

# **Genauigkeitsbetrachtung zur Deformations- analyse von Körpern mittels 3D-Laserscanner**

VON DIPL.-GEOL. P. LENHARD

## **Kurzfassung**

Um Deformationen wie zum Beispiel das Bewegen von Felskörpern oder das Gleiten von Böschungen mit einem Laserscanner erfassen zu können, ist vorab die Genauigkeit des Gerätes und die Tauglichkeit des Aufnahmeverfahrens für diese Problemstellung zu ermitteln. Beispielhaft wurde dies im Labor und im Gelände durchgeführt und einer Fehlerbetrachtung unterzogen. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Kombination Laserscanner – Tachymeter sich als vorteilhaft erwiesen hat, solange mit dem Tachymeter nur die Zielmarken bestimmt werden. Andere Ziele z. B. Kanten, Ecken haben sich als erhebliche Fehlerquellen erwiesen.

## **Allgemeines**

Das Institut für GEO UND UMWELT hat sich zum Ziel gesetzt, Verfahrensweisen zur Ermittlung, Darstellung und Bewertung von möglichen Fels- oder Böschungsabgängen mit Hilfe von 3D-Laserscannern zu entwickeln. – Wie ist hierbei der 3D-Laserscanner optimal einzusetzen? Welche andere Geräte oder Daten müssen hinzugezogen werden? Wie ist die Auswertung zu beschleunigen? Wie genau sind diese Verfahren?

## Methode - Labor

Bezüglich der Genauigkeit wurden unterschiedliche Messverfahren durchgeführt und miteinander verglichen. Diese Versuchsanordnung fand hierbei im Fall 1 unter Laborbedingungen statt; im Fall 2 wurde eine Geländeaufnahme durchgeführt. Zum Einsatz kam der Laserscanner LEICA HDS 3000.

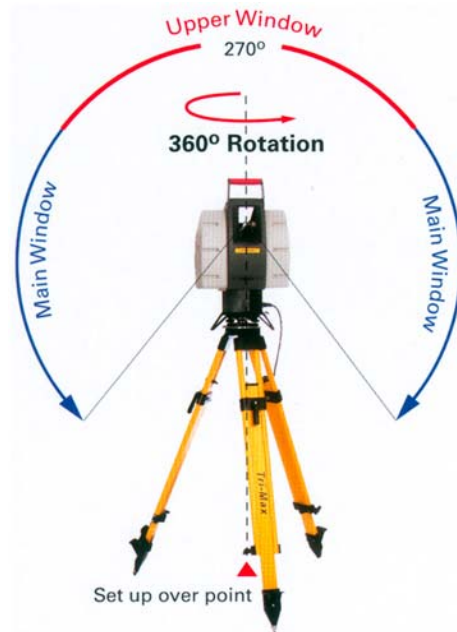


Abb. 1: Laserscanner LEICA HDS 3000

Tab. 1: Systemspezifikationen LEICA HDS 3000

Reichweite	100 m
Messrate	1.800 pts/sec.
Ausschnitt	270° x 360°
Laserklasse	3R
Strahlöffnung	< 6mm bei 50m
Schrittweite	
- horizontal	max. 20.000 pts/row
- vertikal	max. 5.000 pts/row
Genauigkeit	
- Entfernung	4mm / 50m
- Winkel (Hz)	60 microrad
- Winkel (V)	60 microrad
Gewicht	16 kg (ohne Batterie)

(OSTENRIEDER, M. & FUGMANN, J., 2004)

In der Versuchsanordnung wurden drei Körper auf ein Koordinatensystem aufgelegt (s.a. Abb. 2).

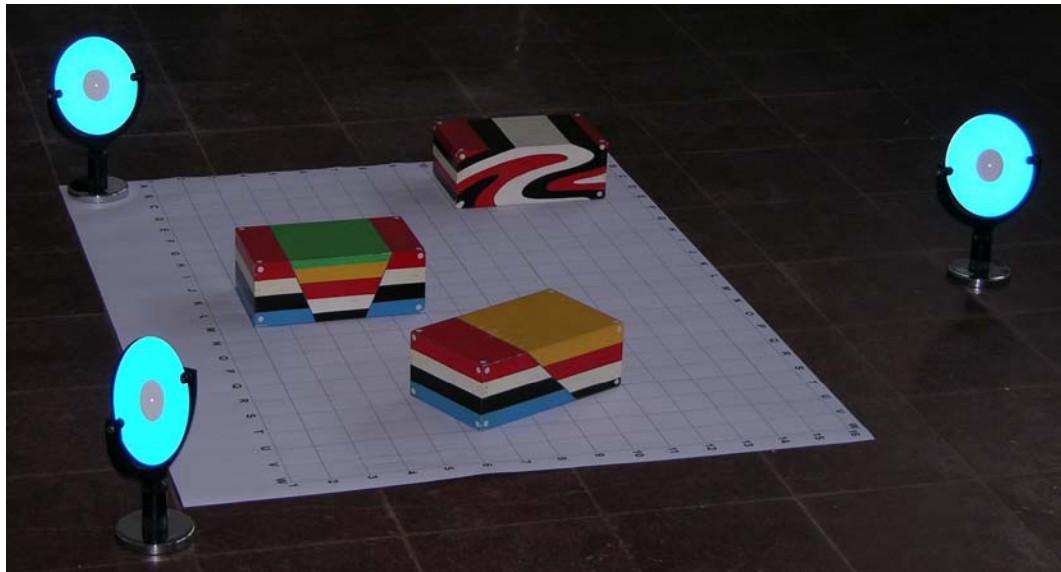


Abb. 2: Versuchsanordnung Box-Verschiebung

Zielmarken wurden um das Modellfeld verteilt und drei Testkörper über zwei Scannerstandorte [1cm auf 10m Entfernung] aufgenommen. Weiterhin wurden über zwei Tachymeterstandorte alle Zielmarken und die Eckpunkte des Modellfeldes und der Modellkörper aufgenommen. Abschließend wurden die Modellkörper per Hand auf dem Modellnetz in Lage und Größe gemessen.

Es wurden somit drei voneinander unabhängige Messverfahren durchgeführt, wobei später die Tachymeterdaten mit den Laserdaten kombiniert und beide Verfahren in einer Fehlerbilanz einander gegenübergestellt wurden.

In einem weiteren Schritt wurden Box 2 und 3 in ihrer Lage verändert und der gesamte Messvorgang über alle drei Verfahren wiederholt. Box 1 wurde in ihrer Position (Kontroll-Box) nicht verändert.

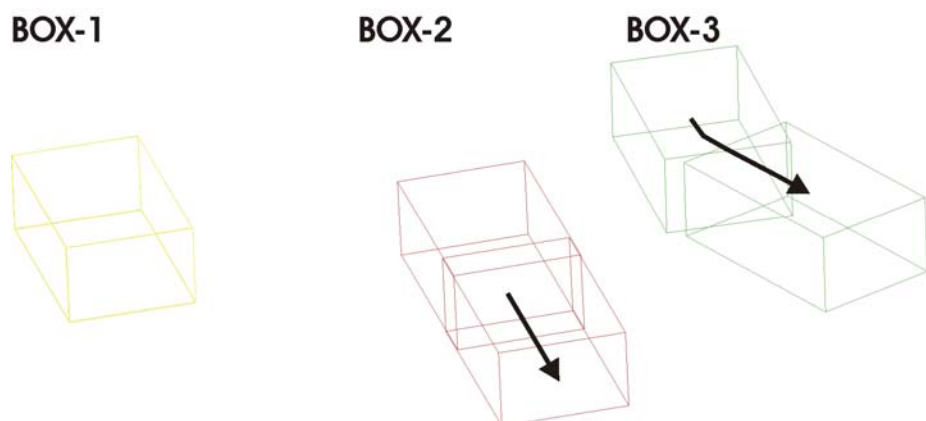


Abb. 3: Vorgehensweise Box-Verschiebung

## Ergebnisse – Labor-

Die Scannerdaten wurden, über die mit dem Tachymeter eingemessenen Zielmarken, in ein übergeordnetes lokales Koordinatensystem überführt. Diese Daten sind in Spalte „Simulation incl. Tachy“ aufgelistet ( s.a. Tab. 2+3 ).

Im ersten Fall wurden der Mittelwert und die Standardabweichung über die Handmessung, Tachymetermessung (alle Werte) und die Simulation durchgeführt. Hierbei ergaben sich Abweichungen von bis zu 60mm. Zu begründen sind diese Abweichungen damit, dass beim Anzielen der Kanten durch Tachymeter, diese nicht immer genau getroffen werden und ihrer Position entsprechend „vorbeifliegen“. – Die selbe Beobachtung ist auch mit dem Scanner zu machen.

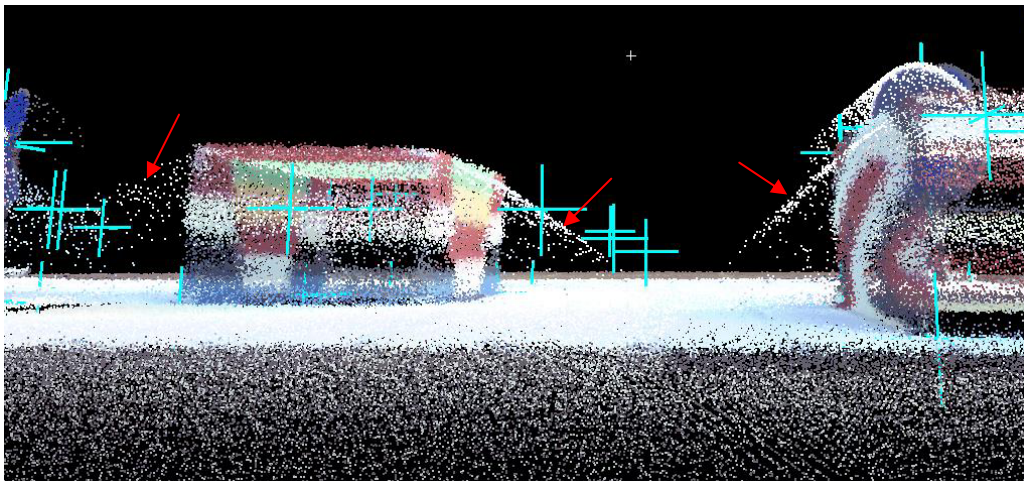


Abb. 4: Streueffekt der Kanten bei hoher Auflösung

Insbesondere bei hohen Auflösungen streuen die Kanten in den Raum ab (s.a. Abb.4). Durch die nachträgliche Simulation und den best-fit-box Modus werden diese Fehlmessungen aber verworfen.

Im zweiten Fall wurden der Mittelwert und die Standardabweichung über Handmessung und Simulation ermittelt. Hierbei wurde eine Abweichung von max. 3mm ermittelt.

Tab. 2: Messwerte Ursprung: Handmessung, Tachymeter und Scanner - Simulation

Ursprung BOX-1												
Punkt-Nr.	Handmessung				Tachymetermessung				Simulation incl. Tachy			
	x	y	z		x	y	z		x	y	z	
11	3049	2016	528		3050	2017	529		3047.6	2017.2	527.6	
12	3197	2016	528		3194	2016	528		3195.9	2016.1	528.4	
17	3049	1768	528		nicht gemessen				3045.8	1774.7	527.2	
16	3197	1768	528		3195	1769	528		3194	1773.6	528.1	
10	3049	2016	623		2972	1985	592		3047.1	2017.1	622.5	
13	3197	2016	623		3192	2015	623		3195.3	2016	623.3	
14	3197	1768	623		3150	1747	605		3193.5	1773.5	623	
15	3049	1768	623		2914	1705	568		3045.2	1774.6	622.1	
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung, Tachymetermessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung						
	x	y	z	x	y	z						
11	3048.9	0.98	2016.7	0.52	528.2	0.59						
12	3195.6	1.24	2016.0	0.05	528.1	0.19						
17	3047.4	1.60	1771.4	3.35	527.6	0.40						
16	3195.3	1.25	1770.2	2.44	528.0	0.05						
10	3022.7	35.86	2006.0	14.88	612.5	14.50						
13	3194.8	2.08	2015.7	0.47	623.1	0.14						
14	3180.2	21.38	1762.8	11.42	617.0	8.49						
15	3002.7	62.76	1749.2	31.37	604.4	25.72						
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung						
	x	y	z	x	y	z						
11	3048.3	0.70	2016.6	0.60	527.8	0.20						
12	3196.5	0.55	2016.1	0.05	528.2	0.20						
17	3047.4	1.60	1771.4	3.35	527.6	0.40						
16	3195.5	1.50	1770.8	2.80	528.1	0.05						
10	3048.1	0.95	2016.6	0.55	622.8	0.25						
13	3196.2	0.85	2016.0	0.00	623.2	0.15						
14	3195.3	1.75	1770.8	2.75	623.0	0.00						
15	3047.1	1.90	1771.3	3.30	622.6	0.45						
[mm]												
Ursprung BOX-2												
Punkt-Nr.	Handmessung				Tachymetermessung				Simulation incl. Tachy			
	x	y	z		x	y	z		x	y	z	
21	3451	2216	528		3451	2215	528		3450.5	2216.4	526.3	
23	3599	2216	528		3599	2215	527		3599.2	2214.5	528.2	
25	3598	1968	528		3596	1966	527		3596	1969.3	528.8	
27	3449	1968	528		nicht gemessen				3447.3	1971.2	526.9	
20	3451	2216	622		3324	2162	561		3449.3	2216.6	620.6	
22	3599	2216	623		3596	2214	622		3598	2214.7	622.5	
24	3598	1968	623		3516	1927	585		3594.8	1969.5	623.1	
26	3449	1968	623		3372	1931	564		3446.1	1971.4	621.2	
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung, Tachymetermessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung						
	x	y	z	x	y	z						
21	3450.8	0.24	2215.8	0.59	527.4	0.80						
23	3599.1	0.09	2215.2	0.62	527.7	0.52						
25	3596.7	0.94	1967.8	1.36	527.9	0.74						
27	3448.2	0.85	1969.6	1.60	527.5	0.55						
20	3408.1	59.47	2198.2	25.60	601.2	28.43						
22	3597.7	1.25	2214.9	0.83	622.5	0.41						
24	3569.6	37.92	1954.8	19.69	610.4	17.94						
26	3422.4	35.63	1956.8	18.30	609.4	17.98						
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung						
	x	y	z	x	y	z						
21	3450.8	0.25	2216.2	0.20	527.2	0.85						
23	3599.1	0.10	2215.3	0.75	528.1	0.10						
25	3597.0	1.00	1968.7	0.65	528.4	0.40						
27	3448.2	0.85	1969.6	1.60	527.5	0.55						
20	3450.2	0.85	2216.3	0.30	621.3	0.70						
22	3598.5	0.50	2215.4	0.65	622.8	0.25						
24	3596.4	1.60	1968.8	0.75	623.1	0.05						
26	3447.6	1.45	1969.7	1.70	622.1	0.90						
[mm]												
Ursprung BOX-3												
Punkt-Nr.	Handmessung				Tachymetermessung				Simulation incl. Tachy			
	x	y	z		x	y	z		x	y	z	
31	3749	2012	528		3748	2013	528		3746.7	2012.8	527.7	
32	3897	2011	528		3895	2012	529		3893.8	2012.8	526.2	
36	3749	1764	528		nicht gemessen				3746.8	1765.7	529.5	
35	3892	1764	528		3893	1764	528		3893.9	1765.7	528	
30	3749	2012	623		3683	1978	587		3747.6	2013.5	622.2	
33	3897	2011	623		3895	2010	622		3894.8	2013.6	620.7	
34	3892	1764	623		3877	1753	612		3894.9	1766.4	622.6	
37	3749	1764	623		3680	1725	589		3747.7	1766.4	624	
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung, Tachymetermessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung						
	x	y	z	x	y	z						
31	3747.9	0.94	2012.6	0.43	527.9	0.14						
32	3895.3	1.32	2011.9	0.74	527.7	1.16						
36	3747.9	1.10	1764.9	0.85	528.8	0.75						
35	3893.0	0.78	1764.6	0.80	528.0	0.00						
30	3726.5	30.79	2001.2	16.39	610.7	16.79						
33	3895.6	0.99	2011.5	1.52	621.9	0.94						
34	3888.0	7.84	1761.1	5.83	619.2	5.09						
37	3725.6	32.22	1751.8	18.98	612.0	16.27						
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung						
	x	y	z	x	y	z						
31	3747.9	1.15	2012.4	0.40	527.9	0.15						
32	3895.4	1.60	2011.9	0.90	527.1	0.90						
36	3747.9	1.10	1764.9	0.85	528.8	0.75						
35	3893.0	0.95	1764.9	0.85	528.0	0.00						
30	3748.3	0.70	2012.8	0.75	622.6	0.40						
33	3895.9	1.10	2012.3	1.30	621.9	1.15						
34	3893.5	1.45	1765.2	1.20	622.8	0.20						
37	3748.4	0.65	1765.2	1.20	623.5	0.50						
[mm]												

Tab. 3: Messwerte Deform: Handmessung, Tachymeter und Scanner - Simulation

Deform BOX-1												
Punkt-Nr.	Handmessung				Tachymetermessung				Simulation incl. Tachy			
	x	y	z		x	y	z		x	y	z	
211	3049	2016	528		3050	2017	529		3048.4	2016.4	528.4	
212	3197	2016	528		3194	2016	528		3196.2	2015	529.3	
217	3049	1768	528		nicht gemessen				3046.1	1774.9	528.4	
216	3197	1768	528		3192	1768	527		3193.9	1773.5	529.2	
210	3049	2016	623		3004	1998	604		3047.8	2016.4	622.5	
213	3197	2016	623		3191	2015	623		3195.6	2015	623.3	
214	3197	1768	623		3171	1758	613		3193.4	1773.5	623.3	
215	3049	1768	623		2956	1726	585		3045.6	1774.9	622.4	
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung, Tachymetermessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
	x		y		z							
211	3049.1	0.66	2016.5	0.41	528.5	0.41						
212	3195.7	1.27	2015.7	0.47	528.4	0.61						
217	3047.6	1.45	1771.5	3.45	528.2	0.20						
216	3194.3	2.06	1769.8	2.59	528.1	0.90						
210	3033.6	20.94	2010.1	8.58	616.5	8.84						
213	3194.5	2.56	2015.3	0.47	623.1	0.14						
214	3187.1	11.50	1766.5	6.42	619.8	4.79						
215	3016.9	43.06	1756.3	21.61	610.1	17.77						
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
	x		y		z							
211	3048.7	0.30	2016.2	0.20	528.2	0.20						
212	3196.6	0.40	2015.5	0.50	528.7	0.65						
217	3047.6	1.45	1771.5	3.45	528.2	0.20						
216	3195.5	1.55	1770.8	2.75	528.6	0.60						
210	3048.4	0.60	2016.2	0.20	622.8	0.25						
213	3196.3	0.70	2015.5	0.50	623.2	0.15						
214	3195.2	1.80	1770.8	2.75	623.2	0.15						
215	3047.3	1.70	1771.5	3.45	622.7	0.30						
[mm]												
Deform BOX-2												
Punkt-Nr.	Handmessung				Tachymetermessung				Simulation incl. Tachy			
	x	y	z		x	y	z		x	y	z	
221	3450	2417	528		3452	2416	528		3451.6	2415.3	528.8	
223	3599	2418	528		3599	2415	527		3600.3	2413.4	528.1	
225	3599	2168	528		3596	2167	528		3597.2	2168.8	529.1	
227	3449	2168	528		nicht gemessen				3448.4	2170.7	527.8	
220	3450	2417	623		3370	2386	582		3450.7	2415.7	620	
222	3599	2418	623		3597	2414	621		3599.5	2413.8	621.3	
224	3599	2168	623		3537	2143	594		3596.4	2169.2	622.4	
226	3449	2168	622		3346	2125	571		3447.6	2171.1	621	
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung, Tachymetermessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
	x		y		z							
221	3451.2	0.86	2416.1	0.70	527.6	0.57						
223	3599.4	0.61	2415.5	1.91	527.7	0.50						
225	3597.4	1.23	2167.9	0.74	528.4	0.52						
227	3448.7	0.30	2169.4	1.35	527.9	0.10						
220	3423.6	37.88	2406.2	14.32	608.3	18.66						
222	3598.5	1.08	2415.3	1.93	621.8	0.88						
224	3577.5	28.63	2160.1	12.08	613.1	13.53						
226	3414.2	48.23	2154.7	21.04	604.7	23.81						
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
	x		y		z							
221	3450.8	0.80	2416.2	0.85	527.4	0.60						
223	3599.7	0.65	2415.7	2.30	528.1	0.05						
225	3598.1	0.90	2168.4	0.40	528.6	0.55						
227	3448.7	0.30	2169.4	1.35	527.9	0.10						
220	3450.4	0.35	2416.4	0.65	621.5	1.50						
222	3599.3	0.25	2415.9	2.10	622.2	0.85						
224	3597.7	1.30	2168.6	0.60	622.7	0.30						
226	3448.3	0.70	2169.6	1.55	621.5	0.50						
[mm]												
Deform BOX-3												
Punkt-Nr.	Handmessung				Tachymetermessung				Simulation incl. Tachy			
	x	y	z		x	y	z		x	y	z	
231	3871	2255	528		3871	2256	528		3870.1	2257.3	527.2	
232	4005	2193	528		4003	2192	528		4004.7	2195.3	527	
235	3903	1967	528		3898	1967	528		3900	1967.7	528.6	
236	3769	2030	528		nicht gemessen				3765.4	2029.7	528.9	
230	3871	2255	623		3799	2222	582		3870.5	2257.7	621.7	
233	4005	2193	623		4002	2191	623		4005.1	2195.8	621.5	
234	3903	1967	623		3824	1926	580		3900.5	1968.2	623.1	
237	3769	2030	623		3702	1998	588		3765.8	2030.2	623.4	
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung, Tachymetermessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
	x		y		z							
231	3870.7	0.42	2256.1	0.94	527.7	0.38						
232	4004.2	0.88	2193.4	1.38	527.7	0.47						
235	3900.3	2.05	1967.2	0.33	528.2	0.28						
236	3767.2	1.80	2029.9	0.15	528.5	0.45						
230	3846.8	33.82	2244.9	16.23	608.9	19.03						
233	4004.0	1.44	2193.3	1.97	622.5	0.71						
234	3875.8	36.67	1953.7	19.62	608.7	20.29						
237	3745.6	30.86	2019.4	15.13	611.5	16.59						
Mittelwert und Standardabweichung über Handmessung und Simulation												
Punkt-Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
	x		y		z							
231	3870.6	0.45	2256.2	1.15	527.6	0.40						
232	4004.9	0.15	2194.2	1.15	527.5	0.50						
235	3901.5	1.50	1967.4	0.35	528.3	0.30						
236	3767.2	1.80	2029.9	0.15	528.5	0.45						
230	3870.8	0.25	2256.4	1.35	622.4	0.65						
233	4005.1	0.05	2194.4	1.40	622.3	0.75						
234	3901.8	1.25	1967.6	0.60	623.1	0.05						
237	3767.4	1.60	2030.1	0.10	623.2	0.20						
[mm]												

## Methode - Gelände

Am Rand der Ortschaft Rechtenstein / Munderkingen sind Massenkalk und Kalkbänke des Weißen Jura aufgeschlossen.

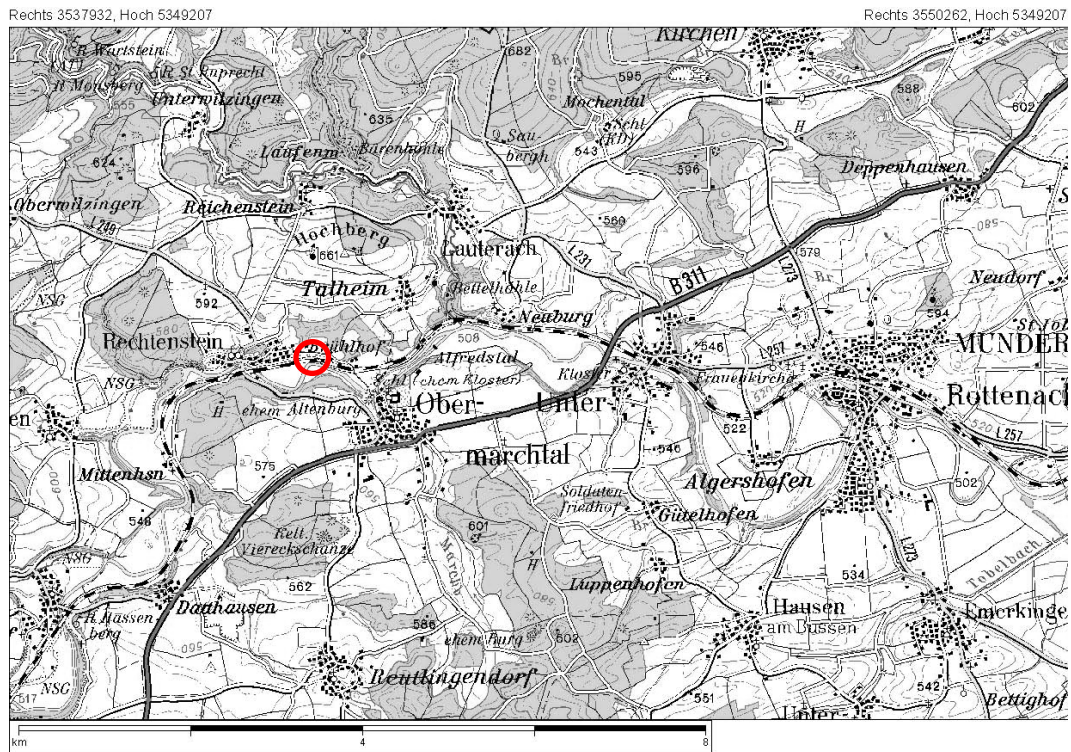


Abb. 5: Topographische Lage Felswand Rechtenstein

Über drei Scannerstandorte (S1, S2, S3) hinweg wurde jeweils ein Scan der Wand mit einer Auflösung von 2,5 cm auf 10m Entfernung durchgeführt. Parallel wurden mittels zuvor angebrachten Bolzen die Zielmarken mit einem Tachymeter eingemessen.

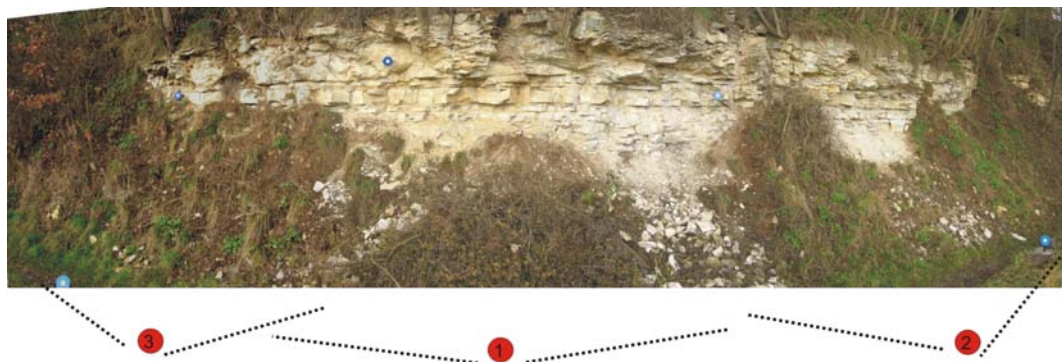


Abb. 6: Ansicht Felswand mit Scannerstandorten und jeweiligem Sichtfeld

Diese Werte bildeten ein übergeordnetes lokales Koordinatensystem, über welches die drei Scanworlds miteinander registriert wurden.



Abb. 7: Registrierte Punktwolke

In einer anschließenden Fehleranalyse (s.a. Tab. 4) wurden bei 4 Referenzpunkten Fehlerraten von 10mm ermittelt, ansonsten belief sich die Fehlerrate auf 3 bis 6mm. Da aus anderen Scanneraufnahmen hier bessere Fehlerbilanzen zu erwarten waren, wurden weitere äußere Faktoren kritisch überprüft. Die Lösung lag in der Nähe zu einer Bahntrasse (2m). Die ständigen Erschütterungen des Bahndammes und die Windstöße durch die vorbeifahrenden Züge sind sehr wahrscheinlich die Erklärung für die erhaltene Fehlerrate. – Zudem besitzt der 3D-Laserscanner keinen Schwingungskompensator.

## **Schlussbetrachtung**

Der 3D-Laserscanner liefert ein detailgetreues Abbild von einem Objekt. Im Vergleich Hand- zur Scanner-Messung wurden max. Abweichungen von 3mm ermittelt. In Kombination mit dem Tachymeter können die einzelnen Scanworlds leicht in ein übergeordnetes Koordinatensystem überführt werden. Es hat sich hierbei aber gezeigt, dass der Tachymeter sich allein auf die Zielmarken beschränken sollte. Kanten oder Eckpunkte am Objekt sind zu große Fehlerquellen. Leicht wird vorbeigezielt und somit sind diese Werte als „Hilfszielmarken“ nicht tauglich. – Auch wegen des fehlenden Schwingungskompensators ist darauf Acht zu geben, wo der Scanner aufgestellt wird. Ein Aufnahme-Standort unmittelbar an stark befahrenen Straßen oder dem Schienennetz, die ein Schwingen des Untergrundes oder Luftstöße verursachen könnten, ist zu vermeiden.