

Pilotprojekt Epochenvergleich „Kanaldenkmal“

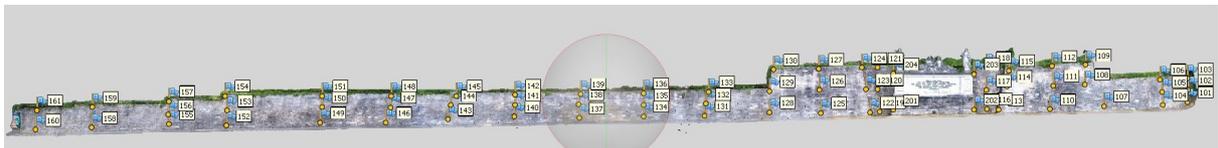
Projektziel

Durch eine Kombination tachymetrischer und photogrammetrischer Aufnahmen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten und einem anschließenden Vergleich soll festgestellt werden, inwiefern sich das Verfahren zur Erkennung etwaiger Deformationen einer Straßen-Stützmauer eignet.

Die Stützmauer von ca. 200 m Länge und einer durchschnittlichen Höhe von 5 m befindet sich in Erlangen Nord entlang der A73 und der Staatsstraße 2244 und ist integraler Bestandteil des sog. Kanalbau-Denkmals.

Vorgehensweise der Aufnahme

Die beiden Aufnahmen wurden im Herbst 2016 und Sommer 2017 durchgeführt, wobei zunächst 65 Reflexmarker gleichmäßig über die Fläche verteilt wurden.



Die tachymetrische Aufnahme erfolgte per Polygonzug und die resultierenden Koordinaten der Reflexmarker dienen einerseits als eigenständige Bewertungsgrundlage etwaiger Deformationen und andererseits als Stützstellen für die photogrammetrische Auswertung.

In der Epoche 2016 erfolgten die Foto-Aufnahmen vom bereits vorhandenen Hubsteiger aus, nachdem dieser zunächst für die Platzierung der Reflexmarker verwendet worden war. Diese Arbeiten wurden zusammen in knapp einem Arbeitstag erledigt, wobei die anliegende Staatsstraße zeitweilig einspurig gesperrt wurde.

In der Epoche 2017 wurden die Foto-Aufnahmen mittels Flugdrohne durchgeführt, die Staatsstraße wurde zeitweise in einer Spur etwas verengt, die Arbeiten wurden in knapp drei Stunden durchgeführt.

Zunächst wurden einige Reflexmarker im unteren Bereich neu gesetzt, nachdem diese nicht mehr vorhanden waren. Dies sollte aus unserer Sicht aber unkritisch sein, da Deformationen wohl weniger am Fuß der Mauer zu erwarten sind und das Neusetzen keine Auswirkung auf die photogrammetrische Auswertung hat.

Tachymetrische Messung

Der Vergleich der Markerpositionen zeigt vor allem Auffälligkeiten der beieinander liegenden Punkte 150, 151 und 154 mit der Tendenz, im mittleren und oberen Bereich eine Verschiebung nach Außen zu charakterisieren. Beim Punkt 150 fand laut Messung eine unplausible Parallelverschiebung zur Mauer statt. Die photogrammetrische Auswertung zeigte im HW ebenfalls einen große Abweichung an. Untersuchungen des Vermessungsbüros ergaben für die Ausgleichung (Standardabweichung pro Wert besser 0,5 mm) hohe Fehlerwerte an, sodass dieser Punkt für die Epoche 2017 als fehlerhaft gemessen klassifiziert und für die weitere Auswertung ausgeschlossen wurde.

Punktnr	Nullmessung 27.09.2016			1. Folgemessung 08.06.2017			Nullmessung - 1. Folgemessung		
	RW	HW	Höhe	RW	HW	Höhe	deltaRW	deltaHW	deltaH
101	4427757,754	5497465,227	279,537	4427757,753	5497465,226	279,538	0,001	0,001	-0,001
102	4427758,420	5497465,152	281,528	4427758,419	5497465,150	281,529	0,001	0,002	-0,001
103	4427758,884	5497465,228	283,432	4427758,883	5497465,226	283,432	0,001	0,002	0,000
104	4427755,084	5497469,307	279,083	4427755,085	5497469,306	279,083	-0,001	0,001	0,000
105	4427752,402	5497469,440	281,198	4427755,402	5497469,439	281,198	0,000	0,001	0,000
106	4427755,648	5497469,731	283,225	4427755,648	5497469,730	283,226	0,000	0,001	-0,001
107	4427752,553	5497478,984	278,872	4427752,553	5497478,984	278,874	0,000	0,000	-0,002
108	4427752,553	5497482,114	282,442	4427752,554	5497482,114	282,443	-0,001	0,000	-0,001
109	4427753,111	5497481,956	285,657	4427753,111	5497481,956	285,659	0,000	0,000	-0,002
110	4427751,010	5497487,781	278,343	4427751,010	5497487,781	278,345	0,000	0,000	-0,002
111	4427751,755	5497487,264	282,244	4427751,755	5497487,263	282,246	0,000	0,001	-0,002
112	4427752,261	5497487,531	285,448	4427752,261	5497487,531	285,449	0,000	0,000	-0,001
113	4427751,043	5497496,278	278,239	4427751,040	5497496,277	278,241	0,003	0,001	-0,002
114	4427751,553	5497494,933	282,106	4427751,552	5497494,933	282,108	0,001	0,000	-0,002
115	4427751,979	5497494,552	284,699	4427751,978	5497494,552	284,700	0,001	0,000	-0,001
116	4427754,294	5497498,223	278,399	4427754,292	5497498,223	278,401	0,002	0,000	-0,002
117	4427754,903	5497498,297	281,496	4427754,901	5497498,297	281,497	0,002	0,000	-0,001
118	4427755,663	5497498,307	285,264	4427755,662	5497498,308	285,265	0,001	-0,001	-0,001
119	4427753,373	5497515,805	277,915	4427753,371	5497515,804	277,915	0,002	0,001	0,000
120	4427754,116	5497516,157	281,627	4427754,114	5497516,156	281,627	0,002	0,001	0,000
121	4427754,814	5497516,136	285,210	4427754,813	5497516,135	285,211	0,001	0,001	-0,001
123	4427750,705	5497518,105	281,625	4427750,703	5497518,105	281,624	0,002	0,000	0,001
124	4427751,327	5497518,786	285,222	4427751,326	5497518,785	285,221	0,001	0,001	0,001
126	4427749,877	5497525,673	281,505	4427749,876	5497525,672	281,505	0,001	0,001	0,000
127	4427750,553	5497525,889	284,991	4427750,550	5497525,888	284,991	0,003	0,001	0,000
129	4427750,282	5497533,907	281,290	4427750,280	5497533,907	281,290	0,002	0,000	0,000
130	4427750,875	5497533,288	284,845	4427750,873	5497533,287	284,845	0,002	0,001	0,000
132	4427751,128	5497544,411	279,226	4427751,125	5497544,411	279,226	0,003	0,000	0,000
133	4427751,432	5497543,882	281,184	4427751,428	5497543,881	281,184	0,004	0,001	0,000
135	4427752,604	5497554,564	279,058	4427752,601	5497554,563	279,058	0,003	0,001	0,000
136	4427752,937	5497554,657	280,963	4427752,934	5497554,656	280,963	0,003	0,001	0,000
137	4427754,350	5497565,198	276,910	4427754,350	5497565,198	276,910	0,000	0,000	0,000
138	4427754,749	5497565,346	279,195	4427754,747	5497565,346	279,195	0,002	0,000	0,000
139	4427754,933	5497564,991	280,850	4427754,931	5497564,992	280,850	0,002	-0,001	0,000
141	4427756,995	5497575,746	279,083	4427756,992	5497575,745	279,083	0,003	0,001	0,000
142	4427757,256	5497575,742	280,710	4427757,253	5497575,742	280,710	0,003	0,000	0,000
144	4427759,810	5497586,314	279,038	4427759,808	5497586,313	279,037	0,002	0,001	0,001
145	4427759,764	5497585,399	280,540	4427759,762	5497585,398	280,539	0,002	0,001	0,001
146	4427762,778	5497596,963	276,175	4427762,777	5497596,962	276,175	0,001	0,001	0,000
147	4427762,801	5497596,207	278,648	4427762,798	5497596,207	278,648	0,003	0,000	0,000
148	4427763,007	5497596,070	280,547	4427763,003	5497596,071	280,546	0,004	-0,001	0,001
149	4427766,434	5497607,749	276,156	4427766,432	5497607,749	276,155	0,002	0,000	0,001
150	4427766,521	5497607,515	278,657	4427766,516	5497607,510	278,657	0,005	0,005	0,000
151	4427766,611	5497607,427	280,547	4427766,604	5497607,428	280,547	0,007	-0,001	0,000
152	4427772,493	5497623,226	275,677	4427772,491	5497623,224	275,676	0,002	0,002	0,001
153	4427772,702	5497623,085	278,124	4427772,698	5497623,084	278,123	0,004	0,001	0,001
154	4427772,991	5497623,459	280,519	4427772,985	5497623,460	280,519	0,006	-0,001	0,000
156	4427777,136	5497632,786	277,459	4427777,134	5497632,785	277,458	0,002	0,001	0,001
157	4427777,272	5497632,626	279,641	4427777,269	5497632,626	279,641	0,003	0,000	0,000
159	4427783,900	5497645,230	278,690	4427783,898	5497645,229	278,689	0,002	0,001	0,001
161	4427789,365	5497654,291	278,178	4427789,364	5497654,290	278,177	0,001	0,001	0,001
201	4427750,515	5497513,566	278,255	4427750,514	5497513,566	278,255	0,001	0,000	0,000
202	4427751,134	5497500,363	278,262	4427751,132	5497500,363	278,263	0,002	0,000	-0,001
203	4427751,432	5497500,289	284,159	4427751,431	5497500,290	284,161	0,001	-0,001	-0,002
204	4427750,794	5497513,577	284,181	4427750,793	5497513,577	284,181	0,001	0,000	0,000

Photogrammetrische Messung

Aus den Einzelaufnahmen wurden in verschiedenen Ansätzen eine hochdichte Punktwolke generiert, zunächst gesamthaft und folgend in überlappenden Teilbereichen (Nord, Mitte, Denkmal, Süd) zur Steigerung der Auflösung und Genauigkeit. Die Epoche 2016 wurde ebenfalls neu prozessiert, um ein konsistentes Ergebnis bei gleichen Prozessierungsparametern zu bekommen.

	Nord 2016	Nord 2017	Mitte 2016	Mitte 2017	Denkm. 2016	Denkm. 2017	Süd 2016	Süd 2017
Anzahl Aufnahmen	59	273	150	409	137	312	123	241
Anzahl Marker	19	18	24	24	16	16	18	18
Anzahl Punktenpixel [Mio.]	13	8	12	8	9	5	12	21
Standardabweichung RE [mm]	0,7	0,8	0,8	1,1	1,5	0,5	1,1	0,6
Standardabweichung HW [mm]	0,9	0,8	1,1	1,1	2,1	0,9	1,9	0,9
Standardabweichung Höhe [mm]	0,7	2,1	1,1	0,6	2,1	0,5	1,5	0,5

Die angegebenen Standardabweichungen beziehen sich auf den Vergleich zwischen photogrammetrisch bestimmter Koordinate einer Reflexmarke durch Rückprojektion und der tachymetrisch gemessenen Koordinate. In der realen Punktwolke zeigt sich an einzelnen Stellen ein erhöhtes Oberflächenrauschen, das noch zusätzlich zu beachten ist.

Neben den einzelnen Punktwolken wurden noch folgende Produkte abgeleitet:

- Oberflächen-Meshes (texturiert / untexturiert) für Epoche 2016
- Orthofotos in verschiedenen Auflösungen

Verfahren zum Vergleich von Punktwolken

Das Standardverfahren zum Vergleich von Punktwolken ist „Cloud-to-mesh“. Hierbei wird aus einer Punktwolke zunächst ein Oberflächen-Mesh erzeugt und jeweils der Abstand zu den Punkten der anderen Punktwolke entlang der Flächennormale gemessen. Das Ergebnis ist ein vorzeichenbehafteter Abstandswert zwischen lokalen Bereichen der Punktwolken.

In der Regel werden die Punktwolken zunächst „registriert“, d.h. Sie werden zueinander so gelagert, dass sie minimalen Abstand zueinander haben. Vorteil ist hierbei, von der absoluten Positionierung, die durch die Referenzmarken gegeben ist und von etwaigen großflächigen Verzerrungen der photogrammetrischen Auswertung unabhängiger zu werden. Die Registrierung macht den Vergleich insgesamt etwas sensibler.

Nachteilig ist hierbei, dass die Flächen vergleichbar sein müssen, d.h., alle Ausreißer und Bewuchs sind penibel zu entfernen, wodurch sich der zu vergleichende Bereich einschränkt. Als weiterer Nachteil ist ein größerer Interpretationsbedarf zu sehen: Bei größeren Registrierungs-Abweichungen bedeutet eine vermeintliche Änderung an einer Stelle beispielsweise nicht, dass sich absolut betrachtet eine Änderung ergeben hat, sondern nur relativ in Bezug auf die Gesamtheit der Punkte.

Neben „Cloud-to-Mesh“ gibt es weitere Verfahren, so wurde „M3C2“ (direkter vorzeichenbehafteter Vergleich zwischen Punktwolken ohne Mesh) exemplarisch auf den Nordteil angewendet.

Die konkrete Vorgehensweise in diesem Projekt war wie folgt:

- Erzeugung Punktwolken und Meshes während der photogrammetrischen Auswertung
- Verwendung von CloudCompare 2.9 beta für alle weiteren Operationen
- Ausreisser-Beseitigung mittels SOR-Filter
- Segmentierung der Punktwolken und Meshes für Vergleichbarkeit
- Registrierung Punktwolke / Mesh
- Bestimmung „Cloud-to-Mesh“-Abstand

Die Farbdarstellung der Distanzen wurde recht knapp gehalten:

- Ausblendung (grau) des Bereichs +/- 2,5 mm
- Mittlere Distanzen (gelb / grün) bis ca. +/- 7,5 mm
- Größere Distanzen (rot / blau)

Die Farben rot und gelb kennzeichnen dabei Distanzen nach außen hin zur Straße.

Epochenvergleich der Punktwolken

In der Übersicht werden die durchgeführten Vergleiche aufgezeigt:

- RGB: Orthofotos der einzelnen Teilbereiche
- C2M registriert: „Cloud-to-Mesh“ mit vorab registrierten Punktwolken. Zusätzlich die beiden Seitenmauern beim Denkmal
- C2M absolut: „Cloud-to-Mesh“ ohne vorherige Registrierung der Punktwolken. Zusätzlich die beiden Seitenmauern beim Denkmal
- M3C2: Versuch mit anderem Algorithmus

Vergleich der Verfahren:

- C2M registriert und absolut liefern ähnliche Ergebnisse
- Die überlappenden Bereiche der einzelnen Verfahren liefern größtenteils ähnliche Ergebnisse (Ausnahmen: C2M absolut im südlichen Nordteil. Denkmal-Fronten bei beiden Verfahren)
- M3C2 zeigt ähnliche Ergebnisse wie C2M

Auffälligkeiten:

- Abweichungen scheinen sich größtenteils an der Nachweisgrenze zu bewegen. Größere Abweichungen, insbesondere im Denkmal-Bereich und Inkonsistenzen zwischen den Überlappungen sollten weiter untersucht werden
- Die tachymetrisch festgestellte Differenz im Bereich 150 / 151 / 154 bestätigt sich auch photogrammetrisch: Die Mauer scheint im oberen Bereich um wenige Millimeter gekippt.
- Die Seitenmauern am Denkmal zeigen photogrammetrisch größere Abweichungen. Dies sollte ebenfalls weiter untersucht werden.
- Im Bereich der Risse im Südteil scheint es auch Abweichungen zu geben, jedoch sind die Ergebnisse nicht eindeutig und müssten weiter untersucht werden.

Epochenvergleich über Orthofotos

Für den Südteil wurde im Bereich der Risse für beide Epochen jeweils ein Orthofoto mit einer Auflösung / Maßstab von 2 mm ausgeleitet. Somit können beispielsweise direkte Vergleiche und Bemaßungen vorgenommen werden. Zu beachten sind die unterschiedlichen Lichtverhältnisse, die z.B. Risse unterschiedlich dick erscheinen lassen. Zudem müssten Abweichungen noch auf photogrammetrische Verzerrungen plausibilisiert werden. Trotzdem scheinen sich in einem Bereich der große Risse leichte Senkungen oder Verschiebungen anzudeuten.

Zusammenfassung und abschließende Bemerkungen

Grundsätzlich liefert dieses Pilotprojekt keine hinreichenden Aussagen darüber, ob Deformationen vorhanden sind oder ob diese ausgeschlossen sind. Desweiteren kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die gefundenen Veränderungen in irgendeiner Form relevant sind für Statik oder Sicherheit. Im Rahmen des Pilotprojekt wurden ausschließlich geometrische und photogrammetrische Analysen vorgenommen.

Es lassen sich geometrische Abweichungen nahe der Nachweisgrenze im Millimeter-Bereich feststellen und größere Abweichungen und Inkonsistenzen, die weiter zu plausibilisieren wären.

Hierzu bietet sich vor allem zunächst mal ein Austausch mit entsprechenden Fachleuten an, die eine prinzipielle Bewertung der bislang gefundenen Ergebnisse durchführen und Hinweise auf das weitere Vorgehen geben können.

Der Bereich „Deformationsmonitoring mittels UAV“ ist für sich genommen noch recht jung und Gegenstand aktueller akademischer Untersuchungen, siehe z.B. das PDF „Vision-based deformation monitoring of large scale structures using Unmanned Aerial Systems“.

Die Kombination tachymetrischer und photogrammetrischer Verfahren scheint für den Anwendungsfall aber sehr vielversprechend zu sein und es wird empfohlen, das Pilotprojekt weiter zu verfolgen

