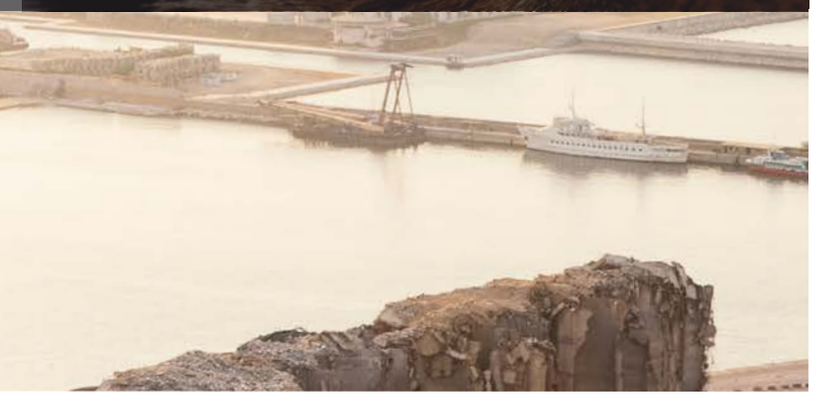
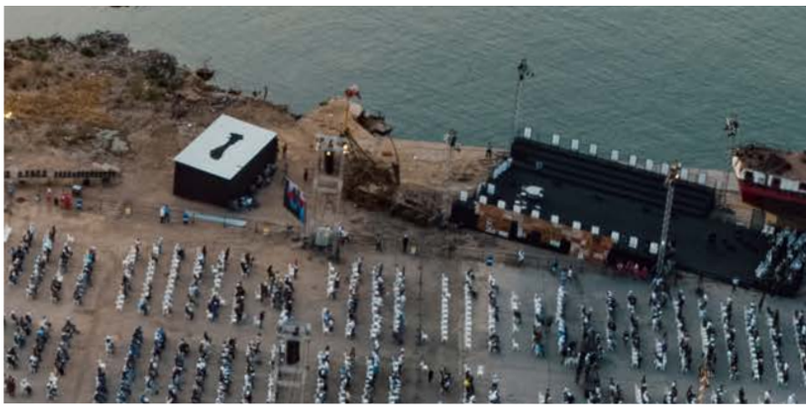
How we build reality

Zoller+Fröhlich



Case Study

Gemeinnützige Bauwerksüberwachung der Silos im Hafen von Beirut



Unternehmensprofil

Zoller + Fröhlich zählt zu den weltweit führenden Unternehmen im Bereich der berührungslosen, terrestrischen Lasermesstechnik und verfügt aufgrund langjähriger Tätigkeit sowie einer Vielzahl durchgeführter Projekte über einen enormen Erfahrungsschatz.
Innovative Ideen werden gefördert und in zukunftsweisende Produkte umgesetzt. Aufgrund des Supports, den wir unseren Kunden entgegenbringen, können wir auf langjährige, treue Kunden bauen, die unseren individuellen Service sehr schätzen.

Ein Projekt von Amann Engineering amann

Von der Explosion betroffene historische Gebäude in Gemmayze, Beirut

Einleitung in das Projekt

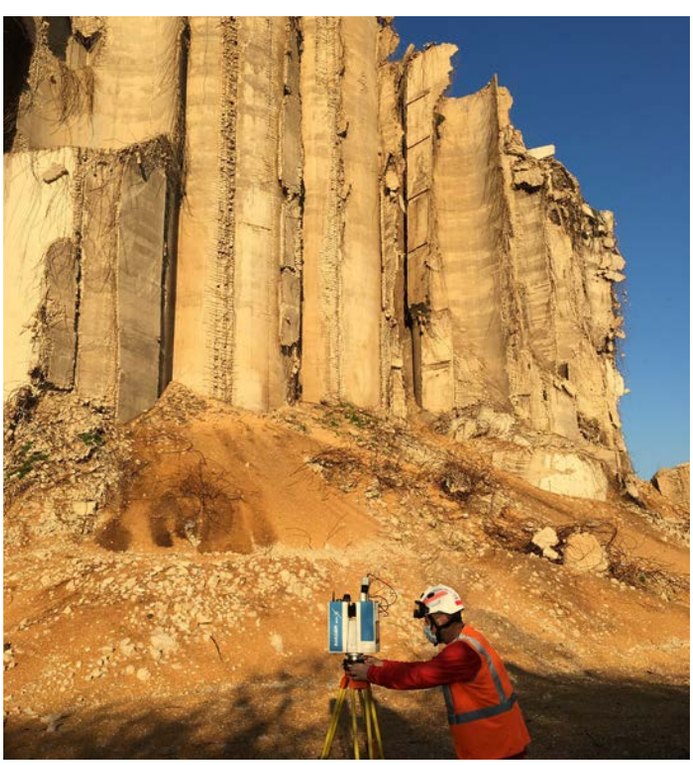
Am 4. August 2020 brach im Hafen von Beirut im Lagerhaus Nr. 12 ein großes Feuer aus, welches eine katastrophale Explosion zur Folge hatte. Diese wiederum war Auslöser einer Druckwelle, die sich über ganz Beirut ausbreitete, schwere Schäden verursachte und bis in das etwa 200 km entfernte Zypern zu hören und zu spüren war. Die Explosion hat deutliche Spuren und Schäden hinterlassen. Tausende Meschen wurden verletzt, verloren ihr Zuhause oder sogar ihr Leben. Darüber hinaus wurden immense Schäden an Immobilien (privat und staatlich), großen Teilen des Hafens und benachbarten Gebäuden verursacht.

Silos im Hafen von Beirut nach der Explosion am 4. August 2020

Silos im Hafen von Beirut nach der Explosion, Libanon

Die Explosion vom 4. August 2020, die das gesamte Hafengebiet von Beirut verwüstete, gilt als eine der schwersten nichtnuklearen Explosionen der Weltgeschichte.
Es entstand ein etwa 140 Meter breiter Krater, welcher mit Meerwasser geflutet wurde. Neben großen Teilen der Stadt wurden auch die Getreidesilos des Landes, die Beirut Hafen Silos, in Mitleidenschaft gezogen. Die Explosion soll Folge der Detonation von mehr als 2000 Tonnen Ammoniumnitrat gewesen sein, einer unter bestimmten Bedingungen hochexplosiven Substanz, die im Lagerhaus des Hafens aufbewahrt wurden. Es wird vermutet, dass der bei Instandhaltungsmaßnahmen entstandene Funkenflug das Feuer auslöste, welches dann direkt in der Nähe gelagerte Feuerwerkskörper entzündete. Bereits kurz nach Ausbruch des Feuers trafen die ersten Feuerwehrleute ein, doch das Feuer breitete sich in Sekundenschnelle unkontrolliert aus. Nach 15 Minuten kam es schließlich zur ersten Explosion. Daraufhin folgte die Detonation, welche Auslöser der gewaltigen Schockwelle war.

Die Explosion verschärft die ohnehin bereits akute Wirtschafts- und Finanzkrise im Libanon. Nicht ausreichende staatliche Finanzmittel führen dazu, dass die Strom- und Wasserversorgung des Landes immer häufiger ausfallen.

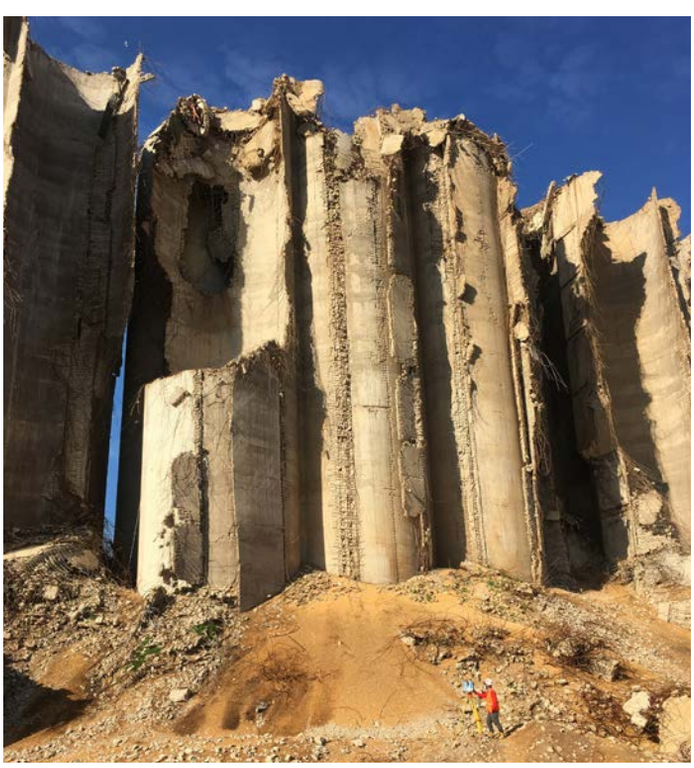


Vor den explodierten Silos im Hafen

Historisches „Blaues Haus“ von Gemmayze nach der Explosion, Beirut

Emmanuel Durand ist französischer Bauingenieur und Siloexperte der Schweizer Amann Engineering GmbH und reiste auf eigene Initiative und unentgeltlicher Basis nach Beirut und unterstützte das Team vor Ort mit seiner Expertise. Er verbrachte mehrere Wochen in Beirut, um das betroffene Gebiet zu scannen und digitale Daten für seine Analyse der Silos zu sammeln. Bei seiner zweiten Reise nach Beirut wurde ihm von Zoller + Fröhlich das notwendige Equipment zur Verfügung gestellt. Unterstützt durch den Z+F IMAGER® 5010X und die Infrarotkamera T-Cam gelang es Durand, die erforderlichen Daten zur Analyse der Hafensilos zu generieren.

Oberste Priorität dieses Scan-Projekts in Beirut war es, die Stabilität der Silos zu identifizieren und diese folglich bewerten und beurteilen zu können. Es wurde eine Antwort darauf gesucht, ob die Silos aufgrund unberechenbarer Einsturzgefahr ein Risiko darstellen und folglich abgerissen werden müssen oder ob sie trotz immenser Schäden, verursacht durch die Explosion, stabil genug sind, um wiederverwendet werden zu können.



Explodierte Silos

Wohngebiet im Mar Mikhael Viertel, Beirut, nach der Explosion

Es ist nahezu unmöglich zu berechnen, wann die Silos einstürzen, da dies jederzeit möglich sein könnte. Aus der Ferne würden sie strukturell robust aussehen, allerdings seien sie gekippt und ihr Fundament sei gebrochen, was zu vertikalen Rissen in zwei der Silos geführt habe.
„Silos sind sehr stabil, solange sie intakt sind, genau wie ein Ei", sagte Durand außerdem. „Wenn die Schale des Eies nur leicht gebrochen ist, wird es sehr schwach und man hat keine Schwierigkeiten, das Ei zu zerschlagen."
Das 3D-Scan-Verfahren in Beirut hatte außerdem zum Ziel, die Wärmeentwicklung innerhalb der Silos beurteilen und die verbleibende Substanz der Silos bestimmen zu können.

Quellen
Diese Fallstudie, welche die Vorfälle in Beirut aufgreift, basiert auf den Informationen aus zwei Artikeln, die von Sahar Ismail und Wassim Raphael, beide von der Saint-Joseph-Universität Beirut, und Emmanuel Durand von Amann Engineering verfasst wurden. Der erste Artikel trägt den Titel „Case study of the Beirut port explosion using 3D laser scan and non-linear finite element model" und wurde im Juni 2021 in der Zeitschrift „Research on Engineering Structures & Materials" veröffentlicht. Ferner wird auf den Artikel „Monitoring the Beirut Port Silos' Structural Health Response a Few Months after Blast Loading Using 3D Laser Scan" verwiesen, der im Juli 2021 im „Jordan Journal of Civil Engineering" publiziert wurde.

Amann Engineering

Amann Engineering GmbH ist ein Schweizer Unternehmen mit Sitz in Genf, welches Unterstützung und Fachwissen im Bereich des Bauwesens und der 3D-Darstellung für die Industrie sowie für Kultur- und Denkmalschutzorganisationen anbietet. Als Beratungsunternehmen für strukturelle Integrität verspricht das Team von Amann Engineering rund um Emmanuel Durand zuverlässige und dennoch erschwingliche Dienstleistungen, um Kunden eine effiziente Lösung zur Schätzung von Reparatur- und Instandhaltungskosten bieten zu können (3D-Laserscanner, Reverse Engineering, digitale Datenerfassung, GIS). Ein weiterer Schwerpunkt des Schweizer Unternehmens liegt auf der Prävention von Unfällen und Schäden an Kundenstandorten weltweit.
Basierend auf Schweizer Technologie und 25 Jahren Erfahrung im internationalen Geschäft gelingt es Amann Engineering kontinuierlich seine Abläufe, Prozesse und Kosten zu optimieren. Als Industrieexperten und Bauprofis mit jahrelanger Erfahrung in großen internationalen Turnkey-Projekten und im Bereich der Anlagenwartung auf globaler Ebene versuchen Emmanuel Durand und sein Team stets, komplexe Projektsituationen im multikulturellen Kontext erfolgreich zu meistern.

Nach den Ereignissen in Beirut im August 2020 unterstützte Amann Engineering die Higher School of Engineering ESIB - USJ bei der Messung der Silo Schäden unentgeltlich.
Im Anschluss an das Scan-Projekt in Beirut spendete Z+F der Saint Joseph University of Beirut einen 3D-Laserscanner für weitergehende Untersuchungen und Messungen.

amann

USJ 1875
Université Saint-Joseph de Beyrouth

Vor den Silos im Beiruter Hafen

Während seines Aufenthalts in Beirut erkannte Emmanuel Durand, dass für seine Wohltätigkeitsarbeit vor Ort dringend eine NRO-Struktur (Nichtregierungsorganisation, engl. NGO, d.h. Non-governmental organization) erforderlich ist, um den Einheimischen das Verständnis zu erleichtern. Laut Durand sei es für die Einheimischen in Beirut nahezu unvorstellbar, dass ein gewinnorientiertes Unternehmen dazu bereit ist, etwas ohne jegliche Vergütung zu leisten.
So entstand die Idee zu „SinA“, einer ebenfalls in Genf angesiedelten Organisation für die Hilfe und Unterstützung in Katastrophenfällen.
SinA (= Scan in Action) ist im Grunde der NRO-Arm von Amann Engineering und widmet sich ausschließlich freiwilligen und gemeinnützigen Aktivitäten wie denjenigen in Beirut.

Die Bilder dieser Fallstudie wurden von Emmanuel Durand (Amann Engineering), Dia Mrad (libanesischer Architekturfotograf) und Joe Kallas (libanesischer Architekt) aufgenommen und für diesen Anwenderbericht zur Verfügung gestellt.

Emmanuel Durand, Amann Engineering

Foto eines Schiffswracks, das durch die Druckwelle aus dem Wasser gehoben wurde

Datenerfassung

Nach Erhalt der Genehmigung des Untersuchungsrichters und der libanesischen Armee führten die Saint Joseph University of Beirut und das Schweizer Team von Amann Engineering, in Begleitung von der libanesischen Armee, das Scan Projekt in Beirut durch. Diese sehr komplexe 3D-Laserscanning-Kampagne im Hafen von Beirut wurde in mehrere Phasen aufgeteilt. Ab September 2020 lag das Hauptaugenmerk der verschiedenen Projektphasen auf der Überwachung als auch der Bewertung der Schäden und Verformungen an den Silos. Das Scanprojekt wurde im November 2020 sowie Ende März und Mitte April 2021 fortgesetzt.
Ab Phase 2 waren Emmanuel Durand und sein Team mit einem Z+F IMAGER® 5010X ausgestattet und konnten so detailgetreue Daten erfassen und 3D-Messungen mit hoher Präzision generieren. Diese 3D-Scans bilden die Verformungen der Silos ab, welche mit dem bloßen Auge nicht erfasst werden können und daher detaillierte Scan-Aufnahmen erfordern.

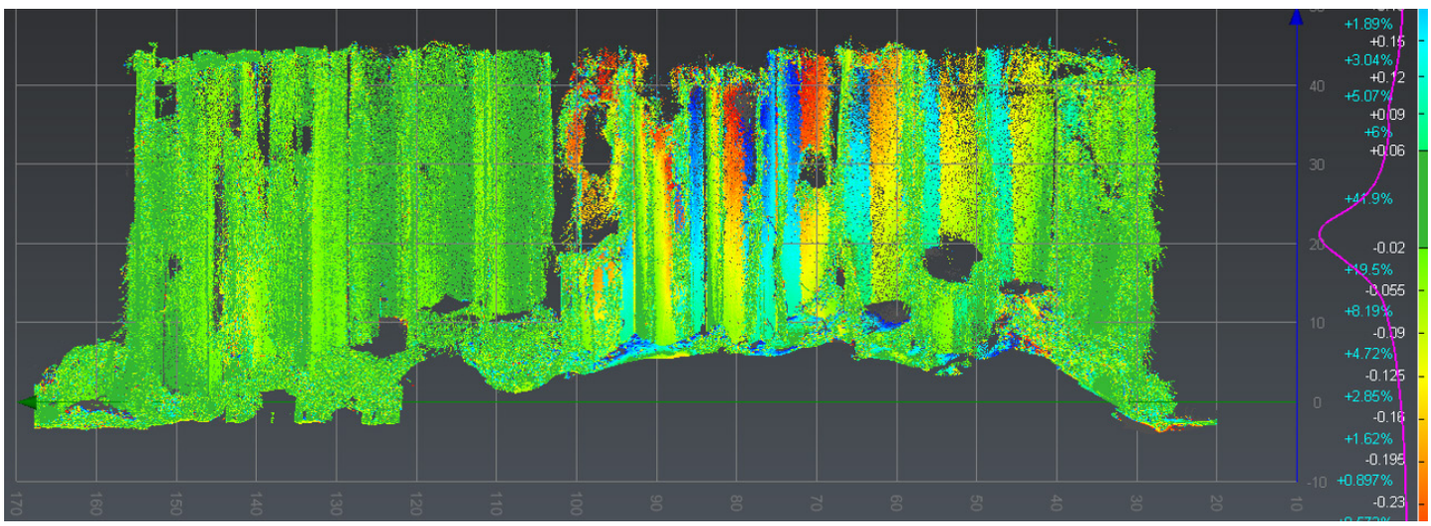
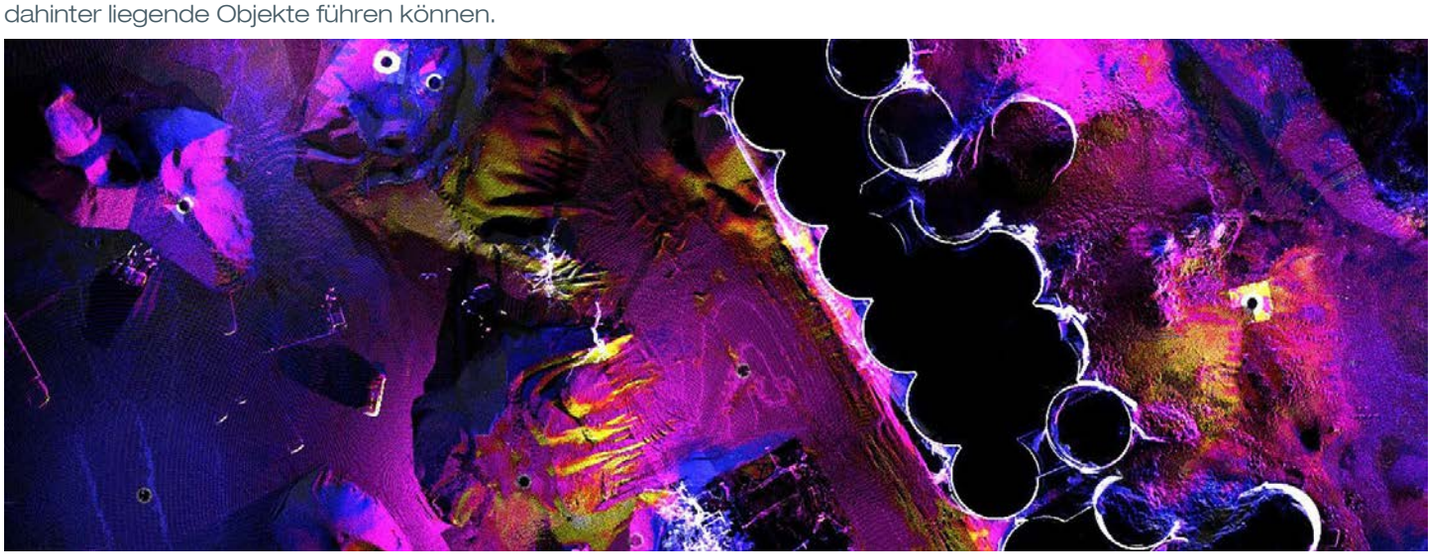


Illustration der 3D-Abweichungsanalyse der Scandaten über mehrere Monate

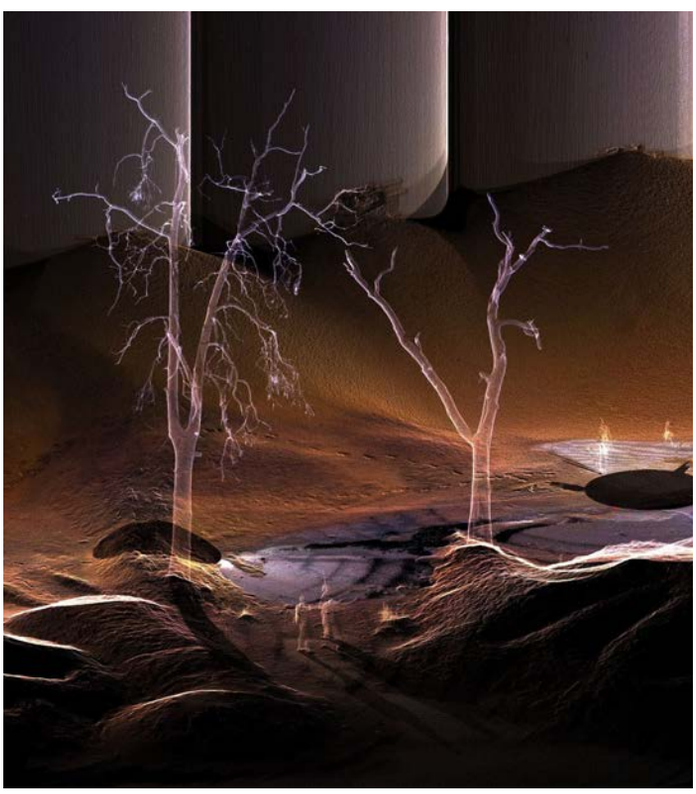
Z+F Imager® 5010X vor den Silos im Hafen von Beirut

Der Z+F IMAGER® 5010X Scanner wurde mit einer externen Infrarotkamera, der Z+F T-Cam, kombiniert, die ein Infrarotspektrum von 8 bis 14 µm abdeckt. Die Lösung erzeugt in weniger als zwei Minuten vollautomatisch 360°-Wärmebildscans. Mit Hilfe der Wärmebildkamera hat Durand die Wärmeentwicklung innerhalb der Silos gemessen und den möglichen Temperaturanstieg der Körner ermittelt.
Die Wärmebilder stellen die Temperaturen in Falschfarben dar. Beginnend mit kälteren Bereichen in blau, verschieben sich die Farben mit steigender Temperatur zu rot und schließlich gelb. Während die T-Cam bei ausreichender Expertise auch für absolute Temperaturmessungen verwendet werden kann, dienen die Wärmebilder in der Regel dazu, Veränderungen der Temperaturunterschiede sichtbar zu machen, die auf Probleme des Materials hinweisen oder zu Vermutungen über dahinter liegende Objekte führen können.



Aufnahme der Infrarotkamera Z+F T-Cam

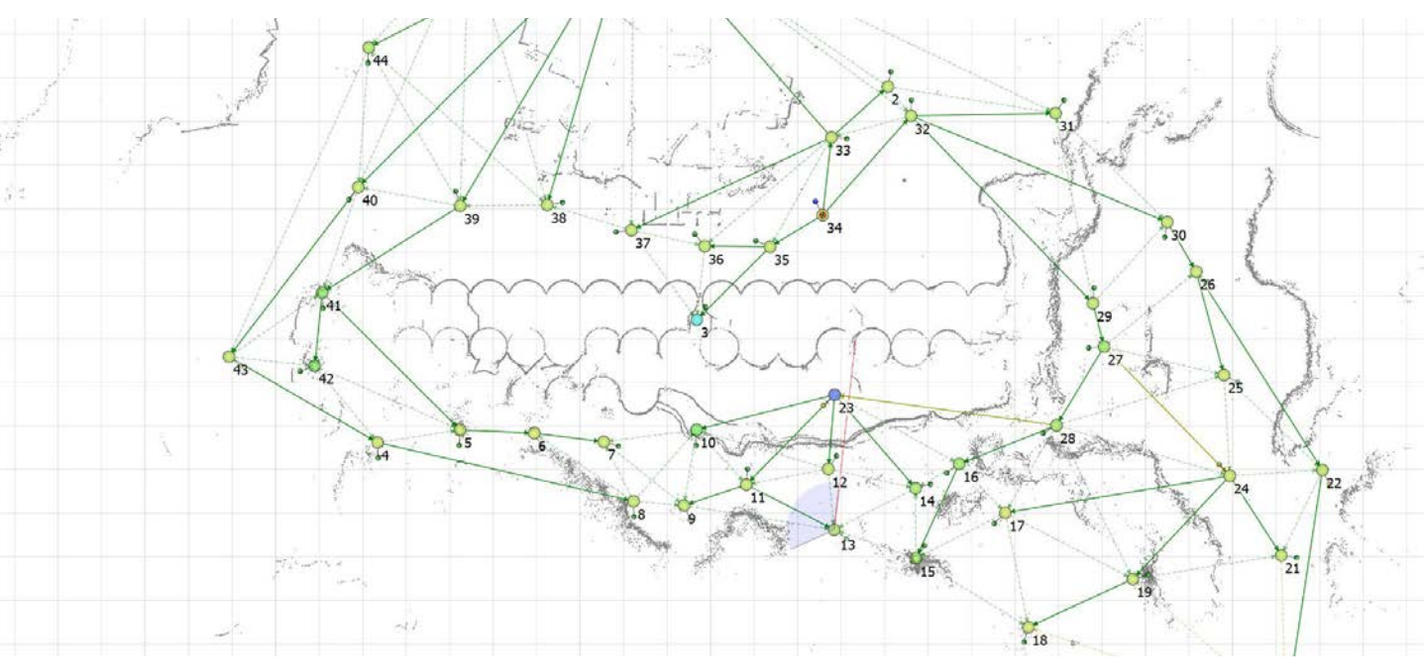
Der Scanner in schwieriger Umgebung



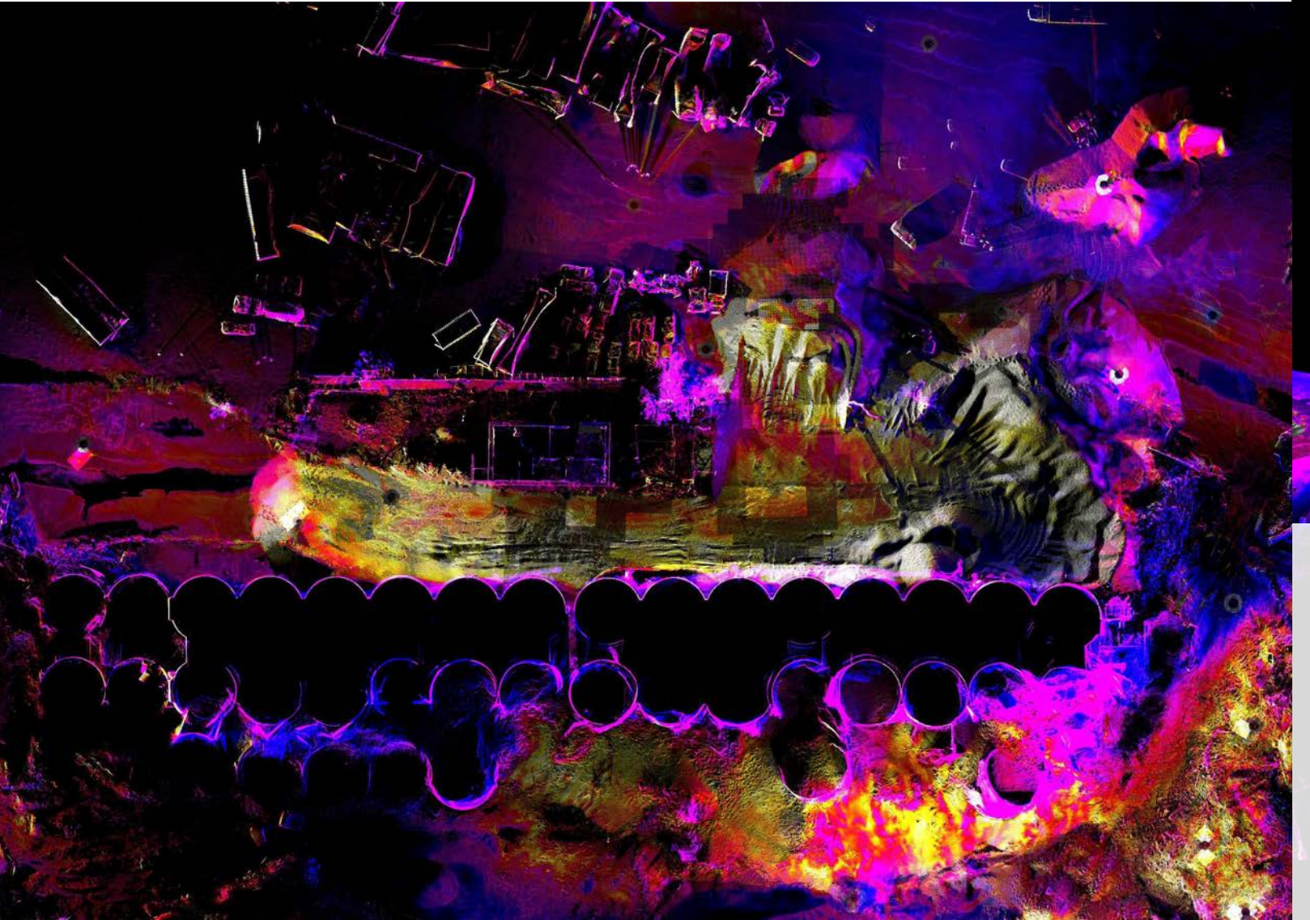
Silhouettenansicht der Punktwolke

Luftaufnahme des Hafens von Beirut

Der Erfassungsbereich des Z+F IMAGER® 5010X ermöglichte es dem Team ein großes Volumen pro Scan in einem sehr geringen Zeitraum zu scannen. Außerdem verfügen die Z+F-Scanner über integrierte HDR-Kameras, mit welchen selbst bei schwierigen Lichtverhältnissen beste Farbscans erstellt werden können. Ergänzend bietet der „blue workflow“ die Möglichkeit, noch direkt vor Ort die Registrierung aller Scandaten abzuschließen.



Diverse Scan-Positionen im Rahmen des Projekts



Aufnahmen der Infrarotkamera Z+F T-Cam

Ergebnisse

Der Nordblock hat sich seit der Explosion am 4. August 2020 um durchschnittlich 0,85 mm pro Tag vertikal gedreht bzw. gekippt, was die Sicherheit des gesamten Bauwerks gefährdet. Die Drehung des Nordblocks erfolgte in Richtung des Explosionskraters, von Westen nach Osten. Die Rotationsgeschwindigkeit war nicht linear, sie hing vom Wetter (Wind, Regen) und der Jahreszeit (Sonnenausrichtung, Umgebungstemperatur) ab.

Die höchste gemessene Neigung an der Spitze der Silos betrug 2 mm/Tag, die geringste ermittelte Neigung lag bei 0,2 mm/Tag. Die maximale Gesamtverschiebung, die bisher seit der Explosion gemessen wurde, betrug 450 mm an der Oberseite der Silos. Um genauere Ergebnisse zu erhalten, wurden bis Ende November 2020 regelmäßige 3D-Scan-Kampagnen mit dem Z+F IMAGER® 5010X durchgeführt.

Basierend auf den generierten Daten, lässt sich sagen, dass die Silos irreparabel sind und den größten Teil ihrer strukturellen Integrität verloren haben. Die Schäden lassen sich auf die ursprüngliche Explosion und die seitdem ständige Neigung infolge der ebenfalls beschädigten Fundamente zurückführen. In ihrem jetzigen Zustand erfüllen die Silos keine Bauvorschriften und können daher nicht wiederverwendet werden. Der aktuelle Standort am Hafen von Beirut ist für den Bau neuer Silos ungeeignet, da entweder der innere Teil (Innenhalbzylinder) der Silos beschädigt und/oder die Fundamentpfähle über den elastischen Bereich hinaus verformt wurden und daher gebrochen sind.

Unmittelbar nach der Explosion wurde Durand schnell klar, dass die Gärung des Getreides ein großes Problem darstellt. Wenn große Mengen an Getreide im Freien gelagert werden und Witterungseinflüssen wie Regen oder Hitze ausgesetzt sind, kann es zu einem inneren Gärungsprozess kommen, welcher enorme Temperaturanstiege zur Folge haben kann. Als Durand das erkannte, verfügte er aber nicht über die nötigen technischen Mittel, um dies zu verhindern. Auf der Suche nach einer Lösung wendete er sich an Zoller + Fröhlich und wurde mit der richtigen Ausrüstung, einem Scanner und der passenden T-Cam, unterstützt.
Nach einer technischen Schulung durch den Z+F-Support wurde die Ausrüstung in den Libanon gebracht. Durand war sofort in der Lage zu handlen und erstellte so die graphischen Dokumente, welche die Entscheidungsträger überzeugten und verdeutlichten, dass die hohen Temperaturen sehr problematisch sind. Die Temperaturen erreichten bereits 80 Grad und stiegen weiter an. Bei 100 Grad hätte ein großes Feuer entstehen können, das nicht mehr zu löschen gewesen wäre. Die Funktionen der T-Cam in Kombination mit denen des Z+F IMAGER® 5010X ermöglichten es, eine unglaubliche Menge an technischen Informationen (Temperatur-, 3D-Daten) in ein einziges sehr aussagekräftiges Dokument zu verwandeln und waren in diesem Moment entscheidend. Es wurde beschlossen, die libanesische Armee mit geeigneter Ausrüstung loszuschicken und die riesigen Getreidehaufen in deutlich kleinere aufzuteilen. Auf diese Weise konnte ein weiterer Brand vermieden und das gesamte Gebiet vor einer neuen Katastrophe bewahrt werden.

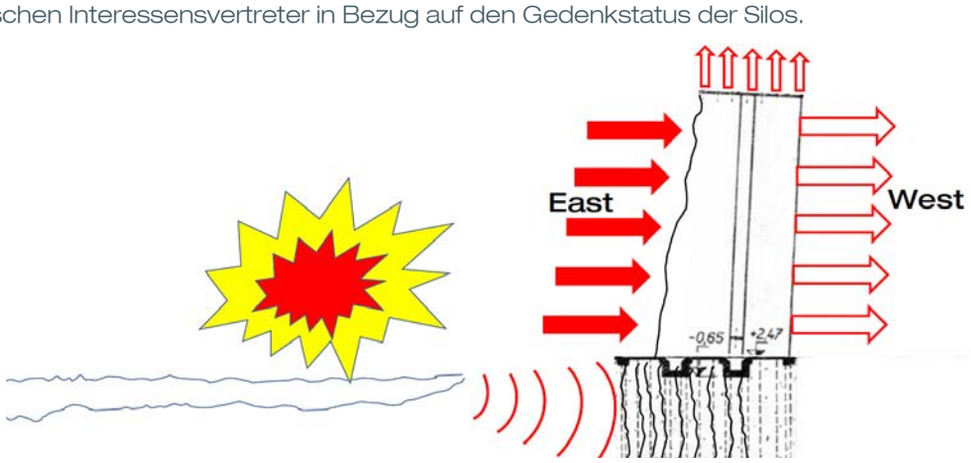
Auf der Grundlage der gesammelten (thermischen) 3D-Scans und Beobachtungen vor Ort werden die folgenden Handlungsempfehlungen abgeleitet:

- keine Wiederverwendung des bestehenden Fundaments für den Bau neuer Silos, da die Silos strukturell irreparabel sind. Jegliche Absicht, sie „wiederherstellen“ zu wollen, würde ein hohes Risiko darstellen und Leben in Gefahr bringen.

- Finanzierung, Planung und Bau neuer Silos und damit auch die Suche nach einem neuen Silostandort, da der Fundamentbau in demselben Gebiet zu kostspielig und technisch kompliziert ist.

- weitere Überwachungen/Beobachtungen der strukturellen Reaktion der Silos in den kommenden Monaten, um die Entwicklung, den Zustand und die Bewegung der verbleibenden Silos zu überprüfen.

- Konsultation aller libanesischen Interessensvertreter in Bezug auf den Gedenkstatus der Silos.

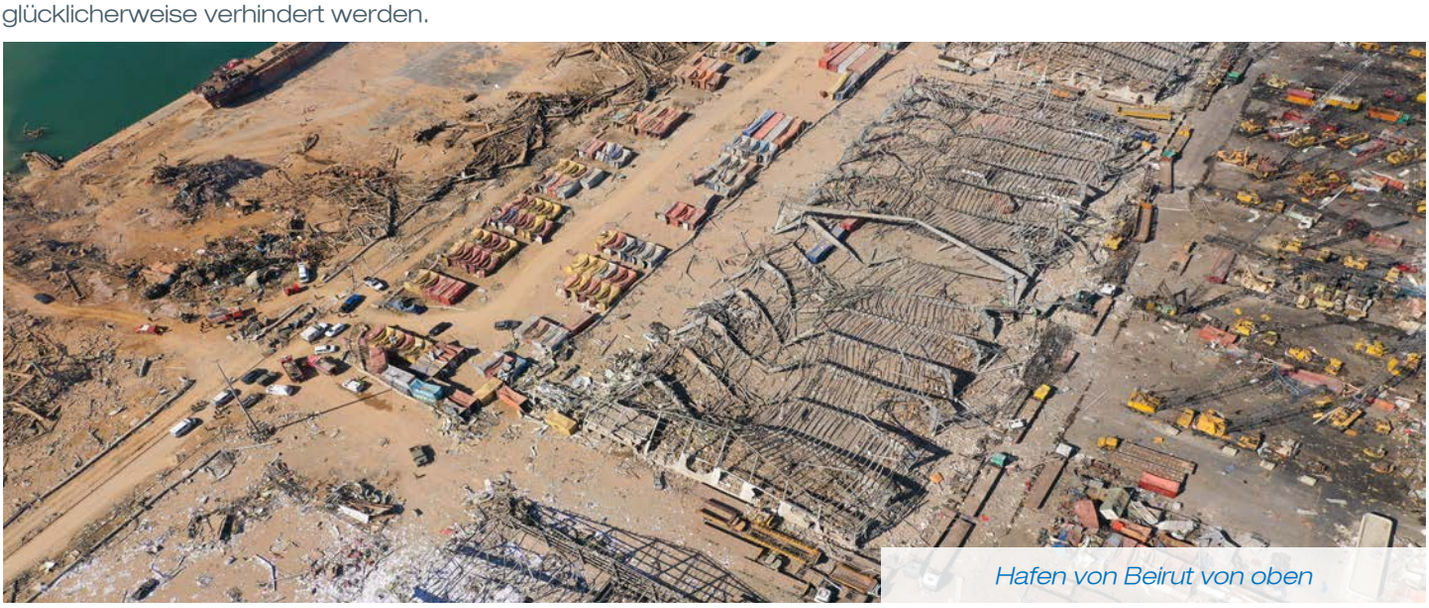


Veranschaulichte Neigung der Silos verursacht durch die Explosion

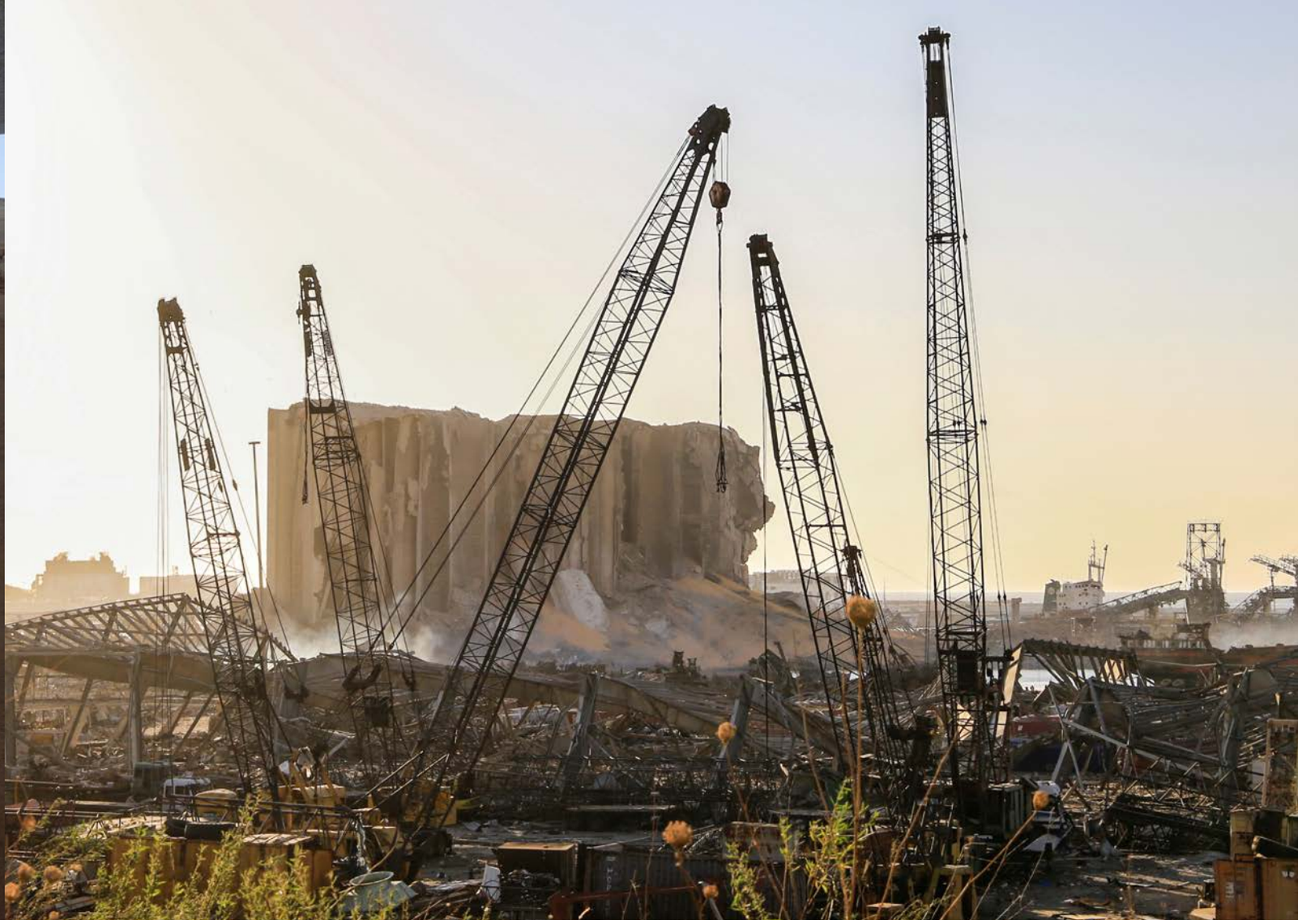
Inmitten der Silos

Fazit

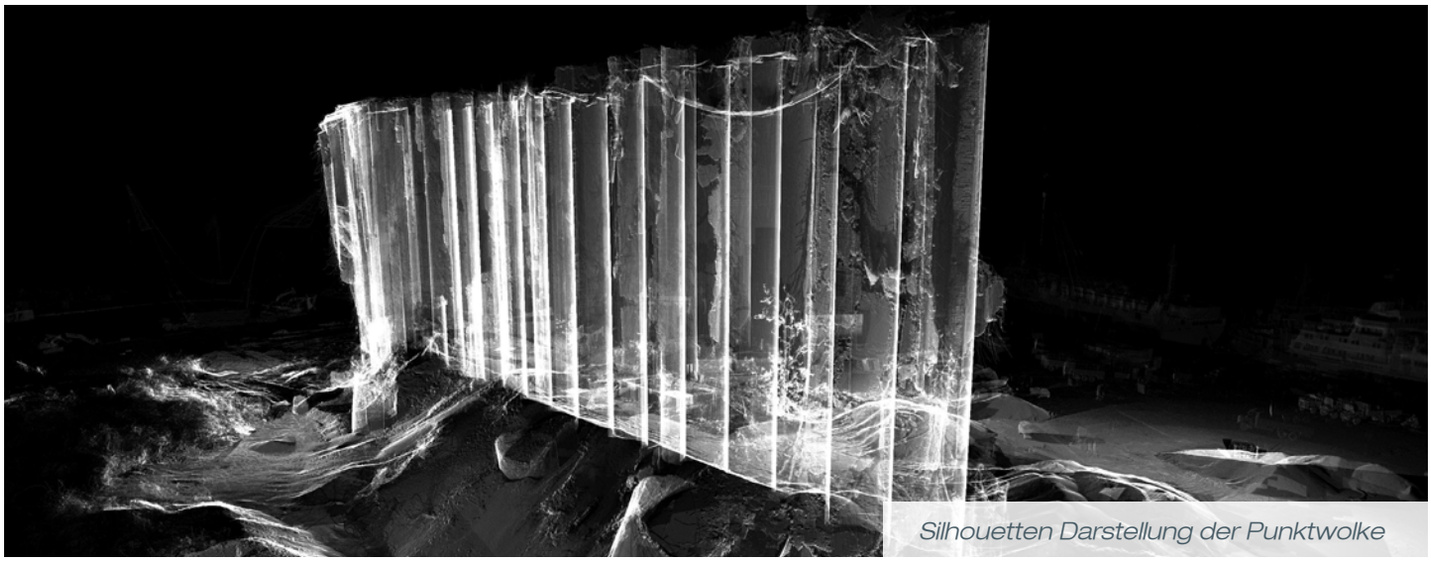
Die 3D-Laserscan-Messungen der Silos von Beirut wurden von der „School of Engineering ESIB“ an der Saint Joseph University Beirut in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Beratungsunternehmen für strukturelle Integrität „Amann Engineering“ in drei Scankampagnen durchgeführt, die im September und November 2020 sowie Ende März bzw. Mitte April 2021 stattfanden. Der Z+F IMAGER® 5010X wurde eingesetzt, um Messungen mit hoher Präzision durchführen und feine Details erfassen zu können. Die 3D-Scan-Technik, die unter anderem in verschiedenen Branchen wie dem Maschinenbau, der Forensik, der strukturellen Gesundheitsüberwachung und der Medizin eingesetzt wird, ermöglichte die Modellierung und Erfassung des Struktur- und Schadensverhaltens der Silos im Beiruter Hafen, was zu einem grundlegenden Verständnis des Problems und zu entsprechenden Maßnahmen führte. Weitere Folgeschäden konnten dadurch glücklicherweise verhindert werden.



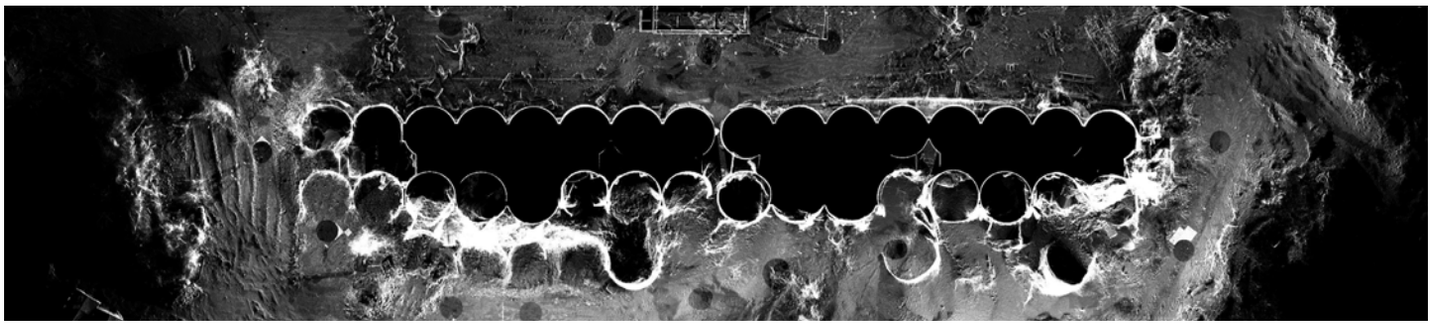
Hafen von Beirut von oben

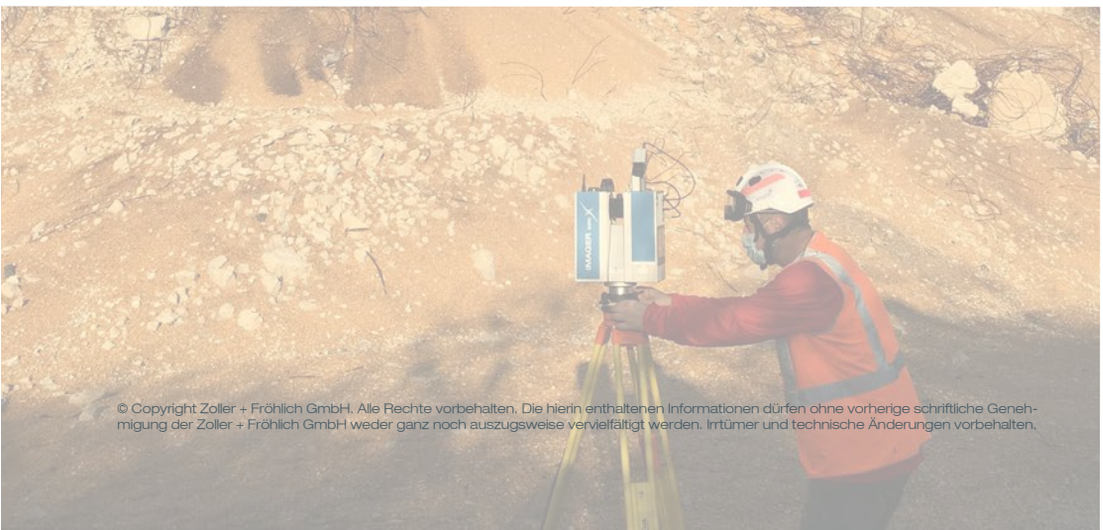


Silos im Beiruter Hafen



Silhouetten Darstellung der Punktwolke





Hauptsitz – Deutschland

Zoller + Fröhlich GmbH
Simoniusstrasse 22
88239 Wangen im Allgäu
Deutschland

Tel.: +49 7522 9308-0
Fax: +49 7522 9308-252

www.zofre.de
info@zofre.de

Niederlassung – USA

Z+F USA, Inc.
700 Old Pond Road
Suite 606
Bridgeville, PA 15017
USA

Tel.: +1 412 257 8575
Fax: +1 412 257 8576

www.zf-usa.com
info@zf-usa.com

© Copyright Zoller + Fröhlich GmbH. Alle Rechte vorbehalten. Die hierin enthaltenen Informationen dürfen ohne vorherige schriftliche Genehmigung der Zoller + Fröhlich GmbH weder ganz noch auszugsweise vervielfältigt werden. Irrtümer und technische Änderungen vorbehalten.

04/2022