



Messbericht

zu Bohrlochaufweitungsversuchen mit Ettlinger Dilatometer und
Ettlinger Seitendrucksonde

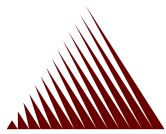
im Rahmen des Projektes

Wesergebirge, ABS/NBS Hannover-Bielefeld

Messzeitraum: 09.09. – 17.11.2025

An den Auftraggeber

ARGE Nammen/Wesergebirge
c/o BOG Bohr- und Umwelttechnik GmbH
Eselsteig 17
07586 Caaschwitz

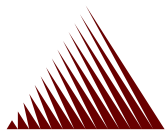


Inhalt

1. Veranlassung.....	3
2. Einleitung und Methodik.....	3
2.1. Messmethodik und Auswertebeschreibung des Ettlinger Dilatometers.....	3
2.2. Messmethodik und Auswertebeschreibung der Ettlinger Seitendrucksonde.....	6
2.3. Versuchs- und Bohrungsübersicht.....	8
3. Ergebnisse und Diskussion.....	9
3.1. Ergebnisse Ettlinger Dilatometer.....	9
3.2. Ergebnisse Ettlinger Seitendrucksonde.....	11
3.3. Ergebniseinordnung und Diskussion.....	14
4. Zusammenfassung.....	17

Anlagen

Anlage 1 a:	Dilatometer_BK-WBL-10_51-00m_16-10-25.pdf
Anlage 1 b:	Dilatometer_WBL-09_21-00m_10-11-25.pdf
Anlage 1 c:	Dilatometer_WBL-09_31-00m_11-11-25.pdf
Anlage 2 a:	Seitendruck_WBL-02-GWM_20-00m_09-09-25.pdf
Anlage 2 b:	Seitendruck_WBL-08-GWM_67-75m_29-09-25.pdf
Anlage 2 c:	Seitendruck_WBL-07_20-00m_07-10-25.pdf
Anlage 2 d:	Seitendruck_WBL-07_43-70m_08-10-25.pdf
Anlage 2 e:	Seitendruck_WBL-07_61-50m_09-10-25.pdf
Anlage 2 f:	Seitendruck_BK-WBL-07_79-50m_13-10-25.pdf
Anlage 2 g:	Seitendruck_BK-WBL-10_19-00m_13-10-25.pdf
Anlage 2 h:	Seitendruck_BK-WBL-07_98-00m_14-10-25.pdf
Anlage 2 i:	Seitendruck_WBL-04_42-40m_04-11-25.pdf
Anlage 2 j:	Seitendruck_WBL-09_11-00m_05-11-25.pdf
Anlage 2 k:	Seitendruck_WBL-04_61-00m_12-11-25.pdf
Anlage 2 l:	Seitendruck_WBL-04_81-00m_13-11-25.pdf
Anlage 2 m:	Seitendruck_WBL-04_99-40m_17-11-25.pdf



1. VERANLASSUNG

Das Geotechnische Ingenieurbüro Prof. Fecker & Partner GmbH, fortan GIF, führt seit den 1980er Jahren geotechnische Messungen im Fels in Deutschland, sowie im europäischen und interkontinentalen Ausland durch.

Thema dieses Berichts sind die Bohrlochaufweitungsversuche mit Ettlinger Dilatometer und Ettlinger Seitendrucksonde im Rahmen des Projekts Wesergebirge, ABS/NBS Hannover-Bielefeld. Nebst der hier behandelten Bohrlochaufweitungsversuche wurde die Firma GIF im o.g. Projekt darüber hinaus beauftragt, orientierte Bohrlochscans inkl. Auswertung mit optischen und akustischen Bohrlochsonden, sowie Bohrlochverlaufsmessungen im Erzbergwerk Barbara, durchzuführen.

Ausdrücklich nicht Gegenstand dieses Berichts sind gutachterliche Leistungen wie der Vergleich der im Folgenden beschriebenen Messergebnisse mit jeglichen Messdaten, die nicht von der Firma GIF erhoben wurden, sowie die Bewertung und Interpretation der hier vorgestellten Ergebnisse im Kontext der lokalen Geologie oder etwaiger Fachliteratur. Die einzige Ausnahme hierzu sind die von der ARGE Nammen/Wesergebirge erstellten Schichtenverzeichnisse der Aufschlussbohrungen, in denen auch die Bohrlochaufweitungsversuche durchgeführt worden sind.

2. EINLEITUNG UND METHODIK

2.1. Messmethodik und Auswertebeschreibung des Ettlinger Dilatometers

Dilatometermessungen sind im Allgemeinen statische Belastungsversuche des anstehenden Gebirges zur Bestimmung seiner Spannungs-Verformungs-Eigenschaften. Die Versuche werden mit Hilfe einer zylindrischen, radial dehnbaren Sonde an beliebigen Stellen innerhalb einer Bohrung (\varnothing 101 mm) durchgeführt. Der Sondendurchmesser beträgt 95 mm. Eine schematische Darstellung des Dilatometers ist Abb. 1 zu entnehmen.

Die Vorteile eines solchen in situ Verfahrens bestehen in der Möglichkeit, die Eigenschaften des Baugrundes in nahezu ungestörtem Zustand zu erfassen, wohingegen durch Laborversuche meist nur die Maximalwerte an ausgesuchten Proben gemessen werden.

Das Messsystem (s. Abb. 2) setzt sich aus der eigentlichen Sonde mit drei jeweils 120° zueinander versetzten Wegaufnehmern, einer Kabeltrommel zur Aufnahme der kombinierten Mess- und Druckleitung, einer Druckversorgung sowie der Messelektronik zusammen.

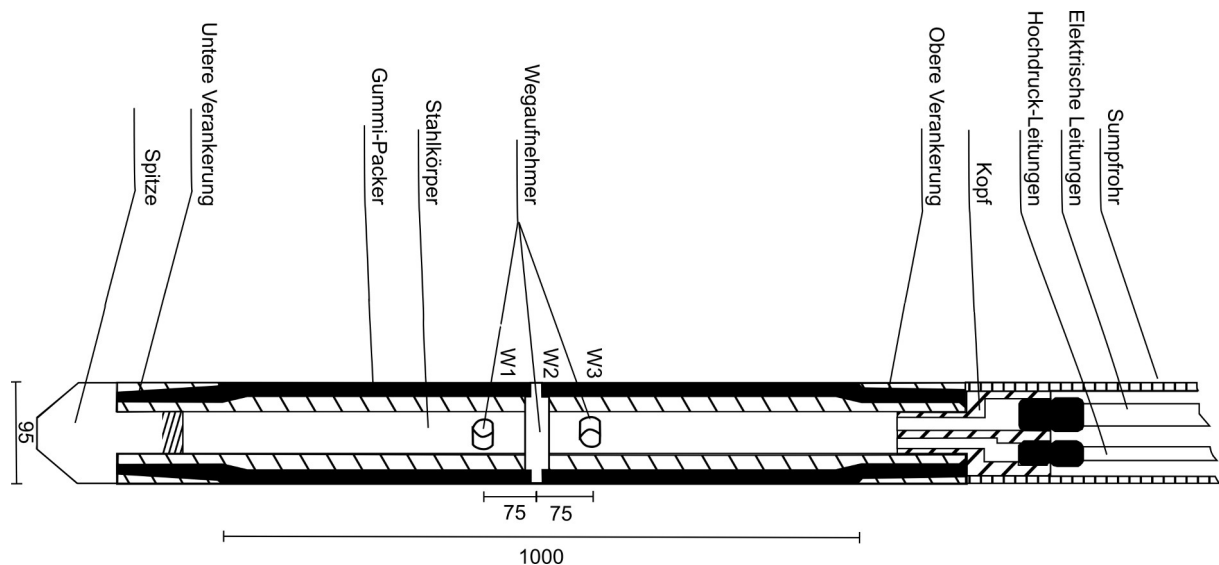
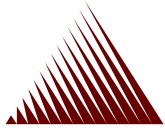


Abb. 1 Schematische Darstellung der Dilatometersonde. Zahlenangaben in mm.

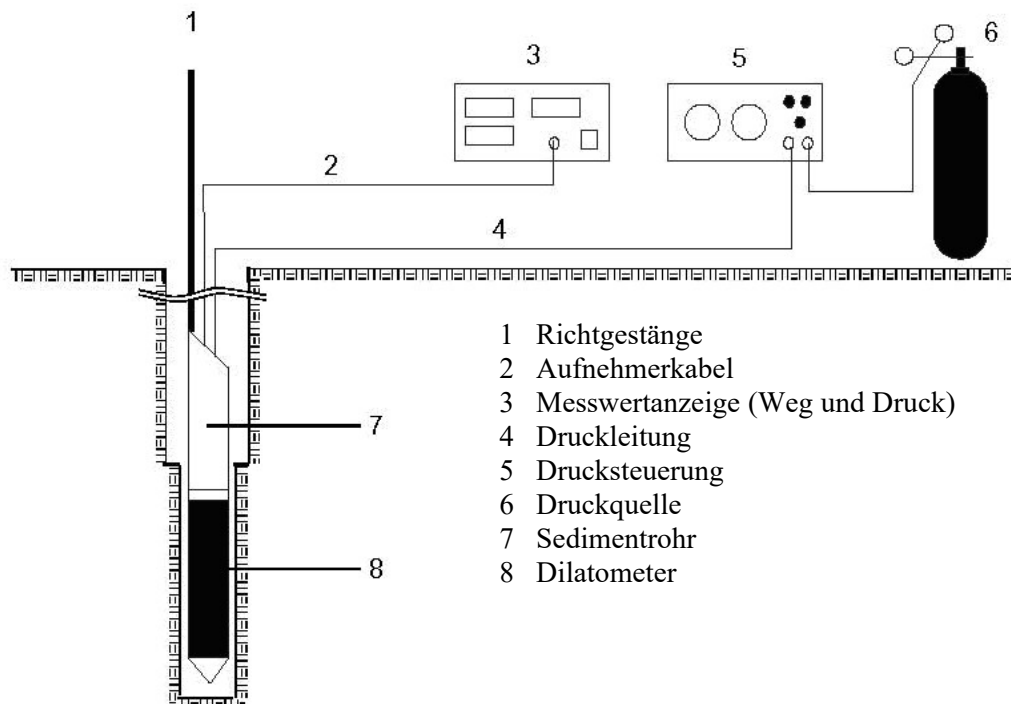
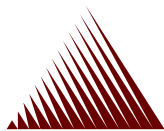


Abb. 2 Schematische Darstellung der Dilatometrausrüstung

Mit der Versuchseinrichtung kann damit auf pneumatischem Wege ein Druck von 100 bar und mehr auf die Bohrlochwand aufgebracht werden. Der Druck in der Sonde wird entweder mit einem Feinmessmanometer Klasse 0.6 oder einem elektrischen Druckaufnehmer kontrolliert. Die mit Wegaufnehmern gemessenen Verformungswerte werden elektrisch auf eine Messbrücke übertragen. Durch den relativ großen Messweg von 25 mm (Ablesegenauigkeit $\pm 0,001$ mm) ist



eine Verwendung der Sonde sowohl in steifen Böden als auch im Fels möglich. Für spezielle Aufgabenstellungen kann die Sonde mit einem Gestänge orientiert ins Bohrloch eingebracht werden. Im Einzelnen besteht die Messausrüstung aus folgenden Komponenten:

- Dilatometersonde (\varnothing 95 mm)
- Kalibrierrohr aus Aluminium (\varnothing Innen 100 mm; Länge 1500 mm)
- Sedimentrohr, kurz (Länge 1000 mm)
- Sedimentrohr, lang (Länge 2100 mm)
- Wirbel zur Ankopplung des Stahlseiles an das Sumpfrohr
- Richtgestänge (in Schüssen von 3 m)
- Druckleitung
- Aufnehmerkabel
- Haspel zum Auftrommeln der gebündelten Messleitungen
- 10 m Verbindungsleitung (Druckminderer/Druckmesseinrichtung)
- Messwertanzeige (Weg und Druck)
- Drucksteuerung
- 50 l Stickstoff-Druckflasche
- Druckminderer (p_v max 300 bar; p_h max 150 bar; Q_n 150 m³/h)
- Automatische Datenerfassung

Die Belastung der Bohrlochwand beim Versuch wird in mehreren Lastzyklen vorgenommen, wobei die Verformungen des Bohrlochs bei jeder einzelnen Laststufe abgelesen und in der jeweiligen Endstufe des Lastzyklus' bis zum Abklingen verfolgt werden. Danach wird wiederum stufenweise bis auf einen geringen Restdruck entlastet, wobei gleichzeitig die Rückverformung bis zum Stillstand gemessen wird. Für den nächst höheren und die weiteren Lastzyklen wird anschließend in gleicher Weise verfahren.

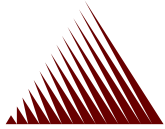
Die so gewonnenen Messergebnisse werden in Diagrammform dargestellt, wobei daraus bereits eine erste Beurteilung des Verformungsverhaltens möglich ist.

Zur weiteren Berechnung der Belastungs- und Entlastungsmoduli E ist die Formel für dickwandige Rohre nach LAMÉ gebräuchlich:

$$E = d \frac{\Delta p}{\Delta d} (1 + \nu) \text{ [MPa]} \quad (1)$$

- ν = Poissonzahl
- d = Anfangsdurchmesser der Bohrung [mm]
- Δp = Druckdifferenz [MPa]
- Δd = Verformung [mm]

Die in der Berechnungsformel enthaltene Poissonzahl kann durch Laborversuche bestimmt oder einer geeigneten Tabelle entnommen werden. In Ermangelung vorgegebener Poissonzahlen wird diese mit $\nu = 0,25$ angenommen.



Alle Moduli werden als Sekantenmodul berechnet, d. h. als Differenz zweier Koordinatenpaare auf der Arbeitslinie. Der Belastungsmodul entspricht somit der Steigung des ansteigenden Abschnittes der Arbeitslinie und kann ab dem zweiten Versuchszyklus in einen Erst- und Wiederbelastungsmodul unterteilt werden. Der Entlastungsmodul entspricht der Steigung des abfallenden Abschnittes der Arbeitslinie zwischen den Punkten mit maximaler Belastung und minimaler Belastung des betreffenden Entlastungszyklus'.

2.2. Messmethodik und Auswertebeschreibung der Ettlinger Seitendrucksonde

Für Bohrungen mit einem Nenndurchmesser von 101 mm bieten wir ein Seitendruckgerät an, dessen kreiszylindrische Schalensegmente wie alle anderen Ettlinger Seitendruckgeräte einen Öffnungswinkel von 120 ° besitzen. Die Sonde SDS 101 weist in der Projektion eine Breite von $b = 87,5 \text{ mm}$ und eine Länge von $h = 490 \text{ mm}$, d. h. eine projizierte Lastfläche von jeweils $A = 0,04287 \text{ m}^2$ auf. Die Lastschalen können mittels vier Druckzylindern von 96 mm auf 136 mm hydraulisch auseinandergedrückt werden. Die maximal erreichbare Bodenpressung beträgt mehr als 4 MN/m^2 . Der Aufbau der eigentlichen Seitendrucksonde ist in Abb. 3 abgebildet.

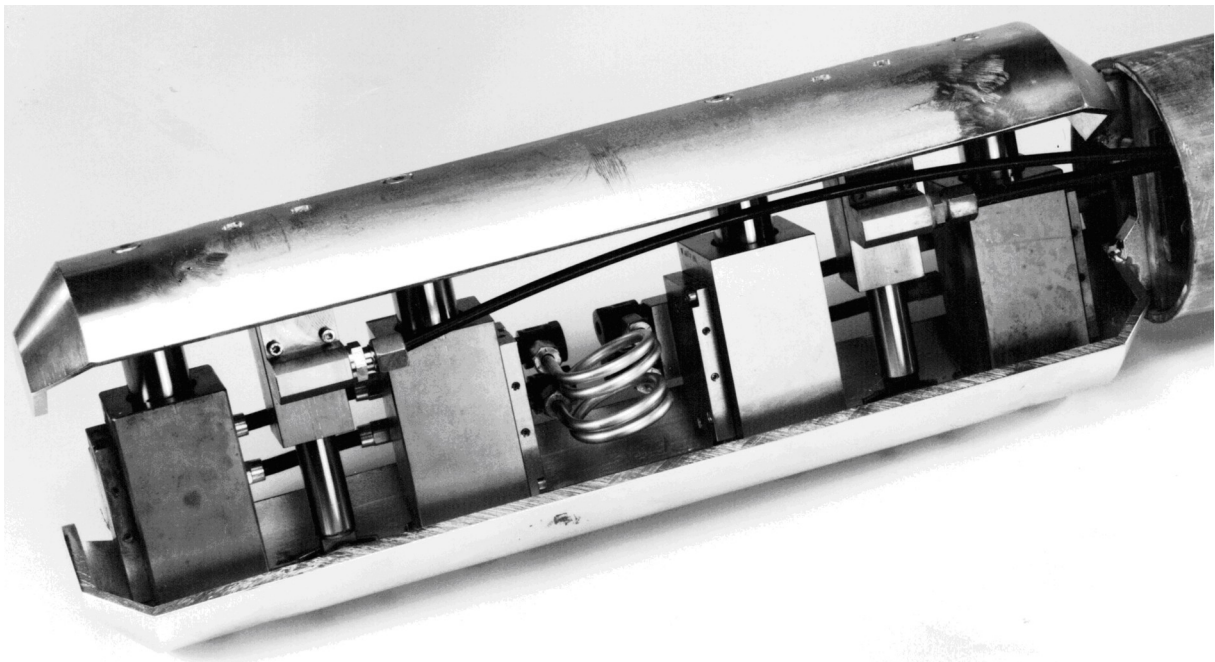
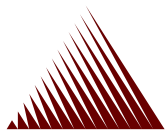


Abb. 3 Lastplatten, Druckzylinder und Wegaufnehmer einer Ettlinger Seitendrucksonde.

Der Versuchsaufbau eines Seitendruckversuchs ist dem eines Dilatometerversuchs (Abb. 2) ähnlich; die wesentlichen Unterschiede sind ein hydraulisches anstatt pneumatisches Drucksystem sowie die Verwendung einer Seitendrucksonde anstatt eines Dilatometers.

Der Seitendruck wird bei allen Ettlinger Seitendruckgeräten vom Versuchsausführenden vorgegeben und mittels elektrischem Druckaufnehmer kontrolliert. Der Anlegedruck bei Versuchsbeginn beträgt im allgemeinen $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$. Die Belastung wird stufenweise aufgebracht. In der Regel genügt es, jede Laststufe zwei Minuten lang konstant zu halten und



danach die Schalenverschiebung abzulesen. Zur Erfassung des zeitlichen Verformungsverhaltens werden zusätzlich Zwischenablesungen durchgeführt.

Normalerweise wird der Versuch mit drei Be- und Entlastungszyklen durchgeführt, wobei die maximale Bodenpressung der Erst- und Wiederbelastung der Gebirgsauflast bzw. den Erfordernissen des projektierten Bauwerks angepasst ist. Die Höchstlast ist erreicht, wenn die Kapazität der Sonde erschöpft ist, oder sich ein Versagen des Bodens im Verlauf der Arbeitslinie ankündigt. Die während des Seitendruckversuches protokollierten Messdaten werden von einer Datenverarbeitungsanlage ausgewertet. Die Versuchsergebnisse werden auf zwei Arten wiedergegeben:

- Grafische Darstellung der Spannungs-Verschiebungslinien (Arbeitslinien)
- Tabellarische Zusammenstellung der Messdaten sowie der hieraus errechneten Kennwerte

Die Arbeitslinien (Abb. 4) weisen je nach Beschaffenheit der Bohrlochwandung und des Gebirges eine mehr oder weniger ausgeprägte Krümmung bei niedrigen Seitendrücken auf. Im Bereich I ist noch kein vollständiger Kontakt zwischen den Lastplatten und dem Boden gegeben. Im Bereich III kündigt sich das Versagen der Bohrlochwandung im gedrückten Bereich an. Der Bereich II kennzeichnet den linear-elastischen Bereich der Arbeitslinie; nur dieser genügt den Grundlagen der Versuchsauswertung.

Es gelten folgende Beziehungen

$$\text{Verformungsmodul:} \quad E = df \frac{\Delta p}{\Delta d} \quad (2)$$

$$\text{Steifemodul:} \quad E_s = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

Hierin bedeuten:	d	=	Anfangsdurchmesser der Versuchsbohrung [mm]
	f	=	Gerätespezifischer Faktor gemäß FE-Berechnung
	Δd	=	Bohrlochaufweitung im Lastintervall [mm]
	Δp	=	Seitendruck im Lastintervall [MPa]

Für das Seitendruckgerät ESDS 101 mit den oben genannten Abmessungen gelten je nach Poissonzahl ν des Gebirges folgende gerätespezifische Faktoren f:

für $\nu = 0,25$ gilt $f = 0,986$

für $\nu = 0,30$ gilt $f = 0,972$

für $\nu = 0,40$ gilt $f = 0,904$

Die im Folgenden aufgelisteten Module sind der Vergleichbarkeit wegen allesamt mit einer angenommen Poissonzahl $\nu = 0,25$ berechnet worden. In den Anlagen des jeweiligen Versuchs sind ebenfalls die Module für $\nu = 0,30$ und $\nu = 0,40$ aufgelistet.

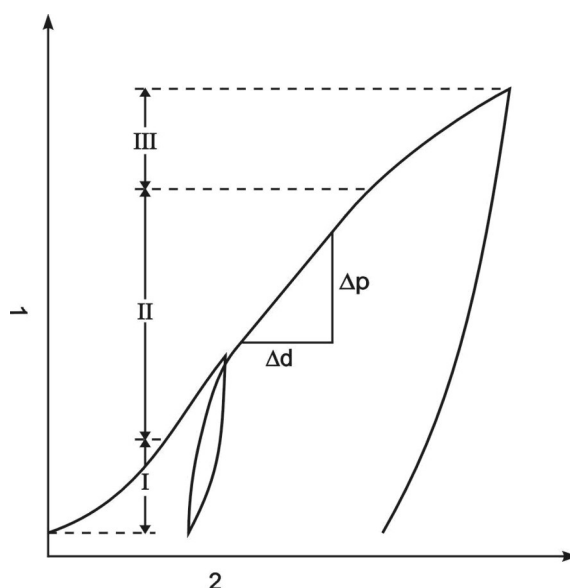


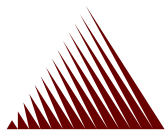
Abb. 4 Arbeitslinie eines Seitendruckversuchs, 1 = Spannung, 2 = Bohrlochaufweitung, I = Anlegeverhalten an die Bohrlochwand, II = linear-elastische Verformung, III = Beginn plastische Verformung

2.3. Versuchs- und Bohrungsübersicht

Insgesamt sind sechzehn Bohrlochaufweitungsversuche in sieben Bohrungen durchgeführt worden, aufgeteilt auf dreizehn Seitendruckversuche und drei Dilatometerversuche (siehe Tab. 1). Die geringere Anzahl an Dilatometerversuchen ist bedingt gewesen durch die Qualität des Bohrkerns der Pilotbohrung. Dieser war entweder verstärkt geklüftet, inhomogen oder nur teilweise vorhanden im Bereich der Versuchsstrecke.

Tab. 1. Übersichtstabelle der durchgeführten Bohrlochaufweitungs-Versuche

Bohrung, Standort	Bohr-richtung	BAV Nr. 1: Typ, Tiefe, Datum	BAV Nr. 2: Typ, Tiefe, Datum	BAV Nr. 3: Typ, Tiefe, Datum	BAV Nr. 4: Typ, Tiefe, Datum	BAV Nr. 5: Typ, Tiefe, Datum
WBL-02, freies Feld	vertikal	SDS101, 20,00 m, 09.09.2025	-	-	-	-
WBL-04, freies Feld	schräg, SSW / 70°	SDS101, 42,40 m, 04.11.2025	SDS101, 61,00 m, 12.11.2025	SDS101, 81,00 m, 13.11.2025	SDS101, 99,40 m, 17.11.2025	-
WBL-07, freies Feld	vertikal	SDS101, 20,00 m, 07.10.2025	SDS101, 43,70 m, 08.10.2025	SDS101, 61,50 m, 09.10.2025	SDS101, 79,50 m, 13.10.2025	SDS101, 98,00 m, 14.10.2025
WBL-08, freies Feld	vertikal	SDS101, 67,75 m, 29.09.2025	-	-	-	-
WBL-09, Bergwerk	horizontal	SDS101, 11,00 m, 05.11.2025	Dilatometer, 21,00 m, 10.11.2025	Dilatometer, 31,00 m, 31.11.2025	-	-
WBL-10, Bergwerk	vertikal	SDS101, 19,00 m, 13.10.2025	Dilatometer, 51,00 m, 16.10.2025	-	-	-



3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1. Ergebnisse Ettlinger Dilatometer

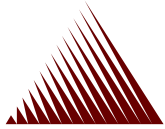
Die Dilatometerversuche wurden mit fünf Versuchszyklen durchgeführt, in denen von einer Grundlast auf ein Lastmaximum für den Zyklus belastet, und daraufhin schrittweise auf die Grundlast entlastet wurde. Der erste Versuchszyklus neigt im Allgemeinen dazu, bedingt durch Anlegeeffekte des Dilatometers an die Bohrlochwand deutlich höhere Verformungen und somit reduzierte Module im Vergleich zu den anderen Zyklen zu zeigen, da noch kein linear-elastischer Zustand vorliegt. Ebenso kann der letzte Zyklus bereits in ein leicht plastisches Verhalten übergehen. Deswegen werden im Folgenden nur die Module des 2., 3. und 4. Versuchszyklus näher betrachtet.

Die Zeit-Weg- und Weg-Belastungs-Diagramme sowie Wiederbelastungsmodule liegen in den jeweiligen Anlagen des Versuchs vor und werden an dieser Stelle nicht erneut gezeigt. Alle Dilatometer-Module wurden gem. Gleichung (1) bestimmt. Die Module der Erstbelastungszyklen wurden hierbei von der Grundlast bzw. maximalen Laststufe des vorherigen Zyklus zur maximalen Laststufe des aktuellen Zyklus bestimmt. Die Module der Entlastungs- und Wiederbelastungszyklen wurden standardisiert im Bereich zwischen p_{30} und p_{70} berechnet. Die Module aller Wege aller Versuche, sowie die maximale angelegte Belastung des jeweiligen Zyklus, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 2. Belastungs- und Entlastungsmodule der durchgeführten Dilatometerversuche, begrenzt auf die Ergebnisse des 2.-4. Versuchszyklus.

Bohrung, Versuchstiefe Zyklus	Erstbelastung			Entlastung			max. Belastung pro Zyklus [MPa]
	Weg 1 [MPa]	Weg 2 [MPa]	Weg 3 [MPa]	Weg 1 [MPa]	Weg 2 [MPa]	Weg 3 [MPa]	
WBL-09, 31,00 m							
2. Zyklus	20979	15734	31468	18783	18847	18064	3,502
3. Zyklus	14126	11558	18162	26684	23331	27140	4,512
4. Zyklus	13930	9644	17909	25003	22344	24431	5,503
WBL-09, 21,00 m							
2. Zyklus	15750	11454	10500	17374	16794	18656	3,498
3. Zyklus	13958	11420	10468	18947	17188	18638	4,500
4. Zyklus	15734	12587	13986	23373	17182	14639	5,502
WBL-10, 51,00 m							
2. Zyklus	19375	13256	17991	31455	34182	33891	4,500
3. Zyklus	20993	16429	16429	35581	27294	23613	7,498
4. Zyklus	31539	16821	20185	50431	21212	20452	11,497

Die Module sind sowohl innerhalb des jeweiligen Zyklus, als auch in den unterschiedlichen Richtungen, überwiegend homogen. Entlastungsmodule sind entweder höher oder vergleichbar hoch wie Belastungsmodule des gleichen Zyklus und Versuchs. Die maximalen Module wurden in den Entlastungen der Bohrung WBL-10 (51,0 m Versuchstiefe) ermittelt und



betragen in der Spitze bis zu 50.000 MPa. Der geringste Modul von etwa 9.600 MPa stammt aus einer Belastung in der Bohrung WBL-09 (31,0 m Versuchstiefe).

Die ermittelten Module zeigen eine auf die Versuchsgesamtheit eine Häufigkeitsverteilung, die einer Gauß'schen Normalverteilung mit einer höheren Anzahl von Datenpunkten entsprechen könnte (Abb. 5). Mit den vorliegenden Daten lässt sich jedoch keine belastbare Aussage hierzu treffen.

Die Belastungsmodule sind zwischen etwa 10.000 MPa und etwa 20.000 MPa sehr gleichmäßig über das gesamte Spektrum verteilt, mit Ausnahme des maximalen Extremwerts. Die Entlastungsmodule sind ebenfalls überwiegend regelmäßig zwischen etwa 17.000 MPa bis etwa 27.000 MPa verteilt, zeigen jedoch eine Häufung von Extremwerten zwischen etwa 31.000 MPa und 36.000 MPa sowie einen sehr prägnanten Maximalwert.

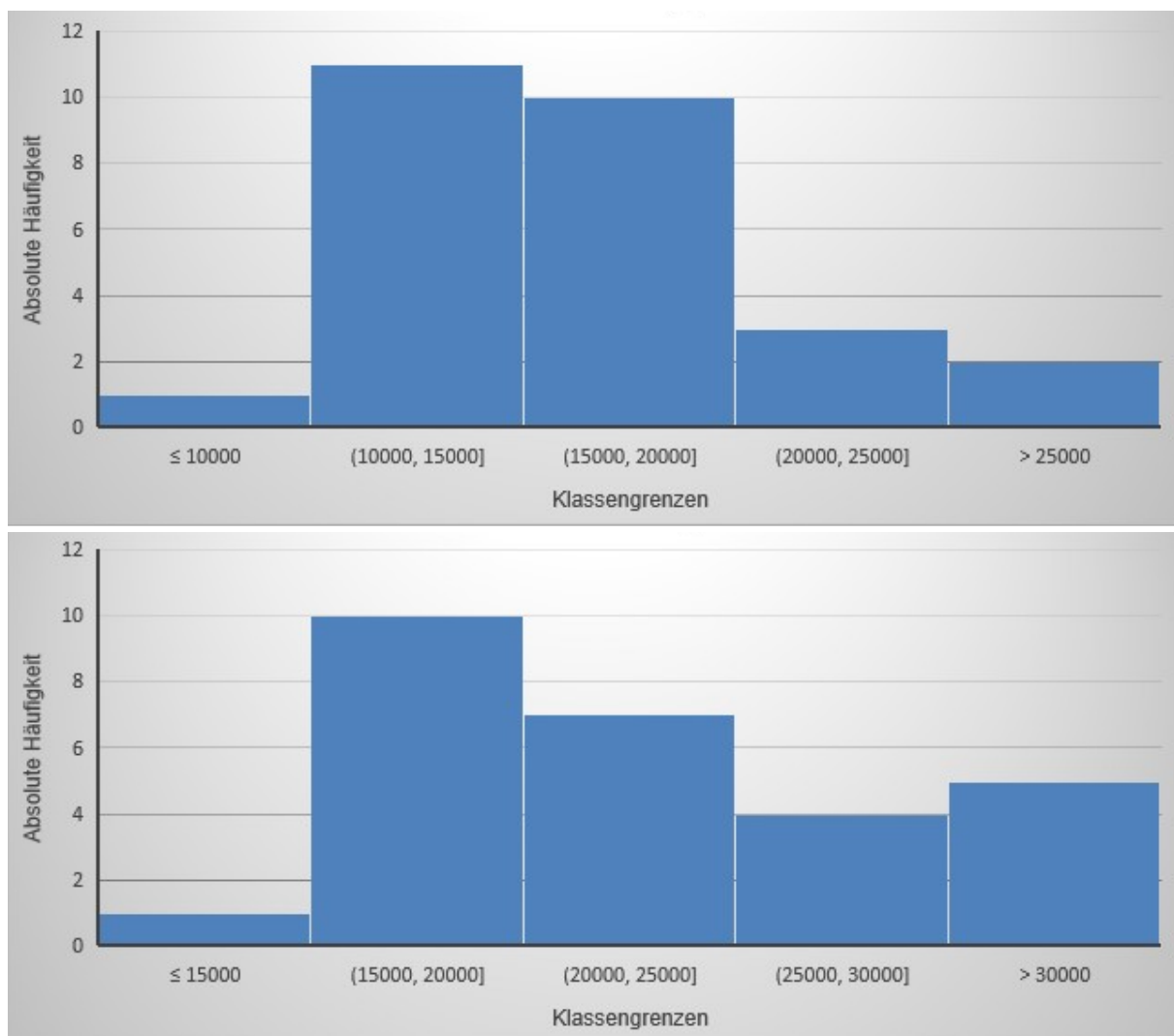
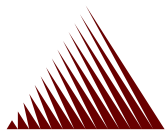


Abb. 5 Histogramm der absoluten Häufigkeitsverteilung aller Dilatometermodule aller Wege, oben Belastung, unten Entlastung, Werte der Klassengrenzen in MPa.



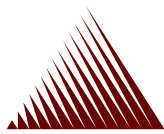
3.2. Ergebnisse Ettlinger Seitendrucksonde

Die Seitendruckversuche wurden mit fünf Versuchszyklen durchgeführt, in denen von einer Grundlast auf ein Lastmaximum für den Zyklus belastet, und daraufhin schrittweise auf die Grundlast entlastet wurde. Bedingt durch Anlegeeffekte der Sondendrucksonde, bei der diese sich in eine ggf. mit Bohrschlamm überdeckte Bohrlochwand einstanzt, können sich deutlich erhöhte Verformungsraten verglichen zu den übrigen Zyklen zeigen. Gleichermäßen setzt im letzten Zyklus generell bereits plastisch geprägtes Verformungsverhalten ein. In beiden Fällen würde kein linear-elastischer Zustand vorliegen, so dass der erste und letzte Belastungszyklus im Folgenden nicht näher betrachtet wurde.

Die jeweiligen Weg-Belastungsdiagramme sind den Anlagen zu entnehmen. Die Elastizitäts-Module wurden gemäß Gleichung (2) bestimmt. Da die Steifemodule, bestimmt nach Gleichung (3) in direktem linearen Zusammenhang zu den Elastizitätsmodulen stehen, sei an dieser Stelle auf die Anlagen verwiesen, im Zuge dieses Berichts wird jedoch nicht näher auf sie eingegangen. Hierbei wurden die Module der Erstbelastungs- und Wiederbelastungszyklen von der Grundlast bzw. maximalen Laststufe des vorherigen Zyklus zur maximalen Laststufe des aktuellen Zyklus bestimmt. Die Module der Entlastungszyklen wurden standardisiert im Bereich zwischen $p_{30\%}$ und $p_{70\%}$ berechnet. Die sich ergebenden Module und die maximale Belastung pro Zyklus für die Belastungs- und Entlastungszyklen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

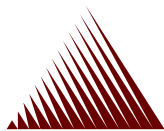
Tab. 3. Tabelle über zwei Seiten. Belastungs- und Entlastungsmodule der durchgeführten Seitendruckversuche, begrenzt auf die Ergebnisse des 2.-4. Versuchszyklus. Verwendete Abkürzungen: Weg o – oberer Wegaufnehmer, Weg u – unterer Wegaufnehmer, Weg m – arithmetische Mittlung der beiden Wegaufnehmer.

Bohrung, Versuchstiefe, Zyklus	Belastung			Entlastung			Max. Belastung pro Zyklus [MPa]
	Weg o [MPa]	Weg u [MPa]	Weg m [MPa]	Weg o [MPa]	Weg u [MPa]	Weg m [MPa]	
WBL-02, 20,00 m							
2. Zyklus	106	120	112	182	578	278	0,500
3. Zyklus	244	200	220	379	935	540	1,100
4. Zyklus	359	237	285	585	1496	843	2,000
WBL-04, 42,40 m							
2. Zyklus	3	46	6	167	100	125	0,341
3. Zyklus	9	77	17	162	136	148	0,503
4. Zyklus	9	61	161	188	89	121	0,701
WBL-04, 61,00 m							
2. Zyklus	87	3471	169	462	6436	867	1,495
3. Zyklus	82	2486	159	593	2837	981	2,102
4. Zyklus	80	4614	157	766	2153	1125	2,800
WBL-04, 81,00 m							
2. Zyklus	162	584	253	380	817	517	1,503
3. Zyklus	223	1253	378	434	1510	674	2,107
4. Zyklus	483	1289	703	798	2391	1190	2,802



Bohrung, Versuchstiefe, Zyklus	Belastung			Entlastung			Max. Belastung pro Zyklus [MPa]
	Weg o [MPa]	Weg u [MPa]	Weg m [MPa]	Weg o [MPa]	Weg u [MPa]	Weg m [MPa]	
WBL-04, 99,40 m							
2. Zyklus	670	610	643	764	882	813	1,629
3. Zyklus	1290	1849	1541	891	1485	1119	2,197
4. Zyklus	1722	1627	1673	2029	1972	2021	2,803
WBL-07, 20,00 m							
2. Zyklus	115	39	58	191	277	226	0,683
3. Zyklus	160	87	113	387	567	462	1,284
4. Zyklus	156	83	109	459	771	573	1,496
WBL-07, 43,70 m							
2. Zyklus	234	599	335	248	2059	443	0,900
3. Zyklus	465	889	608	417	2374	705	1,502
4. Zyklus	926	1226	1062	777	2236	1158	2,305
WBL-07, 61,50 m							
2. Zyklus	274	441	339	202	674	311	1,302
3. Zyklus	1479	629	878	725	1991	1070	2,105
4. Zyklus	1417	512	756	1180	1346	1253	2,898
WBL-07, 79,50 m							
2. Zyklus	411	3585	733	547	66935	1085	1,379
3. Zyklus	489	2125	800	560	32670	1105	2,503
4. Zyklus	1158	2929	1660	673	35534	1322	3,007
WBL-07, 98,00 m							
2. Zyklus	316	1147	493	324	11990	631	1,700
3. Zyklus	1526	2560	1890	792	12987	1487	2,501
4. Zyklus	1700	3792	2347	1050	9788	1884	3,003
WBL-08, 67,75 m							
2. Zyklus	26	46	33	87	108	96	0,800
3. Zyklus	43	107	61	96	192	128	1,400
4. Zyklus	55	242	89	94	249	137	2,000
WBL-09, 11,00 m							
2. Zyklus	3134	2978	3134	1875	10506	3211	2,102
3. Zyklus	4930	3113	3944	2749	6680	3876	2,697
4. Zyklus	6015	4627	5012	3343	7241	4574	3,305
WBL-10, 19,00 m							
2. Zyklus	2993	487	831	2964	1975	2371	1,705
3. Zyklus	4254	945	1567	17913	2043	3725	2,302
4. Zyklus	534	1234	750	2136	2092	2133	2,906

Insgesamt zeichnet sich ein heterogenes Bild der Seitendruckmodul-Verteilung der Versuchsgesamtheit. Es sind sowohl Versuche vorhanden, die über die beiden Wege und die Versuchszyklen hinweg sehr homogene Ergebnisse aufweisen, als auch solche, bei denen



zwischen den Wegen Modulunterschiede von bis zu zwei Größenordnungen ermittelt worden sind. Entlastungsmodule sind zumeist höher oder vergleichbar hoch wie Belastungsmodule des gleichen Zyklus und Versuchs.

In der Spitze betragen die Module bis >60.000 MPa (Tab. 3). In sehr deutlichem Kontrast dazu stehen die geringsten Module <10 MPa. Im arithmetischen Mittel betragen die Belastungsmodule über beide Wegaufnehmer etwa 1200 MPa, und die Entlastungsmodule etwa 3700 MPa. Bedingt durch die hohe Varianz der Module und die Abwesenheit einer gauß'schen Normalverteilung (Abb. 6) sind allgemein gültige Aussagen zur Werteverteilung kaum möglich.

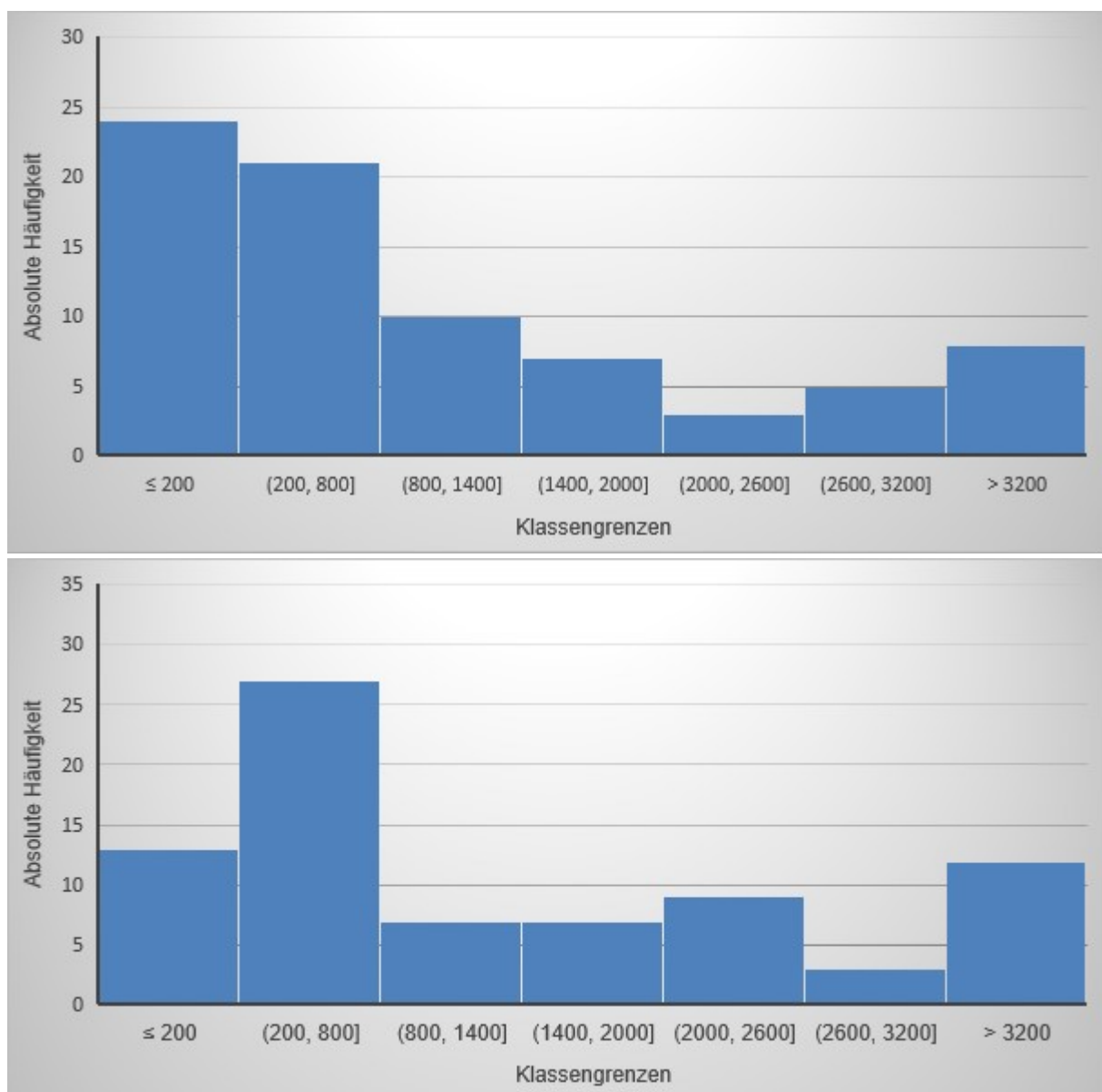
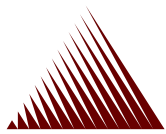


Abb. 6 Histogramm der absoluten Häufigkeitsverteilung aller Module des oberen und unteren Seitendruckwegs, oben Belastung, unten Entlastung, Werte der Klassengrenzen in MPa.



3.3. Ergebniseinordnung und Diskussion

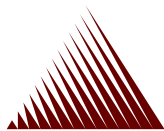
Im Folgenden werden insbesondere die Extremwerte der vorgestellten Bohrlochaufweitungsversuchs-Ergebnisse in Relation zu den vorliegenden Bohrlochscans sowie zu den Schichtenverzeichnissen gestellt, um eine Beurteilung der Ursache für die zum Teil große Varianz im Modul erbringen zu können.

Insgesamt zeigt sich eine sehr große Varianz der ermittelten Module von über vier Größenordnungen, minimal 3 MPa bis maximal über 60.000 MPa. Diese Varianz ist nicht nur zwischen den Versuchen in unterschiedlichen Messtiefen und Bohrlöchern groß, sondern auch im selben Bohrloch, bisweilen am selben Messpunkt, und beträgt auch dort bis zu zwei Größenordnungen. Um eine Vergleichbarkeit und Einordnung der Ergebnisse der Bohrlochaufweitungsversuche miteinander zu ermöglichen, mit dem Ziel, sie in eine überschaubare Anzahl Klassen zu unterteilen, ist eine Vereinheitlichung der Module pro Versuch notwendig.

Im Allgemeinen liefert der Entlastungsmodul, linear-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten vorausgesetzt, zumeist belastbarere Module als der Belastungsmodul, da unter anderem Anlegeeffekte an die Bohrlochwand keine Rolle spielen. Darüber hinaus wurde berücksichtigt, dass Bohrlochaufweitungsversuche in ihrem maximalen Zyklus zum Teil bereits in plastisches Dehnungsverhalten übergehen können. Da in dieser Versuchsreihe Bohrlochaufweitungsversuche mit fünf Versuchszyklen durchgeführt worden sind, sollte daher einer der mittleren Versuchszyklen ausgewählt werden, um den Effekt von Anlegeeffekten und plastischer Verformung auf den resultierenden Modul zu minimieren. Außerdem ist der Effekt von Heterogenität im Gesteinskörper, z. B. durch Trennflächen, Lithologiewechsel und den Zustand der Bohrlochwand, zu berücksichtigen, damit der Gebirgsmodul nicht überschätzt oder unterschätzt wird. Dies ist im Rahmen der hier vorliegenden Informationen nicht trivial und nur eingeschränkt möglich, da neben den Bohrlochaufweitungsversuchen nur die Bohrlochscans und die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen vorliegen, jedoch keine Fotos der Bohrkerns geschweige denn weitere Feld- und Laboruntersuchungen. Aufgrund dessen wurde entschieden, nur die gemittelten Wege des 3. Entlastungszyklus miteinander zu vergleichen, d.h. also des arithmetischen Mittels des oberen und unteren Wegaufnehmers (Seitendruckversuch) bzw. der drei Wegaufnehmer des Dilatometers. Die entsprechenden Werte sind Tab. 4 zu entnehmen.

Tab. 4. Module des gemittelten Weges des 3. Entlastungszyklus, pro Bohrung, entnommen aus Anlage 1a bis 1c bzw. 2a bis 2m.

WBL-02, 20,00 m	WBL-04, 42,40 m	WBL-04, 61,00 m	WBL-04, 81,00 m	WBL-04, 99,40 m	WBL-07, 20,00 m	WBL-07, 43,70 m	WBL-07, 61,50 m	WBL-07, 79,50 m	WBL-07, 98,00 m	WBL-08, 67,75 m	WBL-09, 11,00 m	WBL-09, 21,00 m	WBL-09, 31,00 m	WBL-10, 19,00 m	WBL-10, 51,00 m
540 MPa	148 MPa	981 MPa	674 MPa	1119 MPa	462 MPa	705 MPa	1070 MPa	1105 MPa	1487 MPa	128 MPa	3876 MPa	18746 MPa	23678 MPa	3725 MPa	27294 MPa



Die Spannbreite der Module wird durch die Vereinfachung auf den dritten gemittelten Entlastungsmodul von über vier Größenordnungen auf etwa zwei Größenordnungen reduziert. Eine Betrachtung der Module auf logarithmischer Skala erscheint aussagekräftiger, als die Zahlenwerte auf einer linearen Skala zu vergleichen. Die weiterhin derart große Bandbreite des Datensatzes ist erwartbar, da Versuche sowohl in hartem Fels mit wenigen Trennflächen, als auch in entfestigten Gesteinen, z. T. mit Bohrlochwandausbrüchen, durchgeführt worden sind.

Die besonders niedrigen Module (<200 MPa) aus Tab. 4 stammen aus zwei Bohrungen, die entweder nicht standfest genug für einen Bohrlochscan in dem entsprechenden Abschnitt waren, oder einen größeren Bohrlochwandausbruch im Bereich der Versuchsstrecke aufwiesen (grün, Abb. 7). Das Schichtenverzeichnis spricht die Schichten, in denen diese Versuche durchgeführt worden sind, als sandige bis schluffige Sedimente an. Diese Versuche werden der Modulkategorie I zugeordnet (Tab. 5).

Der Großteil der gemittelten Entlastungsmodul des 3. Versuchszyklus befindet sich im Bereich einiger 100 MPa bis etwa 1500 MPa (Tab. 4). Der nächsthöhere Modul liegt bei etwa 3700 MPa, so dass auch auf Basis der Obergrenze der Modulkategorie I bei 200 MPa, der logarithmischen Skala der Werte, sowie der Wertelücke zwischen 1500 MPa und 3700 MPa, 2000 MPa als Obergrenze der Modulkategorie II vorgeschlagen wird (Tab. 5). Versuche, die diese Modulkategorie ergeben haben, sind an Versuchspositionen mit prägnanten Trennflächen durchgeführt worden und zeigten ein mitunter leicht zerrüttetes Gebirge (gelb, Abb. 7). Laut Schichtenverzeichnis wurde das Bohrgut bzw. der Bohrkern überwiegend als siliziklastisches Lockersediment angesprochen (Korngrößen schluffig-sandig bis sandig-kiesig), im Fall der beiden höchsten Modul dieser Klasse wurde das Gestein als Tonstein klassifiziert.

Gemittelte Entlastungsmodul im dritten Versuchszyklus oberhalb von 2000 MPa sind nur in den Bohrungen gemessen worden, die im Bergwerk abgeteuft wurden. Die Klassifizierung anhand der Modulgrößenordnungen legt eine Untergliederung in zwei Klassen nahe, auch weil zwischen Modulkategorie III (2000 bis 20000 MPa) und Modulkategorie IV (>20000 MPa) ein Gefügeunterschied laut Bohrlochscan vorliegt: Versuche der Modulkategorie III zeigen entweder eine prägnante Schichtung oder eine Kluft direkt im Versuchsbereich (Abb. 7, orange), während Versuche der Modulkategorie IV keine prägnanten Trennflächen aufweisen (Abb. 7, rot). Das Schichtenverzeichnis beschreibt das an der Versuchsposition anstehende Gestein als kompakte, teilweise klüftige Kalksteine (Bohrung WBL-09) bzw. als kompakte Sandstein-Tonstein-Abfolge (Bohrung WBL-10).

Tab. 5. Empirische abgeleitete Modulklassen und Klassifizierungskriterien der Versuchshorizonte, farbkodiert analog zu den entsprechenden Versuchen der Klassen in Abb. 7.

Modulkategorie	Klassifizierung
Modulkategorie I	geringer gemittelter Entlastungsmodul (<200 MPa) im dritten Versuchszyklus, Gebirge an Versuchsposition stärker zerrüttet, ggf. mit Bohrlochwandausbrüchen, und von prägnanten Trennflächen durchzogen
Modulkategorie II	mittlerer gemittelter Entlastungsmodul (200 MPa bis 2000 MPa) im dritten Versuchszyklus, Gebirge an Versuchsposition ggf. leicht zerrüttet, und von prägnanten Trennflächen durchzogen
Modulkategorie III	erhöhter gemittelter Entlastungsmodul (2000 MPa bis 20000 MPa) im dritten Versuchszyklus, optisch standfestes Gebirge an Versuchsposition, wenig prägnante Trennflächen
Modulkategorie IV	hoher gemittelter Entlastungsmodul (>20000 MPa) im dritten Versuchszyklus, optisch standfestes Gebirge, keine prägnanten Trennflächen

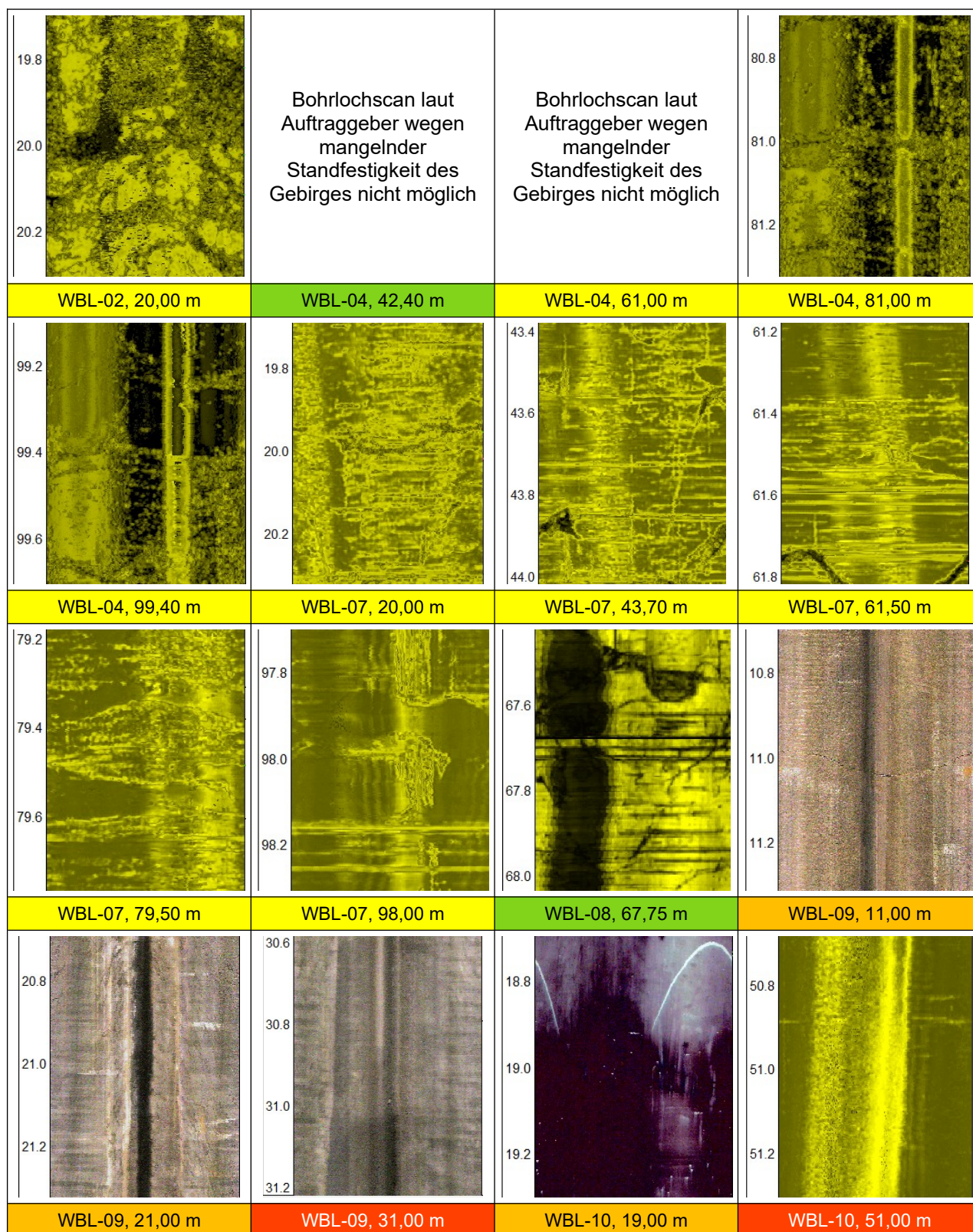
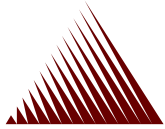


Abb. 7 Bohrlochscanner-Aufnahmen der BAV-Positionen, farbkodiert gemäß Modulklassen (Tab. 5), grün: geringer Modul, gelb: mittlerer Modul, orange: erhöhter Modul, rot: hoher Modul.



Es ist diskutabel, inwiefern eine Bewertung und Ergebnisklassifizierung von nur sechzehn Versuchen statistisch aussagefähig ist. Daher ist die hier vorgenommene Klassifizierung nur als pragmatische Herangehensweise auf die hier vorliegende Versuchsreihe zu sehen, auf keinen Fall jedoch als allgemein gültige Aussage oder Gesetzmäßigkeit.

Es ergeben sich aus der Auswahl gewichteter Ergebnisse der Bohrlochaufweitungsversuche, das heißt in diesem Fall die Beschränkung auf den gemittelten Entlastungsmodul des dritten Versuchszyklus, in Verbindung mit Erkenntnissen aus Bohrlochscans und Schichtenverzeichnis, plausible Erklärungen für die Varianz in der Versuchsreihe. Durch die intuitiv ableitbaren Kriterien der Lithologie, der Gefügeelemente und der Bohrlochwandintegrität lassen sich die hier vorgestellten Klassen relativ eindeutig voneinander abgrenzen, charakterisieren und erklären. Die Varianz der Messergebnisse entspricht demnach der Heterogenität des untersuchten Gesteins am Versuchshorizont, und spiegelt somit die Bandbreite der Gebirgsmodule im Untersuchungsgebiet wider.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Im Zuge der Vorerkundung der Aus- und Neubaustrecke Hannover-Bielefeld wurden geotechnische Untersuchungen im Ortsteil Nammen von Porta Westfalica sowohl über Tage, als auch im Erzbergwerk Barbara, durchgeführt. Gegenstand dieses Berichts sind die Ergebnisse der Bohrlochaufweitungsversuche mit dem flexiblen Dilatometer und der Seitendrucksonde. Insgesamt sind sechzehn Versuche in sechs unterschiedlichen Bohrungen, davon zwei im Bergwerk, durchgeführt worden.

Als Funktion von Belastungsdifferenz und Wegdifferenz wurden aus den druckgeregelt zyklisch gefahrenen Versuchen Belastungs-, Entlastungs-, und Wiederbelastungsmodul berechnet. Während die Dilatometerversuche weitgehend homogene Module zwischen etwa 15000 MPa und etwa 25000 MPa ergaben, zeigten die Module der Seitendruckversuche eine sehr hohe Varianz. Über die Versuchsgesamtheit betrachtet beträgt diese bis über vier Größenordnungen, mit einem minimalen Belastungsmodul von 3 MPa und einem der maximalen Entlastungsmodul >60000 MPa. Die Varianz innerhalb eines Versuchszyklus zwischen den beiden Wegaufnahmen war zum Teil ebenfalls erheblich, und kann bis zu zwei Größenordnungen betragen.

Die Bohrlochaufweitungsversuche sind bewertet und qualifiziert worden, indem der gemittelte dritte Entlastungszyklus als der repräsentativste ermittelt wurde. Hierbei wurden die Aufnahmen der Bohrlochscans an den Versuchshorizonten sowie die Schichtenverzeichnisse herangezogen. Es wurde eine auf diese Versuchsreihe begrenzte Klassifizierung mit vier Klassen abgeleitet, die basierend auf Lithologie, Gefügeelementen und Bohrlochwandintegrität die Varianz in den Messergebnissen plausibel und intuitiv erklären kann.

(ppa. Dr. Alexander Monsees)