

MASTERARBEIT

Institut für Angewandte Geowissenschaften

Technische Universität Graz

KOLKBILDUNG IM BEREICH DES OTTENSTEIN STAUDAMMES, NIEDERÖSTERREICH

Verfasser

Christoph Steinbauer

Betreuer

Univ.-Prof. B.A. M.S. Ph.D. Daniel Scott Kieffer

Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Qian Liu

Institut für Angewandte Geowissenschaften

Graz, 20.03.2012

Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Christoph Steinbauer', written in a cursive style.

Christoph Steinbauer

Graz, 20.03.2012

Danksagung

Ganz besonders möchte ich meinen Betreuern, Herrn Univ.-Prof. Daniel Scott Kieffer sowie Herrn Ao.Univ.-Prof. Qian Liu für Ihre Unterstützung danken. Auch danke ich Herrn Dipl.Ing.Friedrich Zemanek und Herrn Ing. Erich Binder, die dieses Projekt erst ermöglichten. Außerdem möchte ich mich bei dem technischen Personal des Kraftwerks Ottenstein für ihre Unterstützung in diesem Projekt bedanken. Ganz besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. Sven Jacobs, der mich bei der Archivaufarbeitung unterstützte.

Weiters danke ich den Mitarbeitern der TU Graz für ihre Hilfe, ganz besonders Frau Anna Pendl, Herrn Mag. Peter Schreiber und Herrn Gerhard Lauk.

Schlußendlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, ohne deren Unterstützung vieles nicht möglich wäre.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Sicherheit von Staumauern in Bezug auf die Erosion (im engl.: Scour) von geklüfteten Gebirge durch die Einwirkung von Wasser. Zu diesem Zweck wurde die Auskolkung von 1957 im Bereich des Kraftwerks Ottenstein neu aufgearbeitet und anhand der Blocktheorie sowie der „Block Erodability Spectrum Analysis“ neu betrachtet. Die Datengrundlage lieferte einerseits eine Aufarbeitung aller bestehenden Archivaufzeichnungen der EVN, des betreuenden Geologen Dr. Sven Jacobs, sowie bestehende Aufzeichnungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft in Wien. Zusätzlich wurde eine geotechnische Kartierung im Bereich der Sperre Ottenstein, sowie eine detaillierte Tosbeckenstudie unter der Verwendung eines Laserscanners durchgeführt.

Die Auswertung der gewonnenen Daten zeigte, dass die vorherrschenden geologischen Bedingungen, die Auskolkung von 1957 begünstigten. Begünstigend wirkt in diesem Fall, das auftretende blockige Gebirge, die teilweise offenen Klüften, die Blockgrößen als auch die Orientierung der entfernbarer Blöcke.

Abstract

This thesis deals with dam safety with regard to scour of jointed rock mass influenced by flowing water. For this purpose the scour event of 1957 at Ottenstein dam (Lower Austria) was studied and investigated using block theory and the Block erodability spectrum analysis. This investigation was based on archive data of EVN, the records of Dr. Sven Jacobs and documents of the „Bundesamt für Wasserwirtschaft“ in Vienna. Additionally, a geotechnical field study and a detailed study of the plunge pool using, amongst others, a laser scanner was carried out.

Data analysis showed that the scour of 1957 was favored by the occurring geological conditions. The blocky rock mass in combination with open discontinuities, block size and orientations of the removable blocks favored the scour event of 1957.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	VORWORT.....	1
1.2	FRAGESTELLUNG UND ZIEL DER ARBEIT.....	2
2	METHODIK.....	3
2.1	BLOCKTHEORIE.....	3
2.1.1	<i>Definition des Begriffes „Block“.....</i>	4
2.1.2	<i>Block-Typen.....</i>	7
2.1.3	<i>Schmidtsches Netz.....</i>	9
2.1.4	<i>Anwendung der Blocktheorie in stereographischen Projektionen.....</i>	10
2.1.5	<i>Unterscheidung zwischen endlichen und unendlichen Blöcken.....</i>	12
2.1.6	<i>Unterscheidung zwischen entfernbareren und nicht entfernbareren Blöcken.....</i>	13
2.1.6.1	Bestimmung entfernbarer Blöcke.....	14
2.1.6.2	Kinematik und Stabilität entfernbarer Blöcken.....	17
2.2	KOLKBILDUNG.....	23
2.2.1	<i>Erodibility Index Method (EIM).....</i>	24
2.2.2	<i>Kolkbildung im Bereich von Staudämmen.....</i>	27
2.3	GEBIRGSKENNWERTE.....	30
2.3.1	<i>Verwitterung.....</i>	30
2.3.2	<i>Gesteinsfestigkeit.....</i>	30
2.3.3	<i>Orientierung.....</i>	30
2.3.4	<i>Trennflächenrauigkeit und Welligkeit.....</i>	31
2.3.5	<i>Öffnungsweite.....</i>	31
2.3.6	<i>Füllung.....</i>	32
2.3.7	<i>Wasserführung.....</i>	32
2.3.8	<i>Durchtrennungsgrad.....</i>	32
2.3.9	<i>Trennflächenabstand.....</i>	33
2.3.10	<i>Blöcke und Blockhohlformen.....</i>	34
2.4	LIDAR.....	35
3	SPERRE OTTENSTEIN.....	38
3.1	VORWORT.....	38
3.2	ÜBERBLICK SPERRE OTTENSTEIN.....	38
3.3	HOCHWASSERENTLASTUNGSANLAGE DER SPERRE OTTENSTEIN.....	39
3.4	STAU KLAPPENVERSUCHE.....	43

3.4.1	<i>Stauklappenversuch am 01.08.1957</i>	44
3.4.2	<i>Stauklappenversuch am 12.08.1957</i>	44
3.4.3	<i>Stauklappenversuch am 03.09.1957</i>	44
3.4.3.1	Ablauf des Stauklappenversuches	44
3.4.3.2	Aufgetretene Schäden im Tosbecken	49
3.4.3.3	Hydrodynamische Beanspruchungen des Tosbeckens	50
3.4.3.4	Bisherige Erklärungen der Auskolkung	50
3.4.3.5	Sanierungsmaßnahmen	51
3.4.4	<i>Stauklappenversuch am 22.08.1960</i>	53
3.4.5	<i>Stauklappenversuche vom 05.10.1961</i>	53
3.4.6	<i>Stauklappenversuche vom 29.10.1964</i>	53
3.4.7	<i>Zusammenfassung der Stauklappenversuche</i>	53
3.5	ÜBERLÄUFE VON 1957 BIS 2011	56
3.5.1	<i>Hochwasserereignis am 12.08.1959 bis 13.08.1959</i>	56
3.5.2	<i>Hochwasserereignisse von 1965 bis 1975</i>	56
3.5.3	<i>Hochwasserereignisse von 1975 bis 1985</i>	56
3.5.4	<i>Hochwasserereignisse von 1985 bis 2002</i>	56
3.5.5	<i>Hochwasserereignis vom 07.08.2002 bis 09.08.2002</i>	56
3.5.5.1	Schäden im Bereich des Tosbeckens	57
3.5.6	<i>Zusammenfassung der Überläufe</i>	59
3.6	ZUSAMMENFASSUNG DER AUFGETRETENEN SCHÄDEN DES TOSBECKENS	61
4	GEOLOGISCHE VERHÄLTNISS	62
4.1	REGIONALE GEOLOGIE	62
4.2	LOKALE GEOLOGIE	66
4.2.1	<i>Auftretende Lithologien im Sperrenumfeld</i>	66
4.2.2	<i>Bestehende Gebirgskennwerte</i>	69
4.2.3	<i>Geologie des Tosbeckens</i>	69
4.3	GEBIRGSCHARAKTERISIERUNG	70
4.3.1	<i>Vorwort</i>	70
4.3.2	<i>Verwitterung</i>	70
4.3.3	<i>Gesteinsfestigkeit</i>	72
4.3.4	<i>Orientierungsdaten</i>	72
4.3.5	<i>Rauhigkeit und Welligkeit</i>	76
4.3.6	<i>Öffnungsweite</i>	78
4.3.7	<i>Füllung</i>	79
4.3.8	<i>Durchtrennungsgrad</i>	79
4.3.9	<i>Trennflächenabstand</i>	82
4.3.10	<i>Volumetric joint count</i>	83

4.3.11	<i>Wasserführung</i>	83
4.4	GEOLOGISCHE KARTIERUNG	84
4.4.1	<i>Kartierung des Sperrenumfeldes</i>	84
4.4.2	<i>Kartierung des Tosbeckens</i>	84
5	BLOCKHOHLFORM-KATALOG	88
5.1	VORWORT	88
5.2	POSITION DER BLOCKHOHLFORMEN	89
5.3	HÄUFIGKEIT DER AUFTRETENDEN SET- KOMBINATIONEN	89
5.4	BLOCKHOHLFORMEN	90
5.5	JRC DER ERFASSTEN BLOCKHOHLFORMEN	93
5.6	BLOCKHOHLFORM- VOLUMEN	94
5.7	BLOCKGEWICHT	95
6	BLOCKTHEORIE	97
6.1	VERWENDETE PROGRAMME	97
6.2	DATENGRUNDLAGE	98
6.3	AUFTRETENDE JOINT PYRAMID (JP)	99
6.4	EINTEILUNG DER JP IN BLOCKTYPEN	99
6.5	BEWEGUNGSANALYSE	101
6.6	BLOCK FORM, VOLUMEN UND GEWICHT	103
6.7	STABILITÄTSANALYSE	106
7	DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG	118
8	LITERATURVERZEICHNIS	125
9	ANHANG	127
9.1	GEBIRGSKENNWERT	127
9.1.1	<i>Verwitterung</i>	127
9.1.2	<i>Gesteinsfestigkeit</i>	128
9.1.3	<i>Trennflächenrauigkeit und Welligkeit</i>	129
9.2	LIDAR ABLAUF	130
9.2.1	<i>Planung und Vorbereitung</i>	130
9.2.2	<i>Datenaufnahme</i>	131
9.2.3	<i>Datenregistrierung</i>	131
9.3	KOLKBILDUNG	132
9.4	LAGE DER BLOCKHOHLFORMEN	135
9.5	FOTODOKUMENTATION DER BLOCKHOHLFORMEN	140

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Unterscheidung endlicher, unendlicher Block	6
Abb. 2-2	Unterscheidung der Blocktypen	7
Abb. 2-3	Prinzip der stereographischen Projektion	9
Abb. 2-4	Prinzip der whole sphere projection	10
Abb. 2-5	Darstellung eines entfernbar, als auch nicht entfernbar Blockes	14
Abb. 2-6	Darstellung des in Kapitel 2.1.4 angeführten Beispiels; Beschreibung siehe Text	16
Abb. 2-7	Beschreibung der fiktiven Kraft F sowie der Bewegungsrichtung S	18
Abb. 2-8	Darstellung des in Kapitel 2.1.4 angeführten Beispiels;	20
Abb. 2-9	Darstellung des in Kapitel 2.1.4 angeführten Beispiels;	22
Abb. 2-10	Ricobayo Staudamm	23
Abb. 2-11	Erodibility Index und Stream Power	25
Abb. 2-12	Trennflächenorientierung und Strömungsrichtung	27
Abb. 2-13	Beschreibung eines Überfallstrahles	29
Abb. 2-14	Darstellung des scheinbaren Trennflächenabstandes L_0	33
Abb. 2-15	Verwendeter Laser Scanner	36
Abb. 3-1	Überblick, Sperre Ottenstein; Quelle:EVN	38
Abb. 3-2	Lage des Kraftwerkes Ottenstein	40
Abb. 3-3	Stauklappen der Sperre Ottenstein	41
Abb. 3-4	Freier Überfall in das Tosbecken, Höhendifferenz 62 m	42
Abb. 3-5	Abmaße des Tosbeckens	43
Abb. 3-6	Beginn des Überfallversuches	46
Abb. 3-7	Stauklappenversuch vom südlichen Hügel aus beobachtet	46
Abb. 3-8	Aufschlagsfläche des Überfallstrahles	47
Abb. 3-9	Zustand des Tosbeckens vor der Inbetriebnahme; Quelle: EVN-Bildarchiv	48
Abb. 3-10	Zustand des Tosbeckens nach dem Überfall am 03.09.1957;	48
Abb. 3-11	Blick von SE auf das sanierte Tosbecken	52
Abb. 3-12	Beschädigungen der Tosbeckensohle infolge des Hochwassers vom 07.08.2002	58
Abb. 4-1	Strukturelle Übersichtskarte des variszischen Orogens in Mitteleuropa	63
Abb. 4-2	SSE gerichteter Deckenbau der Böhmisches Masse im Ordovizium bis Silu	65
Abb. 4-3	Geologische Übersichtskarte	67
Abb. 4-4	Rastenberger Granodiorit	68
Abb. 4-5	Übersichtskarte des untersuchten Gebietes	70
Abb. 4-6	Rastenberger Granodiorit, Verwitterungszustand	71
Abb. 4-7	Verwitterungszustand	71
Abb. 4-8	Darstellung des Gesteinsfestigkeitsindex R6 bis R0 sowie die Anzahl der Beprobungen	72

Abb. 4-9 Darstellung aller Trennflächenmessungen.....	73
Abb. 4-10 Unterteilung der 682 Trennflächenmessungen in drei Bereiche.	75
Abb. 4-11 JRC global und per Set.	77
Abb. 4-12 Welligkeit, beschrieben durch den Winkel „i“ [°].....	78
Abb. 4-13 Termination, Global und per Set.....	80
Abb. 4-14 Länge der erfassten Trennflächenspuren.....	81
Abb. 4-15 Trennflächenabstand per Set.....	82
Abb. 4-16 Geologische Übersichtskarte der Sperre Ottenstein.....	85
Abb. 4-17 Tosbecken Ottenstein	86
Abb.4-18 Tosbecken Ottenstein, Darstellung der auftretenden Sets.....	87
Abb. 5-1 Abbildung der Blockhohlform	88
Abb. 5-2 Darstellung der Häufigkeit als auch Anzahl der auftretenden Trennflächensets.....	90
Abb. 5-3 Geometrische Grundformen	90
Abb. 5-4 Auftretende Blockhohlform, global;.....	91
Abb. 5-5 Auftretende Blockhohlform per Setkombination.....	92
Abb. 5-6 JRC der erfassten Blockhohlformen, global als auch per Set (1 bis 4).....	93
Abb. 5-7 Übersicht Block Volumen	94
Abb. 5-8 Übersicht Blockgewicht;.....	96
Abb. 6-1 Darstellung eines zweidimensionalen Blockes.....	97
Abb. 6-2 Darstellung der „whole sphere projection“	100
Abb. 6-3 Darstellung der „whole sphere projection“ der auftretenden Sets 1 bis 4.....	102
Abb. 6-4 Darstellung der dreidimensionalen Form der auftretenden Blöcke	103
Abb. 6-5 Darstellung der Trennflächenspuren des Sets 1 bis 4	104
Abb. 6-6 Volumen-Gewichtvergleich	105
Abb. 6-7 Darstellung der Stabilitätsbereiche	107
Abb. 6-8 Darstellung der betrachteten Kräfte	108
Abb. 6-9 Richtung der vorherrschenden Strömungsrichtung unter einem Winkel von 95°	109
Abb. 6-10 Darstellung der Stabilitätsbereiche	111
Abb. 6-11 Verlauf des Winkel θ für die JP0000, JP0100 sowie JP1000.....	112
Abb. 6-12 Verlauf des minimalen Winkels θ , als Liniendiagramm.....	112
Abb. 6-13 Verlauf des minimalen Winkels θ , als Radar- Plot.....	113
Abb. 6-14 Verlauf der fiktiven Kraft F_{\min}	114
Abb. 6-15 Hüllkurve als auch Radar- Plot der fiktiven Kraft F_{\min} ;.....	115
Abb. 6-16 Verlauf der horizontalen fiktiven Kraft F_h	116
Abb. 6-17 Hüllkurve, dargestellt als Liniendiagramm als auch als Radar- Plot	117
Abb. 7-1 Darstellung von Blöcken ohne parallele Seitenflächen	122
Abb. 7-2 Entstehung eines Körpers mit parallelen Seitenflächen.	123

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit der **EVN** (Energie Versorgung Niederösterreich) im Zeitraum vom 06.09.2010 bis einschließlich dem 08.10.2010 durchgeführt. Die Tosbeckenstudie sowie *LiDAR*-Aufnahmen wurden im Zeitraum vom 04.10.2010 bis 08.10.2010 abgehalten.

Im Rahmen dieser Masterarbeit gewährte mir die **EVN** Zugriff zu dem Archiv des Kraftwerkes Ottenstein, dem Archiv der **EVN** Direktion sowie auf relevante Unterlagen von Herrn Dr. Sven Jacobs, der als Geologe für die **EVN** tätig ist. Ebenso erhielt ich Zugriff auf das Archiv des Bundesamtes für Wasserwirtschaft (Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung).

Im Rahmen dieser Archivaufarbeitung wurden von mir alle relevanten Daten der Sperre Ottenstein erhoben sowie alle Überläufe über die Staumauer zusammengetragen, um die Entwicklung des Tosbeckens seit den 50er Jahren bis heute nachvollziehen zu können. Die Daten der Archivaufarbeitung sowie die gewonnenen Daten der Tosbeckenstudie dienten mir hierbei als Grundlage für die vorliegende Masterarbeit.

1.2 Fragestellung und Ziel der Arbeit

Im Rahmen meiner Masterarbeit beschäftige ich mich mit der Sicherheit von Staumauern in Bezug auf die Erosion (im engl.: Scour) von geklüfteten Gebirge durch die Einwirkung von Wasser.

Durch die Einwirkung von Wasser und die damit einhergehende Erosion kann die Stabilität einer Staumauer beeinflusst werden. Nicht nur ältere Staudämme, sondern auch moderne Staudämme sind von diesem Problem betroffen, da die gängigen Erosionsmodelle, welche für die Berechnung verwendet werden, begrenzt sind hinsichtlich der Vorhersage der zu erwartenden Erosion.

Als Beispiel hierfür zu nennen sind Vereinfachungen, die nicht auf die vorhandenen Trennflächen und die dadurch geformten Blöcke in einem Gebirge eingehen. Diese Blöcke sind jedoch der treibende Faktor hinter der Erosion in einem geklüfteten Gebirge. In meiner Masterarbeit versuche ich deshalb gezielt auf individuelle Blöcke einzugehen. Das Ziel ist hierbei mithilfe der Blocktheorie ein besseres Verständnis für die Erosion im geklüfteten Gebirge zu entwickeln. Das Hauptziel dieser Arbeit ist jedoch die Auskolkung von 1957 in Ottenstein aufzuarbeiten und sie mithilfe der Blocktheorie neu zu bewerten.

2 Methodik

2.1 Blocktheorie

Die Blocktheorie wurde von Richard E. Goodman sowie Gen-hua Shi begründet und findet heutzutage Anwendung bei der Planung und dem Design geotechnischer Projekte.

Blöcke können sich in einem Gebirge durch vorhandene Trennflächen als auch durch das Zusammenwirken von Trennflächen mit natürlichen sowie künstlichen Freiflächen formen. Ohne eine vorhandene Freifläche sind diese Blöcke jedoch unbeweglich, bildet sich eine Freifläche durch einen künstlichen oder natürlichen Aufschluss aus, sind die auftretenden Blöcke durch ihre Orientierung zur Freifläche, ihre Form sowie durch die auftretende Reibung zwischen den Trennflächen in beweglich oder unbeweglich zu unterteilen. Sobald ein Block entfernt wird, entsteht Raum, in den sich wiederum Blöcke bewegen können, die zuvor unbeweglich waren. So ist es möglich, dass durch die Entfernung eines Blockes benachbarte Blöcke destabilisiert werden. Würde man hingegen denjenigen Block erkennen der dies hervorruft, wäre es möglich durch Sicherung dieses Blockes (den sog. „Key Block“ oder Schlüsselstein) das Destabilisieren weiterer Blöcke zu vermeiden (Goodman & Shi,1985).

Ziel der Blocktheorie ist es nun, vorhandenen kritischen Blöcke zu identifizieren, lokalisieren sowie ihre Größe und Form zu beschreiben. Wichtig ist hierbei die Identifizierung des sogenannten Schlüsselsteins oder *Key Block*.

Die dafür benötigten Informationen sind:

- Einfallrichtung und Einfallwinkel der auftretenden Trennflächen bzw. Trennflächensets des untersuchten Gebirges
- Anzahl und Orientierung der vorhandenen Freiflächen
- Der Abstand zwischen den auftretenden Trennflächen bzw. Trennflächenscharen

Um die Blocktheorie in der Praxis anzuwenden, sind einige Begrenzungen dieser Methode definiert (Goodman & Shi,1985):

- Alle Trennflächen werden als ebene Flächen angesehen
- Trennflächen erstrecken sich ohne Unterbrechung durch das gesamte untersuchte Gebirge
- Untersuchte Blöcke werden als steif sowie als nicht verformbar angesehen
- Trennflächenmessungen sowie Orientierungsdaten von Freiflächen werden als Datengrundlage erhoben. Es ist hierbei möglich, die Auswertung mithilfe von Trennflächensets durchzuführen.

2.1.1 Definition des Begriffes „Block“

Ein Block ist ein geometrischer Körper, der von einer Anzahl Flächen begrenzt wird. Betrachtet man eine Fläche dieses Körpers, so teilt diese Fläche den Raum in zwei Bereiche: einem Bereich über dieser Fläche sowie einem Bereich unter dieser Fläche. In der Blocktheorie verwendet man dafür den Begriff oberer beziehungsweise unterer Halbraum (im engl.: *half space*). In der vorliegenden Arbeit möchte ich hierbei den Begriff *half space* verwenden. *Lower half space* (Kurzschreibweise: L bzw. 1) für den Bereich unter einer Fläche, *upper half space* (Kurzschreibweise: U bzw. 0) für den Bereich über einer Fläche. Ein Block wird demnach aus einer Kombination von *half spaces* gebildet.

Um dies zu veranschaulichen, stellen wir uns einen Körper vor, der aus vier Flächen aufgebaut wird Tab. 2-1. Jede dieser Flächen trägt mit je einer *half space* zum Volumen dieses Körpers bei. Wie aus Tab. 2-1 ersichtlich, ist die erste Fläche mit U_1 am Blockvolumen beteiligt, die zweite Fläche mit L_2 , die dritte mit L_3 sowie die vierte Fläche mit U_4 . Als Kurzschreibweise verwendet man hierbei $U_1L_2L_3U_4$ oder 0110 zur Blockbeschreibung.

Fläche 1	upper half space	U_1	0
Fläche 2	lower half space	L_2	1
Fläche 3	lower half space	L_3	1
Fläche 4	upper half space	U_4	0

Tab. 2-1: Dargestellt sind die vier Oberflächen (Fläche 1 – 4) eines gedachten Körpers und die ihn begrenzenden Halbräume (z.B upper half space- U_1-0); Beschreibung siehe Text

Auftretende Blöcke können hierbei an allen Seiten von Flächen begrenzt werden. Man spricht demnach von endlichen Blöcken (im engl.: *finit Block*). Jedoch können auch Blöcke auftreten, die nicht durch Flächen gänzlich abgegrenzt werden können. Man spricht dabei von unendlichen Blöcken (im engl.: *infinif Block*). Die Unterscheidung ob ein Block endlich oder unendlich ist durch das *Shi's Theorem* definiert (Goodman & Shi,1985):

„A convex block is finite if its block pyramid is empty. Conversely, a convex block is infinite if its block pyramid is not empty.“

Ein konvexer Block ist demnach endlich, wenn die Blockpyramide (im engl.: *block pyramid* (BP)) leer ist. Wie bereits zuvor erwähnt, kann ein Block durch die ihn begrenzenden Flächen beschrieben werden, z.B. $U_1L_2L_3U_4$. Verschiebt man nun diese Flächen parallel zueinander, ohne sie dabei zu rotieren, daß sie sich in einem Punkt schneiden, so entsteht eine Pyramide, die sogenannte *block pyramid* (BP) ($U^0_1L^0_2L^0_3U^0_4$: Null bezieht sich darauf, dass die Flächen durch den Ursprung verlaufen). Um den Unterschied zwischen einem endlichen und einem unendlichen Block zu veranschaulichen, ist im Folgenden ein zweidimensionales Beispiel angeführt. In Abb. 2-1 (Block A) ist ein zweidimensionaler Block dargestellt, der sich aus U_1 der ersten Fläche, aus U_2 der zweiten Fläche sowie L_3 der dritten Fläche (Kurzschreibweise: $U_1U_2L_3$ oder 001) zusammensetzt. Um nun zu beweisen, dass es sich hierbei um einen endlichen Block handelt, wurden die begrenzenden Flächen verschoben, dass sie sich in einem Punkt schneiden. Der auftretende Block A ($U_1U_2L_3$) ist nun auf einen Punkt ($U^0_1U^0_2L^0_3$) reduziert. Bei $U^0_1U^0_2$ handelt es sich hierbei um die sogenannte *joint pyramid* (JP), bei L^0_3 um die *excavation pyramid* (EP) und bei U^0_3 um die *space pyramid* (SP). Der Index „0“ weist darauf hin, daß die Fläche durch den Ursprung verläuft.

Der betrachtete Block- oder anders ausgedrückt seine BP besteht demnach aus der Schnittmenge (\cap) von EP und JP Gl.2-1.

$$BP = EP \cap JP \qquad \text{Gl.2-1}$$

Um nun zu beweisen, dass der in Abb. 2-1 betrachtete Block A endlich ist, muß die BP leer sein. Anders ausgedrückt, die Schnittmenge von EP und JP muß Null ergeben (Goodman & Shi,1985) Gl.2-2.

$$EP \cap JP = 0$$

Gl.2-2

Eine alternative Aussage, ob es sich um einen endlichen oder unendlichen Block handelt, kann man erzielen, indem man eine SP betrachtet, die komplementär zur EP ist Gl.2-3.

$$SP = \sim EP$$

Gl.2-3

Demnach ist ein Block endlich, wenn seine JP eine Teilmenge (\subset) der SP ist Gl.2-4.

$$JP \subset SP$$

Gl.2-4

Wie in Abb. 2-1 (Block A) dargestellt, ist die JP- bestehend aus $U^0_1U^0_2$, teil der SP (U^0_3), demnach handelt es sich bei dem Block A um einen endlichen Block.

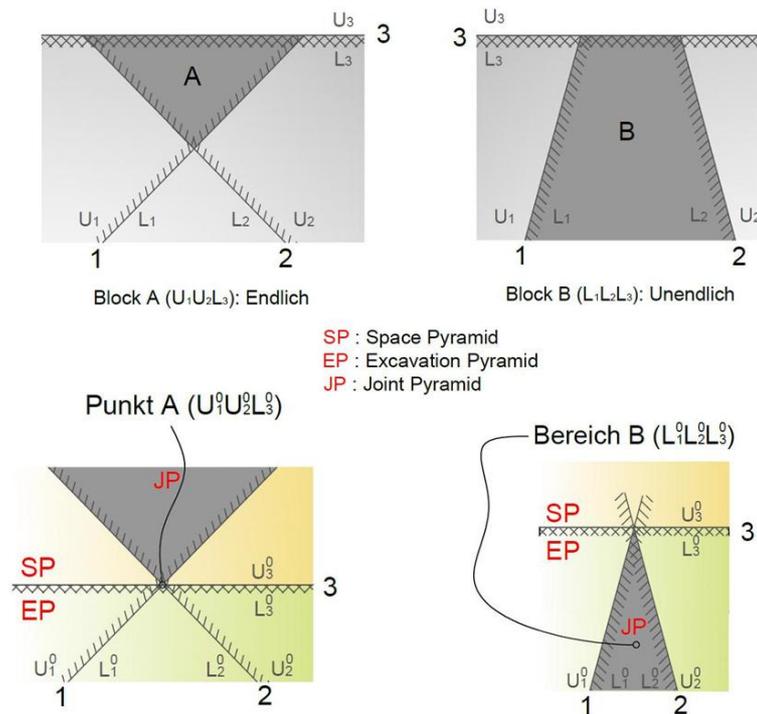


Abb. 2-1 Block A: Darstellung eines endlichen Blockes. Die JP (Joint Pyramid) ist in diesem Fall eine Teilmenge der SP (Space Pyramid); **Block B:** Darstellung eines unendlichen Blockes. Die JP ist in diesem Fall eine Teilmenge der EP (Excavation Pyramid); Beschreibung siehe Text; modifiziert nach (Goodman & Shi, 1985)

Betrachtet man nun den Block B ($L_1L_2L_3$) in Abb. 2-1 und wiederholt den zuvor beschriebenen Vorgang, so erhält man $L_1^0L_2^0L_3^0$. Die JP ($L_1^0L_2^0$) des Blockes ist in diesem Fall nicht in der SP (U_3^0) enthalten. Bei dem Block B handelt es sich demnach um einen unendlichen Block.

Ob ein beobachteter Block endlich oder unendlich ist, kann man entweder durch eine Vektoranalyse bestimmen oder anhand einer stereographischen Projektion. In der vorliegenden Arbeit verwende ich hierbei stereographische Projektionen.

2.1.2 Block-Typen

Grundsätzlich kann man zwischen endlichen (Block Typ 1, 2, 3, 4, 6) und unendlichen Blöcken (Block Typ 5) unterscheiden Abb. 2-2. Endliche Blöcke sind allseitig von Flächen begrenzt, dabei kann es sich zum Beispiel um Trennflächen als auch Freiflächen handeln.

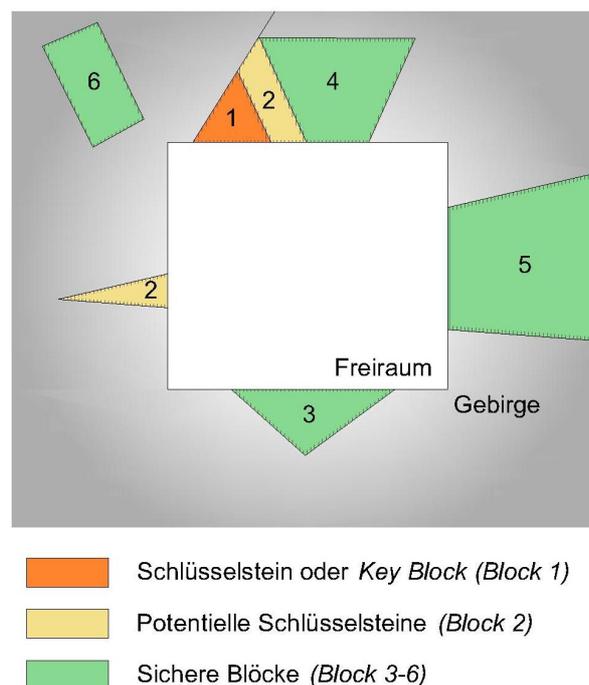


Abb. 2-2 Darstellung der möglichen Blöcke in einem Tunnelquerschnitt, Block Typen 1-4,6 sind hierbei endliche Blöcke. Bei Block Typ 5 handelt es sich um einen unendlichen Block. Weiters wurden die Blöcke unterteilt in: Sichere Blöcke (Block 3-6); Potentielle Schlüsselsteine (Block 2); Schlüsselstein (Block 1); modifiziert nach (Goodman & Shi, 1985)

Weiters kann man endliche Blöcke in nicht entfernbare als auch entfernbare Blöcke unterteilen. Bei nicht entfernbaren Blöcken handelt es sich um den Block

Typ 4 bis 6. Im Nachfolgenden sind die Eigenschaften dieser drei Blocktypen beschrieben.

Block Typ 6:	Block, der ausschließlich durch Trennflächen begrenzt wird (im engl.: <i>joint block</i>). Er grenzt demnach an keine Freifläche und ist unbeweglich.
Block Typ 5:	Block, der an eine Freifläche grenzt, jedoch keine geschlossene Form aufweist (im engl.: <i>infinite Block</i>). Durch das Fehlen einer geschlossenen Form ist er unbeweglich.
Block Typ 4:	Block, der durch seine Form unbeweglich ist (im engl.: <i>tapered block</i>). Durch entfernen des angrenzenden Blockes (2) ist es jedoch möglich diesen Block zu entfernen Abb. 2-2

Block Typen 1-3 sind im Gegensatz zu den Block Typen 4-6 entfernbar. Ob sie sich jedoch unter Einwirkung einer Kraft (zb. Schwerkraft) bewegen, hängt neben der Geometrie des Blockes auch von der Orientierung der resultierenden Kraft sowie der auftretenden Reibung zwischen den Trennflächen ab (Goodman R. , 1989). Im Nachfolgenden sind die Eigenschaften dieser drei Blocktypen beschrieben.

Block Typ 3:	Block, der durch seine Orientierung zur Freifläche unter der Einwirkung der Schwerkraft unbeweglich ist (im engl.: <i>save removable block</i>). Er kann jedoch entfernt werden, falls sich die Richtung der resultierenden Kraft verändert.
Block Typ 2:	Dargestellt in der Firste als auch in der Seitenwand von Abb. 2-2. Der Block in der Firste hat hierbei zwei parallele Seiten und kann sich deshalb nur in eine Richtung bewegen, nämlich parallel zu diesen Seitenflächen. Unebenheiten entlang dieser Flächen können die Reibung stark erhöhen und so die Entfernung des Blocks verhindern. Der Block an der Seitenwand hingegen hat eine flache Basisfläche und ist deshalb durch die auftretende Reibung gesichert. Hierbei handelt es sich um potentielle Schlüsselsteine (im engl.: <i>potential key block</i>)
Block Typ 1:	Block der durch die Herstellung einer Freifläche unter der Einwirkung der Schwerkraft unmittelbar entfernt wird. Hierbei handelt es sich um den sogenannten Schlüsselstein (im engl.: <i>key block</i>)

Um zu unterscheiden, ob ein endlicher Block entfernbar (Block Typ 1 bis 3) oder nicht entfernbar (Block Typ 4) ist, betrachtet man die BP (*block pyramid*) sowie die JP (*joint pyramid*). Nach (Goodman & Shi, 1985) ist ein endlicher Block entfernbar wenn:

„ A convex block is removable if its block pyramid is empty and its joint pyramid is not empty. A convex block is not removable (tapered) if its block pyramid is empty and its joint pyramid is also empty. “

Anhand stereographischer Projektionen ist es nun möglich zu unterscheiden, ob ein Block entfernbar (*removable*) oder nicht entfernbar (*not removable*) ist. In Kapitel 2.1.6 ist dafür ein Beispiel angeführt.

2.1.3 Schmidtsches Netz

Das Schmidtsche Netz dient zur graphischen Darstellung der räumlichen Orientierung von Flächen und Linearen. Dazu verlagert man eine Fläche bzw. Linear in den Mittelpunkt einer Kugel. Betrachtet man den Schnitt der Fläche mit dieser Kugel, so ergibt sich eine Linie, die auf der Kugeloberfläche verläuft. Der Schnittpunkt eines Lineares hingegen erzeugt zwei Durchstichpunkte auf der Kugeloberfläche. Um nun die Schnittlinie einer Fläche bzw. den Durchstichpunkt eines Lineares auf einer Ebene darzustellen, verwendet man stereographische Projektionen (Eisbacher, 1996). Dazu wird diese Kugel in eine obere bzw. untere Hemisphäre aufgeteilt. Man spricht von einer Lagenkugelprojektion der oberen Hemisphäre (*upper hemispherical projection (UHP)*), wenn der Blickpunkt der Projektion sich in der unteren Hemisphäre befindet. Befindet sich hingegen der Blickpunkt in der oberen Hemisphäre, spricht man von einer Lagenkugelprojektion der unteren Hemisphäre (*lower hemispherical projection (LHP)*).

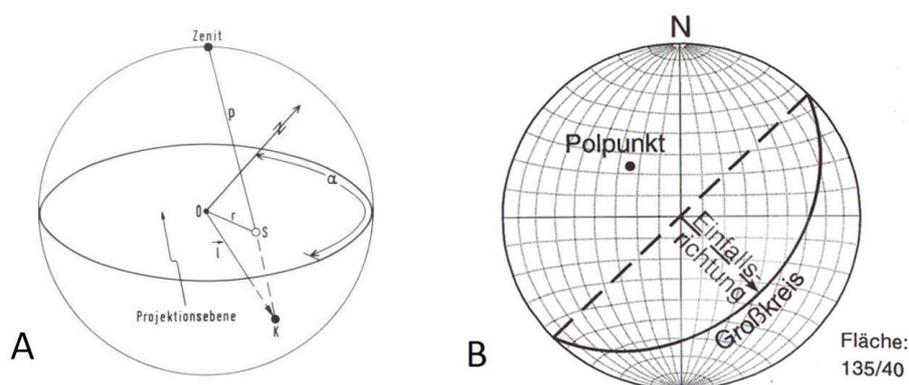


Abb. 2-3 Bild A: Prinzip der stereographischen Projektion. Ein Punkt *K* wird durch die Projektion auf eine Abbildungsebene (Punkt *S*) dargestellt. **Bild B:** Darstellung einer Fläche (135/40) und deren Polpunkt im Schmidtschen Netz; modifiziert nach (Eisbacher, 1996)

Durch eine stereographische Projektion Abb. 2-3.A wird der Punkt *K* der Kugel durch eine Verbindungslinie auf die Abbildungsebene als Punkt *S* dargestellt. In

Abb. 2-3.B erkennt man die Darstellung eines Großkreises, der durch den Schnitt einer Fläche (135/40) mit der unteren Halbkugel entsteht, sowie den Polpunkt der Fläche. Das Schmidtsche Netz ist flächentreu, jedoch nicht winkeltreu.

In der Blocktheorie verwendet man die sogenannte *whole sphere projection* (WHP). Bei der WHP werden wie in Abb. 2-4 beide Hemisphären einer Kugel dargestellt. Betrachtet man eine LHP, so befindet sich der Blickpunkt im Pol der oberen Halbkugel, dargestellt durch das Feld B in Abb. 2-4. Das Feld A in Abb. 2-4 stellt hingegen die untere Hemisphäre dar. Durch die WHP ist es demnach möglich die Oberfläche der Kugel, außer dem Bereich des Blickpunktes, in einer Ebene darzustellen.

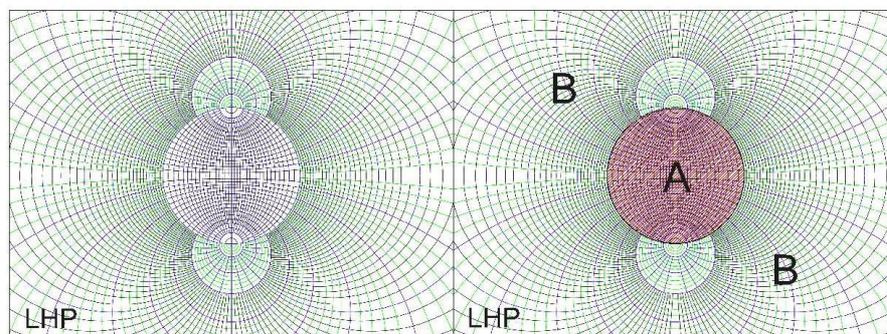


Abb. 2-4 Darstellung einer WHP (*whole sphere projection*); Bereich A stellt in einer LHP die untere Hemisphäre einer Kugel dar, Bereich B die obere Hemisphäre.

2.1.4 Anwendung der Blocktheorie in stereographischen Projektionen

Um die Anwendung der Blocktheorie zu veranschaulichen, betrachten wir vier Trennflächen (J1-J4) sowie eine horizontale Ebene (000/00). Bei dieser Ebene handelt es sich zum Beispiel um die Gesteinsfläche einer Tosbeckensohle.

J1	062/88
J2	342/80
J3	174/15
J4	286/84
Freifläche	000/00

In Abb. 2-6 ist eine WHP (*whole sphere projection*) der oben aufgelisteten Flächen dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Lagenkugelprojektion der unteren

Halbkugel (*lower hemispherical projection* (LHP)) Abb. 2-6 Pfeil A. Die Trennflächen J1 bis J4 sind somit durch Großkreise Abb. 2-6 Pfeil B dargestellt, die Freifläche als blauer Kreis hervorgehoben Abb. 2-6 Pfeil C. Die Großkreise der Trennflächen bilden hierbei Regionen aus, wie zum Beispiel die Region [0111] Abb. 2-6 Pfeil D. Diese Regionen repräsentiert jeweils eine JP (*joint pyramid*). Wie in Abb. 2-6 Pfeil D dargestellt, wird die Region [0111] sowohl durch Großkreise als auch Schnittpunkte dieser Großkreise definiert. Bei den Schnittpunkten (rote Kreise) handelt es sich dabei um die Seitenkanten der JP [0111], bei den Begrenzungslinien handelt es sich um die Seitenflächen der JP [0111]. Die Zahl 1 repräsentiert den Bereich unter der jeweiligen Fläche (*lower half space*), Null hingegen für den Bereich über einer Fläche (*upper half space*). Da es sich um eine Lagenkugelprojektion der unteren Halbkugel (LHP) handelt, befindet sich die EP (*excavation pyramid*) im inneren Bereich des blauen Kreises, welcher die Freifläche darstellt. Umgeben wird die EP von der SP (*space pyramid*). Die gesamte Anzahl der auftretenden JP beträgt nach (Goodman & Shi, 1985) Gl.2-5:

$$2^n \qquad \text{Gl.2-5}$$

Bei dem Exponenten „n“ handelt es sich hierbei um die Anzahl der auftretenden Trennflächen. Im obigen Beispiel mit 4 Trennflächen (n=4) treten demzufolge 16 JP auf:

0000	0111	1110	0101
1111	0001	0110	1010
0100	1100	1101	1000
1001	0011	1011	0010

Ist die Anzahl der Trennflächen größer als drei (n>3), so werden nicht alle JPs in der stereographischen Projektion wiedergegeben. Die Anzahl der in einer stereographischen Projektion auftretenden JP (N_r) ist nach (Goodman & Shi, 1985) Gl.2-6 :

$$N_r = n * (n - 1) + 2 \qquad \text{Gl.2-6}$$

Unter der Annahme von 4 Trennflächen (n=4) sowie einer Freifläche, treten demnach 14 JP in der stereographischen Projektion auf, zwei Blöcke werden

demnach nicht dargestellt. Bei diesen Blöcken handelt es sich um 1001 sowie 0111, die dem Block Typ 4 zugeordnet werden.

2.1.5 Unterscheidung zwischen endlichen und unendlichen Blöcken

Wie bereits zuvor besprochen, handelt es sich um einen endlichen Block, wenn seine JP eine Teilmenge (\subset) der SP ist ($JP \subset SP$) Abb. 2-1. Wendet man dieses Gesetz in Abb. 2-6. an, so sind jene Blöcke unendlich, die sich nicht zur Gänze in der SP befinden. Diese JPs sind:

0001	1110	0101
1100	0110	1010
0011	1101	1111
0010	1011	

Nach (Goodman & Shi, 1985) ist die Anzahl der auftretenden, unendlichen Blöcke bei einer Anzahl von n Trennflächen Gl.2-7:

$$\frac{n^2 + n + 2}{2} \qquad \text{Gl.2-7}$$

Wie aus Gl.2-7 ersichtlich, treten bei 4 Trennflächen (n=4) 11 unendliche Blöcke auf. Aus der Differenz zur gesamten Anzahl auftretender Blöcken Gl.2-5 kann man ableiten, daß 5 endliche Blöcke auftreten. Bei diesen Blöcken handelt es sich um:

0000	1001	0111
0100	1000	

2.1.6 Unterscheidung zwischen entfernbaren und nicht entfernbaren Blöcken

Ein Block ist entfernbar, wenn seine BP ($JP \cap EP$) leer ist, beziehungsweise seine JP nicht leer ist (Goodman & Shi, 1985) Gl.2-8.

$$\begin{aligned} JP &\neq 0 && \text{Gl.2-8} \\ JP \cap EP &= 0 \\ JP &\subset SP \end{aligned}$$

Ist hingegen ein endlicher Block nicht entfernbar (Block Typ 4 (*tapered block*)), so ist sowohl seine JP als auch seine BP leer Gl.2-9.

$$\begin{aligned} JP &= 0 && \text{Gl.2-9} \\ JP \cap EP &= 0 \end{aligned}$$

In Abb. 2-5 ist sowohl ein entfernbarer Block A als auch ein nicht entfernbarer Block B dargestellt. Durch das Verschieben der Trennflächen 1 bis 3 bildet sich bei dem entfernbaren Block eine JP aus, die in diesem Fall durch eine graue Fläche gekennzeichnet ist Abb. 2-5. Der nicht entfernbare Block B weist eine JP in Form eines Punktes auf; die JP hat demnach keine Kanten. Da nicht entfernbare Blöcke keine Kanten aufweisen, können sie auch nicht als Feld in einer stereographischen Projektion auftreten. Wendet man dies auf das vorhergehende Beispiel Abb. 2-6 an, so handelt es sich bei den Blöcken, die nicht in der stereographischen Projektion auftreten, um nicht entfernbare Blöcke (*tapered blocks*).

$$\begin{array}{cc} 1001 & 0111 \\ \hline \end{array}$$

Die Anzahl der nicht entfernbaren Blöcke kann nach (Goodman & Shi, 1985) überprüft werden Gl.2-10.

$$2^n - (n^2 - n + 2) \qquad \text{Gl.2-10}$$

Bei 4 Trennflächen ($n=4$) treten in diesem Fall zwei nicht entfernbare Blöcke auf (1001; 0111).

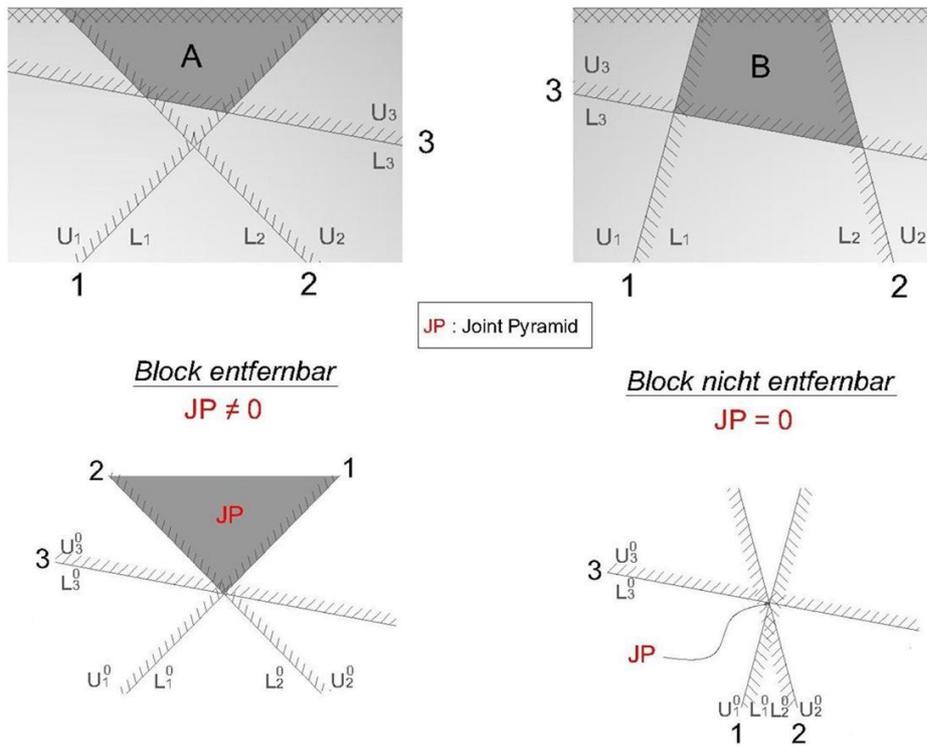


Abb. 2-5 Block A: Darstellung eines entfernbaren, zweidimensionalen Blockes ($JP \neq 0$), der durch drei Trennflächen (1-3) sowie eine horizontalen Freifläche definiert wird. **Block B:** Darstellung eines nicht entfernbaren Blockes ($JP = 0$); Beschreibung siehe Text; modifiziert nach (Goodman & Shi, 1985)

2.1.6.1 Bestimmung entfernbarer Blöcke

Ein Block ist entferbar, wenn seine BP leer ist, beziehungsweise seine JP nicht leer ist (Goodman & Shi, 1985). Weiters muß seine JP eine Teilmenge der SP sein Gl.2-11.

$$\begin{aligned}
 JP &\neq 0 && \text{Gl.2-11} \\
 JP \cap EP &= 0 \\
 JP &\subset SP
 \end{aligned}$$

Nach (Goodman & Shi, 1985) ist die Anzahl der entfernbaren Blöcke bei n auftretenden Trennflächen Gl.2-12:

$$\frac{n^3 - 3n + 2}{2} \quad \text{Gl.2-12}$$

Bei 4 auftretenden Trennflächen sind es demnach 3 entfernbare Blöcke. Betrachtet man nun Abb. 2-6 so sind jene Blöcke entferbar, deren JP sich gänzlich in der SP befinden. Hierbei handelt es sich um den Block 1000 (rote

Schraffur) sowie den Block 0000 (grüne Schraffur). Wie aus Gl.2-12 hervorgeht, treten 3 entfernbare Blöcke auf. Bei dem dritten Block handelt es sich dabei um den Block 0100. Dieser Block befindet sich unmittelbar in der Nähe des Blickpunktes der stereographischen Projektion und kann deshalb nicht in Abb. 2-6 dargestellt werden.

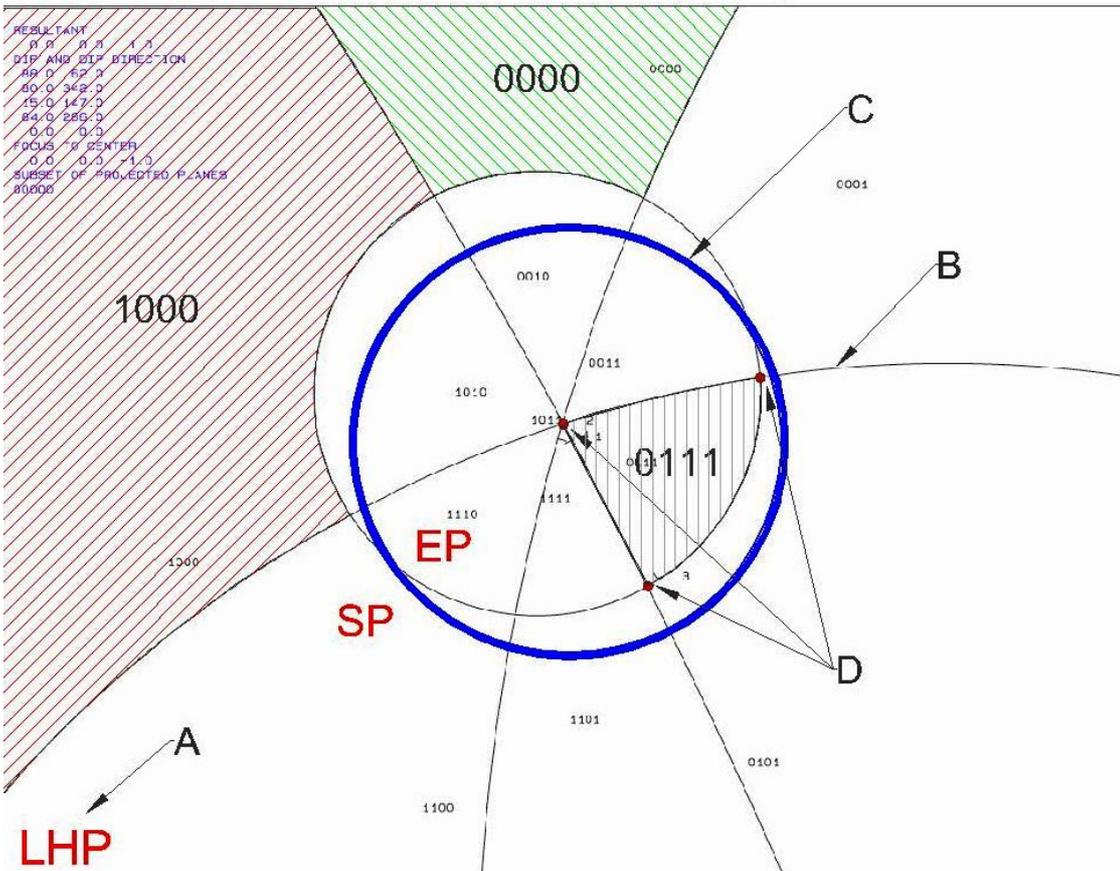
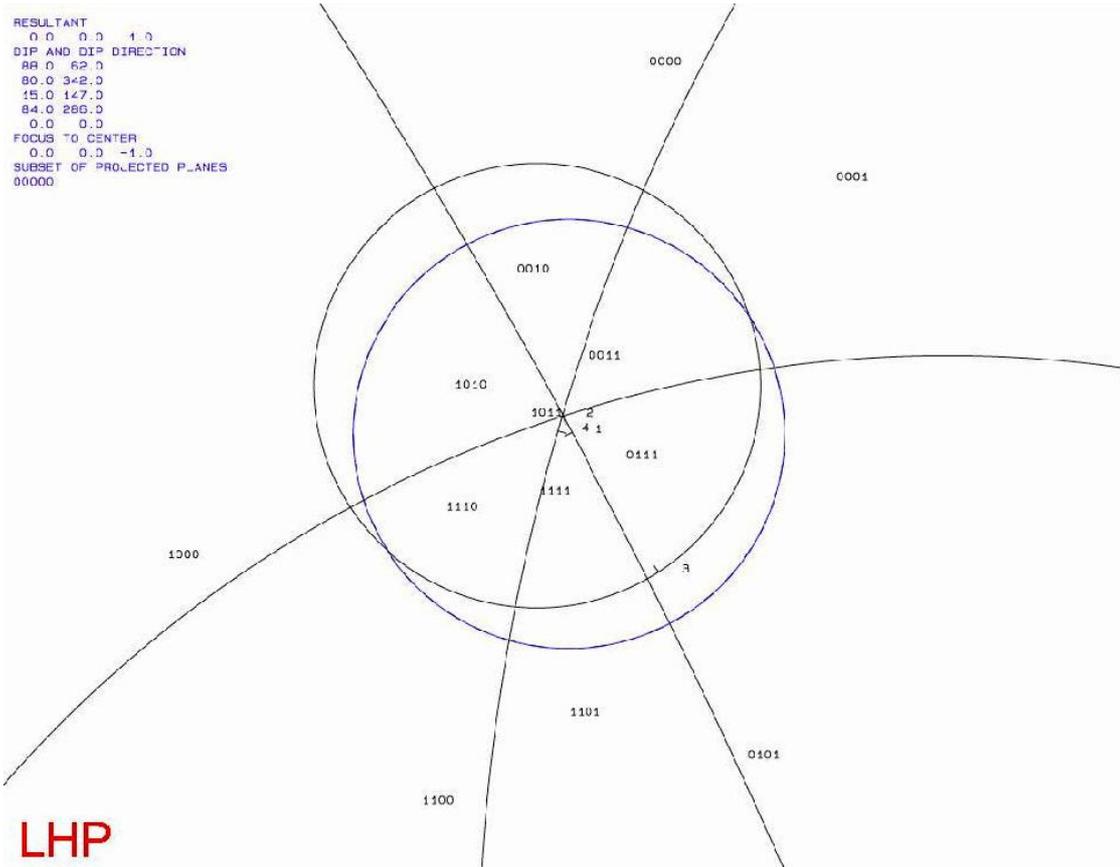


Abb. 2-6 Darstellung des in Kapitel 2.1.4 angeführten Beispiels;
Beschreibung siehe Text

2.1.6.2 Kinematik und Stabilität entferntbarer Blöcke

Im letzten Kapitel wurden anhand eines Beispiels Abb. 2-6 mit 4 Trennflächen sowie 1 horizontalen Freifläche 16 möglichen Blöcke mithilfe stereographischer Projektionen in Block Typen (siehe Kapitel 2.1.2.) unterteilt. In Tab. 2-2 sind die bisherigen Ergebnisse dieses Beispiels zusammengefaßt.

Block Typ 5		Block Typ 4,3,2,1	Block Typ 4	Block Typ 3,2,1
0001	1101	0000	1001	1000
1100	1011	0100	0111	0000
0011	0101	1001		0100
0010	1010	1000		
1110	1111	0111		
0110				
Anzahl der jeweiligen Blöcke				
$\frac{n^2 + n + 2}{2}$	$\left[2^n \right] - \left[\frac{n^2 + n + 2}{2} \right]$	$2^n - (n^2 - n + 2)$	$\frac{n^2 - 3n + 2}{2}$	
11	5	2	3	
Anzahl aller möglichen Blöcke = 16				

Tab. 2-2 Zusammenfassung der identifizierten Blocktypen nach dem Beispiel aus Kapitel 2.1.4; Neben den Blocktypen sind die erforderlichen Gleichungen nach (Goodman & Shi, 1985) zusammengefaßt.

Um eine weitere Unterteilung der Block Typen (3,2,1) durchzuführen Tab. 2-2, bedarf es im ersten Schritt einer Bewegungsanalyse, um den Block Typ 3 von den Block Typen 2 bzw. 1 zu trennen. Um den Block Typ 2 von Block Typ 1 zu trennen, führt man im Anschluß eine Stabilitätsanalyse durch.

Bewegungsanalyse

Die Bewegungsrichtung eines Blockes ist abhängig von der Richtung der auf den Block wirkenden resultierenden Kraft „ r “ Abb. 2-7. Diese Kraft setzt sich einerseits zusammen aus dem Gewicht des Blockes sowie weitere Kräfte, wie zum Beispiel

Wasserdrücke. Die Gleichgewichtsbedingung für endliche, entfernbare Blöcke ist nach (Goodman & Shi, 1985) Gl.2-13.

$$r + \sum_l N_l * \hat{v}_l - T\hat{s} = 0 \quad \text{Gl.2-13}$$

Die Normalkraft „**N**“ wirkt senkrecht auf die Trennfläche „l“, der Einheitsvektor „ $\hat{\nu}$ “ wirkt in Richtung des betrachteten Blockes Abb. 2-7. Die auftretende tangentielle Kraft $-T\hat{s}$ setzt sich zusammen aus der auftretenden Reibung mit dem Reibungswinkel „ Φ “ sowie einer fiktiven Kraft $-F\hat{s}$; Gl.2-14.

$$-T\hat{s} = - \sum_l N_l * \tan\Phi_l \hat{s} - F\hat{s} \quad \text{Gl.2-14}$$

Die fiktive Kraft „**F**“ dient dazu, den Block in den Zustand eines labilen Gleichgewichts zu überführen, oder anders ausgedrückt an die Stabilitätsgrenze des Blockes. Ist „**F**“ positiv, so würde der Block ohne diese fiktive Kraft in Bewegung geraten. Ist „**F**“ hingegen negativ so befindet sich der Block ohne diese fiktive Kraft im Gleichgewichtszustand Abb. 2-7.

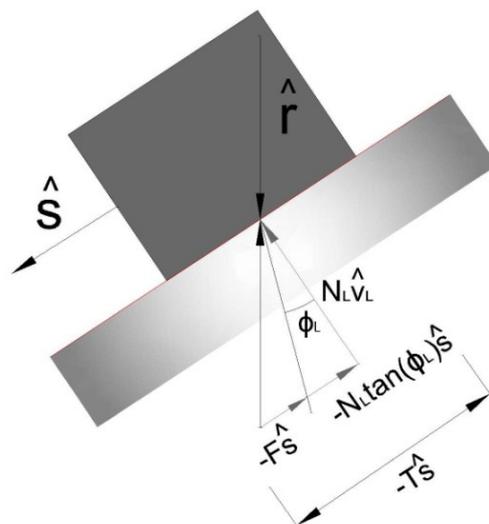


Abb. 2-7 Beschreibung der fiktiven Kraft **F** sowie der Bewegungsrichtung **S**, siehe Text; modifiziert nach (Goodman & Shi, 1985)

Anhand der Bewegungsrichtung eines Blockes „ \hat{S} “ kann man zwischen drei Bewegungsarten unterscheiden (Goodman & Shi, 1985).

- Abhebung eines Blockes (*lifting*): $\hat{s} = \hat{r}$
- Gleiten entlang einer Fläche (*single-plane sliding*): $\hat{s} \in JP \cap P_i$
- Gleiten entlang von zwei Flächen (*two-plane sliding*): $\hat{s} \in JP \cap P_i \cap P_j$

Dabei ist die Bewegungsrichtung „ \hat{S} “ abhängig ist von der JP des Blockes Gl.2-15.

$$\hat{s} \subset JP \qquad \text{Gl.2-15}$$

Anhand einer stereographischen Projektion ist es möglich, bei gegebener resultierender Kraft „ r “ jeder JP einer Bewegungsart zu zuordnen. Betrachtet man nun das zuvor besprochene Beispiel Kapitel 2.1.4 unter Einwirkung der Schwerkraft, so wird jeder JP eine Bewegungsrichtung zugeordnet Abb. 2-8.

Vergleicht man Abb. 2-6 mit Abb. 2-8, so wurden die JP Codes durch Bewegungsarten ersetzt. Folgende Abkürzungen wurden verwendet:

- „i“ : Gleiten entlang von einer Fläche
- „ij“ : Gleiten entlang von zwei Flächen
- „0“ : Abhebung eines Blockes
- „{} oder {S}“ : Sicherer Block

Die in Tab. 2-2 beschriebenen entfernbaren Blöcke (1000, 0100, 0000) können anhand Abb. 2-8 dem Block Typ 3 zugeschrieben werden. Diese Blöcke sind endlich und entfernbare, jedoch nicht durch die Schwerkraft mobilisierbar. Der Block 0100 kann in dieser Abbildung nicht dargestellt werden, da er sich zu nahe am Blickpunkt befindet.

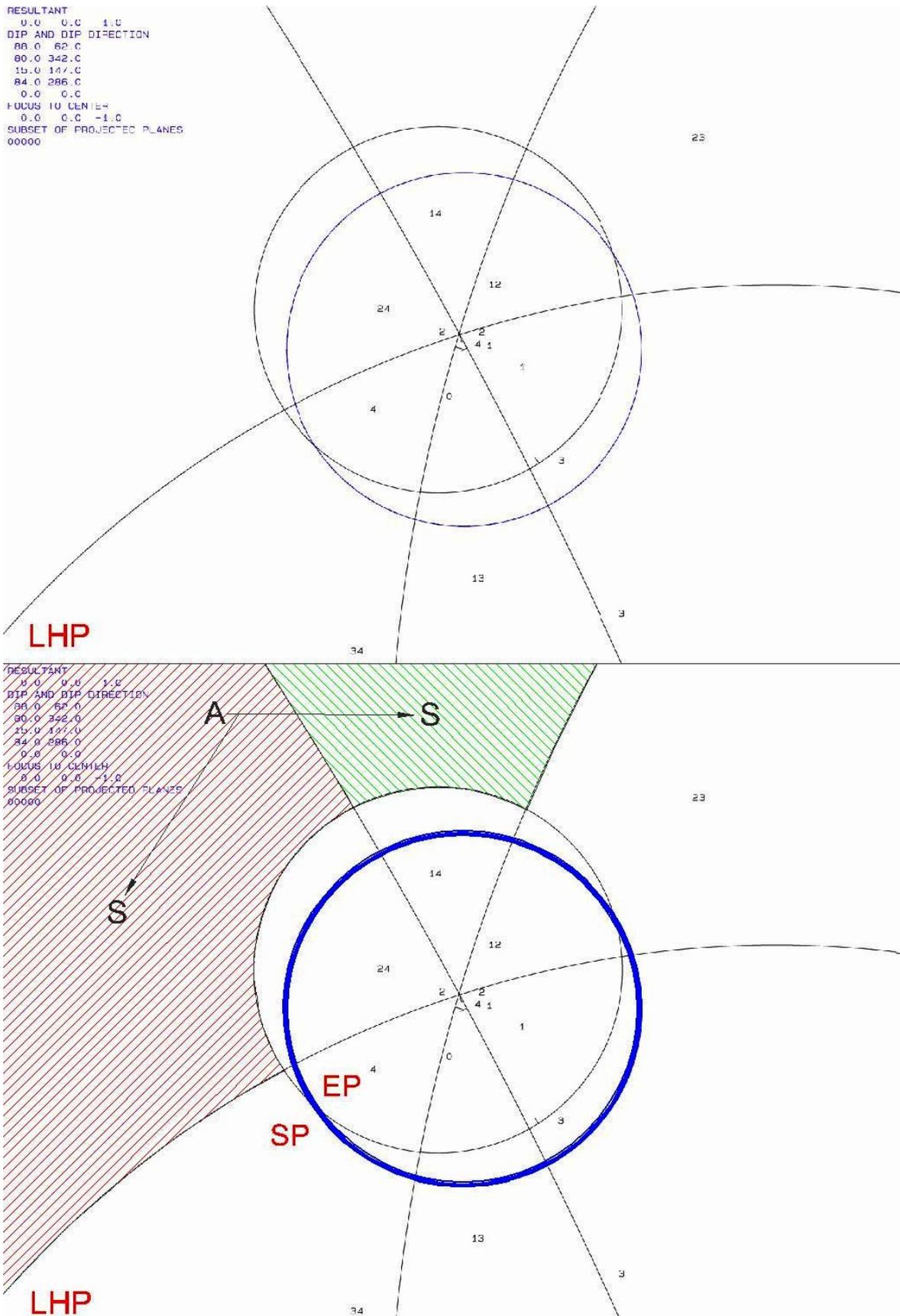


Abb. 2-8 Darstellung des in Kapitel 2.1.4 angeführten Beispiels; Beschreibung siehe Text

Stabilitätsanalyse

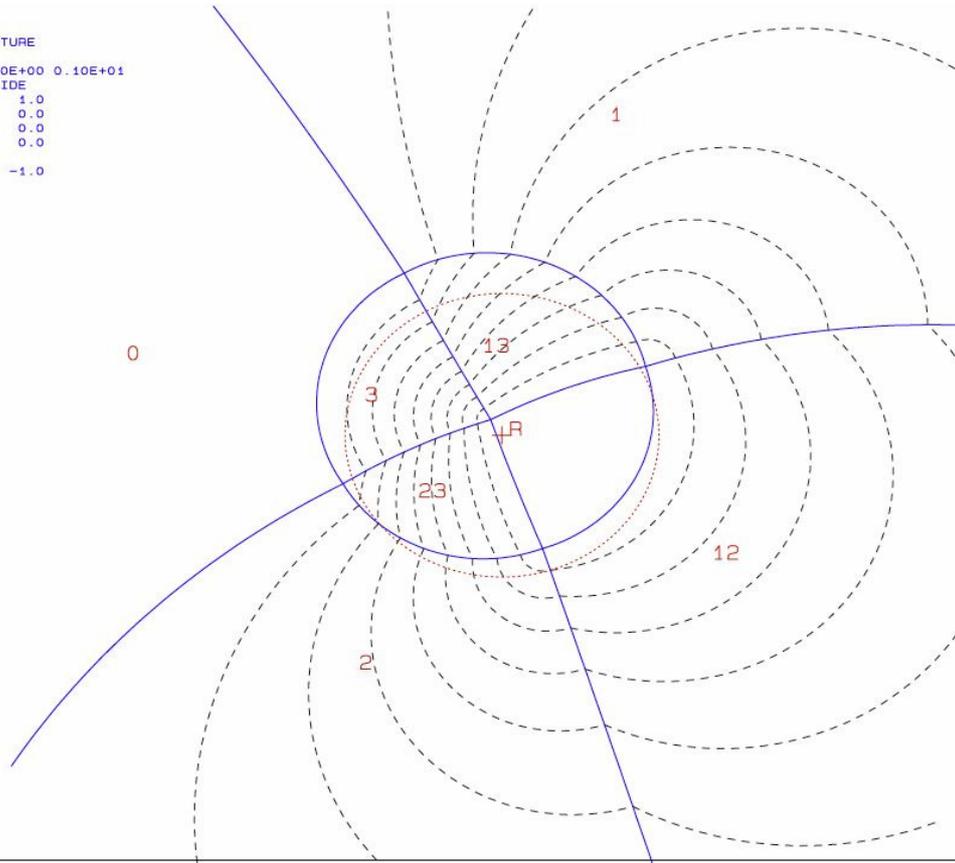
Anhand der Bewegungsanalyse konnten die Blöcke (1000, 0100, 0000) dem Block Typ 3 zugeordnet werden. Block Typen 2 bzw. 1 treten in einer horizontalen Tosbeckensohle unter Wirkung der Schwerkraft nicht auf. Verändert sich jedoch die Richtung der Resultierenden „ r “, wie zum Beispiel unter dem Einfluß von strömendem Wasser, so verändert sich auch die Bewegungsart der auftretenden Blöcke. Um die Veränderung der Bewegungsart darzustellen, betrachtet man einen einzelnen Block (z.B. 1000) und teilt die Projektionsebene in Regionen ein (Abb. 2-9). Jede dieser Regionen stellt hierbei einen Bereich dar, in dem sich die Resultierende r befinden kann, ohne dass sich die Bewegungsart verändert (Goodman & Shi, 1985). Zur Veranschaulichung sind hierbei in Abb. 2-9.A zwei Bereiche hervorgehoben. Wird die Resultierende „ r “ in den rot schraffierten Bereich geplottet, so kann keine Bewegung stattfinden. Wird sie hingegen in den blauen Bereich geplottet, so kann es zu einer Abhebung (0) des Blockes kommen. Weiters ist es möglich innerhalb jedes Bereiches die fiktive Reibung darzustellen (Abb. 2-9.B), welche erforderlich ist, um einen Block zu stabilisieren.

Wird zum Beispiel die Resultierende „ r “ auf den Punkt B (Abb. 2-9) geplottet, so wird ein Reibungswinkel von 20° benötigt, um ein Gleiten entlang von zwei Flächen (1,2) zu vermeiden.

```

P. LONDE PICTURE
RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
88.0 62.0 1.0
80.0 342.0 0.0
15.0 147.0 0.0
84.0 286.0 0.0
FOCUS
0.0 0.0 -1.0
STEP
10.00

```



```

P. LONDE PICTURE
RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
88.0 62.0 1.0
80.0 342.0 0.0
15.0 147.0 0.0
84.0 286.0 0.0
FOCUS
0.0 0.0 -1.0
STEP
10.00

```

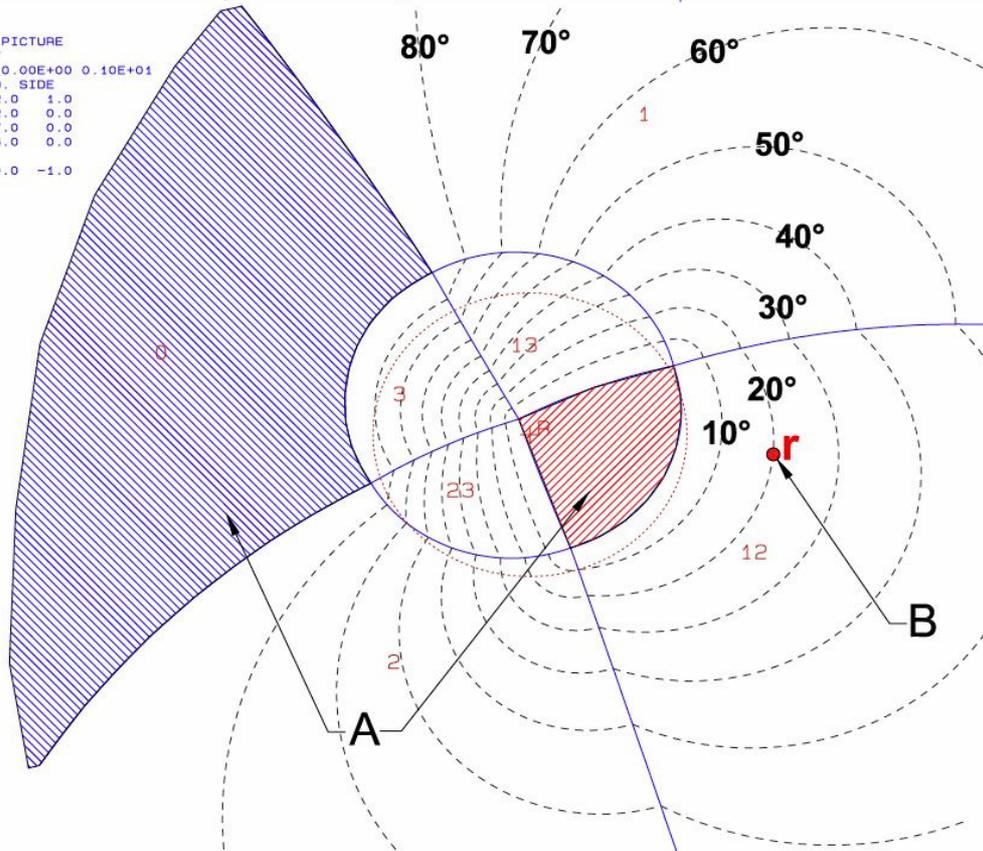


Abb. 2-9 Darstellung des in Kapitel 2.1.4 angeführten Beispiels; Beschreibung siehe Text

2.2 Kolkbildung

Kolke entstehen durch die Wechselwirkung von Wasser mit dem überströmten Material (Boden, Fels, Beton etc.). Durch Strömungskräfte als auch infolge von Turbulenz in der Strömung kommt es dabei zu einer Materialverlagerung. Problematisch ist dieser Vorgang in Verbindung mit vorhandener Infrastruktur wie zum Beispiel Staudämmen, Brückengründungen, Uferbegrenzungen sowie Tunnels (Annandale, 2002).

Zur Ausbildung von Kolken kommt es demnach, wenn die erosive Kapazität des Wassers größer ist als der Widerstand des Materials (Boden, Fels) gegen diese Beanspruchung (Annandale, 2006). Die erosive Kraft von Wasser im Bereich von Staudämmen kann die Stabilität einer Staumauer gefährden, wie das Beispiel von 1933 des Ricobayo Damms in Spanien zeigte. Die Entlastungsanlage wurde in diesem Fall unverkleidet belassen. Infolge eines 19 Tägigen Überlaufes kam es durch die erosive Kraft des Wassers zu einer Auskolkung des überströmten Granits Abb. 2-10.



Abb. 2-10 Linkes Bild: Ricobayo Staudamm, Spanien; Zustand der Entlastungsanlage zu Beginn des Überlaufes (Quelle: Iberdrola, Spanien)
Rechtes Bild: Zustand der Entlastungsanlage nach dem 19 tätigen Überlauf, deutlich ist die Askolkung bzw. der Materialverlust in diesem Zeitraum zu erkennen; Quelle: Iberdrola, Spanien

2.2.1 Erodibility Index Method (EIM)

Um die Ausbildung von Kolken vorhersagen zu können, ist es erforderlich, die erosive Kapazität von Wasser zu quantifizieren sowie die Eigenschaften des überströmten Materials (in diesem Fall Fels) zu erfassen. Anhand des EIM (Annandale, 2006) ist es möglich eine Aussage zu treffen, ob ein überströmtes Gebirge der erosiven Kraft von Wasser standhalten kann. Hierzu wird ein Gleichgewichtszustand zwischen der erosiven Kraft des Wassers, dargestellt durch die Strömungsstärke P und dem Widerstand des Materials gegen die Erosion, dargestellt durch die Funktion $f(K)$ betrachtet Gl.2-16.

$$P = f(K) \quad \text{Gl.2-16}$$

Die Strömungsstärke P besteht hierbei aus dem spezifischen Gewicht des Wassers γ , der Durchflussmenge Q sowie der durchflossenen Fläche A und der abgegebenen Energie ΔE (Annandale, 2006) Gl.2-17.

$$P = \frac{\gamma * Q * \Delta E}{A} \quad \text{Gl.2-17}$$

Ist $P > f(K)$ so ist der Gleichgewichtszustand zwischen der Strömungsstärke P und dem Widerstand des Materials gegen die erosive Kraft des Wasser überschritten, und es kommt zur Bildung eines Kolkes. Ist hingegen $P < f(K)$, so kommt es zu keiner Kolkbildung. Anhand von empirischen Daten wurde ein Zusammenhang zwischen der Strömungsstärke P (Stream Power [KW/m²]) und dem *Erodibility Index* K hergestellt Abb. 2-11. Die in Abb. 2-11 dargestellten roten Vierecken stellen Ereignisse dar, bei denen unter einer bestimmten Strömungsstärke P keine Kolkbildung beobachtet wurde, die blauen Kreise stellen hingegen Ereignisse dar, bei denen eine Kolkbildung beobachtet wurde. Getrennt werden diese Bereiche von einer empirisch ermittelten Gleichgewichtslinie (strichlierte Linie) (Annandale, 2006).

Der *Erodibility Index* K wird aus folgenden Kennwerten gebildet Gl.2-18:

$$K = M_s * K_b * K_d * J_s \quad \text{Gl.2-18}$$

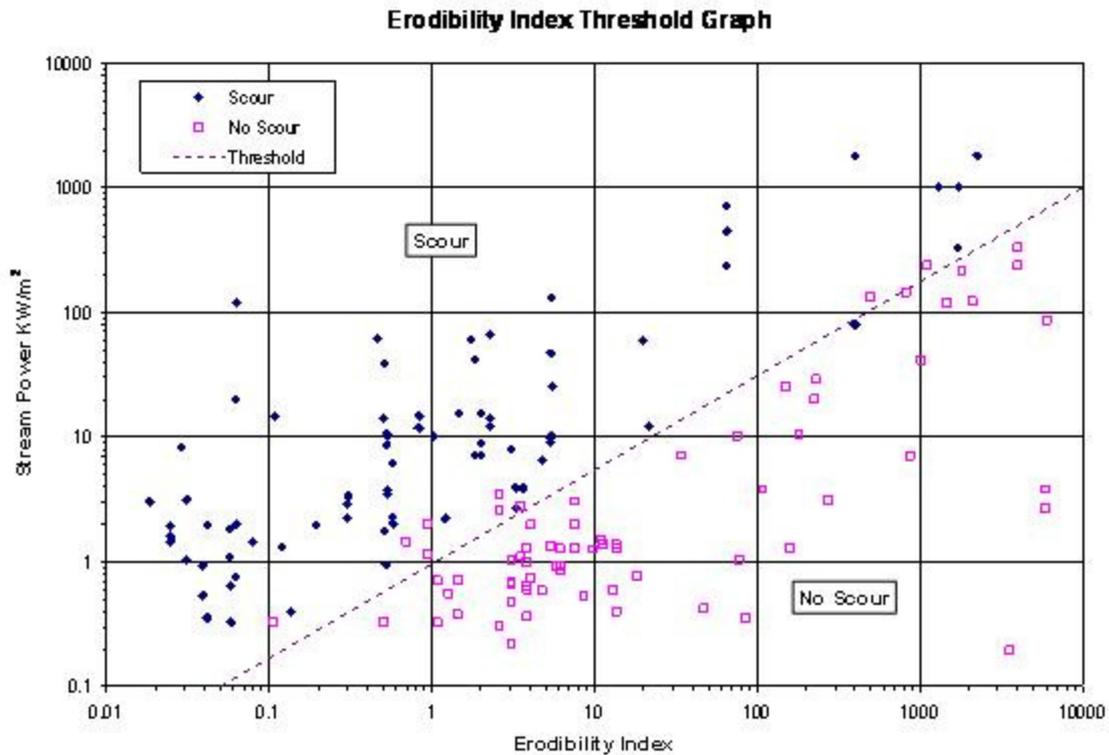


Abb. 2-11 Zusammenhang zwischen Erodibility Index und Stream Power [KW/m²]. Die strichlierte Linie stellt die Grenze der Kolkbildung (im engl.: Scour) dar; Die roten Vierecke sowie die blauen Kreise stellen empirische Daten dar. (Annandale, 2006)

M_s

Der Faktor M_s (*mass strength number*) repräsentiert die Gesteinsfestigkeit. Er kann mit Hilfe einer Tabelle Anhang: Tab. 9-5 anhand der einaxialen Druckfestigkeit (UCS) ermittelt werden.

K_b

Der Faktor K_b (*block size number*) ist abhängig von der Anzahl der auftretenden Trennflächensets sowie dem Trennflächenabstand Gl.2-19.

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} \quad \text{Gl.2-19}$$

Er wird aus dem RQD (**R**ock **Q**uality **D**esignation) sowie dem Faktor J_n, der abhängig ist von der Anzahl der auftretenden Trennflächensets ermittelt, siehe Anhang: Tab. 9-6

K_d

Der Faktor K_d (*discontinuity shear strength number*) repräsentiert den Einfluss der Scherfestigkeit auftretender Trennflächen. Die Scherfestigkeit ist demnach direkt proportional zur auftretenden Oberflächenrauigkeit J_r , sowie invers proportional zum Verwitterungszustand der Trennflächenoberfläche J_a Gl.2-20.

$$K_d = \frac{J_r}{J_a} \qquad \text{Gl.2-20}$$

Der Faktor J_r wird anhand der Oberflächenrauigkeit der Trennfläche mithilfe einer Vergleichstabelle Anhang: Tab. 9-7 ermittelt. Der Faktor J_a wird durch den Verwitterungsgrad der Trennflächen als auch dem Trennflächenabstand aus Tabelle Anhang: Tab. 9-7 ermittelt.

J_s

Der Faktor J_s (*relative ground structure number*) repräsentiert den Einfluss der Orientierung auftretender Trennflächen in Bezug auf die Strömungsrichtung, sowie die Form auftretender Blöcke Anhang: Tab. 9-8.

Betrachtet man in Abb.2-12.A die Orientierung der Trennflächen, so sind die Trennflächenorientierungen benachteiligt, welche ein Einfallen in Strömungsrichtung aufweisen. Der Strömung ist es dadurch ermöglicht im Gegensatz zu Abb.2-12.B Blöcke heraus zu lösen. Betrachtet man die Formen der Blöcke, welche durch die auftretenden Trennflächensets gebildet werden, so sind quaderförmige Blöcke Abb.2-12.D gegenüber Gesteinsplatten Abb.2-12.C benachteiligt.

Wie in Tabelle Anhang: Tab. 9-8 dargestellt, wird die Form der auftretenden Blöcke durch das Längenverhältnis r der auftretenden Blockabmaße festgelegt.

Die EMI beschreibt demnach, dass der Widerstand eines Gebirges gegen die erosive Kraft des Wassers abhängig ist von der Festigkeit des Gesteins (UCS), Anzahl und Orientierung auftretender Trennflächensets, Trennflächenabstand, Scherfestigkeit und Verwitterungsgrad als auch Form und Orientierung auftretender Blöcke.

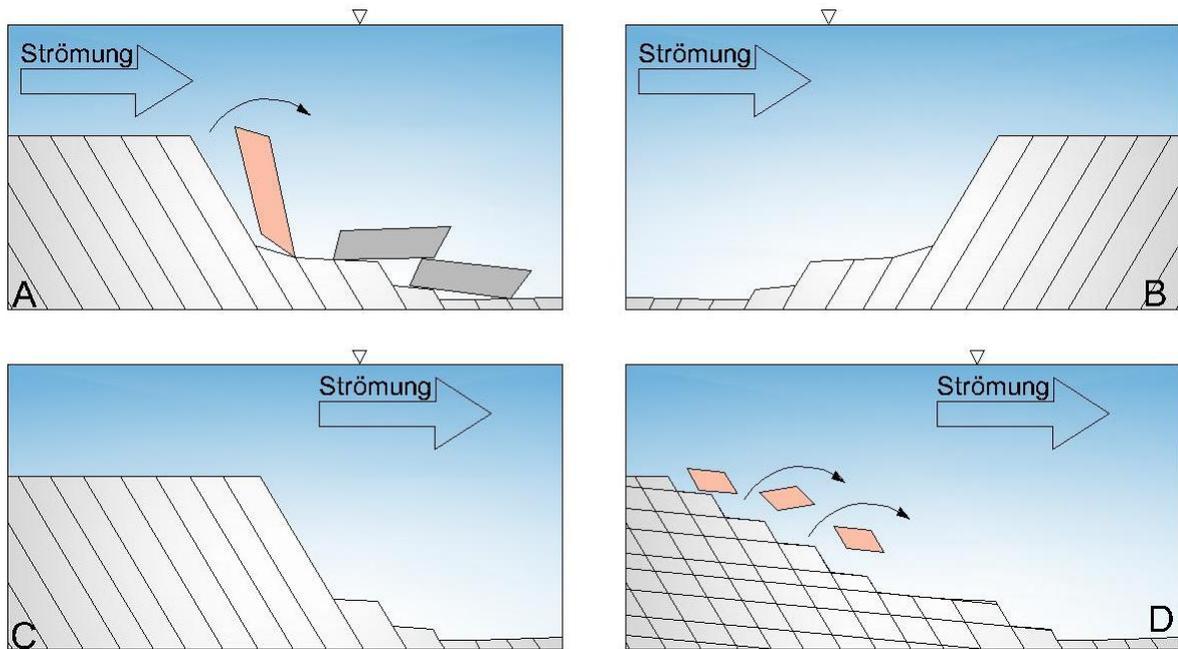


Abb.2-12 Bild A: Orientierung der Trennflächen gegen die Strömungsrichtung. Blöcke können im Gegensatz zu Bild B einfacher herausgelöst werden. **Bild B:** Trennflächenorientierung gegen die Strömungsrichtung **Bild C:** Gesteinsplatten sind weniger anfällig für auftretende Erosion als die im Bild D auftretenden Blöcke. **Bild D:** Blöcke, die angreifbar sind durch die auftretende Strömung; modifiziert nach (Annandale, 2006)

2.2.2 Kolkbildung im Bereich von Staudämmen

Anhand Bollaert's CSM (Comprehensive Scour Model) ist es möglich, Kolkbildung durch Überfallstrahlen im Bereich von Staudämmen zu beschreiben (Bollaert, 2004). Im Gegensatz zur EMI, welcher auf empirische Daten beruht, beschreibt das CSM physikalische Vorgänge, die zur Kolkbildung führen. Um die Auskolkung durch Überfallstrahlen zu beschreiben, unterscheidet Bollaert's CSM zwischen drei Bereichen: Überfallstrahl, Tosbecken sowie das Gebirge.

Verlässt ein Überfallstrahl die Mauerkrone des Staudammes, so beschreibt er eine Wurfparabel. Durch die Strahlaufreißer der Mauerkrone bildet sich ein Luft-Wasser-Gemisch aus Abb. 2-13:1, welches auf die Wasseroberfläche des Tosbeckens auftrifft. Die dadurch entstehende turbulente Wasser-Luft-Scherzone Abb. 2-13:2 breitet sich im Tosbecken aus und trifft auf die Gesteinsoberfläche, wo sie dynamische Druckschwankungen Abb. 2-13:3 hervorruft. Diese Druckschwankungen können sich entlang von Trennflächen Abb. 2-13:4,5 weiter in den Untergrund ausbreiten.

Die Druckdifferenz zwischen Ober- bzw. Unterseite eines Blockes Abb. 2-13:5 ermöglicht es, dass Blöcke aus dem Untergrund herausgelöst werden. Die Einflussfaktoren sind somit die Pulsperiode Δt , die Differenz der Druckschwankung an der Ober- bzw. Unterseite des Blockes ($F_{up} - F_{down}$), das Gewicht des Blockes W_g , die Form des auftretenden Blockes sowie die Reibung der Trennflächen F_{s1} bzw. F_{s2} (Annandale, 2006). Der Impuls $F_{\Delta t}$, der auf einen Block in der Zeit Δt wirkt, ist demnach Gl.2-21 :

$$\int_0^{\Delta t} (F_{up} - F_{down} - W_g - F_{s1} - F_{s2}) dt = F_{\Delta t} \quad \text{Gl.2-21}$$

Herausgelöste Blöcke Abb. 2-13:6 können durch die turbulente Wasserbewegung im Tosbecken zerbrechen bzw. durch den Wasserstrom abtransportiert werden.

Blöcke, die durch ihre Form bzw. ihr Gewicht nicht entfernt werden Abb. 2-13:7, können durch die auftretenden dynamischen Druckschwankungen in kleinere Blöcke zerbrechen und abtransportiert werden. Der Grund hierfür sind Risse, die sich an der Oberfläche des Blockes befinden.

Entlang dieser Risse ist es möglich, dass sich auftretenden Druckschwankungen ausbreiten und auf die beiden Oberflächen des Risses wirken. Überschreitet der dadurch entstehende Stress an der Rissspitze die Gesteinsfestigkeit Abb. 2-13:8, so pflanzt sich der Riß durch das Gestein fort. Trifft er auf eine vorhandene Trennfläche, so kann der Block zerbrechen und herausgelöst werden Abb. 2-13:9. Überschreitet der Stress an der Rissspitze hingegen die Gesteinsfestigkeit nicht, so ist es möglich, dass sich der Riss kontinuierlich durch auftretende Druckschwankungen entwickelt. Man spricht in diesem Fall von einem Ermüdungsbruch.

Die maximal erreichbare Kolkentiefe Abb. 2-13:10 kann anhand Annandale's EMI ermittelt werden. Sie ist demnach abhängig von der erosiven Kraft des Wassers sowie dem Widerstand des Materials gegen die Auskolkung.

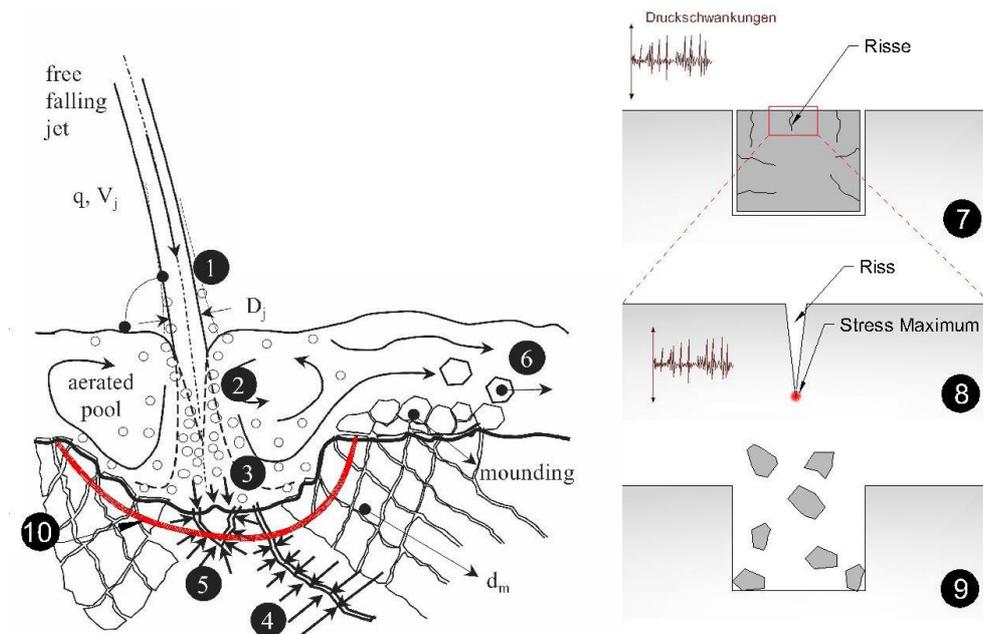


Abb. 2-13 Punkt 1: Überfallstrahl, bestehend aus einem Wasser-Luft-Gemisches; **Punkt 2:** Wasser-Luft-Scherzone im Tosbecken; **Punkt 3:** dynamische Druckschwankungen, ausgelöst durch die auftreffende Wasser-Luft-Scherzone; **Punkt 4:** Ausbreitung dynamischer Druckschwankungen entlang von Trennflächen; **Punkt 5:** Dynamische Druckschwankungen an der Unterseite eines Blockes; **Punkt 6:** Entfernung und Abtransport transportabler Blöcke; **Punkt 7:** Darstellung auftretender Risse an der Oberfläche eines Blockes; **Punkt 8:** Ausbreitung dynamischer Druckschwankungen entlang eines Risses, an der Spitze des Risses tritt das Stress Maximum auf; **Punkt 9:** Durch die Rissausbreitung infolge dynamischer Druckschwankungen kommt es zur Zerlegung des Blockes; **Punkt 10:** Maximale Kolkentiefe; modifiziert nach (Bollaert, 2004).

Die erosive Kraft des Wassers ist eine Funktion der Wassertiefe des Tosbeckens. Mit zunehmender Wassertiefe sinkt die erosive Kraft des Wassers. Ab einer gewissen Wassertiefe herrscht demnach ein Gleichgewicht zwischen der erosiven Kraft des Wassers und dem Widerstand des Materials gegen die Auskolkung. Diese Tiefe stellt die maximal erreichbare Kolkentiefe dar (Annandale, 2006).

2.3 Gebirgskennwerte

Folgende Gebirgskennwerte wurden im Zuge der geologischen Kartierung des Sperrenumfeldes, als auch der Tosbeckensohle aufgenommen.

2.3.1 Verwitterung

Die Beschreibung des Verwitterungszustandes wurde anhand der ISRM Norm durchgeführt (Thuro & Scholz, 2004). Man unterscheidet zwischen 7 Verwitterungsstufen:

- Frischer und unverwitterter Fels
- Angewittert
- Leicht verwittert
- Mittelstark verwittert
- Stark verwittert
- Sehr stark verwittert
- Völlig verwittert (Boden)

Eine genauere Beschreibung ist im Anhang: Tab. 9-1 beigelegt.

2.3.2 Gesteinsfestigkeit

Die Gesteinsfestigkeit wurde unter Verwendung von ISRM Richtlinien (Brown, 1981) geschätzt Anhang: Tab. 9-2. Durch Schlägen mit einem Geologenhammer wird das Gestein in 7 Festigkeitsgruppen- R0 (extremly weak rock; 0,25-1Mpa einaxialen Druckfestigkeit) bis R6 (extremly strong rock; >250 Mpa einaxiale Druckfestigkeit), unterteilt.

2.3.3 Orientierung

Die Trennflächenorientierung wurde mithilfe eines Gefügekompasses nach Clar ermittelt. Dabei wurden Einfallrichtung als auch Einfallswinkel angegeben. Lineare wurden durch ihrer Streichrichtung als auch ihres Einfallswinkel beschrieben.

Zur graphischen Darstellung der Orientierungsdaten wurden sowohl als auch Lagekugelprojektionen als auch Rosendiagramme verwendet.

Bei der verwendeten Lagekugelprojektion handelt es sich um flächentreue Projektion der unteren Lagekugel (Schmidtsches Netz) (Eisbacher, 1996).

2.3.4 Trennflächenrauigkeit und Welligkeit

Die Rauigkeit einer Trennfläche wurde mit Hilfe eines „Barton Kamm“ gemessen und anhand eines Vergleichsschaubildes Anhang: Tab. 9-3 einem JRC (*Joint Roughness Coefficient*) zugeordnet (Brown, 1981). Der JRC erstreckt sich hierbei von JRC=0 bis 20 und beschreibt die Rauigkeit einer Gesteinsoberfläche im cm- bis mm- Maßstab. Neben der Rauigkeit wird eine Trennflächen Oberfläche im dm- bis m- Maßstab, durch ihre Welligkeit charakterisiert. Die Welligkeit einer Oberfläche wird durch die Abweichung von einer glatten Ebene beschrieben. Kenngrößen sind die Amplitude der Winkel „i“ welchen eine Oberfläche zu einer Ebene einschließt (Price, 2009). Weitere Informationen sind im Anhang: Tab. 9-4 beigelegt.

2.3.5 Öffnungsweite

Die Öffnungsweite beschreibt den senkrechten Abstand zwischen den beiden Oberflächen einer Kluft. Der Raum zwischen den Trennflächen ist hierbei leer bzw. mit Wasser gefüllt. Man unterscheidet zwischen Trennflächen die keine Füllung aufweisen, sowie Trennflächen, die eine Füllung aufweisen. Klüfte werden anhand ihrer Kluftöffnung unterschieden (Witt, 2008) Tab. 2-3.

Kluftart nach Erstreckung		Nach Kluftöffnung	
		Sehr dicht	< 0,1 mm
Kleinklüfte	0-1 m	Dicht	0,1 – 0,25 mm
Großklüfte	1- 10 m	Teilweise offen	0,25 – 0,5 mm
Riesenklüfte	> 10 m	Offen	0,5 – 2,5 mm
		Mittelweit offen	2,5 – 10 mm
		Weit offen	> 10 mm

Tab. 2-3 Kluft-Charakterisierung nach (Witt, 2008)

2.3.6 Füllung

Der Zwischenraum einer Trennfläche kann mit zerbrochenen, zerriebenen, verwitterten als auch eingespülten Material gefüllt sein. Das Material wurde im Zuge der geologischen Aufnahme grob anhand Korngröße, Farbe sowie Wassergehalt beschrieben. Weiters wurde es nach seiner Festigkeit grob in Klassen eingeteilt von S1 (Very soft; < 0,025 Mpa einaxiale Druckfestigkeit) bis S6 (Very stiff; < 0,25 – 0,50 Mpa einaxiale Druckfestigkeit) Anhang: Tab. 9-2.

Die Füllung einer Trennfläche hat hierbei Einfluß auf die auftretende Festigkeit (Scherfestigkeit) einer Trennfläche als auch auf die Permeabilität (Witt, 2008).

2.3.7 Wasserführung

Trennflächen, bei denen eine Wasserführung auftrat, wurden wie folgt unterteilt (Brown, 1981) Tab. 2-4:

Typ	Beschreibung
1	Trennfläche ist trocken, ohne Hinweis auf Wasseraustritt
2	Trennfläche ist trocken, zeigt jedoch Hinweise auf Wasseraustritt
3	Trennfläche ist feucht, kein freies Wasser sichtbar
4	Auftreten von Tropfen, kein kontinuierlicher Wasserfluss
5	Kontinuierlicher Wasserfluss

Tab. 2-4 Wasserführung nach (Brown, 1981)

2.3.8 Durchtrennungsgrad

Der Durchtrennungsgrad beschreibt die flächige Ausdehnung einer Trennfläche in einer Ebene. Ist die Anzahl der auftretenden Gesteinsbrücken, welche eine Trennfläche begrenzen, sehr hoch, so hat das Auswirkung auf die Festigkeit eines Gebirges.

Da die flächige Ausdehnung einer Trennfläche sehr schwer im Feld zu erfassen ist, wird hierbei der Verschnitt der Trennfläche mit der Gesteinsoberfläche beschrieben. Im Zuge der Scanline-Aufnahme wurde die Spurlänge über bzw. unter der Scanline erfaßt, sowie die Enden der Trennflächenspur beschrieben (Brown, 1981) Tab. 2-5.

Typ	Beschreibung
X	Trennfläche endet außerhalb des Aufschlussbereiches
R	Trennflächenspur endet im Gestein
D	Trennflächenspur wird durch eine Trennfläche begrenzt

Tab. 2-5 Durchtrennungsgrad nach (Brown, 1981)

Weiters wurde der *Termination Index* ermittelt (Brown, 1981) Gl.2-22.

$$T[\%] = \frac{(\sum R) * 100}{\sum X + \sum R + \sum D} \quad \text{Gl.2-22}$$

Der *Termination Index* T_R kann zur Beschreibung des Durchtrennungsgrades verwendet werden. Ein hoher *Termination Index* bedeutet:

- Geringe Blockigkeit des Gebirges (wenige isolierte Blöcke)
- Trennflächen enden überwiegend im Fels
- Geringe Permeabilität entlang von Trennflächen

2.3.9 Trennflächenabstand

Der Trennflächenabstand sowie der Durchtrennungsgrad sind die ausschlaggebenden Parameter für die Größe der auftretenden Blöcke in einem Gebirge. Der Trennflächenabstand wird mit Hilfe einer Scanline ermittelt. Durch den Verschnitt der Trennfläche mit der Gesteinsoberfläche wird jedoch nur ein scheinbarer Trennflächenabstand gemessen Abb. 2-14 .

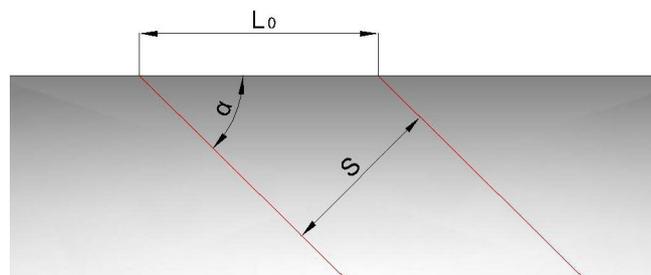


Abb. 2-14 Darstellung des scheinbaren Trennflächenabstandes L_0 ; In grau ist ein Gesteinsvolumen dargestellt sowie in rot zwei parallele Trennflächen. Der Winkel α beschreibt den Winkel zwischen der Trennfläche und der Gesteinsoberfläche; Der Abstand S stellt den gesuchten wahren Trennflächenabstand dar.

In Abb. 2-14 ist ein Gesteinsvolumen mit zwei parallelen Trennflächen (parallele rote Linien) dargestellt. Der Trennflächenabstand S kann durch den Winkel α , der sich zwischen der Trennflächenoberfläche und der Gesteinsoberfläche befindet, sowie dem scheinbaren Trennflächenabstand L_0 berechnet werden (Brown, 1981) Gl.2-23.

$$S = L_0 * \sin(\alpha) \qquad \text{Gl.2-23}$$

Der Trennflächenabstand wird nach **(Prinz & Strauß, 2006)** unterteilt Tab. 2-6.

Außerordentlich engständig, laminiert bzw. geschiefert	< 20 mm
Sehr engständig bzw. sehr dünnbankig	20 – 60 mm
Engständig bzw. dünnbankig	60 – 200 mm
Mittelständig bzw. mittelbankig	200 – 600 mm
Weitständig bzw. dickbankig	600 – 2000 mm
Sehr weitständig bzw. sehr dickbankig	> 2000 mm

Tab. 2-6 Trennflächenabstand nach (Prinz & Strauß, 2006)

2.3.10 Blöcke und Blockhohlformen

Die Blockgröße als auch die Blockform in einem Gebirge wird durch mehrere Faktoren bestimmt. Die Einflussfaktoren sind der Trennflächenabstand, Durchtrennungsgrad sowie auch die Anzahl und Orientierung der auftretenden Trennflächensets.

Die Blockform bzw. die Blockhohlform wird durch die Orientierung der Trennflächensets bestimmt. Als Vereinfachung werden idealisierte geometrische Grundformen zur Beschreibung herangezogen.

Das Blockvolumen bzw. das Volumen der Blockhohlform wird anhand im Gelände aufgenommener Längen- und Winkelmessungen von vereinfachten geometrischen Grundformen (zb. Kubus, Tetraeder, Rhombueder..) berechnet.

Um den Gebirgszustand zu beschreiben, wurden laut ISRM- Norm (Brown, 1981) folgende Begriffe verwendet Tab. 2-7:

Beschreibung	
Massive	Few joints or very wide spacing
Blocky	Equidimensional
Tabular	One dimension considerably smaller than the other two
Columnar	One dimension considerably larger than the other two
Irregular	Wide variations of block size and shape
Crushed	Heavily jointed rock

Tab. 2-7 Gebirgszustand laut ISRM- Norm (Brown, 1981)

Die auftretende Blockgröße wurde mit dem sogenannten „*volumetric joint count*“ J_v berechnet (Brown, 1981) Tab. 2-8 . Set 1 bis Set 3 repräsentieren den normalen Trennflächenabstand Gl.2-24.

$$J_v = \frac{1}{Set\ 1} + \frac{1}{Set\ 2} + \frac{1}{Set\ 3} \left[\frac{joints}{m^3} \right] \quad Gl.2-24$$

Beschreibung	J_v
Very large blocks	< 1
Large Blocks	1-3
Medium sized blocks	3-10
Small blocks	10-30
Very small blocks	>30

Tab. 2-8 Volumetric joint count (Brown, 1981)

2.4 Lidar

Lidar (**L**ight **d**etection **a**nd **r**anging) ist eine Methode zur Erfassung dreidimensionaler Objekte anhand einer Entfernungsmessung. Die Entfernung (s) zu einem Objekt wird aus der Laufzeitdifferenz zwischen dem Aussenden und Empfangen ($t/2$) eines Laser Impulses sowie der Lichtgeschwindigkeit ($c_{Meereshöhe} = 299\ 710\ km/s$) berechnet Gl.2-25.

$$S = \frac{c * t}{2} \quad Gl.2-25$$

Um ein Objekt dreidimensional zu erfassen, wird der Laser sowohl vertikal als auch horizontal über das Objekt gelenkt. Die vertikale Information wird durch die Ablenkung des Laserstrahls durch einen sich drehenden Spiegel Abb. 2-15 :3 hervorgerufen. Durch die Bauweise des verwendeten Scanners ist dadurch eine vertikale Aufnahme des Objektes in einem Winkel von θ ($\theta=80^\circ$, bei dem verwendeten Laserscanner LMS-Z620) Abb. 2-15 :2 gewährleistet. Die horizontale

Ablenkung wird durch eine axiale 360° Drehung des oberen Bereichs Abb. 2-15 :4 des Laser Scanners bewirkt. Durch diese horizontale als auch vertikale Ablenkung des Laserstrahls entsteht ein Raster aus Punkten auf dem abzubildenden Objekt, wobei jeder Punkt (x,y,z) eine Entfernungsmessung darstellt. Bei dem verwendeten Scanner handelt es sich um einen *Long Range Terrestrial Laser LMS-Z620 Scanner* der Firma Riegl:

- Maximale Entfernung zum Scanobjekt: 2000 m
- Datenerfassungsrate: 11 000 Messungen/sek
- Vertikaler Scanwinkel: 80°
- Horizontaler Scanwinkel: 360°
- Maximale Auflösung: 0,004°

In Verbindung mit einem RTK- GPS (der Firma Leica) ist es möglich jedem dieser Punkte eine Ortskoordinate zuzuordnen. Um eine höhere Lagegenauigkeit zu erreichen, wird ein DGPS (**D**ifferential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem) verwendet. Als Korrektursignal diente hierbei APOS (**A**ustrian **P**ositioning **S**ervice). Dadurch ist es möglich, eine Genauigkeit von $\pm 1,5$ cm für die Breiten-, bzw. Längenangabe (x,y) und ± 4 cm für die Höhenangabe (z) zu erreichen.

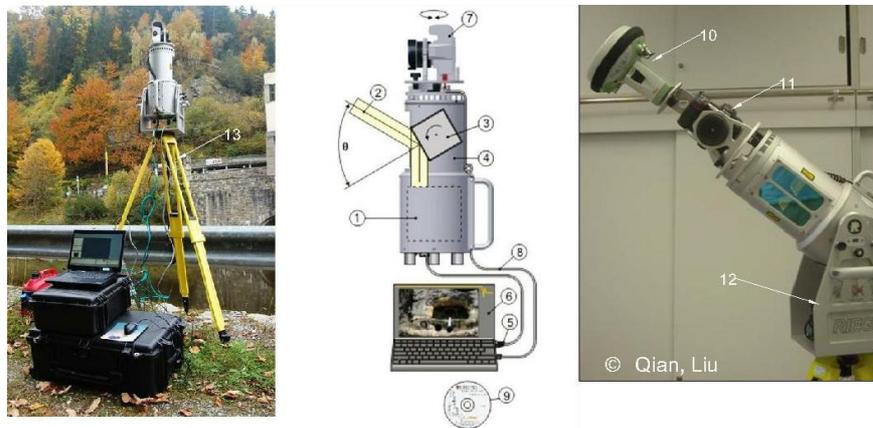


Abb. 2-15 **Punkt 1:** Sende- als auch Empfangseinheit des Lasers; **Punkt 2:** Emittierter Laserstrahl, sowie der vertikale Erfassungswinkel θ ; **Punkt 3:** Rotierender Spiegel; **Punkt 4:** Horizontale Ablenkung des Laserstrahles 0-360°; **Punkt 5:** Datenkabel; Steuerung des Scanners; **Punkt 6:** Computer, benötigte Software, RiScan; **Punkt 7:** Digitalkamera zur Erfassung der Farbinformation; **Punkt 8:** USB- Verbindungskabel zwischen Kamera und Computer; Steuerung der Kamera per Computer; **Punkt 9:** RiScan; **Punkt 10:** Leica RTK-GPS; **Punkt 11:** Verwendete Digitalkamera: Nikon D300; **Punkt 12:** Schwenkeinrichtung; **Punkt 13:** Vermessungsstativ; Quelle der Abbildungen, von Links nach Rechts: Steinbauer,C.; <http://www.riegl.com/>; Liu,Q;

Neben der Ortskoordinate kann auch jedem Punkt eine Farbinformation zugeordnet werden. Dazu wird eine handelsübliche Digitalkamera mit einem kalibrierten Objektiv verwendet Abb. 2-15 :11.

Die gewonnenen Punktwolken der Scanpositionen werden schließlich durch den Registrierungsprozess anhand von Reflektoren (Tiepoints) oder der MSA (**M**ulti **S**tation **A**djustment) in einem Koordinatensystem zusammengefügt. Die daraus resultierende Punktwolke dient als Grundlage für weitere Untersuchungen. In Anhang: Lidar Ablauf sind weitere technische Einzelheiten zum Laserscanner als Einzelheiten zum Arbeitsablauf beigefügt.

3 Sperre Ottenstein

3.1 Vorwort

In diesem Kapitel verwende ich den Ausdruck „linke bzw. rechte Stauklappe“ sowie „linke bzw. rechte Talseite“; Links bezieht sich hierbei auf die nördliche Seite des Kraftwerks Ottenstein, Rechts auf die südliche Seite Abb. 3-1.

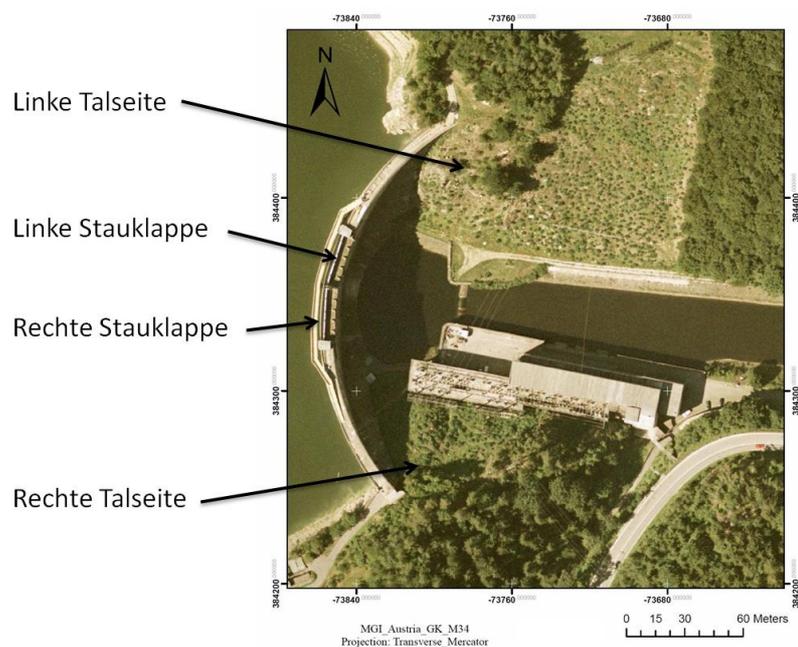


Abb. 3-1 Überblick, Sperre Ottenstein; Quelle:EVN

3.2 Überblick Sperre Ottenstein

Das Kraftwerk Ottenstein ist Teil der EVN AG (Energie-Versorgung Niederösterreich) mit Sitz in Maria Enzersdorf, Niederösterreich. Sie ging aus einer Verschmelzung der NEWAG (Niederösterreichischen Landes-Elektrizitätsgesellschaft) sowie der NIOGAS (Erdgas- und Fernwärmeunternehmen) im Jahre 1986 hervor.

Die Sperre Ottenstein Abb. 3-2 :Bild A (roter Rahmen) ist Teil der Kraftwerksgruppe Ottenstein – Dobra – Krumau – Thurnberg – Wegscheid und bildet die oberste Stufe dieser Abfolge (Schenk, 1970). Das Einzugsgebiet des Kraftwerkes Ottenstein beträgt 889 km². Der Stauinhalt der Sperre Ottenstein wird mit 73 000 000 m³, der Nutzinhalt 51 000 000 m³ angegeben. Die Länge des

Stausees beträgt 14 km bei einer Staupflache von 4 410 000 m². Bei der Talsperrenform handelt es sich um eine 65m hohe Gewolbmauer Abb. 3-2 :Bild B (Kreis 1) mit einer Kronenlänge von 240 m. Die Sperre besitzt 2 Stauklappen zu je 27 m Länge und einer Höhe von 2,6 m (Höhe gemessen von der Sperrenkrone). Über einen 215 m langen Triebwasserstollen wird das Wasser vom Stausee Ottenstein zu den 4 Francisturbinen Abb. 3-2 :Bild B (Kreis 4) geleitet, die je eine Leistung von 12 000 kW aufweisen. In Abhängigkeit vom Wasserstand des Stausees Ottenstein werden 84 bis 100 m³/s für die Stromerzeugung benötigt. Das Wasser wird anschließend direkt in den Stausee Dobra geleitet, welcher bis zu der Gegenschwelle des Tosbeckens Ottenstein reicht Abb. 3-2 :Bild C (Kreis 3). In Schwachlastzeiten wird Wasser über zwei Speicherpumpen vom Speicher Dobra in den Speicher Ottenstein zurückgepumpt, um in Spitzenzeiten diese Energie wiederum nutzen zu können (EVN, 2011). Die Bauarbeiten der Sperrenmauer begannen am 14.10.1954 und dauerten bis zum 25.06.1956; die Eröffnung des Kraftwerkes fand am 06.07.1957 statt.

3.3 Hochwasserentlastungsanlage der Sperre Ottenstein

Die Hochwasserentlastungsanlage der Sperre Ottenstein Abb. 3-3 :Bild A-C wurde einerseits dafür ausgelegt, eine Hochwassermenge von 420 m³/s abzuführen, andererseits dient sie dazu den Speicherraum zu vergrößern, um ihn energiewirtschaftlich nützen zu können. Dazu wurden auf der Sperrenkrone 2 Stauklappen zu je 27 m Länge und einer Höhe von 2,6 m (Höhe gemessen von der Sperrenkrone) installiert (Steyrer,1992) Abb. 3-3 :Bild A.

Der durch die Stauklappen entstehende 54 m breite Überfallstrahl wird über den 8m breiten Überfallrücken Abb. 3-3 :Bild C geleitet und durch die darauf befindlichen Strahlzerteiler in Einzelstrahlen aufgeteilt. Durch die Formgebung des Uberfallruckens soll eine möglichst große Strahlwurfweite erzielt werden, um eine Belastung des Sperrenfues zu vermeiden. Für geringe Klappensenkungen befinden sich an der Stauklappe ebenfalls Strahlaufreißer in Form von Blechen Abb. 3-3 :Bild B (schwarzer Kreis). Die Strahlzerteiler bzw. Strahlaufreißer haben die Aufgabe den Überfallstrahl in mehrere Einzelstrahlen aufzuteilen und zu belufte, um so den Impuls des auftreffenden Uberfallsstrahles in das Tosbecken zu vermindern (Häusler, 1961).

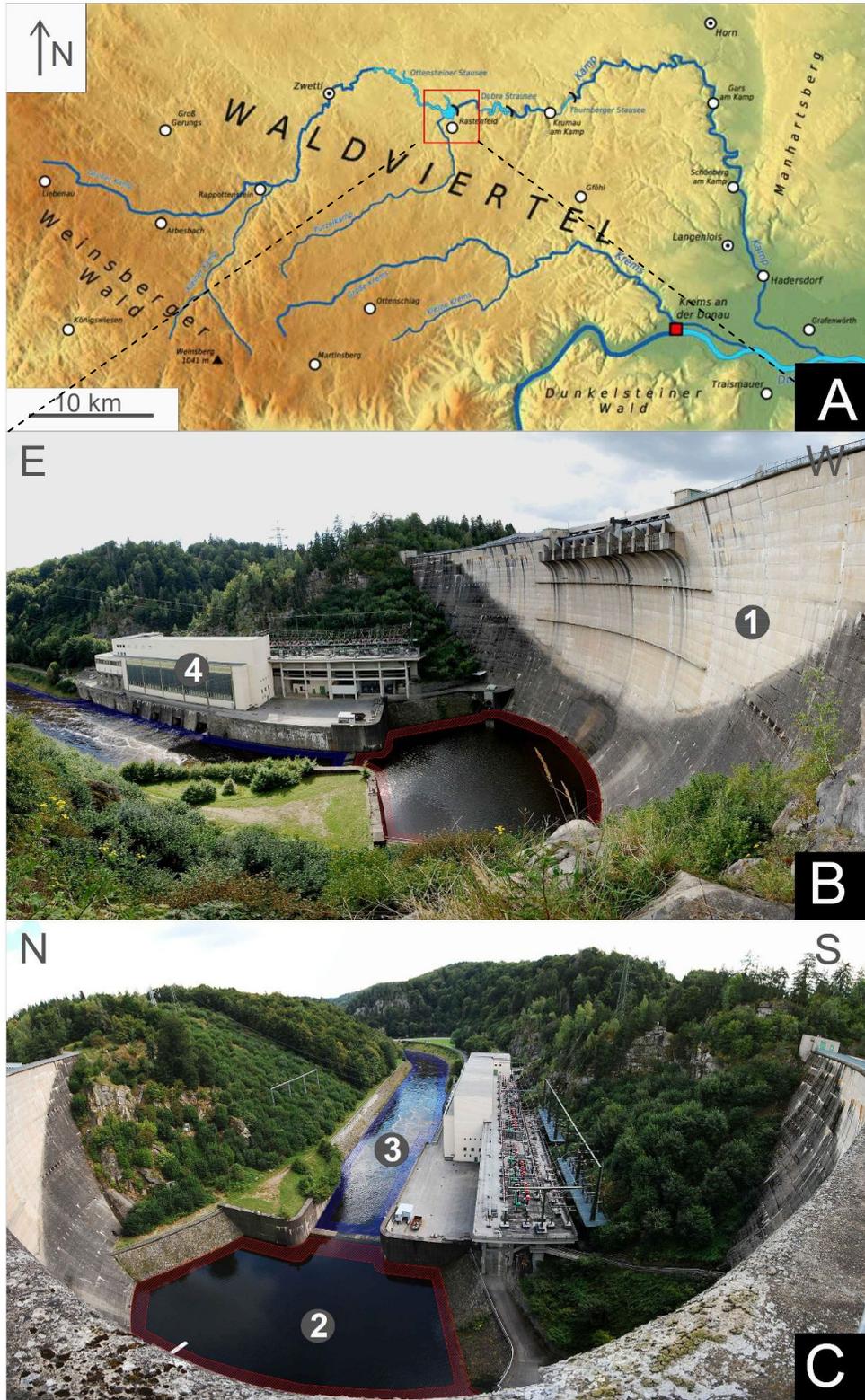


Abb. 3-2 Bild A: Lage des Kraftwerkes Ottenstein (roter Rahmen) in der Nähe der Ortschaft Rastorf im Waldviertel; Weiters ist die Lage der Kraftwerke Dobra sowie Thurnau entlang des Kamp eingezeichnet; Quelle: Ekrem Canli; **Bild B:** Blickpunkt von Norden auf die Staumauer (Kreis 1), sowie das Krafthaus (Kreis 4); Quelle: Steinbauer, C.; **Bild C:** Blickpunkt von der Staumauer Richtung Osten auf das Tosbecken (Kreis 2) sowie den Rückstau des Kraftwerkes Dobra (Kreis 3); Quelle: Steinbauer, C.;

Nachdem das Wasser den Überfallrücken verlassen hat, bildet sich ein freier Überfallstrahl Abb. 3-4, der nach 62 m freiem Fall im Tosbecken auftrifft. Das Tosbecken hat die Funktion die Energie des Überfallstrahles aufzunehmen, welche bereits durch die Aufteilung und Belüftung des Strahles vermindert wurde. Um die Energieaufnahme zu gewährleisten, muß ein ausreichend tiefes Wasserpolster im Tosbecken vorhanden sein. Im optimalen Fall wirken somit auf die Tosbeckensohle außer der statischen Druckbelastung des Wasserpolsters, keine weiteren dynamischen Belastungen durch den eintauchenden Überfallstrahl (Steyrer,1992).

Das Tosbecken (Fläche von zirka 1800 m²) Abb. 3-5 liegt vor der Staumauer direkt unter den beiden Stauklappen der Sperrenkronen Abb. 3-4. Begrenzt wird das Tosbecken durch eine 3,7 m hohe und 20 m lange Sohlenschwelle am Auslass des Tosbeckens Abb. 3-5:Pfeil B, an den beiden Seiten durch zwei 12 m hohe Flügelmauern Abb. 3-5:Pfeile A und der Staumauer selbst.

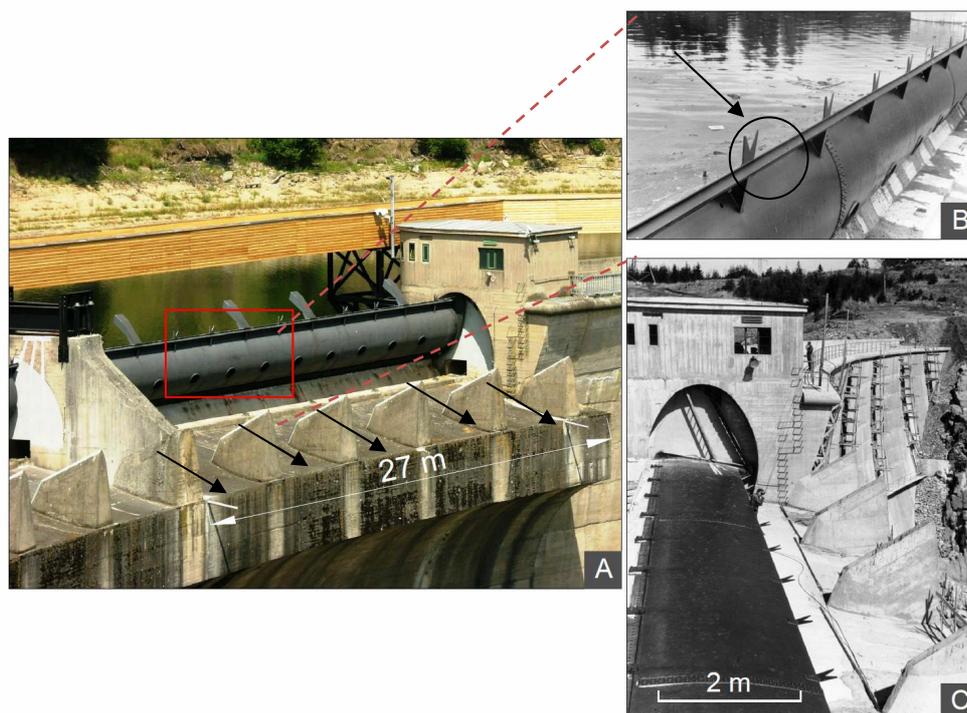


Abb. 3-3 Bild A: Geschlossene Stauklappe, man erkennt 5 Strahlzerteiler je Stauklappe, dargestellt durch 5 Pfeile; **Bild B:** Geschlossene Stauklappe, schwarze Kreise markieren die Strahlaufreißer für geringe Klappensenkung, die Höhe der Stauklappe beträgt 2,6 m, die Breite 27 m; **Bild C:** Überfallrücken mit umgelegter Stauklappe, die Breite des Überfallrückens beträgt 8 m; Quelle: EVN;



Abb. 3-4 Freier Überfall in das Tosbecken, Höhendifferenz 62 m; Quelle: EVN

Die Geometrie des Tosbeckens ist dahingehend ausgelegt, dass bei einem Überlauf über beide Stauklappen der Wasserspiegel im Tosbecken rasch ansteigt, um einen ausreichend großen Wasserpolster für den Überfallstrahl zu schaffen. Die Tosbeckenschwelle stellt ein Hindernis für den Abfluß aus dem Tosbecken dar und führt deshalb zu einem raschen Anstieg des Wasserspiegels (Steyrer, 1992).

In Modellversuchen der Bundesversuchsanstalt für Wasserbau in Wien wurde der Aufschlagsbereich des Überfallstrahles in einem Bereich zwischen 6 bis 15 m vom Mauerfuß ermittelt Abb. 3-8 :Bild A. Im Falle eines schwachen Überfallstrahles kann man von einer Entfernung von 6 m ausgehen und einem Wasserpolster von 4 m, bei einem anstieg der Überflussmenge auf 420 m³/s vergrößert sich der Abstand zum Mauerfuß sowie die Tiefe des Wasserpolsters auf 7 m (NEWAG, 1958).

Die Sohle des Tosbeckens wurde im ersten Ausbauschnitt bis auf eine Ost-West verlaufende Betonplombe naturbelassen ausgeführt. Durch die Beschädigungen bei einem Klappenversuch am 03.09.1957 wurde jedoch das ursprünglich naturbelassene Tosbecken saniert und durch eine stahlbewehrte im Fels verankerte Betonplatte ergänzt (NEWAG, 1965).

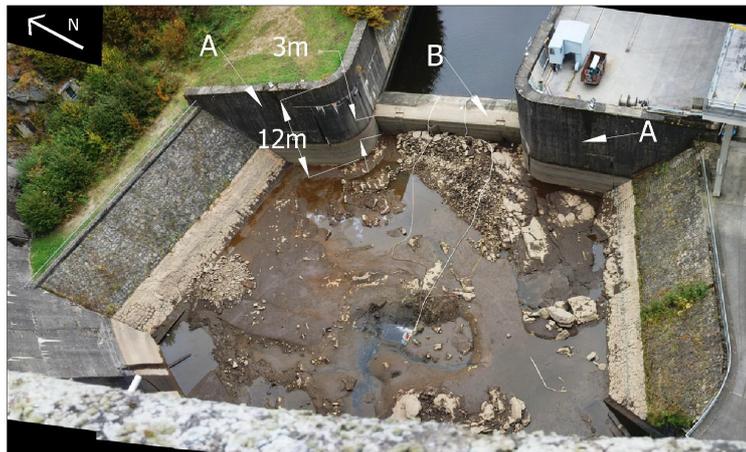
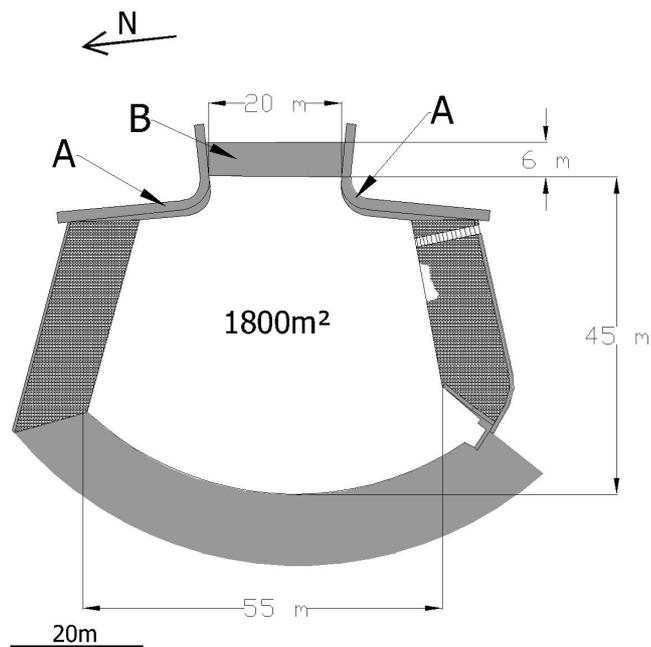


Abb. 3-5 Oberes Bild: Abmaße des Tosbeckens: Es besitzt eine Breite von zirka 55m sowie eine Länge von zirka 45m; Die Höhe der beiden Flügelmauern (**Pfeil A**) beträgt 12m; Die Höhe der Tosbeckenschwelle (**Pfeil B**) 3,7m; Die Gesamtfläche der Tosbeckensohle beträgt 1800 m²; Quelle: Laserscandaten, Steinbauer,C.; **Unteres Bild:** Aufnahme von der Staumauer, wie auch im oberen Bild sind die beiden 12m hohen Flügelmauern mit (**Pfeil A**) gekennzeichnet; Pfeil B beschreibt die 3m hohe Tosbeckenschwelle; Quelle: Steinbauer,C;

3.4 Stauklappenversuche

Im nachfolgenden Kapitel unterscheidet sich zwischen Stauklappenversuchen und Überläufen.

Stauklappenversuche wurden in den ersten Betriebsjahren des Kraftwerkes Ottenstein durchgeführt, um die Strahlbelüftung schrittweise zu verbessern, sowie die Antriebe der beiden Stauklappen zu testen bzw. zu verbessern. Diese

Versuche wurden im Gegensatz zu Überläufen, die z.B. durch ein Hochwasserereignis hervorgerufen wurden, ausführlich dokumentiert.

3.4.1 Stauklappenversuch am 01.08.1957

Stauklappenversuch mit rechter Stauklappe mit 30 m³/s bei Kote 492,85 m (NEWAG, 1985). Keine näheren Angaben bezüglich aufgetretener Schäden an der Tosbeckensohle.

3.4.2 Stauklappenversuch am 12.08.1957

Erprobung der Stauklappen unter Vollstau (Kote 494,95 m), Absenkung der rechten Stauklappe um 80 cm. Der dabei auftretende Überfluss betrug 50 m³/s. Beim Absenken der Stauklappe wurden die Strahlaufreißer der Stauklappe überflossen, vor dem nachfolgenden Versuch am 03.09.1957 wurden zusätzliche Strahlaufreißer an der Stauklappe installiert.

Weiters kam es durch rückströmendes Wasser am Überfallrücken zur Behinderung der seitlich an der Stauklappe liegenden Belüftungskanäle. Durch auftretende Schwingungen an der Stauklappe, wurde der Versuch abgebrochen (NEWAG, 1985). Bei der Begehung des Tosbeckens am 29.08.1957 wurden keine Schäden an der naturbelassenen Tosbeckensohle festgestellt (Horniger, 1982).

3.4.3 Stauklappenversuch am 03.09.1957

Zweiter Stauklappenversuch, welcher der Erprobung verbesserter Strahlaufreißer diente Abb. 3-7: Bild B, rote Pfeile. Grund hierfür waren Probleme mit den Strahlaufreißern beziehungsweise der Belüftung des Überfallstrahles während dem ersten Versuch am 12.08.1957 (NEWAG, 1958).

3.4.3.1 Ablauf des Stauklappenversuches

Im Laufe des zweiten Versuches wurde die rechte Stauklappe (in Fließrichtung des Überfallstrahles betrachtet) Abb. 3-6 : Bild A-Bild C bei Vollstau in 18 min vollkommen umgelegt, wodurch es zu einem Durchfluss von 210 m³/s kam. Die Wasserspiegeldifferenz zu Beginn des Versuches betrug 58 m bei einer Wassertiefe im Tosbecken von 4 m. Durch den raschen Anstieg des Wasserpolsters im Tosbecken wurde jedoch binnen weniger Minuten eine Wassertiefe von 7,5 m erreicht (NEWAG, 1982).

Die Strahlaufreiung, welche seit dem ersten Versuch verbessert wurde, funktionierte zu diesem Zeitpunkt. Die Belüftung des Überfallstrahles war jedoch wie bei dem ersten Versuch behindert. Grund hierfür war teilweise rckstrmendes Wasser, welches durch den Aufprall am berfallrcken entstand und somit die seitlichen Luftkanäle behinderte (NEWAG, 1958). Zu dem Zeitpunkt des zweiten Klappenversuches war somit eine optimal funktionierende Belüftung des Überfallstrahles noch nicht gegeben.

Im Laufe des Versuches erhöhte sich der Wasserpolster im Tosbecken durch die Verengung der Tosbeckenschwelle auf etwa 7m Wassertiefe. Durch den einseitigen Überfall kam es auch zur Ausbildung einer sich gegen den Uhrzeigersinn drehenden Wasserwalze im Tosbecken.

Um während des Versuches Meßdaten aus dem Tosbecken zu erhalten, installierte man zwei Drucksensoren in Felsnischen Abb. 3-8 :Bild B, rote Pfeile. Demnach herrschte bei einem Überfall von 50 m³/s ein Druck in der Höhe von (Auszug aus dem technischen Bericht vom März 1985 (NEWAG, 1958)) Gl.3-1.

$$0,5 + 0,32 \pm 0,27 = 1,19 \text{ at} \quad \text{Gl.3-1}$$

oder in [bar]

$$0,5 + 0,32 \pm 0,27 = 1,20 \text{ bar} \quad \text{Gl.3-2}$$

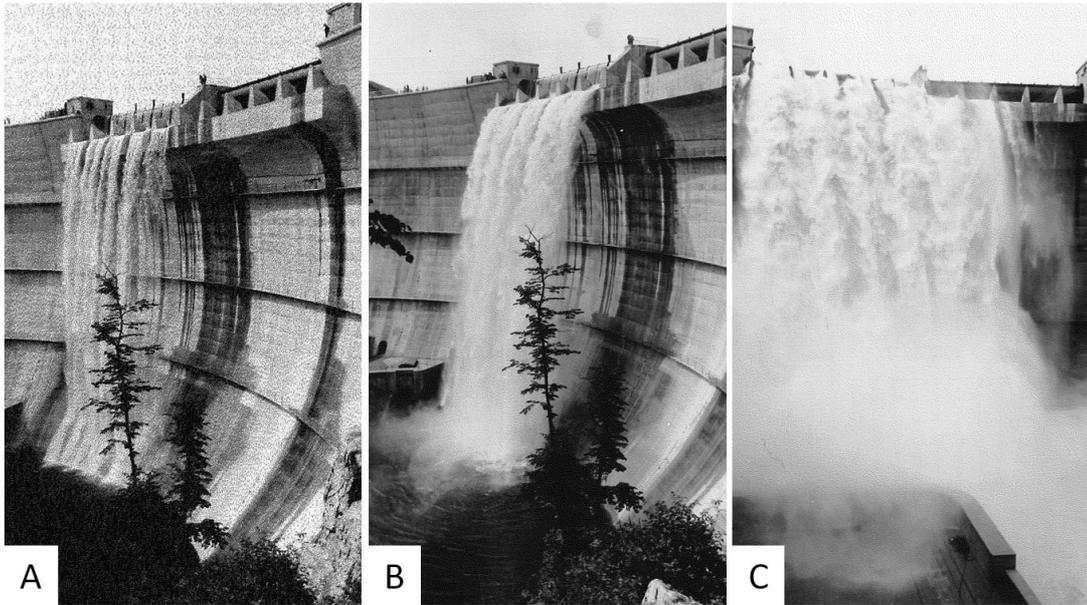


Abb. 3-6 Bild A: Beginn des Überfallversuches; **Bild B:** Senken der Stauklappen; **Bild C:** Volle Öffnung der rechten Stauklappe (rechts: gesehen in Fließrichtung des Wassers); Quelle: EVN-Bildarchiv

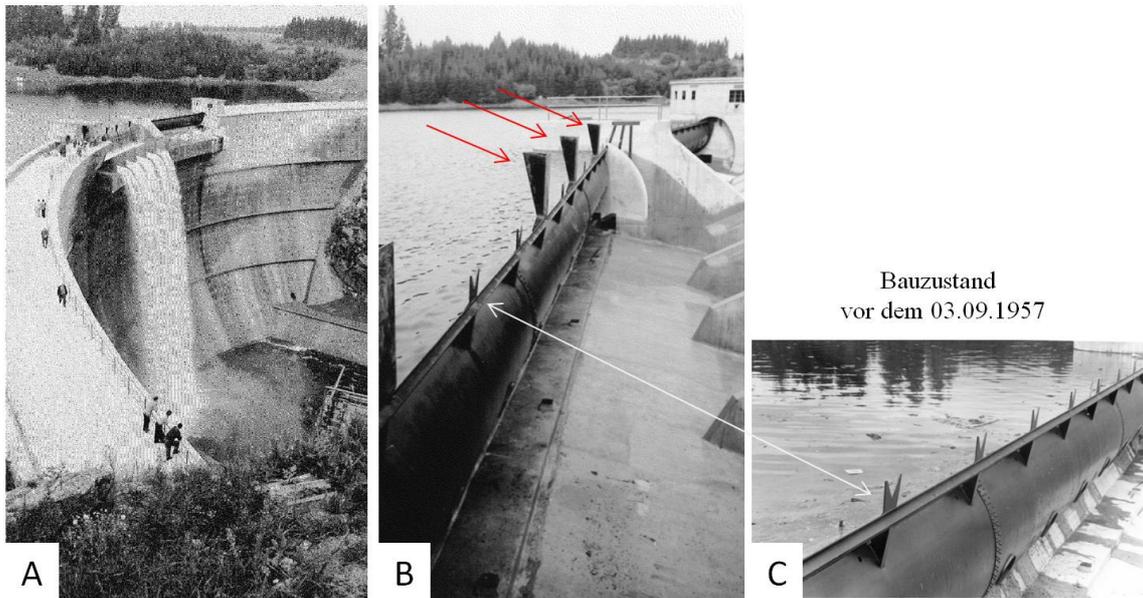
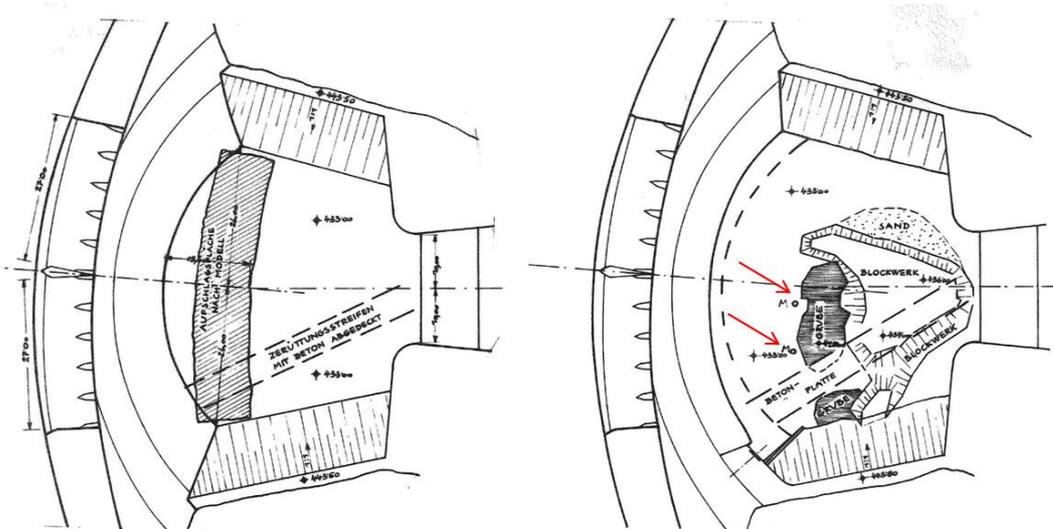


Abb. 3-7 Bild A: Stauklappenversuch vom südlichen Hügel aus beobachtet; **Bild B:** Geschlossene Stauklappe vor dem Versuch, rot markiert sind neu installierte Strahlaureißer; **Bild C:** Ursprünglicher Bauzustand ohne neu installierte Strahlaufreißer, der weiße Pfeil markiert die ursprünglich installierten Strahlaufreißer; Quelle: EVN-Bildarchiv



A AUFSCHLAGSFLÄCHE
NACH MODELL

B AUSKOLKUNG NACH
DEM ÜBERLAUF

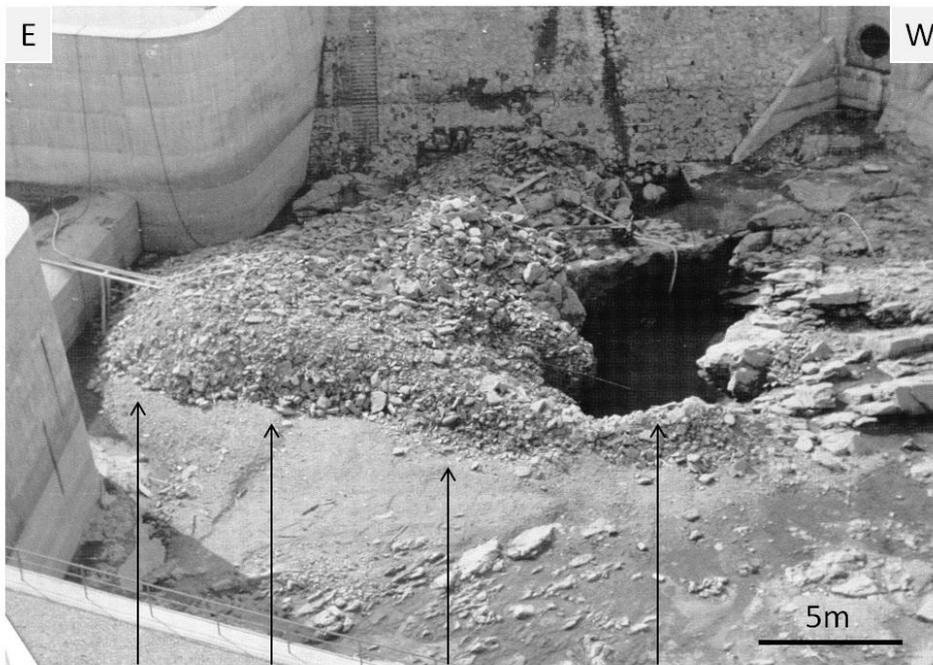
Abb. 3-8 Bild A: Aufschlagsfläche ermittelt nach der Versuchsanordnung der Bundesversuchsanstalt für Wasserbau in Wien (schraffierter Bereich) sowie der mit Beton abgedeckte Zerrüttungsstreifen; **Bild B:** Zustand des Tosbeckens nach dem Überfall am 03.09.1957; Die beiden roten Pfeile markieren die Position der Sensoren während des Versuches am 03.09.1957- gekennzeichnet mit einem Kreis sowie mit einem M: Messdose; Beschreibung siehe Text; Quelle: EVN-Bildarchiv

Tosbecken Ottenstein vor dem Überfall am 03.09.1957



Abb. 3-9 Zustand des Tosbeckens vor der Inbetriebnahme; Quelle: EVN-Bildarchiv

Tosbecken Ottenstein nach dem Überfall am 03.09.1957



Überwiegend: Sand Kies Blockwerk Auskolkung

Abb. 3-10 Zustand des Tosbeckens nach dem Überfall am 03.09.1957; Von links nach rechts erkennt man eine Abfolge von: Überwiegend Sand- Überwiegend Kies- Überwiegend Blockwerk; Beschreibung siehe Text; Quelle: EVN-Bildarchiv

bei einer Druckänderung von $\pm 0,27$ atü oder $\pm 0,27$ bar [1 atü:= 0,980665 bar] mit einer Frequenz von 4 bis 8 Hz. Bei einem Überfall von 210 m³/s konnte ein Druck in der Höhe von Gl.3-3.

$$0,7 + 0,57 \pm 0,09 = 1,37 \text{ atü} \qquad \text{Gl.3-3}$$

oder in [bar]

$$0,71 + 0,58 \pm 0,09 = 1,37 \text{ bar} \qquad \text{Gl.3-4}$$

bei einer Druckänderung von $\pm 0,09$ atü oder $\pm 0,09$ bar mit einer Frequenz von 2,5 bis 8,5 Hz gemessen werden. Umgerechnet würde das bei einem Druck von 1,37 bar einer 13,9 m hohen Wassersäule entsprechen.

3.4.3.2 Aufgetretene Schäden im Tosbecken

Während des 40 Minuten dauernden, einseitigen Überfalls über die rechte Stauklappe (rechts: gesehen in Fließrichtung der Strömung über die Stauklappe) entstand eine 5 m tiefe Auskolkung, bei der in etwa 500 m³ Gestein ausgespült wurde (Vergleiche hierzu Abb. 3-9: Zustand des Tosbeckens vor dem Überfall; Blickrichtung nach Norden, mit Abb. 3-10: Zustand des Tosbeckens nach dem Überfall; Blickrichtung nach Süden). Das Gesteinsmaterial sammelte sich durch die starke Wasserbewegung vor der Tosbeckenschwelle beziehungsweise an der rechten Uferseite des Tosbeckens (in Fließrichtung des Überfallstrahles betrachtet) in Form von Sand, Kies und Blockwerk Abb. 3-10 (NEWAG, 1958). An manchen Stellen waren ausgeschwemmte Felsfugen sowie angehobene Gesteinsplatten erkennbar (NEWAG, 1985).

Die Lage des Kolkes wich von der im Modellaufbau der Bundesversuchsanstalt für Wasserbau in Wien ermittelten Entfernung vom Mauerfuß ab Abb. 3-8: A. Theoretisch sollte der Aufprallbereich je nach Überflussmenge in einer Entfernung von 6 bis 15 m vom Mauerfuß entfernt liegen. Die Auskolkung, die während des zweiten Stauklappenversuches ausbildete war jedoch zirka 26 m vom Mauerfuß entfernt.

An der schräg durch das Tosbecken verlaufenden Betonplombe Abb. 3-8 :Bild A-B, welchen eine Zerrüttungsstreifen abdeckt, konnte nach dem Überfall keine Beschädigung festgestellt werden.

3.4.3.3 Hydrodynamische Beanspruchungen des Tosbeckens

Im Auftrag der EVN wurde 1992 die hydrodynamische Beanspruchung des Tosbeckens berechnet, um so eine mögliche Erklärung für die Auskolkung von 1957 zu finden. Im Folgenden ist eine Zusammenfassung des technischen Berichts (Steyrer, 1992) angeführt, für die genaue Berechnung der Werte möchte ich jedoch auf diesen Bericht verweisen.

Die berechnete Gesamtbelastung der Tosbeckensohle bei völlig umgelegter Stauklappe (Überfluß von 210 m³/s) und völlig ausgebildetem Wasserpolster des Tosbeckens entspricht einer Wassersäule von 12,89 m.

Die Gesamtbelastung der Tosbeckensohle setzt sich hierbei aus einem dynamischen Druckanteil (P_{DYN}) von 6,04 mW (entspricht 6,04 N/cm²) und einem statischen Druckanteil (P_{STAT}) von 6,85 mW zusammen.

Der berechnete Eintauchwinkel des Überfallstrahles in die Wasseroberfläche des Tosbeckens beträgt 75,54°, die Eintauchgeschwindigkeit liegt bei 33,84 m/s.

3.4.3.4 Bisherige Erklärungen der Auskolkung

Aus den bisherigen Erklärungen (Steyrer, 1992) (NEWAG, 1985) (NEWAG, 1958) geht hervor, dass die 500 m³ fassende Kolkbildung während des zweiten Stauklappenversuches am 03.09.1957 nicht allein durch die eher geringe Belastung der Tosbeckensohle während des 40 minütigen Stauklappenversuches zu erklären ist.

Zu diesem Zeitpunkt war die Tosbeckensohle bis auf einen mit Beton abgedeckten Zerrüttungsstreifen Abb. 3-8 :Bild A-B naturbelasser Rastenberger Granodiorit.

Theoretische Berechnungen (Steyrer, 1992) als auch Druckmessungen anhand von zwei Druckmessdosen während des Stauklappenversuches (NEWAG, 1958) kommen zu einer Belastung von 12,89 mWS (0,12 Mpa) (theoretischer Wert) sowie 13,9 mWS (0,13 Mpa) (gemessener Wert).

Diese Belastung ist jedoch zu gering, um den Granit zu zertrümmern (NEWAG, 1958).

Laut (Steyrer, 1992) war der Grund für die Auskolkung von 1957 der geologische Aufbau des Tosbeckens.

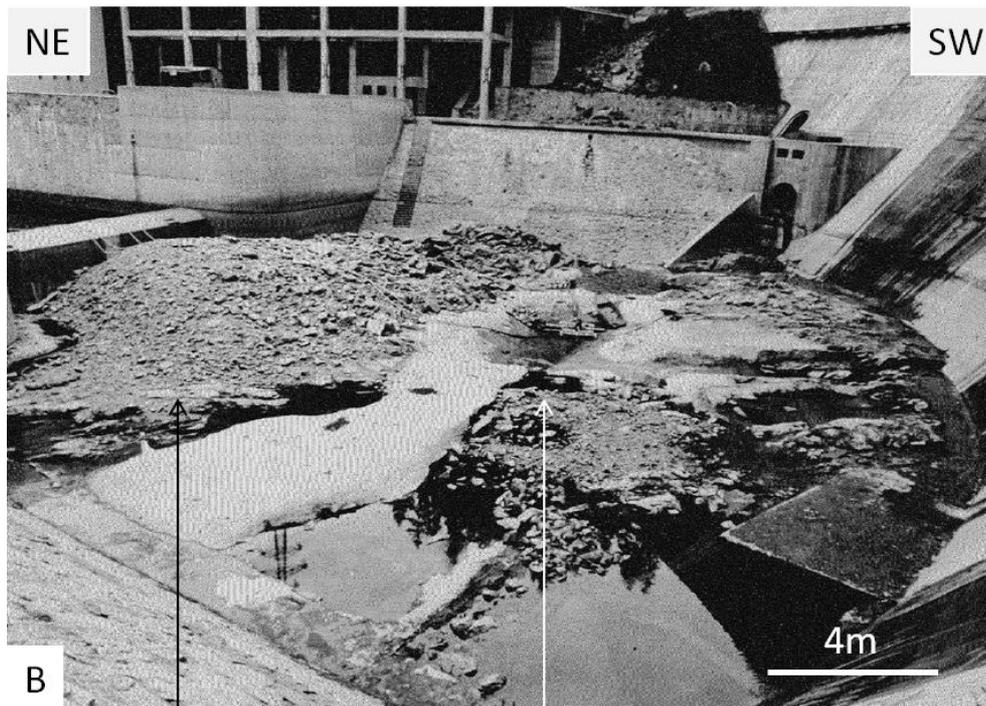
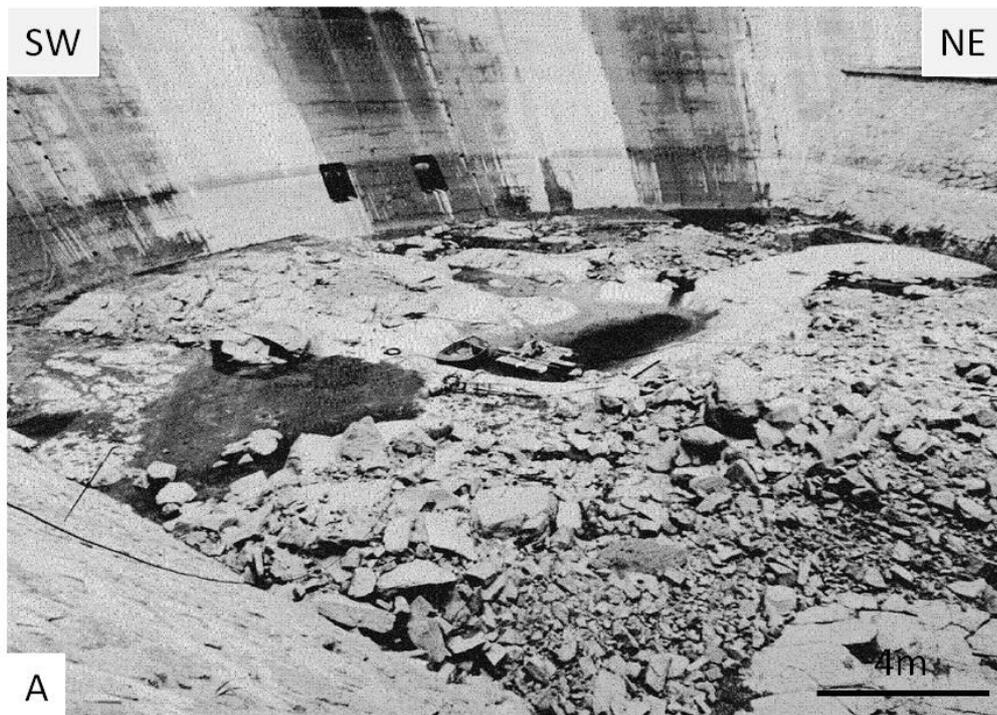
Der durch einen Überfallstrahl entstandene Druck wirkte, auf vorhandene Kluffflächen der naturbelassenen Sohle des Tosbeckens, und kann so zu einem „Aufsprengen“ (Steyrer, 1992) der Kluft führen. Die maximale Tiefe, in der es noch zu einer „Aufsprengung“ einer Kluft bei dem Versuch von 1957 kommen könnte wurde mit 4,68 m berechnet (Steyrer, 1992), die gemessene Kolktiefe betrug hierbei 5 m. Nach dem technischen Bericht von (Steyrer, 1992) entstand der Schaden der Tosbeckensohle demnach nicht durch eine Auskolkung sondern durch eine „Aufsprengung“ einer Kluft, die sich in einer Tiefe von bis zu 5 m befand.

Negativ wirkte sich auch der einseitige Überfall über die Staumauer aus, da in diesem Fall der entstehende Wasserpolster eine geringere Tiefe aufweist und somit die Tosbeckensohle höheren Belastungen ausgesetzt ist.

3.4.3.5 Sanierungsmaßnahmen

Nach der Auskolkung des Tosbeckens wurden die entstandenen Schäden mit Beton aufgefüllt und eine stahlbewehrte Betonplatte 20 bis 25 m vom Mauerfuß im Fels verankert. Die Betonplombe, die den Zerrüttungsstreifen schützte, wurde in der ursprünglichen Form belassen. Nach einem weiteren Überfall am 12.08.1959 bis 13.08.1959 über beide Klappen wurden die Betonplatten verstärkt und vergrößert. Besonderen Wert legte man diesmal auf die Ränder der Betonplatten Abb. 3-11 :Bild A-B. Weitere Überfälle am 22.08.1960 führten zu keinen weiteren größeren Beschädigungen (NEWAG, 1958).

Tosbecken Ottenstein nach dem Hochwasser am 12.08.1959



Sand, Kies, Blockwerk
vom 03.09.1957

Sanierung der Auskolkung
Vom 03.09.1957

Abb. 3-11 Bild A: Blick von SE auf das sanierte Tosbecken. Das Bild wurde nach dem Hochwasser vom 12.08.1959 aufgenommen. **Bild B:** Blick von NW auf das sanierte Tosbecken. Man erkennt ein Sand-Kies-Blockwerk vom 03.09.1957; Quelle: EVN-Bildarchiv

3.4.4 Stauklappenversuch am 22.08.1960

Stauklappenversuch wurde unter Vollstau durchgeführt. Dabei wurden im ersten Schritt beide Klappen um zirka 150 cm abgesenkt, im zweiten Schritt die rechte Klappe auf 225 cm geöffnet. Dabei kam es zu einem Überfluss von 205 m³/s. In der darauffolgenden Begehung am 02.09.1960 konnten keine Schäden, trotz der asymmetrischen Beanspruchung der Tosbeckensohle, durch den einseitigen Überfall festgestellt werden (Horniger, 1982).

3.4.5 Stauklappenversuche vom 05.10.1961

Im Laufe dieser Versuche wurden beide Stauklappen um 175 cm gesenkt. In Summe sind 900 000 m³ Wasser über beide Stauklappen abgeführt worden. In der nachfolgenden Begehung konnten keine besonderen Veränderungen der Tosbeckensohle festgestellt werden (Horniger, 1982).

3.4.6 Stauklappenversuche vom 29.10.1964

In diesen Versuchen wurden beide Stauklappen um 210 cm abgesenkt. Dadurch kam es zu einem Überfluss von etwa 400 m³/s. In Summe wurden etwa 589 000 m³ über beide Klappen abgeführt. Es konnten dabei keine größeren neuen Schäden festgestellt werden (Horniger, 1982).

3.4.7 Zusammenfassung der Stauklappenversuche

Aus den mir zur Verfügung stehenden Unterlagen (Archivaufarbeitung EVN) war ersichtlich, daß insgesamt 6 Stauklappenversuche von 1957 bis 1964 durchgeführt wurden. Bei vier der insgesamt sechs Versuche waren beide Stauklappen beteiligt, drei Versuche wurden mit einer Stauklappe durchgeführt, an einem Versuch 1960 wurden beide Klappen sowohl getrennt als auch gemeinsam erprobt.

Die Durchflussmenge [m³], der Durchfluss [m³/s] sowie die Dauer der Versuche [h:min] konnte jedoch nur bei manchen Versuchen aus den Unterlagen ermittelt werden.

In Tab. 3-1 sind die durchgeführten Versuche zusammengefasst dargestellt. Neben dem Datum des Versuchs sind auch die Versuchsdauer [h:min], die daran beteiligten Stauklappen, der vorhandene Wasserpolster im Tosbecken [m] vor

dem Versuch, der Durchfluss [m^3/s], die Durchflussmenge [m^3] sowie die Kote des Speichers Ottenstein [m] und Bemerkungen sowie eine Quellenangabe aufgelistet.

Die maximal gemessene Strömung während eines Klappenversuches betrug 1957 210 [m^3/s]. Die maximal gemessene Durchflussmenge während eines Klappenversuches betrug 1961 900 000 [m^3].

Das zur Verfügung stehende Wasserpolster des Tosbeckens vor dem eigentlichen Stauklappenversuch war nur in einem Versuch 1957 mit 4 m angegeben. Größere Beschädigungen am Tosbecken wurden nur in einem Fall, am 03.09.1957, festgehalten.

Stauklappenversuche 1957 - 1964												
Nr.	Jahr	Monat	Tag	Eine Klappe	Beide Klappen	Rechte Klappe [cm]	Linke Klappe [cm]	Wasserpolster [m]	Kote [m]	Durchfluss [m³]	Strömung-max [m³/s]	Dauer [h:min:sec]
1	1957	8	1	1		-	0	-	492,85	-	30	-
1	1957	8	12	1		90	0	4	494,95	-	50	-
2	1957	9	3	1		260	0	-	494,9	600000	210	00:48:00
3	1959	8	12-13		1	125	125	-	494,9	-	160	34:55:00
4	1960	8	22		1	150	150	-	494,8	398200	205	-
4	1960	8	22	1		225	0	-	494,8	312200	175	-
4	1960	8	22	1		0	150	-	494,8	257750	102	-
5	1961	10	5		1	175	175	-	-	900000	-	-
6	1964	10	20		1	260	260	-	494,9	-	400 m³/s	01:30:00

Nr.	Schäden	Bemerkung	Quelle
1	-		3
1	-	Abbruch des versuches; Grund Schwingungen der Stauklappe	2-3
2	Beträchtliche Schäden	Erprobung neuer Strahlaufreißer	2-3
3	-		3
4	Keine Schäden	Abnahme, beider Klappen bei ungefähr Vollstau	2-3
4	Keine Schäden	Abnahme, beider Klappen bei ungefähr Vollstau	2-3
4	Keine Schäden	Abnahme, beider Klappen bei ungefähr Vollstau	2-3
5	Keine Schäden	-	1
6	Keine Schäden	Neue Strahlaufreißer	3

Tab. 3-1 Zusammenfassung der aufgetretenen Stauklappenversuche. Der Zeitraum bezieht sich bis 1964. Nach 1964 konnten keine weiteren Stauklappenversuche aus den Unterlagen entnommen werden; Daten, welche aus den Unterlagen nicht erhoben werden konnten, wurden mit „-“, gekennzeichnet; Quellen: 1- (Horniger, 1982); 2-(NEWAG, 1958); 3-Handschriftliche Aufzeichnungen des Sperrenbuches (EVN, 2011);

3.5 Überläufe von 1957 bis 2011

3.5.1 Hochwasserereignis am 12.08.1959 bis 13.08.1959

Im Zeitraum vom 12.08. bis 13.08.1959 kam es zu einem länger dauernden Hochwasserüberfall über beide Stauklappen mit einem Durchfluss von 160 m³/s. In der anschließenden Begehung des Tosbeckens wurden Angriffe sowie Abbrüche der Betonschützplatte festgestellt. Daraufhin wurde im Herbst 1959 eine Sanierung der Tosbeckensohle durchgeführt. Dabei wurde die vorhandene Betonplatte verstärkt und vergrößert sowie deren Ränder gesichert. Um eine rauhe und unregelmäßige Tosbeckensohle zu erzielen, wurden außerdem große Steinblöcke einbetoniert (Horniger, 1982).

3.5.2 Hochwasserereignisse von 1965 bis 1975

Im Zeitraum von 1965 bis 1975 kam es zu fünf weiteren Überfällen. Dabei handelte es sich jedoch laut NEWAG um „*vergleichsweise unbedeutende Hochwässer*“. In Tab. 3-2 sind diese Überströmungen angeführt (Horniger, 1982).

3.5.3 Hochwasserereignisse von 1975 bis 1985

In diesem Zeitraum konnten nur zwei Überfälle erfasst werden Tab. 3-2. Als Quelle diene mir dafür das Sperrenbuch des Kraftwerks Ottenstein (EVN, 2011). Angaben zu etwaigen Beschädigungen der Tosbeckensohle in diesem Zeitraum konnten nicht erfasst werden.

3.5.4 Hochwasserereignisse von 1985 bis 2002

In diesem Zeitraum waren keine Überläufe im Sperrenbuch verzeichnet.

3.5.5 Hochwasserereignis vom 07.08.2002 bis 09.08.2002

In diesem Zeitraum kam es zu einem mehrtägigen Hochwasserüberlauf von über 400 m³/s (max. 530 m³/s, laut Sperrenbuch (EVN, 2011)). Der maximal im Speicher erreichte Wasserspiegel betrug 495m, beide Stauklappen waren 260 cm gesenkt.

Im Laufe dieses Hochwassers entstanden etliche Kolkschäden (Jacobs, 2003) im Tosbecken sowie im Nachtosbecken.

3.5.5.1 Schäden im Bereich des Tosbeckens

In den Bereichen A-E sind durch den mehrtägigen Hochwasserüberfall Beschädigungen der Tosbeckensohle aufgetreten Abb. 3-12. Auszug aus dem Bericht der Inspektion des Tosbeckens an den Talsperren Ottenstein, Dobra und Thurnberg vom 10.10.2002 (BMLFUW, 2002):

Bereich A: Engbegrenzter Kolk unmittelbar am Sperrenfuß – Tiefe nicht festgestellt

Bereich B: Randbereich der bestehenden Betonplombe ist ausgewaschen und unterspült.

Bereich C: Die Blockgruppe ist teilweise gelockert.

Bereich D: Unterwasserseitig der bestehenden Betonabdeckung ist stellenweise bis zu 2 m (horizontal) unterspült. Das ausgeworfene Material wurde im Wesentlichen auf der Störungsplombe unmittelbar vor der Tosbeckenschwelle abgelagert. Die Blockgröße reicht von 0,3 bis 1,0 m Kantenlänge.

Bereich E: Söhlig gelagerte Gneisplatten wurden abgehoben, befinden sich aber noch an Ort und Stelle. Dadurch wurde die Bankungsfuge an der Tosbeckensohle freigelegt.

Die Sanierungsmaßnahmen des Tosbeckens erfolgten im Zeitraum 3. bis 6. April 2003. Dabei wurden Betonplomben in den Bereichen A, B und D hergestellt. Im Bereich D wurde ein Kolk vergossen, um die verbleibenden Blöcke zu fixieren. Der Bereich E wurde unbehandelt belassen (Jacobs, 2003).

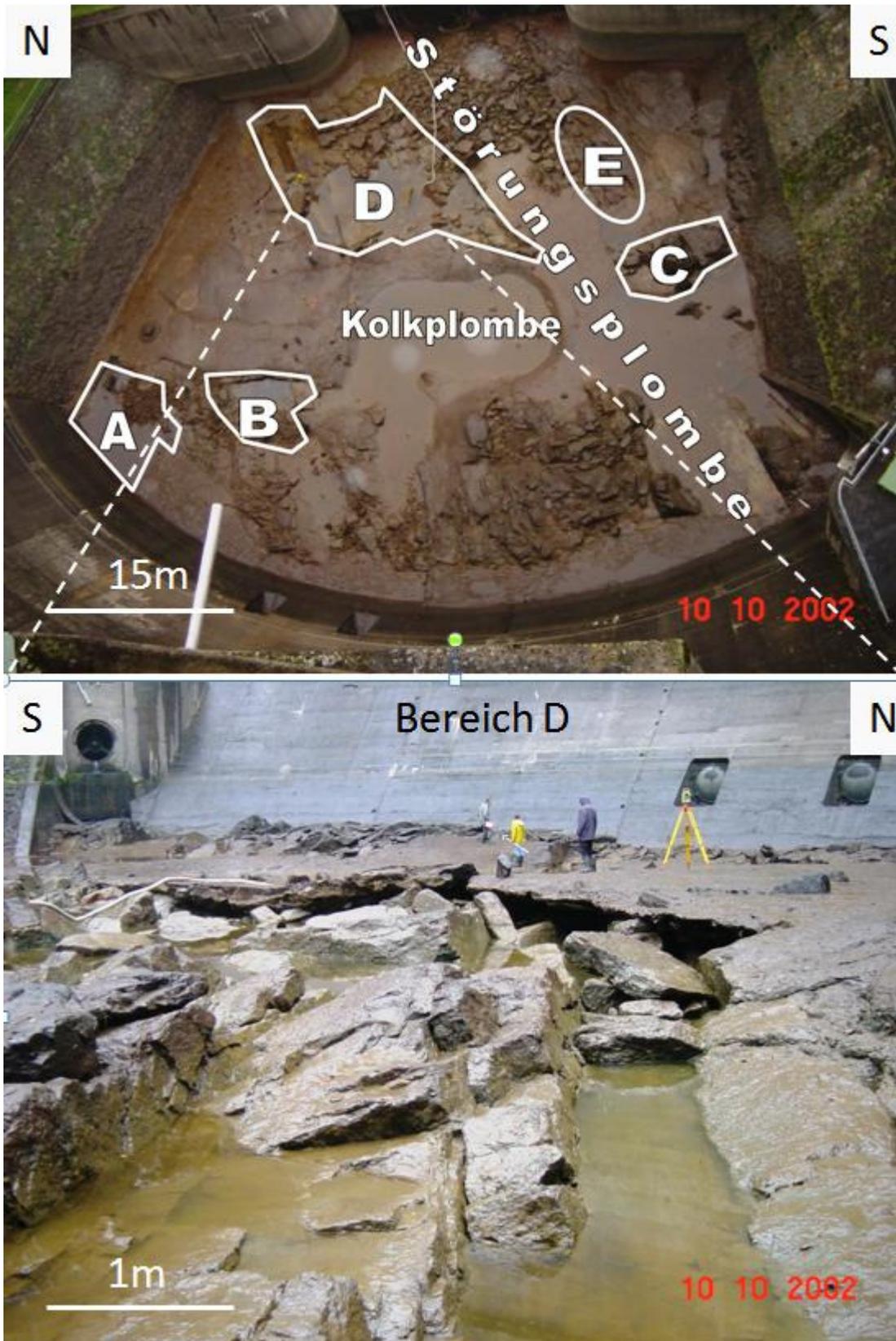


Abb. 3-12 Oberes Bild: Beschädigungen der Tosbeckensohle infolge des Hochwassers vom 07.08.2002 bis 09.08.2002, A bis E, siehe Text; **Unteres Bild:** Blockhohlformen im Bereich D; Quelle: Dr.Sven Jacobs

3.5.6 Zusammenfassung der Überläufe

Aus den mir zur Verfügung stehenden Unterlagen (Archivaufarbeitung EVN) war ersichtlich, dass insgesamt 12 Überläufe von 1958 bis 2002 auftraten. An drei der insgesamt zwölf Überläufe waren beide Stauklappen beteiligt.

Die Durchflussmenge [m³], der Durchfluss [m³/s] sowie die Dauer der Versuche [h:min] konnte jedoch nur bei manchen Überläufen aus den Unterlagen ermittelt werden.

In Tab. 3-2 sind die Überläufe zusammengefasst dargestellt. Neben dem Datum des Überlaufs sind auch die Dauer [h:min], die daran beteiligten Stauklappen, der vorhandene Wasserpolster im Tosbecken [m], der Durchfluss [m³/s], die Durchflussmenge [m³] sowie die Kote des Speichers Ottenstein [m] und Bemerkungen sowie eine Quellenangabe zusammengefaßt dargestellt.

Die maximal gemessene Strömung während eines Überlaufes betrug 2002 530 [m³/s]. Die maximal gemessene Durchflussmenge während eines Überlaufes betrug 1975 180 000 [m³].

Das zur Verfügung stehende Wasserpolster des Tosbeckens vor einem Überlauf war in keinem Fall angegeben. Größere Beschädigungen am Tosbecken wurden nach zwei Überläufen festgehalten: Hochwasserereignis am 12.08.1959 bis 13.08.1959, sowie das Hochwasserereignis vom 07.08.2002 bis 09.08.2002.

Überfälle 1958 - 2002												
Nr.	Jahr	Monat	Tag	Eine Klappe	Beide Klappen	Rechte Klappe [cm]	Linke Klappe [cm]	Wasserpolster [m]	Kote [m]	Durchfluss [m³]	Strömung-max [m³/s]	Dauer [h:min:sec]
1	1958	5	21	1		0	-	-	493,43	-	-	-
2	1958	6	23	1		0	45	-	494,9	-	18	-
3	1958	10	1	1		0	25	-	494,7	-	8	-
4	1959	7	21		1	120	120	-	494,9	-	150	43:45:00
5	1965	5	11-12		1	20	20	-	-	-	15	-
6	1965	6	6-7		1	45-35	45-35	-	-	-	35	-
7	1975	7	5		1	30	30	-	494,9	-	140	-
8	1975	7	10		1	40	40	-	-	145000	-	-
9	1975	7	11		1	40	40	-	-	180000	-	-
10	1985	7	8		1	60	60	-	-	50	-	10:15:00
11	1985	8	8-9		1	30	30	-	-	-	-	11:20:00
12	2002	8	7-9		1	260	260	-	495,35	-	530	35:44:00

Nr.	Schäden	Bemerkung	Quelle
1	-	-	3
2	-	Schwierigkeiten mit dem Windwerk	3
3	-	-	3
4	-	-	3
5	-	keine näheren Angaben	3-1
6	-	keine näheren Angaben	3-1
7	-	-	3-1
8	-	-	3-1
9	-	-	3-1
10	-	-	4
11	-	-	4
12	Schäden an der Betonblombe	-	4

Tab. 3-2 Zusammenfassung der aufgetretenen Überläufe, der Zeitraum bezieht sich hierbei von 1958 bis 2002. Nach 2002 konnten keine Überläufe aus den Unterlagen entnommen werden; Daten, welche aus den Unterlagen nicht erhoben werden konnten, wurden mit „-“ gekennzeichnet; Quellen: 1- (Horniger, 1982); 2-(NEWAG, 1958); 3-Handschriftliche Aufzeichnungen des Sperrenbuches (EVN, 2011);

3.6 Zusammenfassung der aufgetretenen Schäden des Tosbeckens

Seit 1957 kam es bei folgenden Ereignissen zu größeren Schäden der Tosbeckensohle:

- Stauklappenversuch am 03.09.1957 (Kapitel: 3.4.4)
- Hochwasserereignis von 12.08.1959 bis 13.08.1959 (Kapitel: 3.5.1)
- Hochwasserereignis von 07.08.2002 bis 09.08.2002 (Kapitel: 3.5.5)

Die größten Schäden verursachte der Stauklappenversuch von 1957, bei dem 500 m³ Material ausgespült wurden. Daraufhin fand die erste Sanierung des Tosbeckens statt. Neben der Installation einer stahlbewehrten Betonplatte füllte man vorhandene Schäden der Tosbeckensohle mit Beton aus.

Nach dem Hochwasserereignis von 1959, bei dem Teile der Betonschutzplatte beschädigt wurden, fand im Herbst 1959 die zweite Sanierung des Tosbeckens statt. Hierbei wurde die vorhandene Betonplatte verstärkt und vergrößert sowie deren Ränder gesichert.

Anhand der mir zur Verfügung gestellten Unterlagen konnte ich keine größeren Schäden im Zeitraum von 1959 bis 2002 ausmachen.

Im Zuge des Hochwasserereignisses von 2002 kam es zu Schäden im Bereich des Tosbeckens sowie des Nachtosbeckens. Im Bereich des Tosbeckens kam es zu Auskolkungen, der Lockerung von Blockgruppen sowie Unterspülungen der Betonabdeckung.

Im Bereich des Nachtosbeckens kam es zu Ausspülungen von Lockermaterialfüllungen sowie zur Kolkbildung. Diese Schäden wurden im Zuge der Sanierungsarbeiten 2003 behoben.

4 Geologische Verhältnisse

4.1 Regionale Geologie

Das Kraftwerk Ottenstein befindet sich im südlichen Bereich der Böhmisches Masse Abb. 4-1: Bereich B. Sie ist Teil der variszischen Grundgebirgsareale Europas und erstreckt sich in Österreich im Norden von Ober- und Niederösterreich.

Die variszische Orogenese (400 Ma bis zirka 300 Ma) resultierte aus der Kollision von Laurasia und Gondwana sowie der Akkretion verschiedener Mikrokontinente, welche als Armorika zusammenfaßt werden (Schöneberger & Neugebauer, 1997). Neben der Böhmisches Masse, die als Teil von Armorika angesehen wird, findet man in ganz Europa variszische Gebirge. Dazu gehören zum Beispiel das Harz, Südengland, Südportugal, der Schwarzwald als auch die Vogesen (Fuchs, 1976).

In Europa wird das variszische Gebirge in Zonen eingeteilt, die Einteilung dieser Zonen beruht auf die magmatische als auch die tektonische Entwicklung eines Gebietes (Schöneberger & Neugebauer, 1997). In Mitteleuropa unterscheidet man von Nord nach Süd zwischen:

- Subvariszikum
- Rhenoherynikum
- Saxothuringikum
- Moldanubikum

Das Moldanubikum bildet den größten Teil der Böhmisches Masse. Es besteht überwiegend aus hoch metamorphen Gesteinen wie z.B Migmatiten, Gneisen, Amphiboliten und intrudierten Granitkörper.

Aus Abb. 4-1 ist ersichtlich, dass das Moldanubikum im Süden von dem Molassebecken der Alpen, im Osten vom Elbe Lineament sowie im Norden vom Saxothuringikum begrenzt wird.

Im Südosten grenzt das Moldanubikum an das Moravikum, welches zum Rhenoherynikum gezählt wird. Bei dem Moravikum handelt sich nach Oberhauser (1980), um einen Kristallinkomplex von Magmatiten und metamorph überprägten Sedimenten im südöstlichen Teil der Böhmisches Masse.

Im Zuge der variszischen Orogenese verhielt sich das Moldanubikum, als starrer Block, an dessen Randbereich Subduktion des Moravikum stattfand. Das Moldanubikum wurde dabei auf das östliche Moravikum überschoben. Diese Subduktion führte zu einer Krustenverdickung und teilweisen Aufschmelzung der unterschobenen Einheiten.

Die durch diesen Aufschmelzprozess entstandenen Magmatite sind im Verlauf der variszischen Orogenese in das Moldanubikum in mehreren Schüben intrudiert und bildeten dadurch das Südböhmische Granitmassiv (Oberhauser, 1980). Bei diesen Granitkörpern handelt es sich um:

- Rastenberger Granodiorit
- Weinsberger Granit
- Diorite
- Feinkorngranite
- Eisgarner Granit

Der älteste dieser Körper ist der Rastenberger Granodiorit, der nach (Zak, Krystof, Finger, & Faryad, 2011) vor 338 ± 2 Ma intrudierte. Wie man in Abb. 4-1 :Bereich B (roter Rahmen) erkennt, ist er dem Südböhmische Granitmassiv vorgelagert und weist eine linsenförmige Nord- Süd Erstreckung auf. Er ist im Untergrund jedoch nicht mit der Hauptmasse des Südböhmische Granitmassiv verbunden, sondern bildet eine eigenständige Intrusionsmasse.

Der geologische Aufbau des Südböhmische Granitmassiv weist eine unregelmäßige Lappung auf und kann stellenweise Nebengestein umschließen. Die Entwicklung der südöstlichen Böhmisches Masse beginnt im Altpaläozoikum mit der Ausbildung eines E-W streichenden Orogens (Fuchs, 1991). Wie in Abb. 4-2 (Ordovizium–Siliur) dargestellt entwickelte sich ein SSE gerichteter Deckenbau. Im Bereich des Moldanubikums treten folgende tektonischen Einheiten auf: Ostrong Einheit, Drosendorfer Einheit sowie Gföhler Einheit.

Im Laufe des Tournais bis Mitte Vise Abb. 4-2 kommt es im Bereich des moldanubischen Deckenbaus zur Ausbildung einer dextralen Transpressionszone, wodurch das ursprünglich E-W streichende Orogen im östlichen Bereich verbogen wurde (Fuchs, 1991).

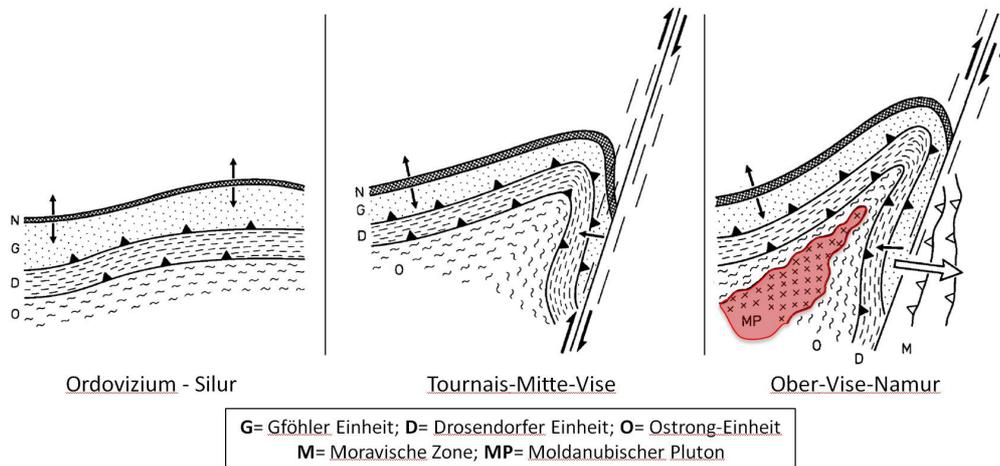


Abb. 4-2 Links: SSE gerichteter Deckenbau der Böhmisches Masse im Ordovizium bis Silur; **Mitte:** Ausbilden einer dextralen Transpressionszone und Schleppung des Deckenbaues; **Rechts:** Durch die Unterschiebung der Moravischen Zone kommt es zu Aufschmelzprozessen sowie zur Intrusion granitischer Schmelzen- MP= Moldanubischer Pluton, rot hervorgehoben; Quelle: modifiziert nach (Fuchs, 1991) Diese Einengung des Moldanubikums (im Ober Vise-Namur) führte zur Ausbildung von Ausgleichsbewegungen, wodurch es zur Überschiebung der im Osten angrenzenden Moravischen Zone kommt.

Durch die Subduktion der Moravischen Zone unter das Moldanubikum kommt es zu Aufschmelzprozessen der unterschobenen Einheiten. Die dabei entstandenen Granitkörper intrudieren in das Moldanubikum und bilden das Süd-Böhmische Granitmassiv zu dem auch der Rastenberger Granodiorit gezählt wird Abb. 4-2.

Nach der variszischen Orogenese wurde das Gebirge der Böhmisches Masse erodiert und von terrigenen sowie marinen Abfolgen überlagert. Im Laufe der alpidischen Orogenese kam es zu einer erneuten Hebung, und dadurch zur Bildung der heute auftretenden Mittelgebirgslandschaft.

Das Störungssystem der Böhmisches Masse wird nach (Schnabel, Krenmayr, Mandl, & Nowotny, 2002) von zwei Richtungen dominiert, einer NW-SE sowie NE-SW Richtung. Diese Störungssysteme entstanden post-variszisch, durch einen sich in nördliche Richtung bewegendem Krustenblock. An dem NW-SE steil gerichtetem Störungssystem kam es dabei zu einem dextralen Bewegungssinn,

bei dem in NE-SW verlaufenden Störungssystem kam es zur Ausbildung eines sinistralen Bewegungsinns. Bei dem, dem Untersuchungsgebiet nächstgelegene Störungssystem (zirka 20km östlich von Ottenstein) handelt es sich um die sogenannte Vitis Störung die dem NE-SW verlaufenden Störungssystem zugehörig ist.

4.2 Lokale Geologie

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt erwähnt liegt das Kraftwerk Ottenstein im Südböhmischen Granitmassiv. Dieses bildete sich im Zuge der variszischen Orogenese durch die Intrusion mehrerer plutonischer Körper (Oberhauser, 1980). Ottenstein liegt im südlichen Bereich des Rastenberger Plutons (Intrusionsalter nach (Zak, Krystof, Finger, & Faryad, 2011) 338 ± 2 Ma), der eine linsenförmige Nord- Süd Erstreckung aufweist. Wie in der geologischen Karte Abb. 4-3 für den Bereich Ottenstein ersichtlich, wird der Rastenberger Pluton östlich vom Dobra-Gneis begrenzt, westlich hingegen von der Monotonen Serie.

Der Rastenberger Pluton wird durch den sogenannten Rastenberger Granodiorit aufgebaut.

4.2.1 Auftretende Lithologien im Sperrenumfeld

Neben dem Rastenberger Granodiorit, der im gesamten Sperrenbereich dominierend ist, sind vereinzelt Aplitgänge anzutreffen, die zum Teil eine Mächtigkeit von einigen Metern erreichen.

Der Rastenberger Granodiorit Abb. 4-4 :Bild A-C weist eine mittel- bis grobkörnige Matrix auf, in der sich bis zu 20 cm große idiomorphe Kalialronfeldspäte befinden, die ihm eine porphyrische Textur verleihen (Fuchs & Matura, 1976). Nach Oberhauser (1980) besteht die Grundmasse des Granodiorits aus Oligoklas-Andesin, Quarz, Biotit sowie untergeordnet auch Pyroxenen. Häufig treten auch cm-lange Hornblenden auf.

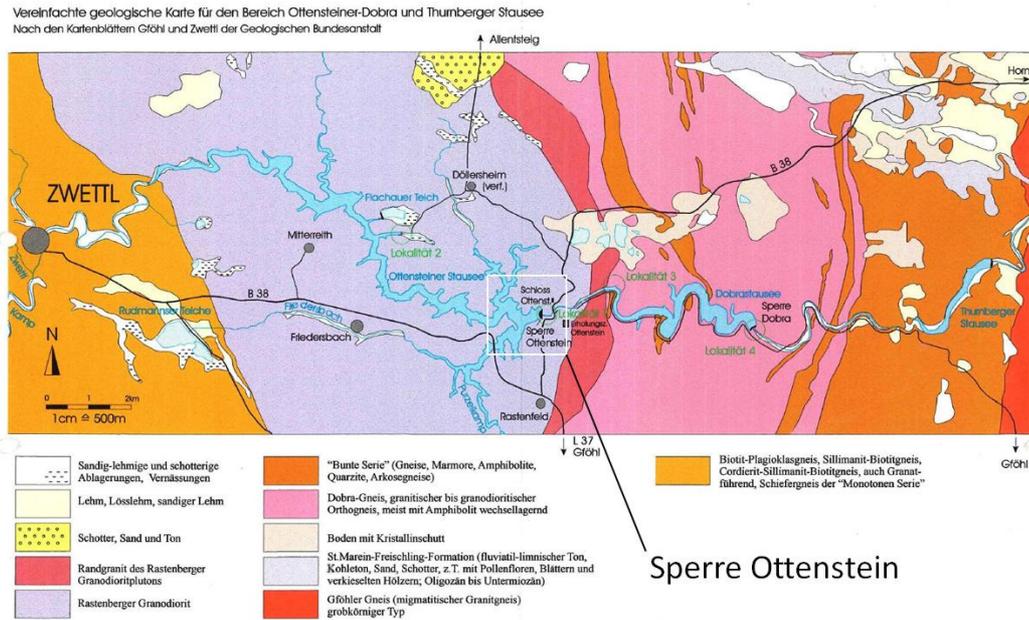


Abb. 4-3 Geologische Übersichtskarte; Das Kraftwerk Ottenstein befindet sich im Bereich des Rastenberger Plutons (weißer Rahmen): Quelle: EVN

Typisch für den Rastenberger Granodiorit sind Dioritschollen im Bereich von einigen Zentimetern bis Dezimetergröße Abb. 4-4 :Bild B. Vereinzelt können sie auch Größen von mehreren Metern erreichen (Oberhauser, 1980). Nach Exner (1968) weisen die auftretenden Dioritschollen ein geregeltes Gefüge in Form einer Nord- Süd streichenden Synklinale auf. Im Bereich des Kraftwerks Ottenstein fallen sie steil (ca. 75°) nach Westen ein.

Gelegentlich treten auch mehrere Meter mächtige Aplitgänge auf, die in den Rastenberger Pluton intrudierten Abb. 4-4 :Bild D. Im Bereich des linken Ufers quert ein bis zu 15 m mächtiger Aplitgang die Staumauer. Dieser Gang verläuft quer entlang des linken Hanges, quert den Fluß und kann am rechten Ufer weiter verfolgt werden. Während der Bauarbeiten zur Sperre Ottenstein wurden weitere, kleinere Gänge entdeckt, die wahrscheinlich Verzweigungen dieses Ganges sind.

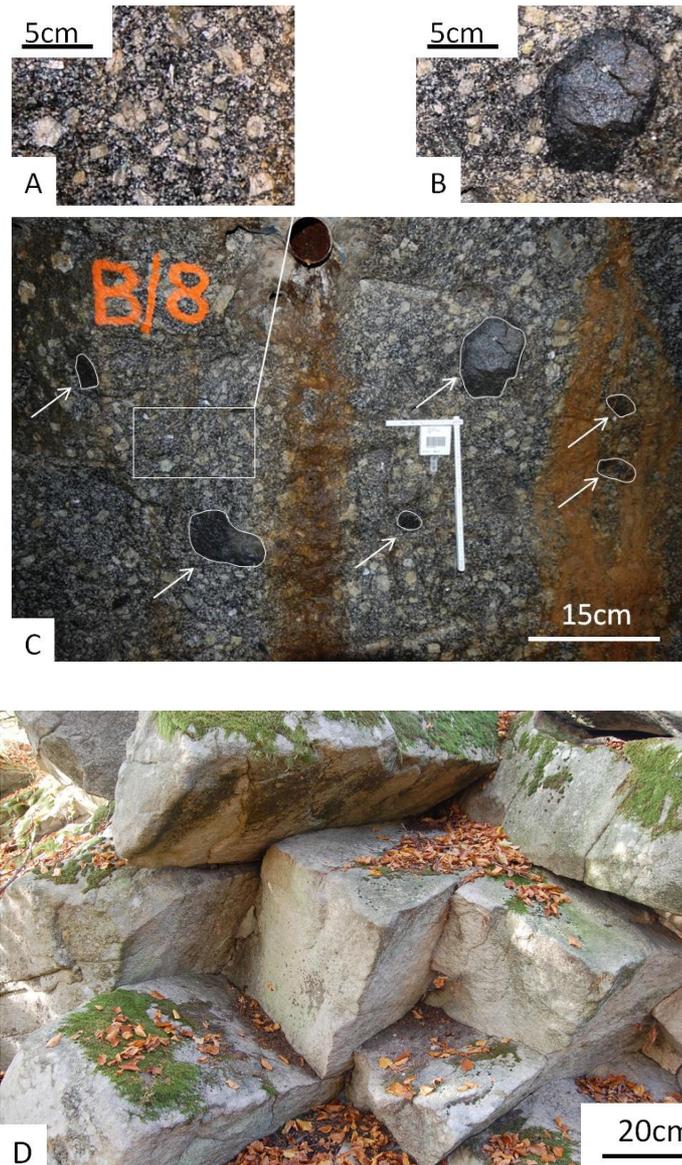


Abb. 4-4 Bild A: Rastenberger Granodiorit; weiß umrahmt und mit Pfeilen markiert erkennt man Dioritschollen, die von einer mittel- bis grobkörnigen Matrix umgeben sind. **Bild B:** Detail aus Bild A, weißer Rahmen; mittel bis grobkörnige Matrix, in der sich bis zu 20cm lange Kalinatronfeldspäte befinden; **Bild C:** Detail aus Bild A; Dioritscholle; Quelle: Steinbauer.C; **Bild D:** Aplitgang am nördlichen Sperrenufer; Quelle: Steinbauer.C;

Ein weiterer Aplitgang mit mehreren Meter Mächtigkeit verläuft am linken Hang parallel zum Tal. Der Übergang zwischen dem Rastenberger Granodiorit und dem Aplitgang weist keinen scharfen Übergang auf.

Der Granit zeigt weder im Talboden noch in den Flanken eine nennenswerte chemische Verwitterung.

4.2.2 Bestehende Gebirgskennwerte

Folgende Gebirgskennwerte Tab. 4-1 wurden von Dr. Sven Jacobs im Rahmen der fünfjährigen Überprüfung der Sperre Ottenstein im Jahre 1997 aus der bestehenden Literatur zusammengefasst. Dabei handelt es sich jedoch nur um Annahmen, die von anderen Sperrenprojekten übernommen wurden.

Druckspannung	2,45	MPa	Zulässige Druckspannung des Rastenberger Granit
	4,9	MPa	Zulässige Druckspannung des auftretenden Aplitganges
Reibungsbeiwerte	33° - 38,6°	Grad	Angenommene Reibungsbeiwerte (min-max)

Tab. 4-1 Verwendete Gebirgskennwerte der Sperre Ottenstein

4.2.3 Geologie des Tosbeckens

Die Lithologie des Tosbeckens wird durch den Rastenberger Granodiorit bestimmt. Hinweise auf etwaige Aplitgänge im Bereich des Tosbeckens werden in der Literatur nicht erwähnt.

Nach Häusler (1961) weist der Rastenberger Granodiorit im Bereich des Tosbeckens überwiegend eine weitständige Klüftung auf. Unmittelbar vor der Staumauer weist er jedoch eine engständige Klüftung auf.

Im rechten Bereich des Tosbeckens streicht ein Zerrüttungsstreifen quer über die Tosbeckensohle bis in den Bereich der Tosbeckensschwelle (Häusler, 1961). Der Zerrüttungsstreifen weist im wasserseitigen Bereich der Staumauer eine Mächtigkeit von 60 cm auf, an der Luftseite der Staumauer vergrößert sich der Zerrüttungsstreifen auf eine Mächtigkeit von 4 m. Die Orientierung des Zerrüttungsstreifen wurde mit (332/68; 333/64; 336/64; 334/71; 336/81) bestimmt. Nach Häusler (1961) besteht der Zerrüttungsstreifen aus lehmigem, sandigem Material sowie Gesteinsbruchstücken.

4.3 Gebirgscharakterisierung

4.3.1 Vorwort

Die in diesem Kapitel angeführten geologischen Daten wurden anhand von fünf Scanline-Aufnahmen sowie durch eine geologische Kartierung in einem 1km fassenden Radius um das Tosbecken Ottenstein ermittelt. Drei der fünf Scanline-Aufnahmen wurden in zwei Stollen an der rechten (südlichen) Talseite, die anderen zwei im Bereich des Tosbeckens. In Abb. 4-5 ist die Position der Scanline- Aufnahmen sowie deren Orientierung als auch deren Länge angeführt.

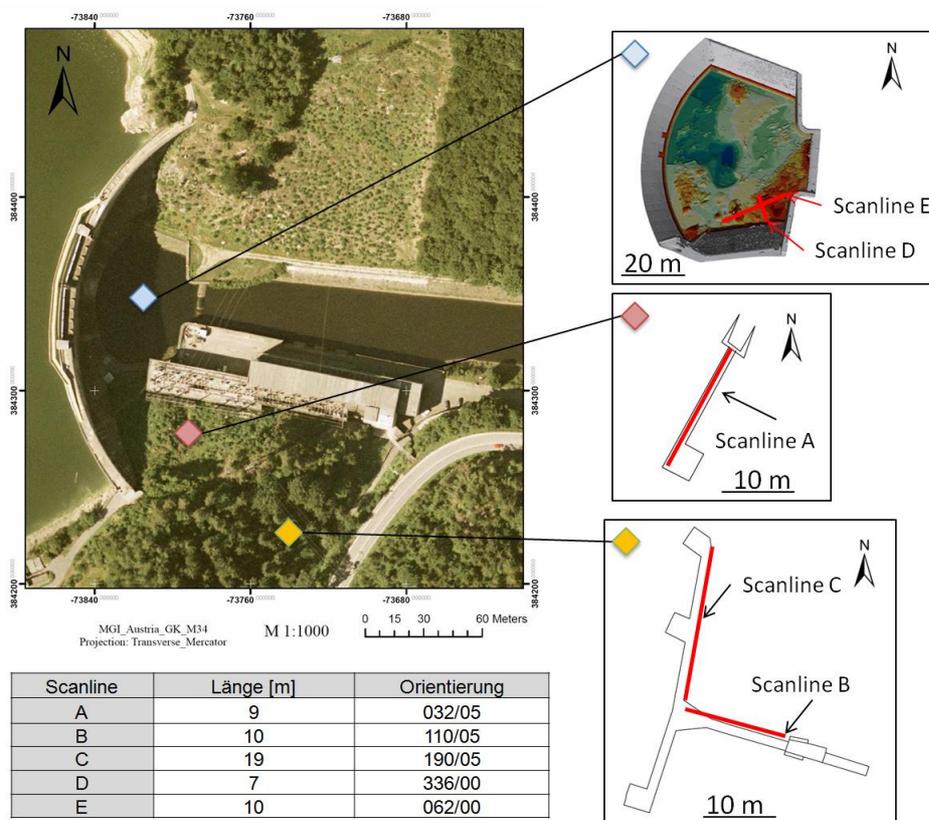


Abb. 4-5 Übersichtskarte des untersuchten Gebietes sowie die Lage der Scanline- Aufnahmen, deren Länge und Orientierung.

4.3.2 Verwitterung

Der Verwitterungszustand des Rastenberger Granodiorit kann generell im Sperrenbereich, nach ISRM- Norm (Brown, 1981), als frisch und unverwittert (Klasse 1) Abb. 4-6: Bild A bis leicht verwittert (Klasse 3) Abb. 4-6 : Bild B beschrieben werden. Stellenweise treten Trennflächen auf, welche eine deutlich rotbraune Färbung aufweisen.

Der Verwitterungszustand des am nördlichen Sperrenufer anstehenden Aplitganges kann nach ISRM- Norm als angewittert (Klasse 2) beschrieben werden Abb. 4-6 :Bild C.

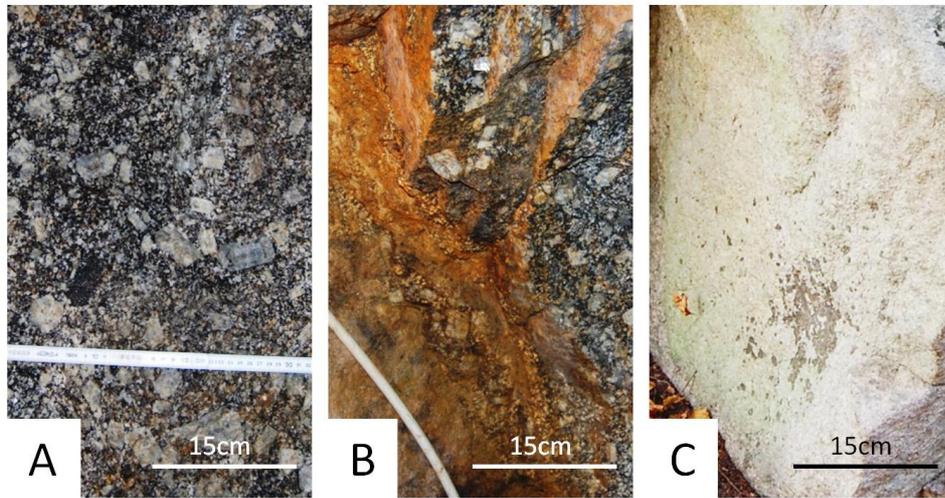


Abb. 4-6 Bild A: Rastenberg Granodiorit, Verwitterungszustand: frisch und unverwittert; **Bild B:** Rastenberg Granodiorit, Verwitterungszustand: leicht verwittert; **Bild C:** Aplitgang, Verwitterungszustand: angewittert; Quelle: Steinbauer, C.;

Die Auswertung der fünf Scanline-Aufnahmen Abb. 4-7 zeigte, dass die überwiegende Anzahl der Trennflächen als frisch und unverwittert (Klasse 1) beschrieben werden kann. Scanline B weist den höchsten Anteil an angewitterten (Klasse 2) bis leicht verwitterten (Klasse 3) Trennflächen auf.

Verwitterungszustand der erfassten Trennflächen, Scanline- Aufnahme A bis E

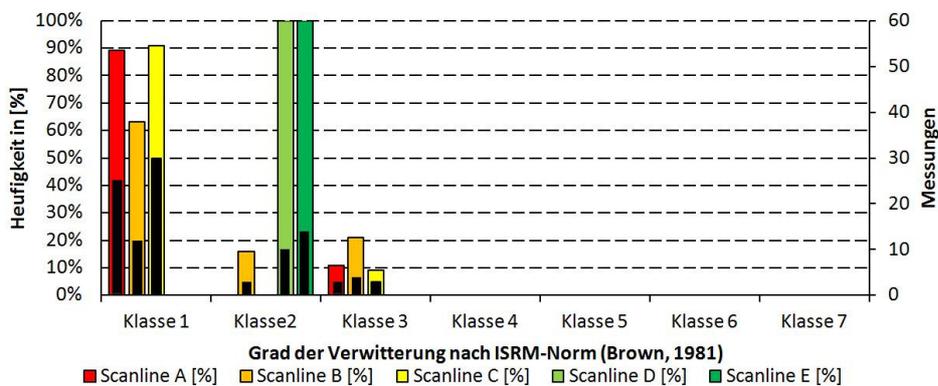


Abb. 4-7 Verwitterungszustand (Klasse 1 bis 7) der mittels Scanline (A-E) erfassten Trennflächen. Die Anzahl der erfassten Trennflächen ist als schwarzer Balken angegeben;

4.3.3 Gesteinsfestigkeit

Die Gesteinsfestigkeit wurde nach ISRM- Norm (Brown, 1981) durch Schläge mit einem Geologenhammer geschätzt Abb. 4-8.

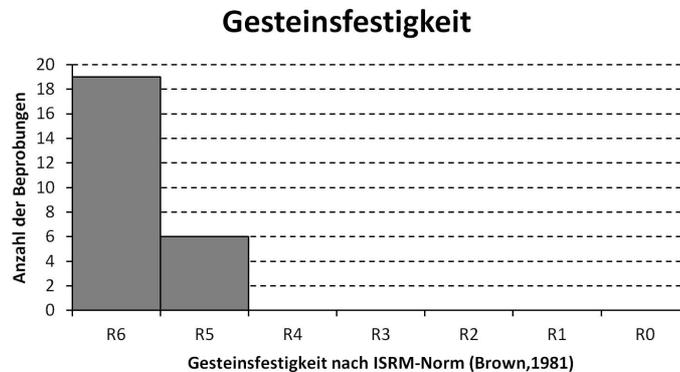


Abb. 4-8 Darstellung des Gesteinsfestigkeitsindex R6 bis R0 sowie die Anzahl der Beprobungen

Die Beprobung fand hierbei im Bereich der Scanline-Aufnahmen A bis E statt. In Summe wurden 24 Beprobungen durchgeführt, 19 dieser Beprobungen (79%) wurde eine Gesteinsfestigkeitsindex von R6 zugeordnet (entspricht einer einaxialen Druckfestigkeit von >250 Mpa), sowie 6 Beprobungen (21%) einem Index von R5 (entspricht einer einaxialen Druckfestigkeit von 100 Mpa bis 250 Mpa).

4.3.4 Orientierungsdaten

Im Rahmen der geologischen Kartierung des Sperrenumfeldes (Radius: ein Kilometer) sowie der Aufnahme des Tosbeckens wurden 682 Orientierungs-Messungen durchgeführt Abb. 4-9.

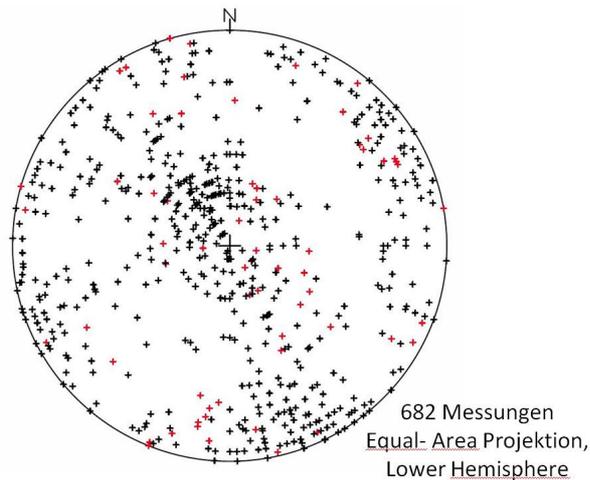
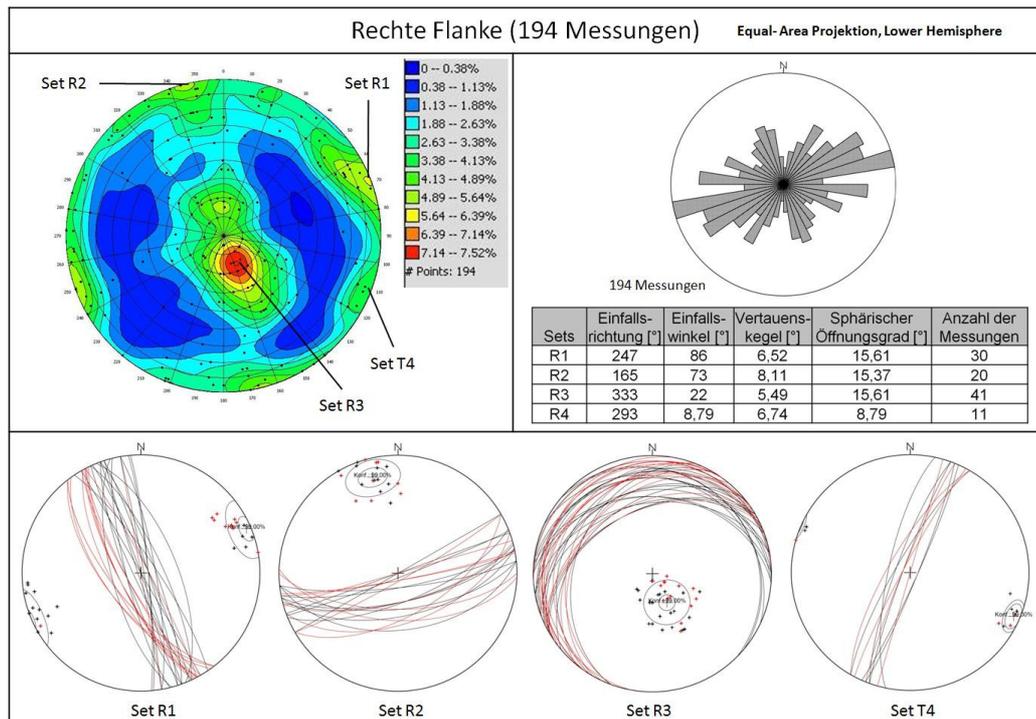
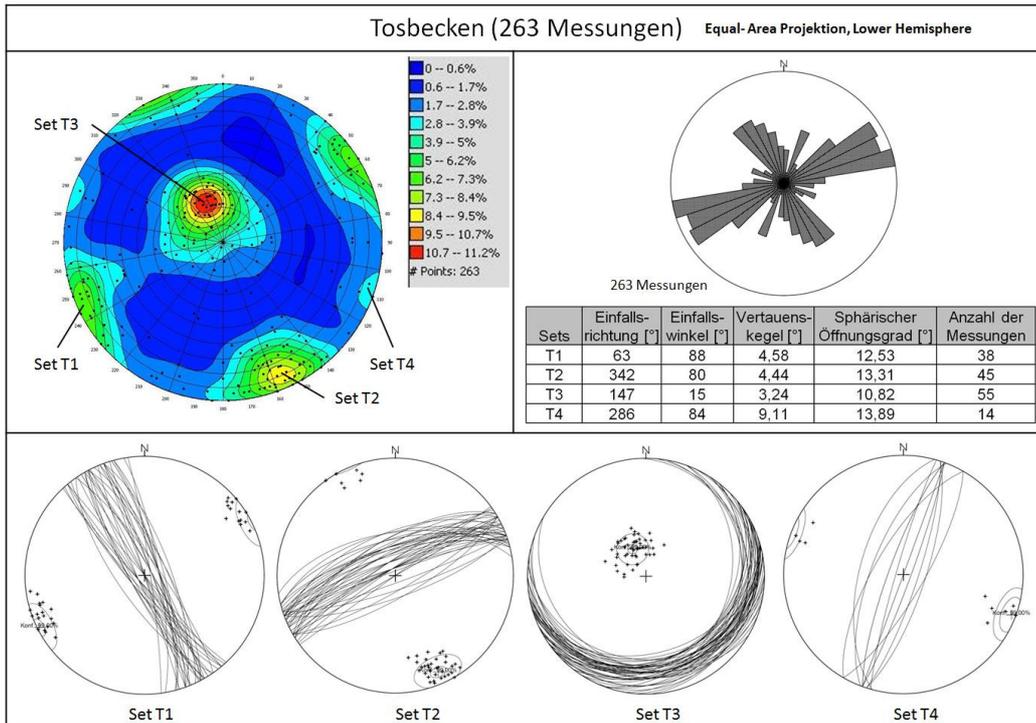


Abb. 4-9 Darstellung aller Trennflächenmessungen

In Abb. 4-10 sind die Messergebnisse für die erfassten Bereiche (Tosbecken- Rechte Flanke- Linke Flanke) zusammengefasst dargestellt. Neben einem Konturplot (die Farben rot bis blau stellen die Dichte der Trennflächenmessungen dar) ist für jeden Bereich eine Richtungsrose (Darstellung der auftretenden Streichrichtungen) dargestellt. Die Orientierung der ermittelten Sets pro Bereich (Tosbecken:T1 bis T4; Rechte Flanke:R1 bis R4; Linke Flanke:L1 bis L5) sind als Tabelle, und als Großkreise mit den dazugehörigen Polpunkte in einer Lambertschen Projektion (untere Halbkugel) dargestellt.

Aus Abb. 4-10 ist ersichtlich, dass sich rechte Flanke (südlicher Bereich des Sperrenufers) sowie das Tosbecken sich von der linken Flanke (nördliches Sperrenufer) unterscheiden. Im Bereich der linken Flanke tritt ein zusätzliches Set (L5: 358/70) auf. Weiters unterscheidet sich die Position der auftretenden Sets L1-L4 der linken Flanke von der Sets R1-R4 der rechten Flanke. Die Sets T1-T4 des Tosbeckens weichen ebenfalls von den Sets der linken Flanke ab. Die rechte Flanke R1-R4 sowie die Sets des Tosbeckens T1-T4 weichen nur geringfügig voneinander ab.



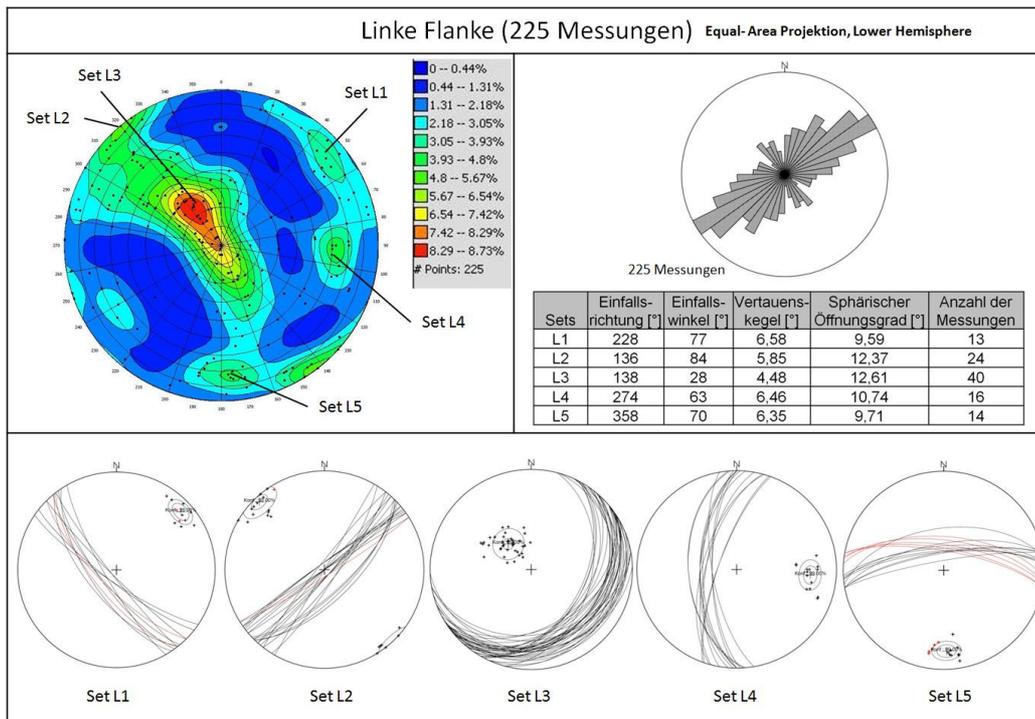


Abb. 4-10 (Sowie vorhergehende Seite): Unterteilung der 682 Trennflächenmessungen in drei Bereiche: Tosbecken (263 Messungen)- Rechte Flanke (194 Messungen)- Linke Flanke (225 Messungen); Darstellung der Messwerte mittels Konturplot (blau-rot) sowie mittels Richtungsrose. Ermittelte Sets werden als Tabelle und als Lambertscher Projektion (Großkreise und Polpunkte) dargestellt.

Da sich die Sets der rechten Flanke (Set R1 bis R4; Scanline- Aufnahme A-B-C) sich von den Sets des Tosbeckens (Set T1 bis T4; Scanline- Aufnahme D-E) nur geringfügig in ihrer Orientierung unterscheiden, wurden sie zusammengefaßt, um eine statistische Auswertung der Scanline-Aufnahme (A bis E) zu ermöglichen. Folgende Sets wurden für die weitere Datenauswertung verwendet:

Set 1	063/88
Set 2	342/80
Set 3	147/15
Set 4	286/84

4.3.5 Rauhigkeit und Welligkeit

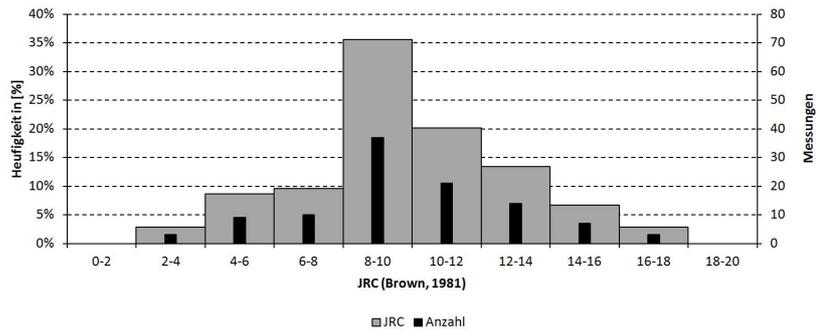
Die Rauhigkeit der erfassten Trennflächen in Scanline- Aufnahme A bis E, wurde mit Hilfe eines „Barton Kamm“ gemessen und anhand eines Vergleichsschaubildes einem JRC (*Joint Roughness Coefficient*) zugeordnet (Brown, 1981).

Global tritt ein JRC im Bereich von JRC 2-4 bis JRC 16-18 auf, am häufigsten wurden Rauigkeiten im Bereich von JRC 8-10 beobachtet (Anteil von 37%). Betrachtet man die Rauigkeit per Set, so zeigt das Set 2 die größte Variation mit einem JRC von 2-4 bis JRC 16-18. Die geringste Variation zeigt das Set 3 mit einem JRC von 8-10 bis JRC 12-14. Harnischflächen konnten vereinzelt in Set 2 (342/80) beobachtet werden.

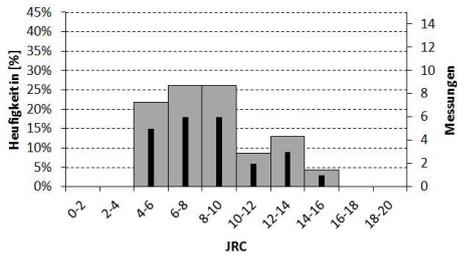
Die Welligkeit der erfassten Trennflächen in Scanline- Aufnahme A bis E wurde durch die Messung des Winkels „i“ (siehe Kapitel: Methodik) durch einen Geologenkompass nach CLAR ermittelt. In Abb. 4-12 sind die Messungen global als auch per Set dargestellt.

Wie in Abb. 4-12 dargestellt treten Welligkeiten in einem Bereich von $<2^\circ$ bis maximal $4-8^\circ$ auf. Global als auch per Set zeigte sich ein einheitliches Bild, die Welligkeit im Bereich von $2-4^\circ$ konnte am häufigsten beobachtet werden.

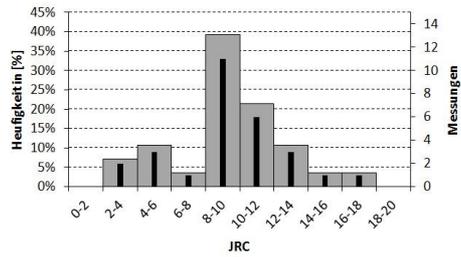
**JRC (Joint Roughness Coefficient) der erfassten Trennflächen,
Scanline- Aufnahme A bis E (Global)**



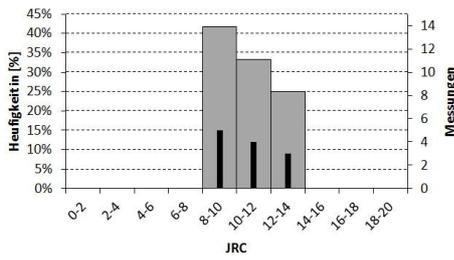
Set 1



Set 2



Set 3



Set 4

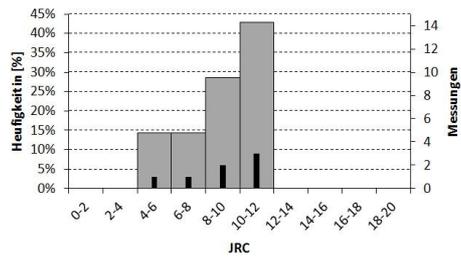


Abb. 4-11 JRC global und per Set (Set 1 bis Set 4) der erfassten Trennflächen in Scanline- Aufnahme A bis E. Die Anzahl der jeweiligen Messungen wird als schwarzer Balken dargestellt.

Welligkeit der erfassten Trennflächen, Scanline- Aufnahme A bis E (Global)

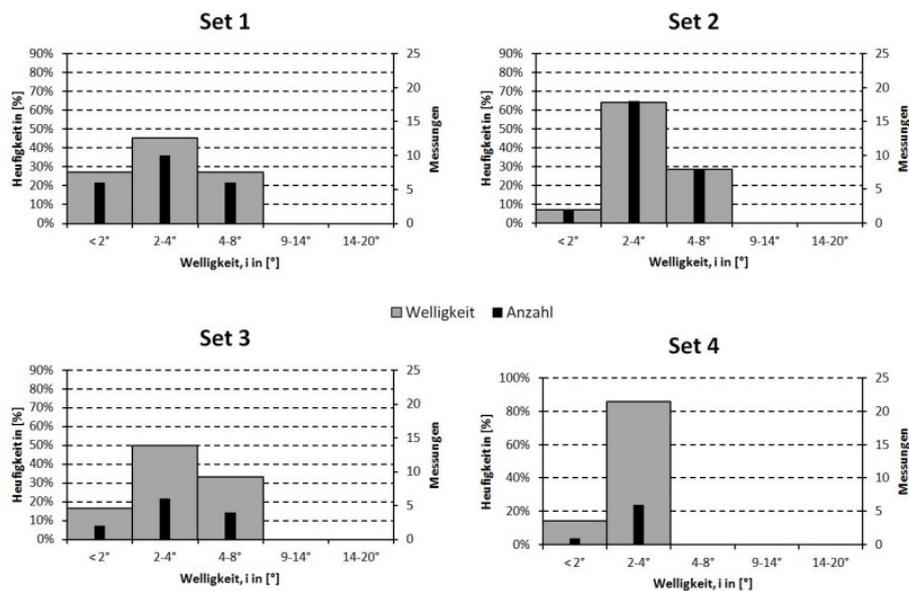
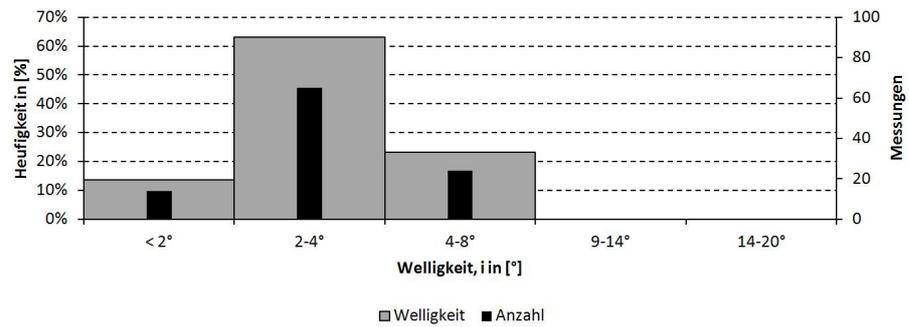
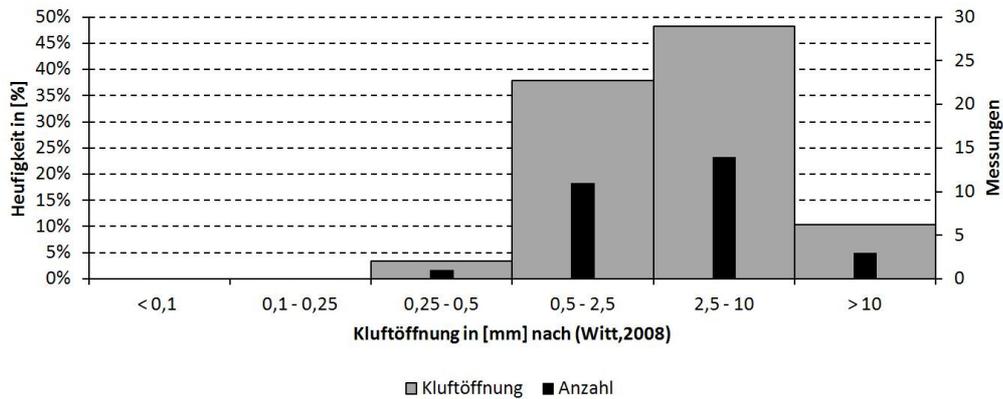


Abb. 4-12 Welligkeit, beschrieben durch den Winkel „i“ [°], global und per Set (Set 1 bis Set 4) der erfassten Trennflächen in Scanline- Aufnahme A bis E. Die Anzahl der jeweiligen Messungen wird als schwarzer Balken dargestellt.

4.3.6 Öffnungsweite

Im Zuge der Scanline- Aufnahme A bis E wurden 91 Trennflächen aufgenommen, 29 (oder 32 %) wiesen eine Öffnung auf. Die Öffnungsweite variierte in einem Bereich zwischen 0,5mm bis 50mm. Nach (Witt, 2008) handelt es sich um teilweise offene Klüfte bis weit offene Klüfte. Am häufigsten (48%) treten mittelweit offene Klüfte (2,5mm bis 10mm) sowie offene Klüfte (39%) (0,5mm bis 2,5mm) auf Tab. 4-2.

Öffnungsweite der erfassten Trennflächen, Scanline- Aufnahme A bis E



Tab. 4-2 Ermittelte Öffnungsweite nach (Witt, 2008)

4.3.7 Füllung

Füllungen treten in den Bereichen der Scanline-Aufnahme A, B sowie C auf. Bei Scanline A konnte bei 3 von insgesamt 28 aufgenommenen Trennflächen (entspricht 11%) eine Kakirit-Füllung festgestellt werden. Bei Kakirit handelt es sich um tektonisch beanspruchte Gesteinsbruchstücke.

In Scanline B wiesen 6 von insgesamt 19 aufgenommenen Trennflächen (entspricht 31%) einen tonigen Belag auf. In Scanline C konnte bei 3 von 33 aufgenommenen Trennflächen (entspricht 9%) ein toniger Belag festgestellt werden.

An der Geländeoberfläche konnten keine Füllungen direkt beobachtet werden, aus Unterlagen geht jedoch hervor, dass im Bereich des Tosbeckens nach (Häusler, 1961) ein 60 cm breiter Zerrüttungsstreifen aus lehmigem, sandigem Material sowie Gesteinsbruchstücken auftritt.

4.3.8 Durchtrennungsgrad

Um den vorherrschenden Durchtrennungsgrad zu beschreiben, wurde die Länge jeder aufgenommenen Trennfläche entlang der Scanline-Aufnahme Abb. 4-14 sowie deren Termination Abb. 4-13 erfasst. Die Termination (siehe Kapitel: Methodik) beschreibt das Ende einer Trennflächenspur, man unterscheidet hierbei

zwischen einer Endung im Gestein (R), in einer Trennfläche (D) sowie außerhalb des Aufschussbereiches (X).

Termination der erfassten Trennflächen, Scanline- Aufnahme A bis E (Global)

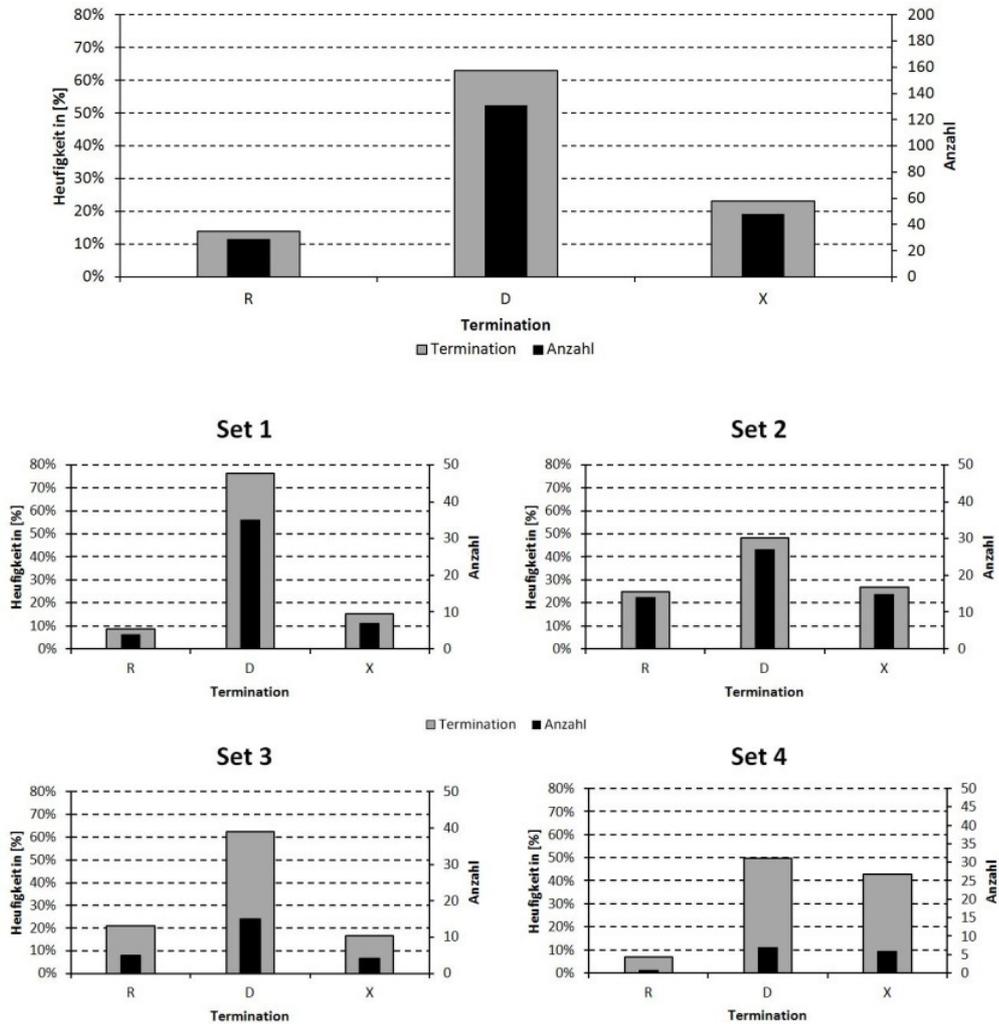


Abb. 4-13 Termination, Global und per Set (Set 1 bis Set 4) der erfassten Trennflächenspuren in Scanline- Aufnahme A bis E. Die Anzahl der jeweiligen Messungen wird als schwarzer Balken dargestellt; R= Trennflächenspur endet im Gestein; D= Trennflächenspur wird durch eine Trennfläche begrenzt; X= Trennflächenspur endet außerhalb des Aufschlusses;

Die statistische Auswertung der Termination, global als auch per Set Abb. 4-13, zeigt, dass der überwiegende Teil (63%) der erfassten Trennflächen durch Trennflächen (D) begrenzt wird.

Die Länge der erfassten Trennflächenspuren wird in Abb. 4-14 global als auch per Set dargestellt. Global weisen 32% der erfassten Trennflächenspuren eine Länge von über 3m auf, 27% der erfassten Trennflächenspuren befinden sich in einem

Bereich von 0,5 bis 1m Länge. Die Länge von Set 1 liegt zu 43% in einem Bereich von 0,5 bis 1m Länge, Set 2 weist hingegen zu 43% Längen größer als 3m auf. Die Spurlängen von Set 3 bzw. Set 4 variieren von 0,5 bis >3m.

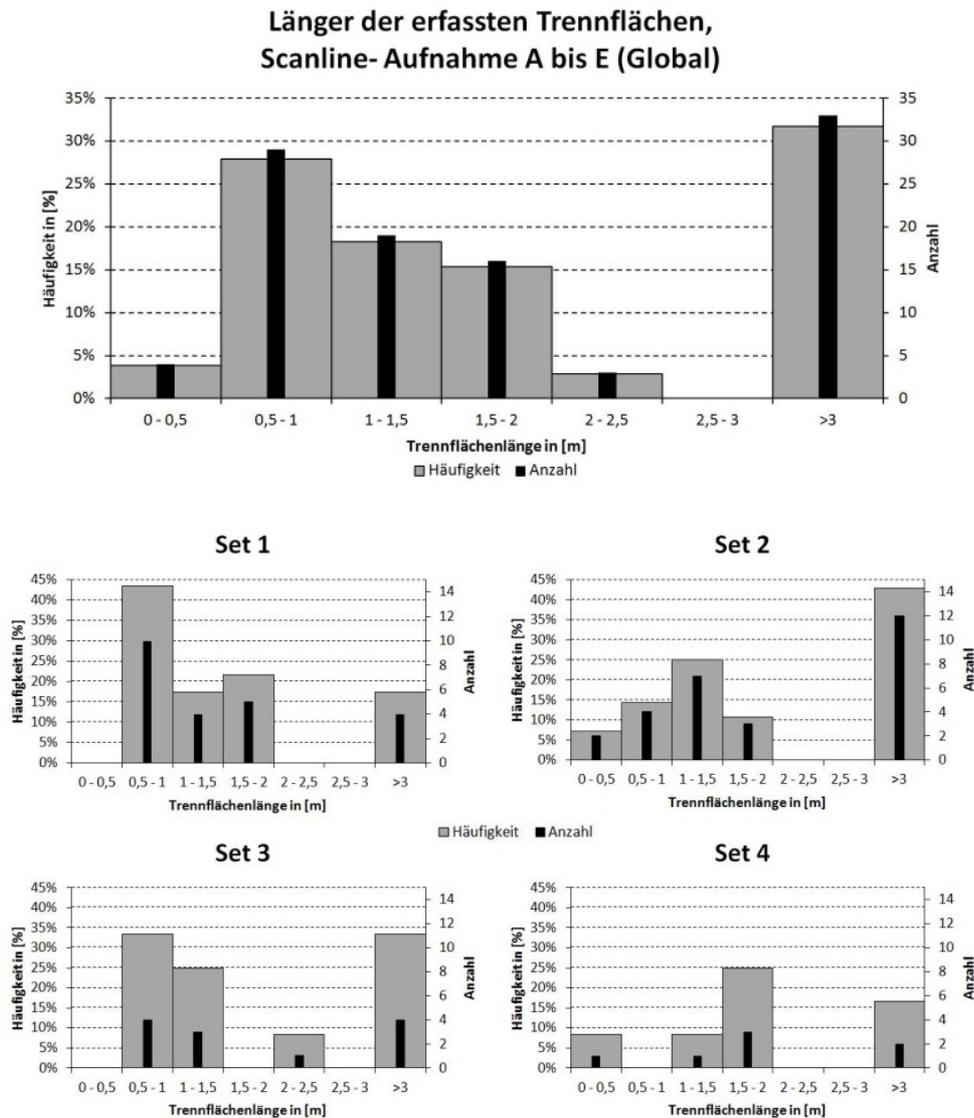


Abb. 4-14 Länge der erfassten Trennflächenspuren, global und per Set (Set 1 bis Set 4) in Scanline- Aufnahme A bis E. Die Anzahl der jeweiligen Messungen wird als schwarzer Balken dargestellt;

In Tab. 4-3 sind die Termination und die Spurlänge, global als auch per Set, zusammengefasst. Der Termination Index T_r ist dabei global 13,9 %.

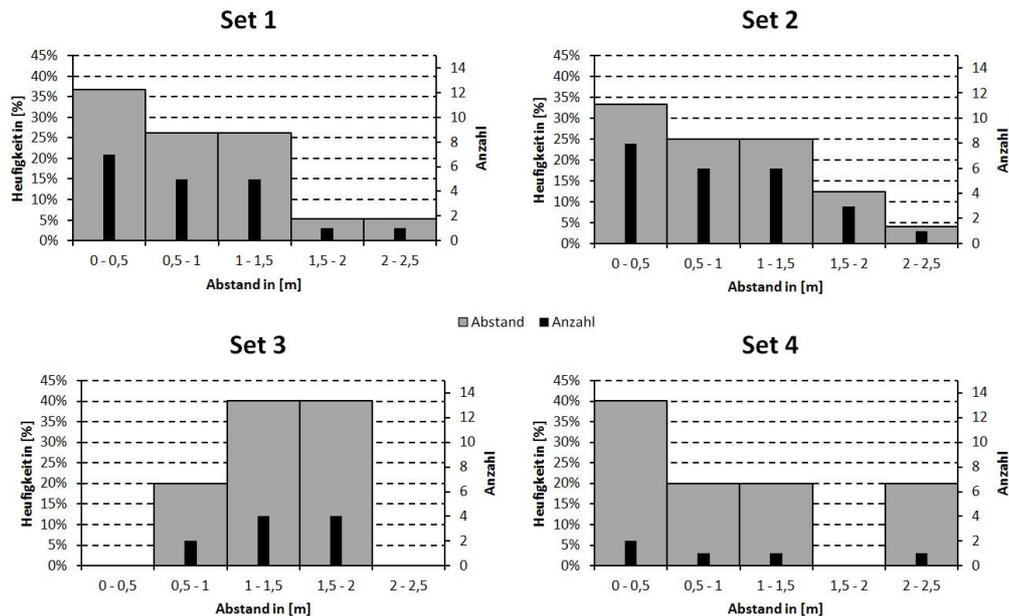
	Termination				Spurlänge			Messungen
	Tr [%]	R [%]	D [%]	X [%]	Mittelwert [m]	Varianz [m]	Standartabweichung [m]	
Global	13,9	13,9	63,0	23,1	1,7	0,9	0,94	104
Set 1	8,7	8,7	76,1	15,2	1,5	0,7	0,83	23
Set 2	25,0	25,0	48,2	26,8	1,9	1,0	1,0	28
Set 3	20,8	20,8	62,5	16,7	1,7	1,1	1,04	12
Set 4	7,1	7,1	50,0	42,9	1,8	0,8	0,89	7

Tab. 4-3 Termination sowie Spurlänge, global und per Set (Set 1 bis Set 4) in Scanline- Aufnahme A bis E; Tr= Termination Index; R= Trennflächenspur endet im Gestein; D= Trennflächenspur wird durch eine Trennfläche begrenzt; X= Trennflächenspur endet außerhalb des Aufschlusses;

4.3.9 Trennflächenabstand

Der Trennflächenabstand wurde per Set aus der scheinbaren Länge (Abstand zwischen zwei auftretenden Trennflächen desselben Sets, entlang einer Scanline) und dem Winkel, den diese Flächen mit der Scanline einschließen, berechnet. In Abb. 4-15 sind die berechneten Werte als Histogramm und tabellarisch zusammengefasst.

Trennflächenabstand per Set



	Min [m]	Max [m]	Mittelwert [m]	Standartabweichung [m]	Varianz [m]	Messungen
Set 1	0,20	2,07	0,83	0,53	0,28	19
Set 2	0,10	2,06	0,87	0,62	0,39	24
Set 3	0,57	1,85	1,33	0,39	0,15	10
Set 4	0,35	2,21	0,94	0,76	0,58	5

Abb. 4-15 Trennflächenabstand per Set

Der Trennflächenabstand befindet sich in einem Bereich von 0,1m (Set 2) bis maximal 2,21m (Set 4). Die Mittelwerte reichen von 0,83m (Set 1) bis maximal 1,33m (Set 3).

4.3.10 Volumetric joint count

Die auftretende Blockgröße wurde mit dem sogenannten „*volumetric joint count*“ J_v berechnet (Brown, 1981) (siehe Kapitel: Methodik). Set 1 bis Set 3 repräsentieren den normalen Trennflächenabstand Tab. 4-4. Wenn der „*volumetric joint count*“ 4.17 joints/m³ beträgt, handelt es sich nach (Brown, 1981), um sogenannte „medium sized blocks“ mit einem Volumen von 0,2 – 8m².

	Trennflächenabstand -Mittelwert [m]	J_v (joints/m ³)
Set 1	0,83	4,17
Set 2	0,87	
Set 3	1,33	
Set 4	0,94	

Tab. 4-4 Volumetric joint count J_v

4.3.11 Wasserführung

Wasserführung entlang von Trennflächen konnte im Bereich der Scanline B sowie C festgestellt werden.

Bei Scanline B zeigten 4 von den insgesamt 19 aufgenommenen Trennflächen an der Trennflächenoberfläche Feuchtigkeit. Nach ISRM- Norm (Brown, 1981) handelt es sich um den Typ 2.

Bei Scanline C konnten auf der Oberfläche von 3 von der insgesamt 33 aufgenommenen Trennflächen Feuchtigkeit und vereinzelt Oxidationsspuren in Form von bräunlichen Belegen festgestellt werden. Folglich handelt es sich nach ISRM-Norm ebenfalls um den Typ 2.

An der Geländeoberfläche konnte keine Wasserführung entlang von Trennflächen beobachtet werden.

4.4 Geologische Kartierung

Die geologische Kartierung des Sperrenumfeldes fand im Zeitraum vom 06.09.2010 bis 16.09.2010 statt. Die Tosbeckenstudie mit der geologischen Aufnahme des Tosbeckens wurde im Zeitraum vom 04.10.2010 bis 08.10.2010 durchgeführt.

4.4.1 Kartierung des Sperrenumfeldes

Das Sperrenumfeld wurde in einem Radius von zirka einem Kilometer kartiert. Die aufgenommenen Daten wurden mithilfe der bestehenden geologischen Karte von Dr. W. Demmer 1989 der Sperre Ottenstein ergänzt Abb. 4-16. Der nördliche Bereich der Sperre Ottenstein wurde zum größten Teil von Dr. Demmer übernommen, da zum Zeitpunkt der Kartierung dieser Bereich wegen starken Bewuchs unzugänglich war. Der südliche Bereich der Sperre Ottenstein war größtenteils zugänglich und konnte kartiert werden.

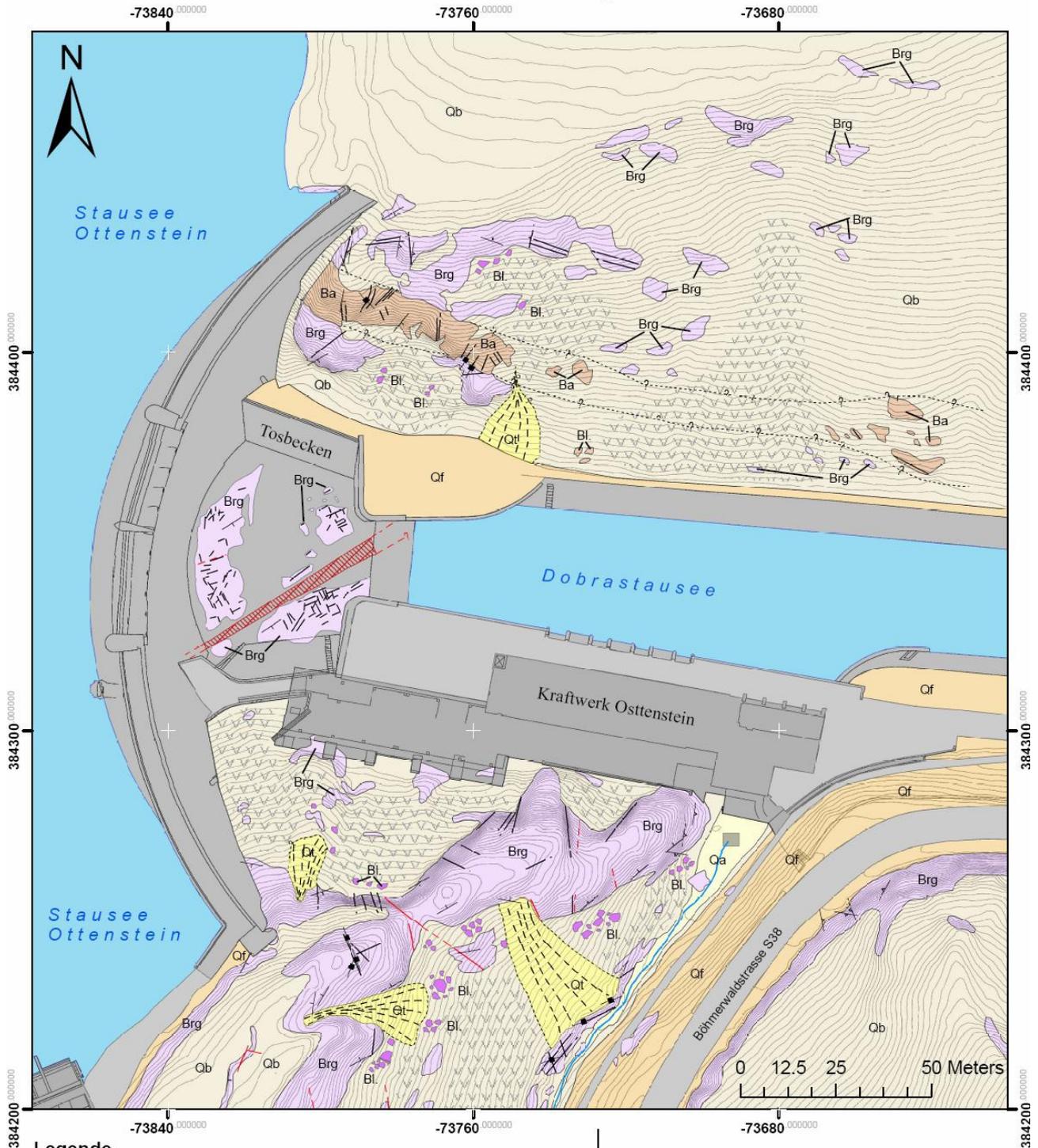
Die der Kartierung zugrunde liegenden topographischen Karte wurde mithilfe einer bestehenden 2.5 D Oberfläche generiert, die Gebäude als auch Infrastruktur wurden aus bestehenden AutoCad Zeichnungen hinzugefügt. Beides wurde mir von der EVN zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden mit GPS-Messungen georeferenziert und in ArcMap zusammengefügt Abb. 4-16.

Für die lokalen geologischen Verhältnisse Abb. 4-16, siehe Kapitel: 4.2

4.4.2 Kartierung des Tosbeckens

Die Kartierung des Tosbeckens wurde mithilfe einer triangulierten Lidar-Aufnahme durchgeführt Abb. 4-17. Im ersten Schritt wurde die Höhe durch eine Farbabstufung (blau: tiefster Punkt; rot höchster Punkt) gekennzeichnet. Der tiefste Punkt der Tosbeckensohle liegt auf 434,1m Meereshöhe, der höchste Punkt auf 436,7m. Die Höhendifferenz zwischen dem tiefsten und höchsten Punkt der Tosbeckensohle beträgt 2,6m. Die aus den Laserscandaten gemessene Gesamtfläche der Tosbeckensohle beträgt zirka 2000m², zirka 1000m² (50%) davon werden eine Betonplombe abgedeckt, 200m² (10%) durch Schutt (siehe Kapitel 3.4) 800m² (40%) werden durch anstehendes Gestein gebildet Abb. 4-17. Für die geologischen Verhältnisse des Tosbeckens Abb.4-18 siehe Kapitel: 4.3

Sperre Ottenstein



Legende

— Schieferrung 1-45°	Antropogen Qf	Rastenberger Granodiorit Brg
— Schieferrung 46-89°	Humoser Schutt	Strassen
— Schieferrung 90°	Blockschutt Bl	EVN- Gebäude
— Störung	Alluvial Qa	Staumauer u. Entlastungsanlage
▨ Zerrüttungsstreifen	Talus Qt	Gewässer
— Kluft	Boden Qb	Bach
----- Vermuteter Verlauf	Aplitgang Ba	

MGI_Austria_GK_M34
Projection: Transverse_Mercator

M 1:1000

Bemerkung: Geologische Übersichtskarte beruht auf der geologischen Aufnahme von Steinbauer, C. 2010 sowie von Dr. W. Demmer, 1989; Quelle: EVN

Abb. 4-16 Geologische Übersichtskarte der Sperre Ottenstein sowie des Tosbeckens; Die Daten beruhen auf der geologischen Kartierung von Steinbauer, C. 2010, sowie der geologischen Kartierung von Dr. W. Demmer 1989; Quelle: EVN

Tosbecken Ottenstein: Überblick

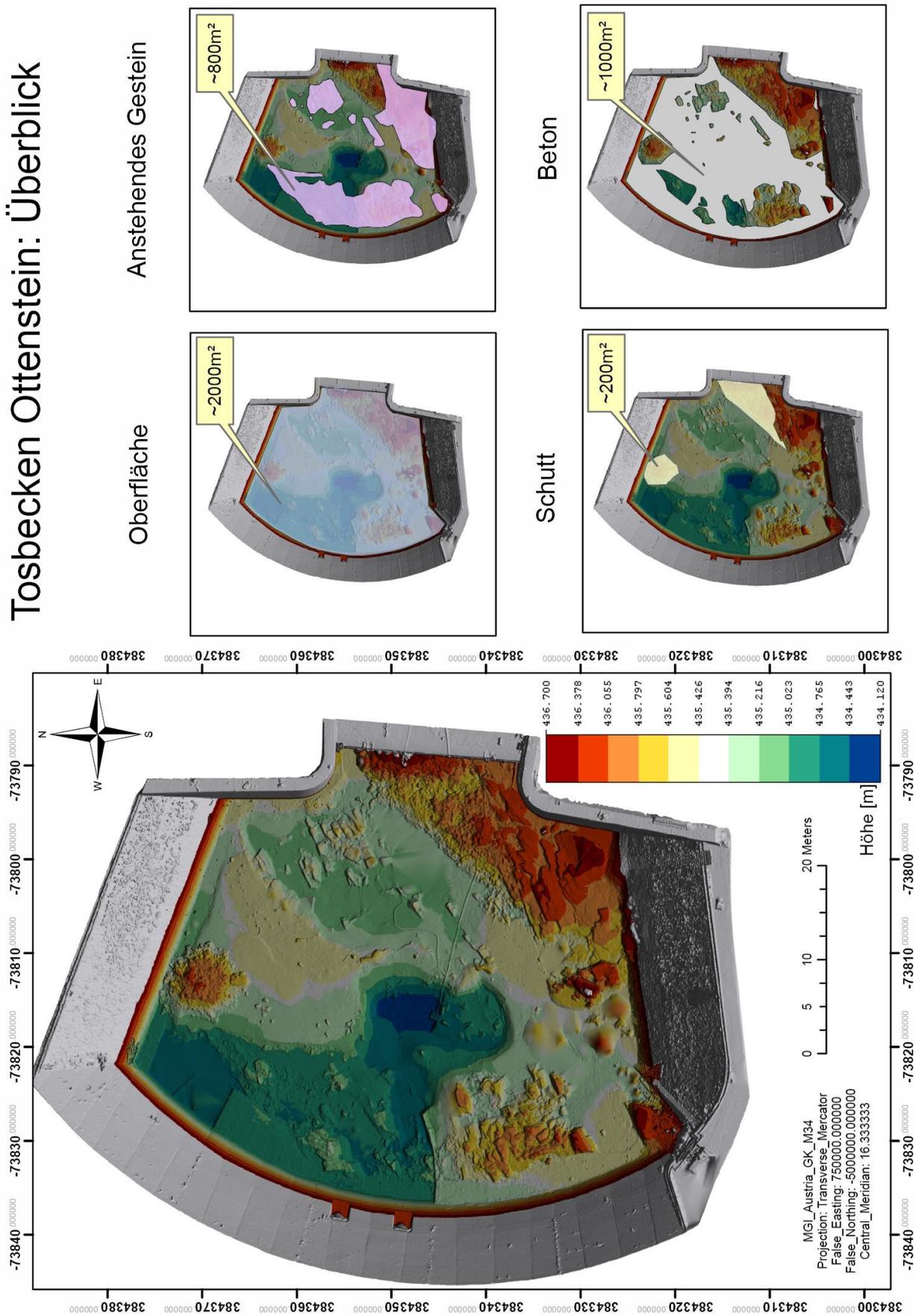


Abb. 4-17 Tosbecken Ottenstein; Höhendarstellung der Tosbeckensohle (blau-tiefster Punkt, bis rot, höchster Punkt); Die Oberfläche wurde in 3 Bereiche unterteilt; Anstehendes Gestein (~800m²), Schutt (~200m²), Beton (~1000m²); Details siehe Text;

Tosbecken Ottenstein: Sets

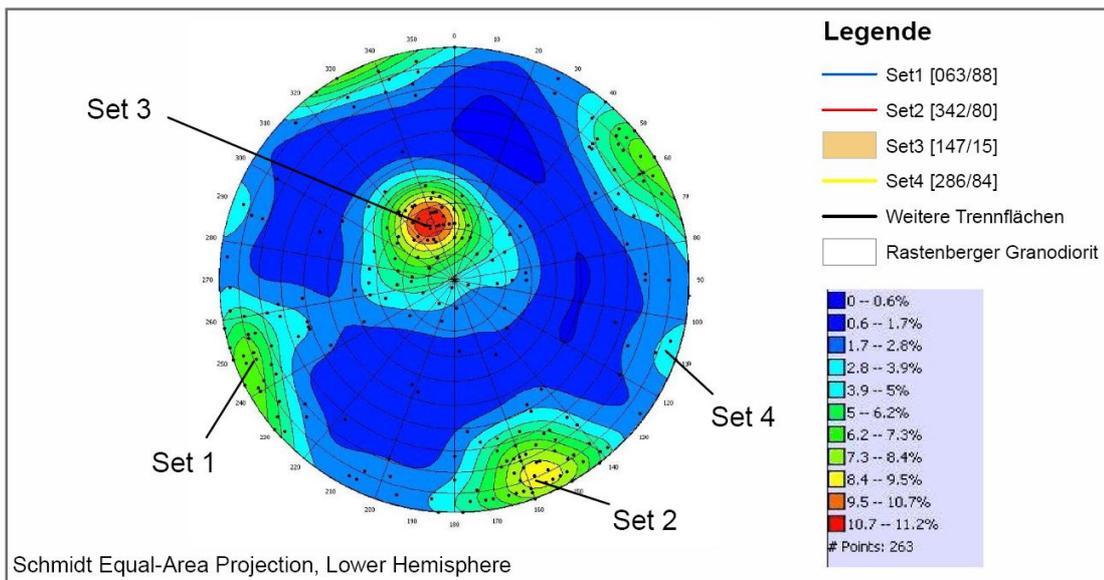
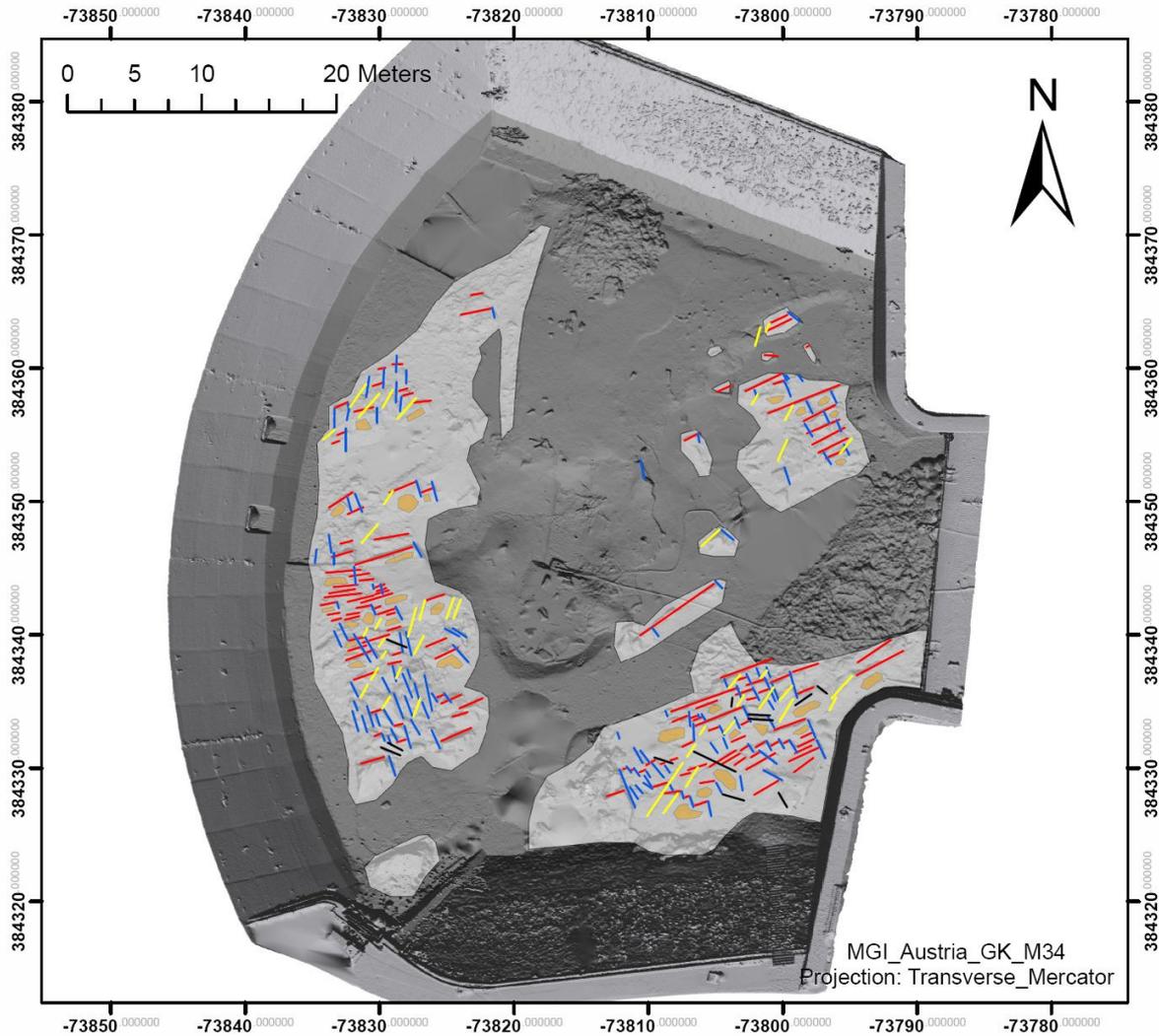


Abb.4-18 Tosbecken Ottenstein, Darstellung der auftretenden Sets (1 bis 4) sowie der Konturplot (Schmidt Equal-Area Projection, Lower Hemisphere) der 263 im Tosbecken gemessenen Trennflächen; siehe Kapitel 4.3

5 Blockhohlform-Katalog

5.1 Vorwort

Die Tosbeckenstudie hatte das Ziel, die geologischen Verhältnisse des Tosbeckens zu beschreiben sowie auftretende Blockhohlformen zu erfassen und zu charakterisieren. Folgende Daten wurden in jeder Blockhohlform erfasst:

- Lage der Blockhohlform
- Abmaße (Länge-Breite-Höhe) der Blockhohlform
- Anzahl und Orientierung der begrenzenden Trennflächen
- JRC jeder Trennfläche (Barton Kamm)
- Fotodokumentation
- Geschätzte Strömungsrichtung

Zur Dokumentation wurde jede Blockhohlform fotografiert. In Abb. 5-1 erkennt man neben der laufenden Nummer (Blockhohlform 1), einen Vergleichsmaßstab (0,75m), die Orientierung (E-W), die geschätzte Strömungsrichtung (blauer Pfeil), die Blockhohlform (gelb unterlegt) sowie die Trennflächenmessung (J1 bis J3). Die fotografische Dokumentation ist in Anhang 9.5 beigefügt.

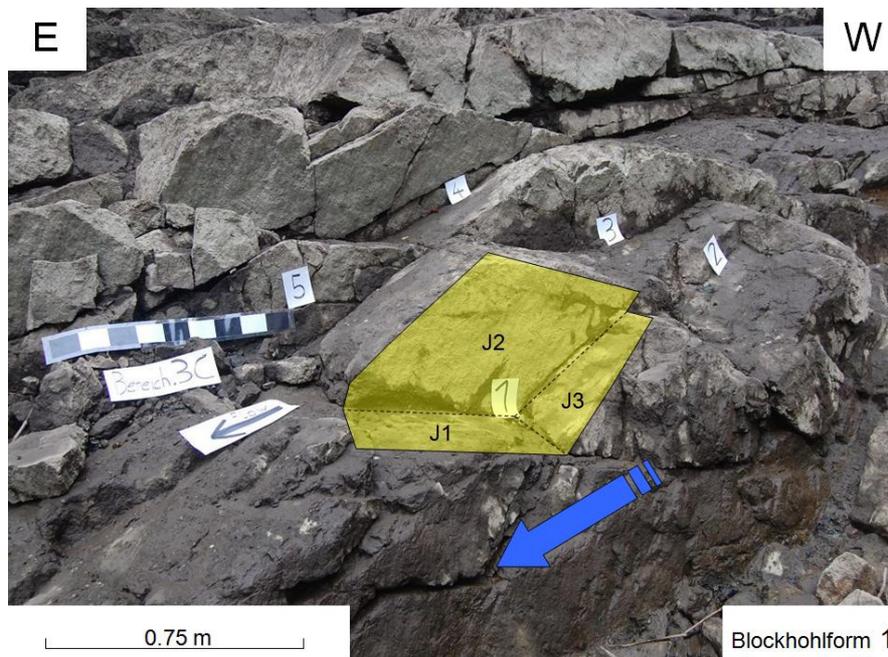


Abb. 5-1 Abbildung der Blockhohlform 1; Blauer Pfeil: Geschätzte Strömungsrichtung; Gelbes Feld: Blockhohlform mit Trennflächen J1 bis J3;

5.2 Position der Blockhohlformen

Die Position jeder Blockhohlform wurde im Feld aufgenommen und beschrieben. Mithilfe der Laserscan-Aufnahme war es möglich, die Position jeder Blockhohlform georeferenziert darzustellen. Dazu wurde eine 2.5D Oberfläche der Tosbeckensohle mit RiScan erstellt. Durch eine orthographische Ansicht der Tosbeckensohle konnten die erfassten Blockhohlformen in ArcMap eingezeichnet werden, siehe dazu Anhang 9.4.

5.3 Häufigkeit der auftretenden Set- Kombinationen

Jede der erfassten Blockhohlformen wird durch mindestens drei Trennflächen sowie der Tosbeckenoberfläche gebildet. Die Trennflächen der Blockhohlformen wurden den ermittelten Trennflächensets des Tosbeckens zugeordnet. Bei den auftretenden Sets des Tosbeckens handelt es sich dabei um:

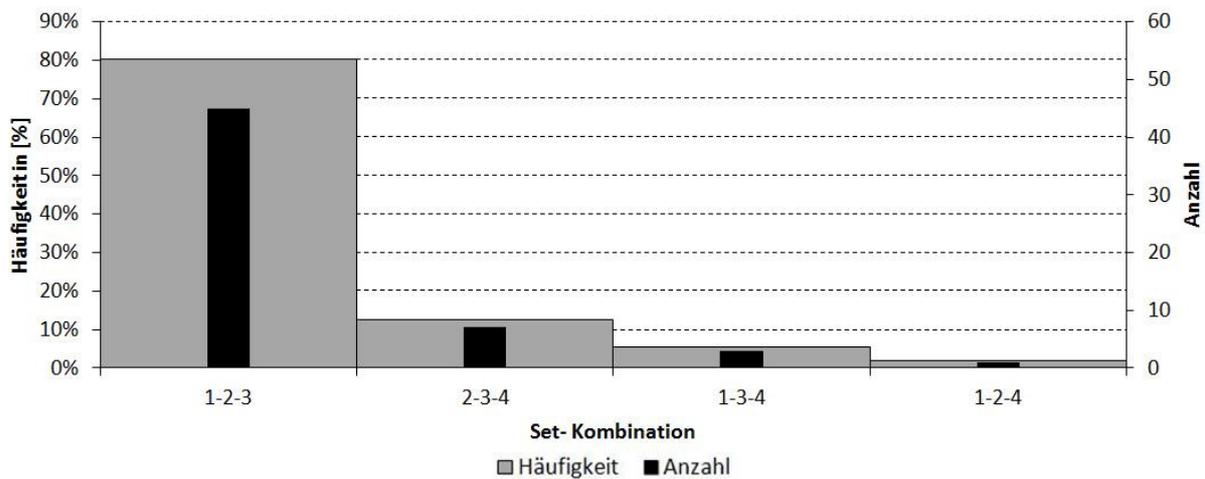
Set 1	063/88
Set 2	342/80
Set 3	147/15
Set 4	286/84

Folgende Trennflächenset-Kombinationen der Blockhohlformen treten im Tosbecken auf:

- Set 1, Set 2, Set 3 (1-2-3)
- Set 2, Set 3, Set 4 (2-3-4)
- Set 1, Set 3, Set 4 (1-3-4)
- Set 1, Set 2, Set 4 (1-2-4)

In Abb. 5-2 sind die auftretenden Kombinationen sowie deren Häufigkeit dargestellt. Mit einem Anteil von 80% dominiert die Set- Kombination 1-2-3 (45 Beobachtungen), Kombinationen, die das Set 4 (286/84) beinhalten, treten nur selten auf. Die Nummern der erfassten Blockhohlform, die jeweils einer Set Kombination zugeordnet werden, sind tabellarisch in Abb. 5-2 aufgelistet.

Heufigkeit der auftretenden Set- Kombinationen



Set- Kombination	Blockhohlform Nummer
1-2-3	1,2,3,4, 5,9, 10, 15, 16, 20, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 33, 37, 52, 53, 54, 57, 66, 68, 6, 7, 12, 13, 24, 31,35,34, 58, 59, 60, 61, 69, 74, 75, 81, 14, 47, 65, 71, 78, 11, 38, 76, 17
2-3-4	25, 43, 46, 55, 8, 44, 50
1-3-4	26, 48, 64
1-2-4	79

Abb. 5-2 Darstellung der Häufigkeit als auch Anzahl (schwarzer Balken) der auftretenden Trennflächensets (1-2-3/2-3-4/1-3-4/1-2-4); Die Tabelle stellt den Zusammenhang zwischen Set- Kombination und beobachteter Blockhohlformnummer dar.

5.4 Blockhohlformen

Im Zuge der Aufnahme des Blockhohlform-Kataloges konnten drei geometrische Blockhohlformen unterschieden werden. Wie in Abb. 5-3 dargestellt handelt es sich in diesem Fall um einen Quader (Körper A), um ein Parallelepiped (Körper B) sowie um keilförmige Körper (Körper C).

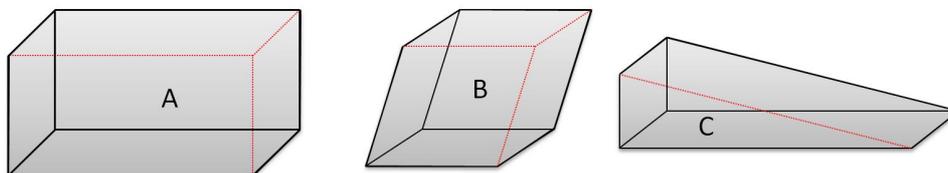
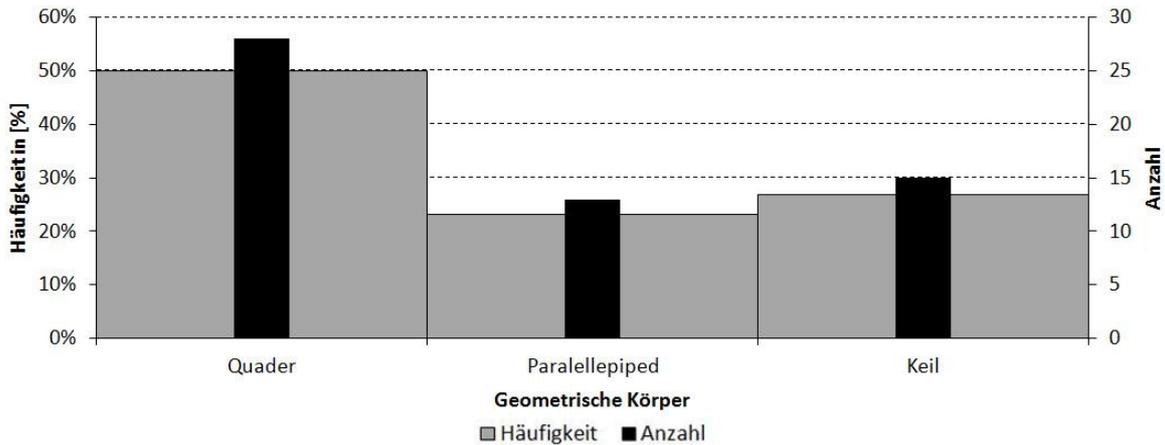


Abb. 5-3 Geometrische Grundformen; **Körper A:** Quader; **Körper B:** Parallelepiped; **Körper C:** Keil;

Von den in Summe erfassten 56 Blockhohlformen sind 50% quaderförmig (28 Stück), 27% weisen eine keilförmige Form auf (15 Stück), bei 23% handelte es sich um ein Parallelepiped (13 Stück). In Abb. 5-4 ist die Häufigkeit als auch die Anzahl der auftretenden Blockhohlformen, sowie deren Nummer dargestellt.

Auftretende Blockhohlformen (Global)

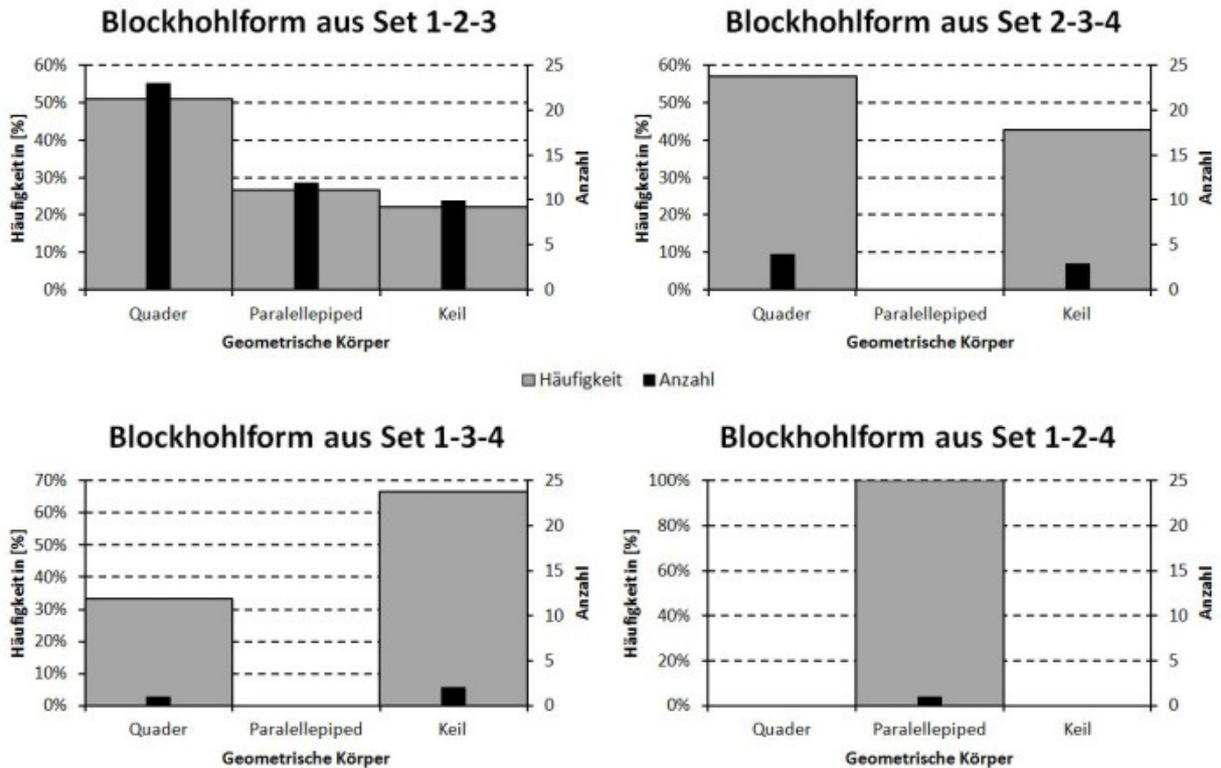


	Blockhohlform Nummer
Quader	7, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 33, 35, 36, 38, 43, 44, 47, 48, 50, 52, 56, 58, 59, 61, 62, 63, 69, 71
Parallelepiped	1, 2, 3, 4, 5, 14, 20, 24, 30, 34, 53, 57, 65, 74, 75, 78, 79
Keil	6, 8, 9, 19, 26, 31, 37, 39, 40, 76, 54, 55, 60, 64, 66, 68, 72, 76, 81

Abb. 5-4 Auftretende Blockhohlform, global; Neben der Häufigkeit in [%] ist die Anzahl der erfassten Hohlformen angeführt. Die Tabelle stellt den Zusammenhang zwischen Blockhohlform und Blockkatalog her.

Neben der auftretenden Blockhohlform (global) wird in Abb. 5-5 die auftretende Blockhohlform per Setkombination dargestellt. Die ebenso in Abb. 5-5 angegebene Tabelle stellt den Zusammenhang mit dem Blockhohlform-Katalog her.

Die Blockhohlformen bestehend aus Set1, Set2 sowie Set3 sind mit einer gesamten Anzahl von 45 Beobachtungen am häufigsten vertreten. Von diesen 45 beobachteten Blockhohlformen handelt es sich bei 51% um quaderförmige Hohlformen (23 Stück), bei 27% handelt es sich um Körper in Form eines Parallelepiped (12 Stück), sowie 22% der erfassten Blockhohlformen sind keilförmig (10 Stück). Blockhohlformen, bei denen das Set 4 beteiligt ist (Set 2-3-4, Set 1-3-4, Set 1-2-4), treten nur untergeordnet auf.



Blockhohlform aus Set 1-2-3	
Quader	7,10,11,12,13,15,16,17,22,23,27,28,29,33,35,38,47,52,58,59,61,69,71
Parallelepiped	1,2,3,4,5,14,20,24,30,34,53,57,65,74,75,78
Keil	6,9,31,37,54,60,66,68,76,81
Blockhohlform aus Set 2-3-4	
Quader	25,43,44,50
Parallelepiped	
Keil	8,46,55
Blockhohlform aus Set 1-3-4	
Quader	48
Parallelepiped	
Keil	26,64
Blockhohlform aus Set 1-2-4	
Quader	
Parallelepiped	79
Keil	

Abb. 5-5 Auftretende Blockhohlform per Setkombination; Neben der Häufigkeit in [%] ist die Anzahl der erfassten Blöcke angeführt. Die Tabelle stellt den Zusammenhang zwischen Blockhohlform und Blockkatalog her.

5.5 JRC der erfassten Blockhohlformen

Der JRC (siehe Kapitel Methodik) wurde mithilfe eines Barton Kammes erfasst. In Abb. 5-6 ist der JRC der erfassten Blockhohlformen global als auch per Set dargestellt. Global befindet sich der JRC in einem Bereich von JRC 4-6 bis JRC 16-18. Am häufigsten tritt ein JRC von 8-10 auf. Set 1 zeigt einen JRC im Bereich von JRC 6-8 bis JRC 16-18, Set 2 ein JRC im Bereich von 4-6 bis 16-18. Set 3 als auch Set 4 zeigen ein JRC im Bereich von JRC 4-6 bis JRC 16-18, mit einem Maximum bei JRC 8-10.

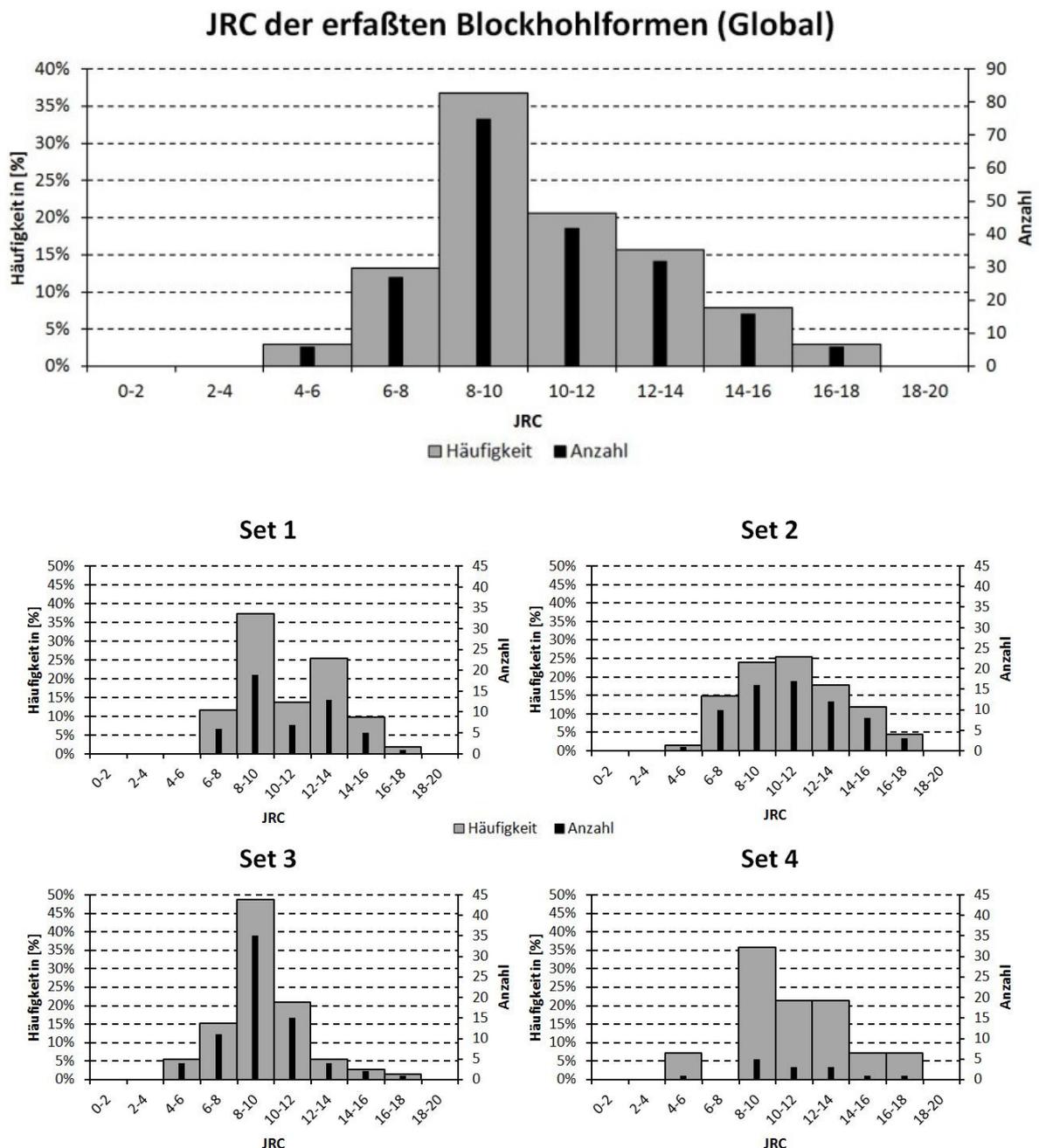


Abb. 5-6 JRC der erfassten Blockhohlformen, global als auch per Set (1 bis 4)

5.6 Blockhohlform- Volumen

Das Volumen der Blockhohlform wurde aufgrund der zugrundeliegenden geometrischen Grundform (siehe Abb. 5-3) ermittelt.

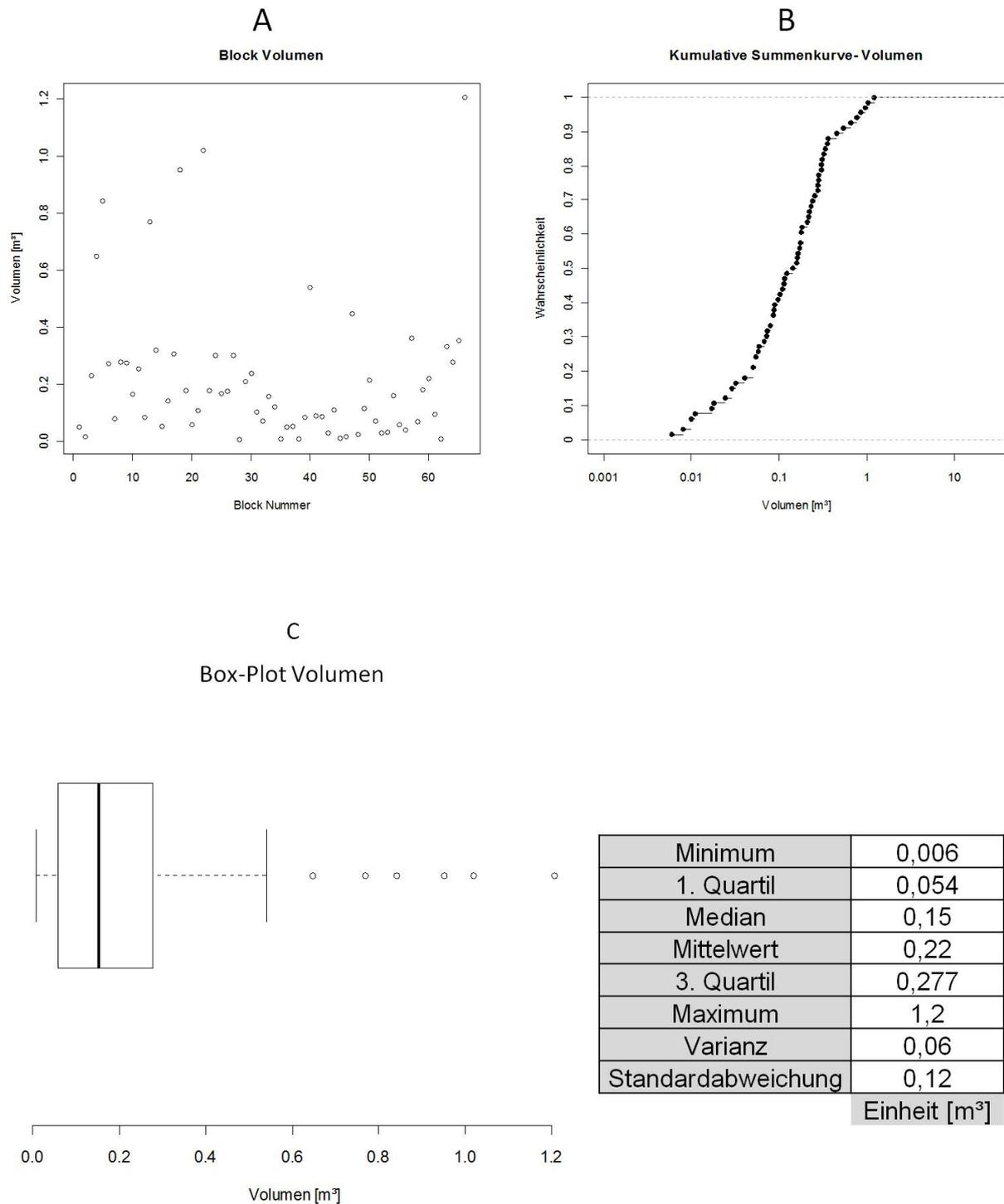


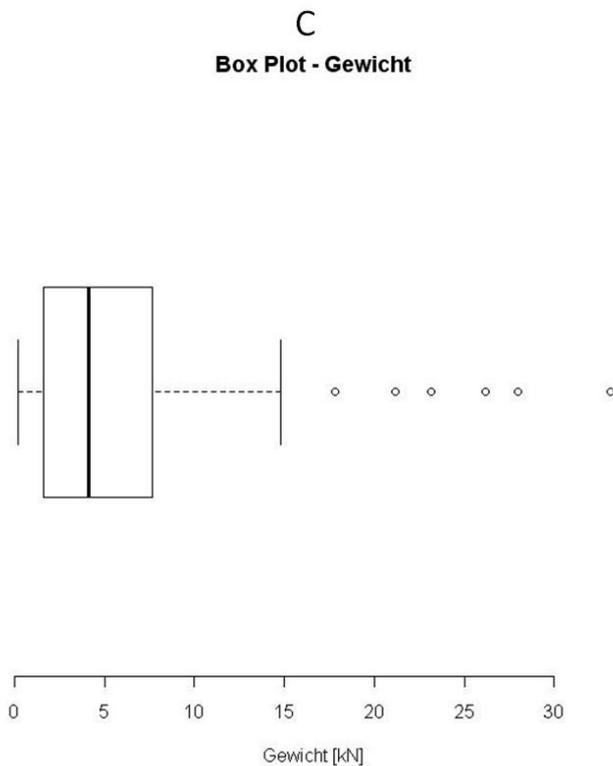
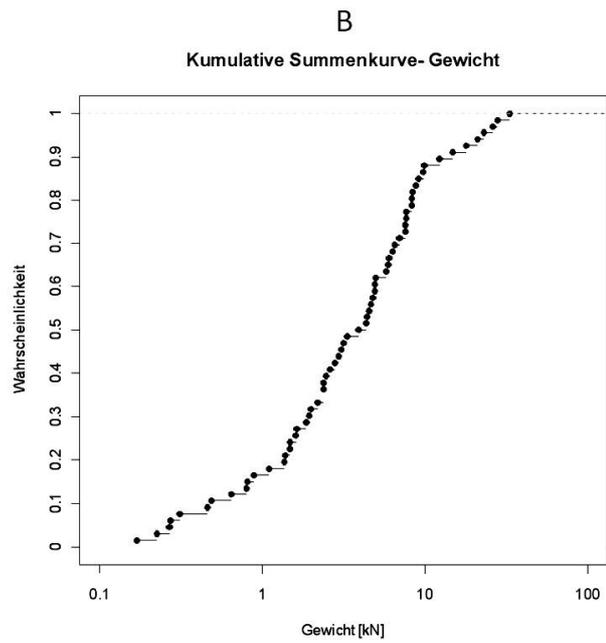
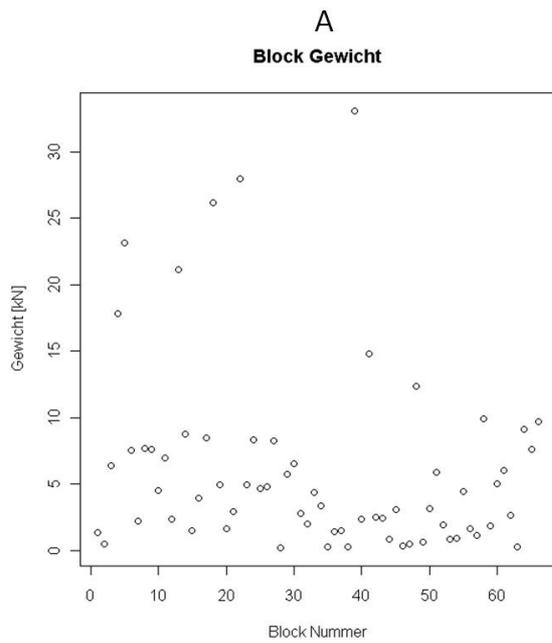
Abb. 5-7 Diagramm A: Übersicht Block Volumen; **Diagramm B:** Kumulative Summenkurve des Volumens; **Diagramm C:** Box-Plot- die Box stellt den Bereich dar, in dem sich 50% der Volumensdaten befinden. Der schwarze Balken innerhalb der Box stellt den Median dar. Ausreißer werden als schwarze Kreise außerhalb der beiden „Whisker“ dargestellt.

Dabei handelt es sich jedoch nur um eine Schätzung des tatsächlichen Volumens des Blockes, welcher sich in der Hohlform befand. In Abb. 5-7 A-C ist das ermittelte Volumen der Blockhohlformen dargestellt. In Abb. 5-7: A ist eine Übersicht des Volumens abgebildet. Das minimale Volumen liegt in diesem Fall bei $0,006 \text{ m}^3$, das maximale Volumen bei $1,2 \text{ m}^3$. Abb. 5-7: B zeigt eine kumulative Summenkurve; das 1 Quartil befindet sich bei $0,058 \text{ m}^3$, der Median bei $0,15 \text{ m}^3$, das 3 Quartil liegt bei $0,277 \text{ m}^3$. Der berechnete Mittelwert liegt im Bereich von $0,22 \text{ m}^3$, die Standardabweichung in einem Bereich von $0,25 \text{ m}^3$. Die Volumenverteilung wird in Abb. 5-7: C zusätzlich als Box-Plot dargestellt.

5.7 Blockgewicht

Das Blockgewicht wurde anhand des Blockhohlformvolumens berechnet. Dabei handelt es sich jedoch um eine Schätzung, da die ursprüngliche Geometrie des Blockes, welcher sich in der Blockhohlform befand, nicht rekonstruiert werden kann. Die Dichte des im Tosbecken auftretenden Granits wird nach (Price, 2009) auf 2800 kg/m^3 geschätzt.

In Abb. 5-8: A ist eine Übersicht des Blockgewichtes dargestellt: Das minimal Gewicht liegt bei $0,16 \text{ kN}$, das maximale Gewicht bei $33,11 \text{ kN}$. Abb. 5-8: B zeigt eine kumulative Summenkurve. Das 1 Quartil befindet sich bei $1,61 \text{ kN}$, der Median bei $4,13 \text{ kN}$, das 3 Quartil liegt bei $7,61 \text{ kN}$. Der Mittelwert beträgt $6,05 \text{ kN}$, die Standardabweichung $6,96 \text{ kN}$. Die Gewichtsverteilung wird in Abb. 5-8: C zusätzlich als Box-Plot dargestellt.



Minimum	0,16
1. Quartil	1,61
Median	4,31
Mittelwert	6,05
3. Quartil	7,61
Maximum	33,11
Varianz	10,86
Standardabweichung	3,29
Einheit [kN]	

Abb. 5-8 Diagramm A: Übersicht Blockgewicht; **Diagramm B:** Kumulative Summenkurve des Blockgewichtes; **Diagramm C:** Box-Plot- die Box stellt den Bereich dar, in dem sich 50% der Gewichtsdaten befinden, der schwarze Balken innerhalb der Box stellt den Median dar. Ausreißer werden als schwarze Kreise außerhalb der beiden „Whisker“ dargestellt.

6 Blocktheorie

6.1 Verwendete Programme

Folgende DOS Programme wurden für die Analyse sowie Darstellung auftretender Blöcke verwendet -Key Block Program: Methods and program by Professor R.Goodman & Dr.Gen-hua Shi; Modification to HPGL file output by Dr.Q.Liu (Goodman & Shi, 1989):

B02HPGL.EXE

Darstellung aller entfernbaren *Joint Pyramids JP* sowie Ermittlung der auftretenden Bewegungsart (*kinematic modes*). Erforderliche Daten sind neben der Anzahl und Orientierung auftretender Trennflächensets bzw. Freiflächen auch die Orientierung der resultierenden Kraft. Die ausgewerteten Daten werden als „*whole sphere stereographic projection*“ dargestellt.

B03HPGL.EXE

Dreidimensionale Darstellung der Block Typen 1-4 (siehe Kapitel Methodik) sowie Ermittlung des möglichen Blockvolumens. Die erforderlichen Daten sind die Anzahl und Orientierung auftretender Trennflächensets und Freiflächen, sowie der JP-Code des darzustellenden Blockes.

Zur Bestimmung des Blockvolumens wird der Trennflächenabstand bzw. Trennflächenabstand per Set als auch der Distanz H_0 benötigt. Der Abstand H_0 stellt die Normallänge (zur Freifläche) zwischen der Freifläche des Blockes und seinem Ursprung dar Abb. 6-1.

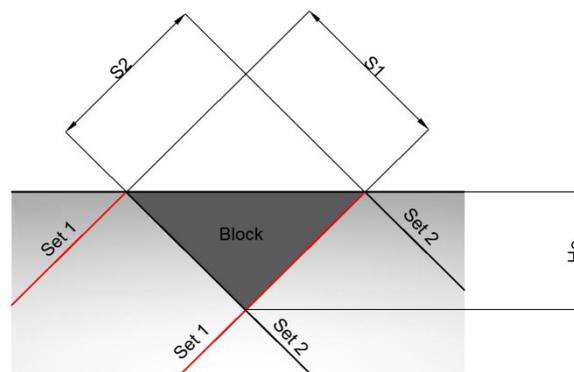


Abb. 6-1 Darstellung eines zweidimensionalen Blockes, der aus zwei Trennflächen (Set1 bzw. Set2) sowie der Oberfläche gebildet wird. Weiters ist der Trennflächenabstand S_1 bzw. S_2 sowie die Höhe H_0 dargestellt.

B11HPGL.EXE

Darstellung der Gleichgewichtsregionen unter Einwirkung der resultierenden Kraft, für mehr als zwei Trennflächensets.

Dieses Programm wird für Stabilitätsuntersuchungen eines festgelegten JP-Codes verwendet. Als Ausgabe erhält man die auftretenden Stabilitätsregionen sowie den Reibungswinkel, welcher erforderlich ist, um einen Block an seine Stabilitätsgrenze zu führen. Die erforderlichen Daten sind die Anzahl und Orientierung auftretender Trennflächensets, der JP- Code des untersuchten Blockes sowie die Richtung der resultierenden Kraft.

6.2 Datengrundlage

Die Grundlage der folgenden Blockanalyse sind die Trennflächensets, welche in Kapitel 4.3.4 angeführt sind, sowie die auftretende horizontale Freifläche der Tosbeckensohle (000/00).

Set 1	063/88
Set 2	342/80
Set 3	147/15
Set 4	286/84

Der Trennflächenabstand per Set wurde mithilfe der Scanline- Aufnahmen ermittelt. Bei den in Tab. 6-1 angeführten normalen Trennflächenabständen (jeweils Minimalwert, Maximalwert sowie Mittelwert- per Set) handelt es sich um die für die Blockanalyse verwendeten Daten.

	Min [m]	Max [m]	Mittelwert [m]	Standartabweichung [m]	Varianz [m]	Messungen
Set 1	0,20	2,07	0,83	0,53	0,28	19
Set 2	0,10	2,06	0,87	0,62	0,39	24
Set 3	0,57	1,85	1,33	0,39	0,15	10
Set 4	0,35	2,21	0,94	0,76	0,58	5

Tab. 6-1 Normaler Trennflächenabstand per Set, jeweils Minimalwert, Maximalwert sowie Mittelwert in [m].

Die Distanz H_0 , siehe Abb. 6-1 wurde von allen aufgenommenen Blockhohlformen der Tosbeckenstudie gemessen. Dabei handelt es sich um den Abstand zwischen

Tosbeckenoberfläche und der Grundfläche der Blockhohlform. In Tab. 6-2 ist dieser Abstand als Minimal-, Maximal- sowie Mittelwert angeführt.

	Tiefe H_0 [m]
Minimum	0,07
Mittelwert	0,24
Maximum	0,42

Tab. 6-2 Abstand H_0 in [m]

6.3 Auftretende Joint Pyramid (JP)

Folgende 16 JP- Codes treten bei den vorliegenden Sets, Set 1 bis Set 4 sowie der horizontalen Freifläche auf:

0000	0111	1110	0101
1111	0001	0110	1010
0100	1100	1101	1000
1001	0011	1011	0010

Die JP-Codes wurden mit dem Programm B02HPGL.EXE ermittelt. Dabei handelt es sich um die Block Typen 1 bis 5, siehe Kapitel Methodik.

6.4 Einteilung der JP in Blocktypen

Die Unterteilung der 16 JP- Codes in die entsprechenden Block Typen wurde im Kapitel Methodik besprochen. In Tab. 6-3 sind die auftretenden Block Typen sowie ihre JP-Codes dargestellt. Durch die Kombination von vier Trennflächensets sowie einer Freifläche treten demnach 11 Blöcke des Typ 5 (*infinite Block*) auf, sowie 5 Blöcke, die vollständig durch Trennflächen als auch der Freifläche begrenzt werden (endliche Blöcke, Block Typen 1,2,3,4). Bei 2 Blöcken handelt es sich um sogenannte „*Tapered Blocks*“ *Block Typ 4 (1001, 0111)*. Diese Blöcke sind dadurch gekennzeichnet, dass sie nicht in der „*whole sphere projection*“ (Projektion der unteren Lagenkugel LHP) dargestellt werden Abb. 6-2. Entfernbare Blöcke (Block Typ 3,2,1) sind in Abb. 6-2 dargestellt. Dabei handelt es sich um jene JP- Codes, die sich zur Gänze in der SP (Space Pyramid) befinden, es handelt es sich um die JP Codes 1000 sowie 0000.

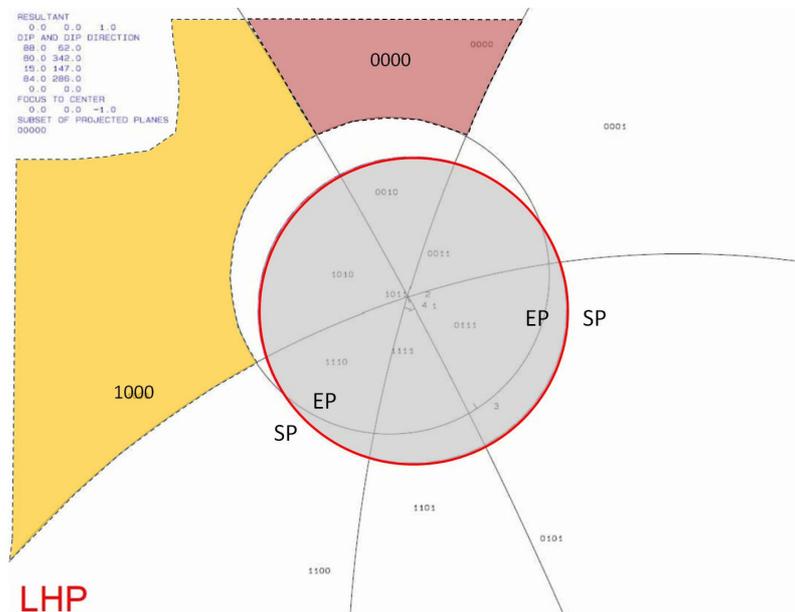
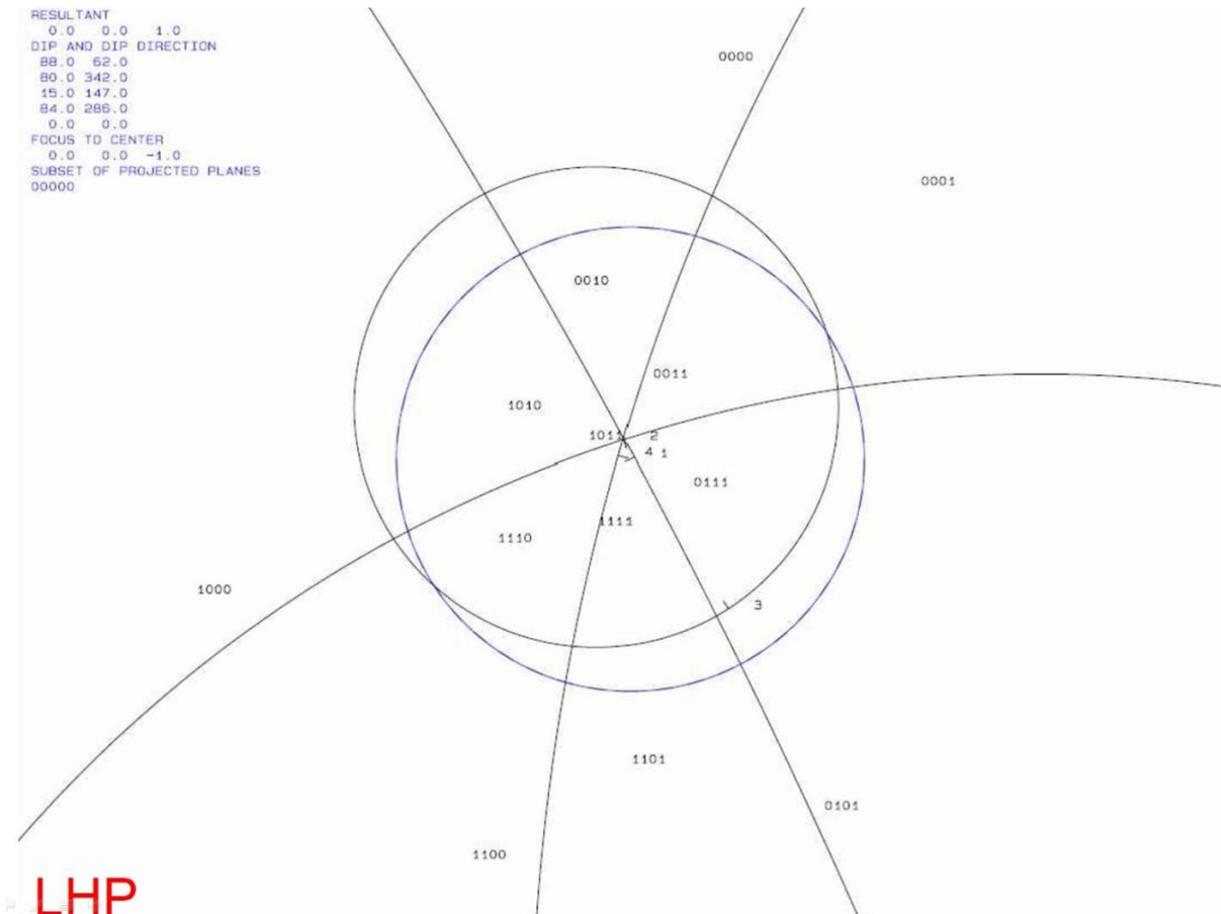


Abb. 6-2 Darstellung der „whole sphere projection“ der auftretenden Sets 1 bis 4, sowie der horizontalen Freifläche (roter Kreis, grau unterlegt). Die EP (excavation pyramid) befindet sich aufgrund der horizontalen Lage der Freifläche im Inneren des roten Kreises umgeben von der SP (space pyramid). Die JP- Codes 1000 (oranges Feld) sowie 0000 (rotes Feld) liegen zur Gänze in der SP und sind dadurch entfernbare, JP 0100 ist durch seine Lage in der Nähe des Blickpunktes der oberen Hemisphäre nicht sichtbar; LHP: Projektion der unteren Lagenkugel;

Block Typ 5		Block Typ 4	Block Typ 3	Block Typ 2	Block Typ 1
0001	1101	1001	1000	-	-
1100	1011	0111	0000		
0011	0101		0100		
0010	1010				
1110	1111				
0110					

Tab. 6-3 Unterteilung der auftretenden JP- Codes, siehe Text;

Die JP0100, welche sich ebenso zur Gänze in der SP befindet, wird aufgrund seiner unmittelbaren Lage in der Nähe des Blickpunktes der oberen Hemisphäre nicht dargestellt. Die weitere Unterteilung der JP- Codes in Block Typen 3,2,1 wird im nachfolgenden Kapitel besprochen.

6.5 Bewegungsanalyse

Um die verbleibenden JP- Codes JP1000, JP0000 sowie JP0100 dem Block Typ 3, Typ 2 oder Typ 1 zuzuordnen, bedarf es im ersten Schritt einer Bewegungsanalyse, um den Typ 3 zu identifizieren. Sowie im darauffolgenden Schritt eine Stabilitätsanalyse um den Typ 2 vom Typ 1 zu unterscheiden.

Die Bewegungsanalyse wurde mit dem Programm B02HPGL.EXE durchgeführt und in Abb. 6-3 dargestellt. Jeder der in der „*whole sphere projection*“ auftretenden JP- Codes wurde durch eine Bewegungsart ersetzt. Unter der Annahme, dass ausschließlich die Schwerkraft (0, 0, -1) auf die zu unterteilenden JP- Codes JP1000, JP0000 sowie JP0100 wirkt, handelt es sich bei allen drei JP- Codes um den Block Typ 3 (save removable block), dargestellt in Abb. 6-3 durch die Bezeichnung S (S: stabil).

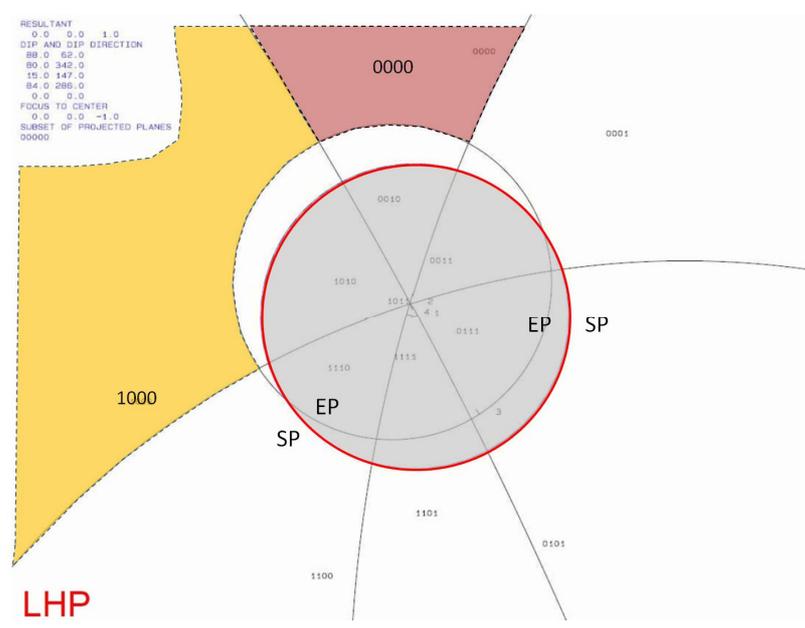
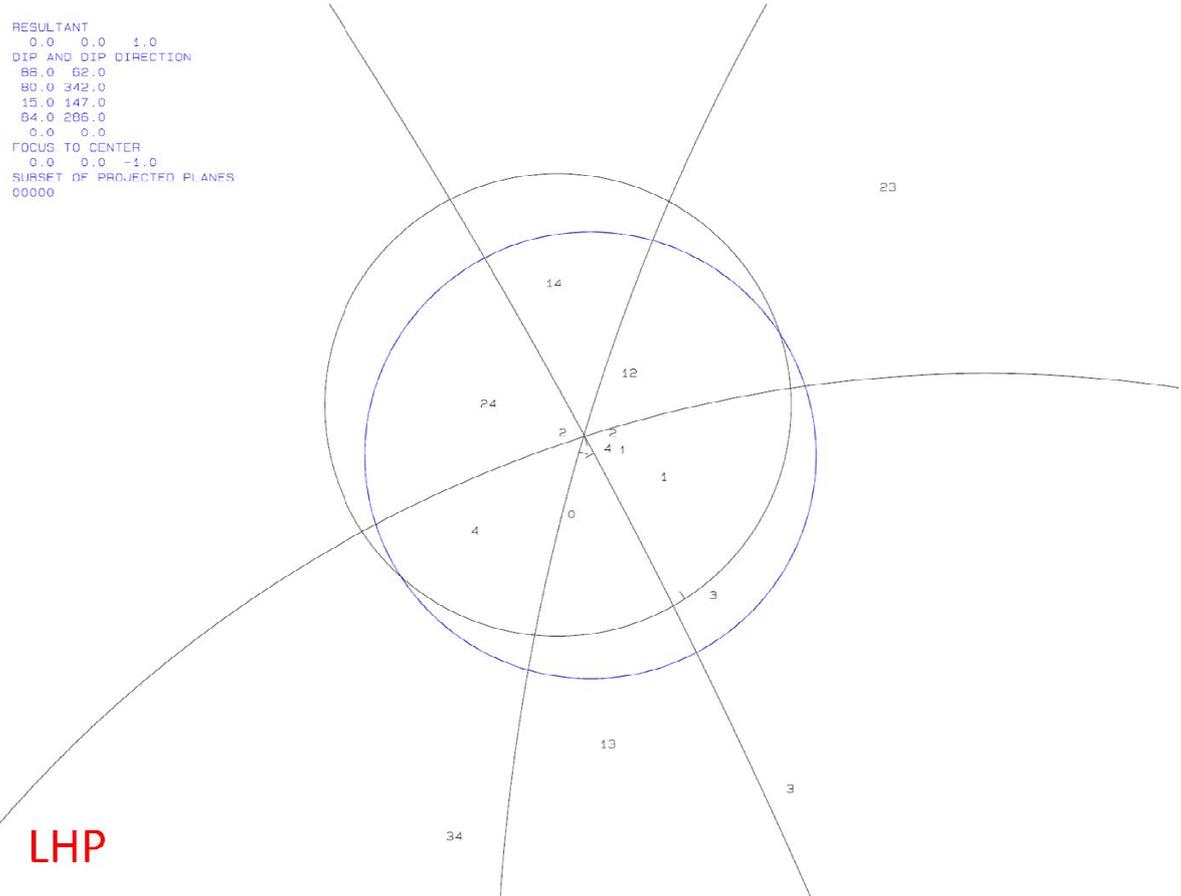


Abb. 6-3 Darstellung der „whole sphere projection“ der auftretenden Sets 1 bis 4, sowie der horizontalen Freifläche (blauer Kreis) LHP: Projektion der unteren Lagenkugel; Der JP- Code 1000 (rote Schraffur) sowie 0000 (grüne Schraffur) als auch JP 0100 besitzen keine Bewegungsart und sind daher Stabil (S)- Pfeil A;

6.6 Block Form, Volumen und Gewicht

Die Blockform wurde anhand der auftretenden Trennflächensets, sowie des entsprechenden JP- Codes, mithilfe des Programms B03HPGL.EXE ermittelt. In Abb. 6-5 sowie Abb. 6-5 ist neben der dreidimensionalen Blockform für die JP- Codes JP1000, JP0000 sowie JP0100 auch eine horizontale Oberfläche mit den Spuren der Trennflächensets, Set 1 bis Set 4 sowie die Form der Blöcke dargestellt.

Zur Berechnung des Blockvolumens wurden die Trennflächenset-Abstände, sowie die Höhe H_0 aus Tab. 6-4 verwendet. Die daraus resultierenden Volumina sind in Tab. 6-4 angeführt.

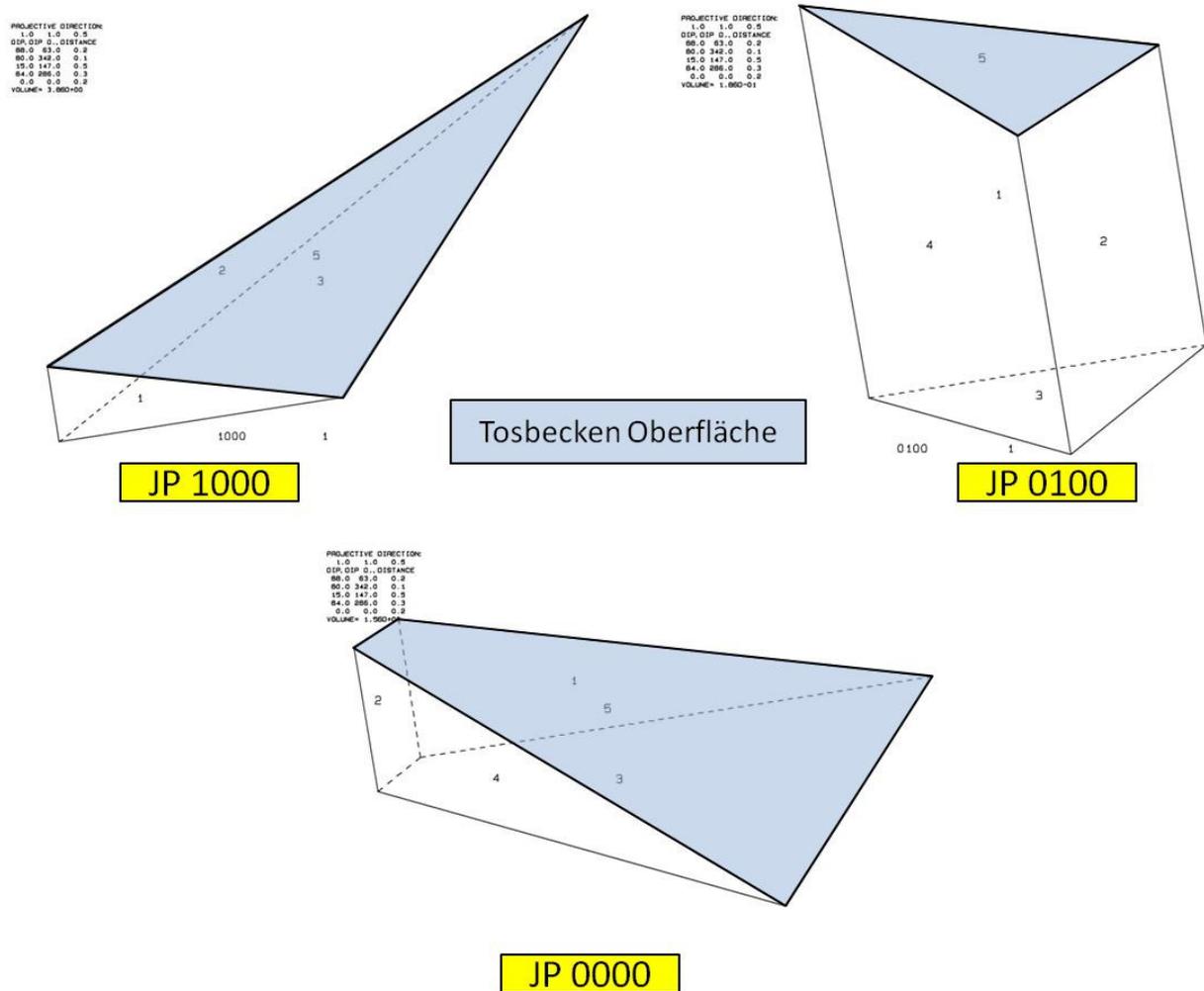
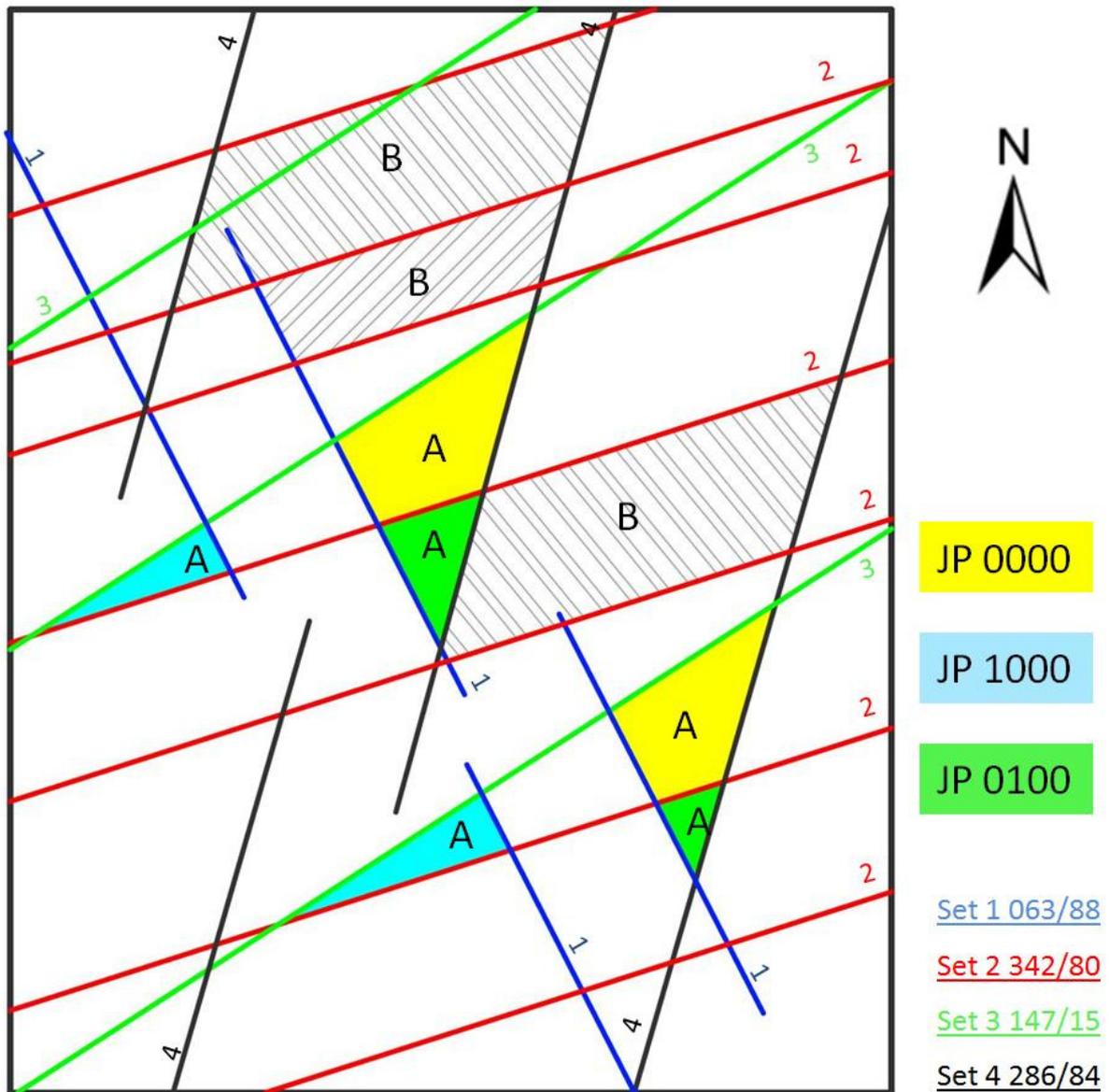


Abb. 6-4 Darstellung der dreidimensionalen Form der auftretenden Blöcke JP1000, JP0100 sowie JP0000. Die blau unterlegte Oberfläche stellt die Freiflächen, in diesem Fall die Tosbeckenoberfläche dar;



A: Keilförmige Blöcke B: Quaderförmige Blöcke

Abb. 6-5 Darstellung der Trennflächenspuren des Sets 1 bis 4 auf einer horizontalen Oberfläche. Blöcke mit der Signatur A repräsentieren keilförmige Blöcke; Blöcke mit der Signatur B repräsentieren quaderförmige Blöcke;

Trennflächenabstand	Abstand per Set [m]		Tiefe H_0 [m]	Block JP	Volumen [m ³]	Gewicht [kN]
	Set 1	Set 2				
Minimalabstand	Set 1	0,2	0,07	1000	2,9	79,7
	Set 2	0,1		100	0,2	5,5
	Set 3	0,57		0	1,3	35,7
	Set 4	0,35				
Mittelwert	Set 1	0,83	0,24	1000	5,7	156,6
	Set 2	0,62		100	2,1	57,7
	Set 3	0,39		0	2,8	76,9
	Set 4	0,76				
Maximalabstand	Set 1	2,07	0,42	1000	243	6674,7
	Set 2	2,06		100	60,1	1650,8
	Set 3	1,85		0	106	2911,6
	Set 4	2,21				

Tab. 6-4 Darstellung des Trennflächenabstandes per Set als auch der Tiefe H_0 , jeweils für den Minimalwert, Mittelwert als auch Maximalwert; Sowie Darstellung der entfernbaren Blöcke JP1000, JP0100 sowie JP0000 mit berechneten Volumina in [m³] als auch Gewicht [kg] unter Berücksichtigung der Dichte von 2800 kg/m³;

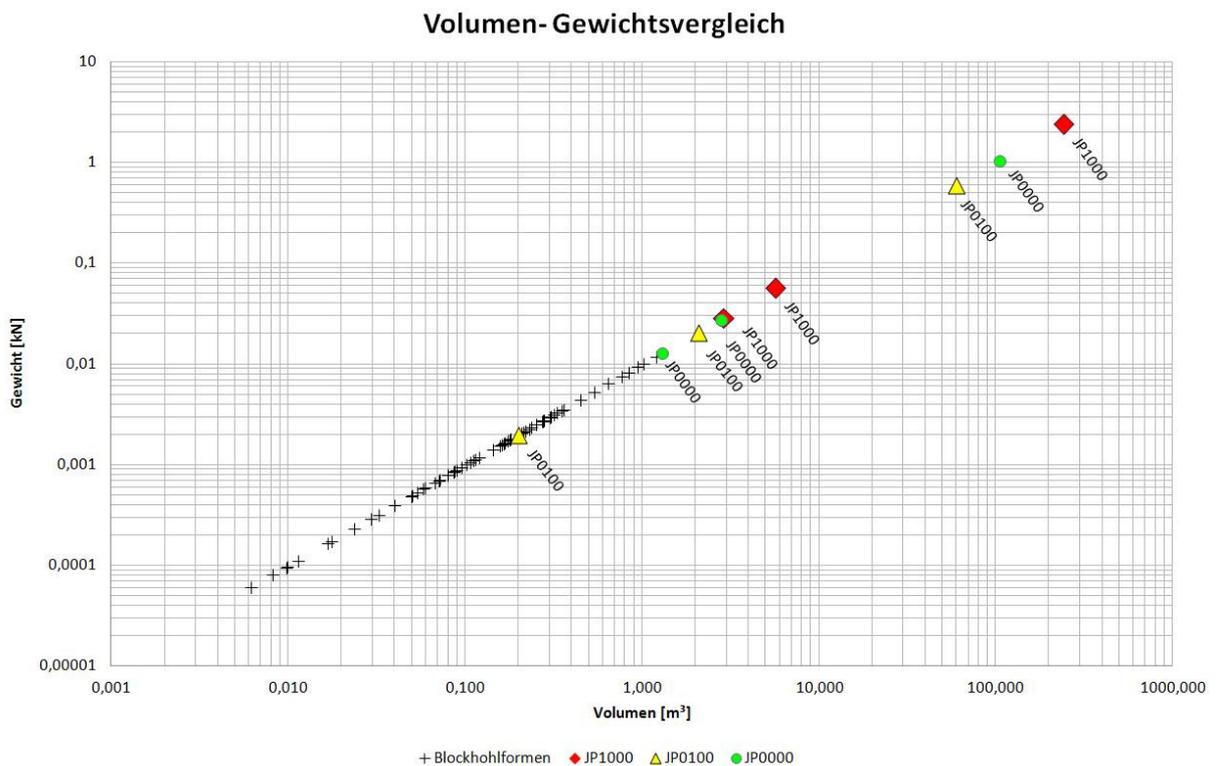


Abb. 6-6 Volumen-Gewichtvergleich zwischen den beobachteten Blockhohlformen (schwarze Kreuze) sowie den ermittelten entfernbaren Blöcken JP1000, JP0100 sowie JP0000; Jeder dieser Blöcke ist durch sein minimales, bzw. maximales mögliches Volumen bzw. Gewicht als auch seinen Mittelwert dargestellt.

Das Blockgewicht wurde anhand des Blockvolumens und der geschätzten Dichte des auftretenden Granits (angenommen 2800 kg/m³ nach (Price, 2009)) berechnet Tab. 6-4.

In Abb. 6-6 wird das Gewicht als auch das Volumen der entfernbareren Blöcke JP1000, JP0100 und JP0000, mit dem Gewicht als auch Volumen, der in der Tosbeckenstudie aufgenommenen Blockhohlform verglichen. Das mögliche auftretende Minimalvolumen der Blöcke JP0100 sowie JP0000 liegt im Volumens-, als auch Gewichtsbereiches der aufgenommenen Blockhohlformen.

6.7 Stabilitätsanalyse

Die Stabilitätsanalyse hat das Ziel, die entfernbareren Blöcke JP 1000, JP0100 sowie JP0000 nicht nur unter der Einwirkung der Schwerkraft zu betrachten sondern auch unter der Einwirkung von äußeren Kräften, die durch strömendes Wasser hervorgerufen werden, siehe hierzu Kapitel Methodik: Kolkbildung. Die durchgeführte Analyse basiert auf der „Block Erodability Spectrum Analysis“ (**BES**) (Kieffer, 2011) und wird im Folgenden beschrieben.

Betrachtet man eine JP, so ändert sich die auftretende Bewegungsart, wenn sich die Orientierung der resultierenden Kraft verschiebt. Betrachtet man die resultierende Kraft **R** Abb. 6-7, so wird die Abbildungsebene in Bereiche gleicher Bewegungsart unterteilt, dargestellt durch schwarze Linien in Abb. 6-7. Jedes dieser Felder ist gekennzeichnet mit der entsprechenden Bewegungsart; Gleiten entlang einer Fläche „i“, gleiten entlang von zwei Flächen „ij“ sowie Hebung „0“. Felder ohne Kennzeichnung besitzen demnach keine Bewegungsart. Zusätzlich sind in Abb. 6-7 die nötigen Reibungswerte als strichlierte Linien angeführt, welche benötigt werden, um den Block in einen Gleichgewichtszustand zu versetzen. Da sich die auftretende Reibung des Rastenberger Granodiorits in einem Bereich von 30° bis 40° befindet, wurden die erforderlichen Gleichgewichtslinien grün als auch rot strichliert gekennzeichnet Abb. 6-7.

Befindet sich die resultierende Kraft **R** demnach im Inneren der blauen Linie (30°), Abb. 6-7 als auch Abb. 6-10 , so kommt es zu keiner Bewegung des jeweiligen Blockes. Befindet sie sich hingegen zwischen roter (40°) und blauer Linie (30°) , so kann es zu einer Bewegung des jeweiligen Blockes kommen. Wird die resultierende Kraft **R** außerhalb der roten Linie (40°) dargestellt, so tritt eine Bewegung des Blockes auf.

Die Kräfte **F_{min}** bzw. **F_h**, Abb. 6-8: Bild A, repräsentieren die minimale als auch horizontal erforderliche fiktive Kraft um den Block in einen Gleichgewichtszustand zu versetzen. Sie werden durch den Winkel **θ** berechnet, siehe Abb. 6-8. **F_{min}** bzw. **F_h** ist demnach Gl. 6-1 bzw. Gl. 6-2:

$$F_h = \tan(\theta) * W \quad \text{Gl. 6-1}$$

$$F_{min} = \sin(\theta) * W \quad \text{Gl. 6-2}$$

Im Folgenden wird das relative Verhältnis zwischen F_h bzw. F_{min} mit der auftretenden Gewichtskraft W betrachtet.

Ist der Winkel θ Abb. 6-8: Bild B über 90° , so ist die minimal erforderliche Kraft F_{min} die Gewichtskraft des Blockes. Kräfte, die in diesem Fall größer als die Gewichtskraft des Blockes sind (F_A), werden in der nachfolgenden Auswertung nicht betrachtet.

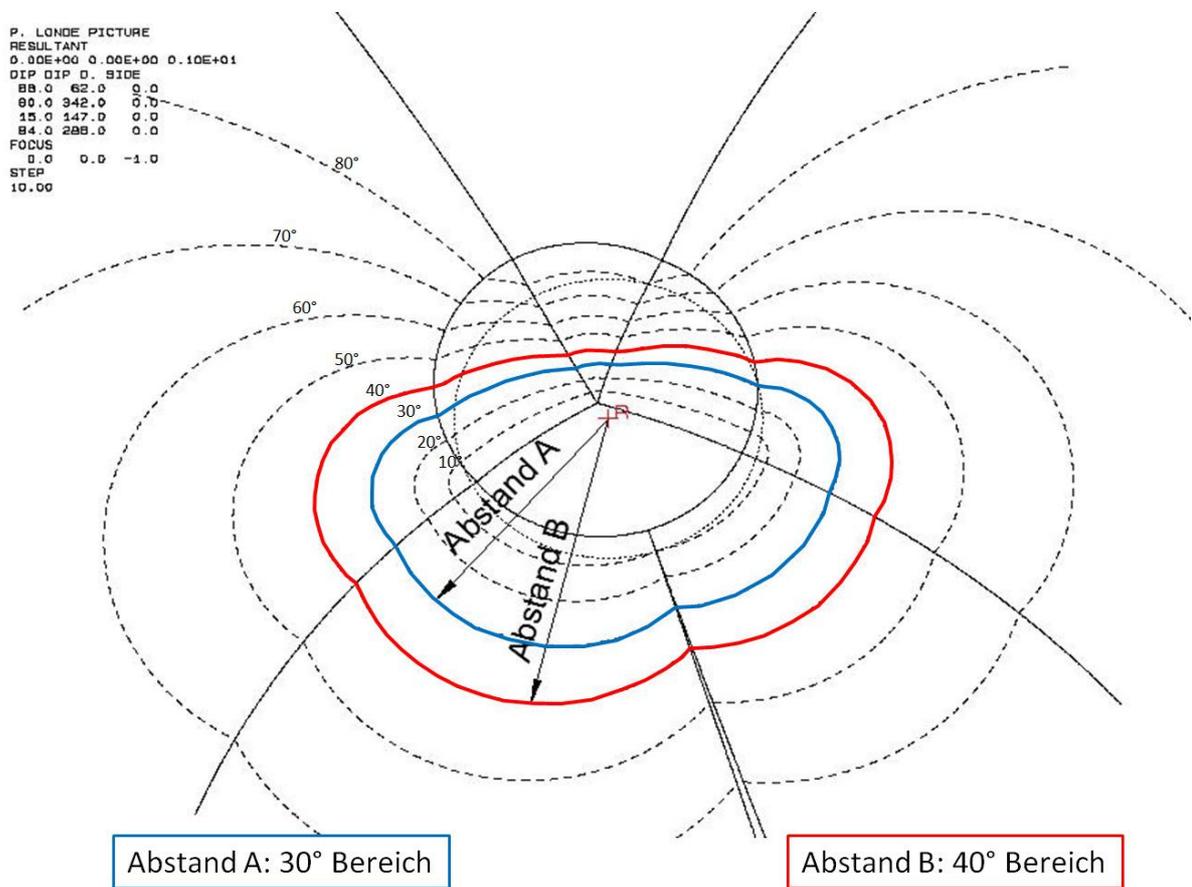


Abb. 6-7 Darstellung der Stabilitätsbereiche unter der Einwirkung der Schwerkraft. Der rote Kreuz „R“ repräsentiert die resultierende Kraft; blau begrenztes Feld: Darstellung des Bereiches $<30^\circ$ auftretender Reibung; rot begrenztes Feld: Darstellung des Bereiches bis 40° auftretender Reibung.

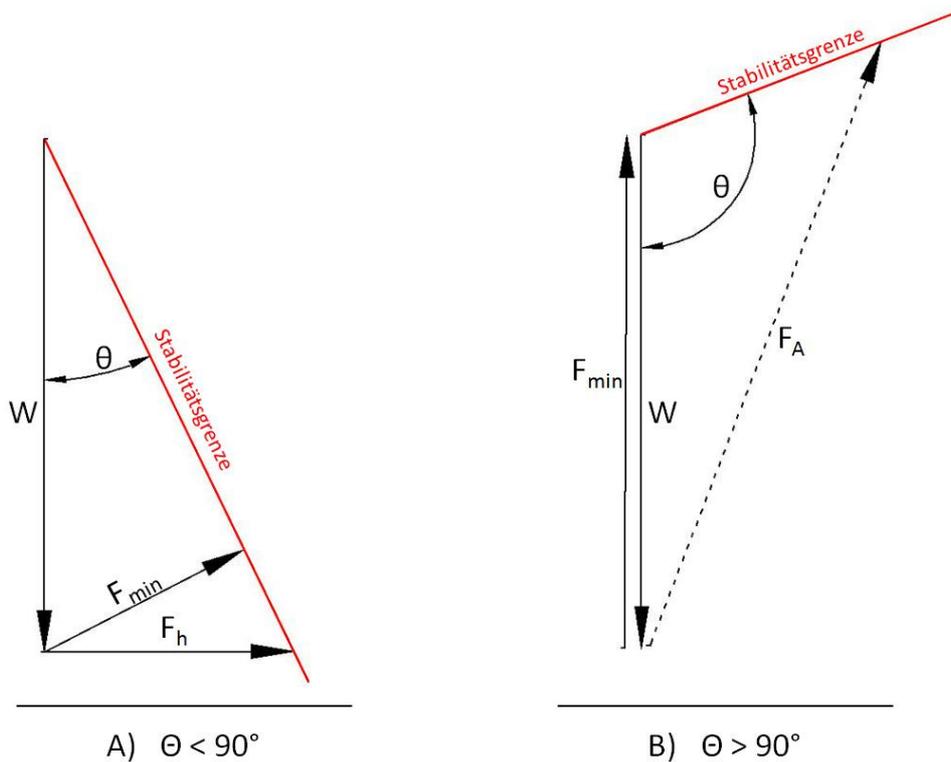


Abb. 6-8 Darstellung der betrachteten Kräfte; **W**-Gewichtskraft; **F_{min}**-minimale fiktive Kraft; **F_h**- horizontale fiktive Kraft; **θ**- Winkel zur Erreichung der Stabilitätsgrenze; **Bild A**: Darstellung $\theta < 90^\circ$; **Bild B**: Darstellung $\theta > 90^\circ$; Beschreibung siehe Text;

Der Winkel θ wird aus dem Abstand der Gewichtskraft **W** (0, 0, -1) mit der erforderlichen Reibung für 30° als auch für 40° , Abb. 6-7 sowie Abb. 6-10, ermittelt und als Liniendiagramm in einem Orientierungsbereich von 0° bis 360° dargestellt Abb. 6-11.

Neben den Verlauf des Winkels θ für die JP 1000, JP0100 sowie JP0000 in einem Bereich von 30° als auch 40° auftretender Reibung ist in Abb. 6-11 die Strömungsrichtung in einer Orientierung von 95° (vertikale strichlierte Linie - A) angeführt. Vergleiche hierzu das Übersichtsbild der Sperre Ottenstein mit eingezeichneter Strömungsrichtung Abb. 6-9.

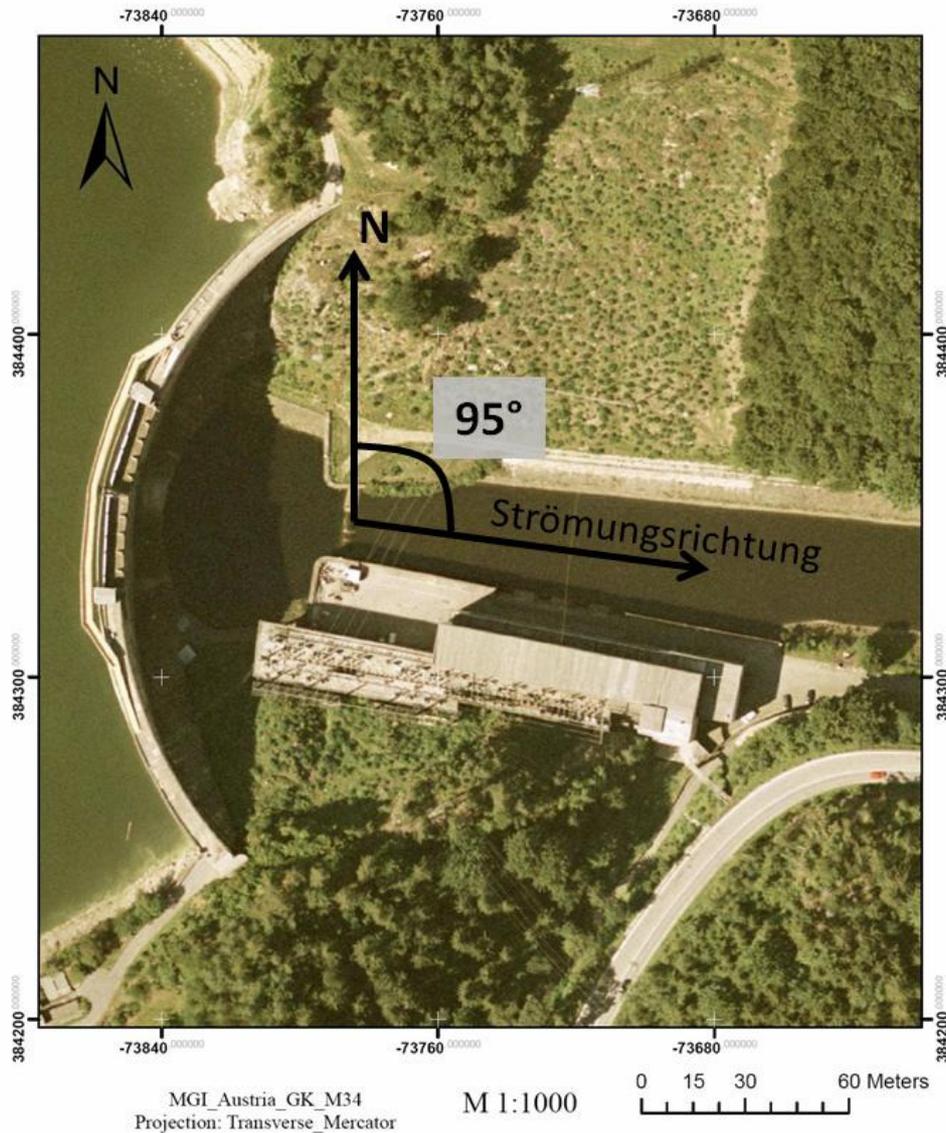


Abb. 6-9 Richtung der vorherrschenden Strömungsrichtung unter einem Winkel von 95°

Der in Abb. 6-11 dargestellte Verlauf des Winkel θ für die JP 1000, JP0100 sowie JP0000 zeigt, dass der kleinste Winkel θ in einem Bereich 90° gegen Nord für JP0000 sowie 190° gegen Nord für JP1000 mit $\theta = 40^\circ$ auftritt. JP0100 hat sein Minimum bei 340° gegen Nord bei einem Winkel θ von 115°. In Abb. 6-12 ist der Verlauf der „Block Erodability Spectrum Analysis“ (Kieffer, 2011) der in Abb. 6-11 dargestellten Linien angeführt. Dabei handelt es sich um den kleinsten auftretenden Winkel θ der drei JP- Codes. Die schwarze Linie in Abb. 6-12 repräsentiert den Verlauf des Winkel θ für einen Reibungswinkel von 30°, die rote den für 40°.

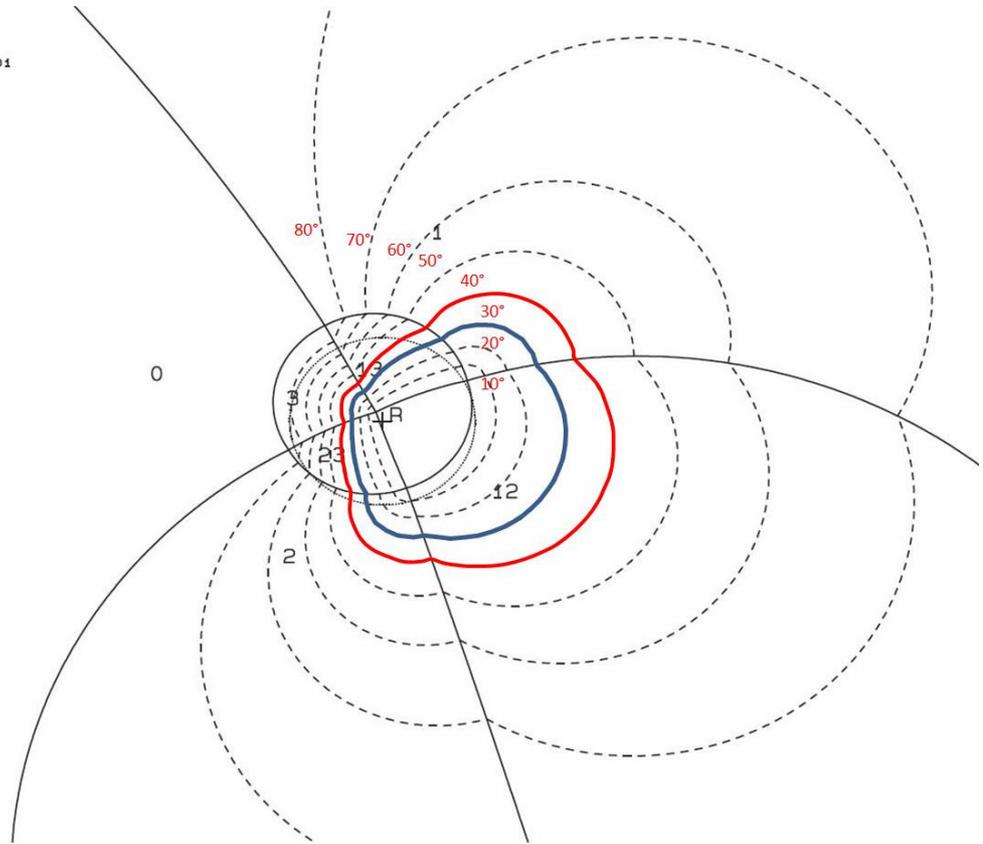
JP1000

```

P. LONDE PICTURE
RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
88.0 62.0 1.0
80.0 342.0 0.0
15.0 147.0 0.0
84.0 286.0 0.0
FOCUS
0.0 0.0 -1.0
STEP
10.00
    
```

40° Bereich

30° Bereich



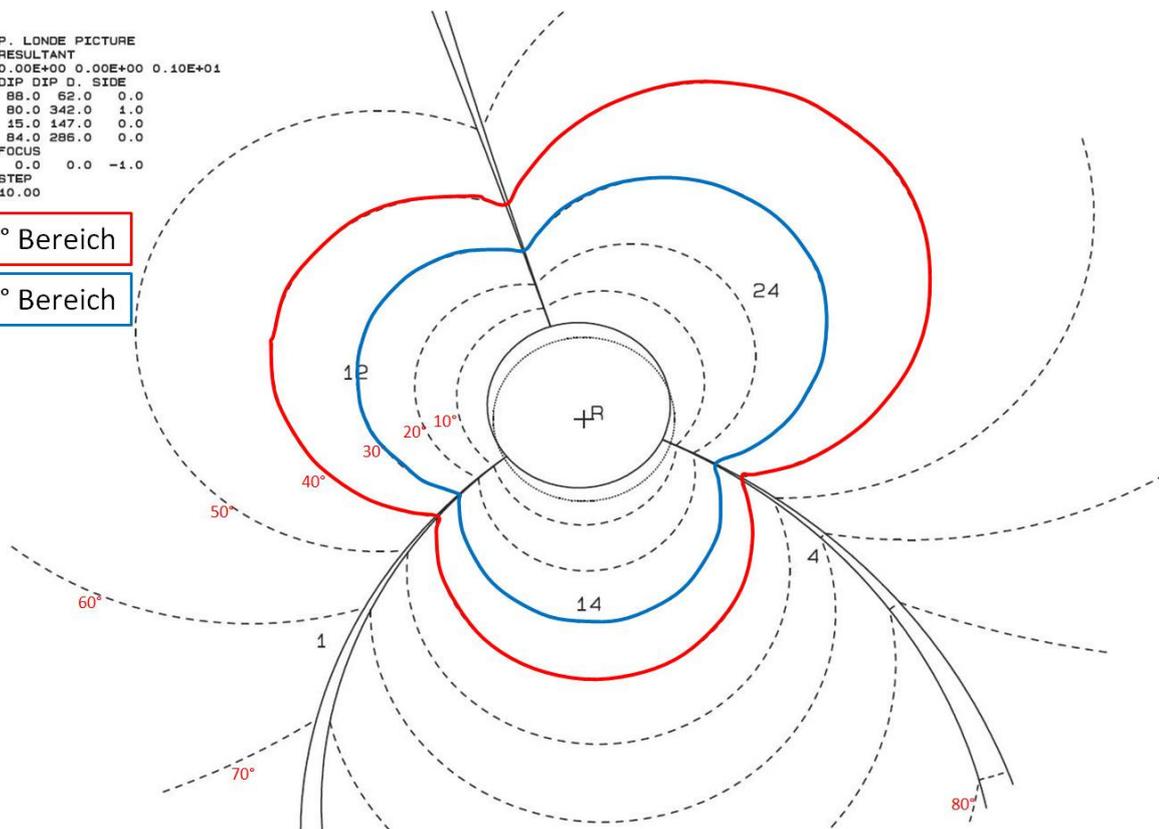
JP0100

```

P. LONDE PICTURE
RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
88.0 62.0 0.0
80.0 342.0 1.0
15.0 147.0 0.0
84.0 286.0 0.0
FOCUS
0.0 0.0 -1.0
STEP
10.00
    
```

40° Bereich

30° Bereich



JP0000

P. LONDE PICTURE
RESULTANT
0.00E+00 0.00E+00 0.10E+01
DIP DIP D. SIDE
88.0 62.0 0.0
80.0 342.0 0.0
15.0 147.0 0.0
84.0 286.0 0.0
FOCUS
0.0 0.0 -1.0
STEP
10.00

40° Bereich

30° Bereich

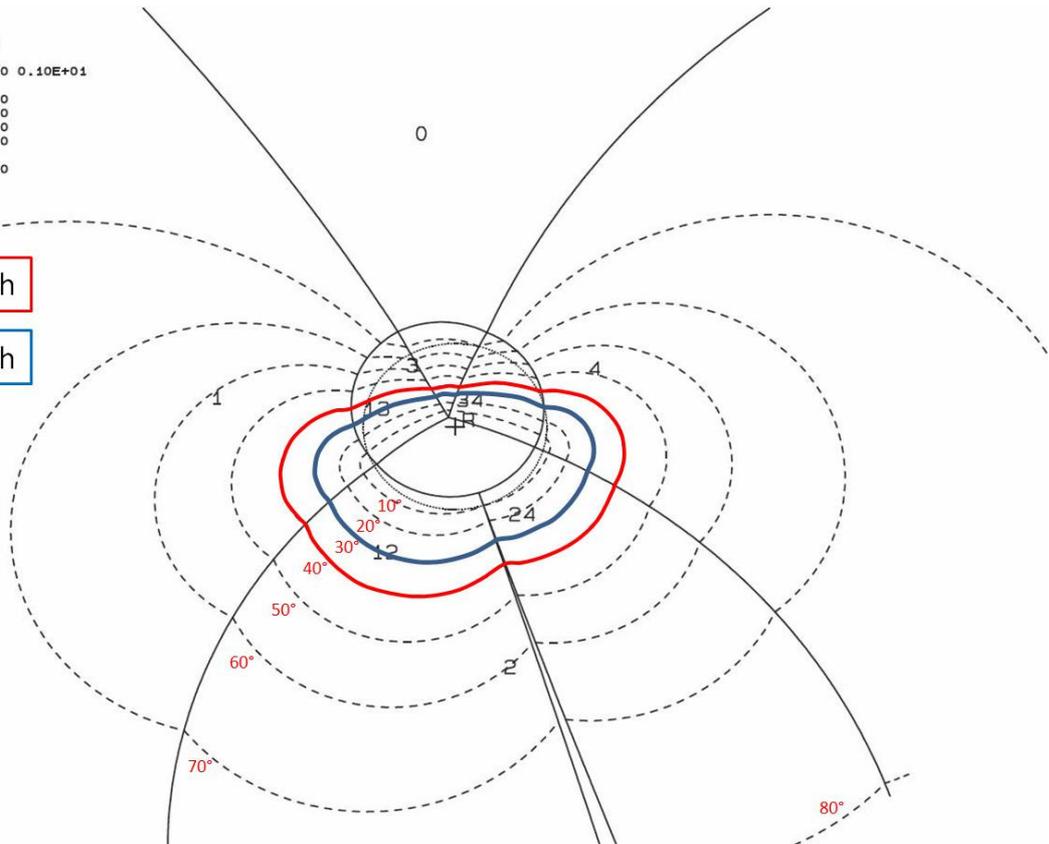


Abb. 6-10 (sowie JP1000 und JP0100 vorhergehende Seite) Darstellung der Stabilitätsbereiche unter Einwirkung der Schwerkraft (0,0,-1), schwarze geschlossene Linien; Der Verlauf der erforderlichen Reibung ist in einem Intervall von 10° als schwarz strichlierte Linie dargestellt; Die blau- bzw. rot unterlegten Kreise stellt die verfügbare Reibung dar- 30° und 40° ;

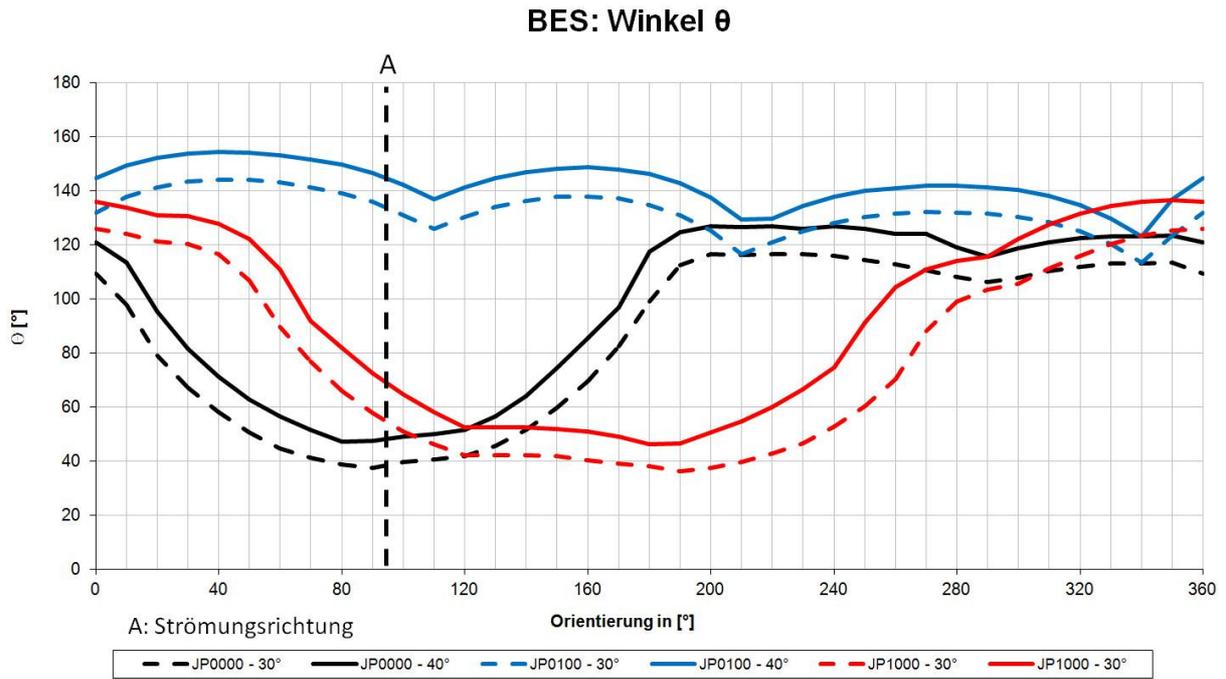


Abb. 6-11 Block Eradability Spectrum (BES): Verlauf des Winkel θ für die JP0000, JP0100 sowie JP1000 in einem Orientierungsbereich von 0° bis 360° ; Durchgezogene Linien stellen den Verlauf des Winkel θ für einen Reibungswert von 40° dar, strichlierte farbige Linien den für 30° Reibung; Die schwarze strichlierte Linie stellt die Orientierung der vorherrschenden Strömung (95°) dar;

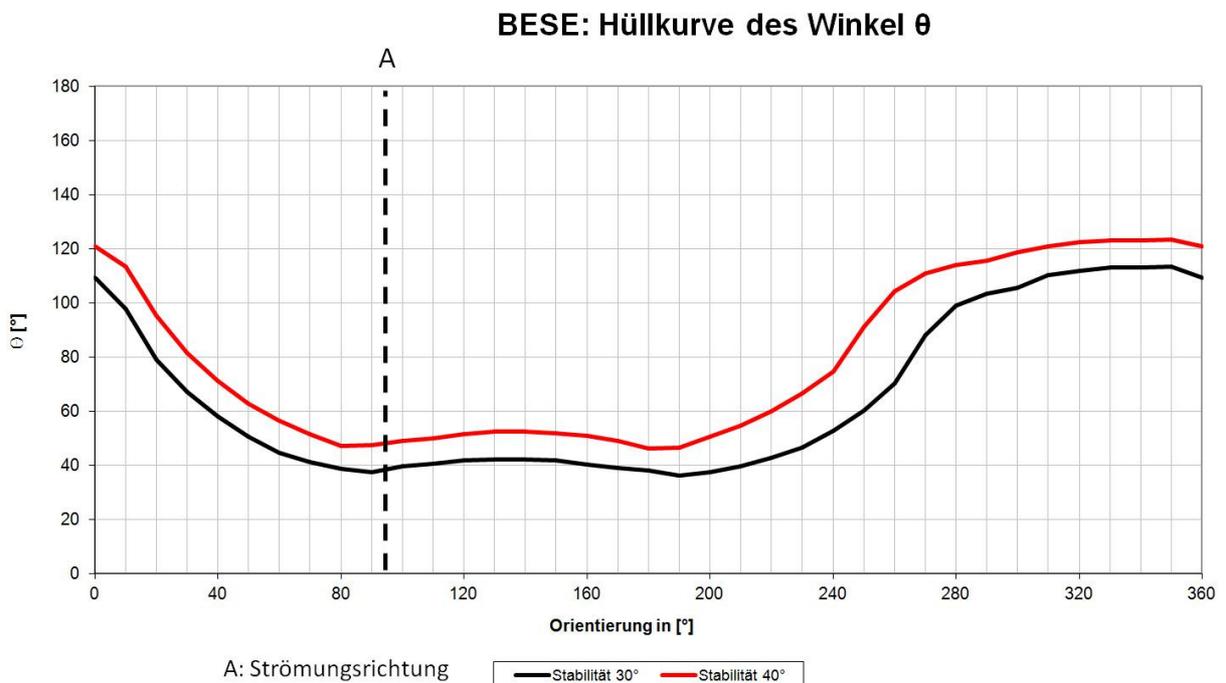


Abb. 6-12 Block Eradability Spectrum Envelope (BESE): Verlauf des minimalen Winkels θ , als Liniendiagramm; Die schwarze Linie stellt einen Reibungswinkel von 30° dar, die rote Linie den Reibungswinkel von 40° ; Die Strömungsrichtung ist als schwarze strichlierte Linie- A bei einer Orientierung von 95° eingezeichnet;

BESE: Hüllkurve des Winkel θ

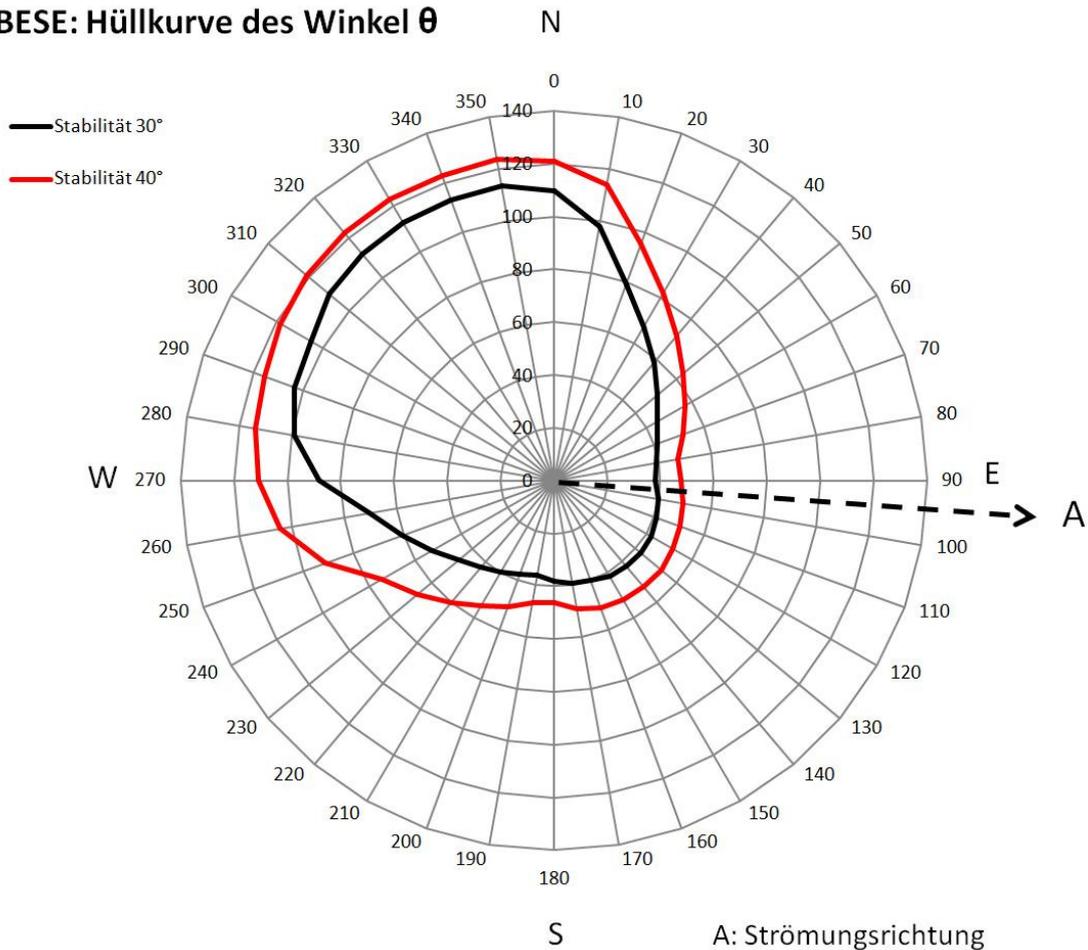


Abb. 6-13 Block Erodability Spectrum Envelope (BESE): Verlauf des minimalen Winkels θ , als Radar- Plot; schwarze Linie- Reibungswinkel von 30°; rote Linie- Reibungswinkel von 40°; Die Strömungsrichtung ist als schwarze strichlierte Linie- A bei einer Orientierung von 95° eingezeichnet;

Der minimale auftretende Winkel θ in Abb. 6-12 sowie Abb. 6-13 tritt in einem Bereich von zirka 80° bis 200° gegen Nord auf und befindet sich in einem Bereich von $\theta=40^\circ$ bis 55°. Die Strömungsrichtung von 95° ist als schwarze strichlierte Linie im Liniendiagramm als auch im Radar- Plot dargestellt.

In Abb. 6-14 sowie Abb. 6-15 ist der Verlauf der fiktiven Kraft F_{\min} per JP- Code als auch in Form einer Hüllkurve (BESE) dargestellt. JP0000 als auch JP1000 weisen ein Minimum der erforderlichen, fiktiven Kraft F_{\min} von -0,6 bis -0,85 fachen der Gewichtskraft W auf. JP0100 weist eine erforderliche fiktive Kraft F_{\min} von -1 auf, das entspricht der Gewichtskraft W .

Das Vorzeichen „-“, weist darauf hin, dass diese Kraft benötigt wird, um den Block an seine Stabilitätsgrenze zu führen.

Die Hüllkurve (BESE) der minimal benötigten fiktiven Kraft F_{\min} , Abb. 6-15, weist in einem Orientierungsbereich von 80° bis zirka 200° gegen Nord ein Minimum der benötigten fiktiven Kraft F_{\min} auf. Die Größenordnung entspricht in diesem Bereich der $-0,6$ bis $-0,8$ fachen der Gewichtskraft.

Die vorherrschende Strömungsrichtung ist in Abb. 6-14 als auch Abb. 6-15 als schwarz strichlierte Linie bei einer Orientierung von 95° gegen Nord eingezeichnet.

Der Verlauf der erforderlichen horizontalen fiktiven Kraft F_h ist in Abb. 6-16 sowie Abb. 6-17 dargestellt. Wie in Abb. 6-16 ersichtlich weist JP0000 ein Minimum bei 80° gegen Nord auf, JP1000 weist ein Minimum bei zirka 180° gegen Nord auf. JP0100 tritt in diesem Diagramm nicht auf, da dieser Block nicht durch eine horizontal wirkende Kraft entfernt werden kann. Die Hüllkurve der erforderlichen minimalen, horizontalen fiktiven Kraft in Abb. 6-17, weist im Bereich von 80° gegen Nord, bis 190° gegen Nord ein Minimum im Bereich von $-0,72$ bis $-1,3$ fachen Gewichtskraft auf.

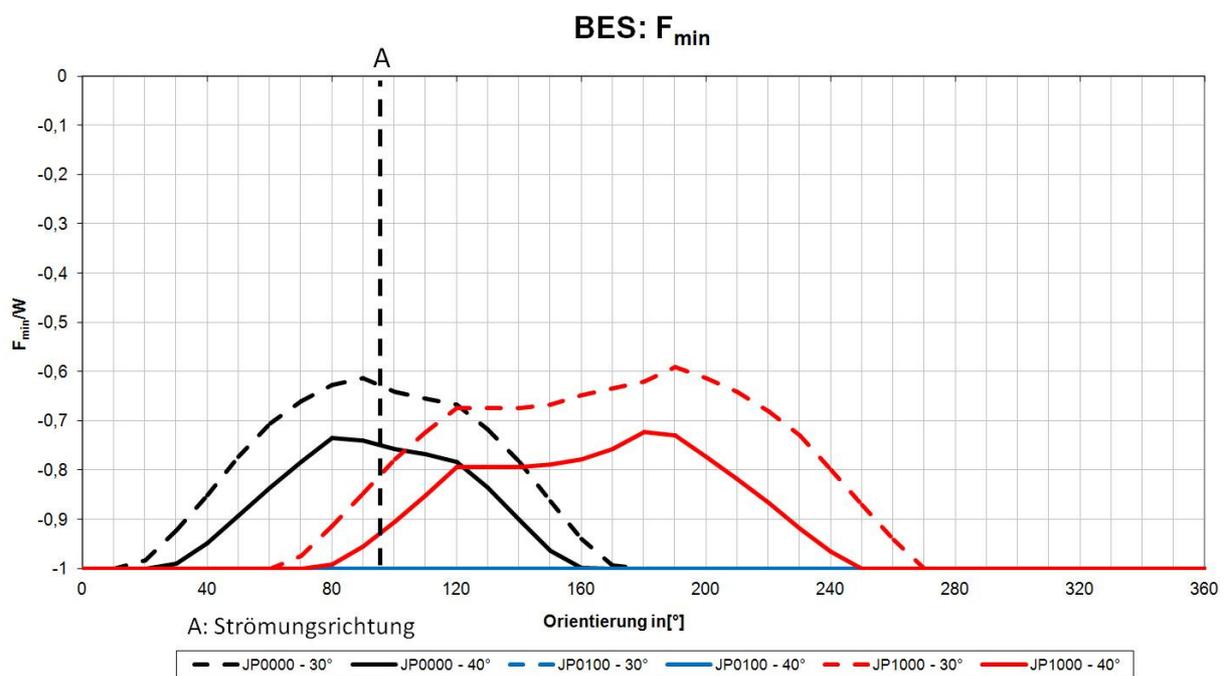


Abb. 6-14 Block Erodability Spectrum (BES): Verlauf der fiktiven Kraft F_{\min} für die JP 0000, JP0100 sowie JP1000 in einem Orientierungsbereich von 0° bis 360° ; Die schwarz strichlierte Linie stellt die Orientierung der auftretenden Strömungsrichtung dar;

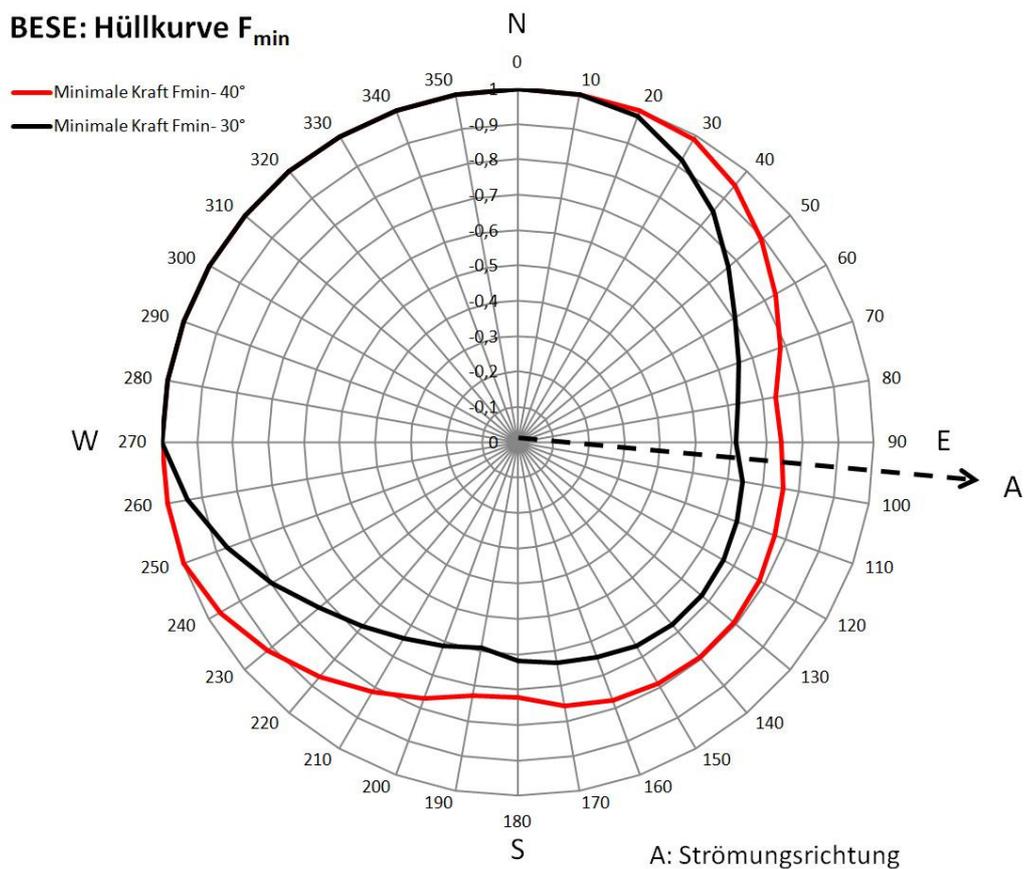
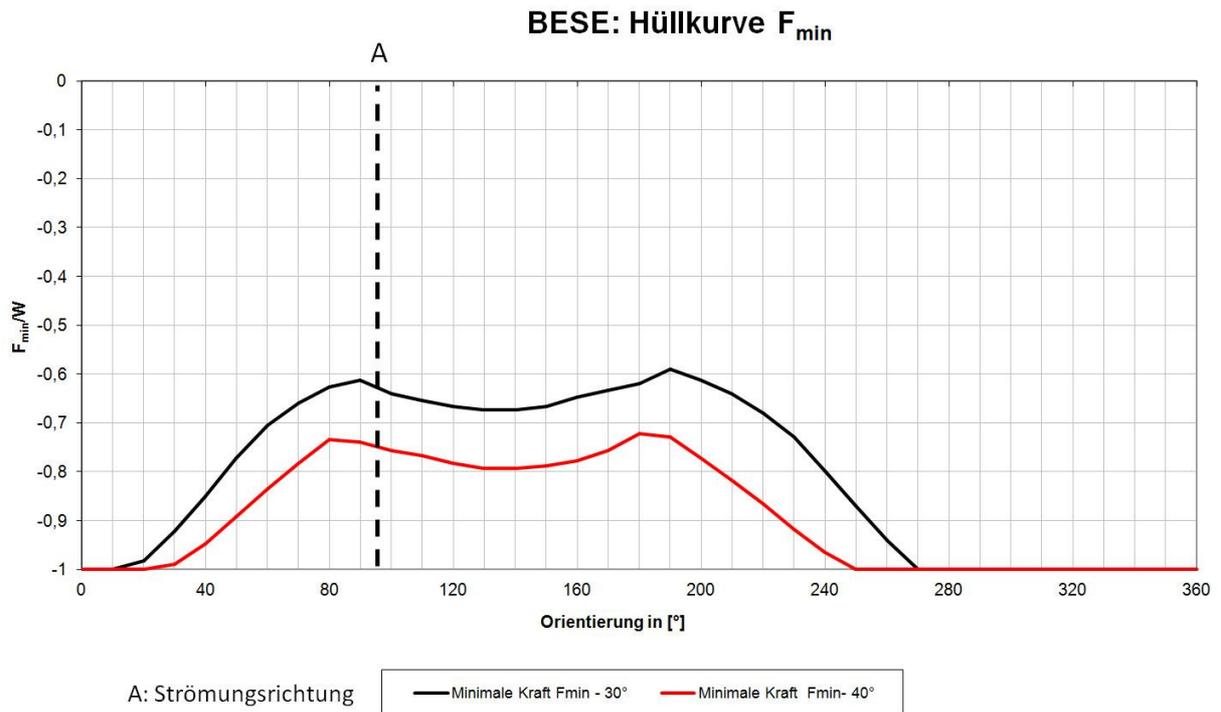


Abb. 6-15 Block Erodability Spectrum Envelope (BESE): Hüllkurve als auch Radar- Plot der fiktiven Kraft F_{min} ; Rote Linie: Verlauf der fiktiven Kraft F_{min} für einen Reibungswinkel von 40°; Schwarze Linie: Verlauf der fiktiven Kraft F_{min} für einen Reibungswinkel von 30°;

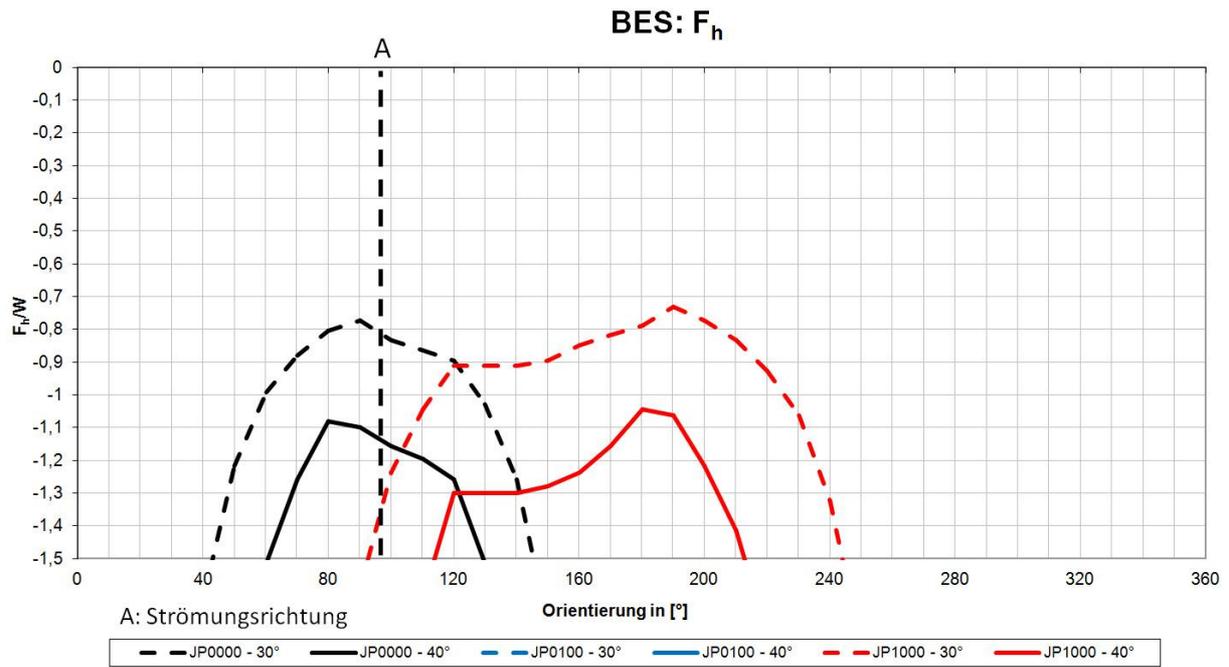
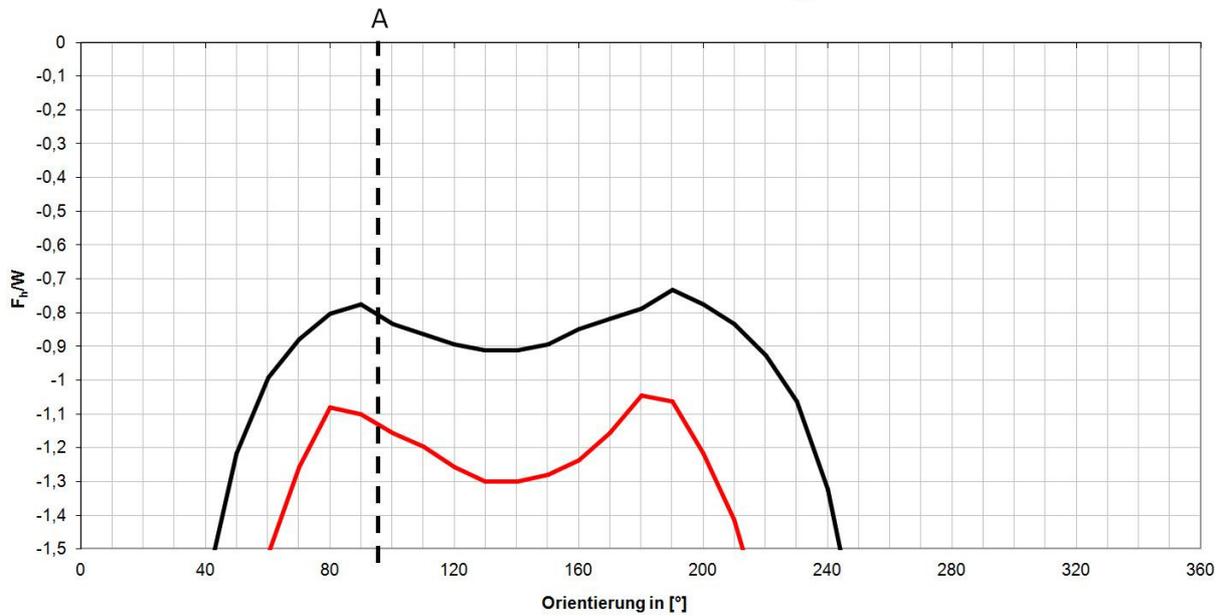


Abb. 6-16 Block Erodability Spectrum (BES): Verlauf der horizontalen fiktiven Kraft F_h für die untersuchten JP- Codes; Die Strömungsrichtung wird durch die schwarz strichlierte Linie dargestellt;

BESE: Hüllkurve F_h



A: Strömungsrichtung



BESE: Hüllkurve F_h

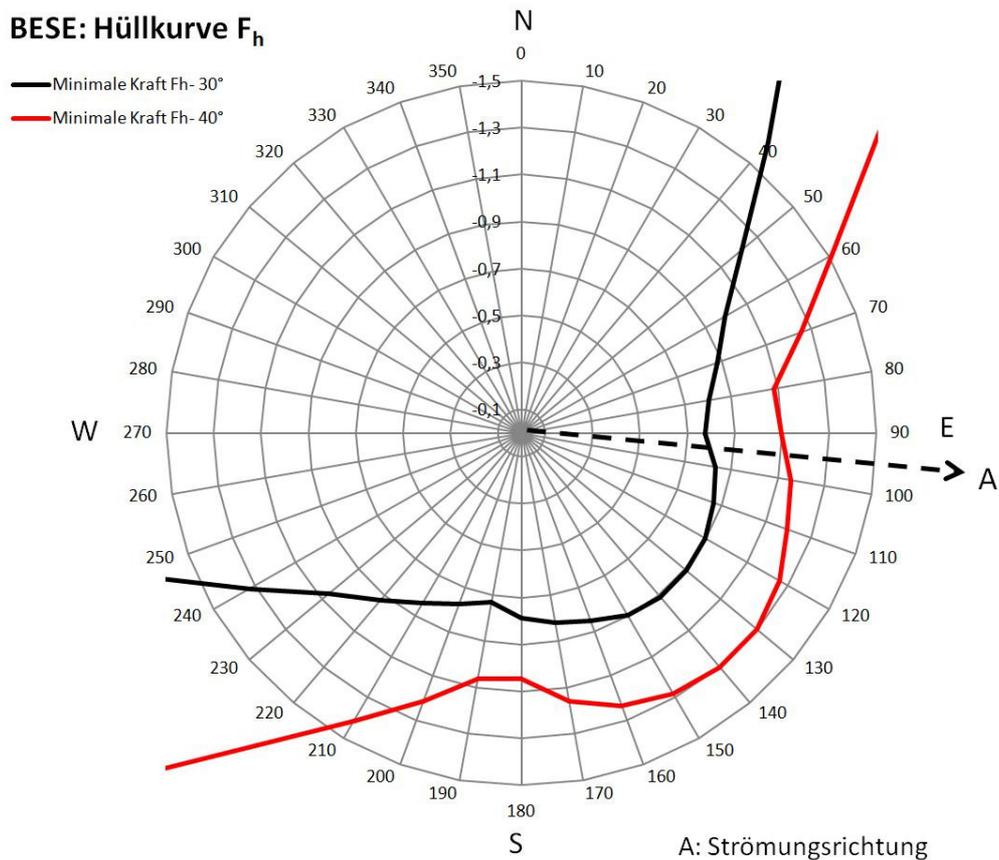


Abb. 6-17 Block Erodability Spectrum Envelope (BESE): Hüllkurve, dargestellt als Liniendiagramm als auch als Radar-Plot der horizontalen fiktiven Kraft F_h ; Die Strömungsrichtung wird durch die schwarz strichlierte Linie dargestellt;

7 Diskussion und Schlussfolgerung

Das Kraftwerk Ottenstein befindet sich im Südböhmischen Granitmassiv im Bereich des Rastenberger Plutons. Er ist der älteste einer Reihe von Intrusionsmassen, welche im Verlauf der variszischen Orogenese intrudierten. Sein Intrusionsalter wird mit 338 ± 2 Ma (Zak, Krystof, Finger, & Faryad, 2011) angegeben. Bei den auftretenden Lithologien im Bereich der Sperrenstelle Ottenstein handelt es sich um den Rastenberger Granodiorit, sowie einen an der nördlichen Sperrenseite NW-SE verlaufenden Aplitgang

Der Rastenberger Granodiorit weist im Bereich der Sperrenstelle eine mittel-, bis grobkörnige Matrix auf, in der sich cm-große Kalialronfeldspäte befinden. Diese Matrix besteht nach Oberhauser (1980) aus Oligoklas-Andesin, Quarz, Biotit sowie vereinzelt Pyroxenen. Im Bereich der nördlichen-, als auch südlichen Sperrenseite treten im Rastenberger Granodiorit cm-große Dioritschollen auf. Im Bereich des Tosbeckens konnten hingegen keine Dioritschollen beobachtet werden.

Der Verwitterungszustand des Rastenberger Granodiorits kann als unverwittert bis leicht verwittert beschrieben werden. Die Gesteinsfestigkeit wurde durch Schläge eines Geologenhammers auf über 250 Mpa, in leicht verwitterten Bereichen mit 100 bis 250 Mpa geschätzt.

Der an der nördlichen Sperrenseite verlaufende Aplitgang weist eine Mächtigkeit von einigen Metern auf und konnte über mehrere hundert Meter an der nördlichen Sperrenseite verfolgt werden. Im Bereich des Tosbeckens konnten keine Aplitgänge im Verlauf der Tosbeckenstudie beobachtet werden. Auch bestehende geologische Unterlagen der Sperre Ottenstein lieferten keine Hinweise auf weitere Aplitgänge im Bereich des Tosbeckens.

Anhand von 682 Trennflächenmessungen in einem 1 km fassenden Radius im Umfeld der Sperre Ottenstein konnten drei Bereiche aufgrund ihrer Trennflächenorientierung unterschieden werden. Dabei handelt es sich um die nördliche-, südliche Sperrenseite sowie das Tosbecken. Da sich die südliche Sperrenseite als auch das Tosbecken nur geringfügig in der Orientierung ihrer Trennflächensets unterscheiden, wurden sie zu einem Bereich zusammengefasst. Im

Bereich der südlichen Sperrenseite als auch dem Tosbecken konnten demnach vier Sets (Set1: 063/88; Set2: 342/80; Set3: 147/15; Set4: 286/84) unterschieden werden. Set 1 (063/88) sowie Set 2 (342/80) ähneln in diesem Fall der Hauptorientierung auftretender Störungssysteme der Südböhmischen Masse, welche eine NW-SE sowie NE-SW Richtung aufweisen.

Größere Störungen konnten im untersuchten Gebiet nicht direkt beobachtet werden. Aus den bestehenden Unterlagen der Sperre Ottenstein geht jedoch hervor, dass ein etwa 4 m breiter Zerrüttungsstreifen im rechten Tosbeckenbereich auftritt. Nach Häusler (1961) besteht der Zerrüttungsstreifen aus lehmigem, sandigem Material sowie Gesteinsbruchstücken.

Anhand der Gebirgscharakterisierung kann das auftretende Gebirge, im Bereich der Sperre Ottenstein, als blockig beschrieben werden.

Der Trennflächenabstand aller erfassten Sets befindet sich in einem Bereich von minimal 0.1 m bis maximal 2.21 m. Der *Termination Index* beträgt 13.9%, das Gebirge weist demnach eine hohe Blockigkeit auf. Die auftretende Blockgröße wurde anhand des *Volumetric joint count* berechnet. Nach Brown (1981) kann man demnach mit Blockvolumina von 0.2 bis 8 m³ rechnen. Die Rauigkeit der erfassten Trennflächensets entspricht überwiegend einem JRC von 8 bis 10. Der Reibungsbeiwert konnte aus den bestehenden Unterlagen der Sperre Ottenstein ermittelt werden, man verwendet hierbei einen Reibungsbeiwert im Bereich von 33° bis 38,6°. Die Welligkeit der beobachteten Trennflächen kann als gering beschrieben werden. Die Öffnungsweite bestehender Klüfte tritt überwiegend in einem Bereich von 2,5 bis 10mm auf, es handelt sich demnach um mittelweit offene Klüfte. Trennflächenfüllungen konnten im Bereich der Sperre Ottenstein vereinzelt beobachtet werden, es handelte sich überwiegend um tonige Beläge. Im Allgemeinen zeigten beobachtete Trennflächen keine Wasserführung, vereinzelt konnte man jedoch Feuchtigkeit an der Trennflächenoberfläche sowie bräunliche Oxidationspuren feststellen.

Die Schäden, welche seit der Inbetriebnahme der Sperre Ottenstein im Bereich des Tosbeckens auftraten, wurden aus den Archiven der EVN aufgearbeitet. Dabei zeigte sich, dass es bei drei Ereignissen zu Beschädigungen im Bereich der

Tosbeckensohle kam. Dabei handelt es sich um die Hochwassereignisse vom 07.08.2002 bzw. vom 12.08.1959 sowie um einen Stauklappenversuch am 03.09.1957.

Die größten Schäden verursachten in diesem Fall der 40 minütige, einseitige Stauklappenversuch der rechten Stauklappe von 1957. Die Tosbeckensohle befand sich zu diesem Zeitpunkt, außer einem mit Beton abgedeckten Zerrüttungsstreifen, in naturbelassenen Zustand. Im Laufe dieses Versuches wurden zirka 500m³ Material aus der Tosbeckensohle ausgespült und verlagert. Alle bisherigen Erklärungen gehen davon aus, dass diese Auskolkung nicht alleine durch die eher geringe Belastung (1.37 bar; Druckänderung von $\pm 0,09$ bar bei einer Frequenz von 2,5 bis 8 Hz) von der Tosbeckensohle zu erklären ist, sondern vielmehr durch den geologischen Aufbau des Tosbeckens.

Ein weiterer negativer Faktor, der angeführt wird, ist der einseitige Überfall über die rechte Stauklappe. Durch ein einseitiges Senken der Stauklappe ist der entstehende Wasserpolster geringer und dadurch die Belastung der Tosbeckensohle in diesem Bereich höher als bei einer beidseitigen Senkung der Stauklappen.

Da der geologische Aufbau des Tosbeckens ein ausschlaggebender Faktor war, um die Auskolkung von 1957 zu erklären, wurde anhand der Blocktheorie sowie einer Tosbeckenstudie versucht die Ereignisse von 1957 neu zu betrachten.

Die Tosbeckenstudie hatte das Ziel bestehende Blockhohlförmigkeiten zu erfassen, um daraus die Form, das Volumen sowie das Gewicht auftretender Blöcke zu ermitteln. Die Daten beruhen hierbei auf Blockhohlförmigkeiten und nicht auf den auftretenden Blöcken des Tosbeckens, da diese bereits entfernt wurden. Es handelt sich demnach nur um eine Schätzung der tatsächlich auftretenden Form, des Gewichts sowie des Volumens.

Bei den auftretenden Blockhohlförmigkeiten konnten drei geometrische Grundformen beobachtet werden. Von den beobachteten 81 Blockhohlförmigkeiten waren 50% quaderförmig, 27% keilförmig sowie 23% wiesen die Form eines Parallelepipeds auf. Die Rauigkeit der die Blockhohlförmigkeit begrenzenden Trennflächen liegt größtenteils bei JRC 8 bis 10 und stimmt mit den beobachteten Trennflächen des Sperrumfeldes überein. Jede der auftretenden Trennflächen einer Blockhohlförmigkeit wurde den entsprechenden Sets zugeordnet. Jede Blockhohlförmigkeit wird hierbei durch drei

Trennflächen begrenzt. Zu 80% dominieren in diesem Fall die Blockhohlformen aus den Sets 1 (063/88), Set 2 (342/80) sowie Set 3 (147/15). Setkombinationen, die das Set 4 (286/84) beinhalten, konnten bei 20% der Blockhohlformen beobachtet werden.

Das Volumen der Blockhohlformen liegt in einem Bereich von 0,006 m³ bis 1,2 m³, der Mittelwert beträgt 0,22 m³. Das aus diesem Volumen berechnete mögliche Blockgewicht liegt in einem Bereich von 0,16 KN bis 33,11 KN, der Mittelwert bei 6,05 KN.

Die Daten der Tosbeckenstudie werden im Folgenden mit den Daten der Blocktheorie verglichen, um die mögliche Form, Volumen und Gewicht entfernbarer Blöcke zu ermitteln.

Die Grundlage der Blocktheorie bilden die vier auftretenden Trennflächensets, sowie die horizontale Tosbeckenoberfläche. Die daraus resultierenden 16 JP- Codes wurden den einzelnen Blocktypen zugeordnet. Unter Einwirkung der Schwerkraft treten demnach 3 JP- Codes auf, bei denen es sich um entfernbarere Blöcke handelt. Bei diesen Blöcken handelt es sich um JP1000, JP0000, sowie JP0100, die dem Block Typ 3 (save removable block) zugeordnet werden. Das Volumen dieser Blöcke wurde anhand der auftretenden Trennflächenset- Abstände, sowie der Distanz (H_0) zwischen der Tosbeckenoberfläche und der Grundfläche der Blockhohlform modelliert. JP1000 liegt in einem Volumensbereich von 2,9 m³ bis 243 m³ (79,65KN bis 6674KN), JP0100 in einem Bereich von 0,2 m³ bis 60 m³ (5,49KN bis 1650KN) sowie JP0000 in einem Bereich von 1,3 m³ bis 106 m³ (35,70 KN bis 2911 KN).

Vergleicht man nun den Volumens-, sowie Gewichtsbereich der auftretenden Blockhohlformen mit dem modellierten Volumens-, sowie Gewichtsbereich der entfernbareren JP- Codes, so erkennt man, dass JP0100 sowie JP0000 sich im Größenbereich der beobachteten Blockhohlformen befinden. Das kleinstmögliche Blockvolumen von JP1000 befindet sich hingegen zirka 2 m³ über dem größten beobachteten Blockhohlformvolumen.

Es ist demnach nicht mit Sicherheit zu sagen, ob JP1000 durch die vorherrschenden Kräfte, durch sein Volumen bzw. Gewicht, entfernt werden kann.

Vergleicht man die beobachteten Blockhohlformen der Tosbeckenstudie mit den entfernbareren Blockformen (JP0100; JP0000; JP1000), so sind jene Blöcke bevorzugt

entfernbar, welche keine parallelen Seitenflächen besitzen. Blöcke mit parallelen Seitenflächen können sich nur in eine Richtung, parallel zu diesen Seitenflächen bewegen. Wird jedoch ein keilförmiger Block entfernt, so wird zusätzlicher Raum geschaffen, in den sich Blöcke mit parallelen Oberflächen bewegen können Abb. 7-1.

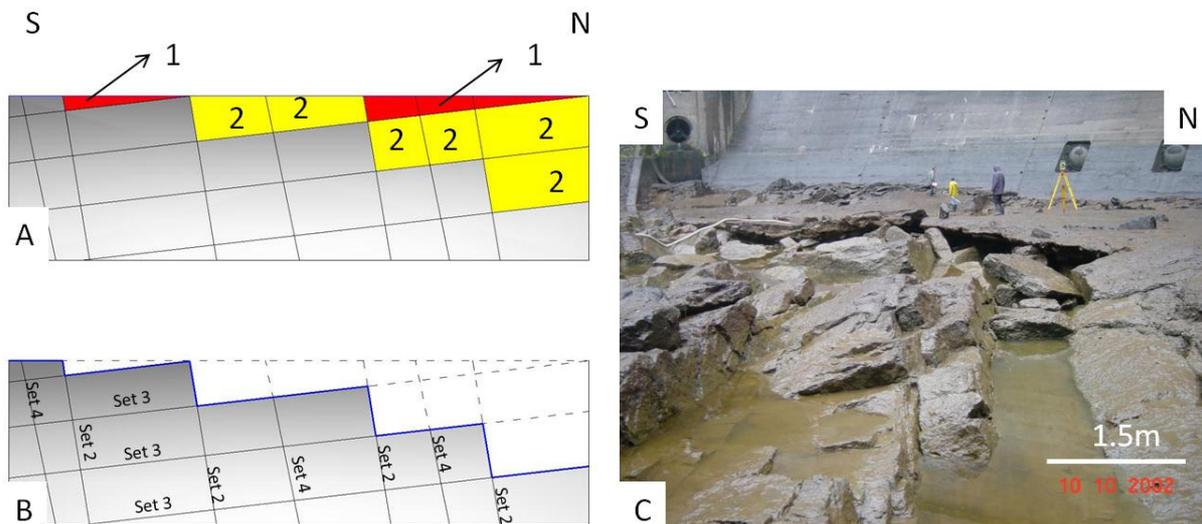


Abb. 7-1 Bild A: Darstellung von Blöcken ohne parallele Seitenflächen (rote Blöcke), sowie Blöcke mit parallelen Seitenflächen (gelbe Blöcke); Dargestellt sind die Trennflächensets, Set 2, Set 3 sowie Set 4, Set1 verläuft ca. parallel zum Profil; **Bild B:** Nach Entfernung der roten Blöcke wird Raum geschaffen, in den sich Blöcke mit parallelen Seitenflächen (gelbe Blöcke) bewegen können; Verbleibende Blockhohlformen sind in diesem Fall überwiegend quaderförmig; **Bild C:** Auftretende Blockhohlformen des Tosbeckens; Quelle: Dr. Sven Jacobs

Blöcke mit parallelen Oberflächen, die sich in den Blockhohlformen befanden, sind demnach schwerer zu entfernen als Blöcke ohne die parallelen Oberflächen der keilförmigen Blockhohlformen. Wird jedoch ein keilförmiger Block entfernt, so können weitere Blöcke mit parallelen Oberflächen entfernt werden. Wie in Abb. 7-1: Bild B dargestellt weisen die verbleibenden Blockhohlformen, nach der Entfernung keilförmiger Blöcke, überwiegend parallele Oberflächen auf.

Vergleicht man das mit den beobachteten Blockhohlformen, so stellt man eine Übereinstimmung zwischen Blocktheorie und Beobachtung fest.

Bei 73% der beobachteten Blockhohlformen handelt es sich um Körper mit parallelen Oberflächen (50% quaderförmig; 23% besitzen die Form eines Parallelepipeds), 27% weisen hingegen eine Keilform auf.

Blöcke mit parallelen Oberflächen bilden sich, wenn sowohl obere als auch untere *half space* einer Trennfläche in einer Blockform auftritt. Betrachtet man JP1000 und

verwendet man von Set 2 sowohl untere- als auch obere *half space*, so entsteht der Körper JP1300 mit zwei parallelen Flächen Abb. 7-2.

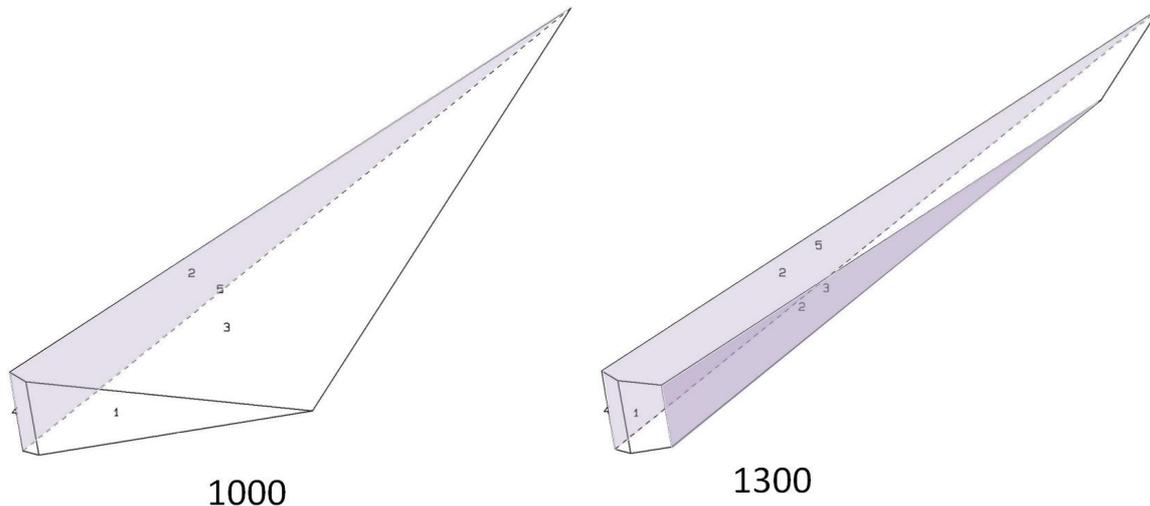


Abb. 7-2 Entstehung eines Körpers mit parallelen Seitenflächen; Von Set 2 (violette Fläche) wird hierzu sowohl die untere als auch obere *half space* verwendet, symbolisiert durch eine 3 in JP1300.

Um die Wirkung von äußeren Kräften infolge der Wasserbewegung im Tosbecken auf die entfernbareren Blöcke JP1000, JP0100 sowie JP0000 zu beschreiben, wurde eine „block erodability spectrum analysis“ (Kieffer, 2011) durchgeführt.

Als Grundlage für diese Untersuchung diente die Gewichtskraft \mathbf{W} sowie der Reibungsbeiwert des auftretenden Rastenberger Granodiorit, der sich in einem Bereich von 30° bis 40° befindet. Der aus den *whole sphere projection* gemessene Winkel θ repräsentiert den Winkel zwischen der Gewichtskraft eines Blockes sowie seiner Stabilitätsgrenze, die durch den verwendeten Reibungswinkel definiert wird (30° bis 40°). Durch den Winkel θ konnten so die fiktiven Kräfte \mathbf{F}_{\min} sowie \mathbf{F}_h berechnet werden, die erforderlich sind, um den betrachteten Block durch eine resultierende Kraft \mathbf{R} an die Stabilitätsgrenze zu führen. \mathbf{F}_{\min} , \mathbf{F}_h sowie Winkel θ beziehen sich dabei auf den Gleichgewichtszustand der ermittelten entfernbareren Blöcke JP1000, JP0100 sowie JP0000.

Der Verlauf des Winkel θ , sowie die fiktiven Kräfte \mathbf{F}_{\min} bzw. \mathbf{F}_h wurden über eine Orientierung von 0° bis 360° betrachtet und mit der auftretenden Strömungsrichtung des Tosbeckens verglichen. Die Strömungsrichtung konnte jedoch nur grob bestimmt

werden. Direkt unter dem Strahl wurde sie mit einem Winkel von 95° von Nord, sowie 275° von Nord angenommen.

Der minimal auftretende Winkel θ des block erodability spectrum befindet sich in einem Bereich von zirka 80° bis 200° von Nord und beträgt 40° bis 55°. Die minimale fiktive Kraft F_{\min} beträgt in diesen Bereich die -0,6 bis -0.85 fachen Gewichtskraft des beobachteten Blockes. Die horizontale fiktive Kraft F_h beträgt in einem Winkel von 80° bis 200° gegen Nord die -0.72 bis -1.3 fache Gewichtskraft W . Das negative Vorzeichen gibt in diesem Fall an, dass diese Kraft aufgewendet werden muß, um die resultierende Kraft R an die Stabilitätsgrenze zu führen.

Vergleicht man den Verlauf des Winkels θ mit der auftretenden Strömungsrichtung im Tosbecken, so befindet sich die Strömungsrichtung von 95° im Bereich des minimalen Winkels θ .

Betrachtet man den Verlauf des Winkels θ für jeden Block getrennt, so können die Blockformen JP1000 sowie JP0000 unter einer Strömungsrichtung von 95° gegen Nord entfernt werden. Die Blockform JP0100 weist von 0° bis 360° gegen Nord einen Winkel θ von über 90° auf. Sie kann demnach nur aus ihrer Blockhohlform durch eine auftretende Kraft angehoben werden.

Betrachtet man alle ermittelten Daten gemeinsam, so wurde die Auskolkung von 1957 durch mehrere geologische Faktoren begünstigt. Neben dem auftretenden blockigen Gebirge mit teilweise offenen Klüften war auch die auftretende Blockgröße im Tosbecken in einem Bereich 0,006 m³ bis 1,2 m³ nachteilig.

Die Orientierung der auftretenden Trennflächensets und die damit gebildeten entfernbareren Blöcke weisen zusätzlich in Strömungsrichtung einen geringeren Widerstand gegen die auftretende Strömung (95° von Nord) auf. Der Einfluss des Zerrüttungsstreifens im rechten Bereich des Tosbeckens konnte aufgrund der geringen Datenlage nicht ermittelt werden. Er dürfte jedoch ebenfalls die Auskolkung begünstigt haben.

8 Literaturverzeichnis

Annandale, W. G. (2002). Fallstudien zur Kolkbildung. *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* .

Annandale, W. G. (2006). *Scour Technology*. The McGraw-Hill Companies.

Bahlburg, H., & Breitzkreuz, C. (2008). *Grundlagen der Geologie*. Spektrum Verlag.

BMLFUW. (2002). *Niederschrift über die Inspektion der Tosbecken an den Talsperren Ottenstein, Dobra und Thurnberg vom 10.10.2002*. Talsperrenüberwachung BMFLUW.

Bollaert, E. (2004). A comprehensive model to evaluate scour formation in plunge pools. *Hydropower & Dams* .

Brown, E. (1981). *Rock Characterisation - Testing and Monitoring*. Pergamnon Press.

Eisbacher, G. (1996). *Einführung in die Tektonik*. Stuttgart: 1996.

EVN. (2011). *evn-naturkraft*. Von <http://www.evn-naturkraft.at> abgerufen

Exner, C. (1968). Zur Rastenberger Granittektonik im Bereich der Kampkraftwerke . *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft* , S. 6-39.

Fuchs, G. (06 1976). Zur Entwicklung der Böhmisches Masse. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* , S. 45-61.

Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons.

Goodman, R., & Shi, G. H. (1985). *Block Theory and its Application to Rock Engeneering*. New Jersey: PRENTICE-HALL; INC.

Goodman, R., & Shi, G. H. (1989). Block theory software package. University of California- Berkeley.

Häusler, H. (1961). *Baugelogischer Schlussbericht über das Kraftwerksprojekt Ottenstein als Unterlage für die behördliche Kollaudierung*. Heinrich Häusler.

Horniger, G. (1982). *Bericht über den derzeitigen Zustand des Tosbeckens der Talsperre Ottenstein am Kamp*. Wien: Horniger Georg.

Jacobs, S. (2003). *Sperre Ottenstein Sanierung des Tosbeckens 2003*. Korneuburg: Sven Jacobs.

Kieffer, D. (2011). The Block Erodability Spectrum Analysis. *personal communication*

NEWAG. (1958). *Über zwei Stauklappen auf die Kuppelmauer- TH-PE/Ci*. Wien: NEAG.

Oberhauser, R. (1980). *Der geologische Aufbau Österreichs*. Geologische Bundesanstalt: Springer Verlag.

Price, D. G. (2009). *Engineering Geology*. Springer-Verlag.

Prinz, H., & Strauß, R. (2006). *Abriss der Ingenierugeologie*. Spektrum-Verlag.

Schenk, K. (1970). *Kampkraftwerk NEWAG*. Maria Enzersdorf: Goldmann Druck.

Schnabel, W., Krenmayr, H., Mandl, G., & Nowotny, A. (2002). *Geologie der österreichischen Bundesländer: Niederösterreich*. Geologischen Bundesanstalt.

Schöneberger, R., & Neugebauer, J. (1997). *Einführung in die Geologie Europas*. Freiburg: Rombach Verlag.

Steyrer, P. (1992). *Sperre Ottenstein- Hydrodynamische Beanspruchung des Tosbeckens*. Salzburg: Tauernplan Consulting GmbH.

Thuro, K., & Scholz, M. (2004). Deep weathering and alteration in granites - a product of coupled processes. In *Elsevier Geo-Engineering Book Series* (S. 785 - 790). Elsevier.

Witt, K. J. (2008). *Grundbau-Taschenbuch*. Ernst & Sohn.

Zak, J., Krystof, V., Finger, F., & Faryad, S. (01 2011). The geration of voluminous S-type granites in the Moldanubian unit, Bohemian Massif, by rapid isothermal exhumation of metapelitic middle crust. *Lithos*, S. 25-40.

9 Anhang

9.1 Gebirgskennwert

9.1.1 Verwitterung

W	IAEG-ISRM	V	Bezeichnung
I	fresh	1	frisch und unverwittert (Fels) Es sind keine farblichen, mikro- oder makroskopischen Veränderungen erkennbar.
II	slightly	2	angewittert Erste Verfärbungen sind durch mikroskopische Zersetzung von Mineralen erkennbar, verringerte Druckfestigkeit des Gesteins.
---	---	3	leicht verwittert Die Färbung ist deutlich rotbraun entlang von Klüften, das Gestein ist deutlich (bis zu 15%) entfestigt.
III	moderately	4	mittelstark verwittert Entlang von Klüften tritt starke Verwitterung auf, die Reibung entlang dieser Trennflächen ist deutlich herabgesetzt, weniger als 40-50% des Gesteins sind zersetzt; alle niedrigeren Verwitterungsstufen treten nebeneinander auf; ein für das Baugeschehen besonders kritischer Zustand.
IV	highly	5	stark verwittert Mehr als 40-50% des Gesteins sind zersetzt, die ursprüngliche Struktur ist aber noch gut erkennbar, die Klüfte bestimmen noch das Gesamtverhalten des Gesteins, obwohl die Reibung entlang der Klüfte stark herabgesetzt ist.
V	extremly	6	sehr stark verwittert Die Trennflächen sind nun wirkungslos, der ursprüngliche Zusammenhalt des Gesteins ist kaum noch vorhanden, aber die ursprüngliche Gesteinsstruktur ist noch in grossen Bereichen erkennbar.
VI	residual soil	7	völlig verwittert (Boden) Die ursprünglichen Strukturen und die Gesteinszusammensetzung sind restlos zerstört, es ist eine deutliche Volumenänderung feststellbar, aber der Boden ist nicht wesentlich transportiert worden.

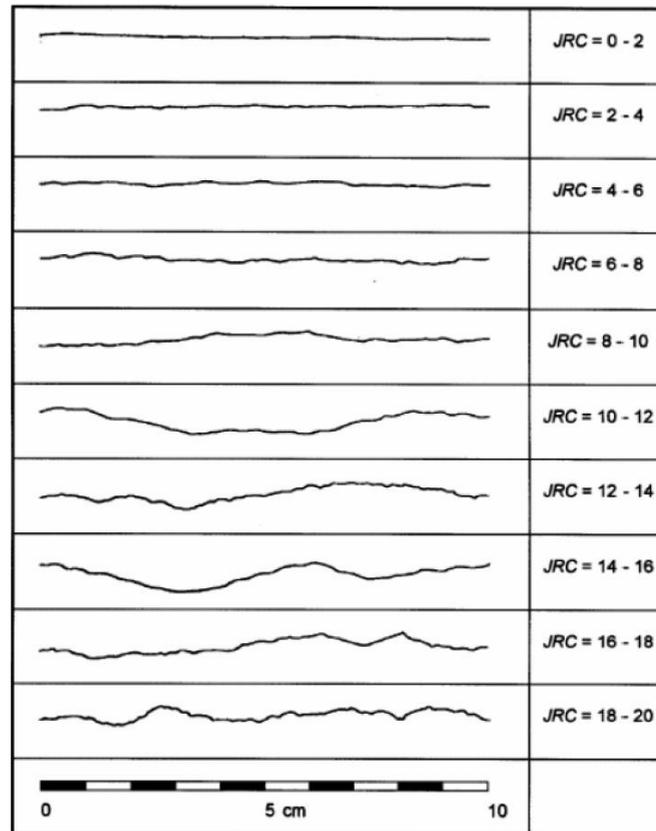
Tab. 9-1 Verwitterungsstufen nach (Thuro & Scholz, 2004) in Anlehnung an die ISRM Norm

9.1.2 Gesteinsfestigkeit

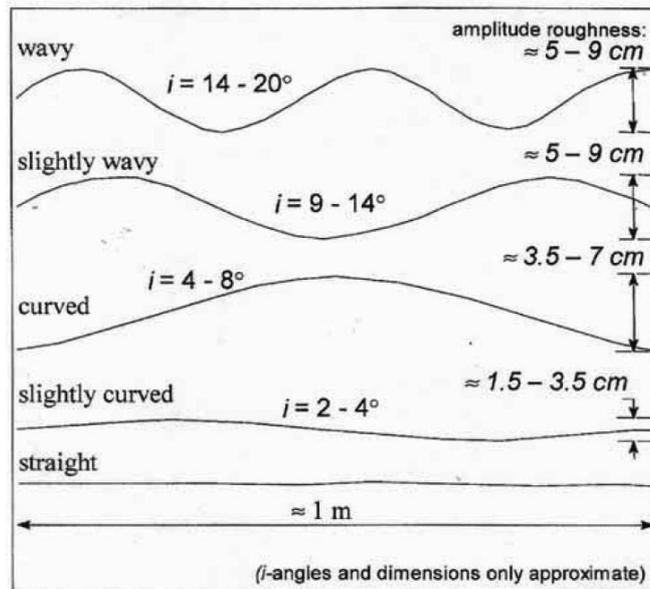
Grade	Description (Note 1)	Identification	Approximate Range of Uniaxial Compressive Strength (MPa) (Note 2)
S1	Very soft	Easily penetrated several inches by fist.	<0.025
S2	Soft	Easily penetrated several inches by thumb.	0.025 - 0.05
S3	Firm	Can be penetrated several inches by thumb with moderate effort.	0.05 - 0.10
S4	Stiff	Readily indented by thumb but penetrated only with great effort.	0.10 - 0.25
S5	Very stiff	Readily indented by thumb nail.	0.25 - 0.50
S6	Hard	Indented with difficulty by thumb nail.	>0.50
R0	Extremely weak rock	Indented by thumb nail.	0.25 - 1.0
R1	Very weak rock	Crumbles under firm blow with point of geological hammer.	1.0 - 5.0
R2	Weak rock	Can be peeled by a pocket knife.	5.0 - 25
R3	Medium strong rock	Can be peeled by a pocket knife with difficulty, shallow indentations made by firm blow with point of geological hammer.	25 - 50
R4	Strong rock	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single firm blow of geological hammer.	50 - 100
R5	Very strong rock	Specimen requires more than one blow of geological hammer to fracture it.	100 - 250
R6	Extremely strong rock	Specimen requires many blows of geological hammer to fracture it. Specimen can only be chipped with geological hammer.	>250

Tab. 9-2 Gesteinsfestigkeit ISRM Norm (Brown, 1981)

9.1.3 Trennflächenrauigkeit und Welligkeit



Tab. 9-3 Vergleichsprofile für die Ermittlung des JRC (joint roughness coefficient) nach Barton (Brown, 1981).



Tab. 9-4 Welligkeit einer Trennflächenoberfläche nach (Price, 2009)

9.2 Lidar Ablauf

9.2.1 Planung und Vorbereitung

Die Planungsphase hat das Ziel, Anzahl und Ort der Scanpositionen festzulegen. Es ist hierbei sinnvoll, mit so wenig Scanpositionen wie möglich zu arbeiten, die jedoch alle geforderten Ziele erfüllen (Datenmenge bzw. Prozessorleistung sind hierbei die begrenzenden Faktoren). Die Planung soll auf die Fragestellung und das zu scannende Objekt (Reflexionsvermögen, Farbe, etc.) ausgerichtet sein.

Bei der Auswahl der Scanpositionen ist darauf zu achten, das Objekt möglichst im rechten Winkel zu seiner Oberfläche zu scannen; schleifende Scanaufnahmen sollten vermieden werden.

Um die gewonnenen Punktwolken der Scanpositionen in einem Koordinatensystem zu zusammenfügen zu können, ist es in der Planungs- und Vorbereitungsphase erforderlich, Reflektoren im Scangebiet anzubringen. Es ist dabei wichtig, auf die räumliche Verteilung der Reflektoren und auch die Entfernung der Scanposition zum Reflektor zu achten. In schwer zugänglichen Bereichen kann es effizienter sein mithilfe von Objekten, zb. Mauern, Fensterrahmen, PKW's etc, und dem MSA (**M**ulti **S**tation **A**djustment) zu arbeiten.

Um möglichst gute Farbdaten für die Punktwolke zu erhalten, ist es wichtig, die vorhandene Topographie und den Sonnenlauf ebenso wie das Reflexionsvermögen des Objekts in die Planung mit einzubeziehen.

9.2.2 Datenaufnahme

1. Zu Beginn der Datenaufnahme muss das Messinstrument an die herrschenden Luftdruck- und Temperatur Bedingungen geeicht werden.
2. Die Datenaufnahme startet mit einem *Overview Scan* in geringer Auflösung, um den Scanbereich zu definieren.
3. Ist der Scanbereich definiert, passt man die Scanauflösung an die Entfernung des Objektes als auch die Fragestellung an und wiederholt den Scanvorgang.
4. Auswählen der gescannten Reflektoren und Durchführen des *Tiepointscans*.
5. Aufnahme der Bildinformation

Während der Datenaufnahme ist es von entscheidender Bedeutung, die Qualität der Daten nach jedem Scanvorgang zu überprüfen und wenn notwendig zusätzliche Scanpositionen einzufügen oder diese zu versetzen. Es handelt sich demnach um einen iterativen Vorgang.

9.2.3 Datenregistrierung

Der erste Schritt der Datenbearbeitung ist die Registrierung der Daten, wodurch die verschiedenen Scanpositionen in einem gemeinsamen Koordinatensystem zusammengefasst werden. Die Registrierung kann entweder über gescannte Reflektoren durchgeführt werden oder über die sogenannte MSA (**M**ulti **S**tation **A**djustment). In dieser Arbeit wurden beide Methoden zur Datenausarbeitung verwendet. Um georeferenzierte Daten zu erhalten, wurde das sogenannte *Backsighting*-Verfahren angewandt. Bei diesem Verfahren ist die geographische Position eines Punktes bekannt (DGPS Messung (**D**ifferential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem)), die Scanpositionen werden auf diesen Punkt registriert. Das Ergebnis des Registrierungsprozesses ist eine georeferenzierte Punktwolke, die als Grundlage für die Datenausarbeitung dient.

9.3 Kolkbildung

TABLE 4.3 Mass Strength Number for Rock (M_s)

Hardness	Identification in profile	Unconfined compressive strength (MPa)	Mass strength number (M_s)
Very soft rock	Material crumbles under firm (moderate) blows with sharp end of geological pick and can be peeled off with a knife; is too hard to cut tri-axial sample by hand.	Less than 1.7	0.87
		1.7–3.3	1.86
Soft rock	Can just be scraped and peeled with a knife; indentations 1 mm to 3 mm show in the specimen with firm (moderate) blows of the pick point.	3.3–6.6	3.95
		6.6–13.2	8.39
Hard rock	Cannot be scraped or peeled with a knife; hand-held specimen can be broken with hammer end of geological pick with a single firm (moderate) blow.	13.2–26.4	17.70
Very hard rock	Hand-held specimen breaks with hammer end of pick under more than one blow.	26.4–53.0	35.0
		53.00–106.0	70.0
Extremely hard rock	Specimen requires many blows with geological pick to break through intact material.	Larger than 212.0	280.0

SOURCE: From Kirsten 1982.

Tab. 9-5 Mass Strength Number for Rock (Annandale, 2006)

TABLE 4.6 Joint Set Number (J_n)

Number of joint sets	Join set number (J_n)
Intact, no, or few joints/fissures	1.00
One joint/fissure set	1.22
One joint/fissure set plus random	1.50
Two joint/fissure sets	1.83
Two joint/fissure sets plus random	2.24
Three joint/fissure sets	2.73
Three joint/fissure sets plus random	3.34
Four joint/fissure sets	4.09
Multiple joint/fissure sets	5.00

SOURCE: From Kirsten 1982.

Tab. 9-6 Joint Set Number (Annandale, 2006)

TABLE 4.8 Joint Alteration Number (J_a)

Description of gouge	Joint alteration number (J_a) for joint separation (mm)		
	1.0 [*]	1.0–5.0 [†]	5.0 [‡]
Tightly healed, hard, non-softening impermeable filling	0.75	—	—
Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	—	—
Slightly altered, non-softening, non-cohesive rock mineral or crushed rock filling	2.0	2.0	4.0
Non-softening, slightly clayey non-cohesive filling	3.0	6.0	10.0
Non-softening, strongly over-consolidated clay mineral filling, with or without crushed rock	3.0	6.0 [§]	10.0
Softening or low friction clay mineral coatings and small quantities of swelling clays	4.0	8.0	13.0
Softening moderately over-consolidated clay mineral filling, with or without crushed rock	4.0	8.00 [§]	13.0
Shattered or micro-shattered (swelling) clay gouge, with or without crushed rock	5.0	10.0 [§]	18.0

NOTE:

^{*}Joint walls effectively in contact.

[†]Joint walls come into contact after approximately 100-mm shear.

[‡]Joint walls do not come into contact at all upon shear.

[§]Also applies when crushed rock occurs in clay gouge without rock wall contact.

SOURCE: From Kirsten 1982.

Tab. 9-7 Joint Alteration Number (Annandale, 2006)

TABLE 4.9 Relative Ground Structure Number (J_s)

Dip direction of closer spaced joint set (degrees)	Dip angle of closer spaced joint set (degrees)	Ratio of joint spacing, r			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	Vertical 90	1.14	1.20	1.24	1.26
In direction of stream flow	89	0.78	0.71	0.65	0.61
	85	0.73	0.66	0.61	0.57
	80	0.67	0.60	0.55	0.52
	70	0.56	0.50	0.46	0.43
	60	0.50	0.46	0.42	0.40
	50	0.49	0.46	0.43	0.41
	40	0.53	0.49	0.46	0.45
	30	0.63	0.59	0.55	0.53
	20	0.84	0.77	0.71	0.67
	10	1.25	1.10	0.98	0.90
	5	1.39	1.23	1.09	1.01
1	1.50	1.33	1.19	1.10	
0/180	Horizontal 0	1.14	1.09	1.05	1.02
Against direction of stream flow	-1	0.78	0.85	0.90	0.94
	-5	0.73	0.79	0.84	0.88
	-10	0.67	0.72	0.78	0.81
	-20	0.56	0.62	0.66	0.69
	-30	0.50	0.55	0.58	0.60
	-40	0.49	0.52	0.55	0.57
	-50	0.53	0.56	0.59	0.61
	-60	0.63	0.68	0.71	0.73
	-70	0.84	0.91	0.97	1.01
	-80	1.26	1.41	1.53	1.61
	-85	1.39	1.55	1.69	1.77
-89	1.50	1.68	1.82	1.91	
180/0	Vertical -90	1.14	1.20	1.24	1.26

NOTES: 1. For intact material take $J_s = 1.0$.

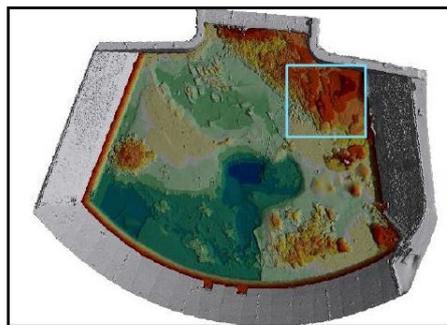
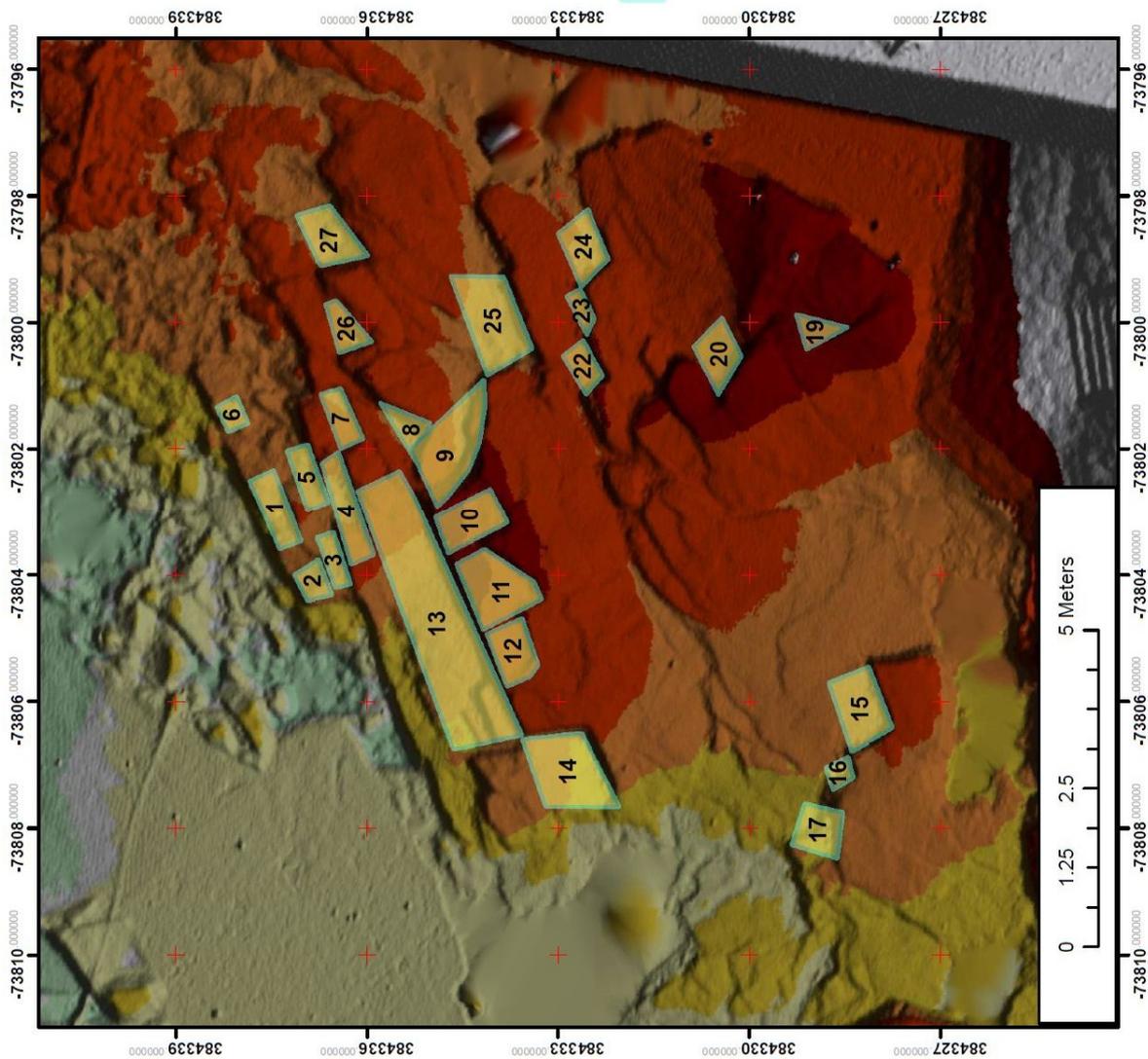
2. For values of r greater than 8 take J_s as for $r = 8$.

SOURCE: From Kirsten 1982.

Tab. 9-8 Relative Ground Structure Number (Annandale, 2006)

9.4 Lage der Blockhohlformen

Tosbecken Ottenstein: Blockhohlformen (1-27)

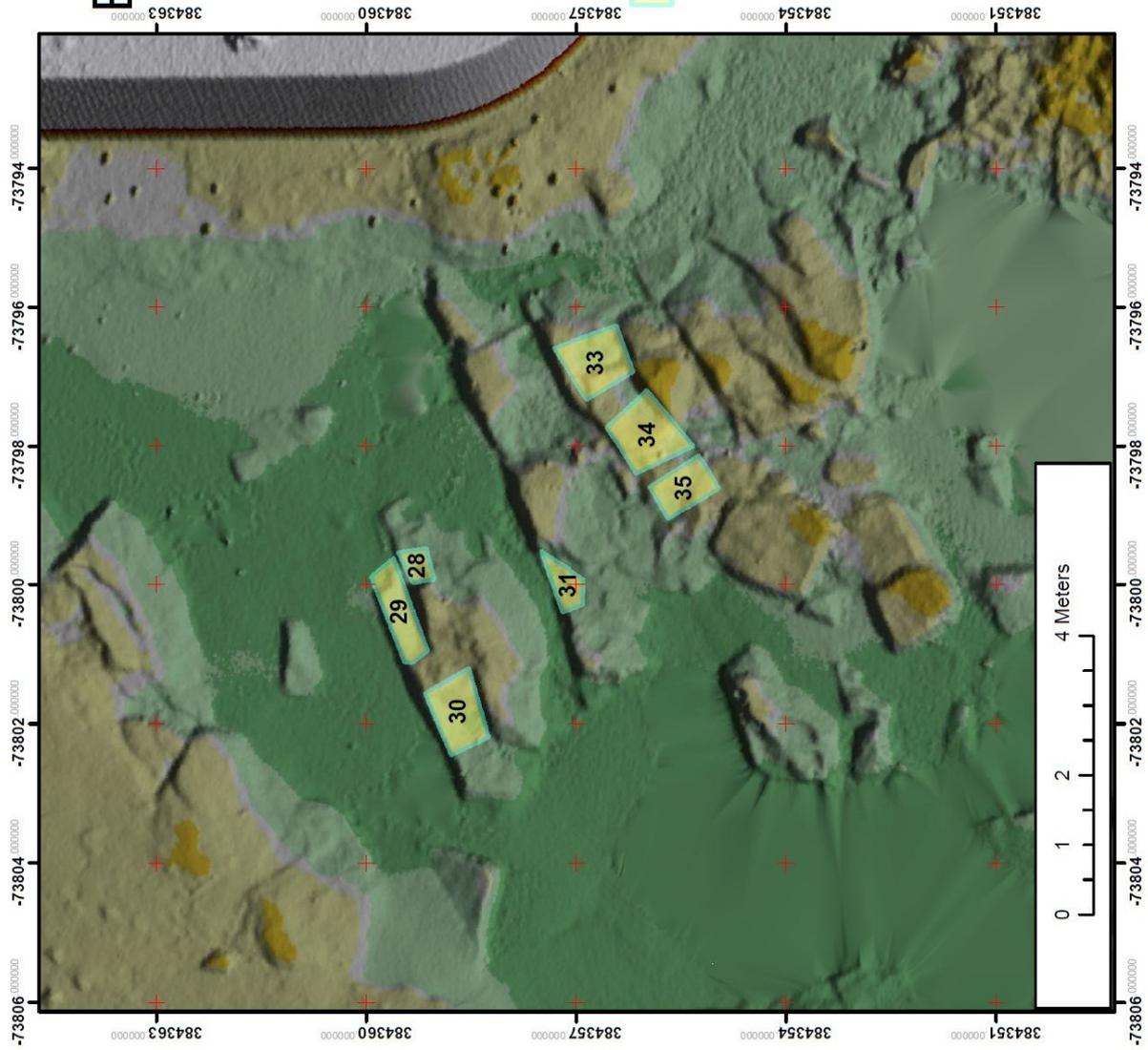
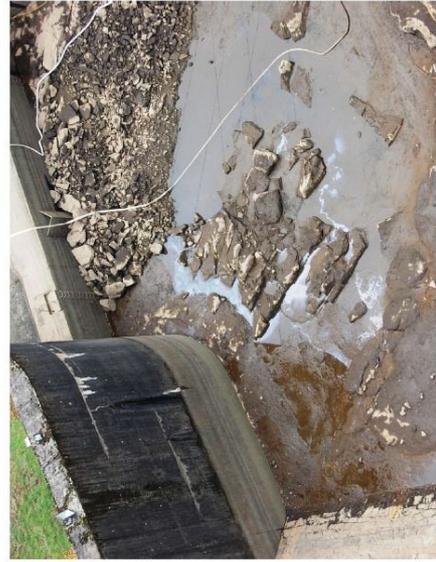
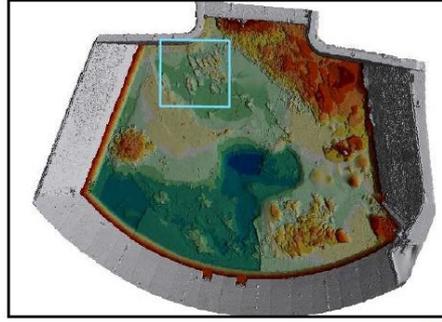


Tosbecken Ottenstein: Blockhohlformen (28-35)

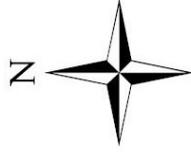
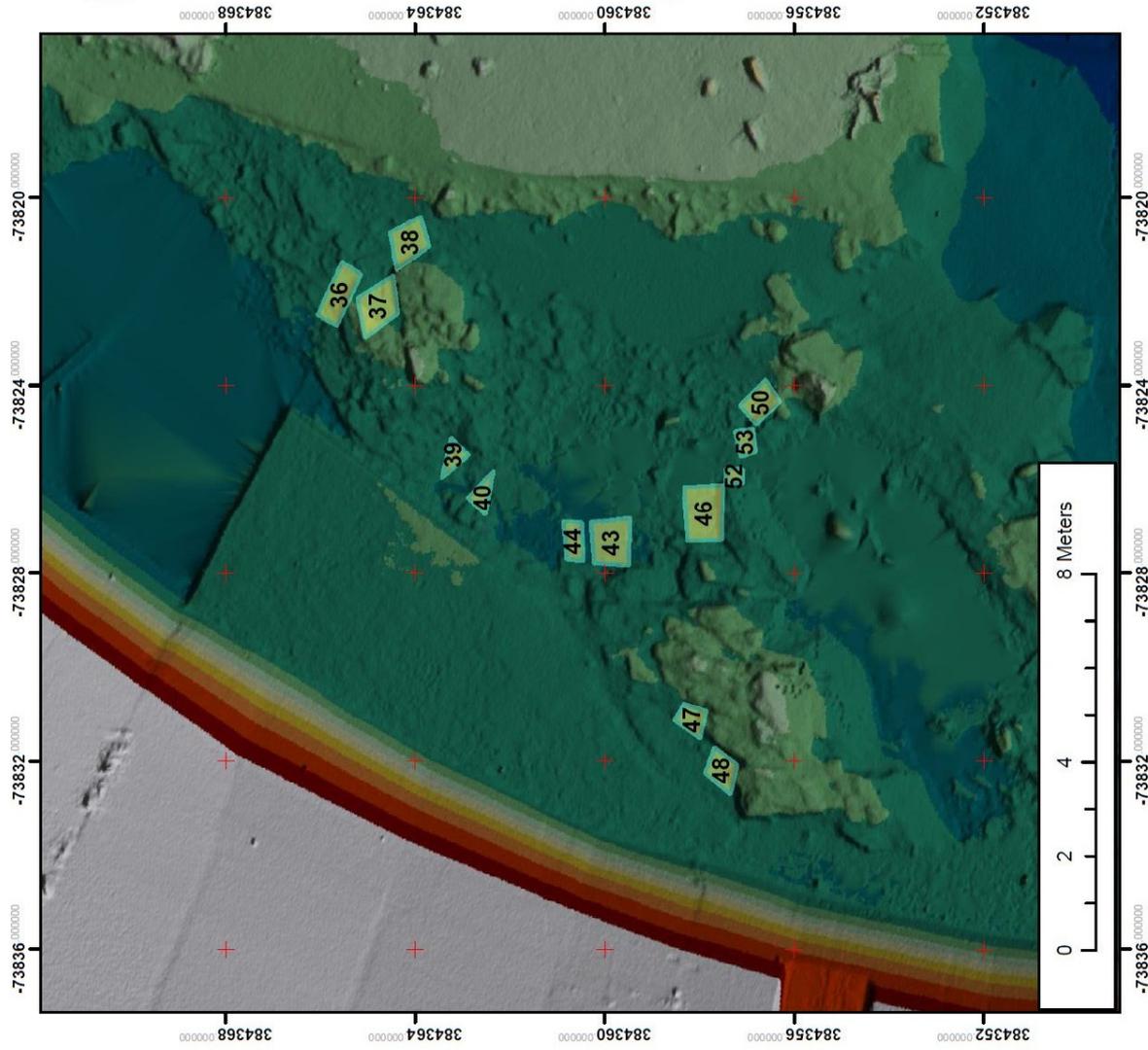


MGI_Austria_GK_M34
Projection: Transverse_Mercator
False_Easting: 750000,000000
False_Northing: -5000000,000000
Central_Meridian: 16.3333333

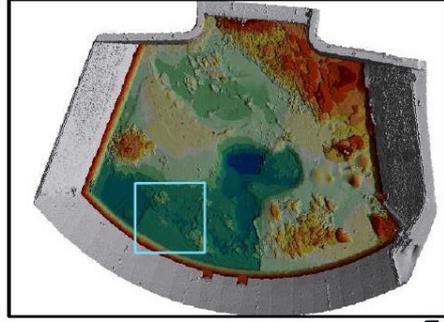
Blockhohlform



Tosbecken Ottenstein: Blockhohlformen (36-53)



MGI_Austria_GK_M34
Projection: Transverse_Mercator
False_Easting: 750000.000000
False_Northing: -5000000.000000
Central_Meridian: 10.333333



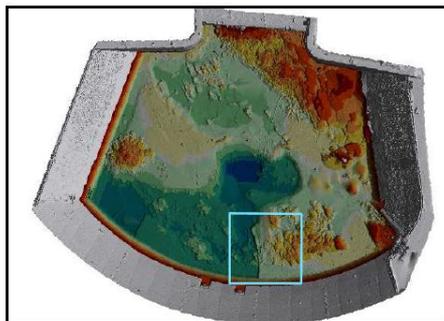
Blockhohlform



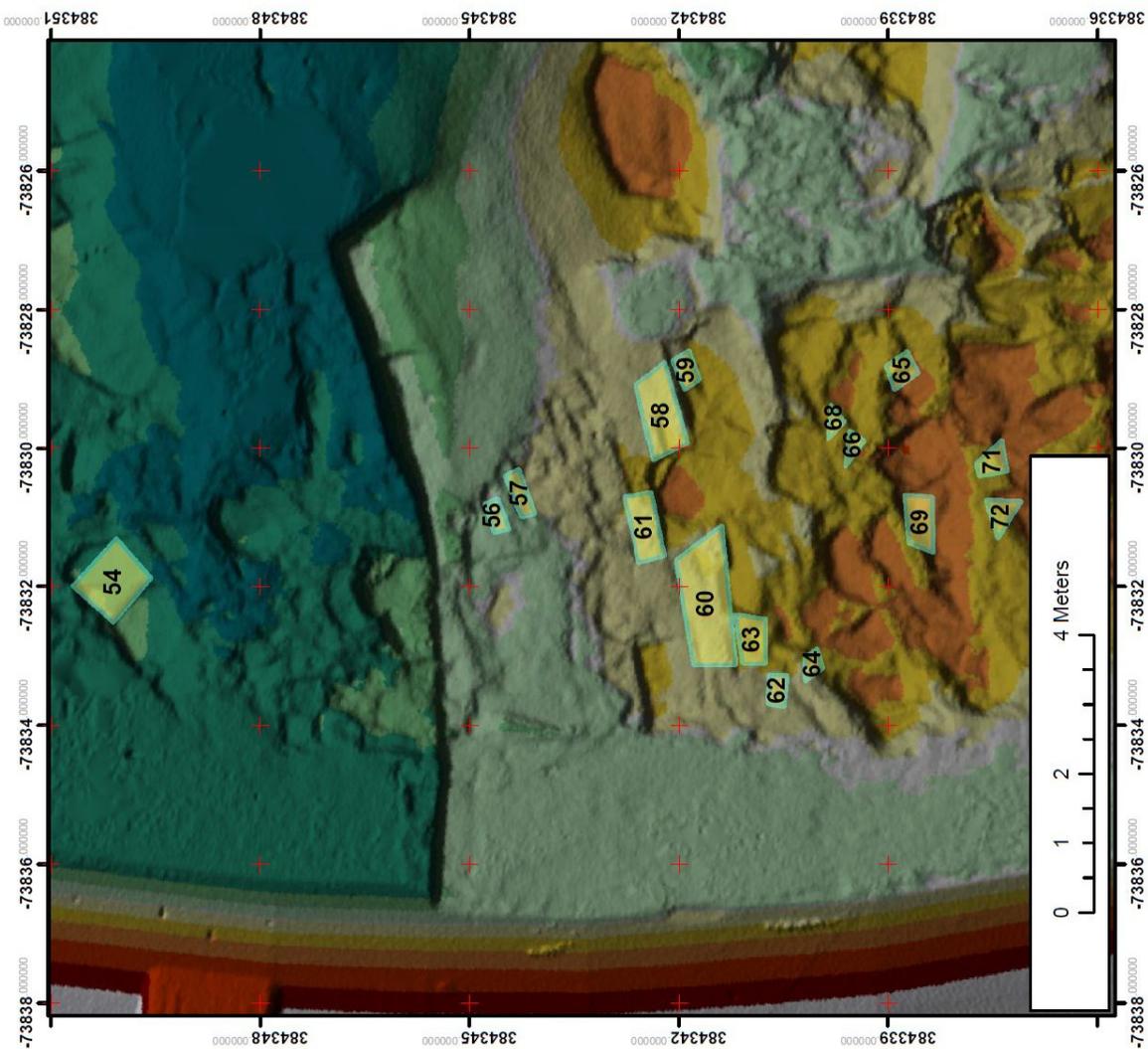
Tosbecken Ottenstein: Blockhohiform (54-72)



MGI_Austria_GK_M34
 Projection: Transverse_Mercator
 False_Easting: 7500000,000000
 False_Northing: -5000000,000000
 Central_Meridian: 16,3333333



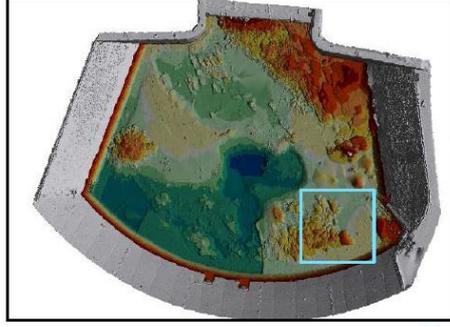
Blockhohiform



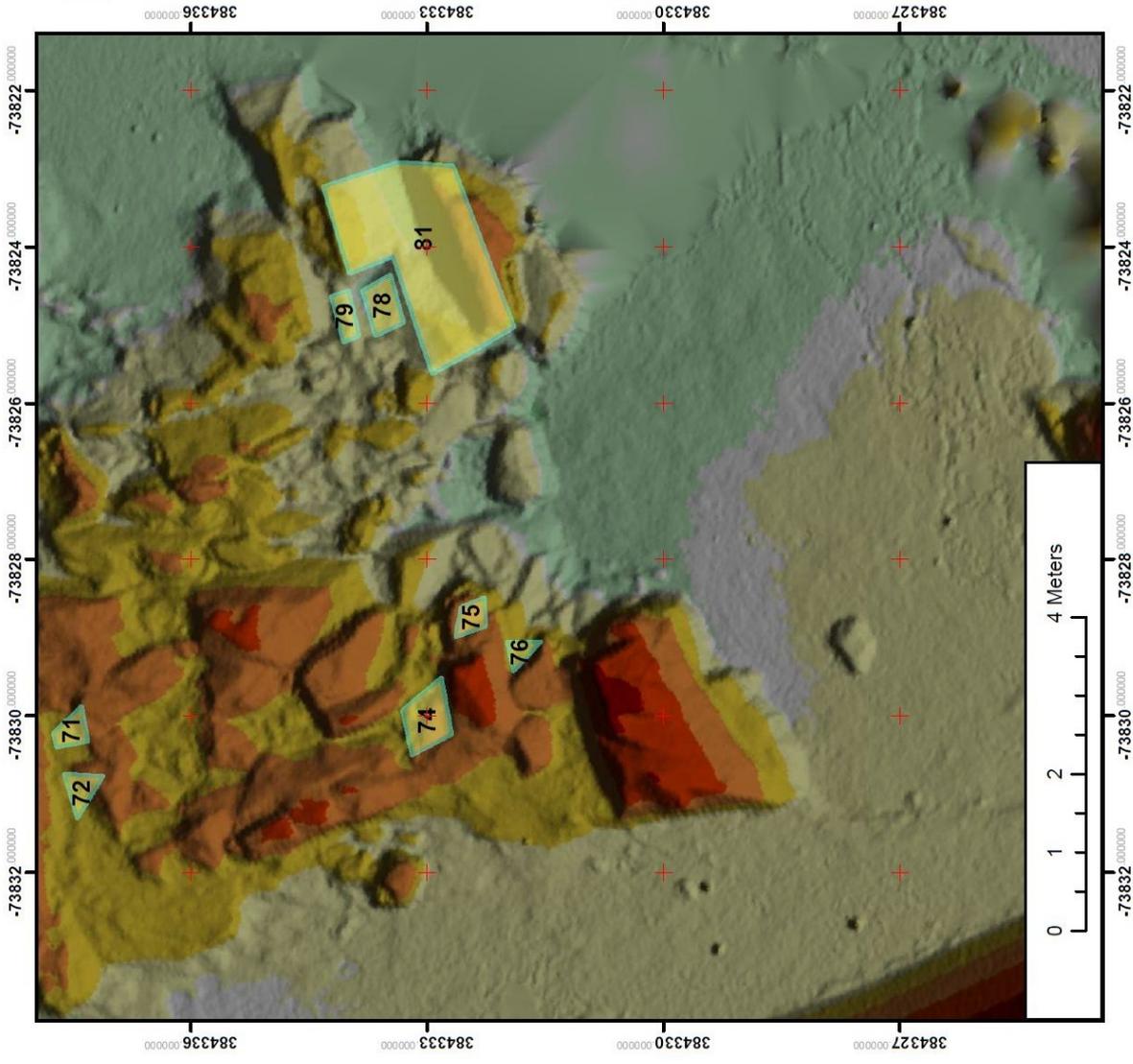
Tosbecken Ottenstein: Blockhohlformen (71-81)



MGI_Austria_GK_M34
 Projection: Transverse_Mercator
 False_Easting: 750000,000000
 False_Northing: -5000000,000000
 Central_Meridian: 16,333333



Blockhohlform



9.5 Fotodokumentation der Blockhohlformen

