

# Rauheit von Betonoberflächen

3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von  
Betonoberflächen

Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und  
Neubeton unter nicht ruhender Belastung

Von der Fakultät Bauwesen der  
Universität Dortmund  
genehmigte

## Dissertation

zur Erlangen des Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)**

von

**Mazin Kadhim El-Tornachi**  
aus Baghdad / Iraq

Dortmund, Deutschland  
2003

Datum der mündliche Prüfung:

Montag den 17.11.2003

Vorsitzender des Promotionsausschusses:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Neisecke

1. Gutachter:  
2. Gutachter:  
weitere Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Horst G. Schäfer  
Dr.-Ing. habil. Klaus Block  
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

# Roughness of Concrete Surfaces

3D-Laser-Measurement and Description of Roughness  
of Concrete Surfaces

Friction and Force Transfer between Concrete Surfaces  
and Strengthening Layers under Dynamic Loads

Dissertation

Approved by the

Faculty of Civil Engineering and Architecture  
of the University of Dortmund

for the degree of

**Doctor of Science in Engineering  
(Dr.-Ing.)**

by

**Mazin Kadhim El-Tornachi**  
From Baghdad / Iraq

Dortmund, Germany  
2003

## **Zusammenfassung:**

# **Rauheit von Betonoberflächen**

## **Teil 1                    3D-Laser-Messung und Beschreibung                               der Rauheit von Betonoberflächen**

Die Regelungen für die Verstärkung und Instandsetzung von Betonbauteilen fordern, dass die Oberflächen der zu verstärkenden Bauteile aufgeraut werden sollen. Es ist aber nicht vorgeschrieben, wie die Rauheit zu bemessen ist, noch wie die Rauheit zu messen ist. Daher wurden diese Fragen hier untersucht.

Eine der Methoden zur Erfassung der Oberflächenrauheit ist das Sandflächenverfahren nach Kaufmann. Diese Methode ist in den aktuellen nationalen Vorschriften mittlerweile standardisiert. Sie hat aber begrenzte Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich der Bereiche der messbaren Rauheiten und ihrer eingeschränkten Einsetzbarkeit auf waagerechte oder leicht geneigte Flächen. Dies führte dazu, dass andere Methoden zur Erfassung der Rauheit notwendig wurden. Eine dieser Methoden ist der Einsatz eines Lasers, mit dem man die Oberfläche abtastet und die Rauheit anschließend berechnet. Bislang wurde diese Methode so eingesetzt, dass man die Fläche nur aus einzelnen Schnitten zusammensetzt. Dies führte dazu, dass man nur 2D-Profile erhielt, die 3D-Natur der Oberfläche aber nicht erfasste. Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein 3D-Laserabtastverfahren ausführlich vorgestellt.

Es wurden drei Serien von Betonplatten hergestellt. Jede Serie wurde mit unterschiedlichen Zuschlägen betoniert. Jede Betonplatte wurde dann stufenweise um 1 mm bis maximal 3 mm aufgeraut. Die Platten wurden mit Hilfe des Sandflächenverfahrens kontrolliert aufgeraut. Anschließend wurden die Platten mit dem Laser flächendeckend abgetastet und die Oberflächenkenngrößen berechnet. Es wurde eine Korrekturempfindlichkeit eingeführt. Somit wurde dann für jede Serie (Sieblinie) und jede Rauheitsstufe die Korrekturempfindlichkeit und ihr Einfluss auf die Oberflächenkenngrößen untersucht und anschließend die Ergebnisse der 3D-Laserverfahren und Sandflächenverfahren mit einander verglichen.

## **Teil 2            Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton                               unter nicht ruhender Belastung**

Mit diesem Verfahren, die Oberflächen mit dem 3D-Verfahren abzutasten, besteht die Möglichkeit, Oberflächen auf neue Weise zu beschreiben. Im zweiten Teil der Arbeit wurde untersucht, inwiefern eine Aufrauung der Oberfläche einen Einfluss auf die übertragene Kräfte zwischen einem Betonbauteil und der Verstärkungsschicht hat. Dies wurde auch unter nicht ruhender Belastung geprüft.

Dazu wurden auch die Betonfestigkeiten der Grundkörper und der Verstärkungsschichten variiert. Der Bewehrungsgrad der Verbundfuge wurde durchgehend gleich gehalten. Es konnte herausgefunden werden, dass die unterschiedlichen Sieblinien keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Nur der Grad der Aufrauung spielt eine Rolle. Es konnte auch herausgefunden werden, dass bei den aufgerauten Flächen die Grundkörper Betonfestigkeit kein Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Die Festigkeit der Verstärkungsschichten führen hingegen zu einer deutlichen Erhöhung der übertragbaren Kräfte. Es konnte auch herausgefunden werden, dass die Festigkeit unter Ermüdungsbeanspruchung hier etwa 50% der Kurzzeitfestigkeit betrug.

## **Abstract**

# **Roughness of Concrete Surfaces**

## **Part 1**

### **3D Laser Measurement and Description of the Roughness of Concrete Surfaces**

The regulations concerning strengthening and rehabilitation of concrete structures require roughening of the concrete surface before casting the strengthening layer. Yet, they do neither describe a definition of the roughness nor a measuring method. Part 1 of this paper deals with this topic.

Different methods were developed for measuring the roughness of the surface. One of these methods is the so called "Sand Volumetric Technique (SVT)" after Kaufmann, which is an easy and quick to use method for measuring macro texture depths. In the meantime this method was implemented in actual German regulations. This method, however has limitations regarding the range of roughness; furthermore the application is restricted on horizontal or slightly sloped surfaces. Therefore it was necessary to develop methods being able to cope with a wider range of roughness and arbitrarily oriented surfaces. One of these methods is the appliance of laser technology. Usually the laser technology was applied for scanning the surface strip by strip, thus obtaining a 2D profile. This kind of application however does not take account of the 3D nature of surfaces. This aspect was dealt with in Part 1 of this paper thus leading to the introduction of a 3D laser measurement and a description of the roughness of concrete surfaces.

Three series of concrete plates were produced, each had a different grain-size distribution curve (GSDC). According to DIN 1045 three curves A,B and C are defined. Every concrete plate was sandblasted in steps of 1 mm and controlled by the SVT-method. Subsequently the whole surface was scanned using the laser method. Thereafter the characteristic roughness parameters were calculated. A correction sensitivity factor was introduced in order to eliminate statistical outliers. Summarising for each test series different combinations of the GSDC, roughness grade and correction sensitivity were studied in order to find their influence on the characteristic roughness parameters of a surface. The results of the 3D laser method were compared to the outcomes of the SVT.

## **Part 2**

### **Friction and Force Transfer between Concrete Surfaces and Strengthening Layers under Dynamic Loads**

By using the 3D method the effect of roughening on the force transfer between base sample and concrete layer under dynamic loads was studied. For this purpose a comparison was made between 'untreated' surfaces and surfaces with a defined roughness of 1 mm. Additionally the concrete strengths of the base sample and the concrete layers were varied. The degree of reinforcement between base sample and concrete layer was kept constant.

The study revealed that the decisive parameters are roughness of the surface and strength of the layer. No major influence was due to GSDC and to concrete strength of the base sample.

Under dynamic loads better results were only obtained when the strength of the layer was increased. The fatigue strength was found to be about 50% of the ultimate static strength.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Beton- und Stahlbetonbau der Universität Dortmund.

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. G. Schäfer für seine Unterstützung und Betreuung bedanken.

Herrn Dipl.-Ing. O. Jung gilt mein besonderer Dank für stundenlange Diskussionen und den regen Gedankenaustausch. Bei Herrn Dr.-Ing. F. Dreier bedanke ich mich für die Unterstützung bei den Berechnungen mit Hilfe des "Interaktiven Verfahrens".

Meinen Dank gilt auch meinen Kollegen am Lehrstuhl für Beton- und Stahlbetonbau für die gute Unterstützung und Zusammenarbeit.

Ich bedanke mich auch bei Herrn Dr.-Ing. habil. K. Block und den Mitarbeitern des Instituts für Bauforschung insbesondere Herrn Penter, Herrn Pastoor und Herr Aebersold für die Hilfe und Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, für ihre langjährige Geduld und ihren Beistand.

Dortmund 2003

## Bezeichnungen

$A_{nm}$	Nominelle Berührungsfläche
$A_s$	Spannungsquerschnitt des Stahles
$A_r$	Vergrößerte Oberfläche: Reibfläche
$A_p$	Projektionsfläche
$A_q$	Abschnittsfläche
$a, b$	Positive dimensionslose Zahlen mit $a < 1$
$d$	Normsandkreisdurchmesser
$E_s$	Elastizitätsmodul
$F$	Schubkraft
$F_r$	Fläche der aufgerauten Oberfläche
$F_e$	Projektionsfläche
$F_f$	Reibungskraft
$F_n$	Normalkraft
$f, \mathbf{m}$	Reibungsbeiwert
$f_{bd}$	Verbundfestigkeit
$f_{ck,cube}$	Charakteristische Würfeldruckfestigkeit des Betons
$f_{ck,cube,28}$	Charakteristische Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen
$f_{cm,cube}$	Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit
$f_{ci,cube,28}$	Mindestwert der Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen
$f_{yk}$	Charakteristische Streckgrenze des Stahles (Nennwert)
$f_{uk}$	Charakteristische Zugfestigkeit des Stahles (Nennwert)
$h$	Sphärenabschnittshöhe
$h_{bd}$	Verbundlänge des Dübels
$h_{pl}$	Plastizierungstiefe des Betons
$K_E$	Korrekturempfindlichkeit
$L_o$	Gestreckte Länge des Profils
$L_v/S_v$	Verhältnis des Laserabtastverfahren zum Sandflächenverfahren
$l$	Bezugsstrecke
$M$	Mantelfläche
$M_r$	Materialanteil
$m$	Mittellinie
N, S, Q	Abtastrichtungen
$N$	Schwingspielzahl
$n$	Anzahl der Profilabweichungen
$p_{nm}$	Nominelle Flächenpressung
$R$	Rautiefe nach Kaufmann
$R_p$	Glättungstiefe
$R_y, R_{max}$	Maximale Profilhöhe



## Bezeichnungen

---

$R_m$	Abstand zwischen der Linie der Profiltäler und der Mittellinie.
$R_a$	Arithmetischer Mittenrauwert
$S_m$	Formfestigkeit
$S_u$	Unterspannung
$T_W$	Verschleißbedingte Gebrauchsdauer
$T_G$	Gesamtgebrauchsdauer
$V_{Rd, sy}$	Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft
$W_{el}$	Elastisches Widerstandsmoment
$X_1$	Abstand zwischen Laserstrahl und Linse
$Y_1$	Lage des abgebildeten Lichtfleckes auf dem Detektor
$Y_3$	Abstand zwischen Linse und Detektor
$y$	Werte der Profilabweichungen innerhalb der Bezugsstrecke
$Z_1$	Abstand zum Objekt
$a_e$	Einfallswinkel
$a_r$	Reflexionswinkel
$\Delta h$	kleinste berechnete Korrekturbedingung
$\Delta s$	Spannungsschwingbreite
$\Delta S$	Schwingbreite der Ermüdungsfestigkeit (Zeitfestigkeit)
$\Delta S_D$	Schwingbreite der Dauerfestigkeit
$c_r$	Oberflächenverhältnis
$I_r$	Profillängenverhältnis
$r$	Bewehrungsgrad
$s_m$	Mittelspannung
$s_A$	Spannungsamplitude
$s_o$	obere Spannung
$s_u$	untere Spannung
$t$	Schubspannung
$t_f$	Reibungsschubspannung
$v$	vertikale Verschiebung
$w$	horizontale Verschiebung
$V$	Reibungswinkel
$\Sigma S$	Summen aller Sphärenoberflächen
$\Sigma M$	Summe aller Sphärenmantelflächen

---

## Inhalt

	Abstrakt.....	I
	Vorwort.....	III
	Inhalt.....	V
	Bezeichnungen.....	IX
<b>1</b>	Problem und Zielsetzung.....	1
1.1	Erster Teil.....	1
1.2	Zweiter Teil.....	2
1.3	Gliederung der Arbeit.....	3
1.4	Literatur.....	4
<b>2</b>	Der Laser.....	5
2.1	Einleitung.....	5
2.2	Definition.....	5
2.3	Historische Entwicklung.....	5
2.4	Physikalische Grundlagen.....	6
2.4.1	Optische Grundlagen der Lasertechnik.....	8
2.5	Anwendungsbereiche des Lasers.....	9
2.6	Eingesetzter Laserapparat und Systemaufbau.....	10
2.7	Das Triangulationsverfahren.....	11
2.8	Literatur.....	13
<b>3</b>	Die Oberflächen.....	15
3.1	Einleitung.....	15
3.2	Begriffe.....	16
3.2.1	Wirkliche Oberfläche.....	16
3.2.2	Istoberfläche.....	16
3.2.3	Geometrische Oberfläche.....	16
3.2.4	Gestaltabweichungen.....	16
3.2.4.1	Gestaltabweichung 1. Ordnung (Formabweichung).....	16
3.2.4.2	Gestaltabweichung 2. Ordnung (Welligkeit).....	16
3.2.4.3	Gestaltabweichung 3. – 5. Ordnung (Rauheit).....	17
3.2.4.4	Gestaltabweichung 6. Ordnung.....	17
3.2.5	Oberflächentextur.....	17
3.2.6	Begriffe zur Oberflächenrauheit.....	20
3.2.7	Oberflächenkenngößen.....	21
3.2.7.1	Glättungstiefe.....	22
3.2.7.2	Maximale Profilhöhe.....	22
3.2.7.3	Arithmetischer Mittenrauwert.....	22
3.2.7.4	Profillängenverhältnis.....	23
3.2.7.5	Profilkuppen.....	23
3.3	Literatur.....	24
<b>4</b>	Versuche.....	25
4.1	Einleitung.....	25
4.2	Versuchsprogramm.....	25
4.3	Versuchsplatten.....	26
4.4	Herstellung der Versuchsplatten.....	26
4.4.1	Zuschlag.....	27
4.4.2	Betongüte.....	28
4.5	Aufrauung der Versuchsplatten.....	29
4.6	Sandflächenverfahren (nach Kaufmann).....	31
4.7	Laserabtastverfahren.....	34
4.7.1	Fehlmessungen.....	35

4.7.1.1	Korrekturverfahren .....	39
4.7.1.2	Korrekturfaktor .....	41
4.7.1.3	Korrektur-Empfindlichkeit.....	42
4.7.1.4	Rechen-Programm .....	42
4.7.2	Einflüsse auf Oberflächenkenngrößen .....	43
4.7.2.1	Einfluss des Korrekturfaktors .....	43
4.7.2.1.1	Glättungstiefe.....	43
4.7.2.1.2	Maximale Rautiefe .....	52
4.7.2.1.3	Mittenrauwert .....	57
4.7.2.1.4	Profillängenverhältnis .....	62
4.7.2.1.5	Vorläufige Zusammenfassung.....	67
4.7.2.2	Einfluss der Abtastauflösung .....	67
4.7.2.2.1	Glättungstiefe .....	69
4.7.2.2.2	Maximale Rautiefe .....	70
4.7.2.2.3	Mittenrauwert .....	71
4.7.2.2.4	Profillängenverhältnis .....	72
4.7.2.2.5	Vorläufige Zusammenfassung.....	72
4.7.2.3	Einfluss der Sieblinien.....	73
4.7.2.3.1	Glättungstiefe .....	73
4.7.2.3.2	Maximale Rautiefe .....	74
4.7.2.3.3	Mittenrauwert .....	74
4.7.2.3.4	Profillängenverhältnis .....	75
4.7.2.3.5	Vorläufige Zusammenfassung.....	76
4.8	Fazit .....	76
4.9	Literatur .....	77
<b>5</b>	<b>3D-Oberflächen .....</b>	<b>79</b>
5.1	Einleitung.....	79
5.2	Dreidimensionale Bearbeitung .....	79
5.2.1	Topographische Darstellung (Konturlinien).....	79
5.2.2	Berge.....	80
5.2.2.1	Bergvolumen.....	87
5.2.2.2	Anzahl der Berge .....	90
5.2.3	Oberfläche .....	91
5.2.3.1	Rechenmodell.....	92
5.2.3.2	Ergebnisse.....	98
5.3	Beobachtete und eingesetzten Größen.....	100
5.4	Sandflächenverfahren versus Laserabtastverfahren .....	100
5.4.1	Glättungstiefe .....	101
5.4.2	Maximale Rautiefe .....	104
5.4.3	Mittenrauwert .....	105
5.4.4	Profillängenverhältnis .....	106
5.4.5	Oberflächenverhältnis .....	106
5.5	Literatur .....	108
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung Teil 1 .....</b>	<b>109</b>
6.1	Ergebnisse.....	110
<b>7</b>	<b>Reibung und Verschleiß .....</b>	<b>111</b>
7.1	Einleitung.....	111
7.2	Tribologie.....	114
7.3	Historische Entwicklung.....	114
7.4	Reibung und Verschleiß .....	114
7.4.1	Reibung.....	114
7.4.2	Reibungskenngrößen.....	114
7.4.2.1	Reibungskraft .....	115
7.4.2.2	Reibungszahl .....	115

7.4.2.3	Reibungswinkel .....	115
7.4.2.4	Reibfläche .....	116
7.4.3	Verschleiß .....	116
7.5	Elemente des Tribosystems .....	117
7.6	Struktur des Tribosystems .....	117
7.7	Beanspruchungskollektiv .....	117
7.8	Verschleißkenngrößen.....	117
7.8.1	Verschleißerscheinungsformen.....	117
7.8.2	Verschleißmessgrößen.....	117
7.8.2.1	Direkte Verschleißmessgrößen.....	117
7.8.2.2	Bezogene Verschleißmessgrößen.....	117
7.8.2.3	Indirekte Verschleißmessgrößen .....	118
7.9	Verschleißmechanismen .....	118
7.10	Literatur .....	119
<b>8</b>	<b>Eigene Versuche zu Reibung und Verschleiß .....</b>	<b>121</b>
8.1	Einleitung.....	121
8.2	Versuchsprogramm .....	121
8.3	Die Grundkörper .....	122
8.3.1	Herstellung der Grundkörper .....	122
8.3.1.1	Die Bewehrung .....	122
8.3.1.2	Der Beton.....	125
8.3.2	Bearbeitung der fertigen Grundkörper.....	125
8.3.2.1	Das Sandstrahlen .....	125
8.3.2.2	Laserabtastverfahren.....	128
8.4	Die Verstärkungsschichten.....	128
8.4.1	Herstellung der Verstärkungsschichten .....	128
8.4.1.1	Die Bewehrung .....	128
8.4.1.2	Der Ortbeton .....	130
8.4.1.3	Entschalung und Trennung der Verstärkungsschichten.....	133
8.5	Zusammenbau der Versuchkörper.....	135
8.5.1	Das Bohren.....	135
8.5.2	Die Dübel .....	137
8.5.3	Setzen der Dübel .....	140
8.6	Die Ergebnisse .....	142
8.6.1	Die Oberflächenkenngrößen.....	142
8.6.2	Die dynamische Beanspruchung .....	145
8.6.2.1	Die Wöhlerlinien.....	147
8.6.3	Das Schubtragverhalten .....	154
8.6.3.1	Rissverhalten und Versagensarten .....	156
8.6.3.2	Fugenverschiebung und Dübelbeanspruchung.....	160
8.6.3.3	Schubspannungen und die Reibbeiwerte.....	174
8.6.4	Betonfestigkeit.....	190
8.6.5	Die Rauheit .....	193
8.6.6	Die Sieblinien .....	194
8.6.7	Die Profiltragkurve .....	195
8.7	Literatur .....	201
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung Teil 2 .....</b>	<b>203</b>
Anhang 1	Korrekturfaktor .....	1-1
Anhang 2	Korrekturfaktor .....	2-1
Anhang 3A	3D-Laserabtastverfahren.....	3-1
Anhang 3B	3D-Laserabtastverfahren.....	3-21
Anhang 3C	3D-Laserabtastverfahren.....	3-41
Anhang 4	Berge.....	4-1
Anhang 5A	3D-Laserabtastverfahren der Grundkörper und der Verstärkungsschichten	

---

Anhang 5B	3D-Laserabtastverfahren der Grundkörper und der Verstärkungsschichten .....	5-1
Anhang 5C	3D-Laserabtastverfahren der Grundkörper und der Verstärkungsschichten .....	5-11
Anhang 6	Profiltragkurven .....	6-1
Anhang 7	Dynamische Belastung .....	7-1
Anhang 8	Wöhlerlinien .....	8-1

## 1 Problem und Zielsetzung

Zuerst wird diese Arbeit in zwei Teile unterteilt um eine leichtere Orientierung zu ermöglichen.

### 1.1 Erster Teil – 3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen

Die Lebensdauererwartung eines Bauwerkes ist die Zeitspanne, in der das Bauwerk die Funktion, für die es konzipiert und gebaut wurde, erfüllt. Unterschiedliche Bauwerke haben unterschiedliche Lebensdauererwartungen, die z. B. für Gebäude bei etwa 50 Jahren und für Brücken bei etwa 100 Jahren liegen. Während dieser Zeit können Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen aus folgenden Gründen erforderlich werden:

- es treten betriebsbedingte Schäden auf,
- eine Nutzungsänderung führt zu höheren Belastungen oder einer Umverteilung der Lasten, z. B. durch Aufstocken des Gebäudes,
- Schäden, die durch Naturkatastrophen oder Umwelteinflüsse verursacht werden (z.B. Erdbeben) und
- der Mensch selbst verursacht traurigerweise durch Krieg Schäden an Bauwerken.

Das Verstärken von Betonbauteilen hat das Ziel

- die Tragfähigkeit,
- die Gebrauchstauglichkeit / Dauerhaftigkeit und
- das Ermüdungsverhalten

wieder herzustellen oder günstig zu verändern [1.3].

Ein wichtiges Verstärkungsverfahren ist die Querschnittsergänzung. Sie wird mit folgenden bekannten Techniken durchgeführt:

- Spritzbeton (mit oder ohne Betonstahlzulagen)
- Ortbeton (mit oder ohne Betonstahlzulagen).

Für die verschiedenen Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen wird in den verschiedenen Vorschriften "eine zu einem zufriedenstellenden Maß vorbereitete Fläche" vorgeschrieben.

- In [1.1] wird die benötigte Oberflächenrauheit mit rau und griffig beschrieben.
- In [1.3] soll diese Fläche eine tragfähige Betonunterlage sein, die durch Sand-, Hochdruckwasser- oder Stahlkugelstrahlen vorbereitet wird.
- DIN 1045 fordert eine raue oder ausreichend profilierte Fuge [1.4].

Die Vorbereitungsmaßnahmen haben das Ziel, die Zusammenarbeit zwischen dem zu bearbeitenden Bauteil und der Verstärkungsschicht zu verbessern. Zusätzlich sollten die Verstärkungstechniken eine gute und kraftschlüssige Verbindung zwischen der Querschnittsergänzung mit der bestehenden Bausubstanz gewährleisten [1.3].

Für die Bestimmung der Rauheit von horizontalen Flächen wird das Sandflächenverfahren vorgeschlagen [1.1], [1.3].

---

Die Haftung zwischen Alt- und Neubeton wird vorrangig behandelt, deshalb entsteht die Notwendigkeit, diese Haftung zu optimieren. Diese wird auch durch Aufrauungsmaßnahmen erzielt. Leider sind sowohl Empfehlungen bezüglich des Grades der Aufrauung, als auch Kenngrößen, die eine Beurteilung der bearbeiteten Oberflächen erlauben, kaum vorhanden. In der Praxis stützte man sich bei der Durchführung der Aufrauungsmaßnahmen bisher auf das Beurteilungsvermögen der Verantwortlichen vor Ort. Dieses Urteilsvermögen basiert jedoch auf Augenmaß und Erfahrungswerten und unterliegt somit einer großen Variabilität. Es wurden verschiedene Hilfsmittel entwickelt, um die Beurteilung zu erleichtern. Eines dieser Hilfsmittel ist das Sandflächenverfahren [1.6]. Dieses Verfahren erlaubt eine relativ leichte und schnelle Beurteilung der untersuchten Oberflächen.

Dieses Verfahren liefert aber nur eine einzige Rauheitskenngröße, nämlich die sogenannte Glättungstiefe. Zusätzlich hat dieses Verfahren eine beschränkte Einsatzmöglichkeit bezüglich der oberen erfassbaren Rauheiten. Zusätzlich ist das Sandflächenverfahren bei senkrechten Oberflächen wie bei Stützen oder Überkopf-Situationen, wie bei Balken oder Decken, nicht einsetzbar.

In einigen DIN-Normen wurden bereits Oberflächenkenngrößen definiert und eingeführt. Diese Kenngrößen basieren auf linearen Abtastungen, welche die Oberflächentexturen wiedergeben. Sie wurden jedoch weitgehend den Bedürfnissen der Metallindustrie und des Maschinenbaus angepasst und sind nur bedingt auf die Erfordernisse des Bauwesens übertragbar.

In [1.5] wird eine Weiterentwicklung im Bereich der Hilfsmittel dargestellt. Dort wurde ein Infrarot-Laser-Messkopf auf einer Linearvorschubeinrichtung angebracht, um lineare Abtastungen durchzuführen. Die so ermittelten Messergebnisse erleichtern die Beurteilung der Oberflächentexturen.

Das Ziel des ersten Teils dieser Arbeit ist es, mit Hilfe von Laserflächenabtastungen ein dreidimensionales Digitalverfahren als Ersatz für das Sandflächenverfahren zu entwickeln.

## **1.2 Zweiter Teil – Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton unter nicht ruhender Belastung**

Nachdem im ersten Teil dieser Arbeit die Möglichkeit entwickelt wird, eine Oberfläche zu untersuchen und zu definieren, wird im zweiten Teil auf die Reibung und der Abrieb bzw. den Verschleiß zwischen Alt- und Neubeton eingegangen. Im Bauwesen stellen sich die Fragen nach Aufrauung, Reibung und Verschleiß dort, wo Griffigkeit und kraftschlüssige Verbindungen besonders wichtig sind, also im Straßenbau, beim Bau der sog. „Festen Fahrbahn“ für Hochgeschwindigkeitsstrecken, im Fertigteilbau und bei Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen.

Im Fertigteilbau können bei der Kraftübertragung zwischen zwei Einzelbauteilen oft die Reibungskräfte in Ansatz gebracht werden. Bei Verstärkungsmaßnahmen wird die Aufrauung bei den Haftkräften berücksichtigt. Die Reibungskraft wird nicht rechnerisch eingesetzt. Das ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Rechenwert der Reibungskräfte durch Abrieb und Verschleiß abgemindert wird und so unter anderem die Standsicherheit gefährdet werden könnte [1.2].

Bislang wurden hauptsächlich die Reibungskräfte zwischen zwei Massivbauteilen untersucht, deren Versagensmuster auf Verschleiß zurückzuführen ist. Bei Verstärkungsmaßnahmen an Decken, Stützen und Balken wird jedoch überwiegend mit relativ dünnen Spritz- oder Ortbetonschichten gearbeitet.

---

Diese Verstärkungsschichten zeigen ein anderes Versagensmuster. Zusätzlich zum Einfluss des Verschleißes muss hier das Versagen des gesamten Strukturaufbaues der Verstärkungsschichten betrachtet werden. Bislang ging man davon aus, dass beim Versagen der Haftung diese Kräfte völlig von den Verankerungselementen übernommen werden.

Diese Arbeit geht auf den Vergleich der Anfangsreibungskräfte und der Endreibungskräfte in einem mit Ortbeton verstärkten Bauteil ein. Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen ob die Reibungskräfte als Rechenkraft in die Berechnungen einbezogen werden können und ob die Reibungskräfte im System abnehmen.

### **1.3 Gliederung der Arbeit**

Zunächst wird in Kapitel 2 eine Einführung in die Thematik des Lasers gegeben. Zusätzlich wird die für diese Arbeit verwendete Laserabtastvorrichtung vorgestellt.

Kapitel 3 befasst sich mit dem Thema Oberflächen. Es werden die genormten Definitionen der verschiedenen Oberflächenkenngrößen und Parameter vorgestellt.

In Kapitel 4 werden Aufbau und Durchführung der Versuche dargestellt. Die Berechnungen und Ergebnisse üblicher Oberflächenerfassungsverfahren werden miteinander verglichen.

In Kapitel 5 wird eine dreidimensional-digitale Annäherung an das Sandflächenverfahren unternommen. Die erfassten und berechneten Oberflächenkenngrößen werden mit dem Sandflächenverfahren verglichen.

In Kapitel 6 werden die gewonnenen Ergebnisse und Empfehlungen des ersten Teils zusammenfasst.

Kapitel 7 ist der normgemäßen Definitionen von Reibung und Verschleiß gewidmet. Die historische Entwicklung des Themas Reibung wird dargestellt. Die verschiedenen eingesetzten Begriffe und Kenngrößen werden dargestellt und definiert.

In Kapitel 8 werden Versuchsaufbau und -durchführung für die Erfassung von Reibung und Verschleiß mit Hilfe der im ersten Teil entwickelten Laserabtast- und rechenverfahren erklärt und dargestellt. Die Ergebnisse und Berechnungen werden zusätzlich präsentiert.

Kapitel 9 fasst die Ergebnisse und Empfehlungen des zweiten Teils zusammen.



#### **1.4 Literatur**

- [1.1] SIVV-Lehrgangs-Handbuch. Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen. Ausbildungsbeirat, Verarbeiten von Kunststoffen im Betonbau beim Deutschen Beton-Verein E.V. März 1990.
- [1.2] H. Paschen: Reibung zwischen Betonflächen unter Einwirkung von Erschütterungen. Betonwerk-Fertigteil-Technik. Heft 3/1979.
- [1.3] Schäfer, H. G. (Hrsg) et al: Verstärken von Betonbauteilen. DAfStb Heft 467. Beuth-Verlag Berlin. 1996.
- [1.4] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001.
- [1.5] Schäfer, H. G., Block, K., Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund. DafStb Heft 456. Beuth-Verlag Berlin 1996.
- [1.6] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. Straßenbautechnik. 1971, H. 3.

## 2 Der Laser

### 2.1 Einleitung

Die Erfassung der Oberflächentexturen ist durch mehrere Verfahren möglich. Unter anderem gibt es das mechanische Tastschnittverfahren, bei dem eine Tastnadel über die Oberflächentexturen geführt wird. Außerdem gibt es Füllverfahren, wie das "Sandflächenverfahren" indem ein Füllmaterial den Leerraum zwischen der Oberflächentextur und einem Prüfhorizont füllt. Der Einsatz eines optischen Verfahrens, wie das in dieser Arbeit eingesetzte Laserabtastverfahren, ist auch möglich. Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Methoden zur Erfassung von Betonoberflächen ist in [2.6] zu finden.

Da die Erfassung der Daten für diese Arbeit mit einem Laser durchgeführt wurde, soll an dieser Stelle ein kleiner Einblick in die Lasertechnik gegeben. Es wird ausdrücklich betont, dass es sich hierbei nicht um eine tiefgehende Studie über die schwierigen physikalischen Grundlagen der Laser-Physik handeln kann. Es wird eingegangen auf die Definition, die historische Entwicklung und die theoretischen Hintergründe. Abschließend werden die möglichen Anwendungsgebiete der Lasertechnik dargestellt.

### 2.2 Definition

Das Wort **Laser** ist die Abkürzung des englischen Ausdruckes „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“, was mit „Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission“ ins Deutsche übersetzt werden kann [2.1].

### 2.3 Historische Entwicklung

Der Laser ist die Weiterentwicklung des **Maser**s, kurz für „**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ („Mikrowellenverstärkung durch angeregte Emission von Strahlung“), zu kürzeren Wellenlängen, [2.1], [2.2]. Das Prinzip der stimulierten oder induzierten Emission und die quantenmechanischen Grundlagen wurden bereits Anfang des 20. Jahrhunderts von Einstein entdeckt. Der Weg zu Maser und Laser jedoch war noch recht weit, erst mussten durch eine große Zahl von Untersuchungen genaue Kenntnisse über den Atomaufbau gewonnen werden. Schawlow und Townes sowie Prokhorov und Basov erarbeiteten um 1950 die physikalischen Grundlagen für den Maser und gaben Anregungen für die praktische Umsetzung der theoretischen Möglichkeiten [2.4].

Townes vom MIT (Massachusetts Institute of Technology) sowie Prokhorov und Basov vom Lebedev Physik Institut in Moskau wurden für ihre bahnbrechenden Arbeiten auf dem Gebiet der Maser 1964 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. 1953 und 1954 gelang es unabhängig voneinander Weber an der Universität Maryland und Townes an der Columbia Universität, Maser zu betreiben. Folgerichtig wurde als nächstes überlegt, ob dieses Prinzip nicht auch bei den sehr viel kürzeren Lichtwellen anwendbar sein könnte. Nach umfangreichen theoretischen Vorarbeiten gelang es Maiman in dem Huges Research Laboratories im Jahre 1960, zum ersten Mal den Lasereffekt an einem Rubin zu beobachten. Abb. 2.1 und Abb. 2.2.

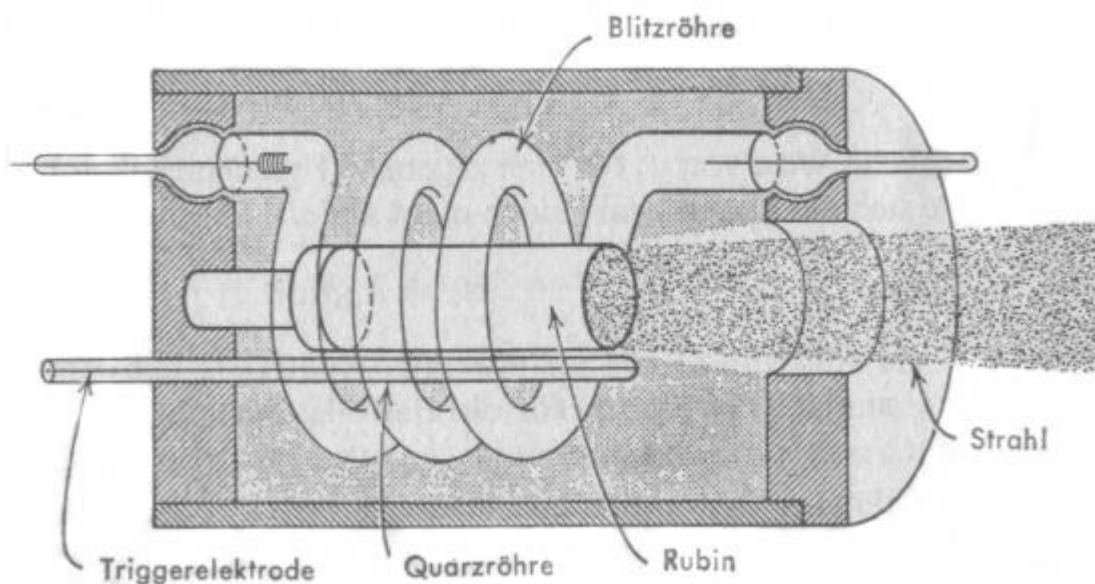


Abb. 2.1 : Eine schematische Darstellung des ersten Rubin-Lasers, [2.2]

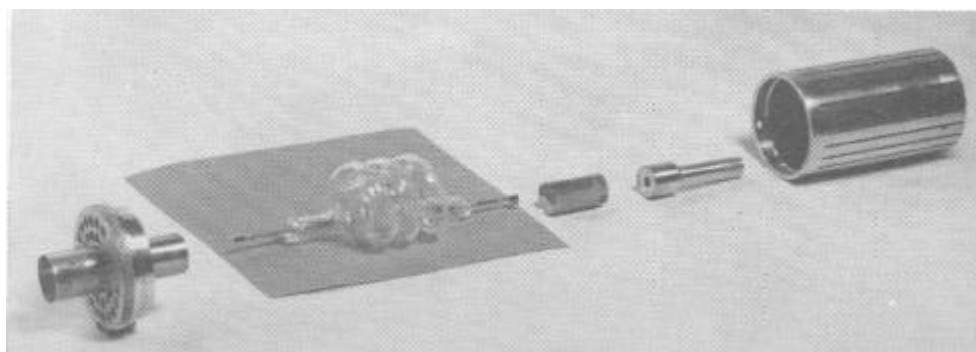


Abb. 2.2 : Die wesentlichen Teile eines Rubin-Lasers, [2.2]

Schon kurz darauf, im Herbst 1960, arbeitete bei Javan in den Bell Telephone Laboratories der erste Helium-Neon-Gas-Laser. Damit war die Richtigkeit der theoretischen Überlegungen bewiesen und die Experimente konnten in größerem Umfang weitergeführt werden. In zahlreichen Forschungsinstituten in aller Welt wurden intensive Forschungsarbeit am Laser aufgenommen, die sich in vielen Veröffentlichungen niederschlugen.

## 2.4 Physikalische Grundlagen

Da der Laser laut Definition Licht ist, soll zunächst das Licht definiert werden.

Das elektromagnetische Spektrum, Abb. 2.3a, erstreckt sich über einen außerordentlich großen Frequenzbereich. Der Teil dieses Spektrums, der für das menschliche Auge sichtbar ist, Abb. 2.3b, wird Licht genannt und umfasst den Wellenlängenbereich von 400 nm bis 750 nm. Abb. 2.3a zeigt anschaulich, wie schmal der Bereich des Lichtes im Vergleich zum gesamten Spektrum ist. Infrarotstrahlung und ultraviolette Strahlung sind Grenzen der Sichtbaren Bereich nach oben und unten.

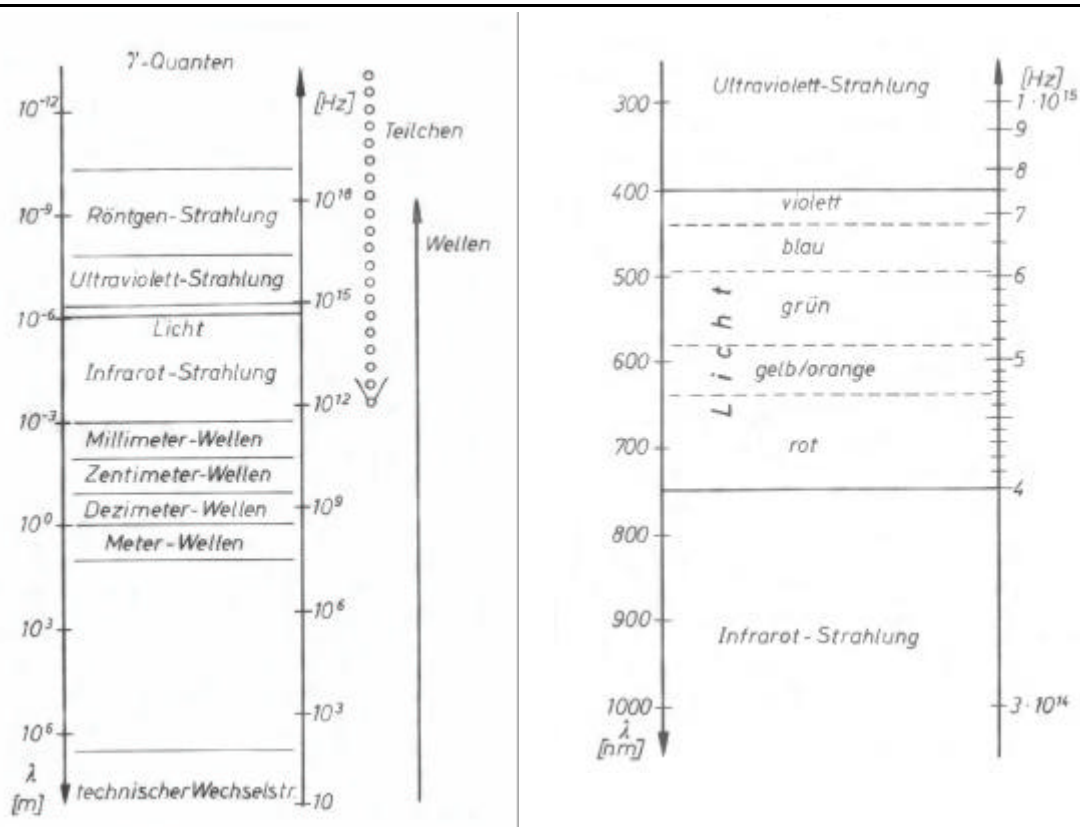


Abb. 2.3 : (a): Das elektromagnetische Spektrum

(b): Wellenlängen des Lichtes, [2.1]

Die Infrarotstrahlung schließt sich an der langwelligen Seite kontinuierlich an das Licht an, während die ultraviolette Strahlung die Fortsetzung des Spektrums zu den kürzeren Wellenlängen ist. Insgesamt überdeckt das Gebiet der Infrarotstrahlung, des Lichtes und der ultravioletten Strahlung einen Wellenlängenbereich von etwa  $10^{-3}$  m bis  $10^{-8}$  m. Licht liegt im Frequenzbereich von  $5 \cdot 10^{14}$  Hz bis  $10^{15}$  Hz, das gesamte Gebiet der Infrarotstrahlung plus Licht plus ultraviolette Strahlung reicht von etwa  $5 \cdot 10^{11}$  bis  $5 \cdot 10^{16}$  Hz. Der erste Bereich vom technischen Wechselstrom bis hin zu den Millimeter-Wellen der Höchstfrequenztechnik wird oft zusammenfassend mit dem Ausdruck elektro-magnetische Wellen gekennzeichnet.

Daran anschließend folgen Infrarotstrahlung, Licht, ultraviolette Strahlung und Röntgen-Strahlung, die mit einander verwandt sind. Deshalb wird oft dieser gesamte Bereich mit dem Wort „Licht“ beschrieben. Wenn in dieser Arbeit von „Licht“ gesprochen wird, ist jedoch nur der sichtbare Anteil des elektromagnetischen Spektrums gemeint.

Der Laser ist definitionsgemäß ein Gerät, das Licht mit Hilfe angeregter Emission von Strahlung verstärkt [2.2]. In der Praxis wird ein Laser allgemein als Strahlungsquelle oder Strahlungsgenerator verwendet. Der Generator wird dadurch realisiert, dass dem Lichtverstärker ein Rückkopplungsmechanismus in Form von Spiegeln oder Reflektoren zugefügt wird. Die physikalische Aufgabe besteht vor allem in der Schaffung eines Materials mit genügend hoher negativer Absorption der einfallenden Strahlung bei einer beliebigen Frequenz, so dass eine angemessene Verstärkung zur Verfügung steht, um die entstehende Dämpfung des Gerätes zu überwinden und eine nutzbare Leistung abzugeben.

Das Arbeitselement der Rubin-Laser ist ein zylinderförmiger rosa Rubin, der einen Anteil von 0,05% Chrom enthält. Der Zylinder hat meist einen Durchmesser zwischen 0,5 und 1,0 cm und eine Länge von 2 bis 10 cm. Die Stirnseiten sind eben und mit einem hohen Genauigkeitsgrad parallel. Eine der Stirnflächen reflektiert vollständig, die andere reflektiert teilweise.

Der Rubin wird von der Seite durch Licht aus einer Blitzlampe bestrahlt, die allgemein nur wenige Millisekunden mit einer Eingangsenergie von 1000 bis 2000 Joule in Betrieb ist. Der größte Teil der Eingangsenergie wird in Wärme umgesetzt, ein geringer Teil wird von der Blitzlampe jedoch als blaue und grüne Strahlung emittiert, welche dann vom Rubin absorbiert wird. Diese Energie bildet die Anregung. Der Rubin trichtert die in einem breiten Spektralbereich absorbierte Energie in eine schmale Emissionslinie. Die Strahlung tritt kohärent durch die teilweise reflektierende Stirnseite des Rubins aus. (Siehe hierzu auch Abb. 2.4).

Das Laserlicht unterscheidet sich vom Licht aus anderen Quellen durch vier Grundeigenschaften:

- Hohe Intensität, [2.2].
- Einfarbigkeit. Durch die induzierte oder stimulierte Emission um eine scharf definierte Energiedifferenz entsteht monochromes Licht, [2.1], [2.2].
- Zeitliche Kohärenz. Von zeitlicher Kohärenz spricht man, wenn zwei oder mehrere Wellen während einer festen Zeit eine konstante Phasendifferenz einhalten, [2.1], [2.2].
- Kohärenz der Strahlung aus verschiedenen Teilen des Lasers und Kollimation.

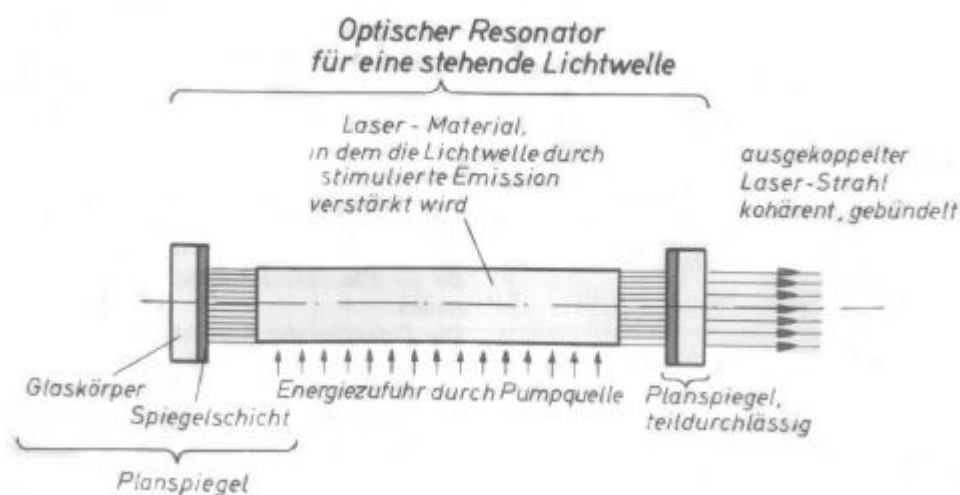


Abb. 2.4 : Eine schematische Darstellung des Laserprinzips. [2.1]

### 2.4.1 Optische Grundlagen der Lasertechnik

Abb. 2.5 zeigt den Strahlenverlauf bei **der Reflexion** an einem ebenen Spiegel, einfallende und reflektierte Strahlen liegen in einer Ebene. Der Einfallswinkel  $\alpha_e$  und der Reflexionswinkel  $\alpha_r$  werden gegen das Einfallslot gemessen. Für die Beziehung zwischen Einfallswinkel und Reflexionswinkel gilt das Reflexionsgesetz

$$\alpha_e = \alpha_r \quad (2.1)$$

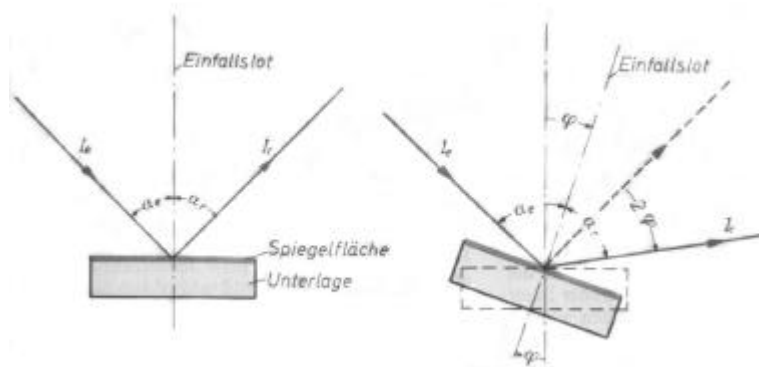


Abb. 2.5 : Das Reflexionsgesetz, [2.1]

## 2.5 Anwendungsbereiche des Lasers

Der Laser wird in viele Bereiche der Technik angewendet. Bei **der Materialbearbeitung** z.B. wird er in den Vorgängen des Bohrens, FräSENS, Lötens und Schweißens eingesetzt. In einem Laserimpuls kann die Energie des Lichtes in sehr kurzer Zeit abgegeben werden, so dass hohe Leistungen erreicht werden. Diese hohen Leistungen des Laser-Impulses lassen sich durch eine Linse, die den Lichtstrahl fokussiert, auf eine kleine Fläche konzentrieren. Auf dieser Fläche entsteht eine sehr hohe Leistungsdichte oder Intensität, die das Material zum Verdampfen bringt.

Die Verdampfung des Materials kann zur Materialbearbeitung genutzt werden. Auf diese Weise lassen sich z. B. Löcher bohren, Schlitze fräSEN und Drähte schneiden, [2.2], [2.4]. Ein Laserstrahl kann auch zum Lötens und Schweißens verwendet werden. Die Impulse müssen dabei zeitlich etwas länger sein, damit auch bei träger Wärmeleitung des Materials eine gleichmäßige Erwärmung und einer haltbare Verbindung gewährleistet ist, [2.1], [2.4].

Im Bereich **der Medizin** wird in manche medizinische Institute mit Spezialräumen der Laser zur therapeutischen Behandlung eingesetzt.. Zur Zeit werden in der Humanmedizin unter anderem Retinaablösungen des Auges und Gehirntumore mit Laserstrahlen behandelt. Der Laserstrahl hat den Vorteil, dass nur die ausgewählte Stelle vom Laserstrahl getroffen wird, wohingegen Röntgenstrahlen und radioaktive Präparate immer auch die Umgebung mit schädigen. Der Einsatz des Laserstrahls als Skalpellersatz befindet sich noch in der Entwicklung, [2.1], [2.2], [2.4].

**Die Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung** basiert auf der Messung des zeitlichen Abstandes zwischen dem Aussenden und Wiederauftreffen des von einem Impulslaser ausgesendeten und vom Messobjekt reflektierten Lichtimpulses. Dabei kann auch bei großen Entfernungen eine hohe Genauigkeit erzielt werden, [2.1], [2.2].

**Die Nachrichten- und Kommunikationstechnik** nutzt wiederum die Bandbreite des Lasers. Bekanntlich ist die Geschwindigkeit oder die Rate, mit der Informationen übertragen werden können, proportional zur Bandbreite des Informationsträgers. Der Schritt von den „Mikrowelle“ in den optischen Bereich erweitert die verfügbare Bandbreite um den Faktor 10.000 oder größer, [2.2], [2.4].

**Die Oberflächenabtastung** ist mit dem Einsatz des Laserstrahls möglich. Dieses Verfahren wird meist im Maschinenbau eingesetzt um die genaue Beschaffenheit der Oberflächen der Produkte zu überprüfen. Diese Methode wird in dieser Arbeit eingesetzt.

## 2.6 Eingesetzter Laserapparat und Systemaufbau

Bei dem eingesetzten Laserapparat handelt es sich um einen Laserabstandssensor. Sein Aufbau ist in Abb. 2.7 dargestellt. Der Laserabstandssensor umfasst die folgenden Komponenten, [2.5]:

- (1) Laser
- (2) Referenzebene
- (3) Objekt
- (4) Objektiv
- (5) Detektor

Der Laserabstandssensor nutzt **das Triangulationsverfahren**, um den Abstand zwischen der Referenzebene und dem zu untersuchenden Objekt zu bestimmen. Der Laserstrahl wird auf das Werkstück gerichtet, von wo er am Auftreffpunkt bei Beachtung der dort vorhandene Ebeneneigung entsprechend der Gl. 2.1 reflektiert wird. Das Objektiv, welches unter einem Winkel zur Einfallsrichtung des Laserstrahls angeordnet ist, bildet den Lichtfleck am Auftreffort des Laserstrahls auf einem Detektor ab, Abb. 2.6 und Abb. 2.7. Die Lage des abgebildeten Lichtflecks auf dem Detektor ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ) ist ein Maß für den Abstand der Objekte ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ) in Z-Richtung, Abb. 2.8.

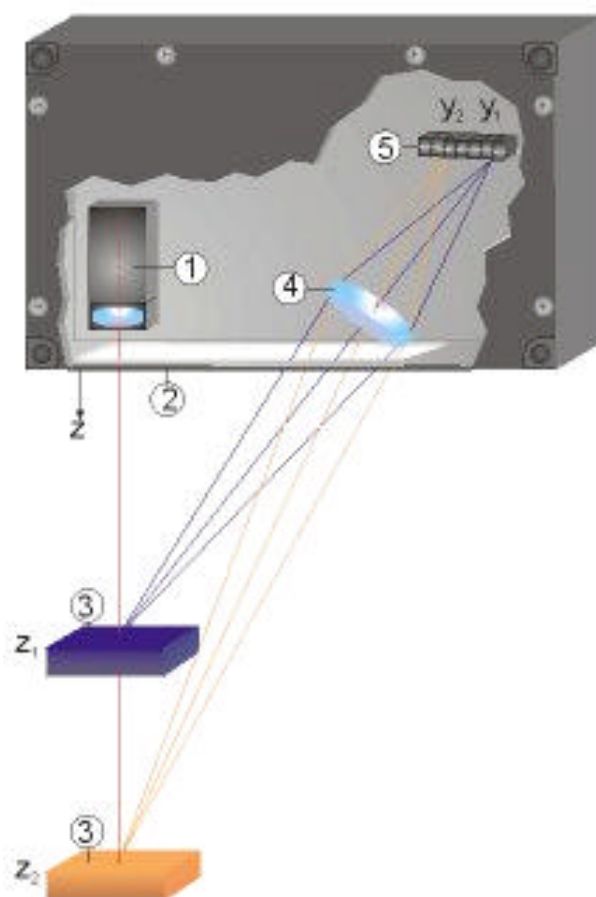


Abb. 2.6 : Aufbau eines Laserabstandssensors, [2.5]

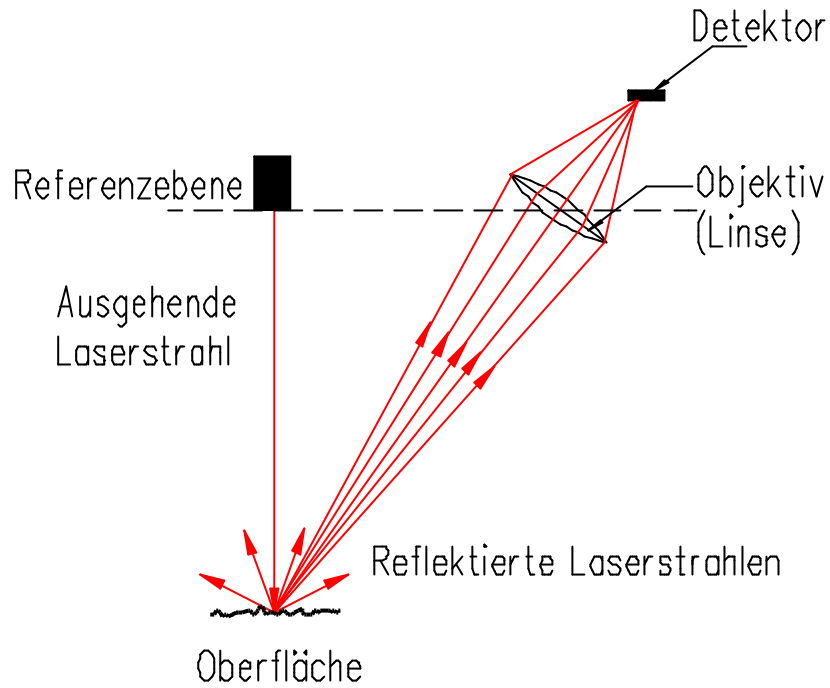


Abb. 2.7 : Grafische Darstellung der Bündelung der Reflektierten Laserstrahlen auf den Detektor

### 2.7 Das Triangulationsverfahren:

Im Folgenden wird dieser Triangulationsverfahren aus Abb. 2.6 und 2.7 interpretiert und schematisch dargestellt.

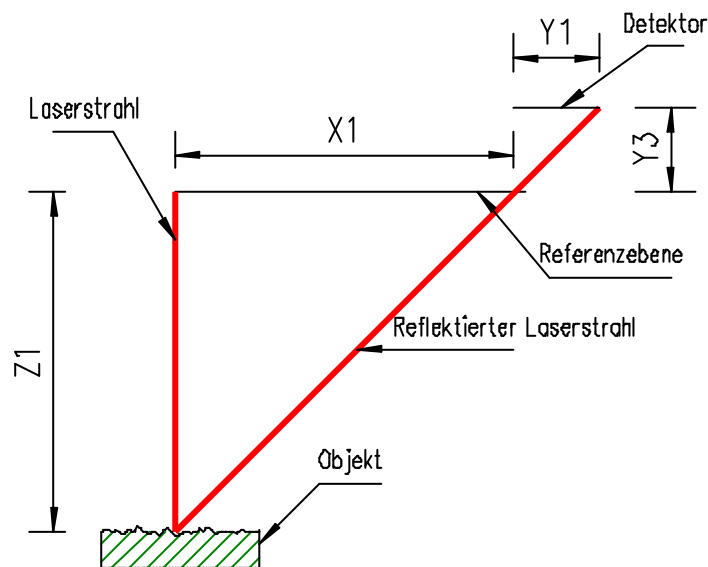


Abb. 2.8 : Lasertriangulation

Durch das Triangulationsverfahren ist es möglich, den Abstand zu einem Objekt zu bestimmen. Aus Abb. 2.8 ergibt sich



$$\frac{Z_1}{X_1} = \frac{Y_3}{Y_1}$$

$$Z_1 = X_1 * \frac{Y_3}{Y_1} \tag{2.2}$$

- $Z_1$  = gesuchter Abstand  
 $Y_1$  = Lage des abgebildeten Lichtfleckes auf dem Detektor  
 $X_1$  = Abstand zwischen Laserstrahl und Linse  
 $Y_3$  = Abstand zwischen Linse und Detektor

$X_1$  und  $Y_3$  sind gerätespezifische Größen, deren Wert vom Gerätetyp abhängen.

## 2.8 Literatur

- [2.1] Tradowsky, K.: Laser kurz und bündig. Vogel- Verlag. 3. Auflage, 1977.
- [2.2] Lengyel, Bela A.: Laser Physikalische Grundlagen und Anwendungsgebiete. Berliner Union. Stuttgart, 1967.
- [2.3] Marshall, Samuel L.: Laser Technology and Applications. McGraw Hill, 1968.
- [2.4] Sargent, M. \ Scully, M. \ Lamb, W.: Laser Physics. Addison- Wesley, 1974.
- [2.5] Laserabstandssensor "Cyclop": Produktunterlagen des Herstellers Nokra Optische Prüftechnik und Automation GmbH, 1998.
- [2.6] Block, K.; Drell, R. Oberflächenrauheit und Haftverbund, beton 2/98, Seiten 75 bis 79.

### 3 Die Oberflächen

#### 3.1 Einleitung

Nachdem in Kapitel 2 die Abtastvorrichtung dargestellt wurde, sollen in diesem Kapitel die verschiedenen Begriffe, Ordnungssysteme und Kenngrößen der Oberflächen sowie deren Eigenschaften dargestellt und definiert werden. Zuerst werden allgemeine Beobachtungen der bearbeiteten Oberflächen festgestellt und definiert. Zu diesem Zweck legen verschiedene internationale Normen ([3.6], [3.7], [3.8], [3.9], [3.10], [3.11], [3.12]) Methoden und Parameter zur Messung von Oberflächentexturen fest. Da die deutsche Norm DIN 4760 [3.1] die verschiedenen Definitionen weitgehend abdeckt, wird hier nur auf diese nationale Norm detailliert eingegangen. DIN 4760 legt die Begriffe und Ordnungssysteme der verschiedenen Gestaltabweichungen fest. In Abb.3.1 ist eine Wüstenlandschaft dargestellt. Diese Landschaftsform zeigt die allgemeinen Merkmale von Oberflächen sehr anschaulich und in großem Maßstab. Deutlich zu erkennen ist die Kombination der Oberflächenmerkmale Rauheit (Sandkörner), Welligkeit (Riefen) und Gestaltabweichung (Bodenkrümmung).



Abb. 3.1 : Die Wüste [3.12]

## 3.2 Begriffe

Bei der Erfassung und Beschreibung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächen fällt den folgenden Begriffen eine Schlüsselfunktion zu:

- Wirkliche Oberfläche
- Istoberfläche
- Geometrische Oberfläche
- Gestaltabweichungen
  - 1. Ordnung
  - 2. Ordnung
  - 3. bis 5. Ordnung
  - 6. Ordnung

### 3.2.1 Wirkliche Oberfläche

Die wirkliche Oberfläche ist die Oberfläche, die den Gegenstand von dem ihn umgebenden Medium trennt.

### 3.2.2 Istoberfläche

Die Istoberfläche ist das messtechnisch erfasste, angenäherte Bild der wirklichen Oberfläche eines Formelementes. DIN 4760 [3.1] stellt fest, dass verschiedene Messverfahren oder Messbedingungen verschiedene Istoberflächen ergeben.

### 3.2.3 Geometrische Oberfläche

Die geometrische Oberfläche ist eine ideale Oberfläche, deren Nennform durch die Zeichnung und / oder andere technische Unterlagen definiert wird.

### 3.2.4 Gestaltabweichungen

Gestaltabweichungen sind die Gesamtheit aller Abweichungen der Istoberflächen von der geometrischen Oberfläche. Die Gestaltabweichungen werden wie folgt unterteilt:

#### 3.2.4.1 Gestaltabweichung 1. Ordnung (Formabweichung)

Gestaltabweichungen 1. Ordnung sind solche Gestaltabweichungen, die nur beim Betrachten der gesamten Istoberfläche eines Formelementes feststellbar sind, wie z.B. Gradheits-, Ebenheits- und Rundheitsabweichungen.

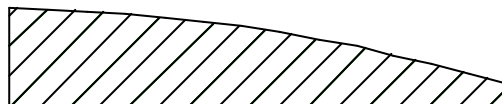


Abb. 3.2 : Gestaltabweichung 1. Ordnung

#### 3.2.4.2 Gestaltabweichung 2. Ordnung (Welligkeit)

Gestaltabweichungen 2. Ordnung sind überwiegend periodisch auftretende Abweichungen der Istoberflächen eines Formelementes, bei denen das Verhältnis der Wellenabstände zur Wellentiefe im Allgemeinen zwischen 1000:1 und 100:1 liegt. Meist sind mehrere Wellenperioden erkennbar, Abb. 3.3.



Abb. 3.3 : Gestaltabweichung 2. Ordnung

### 3.2.4.3 Gestaltabweichung 3. – 5. Ordnung (Rauheit)

Gestaltabweichungen 3. – 5. Ordnung sind regelmäßig oder unregelmäßig wiederkehrende Abweichungen der Oberfläche eines Formelementes, bei denen das Verhältnis der Abstände zur Tiefe im Allgemeinen zwischen 100:1 und 5:1 liegt.

Beispiele hierfür sind Rillen, siehe Abb. 3.4, Riefen, Schuppen und Kuppen, Abb. 3.5. Gestaltabweichungen 5. Ordnung sind z. B. Abweichungen in der Gefügestruktur, die nicht mehr einfach bildlich darstellbar sind.

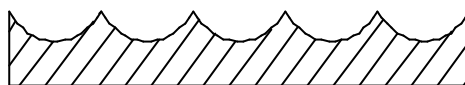


Abb. 3.4 : Gestaltabweichung 3. Ordnung

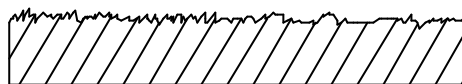


Abb. 3.5 : Gestaltabweichung 4. Ordnung

### 3.2.4.4 Gestaltabweichung 6. Ordnung

Gestaltabweichungen 6. Ordnung sind durch den Aufbau der Materie bedingte Abweichungen, z. B. im Gitteraufbau des Werkstoffes; Auch hier ist ein einfaches Bild nicht darstellbar. Da Gestaltabweichungen selten einzeln vorkommen, stellt man häufig eine Überlagerung aller Ordnungen der Gestaltabweichungen dar, Abb. 3.6.

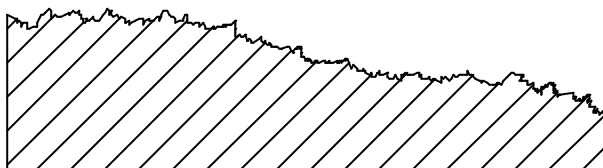


Abb. 3.6 : Überlagerung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung

### 3.2.5 Oberflächentextur

Im nächsten Schritt sollen Merkmale der geometrischen Oberflächentexturen definiert werden. Hierfür steht DIN 4761 [3.2] zu Verfügung. Die Oberflächen können nach ihren optischen Merkmalen in zwei Gruppen unterteilt werden:

- rillige Oberflächen
- nichtrillige Oberflächen

Da die „rilligen Oberflächen“ nicht Bestandteil dieser Arbeit sind, wird hier auf die Merkmale dieser Gruppe nicht weiter eingegangen.

### **Nichtrillige Oberflächen:**

Diese Art Oberflächen zeigen regelmäßige oder unregelmäßige Erscheinungsformen. Ihre Merkmale sind in der Regel zufällig entstanden, z.B. beim Betonieren, beim Auf- oder Abtrag von Baumaterial, beim Aufspritzen oder beim Sandstrahlen. Die Oberflächen können unterteilt werden in:

- Muldige Oberflächen
  - flachmuldige Oberflächen
  - punktförmig vertiefte Oberflächen
  - porige Oberflächen
- Kuppige Oberflächen
  - flachkuppige Oberflächen
  - körnige Oberflächen
- gewellte Oberflächen
  - furchige Oberflächen
  - punktförmig gewellte Oberflächen
  - unregelmäßig gewellte Oberflächen
- schuppige Oberflächen
  - treppenförmig geschichtete Oberflächen
  - flächig versetzte Oberflächen
  - maserige Oberflächen

In dieser Gruppe finden sich auch einige maschinenbau-spezifische Definitionen, die hier nicht weiter erwähnt werden.

#### • **Muldige Oberflächen**

**Flachmuldige Oberflächen** sind örtlich mehr oder weniger scharf begrenzte Vertiefungen der Oberfläche von rundlicher bis eckiger Form. In dieser Arbeit ist dieses Merkmal von Bedeutung, da es beim Abdruck einer sandgestrahlten Betonoberfläche auftritt, Abb. 3.7.

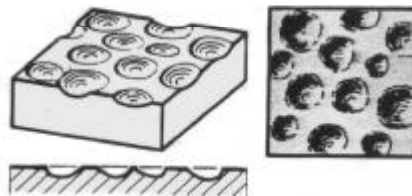


Abb. 3.7 : Flachmuldige Oberflächen, [3.2]

**Punktförmig vertiefte Oberflächen** sind scharf begrenzte Vertiefungen, deren Tiefe im Vergleich zur Breite relativ groß ist, Abb. 3.8.

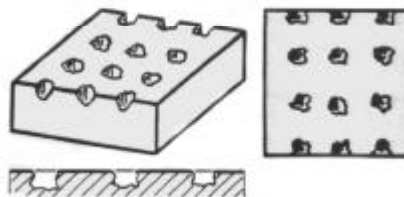


Abb. 3.8 : Punktförmig vertiefte Oberflächen, [3.2]

**Porige Oberflächen:** Poren sind werkstoff- oder herstellungsbedingte Hohlräume. Oberflächenporen sind die an der Oberfläche liegenden oder angeschnittenen Hohlräume, Abb. 3.9.

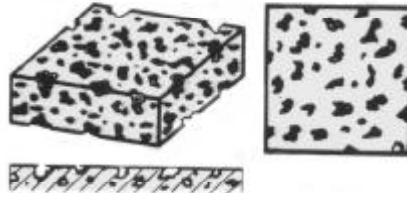


Abb. 3.9 : Porige Oberflächen, [3.2]

- **Kuppige Oberflächen**

Kuppen sind örtlich begrenzte, rundliche oder kantige Erhöhungen auf der Oberfläche.

**Flachkuppige Oberfläche:** Flachkuppen sind rundliche oder stumpfwinkliger Oberflächen-erhöhungen, Abb. 3.10.

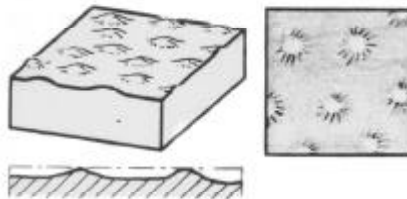


Abb. 3.10 : Flachkuppige Oberfläche, [3.2]

**Körnige Oberflächen** weisen kantige Erhöhungen mit zum Teil überhängendem Böschungswinkel auf, Abb. 3.11.

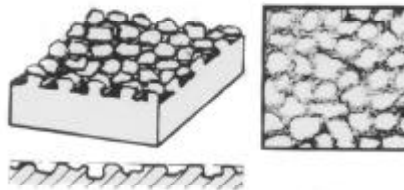


Abb. 3.11 : körnige Oberflächen, [3.2]

- **Gewellte Oberflächen**

Gewellte Oberflächen weisen aneinandergereihte, wellenförmige Erhöhungen und Vertiefungen auf. Bei furchigen Oberflächen verlaufen die Wellen vorwiegend in der gleichen Richtung. Bei punktförmig oder unregelmäßig gewellten Oberflächen verlaufen sie in mehreren Richtungen.

**Furchige Oberflächen** haben teils gleich und teils ungleich verlaufende grabenförmige Vertiefungen und Erhöhungen, Abb. 3.12.

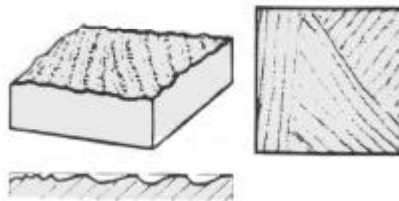


Abb. 3.12 : Furchige Oberflächen, [3.2]

**Punktförmig gewellte Oberflächen** haben regelmäßige, mehr oder weniger ähnliche Vertiefungen und Erhöhungen von rundlicher Form, Abb. 3.13.

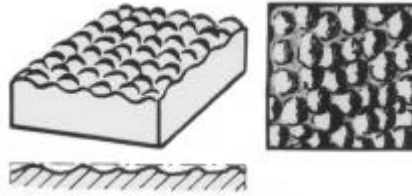


Abb. 3.13 : Punktförmig gewellte Oberflächen, [3.2]

**Unregelmäßig gewellte Oberflächen** haben zufällig erzeugte unregelmäßige Erhöhungen und Vertiefungen von überwiegend rundlicher Form, Abb. 3.14.

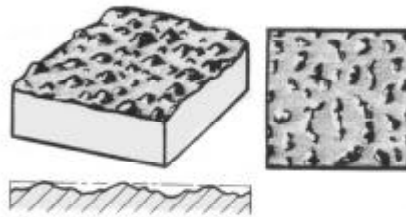


Abb. 3.14 : Unregelmäßig gewellte Oberflächen, [3.2]

- **Schuppige Oberflächen**

Schuppige Oberflächen sind zusammengesetzt aus zahlreichen kleineren Teilflächen, die durch Höhenunterschiede im Material erkennbar sind. Auf treppenförmig geschichtete Oberflächen und unregelmäßig gewellte Oberflächen wird hier nicht näher eingegangen, da sie im Rahmen dieser Arbeit selten bzw. gar nicht vorkommen.

**Maserige Oberflächen** sind Material- und herstellungsbedingte Oberflächenstrukturen mit unterschiedlicher Oberflächentextur Merkmalen zwischen den einzelnen Schichten oder Fasern, Abb. 3.15.

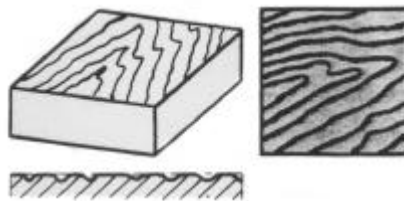


Abb. 3.15 : Maserige Oberflächen [3.2]

### 3.2.6 Begriffe zur Oberflächenrauheit

Die Begriffe zur Oberflächenrauheit werden hier dargestellt und definiert. In DIN 4762 wird der Begriff „Profil“ nur in Bezug auf die Rillenrichtung definiert, die Rillentextur der Oberflächen ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Da die Definition des Begriffes Profil für diese Arbeit erforderlich ist, wird die Definition des wirklichen Profils aus DIN 4762 ersatzweise übernommen.

**Das Profil** ist die Schnittlinie einer Ebene mit einer wirklichen Oberfläche, Abb. 3.16.



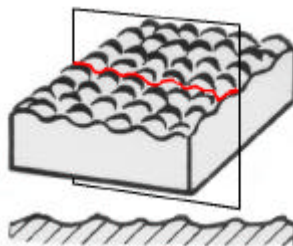


Abb. 3.16 : Das Profil

**Die Bezugslinie** ist eine festgelegte Linie, auf die die Rauheitskenngrößen bezogen ist, Abb. 3.17.

**Die Bezugsstrecke** ist die Länge der Bezugslinie, die zur Ermittlung der die Oberflächenrauheit kennzeichnenden Unregelmäßigkeiten angewendet wird, Abb. 3.17.

**Die Profilabweichung**  $y$  ist der in Messrichtung ermittelte Abstand eines Profilpunktes von der Bezugslinie.

**Die Auswertlänge**  $L_n$  ist die Länge, über die die Werte der Rauheitskenngrößen ermittelt werden. Sie kann eine oder mehrere Bezugsstrecken enthalten, Abb. 3.17.

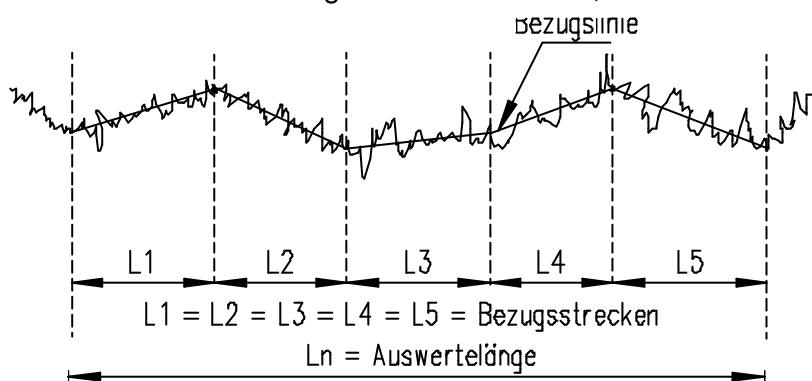


Abb. 3.17: Die Auswertlänge und die Bezugslinien

**Die Mittellinie** ist eine Bezugslinie, die innerhalb der Bezugstrecke das Profil so durchschneidet, dass die Summe der Quadrate der Profilabweichungen von dieser Linie minimal wird. Die Mittellinie ist die Regressionslinie durch das Profil, Abb. 3.18.

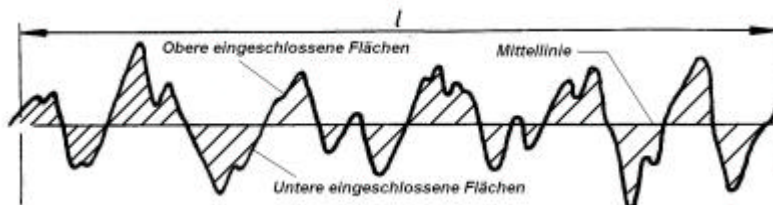


Abb. 3.18 : Die Mittellinie

### 3.2.7 Oberflächenkenngrößen

Die Oberflächenkenngrößen sind die Kenngrößen, mit denen die Eigenschaften der unterschiedlichen Merkmale der Oberflächen erfasst und unterschieden werden können. Hier wurden nur die Kenngrößen ausgewählt, die bei der Bewertung von Oberflächen am häufigsten vorkommen.

### 3.2.7.1 Glättungstiefe $R_p$

Die Glättungstiefe ist in DIN 4762 [3.3] als Abstand des höchsten Punkts des Profils von der Mittellinie ( $m$ ) innerhalb der Bezugsstrecke ( $l$ ) definiert, Abb. 3.19.

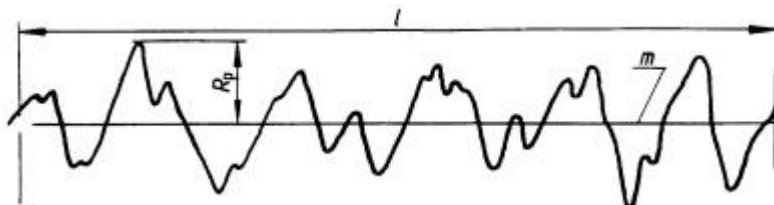


Abb. 3.19 : Die Glättungslinie, [3.3]

### 3.2.7.2 Maximale Profilhöhe $R_y$

Die maximale Profilhöhe ist in DIN 4762 [3.3] als Abstand zwischen der Linie der Profilkuppen  $R_p$  (obere Berührungslinie) und der Linie der Profiltäler  $R_m$  (untere Berührungslinie) innerhalb der Bezugsstrecke ( $l$ ) definiert. Sie ist nach DIN 4768 [3.4] als  $R_{\max}$  die Größte der auf der Gesamtmessstrecke ( $l$ ) vorkommenden Einzelrautiefen, siehe Abb. 3.20. Sie wird auch maximale Rautiefe genannt.

$$R_y = R_p + R_m \quad (3.1)$$

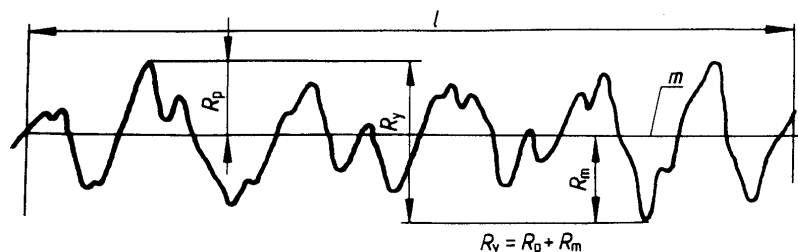


Abb. 3.20 : Die Maximale Profilhöhe, [3.3].

### 3.2.7.3 Arithmetischer Mittenrauwert $R_a$

Der arithmetische Mittenrauwert ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Werte der Profilabweichungen innerhalb der Bezugsstrecke, Abb. 3.21. Er wird weiter in dieser Arbeit abkürzend Mittenrauwert genannt. Der Wert  $R_a$  wird wie folgt berechnet:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3.2)$$

Oder näherungsweise

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.3)$$

mit  $n$  = Anzahl der Profilabweichungen

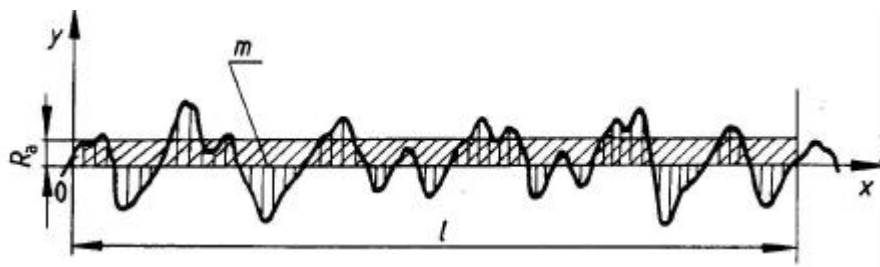


Abb. 3.21 : Der Mittenrauwert, [3.3].

### 3.2.7.4 Profillängenverhältnis $L_r$

Das Profillängenverhältnis ist das Verhältnis der gestreckten Länge des Profils zur Bezugsstrecke. Die gestreckte Länge  $L_o$  des Profils ist die Länge, die sich ergeben würde, wenn der innerhalb der Bezugsstrecke liegende Teil des Profils zu einer geraden Linie gestreckt würde, Abb. 3.22. Es wird auch das Wenzel'sche Quotient genannt.

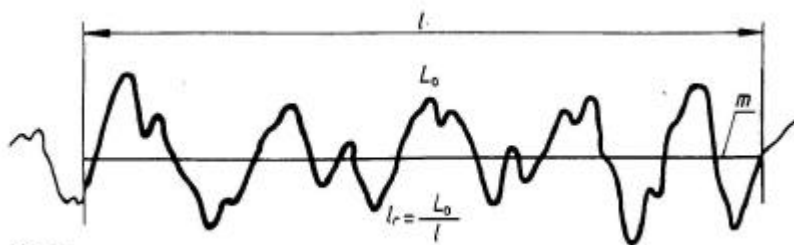


Abb. 3.22 : Das Profillängenverhältnis, [3.3]

$$L_o = \int_0^l \sqrt{1 + \left( \frac{d_y}{d_x} \right)^2} d_x \quad (3.4)$$

$$L_r = \frac{L_o}{l} \quad (3.5)$$

### 3.2.7.5 Profilkuppen

Die Profilkuppe wird als ein nach außen (vom umgebenden Medium zum Material) gerichteter Teil des Profils definiert, der zwei benachbarte Schnittpunkte des Profils mit der Mittellinie verbindet, Abb. 3.23.

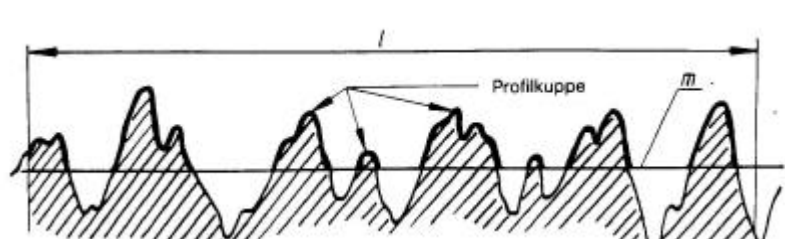


Abb. 3.23 : Die Profilkuppen, [3.3]

### 3.3 Literatur

- [3.1] DIN 4760 : Gestaltabweichungen. Begriffe. Ordnungssysteme. Januar 1982.
- [3.2] DIN 4761 : Oberflächencharakter. Geometrische Oberflächentextur-Merkmale. Begriffe, Kurzzeichen. Juni 1982.
- [3.3] DIN 4762 : Oberflächenrauheit. Begriffe. Oberflächen und ihre Kenngrößen. Juni 1989.
- [3.4] DIN 4768 : Ermittlung der Rauheitskenngrößen  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  mit elektrischen Tastschnittgeräten. Begriffe, Messbedingungen. Mai 1990.
- [3.5] DIN 4776 : Rauheitsmessung. Kenngrößen zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil. Messbedingungen und Auswerteverfahren. Mai 1990.
- [3.6] ISO 1878 : Classification of Instruments and Devices for Measurement and Evaluation of geometrical Parameters of Surface Finish (1974).
- [3.7] JIS B 0601 : Surface Roughness (1976).
- [3.8] JIS B 0610 : Waviness.
- [3.9] BS 1134 : Method for the Assessment of Surface Texture. Part 1, Method and Instrumentation. Part 2, General Information and Guidance (1972).
- [3.10] ANSI B.46.1 : Surface Texture: Surface Roughness, Waviness and Lay (1978).
- [3.11] AS 107C : Surface Finish (rms) (1960).
- [3.12] AS 291D : Surface Texture, Roughness, Waviness and Lay (1964).
- [3.13] Dagnall, H. : Exploring Surface Texture. Rank Taylor Hobson. 1980.

## **4 Versuche**

### **4.1 Einleitung**

In diesem Kapitel werden zuerst das Versuchsprogramm, die Versuchsvorbereitungen sowie die Versuchskörperherstellung dargestellt. Anschließend führt eine detaillierte Betrachtung des 3D-Verfahrens zu einem realistischen Vergleich mit dem Sandflächenverfahren. Hierfür wird die normalerweise eingesetzte Abtastung der aufgerauten Betonoberflächen durch einzelne Tastschnitte durchgeführt. Zuerst werden die Ergebnisse der abgetasteten Einzeltastschnitte betrachtet und bearbeitet, danach werden sie als Gruppe betrachtet und bearbeitet um die gesamte Fläche zu erfassen.

Anschließend werden die zu vergleichenden Verfahren eingesetzt und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Es wird auch versucht, den Einfluss der Veränderung von einzelnen Eigenschaften auf die Ergebnisse darzustellen. Zum Schluss werden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

### **4.2 Versuchsprogramm**

Der Laserstrahl tastet die Oberfläche Schnittweise ab und gibt Sie dann digital wieder. Da das Referenzverfahren, das Sandflächenverfahren, die Oberflächentexturen jedoch flächig erfasst, wurde auch das Abtasten per Laserstrahl in eine flächige Abtastung umgewandelt, indem mehrere lineare Abtastungen parallel nebeneinander durchgeführt wurden.

Um die verschiedenen Oberflächentexturen zu simulieren, die vor Ort aufgrund der verschiedenen eingesetzten Zuschlagssorten und Mischungen entstehen, wurden drei Versuchsserien festgelegt. Jeder Versuchsserie wurde ein Zuschlagsieblinienbereich nach [4.2] zugeordnet.

Die betonierten Versuchsplatten mit den verschiedenen Zuschlagsmischungen wurden dann schrittweise dreimal um ca. 1 mm mit Hilfe der Sandflächenverfahren kontrolliert aufgeraut und anschließend mit dem Laser abgetastet und die Oberflächenkenngrößen berechnet. Anschließend wurden die folgende Einflüsse auf die Oberflächenkenngrößen untersucht:

- Oberflächenrauheiten (1 mm, 2 mm, 3 mm) (nach Kaufmann)
- Korrektor-Empfindlichkeit
- Abtastauflösung (0,5, 1, 3, 6 Messungen/mm)
- Sieblinien (A16, B16, C16)
- Abtastrichtung

Dabei wird untersucht inwiefern das Korrekturverfahren, die eingesetzten Abtastauflösungen und die verschiedene Sieblinien und Abtastrichtungen bei zunehmenden Oberflächenrauheit ein Einfluss auf die Oberflächenkenngrößen haben. Die Daten und Ergebnisse wurden mit dem Referenzverfahren, dem Sandflächenverfahren, und untereinander verglichen.

### 4.3 Versuchsplatten

Es wurden drei Versuchsplatten mit den Abmessungen von jeweils 400mm\*400mm\*120mm hergestellt (A1, B1, C1), Abb. 4.1.

Die Platten hatten eine angestrebte Betongüte von C20/25 nach [4.1], und drei verschiedene Zuschlagmischungen. Die Platte (A1) hatte ein Zuschlaggemisch nach [4.2], im Bereich A16, Platte (B1) im Bereich B16 und Platte (C1) im Bereich C16.



Abb. 4.1 : Die Versuchplatte und ihre Abmessung

### 4.4 Herstellung der Versuchsplatten

Die Versuchsplatten wurden aus Beton eigener Fertigung hergestellt. Sie wurden stehend betoniert, Abb. 4.2. Diese Maßnahme optimierte den Ausnutzungsgrad, da auf diese Weise Ober- und Unterseite der Platte ähnlich strukturiert waren. Der Beton wurde von oben eingeführt und schließlich mit einem Tischrüttler verdichtet. Die Platten verblieben für einen Tag in den Schalungen, die Oberseiten wurde mit feuchten Tüchern abgedeckt. Am zweiten Tag wurde dann die Versuchplatte ausgeschalt und an einem trockenen Ort gelagert.

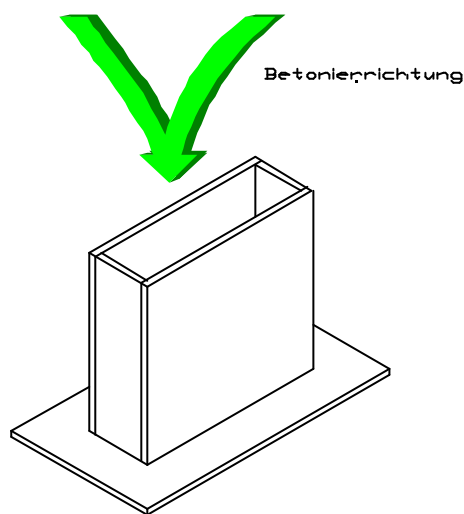


Abb. 4.2 : Schalung und Betonierrichtung für die Versuchsplatten

#### 4.4.1 Zuschlag

Der verwendete Betonzuschlag aus Rheinsand und Rheinkies hatte ein Größtkorn von 16 mm. Per Rüttelmaschine wurde die erforderliche Zuschlagmenge durchgesiebt, Abb. 4.3, und die verschiedenen Korngrößen (<1 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm) wurden getrennt. Die Zuschlagtrennung in den oben genannten Kornklassen erfolgte nach DIN 4226, [4.3].



Abb. 4.3 : Die Rüttelmaschine

Die Einzelkorngrößen wurden zusammen gemischt und geprüft, so dass die gewonnenen Sieblinien der DIN 1045-2, [4.2], so gut wie möglich entsprachen, Abb. 4.4.

Mit der Annahme, dass die kleinste zu erfassende Lochgrößen-Einheit 1 mm ist, wurde diese Größe als kleinste, direkt gesiebte, kontrollierte und getrennte Korngröße gewählt. Daher ist in Abb. 4.4 zu sehen, dass die Sieblinien der Zuschläge kleiner als 1 mm relativ schnell von der genormten Linie abweichen und sich an den tatsächlichen Mengen der Ursprungsmischung orientieren.

Die kontrollierte Zuschlagtrennung war notwendig, um die Mengen der einzelnen Zuschlagkorngrößen in einem bestimmten Betonvolumen sicherzustellen und die Zahl und die Verteilung der verschiedenen Zuschlagkorngrößen in einem bestimmten Querschnitt genau festzulegen.

Das Verfahren stellte zusätzlich eine bessere Trennung zwischen den drei vorgesehenen Serien und klar definierte Oberflächentexturen sicher. Auch die Reproduzierbarkeit der Mischungen und deren Ergebnisse wird auf diese Weise erleichtert.

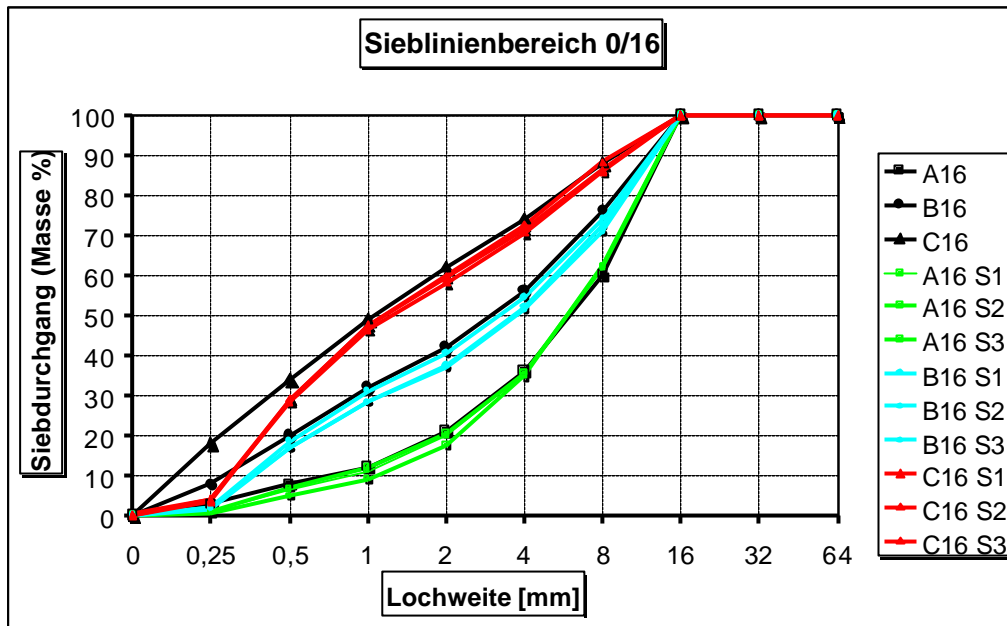
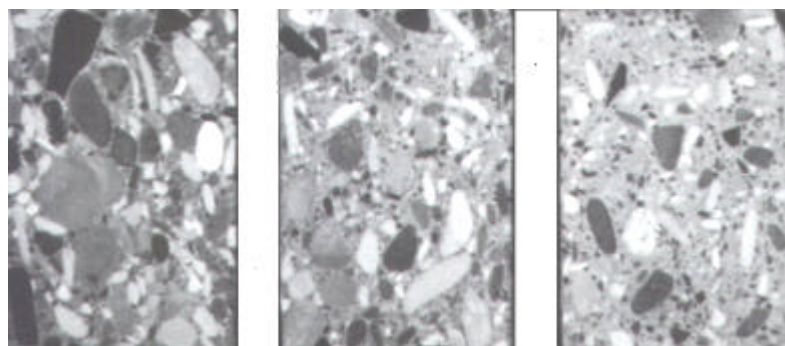


Abb. 4.4 : Die Soll- und Ist- Linien der Zuschlagmischungen, [4.2]



(a) A32

(b) B32

(c) C32

Abb. 4.5 : Betonquerschnitte, [4.10]

In Abb. 4.5 sind drei Betonquerschnitte zu sehen, die erkennen lassen, wie die Sieblinien A, B und C die Verteilung der verschiedenen Zuschlagkorngrößen im Betonquerschnitt beeinflussen. Diese Erkenntnis verdeutlicht der Wichtigkeit einer guten Trennung zwischen den drei Sieblinien und ihren Einfluss auf die späteren Resultate.

#### 4.4.2 Betongüte

Für die Versuchsplatten wurde die Betongüte C20/25 angestrebt. Es wurden, den drei angewendeten Sieblinien entsprechend, drei Betonmischungen entworfen. Die Eigenschaften dieser Betonmischungen sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1 : Ausbreitmaß und Konsistenz [4.2]

Serie (nach Sieblinienbereich)	Ausbreitmaß a [cm]	Konsistenz
A16	38	F2
B16	43	F3
C16	46	F3



Für jede Mischung wurden 15 Probewürfel mit 150 mm Kantenlänge hergestellt. Davon dienen jeweils drei Würfel für die Güteprüfungen bei 28 Tagen Wasserlagerung nach [4.1], als auch für die 28, 60 und 90 Tage Luftlagerungserhärtungsprüfung. Die Hergestellten Betonplatten hatten nach [4.1] die in Tabelle 4.2 aufgeführten Betongüten.

Tabelle 4.2 : Die Druckfestigkeit und Festigkeitsklassen [4.1]

Serie (nach Sieblinienbereich)	Alter [Tage]	Seriendruckfestigkeit $f_{cc,cube}$ (gemessen) [N/mm <sup>2</sup> ]	Seriendruckfestigkeit $f_{cc,cube,28}$ (umgerechnet) [N/mm <sup>2</sup> ]	Festigkeits- klasse
A16	33	35,5	34,5	C25/30
B16	31	46,5	46,0	C30/37
C16	33	41,0	40,5	C25/30

#### 4.5 Aufrauung der Versuchsplatten

Die ausgehärteten Versuchsplatten mussten durch Sandstrahlen stufenweise jeweils um 1mm aufgeraut werden, kontrolliert wurden diese Vorgänge durch das Sandflächenverfahren. Anschließend wurden die Platten mit dem Laser abgetastet. Diese Maßnahmen wurden für die anvisierten Rautiefen 1 mm, 2 mm und 3 mm durchgeführt.

Diese Aufrauung wurde mit einem Sandstrahlgerät erreicht, Abb. 4.6.



Abb. 4.6 : Die Sandstrahlkabine

Das Sandstrahlen wurde solange durchgeführt bis die erwünschten Rauheiten erreicht waren, siehe Abb. 4.7. Der Aufrauungsvorgang per Sandstrahlen wurde mit dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann kontrolliert.



A-Schalungsrau



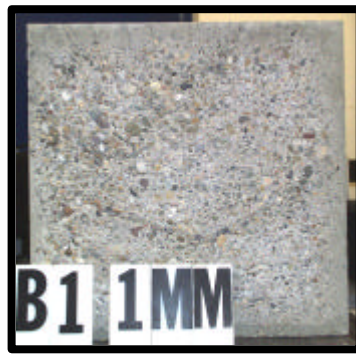
B-Schalungsrau



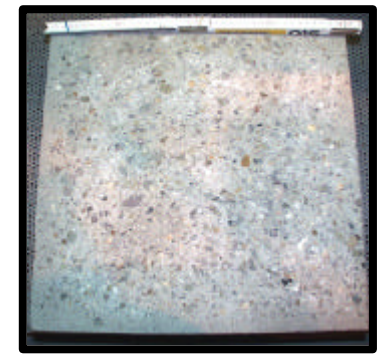
C-Schalungsrau



A-1mm



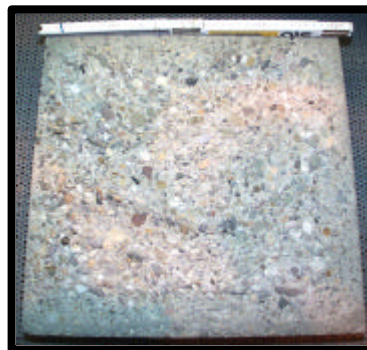
B-1mm



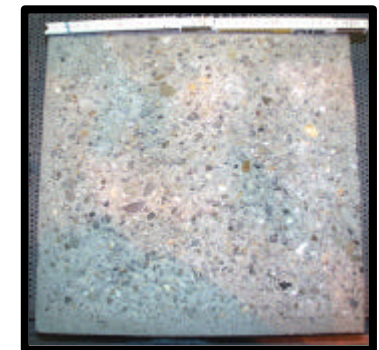
C-1mm



A-2mm



B-2mm



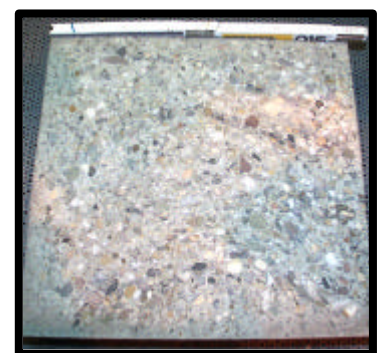
C-2mm



A-3mm



B-3mm



C-3mm

Abb. 4.7: verschiedene Rauheitsgrade

#### 4.6 Sandflächenverfahren nach Kaufmann

Das Sandflächenverfahren dient zur Bestimmung der Rautiefe der Oberflächentexturen [4.5]. Nach diesem Verfahren wird die Rauheit ermittelt, indem eine bestimmte Menge Normsand nach DIN 1164 [4.4] - etwa 14 g entsprechend  $10 \text{ cm}^3$  - auf die zu untersuchende Fläche kegelförmig aufgeschüttet wird. Dieser Sand wird mit einer runden Hartholzscheibe mit einem Durchmesser von 5 cm mit leichten, spiralförmigen Drehbewegungen verteilt.

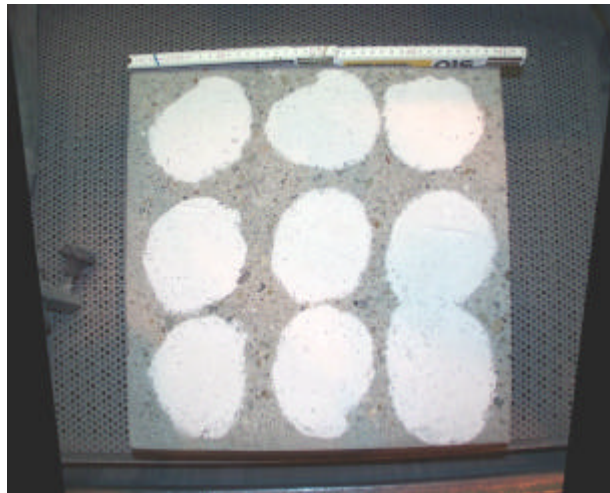


Abb. 4.8 : Die Normsandkreise (Sandflächenverfahren)

Die Erfahrung zeigt, dass ein exakter Kreis nicht zu erzielen ist. Deshalb genügt es, aus mehreren gemessenen Durchmessern den Mittelwert zu errechnen und einen Kreis zu idealisieren. Die Rautiefe wird dadurch ermittelt, dass der gemessene Kreisdurchmesser in die folgende Gleichung eingesetzt wird:

$$R = \frac{V \cdot 4}{\pi \cdot d^2} \quad (4.1)$$

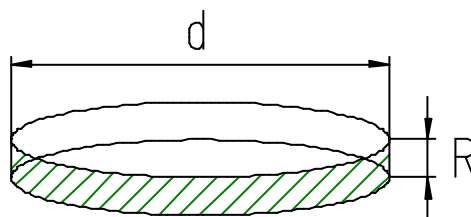


Abb. 4.9 : Höhe  $R$  und Durchmesser  $d$  eines gedachten Sandzylinders

Die Rautiefe  $R$  wird als Höhe des gedachten zylindrischen Körpers mit dem gemessenen Kreisdurchmesser  $d$  und dem Volumen  $V=10 \text{ cm}^3$  definiert, Abb. 4.9. Die Rautiefe  $R$  soll, wie im Abb. 4.10 dargestellt, als Abstand der beiden polygonalen Flächen der Massenausgleichs- und Hülllinie definiert werden.

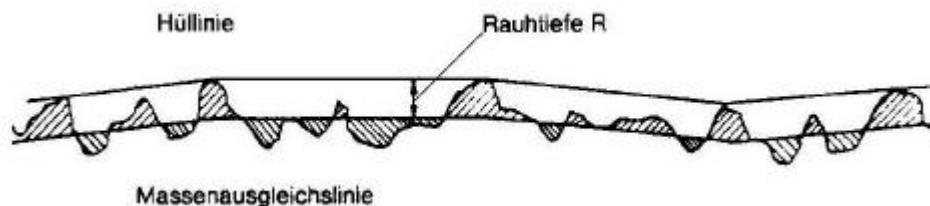


Abb. 4.10 : Ein Abtastquerschnitt

Bei sehr rauen Oberflächen wird eine Erhöhung der Sandmenge empfohlen. Bei Rautiefen unter 0,25 mm ist das Verfahren mit dem angegebenen Sand nicht mehr anwendbar. Die Rautiefen sind ermittelt worden, indem das Sandflächenverfahren mehrmals, über die gesamte Betonoberfläche verteilt, durchgeführt wurde, Abb. 4.8. In Abb. 4.11 kennzeichnen die Kreise die Bereiche, in denen das Sandflächenverfahren eingesetzt worden ist.

Die drei Positionen in den Serien A1-1mm und A1-2mm wurden willkürlich ausgesucht, Abb. 4.11a. Aufgrund der Ergebnisabweichungen des Sandflächenverfahrens im Vergleich zu den erhaltenen Ergebnissen des Laserabtastverfahrens wurde der Anzahl der Kreise in Serie B1-1mm auf fünf erhöht, siehe Abb. 4.11b. Nach der Weiterführung des Sandflächenverfahrens wurde die Anzahl der Kreise in den Serien B1-2mm, C1-1mm und C1-2mm dann nochmals auf neun erhöht. Abb. 4-11c. Die Serien A1-3mm, B1-3mm und C1-3mm wurden mit jeweils neun Positionen durchgeführt, diese neun Positionen wurden jedoch zusätzlich mit einer erhöhten Menge Normsand (20 ml) durchgeführt. Dieser Schritt war notwendig, um eine mögliche Abweichung von den Ergebnissen, die die normale Menge (10 ml) liefern konnte, zu vermeiden. Daran wurde dann später abgesehen, da keine wesentlich abweichenden Ergebnisse festzustellen waren.

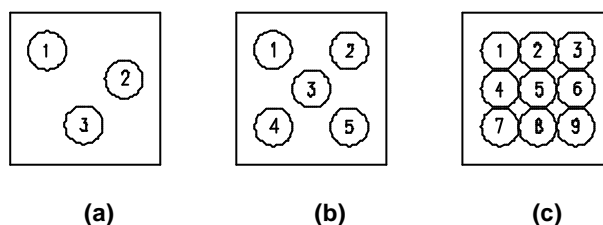


Abb. 4.11 : Anzahl und Positionen der Sandkreise (Sandflächenverfahren)

Tabelle 4.3 : Ergebnisse des Sandflächenverfahrens

Serie	A						B						C						
	1,0		2,0		3,0		1,0		2,0		3,0		1,0		2,0		3,0		
Soll-Rautiefe $R_p$ [mm]																			
Position +	1	10,5	12,0	7,5	8,0	7,0	7,5	11,5	13,0	7,5	8,5	6,5	8,0	9,0	12,0	7,0	7,0	6,5	6,5
	2	10,5	12,5	7,5	9,0	7,75	7,0	8,5	10,0	7,5	8,5	7,25	8,5	10,0	11,8	7,5	7,5	7,5	6,0
	3	12,0	11,0	7,5	8,0	7,0	8,5	10,5	12,0	7,5	8,5	7,0	8,25	11,0	11,0	7,5	8,0	6,0	6,0
	4					7,0	8,25	11,5	11,5	7,5	8,0	6,0	7,25	10,5	11,5	7,5	7,0	6,0	6,5
	5					7,0	6,5	9,5	11,0	6,5	8,5	6,5	7,25	10,0	12,0	6,5	7,0	6,0	6,0
	6					8,25	7,0			7,0	8,0	5,5	6,0	10,8	12,0	7,5	6,0	6,0	6,5
	7					6,5	7,5			7,5	9,0	6,25	7,25	10,0	11,3	7,0	7,5	6,5	6,5
	8					7,0	7,0			7,5	9,0	7,0	7,5	10,0	11,5	8,0	7,0	5,5	7,0
	9					7,5	7,5			8,0	9,0	7,0	7,25	11,0	12,5	7,0	8,5	6,5	8,0

Tabelle 4.4 : Berechnete Rautiefen

Serie		A			B			C		
Die Rauheitsstufen (Soll-Rautiefe $R_p$ ) [mm]		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Position	1	1,0	2,12	2,4	0,85	1,99	2,42	1,15	2,6	3,01
	2	0,96	1,87	2,34	1,5	1,99	2,05	1,08	2,26	2,79
	3	0,96	2,12	2,12	1,0	1,99	2,19	1,05	2,12	3,54
	4			2,19	0,96	2,12	2,9	1,05	2,42	3,26
	5			2,79	1,21	2,26	2,69	1,05	2,79	3,54
	6			2,19		2,26	3,85	0,98	2,79	3,26
	7			2,6		1,87	2,79	1,13	2,42	3,01
	8			2,6		1,87	2,42	1,1	2,26	3,26
	9			2,26		1,76	2,5	0,92	2,12	2,42
Mittelwert der gemessene Rauheit (Ist-Rautiefe $R_p$ ) [mm]		0,97	2,04	2,39	1,10	2,01	2,65	1,06	2,42	3,12

Die Oberflächen wurden, wie schon früher erwähnt, aufgrund ihrer Zuschlagsmischungen in die drei Serien A, B und C unterteilt. Diese Serien wurden aufgeraut und in die drei Soll-Rauheitsstufen (1 mm), (2 mm) und (3 mm) unterteilt. Die Oberflächenrauheit wurde dann mit dem Sandflächenverfahren ermittelt. In Abb. 4.11 repräsentieren die nummerierten Kreise die Einsatzbereiche und in Tabelle 4.3 liefern die Zeilen 1-9 deren Durchmesserwerte. Die für die jeweiligen Kreise gemessenen zwei Durchmesser wurden gemittelt und in Gl. 4.2 eingesetzt. Das Ergebnis liefert den Rauheitswert nach Kaufmann. Diese Werte sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Wie in Tabelle 4.4 dargestellt, ist das Sandflächenverfahren in den Serien A-1mm und A-2mm nur jeweils dreimal eingesetzt worden. Nachdem die gewonnenen Ergebnissen mit dem Laserverfahren verglichen worden waren, zeigten sich Abweichungen in den Ergebnissen. Um den Einfluss, der aus der geringeren Anzahl an Sandflächenverfahren-Einsätzen zu reduzieren, wurde die Anzahl der Messungen in den Serien A-3mm und B-1mm auf fünf gesteigert. Auch hier wurden die Ergebnisse mit den Ergebnissen des Laserabtastverfahrens verglichen und wiederum traten Abweichungen auf. Deshalb wurde entschieden, dass die Zahl der Sandflächenverfahren-Anwendungen auf neun aufzustocken sei, was am Ende zu besseren Ergebnissen führte, siehe hierzu die Serien A-3mm, B-2mm, B-3mm, C-(1,2,3) mm.

Für das weitere Vorgehen, und um die Ergebnisse der Sandflächenverfahren mit denen der Laserabtastverfahrens Vergleichen zu können, werden nur einzelne Messungen aus der Gesamtheit der Einsätze gewählt. Da wie schon erwähnt, die Position der Sandflächenverfahrenseinsätze willkürlich bei Serie A-1mm, A-2mm gewählt worden sind, werden alle drei Einsätze (1, 2, 3) unabhängig von ihren genauen Einsatzposition in betracht genommen. In Serie A-3mm wurden die Einsatzpositionen (1, 5, 9), in Serie B-1mm die Einsatzpositionen (1, 3, 5) verwendet. Bei den Serien B-2mm, B-3mm, C-1mm, C-2mm und C-3mm wurden die Einsatzpositionen (1, 5, 9) eingesetzt, siehe Abb. 4.11, 4.13d und Tabelle 4.4.

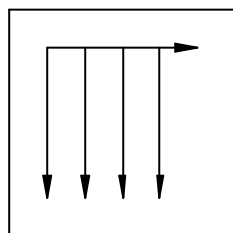
## 4.7 Laserabtastverfahren

Die Erfassung der Oberflächenrauheit wurde mit einem Laserapparat durchgeführt. Der Aufbau dieses Apparates ist in Abb. 4.12 dargestellt.

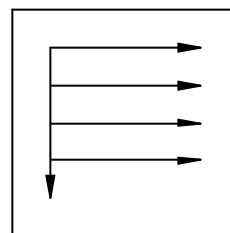


Abb. 4.12. Der Laserapparat

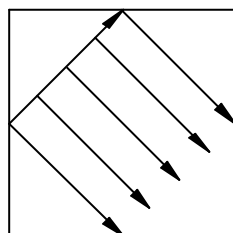
Die Laserabtastprozedur war, wie in Abb. 4.13 dargestellt, in sechs Schritte unterteilt.



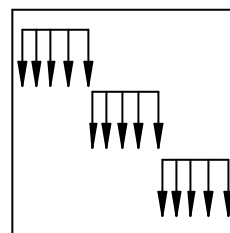
(a) Abtastrichtung N



(b) Abtastrichtung S



(c) Abtastrichtung Q



(d)

Abb. 4.13 : Die verschiedenen Abtastrichtungen

In den Abb. 4.13a, 4.13b und 4.13c ist jeweils eine Prozedur dargestellt. Die drei kleineren, diagonal auf der Platte angeordneten Flächen in Abb. 4.13d stellen jeweils eine Einzelprozedur dar. Für den in Abb. 4.13a, 4.13b und 4.13c dargestellten Abtastauflösung in Vorschubrichtung wurden für die Laserabtastprozedur zwei Auflösungen gewählt, und zwar 3 Messungen/mm, 1 Messungen/mm bzw. 0,5 Messungen/mm. Für die in Abb. 4.13d dargestellten Flächen wurde jeweils eine Auflösung von 6 Messungen/mm gewählt. Die Prozeduren hatten in den Abb. 4.13a, 4.13b und 4.13c eine gesamte Vorschublänge von 350 mm.

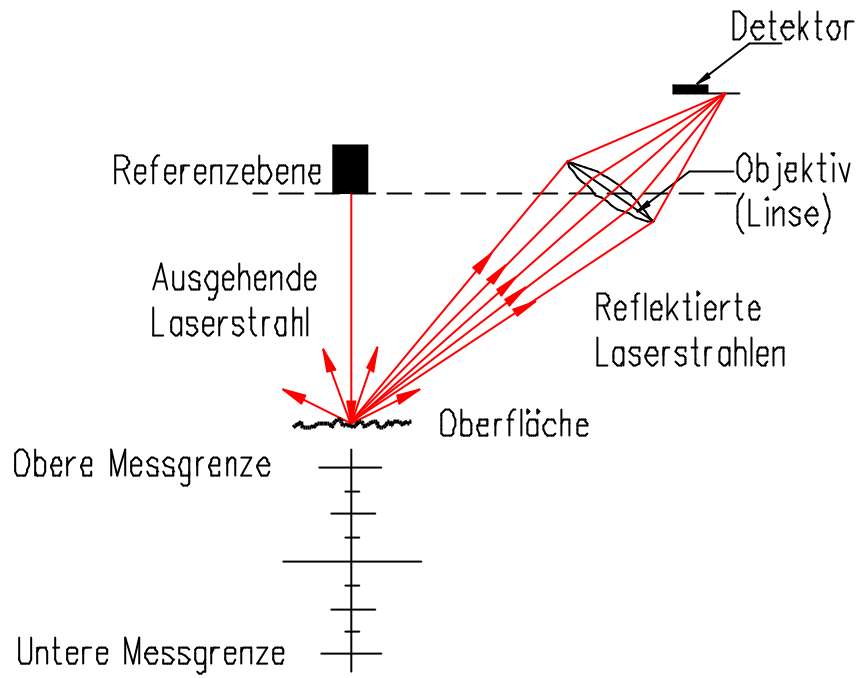
Im Fall der Abb. 4.13d hatten die drei Abtastbereiche jeweils eine Länge von 100 mm. Die Abstände zwischen den einzelnen Linearabtastungen quer zur Vorschubrichtung wurden einheitlich mit 1 mm festgelegt.

#### **4.7.1 Fehlmessungen**

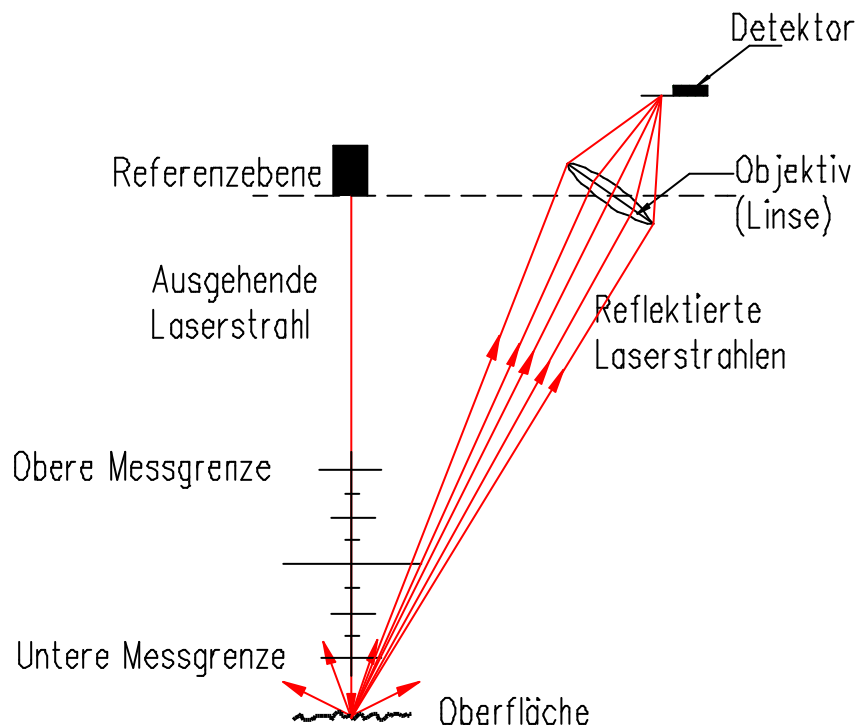
Beim Abtasten der Betonoberflächen fällt der Laserstrahl senkrecht auf die Oberfläche und wird von der abgetasteten Fläche, bei Erfüllung der Gl. 2.1, in Richtung der Detektor des Lasermesskopfes reflektiert, geschieht dies wird ein Messsignal registriert. Dann wird mit Hilfe des Triangulationsverfahrens (siehe Kapitel 1) den Abstand zur Oberfläche festgestellt. Es kann unter bestimmten Voraussetzungen zu Fehlmessungen kommen, deren Einzelwerte nicht zu der Gesamtheit der Oberfläche passen. Diese Fehlmessungen können mehrere Ursachen haben.

- (1) Messen oberhalb der oberen Laserkopfmessgrenze (Fehlmessungen)
- (2) Messen unterhalb der unteren Laserkopfmessgrenze (Fehlmessungen)
- (3) Unterbrechung des Laserstrahls (Fehlmessung)
- (4) Systembedingte Signalstörungen ( Ausreißer)

Fehler aufgrund der ersten beiden Ursachen, Abb. 4.14a und 4.14b, können reduziert werden, indem der Abstand des Laserkopfs zu der abzutastenden Fläche so eingestellt wird, dass die Werte innerhalb des Messbereiches des Apparates liegen. Auf eine Korrektur kann aber trotzdem nicht ganz verzichtet werden. Die beiden letzt genannten Ursachen können nicht verhindert werden, da ihre Fehlerquelle im System selbst begründet ist, Abb. 4.14d. Die verschiedenen Fehlermessungen in ein unkorrigiertes Profil sind in Abb. 4.15 dargestellt. Abb. 4.16 stellt das Profil nach dem Korrekturverfahren dar.

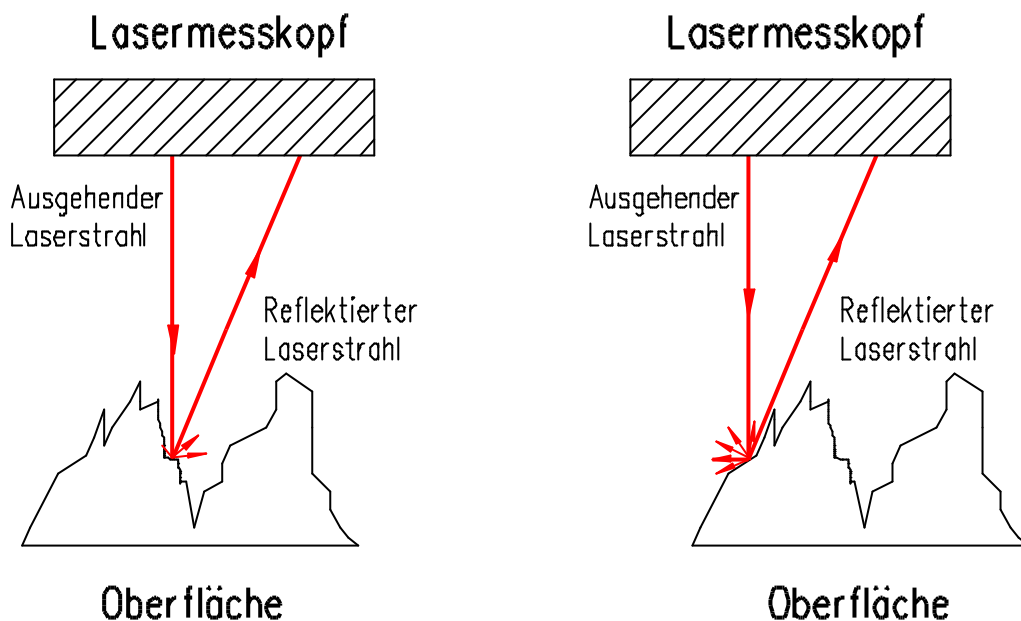


**(a) : Messung Oberhalb der Messgrenze**

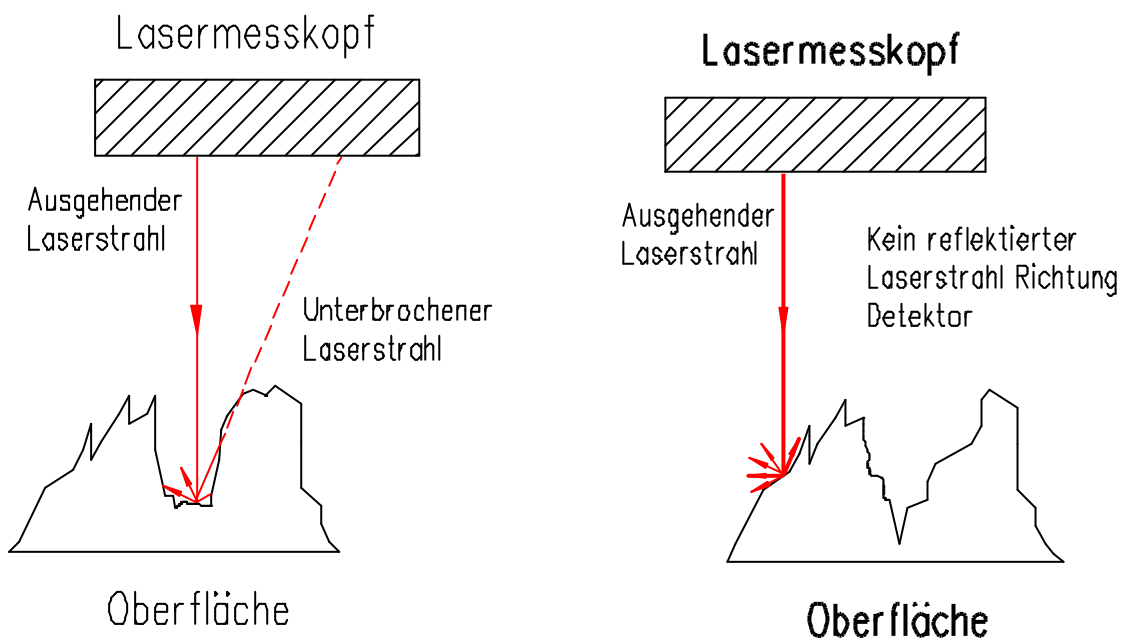


**(b) : Messung Unterhalb der Messgrenze**





(c) : Reflektion des Laserstrahles Richtig der Detektor



(d) : Unterbrechung oder fehlende Reflektion des Laserstrahles Richtung der Detektor

Abb. 4.14 : Unterschiedliche Ursachen für die Fehlmessungen

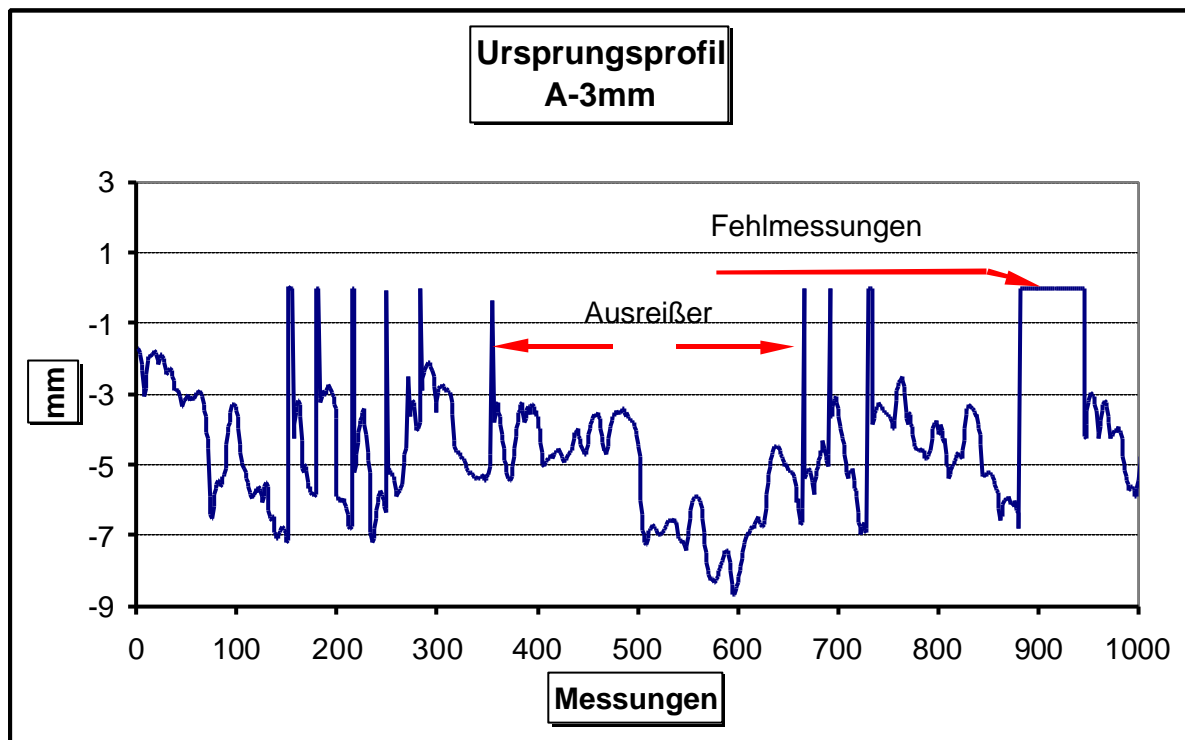


Abb. 4.15 : Ausreißer und Fehlmessungen

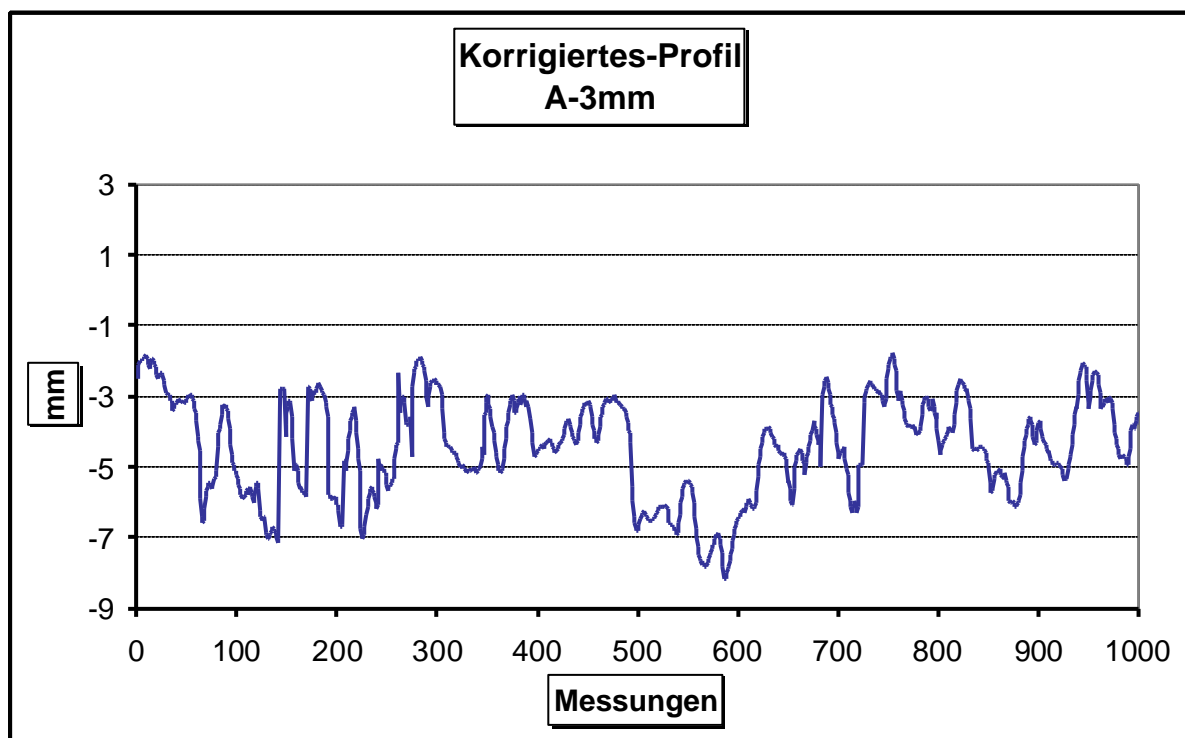


Abb. 4.16 : Das Profil nach der Korrektur

Es war zu beobachten, dass der reflektierte Laserstrahl mit zunehmender Oberflächenrauheit immer häufiger durch herausragende Spitzen gestört wurde. Da dieses Phänomen nicht völlig vermeidbar ist, auch eine Wiederholung der Abtastung nicht immer zu einem besseren Ergebnis führte und das Löschen der fehlerhaften Bereiche innerhalb einer abgetasteten Gesamtoberfläche zu einer starken Verfälschung und Manipulation der Endergebnisse führt, musste eine andere Lösung gefunden werden. In [4.6] wird ein Rechenverfahren vorgeschlagen, in dem eine Fehlmessung mathematisch definiert wird und aufgrund dieser Definition dann eine Korrektur vorgenommen wird. Um herauszufinden welcher Korrekturfaktor eingesetzt werden muss, wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt.

Die durch die Fehlmessungen entstandenen Werte müssen so korrigiert werden, dass die Endergebnisse nicht zu stark manipuliert werden. Ein derartig geeigneter Korrekturfaktor wurde in den Berechnungen verwendet.

#### 4.7.1.1 Korrekturverfahren

Am Anfang mussten zuerst die Fehlmessungen von Typ 1, 2 und 3 behandelt werden. Hierfür wurden für die einzelnen Bezugsstrecken (Kapitel 2) Mittellinien gebildet. Die Werte der Teilstrecken, auf denen die Fehlmessungen erschienen sind, wurden mit den Werten der Mittellinie ersetzt. Nachdem diese Schritte beendet waren, wurden die Fehler von Typ 4 (Ausreißer) behandelt.

Ausreißer sind lokale Fehlmessungen, die zu den davor liegenden und nachfolgenden Werten in keiner vernünftigen Relation stehen und die deshalb die abgetastete Fläche nicht richtig wiedergeben. Die Relation zu den vorherigen und nachfolgenden Werten ist festzulegen; dazu werden die folgenden Bedingungen verwendet [4.6]:

$$\begin{aligned} \text{B1: } & \Delta h_{5,1} > 4(\Delta h) & \text{und} & \Delta h_{5,9} > 4(\Delta h) \\ \text{B2: } & \Delta h_{5,2} > 3(\Delta h) & \text{und} & \Delta h_{5,8} > 3(\Delta h) \\ \text{B3: } & \Delta h_{5,3} + \Delta h_{5,4} > 3(\Delta h) & \text{und} & \Delta h_{5,6} + \Delta h_{5,7} > 3(\Delta h) \end{aligned}$$

Siehe Abb. 4.17a.

Diese Bedingungen wurden zusätzlich ergänzt um mögliche Fehlmessungen in Talrichtung auch zu erfassen, Abb. 4.17b Mit  $\Delta h$  wird der Grenzwert gezeichnet ab dem ein Wert als Fehlmessung eingestuft wird.

$$\begin{aligned} \text{B4: } & -\Delta h_{5,1} > 4(\Delta h) & \text{und} & -\Delta h_{5,9} > 4(\Delta h) \\ \text{B5: } & -\Delta h_{5,2} > 3(\Delta h) & \text{und} & -\Delta h_{5,8} > 3(\Delta h) \\ \text{B6: } & -(\Delta h_{5,3} + \Delta h_{5,4}) > 3(\Delta h) & \text{und} & -(\Delta h_{5,6} + \Delta h_{5,7}) > 3(\Delta h) \end{aligned}$$

Um die oberen Werte zu definieren, wurde eine Serie von neun aufeinander folgenden Werte verwendet.

Der fünfte Wert, der in der Mitte positioniert ist, hat dann vier Werte vor und vier Werte nach ihm. Diesem fünften Wert gilt unsere Aufmerksamkeit. Der jeweilige Höhenunterschied zwischen dem fünften Wert und den restlichen acht Werten wird wie folgt berechnet, Abb. 4.17a und 4.17b:

- $h_5 - h_1 = \Delta h_{5,1}$
- $h_5 - h_2 = \Delta h_{5,2}$
- $h_5 - h_3 = \Delta h_{5,3}$
- $h_5 - h_4 = \Delta h_{5,4}$
- $h_5 - h_6 = \Delta h_{5,6}$
- $h_5 - h_7 = \Delta h_{5,7}$
- $h_5 - h_8 = \Delta h_{5,8}$
- $h_5 - h_9 = \Delta h_{5,9}$

Der Grenzwert  $\Delta h$  wird berechnet aus dem kleinsten Höhenunterschied den der Laserkopf erfassen kann - in diesem Fall 0,002 mm [4.8] -, multipliziert bei dem unbekanntem Faktor:

$$\Delta h = 0,002 * \text{Korrekturfaktor} \tag{4.2}$$

Der Wert  $\Delta h$  wird dann mit den Bedingungen B1 – B6 verglichen.

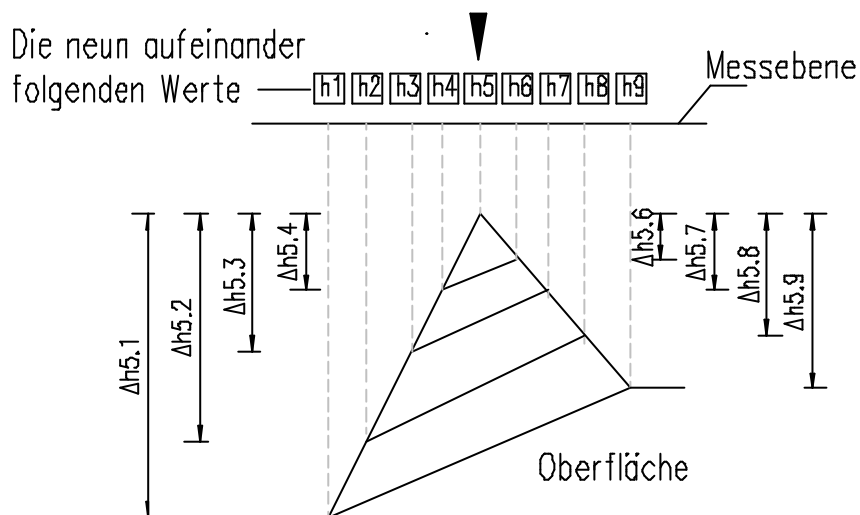


Abb. 4.17a : Definition der Höhenunterschiede des Korrekturverfahrens in Bergrichtung

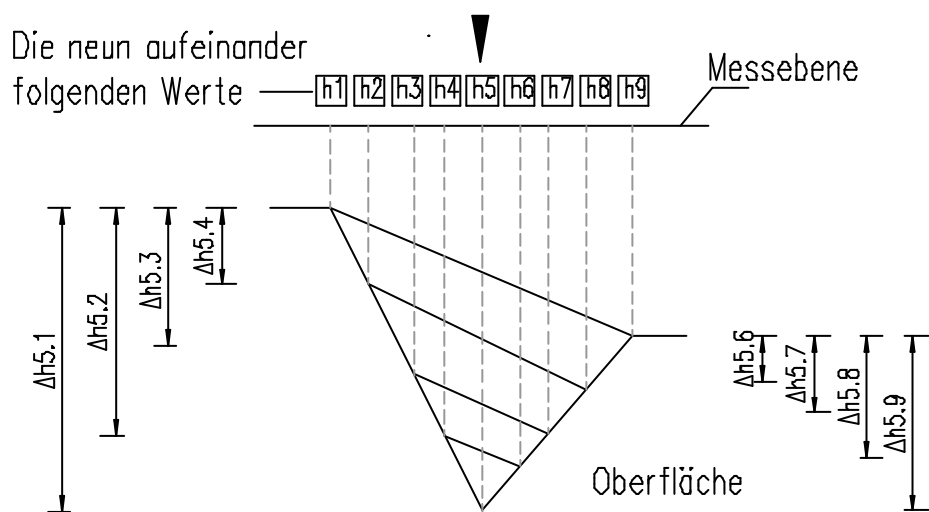


Abb. 4.187b : Definition der Höhenunterschiede des Korrekturverfahrens in Talrichtung

Ist die Bedingung B1 oder B6 erfüllt, werden die Werte der Punkte 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8 durch den aus den Punkten 1 und 9 interpolierten Wert ersetzt. Ist die Bedingung B2 oder B5 erfüllt, werden die Werte der Punkte 3, 4, 5, 6 und 7 durch den aus den Punkten 2 und 8 interpolierten Wert ersetzt.

Wenn die Bedingung B3 und B6 erfüllt ist, werden die Werte der Punkte 4, 5 und 6 durch den aus den Punkten 3 und 7 interpolierten Wert ersetzt. Die Serie der neun Werte wird dann um eine Zeile versetzt und der gesamte, oben genannte Vorgang wird bis zum Ende der Bezugslänge wiederholt.

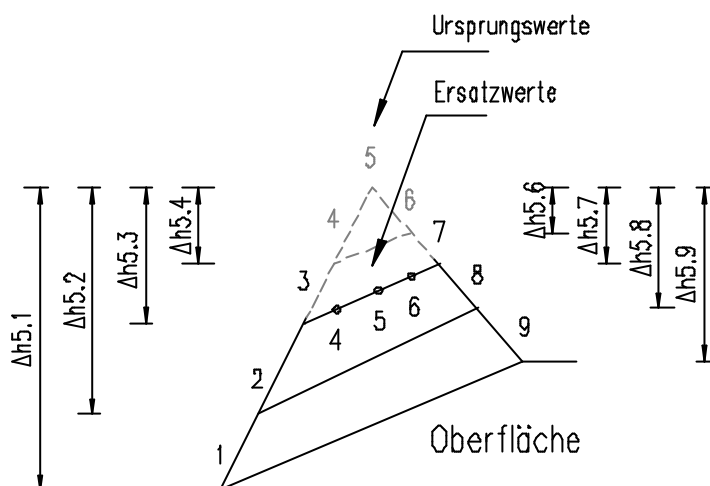


Abb. 4.198 : Korrektur und Ersetzen der Ursprungswerte durch Interpolation

Beispiel:

$\Delta h$  wird mit Gl. 4.2 berechnet und dann mit den Bedingungen B1 – B6 verglichen. Die Bedingung B3 soll hier zutreffen. In diesem Fall würden die Werte der Punkte 4, 5 und 6 durch den Wert der Interpolation zwischen Punkt 3 und 8 ersetzt, Abb. 4.18.

#### 4.7.1.2 Korrekturfaktor

Der Korrekturfaktor spielt eine wichtige Rolle im Korrekturverfahren. Gerät er zu hoch, werden manche Fehler nicht erkannt. Gerät er zu niedrig, werden zu viele Werte manipuliert. In beiden Fällen hat dies negativen Einfluss auf die Endergebnisse. Es ist wahrscheinlich, dass der eingesetzte Faktor auch von der Abtastauflösung abhängig ist. Bei einer groben Abtastauflösung von 0,5 Messungen/mm wird vermutlich ein anderer Faktor erforderlich sein als bei einer hohen Abtastauflösung von 6 Messungen/mm. Diesen Faktor gilt es nun zu finden.

Als Anfangswert wurde der Korrekturfaktor mit dem dimensionslosen Wert 100 festgelegt. Dies entspricht einem  $\Delta h$ -Wert von 0,2 mm. Anschließend sollte der Einfluss einer Senkung bzw. Erhöhung dieses Korrekturfaktors untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde der Anfangswert 100 an der „Senkungsseite“ mit einem Senkungswert von 10%, 50% und 90% korrigiert, und an der „Steigerungsseite“ mit einem Steigerungswert von 110%, 150%, 300%, 600% und 1000%. Das entspricht Korrekturfaktoren von 10, 50, 90, 100, 110, 150, 300, 600 und 1000. Dabei entspricht ein Korrekturfaktor von 10 einer starken Einflussnahme, und ein Korrekturfaktor von 1000 praktisch keiner bzw. einer sehr geringeren Einflussnahme.

Es wurden die Abtastmuster aus den Abb. 4.13a, 4.13b und 4.13c eingesetzt. Die Ergebnisse des Abtastmusters aus Abb. 4.13a wurden mit dem Buchstaben N, die aus Abb. 4.13b mit S und die aus der Abb. 4.13c mit Q gekennzeichnet.

Da die Ergebnisse der unterschiedlichen Abtastmuster N, Q, S im wesentlichen denen der schon durchgeführten Untersuchungen entsprachen, wird hier nur auf das wesentliche eingegangen. Die Ergebnisse werden später als Ergebnisse der Serie A präsentiert. Die detaillierten Untersuchungen sind in Anhang 2 dargestellt.

Im Folgenden soll die Bedeutung der Korrekturfaktoren (10 bis 1000) erklärt werden. Laut Definition aus Absatz 4.8.1.1 ist

$$\Delta h = 0,002 * \text{Korrekturfaktor} \quad (4.2)$$

Ein zu kleiner Korrekturfaktor von 10 führt zu einer starken Manipulation der Daten, und zu einer zu starken Abweichung von den Urwerten. Andererseits führt ein zu hoher Korrekturfaktor von 1000, der praktisch einer Null-Korrektur entspricht, dazu, dass die Fehlmessungen nicht beseitigt werden. Je nachdem, welche Oberflächenkenngößen berechnet werden, führt dies zu unterschiedlich hohen Abweichungen. Die Ergebnisse werden serienweise besprochen. Bei der Darstellung und Besprechung des Einflusses des Korrekturfaktors wurde ersichtlich, dass eine neue Definition eingeführt werden sollte. Die Erhöhung des Korrekturfaktors führt zu einer Verringerung der Daten-Manipulation aber zu einem optischen Kurvenanstieg, also zu einer gegenteiligen Bewegung, Abb. 4.25 bis Abb. 4.27. Um dieser Verwirrung entgegen zu wirken und um die Diskussion zu erleichtern, wird der Ausdruck „Korrektur-Empfindlichkeit“ eingeführt.

#### 4.7.1.3 Korrektur-Empfindlichkeit $K_E$

Die Korrektur-Empfindlichkeit wird mathematisch wie folgt definiert:

$$K_E = \frac{1}{\text{Korrekturfaktor}} \cdot 1000 \quad (4.3)$$

Er soll den Grad der Manipulation, der an den Werten vorgenommen wird, definieren.

Das Einsetzen der Korrekturfaktoren in Gl. 4.3 führt zu den folgenden, in Tabelle 4.5 dargestellten Korrektur-Empfindlichkeits-Werten.

**Tabelle 4.5 : Die Korrektur-Empfindlichkeit**

Korrekturfaktor	10	50	90	100	110	150	300	600	1000
Korrektur-Empfindlichkeit $K_E$	100	20	11	10	9	6	3	2	1

Das Ergebnis lässt sich wie folgt zusammenfassen: Bei einer Erhöhung der Korrektur-Empfindlichkeit steigert sich der Manipulationsgrad der Daten und eine Verringerung der Werte führt zu einer abnehmenden Kurve. So lässt sich der Einfluss der Korrektur-Empfindlichkeit leichter darstellen, Abb. 4.28 bis Abb. 4.30.

#### 4.7.1.4 Rechen-Programm

Um die Berechnungen durchführen zu können, musste ein Computerprogramm geschrieben werden. Die Begrenzung der Möglichkeiten der verfügbaren Hard- und Software, erzwang eine Begrenzung der Datenmenge. Die Entscheidung, ob 0,5, 3 oder 6 Messungen/mm zum Einsatz kommen, wurde auch von den begrenzten Möglichkeiten der vorhandenen Rechner beeinflusst. Die erfassten Daten wurden zuerst als Text-Datei gespeichert und dann mit einem selbst geschriebenen Computer-Programm weiter bearbeitet.

---

Das Programm ist in der Programmiersprache „Visual Basic for Applications“, welches eine Komponente von Microsoft Excel ist, geschrieben worden. Dieses Programm ist in der Lage, das Korrekturverfahren durchzuführen und die verschiedenen Oberflächenkenngrößen zu berechnen.

Da der Quellcode des Programms sehr Umfangreich ist, wird auf ihre Darstellung verzichtet.

## **4.7.2 Einflüsse auf Oberflächenkenngrößen**

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Einflüsse auf die Oberflächenkenngrößen untersucht:

- Oberflächenrauheiten (1 mm, 2 mm, 3 mm) (nach Kaufmann)
- Korrektor-Empfindlichkeit (Korrekturfaktor 10, 50, 90, 100, 110, 150, 300, 600, 1000)
- Abtastauflösung (0,5, 1, 3, 6 Messungen/mm)
- Sieblinien (A16, B16, C16)
- Abtastrichtung (N, S, Q)

Als Vergleichsverfahren wurde durchgehend das Sandflächenverfahren eingesetzt.

Der Einfluss der Abtastrichtung wird nicht als Hauptpunkt behandelt, sondern wird bei den ersten drei der oben genannten Punkten mit untersucht. In DIN 4768 [4.8] wird unter den Messbedingungen die Abtastrichtung in der Richtung gewählt, in der sich die größte Rauheit ergibt. Da diese Bedingung bei Betonoberflächen optisch nicht zu erkennen und zu erfüllen ist, wird sie untersucht, um zu sehen, ob sie bei Betonoberflächen einen Einfluss hat.

### **4.7.2.1 Einfluss des Korrekturfaktors**

#### **4.7.2.1.1 Glättungstiefe $R_p$**

Die wichtigste Größe ist die Glättungstiefe, denn sie ist die Größe, die direkt mit den Ergebnissen des Sandflächenverfahrens verglichen werden kann. Deswegen wird auf die Glättungstiefe detailliert eingegangen. Um eine Übersicht über das üblicherweise eingesetzte Einzeltastschnittverfahren zu bekommen, werden zuerst die Ergebnisse der einzelnen Abtastschnitte dargestellt. In den Abb. 4.19 bis 4.24 repräsentiert die Abszisse die Tastschnittnummer über die gesamte Breite der abgetasteten Fläche.

In den Abb. 4.19, 4.21 und 4.23 werden die Ergebnisse der einzelnen Tastschnitte über die gesamte Fläche der Serie A-1mm dargestellt. Zusätzlich wird der Einfluss des Korrekturfaktors auf die Streuung der Ergebnisse gezeigt. In Abb. 4.19 wurde der Korrekturfaktor 10, in Abb. 4.21 der Korrekturfaktor 600 und in Abb. 4.23 der Korrekturfaktor 1000 eingesetzt. Es ist zu erkennen, dass der Korrekturfaktor die Streuung der Ergebnisse verringert.

Es ist ersichtlich, dass es bei dem herkömmlichen Einzelspaltenabtastverfahren wichtig ist, wo die Abtastung stattfindet. Wie die Abb. 4.19, 4.21 und 4.23 zeigen, streuen die Ergebnisse der Einzelspaltenabtastungen erheblich. Diese Abweichungen können unter Umständen 300% – 400% betragen. Deshalb kann das Einzelspaltenabtastverfahren nur begrenzt einsetzbar sein und gilt dann nur für den Einsatzort.

In den Abb. 4.20, 4.22 und 4.24 werden die Ergebnisse der einzelnen Abtastschnitte der Serie A-3mm dargestellt. Die Streuung der Einzelabtastschnitte ist wieder zu erkennen. Der Einfluss des Korrekturfaktors ist hier offensichtlich nicht so ausgeprägt. Da sich die Ergebnisse der anderen Serien ähnlich verhalten, wird auf deren Darstellung hier verzichtet.

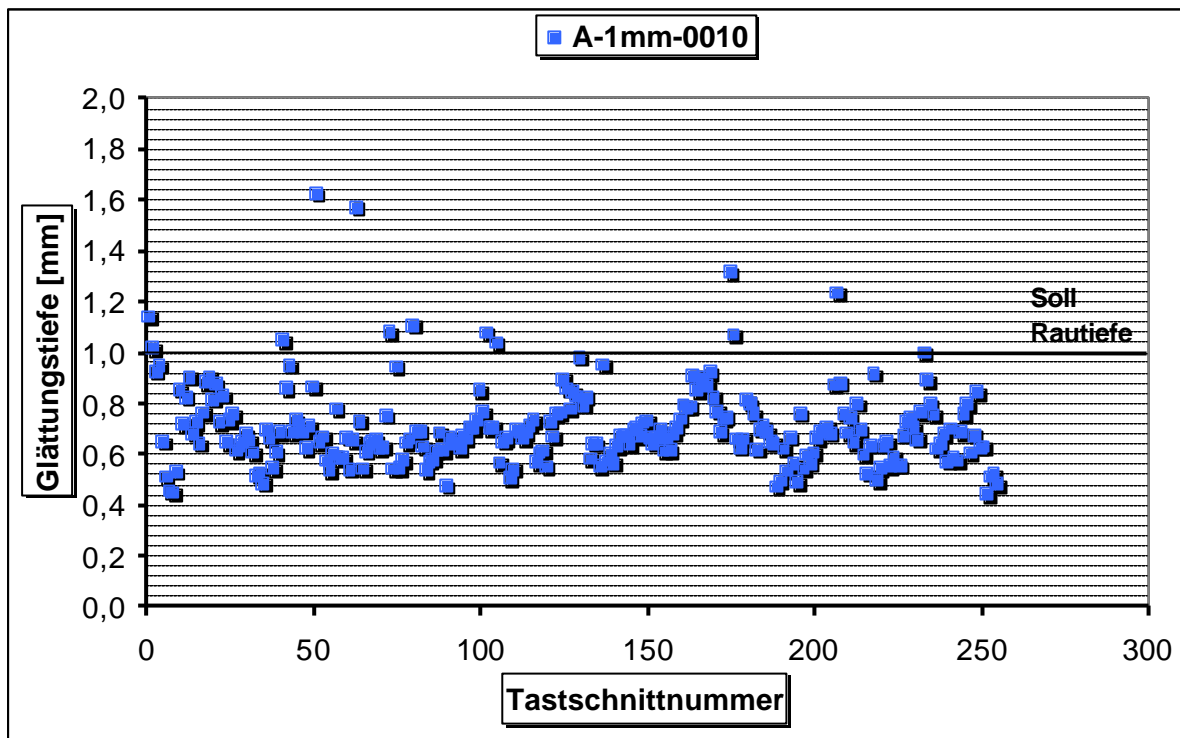


Abb. 4.19 : Einzeltastschnitten, Glättungstiefen bei Rauheitsstufe 1mm und Korrekturfaktor 10

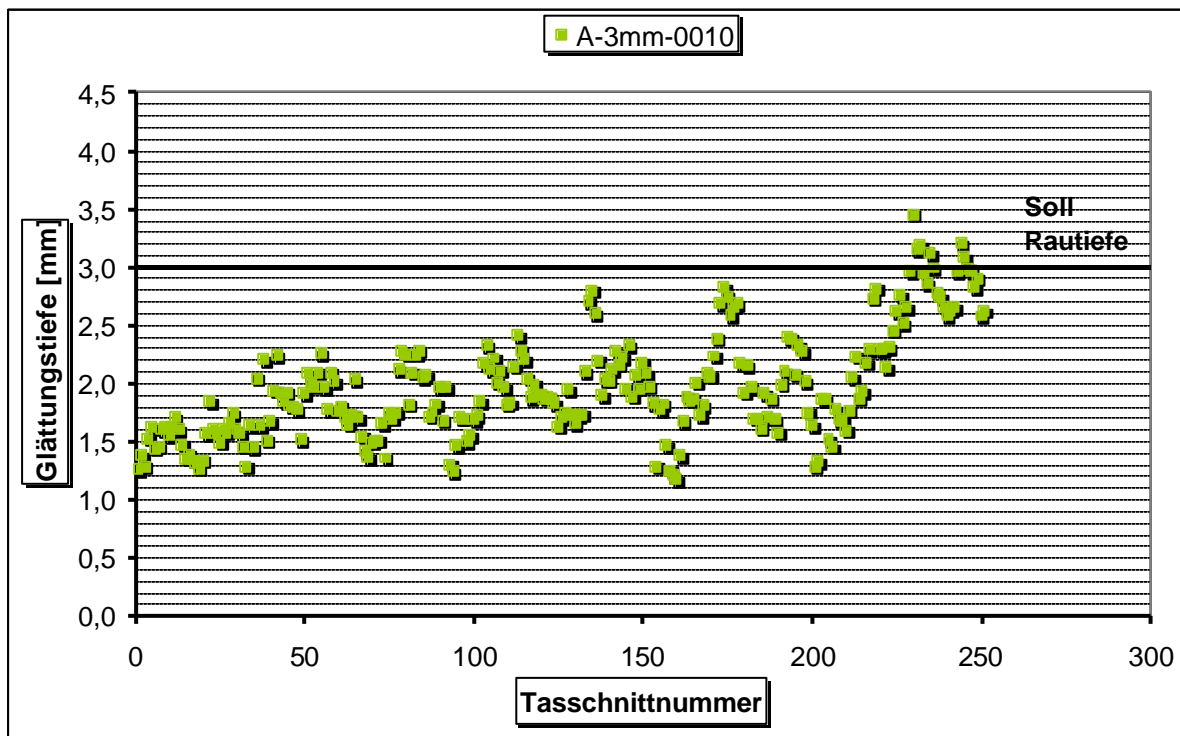


Abb. 4.20 : Einzeltastschnitten, Glättungstiefen bei Rauheitsstufe 3mm und Korrekturfaktor 10



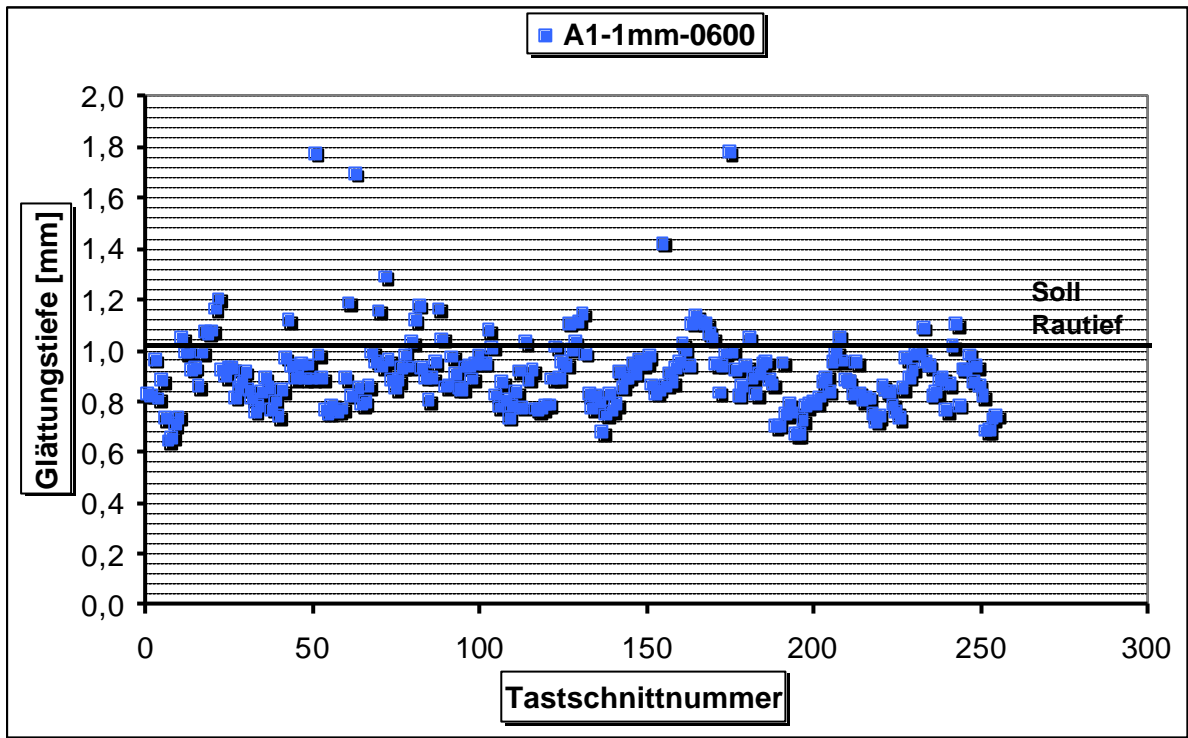


Abb. 4.21 : Einzeltastschnitten, Glättungstiefen bei Rauheitsstufe 1mm und Korrekturfaktor 600

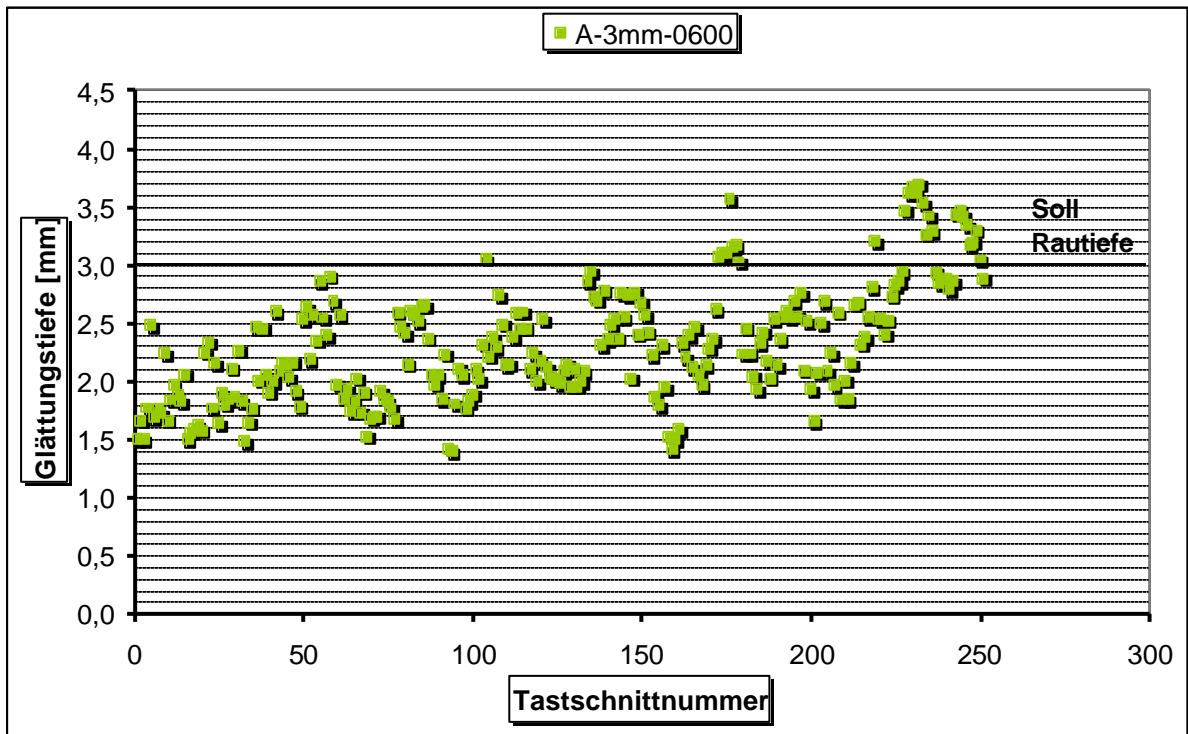


Abb. 4.22: Einzeltastschnitten, Glättungstiefen bei Rauheitsstufe 3mm und Korrekturfaktor 600

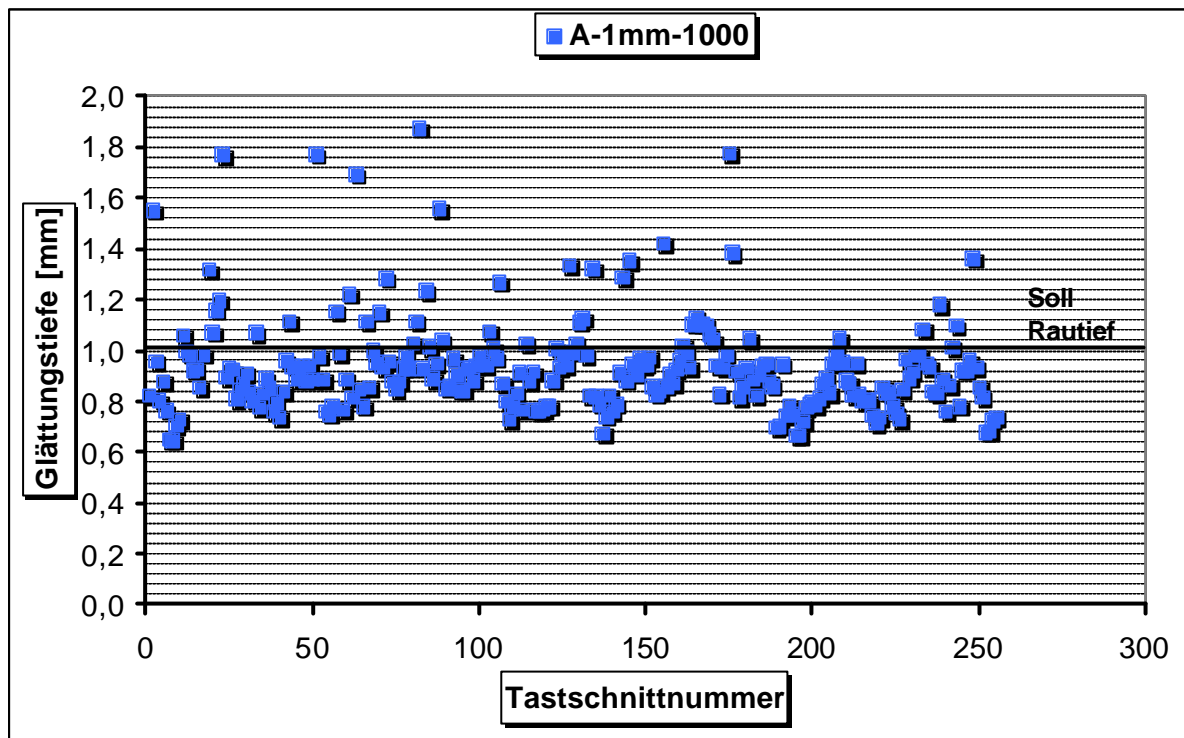


Abb. 4.23 : Einzeltastschnitten, Glättungstiefen bei Rauheitsstufe 1mm und Korrekturfaktor 1000

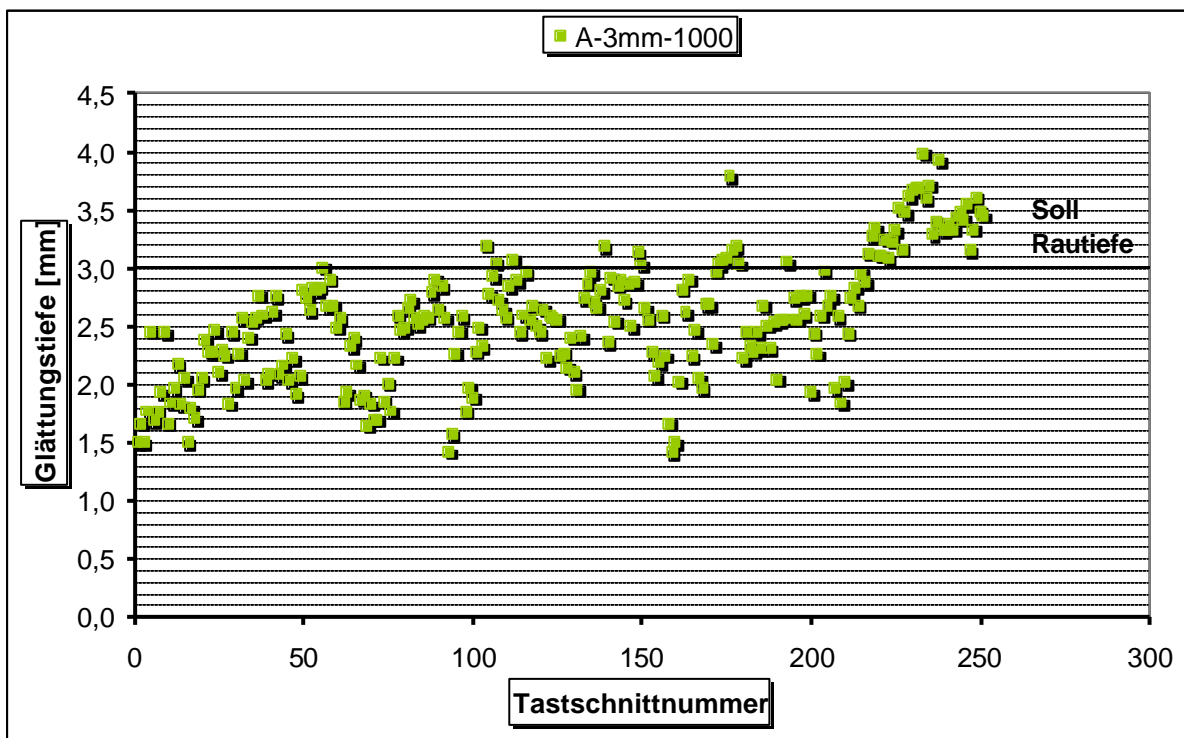


Abb. 4.24 : Einzeltastschnitten, Glättungstiefen bei Rauheitsstufe 3mm und Korrekturfaktor 1000

---

In den Abb. 4.25, 4.26 und 4.27 ist der Einfluss des Korrekturfaktors auf die Serien A, B und C dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Verhalten der drei Serien sehr ähnlich ist. Die Gruppe der Abtastauflösung 0,5 Messungen/mm reagiert am empfindlichsten auf den Korrekturfaktor. Die zwei Gruppen der Abtastauflösung 3 Messungen/mm und 6 Messungen/mm reagieren weitaus geringer und zeigen das, indem sie relativ früh einen waagerechten Kurvenverlauf einnehmen. Der waagerechte Kurvenverlauf bedeutet, dass der Korrekturfaktor weniger Einfluss nimmt und das wiederum spiegelt stabile Werte wider. Aber immerhin nehmen die Werte alle Gruppierungen mit zunehmendem Korrekturfaktor (abnehmende Manipulation) bis zum Korrekturfaktor 1000 zu.

Die Abb. 4.28, 4.29 und 4.30 lassen bezüglich der Frage, bei welcher Korrektur-Empfindlichkeit die besten Ergebnisse zu erreichen sind, keine einfache Aussage zu. Um dies zu erleichtern, werden die Abb. 4.28, 4.29 und 4.30 derart umgestaltet, dass die Abszissen eine logarithmische Aufteilung aufweisen, Abb. 4.31, 4.32 und 4.33.

Nun ist zu erkennen, dass die Werte einer mehr oder weniger ausgeprägten, spiegelverkehrten "S"- Kurve folgen. Dieses "S" ist bei den Ergebnissen der Gruppe mit der Abtastauflösung 0,5 Messungen/mm am klarsten zu sehen. Bei den Gruppen mit der Abtastauflösung 3 Messungen/mm und 6 Messungen/mm nehmen die Werte eine eher langgezogene S-Form ein. Dieses Verhalten ist bei allen drei Gruppen zu beobachten. Die logarithmischen Art der Darstellungen wird empfohlen und weiter verfolgt.

Bei dem Abtastmuster bzw. der Abtastrichtung in den Abb. 4.34, 4.35 und 4.36 sind im allgemeinen keine nennenswerten Verhaltenabweichungen von den vorher beschriebenen Konstellationen festzustellen.

Zu erwähnen ist jedoch, dass das Verhalten der Gruppe der Abtastauflösung 1 Messungen/mm hier eine Zwischenposition zwischen der Gruppe 0,5 Messungen/mm und 3 Messungen/mm einnimmt. (siehe Anhang 2), während der Unterschied der Rauheitsmessungen mit 3 je mm und 6 je mm gering ist. Wie bei allen vorherigen Darstellungen ist eine Korrektur-Empfindlichkeit von 2 bis 3 einzusetzen.

Ein Einfluss der Abtastrichtung ist bei der Glättungstiefe nicht zu erkennen.

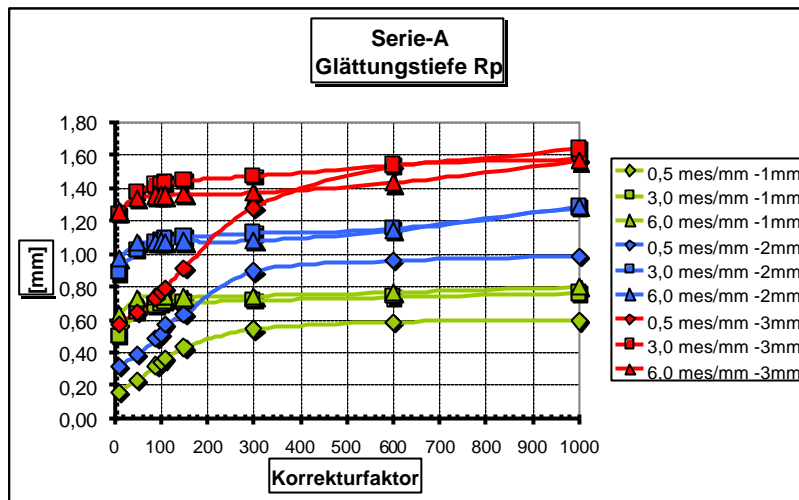


Abb. 4.25 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A

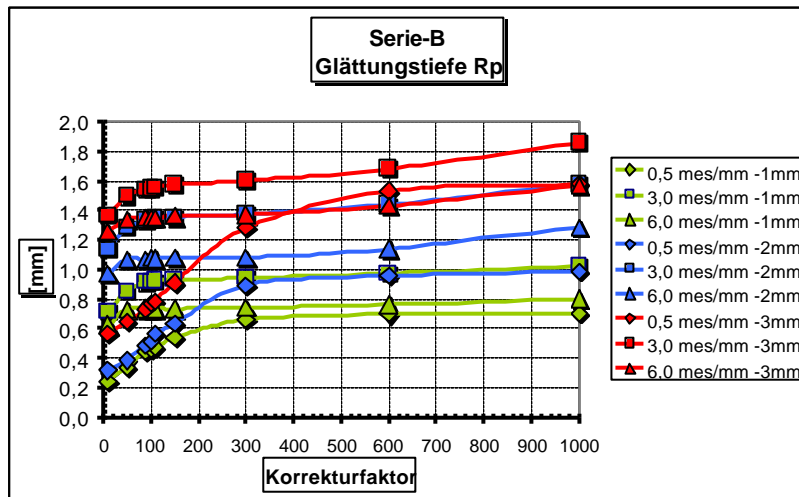


Abb. 4.26 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B

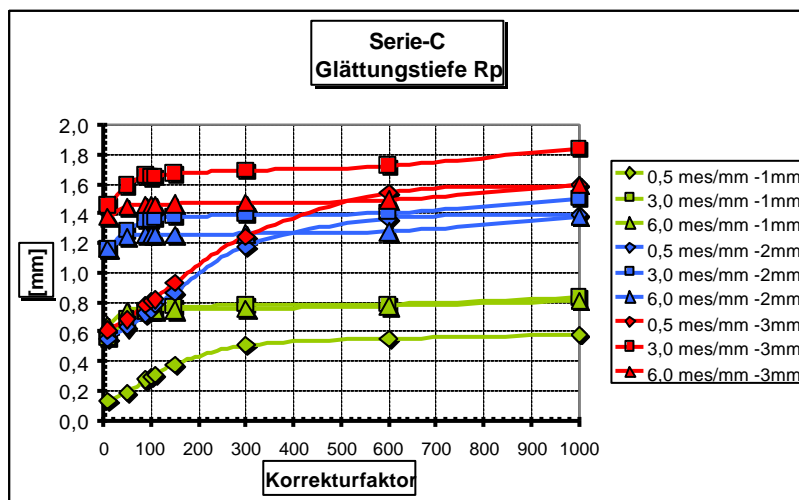


Abb. 4.27 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C

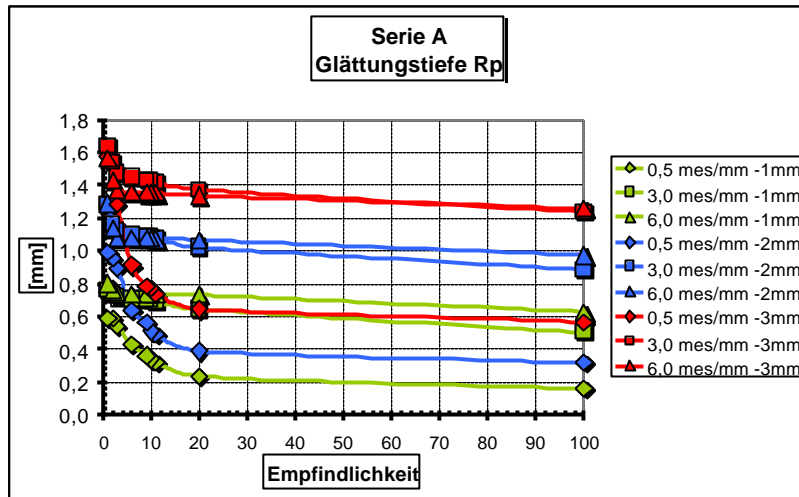


Abb. 4.28 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

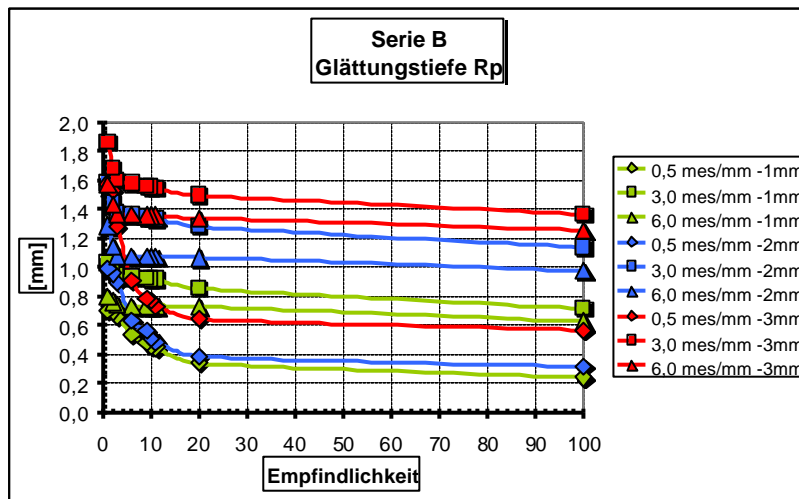


Abb. 4.29 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

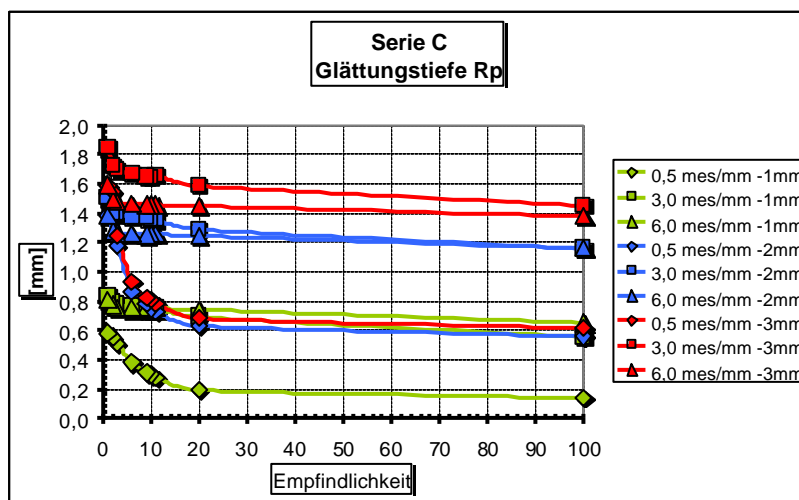


Abb. 4.30 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C

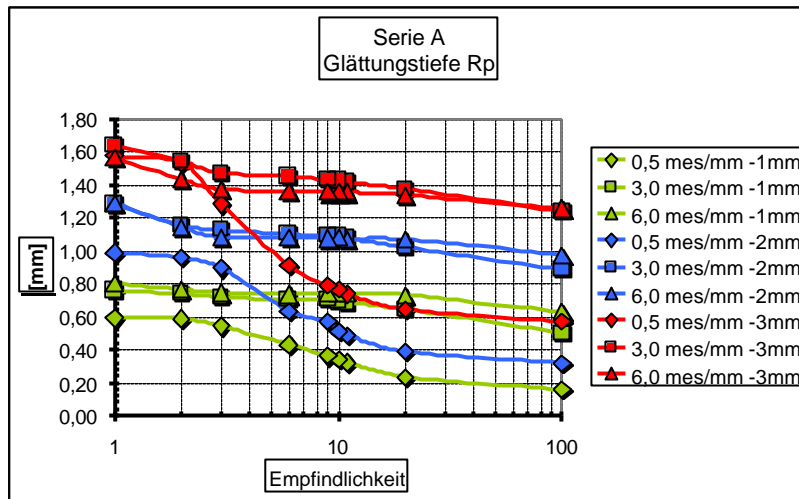


Abb. 4.31 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

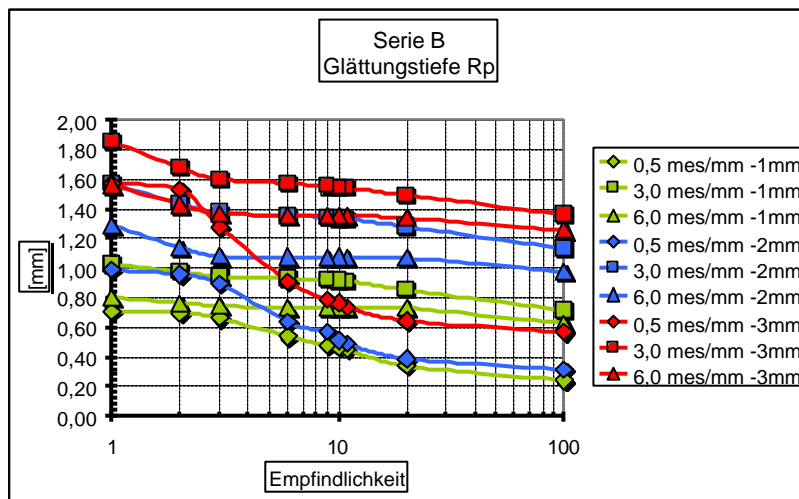


Abb. 4.32 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

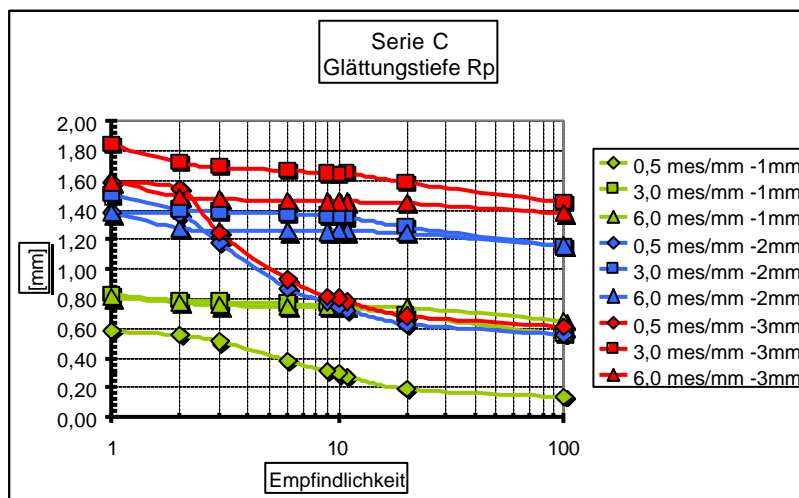


Abb. 4.33 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C

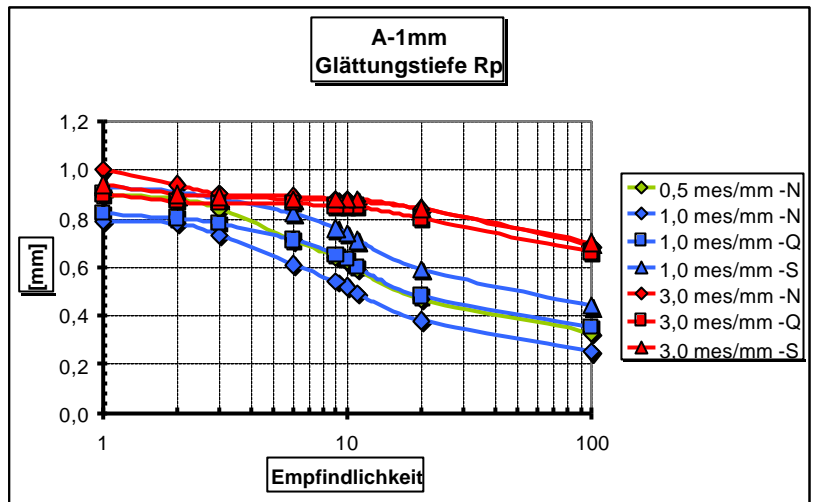


Abb. 4.34 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-1mm

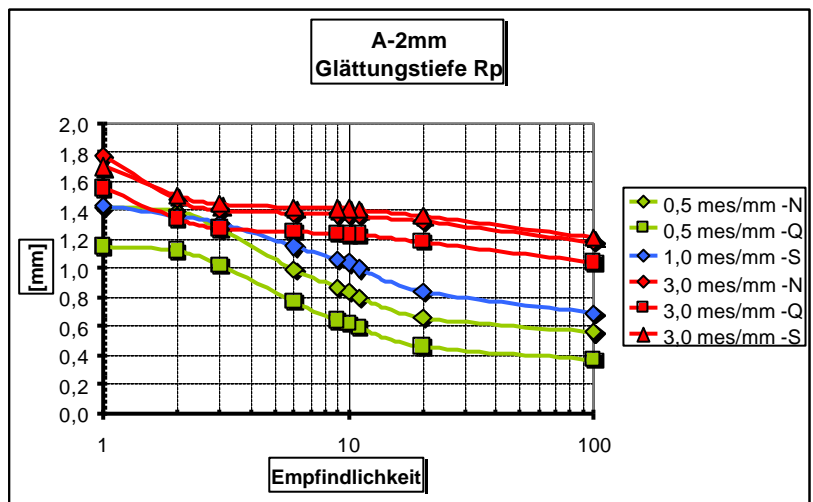


Abb. 4.35 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-2mm

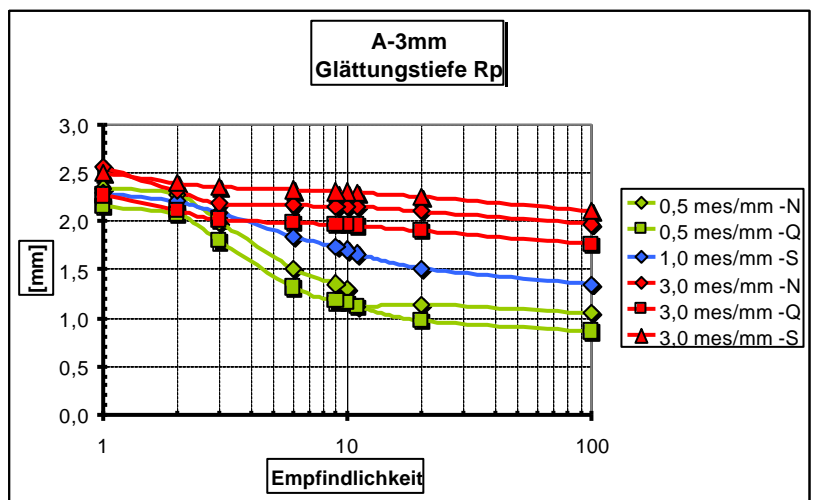


Abb. 4.36 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-3mm

#### 4.7.2.1.2 Maximale Rautiefe $R_y$

Bei der maximalen Rautiefe ist zu erwarten, dass die Ergebnisse sich stark verändern, da sie sich an den maximalen Höhen und maximalen Tiefen des Abtastprofils orientieren, welche mit hohen Fehlerquellen belastet sind. Diese beide Werte werden direkt von dem Korrekturfaktor beeinflusst. Bei allen Serien ist zu beobachten, dass schon ab dem Faktor 1000 eine starke Abnahme der erfassten Werte zu registrieren ist. Dies tritt bei der Gruppe der Abtastauflösung 0,5 Messungen/mm weniger deutlich auf und ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass bei dieser groben Abtastauflösung nicht alle Spitzenwerte erfasst werden, Abb. 4.37, 4.38 und 4.39.

Bei der Darstellung der Ergebnisse in Bezug auf die Korrektur-Empfindlichkeit verändert sich das Bild. Die Ergebnisse, liegen nun innerhalb eines kleinen Korrektur-Empfindlichkeitsbereichs 1-20, Abb. 4.40, 4.41 und 4.42. In der logarithmischen Darstellung nehmen die Werte die Form eines gespiegelten bzw. langgezogenen und gespiegelten „S“ an. Auch hier zeigt sich, dass die Werte der gröberen Abtastauflösung mit zunehmender Korrektur-Empfindlichkeit stärker abnehmen als bei den anderen beiden Abtastauflösungen, Abb. 4.43, 4.44 und 4.45.

Auch bei der Abtastrichtung, Abb. 4.46, 4.47 und 4.48 zeigt sich, dass sich die maximalen Rautiefen entsprechend der vorherigen Konstellationen verhalten. Aber es bestätigt sich hier aufgrund der starken Abweichungen die Notwendigkeit des Einsatzes eines Korrekturfaktors. Der Einfluss der Abtastrichtung ist hier nicht herauszulesen, da sich die Ergebnisse unabhängig von ihrer Abtastrichtung ähnlich verhalten. Die empfohlene, einzusetzende Korrektur-Empfindlichkeit liegt zwischen 2 und 3.



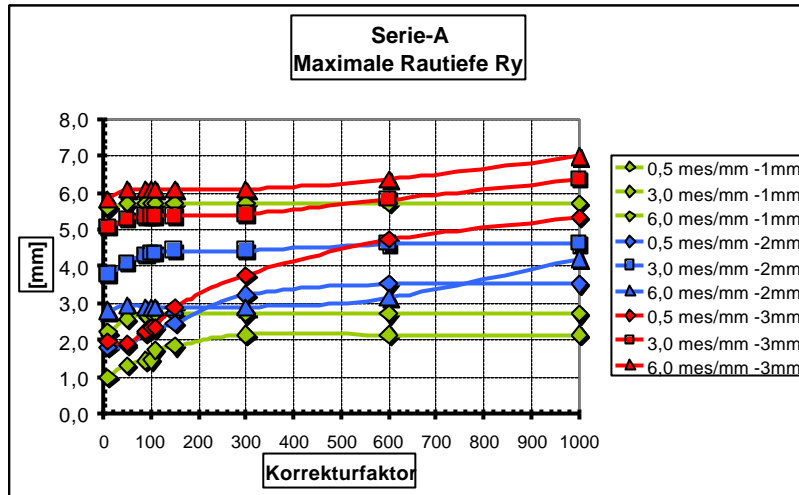


Abb. 4.37 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A

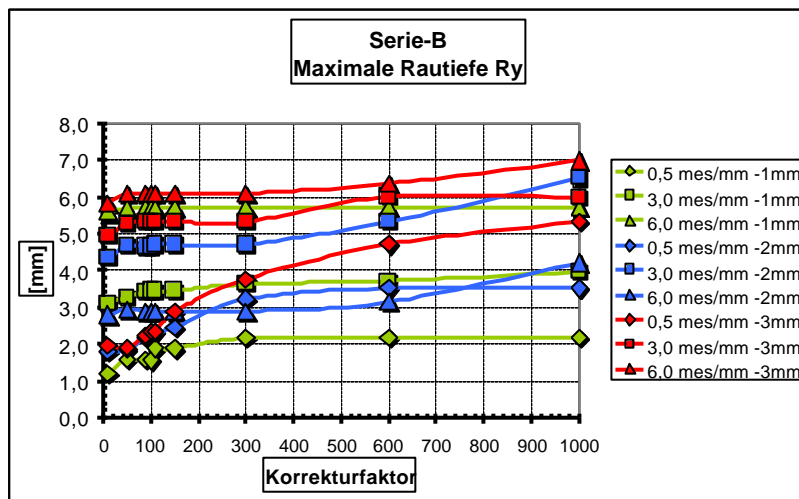


Abb. 4.38 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B

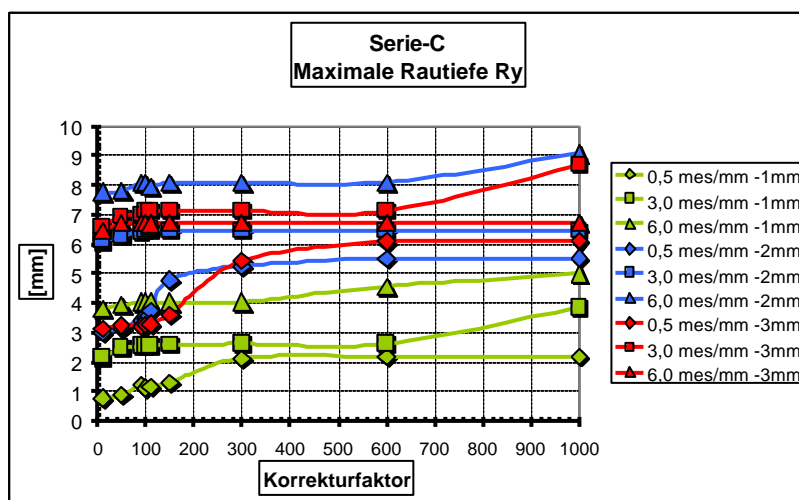


Abb. 4.39 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C

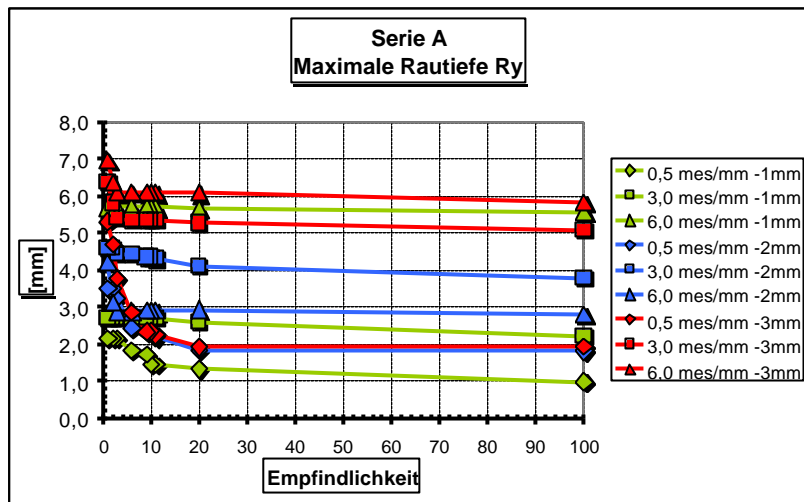


Abb. 4.40 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

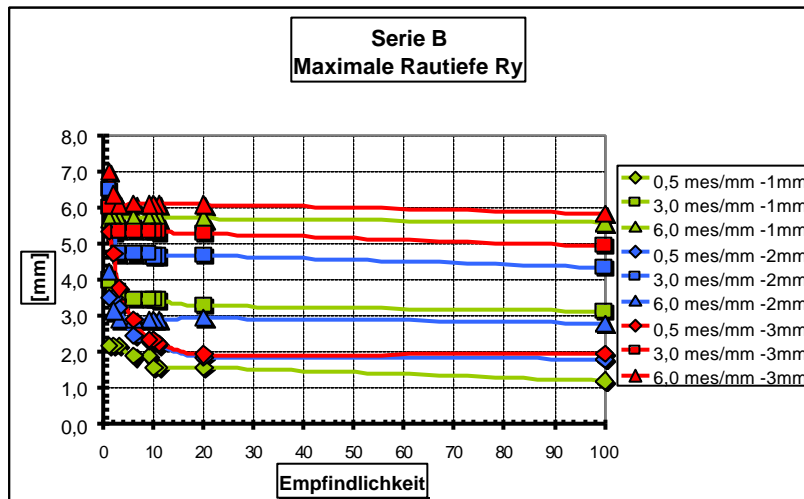


Abb. 4.41 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

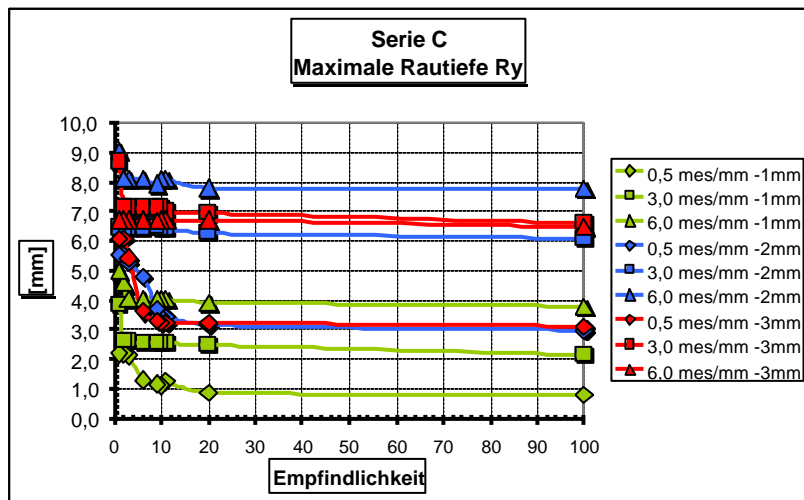


Abb. 4.42 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C

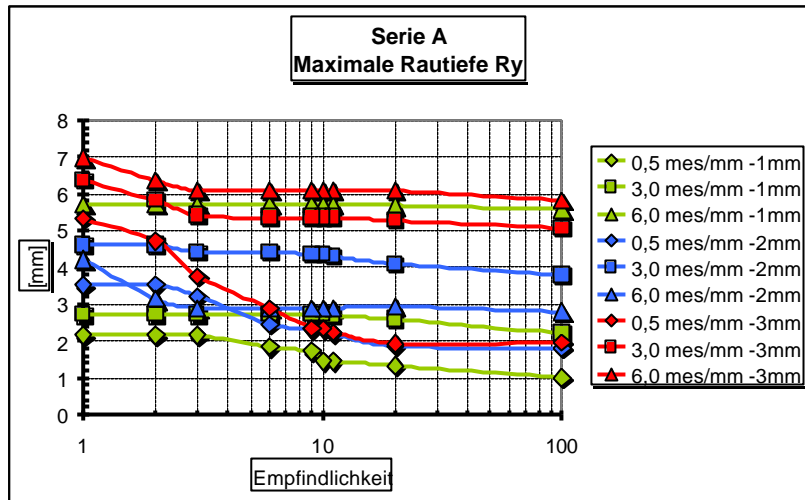


Abb. 4.43 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

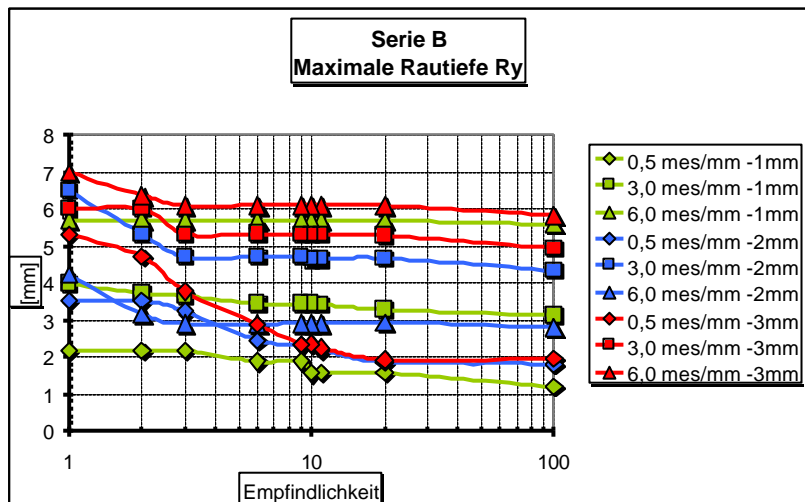


Abb. 4.44 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

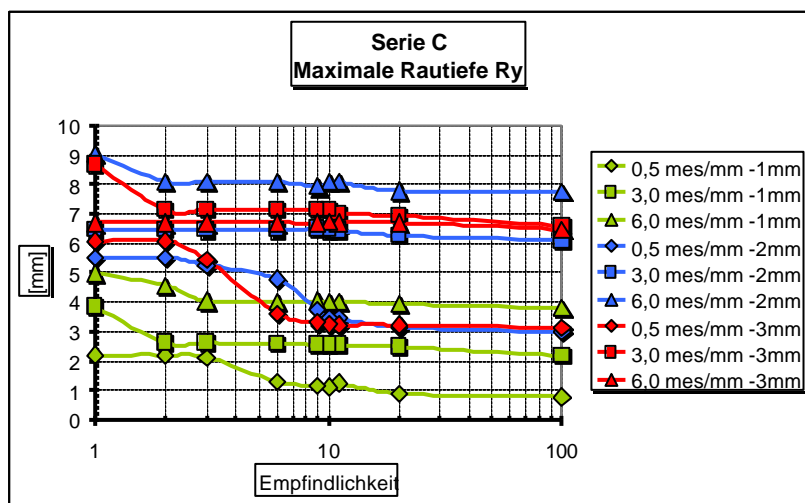


Abb. 4.45 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C

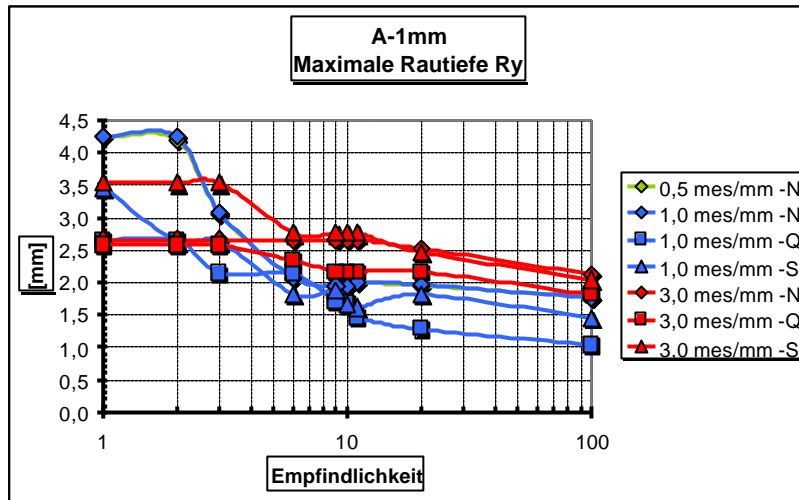


Abb. 4.46 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-1mm

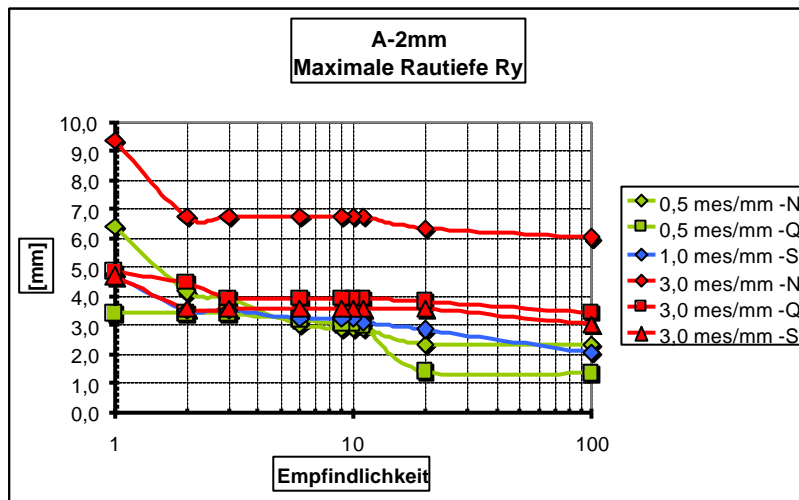


Abb. 4.47 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-2mm

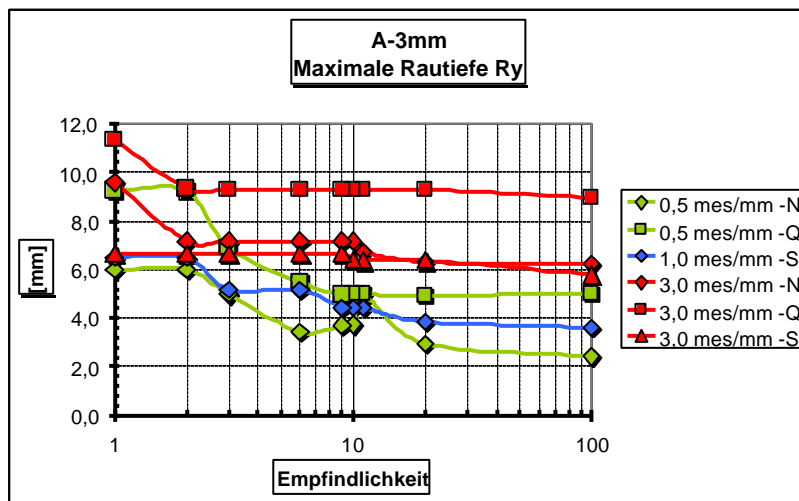


Abb. 4.48 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-3mm

#### 4.7.2.1.3 Mittenrauwert $R_a$

In den Abb. 4.49, 4.50 und 4.51 zeigen alle drei Gruppierungen mit ihrer jeweiligen Abtastauflösung sehr moderate Verhaltensmuster. Die Ergebnisse nehmen hier relativ schnell stabile Werte an. Die Werte der zwei Abtastauflösungen 3 Messungen/mm und 6 Messungen/mm bleiben nah beieinander. Bei 0,5 Messungen/mm bestätigt sich auch der Trend, dass die Werte hier stärker beeinflusst werden. Diese moderaten Verhaltensmuster sind auf die Definition des Mittenrauwertes zurückzuführen, (Kapitel. 2).

Die Darstellung im Bezug auf der Korrektur-Empfindlichkeit folgt in Abb. 4.52, 4.53 und 4.54. Die Werte in der Form der logarithmischen Darstellung nehmen auch hier die Form eines gespiegelten bzw. langgezogenen und gespiegelten „S“ an. Auch hier zeigt sich, dass die Werte der gröberen Abtastauflösung mit zunehmender Korrektur-Empfindlichkeit stärker abnehmen als bei den anderen beiden Abtastauflösungen, Abb. 4.55, 4.56 und 4.57.

Im Allgemeinen liefert der Mittenrauwert bei der Abtastrichtung auch hier ähnliche Verhaltensmuster, siehe Abb. 4.58, 4.59 und 4.60. Es sind keine abweichenden Werte vorhanden, die einen eventuellen Einfluss der Abtastrichtung haben könnte. Die empfohlene einzusetzende Korrektur-Empfindlichkeit liegt zwischen 2 und 3.

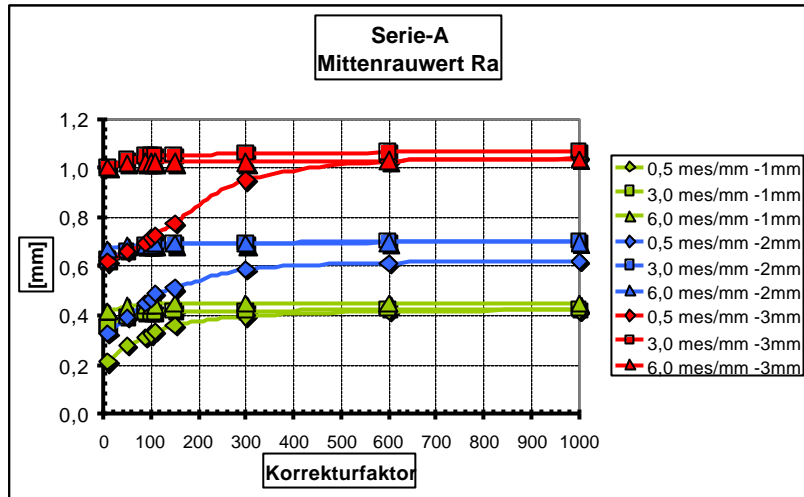


Abb. 4.49 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A

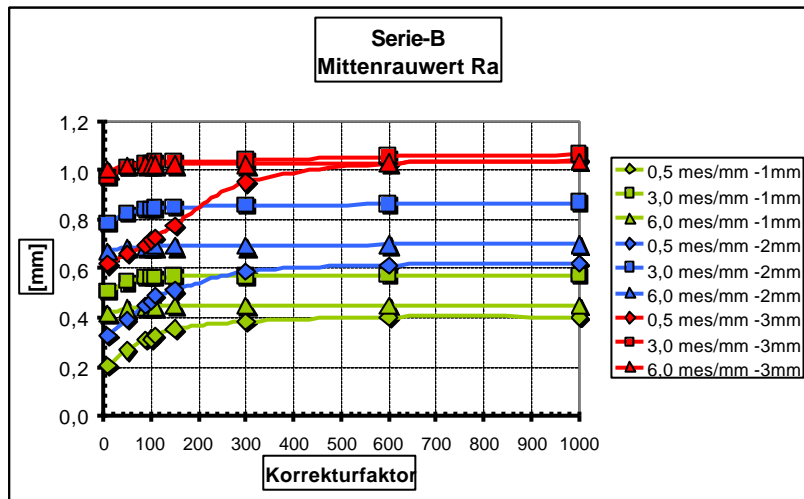


Abb. 4.50 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B

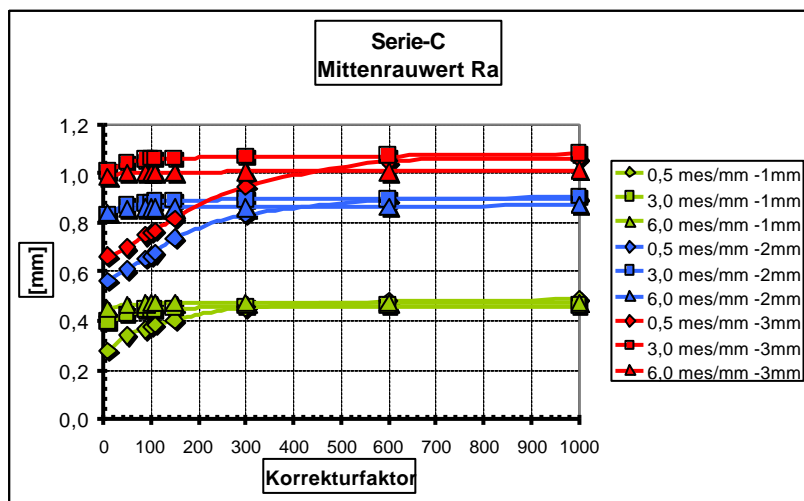


Abb. 4.51 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C

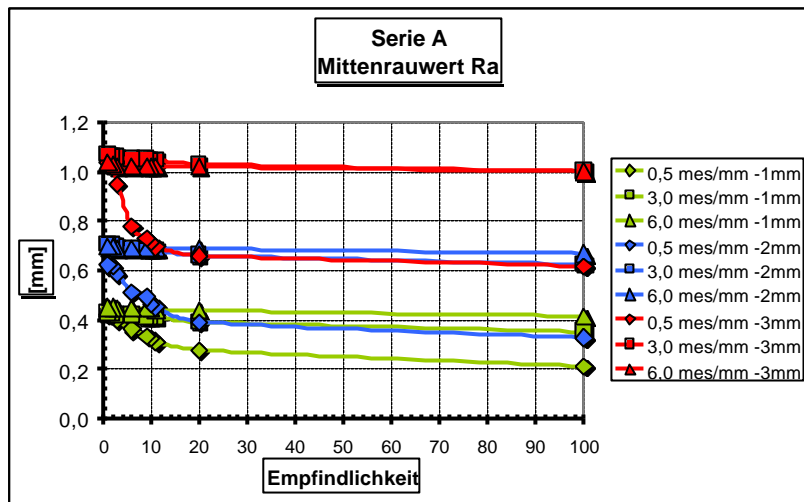


Abb. 4.52 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

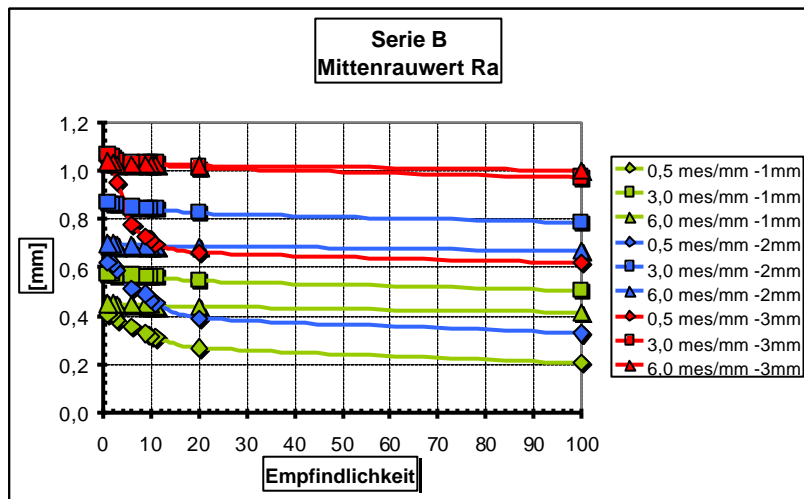


Abb. 4.53 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

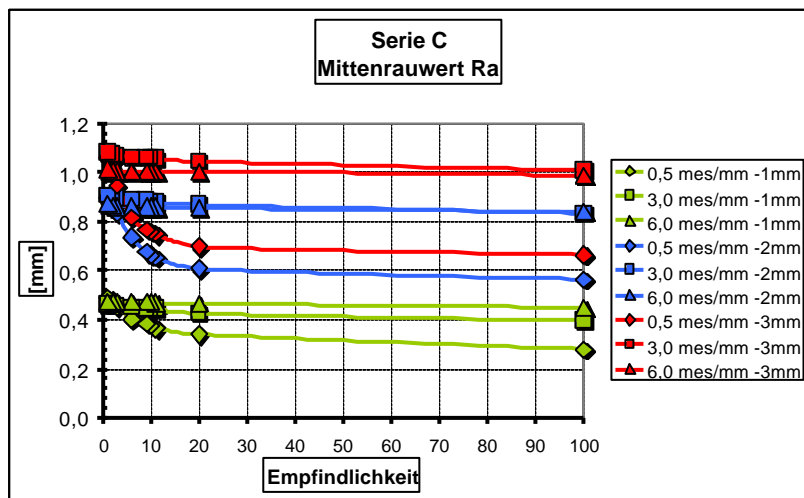


Abb. 4.54 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C

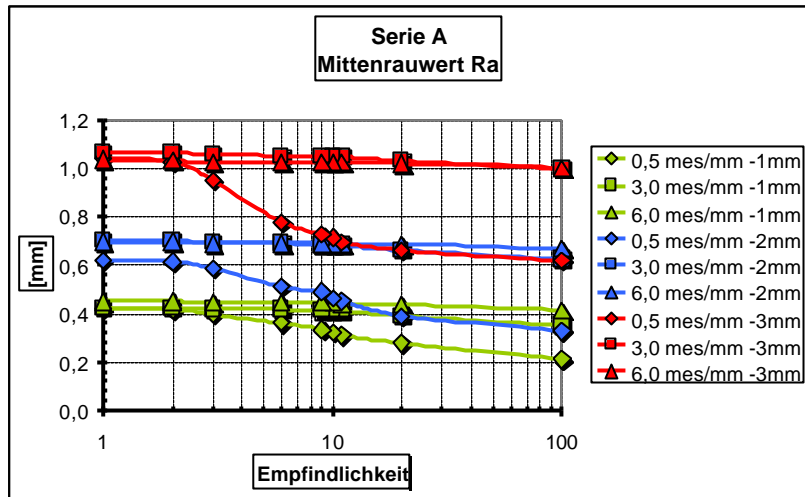


Abb. 4.55 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

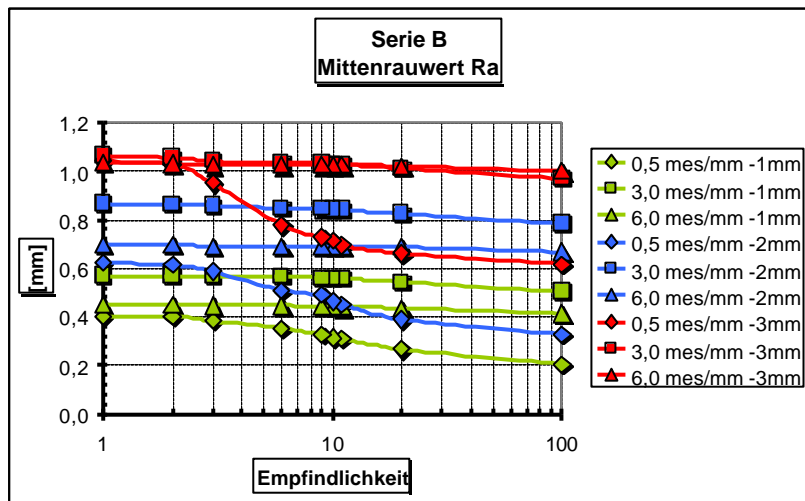


Abb. 4.56 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

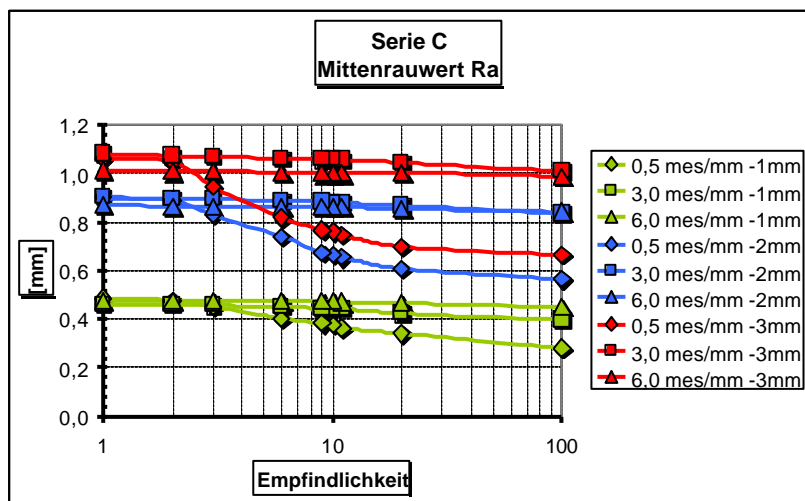


Abb. 4.57 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C



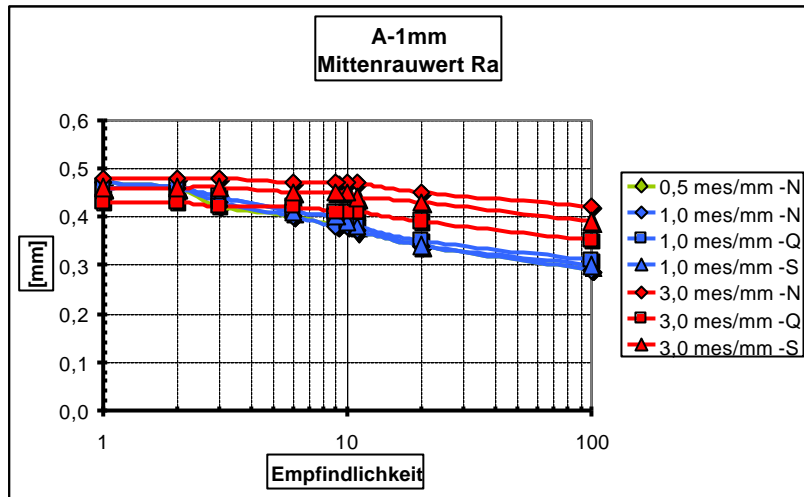


Abb. 4.58 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-1mm

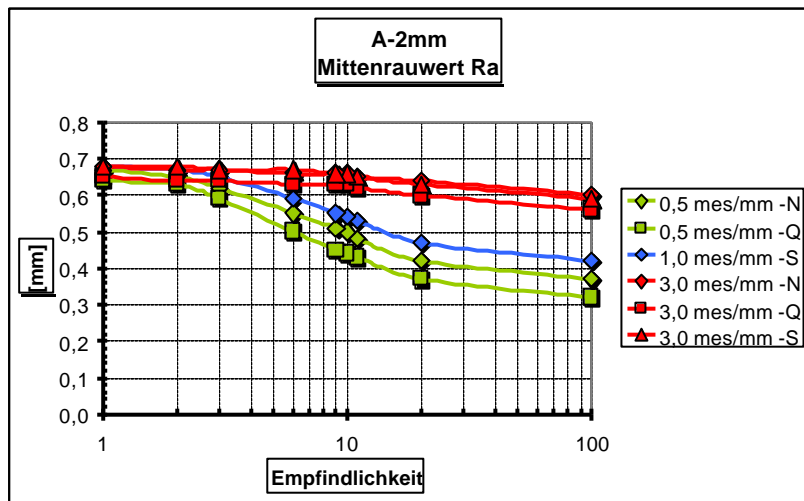


Abb. 4.59 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-2mm

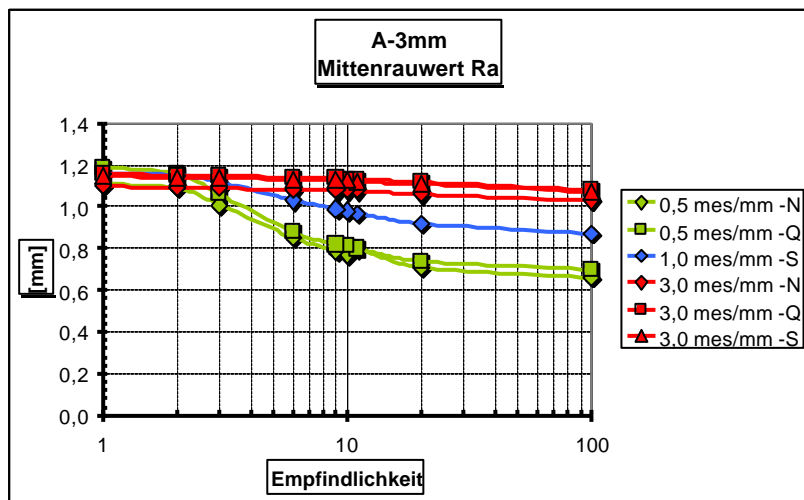


Abb. 4.60 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-3mm

---

#### 4.7.2.1.4 Profillängenverhältnis $l_r$

Wie bei den Mittenrauwert-Ergebnissen nimmt der Korrekturfaktor auch auf das Profillängenverhältnis wenig Einfluss, was wieder auf die Definition zurückzuführen ist, siehe Abb. 4.61, 4.62 und 4.63. Mit der Darstellung der Ergebnisse in Bezug auf die Korrektur-Empfindlichkeit zeigen sich die Werte weitgehend stabil mit relativ geringer Einflussnahme durch Manipulation, siehe Abb. 4.64, 4.65 und 4.66. Bei logarithmischer Darstellung der Korrektur-Empfindlichkeit überwiegt die langgezogene, gespiegelt S-Form. Eine genaue Empfehlung bezüglich der passenden Korrektur-Empfindlichkeit ist nicht möglich, da die meisten Werte nahe beieinander liegen. Als Richtwert kann jedoch eine Korrektur-Empfindlichkeit von 2 genannt werden, Abb. 4.67, 4.68 und 4.69.

Betrachtet man die Ergebnisse der Abtastauflösung im Hinblick auf die Abtastrichtung Abb. 4.70, 4.71 und 4.72, nehmen die Ergebnisse der 3 Messungen/mm eine nahe Verhaltensmuster. Die Ergebnisse der 1 Messungen/mm ähnelt in ihren Verhaltensmustern denen bei 0,5 Messungen/mm. Eine Einflussnahme der Abtastrichtung ist hier nicht zu erkennen.

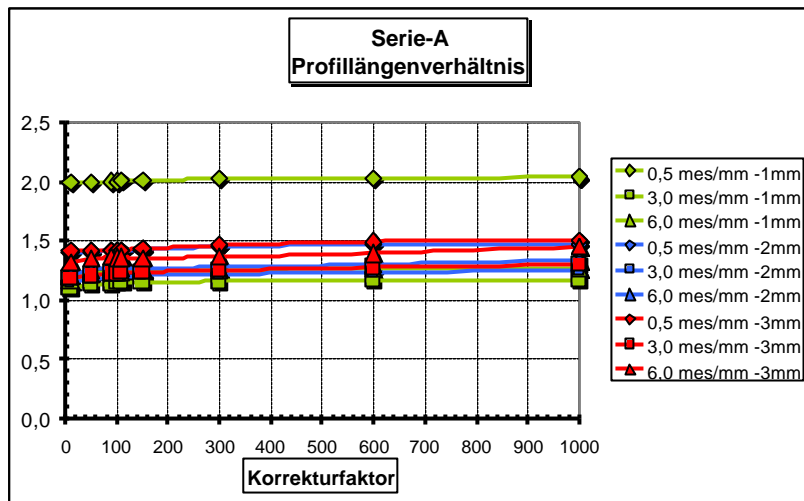


Abb. 4.61 : Verhalten des Profillängenverhältnisses bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A

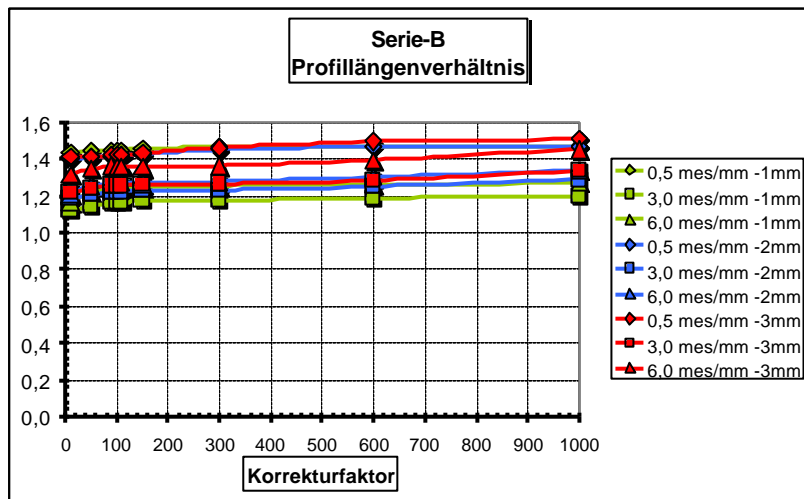


Abb. 4.62 : Verhalten des Profillängenverhältnisses bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B

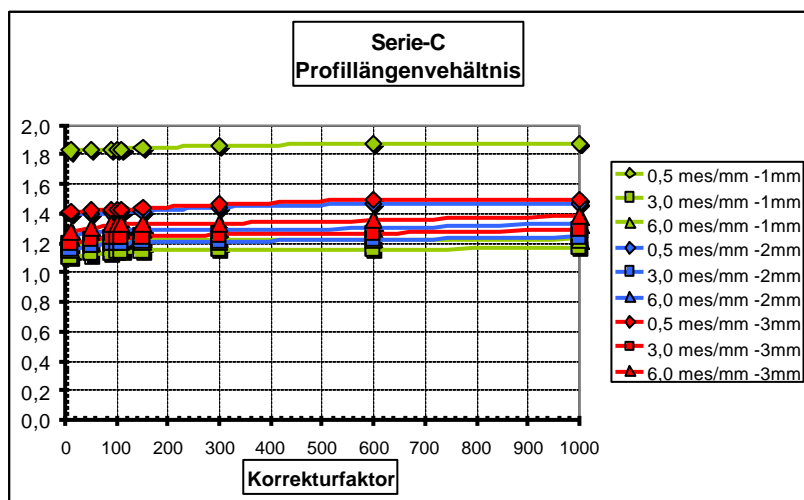


Abb. 4.63 : Verhalten des Profillängenverhältnisses bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C

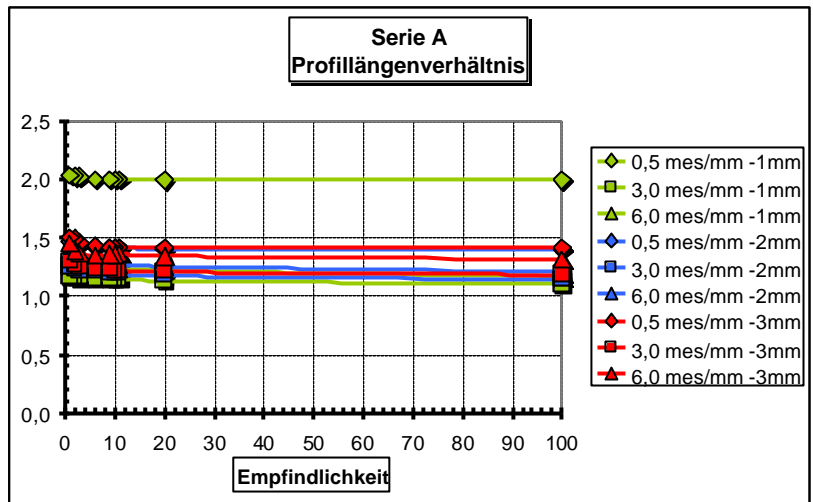


Abb. 4.64 : Verhalten des Profillängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

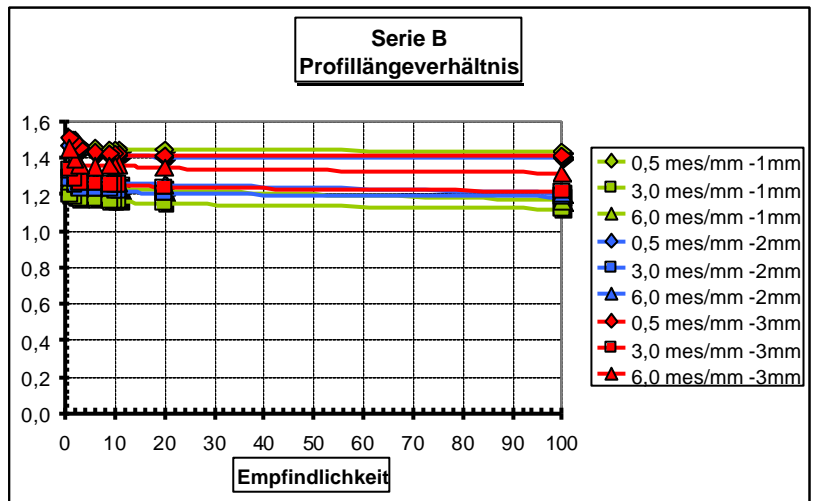


Abb. 4.65 : Verhalten des Profillängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

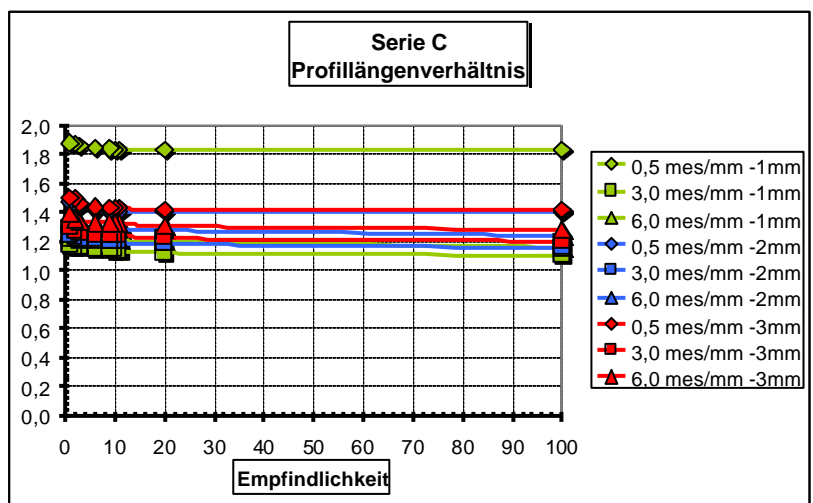


Abb. 4.66 : Verhalten des Profillängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C

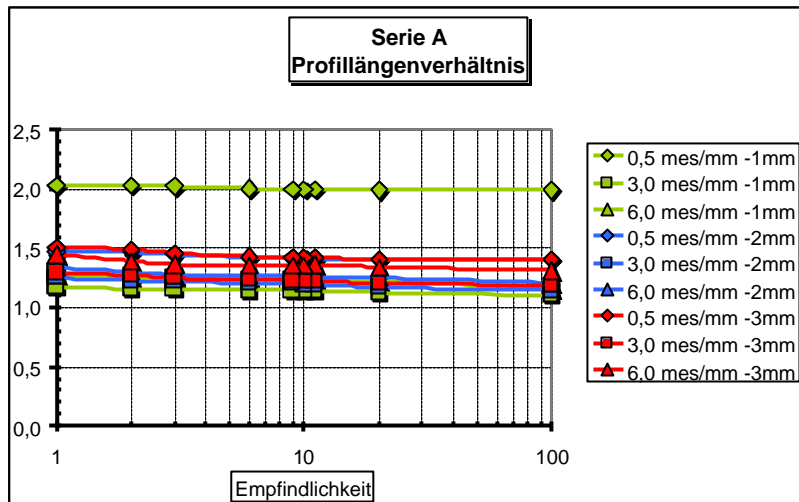


Abb. 4.67 : Verhalten des Profilängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A

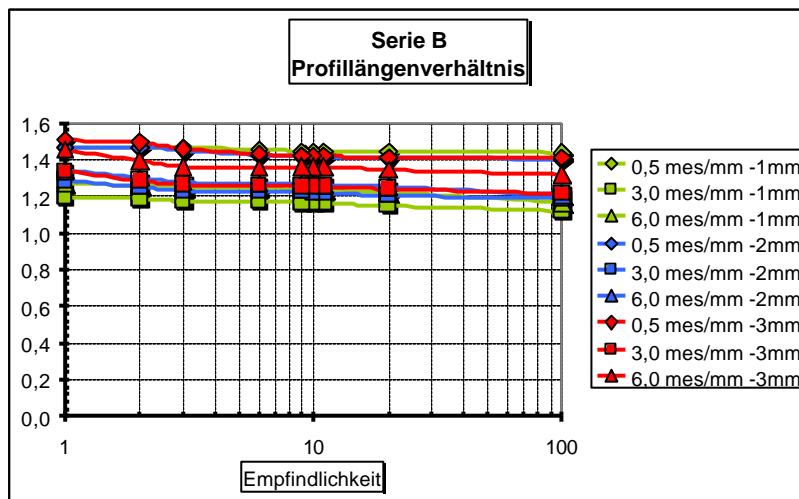


Abb. 4.68 : Verhalten des Profilängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie B

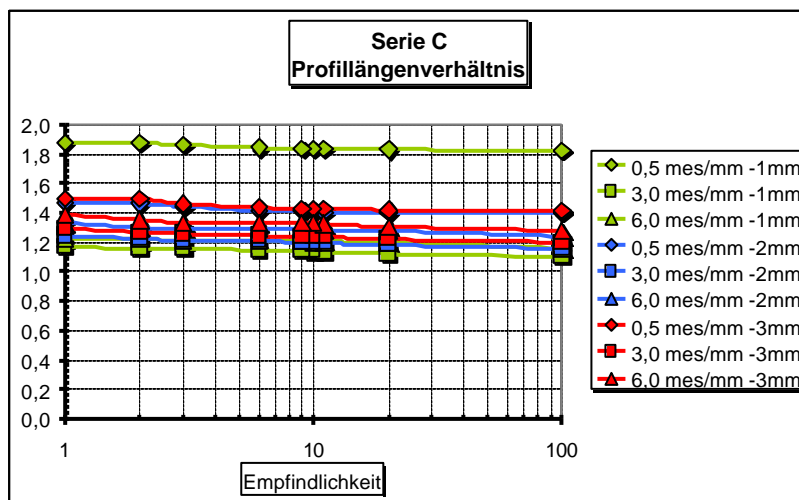


Abb. 4.69 : Verhalten des Profilängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie C.

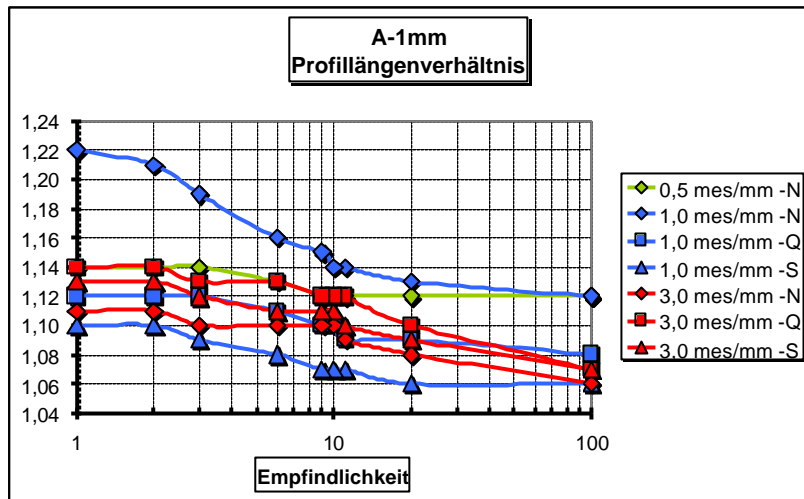


Abb. 4.70 : Verhalten des Profilängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-1mm

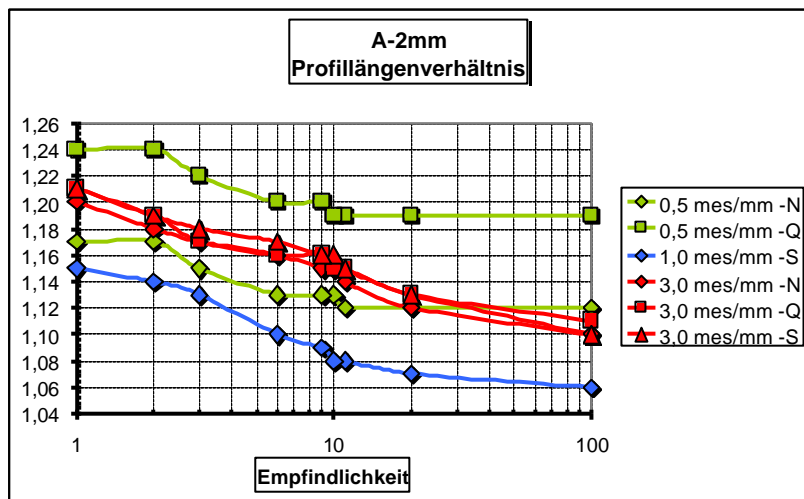


Abb. 4.71 : Verhalten des Profilängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-2mm

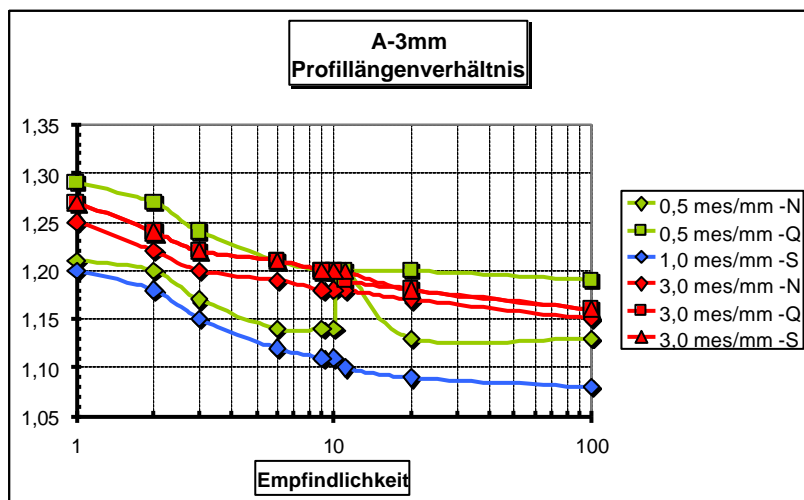


Abb. 4.72 : Verhalten des Profilängenverhältnisses bei Zunahme der Empfindlichkeit, Serie A-3mm

#### 4.7.2.1.5 Vorläufige Zusammenfassung

Es sollte der Einfluss des Korrekturfaktors auf die Ergebnisse der verschiedenen beobachteten Eigenschaften untersucht werden. Ziel war es herauszufinden, welcher Korrekturfaktor die besten Ergebnisse mit dem geringsten Grad an Manipulation liefert.

Der Mittenrauwert  $R_a$  und das Profillängenverhältnis  $I_r$  reagieren am wenigsten auf den Grad der Manipulation. Sie liefern weitgehend stabile Werte. Deshalb ist der Einsatz einer bestimmten Korrektur-Empfindlichkeit von geringer Priorität. Die Maximale Rautiefe  $R_y$  ist die empfindlichste Oberflächengröße, da sie definitionsgemäß auf zwei Größen zurückgreift (Maximalwert und Minimalwert) die sehr stark verändert werden. Die empfohlene Korrektur-Empfindlichkeit ist hier zwischen 2 und 3 anzusetzen. Der einzige mit dem Sandflächenverfahren vergleichbare Größe ist die Glättungstiefe  $R_p$ . Die empfohlene Korrektur-Empfindlichkeit liegt auch hier zwischen 2 und 3. Für die weiteren Schritte wird eine Korrektur-Empfindlichkeit von 2 eingesetzt.

#### 4.7.2.2 Einfluss der Abtastauflösung

Die Abtastauflösung wurde untersucht, um herauszufinden, bei welcher Auflösung die bestmöglichen Ergebnisse mit der kleinstmöglichen Datenmenge zu erreichen sind. Eine Höhe bzw. Länge von 1 mm wurde als die kleinste zu erfassende Größe festgelegt, Abb. 4.73.

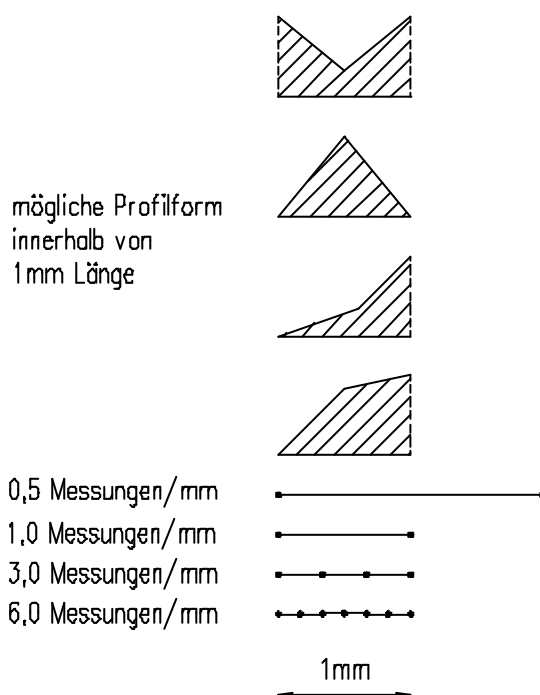


Abb. 4.73 : Mögliche Profilformen und Abtastaufösungen innerhalb von 1 mm Länge

In Abb. 4.73 sind mögliche Profilformen, die innerhalb von 1 mm Bezugslinie vorkommen können, dargestellt. Die möglichen Profilformen werden im selben Maßstab dargestellt wie die Abtastauflösung. So soll, abhängig von der gewählten Abtastauflösung, verdeutlicht werden, wie viele Informationen gewonnen werden bzw. verloren gehen.

---

Bei anfänglich gewählten 0,5 Messungen/mm ist deutlich zu erkennen, dass die Profilform über 1 mm Profillänge nicht erfasst werden kann, da nur alle zwei Millimeter eine Messung durchgeführt wird. Es ist somit wahrscheinlich, dass diese Abtastauflösung bei geringen Rauheiten keine guten Ergebnisse liefern wird.

Dieses könnte sich ändern, wenn die abgetasteten Oberflächen eine rauere Textur hätten. Die Ergebnisse bei einer Abtastauflösung von 1 Messungen/mm werden wahrscheinlich besser sein als bei 0,5 Messungen/mm, aber auch hier gehen vermutlich noch viele Information verloren.

Erst bei einer Steigerung der Abtastauflösung auf 3 bzw. 6 Messungen/mm sind bessere Ergebnisse zu erwarten, da hier auch Detailinformation innerhalb von 1 mm Profillänge erfasst werden können. Es gilt nun die am Ende „wirtschaftlichste“ Auflösung herauszufinden. Zuerst wurden die zu beobachten Oberflächenparameter und -größen festgelegt. Dabei wurden verschiedene Oberflächenkenngrößen erfasst, berechnet, in Kapitel 2 definiert und dargestellt.

Basierend auf den abgetasteten und erfassten Werten wurden für die drei Soll-Rauheitsstufen (1 mm, 2 mm und 3 mm) verschiedene Größen berechnet und in Diagrammen dargestellt:

- Glättungstiefe  $R_p$
- Maximale Rautiefe  $R_y$
- Mittenrauwert  $R_a$
- Profillängenverhältnis  $I_r$

Das erste Ziel war es, festzustellen, welche Abtastauflösung die besten Ergebnisse mit der geringsten "Manipulation" liefert. Natürlich wäre eine sehr hohe Abtastauflösung der sicherste Weg, gute Werte zu bekommen, es ist jedoch auch nötig an die Datenmengen und ihre Bearbeitung zu denken. Da die Bearbeitung per Rechner durchgeführt wird, ist es erforderlich, den Zeitaufwand für die Berechnung zu beachten und die Größe der erzeugten Matrix so zu reduzieren, dass sie in eine Excel-Tabelle einzufügen ist. Folgende Abtastauflösungen sind zu diesem Zweck getestet worden:

- 0,5 Messungen/mm
- 1,0 Messungen/mm
- 3,0 Messungen/mm
- 6,0 Messungen/mm

Zur Untersuchung dieser drei Abtastauflösungen wurde das in Abb. 4.13d dargestellte Abtastmuster gewählt. Dementsprechend gibt es drei Zonen (1, 2, 3). Für jeden wurde eine Korrekturfaktorkurve erstellt, und aus denen wurde dann ein Mittelwertkurve berechnet, siehe Anhang 1. Die Ergebnisse der Korrekturfaktor 600 (Korrektur-Empfindlichkeit 2) wurden dann ermittelt und in den folgenden Grafiken eingesetzt.



#### 4.7.2.2.1 Glättungstiefe $R_p$

In Abb. 4.74 ist der Einfluss der Abtastauflösung auf die Glättungstiefe dargestellt.

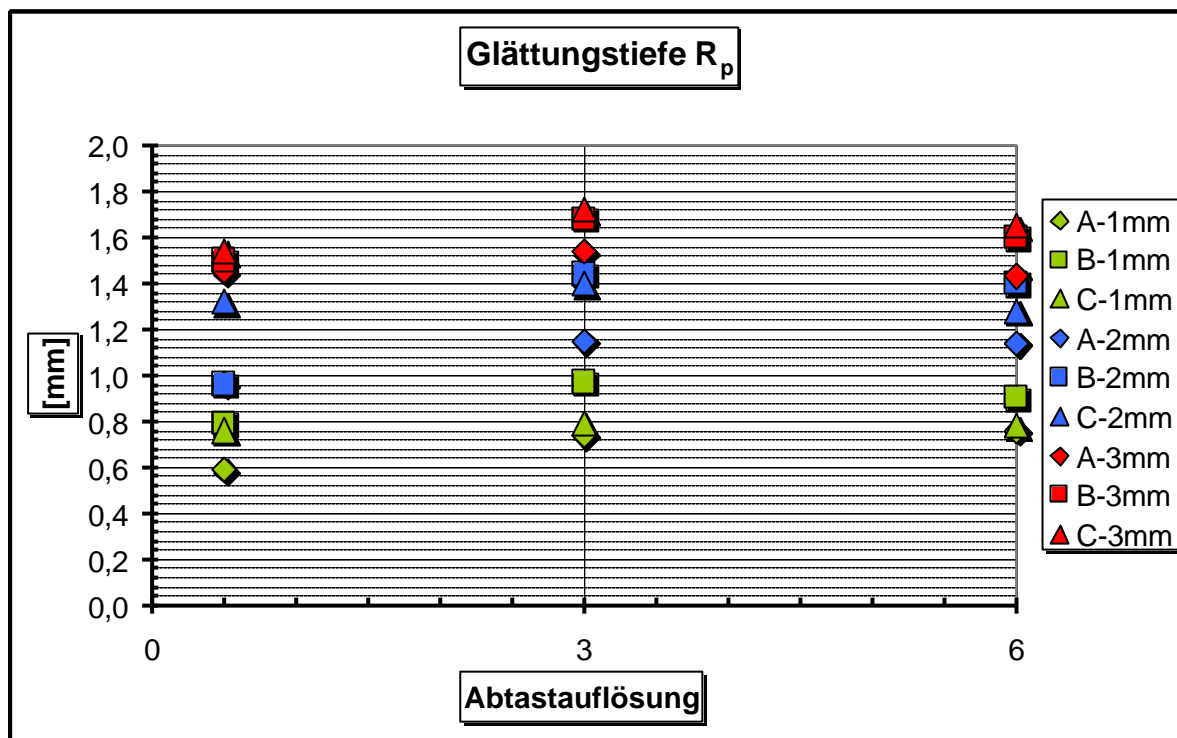


Abb. 4.74 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Abtastauflösung

Es war zu erwarten, dass mit steigender Abtastauflösung auch die Glättungstiefe ansteigt, jedoch nur bis zu einer bestimmten Abtastauflösung, ab der die beobachteten Werte nicht mehr wesentlich zunehmen. Tatsächlich ist zu beobachten, dass die Glättungstiefe zwischen der Abtastauflösung 0,5 Messungen/mm und 3 Messungen/mm diesem oben beschriebenen Muster folgt. Im Bereich zwischen 3 und 6 Messungen/mm steigen die Werte nur noch sehr wenig und nähern sich in zunehmendem Maße einem waagerechten Verlauf an. Diese stabilen Werte in allen Serien bestätigen, dass ab einer bestimmten Abtastauflösung keine wesentlich höheren Werte mehr zu erwarten sind.

Als Ergebnis dieser Untersuchung wird festgestellt, dass im Bereich der Rauheitsstufen 1 mm bis 3 mm eine Abtastauflösung von 3 Messungen/mm ausreicht, um gute Ergebnisse zu erhalten.

#### Einfluss von $L_v/S_v$ auf die Oberflächenrauheit:

$L_v/S_v$  ist das Verhältnis der Ergebnisse des Laserabtastverfahrens zu den Ergebnissen des Sandflächenverfahrens. Es ist anzumerken, dass das Sandflächenverfahren bei der Durchführung eine Ungenauigkeit mit sich bringt. Diese Ungenauigkeit stammt daher, dass es bei der Bemessung der Normsandkreise Abweichungen gibt. Diese reichen aus, um schwankende Ergebnisse zu liefern. Es ist nun von Interesse zu untersuchen, inwieweit die Ergebnisse des Sandflächen- und des Laserabtastverfahrens übereinstimmen.

In Abb. 4.75 ist ein allgemeiner Trend zu erkennen. Die Ergebnisse haben, unabhängig von den Zuschlagssieblinien, die größte Übereinstimmung beim Sandflächenverfahren in der Gruppe mit 1 mm Rautiefe. Bei 2 mm bis 3 mm Rautiefe ist einer Abnahme zu verzeichnen. Dies bestätigt, dass die praktische Durchführung des Sandflächenverfahrens mit zunehmender Oberflächenrauheit schwieriger wird. Es ist auch offensichtlich, dass die Normsandmenge vergrößert werden müsste, um diese Abweichungen auszugleichen.

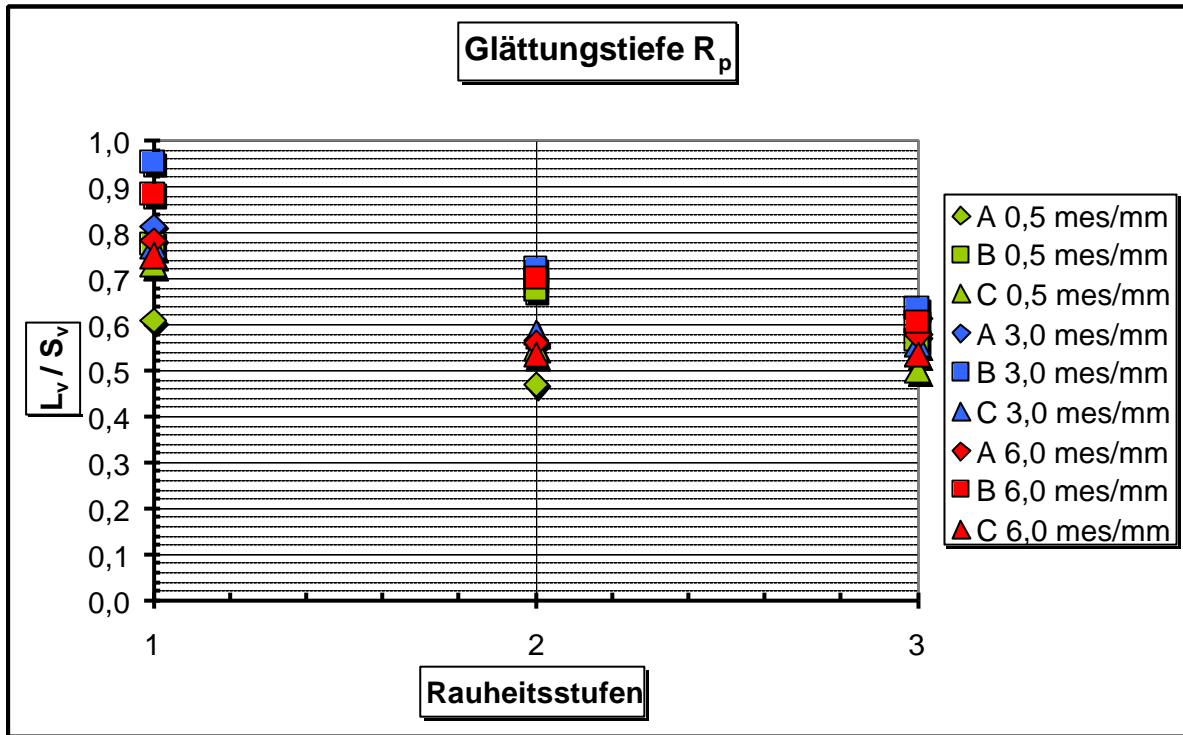


Abb. 4.75 :  $L_v/S_v$  Verhalten bei Zunahme der Rauheitsstufe

#### 4.7.2.2 Maximale Rautiefe $R_y$

Abb. 4.76 zeigt für allen Gruppierungen bei zunehmender Abtastauflösung steigende Tendenzen. Hier bestätigt sich, dass eine Abtastauflösung von 3 Messungen/mm für diese Arbeit ausreichend ist.

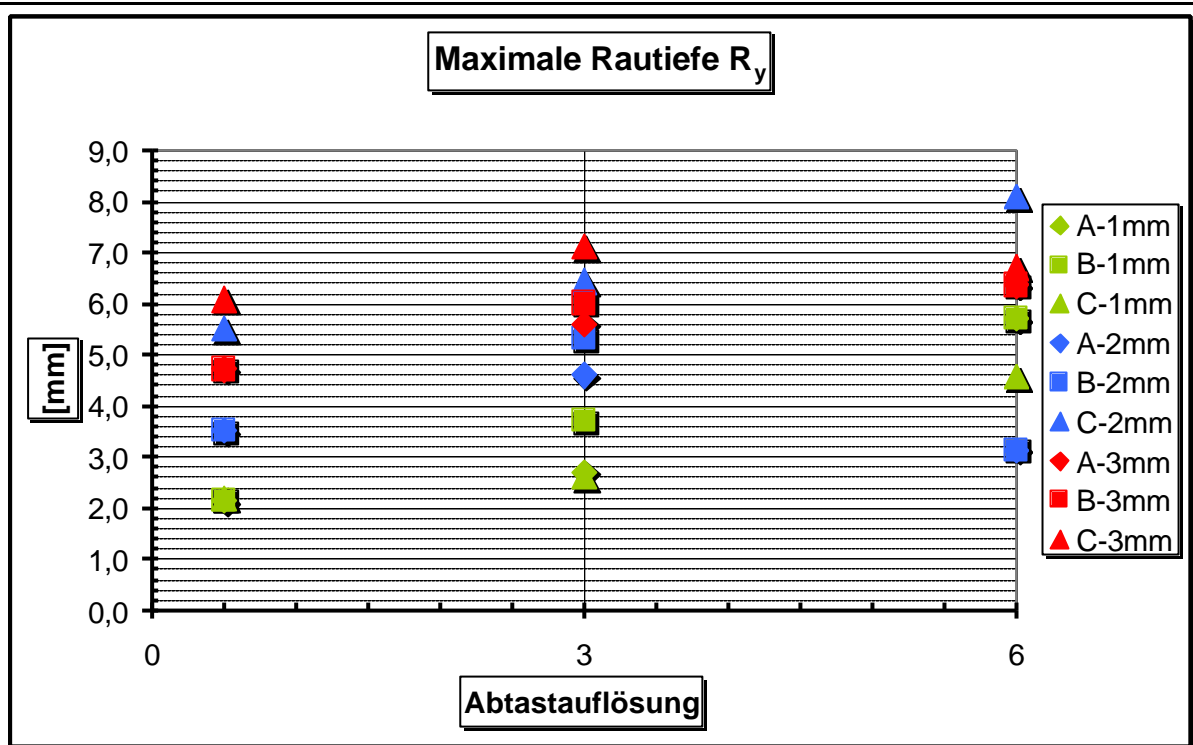


Abb. 4.76 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Zunahme der Abtastaufloesung

**4.7.2.2.3 Mittenrauwert  $R_a$**

Abb. 4.77 zeigt stabile Ergebnisse bei maximal leichter Zunahme. Es ist offensichtlich, dass die Abtastaufloesung keinen wesentlichen Einfluss auf den Mittenrauwert hat. Hinsichtlich des Mittenrauwertes wuerde eine geringere Abtastaufloesung von 0,5 Messungen/mm ausreichen.

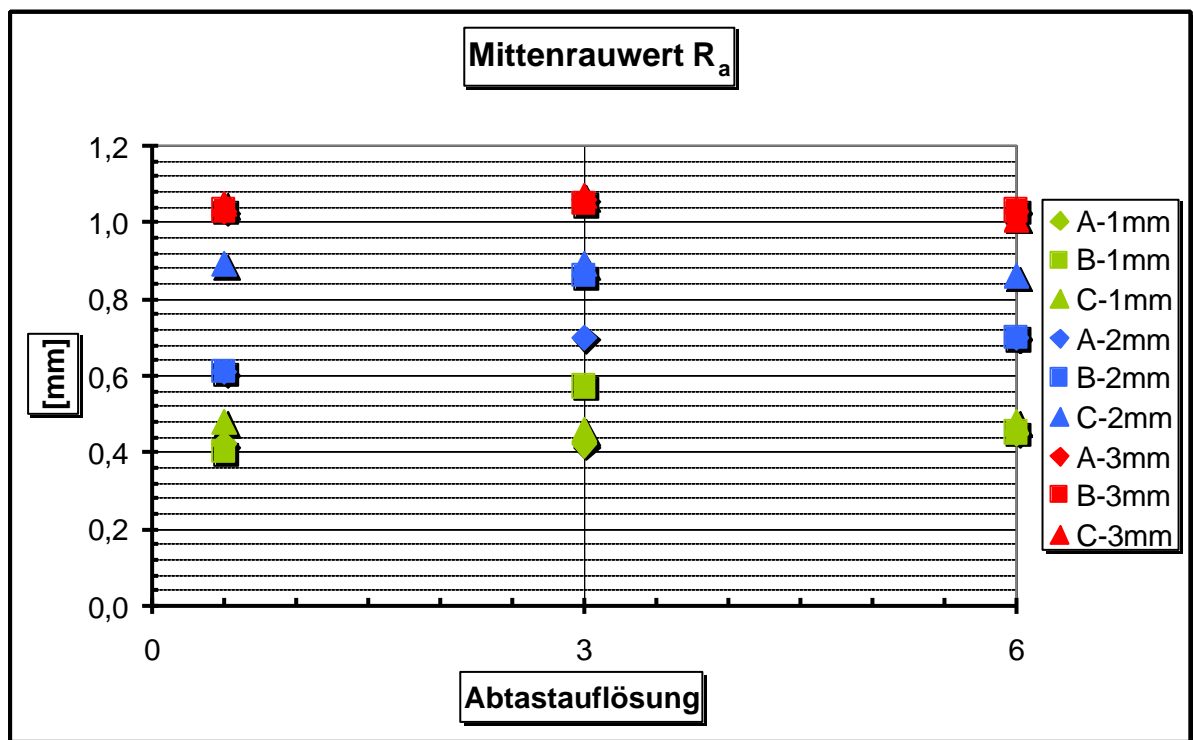


Abb. 4.77 : Verhalten des Mittenrauwertes bei Zunahme der Abtastaufloesung

#### 4.7.2.2.4 Profillängenverhältnis $I_r$

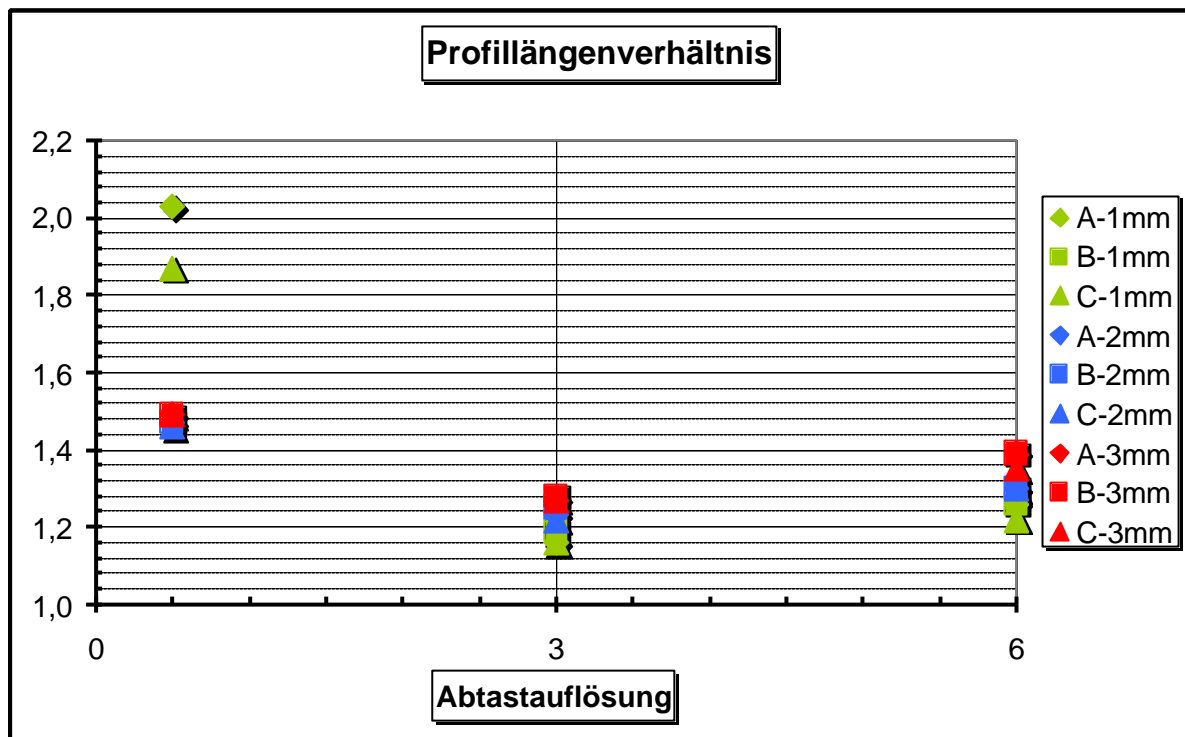


Abb. 4.78 : Verhalten der Profillängenverhältnisses bei Zunahme der Abtastauflösung

Abb. 4.78 verdeutlicht die Abhängigkeit des Profillängenverhältnisses von der Abtastauflösung. Für die Zwecke dieser Arbeit ist jedoch eine Abtastauflösung von 3 Messungen/mm ausreichend.

#### 4.7.2.2.5 Vorläufige Zusammenfassung

Es sollte herausgefunden werden, welche Abtastauflösung bei geringst möglicher Datenmenge die bestmöglichen Ergebnisse liefert. Bei allen beobachteten Größen reicht eine Abtastauflösung von 3 Messungen/mm aus um akzeptable Ergebnisse zu bekommen.

Der Mittenrauwert  $R_a$  und das Profillängenverhältnis  $I_r$  reagieren am wenigsten auf den Grad der Manipulation. Sie liefern weitgehend stabile Werte. Deshalb ist der Einsatz einer bestimmten Korrektur-Empfindlichkeit von geringer Priorität. Die maximale Rautiefe  $R_y$  ist die empfindlichste Oberflächengröße, da sie laut Definition auf zwei Größen zurückgreift - maximaler Wert und minimaler Wert- die sehr stark verändert werden. Die empfohlene Korrektur-Empfindlichkeit liegt hier zwischen 2 und 3.

Die einzige mit den Sandflächenverfahren vergleichbare Größe ist die Glättungstiefe  $R_p$ . Die empfohlene Korrektur-Empfindlichkeit folgt auch hier dem Trend und liegt zwischen 2 und 3. Die Abtastauflösung von 0,5 Messungen/mm ist am empfindlichsten, sie zeigt auch dann noch stärkere Reaktionen auf den Grad der Manipulation, wenn die anderen beiden Abtastauflösungen 3 Messungen/mm und 6 Messungen/mm schon stabilere Werte zeigen.

Dies führt zu der Erkenntnis, dass:

- eine Korrektur-Empfindlichkeit von 2 bei allen beobachteten Oberflächen einen ausreichenden Grad der Manipulation darstellt,
- ab einer Korrektur-Empfindlichkeit von 3 die Manipulation zu stark wird, was zu einer großer Abweichung der Werte von der Ur-Matrix führt,
- eine Abtastauflösung von 3 Messungen/mm bei geringster Datenmenge zu akzeptablen Ergebnissen führt. Eine höhere Abtastauflösung wäre zwar genauer, führte aber zu einer massiven Steigerung der Datenmenge bei nur geringer Ergebnisverbesserung,
- die Abtastrichtung keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Für die weiteren Schritte wird deshalb durchgehend eine Abtastauflösung von 3 Messungen/mm eingesetzt.

### 4.7.2.3 Einfluss der Sieblinien

#### 4.7.2.3.1 Glättungstiefe $R_p$

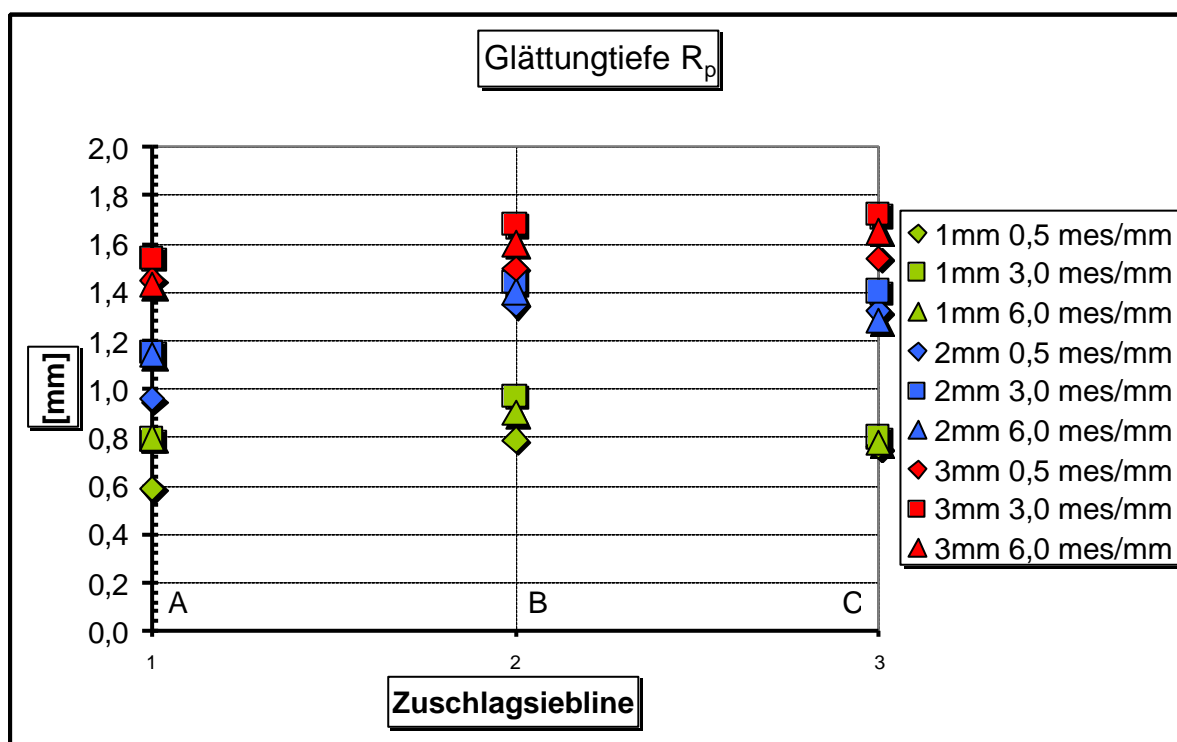


Abb. 4.79 : Verhalten der Glättungstiefe bei Änderung der Zuschlagsieblinien

In Abb. 4.79 wird der Einfluss der eingesetzten Zuschlagsieblinien dargestellt. Bei der grün dargestellten Gruppe „Rauheitsstufe 1 mm“ nehmen die Werte bei 0,5 Messungen/mm, 3 Messungen/mm und 6 Messungen/mm von A nach B zu und fallen bei Sieblinie C wieder ab. Bei der rot dargestellten Gruppe „Rauheitsstufe 3 mm“ nehmen die Ergebnisse bei 0,5 Messungen/mm, 3 Messungen/mm und 6 Messungen/mm von A über B nach C zu. Bei der blau dargestellten Gruppe „Rauheitsstufe 2 mm“ verhalten sich die Ergebnisse qualitativ wie bei der Rauheitsgruppe 1 mm, quantitativ sind die Ergebnistendenzen aber der Rauheitsgruppe 3 mm ähnlicher.

Aus dem allgemeinen Verhalten ist festzuhalten, dass bei den Rautiefen 1 mm und 2 mm die Werte von A zu B zunehmen und dann von B zu C wieder abnehmen.

Auch bei der Rautiefe 3 mm ist eine Zunahme der Werte von A nach B festzustellen, von B nach C nehmen die Werte hier jedoch weiter zu. Es ist offensichtlich, dass die Sieblinien kein eindeutigen Einfluss auf die Glättungstiefe  $R_p$  hat.

#### 4.7.2.3.2 Maximale Rautiefe $R_y$

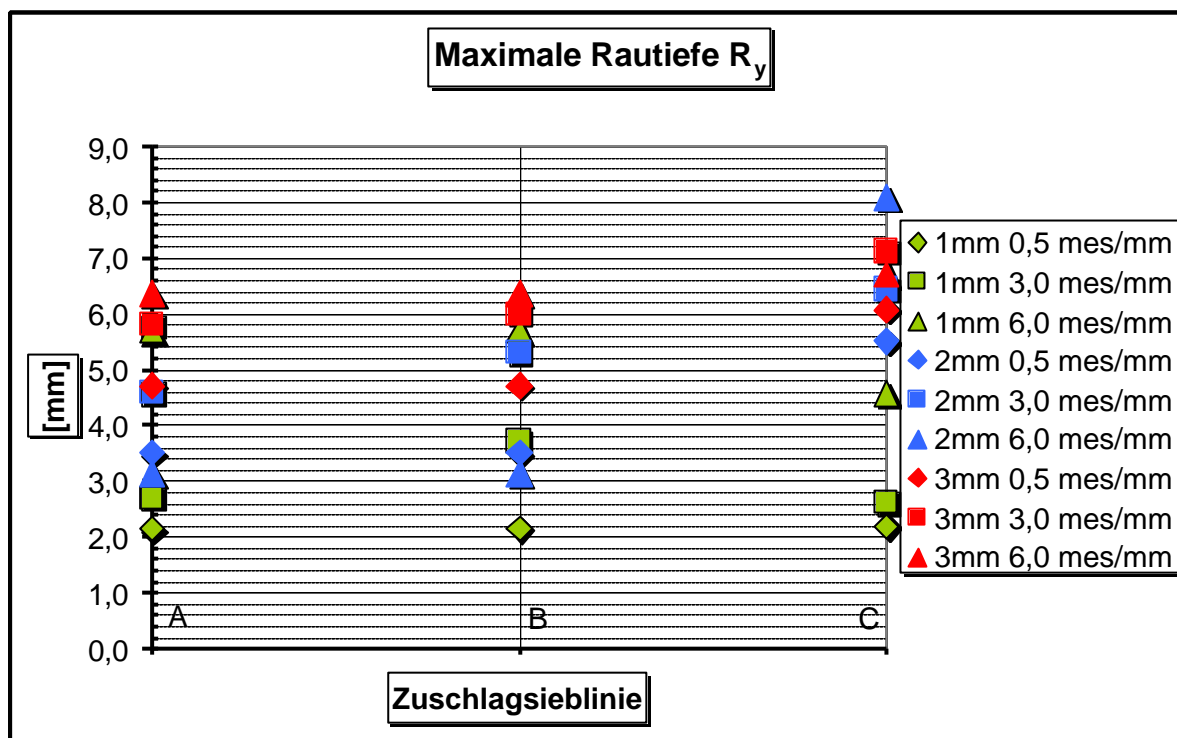


Abb. 4.80 : Verhalten der maximalen Rautiefe bei Änderung der Zuschlagsieblinien

In Abb. 4.80 fällt auf, dass die Ergebnisse bei den Sieblinien A und B relativ konstant sind und die Ergebnisse der Sieblinie C widersprüchlich. Es ist hier keine eindeutige Aussage möglich. Die maximale Rautiefe erweist sich als eine unsichere Oberflächenkenngröße, da sie sich definitionsgemäß auf nur zwei Größen, den höchsten und den tiefsten Punkt, verlässt. Diese zwei Größen erweisen sich als unabhängig von der Oberflächentextur. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die maximale Rautiefe als Größe betrachtet werden kann, die von der Oberflächentextur nicht abhängt.

#### 4.7.2.3.3 Mittenrauwert $R_a$

Wie Abb. 4.81 zeigt, ist auch beim Mittenrauwert  $R_a$  kein eindeutiger Einfluss der Sieblinien zu erkennen.

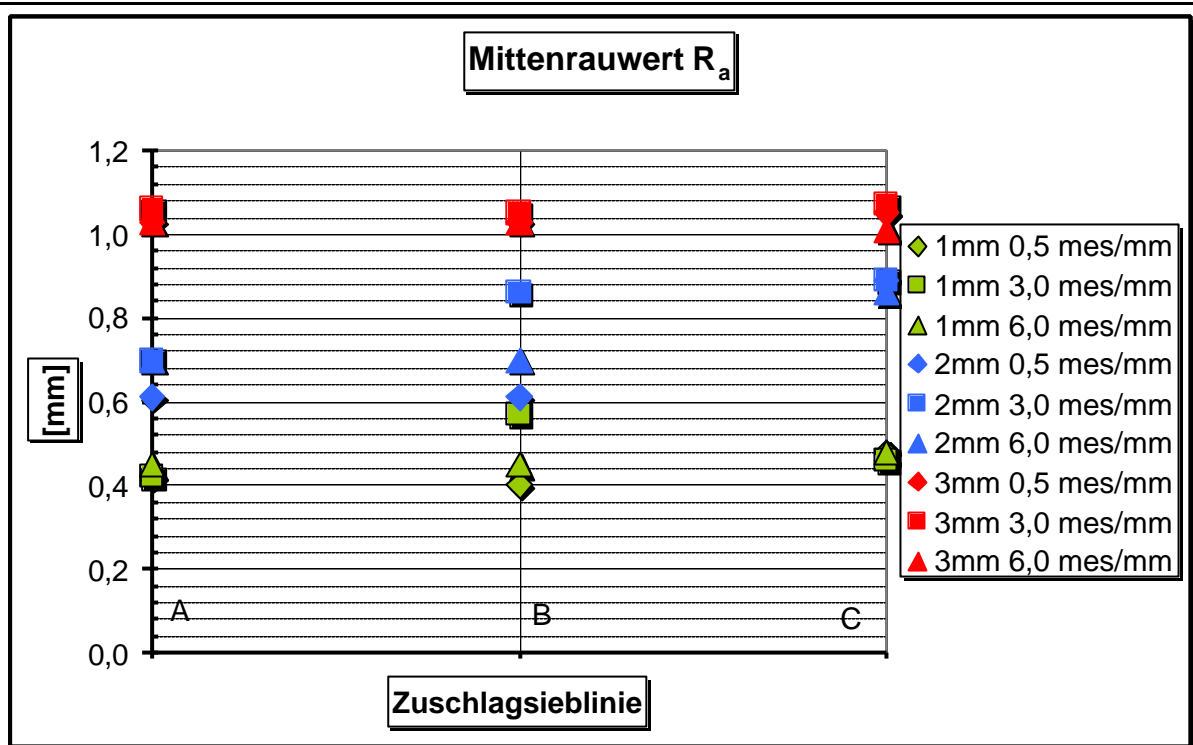


Abb. 4.81 : Verhalten der Mittenrautiefe bei Änderung der Zuschlagsieblinien.

#### 4.7.2.3.4 Profillängenverhältnis $I_r$

Wie Abb. 4.82 zeigt, reagiert das Profillängenverhältnis  $I_r$  - entgegen alle Erwartungen - offensichtlich nicht auf den Einfluss der Sieblinien.

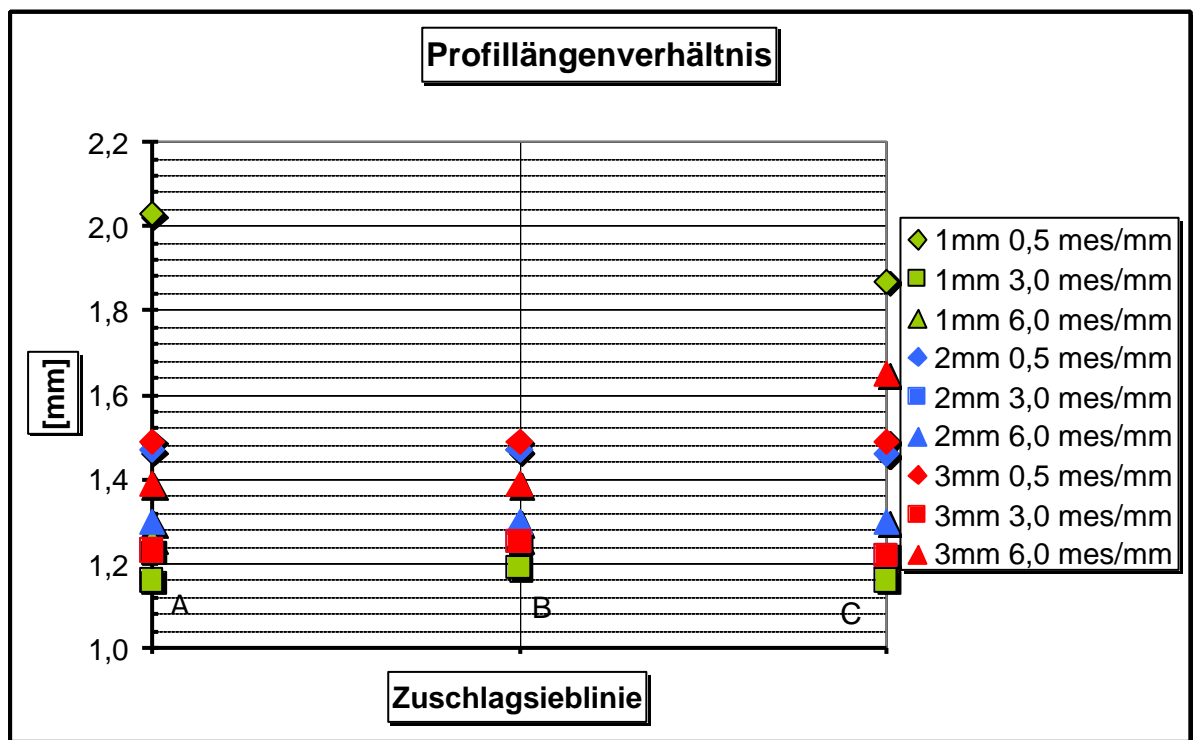


Abb. 4.82 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Änderung der Zuschlagsieblinien.

#### 4.7.2.3.5 Vorläufige Zusammenfassung

Bei den beobachteten Kenngrößen hatten die Sieblinien keinen eindeutigen Einfluss auf die Ergebnisse.

### 4.8 Fazit

Folgende Eigenschaften wurden eingesetzt:

- variierte Zuschlagsmischungen (Sieblinien A16, B16, C16)
- variierte Korrekturfaktoren (10, 50, 90, 100, 110, 150, 300, 600, 1000)
- Abtastrichtung (N, Q, S)

Folgende Größen wurden berechnet:

- Glättungstiefe  $R_p$
- Maximale Rautiefe  $R_y$
- Mittenrauwert  $R_a$
- Profillängenverhältnis  $I_r$

Aufgrund der obigen Erkenntnisse werden für die weiteren Schritte die folgenden Werte eingesetzt:

- Korrektur-Empfindlichkeit: 2
- Abtastauflösung: 3 Messungen/mm

Der Einfluss der Abtastrichtung sowie der Einfluss der Zuschlagsieblinien ist i.a. zu vernachlässigen.



#### 4.9 Literatur

- [4.1] DIN 1045-1 : Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001.
- [4.2] DIN 1045-2 : Beton. Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Juli 2001.
- [4.3] DIN 4226 : Zuschlag für Beton. Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge. Teil 3, April 1983.
- [4.4] DIN 1164 : Zement mit besonderen Eigenschaften, Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis. 1978.
- [4.5] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. Straßenbau-Technik 3/71.
- [4.6] König, Rainer : Zweidimensionale Erfassung von Betonoberflächen mit Computerunterstütztem Infrarot Laser. Diplomarbeit , Lehrstuhl für Beton- und Stahlbetonbau, Universität Dortmund.
- [4.7] Laserabstandssensor "Cyclop" : Produktunterlagen des Herstellers Nokra Optische Prüftechnik und Automation GmbH 1998.
- [4.8] DIN 4768 : Ermittlung der Rauheitskenngrößen mit elektrischen Tastschnittgeräten. Begriffe, Messbedingungen. Mai 1990.
- [4.9] Weber, R. und Tegelaar, R. : Guter Beton. Ratschläge für richtige Betonherstellung. Herausgegeben von der Bauberatung Zement. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. Beton-Verlag. 18. Auflage, März 1993.

## 5 3D-Oberflächen

### 5.1 Einleitung

In den letzten Kapiteln wurde der Erfassung der Oberflächentexturen mit dem Sandflächenverfahren und dem herkömmlichen 2D-Laserabtastverfahren untersucht. Zusätzlich dazu wurden die Oberflächeneigenschaften berechnet. Die Ergebnisse der beiden Verfahren wurden dann miteinander verglichen und die einzelnen beobachteten Oberflächengrößen zueinander ins Verhältnis gesetzt. Die Basis für diesen Vorgang bildeten die Bearbeitung der einzelnen abgetasteten Schnitten und die bewerteten Mittelwerte dieser Abtastschnitten.

Dieser Vorgang war als Annäherung an die herkömmlichen 2D Vorgehensweisen gedacht, da bislang nur maximal zwei Tastschnitten abgetastet und aus den so ermittelten Werten die einzelnen Oberflächeneigenschaften berechnet wurden. Beide genannten Vorgänge bilden eine sogenannte zweidimensionale Darstellung der Oberflächenprofile. Bei dieser Art der Darstellung werden nur die Bezugslänge und die einzelnen Abstände zur Mittellinie dargestellt. Die dritte Dimension, die Transformation der Darstellung von der linearen zur flächigen Beschreibung der bearbeiteten Fläche, wird dabei außer Acht gelassen.

Die Oberflächen von Materialien können jedoch so komplex sein wie die Oberfläche der Erde. Zur genauen Abschätzung der topografischen Eigenschaften unseres Planeten benötigen wir offensichtlich dreidimensionale Karten. Leider sind einfache Methoden zur Herstellung solcher Karten bisher nicht entwickelt worden [5.1]. In diesem Kapitel wird diese Art der 3D-Erfassung und -Bearbeitung der Oberflächentexturen und -eigenschaften untersucht.

### 5.2 Dreidimensionale Bearbeitung

#### 5.2.1 Topographische Darstellung (Konturlinien)

Im nächsten Schritt wurden Konturlinien für die gesamte Oberfläche erstellt, dies wird auch als Topographie bezeichnet. Hierfür wurde die Mittelebene berechnet. Diese Ebene ist das Pendant zur Mittellinie, die in DIN 4672 als die Linie definiert ist, welche oberhalb und unterhalb die gleichen Flächen erzeugt. So ist die Mittelebene dann als die Ebene zu definieren, welche das gleiche Volumen oberhalb und unterhalb erhält.

Die zwei Punkte mit dem größten Abstand zur Mittelebene wurden ermittelt, ein Punkt auf der oberen, positiven Seite und ein Punkt auf der unteren, negativen Seite. Der Abstand zwischen dem höchsten positiven Punkt und der Mittelebene wurde dann in sechs Bereiche unterteilt. Auf die gleiche Art wurde auch der Abstand auf der negativen Seite unterteilt. Danach wurden alle Werte der abgetasteten Oberfläche bzw. Matrix den jeweiligen Bereichen zugeordnet. Um diesen Vorgang optisch darstellbar zu machen, wurde jedem Bereich eine bestimmte Farbe zugeordnet. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist in Abb. 5.2 dargestellt.

### 5.2.2 Berge

Wie bereits erwähnt, ist die Glättungstiefe diejenige Größe, die direkt mit dem Sandflächenverfahren verglichen werden kann. Somit war es wichtig, das Sandflächenverfahren digital nachzubilden. Bei der Durchführung dieses Verfahrens ist zu beobachten, dass die Holzscheibe beim Verteilen des Normsandes über die lokalen Spitzen (Peaks) geführt wird. Je rauer die Oberfläche ist, desto besser sind lokale Spitzen optisch zu erkennen. Diese Spitzen gilt es digital zu definieren und zu erfassen. Da die Holzscheibe eine Ebene darstellt, kann sie die aufgeraute Oberfläche nur in drei Punkten bzw. Spitzen gleichzeitig berühren. Diese drei Spitzen sind dem Sandflächenverfahren entsprechend die drei höchsten Spitzen.

Um jetzt diese drei höchsten Spitzen digital zu erfassen und zu definieren, müssen die zusammengehörigen Bereiche definiert werden, d.h. es müssen Teilbereiche der Oberfläche entweder als „Berg“ oder als „Tal“ definiert werden. Zusätzlich muss geklärt werden, wo ein

Berg anfängt und endet. Dies muss für alle weiteren Schritte digital vorbereitet werden. Als Berg wird im Folgenden der Teilbereich der Oberfläche bezeichnet, der oberhalb der Mittelebene liegt und von allen Seiten von Teilbereichen umgeben ist, die unterhalb der Mittelebene liegen.

Diese Voraussetzungen und Annahmen wurden in ein Computerprogramm eingegeben. Die Ergebnisse dieser Studie sind in Abb. 5.3 dargestellt. Abb. 5.3 zeigt nur die Berge, es wurden also nur die positiven Werte verwendet. Jeder Berg bekam eine Nummer und zur optischen Darstellung eine Farbe; so stellt jede Farbe einen Berg dar. Da der Anzahl der zur Verfügung stehenden Farben begrenzt war, mussten die Farben wiederholt benutzt werden. So kann es vorkommen, dass unter Umständen zwei unterschiedliche Berge nebeneinander liegen und die gleiche Farbe haben.

Nachdem alle Berge definiert und erfasst worden waren, konnten die drei höchsten Berge ermittelt werden und aus diesen Werten wiederum der Mittelwert berechnet werden, der die Glättungstiefe repräsentiert. Leider führte dieses Vorgehen zu sehr hohen Werten, die nicht mit den Werten des Sandflächenverfahrens zu vergleichen waren. Die große Abweichung ergab sich daraus, dass die Basis der Werte des Sandflächenverfahrens der Kreis ist, den der verteilte Normsand bildet und der die örtliche Neigung der Oberfläche annimmt. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das digitale Verfahren die gesamte Oberfläche. Dies führt dazu, dass das digitale Verfahren die durch die Welligkeit verursachten Höhenunterschiede nicht getrennt erfasst, sondern den Spitzenwerten zuordnet. Diese Wertabweichung zwischen Sandflächen- und Digitalverfahren kann nur durch eine Angleichung der beiden Verfahren eliminiert werden. Das Angleichen des Sandflächenverfahrens an das Digitalverfahren würde bedeuten, dass der Holzscheibendurchmesser und die Normsandmenge erheblich vergrößert werden müssten, um sie an die untersuchte Oberfläche anzupassen. Dies hätte den Nachteil, dass hierfür keine Bezugswerte existieren, diese also in einer neuen Untersuchung erst ermittelt werden müssten. Dieser Vorgang wurde deshalb nicht verfolgt. Stattdessen sollte das Digitalverfahren an das Sandflächenverfahren angepasst werden, da dies vermutlich die günstigere Alternative war. Um diese Anpassung zu realisieren, wurde die Oberfläche in kleinere Einzelflächen unterteilt, angepasst an die Maße der Holzscheibe. Dann wurde für jede dieser Teilflächen eine Mittelebene ermittelt. Diese Ebenen wurden virtuell in die Waagerechte gedreht, um die Schritte des ursprünglichen Verfahrens nun erneut durchzuführen.

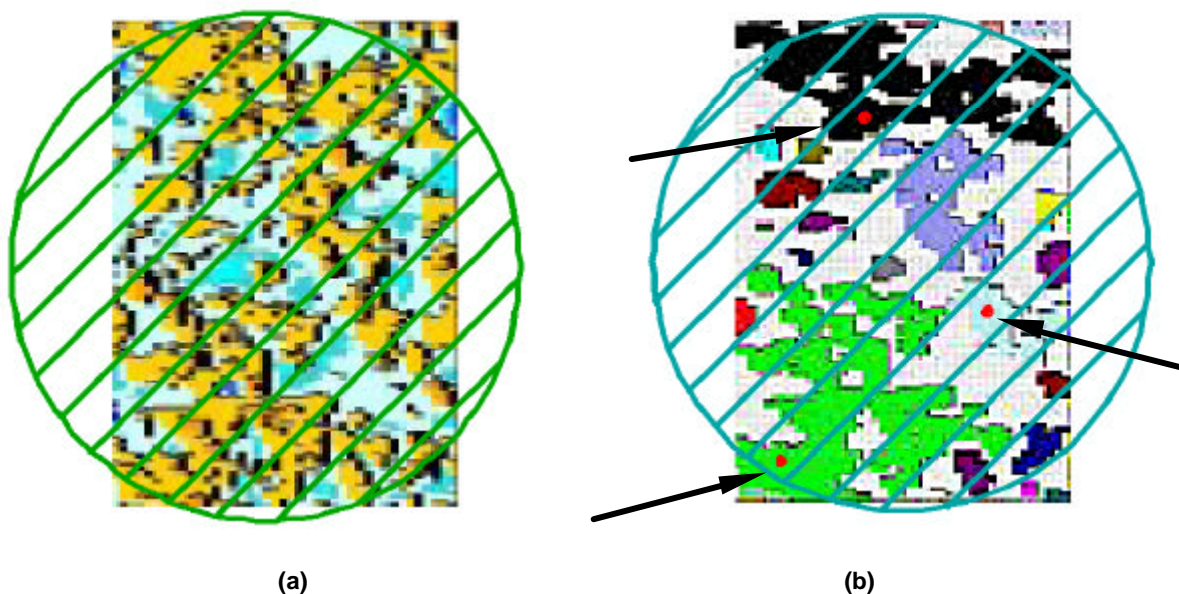


Abb. 5.1 : Die virtuelle Holzscheibe (Kreis) und die möglichen Berührungspunkte

Um diesen Vorgang zu verdeutlichen, wird in Abb. 5.1a ein virtueller Kreis, der die Holzscheibe präsentieren soll, auf die topografische Darstellung einer Teilfläche gelegt. Damit kann man aber die drei Berührungsspitzen noch nicht erkennen; deshalb werden in Abb. 5.1b die Berge gebildet. Jetzt ist man in der Lage, die höchsten Punkte herauszufinden. Aus der Gruppe der höchsten Punkte aller Berge werden dann die drei absolut höchsten Punkte gefunden. In Abb. 5.1b werden sie als drei **rote** Punkte dargestellt

Aus diesen drei Werten wurde der Mittelwert und anschließend die Glättungstiefe für diese Teilfläche berechnet. Aus der Summe aller Teilflächenglättungstiefen wurde dann für die gesamte Fläche der Mittelwert berechnet. Die Resultat dieses verbesserten Vorgangs waren nun mit dem Sandflächenverfahren vergleichbar. Abb. 5.5 zeigt die Zuordnung der Berge innerhalb der Teilflächen. In den Anhängen (3-A), (3-B), (3-C) sind die optischen Resultate einzeln dargestellt.

Die so geschaffene Möglichkeit, einzelne Berge zu definieren, erleichtert es jetzt einzelne Berge zu beobachten und Berechnungen durchzuführen. Ermöglicht wird folglich die wahlweise Beurteilung der gesamten Oberfläche oder der Oberfläche eines einzelnen Berges. Diese Möglichkeit ist jedoch zur Zeit vornehmlich für Studienzwecke wichtig, um Vergleiche zwischen verschiedenen Flächen oder zwischen verschiedenen Bergen innerhalb einer Fläche herstellen zu können.

Zu diesem Zeitpunkt sind folgende Information über einen bestimmten Berg verfügbar:

- die Grundfläche des Berges,
- der höchste Punkt des Berges,
- die Mittelwerte aller Höhenwerte eines Berges,
- das Volumen des Berges.

Andere Größen können je nach Bedarf zusätzlich ermittelt werden. Auf die Bergformen wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Das Verhältnis des Bergvolumens zur mittleren Berghöhe soll dieses Thema später abdecken. Die Wichtigkeit dieser geschaffenen Möglichkeit wird bei den praktischen Untersuchungen im zweiten Teil dieser Arbeit verdeutlicht.

In Abb. 5.2 wird die vom Laser abgetastete Oberfläche dargestellt. Den zuvor erwähnten Bergen, die oberhalb der Mittelebene liegen, werden die rötlichen Farben zugeordnet. Je höher die Werte liegen, desto dunkler ist der zugeordnete Rot-Ton. Die Täler, die unterhalb der Mittelebene liegen, werden nach dem selben Prinzip blau eingefärbt. Für die Berge aus Abb. 5.2 wird jetzt in Abb. 5.3 die Bergzuordnung dargestellt. Es ist zu erkennen, wie den unterschiedlichen Bergen und Bergketten verschiedene Farben zugeordnet werden. Ein Beispiel für die wiederholt verwendeten Farben kann in der oberen Hälfte beobachtet werden. In der oberen linken Ecke ist einem Berg die Farbe Schwarz zugeordnet worden. Direkt rechts daneben ist eine größere Bergkette zu sehen, der zufällig auch die Farbe Schwarz zugeordnet wurde. Dass es sich um zwei verschiedene Berge handelt ist bei genauem Hinschauen daran zu erkennen, dass diese Berge bzw. Bergketten keine Verbindung zueinander haben.

Auch sieht man einige kleine Bereiche, denen eigene Farben zugeordnet sind. Diese kleinen Bereiche sind definitionsgemäß ebenso einzelne Berge. In Abb. 5.4 wird die Unterteilung der Gesamtfläche in die kleineren Quadrate, die einzeln erfasst werden, gezeigt. Entsprechend wird in Abb. 5.5 die Bergzugehörigkeit dann auch für jeden Bereich getrennt durchgeführt. Aufgrund der so gewonnenen Ergebnisse folgt dann die Beurteilung der Gesamtfläche.

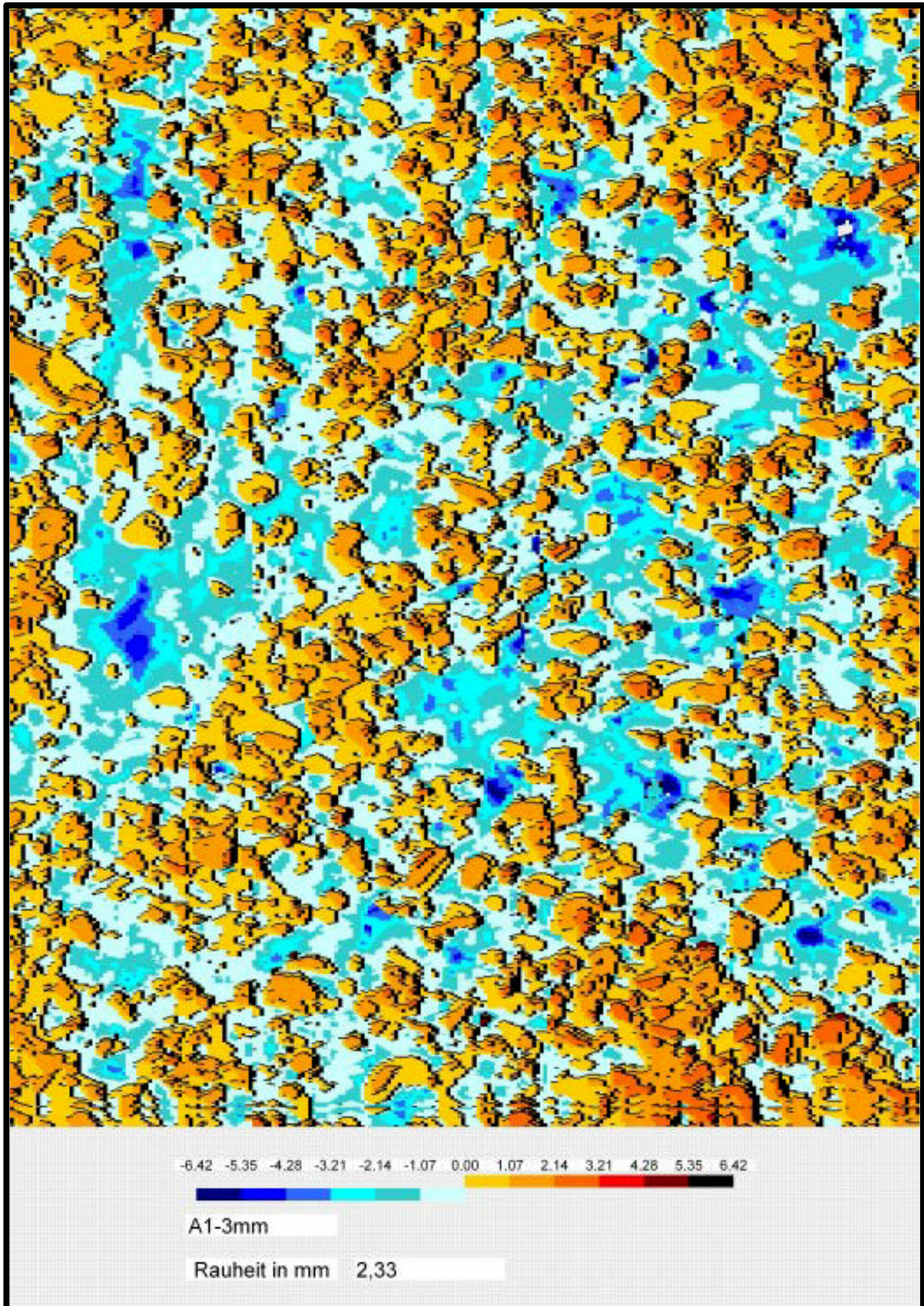


Abb. 5.2 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die gesamte Oberfläche (A1-3mm)

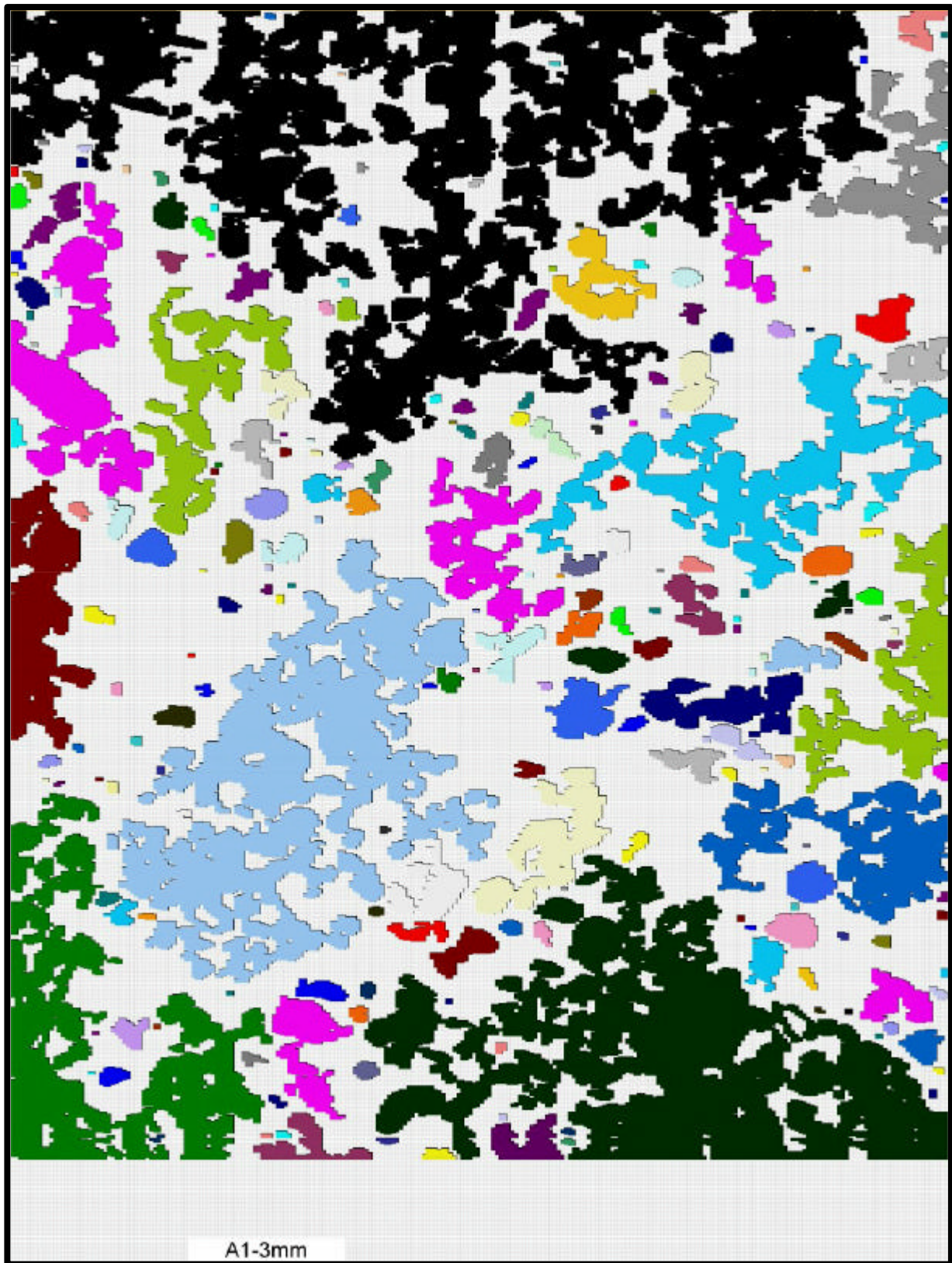


Abb. 5.3 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die gesamte Oberfläche (A1-3mm)

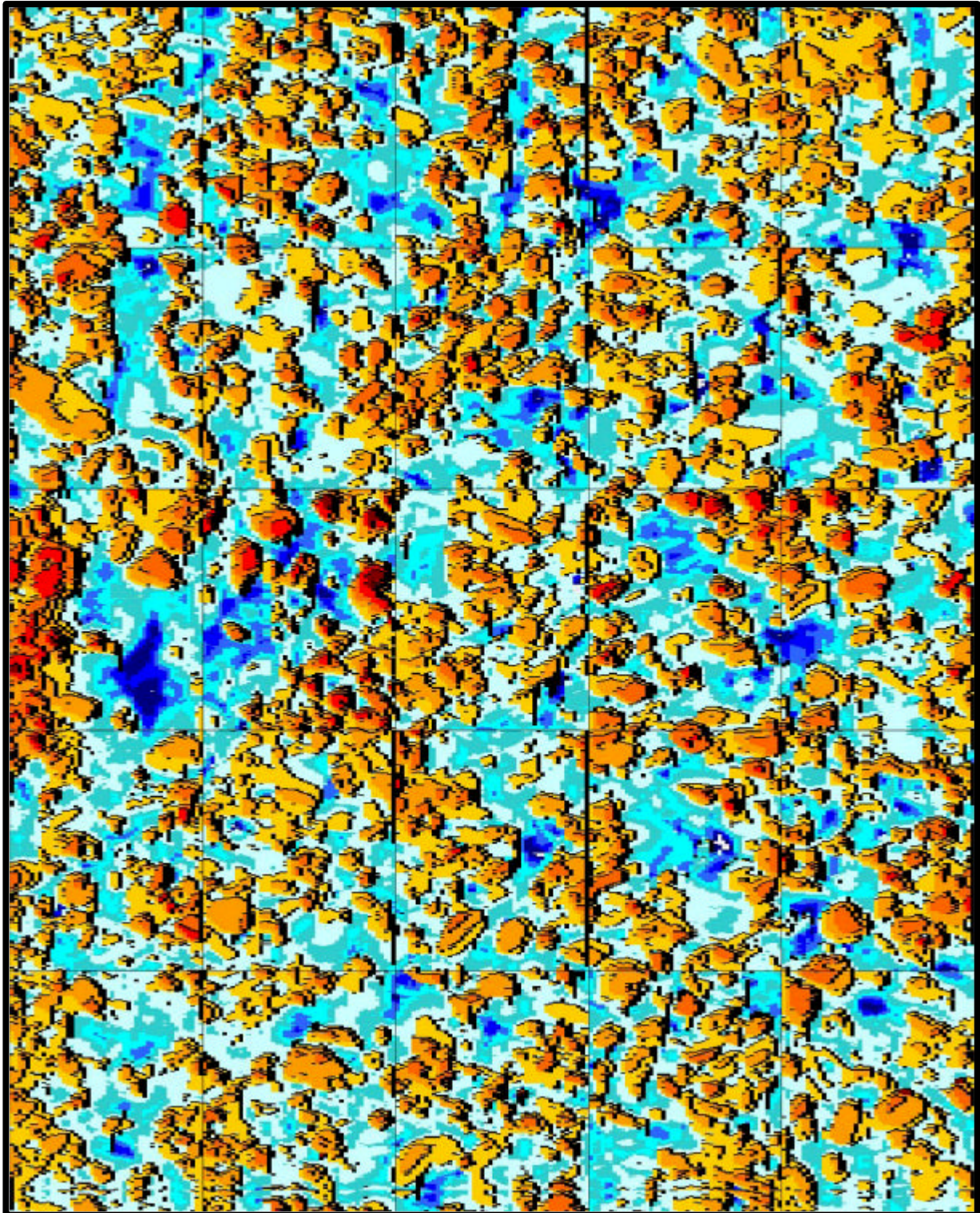


Abb. 5.4 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A1-3mm)



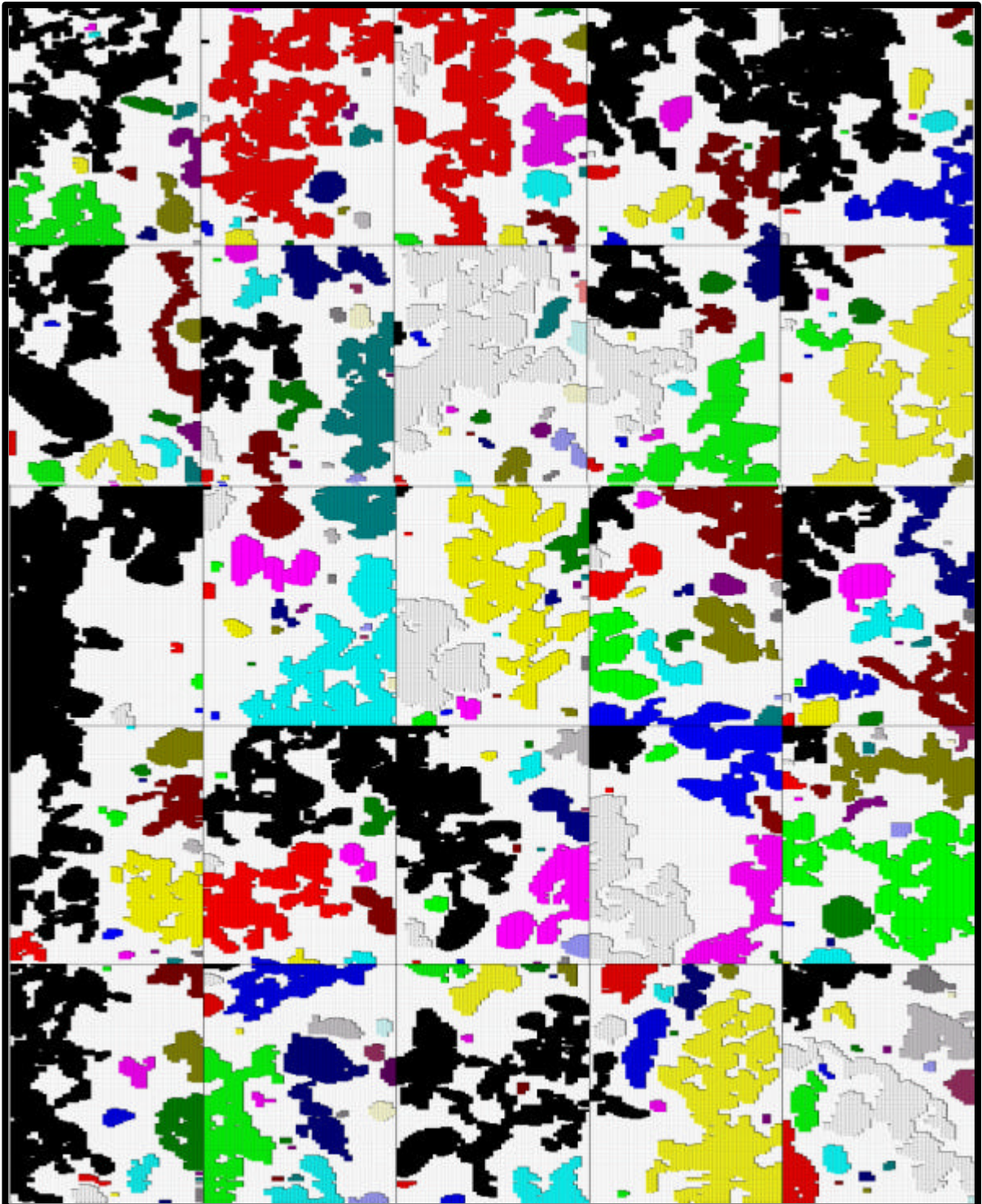


Abb. 5.5 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A1-3mm)

Es wurde bereits dargestellt, dass die Rautiefen erfasst werden, indem die Oberfläche in kleinere Teilflächen unterteilt und dann jede Teilfläche für sich beurteilt wird. Bei der Beurteilung der Berge wird die gesamte Fläche zusammenhängend betrachtet. Zu diesem Zweck werden die in den Abbildungen 5.2 und 5.3 gezeigten Oberflächen genauer untersucht. Dabei werden folgende Einflussgrößen studiert:

- Sieblinien (A, B, C)
- Soll-Rautiefen (1 mm, 2 mm, 3 mm)

### **5.2.2.1 Bergvolumen**

In Abb. 5.6 werden die einzelnen Bergvolumina der Oberfläche A-3mm im Verhältnis zu ihren mittleren Höhen dargestellt; zusätzlich wird der Einfluss der Aufrauung auf die Bergverteilung veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Höhe der Berge mit dem Bergvolumen steigt. Die Abweichungen vom Trend bedeuten Berge, die bei großer Mittelhöhe nur eine kleine Grundfläche besitzen. In Abb. 5.8 ist zu sehen, dass bei allen drei Rautiefen die Volumenklasse (0-0,1 mm<sup>3</sup>) mit 36-50% einen relativ hohen Anteil hat. Die Volumenklasse (1-10 mm<sup>3</sup>) hat in etwa den gleichen Anteil wie die Volumenklasse (0-0,1 mm<sup>3</sup>). Abb. 5.9 lässt erkennen, dass 84-98% der Berge in den Volumenklassen bis 10 mm<sup>3</sup> liegen. Die größeren Volumenklassen (10-100 mm<sup>3</sup>), (100-1000 mm<sup>3</sup>) und (1000-10000 mm<sup>3</sup>) sind kaum vertreten, hier kommen nur einzelne Berge vor.

Betrachtet man die Bergvolumenverteilung der einzelnen Rautiefen, so ist deutlich zu erkennen, dass alle drei Rautiefen insgesamt eine ähnliche Verteilung der Bergvolumina aufweisen. Bei einer Rautiefe von 1 mm ist eine Verlagerung der Bergvolumenanteile auf eher kleinere Berge und bei einer Rautiefe von 3 mm auf eher größere Berge zu erkennen. Bei einer Rautiefe von 2 mm nimmt die Bergvolumenverteilung eine mittlere Position ein.

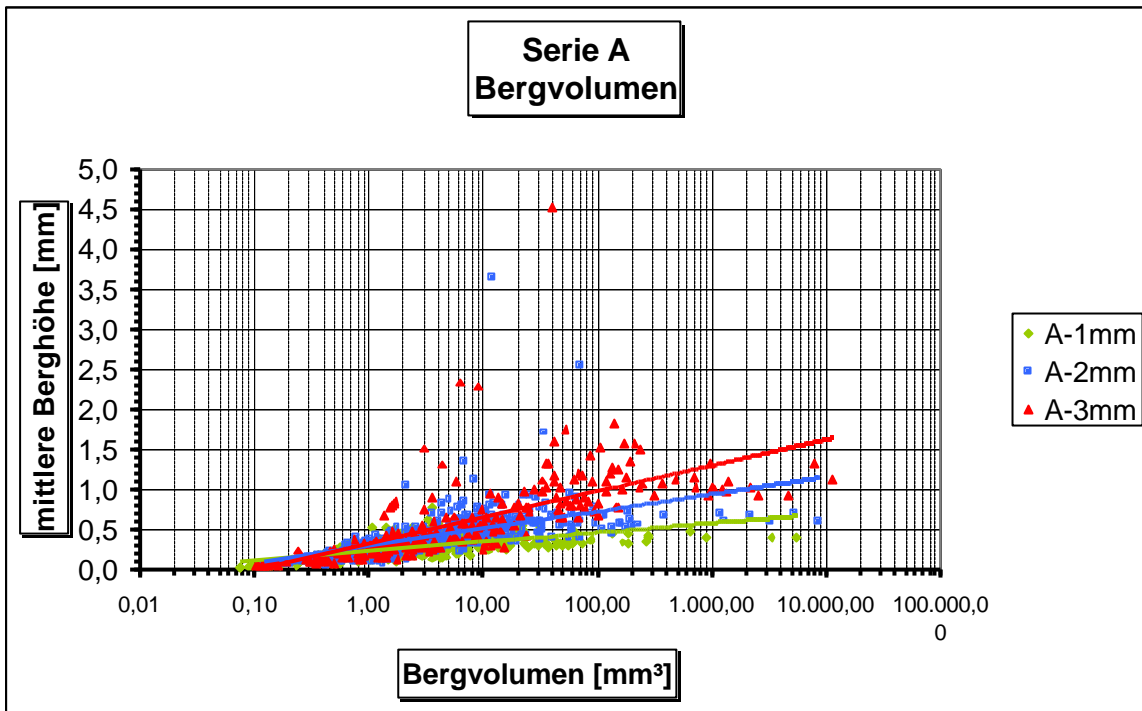


Abb. 5.6 : Verhältnis der mittlere Berghöhen zu deren Volumina, Serie A

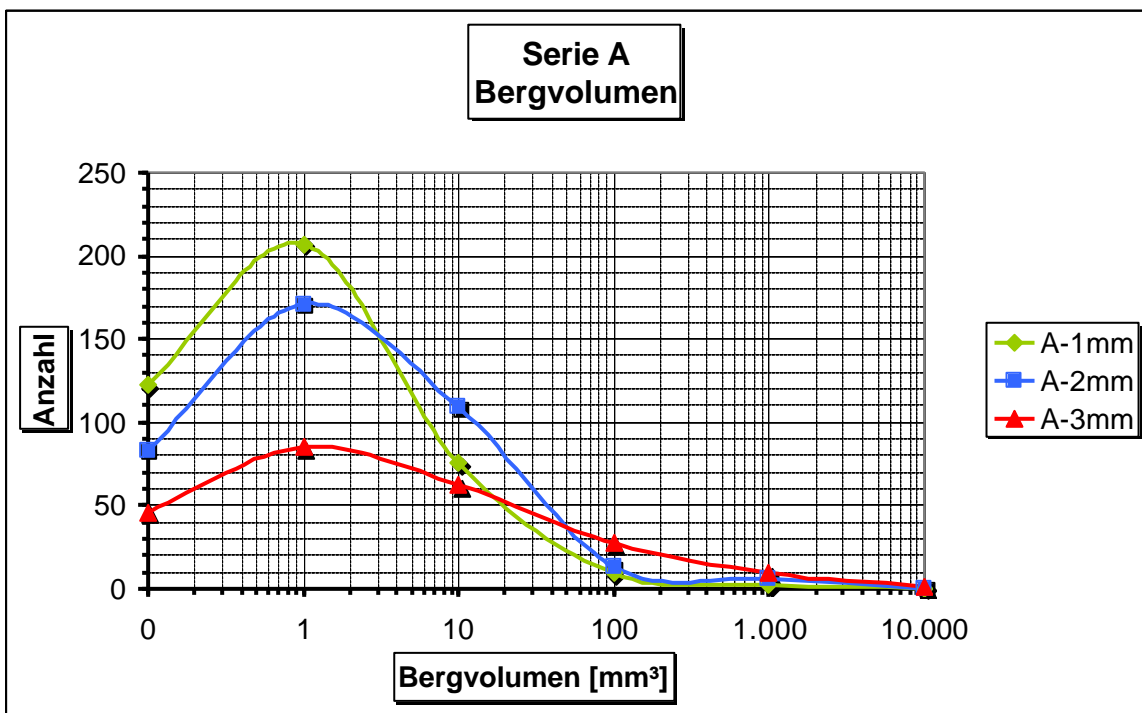


Abb. 5.7 : Häufigkeitsverteilung der Bergvolumen, Serie A

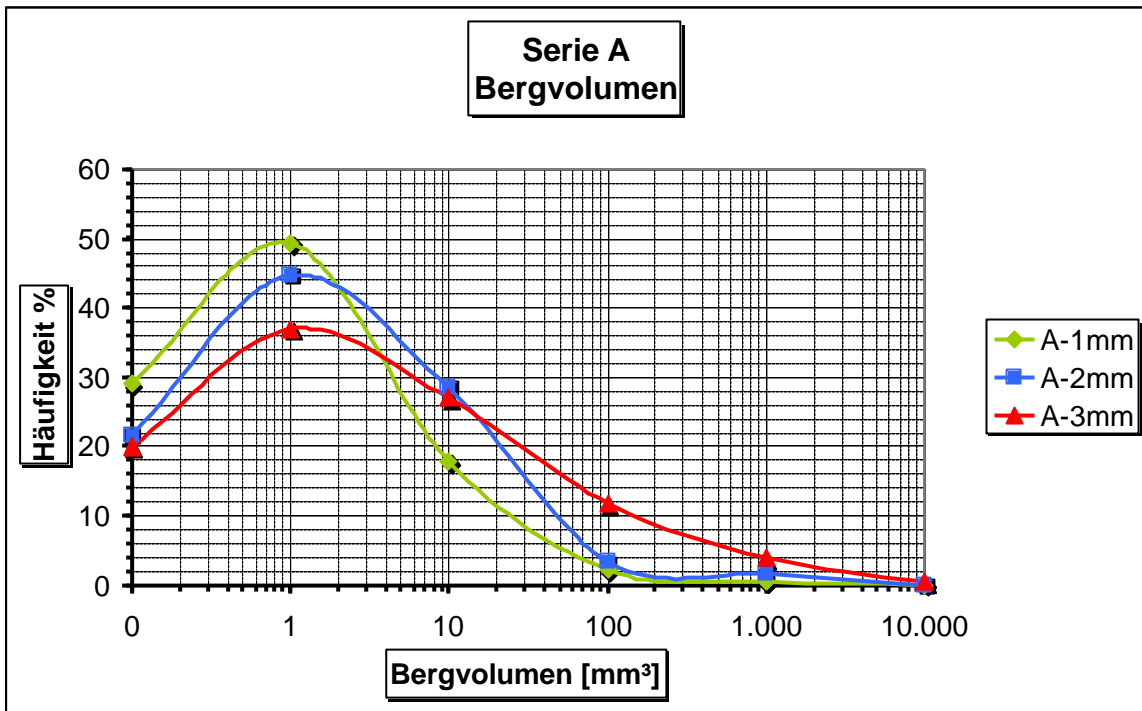


Abb. 5.8 : Prozentuale Häufigkeit der Bergvolumina, Serie A

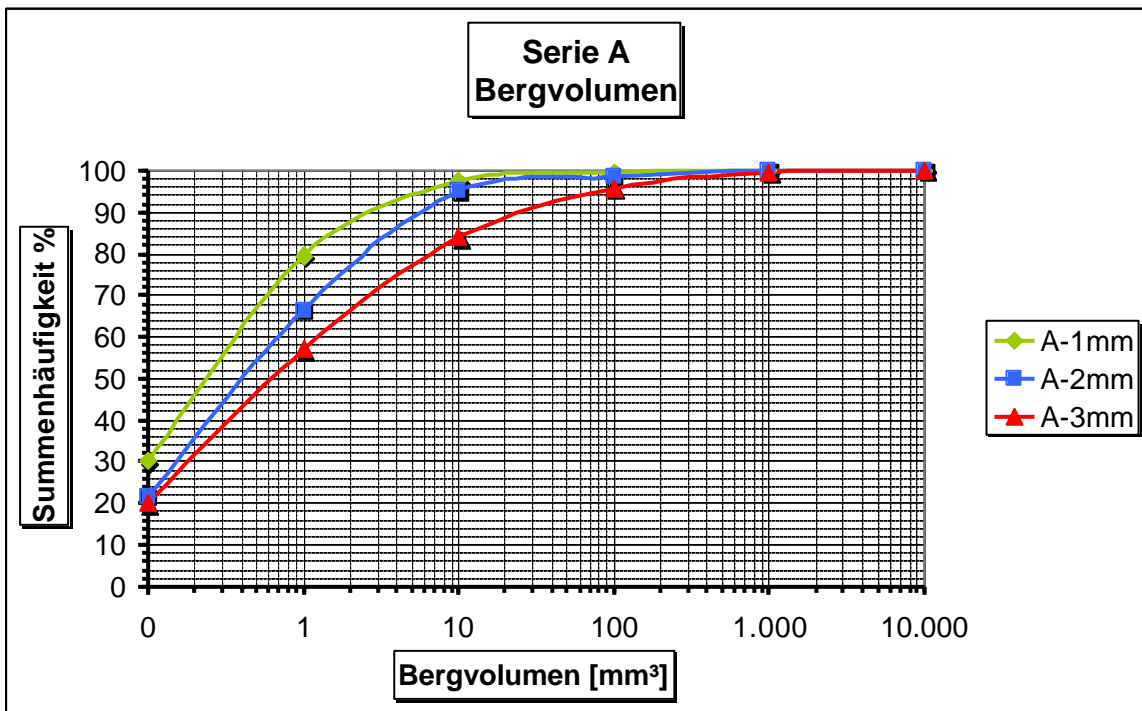


Abb. 5.9 : Prozentuale Summenhäufigkeit der Bergvolumina, Serie A

Es stellt sich nun die Frage, ob diese einzelnen, großen Berge den Hauptteil an der Kraftübertragung haben, oder ob die vielen kleinen Berge diese Kraftübertragung übernehmen. Diese Frage soll erst im zweiten Teil dieser Arbeit geklärt werden.

### 5.2.2 Anzahl der Berge

In Abb. 5.10 ist zu sehen, dass die Anzahl der Berge bei steigender Rauheit abnimmt. Die Abnahme der Berganzahl mit steigender Aufrauung wird dadurch verursacht, dass beim Sandstrahlen die kleineren Zuschlagkörner und der umhüllende Zementstein weggeblasen werden. So treten die größeren Zuschlagkörner stärker hervor und die Täler werden tiefer. Dieses Phänomen setzt sich so nicht beliebig weiter fort, da ab einer bestimmten Strahlzeit nicht nur Zementstein und Kleinzuschlagkörner weggeblasen werden, sondern auch tiefe Löcher in die Oberfläche gerissen werden.

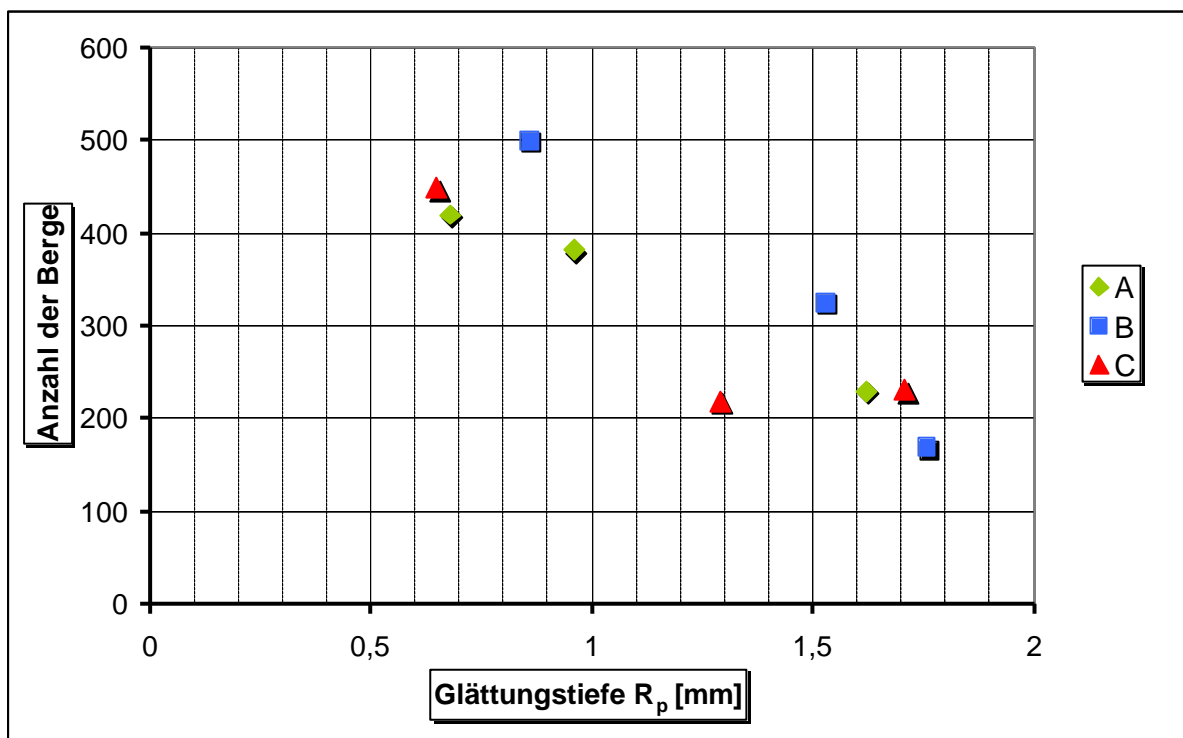


Abb. 5.10 : Abnahme der Bergzahl mit Zunahme der Glättungstiefe

Es ist also bei sinkender Berganzahl gleichzeitig eine Bergvolumenvergrößerung festzustellen. Alle eingesetzten Sieblinien wurden auf die vorgenannten Einflüsse hin untersucht.

Die Ergebnisse für die größeren Rautiefen für die Sieblinien A, B, und C sind in Anhang 4 ausführlicher dargestellt. Im Allgemeinen sind die Ergebnisse der Sieblinie A bei einer Rautiefe von 3 mm repräsentativ.

### 5.2.3 Oberfläche

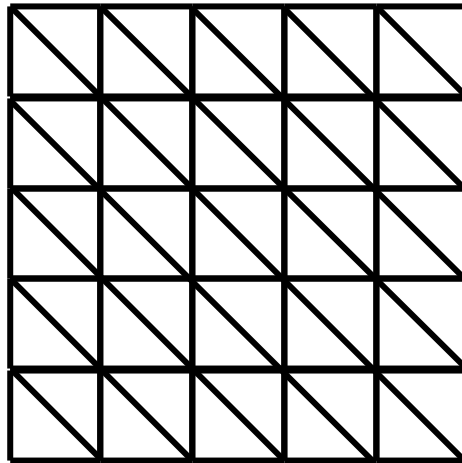


Abb. 5.11 : Das Netz, gebildet aus Rechtecken die jeweils in zwei Dreiecken unterteilt sind

Um die Fläche berechnen zu können, wurde das in Abb. 5.11 dargestellte Netz gebildet und über die Oberfläche gelegt. Jeder Schnittpunkt repräsentiert einen Punkt der Datenmatrix. Die Abstände zwischen den Schnittpunkten zeigen die Abtastauflösung in Zeilen- und Abtast-schnitttrichtung. Durch das Verbinden dieser Punkte werden Rechtecke gebildet. Diese Rechtecke werden dann jeweils in zwei Dreiecke unterteilt. Diese Unterteilung ist notwendig, um die räumliche Natur der Oberfläche zu erfassen und die Berechnung zu erleichtern.

In Abb. 5.12 ist ein Rechteck im Raum dargestellt. Diese Darstellung zeigt, in welcher Form die zwei Dreiecke in verschiedenen Ebenen liegen können. Die Hilfsgrößen  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  zeigen die unterschiedlichen Höhen der jeweils zugehörigen Punkte an. Die Länge der Dreieckseiten wird in X-Richtung von  $L_{x1}, L_{x2}$  und in Y-Richtung von  $L_{y1}, L_{y2}$  dargestellt. BasisX und BasisY sind die Projektionen der jeweiligen Seiten des Rechtecks auf die XY-Ebene, sie besitzen vordefinierte Maße.

Mit diesen Kenntnissen können nun die Flächen der beiden Dreiecke im Raum berechnet werden. Addiert bilden sie die räumliche Fläche des zugehörigen Rechtecks. Durch Aufsummieren der Raumflächen aller Netzrechtecke erhält man die resultierende Gesamtfläche der aufgerauten Oberfläche. Die Fläche der Netzprojektion in XY-Ebene ist bekannt.

Um das „Oberflächenverhältnis“, der aufgerauten Fläche zu ihrer Projektionsfläche berechnen zu können, wird -wie in der folgenden Gleichung dargestellt- die aufgeraute Fläche durch die Projektionsfläche dividiert:

$$c_r = \frac{A_r}{A_p} \quad (5.1)$$

mit

$c_r$  = Oberflächenverhältnis

$A_r$  = Fläche der aufgerauten Oberfläche

$A_p$  = Projektionsfläche

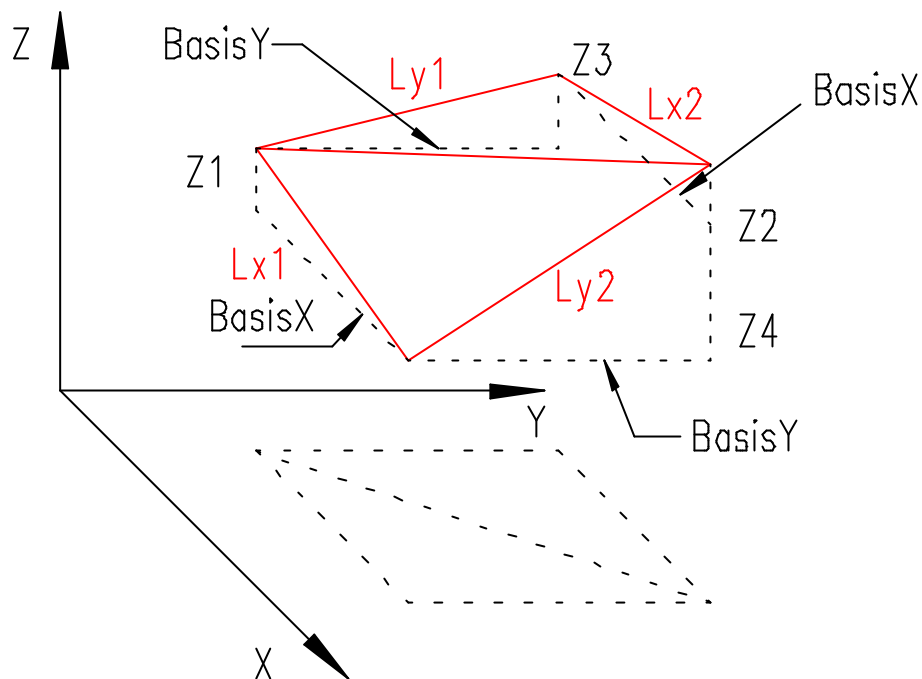


Abb. 5.12 : Der räumliche Darstellung eines Netzrechteckes

Die so berechneten Oberflächenverhältnisse wurden wie auch die in den vorangehenden Kapiteln ermittelten Werte auf ihr Verhalten bei Veränderung des Grades der Manipulation (Empfindlichkeit) untersucht. Die ausführlichen Ergebnisse sind in Anhang 1 dargestellt.

### 5.2.3.1 Rechenmodell

Die Oberfläche ist eine Größe, die nur in der 3D-Betrachtungsweise errechenbar ist. Bei den herkömmlichen 2D Methoden wird jeder einzelner Abtastschnitt für sich betrachtet, gefiltert, korrigiert und berechnet, unabhängig vom Einfluss der Nachbarabtastschnitt. Das Korrigieren enthält auch den Einfluss der Welligkeit. Die Auswertelänge ist zuerst in Bezugsstrecken zu unterteilen, diese Bezugsstrecken sind dann so zu glätten, dass die einzelnen Mittellinien aller Bezugslinien auf einer Ebene liegen. Diese relative Verschiebung zwischen den einzelnen Abtastschnitten ändert die tatsächlichen Höhenunterschiede, was zu einer Verfälschung der Berechnung der tatsächlichen Fläche führt. Diese kann aber vermieden werden bei Betrachtung der gesamten Oberfläche als eine einheitliche Fläche; bei der Bildung der Mittelebene werden die Höhenverhältnisse zwischen den einzelnen Abtastschnitten unverändert gehalten. Wie bei den anderen Oberflächengrößen wurde auch hier der Einfluss des Korrekturfaktors bzw. der Empfindlichkeit untersucht. Die einzelnen Ergebnisse sind Anhang 1 zu entnehmen.

Um das Oberflächenverhältnis zu studieren, wurde ein Rechenmodell aufgestellt. Dieses Rechenmodell simuliert die Vergrößerung einer Oberfläche durch Sandstrahlen. Es wurde darauf geachtet, dass Volumen, Anzahl und Verteilung der Zuschläge in dem untersuchten Modell den in DIN 1045 vorgegebenen Sieblinien (A, B, C) entsprachen. Darauf wurde dann das in Abb. 5.13a dargestellte Modell aufgebaut.

Um die Berechnungen zu erleichtern, wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Zuschläge wurden als Kugeln bzw. Sphären berechnet.
- Um die Anzahl der Sphären zu berechnen und um den leeren Raum, der das Zementstein darstellen soll, zwischen den Sphären auszugleichen, wurden statt der Sphärenvolumina Würfelvolumina berechnet. Die Kantenlänge dieser Würfel waren identisch mit den Sphärendurchmessern.
- Um für die untersuchte Fläche das Schichtvolumen zu berechnen, wurde eine Schichttiefe ausgewählt, die dem größten Zuschlag- bzw. Sphärendurchmesser entspricht, in diesem Fall 14 mm.
- Die Sphären wurden geordnet verteilt. Diese geordnete Verteilung kommt in der Realität so nicht vor; sie erleichtert die Berechnungen jedoch erheblich und macht die Vorgänge übersichtlicher.
- Für die Berechnungen wurde jedem gewählten Durchmesser der den Sieblinien entsprechende Anteil zugeordnet, Tabelle. 5.1.

Zuerst wurden die Hauptbereiche der Sieblinien hälftig geteilt. Dann wurden mit Hilfe der Sieblinien A, B und C die prozentualen Anteile der einzelnen Teilbereiche berechnet. Für jeden Teil wurde die mittlere Korngröße bzw. der Durchmesser ermittelt und in die Berechnungen eingesetzt. Es wurde folgende Unterteilung vorgenommen:

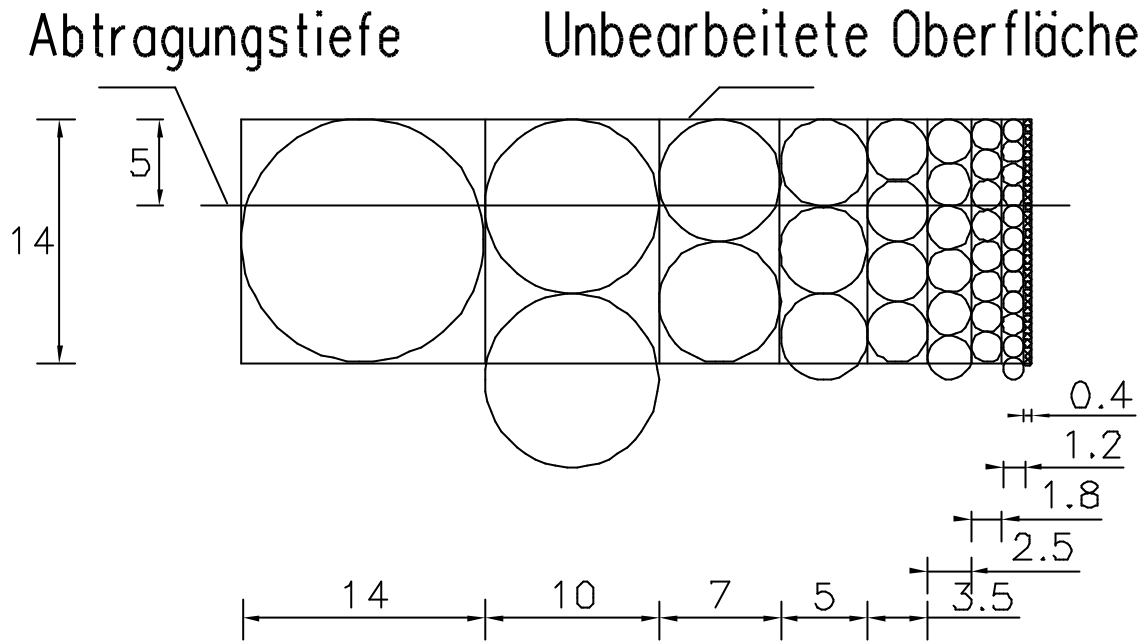
**Tabelle 5.1 : Die eingesetzten mittleren Korngrößen**

Teilbereich [mm]	Mittlere Korngröße [mm]
0,25-0,5	0,375
0,5-1	0,75
1-1,5	1,25
1,5-2	1,75
2-3	2,5
3-4	3,5
4-6	5
6-8	7
8-12	10
12-16	14

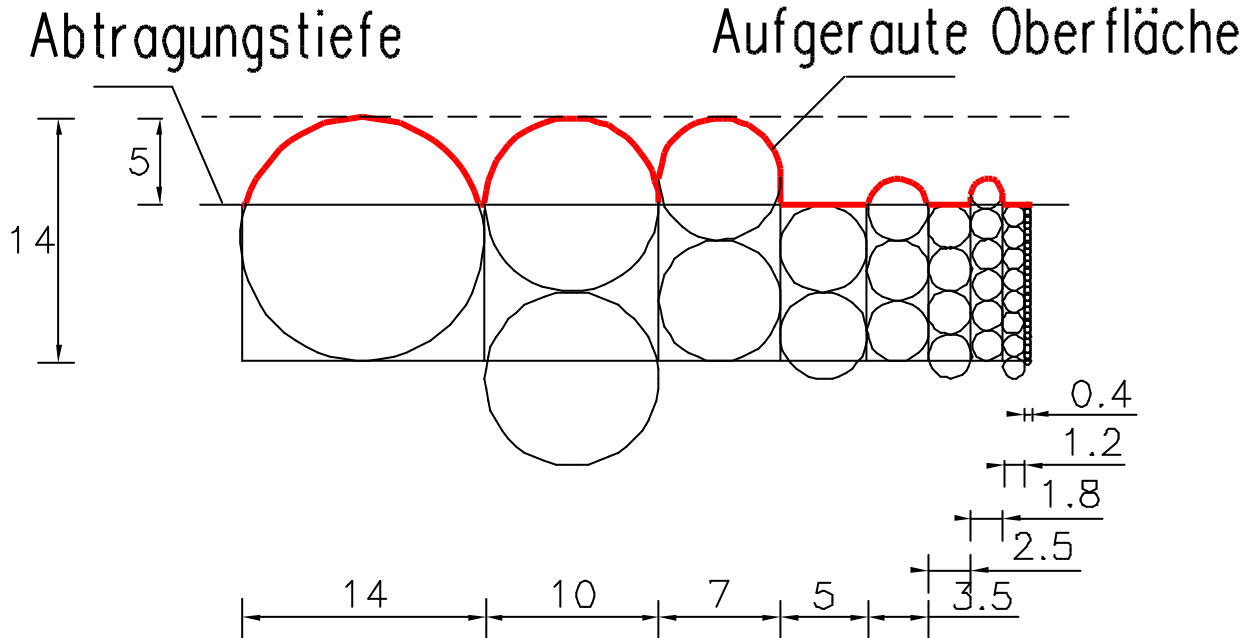
Wie oben erwähnt wurden die Volumina der Zuschläge zuerst als Würfel berechnet. Dieser Schritt war notwendig, um die Volumenanteile der vernachlässigten Korngrößen und die Zementsteinanteile zu ersetzen. Den Würfelkanten wurden als Längen den entsprechenden Sphärendurchmessern zugeordnet. Durch die Berechnung der untersuchten Volumina in einer Tiefe, die dem größten ausgewählten und eingesetzten Korndurchmesser von hier 14 mm entsprach, und mit den jeweils berechneten Volumina und den Anteilen der Mischung konnte die entsprechende Anzahl der Zuschläge berechnet werden, Abb. 5.13a.

Im nächsten Schritt wurde das Sandstrahlen und die Abtragung der oberen Schichten simuliert. Beginnend mit einer Abtragungstiefe von 0 mm, die eine unbearbeitete Oberfläche repräsentiert, wurde die Abtragung in 0,1 mm-Schritten gesteigert. In jedem dieser Schritte wurden die Mantelfläche und Querschnittsfläche der Sphären berechnet. In Abb. 5.13b ist ein Beispiel eine Abtragungstiefe von 5 mm dargestellt.





(a) : Das Rechenmodell (alle Angaben in mm)



(b) : Das Rechenmodell nach der Aufrauung (alle Angaben in mm)

Abb. 5.13 : Das Rechenmodell vor und nach der Aufrauung

Um die Mantelfläche für die Tiefe  $h$  zu berechnen, wurde folgende Gleichung verwendet [5.1]:

$$M = 2pRh \quad (5.2)$$

Für die selbe Tiefe  $h$  wurde auch die Sphärenabschnittsfläche berechnet [5.1]:

$$A_q = pr^2 \quad (5.3)$$

mit

$$r = \sqrt{h(2R - h)} \quad (5.4)$$

mit

- $M$  = Mantelfläche
- $R$  = Radius des Sphäres
- $h$  = Sphärenabschnittshöhe
- $r$  = Radius des Spärenabschnittes
- $Q$  = Abschnittsfläche

Diese Gleichungen kamen zum Einsatz, sobald die Abtragungstiefe bzw. Abtragungsebene  $h$  im Bereich der oberen Hälfte der Sphären lag, Abb. 5.14a und Abb. 5.14b. Wenn die Abtragungsebene in der unteren Hälfte der jeweiligen Sphären lag, wurden die normale Halbsphärenmantelfläche und Querschnittsfläche berechnet [5.1]:

$$M = 2pR^2 \quad (5.5)$$

$$A_q = pR^2 \quad (5.6)$$

Siehe Abb. 5.14a und Abb. 5.14c. Die Hauptgleichung mit der dann das Oberflächenverhältnis berechnet wurde, lautet:

$$A_r = A_p - \Sigma A_q + \Sigma M \quad (5.7)$$

mit:

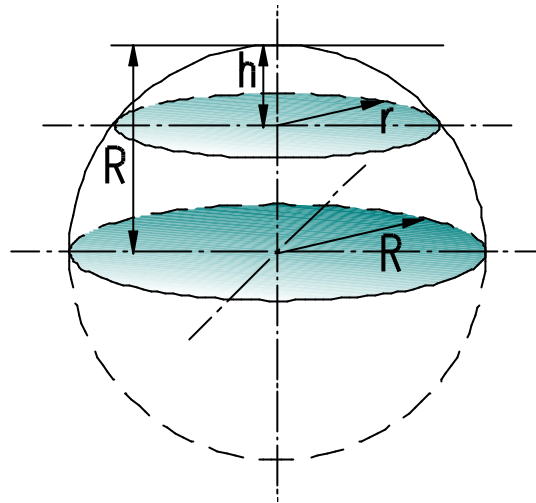
- $A_r$  = vergrößerte Oberfläche (aufgeraute Oberfläche)
- $A_p$  = Projektionsfläche
- $\Sigma A_q$  = Summen aller Sphärenabschnittsflächen
- $\Sigma M$  = Summe aller Sphärenmantelflächen

Das Oberflächenverhältnis wurde dann mit

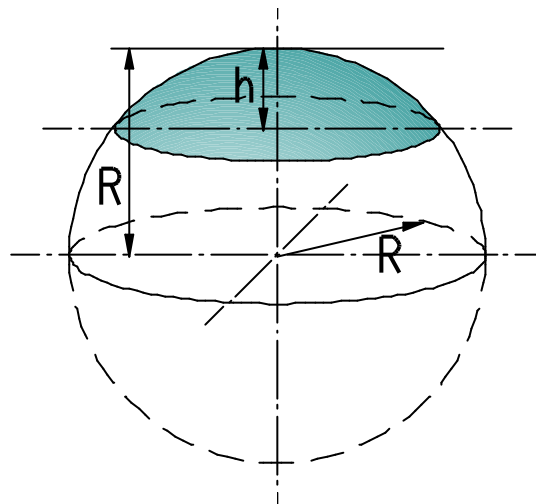
$$c_r = \frac{A_r}{A_p} \quad (5.8)$$

berechnet.

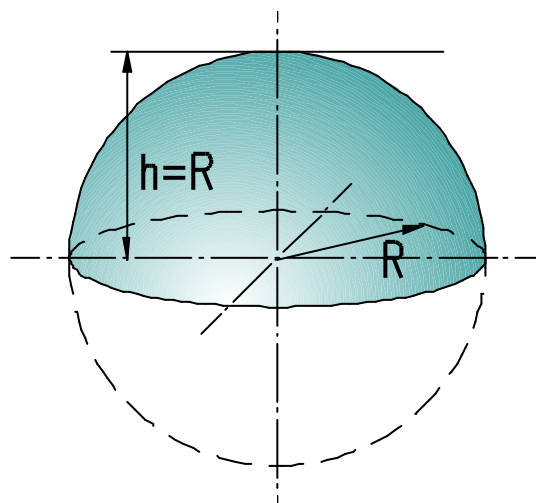
Es ist ersichtlich, dass die Abtragungsebene manche Sphären schneidet, und andere nicht. Die Ergebnisse dieser Studie sind in Abb. 5.15 dargestellt.



(a) : Sphärenabschnittsflächen  $A_q$  bei eine Abschnittshöhe  $h$  und  $R$



(b) : Sphärenmantelfläche  $M$  bei eine Abschnittshöhe  $h$



(c) : Sphärenmantelfläche  $M$  bei eine Abschnittshöhe  $h = R$

Abb. 5.14 : Die unterschiedliche Definitionen der Mantel- und Abschnittsflächen

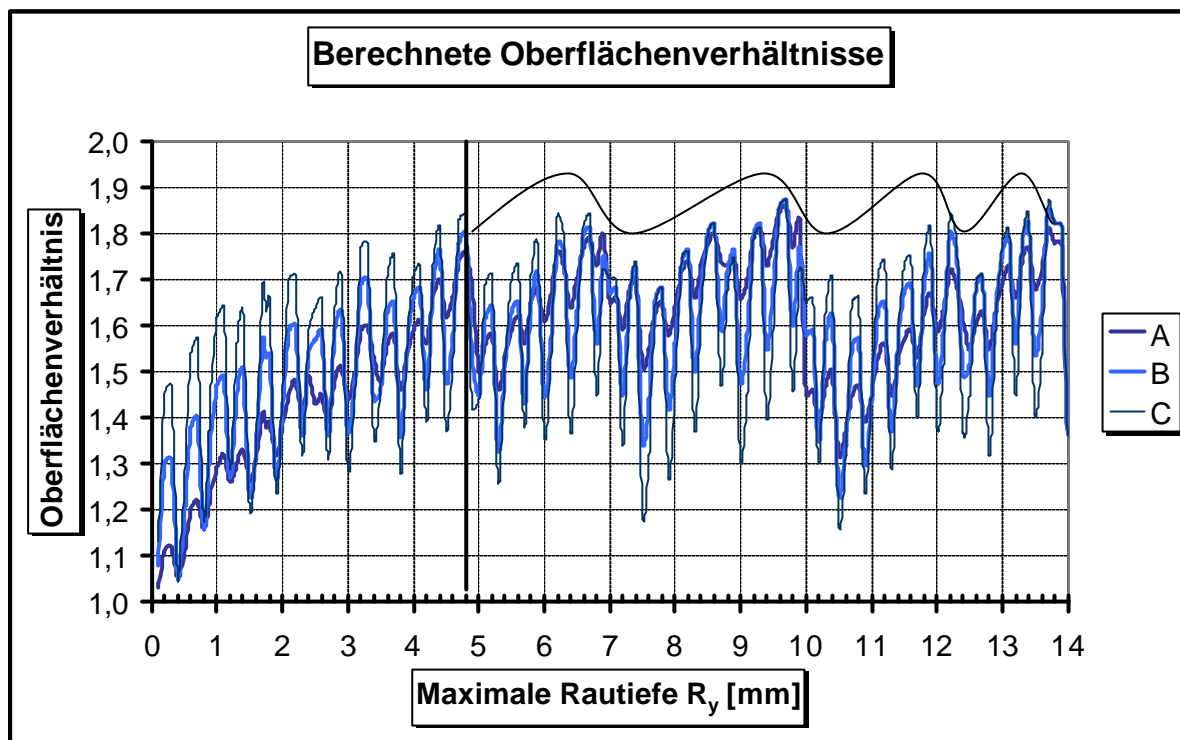


Abb. 5.15 : Die berechneten Oberflächenverhältnisse

In Abb. 5.15 ist zu erkennen, dass das Oberflächenverhältnis mit zunehmender Abtragungstiefe steigt. Die Abtragungstiefe entspricht definitionsgemäß weitgehend der maximale Rautiefe  $R_y$ . Bei einer maximale Rautiefe  $R_y$  von 4,8 mm endet die allgemeine Zunahme, hier beginnt der erste Abfall der Werte. Die Werte beginnen mit weiter zunehmender Abtragungstiefe bzw. wachsenden maximale Rautiefewerten jedoch wieder zu steigen.

Es ist auch zu erkennen, dass das Oberflächenverhältnis ab eine maximale Rautiefe von 4,8 mm keine weitere Zunahme sondern ein wellenförmiges Verhalten mit einer tendenziell waagerechten Bewegungsrichtung zeigt. Dieses wellenförmige Verhalten, das eigentlich Maximum und Minimum des Oberflächenverhältnisses zeigt, ist vermutlich ein Ergebnis der zuvor getroffenen Annahmen. Im verwendeten Rechenmodell sind die Zuschläge bzw. Sphären in einer geordneten Form verteilt. In dieser Ordnung kommt es, je nachdem, wo die Abtragungsebene liegt, zu Maximal- und Minimalwerten. Wenn die Abtragungsebene viele vorhandene Kornquerschnitte schneidet, ist ein Maximalwert zu erwarten, wenn die Abtragungsebene dagegen weniger Kornquerschnitte schneidet, ist ein Minimalwert zu erwarten. In realen Betonmischungen wird die verwendete Rechenmodellordnung so nie vorkommen; es handelt sich dort immer um Mischordnungen. Der zu erwartende Oberflächenverhältniswert liegt dann in einem Zwischenbereich.

### 5.2.3.2 Ergebnisse

Wie schon in Abb. 5.15 gezeigt wurde, ist für die weiteren Schritte der Bereich bis zu einer maximale Rautiefe von 5 mm von Interesse. In Abb. 5.16 ist das Oberflächenverhältnis für eine Mischung A16 dargestellt worden, Abb. 5.17 zeigt das Oberflächenverhältnis einer Mischung B16 und Abb. 5.18 das einer C16-Mischung. Es ist zu erkennen, dass die oberen und unteren Kurven bei der A16-Mischung den geringsten Abstand aufweisen.

Die Sieblinie A16 hat einen geringeren Anteil von kleineren Zuschlaggrößen als die Sieblinie C16. Deshalb ist der relativ große Unterschied zwischen den Ergebnissen der Linien A16 und des C16 auf den Einfluss des größeren Anteils der kleineren Zuschlaggrößen bzw. Sphären zurückzuführen. Durch ihre größere Anzahl besitzen sie eine größere Gesamtmantelfläche. Wenn die Abtragungsebene diesen mehrheitlich durchschneidet, ist das Oberflächenverhältnis hoch. Wenn die Abtragungsebene die kleineren Zuschlagkörner jedoch mehrheitlich nicht durchschneidet, ist das Oberflächenverhältnis relativ klein. Bei einer Mischung A16 ist der Anteil der kleineren Durchmesser geringer und somit ihr Einfluss auf die Schwankung der Ergebnisse entsprechend geringer. Die Mischung B16 ist eine Zwischenmischung, die zwischen den beiden anderen Mischungen liegt. Aus diesem Grund liegen die Ergebnisse auch zwischen den Ergebnisse der beiden anderen Mischungen.

Es ist von Interesse zu sehen, ob die Ergebnisse der Laboruntersuchungen mit den Ergebnisse des Rechenmodells übereinstimmen. In den Abb. 5.16, 5.17 und 5.18 ist zu erkennen, dass bei allen drei Sieblinien die aus dem Laserabtastverfahren bzw. aus dem Digitalenverfahren gewonnenen Ergebnisse innerhalb der Max- und Min- Linien liegen. Dies wird in Abb. 5.19 verdeutlicht bei der Darstellung der Ergebnisse aller Serien zusammen. Obwohl die eingesetzten maximale Rautiefen den Werten der Glättungstiefen bis zu 3mm entsprechen, ist es wegen der geringeren Abtragungstiefe bzw. der geringen maximale Rautiefe nicht möglich zu beurteilen, ob dieser Trend auch weiterhin dem Rechenmodell folgt.

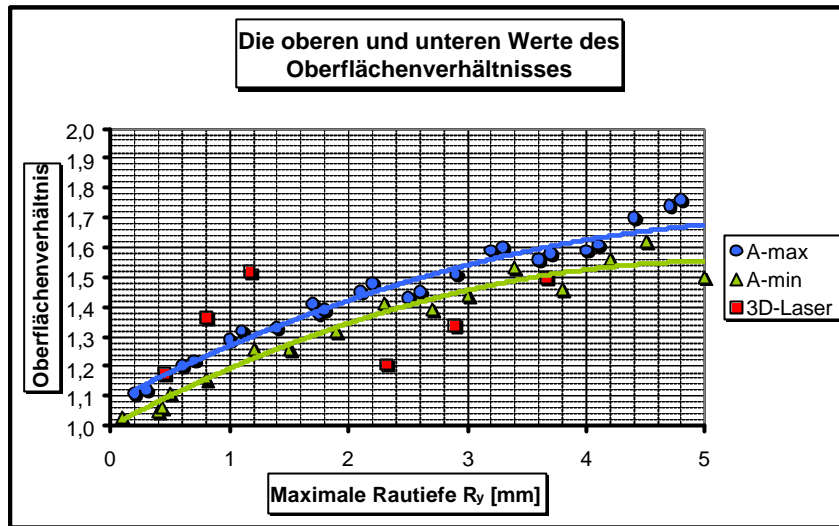


Abb. 5.16 . Die oberen und unteren Werte des Oberflächenverhältnisses, Sieblinie A

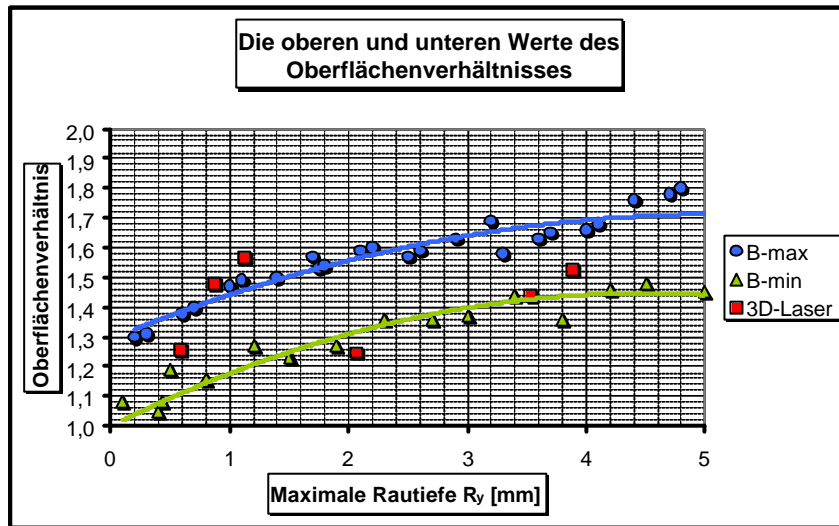


Abb. 5.17 : Die oberen und unteren Werte des Oberflächenverhältnisses, Sieblinie B

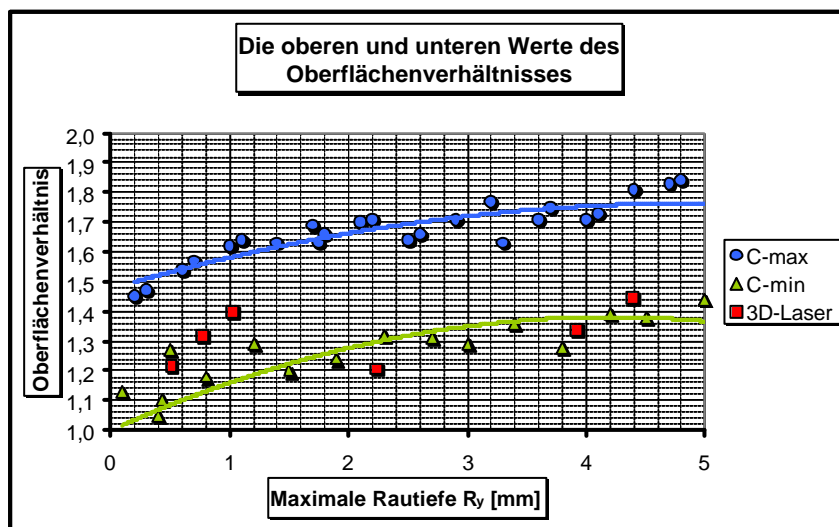


Abb. 5.18 : Die oberen und unteren Werte des Oberflächenverhältnisses, Sieblinie C

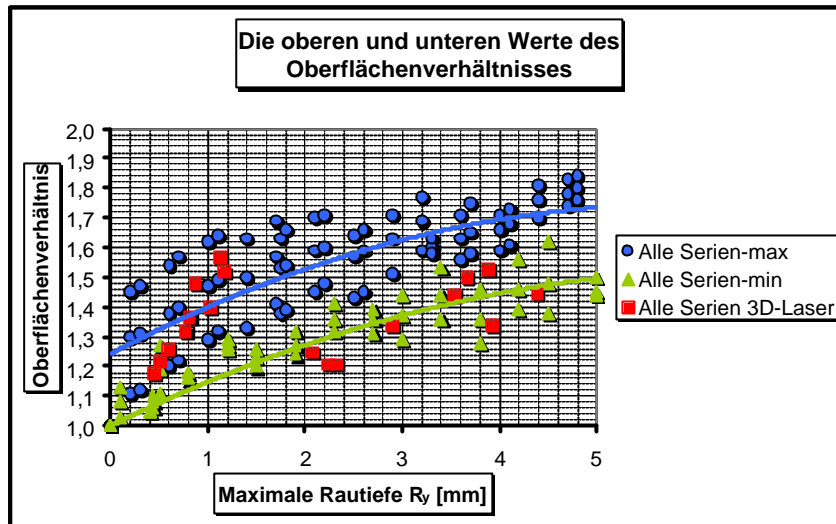


Abb. 5.19 : Die oberen und unteren Werte des Oberflächenverhältnisses alle Sieblinien

### 5.3 Beobachtete und eingesetzten Größen

Um den Einstieg in die Diskussion zu erleichtern, werden die beobachteten und eingesetzten Größen zunächst noch einmal aufgeführt:

- Variierte Zuschlagsmischungen (Sieblinien A16, B16, C16); da die Zuschlagkorngröße bei allen Versuchsplatten gleich ist, wird vereinfachend das Suffix „16“ weggelassen. Die Versuchsplatten werden nur mit A, B oder C bezeichnet.
- Variierte Oberflächenrauheiten (1 mm, 2 mm, 3 mm)

Das Sandflächenverfahren wird als Vergleichsmethode (Referenz) eingesetzt. Die beobachteten und eingesetzten Größen sind:

- Glättungstiefe  $R_p$
- Maximale Rautiefe  $R_y$
- Mittenrauwert  $R_a$
- Profillängenverhältnis  $I_r$
- Oberflächenverhältnis  $c_r$

### 5.4 Sandflächenverfahren versus Laserabtastverfahren

Für die 3D-Versuche wurden die gleichen Berechnungen wie beim herkömmlichen 2D-Verfahren durchgeführt. Da das allgemeine Verhaltensmuster des 3D-Verfahrens dem herkömmlichen 2D-Verfahren ähnelt, wird auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse verzichtet. Statt dessen werden folgende Ergebnisse aus dem herkömmlichen 2D-Verfahren für das 3D-Verfahren übernommen:

- Abtastauflösung 3 Messungen/mm
- Empfindlichkeitsfaktor 2 (Korrekturfaktor 600)

Aufgrund dieser Annahmen wurden die Ergebnisse der folgenden Gruppierungen zusammengeführt und für die dreidimensionale Bearbeitung verwendet:

- Serien (A, B, C)
- Rautiefen (1 mm, 2 mm, 3 mm)
- Abtastrichtungen (N, Q, S)

Es ist von Interesse zu sehen, in welcher Relation die hier beobachteten Oberflächenkenngrößen zu den Ergebnissen des Sandflächenverfahrens stehen.

#### 5.4.1 Glättungstiefe $R_p$

Zuerst wurden die Ergebnisse des Sandflächenverfahrens, des herkömmlichen 2D-Verfahrens und des neuen 3D-Verfahrens miteinander verglichen. In den Abb. 5.20, 5.21 und 5.22 werden für die Serien (A, B und C) mit den Soll-Rauheitsstufen (1 mm, 2 mm, 3 mm) die Ergebnisse der drei Methoden dargestellt. Um eine mögliche Verwirrung, die durch die zusätzliche Darstellung der Ergebnisse in Bezug auf die Abtastrichtung verursacht werden könnte, zu reduzieren, sind statt dessen die Mittelwerte berechnet worden und in den Grafiken dargestellt. Dies erleichtert auch den Vergleich mit dem Sandflächenverfahren.

Da beim Sandflächenverfahren Abweichungen aufgrund von Fehlmessungen bei der Erfassung der Normsandkreisdurchmesser nicht auszuschließen sind, wurde zu allen gemessenen Durchmessern ein Wert von 0,50 cm addiert und subtrahiert.

Da die Normsandkreise in der Praxis nicht exakt Kreisförmig sind, sondern mehr oder weniger ovale Formen mit ausgefranzten Grenzen aufweisen, mussten in einigen Fällen die Werte der abgelesenen Durchmesser nach oben bzw. nach unten korrigiert werden. In der Praxis wird meist mit einer Durchmesser-Abweichung von 0,5 cm gearbeitet.

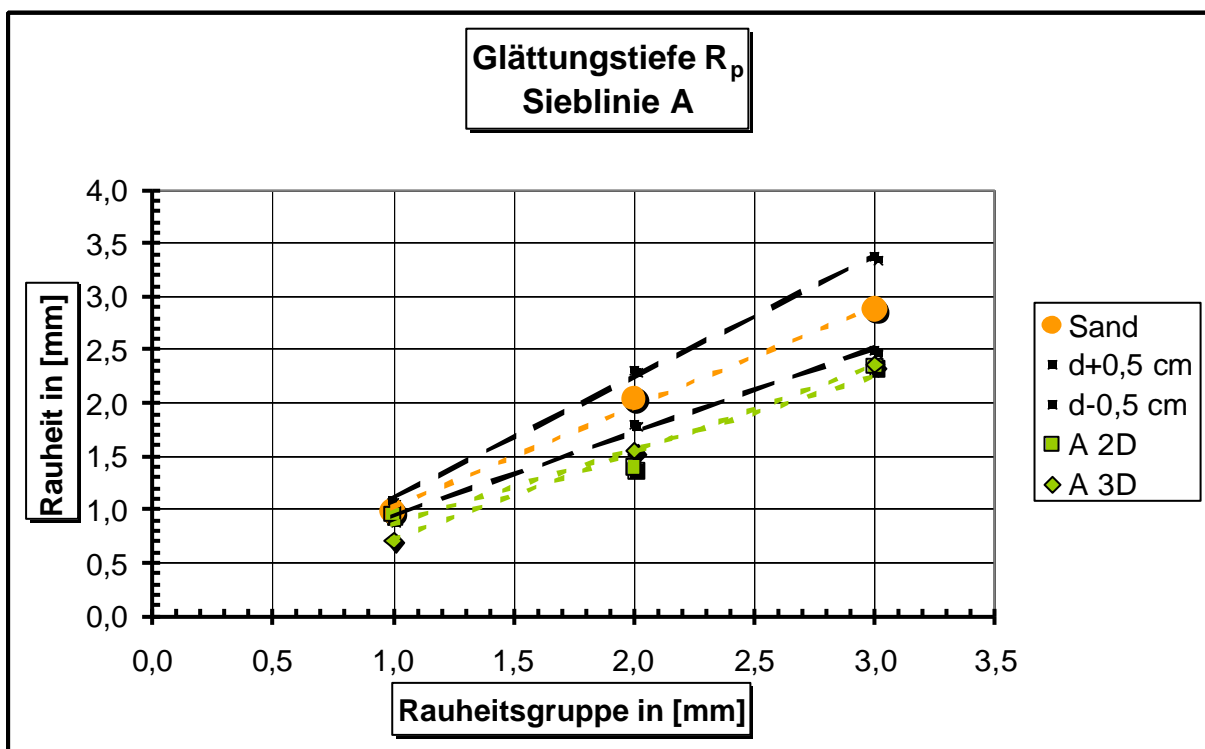


Abb. 5.20 : Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen eingesetzten Verfahren, Sieblinie A



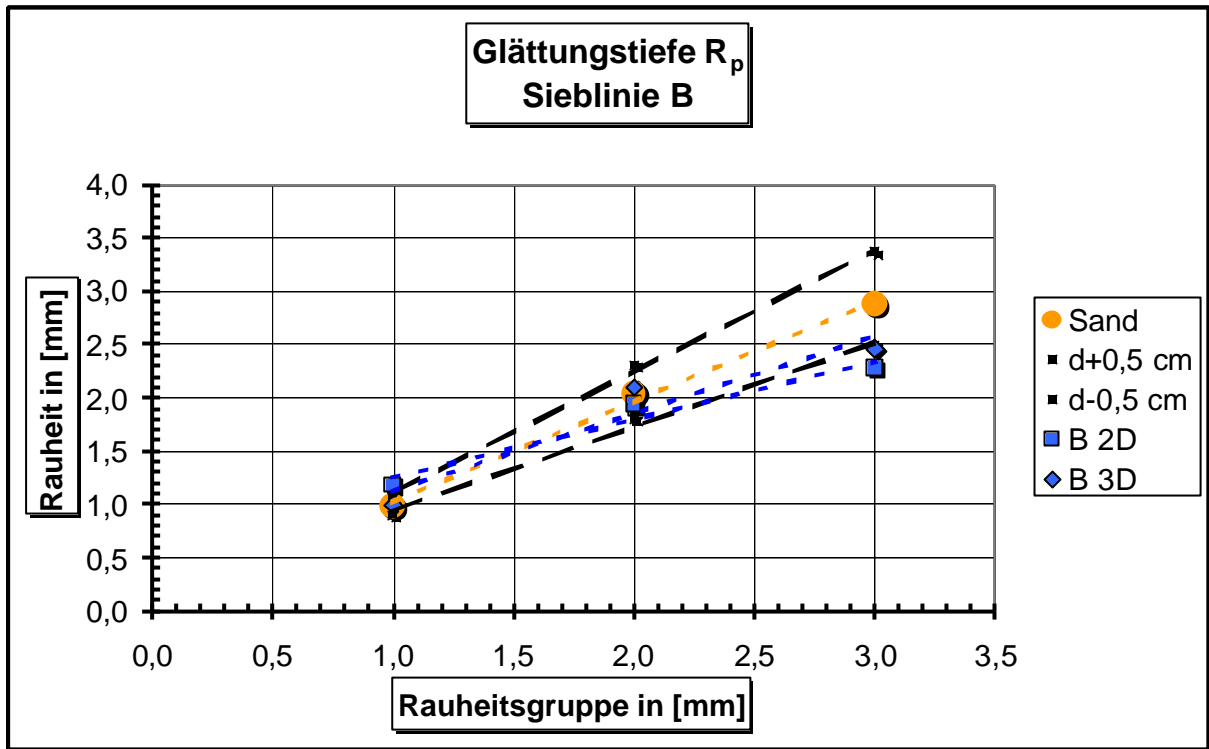


Abb. 5.21 : Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen eingesetzten Verfahren, Sieblinie B

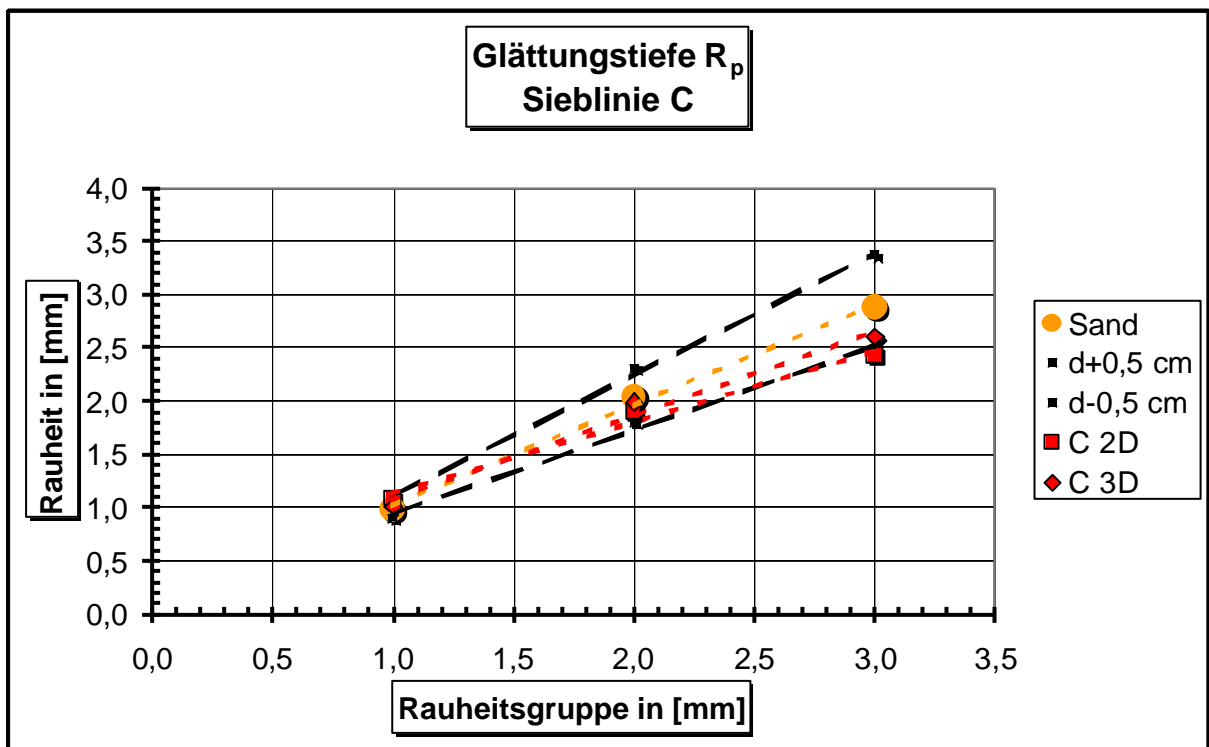


Abb. 5.22 : Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen eingesetzten Verfahren, Sieblinie C

In den drei Abbildungen 5.20 bis 5.22 ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel bestätigt, und dass auch die neue 3D-Methode den bekannten Tendenzen folgt. Im Bereich von 1 mm Rautiefe werden die größten Übereinstimmungen mit den Sandflächenverfahren festgestellt. Bei den Serien B und C im Bereich von 2 mm Rautiefe liegen die Ergebnisse im Bereich der gewählten Toleranzen. Bei der Serie A ist eine Abweichung über die Toleranzen hinaus zu registrieren. Alle drei Serien zeigen ein ähnliches Verhalten im Bereich der Rauheit 3 mm, indem sie knapp unter der äußeren Toleranz liegen. Ein möglicher Grund für die Abweichung ist, dass bei der Zunahme der Oberflächenrauheit die Bildung von Normsandkreisen schwieriger wird, was wiederum zu einem zu konservativen Messergebnis führt. Diese moderate Neigung bei der Bemessung könnte in anderen Fällen auch zu großzügig ausfallen. Also ist die Richtigkeit der neuen 3D-Methode im Vergleich zum gängigen Sandflächenverfahren immer mit Abweichungen behaftet.

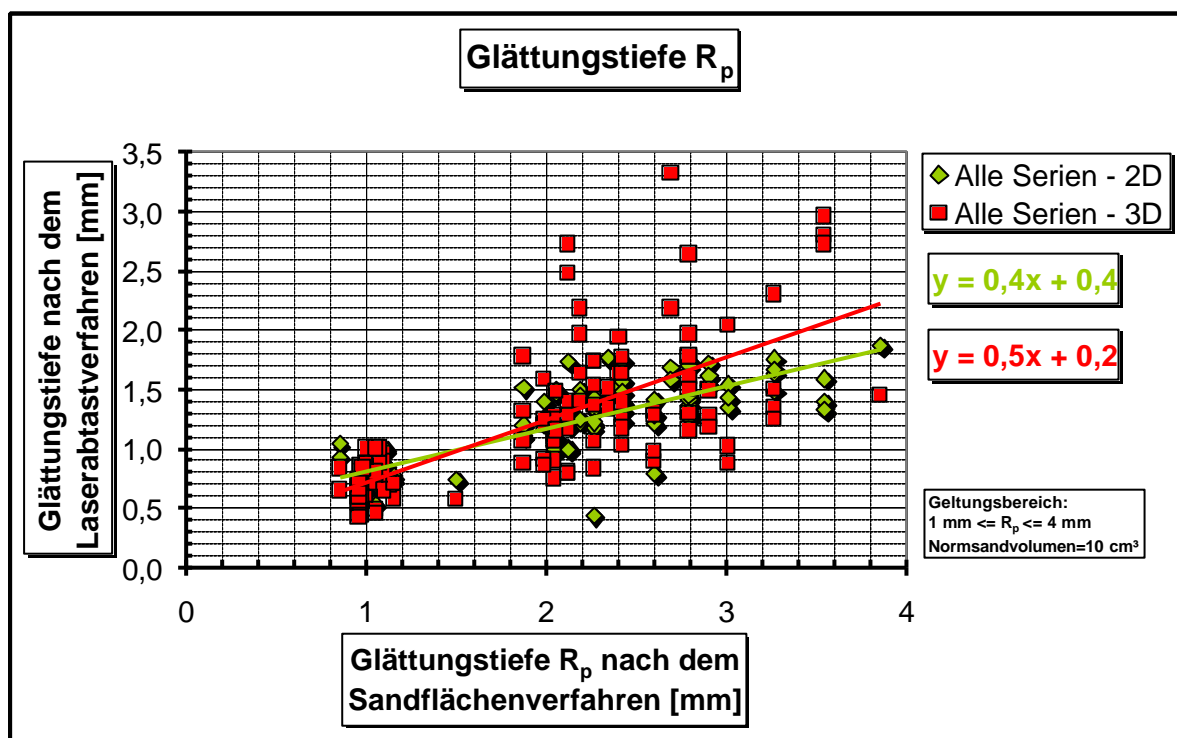


Abb. 5.23 : Glättungstiefen nach dem Sandflächenverfahren, dem herkömmlichen 2D und nach dem 3D- Laserabtastverfahren

Abb. 5.23 vergleicht die Glättungstiefen nach dem Sandflächenverfahren, und dem herkömmlichem 2D-Laserabtastverfahren und dem 3D-Laserabtastverfahren. Zwischen diesen Werten wurde eine Trendlinie eingezeichnet.

Das Verhältnis zwischen der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren und der Glättungstiefe nach dem herkömmlichen 2D-Laserabtastverfahren kann mit der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$R_p = 0,4R_p(\text{Sandflächenverfahren}) + 0,4 \quad (5.9)$$

Das Verhältnis zwischen der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren und der Glättungstiefe nach dem 3D-Laserabtastverfahren wird durch die mit folgenden Gleichung beschrieben:

$$R_p = 0,5R_p(\text{Sandflächenverfahren}) + 0,2 \quad (5.10)$$

Es muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Richtigkeit dieser Gleichungen stark von der Ausführungsqualität des Sandflächenverfahrens abhängt, da es eine „menschliche Fehlerquelle“ enthält. Der Einfluss dieser Fehlerquelle könnte durch eine größere Anzahl von Versuchsdurchführungen reduziert werden. Der so ermittelte, genauere Wert würde aber wahrscheinlich nur unwesentlich vom bisherigen Wert abweichen.

#### 5.4.2 Maximale Rautiefe $R_y$

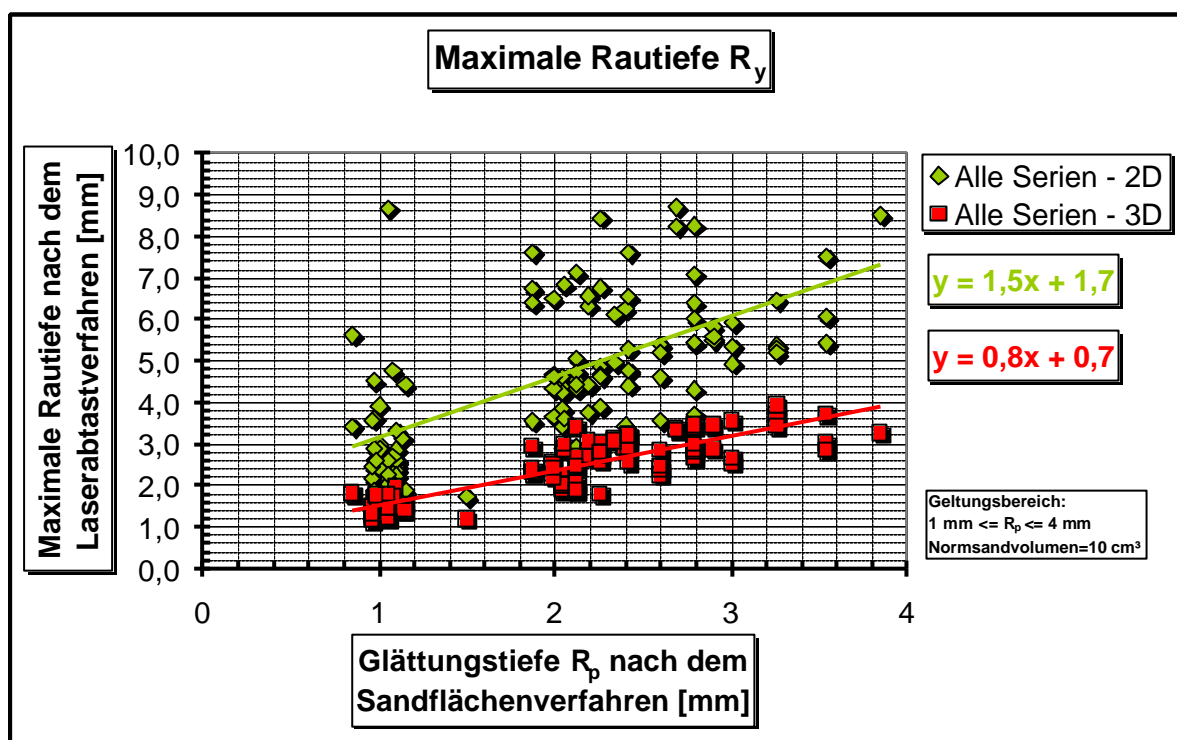


Abb. 5.24 : Verhältnis der Glättungstiefen nach dem Sandflächenverfahren zur maximalen Rautiefe nach dem herkömmlichen 2D und 3D-Laserabtastrverfahren

Abb. 5.24 zeigt das Verhältnis zwischen den nach dem Sandflächenverfahren gewonnenen Glättungstiefen und den mit dem herkömmlichen 2D bzw. dem 3D-Laserabtastrverfahren berechneten maximalen Rautiefen.

Es ist ersichtlich, dass das 3D-Verfahren kleinere Werte liefert als das herkömmliche 2D-Verfahren. Die Werte nach dem herkömmlichen 2D Verfahren liegen im Schnitt doppelt so hoch wie nach dem 3D-Verfahren. Das Verhältnis zwischen der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren und der maximalen Rautiefe nach dem herkömmlichen 2D-Laserabtastrverfahren kann durch folgende Gleichung dargestellt werden:

$$R_y = 1,5R_p(\text{Sandflächenverfahren}) + 1,7 \quad (5.11)$$

Das Verhältnis zwischen der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren und der maximalen Rautiefe nach dem 3D-Laserabtastrverfahren wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$R_y = 0,8R_p(\text{Sandflächenverfahren}) + 0,7 \quad (5.12)$$

Da die Definition der maximalen Rautiefe auf den Maximal- und Minimalwerten der Oberfläche basiert, kann es vorkommen, dass ein unerwarteter Ausreißer dieser Extremwerte bei den oben genannten Gleichungen zu einem absurden Ergebnis führt.

### 5.4.3 Mittenrauwert $R_a$

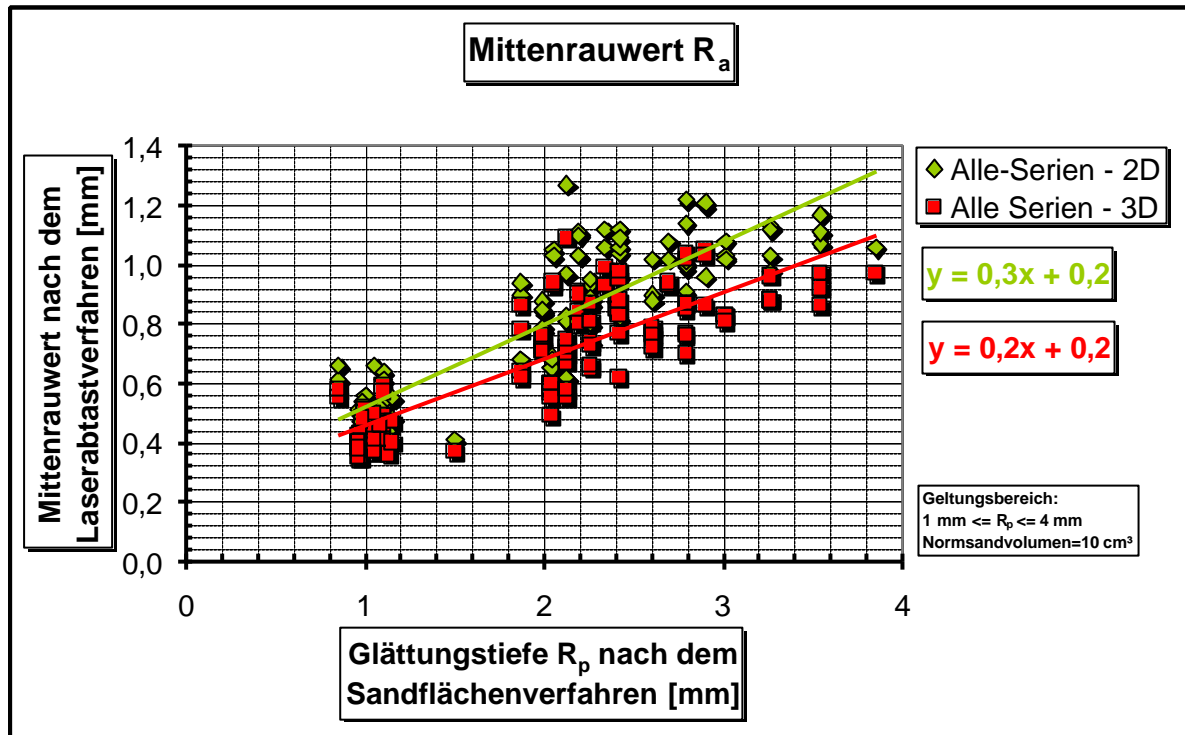


Abb. 5.25 : Verhältnis der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren zum Mittenrauwert nach herkömmlichen 2D und 3D-Laserabtastverfahren

Im Verhältnis zur maximalen Rautiefe liegen die Ergebnisse des Mittenrauwertes viel näher beieinander, obwohl die Werte nach dem 3D-Verfahren hier niedriger sind, Abb. 5.25. Dies ist wieder das Resultat der unterschiedlichen Bearbeitung und Berechnung dieser Oberflächengröße. Die Verschiebung der Mittellinien gegeneinander führt auch hier beim herkömmlichen 2D-Verfahren zu höheren Werten als beim 3D-Verfahren. Es gibt jedoch eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse bei 1 mm Rautiefe. Mit steigender Rauheit laufen die Ergebnisse dann weiter auseinander. Das Verhältnis zwischen dem Mittenrauwert nach dem Sandflächenverfahren und dem Mittenrauwert nach dem herkömmlichen 2D-Laserabtastverfahren wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$R_a = 0,3R_p(\text{Sandflächenverfahren}) + 0,2 \quad (5.13)$$

Das Verhältnis zwischen dem Mittenrauwert nach dem Sandflächenverfahren und dem Mittenrauwert nach dem 3D-Laserabtastverfahren wird durch Gl. 5.13 beschrieben:

$$R_a = 0,2R_p(\text{Sandflächenverfahren}) + 0,2 \quad (5.14)$$

Weil die Definition des Mittenrauwert auf dem Mittelwert aller vorkommenden Werte der Oberfläche basiert, kann ein unerwarteter Ausreißer die Ergebnisse der oben genannten Gleichungen nicht beeinflussen.

#### 5.4.4 Profillängenverhältnis $I_r$

Ein Vergleich zwischen dem herkömmlichen 2D und dem 3D-Verfahren kann hier nicht durchgeführt werden, da es laut Definition nicht möglich ist, für die gesamte Fläche eine Profillänge zu berechnen. Aus diesem Grund werden hier nur die Ergebnisse des herkömmlichen 2D-Verfahrens dargestellt.

In Abb. 5.26 ist das Profillängenverhältnis im Vergleich zum Rauheitswert des Sandflächenverfahrens dargestellt. Das Verhältnis wird in folgender Gleichung beschrieben:

$$I_r = 0,04R_p (\text{Sandfläche nverfahren}) + 1,15 \quad (5.15)$$

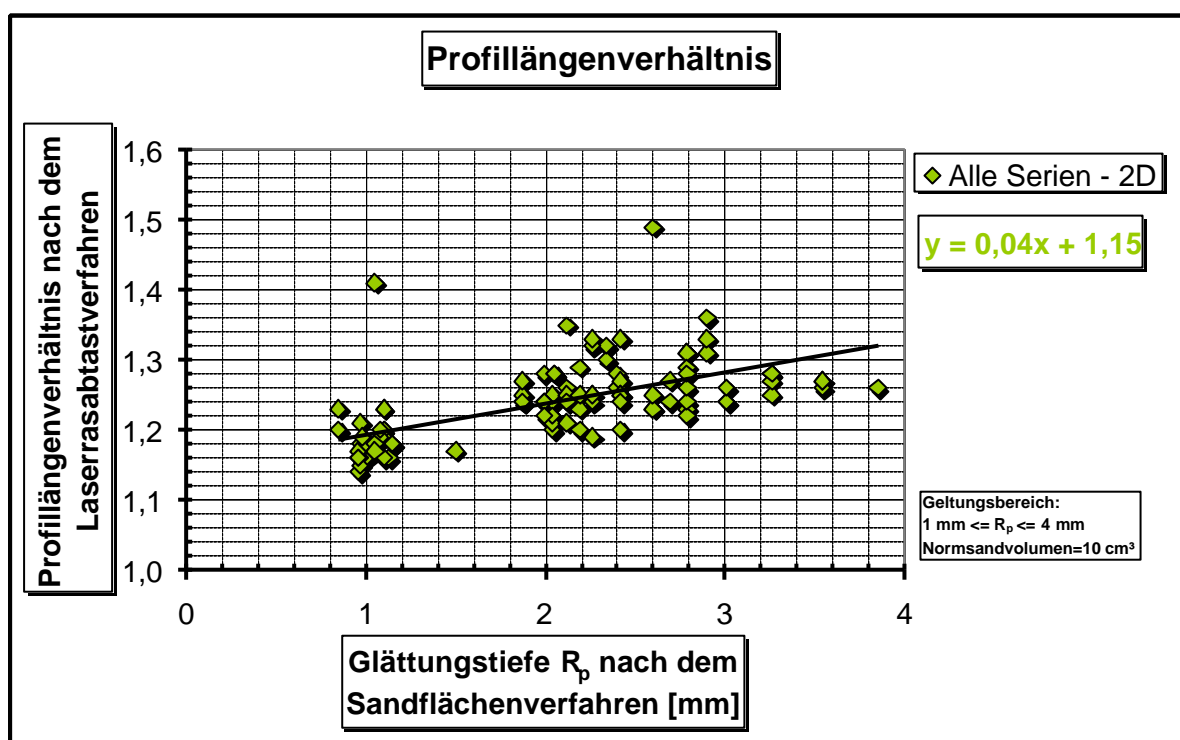


Abb. 5.26 : Verhältnis der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren zum Profillängenverhältnis der herkömmlichen 2D Laserabtastverfahren

#### 5.4.5 Oberflächenverhältnis $c_r$

Es ist auch hier nicht möglich, einen Vergleich zwischen den beiden Bearbeitungsverfahren herzustellen. Beim herkömmlichen 2D-Verfahren ist es nicht möglich, die Oberfläche zu berechnen, da das Verhältnis zwischen den einzelnen Abtastschnitten verändert wird und eine zuverlässige Flächenberechnung folglich nicht möglich ist. Wie bereits früher erwähnt, ist das Oberflächenverhältnis das Verhältnis zwischen der tatsächlichen räumlichen Fläche und der Fläche ihrer Projektion. Die Ergebnisse des 3D-Verfahrens werden einzeln dargestellt.

Das Verhältnis zwischen der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren und dem Oberflächenverhältnis nach dem 3D-Verfahren kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$c_r = 0,12R_p (\text{Sandflächenverfahren}) + 1,1 \quad (5.16)$$

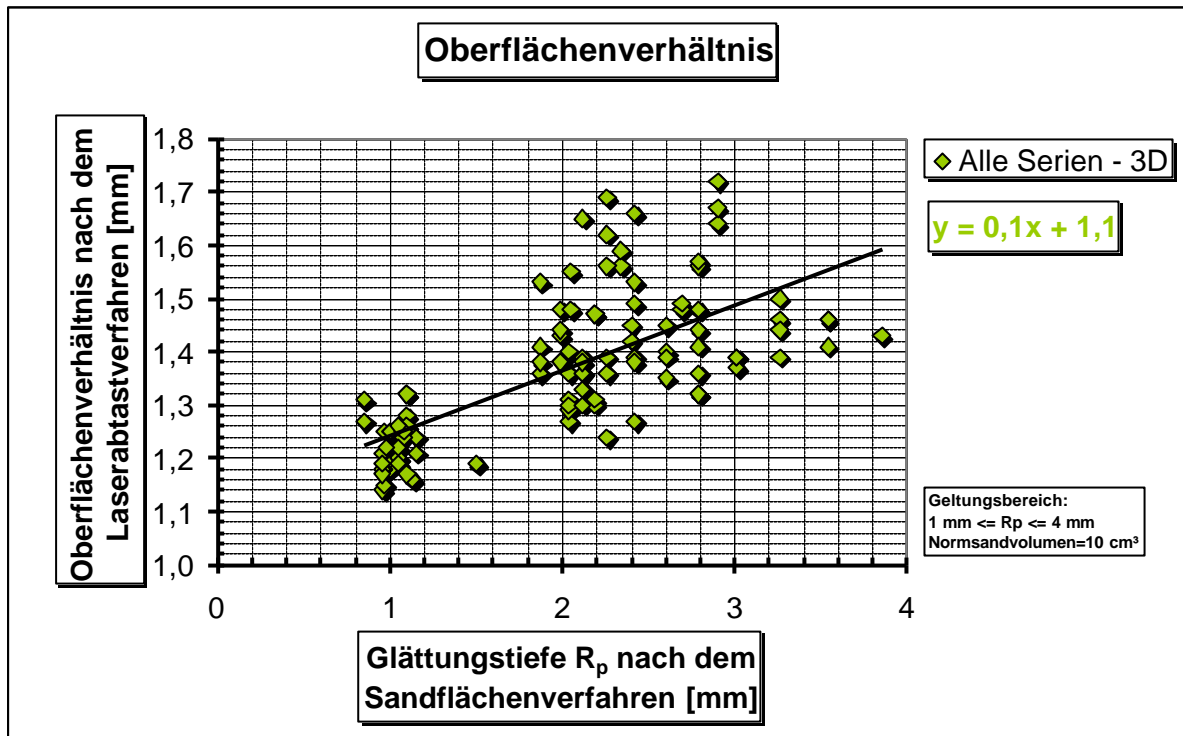


Abb. 5.27 : Verhältnis der Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren zum Oberflächenverhältnis 3D- Laserabtastverfahrens

Die unterschiedlichen Werte und das Verhalten der zwei verglichenen Verfahren gegenüber dem Sandflächenverfahren könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Oberflächenkenngrößen in diesen beiden Fällen unterschiedlich berechnet werden. Beim herkömmlichen 2D-Verfahren wird jeder Abtastschnitt einzeln bearbeitet und die Mittellinie gebildet. Dies führt dazu, dass alle Mittellinien jetzt virtuell in einer Ebene liegen. Da eine Verschiebung und eine virtuelle Umgestaltung bei der bearbeiteten Oberfläche durchgeführt wird, wird die Realität richtig abgebildet. Diese virtuelle Umgestaltung kann dazu führen, dass ein Profilpunkt einen bestimmten Wert im Bezug zur Mittellinie hat, gleichzeitig aber einen anderen, höheren oder niedrigeren Wert in Bezug auf die Mittelebene bekommt.

Diese virtuelle Umgestaltung findet beim 3D-Verfahren nicht statt, die Verhältnisse zwischen den Werten einer Teilfläche werden nicht verändert. Dieser Vorgang ermöglicht gleichbleibende Verhältnisse, und führt im Endeffekt zu den richtigen Ergebnissen. Entsprechend bekommen die beobachteten Oberflächenkenngrößen unterschiedliche Werte je nachdem ob sie mit dem herkömmlichen 2D oder dem 3D-Verfahren bewertet werden. Es ist zu sehen, dass sich die Ergebnisse der beiden verglichenen Verfahren bei niedrigen Rauheiten einander angleichen. Erst mit steigender Rauheit laufen die Ergebnisse auseinander.

**5.5 Literatur**

- [5.1] Bronstein, I. N. und Semendjajew : Taschenbuch der Mathematik. 1974, 14.Auflage  
Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfurt/Main.
- [5.2] Halling, J.: Principles of Tribology. The Macmillan Press LTD. 1975.

## 6 Zusammenfassung Teil 1

Das Ziel des ersten Teils dieser Arbeit war es, ein dreidimensionales Oberflächen-erfassungs- und Bewertungsverfahren zu entwickeln, welches dem üblicherweise eingesetzten Sandflächenverfahren gleichwertig ist.

Hierfür wurden drei Betonplatten hergestellt, jede dieser Betonplatten hatte ihre eigene Zuschlagsmischung:

- Die erste Betonplatte hatte eine Zuschlagsmischung mit der Sieblinie A.
- Die zweite Betonplatte hatte eine Zuschlagsmischung mit der Sieblinie B.
- Die dritte Betonplatte hatte eine Zuschlagsmischung mit der Sieblinie C.

Jede dieser Betonplatten wurde in 1 mm-Stufen aufgeraut und in Serien mit drei Sollrautiefen unterteilt:

- Sollrautiefe 1 mm
- Sollrautiefe 2 mm
- Sollrautiefe 3 mm

Jeder diese Sollrautiefen wurde in drei Richtungen abgetastet:

- Hauptabtastrichtung
- Quer zur Hauptabtastrichtung
- Diagonale Abtastrichtung

Die Abtastungen wurden mit unterschiedlicher Abtastauflösung durchgeführt:

- 0,5 Messungen/mm
- 1,0 Messungen/mm
- 3,0 Messungen/mm
- 6,0 Messungen/mm

Unter Berücksichtigung aller oben genannter Elemente wurde ein Korrekturfaktor gesucht. Folgende Korrekturfaktoren wurden eingesetzt:

- Faktor 10 (repräsentiert eine sehr starke Manipulation)
- Faktor 50
- Faktor 90
- Faktor 100
- Faktor 110
- Faktor 150
- Faktor 300
- Faktor 600
- Faktor 1000 (repräsentiert eine sehr schwache Manipulation)

Alle oben genannten Elemente wurden untereinander kombiniert, um zu richtigen Ergebnissen zu gelangen.



## 6.1 Ergebnisse

Die unterschiedlichen Abtastrichtungen ergaben keine wesentlichen Unterschiede, was zu der Erkenntnis führt, dass beim dreidimensionalen Abtastverfahren die Richtung des Abtastens **keinen** Einfluss hat.

Je höher der Abtastauflösung, desto bessere Ergebnisse sind zu erwarten. Es wurde herausgefunden, dass ab einer Messtakt von 1 Messungen/mm akzeptable Ergebnisse zu erwarten sind. Der beste Abtastauflösung mit der geringsten Menge an benötigten Daten lag bei 3 Messungen/mm. Höhere Auflösungen würden die Ergebnisse geringfügig verbessern, führten aber zu einer erheblichen Steigerung der zu bearbeitenden Daten.

Ein zu geringeren Korrekturfaktor führte zu einer erheblichen Abweichung von den ursprünglich unmanipulierten Ergebnissen. Ein Korrekturfaktor von 600 erwies sich als akzeptabel. Ohne Korrektur durchzuführen, also Einsatz einer Faktor von 1000, erhielt man bei einigen Oberflächenkenngrößen falsche Ergebnisse.

Daraus ergaben sich für den 3D-Abtastverfahren die folgenden Empfehlungen:

- Abtastauflösung 3 Messungen/mm
- Korrekturfaktor 600 entsprechend einer Empfindlichkeitsstufe 2
- Abtastrichtung ist irrelevant

## **7 Reibung und Verschleiß**

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde ein 3D-Digitalverfahren als Ersatz für das Sandflächenverfahren vorgeschlagen. Mit diesem neuen Verfahren ist es möglich, eine optische Darstellung einer Oberfläche herzustellen und deren Oberflächenkenngrößen zu berechnen. Mit Hilfe des neuen 3D-Verfahrens wird im zweiten Teil dieser Arbeit die Reibung und der Verschleiß zwischen einem zu verstärkenden Betonbauteil und der Verstärkungsschicht bei Ausfall der Haftung untersucht. Infolge der Verstärkung eines Betonbauteils wirkt im Regelfall eine Schubkraft zwischen altem und neuem Beton.

Hier werden die verschiedenen Begriffe vorgestellt und definiert. In dem folgende Kapitel werden dann die eigenen Versuche zur Reibung und zum Verschleiß dargestellt und deren Ergebnisse diskutiert.

### **7.1 Einleitung**

Dieser Teil der Arbeit befasst sich mit der Reibung zwischen einem zu verstärkenden Bauteil und einer Verstärkungsschicht sowie mit Abrieb und Verschleiß. Es erscheint von Interesse, eine Übersicht über diese Thematik zu erstellen. Tribologie ist ein übergeordneter, modernen [7.1] Ausdruck für dieses Thema.

Im Allgemeinen wird diese Problematik vom Maschinenbau beherrscht. Im Folgenden werden die verschiedenen Begriffe und Kenngrößen zum Thema dargestellt und definiert. Die DIN-Normen [7.8], [7.9], [7.11] liefern eine gute Einführung in diese Thematik. Auch auf die historische Entwicklung wird kurz eingegangen.

## 7.2 Tribologie

Tribo kommt aus dem Griechischen und bedeutet „reiben“. Tribologie ist also die „Wissenschaft von Reibung, Verschleiß und Schmierung gegeneinander bewegter Körper“, [7.1], [7.2], [7.7], [7.13]. Der Begriff wurde in den 1960er Jahren aus dem Englischen übernommen. Das Gebiet der Tribologie umfast einen großen Bereich der Technik und ist interdisziplinär definiert. Es ist aus den Bedürfnissen des Maschinenbaus entstanden und von dieser Seite stark beeinflusst worden. Es ist noch nicht eindeutig geklärt, welche Begriffe und Definitionen in den Bereich des Bauwesens übertragbar sind. Deshalb werden hier nicht alle Begriffe und Definitionen der gültigen Normen übernommen.

## 7.3 Historische Entwicklung

Eines der ersten tribologischen Geräte, die die Menschheit entwickelte, war das Rad [7.1]. Historische Dokumente zeigen, dass das Rad zwar schon vor 3500 v. Chr. in Mesopotamien (im heutigen Irak) im Einsatz war, bei einer hochentwickelten Zivilisation wie den Inkas jedoch nie zur praktischen Anwendung entwickelt wurde.

In Abbildung 7.1 ist der Transport einer ägyptischen Statue dargestellt. Der Fund illustriert den Einsatz von tribologischen Prinzipien bei der alten Ägyptern. Es ist zu sehen, dass die alten Ägypter der Transport schwerer Bauteile bei der Errichtung ihrer Städte und Monumente mit schlittenartigen Konstruktionen durchgeführt haben. Im vorderen Bereich des Schlittens ist ein Mann zu erkennen, der stehend eine fettartige Flüssigkeit in die Bewegungsrichtung des Schlittens kippt, um die Reibung zwischen dem Schlitten und den Holzrollen zu reduzieren. So ist zu erkennen, dass das Thema von Reibung und Reibungsreduzierung schon in der ägyptische Zivilisation erkannt und behandelt worden ist. Leonardo da Vinci (1452-1519) war der erste, der eine wissenschaftliche Definition für das Thema Reibung präsentierte. Er erkannte, dass Reibungskraft proportional zur Last und unabhängig von der Fläche ist. Erst zweihundert Jahre später wurden diese beiden Gesetze, unabhängig von Leonardo da Vinci, von Amontons 1699 neu entdeckt und deshalb üblicherweise ihm zugeschrieben.

Im 18. Jahrhundert erfuhr die Tribologie durch die industrielle Revolution eine weitere Entwicklung. Um 1780 entdeckte Coulomb das dritte Gesetz der Reibung. Dieses Gesetz besagt, dass die Reibung unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Seitdem findet die Tribologie ihren Einsatz im Maschinenbau und wird mit der Entwicklung der industriellen Bedürfnisse weiter entwickelt.

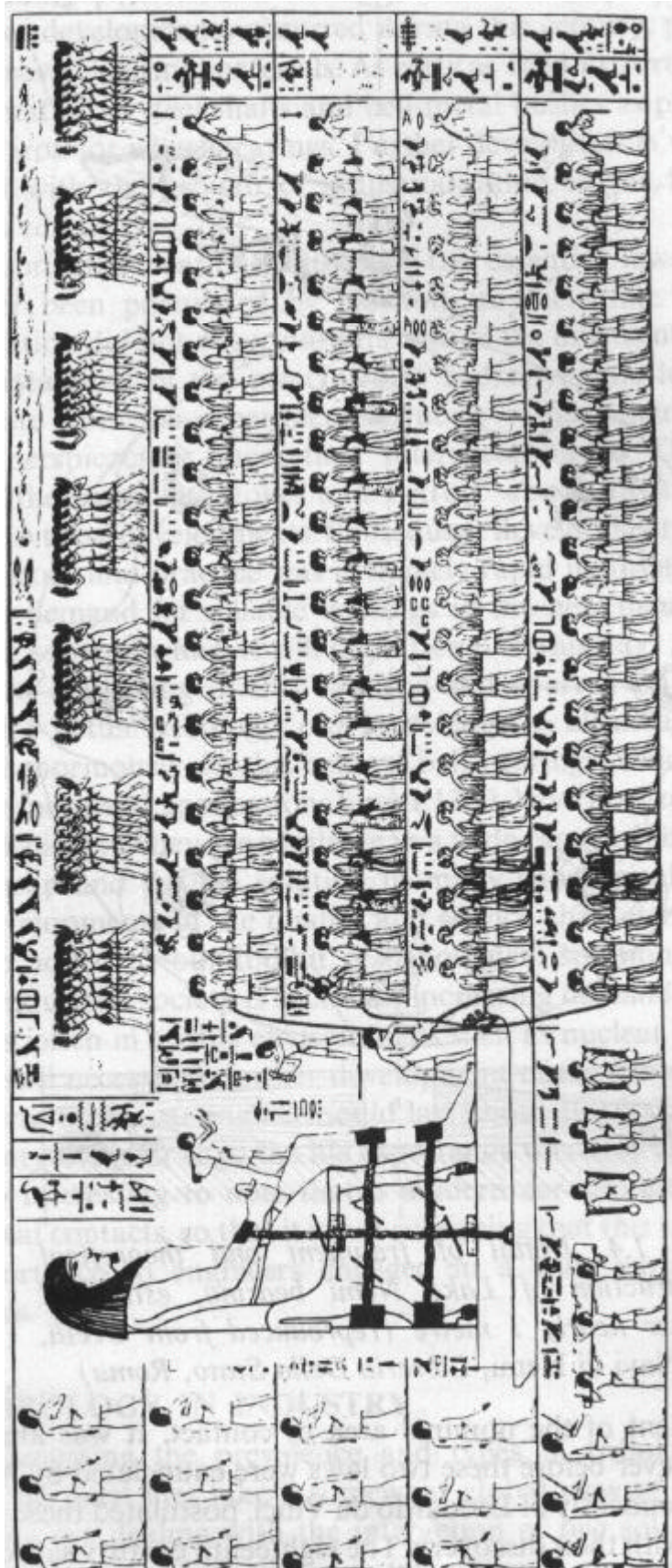


Abb. 7.1 : Der Transport einer ägyptischen Statue, ca. 1900 v.Chr, [7.1]

## 7.4 Reibung und Verschleiß

Nachstehend werden die in den gültigen Normen für diese Arbeit relevanten Begriffe und Definitionen dargestellt. Es ist festzustellen, dass Reibung und Verschleiß nicht in unmittelbarem Zusammenhang stehen. Während in manchen Fällen hohe Reibung mit hohem Verschleiß verbunden ist, gibt es zahlreiche Fälle, bei denen hohe Reibung und niedriger Verschleiß oder geringe Reibung und hoher Verschleiß zusammentreffen dies hat mit der Eigenschaften und Festigkeiten der miteinander reibende Körper zu tun, [7.13].

### 7.4.1 Reibung

Reibung ist eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern. Sie wirkt einer Relativbewegung entgegen, [7.11].

- **Reibung in Abhängigkeit vom Bewegungszustand**

**Haftreibung (statische Reibung)** ist die Reibung, bei der die angreifenden Kräfte nicht ausreichen, um eine Relativbewegung zu bewirken, [7.11].

**Bewegungsreibung (dynamische Reibung)** wird wie folgt unterteilt:

- Anlaufreibung [7.11]:  
Anlaufreibung ist die Reibung zu Beginn der Relativbewegung (die Haftreibung wird überwunden).
- Auslaufreibung [7.11]:  
Auslaufreibung ist die Reibung gegen Ende der Relativbewegung (die Haftreibung wird erreicht).
- **Reibung in Abhängigkeit von der Art der Relativbewegung der Reibpartner (Reibungsarten)**

Man unterscheidet die Begriffe Gleitreibung, Rollreibung, Wälzreibung, Bohrreibung und Stoßreibung. Die in dieser Arbeit behandelte Reibung ist eine Mischung aus Stoß- und Gleitreibung. Bei einer dynamischen Belastung werden durch die relative Bewegung der Grundkörper und der Verstärkungsschichten die Berge und Talseiten gegeneinander in eine stoßartige Bewegung gedrückt. Dies entwickelt sich dann mit der Verschleiß- und Abschererscheinungen zu einer gleitartigen Reibung.

- **Reibung in Abhängigkeit vom Aggregatzustand der beteiligten Stoffbereiche (Reibungszustände)**

In Abhängigkeit des reiben Mediums unterscheidet man die Begriffe Festkörperreibung, Flüssigkeitsreibung, Gasreibung, Mischreibung. Für die vorliegende Arbeit ist nur die Festkörperreibung relevant.

### 7.4.2 Reibungskenngrößen

Die Reibung wird durch folgende Kenngrößen charakterisiert, [7.11]:

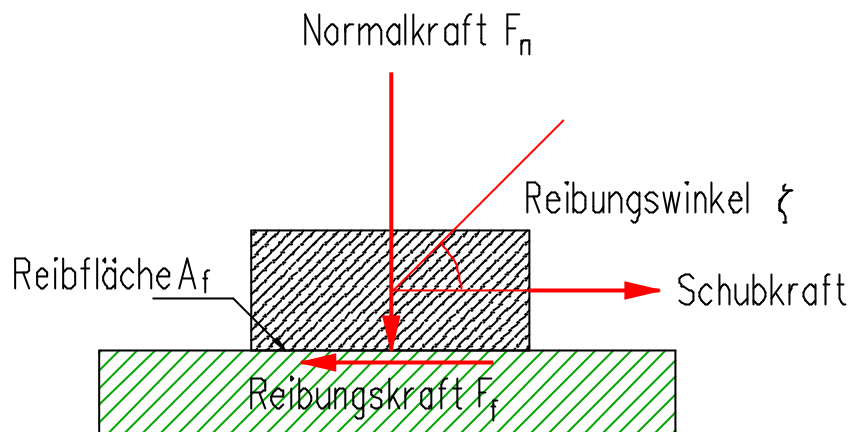


Abb. 7.2 : Die Reibungskenngrößen

#### 7.4.2.1 Reibungskraft $F_f$

Die Reibungskraft ist diejenige Kraft, die infolge Reibung als mechanischer Widerstand gegen eine Relativbewegung auftritt. Der Index  $f$  ist von engl. "Friction" (Reibung) abgeleitet.

#### 7.4.2.2 Reibungszahl $f$

Die Reibungszahl  $f$  ist die Kenngröße der Reibung mit der Dimension 1 in der Form

$$f = \frac{F_f}{F_n} \quad (7.1)$$

mit

$F_n$  = Normalkraft

Sie wird in DIN 1045 als Reibungsbeiwert benannt, und ist dort mit  $\mu$  bezeichnet.

#### 7.4.2.3 Reibungswinkel $V$

Der Reibungswinkel ist der Winkel zwischen der Richtung der Normalkraft  $F_n$  und der Richtung der resultierenden aus Reibungskraft  $F_f$  und Normalkraft  $F_n$

$$V = \arctan f \quad (7.2)$$

und

$$f = \tan V \quad (7.3)$$

#### 7.4.2.4 Reibfläche $A_f$

Die Reibfläche ist der Oberflächenbereich eines Festkörpers, der ständig oder zeitweilig im Reibkontakt steht.

**Nominelle Berührungsfläche  $A_{nm}$** : Die nominelle Berührungsfläche ist der Reibflächenbereich, in dem die Reibpartner ständig im Berührung sind.

**Reibungsschubspannung  $t_f$** : Die Reibungsschubspannung wird hier als der Mittelwert der flächenbezogene Reibungskraft definiert in der Form

$$t_f = \frac{F_f}{A_{nm}} = p_{nm} \cdot f \quad (7.4)$$

mit

$p_{nm}$  = nominelle Flächenpressung.

#### 7.4.3 Verschleiß

Der Verschleiß ist laut DIN 50320 [7.8] der fortschreitende Materialverlust an der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung mit einem festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper. An dieser Definition interessiert uns der Verschleiß durch Kontakt und Relativbewegung zwischen zwei Festkörpern. DIN 50320 bezeichnet die Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt und Relativbewegung eines festen Gegenkörpers als tribologische Beanspruchung.

Der Verschleiß äußert sich im Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen (Verschleißpartikel) sowie in Stoff- und Formänderungen der tribologisch beanspruchten oberflächenschicht.

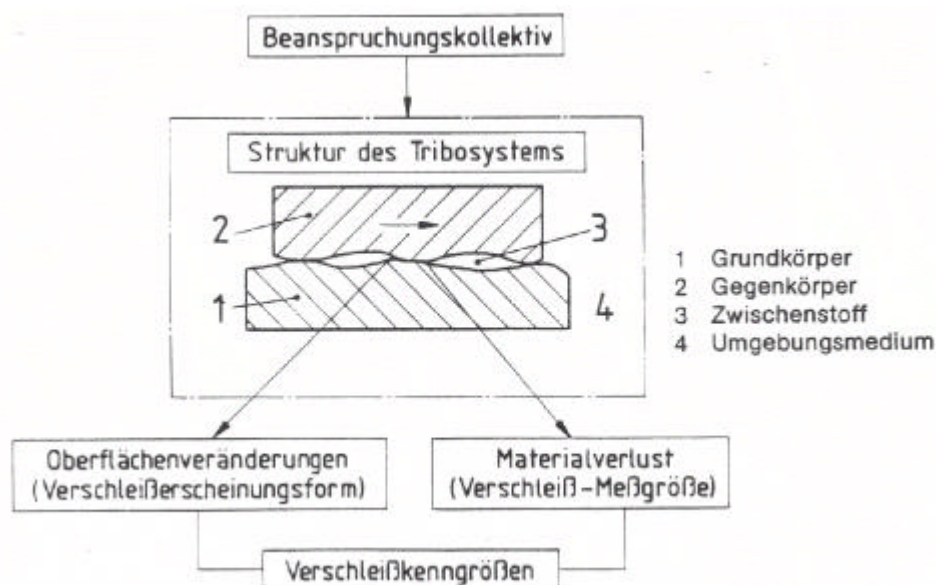


Abb. 7.3 : Darstellung eines Tribosystems, [7.8]

## **7.5 Elemente des Tribosystems**

Die Elemente des Tribosystems sind die am Verschleiß unmittelbar beteiligten Bauteile und Stoffe, [7.8].

## **7.6 Struktur des Tribosystems**

Die Eigenschaften und Wechselwirkungen der Elemente des Tribosystems charakterisieren die Struktur des Tribosystems, [7.8].

## **7.7 Beanspruchungskollektiv**

Als Beanspruchungskollektiv werden die von außen auf die Elemente des Tribosystems einwirkenden Beanspruchungsgrößen bezeichnet, [7.8].

## **7.8 Verschleißkenngrößen**

Die Verschleißkenngrößen beschreiben den beim Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Struktur des Tribosystems auftretenden Verschleiß, [7.8].

### **7.8.1 Verschleißerscheinungsformen**

Unter Verschleißerscheinungsformen versteht man die sich durch Verschleiß ergebende Veränderung der Oberflächenschicht eines Körpers sowie die Art und Form der anfallenden Verschleißpartikel. Nach DIN 50321 gehören die Verschleißerscheinungsformen zu den Verschleißkenngrößen eines tribologische Systems.

### **7.8.2 Verschleißmessgrößen**

Die Verschleißmessgrößen kennzeichnen direkt oder indirekt die Änderung der Gestalt oder der Masse eines Körpers durch Verschleiß, [7.8], [7.9]. Sie gehören laut DIN 50321 [7.9] zu den Verschleißkenngrößen eines tribologischen Systems. Es wird zwischen direkten, bezogenen und indirekten Verschleißmessgrößen unterschieden.

#### **7.8.2.1 Direkte Verschleißmessgrößen**

Die direkten Verschleißmessgrößen sind Maße für die Gestalt- oder Massenänderung eines verschleißenden Körpers.

#### **7.8.2.2 Bezogene Verschleißmessgrößen**

Die bezogenen Verschleißmessgrößen ergeben sich aus dem Verhältnis des Verschleißbetrages zu Bezugsgrößen, wie Beanspruchungsdauer, Beanspruchungsweg, Durchsatz oder gegebenenfalls auch anderen geeigneten Größen.



### 7.8.2.3 Indirekte Verschleißmessgrößen

Die indirekten Verschleißmessgrößen beruhen nicht auf der Messung von verschleißbedingten Gestalt- oder Massenänderungen, sondern auf der Messung der Dauer des Durchsatzes, in welchem ein verschleißendes Bauteil oder Tribosystem seine Funktionalität verliert. Für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit wird mit den indirekten Verschleißmessgrößen gearbeitet, da die Bedingungen für die Erfassung der anderen Messgrößen für das in dieser Arbeit eingesetzte Tribosystem nicht vorhanden sind, [7.9]. Zum Abschätzen der indirekten Verschleißmessgrößen ist es notwendig, den Neuzustand des Tribosystems zu erfassen und das Erreichen seiner Funktionsunfähigkeit festzulegen.

**Die verschleißbedingte Gebrauchsdauer  $T_w$**  ergibt sich aus der Dauer der Beanspruchung bis ein Bauteil oder Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert abzüglich der Stillstandzeiten.

**Die Gesamtgebrauchsdauer  $T_G$**  ergibt sich aus der Dauer der Beanspruchung einschließlich der Stillstandzeiten, in denen ein Bauteil oder Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert.

## 7.9 Verschleißmechanismen

Die Verschleißmechanismen ergeben sich aus dem Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Elemente des tribologischen Systems und äußern sich in energetischen und stofflichen Wechselwirkungen zwischen Grundkörper und Gegenkörper bei Beeinflussung durch Zwischenstoff und Umgebungsmedium, [7.8]. In dieser Arbeit wird keine Beeinflussung durch Zwischenstoffe oder Umgebungsmedien auftreten.

Folgende vier Hauptverschleißmechanismen müssen unterschieden werden:

- Adhäsion: Ausbildung und Trennung von Grenzflächenhaftverbindungen
- Abrasion: Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung
- Oberflächenzerrüttung: Ermüdung und Rissbildung in Oberflächenbereichen durch Wechselbeanspruchungen, die zu Materialtrennung führen
- Tribochemische Reaktionen: Entstehung von Reaktionsprodukten durch tribologische Beanspruchung bei chemischer Reaktion von Grundkörper, Gegenkörper und angrenzendem Medium.

Es ist zu vermuten, dass bei den in dieser Arbeit behandelten Vorgängen eine Superposition der Hauptverschleißmechanismen Abrasion und Oberflächenzerrüttung eintritt.

Entsprechend DIN 50320 [7.8] kann man die in diese Arbeit auftretenden Verschleißarten zwischen

- Gleitverschleiß
- Schwingungsverschleiß
- Korngleitverschleiß

einordnen.

**7.10 Literatur**

- [7.1] Halling, J. : Principles of Tribology. The Macmillan Press LTD, 1975.
- [7.2] Polzer, G. und Meißner, F. : Grundlagen zu Reibung und Verschleiß. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig. 1982.
- [7.3] Kragelski, I. W. : Reibung und Verschleiß. VEB Verlag Technik Berlin. 1971.
- [7.4] Fongsun Ling, F. : Surface Mechanics. John Wiley & Sons. 1973.
- [7.5] Dagnal, H. : Exploring Surface Texture. Rank Taylor Hobson. 1980.
- [7.6] Raue, J., Leins, W. und Meyer, G. : Ein Messverfahren zur Erfassung der hydraulischen Rauheit von Fahrbahnoberflächen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau. 1977.
- [7.7] Duden : Das Große Fremdwörterbuch. Dudenverlag 1994.
- [7.8] DIN 50320 : Verschleiß, Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Dezember 1979.
- [7.9] DIN 50321 : Verschleißmessgrößen. Dezember 1979.
- [7.10] DIN 50322 : Kategorien der Verschleißprüfung. März 1986.
- [7.11] DIN 50323-2 : Tribologie, Verschleiß, Begriffe. August 1995.
- [7.12] DIN 50323-3 : Tribologie Reibung, Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen. Dezember 1993.
- [7.13] Kirschke, K. : Reibung und Verschleiß: Ursachen und Maßnahmen zu ihrer Beeinflussung. Oberfläche - Surface 22, Heft 10/1981.

## **8 Eigene Versuche zu Reibung und Verschleiß**

### **8.1 Einleitung**

Bei den Verstärkungsmaßnahmen von Betonbauteilen wird verlangt, dass die Flächen vorbereitet werden, [8.2]. Diese Vorbereitung soll die Haft- und Kraftübertragung zwischen den zu verstärkenden Bauteilflächen und der verstärkenden Schicht verbessern. Diese Vorbereitung erfordert eine Aufrauung dieser Flächen. Die Aufrauung kann durch verschiedene Methoden hergestellt werden. Die in dieser Arbeit eingesetzte Methode ist die Aufrauung durch Sandstrahlen. Nach einer erfolgreichen Verstärkungsmaßnahme kann unter Umständen durch Einwirkung des Schwindens des Neubetons zu einer Verkürzung führen, die ihrerseits zu Kräften und Spannungen führt, die eine Trennung zwischen der Verstärkungsschicht und dem Altbeton verursachen kann. Dieser Vorgang kann durch schlechte oder zu geringere Aufrauung begünstigt werden. Da diese mögliche Trennungerscheinung zwischen Alt- und Neubeton nicht durchgängig auf der gesamten Bauteillänge zu erwarten ist, wird sie so berücksichtigt, dass hier die Haftung schon im voraus durch Trennung der Verstärkungsschichten von den Grundkörpern ausgeschaltet wurde. Da diese Verstärkungsschichten aber mit Dübeln zusammengehalten werden, kommt es zu einer Übertragung der Kräfte durch Reibung. Diesen Reibungskräften und ihrer Abnahme durch Verschleiß gilt hier die Aufmerksamkeit. Zu diesem Zweck werden Wöhlerlinien für die Versuchskörper ermittelt. Die Wöhlerlinien werden normalerweise eingesetzt, um das Ermüdungsverhalten der untersuchten Objekte zu untersuchen. Das Ermüdungsverhalten der Verankerungselemente selbst wird in dieser Arbeit nur am Rande untersucht. Eine umfassende Darstellung des Ermüdungstragverhaltens von Dübeln ist in [8.6] zu finden.

### **8.2 Versuchsprogramm**

In den Versuchen gilt die Aufmerksamkeit den Reibungskräften und ihrer Abnahme aufgrund des auftretenden Reibflächenverschleißes. Hierfür wurden zuerst Grundkörper hergestellt. Für jede Zuschlagmischung (A, B und C) wurde eine Serie von vier Grundkörpern hergestellt. Zwei der vier Grundkörper wurden auf ca. 1 mm Rautiefe aufgeraut [8.2] und zwei schalungsrau belassen, um den "worst case" zu simulieren.

Danach wurden alle Seiten der Grundkörper mit einer 50 mm starken Verstärkungsschicht aus Ortbeton versehen. Nach der Erhärtung der Verstärkungsschichten wurden sie von den Grundkörpern getrennt. Diese Maßnahme wurde gewählt, um sicher zugehen, dass der Haftverbund gänzlich ausgeschaltet wurde und ausschließlich die Reibkräfte untersucht werden konnten. Die Verstärkungsschichten besaßen nun einen Abdruck der Grundkörperflächen. Dieser Abdruck wurde mit dem Laserabtastverfahren abgetastet und mit dem 3D-Verfahren berechnet. Die Grundkörperflächen wurden von den Resten des Paraffins mechanisch gereinigt. Dabei wurde beachtet, dass dabei keine zusätzliche Aufrauung zustande kam.

Es wurde zwischen der Oberflächenkenngrößen der Grundkörper und der Verstärkungsschichten verglichen um die Unterschiede, die nur mit Hilfe der 3D-Verfahren möglich wurde, zu untersuchen.

Es wurde bei totalem Ausfall des Haftverbundes versucht herauszufinden, inwiefern die infolge der Oberflächenrauheit hervorgerufenen Reibungskräfte in der Lage sind, die ausgeübten Kräfte weiterzuleiten. Hierfür wurden die Versuchskörper auch dynamisch belastet, um Wöhlerlinien ermitteln zu können.

Folgende Größen wurden variiert, um deren Einfluss zu untersuchen:

- die Zuschlagsieblinien,
- die unterschiedlichen Betonfestigkeiten des Alt- und Neubetons,
- die Rauheit.

### 8.3 Grundkörper

Es wurden zwölf Grundkörper hergestellt, jeweils vier für jede Serie A, B und C. Sie hatten die Abmessungen von 600 mm x 200 mm x 200 mm, siehe Abb. 8.1.



Abb. 8.1 : Grundkörper

Die Grundkörper hatten drei verschiedene Zuschlagmischungen, mit einer angestrebten Betongüte von C20/25. Die Grundkörper der Serie A hatten ein Zuschlaggemisch nach [2] im Bereich A16, Grundkörper der Serie B im Bereich B16 und die Grundkörper der Serie C im Bereich C16.

#### 8.3.1 Herstellung der Grundkörper

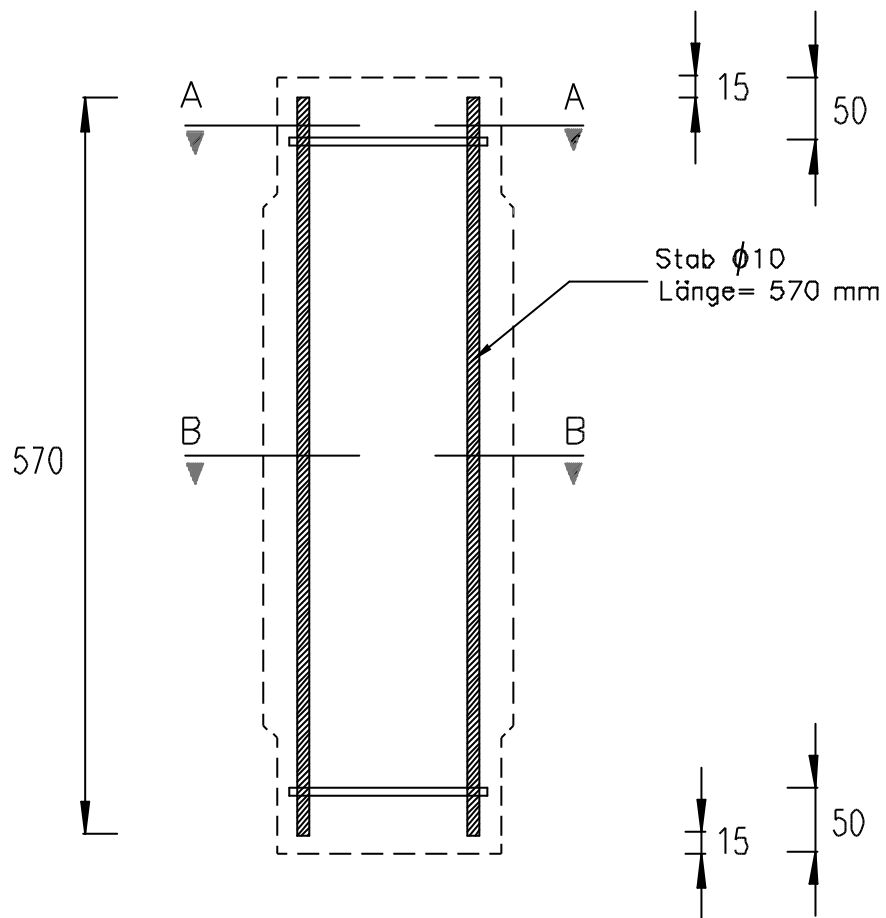
Die Grundkörper wurden mit der gleichen Betonmischung hergestellt wie die Versuchsplatten in Kapitel 4. Die Grundkörper wurden stehend betoniert. Der Beton wurde dann von der Oberseite her eingeführt und schließlich mit einem Tischrüttler verdichtet. Die Grundkörper blieben einen Taglang in der Schalung und wurden von der Oberseite mit feuchten Tüchern abgedeckt. Danach wurden die Grundkörper ausgeschalt und an einem trockenen Ort gelagert.

Da die Grundkörper stehend betoniert wurden, konnten sie optimal ausgenutzt werden, eine relativ geringe Grundkörperzahl stellte eine größere Anzahl von Oberflächen mit ähnlichen Voraussetzungen zur Verfügung, Abb. 8.1.

##### 8.3.1.1 Die Bewehrung

Die Grundkörper wurden mit einem einfachen Bewehrungskorb versehen, die Bewehrung bestand aus vier Längsstäben BSt 500S  $\varnothing 10$ , verbunden mit zwei Bügeln BSt 500S  $\varnothing 6$ , siehe Abb. 8.2 und 8.3.

Stäbenanzahl : 4 je Probe



Alle Angaben in mm

**Abb. 8.2 : Der konstruktive Bewehrungskorb der Grundkörper, Längsstäbe**

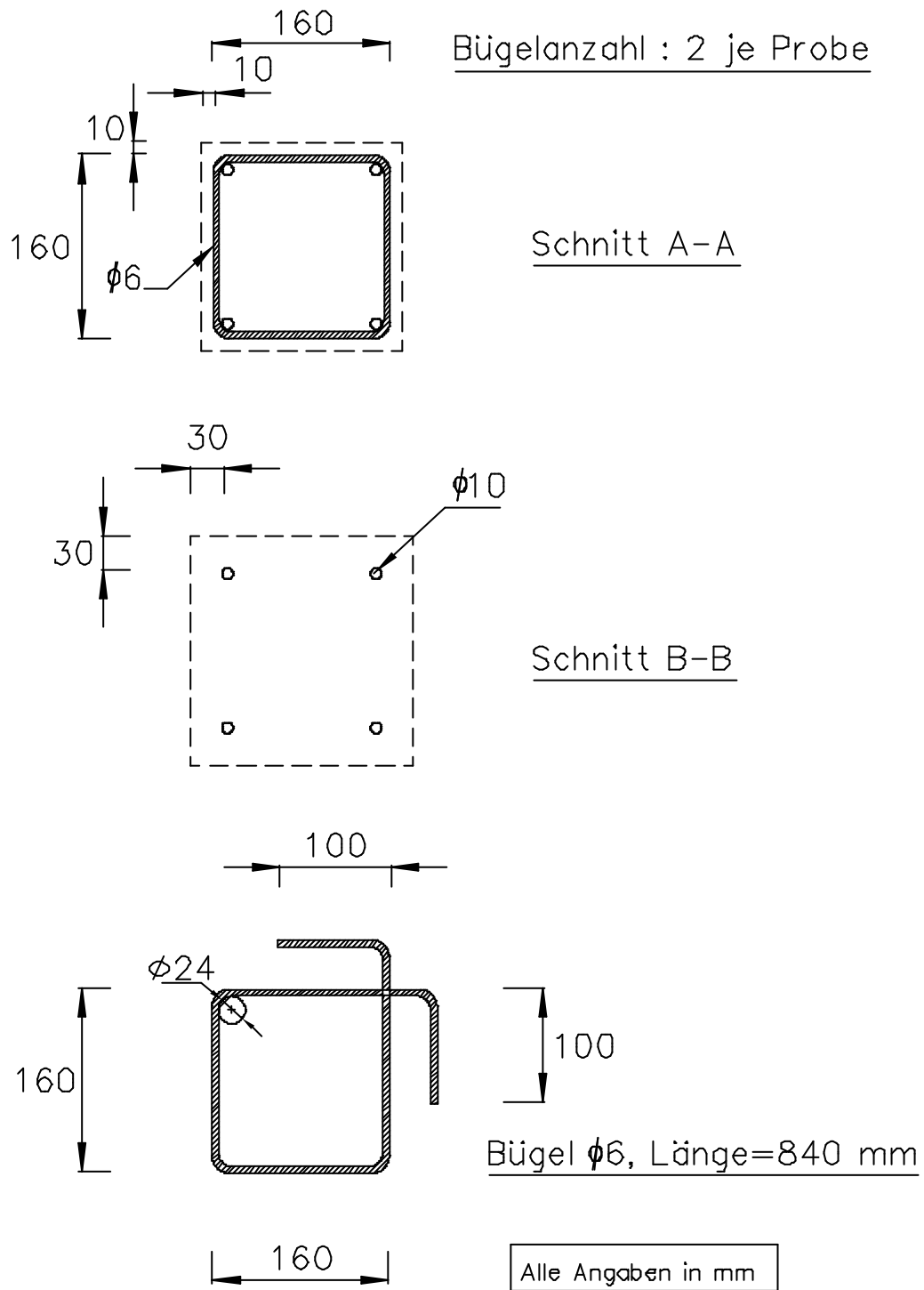


Abb. 8.3 : Der konstruktive Bewehrungskorb der Grundkörper, Bügel

### 8.3.1.2 *Der Beton*

Die eingesetzten Baustoffe wurden bereits in Kapitel 4 vorgestellt, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

### 8.3.2 *Bearbeitung der fertigen Grundkörper*

#### 8.3.2.1 *Das Sandstrahlen*

Die Aufrauungsprozedur per Sandstrahlen wurde mit dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann kontrolliert, siehe Abb. 8.4.



Abb. 8.4 : Durchführung des Sandflächenverfahrens

In den Abb. 8.5 bis 8.10 sind die Grundkörper der verschiedenen Serien A, B und C zum Vergleich einmal schalungsrau belassen und einmal auf 1 mm Rautiefe sandgestrahlt dargestellt. Um die gesamte aufgeraute Fläche zu erfassen, wurde das Sandflächenverfahren für jede Seite dreimal angewendet, Abb. 8.4. Die Ergebnisse des Sandflächenverfahrens sind in den Tabellen 8.1 und 8.2 zusammengefasst. Anschließend wurden die Flächen mit dem Lasergerät abgetastet und mit dem 3D-Verfahren berechnet.



Abb. 8.5 : A1-Schalungsrau

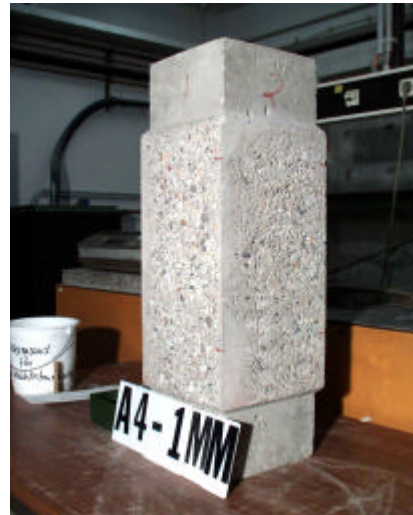


Abb. 8.6 : A4-1mm Aufrauung



Abb. 8.7 : B1-Schalungsrau



Abb. 8.8 : B4-1mm Aufrauung



Abb. 8.9 : C1-Schalungsrau



Abb. 8.10 : C4-1mm Aufrauung



**Ergebnisse der Sandflächenverfahren:**

Tabelle 8.1 : Die gemessenen Kreisdurchmesser beim Sandflächenverfahren

Serie		A			B			C		
Seite	Pos.	Durchmesser [cm]		Mittelwert [cm]	Durchmesser [cm]		Mittelwert [cm]	Durchmesser [cm]		Mittelwert [cm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3-S1	1	10,0	12,0	10,90	11,5	11,5	11,40	11,5	12,0	11,60
	2	10,0	11,5		11,5	11,0		10,0	13,0	
	3	10,0	12,0		11,0	12,0		11,0	12,5	
3-S2	1	10,5	12,0	11,50	11,5	12,5	11,80	11,5	12,5	11,75
	2	10,0	12,5		11,0	12,0		11,5	12,0	
	3	12,0	12,0		11,0	13,0		11,5	11,5	
3-S3	1	11,0	11,5	11,33	11,5	13,0	11,60	11,0	13,0	11,60
	2	10,5	12,0		10,0	11,5		11,0	12,0	
	3	11,0	12,0		11,5	12,0		10,5	12,5	
3-S4	1	10,0	12	10,80	11,5	12,0	11,60	10,5	12,0	11,60
	2	10,5	10,5		10,5	11,5		11,0	12,5	
	3	10,0	12,0		11,5	13,0		12,0	12,0	
4-S1	1	11,5	12,5	11,60	11,5	12,5	11,80	11,0	13,0	11,80
	2	11,0	11,5		11,0	12,0		10,0	14,0	
	3	11,5	12,0		12,5	11,5		11,5	11,5	
4-S2	1	10,5	12,5	11,80	13,0	10,5	11,60	11,5	12,0	11,40
	2	11,0	13,0		12,0	11,5		11,0	12,0	
	3	11,5	12,5		11,0	12,0		11,0	11,0	
4-S3	1	11,5	12,0	11,50	11,0	12,5	11,25	11,5	12,0	11,60
	2	10,5	11,5		10,0	12,0		11,5	12,0	
	3	11,5	12,0		10,0	12,0		11,0	12,0	
4-S4	1	12,5	11,0	11,80	13,0	11,0	11,60	10,5	12,0	11,00
	2	11,5	12,0		11,0	12,0		10,0	11,5	
	3	11,0	13,0		11,0	11,5		11,0	11,0	

In Tabelle 8.1 werden in Spalte 1 die vier Seiten (3-S1) bis (3-S4) des dritten Grundkörpers und der vier Seiten (4-S1) bis (4-S4) des vierten Grundkörpers aufgeführt, in Spalte 2 sind die drei Positionen der Normsandkreise zu finden.

In den Spalten 3 und 4 werden die beiden pro Position gemessenen Durchmesser dargestellt. In Spalte 5 sind die aus den gemessenen Durchmessern der drei Positionen berechneten Mittelwerte einer Seite des Grundkörpers A zu finden. Entsprechendes gilt für die Spalten 6, 7 und 8 für die Grundkörper B, und die Spalten 9, 10 und 11 für die Grundkörper C. Die schalungsrauen Grundkörper der jeweiligen Serie wurden nicht vermessen.

Tabelle 8.2 : Die berechneten Glättungstiefen nach Kaufmann

Serie	Rauheit $R_p$ [mm]		
	A	B	C
3-S1	1,07	0,98	0,95
3-S2	0,96	0,91	0,92
3-S3	0,99	0,95	0,95
3-S4	1,09	0,95	0,95
4-S1	0,95	0,91	0,91
4-S2	0,91	0,95	0,98
4-S3	0,96	1,01	0,95
4-S4	0,91	0,95	1,05

In Tabelle 8.2 sind die Rauheiten dargestellt, die aus den in Tabelle 8.1 ermittelten Durchmessern berechnet wurden. Hierfür wurde Gl. 4.1 eingesetzt.

### 8.3.2.2 Laserabtastverfahren

Die Erfassung der Oberflächenrauheit wurde mit dem Lasergerät durchgeführt. In Vorschubrichtung wurde ein Abtastauflösung von 3 Messungen/mm gewählt. Die Abstände zwischen den einzelnen linearen Abtastungen quer zur Vorschubrichtung wurden in allen Fällen mit 1 mm festgelegt. Alle Vorgänge hatten eine Gesamt-Vorschubslänge von 350 mm.

#### Ergebnisse der Laserabtastverfahren:

Nachdem das Sandflächenverfahren durchgeführt und die Rauheiten festgestellt worden waren, war es jetzt möglich das Laserabtastverfahren einzusetzen. Folgende Größen wurden berechnet:

- Glättungstiefe  $R_p$
- Maximale Rautiefe  $R_y$
- Mittenrauwert  $R_a$
- Oberflächenverhältnis  $c_r$

Das Ziel dieses Schrittes ist es, die Betonoberfläche digital zu erfassen und deren Oberflächenkenngrößen zu berechnen. Die gewonnenen Ergebnisse sind mit denen der Verstärkungsschichten gemeinsam in Tabelle 8.5 dargestellt.

## 8.4 Die Verstärkungsschichten

Bevor die Verstärkungsschichten betoniert wurden, wurden alle vier Seitenflächen der Grundkörper mit geschmolzenem Paraffin abgetupft. Diese Maßnahme war notwendig, um die spätere Haftung zwischen Alt- und Neubeton abzuschwächen bzw. zu verhindern. Dies wiederum war notwendig, um die Verstärkungsschicht leichter vom Grundkörper trennen zu können. So konnte der Einfluss der Haftung auf spätere Versuche unterbunden werden.

Um die Verstärkungsschichten zu betonieren, wären normalerweise mindestens vier Betoniervorgänge und somit auch vier Betonmischungen notwendig. Um die Anzahl der Betonmischungen zu reduzieren, wurden die Grundkörper so aufgestellt, so dass zwei Seiten auf einmal betoniert werden konnten. Durch diese Maßnahme konnte die Anzahl der Betonmischungen auf zwei reduziert werden. Es wurden also zwei Seiten betoniert und die Oberseiten mit feuchten Tüchern abgedeckt. Am zweiten Tag wurden die Grundkörper umgedreht und die anderen beiden Seiten betoniert und abgedeckt. Es wurden keine besonderen Verdichtungsmaßnahmen wie z.B. ein Rütteltisch eingesetzt. Nach einem Tag wurden die Versuchsproben ausgeschalt und dann an einem trockenen Ort gelagert, siehe Abb. 8.11.

### 8.4.1 Herstellung der Verstärkungsschichten

#### 8.4.1.1 Die Bewehrung

Jede Grundkörperseite erhielt als Längsbewehrung zwei BSt 500S-GEWI  $\varnothing 16$ . Der Abstand zwischen zwei Bewehrungsstäben betrug 110 mm. Auf die Längsstäbe wurden vier Querstäbe aus BSt 500S  $\varnothing 6$  geschweißt. Schalung, Bewehrung und Aufbau sind in den Abb. 8.12, 8.13 und 8.14 dargestellt. Die Bewehrung für die Verstärkungsschicht wurde direkt auf dem Altbeton positioniert, da über sie die Schubkraft mit möglichst geringer Exzentrizität eingeleitet werden sollte. Die GEWI Bewehrung wurde hier eingesetzt, um der Einbau in die Prüfmaschine und die Kräfteinleitung über passende Muttern zu erleichtern.



Abb. 8.11 : Schalung und Betonierichtung der Verstärkungsschichten



Abb. 8.12 : Aufbau und Betonierichtung der Verstärkungsschichten

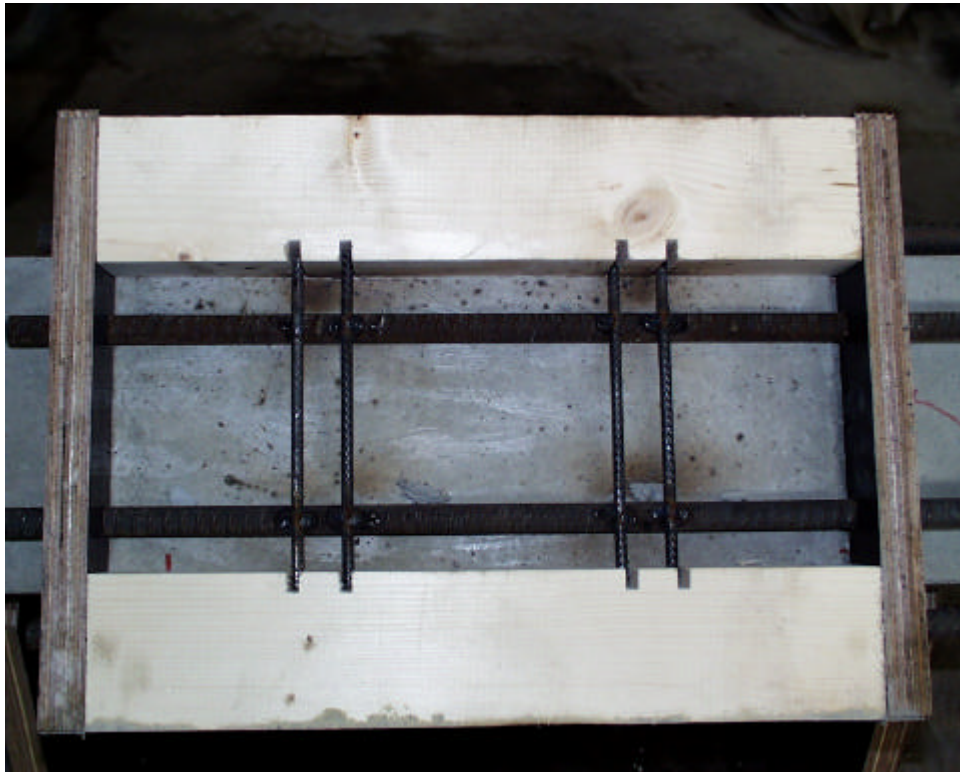


Abb. 8.13 : Die Schalung und Bewehrung einer Verstärkungsschichtseite

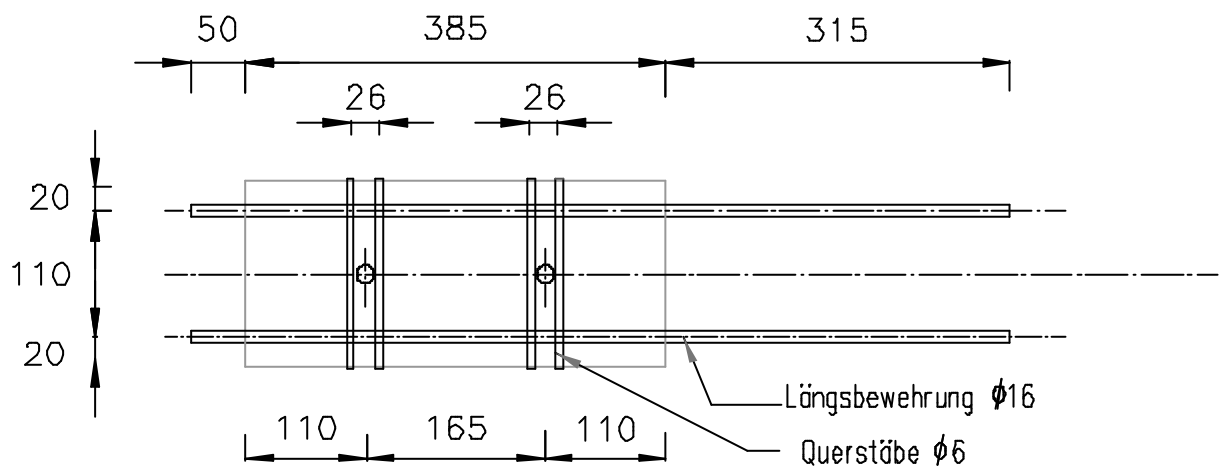


Abb. 8.14 : Bewehrung, Maße und Abstände der Verstärkungsschichten

#### 8.4.1.2 Der Ortbeton

Für alle Verstärkungsschichten wurde eine Betonmischung der Betongüte C20/25 mit einer Zuschlagsmischung der Sieblinie B8 entworfen. Es wurde zwei Betonmischungen hergestellt. Die Eigenschaften dieser beiden Betonmischungen sind in Tabelle 8.3 dargestellt.

Tabelle 8.3 : Ausbreitmaß und Konsistenz

Mischung	Ausbreitmaß a [cm]	Konsistenz
1	38	F2
2	43	F3

Für jede Mischung wurden 12 Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge hergestellt. Davon dienten je drei Würfel der Güteprüfung nach 28-Tage-Wasserlagerung nach [8.16] und drei der 28-Tage-Luftlagerungs-Erhärtungsprüfung. Die hergestellten Betonverstärkungsschichten besaßen die in Tabelle 8.4 dargestellten Betongüten nach [8.16].

Tabelle 8.4 : Druckfestigkeit und Festigkeitsklassen

Mischung	Alter [Tage]	Mittelseriendruck Festigkeit $f_{cm,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mindestseriendruck Festigkeit $f_{ci,cube28}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Festigkeits- klasse
1	28	25,5	27,0	C16/20
2	28	40,0	39,5	C25/30



Abb. 8.15 : Die erste Betoniervorgang

Abb. 8.16 zeigt eine Übersicht aller Versuchskörper vor und nach der Betonierung.

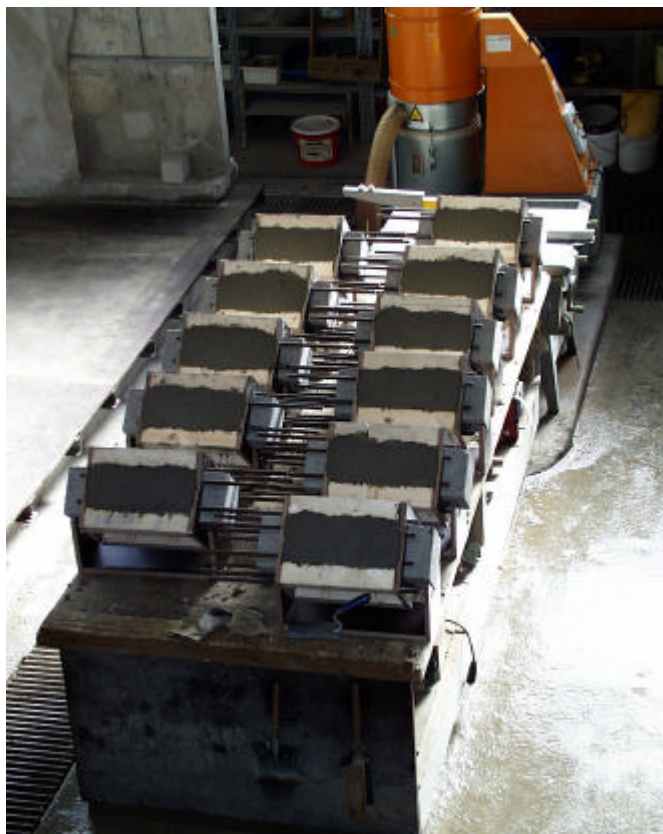
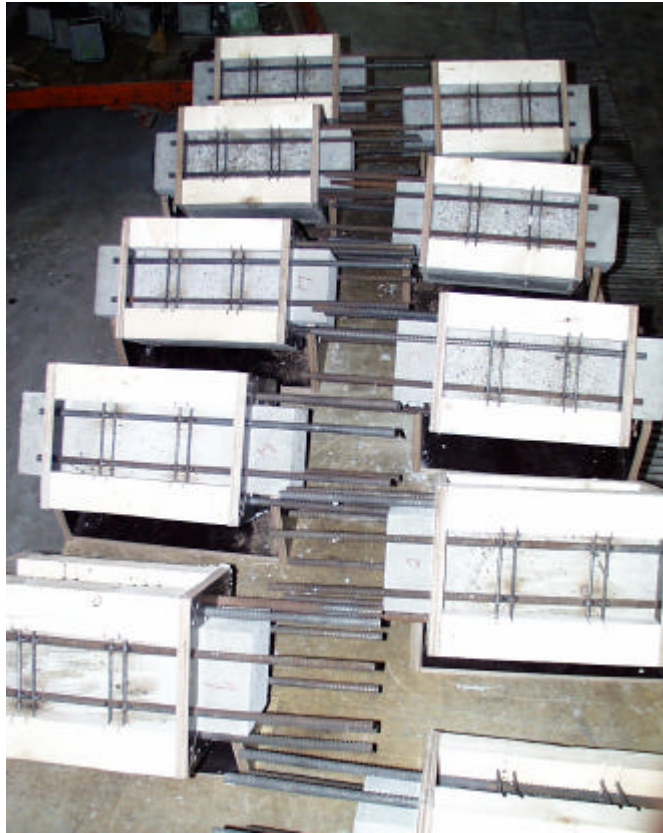


Abb. 8.16 : Die Versuchskörper vor und nach der Betonierung

### 8.4.1.3 Entschalung und Trennung der Verstärkungsschichten

Nach einen Tag wurden die Verstärkungsschichten ausgeschalt. Abb. 8.17 zeigt die Versuchskörper nach dem Ausschalen.



Abb. 8.17 : Die Versuchskörper nach der Entschalung

Anschließend wurden die Verstärkungsschichten vom Grundkörper getrennt. Dies wurde durch die beschriebene, vorherige Haftschwächung mit Paraffin erleichtert. Die Grundkörperflächen wurden von den Resten des Paraffins gereinigt.

In Abb. 8.18 sind auf den vier Verstärkungsschichten die Abdrücke der 1 mm aufgerauten Grundkörperflächen zu erkennen. Diese Abdrücke wurden auch mit dem Laserverfahren abgetastet und mit dem 3D-Verfahren berechnet.



Abb. 8.18 : Die getrennten Verstärkungsschichten



## 8.5 Zusammenbau der Versuchskörper

Nachdem die Grundkörper und Verstärkungsschichten hergestellt, getrennt und vermessen worden waren, war der nächste Schritt der Zusammenbau.

### 8.5.1 Das Bohren

Wegen der Entscheidung, die Haftung in dieser Arbeit auszuschließen, mussten die Verstärkungsschichten von den Grundkörpern getrennt werden. Aus diesem Grund war es nicht möglich, die Dübel vor dem Betonieren zu setzen, sie mussten nachträglich gesetzt werden. Um eine Exzentrizität der Bohrlöcher (Abb. 8.19b) zu vermeiden, wurden die Verstärkungsschichten auf den Grundkörpern befestigt und anschließend die Setzlöcher mit einer Kernbohrmaschine bis in die vorgesehene Tiefe gebohrt, siehe Abb. 8.19a und 8.20. In Abb. 8.21 ist die Bohrmaßnahme dargestellt, in Abb. 8.22 die fertig gebohrten Versuchskörper.

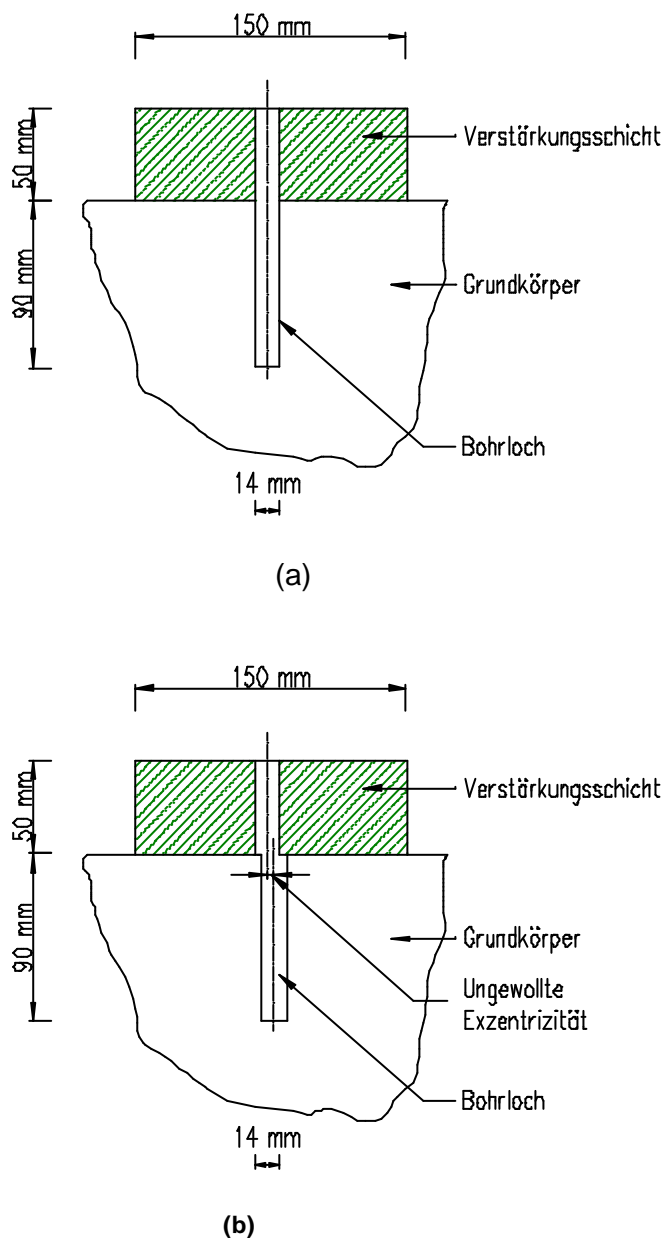
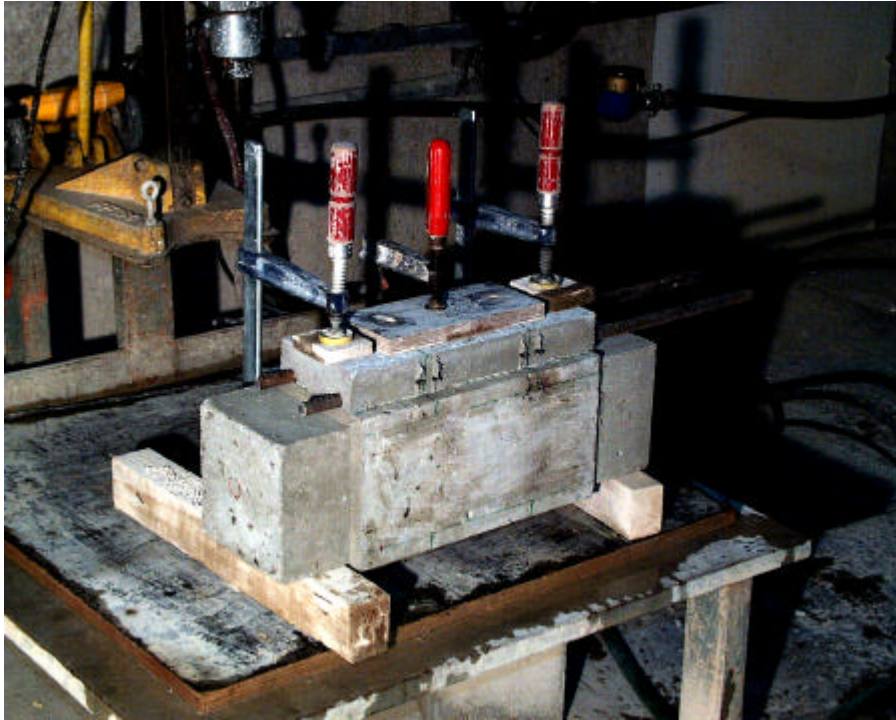


Abb. 8.19 : Die Bohrlochmaße



**Abb. 8.20 : Die Befestigung und Vorbereitung auf die Bohrmaßnahme**



**Abb. 8.21 : Die Bohrmaßnahme**

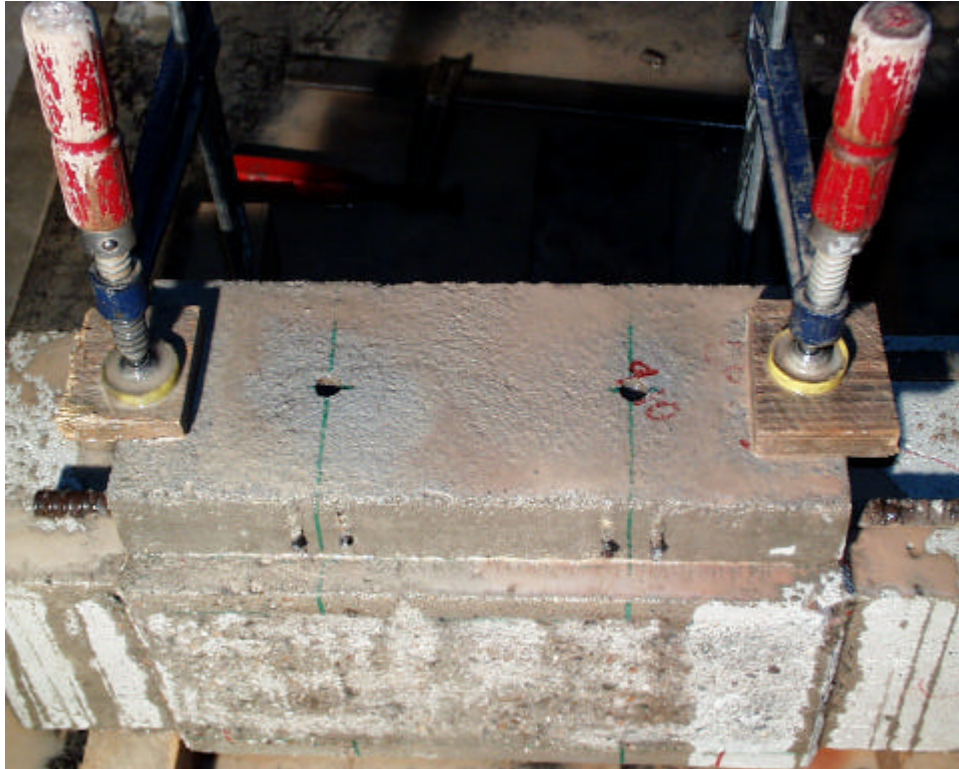


Abb. 8.22 : Die fertig gebohrten Versuchskörper

Nachdem alle Versuchskörper gebohrt und getrocknet waren, wurden die Bohrlöcher mit einem Schlagbohrer aufgeraut. Das Bohrmehl wurde anschließend heraus geblasen. Es muss hier erwähnt werden, dass die Mindestsetztiefe unterschritten wurde, um die Grundkörpermaße zu minimieren.

### **8.5.2 Die Dübel**

Als Dübel wurden einfache Gewindestangen eingesetzt, die zuerst von Schäfer und Bätjer [8.8] eingesetzt worden waren; auch Jung [8.1] setzte diese Gewindestangen ein. Der Grund für diese Wahl waren die begrenzten Rand- und Achsabstände, bei dem die normierten Dübel nicht eingesetzt werden dürfen. Die Gewindestangen hatten ein Durchmesser von 12 mm und gehörten zur Festigkeitsklasse 8.8, siehe Abb. 8.23 und 8.24.



**Abb. 8.23 : Die eingesetzten Gewindestangen**

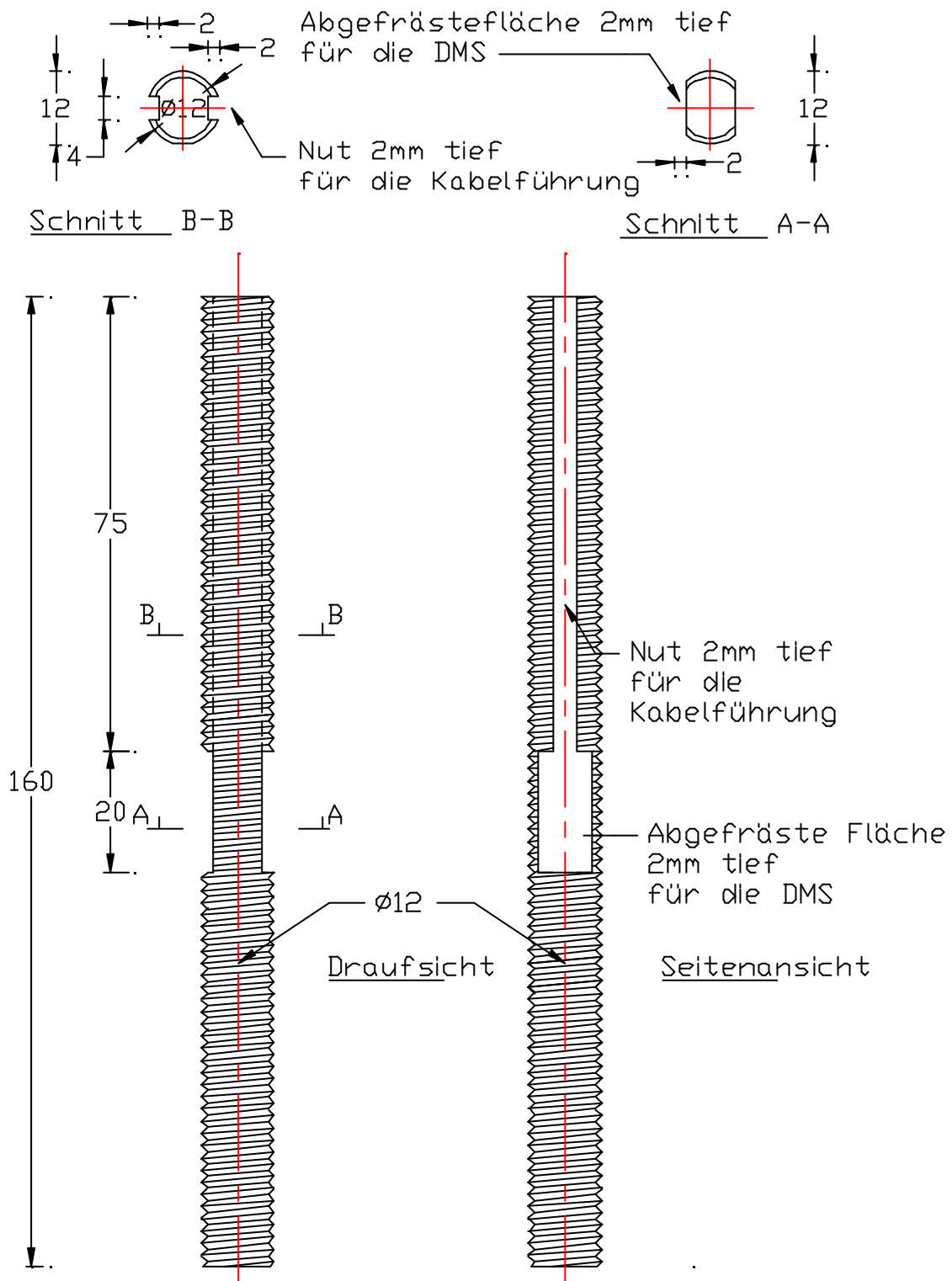


Abb. 8.24 : Eingesetzte Dübel

Die eingesetzten Dübel wurden so präpariert, dass die später einwirkenden Kräfte gemessen werden konnten. Hierfür musste Platz geschaffen werden, um die DMS aufkleben zu können. In den Abb. 8.23 und 8.24 wird diese Präparation verdeutlicht. Abb. 8.24 zeigt zwei abgefräste, 2 mm tiefe, sich gegenüberliegende Flächen. Deren Anordnung wurde in einer Entfernung von der Betonoberfläche gewählt, in der das maximal zu erwartende Moment zu erwarten ist.

Diese Entfernung wird mit  $d$  (Dübeldurchmesser) von der oberen Betonbetonfläche angegeben. Hier ist  $d$  gleich 12 mm. Um die DMS-Kabel nach außen führen zu können, wurde für jede Fläche eine 2 mm tiefe Nut für die Kabelführung gefräst. Anschließend wurden die DMS und deren Kabel mit einer Silikonschicht geschützt. Der Verbundmittelbewehrungsgrad betrug bei allen Versuchen  $r = 0,003$ . Er wurde für den durch die gefrästen Flächen reduzierten Querschnitt berechnet.

### 8.5.3 Das Setzen der Dübel

Die Abb. 8.25 und 8.26 zeigen, wie die vier Verstärkungsschichten mit Schraubzwingen befestigt wurden und wie der Klebstoff in die Setzlöcher gepresst wurde. Die Dübel wurden anschließend eingesetzt und der austretende Klebstoff entfernt.

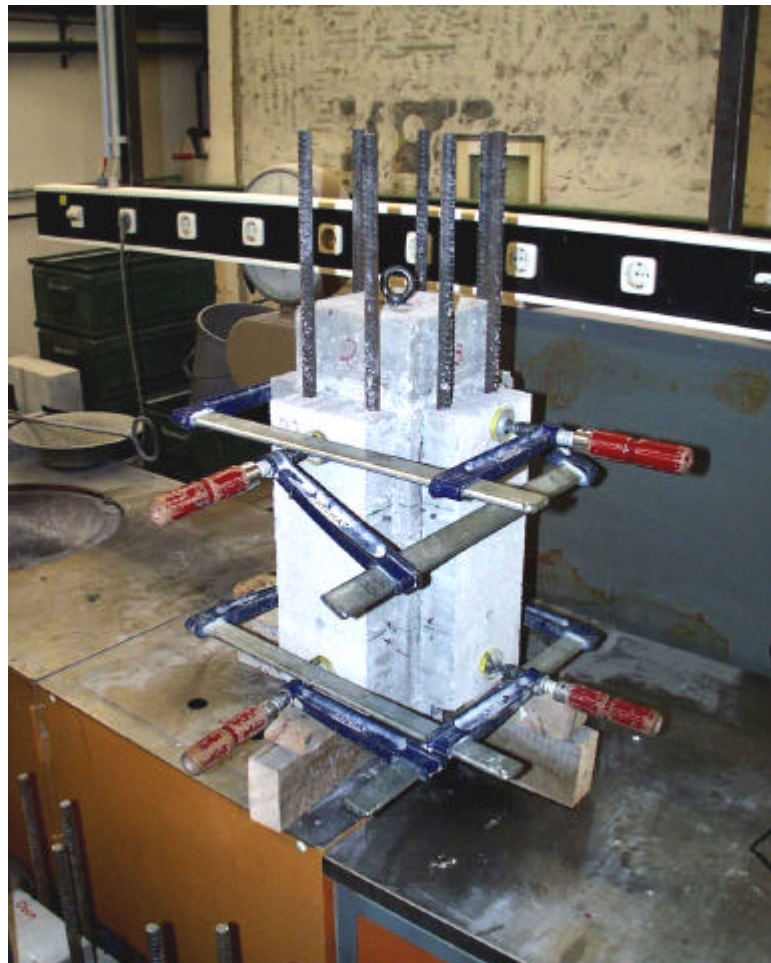


Abb. 8.25 : Befestigung der Versuchskörper

Der Hier eingesetzte Klebstoff war der UPAT UPM 33 der für spreizdruckfreie Verankerung geeignet ist.



Abb. 8.26 : Einbringen des Klebstoffs

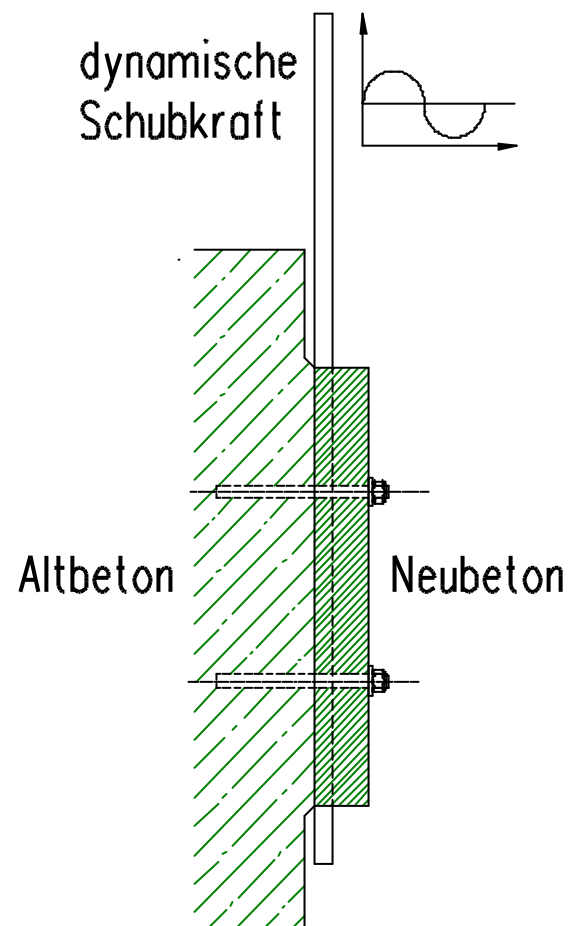
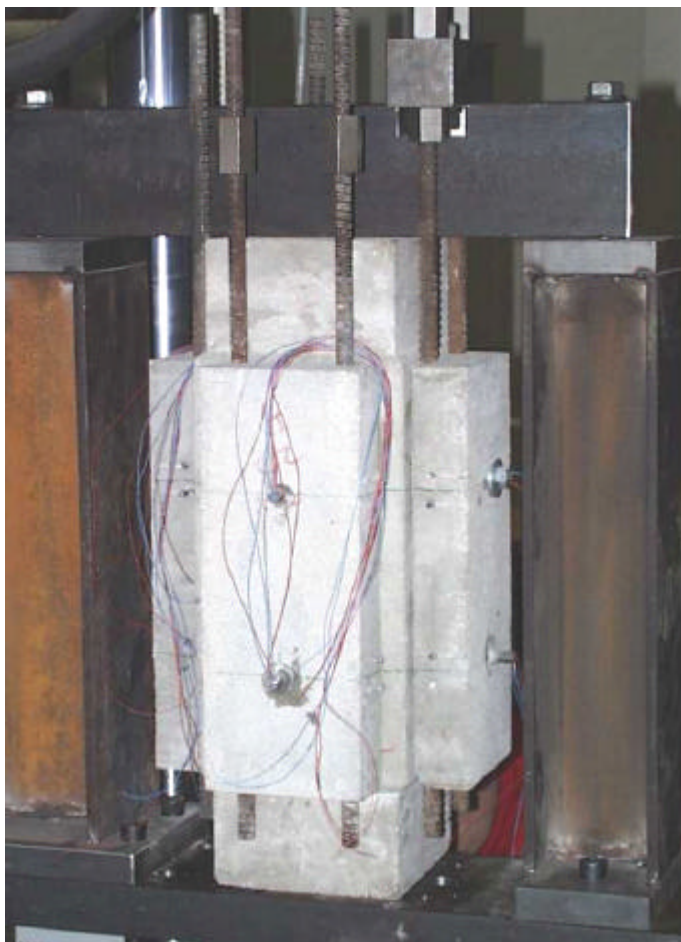


Abb. 8.27 : Die fertigen Versuchskörper und Versuchsaufbau

## 8.6 Die Ergebnisse

Zuerst wurden die Oberflächen der Grundkörper und der Verstärkungsschichten mit dem Laserverfahren abgetastet, anschließend wurden sie mit dem 3D-Verfahren berechnet.

### 8.6.1 Die Oberflächenkenngößen

Tabelle 8.5 : Die Ergebnisse des 3D-Laserabtastverfahrens

Serie	Seite	Glättungstiefe $R_p$			Maximale Rautiefe $R_y$			Mittenrauwert $R_a$			Profillängen-Verhältnis $I_r$			Oberflächen-Verhältnis $C_r$		
		Probe	Verst.-Schicht	Diff. %	Probe	Verst.-Schicht	Diff. %	Probe	Verst.-Schicht	Diff. %	Probe	Verst.-Schicht	Def. %	Probe	Verst.-Schicht	Def. %
A3-1mm	1	1,34	0,82	39	8,92	3,38	62	0,56	0,53	5	1,11	1,08	3	1,23	1,17	5
	2	1,01	0,58	43	7,20	3,17	56	0,49	0,46	6	1,10	1,08	2	1,17	1,14	3
	3	1,14	0,62	46	8,59	3,48	59	0,50	0,45	10	1,10	1,07	3	1,19	1,13	5
	4	1,40	0,75	46	7,54	3,44	54	0,59	0,51	14	1,13	1,08	4	1,25	1,17	6
A4-1mm	1	0,72	0,46	36	4,41	2,59	41	0,48	0,41	15	1,10	1,07	3	1,17	1,13	4
	2	0,75	0,57	24	5,24	3,40	35	0,49	0,45	8	1,10	1,08	2	1,18	1,17	1
	3	1,02	0,64	37	6,60	3,40	48	0,49	0,45	8	1,17	1,08	8	1,22	1,15	6
	4	1,09	0,53	51	8,25	2,05	75	0,48	0,43	10	1,11	1,07	4	1,20	1,14	5
B3-1mm	1	0,79	0,58	27	4,62	3,72	12	0,42	0,45	0	1,09	1,07	2	1,16	1,13	3
	2	0,73	0,48	34	4,35	3,30	24	0,43	0,39	9	1,09	1,07	2	1,16	1,14	2
	3	0,78	0,55	29	4,75	2,46	48	0,45	0,43	4	1,10	1,07	3	1,18	1,15	2
	4	0,72	0,46	36	4,33	3,13	28	0,44	0,40	9	1,10	1,06	4	1,17	1,13	3
B4-1mm	1	0,73	0,55	25	5,48	3,35	39	0,42	0,41	2	1,09	1,07	2	1,16	1,14	2
	2	0,69	0,54	22	4,82	3,79	21	0,39	0,38	3	1,08	1,07	1	1,12	1,14	2
	3	0,70	0,60	14	5,12	3,17	38	0,49	0,48	2	1,10	1,07	3	1,15	1,14	1
	4	0,70	0,53	24	4,39	2,97	32	0,42	0,38	9	1,10	1,06	4	1,19	1,13	5
C3-1mm	1	0,62	0,65	0	5,38	3,59	33	0,43	0,41	5	1,08	1,07	1	1,14	1,12	2
	2	0,70	0,55	21	4,96	3,88	22	0,47	0,46	2	1,09	1,08	1	1,15	1,14	1
	3	0,61	0,68	0	5,32	3,60	32	0,44	0,45	0	1,08	1,07	1	1,16	1,14	2
	4	0,61	0,46	25	4,52	2,66	41	0,41	0,41	0	1,09	1,07	2	1,13	1,13	0
C4-1mm	1	0,61	0,64	0	4,90	4,11	16	0,44	0,44	0	1,09	1,07	2	1,18	1,12	5
	2	0,74	0,53	28	4,81	3,69	23	0,44	0,41	7	1,10	1,07	3	1,17	1,14	3
	3	0,61	0,54	11	5,04	3,38	33	0,46	0,40	13	1,09	1,07	2	1,14	1,12	2
	4	0,89	0,59	34	5,12	2,28	55	0,49	0,45	8	1,11	1,07	4	1,20	1,15	4
Mittelwerte		0,82	0,59	23	5,61	3,25	42	0,46	0,43	6,5	1,1	1,07	2,7	1,17	1,14	2,5

Die Ergebnisse der durchgeführten Laserabtastungen der Grundkörper und der Verstärkungsschichten werden in Tabelle 8 5 gezeigt.



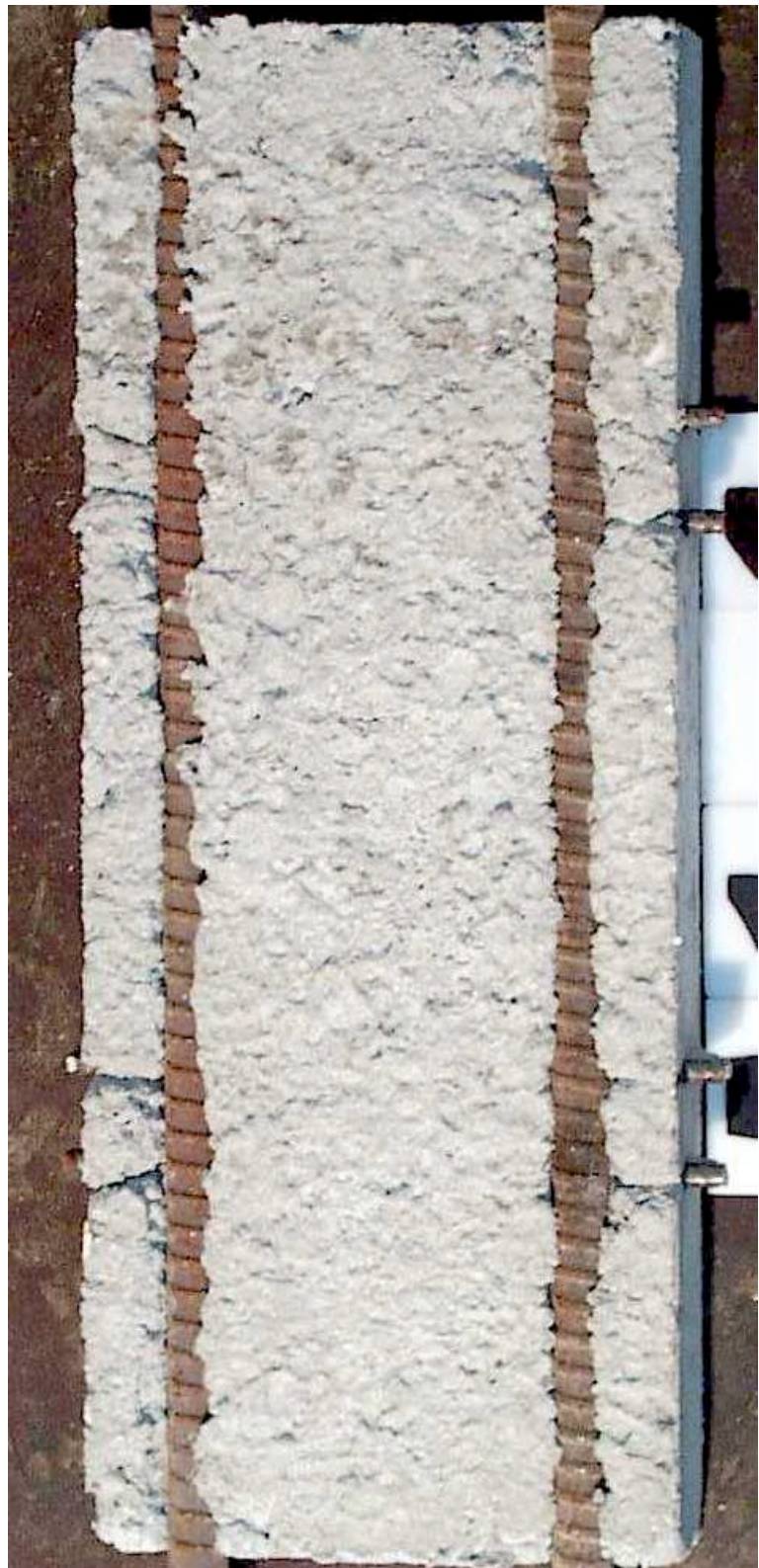
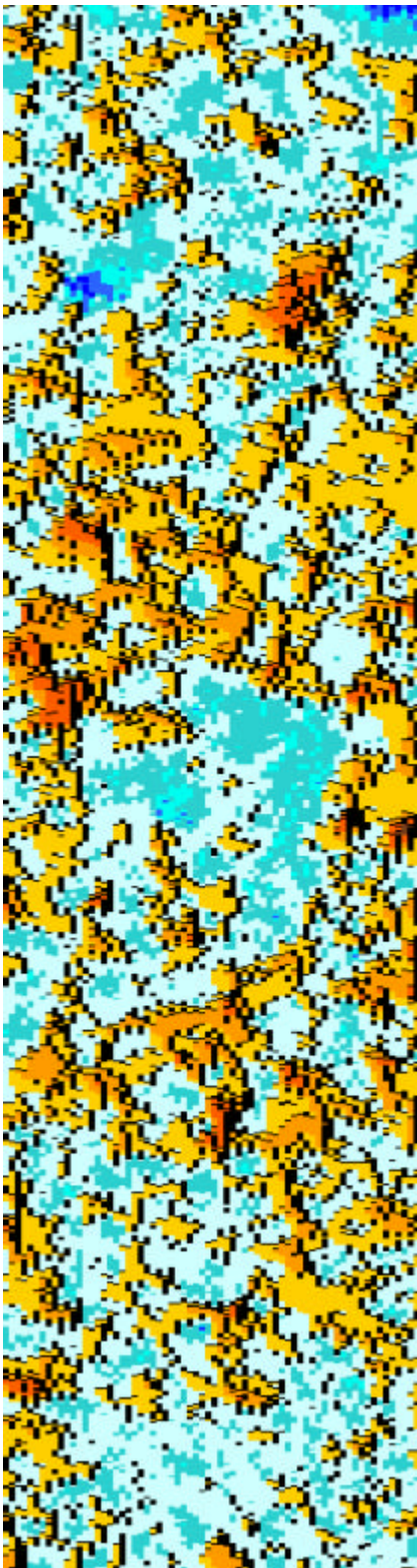
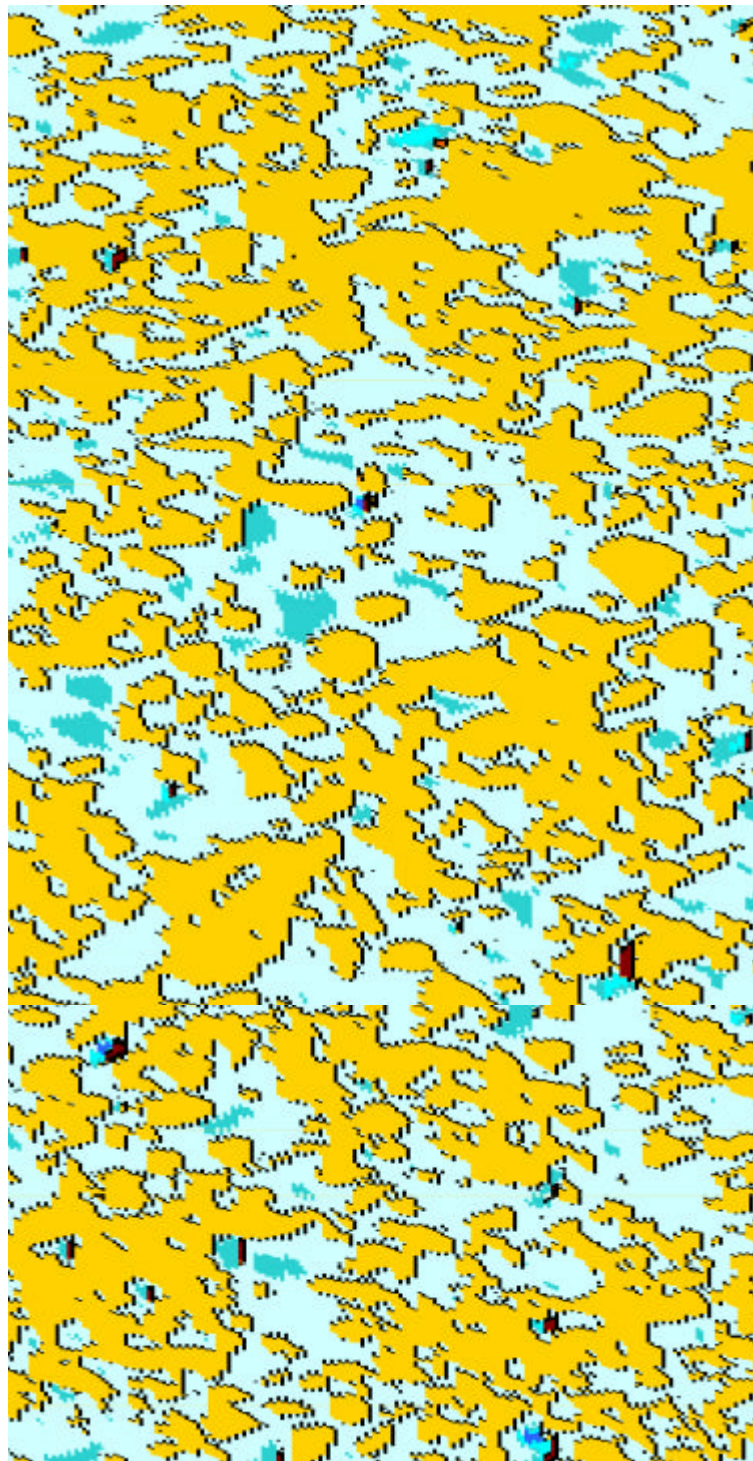


Abb. 8.28 : Verstärkungsschicht A3-1mm-S1



**Abb. 8.29 : Grundkörper A3-1mm-S1**

In Abb. 8.28 ist die abgetastete Verstärkungsschicht dargestellt. In Abb. 8.29 ist die zugehörige, abgetastete Grundkörperoberfläche gezeigt. Es ist nicht leicht, die Übereinstimmung der zwei Abtastabbildungen zu entdecken, weil der erste das Abdruckbild der zweiten ist, also eine Art Negativ. Außerdem, ist Farbenzuordnung eine andere wegen der in Abb. 8.29 zu erkennenden einzelnen hohen Ausschläge (dunkel dargestellt), welche die Farbenzuordnung der Restflächen stark beeinflussten. Die Darstellungen in Abb. 8.28 und 8.29 gehören zu der Probe (A3-1mm-S1) alle andern Darstellungen sind in Anhang 6 gezeigt.

In Tabelle 8.5 wurden die Oberflächenkenngrößen für jeweils eine Grundkörperseite und deren Verstärkungsschicht dargestellt. Bei fast allen berechneten Oberflächenkenngrößen ist eine Abnahme der Werte der Verstärkungsschichtkenngrößen gegenüber denen den Werten der Grundkörper festzustellen. Dies führt zu der Erkenntnis, dass die eingebrachten Ortbeton-schichten keinen exakten Abdruck der Grundkörperoberflächen wiedergeben. Das bedeutet, dass nicht die gesamte Oberfläche zur Haft- oder Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton beiträgt. Die Glättungstiefe  $R_p$  der Verstärkungsschicht vermindert sich im Schnitt um 23%. Die Werte der maximalen Rautiefe  $R_y$  reduzieren sich im Schnitt um 42%. Der Mittenrauwert  $R_a$  zeigt eine durchschnittliche Verminderung der Werte um 6,5%. Das Profillängenverhältnis  $I_r$  und das Oberflächenverhältnis  $c_r$  haben im Schnitt eine Werteabnahme von 2,7% respektive 2,5% zu verzeichnen.

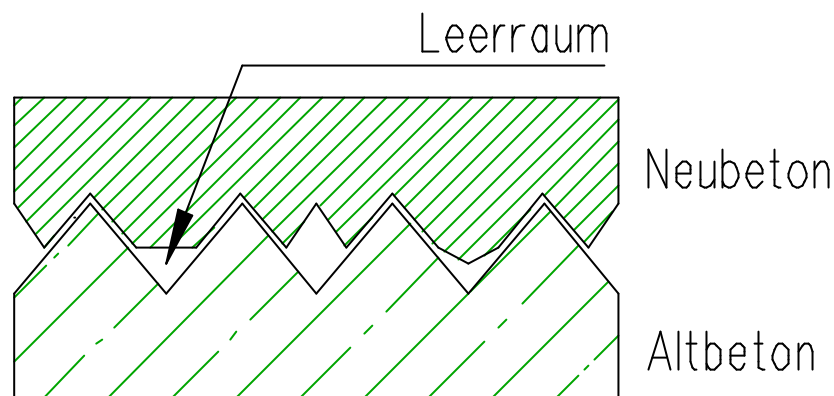


Abb. 8.30 : Grafische Darstellung der Leerräume zwischen Alt- und Neubeton

Abb. 8.30 zeigt eine grafische Darstellung der Schnittstelle zwischen Neu- und Altbeton, die Leerräume zwischen den beiden Bauteilen sind deutlich zu erkennen. Diese Leerräume führen offensichtlich zu der allgemeinen Abminderung der Oberflächenkenngrößen.

### 8.6.2 Die dynamische Beanspruchung

In diesem Teil der Arbeit wurde versucht, den Einfluss der Rauheit auf die Steigerung der Kraftübertragung zwischen dem Betonuntergrund und der aufbetonierten Schicht herauszufinden. Zusätzlich wurde untersucht, ob und warum verschiedene Zuschlagssieblinien Einfluss auf die Reibungskräfte und die mögliche Verschleißerscheinung haben. Im Folgenden sind die untersuchten Eigenschaften und Einflüsse aufgeführt:

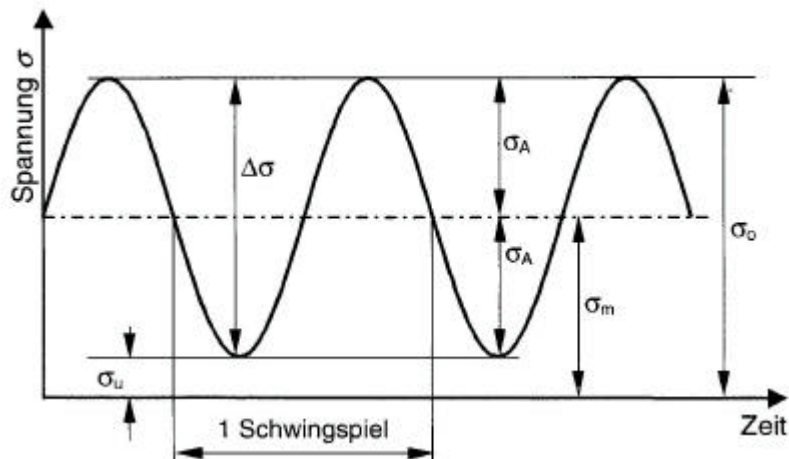
- Rauheit
- Zuschlagssieblinien
- Unterschiedliche Betonfestigkeiten von Alt- und Neubeton

Um die oben genannten Einflüsse zu untersuchen, wurden dynamische Belastungen durchgeführt. Sie wurden durchgeführt mit dem Ziel, Wöhlerlinien zu erzeugen, die den Effekt der verschiedenen Einflüsse auf die maximale Beanspruchungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der untersuchten Proben hervorheben.

Zuerst werden die allgemeinen Größen und Bezeichnungen für die nicht ruhenden Belastungen dargestellt. Zu diesem Zweck werden in Abb. 8.31 die Bezeichnungen nach DIN 50100 [8.9] dargestellt. Darin ist

- ◆  $\Delta s$  die Spannungsschwingbreite
- ◆  $s_m$  die Mittelspannung
- ◆  $s_A$  die Spannungsamplitude
- ◆  $s_o$  die obere Spannung
- ◆  $s_u$  die untere Spannung.

In Abb. 8.32 sind die Beanspruchungsfälle dargestellt.



Mit  $\Delta s = s_o + s_u = 2s_A$        $s_m = (s_o + s_u) / 2$        $s_A = (s_o - s_u) / 2$

Abb. 8.31 : Periodische Beanspruchung, [8.6]

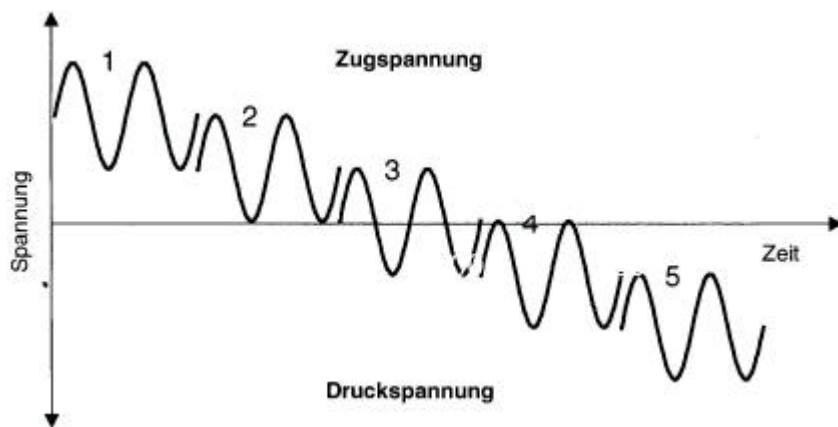


Abb. 8.32 : Beanspruchungsbereiche [8.6]

Die Beanspruchungsbereiche sind in DIN 50100 [8.9] definiert. In [8.6] werden sie wie folgt unterteilt:

- |                                 |                         |
|---------------------------------|-------------------------|
| (1) Zugschwellbeanspruchung     | $s_o > 0$ and $s_u > 0$ |
| (2) Zugursprungsbeanspruchung   | $s_o > 0$ and $s_u = 0$ |
| (3) Reine Wechselbeanspruchung  | $s_o = -s_u$            |
| (4) Druckursprungsbeanspruchung | $s_o = 0$ and $s_u < 0$ |
| (5) Druckschwellbeanspruchung   | $s_o < 0$ and $s_u < 0$ |

### 8.6.2.1 Die Wöhlerlinien

August Wöhler beschrieb 1858 den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schwingspiele und der Festigkeit für den Werkstoff Stahl. Er trug die Ergebnisse in ein Koordinatensystem mit der Bruchschwingspielzahl als Abszisse und dem Spannungsausschlag als Ordinate ein. Die so erhaltenen Diagramme wurden dann als „Wöhlerkurven“ oder „Wöhlerlinien“ bekannt, [8.5]. Die Wöhlerlinien in dieser Arbeit wurden mit Hilfe des "Interaktionsverfahrens" erstellt, [8.6].

Für das weitere Vorgehen sind einige Definitionen für die Begriffe „Dauerfestigkeit“ und „Zeitfestigkeit“ angebracht. Laut DIN 50100 [8.9] gilt:

- Die Dauerschwingfestigkeit (kurz Dauerfestigkeit genannt) ist der um eine gegebene Mittelspannung schwingende größte Spannungsausschlag den eine Probe „unendlich oft“ ohne Bruch und ohne unzulässige Verformung aushält.
- Die Zeitfestigkeit (kurz Zeitfestigkeit oder auch Ermüdungsfestigkeit genannt) ist der Spannungswert  $s_D$  für Bruch-Schwingspielzahlen  $N$ , die geringer sind als die Grenz-Schwingspielzahl.
- Die Schadenslinie gibt an, bis zu welcher Schwingspielzahl eine Dauerbeanspruchung im Gebiet der Zeitfestigkeit ertragen werden kann, ohne dass eine Schädigung des Werkstoffes eintritt.

In Abb. 8.33 ist die Schadenslinie dargestellt.

Darin ist:

- |           |  |
|-----------|--|
| Bereich 1 | Bereich der Überbeanspruchung mit Werkstoffschädigung    |
| Bereich 2 | Bereich der Überbeanspruchung ohne Werkstoffschädigung   |
| Bereich 3 | Bereich der Beanspruchung unterhalb der Dauerfestigkeit. |

DIN 50100 macht darauf aufmerksam, dass die verschiedenen Verfahren zur Ermittlung der die Dauerfestigkeit nicht notwendigerweise die gleiche Schadenslinie ergeben. Die ermittelten Schadenslinien werden im Folgenden als die gesuchten Wöhlerlinien betrachtet.

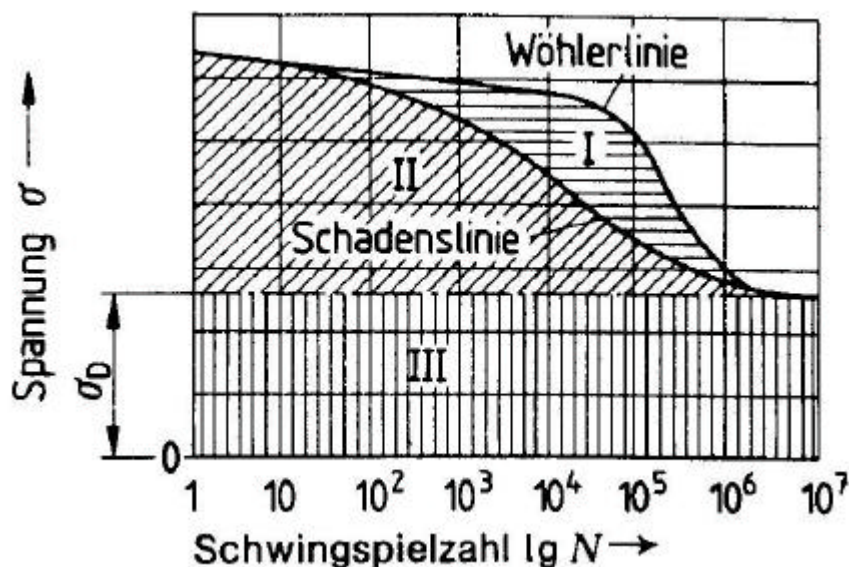


Abb. 8.33 : Erweitertes Wöhlerlinienschaubild mit Schadenslinien nach DIN 50100

Zur Ermittlung der Wöhlerlinien wurde zunächst für jede Serie mindestens ein statischer Versuch durchgeführt. Diese Ergebnisse dienen als Ausgangspunkte für die weiteren dynamischen Versuche. Die statischen Versuche wurden weggesteuert durchgeführt mit einer Weggeschwindigkeit von 0,02 [mm/sec]. Nachdem Fließgrenze und Belastungsgrenze bekannt waren, konnten dann die dynamischen Versuche weiter geplant werden.

Die dynamischen Versuche waren Schwelllastversuche, bei denen die untere Last mit 2kN festgelegt wurde. Die obere Lastgrenze wurde solange vermindert, bis die Dauerfestigkeit erreicht wurde. Die Proben wurden dann bis zum Bruch belastet. Dies war im Bereich der Zeitfestigkeit möglich, aber nach Erreichen der Dauerfestigkeit wurde der Versuch ab einer Schwingspielzahl  $2 \cdot 10^6$  beendet und auf einem höheren Belastungsniveau in einem weiteren Lauf wieder belastet. Während des Versuchs wurde fortlaufend die relative Verschiebung zwischen Verstärkungsschicht und Grundkörper erfasst. Wenn diese Verschiebungen überproportional anstiegen, galt die zugehörige Schwingspielzahl als die kritische, ab der die Schadenslinie überschritten wurde. Diese Schwingspielzahlen werden gesucht.

Die Ergebnisse der einzelnen Versuche werden im Rahmen einer Diskussion dargelegt. Zuerst werden die einzelnen Ergebnisse in Tabelle 8.6, 8.7 und 8.8 für die schalungsrau belassenen Grundkörper, und in Tabelle 8.9, 8.10 und 8.11 für die aufgerauten Grundkörper dargestellt. In Abb. 8.34 wurden die Ergebnisse der schalungsrau belassenen Grundkörper und in Abb. 8.35 die Ergebnisse der aufgerauten Grundkörper grafisch dargestellt.

**Tabelle 8.6 : Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche (Serie A-schalungsrau)**

Serie	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Schwingbreite [kN]	Schwingspielzahl [N]	Grundkörper		Verstärkungsschicht	
					Wasserlagerung	Luftlagerung	Wasserlagerung	Luftlagerung
	1	2	3	4	5	6	7	8
A1-S1-schalungsrau-dyn	32	2	30	745	C20/25	C16/20	C16/20	C12/15
A1-S2-schalungsrau-dyn	33	2	31	1.115	C20/25	C16/20	C16/20	C12/15
A1-S3-schalungsrau-dyn	31	2	29	3.128	C20/25	C16/20	C25/30	C16/20
A1-S4-schalungsrau-dyn	23	2	21	58.181	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
A2-S1-schalungsrau-stat	26	2	24	1	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
A2-S2-schalungsrau-dyn	22	2	20	87.205	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
A2-S3-schalungsrau-dyn	27	2	25	210.461	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
A2-S4-schalungsrau-stat	40	2	38	1	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20

Tabelle 8.7 : Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche (Serie B-schalungsräum)

Serie	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Schwingbreite [kN]	Schwingspielzahl [N]	Gründkörper		Verstärkungsschicht	
					Wasserlagerung	Luftlagerung	Wasserlagerung	Luftlagerung
	1	2	3	4	5	6	7	8
B1-S1-schalungsräum-dyn	21	2	19	2.884.502	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B1-S1-schalungsräum-dyn-2.Lauf	33	2	31	24.154	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B1-S2-schalungsräum-dyn	28	2	26	4.228	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B1-S3-schalungsräum-stat	36	2	34	1	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B1-S4-schalungsräum-dyn	24	2	22	3.218.665	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B1-S4-schalungsräum-dyn-2.Lauf	37	2	35	3.645	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B2-S1-schalungsräum-stat	45	2	43	1	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B2-S2-schalungsräum-dyn	25	2	23	9.053	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B2-S3-schalungsräum-dyn	18	2	16	2.886.466	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B2-S3-schalungsräum-dyn-2.Lauf	29	2	27	29.167	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B2-S4-schalungsräum-dyn	26	2	24	10.015	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20

Tabelle 8.8 : Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche (Serie C-schalungsräum)

Serie	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Schwingbreite [kN]	Schwingspielzahl [N]	Gründkörper		Verstärkungsschicht	
					Wasserlagerung	Luftlagerung	Wasserlagerung	Luftlagerung
	1	2	3	4	5	6	7	8
C1-S1-schalungsräum-dyn	27	2	25	349.919	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
C1-S3-schalungsräum-dyn	17	2	15	2.220.321	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C1-S4-schalungsräum-dyn	31	2	29	2.784	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
C2-S1-schalungsräum-Stat	41	2	39	1	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
C2-S2-schalungsräum-dyn	25	2	23	2.032	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C2-S3-schalungsräum-dyn	24	2	22	21.690	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C2-S4-schalungsräum-dyn	19	2	17	1.302.347	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20

Tabelle 8.9 : Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche (Serie A-rau)

Serie	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Schwingbreite [kN]	Schwingspielzahl [N]	Gründkörper		Verstärkungsschicht	
					Wasserlagerung	Luftlagerung	Wasserlagerung	Luftlagerung
	1	2	3	4	5	6	7	8
A3-S1-rau-stat	49	2	47	1	C20/25	C16/20	C16/20	C12/15
A3-S2-rau-stat	71	2	69	1	C20/25	C16/20	C25/30	C16/20
A3-S3-rau-dyn	57	2	55	28	C20/25	C16/20	C25/30	C16/20
A3-S4-rau-dyn	24	2	22	3.395.023	C20/25	C16/20	C16/20	C12/15
A3-S4-rau-dyn-2.Lauf	43	2	41	162	C30/37	C30/37	C25/30	C12/15
A4-S1-rau-dyn	38	2	36	5.365	C20/25	C16/20	C16/20	C12/15
A4-S2-rau-dyn	30	2	28	66.442	C20/25	C16/20	C16/20	C12/15
A4-S3-rau-dyn	48	2	46	410	C20/25	C16/20	C25/30	C16/20
A4-S4-rau-dyn	30	2	28	4.082.832	C20/25	C16/20	C25/30	C16/20
A4-S4-rau-dyn-2.Lauf	40	2	38	28.578	C20/25	C16/20	C25/30	C16/20

Tabelle 8.10 : Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche (Serie B-rau)

Serie	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Schwingbreite [kN]	Schwingspielzahl [N]	Gründkörper		Verstärkungsschicht	
					Wasserlagerung	Luftlagerung	Wasserlagerung	Luftlagerung
	1	2	3	4	5	6	7	8
B3-S1-rau-stat	54	2	52	1	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B3-S2-rau-dyn	44	2	42	1.795	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B3-S3-rau-dyn	35	2	33	3.737	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B3-S4-rau-dyn	27	2	25	1.697.171	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B4-S1-rau-dyn	37	2	35	151.443	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B4-S2-rau-dyn	33	2	31	386.051	C30/37	C30/37	C25/30	C16/20
B4-S3-rau-dyn	25	2	23	3.034785	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B4-S3-rau-dyn-2Lauf	39	2	37	1.773	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15
B4-S4-rau-Stat	40	2	38	1	C30/37	C30/37	C16/20	C12/15



Tabelle 8.11 : Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche (Serie C-rau)

Serie	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Schwingbreite [kN]	Schwingspielzahl [N]	Gründkörper		Verstärkungsschicht	
					Wasserlagerung	Luftlagerung	Wasserlagerung	Luftlagerung
	1	2	3	4	5	6	7	8
C3-S1-rau-dyn	35	2	33	32.546	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C3-S2-rau-stat	49	2	47	1	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C3-S3-rau-dyn	46	2	44	1.683	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
C3-S4-rau-stat	57	2	55	1	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
C4-S1-rau-dyn	26	2	24	940.319	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C4-S2-rau-dyn	24	2	22	3.249.467	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C4-S2-rau-dyn-2Lauf	41	2	39	9.765	C25/30	C25/30	C16/20	C12/15
C4-S3-rau-dyn	31	2	29	1.500.591	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
C4-S3-rau-dyn-2Lauf	42	2	40	47.201	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20
C4-S4-rau-dyn	34	2	32	32.461	C25/30	C25/30	C25/30	C16/20

Zur Vereinfachung der Beschreibung wird hier folgendes vereinbart:

- ◆ Bei der Betonfestigkeit der Grundkörper sind die drei Gruppen der Betonfestigkeiten
  - C20/25 als niedrig
  - C25/30 als mittel
  - Und C30/37 als hoch benannt worden.
- ◆ Bei der Betonfestigkeit der Verstärkungsschichten sind die zwei Gruppen der Betonfestigkeiten
  - C12/15 als niedrig
  - und C16/20 als hoch benannt worden.

Die Wöhlerlinien wurden mit Hilfe des Interaktiven Verfahrens erstellt, [8.6]. Dafür wurde die folgende Funktion verwendet

$$\Delta S = \Delta S_D + (S_m - S_u - \Delta S_D) a^{(\lg N)^b} \quad (8.1)$$

worin

$\Delta S$  = Schwingbreite der Ermüdungsfestigkeit (Zeitfestigkeit)

$\Delta S_D$  = Schwingbreite der Dauerfestigkeit

$S_m$  = Formfestigkeit; z.B. gilt für die Zugfestigkeit  $S_m = R_m$

$S_u$  = Unterspannung

$a, b$  = positive dimensionslose Zahlen mit  $a < 1$

$N$  = Schwingspielzahl

Nach dem Interaktiven Verfahren ist es möglich, mit der unterschiedlichen Versuchsergebnisse der Mittellinie der Ermüdungsfestigkeit nach dem Prinzip des Minimums der Fehlerquadrate mit der oben genannten Funktion beschrieben werden, [8.7].

Die freien Parameter  $\Delta S_D, a, b$  werden mit einer Regressionsanalyse angepasst, um das Minimum der Summe der Fehlerquadrate aus der Differenz der Schwingbreiten zu finden. Als Ergebnis erhält man eine Mittelwertfunktion, [8.7].

Einzelheiten dieses Verfahrens werden in [8.6] bzw. [8.7] ausführlich dargestellt.

Die einzelnen Ergebnisse des Interaktiven Verfahrens sind in Tabelle 8.12 dargestellt.

Tabelle 8.12 : Ergebnisse des Interaktiven Verfahrens

	Serie		Betonfestigkeit		$\Delta S_D$	$S_m$	$S_u$	$a$	$b$	Rau/Schalungsrau	Dauerfestigkeit / Kurzzeitfestigkeit.
			Grundkörper	Verstärkungsschicht							
Schalungsrau	1	B	Hoch	Hoch	20	45	2	0,9966	4,11	-	46%
	2	B	Hoch	Niedrig	16	36	2	0,9958	3,98	-	47%
	3	C	Mittel	Hoch	17	41	2	0,9958	3,89	-	44%
	4	C	Mittel	Niedrig	15	33	2	0,996	4	-	49%
	5	A	Niedrig	Hoch	16,5	40	2	0,9959	3,9	-	43%
	6	A	Niedrig	Niedrig	14	31	2	0,9962	4	-	48%
Rau	7	B	Hoch	Hoch	27,5	56	2	0,977	2,65	137,5%	51%
	8	B	Hoch	Niedrig	22,5	46	2	0,983	2,78	140,6%	51%
	9	C	Mittel	Hoch	27,5	56	2	0,977	2,65	161,8%	51%
	10	C	Mittel	Niedrig	22,5	46	2	0,983	2,78	150,0%	51%
	11	A	Niedrig	Hoch	27,5	56	2	0,977	2,65	166,7%	51%
	12	A	Niedrig	Niedrig	22,5	46	2	0,983	2,78	160,7%	51%

In Abb.8.34 werden die berechneten Wöhlerlinien als Mittelwertfunktion aus den Versuchsergebnissen der schalungsrau belassenen Oberflächen dargestellt. Die Wöhlerlinien mit dem blauen Ton haben eine höhere Festigkeit der Verstärkungsschicht und eine gestaffelt steigende Grundkörperfestigkeit. Die Wöhlerlinien mit dem roten Ton haben eine niedrigere Verstärkungsschicht Festigkeit und eine aufsteigende Grundkörperfestigkeit. Abb. 8.35 stellt die berechneten Wöhlerlinien der aufgerauten Oberflächen dar, worin die blaue Linie die Wöhlerlinie mit dem höherem Verstärkungsschichtbetonfestigkeit darstellt. Rote Farbe kennzeichnet die mit dem niedrigeren Verstärkungsschichtbetonfestigkeit. Die ausführliche Darstellung der einzelnen Wöhlerlinien erfolgt in Anhang 9.

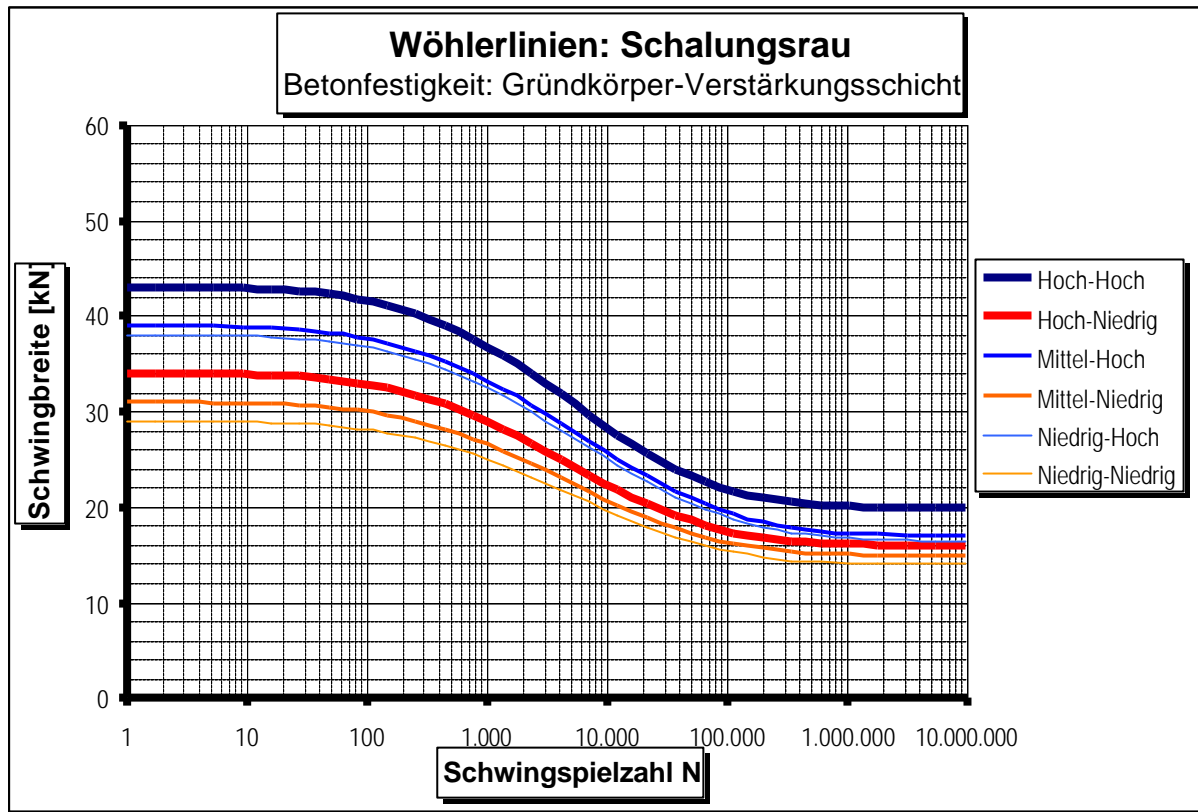


Abb. 8.34 : Wöhlerlinien für die schalungsrau belassenen Grundkörper

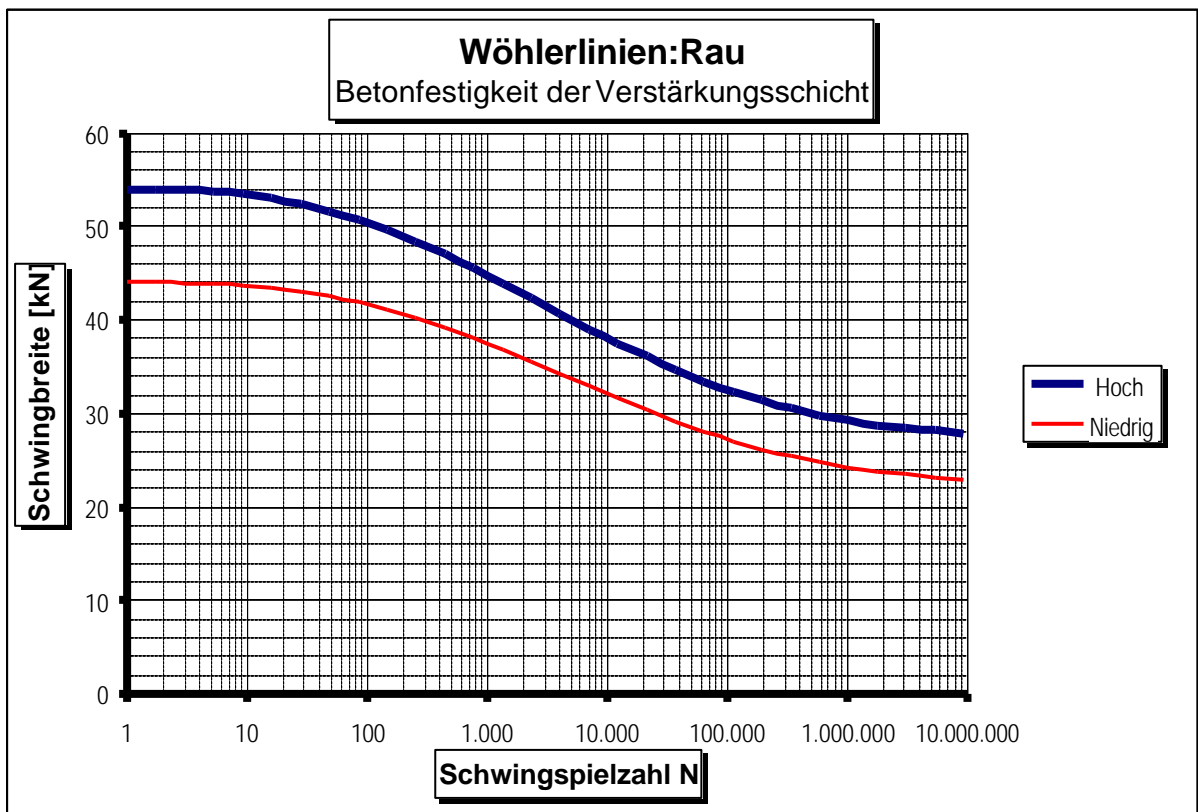


Abb. 8.35 : Wöhlerlinien für die aufgerauten Grundkörper

Zusätzlich wurden die erfassten Dehnmessstreifenwerten in Axialkräfte und Biegemomente umgerechnet, siehe Abb. 8.36. In Abb. 8.37 wird der Ansatz der Berechnungen und in Abb. 8.38 werden die resultierenden Kräfte dargestellt.

### **8.6.3 Das Schubtragverhalten**

Es ist von Interesse, das Zusammenwirken der Verankerungselemente und der Reibungskräfte sowie deren Verlauf während der Belastungsdauer und des Schädigungsprozesses zu untersuchen. Hierfür wird aus der Gesamtheit des Versuchsumfangs zuerst ein Grundkörper mit einer schalungsrau belassenen Oberfläche betrachtet und untersucht und dann mit einer aufgerauten Fläche verglichen. Um die Verhaltensunterschiede zwischen den im Bereich der Zeitfestigkeit zu Bruch belasteten Proben und den intakten Proben im Bereich der Dauerfestigkeit zu verdeutlichen, wird als Beispiel jeweils eine Probe ausführlich untersucht. Hierfür wurden die folgenden Grundkörper ausgesucht:

- ◆ Die zu Bruch belasteten Proben (Zeitfestigkeit):
  - B2-S3-schalungsrau-dyn-2.Lauf
  - B3-S3-rau-dyn
  
- ◆ Die unter Last ungebrochenen Proben (Dauerfestigkeit):
  - B1-S1-schalungsrau-dyn
  - B4-S3-rau-dyn

Die grafischen Darstellungen der Ergebnisse aller anderen Versuche sind in Anhang 8 zusammengestellt.

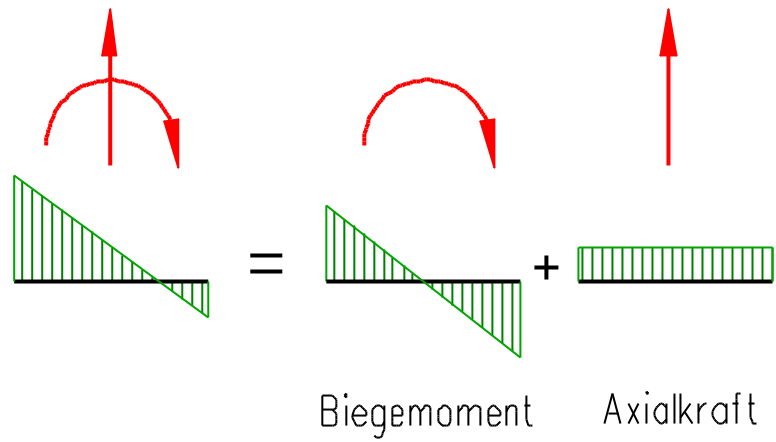


Abb. 8.36 : Das Umrechnen in Axialkräfte und Biegemomente

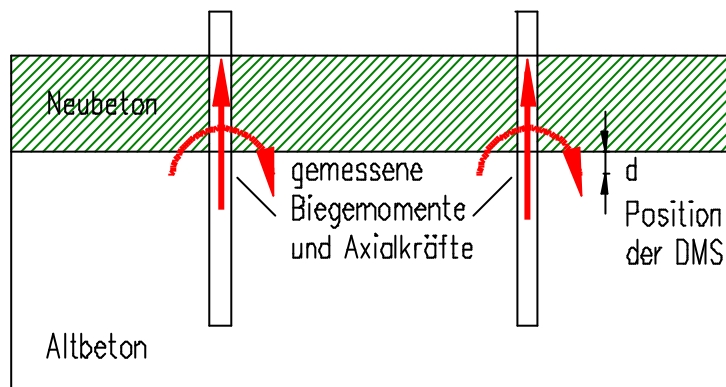


Abb. 8.37 : Die resultierenden gemessenen Kräfte

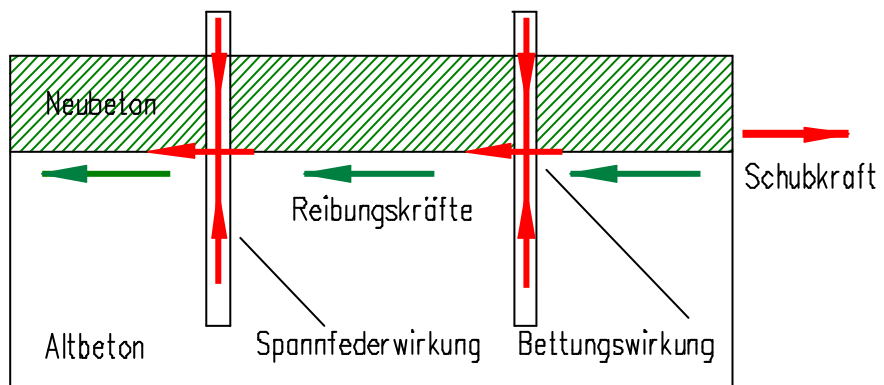


Abb. 8.38 : Die resultierenden Kräfte

### 8.6.3.1 Rissverhalten und Versagensarten

Bei allen Versuchen waren Rissverhalten und Versagensarten zwischen den Versuchskörpern mit schalungsrau belassenen Oberflächen und denen mit aufgerauten Oberflächen zu unterscheiden. Das gleiche gilt für die im Bereich der Zeitfestigkeit belasteten Versuchskörpern und denen, bei denen sich eine Dauerbelastung einstellen konnte. Um die Darstellung des Rissverhaltens zu erleichtern, wird der zeitliche Ablauf der Rissentwicklung für den Versuchskörper B3-S3-rau-dyn in den Abb. 8.40 bis 8.44 dargestellt.

In Abb. 8.40 ist zu erkennen, dass die ersten Risse im unteren Dübelbereich entstehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verankerungslänge hinter dem unteren Dübel nicht ausreicht, um die ausgeübten Kräfte zu übertragen. Dies könnte man unterbinden, indem man eine längere Verankerungslänge zur Verfügung stellt, was das allgemeine Verhalten verbessert und so die Ergebnisse steigert. Dies hätte jedoch die Grundkörpermaße vergrößert und die Handhabung und Durchführung erschwert, siehe Abb. 8.39.

Die untere Verankerungslänge

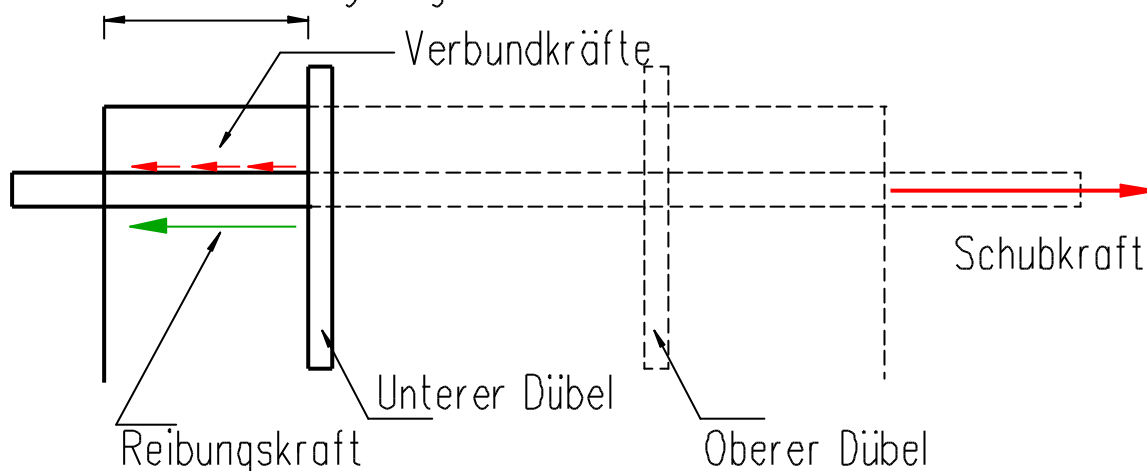


Abb. 8.39 : Die untere Verankerungslänge

In den Abb. 8.40 und 8.41 ist zu erkennen, wie sich die Risse im unteren Dübelbereich weiter entwickelten, im Bereich der oberen Dübel gleichzeitig jedoch optisch keine Risse zu erkennen sind, siehe Abb. 8.42. Dies bestätigt, dass für den oberen Dübel eine ausreichende Verankerungslänge vorhanden ist.

In den Abb. 8.43 und 8.44 ist das Versagensbild dargestellt.

Es sei ausdrücklich erwähnt, dass bei fast allen untersuchten aufgerauten Flächen die Dübel nicht durch Ermüdung versagten. Anders war es bei den schalungsrau belassenen Flächen, bei denen sich regelmäßig Ermüdungsversagen der oberen Dübel einstellte.

In den Abb. 8.45 bis 8.47 ist das endgültige Versagen der Versuchskörper C2-S4-schalungsrau dargestellt. Da keine wesentlichen Veränderungen im Rissverhalten während der laufenden Versuche zu entdecken war, wird hier auf ihre zeitliche Darstellung verzichtet. Zum Ende der Belastungsdauer hin ist die wesentliche Beobachtung, dass der obere Dübel durch Ermüdung versagte, während der untere Dübel durchgehend bei allen Versuchen intakt blieb. Wie auch bei aufgerauten Versuchskörpern endete der untere Dübelbereich früh durch klaffende Risse. Dies ist auch der Grund dafür, dass der untere Dübel intakt blieb und nicht durch Ermüdung versagte.

Die Verstärkungsschichten der aufgerauten Grundkörper wiesen am Ende der Belastung Risse auf, die sich über die gesamte Verstärkungsschicht verteilten, siehe Abb. 8.43 und 8.44. Anders war es bei den Verstärkungsschichten der schalungsrau belassenen Grundkörper, die meist weitgehend intakt blieben. Eine Ausnahme bildete hier nur der Bereich der unteren Dübel. Dies ist auf den Einfluss von Rauheit und Reibungskräften zurückzuführen. Die Rauheit beeinflusst die Verteilung der Kraftübertragung von den Erweiterungsschichten auf den Grundkörper, deshalb verteilen sich die Risse über die ganze Verstärkungsschicht. Bei den schalungsrau belassenen Flächen war aufgrund der geringeren Reibungskräfte die Kraftübertragung zwischen der Verstärkungsschicht und dem Grundkörper über die Dübel eingestellt, woraus die geringe Rissneigung folgte.

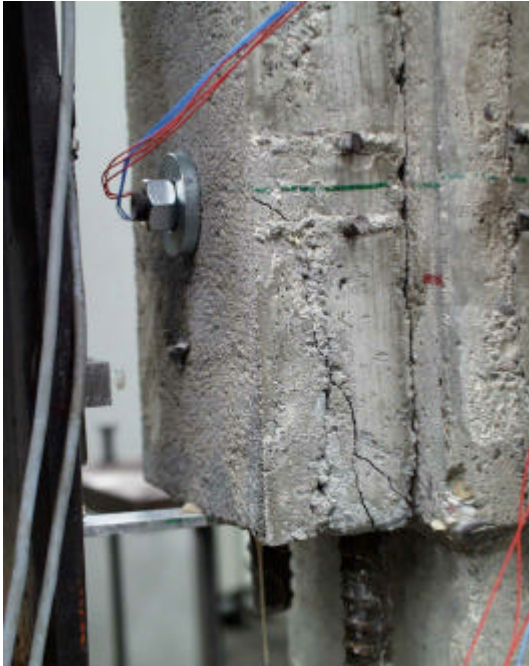


Abb. 8.40 : Bereich der unteren Dübel



Abb. 8.41 : Risse im unteren Dübelbereich



Abb. 8.42 : Ungerissener oberer Dübelbereich



Abb. 8.43 : Versagen der Verstärkungsschicht



Abb. 8.44 : Versagen der Verstärkungsschicht



Abb. 8.45 : Versagen durch Dübelermüdung



Abb. 8.46 : Heilgebliebene oberer Dübelbereich trotz Dübelversagens



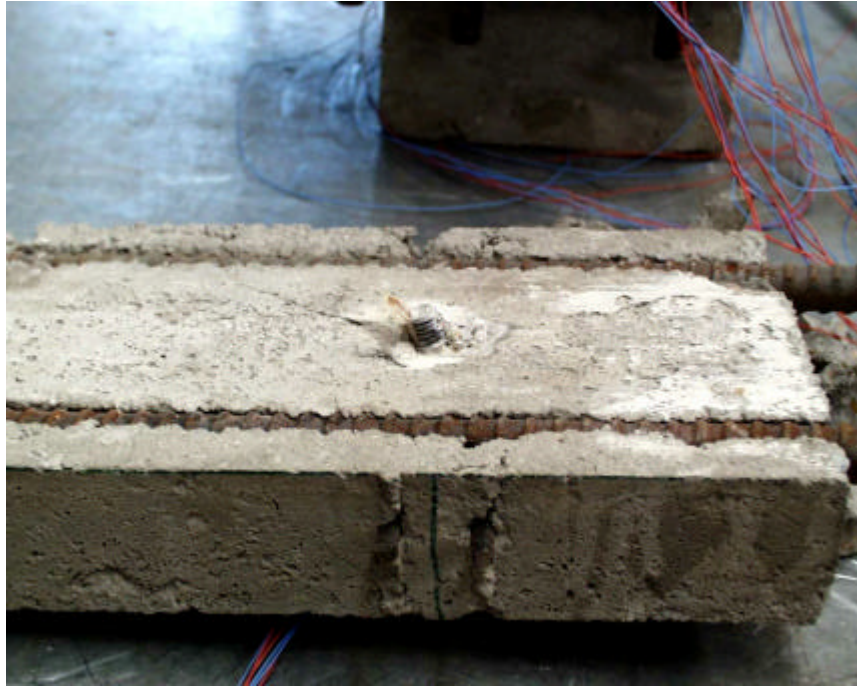


Abb. 8.47 : Durch Ermüdung gebrochene Dübel

In Abb.8.47 ist zu erkennen, wie der obere Dübel durch Ermüdung versagt hat. Das Ermüdungsversagen stellte sich dort ein, wo die DMS angebracht war. Dieser abgefräste Bereich der Fläche diente zwangsläufig als „ungewollte Sollbruchstelle“.

Es ist noch zu erwähnen, dass bei leichter Exzentrizität der Lasteinleitung Risse schon früh entstanden sind und dass diese Exzentrizität somit einen Einfluss auf die Rissbildung hatte. Um die Exzentrizität zu mindern, wurden daraufhin eine Kalotte und eine Unterlegscheibe eingesetzt. Die exzentrische Lasteinleitung konnte auf diese Weise so ausgeglichen werden, siehe Abb. 8.48.

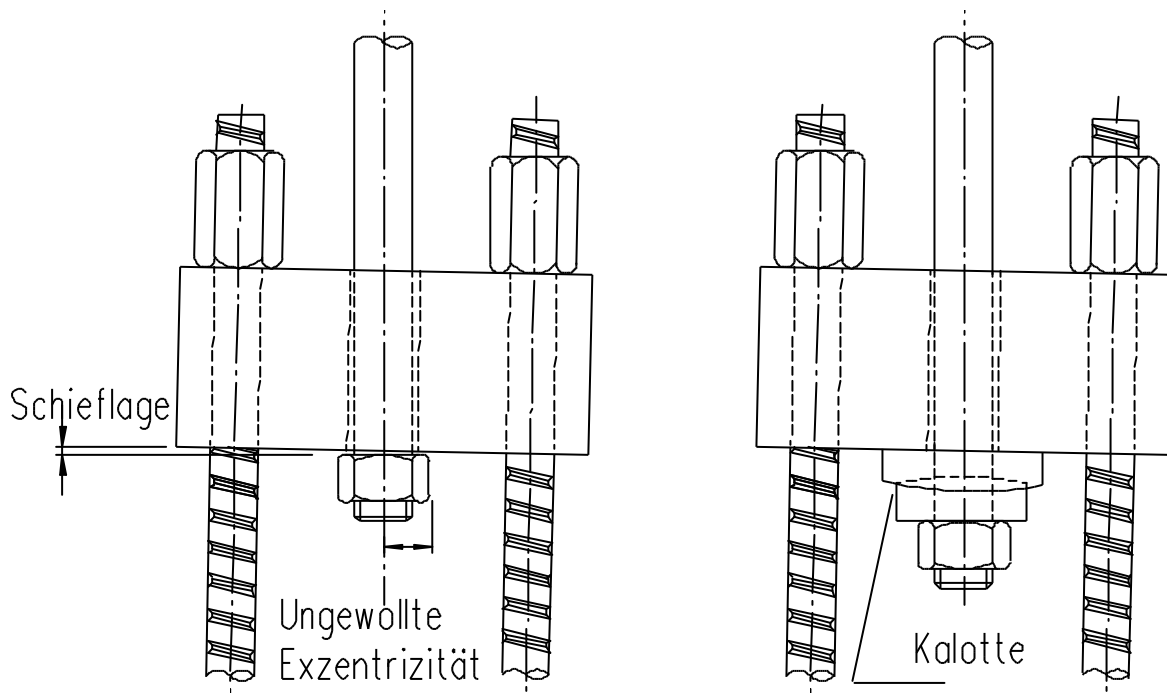


Abb. 8.48: Einsatz einer Kalotte und Unterlegscheibe zur Verminderung von Exzentrizitäten

### 8.6.3.2 Fugenverschiebung und Dübelbeanspruchung

Ein eindeutiger Unterschied im zeitlichen Ablauf der Fugenverschiebung und der Dübelbeanspruchung bei den aufgerauten und den schalungsrau belassenen Flächen konnte nicht gefunden werden, obwohl die Endergebnisse der zwei unterschiedlich vorbereiteten Flächen hinsichtlich der Höhe der Verschiebungen und der Dübelbeanspruchung im Allgemeinen klarer und deutlicher zu erkennen waren. Trotzdem soll der Ablauf der ausgesuchten Proben gezeigt werden.

Bei der allgemeinen Beobachtung der Belastung und des Verschleißverhaltens ist die Wegzunahme bis zu 90% der Beanspruchungsdauer gering geblieben, Abb. 8.49. Die Verschiebung lag dann bei 0,76 mm. Die ersten erkennbaren Risse zeigten sich schon bei etwa 40% der Beanspruchungsdauer im Bereich der unteren Dübel. Diese Rissentwicklung hatte auf die Wegzunahme offensichtlich nur wenig Einfluss. Eine Ausnahme bildet nur der plötzliche Anstieg der Axialkraft beim oberen Dübel, wenngleich die Axialkraft der unteren Dübel davon nicht beeinflusst wurde, siehe Abb. 8.50. Die Biegemomente nahmen stetig zu, siehe Abb. 8.51.

Diese allgemeine Dübelbeanspruchung entspricht eher den Erwartungen bei schalungsrau belassenen Flächen, wo die Dübel aufgrund der weitgehend fehlenden Reibungskräfte mehr auf Biegung beansprucht wurden als auf Zug. Ab etwa 90% der Beanspruchungsdauer klafften die Risse dann auf, was letztendlich zum Versagen führte. In den Abb. 8.50 und 8.51 sind die stark abnehmenden Werte, die etwa ab 70% der Belastungsdauer zu erkennen sind, keine Versagenserscheinungen, sondern vielmehr ein Abfall der Werte durch Ausfall der Dehnmessstreifen.

Die Belastbarkeit, die trotz der Risse weiterhin vorhanden war, ist auf die Verstärkungsschicht zurückzuführen, welche die Schubkräfte über die Querstäbe zum Dübel weitergeleitet hat. Um den Schädigungsprozess bei jedem Belastungszyklus untersuchen zu können, wurden für jeden zehnten Prozentanteil der Beanspruchungsdauer Hystereseschleifen dargestellt.

Die Bezeichnung „0%“ für die Hystereseschleifen wird im Folgenden als Synonym für die erste Belastungsschleife benutzt. In den Abb. 8.52 und 8.53 wird die zeitliche Entwicklung der Schubkraft-Weg-Hystereseschleifen dargestellt, und zwar sowohl für den oberen als auch für den unteren Dübel.

Bei der Probe C4-S4-Rau-dyn zeigen der obere und der untere Dübel ein ähnliches Verschiebungsverhalten; ab 90% der Beanspruchungsdauer nimmt der Weg des oberen Dübels ohne Einflussnahme auf den unteren Weg plötzlich zu, siehe Abb. 8.54. In Abb. 8.55 ist zu erkennen, dass die Axialkraft der oberen Dübel bei 60% der Beanspruchungsdauer plötzlich zunimmt, ohne dass das Biegemoment beeinflusst wird. Auch diese Entwicklung ist auf die entstandenen Risse zurückzuführen, die für die Umverteilung der Kräfte verantwortlich sind. Die Axial- und Biegemomente der unteren Dübel blieben unberührt von der Kraftverlagerung im oberen Dübel; dies ist durch den relativ früh entstandenen Riss im unteren Dübelbereich zu erklären. Der plötzliche Abfall der Axialkräfte bzw. der Biegemomente in Abb. 8.55 und Abb. 8.56 ist auf den frühen Ausfall der Dehnmessstreifen zurückzuführen.

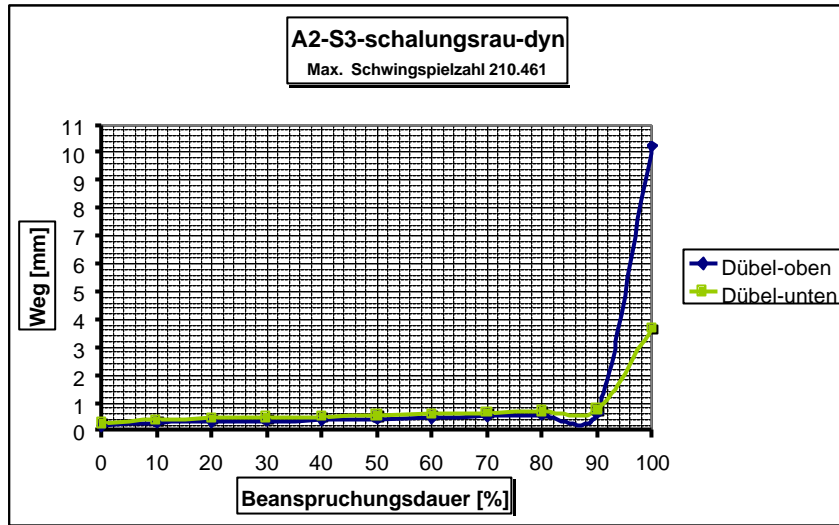


Abb. 8.49 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

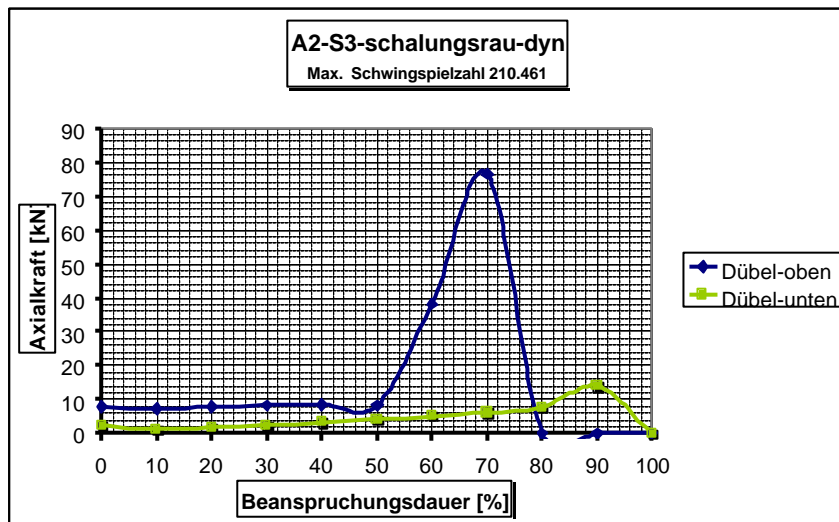


Abb. 8.50 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

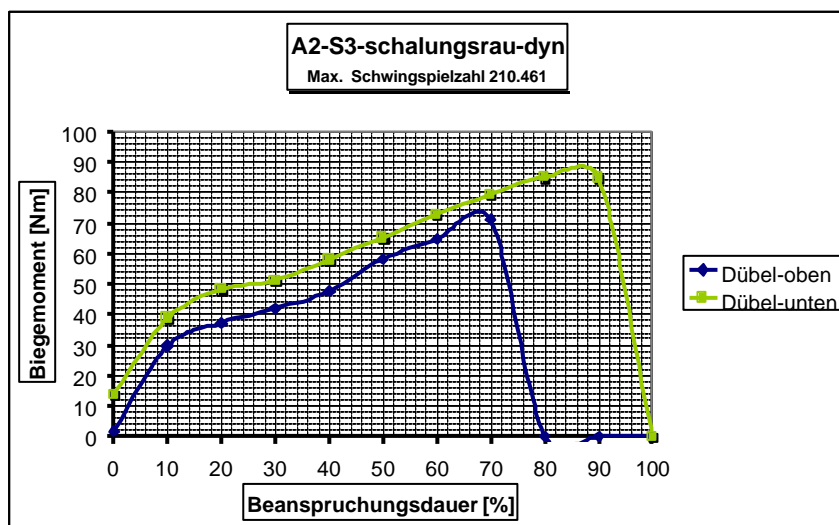


Abb. 8.51 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

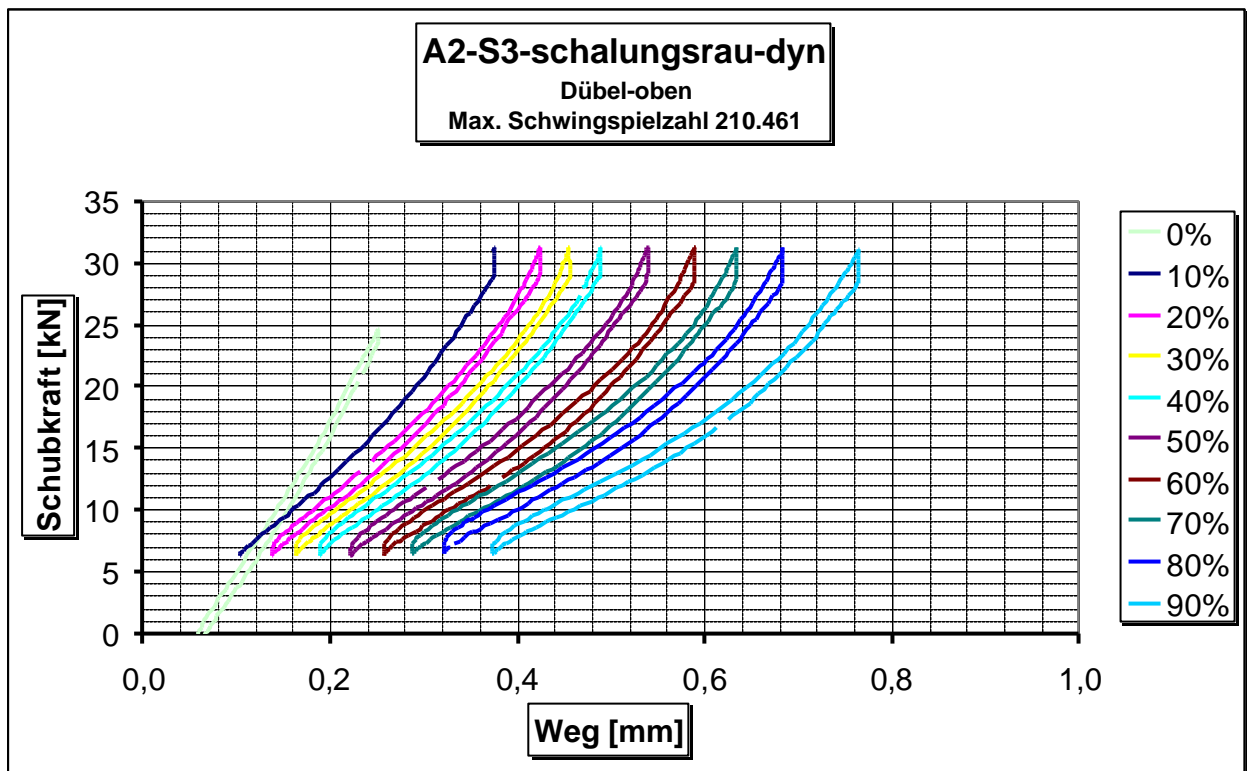


Abb. 8.52 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

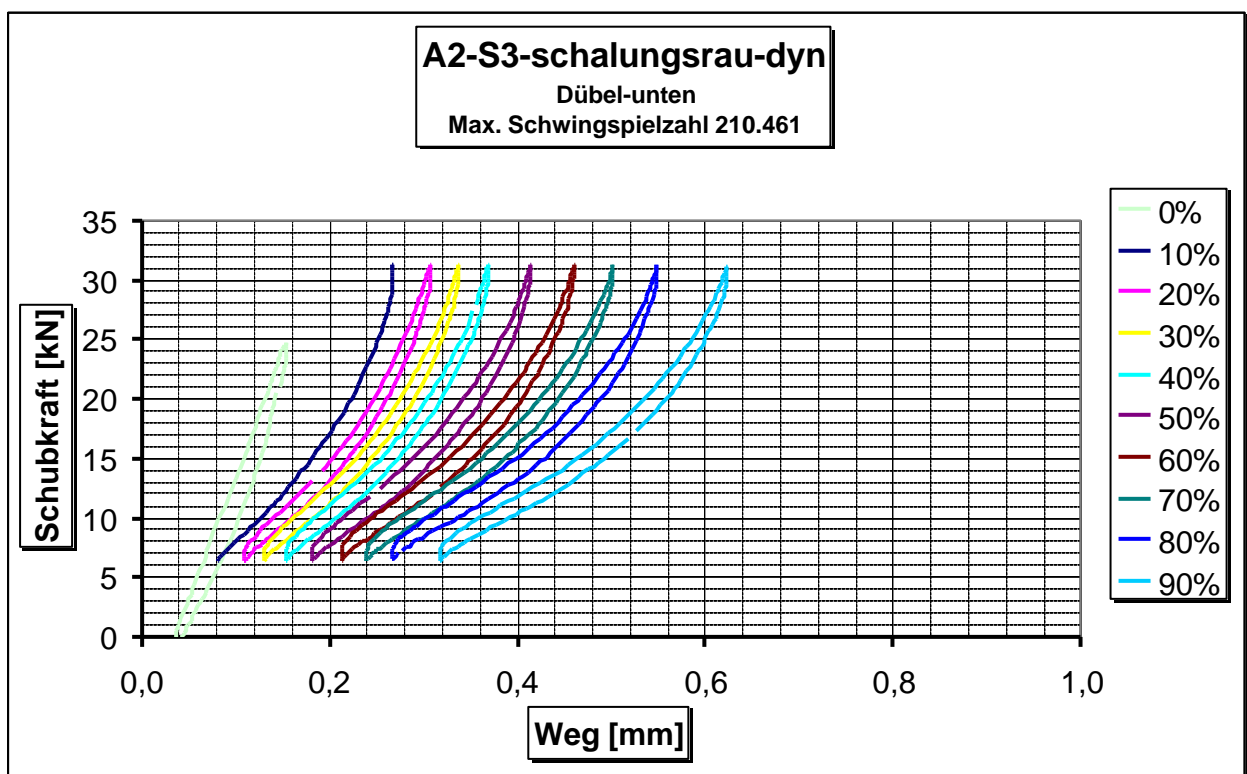


Abb. 8.53 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

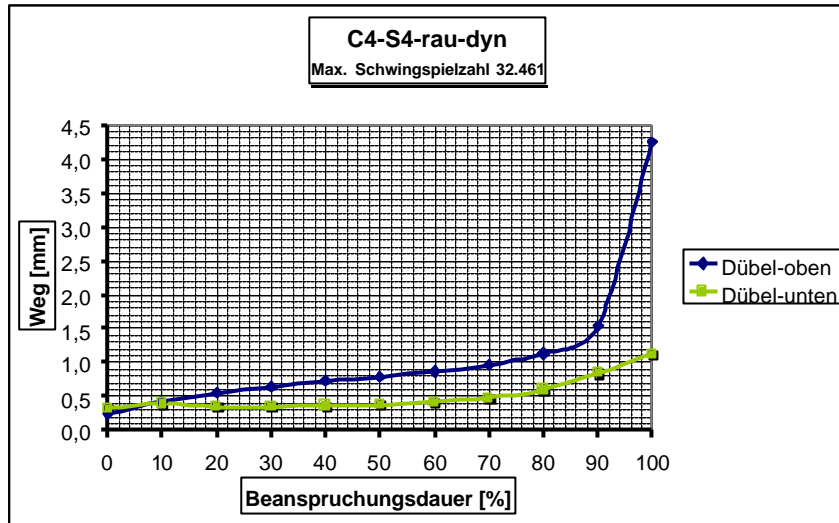


Abb. 8.54 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

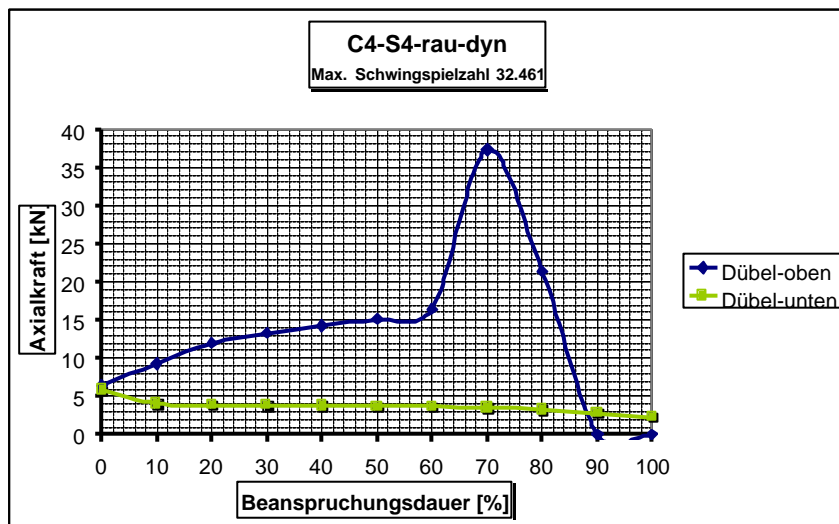


Abb. 8.55 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

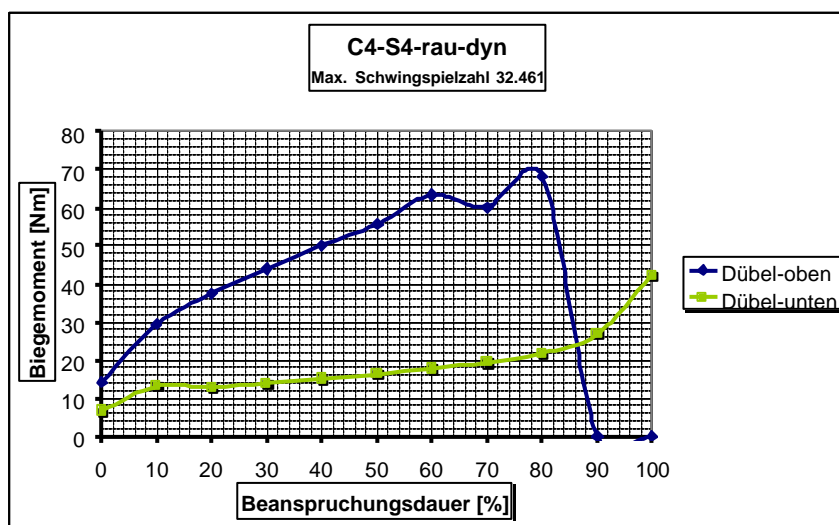


Abb. 8.56 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

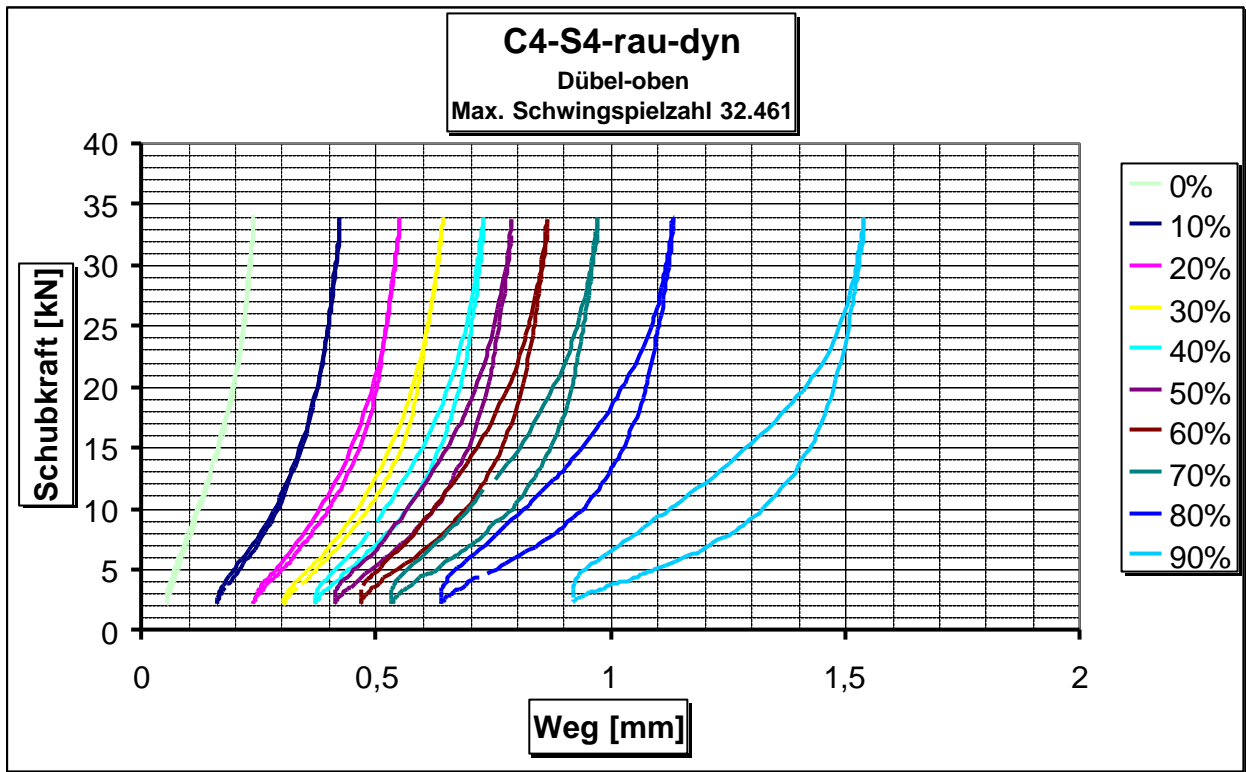


Abb. 8.57 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

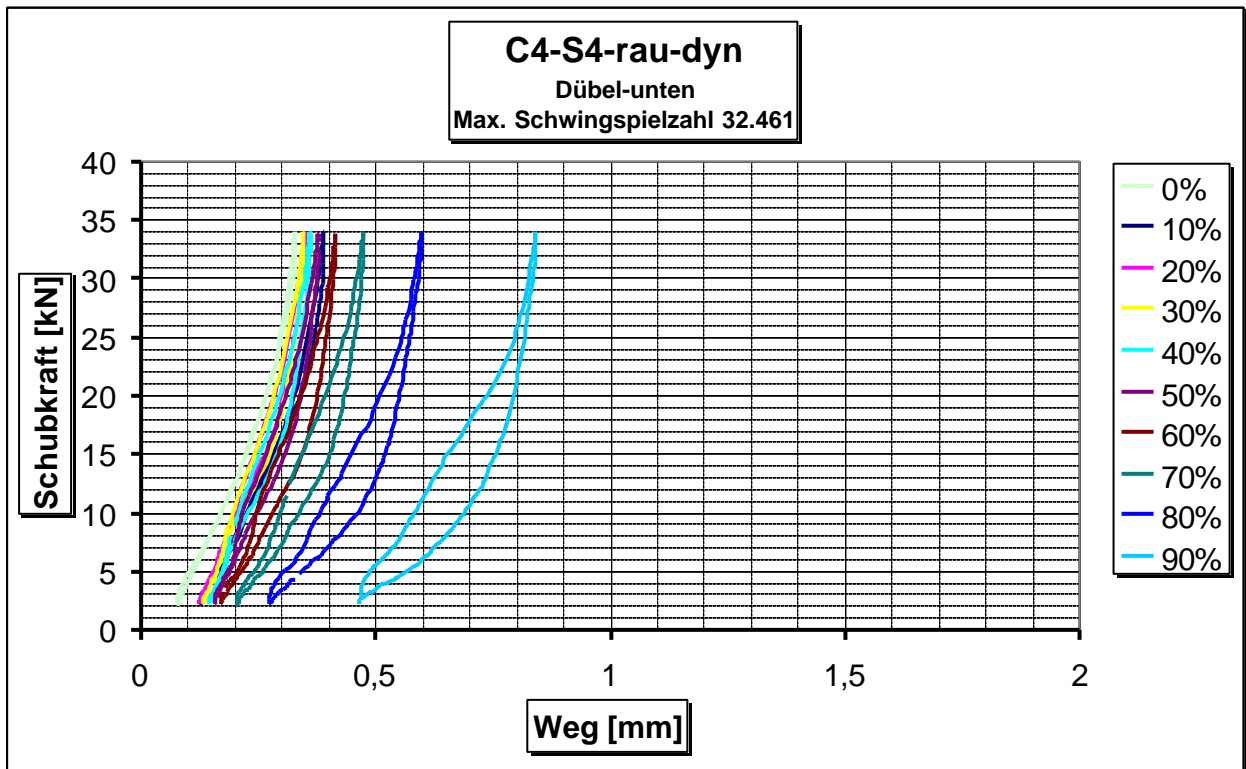


Abb. 8.58 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

In Abb. 8.59 werden zwei Hystereseschleifen der unteren Dübel betrachtet, um den Schädigungsprozess zu untersuchen zu können. Es ist zu erkennen, dass bei der Hystereseschleife 0% die Steigende Kurve des Schubkraftwiderstandes zwischen Punkt 1 und 2 ohne Verzögerung zunimmt. Dies ist auf die 2 kN Unterlast zurückzuführen, die den Kontakt zwischen den Berg- und Talseiten sichert und einen verzögerungslosen Schubwiderstand gewährleistet. Während der Entlastung sind Entlastungsast und Belastungsast zwischen Punkt 2 und 1 fast deckungsgleich; in dieser Phase der Beanspruchungsdauer waren also keine Schäden festzustellen. Gleichzeitig werden in Abb. 8.60 respektive Abb. 8.61 die Axialkräfte und Biegemomente beobachtet. Sie werden in Bezug auf die einsetzende Fugenverschiebung dargestellt. Bei einsetzender Fugenverschiebung in Schubkraft-Richtung zwingt die Rauheit die gegen die Talseiten drückenden Berge eine Abhebung der Verstärkungsschicht zu verursachen. Dies führt dann zu Axialkräften bzw. zur Federwirkung der Dübel. Gleichzeitig entstehen aufgrund der seitlichen Verschiebung Biegemomente. Die Axialkräfte und die Biegemomente stiegen zwischen Punkt 1 und 2 gleichzeitig an. Dies bedeutet, dass der Dübel sich in Richtung der Schubkraft verbiegt. Durch die Verbiegung erhält der Dübel eine Axialkomponente aus der Schubkraft, welche die Axialkraft steigert, gleichzeitig wird die Biegungskraft erzeugende Komponente kleiner. Dies wird auch „Kinking-Effekt“ genannt, [8.10]. "Kinking" bedeutet nach [8.11], Biegung oder Knickbildung in einer Kette oder einen Stahlseil.

Da die Belastung kraftgesteuert durchgeführt wurde, nimmt der Weg durch Abrieb und Verschleiß ständig zu. In Abb. 8.59 ist in der 90%-Beanspruchungsschleife zu erkennen, dass zwischen den Punkten A, B und C der Schubkraftwiderstand gleichermaßen zunimmt. Durch den fortschreitenden Verschleiß nimmt auf dem Entlastungsast (CDA) der Schubwiderstand durch die in dieser Belastungsschleife verursachten Schäden schneller ab. Am unteren Ende der Verstärkungsschicht ist ein Sonderverhalten zu beobachten. Durch die einsetzende Fugenverschiebung zwingt die Rauheit das untere Ende zum Abheben und aufgrund der mit der Zeit entwickelten Risse werden die Axialkräfte geringer, das Biegemoment jedoch steigt, siehe hierzu Anhang 7, Abb. 8.338. Dieses Verhalten schreitet fort bis die Axialkraft fast vollständig verschwindet. Dies ist in Abb. 8.60 in der 90%-Schleife der Beanspruchungsdauer zwischen Punkt A und B zu sehen. Danach nimmt die Axialkraft wieder zu, weil durch die Verbiegung die Axialkomponente der Schubkraft zunimmt (Punkt B und C).

Bei der Entlastung nimmt der Biegewinkel ab und somit auch die Axialkomponente (Punkt D). Gleichzeitig nimmt das untere Ende der Verstärkungsschicht wieder seinen Ausgangspunkt ein. Dies wirkt wie ein Hebel, der den Dübel mit einer Axialkraft belastet (Punkt A). Dieser Schädigungsprozess nimmt bis zum endgültigen Versagen weiter zu.

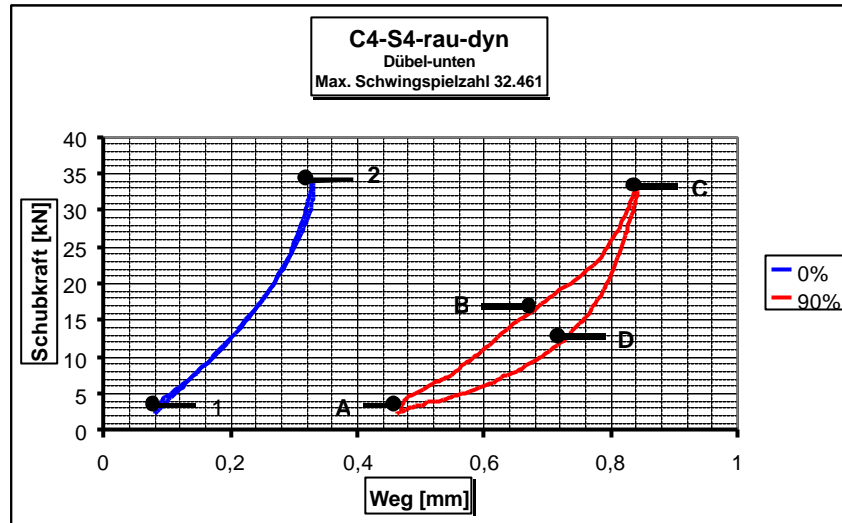


Abb. 8.59 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

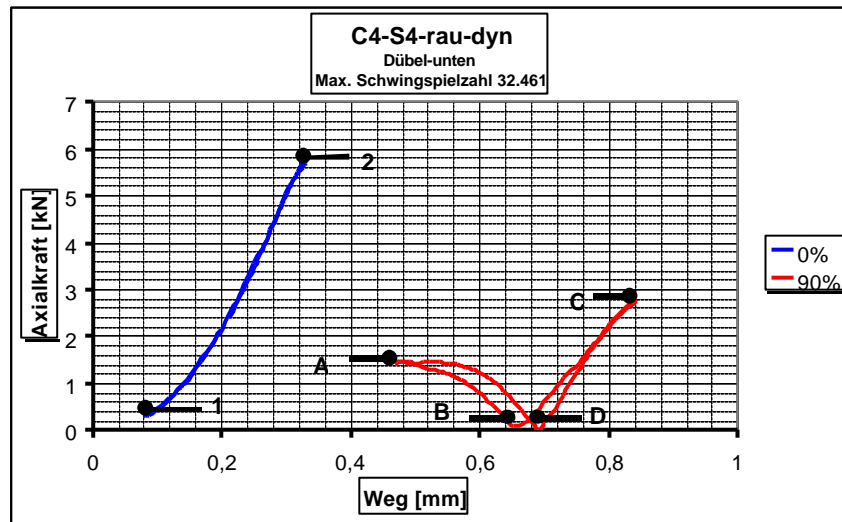


Abb. 8.60 : Weg-Axialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

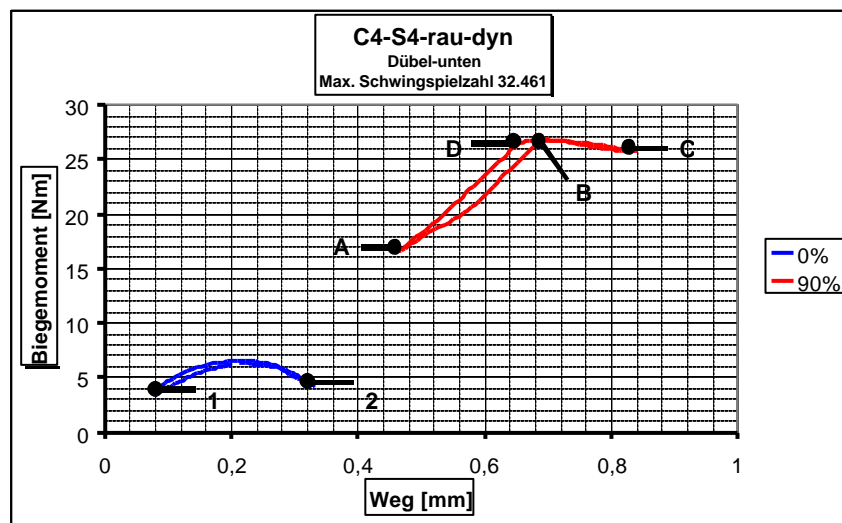


Abb. 8.61 : Weg-Biegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel



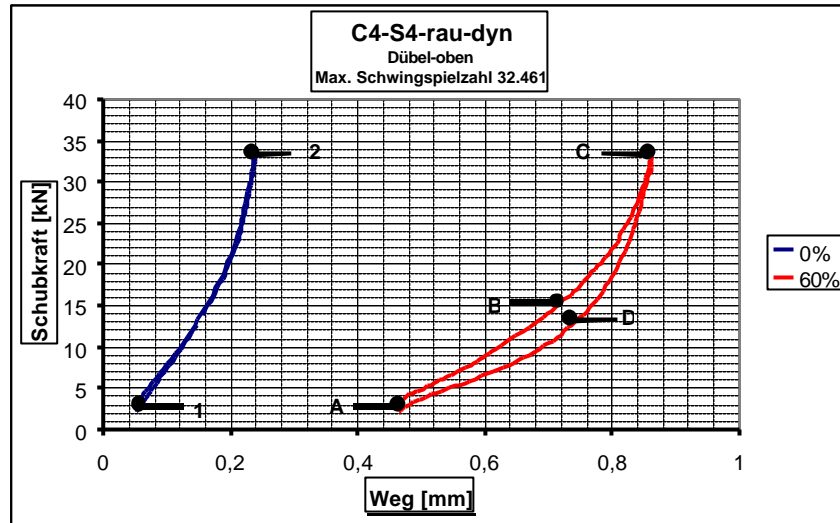


Abb. 8.62 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

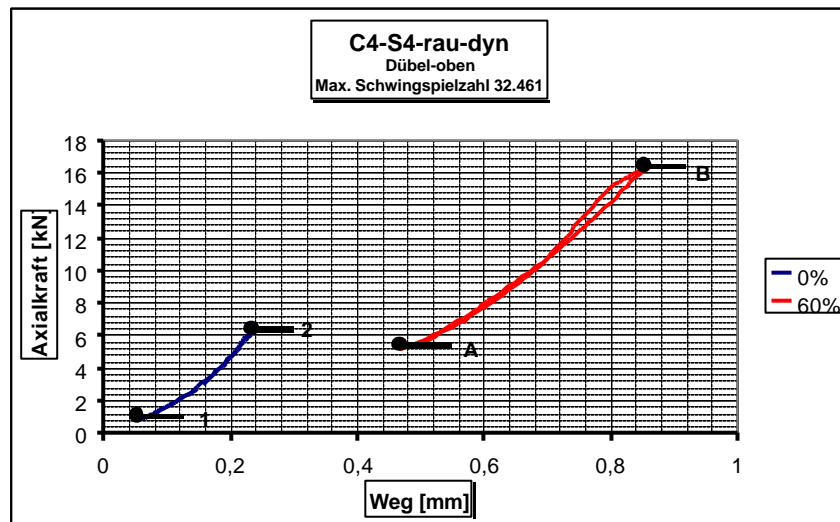


Abb. 8.63 : Weg-Axialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

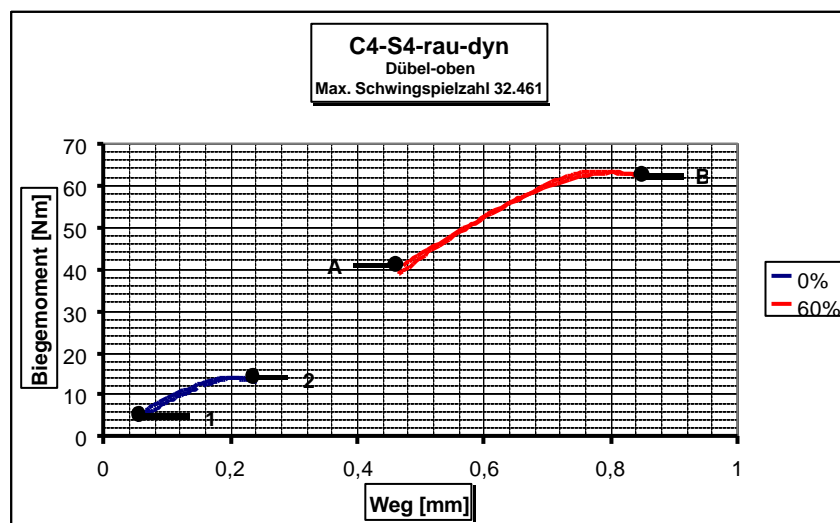


Abb. 8.64 : Weg-Biegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

Da das Weg-Schubverhalten beim oberen Dübel ähnlich aussieht, wird hier nicht weiter darauf eingegangen, Abb. 8.62. Die Axialkräfte und Biegemomente zeigen einen normalen Verlauf. Die Axialkraft steigt mit dem Biegemoment an. Der hohe Axial- und Biegemoment- Vorspannung resultiert aus Verschleiß und Verschiebung der Fuge in Richtung der Schubkraft, Abb. 8.63 und 8.64. Da im Bereich der oberen Dübel weder ein Hebelarm-Effekt noch Risse vorhanden ist, kommt ein Verhalten wie im unteren Dübelbereich nicht vor.

Bei dem Langläufer bzw. dem Durchläufer ist zuerst zu erkennen, dass die resultierenden Wege sehr kurz ausgefallen sind, Abb. 8.65. Dementsprechend waren die Axialkräfte und die Biegemomente relativ gering, Abb. 8.66 und 8.67. Trotzdem ist zu erkennen, dass das Biegemoment mit der Belastungsdauer zunahm. Aus den Abb. 8.68 und 8.69 ist zu entnehmen, wie gleichmäßig und ähnlich die Hystereseschleifen ausfielen.

Bei den aufgerauten Flächen sind die verursachten Wege geringer als bei den schalungsrau belassenen Oberflächen, Abb. 8.70. Auch hier verhielten sich die Axialkräfte und Biegemomente relativ konstant. Diese konstanten Werte dienen als Bestätigung dafür, dass die Schubkräfte nicht ausreichen, um Schäden an den Bergen zu verursachen und es zu keiner Zunahme der verursachten Wege kommt. Dies bedeutet andererseits, dass die verursachten Axialkräfte und Biegemomente konstant bleiben. In den Abb. 8.73 und 8.74 ist zu sehen, dass der Schädigungsprozess hier im Verlauf der Beanspruchungsdauer sehr gering ausfiel.

Durch die beobachtete frühe Rissentwicklung im unteren Dübelbereich wird deutlich, dass bessere Ergebnisse zu erzielen wären, hätte man sie mit konstruktiven Mitteln unterbunden, z. B. der Verlegung eine höhere Anzahl von Querstäben in der Verstärkungsschicht oder der Einsatz eines äußeren Stahlrahmens um die Verstärkungsschicht herum.

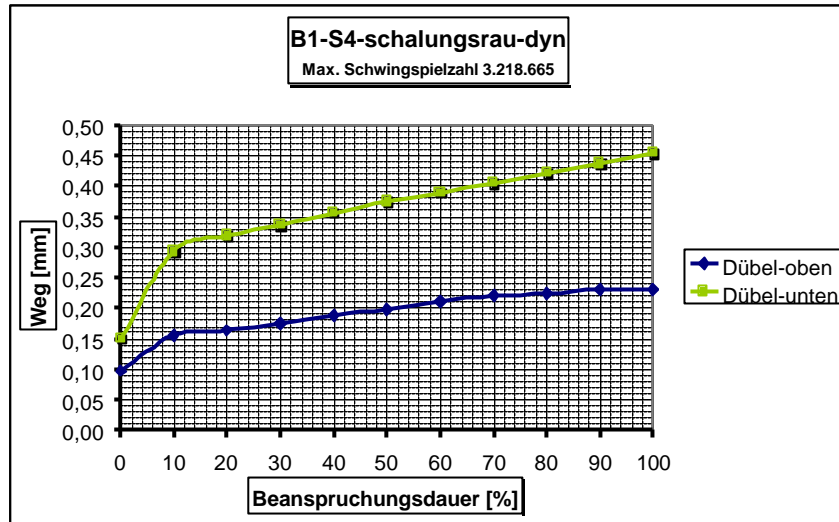


Abb. 8.65 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

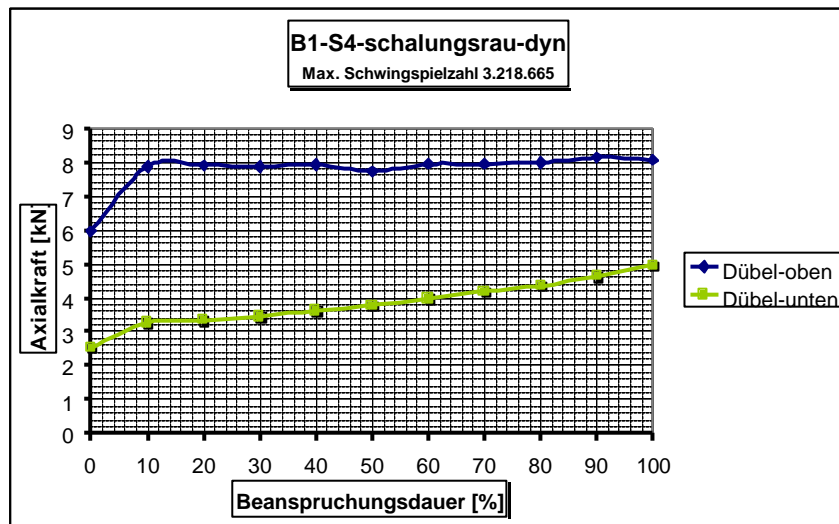


Abb. 8.66 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

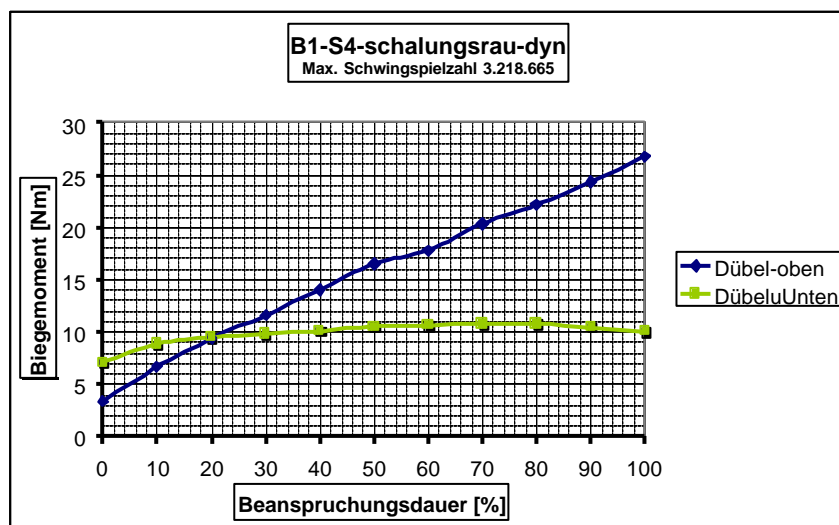


Abb. 8.67 : Dübelbiegemomente mit Zunahme der Beanspruchungsdauer

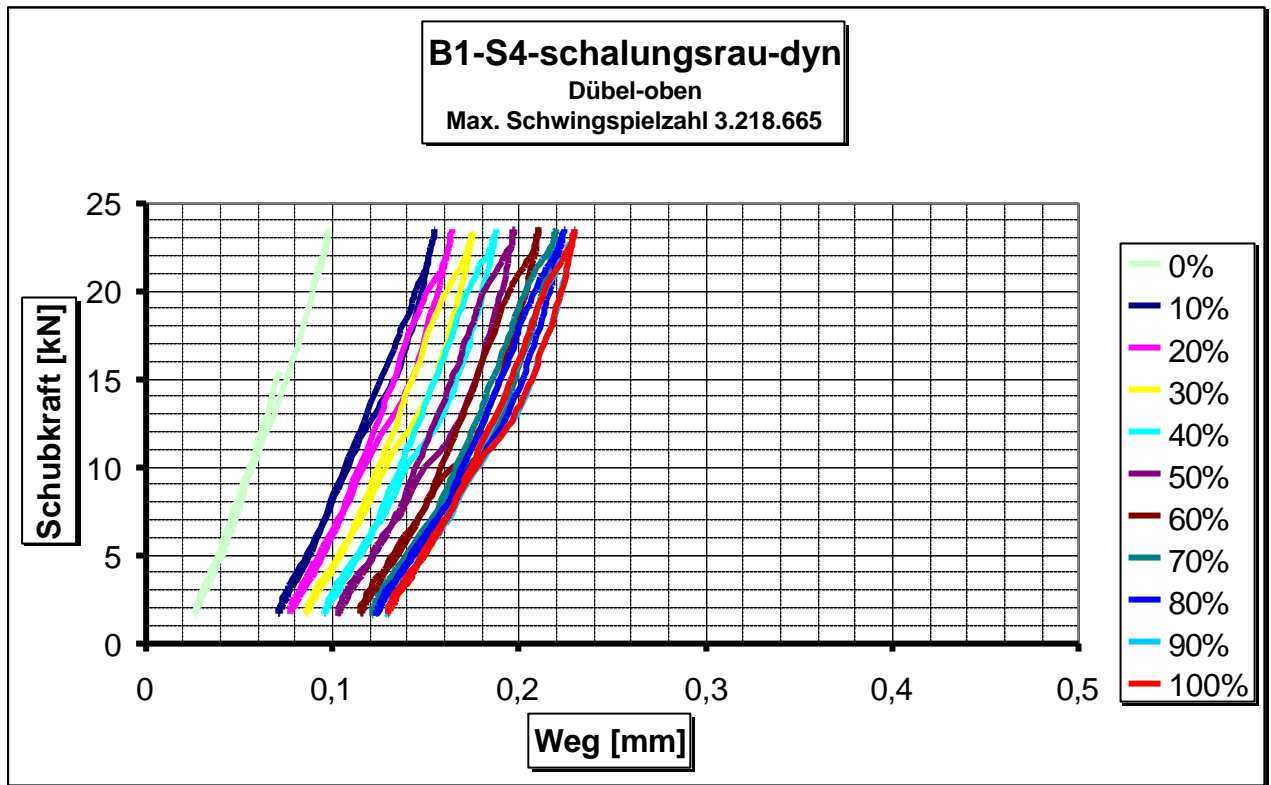


Abb. 8.68 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

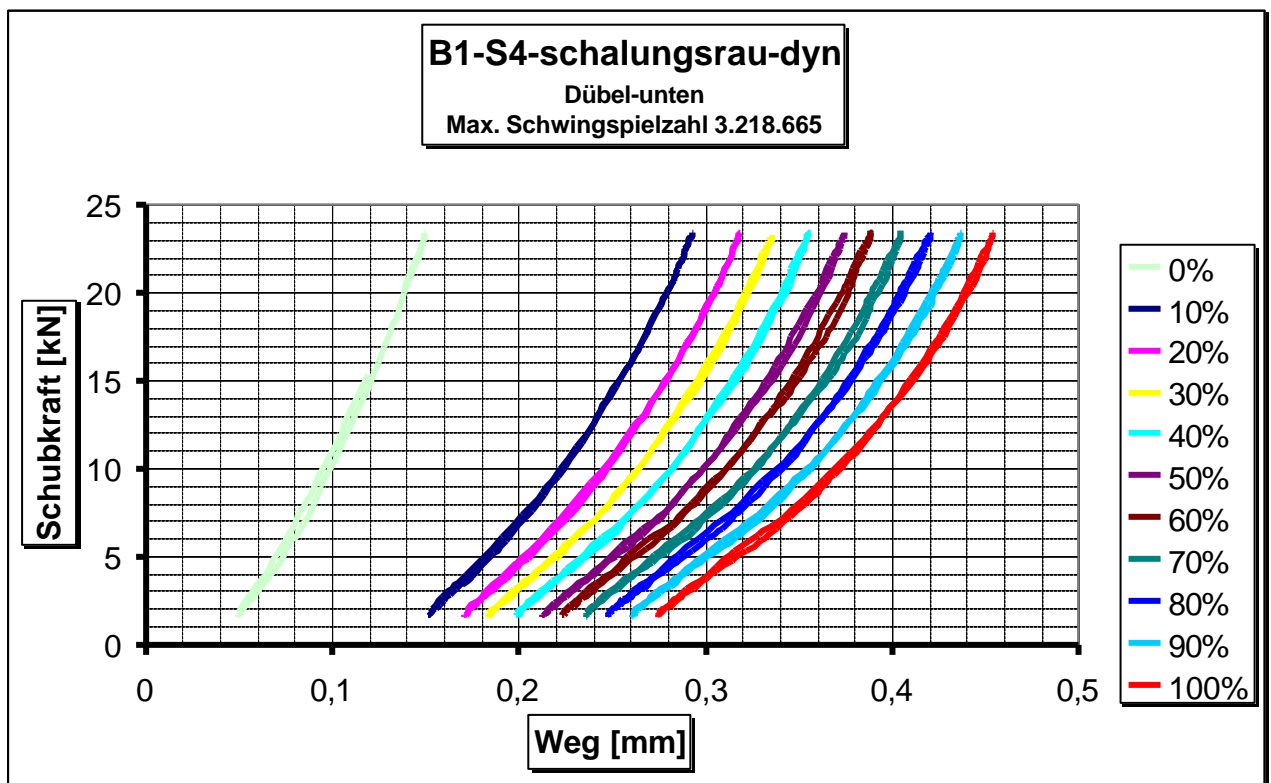


Abb. 8.69 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

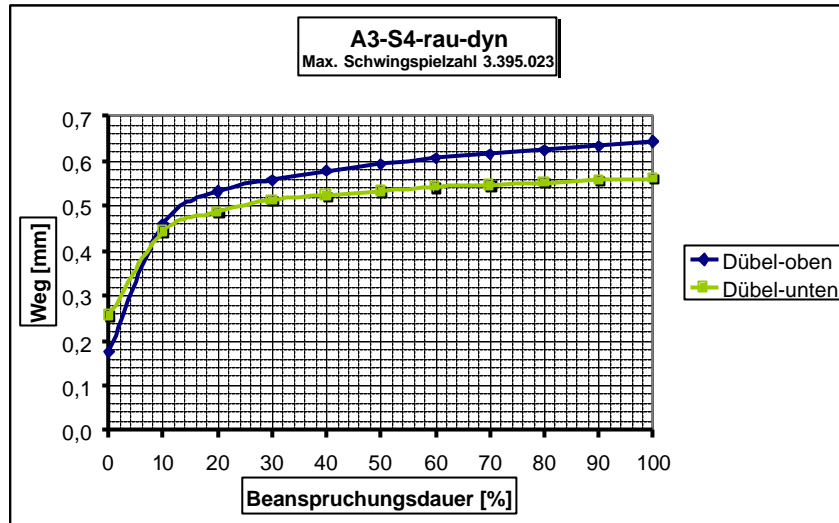


Abb. 8.70 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

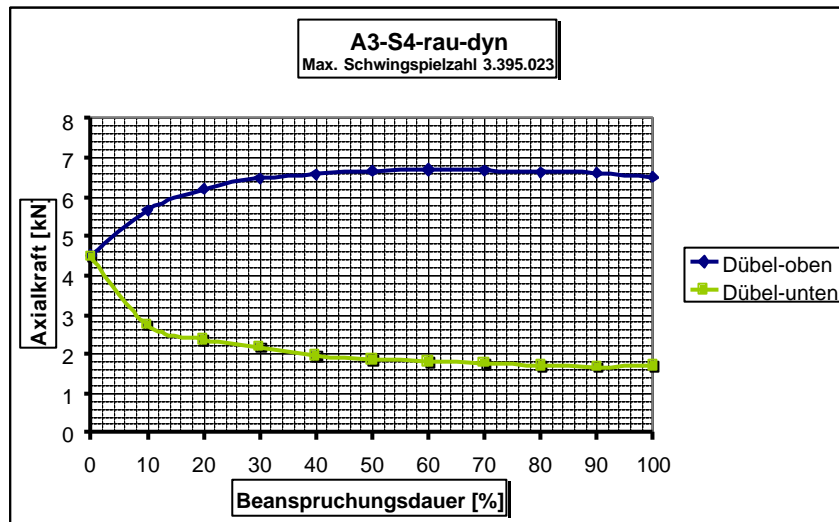


Abb. 8.71 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

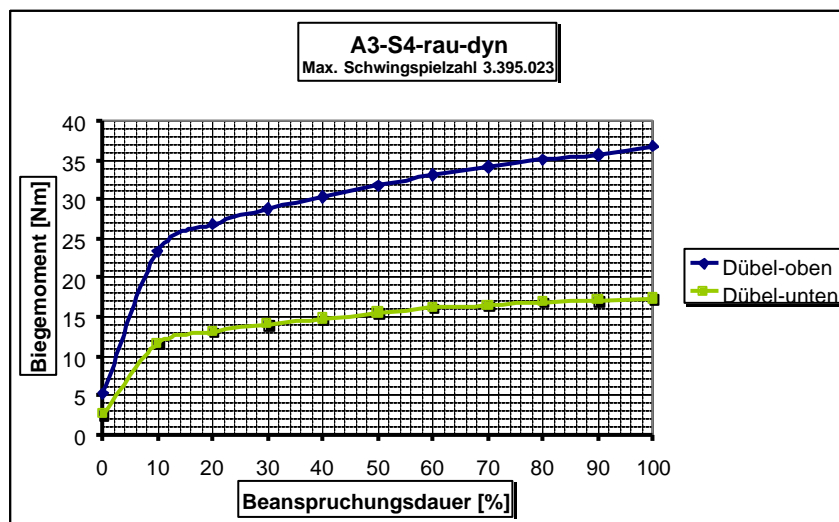


Abb. 8.72 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

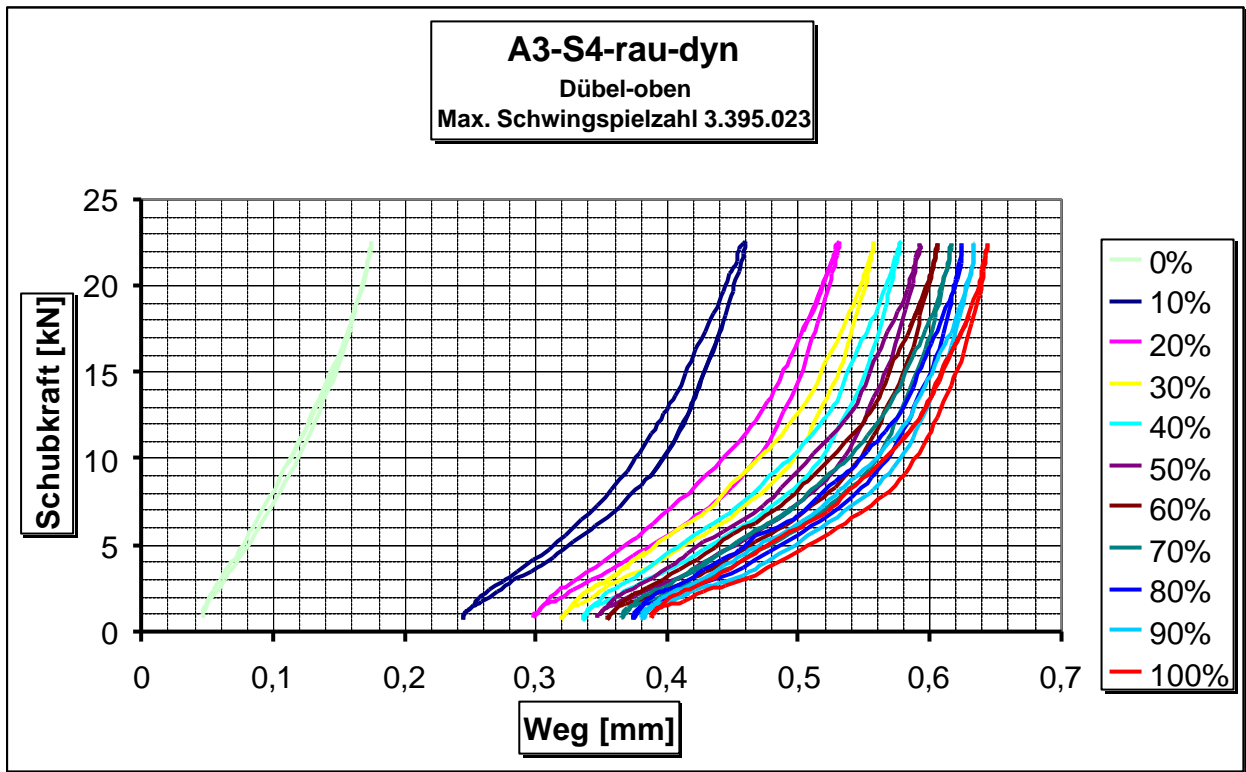


Abb. 8.73 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

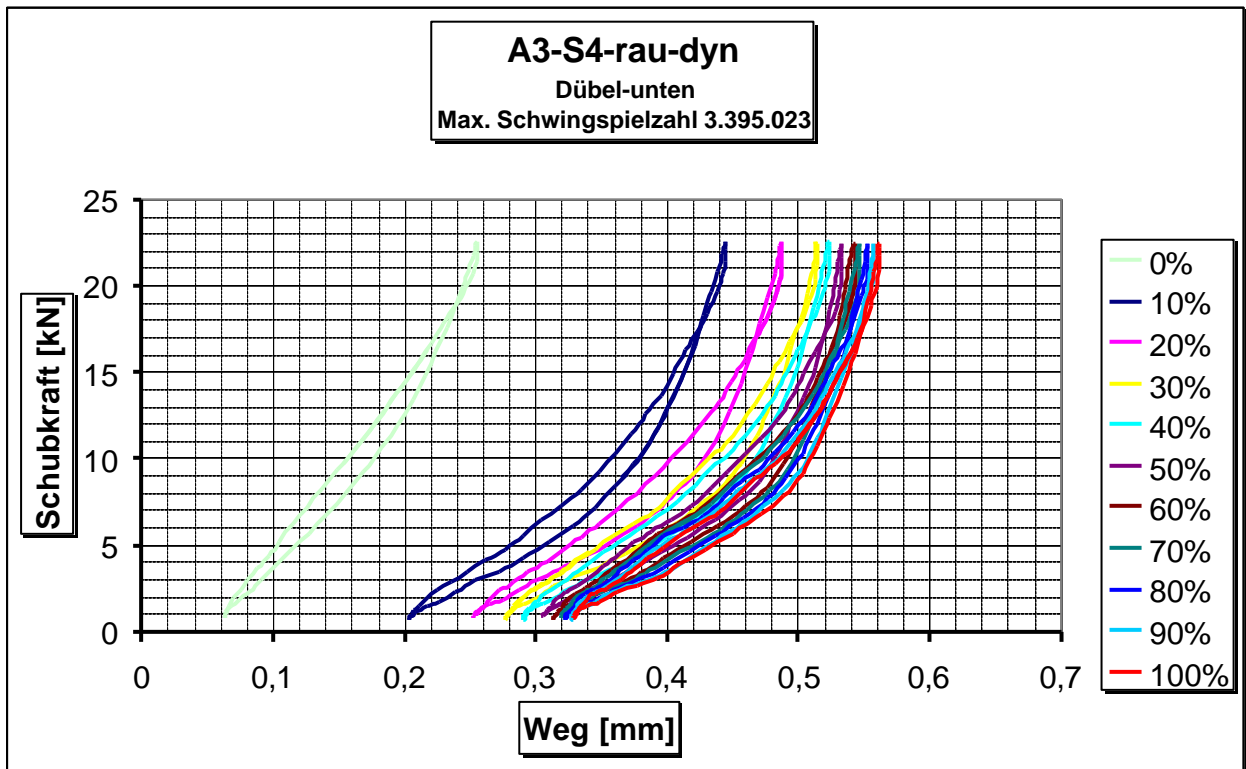


Abb. 8.74 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

Es stellt sich die Frage, warum die verschiedenen Sieblinien und somit die unterschiedliche Korngrößenverteilung keinen wesentlichen Einfluss auf die Reibungskräfte haben. Die Ergebnisse der dynamischen Versuche zeigen, dass es im Fall der Durchläufer nur zu einer sehr geringen Verschiebung kommt. Das heißt, dass die Berge der Verstärkungsschichten aus den ihnen gegenüberliegenden Tälern auf der Grundkörper-Seite nicht „herauskommen“. Vielmehr bleiben diese Berge in ihren Tälern auf der Grundkörperseite und bewegen sich relativ dazu. Die Bergseiten drücken dann an die Talseiten und verursachen, je nachdem wie hoch die ausgeübten Kräfte sind, Schäden an den Bergen. Wie schon erwähnt, besitzen die Verstärkungsschichten auf gleicher Höhe einen geringeren Materialanteil als die Grundkörper. Weiterhin kommt hinzu, dass das füllende Material auf der Seite der Verstärkungsschichten meist Zementstein ist, der eine geringere Festigkeit besitzt als der durch Sandstrahlung freigelegte Zuschlag. Diese Erkenntnis führt zu dem Ergebnis, dass die Schäden und das Abscheren auf der Verstärkungsschicht-Seite zwangsläufig geschehen müssen, siehe Abb. 8.75 und 8.76.

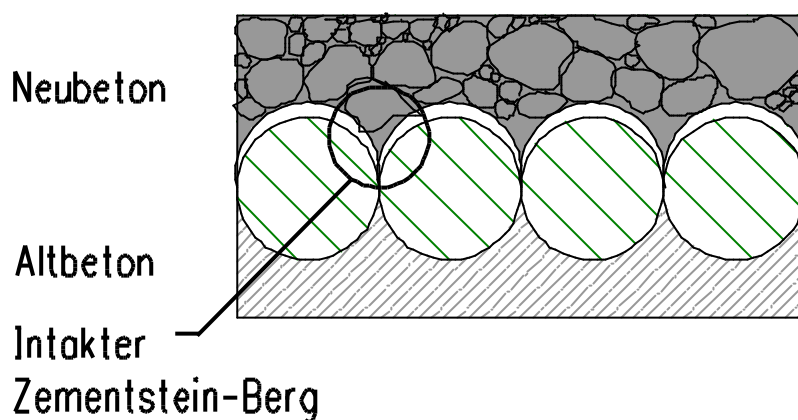


Abb. 8.75 : Unbeschädigte Zementsteinberge und intaktes mechanisches Verhaken

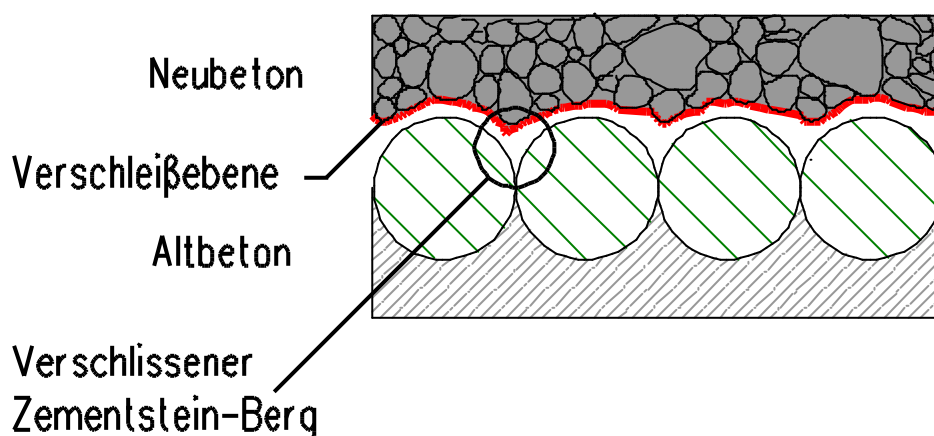


Abb. 8.76 : Verschleiß der Zementsteinberge und Beschädigung des mechanischen Verhakens

Bei den Versuchen wo die Belastung zum Versagen geführt hat und wo als Ergebnis größere Wege aufgetreten waren, war zu erkennen, dass das Zermalmen des Zementsteins auf der Seite der Verstärkungsschicht die Ursache für die längeren Wege war. Diese längeren Wege führten schließlich zu der Kräfteverlagerung, die dann Betonrisse verursachten und damit zur Schwächung der untersuchten Proben. Die Zementsteinfestigkeit spielt hier also eine größere Rolle als die Zuschläge selbst. Bei dem Versuchsaufbau war die Größe der Verschiebungsgrenze so eingestellt, dass ein Versagen auf jeden Fall eintreten konnte.

Das Versagen des Betons bzw. das Versagen der Dübel -falls der Beton halten sollte- war dann die Ursache für größere Verschiebungen, die, wenn sie die Verschiebungsgrenze überschritten hatten, die Unterbrechung des Versuches verursachten. Die Verschiebungsgrenze wurde bei 10 mm angesetzt. Die 10 mm-Grenze wurde aus den statischen Versuchen abgeleitet.

### 8.6.3.3 Schubkräfte und Reibbeiwerte

Auch die Schubkräfte und das Zusammenspiel mit der Dübelbeanspruchung wurden untersucht. Als Ergebnis wurde dann der Reibbeiwerte ermittelt. Im Voraus ist anzumerken, dass es schwer ist, die komplizierten Vorgänge nachzuvollziehen, die Dübelspannkkräfte, die Dübelbettungskräfte, die Rauheit der Oberflächen und die resultierenden Reibungskräfte stehen in Wechselwirkung. Im Folgenden wird deshalb versucht, die Versuchsergebnisse mit den verschiedenen theoretischen Berechnungsansätzen in Einklang zu bringen.

Die erfassten Werte der Dehnungsmessstreifen wurden in Axialkräfte und Biegemomente umgerechnet, siehe Abb. 8.36.

Die Berechnungen der Dübelspannkkräfte (Axialkräfte), die Dübelbettungskräfte (Dübelwirkung), und die resultierenden Reibungskräfte wurden mit Hilfe dem in [8.15] vorgeschlagenem Rechenmodell durchgeführt. Es wird hier nur die nötigen Gleichungen dieser Rechenmodell dargestellt. Die Einzelheiten werden in [8.15] wiedergegeben.

Bei der Berechnung der Schubspannungen wird die Reibfläche  $A_{nm}$  mit der in Abb. 8.77 mitwirkenden Breite eingesetzt.

Die Berechnungen sind von der Funktionsfähigkeit aller vier Dehnungsmessstreifen einer untersuchten Seite abhängig. Ein Teil der Dehnungsmessstreifen fiel jedoch während der Versuche in unterschiedlichen Beanspruchungsphasen aus. Dies störte die durchgehende Vergleichbarkeit der verschiedenen Ergebnisse erheblich.

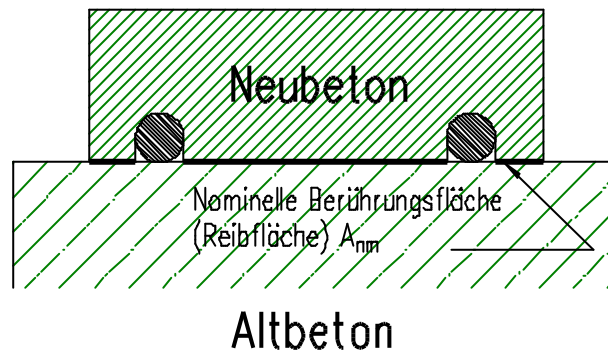


Abb. 8.77 : Die nominelle Berührungsfläche (Reibfläche), (mitwirkende Breite)



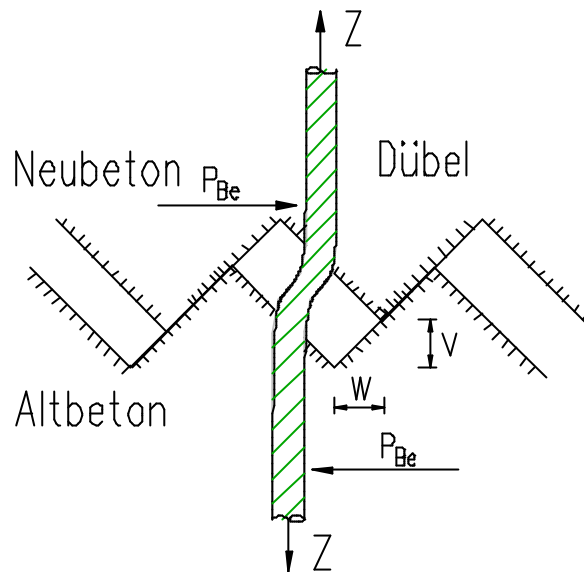


Abb. (8.78) : Die horizontale und vertikale Verschiebungen und die resultierende Spannfederwirkung und Bettungswirkung der Dübel

In [8.15] wird die folgende Beziehung zwischen den horizontalen und vertikalen Verschiebung vorgeschlagen:

$$\text{Glatt: } v = 0,2w^{2/3} \quad (8.2)$$

$$\text{Rau: } v = 0,4w^{2/3} \quad (8.3)$$

mit

$v$  die vertikale Verschiebung und

$w$  die horizontale Verschiebung zwischen Alt- und Neubeton, Abb. 8.78.

Die horizontale Verschiebung  $w$  wird aus der Ergebnisse der Versuche genommen.

Mit Gleichung 8.3 kann die folgende Gleichung 8.4 für die Zugkraft  $Z$  im Verbundmittel bestimmt werden:

$$Z = \frac{vE_s p d^2}{4h_{bd}} \quad (8.4)$$

mit

$$h_{bd} = \sqrt{\frac{vE_s d}{4f_{bd}}} \quad (8.5)$$

$h_{bd}$  die Verbundlänge der Dübel

$f_{bd}$  die Verbundfestigkeit zwischen Beton und Stahl

$E_s$  Elastizitätsmodul des Dübels

Um die Reibungskräfte und Reibbeiwerte berechnen zu können, mussten die Bettungswirkung der Dübel eliminiert werden. Die Bettungskräfte der Dübel wird im Bezug zur Verschiebung  $w$  mit folgende Gleichung berechnet [8.15]:

$$P_{Be} = \frac{w + \frac{0,56 f_{ck} h_{Pl}}{k_E E_{cm}} \left[ 4 + \frac{6h}{k_E} + \frac{4h_{Pl}^2}{k_E^2 d^2} + 5,093 \frac{h^3}{d^3} k_E \frac{E_{cm}}{E_s} \right]}{\frac{1}{k_E} d E_{cm} \left[ 2 + \frac{4h_{Pl}}{k_E d} + \frac{4h_{Pl}^2}{k_E^2 d^2} + 6,79 \frac{h_{Pl}^3}{d^3} k_E \frac{E_{cm}}{E_s} \right]} \quad (8.6)$$

mit

$$k_E = \frac{1}{2} \sqrt[4]{\frac{\rho E_s}{E_{cm}}} \quad (8.7)$$

und

- $f_{ck}$  charakteristische Betonfestigkeit  
 $E_{cm}$  mittlerer Elastizitätsmodul für Normalbeton  
 $h_{Pl}$  Plastizierungstiefe des Betons  
 $d$  Durchmesser des Dübels

Die Bettungskraft ist der Widerstand der Verbundbewehrung gegenüber den gegenseitigen Verschiebungen des Alt- und Neubetons [8.15]. Die Reibungskraft  $F_f$  wird dann mit den folgenden Gleichung berechnet:

$$F_f = F - (P1_{Be} + P2_{Be}) \quad (8.8)$$

worin

- $F$  Schubkraft  
 $P1_{Be}, P2_{Be}$  Bettungswirkungskräfte der oberen und unteren Dübel

somit ist es jetzt möglich das Reibungsbeiwert  $m$  mit Gl. 7.1 zu berechnen.

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft  $V_{Rd,sys}$  nach [8.2] wird mit folgende Gleichung berechnet:

$$V_{Rd,sys} = 0,09 k_T f_{ck}^{1/3} b + m(k a_s f_{yd} - s_{Nd} b) + a_s a_s \sqrt{f_{yd} f_{cd}} \quad (8.9)$$

Darin ist

- $0,09 k_T f_{ck}^{1/3} b$  Der Kohäsionsanteil der Schubwiderstand. Hier in diese Arbeit = 0  
 $m(k a_s f_{yd} - s_{Nd} b)$  Der Reibungsanteil der Schubwiderstand.  $s_{Nd} b$  ist in dieser Arbeit = 0  
 $a_s a_s \sqrt{f_{yd} f_{cd}}$  Der Dübelwirkung (Bettungswirkung)

Die einzelnen Ergebnisse werden später in den Tabellen 8.14, bis 8.23 detailliert dargestellt und besprochen.

Tabelle 8.13 : Ergebnisse der statischen Versuche

	Serie	Grundkörper- Betonfestigkeit	Fließkraft		Bruchkraft	
			Kraft [kN]	Weg [mm]	Kraft [kN]	Weg [mm]
	1	2	3	4	5	6
1	A2-S1-schalungsrau- stat	C20/25	23,0	0,3	26,0	3,8
2	A2-S4-schalungsrau- stat	C20/25	40,0	1,0	35,0	4,2
3	B1-S3-schalungsrau- stat	C30/37	33,0	0,3	37,0	6,3
4	B2-S1-schalungsrau- stat	C30/37	40,0	0,4	45,0	8,7
5	C2-S1-schalungsrau- stat	C25/30	35,0	0,7	41,0	7,2
6	A3-S1-rau-stat	C20/25	45,0	0,7	49,0	1,7
7	A3-S2-rau-stat	C20/25	66,0	0,4	71,0	0,67
8	B3-S1-rau-stat	C30/37	49,5	2,2	53,8	3
9	B4-S4-rau-stat	C30/37	36,6	0,9	40,3	1,87
10	C3-S2-rau-stat	C25/30	46,9	0,2	49,0	0,93
11	C3-S4-rau-stat	C25/30	49,6	1,5	56,6	2,85

In Tabelle 8.13 sind die Ergebnisse der statischen Versuche zusammengefasst. Die Abb. 8.79 bis 8.89 zeigen eine grafische Darstellung der Schubkraft-Weg-Diagramme. Es ist zu erkennen, dass die wichtige Fließgrenze unabhängig von der Oberflächenrauheit bei fast allen Versuche bei etwa 0,2 mm lag und maximal etwa 2 mm betrug. Die Unterschiede zwischen schalungsrauen und aufgerauten Flächen lagen bei den höheren Fließgrenzen, dort lagen die Werte der aufgerauten Flächen höher. Bei der Erstellung der Wöhlerlinien dienten die Ergebnisse der Belastungsgrenzwerte als Ansatzpunkt für die Berechnung der weiteren Belastungspunkte.

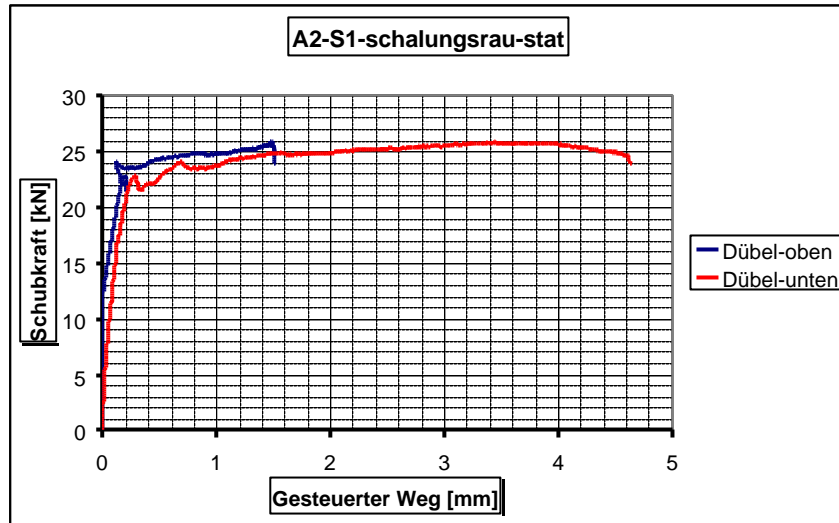


Abb. 8.79 : Statischer Schubversuch (A2-S1-schalungsrau-stat)

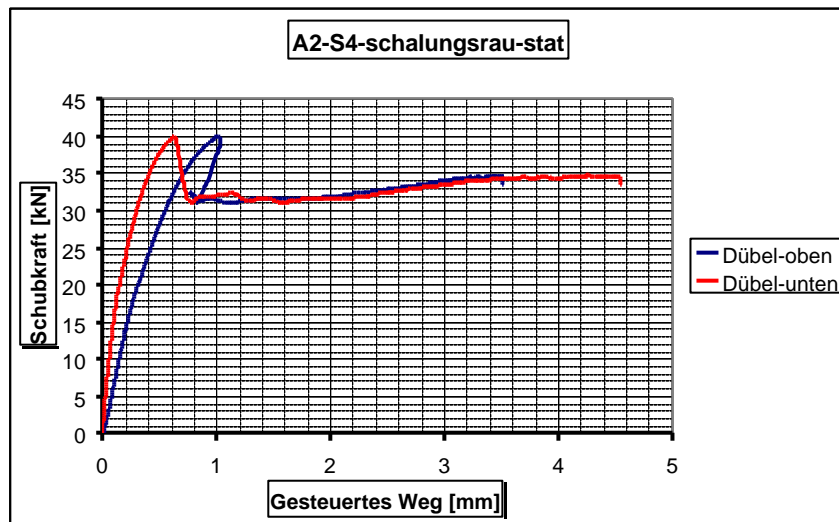


Abb. 8.80 : Statischer Schubversuch (A2-S4-schalungsrau-stat)

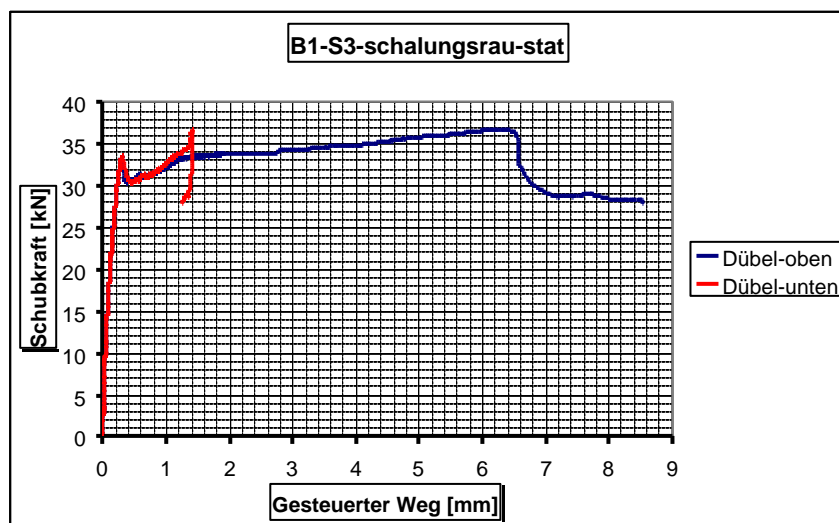


Abb. 8.81 : Statischer Schubversuch (B2-S3-schalungsrau-stat)

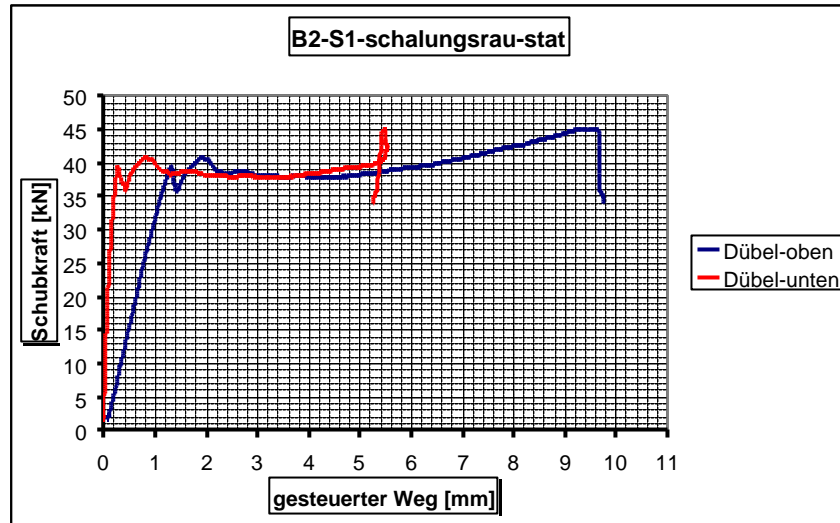


Abb. 8.82 : Statischer Schubversuch (B2-S1-schalungrau-stat)

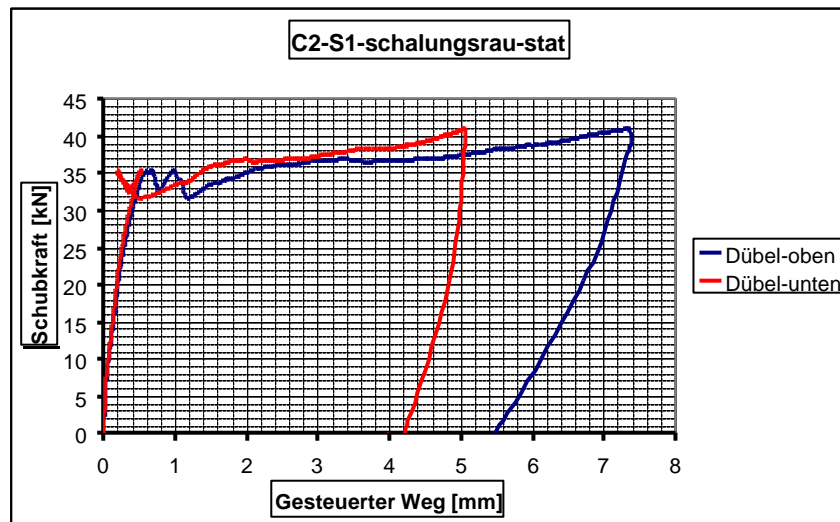


Abb. 8.83 : Statischer Schubversuch (C2-S1-schalungrau-stat)

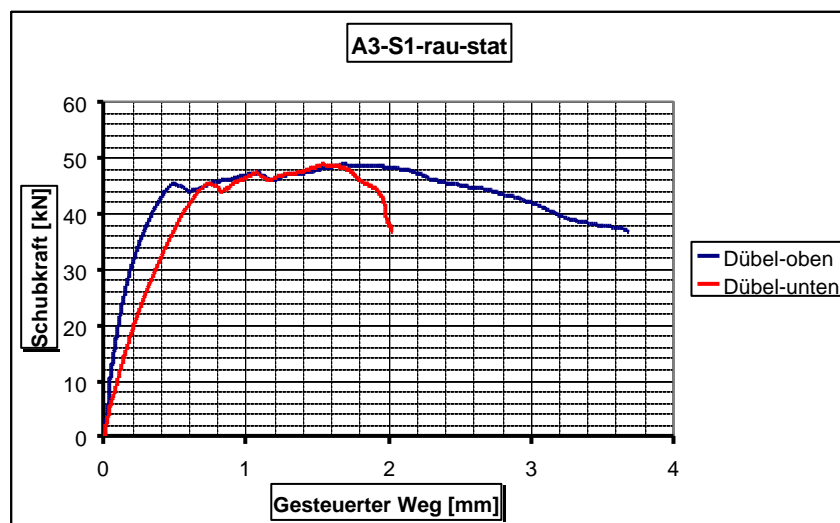


Abb. 8.84 : Statischer Schubversuch (A3-S1-schalungrau-stat)

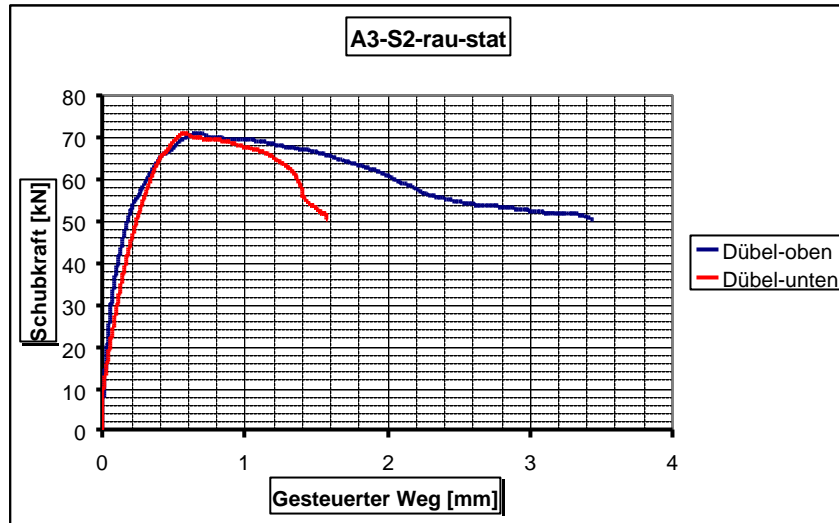


Abb. 8.85 : Statische Schubversuch (A3-S2-rau-stat)

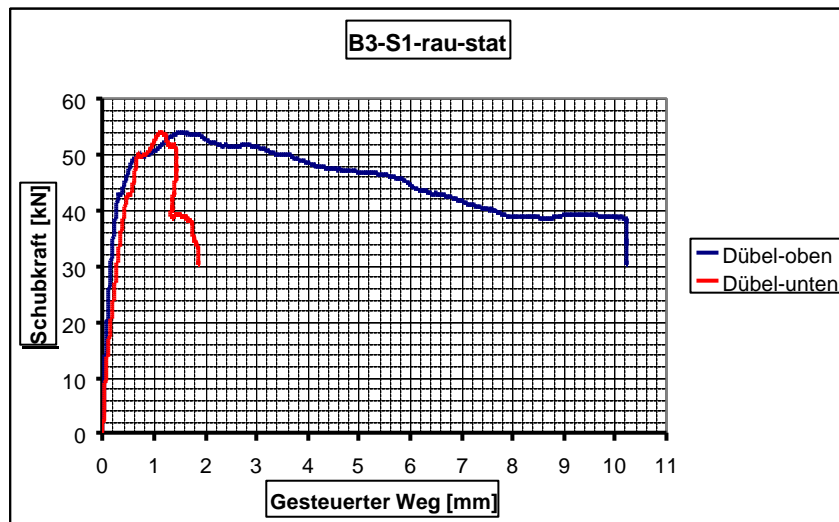


Abb. 8.86 : Statischer Schubversuch (B3-S1-rau-stat)

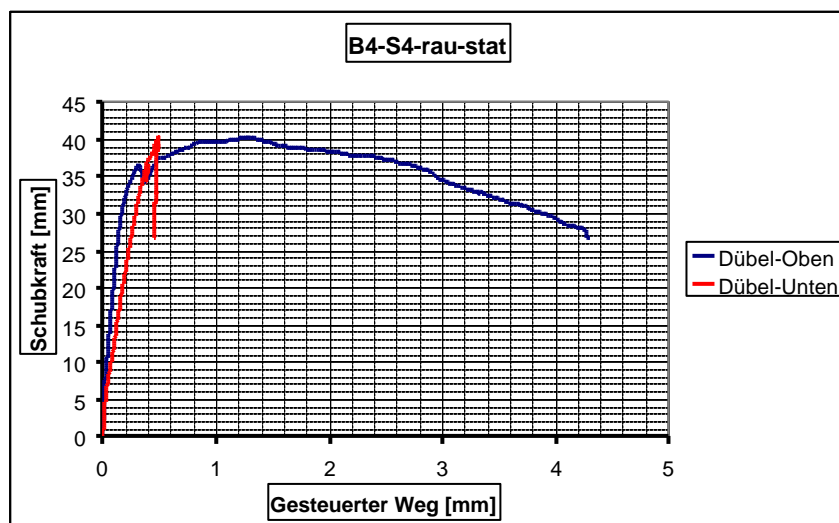


Abb. 8.87 : Statischer Schubversuch (B4-S4-rau-stat)

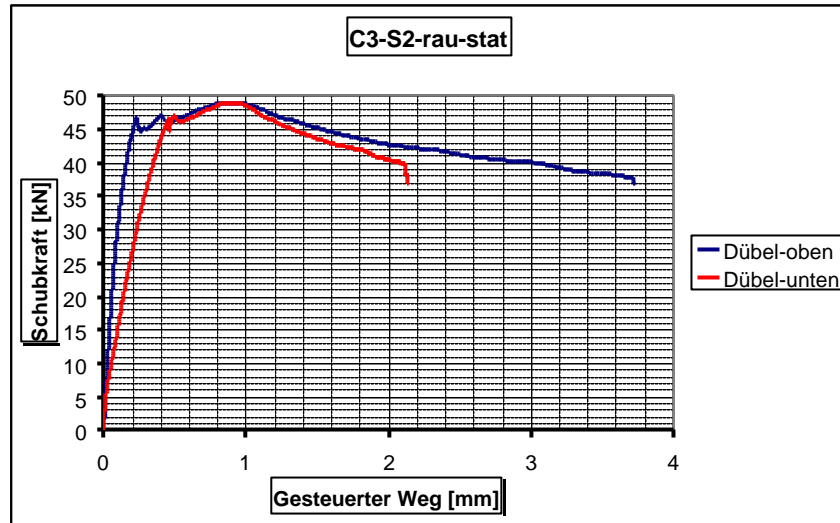


Abb. 8.88 : Statischer Schubversuch (C3-S2-rau-stat)

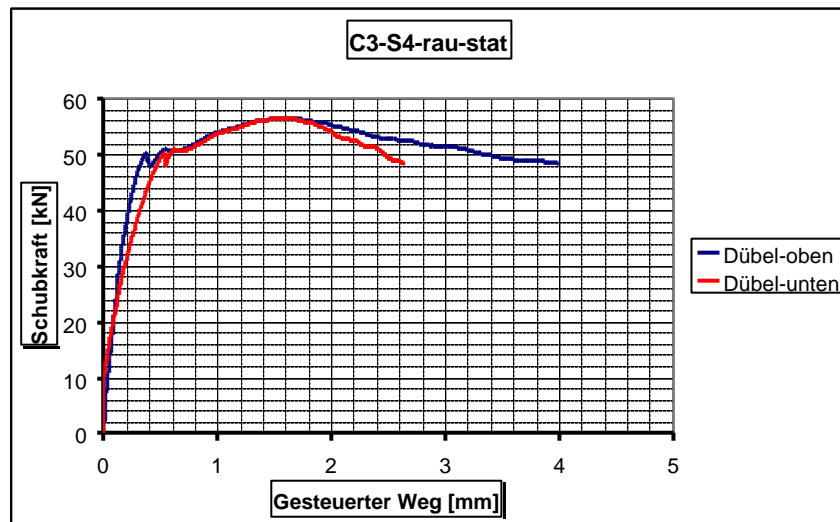


Abb. 8.89 : Statischer Schubversuch (C3-S4-rau-stat)

Zuerst sollen die Ergebnisse der Lang- und Durchläufer untersucht werden, da sie für uns von vorrangigem Interesse sind werden sie **Fett** dargestellt. Ihre Ergebnisse und die der Zeitfestigkeitsversuche sind in den folgenden Tabellen dargestellt. In den Tabelle 8.14 sind die Reibbeiwerte der schalungsrauen und aufgerauten statischen Versuche dargestellt. In den Tabellen 8.15 bis 8.17 sind die Reibungsbeiwerte für die schalungsrau belassenen Grundkörper und in den Tabellen 8.18 bis 8.20 für die aufgerauten Grundkörper dargestellt. Da die Dehnungsmessstreifen an der Stelle des maximal zu erwartenden Moments platziert worden waren, fielen etliche Dehnungsmessstreifen vorzeitig aus und verhinderten so die Datenerfassung bis zum Belastungsende.

**Tabelle 8.14 : Die Reibbeiwerte der rauhen und schalungsrauen Flächen, Serie A, B und C (statisch)**

	<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>		<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>
	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	A2-S1-schalungsrau-stat	0,54		A3-S1-rau-stat	0,88
<b>2</b>	A2-S4-schalungsrau-stat	0,71		A3-S2-rau-stat	1,33
<b>3</b>	B1-S3-schalungsrau-stat	0,77		B3-S1-rau-stat	0,96
<b>4</b>	B2-S1-schalungsrau-stat	0,43		B4-S4-rau-stat	0,66
<b>5</b>	C2-S1-schalungsrau-stat	0,90		C3-S2-rau-stat	0,81
<b>6</b>	-----			C3-S4-rau-dyn	1,04

**Tabelle 8.15 : Die Reibbeiwerte der rauhen und schalungsrauen Flächen, Serie A (dynamisch)**

	<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>		<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>
	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	A1-S1-schalungsrau-dyn	1,0		<b>A3-S4-rau-dyn</b>	<b>1,53</b>
<b>2</b>	A1-S2-schalungsrau-dyn	1,13		A3-S4-rau-dyn-2.Lauf	1,28
<b>3</b>	A1-S4-schalungsrau-dyn	0,78		A4-S1-rau-dyn	1,33
<b>4</b>	A2-S2-schalungsrau-dyn	1,35		A4-S2-rau-dyn	1,33
<b>5</b>	A2-S3-schalungsrau-dyn	1,02		A4-S3-rau-dyn	1,49
<b>6</b>	-----			<b>A4-S4-rau-dyn</b>	<b>1,33</b>
<b>7</b>	-----			A4-S4-rau-dyn-2.Lauf	1,02

**Tabelle 8.16 : Die Reibbeiwerte der rauhen und schalungsrauen Flächen, Serie B (dynamisch)**

	<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>		<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>
	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>B1-S1-schalungsrau-dyn</b>	<b>1,03</b>		B3-S2-rau-dyn	0,92
<b>2</b>	B1-S1-schalungsrau-dyn-2.Lauf	1,35		B3-S3-rau-dyn	0,97
<b>3</b>	<b>B1-S4-schalungsrau-dyn</b>	<b>1,0</b>		B4-S4-rau-dyn	1,41
<b>4</b>	B1-S4-schalungsrau-dyn-2.Lauf	1,54		B4-S1-rau-dyn	0,99
<b>5</b>	B2-S2-schalungsrau-dyn	0,92		<b>B4-S2-rau-dyn</b>	<b>1,06</b>
<b>6</b>	B2-S4-schalungsrau-dyn	0,56		<b>B4-S3-rau-dyn</b>	<b>1,27</b>
<b>7</b>	-----			B4-S3-rau-dyn-2.Lauf	1,63



Tabelle 8.17 : Die Reibbeiwerte der rauen und schalungsrauen Flächen, Serie C (dynamisch)

	<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>		<b>Serie</b>	<b>Max. Reibbeiwert <math>\mu</math></b>
	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>3</b>	<b>4</b>
1	C1-S1-schalungsrau-dyn	1,17		C3-S1-rau-dyn	1,40
2	<b>C1-S3-schalungsrau-dyn</b>	<b>0,85</b>		C3-S3-rau-dyn	0,74
3	C1-S4-schalungsrau-dyn	1,06		<b>C4-S1-rau-dyn</b>	<b>0,84</b>
4	C2-S3-schalungsrau-dyn	0,74		C4-S1-rau-dyn-2.Lauf	0,71
5	<b>C2-S4-schalungsrau-dyn</b>	<b>1,48</b>		<b>C4-S2-rau-dyn</b>	<b>1,27</b>
6	-----			<b>C4-S3-rau-dyn</b>	<b>2,28*</b>
7	-----			C4-S3-rau-dyn-2.Lauf	1,43
8	-----			C4-S4-rau-dyn	1,44

\* vermutlicher Ausreißer

- Mittelwert der Reibbeiwerte für die schalungsrauen Flächen  $\mu \approx 1,0$
- Mittelwert der Reibbeiwerte für die aufgerauten Flächen  $\mu \approx 1,2$

Der Abnahme der Reibbeiwerte während der Beanspruchungsdauer stellte sich fortlaufend ein. Eindeutig war das bei den Zeitfestigkeitsversuchen zu erkennen, die Dauerfestigkeitsversuche lieferten hingegen stabile Reibbeiwerte. In manchen Fällen konnten die Daten wegen der teilweise frühzeitig versagenden Dehnmessstreifen nicht weiter erfasst werden. Deshalb wurde nur der maximale Anfangsreibbeiwert dargestellt.

Es konnte eine Steigerung der Mittelwert der Reibbeiwerte der aufgerauten Flächen gegenüber der schalungsrauen Flächen von ca. 20% festgestellt werden. Eine eindeutige Trennung der Reibbeiwerte nach der Belastung zwischen den schalungsrau belassenen und den aufgerauten Flächen konnte nicht hergestellt werden, obwohl dies ursprünglich erwartet wurde. Dieser Umstand könnte sowohl auf die starke Streuung der Ergebnisse als auch auf den relativ starken Verschleiß und den Abrieb der Zementstein-Berge zurückzuführen sein. Das führte im Endeffekt zu einer glatt aufgeriebenen Fläche, die sich dann ähnlich verhält wie eine schalungsrau belassene Fläche.

In den Tabellen 8.18 bis 8.23 werden die einwirkenden und die berechneten aufnehmbaren Schubkräfte dargestellt.

Tabelle 8.18 : Schubkräfte, Serie A-Schalungsrau (dynamisch)

	<b>Serie</b>	<b>Max. einwirkende Schubkraft <math>V_{Ed}</math> [kN]</b>	<b>Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft <math>V_{Rd,sy}</math> [kN]</b>	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,sy}}$
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
1	A1-S1-schalungsrau-dyn	23,70	26,3	0,90
2	A1-S2-schalungsrau-dyn	24,40	26,3	0,92
3	A1-S4-schalungsrau-dyn	17,03	30,4	0,56
4	A2-S2-schalungsrau-dyn	16,30	26,3	0,62
5	A2-S3-schalungsrau-dyn	20,00	30,4	0,66

Tabelle 8.19 : Schubkräfte, Serie B-schalungsrau (dynamisch)

	<b>Serie</b>	<b>Max. einwirkende Schubkraft</b> $V_{Ed}$ [kN]	<b>Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft</b> $V_{Rd,sy}$ [kN]	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,sy}}$
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>B1-S1-schalungsrau-dyn</b>	<b>15,60</b>	<b>30,4</b>	<b>0,51</b>
<b>2</b>	B1-S1-schalungsrau-dyn-2Lauf	24,40	30,4	0,80
<b>3</b>	<b>B1-S4-schalungsrau-dyn</b>	<b>17,78</b>	<b>30,4</b>	<b>0,58</b>
<b>4</b>	B1-S4-schalungsrau-dyn-2Lauf	27,40	30,4	0,90
<b>5</b>	B2-S2-schalungsrau-dyn	18,50	26,3	0,70
<b>6</b>	B2-S4-schalungsrau-dyn	19,20	30,4	0,63

Tabelle 8.20 : Schubkräfte, Serie C-schalungsrau (dynamisch)

	<b>Serie</b>	<b>Max. einwirkende Schubkraft</b> $V_{Ed}$ [kN]	<b>Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft</b> $V_{Rd,sy}$ [kN]	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,sy}}$
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	C2-S3-schalungsrau-dyn	17,77	26,3	0,67
<b>2</b>	<b>C2-S4-schalungsrau-dyn</b>	<b>14,07</b>	<b>30,4</b>	<b>0,46</b>
<b>3</b>	C1-S1-schalungsrau-dyn	20,00	30,4	0,65
<b>4</b>	<b>C1-S3-schalungsrau-dyn</b>	<b>12,60</b>	<b>26,3</b>	<b>0,48</b>
<b>5</b>	C1-S4-schalungsrau-dyn	23,00	30,4	0,76

Tabelle 8.21 : Schubkräfte, Serie A-rau (dynamisch)

	<b>Serie</b>	<b>Max. einwirkende Schubkraft</b> $V_{Ed}$ [kN]	<b>Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft</b> $V_{Rd,sy}$ [kN]	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,sy}}$
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>A3-S4-rau-dyn</b>	<b>17,7</b>	<b>56,0</b>	<b>0,32</b>
<b>2</b>	A3-S4-rau-dyn-2.Lauf	31,8	56,0	0,57
<b>3</b>	A4-S1-rau-dyn	28,1	56,0	0,50
<b>4</b>	A4-S2-rau-dyn	22,2	56,0	0,40
<b>5</b>	A4-S3-rau-dyn	35,6	59,0	0,63
<b>6</b>	<b>A4-S4-rau-dyn</b>	<b>22,2</b>	<b>59,0</b>	<b>0,38</b>
<b>7</b>	A4-S4-rau-dyn-2.Lauf	29,6	59,0	0,50

Tabelle 8.22 : Schubkräfte, Serie B-rau (dynamisch)

	<b>Serie</b>	<b>Max. einwirkende Schubkraft</b> $V_{Ed}$ [kN]	<b>Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft</b> $V_{Rd, sy}$ [kN]	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd, sy}}$
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	B3-S2-rau-dyn	32,6	59,00	0,55
<b>2</b>	B3-S3-rau-dyn	25,9	56,00	0,46
<b>3</b>	B4-S1-rau-dyn	27,4	59,00	0,46
<b>4</b>	B4-S2-rau-dyn	24,4	56,00	0,43
<b>5</b>	<b>B4-S3-rau-dyn</b>	<b>18,5</b>	<b>56,00</b>	<b>0,33</b>
<b>6</b>	B4-S3-rau-dyn-2.Lauf	28,9	56,00	0,52

Tabelle 8.23 : Schubkräfte Serie C-rau (dynamisch)

	<b>Serie</b>	<b>Max. einwirkende Schubkraft</b> $V_{Ed}$ [kN]	<b>Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft</b> $V_{Rd, sy}$ [kN]	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd, sy}}$
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	C3-S1-rau-dyn	25,9	56,00	0,46
<b>2</b>	<b>C4-S1-rau-dyn</b>	<b>19,2</b>	<b>56,00</b>	<b>0,34</b>
<b>3</b>	<b>C4-S2-rau-dyn</b>	<b>17,7</b>	<b>56,00</b>	<b>0,32</b>
<b>4</b>	C4-S2-rau-dyn-2.Lauf	30,3	56,00	0,54
<b>5</b>	C4-S4-rau-dyn	25,2	59,00	0,43

Tabelle 8.24 : Statische Schubkräfte

	<b>Serie</b>	<b>Fließgrenze</b>		<b>Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft</b> $V_{Rd, sy}$ [kN]	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd, sy}}$
		<b>Max. einwirkende Schubkraft</b> $V_{Ed}$ [kN]	<b>Gemessene Schubspannung</b> $\bar{t}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	A2-S1-schalungsrau-stat	17,03	0,51	26,30	0,65
<b>2</b>	A2-S4-schalungsrau-stat	29,60	0,88	30,40	0,97
<b>3</b>	B1-S3-schalungsrau-stat	24,40	0,73	26,30	0,93
<b>4</b>	B2-S1-schalungsrau-stat	29,60	0,88	30,40	0,97
<b>5</b>	C2-S1-schalungsrau-stat	25,90	0,77	30,40	0,85
<b>6</b>	A3-S1-rau-stat	33,30	0,99	56,00	0,58
<b>7</b>	A3-S2-rau-stat	40,70	1,21	59,00	0,69
<b>8</b>	B3-S1-rau-stat	37,04	1,10	59,00	0,63
<b>9</b>	B4-S4-rau-stat	26,60	0,79	56,00	0,47
<b>10</b>	C3-S2-rau-stat	34,80	1,03	56,00	0,62
<b>11</b>	C3-S4-rau-stat	37,04	1,10	59,00	0,63

Bei den Lang- und Durchläufern - Fett dargestellt - ist zu erkennen, dass die gemessene einwirkende Schubkräfte  $V_{Ed}$  im Bereich der Dauerfestigkeit lagen soweit sie etwa 50% der Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkräfte  $V_{Rd, sy}$  betragen. Die gemessenen Axialkräfte lagen unter der laut Zulassung erlaubten Kraft, dies gilt auch für die Biegemomente.

Bislang wurden die Schubkräfte im Bereich der Dauerfestigkeit studiert. Jetzt wäre es von Interesse herauszufinden, wie es sich mit den auf der Höhe der Fließkräfte liegenden Schubkräften verhält. Deswegen werden sie in Tabelle 8.24 zusammengefasst. In Tabelle 8.24 ist zu sehen, dass alle gemessene einwirkende Schubkräfte  $V_{Ed}$  im Bereich der Bemessungswerte der aufnehmbaren Schubkräfte  $V_{Rd, sy}$  lagen. Das Grundkörperbetonversagen spielte auch bei den statischen Versuchen keine Rolle, da es trotz Unterschreitung der vorgegebenen Randabstände bei keinem Versuche auftrat.



**Abb. 8.90 : Abdruck eines schalungsrau belassenen Untergrundes, Serie A**



**Abb. 8.91 : Abdruck eines aufgerauten Untergrundes, Serie A**



**Abb. 8.92 : Abdruck eines schalungsrau belassenen Untergrundes, Serie B**



**Abb. 8.93 : Abdruck eines aufgerauten Untergrundes, Serie B**



**Abb. 8.94 : Abdruck eines Schalungsrau belassenen Untergrundes, Serie C**



**Abb. 8.95 : Ein Abdruck ein aufgeraute Untergrund (Serie C).**

Es ist auch von Interesse zu beobachten, dass das Belastungsniveau erhöht werden konnte bei einer Aufräumung von im Schnitt nur 0,60 mm Glättungstiefe  $R_p$  nach dem 3D-Verfahren (1 mm Glättungstiefe nach dem Sandflächenverfahren) und unter Beibehaltung des selben Bewehrungsgrades. Darauf wird im nächsten Abschnitt detaillierter eingegangen. Dies bedeutet, dass trotz aussetzender Haftung noch eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen vorhanden ist, wenn das Belastungsniveau unter der Schadens- bzw. Wöhlerlinie bleibt.

In den Abb. 8.90, 8.92 und 8.94 sind die Reibflächen der Verstärkungsschichten zu sehen. Darin ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Sieblinien die Kraftübertragung durch Reibung nicht beeinflussen. Anders sieht es bei den Abb. 8.91, 8.93 und 8.95 aus; dort ist zu erkennen, wie der Zementstein die Lücken bzw. Täler der aufgerauten Flächen ausgefüllt hat. Es ist auch darauf aufmerksam zu machen, dass die Verzahnung mit den aufgerauten Flächen fast ausschließlich aus Zementstein gebildet wird, es sind keine Zuschläge zu erkennen, die sich an der Reibkraftübertragung eventuell beteiligen könnten. Dies bedeutet, dass für die Übertragung durch Reibung fast ausschließlich der Zementstein der Verstärkungsschicht verantwortlich ist; ihm sollten wir unsere Aufmerksamkeit widmen.

Jetzt wäre es von Interesse zu wissen, inwiefern sich der Zementstein der unterschiedlichen Sieblinien an der Kraftübertragung beteiligt. Aus dem ersten Teil dieser Arbeit ist bekannt, dass der weggeblasene Zementstein der aufgerauten Flächen unabhängig von der Sieblinie bei gleich bleibender Rauheit gleich bleibt, auch wenn die Zementsteinvolumina unterschiedlich verteilt sind. Die Kraftübertragung hängt also nicht von der Sieblinie ab, sondern von der Festigkeit des Zementsteins.

Ein andere Merkmal ist, dass Verschleiß und Abrieb ausschließlich auf der Seite der Erweiterungsschicht stattfinden. Dies ist darin begründet, dass der Materialanteil der Verstärkungsschicht niedriger ist als die des aufgerauten Untergrundes. Dies führt dazu, dass die Belastung auf der Verstärkungsschichtseite von einer geringeren Schubfläche zu tragen ist, was dort wiederum zu einer Erhöhung der Schubspannung führt. Andererseits wird die Reibkraft auf dem aufgerauten Grundkörper nur von Zuschlägen widerstanden, die eine höhere Festigkeit besitzen.

#### **8.6.4 Die Betonfestigkeit**

Bei der Durchführung der Versuche und während der Erstellung der Wöhlerlinien beeinflussten die Betonfestigkeiten der Grundkörper und der Verstärkungsschichten die Ergebnisse unterschiedlich. Aus Abb. 8.34 ist deutlich zu erkennen, dass bei den Schalungsrau belassenen Grundkörper, die Grundkörperbetonfestigkeit steigenden Einfluss bei gleichbleibender Betonfestigkeit der Verstärkungsschicht hat. Zusätzlich steigerte die Erhöhung der Verstärkungsschichtbetonfestigkeit die Resultate.

In Abb. 8.35 bei den aufgerauten Grundkörpern, ist zu erkennen, dass die Grundkörperbetonfestigkeit keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte; sie ergaben deckungsgleiche Wöhlerlinien. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Betonfestigkeit der Verstärkungsschichten hier eine wesentliche Rolle spielt. Die Erhöhung der Betonfestigkeit der Verstärkungsschichten wird prompt mit einer Verbesserung und Erhöhung der Zeit- und Dauerfestigkeiten belohnt. Der gleiche Einfluss ist bei den schalungsrau belassenen Grundkörpern zu finden.



**Tabelle 8.25 : Einfluss der Verstärkungsschichtbetonfestigkeit von niedrig auf hoch auf die Dauerfestigkeit  $\Delta S_D$  bei gleichbleibender Grundkörperbetonfestigkeit bei schalungsrauen Oberflächen**

	Serie		Betonfestigkeit		$\Delta S_D$	Einflussfaktor Hoch/Niedrig		Mittelwert
			Grundkörper	Verstärkungsschicht				
	1	2	3	4	5	6		
<b>Schalungsrau</b>	1	B	Hoch	Hoch	20	125%		120%
	2	B	Hoch	Niedrig	16			
	3	C	Mittel	Hoch	17	113%		
	4	C	Mittel	Niedrig	15			
	5	A	Niedrig	Hoch	16,5	118%		
	6	A	Niedrig	Niedrig	14			

In Tabelle 8.25 werden die für die schalungsrau belassene Oberflächen und Tabelle 8.27 die für die rauhen Oberflächen berechneten Faktoren dargestellt, die aus dem Verhältnis der  $\Delta S_D$  der höheren Verstärkungsschichtbetonfestigkeit zu den niedrigeren, bei gleich bleibenden Grundkörperbetonfestigkeit berechnet werden.

**Tabelle 8.26 : Einfluss der Grundkörperbetonfestigkeit auf die Dauerfestigkeit  $\Delta S_D$  bei gleichbleibender Verstärkungsschichtbetonfestigkeit bei schalungsrauen Oberflächen**

	Serie		Betonfestigkeit		$\Delta S_D$	Einflussfaktor Hoch/Niedrig		
			Grundkörper	Verstärkungsschicht				
	1	2	3	4	B/C	C/A	B/A	
<b>Schalungsrau</b>	1	B	Hoch	Hoch	20	118%	-	121%
	2	C	Mittel	Hoch	17		103%	
	3	A	Niedrig	Hoch	16,5	-		
	4	B	Hoch	Niedrig	16	107%	-	114%
	5	C	Mittel	Niedrig	15		107%	
	6	A	Niedrig	Niedrig	14	-		

In Tabelle 8.26 werden die für die Schalungsrau belassene Oberflächen und in Tabelle 8.28 die für die rauhen Oberflächen berechneten Faktoren dargestellt, die aus dem Verhältnis der  $\Delta S_D$  der höheren Grundkörperbetonfestigkeit zu den niedrigeren, bei gleich bleibenden Verstärkungsschichtbetonfestigkeit berechnet werden.

**Tabelle 8.27 : Einfluss der Verstärkungsschichtbetonfestigkeit auf die Dauerfestigkeit  $\Delta S_D$  bei gleichbleibender Grundkörperbetonfestigkeit bei rauen Oberflächen.**

	Serie		Betonfestigkeit		$\Delta S_D$	Einflussfaktor Hoch/Niedrig
			Grundkörper	Verstärkungsschicht		
	1	2	3	4		
<b>Rau</b>	1	B	Hoch	Hoch	27,5	122%
	2	B	Hoch	Niedrig	22,5	
	3	C	Mittel	Hoch	27,5	122%
	4	C	Mittel	Niedrig	22,5	
	5	A	Niedrig	Hoch	27,5	122%
	6	A	Niedrig	Niedrig	22,5	

**Tabelle 8.28 : Einfluss der Grundkörperbetonfestigkeit auf die Dauerfestigkeit  $\Delta S_D$  bei gleichbleibender Verstärkungsschichtbetonfestigkeit bei rauen Oberflächen**

	Serie		Betonfestigkeit		$\Delta S_D$	Einflussfaktor Hoch/Niedrig		
			Grundkörper	Verstärkungsschicht		B/C	C/A	B/A
	1	2	3	4				
<b>Rau</b>	1	B	Hoch	Hoch	27,5	0%	-	0%
	2	C	Mittel	Hoch	27,5		0%	
	3	A	Niedrig	Hoch	27,5	-	0%	
	4	B	Hoch	Niedrig	22,5	0%	-	0%
	5	C	Mittel	Niedrig	22,5		0%	
	6	A	Niedrig	Niedrig	22,5	-	0%	

Bei den schalungsrauen Grundkörpern ist aus Tabelle 8.25 zu erkennen, dass bei Erhöhung der Festigkeit der Verstärkungsschicht bei gleich bleibender Grundkörperbetonfestigkeit eine Erhöhung der Ergebnisse zwischen 113% und 125%, im Mittel bei 120% liegt. Ändert man andererseits die Grundkörperfestigkeit bei gleichbleibender Festigkeit der Verstärkungsschicht, siehe Tabelle 8.26, steigen die Ergebnisse auch hier, aber sie liegen nur zwischen 107% und 121% und sind niedriger.

Bei den aufgerauten Grundkörpern ist aus Tabelle 8.27 zu entnehmen, dass bei Erhöhung der Festigkeit der Verstärkungsschicht bei gleich bleibender Grundkörperfestigkeiten eine Erhöhung der Ergebnisse in allen Fällen bei 122% liegt. Aus Tabelle 8.28 andererseits ist zu entnehmen, dass Erhöhung der Grundkörperfestigkeit bei gleich bleibender Verstärkungsschichtfestigkeit überhaupt kein Einfluss hat.

Es ist zu sehen, dass die Festigkeit der Verstärkungsschicht einen deutlich erhöhenden Einfluss sowohl bei den schalungsrauen aber auch bei den aufgerauten Grundkörpern ausübt. Daraus folgt, dass bei die Erhöhung der Festigkeit der Verstärkungsschicht Vorrang gegenüber einer Erhöhung der Grundkörperbetonfestigkeit haben sollte.

### 8.6.5 Die Rauheit

Die Abb. 8.34 und 8.35 zeigen deutlich, dass die Rauheit von herausragender Wichtigkeit ist. Sie vergrößert den Scherwiderstand und die Dauerfestigkeit gegenüber den schalungsrau belassenen Oberflächen bei ähnlichen Voraussetzungen (gleiche Grundkörper- und Verstärkungsschichtbetonfestigkeit). In Tabelle 8.29 sind die berechneten Faktoren der Einfluss der Aufrauung zusammengestellt.

Tabelle 8.29 : Ergebnisse des Interaktiven Verfahrens

	Serie		Betonfestigkeit		$\Delta S_D$	Einflussfaktor Rau/Schalungsrau
			Grundkörper	Verstärkungsschicht		
	1	2	3	4	5	
<b>Schalungsrau</b>	1	B	Hoch	Hoch	20	-
	2	B	Hoch	Niedrig	16	-
	3	C	Mittel	Hoch	17	-
	4	C	Mittel	Niedrig	15	-
	5	A	Niedrig	Hoch	16,5	-
	6	A	Niedrig	Niedrig	14	-
<b>Rau</b>	7	B	Hoch	Hoch	27,5	137%
	8	B	Hoch	Niedrig	22,5	141%
	9	C	Mittel	Hoch	27,5	162%
	10	C	Mittel	Niedrig	22,5	150%
	11	A	Niedrig	Hoch	27,5	167%
	12	A	Niedrig	Niedrig	22,5	161%

Sie liegen zwischen 137% und 167%, und sind damit deutlich höher als bei dort wo die Betonfestigkeiten variiert worden sind. Dies führt zu der Empfehlung, auf die Aufrauung der Oberflächen zu achten, da dies bessere Ergebnisse liefert, als eine Steigerung der Betonfestigkeit bei schlechterer Oberflächenvorbereitung.

### 8.6.6 Die Sieblinien

Auch wenn die Grafiken den Eindruck erwecken, die unterschiedlichen Sieblinien hätten einen erheblichen Einfluss auf die Rauheit und damit im Endeffekt auch auf die Reibung, so ist dennoch festzustellen, dass die unterschiedlichen Sieblinien mit gleichem Größtkorn tatsächlich nahezu keinen Einfluss auf die Schubkraftübertragung hatten. Das bedeutet, dass die verschiedenen Sieblinien zwar verschiedene Bergvolumina und Bergverteilungen besitzen, andererseits aber auch eine ähnliche Materialverteilung aufweisen, was im Endeffekt zu einer ähnlichen Schubfläche führt. Diese Aussage ist nur in Verbindung mit der Reibung zu verstehen. Die Einflüsse auf die Haftung wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt und somit auch nicht untersucht.

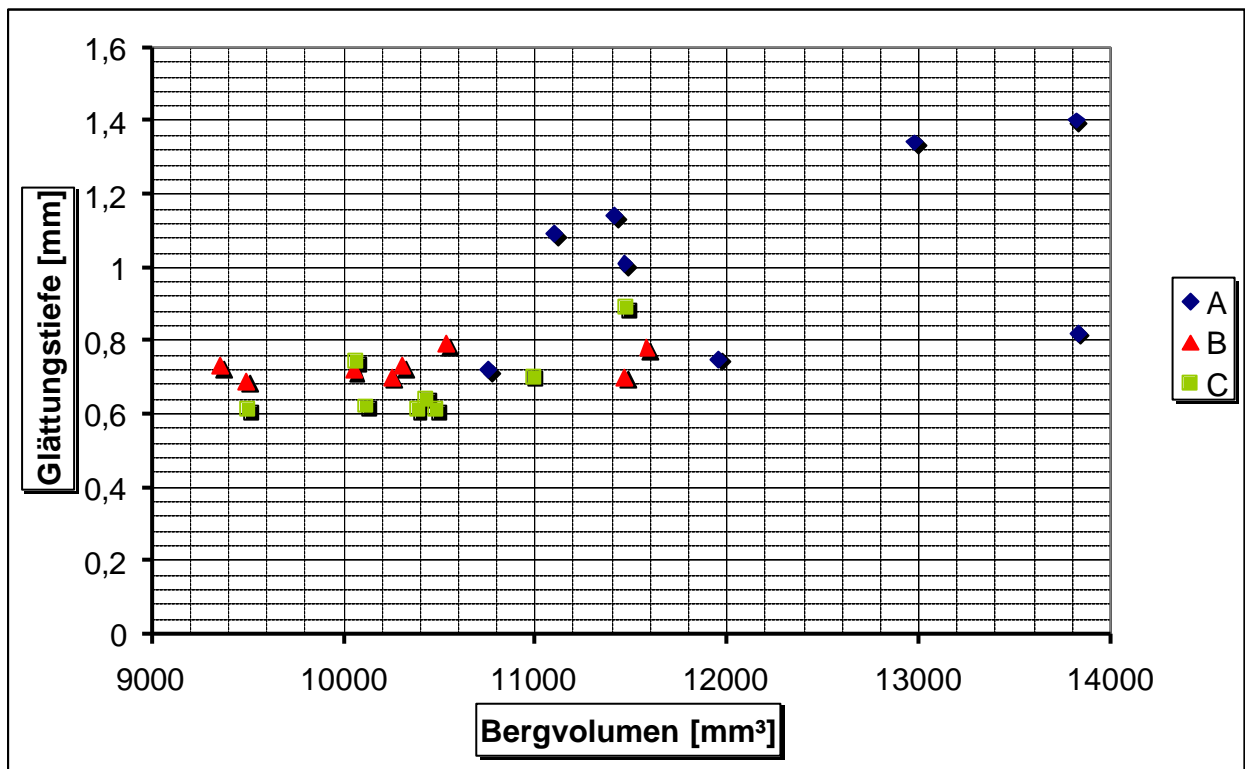


Abb. 8.96 : Einfluss der Rauheit auf die Bergvolumina

In Abb. 8.96 ist zu sehen, dass die Summe der Bergvolumen der abgetasteten Grundkörper eher von der Glättungstiefe  $R_p$  abhängt als von den unterschiedlichen Sieblinien.

### 8.6.7 Die Profiltragkurve

Bislang wurde das allgemeine Trag- und Schubverhalten Gehandelt und die verschiedenen Einfluss-Faktoren diskutiert. Im folgenden soll versucht werden, die Ergebnisse mit den Profiltragkurven zu erklären.

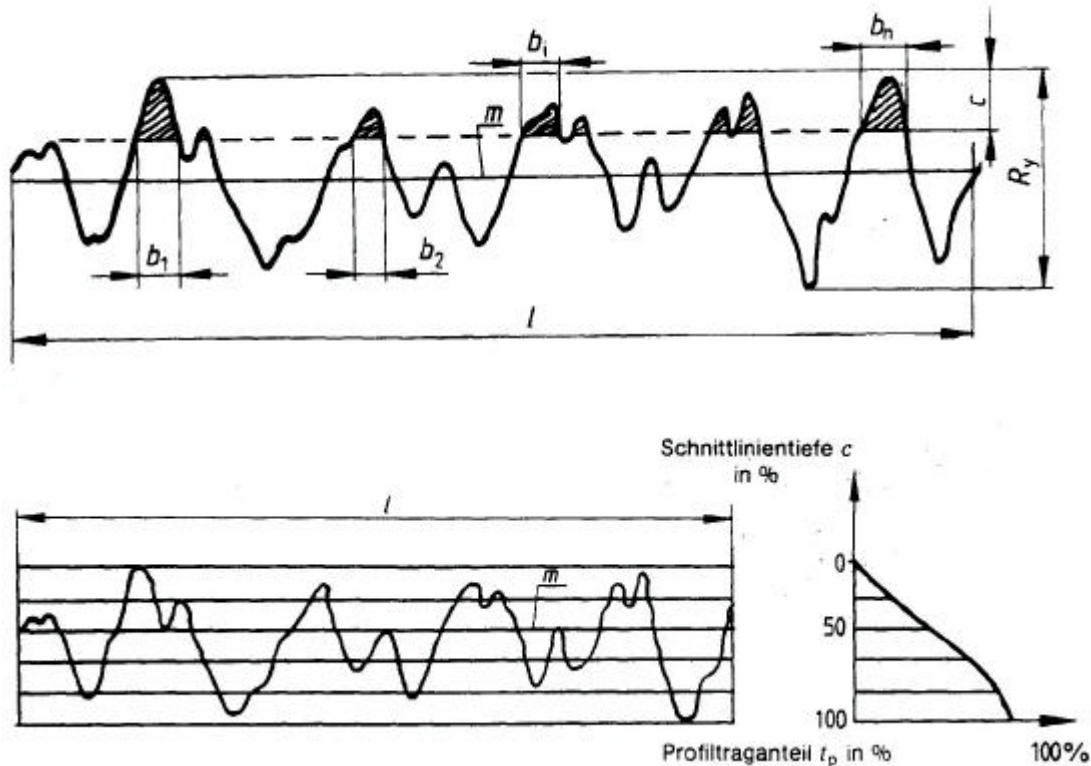


Abb. 8.97 : Die Profiltragkurve (Abbott-Kurve), [8.3]

Nach DIN 4762 [8.3] ist die Profiltragkurve die grafische Darstellung der Beziehung zwischen Profiltraganteil und Schnittlinientiefe. In DIN 4776 [8.4] wird die Profiltragkurve auch als "Abbott-Kurve" bezeichnet, sie beschreibt die Zunahme des Materialanteils mit der Tiefe im Rauheitsprofil und dient zur Beurteilung des Funktionsverhaltens mechanisch hoch beanspruchter Oberflächen. Abb. 8.97 führt zu folgenden Definitionen:

- ◆ Der Materialanteil einer Schnittlinie ist die Summe der Teilstrecken  $b_1$  bis  $b_n$  innerhalb der Gesamtmessstrecke. Somit ist:

$$l_n = \sum_1^n b_n \quad (8.10)$$

- ◆ Der Materialanteil ist das Verhältnis der materialerfüllten Länge zur Gesamtmessstrecke.

Somit ist:

$$M_r = \frac{l_n}{l} * 100 \text{ in \%} \quad (8.11)$$

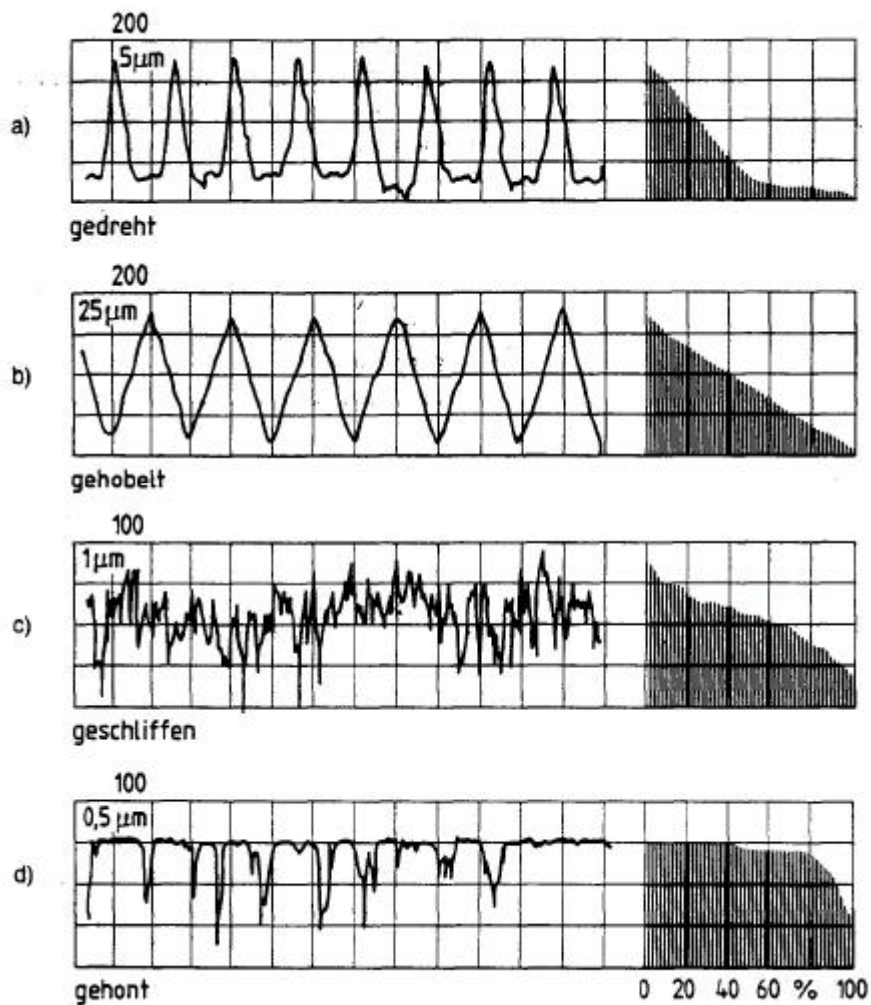
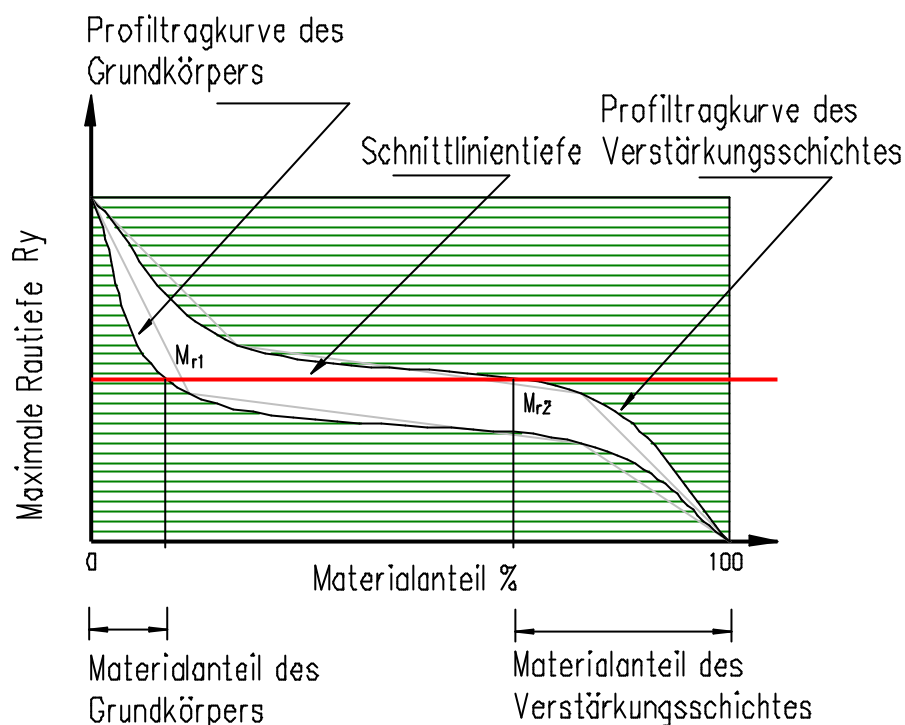


Abb. 8.98 : Verschiedene Profilformen und die resultierende Abbott-Kurven, [8.4]

In Abb. 8.98 sind verschiedene Profilformen und die entsprechenden Profiltragkurven dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Abbott-Kurve in Abb. 8.98a eine konkave Form besitzt; dies entspricht einem Anstieg des Materialanteils. Diese konkave Form verändert sich in den Abb. 8.98b, 8.98c und 8.98d zu einer konvexen Form.

Die Form der Kurve in Abb. 8.98d entspricht der umgedrehten Form aus Abb. 8.98a. Wenn also die Profilform aus Abb. 8.98a umgedreht auf die Profilform aus Abb. 8.98d gesetzt wird, könnte eine Übereinstimmung in Form eines positiven und negativen Abdrucks eintreten. Je nachdem wie gut sich die zwei Profilformen anpassen, müsste also im Endeffekt eine durchgehende 100%-Traganteilkurve bzw. Abbott-Kurve zu erhalten sein, Abb. 8.99.



**Abb. 8.99 : Die Profiltragkurve des Grundkörpers und des darüber liegenden Verstärkungsschichtes und die Resultierende Materialanteile**

Dieser Vorgang würde dann der Übereinstimmung der Profiltragkurven der Verstärkungsschicht und der Grundkörper wiedergeben. Ist der Übereinstimmung so wie bei ein monolithischen betonierten Querschnitt, müsste eine 100%- Traganteilkurve bzw. Materialanteil zu erhalten sein. Dies wäre dann der optimale Zustand. Trennt man die Verstärkungsschichten von den Grundkörpern ist Verständlicherweise keine Übereinstimmung zu erwarten, weil da einfach kein Kontakt zwischen den Flächen gibt, also eine 0%-Traganteilkurve bzw. Materialanteil ist hier zu erwarten. In der Praxis aber wird ein zwischen Fall eintreten, weil zwischen der Verstärkungsschicht und der Grundkörper ein Kontakt gibt und so könnte man die Übereinstimmung der umgedrehten und übereinanderliegenden Profiltragkurven der zwei Bauteilen als ein Maß für die vorhandene Verzahnung betrachten. Dies entspricht dann dem Prozentsatz der schubkraftübertragenden Fläche.

Für alle Seiten der Grundkörper der Serien A, B und C wurden die Profiltragkurven (Abbott-Kurven) ermittelt. Zusätzlich wurden auch die Profiltragkurven für die entsprechenden Verstärkungsschichten erstellt. Um die Übereinstimmung der Profiltragkurven einer Grundkörperseite und ihrer entsprechenden Verstärkungsschicht zu überprüfen, wurden die beiden Profiltragkurven übereinander gelegt und in einer Grafik dargestellt.

Um zu untersuchen, wie weit eine Oberfläche und ihr Abdruck übereinstimmen wurden die Ergebnisse der zwei Profiltragkurven in einer bestimmten Höhe gemäß Abb. 8.99 in den folgenden Gleichungen bearbeitet:

$$M_{r,Grundkörper} = M_{r1} \quad (8.12)$$

$$M_{r,Verstärkungsschicht} = 100 - M_{r2} \quad (8.13)$$

$$M_{r,Vorhanden} = M_{r,Grundkörper} + M_{r,Verstärkungsschicht} \quad (8.14)$$

Die Ergebnisse sind in den Abb. 8.100 bis 8.107 dargestellt und in Tabelle 8.29 für alle Serien zusammengefasst. Die Grafiken der anderen Serien sind in Anhang 6 dargestellt.

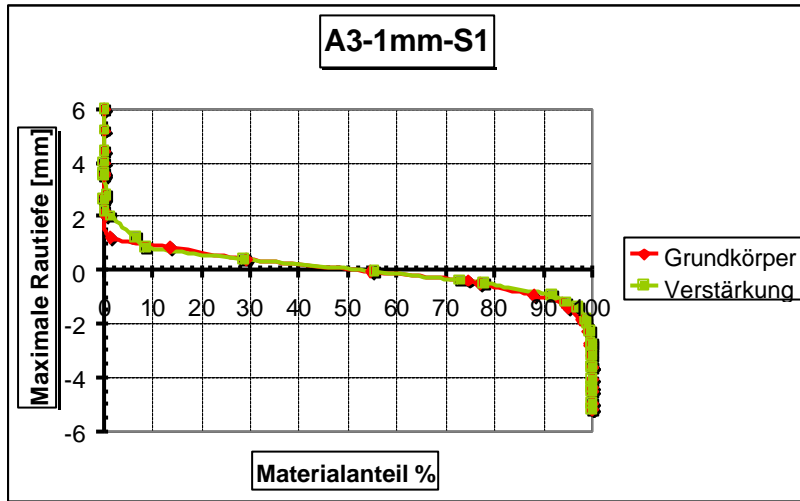


Abb. 8.100 : Abbott-Kurven für A3-1mm-S1

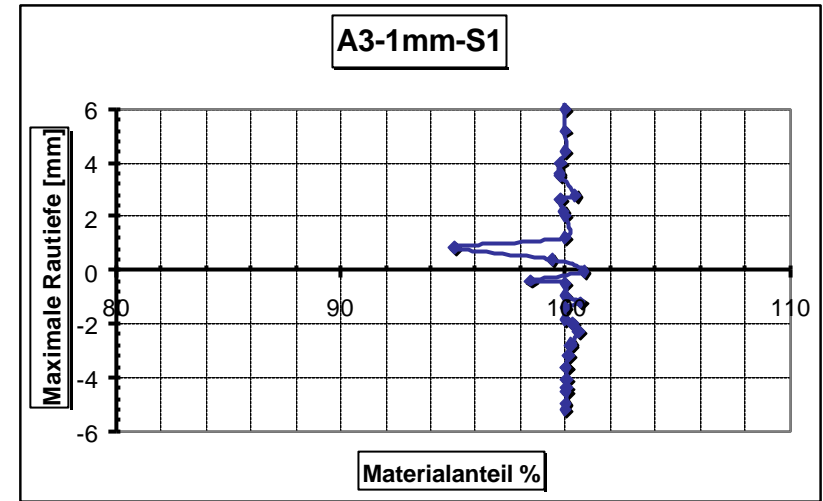


Abb. 8.101 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven für A3-1mm-S1

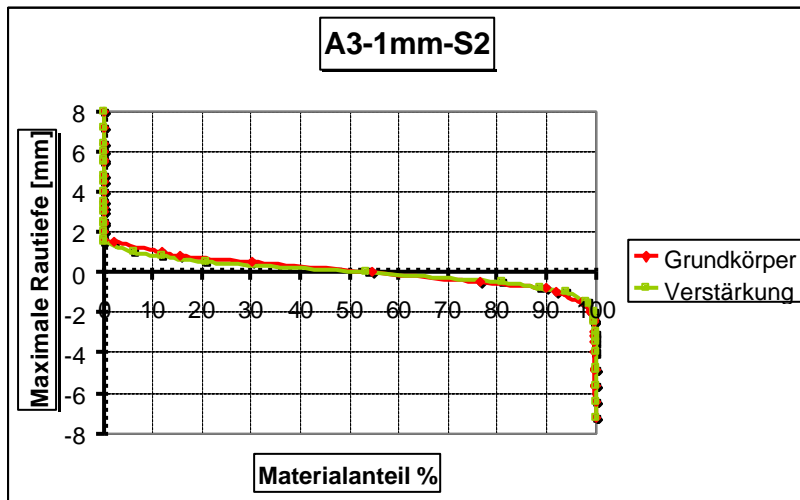


Abb. 8.102 : Abbott-Kurven für A3-1mm-S2

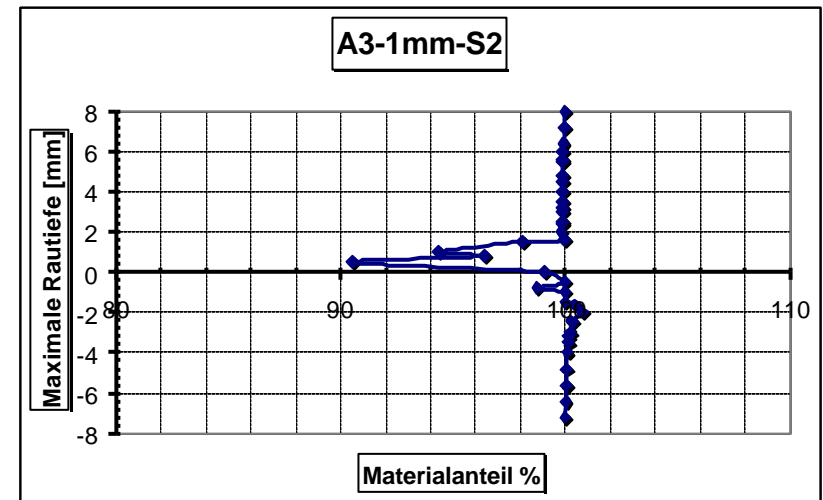


Abb. 8.103 : Übereinstimmung der Abbott Kurven für A3-1mm-S2



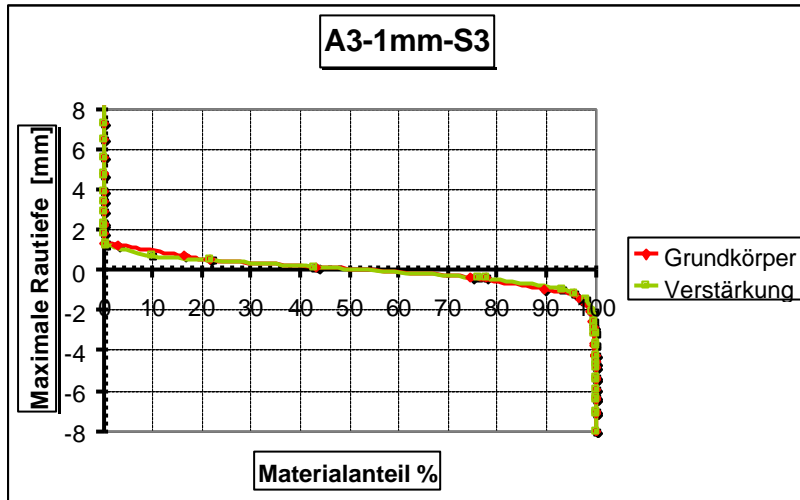


Abb. 8.104 : Abbott-Kurven für A3-1mm-S3

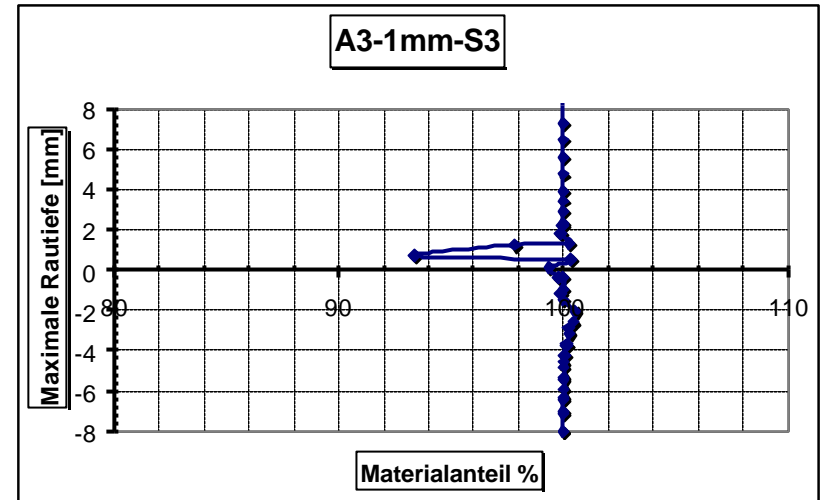


Abb. 8.105 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven für A3-1mm-S3

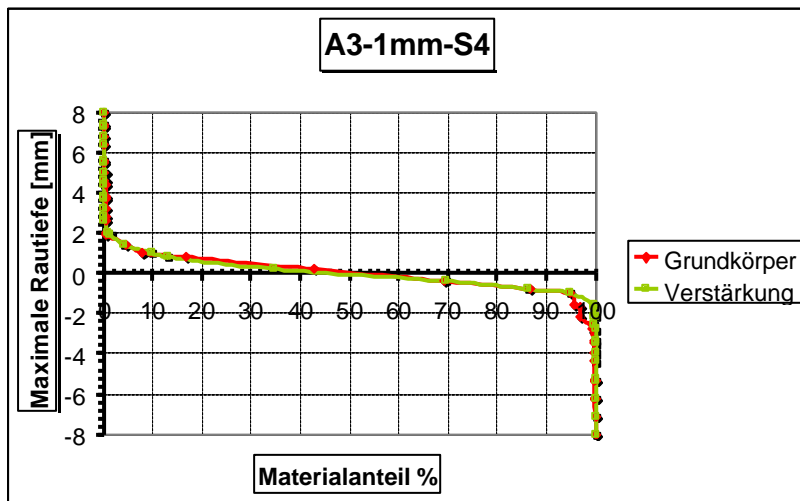


Abb. 8.106 : Abbott-Kurven für A3-1mm-S4

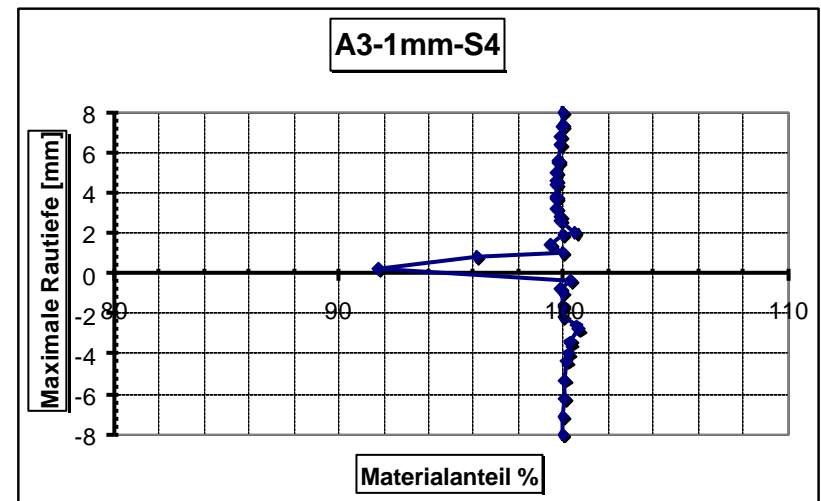


Abb. 8.107 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven für A3-1mm-S4

Tabelle 8.30 : Materialanteilebene

	<b>Grundkörperseite</b>	<b>Reduzierung des Materialanteils %</b>	<b>Materialanteilebene [mm]</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
1	A3-S1	95,0	0,85
2	A3-S2	90,5	0,50
3	A3-S3	93,3	0,70
4	A3-S4	91,7	0,20
5	A4-S1	90,8	0,75
6	A4-S2	94,1	1,20
7	A4-S3	91,8	1,00
8	A4-S4	87,7	0,80
9	B3-S1	96,8	-0,25
10	B3-S2	91,4	0,30
11	B3-S3	86,1	-0,45
12	B3-S4	95,5	1,00
13	B4-S1	93,5	0,75
14	B4-S2	92,6	0,50
15	B4-S3	94,4	1,00
16	B4-S4	90,7	0,80
17	C3-S1	96,3	0,62
18	C3-S2	88,1	0,70
19	C3-S3	95,0	0,61
20	C3-S4	86,0	0,61
21	C4-S1	92,1	0,75
22	C4-S2	94,6	0,50
23	C4-S3	94,9	0,25
24	C4-S4	94,2	0,80
	<b>Mittelwert</b>	<b>92,4</b>	<b>0,6</b>

Tabelle 8.30 zeigt, dass der Materialanteil im Allgemeinen in einer bestimmten Höhe abnimmt, er reduziert sich in Zeile 11 bis auf 86,1%, die geringste Reduzierung des Materialanteils ist mit 96,87% in Zeile 9 zu finden. In Zeile 25 ist der Mittelwert der Materialanteile zu finden. Daraus folgt, dass die zu Verfügung stehende Reibfläche um im Schnitt 8% sich Reduziert. Das Minus Zeichen in Spalte 3 weisen nur auf der Position der schwächste Materialebene in Abb. 8.101, 8.103, 8.105 und 8.107. Diese Erkenntnisse bestätigen die gewonnen Ergebnisse aus Tabelle 8.5. Dies bedeutet, dass die Oberflächen-Vergrößerung bei der Berechnung der Haftung zu reduzieren ist, da nicht die gesamte Oberfläche an der Haftung beteiligt ist.

Weil sich der Materialanteil in einer bestimmten Höhe abschwächt dürfte die Fläche bei der Berechnung der Schubkräfte nicht voll angerechnet werden. Das bedeutet auch, dass eine Umlagerung der Kräfte auf eine kleinere Fläche stattfindet; diese hätte einen Einfluss auf die ausgeübten Kräfte auf die Einzelbetonbestandteile, nämlich Zuschläge und Zementstein.

Um dies zu verhindern, müsste versucht werden, die Abnahme der Materialanteile zu reduzieren. Dies wird eher möglich bei der Einsatz von Spritzbeton bei den Verstärkungsmaßnahmen, da der Spritzbeton gegen der Untergrund geschleudert und verdichtet wird und so bessere Ergebnisse zu erwarten sind. Diese ändert sich in Abhängigkeit von der Qualität des Betonierens und der Verdichtung.

---

## 8.7 Literatur

- [8.1] Jung, O. : Verbundmittel in spritzbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Universität Dortmund. Abschlußbericht zu dem vom Deutschen Beton-Verein E.V. geförderten Forschungsvorhaben DBV-NR. 159. 1996.
- [8.2] DIN 1045-1 : Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001.
- [8.3] DIN 4762 : Oberflächenrauheit. Begriffe, Oberflächen und ihre Kenngrößen. Januar 1989.
- [8.4] DIN 4776 : Rauheitsmessung. Kenngrößen zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil. Messbedingung und Auswerteverfahren. Mai 1990.
- [8.5] Wöhler, A. : Z. Bauwesen 8 (1858) 642, 10 (1860) 583, 13 (1863) 233, 16 (1866) 67, 20 (1870) 74.
- [8.6] Block, K. und Dreier, F.: Das Ermüdungsverhalten von Dübelbefestigungen. DAFStb. Heft 541. Beuth Verlag GmbH. Berlin 2003
- [8.7] Block, K. und Dreier, F. : Die Ermüdungsfestigkeit zuverlässig und kostengünstig ermitteln. Das interaktive Verfahren. Material Prüfung. Organ der Bundesanstalt für Materialforschung und- Prüfung. Berlin (BAM). 40. Jahrgang. 1998.
- [8.8] Schäfer, H.G. und Bäätjer, G. : Verbundmittel in spritzbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Abschlussbericht zu dem vom Deutschen Beton. Verein E.V. geförderten Forschungsvorhaben DBV-Nr. 127. Dortmund, März 1992.
- [8.9] DIN 50100 : Dauerschwingversuch. Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung. Februar 1978.
- [8.10] Randl, N. und Wicke, M. : Schubübertragung zwischen Alt- und Neubeton. Experimentelle Untersuchungen, theoretischer Hintergrund und Bemessungsansatz. Beton- und Stahlbetonbau (95) August 2000 Heft 8.
- [8.11] De Vries, L. und Herrmann, T. : English - German Technical and Engineering Dictionary. MacGraw - Hill Book Company 1967. Nachdruck 1972. Oscar Brandstetter Verlag KG. Wiesbaden.
- [8.12] Schäfer, H.G. : Verstärken von Betonbauteilen. Sachstandsbericht. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 467. Beuth Verlag GmbH. Berlin 1996.
- [8.13] Schäfer, H.G. und Schmidt, W. : Zum Schubtragverhalten von Fertigplatten mit Ortbetonergänzung. DAFStb. Heft 456. Beuth Verlag GmbH. Berlin 1996.
- [8.14] Schäfer, H.G. und Bäätjer, G. : Verbundmittel in spritzbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Abschlußbericht zu dem vom Deutschen Beton-Verein E.V. geförderten Forschungsvorhaben. Schriftenreihe „Konstruktiver Ingenieurbau“ der Universität Dortmund, H. 15. Selbstverlag. Dortmund, März 1992.
- [8.15] Ackermann, G. und Burkhardt M.: Tragverhalten von bewehrten Verbundfugen bei Fertigteilen und Ortbeton in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), Heft 7, S. 165-170 und Heft 8, S. 197-200.
- [8.16] DIN 1045-2 : Beton. Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Juli 2001.

---

## 9 Zusammenfassung Teil 2

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurde versucht, bei totalem Ausfall des Haftverbundes herauszufinden, inwiefern die infolge der Oberflächenrauheit hervorgerufenen Reibungskräfte in der Lage sind, die einwirkenden Kräfte weiterzuleiten. Zusätzlich wurde die Abnahme dieser Reibungskräfte durch Verschleiß untersucht. Der Verschleiß konnte unter ermüdungsrelevanter Belastungen verursacht werden. Dafür wurden Wöhlerlinien ermittelt. Folgende Größen wurden variiert, um deren Einfluss zu untersuchen:

- die Zuschlagsieblinien,
- die unterschiedlichen Betonfestigkeiten des Alt- und Neubetons,
- die Rauheit.

Ein Ergebnis war, dass die unterschiedlichen Sieblinien und die Form der aufgerauten Betonoberfläche keinen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse haben; nur die Rauheit und die eingesetzten Betonfestigkeiten spielten hier eine Rolle.

Eine Erhöhung der Betonfestigkeit der Grundkörper hatte nur bei den schalungsrau belassenen Flächen einen erhöhenden Einfluss, sie lag zwischen 7-14%. Sie hatten aber überhaupt keinen Einfluss auf die Ergebnisse bei den aufgerauten Flächen. Erhöhung der Festigkeit der Verstärkungsschichten ergab entsprechend höhere Ergebnisse bei den aufgerauten und schalungsrau belassenen Flächen. Bei den schalungsrauen Flächen lag die Verbesserung der Ergebnisse zwischen 13-25%. Bei den aufgerauten Flächen ergab eine Erhöhung der Festigkeit der Verstärkungsschicht auch eine signifikante Erhöhung der Tragfähigkeit.

Die Oberflächenrauheit hatte hier den größten Einfluss auf die Verbesserung der Ergebnisse. Mit zunehmender Rauheit konnten sich die übertragbaren Schubkräfte bis zu 67% gesteigert werden. Die Rauheit vergrößert den Scherwiderstand und die Dauerfestigkeit gegenüber den schalungsrau belassenen Oberflächen bei ähnlichen Voraussetzungen (gleiche Grundkörper- und Verstärkungsschicht Festigkeit). Die Dauerfestigkeiten der schalungsrauen Flächen lagen bei 43-48% und bei den aufgerauten Flächen bei 51% der Kurzzeitfestigkeiten. Es war zu erkennen, dass es immer zu aufnehmbaren Schwingungsspielzahlen von mehr als  $2 \cdot 10^6$  kam, wenn die Schubkräfte etwa bei 50% der Bemessungswerte der aufnehmbaren Schubkräfte  $V_{Rd,sy}$  sanken.

Es konnte kein eindeutiger Unterschied im zeitlichen Ablauf der Fugenverschiebung und der Dübelbeanspruchung bei den aufgerauten und schalungsrau belassenen Flächen gefunden werden.

Es ist auch anzumerken, dass bei den schalungsrau belassenen Oberflächen das Versagen vom Bruch der Dübel begleitet war, obwohl die Risse und Schäden im Beton ziemlich früh auftraten. Bei den aufgerauten Flächen wurde das Gesamtversagen hauptsächlich durch das Versagen des Betons ausgelöst. Die Brüche der Dübel waren dann nur ein Resultat des allgemeinen Zusammenbruchs des Versuchskörpers. Die Zementsteinfestigkeit spielt hier eine größere Rolle als die Zuschläge selbst. Da die mechanische Verzahnung ausschließlich durch den Zementstein der Verstärkungsschicht und die Zuschläge des Untergrundes zustande kommt, führte dies zu dem Ergebnis, dass die Schäden und das Abscheren auf der Seite der Verstärkungsschicht zwangsläufig geschehen müssen. Dies hat damit zu tun, dass der Materialanteil der Verstärkungsschichten niedriger ist als der des aufgerauten Untergrundes. Dies führt dazu, dass die Belastung auf der Seite der Verstärkungsschicht von einer geringeren Schubfläche zu tragen ist, was wiederum zu einer Erhöhung der Schubspannung führt. Andererseits wird der Reibkraft auf dem aufgerauten Grundkörper nur von Zuschlägen aufgenommen, die eine höhere Festigkeit besitzen. Deshalb muss durch Verdichtungsmaßnahmen die Abnahme des Materialanteils verhindert werden.

Dies wird eher möglich bei der Einsatz von Spritzbeton bei der Verstärkungsmaßnahmen, da der Spritzbeton gegen der Untergrund geschleudert und verdichtet wird und so bessere Ergebnisse zu erwarten sind. Obwohl es sich bei dem eingesetzten Bewehrungsgrad um den kleinstmöglichen handelte, war es möglich, bei Ausschaltung des Haftverbundes eine Dauerbelastbarkeit zu erreichen, die der Mindest-Anforderung zur Verstärkung von Platten und Balken genügte.

Bei aufgerauten Oberflächen war grundsätzlich eine größere Schubsteifigkeit im Gebrauchslastbereich zu erkennen.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird empfohlen:

- Gute und kontrollierte Aufrauung der Betonoberflächen
- Einsatz einer hohen Verstärkungsschichtbetonfestigkeit
- Einsatz von Verdichtungsmaßnahmen um der Abnahme der Materialanteil zu vermindern und die mechanische Verzahnung zu verbessern
- Eine Reduzierung des Verbundmittelbewehrungsgrades kann vorerst nicht empfohlen werden.
- Als Verbundmittel sollten Dübel ausgewählt werden, die ihre Vorspannung auch nach ermüdungsrelevanter Beanspruchung zumindest teilweise noch aufrecht erhalten können. Damit ist ein Anpressen der Verstärkungsschicht und damit ein zuverlässiger Reibverbund gewährleistet.
- Weitere Untersuchungen, mit dem Ziel, andere Rauheitsstufen z. B. (2 mm und 3mm) sowie mindestens eine höhere Festigkeit der Verstärkungsschicht zu testen, wären wünschenswert.
- Außerdem wäre noch der Frage nachzugehen, wie sich die hier gefundenen Ergebnisse auf Verbindungen mit intaktem Haftverbund auswirken.

**1****Anhang 1****Der Korrekturfaktor**

In diesem Anhang werden Korrekturfaktorkurven für die drei Abtastzonen entsprechend der Abtastmuster Abb. 4.13d in Kapitel 4 dargestellt.

Die Ergebnisse der Abtastaufösungen 0,5, 3 und 6 Messungen/mm, für jeweils der Rauheitsstufen 1 mm, 2 mm und 3 mm werden für die folgenden Oberflächenkenngrößen:

- Glättungstiefe  $R_p$
- Maximale Rautiefe  $R_y$
- Mittenrauwert  $R_a$
- Profillängenverhältnis  $I_r$
- Oberflächenverhältnis  $c_r$

und jeweils für die Serien A, B und C dargestellt.

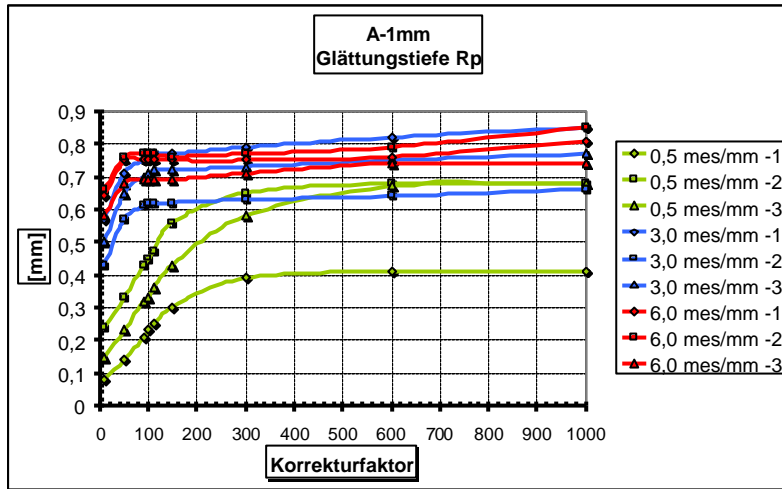


Abb. 1.1 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-1mm

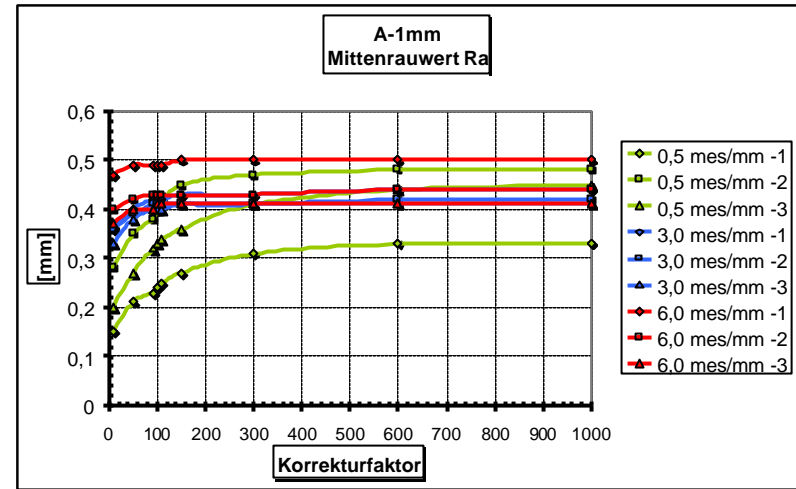


Abb. 1.3 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-1mm

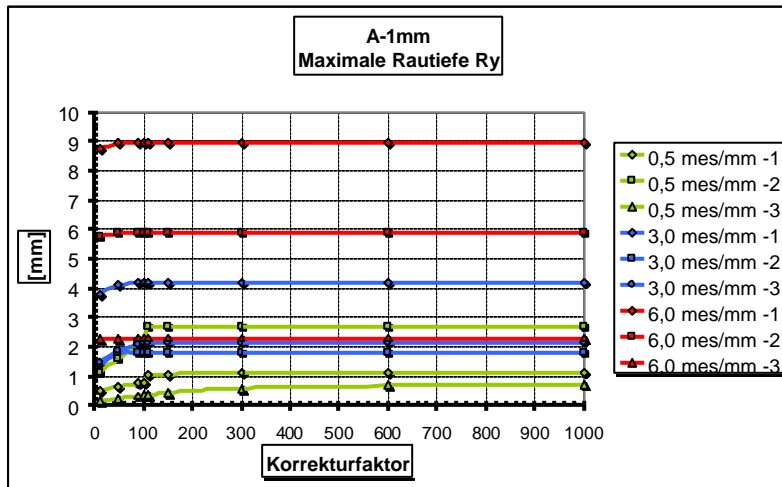


Abb. 1.2 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-1mm

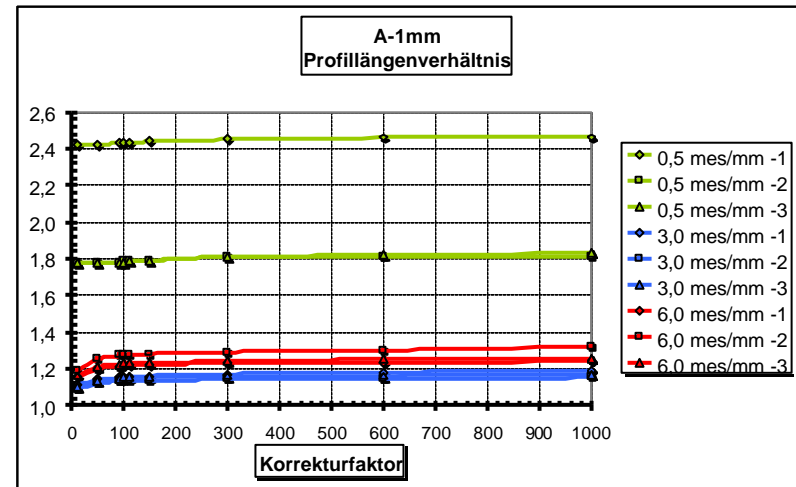


Abb. 1.4 : Verhalten der Profilängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-1mm

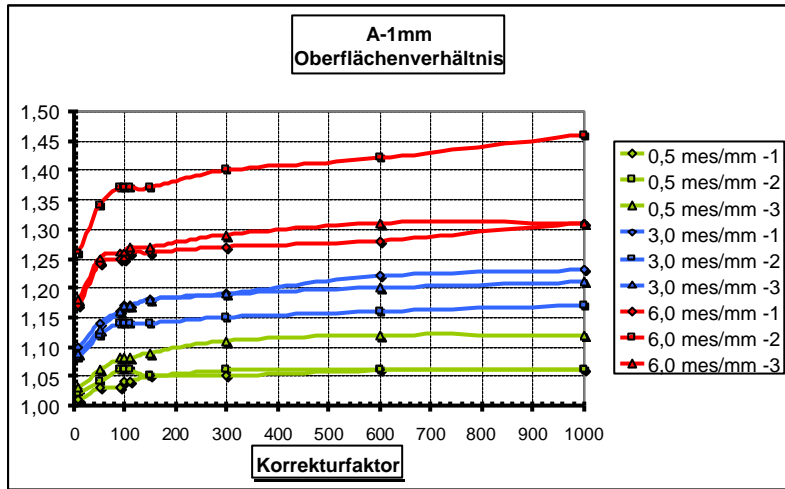


Abb. 1.5 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-1mm

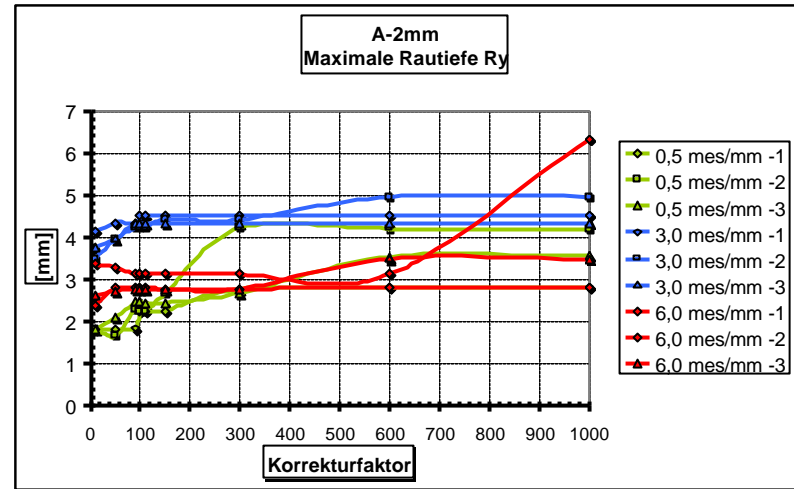


Abb. 1.7 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-2mm

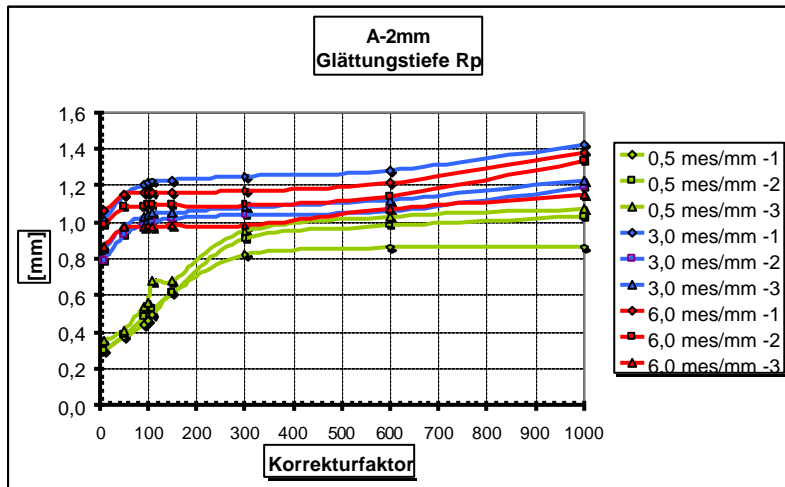


Abb. 1.6 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-2mm

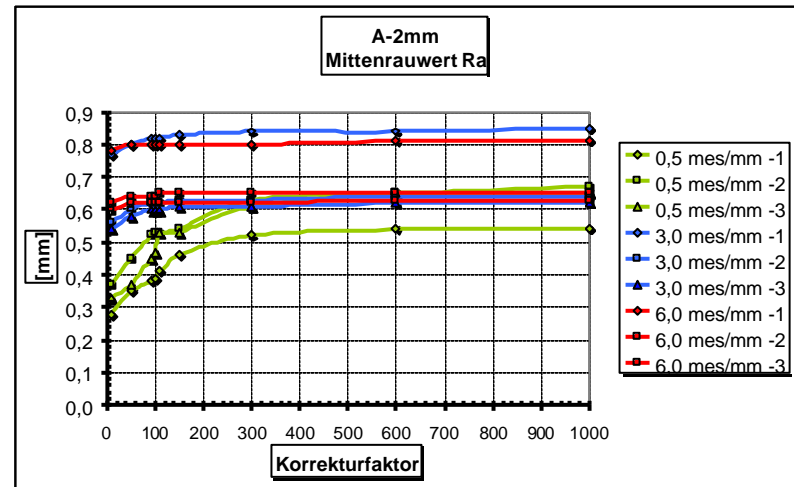


Abb. 1.8 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-2mm



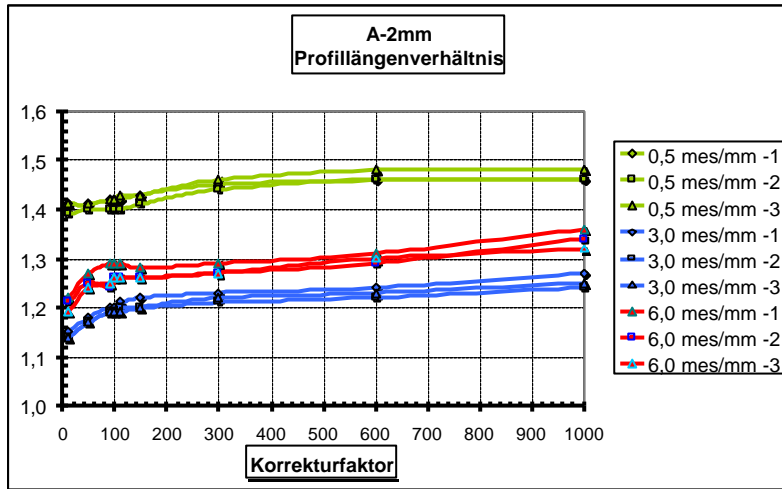


Abb. 1.9 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-2mm

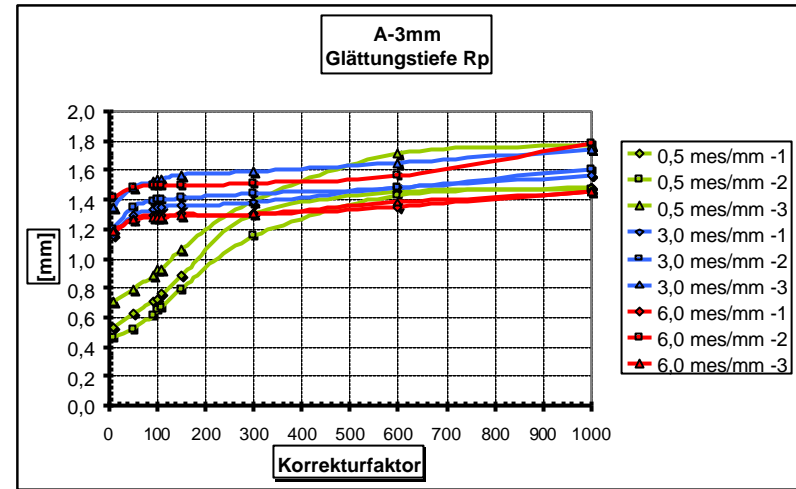


Abb. 1.11 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-3mm

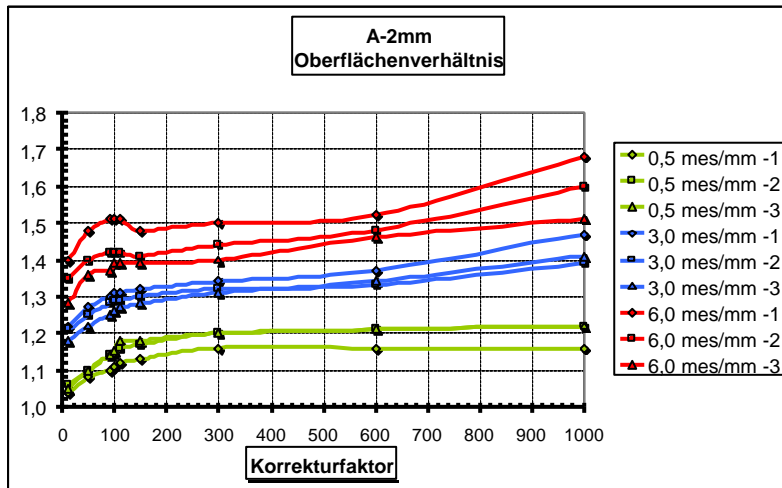


Abb. 1.10 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-2mm

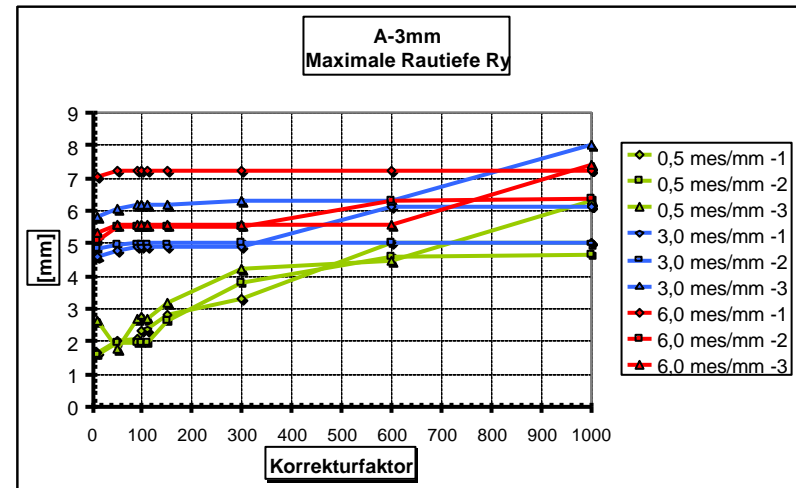


Abb. 1.12 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-3mm

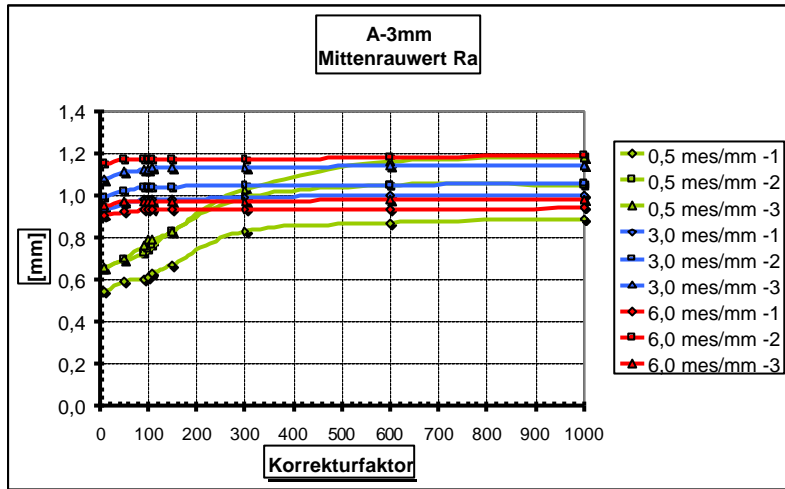


Abb. 13 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-3mm

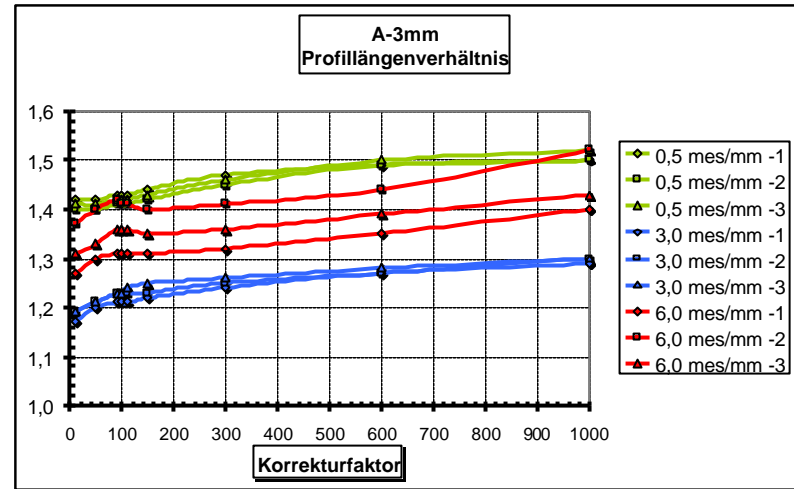


Abb. 1.15 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-3mm

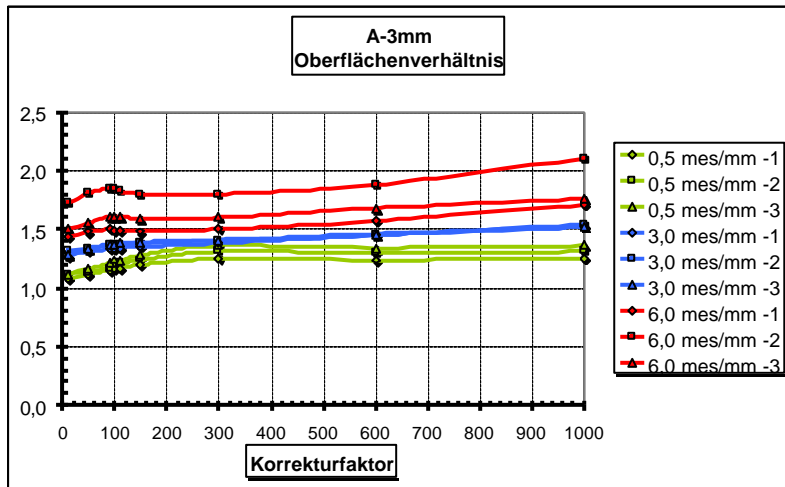


Abb. 1.14 : Verhalten der Profilflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie A-3mm

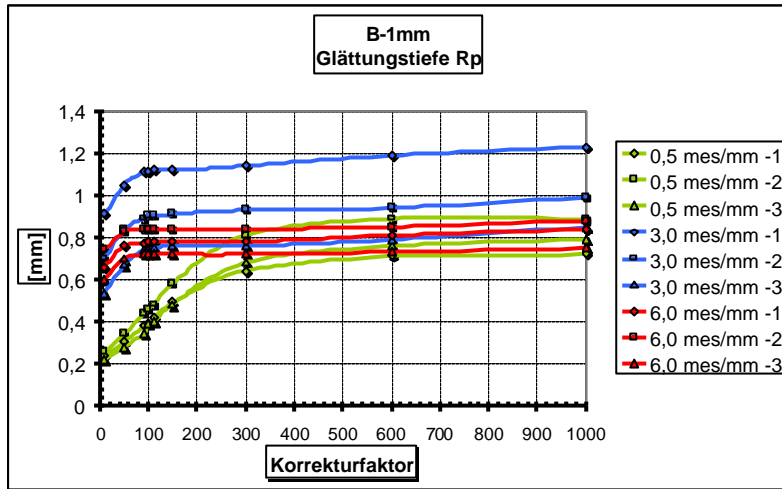


Abb. 1.16 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-1mm

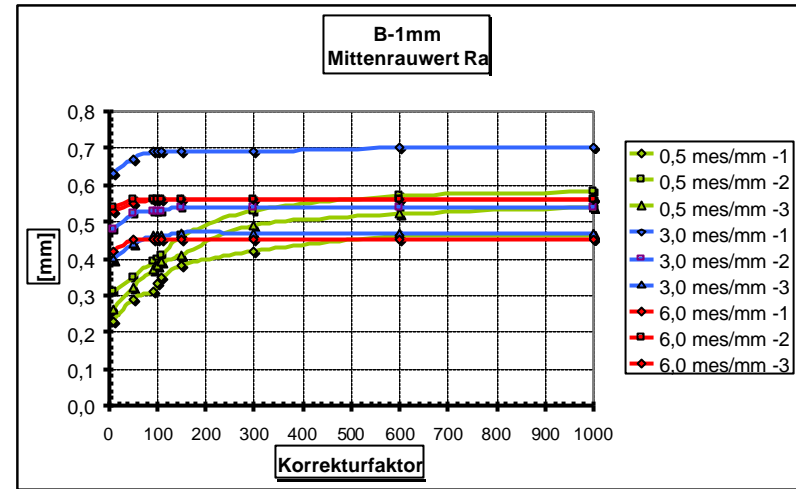


Abb. 1.18 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-1mm

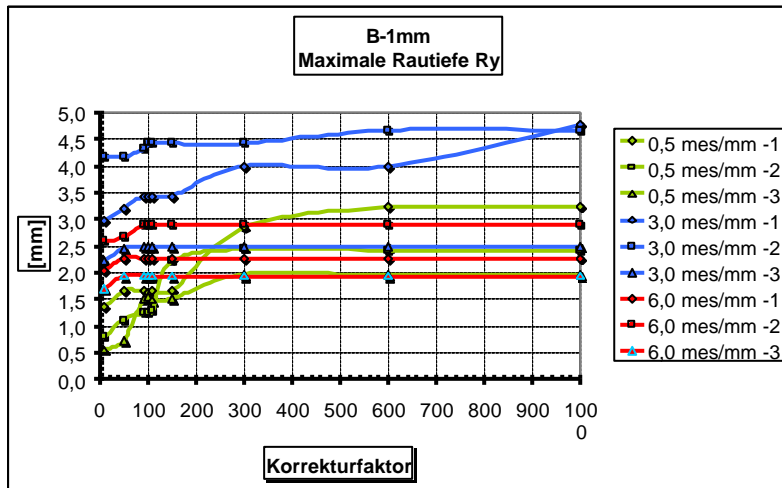


Abb. 1.17 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-1mm

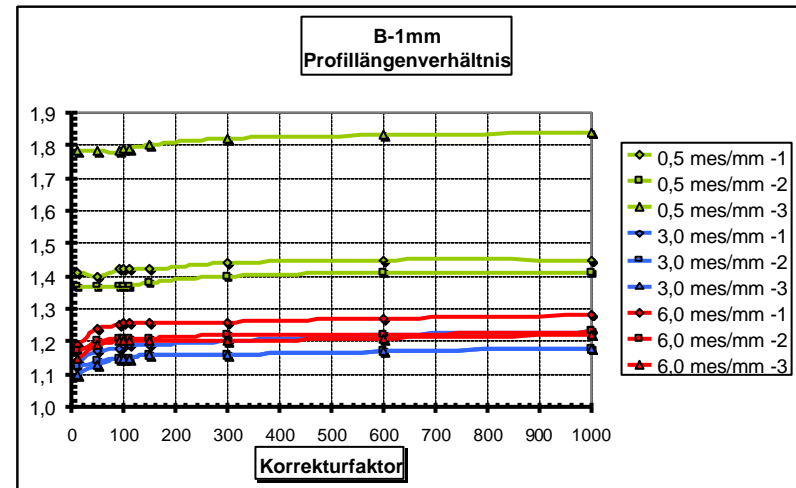


Abb. 1.19 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-1mm

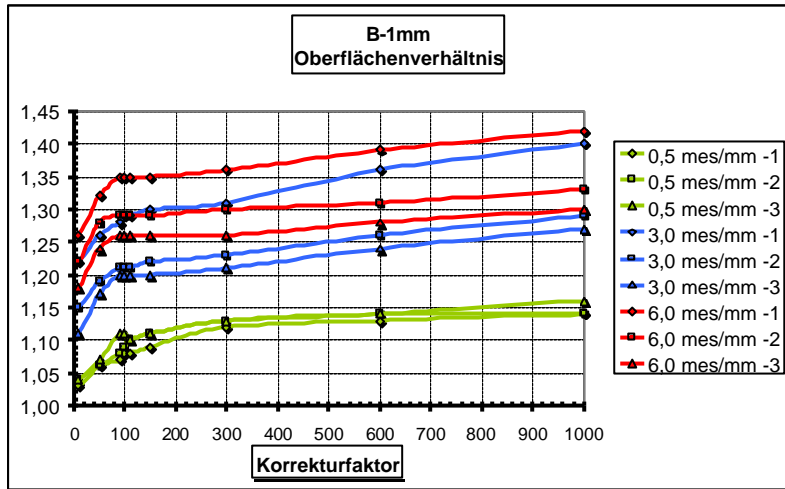


Abb. 1.20 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-1mm

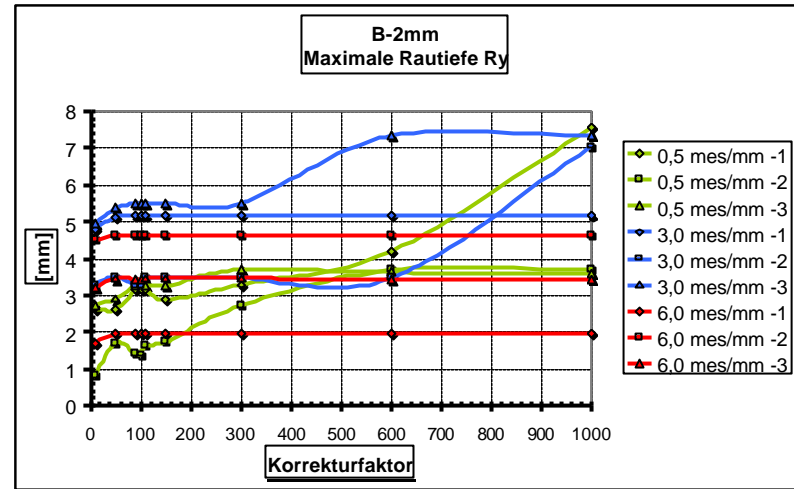


Abb. 1.22 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-2mm

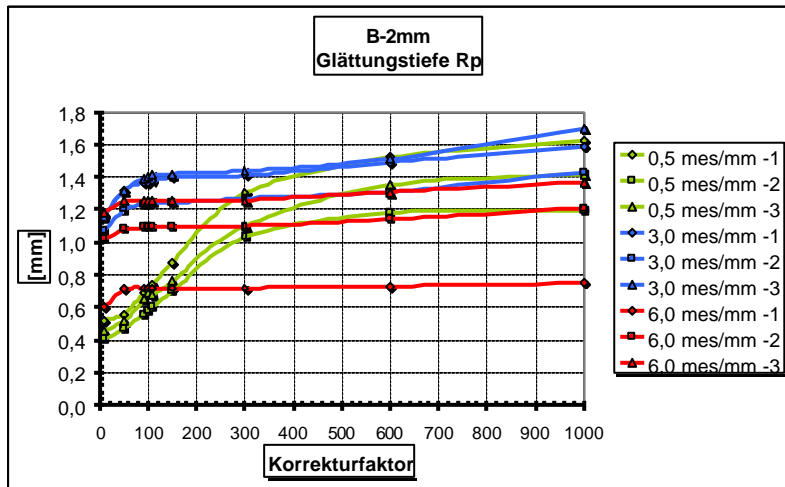


Abb. 1.21 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-2mm

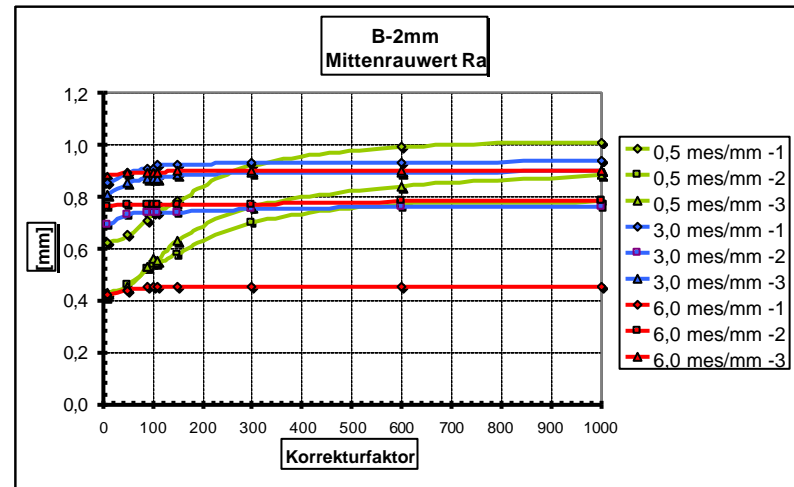


Abb. 1.23 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-2mm

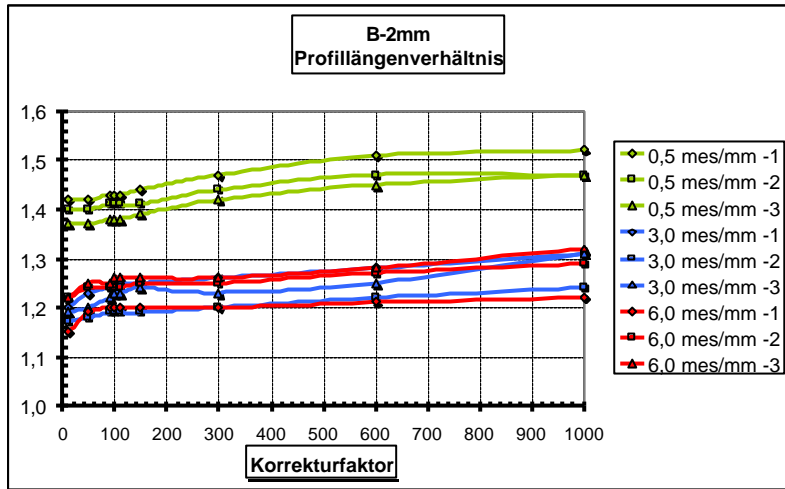


Abb. 1.24 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-2mm

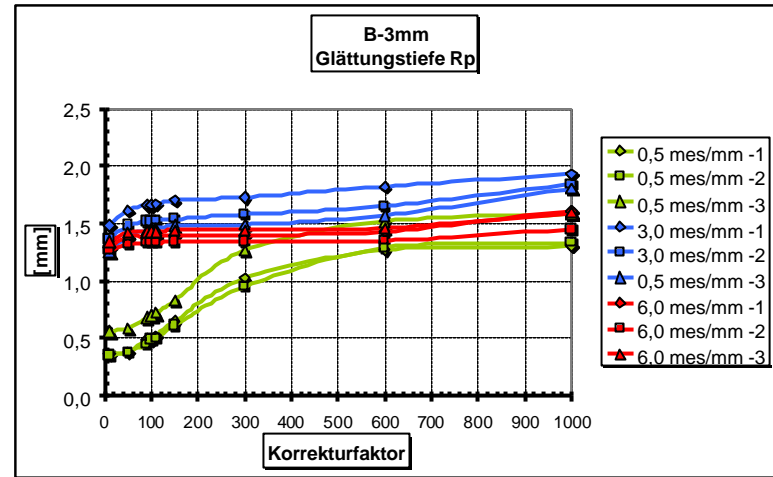


Abb. 1.26 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-3mm

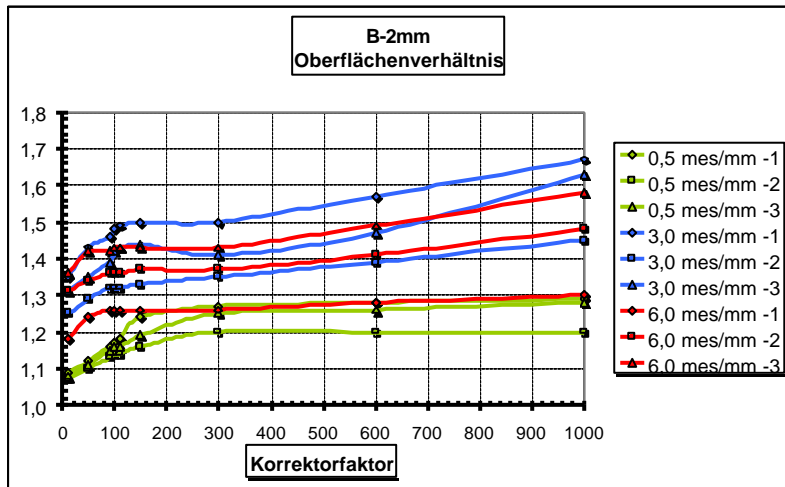


Abb. 1.25 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-2mm

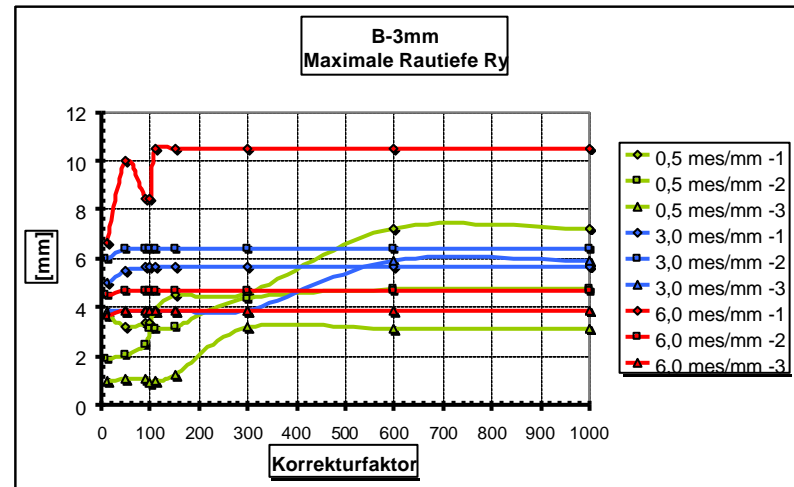


Abb. 1.27 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-3mm

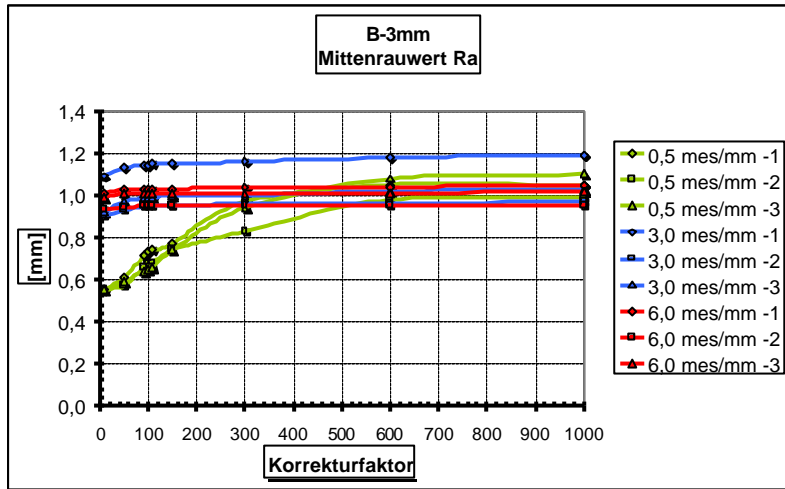


Abb. 1.28 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-3mm

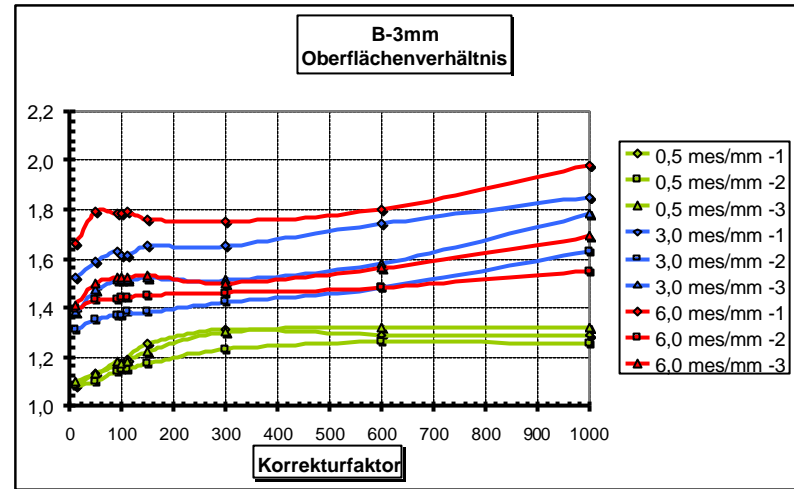


Abb. 1.30 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-3mm

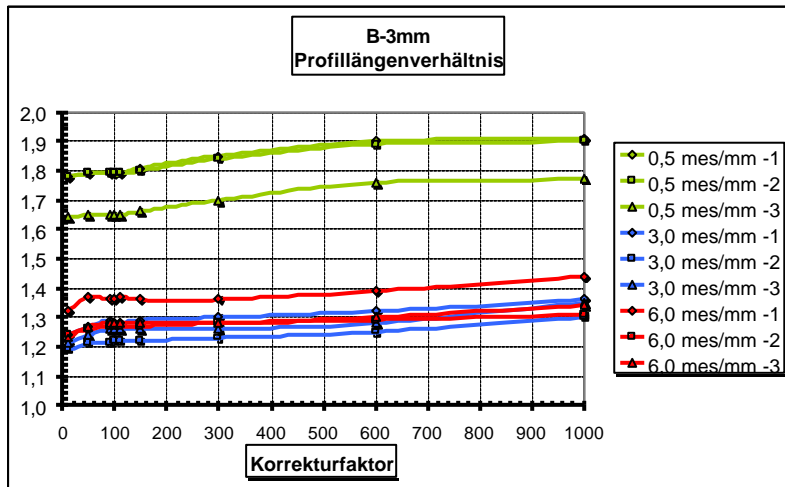


Abb. 1.29 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie B-3mm

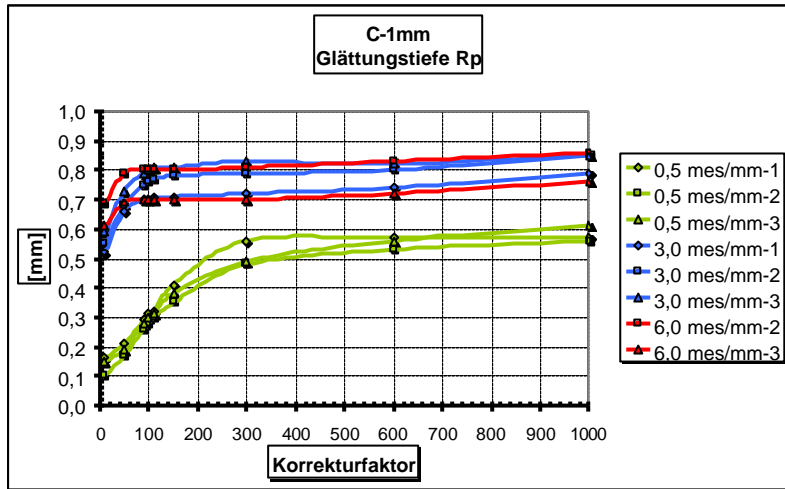


Abb. 1.31 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-1mm

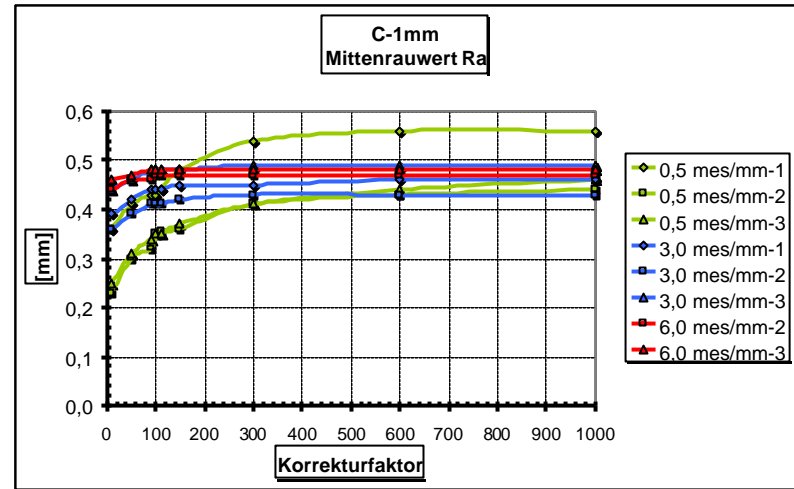


Abb. 1.33 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-1mm

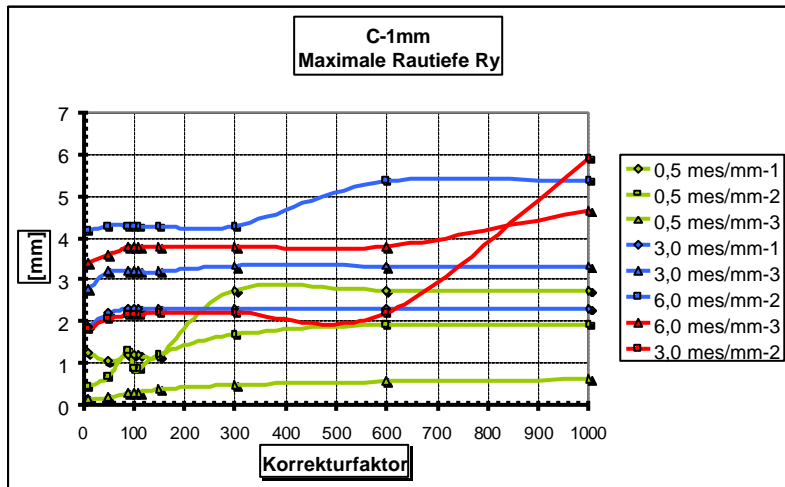


Abb. 1.32 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-1mm

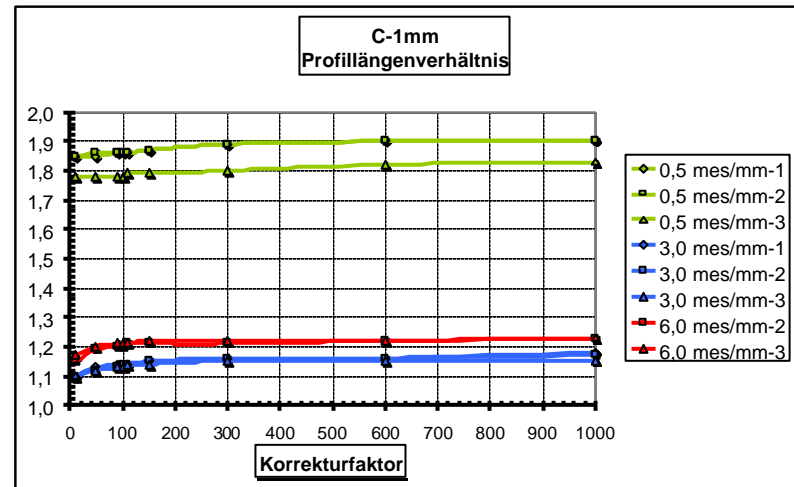


Abb. 1.34 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-1mm

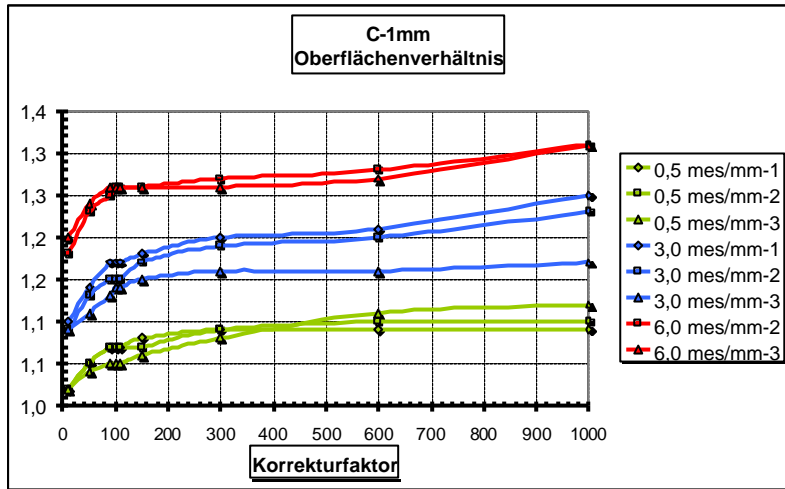


Abb. 1.35 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-1mm

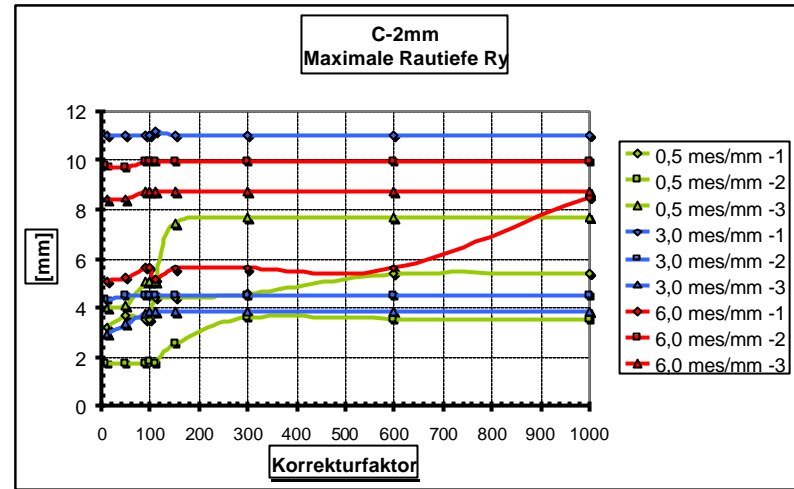


Abb. 1.37 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-2mm

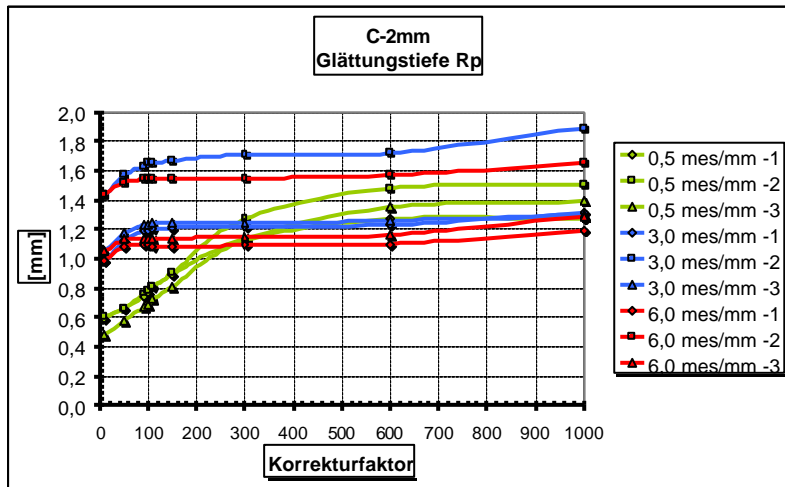


Abb. 1.36 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-2mm

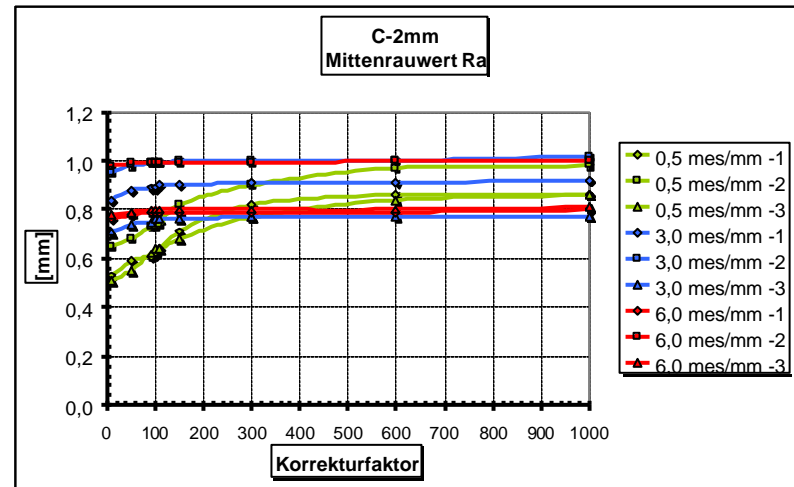


Abb. 1.38 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-2mm



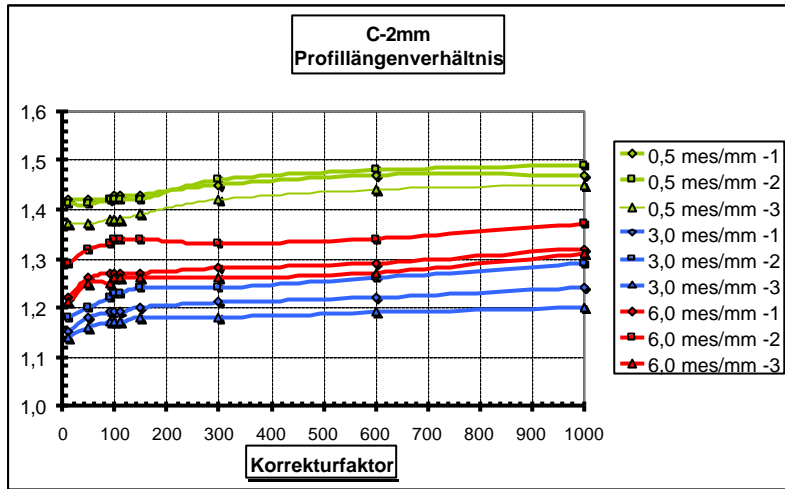


Abb. 1.39 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-2mm

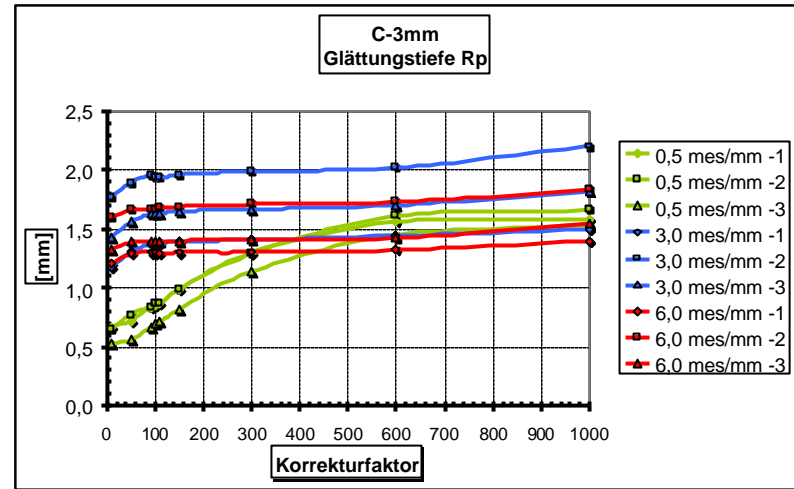


Abb. 1.41 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-3mm

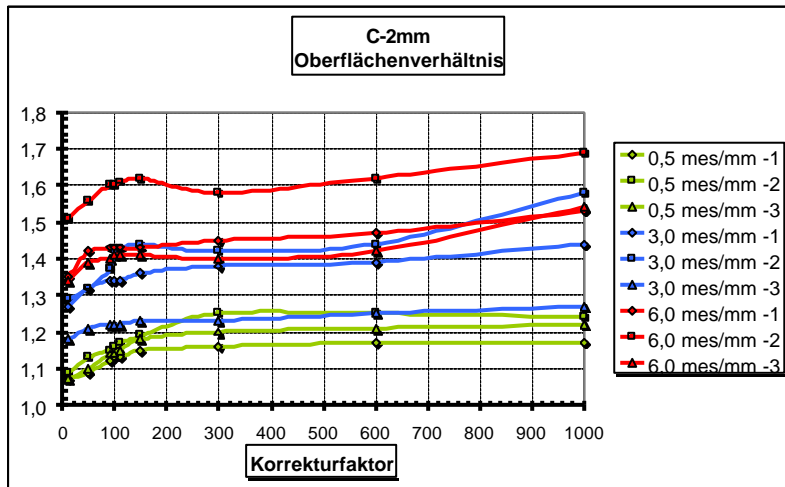


Abb. 1.40 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-2mm

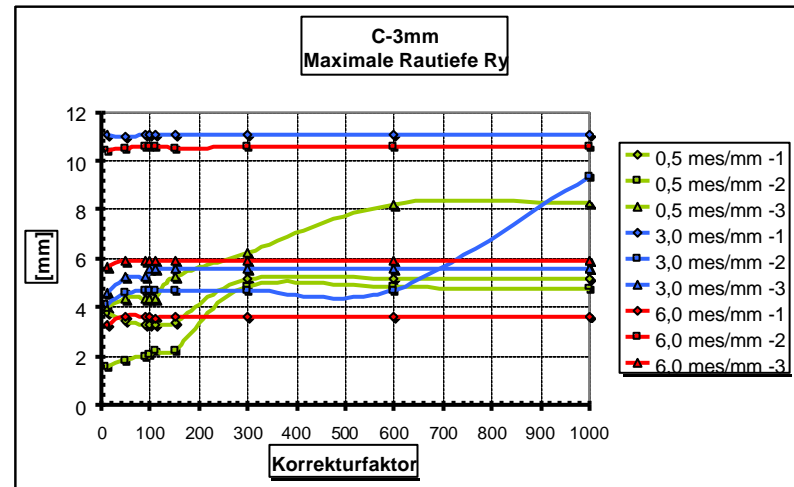


Abb. 1.42 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-3mm

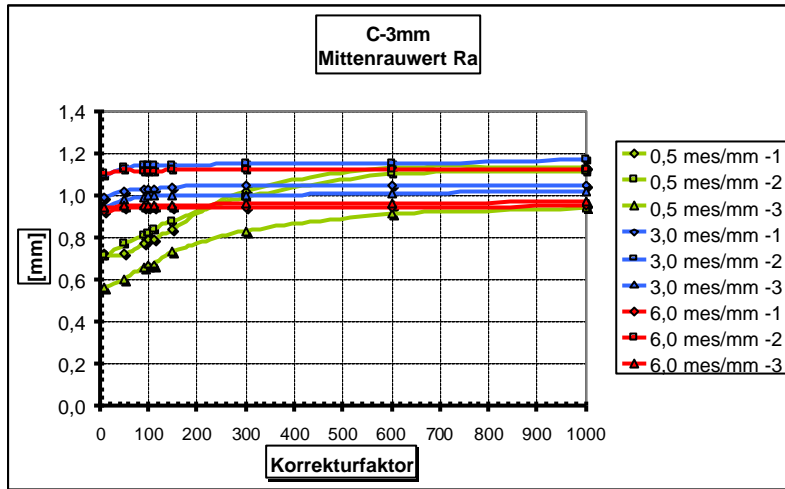


Abb. 1.43 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-3mm

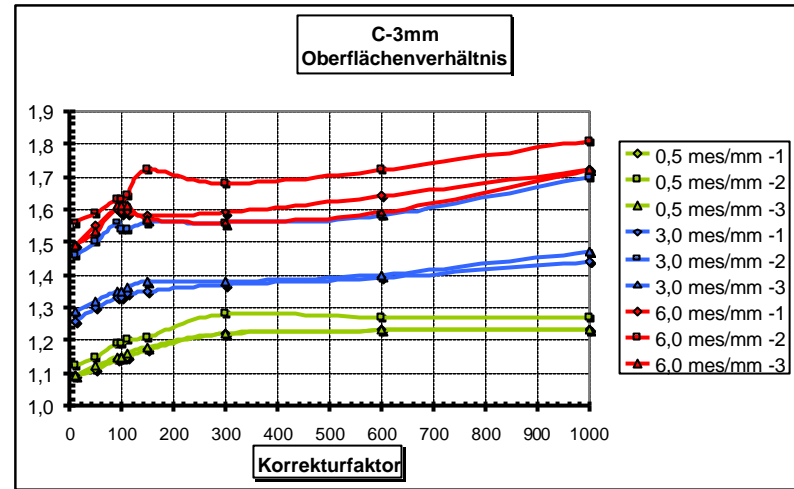


Abb. 1.45 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-3mm

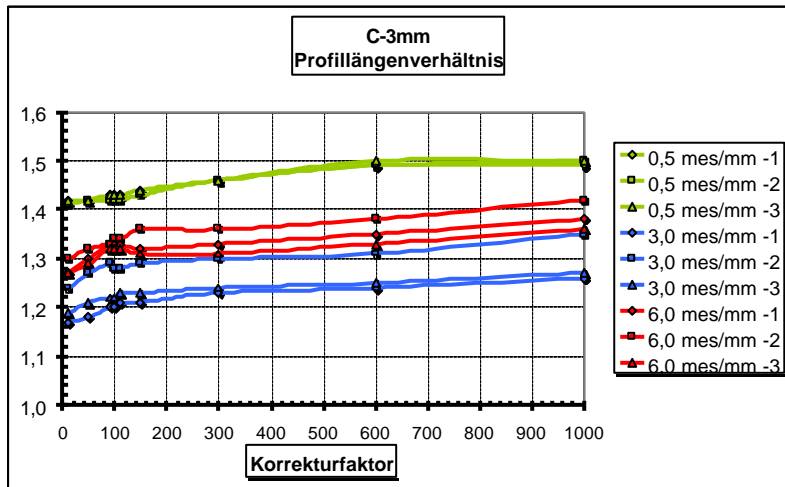


Abb. 1.44 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme der Korrekturfaktor, Serie C-3mm

**2****Anhang 2****Der Korrekturfaktor**

In diesem Anhang wird der Einfluss des Korrekturfaktors auf die Ergebnisse des Laserabtastverfahrens Dargestellt.

Die Ergebnisse der Abtastauflösungen 0,5, 1 und 3 Messungen/mm, für jeweils der Rauheitsstufen 1 mm, 2 mm und 3 mm werden für die folgenden Oberflächenkenngrößen:

- Glättungstiefe  $R_p$
- Maximale Rautiefe  $R_y$
- Mittenrauwert  $R_a$
- Profillängenverhältnis  $I_r$
- Oberflächenverhältnis  $c_r$

Und jeweils für die Serien A, B und C in den Abtastrichtungen

- N
- Q
- S

dargestellt.

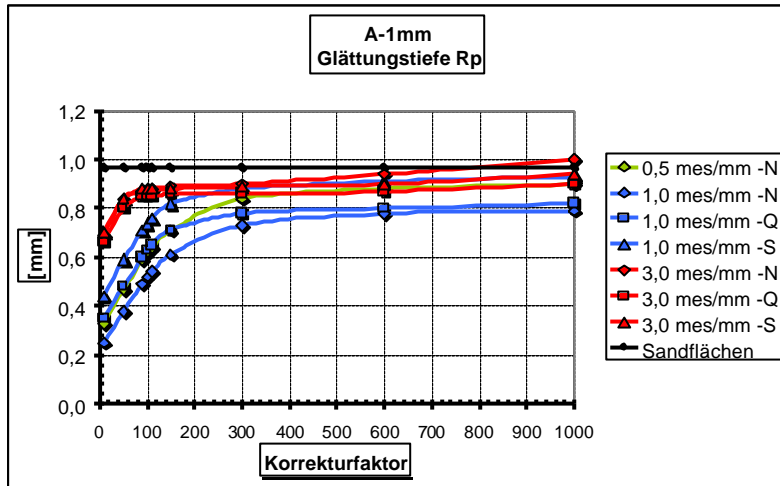


Abb. 2.1 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-1mm

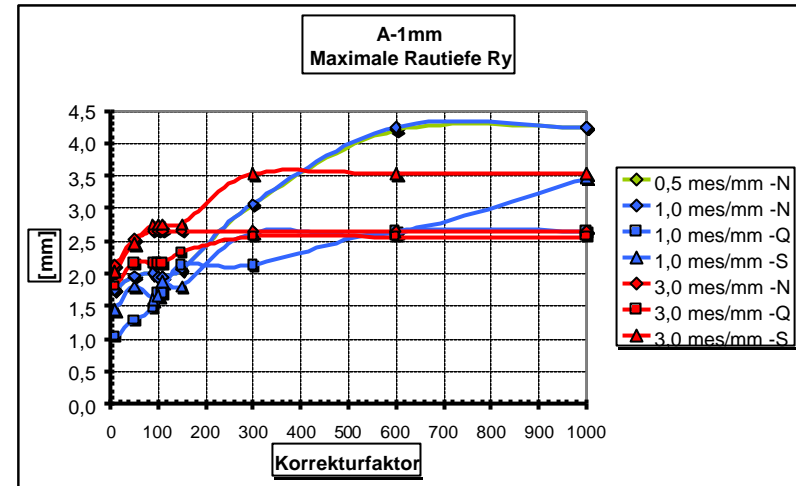


Abb. 2.3 : Verhalten der Mittenrautigkeit bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-1mm

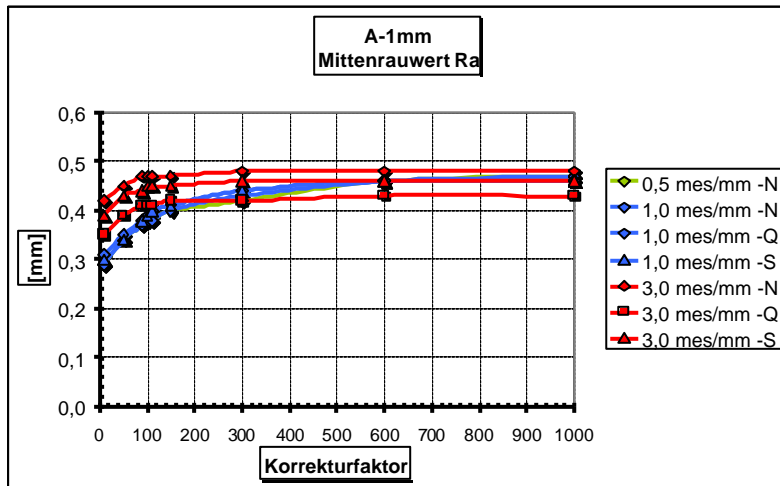


Abb. 2.2 : Verhalten der Maximalen Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-1mm

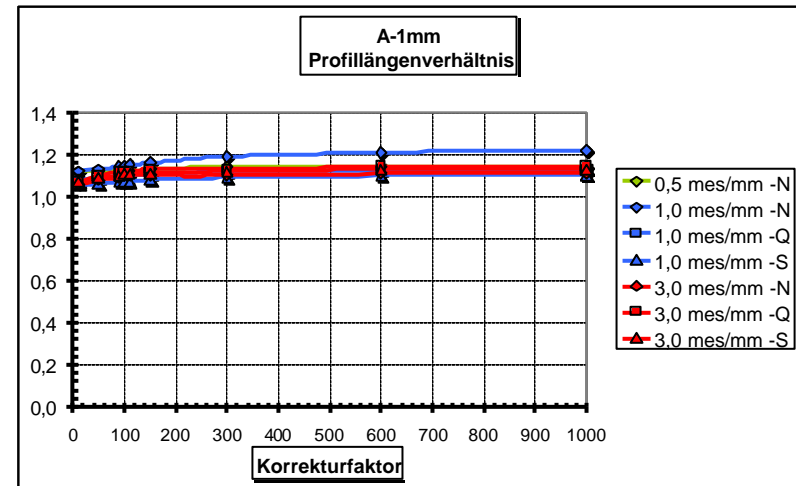


Abb. 2.4 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-1mm

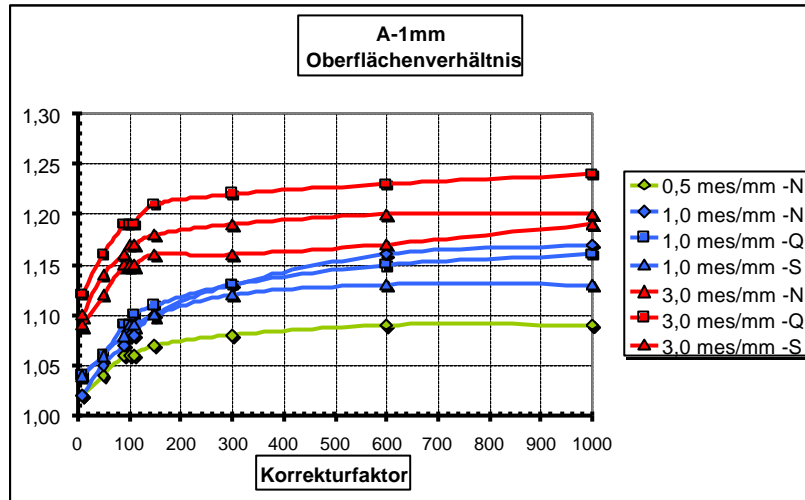


Abb. 2.5 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-1mm

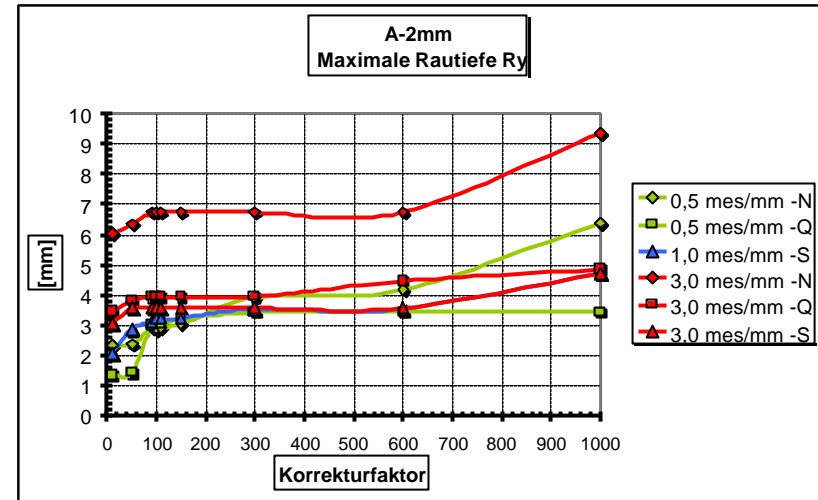


Abb. 2.7 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-2mm

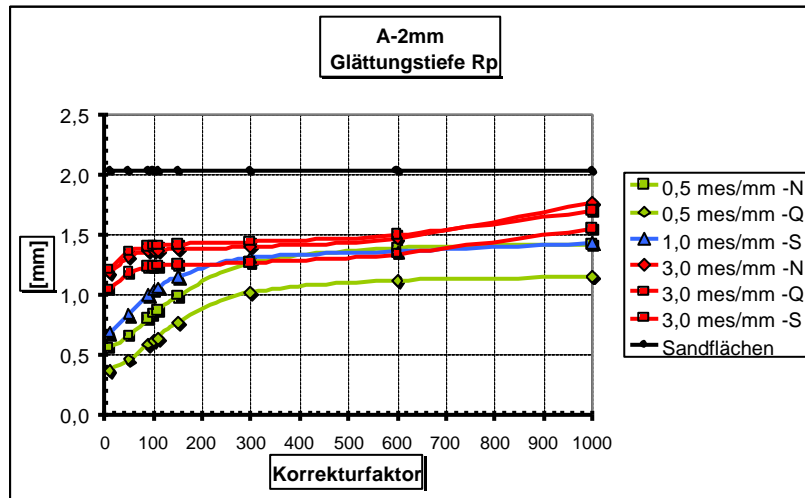


Abb. 2.6 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-2mm

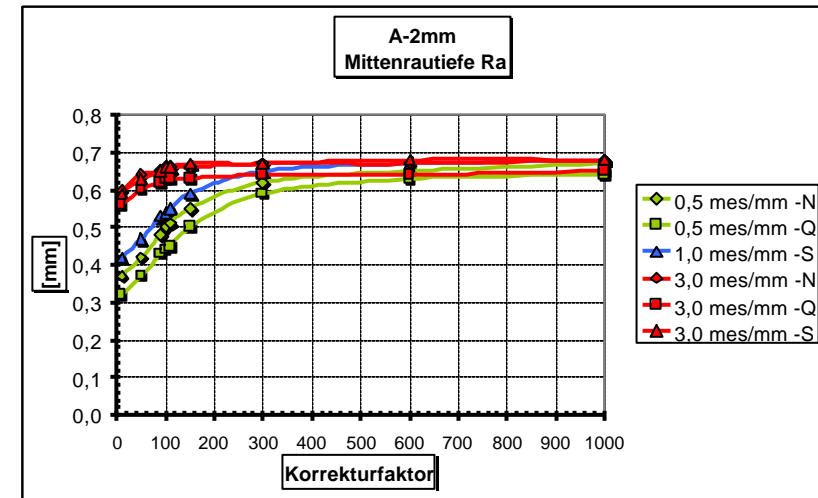


Abb. 2.8 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-2mm

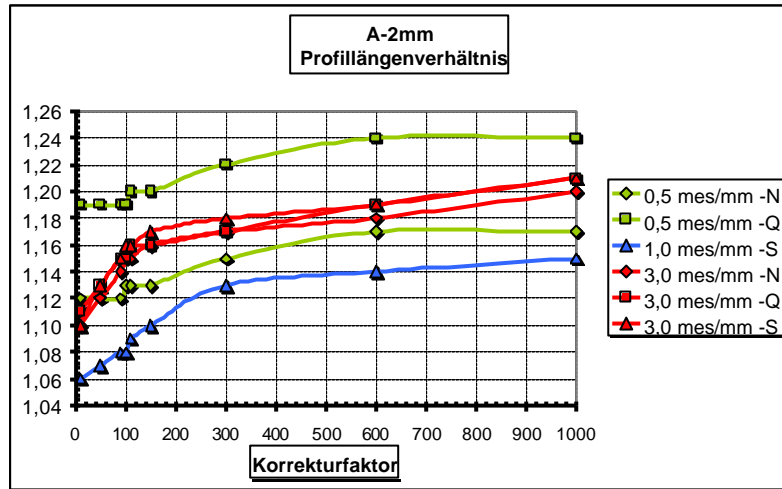


Abb. 2.9 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-2mm

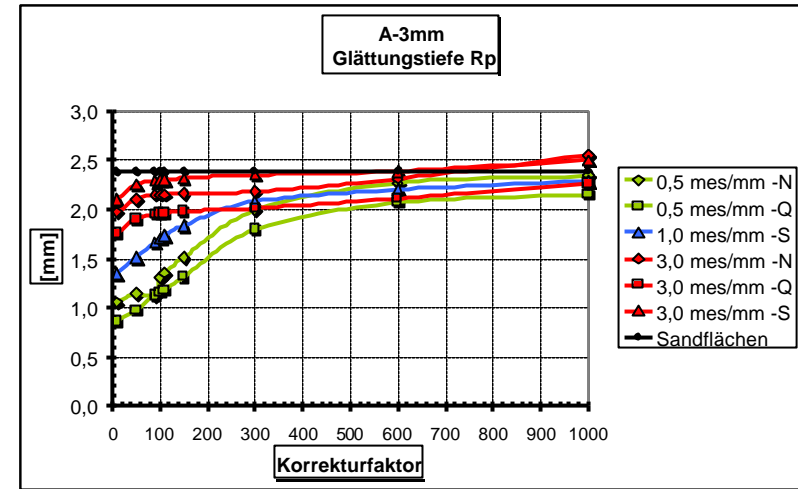


Abb. 2.11 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-3mm

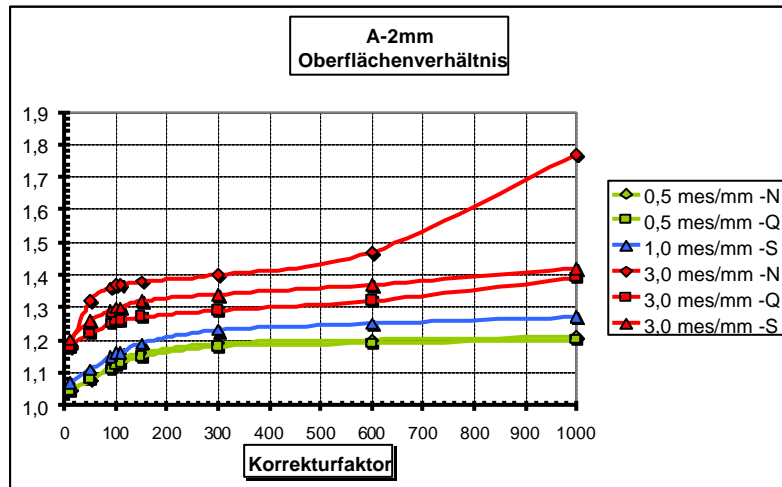


Abb. 2.10 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-2mm

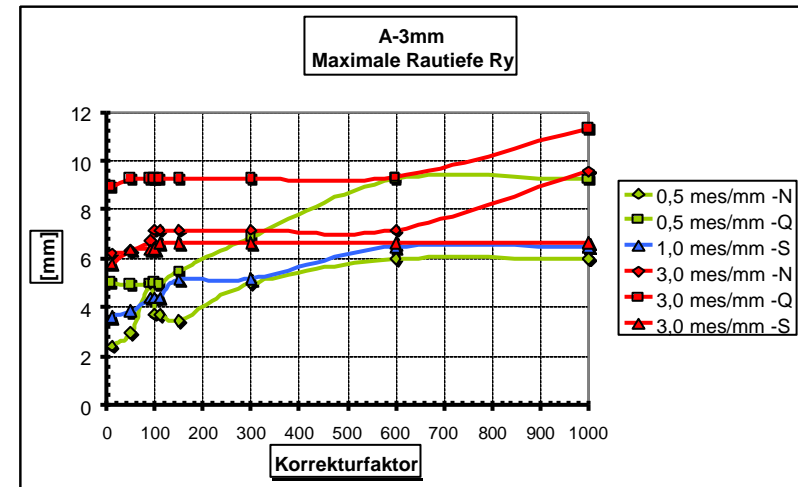


Abb. 2.12 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-3mm

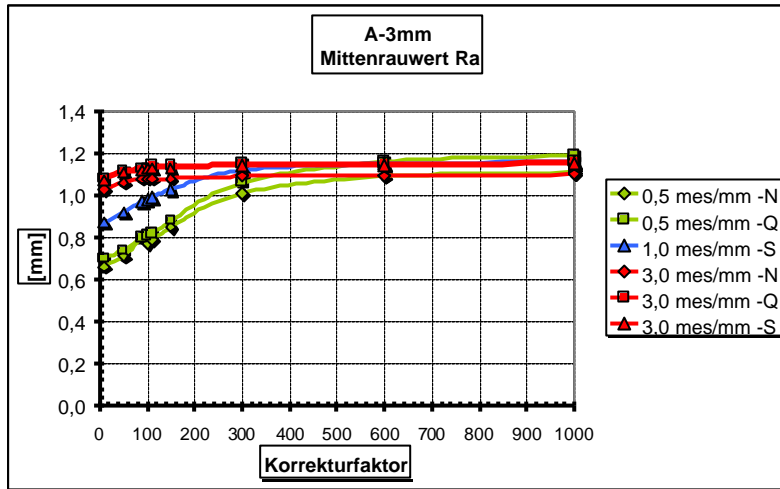


Abb. 2.13: Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-3mm

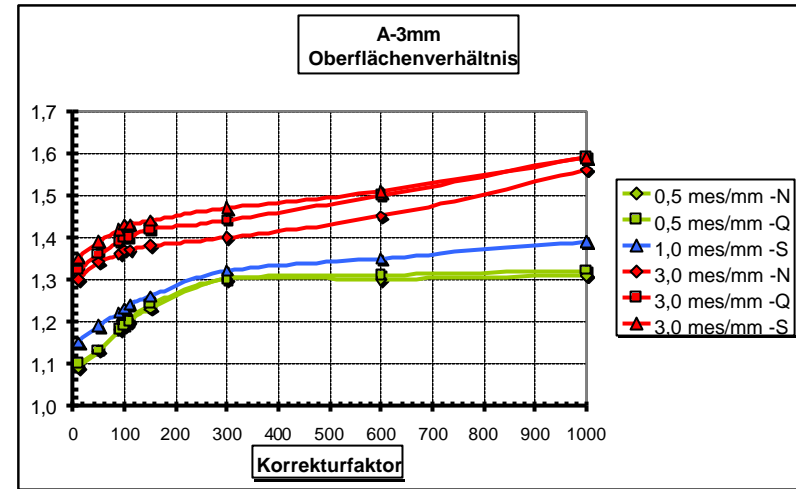


Abb. 2.15 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-3mm

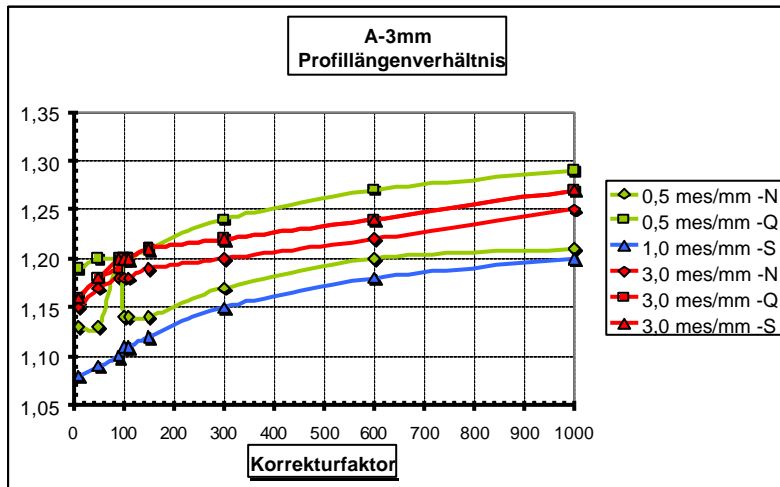


Abb. 2.14 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie A-3mm

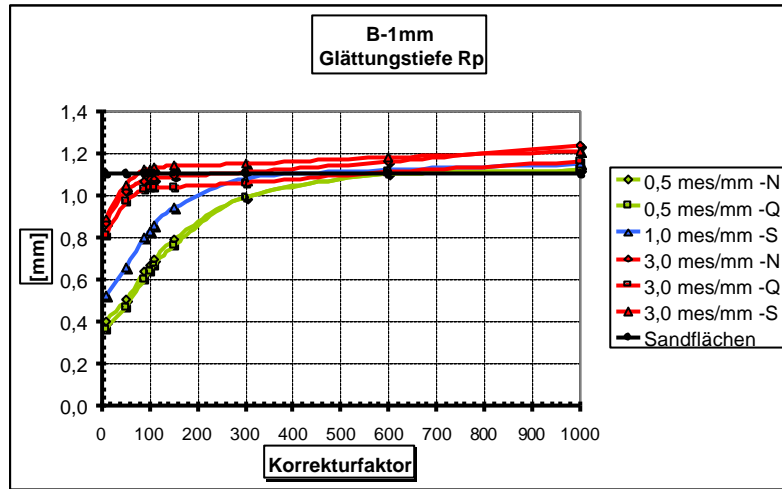


Abb. 2.16 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-1mm

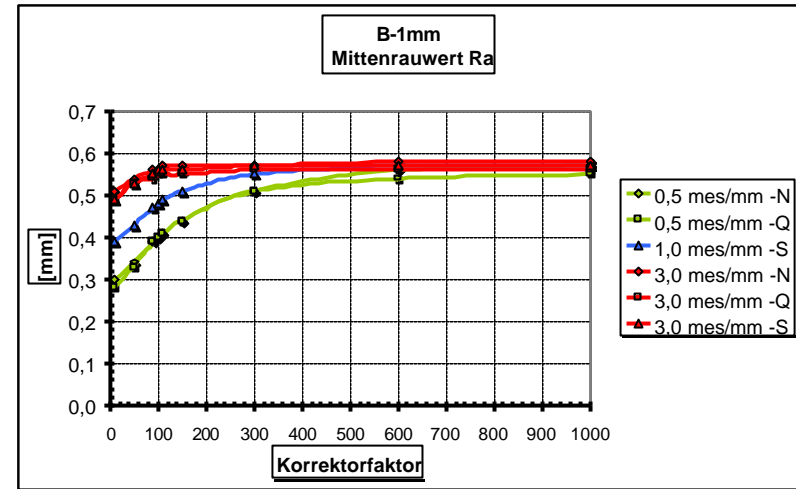


Abb. 2.18 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-1mm

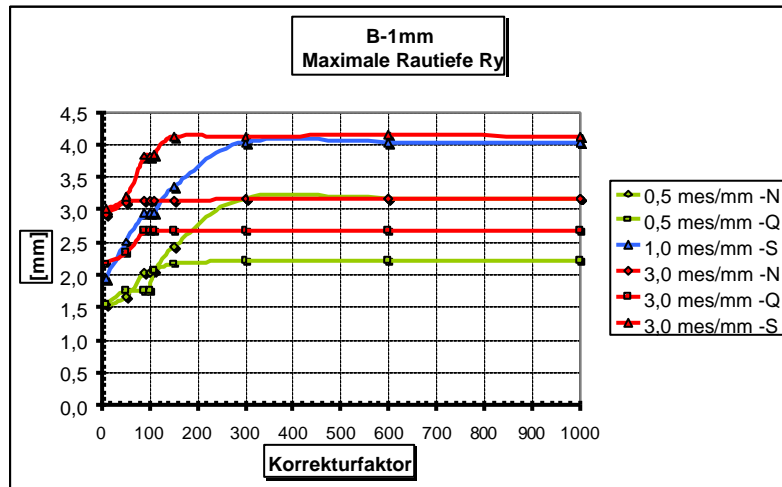


Abb. 2.17 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-1mm

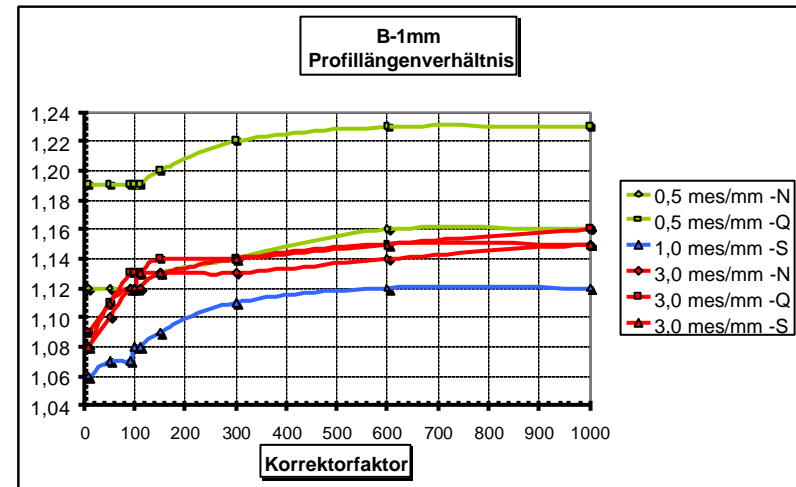


Abb. 2.19 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-1mm



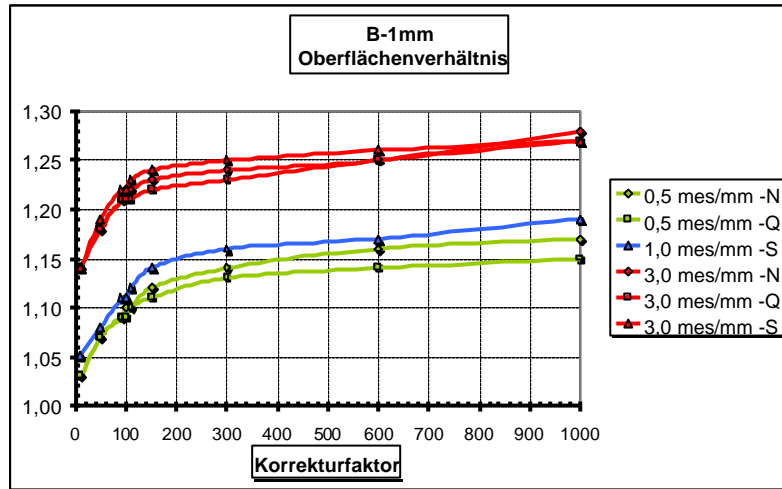


Abb. 2.20 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-1mm

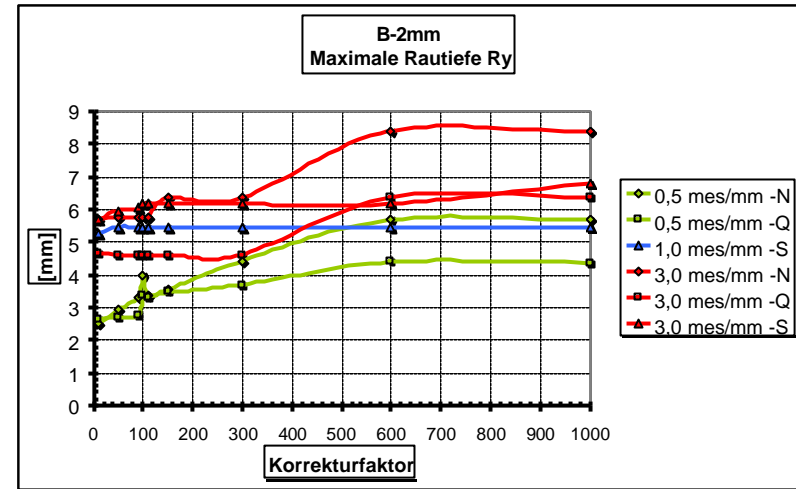


Abb. 2.22 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-2mm

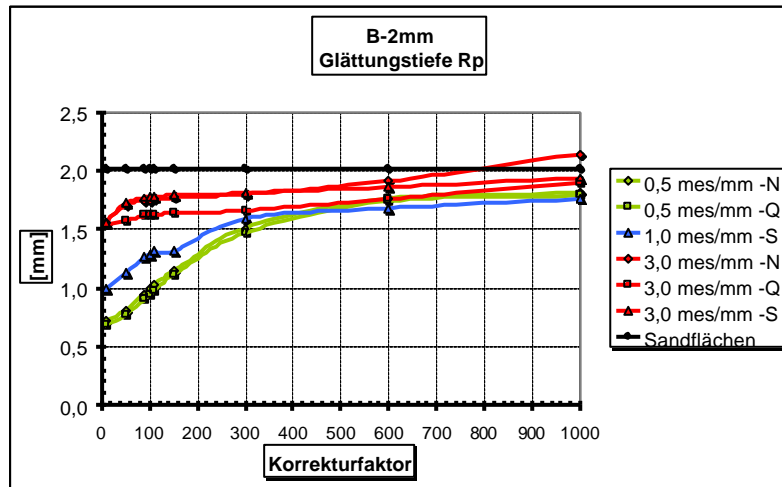


Abb. 2.21 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-2mm

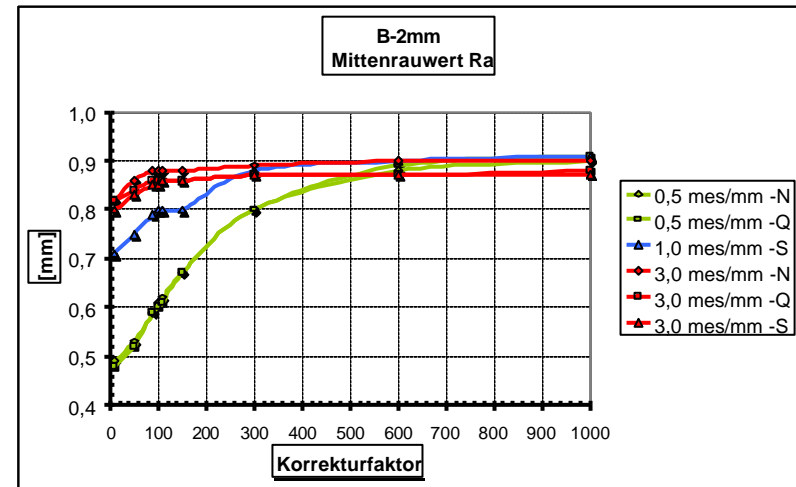


Abb. 2.23 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-2mm

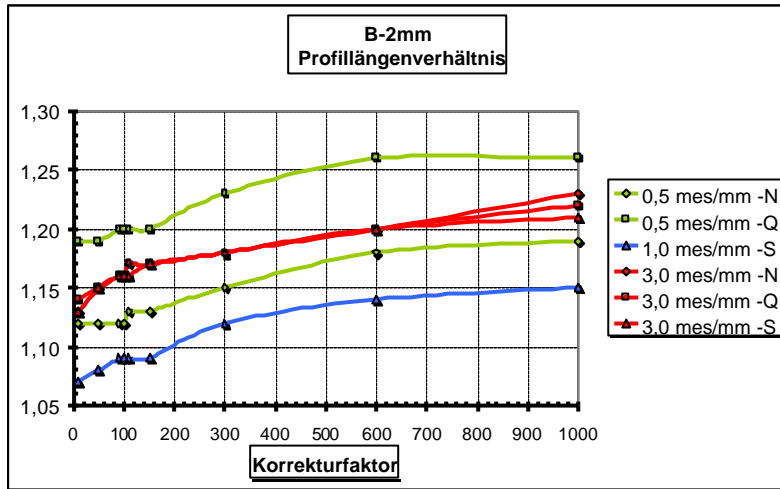


Abb. 2.24 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-2mm

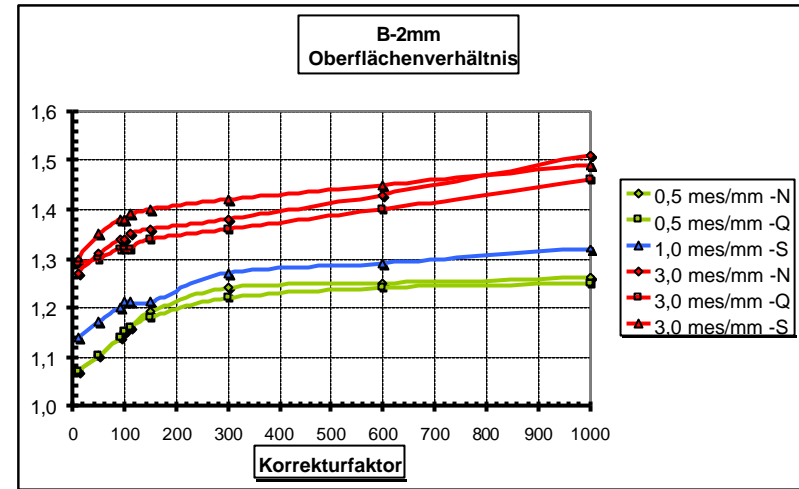


Abb. 2.26 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-3mm

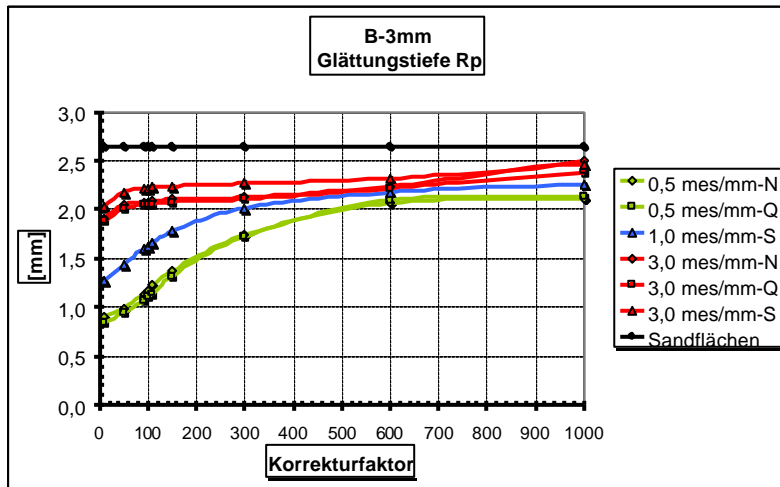


Abb. 2.25 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-2mm

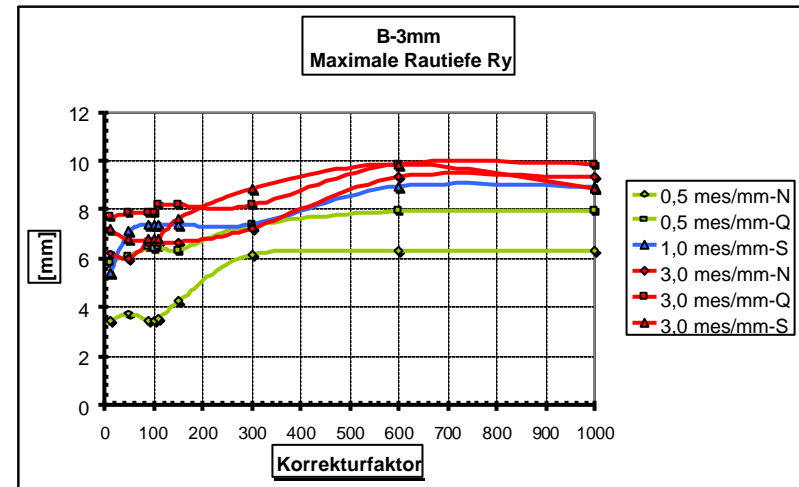


Abb. 2.27 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-3mm

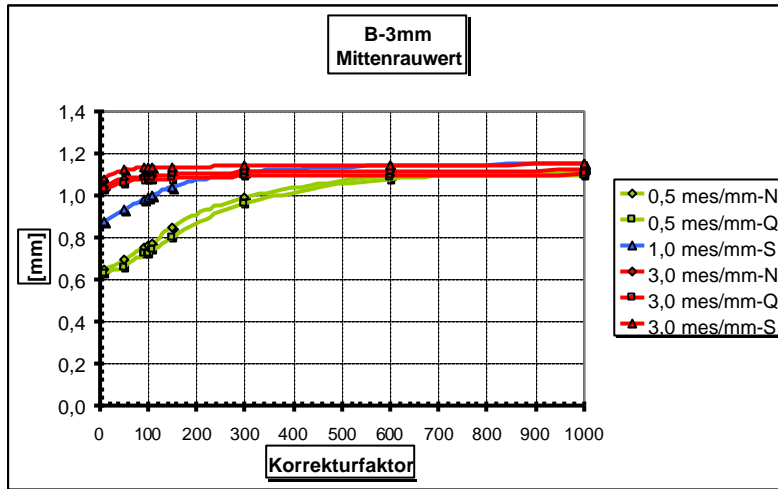


Abb. 2.28 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-3mm

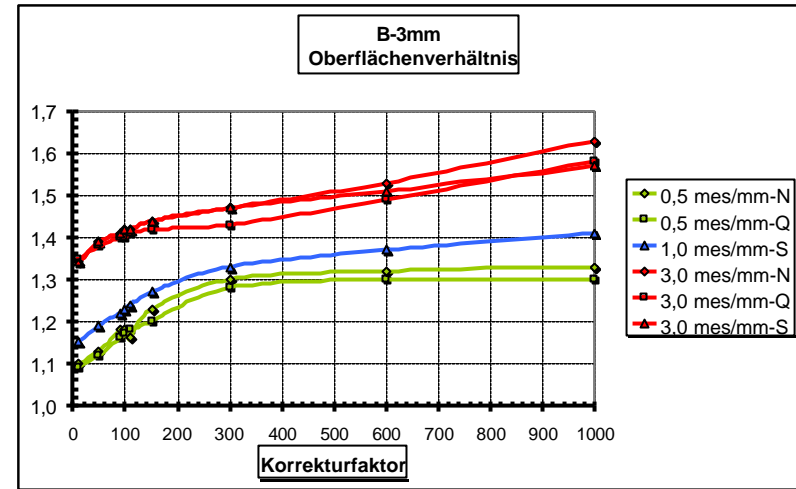


Abb. 2.30 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-3mm

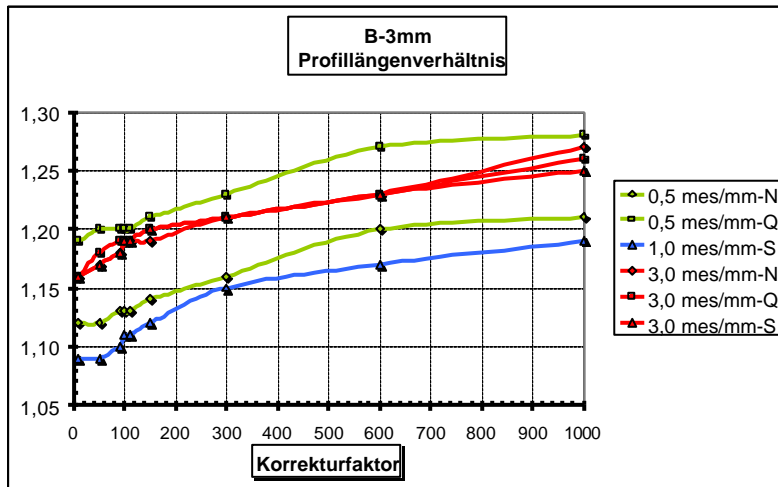


Abb. 2.29 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie B-3mm

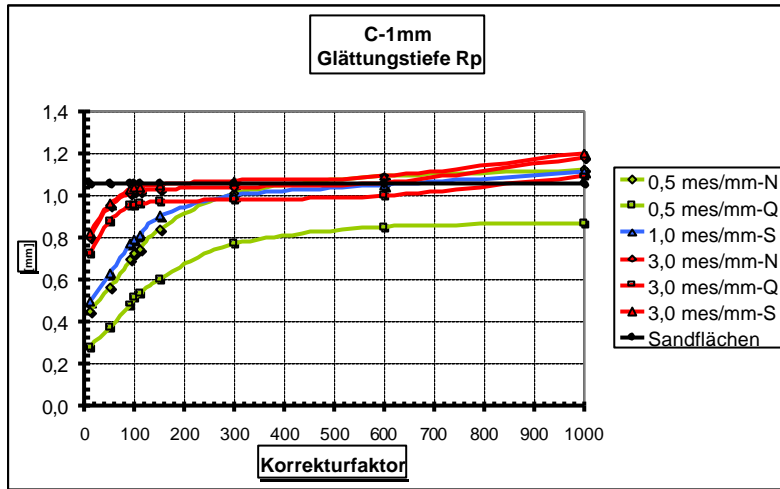


Abb. 2.31 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-1mm

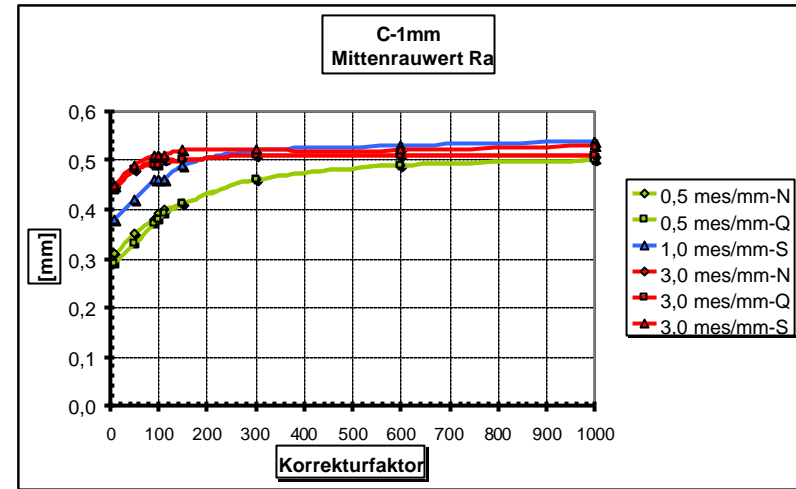


Abb. 2.33 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-1mm

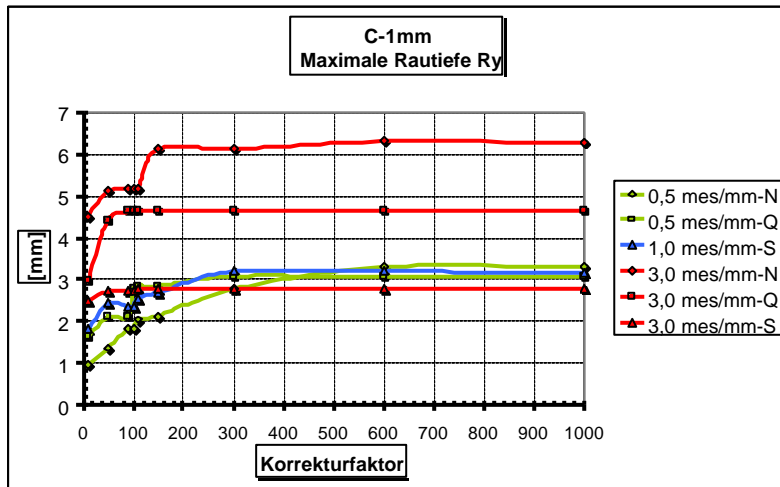


Abb. 2.32 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-1mm

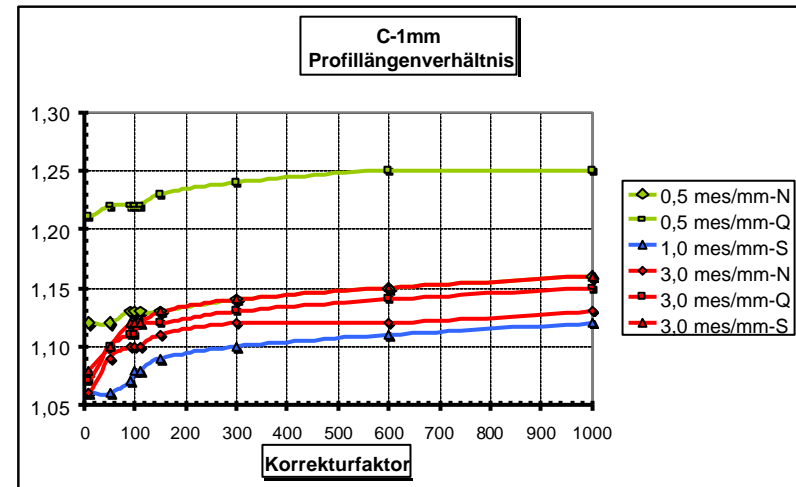


Abb. 2.34 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-1mm

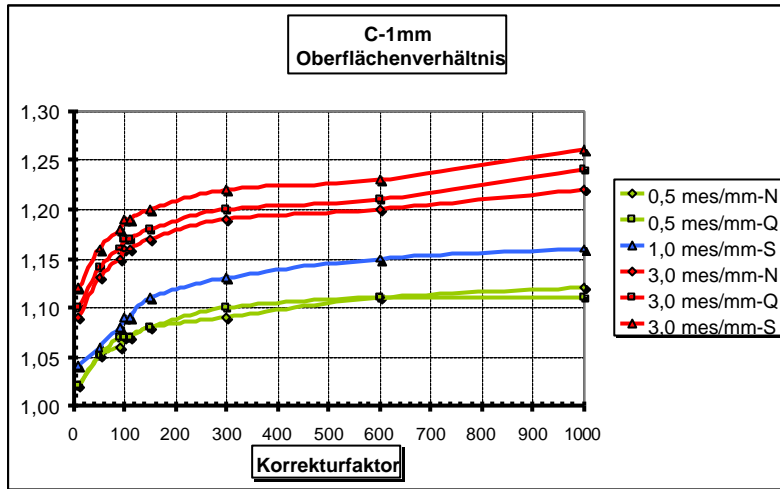


Abb. 2.35 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-1mm

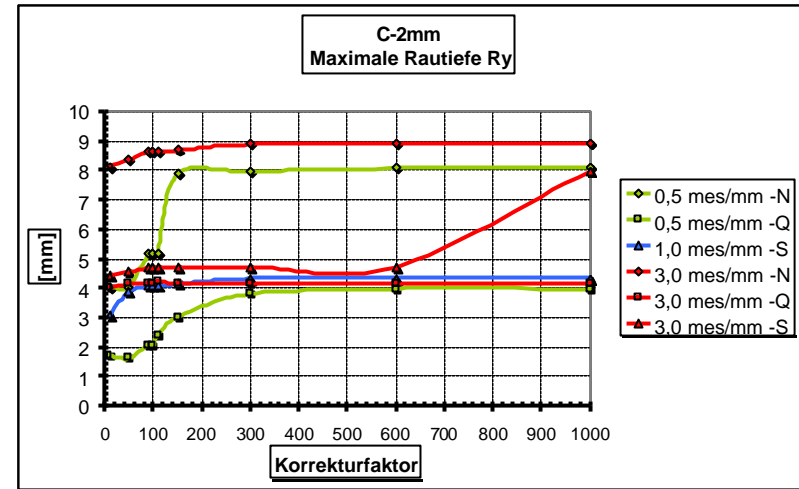


Abb. 2.37 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-2mm

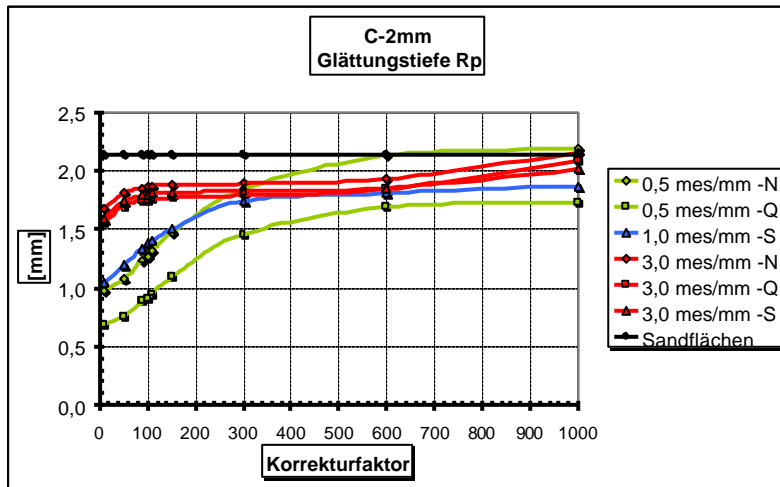


Abb. 2.36 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-2mm

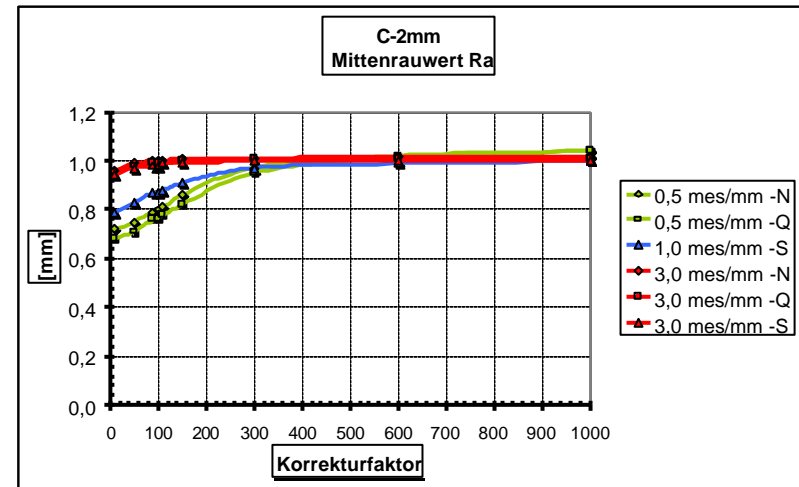


Abb. 2.38 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-2mm

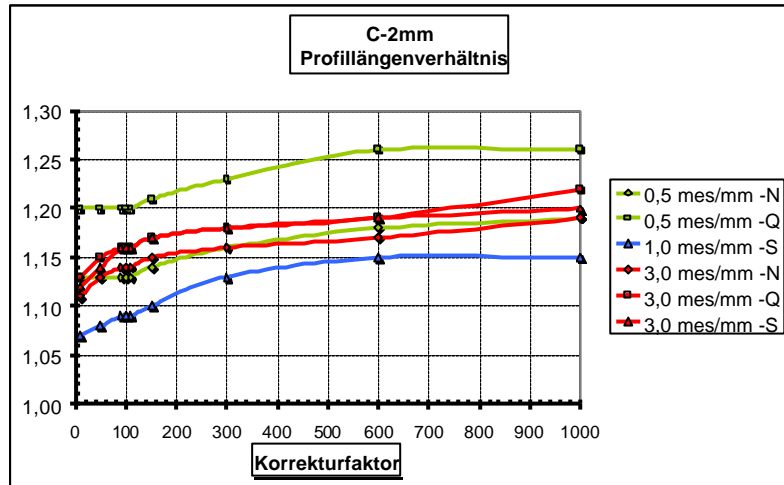


Abb. 2.39 : Verhalten der Profil­längen­verhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-2mm

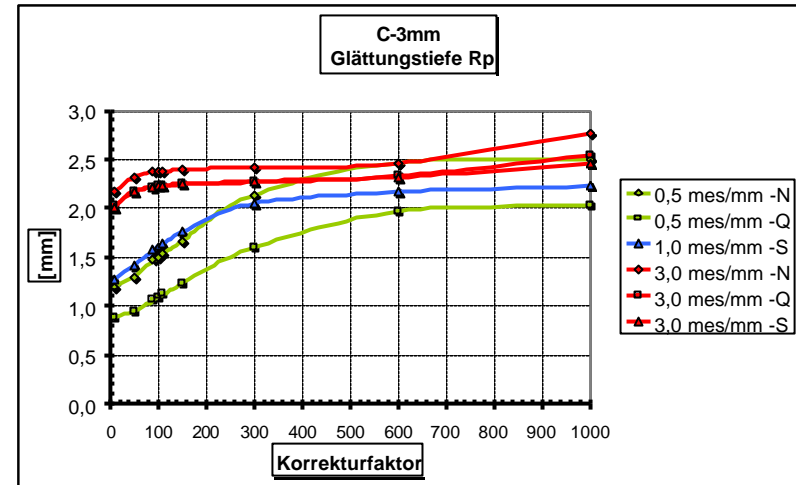


Abb. 2.41 : Verhalten der Glättungstiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-3mm

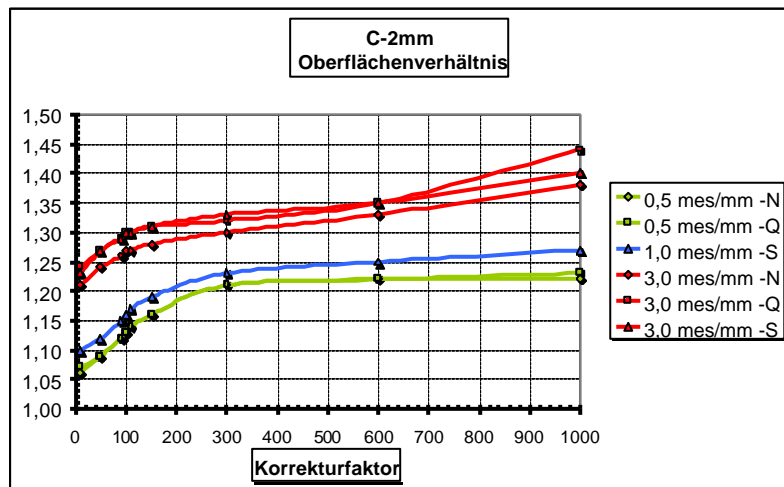


Abb. 2.40 : Verhalten der Oberflächen­verhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-2mm

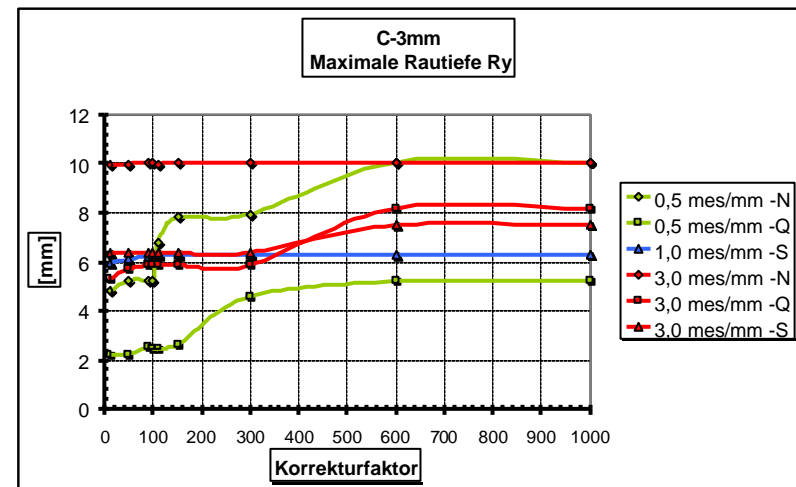


Abb. 2.42 : Verhalten der Maximale Rautiefe bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-3mm

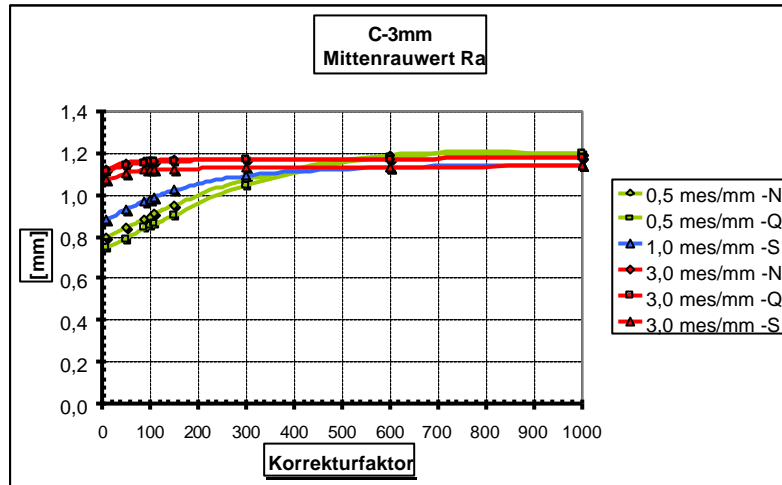


Abb. 2.43 : Verhalten der Mittenrauwert bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-3mm

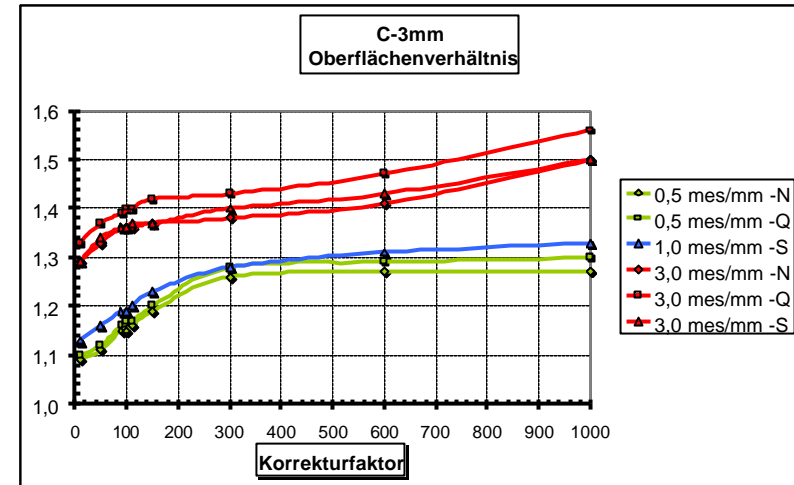


Abb. 2.45 : Verhalten der Oberflächenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-3mm

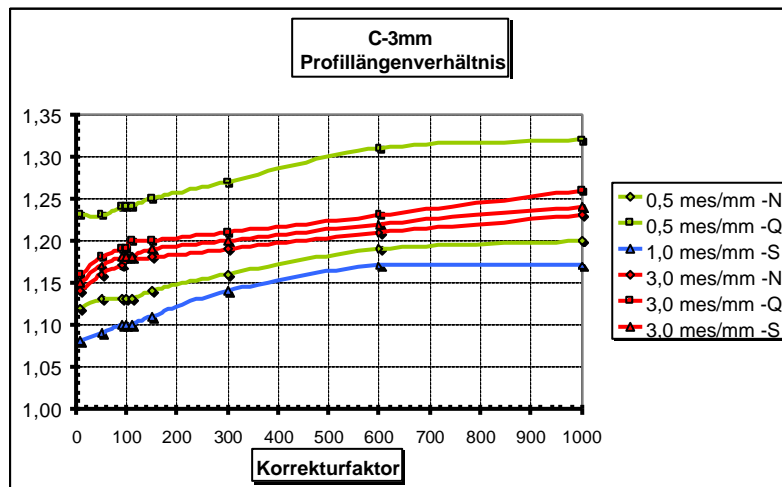


Abb. 2.44 : Verhalten der Profillängenverhältnis bei Zunahme des Korrekturfaktors, Serie C-3mm

**3**

**Anhang 3A**

**3D-Laserabtastverfahren**



---

**Serie A 1mm**

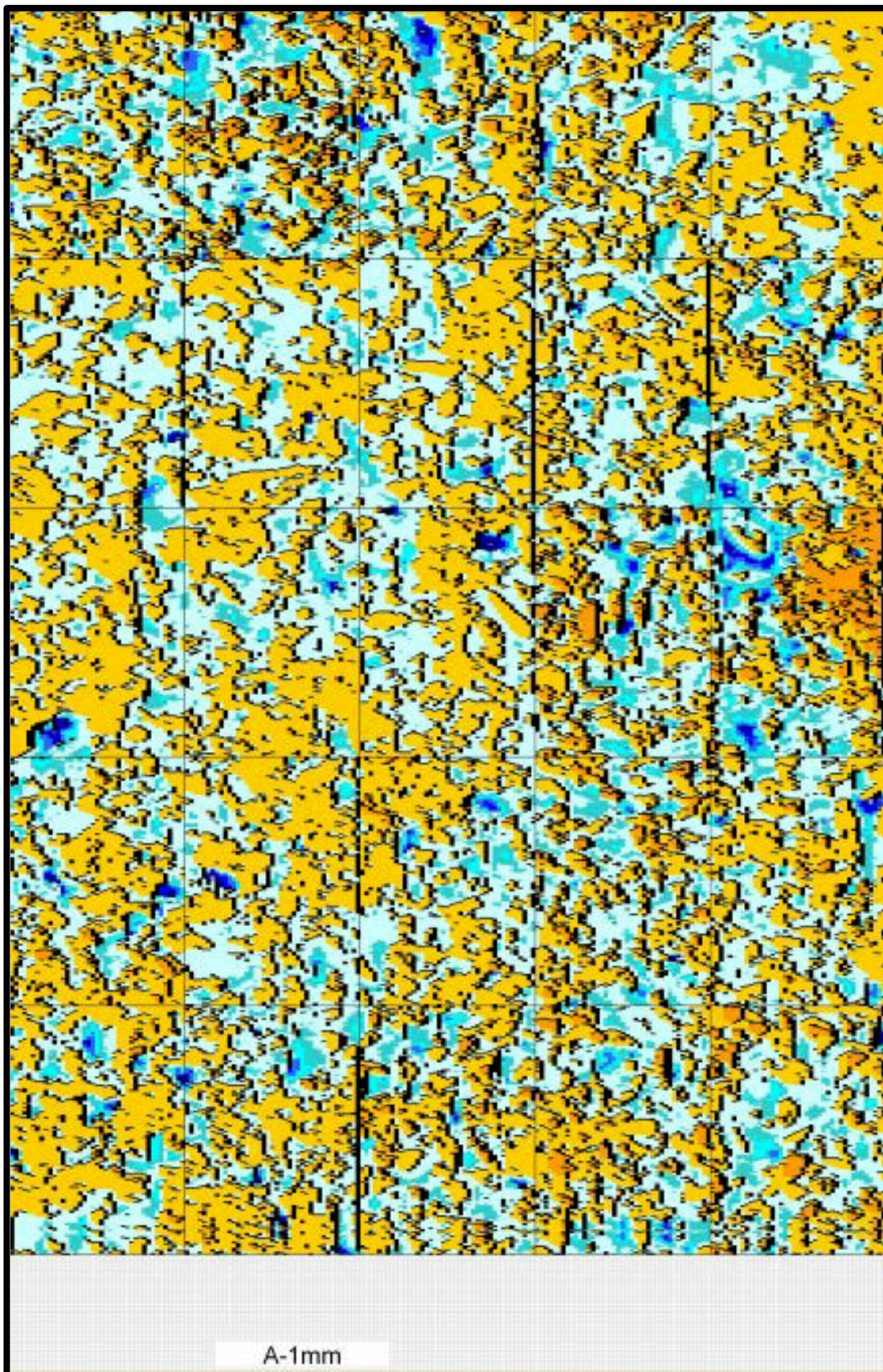


Abb. 3.1 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-1mm)

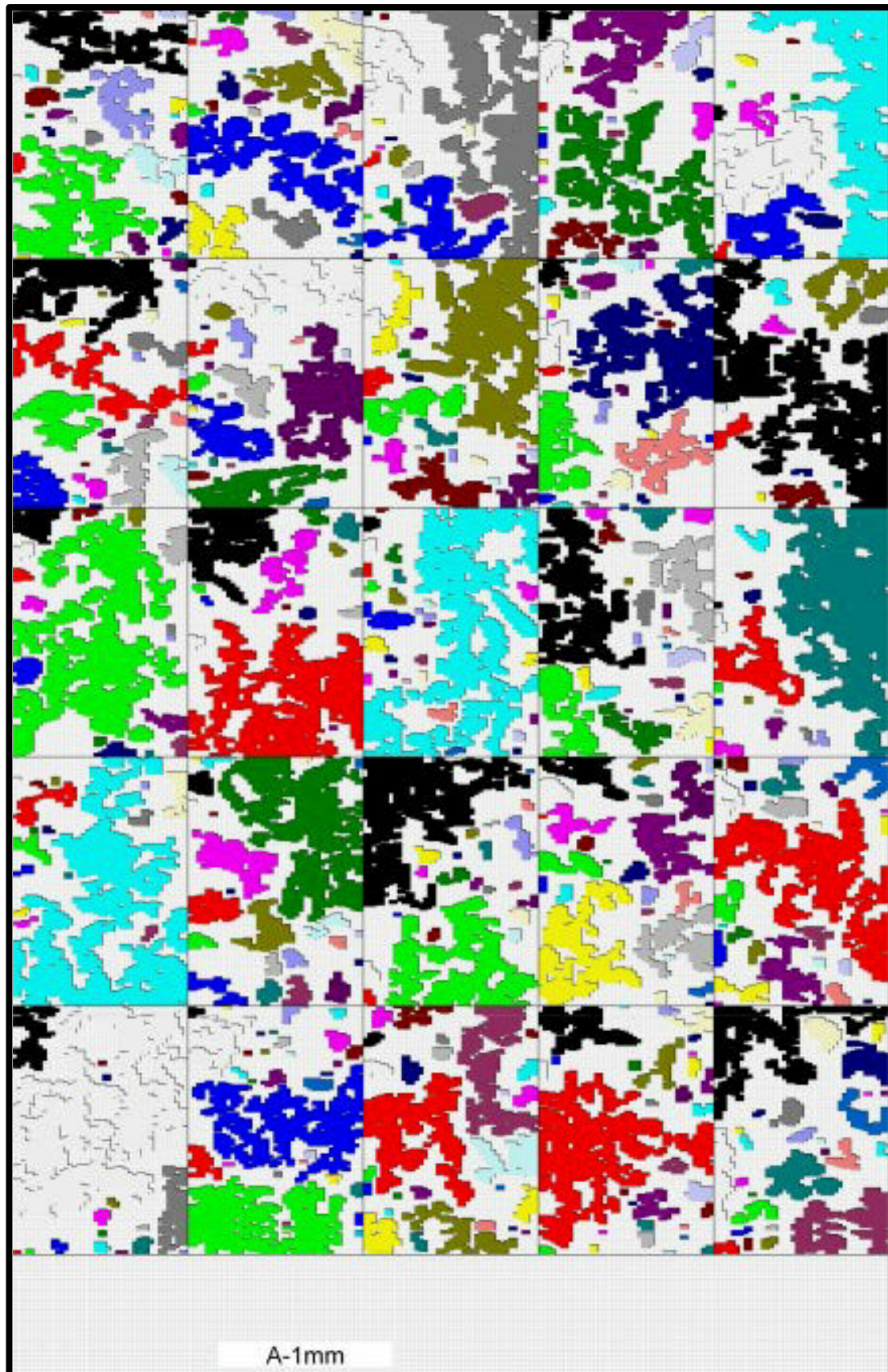


Abb. 3.2 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-1mm)

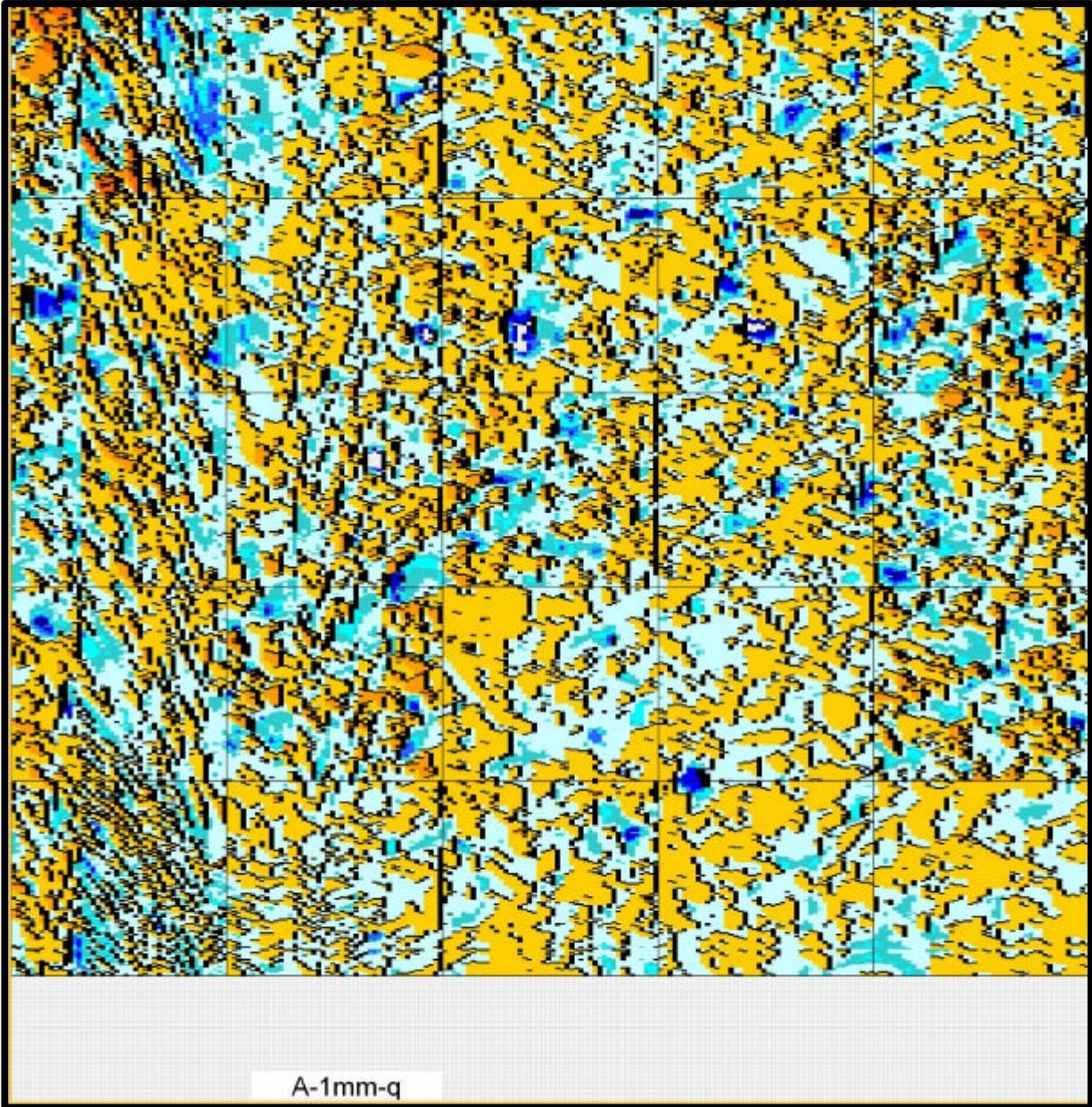


Abb. 3.3 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-1mm-q)

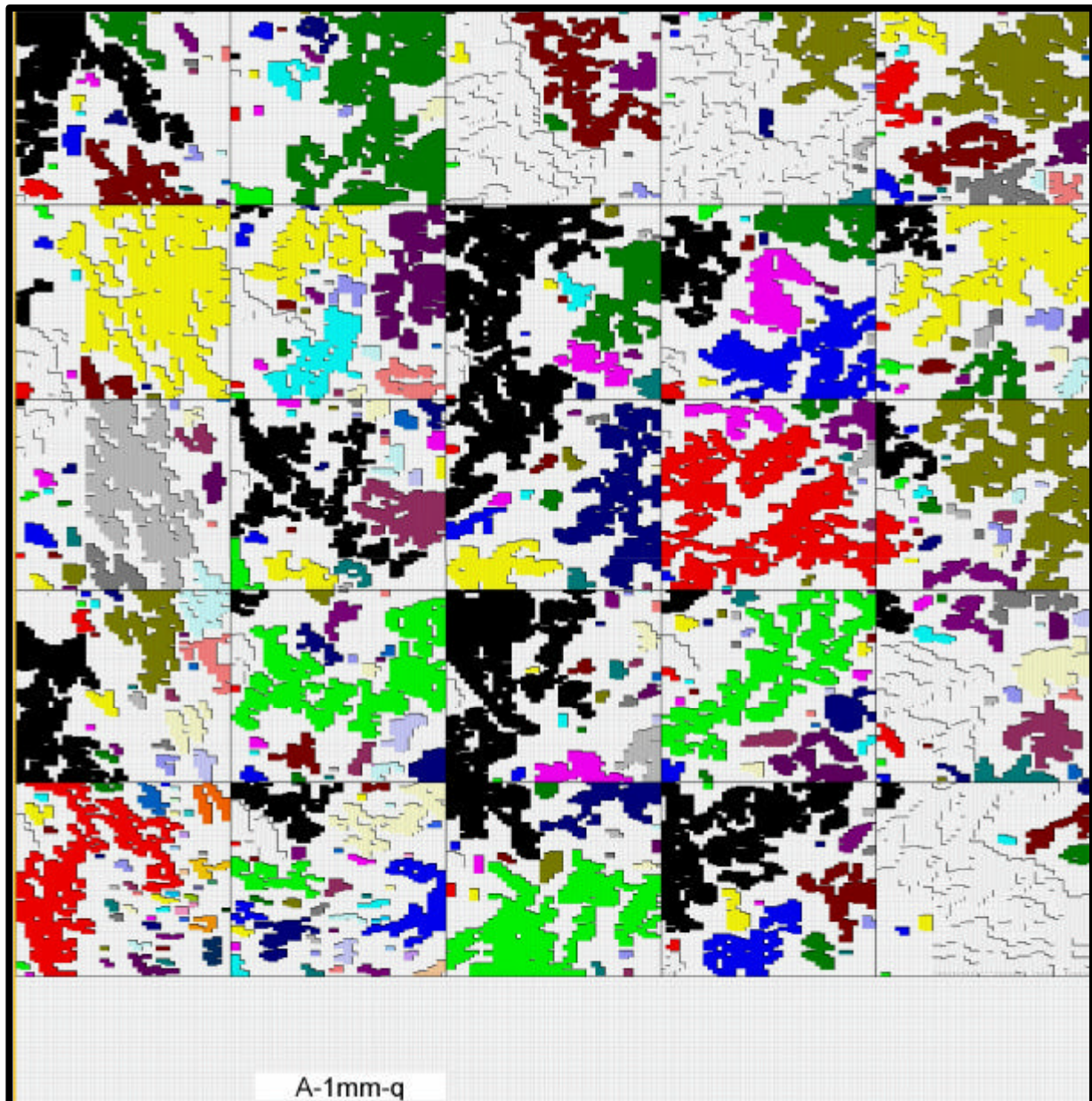


Abb. 3.4 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-1mm-q)

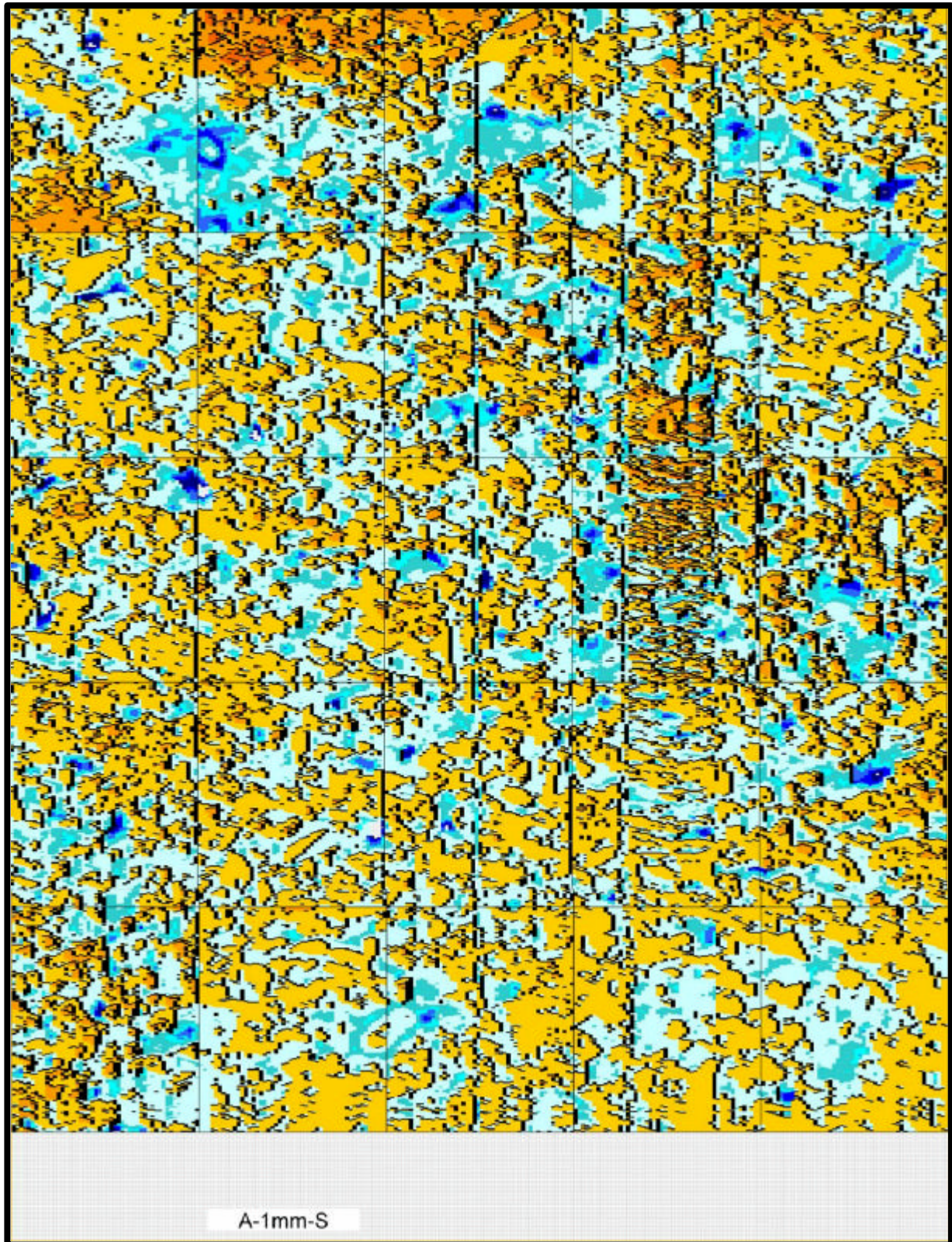


Abb. 3.5 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-1mm-S)

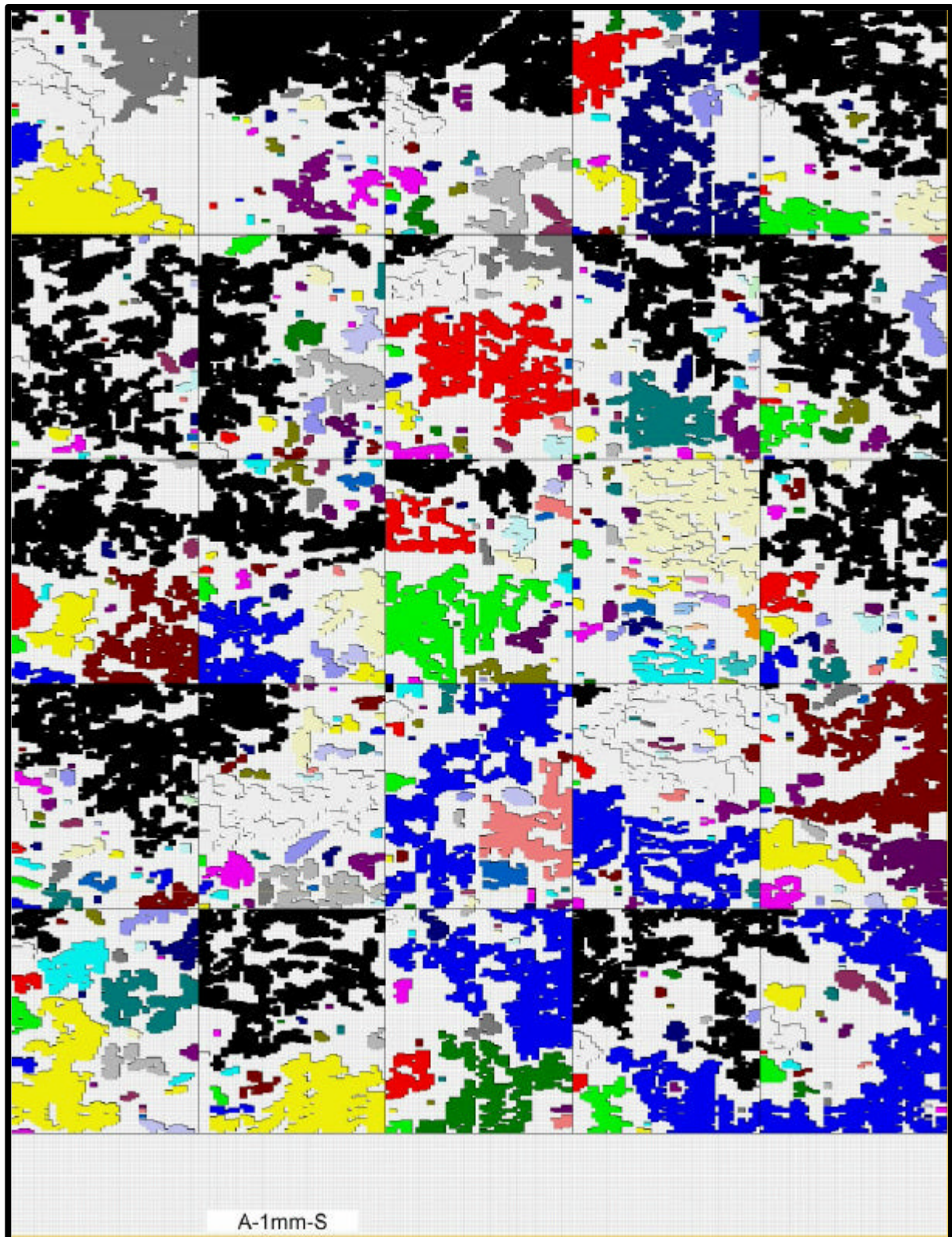


Abb. 3.6 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-1mm-S)

**Serie A 2mm**

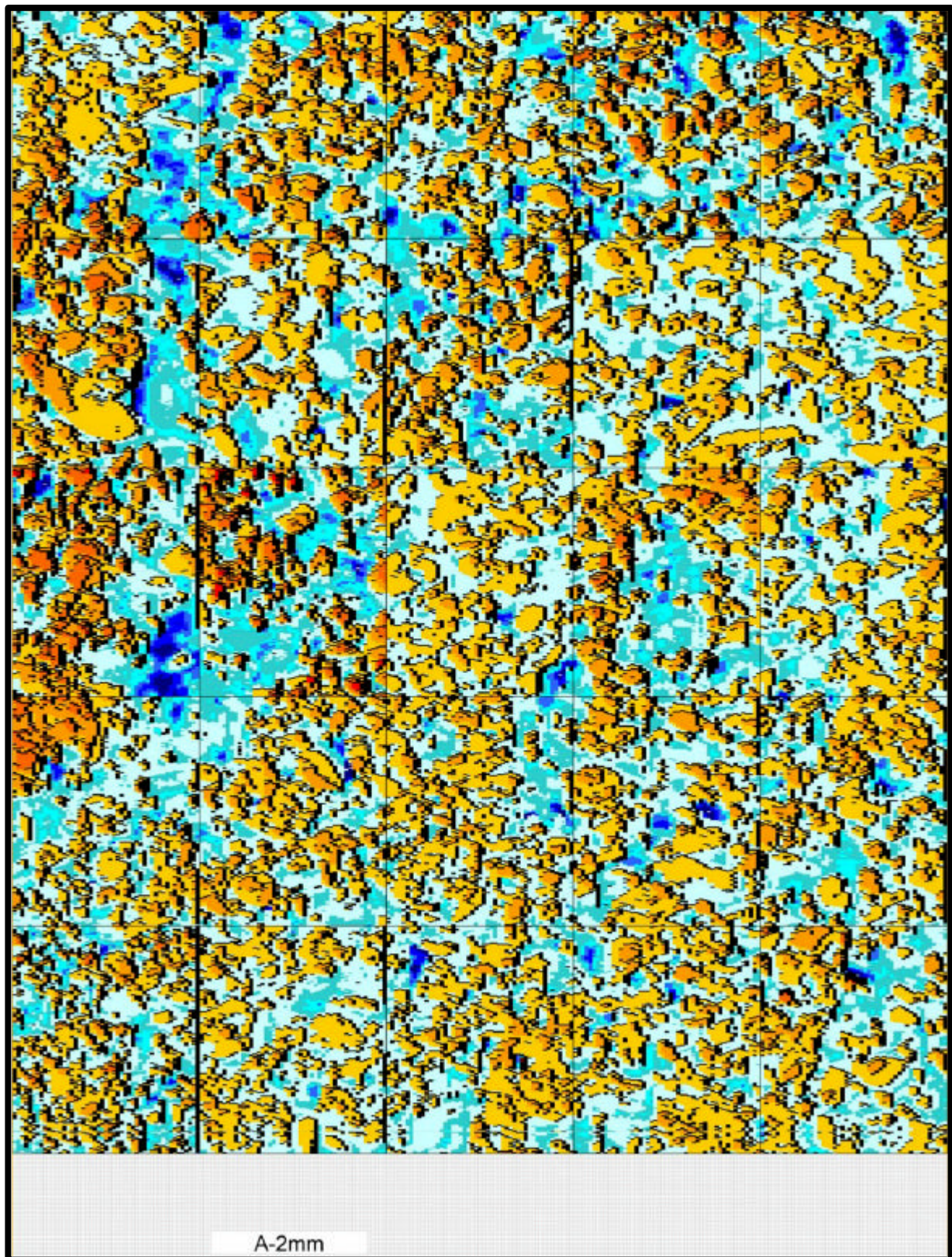


Abb. 3.7 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-2mm)

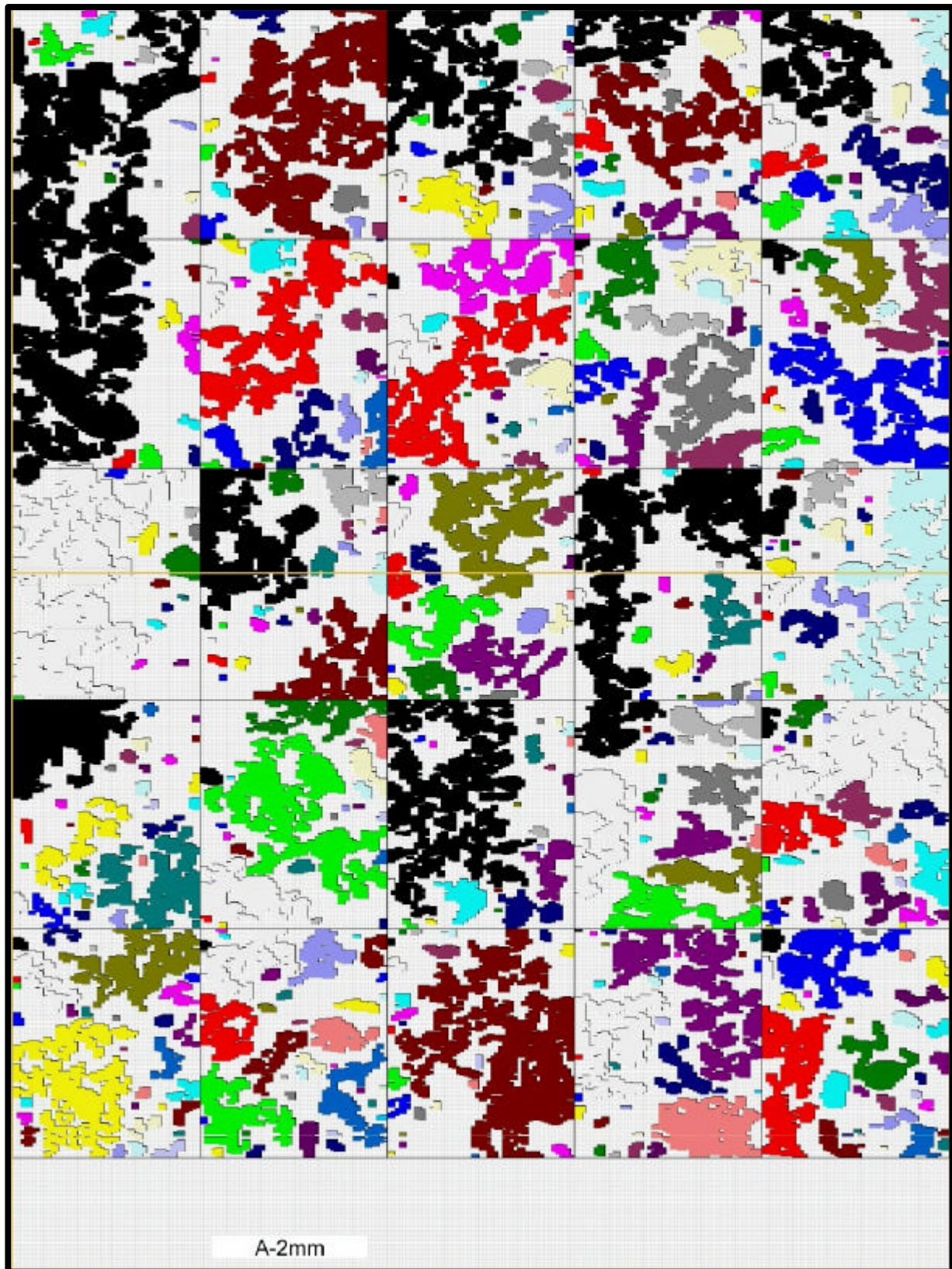


Abb. 3.8 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-2mm)



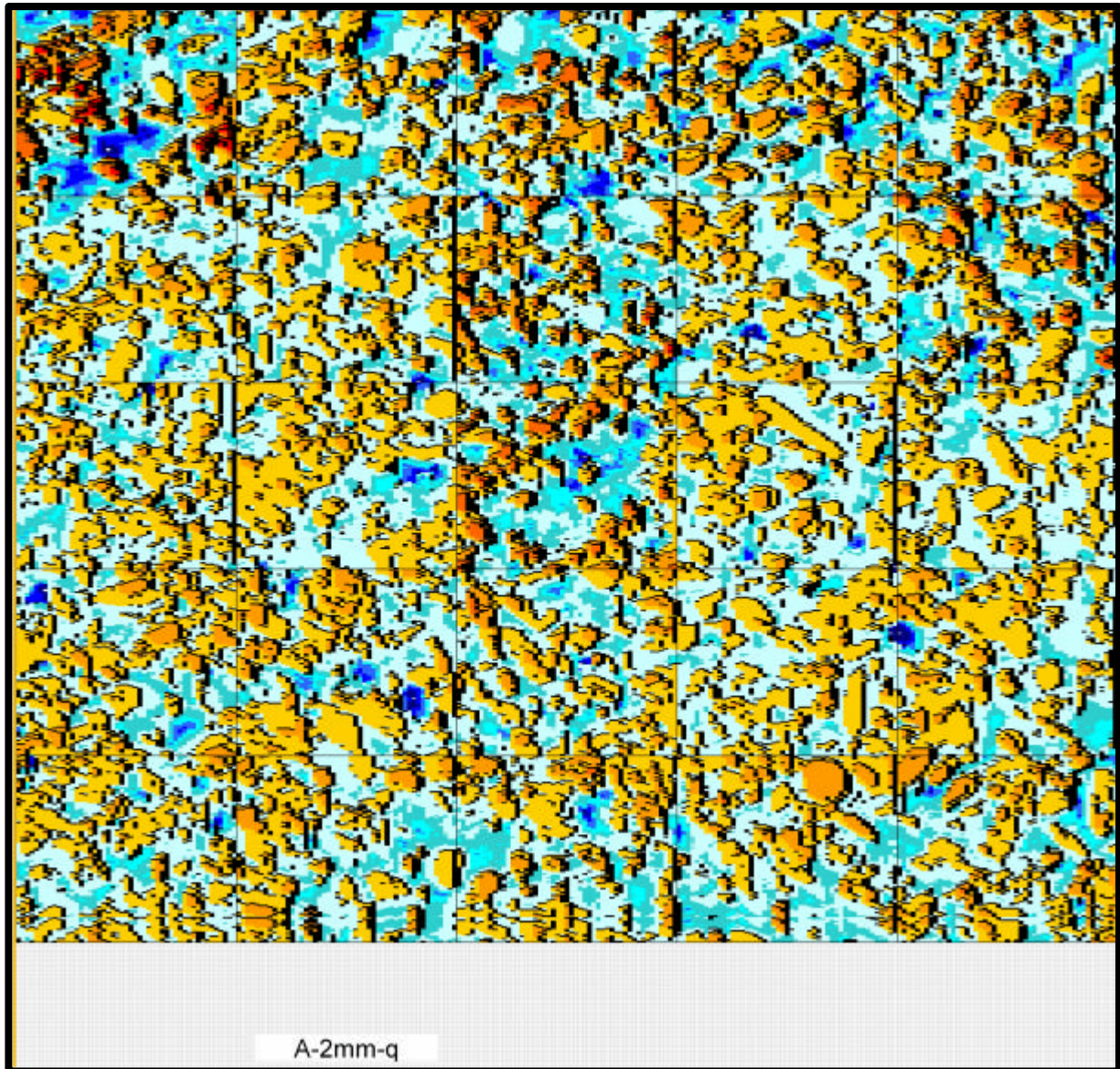


Abb. 3.9 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-2mm-q)

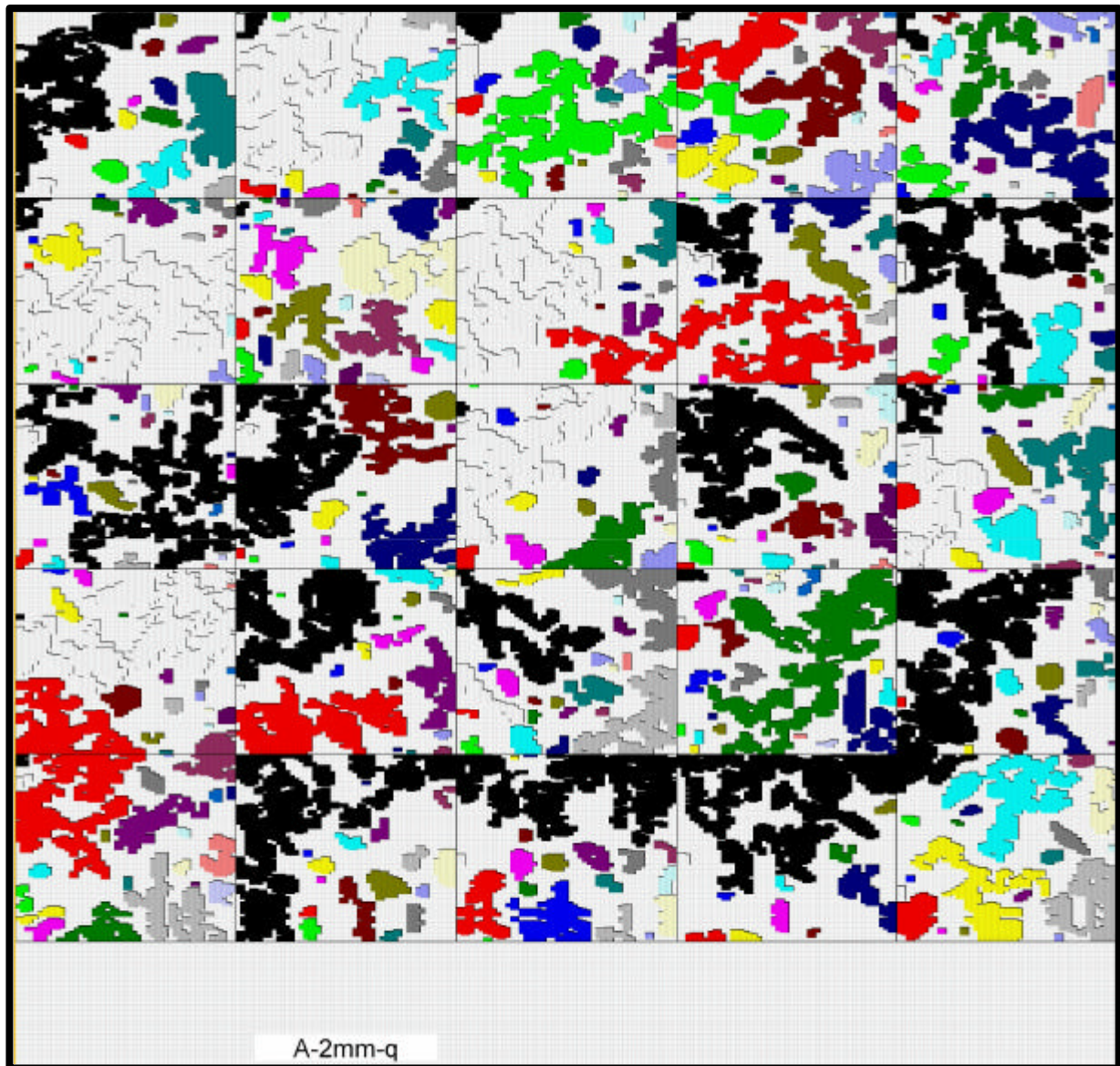


Abb. 3.10 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-2mm-q)

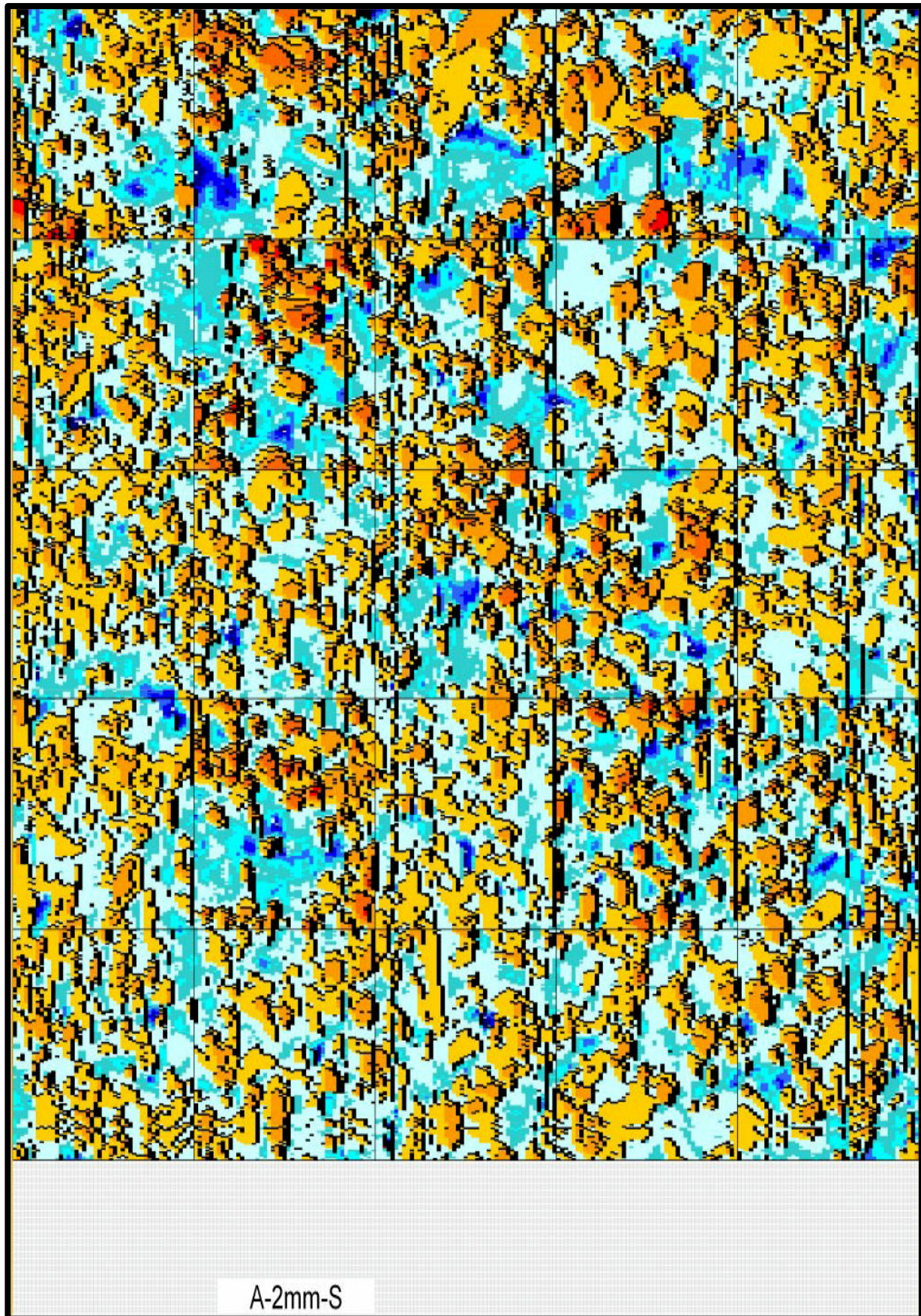


Abb. 3.11 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-2mm-S)

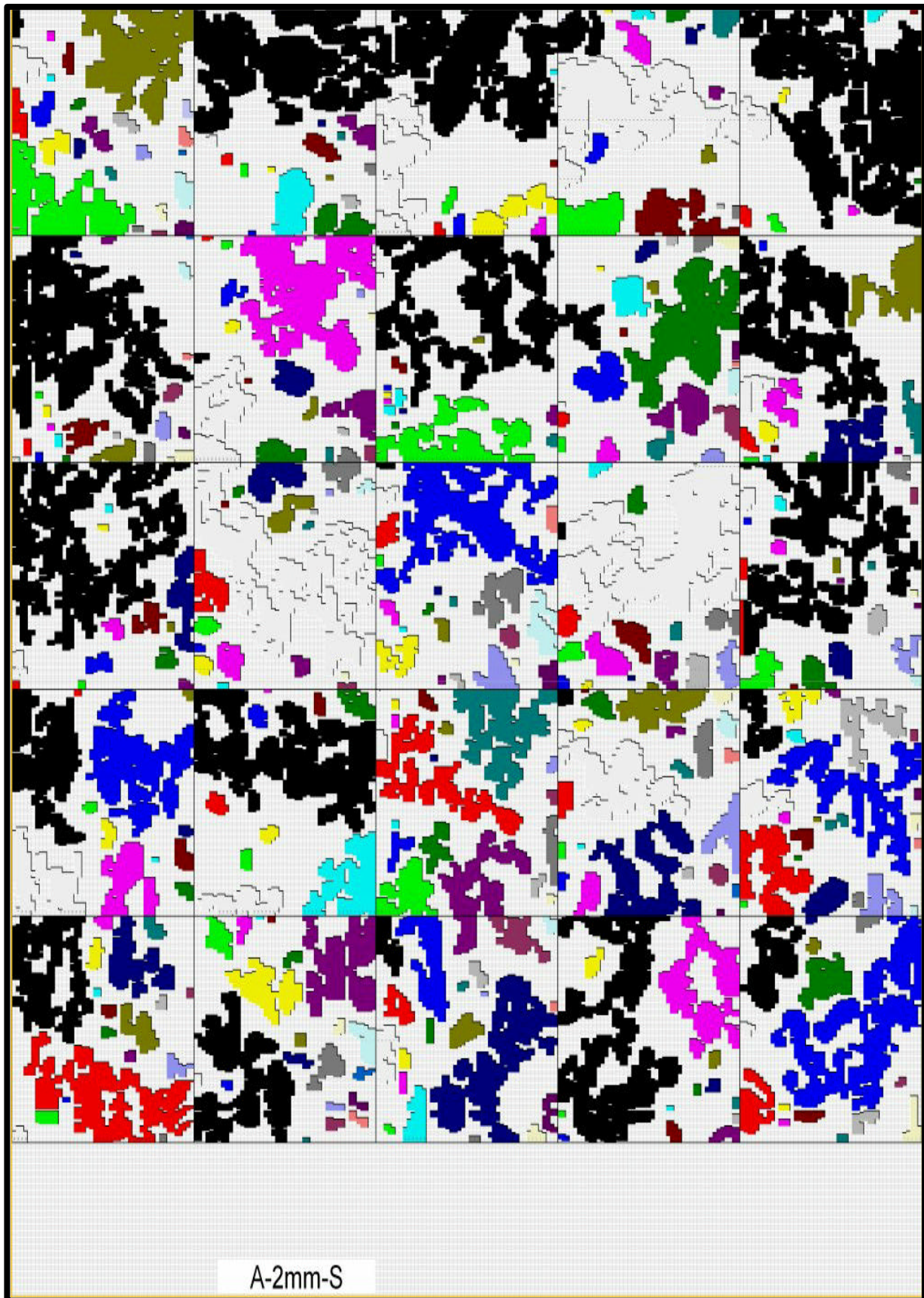


Abb. 3.12 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-2mm-S)

---

**Serie A 3mm**

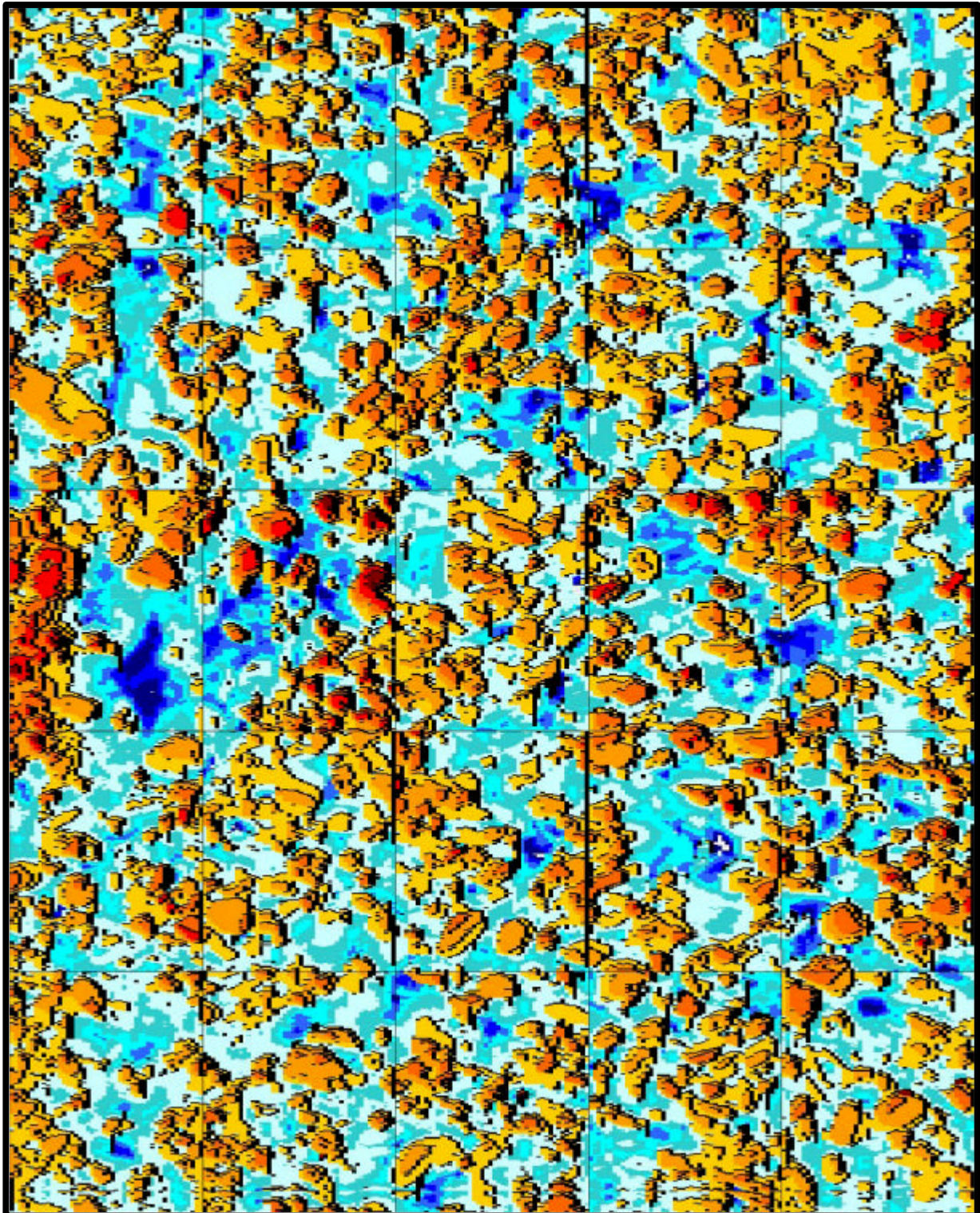


Abb. 3.13 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-3mm)

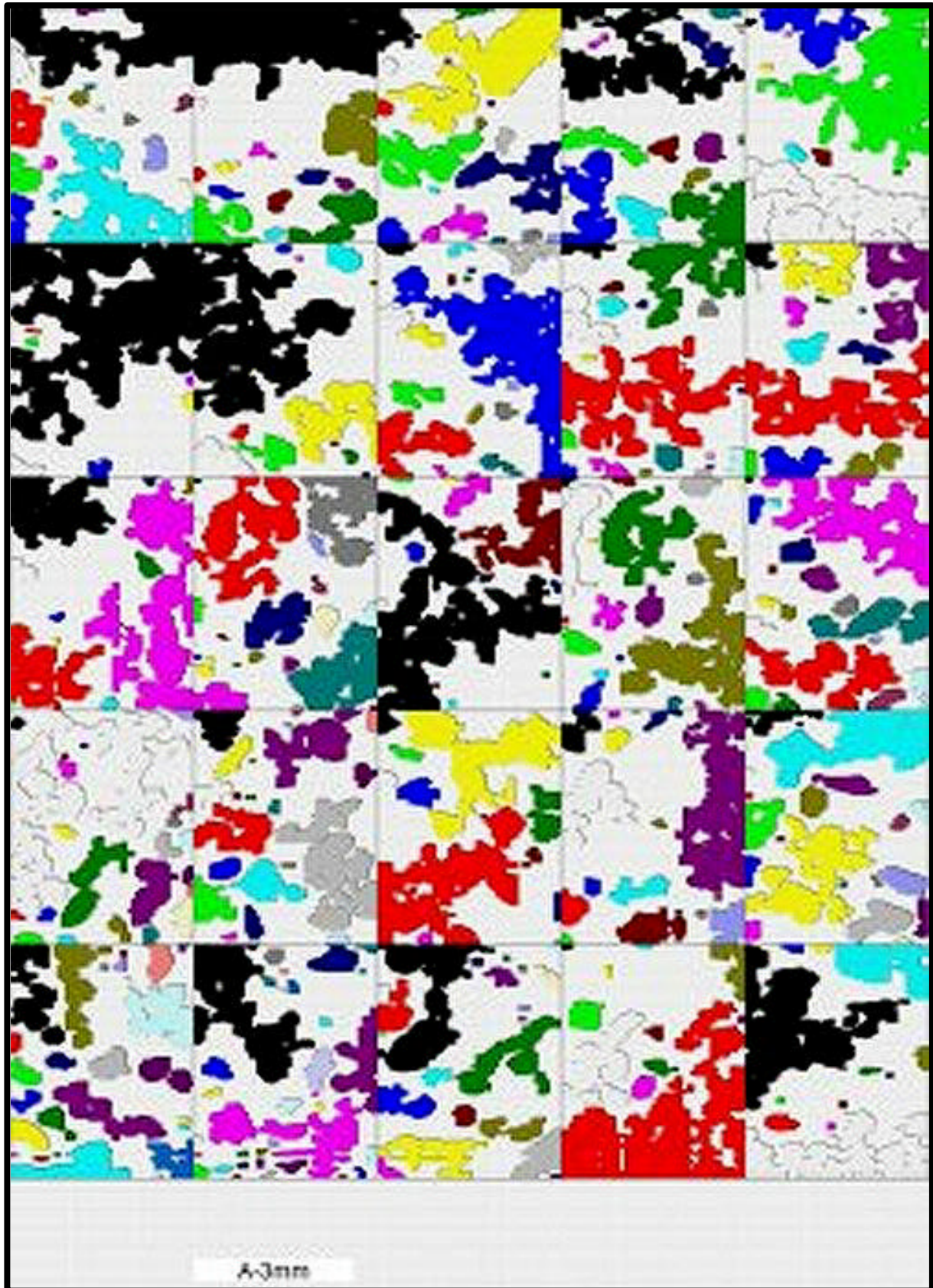


Abb. 3.14 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-3mm)

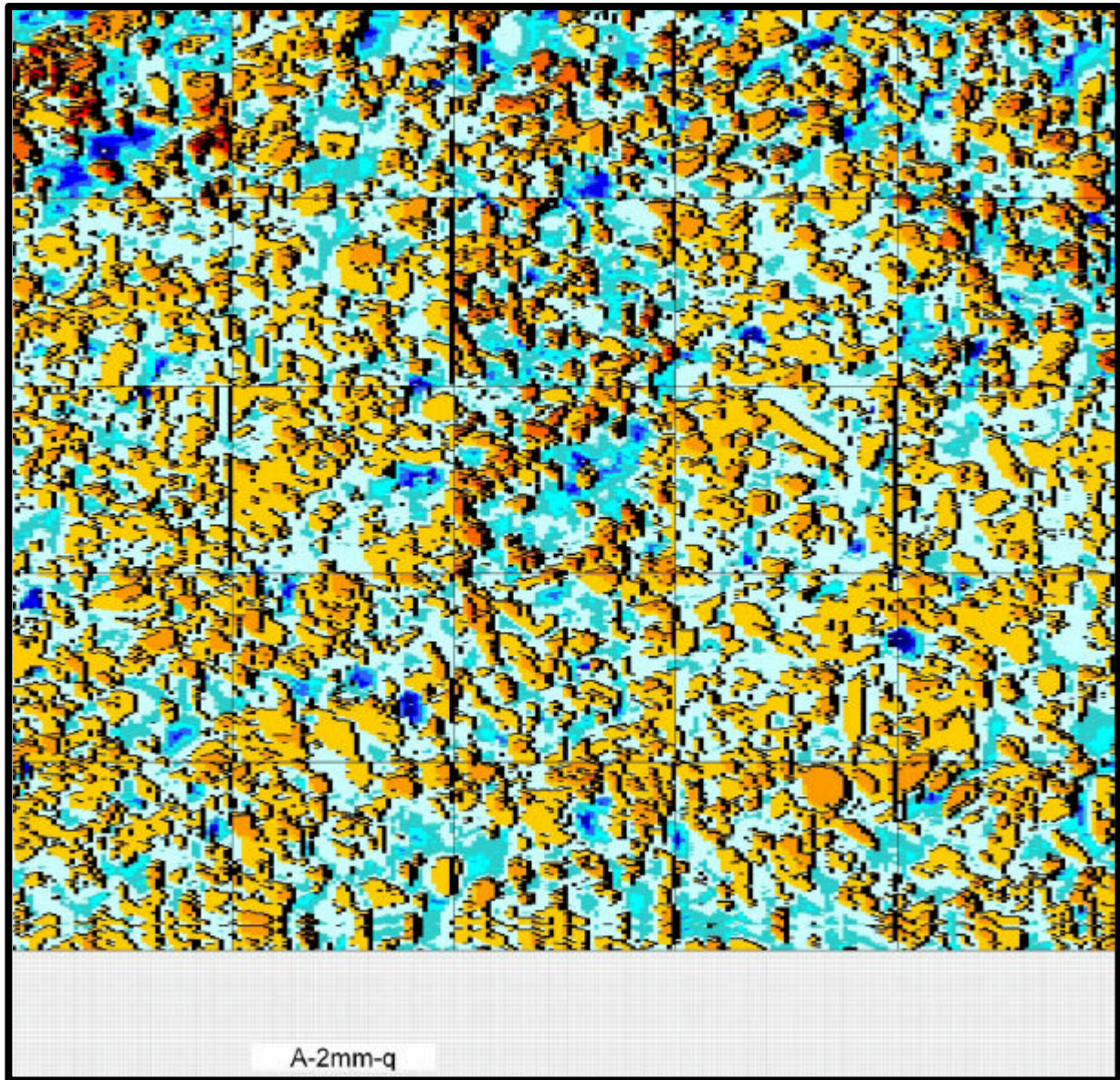


Abb. 3.15 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-3mm-q)

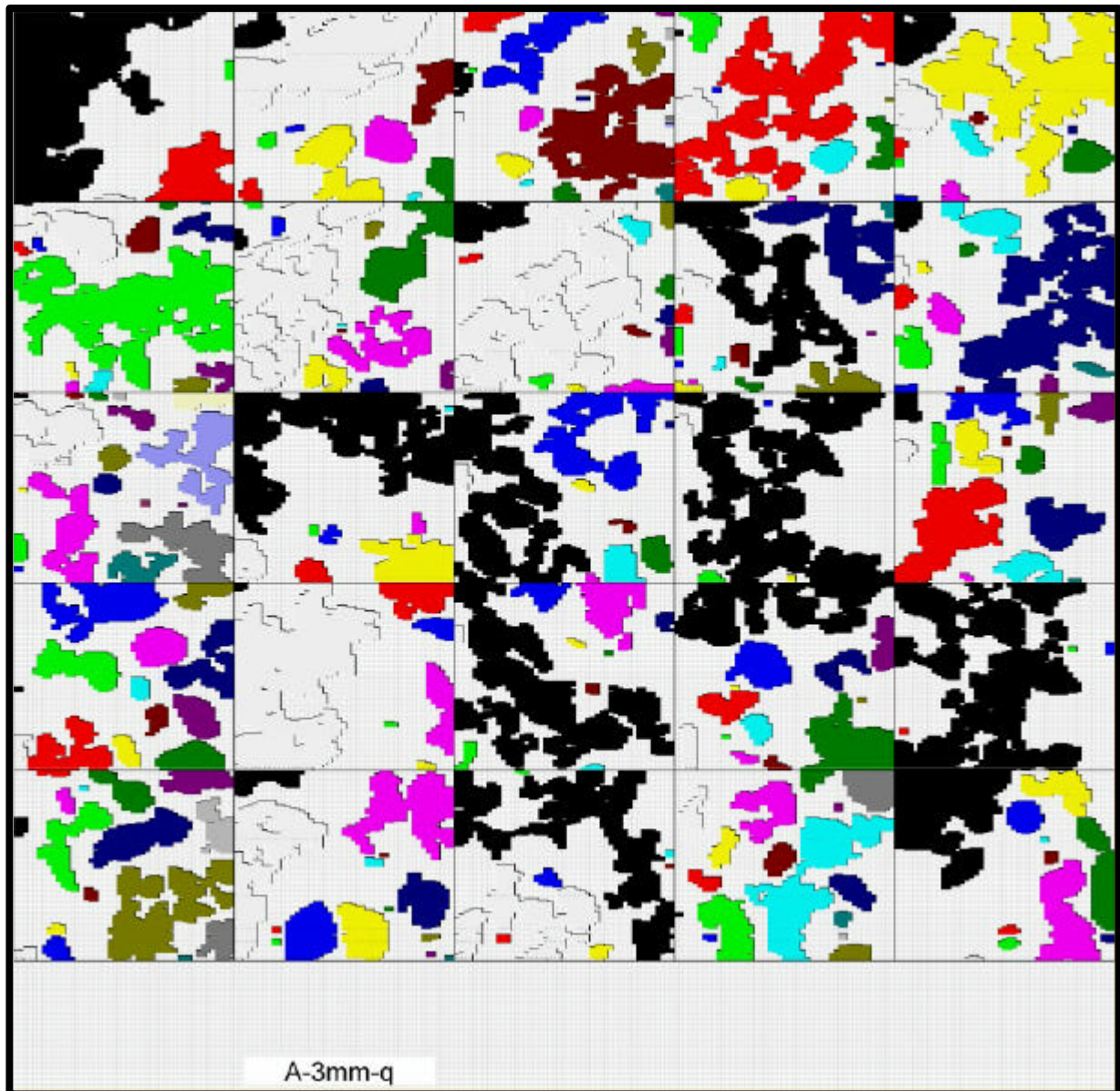


Abb. 3.16 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-3mm-q)



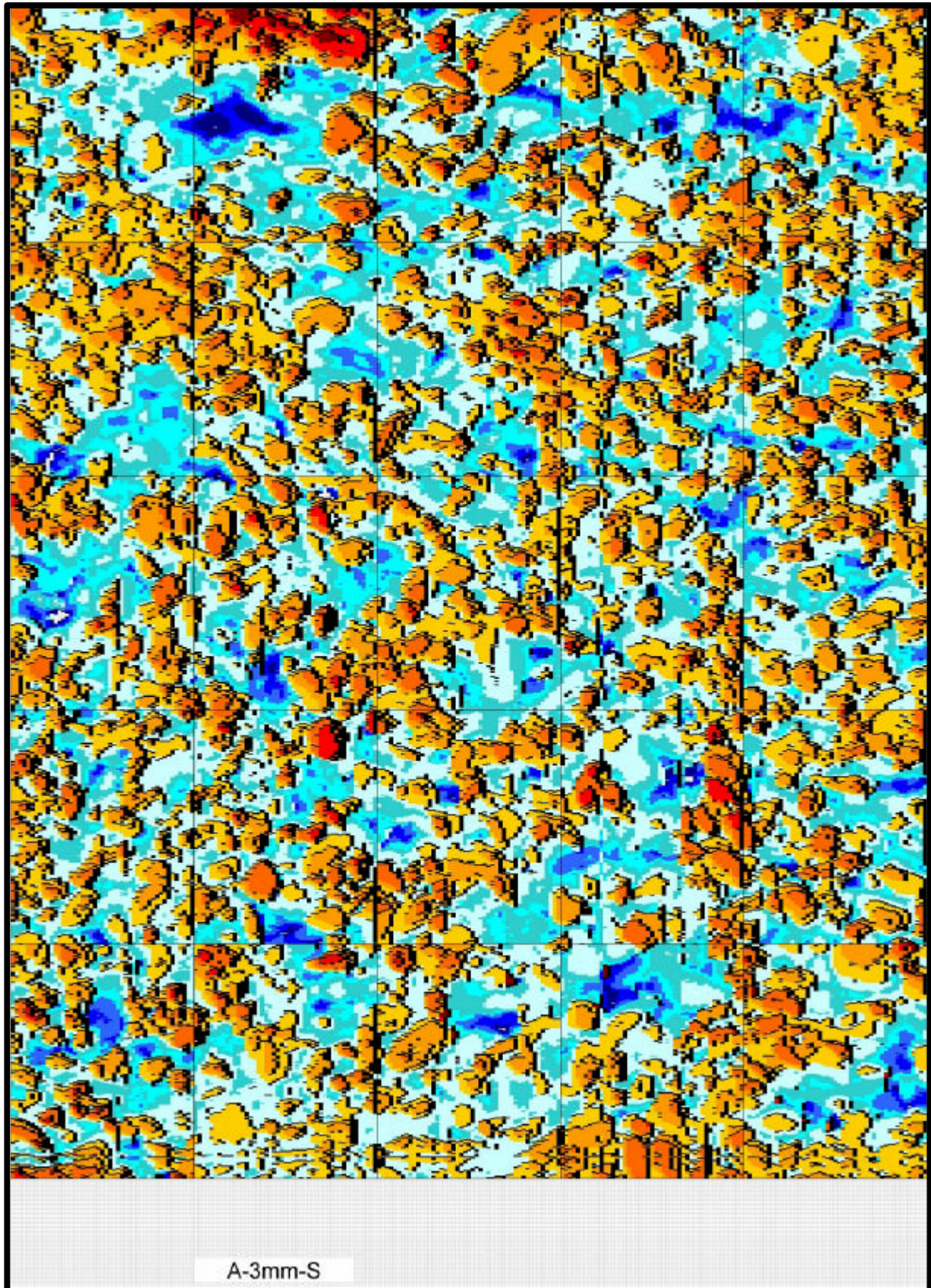


Abb. 3.17 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (A-3mm-S)

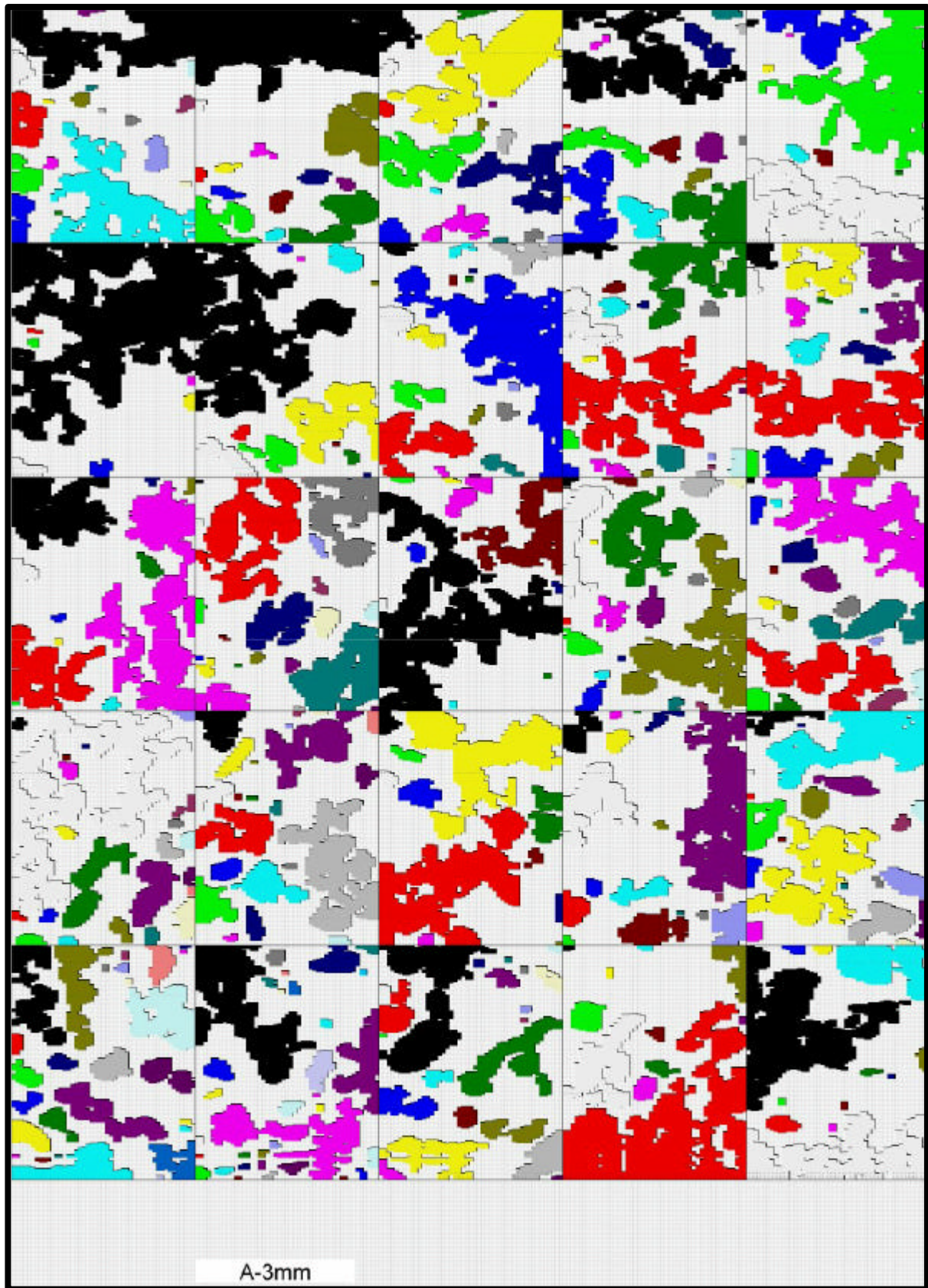


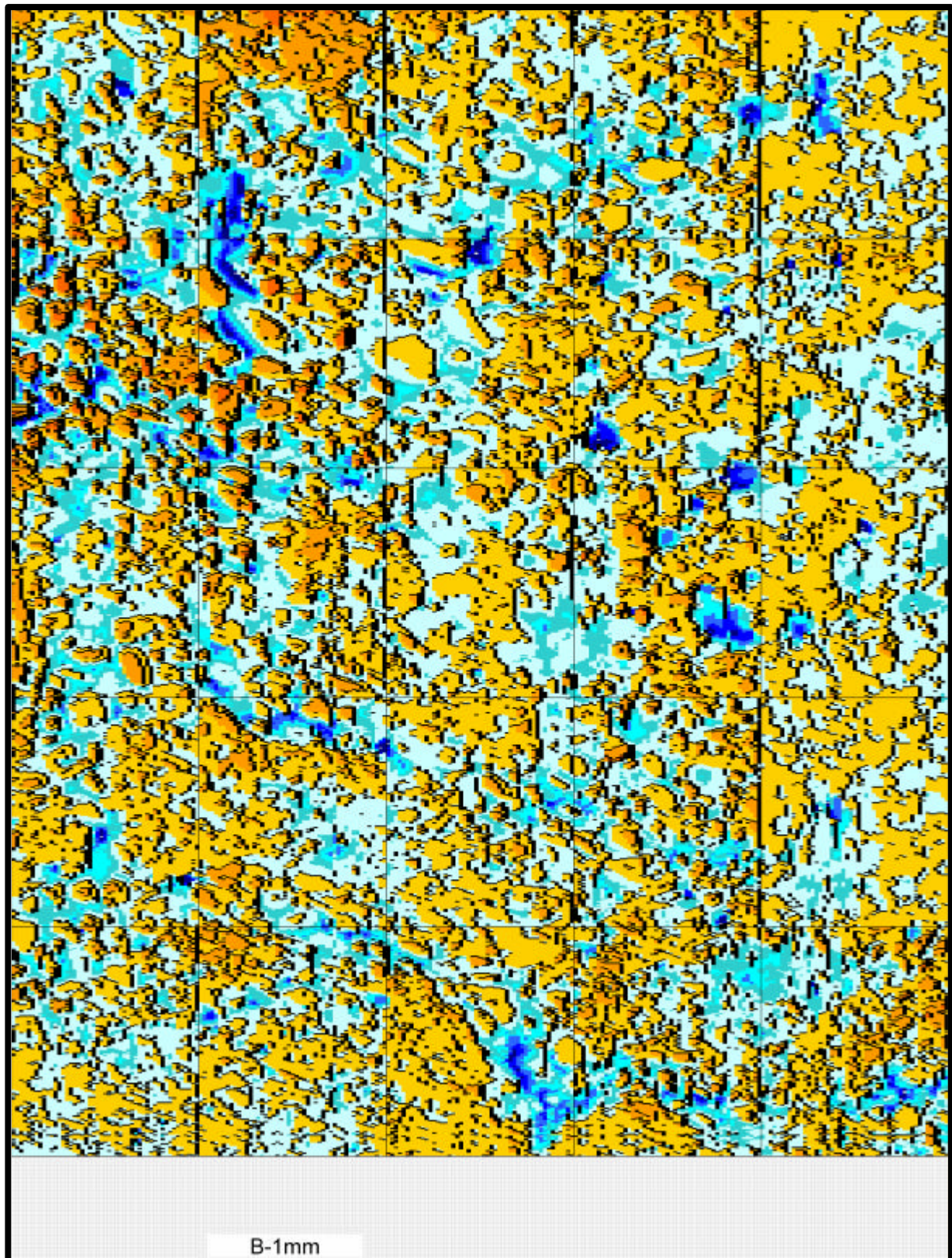
Abb. 3.18 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (A-3mm-S)

**3**

**Anhang 3B**

---

**Serie B-1mm**



**Abb. 3.39 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (B-1mm)**

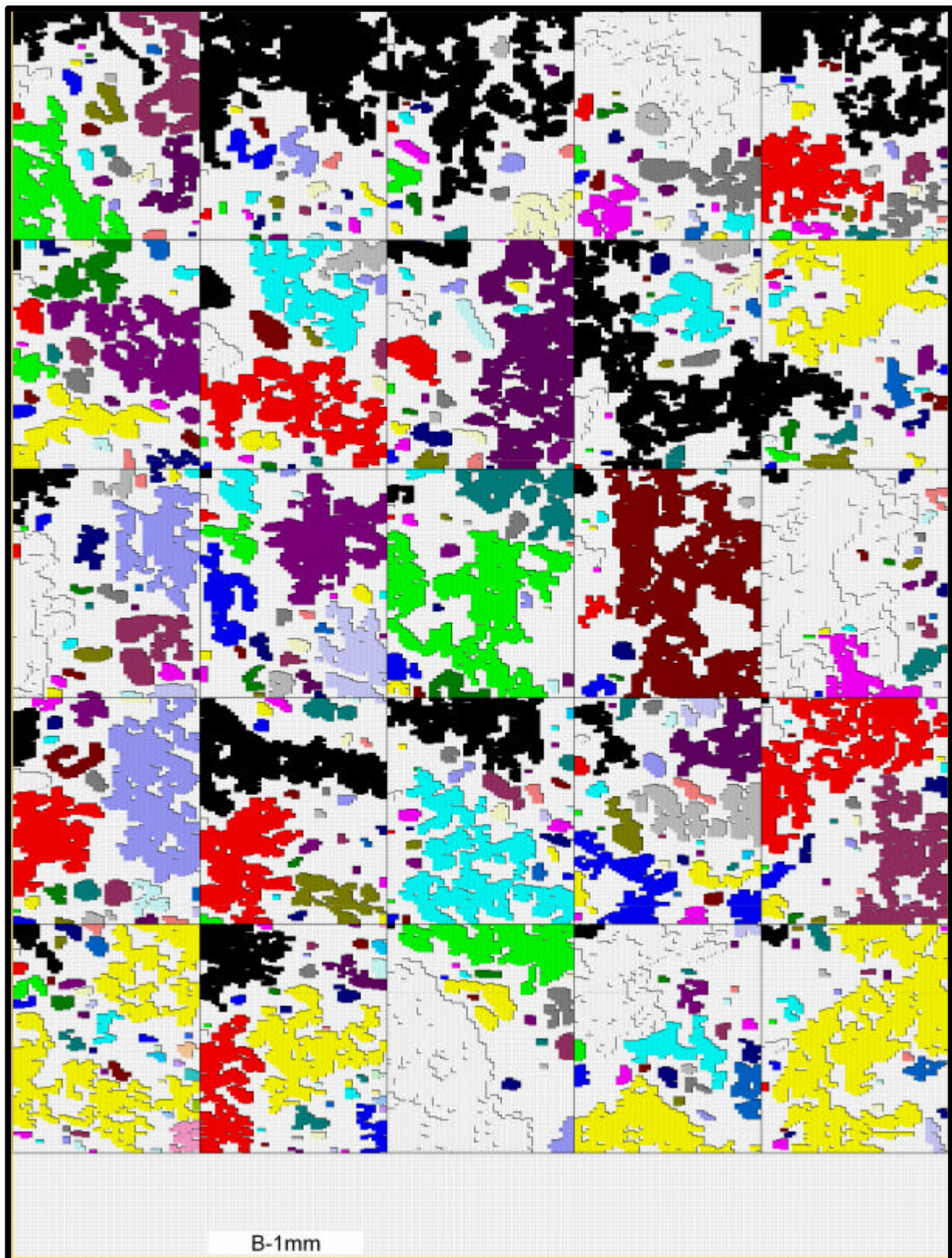


Abb. 3.40 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-1mm)

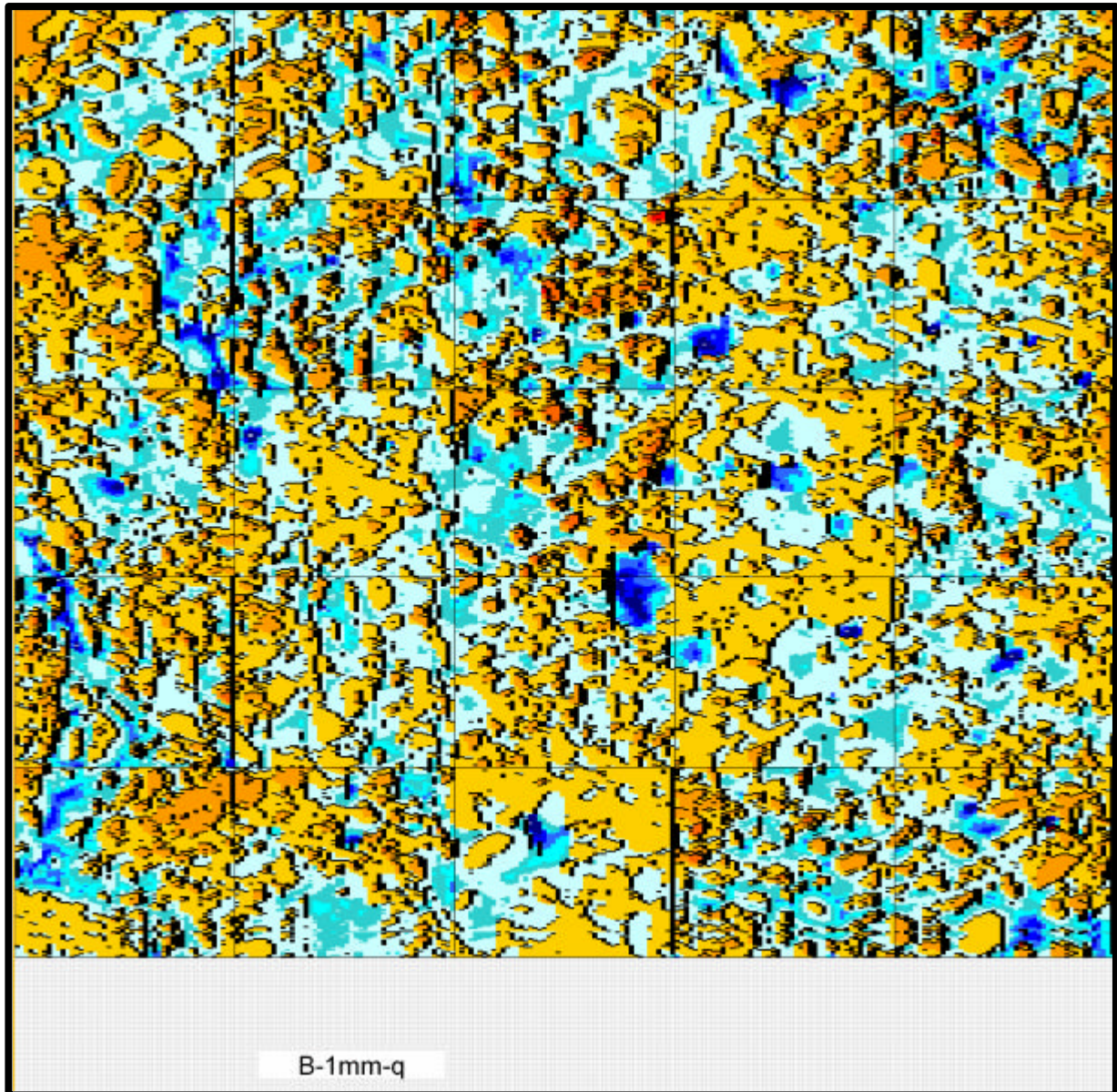


Abb. 3.43 : Die optische Darstellung der Abtastergebnisse für die unterteilte Oberfläche (B-1mm-q)

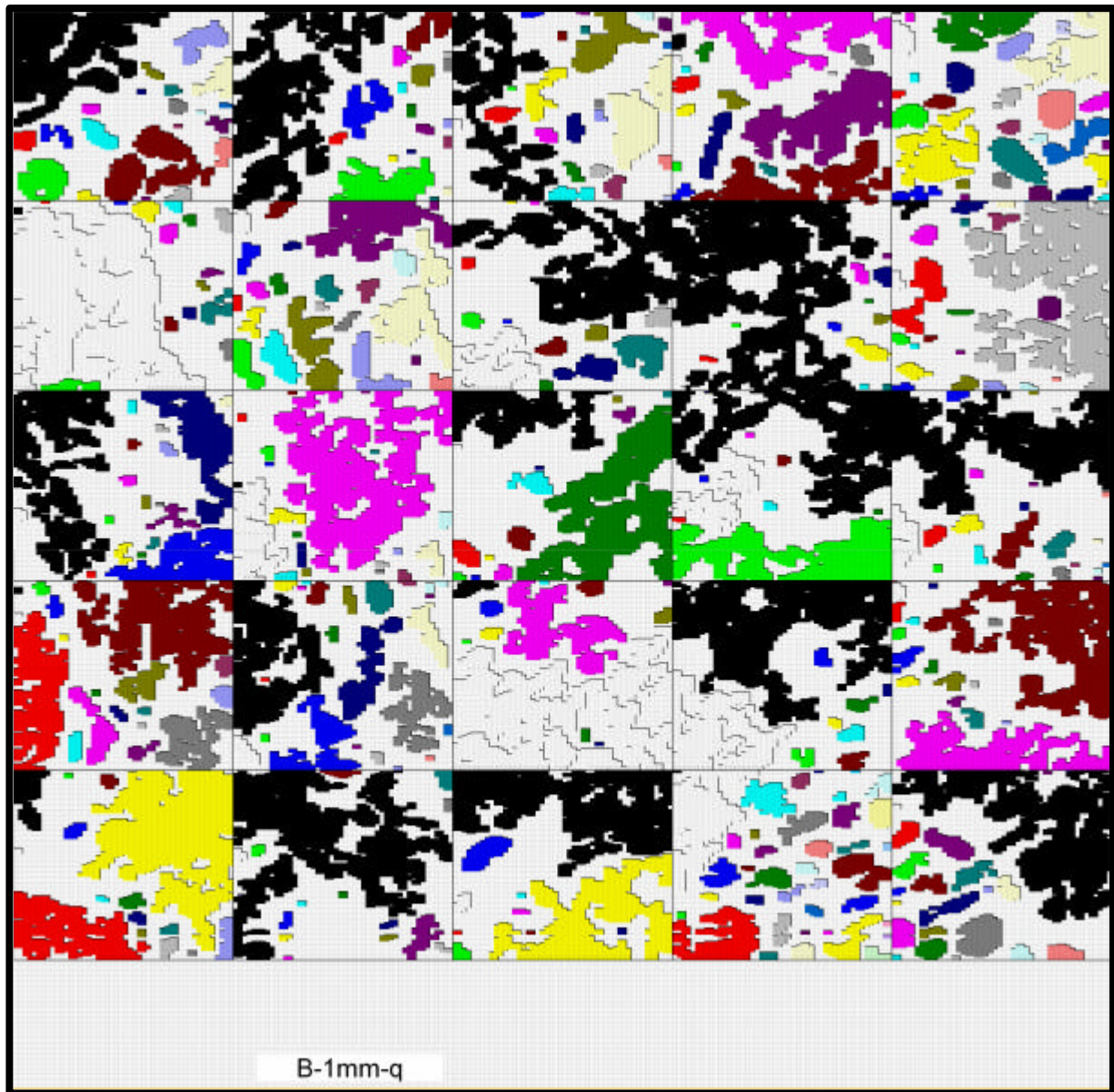


Abb. 3.44 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-1mm-q)

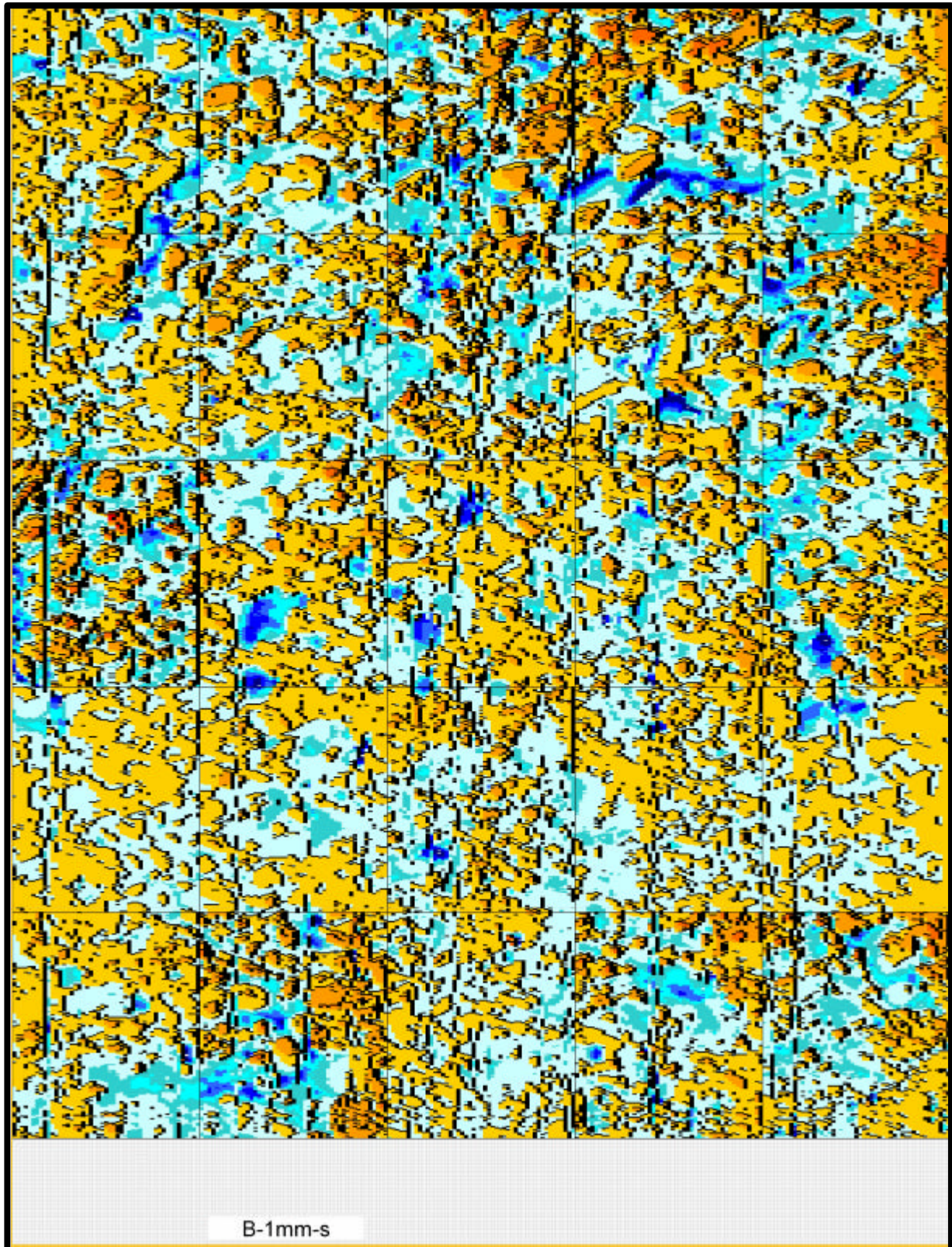


Abb. 3.47 : Die optische Darstellung der Abtastergebnisse für die unterteilte Oberfläche (B-1mm-S)



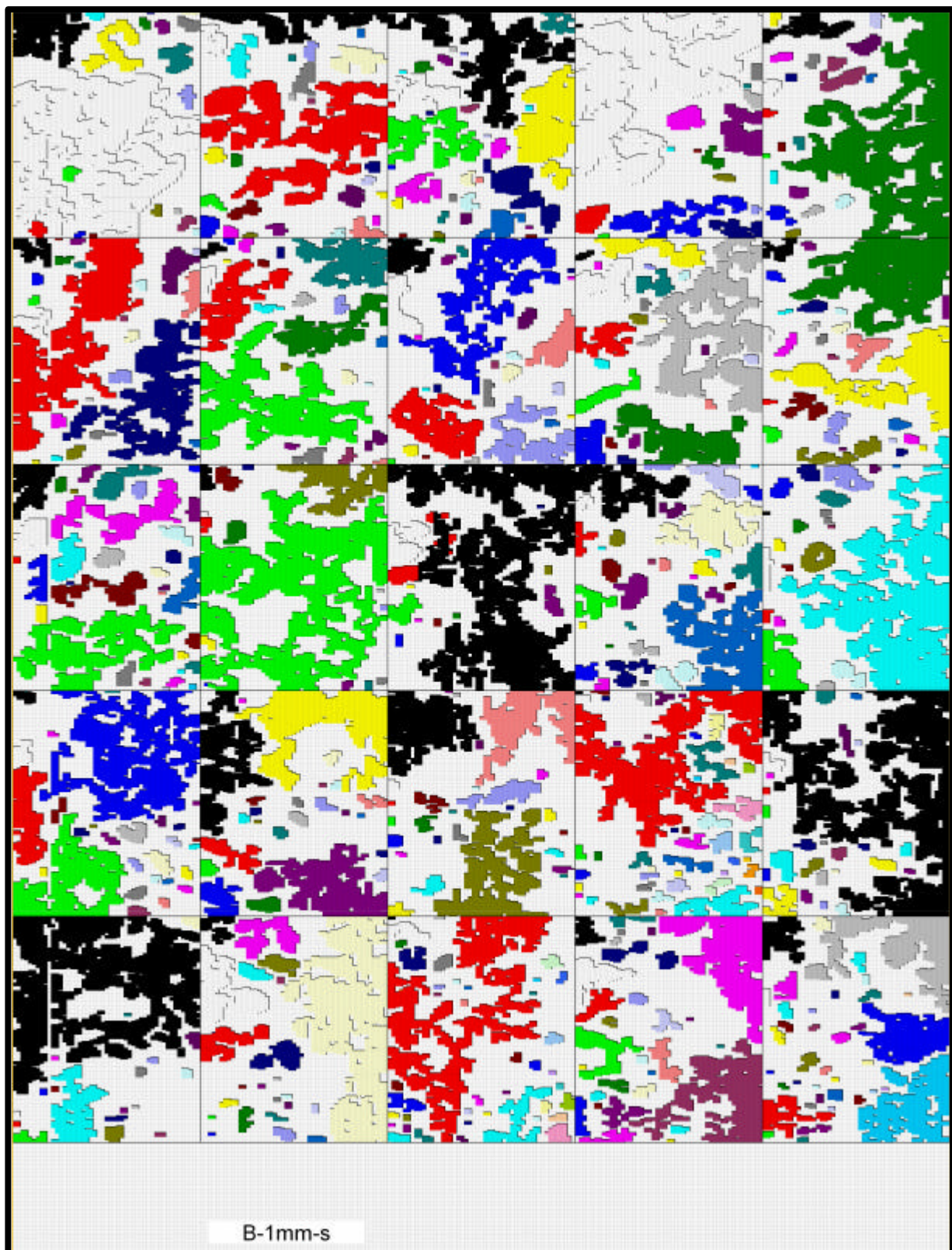


Abb. 3.48 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-1mm-S)

---

**Serie B-2mm**

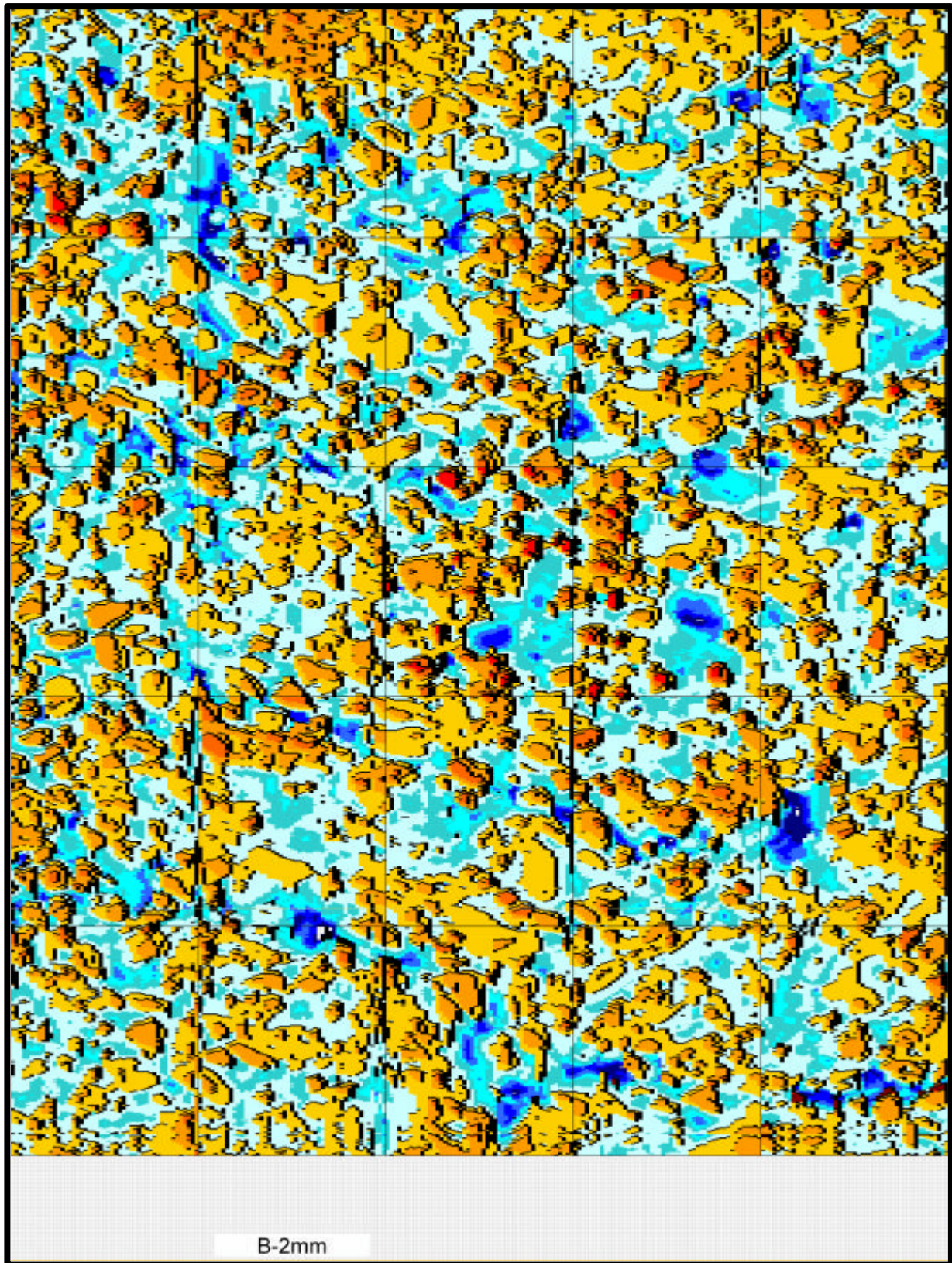


Abb. 3.51 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (B-2mm)

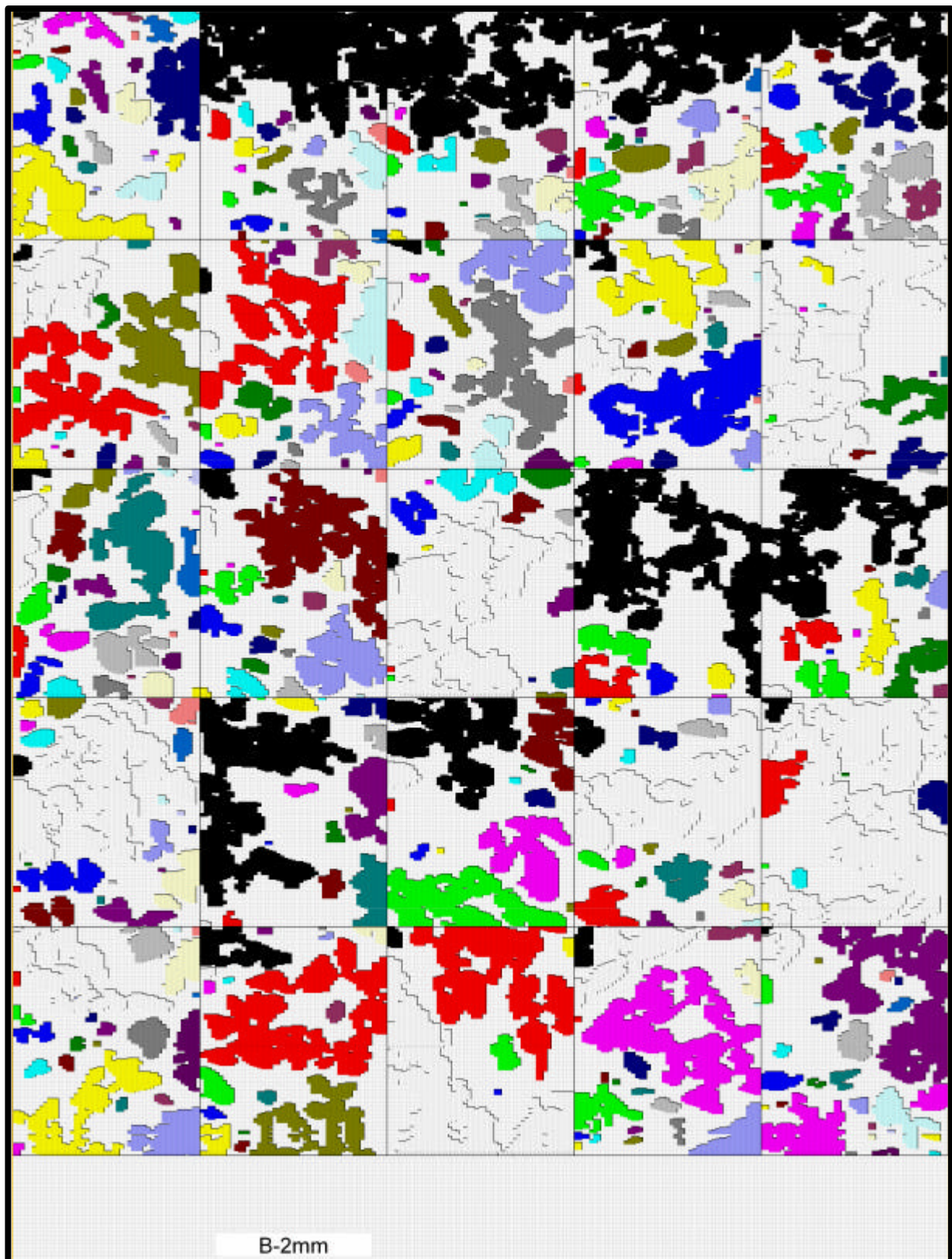


Abb. 3.52 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-2mm)

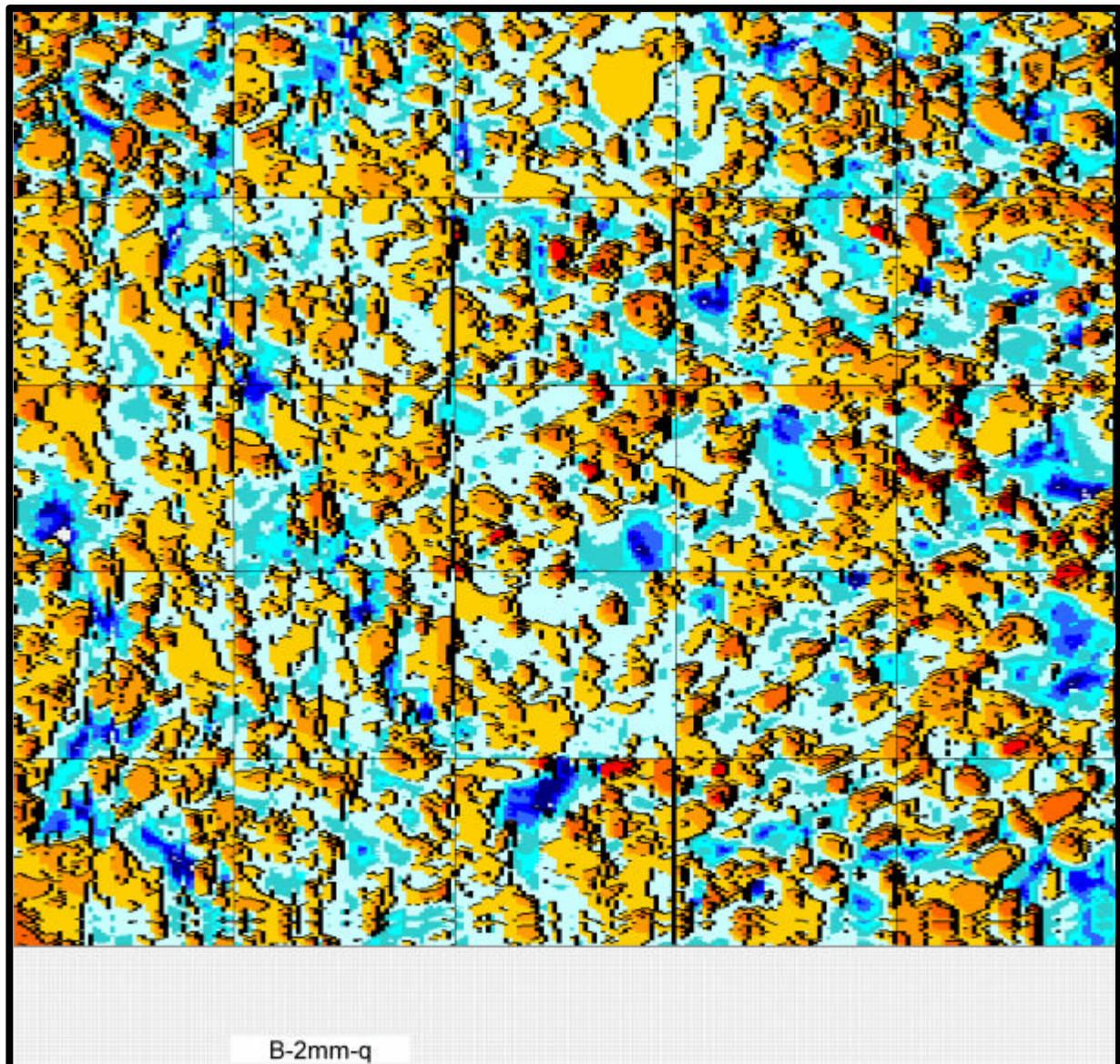


Abb. 3.55 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (B-2mm-q)

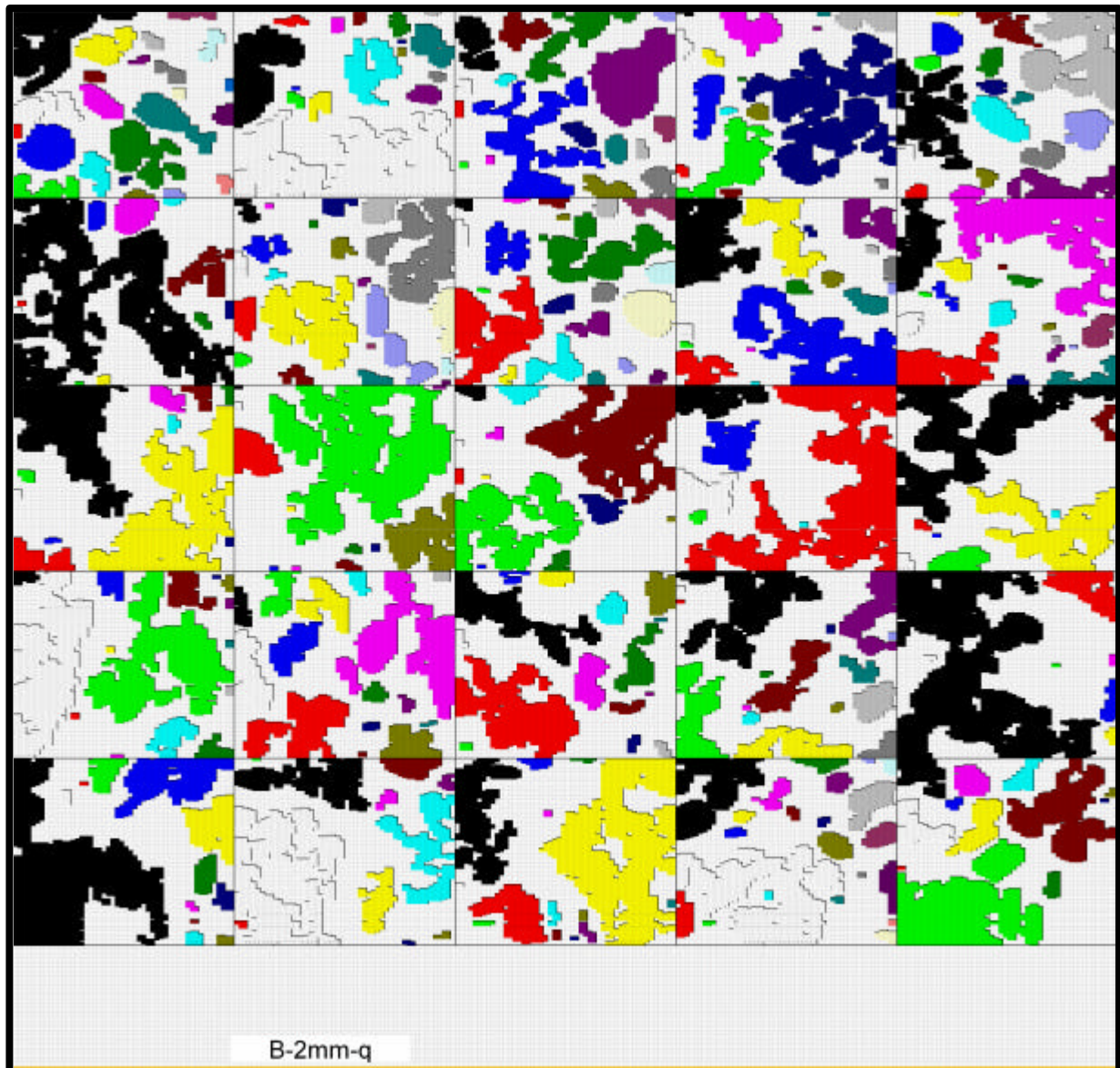


Abb. 3.56 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-2mm-q)

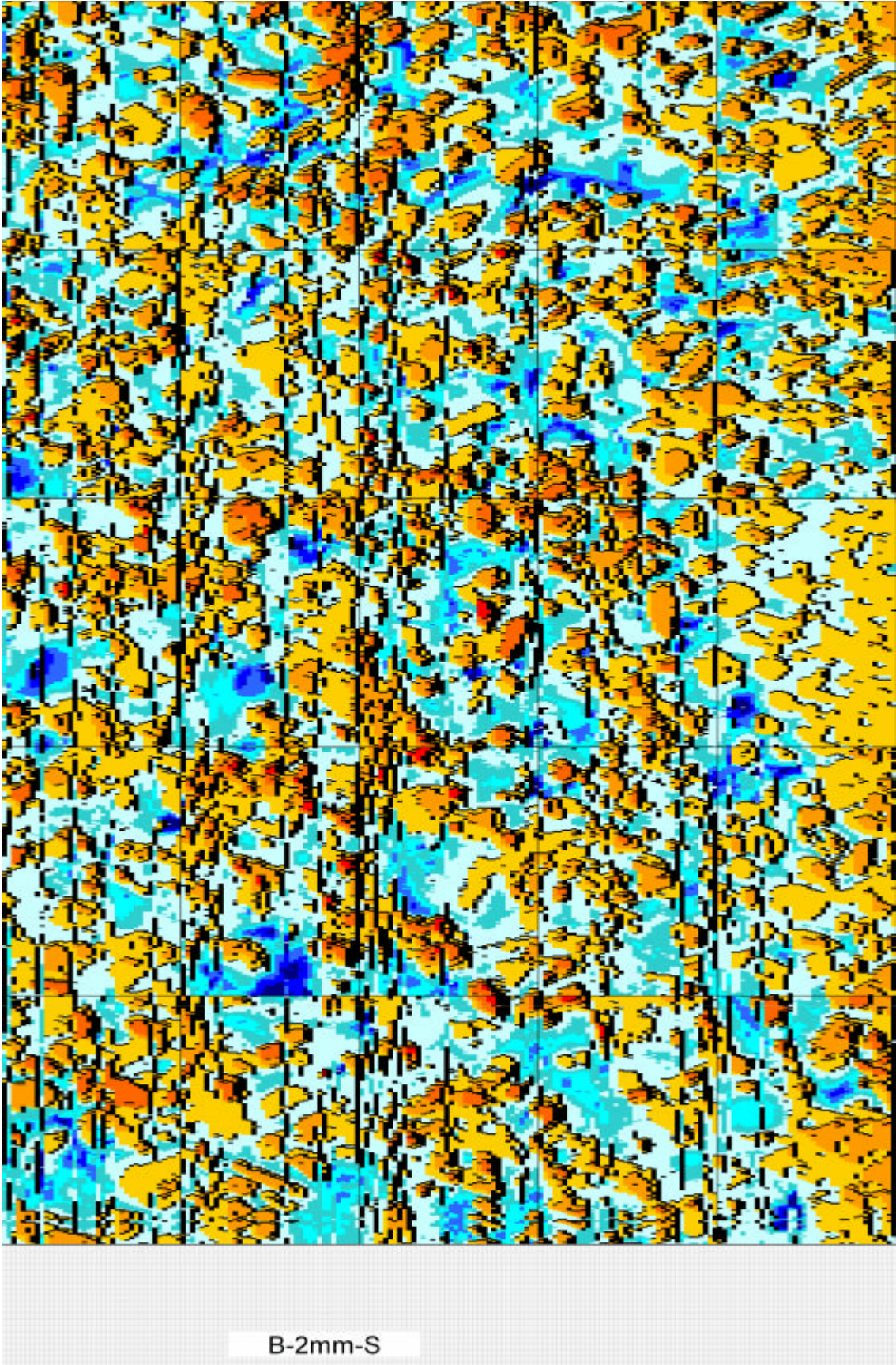


Abb. 3.59 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (B-2mm-S)

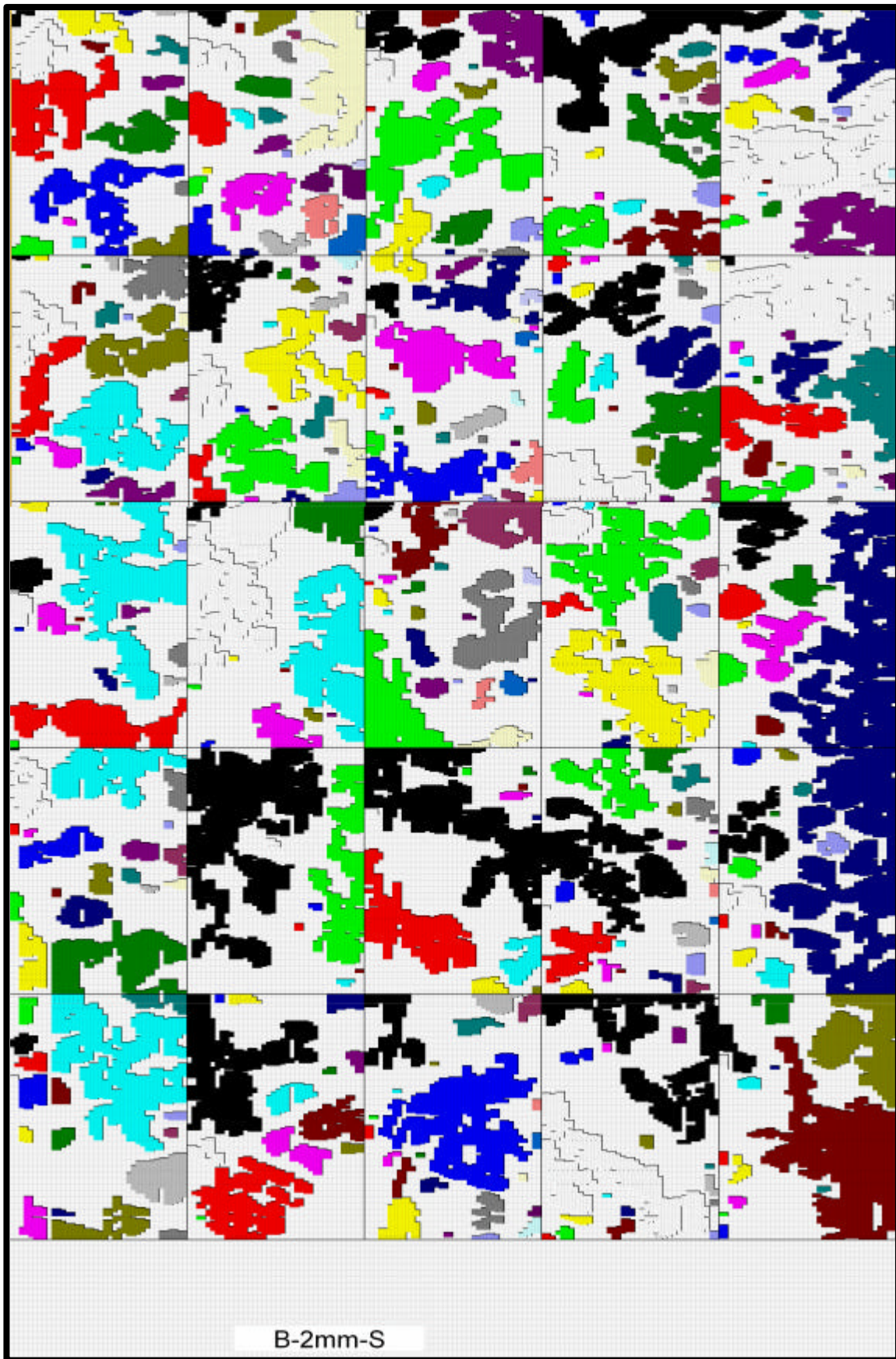


Abb. 3.60 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-2mm-S)

**Serie B-3mm**

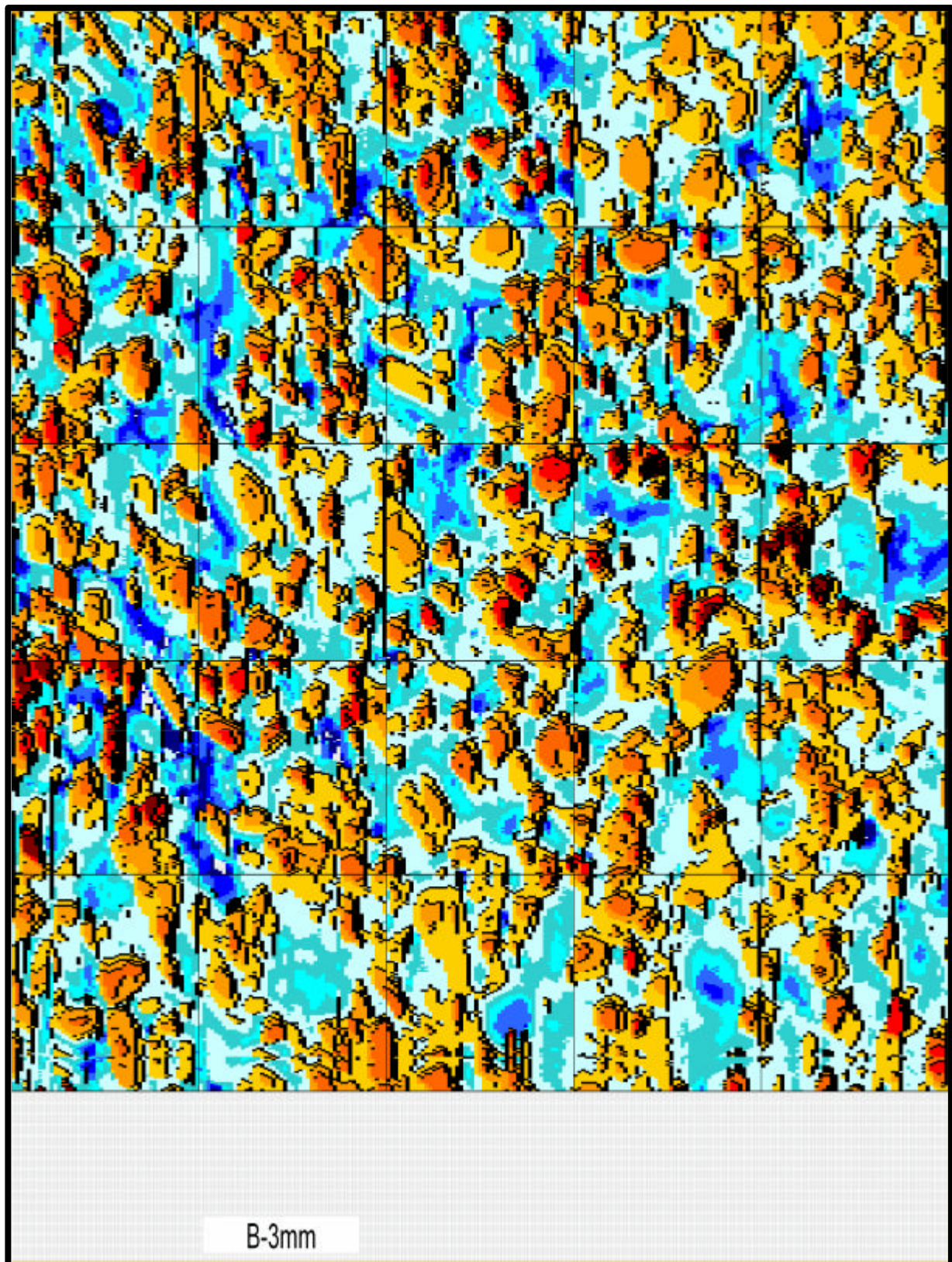


Abb. 3.63 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (B-3mm)



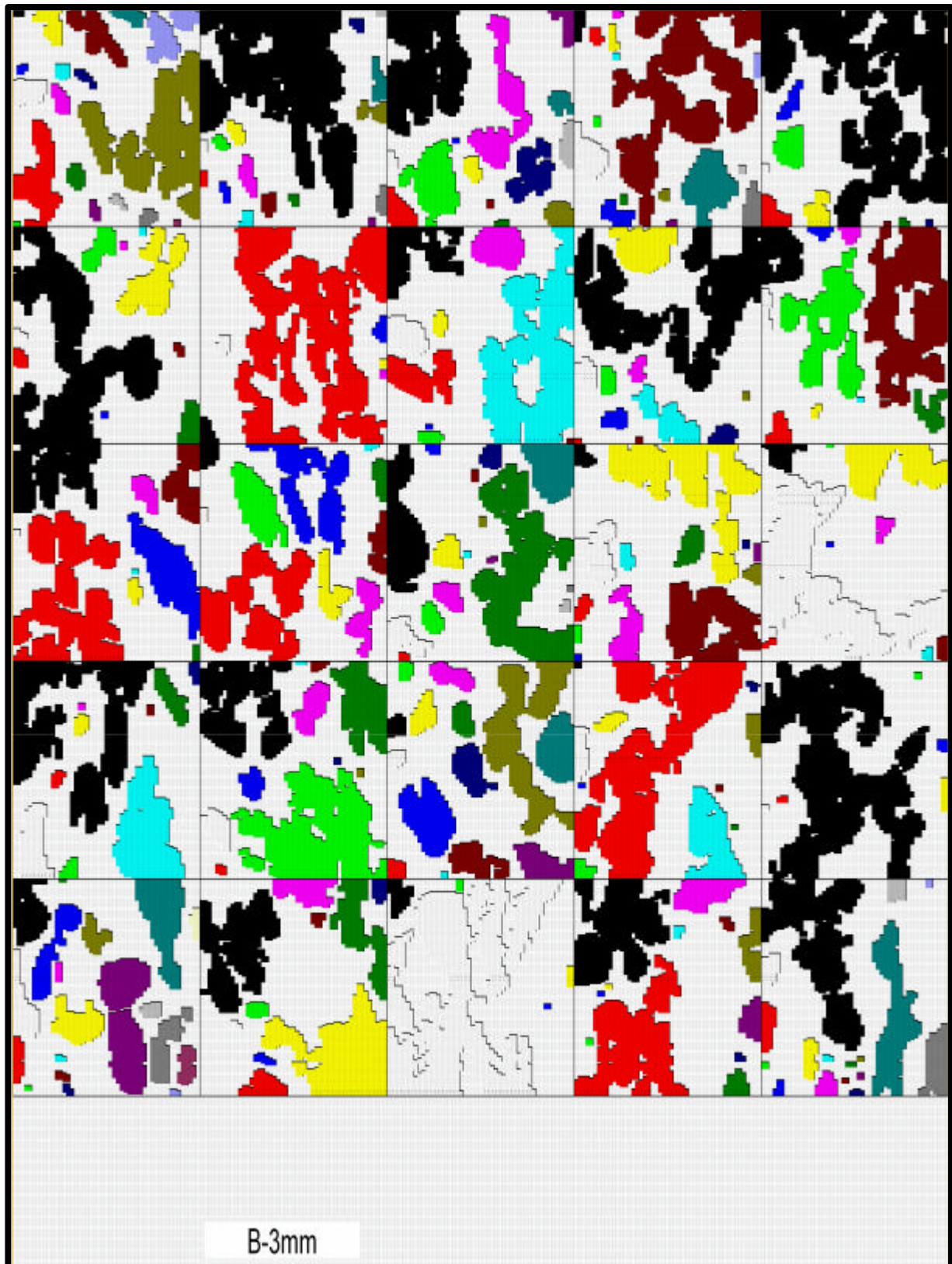


Abb. 3.64 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-3mm)

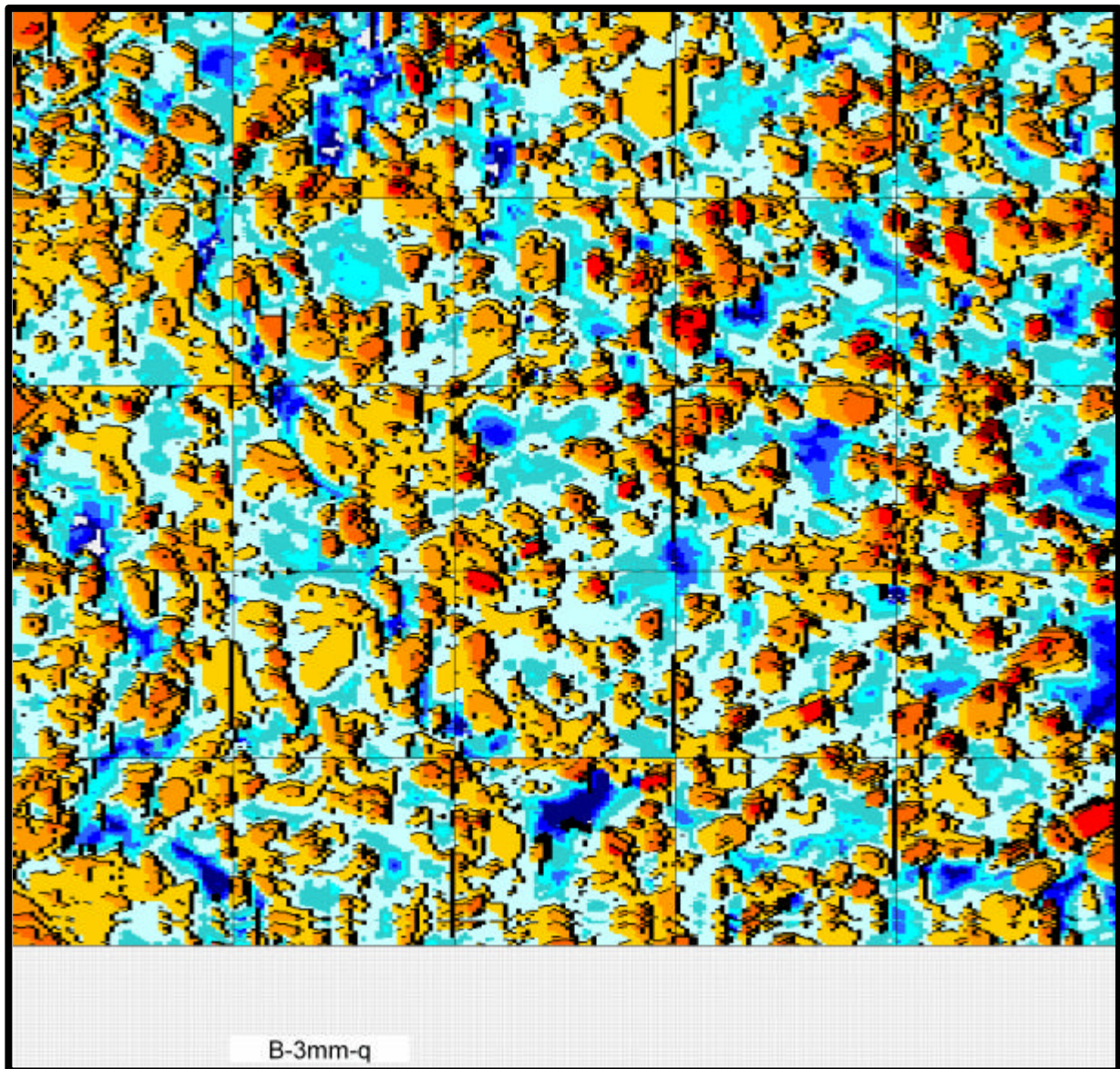


Abb. 3.66 : Die optische Darstellung der Abtastergebnisse für die gesamte Oberfläche (B-3mm-q)

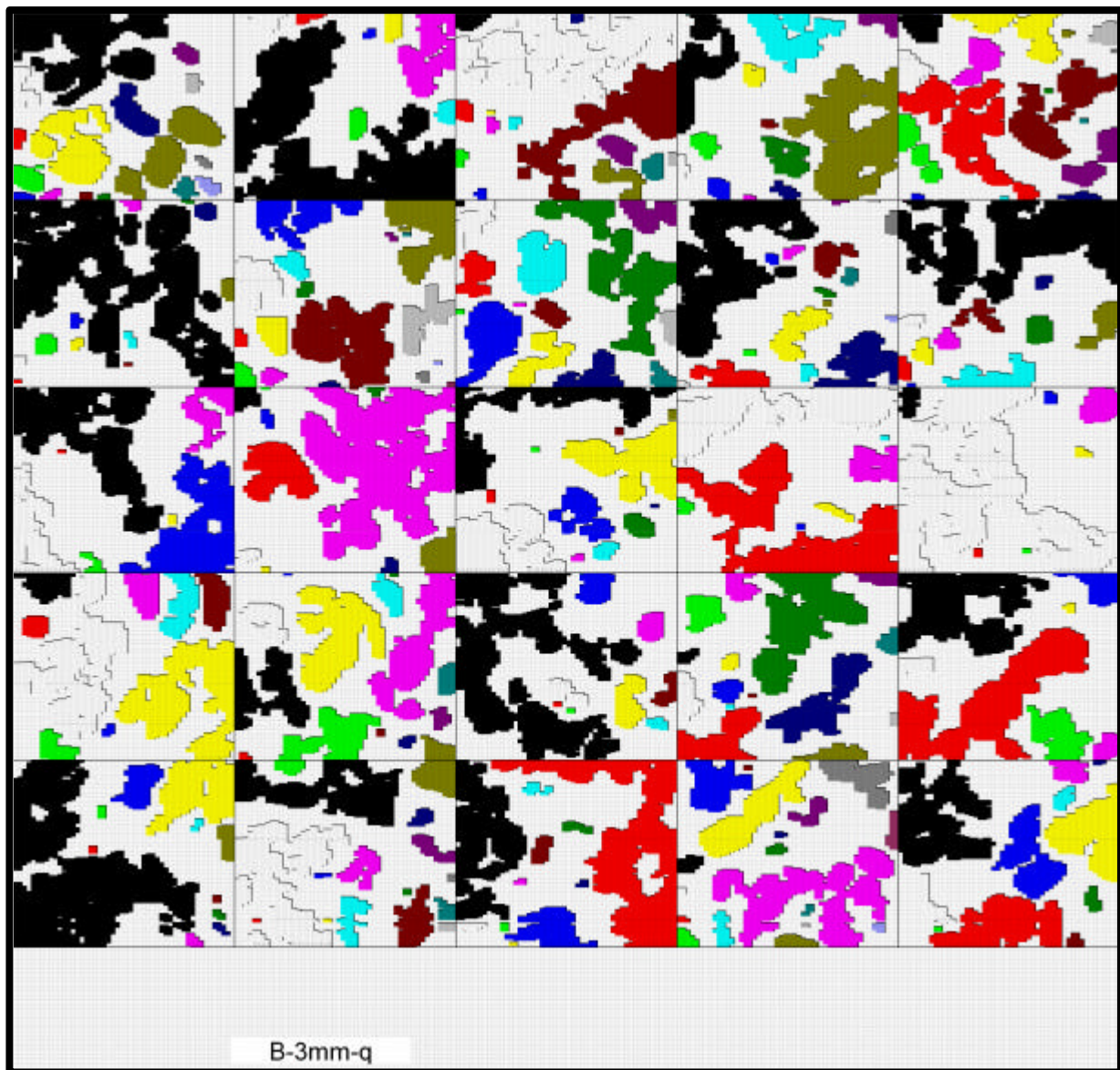


Abb. 3.67 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-3mm-q)

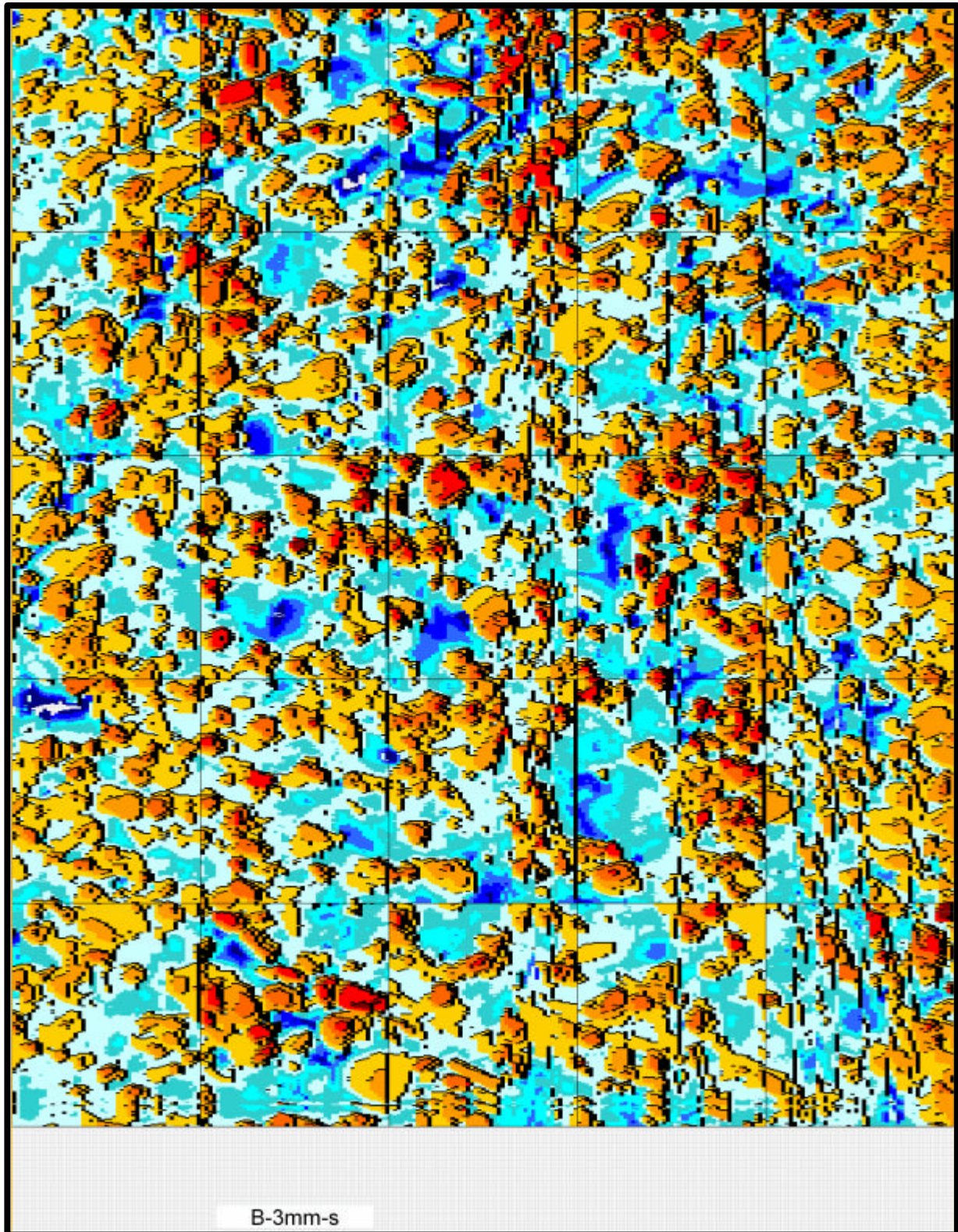


Abb. 3.71 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (B-3mm-S)

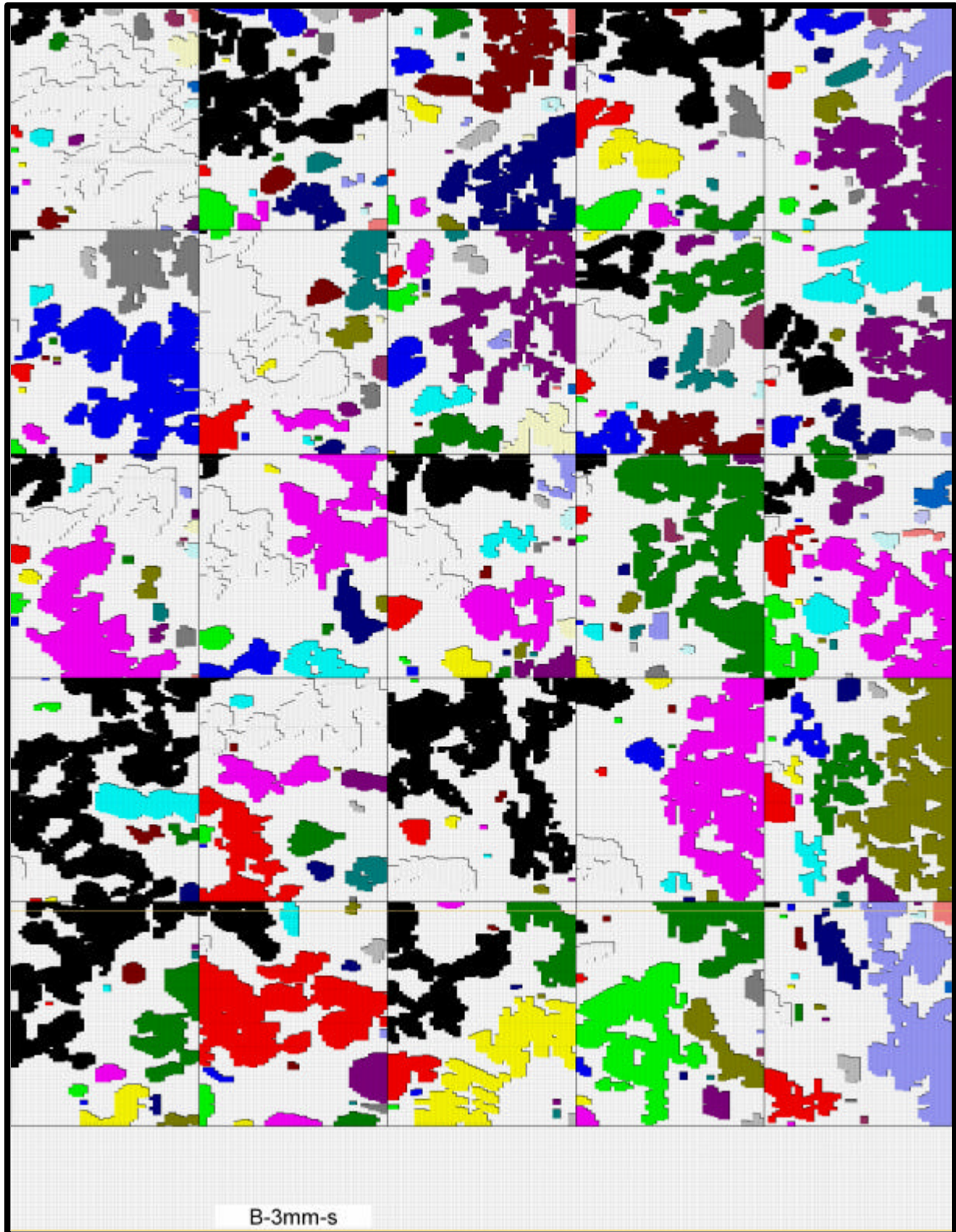


Abb. 3.72 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (B-3mm-S)

**3**

***Anhang 3C***

**Serie C-1mm**

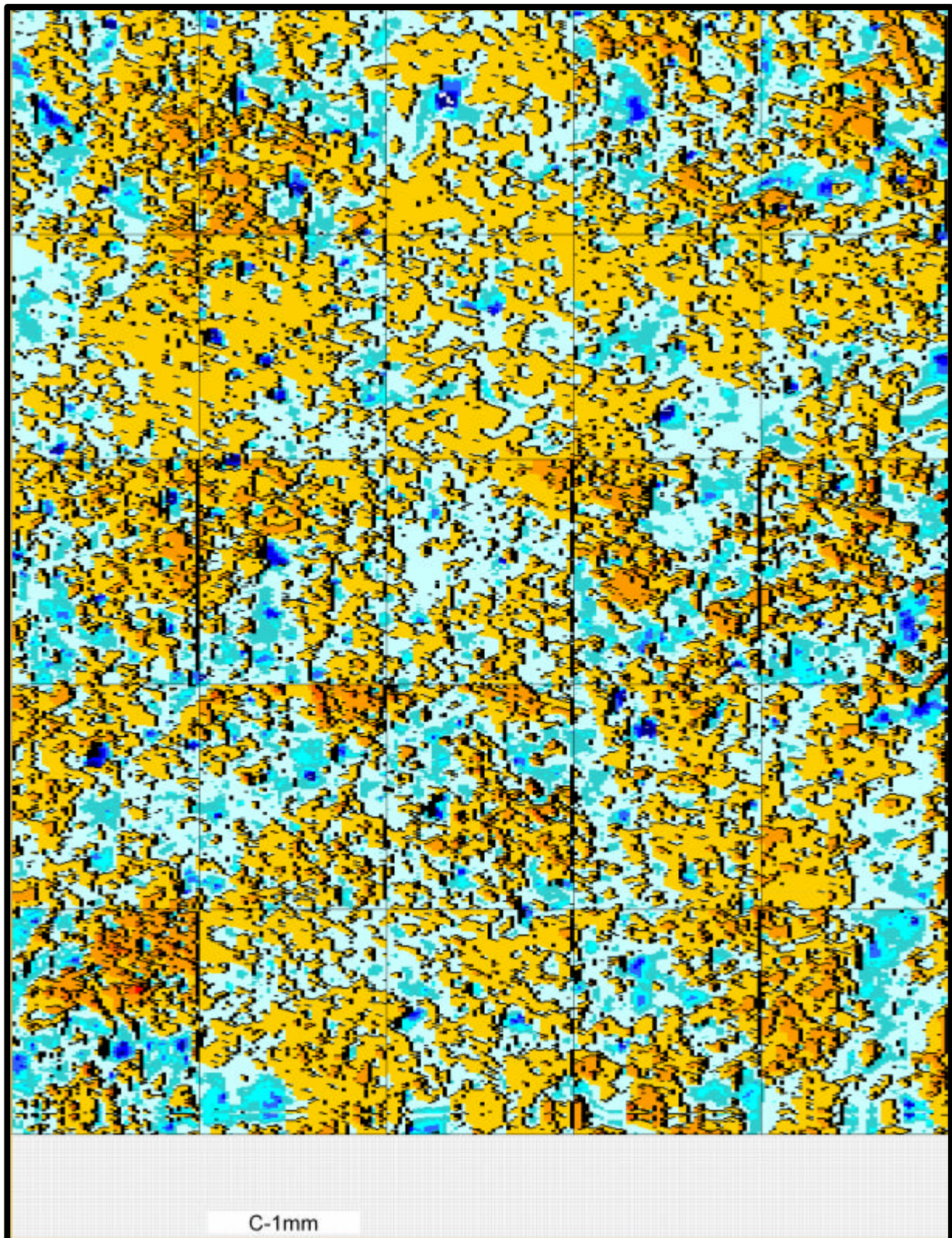


Abb. 3.75 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-1mm)

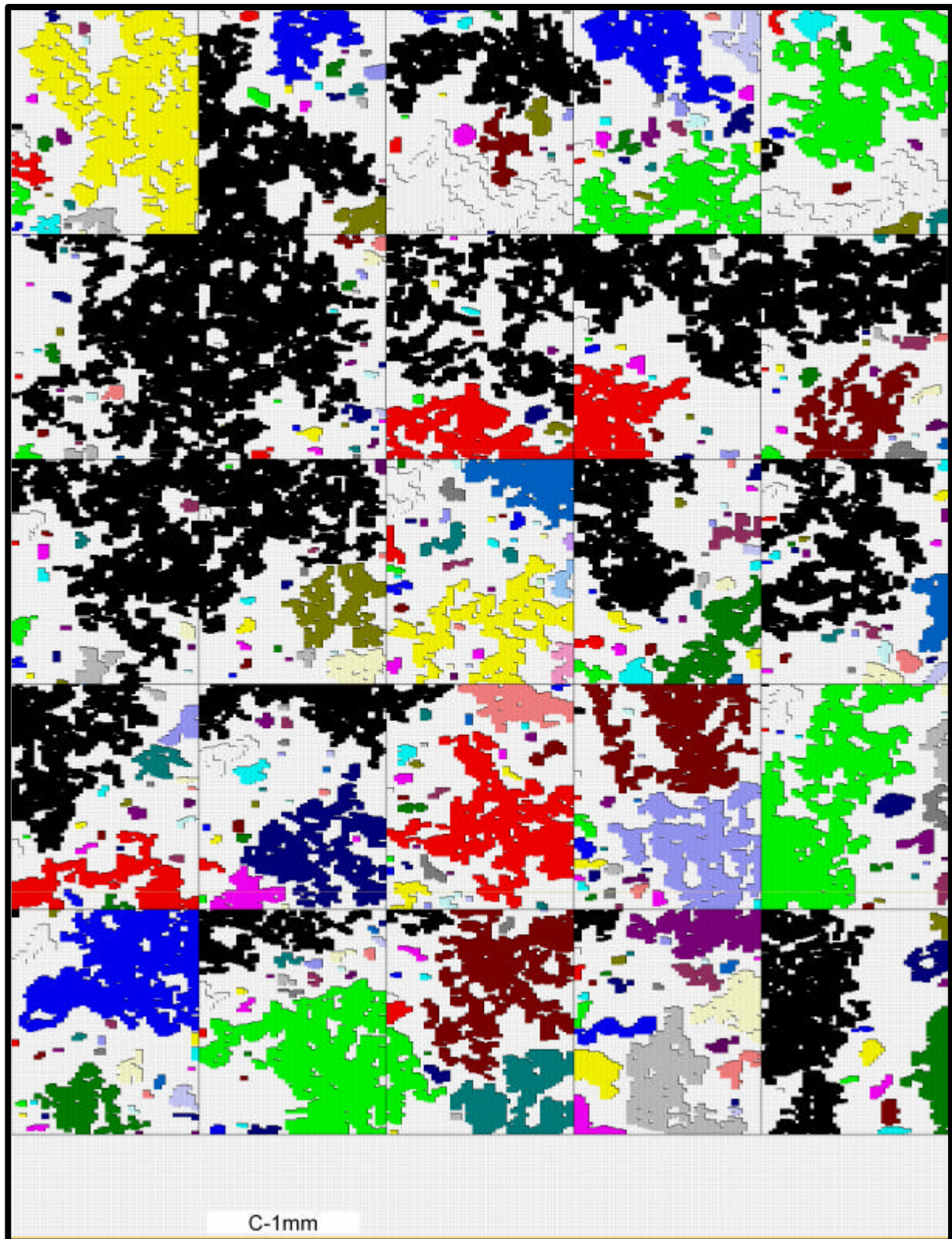


Abb. 3.76 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-1mm)



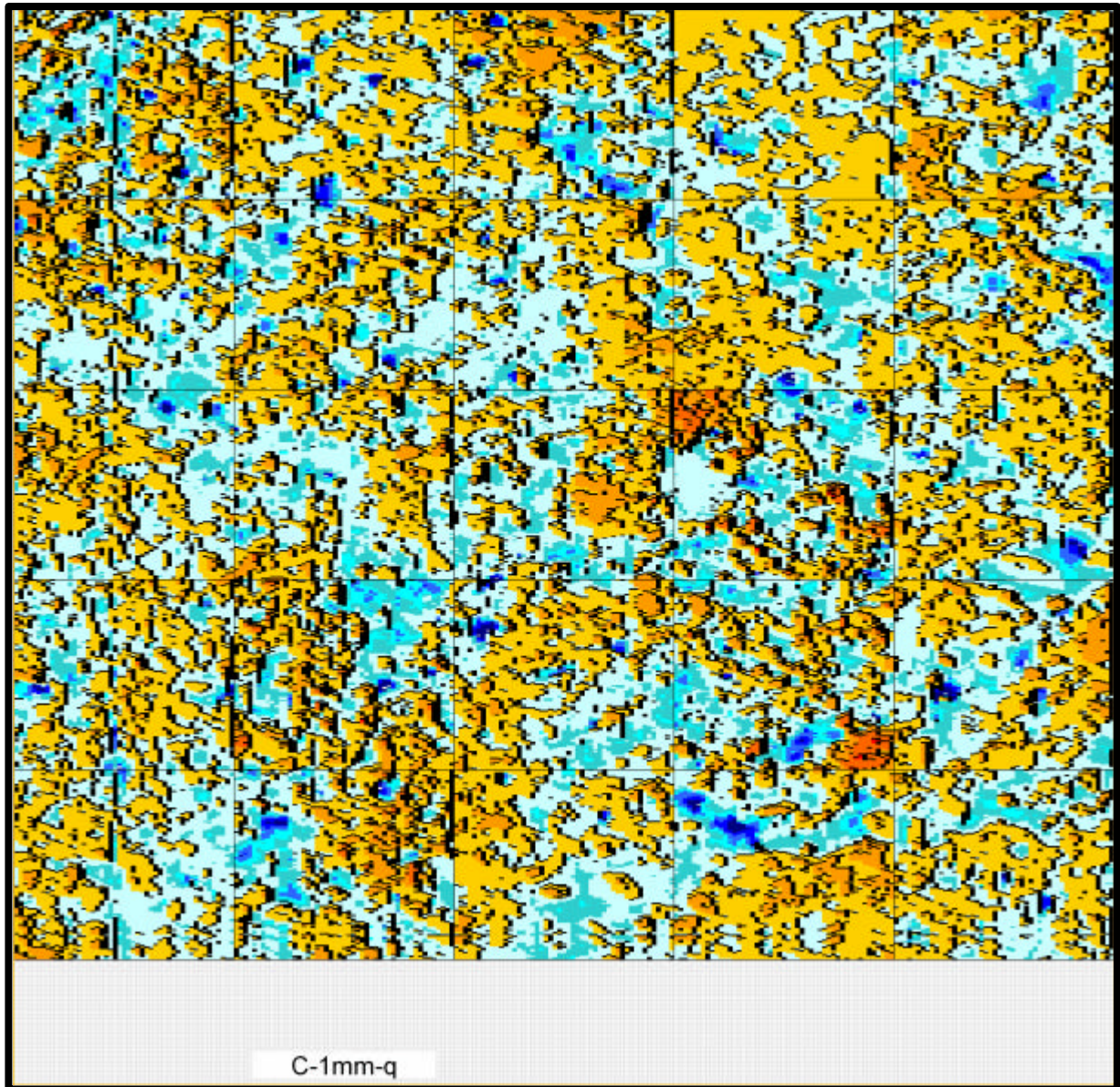


Abb. 3.79 : Die optische Darstellung der Abtastergebnisse für die unterteilte Oberfläche (C-1mm-q)

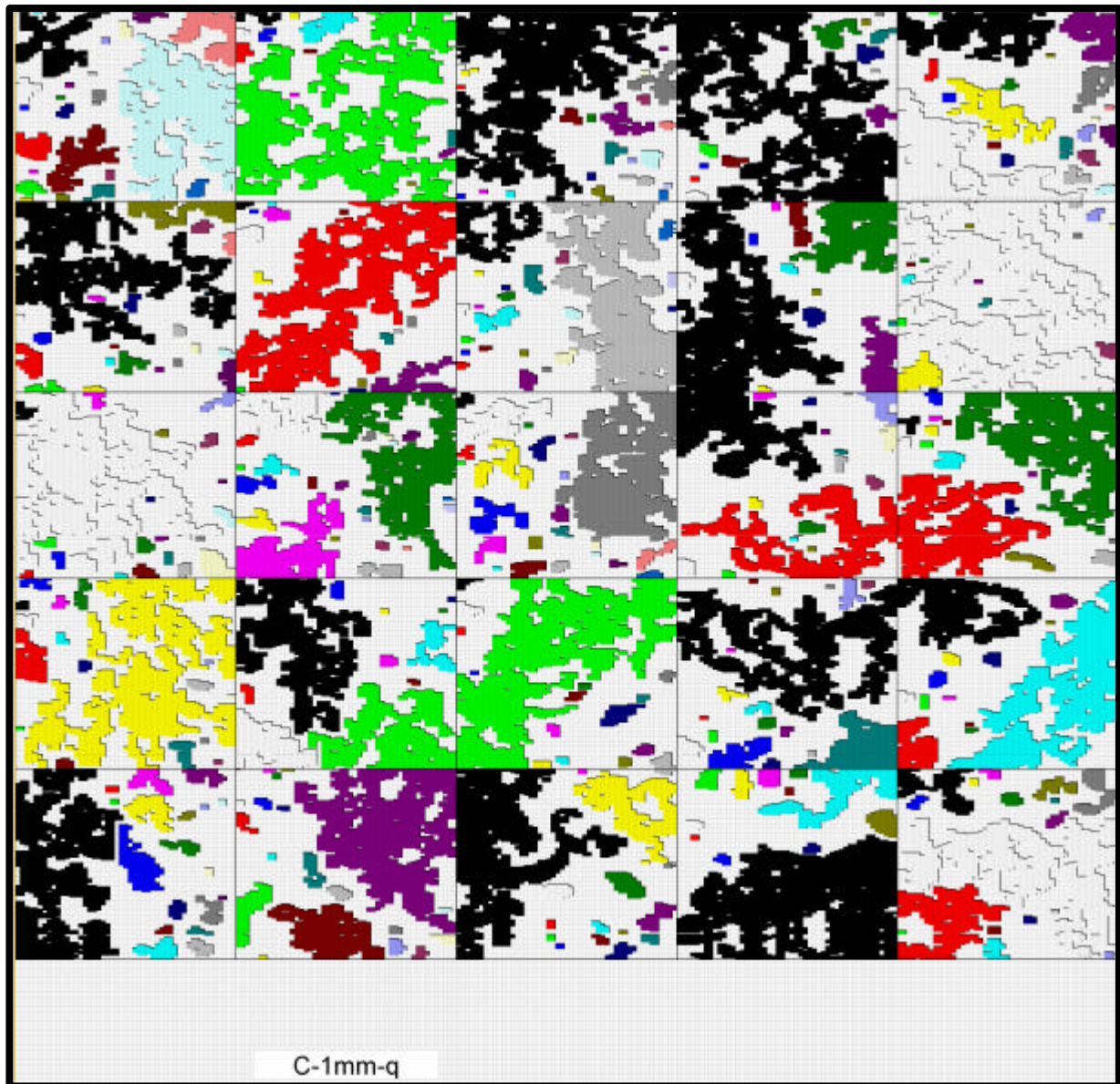


Abb. 3.80 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-1mm-q)

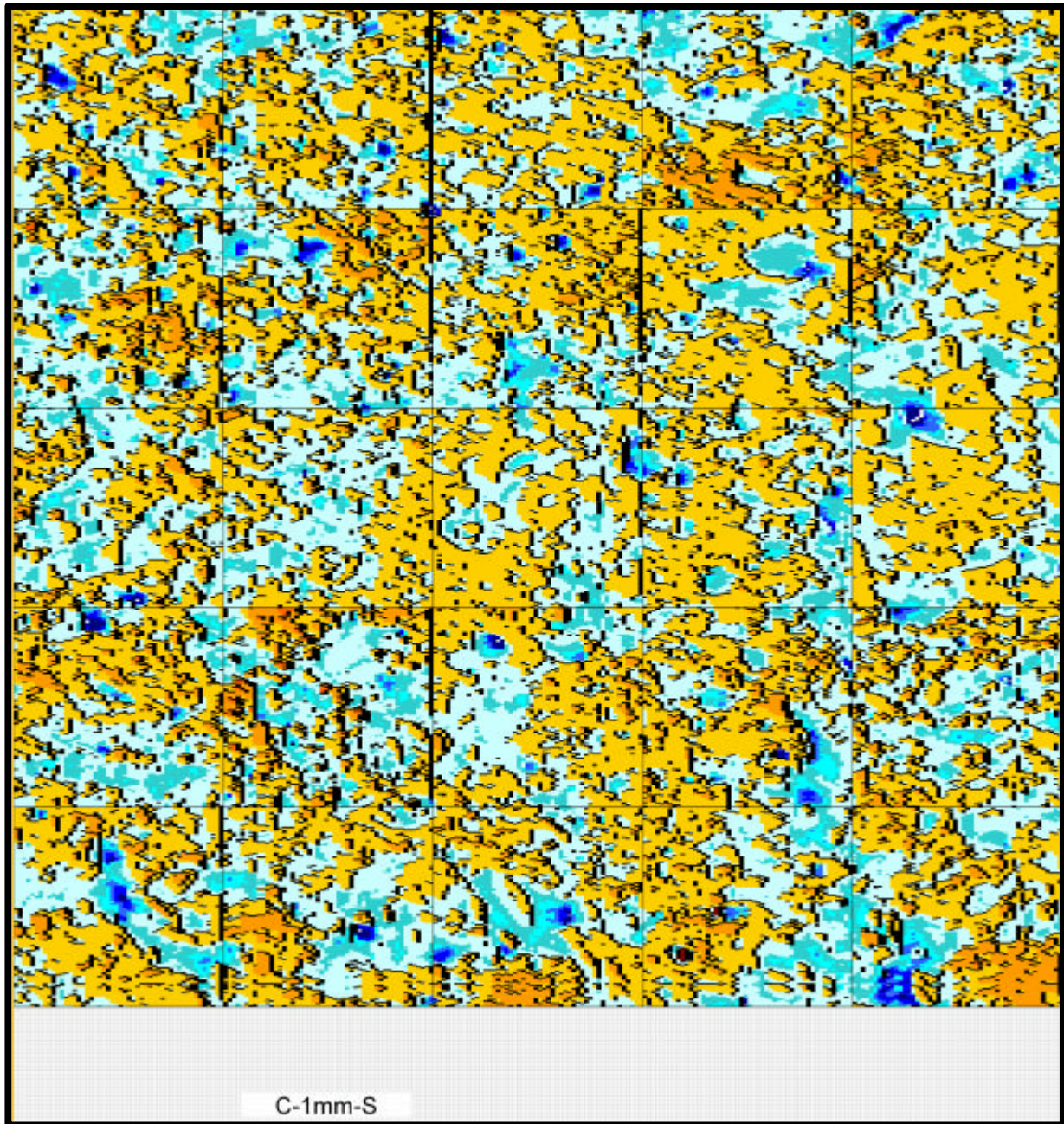


Abb. 3.83 : Die optische Darstellung der Abtastergebnisse für die unterteilte Oberfläche (C-1mm-S)

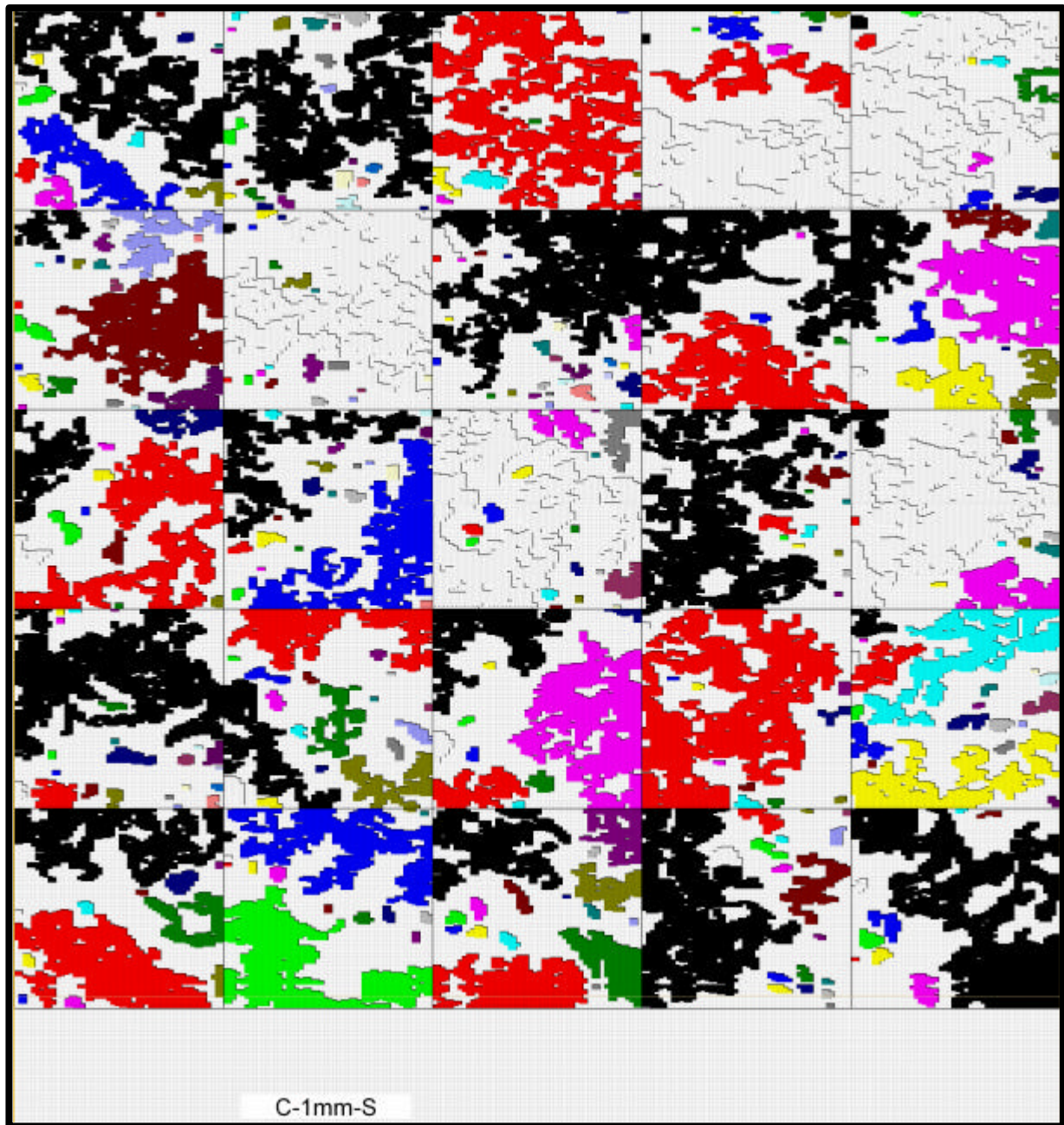


Abb. 3.84 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-1mm-S)

**Serie C-2mm**

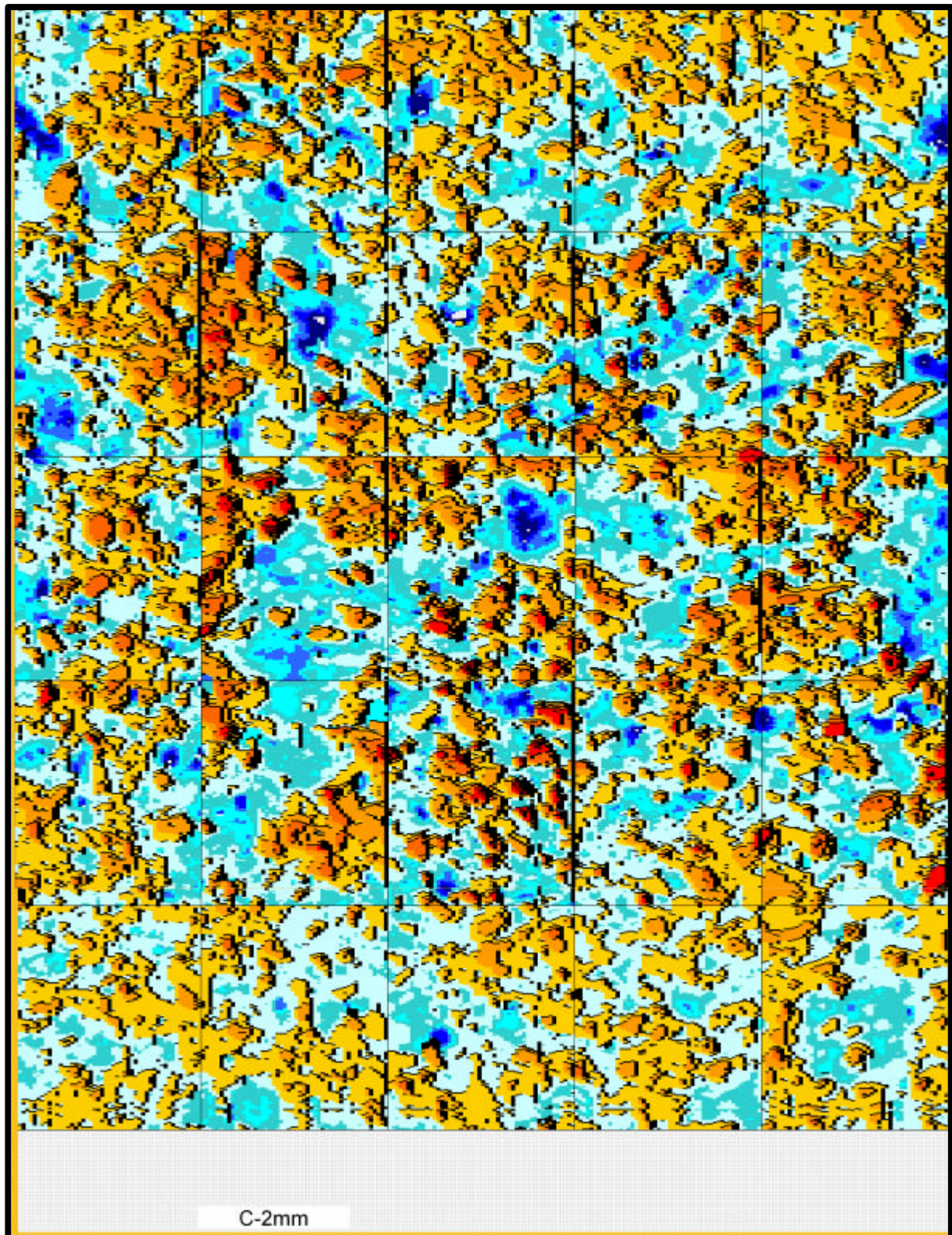


Abb. 3.87 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-2mm)

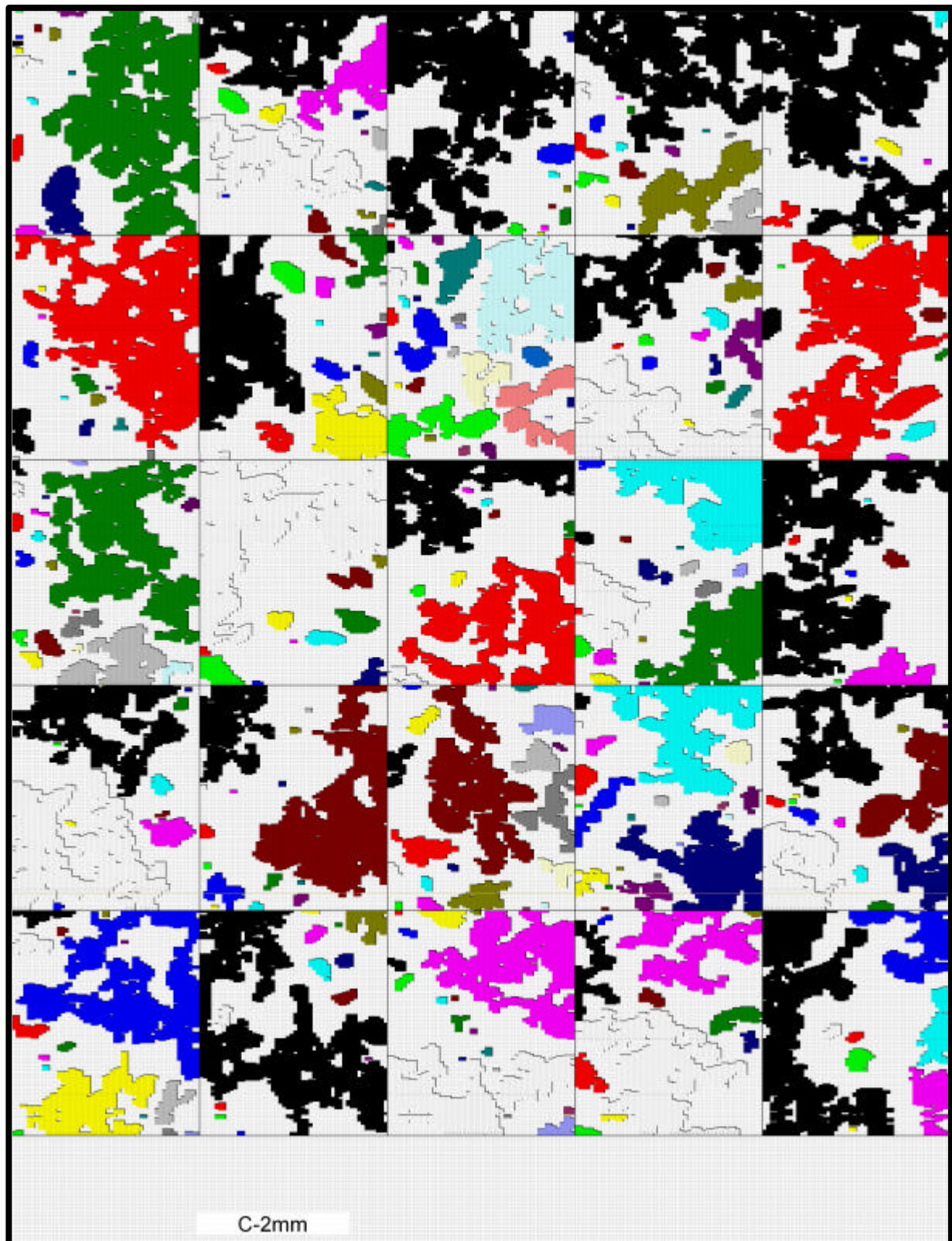


Abb. 3.88 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-2mm)

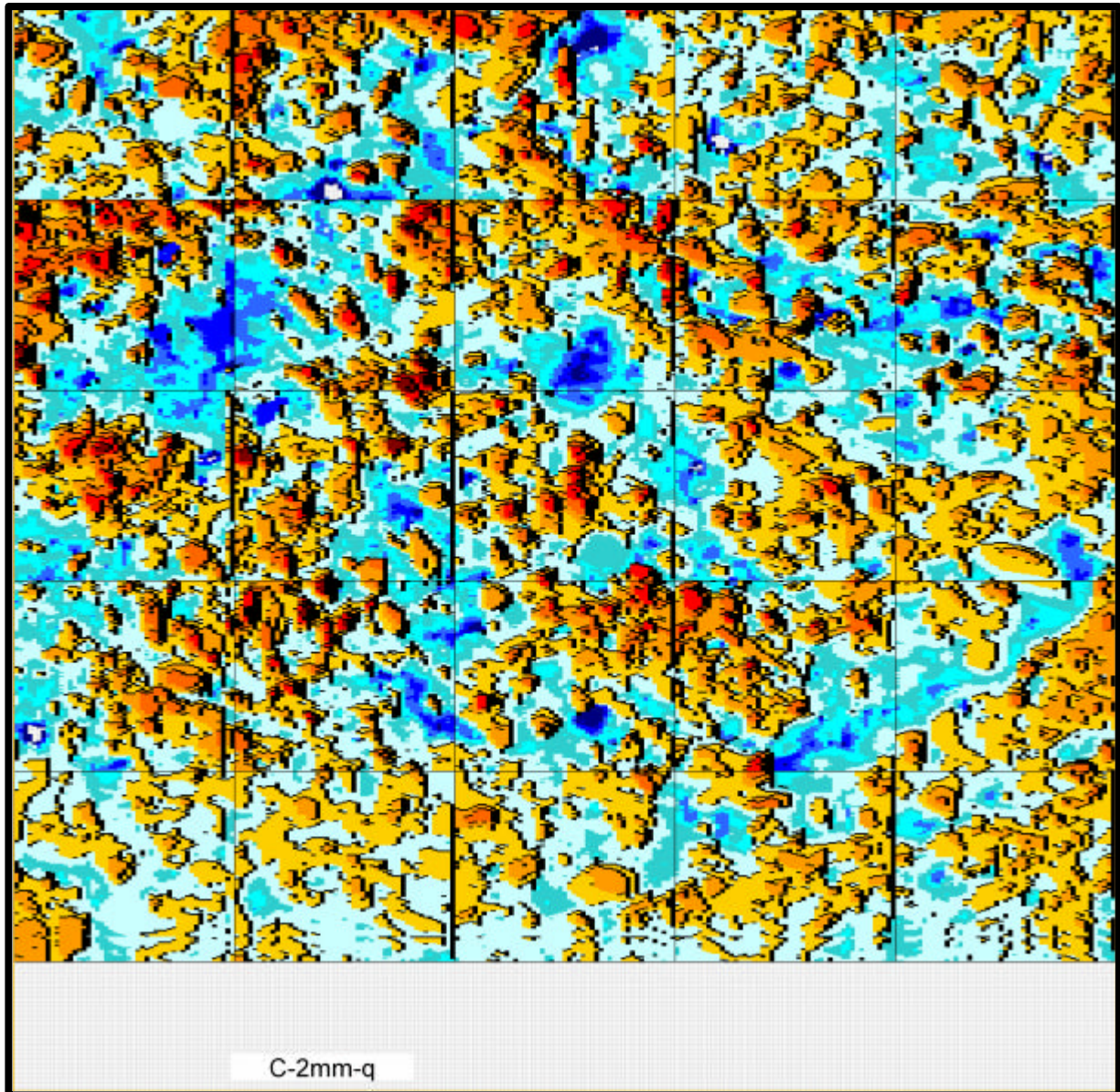


Abb. 3.91 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-2mm-q)

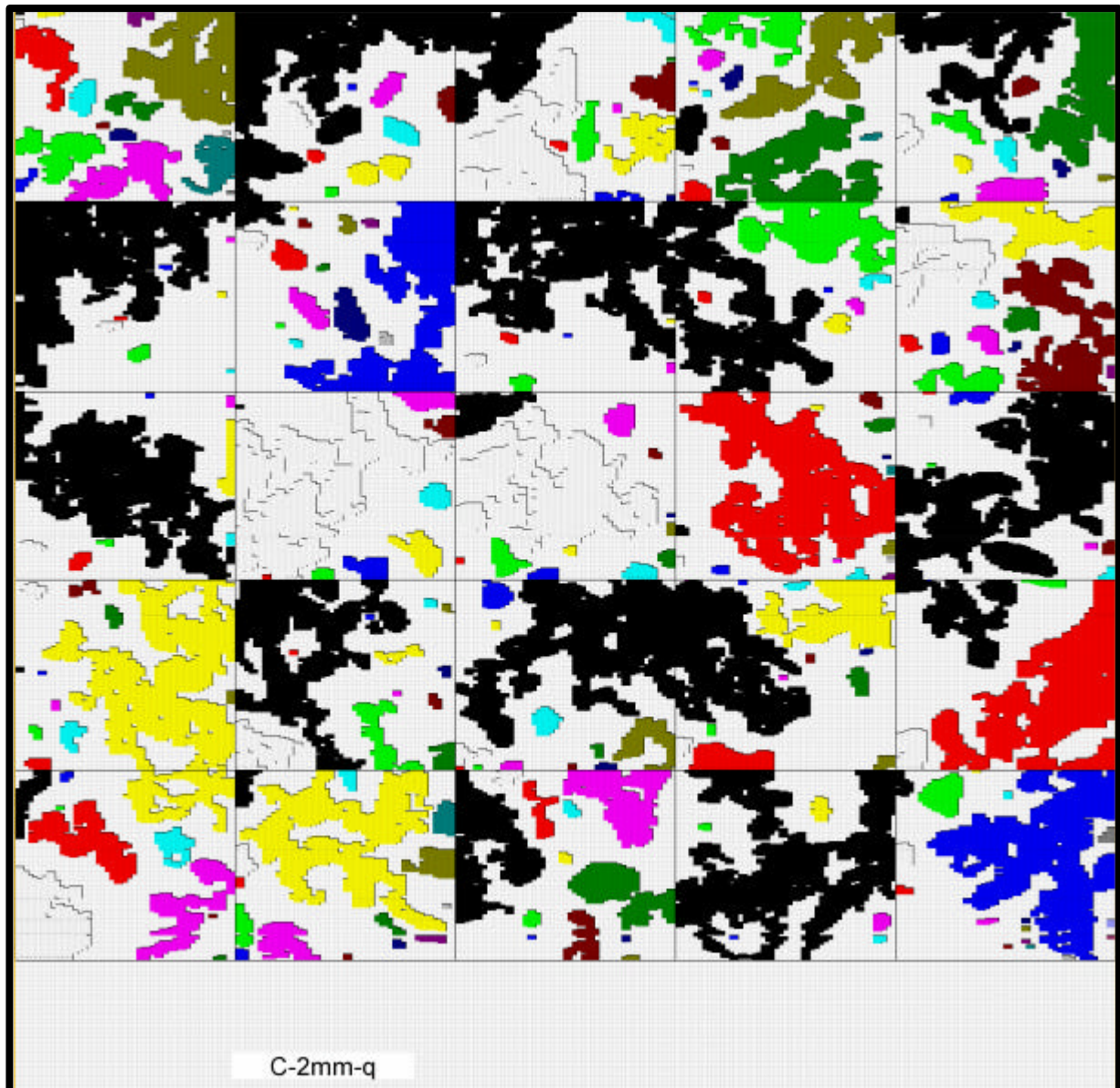


Abb. 3.92 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-2mm-q)



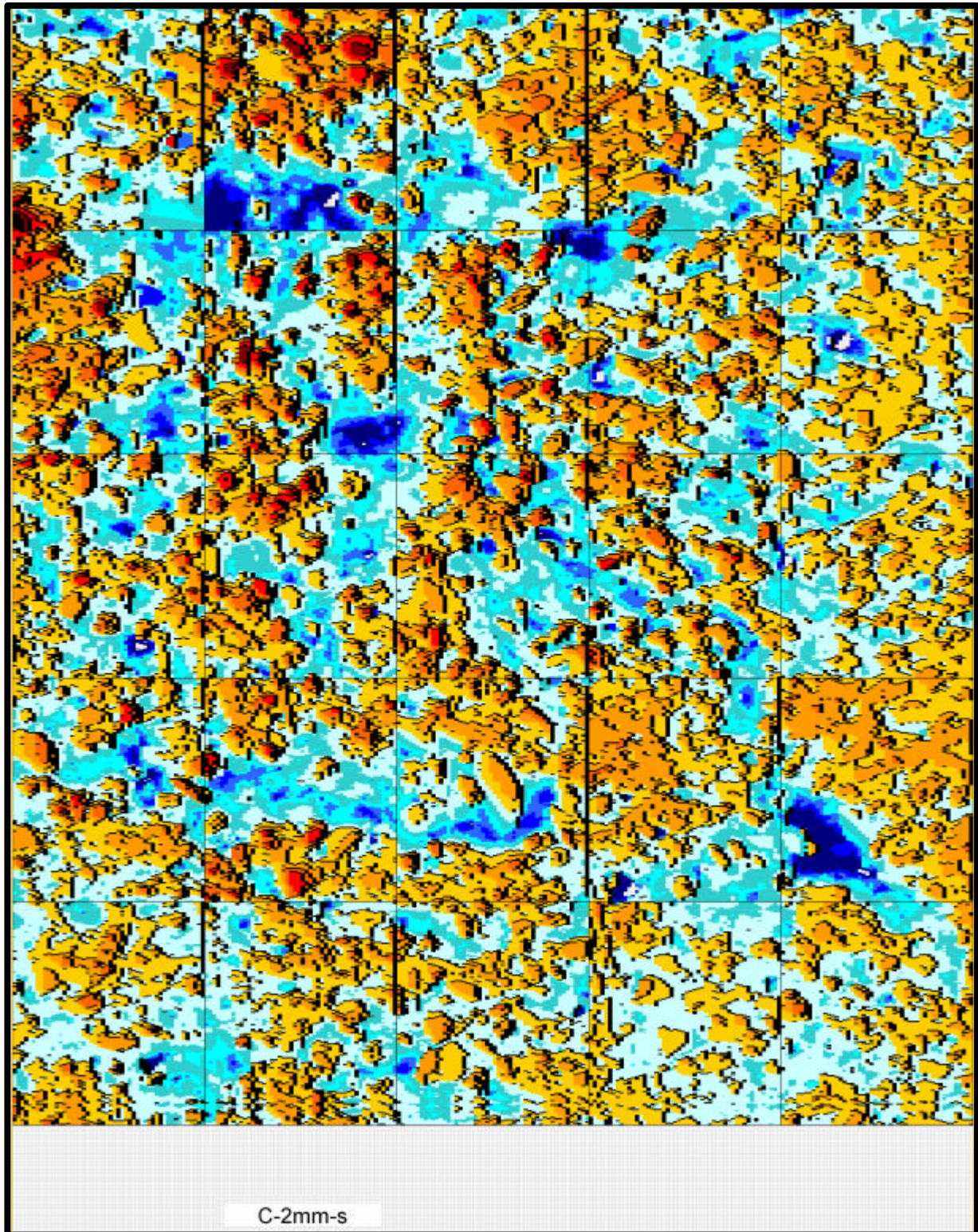


Abb. 3.95 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-2mm-S)

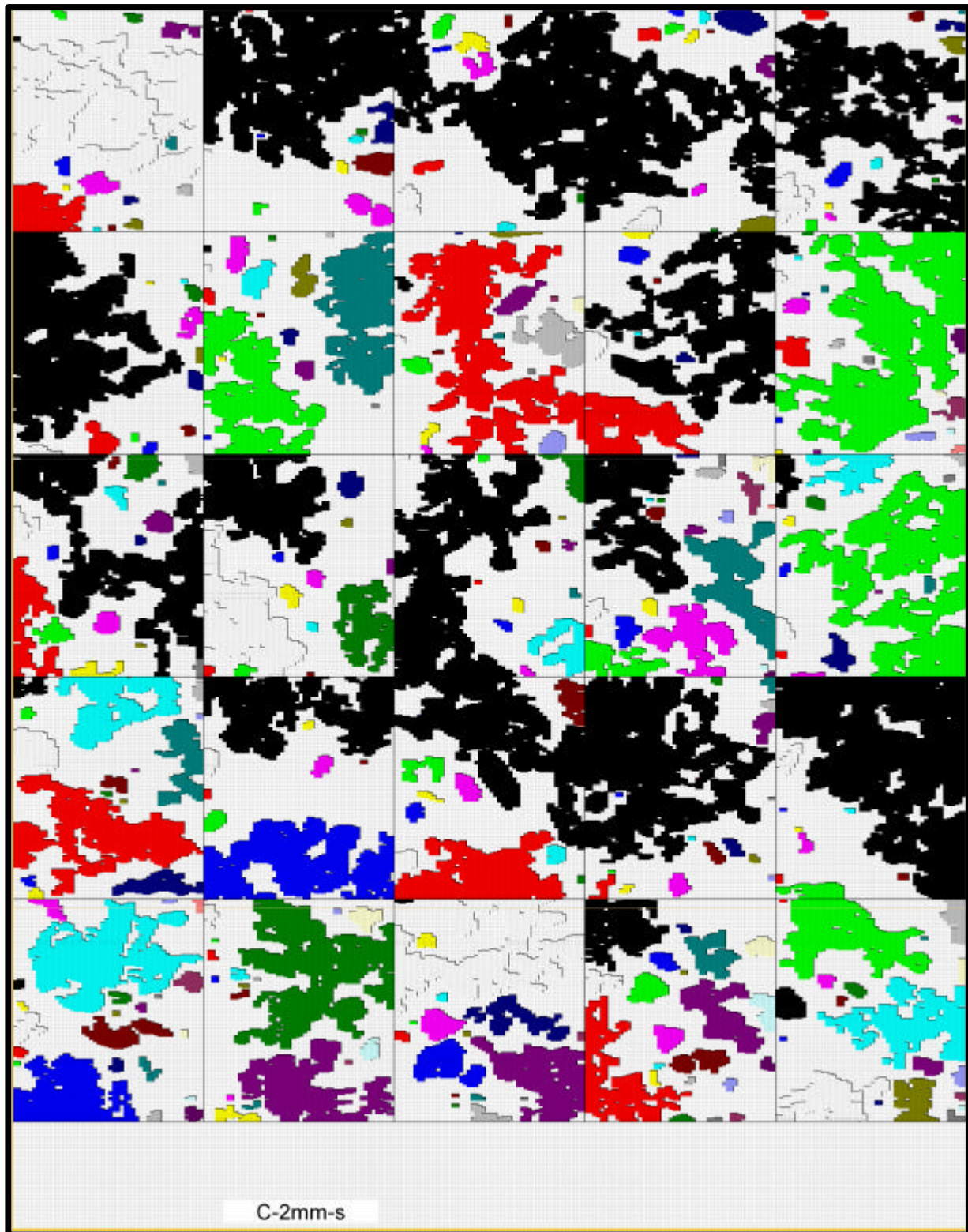


Abb. 3.96 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-2mm-S)

**Serie C-3mm**

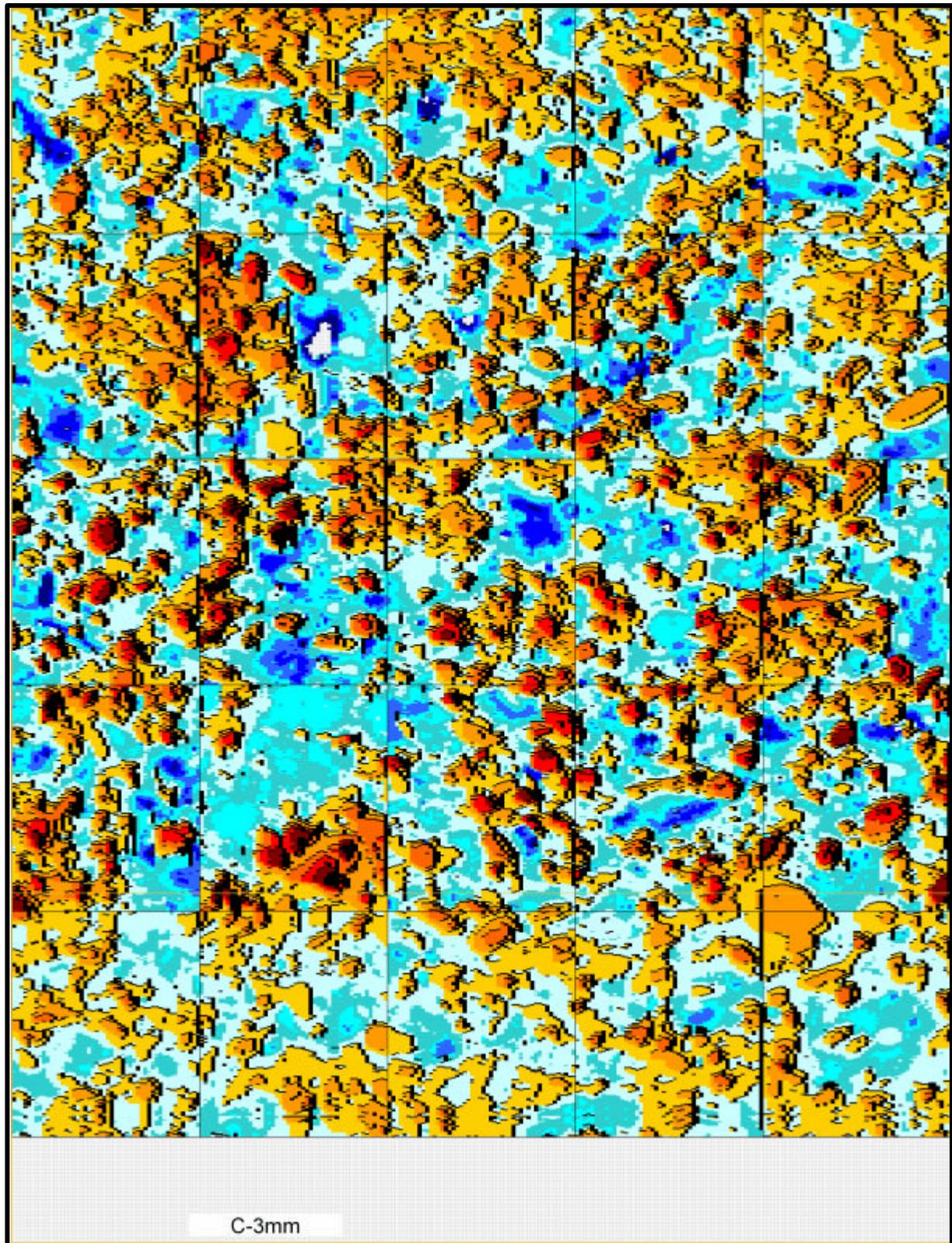


Abb. 3.99 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-3mm)

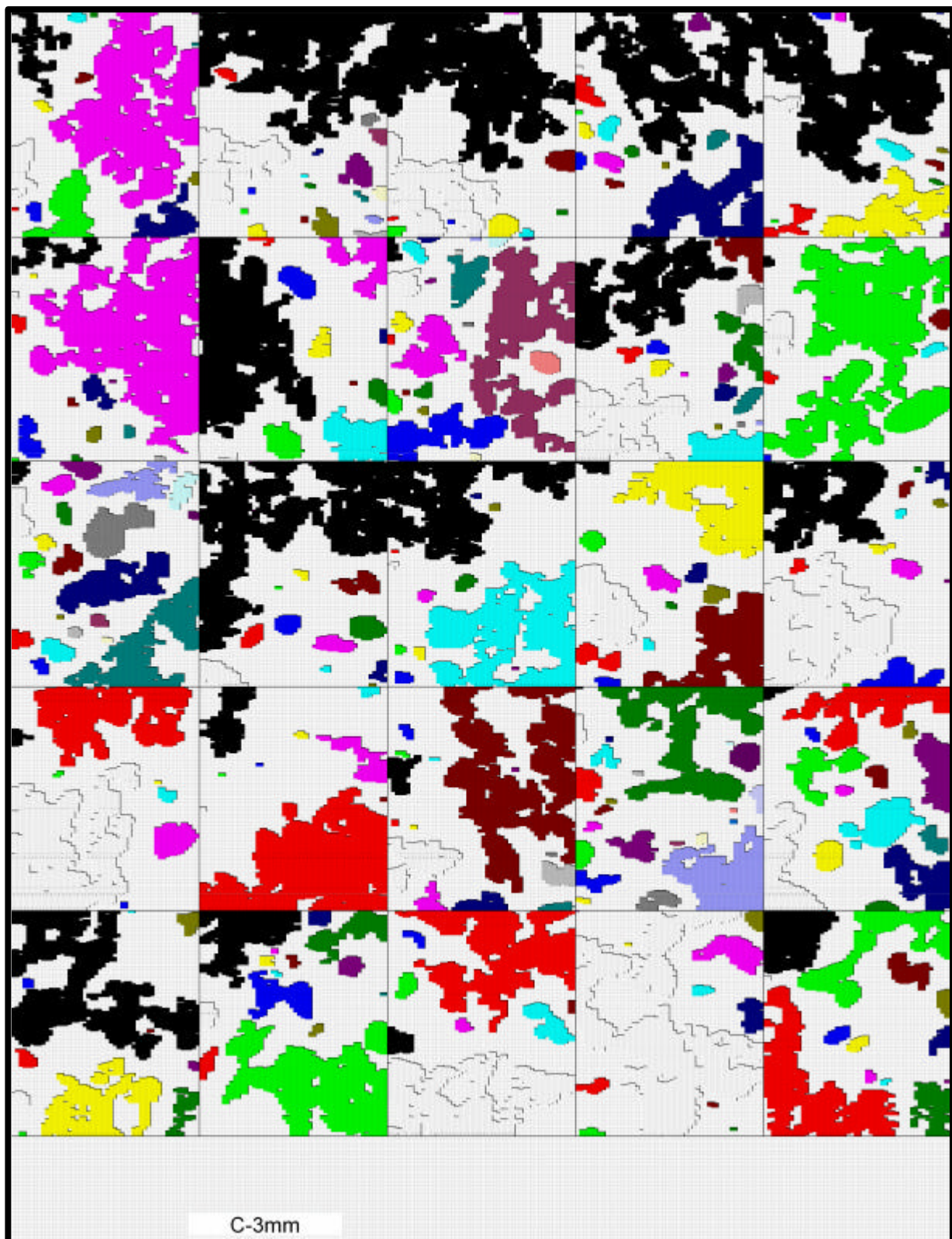


Abb. 3.100 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-3mm)

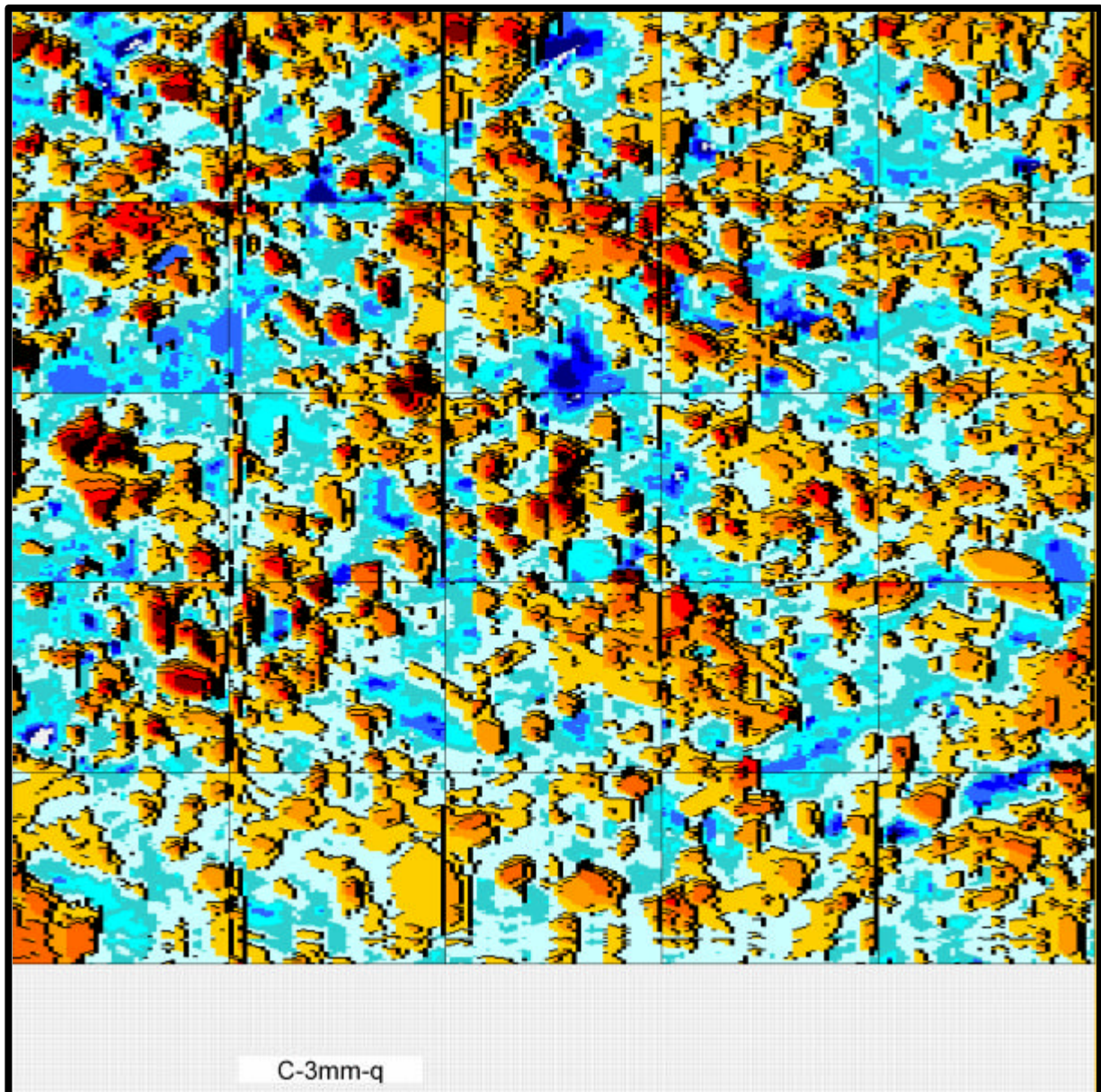


Abb. 3.103 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-3mm-q)

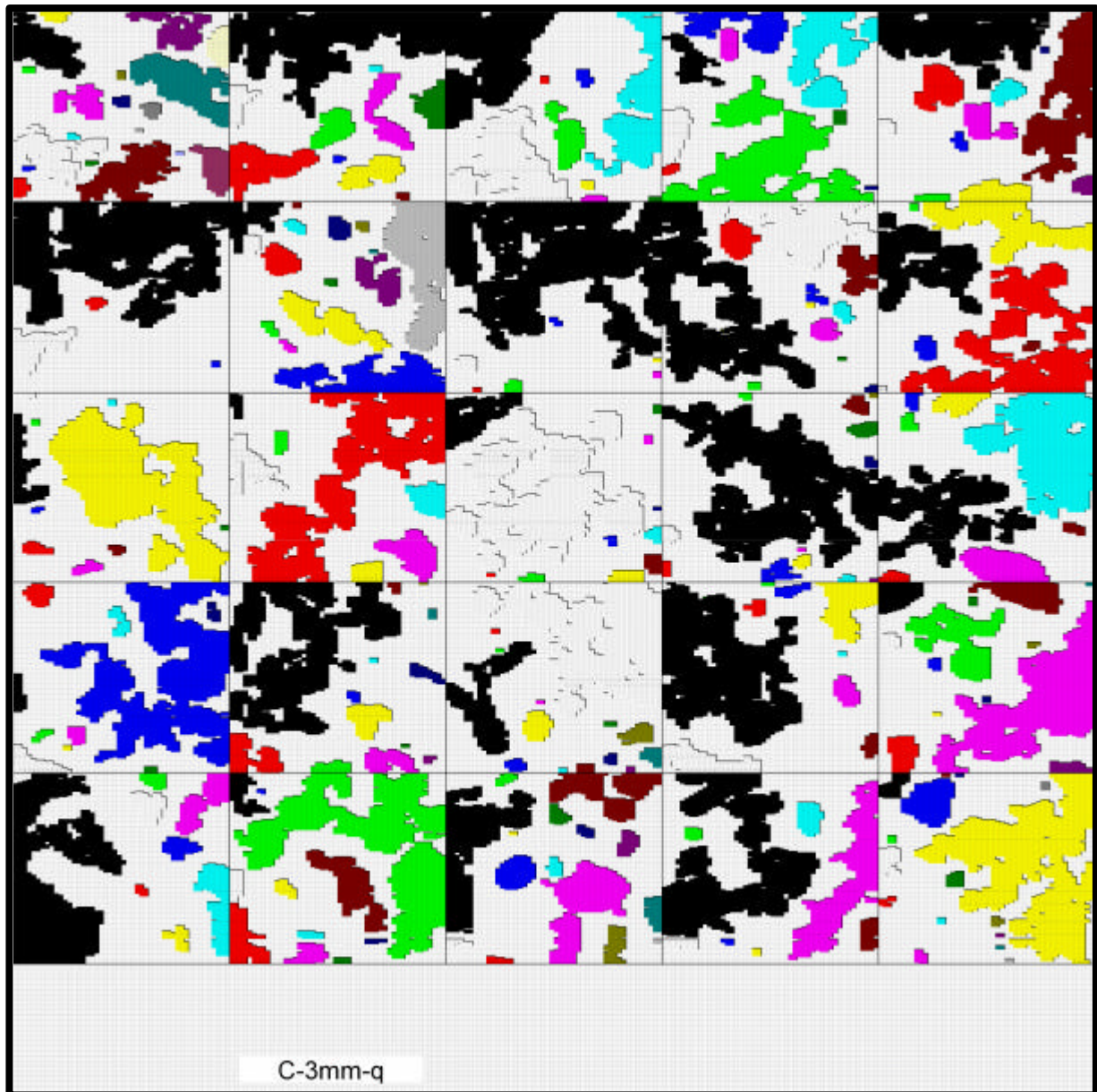


Abb. 3.104 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-3mm-q)

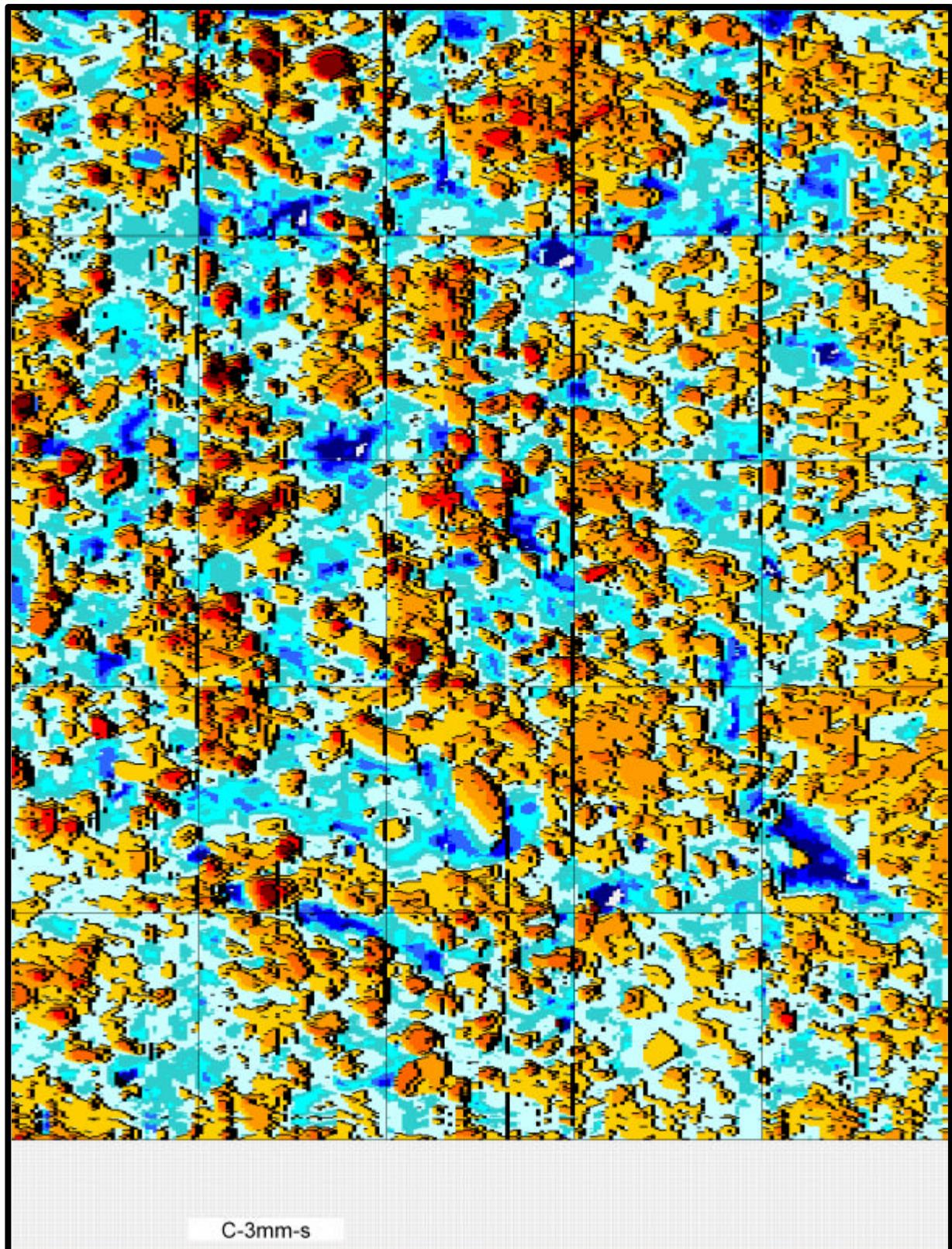


Abb. 3.107 : Die optische Darstellung der Abtastergebnis für die unterteilte Oberfläche (C-3mm-S)

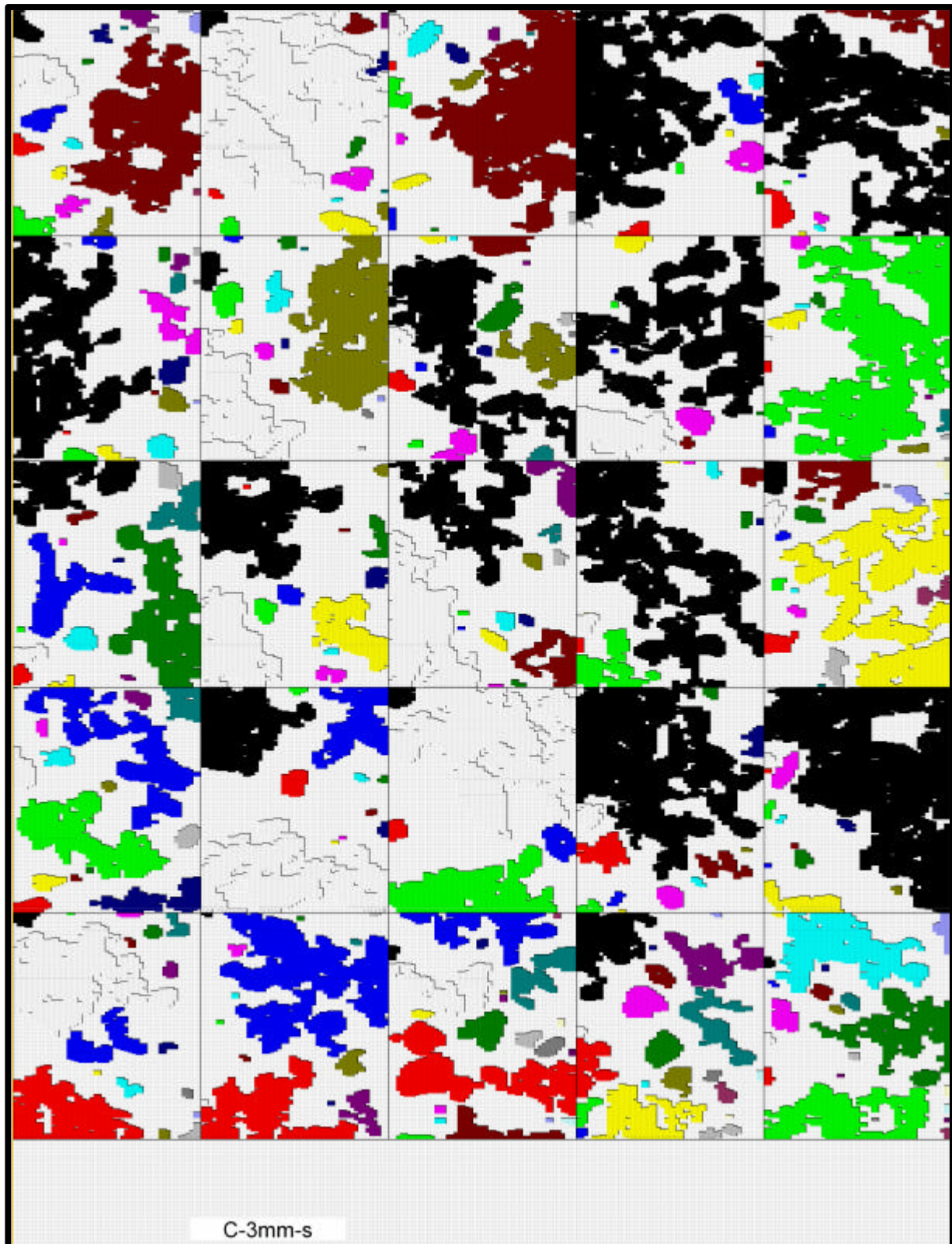


Abb. 3.108 : Die optische Darstellung der berechneten Berge für die unterteilte Oberfläche (C-3mm-S)



**4**

**Anhang 4**

**Die Berge**

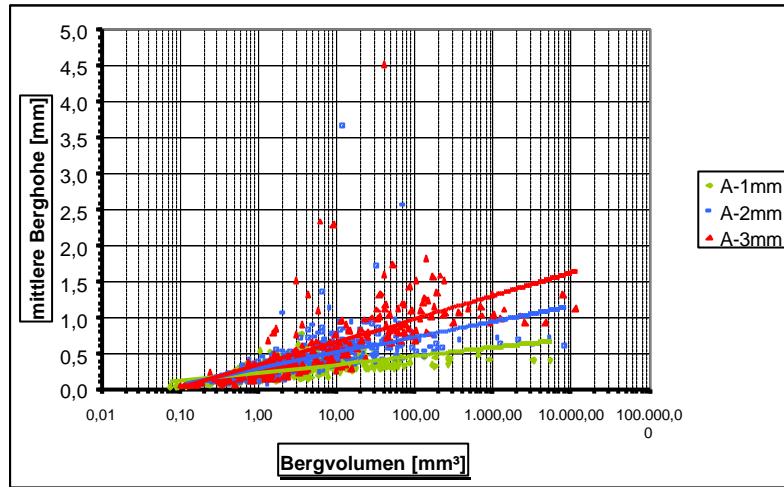


Abb. 4.1 : Verhältnis der mittlere Berghöhen zu deren Volumina, Serie A

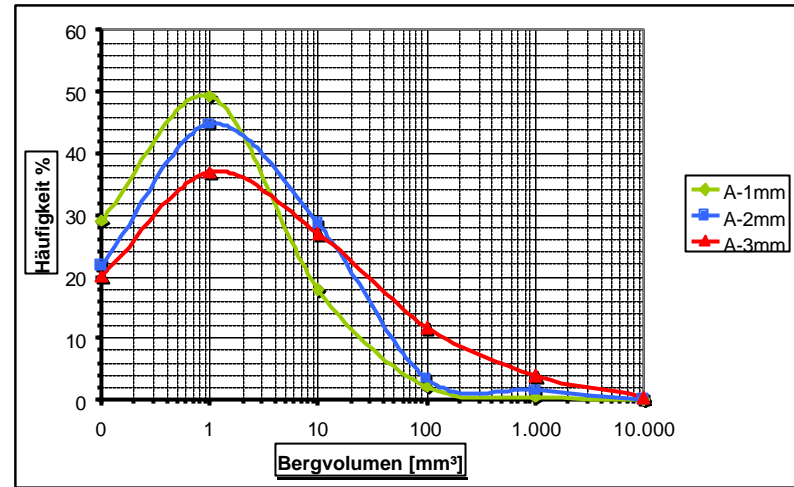


Abb. 4.3 : Prozentuale Häufigkeit der Bergvolumina, Serie A

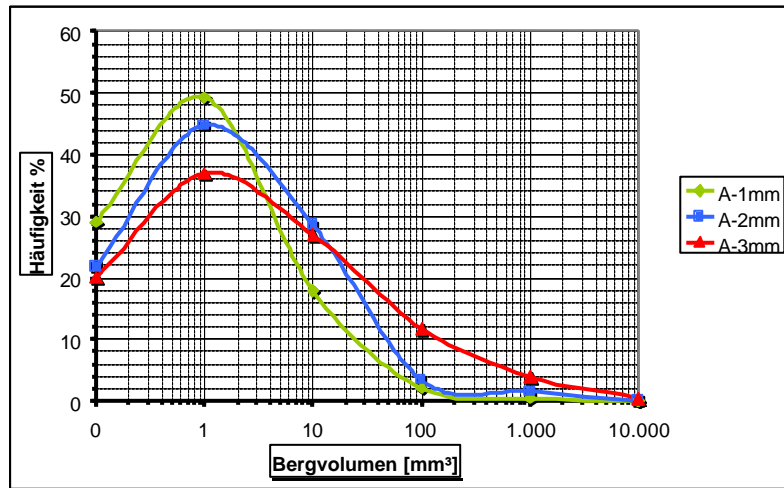


Abb. 4.2 : Anzahlverteilung der Bergvolumen, Serie A

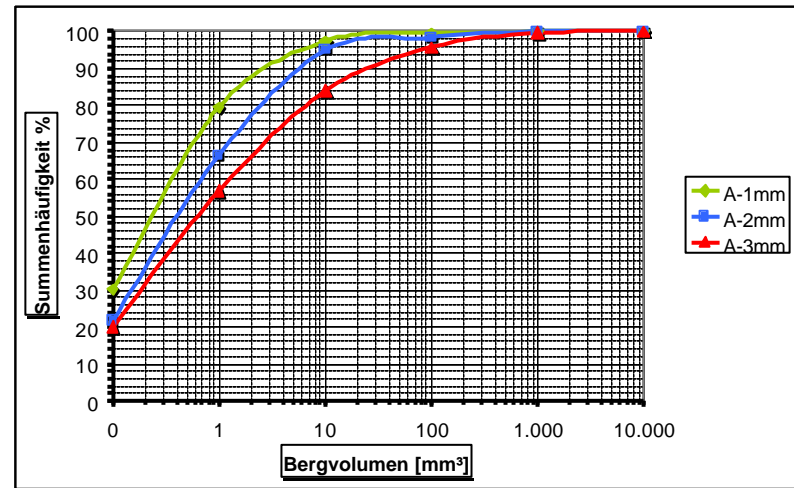


Abb. 4.4 : Prozentuale Summenhäufigkeit der Bergvolumina, Serie A

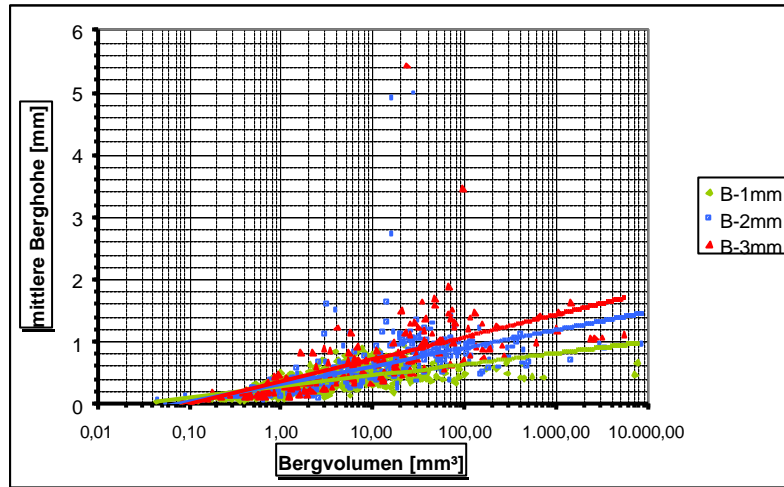


Abb. 4.5 : Verhältnis der mittlere Berghöhen zu deren Volumina, Serie B

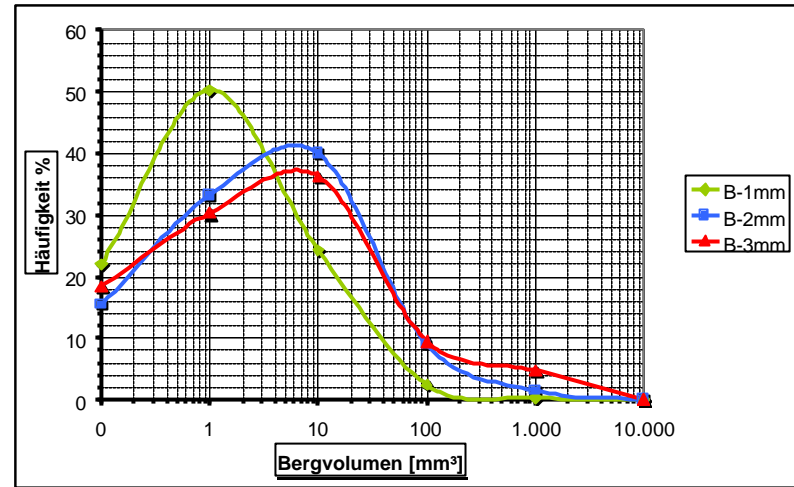


Abb. 4.7 : Prozentuale Häufigkeit der Bergvolumina, Serie B

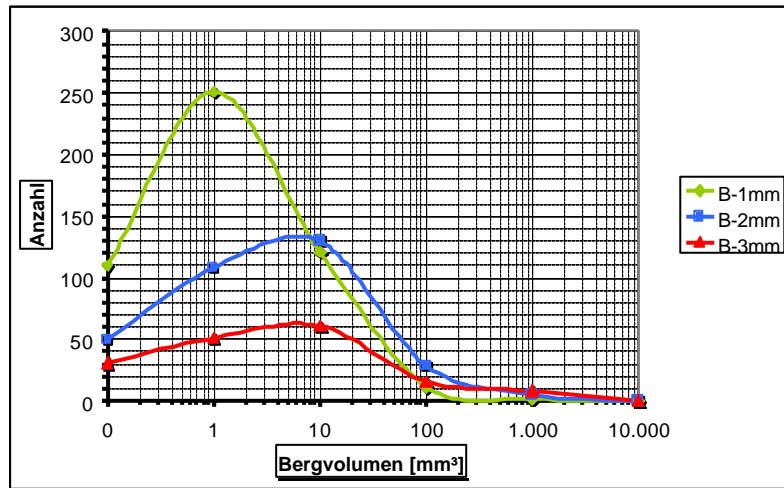


Abb. 4.6 : Anzahlverteilung der Bergvolumen, Serie B

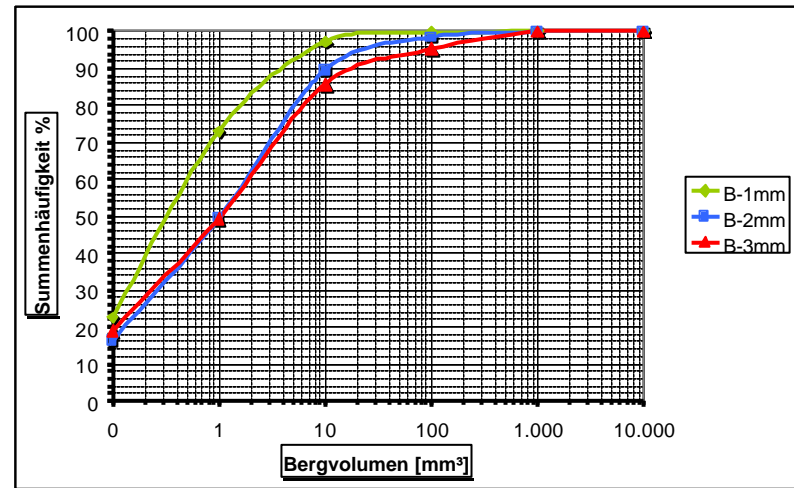


Abb. 4.8 : Prozentuale Summenhäufigkeit der Bergvolumina, Serie B

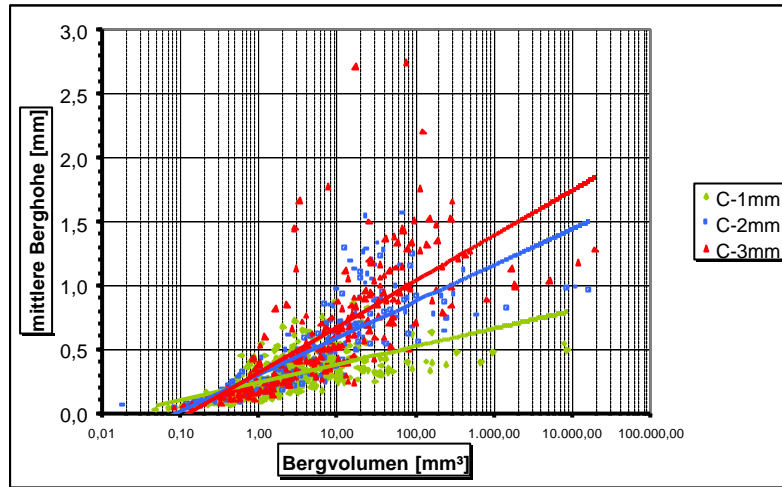


Abb. 4.9 : Verhältnis der mittlere Berghöhen zu deren Volumina, Serie C

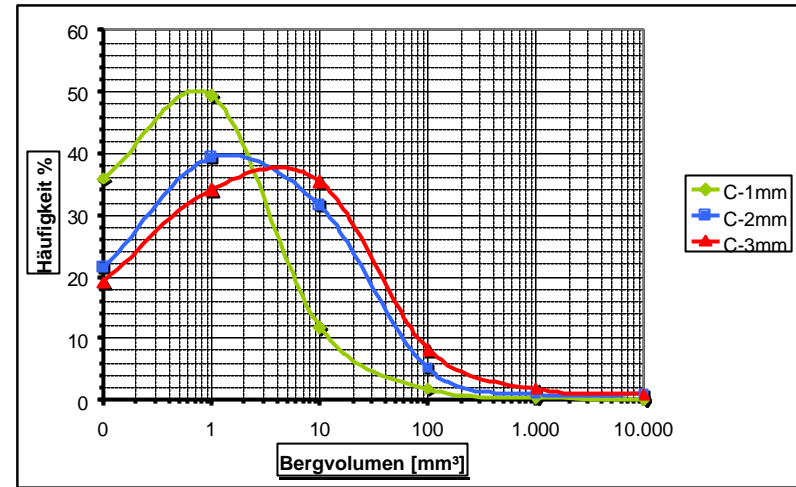


Abb. 4.11 : Prozentuelle Häufigkeit der Bergvolumina, Serie C

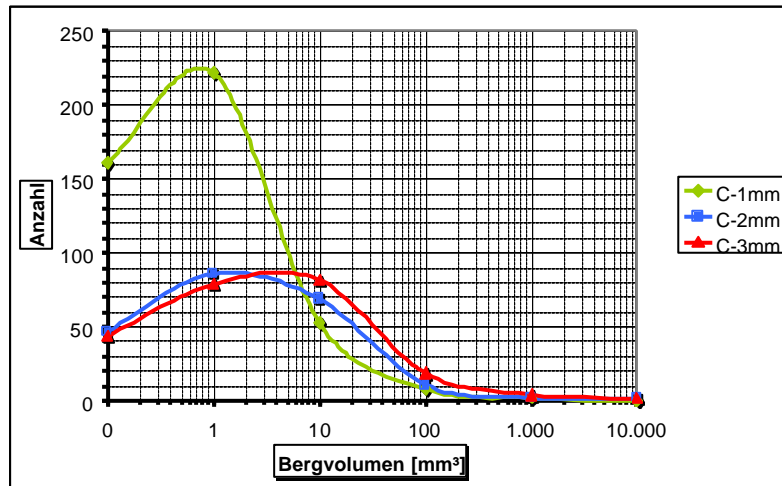


Abb. 4.10 : Anzahlverteilung der Bergvolumen, Serie C

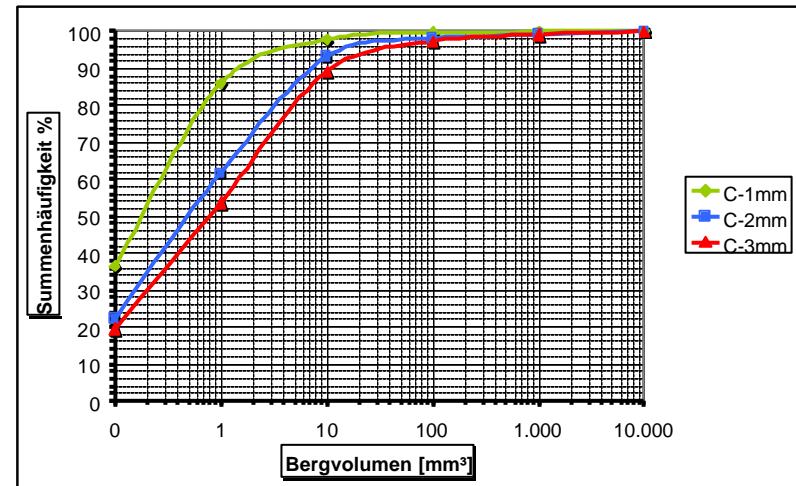


Abb. 4.12 : Prozentuale Summenhäufigkeit der Bergvolumina, Serie C

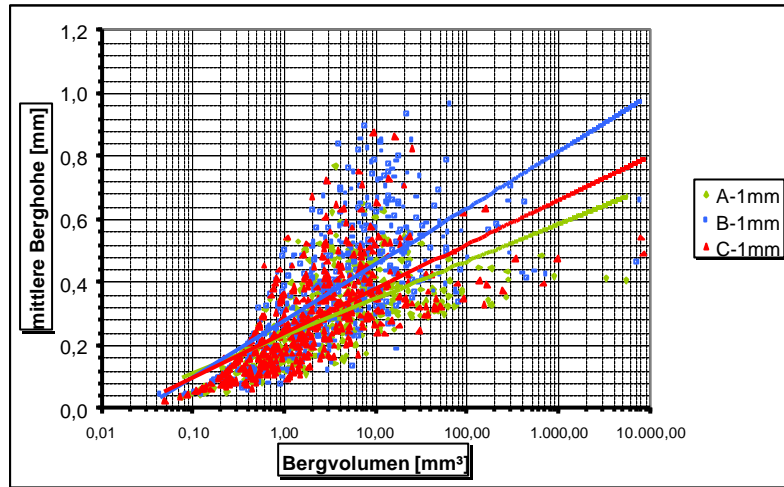


Abb. 4.13 : Verhältnis der mittlere Berghöhen zu deren Volumina. Alle Serien bei 1mm Rautiefe

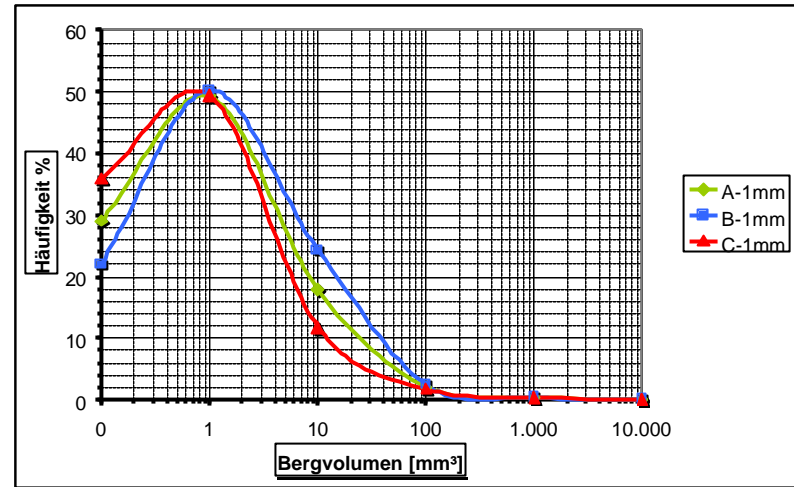


Abb. 4.15 : Prozentuale Häufigkeit der Bergvolumina. Alle Serien bei 1mm Rautiefe

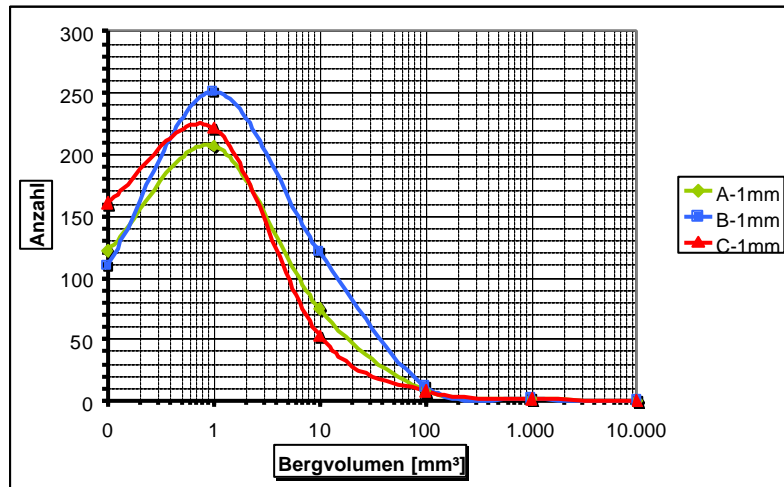


Abb. 4.14 : Anzahlverteilung der Bergvolumen. Alle Serien bei 1mm Rautiefe

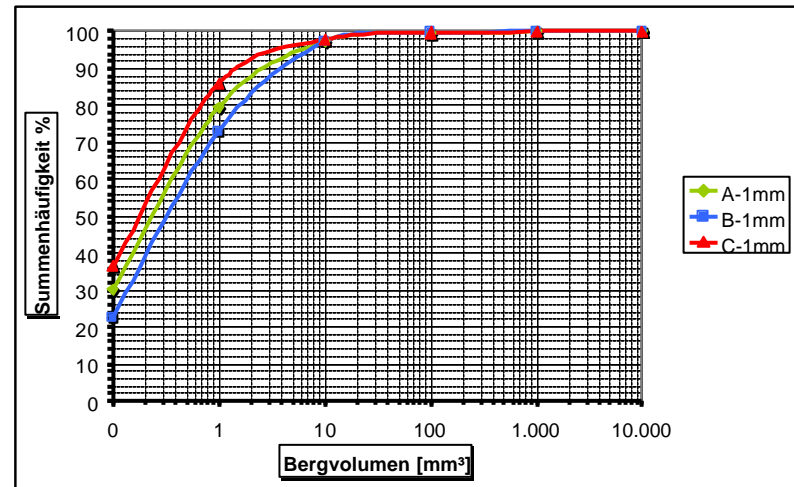


Abb. 4.16 : Prozentuale Summenhäufigkeit der Bergvolumina. Alle Serien bei 1mm Rautiefe

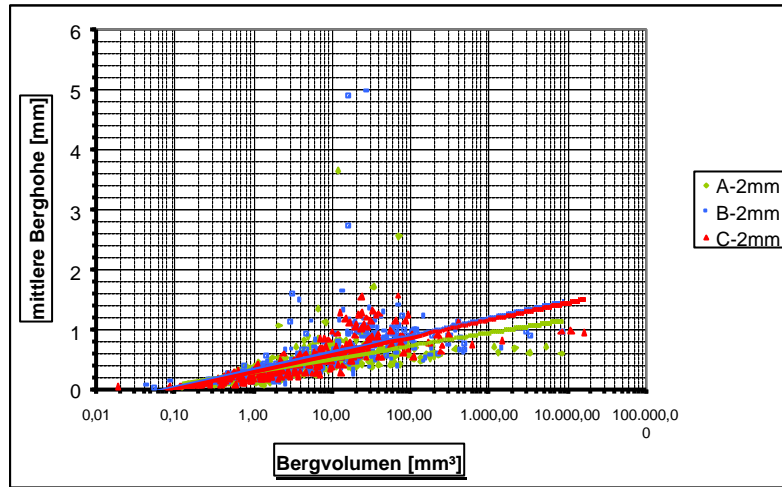


Abb. 4.17 : Verhältnis der mittlere Berghöhen zu deren Volumina. Alle Serien bei 2mm Rautiefe

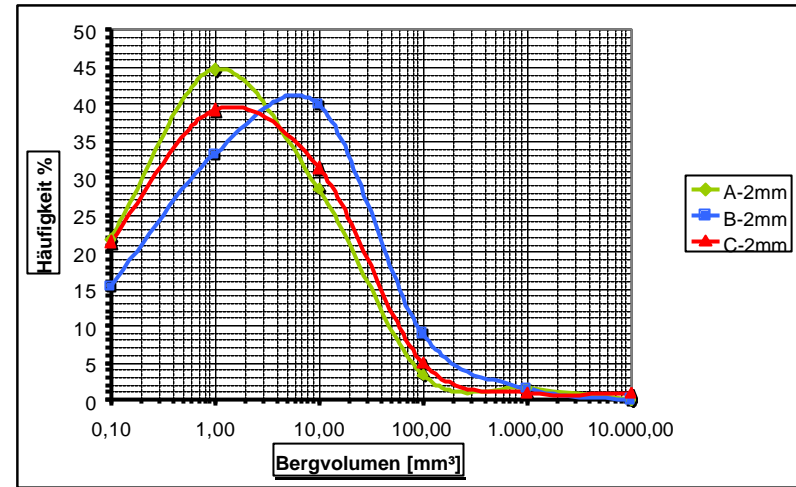


Abb. 4.19 : Prozentuale Häufigkeit der Bergvolumina. Alle Serien bei 2mm Rautiefe

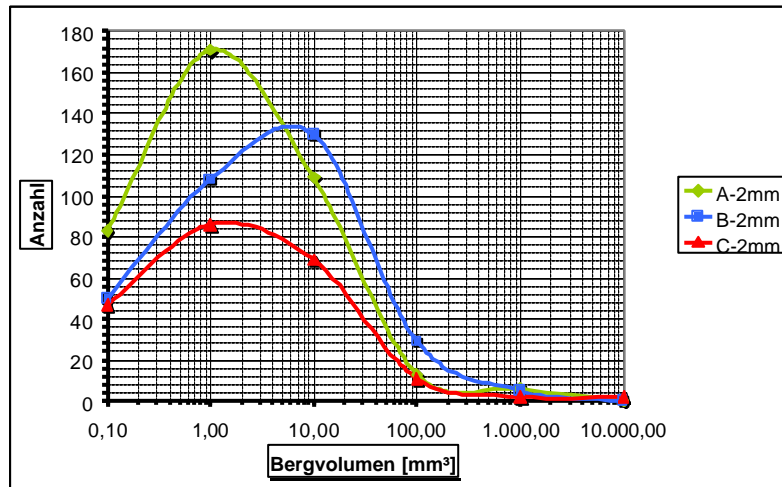


Abb. 4.18 : Anzahlverteilung der Bergvolumen. Alle Serien bei 2mm Rautiefe

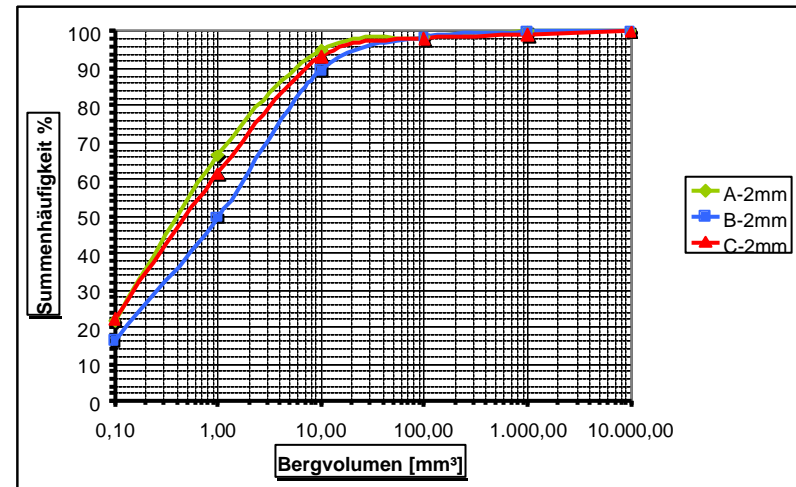


Abb. 4.20 : Prozentuale Summenhäufigkeit der Bergvolumina. Alle Serien bei 2mm Rautiefe

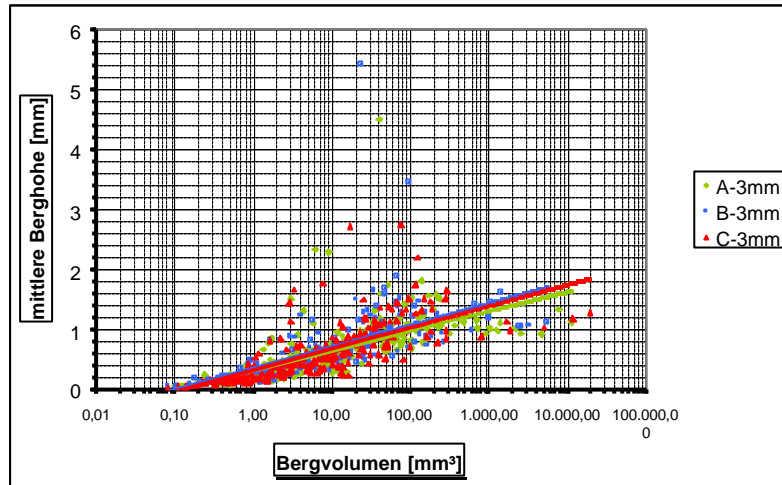


Abb. 4.21 : Verhältnis der mittlere Berghöhen zu deren Volumina. Alle Serien bei 3mm Rautiefe

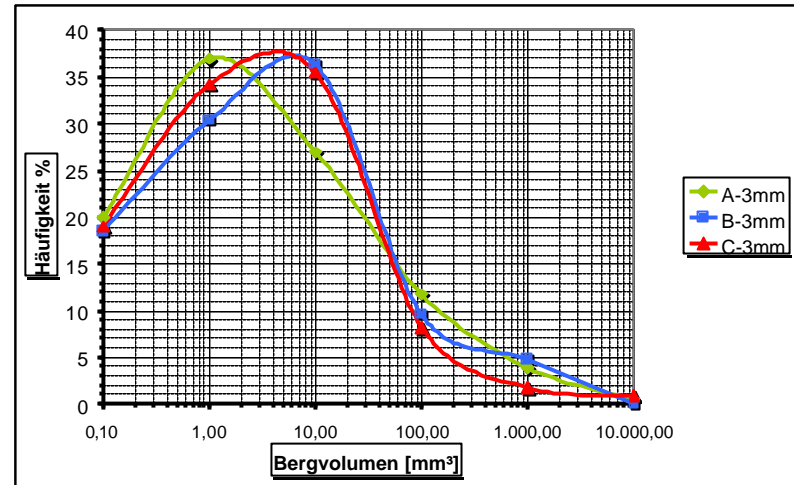


Abb. 4.23 : Prozentuale Häufigkeit der Bergvolumina. Alle Serien bei 3mm Rautiefe

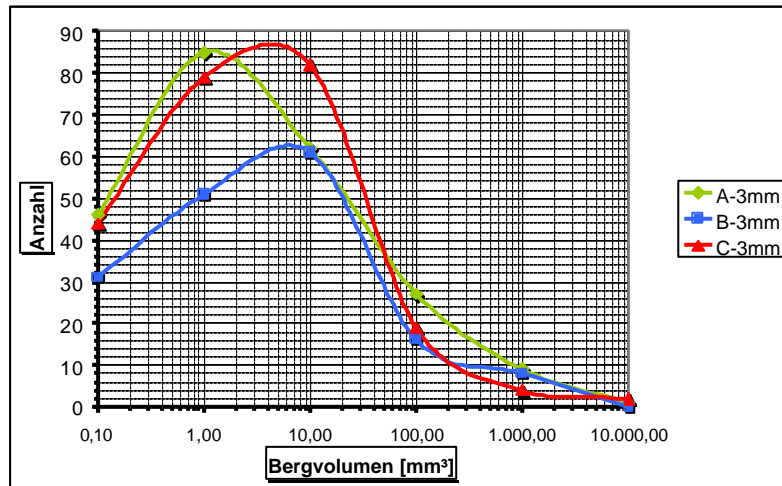


Abb. 4.22 : Anzahlverteilung der Bergvolumen. Alle Serien bei 3mm Rautiefe

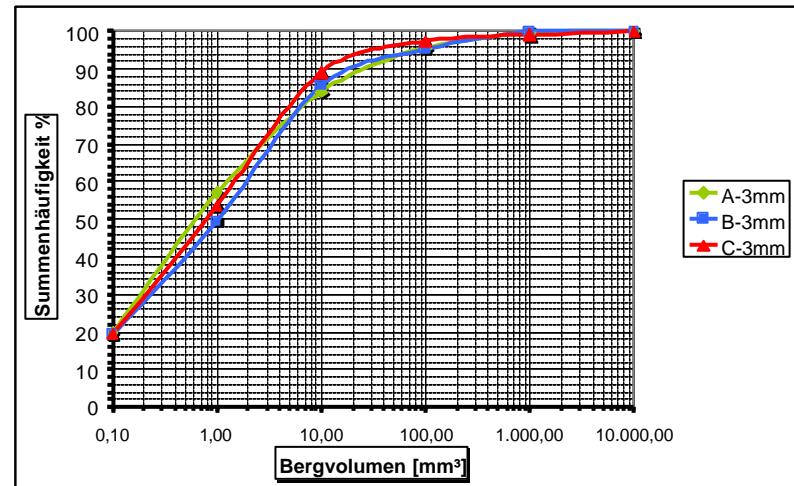


Abb. 4.24 : Prozentuale Summenhäufigkeit der Bergvolumina. Alle Serien bei 3mm Rautiefe

**5**

**Anhang 5A**

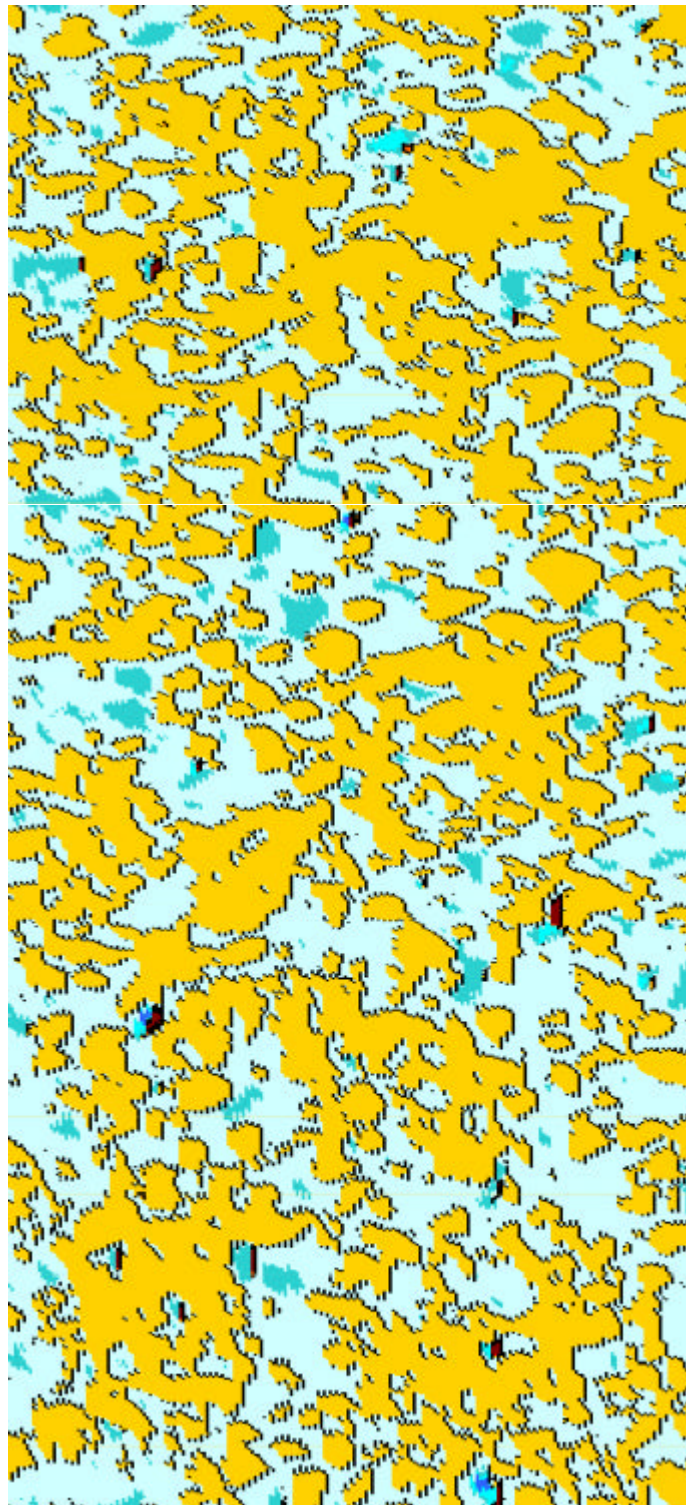
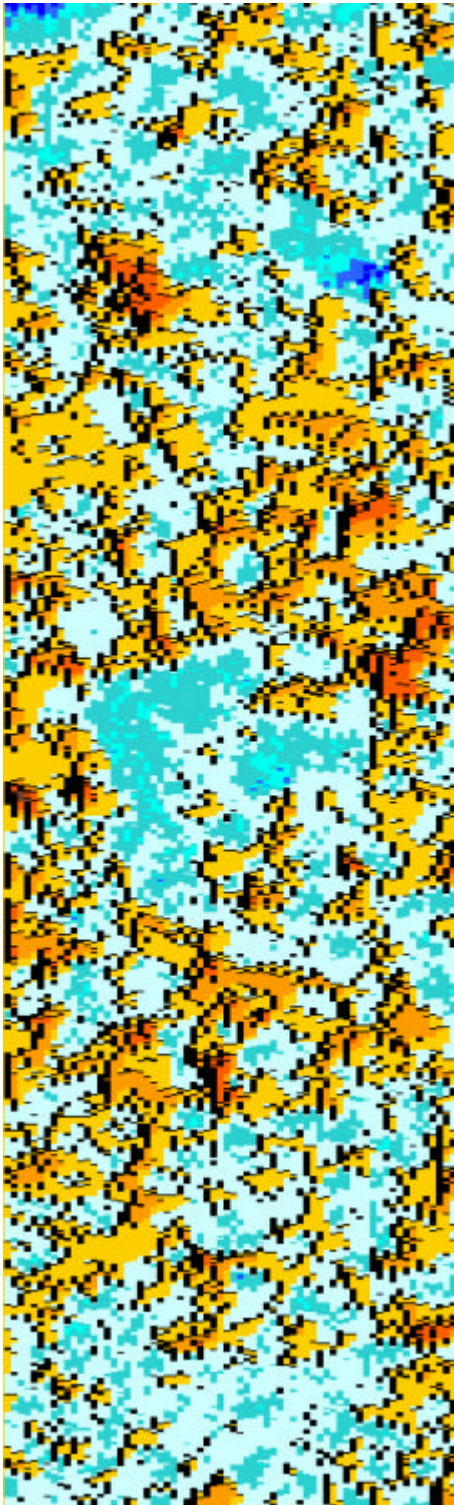
**3D-Laserabtastverfahren**

In diesem Anhang werden die optische Darstellungen der 3D-Laserabtastverfahren für die aufgerauten Seiten der Grundkörper und ihren entsprechenden Verstärkungsschichten dargestellt.

Die Darstellungen werden entsprechend ihre Serien Unterteilt.



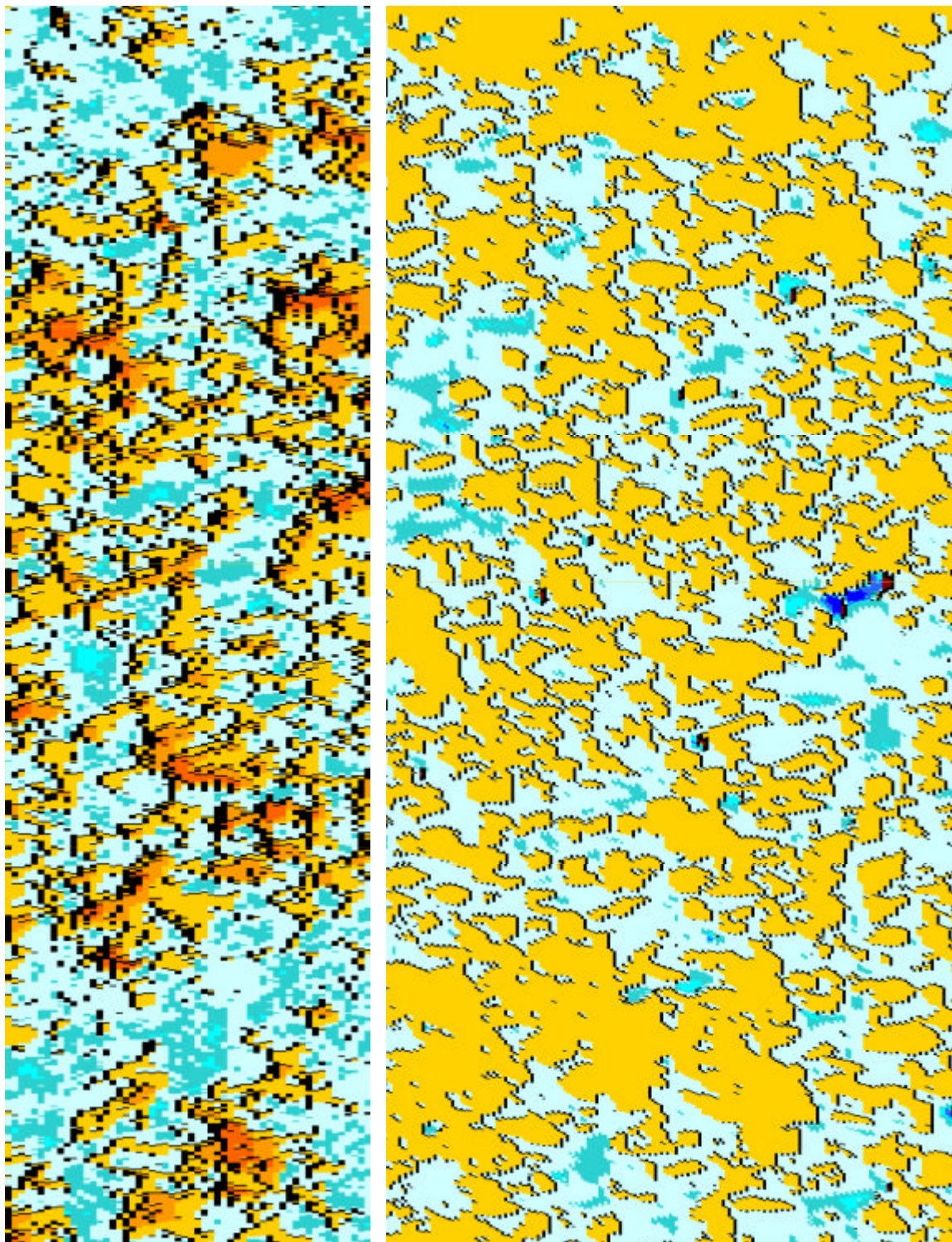
**Serie A 1mm:**



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 1

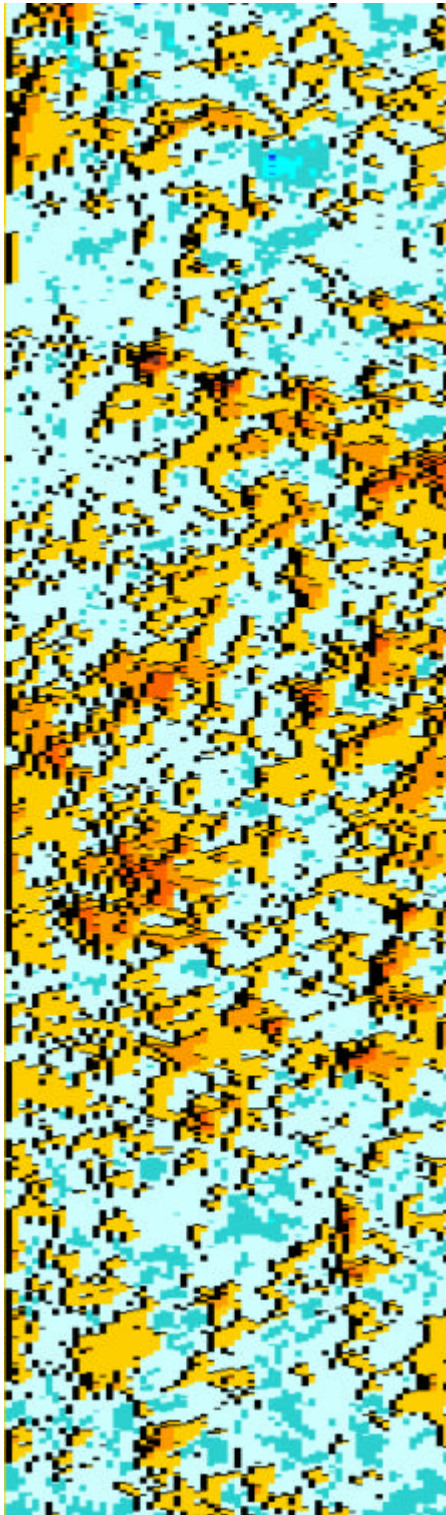
**Abb. 5.1 : A3-1mm-S1**



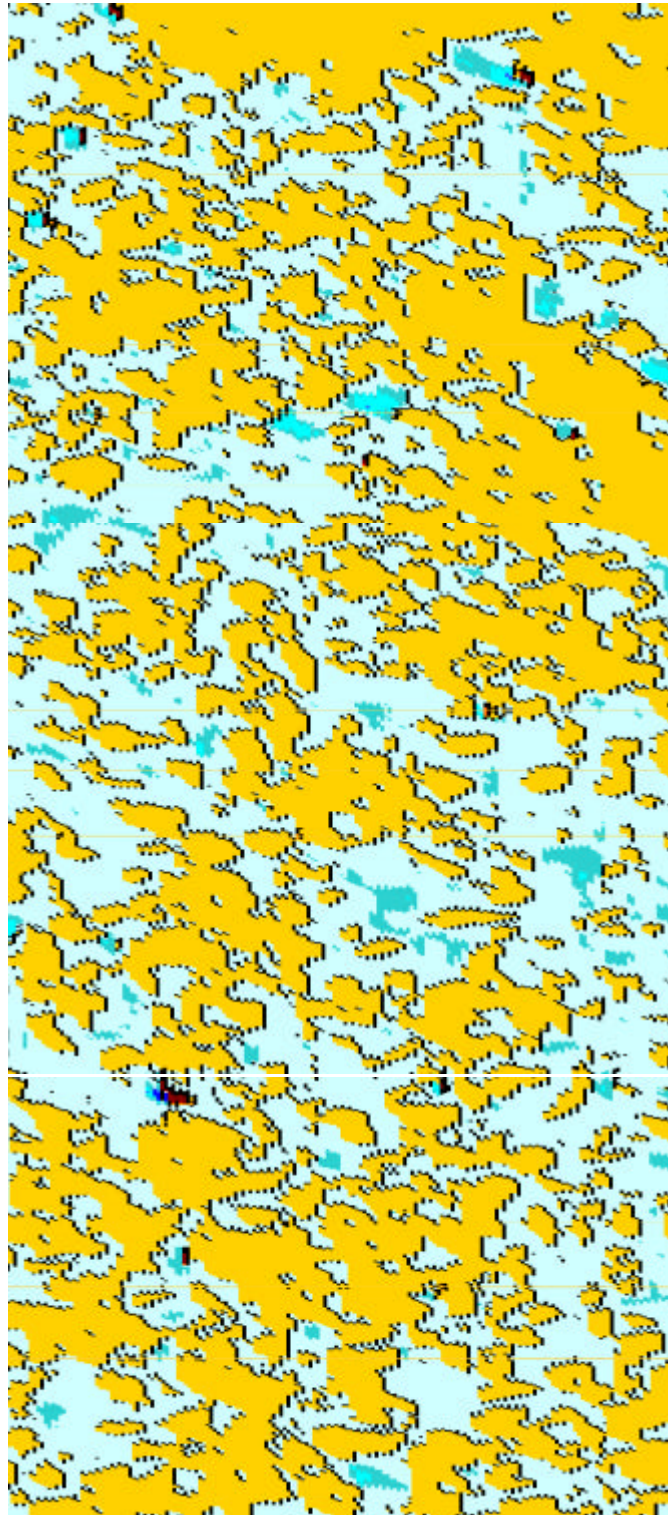
Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 2

Abb. 5.2 : A3-1mm-S2

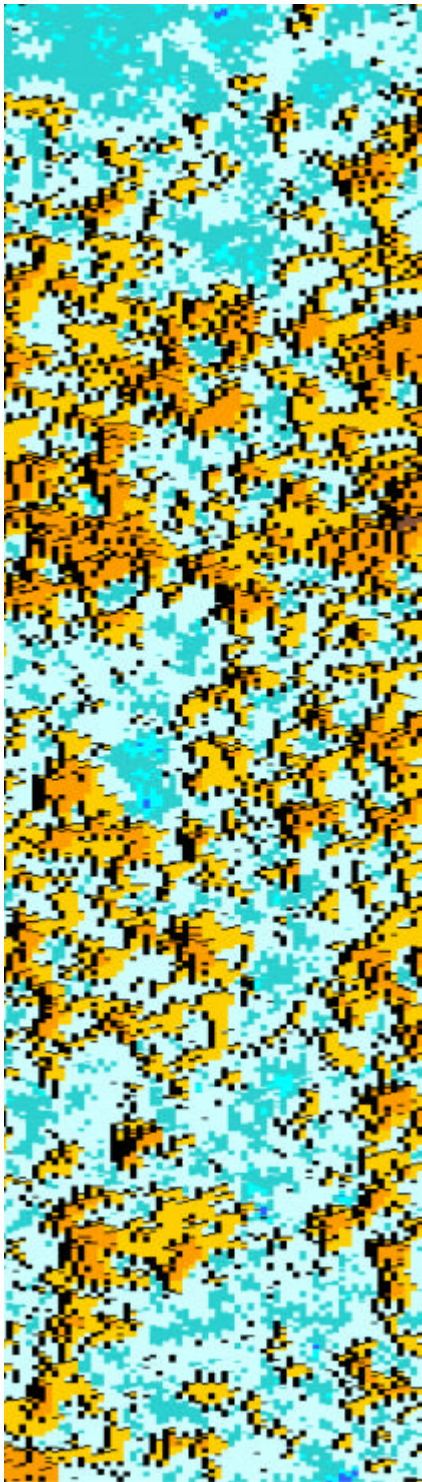


Verstärkungsschicht

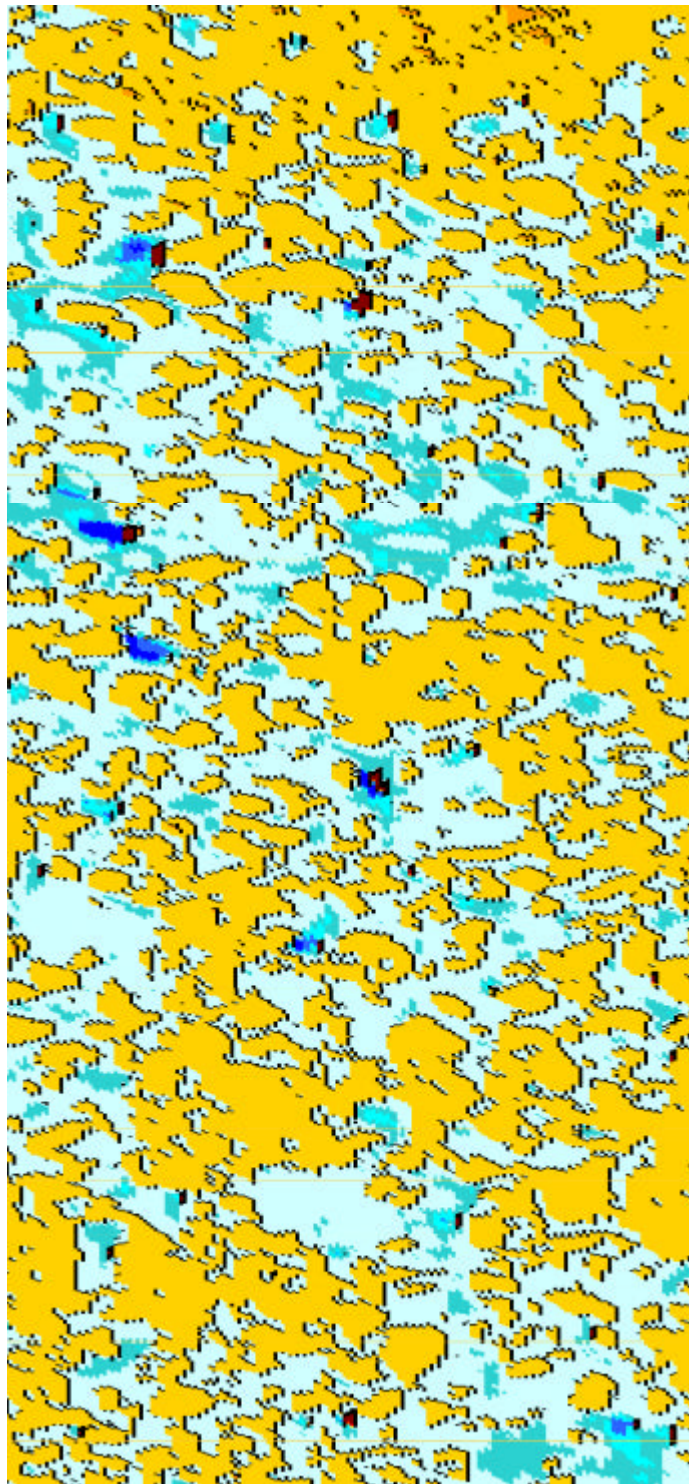


Grundkörper Seite 3

Abb. 5.3 : A3-1mm-S3

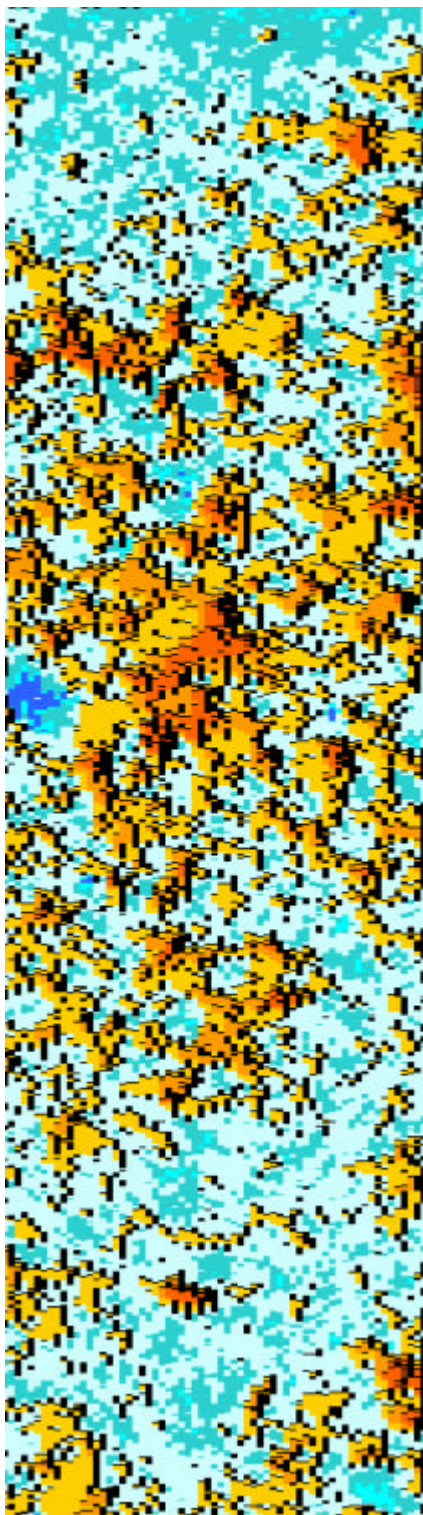


Verstärkungsschicht

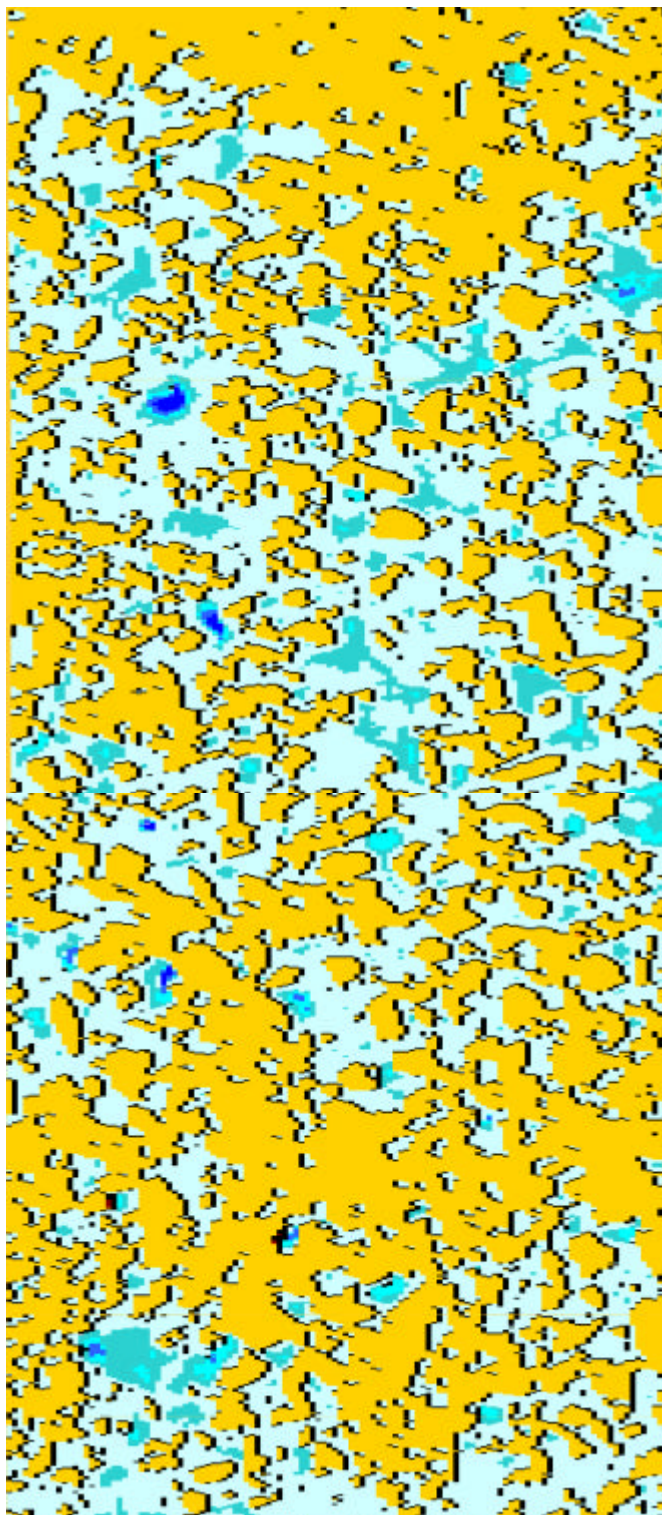


Grundkörper Seite 4

Abb. 5.4 : A3-1mm-S4

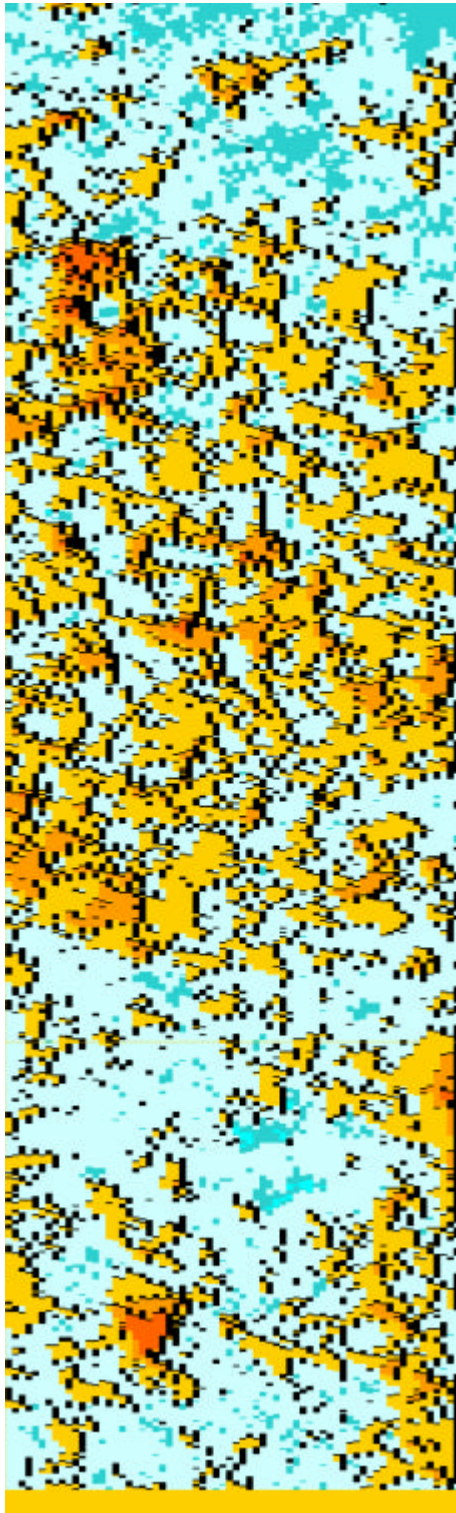


Verstärkungsschicht

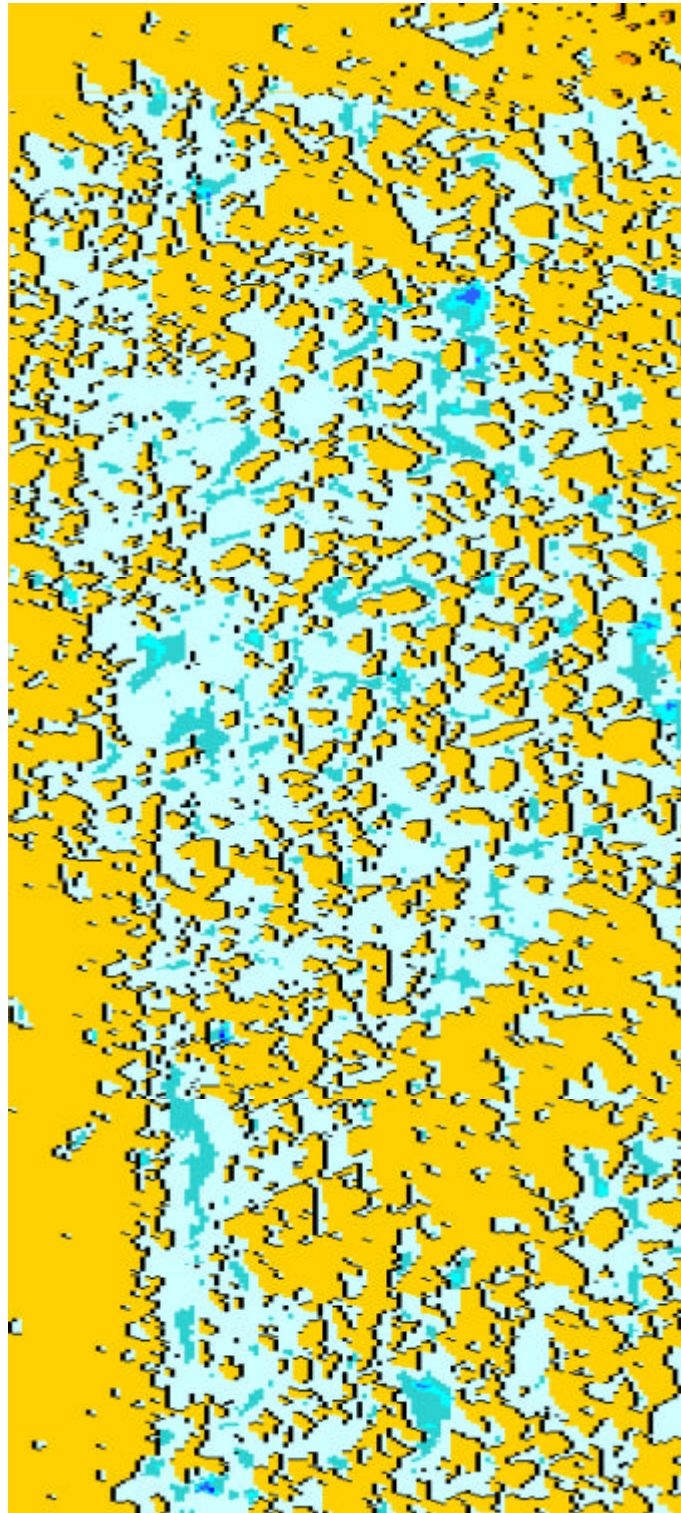


Grundkörper Seite 1

Abb. 5.5 : A4-1mm-S1

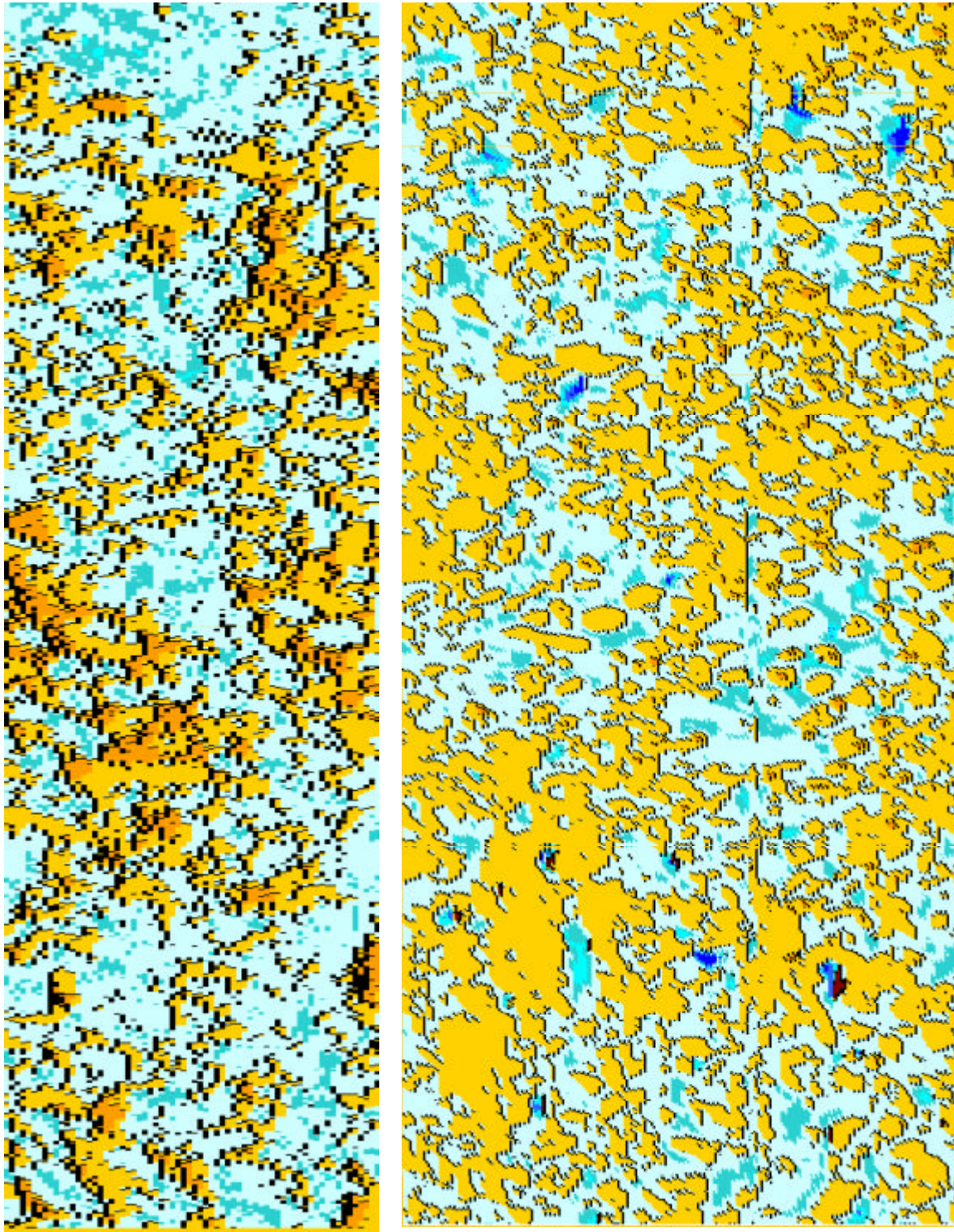


Verstärkungsschicht



Grundkörper Seite 2

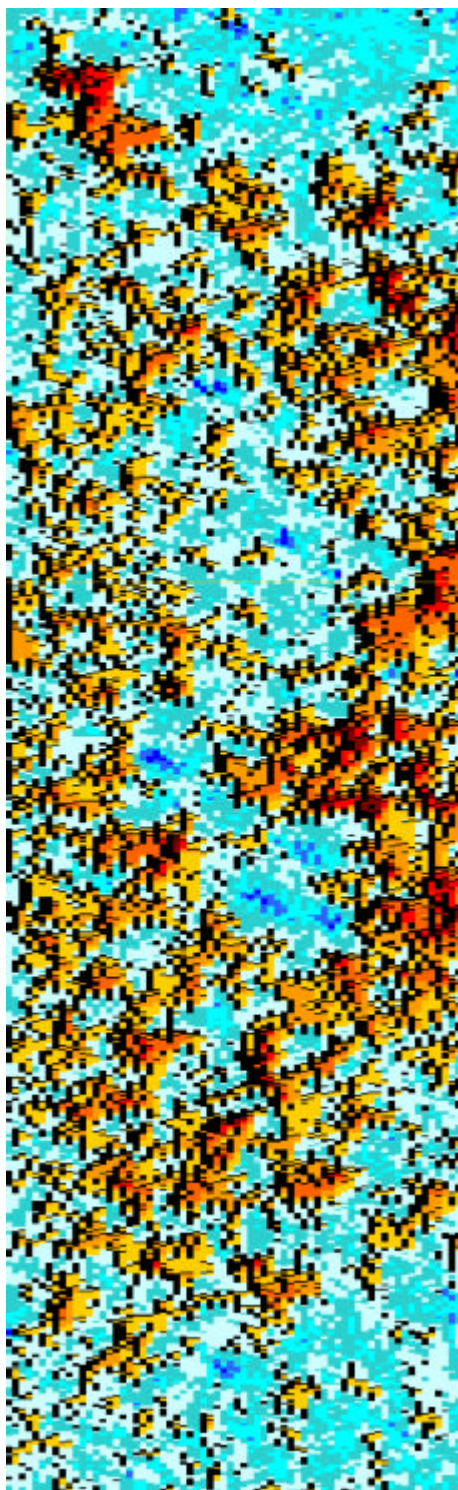
Abb. 5.6 : A4-1mm-S2



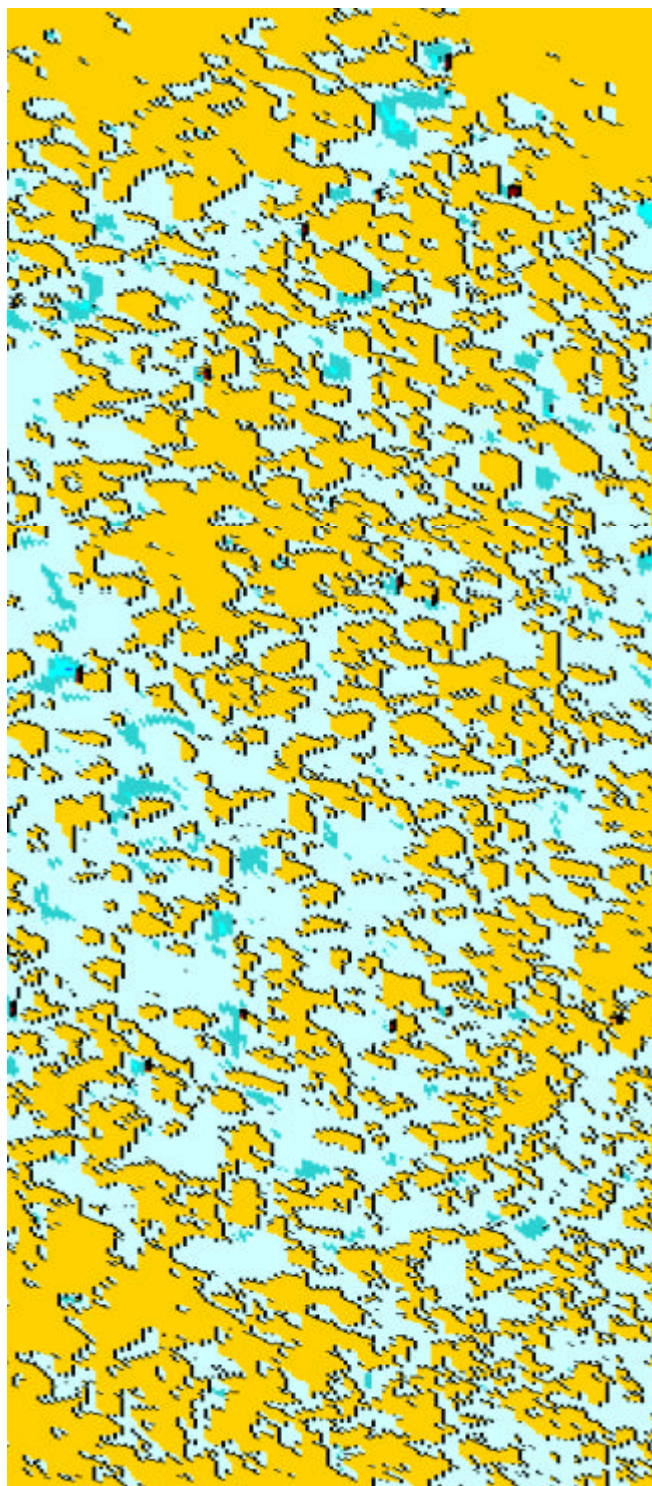
Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 3

Abb. 5.7 : A4-1mm-S3



Verstärkungsschicht



Grundkörper Seite 4

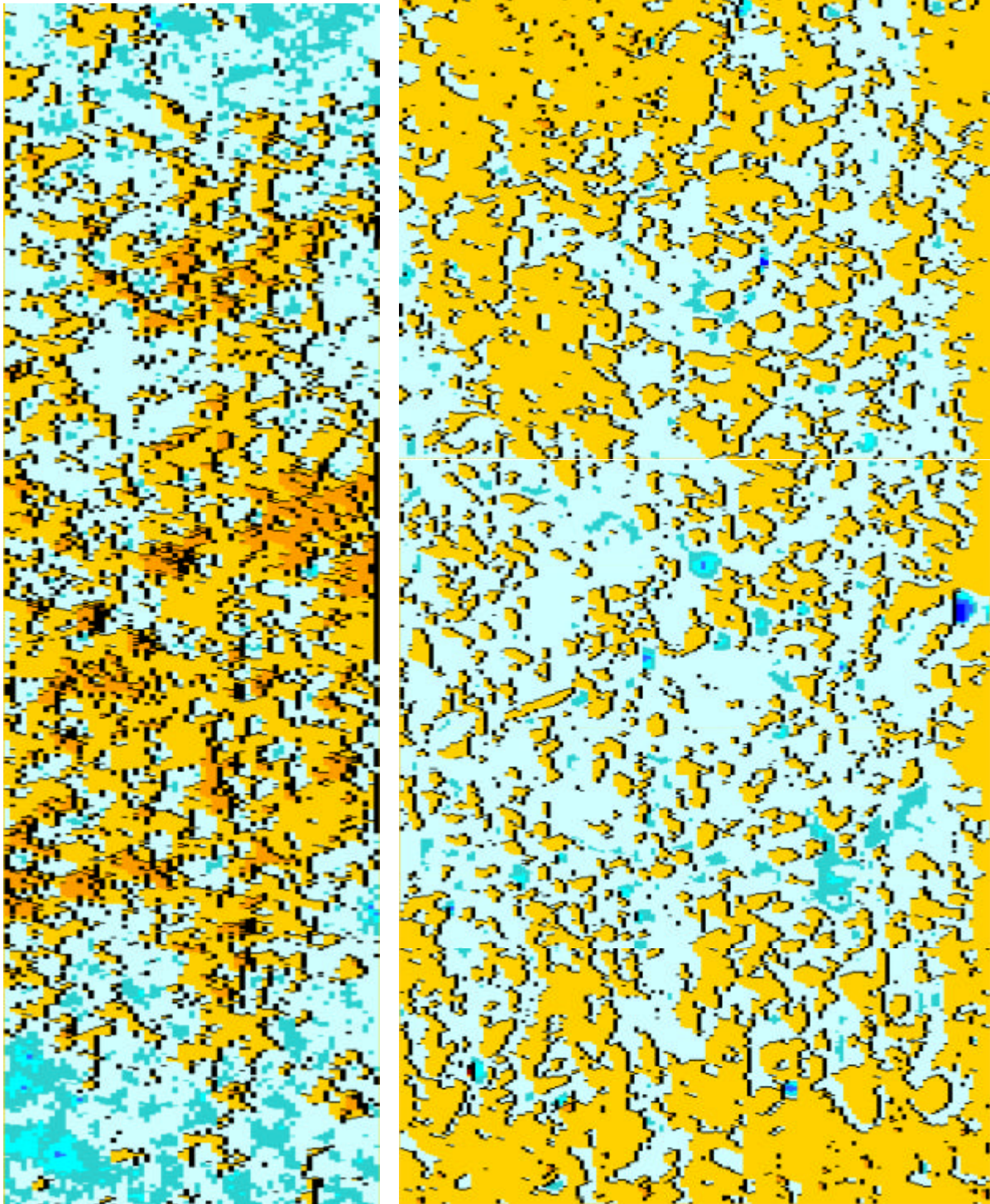
Abb. 5.8 : A4-1mm-S4



**5**

**Anhang 5B**

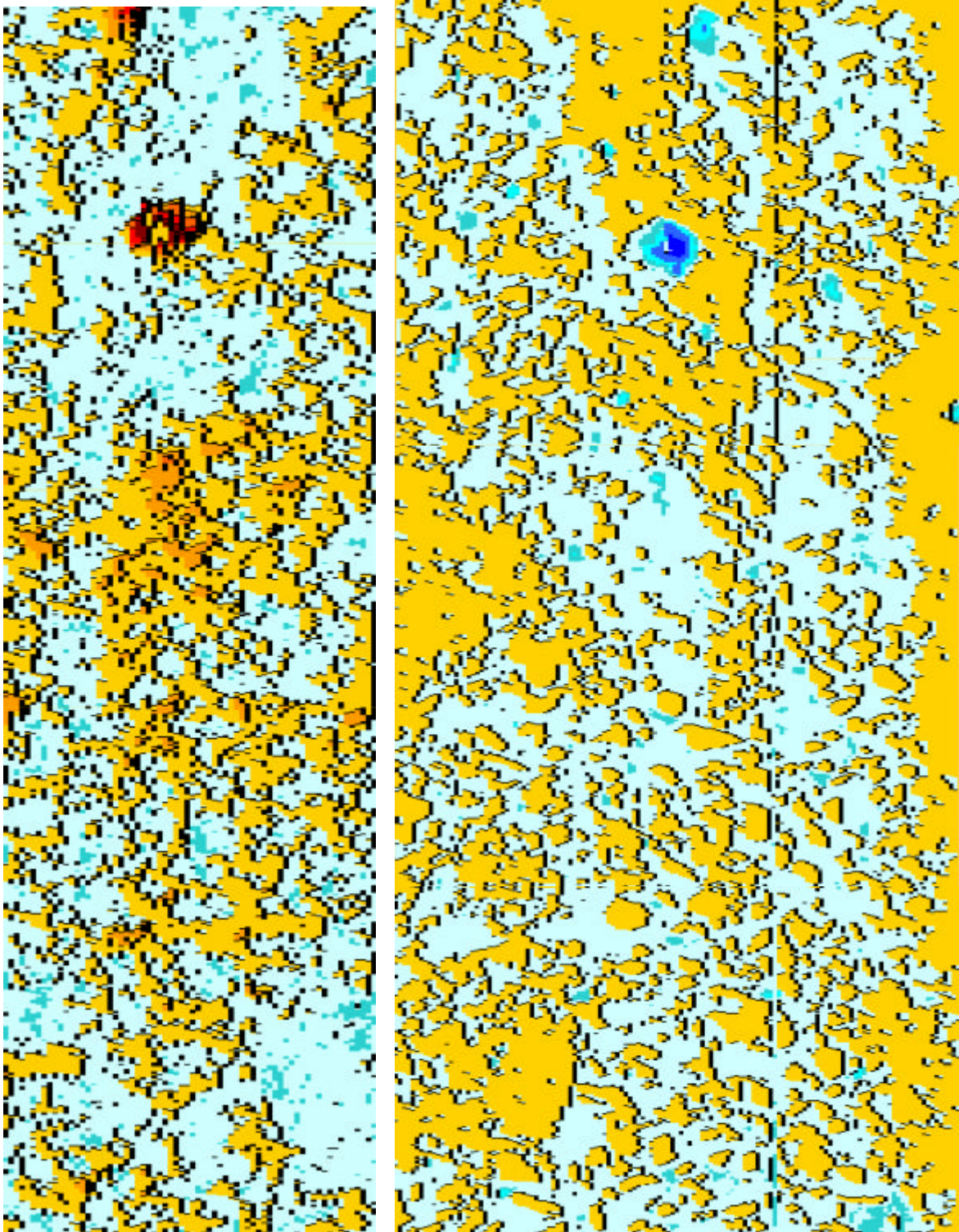
Serie B 1mm



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 1

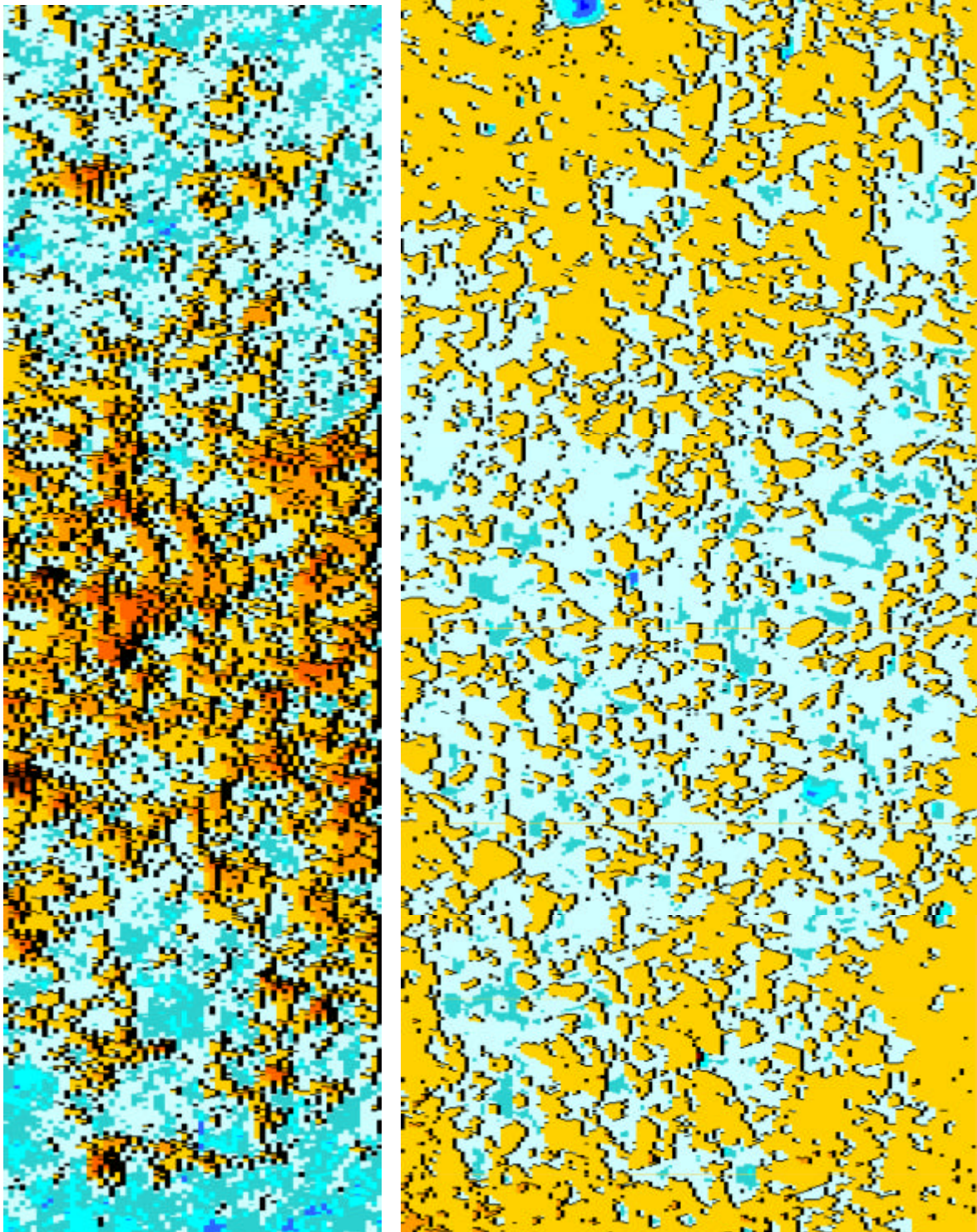
Abb. 5.1 : B3-1mm-S1



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 2

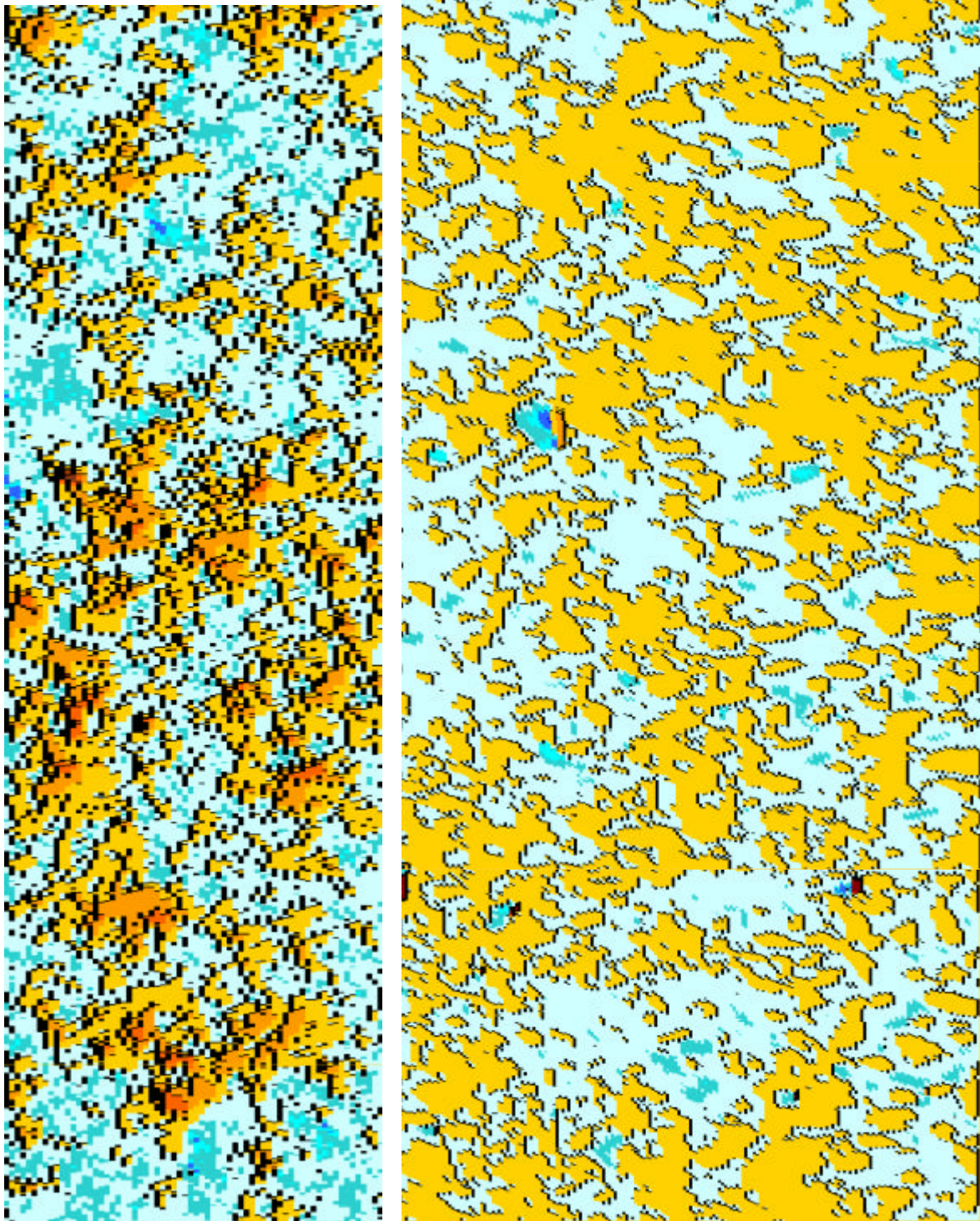
Abb. 5.2 : B3-1mm-S2



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 3

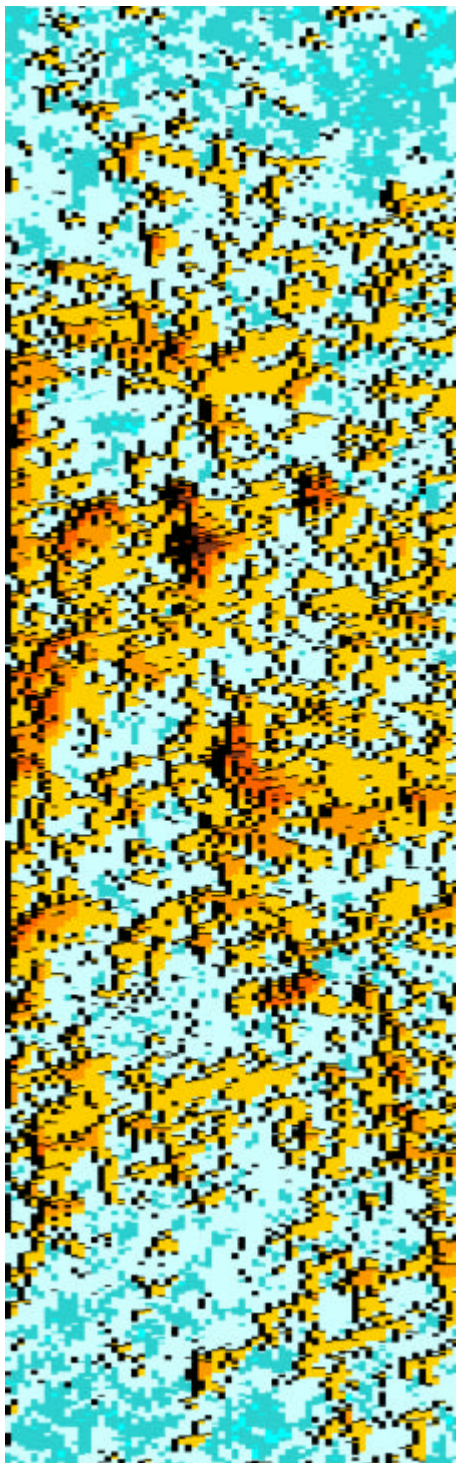
Abb. 5.3 : B3-1mm-S3



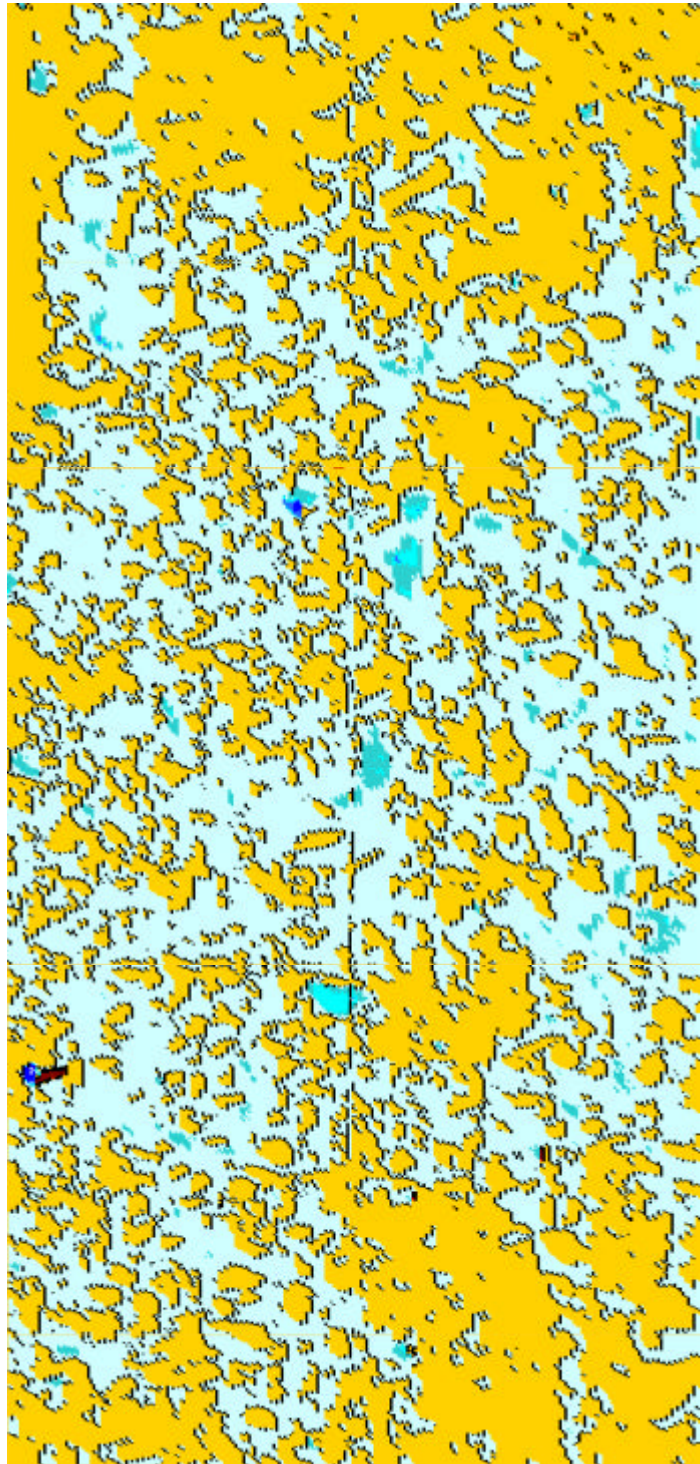
Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 4

Abb. 5.4: B3-1mm-S4

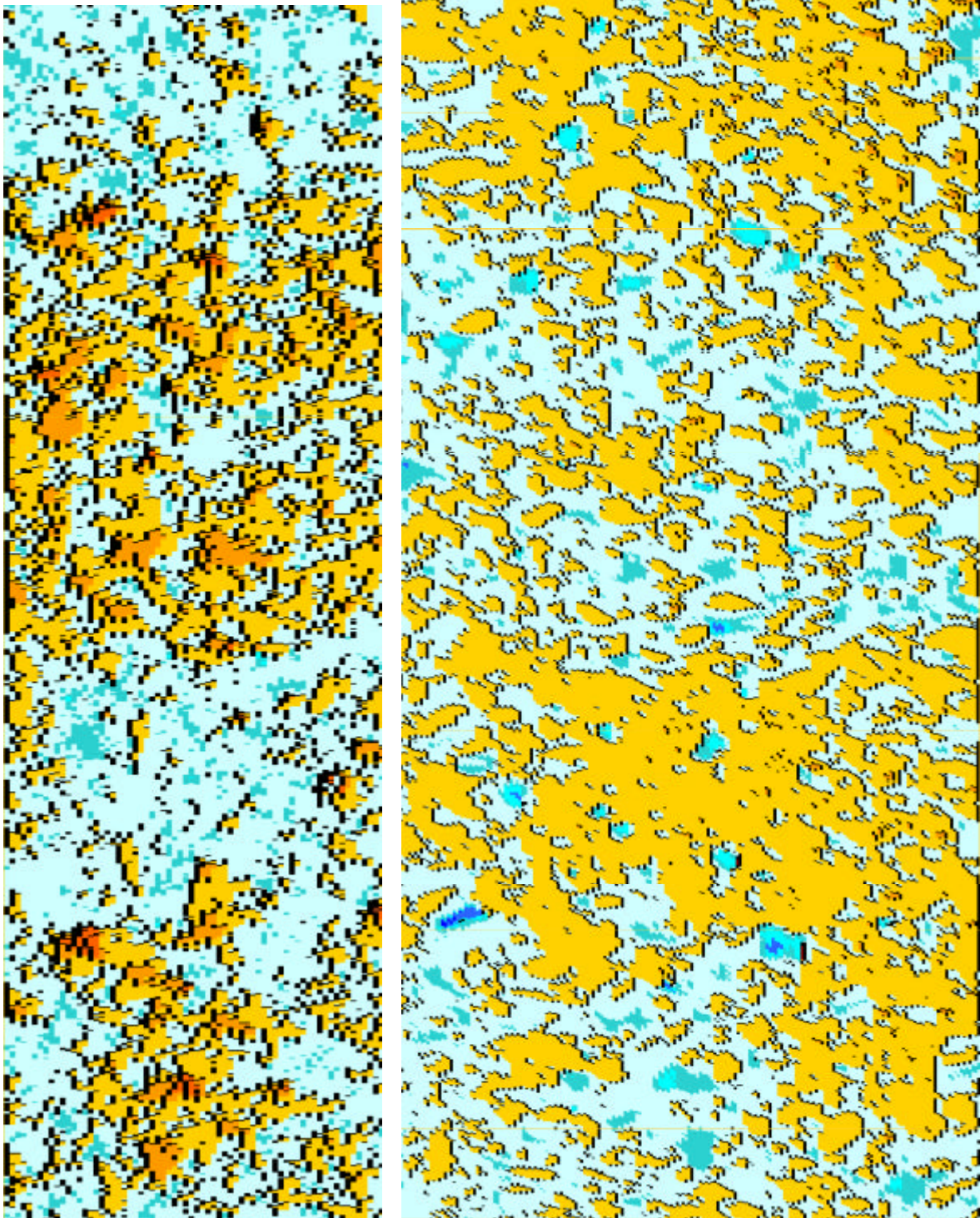


Verstärkungsschicht



Grundkörper Seite 1

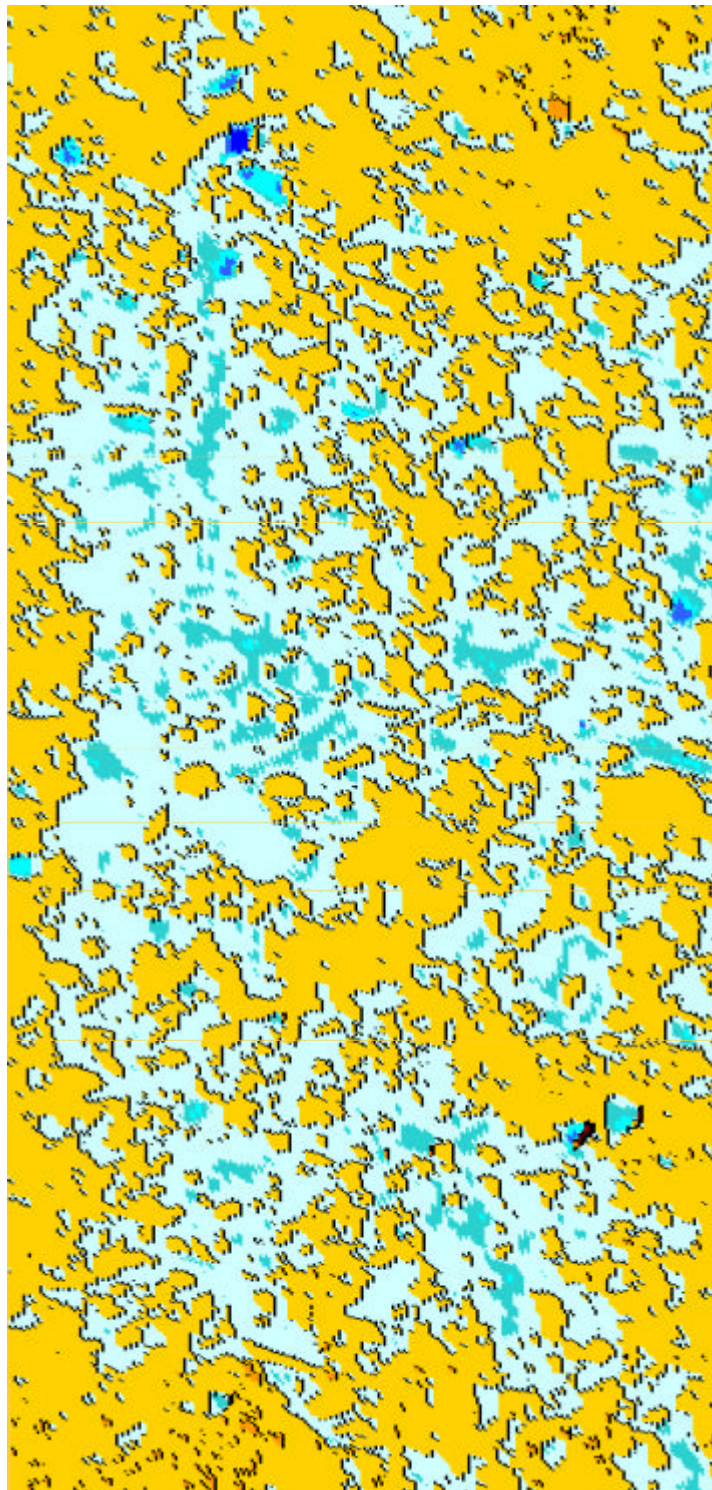
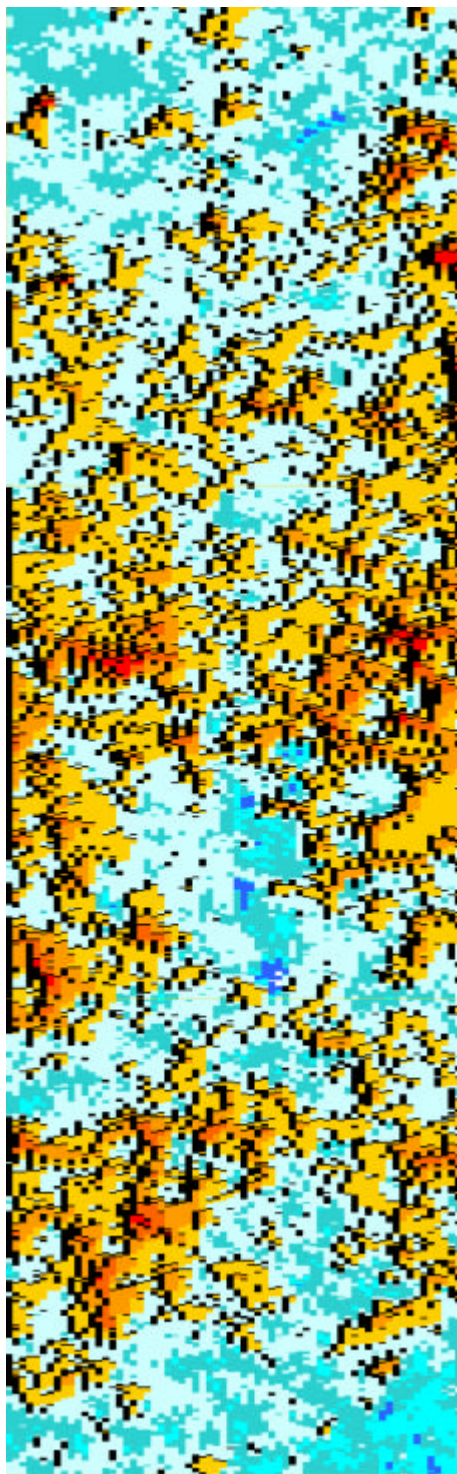
Abb. 5.5 : B4-1mm-S1



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 2

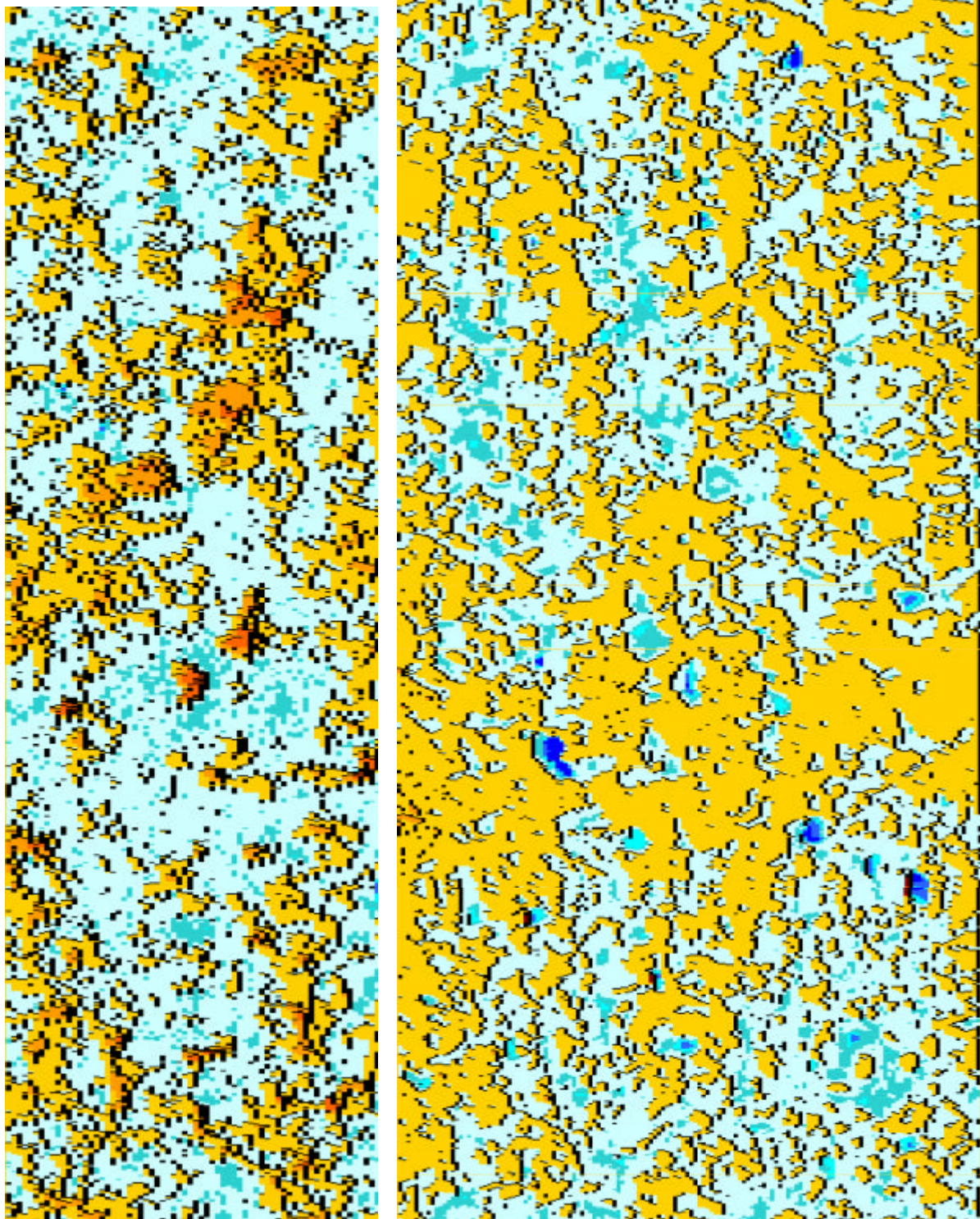
Abb. 5.6 : B4-1mm-S2



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 3

Abb. 5.7 : B4-1mm-S3



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 4

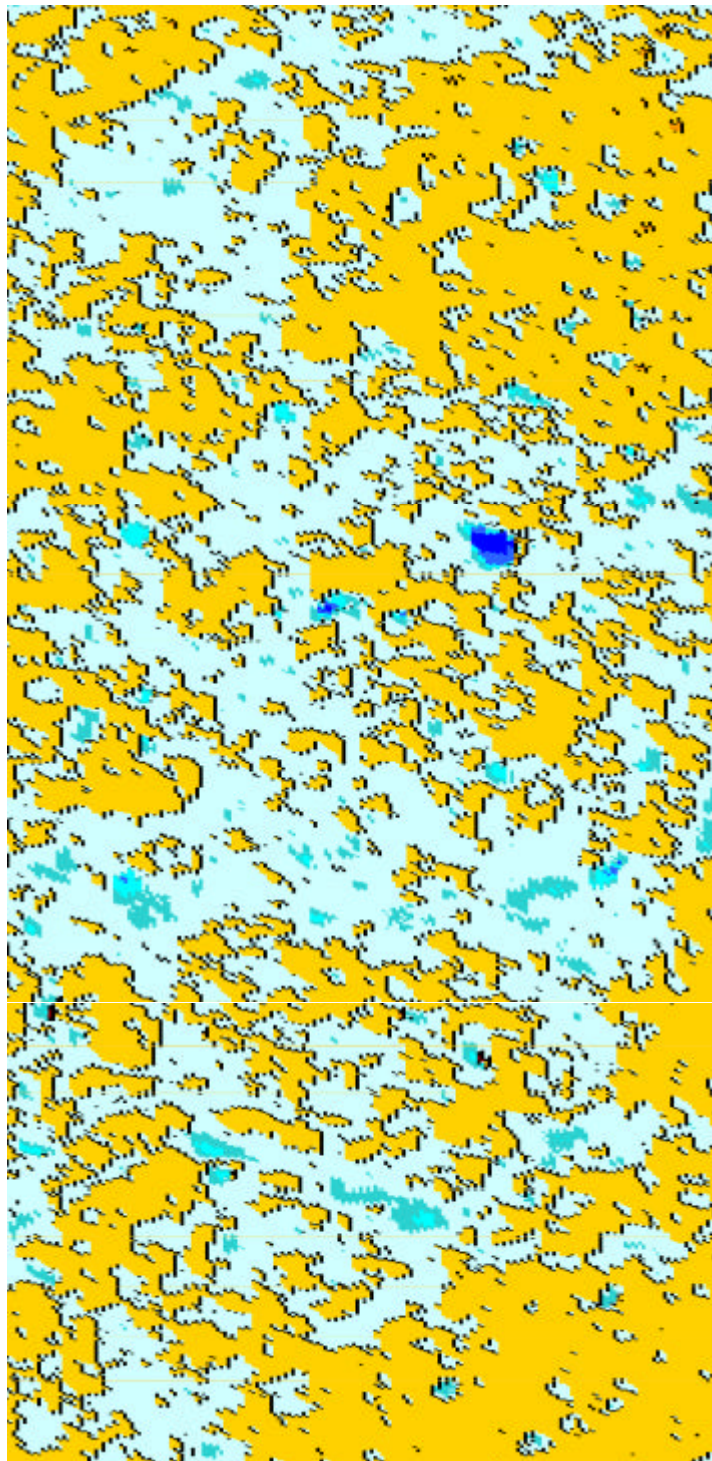
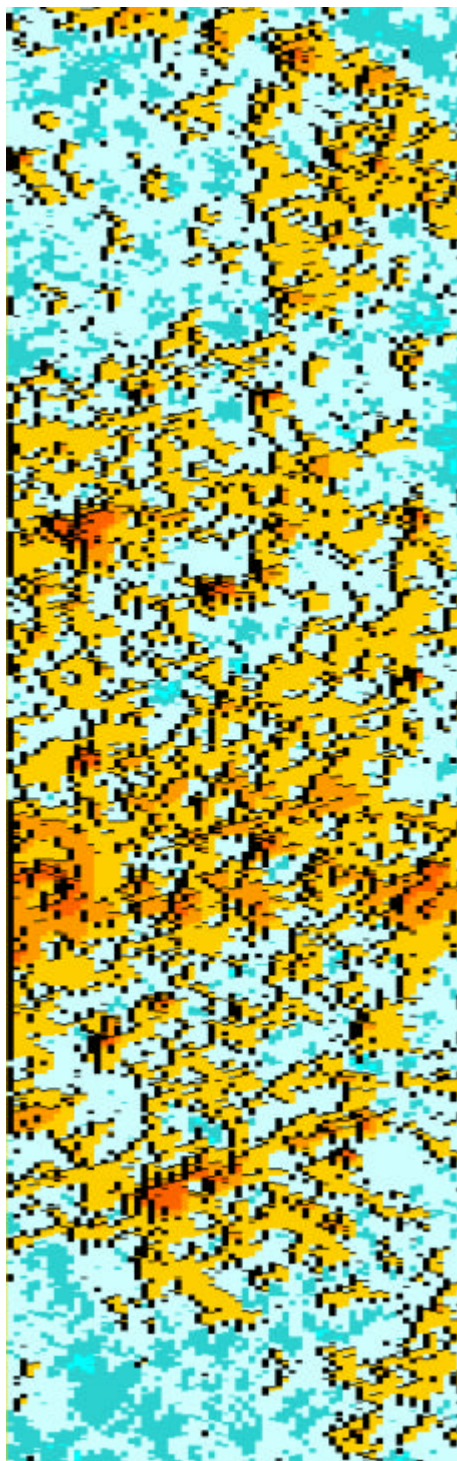
Abb. 5.8 : B4-1mm-S4



**5**

**Anhang 5C**

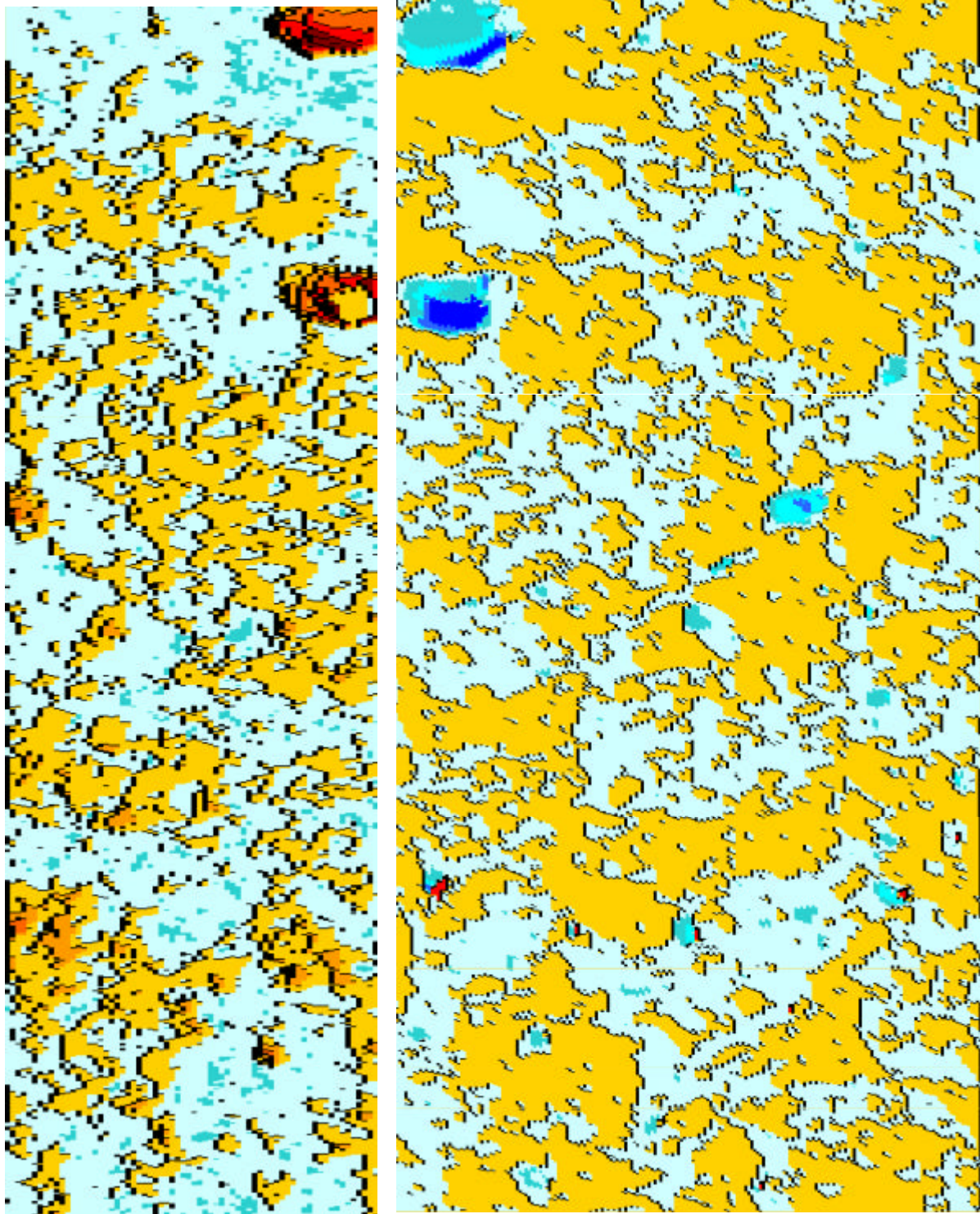
**Serie C 1mm**



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 1

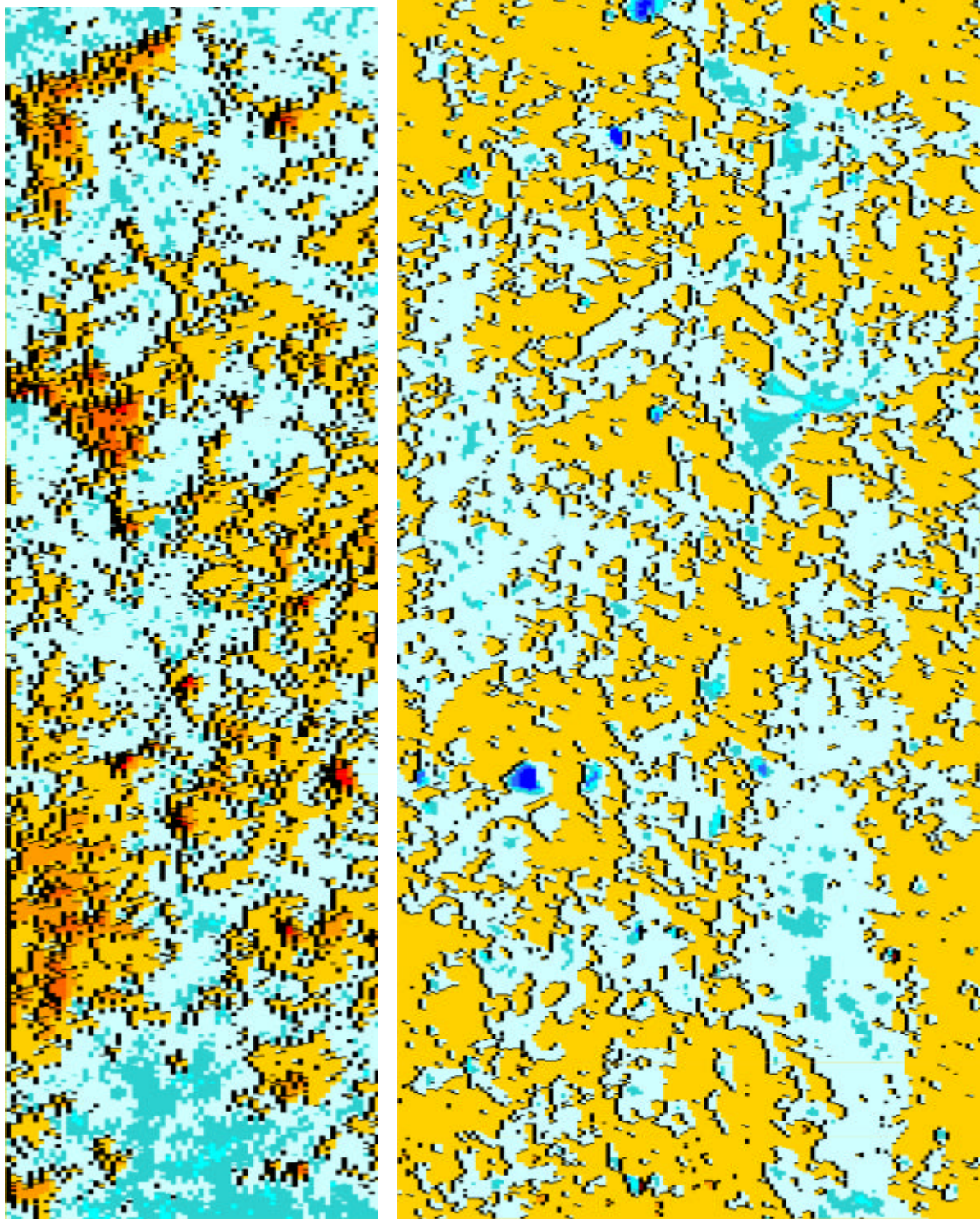
Abb. 5.1 : C3-1mm-S1



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 2

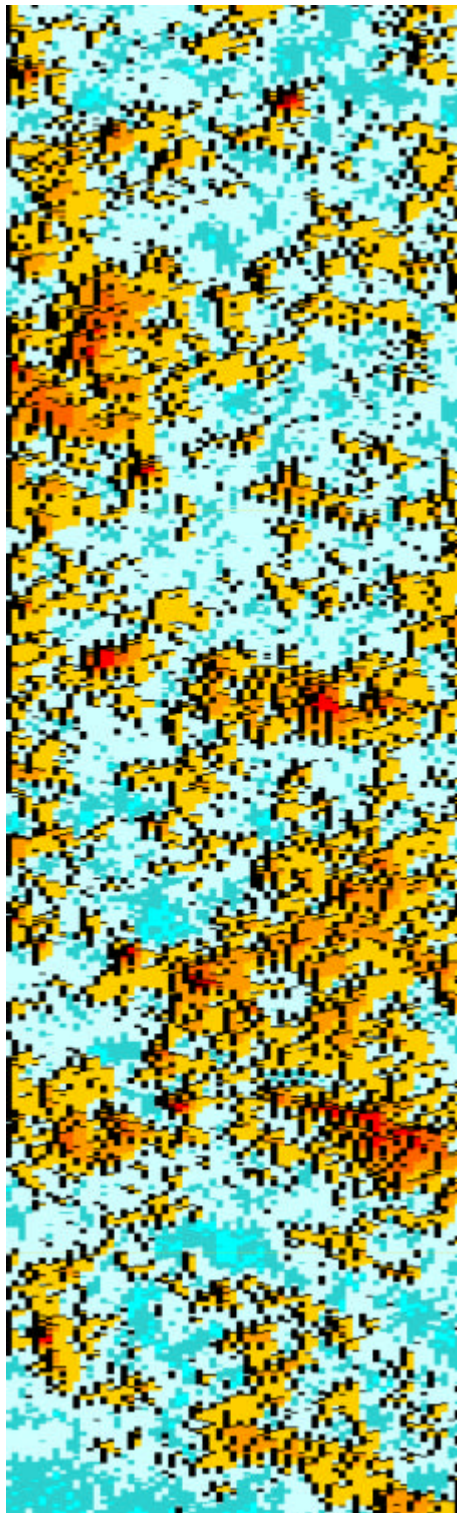
Abb. 5.2 : C3-1mm-S2



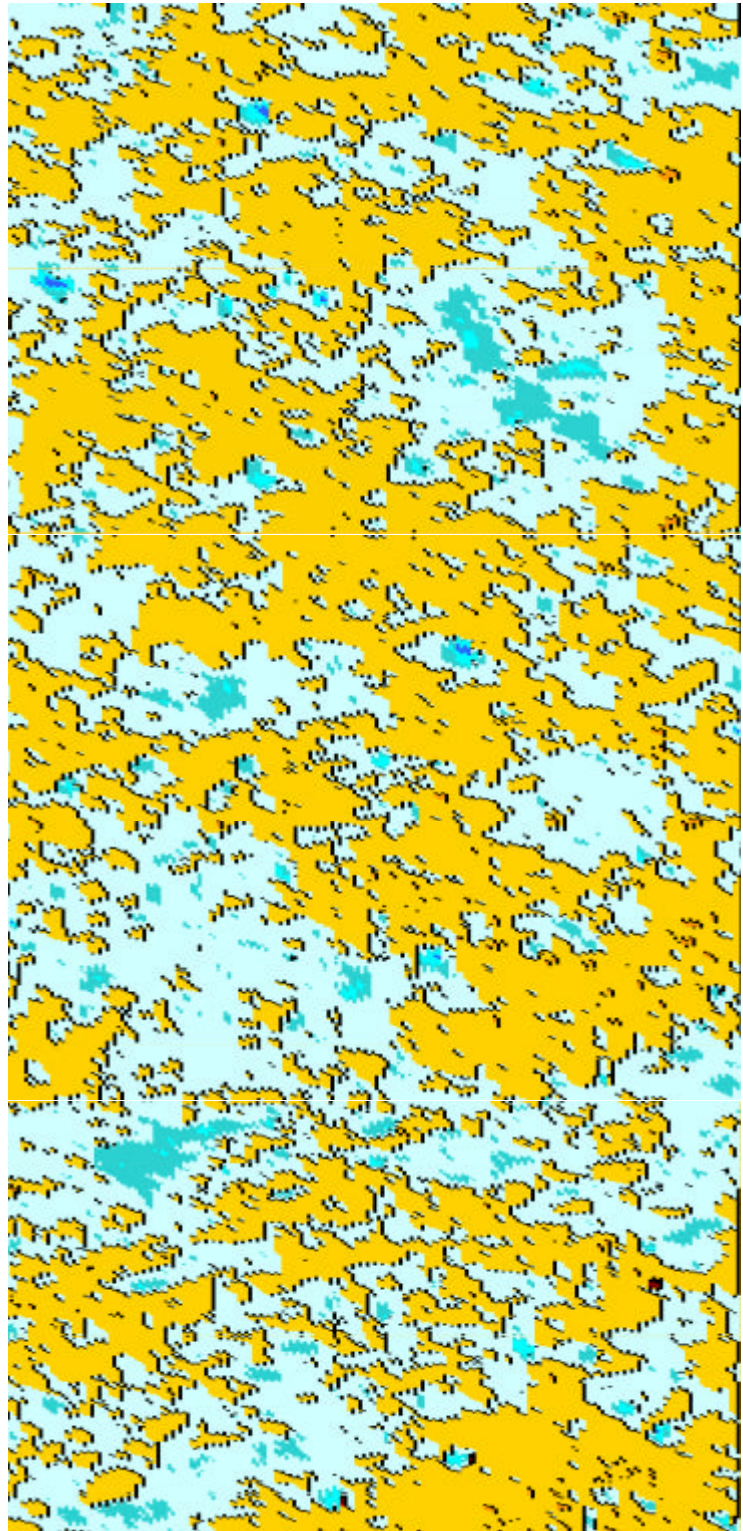
Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 3

Abb. 5.3 : C3-1mm-S3

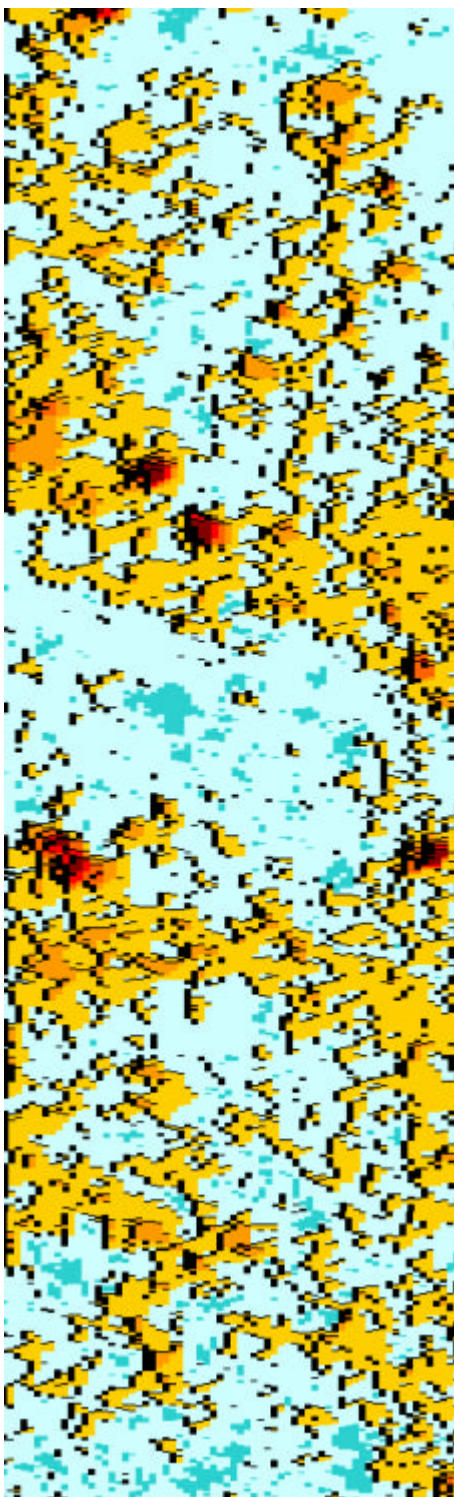


Verstärkungsschicht

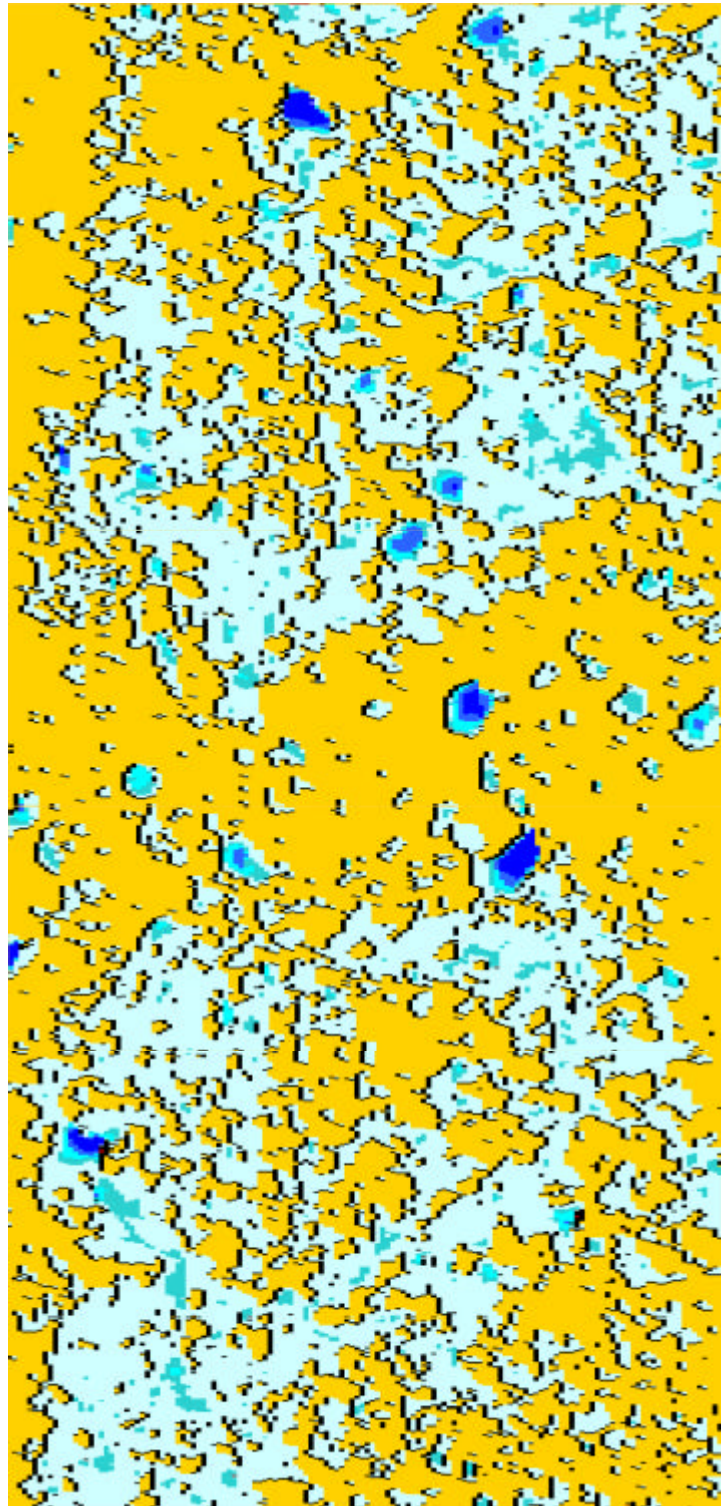


Grundkörper Seite 4

Abb. 5.4 : C3-1mm-S4

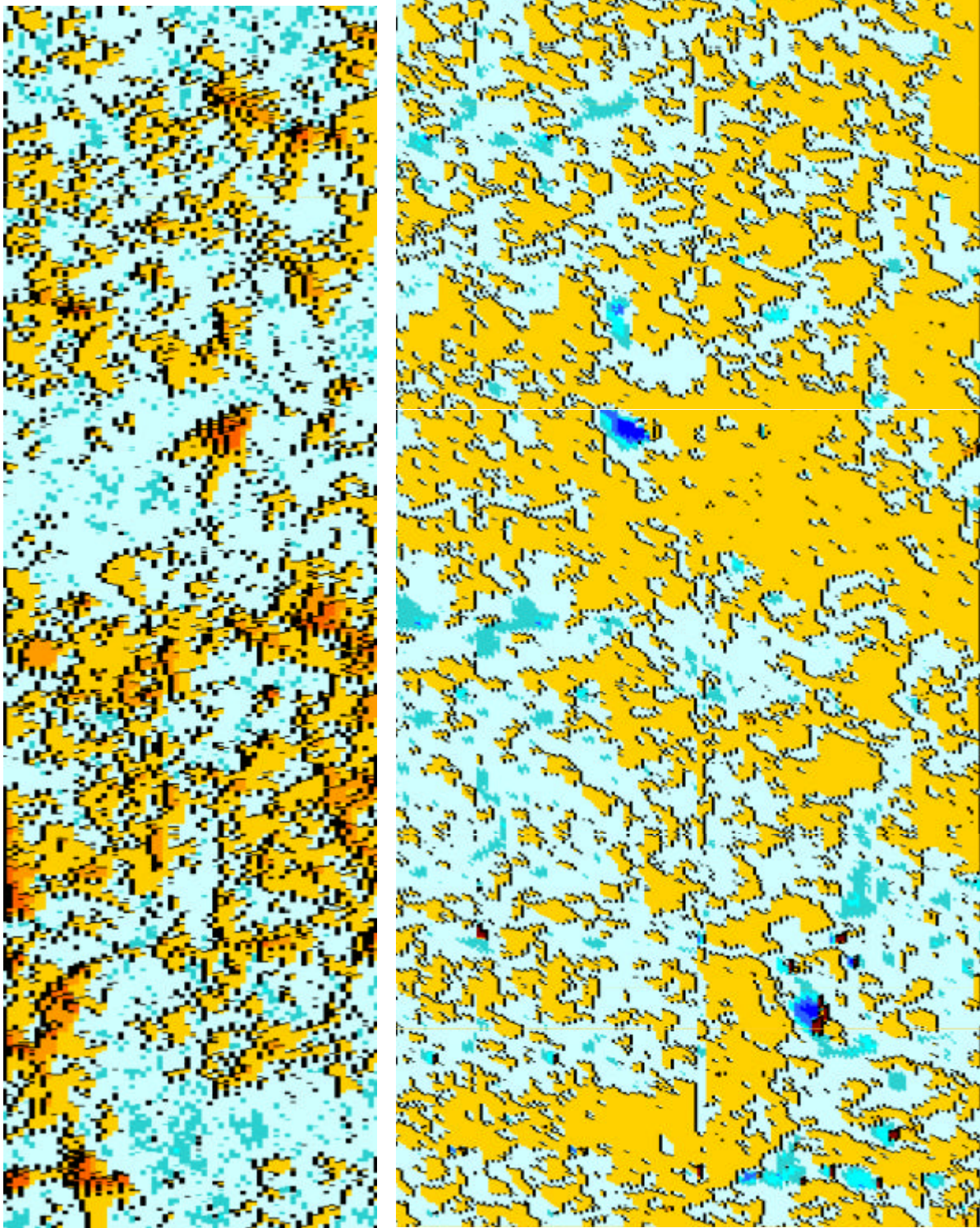


Verstärkungsschicht



Grundkörper Seite 1

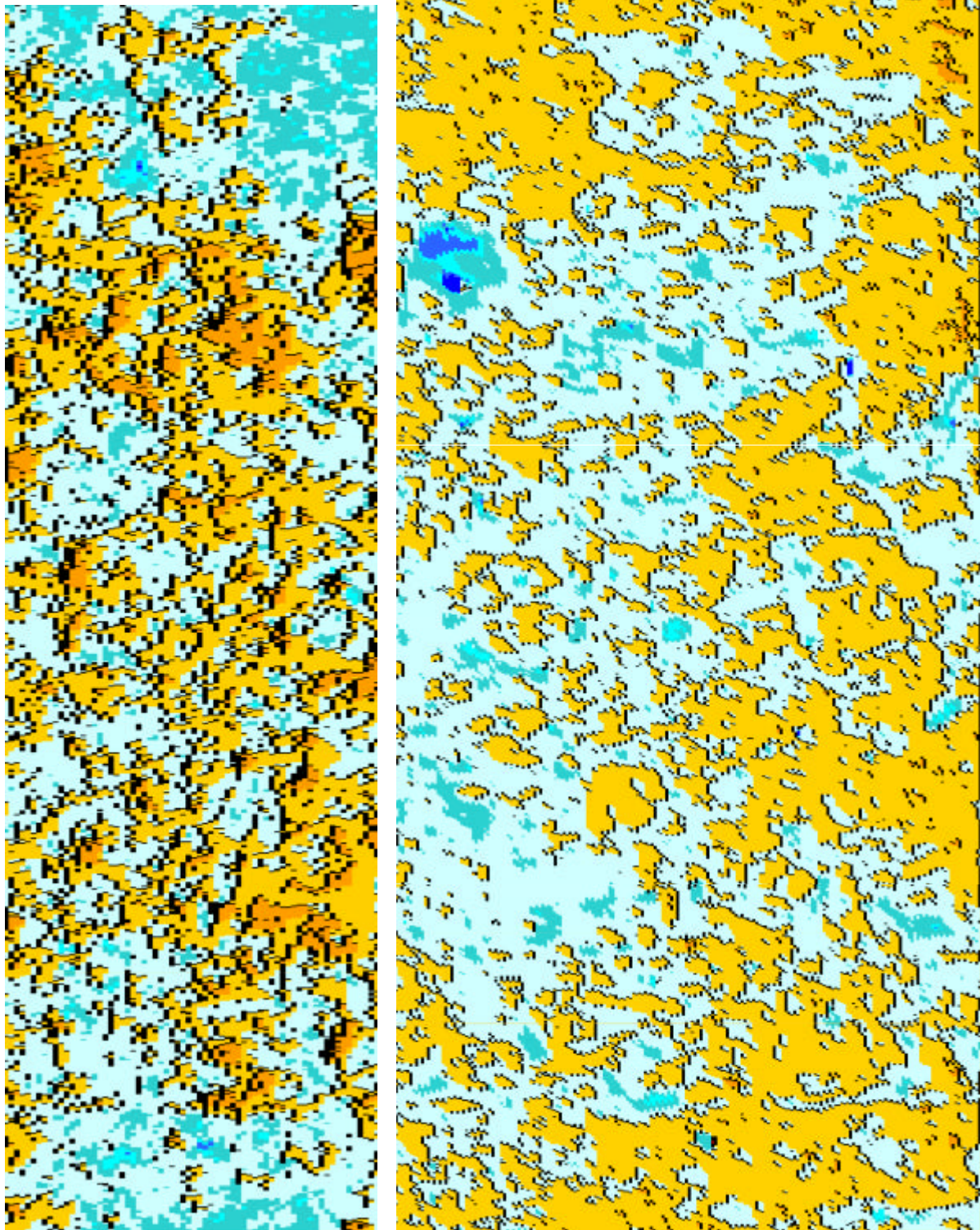
Abb. 5.5 : C4-1mm-S1



Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 2

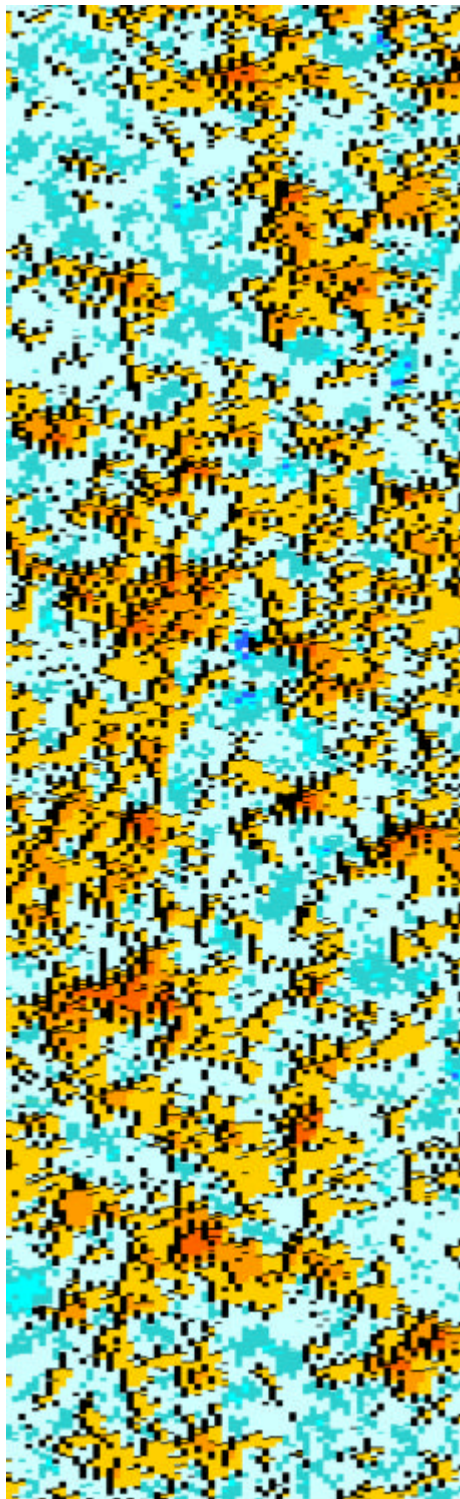
Abb. 5.6 : C4-1mm-S2



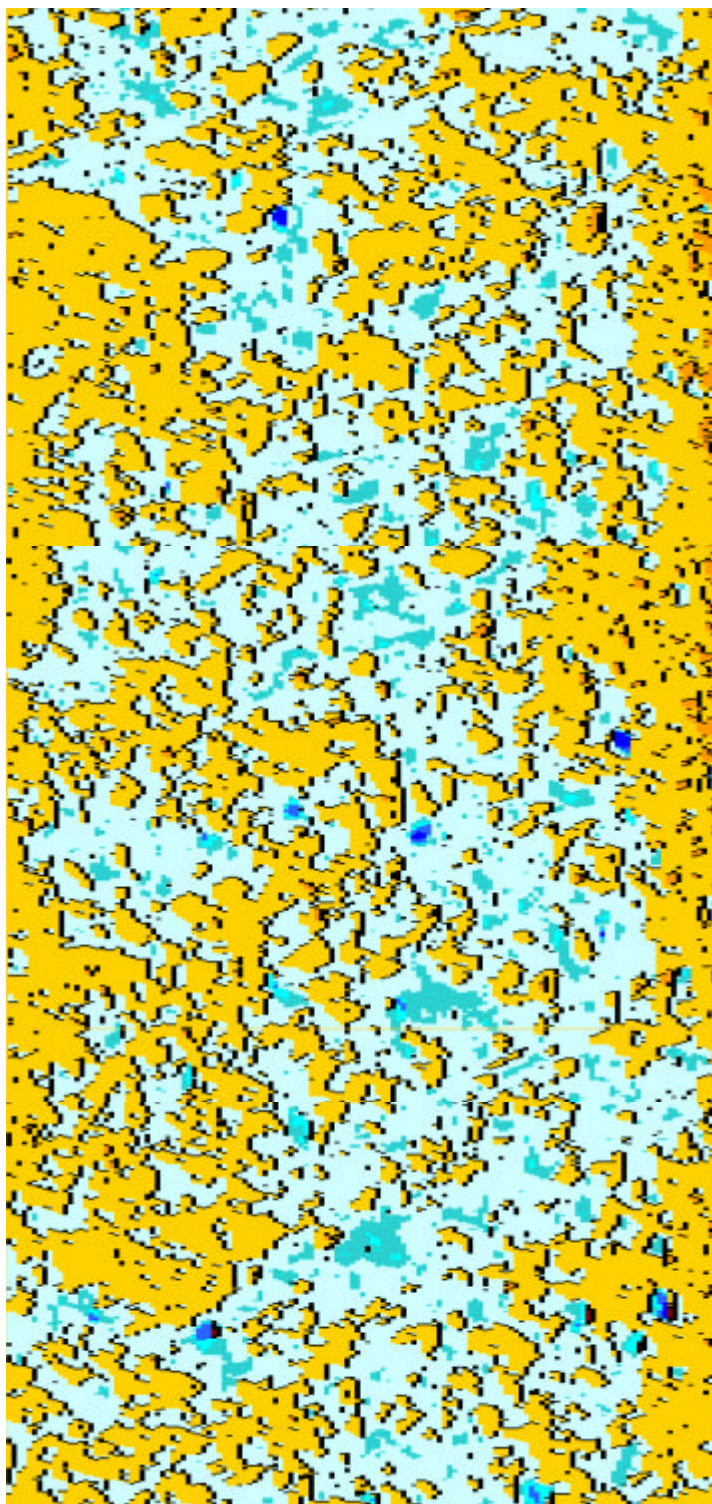
Verstärkungsschicht

Grundkörper Seite 3

Abb. 5.7 : C4-1mm-S3



Verstärkungsschicht



Grundkörper Seite 4

Abb. 5.8 : C4-1mm-S4



## **6 Die Profiltragkurven**

In diesem Anhang werden die Profiltragkurven, die in Kapitel 8 vorgestellt und besprochen worden sind, dargestellt

Die Grafiken werden laut ihre Serien A,B und C unterteilt und jeweils für jeder der Vier Seiten einer Grundkörper.

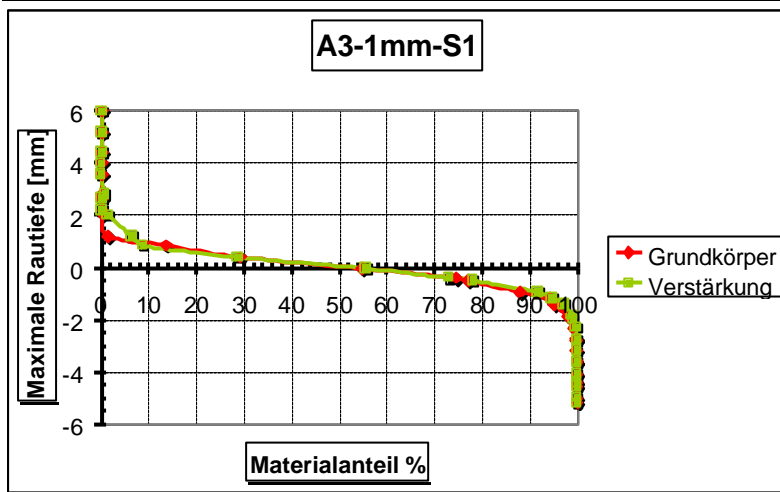


Abb. 6.1 : Abbott-Kurven A3-1mm-S1

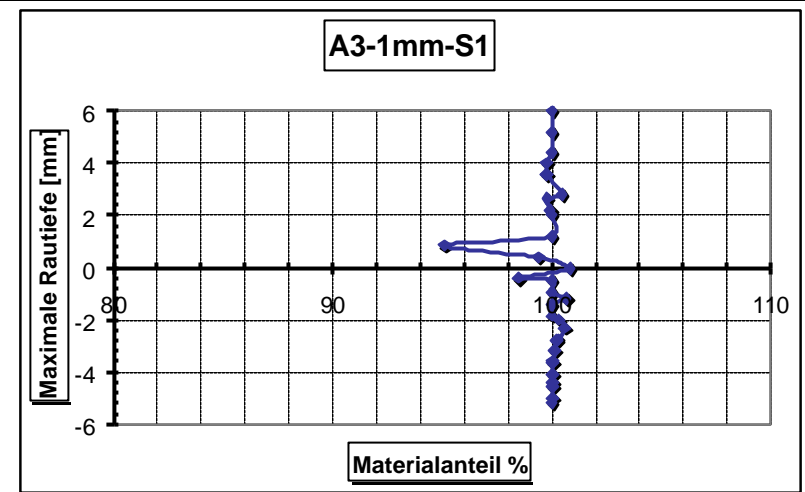


Abb. 6.2 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A3-1mm-S1

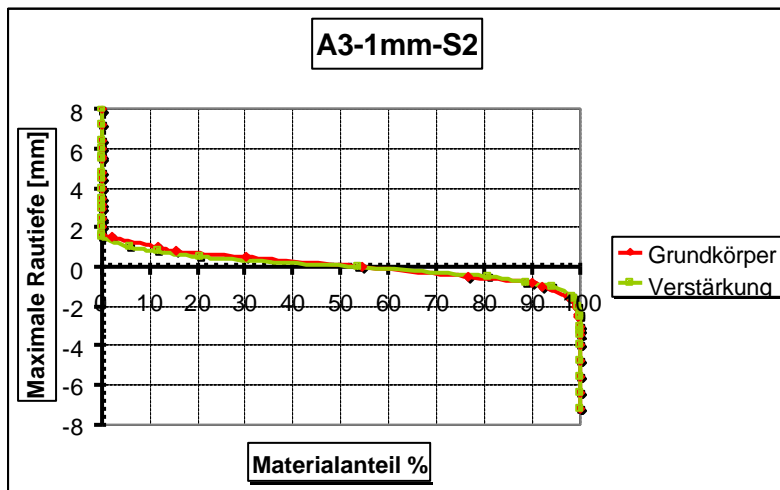


Abb. 6.3 : Abbott-Kurven A3-1mm-S2

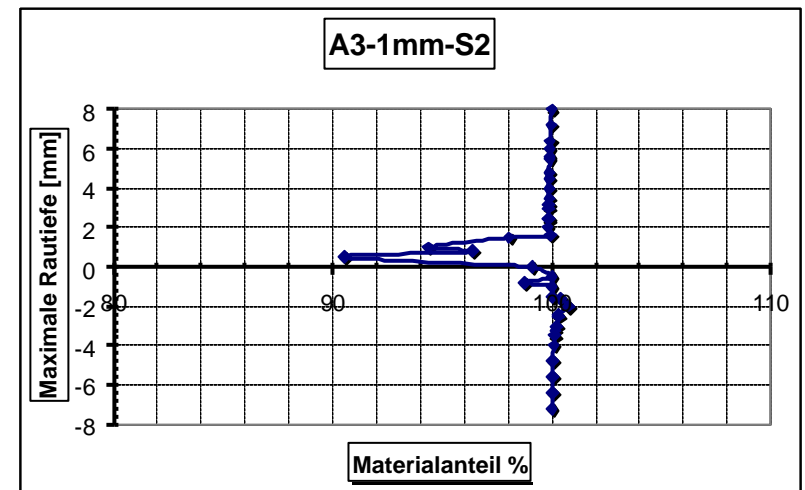


Abb. 6.4 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A3-1mm-S2

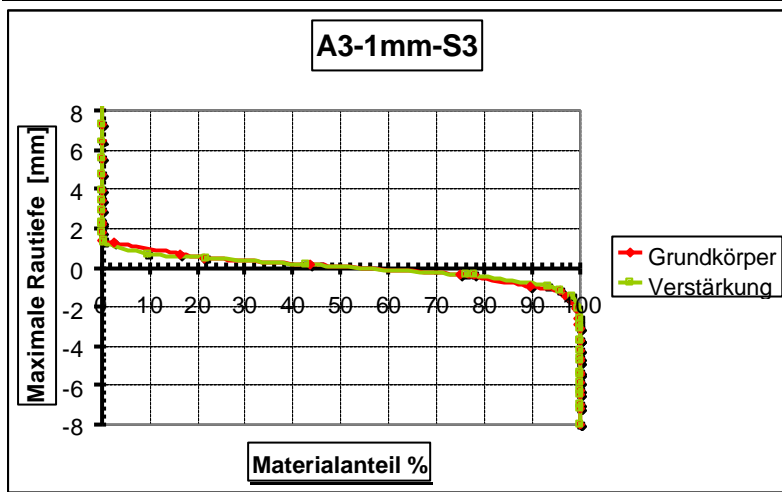


Abb. 6.5 : Abbott-Kurven A3-1mm-S3

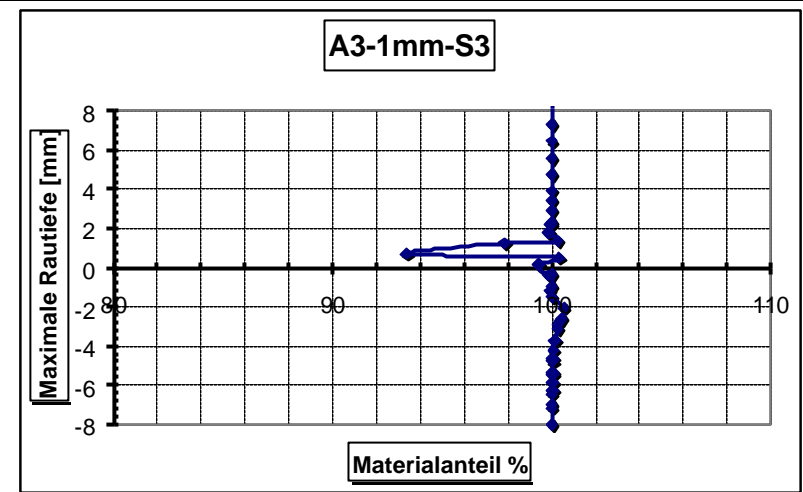


Abb. 6.6 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A3-1mm-S3

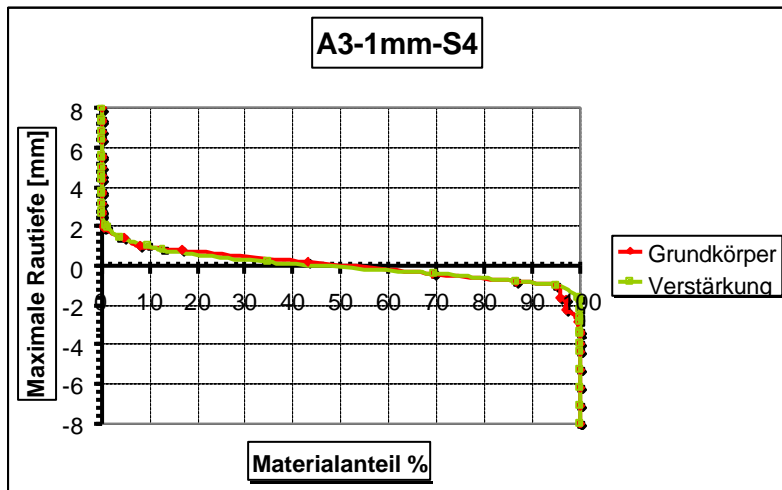


Abb. 6.7 : Abbott-Kurven A3-1mm-S4

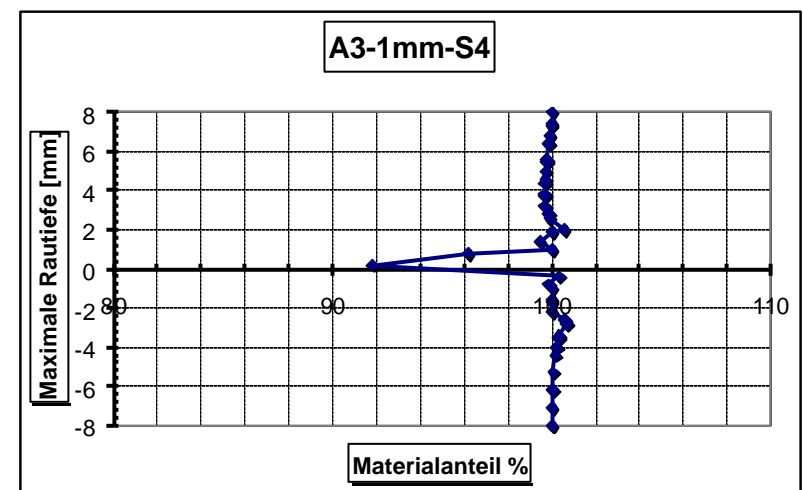


Abb. 6.8 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A3-1mm-S4

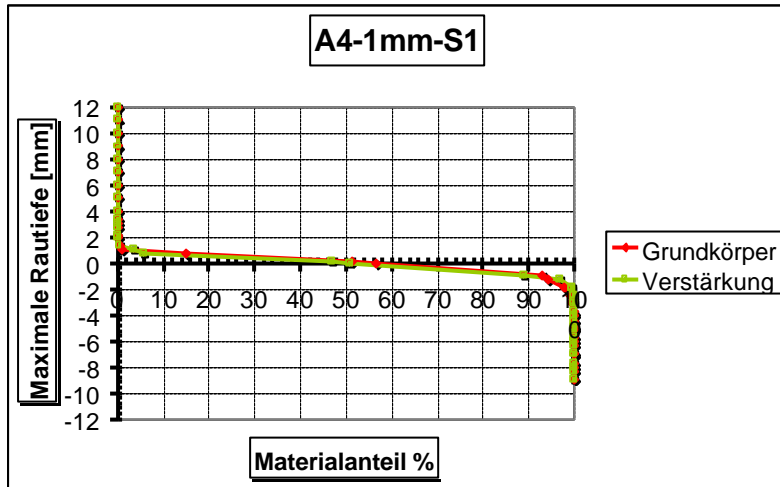


Abb. 6.9 : Abbott-Kurven A4-1mm-S1

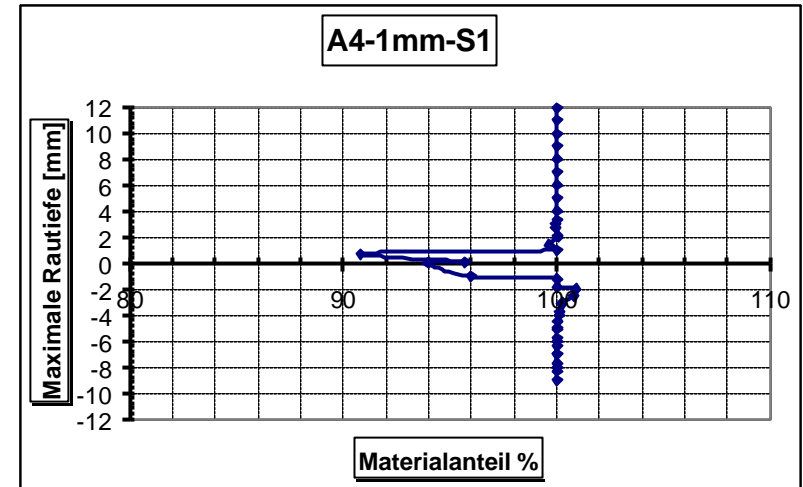


Abb. 6.10 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A4-1mm-S1

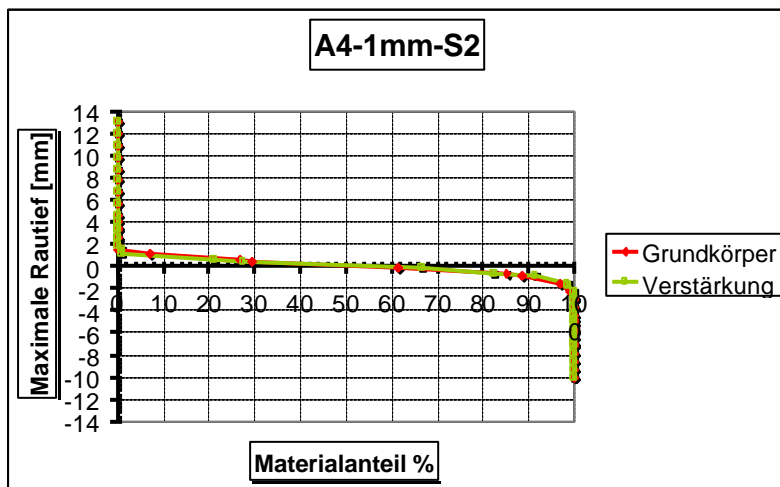


Abb. 6.11 : Abbott-Kurven A4-1mm-S2

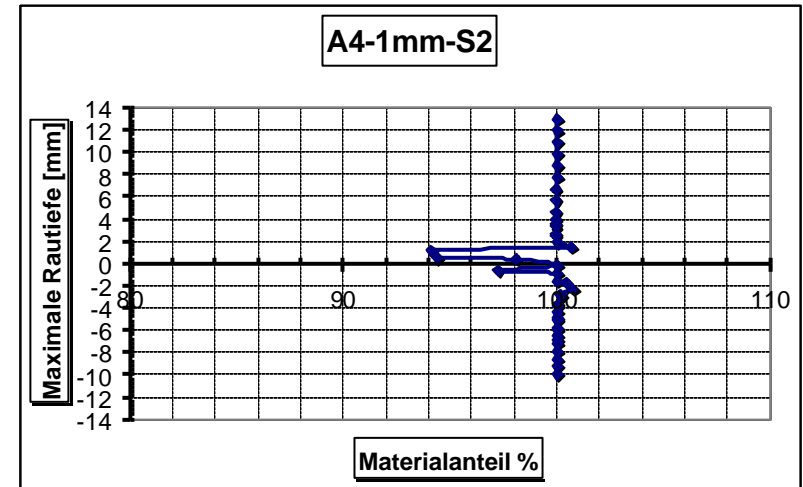


Abb. 6.12 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A4-1mm-S2

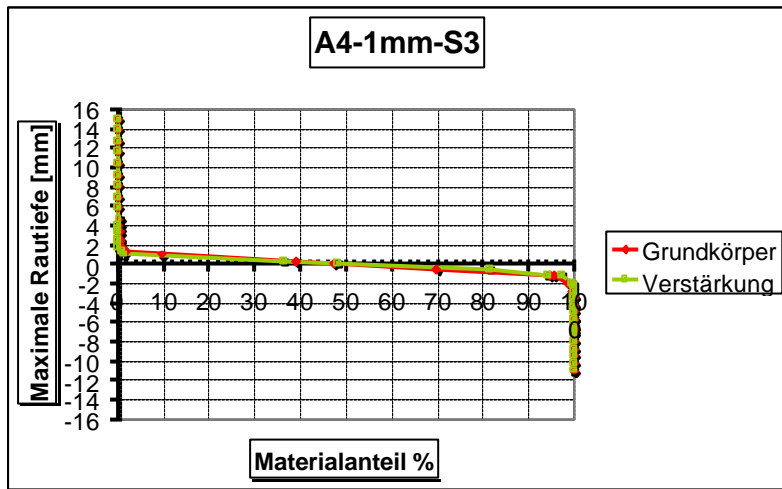


Abb. 6.13 : Abbott-Kurven A4-1mm-S3

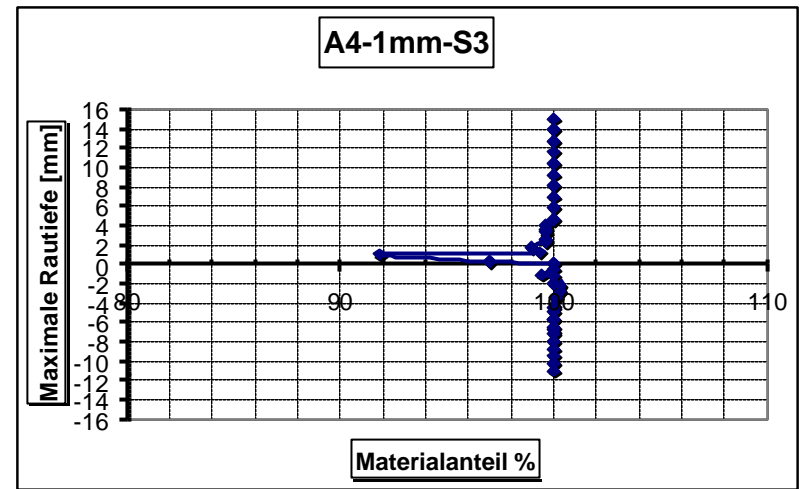


Abb. 6.14 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A4-1mm-S3

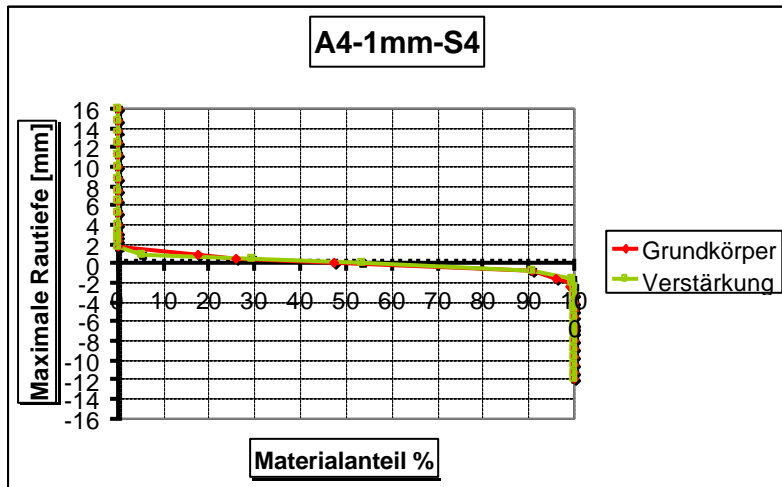


Abb. 6.15 : Abbott-Kurven A4-1mm-S4

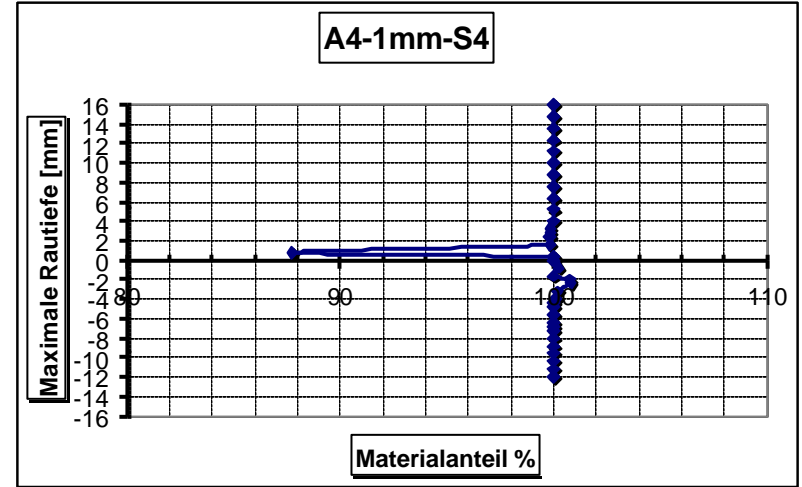


Abb. 6.16 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven A4-1mm-S4

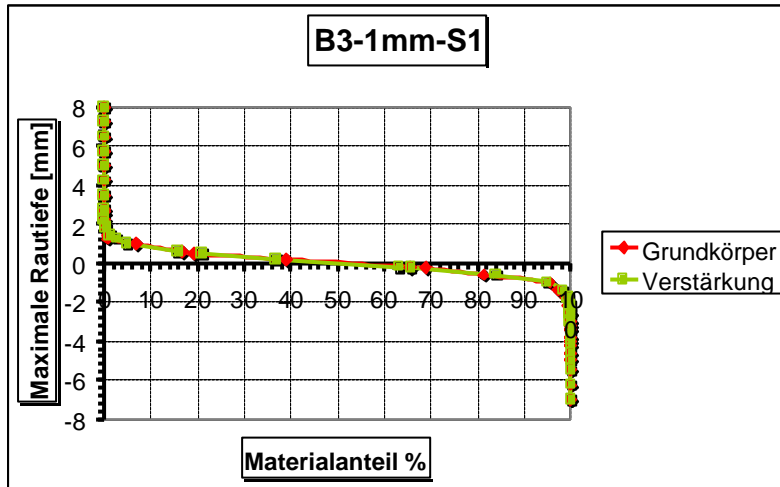


Abb. 6.17 : Abbott-Kurven B3-1mm-S1

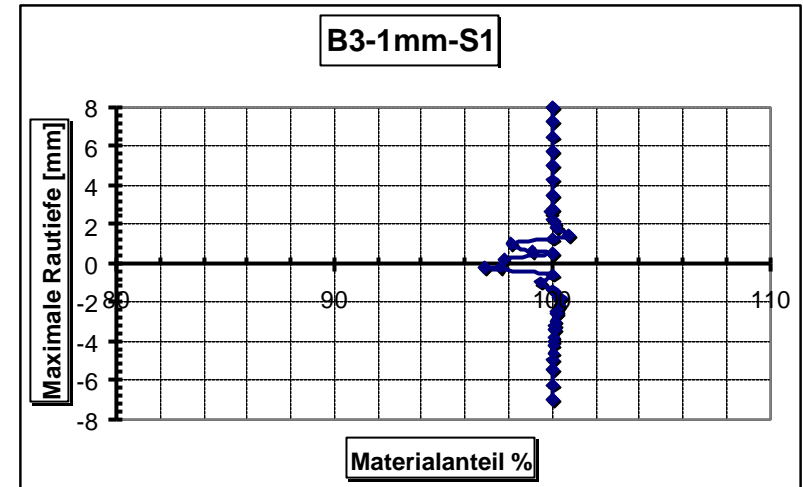


Abb. 6.18 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B3-1mm-S1

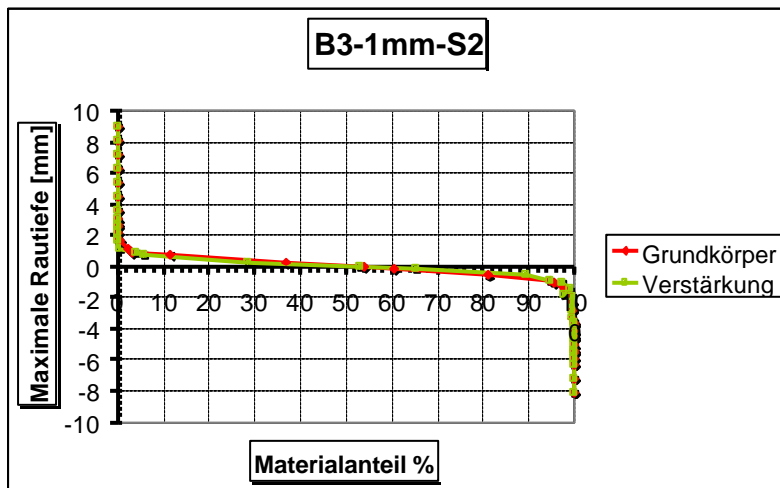


Abb. 6.19 : Abbott-Kurven B3-1mm-S2

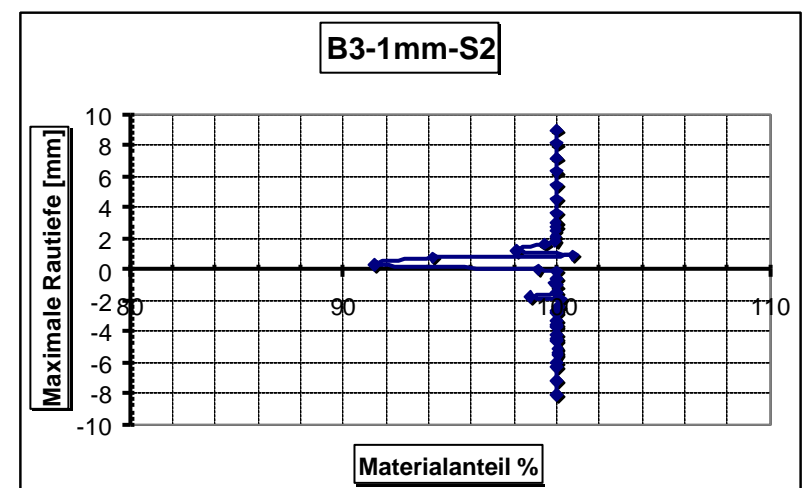


Abb. 6.20 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B3-1mm-S2

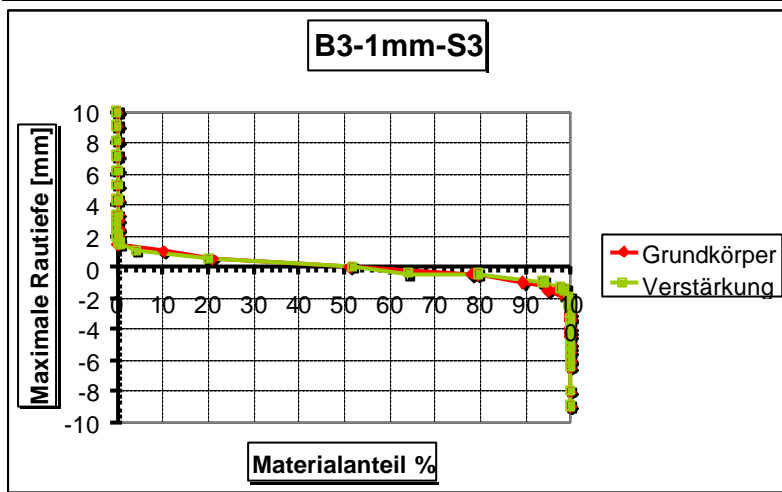


Abb. 6.21 : Abbott-Kurven B3-1mm-S3

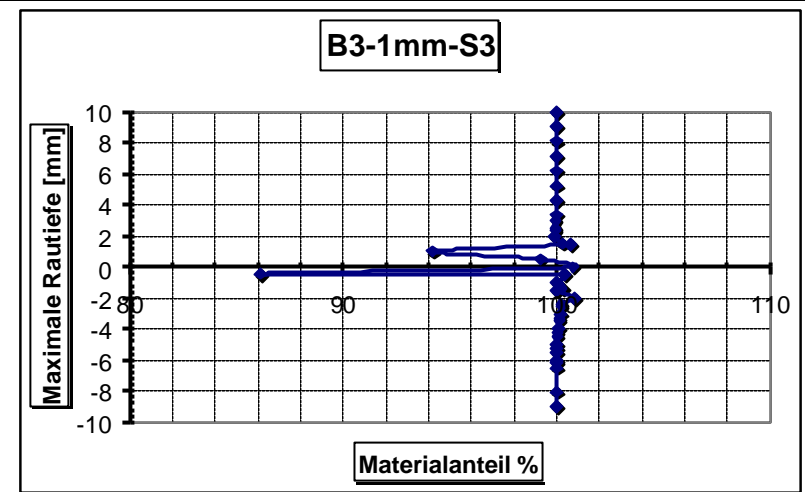


Abb. 6.22 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B3-1mm-S3

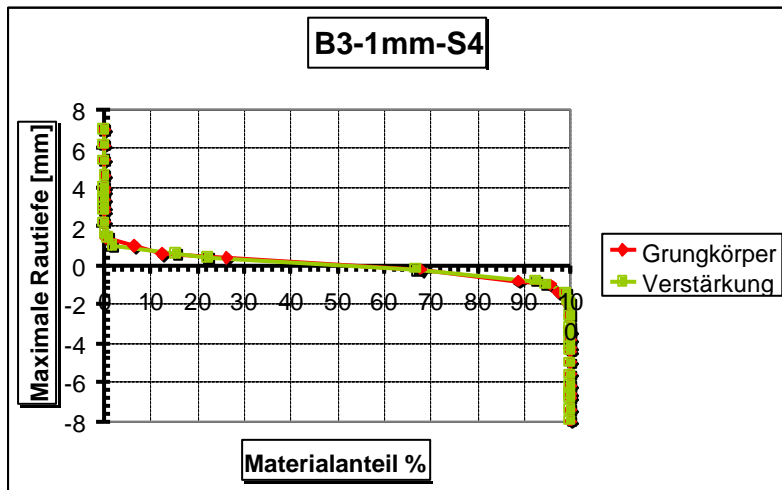


Abb. 6.23 : Abbott-Kurven B3-1mm-S4

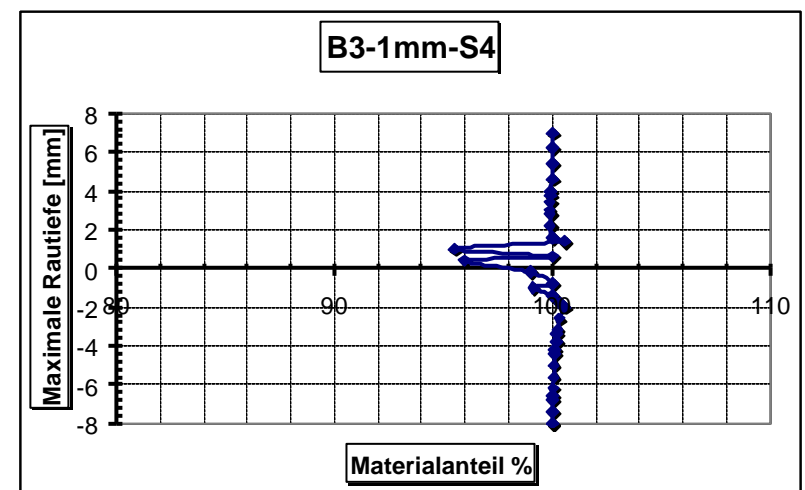


Abb. 6.24 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B3-1mm-S4

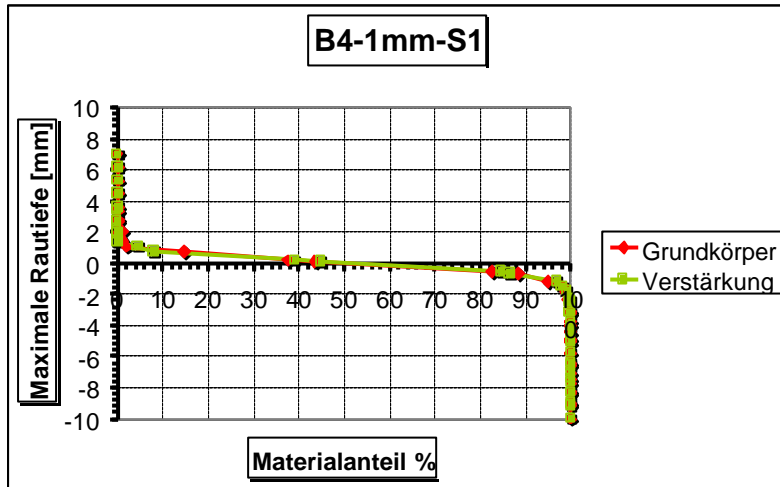


Abb. 6.25 : Abbott-Kurven B4-1mm-S1

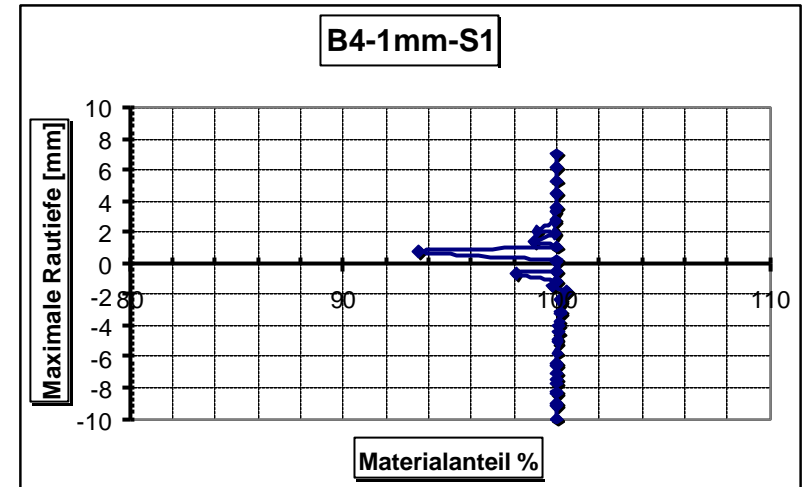


Abb. 6.26 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B4-1mm-S1

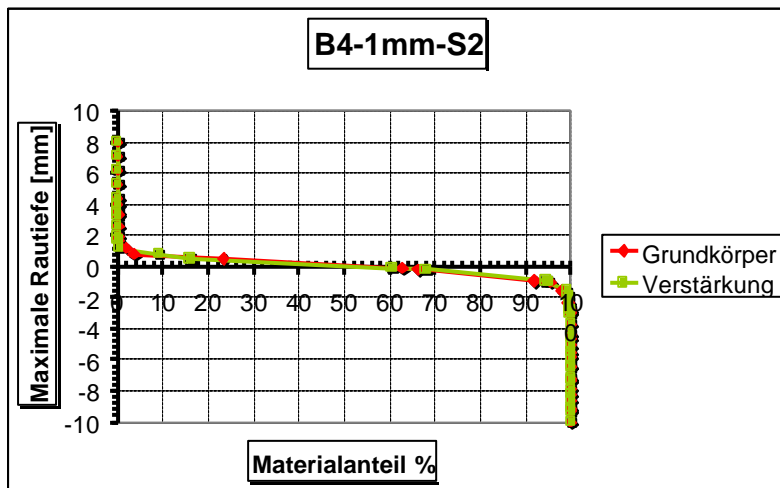


Abb. 6.27 : Abbott-Kurven B4-1mm-S2

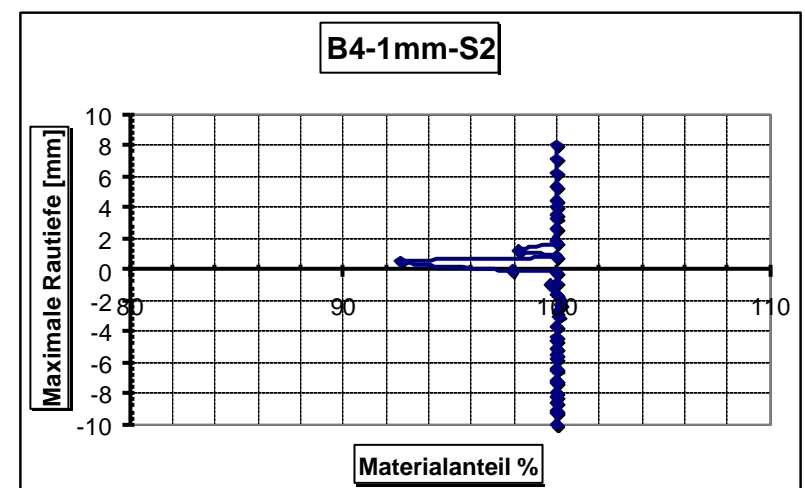


Abb. 6.28 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B4-1mm-S2



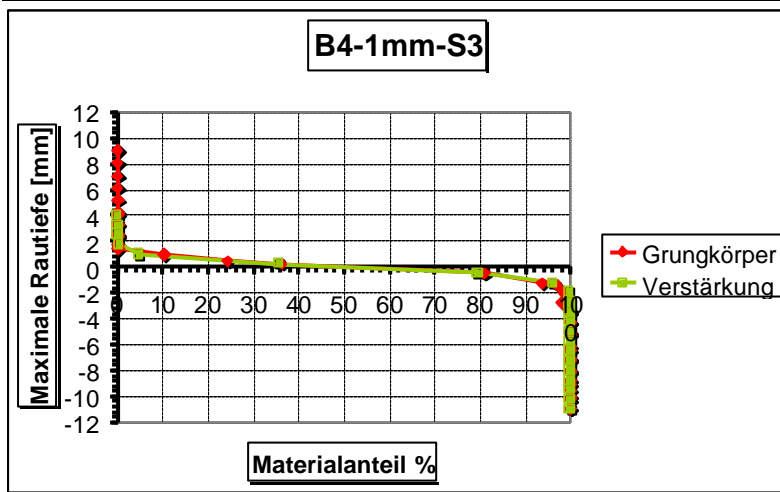


Abb. 6.29 : Abbott-Kurven B4-1mm-S3

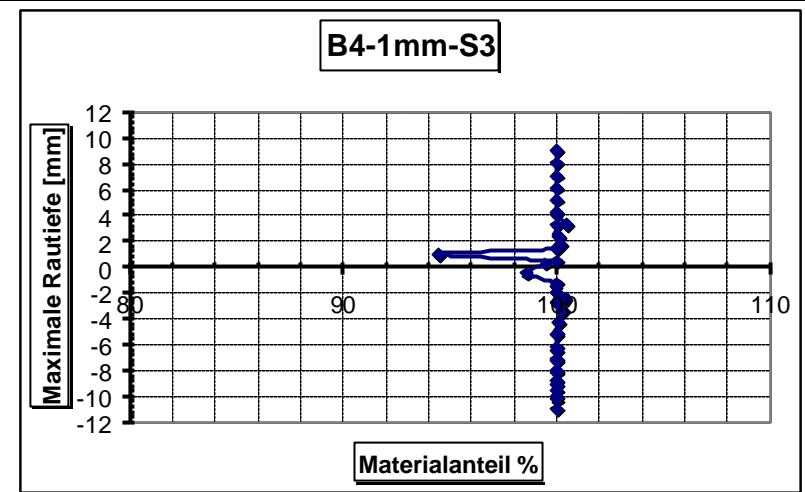


Abb. 6.30 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B4-1mm-S3

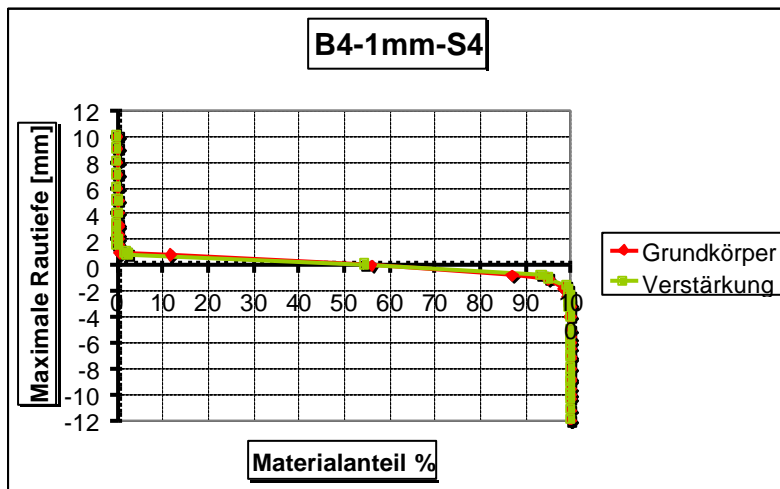


Abb. 6.31 : Abbott-Kurven B4-1mm-S4

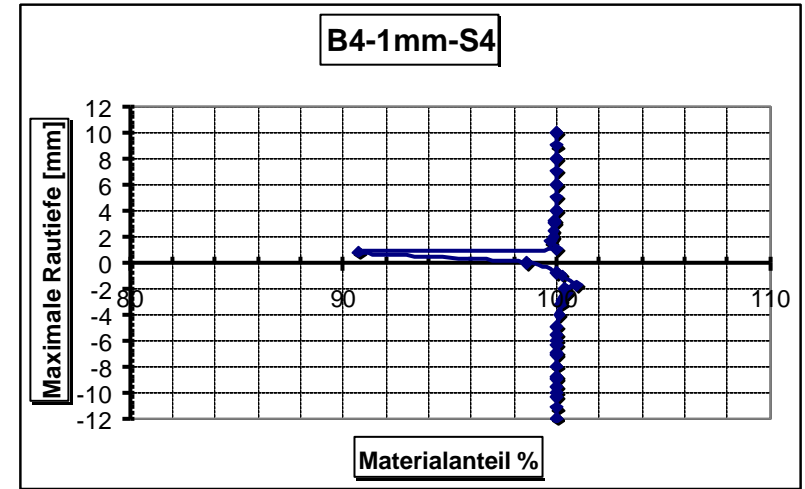


Abb. 6.32 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven B4-1mm-S4

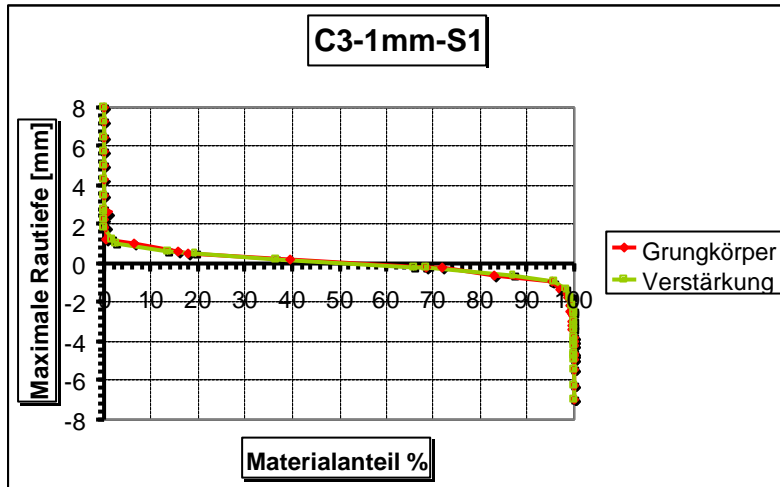


Abb. 6.33 : Abbott-Kurven C3-1mm-S1

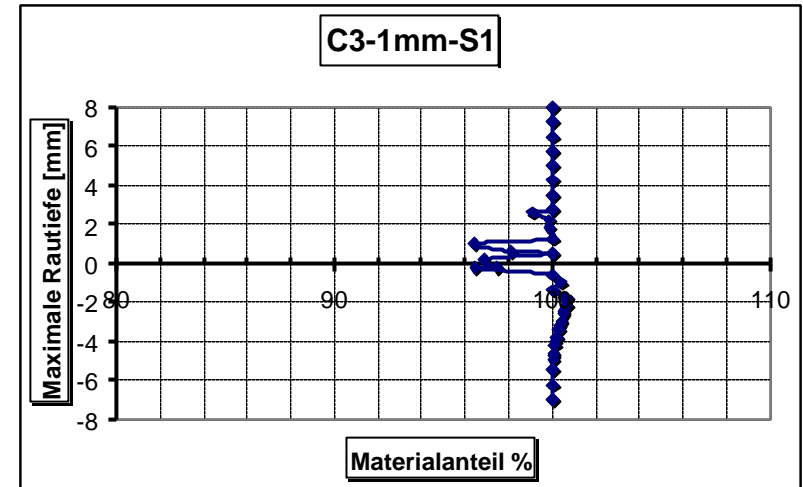


Abb. 6.34 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C3-1mm-S1

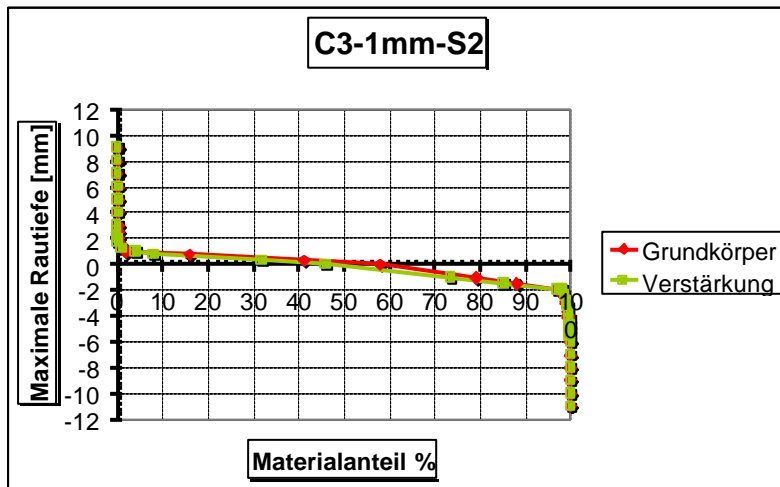


Abb. 6.35 : Abbott-Kurven C3-1mm-S2

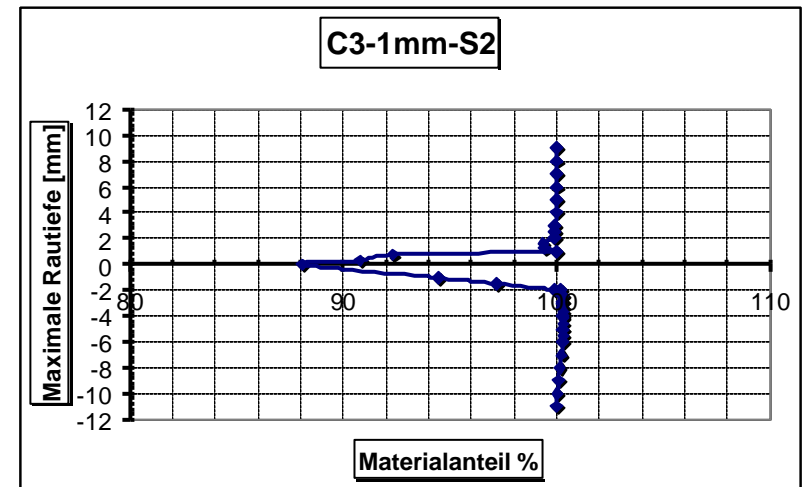


Abb. 6.36 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C3-1mm-S2

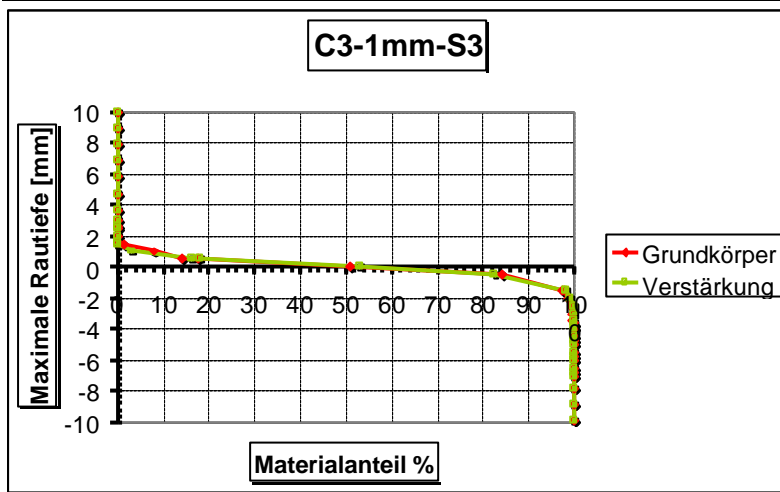


Abb. 6.37 : Abbott-Kurven C3-1mm-S3

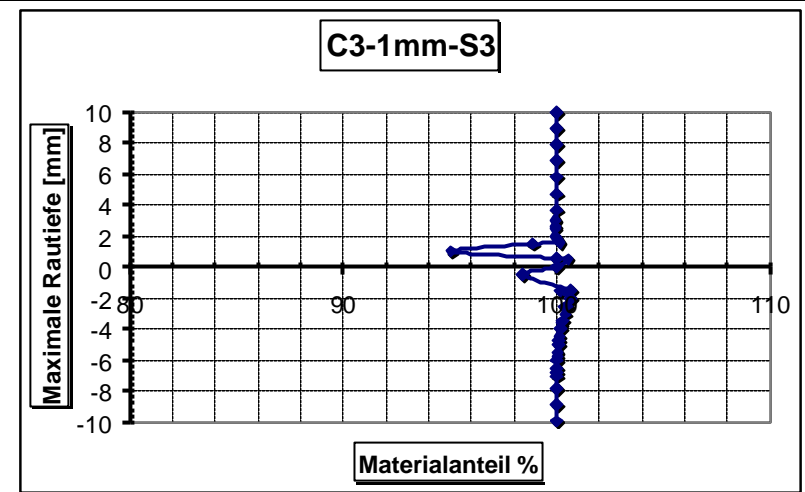


Abb. 6.38 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C3-1mm-S3

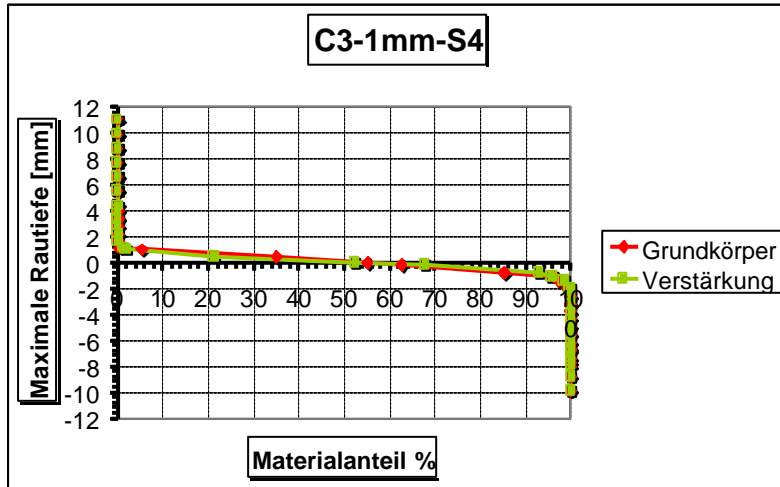


Abb. 6.39 : Abbott-Kurven C3-1mm-S4

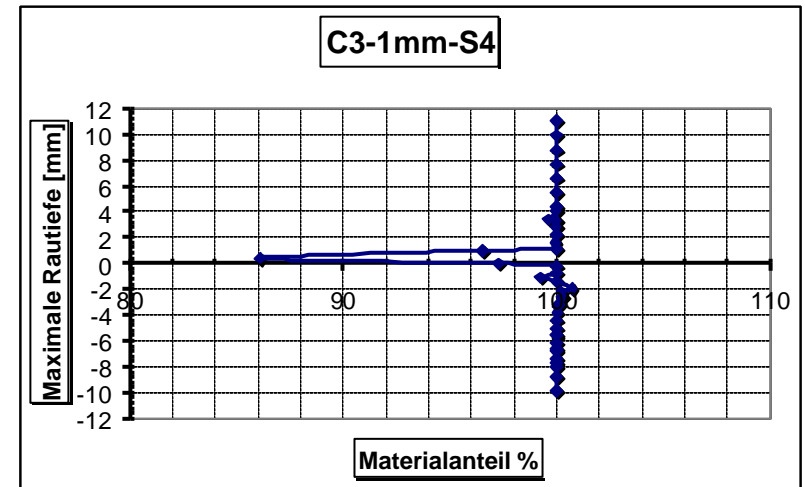


Abb. 6.40 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C3-1mm-S4

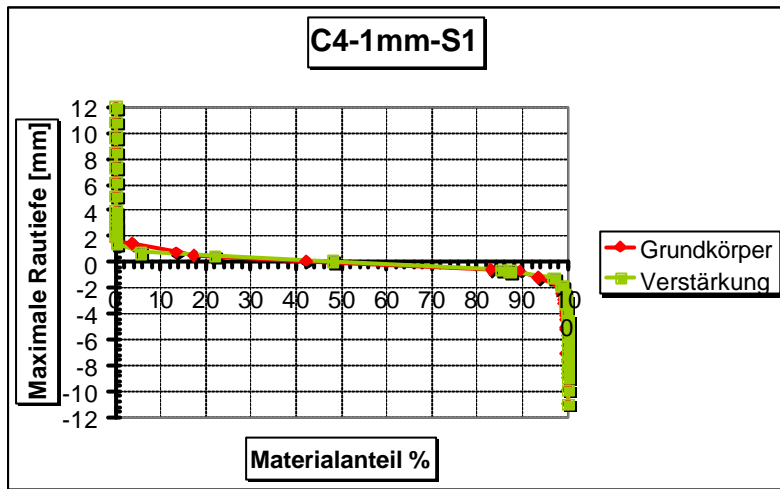


Abb. 6.41 : Abbott-Kurven C4-1mm-S1

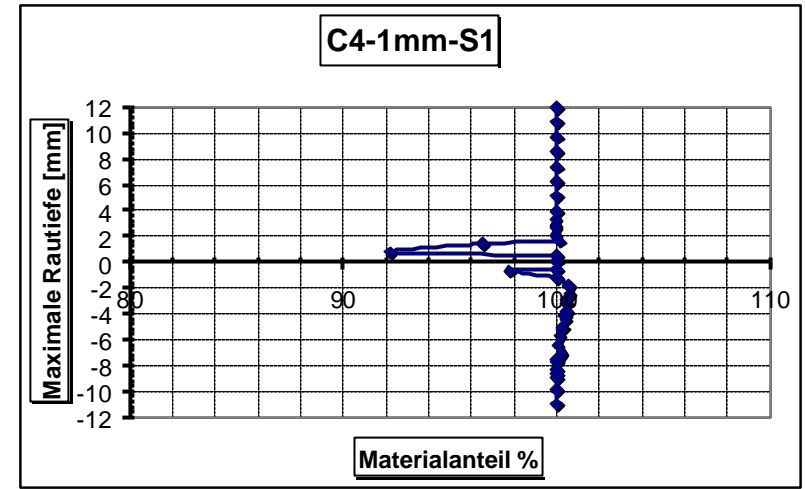


Abb. 6.42 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C4-1mm-S1

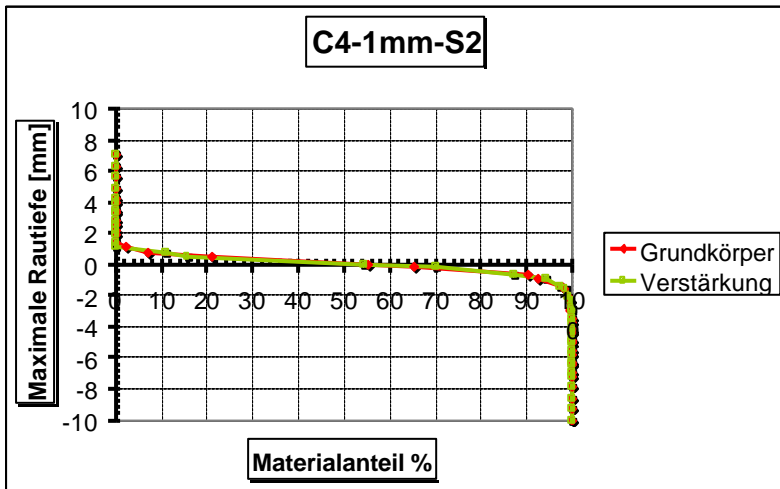


Abb. 6.43 : Abbott-Kurven C4-1mm-S2

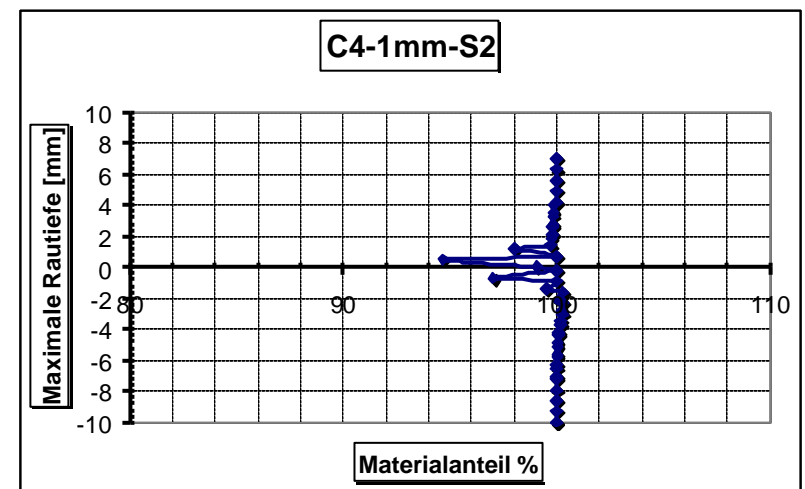


Abb. 6.44 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C4-1mm-S2

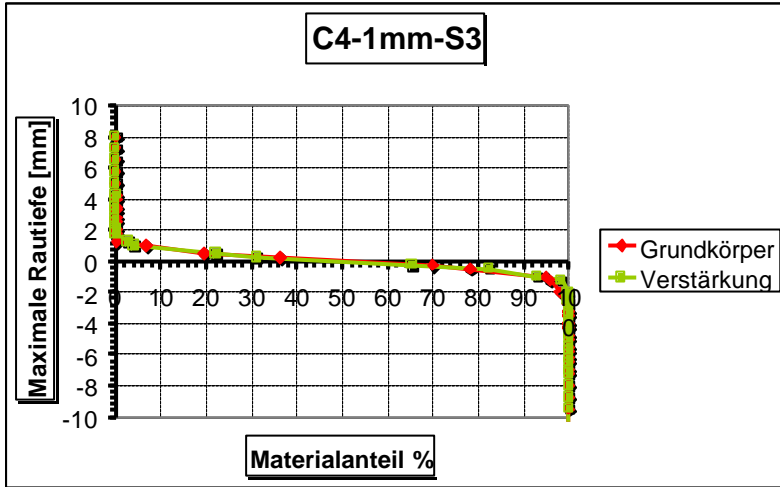


Abb. 6.45 : Abbott-Kurven C4-1mm-S3

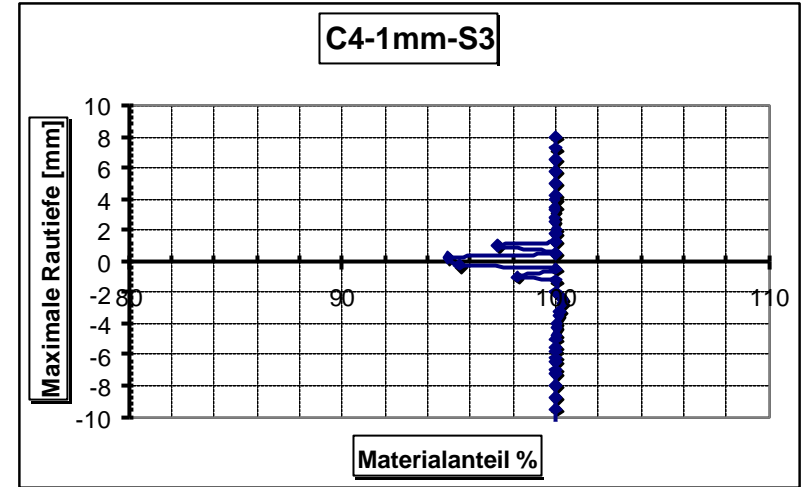


Abb. 6.46 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C4-1mm-S3

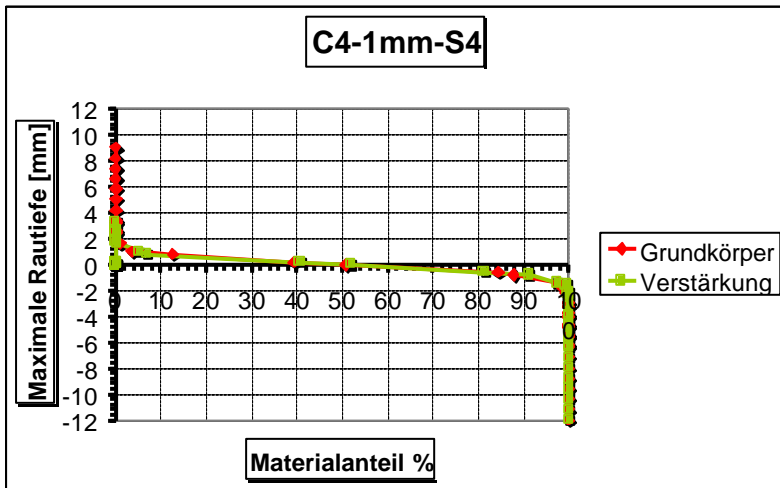


Abb. 6.47 : Abbott-Kurven C4-1mm-S4

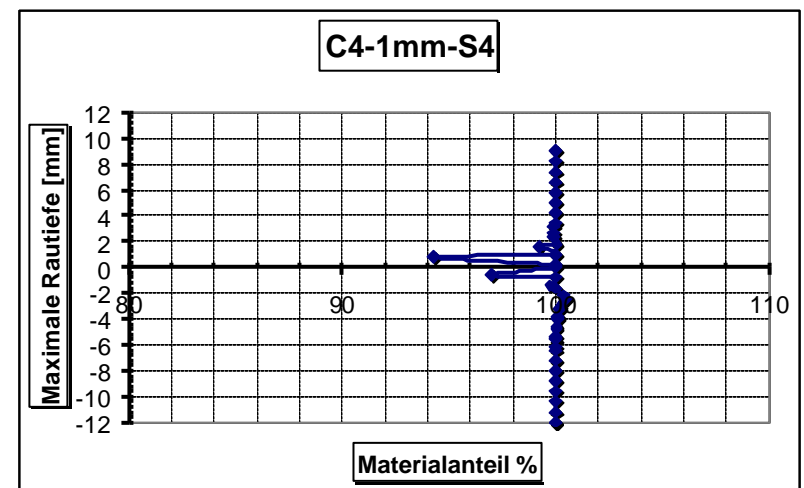


Abb. 6.48 : Übereinstimmung der Abbott-Kurven C4-1mm-S4

**7**

**Anhang 7**

***Dynamische Belastungen***

In diesem Anhang werden die in Kapitel 8 vorgestellte Ergebnisse der dynamische Belastungen detailliert grafisch dargestellt

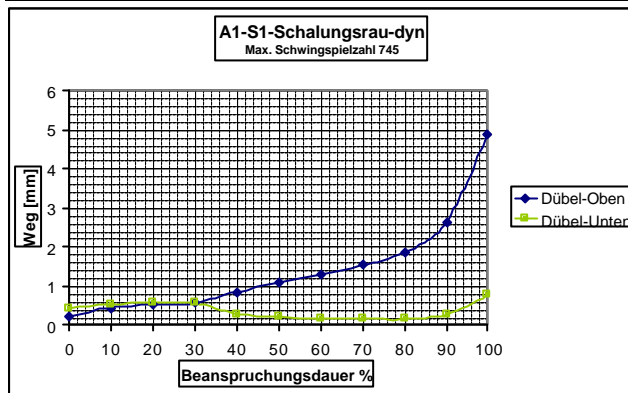


Abb. 7.1 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

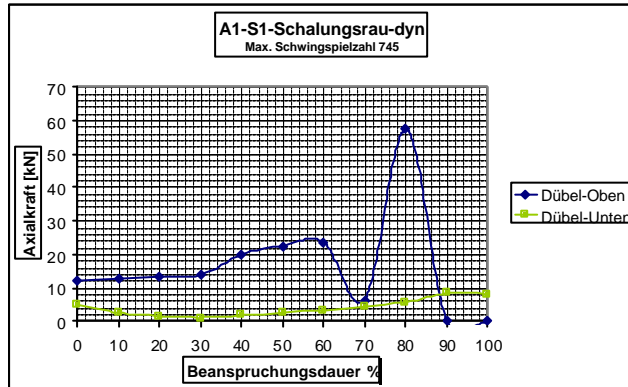


Abb. 7.2 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

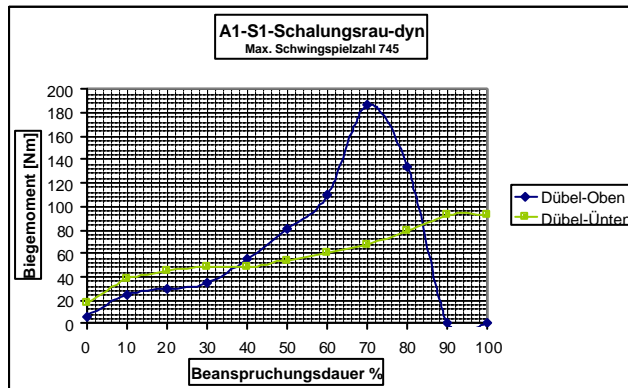


Abb. 7.3 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

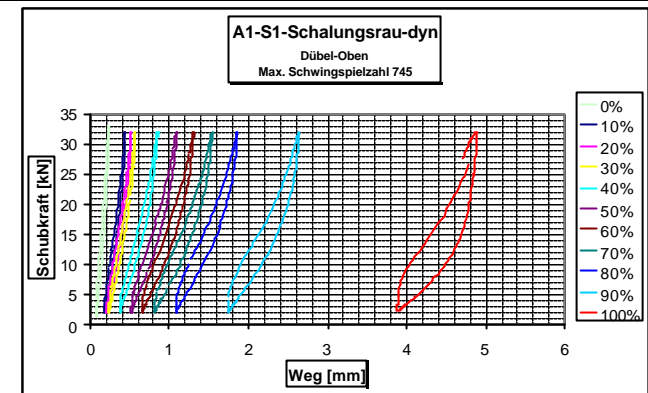


Abb. 7.4 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

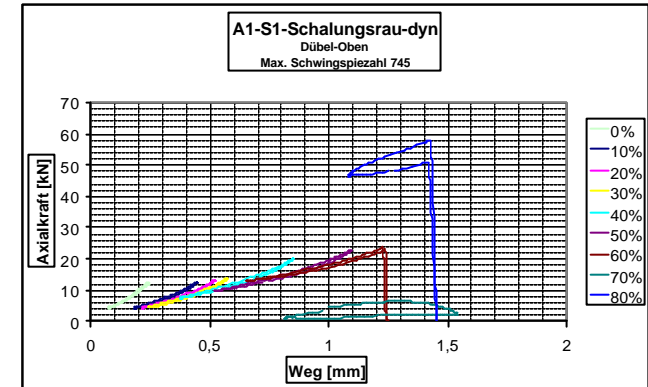


Abb. 7.5 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

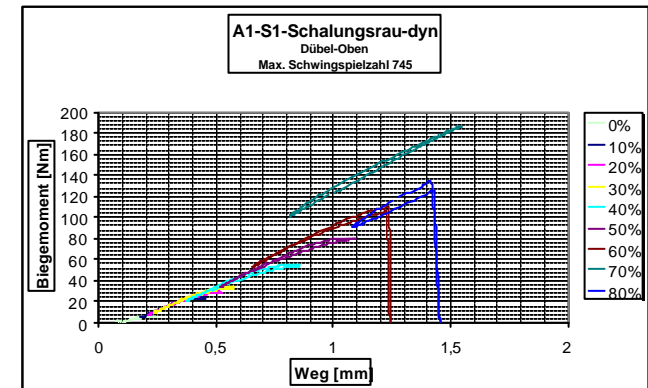


Abb. 7.6 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

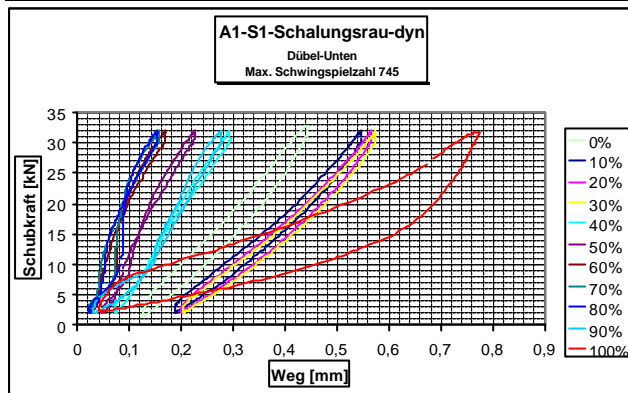


Abb. 7.7 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

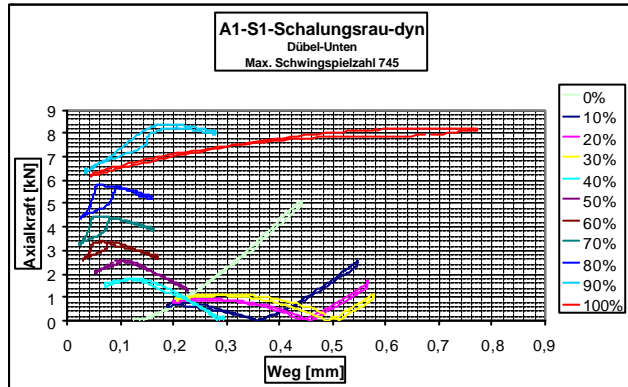


Abb. 7.8 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

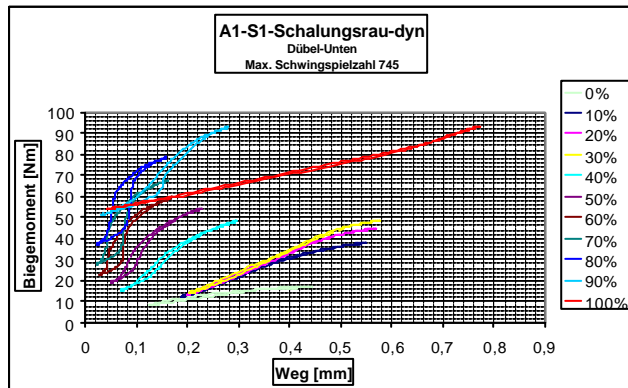


Abb. 7.9 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

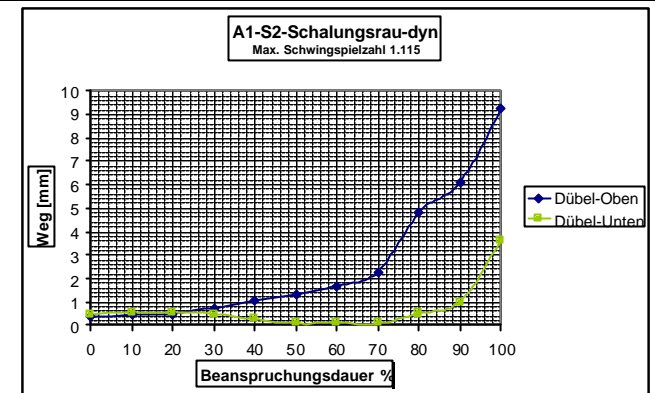


Abb. 7.10 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

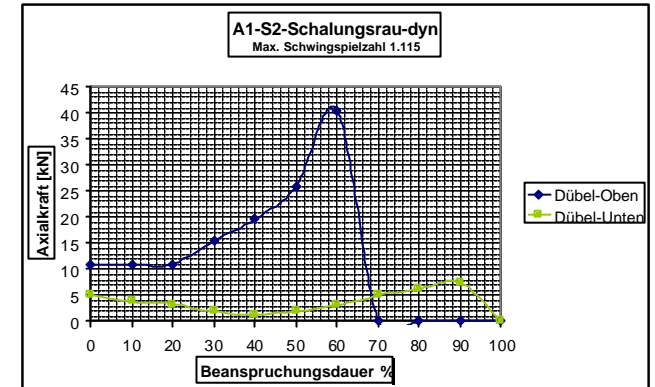


Abb. 7.11 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

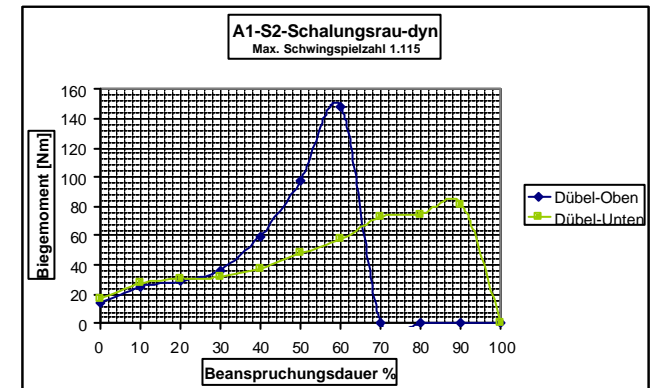


Abb. 7.12 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer



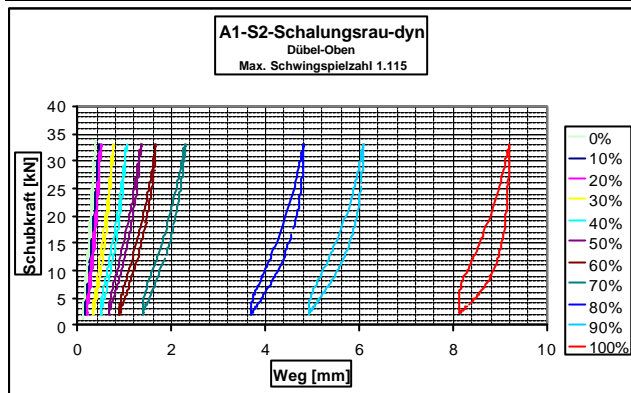


Abb. 7.13 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

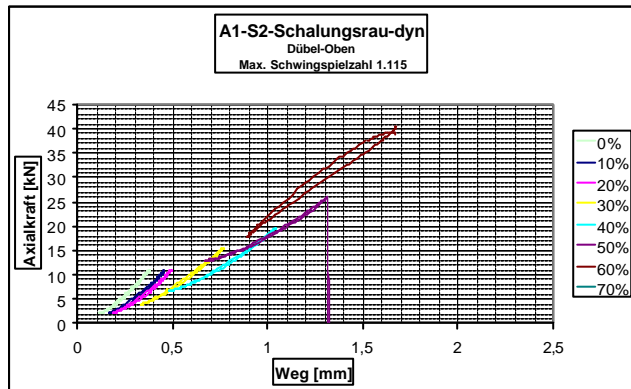


Abb. 7.14 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

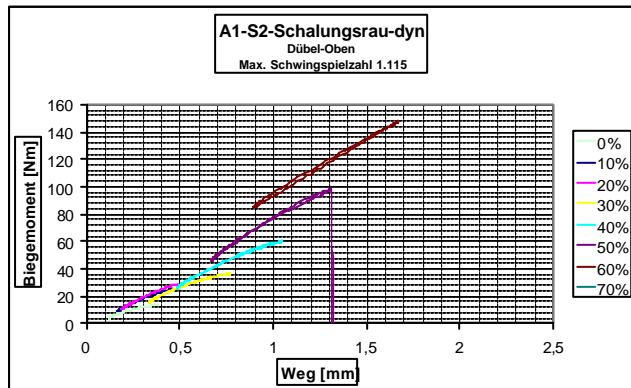


Abb. 7.15 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

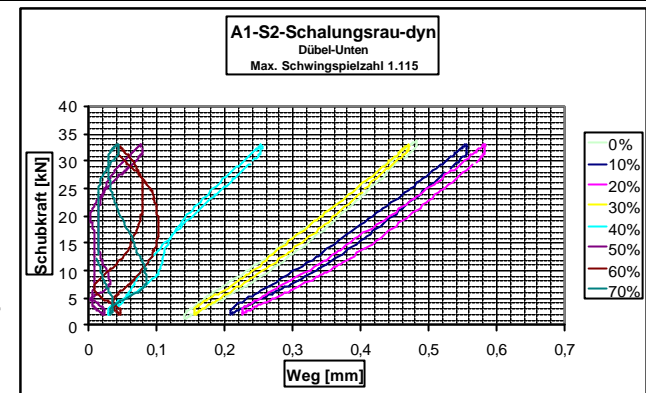


Abb. 7.16 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

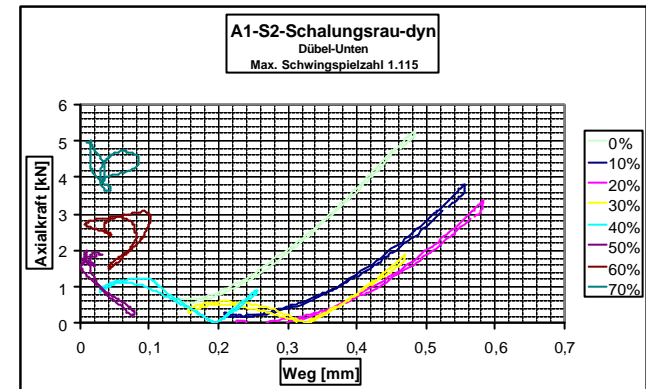


Abb. 7.17 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

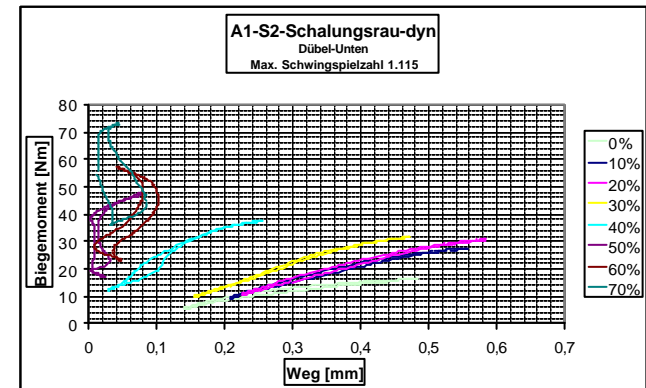


Abbildung 7.18 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

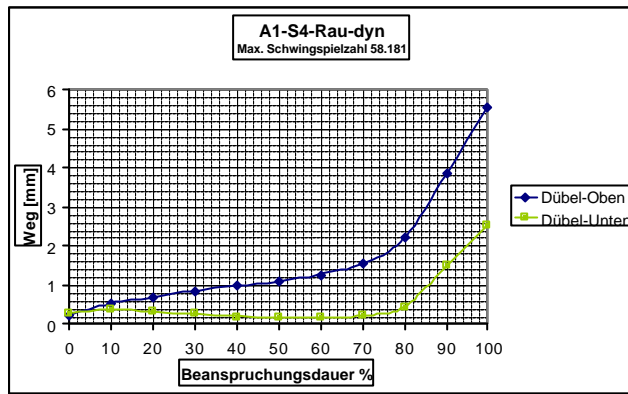


Abb. 7.19 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

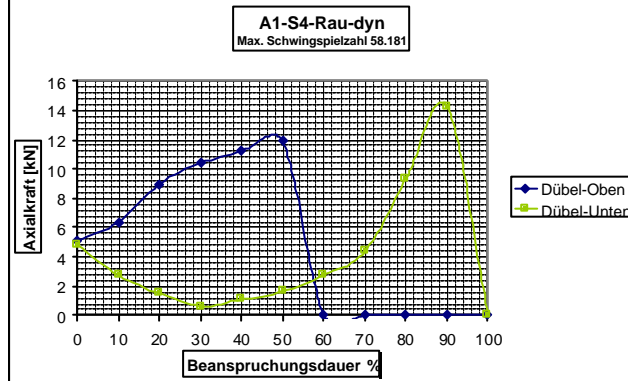


Abb. 7.20 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

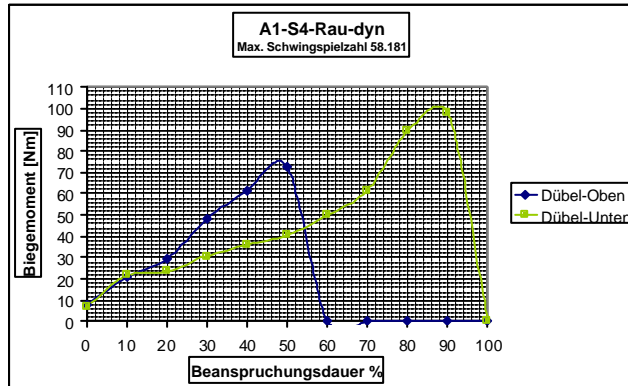


Abb. 7.21 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

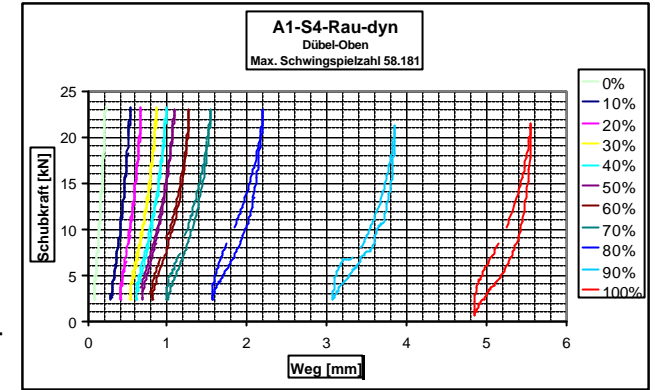


Abb. 7.22 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

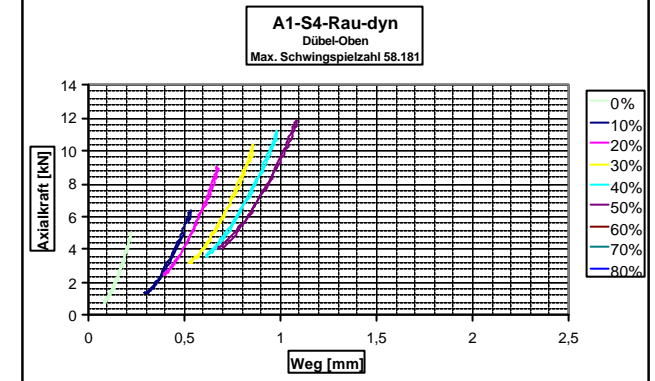


Abb. 7.23 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

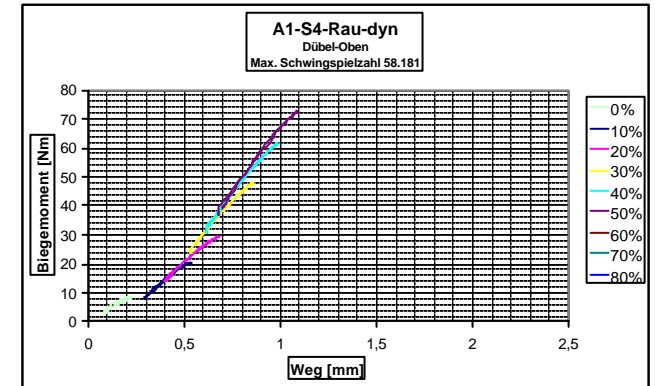


Abb. 7.24 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

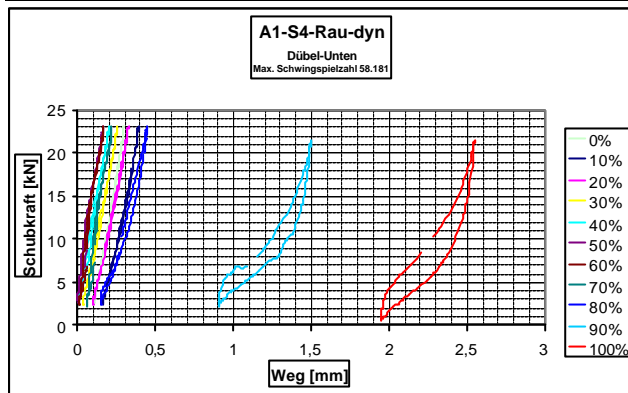


Abb. 7.25 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

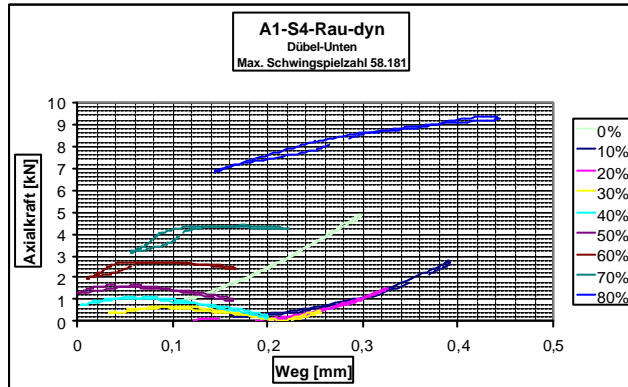


Abb. 7.26 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

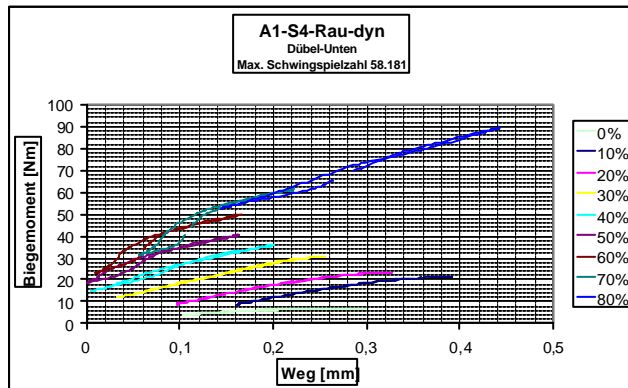


Abb. 7.27 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

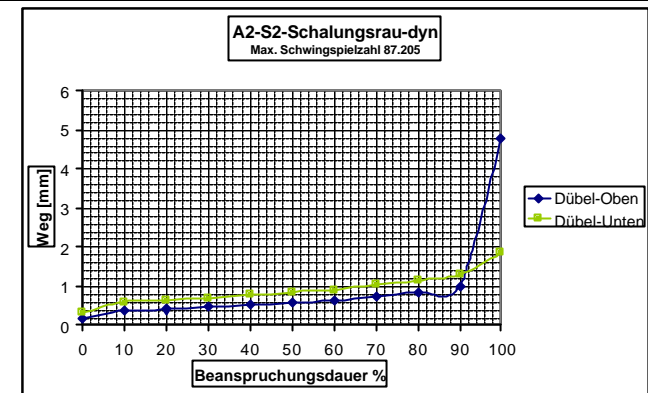


Abb. 7.28 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

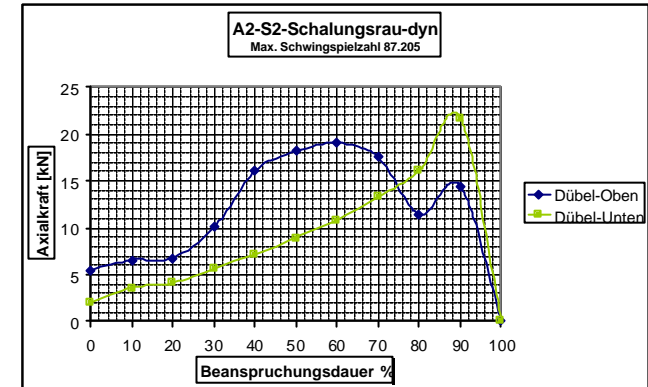


Abb. 7.29 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

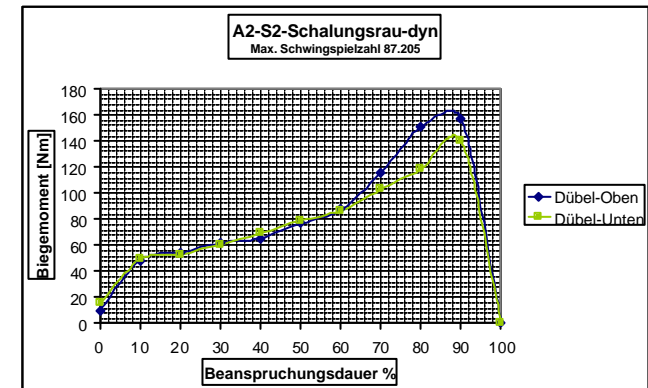


Abb. 7.30 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

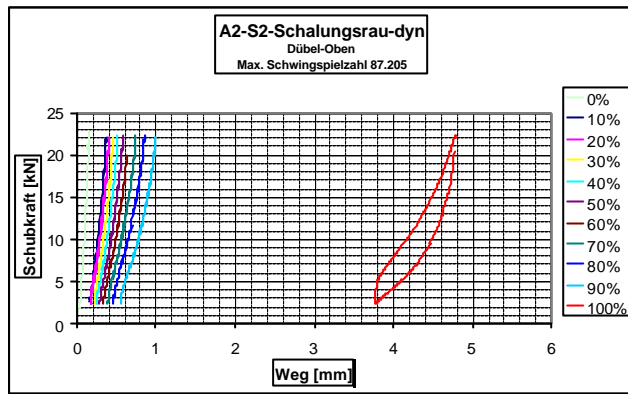


Abb. 7.31 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

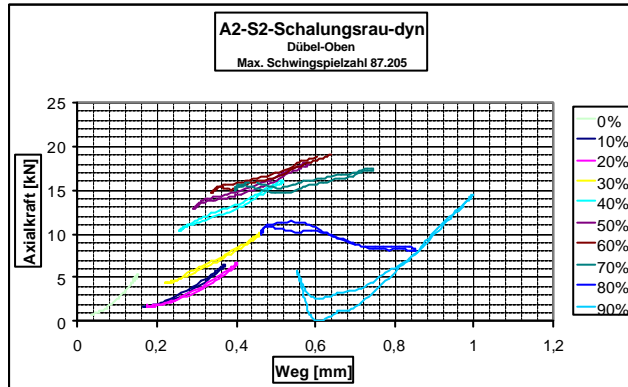


Abb. 7.32 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

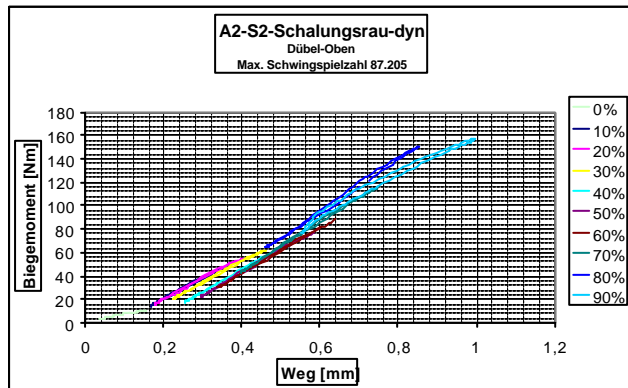


Abb. 7.33 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

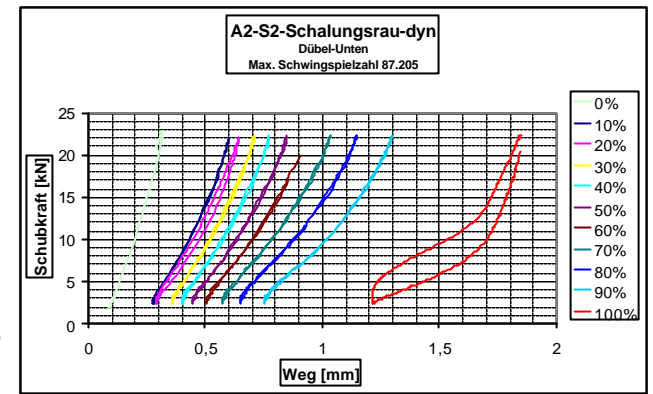


Abb. 7.34 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

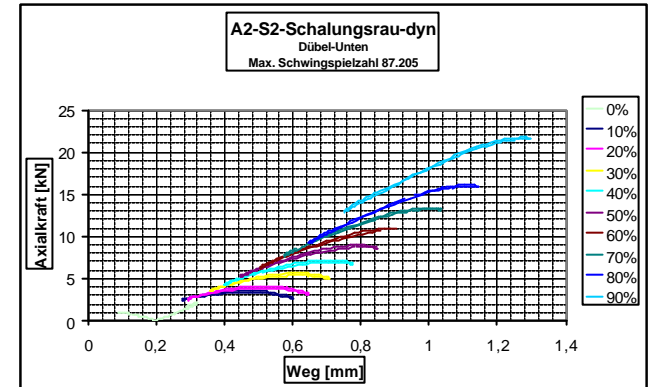


Abb. 7.35 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

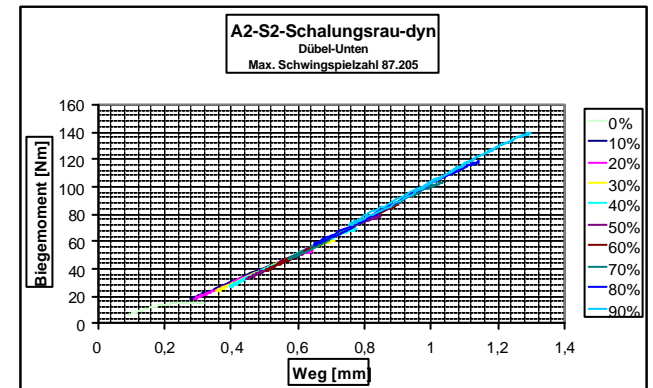


Abbildung 7.36 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

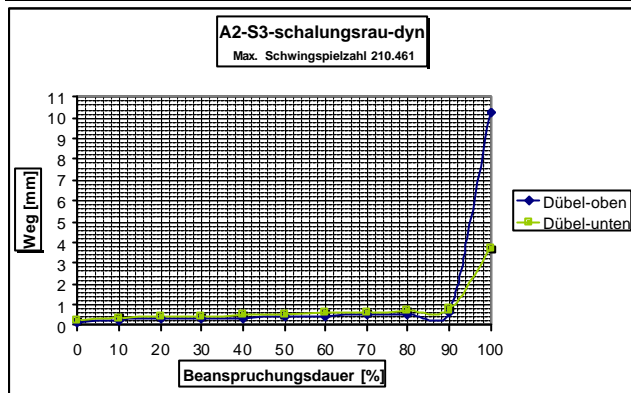


Abb. 7.37 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

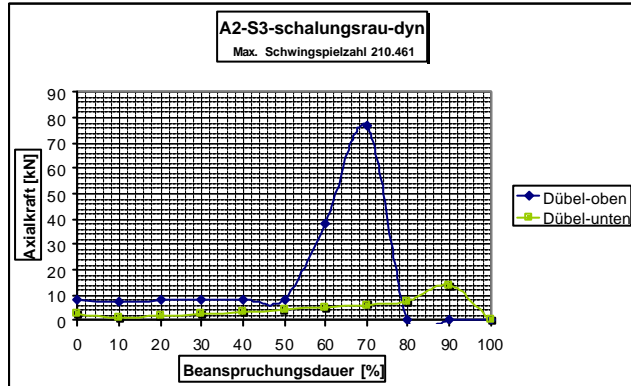


Abb. 7.38 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

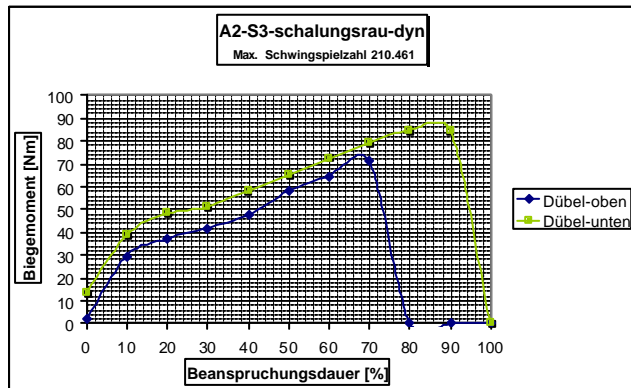


Abb. 7.39 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

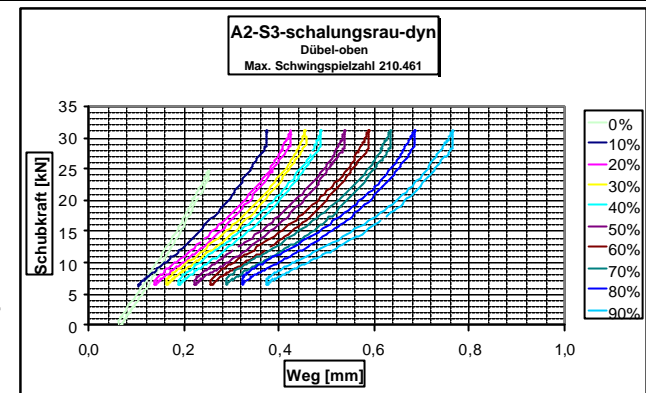


Abb. 7.40 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

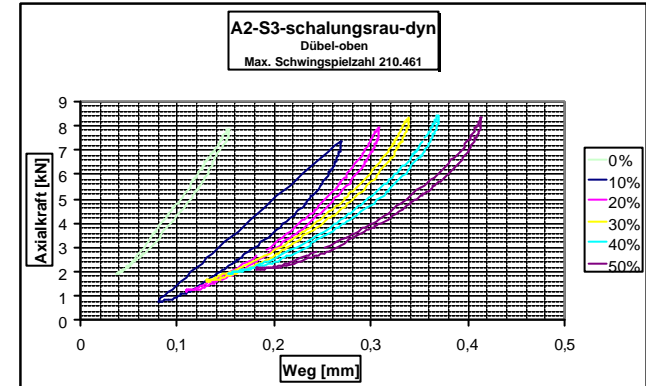


Abb. 7.41 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

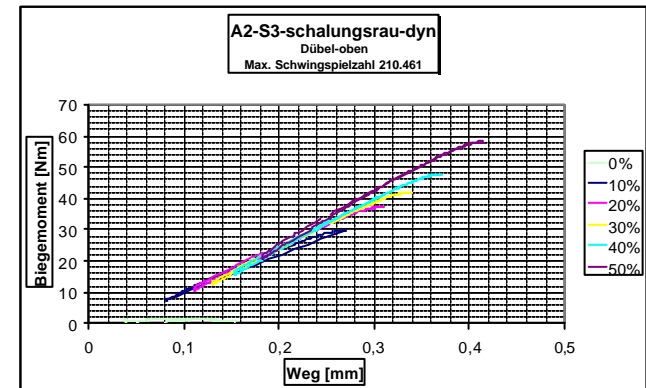


Abb. 7.42 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

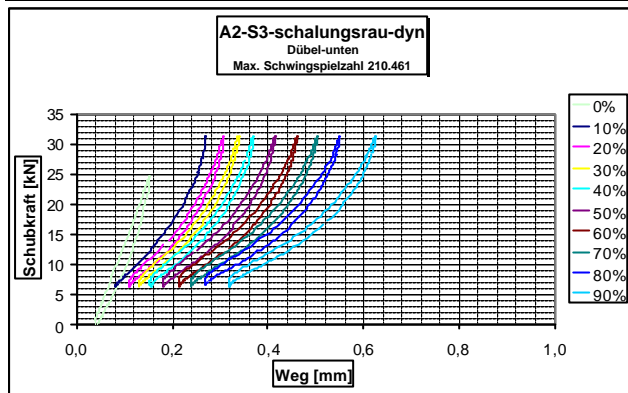


Abb. 7.43 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

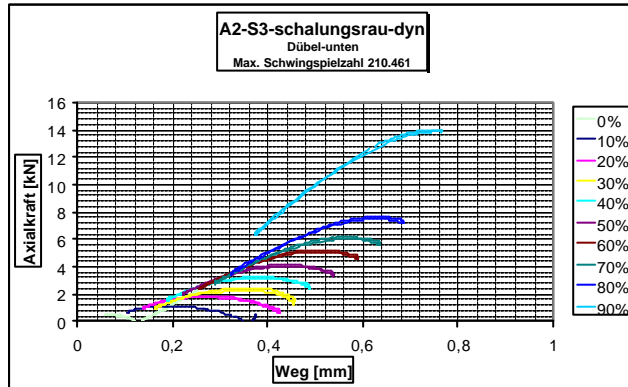


Abb. 7.44 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

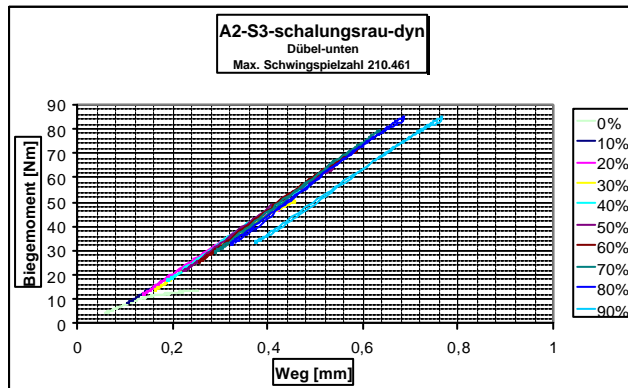


Abb. 7.45 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

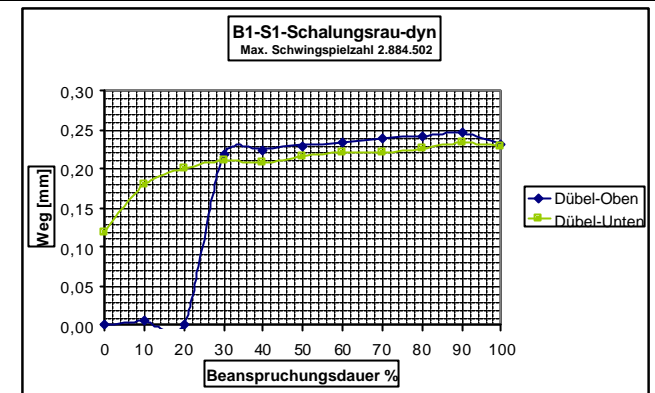


Abb. 7.46 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

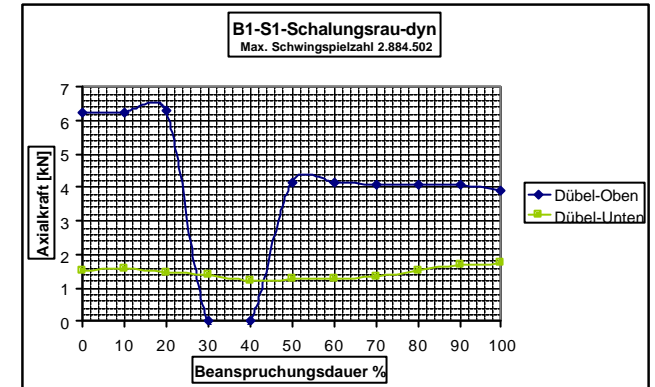


Abb. 7.47 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

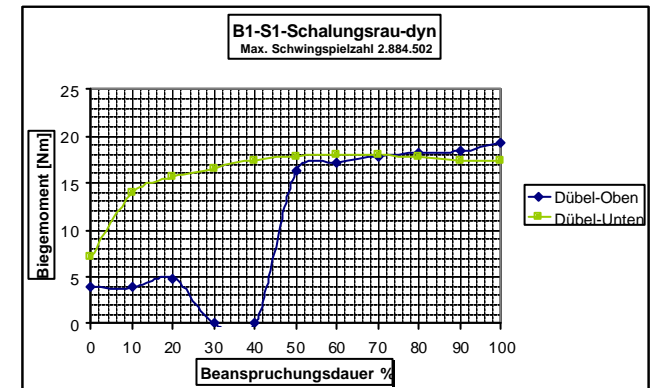


Abb. 7.48 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

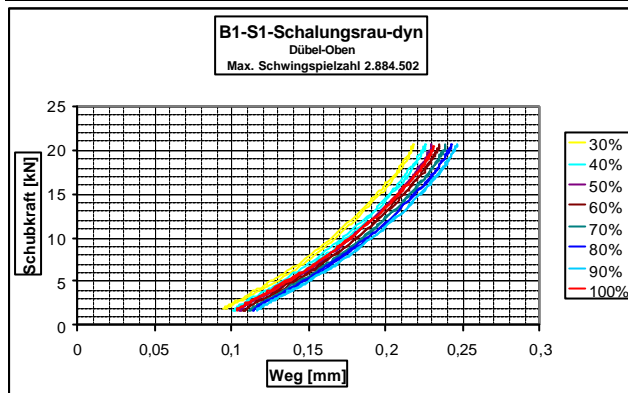


Abb. 7.49 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

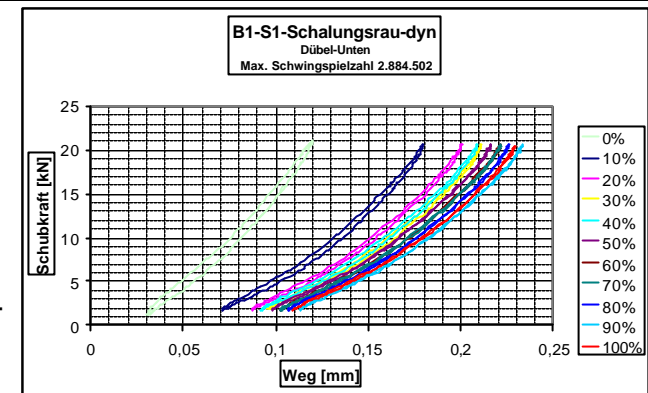


Abb. 7.52 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

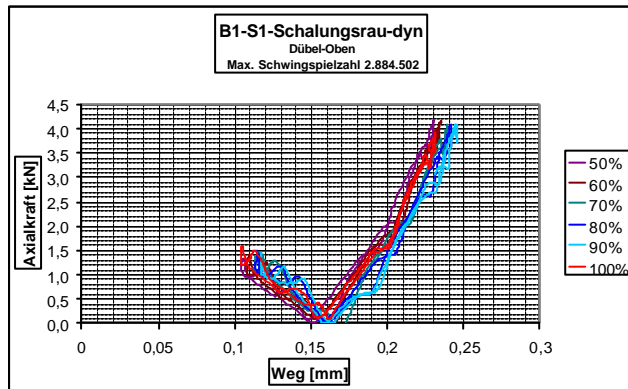


Abb. 7.50 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

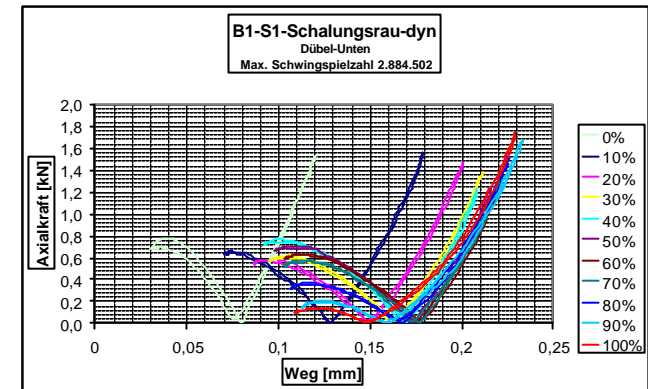


Abb. 7.53 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

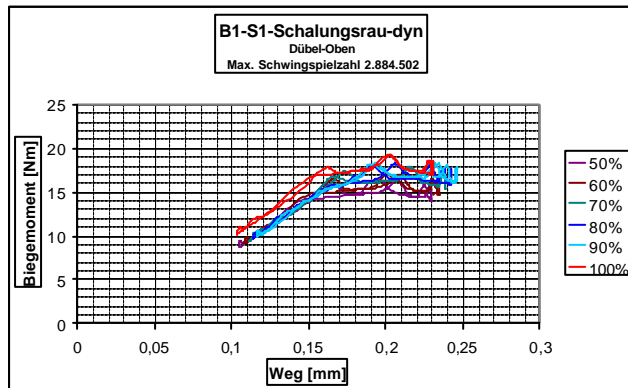


Abb. 7.51 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

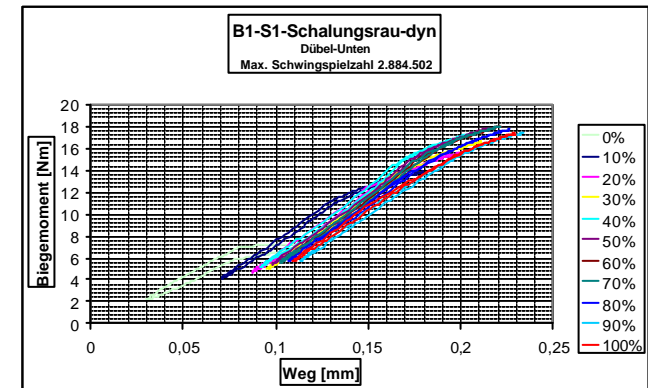


Abb. 7.54 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

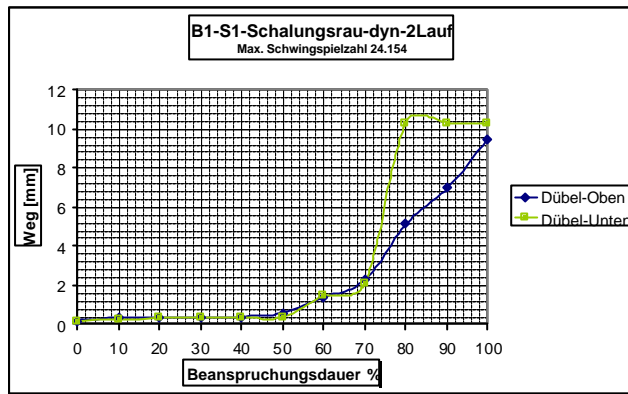


Abb. 7.55 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

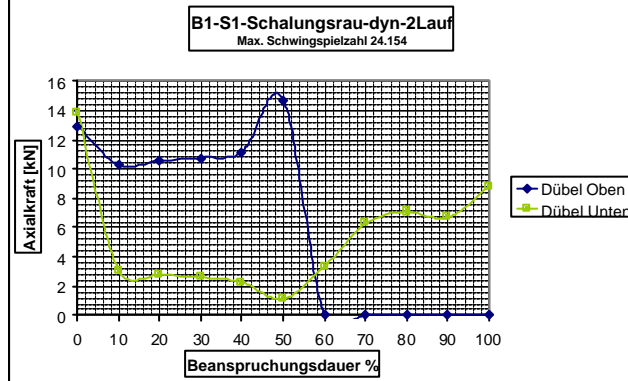


Abb. 7.56 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

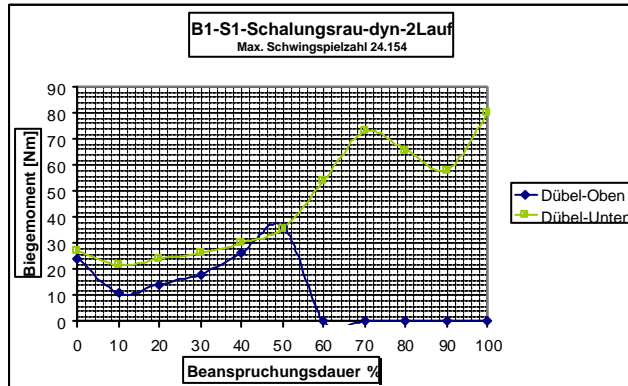


Abb. 7.57 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

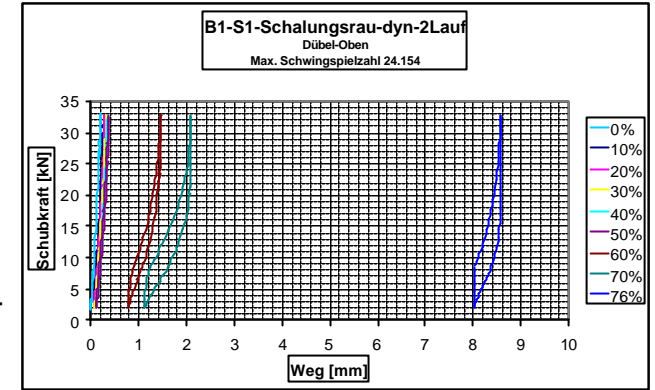


Abb. 7.58 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

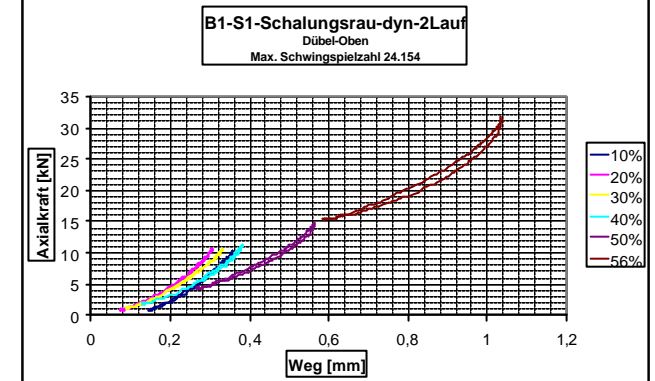


Abb. 7.59 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

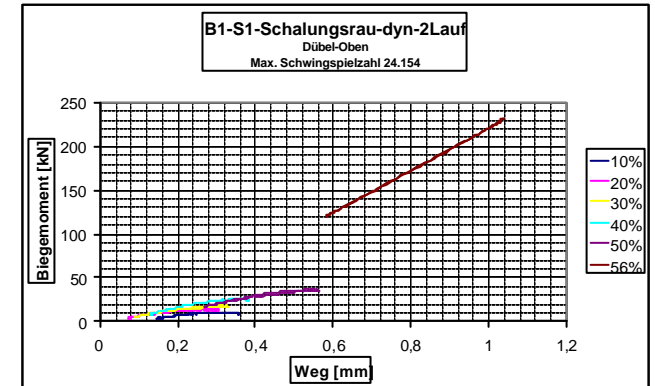


Abb. 7.60 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel



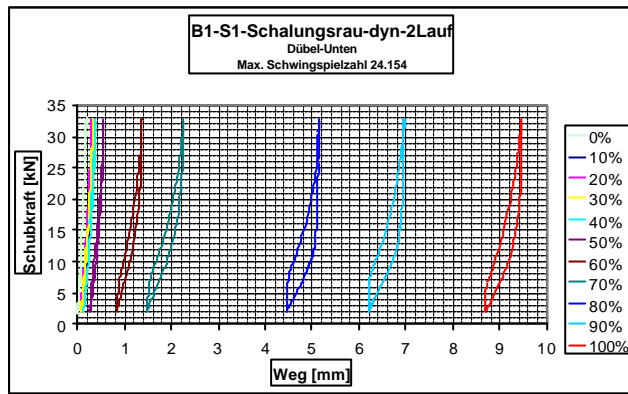


Abb. 7.61 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

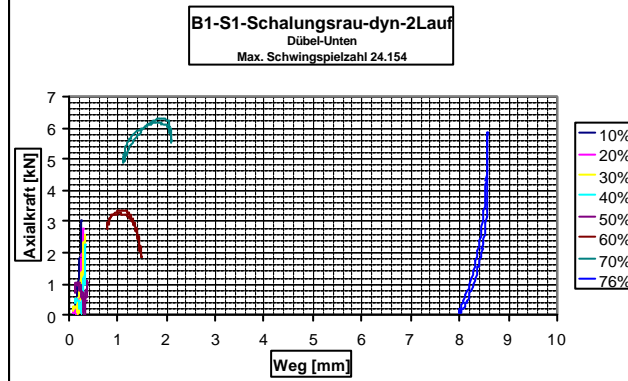


Abb. 7.62 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

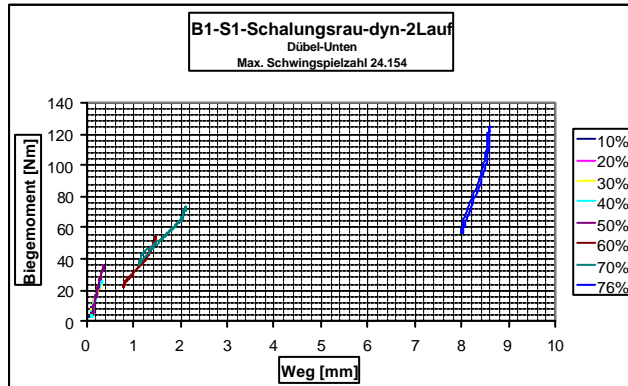


Abb. 7.63 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

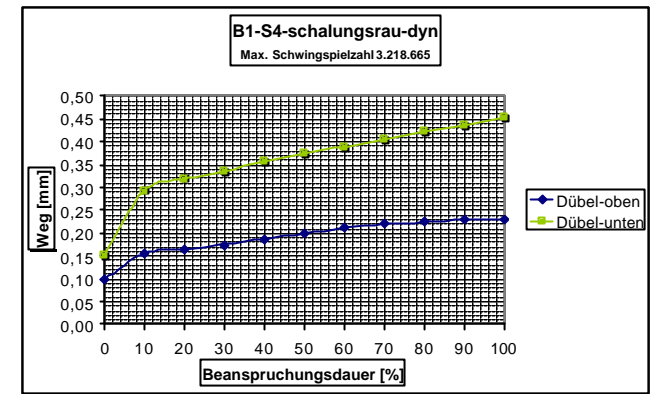


Abb. 7.64 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

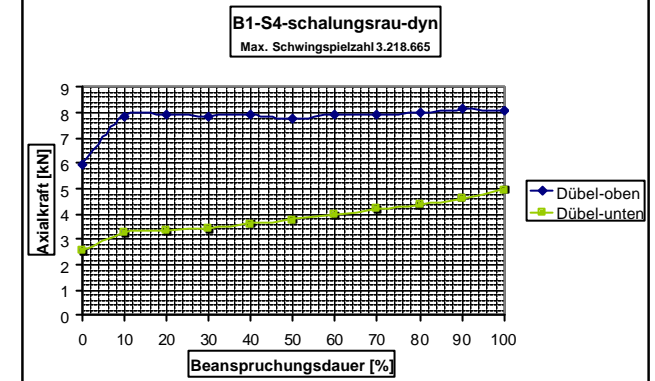


Abb. 7.65 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

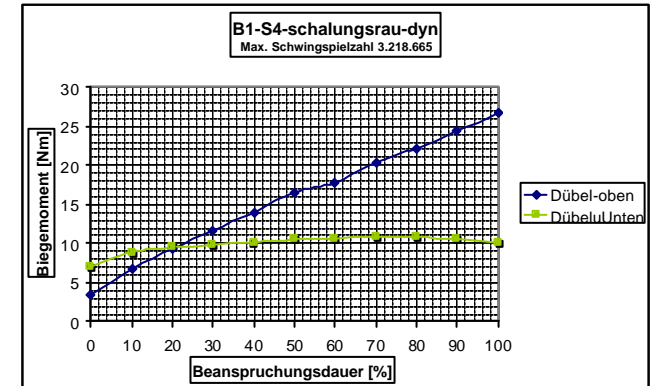


Abb. 7.66 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

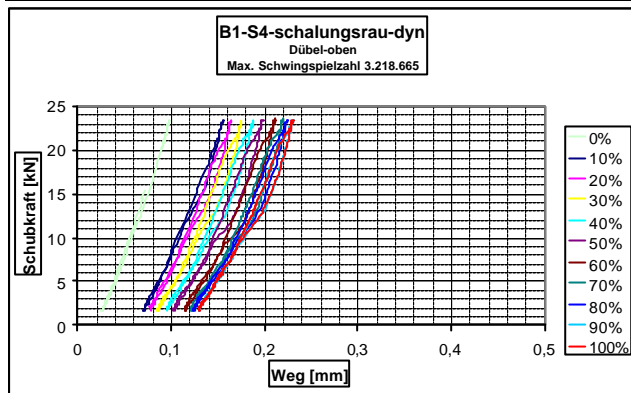


Abb. 7.67 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

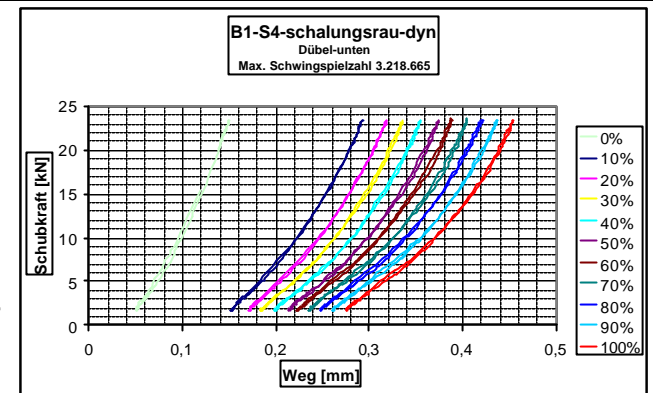


Abb. 7.70 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

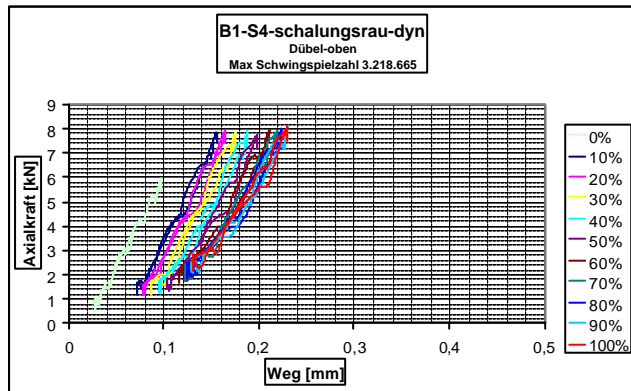


Abb. 7.68 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

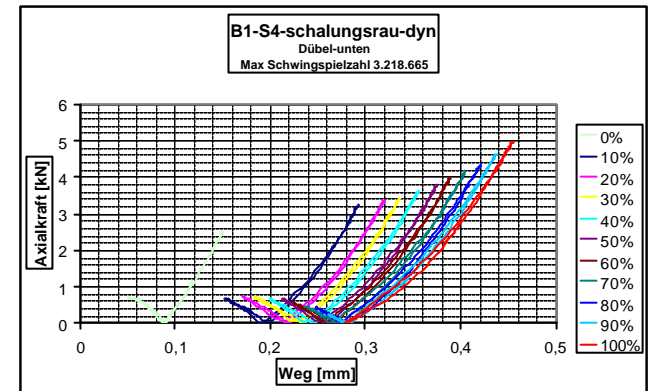


Abb. 7.71 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

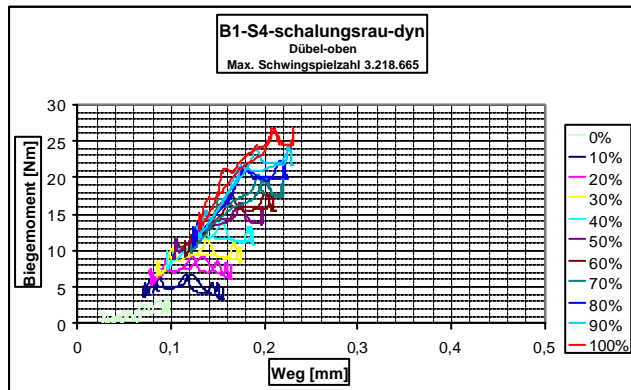


Abb. 7.69 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

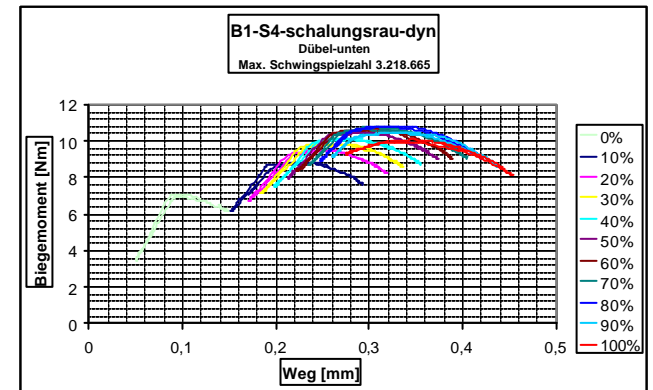


Abb. 7.72 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

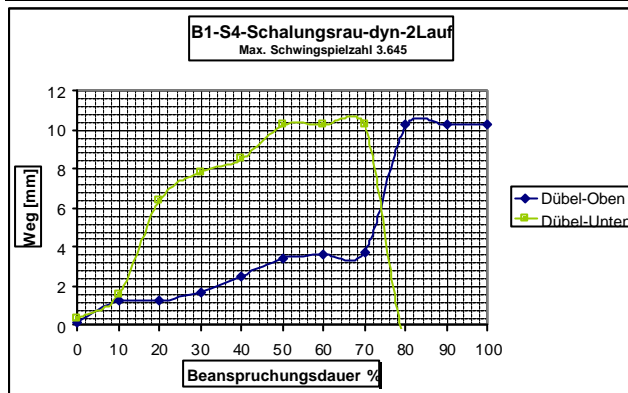


Abb. 7.73 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

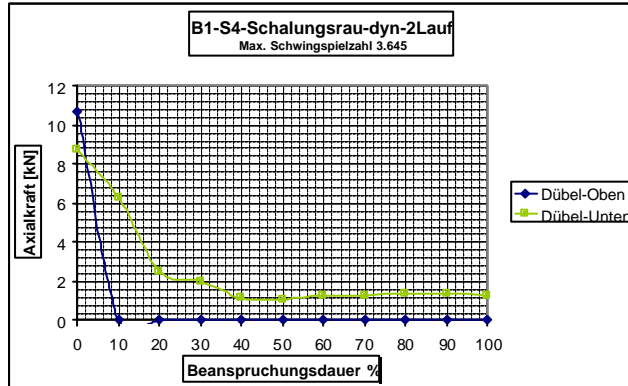


Abb. 7.74 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

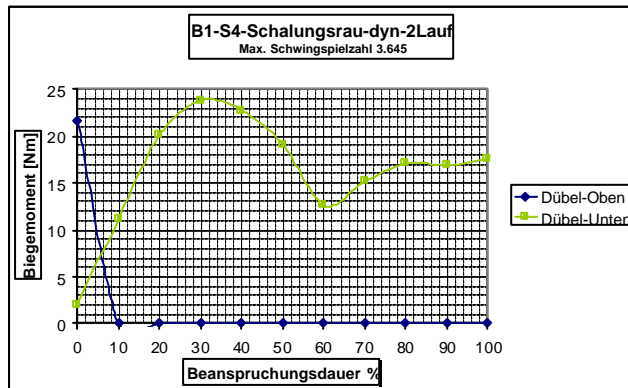


Abb. 7.75 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

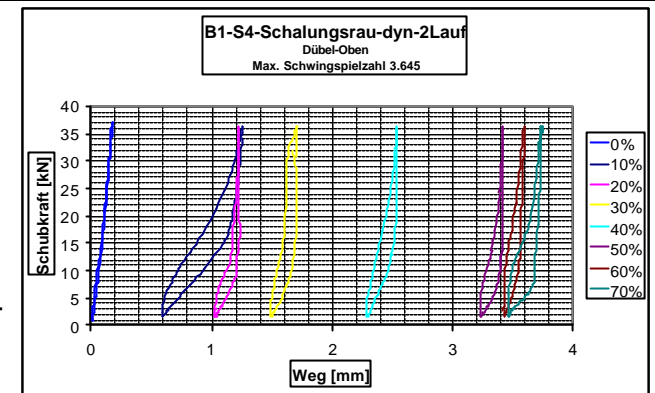


Abb. 7.76 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

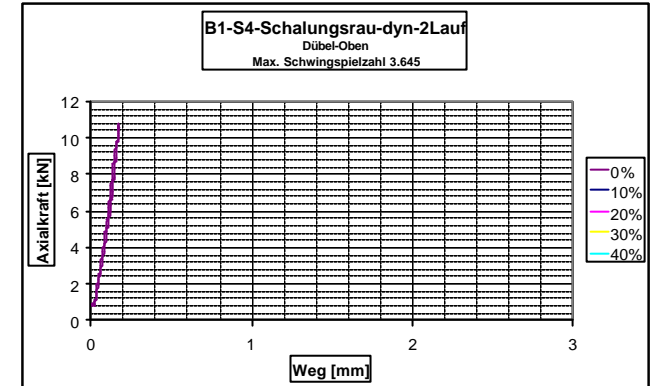


Abb. 7.77 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

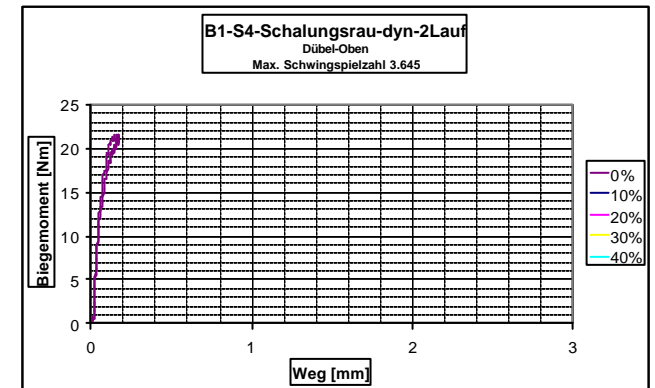


Abb. 7.78 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

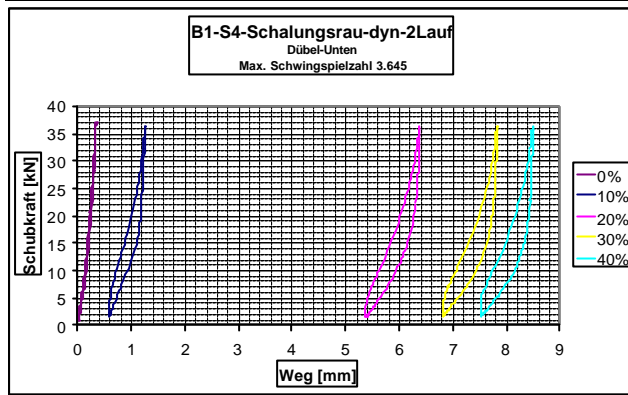


Abb. 7.79 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

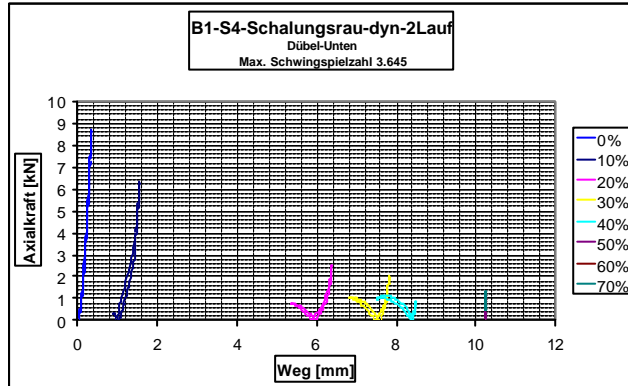


Abb. 7.80 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

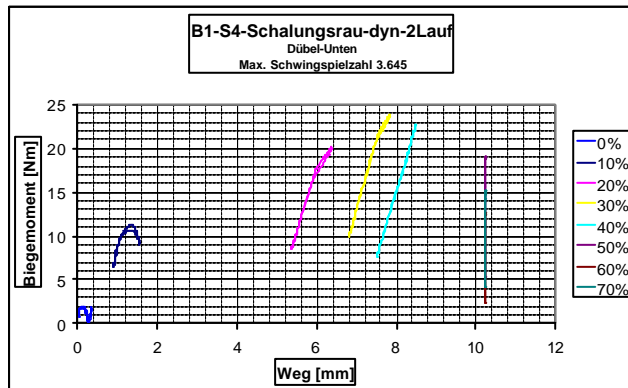


Abb. 7.81 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

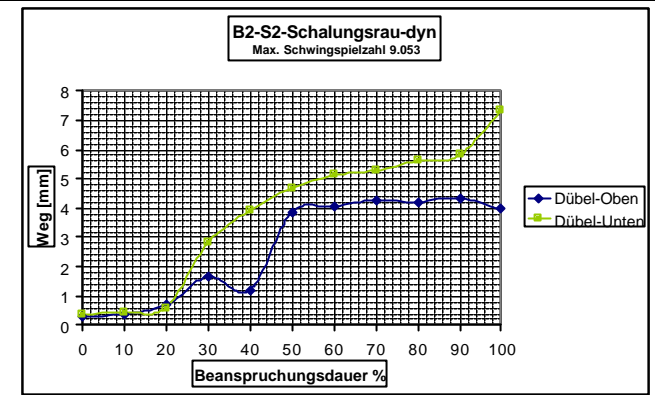


Abb. 7.82 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

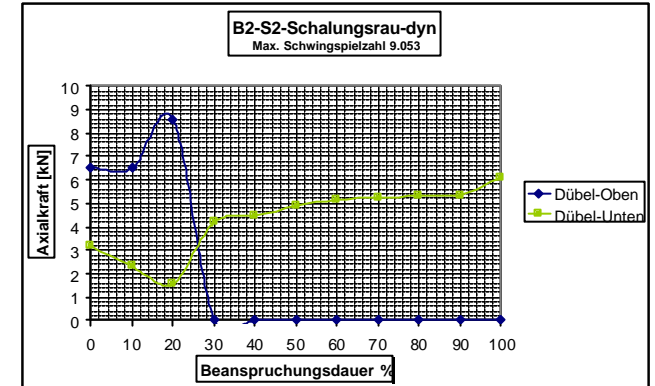


Abb. 7.83 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

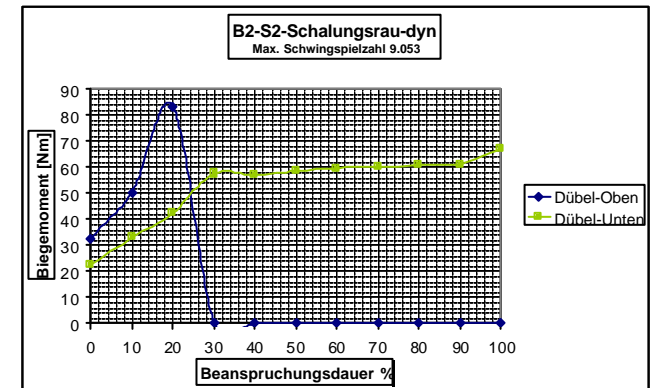


Abb. 7.84 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

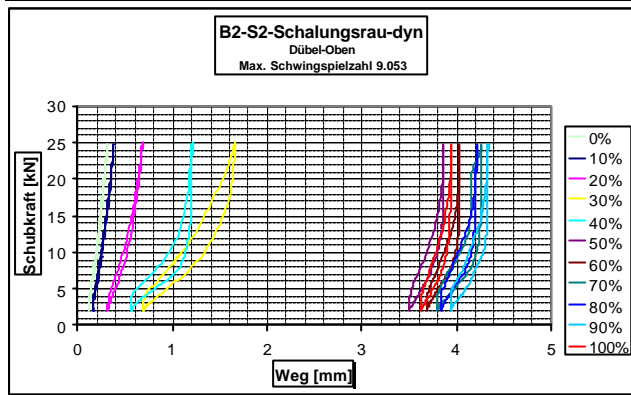


Abb. 7.85 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

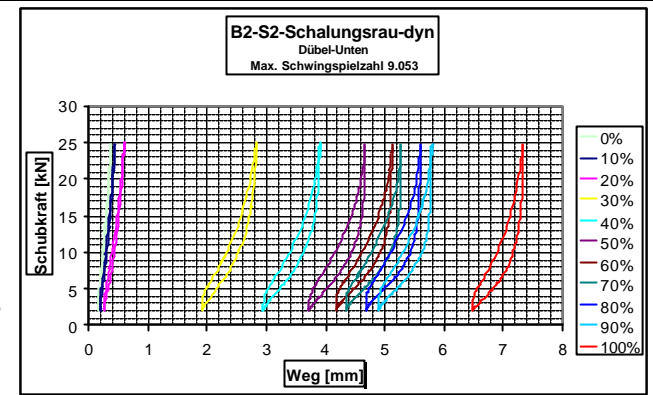


Abb. 7.88 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

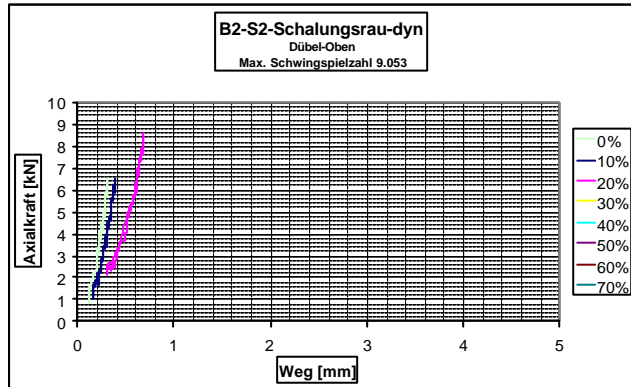


Abb. 7.86 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

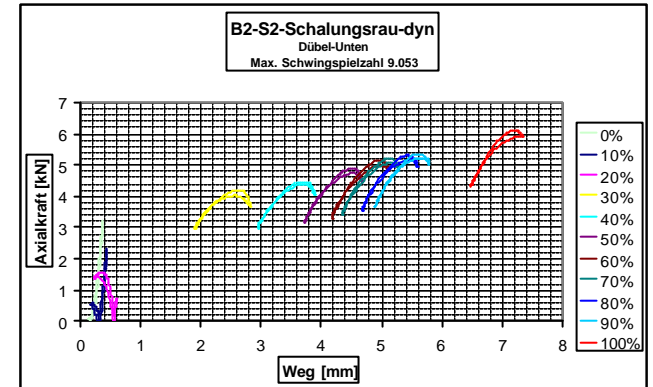


Abb. 7.89 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

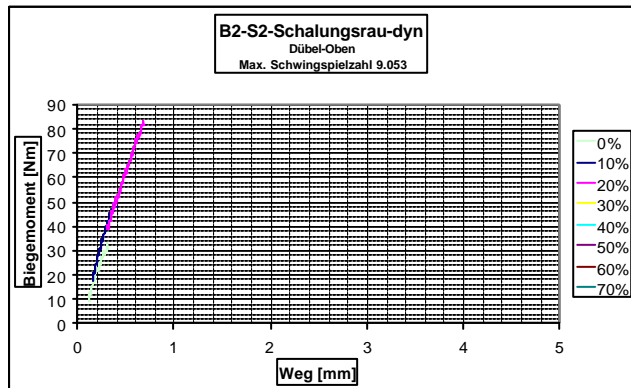


Abb. 7.87 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

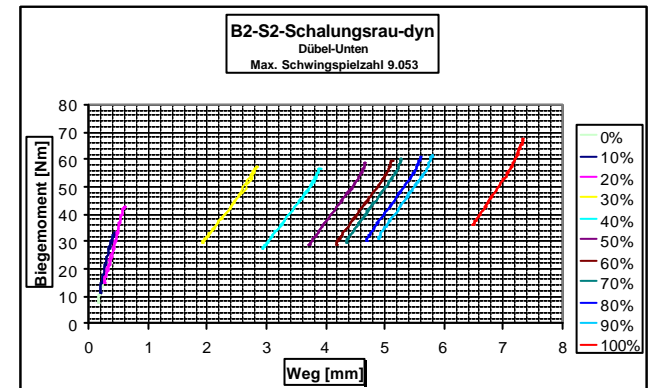


Abb. 7.90 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

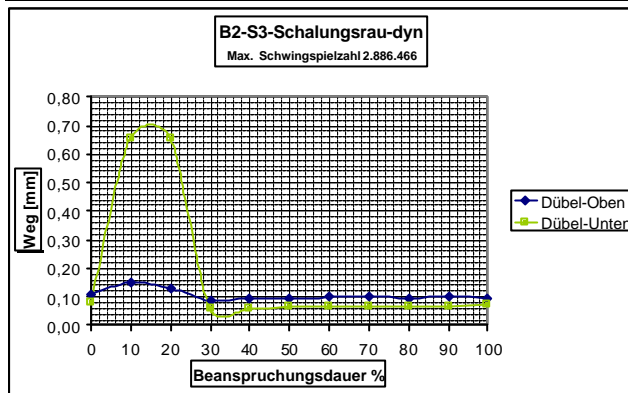


Abb. 7.91 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

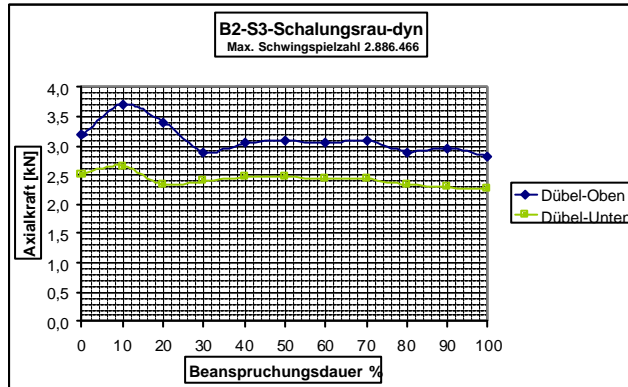


Abb. 7.92 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

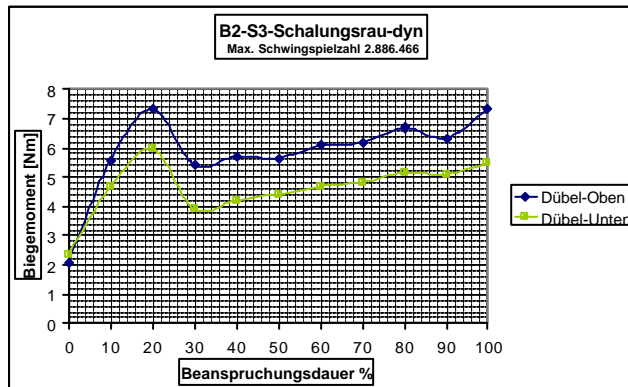


Abb. 7.93 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

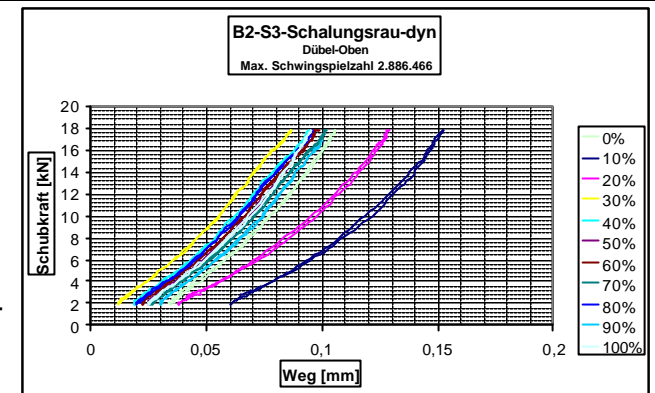


Abb. 7.94 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

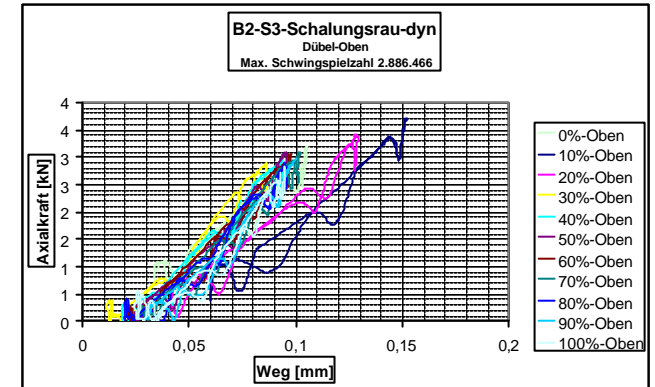


Abb. 7.95 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

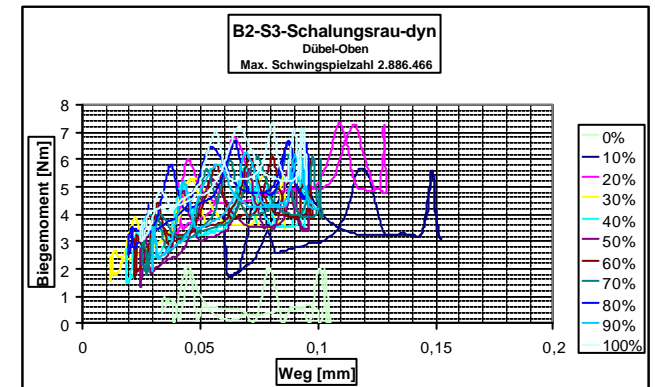


Abb. 7.96 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

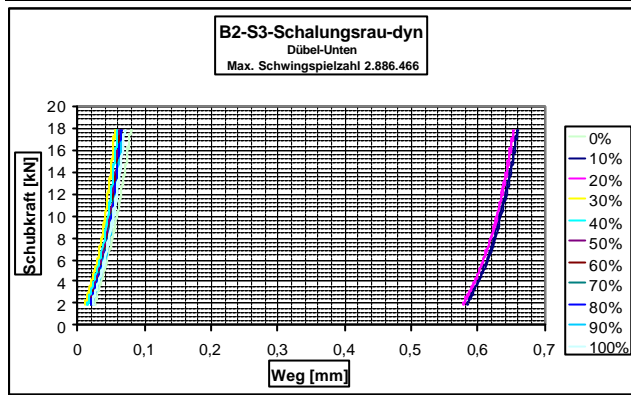


Abb. 7.97 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

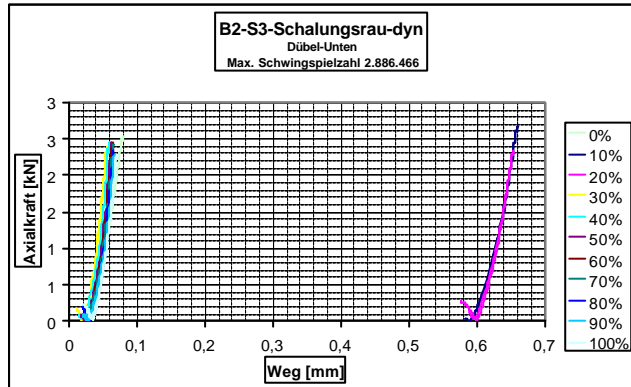


Abb. 7.98 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

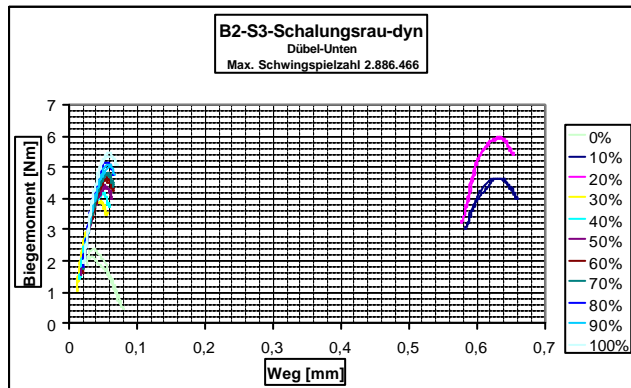


Abb. 7.99 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

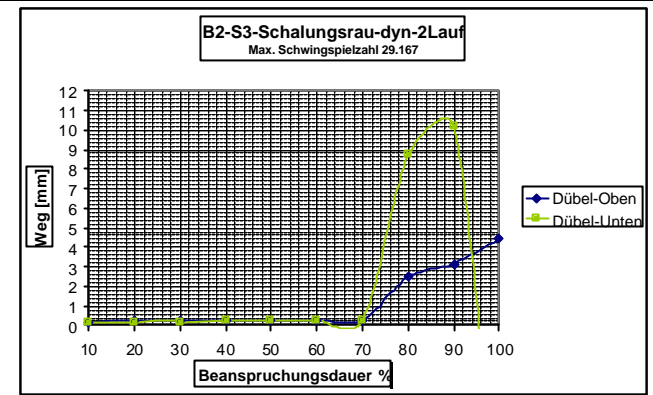


Abb. 7.100 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

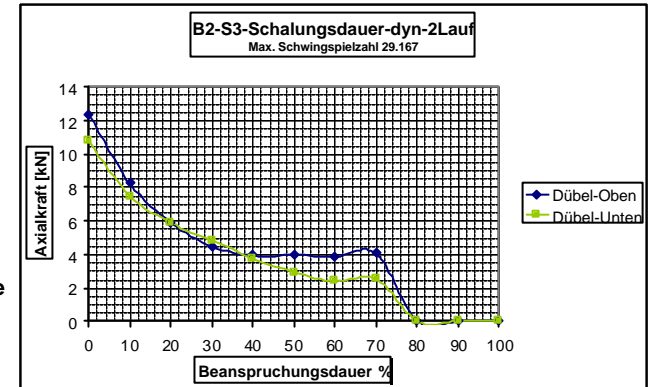


Abb. 7.101 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

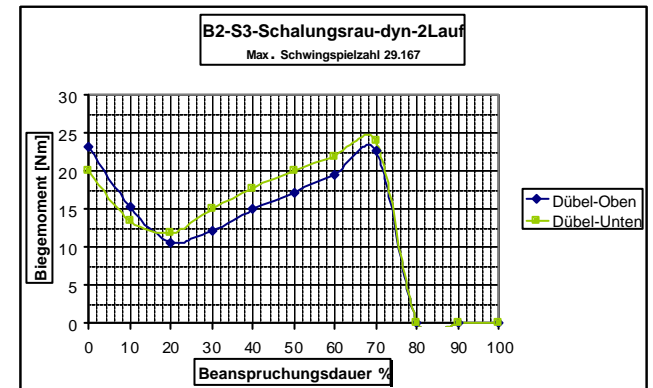


Abb. 7.102 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

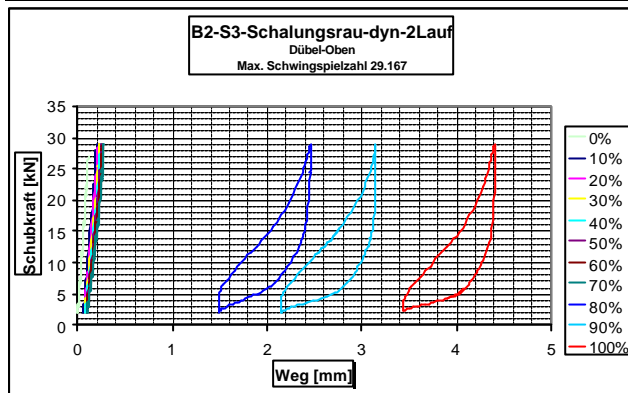


Abb. 7.103 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

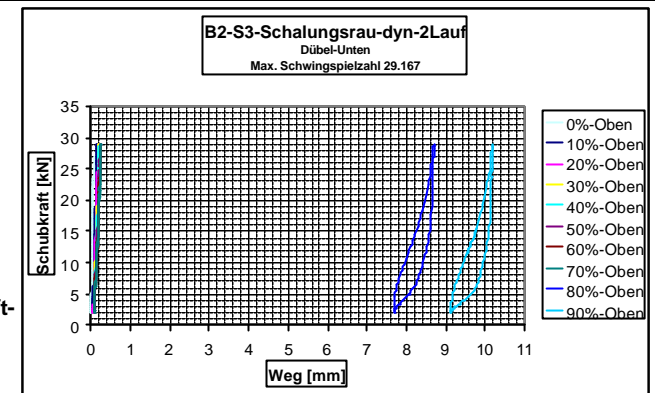


Abb. 7.106 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

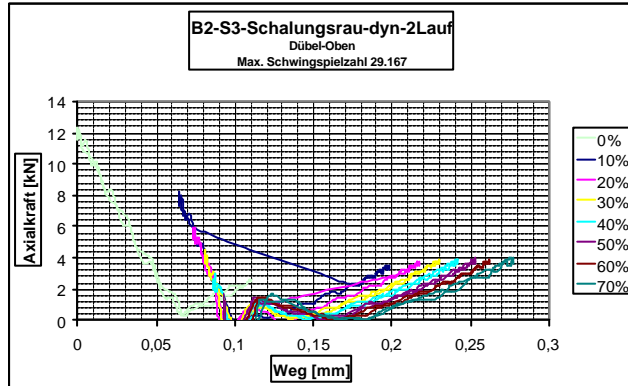


Abb. 7.104 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

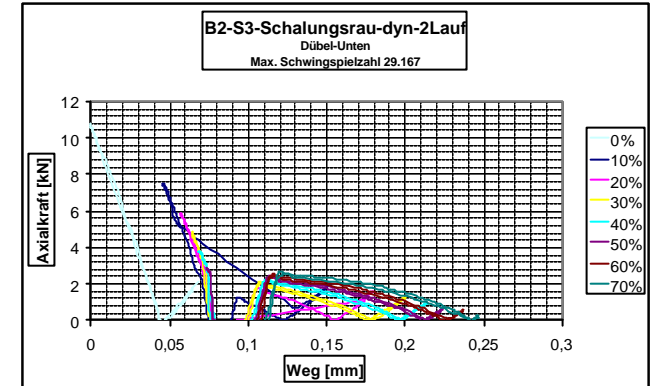


Abb. 7.107 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

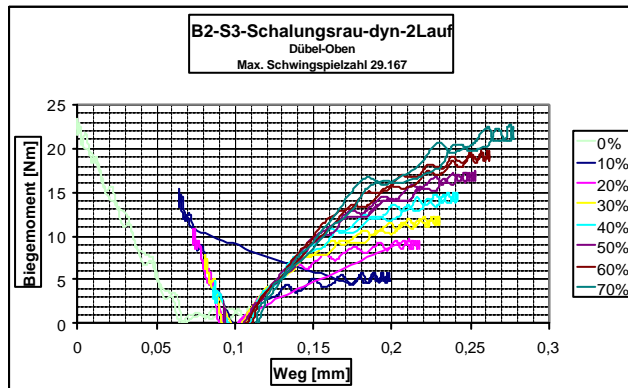


Abb. 7.105 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

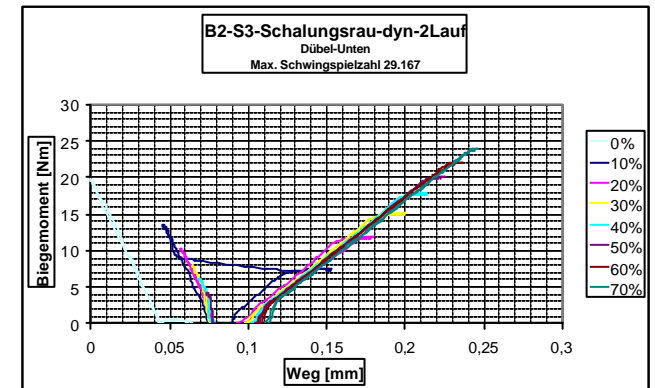


Abb. 7.108 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel



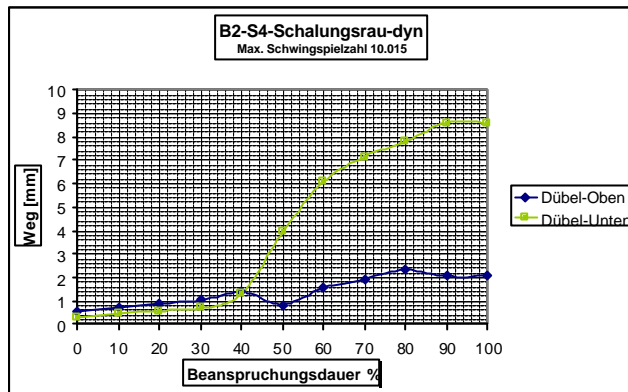


Abb. 7.109 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

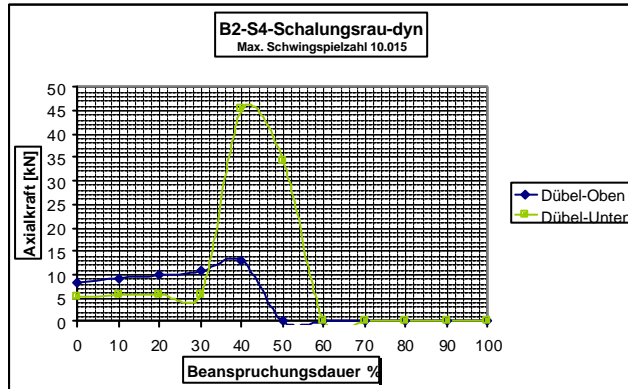


Abb. 7.110 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

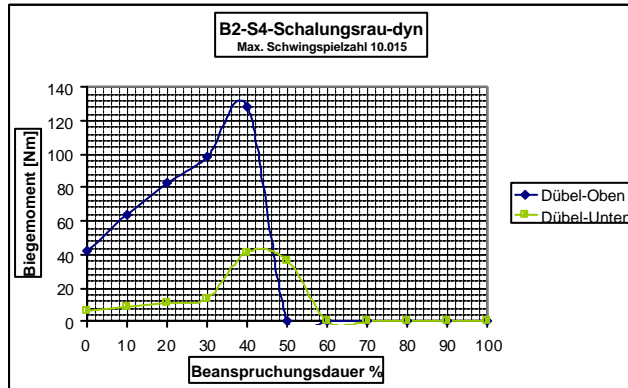


Abb. 7.111 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

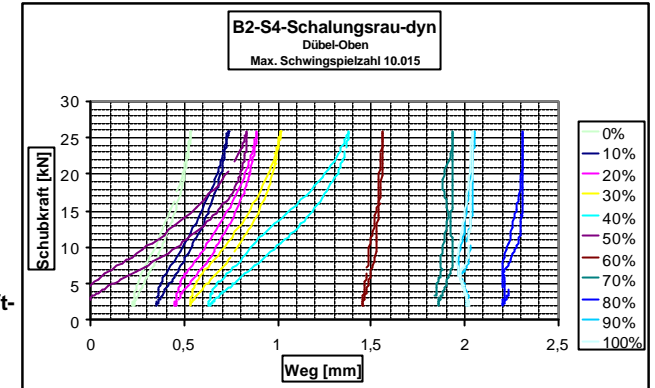


Abb. 7.112 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

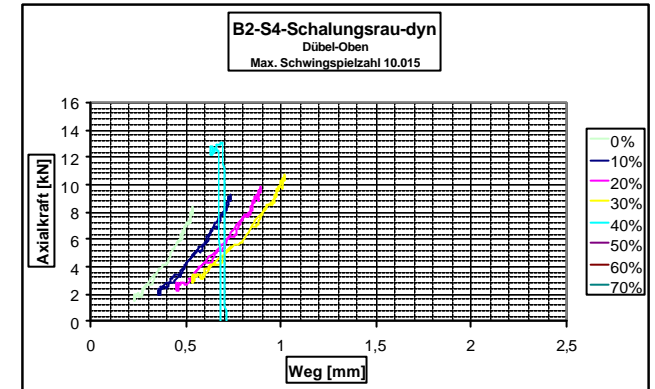


Abb. 7.113 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

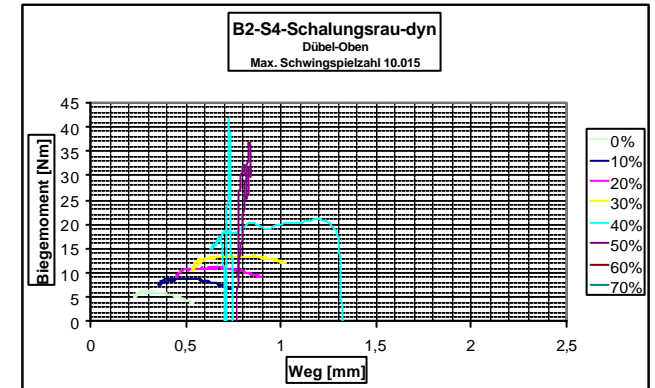


Abb. 7.114 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

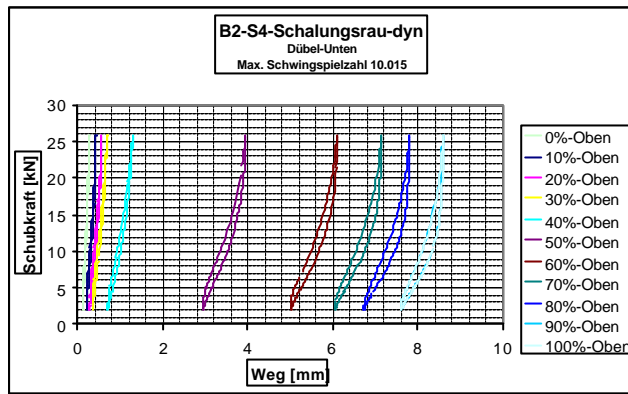


Abb. 7.115 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

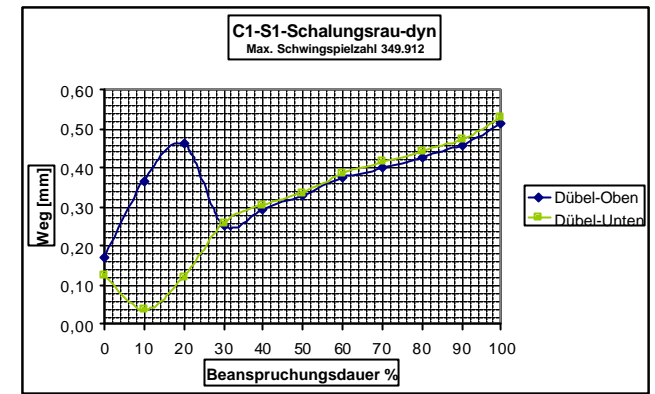


Abb. 7.118 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

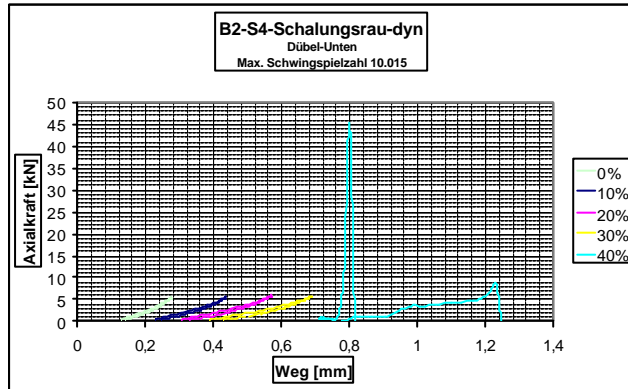


Abb. 7.116 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

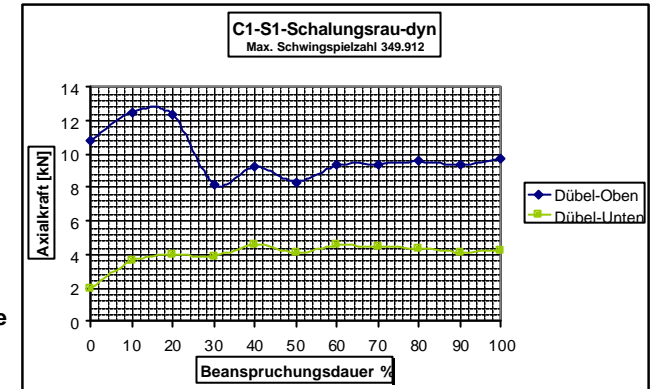


Abb. 7.119 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

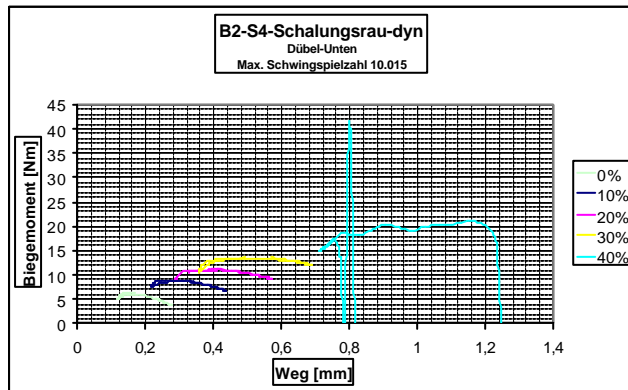


Abb. 7.117 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

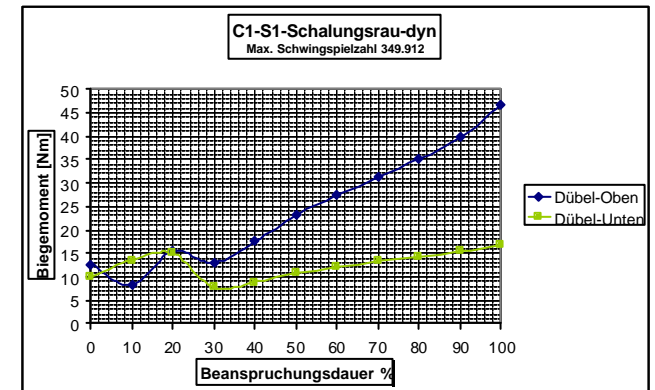


Abb. 7.120 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

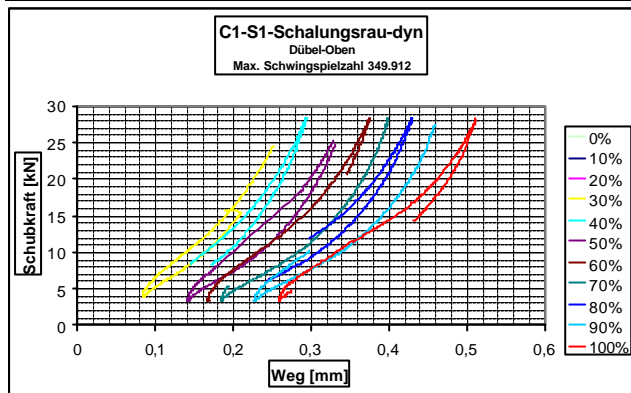


Abb. 7.121 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

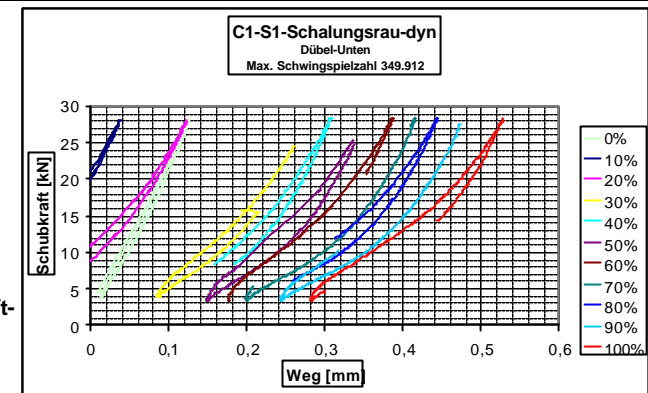


Abb. 7.124 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

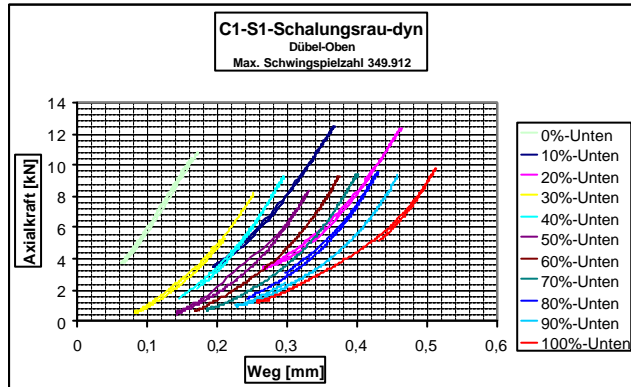


Abb. 7.122 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

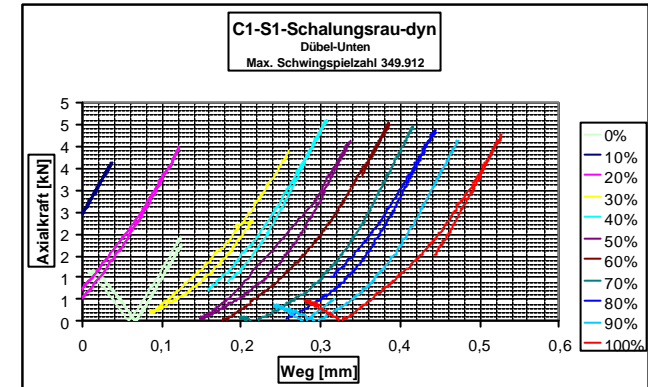


Abb. 7.125 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

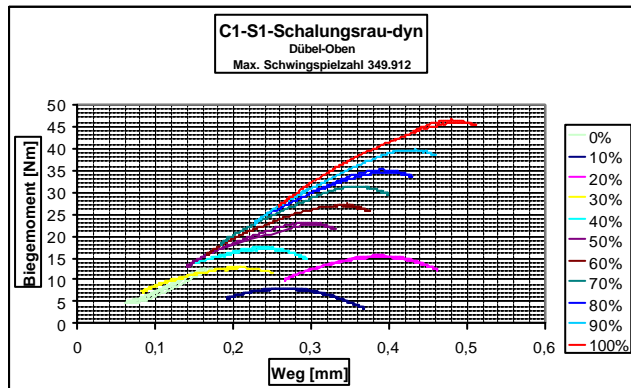


Abb. 7.123 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

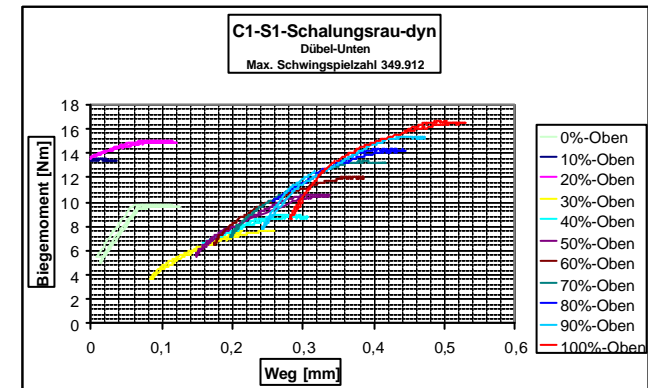


Abb. 7.126 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

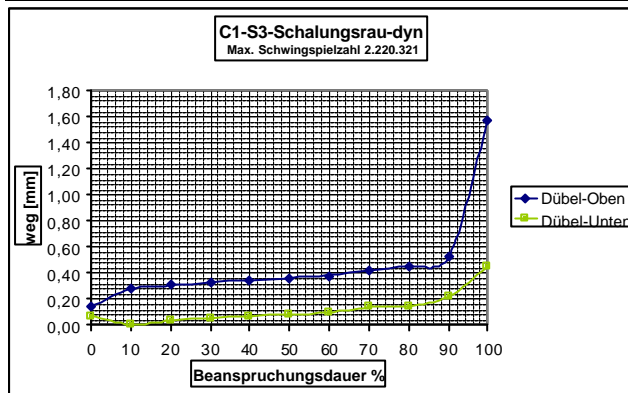


Abb. 7.127 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

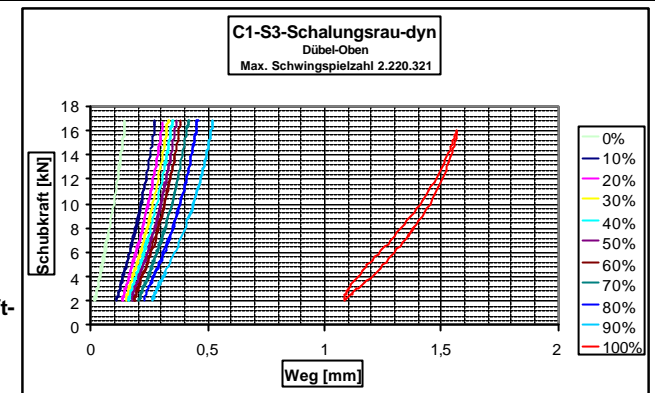


Abb. 7.130 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

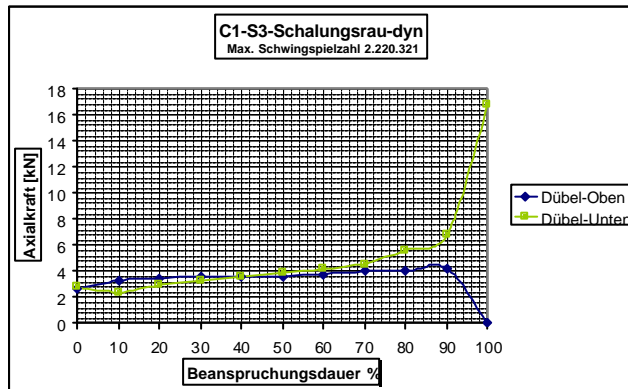


Abb. 7.128 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

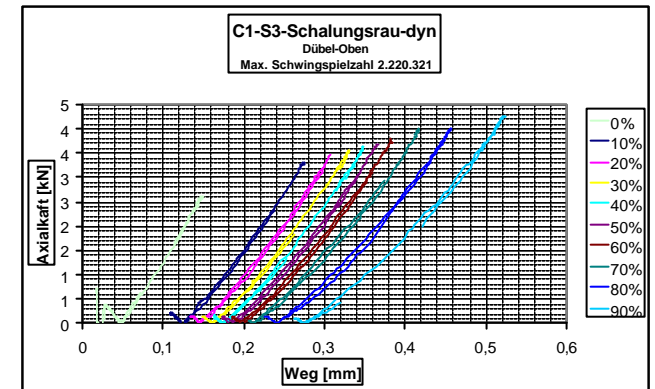


Abb. 7.131 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

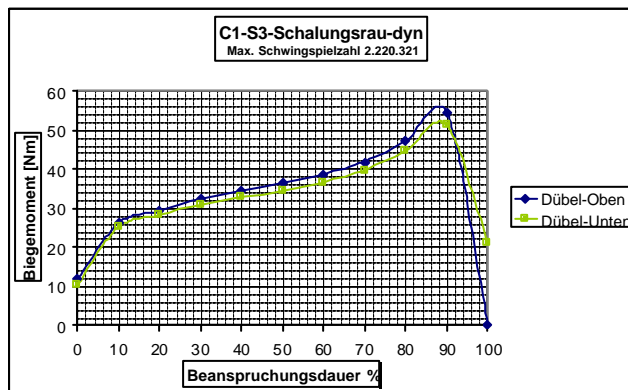


Abb. 7.129 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

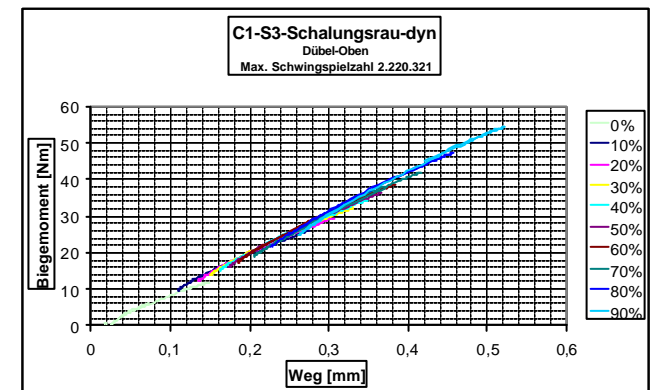


Abb. 7.132 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

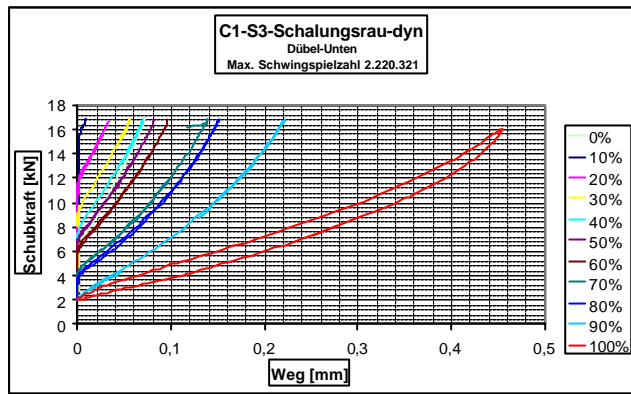


Abb. 7.133 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

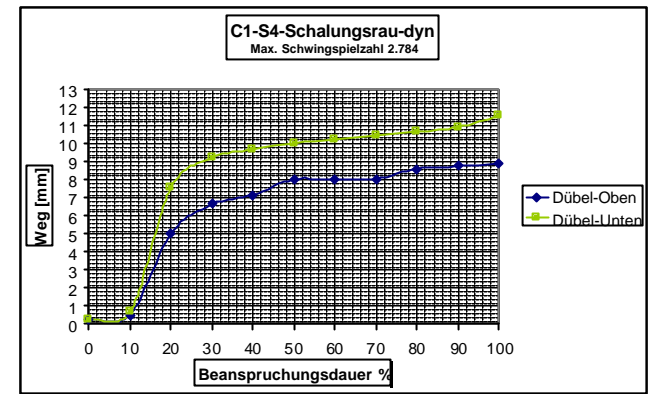


Abb. 7.136 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

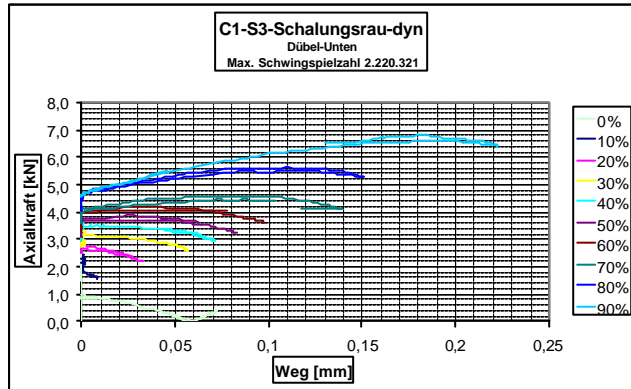


Abb. 7.134 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

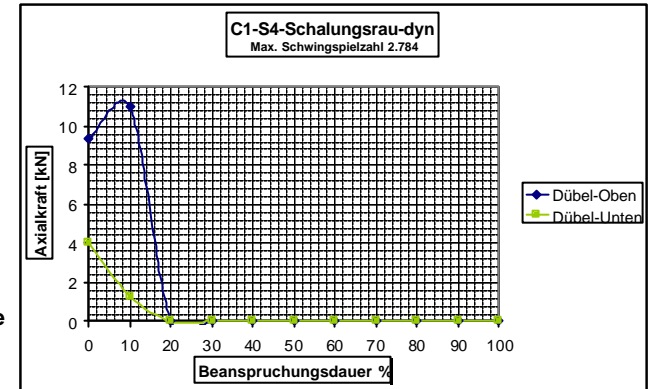


Abb. 7.137 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

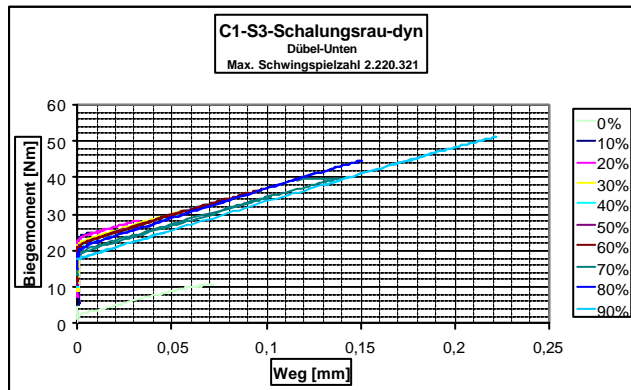


Abb. 7.135 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

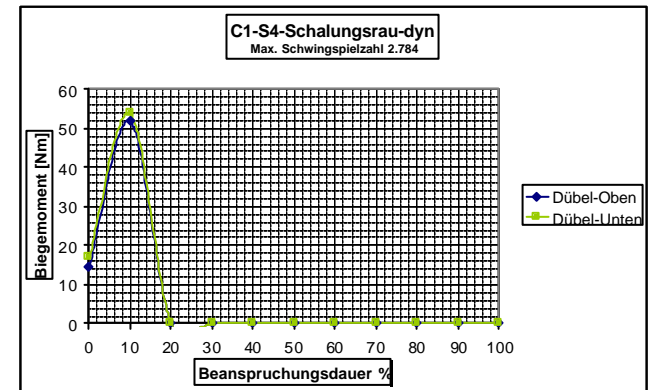


Abb. 7.138 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

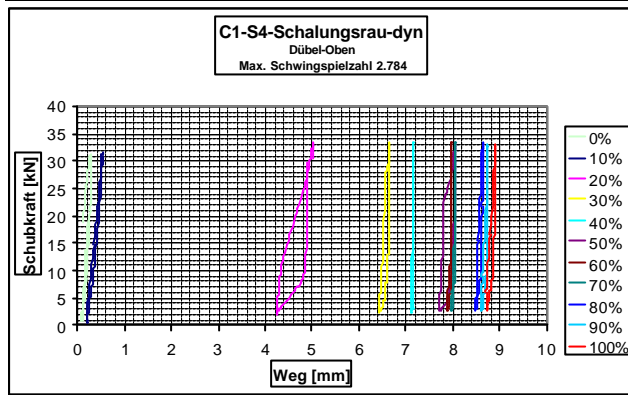


Abb. 7.139 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

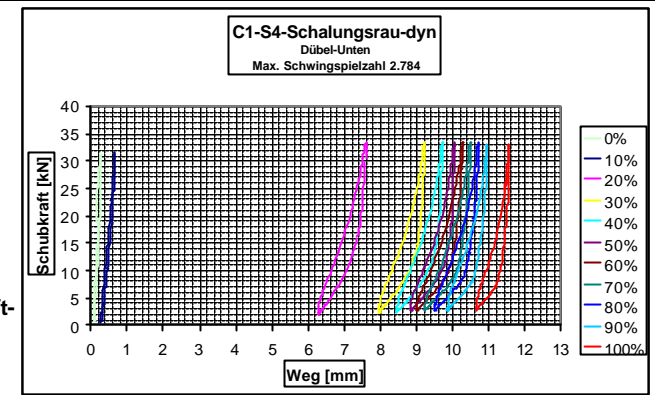


Abb. 7.142 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

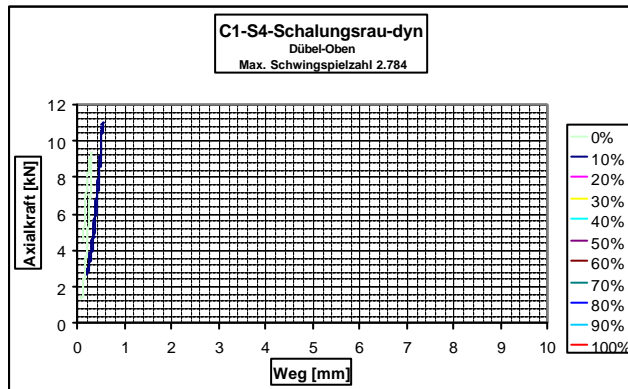


Abb. 7.140 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

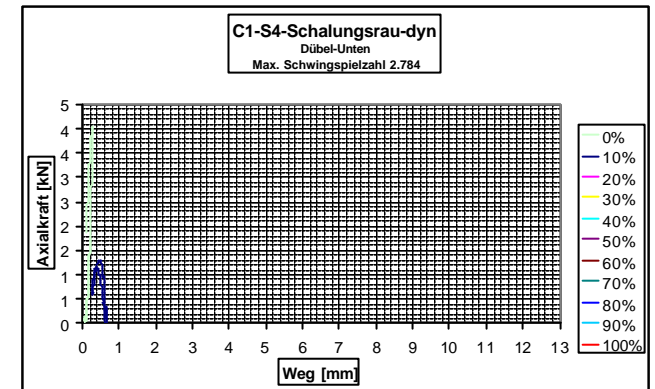


Abb. 7.143 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

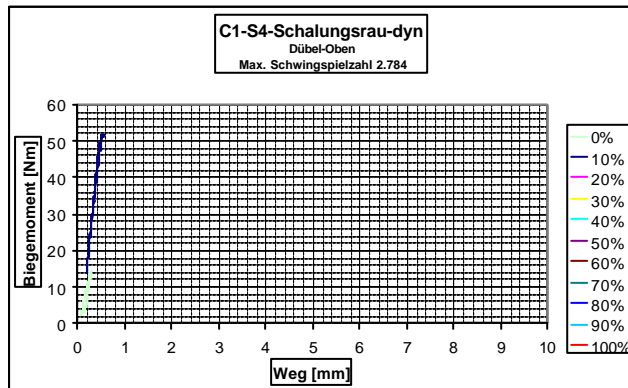


Abb. 7.141 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

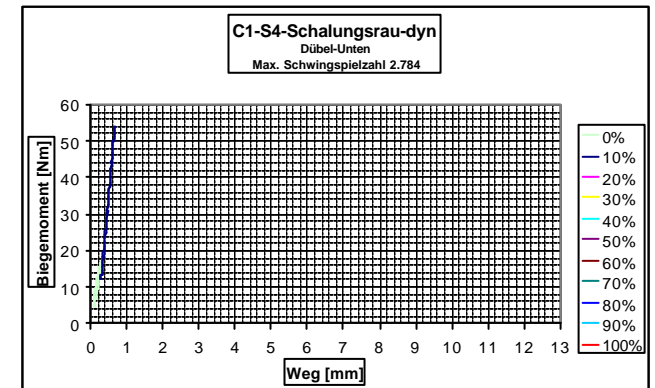


Abb. 7.144 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

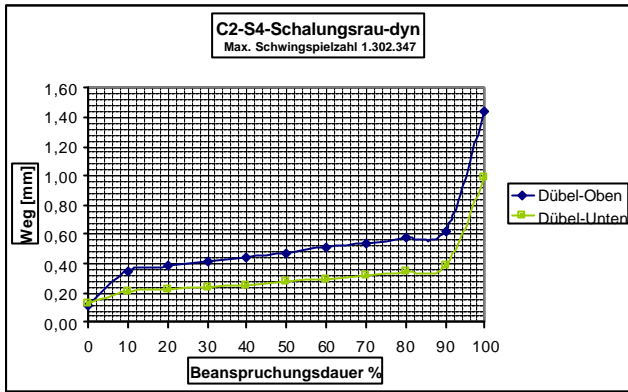


Abb. 7.145 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

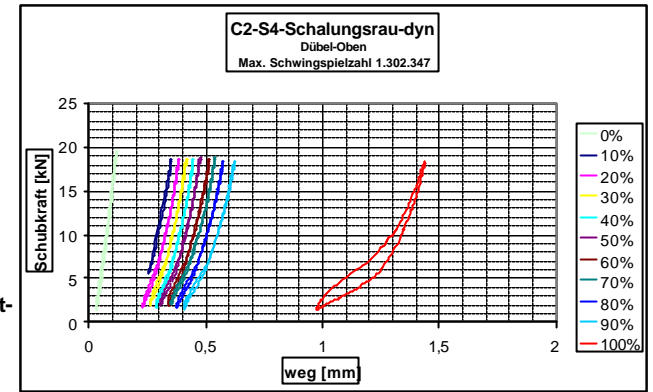


Abb. 7.148 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

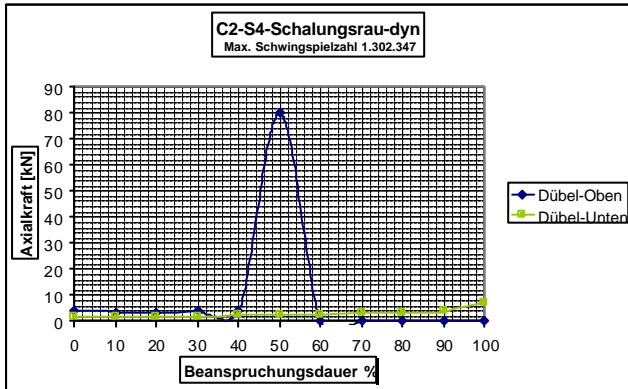


Abb. 7.146 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

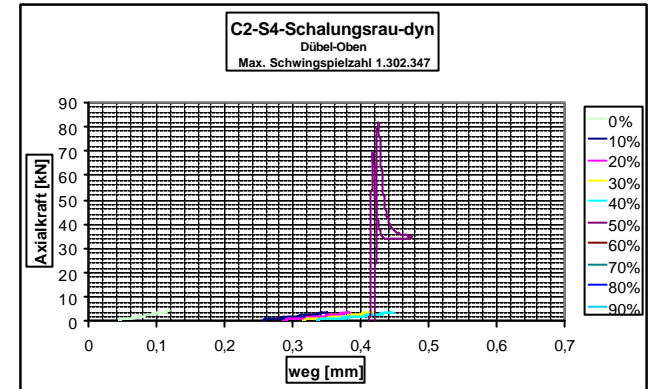


Abb. 7.149 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

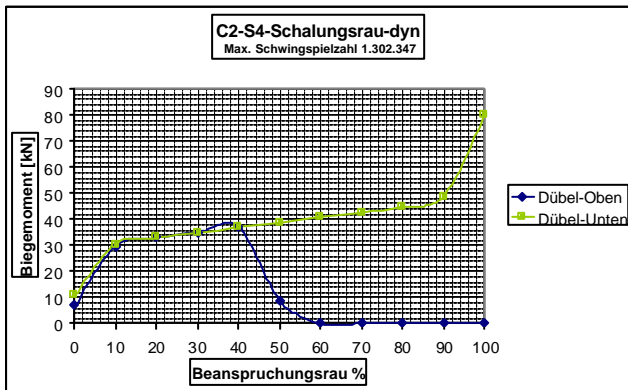


Abb. 7.147 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

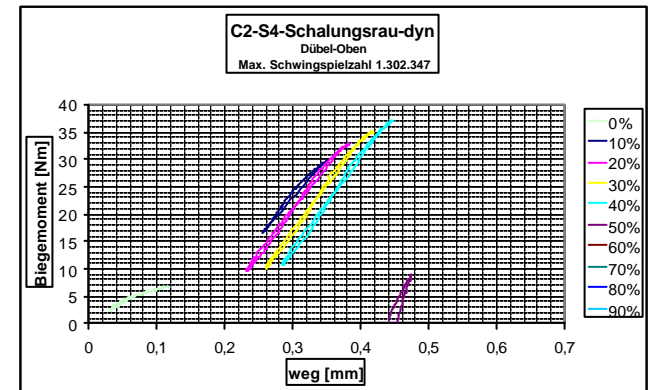


Abb. 7.150 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

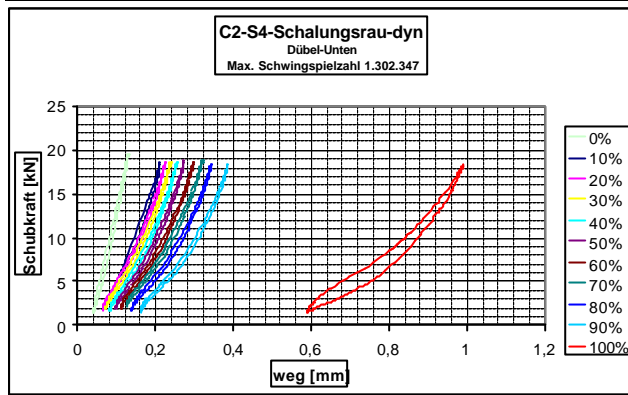


Abb. 7.151 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

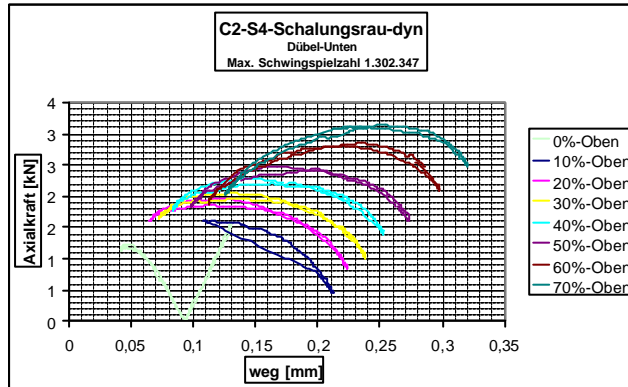


Abb. 7.152 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

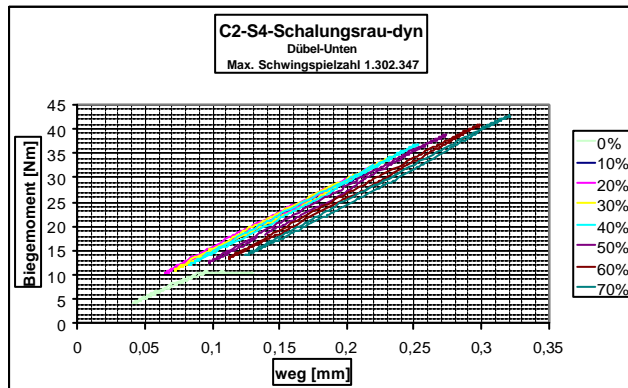


Abb. 7.153 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

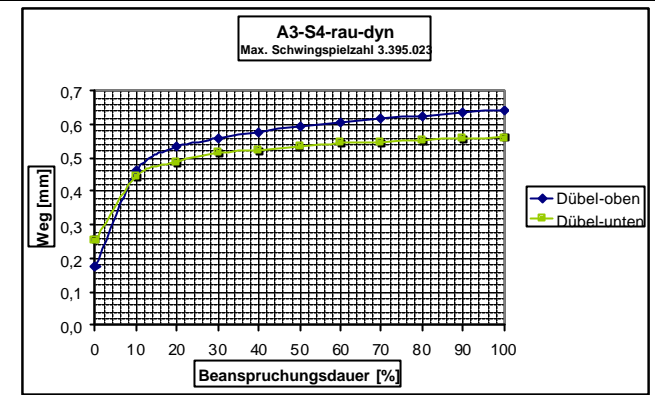


Abb. 7.154 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

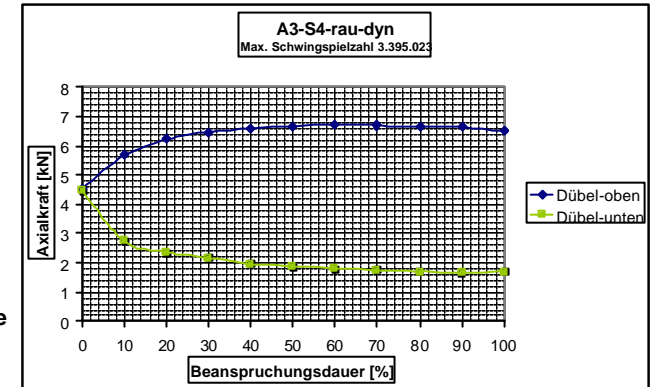


Abb. 7.155 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

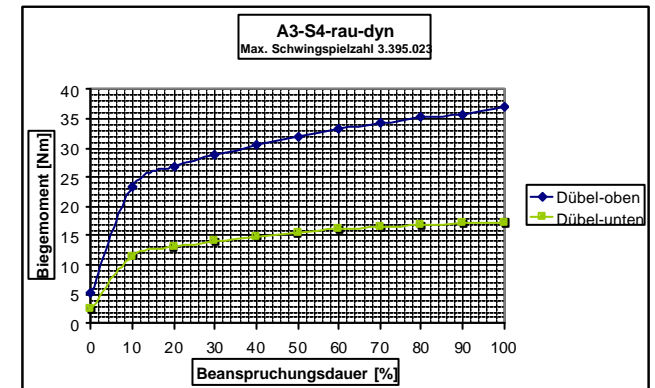


Abb. 7.156 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer



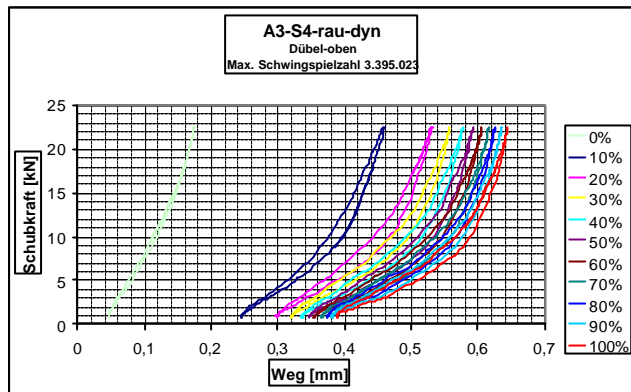


Abb. 7.157 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

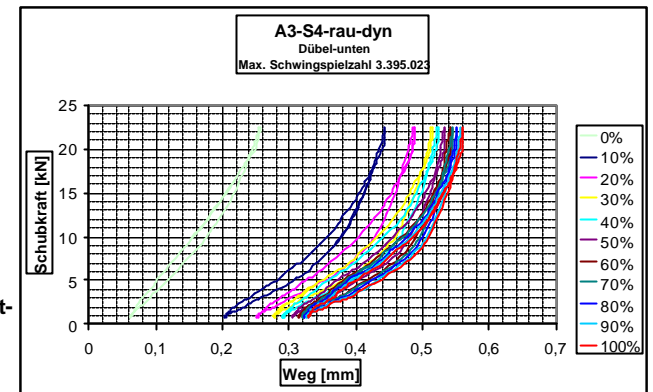


Abb. 7.160 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

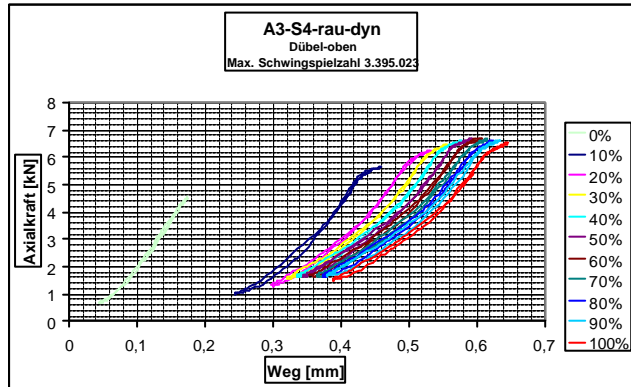


Abb. 7.158 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

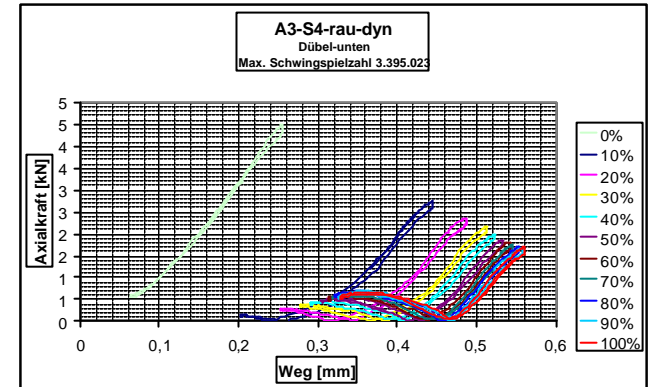


Abb. 7.161 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

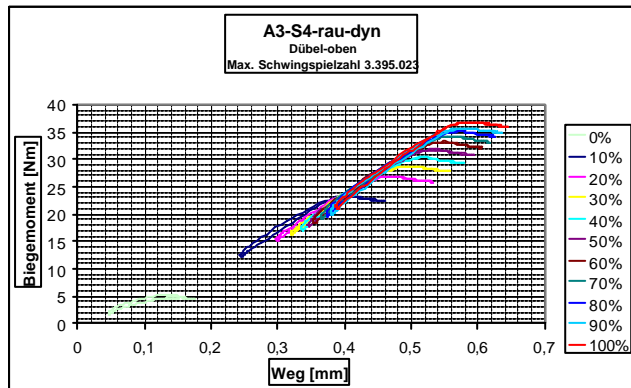


Abb. 7.159 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

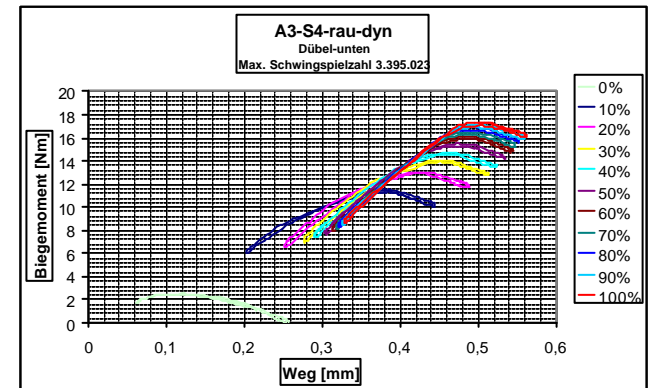


Abb. 7.162 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

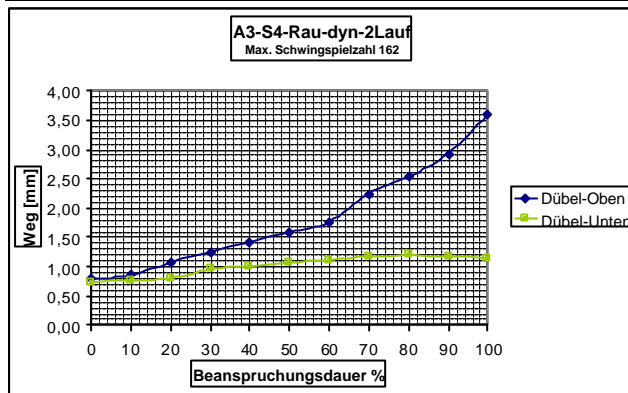


Abb. 7.163 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

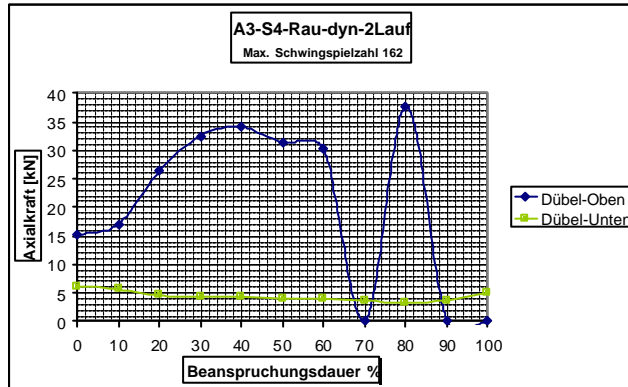


Abb. 7.164 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

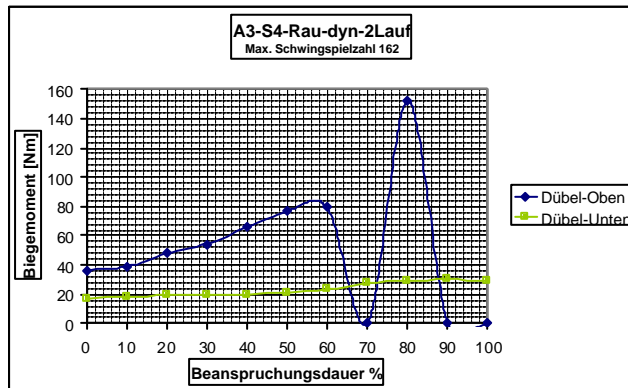


Abb. 7.165 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

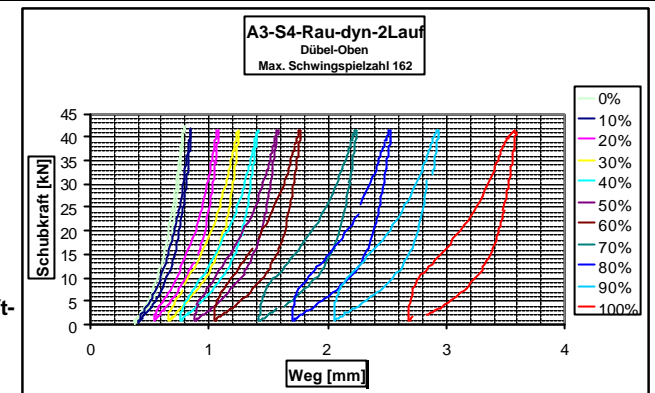


Abb. 7.166 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

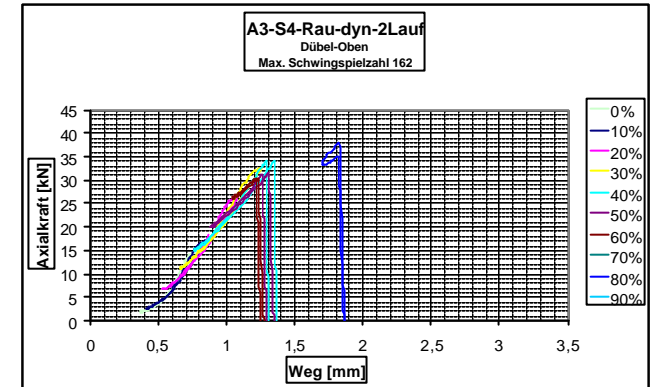


Abb. 7.167 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

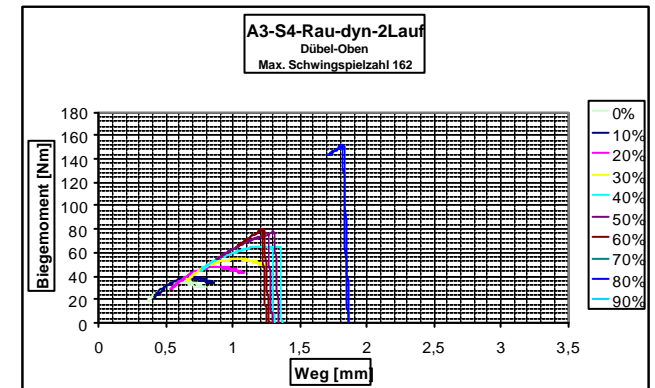


Abb. 7.168 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

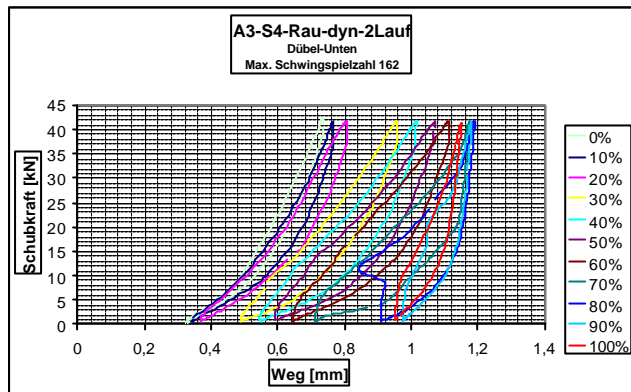


Abb. 7.169 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

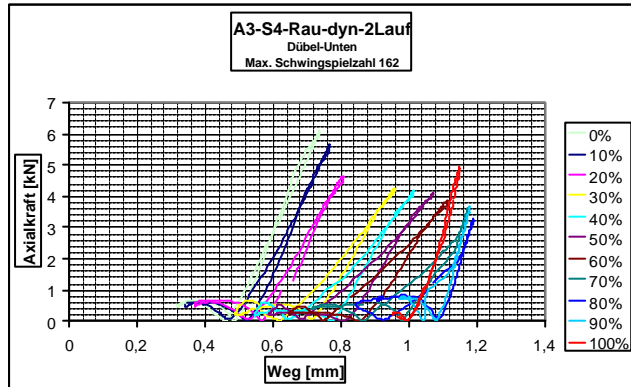


Abb. 7.170 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

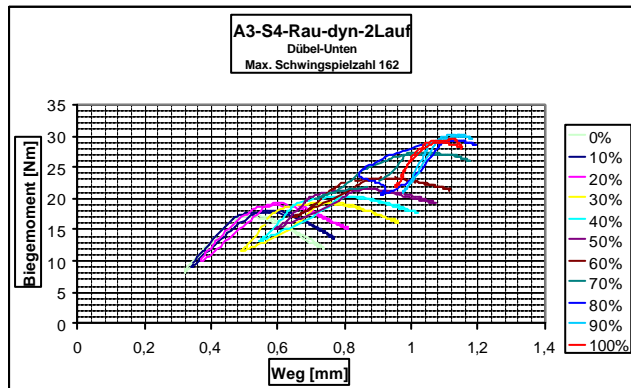


Abb. 7.171 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

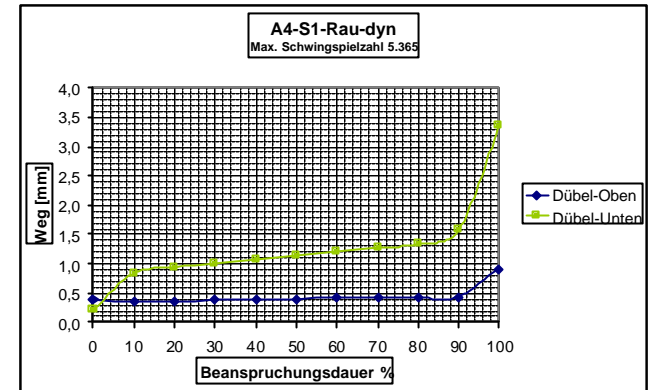


Abb. 7.172 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

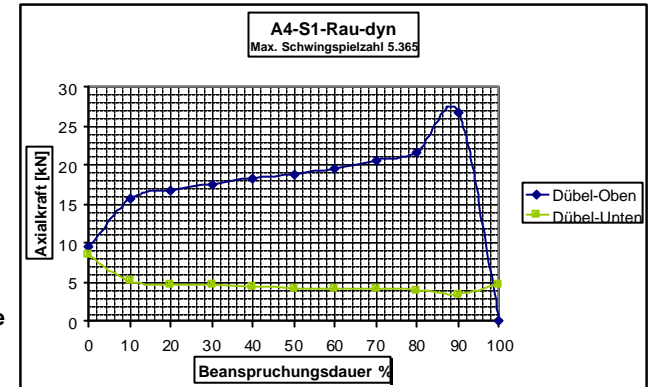


Abb. 7.173 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

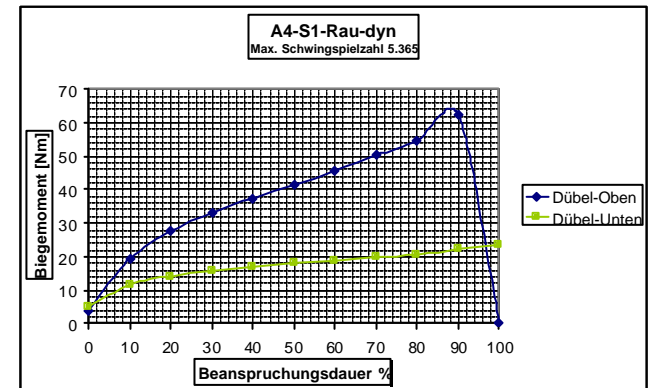


Abb. 7.174 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

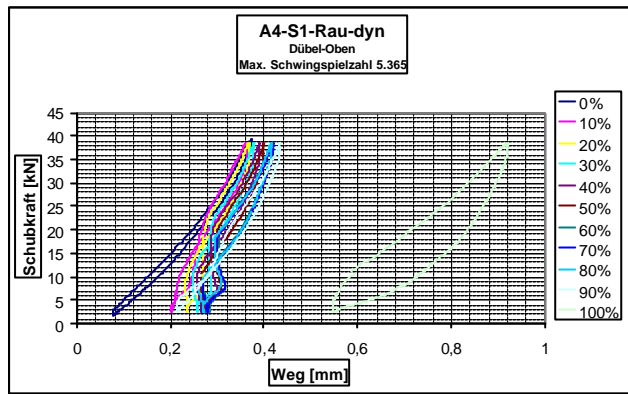


Abb. 7.175 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

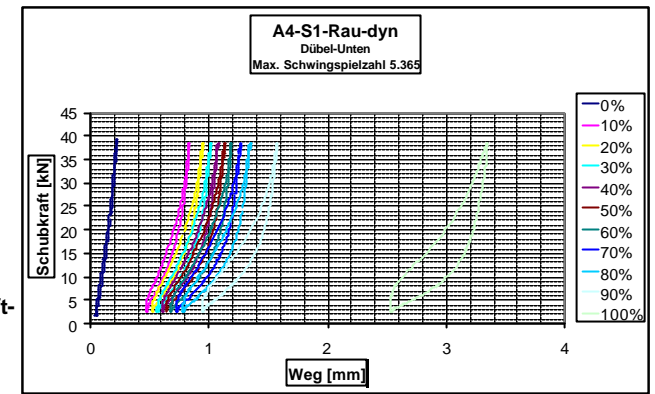


Abb. 7.178 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

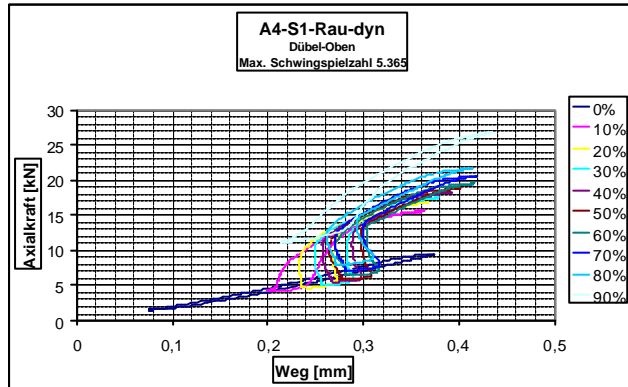


Abb. 7.176 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

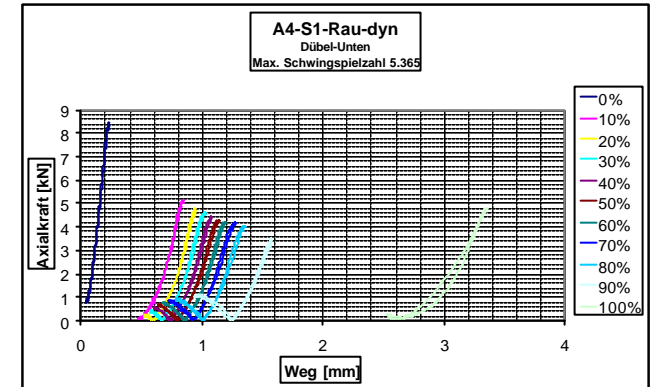


Abb. 7.179 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

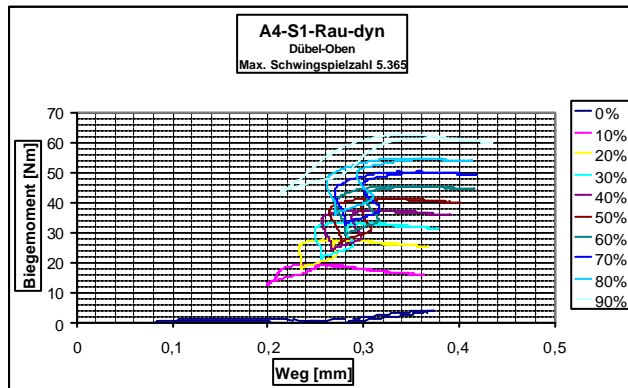


Abb. 7.177 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

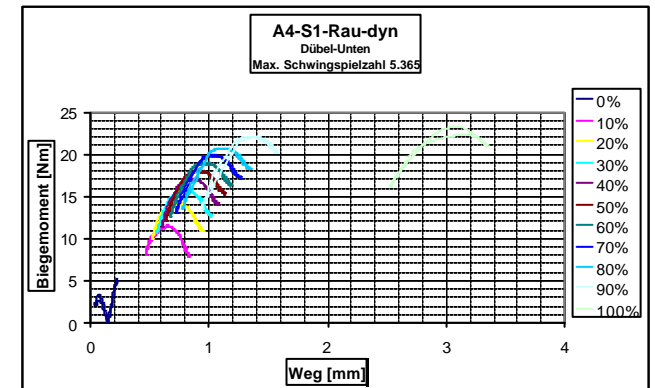


Abb. 7.180 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

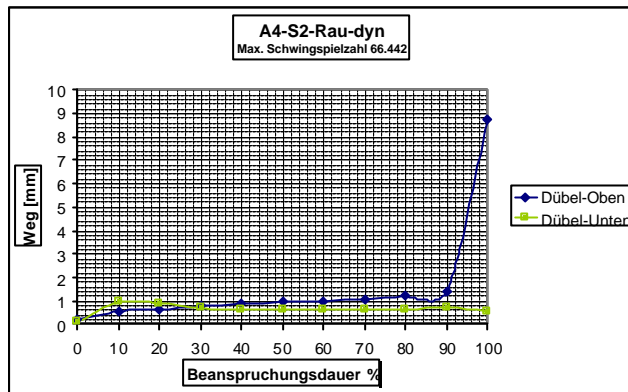


Abb. 7.181 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

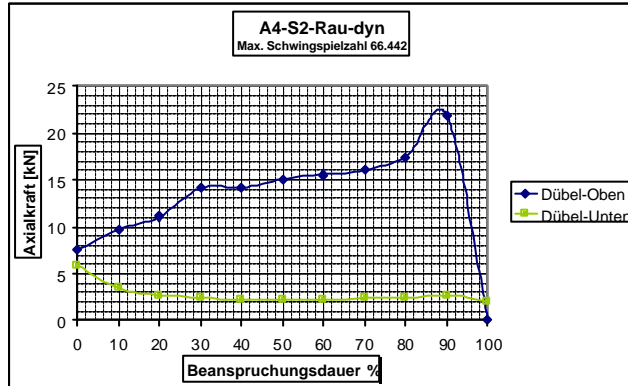


Abb. 7.182 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

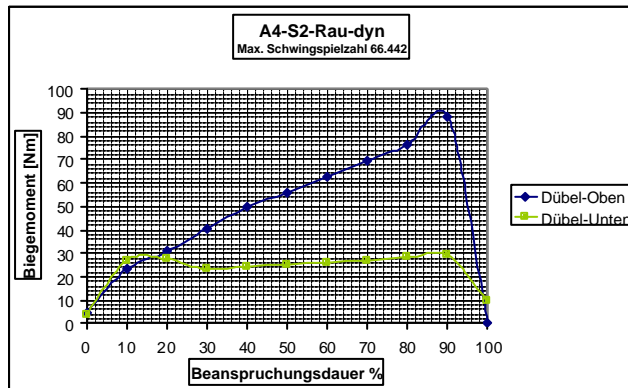


Abb. 7.183 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

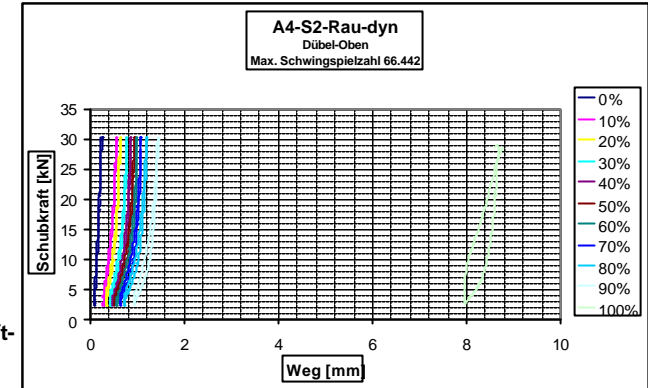


Abb. 7.184 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

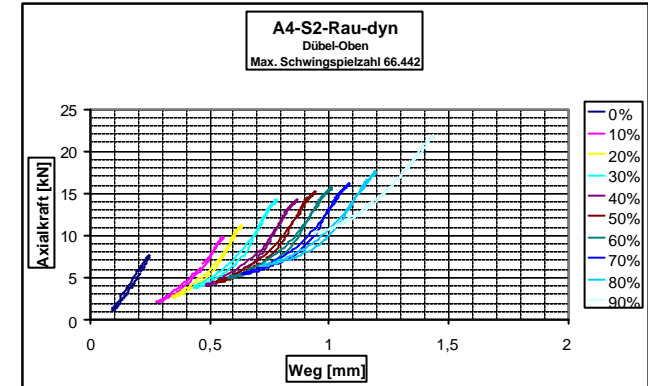


Abb. 7.185 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

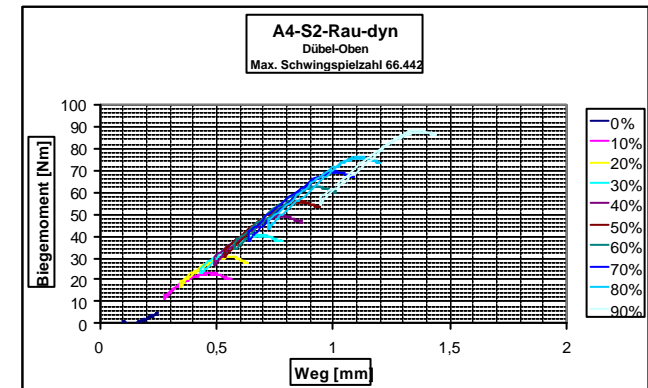


Abb. 7.186 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

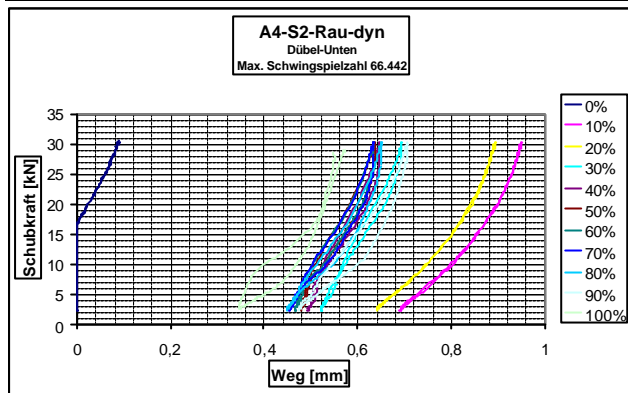


Abb. 7.187 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

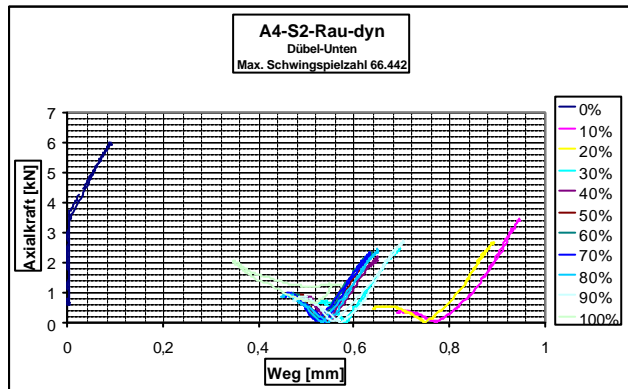


Abb. 7.188 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

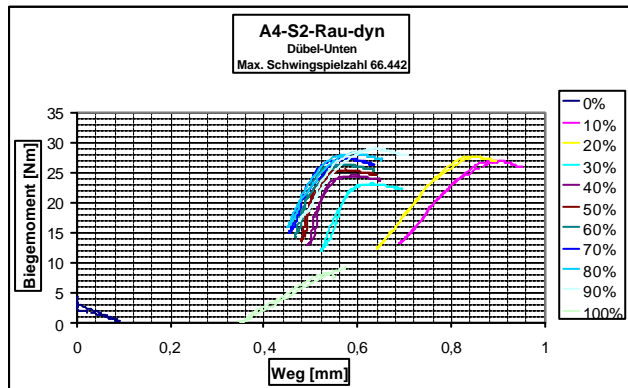


Abb. 7.189 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

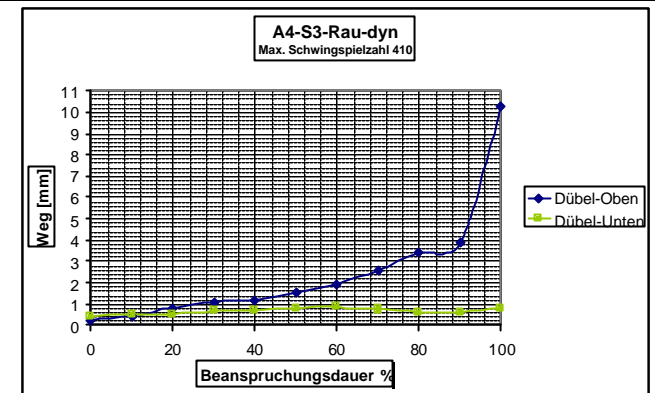


Abb. 7.190 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

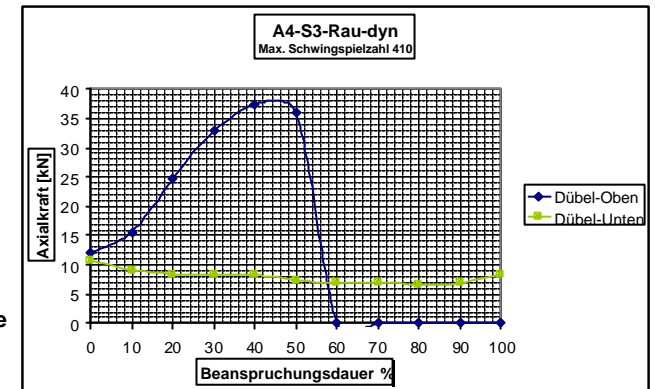


Abb. 7.191 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

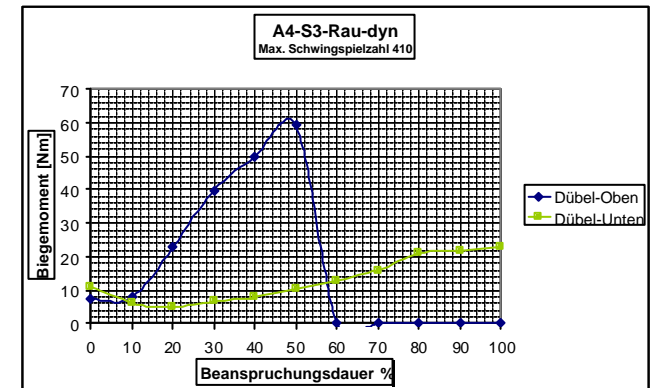


Abb. 7.192 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

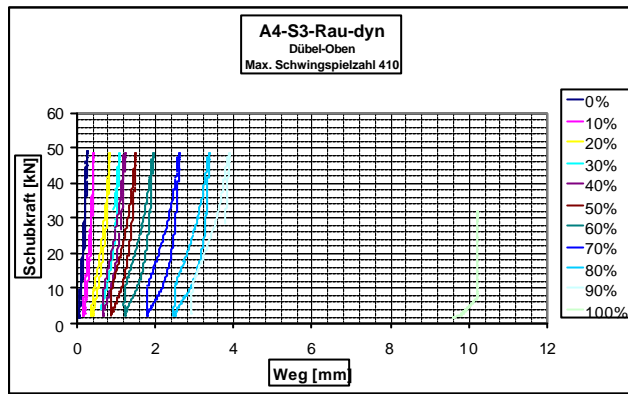


Abb. 7.193 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

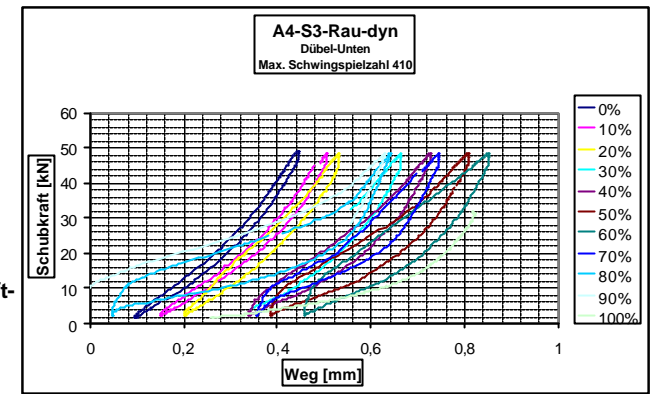


Abb. 7.196 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

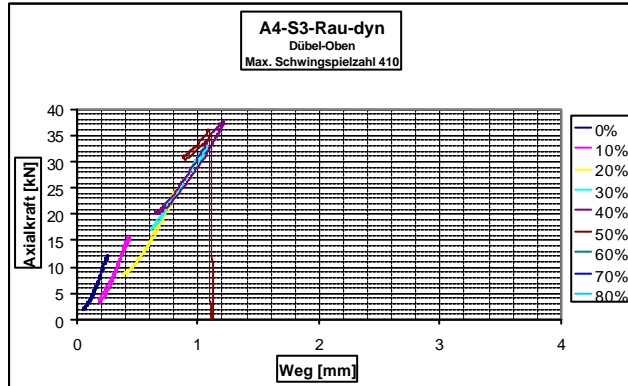


Abb. 7.194 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

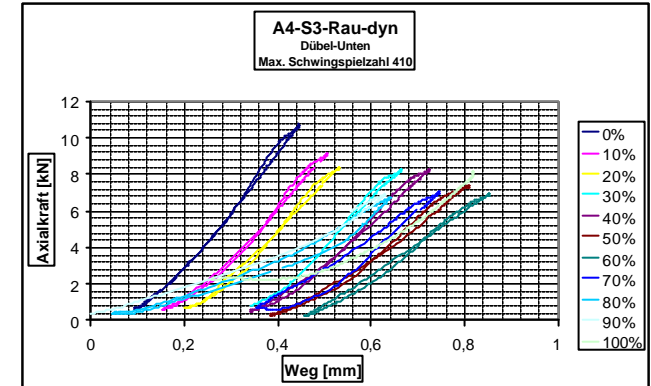


Abb. 7.197 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

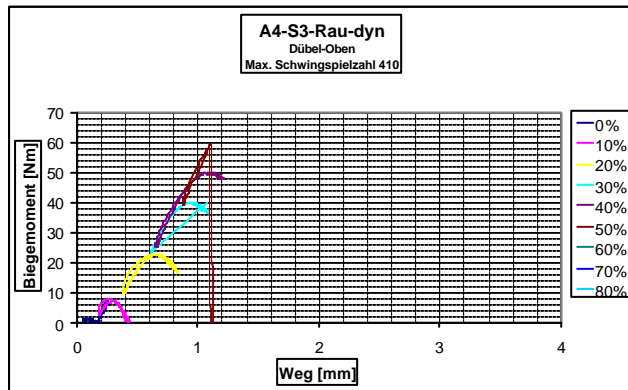


Abb. 7.195 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

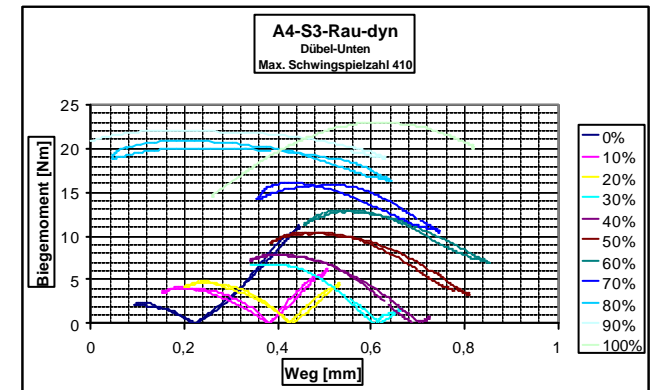


Abb. 7.198 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

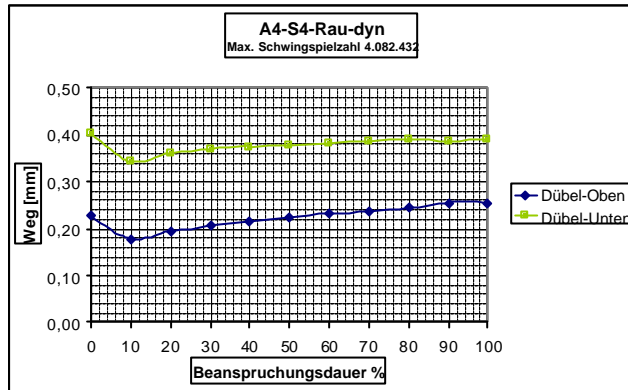


Abb. 7.199 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

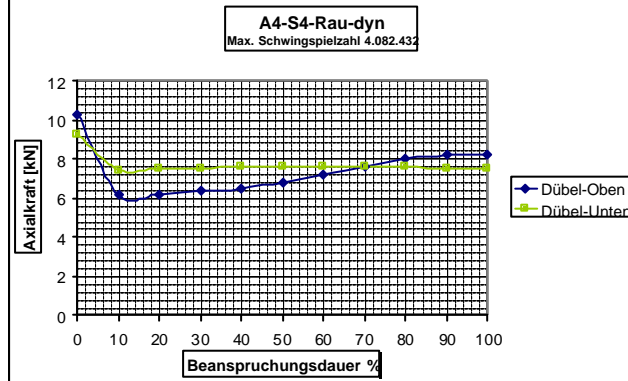


Abb. 7.200 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

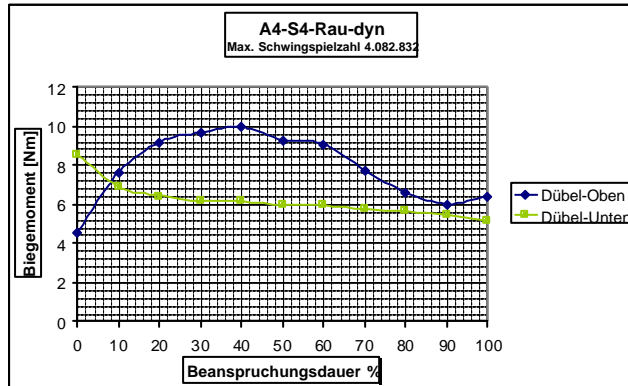


Abb. 7.201 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

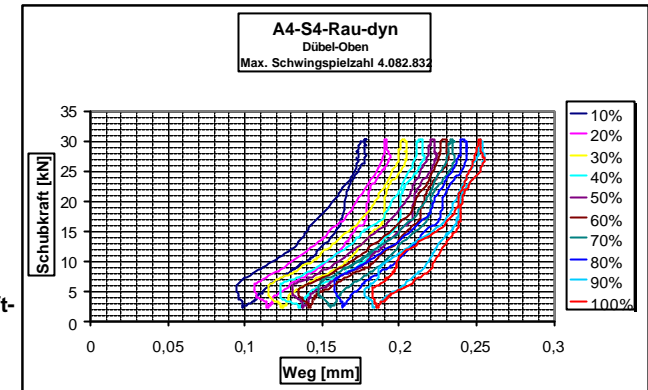


Abb. 7.202 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

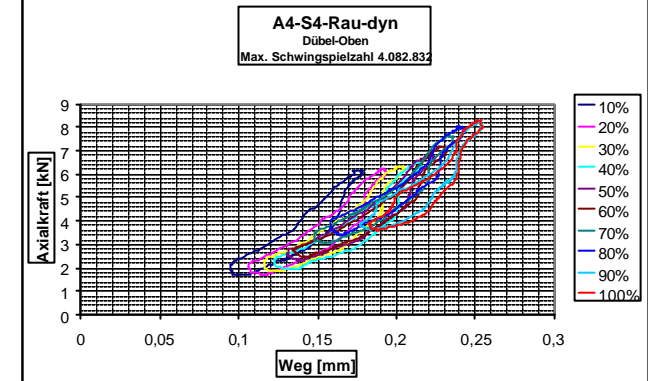


Abb. 7.203 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

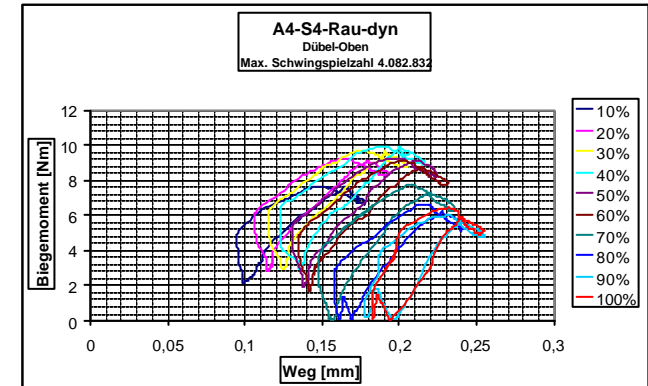


Abb. 7.204 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel



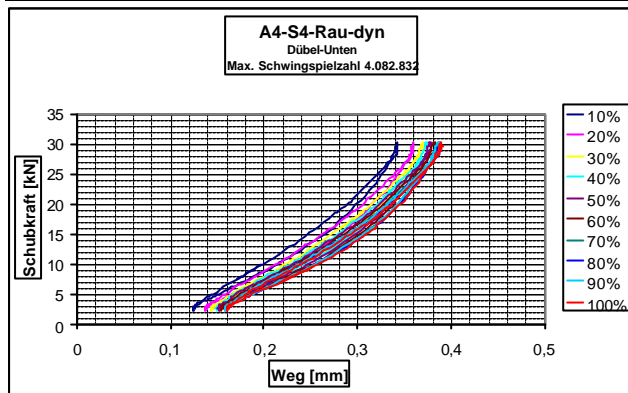


Abb. 7.205 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

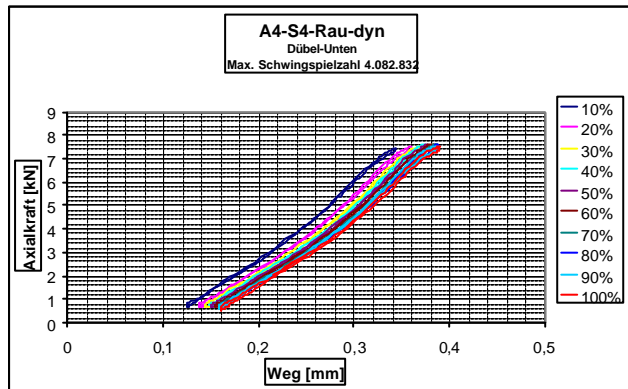


Abb. 7.206 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

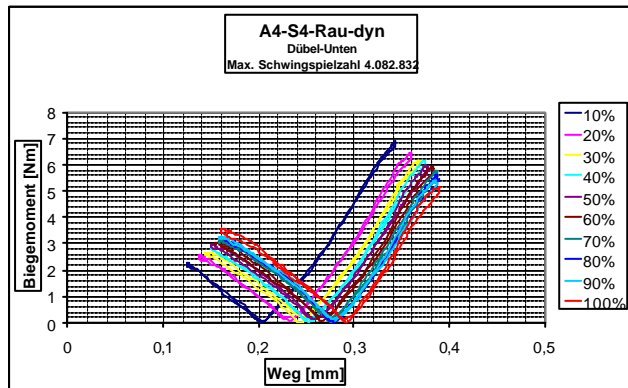


Abb. 7.207 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

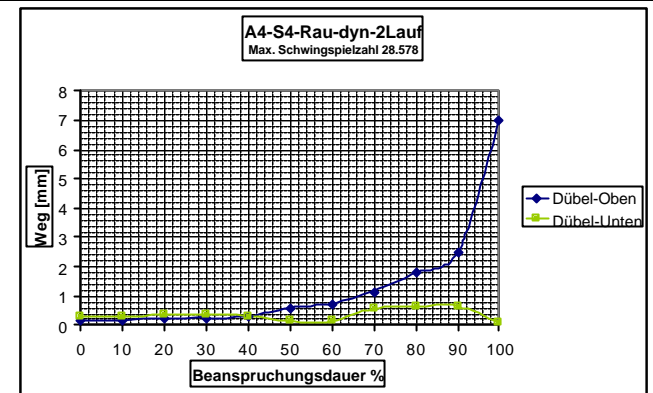


Abb. 7.208 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

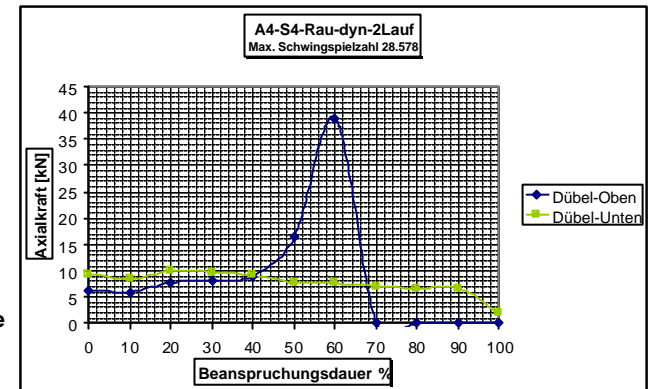


Abb. 7.209 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

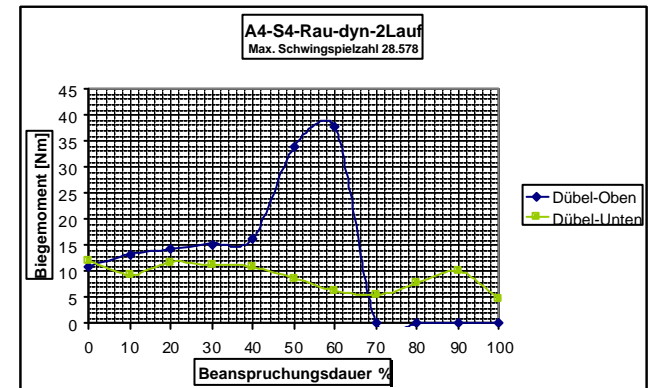


Abb. 7.210 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

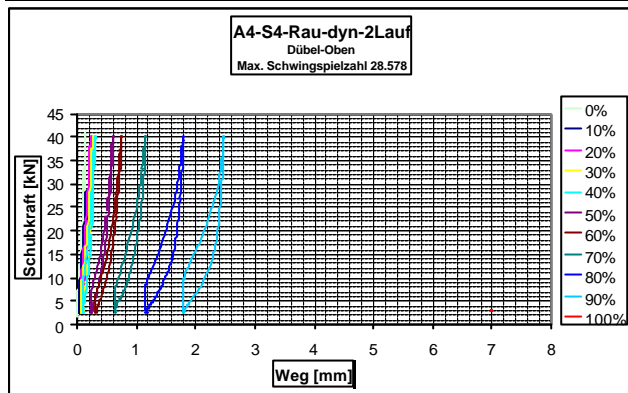


Abb. 7.211 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

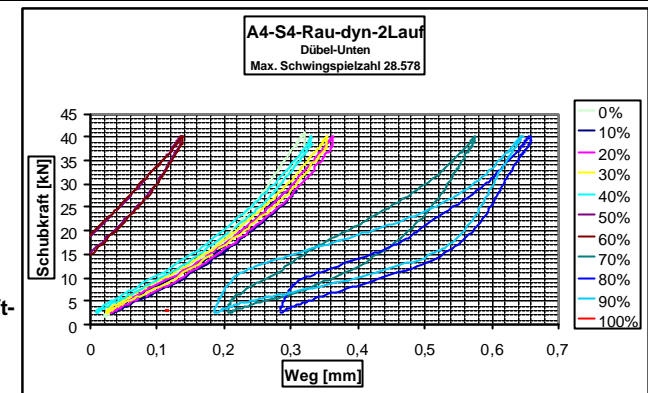
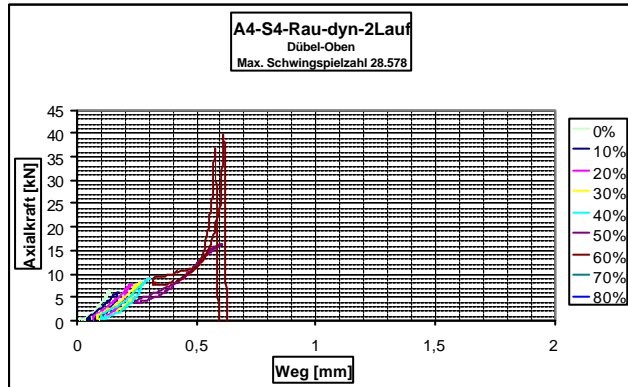


Abb. 7.214 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel



Ab. 7.212 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

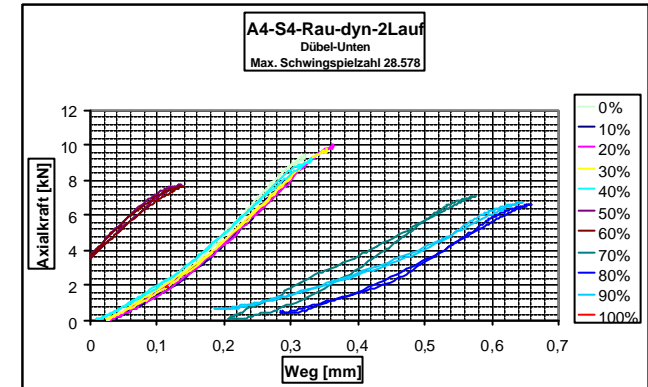


Abb. 7.215 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

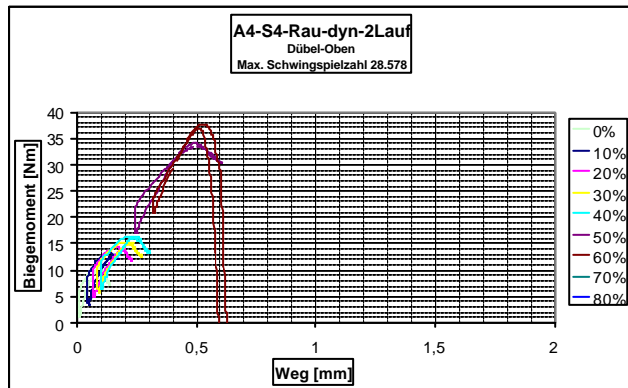


Abb. 7.213 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

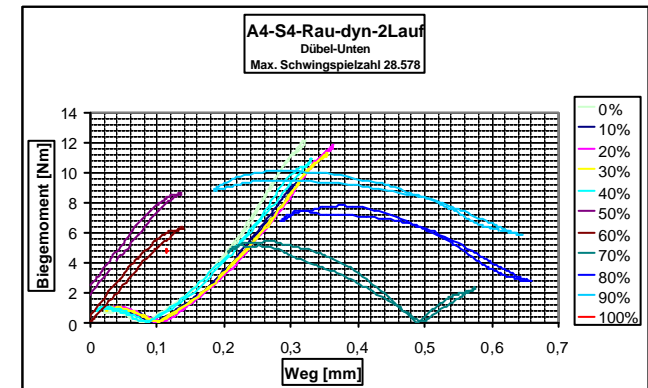


Abb. 7.216 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

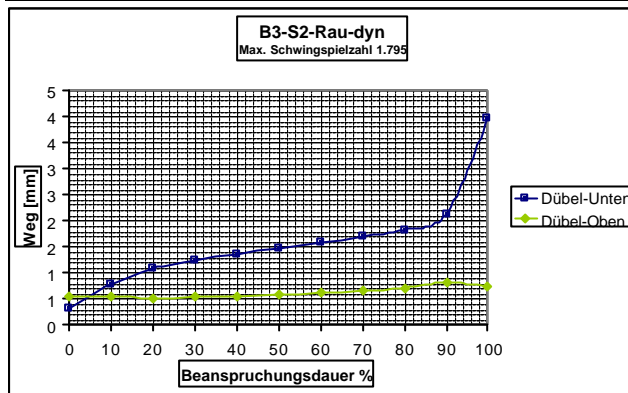


Abb. 7.217 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

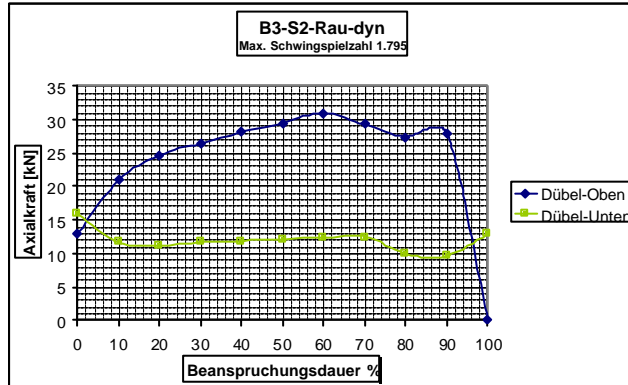


Abb. 7.218 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

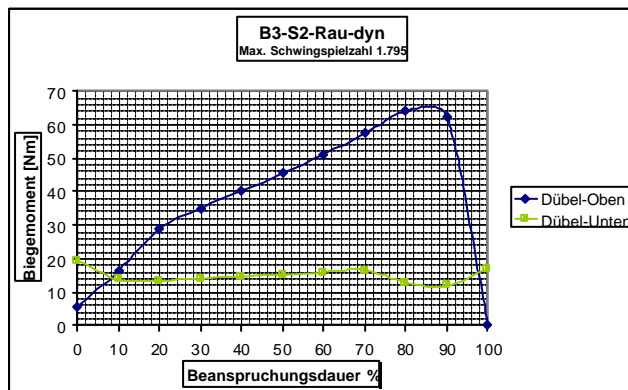


Abb. 7.219 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

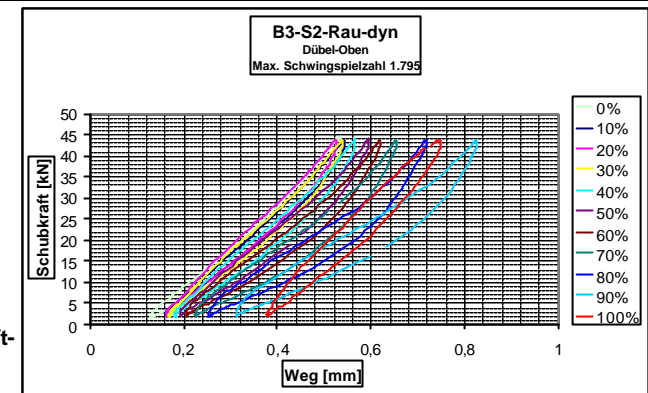


Abb. 7.220 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

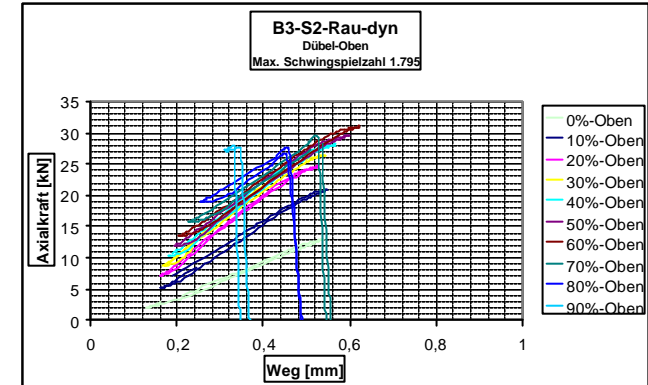


Abb. 7.221 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

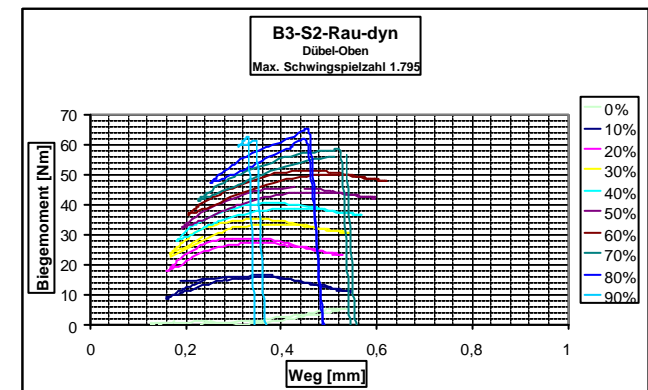


Abb. 7.222 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

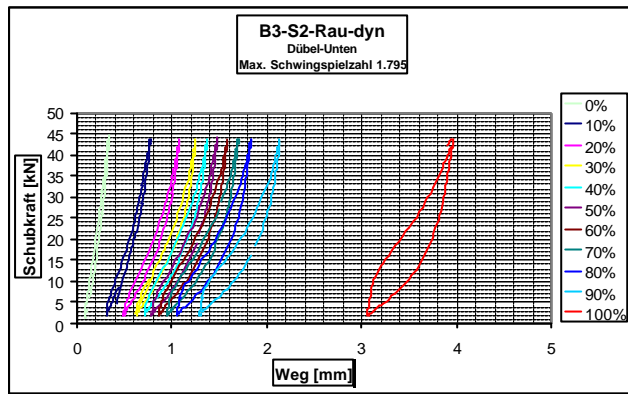


Abb. 7.223 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

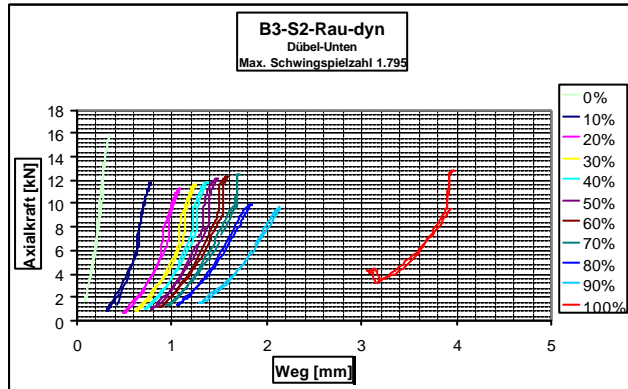


Abb. 7.224 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

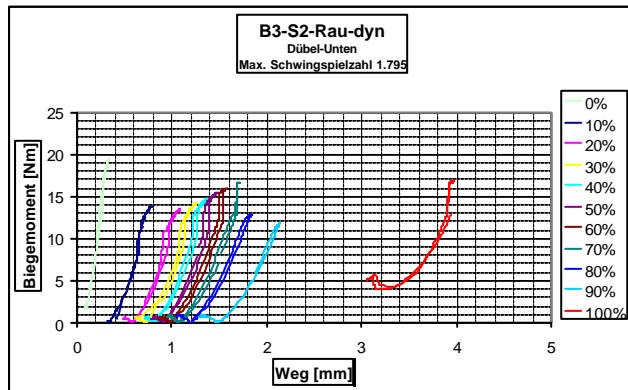


Abb. 7.225 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

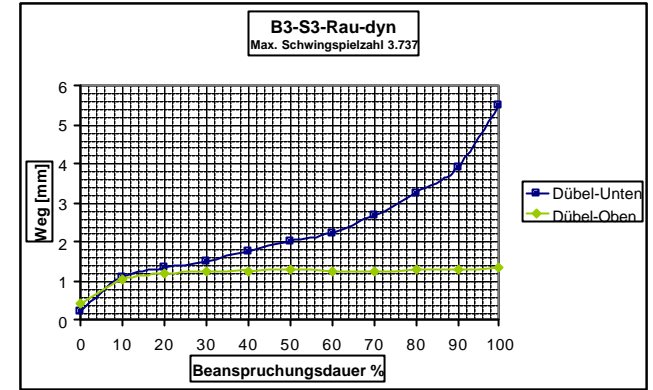


Abb. 7.226 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

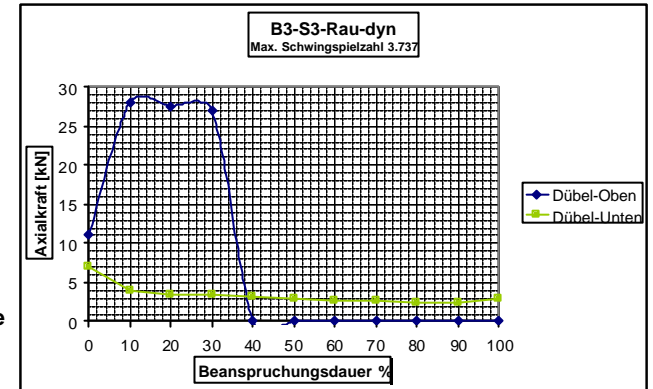


Abb. 7.227 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

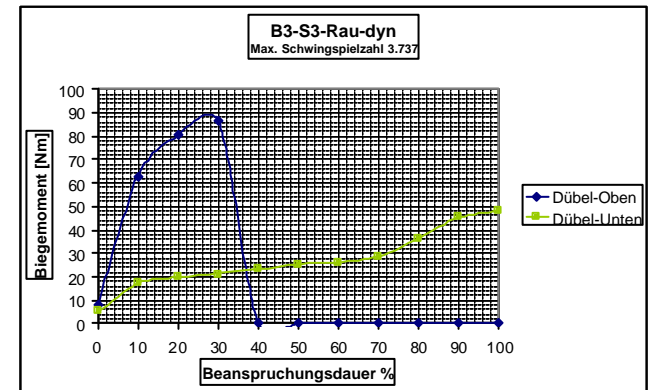


Abb. 7.228 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

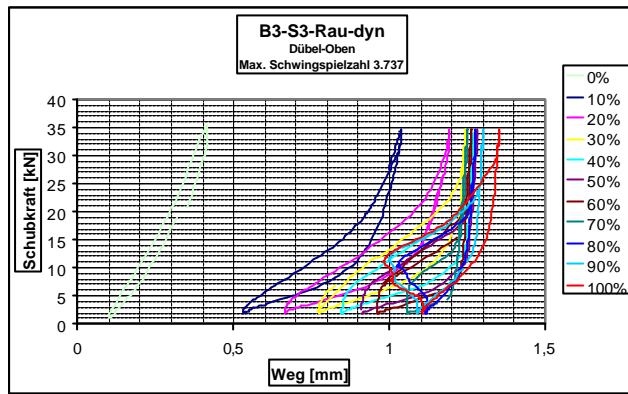


Abb. 7.229 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

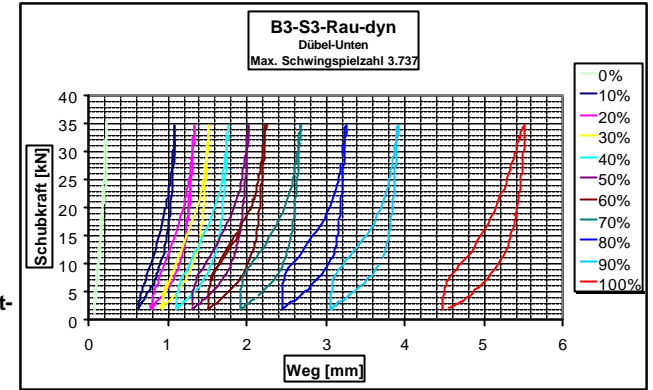


Abb. 7.232 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

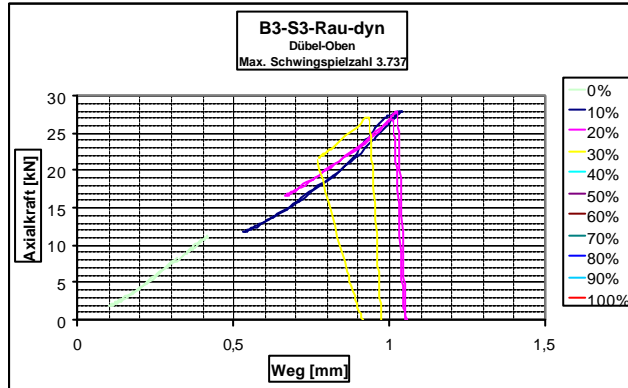


Abb. 7.230 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

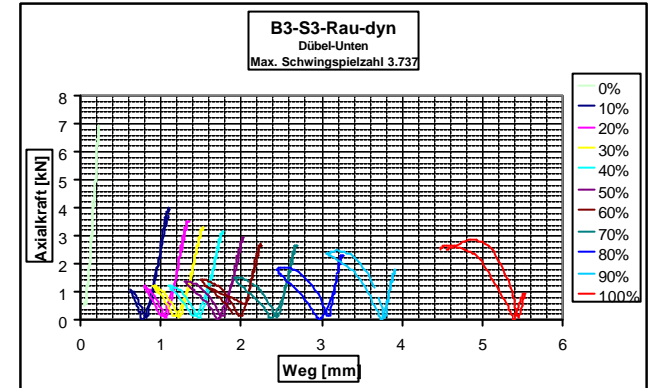


Abb. 7.233 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

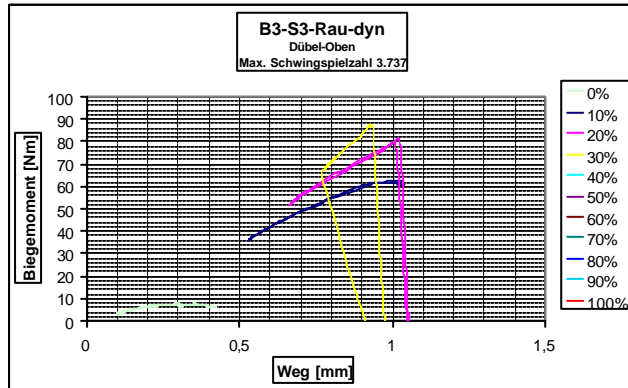


Abb. 7.231 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

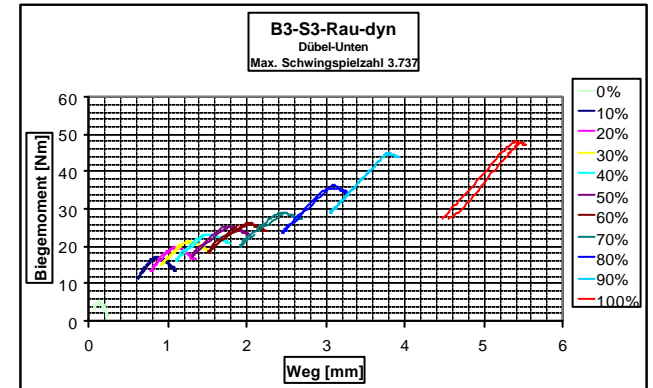


Abb. 7.234 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

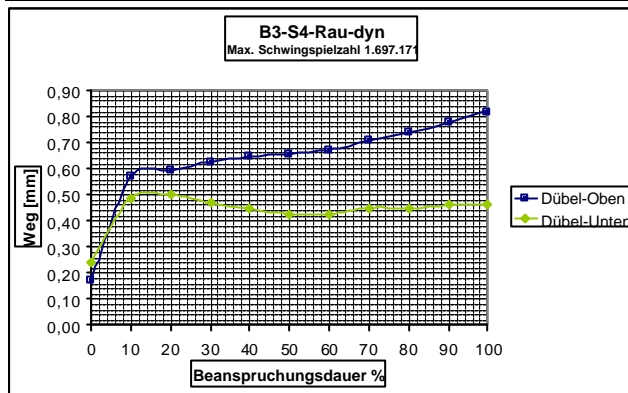


Abb. 7.235 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

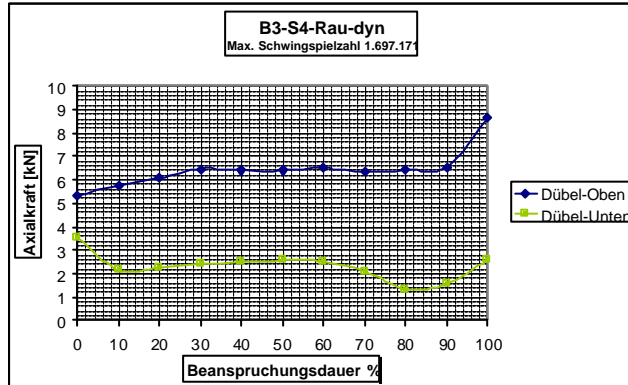


Abb. 7.236 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

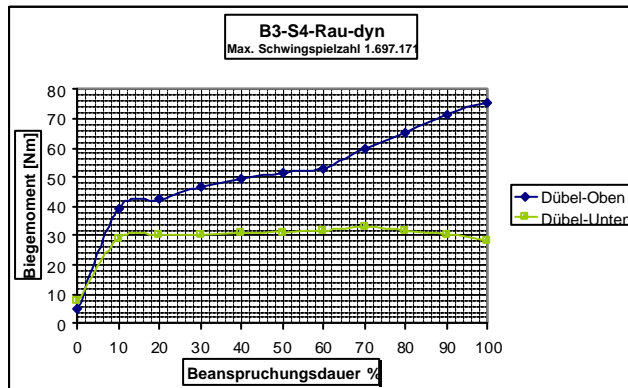


Abb. 7.237 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

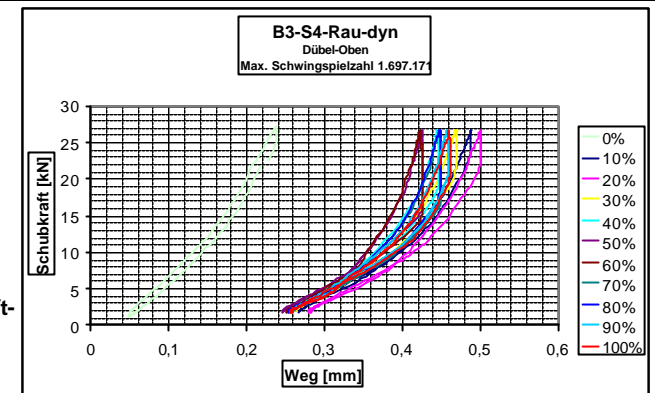


Abb. 7.238 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

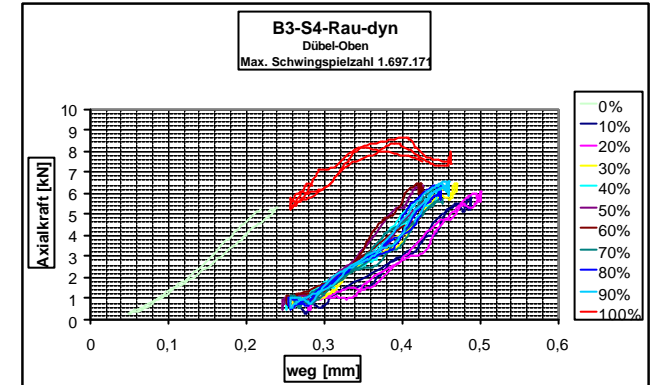


Abb. 7.239 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

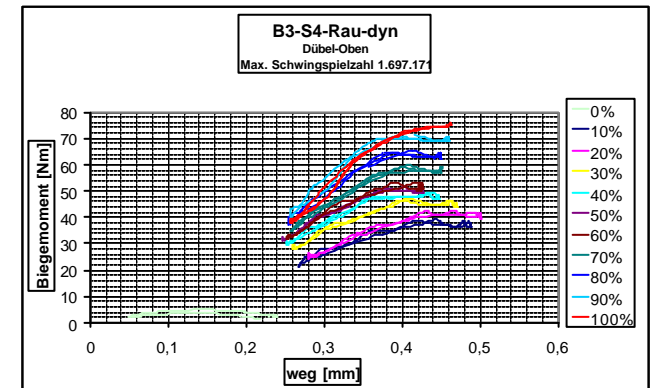


Abb. 7.240 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

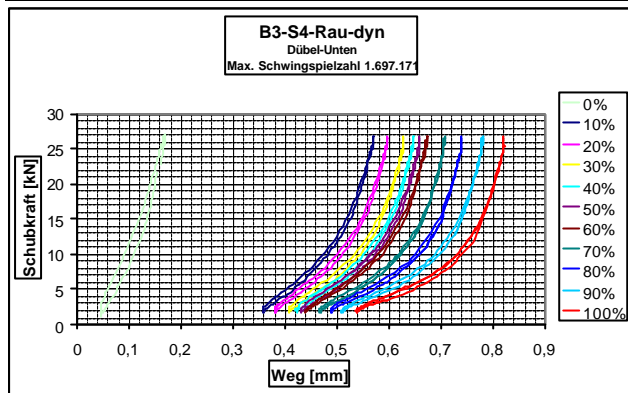


Abb. 7.241 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

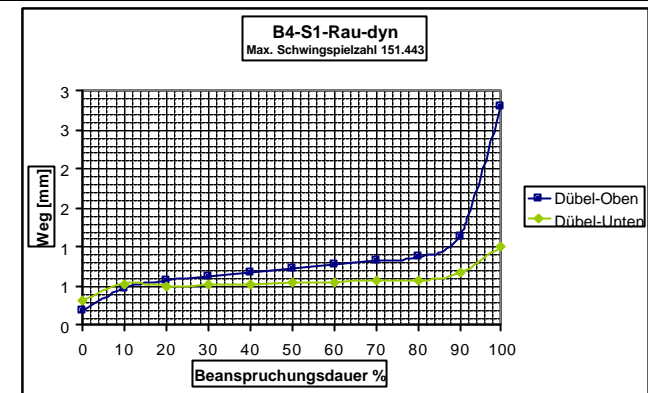


Abb. 7.244 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

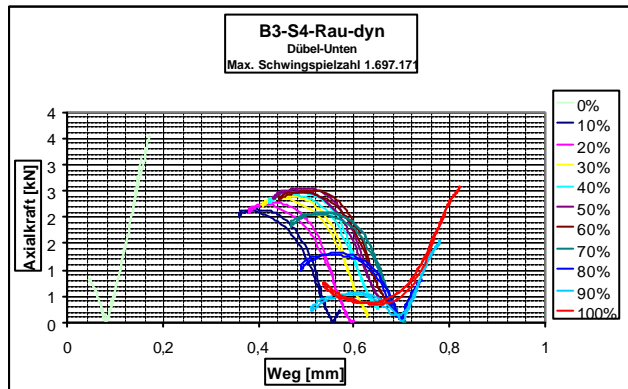


Abb. 7.242 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

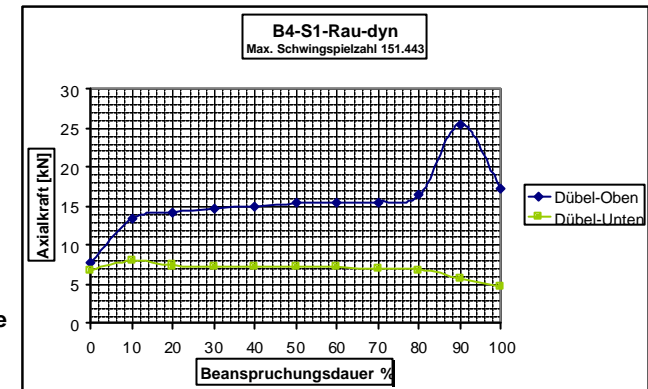


Abb. 7.245 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

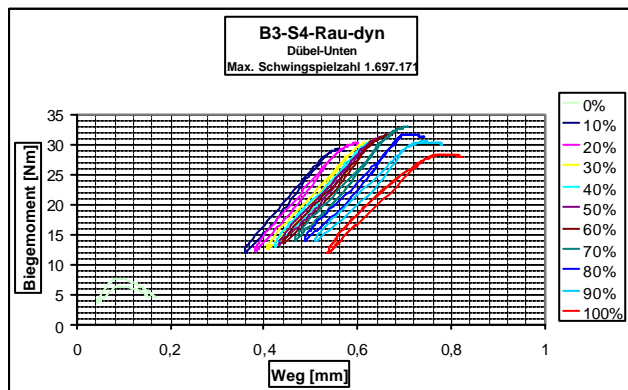


Abb. 7.243 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

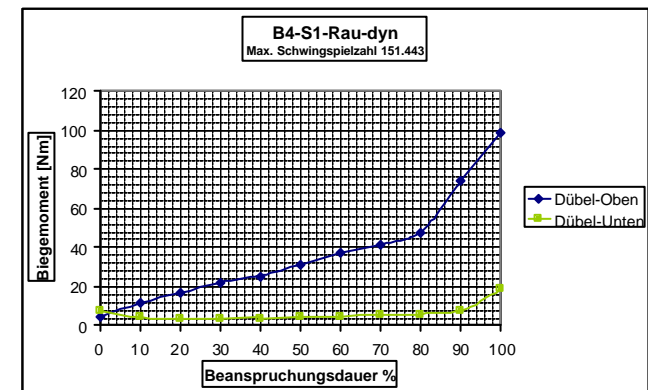


Abb. 7.246 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

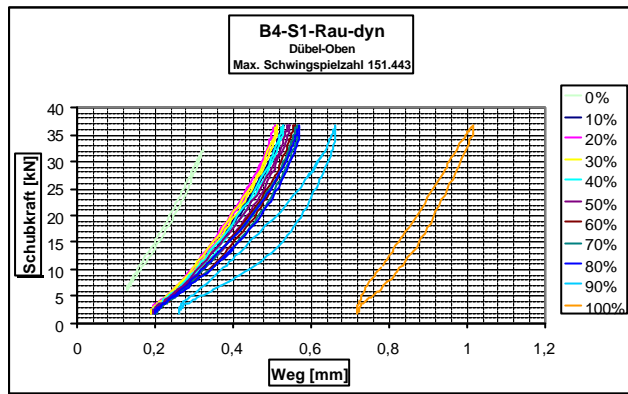


Abb. 7.247 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

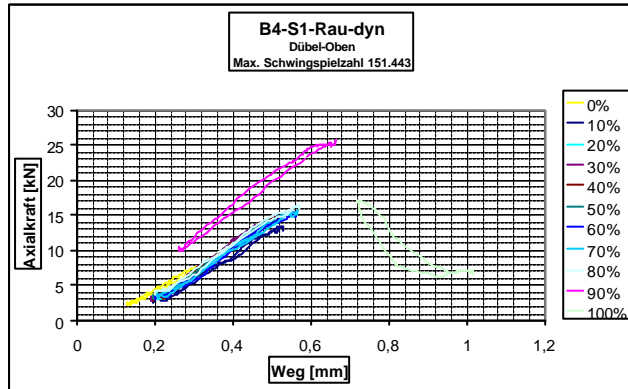


Abb. 7.248 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

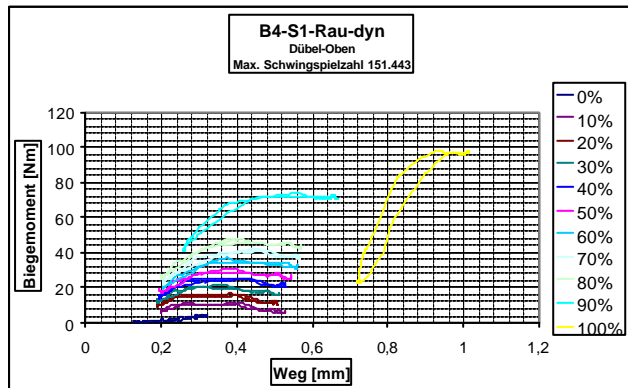


Abb. 7.249 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

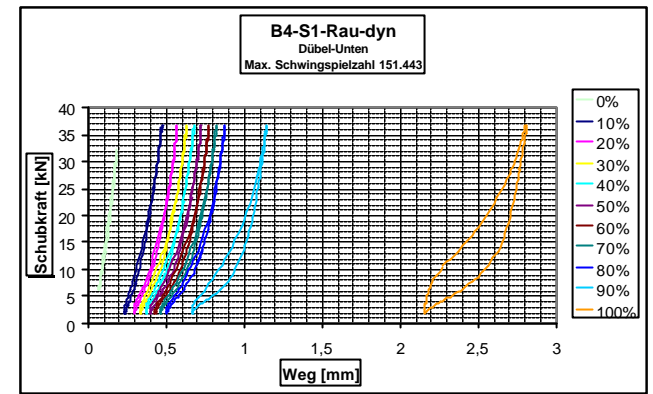


Abb. 7.250 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

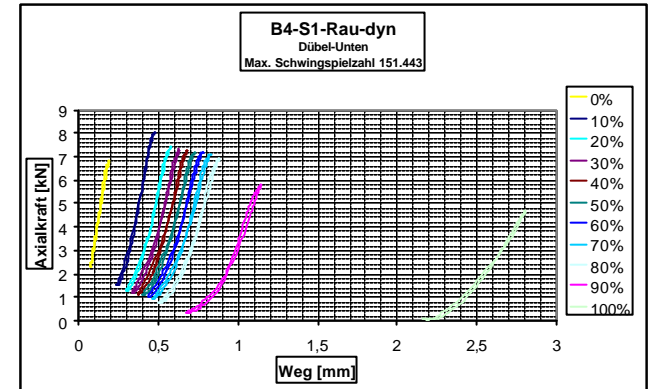


Abb. 7.251 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

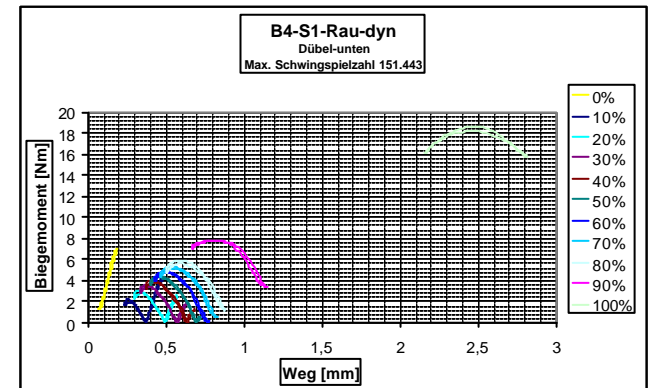


Abb. 7.252 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel



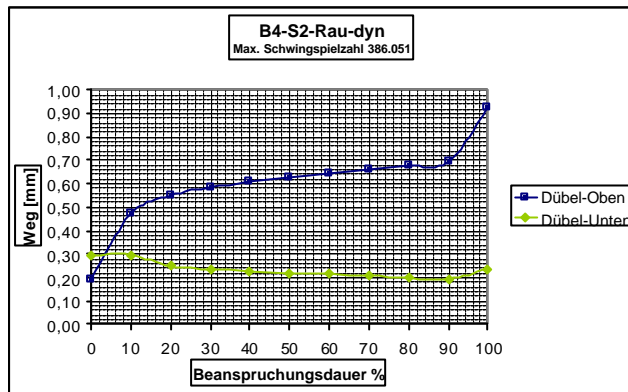


Abb. 7.253 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

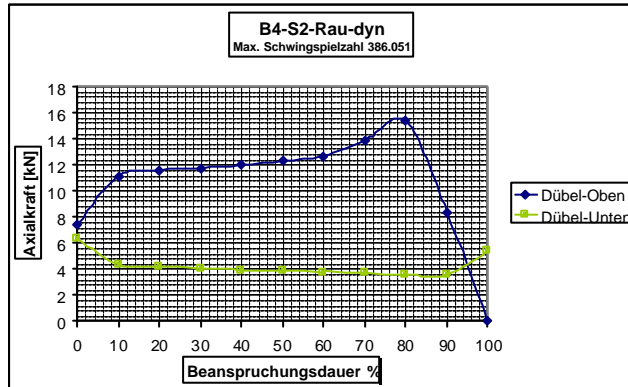


Abb. 7.254 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

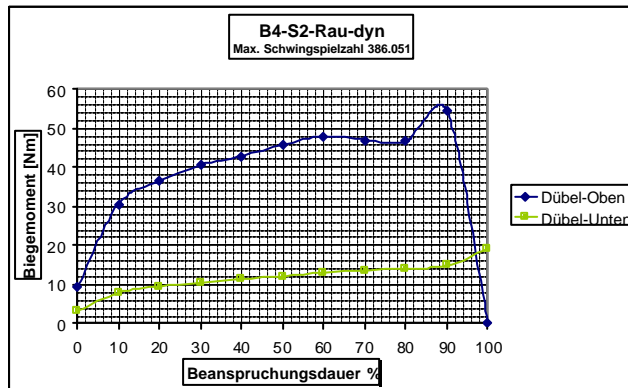


Abb. 7.255 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

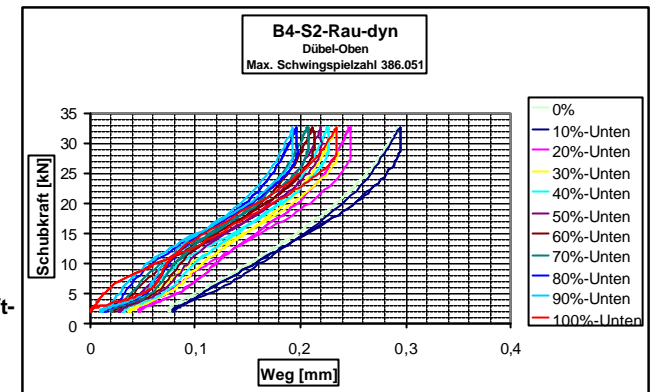


Abb. 7.256 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

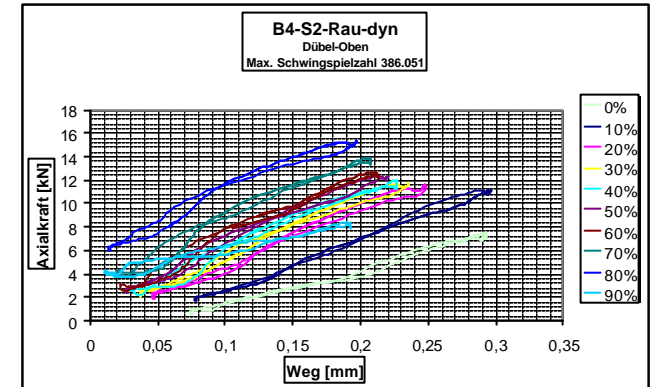


Abb. 7.257 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

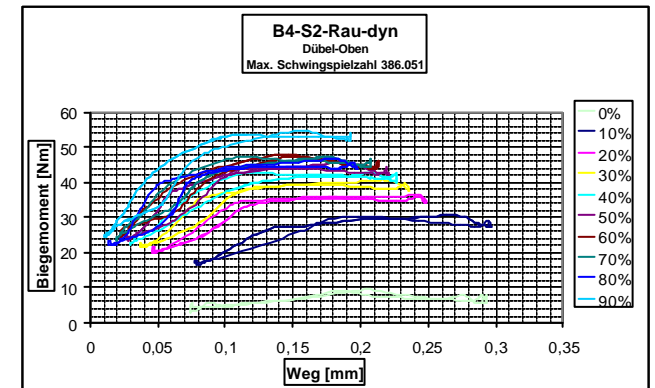


Abb. 7.258 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

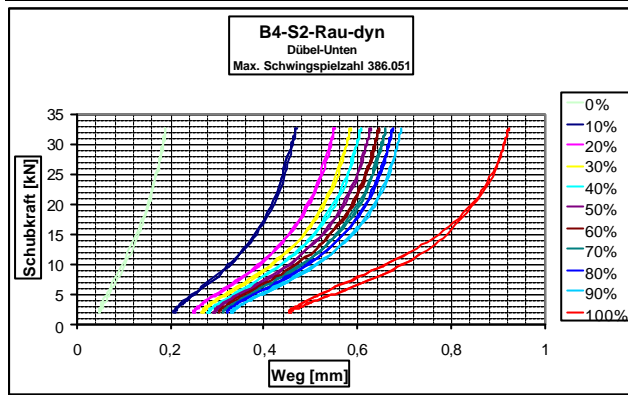


Abb. 7.259 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

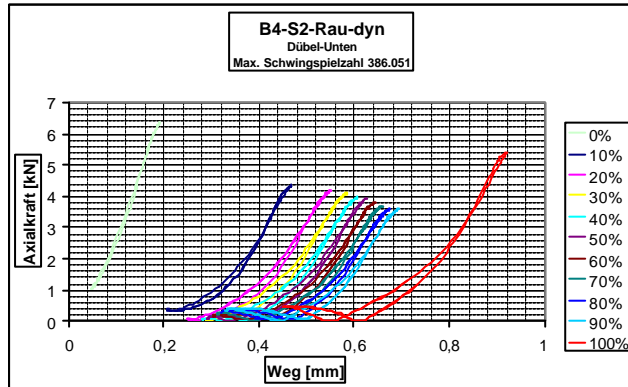


Abb. 7.260 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

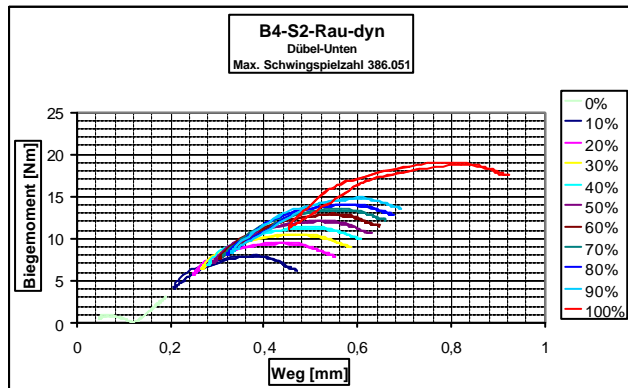


Abb. 7.261 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

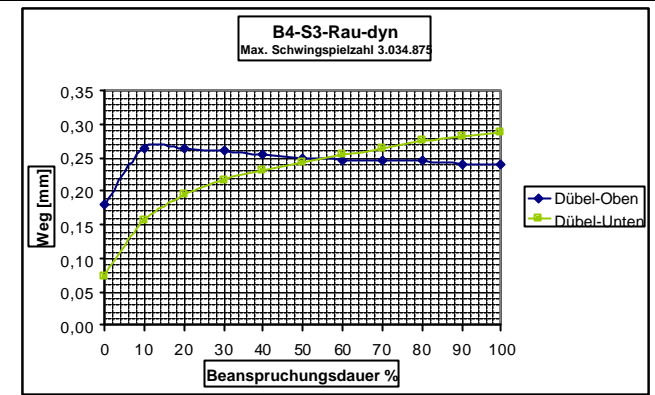


Abb. 7.262 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

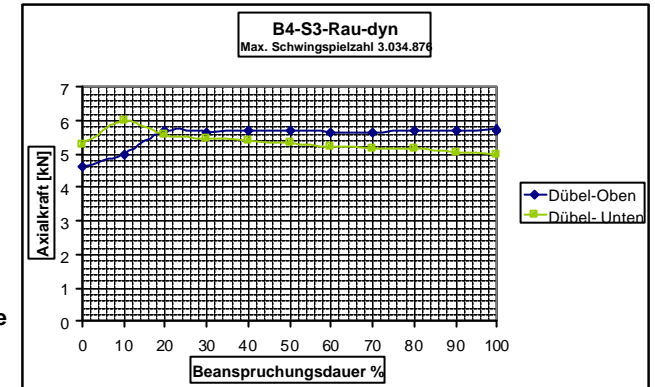


Abb. 7.263 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

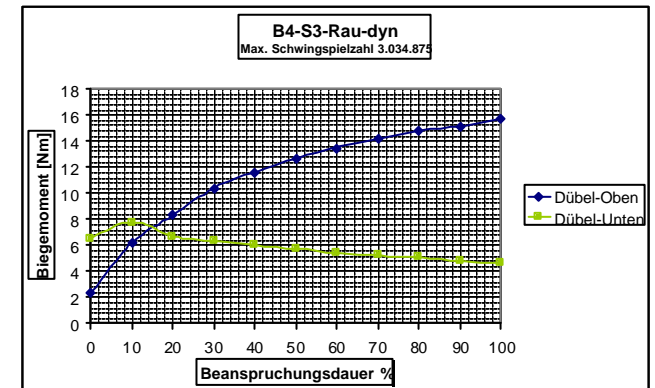


Abb. 7.264 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

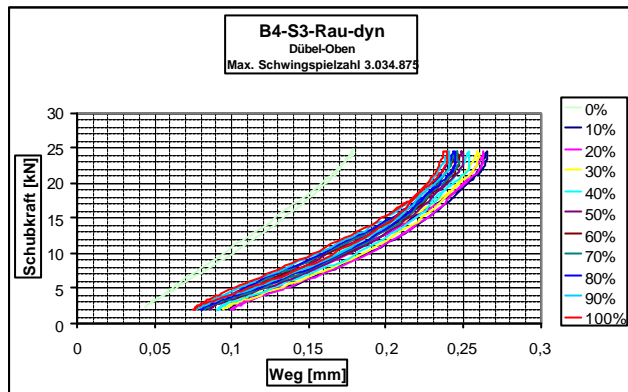


Abb. 7.265 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

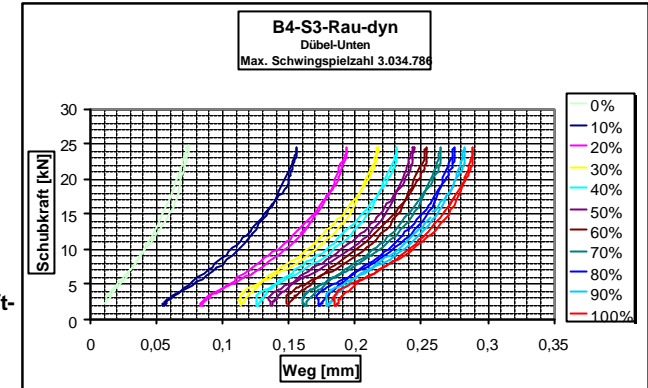


Abb. 7.268 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

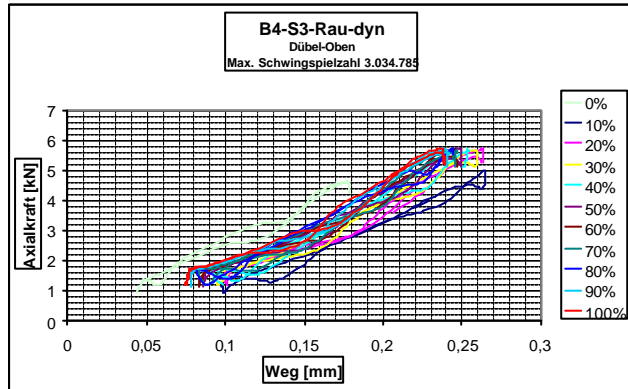


Abb. 7.266 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

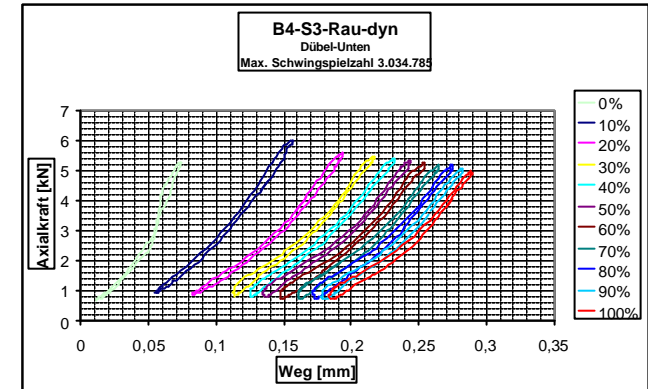


Abb. 7.269 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

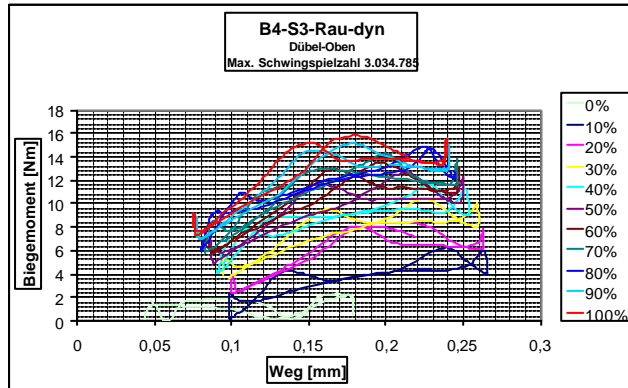


Abb. 7.267 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

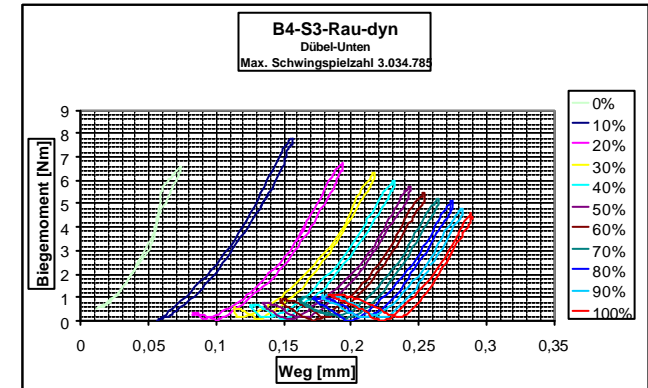


Abb. 7.270 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

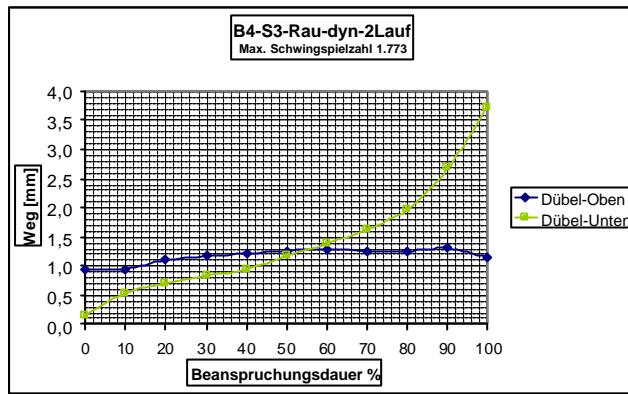


Abb. 7.271 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

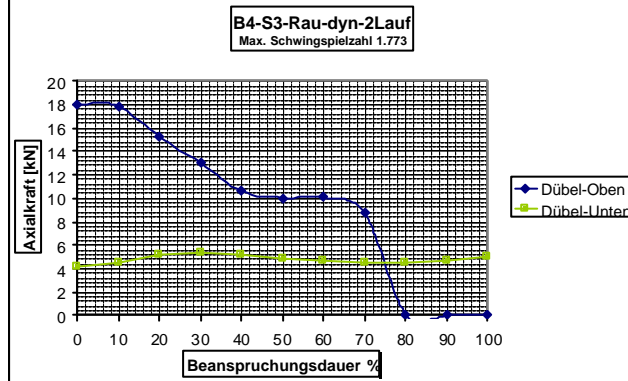


Abb. 7.272 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

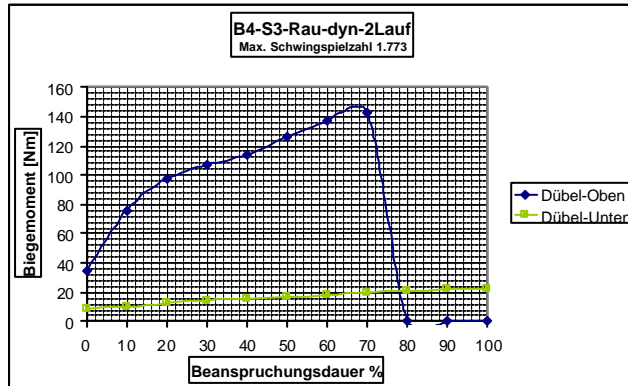


Abb. 7.273 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

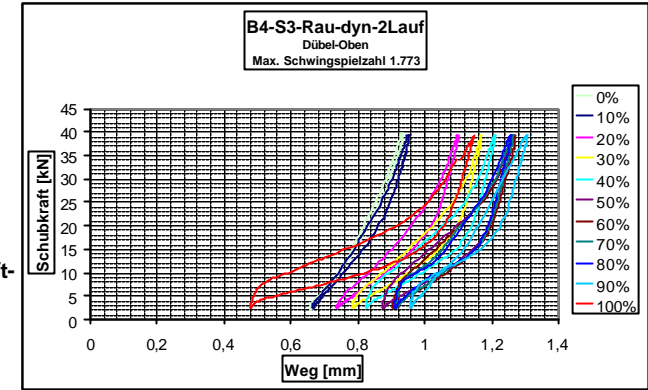


Abb. 7.274 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

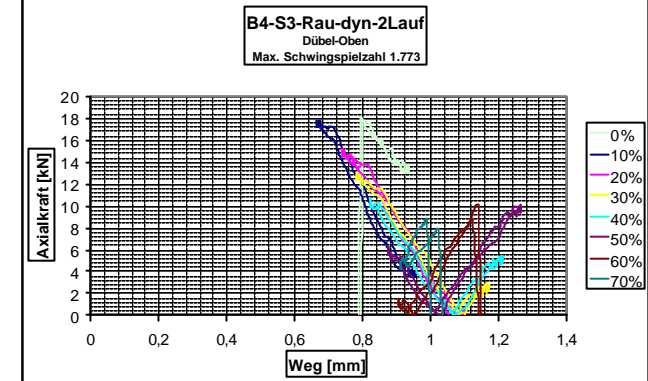


Abb. 7.275 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

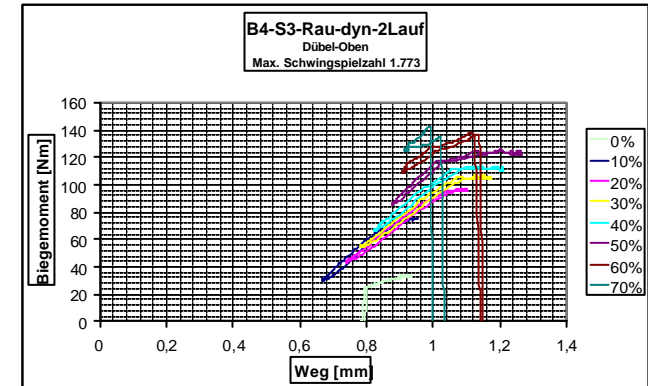


Abb. 7.276 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

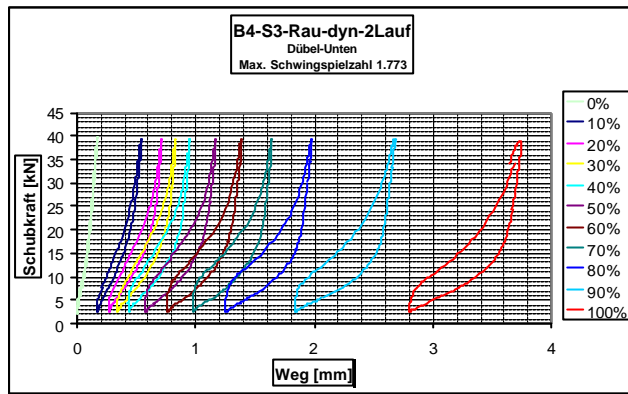


Abb. 7.277 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

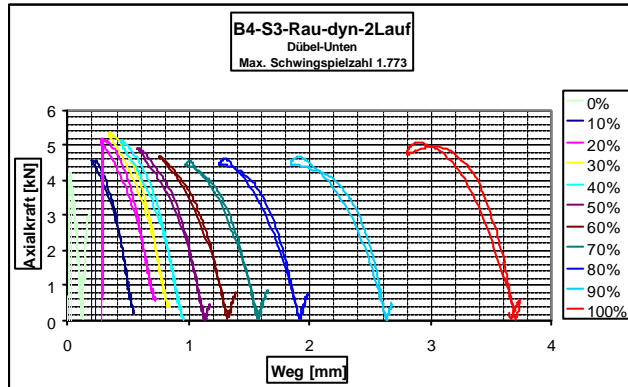


Abb. 7.278 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

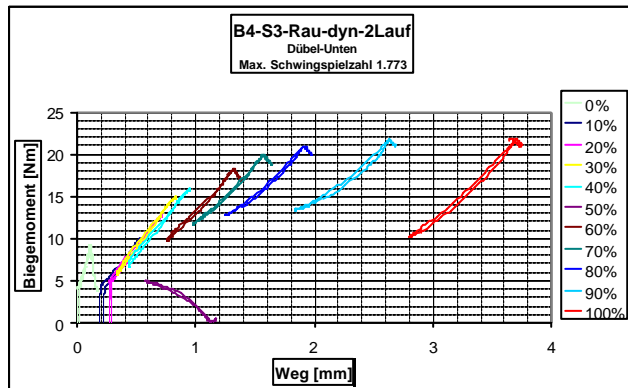


Abb. 7.279 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

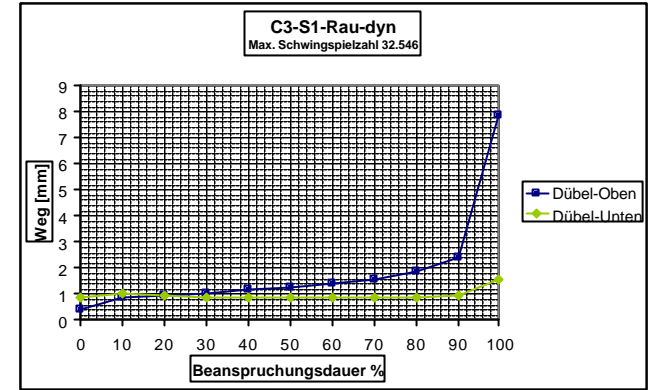


Abb. 7.280 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

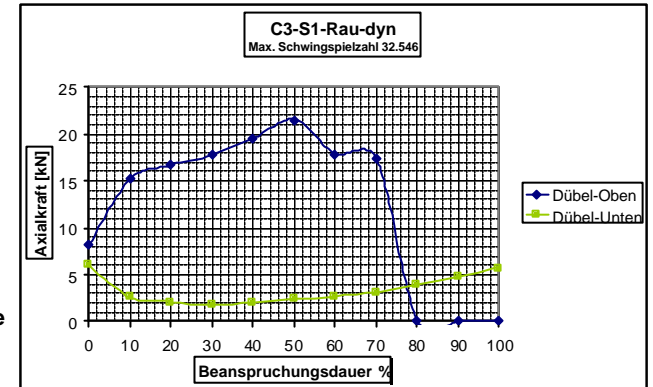


Abb. 7.281 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

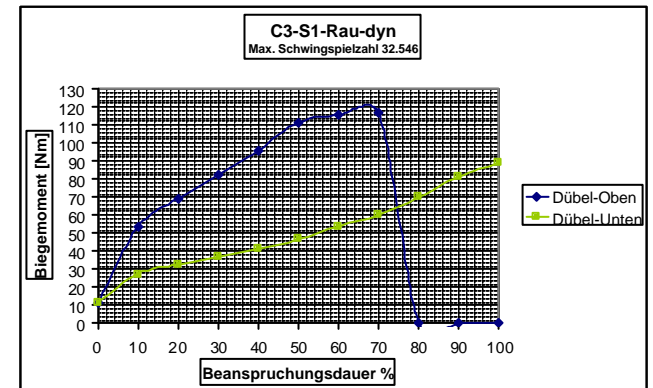


Abb. 7.282 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

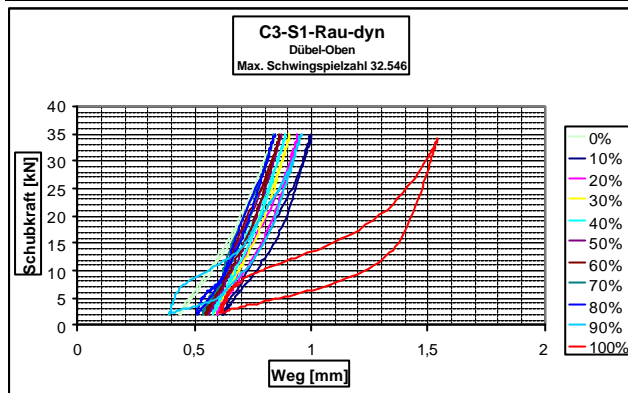


Abb. 7.283 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

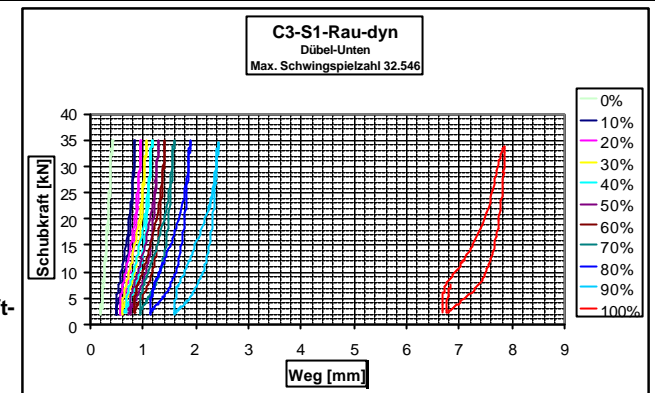


Abb. 7.286 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

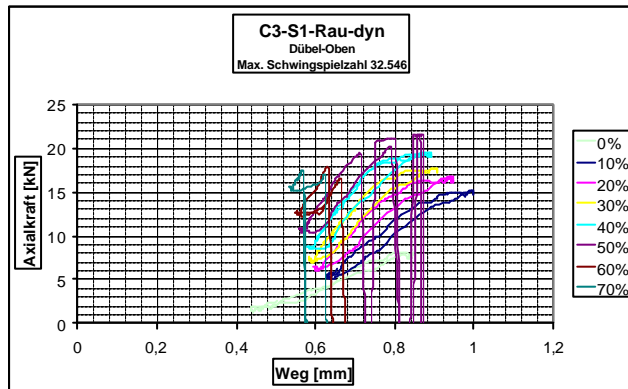


Abb. 7.284 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

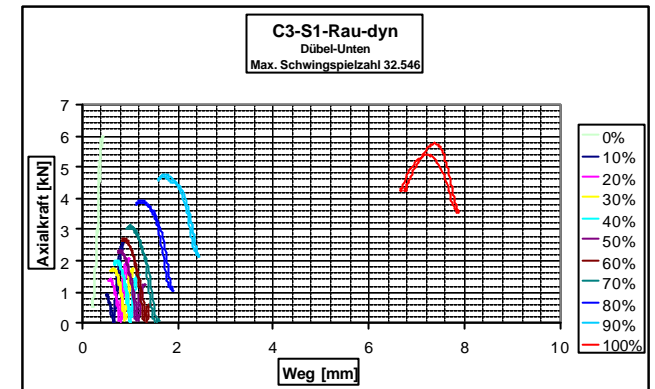


Abb. 7.287 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

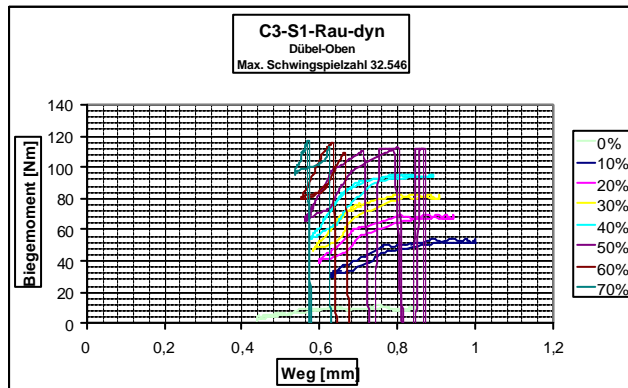


Abb. 7.285 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

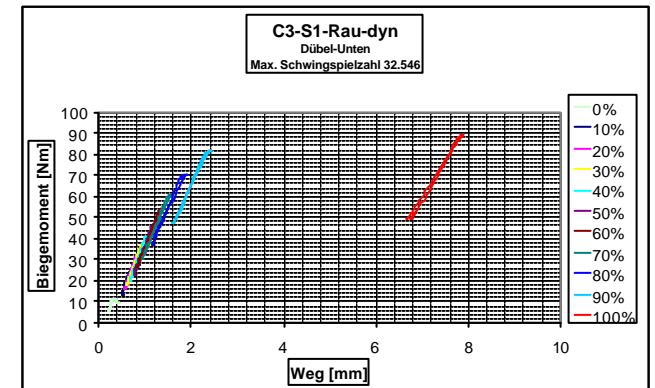


Abb. 7.288 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

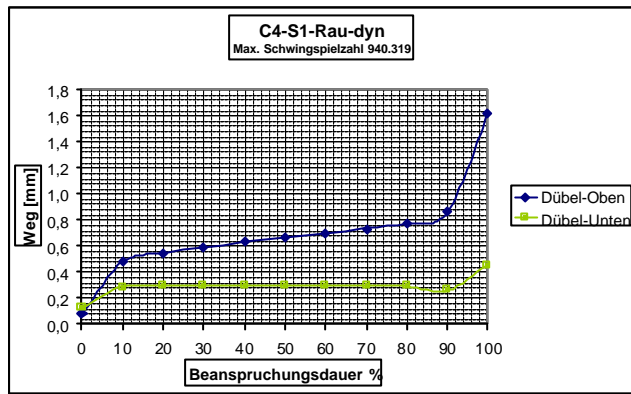


Abb. 7.289 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

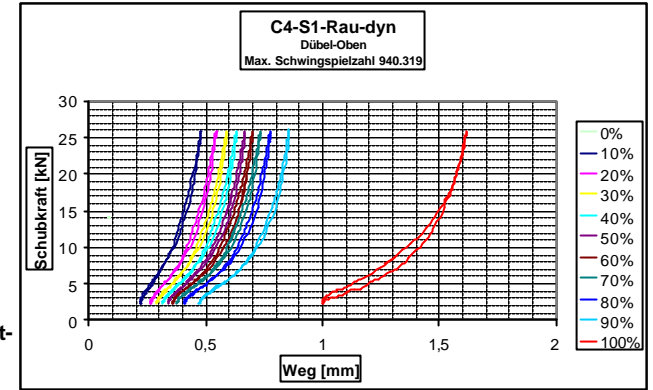


Abb. 7.292 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

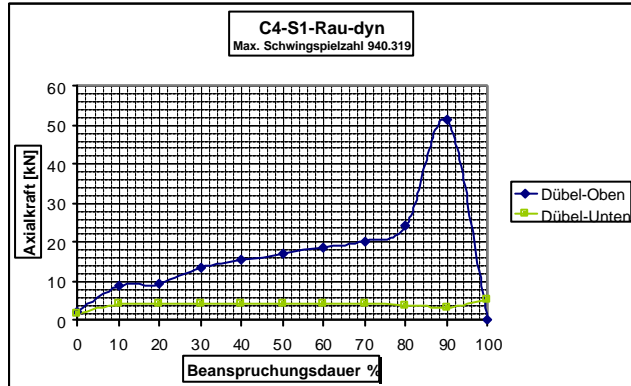


Abb. 7.290 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

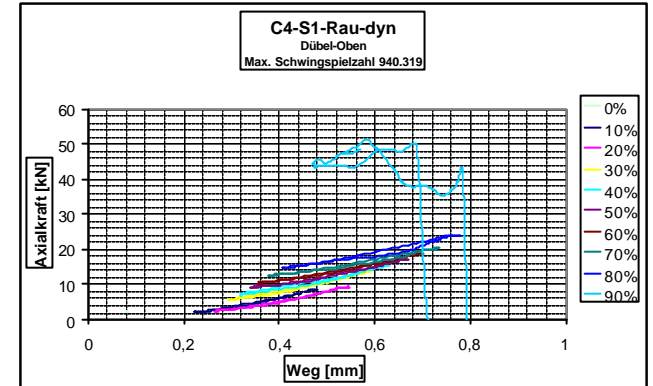


Abb. 7.293 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

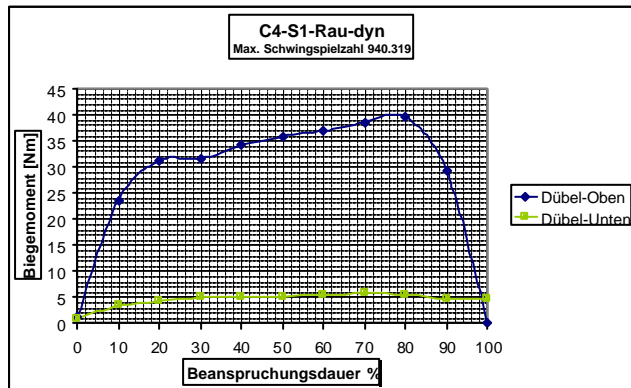


Abb. 7.291 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

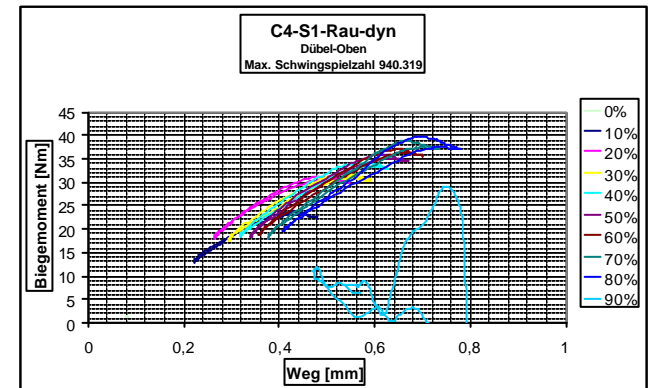


Abb. 7.294 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

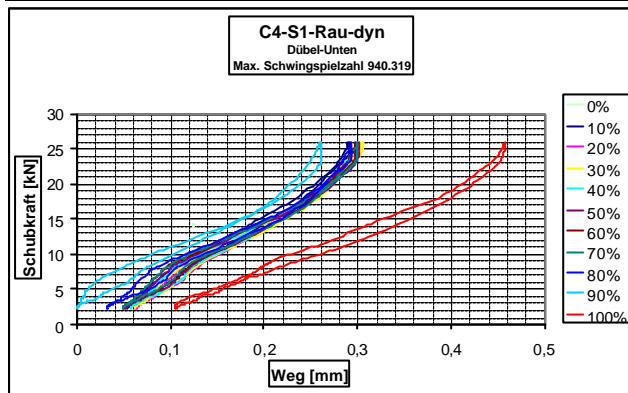


Abb. 7.295 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

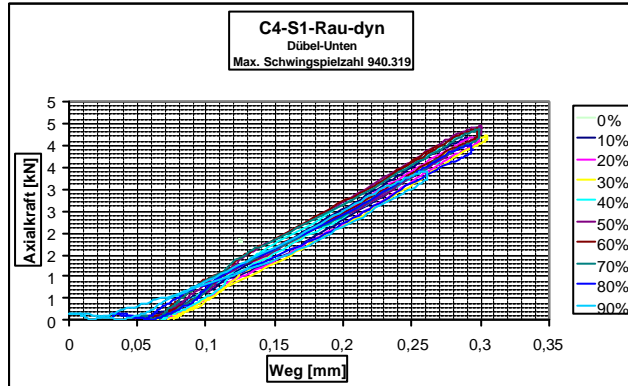


Abb. 7.296 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

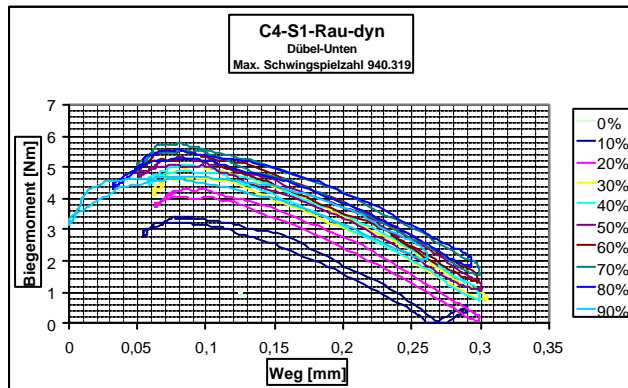


Abb. 7.297 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

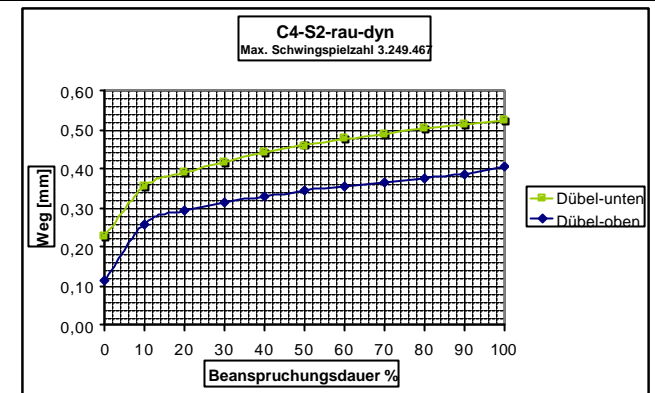


Abb. 7.298 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

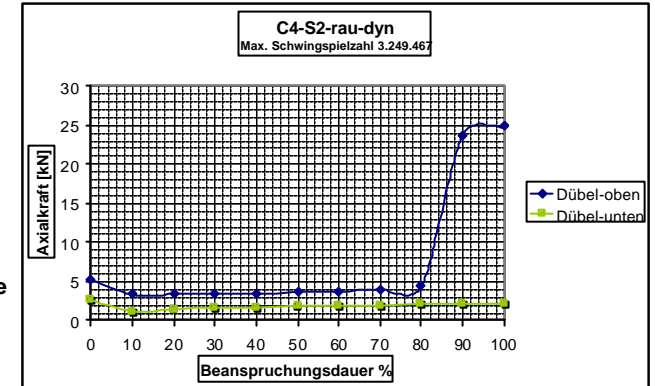


Abb. 7.299 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

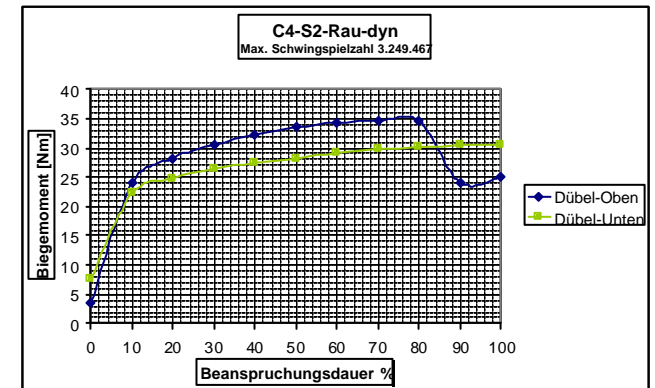


Abb. 7.300 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer



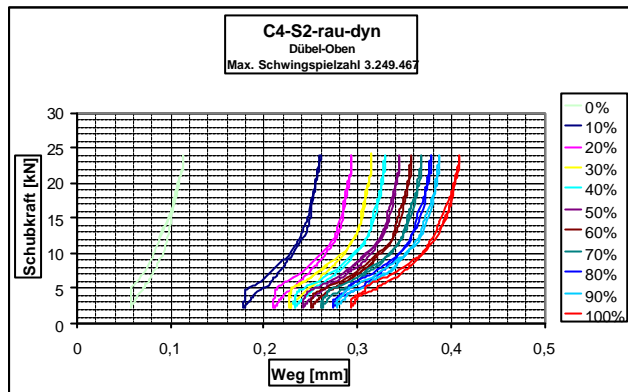


Abb. 7.301 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

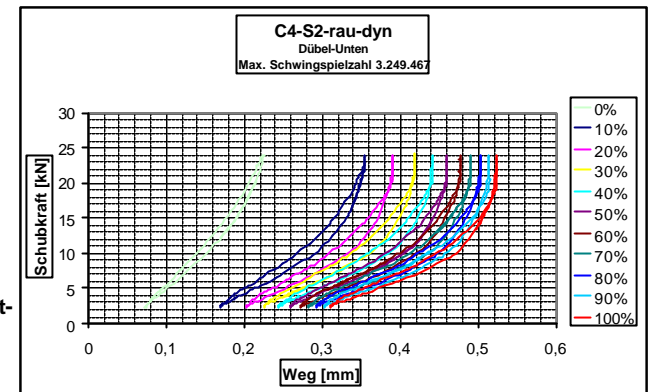


Abb. 7.304 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

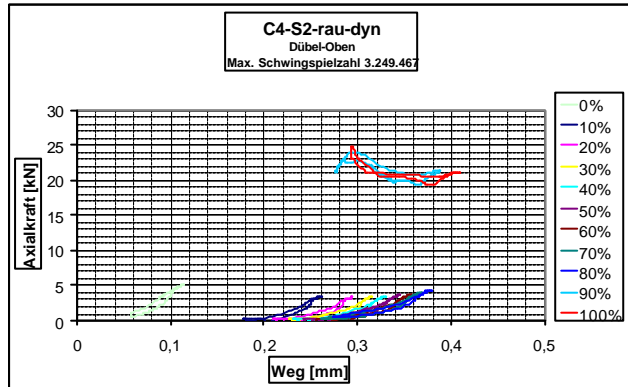


Abb. 7.302 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

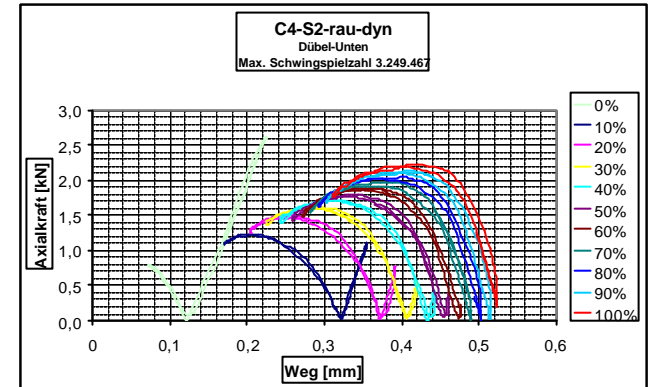


Abb. 7.305 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

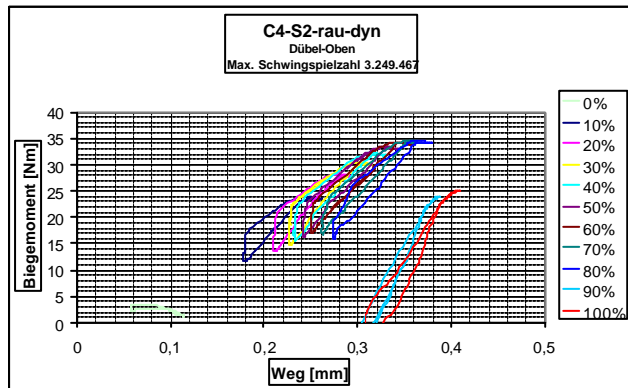


Abb. 7.303 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

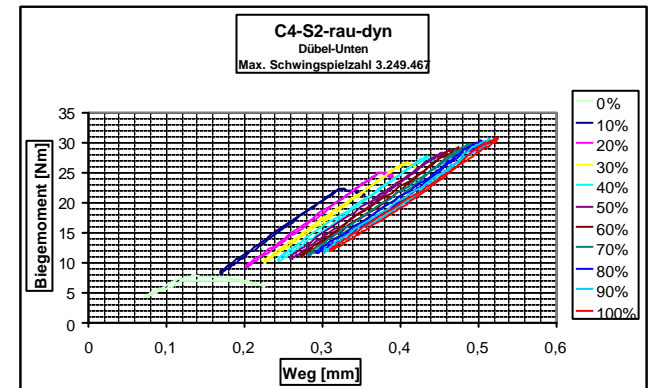


Abb. 7.306 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

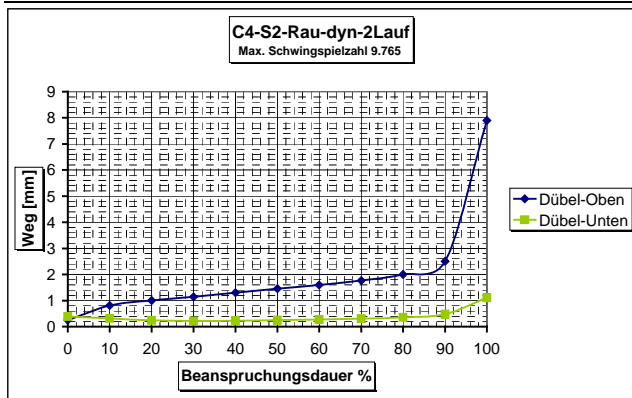


Abb. 7.307 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

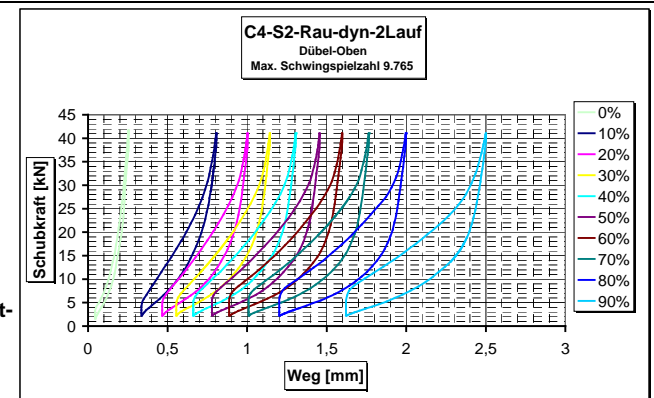


Abb. 7.310 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

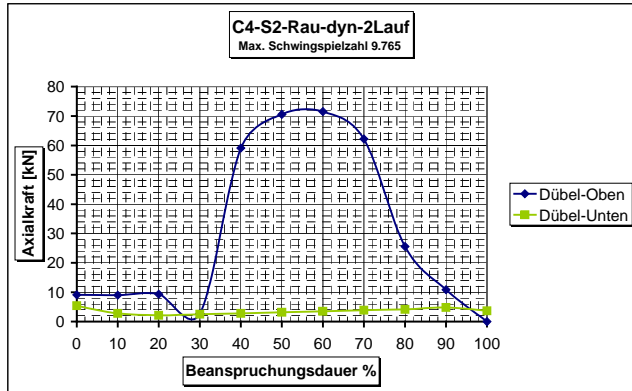


Abb. 7.308 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

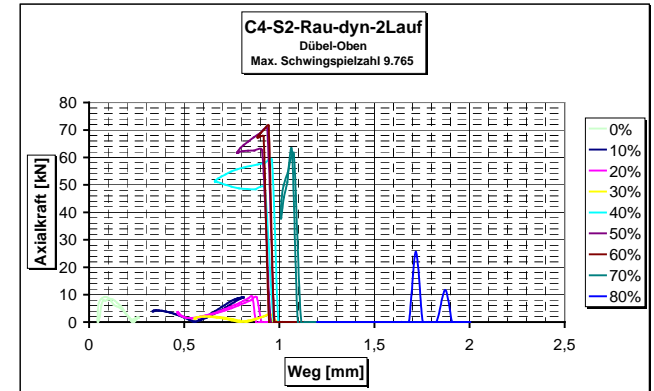


Abb. 7.311 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

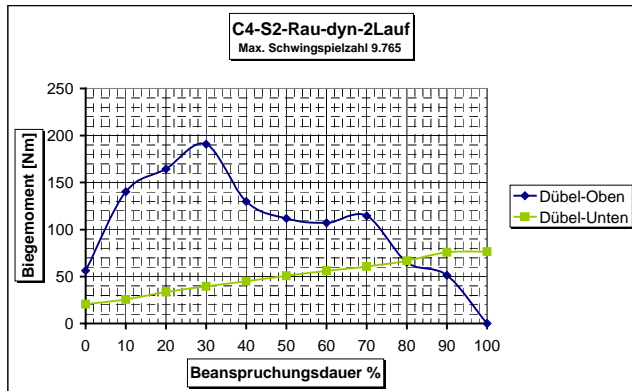


Abb. 7.309 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

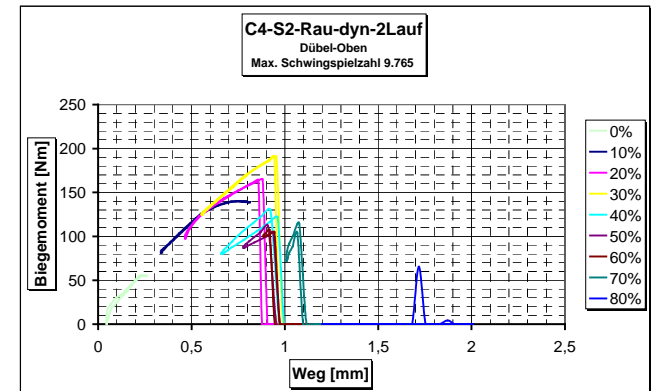


Abb. 7.312 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

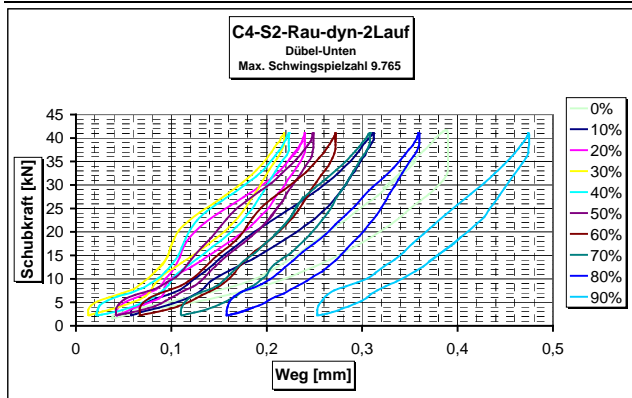


Abb. 7.313 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

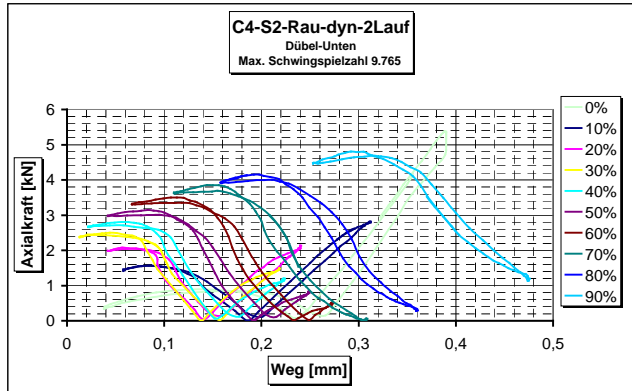


Abb. 7.314 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

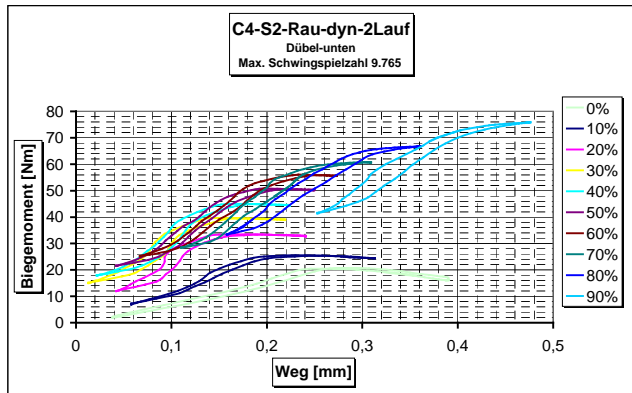


Abb. 7.315 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

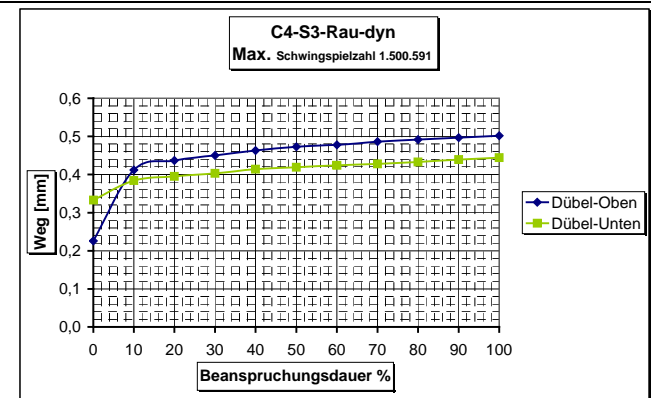


Abb. 7.316 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

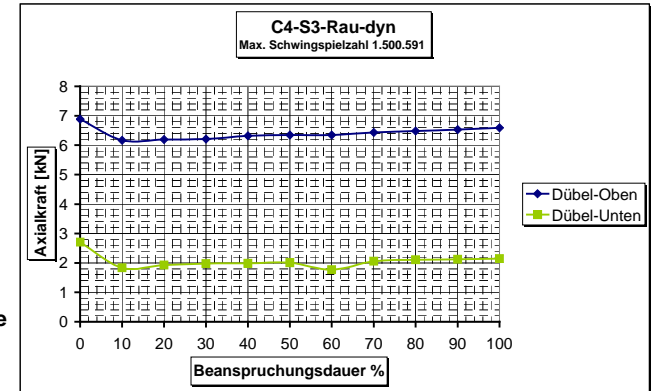


Abb. 7.317 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

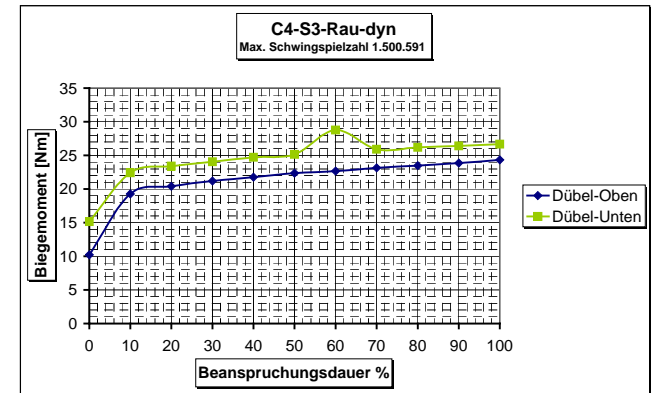


Abb. 7.318 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

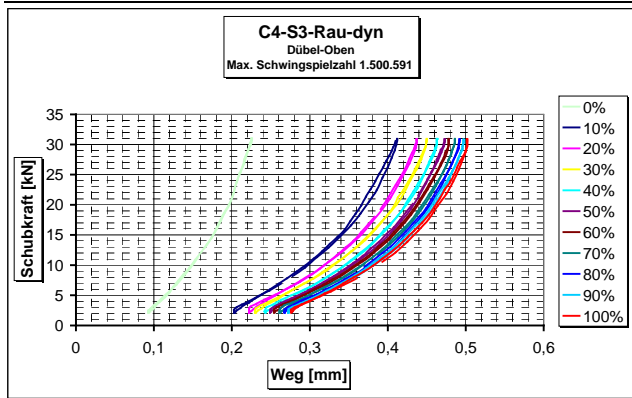


Abb. 7.319 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

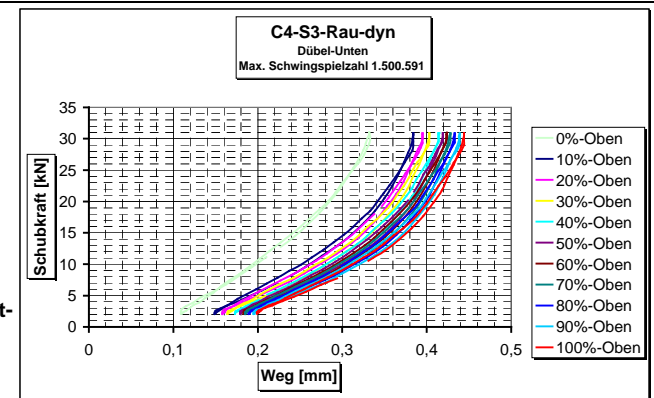


Abb. 7.322 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

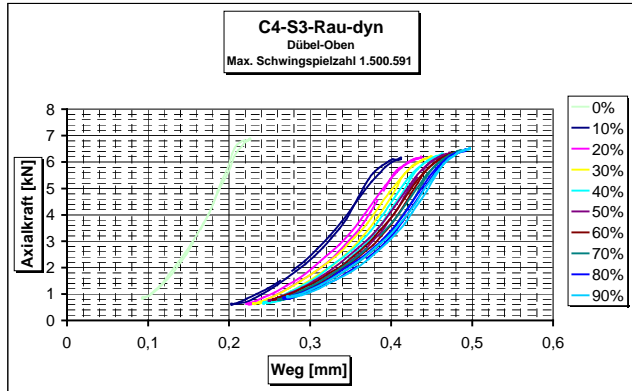


Abb. 7.320 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

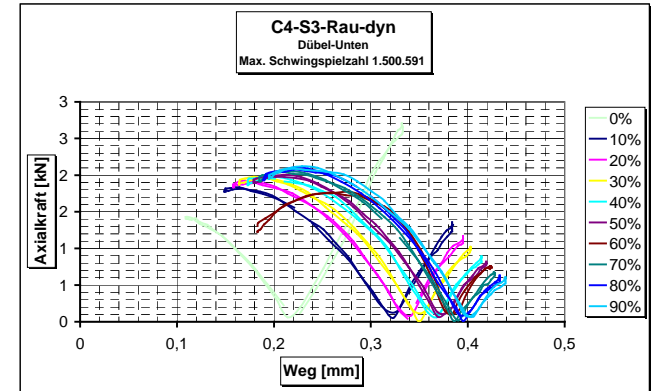


Abb. 7.323 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

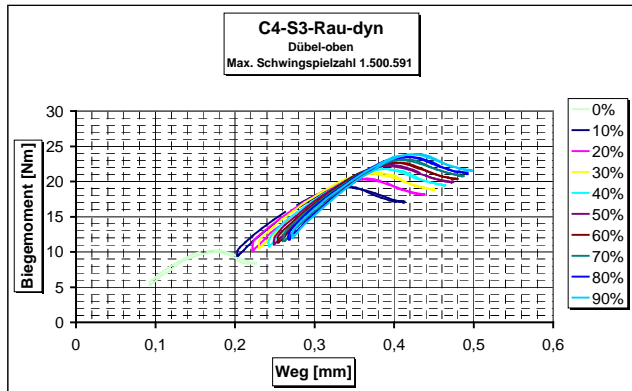


Abb. 7.321 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

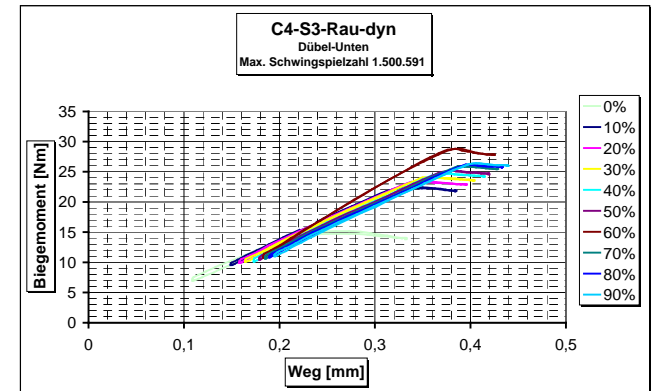


Abb. 7.324 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

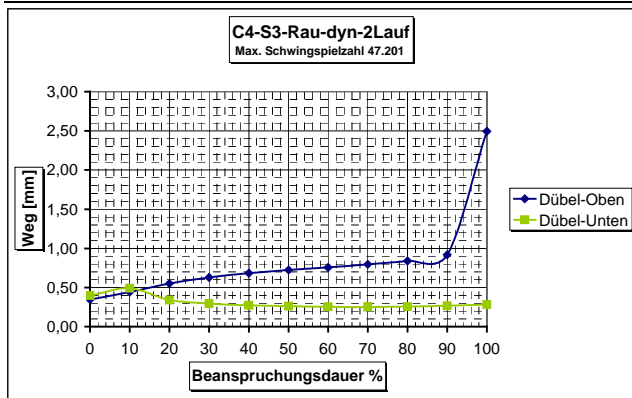


Abb. 7.325 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

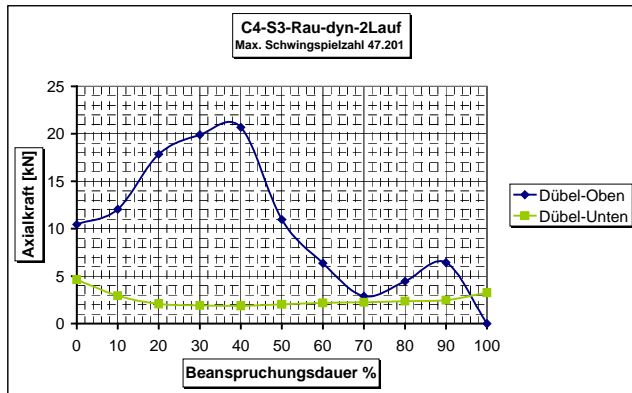


Abb. 7.326 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

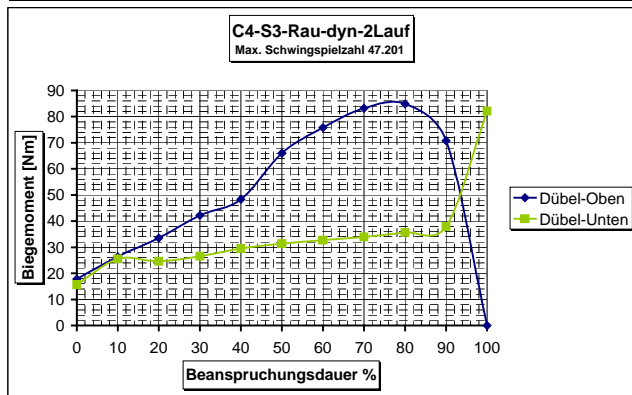


Abb. 7.327 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

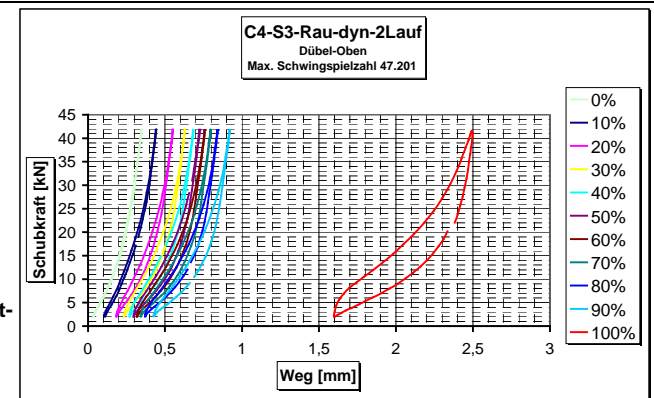


Abb. 7.328 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

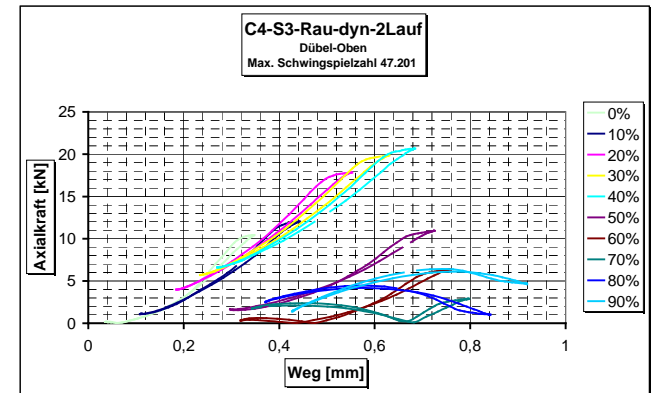


Abb. 7.329 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

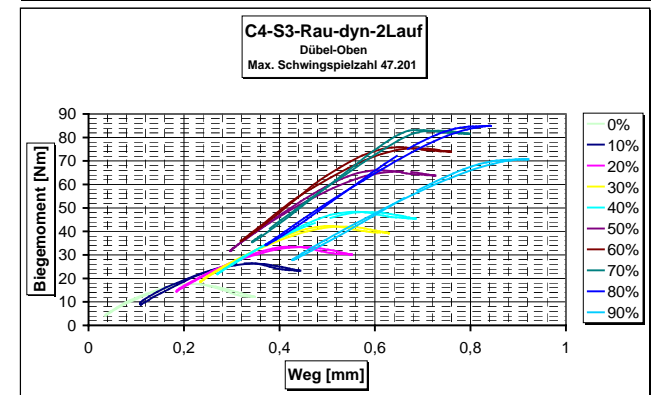


Abb. 7.330 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

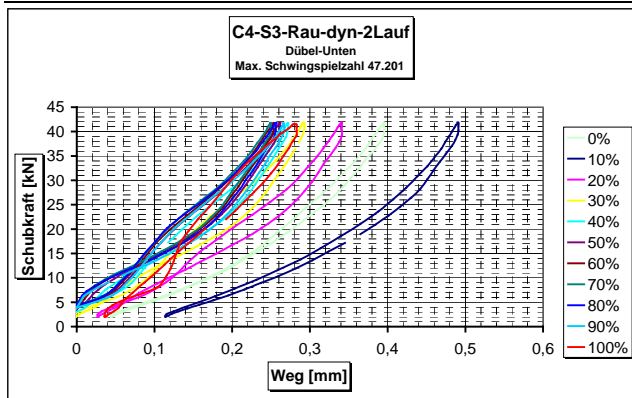


Abb. 7.331 : Wegverlauf bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

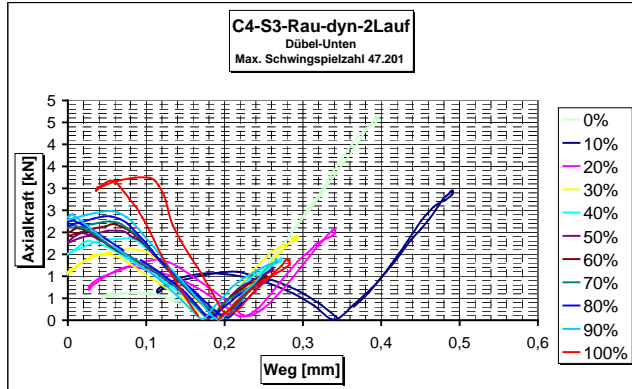


Abb. 7.332 : Dübelaxialkräfte bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

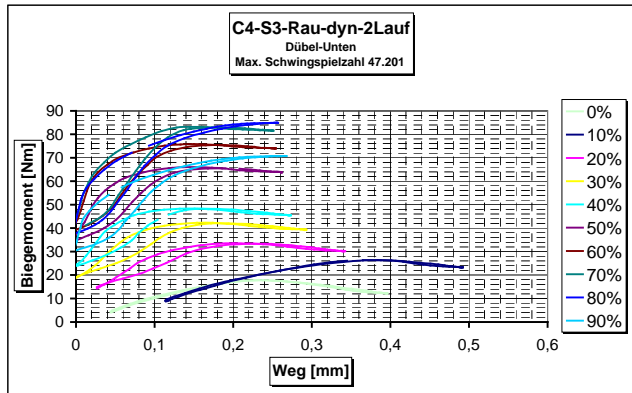


Abb. 7.333 : Dübelbiegemomente bei Zunahme der Beanspruchungsdauer

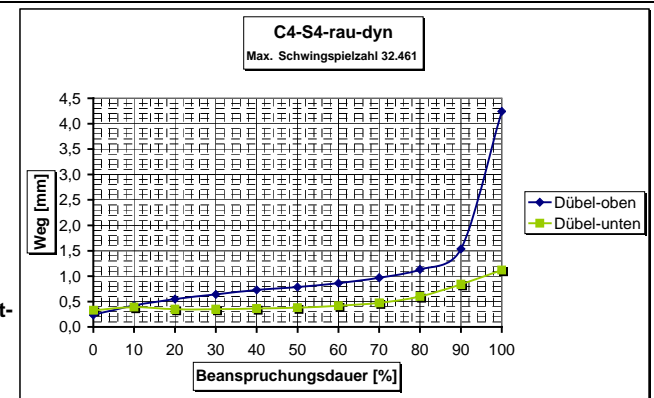


Abb. 7.334 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

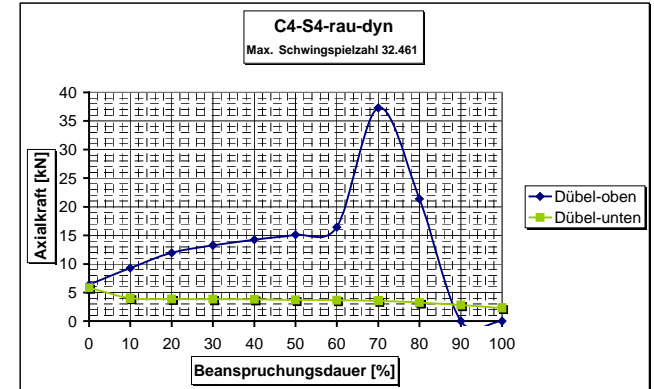


Abb. 7.335 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

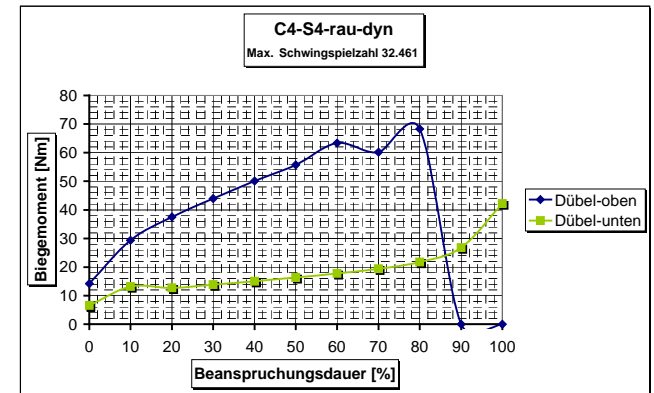


Abb. 7.336 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

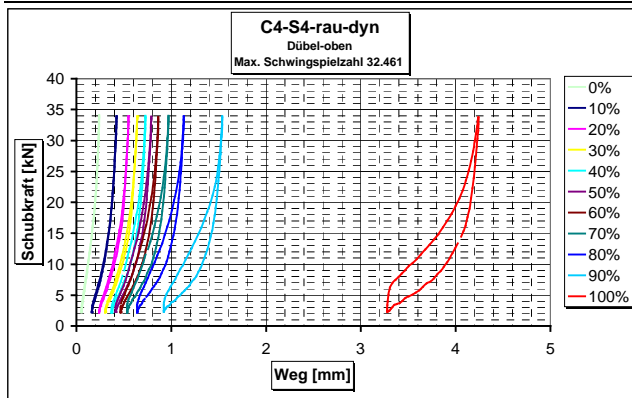


Abb. 7.337 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

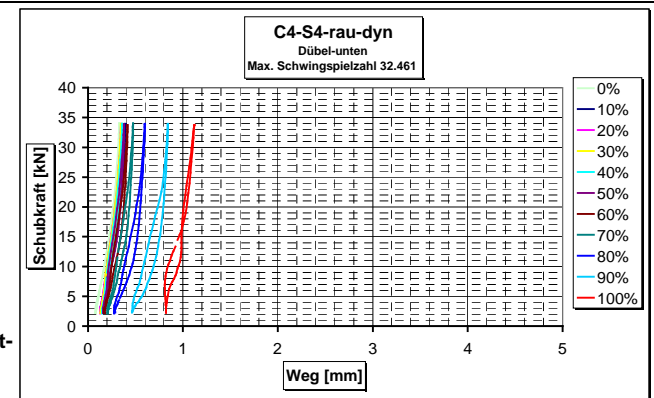


Abb. 7.340 : Weg-Schubkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

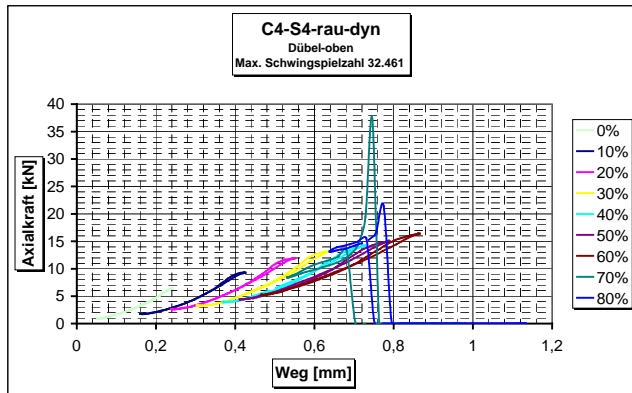


Abb. 7.338 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der oberen Dübel

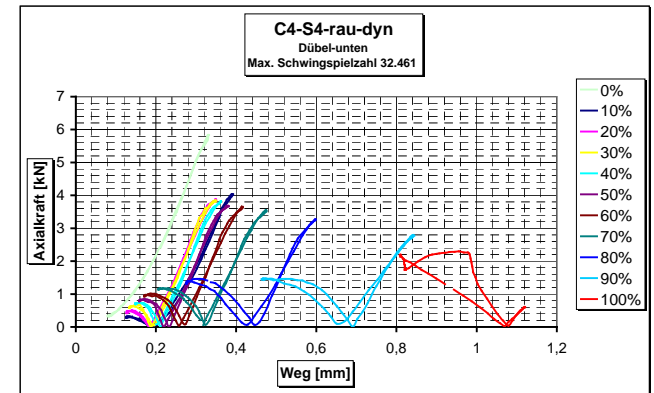


Abb. 7.341 : Weg-Dübelaxialkraft-Hystereseschleifen der unteren Dübel

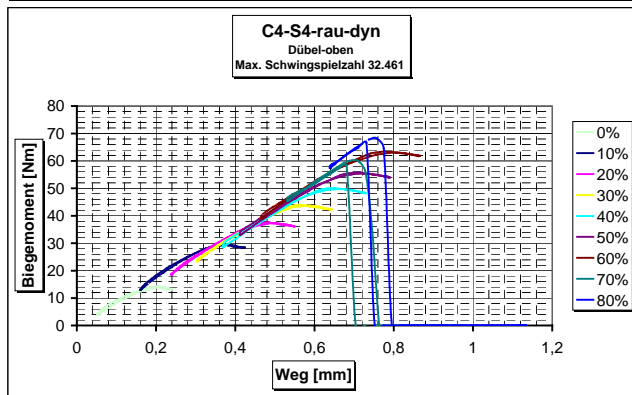


Abb. 7.339 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der oberen Dübel

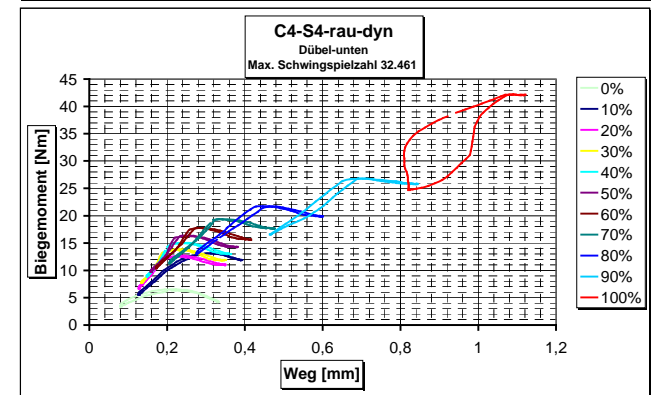


Abb. 7.342 : Weg-Dübelbiegemoment-Hystereseschleifen der unteren Dübel

**8**

**Anhang 8**

**Die Wöhlerlinien**



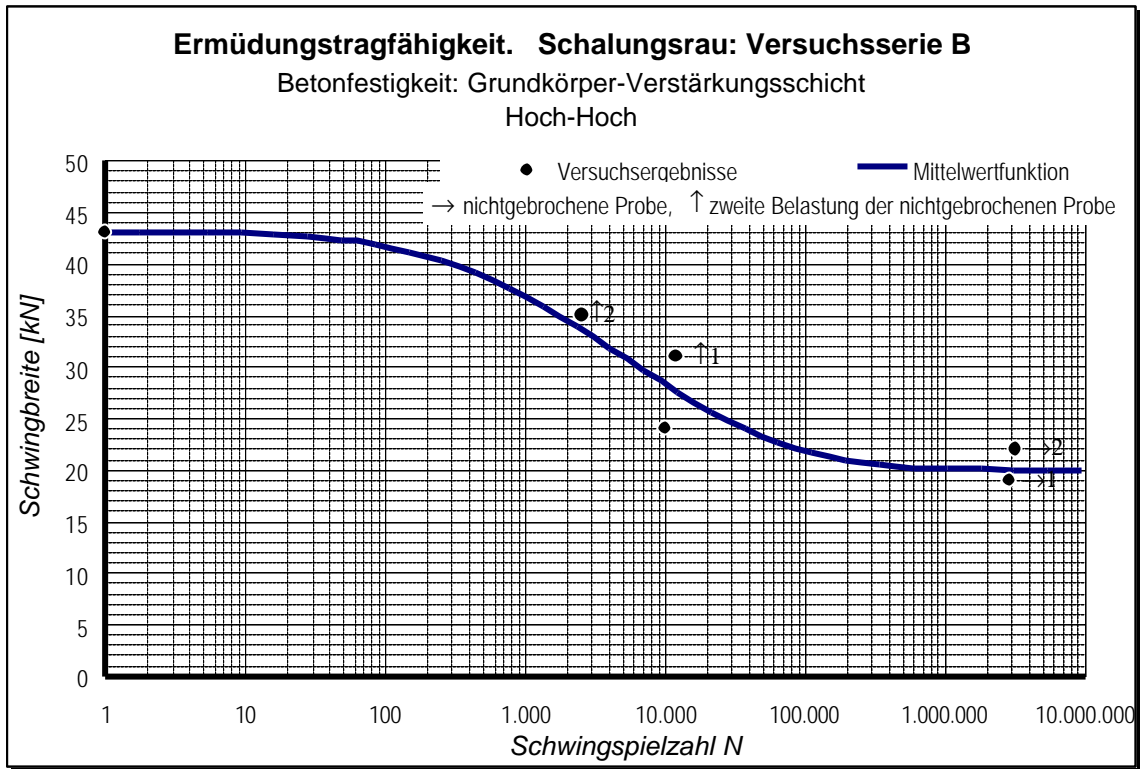


Abb. 8.1 : Wöhlerlinien der Versuchsserie B (Schalungsrau). Betonfestigkeit: Grundkörper-Verstärkungsschicht: Hoch-Hoch

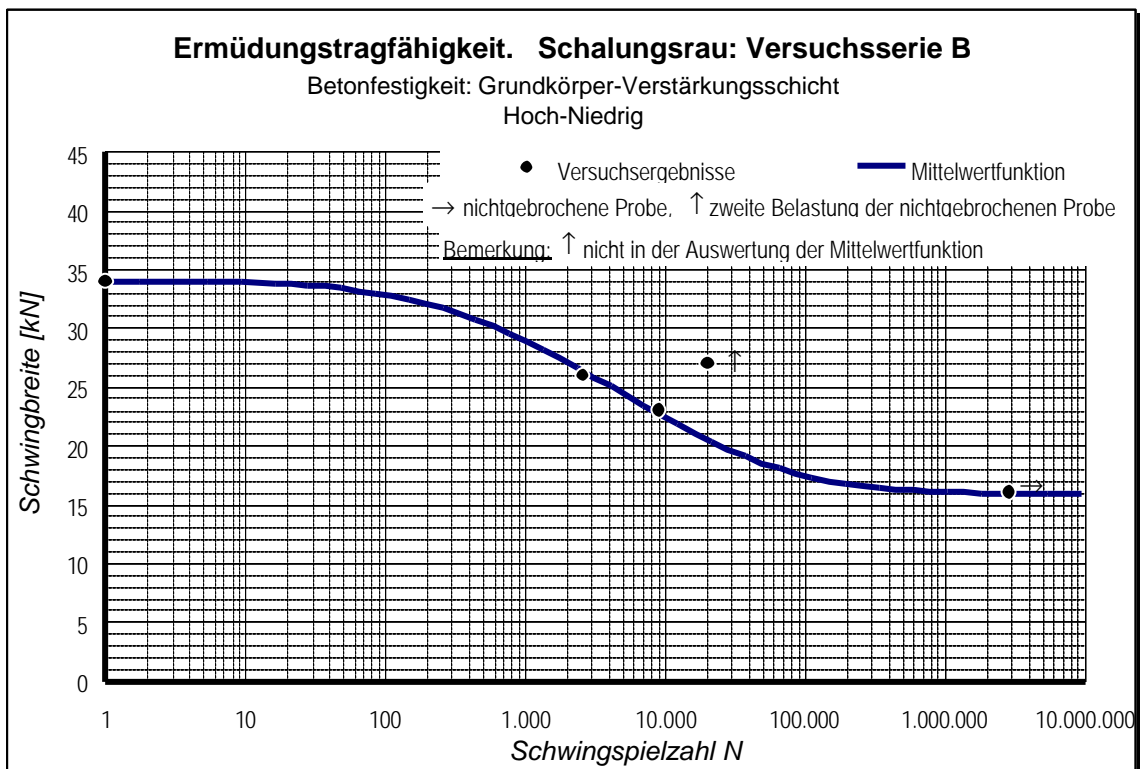


Abb. 8.2 : Wöhlerlinien der Versuchsserie B (Schalungsrau). Betonfestigkeit: Grundkörper-Verstärkungsschicht: Hoch-Niedrig

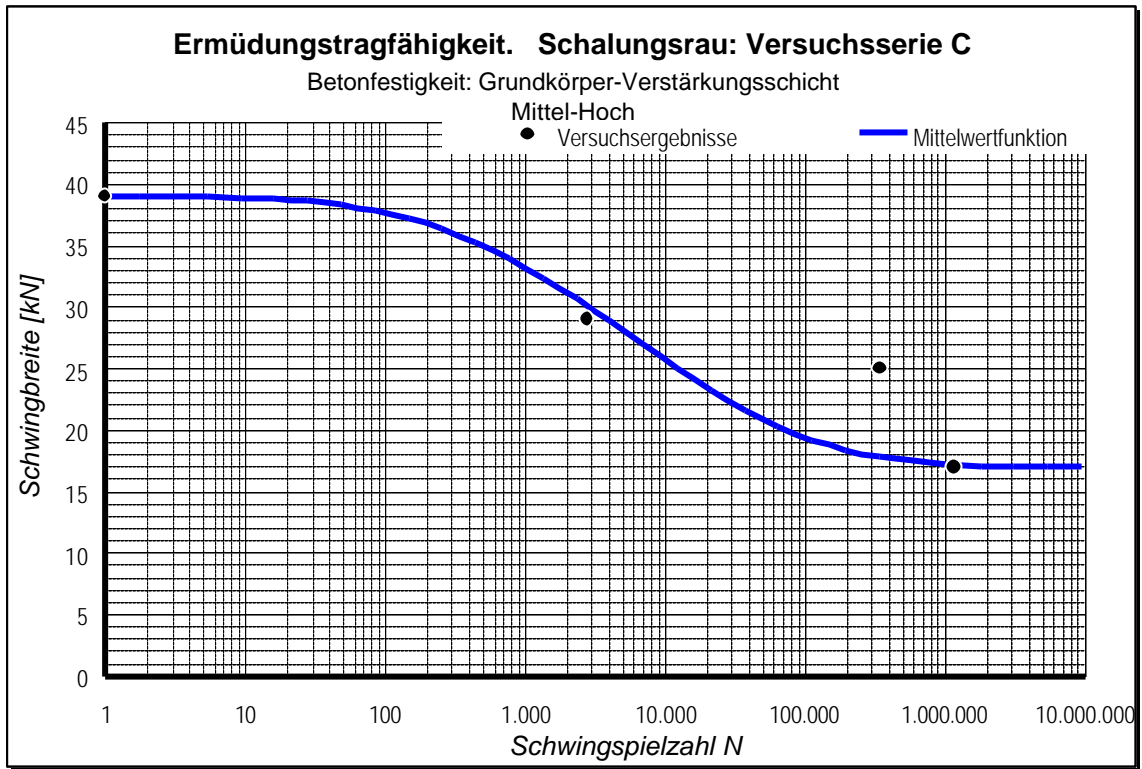


Abb. 8.3 : Wöhlerlinien der Versuchsserie C (Schalungrau). Betonfestigkeit: Grundkörper-Verstärkungsschicht: Mittel-Hoch

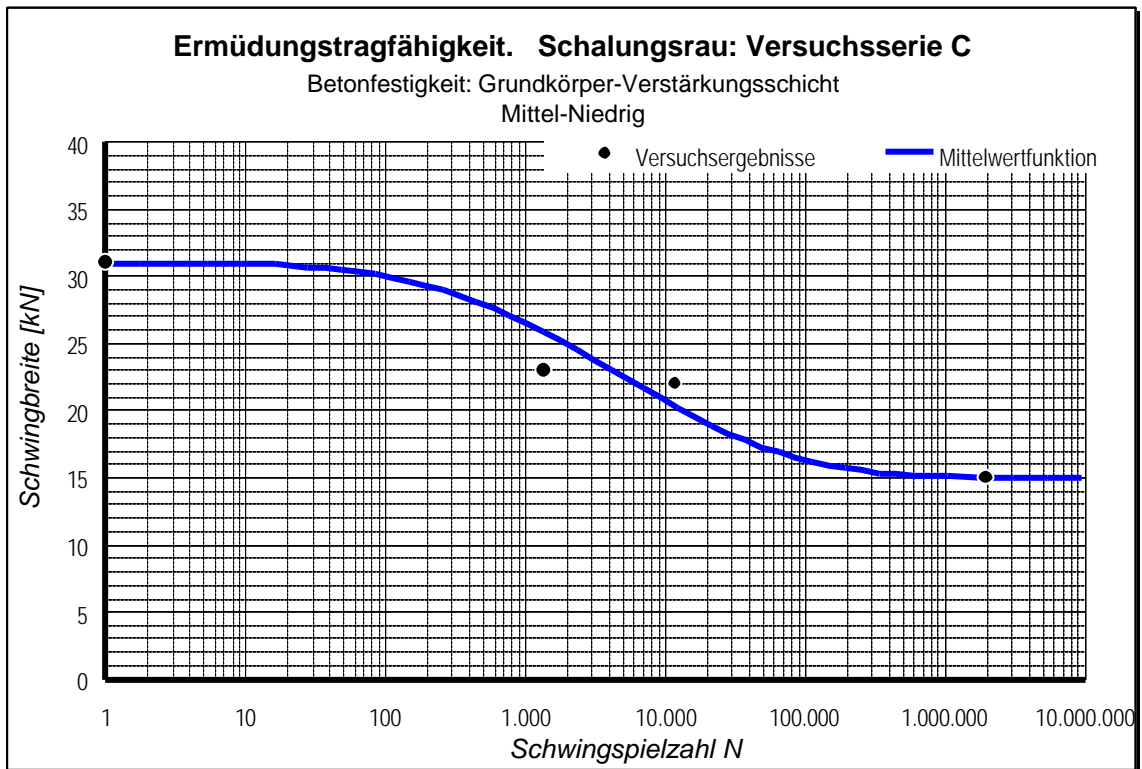


Abb. 8.4 : Wöhlerlinien der Versuchsserie C (Schalungrau). Betonfestigkeit: Grundkörper-Verstärkungsschicht: Mittel-Niedrig

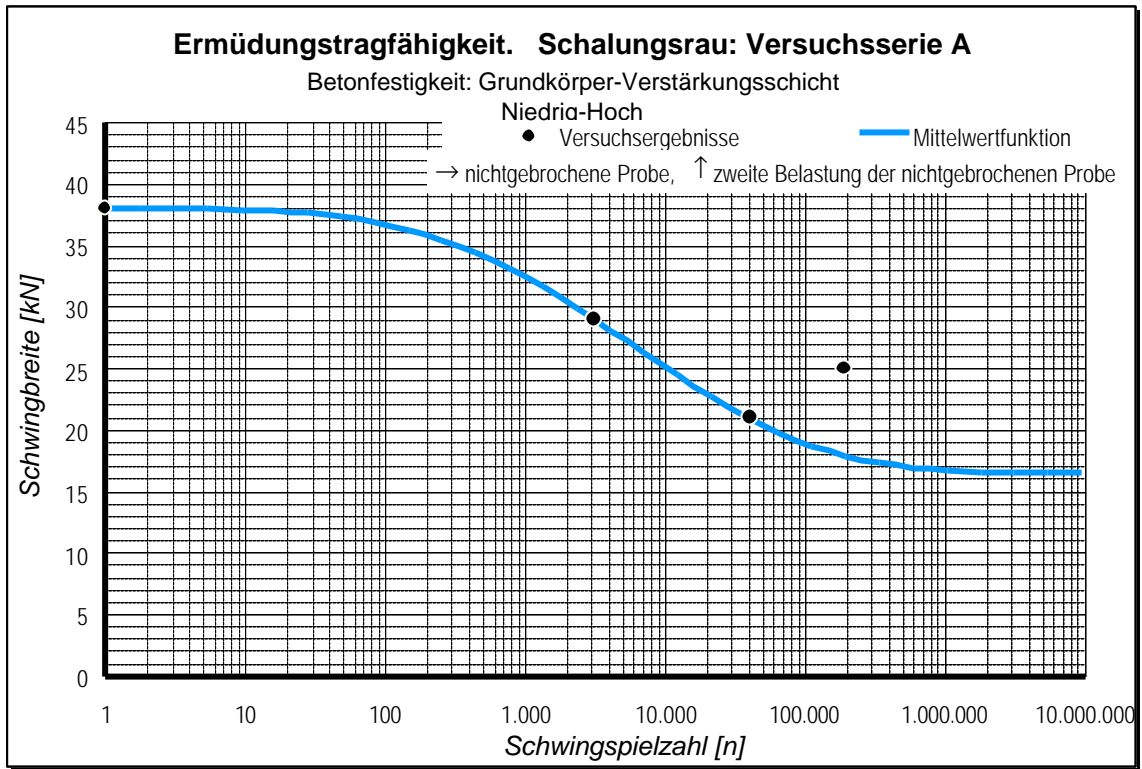


Abb. 8.5 : Wöhlerlinien der Versuchsserie A (Schalungsrau). Betonfestigkeit: Grundkörper-Verstärkungsschicht: Niedrig-Hoch

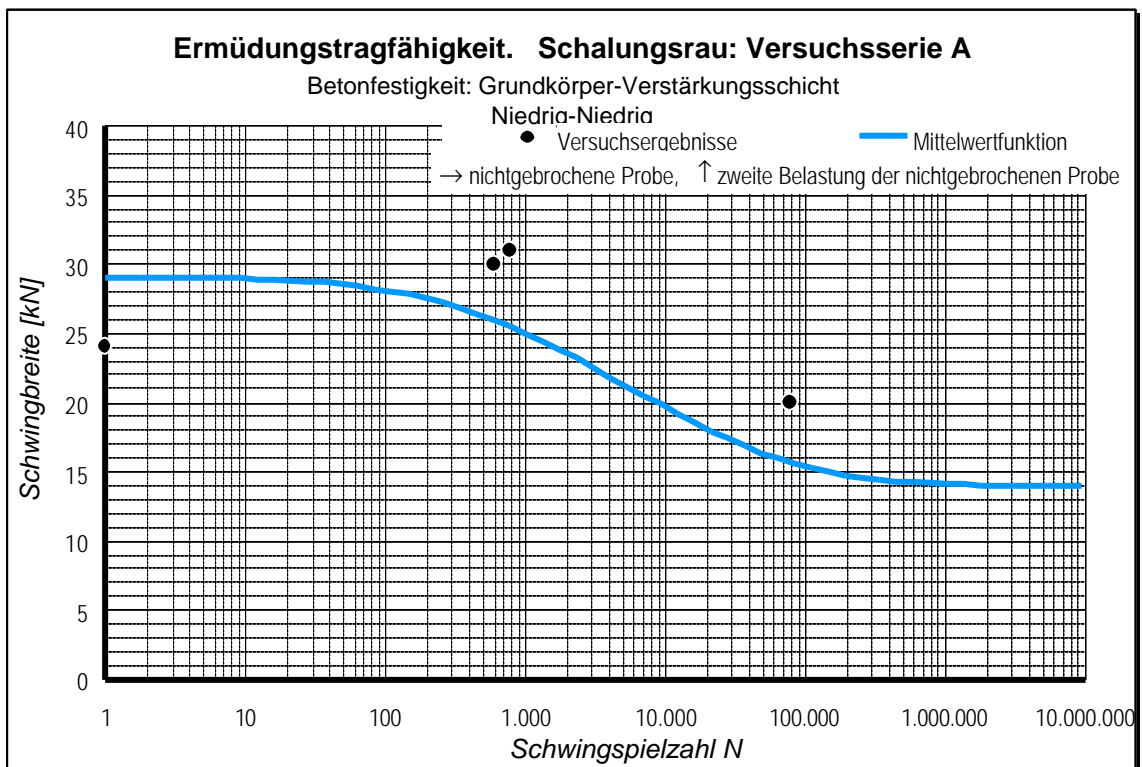


Abb. 8.6 : Wöhlerlinien der Versuchsserie A (Schalungsrau). Betonfestigkeit: Grundkörper-Verstärkungsschicht: Niedrig-Niedrig

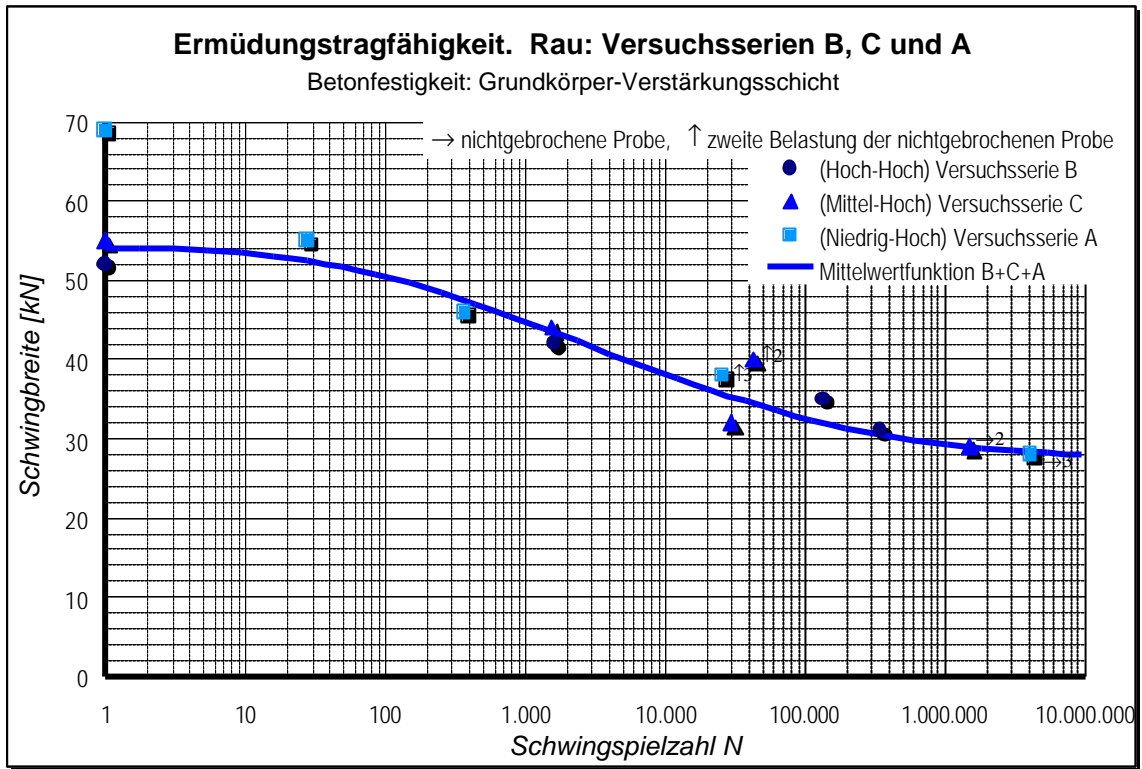


Abb. 8.7 : Wöhlerlinien der Versuchsserien B, C und A (Rau), Betonfestigkeit: Verstärkungsschicht: Hoch

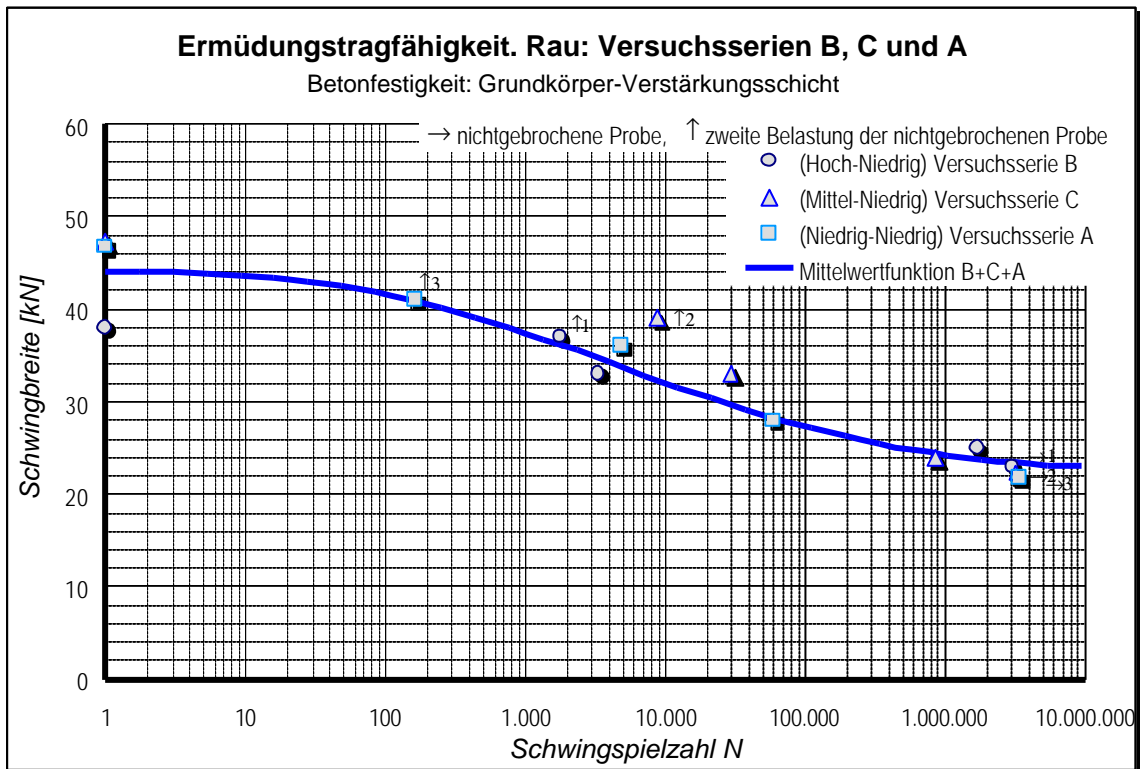


Abb. 8.8 : Wöhlerlinien der Versuchsserien B, C und A (Rau), Betonfestigkeit: Verstärkungsschicht: Niedrig

## LEBENS LAUF

Name : Kadhim  
Vorname : Mazin  
Geburtsdatum : 06.10.1968  
Geburtsort : Bagdad – Irak  
Familienstand : Ledig

**Schul Ausbildung:** 1974 – 1977 **Grundschule:** Sheffield – England  
1977 – 1980 **Grundschule:** Bagdad – Irak  
1980 – 1983 **Mittelschule:** Bagdad – Irak  
1983 – 1986 **Gymnasium:** Bagdad – Irak

**Studium:** 1986 – 1990 **Universität:** Bagdad – Irak:  
"University of Technology, Building and Construction  
Engineering Department". Abschluss BSc.

**Militärdienst und  
Berufspraxis:** 1990 – 1993 Bagdad – Irak:  
Berufstätigkeiten in verschiedenen Disziplinen des  
Bauingenieurwesens.

Ministry of Industry / Baghdad-IRAQ

El-Fao Company

- Department of Development and Scientific Research
- Department of Roads, Bridges and Steel Structures
- The Consulting Bureau

**Sprachkurs:** 1993 – 1994 Hamburg: "Deutsch-Institut für Ausländer  
e.V."

**Ausbaustudium an der  
Universität Dortmund :** 1994 – 1996 Besuch von Vorlesungen und Übungen,  
Vorbereitung auf die verlangten Kenntnis- Prüfungen.  
Vorläufige Zulassung als Doktorand.

**Promotion :** 1996 – 2002 Zulassung als Doktorand, Tätigkeit als  
wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Beton-  
und Stahlbetonbau, Universität Dortmund.  
2003 Abschluss Dr.-Ing.