

Elastische Lagerung als Massnahme zur Isolierung von Seilbahnschwingungen

F. Logemann, O. F. Stirnimann, mageba sa, Bülach, CH

Abstract

Elastische Lagerungen von Bauwerken haben in den letzten Jahren, durch eine zunehmend verdichtete Bauweise im städtischen Bereich, immer mehr an Bedeutung gewonnen. Häufig werden Elastomerlager zwischen dem dynamisch angeregten Untergrund und dem zu schützenden Gebäudebereich verwendet. Als Entkopplungselement reduzieren die Lager wirksam Lärm und Erschütterungen.

Der Betrieb von Luftseilbahnen verursacht neben Stoßimpulsanregungen auch im hörbaren Körperschallbereich liegende Emissionen durch die Litzen des Seils. Um zu verhindern, dass Schwingungsenergie in angrenzende Bauteile eingeleitet wird und in lärmschutzbedürftigen Räumen als sekundär abgestrahlter Körperschall wahrgenommen werden kann, ist die elastische Lagerung eine wirksame Schallschutzmaßnahme.

Anhand von zwei Praxisbeispielen soll die Planung und Montage von elastischen Lagern zum Schutz vor Schwingungseinwirkungen aus Luftseilbahnverkehr vorgestellt werden.

Im Rahmen eines Immobilienentwicklungsprojektes in der georgischen Hauptstadt Tiflis wird unter anderem das Hotel Freedom Square errichtet, das mittels Seilbahn mit einem weiteren Investitionsprojekt verbunden sein wird. Bewehrte Elastomerlager mit einer Dicke von mehr als 300 mm werden genutzt um das Fundament der Seilbahnstation auf dem Dach des Hotel Freedom Square elastisch zu lagern.

In Fiesch im Schweizer Kanton Wallis wird der Knotenpunktbahnhof ÖV-HUB Fiesch gebaut. Die Bauherrschaften errichten neben der heutigen Station einen neuen Bahnhof mit integrierter Talstation der ebenfalls neuen Zubringerbahn auf die Fiescheralp. In der Planungsphase wurden zwei Lagerungsvarianten mit einer Abstimmfrequenz von ≤ 25 Hz dimensioniert: eine vollflächige Trennung auf ca. $1'050 \text{ m}^2$ zwischen Seilbahngebäude und Fremdvermietungsbereichen in der Talstation und eine Lagerung unter der Seilbahn, auf den Wänden der Talstation, um die Körperschallemissionen näher an der Quelle zu dämmen.

ELASTISCHE LAGERUNG ALS MASSNAHME ZUR ISOLIERUNG VON SEILBAHNSCHWINGUNGEN

Florian Logemann¹ und Orlando Fabio Stirnimann²

¹ mageba sa, flogemann@mageba.ch

² mageba sa, fstirnimann@mageba.ch

1. EINFÜHRUNG

1.1 Allgemeine Informationen zur Ausgangslage

Der Betrieb von Maschinen, Anlagen und Fahrzeugen verursacht häufig für Ihre Umgebung störende Lärm- und Schwingungsbelastungen, die Gesundheits- sowie Bauteilschäden zur Folge haben können. Ursächlich dafür sind ungleichförmige oder drehende Bewegungen mit unausgeglichenen Massen. Beim Betrieb von Luftseilbahnen liegen Anregungen durch litzeninduzierte Schwingungen, Stoßimpulse, Laufrollen-, Getriebe- und Antriebsgeräusche vor. Um die in das Bauwerk eingeleitete Schwingungsenergie und den sekundär abgestrahlten Körperschall am Immissionsort zu mindern, sind neben einer akustisch optimierten Seilbahnanlage (Seil-Rundheit, Rollendurchmesser) folgende Maßnahmen möglich:

- Elastische Lagerung / Schwingungsisolierung
- Große Fundamentmassen
- Querschnittssprünge (z.B. Dickenänderungen und Verzweigungen)
- Entfernungsvergrößerung zwischen Emissions- und Immissionsort
- Vorsatzschalen im Empfangsraum
- Erhöhung der Materialdämpfung (untergeordnete Rolle im Hochbau)

Seit mehr als drei Jahrzehnten werden Bauwerke unter Verwendung von Elastomeren vor Schwingungseinwirkungen geschützt. Elastomere werden als Bindeglied zwischen der dynamisch angeregten Umgebung und den schutzbedürftigen Räumen im Inneren des Gebäudes eingesetzt und wirken sich federnd auf Kräfte und Momente aus. Die Lagerungselemente können so eine wirksame Schwingungs- und Stoßdämpfung ermöglichen. Diese Eigenschaft ist in der Struktur und Vernetzung der Moleküle der Elastomere begründet. In Abhängigkeit von den mechanischen Eigenschaften und der Beständigkeit gegen äußere Einflüsse können unterschiedliche Materialien zur Lagerung genutzt werden.

Die elastische Lagerung als Maßnahme zur Isolation von Luftseilbahnschwingungen wird im Folgenden an den zwei Praxisbeispielen Panorama Tbilisi, Georgien und ÖV-HUB Fiesch, Schweiz dargestellt.

2. PLANUNG DER ELASTISCHEN LAGERUNG

Zu Beginn der Planungsphase wird durch den Fachplaner (Baudynamiker, Akustiker) eine Schall- und Schwingungsprognose erstellt, welche die einzuhaltende Eigenfrequenz der elastischen Lager festlegt. Diese Eigenfrequenz wird so gewählt, dass die maßgebenden Frequenzanteile der Anregung ausreichend gedämpft werden. In der Regel beruht die dynamische Bemessung der Lager dann auf dem Modell des gedämpften Einmassenschwingers. Dieses Modell setzt theoretisch dynamisch unendlich steife Massen und ein starres Fundament voraus. Vereinfacht trifft dies aufgrund ihrer steifen Struktur auch auf Gebäude zu. Zur Berechnung der Eigenfrequenz der Lager ist die exakte Kenntnis der

statischen und dynamischen Lagereigenschaften notwendig. Diese Eigenschaften, in Abhängigkeit von der statischen und dynamischen Belastungssituation, werden von mageba sa durch ein auf Messdaten basierendes Bemessungstool berücksichtigt.

In Abhängigkeit der Bauwerkssituation sind verschiedene Anordnungen der Lagerungsebene möglich. Es gilt jedoch zu beachten, dass eine Anordnung der Lager über der Gründungsebene von Gebäuden einen großen Planungsaufwand zur Folge hat, weil die horizontalen Lasten nicht über die Seitenwände im Erdreich abgetragen werden können. Die Lastabtragung von Einwirkungen insbesondere aus Erdbeben kann spezielle Lösungen wie z.B. elastisch ummantelte Schubdorne oder spezielle Horizontallagerkonstruktionen erfordern. Außerdem sind bei sehr tiefen Abstimmfrequenzen und entsprechend großen Verformungswegen iterative Vorgehensweisen bei der Lastermittlung erforderlich, was den Dimensionierungsaufwand zusätzlich erhöht.

2.1 Panorama Tbilisi

Das Projekt Panorama Tiflis besteht aus dem Bau von vier multifunktionalen Zentren in verschiedenen Zonen der georgischen Hauptstadt Tiflis. Das Projekt erstreckt sich von dem im Zentrum von Tiflis befindlichen Platz Freedom Square bis zum stadtnahen Sololaki-Berg. Es ist eines der größten Immobilienprojekte des Landes und umfasst Hotels, Ausstellungszentren, Konferenzräume, Gesundheits- und Freizeitzentren [1]. Das Luxushotel Freedom Square wird durch eine Seilbahn mit einem weiteren Hotelprojekt auf dem Sololaki-Berg und anderen Stadtteilen verbunden werden [2].



Abbildung 1: Hotel Freedom Square Projekt, Quelle: Georgian Co-Investment Fund.

Um Lärmbelästigungen durch den Betrieb der Seilbahn in den Hotelsuiten unter der auf dem Dach des Hotel Freedom Square befindlichen Seilbahnstation zu verhindern, wurde das Fundament der Seilbahn auf bewehrten Elastomerlagern mit einseitig aufvulkanisierter Stahlplatte gelagert.

Zur Abtragung der Vertikalkräfte wurden zehn Naturkautschuklager des mageba Typs VIBRAX®BLOCK B/C mit Seitenlängen von bis zu 520 mm und einer Höhe von 307 mm eingebaut. Für die horizontale Lastabtragung wurden insgesamt 24 VIBRAX®BLOCK Lager, davon 14 Lager mit einem modifizierten Compound zur Dämpfung der Einwirkungen im Erdbebenlastfall, verwendet.

Die abzutragenden Lasten wurden durch den Tragwerksplaner in einem iterativen Prozess mit mageba ermittelt. Die berechneten Lagersteifigkeiten wurden in das statische Tragwerksmodell übertragen, die Lasten ermittelt und nach erneuter Bemessung der Lager die aktualisierten Steifigkeiten in das Modell eingegeben. Ergänzend wurde von einem Baudynamiker eine dynamische Simulation des Tragverhaltens der Talstation durchgeführt.

Es musste bei der Bemessung der Lager eine Vielzahl von Lastkombinationen durch Einwirkungen aus Eigen-, Wind- und Schneelasten sowie Erdbeben- und Seilzugkräften berücksichtigt werden. Die charakteristischen Belastungen pro Lagerelement lagen zwischen 170 und 590 kN und die horizontale und vertikale Eigenfrequenz der Lagerung wurde an der Machbarkeitsgrenze für Elastomerlager gemäss den Vorgaben des Seilbahnherstellers Doppelmayr ausgelegt.

Eine ähnlich tief abgestimmte Lagerung mit entsprechend großen Verformungswegen wurde bis zum heutigen Zeitpunkt durch mageba noch nicht umgesetzt, weshalb es notwendig war, die Bemessungsgleichungen, welche dem VIBRAX®BLOCK Bemessungstool zugrunde liegen, anhand von zusätzlichen statischen und dynamischen Tests weiter zu optimieren. Hierzu wurden Probelager mit den gemäss Berechnung erforderlichen Schichtdicken und Abmessungen produziert und im Werksprüfstand sowie an der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) getestet.

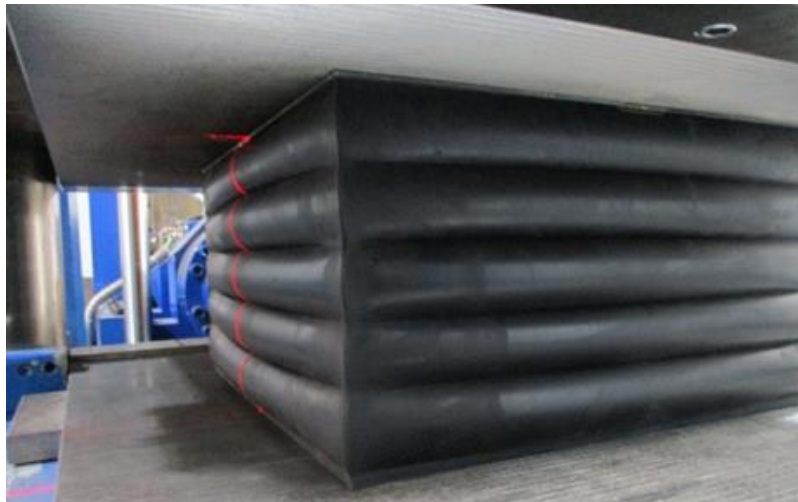


Abbildung 2: VIBRAX®BLOCK Lager unter Druckbelastung im Prüfstand, Quelle: mageba SA.

2.2 ÖV-HUB Fiesch

In Fiesch im Schweizer Kanton Wallis wird der Knotenpunktbahnhof ÖV-HUB Fiesch erstellt. Es ist ein gemeinschaftliches Projekt der Aletsch Bahnen AG, Matterhorn Gotthard AG und Postauto in Zusammenarbeit mit der Gemeinde Fiesch [3].

Die Bauherrschaften investieren ca. CHF 45 Mio. [3] in die neue Bahnstation der Matterhorn Gotthard Bahn mit integrierter Talstation, der dazugehörigen 10er Gondelbahn auf die Fiescheralp und die umgebaute Bergstation. Die Fiescheralp liegt im Bereich der UNESCO-Weltnaturerbe Region Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn [4] und ist einer der Zugangsorte zum Skigebiet Aletsch Arena. Das Projekt wird umgesetzt, um die Förderleistung der Seilbahn zu erhöhen, Wartezeiten der Gäste zu verringern und eine optimale Anbindung an den ÖV (Matterhorn-Gotthard-Bahn und Postauto) zu gewährleisten [3].



Abbildung 3: ÖV-HUB Fiesch – Knotenpunktbahnhof und Talstation, Quelle: ALETSCHE BAHNEN AG.

Antrieb und Getriebe der Seilbahn, welche Emissionen im tieffrequenten Bereich verursachen, befinden sich an der Bergstation, sodass an der Talstation hauptsächlich Anregungen im hörbaren Körperschallbereich maßgebend sind. Der hierfür relevante Anregungsmechanismus ist die litzeninduzierte Seilschwingung, welche, in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, zwischen 80 und 120 Hz liegt [5].

Eine Schallimmissionsprognose, basierend auf Schwingungsemissionen, die auf dem Fundament einer vergleichbaren Gondelbahn gemessen wurden, ergab, dass die gesetzlichen Grenzwerte in der Schalterhalle (Arbeitsgesetz) unterhalb der Seilbahn, bei Verwendung von entkoppelten Vorsatzzschalen, voraussichtlich eingehalten werden können. In den fremdgenutzten Bereichen der Talstation werden die Grenzwerte gemäß Norm SIA 181 (Schallschutz im Hochbau) jedoch überschritten. Als Maßnahme wurde u.a. eine elastische Trennung mit einer Abstimmfrequenz von ≤ 25 Hz festgelegt, um den Mindestschallschutz gegenüber der Seilbahn einhalten zu können [5].

Prinzipiell sind drei mögliche Varianten hinsichtlich der erforderlichen Körperschallisolationsebene denkbar.

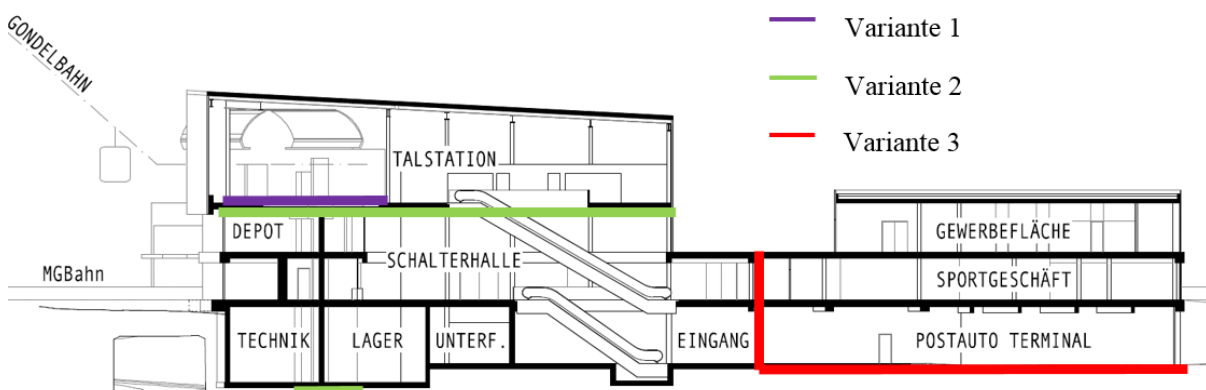


Abbildung 4: Mögliche Isolationsebenen.

2.2.1. Variante 1 – Lagerung direkt unter der Seilbahn

Eine Ausführung der Lagerung direkt unter der Seilbahn, ähnlich wie bei dem in Kapitel 2.1 vorgestellten Projekt Panorama Tbilisi, hat den Vorteil, dass die Vibrationen direkt an der Quelle gedämmt werden. Der Lärmimmissionspegel wird sowohl in den fremdgenutzten Bereichen als auch in der Schalterhalle verringert.

Diese Variante wurde jedoch aufgrund der statischen Anforderungen (Nachweis im Erdbebenfall) für das Projekt in Fiesch verworfen. Außerdem ist der Planungsaufwand für Tragwerksplaner, Baudynamiker, Lager- und Seilbahnhersteller, wie zuvor in Kapitel 2.1 beschrieben, sehr hoch und erschien auch aufgrund des engen Zeitplans (drei Monate zwischen Start der Detailplanung Lager und Montagebeginn) beim Projekt in Fiesch nicht als zielführend.

2.2.2. Variante 2 – Trennung zwischen Erd- und Perrongeschoss

Im Gebäude der Seilbahn ist nur die oberste Betondecke und die Bodenplatte mit den Stehern der Seilbahn verbunden, die Decken dazwischen dagegen nicht. Daraus ergibt sich eine Entkopplungsmöglichkeit auf den Wänden der obersten Betondecke in Kombination mit einer Lagerung unter der Bodenplatte des Stehers.

Diese Variante wurde in der Planungsphase zunächst weiterverfolgt. Bei der Vorabdimensionierung der Elastomerlager mussten die Einfederungen zwischen den einzelnen Lagergruppen auf den Wänden aufeinander abgestimmt und die differentiellen Setzungen zwischen Seilbahngebäude und Drittnutzungsgebäude beachtet werden. Die Horizontallasten müssen in diesem Fall über elastisch entkoppelte Aussteifungen (z.B. Schubdorne) abgetragen werden.

Letztlich hat sich die Bauherrschaft angesichts des erhöhten Detailplanungsaufwandes (u.a. Koordination mit der Haustechnik, Ausführungsdetails an den Aufzügen) gegen diese Variante entschieden.

2.2.3. Variante 3 – Vollflächige Lagerung unter Bodenplatte des fremdgenutzten Gebäudes

Unter der gesamten Bodenplatte des fremdgenutzten Gebäudes werden zwischen Magerbeton und Fundament Elastomerlager eingebracht. Seilbahngebäude und Gebäude Dritter sind vertikal komplett baulich zu trennen. Es darf bei dieser Variante keine starren Verbindungen zwischen den Gebäudeteilen geben und das Füllmaterial eine maximale Dichte von 40 kg/m^3 aufweisen [5]. Auch hier müssen die differentiellen Setzungen zwischen Seilbahngebäude und Drittnutzungsgebäude beachtet werden. Diese Setzungen werden durch eine zusätzliche Betonplatte, auf der Elastomerlager am Gebäudeübergang verlegt werden, aufgenommen.

Diese Variante hat zwar Nachteile in Form eines erhöhten Materialaufwands, einer geringeren Dämmwirkung durch die verringerte schwingende Masse pro elastisch federnder Fläche und einer erhöhten Ebenheitsanforderung an die Magerbetonschicht, jedoch praktische Vorteile - die zuvor erwähnten komplizierten Ausführungsdetails entfallen - im Vergleich zu Variante 1 und 2, weshalb sich die Bauherrschaft für diese Variante entschieden hat.

Zunächst wurde an eine Flächenlagerung unter Bodenplatte mit geschäumten Polyurethanlagern gedacht. Diese werden häufig bei Lagerungen zum Schutz vor Einwirkungen aus Bahnverkehr projektiert und erlauben Abstimmfrequenzen von $> 8 \text{ Hz}$ (in Abhängigkeit von der Materialdicke). Im vorliegenden Fall wird jedoch eine höhere Eigenfrequenz von $\leq 25 \text{ Hz}$ gefordert, wodurch Gummigranulatlager aus mageba VIBRAX®DAMP eine technisch sinnvolle und wirtschaftliche Alternative darstellen.

VIBRAX®PUR			
Elastomerlager aus Polyurethan			 Gemischtzelliger Polyurethanschaum
Lastbereich	0.01–2.8 N/mm ²		
Eigenfrequenz ²⁾	≥ 8 Hz		
Einbaudicke	12–50 mm		
VIBRAX®DAMP			
Elastomerlager aus Gummigranulat			 Profilierte Gummifasermatte mit PU-Elastomer gebunden
Soft Medium Hard Ultra Supreme			
Lastbereich	0.05–2.0 N/mm ²		
Eigenfrequenz ²⁾	≥ 15 Hz		
Einbaudicke	10–30 mm		

Abbildung 5: Auszug aus der mageba Anwendungsbroschüre Schwingungsisolation, Quelle: mageba SA.

Die VIBRAX®DAMP Lager wurden entsprechend der vom Tragwerksplaner ermittelten abzufedernden, charakteristischen Bodenpressungen so ausgewählt, dass die verschiedenen Lastzonen annähernd die gleiche Einfederung aufweisen. Für die Ermittlung der vertikalen Eigenfrequenz der Lagerung musste die Abhängigkeit der dynamischen Steifigkeit der Lager von der Last, Anregungsamplitude und Frequenz (Anregung Seilbahn 80-120 Hz) sowie das Dauerstandverhalten berücksichtigt werden.

3. MONTAGE DER ELASTISCHEN LAGER

3.1 Panorama Tbilisi

In Tiflis wurde auf der obersten Geschossdecke des Hotel Freedom Square ein Fundament erstellt, auf welchem Stahleinlegeeile für die Elastomerlager, gemäss Verlegeplan, eingebracht wurden. Auf diese Weise konnten die ca. 120 kg schweren VIBRAX®BLOCK B/C-Vertikallager mit der erforderlichen Ebenheit nach den Vorgaben von Doppelmayr Seilbahnen / mageba und unter Aufsicht von Doppelmayr montiert werden. Beim Erstellen der Schalung für das Betonieren des Seilbahnfundamentes mussten die zu erwartenden Lagerverformungen berücksichtigt werden.



Abbildung 6: VIBRAX®BLOCK Vertikallager, Quelle: Doppelmayr Seilbahnen GmbH.

In den dann folgenden Schritten wurden die Horizontallager, Erdbebenanschlage und Lagerkonsolen positioniert und parallel zu den Auenkannten des Fundamentes ausgerichtet, bevor dann zu einem späteren Zeitpunkt die Lager vorgespannt und die Forderseile der Seilbahn gespannt werden können.



Abbildung 7: Seilbahnfundament während der Bauphase, Quelle: Doppelmayr Seilbahnen GmbH.

3.2 V-HUB Fiesch

In Fiesch wurden die Elastomerlager auf einer Magerbetonschicht mit erhöhter Qualitätsanforderung (abtaloschiert, Ebenheit < 3 mm) gema des Montageplans durch mageba verlegt. Die Elastormattenstoe wurden mit wasserdichtem Klebeband verklebt und Rohrleitungen mit Elastomerlagern umhüllt um Schallbrucken zu verhindern. Zum zusätzlichen Schutz wurde die Lagerung vor dem Betonieren mit PE-Folie abgedeckt und die Folienstoe mit Klebeband verklebt. Dadurch das mageba, neben der Bemessung und Lieferung, auch die Montage der Lager durchführte, konnte eine fachgerechte Montage erfolgen und es waren keine zusätzlichen Aufsichtspersonen zur Kontrolle notwendig.



Abbildung 8: VIBRAX[]DAMP Elastormatten während der Baustellenmontage, Quelle: mageba SA.

Außer der Montage der horizontalen und vertikalen Elastomerlager auf einer Fläche von insgesamt 1'050 m² war bei der Erstellung des ÖV-HUB Fiesch aus schalltechnischer Sicht auch eine bauliche Gebäudetrennung zwischen dem Seilbahngebäude und dem Gebäudeteil in Fremdnutzung notwendig. Bauseitig wurden Schalungselemente beim Erstellen der Wände verwendet, die nachträglich wieder entfernt werden konnten. So wurde ein Luftraum ohne Körperschallübertragungsmöglichkeiten zwischen den Gebäudeteilen geschaffen.

4. SCHLUSSBEMERKUNGEN UND AUSBLICK

Die vorgestellten Projekte zeigen, dass bei Luftseilbahnschwingungen vor allem Anregungen im hörbaren Körperschallbereich vorliegen, die je nach Bauwerkssituation sehr unterschiedliche Anforderungen an die Planung und Ausführung von elastischen Lagerungen zum Schutz vor den Schwingungseinwirkungen aus Luftseilbahnverkehr verursachen können.

Der Lagerhersteller sollte bereits in der Planungsphase mit eingebunden werden, damit frühzeitig alle Bemessungs- und Ausführungsdetails abgeklärt werden können und somit eine reibungslose Umsetzung der elastischen Lagerungsmaßnahme ermöglicht wird.

Während des Projektes Panorama Tbilisi bestätigten Messungen der Lagerverformung nach dem Betonieren des Seilbahnfundamentes (22.5 mm) das zuvor berechnete Verformungsverhalten (25 mm).

Die Montage der Lager kann bei beiden vorgestellten Projekten voraussichtlich bis Ende des Jahres 2019 abgeschlossen werden. Nach Fertigstellung und Bezug der Gebäude sind jeweils abschließende Schall- und Schwingungsmessungen in den sensiblen Räumen geplant.

LITERATUR

- [1] Lorusso, M. (2018). *The Panorama Tbilisi project: a monster in town*, Webseite <https://www.balcanicaucaso.org/eng/Areas/Georgia/The-Panorama-Tbilisi-project-a-monster-in-town-186839>, abgerufen im Februar 2019
- [2] Georgian Co-Investment Fund *Hotel on Freedom Square 7**, Webseite <http://gcfund.ge/en/hospitalityandrealstate/8/>, abgerufen im Februar 2019
- [3] Aletsch Bahnen AG (2019). *Projekt ÖV-HUB Fiesch*, Webseite <https://www.aletscharena.ch/quicklinks/ueber-uns/aletsch-bahnen-ag/oev-hub-fiesch/presentation-oev-hub-homepage.pdf>, abgerufen im Februar 2019
- [4] UNESCO World Heritage Centre (2019). *World Heritage List Swiss Alps*, Webseite <http://whc.unesco.org/en/list/1037/>, abgerufen im Februar 2019
- [5] Gartenmann Engineering AG (2018). *Aktennotiz Version 1.1 ÖV-HUB Fiesch, Körperschallschutz Luftseilbahn*, Bern, Schweiz