmender Plastizitätszahl zu.
- im Umkehrschluss gilt, dass die Neigung zur Feinkornfreisetzung mit abnehmender Plastizitätszahl zunimmt, da die flüssige Konsistenz schneller erreicht wird.

Im Hinblick auf den von [83] angegebenen Erdbrei-Konsistenzbereich gilt:

- bei gleicher Konsistenz steigt der Konditionierungsaufwand mit der Plastizität, da eine zunehmende Wasserzugabe notwendig wird, um die Erdbrei-Konsistenz zu erreichen.
- Mit abnehmender Plastizität wird die Dosierung der Wasserzugaben schwieriger, da das Konsistenzfeld des Erdbreis mit geringeren Wassergehalts-Bandbreiten vorliegt; bei zu geringer Plastizität führen schon geringe Wasserzugaben dazu, dass die Konsistenzzahl des Erdbreis unter 0,40 fällt.

4.5. Vergleich mit bisherigen Bewertungsdiagrammen

Im Folgenden wird überprüft, ob die Beurteilungen mit Hilfe der auf der Kombination aus Konsistenz- und Plastizitätszahl basierenden Verklebungsdiagramme und mit dem neuen universellen Bewertungsdiagramm vergleichbar sind.

4.5.1. Randbedingung: hohe Verfügbarkeit von Wasser

Zunächst werden das Verklebungsdiagramm von Thewes [61] und das neue Bewertungsdiagramm im Hinblick auf flüssigkeitsgestützte Schildvortriebe miteinander verglichen. Dazu werden zunächst Wertepaare von 460 Böden entsprechend ihrer Verklebungspotenziale des Diagramms von Thewes sortiert (Abb. 4.13).

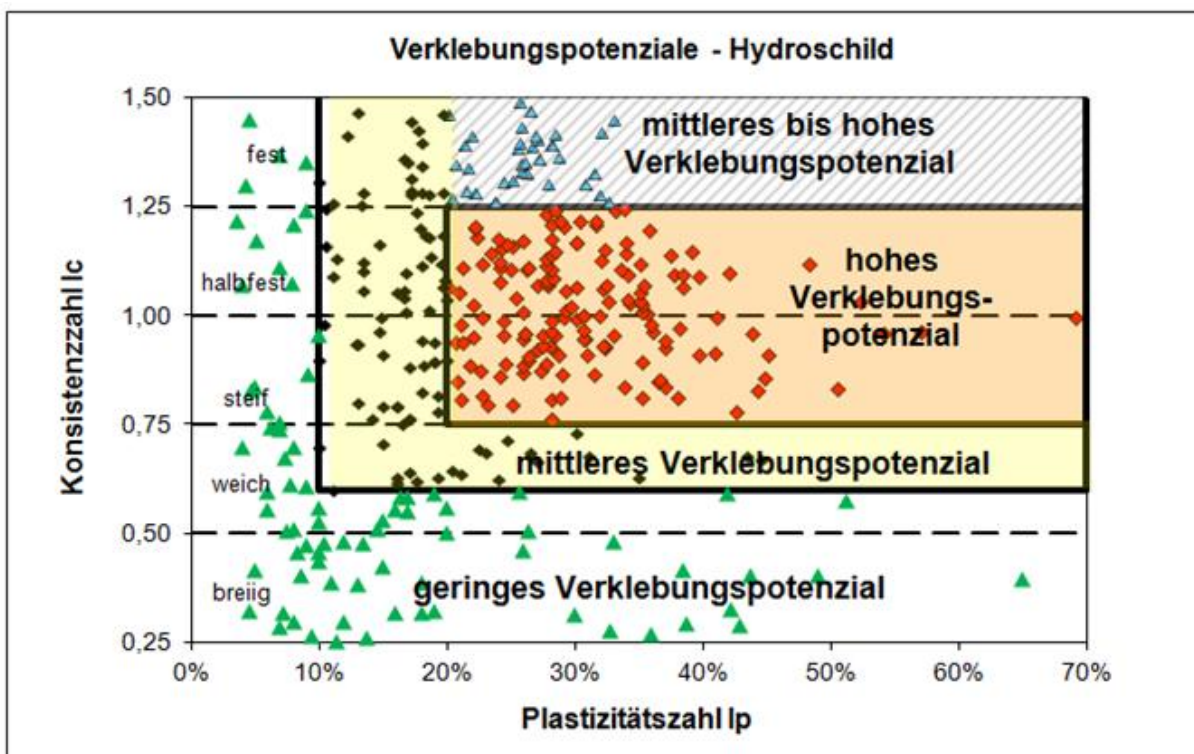


Abbildung 4.13: Verklebungsdiagramm für Hydroschildvortriebe [61] mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale sortiert sind

Anschließend werden die Wertepaare, entsprechend dieser Sortierung, in das neue Bewertungsdiagramm eingetragen (Abb. 4.14).

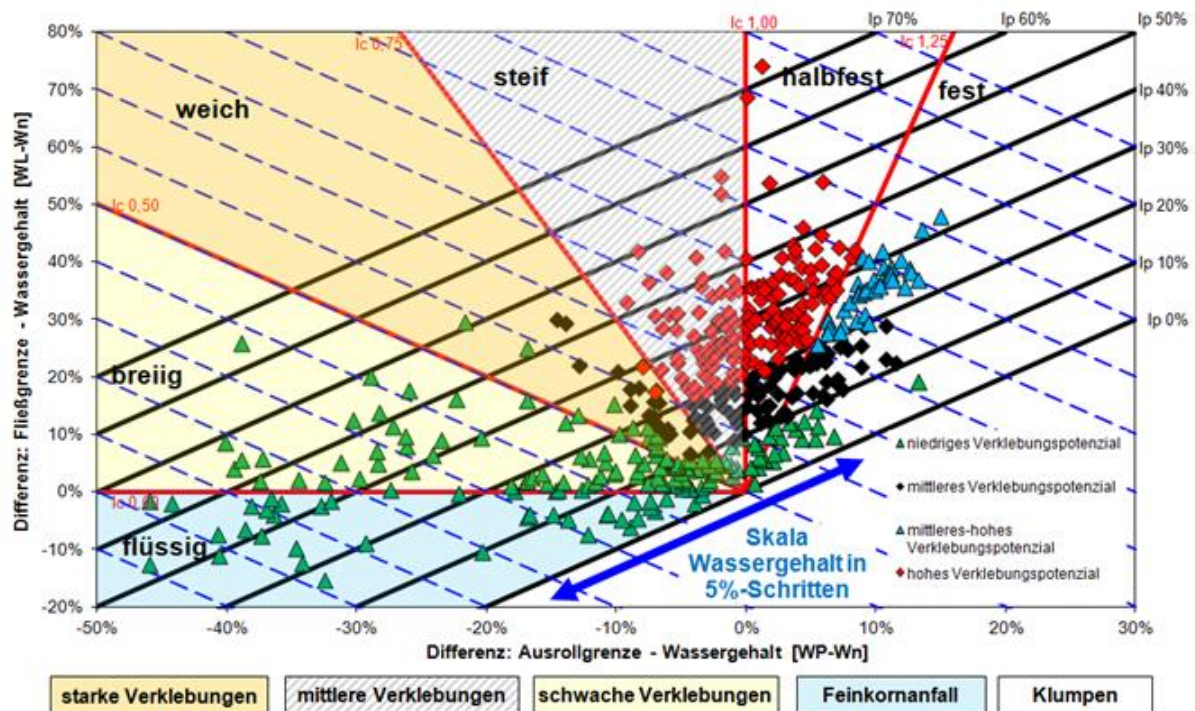


Abbildung 4.14: Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale in Abbildung 4.13 sortiert sind

Im universellen Verklebungsdiagramm wird im Hinblick auf die Randbedingung der hohen Verfügbarkeit von Wasser bewertet, inwieweit die Böden umgewandelt werden.

4.5.1.1. Hohes Verklebungspotenzial nach Thewes

Böden mit steifer-halbfester Konsistenz und einer Plastizität $>20\%$ (rote Rauten in Abb. 4.14) würden bei der zu erwartenden Wassergehaltszunahme in den besonders klebrigen Konsistenzbereich verschoben. Die hohe Bandbreite an möglichen Wassergehalten im Konsistenzfeld der Verklebungen bei Plastizitätszahlen $>20\%$ deutet auf eine hohe Wahrscheinlichkeit hin. Die Bewertung ist somit vergleichbar.

4.5.1.2. Mittleres bis hohes Verklebungspotenzial nach Thewes

Die Böden mit fester Konsistenz und einer Plastizität $>20\%$ (blaue Dreiecke in Abb. 4.14) würden bei der zu erwartenden Wassergehaltszunahme ebenfalls in den klebrigen Konsistenzbereich verschoben. Aufgrund der höheren Konsistenz wäre die notwendige Wasseraufnahme gegenüber den steifen bis halbfesten Böden allerdings größer. Es wären also auch Verklebungen zu erwarten, wobei eine längere Verweildauer erforderlich wäre, um vergleichbar kritische Zustände hervorzurufen. Bei gleicher Verweildauer würden diese weniger kritisch werden. Die Bewertung ist somit vergleichbar.

4.5.1.3. Mittleres Verklebungspotenzial nach Thewes

Die Böden mit weicher Konsistenz und einer Plastizitätszahl $>10\%$ (schwarze rauten in Abb. 4.14) lassen bei der zu erwartenden Wasserrzunahme eher eine Verschiebung in den breiigen Konsistenzbereich erwarten. Dieser ist zwar noch klebrig, aber hinsichtlich des Vortriebs weniger kritisch. Im Bereich der Plastizitätszahlen zwischen 10 und 20% würden aufgrund der relativ geringen Bandbreite an Wassergehalten in der besonders klebrigen, weichen Konsistenz auch Böden mit höherer Konsistenz in das breiige Konsistenzfeld verschoben. Insgesamt ist auch mit Verklebungen zu rechnen, wobei diese aber weniger kritisch sind. Die Bewertung ist somit vergleichbar.

4.5.1.4. Niedriges Verklebungspotenzial nach Thewes

Die Böden mit niedriger Konsistenz liegen nah am flüssigen Konsistenzbereich (grüne Dreiecke in Abb. 4.14). Die zu erwartende Wassergehaltszunahme lässt demnach statt Verklebungen eher eine Freisetzung von Feinkorn erwarten. Unterhalb einer Plastizitätszahl von 10% (grüne Dreiecke in Abb. 4.14) liegt nur eine geringe Bandbreite an möglichen Wassergehalten innerhalb der klebrigen Konsistenz vor. Die zu erwartende Wassergehaltszunahme führt demnach, unabhängig von der Konsistenz, zu einer Verschiebung in den flüssigen Bereich. Die Bewertung ist somit vergleichbar.

4.5.1.5. Vergleich der Aussagekraft

Im Hinblick auf flüssigkeitsgestützte Schildvortriebe führen beide Diagramme zu einer gleichwertigen Einschätzung. Die einfachere Handhabung spricht dabei für das auf der Kombination von Konsistenz- und Plastizitätszahl basierende Diagramm. Die gleichzeitige Bewertung von Verklebungen und Feinkornanfall ist allerdings nur mit dem neuen Bewertungsdiagramm möglich. Wenn der Baugrund ausschließlich für den flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb beurteilt werden soll, wird eine parallele Anwendung beider Diagrammen empfohlen.

4.5.2. Randbedingung: keine Verfügbarkeit von Wasser

Außerdem wird überprüft, ob auch die Beurteilungen mit Hilfe des Verklebungsdiagramms für offen gefahrene Schildvortriebe ohne Bergwasserzutritte nach [61] und dem neuen Bewertungsdiagramm zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Dazu werden zunächst Wertepaare von 460 Böden entsprechend ihrer Verklebungspotenziale des Diagramms nach [61] sortiert (Abb. 4.15).

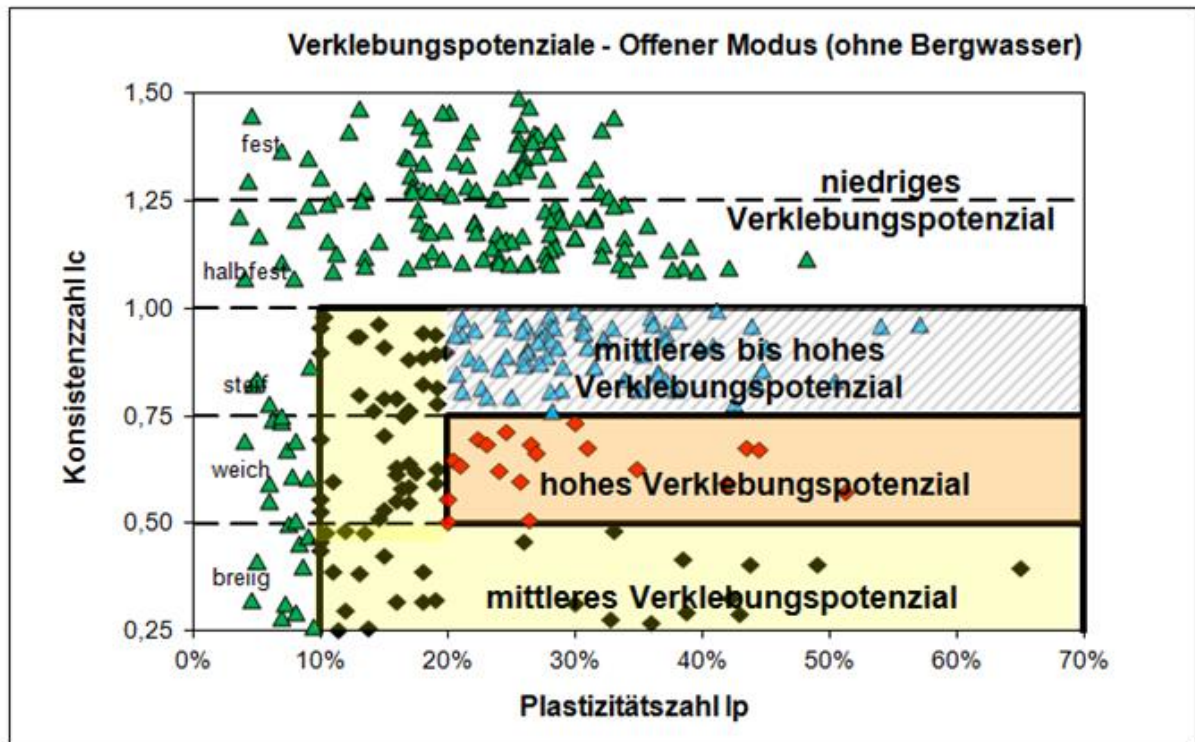


Abbildung 4.15: Verklebungsdiagramm für offen gefahrene Schildvortriebe [61] mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale sortiert sind

Anschließend werden die Wertepaare, entsprechend dieser Sortierung, in das neue Bewertungsdiagramm eingetragen (Abb. 4.16).

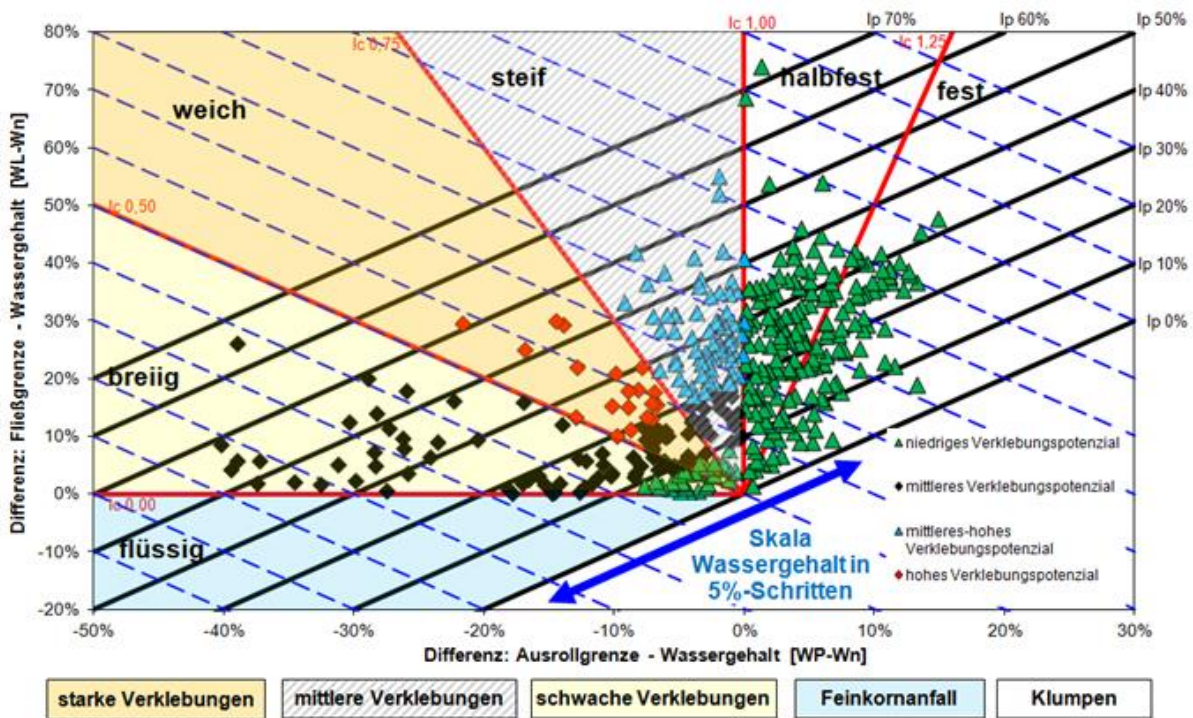


Abbildung 4.16: Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Wertepaaren von Böden, die entsprechend der Verklebungspotenziale in Abbildung 4.15 sortiert sind

Im Verklebungsdiagramm in Abbildung 4.15 beziehen sich die unterschiedlich kritischen Felder auf die natürliche Konsistenz des Bodens, wobei diese nur ohne Bergwasser gelten. Im neuen Bewertungsdiagramm in Abbildung 4.16 beziehen sich die abgegrenzten Felder auf die im Vortrieb wirksamen kritischen Konsistenzbereiche. Theoretisch müssten die Bewertungsfelder beider Diagramme somit übereinstimmen.

Der überwiegende Teil der Wertepaare wird bei beiden Diagrammen vergleichbar eingestuft: Die Böden mit geringem Verklebungspotential (grüne Dreiecke) liegen im neuen Bewertungsdiagramm weitestgehend im Bereich der unkritischen förderbaren Klumpen, während die Böden mit höheren Verklebungspotenzialen die Konsistenzfelder der Verklebungen abdecken.

Allerdings liegen Böden mit mittlerem Verklebungspotenzial (schwarze Rauten) im neuen Bewertungsdiagramm im Konsistenzbereich schwacher Verklebungen. Auf diesen Widerspruch verweisen Fernández-Steeger & Feinendegen [44] im Hinblick auf die Diagrammversionen von Hollmann & Thewes 2011 [61]. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Diagramm in Abbildung 4.15 durch die Verschiebung der Verklebungspotenziale des Diagramms in Abbildung 4.13 generiert wurde (vgl. Kap. 4.1). Dabei wurden die an das hohe Verklebungspotenzial angrenzenden Felder an sich nicht verändert, sondern lediglich verschoben. Im Gegensatz dazu wurden die Felder im neuen Diagramm in Abbildung 4.16 auf Basis der im Vortrieb wirksamen Konsistenzbereiche festgelegt (vgl. Kap. 4.3). Eine weitere Diskrepanz liegt zum Beispiel darin, dass auch ein Boden mit geringem Verklebungspotenzi-

al mit weicher Konsistenz klebrig wäre. Die sehr geringe mögliche Wassergehaltsbandbreite in dieser Konsistenz lässt Verklebungen bei diesen Böden allerdings kaum erwarten.

Eine Beurteilung von Böden hinsichtlich offen gefahrener Schildvortriebe anhand des Diagramms in Abbildung 4.15 ist schon deshalb wenig sinnvoll, da die Verklebungspotenziale von Thewes [108] auf den Praxiserfahrungen von flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben basieren. So sind beispielsweise „lange Spülzeiten“ als ein typisches Merkmal zur Definition der Verklebungspotenziale nicht auf offen gefahrene Schildvortriebe übertragbar.

Das Diagramm in Abbildung 4.15 ist ausdrücklich nicht als wirkliche Bewertungsalternative zum neuen Bewertungsdiagramm gedacht; es soll vielmehr die Abhängigkeit eines auf der Konsistenzzahl basierten Diagramms von der jeweiligen Wasserverfügbarkeit veranschaulichen. Da hierzu nur zwei Randbedingungen eindeutig definiert werden können (keine oder sehr hohe Wasserverfügbarkeit), wurde das neue Bewertungsdiagramm entwickelt.

Im Hinblick auf praktische Anwendungen des allgemeinen Bewertungsdiagramms wird auf Kapitel 6.2 verwiesen.

5. Modifikation des Siebtrommelversuchs im Hinblick auf Verklebungen

Im diesem Kapitel wird ein auf dem Siebtrommelversuch basierendes Versuchskonzept entwickelt, das systematische bodenmechanische Untersuchungen an den Zerfallsprodukten erlaubt. Das Versuchskonzept wurde 2011 erstmals von Hollmann & Thewes vorgestellt [61]. Der vorgeschlagene Versuchsablauf wurde im Rahmen einer während der wissenschaftlichen Arbeit betreuten Masterarbeit weiter modifiziert [122]. Eine aktualisierte Veröffentlichung hierzu stammt von Hollmann et al. [65]. Im Rahmen dieses Kapitels werden einzelne Formulierungen der Publikationen [61, 65] übernommen.

5.1. Problematik derzeitiger Bewertungen von Festgestein

Die Verklebungsneigung von Lockergesteinen kann inzwischen relativ gut bewertet werden, sofern die entsprechenden Baugrundeigenschaften bekannt sind (vgl. Kap. 3.2.3 und Kap. 4). Im Gegensatz dazu existiert für Fels noch kein eindeutiges Bewertungsschema. Problematisch ist dabei einerseits die zum Teil unklare Abgrenzung zwischen Fest- und Lockergestein (vgl. Kap. 3.2.2) und andererseits eine fehlende Systematik in der Bewertung potenzieller Zerfallsprodukte (vgl. Kap. 3.2.4).

5.1.1. Klassifizierung bindiger Böden als Fels

Häufig werden Gesteine, die bodenmechanisch auf Basis der Zustandsgrenzen als Lockergestein eingestuft werden müssten, petrographisch als Festgestein klassifiziert. Neben der nicht eindeutig definierten Grenzziehung zwischen Boden und Fels (vgl. Kap. 3.2.2), ist dafür vielfach auch der regionalgeologische Blickpunkt verantwortlich. So ist auch ein halbfester Ton „mit *Stahlnagel oder Messerspitze leicht ritzbar*“ und könnte somit entsprechend DIN 4022-1 [26] bzw. DIN EN ISO 14689-1 [29] als Tonstein mit „*mäßiger Kornbindung*“ klassifiziert werden, sofern der stratigraphischen Einheit allgemein Festgesteine zugeordnet werden. Die Bestimmung der Atterberggrenzen, die zu einer eindeutigen Klassifizierung als Lockergestein mit entsprechender Konsistenz- und Plastizitätszahl führen würde, wird dann in der Regel an diesem vermeintlichen Festgestein nicht durchgeführt. Das ist gerade deshalb problematisch, weil sich diese Gesteine im Sinne der DIN 4020 [24] im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben bautechnisch dann auch wie bindige Lockergesteine verhalten (→Abbau- und Transportvorgänge).

Beispielsweise können zwei Böden unterschiedlicher Herkunft bautechnisch eigentlich vergleichbar eingestuft werden, obwohl diese in der Ausschreibung einmal als Lockergestein und einmal als Festgestein klassifiziert werden (Abb. 5.1). Bei den schwarzen Wertepaaren handelt es sich um tertiäre Tone, Schluffe und Mergel der stratigraphischen Einheit Flinzmergel. Sie liegen in Wechsellagerung mit Sanden vor und sind in den Ausschreibungsunterlagen eines Münchner U-Bahn-Loses auf Basis der Atterberggrenzen als bindige Böden mit überwiegend steifer bis fester Konsistenz klassifiziert. Bei den roten Wertepaaren handelt es sich ebenfalls um steife bis feste Tone. Die Atterberggrenzen stammen dabei nicht aus den

Ausschreibungsunterlagen, sondern wurden an während der Ausführungsphase eines Hydroschildvortriebs mit starken Verklebungen entnommenen Ortsbrustproben ermittelt. Die mit Sandsteinen in Wechsellagerung vorliegenden Tone der stratigraphischen Einheit Buntsandstein sind in der Ausschreibung als feinkörniges Festgestein klassifiziert. Während die tertiären Böden hinsichtlich der Verklebungsneigung entsprechend kritisch bewertet werden konnten, war das an den vermeintlichen Festgesteinen des Buntsandsteins aufgrund fehlender Atterberggrenzen nicht möglich. Dabei sind diese gegenüber dem Münchner Flinzmergel aufgrund der tendenziell höheren Plastizität sogar kritischer im Hinblick auf Verklebungen zu werten (Abb. 5.1).

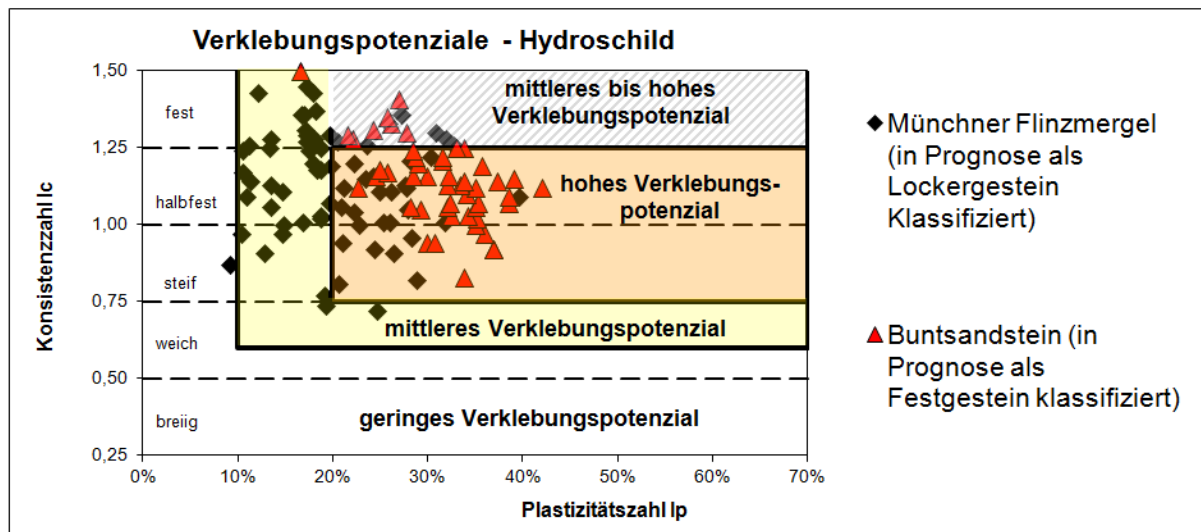


Abbildung 5.1: Verklebungsdiagramm nach Thewes mit Darstellung bindiger Böden unterschiedlicher Baustellen

Es ist daher zu empfehlen im Hinblick auf Schildvortriebe auch Gesteine, die aus petrologischer oder regionalgeologischer Sicht als Festgestein klassifiziert wurden, als Lockergestein zu bewerten, sobald nach DIN 18122-1 [30] die Atterberggrenzen bestimmt werden können [65]. Untersuchungsverfahren zur Beurteilung der Verklebungsneigung von Fels, sollten bei als Festgestein klassifizierten bindigen Böden zumindest zu einer entsprechend kritischen Beurteilung führen

5.1.2. Veränderlich fester Fels

Damit Festgestein bei Schildvortrieben hinsichtlich von Verklebungen und/oder einer mengenmäßig relevanten Feinkornfreisetzung kritisch werden kann, müssen drei Randbedingungen erfüllt sein [65]:

- Es muss Wasser in Form von Berg- oder Prozesswasser vorhanden sein.
- Das Festgestein muss veränderlich fest sein, also eine Zerfallsneigung aufweisen.
- Die möglichen Zerfallsprodukte müssen kritisch sein (Anteil und Art der Tonminerale; Tonanteil <0,002 mm).

Eine verlässliche Prognose potenzieller Bergwasserzutritte ist zur Bewertung eines Schildvortriebs zwingend notwendig, wird aber im Rahmen dieses Kapitels nicht weiter behandelt.

Kritische Bestandteile können nur dann in größerer Menge aus dem Felsverband freigesetzt werden, wenn neben Wasser auch eine Zerfallsneigung vorhanden ist. Durch Bruchvorgänge und aus der Zermalmungszone der Diskenspuren entstehen aus dauerhaft festem Festgestein hingegen nur geringe Mengen Feinkorn (vgl. Kap. 3.2.4.2). Genauere Untersuchungen hierzu stehen allerdings noch aus. Unter Vernachlässigung des denkbaren Feinkornanfalls durch Bruchvorgänge oder aus der Zermalmungszone, kann das zu erwartende Verhalten in Form einer Bewertungsmatrix abgeschätzt werden (Tab. 5.1). Dabei wird für jeden möglichen Fall ein typisches Beispiel angegeben.

Wasser	Zerfallsneigung	mögliche Zerfallsprodukte	Verhalten	Beispiel
kein bis wenig Wasser verfügbar	keine bis geringe Zerfallsneigung	keiner bis geringer Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Unkritisch: ohne Wasser und Zerfallsneigung: Kein Zerfall; keine kritischen Bestandteile	Offener Schildvortrieb ohne Bergwasserzutritte in dauerhaft festem Sandstein: vorwiegend Sandsteinchips
kein bis wenig Wasser verfügbar	mittlere bis hohe Zerfallsneigung	keiner bis geringer Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Unkritisch: ohne Wasser trotz Zerfallsneigung: Kein Zerfall; keine kritischen Bestandteile	Offener Schildvortrieb ohne Bergwasserzutritte in veränderlich festem Sandstein: vorwiegend Sandsteinchips
kein bis wenig Wasser verfügbar	keine bis geringe Zerfallsneigung	mittlerer bis hoher Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Unkritisch: ohne Wasser und Zerfallsneigung: Kein Zerfall; denkbare kritische Bestandteile werden nicht freigesetzt	Offener Schildvortrieb ohne Bergwasserzutritte in dauerhaft festem Tonstein: vorwiegend Tonsteinchips
kein bis wenig Wasser verfügbar	mittlere bis hohe Zerfallsneigung	mittlerer bis hoher Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Unkritisch: ohne Wasser trotz Zerfallsneigung: Kein Zerfall; denkbare kritische Bestandteile werden nicht freigesetzt	Offener Schildvortrieb ohne Bergwasserzutritte in veränderlich festem Tonstein: vorwiegend Tonsteinchips
mittlere bis hohe Wassermenge verfügbar	keine bis geringe Zerfallsneigung	keiner bis geringer Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Unkritisch: ohne Zerfallsneigung trotz Wasser: Kein Zerfall; keine kritischen Bestandteile	Hydroschildvortrieb in dauerhaft festem Sandstein: vorwiegend Sandsteinchips
mittlere bis hohe Wassermenge verfügbar	mittlere bis hohe Zerfallsneigung	keiner bis geringer Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Unkritisch: trotz Wasser und Zerfallsneigung werden unkritische Bestandteile freigesetzt	Hydroschildvortrieb in veränderlich festem Sandstein: vorwiegend Zerfallsprodukte bis hin zum Sand
mittlere bis hohe Wassermenge verfügbar	keine bis geringe Zerfallsneigung	mittlerer bis hoher Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Unkritisch: ohne Zerfallsneigung trotz Wasser: Kein Zerfall; denkbare kritische Bestandteile werden nicht freigesetzt	Hydroschildvortrieb in dauerhaft festem Tonstein: vorwiegend Tonsteinchips
mittlere bis hohe Wassermenge verfügbar	mittlere bis hohe Zerfallsneigung	mittlerer bis hoher Anteil an Tonmineralen/Körnern <0,002mm	Kritisch: kritische Bestandteile werden durch Wasser und Zerfallsneigung freigesetzt	Hydroschildvortrieb in veränderlich festem Tonstein: vorwiegend Zerfallsprodukte bis hin zum Ton

Tabelle 5.1: Bewertungsmatrix zur Beurteilung der Verklebungsfahr und des Feinkornanfalls im Fels mit Beispielen (rot: kritische Randbedingungen, grün: unkritische Randbedingungen)

Welche Wassermenge kritisch ist, muss für jeden Vortrieb neu bewertet werden, da sie von verschiedenen Randbedingungen abhängt (z.B. Querschnittsgröße, Ringbauzeit). Auf unter-

schiedlich kritische Bergwasserzuflüsse wird in Kapitel 6.2 anhand von Beispielen aus der Praxis näher eingegangen.

Obwohl die Zerfallsneigung in der Regel im Rahmen genormter Versuche ermittelt wird, können die möglichen Zerfallsprodukte bisher lediglich aufgrund anderer Eigenschaften (Tonminerologie, Tonanteil) des Festgesteins abgeschätzt werden (vgl. Kap. 3.2.4). Insbesondere die im Hinblick auf Verklebungen besonders aussagekräftige Plastizitätszahl kann nicht normgerecht ermittelt werden. Untersuchungsverfahren zur Bewertung der Verklebungsneigung von Fels, sollten neben der Bestimmung der Zerfallsneigung auch systematische Beurteilungen der Zerfallsprodukte erlauben.

5.2. Aussagekraft der Zerfallsversuche im Hinblick auf Schildvortriebe

Nickmann [87] beschreibt eine Vielzahl von Verfahren zur Ermittlung der Veränderlichkeit bzw. der Zerfallsneigung von Festgesteinen, wobei Aussagen zur Verwitterungsempfindlichkeit von an der Geländeoberfläche freiliegenden Gesteinen im Vordergrund stehen (z.B. Böschungsstabilität). Der Großteil dieser Versuche wird in der Praxis selten durchgeführt und ist nicht zur Prognose im Hinblick auf Schildvortriebe geeignet. In der Praxis wird die Zerfallsbeständigkeit in der Regel mittels Siebtrommelversuch bzw. Slake-Durability-Test ermittelt (vgl. Kap. 3.2.4.3). Im deutschsprachigen Raum wird häufig auch der Wasserlagerungsversuch durchgeführt (vgl. Kap. 3.2.4.3). Im Folgenden wird daher sowohl näher auf den Wasserlagerungs- als auch auf den Siebtrommelversuch eingegangen. Hinsichtlich sonstiger Versuche zur Bestimmung der Veränderlichkeit wird auf die Zusammenstellung von Nickmann [87] verwiesen.

5.2.1. Wasserlagerungsversuch

Die Veränderlichkeit von Festgesteinen wird mittels Wasserlagerungsversuch nach DIN 4022-1 bzw. der diese ersetzenden DIN EN ISO 14689-1 bestimmt [26, 29].

5.2.1.1. Verfahren

Nach DIN 4022-1 wird die zuvor nicht getrocknete Probe nach 24stündiger Lagerung in klarem Wasser visuell beurteilt und entsprechend ihres Zerfalls in vier Veränderlichkeitsklassen eingestuft [26]. In der DIN EN ISO 14689-1 [29] ist der Versuchsablauf nicht mehr vollständig aufgeführt, wobei Nickmann auf ein vergleichbares Verfahren schließt [87]. Außerdem wird die Veränderlichkeit stärker unterteilt klassifiziert. Die Klassifikationen beider Normen werden von Nickmann [87] gegenübergestellt (Tab. 5.2)

DIN 4022 T1		DIN EN ISO 14689-1		
Klassifikation	Befund	Beschreibung	Bezeichnung	Grad
nicht veränderlich	keine Veränderungen an der Probe festzustellen	keine Veränderungen	nicht veränderlich	1
mäßig veränderlich	Oberfläche der Probe aufgeweicht oder Teile bröckeln ab	Bildung von einigen Rissen oder Bröckeln von Teilen der Probenoberfläche	veränderlich	2
veränderlich	Probe zerfallen, aber Einzelbestandteile noch fest	Bildung von vielen Rissen, Gestein zerfällt in kleine Stücke oder starkes Bröckeln der Probenoberfläche		3
stark veränderlich	Probe ganz zerfallen und in Brei übergegangen	Probe ist zerfallen oder Bröckeln fast der gesamten Probenoberfläche	stark	4
		Probe ist vollständig zerfallen oder in Brei übergegangen	stark veränderlich	5

Tabelle 5.2: Gegenüberstellung der Veränderlichkeitsklassen zwischen DIN 4022-1 und DIN EN ISO 14689-1 nach Nickmann [87]

Entsprechend der Normung weist die Veränderlichkeitsklasse „*nicht veränderlich*“ das Gestein als dauerhaft festes Festgestein aus. Insbesondere die Klassen „*nicht veränderlich*“ und „*mäßig veränderlich*“ nach DIN 4022-1 [26] bzw. die Grade 1 und 2 nach DIN EN ISO 14689-1 [29] lassen aufgrund der Beschreibung des Gesteinsverhaltens nicht auf nennenswerte Probleme hinsichtlich von Verklebungen oder der Freisetzung von Feinkorn schließen. Im Gegensatz dazu ist bei der Veränderlichkeitsklasse „*stark veränderlich*“ ein entsprechender Zerfall des Festgesteins in bodenartige Bestandteile zu erwarten. In Tabelle 5 der DIN 4022-1 [26] werden den „*wichtigsten Gesteinsarten*“ unter anderem ihre typischen Veränderlichkeitsklassen zugeordnet (Tab. 5.3). Dort sind auch die feinkörnigen Sedimentgesteine als „*nicht bis mäßig veränderlich*“ eingestuft.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Benennung	Kurzzeichen nach DIN 4023	Beschreibungsmerkmale						Veränderlichkeit in Wasser
		Körnigkeit	Raumausfüllung	Festigkeit Kornbindung	Härte	Salzsäureversuch		
1 Konglomerat Brekzie	Gst	vollkörnig bis teilkörnig	meist porös	mäßig bis gut	keine Angabe	0 bis ++	nicht bis mäßig veränderlich	
2 Sandstein	Sst	vollkörnig	dicht bis porös	meist gut	3 bis 6	0	nicht veränderlich	
3 Schluffstein	Ust	nichtkörnig	dicht	gut	3 bis 5	0	meist nicht veränderlich	
4 Tonstein	Tst	nichtkörnig	dicht	gut	3 bis 5	0	nicht bis mäßig veränderlich	
5 Mergelstein	Mst	nichtkörnig	dicht	gut	3 bis 4	+	mäßig bis nicht veränderlich	
6 Kalkstein	Kst	nichtkörnig oder vollkörnig	dicht	gut	4	++	nicht veränderlich	
7 Dolomitstein	Dst	nichtkörnig oder vollkörnig	dicht bis kavernös	gut	4	0	nicht veränderlich	

Tabelle 5.3: Ausschnitt der Tabelle 5 zur Benennung und Beschreibung wichtigster Gesteinsarten nach DIN 4022-1 [26] (modifiziert: feinkörnige Gesteine und deren Veränderlichkeit farblich umrandet)

Dabei schreibt die DIN 4022-1 vor, die Eigenschaften der zu klassifizierenden Gesteine mit denen in Tabelle 5 zu vergleichen und Abweichungen zu dem aufgeführten Regelfall zu vermerken („*Stimmen Benennung und die zugehörigen Beschreibungsmerkmale nicht überein, ist dies gesondert zu vermerken*“) [26]. Im Umkehrschluss ist daher davon auszugehen, dass

im Rahmen dieser Norm klassifizierte Gesteine – ohne Angabe der Veränderlichkeit – dem Fall der Tabelle 5 entsprechen und somit „*nicht bis mäßig veränderlich*“ sind. Sie wären demnach im Hinblick auf Verklebungen oder einen erhöhten Feinkornanfall selbst unter Wassereinfluss eher unkritisch zu werten.

5.2.1.2. Aussagekraft

Beim Wasserlagerungsversuch ist nach Nickmann [87] insbesondere die Subjektivität des optischen und händischen Befunds und damit auch der daraus folgenden Einstufung problematisch. Außerdem wird die witterungsbedingte Wechselbeanspruchung von Austrocknen und Wiederbefeuchten an der Geländeoberfläche nicht berücksichtigt. Dementsprechend hat sie einen modifizierten Wasserlagerungsversuch entwickelt. Dabei wird eine Siebung der Zerfallsprodukte durchgeführt. Zusätzlich wird die prozentuale Masse des größten nicht zerfallenen Gesteinsstücks als Indexwert der Veränderlichkeit angegeben. Um die Witterungseinflüsse besser zu berücksichtigen wird anschließend an den Zerfallsprodukten ein zweifacher Trocknungs-Befeuchtungswechsel durchgeführt, wobei nach jeder Wässerung die Kornverteilung bestimmt wird. Der so modifizierte Versuch erlaubt eine bessere Klassifikation veränderlich fester Gesteine im Hinblick auf zahlreiche ingenieurgeologische Fragestellungen.

Obwohl der Wasserlagerungsversuch die Einwirkung von Wasser berücksichtigt, bildet er die für Schildvortriebe typische mechanische Beanspruchung des Gesteins nicht ab [62; 65]. Da Vortrieb und Förderungsprozesse nicht durch Verwitterungsvorgänge beeinflusst werden, ist die Modifikation von Nickmann [87] mit Trocknungs-Befeuchtungswechseln im Hinblick auf Schildvortriebe nicht relevant. Der Wasserlagerungsversuch ist sowohl in den Versionen nach DIN 4022-1 [26] bzw. DIN EN ISO 14689-1 [29] als auch in der von Nickmann [87] modifizierten Form nur wenig zur Bewertung der Verklebungsneigung bzw. des zu erwartenden Feinkornanfalls geeignet. Untersuchungen im Rahmen einer Masterarbeit bestätigen die geringe Aussagekraft des Wasserlagerungsversuchs im Hinblick auf Schildvortriebe [122]. Dabei wurde die Veränderlichkeit an neun Ortsbrustproben eines Hydroschildvortriebs ermittelt, wobei diese überwiegend als „*nicht bis mäßig veränderlich*“ eingestuft wurden (lediglich eine Probe „*mäßig veränderlich bis veränderlich*“). Trotz dieser eigentlich unkritischen Klassifizierung war der Vortrieb durch massive Verklebungen beeinflusst.

Der Wasserlagerungsversuch deckt Klassifizierungen bindiger Böden als Fels (vgl. Kap. 5.1.1) nicht zwangsläufig auf. Beispielsweise weist die Untersuchung von Weiz mittels Wasserlagerungsversuch einen Ton als „*mäßig veränderliches*“ Festgestein aus [122], obwohl dieser aufgrund seiner Atterberggrenzen gemäß dem Verklebungsdiagramm in Abbildung 5.1 ein mittleres bis hohes Verklebungspotenzial hat.

5.2.2. Siebtrommelversuch

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Zerfallsneigung von Fels, ist der Siebtrommelversuch nach Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises Fels der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) [23] bzw. der Slake-Durability-Test nach American Society for Testing and Materials (ASTM) [4] oder nach International Society for Rock Mechanics (ISRM) [69].

5.2.2.1. Verfahren

Beim Siebtrommelversuch wird die Zerfallsbeständigkeit als Indexwert bestimmt, wobei diese als „Resistenz eines Gesteins gegenüber den Faktoren

- *mechanischer Abrieb*
- *wechselnde Wassergehalte und*
- *Temperaturänderung“*

definiert ist [23]. Der Versuch entspricht weitestgehend dem Slake-Durability-Test [4, 69]. Beim Siebtrommelversuch wird die Gesteinsprobe in einer mittels Motor betriebenen Siebtrommel in einem wassergefüllten Trog rotiert, wobei heutige Apparaturen in der Regel mit zwei gleichzeitig betriebsfähigen Siebtrommeln ausgestattet sind (Abb. 5.2). Der Massenanteil des in der Siebtrommel mit einer Maschenweite von 2 mm verbliebenen Materials bildet den Zerfallsbeständigkeitsindex bzw. den Slake-Durability-Index. Ein Indexwert von 100% bedeutet dabei absolute Beständigkeit, während ein solcher von 0% völligen Zerfall ausweist.



Abbildung 5.2: Apparatur zum Siebtrommelversuch nach Durchführung eines Versuchs mit deutlicher Verfärbung des Wassers innerhalb der Tröge infolge des Zerfalls (Foto aus Masterarbeit von Weiz [122])

Verbale Klassifikationen der Zerfallsbeständigkeit unterschiedlicher Autoren bzw. Regelwerke auf Basis des Indexwertes wurden von Nickmann [87] gegenübergestellt (Tab. 5.4).

Bezeichnung der Dauerhaftigkeit FRANKLIN & CHANDRA, 1972	Slake durability Index I_d FRANKLIN & CHANDRA, 1972	Slake durability Index I_{d2} GAMBLE 1971, DGGT 2002	Zerfallsbeständigkeit DGGT
extremely high	95-100	–	–
very high	90-95	98-100	zerfallsresistent
high	75-90	95-98	sehr hoch
medium high	–	85-95	hoch
medium	50-75	60-85	mittel
low	25-50	30-60	niedrig
very low	0-25	0-30	sehr niedrig

Tabelle 5.4: Gegenüberstellung der Zerfallsbeständigkeit auf Basis des Siebtrommelindex unterschiedlicher Autoren [87]

In der ursprünglichen Version von Franklin & Chandra [48] wird eine Klassifikation anhand des Slake-Durability Index I_d nach dem ersten Rotationsdurchgang vorgeschlagen. Die deutsche Empfehlung der DGGT legt für sehr resistente Gesteine bis zu 6 Durchgänge oder einen Massenverlust >70% nahe [23]. Um Temperatureinflüsse im Rahmen der Verwitterung zu simulieren, wird die Probe vor dem Versuch und nach jedem Zyklus getrocknet. Neben der Anzahl der Zyklen wurden laut Nickmann [87] in der Vergangenheit Änderungen des Versuchsablaufs in Bezug auf folgende Details untersucht:

- Länge der Zyklen
- Anzahl der Umdrehungen
- Aufbereitung der Proben
- Siebungen vor und nach dem Versuch
- Bestimmung der Atterberggrenzen am Siebdurchgang
- Unterschiedlich lange Beanspruchung einzelner Stücke

Die Änderungsvorschläge haben sich nicht durchgesetzt, so dass im Hinblick auf die entsprechende Literaturrecherche von Nickmann [87] verwiesen wird. Auf die Kombinationen des Versuchsablaufs mit bodenmechanischen Versuchen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit gesondert eingegangen. In der Praxis hat sich vor allem der Siebtrommelindex I_{d2} nach dem zweiten Zyklus, der inzwischen international vergleichbar ist, durchgesetzt.

5.2.2.2. Aussagekraft

Während beim Wasserlagerungsversuch lediglich der Einfluss des Wassers hinsichtlich der Zerfallsneigung berücksichtigt wird, simuliert der Siebtrommelversuch mit der Rotation der Siebtrommel auch die mechanische Beeinflussung beim Vortrieb. Dementsprechend ist der Siebtrommelversuch laut Hollmann & Thewes eher zur Bewertung der Zerfallsneigung im Hinblick auf Schildvortriebe geeignet [62, 65]. Dabei führt die mechanische Beanspruchung beim Siebtrommelversuch teilweise zu einer ungünstigeren Bewertung als infolge des Wasserlagerungsversuchs, was durch die Gegenüberstellung der Untersuchungen von Weiz [122] bestätigt wird (Tab. 5.5).

TVM	TM	Wasserlagerungsversuch		Siebtrommelversuch	
		DIN 4022-1	DIN EN ISO 14689-1	I _{d2}	Zerfallsbeständigkeit DGGT
Süd	81,36	mäßig veränderlich-veränderlich	3	42%	niedrig
Süd	136,75	nicht veränderlich	1	11%	sehr niedrig
Süd	173,24	nicht veränderlich	1	56%	niedrig
Süd	183,8	mäßig veränderlich	2	11%	sehr niedrig
Nord	378,29	mäßig veränderlich	2	71%	mittel
Nord	458,97	mäßig veränderlich	2	97%	sehr hoch
Nord	670,55	mäßig veränderlich	2	95%	sehr hoch
Nord	789,55	mäßig veränderlich	2	80%	mittel
Süd	1418,22	mäßig veränderlich	2	87%	hoch

Tabelle 5.5: Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse des Siebtrommel- und Wasserlagerungsversuchs von Weiz [122]

Proben, die auf Basis des Wasserlagerungsversuchs mit der Einstufung „mäßig veränderlich“ zunächst als vergleichbar erscheinen, sind infolge des Siebtrommelversuchs einerseits mit einer sehr hohen (z.B. Probe: TVM Süd, TM 458,97) und andererseits mit einer sehr niedrigen Zerfallsbeständigkeit (z.B. Probe: TVM Süd, TM 183,8) sehr unterschiedlich zu bewerten. Selbst als „nicht veränderlich“ klassifizierten Gesteinen muss aufgrund des Siebtrommelindex eine sehr niedrige Zerfallsbeständigkeit zugewiesen werden (z.B. Probe: TVM Süd, TM 136,75).

Allerdings wurde der Slake-Durability-Test ursprünglich auch zur Bewertung anderer ingenieurgeologischer Fragestellungen entwickelt. Demnach soll der Indexwert Aussagen zur Verwitterungsanfälligkeit eines Gesteins erlauben. Fragestellungen hinsichtlich der Eignung eines der Witterung ausgesetzten Gesteins bei einer Böschung oder als Planum eines Bauwerks stehen dabei im Vordergrund. Auch wenn mit zunehmendem Siebtrommelindex eher eine Chipbildung zu erwarten ist [62], reicht der Siebtrommelversuch im Hinblick auf die Prognose von Verklebungen oder den Anfall von Feinkorn nicht aus. Es wird lediglich der Anteil des in der Trommel verbliebenen Rückstands >2 mm (Fraktion: Kies und Steine) bzw. indirekt des zerfallenen Durchgangs <2 mm (Fraktion: Ton, Schluff und Sand) ermittelt. Dabei muss selbst ein Indexwert von 0% nicht zwangsläufig kritisch in Bezug auf Verklebungen oder Feinkornfreisetzungen sein. Es ist zwar ein Zerfall mit entsprechend hoher Feinkornfraktion (Abb. 5.3, rote Kurve), aber auch in relativ unkritische Gesteinsbruchstücke der Sandfraktion (Abb. 5.3, grüne Kurve) denkbar. Die Zerfallsprodukte lägen dann sogar im typischen Einsatzbereich eines Hydroschildes nach Maidl et al. [83].

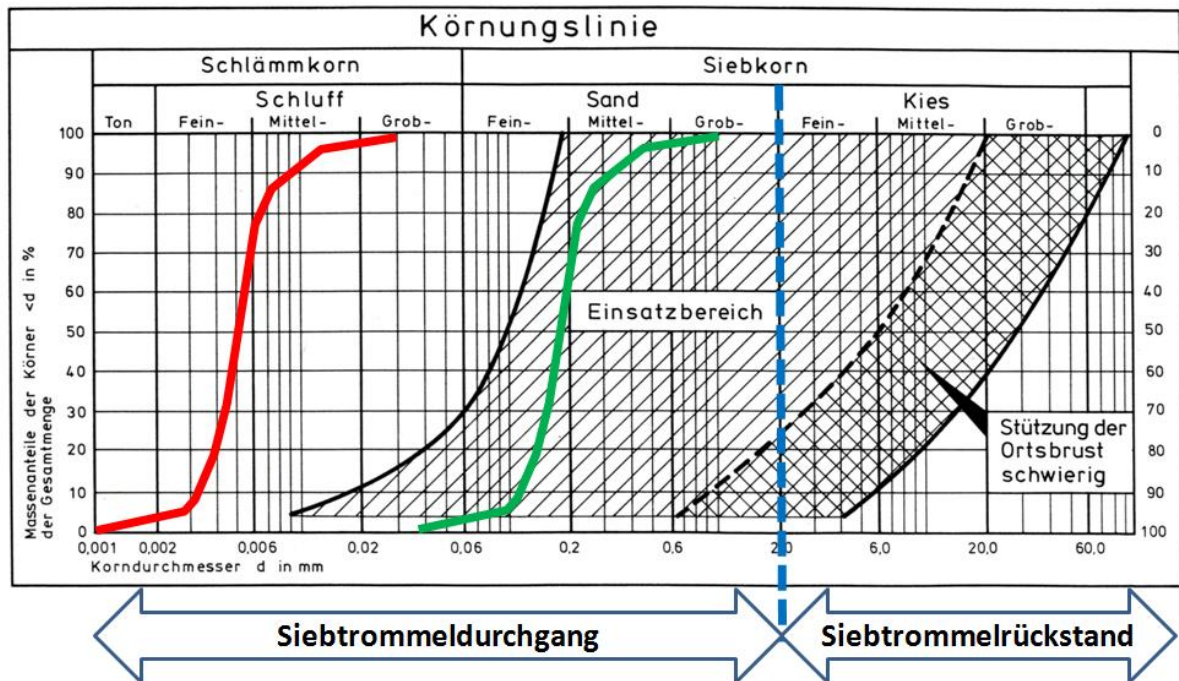


Abbildung 5.3: Einsatzbereich von Hydroschilden in Abhängigkeit der Kornverteilung nach Maidl et al. [83] (modifiziert: mit Angabe der Siebtrommelfraktionen und theoretischen Körnungskurven des Siebdurchgangs)

Im Gegensatz dazu weist ein hoher Siebtrommelindex auch nicht unbedingt auf ein unkritisches Verhalten hin, da neben Gesteinsbruchstücken (Abb. 5.4-a) auch Fetzen oder Kugeln eines feinkörnigen Lockergesteins (Abb. 5.4-b) in der Siebtrommel erhalten bleiben können [62].

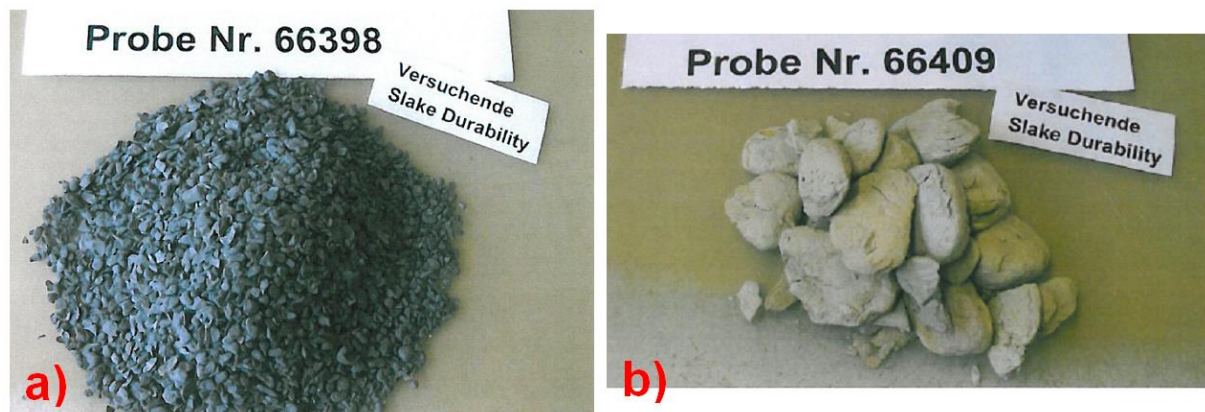


Abbildung 5.4: Getrocknete Zerfallsrückstände des Siebtrommelversuchs [62] a) splittrige Gesteinsfragmente b) Tonfetzen (vor Trocknung mit klebriger Konsistenz)

Die Bildung sogenannter „mudballs“ wird bereits von Deere & Gamble als mögliche Fehlerquelle des Slake-Durability-Tests aufgezeigt [21]. Hierbei dürfte es sich um vergleichbare Reste von feinkörnigen Lockergesteinen in der Siebtrommel handeln, die allein auf Basis des Indexwertes als nicht zerfallenes Festgestein und damit zu positiv gewertet würden. Im Hinblick auf die Verklebungsneigung eines Schildvortriebs ist diese Fehlinterpretation besonders kritisch, da bindige Zerfallsprodukte in der Siebtrommel letztlich potenzielles Verklebungsma-

terial repräsentieren. Ein hoher Siebtrommelindex kann somit theoretisch sowohl auf wenig Zerfall bzw. die Bildung von Chips als auch eine hohe Verklebungsgefahr hindeuten.

Dementsprechend deckt auch der Siebtrommelversuch nicht zwangsläufig auf, dass bindige Böden als Fels klassifiziert werden. Beispielsweise weist ein Slake-Durability-Index von 87% einen von Weiz [122] untersuchten Ton als Festgestein mit hoher Beständigkeit aus, obwohl dieser aufgrund seiner Atterberggrenzen nach Abbildung 5.1 ein mittleres bis hohes Verklebungspotenzial hat. Generell ist mit zunehmender Plastizität ein abnehmender Zerfall eines bindigen Bodens in der Siebtrommel zu erwarten (vgl. Abb. 4.12), was Untersuchungen mit einem modifizierten Siebtrommelversuch von Baumgärtel et al. [7] bestätigen (vgl. Kap. 3.2.3.3). Je höher die Verklebungsneigung (zunehmende Plastizität) eines Lockergesteins, desto höher wäre der Zerfallsbeständigkeitsindex und somit eine entsprechend unkritische Einstufung als vermeintlich beständiges Festgestein. Das zeigt sich auch darin, dass die „mudballs“ von Deere & Gamble [21] die höchsten Plastizitätszahlen aller untersuchten Proben aufwiesen ($I_p = 142$ und 192%).

5.2.2.3. Kombination mit bodenmechanischen Untersuchungen

Von Deere & Gamble [21] wird vorgeschlagen, am Material des Siebdurchgangs die Atterberggrenzen zu bestimmen. Ein Bewertungsdiagramm, das den Slake-Durability-Index mit der Plastizitätszahl kombiniert, wurde von Franklin & Chandra [48] aufgezeigt und in Empfehlungen der ISRM [69] übernommen (Abb. 5.5).

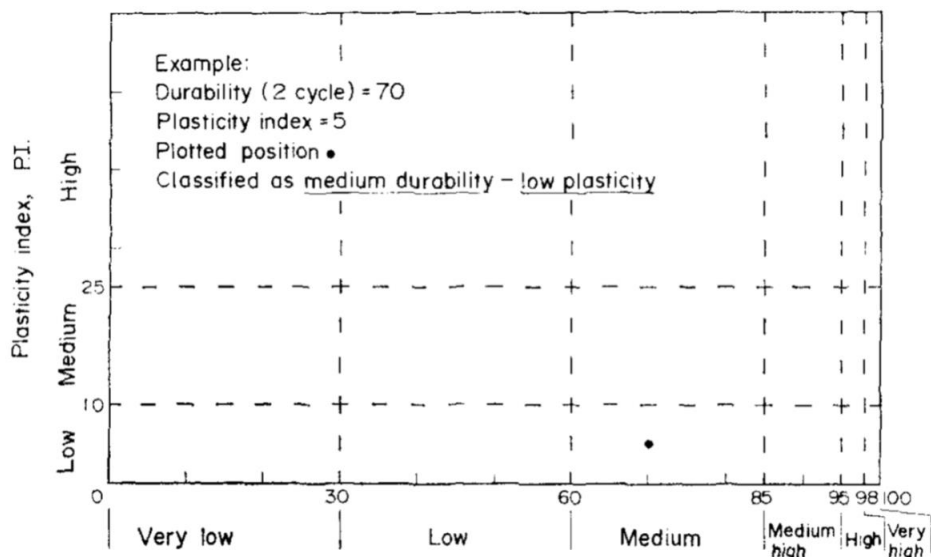


Abbildung 5.5: Bewertungsdiagramm mit Kombination aus Slake-Durability-Index und Plastizitätszahl des Siebdurchgangs nach Franklin & Chandra [48]

Bei zu hoher Zerfallsbeständigkeit sollen die Atterberggrenzen an künstlich zerkleinertem Material des Siebtrommelrückstands ermittelt werden, sofern zu wenig Material des Siebtrommeldurchgangs vorhanden ist. Ein solches Vorgehen entspricht allerdings nicht der Normung zur Bestimmung der Atterberggrenzen (vgl. auch Kap. 3.3.1). Anhand der bei Deere & Chandra [21] aufgeführten Laborergebnisse ist nicht erkennbar, warum teils der Siebtrommelrückstand und teils der Siebtrommeldurchgang untersucht wurde. Eine Abhängigkeit

vom Slake-Durability-Index ist nicht erkennbar. Nach dem Verfahren von Deere & Chandra [21] kann zumindest ein Teil der Zerfallsprodukte analog zu einem Lockergestein im Hinblick auf Verklebungen oder den Feinkornanfall bewertet werden. Die Bewertung ist allerdings nur für den Siebtrommeldurchgang sinnvoll, wobei der entsprechende Anteil aus dem Slake-Durability-Index ableitbar ist. Je geringer der Siebtrommelindex, desto größer ist die Relevanz dieser Beurteilung. Die Kombination von Fließ- und Ausrollgrenze des Siebdurchgangs mit dem natürlichen Wassergehalt des Gesteins ermöglicht unter anderem auch im allgemeinen Bewertungsdiagramm nach Kapitel 4, was an Beispielwerten von Deere & Chandra [21] aufgezeigt werden kann (Abb. 5.6).

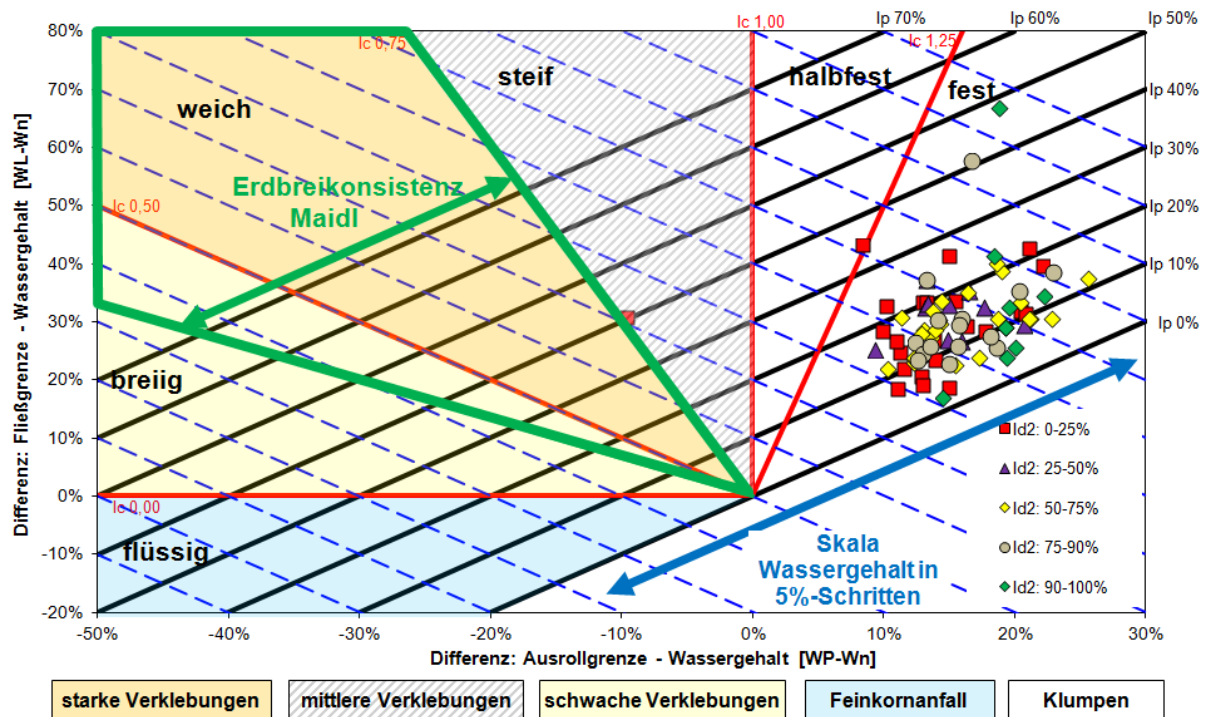


Abbildung 5.6: Allgemeines Bewertungsdiagramm mit entsprechend des Slake-Durability-Indexes sortierten Wertepaaren des Siebtrommeldurchgangs (Fließ- und Ausrollgrenze: Siebtrommeldurchgang; Wassergehalt: Ausgangsgestein) nach Deere & Chandra [21]

Dabei gilt analog zum Lockergestein (vgl. Kap. 4.4):

- Hohe Plastizitätszahlen deuten auf Verklebungen infolge zerfallenden Materials hin.
- Geringe Plastizitätszahlen deuten darauf hin, dass die Zerfallsprodukte als dispergiertes Feinkorn anfallen.

Davon ausgehend, dass die Zerfallsprodukte des Siebtrommeldurchgangs im Augenblick des Zerfalls einen zum Ausgangsgestein vergleichbaren Wassergehalt aufweisen, kann die notwendige Wassergehaltsänderung zur Umwandlung in Verklebungsmaterial abgelesen werden. Es gilt daher:

- Je näher die Wertepaare am kritischen Konsistenzfeld der Verklebungen liegen, desto eher werden die Zerfallsprodukte des Siebtrommeldurchgangs in Verklebungsmaterial umgewandelt.

Das Diagramm macht außerdem deutlich, dass ein veränderlich festes Gestein ohne Wasser nicht kritisch werden kann (vgl. Kap. 5.1). Selbst wenn das Gestein auch ohne Wasser teilweise in die Fraktion des Siebtrommeldurchgangs zerfallen würde, wäre das Zerfallsprodukt zunächst nicht kritisch: Es wäre in diesem Fall eine entsprechende Wassergehaltserhöhung von mindestens 10% zur Umwandlung in Verklebungsmaterial notwendig (Abb. 5.6). Die vergleichbare Bewertung der zur Norm abweichend bestimmten Atterberggrenzen des Siebtrommelrückstands wird nicht als sinnvoll angesehen, weil die Gesteinsbruchstücke, ohne vorherige mechanische Zerkleinerung, möglicherweise nicht in plastisches Bodenmaterial zerfallen würden.

Richardson [96] empfiehlt Siebungen des Siebrückstands, um das Zerfallsverhalten besser zu beschreiben. Die Fraktion des Siebtrommeldurchgangs, die im Hinblick auf Verklebungen oder die Prognose des Feinkornanfalls relevanter wäre, wird nicht untersucht.

Durch die Kombination des Siebtrommelversuchs mit bodenmechanischen Untersuchungen der Zerfallsprodukte hat sich die Aussagekraft im Hinblick auf Schildvortriebe erhöht. In der Praxis hat sich bislang allerdings weder die Bestimmung der Atterberggrenzen noch der Kornverteilung an Teilen der Zerfallsprodukte durchgesetzt.

5.3. Modifizierter Siebtrommelversuch

Da Teile der Festgesteine während des Zerfalls in lockergesteinsartige Zerfallsprodukte umgewandelt werden, ist eine Beurteilung dieser Gesteinsteile analog zum Lockergestein zu empfehlen [62]. In Anlehnung an Deere & Gamble [21] und Richardson [96] sollen dabei die Atterberggrenzen und die Kornverteilung von den Zerfallsprodukten des Siebtrommelversuchs bestimmt werden, da sowohl der Feinkornanteil als auch die Plastizitätszahl bei Lockergesteinen gut zur Bewertung der Verklebungsneigung geeignet sind. Es wird daher in Abbildung 5.7 ein Untersuchungsschema zur bodenmechanischen Beurteilung der Zerfallsprodukte vorgeschlagen [62].

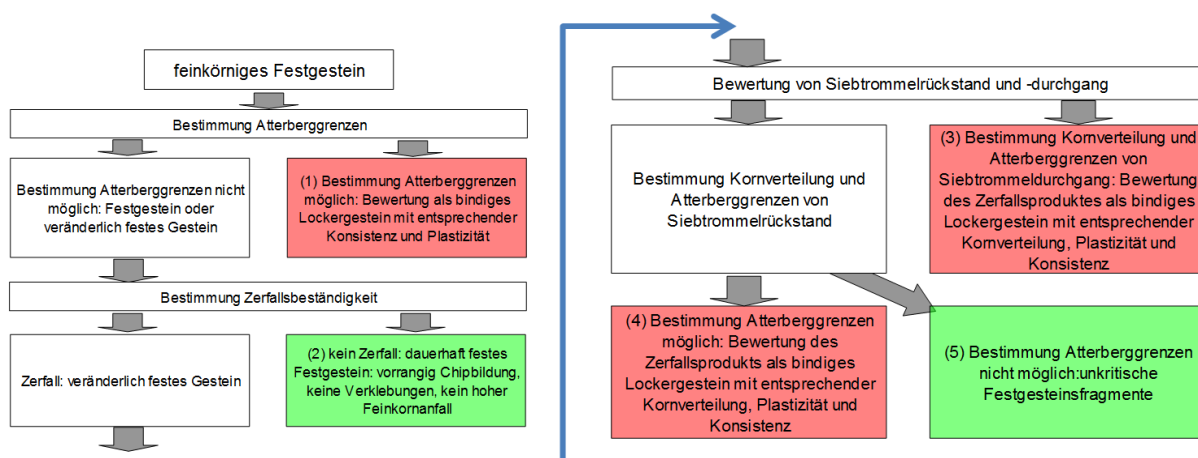


Abbildung 5.7: Untersuchungsschema zur Beurteilung der Verklebungsneigung und des Feinkornanfalls bei feinkörnigen Festgesteinen [61, modifiziert] (grün: unkritisch, rot kritisch)

Die Bewertung erfolgt je nach Versuchsergebnis für das ganze Gestein oder die jeweilige Teilfraktion der Zerfallsprodukte entweder als Lockergestein (Feld 1, 3 und 4) oder als Festgestein (Feld 2 und 5).

5.3.1. Versuchskonzept

Das Versuchskonzept wurde unter Anleitung des Autors im Rahmen einer Masterarbeit umgesetzt [122]. Um die Aussagekraft bereits etablierter Laborkennwerte zu erhalten, sollten alle Einzelversuche des Untersuchungsschemas in unmodifizierter Form entsprechend ihrer Normen und Empfehlungen durchgeführt werden. Grundlage ist dabei zunächst der Siebtrommelversuch, wobei, entsprechend der allgemeinen Vorgehensweise, der Zerfallsbeständigkeitsindex I_{d2} nach dem zweiten Zyklus ermittelt wird. Anschließend werden dessen Zerfallsprodukte weiter untersucht. Um sowohl die Atterberggrenzen als auch die Kornverteilung ermitteln zu können, muss der Versuch an zwei Teilproben doppelt durchgeführt werden. Abweichend zu dem von Richardson [96] vorgeschlagenen Verfahren wird dann nicht nur der Siebtrommelrückstand gesiebt, sondern an der ganzen zerfallenen Probe (Siebtrommeldurchgang und Siebtrommelrückstand) eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse nach DIN 18123 [32] durchgeführt. In diesem Zusammenhang ist vor allem die zusätzliche Berücksichtigung des Siebtrommeldurchgangs entscheidend, da insbesondere die Fein- und Tonanteile im Hinblick auf Verklebungen von Interesse sind. An der anderen Probe werden die Atterberggrenzen nach DIN 18122-1 [30] bestimmt. Während Deere & Gamble [21] diese, entsprechend der Norm, nur am Siebtrommeldurchgang ermittelt haben, werden sie nach diesem Verfahren auch am Siebtrommelrückstand bestimmt (sofern das möglich ist).

Da sowohl DIN 18123 [32] als auch DIN 18122-1 [30] Trocknungen der Proben ausdrücklich ausschließen, aber die Proben vor dem Siebtrommelversuch bzw. zwischen den einzelnen Zyklen nach Empfehlung der DGGT [23] bzw. nach ASTM [4] getrocknet werden müssen, ist eine exakte Einhaltung aller Normen und Empfehlungen im Rahmen dieses Untersuchungsschemas nicht möglich. Dabei wäre getrocknetes Material zur Bestimmung der Atterberggrenzen besonders kritisch zu bewerten, da sich die Eigenschaften der Tonminerale und damit die Fließ- und Ausrollgrenze ändern können. Nickmann [87] verweist dementsprechend auf die begrenzte Aussagekraft der Plastizitätszahlen aufgrund der Trocknung nach dem Verfahren von Deere & Gamble [21]. Auch die Schlämmanalyse kann durch die Trocknung beeinflusst werden, wobei nach Prinz & Strauß [94] Teilchenagglomerationen eine in Richtung Grobkorn verschobene Körnungslinie bzw. einen geringeren Tongehalt verursachen können. Kontrollversuche von Weiz [122] an gleichen Proben im bergfeuchten und getrockneten Zustand weisen Abweichungen der Fließgrenze von 5% und 14 bis 26% geringere Tongehalte auf. Da witterungsbedingte Temperaturwechsel beim Schildvortrieb im Normalfall nicht auftreten, ist die entsprechende Simulation durch Trocknungen beim Siebtrommelversuch nicht notwendig. Nickmann [87] stuft die Trocknung gar als ein Hauptproblem des Siebtrommelversuchs ein.

Dementsprechend wird der Siebtrommelversuch im Rahmen des für Schildvortriebe vorgeschlagenen Untersuchungsschemas abweichend zu den Empfehlungen der DGGT [23] bzw.

nach ASTM [4] an bergfeuchten Proben durchgeführt. Zusätzlich entfallen die Trocknungen zwischen den einzelnen Zyklen. Ohne Trocknungen können beide Rotationszyklen direkt hintereinander durchgeführt werden. Die Versuchsdauer gegenüber dem genormten Siebtrommelversuch verkürzt sich von mehreren Tagen auf etwa eine Stunde [65, 122]. In wie weit die fehlende Trocknung Einfluss auf den Zerfallsbeständigkeitsindex hat, wurde nicht durch Kontrollversuche überprüft. Im weiteren Verlauf des Versuchskonzepts (Abb. 5.8) erfolgen die bodenmechanischen Untersuchungen der Zerfallsprodukte exakt nach den entsprechenden Normen.

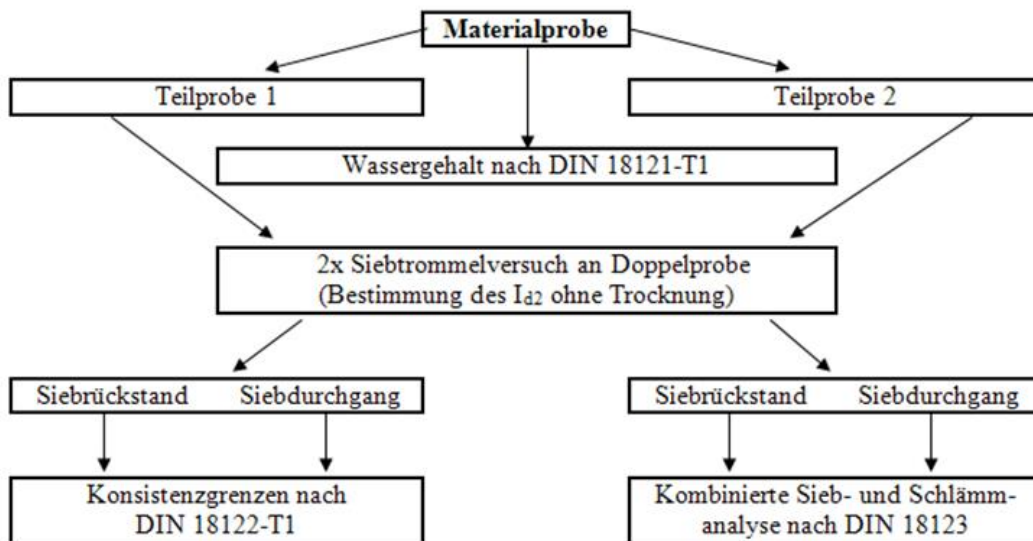


Abbildung 5.8: Versuchskonzept des modifizierten Siebtrommelversuchs [65, 122]

5.3.2. Versuchsergebnisse

Die untersuchten Proben der stratigraphischen Einheiten Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper wurden an der Ortsbrust eines Hydroschildvortriebs mit unterschiedlich starken Verklebungen entnommen (vgl. Kap. 6.2.2: Projekt B). Insgesamt wurden über 100 feinkörnige Gesteine entnommen. Am Großteil der aus petrologischer bzw. regionalgeologischer Sicht zunächst als Festgestein eingestuften Gesteine konnten die Atterberggrenzen nach DIN 18122-1 [30] bestimmt werden, so dass diese aus bautechnischer Sicht als Lockergesteine klassifiziert werden können. Den steifen bis festen Tonen kann nach ein mittleres bis hohes bzw. ein hohes Verklebungspotenzial zugewiesen werden (Abb. 5.1: rote Wertepaare). Dementsprechend konnten bisher nur 8 veränderlich feste Festgesteinsproben untersucht werden (Tab. 5.6). Um zu überprüfen, ob das neue Untersuchungsverfahren zu einer entsprechend kritischen Bewertung von fälschlich als Festgestein klassifizierten bindigen Böden führt, werden zusätzlich zwei mittelplastische Tone als Kontrollproben verwendet. Diese werden im Folgenden zunächst analog zu den Festgesteinsproben bewertet, sind aber mit einem Stern-Index markiert (Tab. 5.6). Die in der Tabelle dargestellten Wassergehalte wurden zeitnah auf der Baustelle bestimmt.

TVM	Tunnelmeter	Probe	Wassergehalt	Gesteinsansprache (DIN 4022-1)	Stratigraphische Einheit
Süd	81,36	7	13,0%	Tonmergelstein	oberer Muschelkalk
Süd	136,75	3	12,8%	Tonmergelstein	oberer Muschelkalk
Süd	173,24	4	8,9%	Tonmergelstein	oberer Muschelkalk
Süd	183,8	5	11,1%	Tonstein	unterer Keuper
Süd	246,72	10*	25,5%	Ton, schluffig, feinsandig	unterer Keuper
Nord	378,29	8	13,5%	Tonstein/Schluffstein	unterer Buntsandstein
Nord	458,97	1	9,6%	Schluffstein	unterer Buntsandstein
Nord	670,55	2	6,0%	Schluffstein	unterer Buntsandstein
Nord	789,55	6	15,4%	Tonstein	unterer Buntsandstein
Süd	1418,22	9*	11,0%	Ton, feinsandig	mittlerer Buntsandstein

Tabelle 5.6: Übersichtstabelle der mittels modifiziertem Siebtrommelversuch untersuchten Proben

Aufgrund der erschwerten Probennahme (vgl. Kap. 6.1) konnte die in der Empfehlung der DGGT [23] für den Siebtrommelversuch geforderte Probemenge von etwa 500 g nicht immer eingehalten werden, zumal der Versuch doppelt ausgeführt wurde.

5.3.2.1. Zerfallsbeständigkeitsindex

Auf Grundlage des Zerfallsbeständigkeitsindex kann den Gesteinen eine große Bandbreite der Zerfallsbeständigkeit zugewiesen werden (Abb. 5.9). Dabei wären Proben mit hohem Zerfallsbeständigkeitsindex im Rahmen der klassischen Auswertung des Siebtrommelversuchs unkritisch (Abb. 5.9: grün), da der größte Teil des Gesteins als Festgestein erhalten bleibt und somit als Chips abgebaut werden dürfte. Im Gegensatz dazu wären Proben mit niedrigem Zerfallsbeständigkeitsindex kritisch (Abb. 5.9: rot), da der größte Teil des Festgestein zerfällt. Hier würde man eher Verklebungen oder den Anfall von Feinkorn erwarten. Die Aussagekraft für die mittleren Zerfallsbeständigkeitsindizes ist dagegen gering (Abb. 5.9: gelb).

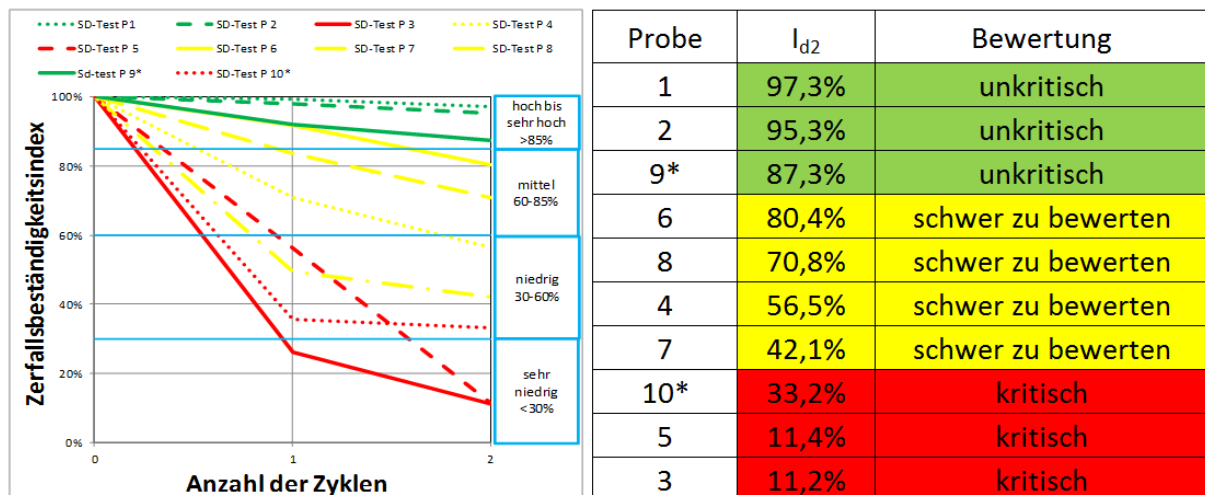


Abbildung 5.9: Ergebnisse des Siebtrommelversuchs von Weiz [122] mit Bewertung der Zerfallsbeständigkeit im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Spalte der Zerfallsbeständigkeit aus Abb. 5.9 mit der entsprechenden Farbgebung zur Bewertung bei weiteren Auswertungen als Vergleich

hinzugefügt. Somit wird erkennbar, inwiefern sich die Bewertung durch zusätzliche Untersuchungen ändert oder eindeutiger wird.

5.3.2.2. Atterberggrenzen

Im Hinblick auf die Atterberggrenzen des Siebtrommelrückstands ergeben sich drei Möglichkeiten (vgl. Hollmann et al. [65]):

- Bestimmung der Atterberggrenzen nach DIN 18122-1 [30] möglich: Siebrückstand = bindiger Boden
- Bestimmung der Atterberggrenzen nach DIN 18122-1 [30] nicht möglich: Siebrückstand = Festgestein
- Zu wenig Material zur Bestimmung der Atterberggrenzen: hoher Zerfall beim Siebtrommelversuch

Von sechs untersuchten Proben konnten die Atterberggrenzen nicht bestimmt werden, so dass der Rückstand als Festgestein zu klassifizieren ist (Tab. 5.7).

	Gestein	Siebrückstand	
Probe	I_{d2}	I_p	Bewertung
1	97,3%	nicht möglich	unkritisch
2	95,3%	nicht möglich	unkritisch
9*	87,3%	20,5%	kritisch
6	80,4%	nicht möglich	schwer zu bewerten
8	70,8%	nicht möglich	schwer zu bewerten
4	56,5%	nicht möglich	schwer zu bewerten
7	42,1%	nicht möglich	schwer zu bewerten
10*	33,2%	10,5%	kritisch
5	11,4%	15,7%	kritisch
3	11,2%	25,7%	kritisch

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Atterberggrenzen des Siebtrommelrückstands von Weiz [122] mit Bewertung im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben

Ein hoher Zerfallsbeständigkeitsindex führt dann aufgrund des hohen Anteils am Ausgangsgestein zu einer unkritischen Wertung (Tab. 5.6: grün). Bei mittlerem oder geringem Zerfallsbeständigkeitsindex ist das Gestein trotzdem schwer zu bewerten, da der Siebdurchgang auch einen relevanten Anteil ausmacht (Tab. 5.6: gelb). Die restlichen Proben können entsprechend ihrer Atterberggrenzen kritisch eingestuft werden, wobei ein hoher Zerfallsbeständigkeitsindex in diesen Fällen irreführend ist. Die allein auf Basis des Siebtrommelversuchs als unkritisch bewertete Lockergesteinsprobe (Probe 9*) würde jetzt entsprechend

kritisch gewertet. Demnach erhöht sich die Relevanz der Plastizitätszahl des Siebtrommelrückstands mit zunehmender Zerfallsbeständigkeit.

Bei der Bestimmung der Atterberggrenzen des Siebtrommeldurchgangs ist zu berücksichtigen, dass die Zerfallsprodukte in einer Suspension im Plexiglasbehälter vorliegen. Nach Weiz [122] kann das Wasser nach Absinken der Schwebstoffe am besten mit einem Schlauch abgesaugt werden. Im Hinblick auf die Atterberggrenzen des Siebtrommeldurchgangs ergeben sich nun ebenfalls drei Möglichkeiten (vgl. Hollmann et al. [65]):

- Bestimmung der Atterberggrenzen nach DIN 18122-1 [30] möglich: Siebdurchgang = bindiger Boden
- Bestimmung der Atterberggrenzen nach DIN 18122-1 [30] nicht möglich: Siebdurchgang = Festgesteinssplitter
- Zu wenig Material zur Bestimmung der Atterberggrenzen: geringer Zerfall beim Siebtrommelversuch

An allen untersuchten Proben konnten die Atterberggrenzen bestimmt werden (Tab. 5.8), so dass der Siebdurchgang als bindiger Boden klassifiziert werden kann. Lediglich eine Probe wies aufgrund der sehr hohen Zerfallsbeständigkeit zu wenig Material im Siebdurchgang auf. Die Proben sind dementsprechend kritisch zu werten (Tab. 5.8: rot), wobei die Relevanz der Plastizitätszahlen mit zunehmendem Zerfallsbeständigkeitsindex sinkt [65]. Aufgrund des dann geringeren Anteils des Siebtrommeldurchgangs sind diese Proben weniger eindeutig zu bewerten (Tab. 5.8: gelb).

Probe	Gestein	Siebdurchgang	Bewertung
	I_{d2}	I_p	
1	97,3%	zu wenig Material	schwer zu bewerten
2	95,3%	12,8%	schwer zu bewerten
9*	87,3%	20,8%	schwer zu bewerten
6	80,4%	10,0%	schwer zu bewerten
8	70,8%	9,7%	schwer zu bewerten
4	56,5%	9,8%	kritisch
7	42,1%	16,1%	kritisch
10*	33,2%	13,8%	kritisch
5	11,4%	15,1%	kritisch
3	11,2%	19,0%	kritisch

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Atterberggrenzen des Siebtrommeldurchgangs von Weiz [122] mit Bewertung im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben

5.3.2.3. Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse

Die Korngrößenanalyse wurde von Weiz [122] analog zu den Atterberggrenzen sowohl am Siebtrommelrückstand als auch am –durchgang ermittelt. In Abhängigkeit vom Siebtrommelindex kann dann für eine der beiden Fraktionen zu wenig Material zur normgerechten Analyse vorliegen. Außerdem kann es vorkommen, dass bei einem aus größeren Gesteinsbruchstücken bestehendem Trommelrückstand im Hinblick auf das Größtkorn nicht in ausreichender Menge Probenmaterial vorliegen. Es ist zu empfehlen, die beiden Fraktionen der Zerfallsprodukte in einem Versuch zu bestimmen [65]. Im Hinblick auf Verklebungen bzw. die Freisetzung von Feinkorn sind vor allem der Feinstkornanteil (Tonfraktion <0,002 mm) und der Feinkornanteil (Summe Schluff- und Tonfraktion <0,06 mm) an der Kornverteilungskurve interessant (vgl. Kap. 3.1.3). Möglicherweise kann im Rahmen des Untersuchungsverfahrens der Feinkornanteil größer als der Anteil des Siebtrommeldurchgangs sein [65]. Dafür kann an den gröberen Bruchstücken des Siebtrommelrückstands haftendes Feinkorn oder ein weiterer Zerfall im Rahmen der kombinierten Sieb-Schlämmanalyse verantwortlich sein.

Bei den untersuchten Proben wurde ein Feinkornanteil zwischen 2 und 99% am gesamten Zerfallsprodukt (Summe Siebtrommeldurchgang und –rückstand) ermittelt (Abb. 5.10). Um die Bewertung zu erleichtern, wurden zu Vergleich auch Kornverteilungen von Verklebungsproben (Abb. 5.10: schwarze Kurven) bestimmt.

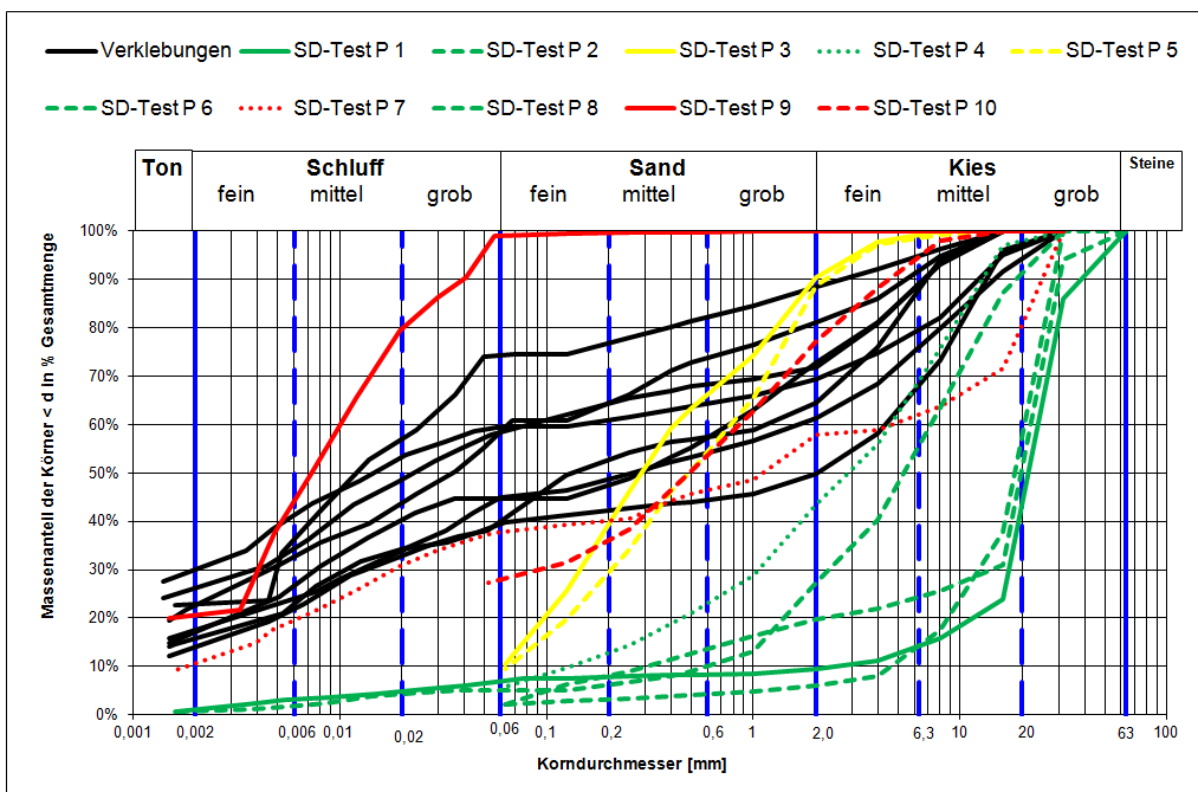


Abbildung 5.10: Kornverteilungen der Zerfallsprodukte des Siebtrommelversuchs und von Verklebungsproben von Weiz [122]

Ein Teil der Zerfallsprodukte hat eine zu den Verklebungsproben vergleichbare Kornverteilung mit relativ hohen Feinkorngehalten (Abb. 5.10: rote Körnungslinien) und ist dementsprechend kritisch zu bewerten (Tab. 5.9: rot). Zwei Proben liegen mit geringeren Feinkornanteilen

len nur bereichsweise im Korngrößenbereich der Verklebungen (Abb. 5.10: gelbe Körnungslinien) und sind nur schwer zu bewerten (Tab. 5.9: gelb). Im Gegensatz dazu sind die größeren Kornverteilungen mit niedrigem Feinkornanteil (Abb. 5.10: grüne Körnungslinien) unkritisch zu bewerten (Tab. 5.9: grün).

	Gestein	Zerfallsprodukte	
Probe	I_{d2}	Feinkornanteil	Bewertung
1	97,3%	7,0%	unkritisch
2	95,3%	2,0%	unkritisch
9	87,3%	98,9%	kritisch
6	80,4%	2,2%	unkritisch
8	70,8%	5,0%	unkritisch
4	56,5%	5,7%	unkritisch
7	42,1%	37,6%	kritisch
10	33,2%	27,3%	kritisch
5	11,4%	9,5%	schwer zu bewerten
3	11,2%	10,5%	schwer zu bewerten

Tabelle 5.9: Feinkornanteil der Zerfallsprodukte des Siebtrommelversuchs von Weiz [122] mit Bewertung im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben

Auch dieser Teilversuch führt zu einer entsprechend kritischen Einschätzung der allein auf Basis des Siebtrommelversuchs als unkritisch bewerteten Lockergesteinsprobe (Probe 9*). Im Gegensatz zur Wertung der Plastizitätszahl muss die Kornverteilungskurve der Zerfallsprodukte nicht parallel zum Zerfallsbeständigkeitsindex beurteilt werden.

5.3.3. Bewertungsmöglichkeiten

Die Ergebnisse der bodenmechanischen Laborversuche (Tab. 5.7, 5.8 und 5.9) erlauben gegenüber einer alleinigen Auswertung des Siebtrommelversuchs (Abb. 5.9) genauere und zum Teil auch differierende Beurteilungen. Trotzdem sind einzelne Proben dabei, die dennoch nicht eindeutig zu bewerten sind. In diesem Kapitel werden Möglichkeiten zur genaueren Auswertung der Untersuchungsergebnisse gegeben.

5.3.3.1. Vergleich der Einzelversuche

Es ist zu empfehlen, eine vergleichende Bewertung aller Versuchsergebnisse durchzuführen [65]. Dazu werden die einzelnen Versuchsergebnisse in einer Bewertungstabelle aufgeführt, wobei die entsprechende Farbgebung zur Bewertung der jeweiligen Versuche entsprechend den Tabellen 5.6 bis 5.8 beibehalten wird (Tab. 5.10). Insbesondere die Atterberggrenzen beider Zerfallsfraktionen müssen zusammen mit dem Zerfallsbeständigkeitsindex bewertet werden. Während bei Probe 5 sowohl Siebtrommelrückstand als auch Siebtrommeldurch-

gang eine Plastizitätszahl von 15,1% bzw. 15,7% aufweisen, stammt die Plastizitätszahl von 16,1% bei Probe 7 lediglich vom Siebtrommeldurchgang. Dementsprechend ist zu erwarten, dass Probe 5 trotz ähnlicher Plastizitätszahlen kritischer als Probe 7 sein wird.

Auf Basis der Kombination beider Versuche wird jeweils ein Anteil an bindigem Boden und an Festgestein an den Zerfallsprodukten wie folgt definiert:

- Anteil Festgestein: Anteil der Zerfallsprodukte, an denen die Atterberggrenzen nicht bestimmt werden können (entspricht dem Zerfallsbeständigkeitsindex, wenn Atterberggrenzen nur an Siebtrommeldurchgang bestimmt werden können)
- Anteil bindiger Boden: Anteil der Zerfallsprodukte, an denen die Atterberggrenzen bestimmt werden können (entspricht 100%, wenn Atterberggrenzen sowohl an Siebtrommeldurchgang als auch an Siebtrommelrückstand bestimmt werden können)

Probe	Gestein	Siebdurchgang	Siebrückstand	Zerfallsprodukte			Bewertung
	I_{d2}	I_p	I_p	Feinkornanteil	bindiger Boden	Festgestein	
1	97,3%	zu wenig Material	nicht möglich	7,0%	7,0%	93,0%	unkritisch
2	95,3%	12,8%	nicht möglich	2,0%	4,7%	95,3%	unkritisch
9*	87,3%	20,8%	20,5%	98,9%	100,0%	0,0%	kritisch
6	80,4%	10,0%	nicht möglich	2,2%	19,6%	80,4%	unkritisch
8	70,8%	9,7%	nicht möglich	5,0%	29,2%	70,8%	unkritisch
4	56,5%	9,8%	nicht möglich	5,7%	43,5%	56,5%	unkritisch
7	42,1%	16,1%	nicht möglich	37,6%	57,9%	42,1%	kritisch
10*	33,2%	13,8%	10,5%	27,3%	100,0%	0,0%	kritisch
5	11,4%	15,1%	15,7%	9,5%	100,0%	0,0%	kritisch
3	11,2%	19,0%	25,7%	10,5%	100,0%	0,0%	kritisch

Tabelle 5.10: Vergleichende Auswertung des Zerfallsbeständigkeitsindex mit Bewertung der Zerfallsprodukte im Hinblick auf Verklebungen und Feinkornfreisetzungen bei Schildvortrieben (rot: kritisch, grün: unkritisch, gelb: nicht eindeutig zu bewerten)

Den Zerfallsprodukten des Schluffsteins der Probe 1 müsste demnach 100% Festgestein zugeordnet werden. Abweichend dazu wird hier allerdings der Feinkornanteil als bindiger Boden aufgeführt. Der scheinbare Widerspruch zwischen Feinkornanteil und Zerfallsbeständigkeitsindex dürfte an den Randbedingungen der Versuche liegen (vgl. Kap. 5.3.2.3).

Insgesamt gilt für die Zerfallsprodukte:

- Je höher der Anteil an bindigem Boden, desto kritischer
- Je höher der Feinkornanteil der Kornverteilung, desto kritischer
- Je höher die Plastizitätszahl, desto kritischer

Dementsprechend sind die Proben 3, 5, 7, 9 und 10 kritisch zu bewerten. Im Gegensatz dazu sind die Proben 1, 2, 4, 6 und 8 unkritisch zu werten, da ihre Zerfallsprodukte zum großen Teil aus Festgesteinsresten bestehen und relativ niedrige Feinkorngehalte aufweisen.

Gegenüber der alleinigen Bewertung des Zerfallsbeständigkeitsindex (Abb. 5.9) werden fünf von zehn Proben vergleichbar eingestuft (Proben 1, 2, 3, 5 und 10). Von den vier nicht eindeutig zu bewertenden Proben (Proben 4, 6, 7 und 8), werden drei als unkritisch und eine als kritisch eingestuft. Am wenigsten eindeutig ist hierbei Probe 4 zu sehen, da ihre Zerfallsprodukte zu einem hohen Anteil aus bindigem Boden bestehen. Insgesamt wird sie aufgrund des geringen Feinkornanteils und der relativ niedrigen Plastizitätszahl des Siebtrommel-durchgangs als unkritisch gewertet. Entscheidend ist, dass die auf alleiniger Basis des Siebtrommelversuchs als unkritisch eingestufte Probe 9 (→ Festgestein mit hoher Zerfallsbeständigkeit) bei diesem Untersuchungsverfahren als kritisch eingestuft wird. Dabei war der Vortrieb vor allem in diesen Schichten durch Verklebungen beeinflusst.

5.3.3.2. Plastizität-Zerfalls-Diagramm

Es wird vorgeschlagen, ein Bewertungsdiagramm mit unterschiedlich kritischen Feldern zu erstellen (vgl. Hollmann & Thewes [65]). Ein erster Entwurf wird in Abbildung 5.11 vorgestellt. Während das Diagramm von Franklin & Chandra [48] in Abbildung 5.5 auf der Kombination aus Plastizitätszahl und Slake-Durability-Index basiert, empfiehlt sich im Hinblick auf die Prognose von Verklebungen den Anteil an bindigem Boden entsprechend Tabelle 5.10 zu verwenden. Dabei bilden in Abbildung 5.11 der Anteil an bindigem Boden die x-Achse und die Plastizitätszahl (wenn an Siebtrommelrückstand und -durchgang bestimmbar: Mittelwert) die y-Achse. Um unterschiedlich kritische Felder innerhalb des Diagramms festzulegen, müssen auch die Erkenntnisse des Schildvortriebs, von dem die Proben stammen, berücksichtigt werden. Das Ausmaß der Verklebungen während des Vortriebs wird in Form des Verklebungsgrads des Schneidrads berücksichtigt, wobei dieser bei der Probennahme bestimmt wird (vgl. dazu Kap. 6.1.2).

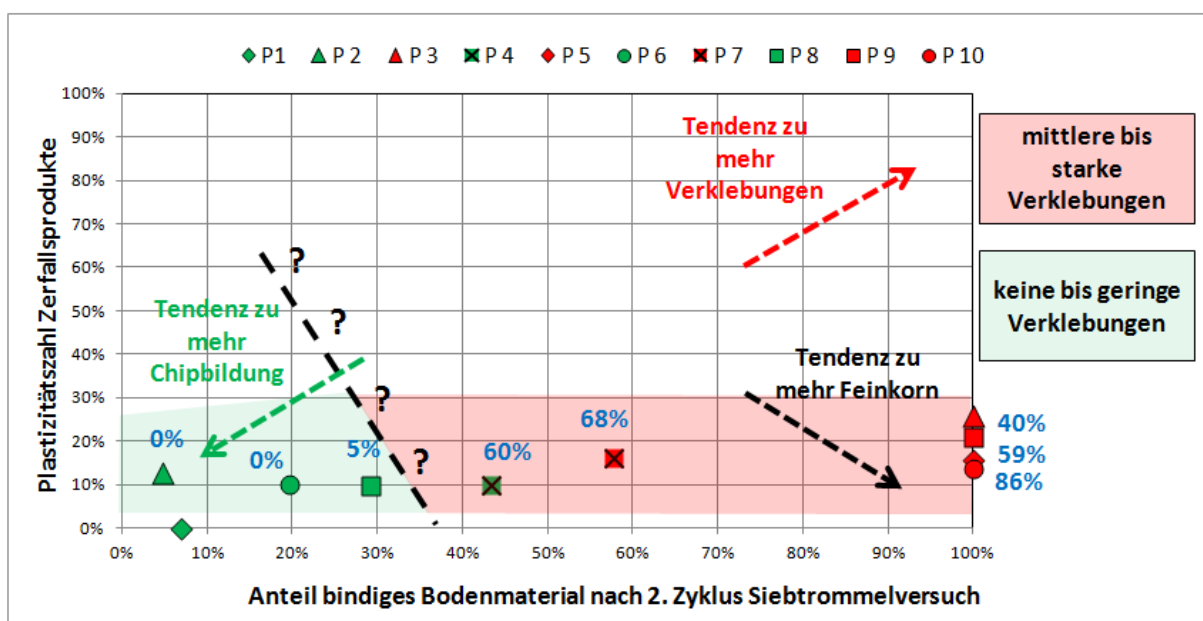


Abbildung 5.11: Diagramm zur Bewertung der Verklebungsneigung auf Basis des modifizierten Siebtrommelversuchs [65]. Der Verklebungsgrad des Schneidrads ist in Form der blauen Prozentzahlen angegeben

Trotz der geringen Datenmenge sind tendenzielle Abhängigkeiten ableitbar. Ein zunehmender Lockergesteinsanteil an den Zerfallsprodukten ist an einen höheren Verklebungsgrad des Schneidrads gebunden. Außerdem dürfte die Verklebungsneigung analog zum Lockergestein mit steigender Plastizitätszahl zunehmen, auch wenn dieser Bereich im Diagramm noch nicht mit Daten belegt ist. Generell gilt für die Wertepaare:

- je größer die Plastizität und der Anteil bindigen Bodenmaterials an den Zerfallsprodukten (=je weiter rechts oben im Diagramm), desto kritischer sind die Zerfallsprodukte im Hinblick auf Verklebungen
- je geringer die Plastizität und der Anteil bindigen Bodenmaterials an den Zerfallsprodukten (=je weiter links unten im Diagramm), desto eher ist eine Chipbildung zu erwarten
- je geringer die Plastizität bei gleichzeitig hohem Anteil bindigen Bodenmaterials an den Zerfallsprodukten (=je weiter rechts unten), desto eher ist ein hoher Feinkornanfall zu erwarten

Aufgrund der geringen Datenbasis sind große Bereiche innerhalb des Diagramms noch nicht untersucht. Dementsprechend sind die unterschiedlichen Felder teilweise mit Fragezeichen versehen und nur grob abgegrenzt. Ergänzungen des Diagramms durch Proben aus konventionell vorgetriebenen Tunneln oder Steinbrüchen werden als wenig aussagekräftig im Hinblick auf Schildvortriebe gewertet [65]. Das Diagramm sollte zukünftig im Rahmen weiterer Schildvortriebe überprüft und genauer eingegrenzt werden.

5.3.3.3. Verklebungsdiagramme für Lockergesteine

In Kapitel 5.2.2.3 wurden bereits die Werte des Siebtrommeldurchgangs von Derre & Gamble [21] mittels des neuen Bewertungsdiagramms aus Kapitel 4 ausgewertet. Im Gegensatz dazu können nach dem neuen Untersuchungsverfahren die gesamten Zerfallsprodukte beurteilt werden (Abb. 5.12).

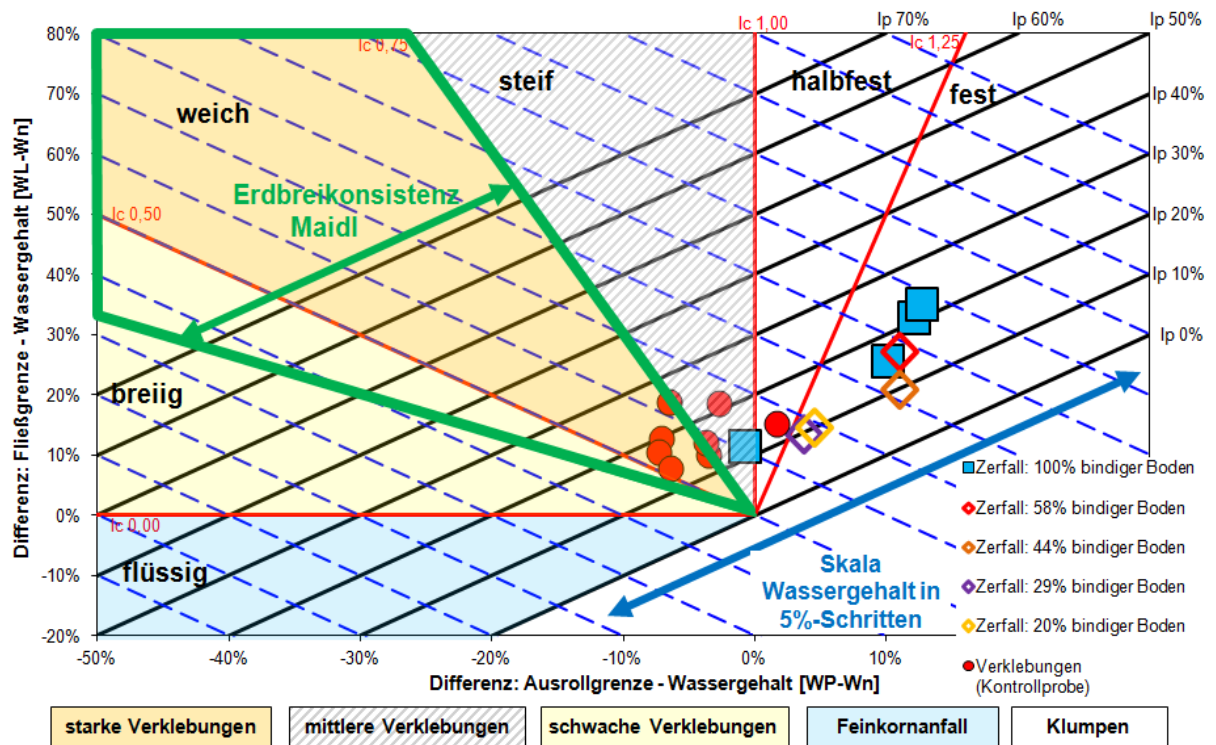


Abbildung 5.12: Allgemeines Bewertungsdiagramm mit Wertepaaren der Zerfallsprodukte veränderlich fester Gesteine (Fließ- und Ausrollgrenze: Mittelwerte aus Siebtrommelrückstand und -durchgang; Wassergehalt: Ausgangsgestein)

Dabei können veränderlich feste Gesteine, die zu 100% in bindigen Boden zerfallen (Abb. 5.12, blaue Quadrate) analog zum Lockergestein bewertet werden. Bei der Probe im Konsistenzfeld der Verklebungen handelt es sich um einen steifen Ton, der als Kontrollprobe verwendet wurde (vgl. Tab. 5.6). Die restlichen Proben, die nicht vollständig in bindigen Boden zerfallen sind, können nur anteilmäßig entsprechend beurteilt werden (Abb. 5.12, Rauten). Je höher dabei der Anteil an bindigem Boden an den Zerfallsprodukten, desto aussagefähiger ist die Bewertung. Zusätzlich sind die Wertepaare der Verklebungsproben (Abb. 5.12, rote Kreise) dargestellt, so dass die Wassergehaltsänderungen bei der Umwandlung im Rahmen des Hyroschildvortriebs von etwa 10 bis 15% für den Hauptteil der Proben ablesbar sind. Auch hier wird deutlich, dass der Hauptteil der Gesteine und auch deren Zerfallsprodukte ohne Wasser nicht kritisch werden kann. Analog zum Lockergestein kann auch der Aufwand zur Erdbreikonditionierung für die Zerfallsprodukte der nach dem neuen Verfahren untersuchten veränderlich festen Gesteine abgelesen werden (vgl. Kap. 4.4). In diesem Fall wäre für den Hauptteil der Zerfallsprodukte eine Wassergehaltserhöhung von etwa 20% notwendig. Auch hierbei sind aber die Anteile des bindigen Bodens an den Zerfallsprodukten zu berücksichtigen. So wäre beispielsweise bei der Probe mit etwa 20% Anteil an bindigem Boden an den Zerfallsprodukten (Abb. 5.12, gelbe Raute) nicht nur die notwendige Wassergehaltsänderung relevant, sondern vor allem die Kornverteilung des Siebtrommelrückstands.

5.4. Fazit zum neuen Untersuchungskonzept

Das vorgestellte Untersuchungsschema erleichtert die Bewertungsmöglichkeiten im Hinblick auf Verklebungen bei Schildvortrieben in Festgesteinen. Mögliche Fehlinterpretationen bisheriger Laborversuche, wie z. B. mittels Siebtrommelversuch, können damit vermieden werden. Das Versuchskonzept bietet folgende Vorteile:

- Das neue Untersuchungskonzept basiert auf standardisierten Normen und Empfehlungen. Diese werden mit Ausnahme des Wegfalls der Trocknung beim Siebtrommelversuch eingehalten. Formatierungen und Aufbereitungen der Proben führen zu vergleichbaren Kennwerten der Einzelversuche. Da die Einzelversuche in vielen Prüfeinrichtungen durchgeführt werden können, ist eine relativ einfache Umsetzung des Untersuchungskonzepts möglich.
- Auf Basis des neuen Untersuchungskonzepts werden bindige Böden, die als Festgestein klassifiziert wurden, kritisch bewertet. Demzufolge führen diese aus bautechnischer Sicht falschen Einstufungen nicht mehr zu unkritischen Fehleinschätzungen der Neigung zur Ausbildung von Verklebungen bzw. der Feinkornfreisetzung.
- Die systematische Bestimmung bodenmechanischer Kennwerte der Zerfallsprodukte erlaubt zu Lockergesteinen analoge Bewertungsmethoden. Dabei sind Auswertungen auf Basis von Bewertungsdiagrammen möglich.

Insbesondere im Hinblick auf die Bewertungsmethoden (vgl. Kap. 5.3.3) ist eine höhere Datenmenge erforderlich. Dabei sollte auch eine größere Bandbreite an Gesteinen untersucht werden.

6. Verklebungen und Feinkornanfall in der Praxis

In diesem Kapitel werden die Erfahrungen des Autors mit Verklebungen und freigesetztem Feinkorn anhand von drei Praxisbeispielen dargelegt. Außerdem wird die Anwendung des neuen Bewertungsdiagramms (vgl. Kap. 4) an diesen Vortrieben aufgezeigt. Die entsprechenden Vortriebe wurden vor Beginn der wissenschaftlichen Arbeit von mir als Ingenieurgeologe und/oder Geotechnischer Fachbauleiter betreut. Im Rahmen dieser Arbeit wird weder auf vertragliche Aspekte noch auf mögliche Abweichungen gegenüber den ausgeschriebenen Baugrundverhältnissen eingegangen. Alle weiteren Ausführungen berücksichtigen sowohl die in den Baugrundgutachten beschriebenen als auch die tatsächlich angetroffenen Baugrundverhältnisse. Dabei wird auch auf unveröffentlichte Berichte im Rahmen der Baustellenabwicklung eingegangen [3, 59, 60]. Eine Veröffentlichung stammt von Hollmann et al. [67]. In diesem Kapitel werden einzelne Formulierungen aus diesen Quellen übernommen.

6.1. Ingenieurgeologische Dokumentationen der Schildvortriebe

Zunächst wird kurz auf die Besonderheiten bei der ingenieurgeologischen Dokumentation von Schildvortrieben eingegangen. Die meisten Erkenntnisse dieser Arbeit basieren auf den in diesem Kapitel beschriebenen Praxiserfahrungen und somit auf den vortriebsbegleitend durchgeführten Dokumentationen.

6.1.1. Ortsbrust und Probennahmen

Bei konventionell aufgefahrenen Tunneln werden die Gebirgsverhältnisse in der Regel systematisch durch Tunnelkartierungen dokumentiert. Auf den Baugrund zurückzuführende Auswirkungen auf das Bauverfahren können dann meist anhand der tatsächlich angetroffenen Gebirgsverhältnisse erklärt werden. Die Überprüfung geotechnischer Vorgaben der Planungsphase mit entsprechenden Anpassungen während des Vortriebs ist oft Teil des Sicherheitskonzeptes. Bei maschinellen Tunnelvortrieben sind Dokumentationen der anstehenden Gesteine in der Praxis oft auf Gripper-Tunnelbohrmaschinen, mit in der Regel guter Einsicht der Laibung (Abb. 6.1), beschränkt.

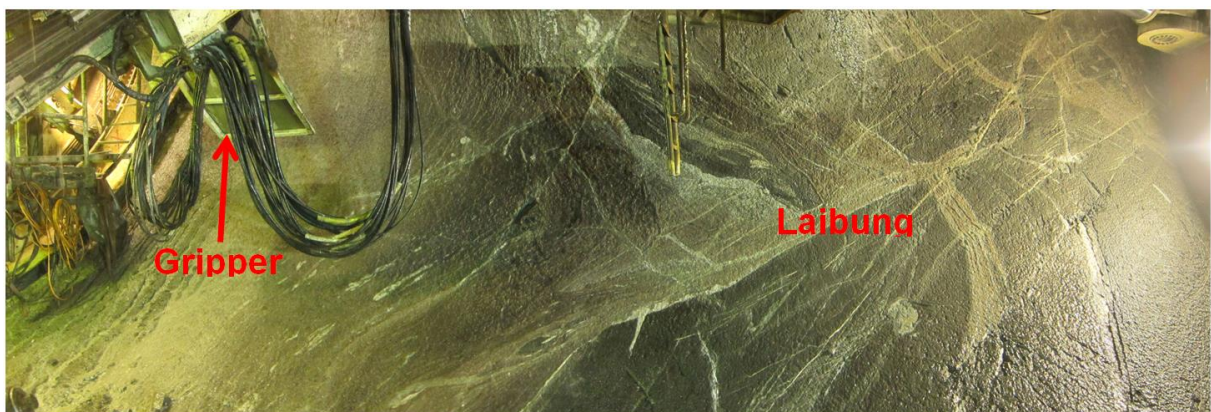


Abbildung 6.1: Laibung eines mit Gripper-TBM aufgefahrenen Tunnels (Foto: Markus Weh)

Im Gegensatz dazu ist der anstehende Baugrund bei Schildvortrieben meist schwer zugänglich, da die Laibung nach Einbau des Tübbings verdeckt ist. Die Einsicht auf die Ortsbrust ist auf den Blick durch die Schneidradöffnungen (Abb. 6.2) und einen wenige cm breiten Ausschnitt der Laibung zwischen Schildschneide und Schneidrad beschränkt. Dabei sind allerdings nicht immer alle Schneidradöffnungen einsehbar, zumal diese im äußeren und unteren Ortsbrustbereich nur mit großem Aufwand erreichbar sind.

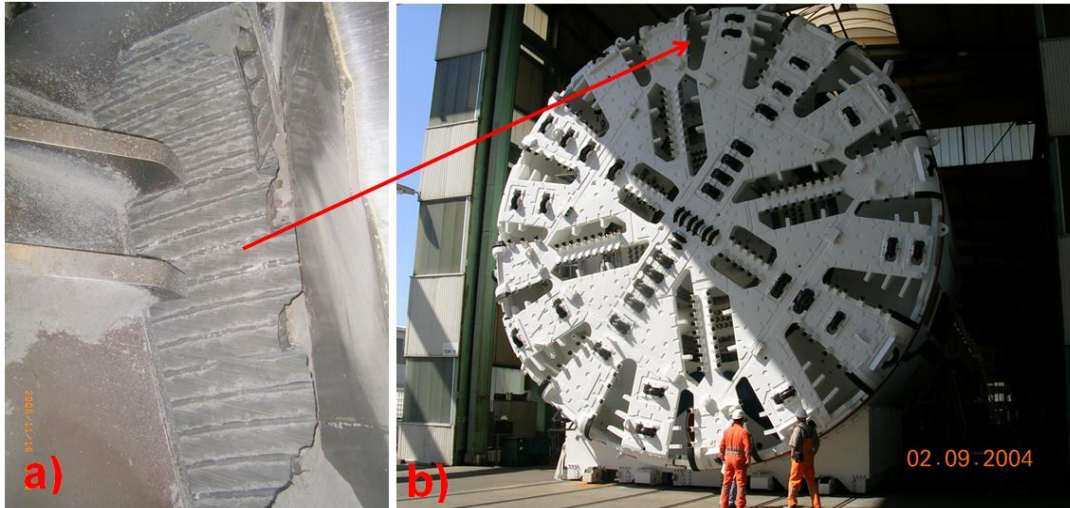


Abbildung 6.2: a) Blick auf die Ortsbrust durch eine Schneidradöffnung b) Schneidradöffnungen als potenzielle Zugangsmöglichkeit an die Ortsbrust

Bei offen gefahrenen Schildvortrieben, sind Einstiege in die Abbaukammer unter atmosphärischen Bedingungen bei jedem Stillstand (z.B. bei jedem Ringbau) möglich. Im Gegensatz dazu ist die ingenieurgeologische Dokumentation der Ortsbrustverhältnisse bei Schildvortrieben mit Ortsbruststützung erschwert. Einstiege in die Abbaukammer erfordern Absenkungen des Stützmediums und können in der Regel nur mit Druckluftbeaufschlagung erfolgen. In vielen Fällen kann das Stützmedium nur teilabgesenkt werden, so dass die unteren Ortsbrustbereiche überhaupt nicht zugänglich sind. Vor allem Dokumentationen von Schildvortrieben mit Flüssigkeitsstützung in nicht standfesten Lockergesteinen sind mit großem Aufwand verbunden, da die Ortsbrust mit einem Filterkuchen versiegelt ist. In solchen Fällen kann oft nur ein sehr kleiner Teil der Ortsbrust kurzzeitig freigelegt werden (Abb. 6.3).



Abbildung 6.3: a) Ingenieurgeologische Dokumentation bei einem Hydroschildvortrieb in Kiesen a) Abschälen des Filterkuchens b) Dokumentation und Beprobung c) Erneutes Versiegeln des freigelegten Ortsbrustbereichs zur Minimierung von Druckluftverlusten

Dabei müssen Dokumentation und Beprobung sehr schnell erfolgen, bevor die Probennahmestelle wieder mit Suspension versiegelt wird. Eine Beprobung kann unter diesen Bedingungen nur erfolgen, wenn die Ortsbrust entsprechend stabil bleibt und keine größeren Druckluftverluste auftreten. Der Vergleich eines Sprengvortriebs mit einem Hydroschildvortrieb mit ähnlichem Querschnitt (beides zweigleisige Eisenbahntunnel) verdeutlicht den unterschiedlichen Zugang zum anstehenden Baugrund (Abb. 6.4).

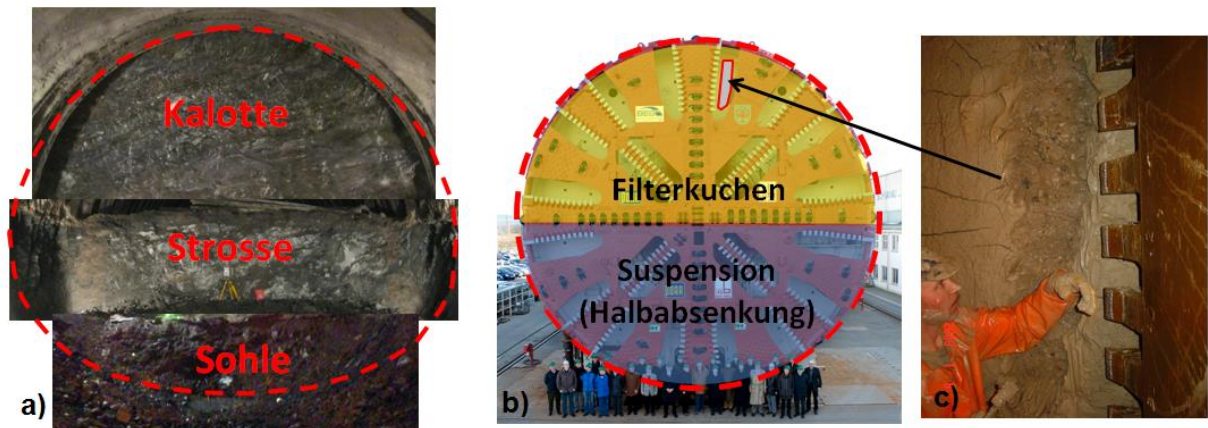


Abbildung 6.4: Unterschiedliche Ortsbrustinsicht bei einem zweigleisigen Eisenbahntunnel a) Sprengvortrieb im Fels mit vollständig einsehbarer Ortsbrust (Fotos von Kalotte, Strosse und Sohle) b) Schneidrad eines Hydroschilds mit geringer Ortsbrusteinsicht (Pfeil: graues Feld) Bei diesem Beispiel wäre die untere Ortsbrusthälfte aufgrund des teilabgesenkten Suspensionsspiegels nicht zugänglich (blau). Im Bereich der oberen Ortsbrusthälfte müsste zunächst der Filterkuchen (gelb) entfernt werden c) Blick durch die Schneidradöffnung auf einen Teil des freigelegten Ortsbrustbereichs

Anzumerken ist, dass bei einem konventionellen Vortrieb in Kiesen, also zu dem Hydroschildvortrieb von Abbildung 6.4 vergleichbaren Baugrundverhältnissen, die Ortsbrust in vielen kleinen Teilausbrüchen vorgetrieben würde. Trotzdem kann bei konventionellen Vortrieben die gesamte Ortsbrust dokumentiert werden, während bei Schildvortrieben immer nur Kartierungen von Teilen der Ortsbrust möglich sind. Generell ist es jedoch bei Schildvortrieben oftmals Zufall, ob kleinräumige Besonderheiten (z.B. Wasserzutritte, Karstspalten, Störungen, Blöcke) bei der Ortsbrustkartierung überhaupt erkannt werden (Abb. 6.5).



Abbildung 6.5: a) Störung (Pfeil) zwischen zwei unterschiedlichen Gesteinen b) Linsenförmiger Härtling (Pfeil) als Einlagerung in Gesteinen mit geringer Festigkeit [119] c) Karstspalte (Pfeil)

Beispielsweise hätten in den Fällen aus Abbildung 6.5 geringfügig andere Schneidradstellungen die Dokumentation dieser Strukturen verhindert. In der Praxis weisen häufig Auffälligkeiten während des Vortriebs (z.B. auf der Separationsanlage) auf bestimmte Besonderheiten des Baugrunds hin, ohne dass diese bei Einstigen dokumentiert werden können. Auch wenn der Grund für bestimmte Erschwernisse nicht dokumentiert werden kann, bedeutet das bei Schildvortrieben nicht, dass dieser nicht im Baugrund zu finden ist. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu konventionellen Vortrieben.

Eine Überprüfung bestimmter Baugrundeigenschaften ist vielfach nur durch Laborversuche möglich. Insbesondere Schildvortriebe erfordern eine hohe Sorgfalt bei der Probennahme. Dies gilt besonders, wenn bindige Böden oder veränderlich feste Festgesteine mit Stützflüssigkeiten oder Erdbrei in Kontakt kommen. Daher sollte der äußere, möglicherweise aufgeweichte Bereich der Ortsbrust vor der Dokumentation und der Probennahme entfernt werden. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die Entfernung der äußeren 3 bis 5 cm ausreichend ist, da die Stützflüssigkeit und eventuelle chemische Zusätze im Regelfall nicht in den Boden eindringen können (sofern keine offenen Klüfte vorhanden sind). Um mögliche Einflüsse der Stützflüssigkeit oder des Schneidrads auf die Eigenschaften bindiger Böden zu erforschen und die Entnahme „vorgeschiedigter“ Proben ausschließen zu können, wurden bei einem Hydroschildvortrieb an der gleichen Station Kontrollproben aus der gleichen Schicht an der Ortsbrust der TVM, des konventionell aufgefahrenen Querschlags und einer Kernbohrung untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die Proben in Bezug auf ihre Konsistenz und Plastizität nahezu identisch sind [60]. Bei entsprechender Sorgfalt können an der Ortsbrust von Schildvortrieben Proben des anstehenden Baugrunds mit hoher Qualität entnommen werden. Aufgrund der oft schlechten Zugänglichkeit werden bei Schildvortrieben relativ häufig Proben des gefördertsten Ausbruchsmaterials genommen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Fest- oder Lockergesteine im Hinblick auf viele Eigenschaften verändert werden, sobald sie aus der Ortsbrust gelöst wurden. Bei Proben des Ausbruchsmaterials handelt es sich somit um stark gestörte Proben, auch wenn trotzdem bestimmte Eigenschaften erhalten bleiben (beispielsweise die Plastizitätszahl eines bindigen Bodens bei Flüssigkeitsförderung). Vor allem im Hinblick auf Verklebungen können durch den Vergleich der natürlich anstehenden Gesteine mit den Proben des Ausbruchs- oder Verklebungsmaterials wichtige Erkenntnisse abgeleitet werden. Im Rahmen der in diesem Kapitel beschriebenen Projekte wurden daher folgende systematische Probennahmen durchgeführt:

- anstehende Fest- und Lockergesteine
 - Ortsbrustproben der Schildvortriebe
 - Ortsbrustproben der Querschläge
 - Proben aus Schächten, Start- und Zielbaugruben
 - Bohrkernproben
- Verklebungsmaterial aus verklebten Bereichen des Schneidrads und der Abbaukammer (alle Vortriebsverfahren)
- Ausbruchsmaterial
 - Bandproben offen gefahrener Schildvortrieb

- Erdbreiprüfen EPB-Schild (Entnahme nach Förderung durch Schnecke)
- Separationsproben Hydroschildvortrieb

Nach Möglichkeit wurden Verklebungs- und Ausbruchsmaterial sowie die Ortsbrust im gleichen Stationierungsbereich beprobt. Im Normalfall wurde der Wassergehalt bereits in Baustellenlabors zeitnah ermittelt. Auf sonstige Laboruntersuchungen wird in den folgenden Kapiteln bei dem jeweiligen Projekt eingegangen.

6.1.2. Quantifizierung von Verklebungen

Das Ausmaß von Verklebungen kann nur schwer quantifiziert werden. Die Behinderungen durch die Erschwernisse infolge von Verklebungen werden von den Projektbeteiligten oftmals als unterschiedlich stark empfunden. Unterschiedliche Projekte sind daher nur bedingt miteinander vergleichbar. Die Quantifizierung der Erschwernisse in der Praxis erfolgt häufig über die Stillstände (z.B. Reinigungsaufwand) oder die reduzierte Vortriebsleistung. Dazu wird den Vortriebsabschnitten mit Verklebungen eine Referenzstrecke, ohne Behinderungen, gegenüber gestellt. Im Rahmen der betreuten Schildvortriebe wurden Methoden entwickelt, Verklebungsgrade als Maß für die Stärke der Verklebungen, quantitativ zu erfassen [3, 65]. Da Verklebungsmaterial unter anderem auch die Schneidradöffnungen verstopft (vgl. Kap. 6.3), kann der Verklebungsgrad der einzelnen Öffnungen bei Einstiegen in die Abbaukammer abgeschätzt werden (Abb. 6.6). Dabei bedeutet 100% vollständig geschlossen und 0% ohne Verklebungen.

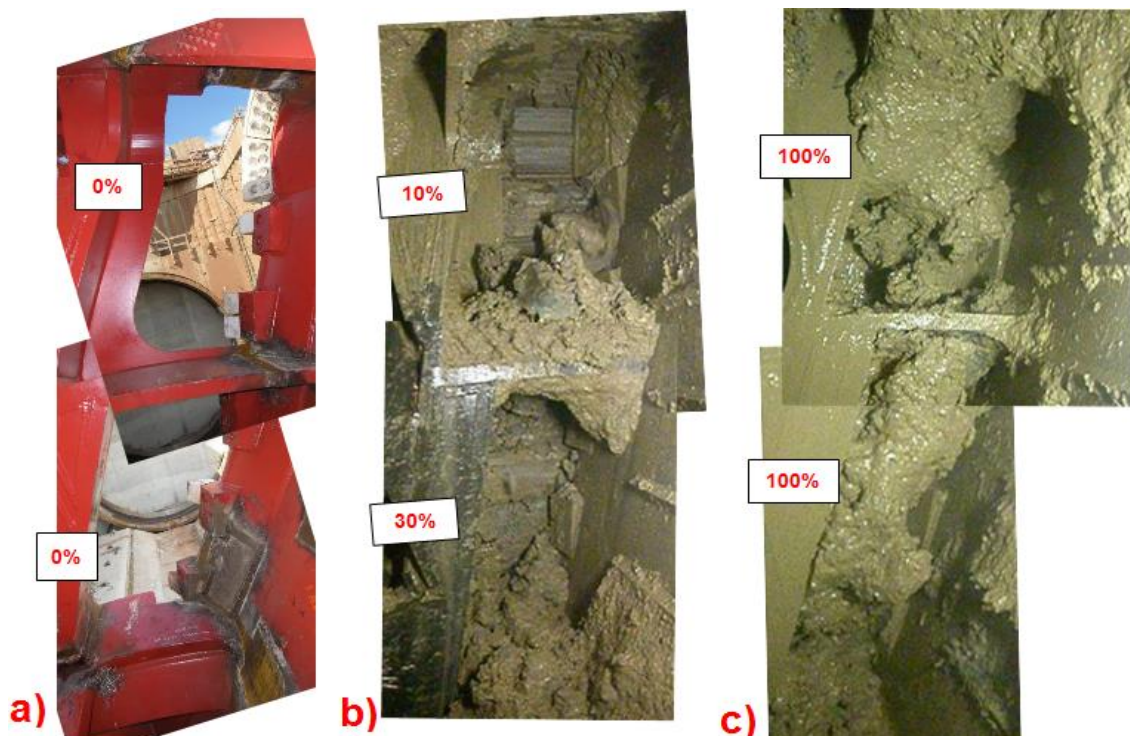


Abbildung 6.6: Blick aus der Abbaukammer durch die beiden äußeren Schneidradöffnungen mit Angabe des Verklebungsgrades in % (Abbildungen jeweils aus zwei einzelnen Fotos zusammengesetzt) [65] a) Vergleichsfoto ohne Verklebungen vor Vortriebsbeginn b) und c) Verlebte Schneidradöffnungen mit unterschiedlichem Verklebungsgrad

Um den Verklebungsgrad jeder einzelnen Schneidradöffnung zu ermitteln, muss das Schneidrad abschnittsweise gedreht werden. Um spätere Differenzen im Hinblick auf die Abschätzungen zu vermeiden, wird empfohlen, die verklebten Öffnungen bei der Schneidraddrehung zu filmen. Der Mittelwert aller einsehbaren Schneidradöffnungen bildet einen Index-Wert, der den Verklebungsgrad des Schneidrads widerspiegelt (Abb. 6.7). Dabei sind selbst gegenüberliegende Schneidradöffnungen oft unterschiedlich stark verklebt (z.B. Vergleich Hauptarm 1 und Hauptarm 4 in Abbildung 6.7). Demzufolge kann das Schneidrad unsymmetrisch verklebt sein.

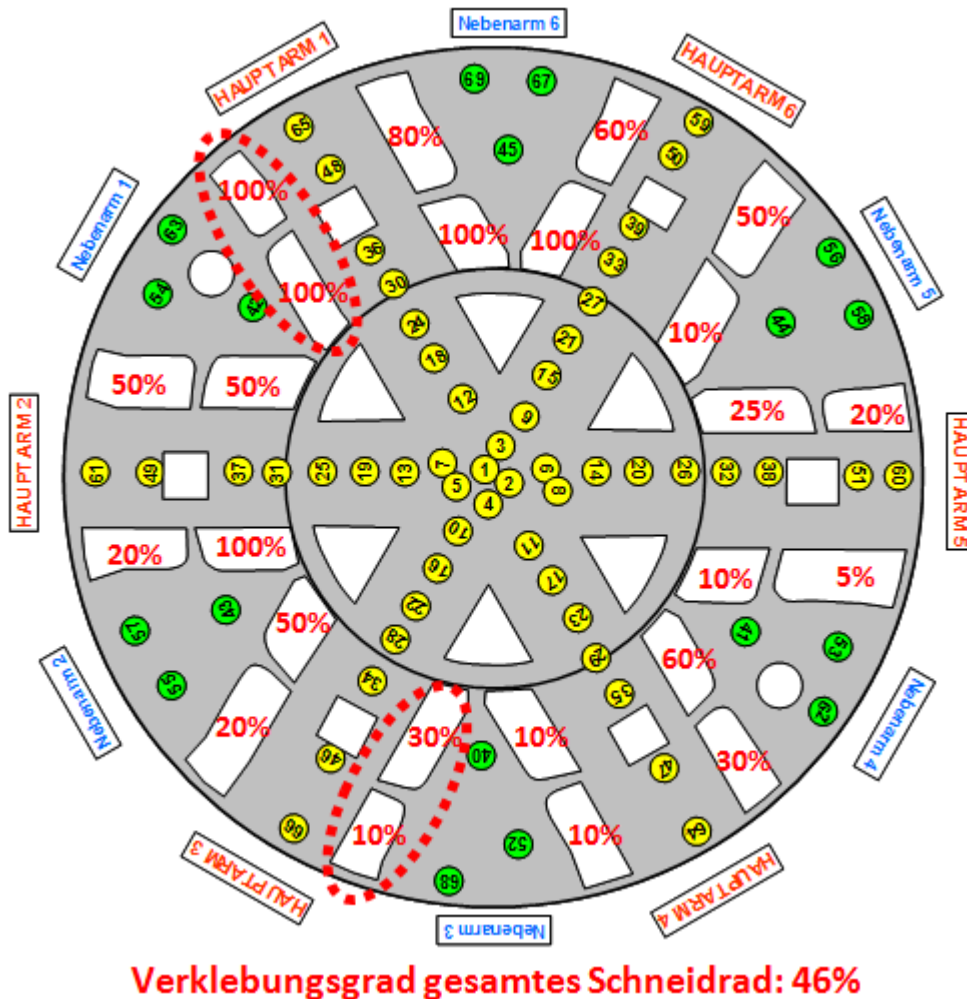


Abbildung 6.7: Herleitung des Schneidradverklebungsgrads aus Einzelaufnahmen (grau: Schneidradrückseite, weiß: Schneidradöffnung, rote Zahlen: Verklebungsgrad einzelner Öffnungen, gelb und grün: Werkzeugkästen, rot umrandet: Schneidradöffnungen aus Abbildung 6.6-a und 6.6-b) [65]

Vergleichend dazu kann auch der Anteil von verklebten Werkzeugkästen bestimmt werden. Die Dokumentationen der Verklebungen sind vor allem bei offen gefahrenen Schildvortrieben mit regelmäßigen Einstiegen in die Abbaukammer aussagekräftig. Bei flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben sind die Abstände der Einstiege häufig sehr groß, so dass auch eine zusätzliche Dokumentation der Separation sinnvoll sein kann. Neben Gesteinsbruchstücken, Chips oder Grobkorn (Kies und Steine) halten die Grobsiebe in verklebungsanfälliger Baugrund häufig auch bindige Kugeln aus Verklebungsmaterial zurück (Abb. 6.8).



Abbildung 6.8: Material auf den Grobsieben eines Hydroschildvortriebs a) Überwiegend Gesteinsbruchstücke b) Überwiegend bindige Kugeln als sekundäres Verklebungsmaterial (vgl. Kap. 3.1.2)

Die Verklebungen können dann anhand des Massenanteils der bindigen Verklebungskugeln gegenüber anderen Komponenten einer Grobsiebprobe quantifiziert werden. Die Dokumentation eines Hydroschildvortriebs zeigt, dass die beschriebenen Quantifizierungen weitestgehend zu ähnlichen Ergebnissen führen (Abb. 6.9).

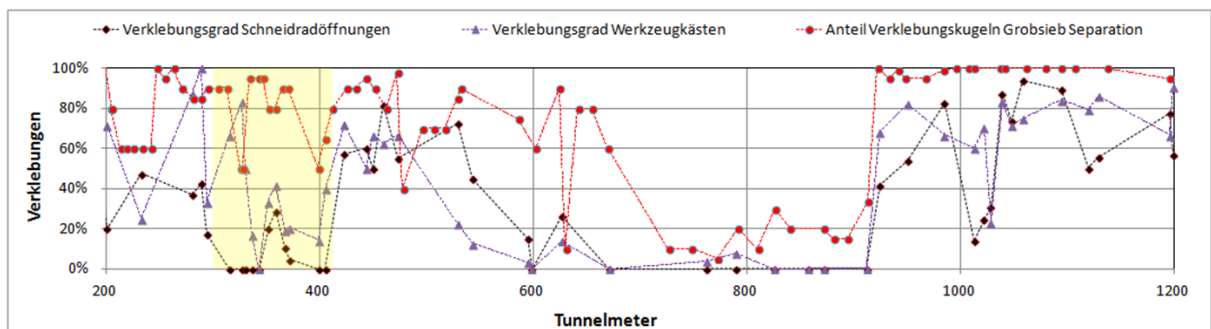


Abbildung 6.9: Quantifizierung der Verklebungen eines Hydroschildvortriebs anhand des Verklebungsgrads der Schneiradöffnungen, der Werkzeugkästen und des Anteils bindiger Kugeln auf den Grobsieben

Allerdings sind auch Bereiche mit weniger guten Übereinstimmungen möglich (z.B. Abb. 6.9: gelb hinterlegt). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Verklebungsgrad des Schneirads und der Grobsiebe nicht immer an der gleichen Station ermittelt wurde und die Kurven in Abbildung 6.9 zwischen den Datenpunkten linear interpoliert sind. Ursachen unterschiedlicher Verklebungen von Grobsieb und Schneirad können beispielsweise auf einer kurz zuvor durchgeführten Reinigung des Schneirads basieren. In dem in Abbildung 6.9 markierten Vortriebsbereich wurde das Schneirad sehr oft gereinigt, so dass sich Verklebungen weniger stark aufbauen konnten, auf den Grobsieben aber weiter Verklebungsmaterial anfiel. Im Allgemeinen führen die Dokumentationen der unterschiedlichen Verklebungen zu tendenziell ähnlichen Ergebnissen.

Die so quantifizierten Verklebungen können dann anderen Daten (z.B. Baugrundeigenschaften, Betriebsdaten, Vortriebsleistung, Stillstände, Vortriebsmodi) gegenübergestellt werden.

Aus Abbildung 6.6 ist leicht abzuleiten, dass die ingenieurgeologische Dokumentation in Bereichen mit Verklebungen aufgrund der noch stärker eingeschränkten Einsicht der Baugrundverhältnisse besonders erschwert ist. Beispielsweise sind bei offen gefahrenen Schildvortrieben Wasserzutritte als Ursache der Verklebungen häufig nicht zu quantifizieren, obwohl diese hörbar sind („Rauschen“).

Die ingenieurgeologische Dokumentation von Schildvortrieben ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Dies gilt vor allem in Vortriebsbereichen mit Verklebungen. Allerdings sind die Erkenntnisse, die im Rahmen der Vortriebe mit einer entsprechend sorgfältigen Dokumentation gewonnen werden können, meist relativ aufschlussreich.

6.2. Praxisprojekte

Die hier dokumentierten Projekte umfassen mit Vortrieben ohne Ortsbruststützung, mit Flüssigkeits- und Erddruckstützung die wichtigsten Schildvortriebsverfahren (vgl. Kap. 2). Bei allen drei betreuten Schildvortrieben traten mehr oder weniger starke Verklebungen auf. Die Vortriebe werden im Folgenden kurz im Hinblick auf die Baugrundverhältnisse, das gewählte Vortriebsverfahren und die Erschwernisse in Bezug auf Verklebungen bzw. einen erhöhten Feinkornanfall beschrieben.

6.2.1. Erddruckschildvortrieb (Projekt A)

6.2.1.1. Baugrundverhältnisse

Der Vortrieb verlief in tertiären und jurassischen Festgesteinen und wies Überlagerungshöhen von 25 bis 100 m auf. Der Grundwasserspiegel bei höchster Überlagerung betrug etwa 90 m. Quartäre Sedimente in Form von Hangschutt, Lößlehm, Abschwemm- und Rutschmassen wurden hauptsächlich im Bereich der Start- und Zielbaugruben angetroffen. Den jeweiligen stratigraphischen Einheiten können unterschiedliche Sedimentgesteine zugeordnet werden (Tab. 6.6).

Stratigraphie			Festgesteine	Lockergesteine
Quartär	Holozän	Abschwemm Massen	-	umgelagerter Lößlehm, Hangschutt
	Pleistozän	Hangschutt, Lößlehm, Rutschmassen	-	Ton, Schluff, Sand, Kies, Steine, Blöcke
Tertiär	Oligozän	Melettaschichten (MS)	Mergelsteine, Tonsteine, Sandsteine	Tone
		Fischschiefer (FS)	Tonsteine, Tonmergelsteine, Mergelkalksteine	-
		Foraminiferenmergel (FF)	Mergelsteine	Tone
		Bunte Mergel (tBU)	Gipsmergelzone (GMZ): Mergelsteine, Sandsteine, Gipslagen	Tone
			Konglomeratische Schichten (KGS): Sandsteine, Konglomerate, Mergelsteine	Tone
	Streifige Mergel (tSM)	Mergelsteine, Tonmergelsteine, Sandsteine, Konglomerate	Tone	
	Eozän	Lymnäenmergel/kalke (tLM/tLK)	Tonsteine, Mergelsteine, Kalksteine, Sandsteine, Konglomerate	Tone
Planorbekalk (PK)		Mergelsteine, Tonmergelsteine, Kalkmergelsteine, Kalksteine	-	
Jura	Oxford	Korallenkalk (oxK)	Kalksteine (teilweise verkarstet)	Tone (Karstfüllungen)

Tabelle 6.1: Stratigraphische Einheiten mit Zuordnung der Gesteinstypen

Die tertiären Abfolgen des Oligozäns und Eozäns setzen sich weitestgehend aus Wechsellaagerungen von Mergel-, Ton- und Sandsteinen zusammen. Bereichsweise lagen einzelne Gesteine innerhalb der Festgesteinsabfolge als Lockergestein vor. Das Gebirge ist durch mehrere Störzonen in einzelne Bruchschollen zerlegt. Auf der ersten Hälfte des Vortriebs

wurden neben den tertiären Wechselfolgen auch die Kalksteine des Eozäns und des Juras durchfahren (Abb. 6.10). Die Kalksteine des Jura, des Planorbenkalks und der Lymnänenkalke waren zum Teil verkarstet.

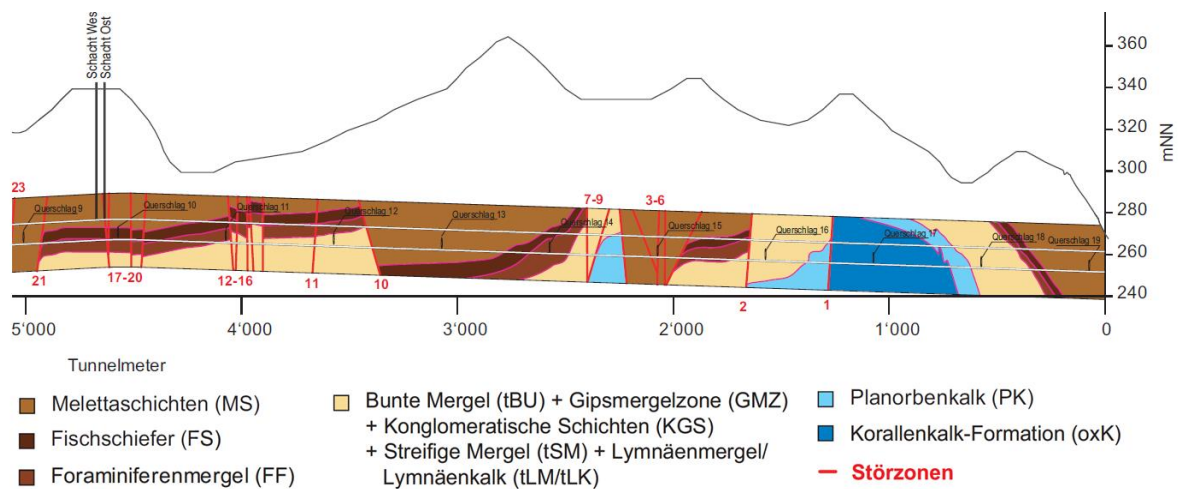


Abbildung 6.10: Geologischer Längsschnitt TM 0 bis 5000 [3, modifiziert: nur Hälfte des Längsschnitts]

Die zweite Tunnelhälfte verlief in den vorwiegend feinkörnigen Sedimenten des Tertiärs (Abb. 6.11).

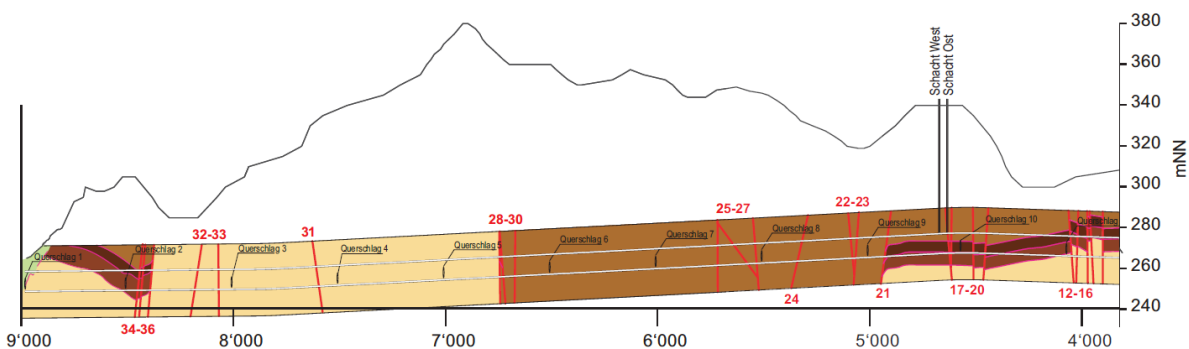


Abbildung 6.11: Geologischer Längsschnitt TM 5000 bis 9000 (Legende: vgl. Abb. 6.10) [3, modifiziert: nur Hälfte des Längsschnitts]

Aufgrund weitestgehend ähnlicher Gesteinstypen wurden die stratigraphischen Einheiten der Bunten Mergel, der Streifigen Mergel und der Lymnänenmergel/kalke im geologischen Längsschnitt zusammengefasst. Eindeutige Zuordnungen in der Praxis sind nur an der Basis der Lymnänenmergel/kalke im Bereich der Grenze zum Planorbenkalk und am Top der Bunten Mergel im Bereich der Grenze zum Foraminiferenmergel möglich. Die Unterscheidung dieser stratigraphischen Einheiten in Tabelle 6.1 ist im Wesentlichen auf den regional geologischen Hintergrund zurückzuführen. Sie basiert unter anderem auf der Auswertung von Mikrofossilien und ist bautechnisch kaum relevant. An der Basis der Lymnänenmergel wurde die sogenannte Rote Leitschicht angetroffen, die aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften gesondert behandelt wird.

6.2.1.2. Vortriebsverfahren

Die beiden Vortriebe wurden mit zwei Erddruckschildvortriebsmaschinen mit Bandförderung der Firma Herrenknecht durchgeführt. Das Schneidrad mit 11,16 m Durchmesser (Abb. 6.12) war mit 12 Räumern, 164 Schälmessern und 64 Rollenmeißeln bestückt.

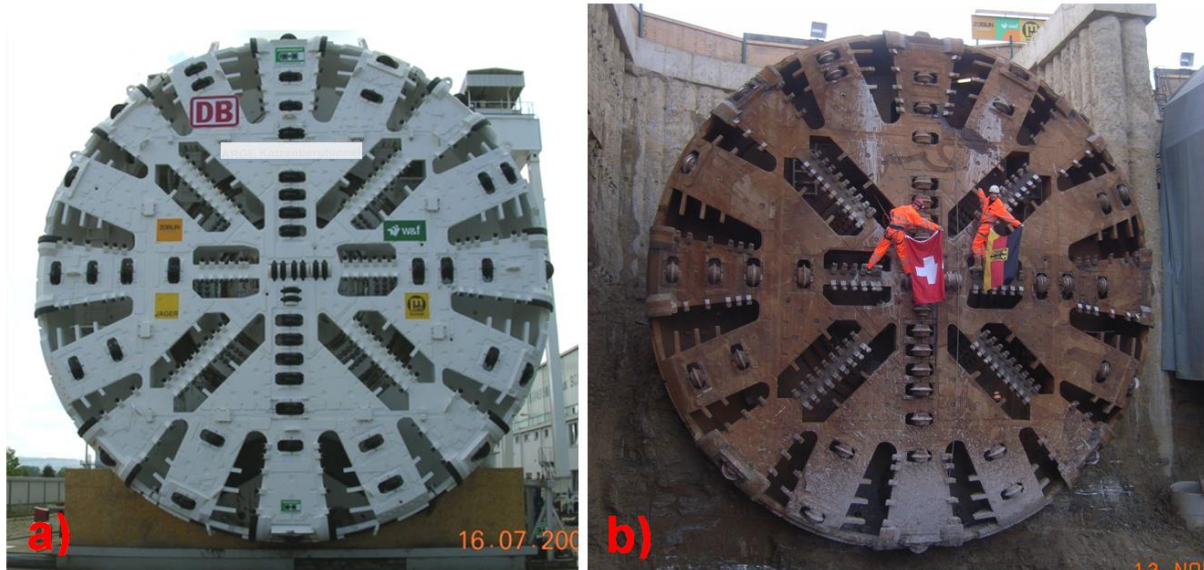


Abbildung 6.12: a) Schneidrad vor Vortriebsbeginn. b) Schneidrad nach Vortriebsende

Der Vortrieb wurde in drei unterschiedlichen Vortriebsmodi durchgeführt:

- Offener Modus: Vortrieb unter atmosphärischen Bedingungen (Abb. 6.13-a)
- Halboffener Modus: Teilfüllung mit Ausbruchmaterial und Druckluftbeaufschlagung (Abb. 6.13-b)
- Geschlossener Modus (EPB-Modus): Vollfüllung mit Erdbrei (Abb. 6.13-c)

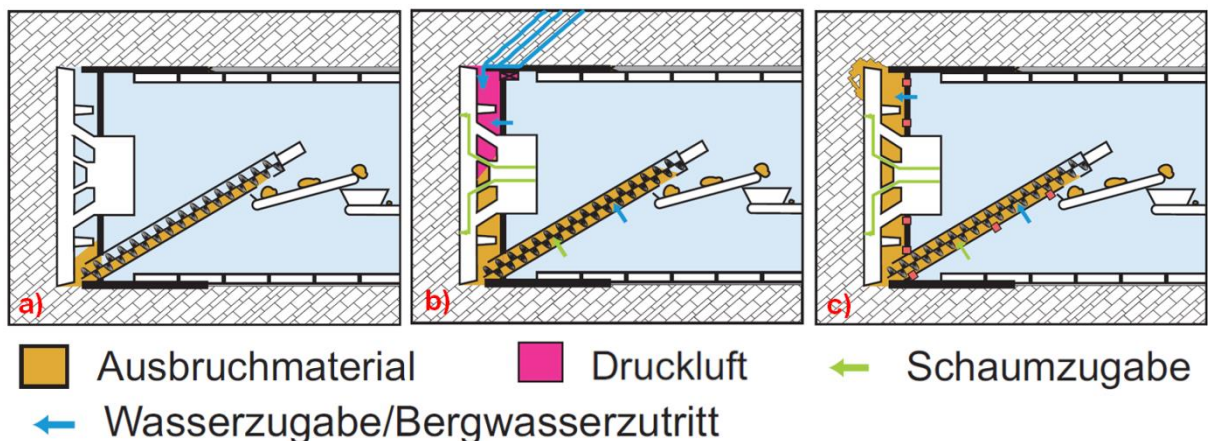


Abbildung 6.13: Vortriebsmodi [3] a) Offen/atmosphärisch b) Halboffen/Erdbrei-Druckluft c) Geschlossen/Erdbrei

Bei jedem Vortriebsmodus wurde das abgebaute Material durch die Schnecke aus der Abbaukammer gefördert und über die Förderbänder aus dem Tunnel abtransportiert. Die Wahl des Vortriebsmodus erfolgte auf Basis der angetroffenen Gebirgsverhältnisse, wobei Wechsel jederzeit möglich waren. Bei relativ standfesten Ortsbrustverhältnissen mit geringen bis

mittleren Bergwasserzutritten konnte der Vortrieb ohne Ortsbruststützung im offenen Modus erfolgen. Bei plötzlich abnehmender Standfestigkeit oder bei stärkeren Wasserzutritten konnte der Vortrieb auf den halboffenen Modus mit Erdbrei-Teilfüllung und zusätzlicher Druckluftstützung umgestellt werden. Dieser Modus wurde auch bei Steuerungsproblemen infolge unterschiedlicher Festigkeiten an der Ortsbrust eingesetzt (z.B. schleifender Anschnitt von Störzonen). Bei nicht standfesten Ortsbrustverhältnissen mit oder ohne Wasserzutritte wurde der Vortrieb im geschlossenen Modus mit Erdbreistützung durchgeführt.

6.2.1.3. Verklebungen und Feinkornanfall

Die in diesem Kapitel beschriebenen Erfahrungen basieren vor allem auf einer umfangreichen vortriebsbegleitenden Dokumentation der Schildvortriebe (Tab. 6.2).

Dokumentation/Probennahme mit Wassergehaltsbestimmung	Anzahl
Ortsbrustaufnahmen	1575
Verklebungsgrad Schneidrad	162
Wasserzutritte (Messungen und Schätzungen)	1087
Ortsbrustproben	417
Bandproben	105
Erdbreipproben	62

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der vortriebsbegleitenden Dokumentationen der Schildvortriebe

Weitere Probennahmen und Dokumentationen erfolgten bei den konventionellen Vortrieben von 19 Querschlägen und 2 Lüftungsschächten. Insgesamt wurden die Wassergehalte an allen Proben zeitnah auf der Baustelle bestimmt. Außerdem wurden zahlreiche Laborversuche an verschiedenen Instituten durchgeführt. Dabei wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels hauptsächlich auf die im Hinblick auf Verklebungen relevanten Eigenschaften der feinkörnigen Gesteine eingegangen.

Innerhalb der tertiären Abfolgen wurden sowohl bindige Böden, als auch veränderlich feste Gesteine angetroffen. Nur die Fischschiefer enthielten in tektonisch unbeeinflussten Bereichen keine Lockergesteine. Es werden im Folgenden zunächst die Lockergesteine bewertet. Die Tone und Mergel der Bunten Mergel, der Streifigen Mergel, der Lymnäenmergel, der Foraminiferenmergel und der Melettaschichten sind mit mittleren Konsistenzzahlen von 1,4 vorwiegend von fester Konsistenz. Das Löseverhalten gleicht weitestgehend dem eines bindigen Lockergesteins (vgl. Kap. 3.1.2). Die Spuren der Schneidringe sind in den Boden gepresst und nicht mit dem für die Chipbildung im Fels typischen Gesteinsmehl belegt (Abb. 6.14).

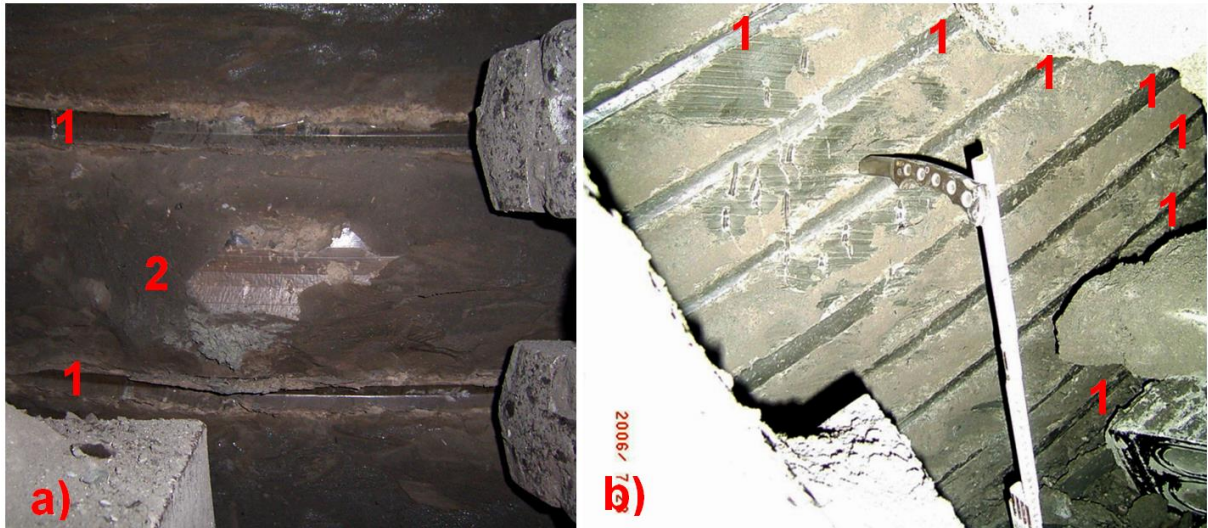


Abbildung 6.14: a) Ortsbrust im Foraminiferenmergel mit in den Boden gepressten Diskenspuren (1) und Schälmesserspur (2) c) Ortsbrust in den Melettaschichten mit in den Boden gepressten Diskenspuren (1)

Die sogenannte Rote Leitschicht nimmt innerhalb der Festgesteinsabfolge eine Sonderstellung ein. Mit mittleren Konsistenzzahlen von 1,1 weisen die mehrere Meter mächtigen Tone eine überwiegend halbfeste Konsistenz auf. Sie bildet die Basis der Lymnänenmergel und liegt auf der unregelmäßigen und teilweise verkarsteten Oberfläche des Planorbenkalks auf (Abb. 6.15). Aufgrund der auffälligen Rotfärbung fungiert sie als Leithorizont für diese stratigraphische Grenze. Sie wird als innerhalb der Festgesteinsabfolge mit den ursprünglichen Eigenschaften konservierter fossiler Bodenhorizont (Paläoboden) gedeutet [57, Hollmann 2009d].

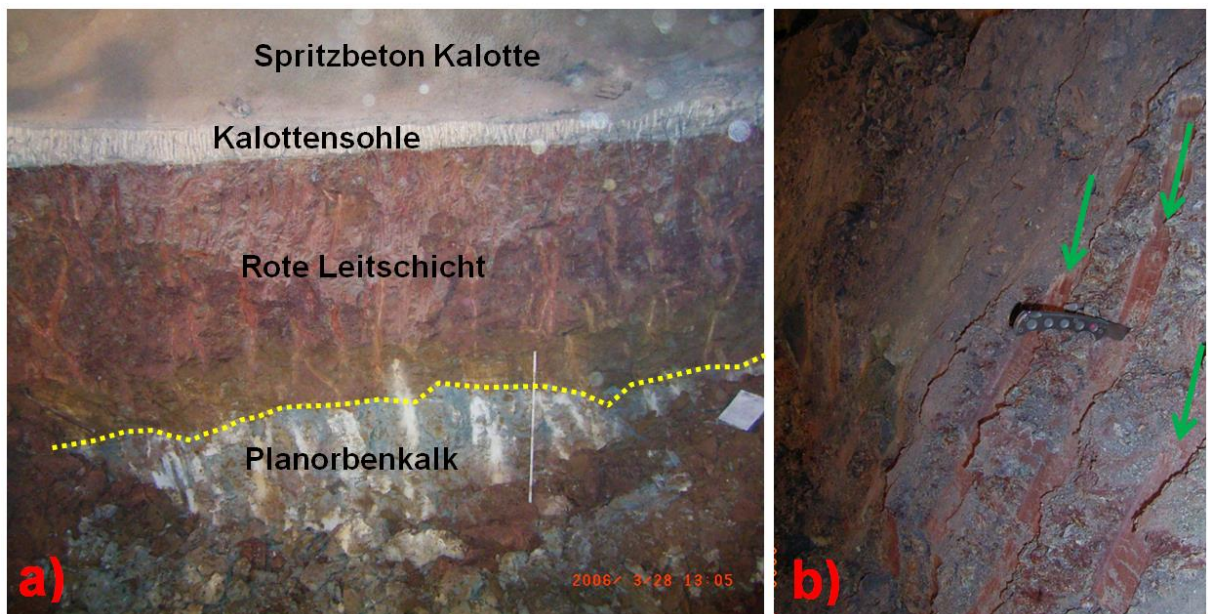


Abbildung 6.15: a) Strosse eines Querschlags mit Tonen der Roten Leitschicht im Hangenden des Planorbenkalks (Grenze gelbe Linie) b) Strosse eines Querschlags mit Tonen der Roten Leitschicht (Schälspuren der Baggerzähne: grüne Pfeile)

Die bindigen Böden des Tertiärs sind aufgrund unterschiedlicher Kalkgehalte nach Prinz & Strauß [94] sowohl als Tone als auch als Mergel zu klassifizieren. Sie weisen trotz einer gewissen Bandbreite vergleichbare Atterberggrenzen auf und werden im Folgenden zusammengefasst bewertet (Rote Leitschicht ausgenommen). Sie sind aufgrund ihrer Atterberggrenzen aus bautechnischer Sicht überwiegend als mittel- bis ausgeprägt plastische Tone zu klassifizieren (Abb. 6.16).

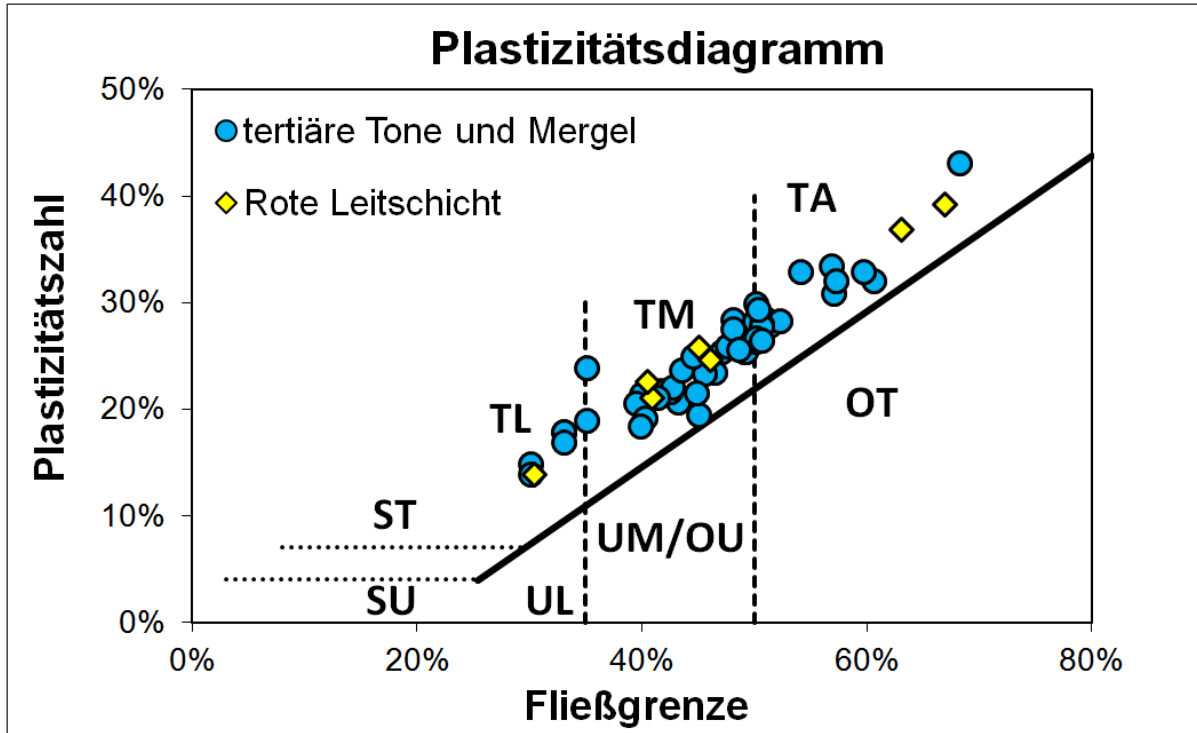


Abbildung 6.16: Einstufung der bindigen Böden anhand der Atterberggrenzen

Der Schwerpunkt liegt im Bereich der mittelplastischen Tone. Einzelne Böden können als leichtplastische Tone eingestuft werden. Eine Bewertung der Böden im Diagramm von Thewes ist weder für offen gefahrene noch für Erddruckschildvortriebe sinnvoll und wird daher für die Böden dieses Projekts nicht durchgeführt (Vgl. Kap. 3.2.3.3 und 4.1). Die Beurteilung im allgemeinen Bewertungsdiagramm aus Kapitel 4 erfolgt an anderer Stelle innerhalb dieses Kapitels für die unterschiedlichen Vortriebsmodi.

Innerhalb der Tertiären Wechselfolgen wurden auch feinkörnige Gesteine angetroffen, an denen keine Atterberggrenzen bestimmt werden konnten. Beim Abbauprozess kam es dort in den Schneidspuren der Rollenmeißel zur für Festgesteine typischen Zermalmungszone mit Gesteinspulver und zur Chipbildung. Im Bereich einer Störung, bei der die Melettaschichten gegenüber den Lymnäenmergeln abgeschoben wurden, wird das unterschiedliche Löseverhalten von Boden und Fels besonders deutlich (Abb. 6.17). Im Ortsbrustbereich der Lymnäenmergel wurden feinkörnige Festgesteine angetroffen und in Form von Chips gelöst, während die Disken im Bereich der zu halbfestem Ton zerscherten Störungsfüllung tief in die Ortsbrust gedrückt wurden.

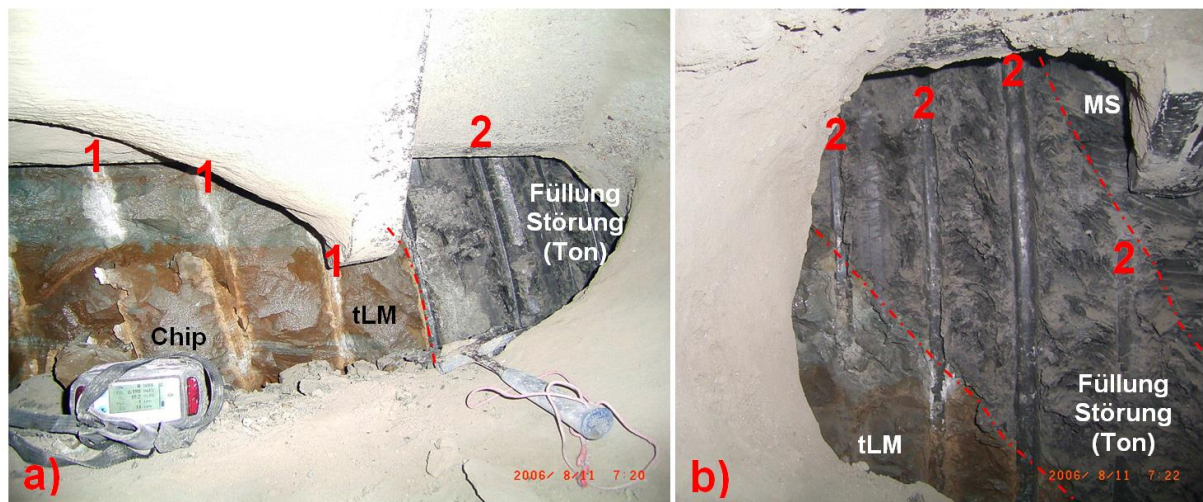


Abbildung 6.17: Störung zwischen Melettaschichten (MS) und Lymnäenmergeln (tLM) (Störungsränder: rot gestrichelt) a) In den Mergelsteinen der Lymnäenmergel sind die Schneidspuren mit Gesteinspulver belegt (1) und es kommt zum Absprennen von Chips. Im schwarzen Ton der Störungsfüllung wurden die Disken in den Boden gedrückt (2) b) Detail der Störungsfüllung mit tief in den Boden gedrückten Diskenspuren (2)

Siebtrommelversuche zeigen, dass die feinkörnigen Gesteine des Tertiärs eine große Bandbreite der Zerfallsbeständigkeit aufweisen (Abb. 6.18).

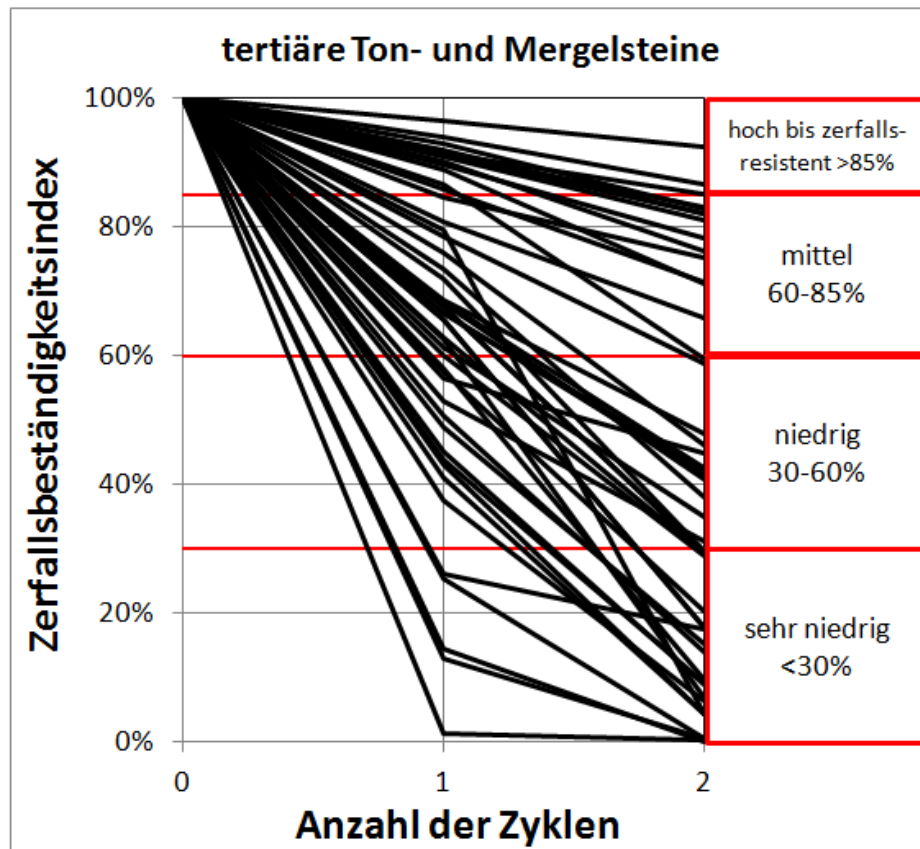


Abbildung 6.18: Ergebnisse der Siebtrommelversuche mit großer Bandbreite der Zerfallsbeständigkeit

Dabei weist der Hauptteil der feinkörnigen Festgesteine nur eine sehr niedrige Zerfallsbeständigkeit auf. Lediglich 6,1% der Festgesteine kann aufgrund der Siebtrommelversuche eine hohe Zerfallsbeständigkeit zugewiesen werden (Abb. 6.19).

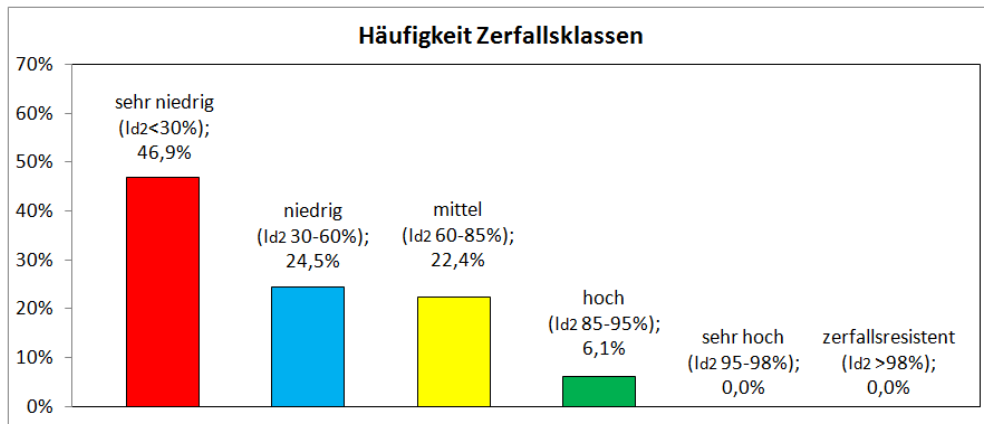


Abbildung 6.19: Häufigkeit der Zerfallsbeständigkeitsklassen auf Basis der Siebtrommelversuche

Während die veränderlich festen Gesteine in Kapitel 5 mit dem modifizierten Siebtrommelversuch untersucht wurden und somit analog zum Lockergestein bewertet werden können (vgl. Kap. 5), wurden ähnliche Untersuchungen an den feinkörnigen Gesteinen von Projekt A nicht durchgeführt. Anzumerken ist, dass das erweiterte Untersuchungsverfahren erst 2011 von Hollmann & Thewes [62] vorgeschlagen wurde, der Durchschlag von Projekt A aber bereits 2007 erfolgte. Die entsprechenden Proben liegen nicht mehr vor. Dementsprechend sind die in Kapitel 5 aufgeführten Fehleinschätzungen der Siebtrommelindizes möglich. Außerdem ist nicht auszuschließen, dass einzelne Versuchsergebnisse an Lockergesteinen bestimmt wurden.

Im Rahmen der Vortriebe wurden bereichsweise hohe Bergwasserzutritte in die Abbaukammer angetroffen (Abb.6.20). Die Dokumentation erfolgte durch Messungen und einvernehmliche Schätzungen. Dabei konnte das Wasser über die Laibung des gesamten Schildbereichs und von der Ortsbrust in die Abbaukammer zufließen.

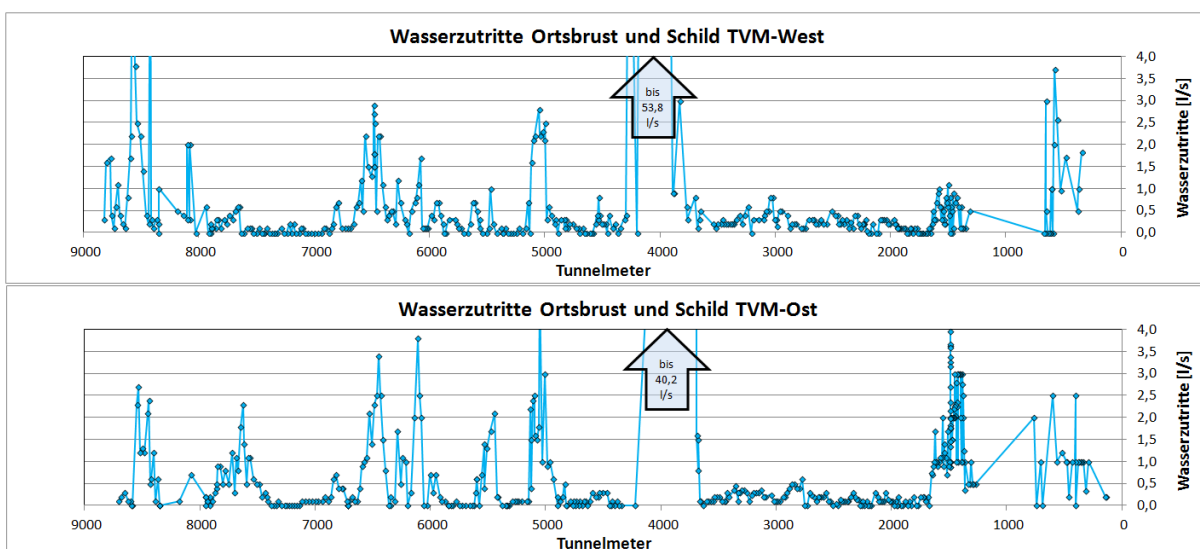


Abbildung 6.20: Wasserzutritte in die Abbaukammer im Bereich beider Vortriebsmaschinen

Bergwasserzutritte erfolgten vor allem aus Klüften der relativ spröden Gesteine des Tertiärs (Konglomerate, Sand- und Kalksteine) (Abb. 6.21-a) und aus Karsthohlräumen der jurassischen Kalksteine. Im Bereich einer Großstörung wurden auch massive Wasserzutritte aus offenen Klüften der feinkörnigen Fischechiefer beobachtet (Abb. 6.21-b).



Abbildung 6.21: a) Wasserzutritte aus Sandsteinen an der Ortsbrust b) Wasserzutritt aus einer offenen Kluft der Fischechiefer im Firstbereich

Während Bergwasser im offenen Vortriebsmodus ungehindert zufließen kann, soll der als Stützmedium fungierende Erdbrei Wasserzutritte in die Abbaukammer verhindern (vgl. Kap. 2.2.5 und 3.2.5.3). Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die unterschiedlichen Vortriebsmodi getrennt behandelt.

6.2.1.4. Geschlossener Vortriebsmodus mit Erdbreistützung

Der Vortrieb im geschlossenen Modus mit Erddruckstützung erfolgte in mehreren Bereichen aus unterschiedlichen Gründen und war vor allem bei geringer Überlagerung und hohen Wasserzutritten erforderlich (Abb. 6.22).

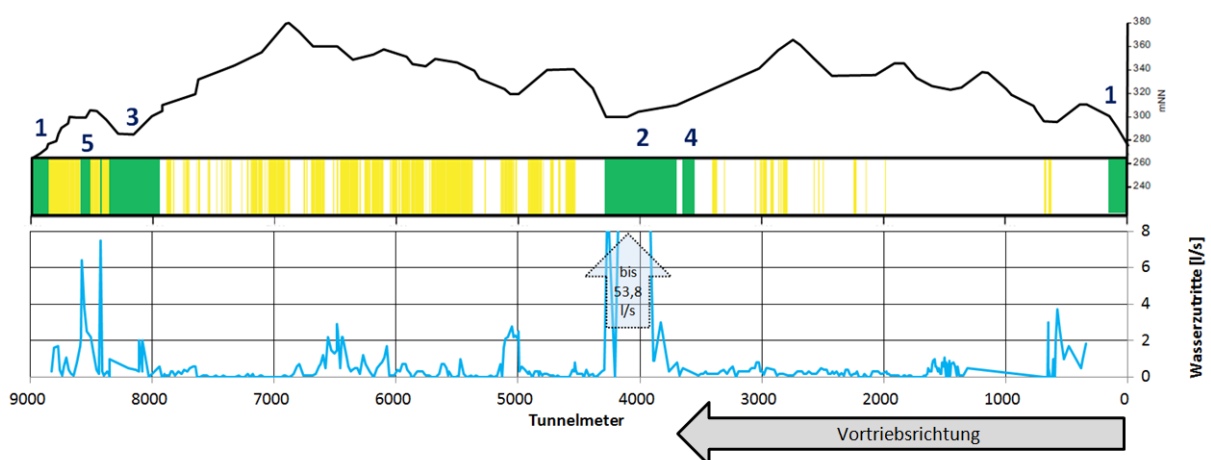


Abbildung 6.22: Verteilung der Vortriebsmodi der TVM-West (weiß: offen/atmosphärisch, gelb: halboffen/Teilfüllung und Druckluftstützung, grün: geschlossen/Erddruckstützung) in Abhängigkeit von Überlagerung und Wasserzutritten

Auch im Bereich einer durch den Auftraggeber angeordneten „Analysestrecke“ und bei der Unterfahrung eines Rutschhangs mit Wohnbebauung erfolgte der Vortrieb im geschlossenen Modus (Tab. 6.3).

Tunnelmeter		Länge	Begründung der Wahl des Vortriebsmodus	Bereich Abb. 6.24
von	bis	[m]		
0	155	155	Anfahrbereich mit niedriger Überlagerung	1
3550	3649	99	Anordnung des AG ("Analysestrecke")	4
3699	4288	589	Störzone mit nachbrüchigen bis gebrächen Ortsbrustverhältnissen und Bergwasserzutritten bis 53,8 l/s	2
7950	8350	400	Unterfahrung eines Rutschhangs mit Wohnbebauung	3
8422	8436	14	hohe Wasserzutritte	5
8520	8596	76	hohe Wasserzutritte	5
8900	8984	84	Ausfahrbereich mit niedriger Überlagerung	1

Tabelle 6.3: Vortrieb der TVM-West mit Erddruckstützung und Begründung der Wahl des Vortriebsmodus

Im Folgenden werden die Unterfahrung des Rutschhangs (Bereich 3) und der Vortrieb im Bereich der Störzone (Bereich 2) genauer betrachtet.

Im Gegensatz zum Vortrieb im offenen Modus ist im geschlossenen Modus mit Erddruckstützung ein Zerfall des Gesteins in feinkörnige Bestandteile gewünscht, um einen Erdbrei als Stützmedium zu erzeugen. Die Darstellung der tertiären Tone und Mergel aus Abbildung 6.16 im neuen Bewertungsdiagramm aus Kapitel 4 zeigt, dass die Böden im natürlichen Zustand nicht als Erdbrei geeignet sind und eine entsprechende Zunahme des Wassergehalts erfordern (Abb. 6.23). Die Rote Leitschicht ist nicht dargestellt, da sie in den Vortriebsbereichen mit Erddruckstützung nicht angetroffen wurde.

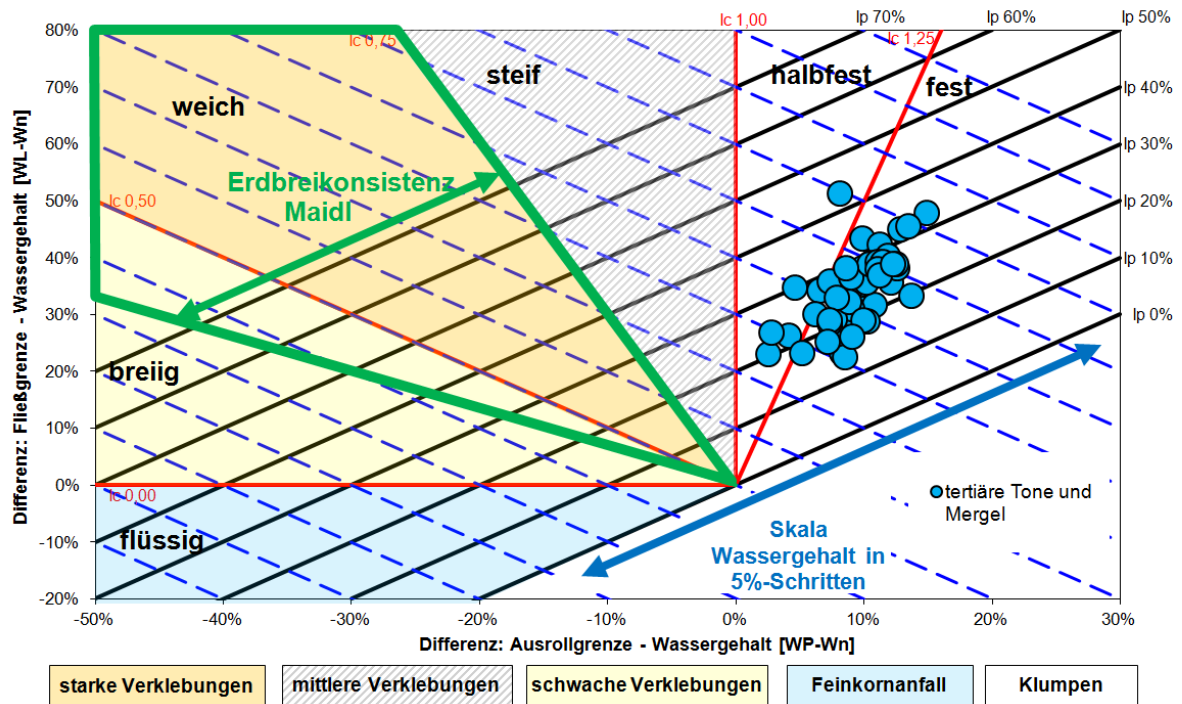


Abbildung 6.23: Darstellung der tertiären Tone und Mergel im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10.

Das Ausbruchsmaterial muss somit durch Wasserzugaben in die Abbaukammer in einen als Stützmedium geeigneten Erdbrei konditioniert werden (Abb. 6.24). Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, wird das Ausbruchsmaterial dabei automatisch auch in den Konsistenzbereich von Verklebungsmaterial verschoben. Zusätzlich kann die Zugabe anderer Konditionierungsmittel, wie z.B. Schäume, erforderlich sein. Bei diesem Projekt war der Einsatz von Additiven aus ökologischen Gründen möglichst zu minimieren.



Abbildung 6.24: Vergleich von nicht konditioniertem Ausbruchsmaterial mit Erdbrei a) Förderband mit trockenem Ausbruchsmaterial im offenen Modus. b) Förderband mit Erdbrei im geschlossenen Modus

Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einer Ortsbrust mit Festgesteinsanteilen selten das gesamte Ausbruchsmaterial in einen Erdbrei konditioniert werden kann. Bei diesem Projekt wurden beispielsweise auch Kalk- und Sandsteine mit einaxialen Druckfestigkeiten bis 130

MPa und ohne Zerfallsneigung angetroffen. Der Erdbrei enthält somit neben der feinkörnigen Matrix auch Gesteinsbruchstücke in Kies- und Steinkorngröße (Abb. 6.25).

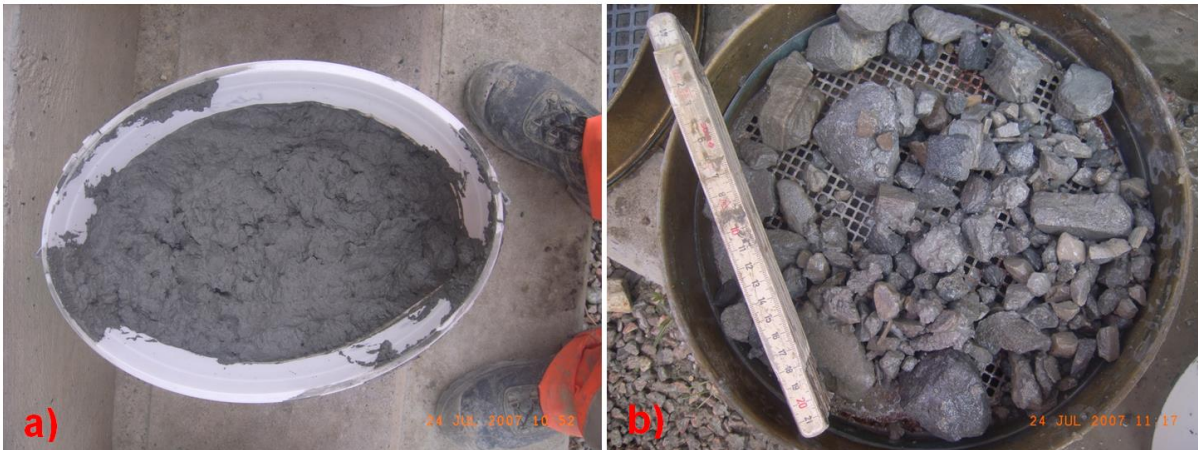


Abbildung 6.25: a) Erdbreiprobe b) Nicht konditionierbare Gesteinsbruchstücke (Kalk- und Sandstein) des Erdbreis, nachdem die feinkörnige Matrix ausgewaschen wurde

Die in Abbildung 6.18 dargestellten Siebtrammelerggebnisse deuten darauf hin, dass selbst die feinkörnigen Festgesteine bereichsweise nicht vollständig konditionierbar sind, da vereinzelte Proben eine hohe Zerfallsbeständigkeit aufwiesen. Eindeutige Angaben dazu sind allein aufgrund der Siebtrammelindizes nicht möglich. Der erweiterte Siebtrammelversuch entsprechend Kapitel 5 mit Kornverteilungskurven der Zerfallsprodukte ließe auch im Hinblick auf die Konditionierung veränderlich fester Gesteine genauere Aussagen zu, wurde bei diesem Projekt aber noch nicht durchgeführt.

Im Vortriebsbereich des Rutschhangs zwischen TM 7950 und 8350 (bezogen auf die Weströhre, Bereich 3 in Abb. 6.22) wurden systematisch Erdbreiprobe entnommen und der Wassergehalt der feinkörnigen Matrix bestimmt. Im Vergleich zum mittleren Wassergehalt der Ortsbrustproben kann die Wassergehaltszunahme im Rahmen der Konditionierung abgeschätzt werden (Abb. 6.26).

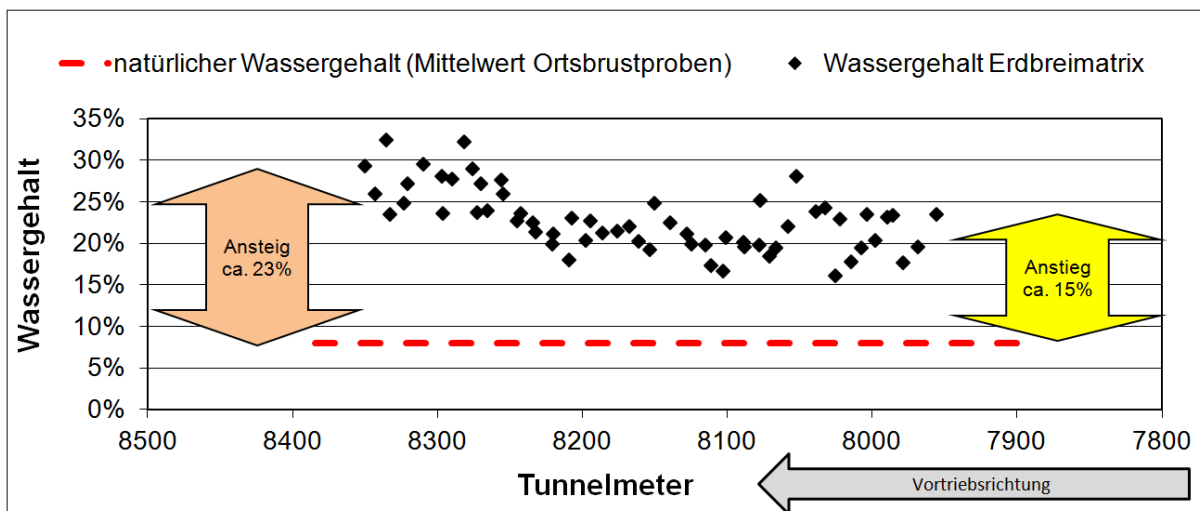


Abbildung 6.26: Wassergehalte der Erdbreiprobe im Vergleich zum natürlichen Boden [61, modifiziert]

Während der Vortriebe wurde die günstigste Wasserzugabe nach Erfahrung der Schildfahrer eingestellt, wobei sich im Hinblick auf Verklebungen eine möglichst niedrige Breikonsistenz, bei der die Förderschnecke druckdicht blieb, als besonders günstig erwies. Aus Abbildung 6.26 ist abzuleiten, dass dabei die Wassergehaltserhöhung vom natürlichen Boden zum Erdbrei im Laufe des Vortriebs von etwa 15% auf etwa 23% zugenommen hat. Die Beurteilung im allgemeinen Bewertungsdiagramm zeigt, dass der Hauptteil der tertiären Böden (Mittelwert aus Abbildung 6.23) bei der Wassergehaltserhöhung zwischen 15% und 23% im Rahmen der Konditionierung in den Konsistenzbereich für Erdbrei nach Maidl et. al [83] verschoben wurde (Abb. 6.27). Dabei führte die Wassergehaltserhöhung von 15% allerdings zu einer Verschiebung an die Obergrenze der Erdbreikonsistenz und in den Grenzbereich der mittleren zu den starken Verklebungen. Durch die Wassergehaltserhöhung von 23% wurde eine Verschiebung an die Untergrenze der Erdbreikonsistenz in den Bereich der schwachen Verklebungen, bei denen das Verklebungsmaterial eine geringere Scherfestigkeit hat, erreicht.

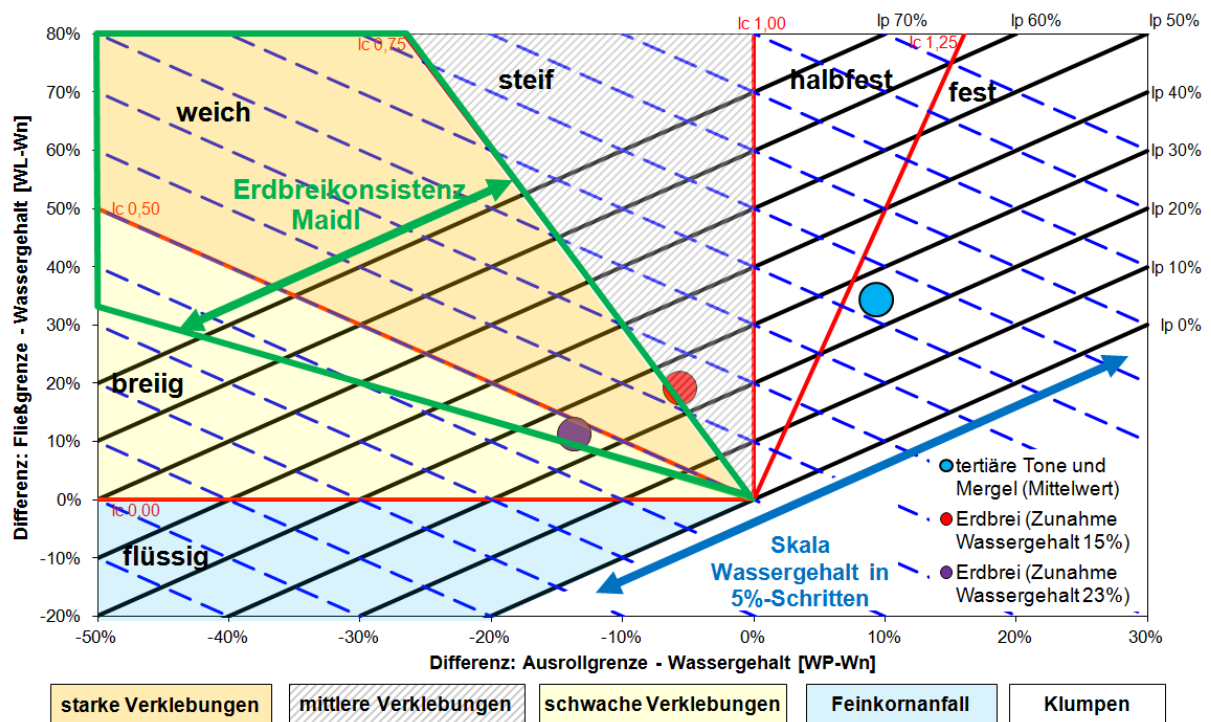


Abbildung 6.27: Verschiebung der tertiären Tone und Mergel im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10 infolge der aus den Erdbreiprüfungen abgeleiteten Wassergehaltserhöhungen

Die für den Hauptteil der tertiären Tone und Mergel günstigste Wassergehaltserhöhung bei der Erdbreikonditionierung im Hinblick auf Verklebungen liegt demnach bei 23% und wäre mit dem allgemeinen Bewertungsdiagramm schon im Vorfeld des Vortriebs abschätzbar gewesen (Voraussetzung: Wassergehalt und Atterberggrenzen des natürlichen Bodens sind bekannt). Anzumerken ist, dass aus wirtschaftlichen Gründen auch eine höhere Konsistenz des Erdbreis sinnvoll sein kann. Beispielsweise ist die dann höhere Verklebungsneigung mit einem geringeren Deponierungsaufwand und einem geringeren Wasserverbrauch verbunden.

Zur Überprüfung der Aussagekraft des allgemeinen Bewertungsdiagramms wird die theoretisch notwendige Wasserzugabe zu den Wassergehaltserhöhungen aus Abbildung 6.27 be-

rechnet und mit dem tatsächlichen Konditionierungsaufwand des Projekts verglichen. Dabei gelten die folgenden Randbedingungen:

- Schneidraddurchmesser 11,16; Ringlänge 2 m (\rightarrow 195,6 m³ Ausbruchsvolumen/Vortrieb)
- 80% Anteil konditionierbarer Ton (\rightarrow 156,5 m³ Ausbruchsvolumen/Vortrieb); abgeleitet aus Anteilen Gesteinsbruchstücke im Erdbrei (vgl. Abb. 6.26)
- Wassergehaltserhöhung im Rahmen der Konditionierung nach Abb. 6.26 bzw. 6.27
- Mittelwerte des natürlichen Bodens (\rightarrow Wassergehalt: 7,6%, Feuchtdichte: 2,6 t/m³)

Aus den Mittelwerten von Wassergehalt (W) und Feuchtdichte (ρ) des Tons kann dabei zunächst entsprechend Gleichung (21) die Trockendichte (ρ_d) ermittelt werden (Tab. 6.4).

$$\rho_d = \rho / (1 + W) \quad (21)$$

Nach Gleichung (22) wird dann anhand des Ausbruchsvolumens (V) des Tons die Trockenmasse (m_d) des Tons berechnet (Tab. 6.4).

$$\rho_d = m_d / V \quad (22)$$

Die notwendige Masse Wasser (m_W) zur Erhöhung des Wassergehalts um 15% bzw. 23% kann dann aus Gleichung (23) abgeleitet werden (Tab. 6.4).

$$W = m_W / m_d \quad (23)$$

Baugrund			Vortrieb		berechnete Werte			
Feuchtdichte	Wassergehalt	Ortsbrustanteil Ton	Ausbruchsvolumen	Wassergehaltserhöhung Konditionierung	Ausbruchsvolumen Ton	Trockendichte Ton	Trockenmasse Ton	notwendige Wasserzugabe
[t/m ³]			[m ³]		[m ³]	[t/m ³]	t	t
2,6	7,6%	80%	195,6	15,0%	156,5	2,4	370,9	55,6
2,6	7,6%	80%	195,6	23,0%	156,5	2,4	370,9	85,3

Tabelle 6.4: Ermittlung der notwendigen Wasserzugabe bei vorgegebener Wassergehaltserhöhung des Bodens im Rahmen der Konditionierung. Die Randbedingungen aus Baugrund und Vortrieb sind gelb und das Ergebnis ist grün hinterlegt

Die Wassergehalte der Erdbreiprüfungen aus Abbildung 6.26 können entsprechend Tabelle 6.4 in theoretische Wasserzugaben umgerechnet werden und stimmen relativ gut mit den tatsächlichen Wasserzugaben beim Vortrieb überein (Abb. 6.28). Die aus dem allgemeinen Bewertungsdiagramm abgeleitete optimale Wassergehaltserhöhung von 23% führt zu einer Wasserzugabe von 85,3 t pro Vortriebszyklus (Tab. 6.4) und stimmt gut mit der tatsächlichen Konditionierung am Ende der Vortriebsstrecke im geschlossenen Modus überein (ca. TM 8300 in Abb. 6.28).

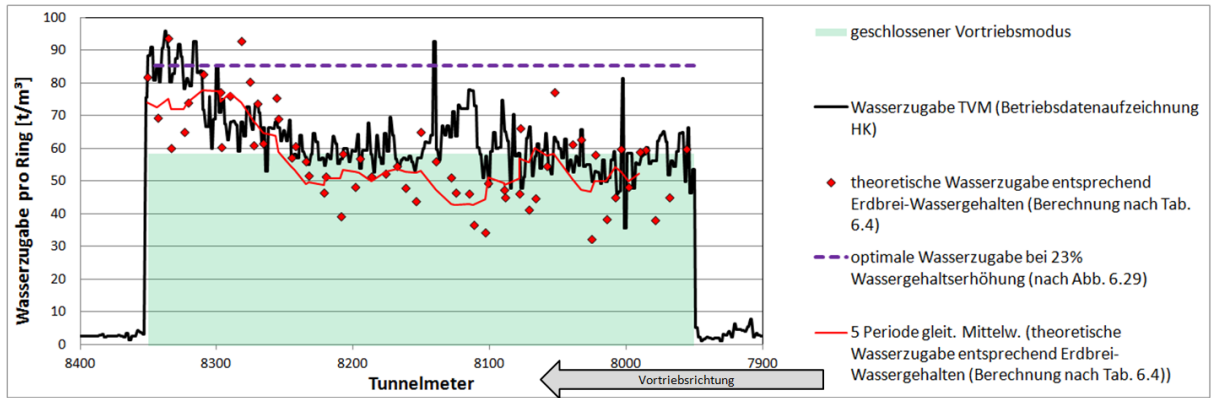


Abbildung 6.28: Gegenüberstellung der tatsächlichen und theoretischen Wasserzugaben pro Tunnelmeter

Im Vortriebsbereich zwischen TM 3699 und 4288 (bezogen auf die Weströhre, Bereich 2 in Abb. 6.22) verlief der Vortrieb innerhalb einer Großstörung im geschlossenen Modus. Im Bereich der Störzone wurden stark zerrüttete Gesteine der Fischschiefer und der Melettaschichten mit starken Kluftwasserzutritten angetroffen. Die Erddruckstützung war sowohl aufgrund des nachbrüchigen bis gebrächen Gebirgsverhaltens als auch aufgrund der Wasserzutritte erforderlich (Abb. 6.29).

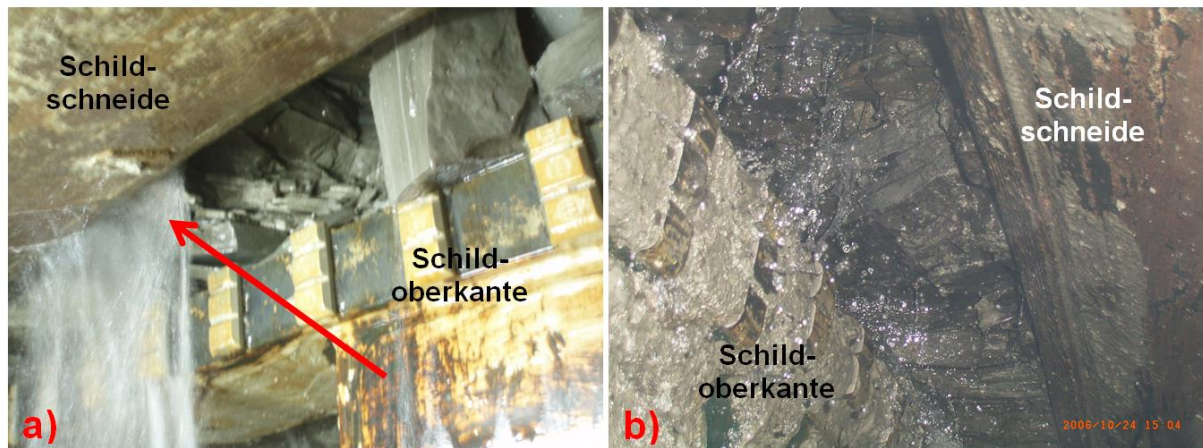


Abbildung 6.29: Firstbereich innerhalb der Störzone nach Teilabsenkung des Erdbreis a) Nachbrüche innerhalb der Melettaschichten und Wasserzutritt über den Schild (Pfeil) b) Stark zerrüttete Fischschiefer mit Wasserzutritten

Im Gegensatz zu Porengrundwasserleitern mit gleichmäßigen Wasserzutritten aus den Poren tritt Wasser in Festgesteinsabfolgen hauptsächlich punktuell aus offenen Klüften zu (vgl. Abb. 6.21-b). Es kann daher in der Regel nicht ausreichend durch Druckluft verdrängt werden. Bei Wasserzutritten bis fast 54 l/s kam es bei Absenkungen des Erdbreis zu schnellen Anstiegen des Wasserspiegels in die Abbaukammer (Abb. 6.30).



Abbildung 6.30: Teilabsenkung des Erdbreis a) Wasseranstieg in der Abbaukammer durch massiven Wasserzufluss (Pfeil) von der Ortsbrust durch eine Schneiradöffnung b) Wasserzutritte über den Schild mit Anstieg des Wasserspiegels in der Abbaukammer

Teilabsenkungen waren vor allem im Hinblick auf Werkzeugkontrollen und –wechsel erforderlich, die besonders erschwert waren (Abb. 6.31-a). Außerdem erwies sich die Wasseraufbereitung der während der Einstiege anfallenden großen Abwassermengen als problematisch, da diese mit Feinkorn angereichert waren (Abb. 6.31-b). Die hohen Zulaufmengen waren trotz eines nachträglich installierten und auf 30 l/s ausgelegten Pufferbeckens kaum beherrschbar.



Abbildung 6.31: a) Blick durch die Luke der Druckluftschleuse in die Abbaukammer: Werkzeugkontrolle innerhalb der Störzone b) Überlauf der Wasseraufbereitungsanlage in ein Pufferbecken. Das überlaufende Wasser entspricht etwa dem gleichzeitig auf der TVM beim Einstieg zulaufenden Bergwasser

Die Wasserzutritte konnten in diesem Vortriebsbereich aufgrund der Randbedingungen nur mit hohem Aufwand dokumentiert werden. Vielfach wurden die Zuläufe aus Bohrungen oder der überlaufenden Abbaukammer gemessen (Abb. 6.32). Es ist davon auszugehen, dass oft nur Mindestwasserzutritte festgehalten wurden.



Abbildung 6.32: a) Messbare Wasserzutritte aus den Bohrungen eines Injektionsschotts b) Messung des Überlaufs der Abbaukammer während der Teilabsenkung des Erdbreis. „Auslitern“ mit einem 200-Liter-Fass

Weh et al. [121] konnten für diesen Vortriebsabschnitt zeigen, dass gerade in Bereichen mit besonders hohen Bergwasserzutritten weniger Wasser zur Konditionierung zugegeben wurde (Abb. 6.33). Es ist davon auszugehen, dass in diesen Bereichen auch im geschlossenen Modus ein Teil des Bergwassers in die Abbaukammer zugelaufen ist. Die Konditionierung des abgebauten Bodens erfolgte dann sowohl mit dem zugegebenen, als auch mit dem zugelaufenen Wasser.

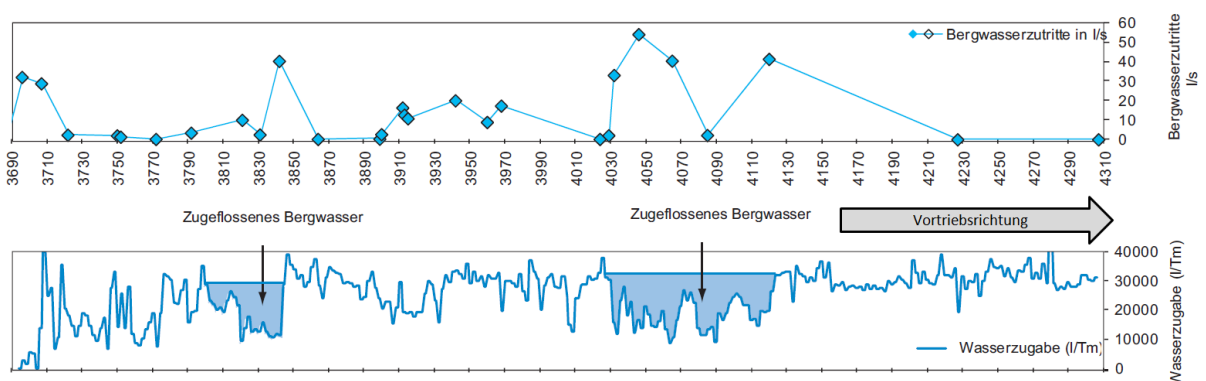


Abbildung 6.33: Gegenüberstellung der Bergwasserzutritte (oben) und der Wasserzugaben zur Konditionierung des Erdbreis (unten). In den blau hinterlegten Vortriebsbereichen ist ein Zulauf von Bergwasser zu erwarten, so dass entsprechend weniger Wasser zugegeben werden musste [121]

Nach Weh et al. führte die Konditionierung mit Schaum dazu, dass sich im Firstbereich eine Druckluftblase oberhalb des Erdbreis bildete, wobei die Druckluft die starken, punktuellen Kluftwasserzutritte in diesem Bereich nicht zurückhalten konnte (vgl. auch Abb. 6.29 und 6.30). Demzufolge wird im Zuge der Konditionierung das Wasser aus dem Schaum in den abgebauten Boden abgegeben, während sich die Luft aus dem Schaum oberhalb des Erdbreis ansammelt.

Die Anwendung des neuen Bewertungsdiagramms nach Abbildung 4.10 ist für diesen Störungsbereich nicht sinnvoll:

- Der Erdbrei wurde nicht systematisch beprobt (Wassergehalte und Anteile an dauerhaft festen Gesteinsbruchstücken im Erdbrei sind nicht bekannt).
- Die zur Konditionierung zugegebene Wassermenge ist nicht repräsentativ, da auch Bergwasser zugeflossen ist.

6.2.1.5. Offener und halboffener Vortriebsmodus

Im Gegensatz zum geschlossenen Modus sind Zerfall und Konsistenzänderung des Gesteins im offenen Modus nicht gewünscht und führen in der Regel zu Erschwernissen. Da das Ausbruchsmaterial sowohl im offenen Modus unter atmosphärischen Bedingungen als auch im halboffenen Modus mit Druckluftbeaufschlagung nicht in der Abbaukammer konditioniert wurde, werden beide Vortriebsmodi zusammen behandelt. Der Vortrieb im offenen und halboffenen Modus erfolgte in allen in Tabelle 6.6 aufgeführten stratigraphischen Einheiten. Im neuen Bewertungsdiagramm ist erkennbar, dass die tertiären Böden mit ihren natürlichen Wassergehalten größtenteils außerhalb des Konsistenzfeldes der Verklebungen liegen und somit unkritisch sind (Abb. 6.34).

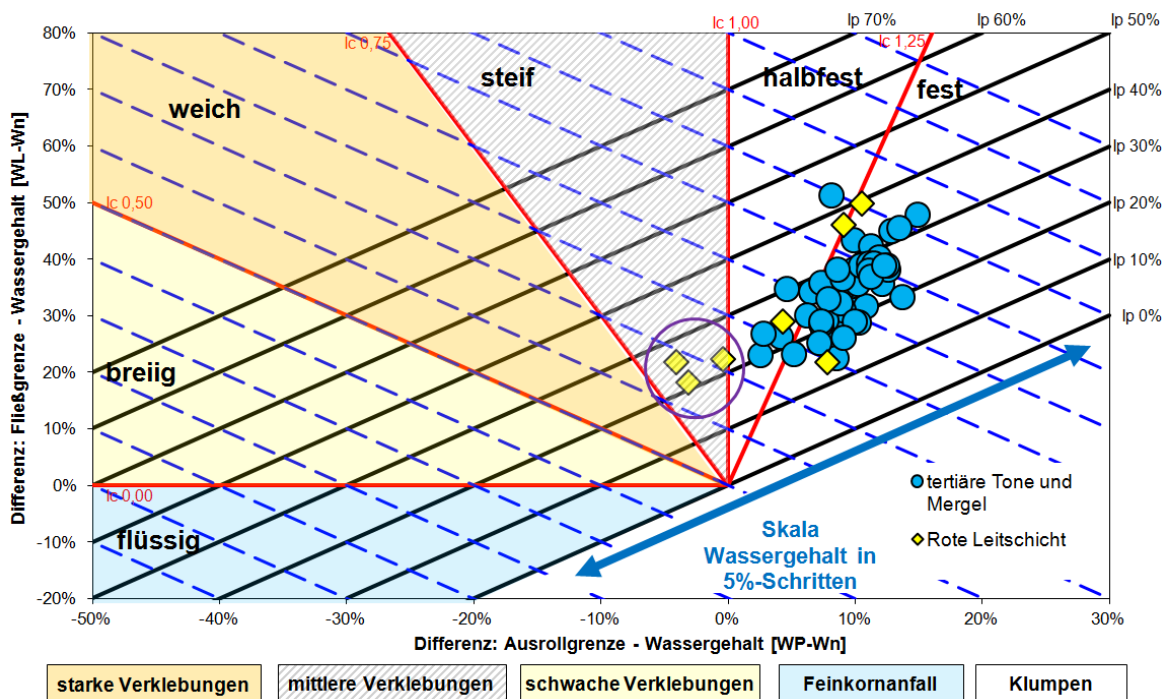


Abbildung 6.34: Einstufung der Böden im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10

Lediglich ein Teil der Böden der Roten Leitschicht liegt bereits im natürlichen Zustand im Konsistenzbereich mittlerer Verklebungen (Abb. 6.34: violett umrandet). Dabei erwies sich die Rote Leitschicht im Hinblick auf Verklebungen als besonders problematisch. Aufgrund der teilweise bereits im natürlichen Zustand kritischen Konsistenz führte diese auch ohne Bergwasser zu Verklebungen. Für den überwiegenden Teil der bindigen Böden kann aus Abbildung 6.34 abgeleitet werden, dass diese im offenen Vortriebsmodus nicht kritisch werden können, sofern keine Bergwasserzutritte auftreten. Auch die veränderlichen Festgesteine benötigen Wasser, um zu zerfallen. So wurden bei trockenen Ortsbrustverhältnissen Vortriebsleistungen über 30 m pro Tag erreicht. Eine Beurteilung erfordert also die Berücksichtigung der Bergwasserzutritte, wobei ein kritischer Grenzwasserzufluss für Projekt A abgeleitet werden kann. Zwischen TM 4500 und 8000 wurde zusätzlich zu den Bergwasserzutritten auch der Verklebungsgrad der Schneidradöffnungen (Quantifizierung von Verklebungen: vgl. Kap. 6.1.2) dokumentiert (Abb. 6.35). Obwohl für diesen Vortriebsabschnitt eine relativ gute Abhängigkeit zwischen Verklebungen und Wasserzutritten nachgewiesen werden konnte, sind die Maxima von Verklebungsgrad und Bergwasserzufluss, bezogen auf den Tunnelmeter, bereichsweise gegeneinander versetzt (Abb. 6.35, Beispiele: rote Pfeile). Die Ursache hierfür liegt vor allem an der eingeschränkten Sicht bei starken Verklebungen, so dass gerade die stärksten Wasserzutritte oft nicht vollständig dokumentiert werden können. Vor TM 4500 wurde keine systematische Dokumentation der Verklebungen durchgeführt.

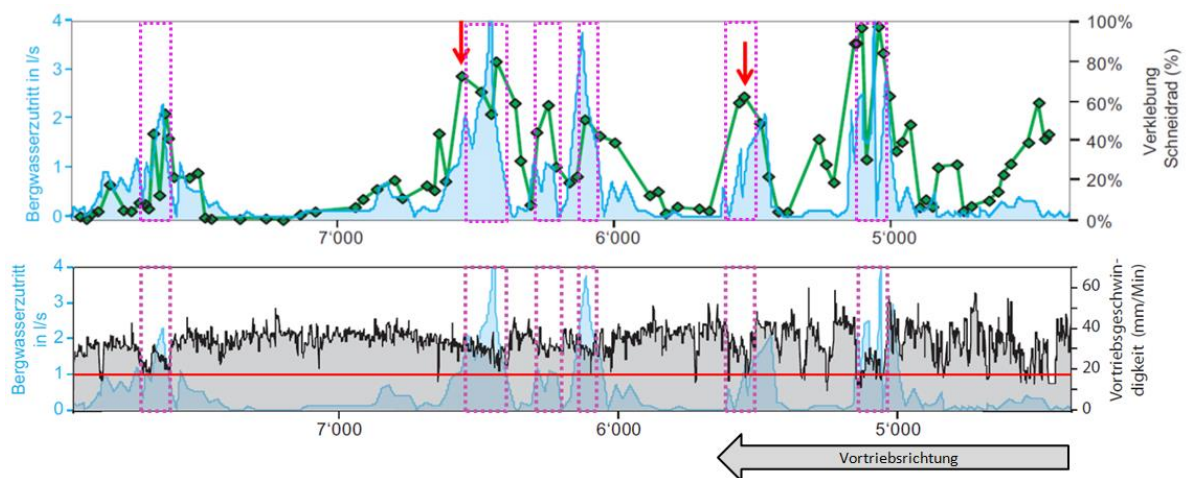


Abbildung 6.35: oberes Diagramm: Abhängigkeit zwischen Bergwasserzutritten (blau) in die Abbaukammer und Verklebungsgrad des Schneidrads (grüne Linie) am Beispiel der TVM-Ost [3, modifiziert]; unteres Diagramm: Rücknahme der Vortriebsgeschwindigkeit (schwarze Linie) in Abhängigkeit der Bergwasserzutritte (blau). Definition kritischer Bereiche mit deutlicher Reduzierung der Vortriebsgeschwindigkeit (pinkfarbene Kästchen) und kritischer Grenzwassermenge von 1 l/s (rote Linie) [3, modifiziert]

Insgesamt kann für dieses Projekt ein kritischer Grenzwasserzufluss von 1 l/s mit deutlichen Zunahmen des Verklebungsgrads (Abb. 6.35: oberes Diagramm) und Abnahmen der Vortriebsgeschwindigkeit (Abb. 6.35: unteres Diagramm) abgeleitet werden. Dabei geht aus Abbildung 6.35 eine mittlere Vortriebsgeschwindigkeit von 37 mm/min bei Wasserzutritten <1 l/s hervor, die bei >1 l/s im Bereich von stärkeren Verklebungen auf im Mittel 27 mm/min abnahm.

Durch Bergwasserzutritte kam es während des Ringbaus oder anderer Vortriebsstillstände zu Wasseransammlungen in der Abbaukammer (Abb. 6.36).

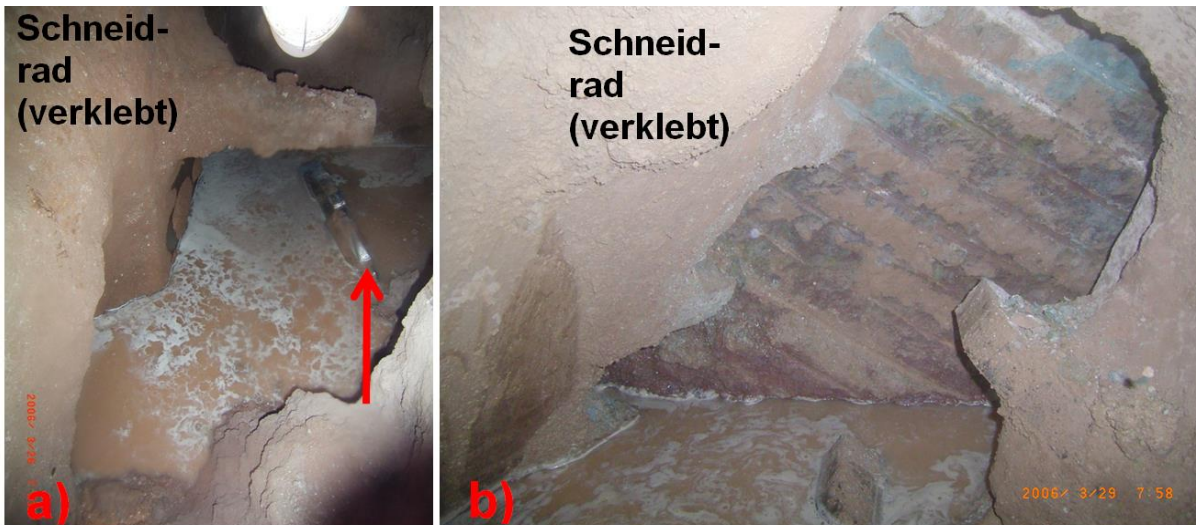


Abbildung 6.36: a) Wasseransammlung in der Abbaukammer infolge von Bergwasserzutritten während des Ringbaus (Oberkannte Förderschnecke: roter Pfeil) b) Blick durch die Schneidradöffnung auf die Ortsbrust

Bei Bergwasserzutritten ist dementsprechend im Anschluss an einen Stillstand in der Regel eine größere Menge an Wasser verfügbar, als während des restlichen Vortriebs. Die Konsistenz des Ausbruchsmaterials ändert sich dann mit zunehmendem „Verbrauch“ des angesammelten Bergwassers. Bei entsprechender Wasseransammlung in der Abbaukammer können alle Konsistenzbereiche zwischen flüssig und fest vorkommen (Abb. 6.37).



Abbildung 6.37: Unterschiedliche Konsistenzbereiche des Ausbruchsmaterials infolge Bergwassers

Die während eines Vortriebs wechselnde Konsistenz kann im allgemeinen Bewertungsdiagramm als Reihe von Bandproben dargestellt werden (Abb. 6.38).

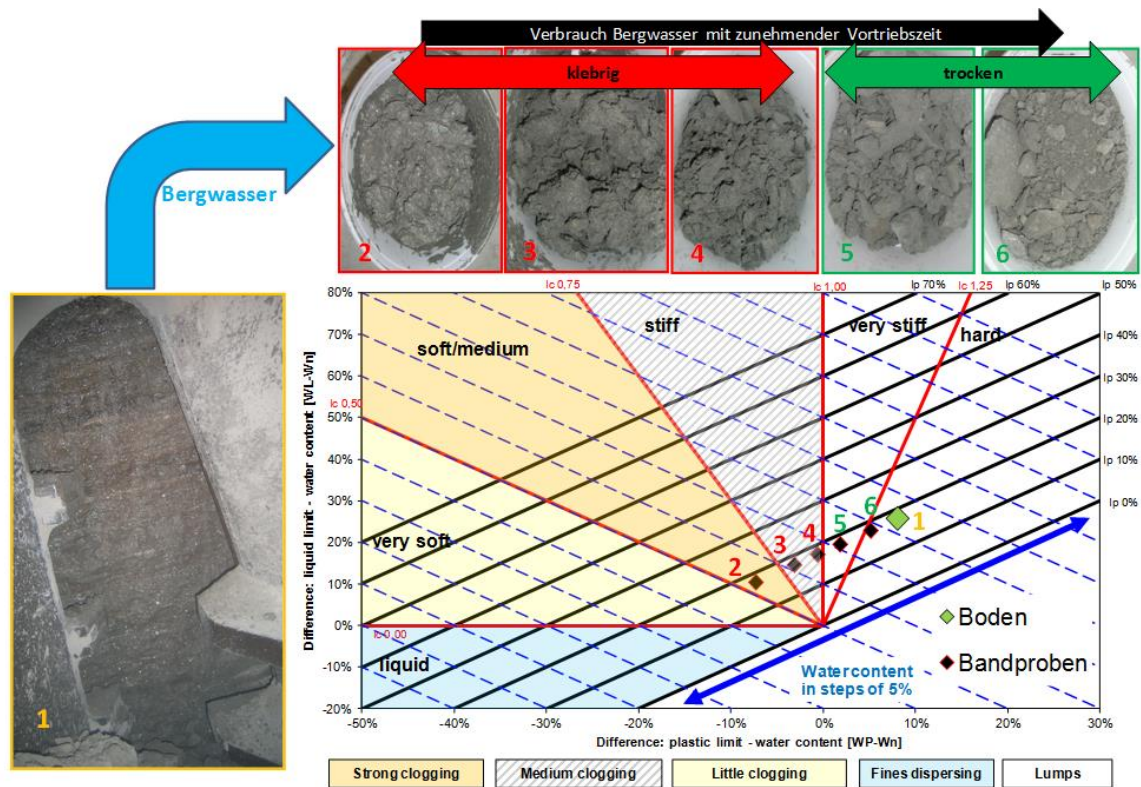


Abbildung 6.38: Konsistenzänderung des Ausbruchsmaterials infolge Bergwassers und Verschiebung der Wertepaare im neuen Bewertungsdiagramm [67]

Das Beispiel zeigt, dass der im natürlichen Zustand unkritische Boden (Probe 1) zum Zeitpunkt des Vortriebsbeginns aufgrund des während des Stillstands zugelaufenen Bergwassers zunächst in Verklebungsmaterial (Probe 2 bis 4) umgewandelt wurde. Im weiteren Vortriebsverlauf wurde nach dem Aufbrauch des Wassers wieder Material mit unkritischer Konsistenz gefördert (Probe 5 und 6).

Wassergehaltsbestimmungen von Bandproben zeigen nicht nur mögliche Konsistenzbereiche, sondern auch Unterschiede der Vortriebsdauer, bis kritische Konsistenzbereiche durchlaufen wurden (Abb. 6.39). Die Unterschiede hängen dabei sowohl vom Bergwasserzufluss als auch von der Stillstandsdauer ab.

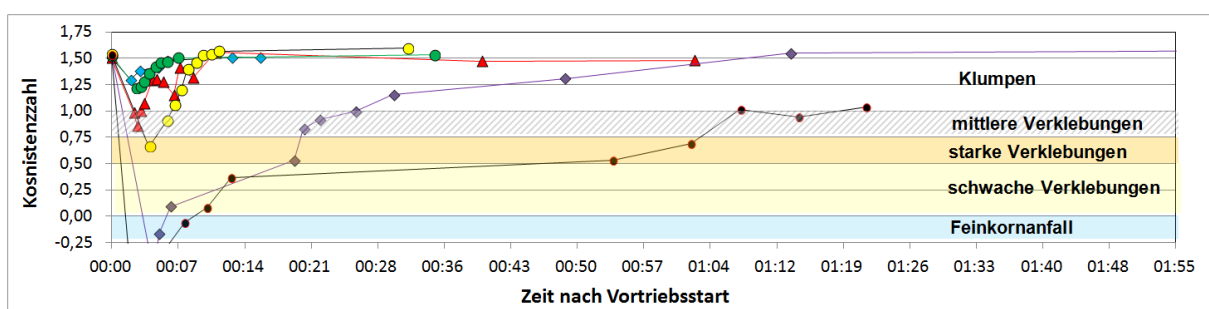


Abbildung 6.39: Entwicklung der Konsistenz mit der Vortriebszeit („wirksame“ Konsistenzbereiche des neuen Bewertungsdiagramms). Jede Datenreihe entspricht den Wassergehalten eines Hubs

So reichte die verfügbare Wassermenge zum Teil nicht aus, um kritische Umwandlungen zu erzeugen (grüne und blaue Kurve), während in anderen Fällen über eine Stunde lang Material mit kritischer Konsistenz gefördert wurde (schwarze Kurve)

In Kapitel 6.2.1.4 wurde die zur Konditionierung des Erdbreis im geschlossenen Modus notwendige Wasserzugabe berechnet (Tab. 6.4). Die entsprechende optimale Wassergehaltserhöhung wurde aus dem neuen Bewertungsdiagramm abgeleitet (Abb. 6.27). Zur Berechnung wurde eine gleichmäßige Wassergehaltserhöhung des Bodens infolge der Konditionierung angenommen. Vergleichbare Berechnungen sind für den offenen Modus nicht möglich, da die zugelaufene Bergwassermenge nicht zu einer gleichmäßigen Wassergehaltserhöhung führt. Wie am Beispiel der Bandreihe in Abbildung 6.38 dargestellt, würden die Proben aus Abbildung 6.39 im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10 einen großen, teilweise sogar den gesamten Konsistenzbereich abdecken. Die Aussagekraft wäre gering. Allerdings sind für den offenen Modus Vergleich unterschiedlicher Projekte möglich (vgl. Kap. 6.2.2).

Die häufigen Konsistenzwechsel des Ausbruchsmaterials können relativ feste Strukturen entstehen lassen, die von Weh als Verbackungen beschrieben werden [119, 120, 121]. Dabei kommt es durch An- und Einpressen von trockenem Ausbruchsmaterial in das breiig bis steife Verklebungsmaterial zum Anwachsen und Versteifen der Verklebung (Abb. 6.40).



Abbildung 6.40: a) Schälspur des Agitators in einer relativ trockenen Verbackung b) Schichtartiger Aufbau einer Verklebung/Verbackung an der Druckwand nach Baugrundwechsel (außen: schwarzes, trockenes Material, Mitte: hellbraunes, trockenes Material, innen braunes, steifes Material) c) Probe einer festen Verbackung [67]

Verbackungen können nur entstehen, wenn nach der Ausbildung der eigentlichen Verklebung auch trockenes Ausbruchsmaterial gefördert wird, also kein oder nur wenig freies Wasser verfügbar ist. Die Entstehung von Verbackungen ist damit auf offen gefahrene Schildvortriebe beschränkt.

6.2.1.6. Erkenntnisse

Das Projekt zeigt, dass auch bei Schildvortrieben im Fels Verklebungen auftreten können. In diesem Fall waren sowohl feinkörnige Lockergesteine innerhalb der Festgesteinsabfolgen als auch veränderlich feste Gesteine als Ursache zu sehen. Dabei traten Probleme vor allem in offen gefahrenen Vortriebsbereichen mit hohen Bergwasserzutritten auf, während unter trockenen Bedingungen relativ hohe Vortriebsleistungen erreicht wurden. Folgende Aussagen können aus den Vortrieben abgeleitet werden:

- Veränderlich feste Gesteine und bindige Böden mit im Hinblick auf Verklebungen unkritischer Ausgangskonsistenz können ohne Zutritt oder Zugabe von Wasser nicht kritisch werden.
- Bei offen gefahrenen Schildvortrieben wird bei Bergwasserzutritt während des Vortriebszyklusses Ausbruchsmaterial mit unterschiedlicher Konsistenz gefördert. Dadurch wird die Bewertung der Verklebungsneigung erschwert.
- Eine Konditionierung des Ausbruchsmaterials in einen als Stützmedium geeigneten Erdbrei ist auch in Festgesteinsabfolgen möglich, sofern diese ausreichende Anteile an bindigen Böden und/oder an feinkörnigen, veränderlich festen Festgesteinen enthalten. Dauerhaft feste Festgesteine können dabei nicht konditioniert werden und sind als Gesteinsbruchstücke im Erdbrei enthalten. Der Erdbrei ist also im Gegensatz zu Vortrieben im Lockergestein inhomogener.
- Obwohl mit Erddruckstützung auch Vortriebsbereiche mit extremen Randbedingungen beherrschbar sind (z.B. bis 54 l/s Bergwasserzutritte), können Wasserzutritte in Kluftgrundwasserleitern nicht immer verhindert werden. Das gilt dann, wenn sich infolge der Schaumersetzung bei der Konditionierung Luft oberhalb des Erdbreis ansammelt.
- Die Konditionierung von Böden kann mit dem allgemeinen Bewertungsdiagramm abgeschätzt werden, sofern die entsprechenden Bodenkennwerte (Wassergehalt, Feuchtdichte, Atterberggrenzen) bekannt sind.

6.2.2. Hydroschildvortrieb/Offener Schildvortrieb (Projekt B)

6.2.2.1. Baugrundverhältnisse

Der Vortrieb verlief überwiegend in triassischen Festgesteinen. Dabei wurden Schichteinheiten des Keupers, Muschelkalks und Buntsandsteins durchfahren. Bereichsweise lagen einzelne Gesteine innerhalb der Festgesteinsabfolge als Lockergestein vor, wobei die Ursache dafür nicht immer eindeutig geklärt werden konnte. Theoretisch sind Entfestigungen durch tektonische Prozesse, Verwitterungsvorgänge oder eine entsprechend geringe Diagenese denkbar. Innerhalb der jeweiligen stratigraphischen Einheiten wurden unterschiedliche Sedimentgesteine angetroffen (Tab. 6.5).

Stratigraphie	Festgesteine	Lockergesteine
Keuper	Tonsteine, Schluffsteine, Mergelsteine, Kalksteine, Sandsteine	Tone, Schluffe
Muschelkalk	Kalksteine, Mergelsteine, Tonmergelsteine	-
Unterer Buntsandstein	Sandsteine, Schluffsteine, Tonsteine	-
Oberer Buntsandstein	Sandsteine, Schluffsteine, Tonsteine	Tone, Schluffe

Tabelle 6.5: Stratigraphische Einheiten mit Zuordnung der Gesteinstypen

Es lagen eine Überlagerung von 4,5 bis 65 m und ein maximaler Grundwasserstand von 50 m oberhalb der Firste vor. Der Hauptteil des Vortriebs verlief in Gesteinen des mittleren Buntsandsteins, wobei Sandsteine mit über 70% Ortsbrustanteil überwogen (Abb. 6.41). Schichten des Keupers und des Muschelkalks wurden lediglich auf den ersten 300 m des Vortriebs angetroffen, wobei diese durch eine mehrere Dekameter mächtige Großstörung von den Gesteinen des Buntsandsteins abgetrennt wurden.

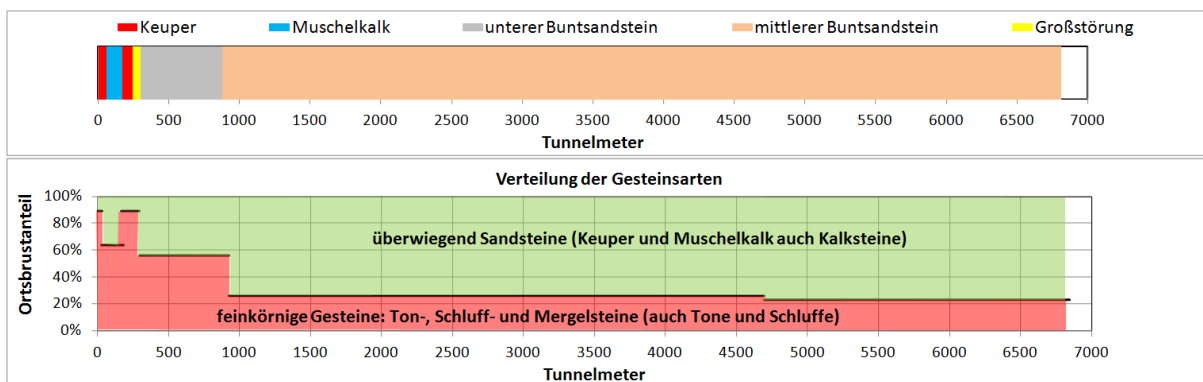


Abbildung 6.41: Verteilung der stratigraphischen Einheiten und der einzelnen Gesteinsarten

6.2.2.2. Vortriebsverfahren

Die beiden Vortriebe wurden mit zwei umbaubaren Mixschildvortriebsmaschinen der Firma Herrenknecht durchgeführt. Das Schneidrad mit 10,8 m Durchmesser (Abb. 6.42) war mit 12 Räumern, 84 Schälmessern und 73 Rollenmeißeln bestückt.



Abbildung 6.42: a) Schneidrad vor Vortriebsbeginn b) Schneidrad nach Vortriebsende

Der Vortrieb begann im Modus „flüssigkeitsgestützte Ortsbrust“. Die Flüssigkeitsstützung war zunächst erforderlich, da der Vortrieb im Einflussbereich einer Großstörung verlief, so dass ständige Wechsel zwischen standfestem Fels und zerrüttetem Gebirge erwartet wurden. Außerdem war in diesem Bereich keine Grundwasserabsenkung zulässig. Die Hydroschildvortriebe wurden wahlweise in zwei Vortriebsmodi ausgeführt: Bei nicht eindeutig standfesten Ortsbrustverhältnissen erfolgte der Vortrieb im geschlossenen Modus mit Vollfüllung der Suspension. Im Bereich standfester Ortsbrustverhältnisse konnte der Suspensionsspiegel zur Hälfte abgesenkt werden, so dass der Vortrieb im halboffenen Modus mit Halbfüllung der Suspension und Druckluftbeaufschlagung der oberen Ortsbrusthälfte erfolgte. Da nach etwa 1530 m innerhalb des Buntsandsteins durchweg standfeste Ortsbrustverhältnisse erwartet wurden, wurde der restliche Vortrieb bis TM 6970 als Schildvortrieb ohne Ortsbruststützung durchgeführt, zumal der Grundwasserstand mittels obertägiger Brunnen abgesenkt werden konnte. Die Maschinen wurden vom Hydroschild in einen offengefahrenen Schild mit Bandförderung umgebaut. Die unterschiedlichen Vortriebsmodi beider Maschinen können Abbildung 6.43 entnommen werden, wobei der Vortrieb mit Halbfüllung bei der nachlaufenden TVM aufgrund der Erkenntnisse des ersten Vortriebs häufiger umgesetzt werden konnte.

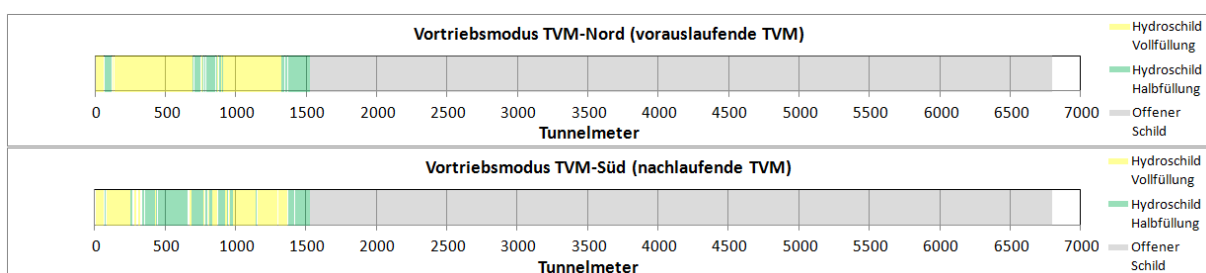


Abbildung 6.43: Verteilung der Vortriebsmodi

6.2.2.3. Verklebungen und Feinkornanfall

Die in diesem Kapitel beschriebenen Erfahrungen basieren vor allem auf einer umfangreichen vortriebsbegleitenden Dokumentation der Schildvortriebe (Tab. 6.6).

Dokumentation/Probennahme mit Wassergehaltsbestimmung	Anzahl
Ortsbrustaufnahmen	357
Verklebungsgrad Schneidrad	193
Wasserzutritte (Messungen und Schätzungen)	335
Ortsbrustproben	498
Verklebungsproben	58
Bandproben	115
Proben Separationsanlage	311

Tabelle 6.6: Zusammenstellung der vortriebsbegleitenden Dokumentationen der Schildvortriebe

Weitere Probennahmen und Dokumentationen erfolgten bei den konventionellen Vortrieben von 13 Querschlägen und zwei vortriebsbegleitend hergestellten Kernbohrungen. Die Wassergehalte an allen Proben wurden zeitnah auf der Baustelle bestimmt. Außerdem wurden zahlreiche Laborversuche an verschiedenen Instituten durchgeführt. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird hauptsächlich auf die im Hinblick auf Verklebungen relevanten Eigenschaften der feinkörnigen Gesteine eingegangen.

Während beim Hydroschildvortrieb Erschwernisse durch Verklebungen und einen hohen Feinkornanfall auftraten, verlief der Schildvortrieb ohne Ortsbruststützung im weitestgehend trockenen Gebirge. Im Folgenden werden daher beide Vortriebsabschnitte zunächst getrennt voneinander betrachtet.

6.2.2.4. Hydroschildvortrieb (TM 0 bis ca. 1530)

Im Bereich des Keupers und des Buntsandsteins sind die feinkörnigen Gesteine anhand ihrer Atterberggrenzen aus bautechnischer Sicht weitestgehend als mittel- bis ausgeprägt plastische Tone und somit als bindige Böden zu klassifizieren (Abb. 6.44). Die dargestellten Wertepaare des Buntsandsteins stammen dabei nicht nur von der Ortsbrust des Hydroschildvortriebs, sondern auch aus dem Bereich des Schildvortriebs ohne Ortsbruststützung, aus konventionell vorgetriebenen Querschlägen und aus einer baubegleitend ausgeführten Kernbohrung. Die labortechnischen Eigenschaften der Proben des mittleren Buntsandsteins waren dabei über die gesamte Vortriebsstrecke innerhalb einer gewissen Schwankungsbreite vergleichbar.

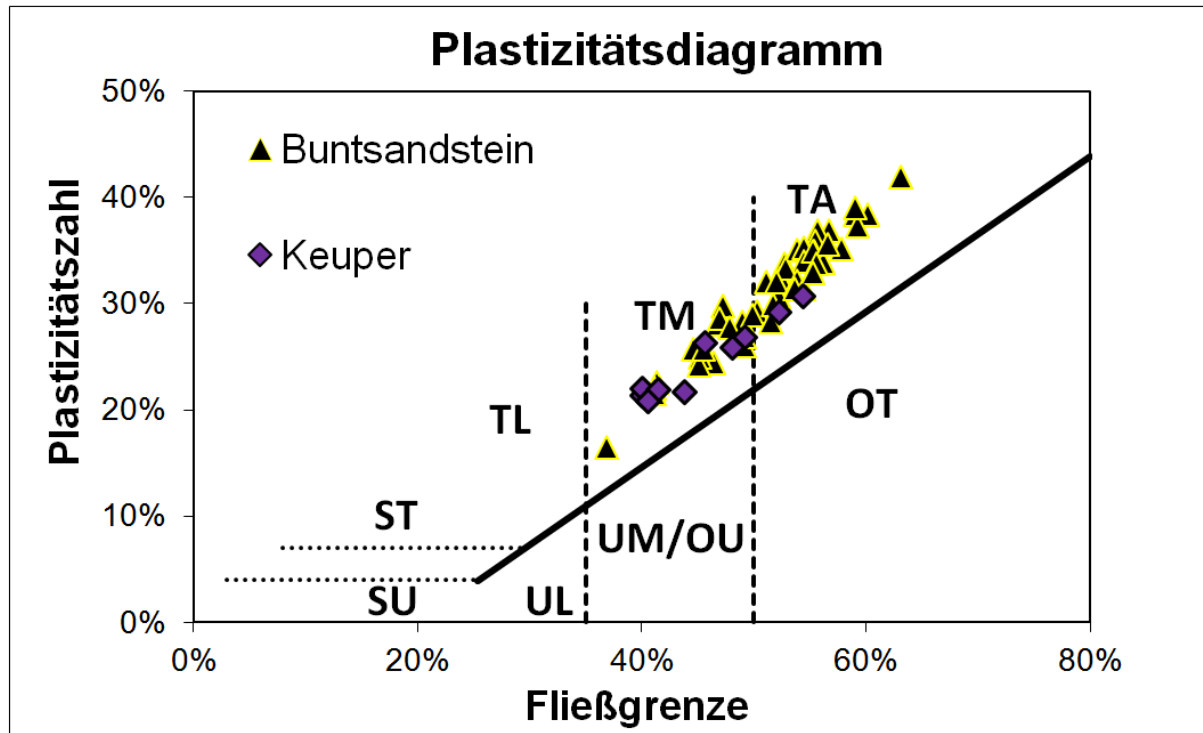


Abbildung 6.44: Einstufung der Gesteine des Keupers und des Buntsandsteins anhand der Atterberggrenzen

Während die Tone im Keuper den Hauptteil der Ortsbrust bildeten, kamen sie im Buntsandstein als wenige Millimeter bis mehrere Meter mächtige Lagen innerhalb der Sandsteine vor (Abb. 6.45).

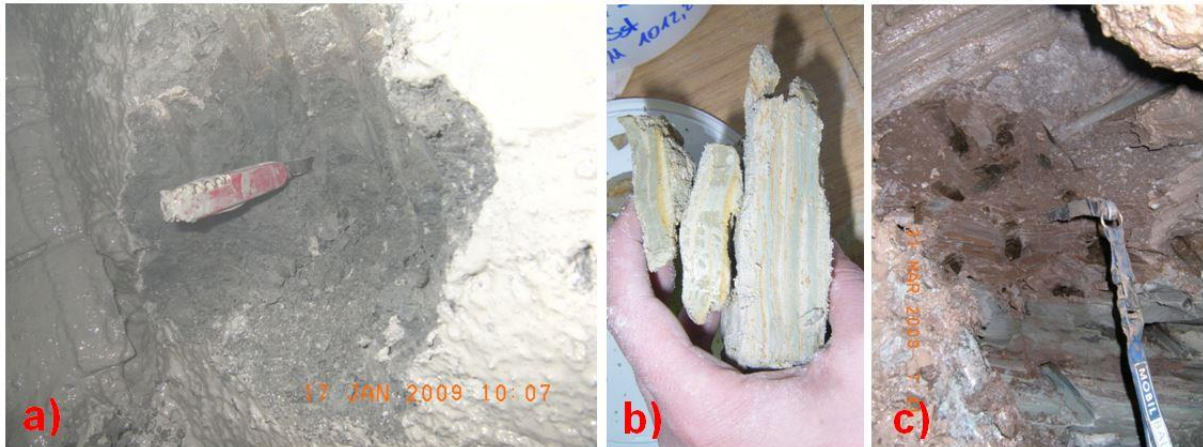


Abbildung 6.45: Tone des Projektes A [60] a) Tone des Keupers an der Ortsbrust. b) Feinschichtung von Sandsteinen mit Tonlagen (graugrün) c) Massige Tone des Buntsandsteins an der Ortsbrust

Dabei wiesen die Tone eine steife bis feste, überwiegend halbfeste Konsistenz auf. Die Böden haben ein mittleres bis hohes Verklebungspotenzial (Abb. 6.46).

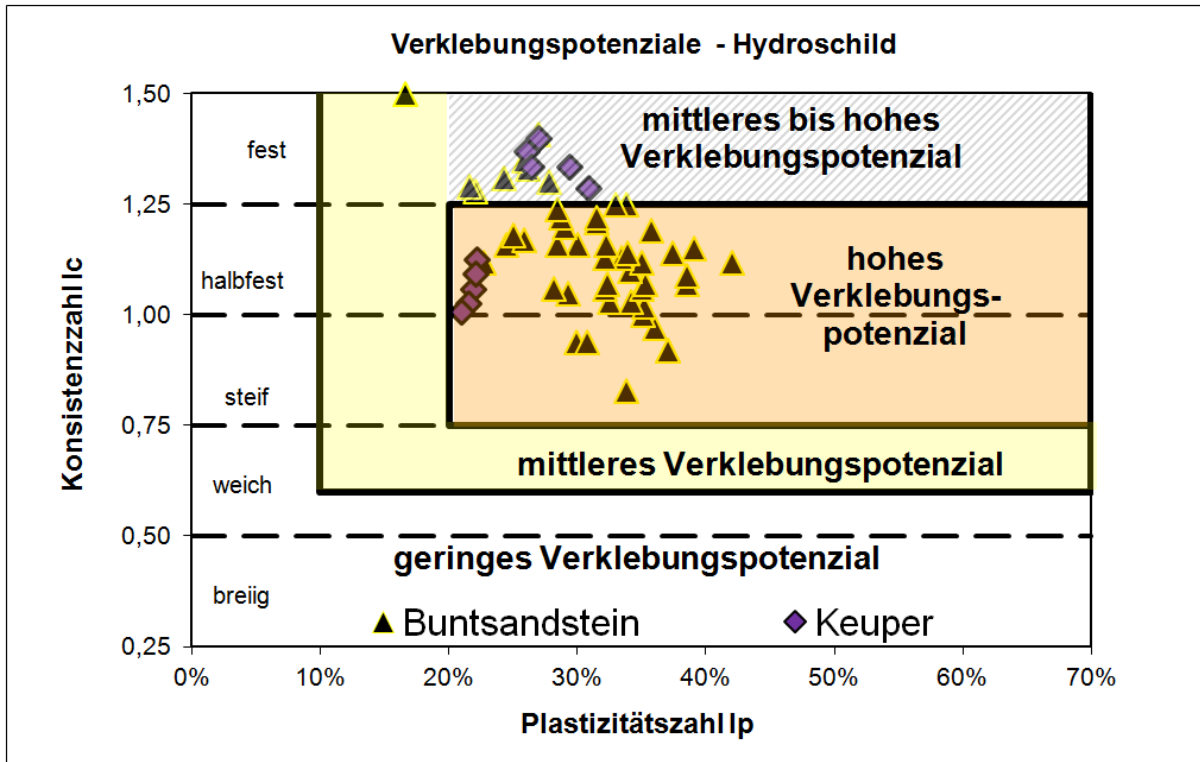


Abbildung 6.46: Verklebungspotenziale der Gesteine des Keupers und des Buntsandsteins.

Die Darstellung der Böden im allgemeinen Bewertungsdiagramm weist aufgrund der hohen Bandbreite an möglichen Wassergehalten im Konsistenzfeld der Verklebungen auf eine hohe Wahrscheinlichkeit zur Ausbildung von Verklebungen hin (Abb. 6.47).

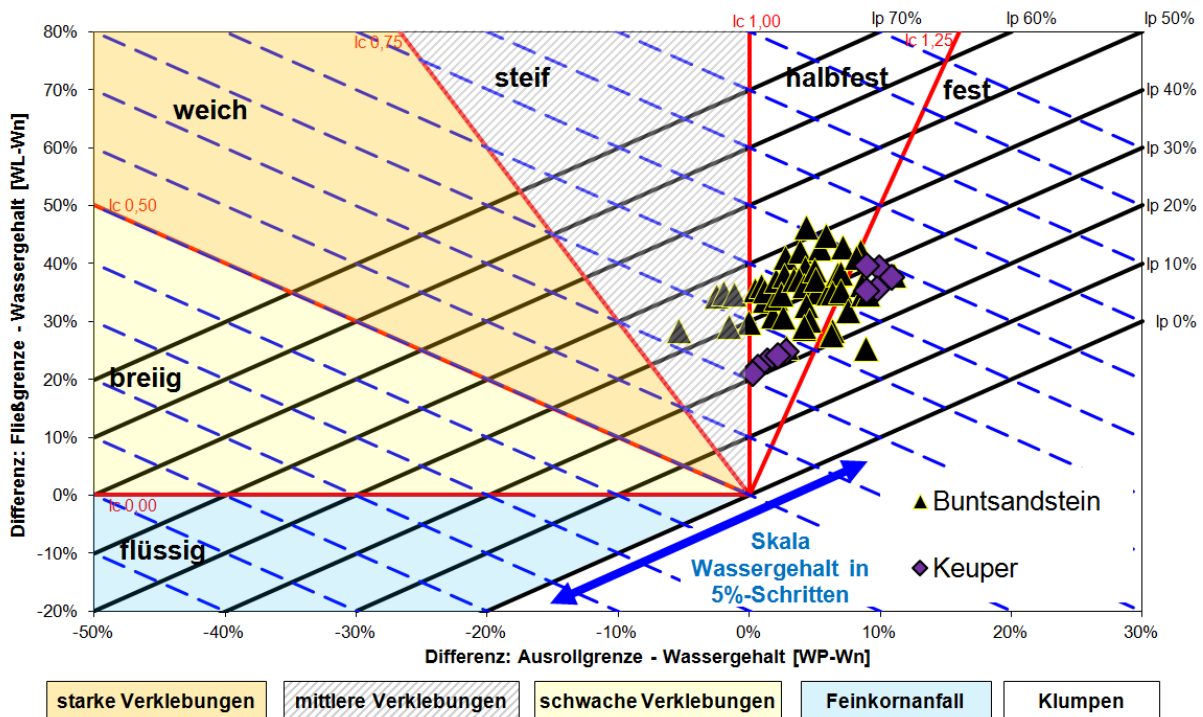


Abbildung 6.47: Tone des Keupers und des Buntsandsteins im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10

Im Bereich des Muschelkalks und teilweise auch des Unteren Buntsandsteins konnten keine Atterberggrenzen der feinkörnigen Gesteine bestimmt werden. Die Ergebnisse der Siebtrommelversuche weisen diese als veränderlich feste Gesteine aus. Die entsprechenden Ortsbrustproben und deren Zerfallsprodukte wurden im Rahmen des modifizierten Siebtrommelversuchs untersucht (vgl. Kap. 5.3.2). Dabei erfolgte auch eine Bewertung der bodenartigen Zerfallsprodukte im neuen Bewertungsdiagramm nach Kapitel 4 (vgl. Kap. 5.3.3.3 und Abb. 5.12). Im Hinblick auf die entsprechenden Auswertungen wird auf Kapitel 5 verwiesen. Die Darstellung der Zerfallsprodukte erfolgt auch in Abbildung 6.49.

Im Rahmen des Hydroschildvortriebs wurden die Wassergehalte von Proben der feinkörnigen Gesteine der Ortsbrust und an Verklebungsmaterial aus der Abbaukammer ermittelt. Trotz relativ großer Schwankungsbreite kann eine mittlere Differenz der Wassergehalte zwischen den feinkörnigen Gesteinen und dem Verklebungsmaterial von etwa 10% abgeleitet werden (Abb. 6.48). Dabei täuschen kleine Sandsteinstückchen im Verklebungsmaterial wahrscheinlich etwas zu niedrige Wassergehalte vor, so dass die Differenz zur klebrigen Matrix des Verklebungsmaterials in der Realität etwas größer sein dürfte. Inwiefern die Wassergehaltserhöhung um ca. 10% auch auf andere Hydroschildvortriebe übertragbar ist, kann nur durch weitere systematische Bestimmungen der Wassergehalte von Verklebungen und Ausbruchsmaterial in der Praxis bestätigt werden.

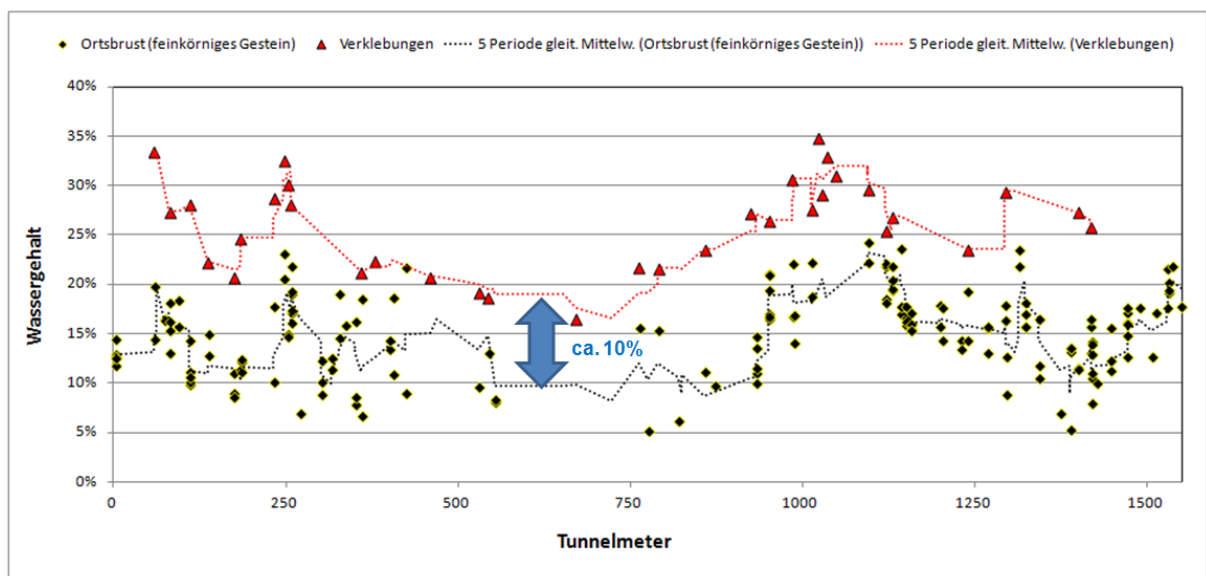


Abbildung 6.48: Wassergehalte der feinkörnigen Gesteine und des Verklebungsmaterials im Bereich des Hydroschildvortriebs

Die für diesen Hydroschildvortrieb typische Wassergehaltserhöhung von etwa 10% bei der Umwandlung des feinkörnigen Ausgangsgesteins bis hin zum Verklebungsmaterial ermöglicht eine Überprüfung des allgemeinen Bewertungsdiagramms. Dazu werden die Wertepaare aller Böden (aus Abb. 6.47) und der Zerfallsprodukte der veränderlich festen Gesteine des modifizierten Siebtrommelversuchs (aus Abb. 5.12) dargestellt und deren Wassergehalte um 10% erhöht. Es zeigt sich, dass die Wertepaare der Ausgangsgesteine bei dieser Wassergehaltserhöhung größtenteils in den Konsistenzbereich der mittleren bis starken Verklebungen verschoben werden (Abb. 6.49).

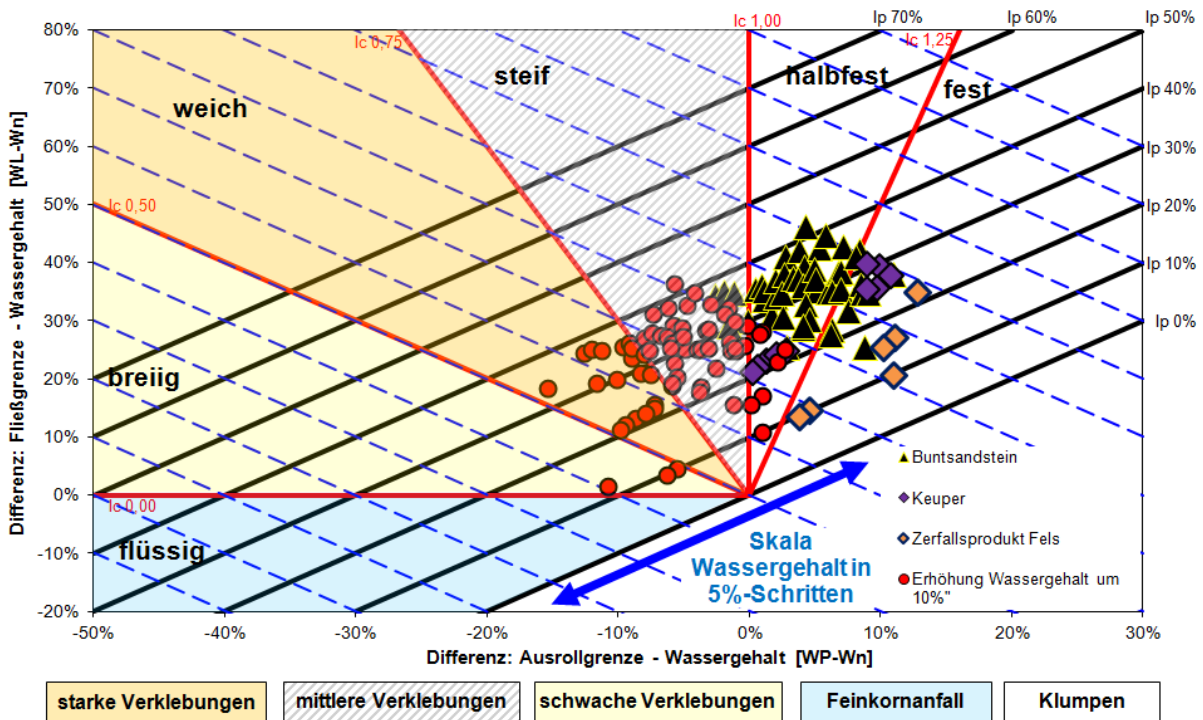


Abbildung 6.49: Erhöhung der Wassergehalte um 10% und Verschiebung der Wertepaare neuen Bewertungsdiagrammnach Abbildung 4.10

Während des Vortriebs hatte das Verklebungsmaterial im Bereich der Abbaukammer überwiegend eine weiche bis steife Konsistenz (Abb. 6.50).



Abbildung 6.50: Verklebungsmaterial aus dem Bereich des Hydroschildvortriebs. a) Im Bereich einer Schneidradöffnung. b) Probe von weichem Verklebungsmaterial

Dabei führte die immer noch relativ hohe Konsistenzzahl des Verklebungsmaterials im Bereich der Abbaukammer (verursacht durch die hohe Konsistenzzahl des natürlichen Bodens) auch zu massiven Verklebungen auf der Separationsanlage bzw. zur Förderung großer Mengen an bindigen Kugeln (Abb. 6.51), da das geförderte Verklebungsmaterial selbst auf dem Transportweg und dem dementsprechend längeren Flüssigkeitskontakt noch im Konsistenzbereich der Verklebungen blieb.

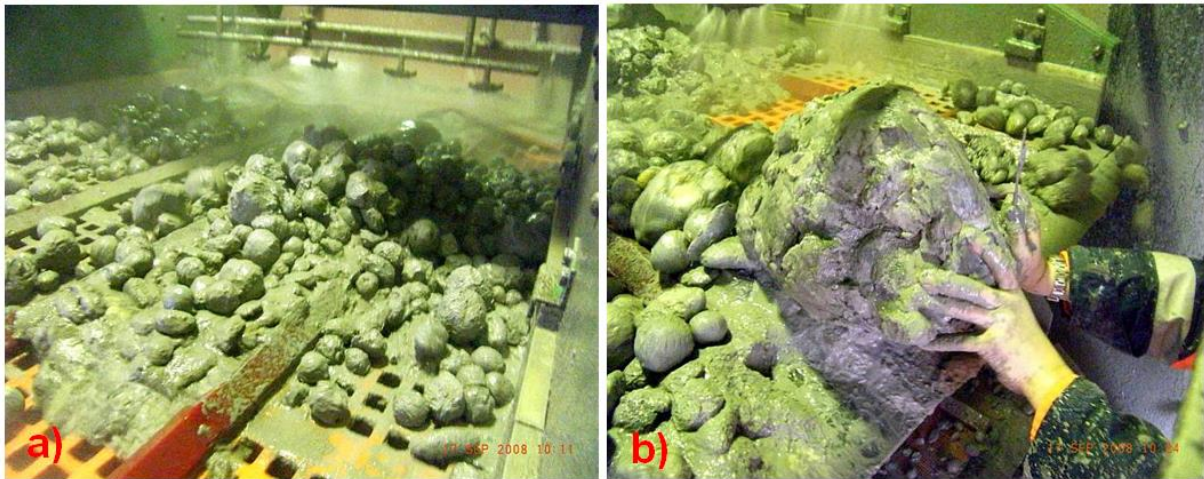


Abbildung 6.51: Verklebungsmaterial auf den Grobsieben des Hydroschildvortriebs a) Förderung bindiger Kugeln mit Verklebung der Siebmaschen b) Verklebungsagglomerat durch Zusammenballung vieler bindiger Kugeln

Im Prinzip sind die bindigen Böden und die Zerfallsprodukte der veränderlich festen Gesteine im Hinblick auf Hydroschildvortriebe alle relativ kritisch zu werten. In Abhängigkeit von der Plastizität steigt die Verklebungsneigung in der Reihe: Zerfallsprodukte der veränderlich festen Gesteine → Tone des Keupers → Tone des Buntsandsteins (vgl. Abb. 6.49). Dafür weisen die Tone im Keuper gegenüber denen des Buntsandsteins deutlich höhere Ortsbrustanteile auf (Abb. 6.41: Keuper: >80%, mittlerer Buntsandstein: <25%). Unterschiede im Hinblick auf die Intensität der Verklebungen sind somit zwischen den stratigraphischen Einheiten im Bereich des Hydroschildes kaum erkennbar.

Im Gegensatz dazu sind die Erschwernisse durch Verklebungen hauptsächlich an den Vortriebsmodus gekoppelt. Beim Hydroschildvortrieb im verklebungsanfälligen Baugrund ist vor allem problematisch, dass die Stützflüssigkeit nicht nur der Ortsbruststützung dient, sondern auch als Fördermedium fungiert. Dementsprechend hat das Ausbruchsmaterial auch bei standfesten Ortsbrustverhältnissen ständig Kontakt mit der Stützflüssigkeit. Beim deutlich flexibleren Erddruckschildvortrieb kann bei standfesten Ortsbrustverhältnissen in den offenen Modus gewechselt werden. Bei beiden Vortrieben hat sich gezeigt, dass sich im Modus Halfüllung deutlich weniger Verklebungen gebildet haben (Abb. 6.52). Dabei konnten die Verklebungen anhand des Verklebungsgrades der Schneidradöffnungen und der Werkzeugkästen sowie am Anteil von bindigen Kugeln gegenüber Gesteinsbruchstücken auf den Grobsieben quantifiziert werden (vgl. auch Kap. 6.1.2).

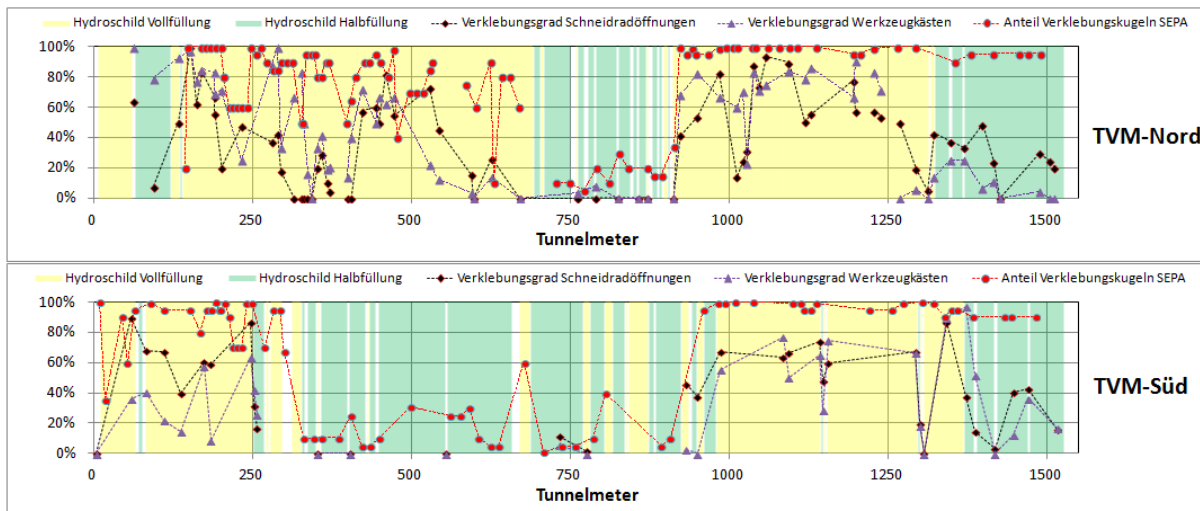


Abbildung 6.52: Intensität der Verklebungen in Abhängigkeit vom Vortriebsmodus im Bereich des Hydroschildvortriebs

Der Vorteil des Vortriebs mit Halbfüllung beruht auf zwei Ursachen: Zum Einen ist das Verklebungsmaterial am Schneirad dem ständigen Wechsel zwischen Suspension (Auftrieb) und Luft (kein Auftrieb) ausgesetzt und kann sich dadurch eher ablösen. Zum Anderen ist die Reinigungswirkung der auf das Schneirad gerichteten Strahlen der Spüldüsen oberhalb des Suspensionsspiegels sehr viel stärker.

Während des gesamten Hydroschildvortriebs trat auch ein erhöhter Feinkornanfall auf. Dabei kam es immer wieder zu Anstiegen der Suspensionsdichte, so dass die Suspension häufig aus dem Förderkreislauf ausgetauscht werden musste. Der Vortrieb wurde allerdings sehr viel stärker durch Verklebungen im Bereich der Abbaukammer behindert. Die Reduzierung der Vortriebsleistung der Schildvortriebe war dabei in der Regel so groß, dass es durch die Separationsanlage trotz erhöhtem Feinkornanfall selten zu zusätzlichen Stillständen kam. Die starken Verklebungserscheinungen auf der Separationsanlage führten allerdings auch zu einem höheren Reinigungsaufwand und zum Einsatz von zusätzlichem Personal. Aus diesen Gründen wird bei diesem Projekt nicht weiter auf den Feinkornanfall eingegangen. Die freigesetzten Tonminerale konnten meist in der Suspension verbleiben, weswegen größtenteils keine Zugabe von Bentonit erforderlich wurde.

6.2.2.5. Offen gefahrener Schildvortrieb (TM 1530 bis 6970)

Im Bereich des offen gefahrenen Schildvortriebs wurden ausschließlich Gesteine des mittleren Buntsandsteins angetroffen. Diese sind zu denen der Hydroschildstrecke vergleichbar, so dass im Hinblick auf die bautechnische Einstufung der mittel- bis ausgeprägt plastischen Tone auf die Darstellung des mittleren Buntsandsteins in Abbildung 6.44 verwiesen wird. Eine Bewertung im Diagramm nach Thewes entsprechend Abbildung 6.46 ist für offen gefahrene Schildvortriebe nicht sinnvoll (vgl. Kap. 3.2.3.3 und 4.1). Das neue Bewertungsdiagramm aus Kapitel 4 zeigt, dass die Böden mit ihren natürlichen Wassergehalten größtenteils außerhalb des Konsistenzfeldes von Verklebungen liegen und somit in der Regel unkri-

tisch sind (Abb. 6.53). Nur ein geringer Teil liegt bereits im Bereich mittlerer Verklebungen (Abb. 6.53: violett umrandet) und könnte somit auch ohne Bergwasser kritisch sein.

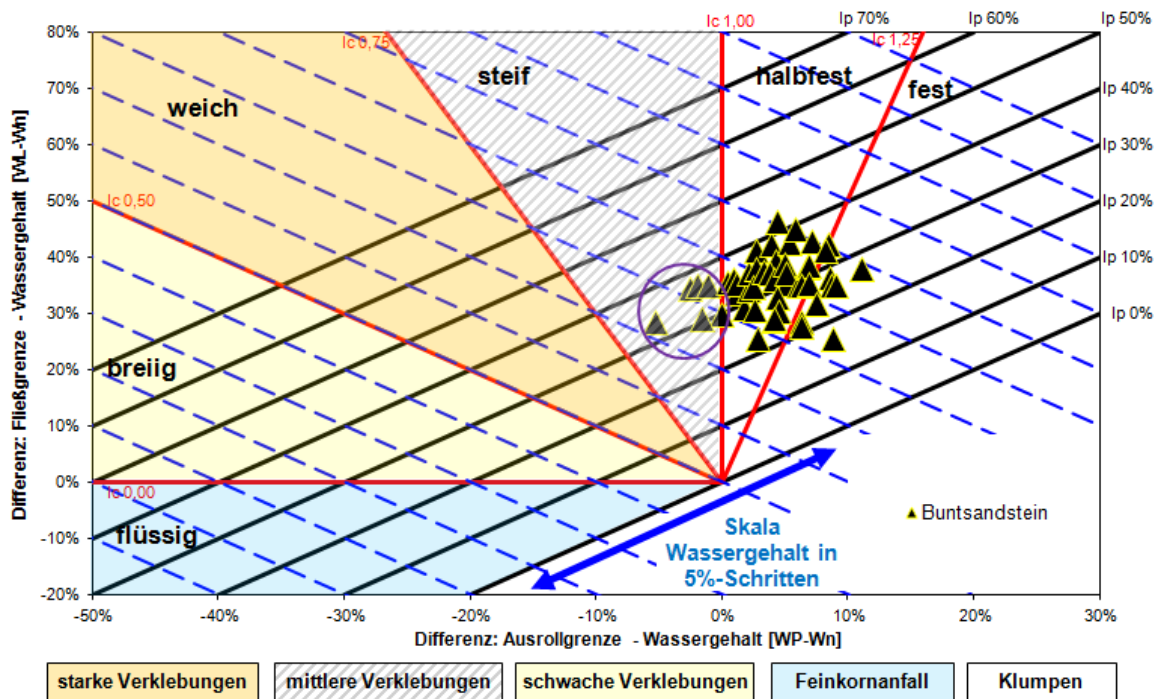


Abbildung 6.53: Tone des Buntsandsteins im allgemeinen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10

Analog zu Projekt A muss im Hinblick auf den offenen Schildvortrieb eine Bewertung der Bergwasserzutritte erfolgen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im Bereich der offen gefahrenen Schildvortriebe eine obertägige Grundwasserabsenkung mittels Brunnen durchgeführt wurde. Der Vortrieb war, im Gegensatz zu Projekt A, nicht durch größere Bergwasserzutritte beeinflusst. Im einsehbaren Bereich der Ortsbrust wurden meist Restwasserzutritte zwischen 0,1 und 0,5 l/s angetroffen (Abb. 6.54). Analog zum Hydroschildvortrieb wurde der Verklebungsgrad des Schneidrads dokumentiert, wobei beim offen gefahrenen Schildvortrieb nennenswerte Erschwernisse durch Verklebungen ausblieben. Der Verklebungsgrad des Schneidrads lag größtenteils unter 30% (Abb. 6.54). Lediglich im Bereich höherer Wasserzutritte bis 1 l/s (etwa TM 3500 bis 3600) bzw. bis 2 l/s (etwa TM 2500 bis 2600) wies das Schneidrad einen höheren Verklebungsgrad auf.

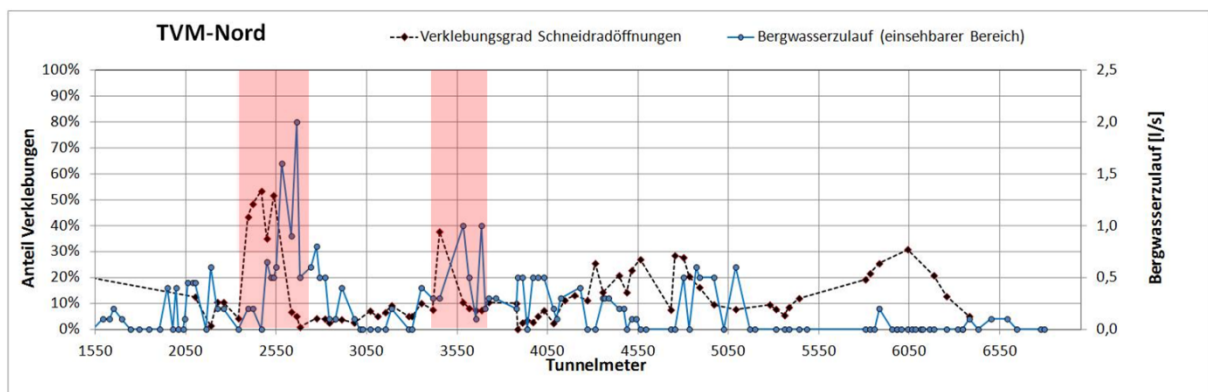


Abbildung 6.54: Intensität der Verklebungen in Abhängigkeit der Wasserzutritte im Bereich des offen gefahrenen Schildvortriebs (höhere Wasserzutritte und höherer Verklebungsgrad rötlich hinterlegt)

Der geringfügig erhöhte Verklebungsgrad ohne Bergwasserzulauf im Vortriebsabschnitt bei TM 6000 bis 6100 ist dagegen durch Böden erklärbar, die bereits im natürlichen Zustand kritische Konsistenzzahlen aufwiesen (Abb. 6.53: violett umrandet). Hier war der Baugrund durch eine stärkere Verwitterung infolge geringerer Überlagerung geprägt. Die Vortriebsbereiche mit erhöhten Verklebungsgraden erforderten regelmäßige Reinigungsarbeiten während des Ringbaus, führten aber nicht zu nennenswerten Erschwernissen, wie beispielsweise während des Hydroschildvortriebs.

Auch in diesem Vortriebsabschnitt wurden systematisch Wassergehalte an Proben der feinkörnigen Gesteine der Ortsbrust und an auf den Bändern entnommenem Ausbruchsmaterial bestimmt. Trotz einer gewissen Schwankungsbreite ist keine Differenz der Wassergehalte zwischen den feinkörnigen Gesteinen und dem Ausbruchsmaterial auf dem Band erkennbar (Abb. 6.55). Lediglich im Bereich der hohen Bergwasserzutritte bei TM 2550 hat das Material auf dem Band entsprechend hohe Wassergehalte (außerhalb des gewählten Bereichs der y-Achse). Bereichsweise niedrigere Wassergehalte der Verklebungs- und Bandproben sind auf kleine Sandsteinstückchen im Probenmaterial zurückzuführen.

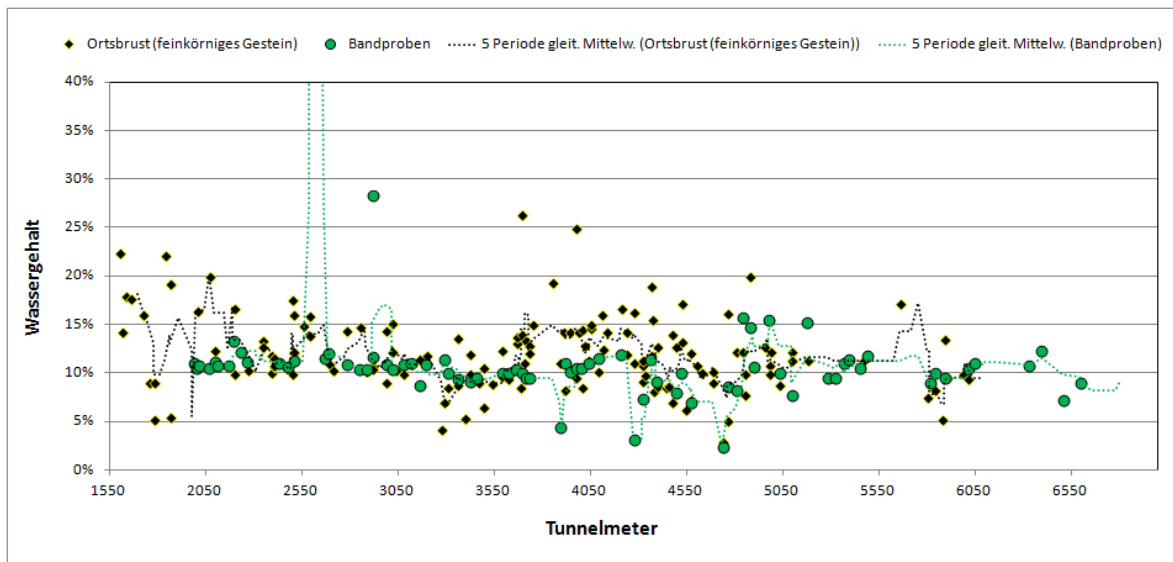


Abbildung 6.55: Wassergehalte der feinkörnigen Gesteine und der Bandproben im Bereich des offenen Schildvortriebs

Der Vortrieb im offenen Modus war vor allem deswegen in Bezug auf Verklebungen weitestgehend unkritisch, weil aufgrund der Grundwasserabsenkung keine nennenswerten Wasserzutritte auftraten. Dementsprechend kam es selten zu Erhöhungen des Wassergehalts im Ausbruchsmaterial (Abb. 6.55) und nicht zu Umwandlungen in Verklebungsmaterial. Insgesamt kann aus Abbildung 6.54 für die Böden des Buntsandsteins ein kritischer Grenzwasserzulauf von etwa 0,6 l/s abgeleitet werden, ab dem sich während des Vortriebs überhaupt erst relevante Verklebungen gebildet haben (dieser wurde aber kaum überschritten). Im Gegensatz dazu traten bei Projekt A erst ab etwa 1 l/s verstärkt Verklebungen auf, wobei diese ohne Grundwasserabsenkung oft vorkamen (vgl. Kap. 6.2.1.5). Die unterschiedliche Anfälligkeit im Hinblick auf die Wasserzutritte trotz vergleichbarer Schneidradgröße, kann mit Hilfe des neuen Bewertungsdiagramms aufgezeigt werden (Abb. 6.56).

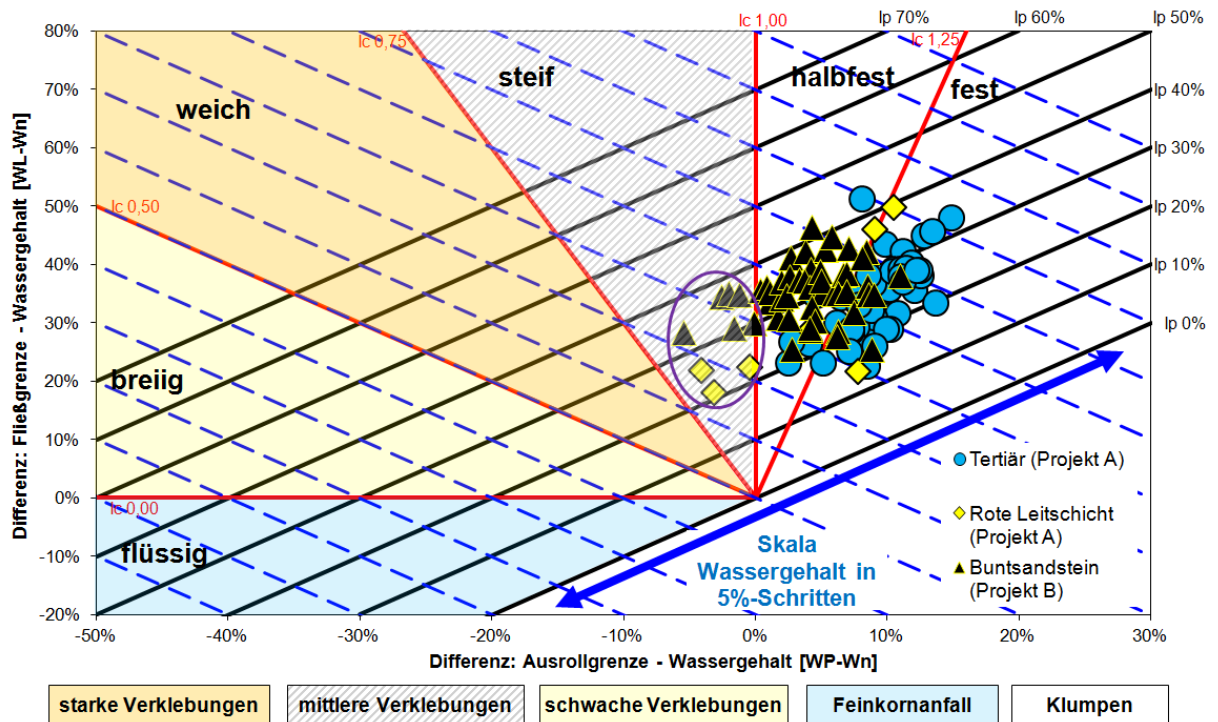


Abbildung 6.56: Vergleich der Böden von Projekt A und B im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10

Dabei liegen die Böden von Projekt B (schwarze Dreiecke) im Mittel näher am kritischen Konsistenzfeld von Verklebungsmaterial als die von Projekt A (blaue Kreise). Dementsprechend ist bei den Böden von Projekt A eine größere Wassergehaltserhöhung bzw. ein höherer Wasserzutritt zur kritischen Umwandlung notwendig, als bei Projekt B. Teile der Böden von Projekt B und der Roten Leitschicht von Projekt A liegen bereits im Konsistenzbereich von Verklebungsmaterial und führten bereichsweise auch ohne Bergwasserzutritten zu Verklebungen.

6.2.2.6. Erkenntnisse

Auch das Projekt B zeigt, dass bei Schildvortrieben im Fels Verklebungen und ein erhöhter Feinkornanteil auftreten können (vgl. Kap. 6.2.1.6). Dabei traten die entsprechenden Erschwernisse fast ausschließlich im Bereich der Hydroschildvortriebe auf, während die offenen gefahrenen Schildvortriebe nur untergeordnet in geringem Ausmaß beeinträchtigt waren. Während der Hydroschildvortriebe überwogen Erschwernisse infolge Verklebungen gegenüber Erschwernissen aus erhöhtem Feinkornanfall, wofür die relativ hohen Plastizitätszahlen der Böden als Ursache zu sehen sind. Folgende Aussagen können aus den Vortrieben abgeleitet werden:

- Veränderlich feste Gesteine und bindige Böden mit im Hinblick auf Verklebungen unkritischer Ausgangskonsistenz können ohne Zutritt oder Zugabe von Wasser nicht kritisch werden.
- Für diesen Hydroschildvortrieb konnte eine Wassergehaltszunahme von etwa 10% bei der Umwandlung vom natürlichen Boden bis hin zum Verklebungsmaterial infolge der Stützflüssigkeit nachgewiesen werden. Inwieweit dieser Wert generell auf andere Hydroschildvortriebe übertragbar ist, kann nur durch systematische Untersuchungen bei anderen Vortrieben überprüft werden.
- Bindige Böden können im Hinblick auf Wassergehaltsänderungen infolge von Bergwasserzutritten relativ zueinander verglichen und beurteilt werden.

6.2.3. Hydroschildvortrieb (Projekt C)

6.2.3.1. Baugrundverhältnisse

Der Vortrieb verlief überwiegend in Lockergesteinen, wobei die gesamte Bandbreite von Tonen, Schluffen, Sanden, Kiessanden und weitgestuften Kiesen durchfahren wurde. Lediglich im Start- und Zielbereich wurde Fels in Form von Dolomiten und Kalksteinen angetroffen. Den Lockergesteinen können dabei sowohl Fluss-, See-, Delta als auch Schwemmfächer- bzw. Schuttablagerungsräume zugeordnet werden (Tab. 6.7). Die Zuordnung der mittleren Kornfraktionen wurde den Kornverteilungsdiagrammen des Baugrundgutachtens von Projekt C [8] entnommen.

Faziesbereiche	Bodenarten	Kies (2-63 mm)	Sand (0,06-2 mm)	Schluff (0,002-0,06 mm)	Ton (<0,002 mm)
Flussschotter	weitgestufte Kiese	67%	25%	7%	1%
verschwemmte Flusskiese	Kiessande	43%	46%	10%	1%
Deltasedimente	Fein- Mittelsande	3%	86%	9%	2%
Deltasedimente	Schluffe bis Feinsande	0%	29%	64%	7%
Seetone	Tonige Schluffe	0%	4%	71%	25%
Schwemmfächer/Murschutt	schluffig, steinige Kiese mit Blocklagen	62%	19%	15%	5%
Lagen im Schwemmfächer/Murschutt	Schluff-Sandlagen	4%	41%	46%	10%

Tabelle 6.7: Faziesbereiche und Bodenarten mit Angabe der mittleren Korngrößenanteilen

Der Vortrieb mit 12 bis 45 m Überlagerung verlief etwa zur Hälfte unter dem Talflurbereich eines Flusses und zur anderen Hälfte unter einem Schwemmfächer mit Murschutteinlagerungen (Abb. 6.57). Der Grundwasserstand lag maximal 18,5 m oberhalb der Firste. Im Talflurbereich dominieren mittelkörnige Fluss- und Deltasedimente, wohingegen unterhalb des Schwemmfächers vorwiegend die weitgestuften Kiese der Flussschotter vorkommen. Schluffig, steinige Kiese mit Blöcken bis 1,5 m Kantenlänge des eigentlichen Schwemmfächers sind untergeordnet im Firstbereich prognostiziert.

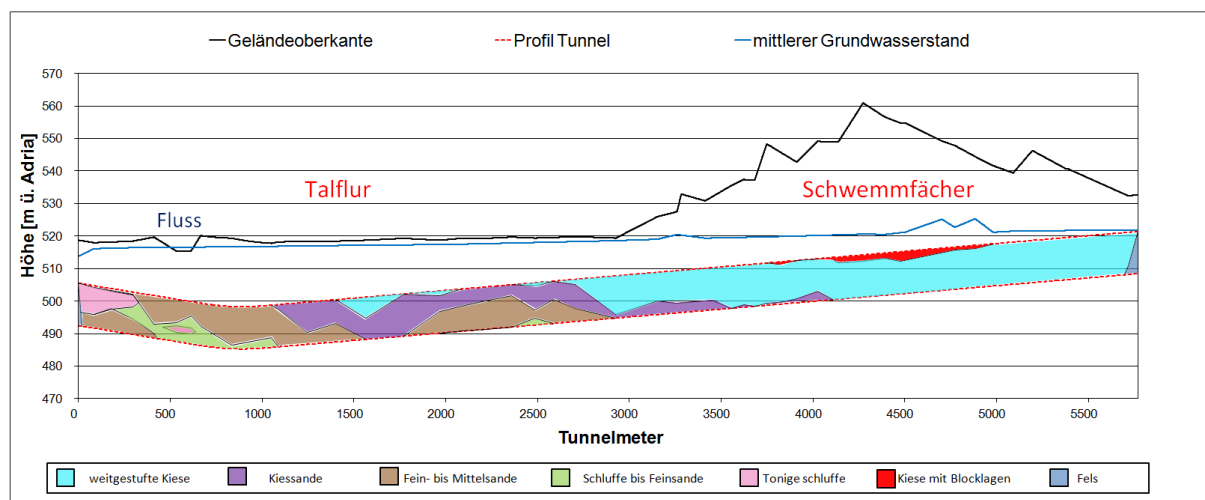


Abbildung 6.57: Vereinfachter Geologischer Längsschnitt mit Verteilung der Bodenarten innerhalb des Querschnitts (Basis: Erkundungsbohrungen der Ausschreibung von Projekt C)

Unter Berücksichtigung der Mächtigkeit und der Lage im Querschnitt können die Ortsbrustanteile der einzelnen Bodenarten ermittelt werden (Abb. 6.58).

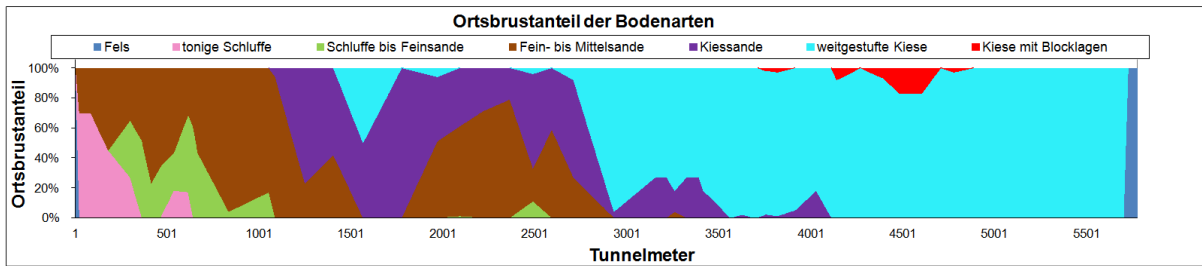


Abbildung 6.58: Ortsbrustanteile der einzelnen Bodenarten [59, modifiziert]

Die Kombination der Ortsbrustanteile aus Abbildung 6.58 und der mittleren Kornverteilung aus Tabelle 6.7 der einzelnen Bodenarten ermöglicht die Darstellung eines mittleren Anteils unterschiedlicher Kornfraktionen bezogen auf die Ortsbrust (Abb. 6.59). Somit kann die im Vortrieb anfallende mittlere Kornfraktion abgeschätzt werden. Dabei überwiegen Sand und Kies, wobei mögliche Blöcke und Schluff-Sandlagen im Bereich des Schwemmfächers nicht berücksichtigt sind.

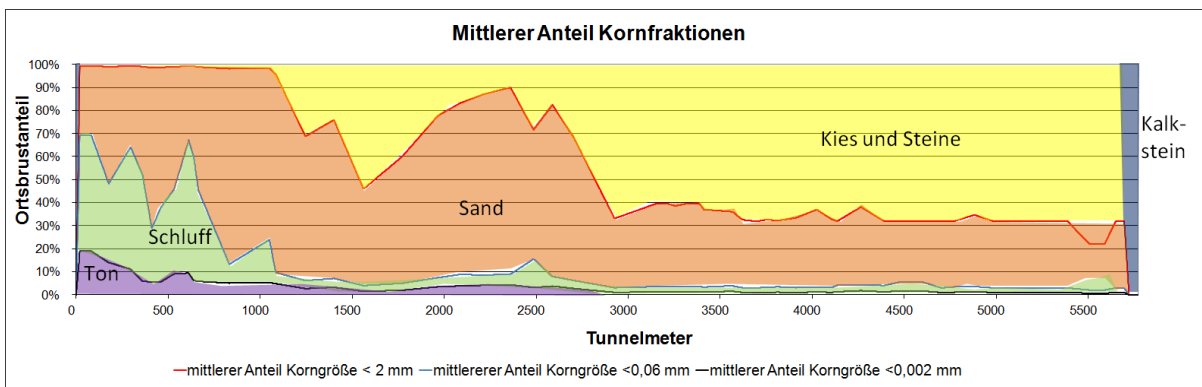


Abbildung 6.59: Über Ortsbrust gemittelter Anteil der Kornfraktionen (Blöcke und Schluff-Sandlagen im Schwemmfächer nicht berücksichtigt)

Bezogen auf die gesamte Tunnelstrecke verläuft der Hauptteil des Vortriebs mit über 90% des Ausbruchsvolumens in mittel- bis grobkörnigen Sedimenten (Abb. 6.60: weitgestufte Kiese, Fein-Mittelsande, Kiessande, Kiese mit Blocklagen).

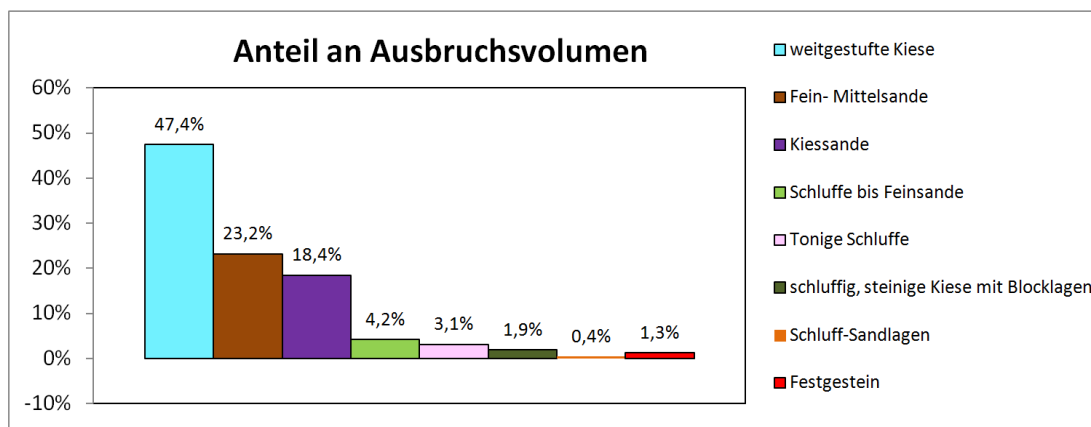


Abbildung 6.60 Anteile der Bodenarten am Ausbruchsvolumen

6.2.3.2. Vortriebsverfahren

Aufgrund der überwiegend prognostizierten mittel- bis grobkörnigen Böden kam eine flüssigkeitsgestützte Schildmaschine zum Einsatz. Der Vortrieb erfolgte ausschließlich im flüssigkeitsgestützten Vortriebsmodus. Der Hydroschild der Firma Herrenknecht war mit einem Schneidradrad mit 13 m Durchmesser und einem Öffnungsgrad von 30% ausgestattet (Abb. 6.61).

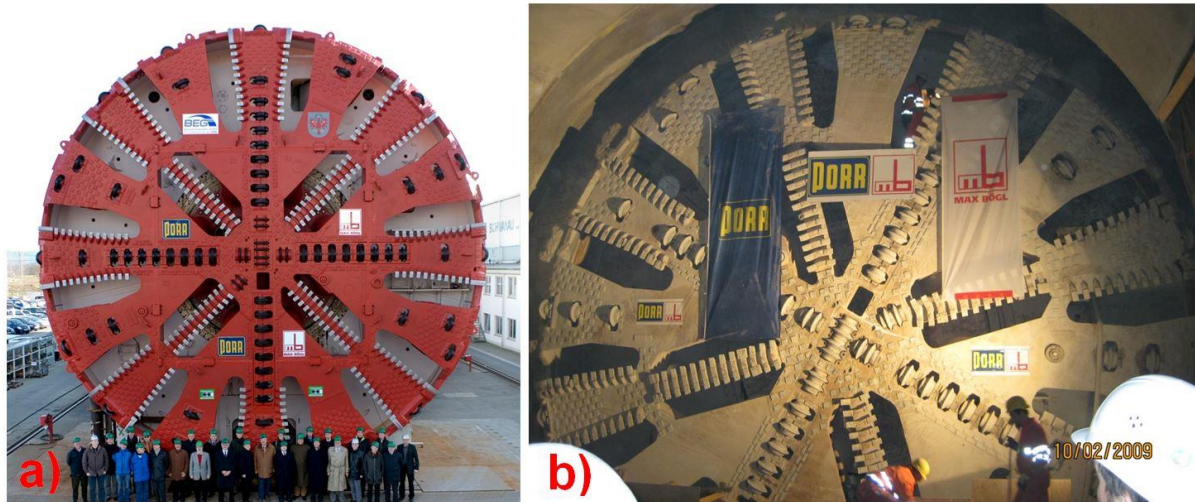


Abbildung 6.61 a) Schneidrad vor Vortriebsbeginn b) Schneidrad nach Vortriebsende

Das Schneidrad war mit 16 Räumern sowie 268 Schälmessern bestückt und wies zusätzlich 70 Werkzeugkästen auf, die wahlweise mit Rollenmeißeln oder Rippern besetzt werden konnten. Während des Vortriebs war das Schneidrad gleichzeitig sowohl mit Rippern als auch mit Rollenmeißeln bestückt, wobei der Mischbesatz kontinuierlich an die geologischen Verhältnisse angepasst wurde. Während Ripper in der ganzen Bandbreite von mitteldicht bis dicht gelagerten Sanden, Kiessanden und Kiesen eingesetzt werden konnten, waren beim Antreffen von Blöcken und in sehr dicht gelagerten Kiesen Rollenmeißel erforderlich.

6.2.3.3. Verklebungen und Feinkornanfall

Obwohl feinkörnige Sedimente in Summe nur 7,7% des Ausbruchsvolumens ausmachten (Abb. 6.60: tonige Schluffe, Schluffe bis Feinsande, Schluff-Sandlagen), wurde der Vortrieb sowohl durch Verklebungen als auch durch einen bereichsweise hohen Feinkornanfall beeinträchtigt. Im Vergleich zum Projekt B waren die Verklebungen dabei weniger kritisch. Als ursächliche bindige Böden kommen die tonigen Schluffe (Seetone) bzw. die Schluffe bis Feinsande (Deltasedimente) in Frage (Abb. 6.62-a). Außerdem wurden innerhalb der Flussschotter Lehmlagen angetroffen (Abb. 6.62-b).

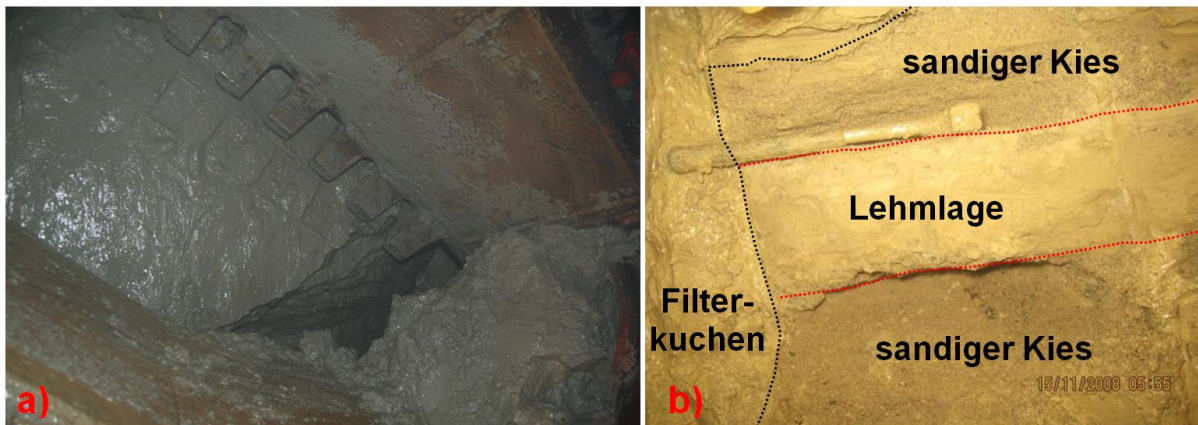


Abbildung 6.62: a) Tonige Schluffe (Seeton) b) Lehmlage innerhalb der Flusskiese (Filterkuchen an dieser Stelle der Ortsbrust zuvor entfernt)

Überraschend ist, dass ausgerechnet Schluffe zu Verklebungen führten. Auch wenn bei den Schluffen der Seeton- und der Deltafazies die Schlufffraktion als Korngröße überwiegt (vgl. Tab. 6.7: 64% und 71%), sind zumindest Teile der Böden bodenmechanisch entsprechend ihrer Atterberggrenzen als leicht- bis mittelplastische Tone (TL, TM) zu klassifizieren (Abb. 6.63).

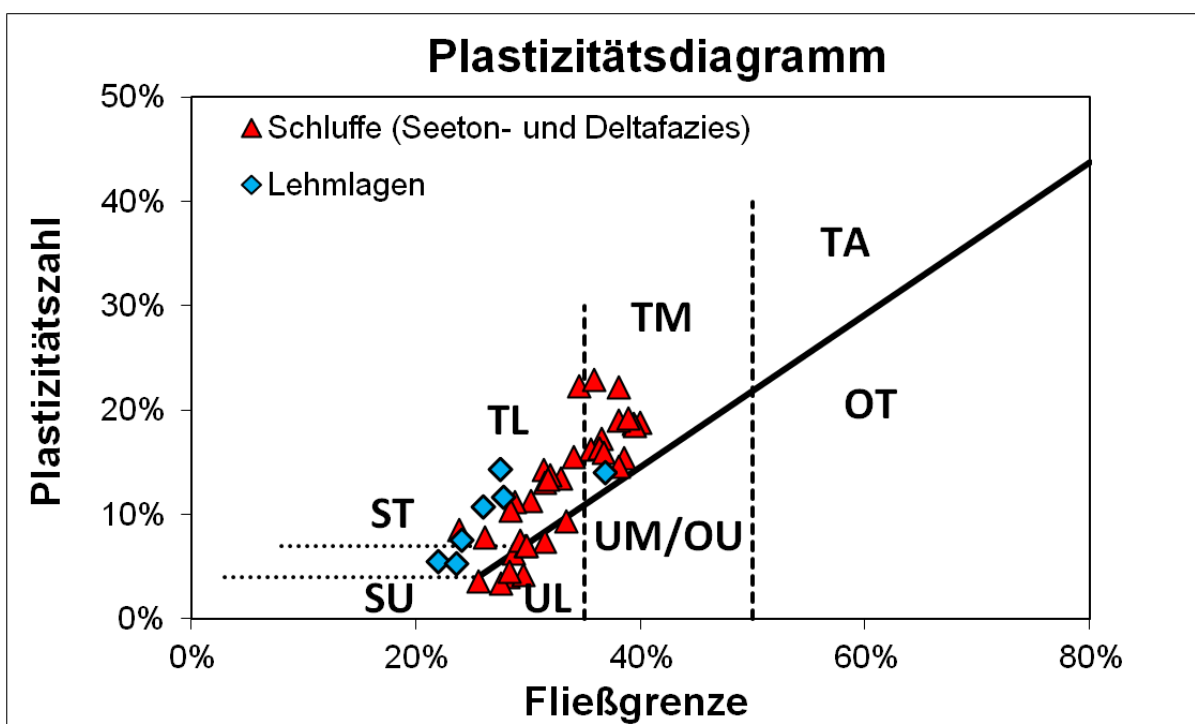


Abbildung 6.63: Einstufung der Schluffe (Seetone und Deltasedimente) und der Lehmlagen anhand der Atterberggrenzen

Aus bautechnischer Sicht empfiehlt u. a. die DIN 4022-1 [26] die Benennung bindiger Böden nach den plastischen Eigenschaften, statt nach der Korngröße. Dabei sind die plastischen Eigenschaften im Hinblick auf Verklebungen bei Schildvortrieben besonders relevant. Möglicherweise handelt es sich auch bei den von Fernández-Steeger & Feinendegen [44] als

besonders kritisch beschriebenen Schluffen aus bodenmechanischer Sicht um Tone entsprechender Plastizität (vgl. Kap. 3.2.3.1).

Die Böden haben ein geringes bis mittleres Verklebungspotenzial (Abb. 6.64) und sind gegenüber den Böden aus Projekt B, deutlich weniger kritisch zu werten (vgl. Abb. 6.46).

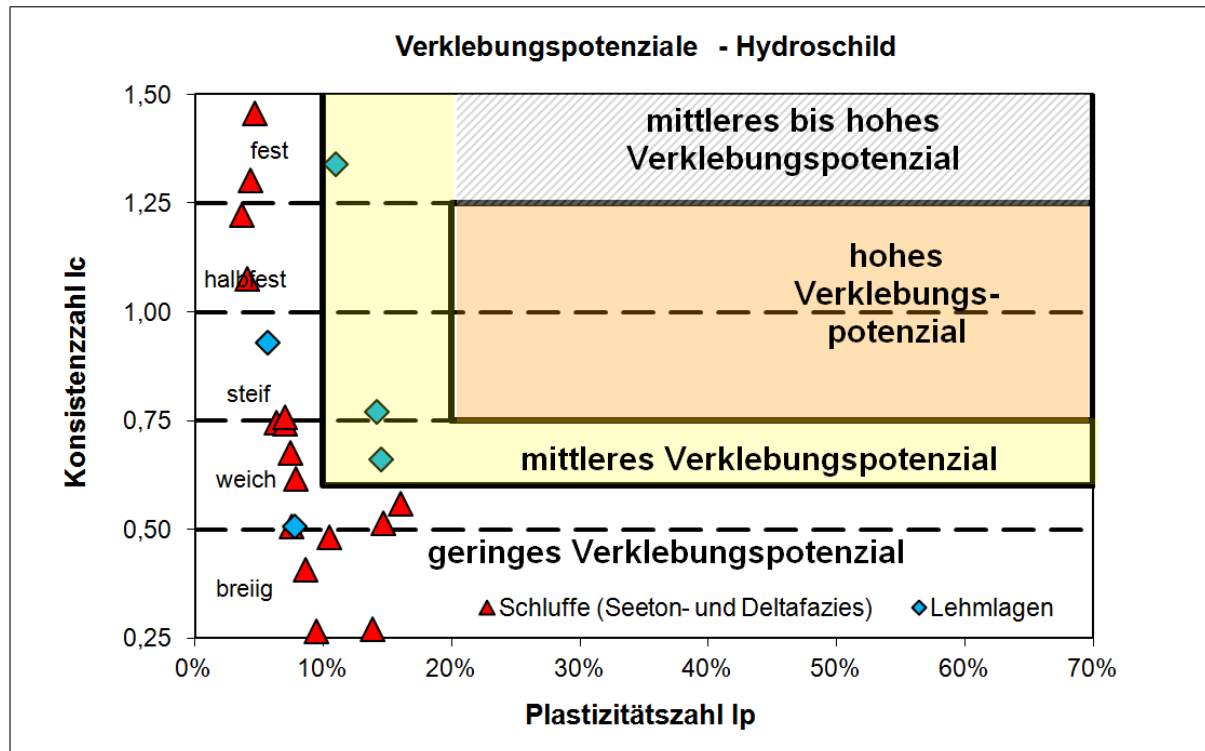


Abbildung 6.64: Verklebungspotenziale der Schluffe (Seetone und Deltasedimente) und der Lehmlagen

Die Darstellung im neuen Bewertungsdiagramm aus Kapitel 4 veranschaulicht das in der Schwankungsbreite von Plastizität und Konsistenz begründete unterschiedliche Verhalten der Böden (Abb. 6.65). Ein großer Teil der dargestellten Böden dürfte infolge der Stützflüssigkeit schnell als Feinkorn in Suspension gehen: Diese haben entweder bereits im Ausgangszustand eine breiige Konsistenz nahe der Fleißgrenze (violett umrandet) oder mit Plastizitätszahlen unter 10% (braun umrandet) nur eine geringe Bandbreite an möglichen Wassergehalten im Konsistenzbereich der Verklebungen. Bei beiden ist jeweils nur eine geringe Wasseraufnahme notwendig, um in den flüssigen Konsistenzbereich verschoben zu werden. Die Böden mit Plastizitätszahlen >10% und mindestens weicher Konsistenz (grün umrandet) führen hingegen eher zu Verklebungen.

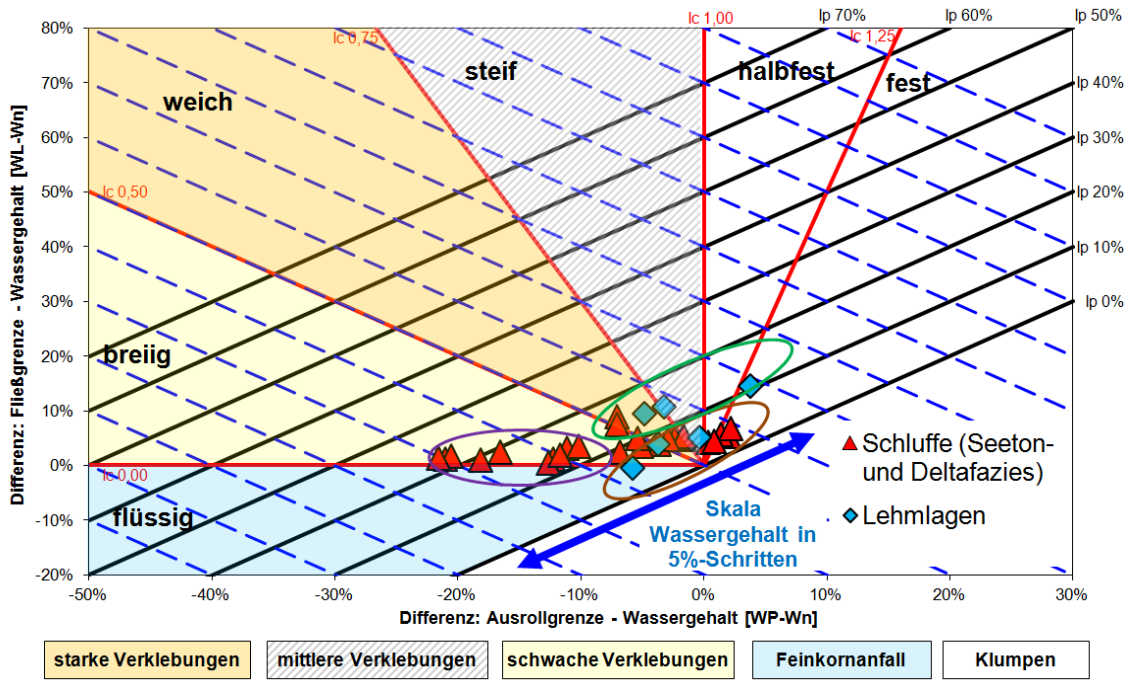


Abbildung 6.65: Schluffe (Seetone und Deltasedimente) und Lehmlagen im neuen Bewertungsdiagramm nach Abbildung 4.10

Im Gegensatz zu Projekt B wurden bei Projekt C keine systematischen Wassergehaltsbestimmungen an Böden und Verklebungsmaterial durchgeführt. Daher wird die in Projekt B für den Hydroschild hergeleitete Wassergehaltserhöhung von 10% bei der Umwandlung des Bodens in Verklebungsmaterial (vgl. Abb. 6.48) auf dieses Projekt übertragen. Analog zur Vorgehensweise bei Projekt B werden die Wertepaare der Böden (aus Abb. 6.65) im neuen Bewertungsdiagramm dargestellt und deren Wassergehalte um 10% erhöht (Abb. 6.66).

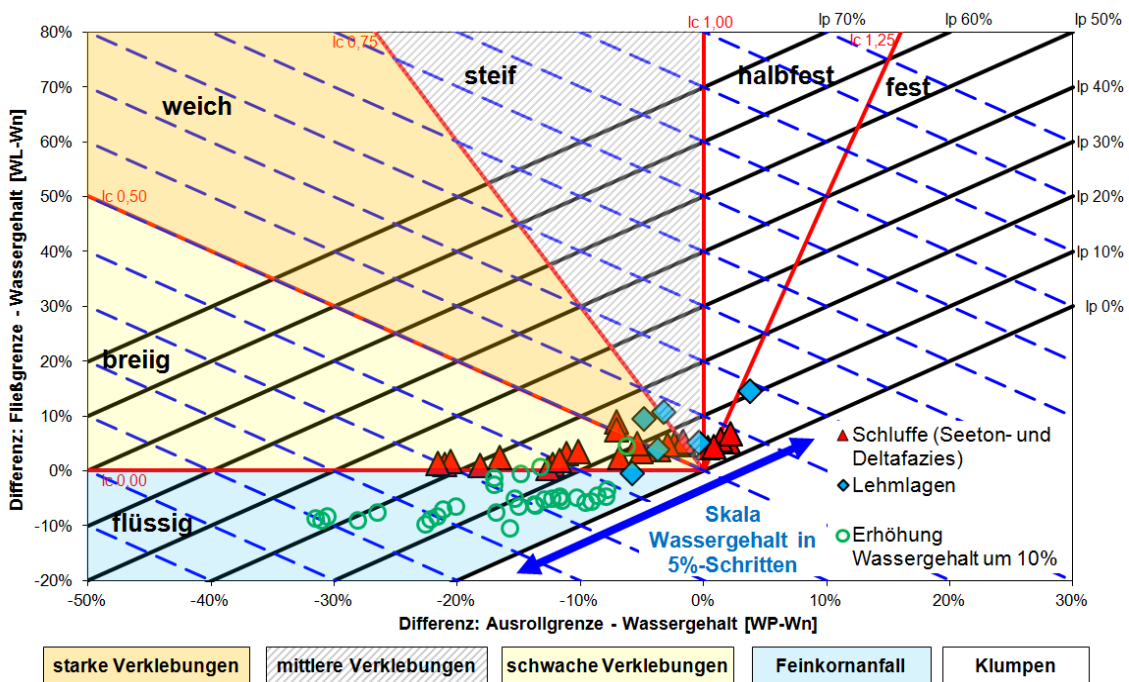


Abbildung 6.66: Verschiebung der Ausgangsböden bei 10% Wassergehaltszunahme

Auch wenn die Wassergehaltserhöhung von 10% für Projekt C nicht belegt ist, spiegelt die Auswertung in Abbildung 6.66 die Praxiserfahrungen wieder. Ein großer Teil des Bodens fiel dabei als Feinkorn an. Verklebungen erwiesen sich als nicht ganz so kritisch wie beim Hydroschildvortrieb von Projekt B und waren nicht wie dort als weiches bis steifes Verklebungsmaterial (vgl. Abb. 6.50), sondern als breiige Verklebungspasten ausgebildet (Abb. 6.67).



Abbildung 6.67: a) Blick aus der Schleuse in die Abbaukammer: Verklebungspasten an der Schneidrückseite [59] b) Probe einer breiigen Verklebungspaste [67]

Dementsprechend wurden Verklebungen der Grobsiebe auch eher durch Fladen und Pasten von Verklebungsmaterial (Abb. 6.68) als durch Zusammenballungen bindiger Kugeln wie bei Projekt B (vgl. Abb. 6.51) verursacht.

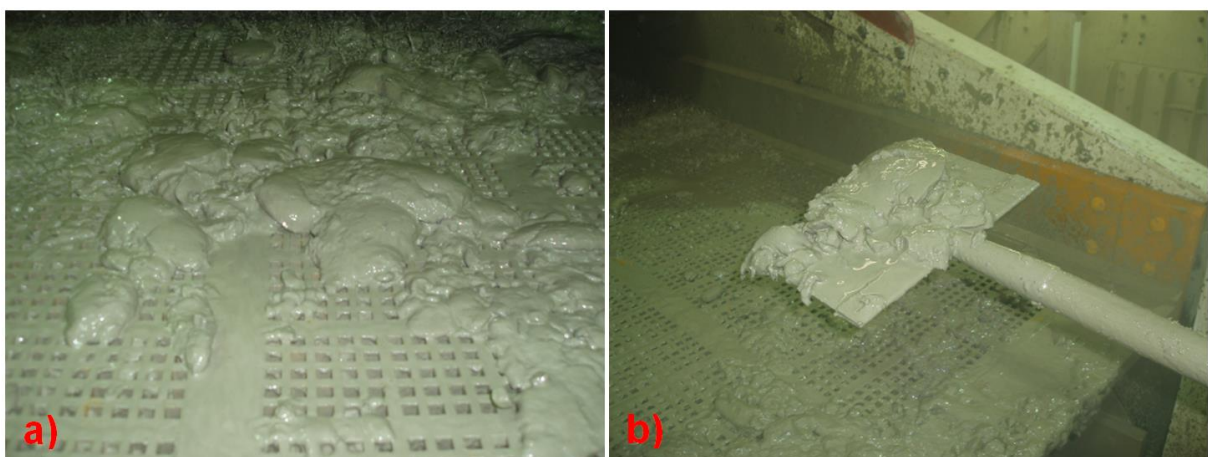


Abbildung 6.68: a) Verstopfungen der Maschen durch Verklebungspasten und Fladen auf den Grobsieben [59] b) Breiige Verklebungspaste auf dem Grobsieb [59]

Allerdings deuten manuelle Ansprachen an bindigen Böden auch auf höhere Konsistenzbereiche an der Ortsbrust hin, als es die Auswertungen der Abbildungen 6.64 und 6.65 vermuten lassen. Zu Beginn des Vortriebs wurden noch keine Wassergehalte bestimmt. Dementsprechend wurden auch bei Projekt C bereichsweise bindige Kugeln und Verklebungen mit höherer Konsistenz angetroffen.

Auf Basis der Dokumentationen von Verklebungen im Bereich der Abbaukammer und auf der Separationsanlage können insgesamt vier Strecken mit Verklebungen als Erschwernis definiert werden (Abb. 6.69). Eine Quantifizierung der Verklebungen analog zu Projekt B (vgl. Abb. 6.52) erfolgte bei Projekt C nicht.

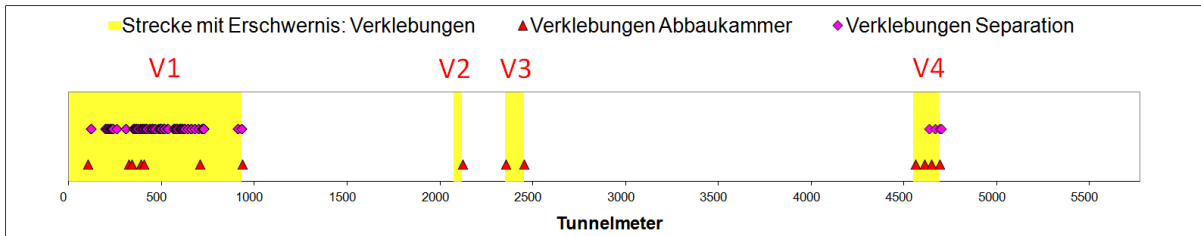


Abbildung 6.69: „Verklebungsstrecken“ auf Basis der Verklebungen (Separationsanlage und TVM)

Eine erhöhte Freisetzung von Feinkorn führt meist zu Anstiegen der Suspensionsdichten, da Bodenteilchen $<0,03$ mm im Regelfall nicht aus dem Kreislauf separiert werden können (vgl. Kap. 2.2.4). Sie reichern sich in der Suspension an, so dass diese regelmäßig ausgetauscht und durch frische Suspension ersetzt werden muss. Vortriebsstrecken mit hohen Suspensionsdichten sind somit typisch für einen erhöhten Anfall von Feinkorn (Abb. 6.70).

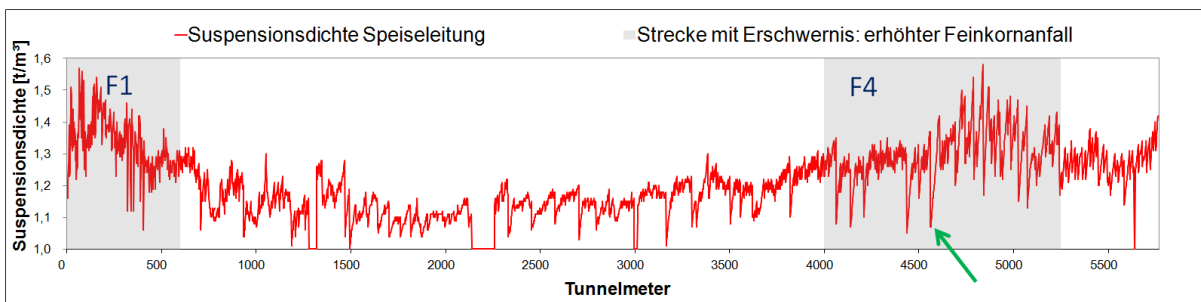


Abbildung 6.70: Suspensionsdichte der Speiseleitung mit Definition der „Feinkornanfall-Strecken“

Dabei hängt die Suspensionsdichte nicht nur von der Freisetzung von Feinkorn aus dem Baugrund, sondern auch von der Häufigkeit des Suspensionsaustauschs ab. Suspensionsaustausche sind in Abbildung 6.70 an den lokalen Minima der Suspensionsdichte erkennbar (beispielhaft mit Pfeil markiert), da innerhalb eines Vortriebs die Suspension nach der Entnahme mit hoher Dichte und der Zugabe mit geringer Dichte stark reduziert ist. Anhand der Differenz der Suspensionsdichte der Speiseleitung von einem Vortriebszyklus zum nächsten kann die Austauschhäufigkeit der Suspension als Näherung aufgezeigt werden (Abb. 6.71).

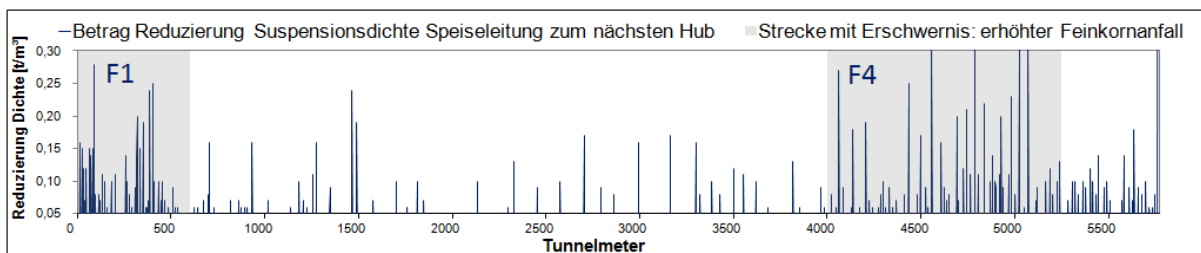


Abbildung 6.71: Differenz der Suspensionsdichte der Speiseleitung von einem Vortriebszyklus zum nächsten (Werte $<0,05$ t/m³ eliminiert) als Maß der "Austauschhäufigkeit" der Suspension mit Definition der „Feinkornanfall-Strecken“

Bei zu hohem Feinkornanfall kann es zur Überlastung der Separationsanlage kommen, wenn die Kapazität von Altbentonit-Tank oder Zentrifuge nicht ausreichen und Suspension mit zu hoher Dichte nicht mehr aus dem Kreislauf ausgetauscht werden kann. Die Stillstände der Separationsanlage können somit ebenfalls zur Eingrenzung der Strecken mit erhöhtem Feinkornanfall verwendet werden, wobei hier vor allem der erste Vortriebsabschnitt zu nennen ist (Abb. 6.72).

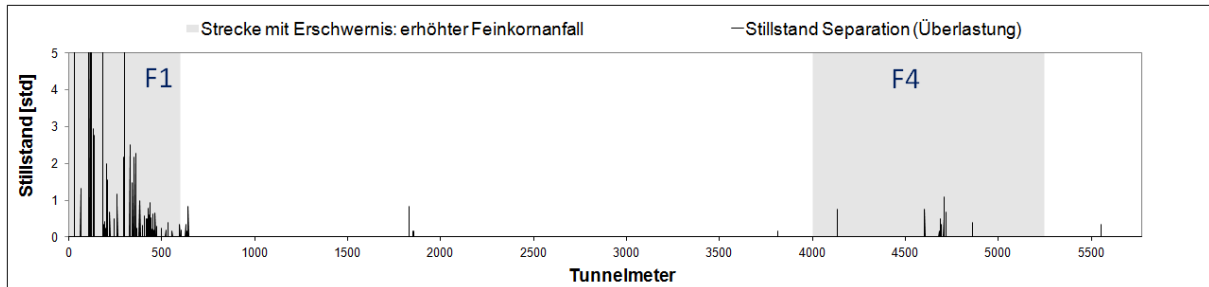


Abbildung 6.72: Stillstände der Separationsanlage mit Definition der „Feinkornanfall-Strecken“

Die so definierten Vortriebsbereiche mit der entsprechenden Erschwernis können nun den Baugrundverhältnissen gegenüber gestellt werden. Erschwernisse traten dabei nicht nur in Vortriebsbereichen mit hohen Anteilen an feinkörnigen Sedimenten auf (Abb. 6.73). Dabei fällt auf, dass Erschwernisse durch Verklebungen und Feinkornfreisetzung nicht zwangsläufig parallel zueinander auftraten (z.B. V2 /V3: nur Verklebungen, F2: zum Teil nur Feinkornfreisetzung). Hierauf wird im weiteren Verlauf diese Kapitels genauer eingegangen.

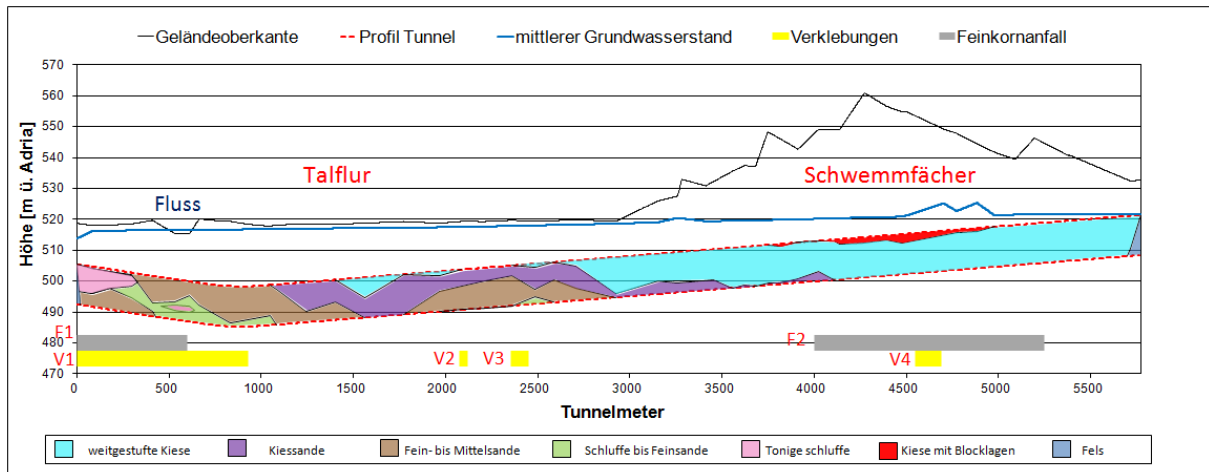


Abbildung 6.73: Geologischer Längsschnitt nach Abbildung 6.57 und Angabe der Vortriebsbereiche mit Erschwernissen durch Verklebungen (V1 bis V4) oder erhöhten Feinkornanfall (F1 und F2)

Die relevanten Vortriebsbereiche werden im Folgenden vereinfacht V1 bis V4 (Verklebungen) und F1 bis F2 (Feinkornanfall) bezeichnet (Tab. 6.8). In der Tabelle ist auch der auf Abbildung 6.59 basierende mittlere Feinkornanteil (Summe aus Ton- und Schluffanteil, bezogen auf die gesamte Ortsbrust) angegeben.

Tunnelmeter	Erschwernis	Hauptbodenart in Querschnitt	mittlerer Feinkornanteil (<0,06 mm) an Ortsbrust
0 bis 932	Verklebungen (V1)	tonige Schluffe und Schluffe bis Feinsande	20-70%
2074 bis 2120	Verklebungen (V2)	Sand und Kiessande	<10%
2352 bis 2454	Verklebungen (V3)	Sand und Kiessande	<10%
4549 bis 4692	Verklebungen (V4)	weitgestufte Kiese	<5%
0 bis 600	Feinkornanfall (F1)	tonige Schluffe und Schluffe bis Feinsande	30-70%
4000 bis 5250	Feinkornanfall (F2)	weitgestufte Kiese	<5%

Tabelle 6.8: Vortriebsbereiche mit Erschwernissen mit Zuordnung der Hauptbodenarten und des mittleren Feinkornanteils

Im Folgenden werden die in Tabelle 6.8 aufgeführten Vortriebsbereiche einzeln behandelt.

6.2.3.4. TM 0 bis 1000 (Verklebungen und Feinkornanfall)

Bis TM 600 war der Vortrieb gleichzeitig durch einen hohen Feinkornanfall (F1) und durch Verklebungen (V1) beeinflusst (Abb. 6.74). Verklebungen traten auch im weiteren Vortriebsverlauf bis TM 1000 auf. Im Querschnitt wurden tonige Schluffe (Seetone), Schluffe bis Feinsande (Deltasedimente) und Fein- Mittelsande (Deltasedimente) angeschnitten.

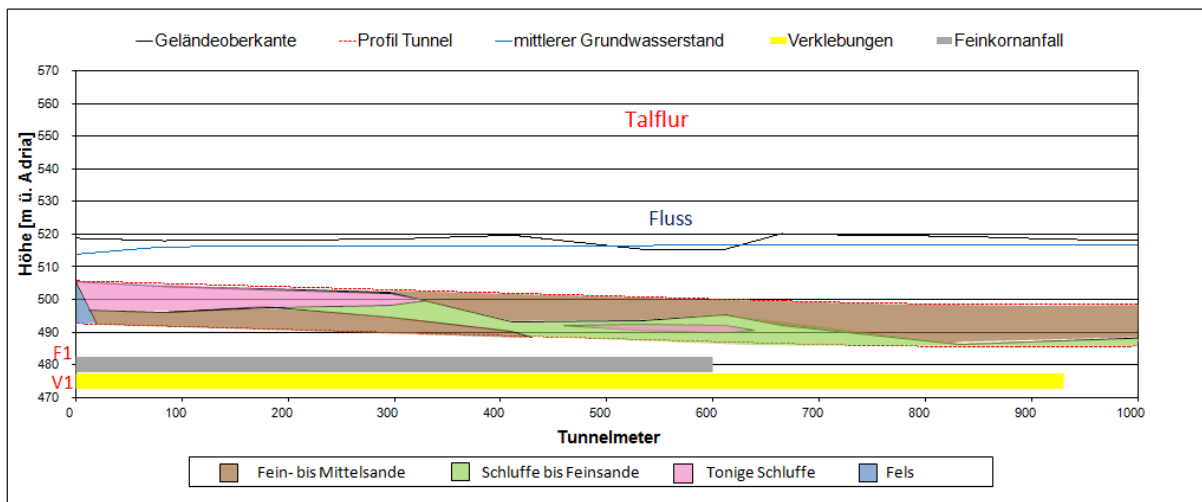


Abbildung 6.74: Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall

Die Verklebungen und der hohe Anfall an Feinkorn wurden durch die Schluffe bzw. leicht- bis mittelplastischen Tone (Seetone und Deltasedimente) verursacht (vgl. Abb. 6.64 bis 6.66). Die Darstellungen im neuen Bewertungsdiagramm (Abb. 6.65 und 6.66) zeigen, dass Teile der Böden eher als Feinkorn freigesetzt werden, während andere Teile zur Bildung von Verklebungen neigen. Der hohe Ortsbrustanteil zu Beginn des Vortriebs lässt eine große Bandbreite der in Abb. 6.65 dargestellten Wertepaare erwarten, so dass gleichzeitig Verklebungen und ein hoher Feinkornanfall auftraten. Dabei war die Erschwernis durch die Freisetzung von Feinkorn bis TM 600 an die hohen mittleren Schluff- und Tongehalte, bezogen auf die gesamte Ortsbrust, gebunden (Abb. 6.75).

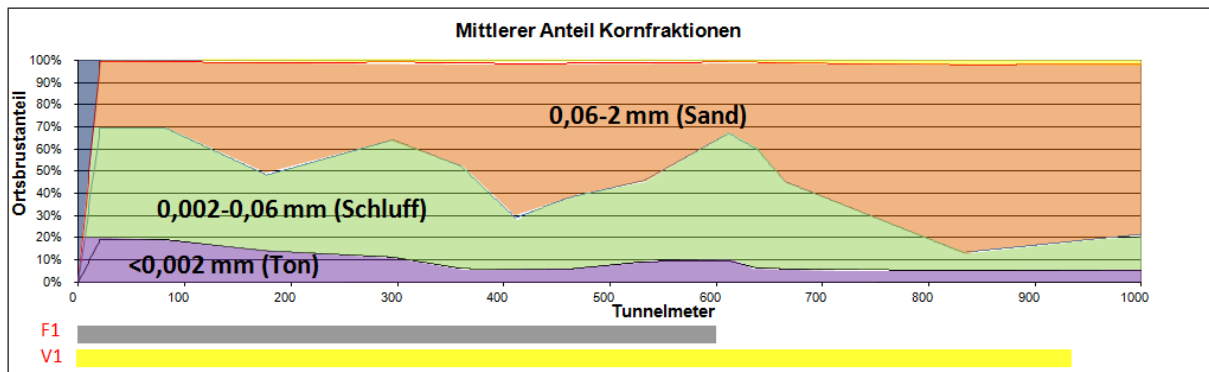


Abbildung 6.75: Mittlere Kornfraktionen mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall

Im weiteren Verlauf kam es auch bei geringen Ortsbrustanteilen binder Böden zu Verklebungen (Abb. 6.74: ab TM 800), da diese wahrscheinlich eine entsprechend hohe Plastizität innerhalb der Bandbreite des Bodens hatten. Der mittlere Ortsbrustanteil der Schluff- und Tonfraktion war aber zu gering (Abb. 6.75: ab TM 800), um gleichzeitig Erschwernisse durch einen hohen Feinkornanfall auszulösen.

6.2.3.5. TM 2000 bis 2500 (Verklebungen)

Im Vortriebsabschnitt zwischen TM 2000 und 2500 war der Vortrieb zweimal durch Verklebungen (V2 und V3) beeinflusst (Abb. 6.76). Im Querschnitt wurden hauptsächlich Fein- Mittelsande (Deltasedimente) und Kiessande (verschwemmte Flusskiese) angeschnitten. Feinkörnige Böden in Form von Schluffen bis Feinsanden (Deltasedimente) wurden entsprechend der Erkundung nur bereichsweise knapp in der Sohle angeschnitten.

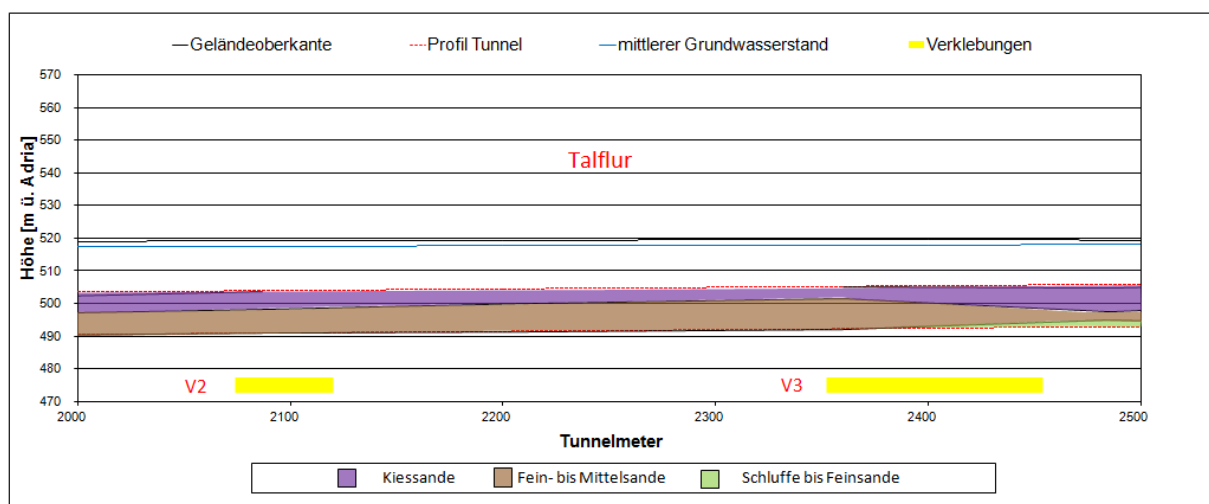


Abbildung 6.76: Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen

Da in diesem Vortriebsbereich die Ortsbrust im Sohlbereich nicht begutachtet werden konnte (keine Vollabsenkung möglich), kann nicht ausgeschlossen werden, dass die entsprechenden Böden höhere Ortsbrustanteile aufwiesen. Es ist zu vermuten, dass diese im Bereich der beiden durch Verklebungen beeinflussten Abschnitte am weitesten in den Querschnitt reichten. Die Verklebungen wurden ebenfalls durch die Schluffe bzw. leicht- bis mittelplastischen

Tone (Deltasedimente) verursacht (vgl. Abb. 6.64 bis 6.66), wobei hier bereits Ortsbrustanteile unter 11% ausreichen. Aufgrund des geringen Feinkornanteils (Tab. 6.8), bezogen auf die gesamte Ortsbrust, traten hier keine Erschwernisse durch einen hohen Feinkornanfall auf (Abb. 6.77).

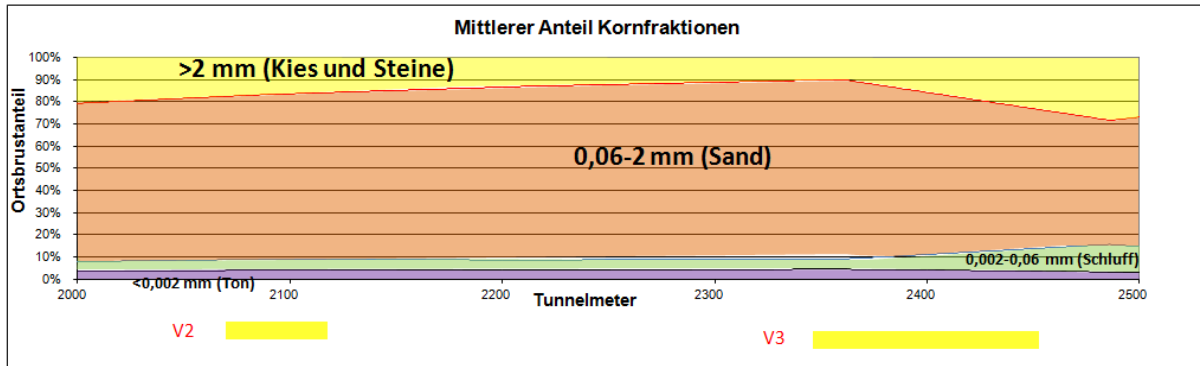


Abbildung 6.77: Mittlere Kornfraktionen mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen

Im Prinzip sind die beiden Vortriebsbereiche (V2 und V3) mit dem Ende der ersten Vortriebsstrecke (V1: etwa ab TM 800, vgl. Abb. 6.74 und 6.75) vergleichbar. Für diese Bereiche gilt, dass Verklebungen auch ohne Feinkornfreisetzung möglich sind, wenn der Boden eine entsprechende Verklebungsneigung (Plastizitätszahl) hat, aber der Feinkornanteil (bezogen auf die gesamte Ortsbrust) relativ gering ist (V1 ab TM 800: <20%, V2 und V3: <10%). Die These eines durch Verklebungen ausgelösten Anstiegs der Suspensionsdichte ist zumindest in diesem Fall nicht haltbar (vgl. Kap. 3.4.3).

6.2.3.6. TM 3800 bis 5300 (Verklebungen und Feinkornanfall)

Zwischen TM 4000 und 5250 war der Vortrieb durch einen hohen Feinkornanfall (F2) beeinflusst (Abb. 6.78). Verklebungen traten zwischen TM 4549 und 4692 auf. Im Querschnitt wurden überwiegend weitgestufte Kiese (Flussschotter) und untergeordnet Kiese des Schwemmfächers sowie Kiessande (verschwemmte Flusskiese) angeschnitten.

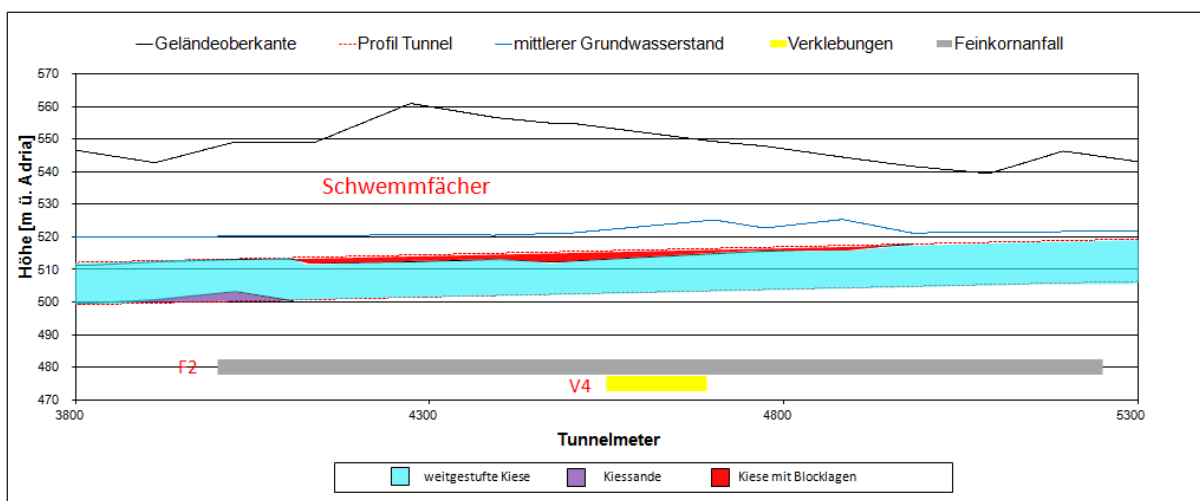


Abbildung 6.78: Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall

Die Erschwernisse sind insofern überraschend, als dass der Längenschnitt für diese Bereiche keine bindigen Böden ausweist. Im Gegensatz zur ersten Strecke mit erhöhtem Feinkornanfall (F1: vgl. 6.65) ist in diesem Fall aufgrund der vorwiegend grobkörnigen Bodenarten auch kein hoher Anteil an Feinkorn an der Ortsbrust als Ursache zu erkennen (Abb. 6.79).

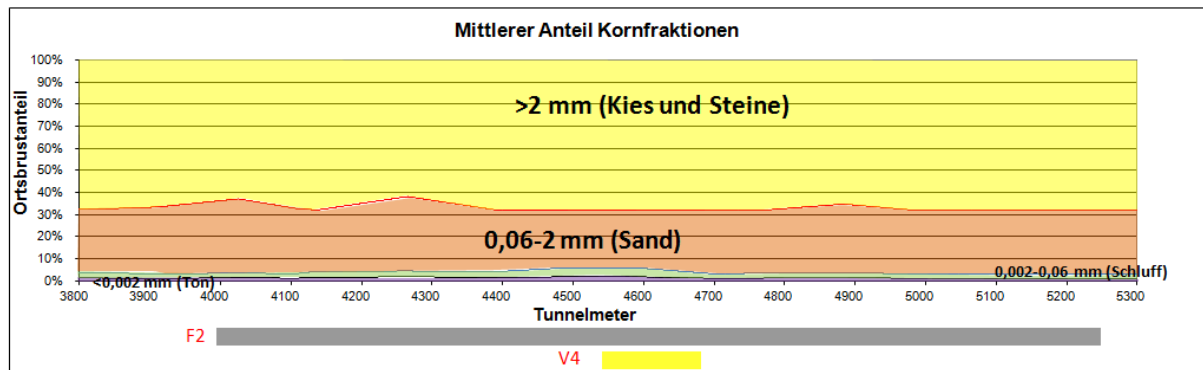


Abbildung 6.79: Mittlere Kornfraktionen mit Angabe der Erschwernisse durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanfall

Im Folgenden wird zunächst der Grund für die Verklebungen und anschließend für den hohen Feinkornanfall aufgezeigt. Im Bereich der Erschwernisse mit Verklebungen zwischen TM 4549 und 4692 wurden Lehmlagen innerhalb der Kiese angetroffen (Abb. 6.62-b). Im Rahmen der Vortriebsdokumentation konnte nicht geklärt werden, ob es sich dabei um Lehmlagen innerhalb der Flussschotter oder Schluff-Sandlagen innerhalb der Kiese des Schwemmfächers (vgl. Tab. 6.7: untere Zeile) handelt. In den Auswertungen der Abbildungen 6.63 bis 6.66 sind daher sowohl Laborkennwerte der Schluff-Sandlagen innerhalb der Kiese des Schwemmfächers aus dem Baugrundgutachten [8] als auch von an der Ortsbrust entnommenen Lehmproben dargestellt. Die Darstellungen im neuen Bewertungsdiagramm zeigen (Abb. 6.65 und 6.66), dass Teile der Lehme infolge der Stützflüssigkeit schnell als Feinkorn in Suspension gehen, wohingegen andere Teile eher Verklebungen verursachen. Die Lehmlagen können somit, einen entsprechenden Ortsbrustanteil vorausgesetzt, sowohl Ursache der Verklebungen als auch des erhöhten Anfalls von Feinkorn sein. Auch wenn die Lehmlagen nur im Vortriebsbereich zwischen TM 4549 und 4692 angetroffen wurden, ist nicht auszuschließen, dass sie auch den Feinkornanfall im Bereich des gesamten Vortriebsabschnitts zwischen TM 4000 und 5100 verursacht haben. Hierbei ist auf die aufgrund des Filterkuchens eingeschränkte Einsicht zu verweisen (vgl. Kap. 6.1.1), so dass Lehmlagen nicht immer zwingend freigelegt werden konnten.

Für den Teilabschnitt zwischen TM 4000 und 4250 lässt sich der erhöhte Feinkornanfall auch durch eine Block-Steinlage, bei der Blöcke bis 1,5 m Kantenlänge in eine Matrix aus Schluff eingebettet waren, erklären. Während des Druckluftestiegs traten im Bereich der Blocklage Vorbrüchen auf, da die Schluffmatrix weitestgehend nur eine breiige Konsistenz aufwies und die Blöcke aus der Ortsbrust rutschten (Abb. 6.80). Aufgrund der feinkörnigen Matrix kam es auch ohne vollständigen Filterkuchen nicht zu nennenswerten Druckluftverlusten.

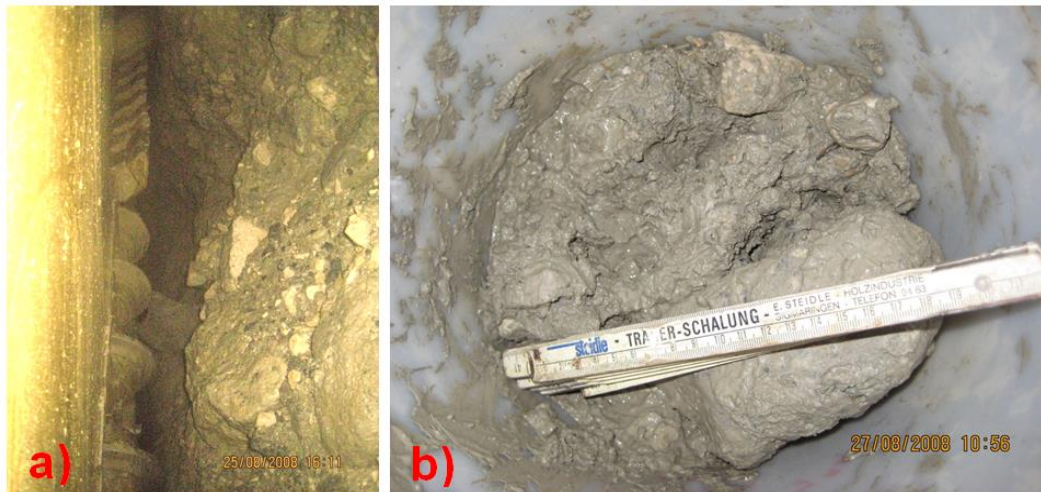


Abbildung 6.80: a) Vorgebrochene Ortsbrust im Bereich einer Block-Steinlage mit schluffiger Matrix
b) Probe aus der Block-Steinlage mit Stein- und Kieskomponenten und breiiger Schluffmatrix

Auch wenn an der Schluffmatrix keine Atterberggrenzen bestimmt wurden, kann aufgrund der überwiegend breiigen Konsistenz abgeleitet werden, dass mit einer relativ geringen Wassergehaltserhöhung der flüssige Konsistenzbereich erreicht und somit relativ schnell Feinkorn freigesetzt wird. Der Boden hat daher keine Verklebungsneigung. In diesem Bereich kommt es also zu Anstiegen der Suspensionsdichte infolge der Feinkornfreisetzung, ohne dass Verklebungen entstehen. Die These von durch hohe Suspensionsdichten ausgelöste Verklebungen ist zumindest in diesem Fall nicht haltbar.

Für den Teilabschnitt zwischen TM 4600 und 5250 kann der erhöhte Feinkornanfall durch die sehr hohe Lagerungsdichte der Kiese und das in diesem Bereich geänderte Löseverhalten erklärt werden. Die größeren Komponenten der Kiese mit sehr dichter Lagerung wurden im Gegensatz zu denen mit mitteldichter bis dichter Lagerung nicht als intaktes Korn aus dem Verband gelöst, sondern heraus gebrochen und zerrieben. Das wird beim Vergleich unterschiedlich dicht gelagerter Kiese am Gefüge direkt unter dem Filterkuchen, also der letzten Abbaufont, deutlich (Abb. 6.81).

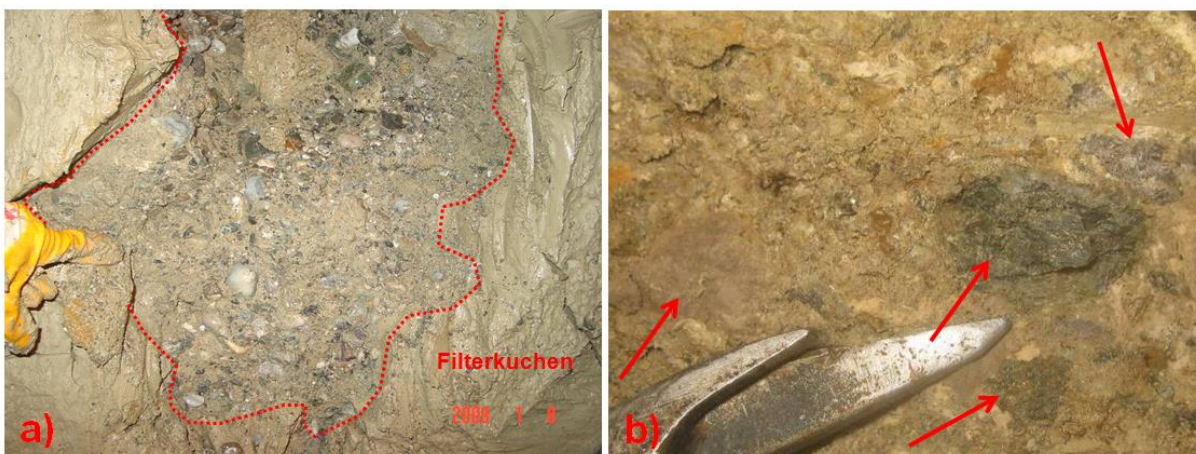


Abbildung 6.81: Ortsbrust in weitgestuften Kiesen nach bereichsweiser Entfernung des Filterkuchens
a) Mitteldichte bis dichte Lagerung mit intakten Körnern an der Abbaufont direkt unter dem Filterkuchen
b) Sehr dichte Lagerung mit "abgeriebenen" Kornresten direkt unter dem Filterkuchen (Peile)

Wenige Zentimeter in Vortriebsrichtung steht vor der Abbaufont mit gebrochenen bzw. zerriebenen Körnern der "ungestörte" Kies mit intakten Körnern in sehr dichter Lagerung an (Abb. 6.82).

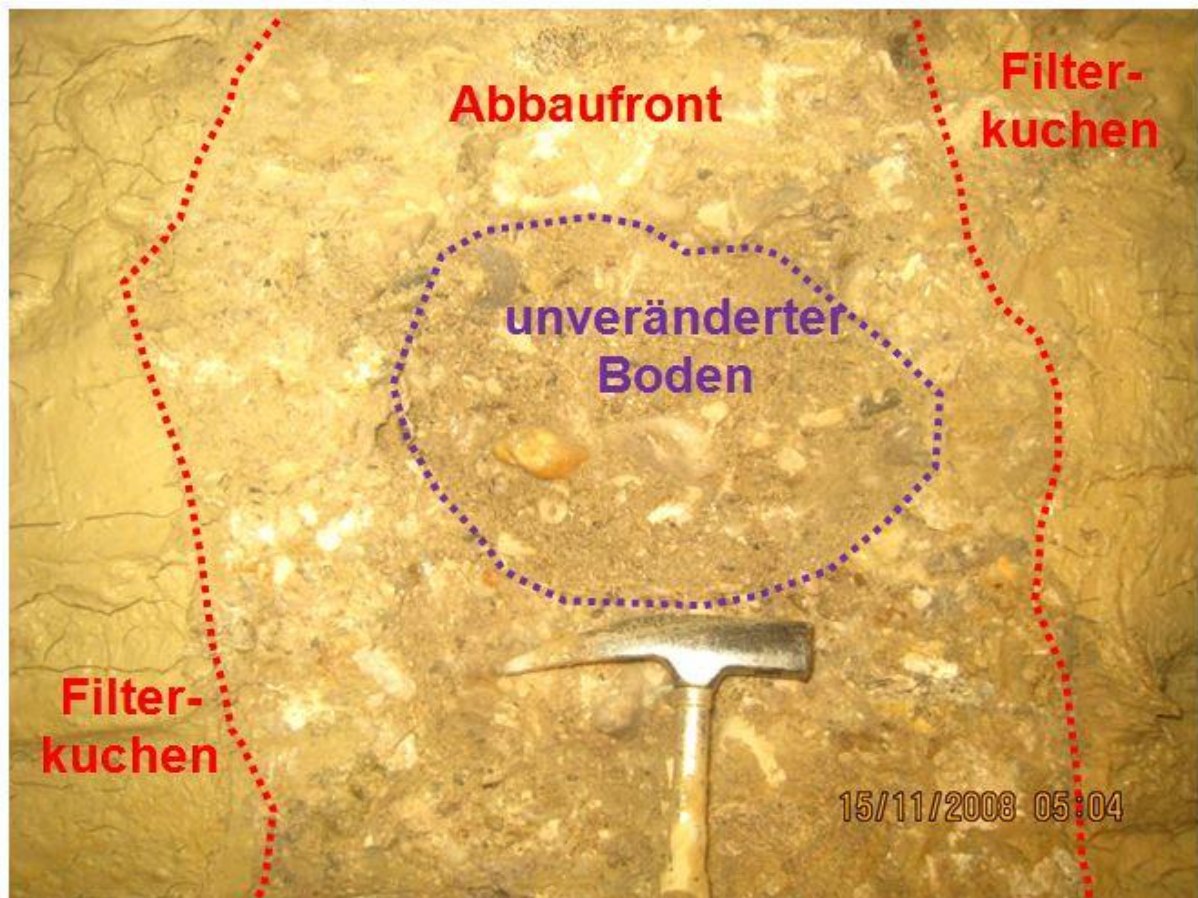


Abbildung 6.82: Ortsbrust in weitgestuften Kiesen nach bereichsweiser Entfernung des Filterkuchens. Vor der Abbaufont (in Vortriebsrichtung) steht der Kies mit intakten Körnern an (violett umrandet) [59, modifiziert]

Dabei wurde sowohl der durch den Abbauprozess beeinflusste Boden aus der Abbaufont als auch der in Vortriebsrichtung davor anstehende natürliche Boden beprobt. An beiden Proben wurde die Kornverteilung ermittelt und der Anteil der gebrochenen Körner bestimmt. Im Vergleich sind im Boden aus der Abbaufont deutlich mehr gebrochene Körner enthalten (Zunahme Massenanteil vom natürlichen Boden zur Abbaufont: Fraktion Grobkies: 11% → 49%, Fraktion Mittelkies: 20% → 48%, Fraktion Feinkies: 20% → 67%) [59]. Auch konnte vom natürlichen Boden zum Boden aus der Abbaufont eine Zunahme des Feinkornanteils nachgewiesen werden. Dabei nahm der Anteil <0,035 mm, also der Kornfraktion, die nicht mehr durch die Zyklone aus der Suspension abgetrennt werden konnte, von 3% auf 9% zu [59].

Außerdem wurden in den Kiesproben in diesem Bereich sogenannte veraschte Dolomite gefunden. Die im Gebirgsverband intakten Kieskörner lassen sich bereits mit leichtem Fingerdruck zerreiben (Abb. 6.83) und dürften somit im Rahmen des Abbauprozesses vollständig in feinkörnige Bestandteile zerfallen.



Abbildung 6.83: a) Intaktes Korn eines veraschten Dolomits aus einer Kiesprobe b) Mit leichtem Fingerdruck zerriebener Dolomit [59]

Während des Abbauprozesses wurde in diesem Vortriebsabschnitt somit verstärkt Gesteinspulver freigesetzt, was teilweise an den Körnern der Proben und insbesondere an weißlichen Lagen innerhalb der Verklebungen im Bereich zwischen TM 4549 und 4692 erkennbar wird (Abb. 6.84).



Abbildung 6.84: a) Anhaftungen von Gesteinspulver an Kieskörnern einer Ortsbrustprobe [59] b) Verklebungsmaterial von der Schneidradvorderkante mit weißlichen Lagen aus Gesteinspulver. Der Stift ist parallel zur Ortsbrust ausgerichtet, so dass sich die einzelnen Lagen senkrecht dazu angelagert haben [59, modifiziert]

In Vortriebsbereich haben sich aufgrund der Lehmlagen Verklebungen gebildet während infolge der sehr dichten Lagerung Gesteinspulver freigesetzt wurde. An das Schneidrad hat sich also bei jeder Drehung im Wechsel Verklebungsmaterial (Kontakt mit den Lehmlagen) und Gesteinspulver (Kontakt mit den sehr dichten Kiesen) angelagert, was zu der Feinlamination in Abbildung 6.84-b führte.

Zusammenfassend lassen sich so ein Großteil des erhöhten Feinkornanfalls und der Verklebungen in diesem Bereich erklären (Abb. 6.85). Lediglich der erhöhte Feinkornanfall im Be-

reich zwischen TM 4250 und 4550 ist nicht eindeutig zu erklären. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass immer nur ein sehr kleiner Teil der Ortsbrust begutachtet werden konnte. Eine der zuvor beschriebenen Ursachen, kann also auch hier der Grund sein, auch wenn sie nicht dokumentiert werden konnte.

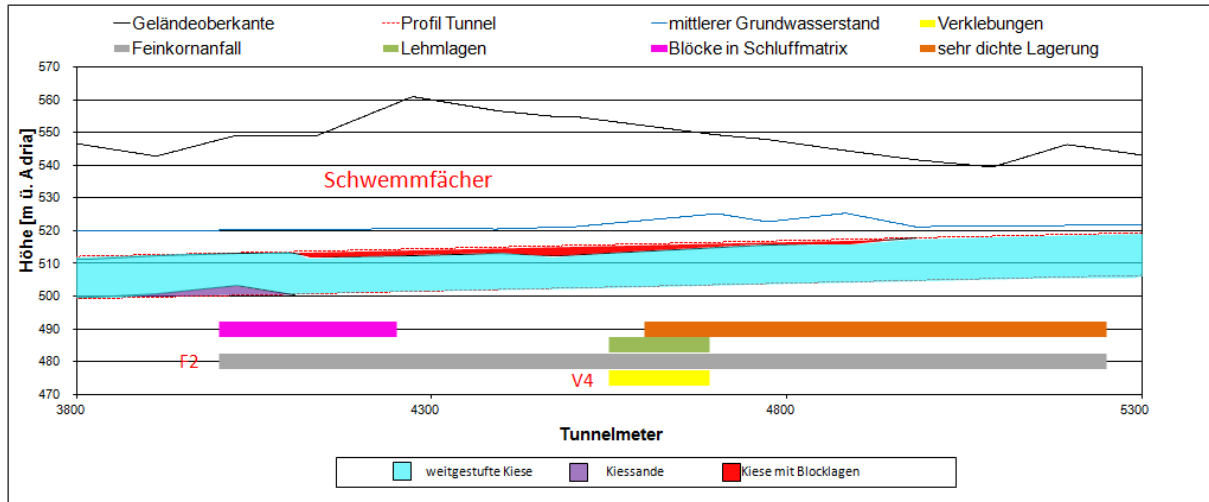


Abbildung 6.85: Geologischer Längsschnitt mit Angabe der Vortriebsbereiche mit Erschwernissen durch Verklebungen und erhöhten Feinkornanteil. Außerdem sind auf der Ortsbrustdokumentation basierende geologische Besonderheiten, die als Ursache der Erschwernisse möglich sind, dargestellt

6.2.3.7. Erkenntnisse

Auch dieses Projekt zeigt, dass bei Schildvortrieben im Lockergestein Verklebungen und ein erhöhter Feinkornanfall gleichzeitig auftreten können. Insbesondere bei großen Schwankungsbreiten von Plastizitäts- und Konsistenzzahl kann ein Teil des feinkörnigen Bodens schnell als Feinkorn freigesetzt werden, während ein anderer Teil in Verklebungsmaterial umgewandelt wird. Somit können diese Böden gleichzeitig Verklebungen und Anstiege der Suspensionsdichte auslösen. In diesem Fall werden aber weder Verklebungen durch die hohe Suspensionsdichte ausgelöst, noch umgekehrt (vgl. Kap. 3.4.3). Auch sind Baugrundbedingungen möglich, bei denen nur eine der beiden Erschwernisse auftreten kann. Folgende Aussagen können aus dem Vortrieb abgeleitet werden:

- Während nach Thewes [108] bei ausgeprägt plastischen Tonen ab 10-15% Ortsbrustanteil mit nachteiligen Auswirkungen in Bezug auf Verklebungen zu rechnen ist, traten bei diesem Projekt bei etwa 11% Ortsbrustanteil (aus Längsschnitt abgeleitet) auch in mittelplastischen Tonen bereits Erschwernisse mit Verklebungen auf (vgl. Kap. 6.2.3.5: Verklebungsstrecke V2 und V3). Dabei können auch mittelplastische Tone in Form von Lehmlagen und Linsen kritisch sein (Kap. 6.2.3.6: Verklebungsstrecke V4).
- Wenn bindige Böden große Bandbreiten der Plastizität und/oder der Konsistenz aufweisen, sind gleichzeitige Erschwernisse durch Verklebungen und Feinkornfreisetzungen möglich (vgl. Kap. 6.2.3.4: Verklebungsstrecke V1 und Feinkornstrecke F1). Insbesondere Erschwernisse durch Feinkornfreisetzungen und dadurch bedingte Anstiege der Suspensionsdichten hängen von der Häufigkeit des Suspensionsaustauschs und dem auf die gesamte Ortsbrust gemittelten Feinkornanteil des Baugrunds ab.
- Werden bindige Böden mit Verklebungsneigung, bei gleichzeitig geringem auf die gesamte Ortsbrust gemitteltem Feinkornanteil (<20%), angetroffen, treten ausschließlich Verklebungen auf (vgl. Kap. 6.2.3.5: Verklebungsstrecken V2 und V3).
- Werden bindige Böden mit niedriger Konsistenz und/oder Plastizität, angetroffen, wird vorrangig Feinkorn freigesetzt. Das führt zu Anstiegen der Suspensionsdichten, ohne dass Verklebungen entstehen müssen (vgl. Kap. 6.2.3.5: Feinkornstrecke F2 im Bereich der Blocklage mit breiiger Matrix).
- In Kiesen mit sehr hoher Lagerungsdichte können Bruchvorgänge beim Abbauprozess zur Freisetzung von Feinkorn in Form von Gesteinspulver führen. Das führt zu Anstiegen der Suspensionsdichten, ohne dass Verklebungen entstehen müssen (vgl. Kap. 6.2.3.5: Feinkornstrecke F2 im Bereich sehr hoher Lagerungsdichte).

6.3. Ausbildung und Auswirkung von Verklebungen

In diesem Kapitel wird beschrieben, in welchen Bereichen des Vortriebssystems Verklebungen und Verbackungen auftreten. Dabei werden Erkenntnisse aller drei in Kapitel 6.2 aufgeführten Projekte berücksichtigt.

6.3.1. Verklebungen im Bereich der Abbaukammer

Verklebungen bilden sich zunächst am Kontakt zwischen Vortriebsmaschine und Gebirge bzw. abgebautem Ausbruchsmaterial. Dabei lagern sie sich schichtweise an die Metalloberflächen und anschließend an bereits anhaftendes Verklebungsmaterial an. Sie können an verschiedenen Stellen innerhalb der Abbaukammer auftreten und den Vortrieb auf unterschiedliche Weise beeinflussen.

6.3.1.1. Schneidrad und Schneidradaufhängung

Während des Vortriebs bilden sich Verklebungen aufgrund des direkten Kontakts zum verklebungsfähigen Baugrund als erstes am Stahlbau an der Vorderseite des Schneidrads. Dabei entstehen scheibenförmige Verklebungen zwischen Schneidrad und Ortsbrust, die Thewes als Tonscheiben beschreibt [111]. Scheibenförmig zusammenhängendes Verklebungsmaterial zwischen Ortsbrust und Schneidrad wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Verklebungsscheibe bezeichnet. Bei den betreuten Vortrieben wurden bis zu 25 cm starke Verklebungsscheiben vor dem Schneidrad angetroffen (Abb. 6.86).



Abbildung 6.86: Verklebungsmaterial zwischen zurückgezogenem Schneidrad und Ortsbrust a) Verklebungsmaterial an der Schneidradvorderseite (SM: verschlissene Schälmesser) [60, 61] b) Von der Schneidradvorderkante abgelöste Verklebungsscheibe (R: Ripper) [59]

Dabei behindern entsprechend mächtige Verklebungsscheiben den Eindringvorgang der Werkzeuge in die Ortsbrust. Somit wird die Effektivität der Werkzeuge reduziert, was im Lockergestein nach Thewes im Extremfall dazu führt, dass der Boden verdrängt und nicht mehr

geschnitten wird [111]. Auch im Fels kann die Absprengung der Gesteinschips durch die Rollenmeißel (Abb. 6.87-a) infolge der „puffernden“ Wirkung der Verklebungsscheibe behindert werden (Abb. 6.87-b) sofern das Verklebungsmaterial zwischen Schneidrad und Ortsbrust nicht Richtung Schneidradöffnung verdrängt werden kann.

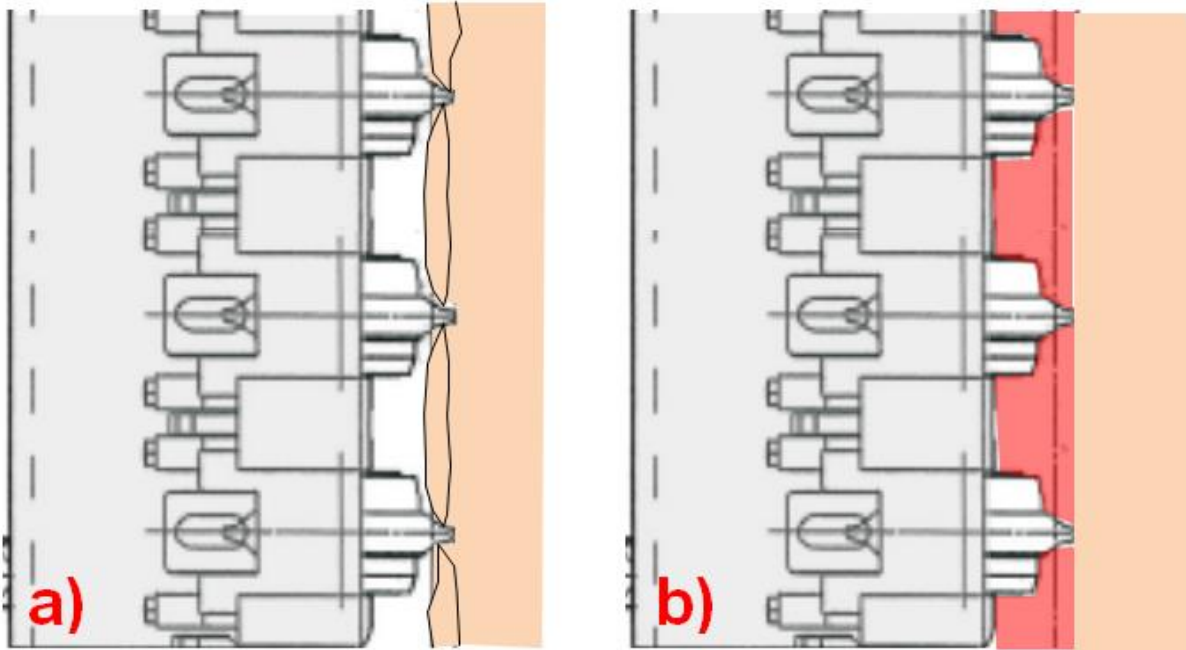


Abbildung 6.87: Schematische Darstellung der Auswirkung der Verklebungsscheibe auf die Effektivität der Werkzeuge a) schematische Darstellung des Eindringvorgangs an der Ortsbrust mit Chipbildung durch Rollenmeißel (orange: Gebirge, vereinfacht: Zugrisse und Zermalmungszone vor Schneidring nicht dargestellt) b) Durch Verklebungsscheibe behinderter Abbauprozess (orange: Gebirge; rot: Verklebungsscheibe)

Der behinderte Abbauprozess führt laut Thewes [111] zu Erhöhungen von Drehmoment und Schneidradandruck, wobei auf den Einfluss von Verklebungen auf die Betriebsdaten in Kapitel 7 näher eingegangen wird. Im Fels kann auch abgebautes Festgestein Teil der Verklebungsscheibe werden und in dieser zwischen Schneidrad und Ortsbrust – ähnlich wie durch einen „Mühlstein“ – aufgerieben werden. In diesem Fall kann dann noch zusätzliches Feinkorn aus eigentlich unkritischem dauerhaft festem Festgestein (vgl. Kap. 3.2.4.2) freigesetzt werden. Hierzu kann es aber nur kommen, wenn die Verklebungsscheibe zuvor infolge feinkörniger Lockergesteine oder veränderlicher Festgesteine gebildet wird.

Die Gefahr von Verklebungsscheiben steigt mit abnehmendem Öffnungsgrad des Schneidrads, da bei geschlossenen Schneidrädern mehr Fläche zur Anlagerung vorhanden ist und das Material schlechter durch Öffnungen im Schneidrad in Richtung Abbaukammer verdrängt werden kann. Mit zunehmender Bildung von Verklebungsmaterial verstopfen auch die Öffnungen im Schneidrad. Hierbei verkleben zunächst die relativ kleinen Werkzeugkästen (Abb. 6.88), die sowohl mit Rippern als auch mit Rollenmeißel besetzt sein können.

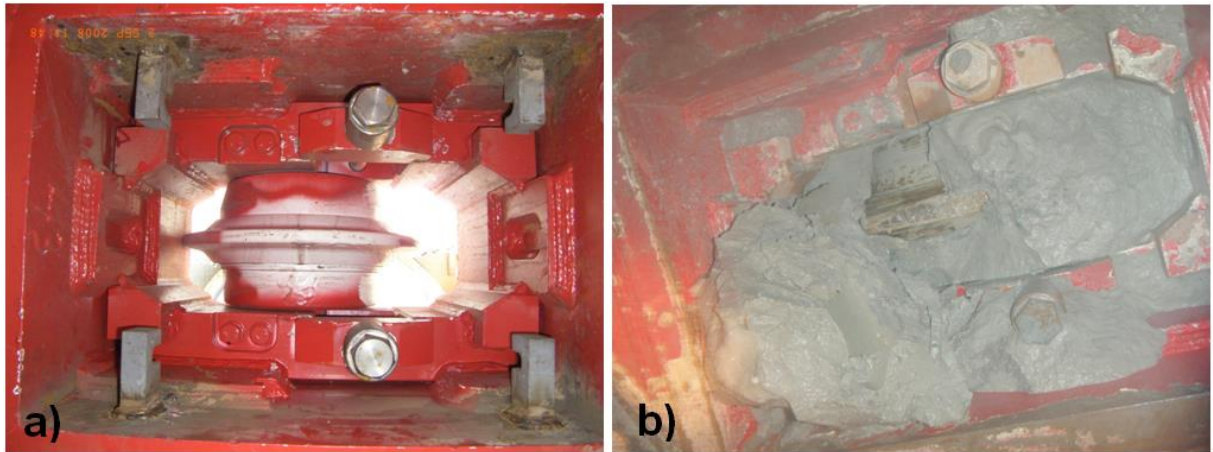


Abbildung 6.88: a) Werkzeugkasten mit Rollenmeißel ohne Verklebungen (Vergleichsfoto). b) Durch Verklebungen verstopfter Werkzeugkasten

Auch die Schneiradöffnungen, als Durchlass für das an der Ortsbrust gelöste Material, können durch Verklebungsmaterial teilweise oder vollständig verschlossen werden (Abb. 6.89).

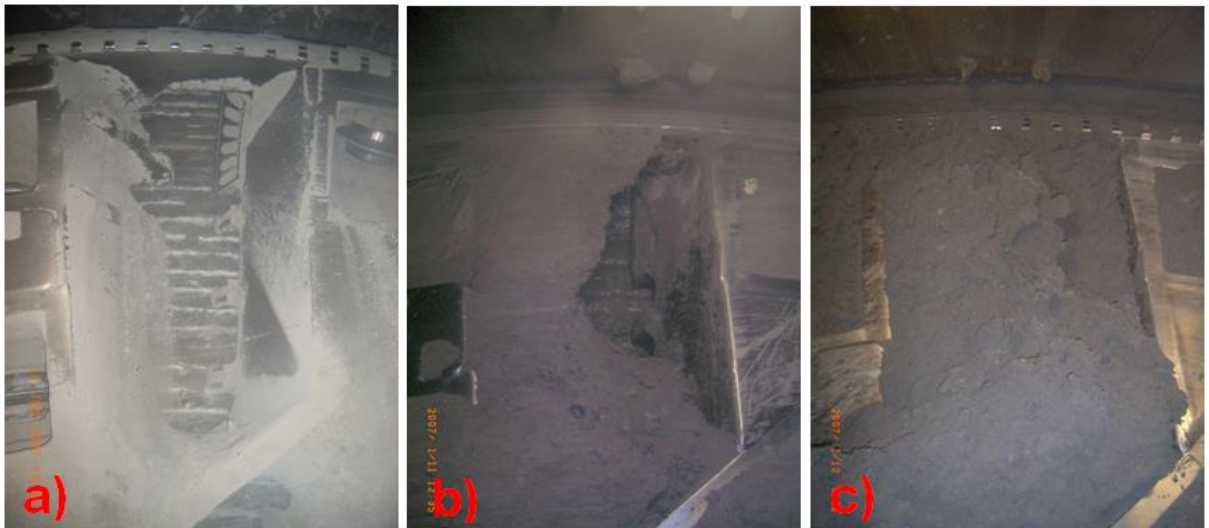


Abbildung 6.89: Schneiradöffnungen mit unterschiedlichem Verklebungsgrad a) Schneiradöffnung ohne Verklebungen (Vergleichsfoto) b) Schneiradöffnung zu etwa 80% verklebt c) Schneiradöffnung zu 100% verklebt

Im Extremfall wachsen die Verklebungen von der Vorderseite, durch alle Öffnungen bis über die Rückseite des Schneirads, bis dieses auch von der Rückseite aus wie eine mit Ton belegte "Töpferscheibe" erscheint (Abb. 6.90-b).

Die Dokumentation der verklebten Schneiradöffnungen ermöglicht eine relativ aussagekräftige Quantifizierung von Verklebungen (vgl. Kap. 6.1.2).



Abbildung 6.90: a) Schneidradrückseite mit wenig Verklebungen (Vergleichsfoto) b) Komplett bis über die Rückseite des Schneidrads angewachsene Verklebungen ("Töpferscheibe") [3]

Auch an den Armen der Schneidradaufhängung können sich Verklebungen bilden, wobei der sogenannte Schneiradstern komplett verklebt sein kann (Abb. 6.91-b).

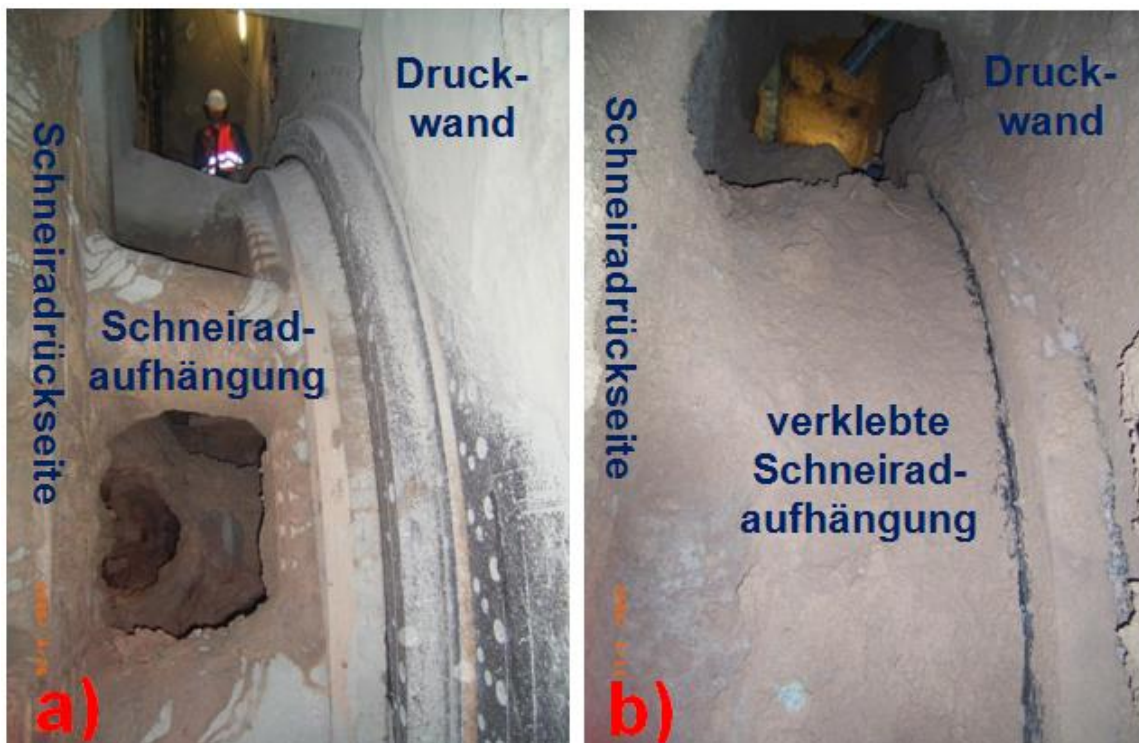


Abbildung 6.91: a) Schneiradaufhängung ohne Verklebungen nach Reinigungsarbeiten (Vergleichsfoto) [57] b) Vollständig verklebte Schneiradaufhängung [57]

Aufgrund der Verklebungen des Schneiradsterns wird die Materialförderung behindert, da abgebautes Material im Zentrum nur schwer in die Abbaukammer gelangt und Ausbruchsmaterial aus dem oberen Ortsbrustbereich nicht mehr direkt durch die Schneiradaufhängung Richtung Fördereinrichtung fallen kann.

Generell gilt für alle Verklebungen am Schneirad und an der Schneiradaufhängung, dass diese im Rahmen des Vortriebs als zusätzliche Masse mit bewegt werden müssen.

6.3.1.2. Druckwand und Schnittstelle zu Fördereinrichtungen

Auch an der Druck- bzw. Tauchwand bauen sich häufig Verklebungen auf (Abb. 6.92), die den Zwischenraum bis zur Schneiradrückseite komplett auffüllen können (Abb. 6.92-a). Im Extremfall kann das Schneirad infolge der Reibung zwischen Schneiradrückseite und Verklebung gebremst werden.

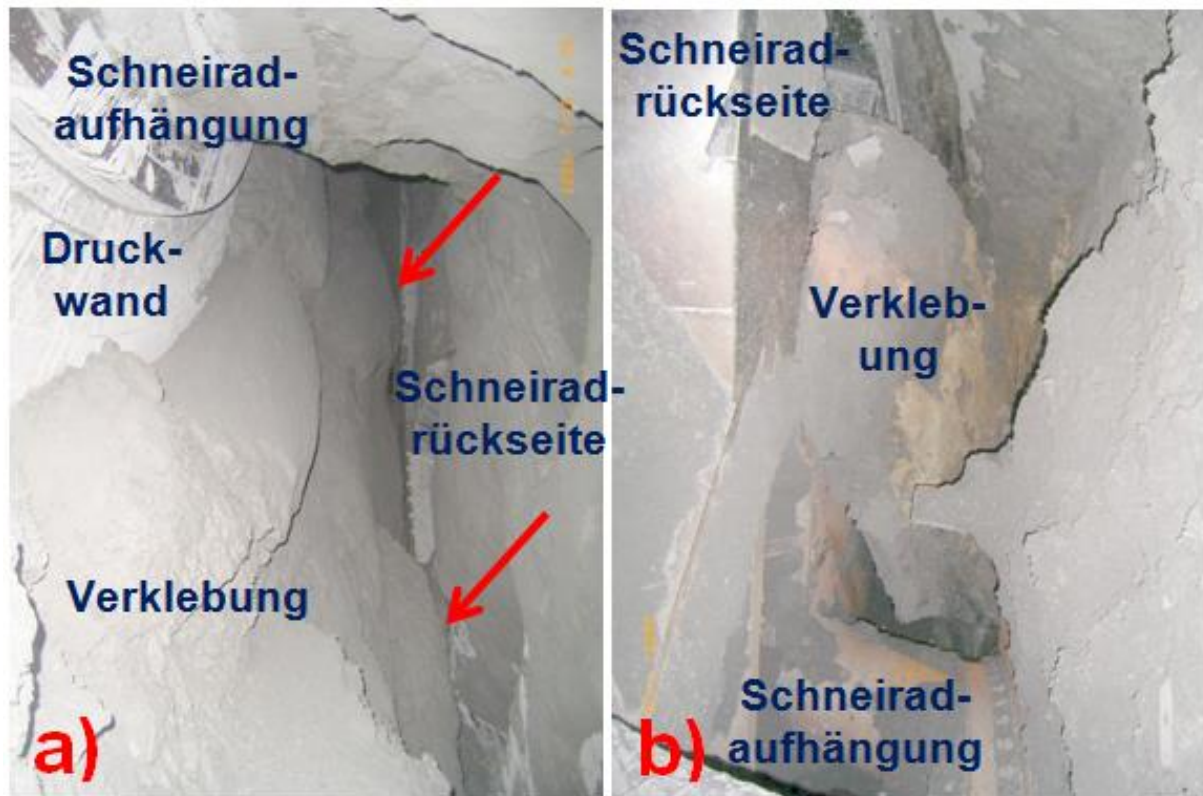


Abbildung 6.92: a) Verklebungen an der Druckwand mit Kontakten zur Schneiradrückseite (rote Pfeile) b) Infolge Reinigungsarbeiten von der Druckwand abgelöstes Verklebungsmaterial

Durch die Verklebungen an der Druck- oder Tauchwand werden Förderwege verengt, so dass die Weiterleitung des an der Ortsbrust gelösten Materials zur Fördereinrichtung behindert wird. An der Druck- oder Tauchwand angebrachte Vorrichtungen (Druckmessdosen, Gasmesssonden, Durchführungen für Bohrungen, Haken für Podeste) sind nicht mehr direkt zugänglich oder gar in ihrer Funktion beeinträchtigt.

Auch im Bereich der Schnittstelle zwischen Abbaukammer und Fördereinrichtung können Verklebungen und Verbackungen zu Behinderungen führen, wobei diese in Abhängigkeit vom Vortriebsverfahren unterschiedlich ausgebildet sind. Beispielsweise sind bei Erddruck-

schildvortrieben (Projekt A) Verklebungen und Verbackungen vor und neben der Förderschnecke möglich (Abb. 6.93). Diese können nicht durch die rückseitig am Schneidrad angebrachten Agitatoren abgeschält werden, da dieser Raum systembedingt nicht von Agitatoren befahren werden kann (sonst Kollision Agitator und Schnecke möglich).

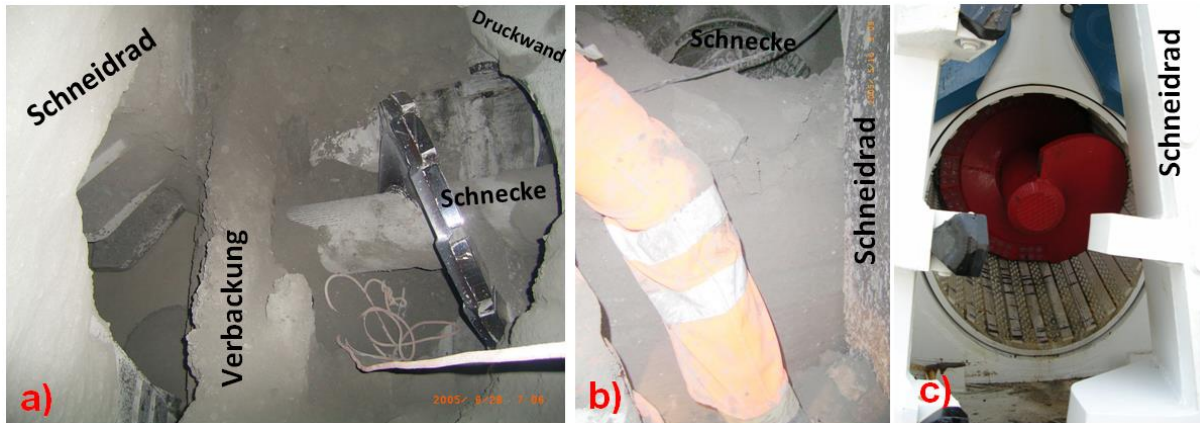


Abbildung 6.93: Verbackungen im Bereich der Förderschnecke [67] a) Mauerartige Verbackung zwischen vollständig ausgefahrener Förderschnecke und Schneidrad b) Blick von der Ortsbrust durch Schneidradöffnung auf Verbackungsmauer als „Hindernis“ vor Förderschneckenöffnung c) Vergleichsfoto vor Vortriebsbeginn: Blick durch Schneidradöffnung Richtung Förderschnecke

Die Verbackungsmauer in Abbildung 6.93-a und 6.93-b behinderte die Materialförderung so sehr, dass im offenen Modus ein direktes Zurückschieben des Ausbruchsmaterials aus dem Schneidradbereich Richtung Schnecke nur noch beschränkt möglich war. Das Ausbruchsmaterial ließ sich nur noch zur Schnecke transportieren, indem es vom Schneidrad angehoben und nach hinten über die Verbackungsmauer zur Öffnung über der Schnecke transportiert wurde. Vergleichbare Verbackungsmauern haben sich bei einem offen gefahrenen Schildvortrieb (Projekt B) innerhalb des Muckrings auf den Rändern des Übergabetrichters zum Förderband gebildet (Abb. 6.102). Hierdurch wurde die Übergabe von Ausbruchsmaterial aus dem Muckring auf das Förderband eingeschränkt und somit der gesamte Förderprozess behindert.

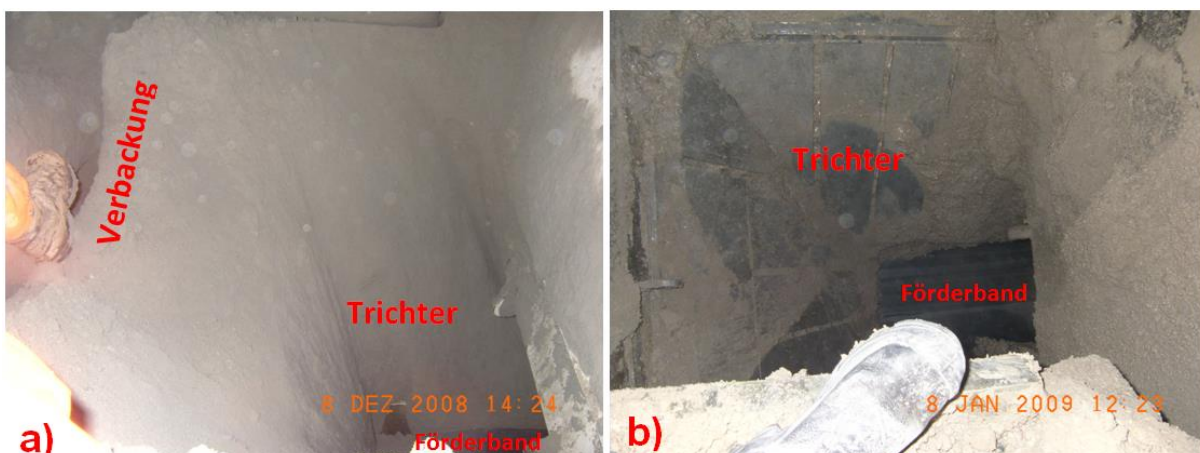


Abbildung 6.94: a) Übergabetrichter innerhalb des Muckrings mit Verbackungsmauern auf dem Rand b) Vergleichsfoto mit Blick in den gereinigten Übergabetrichter

Auch bei einem Hydroschildvortrieb (Projekt C) wurden Verklebungsmauern angetroffen, wobei in diesem Fall Grobkorn der nicht bindigen Böden in das Verklebungsmaterial gepresst wurde und zu einer Verfestigung führte [67]. Durch eine bis zu 60 cm hohe Verklebungsmauer direkt vor der Tauchwandöffnung wurde die Förderung des Ausbruchsmaterials massiv behindert, wobei zwischen Verklebungsmauer und Schneidrad bzw. der Ortsbrust ein Gemisch aus Boden, Schlamm und Restsuspension angetroffen wurde (Abb. 6.95). Auch hier musste ein Teil des Ausbruchsmaterials vom Schneidrad angehoben und nach hinten über die Verklebungsmauer zur Tauchwandöffnung transportiert werden.

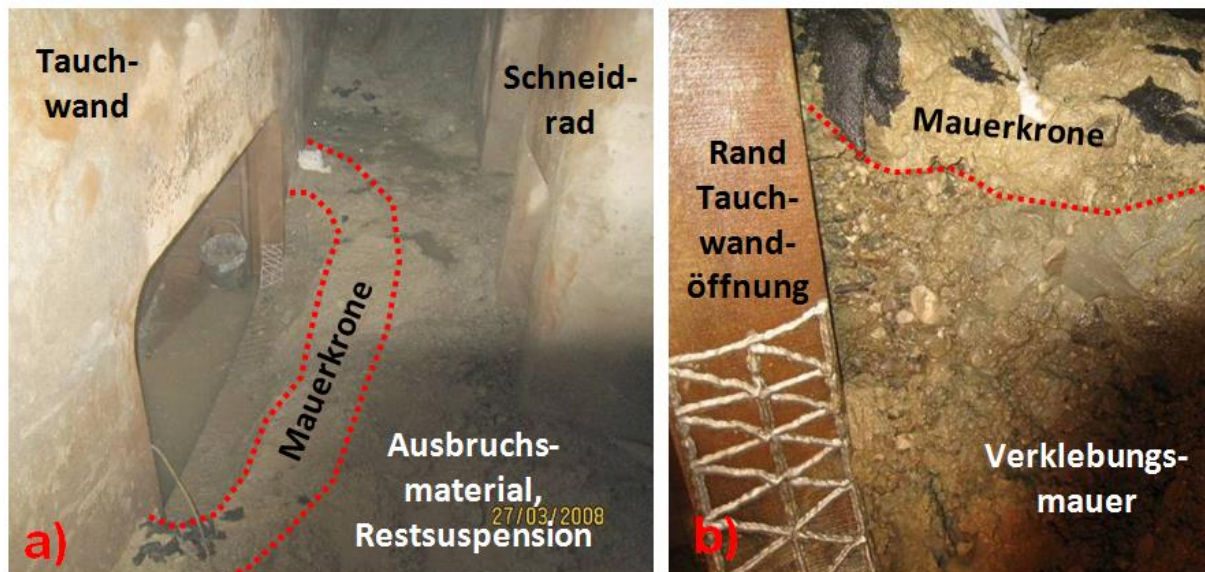


Abbildung 6.95: Abbaukammer bei Druckluftestieg mit Vollabsenkung der Suspension a) Verklebungsmauer vor Tauchwandöffnung und dahinter angestautes Ausbruchsmaterial mit Restsuspension b) Blick aus der Arbeitskammer durch die Tauchwandöffnung auf einen Teil der Verklebungsmauer mit Kieskomponenten in einer steifen Verklebungsmatrix

Verklebungsmauern im Übergangsbereich zu den nachfolgenden Fördereinrichtungen behindern vor allem die Materialförderung. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit werden sie häufig erst sehr spät erkannt.

6.3.2. Verklebungen außerhalb der Abbaukammer

Sobald Verklebungsmaterial die Abbaukammer verlassen hat, führt es häufig an anderen Stellen der Systemkette zu weiteren Verklebungen. Dabei kann Material, das bereits in der Abbaukammer zu Erschwernissen geführt hat, den Vortrieb als sekundäre Verklebung erneut behindern [61].

6.3.2.1. Förderbänder

Verklebungsmaterial führt vor allem auf den Förderbändern offen gefahrener Schildvortriebe zu Behinderungen. Dabei kann es zu Verstopfungen an Engpässen der Bandanlagen, zu

zurückrollendem Material an Steigbändern und zu Verstopfungen der Bandübergaben kommen (Abb. 6.96).



Abbildung 6.96: a) Materialstaus (Pfeil) auf Förderband infolge von Zusammenballungen aus steifem Ausbruchsmaterial b) In Form von großen Kugeln (Pfeil) zurückrollendes Verklebungsmaterial auf Steigband [3] c) Durch weiches Ausbruchsmaterial verstopfte Bandübergabe

Die Behinderungen führen dabei oft zu Ausfällen der Förderbänder und dadurch zu Unterbrechungen des Vortriebs. Auch wenn im offenen Modus inzwischen wieder relativ trockenes Ausbruchsmaterial gefördert wurde, läuft während des Stillstands der Bandanlagen erneut Bergwasser in die Abbaukammer. Der Vortrieb beginnt dann häufig wieder mit der Förderung von Ausbruchsmaterial mit kritischer Konsistenz. Verklebungen der Bandanlagen erfordern in der Regel umfangreiche Reinigungsarbeiten mit hohem Personalbedarf.

6.3.2.2. Separationsanlage

Die Förderung von Verklebungsmaterial in Form von bindigen Kugeln und Fladen führt häufig zu Verstopfungen der Siebmaschen (Abb. 3.2-b, 6.51 und 6.68). Wenn die Suspension dann nicht mehr richtig ablaufen kann, kann es zum Überlaufen der Siebe und zu Überschwemmungen der ganzen Separationsanlage kommen (Abb. 6.97).



Abbildung 6.97: a) Überlauf des Grobsiebs infolge verklebter Siebmaschen [59] b) Überschwemmung der Separationsanlage infolge übergelaufener Grobsiebe [59]

Außerdem sind Verklebungen im Bereich der Siebrutschen möglich, so dass die Materialab-
leitung behindert werden kann (Abb. 6.98).



Abbildung 6.98: a) Verklebung der Siebrutschen [60] b) Ableitung des Ausbruchsmaterials auf ein Förderband über eine Rutsche (Transportweg: grüner Pfeil) Ein Teil des Ausbruchsmaterials wird infolge bereichsweise verklebter Rutschen nicht auf das Förderband, sondern in den unteren Bereich der Separationsanlage abgeleitet (roter Pfeil) [60]

Das Ausmaß der Behinderungen kann durch Bedüsungen der Grobsiebe und einen erhöhten manuellen Reinigungsaufwand reduziert werden. Die Bedüsungen der Siebe führen zu einer Erhöhung des Wassergehalts an der Unterseite der Verklebungskugeln (Abb. 6.99), die dadurch eine weniger kritische Konsistenz bekommen.



Abbildung 6.99: a) Bedüsung des oberen Grobsiebs [60]. b) Schmierschicht mit flüssig bis breiiger Konsistenz (roter Pfeil) an der Unterseite einer Verklebungskugel [60]

Insgesamt reduzieren diese Maßnahmen zwar die Behinderungen durch Verklebungen, führen aber andererseits zur Erhöhung des Wassergehalts des Ausbruchsmaterials und erschweren die Deponierung (z.B. höhere Zugabe von Kalk erforderlich).

6.3.2.3. Transport

Die Klebrigkeit des Ausbruchsmaterials kann auch zu Verklebungen von Laderschaufeln und LKW-Ladeflächen führen (Abb. 6.100), was zu Reduzierungen der Transportkapazität führen kann.



Abbildung 6.100: a) Verklebungen im Bereich einer Laderschaufel [60] b) Verklebungen der Ladefläche eines LKWs [60]

Auf die Einflüsse von Verklebungen auf Transportfahrzeuge und die Probleme im Rahmen der Deponierung wird im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr eingegangen. Vielmehr sollte aufgezeigt werden, dass Verklebungen die Systemkette eines Schildvortriebs vom Abbauprozess an der Ortsbrust bis hin zum Abtransport des Ausbruchsmaterials behindern können.

6.3.3. Verklebungen und Verschleiß

Während Erschwernisse durch Verklebungen bei Vortrieben in tonmineralhaltigen feinkörnigen Böden oder veränderlich festen Gesteinen auftreten, wird ein erhöhter Verschleiß eher durch mittel- bis grobkörnige Locker- oder Festgesteine mit abrasiven Mineralbestand verursacht. Auf den ersten Blick schließen sich Verklebungen und Verschleiß somit aus. Im Folgenden wird dargelegt, dass Verklebungen und ein erhöhter Verschleiß parallel zueinander auftreten können.

6.3.3.1. Werkzeugkontrolle und- wechsel

Die Verklebungen der Werkzeugkästen, der Schneiradöffnungen und der Schneiradaufhängung erschweren sowohl die Kontrolle als auch die Wechsel der Werkzeuge (Abb. 101).

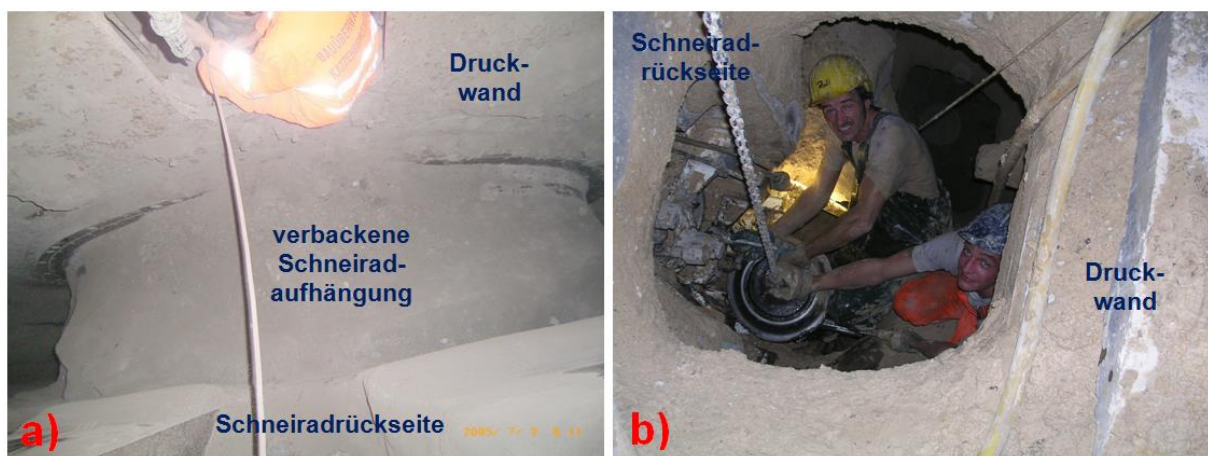


Abbildung 6.101: a) Blick von oben auf die vollständig verbackene Schneiradaufhängung b) Wechsel eines Rollenmeißels im Zentrumsbereich nach vorheriger Reinigung der Schneiradaufhängung

Dabei ist ein hoher Reinigungsaufwand erforderlich, wobei Beschädigungen des Filterkuchens oder Vorbrüche der Ortsbrust häufig nicht vermieden werden können (Abb. 6.102).

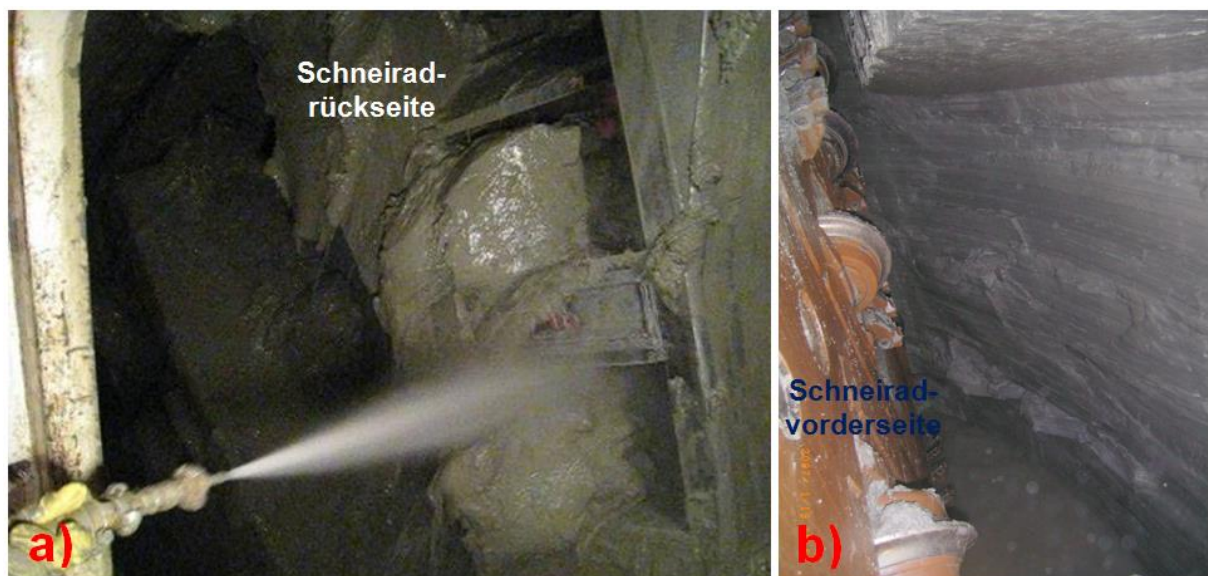


Abbildung 6.102: a) Reinigung von Verklebungen b) Vorbruch eines Tons infolge Reinigungsarbeiten

Die Verklebungsscheibe kann auch zu Problemen bei Drucklufteinstiegen führen. Bei Hydro-schildvortrieben in nicht standfesten Lockergesteinen wird das Schneidrad vor Drucklufteinstiegen zurückgezogen, um eine vollflächigen Ausbildung des Suspensionsfilterkuchens zu ermöglichen. Damit der Filterkuchen nicht beschädigt wird, wird das Schneidrad während des Einstiegs nur im von der Ortsbrust zurückgezogenen Zustand gedreht, um Reinigungsarbeiten, Werkzeugkontrollen oder -wechsel durchzuführen. Beim Abziehen des Schneidrads können Teile der Verklebungsscheibe am Schneidrad (6.86-a und 6.103-a) und an der Ortsbrust (6.103) haften bleiben oder aber vom Schneidrad abfallen (6.86-b). Lösen sich an der Ortsbrust haftende Reste der Verklebungsscheibe während des Drucklufteinstiegs, kann es zu plötzlichen Nachbrüchen oder Druckluftverlusten kommen, da Bereiche der Ortsbrust schlagartig frei von Filterkuchen sind. Weitere Beschädigungen des Filterkuchens sind durch während der Drehung vom Schneidrad abfallendes Verklebungsmaterial möglich.

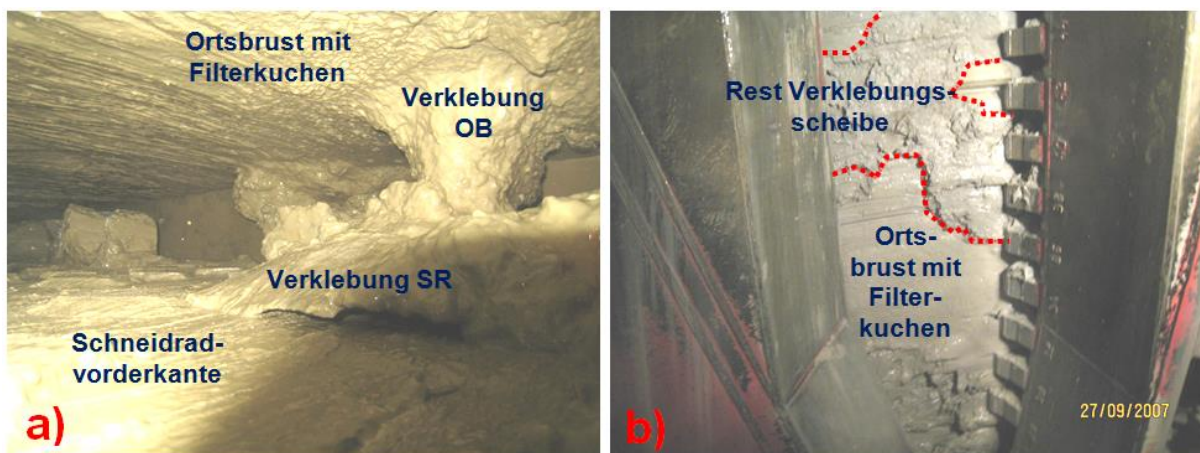


Abbildung 6.103: a) Reste der Verklebungsscheibe am Schneidrad (Verklebung SR) und an der Ortsbrust (Verklebung OB) [60] b) Reste der Verklebungsscheibe an der Ortsbrust [60]

6.3.3.2. Abrasive Gesteine als Teil von Verklebungen

Verklebungen entstehen bei Vortrieben in feinkörnigen Böden oder veränderlich festen Festgesteinen. Die entsprechenden Gesteine sind aufgrund der geringen Korngrößen und der hohen Anteile an Tonmineralen in der Regel wenig verschleißscharf. Die auf Quarz bezogene Verschleißscharfe nach Rosival (Quarz = 100) liegt bei Tonmineralen lediglich bei 0,03. Probleme treten dann auf, wenn an der gleichen Ortsbrust auch Gesteine mit abrasivem Mineralbestand angetroffen werden. Dazu zählen im Lockergestein mittel- bis grobkörnige Böden (Sand, Kies und Steine) und im Fels dauerhaft feste Festgesteine mit hoher Festigkeit (in sedimentären Abfolgen: Sandsteine und Konglomerate). Auf die Abrasivität von Boden und Fels wird hier nicht weiter eingegangen, sondern auf die Arbeiten von Drucker (Lockergestein) und Plinninger (Festgestein) verwiesen [36, 93].

Verschleißscharfe können Komponenten Bestandteil der Verklebungen werden, wobei diese innerhalb der Verklebungsscheibe häufig sogar zu besonders abrasiven, scharfkantigen Bruchstücken aufbereitet werden (Abb. 6.104).

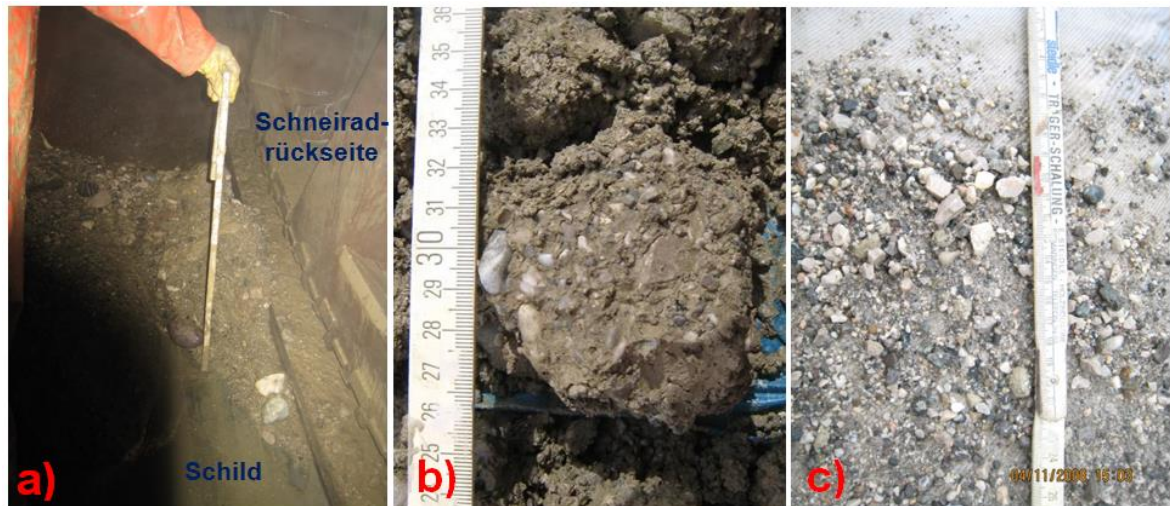


Abbildung 6.104: a) Verklebungen an der Schildeisenschneide mit grobkörnigen Bestandteilen (Kies und Steine) b) Kieskörner innerhalb einer Verklebungsmatrix c) Mittel- bis grobkörnige, gebrochene Körner aus einer Probe der Verklebungsscheibe, nachdem die feinkörnige Matrix ausgewaschen wurde

In Felsabfolgen können Gesteinsbruchstücke dauerhaft fester Gesteine als abrasive Komponenten Bestandteil der Verklebungen werden. Insgesamt können sowohl verschleißscharfe Verklebungspasten als auch relativ feste mauerartige Strukturen kritisch sein.

6.3.3.3. Verklebungstypischer Verschleiß

Im Normalfall kommt es bei Rollenmeißeln zu einem gleichmäßigen Verschleiß. Infolge verklebter Werkzeugkästen (6.88-b) können die Rollenmeißel blockieren, so dass der Schneidring einseitig abgeschliffen wird (Abb. 6.105).



Abbildung 6.105: a) Einseitiger Abschleiß (Pfeile) des Schneidrings eines blockierten Rollenmeißels b) Blick auf die abgeschliffene Schnittkante des Schneidrings eines Rollenmeißels

Wenn neben feinkörnigen Böden auch Gesteine hoher Festigkeit (z.B. Blöcke oder harte Sandsteinbänke) angetroffen werden, können die Schneidringe der blockierten Rollenmeißel durch die Schlagbeanspruchung beim Überrollen der harten Gesteine reißen. Dabei besteht die Gefahr, dass die Schneidringbruchstücke von anderen Werkzeugen überrollt und so zusätzliche Gewaltschäden verursachen. Am Beispiel von Projekt A kann zumindest ein ten-

denziell mit dem Verklebungsgrad des Schneidrads zunehmender Verschleiß aufgezeigt werden (Abb. 6.106).

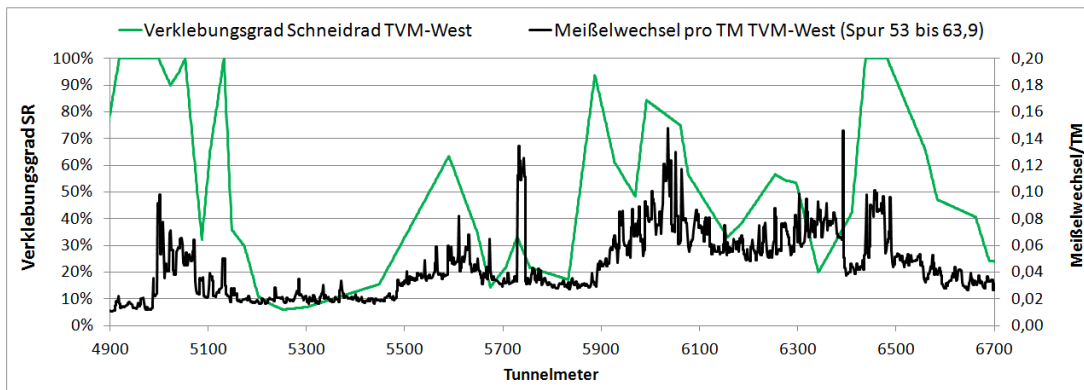


Abbildung 6.106: Vergleich von Meißelverbrauch pro Tunnelmeter und Verklebungsgrad des Schneidrads für Projekt A

Dabei ist zu beachten, dass gerade in den Bereichen mit starken Verklebungen auch relativ harte Sandsteinbänke an der Ortsbrust angetroffen wurden. Kluftwasser aus den Sandsteinen führte zur Umwandlung der gleichzeitig angetroffenen feinkörnigen Böden in Verklebungsmaterial. Die Verschleißzunahme in diesen Bereichen kann also mehrere sich überlagernde Ursachen haben.

Eine weitere durch Verklebungen verursachte Verschleißform kann an der Rückseite des Schneidrads auftreten. Diese kann durch bis an das Schneidrad reichende Verklebungen der Druckwand (Abb. 6.92-a) oder durch Verklebungsmauern an der Schildschneide (vgl. Abb. 6.93 und 6.104-a) verursacht sein, sofern diese auch abrasive Bestandteile enthalten. Beispielsweise wurde der äußere Agitator durch eine Verklebungsmauer an der Schildschneide bei einem Hydroschildvortrieb (Projekt C) innerhalb kurzer Zeit so tief eingekerbt (Abb. 6.107), dass er entfernt werden musste.

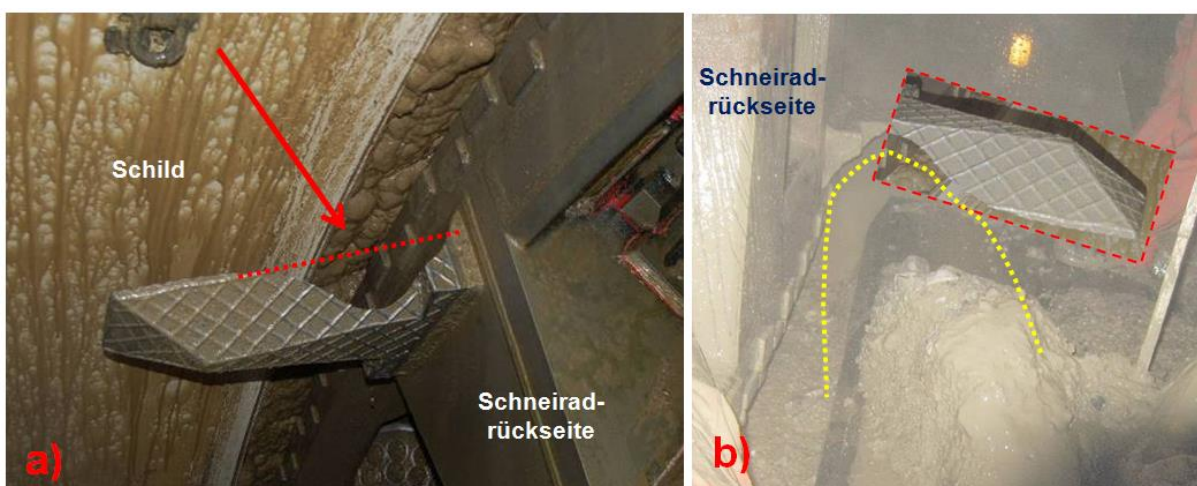


Abbildung 6.107: a) Durch Verschleiß eingekerbter Agitator (ehemalige Metallkante: rote Linie) b) Rest einer Verklebungsmauer an der Schildschneide als Ursache für den Verschleiß des Agitators (entfernter Agitator gedanklich als Fotomontage wieder angefügt; Kontur der Verklebungsmauer vor Reinigung: gelbe Linie)

6.3.3.4. Verlängerte Werkzeugwege

Aufgrund ansteigender Schneidraddrehmomente und – anpresskräfte infolge von Verklebungen (vgl. Kap. 7.3.2), wird die Vortriebsgeschwindigkeit zurückgenommen. Die „puffernde Wirkung“ der Verklebungsscheibe (vgl. Abb. 6.86 und 6.87) führt aber dazu, dass trotz erhöhter Vortriebspresenkräfte, eine geringere Penetration möglich ist. Bei gleichbleibender Schneidraddrehzahl erhöht sich dadurch die Anzahl der Schneiradumdrehungen für die gleiche Vortriebsstrecke. Am Beispiel von Projekt A wird für die Spur 63,9 ein tendenziell mit dem Verklebungsgrad des Schneirads zunehmender Werkzeugweg pro Vortriebsmeter aufgezeigt (Abb. 6.108).

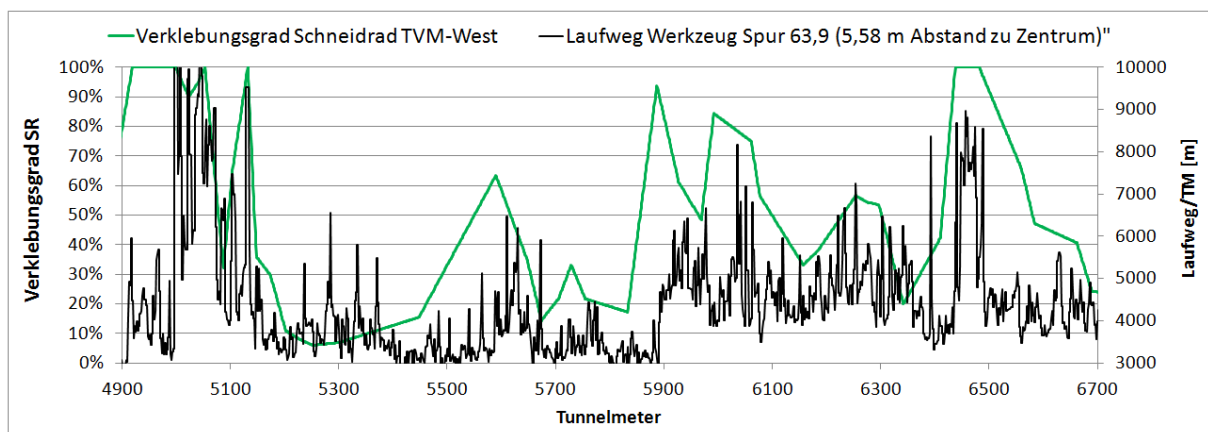


Abbildung 6.108: Vergleich von Werkzeugweg pro Vortriebsmeter und Verklebungsgrad des Schneirads für Projekt A

Dementsprechend wird allein aufgrund der längeren Werkzeugwege, als Resultat der Verklebungsscheibe, ein höherer Verschleiß verursacht. Dieser ist unabhängig von der Abrasivität des Baugrunds. Der so verursachte Verschleiß wird natürlich noch größer, wenn gleichzeitig auch abrasive Gesteine angetroffen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Abhängigkeit der Werkzeugwechselhäufigkeit und des Schneiradverklebungsgrades in Abbildung 116 auch durch die längeren Werkzeugwege verursacht wurden.

6.3.3.5. Erkenntnisse zur Wechselwirkung zwischen Verklebungen und Verschleiß

- Der Verschleißzustand der Werkzeuge ist bei Erschwernissen durch Verklebungen schlecht zu kontrollieren. Infolge der Reinigungsarbeiten können, gegenüber Vortriebsbereichen ohne Verklebungen, in der gleichen Stillstandszeit weniger Werkzeuge kontrolliert und gewechselt werden. Drucklufteinstiege müssen häufiger abgebrochen werden.
- Abrasive Gesteine können als Bestandteil von Verklebungen zu erhöhtem Verschleiß führen. Dabei sind mittel- bis grobkörnige Böden (Sand, Kies, Steine) und dauerhaft feste Gesteine mit hoher Festigkeit besonders kritisch.
- Verklebungen führen meist zu erhöhtem Verschleiß und zu ungewöhnlichen Verschleißbildern. Dabei sind einseitig verschlissene Schneidringe blockierter Rollenmeißel typisch. Ungewöhnlicher Verschleiß an der Schneidradrückseite (Agitatoren oder Rückseite der Schneidradfelge) weisen auf Verklebungsmauern im Sohlbereich hin.
- Eine geringere Penetration infolge von Verklebungen führt bei gleichbleibender Drehzahl in der gleichen Vortriebsstrecke zu mehr Schneidradumdrehungen. Aufgrund der dadurch bedingten längeren Werkzeugwege, steigt der Verschleiß.

7. Betriebsdatenanalysen im Hinblick auf Verklebungen

In diesem Kapitel werden die Interaktionen zwischen Vortriebsmaschine und Baugrund der in Kapitel 6 aufgeführten Praxisprojekte analysiert. Hierzu werden Betriebsdatenanalysen durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf den Auswirkungen von Verklebungen auf die Maschinendatensätze liegt. Zunächst wird auf die Erfassung und auf die Aufbereitung der Daten eingegangen. Außerdem werden unterschiedliche Einflüsse auf ausgesuchte Betriebsdaten diskutiert und die abbauspezifischen Anteile hergeleitet. Ein großer Teil der in diesem Kapitel dargelegten Erkenntnisse wurde im Rahmen einer Forschungsgruppe gemeinsam mit Jan Düllmann erarbeitet. In diesem Zusammenhang wurde ein Statusbericht im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 837 „Interaktionsmodelle für den Maschinellen Tunnelbau“ erarbeitet [38, 39]. Veröffentlichungen während der Dissertation stammen von Düllmann et al. und Hollmann et al. [37, 66]. In diesem Kapitel werden einzelne Formulierungen und modifizierte Abbildungen aus diesen Quellen übernommen.

7.1. Messung und Berechnung von Betriebsdaten

Bei maschinellen Tunnelvortrieben werden in Sekundenabständen hunderte von Betriebsdaten generiert (vgl. auch Kap. 3.4.1). Dadurch ist der Einsatz entsprechend hoher Mengen an Messsensoren erforderlich, die an unterschiedlichen Stellen auf der Vortriebsmaschine verbaut sind. Dabei werden kontinuierlich analoge elektrische Signale übermittelt, die mittels Messumformer in eine physikalische Größe (z.B. Druck) umgewandelt werden. Da jeder Sensor nur einen vom Hersteller vorgegebenen, begrenzten Messbereich hat (bei Druckmessgebern beispielsweise 0 bis 100 bar), ist bei einer Über- oder Unterschreitung die korrekte Umrechnung der Eingangssignale nicht mehr gewährleistet. Dabei kann auch eine nur kurzfristige Überlastung der Auslegung und Überschreitung der Überlastsicherheit zur Beschädigung der Sensoren führen. Außerdem sind Änderungen von Nullpunkt und Linearität des Sensorsignals möglich, so dass die Umwandlung der Eingangssignale gestört ist und neu kalibriert werden muss. Beispielsweise sind bei unerwartet auftretenden Verklebungen Überlastungen der Sensoren der Schneidradverschiebezyylinder durch hohe Druckspitzen während des Vortriebs denkbar. Während zu klein dimensionierte Sensoren Fehlmessungen verursachen können, beeinträchtigen überdimensionierte Sensoren die Messgenauigkeit, da die Messtoleranz vom Endwert des Messbereichs abhängt. Dementsprechend ist die Messauflösung geringer, wenn nur ein kleiner Teil der Messbandbreite ausgenutzt wird.

Die Kalibrierung der eingebauten Messsensoren wird in der Regel nur vor Vortriebsbeginn überprüft. Aufgrund der hohen Anzahl und bereichsweise schlechten Zugänglichkeit der Sensoren sind diese im Rahmen des laufenden Vortriebs schwer zu kontrollieren. In Einzelfällen ist überhaupt kein Zugriff auf die Messtechnik möglich. Beispielsweise können Druckmessdosen im unteren Tauchwandbereich in Vortriebsabschnitten, in denen Vollabsenkungen nicht möglich sind, nicht kontrolliert werden. Solange Beschädigungen nicht zum Ausfall einer Datenreihe bzw. Überlastüberschreitungen nicht zur Anzeige offensichtlich fehlerhafter Daten führen, werden diese in der Praxis auch in gut zugänglichen Bereichen selten kontrol-

liert. Im Gegensatz dazu müssen Sensoren an labortechnischen Geräten regelmäßig kontrolliert und kalibriert werden, da die Messgenauigkeit über längere Zeiträume auch ohne Überlastüberschreitung abnehmen kann.

Dabei sind die widrigen Bedingungen, denen die Messtechnik auf einer Vortriebsmaschine ausgesetzt ist, zu berücksichtigen. Anders als im Labor, beeinflussen große Kabellängen, Schwankungen der Temperatur, der Feuchtigkeit sowie Vibrationen und Gewalteinwirkungen die Messungen auf einer Vortriebsmaschine. In der Abbaukammer können auch Verklebungen zu Ausfällen von Sensoren führen (z.B. Sensoren in der Druckwand: vgl. Kap. 6.3.1.2). Werden mehrere beschädigte Sensoren ausgetauscht, ist auch der fehlerhafte Anschluss beim Wiedereinbau möglich (z.B. vertauschte Anschlüsse von Druckmessdosens, vgl. Anl. 1).

Hinzu kommt, dass ein großer Teil der Betriebsdaten aus einzelnen gemessenen Daten berechnet wird. Am Beispiel der Anpresskraft der Schneidradverschiebung, die im Folgenden vereinfacht als Schneidradanpresskraft bezeichnet wird, soll die Komplexität der Datengenerierung aufgezeigt werden. Die Schneidradanpresskraft wird aus den gemessenen Öldrücken der Schneidradverschiebezylinder berechnet. Diese ermöglichen ein Verkippen und Verschieben des Schneidrads und übertragen die Kräfte aus Schneidrad und Schneidradantrieb in die Schildkonstruktion. Im folgenden Beispiel sind 12 Schneidradverschiebezylinder in drei Gruppen zusammengefasst (Abb. 7.1).

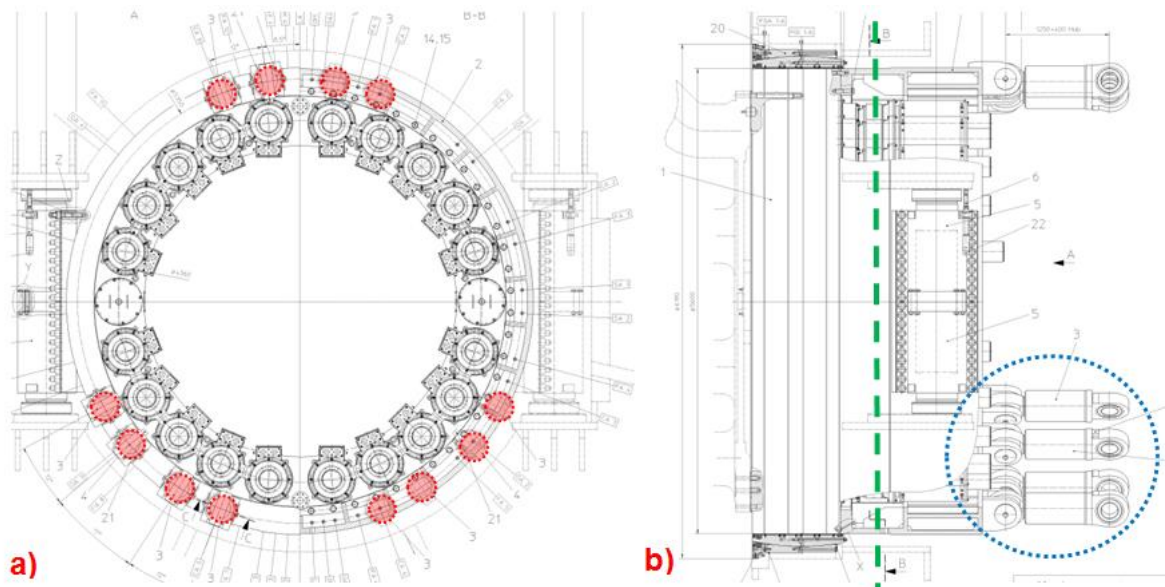


Abbildung 7.1: Schneidradantrieb: farblich modifizierte Ausschnitte aus Konstruktionsplänen der Firma Herrenknecht a) Schnitt senkrecht zur Tunnelachse (Schneidradverschiebezylinder: rot hinterlegt) b) Schnitt parallel zur Tunnelachse mit einer vollständige Zylindergruppe (blau umrandet, Schnittebene Abbildung 7.1-a: grüne Linie)

Die Drücke werden innerhalb des Hydraulikzylinders sowohl vor als auch hinter dem Kolbenboden gemessen (Abb. 7.2). Der Öldruck wirkt in der einen Kammer auf die volle Kolbenbodenfläche (Druck Kolben) und in der anderen Kammer auf die um den Stangenquerschnitt reduzierte Kolbenbodenfläche (Druck Stange). Beim Druckanstieg innerhalb der entsprechenden Kammer bewegt sich das Schneidrad vor oder zurück.

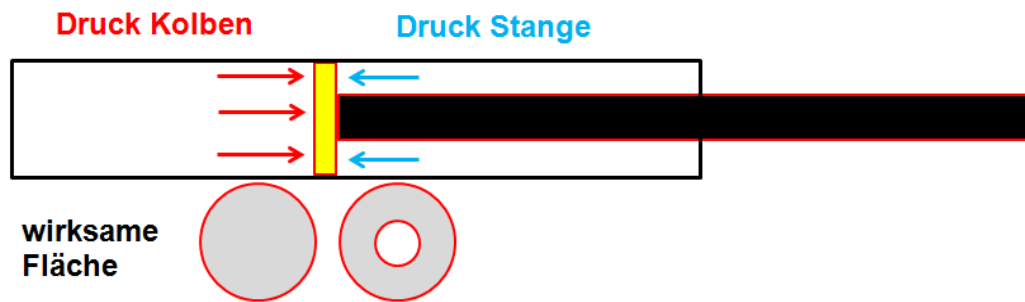


Abbildung 7.2: Schematische Prinzipskizze eines Schneiradverschiebezylinders mit unterschiedlichen wirksamen Flächen

Die an den Zylindern gemessenen Drücke werden entsprechend der wirksamen Kolbenbodenflächen in Kräfte umgerechnet und daraus die Kraftresultierende ermittelt. Da die Druckmessungen in der Regel nur an einem Zylinder pro Gruppe ausgeführt werden, wird der Wert auf die drei restlichen Zylinder der gleichen Gruppe übertragen. Die als Betriebsdatenreihe generierte Schneiradanpresskraft ergibt sich aus der Summe aller drei Zylindergruppen. Bei diesem Beispiel bilden die anhand gemessener Zylinderdrücke berechneten Einzelkräfte dann nur einen Teil der in der Visualisierung angezeigten Schneiradanpresskraft (Abb. 7.3).

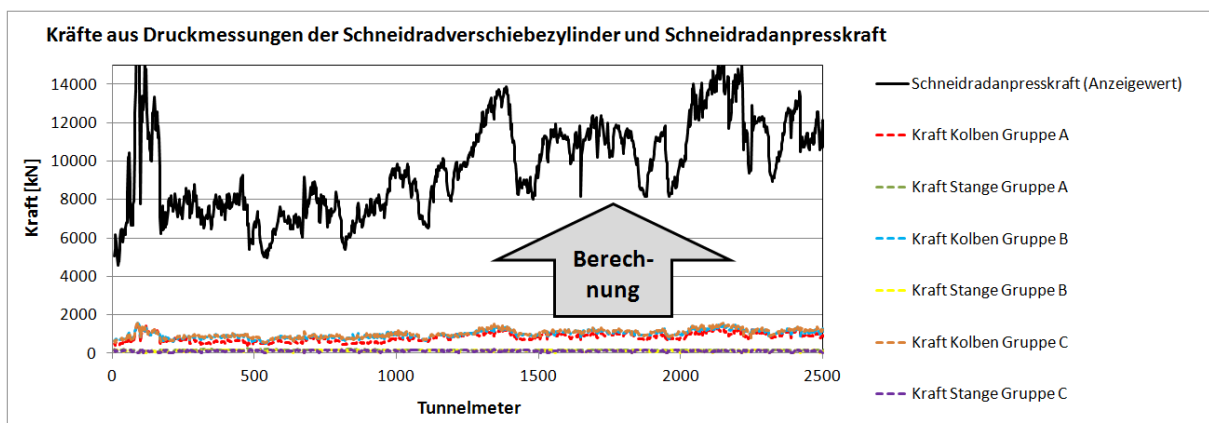


Abbildung 7.3: Aus den Öldrücken berechnete Kräfte einzelner Schneiradverschiebezylinder (nicht auf ganze Gruppe umgerechnet) im Vergleich des Betriebsdatenparameters Schneiradanpresskraft

Aufgrund der komplizierten Datenerfassung sind Fehler bei der Messung der einzelnen Drücke und im Rahmen der Datenumrechnungen möglich. Bei alleiniger Beurteilung der Schneiradanpresskraft dürften beispielsweise Messfehler einzelner Datenreihen der Zylinderdrücke kaum auffallen.

In ähnlicher Weise wird die Gesamtvortriebskraft aus den Öldrücken der Vortriebspresen ermittelt. Einige Parameter werden aus der Kombination anderer Betriebsdaten berechnet. So wird beispielsweise die Penetration aus der Schneiraddrehzahl und der Vortriebsgeschwindigkeit berechnet. Infolge der Randbedingungen bei den Datenmessungen und der Berechnung einzelner Betriebsdaten sind fehlerhafte Datensätze möglich. Diese Möglichkeit sollte bei der Interpretation von Betriebsdaten immer berücksichtigt werden.

7.2. Aktiv- und Passivparameter

Bei Betriebsdaten muss zwischen Aktiv- und Passivparametern unterschieden werden.

Aktivparameter werden im Rahmen der Vortriebssteuerung vorgegeben. Dabei stellt der Schildfahrer die Vortriebsgeschwindigkeit ein [45]. Außerdem wird die Schneidraddrehzahl aktiv vorgegeben. Aus der Vortriebsgeschwindigkeit in [mm/min] und der Schneidraddrehzahl in [U/min] wird die Penetration in [mm/U] berechnet. Die fiktive Penetration wird somit indirekt auch vorgegeben. Weitere aktiv eingestellte Parameter sind der Stützdruck, die Durchflussmengen im Förderkreislauf von Hydroschildvortrieben oder die Schneckendrehzahl bei Erddruckschildvortrieben. Während des Vortriebs wird eine möglichst hohe Vortriebsgeschwindigkeit und Penetration angestrebt.

Im Gegensatz dazu sind die Passivparameter Gesamtvortriebskraft, Schneiradanpresskraft und Schneidraddrehmoment als limitierende Werte zu sehen. Änderungen dieser Betriebsdaten hängen von der Vorgabe der Aktivparameter und von anderen Einflüssen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher spezifiziert werden, ab. Im Normalfall steigen Gesamtvortriebskraft, Schneiradanpresskraft und Schneidraddrehmoment mit zunehmender Penetration. Sobald bestimmte Grenzwerte erreicht werden (abhängig von der jeweiligen Vortriebsmaschine), wird die Vorgabe der Aktivparameter insofern geändert, dass die Penetration reduziert wird.

7.3. Einflüsse auf Betriebsdaten

Betriebsdatenänderungen können sowohl durch Baugrundwechsel als auch durch verfahrenstechnische Randbedingungen begründet sein. Düllmann et al. und Hollmann et al. unterscheiden zwischen abbaunabhängigen und abbauspezifischen Einflüssen [37, 66, 38, 39]. Diese können noch weiter unterteilt werden (Tab. 7.1).

Rohdaten der Betriebsdatenaufzeichnung			
Abbaunabhängige Einflüsse		Abbauspezifische Einflüsse	
Technische Einflüsse	Einfluss Schildfahrer	Einfluss Schneirad	Einfluss Abbauwiderstand des Baugrunds
Stützdruck	Vorgabe Aktivparameter	Design Schneirad (Durchmesser, Öffnungsgrad, Werkzeugbesatz)	Baugrundeigenschaften
Reibungskräfte		Verschleißzustand	
		Verklebungsgrad	

Tabelle 7.1: Einflüsse auf die Betriebsdaten einer Tunnelvortriebsmaschine

Um Betriebsdaten im Hinblick auf Baugrundeinflüsse oder im Hinblick auf Verklebungen beurteilen zu können, ist eine entsprechende Datenaufbereitung erforderlich. Erste Ansätze hierzu stammen von Jung et al. [75] und Festa et al. [46].

7.3.1. Abbauunabhängige Einflüsse

In diesem Kapitel wird auf die vom Abbauprozess unabhängigen Einflüsse auf die Betriebsdaten eingegangen. Dabei kann zwischen Auswirkungen aufgrund der verfahrenstechnischen Randbedingungen und der Maschinenbedienung bzw. Fahrweise der Vortriebsmaschine unterschieden werden. Für ausgesuchte Betriebsdaten werden im Hinblick auf diese Einflüsse aufbereitete Parameter hergeleitet.

7.3.1.1. Abbauunabhängige Einflüsse auf die Schneidradanpresskraft

Die auf Basis der Drücke in den Schneidradverschiebezyindern erzeugte Schneidradanpresskraft (vgl. Kap 7.1) besteht zum Teil aus der Kraft, die zum Abbau des Gesteins an der Ortsbrust notwendig ist, ab. Sie ist damit ein wichtiger Betriebsdatenparameter zur Analyse der Interaktion zwischen Baugrund und Vortriebsmaschine und steigt unter anderem mit dem Abbauwiderstand des Gebirges. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Reibungskräfte und aus dem Stützdruck resultierende Kräfte auch Bestandteile der Schneidradanpresskraft sind (Abb. 7.4).

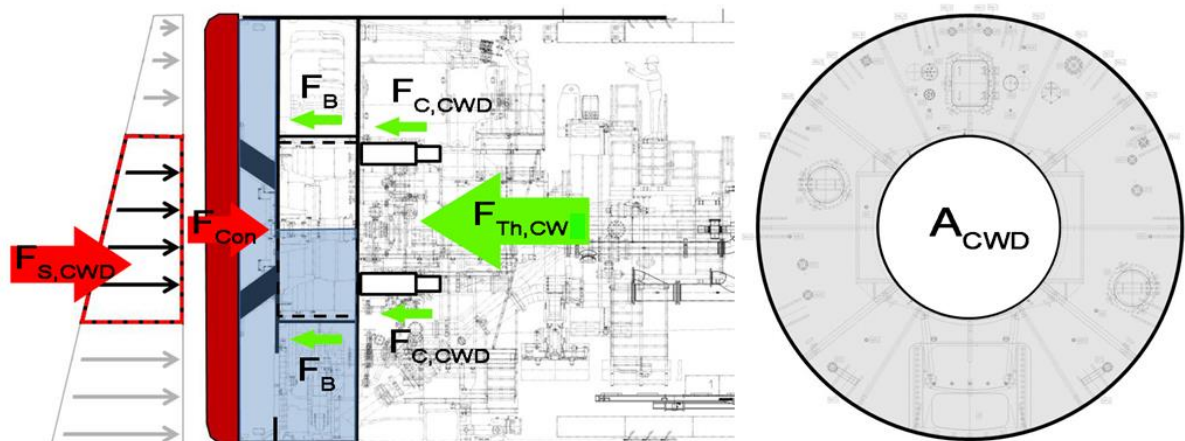


Abbildung 7.4: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte im Hinblick auf die Schneidradanpresskraft [37, modifiziert]

Für Betriebsdatenanalysen hinsichtlich der Baugrundverhältnisse wird eine Berechnung der Schneidradkontaktkraft aus der Schneidradanpresskraft entsprechend Gleichung (24) empfohlen.

$$F_{Con} = F_{Th,CW} - F_{S,CWD} + F_B + F_{C,CWD} \quad (24)$$

mit

- F_{Con} = Schneidradkontaktkraft [kN]
- $F_{Th,CW}$ = Schneidradanpresskraft (Anzeigewert Betriebsdatenaufzeichnung) [kN]
- $F_{S,CWD}$ = resultierende Stützkraft auf Schneidradantrieb [kN]
- F_B = Reibkraft Lager Schneidradverschiebung [kN]
- $F_{C,CWD}$ = Reibkraft Schneidradverschiebezylinder [kN]

Dabei ist der Anteil der Stützkraft ($F_{S, \text{CWD}}$) an der Schneidradanpresskraft besonders groß, was anhand der Daten eines Hydroschildvortriebs aufgezeigt wird (Abb. 7.5).

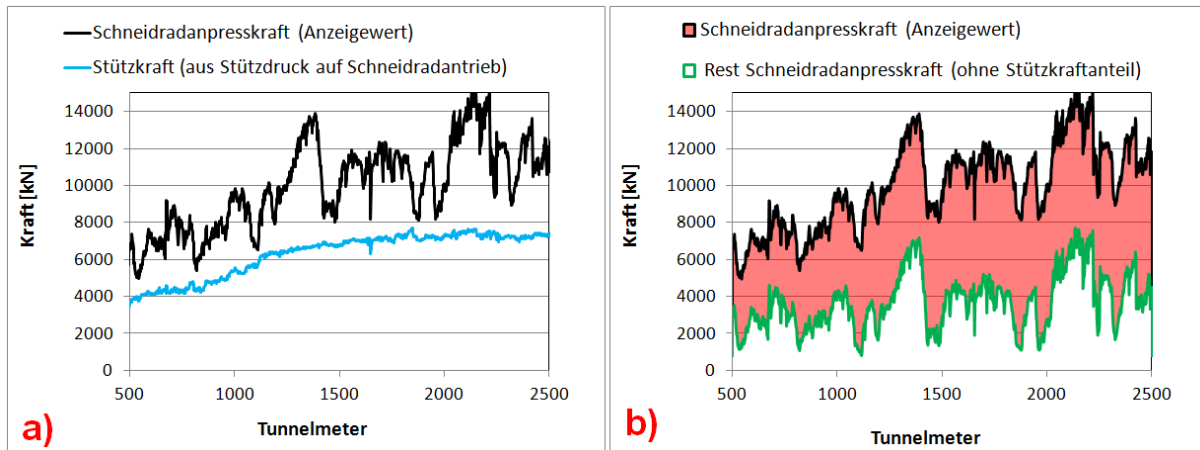


Abbildung 7.5: a) Vergleich Schneidradanpresskraft (schwarze Linie) als Anzeigewert der Betriebsdatenaufzeichnung mit der auf den Schneidradantrieb wirkenden Stützkraft (blaue Linie) und b) mit der um den Stützkraftanteil reduzierten Schneidradanpresskraft (grüne Linie)

Der rot hinterlegte Bereich zwischen der grünen und der schwarzen Linie in Abbildung 7.5-b repräsentiert bei diesem Beispiel den Stützkraftanteil an der Schneidradanpresskraft der Betriebsdatenaufzeichnung. Generell steigt der Anteil mit zunehmendem Stützdruck und zunehmendem Durchmesser des Schneidradantriebs (größere wirksame Fläche). Von Düllmann et al. [37] wurden drei Projekten analysiert, wobei bis 89% die aus dem Stützdruck resultierende Kraft an den Rohdaten der Schneidradanpresskraft betrug. Dabei sinkt der aus dem Stützdruck herrührende Anteil an der Schneidradanpresskraft mit zunehmendem Lösewiderstand des Gebirges (89%: mitteldicht gelagerter Kies; 64%: dicht bis sehr dicht gelagerter Kies; 31%: schwach verfestigter Fels).

Aus der Reibung des Schneidradantrieblagers und der Schneidradverschiebezylinder resultieren weitere vom Abbauprozess unabhängige Kräfte (Abb. 7.4: F_B und $F_{C, \text{CWD}}$). Ohne Ortsbrustkontakt und Stützdruck ist bereits ein Zylinderdruck erforderlich, um die Reibung zu überwinden und das Schneidrad zu verschieben. Da das Schneidrad aber während des Vortriebs nicht verschoben wird, werden Kräfte entgegen der Vortriebsrichtung zum Teil von der Reibung aufgenommen und nicht durch die Messungen der Zylinder erfasst. Die Reibungskräfte müssen somit in Vortriebsrichtung angesetzt werden (Abb. 7.4 und Gleichung 24). Weitere Reibungskräfte sind aufgrund ihrer zu vernachlässigenden Beträge der Übersicht halber nicht dargestellt (z.B. im Bereich der Schildschwanzdichtung). Insgesamt können die unterschiedlichen Reibungskräfte anhand der Betriebsdaten nicht unterschieden werden. Sie können nur ermittelt werden, wenn das Schneidrad bei einem Stillstand oder vor Vortriebsbeginn ohne Ortsbrustkontakt verschoben wird. Dazu ist eine Analyse der Momentanwerte erforderlich. Düllmann et al. [38] konnten dabei allerdings unterschiedliche Kräfte für die Schneidradbewegung nachweisen (Abb. 7.6). Im ersten Fall erfordert die Verschiebung nur eine Kraft zwischen 550 und 700 kN (Abb. 7.6-a), während im zweiten Fall 1400 bis 1600 kN benötigt wurden (Abb. 7.6-b). Demnach wären unterschiedliche Reibungskräfte wirksam.

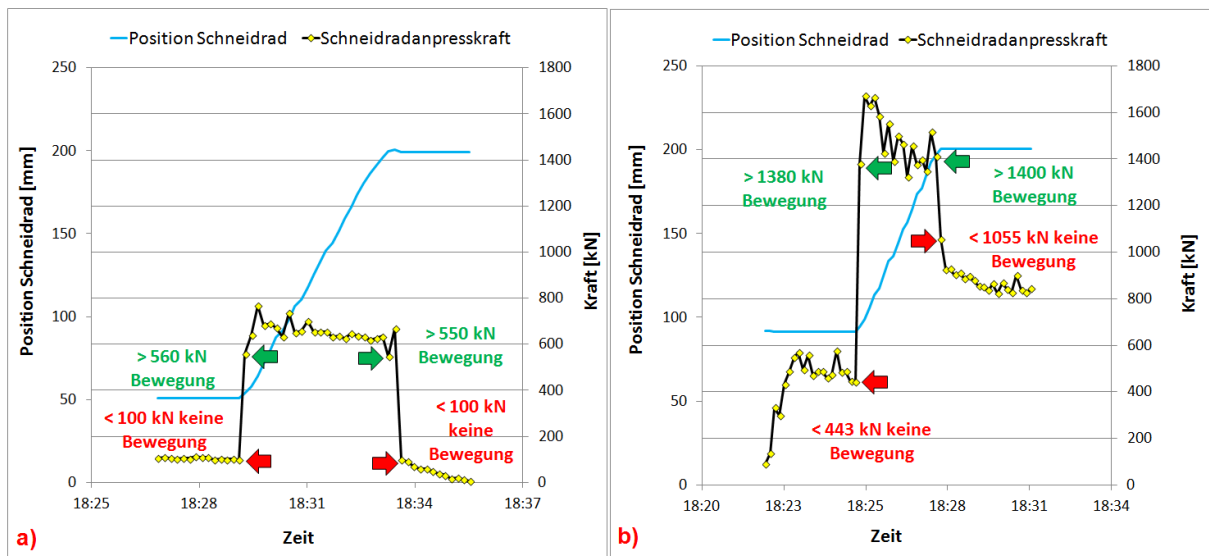


Abbildung 7.6: Verschiebung des Schneidrades bei unterschiedlichen Kräften a) Bewegung zwischen 550 und 700 kN b) Bewegung zwischen 1400 und 1600 kN [38, modifiziert]

Die Reibungskräfte können oft nur näherungsweise bestimmt bzw. aus den unterschiedlichen Werten abgeschätzt werden. Die Bestimmung der Reibungskräfte, als Anteil der Schneidradanpresskraft, erfordert die Auswertung der Momentanwerte ganz bestimmter Vortriebsituationen und ist in den meisten Fällen im Nachgang eines Vortriebs kaum noch möglich. Obwohl Abbildung 7.6 zeigt, dass auch Reibungseffekte einen nennenswerten Anteil an den Rohdaten der Schneidradanpresskraft haben, macht die Stützkraftkomponente den Hauptteil aus.

7.3.1.2. Abbaunabhängige Einflüsse auf die Gesamtvortriebskraft

Die Gesamtvortriebskraft wird aus den gemessenen Öldrücken der Vortriebspressen generiert. Analog zur Schneidradanpresskraft (vgl. Kap. 7.1) werden auch hier Messungen an einzelnen Zylindern auf die ganze Gruppe hochgerechnet und aus deren Summe die in der Betriebsdatenaufzeichnung angezeigte Gesamtvortriebskraft berechnet. Auch dieser Parameter bildet zum Teil Kräfte ab, die aus dem Baugrund bzw. dem Abbauprozess herrühren. Dabei muss berücksichtigt werden, dass auch hier eine aus dem Stützdruck resultierende Kraft und Reibungskräfte ein Teil der Gesamtvortriebskraft sind (Abb. 7.7).

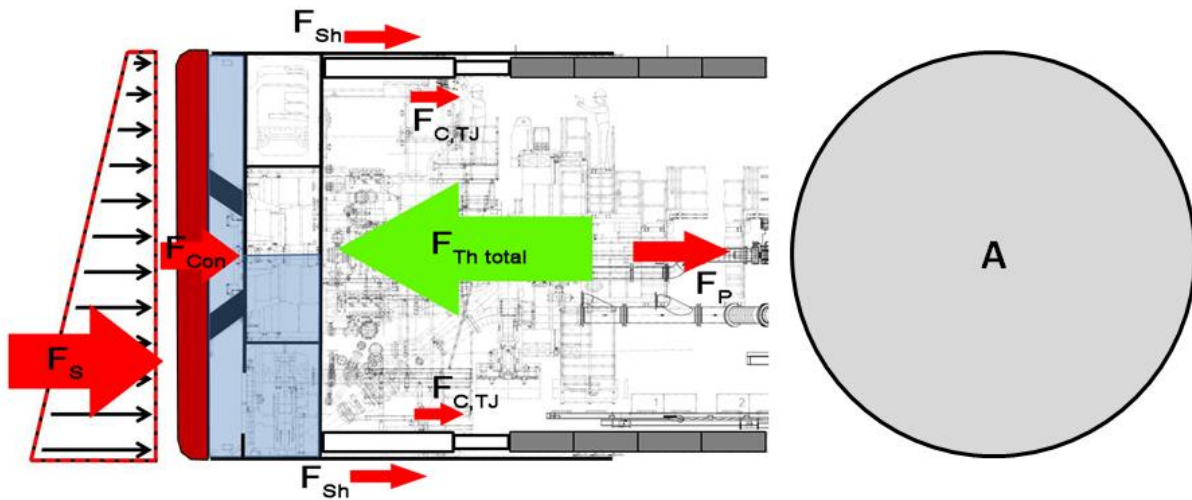


Abbildung 7.7: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte im Hinblick auf die Gesamtvortriebskraft [37, modifiziert]

Die Gesamtvortriebskraft enthält somit zwei auf den Baugrund zurückzuführende Kraftkomponenten. Zunächst ist die Schneidradkontaktkraft (F_{Con}) zu nennen, die aus dem Abbauprozess resultiert (vgl. Kap. 7.2.1.1). Im Gegensatz dazu erlaubt die Kraft der Schildmantelreibung (F_{Sh}) keine Rückschlüsse auf den Abbauprozess. Allerdings sind Erkenntnisse im Hinblick auf den durchfahrenen Baugrund möglich. Beide Kräfte sind aber nur ein Teil der Gesamtvortriebskraft. Dementsprechend ist die in der Praxis bei Betriebsdatenanalysen hinsichtlich der Baugrundverhältnisse verwendete Gesamtvortriebskraft auch durch weitere Einflüsse geprägt. Da die Schneidradkontaktkraft aus den Rohdaten der Schneidradanpresskraft berechnet werden kann (vgl. Kap. 7.2.1.1), wird eine Berechnung der Schildmantelreibungskraft entsprechend Gleichung (25) empfohlen. Auch hierbei wird die Reibung zwischen Schildschwanzdichtung und Tübbingaussenseite vernachlässigt (vgl. Kap. 7.3.1.1).

$$F_{Sh} = F_{Th, total} - F_S - F_{C, TJ} - F_{Con} - F_P \quad (25)$$

mit

- F_{Sh} = Kraft aus Schildmantelreibung [kN]
- $F_{Th, total}$ = Gesamtvortriebskraft (Anzeigewert Betriebsdatenaufzeichnung) [kN]
- F_S = resultierende Stützkraft auf Tauch- bzw. Druckwand [kN]
- F_{Con} = Schneidradkontaktkraft [kN]
- F_P = Schleppkraft Nachläufer [kN]
- $F_{C, TJ}$ = Reibungskraft Vortriebspressen [kN]

Dabei ist der Anteil der Stützkraft (F_S) an der Gesamtvortriebskraft besonders groß, was anhand der Daten eines Hydroschildvortriebs aufgezeigt wird (Abb. 7.8). Der rot hinterlegte Bereich zwischen der grünen und der schwarzen Linie in Abbildung 7.8-b repräsentiert bei diesem Beispiel den Stützkraftanteil an der Gesamtvortriebskraft der Betriebsdatenaufzeichnung. Generell steigt der Anteil mit zunehmendem Stützdruck und zunehmendem Durchmesser des Schneidradantriebs (größere wirksame Fläche).

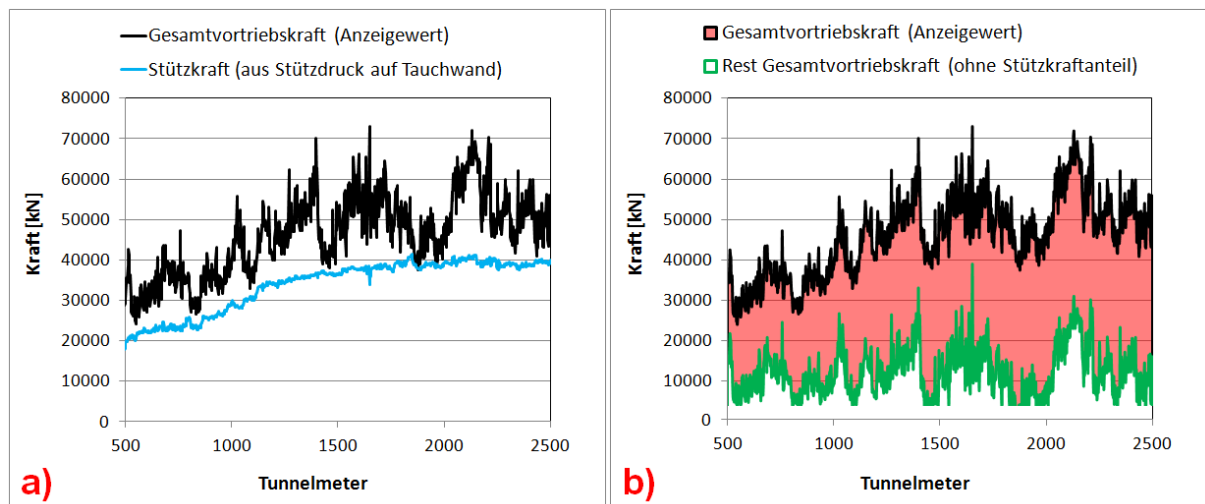


Abbildung 7.8: a) Vergleich Gesamtvortriebskraft (schwarze Linie) als Anzeigewert der Betriebsdatenaufzeichnung mit der Stützkraft (blaue Linie) und b) mit der um den Stützkraftanteil reduzierten Gesamtvortriebskraft (grüne Linie)

Die Reibungskräfte der Vortriebszylinder wirken entgegen der Vortriebsrichtung (Abb. 7.7), da die Pressen während des Vortriebs bewegt werden. Sie können theoretisch an den während des Ringbaus aufgezeichneten Momentanwerten bestimmt werden, da sich dann die Pressen gruppenweise, ohne Kontakt zum Tübbing, vor und zurück bewegen. Dabei hat der Vortriebszylinder am Ende des letzten Hubs die Position von ca. 2500 mm erreicht, wird während des Einbaus des entsprechenden Tübbingsegments auf die Position 0 mm zurückgezogen und anschließend soweit ausgefahren, bis der Pressenschuh am neu gebauten Ring bei einer Position von etwa 500 mm ansetzt (Abb. 7.9-a). Beim Vorschieben der Vortriebspresse kann aus dem gemessenen Druck die Reibungskraft für das lastfreie Bewegen des Zylinders berechnet werden (Abb. 7.9-b).

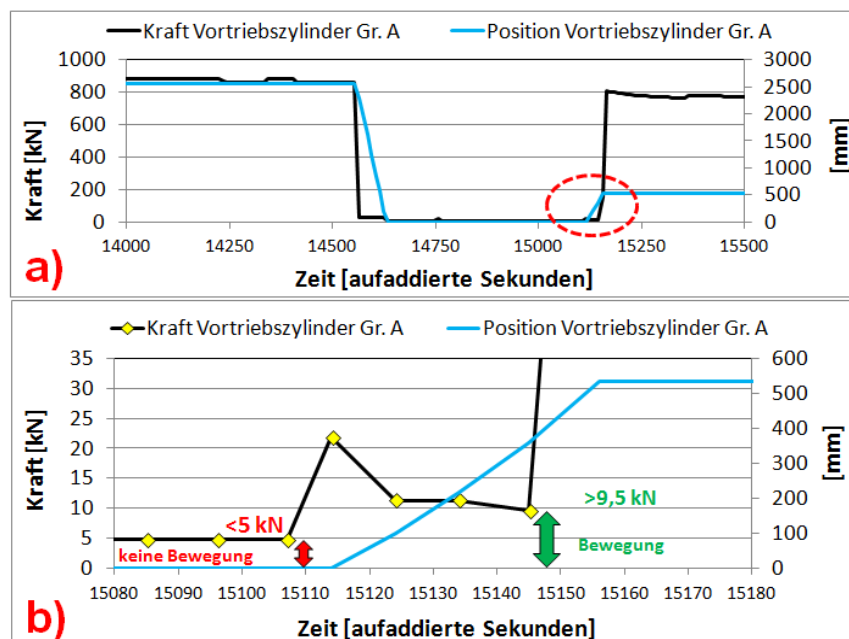


Abbildung 7.9: a) Kraft und Bewegung eines Vortriebszylinders während des Ringbaus b) Rot umrandeter Bereich aus 7.9-a

Dabei bewegt sich die Presse oberhalb 9,5 kN, während unterhalb von 5 kN noch keine Bewegung stattfindet, also die Reibungskraft noch nicht überschritten wurde. Dementsprechend kann als Mittelwert 7 kN angenommen, woraus für 56 Einzelpressen eine Gesamtreibungskraft von 392 kN abgeschätzt werden kann. Allerdings bewegt sich die Presse bei einem anderen Beispiel selbst bei 18 kN noch nicht (Abb. 7.10). Aufgrund der Bewegung ab 28 kN kann ein Mittelwert von 23 kN für eine Vortriebspresse und eine Gesamtreibungskraft von 1288 kN abgeschätzt werden.

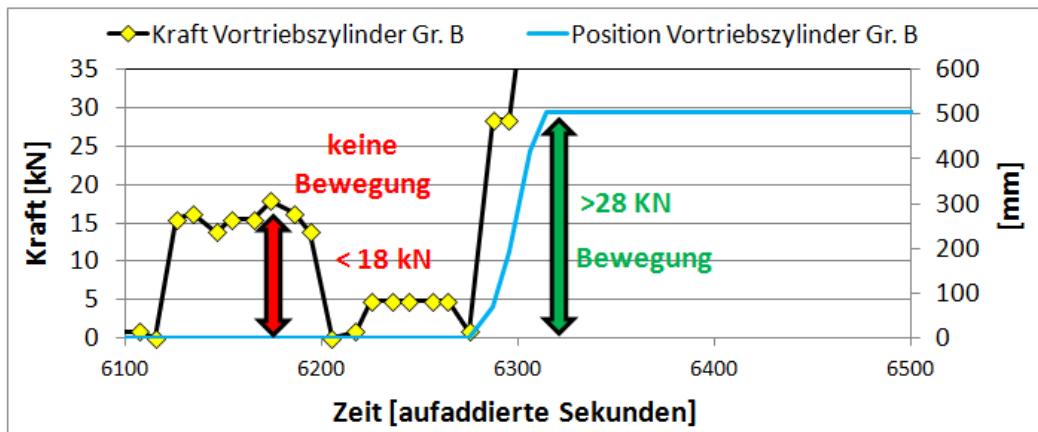


Abbildung 7.10: a) Kraft und Bewegung eines Vortriebszylinders während des Ringbaus

Die Reibungskräfte können also nur näherungsweise bestimmt bzw. aus unterschiedlichen Werten abgeschätzt werden. Obwohl die Vortriebspessendrucke von jedem Ringbau analysiert werden können und im Gegensatz zu den Analysen der Schneiradverschiebezylinder keine besondere Vortriebssituation erfordern, konnten bei diesem Beispiel trotz Untersuchung von zahlreichen Momentanwert-Dateien lediglich die aus den Abbildungen 7.9 und 7.10 abgeleiteten Reibungskräfte ermittelt werden. Im Regelfall steigt der Pressendruck innerhalb des 10-sekündigen Aufzeichnungsintervalls bis zur ersten Pressenbewegung so stark an, dass der Druck beim Beginn der Bewegung nicht abgrenzbar ist.

Die Schleppkraft des Nachläufers (F_P) und die aus der Schneiradanpresskraft generierte Schneiradkontaktkraft (vgl. Kap. 7.2.1.1) sind ebenfalls Teil der Gesamtvortriebskraft, wobei die Stützkraft insgesamt den Hauptanteil ausmacht (Abb. 7.11).

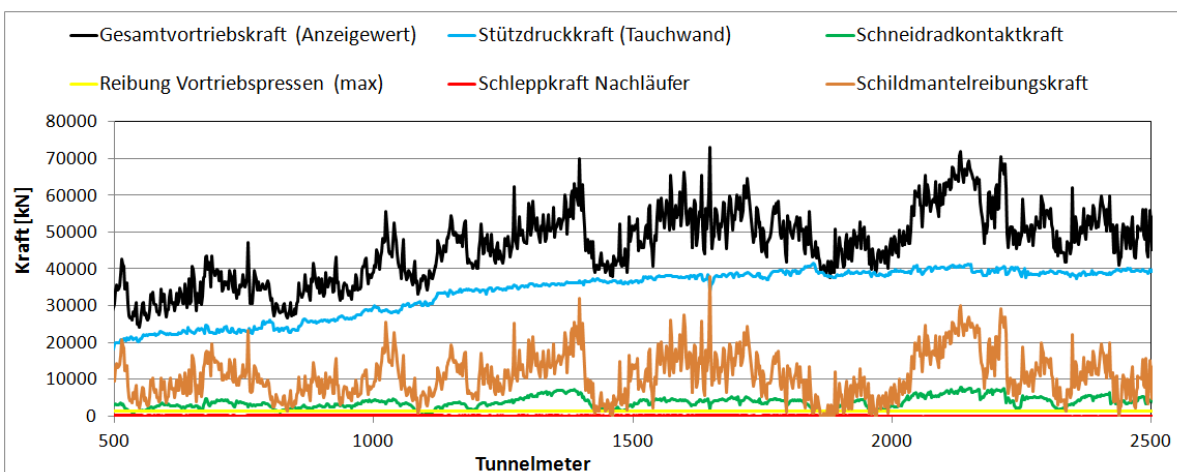


Abbildung 7.11: Gesamtvortriebskraft mit unterschiedlichen Teilkomponenten

7.3.1.3. Abbauunabhängige Einflüsse auf das Schneidraddrehmoment

Auch das Schneidraddrehmoment hängt unter anderem vom Abbauprozess ab. Es ist damit ein wichtiger Betriebsdatenparameter zur Analyse der Interaktion zwischen Baugrund und Vortriebsmaschine. Allerdings beinhaltet auch das Schneidraddrehmoment einen abbauunabhängigen Anteil. Wird das Schneidrad ohne Kontakt zur Ortsbrust und ohne Füllung der Abbaukammer gedreht, ist bereits ein Leerdrehmoment (M_{CW}) erforderlich. Dementsprechend kann das effektive Schneidraddrehmoment (M_{eff}) entsprechend Gleichung (26) aus dem im Rahmen der Betriebsdatenaufzeichnung erfassten Schneidraddrehmoment (M_{raw}) berechnet werden.

$$M_{eff} = M_{raw} - M_{CW} \quad (26)$$

mit

M_{eff} = effektives Schneidraddrehmoment [MNm]

M_{raw} = Schneidraddrehmoment (Anzeigewert Datenaufzeichnung) [MNm]

M_{CW} = Leerdrehmoment [MNm]

An den während eines Stillstands mit zurückgezogenem Schneidrad aufgezeichneten Momentanwerten kann das Leerdrehmoment bei der Schneidraddrehung, ohne Ortsbrustkontakt, bestimmt werden (Abb. 7.12). Nach einem Startdrehmoment zu Beginn des Drehvorgangs ist, bei konstanter Drehzahl, ein Leerdrehmoment von 0,2 bis 0,25 MNm erkennbar.

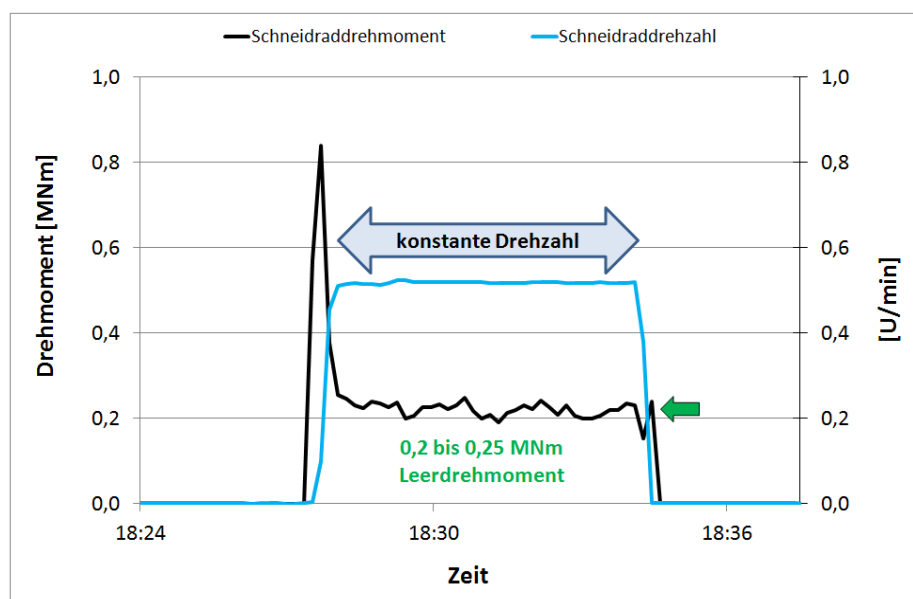


Abbildung 7.12: Leerdrehmoment bei Schneidraddrehung ohne Ortsbrustkontakt [38, modifiziert]

Bei einem durchschnittlichen Schneidraddrehmoment von etwa 0,5 MNm während des Vortriebs hat das Leerdrehmoment einen entsprechend hohen Anteil. Dabei ist das Schneidraddrehmoment in diesem Fall allerdings eher gering, da der betreffende Kies nur eine relativ geringe Lagerungsdichte hatte und entsprechend leicht gelöst wurde. Generell dürfte der Anteil des Leerdrehmoments am Schneidraddrehmoment mit zunehmendem Lösewiderstand des Gebirges sinken.

Sofern das Leerdrehmoment als vom Abbauprozess unabhängige Komponente des Schneidraddrehmoments definiert wird, muss es auch ansteigen, sofern die Abbaukammer mit Ausbruchsmaterial oder Erdbrei teil- bzw. vollgefüllt ist. Bei Erdruckschildvortrieben in Felsabfolgen kann auch ein mit Gesteinsbruchstücken angereicherter Erdbrei aufgrund seiner Inhomogenität Auswirkungen auf das Leerdrehmoment haben. Im Gegensatz dazu dürfte der Einfluss der Suspension bei flüssigkeitsgestützten Vortrieben so gering sein, dass höhere Auswirkungen durch die Messtoleranzen der verbauten Sensoren zu erwarten sind. Auch ungleichmäßige Verklebungen am Schneidrad bzw. der Schneidradaufhängung (vgl. Kap. 6.3.1.1) können zu einer Änderung des Leerdrehmoments führen.

Eine wirkliche Berücksichtigung aller dieser Faktoren im Hinblick auf das Leerdrehmoment ist allein aufgrund der unterschiedlichen Vortriebsmodi (vgl. Kap. 6) und der ständig wechselnden Randbedingungen während des Vortriebs schwierig. Es wäre somit nicht nur die tägliche Dokumentation dieser Randbedingungen, sondern auch eine fortwährende Neubestimmung des Leerdrehmoments erforderlich. Das ist in der Praxis nicht praktikabel. Nach Möglichkeit sollte zumindest das Leerdrehmoment in der nicht gefüllten Abbaukammer bestimmt werden, wobei selbst diese Ermittlung im Nachgang eines Vortriebs oft kaum möglich ist. Bei der Datenanalyse sollten aber, neben Baugrundeinflüssen, zumindest die Möglichkeit von Einflüssen aus dem Ausbruchsmaterial berücksichtigt werden.

7.3.1.4. Abbaunabhängige Einflüsse auf die Penetration

Da die Penetration durch die Einstellung der Aktivparameter vorgegeben wird (vgl. Kap. 7.2), kann sie nicht in Form der aufgezeichneten Rohdaten zur Analyse der Interaktion zwischen Baugrund und Maschine verwendet werden. In der Praxis wird sie daher vielfach parallel zur Schneidradanpresskraft bewertet. Von Rutschmann [97] wurde durch die Normierung der Penetration auf die Werkzeuganpresskraft die sogenannte spezifische Penetration als Bohrbarkeit für Hartgesteinsvortriebsmaschinen definiert.

Für Schildvortriebe empfiehlt sich, die aus der Schneidradanpresskraft abgeleitete Schneidradkontaktkraft (F_{Con}) mit den Rohdaten der Penetration (Pen_{raw}) zu kombinieren und so nach Gleichung (27) die spezifische Penetration (Pen_{spec}) zu berechnen.

$$\text{Pen}_{\text{spec}} = \text{Pen}_{\text{raw}} / F_{\text{Con}} \quad (27)$$

mit

Pen_{spec}	=	spezifische Penetration [(mm/U)/kN]
Pen_{raw}	=	Penetration (Anzeigewert Betriebsdatenaufzeichnung) [mm/U]
F_{Con}	=	Schneidradkontaktkraft [kN]

Die Kombination eines passiven Zielparameters mit einem Passivparameter ermöglicht die Bewertung des Abbauprozesses unter Berücksichtigung der Einflüsse durch die Fahrweise der TVM.

7.3.2. Abbauspezifische Einflüsse

Um die abbauunabhängigen Einflüsse zu berücksichtigen, wurden in Kapitel 7.3.1 die abbauspezifischen Komponenten ausgesuchter Betriebsdaten hergeleitet. Die Verwendung entsprechend aufbereiteter Daten erlaubt bessere Beurteilungen der Interaktion zwischen Baugrund und Maschine. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch die abbauspezifischen Betriebsdaten nicht ausschließlich von dem durchfahrenen Baugrund abhängen, sondern auch durch weitere verfahrenstechnische Randbedingungen beeinflusst sind. Die abbauspezifischen Datenanteile hängen von der Effektivität des Abbauprozesses ab. Sie sind einerseits vom Zustand des Schneidrads und andererseits vom Abbauwiderstand des Baugrunds beeinflusst (Abb. 7.13).

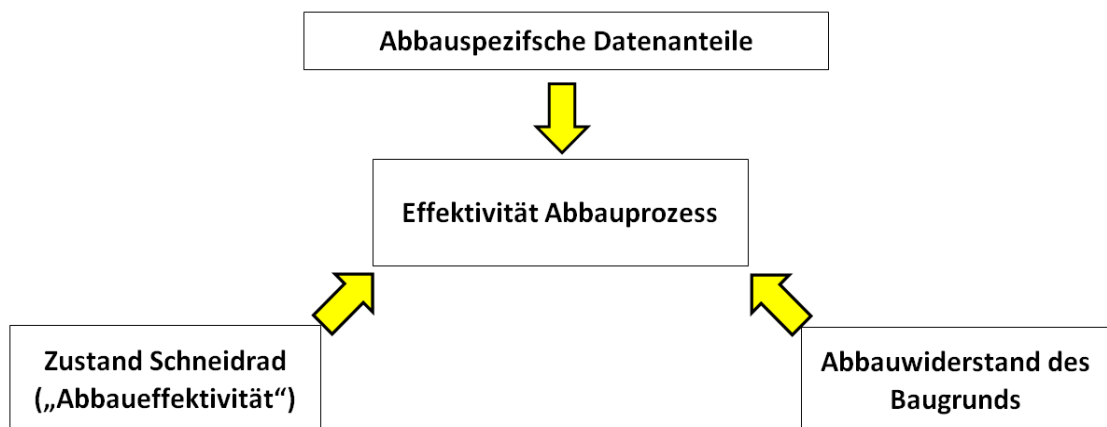


Abbildung 7.13: Einflüsse auf die abbauspezifischen Betriebsdatenanteile

Im Folgenden wird zunächst auf die Einflüsse durch das Schneidrad und anschließend auf den Abbauwiderstand des Baugrunds eingegangen.

7.3.2.1. Schneidraddesign und Werkzeugbesatz

Betriebsdaten unterschiedlicher Maschinenvortriebe lassen sich oft nur schwer miteinander vergleichen, da sich die Projekte in der Regel im Schneidraddesign unterscheiden (Abb. 7.14).

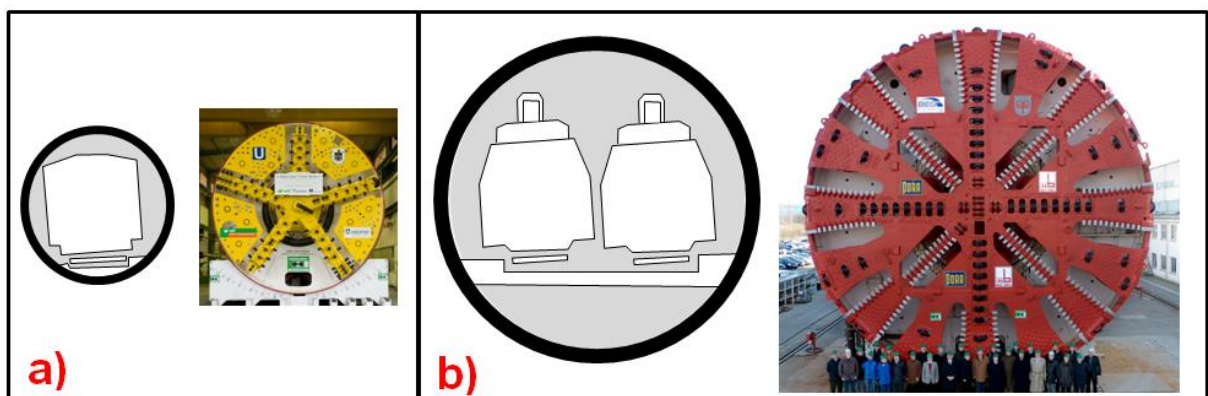


Abbildung 7.14: a) 1-gleisiger U-Bahntunnel (Schneidrad: Durchmesser 7,35 m; Öffnungsgrad 85%) b) 2-gleisiger Eisenbahntunnel (Schneidrad: Durchmesser 13 m; Öffnungsgrad 30%) [66]

Die in Abbildung 7.14 dargestellten Schneidräder stammen beide von Hydroschildvortrieben, die im Lockergestein eingesetzt wurden. Selbst wenn beide Vortriebsmaschinen in vergleichbaren Baugrundverhältnissen eingesetzt worden wären, würden sich die abbauspezifischen Betriebsdaten unterscheiden, da die Schneidräder unterschiedliche Durchmesser und Öffnungsgrade aufweisen.

Aufgrund der höheren Werkzeuganzahl muss auch die Schneiradkontaktkraft, die auch die Kräfte der einzelnen Werkzeuge beinhaltet, mit zunehmendem Schneiraddurchmesser ansteigen. Dementsprechend sinkt auch die spezifische Penetration. Aufgrund der größeren Schildmantelfläche steigt auch die Schildmantelreibungskraft mit zunehmendem Durchmesser. Unterschiede der abbauspezifischen Betriebsdaten in Abhängigkeit von Schneiraddurchmesser und Öffnungsgrad ließen sich nur genau quantifizieren, wenn Vortriebsmaschinen mit unterschiedlichen Schneirädern in gleichen Baugrundverhältnissen verglichen würden. Um trotzdem unterschiedliche Schildvortriebe miteinander vergleichen zu können, können Betriebsdaten auf die Anzahl der Werkzeuge oder die theoretische Schneiradfläche normiert werden.

Die abbauspezifischen Betriebsdaten werden auch vom Werkzeugbesatz beeinflusst. Dabei können in einem Projekt unterschiedliche Werkzeugtypen eingesetzt werden (Abb. 7.15).

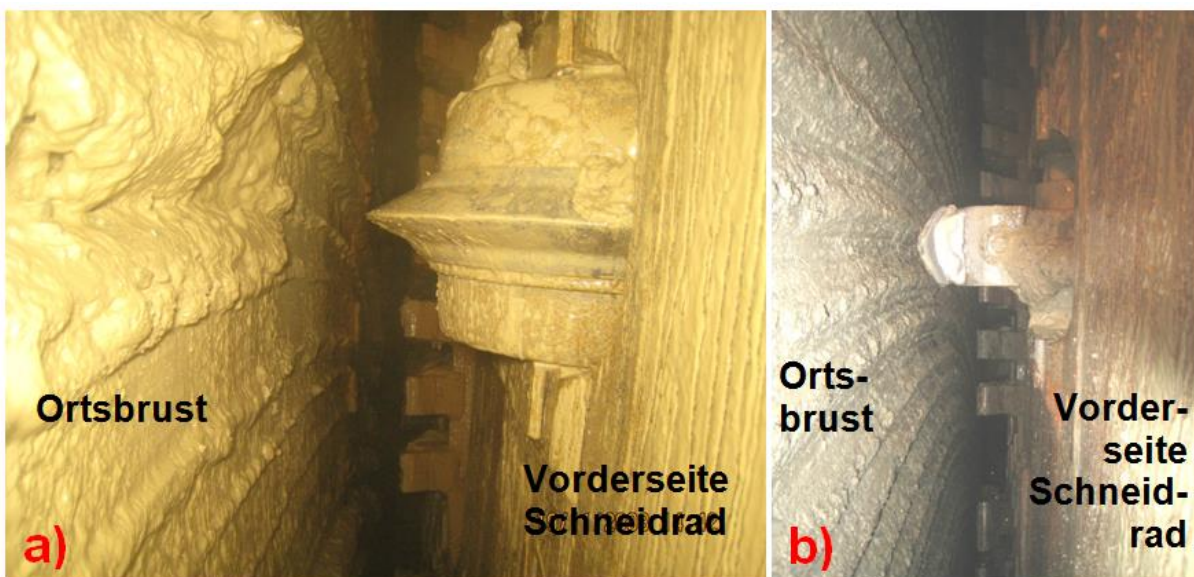


Abbildung 7.15: a) Schneiradbesatz mit Schälmessern und Rollenmeißeln b) Schneiradbesatz mit Schälmessern und Rippern [66]

Aufgrund unterschiedlicher Wirkungsweise der Werkzeuge (Schälmesser schälen, Ripper reißen und Rollenmeißel sprengen Gesteinschips ab) beeinflusst der Werkzeugbesatz die Effektivität des Abbauprozesses und somit die abbauspezifischen Betriebsdaten.

7.3.2.2. Schneidradzustand: Verschleiß und Verklebungen

Während Schneidraddesign und Werkzeugbesatz im Hinblick auf ein Projekt konstant bzw. zumindest bekannt sind, ändert sich der Verschleißzustand laufend. Das liegt daran, dass die Werkzeuge in Abhängigkeit der Abrasivität des Bodens mehr oder weniger schnell verschleifen und regelmäßig durch neue ausgetauscht werden (Abb. 7.16).

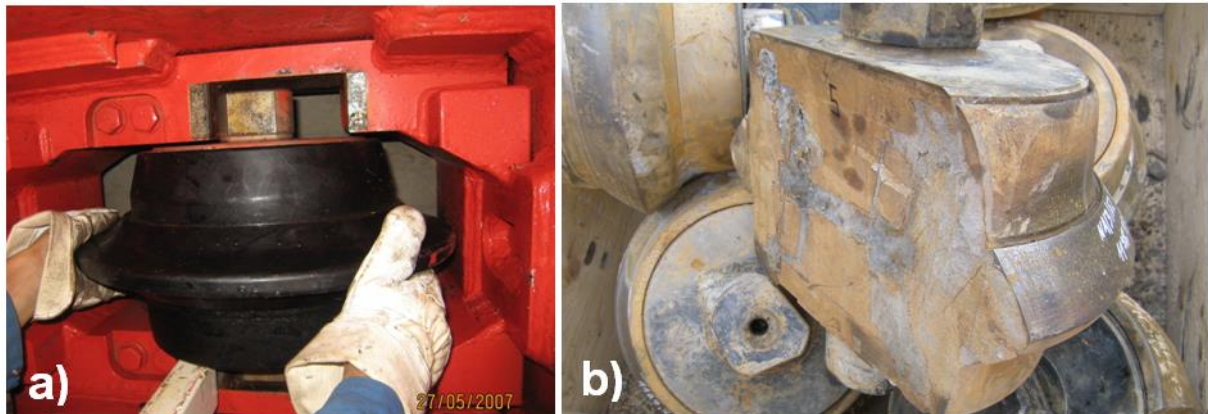


Abbildung 7.16: a) Einbau eines neuen Rollenmeißels b) Bis auf den Kern verschlissener Rollenmeißel [66]

In manchen Fällen kann der Verschleiß sogar Schäden am Stahlbau des Schneidrads verursachen, so dass der Abbauprozess massiv gestört wird (Abb. 7.17).

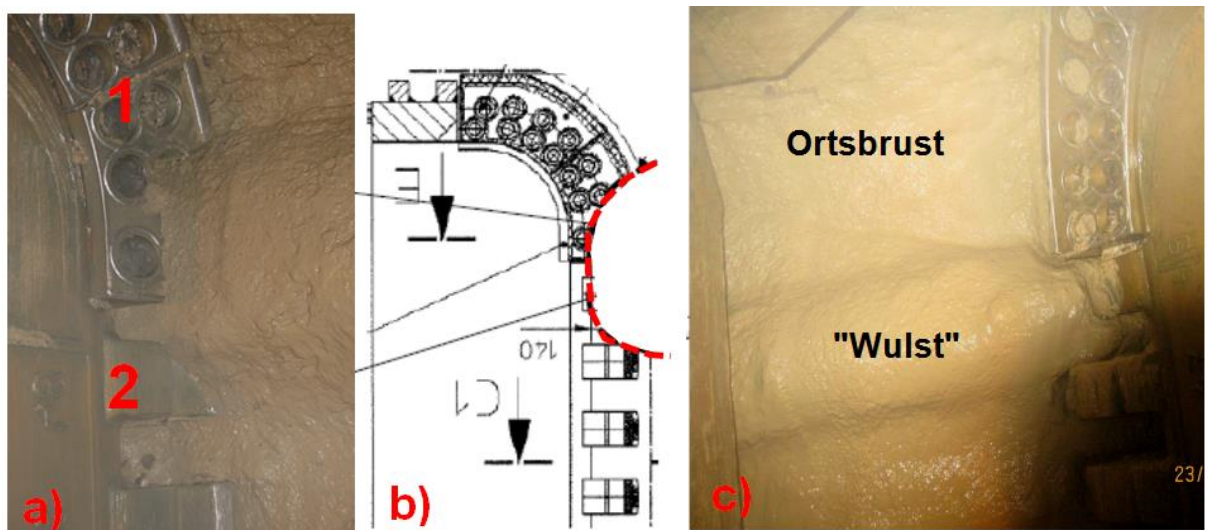


Abbildung 7.17: Gestörter Abbauprozess durch lokal begrenzten Verschleiß von Räubern, Schälmessern und Stahlbau des Schneidrads [59, modifiziert] a) Lokal begrenzter Verschleiß im Übergang zwischen Räumer (1) und äußerstem Schälmesser (2) b) Einkerbung bis in den Stahlbau des Schneidrads (rote Linie) c) „Wulstartige“ Vorwölbung der Ortsbrust durch behinderten Abbauprozess infolge des Schneidradverschleißes

Mit zunehmendem Verschleiß sinkt die Effektivität des Abbauprozesses. Dementsprechend steigt die Schneidradkontaktkraft, was an einem Hydroschildvortrieb aufgezeigt werden kann (Abb. 7.18).

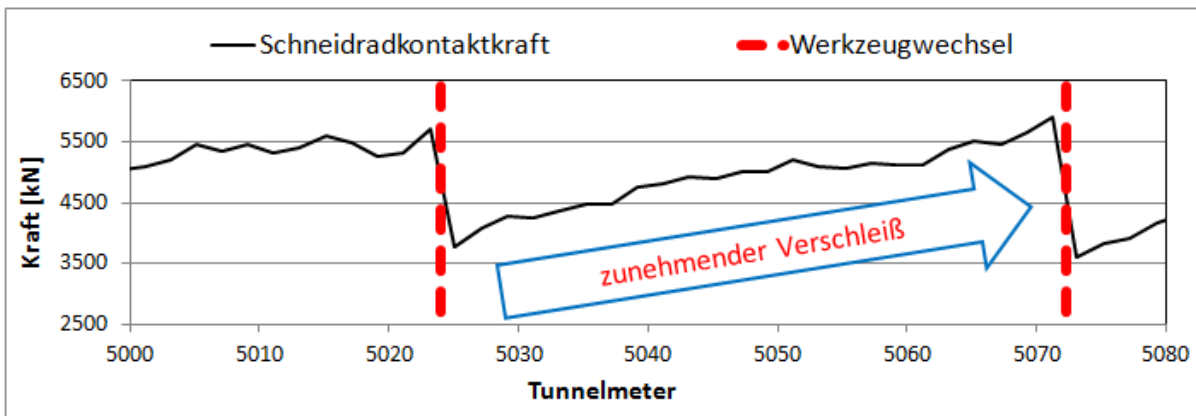


Abbildung 7.18: Anstieg der Schneidradkontaktkraft mit zunehmendem Verschleiß (Randbedingungen: Schneidrad: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper, Kiese mit hoher Lagerungsdichte) [66, modifiziert]

Dabei kann unter diesen Randbedingungen ein Anstieg der Schneidradkontaktkraft von ca. 3500 kN, bei nicht verschlissenen Werkzeugen (direkt nach Werkzeugwechsel), bis ca. 5500 kN, bei stärker zerschlissenen Werkzeugen (direkt vor Werkzeugwechsel) nachgewiesen werden.

In ähnlicher Weise kann für den gleichen Vortriebsabschnitt ein mit zunehmendem Verschleiß ansteigendes Schneidraddrehmoment nachgewiesen werden (Abb. 7.19). Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Leerdrehmoment bei diesem Projekt nachträglich nicht mehr ermittelt werden konnte. Da das Leerdrehmoment auf dieser kurzen Vortriebsstrecke wahrscheinlich kaum Änderungen aufwies und die Daten aus Abbildung 7.19 dann, zur Ermittlung des effektiven Schneidraddrehmoments um einen konstanten Betrag reduziert worden wären, kann die Abhängigkeit vom Verschleiß auch an den Rohdaten nachgewiesen werden.

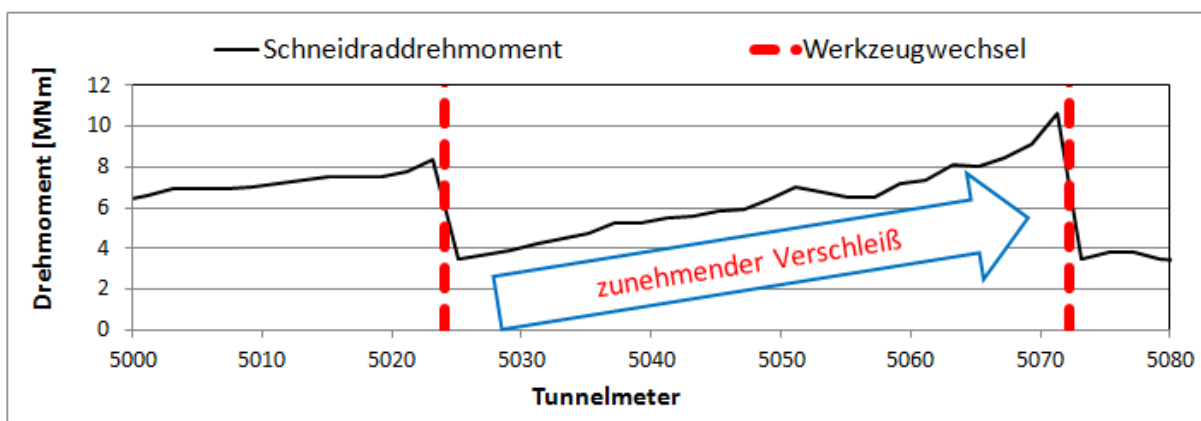


Abbildung 7.19: Anstieg des Schneidraddrehmoments mit zunehmendem Verschleiß

Dabei ist zu erkennen, dass das Schneidraddrehmoment von 4 MNm, bei nicht verschlissenen Werkzeugen (direkt nach Werkzeugwechsel), mit zunehmendem Verschleiß auf mehr als das doppelte ansteigen kann (direkt vor Werkzeugwechsel).

Mit zunehmendem Verschleiß nimmt die spezifische Penetration ab (Abb. 7.20). Die reduzierte Abbaueffektivität des Schneidrads führt zum Abfall der Bohrbarkeit.

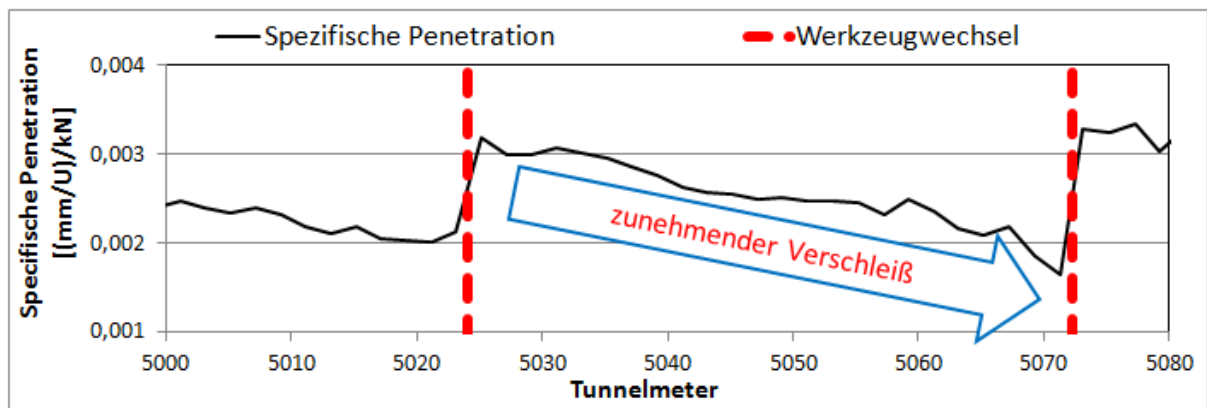


Abbildung 7.20: Abfall der spezifischen Penetration mit zunehmendem Verschleiß [66, modifiziert]

Während der Verschleißzustand des Schneidrads Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten Schneidradkontaktkraft, effektives Schneidraddrehmoment und spezifische Penetration hat, wirkt er sich nicht auf die aus der Gesamtvortriebskraft generierten Mantelreibungskraft aus. Diese resultiert zwar auch aus den Baugrundverhältnissen, nicht aber aus dem Abbauprozess. Sie ist damit eine baugrundspezifische und nicht eine abbauspezifische Komponente der Gesamtvortriebskraft. Anstiege der Vortriebskraft bei starkem Verschleiß resultieren aus Anstiegen der, ebenfalls Anteiligen, Schneidradkontaktkraft (vgl. Abb. 7.7).

Die Abbaueffektivität wird auch durch Verklebungen reduziert. Wie in Kapitel 6.3.1.1 beschrieben, verhindert die Verklebungsscheibe vor dem Schneidrad (vgl. Abb. 6.86 und 6.87) die Abbaueffektivität der Werkzeuge. Dementsprechend steigt die Schneidradkontaktkraft in Vortriebsbereichen mit verklebtem Schneidrad stark an, was am Beispiel eines Hydroschildvortriebs aufgezeigt werden kann (Abb. 7.21).

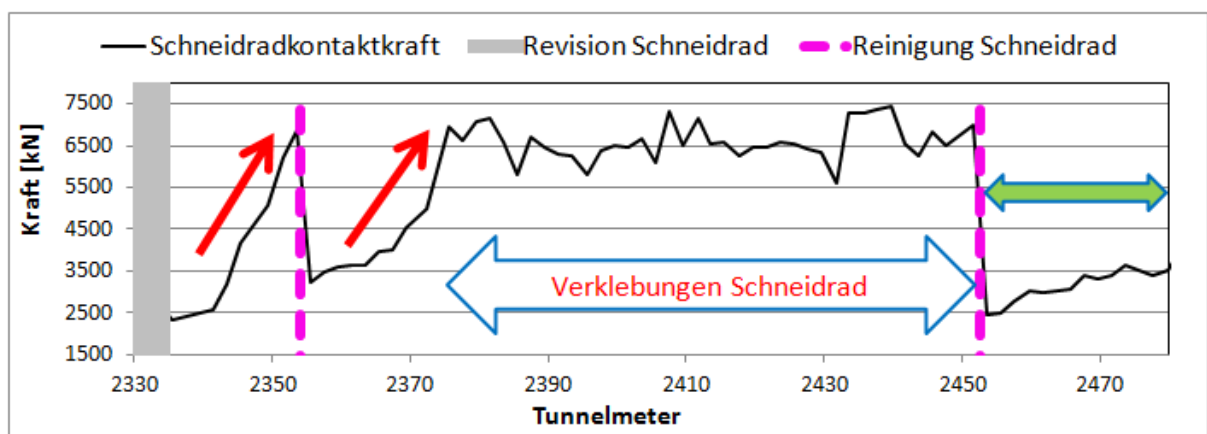


Abbildung 7.21: Anstieg der Schneidradkontaktkraft durch Verklebungen (rote Pfeile). Im Anschluss an den zweiten Reinigungsstillstand, steigt die Schneidradkontaktkraft ohne bindige Böden nicht mehr an (grüner Doppelpfeil) (Randbedingungen: Schneidrad: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Ripper, Ortsbrustanteile: 30% Kiese, 65% Sand, 5% Schluff und Ton) [66, modifiziert]

Auch hier kann für den gleichen Vortriebsabschnitt ein mit zunehmenden Verklebungen ansteigendes Schneidraddrehmoment nachgewiesen werden (Abb. 7.22).

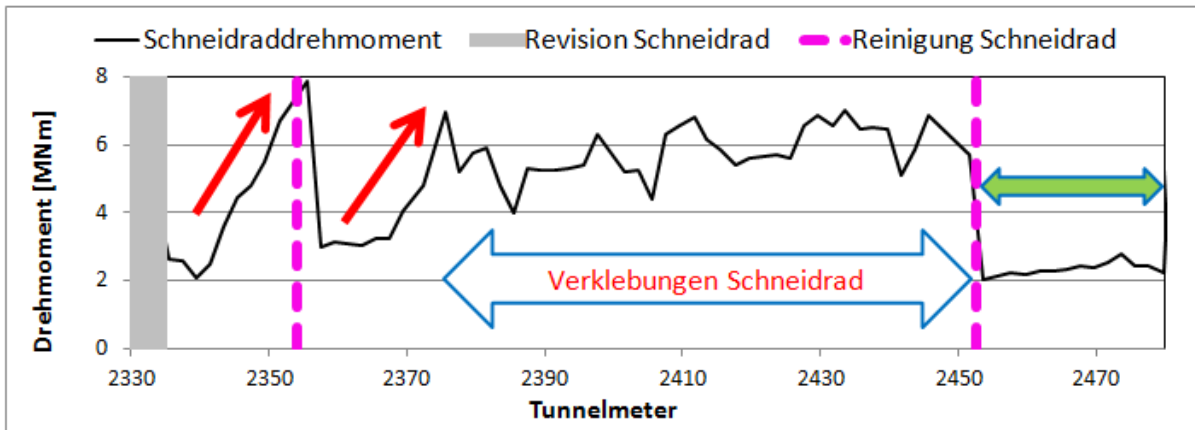


Abbildung 7.22: Anstieg des Schneidraddrehmoments durch Verklebungen (rote Pfeile). Im Anschluss an den zweiten Reinigungsstillstand, steigt das Drehmoment ohne bindige Böden nicht mehr an (grüner Doppelpfeil)

Das Schneidraddrehmoment erhöht sich nicht nur infolge des durch die Verklebungsscheibe gestörten Abbauprozesses, sondern auch durch ungleichmäßige Verklebungen am Schneidrad und dessen Aufhängung. Wird ein ungleichmäßig verklebtes Schneidrad von der Ortsbrust abgezogen und gedreht, ist das Leerdrehmoment höher als im nicht verklebten Zustand. Verklebung beeinflussen also in diesem Fall sowohl die abbauspezifische, als auch die abbauunabhängige Komponente des Schneidraddrehmoments. Da Abbildung 7.22 die Rohdaten des Schneidraddrehmoments dargestellt sind, beruhen die Anstiege auf beiden Effekten.

Um die Fahrweise der TVM zu berücksichtigen, wird auch die spezifische Penetration für den betreffenden Vortriebsbereich analysiert. Diese nimmt mit zunehmenden Verklebungen ab (Abb. 7.23).

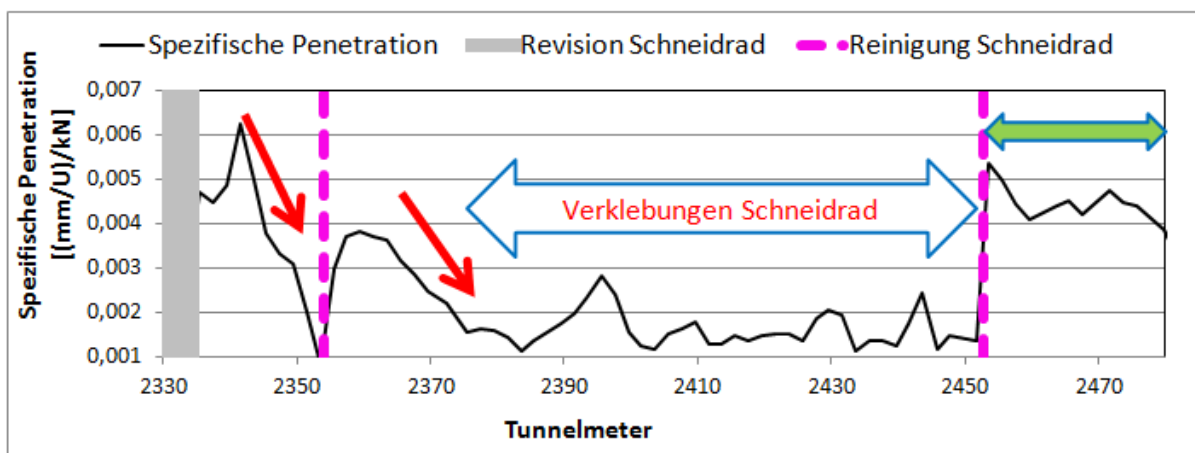


Abbildung 7.23: Abfall der spezifischen Penetration mit zunehmenden Verklebungen (rote Pfeile). Im Anschluss an den zweiten Reinigungsstillstand, sinkt die spezifische Penetration ohne bindige Böden nicht mehr stark ab (grüner Doppelpfeil) [66, modifiziert]

Während Verklebungen Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten Schneidradkontaktkraft, effektives Schneidraddrehmoment und spezifische Penetration haben, wirken sie sich nicht auf die, aus der Gesamtvortriebskraft generierten Mantelreibungskraft, aus. Anstiege der Gesamtvortriebskraft bei starken Verklebungen resultieren aus den Anstiegen der, ebenfalls anteiligen, Schneidradkontaktkraft (vgl. Abb. 7.7). Allerdings kann die Adhäsion bindiger Böden am Schildmantel auch zu Anstiegen der Mantelreibungskraft führen. Das ist allerdings keine Auswirkung von Verklebungen. Die Gesamtvortriebskraft und die baugrundspezifische Komponente werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Im Hinblick auf die in den Abbildungen 7.21 bis 7.23 aufgezeigten Abhängigkeiten muss berücksichtigt werden, dass die Auswirkungen der Verklebungen auch durch Verschleißeffekte überlagert sein können. Das ist vor allem deshalb relevant, da beide Effekte ähnliche Datenänderungen auslösen (vgl. Abb. 7.18 bis 7.23) und Verklebungen Verschleißeffekte noch verstärken können (Vgl. Kap. 6.3.3). In diesem Fall dürften die Daten nur geringfügig durch Verschleißeffekte überlagert sein, da das Schneidrad zu Beginn dieser Strecke im Rahmen einer intensiven Revision komplett mit neuen Werkzeugen ausgestattet wurde.

Betriebsdatenanalysen erfordern also nicht nur die Berücksichtigung abbauunabhängiger Einflüsse, sondern auch umfangreiche Informationen zum Schneidradzustand von der jeweiligen Baustelle.

7.3.2.3. Direkter Einfluss Baugrund: Abbauwiderstand

Der Abbauwiderstand des Baugrunds hat großen Einfluss auf die abbauspezifischen Betriebsdaten und hängt vor allem von den Eigenschaften, die die Festigkeit des Baugrunds bestimmen, ab. Diese ist im Hinblick auf die Analyse von Betriebsdaten weitaus wichtiger als der eigentliche Bodentyp. Der Abbauwiderstand steigt mit zunehmender Konsistenz bindiger Böden bzw. Lagerungsdichte nichtbindiger Böden (Abb. 7.24). Als Vergleich sind typische SPT-Werte, die im Hinblick auf die Konsistenz von Terzaghi & Peck [107] und im Hinblick auf die Lagerungsdichte von Meyerhof [86] stammen, aufgeführt. Auch wenn die SPT-Werte nicht unbedingt den Abbauwiderstand repräsentieren, dürfte zumindest eine ähnliche Tendenz vorliegen, da sie auf den Eindringwiderständen der Sonde des Standard-Penetration-Tests beruhen. Wenn zunächst Verklebungen und Abrasivität vernachlässigt werden, steigen Schneidradkontaktkraft und effektives Schneidraddrehmoment in der Reihe vom breiigen bzw. sehr locker gelagerten Boden bis hin zum schwach verfestigten Festgestein an (Abb. 7.24). Gleichzeitig nimmt die spezifische Penetration ab. Mit ansteigender Scherfestigkeit ist eine zu Abbildung 7.24 vergleichbare Änderung der abbauspezifischen Betriebsdaten zu erwarten, zumal die Scherfestigkeit von Böden mit der Konsistenz bzw. der Lagerungsdichte korreliert.

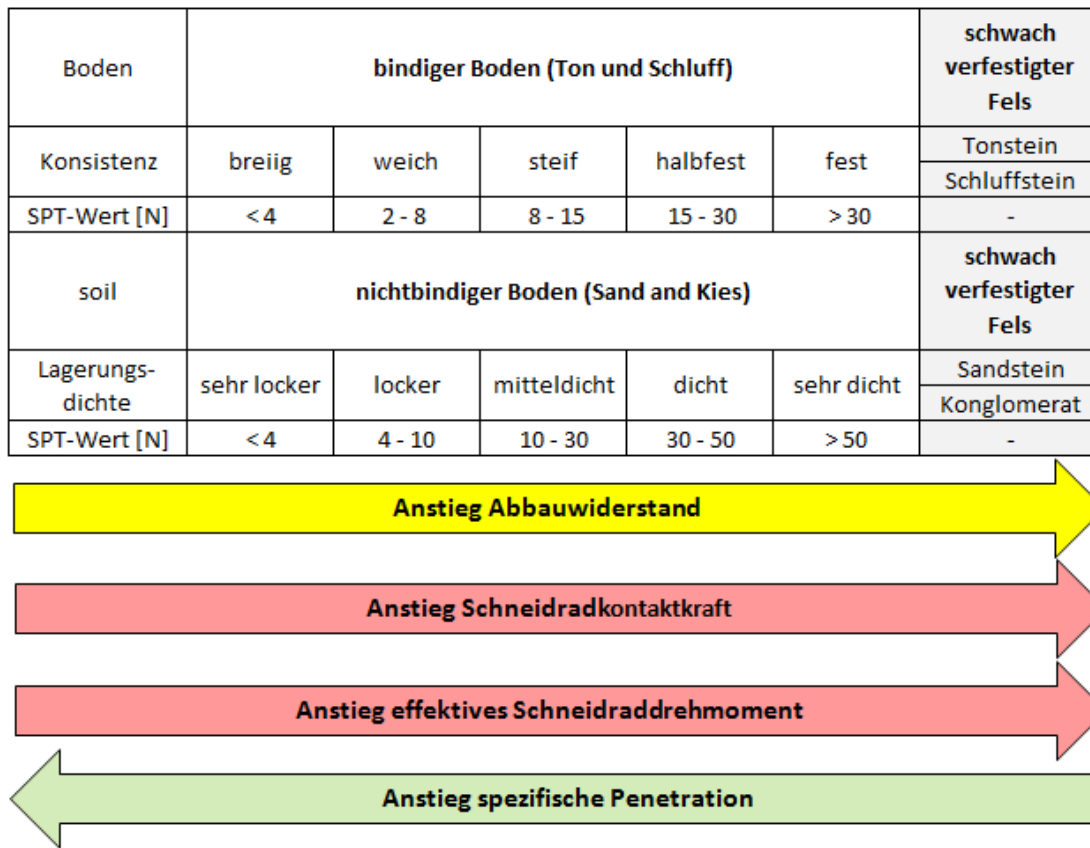


Abbildung 7.24: Abhängigkeit des Abbauwiderstands von Konsistenz und Lagerungsdichte und Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten [66, modifiziert]

Am Beispiel eines Hydroschildvortriebs in sandigen Kiesen werden die Einflüsse der Lagerungsdichte aufgezeigt. Die Lagerungsdichte in den entsprechenden Vortriebsbereichen basiert dabei sowohl auf SPT-Werten der Erkundung, als auch auf manuellen Ansprachen bei der Ortsbrustkartierung. Je höher die Lagerungsdichte, desto größer ist die Schneiradkontaktkraft (Abb. 7.25).

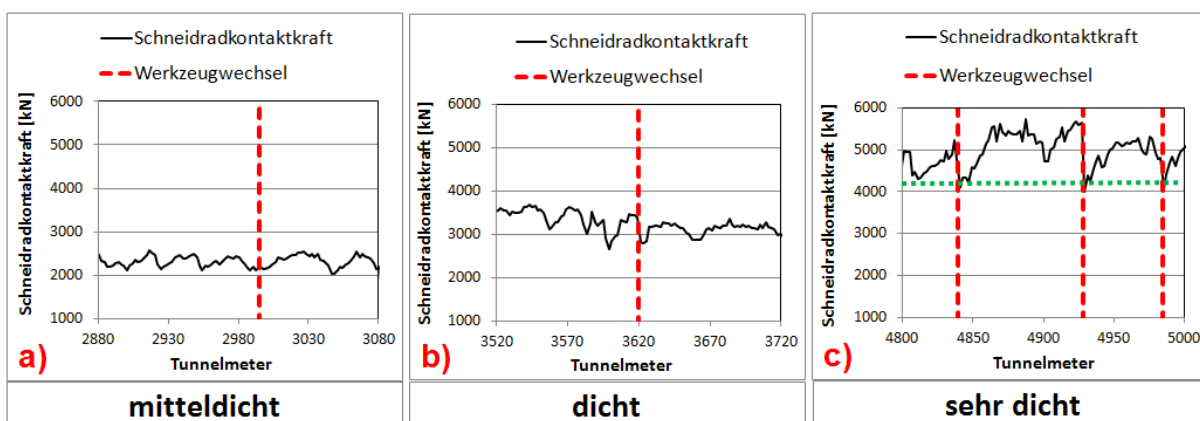


Abbildung 7.25: Schneiradkontaktkraft bei Kiesen unterschiedlicher Lagerungsdichte (Randbedingungen: Schneirad: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper) [66, modifiziert] a) Werkzeugbesatz: 5% Disken/95% Ripper b) Werkzeugbesatz: 70% Disken/30% Ripper c) Werkzeugbesatz: 97% Disken/3% Ripper (grüne Linie: theoretische Schneiradanpresskraft ohne Verschleiß)

Je höher die Lagerungsdichte, desto größer ist auch das Schneidraddrehmoment (Abb. 7.26). Auch in diesem Fall sind die Rohdaten inklusive des Leerdrehmoments dargestellt, da dieses nachträglich nicht isoliert werden konnte.

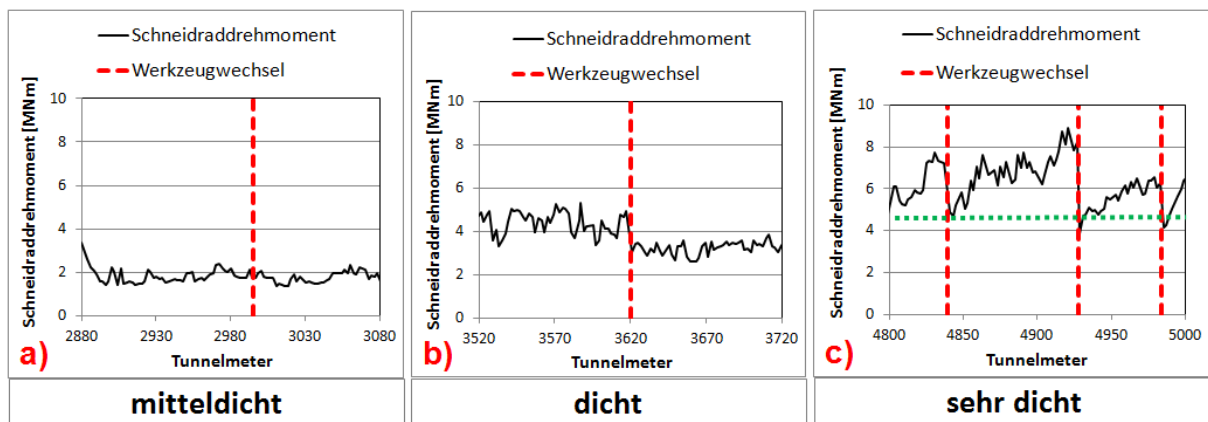


Abbildung 7.26: Schneidraddrehmoment bei Kiesen unterschiedlicher Lagerungsdichte (die Randbedingungen entsprechen Abbildung 7.25)

Im Gegensatz dazu sinkt die spezifische Penetration mit zunehmender Lagerungsdichte (Abb. 7.27).

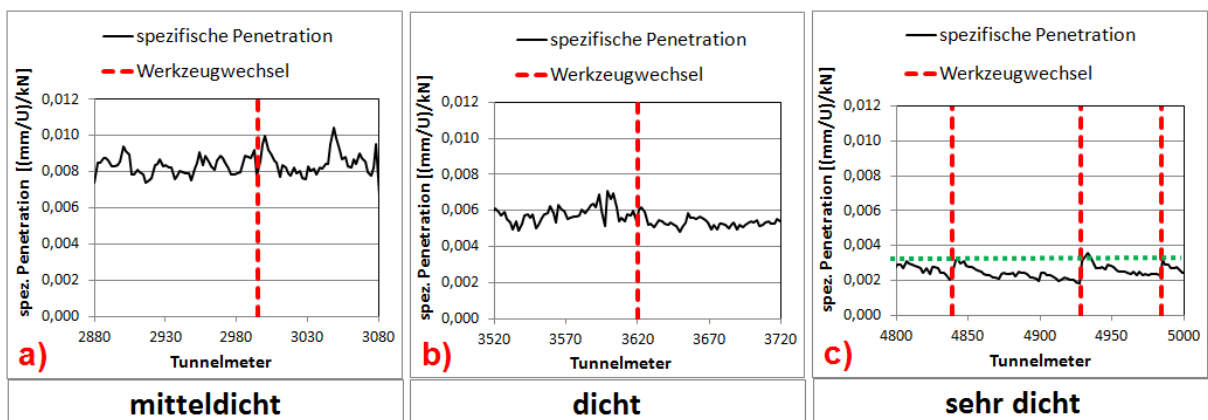


Abbildung 7.27: Spezifische Penetration bei Kiesen unterschiedlicher Lagerungsdichte (die Randbedingungen entsprechen Abbildung 7.25)

Die Betriebsdaten sind in diesen Fällen aber nicht nur durch die Lagerungsdichte, also den Abbauwiderstand, sondern auch durch den Verschleiß beeinflusst. Das ist beim Vergleich der Betriebsdaten vor und nach den Werkzeugwechseln und dabei vor allem bei dem Vortriebsabschnitt mit sehr hoher Lagerungsdichte erkennbar. Dabei sind die theoretischen Datenverläufe, ohne Verschleiß, als grüne Linie dargestellt (Abb. 7.25-c, 7.26-c und 7.27-c). Weniger deutlich sind vergleichbare Tendenzen auch nach dem Werkzeugwechsel im Bereich der dichten Lagerung erkennbar (Abb. 7.25-b, 7.26-b und 7.27-b). Außerdem muss berücksichtigt werden, dass der Werkzeugbesatz in Abhängigkeit der Lagerungsdichte geändert wurde und somit die abbauspezifischen Betriebsdaten wahrscheinlich ebenfalls beeinflusst. Da mit zunehmender Lagerungsdichte einzelne Kieskörner immer schwerer aus dem Verband gerissen werden können, sind Ripper zunehmend ineffektiv und die Gefahr von Gewaltschäden steigt. Daher wurde der Anteil von Disken gegenüber Rippern mit zu-

nehmender Lagerungsdichte erhöht. Auch wenn die abbauspezifischen Betriebsdaten in diesen Fällen hauptsächlich vom Abbauwiderstand des Bodens beeinflusst sind, wirken sich überlagernd der Verschleiß und der Werkzeugbesatz aus.

Die Beispiele zeigen, dass innerhalb gleicher Bodenarten in Abhängigkeit der Lagerungsdichte starke Unterschiede der abbauspezifischen Betriebsdaten vorliegen können. Im Gegensatz dazu verursachen Wechsel der Bodenarten bei gleicher Lagerungsdichte (z.B. Wechsel von einem sehr dicht gelagerten Kies in einen sehr dicht gelagerten Sand) keine nennenswerten Änderungen der abbauspezifischen Betriebsdaten. Betriebsdatenanalysen erfordern daher möglichst genau Kenntnisse der Lagerungsdichte bzw. der Konsistenz. Der Unterschied des Abbauwiderstands steigt mit zunehmendem Festigkeitskontrast des Baugrundwechsels. Die Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten sind bei einem Hydroschildvortrieb, der zunächst vollflächig im Kies, dann tlw. im Kies und im Fels (Mixed-Face) und anschließend vollflächig im Fels verlief, besonders gut erkennbar (Abb. 7.28).

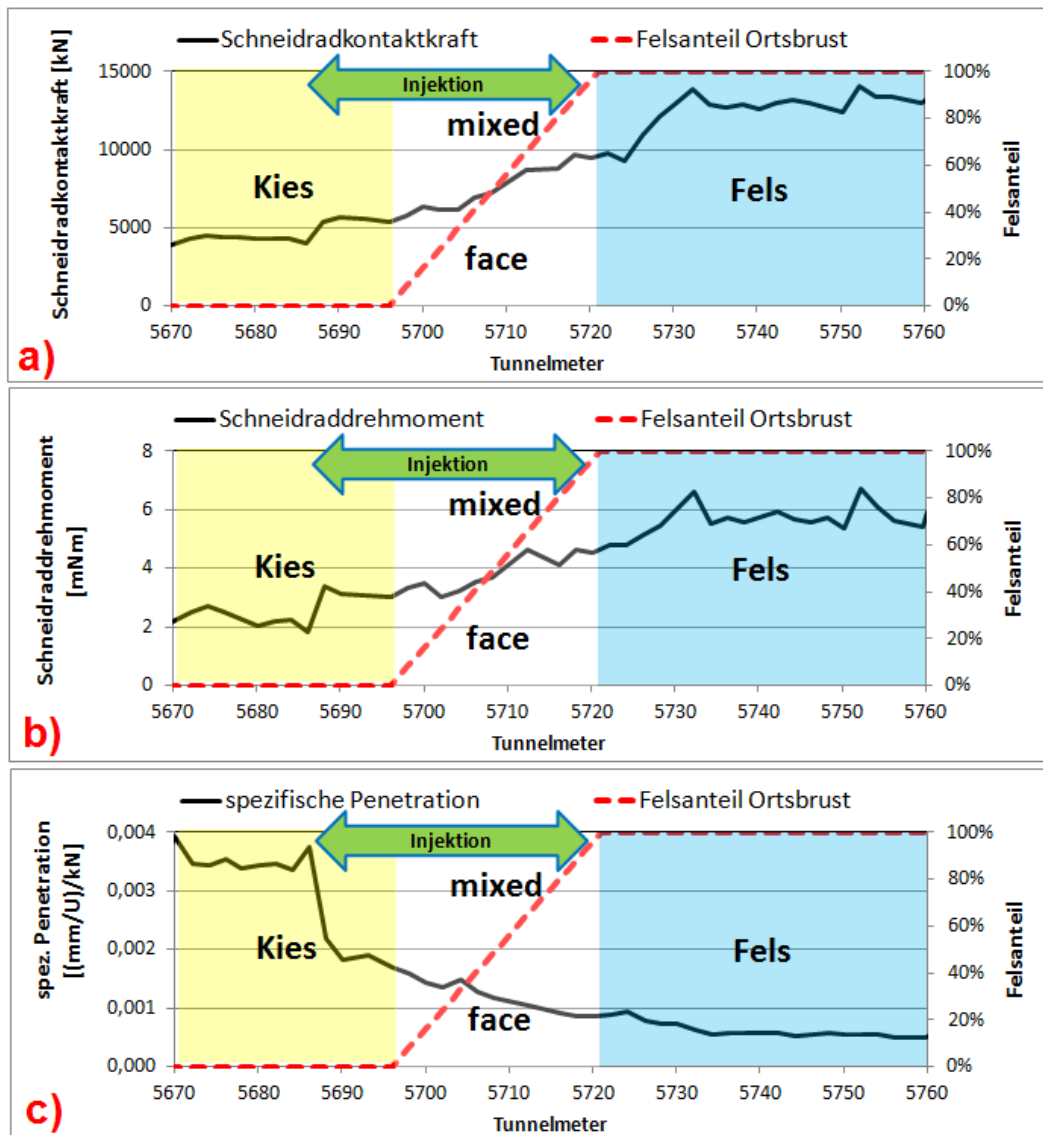


Abbildung 7.28: Abbauspezifischen Betriebsdaten in Boden und Fels (Randbedingungen: Schneidrad-durchmesser 13m, Schneidradöffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper) [66, modifiziert]

Der Kies war im Mixed-Face-Bereich und kurz davor injiziert, um Auswirkungen des schleifenden Anschnitts der Felsoberfläche zu vermeiden. Neben den deutlichen Anstiegen der Schneidraddruckkraft und des Schneidraddrehmoments bzw. der Abnahme der spezifischen Penetration mit zunehmendem Felsanteil ist auch der Beginn der verfestigten Kiese an den Datenänderungen zu erkennen.

Von Alber wurden bei Hartgesteinstunnelbohrmaschinen im Fels ähnliche Wechsel der Werkzeugkraft in Abhängigkeit unterschiedlicher Festigkeiten der Gesteine nachgewiesen [1]. Auch andere Mixed-Face-Bedingungen mit Felseinlagerungen in Lockergesteinen, wie z.B. Blöcke oder partielle Verfestigungen des Porenraums (z.B. Nagelfluh-Einlagerungen in Kiesen) erhöhen den Abbauwiderstand und führen zu Änderungen der abbauspezifischen Betriebsdaten.

7.3.2.4. Indirekter Einfluss Baugrund: Abrasivität und Verklebungsneigung

Aus Kapitel 7.3.2.2 geht hervor, dass Verklebungen und Verschleiß die Abbaueffektivität des Schneidrads verringern. Dementsprechend haben Baugrundeigenschaften, die die Abrasivität und die Verklebungsneigung beeinflussen, indirekte Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten. Dies gilt auch dann, wenn sie den Abbauwiderstand nicht beeinflussen.

Im Hinblick auf den Verschleiß bei Schildvortrieben in Lockergesteinen werden in der aktuellen Empfehlung der DAUB von 2010 [19] die folgenden Eigenschaften als relevant aufgeführt: LCPC-Index, äquivalenter Quarzanteil, Steinanteil, Blockanteil, Druckfestigkeit, Scherfestigkeit und Lagerungsdichte. Außerdem steigt die Abrasivität mit abnehmender Kornrundung und zunehmender Korngröße. Dabei werden die abbauspezifischen Betriebsdaten besonders beeinflusst, wenn die Bodenparameter sowohl die Abrasivität als auch den Abbauwiderstand erhöhen. Das konnte bereits am Beispiel der Lagerungsdichte aufgezeigt werden (vgl. Abb. 7.25-a, 7.26-a und 7.27-a mit 7.25-c, 7.26-c und 7.27-c). Aber auch Bodenparameter ohne Einfluss auf den Abbauwiderstand, wie z.B. der äquivalente Quarzanteil, haben indirekte Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten. Sie führen zu einer höheren Abrasivität und damit zu einem höheren Werkzeugverschleiß bzw. einer geringeren Abbaueffektivität des Schneidrads (vgl. Kap. 7.3.2.2).

Im Hinblick auf Baugrundeigenschaften, die Verklebungen verursachen, wird vor allem auf Kapitel 3 verwiesen. Auch hier können Bodeneigenschaften ohne Einfluss auf den Abbauwiderstand, wie z.B. ein hoher Anteil kritischer Tonminerale, indirekte Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten haben. Sie verursachen Verklebungen und eine dementsprechend verringerte Abbaueffektivität des Schneidrads (vgl. Kap. 7.3.2.2). Da Verklebungen die Einflüsse aus dem Abbauwiderstand des Baugrunds überlagern, kann ein Baugrundwechsel von halbfesten zu weichen Tönen beispielsweise zu Anstiegen der Schneidraddruckkraft führen, obwohl Tone mit fester Konsistenz eigentlich einen höheren Abbauwiderstand haben (Abb. 7.24). Die häufig in der Praxis beschriebenen Betriebsdatenänderungen bei Baugrundwechseln von Sand zu Ton beruhen ebenfalls eher auf Verklebungen, als auf dem Abbauwiderstand der beiden Bodentypen.

7.3.2.5. Bohrhindernisse

Auch Bohrhindernisse anthropogenen Ursprungs beeinflussen die abbauspezifischen Betriebsdaten, was an einem Hydroschildvortrieb in Kiesanden bei der Durchfahrt eines Dichtblocks aufgezeigt werden soll (Abb. 7.29).

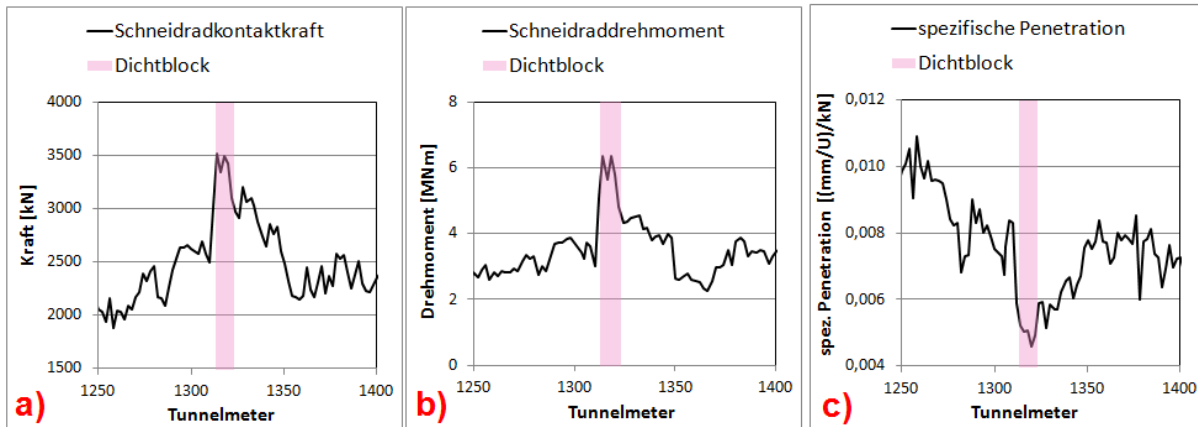


Abbildung 7.29: Auswirkungen eines Bohrhindernisses (Dichtblock) auf die abbauspezifischen Betriebsdaten (Schneidraddring: Durchmesser 13m, Öffnungsgrad 30%, 268 Schälmesser, 64 Disken/Ripper)

Der in der Regel hohe Festigkeitskontrast führt dabei zu plötzlichen Anstiegen von Schneidraddringkraft, Schneidraddrehmoment bzw. einem Abfall der spezifischen Penetration. Da Bohrhindernisse ähnliche Auswirkungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten wie Erhöhungen des Abbauwiderstands durch Baugrundwechsel haben, müssen diese bei der Datenanalyse berücksichtigt werden. Während Bohrhindernisse wie Dichtblöcke, Dichtwände oder Schlitzwände in der Regel bekannt sind, werden alte Gründungen, Bohrpfähle, Anker, Spundwände oder verlorene Verrohrungen häufig überraschend angetroffen (Abb. 7.30).



Abbildung 7.30: Bei einem Hydroschild unerwartet angetroffene Verrohrung einer Erkundungsbohrung [59, modifiziert] a) Bergung der Verrohrung mit Werkzeugspuren (Pfeil) b) Teil einer Verrohrung mit Werkzeugspuren (Pfeile)

Dabei können insbesondere Bohrhindernisse aus Metall die abbauspezifischen Betriebsdaten, auch nachdem sie bereits durchfahren wurden, noch indirekt beeinflussen, da sie zu Schäden an Werkzeugen und Schneidraddring führen können und somit die Abbaueffektivität des Schneidraddrings verringert wird (vgl. Kap. 7.3.2.2).

7.3.2.6. Fallbeispiel: Aussagekraft der Rohdaten im Hinblick auf den Baugrund

An einem Fallbeispiel soll die Notwendigkeit der in Kapitel 7.3.1 empfohlenen Verwendung der abbauspezifischen Betriebsdaten aufgezeigt werden.

Für zwei Hydroschildvortriebe benachbarter Baulose wurden Datenanalysen hinsichtlich der Interaktion Baugrund – Maschine durchgeführt [123]. Im Rahmen der Analysen wurden die Betriebsdaten verwendet, ohne die abbauspezifischen Teilkomponenten zu isolieren. Die beiden Vortriebe verliefen überwiegend in mittel- bis grobkörnigen quartären Lockergesteinen. Dabei wurde vor allem für die kiesbetonten Vortriebsbereiche ein linearer Zusammenhang zwischen Überlagerung und den Betriebsdaten Schneidradanpresskraft (Abb. 7.31) und der Gesamtvortriebskraft aufgezeigt.

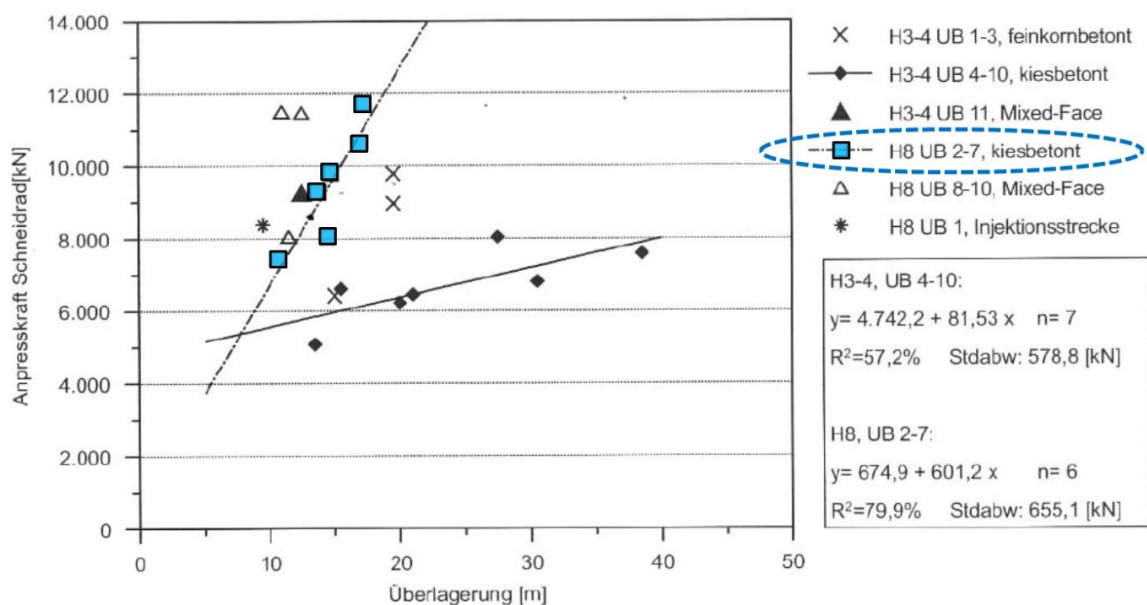


Abbildung 7.31: Gegenüberstellung der Mittelwerte der Schneidradanpresskraft zur Überlagerung für einzelne Vortriebsbereiche [123 Fig. 62, modifiziert]. Gegenüber dem Original wurden die Datenpunkte des kiesbetonten Bereichs eines der beiden Vortriebe (TM 500-3200), der im Folgenden näher betrachtet wird, blau markiert

Die Korrelation wird auf den Baugrund zurückgeführt, wobei die Überlagerungshöhe näherungsweise als relatives Maß für die Lagerungsdichte gewertet wird [123]. Die Betriebsdatenanstiege werden dann auf die zunehmend notwendige Kraft zum Lösen des kompakteren Baugrunds zurückgeführt. Ein steigender Abbauwiderstand mit zunehmender Lagerungsdichte ist nachvollziehbar und wurde in Kapitel 7.3.2.3 anhand der abbauspezifischen Betriebsdaten nachgewiesen. Um die in Abbildung 7.31 blau hinterlegten Daten im Hinblick auf die entsprechende Tendenz zu überprüfen, werden die Betriebsdaten des betreffenden Vortriebsabschnitts im Folgenden hinsichtlich ihrer abbauunabhängigen und abbauspezifischen Anteile bewertet.

Wie von Wendl beschrieben, steigen die Rohdaten der Schneidradanpresskraft im kiesbetonten Vortriebsbereich mit zunehmender Überlagerung an (Abb. 7.32-a). Die Abhängigkeit von der Überlagerung ist in diesem Fall nicht auf den Baugrund zurückzuführen, sondern

vorrangig durch den Stützdruck bedingt, der mit zunehmendem Erd- und Grundwasserdruck (=Zunahme Überlagerung und Grundwasserhöhe) höher eingestellt wurde (Abb. 7.32-b).

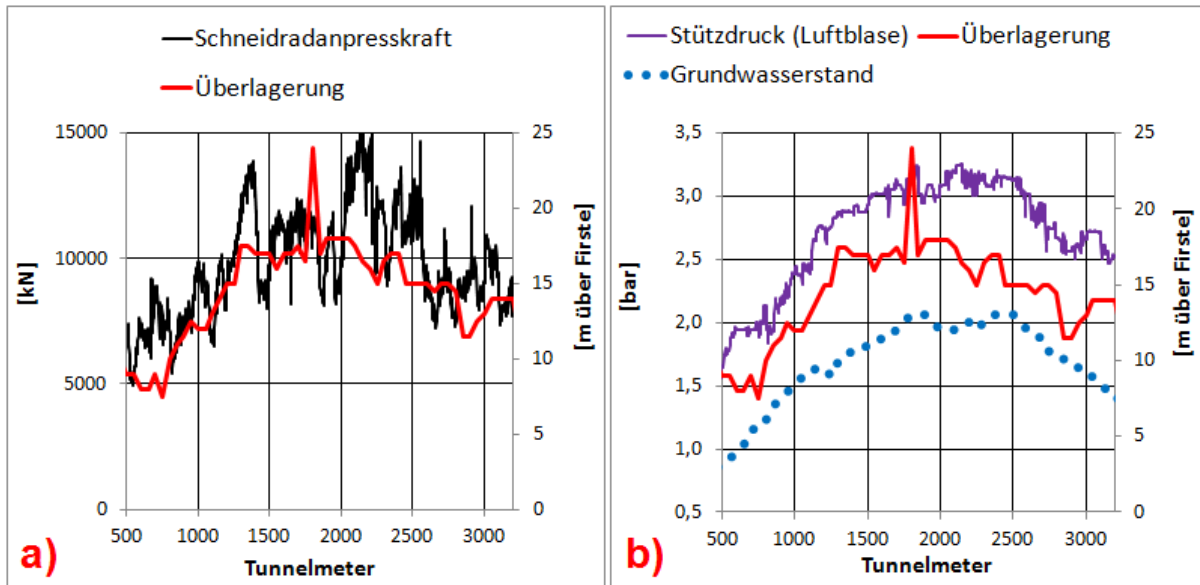


Abbildung 7.32: a) Anstieg der Schneidradanpresskraft (Rohdaten) mit der Überlagerung b) Abhängigkeit zwischen Stützdruck und Überlagerung sowie Grundwasserstand über Firste

Aufgrund des Stützdrucks ergibt sich eine gute Korrelation zwischen Überlagerung und der im Hinblick auf die Rohdaten der Schneidradanpresskraft anteilmäßig größten Teilkomponente in Form der auf den Schneidradantrieb wirkenden Stützkraft (Abb. 7.33-a). Die gegenüber den Rohdaten anteilmäßig geringere abbauspezifische Teilkomponente in Form der Schneidradkontaktkraft korreliert dagegen nicht mit der Überlagerung (Abb. 7.33-b).

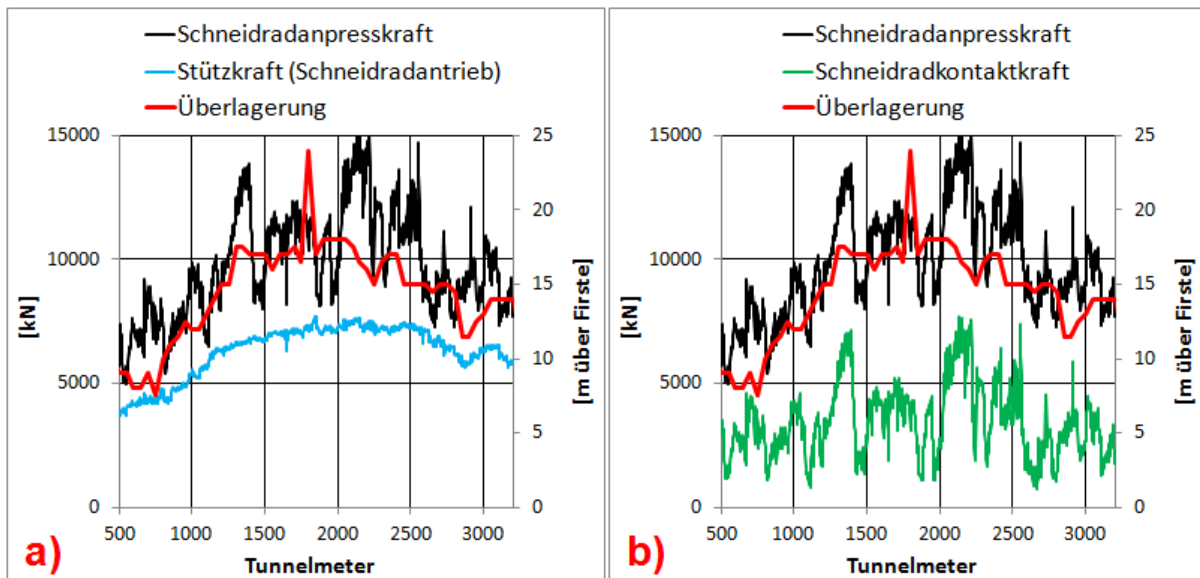


Abbildung 7.33: a) Vergleich der auf den Schneidradantrieb wirkenden Stützkraft mit der Überlagerung b) Vergleich der abbauspezifischen Schneidradkontaktkraft und der Überlagerung (ohne Korrelation)

Die lokalen Änderungen der Schneidradkontaktkraft in Abbildung 7.33-b sind dagegen wahrscheinlich auf unterschiedliche abbauspezifische Einflüsse (z.B. auch Wechsel der Lagerungsdichte denkbar) zurückzuführen.

Das Beispiel zeigt deutlich, dass die in Kapitel 7.3.1 empfohlenen Aufbereitungen der Betriebsdaten und die Generierung ihrer abbauspezifischen Datenanteile im Hinblick auf sinnvolle Analysen der Interaktion Baugrund – Maschine erforderlich sind. Die Berücksichtigung der tatsächlichen abbauspezifischen Einflüsse ist dabei genauso wichtig. Statt einer möglichen Korrelation zwischen Überlagerung und Lagerungsdichte wäre eine Auswertung von Standard-Penetration-Tests oder manueller Ansprachen der Ortsbrust zielführender, zumal hohe Lagerungsdichten auch bei geringer Überlagerung möglich sind.

7.3.2.7. Auswertungen von Paxis-Betriebsdaten im Hinblick auf Verklebungen

In diesem Kapitel werden über Kapitel 7.3.2.2 hinausgehende Betriebsdatenanalysen im Hinblick auf die Auswirkung von Verklebungen durchgeführt. Dazu werden ausgewählte Vortriebsabschnitte der in Kapitel 6 aufgeführten Projekte näher analysiert. Dabei ist zu beachten, dass einzelne in Kapitel 7.3.1 empfohlene Datenaufbereitungen an den Betriebsdaten der drei Projekte nachträglich nicht mehr möglich waren. Dies betrifft vorrangig die Bestimmung der Reibungskräfte der Schneidradverschiebezyylinder bei der Ermittlung der Schneidradkontaktkraft (vgl. Kap. 7.3.1.1). Die in diesem Kapitel verwendeten Schneidradkontaktkräfte sind dementsprechend zwar hinsichtlich der Stützkraftkomponente, nicht aber der Reibungskräfte, bereinigt. Auch das Leerdrehmoment des Schneidrads konnte im Nachgang nicht mehr ermittelt werden. Auswertungen der Rohdaten des Schneidraddrehmoments beinhalten daher sowohl aus dem Abbauprozess als auch aus den Bedingungen in der Abbaukammer resultierende Einflüsse.

Bei Projekt A wurde der Verklebungsgrad des Schneidrads bereichsweise dokumentiert (vgl. Kap. 6.2.1 und 6.2.1.5). Im analysierten Abschnitt wurden überwiegend feste Tone (Melettschichten, vgl. Kap. 6.2.1) angetroffen. In die Tone waren bereichsweise veränderlich feste Tonsteine (mittlere einaxiale Druckfestigkeit: 2 MPa) und Sandsteine (mittlere einaxiale Druckfestigkeit 5 MPa) eingeschaltet. Eine genaue Zuordnung der Sandsteine ist in diesem Vortriebsabschnitt aufgrund der meist schlechten Ortsbrusteinsicht nicht möglich (vgl. Kap. 6.1). Der Vortrieb der TVM-Ost wurde zwischen TM 5000 und 5800 im offenen und halboffenen Modus durchgeführt, so dass bei Druckluftstützung eine Berücksichtigung der Stützkraft erforderlich ist. Die um die Stützkraft bereinigte Schneidradkontaktkraft steigt in Bereichen mit hohem Verklebungsgrad an (Abb. 7.34).

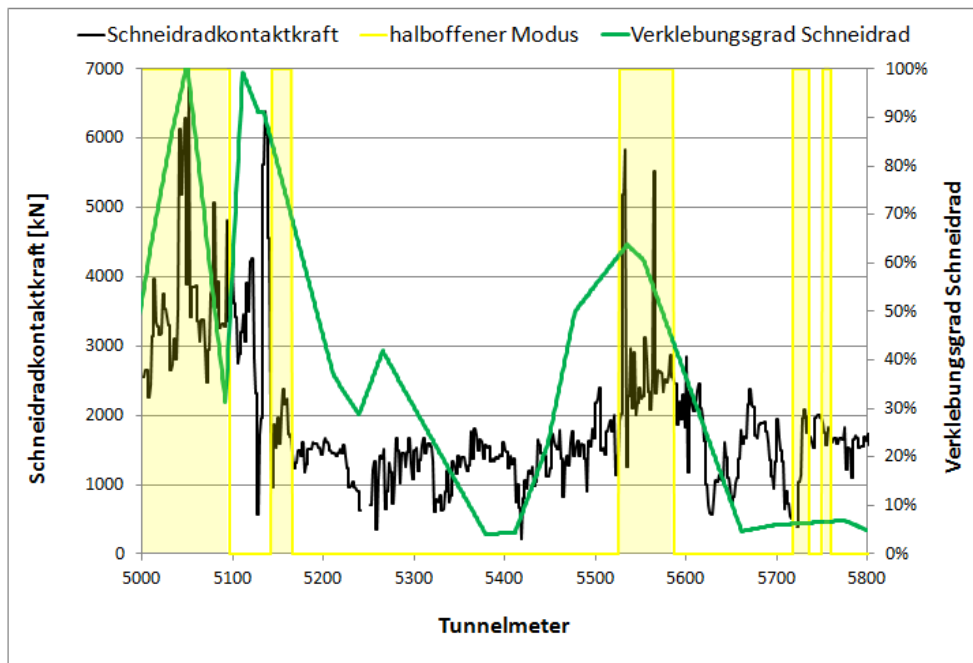


Abbildung 7.34: Vergleich von Schneidradkontaktkraft und Verklebungsgrad des Schneidrads

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Anstieg der Schneidradkontaktkraft wahrscheinlich nicht nur allein auf den höheren Verklebungsgrad zurückzuführen ist. Die Abbaueffektivität des Schneidrads ist dort auch durch einen infolge der Verklebungen verstärkten Verschleiß beeinflusst (vgl. Kap. 6.3.3.3). Außerdem führen Sandsteinbänke innerhalb der Melettaschichten lokal zu Erhöhungen des Abbauwiderstands.

Um die Fahrweise der TVM zu berücksichtigen, wird auch die spezifische Penetration mit dem Verklebungsgrad des Schneidrads verglichen (Abb. 7.35). Dabei ist mit zunehmendem Verklebungsgrad eine abfallende spezifische Penetration erkennbar.

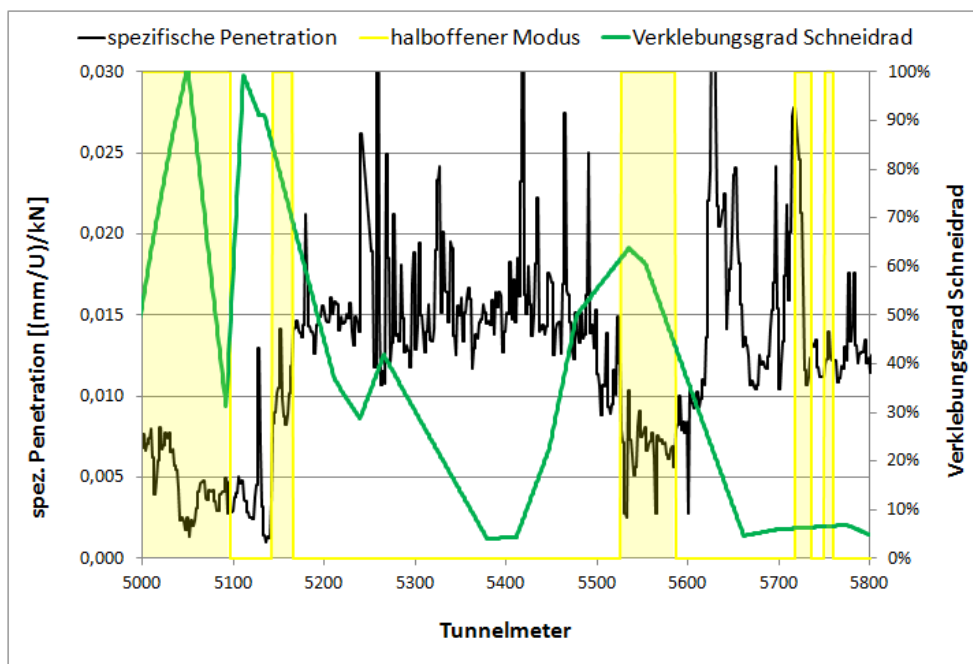


Abbildung 7.35: Vergleich von spezifischer Penetration und Verklebungsgrad des Schneidrads

Die Abhängigkeit der abbauspezifischen Betriebsdaten vom Verklebungsgrad kann allerdings nur als grobe Tendenz nachgewiesen werden (Abb. 7.36), wobei ausdrücklich auf die Streuung der Datenpunkte und das relativ geringe Bestimmtheitsmaß der Trendlinien hingewiesen wird.

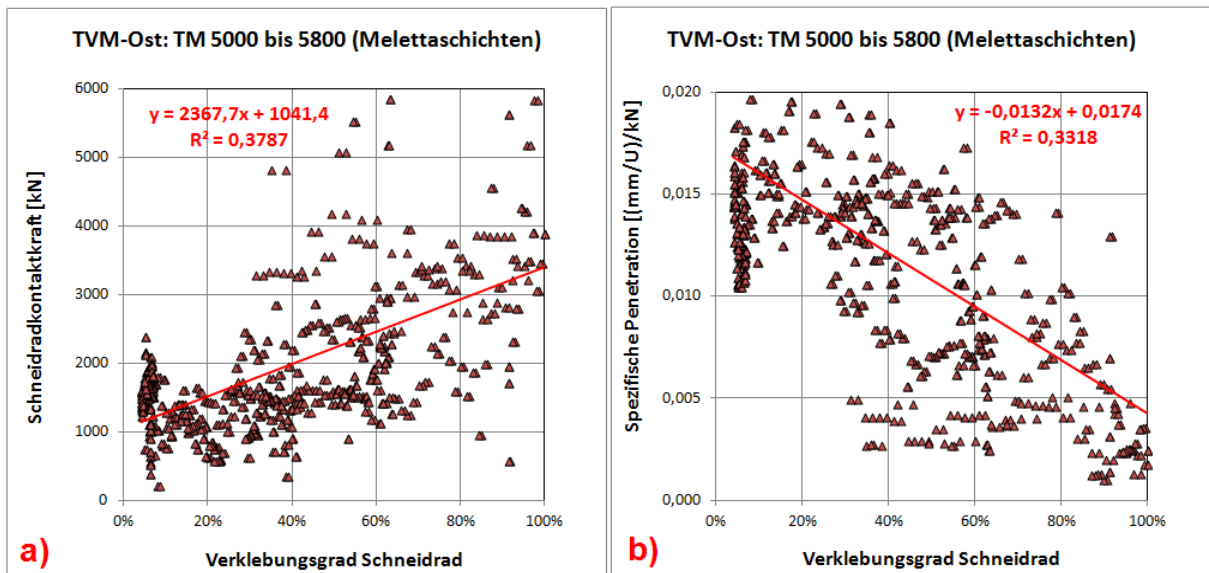


Abbildung 7.36: Vergleich des Schneiradverklebungsgrades mit a) Schneiradkontaktkraft und b) spezifischer Penetration

Auch das Schneiraddrehmoment steigt in den Bereichen mit hohem Verklebungsgrad an (Abb. 7.37-a). Die Tendenz ist allerdings weniger deutlich, zumal auch hohe Drehmomente in Vortriebsbereichen ohne Verklebungen auftreten. Demensprechend gering ist das Bestimmtheitsmaß der Trendlinie in Abbildung 7.37-b.

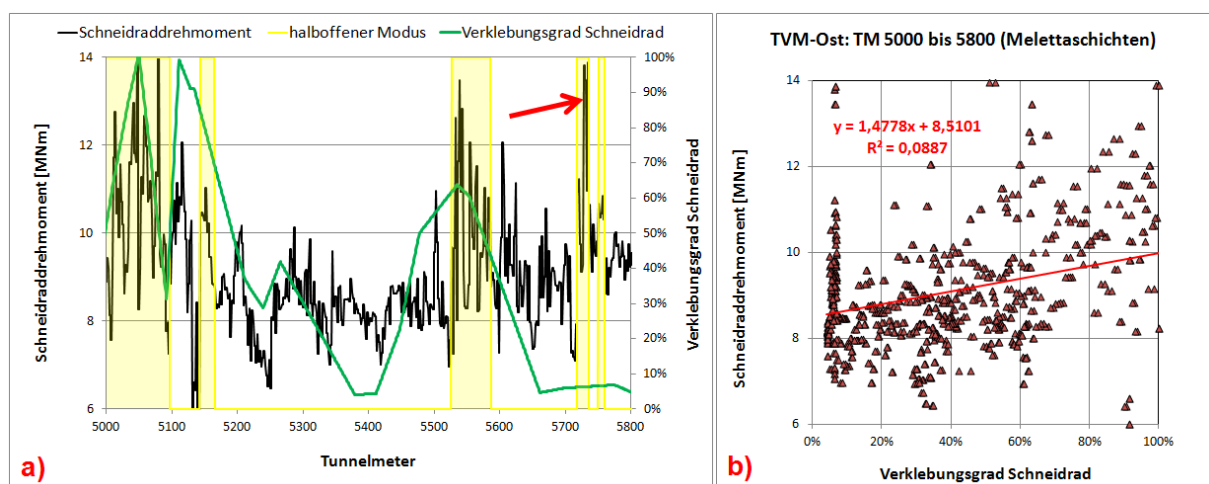


Abbildung 7.37: Vergleich von Schneiraddrehmoment und Verklebungsgrad des Schneirads

In Bereichen mit halboffenem Vortriebsmodus sind die Anstiege des Schneiraddrehmoments wahrscheinlich auch auf die Teilfüllung der Abbaukammer mit Ausbruchsmaterial zurückzuführen (Abb. 7.37-a: z.B. Datenanstieg bei geringen Verklebungen im halboffenen Modus: roter Pfeil). Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Leerdrehmoment nicht bestimmt werden konnte. Änderungen der Rohdaten beruhen in diesem Fall zum Teil auf dem effekti-

ven Schneidraddrehmoment (Ortsbrustkontakt → Verklebungsscheibe, Verschleiß und Abbauwiderstand) und zum Teil auf dem Leerdrehmoment (kein Ortsbrustkontakt → ungleichmäßige Verklebungen am Schneirad, Teilfüllung mit Ausbruchsmaterial). Die Betriebsdatenanalyse anhand der Rohdaten ist also nur sehr ungenau.

Der Vortrieb bei Projekt B erfolgte zunächst mit einem Hydroschild, der bei etwa TM 1530 in einen offen gefahrenen Schild umgebaut wurde (vgl. Kap. 6.2.2). Dabei wurden sowohl am Ende des Hydroschildvortriebs als auch zu Beginn des offenen Schildvortriebs vergleichbare Gesteine des unteren Buntsandsteins angetroffen. Dabei lag eine Wechselfolge aus halbfesten bis festen Tonen und Sandsteinen mit mittlerer einaxialer Druckfestigkeit von 70 MPa vor. Der Hydroschildvortrieb war, im Gegensatz zum offenen Schildvortrieb mit nur geringen Bergwasserzutritten, infolge der Stützflüssigkeit durch Verklebungen beeinflusst (vgl. Kap. 6.2.2). Dementsprechend können die unterschiedlichen Kraftanteile an der Schneiradanpresskraft in diesem Bereich relativ genau aufgezeigt werden (Abb. 7.38).

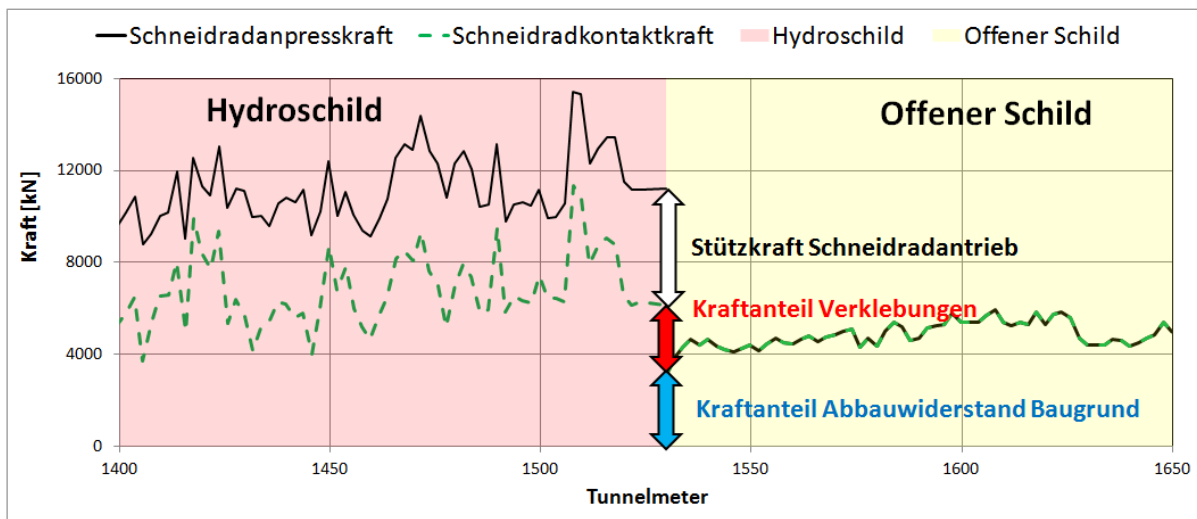


Abbildung 7.38: Vergleich der Kraftanteile der Schneiradanpresskraft

Der Stützkraftanteil (weißer Doppelpfeil) wird beim Vergleich von Schneiradanpresskraft (schwarze Linie) und Schneiradkontaktkraft (grüne Linie) der Hydroschildstrecke erkennbar. Da im offen gefahrenen Bereich kein Stützdruck wirkte, entsprechen die Rohdaten der Schneiradanpresskraft in diesem Fall der Schneiradkontaktkraft (grüne und schwarze Linie überlagert). Da hier keine Verklebungen auftraten, repräsentiert sie den aus dem Abbauwiderstand des Baugrunds resultierenden Kraftanteil (blauer Doppelpfeil). Die Differenz der Schneiradkontaktkraft beider Vortriebsmodi entspricht hier dem aus den Verklebungen resultierenden Kraftanteil (roter Doppelpfeil). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Reibungskräfte bei der Erzeugung der Schneiradanpresskraft nicht berücksichtigt wurden. Obwohl der Verschleiß in diesem Vortriebsabschnitt gering war, kann ein Einfluss auf die Daten nicht ganz ausgeschlossen werden.

Für die spezifische Penetration kann ein ähnlicher Einfluss durch die Verklebungen nachgewiesen werden (Abb. 7.39). Dabei ist eine entsprechend höhere Bohrbarkeit im offen gefahrenen Vortriebsbereich ohne Verklebungen nachweisbar. Der durch Verklebungen ausgelöste Anteil der spezifischen Penetration (roter Doppelpfeil) ist an der Umbauposition ablesbar.

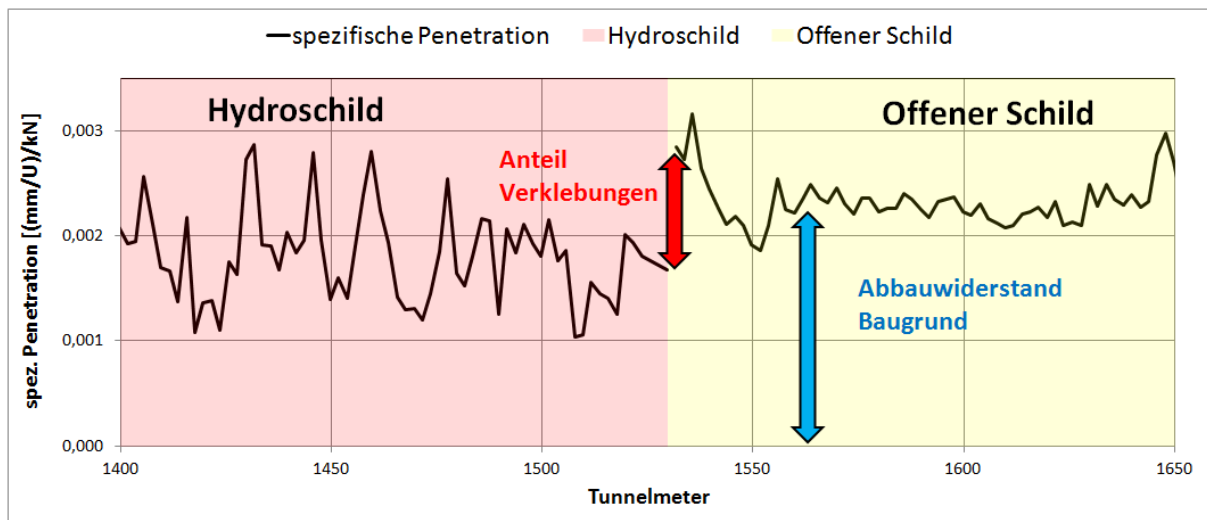


Abbildung 7.39: Verklebungsanteil der spezifischen Penetration

Analysen der abbauspezifischen Betriebsdaten von Projekt C wurden bereits in Kapitel 7.3.2 durchgeführt. Dabei konnte auch der Einfluss von Verklebungen auf die Datensätze aufgezeigt werden. Bei der Datenaufbereitung von Projekt C wurde allerdings offensichtlich, dass die Messung des Stützdrucks und der Schneiradanpresskraft bereichsweise fehlerhaft waren. Die Stützdruckmessung war durch Ausfälle einzelner Druckmessdosens infolge von Verklebungen und durch bei Wartungsarbeiten vertauschter Anschlüsse beeinträchtigt. Die Rohdaten der Schneiradanpresskraft wiesen einen Datenfehler von 3500 kN auf. Im Hinblick auf die Korrektur dieser zur Generierung der Schneiradkontaktkraft notwendigen Rohdaten wird auf den Anhang verwiesen (Anhang 1).

7.3.2.8. Fazit

Betriebsdatenanalysen der Interaktion Baugrund – Maschine erfordern die Isolierung der abbauspezifischen Datenanteile. Dabei hat sich gezeigt, dass vor allem die Stützkraft, die aus dem auf den Schneiradantrieb wirkenden Stützdruck resultiert berücksichtigt werden muss. Weitere unabhängige Einflüsse sind Reibungskräfte und die Steuerung der TVM (vgl. Kap. 7.3).

An drei Praxisprojekten konnten zahlreiche Auswirkungen von Verklebungen auf die abbauspezifischen Betriebsdaten nachgewiesen und zumindest sehr grob quantifiziert werden. Für die Schneiradkontaktkraft werden beispielhaft Mittelwerte mit und ohne Verklebungen angegeben (Tab. 7.2). Die entsprechenden Werte sind auch aus den Auswertungen der jeweiligen Projekte abschätzbar (vgl. Abb. 7.21, 7.36-a und 7.38).

Randbedingungen				mittlere Schneidradkontaktkraft [kN]		
Projekt	Vortrieb	Schneidrad	Baugrund	ohne Verklebungen	mit Verklebungen	Anstieg durch Verklebungen
A	Erddruckschild ohne Stützung Druckluft	Durchmesser 11,16m Öffnungsgrad 25% 164 Schälmesser 64 Rollenmeißel	tertiäre Melettaschichten: überwiegend feste Tone (TL-TA) untergeordnet veränderlich feste Tonsteine (mittlere einaxiale Sandsteine (mittlere einaxiale Druckfestigkeit 2 Mpa)	1500 (<20% Verklebungsgrad Schneidrad)	3000 (>80% Verklebungsgrad Schneidrad)	100%
B	Hydroschild offener Schild	Durchmesser 10,8 m Öffnungsgrad 25% 84 Schälmesser 73 Rollenmeißel	unterer Buntsandstein: Wechselfolge Sandsteine (mittlere einaxiale Druckfestigkeit 70 Mpa) halbfeste bis feste Tone (TL-TA)	4800	6700	40%
C	Hydroschild	Durchmesser 13m Öffnungsgrad 30% 268 Schälmesser 64 Ripper	quartäre Sedimente 30% dicht gelagerte Kiese 65% dicht gelagerte Sande 5% Tone und Schluffe (TL-TM)	3500	6500	86%

Tabelle 7.2: Einflüsse von Verklebungen auf die Schneidradkontaktkraft unterschiedlicher Projekte

Obwohl der Einfluss der Verklebungen durch die Anstiege der Schneidradkontaktkraft nachgewiesen werden kann, sind Vergleiche der Projekte untereinander nicht sinnvoll. Die Randbedingungen, insbesondere in Bezug auf die Schneidräder (Durchmesser, Öffnungsgrad, Werkzeugbesatz), sind zu unterschiedlich. Dabei ist die höhere Schneidradkontaktkraft (ohne Verklebungen) von 3500 kN in dicht gelagerten Lockergesteinen gegenüber 1500 kN in Wechselfolgen im Boden-Fels-Grenzbereich zumindest überraschend. Dieser ist nicht nur im unterschiedlichen Schneidraddurchmesser begründet, was durch eine Normierung der Schneidradkontaktkraft m^2 Schneidradfläche offensichtlich wird (Projekt A: 136 kN/m^2 ; Projekt C: 269 kN/m^2). Dabei dürfte der Besatz mit Rippern bei Projekt C eine weitere Rolle spielen. Analysen im Hinblick auf Verklebungen sollten auf eng begrenzte und gut dokumentierte Bereiche eines Projekts beschränkt bleiben.

Die Datenanalyse wird noch dadurch erschwert, dass unterschiedliche Einflüsse tendenziell ähnliche Datenänderungen generieren. Beispielsweise führen folgende Wechsel der Randbedingungen bei einem Schildvortrieb im Kies zu einem Anstieg der Schneidradkontaktkraft:

- Erhöhung der Lagerungsdichte
- Einlagerungen von Steinen und Blöcken
- Partielle Verkittungen des Gefüges
- Einlagerungen von Lehmlagen (Verklebungsscheibe)
- Verschleiß der Werkzeuge

Die Aussagekraft von Betriebsdatenanalysen steigt daher mit der Qualität der Dokumentation während des Vortriebs. Dabei sind sowohl Informationen im Hinblick auf die tatsächlich angetroffenen Baugrundverhältnisse, den Werkzeugverschleiß als auch Erschwernisse durch Verklebungen sinnvoll. Ohne entsprechende Erkenntnisse steigt das Risiko von Fehlinterpretationen. Trotz sehr umfangreicher ingenieurgeologischer Dokumentationen der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Praxisprojekte konnten einzelne Betriebsdatenänderungen überhaupt nicht erklärt werden.

8. Empfehlungen für die Praxis

Auf Basis der Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel sind hier Empfehlungen für die Praxis zusammengestellt, zunächst zur Bewertung der Verklebungsanfälligkeit in Baugrundgutachten, anschließend im Hinblick auf Betriebsdatenanalysen.

8.1. Empfehlungen für Baugrundgutachten

Die Neigung des Baugrunds zur Ausbildung von Verklebungen und zur Freisetzung von Feinkorn führt zu zahlreichen Erschwernissen bei Schildvortrieben (Vgl. Kap. 6). Dementsprechend muss der Baugrund hinsichtlich dieser Erschwernisse im Vorfeld eines Schildvortriebs bewertet werden. Die Erkundung und die daraus folgenden Bewertungen dieser Risiken sind Teil des Baugrundgutachtens. Auf Basis der dort angegebenen Baugrundeigenschaften und –bewertungen werden unter anderem Entscheidungen hinsichtlich des Vortriebsverfahrens getroffen. Wenn im Baugrundgutachten keine Hinweise auf entsprechende Erschwernisse vorkommen, können diese durch die Bieter im Rahmen der Angebotsphase auch nicht berücksichtigt werden. Baugrundgutachten, die Verklebungen pauschal prognostizieren und nicht mit relevanten Baugrundeigenschaften belegen, ermöglichen hingegen wenig vergleichbare Angebote unterschiedlicher Bieter.

Im Folgenden werden, auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit, relevante Angaben und Bewertungen für Baugrundgutachten empfohlen. Die Angaben beziehen sich dabei ausschließlich auf die Neigung des Baugrunds zur Ausbildung von Verklebungen und zur Freisetzung von Feinkorn.

Die zur Bewertung der Verklebungsneigung von Lockergesteinen wichtigsten Kennwerte sind in der Regel Standard der meisten Baugrundgutachten (Abb. 8.1). Um das Adäsionsverhalten besser bewerten zu können, sind auch Tonmineralanalysen sinnvoll.

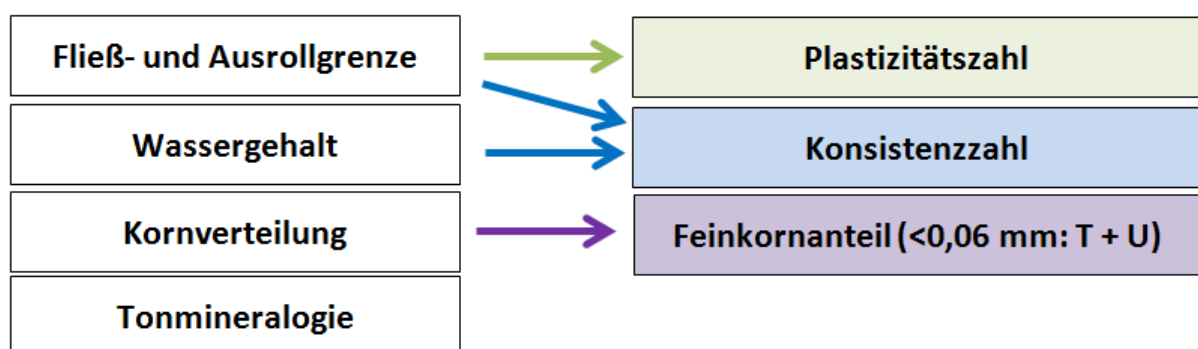


Abbildung 8.1: Empfohlene Untersuchungen zur Bewertung der Verklebungsneigung von Lockergesteinen

Dabei wird insbesondere empfohlen, bindige Böden auf Basis der Atterberggrenzen mittels Plastizitätsdiagramm bautechnisch einzustufen [35]. Beispielsweise sollte ein mittelplastischer Ton nach DIN 18196 eindeutig der Gruppe TM zugeordnet werden, auch wenn bei der Kornverteilung der Schluffanteil dominiert oder der Ton aus regionalgeologischen Aspekten

als Tonstein bezeichnet wird. Dabei ist eine statistisch belastbare Anzahl der Bodenkennwerte erforderlich, um mögliche Bandbreiten zu berücksichtigen.

Auf Basis der Bodenkennwerte wird eine Bewertung entsprechend des Diagramms von Thewes (Abb. 4.1-a) empfohlen. Dabei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das Diagramm von Thewes ausschließlich zur Bewertung von flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben geeignet ist und auch dabei nur für den natürlich anstehenden Boden gilt. Um die Randbedingungen unterschiedlicher Vortriebsverfahren bewerten zu können, wird die Beurteilung entsprechend des allgemeinen Bewertungsdiagramms (Abb. 8.2) empfohlen.

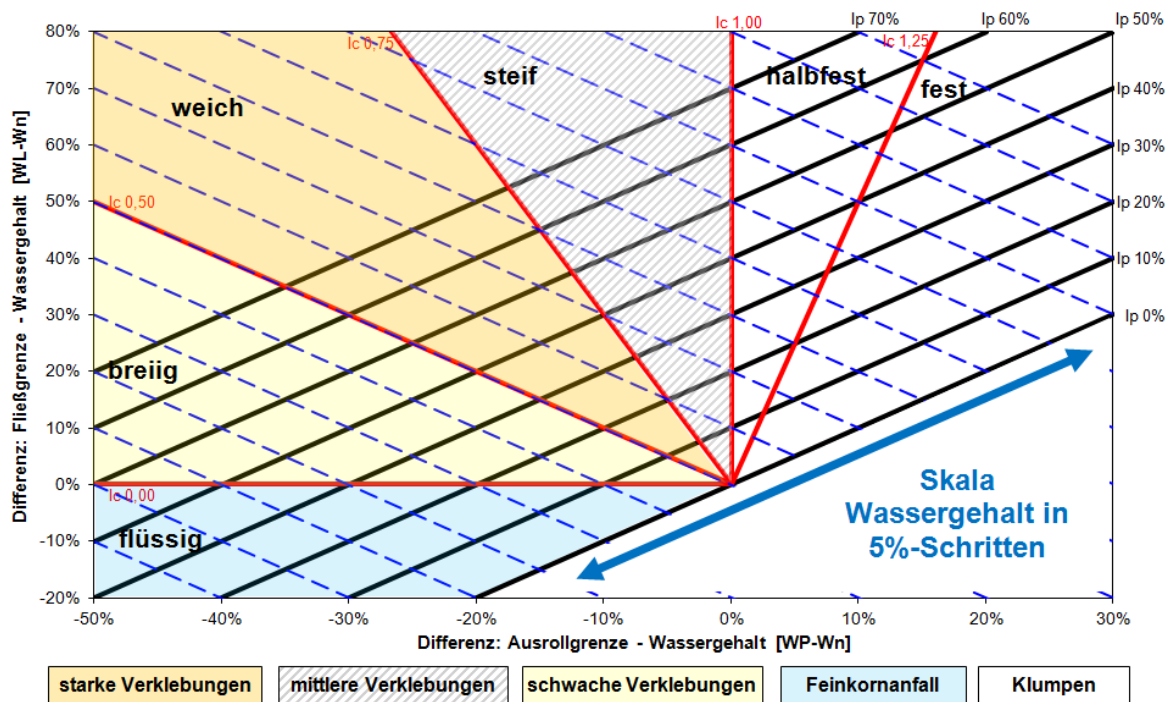


Abbildung 8.2: Bewertungsdiagramm zur Bewertung der Neigung von Böden zur Ausbildung von Verklebungen und zur Feinkornfreisetzung

Das Diagramm erlaubt einerseits Bewertungen der Böden im natürlichen Zustand und zeigt andererseits auf, welche Wassergehaltsänderungen zu kritischen Konsistenzumwandlungen führen. Die Anwendung des Diagramms wird in Kapitel 4 dargelegt und in Kapitel 6 mit Praxisbeispielen belegt. Stattdessen wird für Fels das nachfolgende Untersuchungsverfahren vorgeschlagen.

Die bodenmechanischen Kennwerte aus Abbildung 8.1 können an Festgesteinen nicht entsprechend der jeweiligen Normen ermittelt werden. Von einer von der Norm abweichenden Bestimmung der Bodenkennwerte an Felsproben (etwa nach vorheriger mechanischer Zerkleinerung) wird abgeraten. Die Übertragbarkeit des allgemeinen Bewertungsdiagramms auf solche Kennwerte ist nicht belegt.

Der in Kapitel 5 vorgeschlagene modifizierte Siebtrommelversuch ermöglicht die Bestimmung der Zerfallsneigung (also eine Einstufung als dauerhaft oder veränderlich festes Gestein) und die Ermittlung von Zustandsgrenzen und Feinkornanteil an den Zerfallsprodukten (Abb. 8.3). Somit werden die bodenmechanischen Kennwerte des potenziell zerfallenden, also kritischen, Anteils der Festgesteinsproben ermittelt.

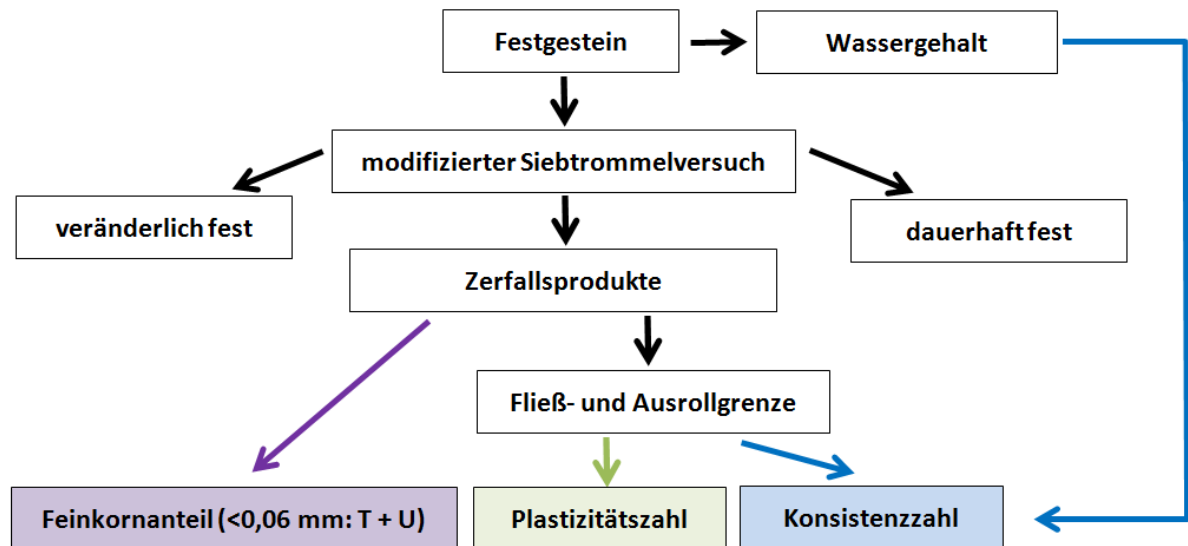


Abbildung 8.3: Bestimmung der Bodenkennwerte der Zerfallsprodukte des modifizierten Siebtrommelversuchs zur Bewertung der Verklebungsneigung von veränderlich festen Festgesteinen

Die Zerfallsprodukte können somit hinsichtlich der Verklebungsneigung analog zum Lockergestein nach Abbildung 8.2 bewertet werden. Zur besseren Beurteilung der Verklebungsneigung von Fels werden die Durchführung des modifizierten Siebtrommelversuchs und eine darauf basierende Auswertung im allgemeinen Bewertungsdiagramm empfohlen.

Um potenzielle Konsistenzänderungen des Bodens und/oder einen möglichen Zerfall von Fels abschätzen zu können, muss das Baugrundgutachten belastbare Prognosen der Bergwasserzutritte enthalten.

Die graphische Darstellung der geologischen Verhältnisse in Baugrundgutachten erfolgt in Form ingenieurgeologischer Längsschnitte, in denen der Verlauf von Tunnelfirste und –sohle dargestellt ist. Diese beinhalten unter anderem die Schichtverläufe einzelner Boden- bzw. Felsarten. Vor allem im Hinblick auf Schildvortriebe von Interesse ist aber nicht nur die Lage einer Bodenschicht in Bezug auf das Tunnelprofil, sondern auch der Ortsbrustanteil. Anhand der Kornverteilungskurven und der Ortsbrustanteile kann außerdem der auf die gesamte Ortsbrust bezogene mittlere Anteil der Kornfraktionen angegeben werden (vgl. dazu Abb. 6.65 bis 6.67). Dementsprechend werden folgende Längsschnitte für Baugrundgutachten von Schildvortrieben empfohlen:

- Geologischer Längsschnitt (Firste/Sohle, Schichtverlauf, Überlagerung, GW-Stand)
- Längsschnitt Ortsbrustanteile Boden- und Felsarten
- Längsschnitt mittlere Kornverteilung der Ortsbrust

Um den Bietern eigene Bewertungen der Bodenkennwerte in Abbildung 8.1 oder 8.3 zu ermöglichen, müssen diese in den Baugrundgutachten auch in auswertbarer Form aufgeführt sein. Dabei sollten die Bandbreite der Kennwerte, der darin dominierende Wertebereich und insbesondere die Lage in Bezug auf den Tunnelquerschnitt und die Stationierung deutlich erkennbar dargestellt sein. Die alleinige Aufführung der Kennwerte in verschiedenen tabellarischen Anlagen ermöglicht keine tiefgreifende Bewertung im Rahmen der Angebotsphase.

8.2. Empfehlungen im Hinblick auf Betriebsdaten

Die in der Regel bei Betriebsdatenanalysen der Interaktion Baugrund – Maschine verwendete Datensätze enthalten zahlreiche von Baugrund und Abbauprozess unabhängige Anteile. Daher wird die Anzeige der abbau- und baugrundspezifischen Anteile der Rohdaten der Datenvisualisierung als zusätzliche Betriebsdaten empfohlen (Tab. 8.1).

Verwendbarkeit zur Analyse der Interaktion Baugrund - Maschine	
Rohdaten der Datenaufzeichnung	abbau- und baugrundspezifische Komponente
Schneidradanpresskraft	Schneidradkontaktkraft
zur direkten Auswertung ungeeignet	zur direkten Auswertung geeignet
zu korrigierende Datenanteile: Stützkraft (sehr hoch), Reibungskäfte (gering) Aussagekraft ohne Korrektur Stützkraft sehr gering Verwendung bei bestimmten Ausnahmen möglich (Vortrieb bei gleichbleibender Druckstufe oder drucklos)	Datenanteil resultiert aus dem Abbauprozess Einflüsse aus Abbauwiderstand des Baugrunds und Schneidradzustand (Verklebungsgrad und Verschleiß)
Gesamtvortriebskraft	Mantelreibungskraft
zur direkten Auswertung ungeeignet	zur direkten Auswertung bedingt geeignet
zu korrigierende Datenanteile: Stützkraft (sehr hoch), Reibungskäfte (gering), Schleppkraft (gering), Schneidradkontaktkraft (gering) Aussagekraft ohne Korrektur Stützkraft sehr gering, außerdem Überlagerung vieler Effekte	Datenanteil resultiert nicht aus dem Abbauprozess, sondern aus der Reibung am Schild Einflüsse aus Abbauwiderstand des Baugrunds und Schneidradzustand nicht ableitbar viele Annahmen (Fehlerquellen) bei der Datenaufbereitung
Schneidraddrehmoment	effektives Schneidraddrehmoment
zur direkten Auswertung bedingt geeignet	zur direkten Auswertung geeignet
zu korrigierende Datenanteile: Leerdrehmoment bei Drehung ohne Ortsbrustkontakt Aussagekraft bei Voll- oder Teilfüllungen mit Erdbrei bzw. Ausbruchsmaterial zumindest beeinträchtigt Verwendung kurzzeitiger Änderungen im gleichen Vortriebsmodus möglich	Datenanteil resultiert aus dem Abbauprozess Einflüsse aus Abbauwiderstand des Baugrunds und Schneidradzustand (Verklebungsgrad und Verschleiß)
Penetration	spezifische Penetration
zur direkten Auswertung ungeeignet	zur direkten Auswertung geeignet
wird als vorgegebener Zielwert durch die aktive Steuerung angestrebt	Datenanteil resultiert aus dem Abbauprozess Einflüsse aus Abbauwiderstand des Baugrunds und Schneidradzustand (Verklebungsgrad und Verschleiß)

Tabelle 8.1: Betriebsdaten mit jeweiligen abbau- und baugrundspezifischen Datenanteilen

Auch wenn die abbauspezifischen Betriebsdaten zur Verfügung stehen, wird die Datenanalyse noch dadurch erschwert, dass unterschiedliche Einflüsse tendenziell ähnliche Datenänderungen generieren. Wie in Kapitel 7.3 beschrieben, führen sowohl Wechsel des Abbauwiderstands als auch der Abbaueffektivität des Schneidrads zu Änderungen der abbauspezifi-

schen Betriebsdaten. Es wird daher empfohlen, Betriebsdatenanalysen immer kombiniert mit folgenden Dokumentationen durchzuführen:

- tatsächlich angetroffene Baugrundverhältnisse
- Werkzeugverschleiß
- Erschwernisse durch Verklebungen (idealerweise Verklebungsgrad Separation oder Anteil Verklebungsmaterial auf Grobsieben (vgl. Kap. 6.1.2)

Im Hinblick auf die tatsächlich angetroffenen Baugrundverhältnisse sollte der Schwerpunkt auf dem Abbauwiderstand und den die Effektivität des Schneidrads beeinflussenden Faktoren (Verklebungsneigung und Abrasivität) liegen (vgl. Kap. 7.3.2). Dabei sinkt die Gefahr möglicher Fehlinterpretationen der Betriebsdaten mit zunehmender Dokumentation der abbauspezifischen Einflüsse.

Die Aufbereitung der Betriebsdaten im Hinblick auf die abbauspezifischen Anteile ist in Bezug auf einzelne Einflüsse im Nachgang eines Vortriebs oft kaum mehr möglich (vgl. Kap. 7.3.1). Das betrifft vor allem erforderliche eDatenanteil, die nur unter bestimmten Vortriebsbedingungen ermittelt werden können. Es wird daher empfohlen diese bereits vorab zu bestimmen:

- Leerdrehmoment (Drehen Schneidrad ohne Ortsbrustkontakt)
- Reibungskräfte Schneidradverschiebung (Vor- und Zurückschieben Schneidrad)
- Reibungskräfte Vortriebspresen (Vor- und Zurückschieben Vortriebspresen)

Dabei wird eine gegenüber der 10-sekündigen Datenmessung erhöhte Aufzeichnungsfrequenz empfohlen.

Während des Vortriebs sind weitere Bestimmungen des Schneidraddrehmoments ohne Ortsbrustkontakt sinnvoll. So sollte das Leerdrehmoment in Erdbrei oder bei Teilfüllung ermittelt werden, da der Einfluss des Abbauprozesses auf das Schneidraddrehmoment durch das Ausbruchsmaterial in der Abbaukammer überlagert wird (Reibung an Schneidrad).

Um Messfehler bei der Datenaufzeichnung zu vermeiden, werden Kalibrierungen und Überprüfungen der Sensoren empfohlen. Aufgrund des teilweise hohen Aufwands und der bereichsweise schweren Zugänglichkeit (z.B. Sensoren in der Abbaukammer), dürften diese nur sehr unregelmäßig umsetzbar sein. Entsprechende Überprüfungen werden vor allem dann empfohlen, wenn Betriebsdaten ungewöhnliche Werte aufweisen (vgl. beispielsweise Anhang 1: Stützkraft auf Schneidradantrieb > Schneidradanpresskraft).

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit werden neue Ansätze zur Bewertung der Neigung des Baugrunds zur Ausbildung von Verklebungen und zur erhöhten Freisetzung von Feinkorn aufgezeigt. Basierend auf einer umfangreichen Beschreibung der publizierten Grundlagen zu beiden Erschwernissen, wird der weitere Forschungsbedarf zum Themenkomplex „Verklebungen und Feinkornfreisetzung“ abgeleitet.

Auf Basis der Zustandsgrenzen und des Wassergehalts wird ein allgemeines Bewertungsdiagramm vorgeschlagen. Es erlaubt über bisherige Methoden hinausgehende Abschätzungen. Dabei können Wassergehaltsänderungen und die dadurch ausgelösten Verschiebungen der Konsistenz bewertet werden. Dementsprechend sind Aussagen möglich, ob ein Boden bei einer vorgegebenen Wassergehaltsänderung eher die Konsistenz von Verklebungsmaterial erreicht oder eher Feinkorn mit flüssiger Konsistenz freisetzt. Dementsprechend sind zu erwartende Maßnahmen (Separations- oder Reinigungsaufwand) besser planbar. Mit Hilfe des Diagramms können somit unterschiedliche hydrogeologische und baubetriebliche Randbedingungen (Bergwasser, Stützflüssigkeit) bewertet werden. Schildtypen mit unterschiedlicher Verfügbarkeit an Wasser können in einem Diagramm für den jeweiligen Boden im Hinblick auf mögliche Vor- und Nachteile verglichen werden. Außerdem kann abgeschätzt werden, bei welcher Wassergehaltserhöhung ein Boden eine geeignete Erdbreikonsistenz erreicht. Somit ist der Konditionierungsaufwand mit Wasser bewertbar. Die Aussagekraft des neuen Bewertungsdiagramms wird mit Anwendungsbeispielen eigener Praxisprojekte belegt. Dabei sind Aussagen zu unterschiedlichen Vortriebsverfahren und zu unterschiedlichen Vortriebsmodi möglich. Im Rahmen weiterer Schildvortriebsprojekte ist die Überprüfung der Aussagekraft des Diagramms möglich und sinnvoll. Dazu können, je nach Schildtyp, Beprobungen der Ortsbrust, des Ausbruchsmaterials, von Verklebungen und von Erdbrei beitragen. Neue Erkenntnisse und eine zunehmende Datendichte könnten beispielsweise zu Verschiebungen der unterschiedlich kritischen Konsistenzbereiche innerhalb des Diagramms führen. Diese basieren auf bisher publizierten und eigenen Erfahrungen. Genauso sind Verschiebungen der im Diagramm dargestellten Grenzen der Erdbreikonsistenz denkbar.

Um auch systematische Bewertungen von Festgesteinen zu ermöglichen, wird eine Modifikation des Siebtrommelversuchs (Slake-Durability-Test) entwickelt. Diese ermöglicht eine zum Lockergestein vergleichbare Bewertung der bei dem Versuch anfallenden Zerfallsprodukte. Trotz einer relativ geringen Datenbasis sind die Versuchsergebnisse aussagekräftig. Es kann vor allem aufgezeigt werden, dass Bewertungen einzelner untersuchter Gesteine auf Basis des bisherigen standardisierten Siebtrommelversuchs zu Fehleinschätzungen geführt hätten. Die Verklebungsneigung einzelner untersuchter Gesteine wäre dann nicht offensichtlich geworden. Im Rahmen zukünftiger Schildvortriebe in feinkörnigen, veränderlich festen Festgesteinen sind Überprüfungen des modifizierten Versuchsablaufs denkbar. Dazu sind entsprechende Probenahmen erforderlich. Die systematischen bodenmechanischen Untersuchungen der Zerfallsprodukte lassen nicht nur Aussagen zur Freisetzung von Feinkorn und zur Verklebungsneigung zu sondern erlauben auch Bewertungen zur Eignung des zerfallenden Gesteins als Erdbrei. Dieser Aspekt wird im Rahmen der Arbeit nicht weiter untersucht. Weitere Forschung in dieser Hinsicht erscheint sinnvoll.

Um Auswirkungen von Verklebungen auf maschinelle Tunnelvortriebe besser bewerten und möglicherweise quantifizieren zu können, sind Betriebsdatenanalysen sinnvoll. Tendenzielle Änderungen bestimmter Betriebsdatensätze aufgrund von Verklebungen können im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen werden. Dazu werden eigene Praxisprojekte mit umfassenden Dokumentationen der Baugrundverhältnisse und der Erschwernisse infolge von Verklebungen ausgewertet. Dabei wird aufgezeigt, dass zahlreiche weitere Einflüsse Änderungen von Betriebsdaten auslösen können und entsprechende Aufbereitungen der Rohdaten erforderlich sind. Bei zukünftigen Schildvortrieben können Betriebsdatenanalysen zu weiteren Erkenntnissen im Hinblick auf Verklebungen führen. Dazu müssen Einflüsse, die zu vergleichbaren Datenänderungen führen können (z.B. Zunahme Abbauwiderstand, Verschleiß) berücksichtigt werden. Entsprechende Dokumentationen auf der Baustelle sind sinnvoll.

10. Literaturverzeichnis

- [1] Alber, M. (1999): Geotechnische Aspekte einer TBM-Vertragsklassifikation. Dissertation TU Berlin, Mensch & Buch Verlag.
- [2] Association Française des Tunnels: New recommendations on choosing mechanised tunnelling techniques. In: Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs). ITA – AITES, pp. 1-118.
- [3] ARGE Katzenberg (2008): Bericht BR-900aS – Baugrund und Baubetrieb (unveröffentlicht).
- [4] ASTM (1987): Standard Test method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks. Designation: D 4644-87 (Reapproved 1998).
- [5] Atkinson, J. H., Fookes, P.G., Miglio, B. F., Pettifer, G. S. (2003): De-structuring and diaggagation of Mercia Mudstone during full-face tunnelling. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 36, pp293-303.
- [6] Azzam, R., Feinendegen, M., Fernández-Steeger, T. M., Spagnoli G., Stanjek, H., Ziegler, M. (2013): InProTunnel – Grenzflächenprozesse zwischen Mineral- und Werkzeugoberflächen – Ursachen, Probleme und Lösungsansätze am Beispiel des maschinellen Tunnelbaus. Schlussbericht zu BMBF Förderkennzeichen 03G0713A im Rahmen des BMBF-Sonderprogramms GEOTECHNOLOGIEN Förderrichtlinie „Mineraloberflächen – Von atomaren Prozessen zur Geotechnik“. RWTH Aachen.
- [7] Baumgärtel, T, Fillibeck, J., Vogt, N. (2012): Zerfall von festen Tonen und Tonsteinen bei hydraulischer und mechanischer Beanspruchung. Geomechanics and Tunnelling 5 (2012), No. 5, pp. 567-573.
- [8] Brenner Eisenbahn GmbH (2005): Geotechnischer Bericht: Ausbau Eisenbahnachse Brenner München –Verona, Teilprojekt Zulaufstrecke Nord, Abschnitt Kundl/Radfeld – Baumkirchen, Tunnel Radfeld/Wiesing Schildbauweise Ausschreibungsprojekt Los H3-4.
- [9] Büchi, E., Thalmann, C. (1995): Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial. Einfluss des Schneidrollenabstands. TBM Know-How zum Projekt NEAT, Atlas Copco-Robbins Symposium, Luzern.
- [10] Budach, C. (2010): Neue Untersuchungen zur Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden, In: 50 Jahre STUVA 1960 -2010: Vergangenheit trifft Zukunft, S. 252-261.
- [11] Budach, C. (2011): Untersuchungen zum erweiterten Einsatz von Erddruckschilden in grobkörnigen Lockergesteinen. Ruhr-Universität Bochum. Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2012-02, Dissertation.

- [12] Bundesanstalt für Straßenwesen (2012): ZTV-ING – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5: Tunnelbau, Abschnitt 3: Maschinelle Schildvortriebsverfahren, Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056.
- [13] Bundesanstalt für Wasserbau (2006): Richtlinien für die Prüfung von mineralischen Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW).
- [14] Burbaum, U. (2009): Adhäsion bindiger Böden an Werkstoffoberflächen von Tunnelvortriebsmaschinen. Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachbereich Material und Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt, Dissertation.
- [15] Burbaum, U., Sass, I., Breuer, B. (2010): Verklebungseigenschaften von veränderlich festen Tonsteinen am Beispiel des Stuttgarter Lias a. Geotechnik 33 (2010) Nr. 2, S. 175-178.
- [16] DAUB (1993): Empfehlungen zur Planung, Ausschreibung und Vergabe von schildgestützten Vortrieben. Tunnel 2/1993, S. 91-96.
- [17] DAUB, ÖGG, FGSV, FGU (1998): Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen. Tunnelbautaschenbuch 1998, S. 257-290.
- [18] DAUB, ÖGG, FGSV, FGU (2000): Recommendations for Selecting and Evaluation Tunnel Boring machines. In: Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs). ITA – AITES, pp. 1-118.
- [19] DAUB (2010): Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen.
- [20] DB (2003): Leitfaden zur Richtlinie 853 – Kommentare und Planungshilfen zu 853.0101 – Begriffe im Tunnelbau.
- [21] Deere, D. U., Gamble, J. C. (1971): Durability-plasticity classification of shales and indurated clay. Proceedings of the 22nd Annual Highway Geology Symposium; Norman, Oklahoma 1971; pp. 37-52.
- [22] Deulofeu, C., Schwarz, H., Maidl, U., Comulada, M. (2007): Data management for highly mechanized shield tunneling in the construction of the Line 9 Metro Barcelona. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises.
- [23] DGGT (2002): Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. Zerfallsbeständigkeit von Gestein. Siebtrommelversuch. Bautechnik 79 (2002) Nr. 2, S. 101-105.
- [24] DIN 4020 (1990): Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke.
- [25] DIN 4020 (2003): Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke.

- [26] DIN 4022-1 (1987): Baugrund und Grundwasser. Benennen und Beschreiben von Boden und Fels
- [27] DIN EN ISO 14688-1 (2003): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung.
- [28] DIN EN ISO 14688-2 (2004): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen.
- [29] DIN EN ISO 14688-1 (2004): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels – Teil 1: Benennung und Beschreibung.
- [30] DIN 18122, Teil 1 (1997): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte – Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen). Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.
- [31] DIN 18122, Teil 2 (2000): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte – Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen). Bestimmung der Schrumpfgrenze.
- [32] DIN 18123 (2011): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- [33] DIN 18129 (2011): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte – Kalkgehaltsbestimmung.
- [34] DIN 18312 (2012): VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Untertagebauarbeiten.
- [35] DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- [36] Drucker, P. (2013): Über die Abrasivität von Lockergesteinen und den Werkzeugverschleiß im Spezialtiefbau. TU Wien, Dissertation.
- [37] Düllmann, J., Hollmann, F. S., Thewes, M., Alber, M. (2013): Analysis of Soil-Machine-Interactions (Part 1): Processing of TBM-Machine Data and Extraction of Excavation-specific Data. Proc. EURO: TUN 2013, 3rd International Conference on Computational Methods in Tunnelling and Subsurface Engineering. Ruhr University Bochum, pp. 621-634.
- [38] Düllmann, J., Hollmann, F. S., Thewes, M., Alber, M. (2013): Measurement and processing of machine data from shield tunneling for analyses of the excavation process. Statusbericht SFB 837, Ruhr-Universität Bochum (unveröffentlicht).
- [39] Düllmann, J., Hollmann, F. S., Thewes, M., Alber, M. (2013): Messung, Aufbereitung und Bereinigung von Maschinendaten von Schildvortrieben

- als Voraussetzung für die Analyse des Abbauprozesses. Statusbericht SFB 837, Ruhr-Universität Bochum (unveröffentlicht).
- [40] Einstein, H. H. (1996): Tunnelling in difficult ground – swelling behaviour and identification of swelling rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 29 (3), pp. 113-124.
- [41] Feinendegen, M., Ziegler, M., Spagnoli, G., Weh, M., Nehrer, H., Fernández-Steeger, T. M., Stanjek, H. (2010): Grenzflächenprozesse zwischen Mineral- und Werkzeuoberflächen – Verklebungsproblematik beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Erddruckschilden. *Geotechnik* 33 (2010) Nr. 2, S. 180-184.
- [42] Feinendegen, M., Ziegler, M., Weh, M., Spagnoli, G. (2011): Verklebungen beim EPB-Vortrieb: Einflüsse, Klassifikation und neue Manipulationsverfahren. *Forschung + Praxis* 44: STUVA-Tagung 2011, S. 234-240.
- [43] Feinendegen, M., Ziegler, M., Spagnoli, G., Weh, M. (2012): Maschineller Tunnelvortrieb in veränderlich festen Gesteinen: Entfestigung und Verklebung. *Mining + Geo* (2012) Nr. 5, S. 784-794.
- [44] Fernández-Steeger, T. M., Feinendegen, M. (2013): Verklebungen in der EPB-Praxis: Auftreten, Einflüsse und Quantifizierung. 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, München, 2013, S. 43-48.
- [45] Feißt, A (2013): E-Mail von Albert Feißt (Leiter der Abteilung Hydraulik bei der Herrenknecht AG) vom 18.06.13: „Steuerung Vortrieb TBM“ (unveröff.
- [46] Festa, D., Broere, W., Bosch, J. W. (2012): An investigation into the forces acting on a TBM during driving – Mining the TBM logged data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 32, pp. 143-157.
- [47] FGSV 532 (1980): Merkblatt über Felsgruppenbeschreibung für bautechnische Zwecke im Straßenbau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln.
- [48] Franklin, J. A., Chandra, R. (1972): The slake-durability test. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, Vol. 9, pp. 325-341.
- [49] Gehring, K. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. *Felsbau* 13, S. 439-448.
- [50] Gwildis, U., Sass, I. (2008): Maschineller Tunnelbau in wechselhafter glazialer Geologie – ein Ansatz probabilistischer Baugrundbeschreibung und baubegleitender Überprüfung. *Geotechnik* 31 (2008) Nr. 4, S. 301-307.

- [51] Handke, D., Matt, R. Wilfinger, N. (2011): Maschinen- und verfahrenstechnische Charakterisierung des Gebirges unter dem Einfluss des Interaktionsverhaltens Maschine-Baugrund. Tunnel 6/2011, S. 12-23.
- [52] Haid, H-G., Maidl, U. (2007): Prozess Controlling zur Klärung der Risikosphäre bei den Vortrieben des Katzenbergtunnels. Felsbau 25 (2007). S. 2-10.
- [53] Heitfeld, K. H. (1985): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen.- Springer Verlag, Heidelberg, S.695.
- [54] Herrenknecht AG (2008): Bahnbrechende Vortriebstechnik für unterirdische Verkehrssysteme, Schwanau, 2008.
- [55] Hollmann, F. S., Flicke, J. (2007): Berücksichtigung der Geologie bei der Planung der Bangkok MRT U-Bahn-Linie Blue Line South als EPB-Vortrieb. 16. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum „Junge Ingenieurgeologen“, Bochum, 2007, S. 423-431.
- [56] Hollmann, F. S. (2007): Verklebungsproblematik im Bereich des Katzenbergtunnels und darauf aufbauendes Konzept eines einfachen Index-Versuchs zur Vorhersage der Verklebungsanfälligkeit von Tonen und Tonsteinen beim Einsatz von Tunnelvortriebsmaschinen (unveröffentlichtes Dissertationskonzept).
- [57] Hollmann, F. S., Weh, M. (2009): Harnischtone und Tonsteine in Molassegesteinen – Deutung als Paläoboden und Auswirkungen auf die Praxis am Beispiel konventioneller und maschineller Tunnelvortriebe. Geotechnik 32 (2009) Nr. 4, S. 234-241.
- [58] Hollmann, F. S., Weh, M., Scholz, M., Düllmann, J., Hahn, C., Boll, S., Wendl, K. (2009): Möglichkeiten und Grenzen der geologischen Dokumentation bei Schildvortrieben anhand von Praxisbeispielen in Form von Erddruck-, Hydro- und offenen Schildvortrieben. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Heft 63, S. 115.
- [59] Hollmann, F. S. (2009): Geotechnischer Bericht zum TVM-Vortrieb ARGE H3-4 (unveröffentlicht).
- [60] Hollmann, F. S. (2010): Geotechnischer Bericht zum Nachtrag Verklebungen – ARGE Finnetunnel (unveröffentlicht).
- [61] Hollmann, F. S., Thewes, M. (2011): Bewertung der Neigung zur Ausbildung von Verklebungen und zum Anfall von gelöstem Feinkorn bei Schildvortrieben im Lockergestein. 18. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum für junge Ingenieurgeologen, Berlin, 2011, S. 237-244.
- [62] Hollmann, F. S., Thewes, M. (2011): Bewertung der Neigung zur Ausbildung von Verklebungen und zum Anfall von gelöstem Feinkorn bei Schildvortrieben im Festgestein. 18. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum für junge Ingenieurgeologen, Berlin, 2011, S. 245-250.

- [63] Hollmann, F. S., Thewes, M. (2012): Bewertung der Neigung zur Verklebungsbildung und zur Feinkornfreisetzung bei Schildvortrieben. *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 5, No. 5, S. 574-580.
- [64] Hollmann, F. S., Thewes, M. (2013): Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised Tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 37, pp. 96-106.
- [65] Hollmann, F. S., Weiz, M., Thewes, M., Alber, M. (2013): Analyse des Siebdurchgangs und – rückstands beim Siebtrommelversuch im Hinblick auf maschinelle Tunnelvortriebe. 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, München, 2013, S. 49-54.
- [66] Hollmann, F. S., Düllmann, J., Thewes, M., Alber, M. (2013): Analysis of Soil-Machine-Interactions (Part 2): Influences on the Excavation-specific Data of TBM-Machine Data. *Proc. EURO: TUN 2013, 3rd International Conference on Computational Methods in Tunnelling and Subsurface Engineering*. Ruhr University Bochum, pp. 635-646.
- [67] Hollmann, F. S., Thewes, M., Weh, M. (2014): Einflüsse von Verklebungen auf die Materialförderung von Schildvortrieben. *Tunnel 2/2014*, (Publikation angenommen).
- [68] Ilici, N., Temel, M., Sezgin, S., Akpınar, T., Guarasio, S., Polat, C., Bilgin, N. (2013): Clogging and squeezing of marl-clayey limestone on the performance of a hard rock TBM in Suruc Tunnel, Turkey. *World Tunnel Congress 2013 Geneva*, pp. 2108-2114.
- [69] ISRM (1981): Suggested Methods for Determining Water content, Porosity, density, Absorption and Related properties and swelling and Slake-Durability Index Properties.
- [70] Italian Tunnelling Association (2000): Guidelines for the selection of TBMs. In: *Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*. ITA – AITES, pp. 1-118.
- [71] ITA Working Group 14 - Japanese and Norwegian Working Group (2000): Guidelines for Selecting TBMs for Soft Ground. In: *Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*. ITA – AITES, pp. 1-118.
- [72] ITA Working Group 14 Mechanised Tunnelling (2000): *Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*. ITA – AITES, pp. 1-118.
- [73] Jancsecz S. (1991) Definition geotechnischer Parameter für den Einsatz von Schildvortriebsmaschinen mit suspensionsgestützter Ortsbrust. *Forschung + Praxis 34: STUVA-Tagung 1991, Düsseldorf*, S. 34-40.
- [74] Jasmund, K., Lagaly, G. (1993): *Tonminerale und Tone*. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 490 S.

- [75] Jung, H-S., Choi, J-M., Chun, B-S., Park, J-S., Lee, Y-J. (2011): Causes of reduction in shield TBM performance – A case study in Seoul. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26 (2011), pp. 453-461.
- [76] Köhler, M., Maidl, U., Martak, L. (2011): Abrasivität und Werkzeugverschleiß beim Schildvortrieb im Lockergestein. *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 4, No. 1, S. 36-53.
- [77] Kündig, R., Mumenthaler, T., Eckhardt, P., Keusen, H. R., Schindler, C., Hofmann, F., Vogler, R., Guntli, P. (1997): Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweizerische Geotechnische Kommission. Zürich, S. 522.
- [78] Langmaack, L. (2000): *Advanced Technology of Soil Conditioning*. North American Tunnelling Congress. Boston 2000. Balkema, Rotterdam, pp. 525-536.
- [79] Leshchinski, D., Richter, S. D., Fowler, J. (1992): Clay Lumps under Simulated Hydraulic Transport Conditions. *Geotechnical Testing Journal* 15 (1992), No. 4, pp. 393-398.
- [80] Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L. (1995): *Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 471 S.
- [81] Maidl, U., Nellessen, P. (2003): Zukünftige Anforderungen an die Datenaufnahme und –auswertung bei Schildvortrieben. *Bauingenieur*, Band 78, S. 150-162.
- [82] Maidl, B. (2004): *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 2: Grundlagen und Zusatzleistungen für Planung und Ausführung*. 3. Auflage. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 356 S.
- [83] Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G. (2011): *Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 492 S.
- [84] Maidl, U., Köhler, M., Schretter, K. (2011): Umsetzung der Beobachtungsmethode beim TVM-Vortrieb – Projektlose H3-4 und H8 im Unterrinntal.
- [85] Van Marcke, P., Laenen, B. (2005): The Ypresian clays as possible host rocks for radioactive waste disposal: an evaluation. ONDRAF/NIRAS, Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials, ><http://www.niras-avalplan.be/niew/downloads/NIROND-TR-2005-01.pdf>>.
- [86] Meyerhof, G. G. (1956): Penetration tests an bearing capacity of cohesionless soils. *Journal of the soil mechanics and foundation division*. ASCE, Vol 82, No. SM1, pp. 1-19.
- [87] Nickmann, M. (2009): Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten. *Münchner Geowis-*

- senschaftliche Abhandlungen 12. Reihe B, Ingenieurgeologie Hydrogeologie Geothermie, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, Dissertation.
- [88] ÖNORM B 2203-2 (2005): Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb.
- [89] ÖNORM B 4402 (2003): Erd- und Grundbau – Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke.
- [90] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2008): Richtlinie Schildvortrieb.
- [91] Pimentel, E. (2003): Swelling behavior of sedimentary rocks under consideration of micromechanical aspects and its consequences on structure design. Proc. Geotechnical Measurements and Modelling. Swets & Zeitlinger, Karlsruhe, pp. 367-374.
- [92] Placzek, D., Bretz, H. (2000): Erschwernisse beim maschinellen Tunnelbau im Schildvortrieb infolge Tonsteinzerfalls. Taschenbuch für den Tunnelbau 2000. S. 21-44.
- [93] Plinninger, R. J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirglöseverfahren im Festgestein. Münchner Geologische Hefte. Reihe B, 17 Angewandte Geologie, Hieronymus-Verlag, München, Dissertation.
- [94] Prinz, H.: Strauß, R. (2011): Ingenieurgeologie. 5. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 738 S.
- [95] Quick, H., Michael, J., Döllmann, O., Gönner, J. (2005): Trennflächen in Lockergesteinen – Genese und bautechnische Auswirkungen. Felsbau 23, S. 67-74.
- [96] Richardson, D. N. (1985): Relative durability of shale – a suggested rating system. Proceedings of the 36th Annual Highway Geology Symposium; Clarksville, Indiana 1985; pp. 105-138.
- [97] Rutschmann, W. (1974): Mechanischer Tunnelvortrieb im Festgestein. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [98] Sager, H.-J., Maidl, U. (2000): Innovative Methoden zur Begegnung der Verklebungsproblematik bei Flüssigkeitsschilden der Tunnel unter der Westerschelde. Forschung + Praxis 38: STUVA-Tagung 2000, Köln, S. 68-72.
- [99] Schlick, G. (1989): Adhäsion im Boden-Werkzeug-System. Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb, Universität Karlsruhe, Heft F39, Dissertation.
- [100] Schretter, K. Maidl, U., Wingmann, J., Labda, T. (2009): Prozesscontrolling bei den Hydroschildvortrieben (H3-4 und H8). Geomechanics and Tunneling, Vol. 2, No. 6, S. 709-720.

- [101] SIA 118/198 (2007): Allgemeine Bedingungen für Untertagebau – Allgemeine Vertragsbedingungen zur Norm SIA 198 Untertagebau – Ausführung.
- [102] SIA 198 (2004): Untertagebau – Ausführung.
- [103] Spagnoli, G. (2011): Electro-chemo-mechanical manipulations of clays regarding the clogging during EPB-tunnel driving. Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, Dissertation.
- [104] Stahl, F. Babendererde, L. (2009): Bauüberwachung und Qualitätssicherung eines Projektes mit mehreren TBM-Vortrieben. Tunnel 3/2009, S. 2-9.
- [105] Stein, D. (2003): Grabenloser Leitungsbau. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1144 S.
- [106] Suquet, L. (2007): Métro de Saint-Petersbourg Réhabilitation du tronçon entre les stations Lesnaya et Mujestva. Tunnels et Ouvrages Souterrains, No. 202, pp.269-276.
- [107] Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967): Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley, New York.
- [108] Thewes, M. (1999): Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Berichte aus Bodenmechanik und Grundbau der Bergischen Universität Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bd. 21. Aachen: Shaker Verlag, Dissertation.
- [109] Thewes, M. (2003): Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Geotechnik 26 (2003) Nr.4, S. 253-261.
- [110] Thewes, M., Burger, W. (2004): Clogging risks for TBM drives in clay. Tunnels & Tunnelling International, pp. 28-31.
- [111] Thewes, M. (2005): Verklebungen beim Schildvortrieb. Taschenbuch für den Tunnelbau 2005. S. 89-116.
- [112] Thewes, M. (2007): Mechanized Urban Tunnelling – Machine Technology. The 3rd Training course Tunnelling in Urban Area, ITA WTC 2007 Prague.
- [113] Thewes, M., Budach, C. (2010): Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden. Geomechanics and Tunnelling, Vol. 3, No. 3, S. 256-267.
- [114] Thewes, M., Hollmann, F. S. (2013): Vortrieb mit Hydro- und EPB-Schilden in Tonformationen – Beurteilung von Verklebungsneigung und Feinkornanfall. Brenner Congress 2013, S. 95-103.
- [115] Thewes, M (2013): Tunnelbau im Schildvortrieb – Verfahrenstechniken und Planungsgrundlagen. Betonkalender 2014, Band 1, S. 121-169.

- [116] Thewes, M., Hollmann, F. S. (2014): Clogging and disintegration of fines during mechanised tunneling in clayey soils. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz Iguacu. Brazil, (Publikation angenommen).
- [117] Ward, D., Robinson, R., Aderson, M. (2013): Characterizing Seattle's Soils. North American Tunnelling Journal, Oct/Nov 2013, pp. 8-14.
- [118] Weber, W. (1995): Auffahren unterschiedlicher Streckenabschnitte durch Hinterschneidetechnik – Die Entwicklung einer neuartigen Tunnelvortriebsmaschine. Tunnels & Tunnelling BAUMA Special Issue, S. 74-80.
- [119] Weh, M., Zwick, O., Ziegler, M. (2009): Maschinenvortrieb in verklebungsanfälligem Baugrund, Teil 1. Tunnel 1/2009, S. 25-36.
- [120] Weh, M., Ziegler, M., Zwick, O. (2009): Verklebungen bei EPB-Vortrieben in wechselndem Baugrund: Eintrittsbedingungen und Gegenmaßnahmen. Forschung + Praxis 43: STUVA-Tagung 2009, S. 185-189.
- [121] Weh, M., Zwick, O., Ziegler, M. (2009): Maschinenvortrieb in verklebungsanfälligem Baugrund, Teil 2. Tunnel 2/2009, S. 18-28.
- [122] Weiz, M. (2013): Erweiterung des Siebtrommelversuches im Hinblick auf die Prognose von Verklebungen und Feinkornanfall bei maschinellen Schildvortrieben im Tunnelbau (unveröffentlichte Masterarbeit).
- [123] Wendl, K. (2012): Ingenieurgeologische Vortriebsdokumentation und Auswertung von Hydroschilden. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen 18. Reihe B, Ingenieurgeologie Hydrogeologie Geothermie, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, Dissertation.
- [124] Wendl, K., Scholz, M., Thuro, K. (2012): Charakterisierung der ingenieurgeologischen Vortriebsdokumentation von Hydroschildvortrieben am Beispiel der Baulose H3-4 und H8 im Unterinntal. Geotechnik 35 (2012) Nr. 3, S. 168-176.
- [125] Witt, K. J. (2008): Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen. 7. Auflage. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 814 S.
- [126] Wittke-Schmitt, B., Schmitt, D. (2011): Untersuchungen zur Verbreitbarkeit von Fels. Taschenbuch für den Tunnelbau 2011. S. 395-412.
- [127] Zumsteg, R. (2012): Optimization of clay-polymer mixtures for soil conditioning. ETH Zürich, Dissertation.

11. Anlagen

Anlage 1: Betriebsdatenkorrekturen bei Projekt C

Im Rahmen der Analyse des Projekts C werden Datenfehler bei der Generierung der abbauspezifischen Betriebsdaten offensichtlich. Dabei ist vor allem die Aufzeichnung des Stützdrucks und der Schneiradanpresskraft betroffen. Im Rahmen dieser Anlage wird der Umfang dieser Datenfehler aufgezeigt und eine entsprechende Korrektur durchgeführt. Alle im Rahmen der Betriebsdatenanalyse des Projekts C verwendeten Rohdaten von Stützdruck und Schneiradanpresskraft sind, wie in dieser Anlage beschrieben, entsprechend aufbereitet. Die Analyse des Datenfehlers, die Suche nach möglichen Ursachen sowie insbesondere der nachfolgend vorgestellte Korrekturansatz wurden in enger Abstimmung mit dem Maschinenhersteller, der Herrenknecht AG, durchgeführt.

Korrektur des aufgezeichneten Stützdrucks

Die Ableitung der abbauspezifischen Schneiradkontaktkraft aus den Rohdaten der Schneiradanpresskraft der Betriebsdatenaufzeichnung erfordert die Berücksichtigung der aufgrund des Stützdrucks auf den Schneiradantrieb wirkenden Kraftresultierenden (vgl. Kap. 7.3.1.1). Dazu muss der Stützdruck in der Mitte des Schneiradantriebs, als genau auf Tunnelachse bekannt sein.

Der Stützdruck wird in dem betreffenden Projekt kontinuierlich mittels vier Druckmessdosen in der Abbaukammer gemessen. Davon sind jeweils zwei Dosen im First- und im Achsbereich mit einer Höhendifferenz von 6,1 m angeordnet (Abb. A1.1). Zusätzlich wird der Luftpolderdruck in der Arbeitskammer erfasst.

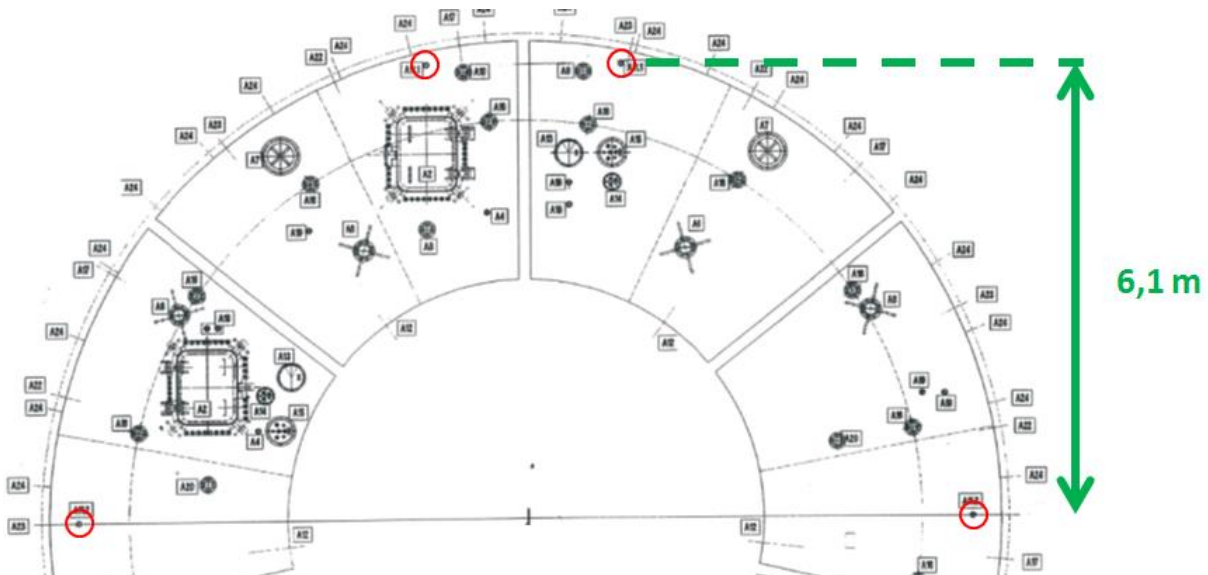


Abbildung A1.1: Ausschnitt der Tauchwandansicht mit Lage der Druckmessdosen (rot) [Ausschnitt aus Plan der Herrenknecht AG, modifiziert]

Der auf Achshöhe wirkende Stützdruck wird also mit zwei Druckmessdosen direkt gemessen, so dass im Normalfall zumindest eine Datenreihe zur Ermittlung der Stützdruckkraft auf den

Schneidradantrieb verwendet werden hätte können. Allerdings weist die Datenaufzeichnung der Druckmessdosen bei diesem Projekt über einen Teil des Vortriebsbereichs starke Schwankungsbreiten bzw. nicht plausible Werte aus. Außerdem gibt es einige Datenausfälle einzelner Druckmessdosen. Die zum Teil lücken- bzw. fehlerhaften Daten basieren vor allem auf den während des Vortriebs aufgetretenen Verklebungen, die zu Beschädigungen der Druckmessdosen führen können und die Wartung erschweren (vgl. Kap. 6.3.1.2). Eine zur Wartung notwendige Absenkung des Bentonit-Spiegels bis unter das Achsniveau, um die Druckmessdosen auf Achshöhe zu erreichen, war über weite Strecken nicht möglich.

Lediglich der Luftpolsterdruck in der Arbeitskammer ist über die ganze Tunnelstrecke plausibel (Abb. A1.2). Insgesamt kann die Vortriebsstrecke im Hinblick auf die aufgezeichneten Stützdrücke der Druckmessdosen in fünf unterschiedliche Bereiche unterteilt werden.

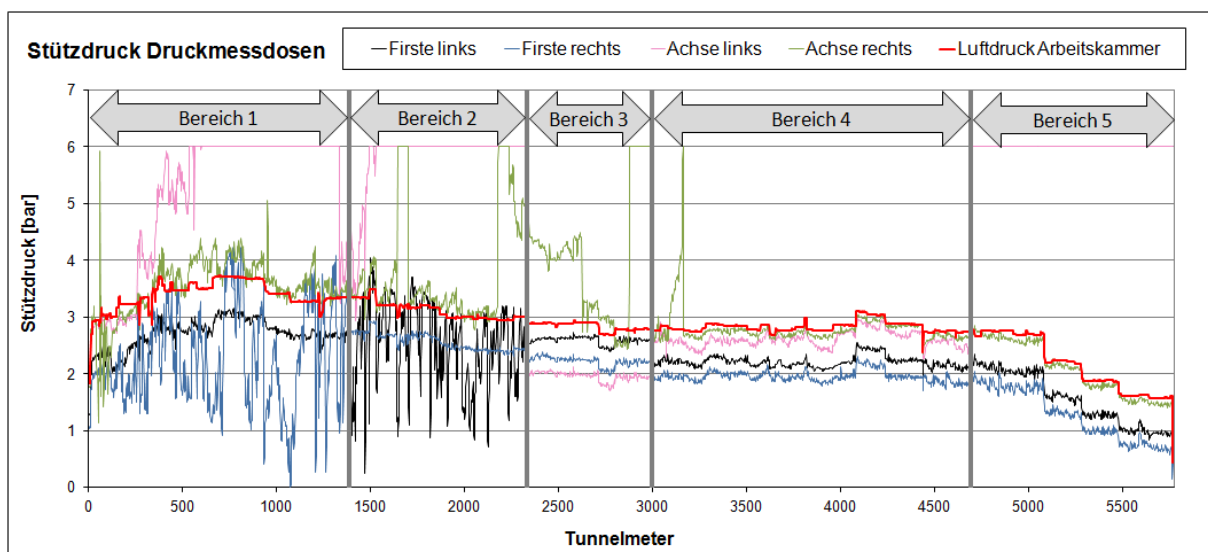


Abbildung A1.2: Stützdruckaufzeichnung unterschiedlicher Druckmessdosen (Rohdaten)

Im Bereich 1 zeigt die linke Firstmessdose (schwarze Linie) plausible Werte an, die mit dem Druck der Arbeitskammer (rote Linie) korrespondieren. Während die Messwerte der rechten Achsmessdose (grüne Linie) zumindest tendenziell verlässlich erscheinen, weisen die Drücke der rechten Firstmessdose (blaue Linie) und der linken Achsmessdose (rosafarbene Linie) starke Schwankungen bzw. unterbrochene Datenaufzeichnungen auf.

Im Bereich 2 zeigt die Datenaufzeichnung der rechten Firstmessdose (blaue Linie) plausible Werte an, die mit dem Druck der Arbeitskammer (rote Linie) korrespondieren. Während die rechte Achsmessdose (grüne Linie) weiterhin für den Hauptteil der Strecke nachvollziehbare Werte anzeigt, weisen die Drücke der linken Firstmessdose (schwarze Linie) und der linken Achsmessdose (rosafarbene Linie) starke Schwankungen bzw. unterbrochene Datenaufzeichnungen auf.

Bei TM 2330 konnte erstmals eine Vollabsenkung in einem Dichtblock durchgeführt werden. Nach komplettem Austausch der Druckmessdosen korrespondieren die Werte beider Firstmessdosen (schwarze und blaue Linie) und der linken Achsmessdose im Bereich 3 relativ gut mit dem Druck der Arbeitskammer (rote Linie). Da der Druck auf Achshöhe allerdings nicht niedriger als im Firstbereich sein kann, sind die Messwerte auch in diesem Bereich

nicht plausibel. Die Druckmessdosen sind vertauscht angeschlossen worden. Letztendlich werden die Datensätze der linken Achs- und der linken Firstmessdose vertauscht angezeigt (jetzt linke Firste: rosafarbene Linie, linke Achse: schwarze Linie).

Nach einem erneuten Austausch der Druckmessdosenanschlüsse und der Wartung der rechten Achsmessdose während eines Druckluftestiegs bei TM 2995 korrespondieren die Drücke aller Druckmessdosen der Druckwand im Bereich 4 relativ gut mit dem Druck der Abbaukammer. Inzwischen wird der Datensatz der linken Achsmessdose wieder richtig angezeigt (jetzt linke Achse: rosafarbene Linie). Allerdings sind jetzt die Anschlüsse beider Firstmessdosen miteinander vertauscht (jetzt linke Firste: blaue Linie, rechte Firste: schwarze Linie). Der Austausch der Anschlüsse ist anhand der „Datensprünge“ bei TM 2995 erkennbar.

Im Bereich 5 zeigen beide Firstmessdosen und die rechte Achsmessdose weiterhin plausible Drücke an. Die Datenaufzeichnung der linken Achsmessdose (rosafarbene Linie) reißt ab.

Trotz der bereichsweise fehlerhaften Stützdruckaufzeichnungen war die Kontrolle des Stützdrucks in der Firste jederzeit möglich, da auf der gesamten Strecke mindestens eine der beiden Druckmessdosen in der Firste plausible Daten aufgezeichnet hat.

Um verlässliche Stützdrücke auf Höhe der Achse zu erhalten, müssen die Rohdaten aufbereitet werden. Aufgrund von Datenausfällen und offensichtlich fehlerhaften Aufzeichnungen werden die Datensätze beider Achsmessdosen nur zum Teil verwendet. In Bereichen, in denen beide Druckmessdosen nachvollziehbare Daten aufweisen, wird der Mittelwert verwendet. Außerdem sind die Datensätze im Bereich 3 in Bezug auf die vertauschten Anschlüsse korrigiert worden (Abb. A1.3). Der so aufbereitete Stützdruck auf Achshöhe (violette Linie) weist vor allem in Bereich 1 auffällige Schwankungen auf. Außerdem können einzelne Tunnelabschnitte aufgrund der Datenausfälle beider Druckmessdosen überhaupt nicht rekonstruiert werden.

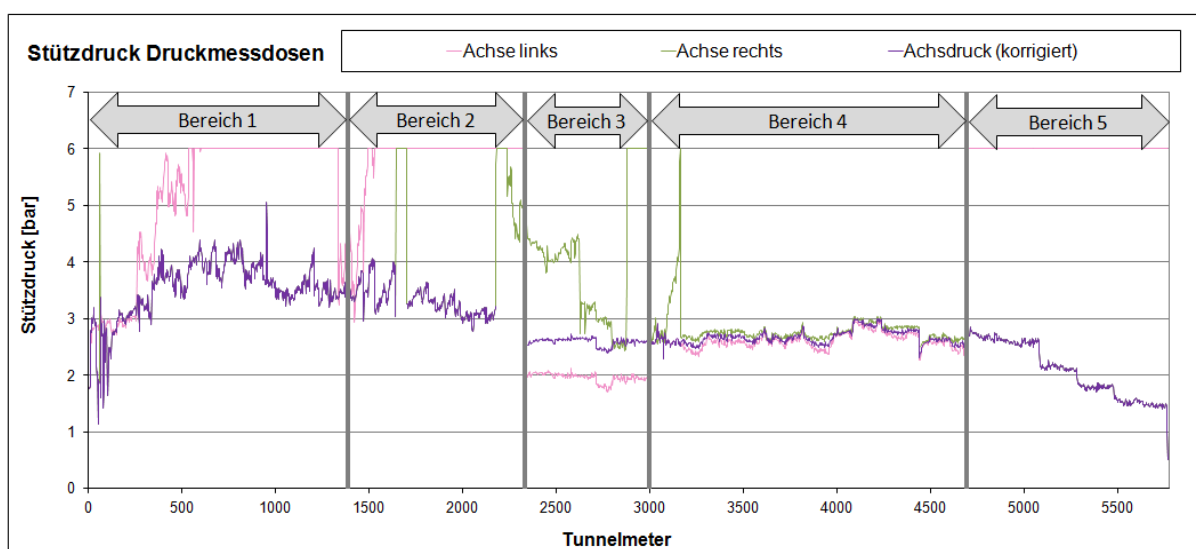


Abbildung A1.3: Vergleich Stützdruck auf Achsniveau (nach Datenkorrektur) mit den Rohdaten der Achsmessdosen

Im Vergleich zum Stützdruck auf Achsniveau kann aus den Firstdruckmessdosen ein weniger schwankender und vor allem über die ganze Tunnelstrecke nachvollziehbarer Druck auf Höhe der Firste abgeleitet werden. Allerdings ist auch dazu zunächst eine Aufbereitung der Firstdruckrohdaten erforderlich. Auch hier können nicht alle Rohdaten verwendet werden. In Bereichen, in denen beide Druckmessdosen nachvollziehbare Daten aufweisen, wird der Mittelwert verwendet. Außerdem sind die Datensätze im Bereich 3 in Bezug auf die vertauschten Anschlüsse korrigiert worden (Abb. A1.4). Der so aufbereitete Stützdruck auf Firsthöhe (gelbe Linie) ist für die gesamte Tunnelstrecke plausibel.

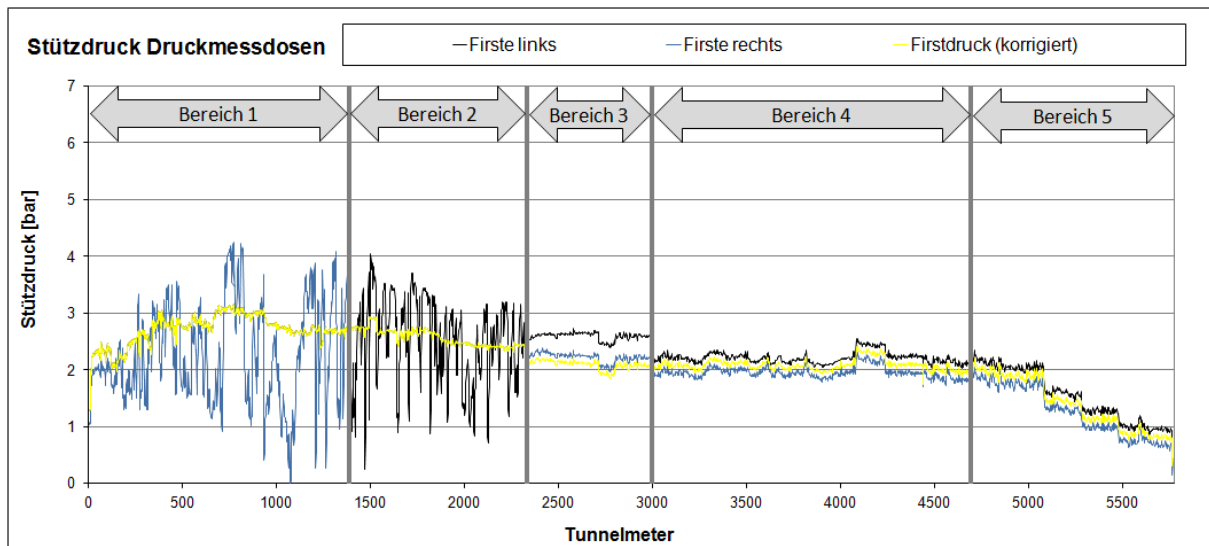


Abbildung A1.4: Vergleich Stützdruck auf Firstniveau (nach Datenkorrektur) mit den Rohdaten der Firstmessdosen

Der Stützdruck auf Achsniveau kann dann alternativ aus dem Stützdruck in der Firste ermittelt werden, sofern die Stützflüssigkeit berücksichtigt wird. Eine Berechnung nach Gleichung (A1) ist möglich.

$$p_{\text{Achse}} = p_{\text{Firste}} + \Delta h_{\text{Firste-Achse}} \cdot \rho_{\text{Susp}} \cdot g / 100 \quad (\text{A1})$$

mit

p_{Achse}	=	Stützdruck auf Achsniveau [bar]
p_{Firste}	=	Stützdruck auf Firstniveau [bar]
$\Delta h_{\text{Firste-Achse}}$	=	Höhendifferenz First- zu Achsmessdose (hier 6,1 m)
ρ_{Susp}	=	Suspensionsdichte Abbaukammer [kg/m ³]
g	=	Erdbeschleunigung: 9,81 m/s ²

Aus dem korrigierten Firstdruck (Abb. A1.4: gelbe Linie) wird der Stützdruck auf Achsniveau ermittelt, wobei die Suspensionsdichte ebenfalls der Betriebsdatenaufzeichnung entnommen ist. Dabei wird der Mittelwert der Suspensionsdichte aus Förder- und Speiseleitung verwendet, um im Hinblick auf die Abbaukammer repräsentative Daten zu erhalten. Beide Methoden ergeben einen vergleichbaren Stützdruck auf Achsniveau (A1.5), wobei der auf den Firstdruckmessdosen basierende Achsstützdruck (grüne Linie) gegenüber dem aus den Achs-

messdosen ermittelten Achsdruck (violette Linie), weniger stark schwankt. Da die Luftblase in der Arbeitskammer bei diesem Vortrieb in der Regel bis zur Achse reicht, zeigt der Luftdruck einen ähnlichen Verlauf an (rote Linie).

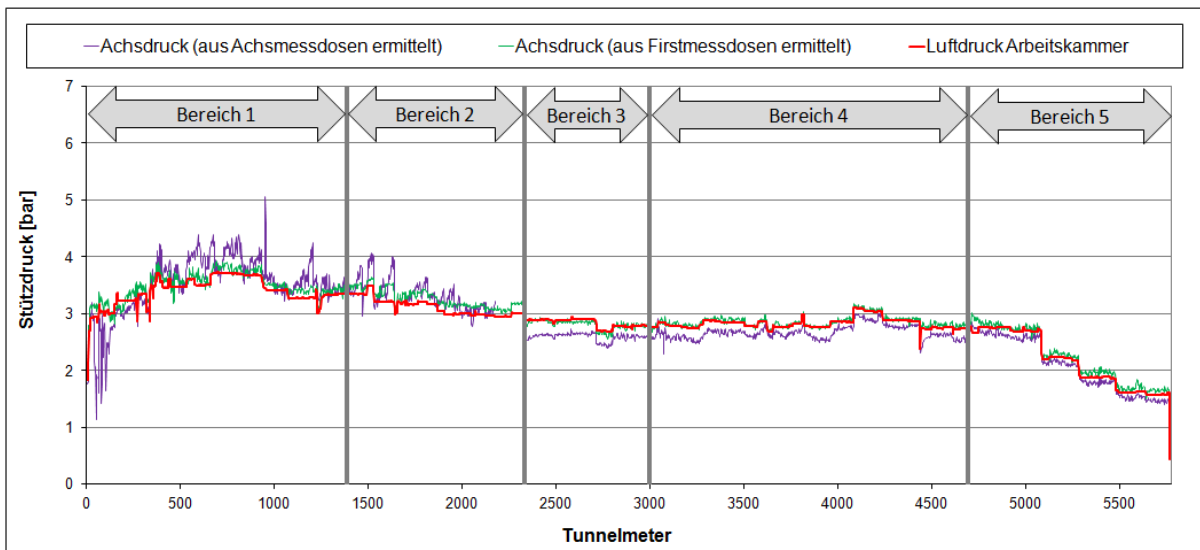


Abbildung A1.5: Vergleich unterschiedlich ermittelter Stützdrücke auf Achsniveau

Die Berechnung der Stützkraftresultierenden des auf den Schneidradantrieb wirkenden Stützdrucks ist sowohl auf Basis des aus den Datenaufzeichnungen der Firstdruckmessdosen ermittelten Stützdrucks als auch bei Verwendung des Luftdrucks der Arbeitskammer möglich (Abb. A1.6). Die Verwendung des auf den Messungen der Achsdruckmessdosen basierenden Stützdruck erscheint weniger sinnvoll.

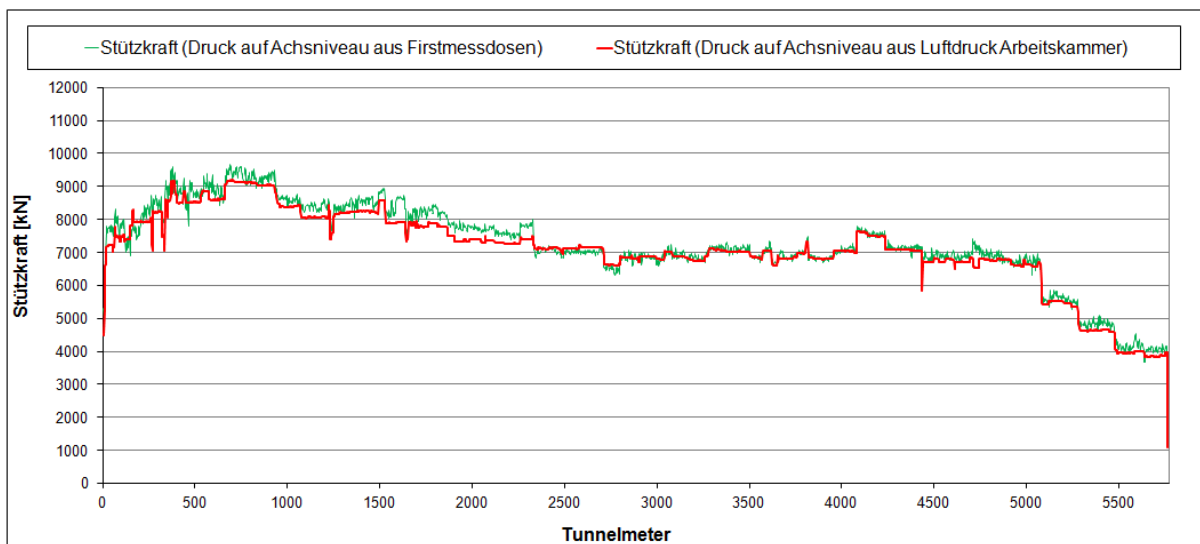


Abbildung A1.6: Vergleich unterschiedlich ermittelter Stützkräfte (aus Stützdruck auf Schneidradantrieb)

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Stützkraft bei allen Betriebsdatenauswertungen auf Basis des Luftdrucks innerhalb der Arbeitskammer berechnet. Das ist in diesem Fall möglich, weil der Suspensionsspiegel in der Arbeitskammer über die gesamte Vortriebsstrecke auf Höhe der Tunnelachse liegt.

Korrektur der aufgezeichneten Schneidradanpresskraft

Um die abbauspezifische Schneidradkontaktkraft zu generieren, müssen die Rohdaten der Schneidradanpresskraft um die Stützkraft reduziert werden (vgl. Kap. 7.3.1.1). Da die Stützkraft, als Kraftresultierende des auf den Schneidradantrieb wirkenden Stützdruks, zum Teil größer als die Schneidradanpresstkraft ist, wird die Schneidradkontaktkraft bereichsweise negativ (Abb. A1.7).

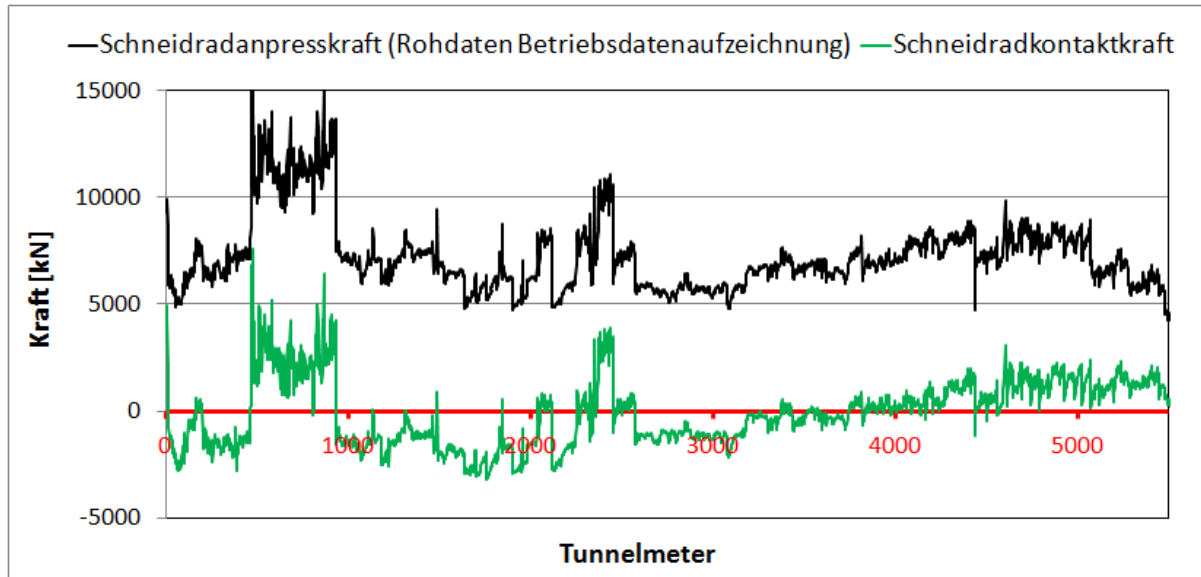


Abbildung A1.7: Schneidradanpresskraft und bereichsweise negative Schneidradkontaktkraft

Die Rohdaten der Schneidradanpresskraft müssen also einen Messfehler aufweisen. Aufgrund der aufwendigen Generierung des Betriebsdatenparameters Schneidradanpresskraft anhand der Drücke der Schneidradverschiebezylinder (vgl. Kap. 7.1), werden die Daten zunächst im Hinblick auf Umrechnungsfehler überprüft. Diese können ausgeschlossen werden, da eine entsprechende Berechnung zu gleichen Datensätzen führt (Abb. A1.8).

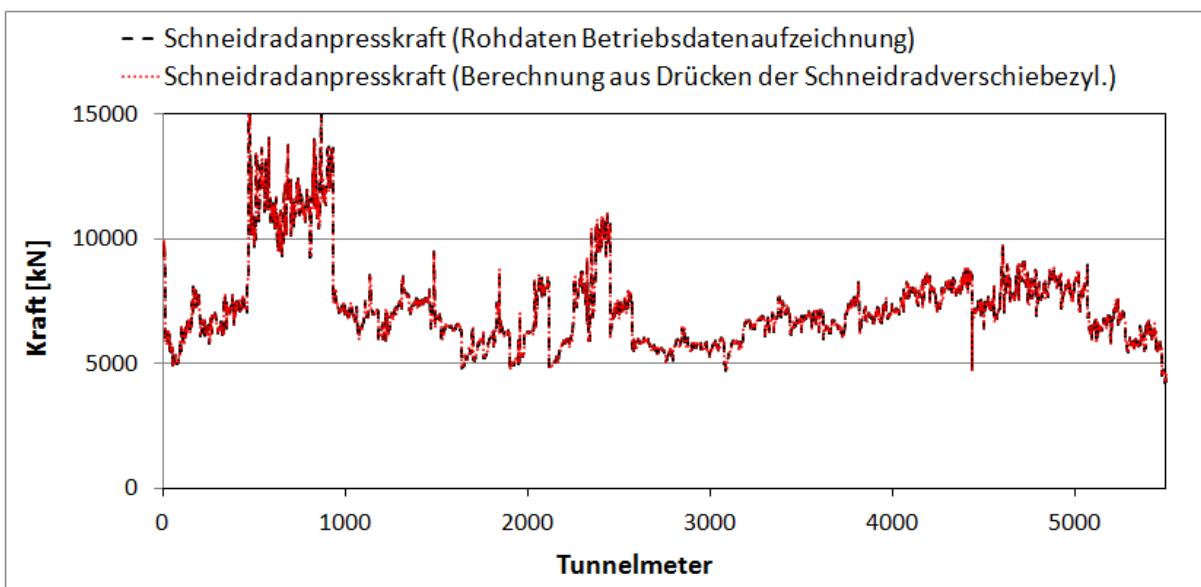


Abbildung A1.8: Überprüfung der Generierung von Schneidradanpresskraft aus den Zylinderdrücken

Somit sind bereits die Schneidradverschiebezylinderdrücke fehlerhaft, wobei die Ursache des Datenfehlers im Nachgang nicht mehr geklärt werden kann. Das zu Projekt C benachbarte Baulos mit vergleichbarer Schildmaschine verläuft in den gleichen Schichteinheiten. Dementsprechend sind, bezogen auf die ganze Tunnelstrecke, ähnliche Baugrundverhältnisse und vergleichbare Schneidradanpresskräfte bzw. Schneidradkontaktkräfte zu erwarten. Der Datenvergleich zeigt aber, dass die Schneidradanpresskraft beim Nachbarbaulos in großen Bereichen höher ist und die Schneidradkontaktkraft nicht negativ wird (Abb. A1.9).

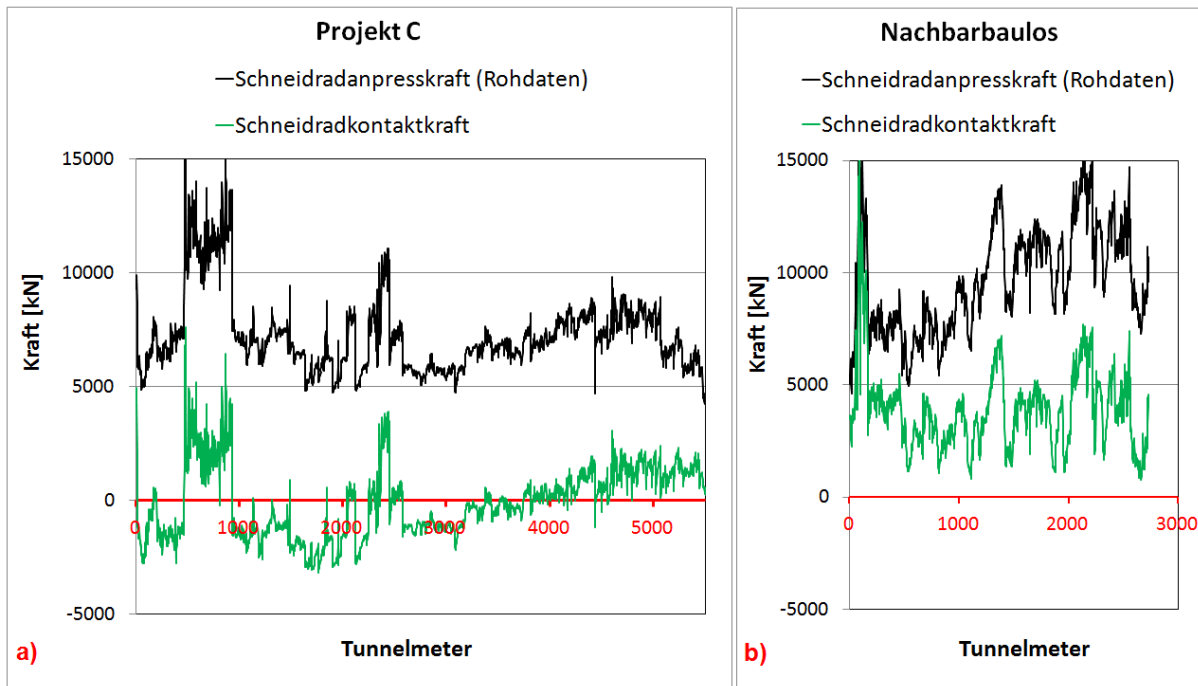


Abbildung A1.9: Vergleich Schneidradanpresskraft und Schneidradkontaktkraft a) Projekt C mit teilweise negativer Schneidradkontaktkraft b) Nachbarbaulos mit durchweg positiver Schneidradkontaktkraft.

Um die Rohdatensätze der Schneidradanpresskraft beider Projekte besser miteinander vergleichen zu können, wird eine andere Darstellung gewählt. Dabei bilden Schneidradanpresskraft und Stützdruck die Diagrammachsen (Abb. A1.10). In die Diagramme kann die auf den Schneidradantrieb wirkende Stützkraft als mit dem Stützdruck zunehmendes Linear (schwarze Linie mit gelben Datenpunkten) eingetragen werden. Aufgrund bei beiden Tunnelvortriebsmaschinen gleicher Schneidradantriebsfläche sind die Stützkraftlineare beider Projekte identisch. Alle Datenpunkte müssen eigentlich oberhalb der Stützkraftlinie liegen, da die Schneidradanpresskraft nicht größer als die Stützkraft sein kann. Der Datenfehler bei Projekt C (rote Datenpunkte) wird auch in dieser Darstellung offensichtlich, wobei dieser in der gesamten Stützdruckbandbreite auftritt (Abb. A1.10-a). Im Gegensatz dazu liegen alle Datenpunkte des Nachbarbauloses (blaue Datenpunkte) oberhalb der Stützkraftlinie (Abb. A1.10-b). Bei dieser Darstellung beruht die Streuung der Datenpunkte parallel zum Linear der Stützkraft auf dem Stützdruck und die Streuung parallel zur y-Achse (=konstanter Stützdruck) auf Einflüssen aus dem Abbauprozess.

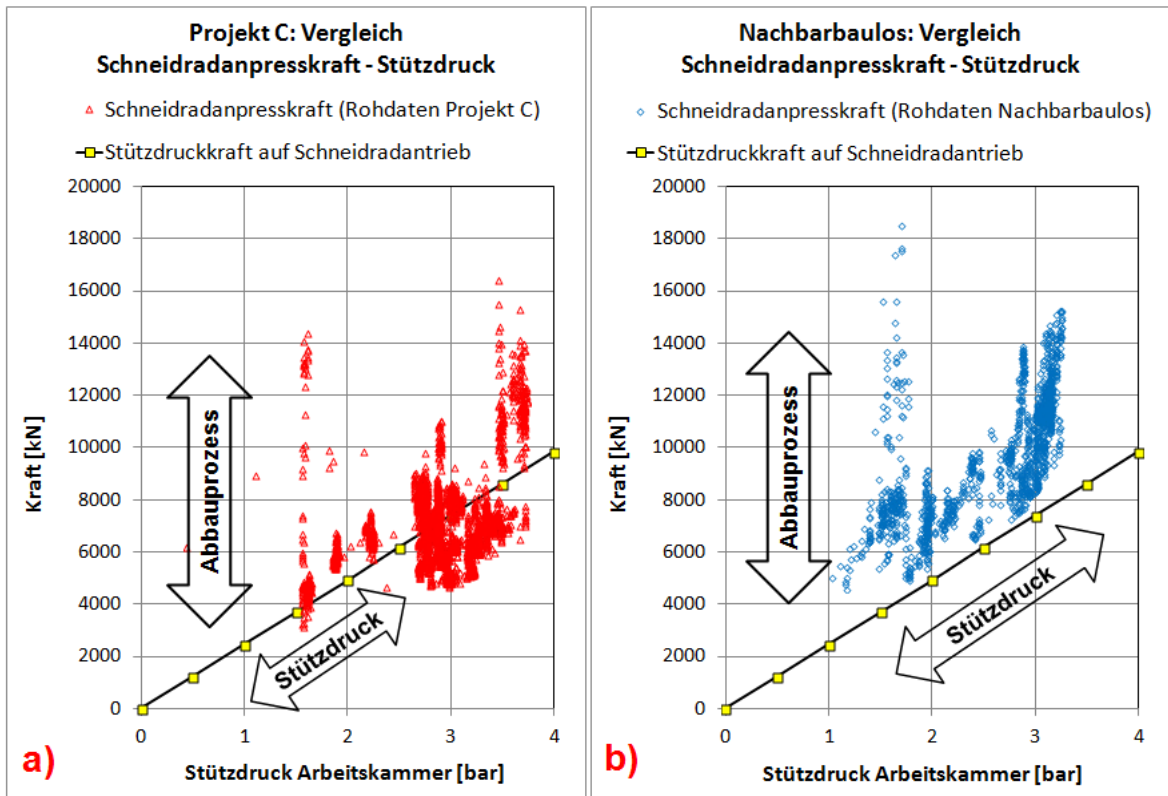


Abbildung A1.10: Vergleich Schneidradanpresskraft und Stützdruck a) Projekt C b) Nachbarbaulos

Trotz Datenfehler bei Projekt C zeigen die Datensätze beider Vortriebe im Hinblick auf die aus dem Abbauprozess resultierende Streuung eine vergleichbare Bandbreite (Abb. A1.11).

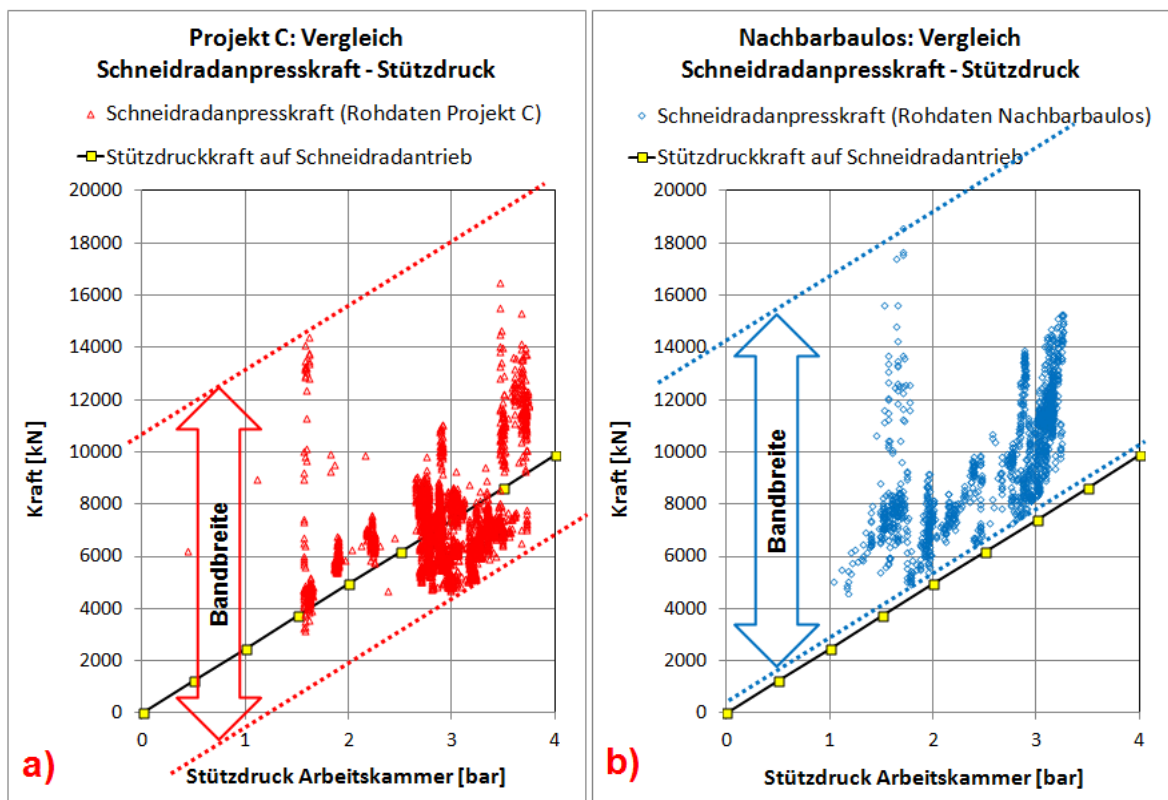


Abbildung A1.11: Aus dem Abbauprozess resultierende Bandbreite der Schneidradanpresskraft a) Projekt C b) Nachbarbaulos

Wenn die Datensätze beider Projekte in einem Diagramm dargestellt werden (Abb. A1.12-a), ist eine Datendifferenz von etwa 3500 kN ableitbar. Die Korrektur der Rohdaten der Schneidradanpresskraft um 3500 kN erzeugt bei beiden Projekten weitestgehend deckungsgleiche Datensätze (Abb. A1.12-b).

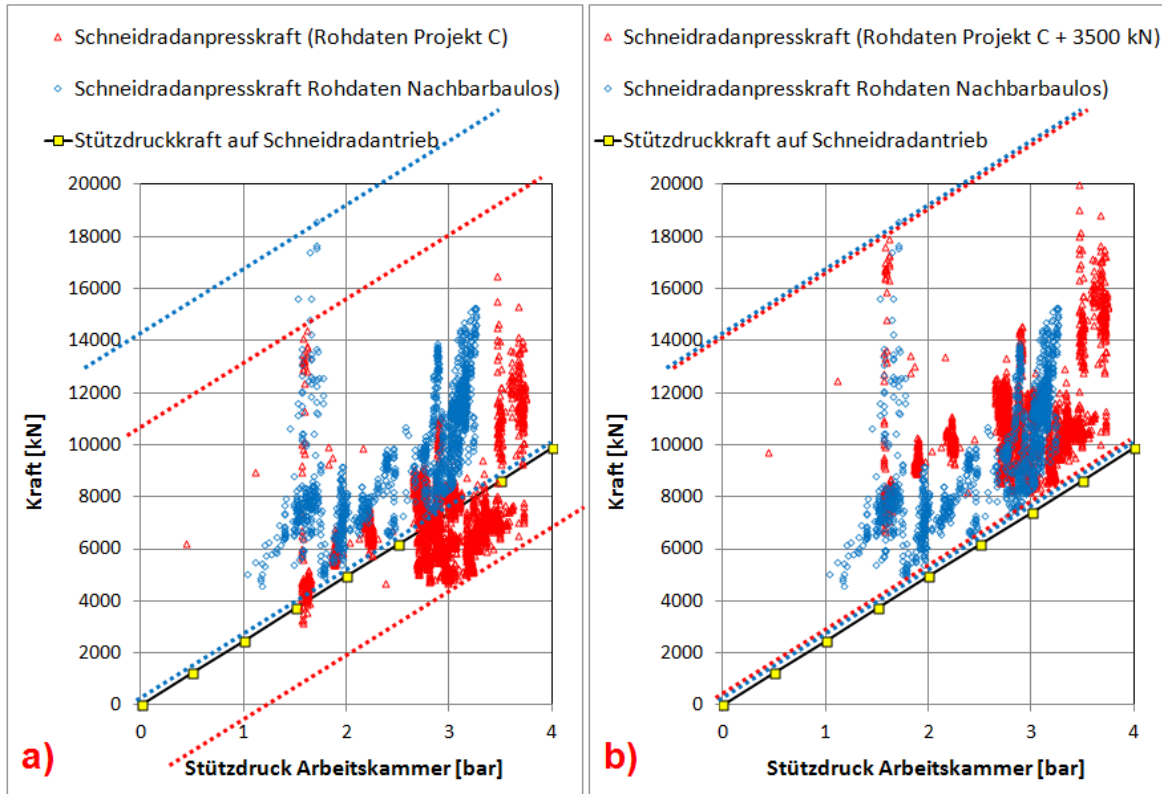


Abbildung A1.12: Korrektur der Schneidradanpresskraft von Projekt C a) vor der Datenkorrektur b) nach Addition von 3500 kN zur Schneidradanpresskraft von Projekt C

Die Rohdaten der Schneidradanpresskraft von Projekt C sind zwischen TM 470 und 935 um etwa 3500 kN erhöht (Abb. A1.13). Obwohl ein entsprechender Datenversatz beispielsweise auch durch Verklebungen erklärbar wäre, ist für diesen Bereich (roter Doppelpfeil) eine kurzzeitige, korrekte Datenaufzeichnung wahrscheinlich.

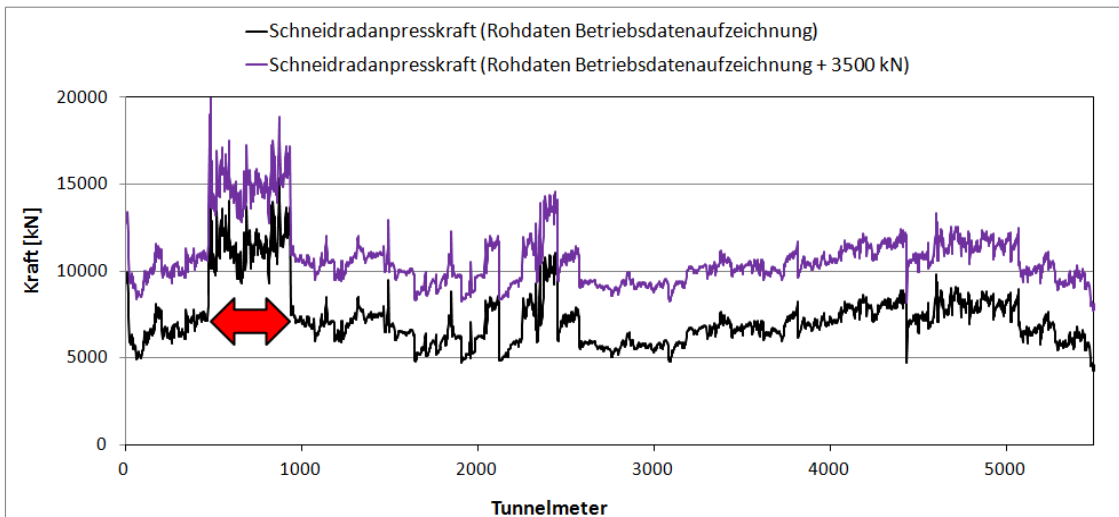


Abbildung A1.13: Schneidradanpresskraft von Projekt C mit Datenkorrektur

Dabei fällt auf, dass die Rohdaten der Schneidradanpresskraft (schwarze Linie) relativ gut zum restlichen Verlauf der um 3500 kN erhöhten Schneidradanpresskraft (violette Linie) passen. Die Datenkorrektur der Schneidradanpresskraftrohdaten von Projekt C erfordert also nur eine Addition von 3500 kN für die Datensätze zwischen TM 0 und 470 und ab TM 935 bis Vortriebsende. Ohne die Datensätze der Felsstrecken beider Projekte ergibt sich so eine gute Übereinstimmung der Datensätze (Abb. A1.14).

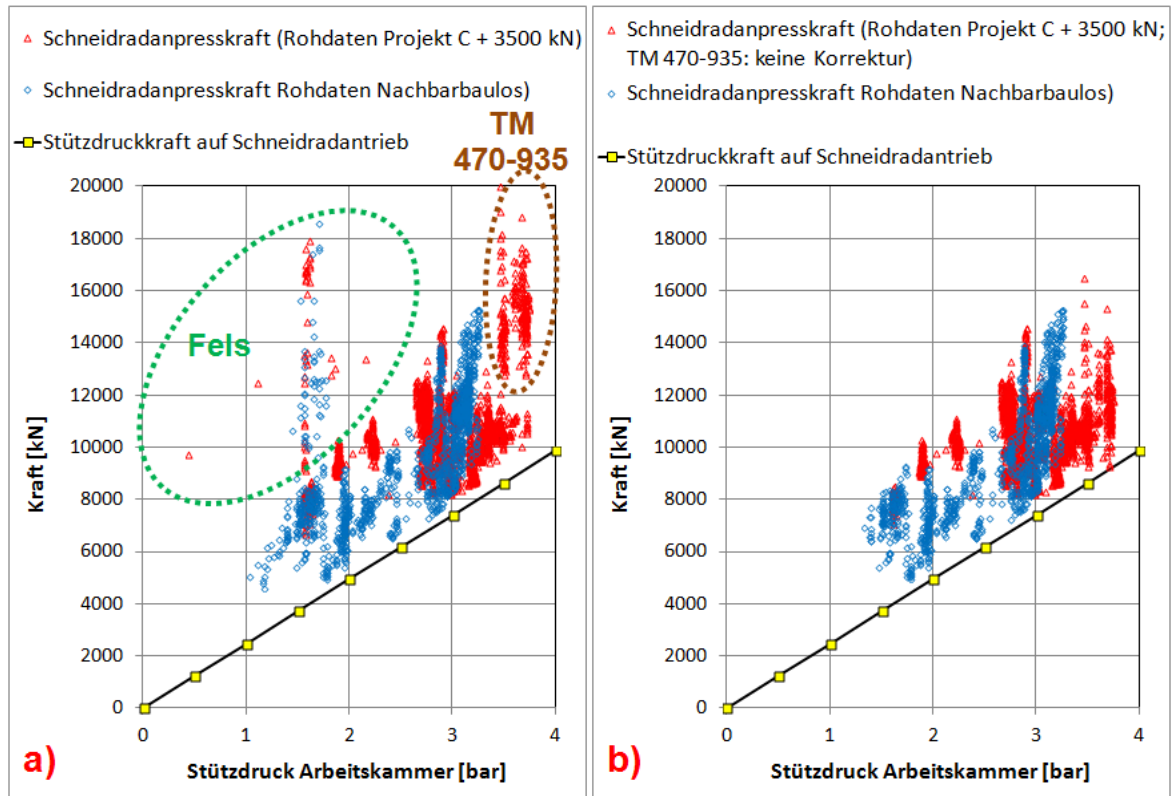


Abbildung A1.14: Einfluss der Felstrecken und teilweise korrekter Datensätze bei Projekt C a) vor Berücksichtigung beider Einflüsse b) ohne Datensätze von Felstrecken und ohne Korrektur der Schneidradanpresskraftrohdaten von Projekt C zwischen TM 470 und 935

Die aufbereiteten Schneidradanpresskraftrohdaten und die daraus abgeleitete Schneidradkontaktkraft von Projekt C sind Abbildung A1.15-a zu entnehmen (Abb. A1.15-a). Die Daten sind nach der entsprechenden Korrektur zu den Daten des Nachbarlooses vergleichbar (Abb. A1.15-b).

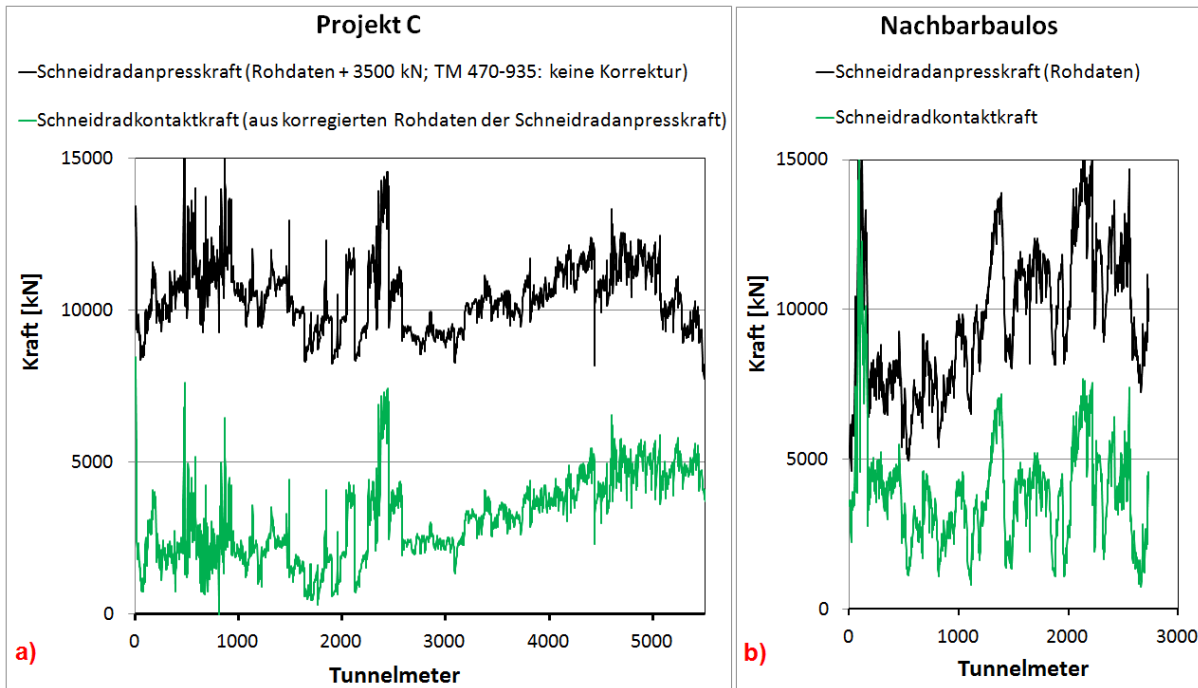


Abbildung A1.15: Vergleich Schneidradanpresskraft und Schneidradkontaktkraft a) Projekt C mit entsprechend korrigierten Datensätzen b) Nachbarbaulos

Die in diesem Kapitel aufgezeigte Datenkorrektur der Schneidradanpresskraft führt zu gut nachvollziehbaren Datensätzen. Trotz hohem Analyseaufwand in Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller kann die Ursache der Datenfehler nicht aufgeklärt werden. Die entsprechenden korrigierten Datensätze können also auch nur als Annäherung an die wirklichen Daten gesehen werden. Da insbesondere für Projekt C umfangreich Baustellendokumentationen vorliegen ist und viele abbauspezifische Einflüsse relativ gut entsprechenden Tunnelbereichen zugeordnet werden können, werden die korrigierten Betriebsdaten zur Datenanalyse verwendet. Während die notwendige Addition von 3500 kN sehr gut nachvollziehbar ist, ist eine Verwendung der Rohdaten zwischen TM 470 und 935 weniger eindeutig abgeleitet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher keine Betriebsdatenanalysen der ersten 1000 m von Projekt C durchgeführt. Für den Rest der Vortriebsstrecke wurde zu den Rohdaten der Schneidradanpresskraft 3500 kN addiert. Aus diesen Datensätzen wurde auch die Schneidradanpresskraft generiert. Das betrifft alle Datenanalysen von Kapitel 7.3.2.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Fritz Stefan Hollmann
Titel: Dipl.-Geol.
Geburtsdatum: 06.01.1972
Geburtsort: Dortmund
Familienstand: ledig
E-Mail-Adresse: Fritz.Hollmann@gmx.de

Schulbildung

08.1982 – 06.1991 Immanuel-Kant-Gymnasium, Dortmund
Abschluss der allgemeinen Hochschulreife

Wehrdienst

04.1992 – 04.1993 Schreiberfunker, Bundesmarine

Universitätsausbildung

04.1993 – 09.2000 Ruhr-Universität Bochum, Abschluss: Diplom-Geologe

Beruflicher Werdegang:

03.2012 – 03.2014 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb an der Ruhr-Universität Bochum

01.2011 – 02.2012 NBS Ebenfeld-Erfurt, ARGE Tunnel Silberberg / ARGE Tunnel Lohmeberg, Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co. KG, Zentralbereich Tunnelbau, München

05.2008 – 02.2011 NBS Erfurt-Halle, ARGE Finnetunnel, Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co. KG, Zentralbereich Tunnelbau, München

Lebenslauf

- 01.2008 – 08.2009 Ausbau Unterinntal-Bahn, ARGE H3-4, Münster-Wiesing, Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co. KG, Zentralbereich Tunnelbau, München
- 03.2006 – 12.2007 NBS Karlsruhe-Basel, ARGE Katzenbergtunnel, ARGE Katzenbergtunnel, Efringen-Kirchen
- 09.2005 – 12.2005 Mass Rapid Transit 3 Lines Project, Bangkok, Thailand, IMM Maidl & Maidl, Beratende Ingenieure, Bochum
- 07.2004 – 08.2005 BÜ Schottenbergtunnel, Meißen, SUTEC Spezialtiefbau und Umwelttechnik Consulting GmbH, München
- 01.2002 – 06.2004 ARGE U-Bahn Olympiapark, München, Los 1, Linie 3 Nord, Ed. Züblin AG, Niederlassung Tunnelbau, Stuttgart
- 10.2001 – 12.2001 Ausbau Eisenbahnachse Brenner, München-Verona, Teilprojekt Zulaufstrecke Nord, Erkundungsstollen Unterinntal, ILF, Beratende Ingenieure, Innsbruck
- 05.2001 – 09.2001 ARGE U-Bahn Fürth, BA -3.1.1, Ed. Züblin AG, Niederlassung Tunnelbau, Stuttgart