

Elastische Lagerung von Bauwerken im Grundwasser

Gebäude lassen sich durch eine elastische Lagerung von unerwünschten Schwingungseinwirkungen isolieren. Dabei stellen im Grundwasser gegründete Bauwerke eine besondere Herausforderung dar, da die Elastomere in diesen Fällen erhöhten Anforderungen ausgesetzt sind. Wie im nachfolgenden Bericht dargelegt wird, sind Polyurethan-Werkstoffe zur elastischen Entkopplung von Bauwerken im Grundwasser geeignet. Die Wirksamkeit wird anhand von zwei Ausführungsbeispielen erläutert.

Einleitung

Bauwerke können vor unerwünschten Erschütterungen aus der Nachbarschaft durch eine elastische Lagerung geschützt werden. Solche Erschütterungen können zum Beispiel durch nahe gelegene Verkehrsstraßen verursacht werden. Man spricht in diesem Fall von einer elastischen Isolierung des Empfängers (sogenannte Empfängerisolierung). Daneben ist es möglich, dass dynamische Anregungen von einem Bauwerk selbst ausgehen, wenn dieses beispielsweise industriell genutzt wird (z. B. Wasserkraftwerk, Stanzwerk). Um die bestehende Bebauung im Nahfeld dieses Bauwerks zu schützen, kann sich die elastische Entkopplung des abstrahlenden Bauwerks als vorteilhaft erweisen (sogenannte Quellenisolierung). Die unerwünschten Schwingungen werden in beiden Fällen durch eine elastische Entkopplung gedämpft.

In diesem Bericht wird beschrieben, welche Parameter die Isolierung beeinflussen und wie die Dämmwirkung der elastischen Bauwerksentkopplung gesteuert werden kann. Dabei werden hohe Anforderungen an die Werkstoffe gestellt. Elastomere auf Basis von Polyurethan (PUR) erfüllen diese Bedingungen und sind daher für diesen anspruchsvollen Einsatzbereich gut geeignet. In diesem Zusammenhang werden die schwingungsisolierenden Eigenschaften der entsprechenden Werkstoffe erläutert.

Beim Einsatz im Grundwasser ergeben sich darüber hinaus weitergehende Anforderungen und Besonderheiten. Exemplarisch werden zwei Projekte vorgestellt.

Prinzip der Schwingungsisolierung

Die schwingungsisolierende Wirkung beruht auf dem Prinzip der Massenkraftkompensation. Dieses physikalische Prinzip lässt sich durch ein Masse-Feder-System abbilden (Bild 1). Die Masse m des Bauwerks ist vom Untergrund elastisch entkoppelt. Die Eigenfrequenz f_0 leitet sich aus der Masse m und der Steifigkeit c der elastischen Lagerung ab:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$$

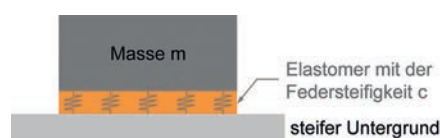


Bild 1. Masse-Feder-System

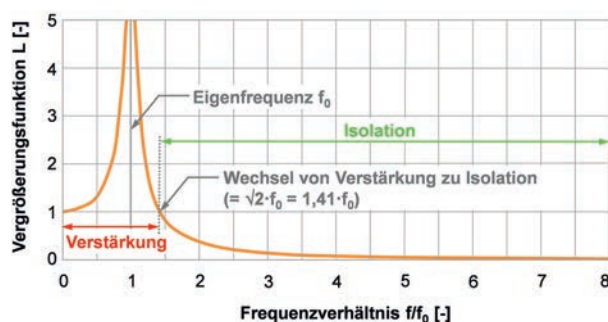


Bild 2. Vergrößerungsfunktion mit verstärkender und isolierender Wirkung

Die Masse stellt in diesem Zusammenhang keine variable Größe dar, da sie im Regelfall exogen vorgegeben ist. Eine tief abgestimmte Eigenfrequenz ist demnach nur durch eine geringe Steifigkeit des Elastomers zu erzielen. Eine geringe Elastomersteifigkeit lässt sich durch die entsprechende Materialauswahl vorgeben, wobei die Werte nach unten begrenzt sind; hierauf wird weiter unten im Detail eingegangen. Darüber hinaus kann die Steifigkeit der Gebäudelagerung durch die Abmessungen der verwendeten Elastomermatten definiert werden. Bei vollflächiger Gebäudelagerung steht die Materialdicke als einzige variable Größe zur Verfügung. Mit zunehmender Dicke d nehmen die Steifigkeit c und damit die Eigenfrequenz f_0 der Bauwerkslagerung ab:

$$c = \frac{EA}{d}$$

wobei E der E-Modul, A die Fläche und d die Dicke des Elastomers bezeichnen.

Für eine möglichst hohe Wirksamkeit der schwingungsisolierenden Maßnahme sollte die Eigenfrequenz f_0 deutlich unterhalb der relevanten Anregungsfrequenzen f_i liegen. In diesem Zusammenhang ist allgemein bekannt, dass die isolierende Wirkung – unab-

hängig von der Art der elastischen Lagerung – erst bei einem Frequenzverhältnis f/f_0 von größer $\sqrt{2}$ auftritt. Bei einem kleineren Verhältnis zwischen Anrege- und Eigenfrequenz wird die einwirkende Schwingung verstärkt. Das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsamplitude weist dann Werte > 1 auf (Bild 2).

Werkstoffe

Unter Berücksichtigung eines Masse-Feder-Systems kann die Wirksamkeit einer schwingungsisolierenden Maßnahme sehr gut prognostiziert werden. Dies ermöglicht eine im Hinblick auf die Technik und die Wirtschaftlichkeit optimal ausgearbeitete Lösung.

Elastomere weisen in mechanischer Hinsicht Eigenschaften auf, die in idealisierter Form als eine Kombination aus Feder- und Dämpferelementen beschrieben werden können. Ihr elastisches Verhalten ist zum einen auf die Materialeigenschaften des Festkörperanteils (sogenannte Hartphase) zurückzuführen. Daneben werden die elastischen Eigenschaften von der Porenstruktur und durch die äußere Formgebung (Hohlräume, Formfaktor¹) beeinflusst, Bild 3. Hochwertige Elastomere auf Basis von Polyurethan (PUR) mit definierten statischen und dynamischen Eigenschaften ermöglichen je nach Werkstoff und Typ dauerhafte statische Pressungen bis zu $1,5 \text{ MN/m}^2$. Darüber hinaus sind auch kurzzeitige Lastspitzen zulässig, die ein Vielfaches davon betragen können.

Im Fundamentbereich werden die Elastomermatten im Wesentlichen durch das Eigengewicht des Bauwerks statisch belastet. Darüber hinaus sind die sogenannten quasi-ständigen Nutzlasten bei der Auslegung mit einzubeziehen.

Bei seitlich an den Wänden anzubringenden Matten ist grundsätzlich zwischen dem Bau- und dem Endzustand zu unterscheiden. Je nach Bauverfahren können die Matten während der Bauphase durch den Frisch-

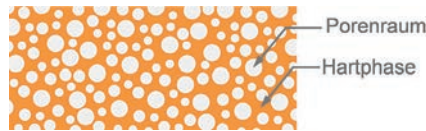


Bild 3. Schematische Darstellung eines Elastomers mit Hartphase und Porenraum

betondruck beaufschlagt werden. Im fertig gestellten Zustand folgt die Belastung im Wesentlichen aus dem Erdruhedruck.

Der Schutz vor unerwünschten Schwingungen muss über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks mit möglichst gleichbleibender Qualität aufrechterhalten werden. Bei der elastischen Lagerung von Gebäuden sind daher hohe Anforderungen an die physikalische und chemische Langlebigkeit der Werkstoffe zu stellen, da die Elastomermatten nach Fertigstellung des Bauwerks in aller Regel nicht mehr zugänglich sind. Die für Gebäudelagerungen als besonders relevant angesehenen Langzeiteigenschaften der im Folgenden verwendeten Sylomer[®] und Sylodyn[®] sind durch Nachmessungen und anhand von Untersuchungen bestätigt [1], [2].

Besonderheiten bei Gebäudelagerung im Grundwasser und Ausführungsbeispiele

Wasser ist inkompressibel und damit grundsätzlich für jede Art von elastischer Lagerung als nachteilig einzustufen. Sofern die Gründungskote dauerhaft im Grundwasser liegt ist davon auszugehen, dass ein Teil der Porenstruktur mit Wasser gesättigt ist. Der Grad der Sättigung ist von der Porenstruktur (gemischt- bzw. geschlossenzellig) sowie der Porengröße und -verteilung abhängig. Die elastische Wirkung des Elastomers wird bei derart gegründeten Bauwerken durch die nicht wassergesättigten Poren und die Eigenschaften der Hartphase bestimmt. Für Bauwerkslagerungen im Grundwasser kommt der Verwendung eines hochwertigen elastischen Werkstoffs mit ausgezeichneten Hartphase-Eigenschaften daher eine besondere Bedeutung zu. Zusätzlich zu den oben beschriebenen physikalischen und chemischen Anforderungen ist eine hohe Hydrolysebeständigkeit erforderlich (Hydrolyse: irreversible Aufspaltung einer chemi-

schen Verbindung durch Reaktion mit Wasser), da in der Folge Veränderungen der mechanischen Eigenschaften zu erwarten wären.

Wie oben bereits erwähnt, kann die isolierende Wirkung eines Masse-Feder-Systems sehr genau bestimmt werden. Bei Gebäudelagerungen im Grundwasser wird das schwingungsfähige System durch die mangelnde Kompressibilität des Wassers grundsätzlich steifer, wobei der Einfluss des Wassers bei Verwendung hochwertiger Elastomere der Werkstoffe nur gering ist. Versuche unter bauwerksüblichen Randbedingungen haben gezeigt, dass bei einem Wasserdruck von 0,5 bar (5 m Wassersäule) mit einer Zunahme der Eigenfrequenz um nur ca. 10 % zu rechnen ist [3]. Dieser marginale Effekt kann bereits im Vorfeld bei der Auslegung Berücksichtigung finden.

Elastische Lagerung des Kraftwerks Kesselstraße

Das erste Ausführungsbeispiel beschreibt das Kraftwerk Kesselstraße in Kempten, beim dem sich in direkter Nachbarschaft denkmalgeschützte Bauwerke befinden. Diese Bauwerke werden zu hochwertigen Wohngebäuden umgebaut und mittels elastischer Lagerung vor Schwingungen der Wasserturbine geschützt. Das Kraftwerk befindet sich westseitig der Iller und wird über diese mit Wasser gespeist. Das Kraftwerk wurde ursprünglich im Jahr 1958 erbaut und in den Jahren 2007 bis 2010 neu errichtet. Im Zuge des Kraftwerkneubaus wurde der Fundamentbereich freigelegt und das Kraftwerk elastisch entkoppelt (sogenannte Quellenisolierung, Bild 4).

Im Zuge der Bauausführung wurde eine dichte Baugrubenumschließung hergestellt. Die Arbeiten im Fundamentbereich des Kraftwerks konnten daher im Trockenen ausgeführt werden. Neben der Grundfläche des Maschinenhauses waren auch die auf-

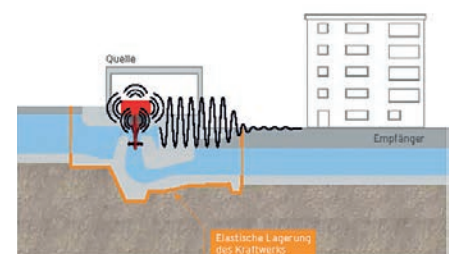


Bild 4. Isolierung des Kraftwerks Kesselstraße

¹ Der Formfaktor ist das geometrische Maß für die Form eines Elastomerlagers und als Quotient aus belasteter Fläche zur Mantelfläche des Lagers definiert.

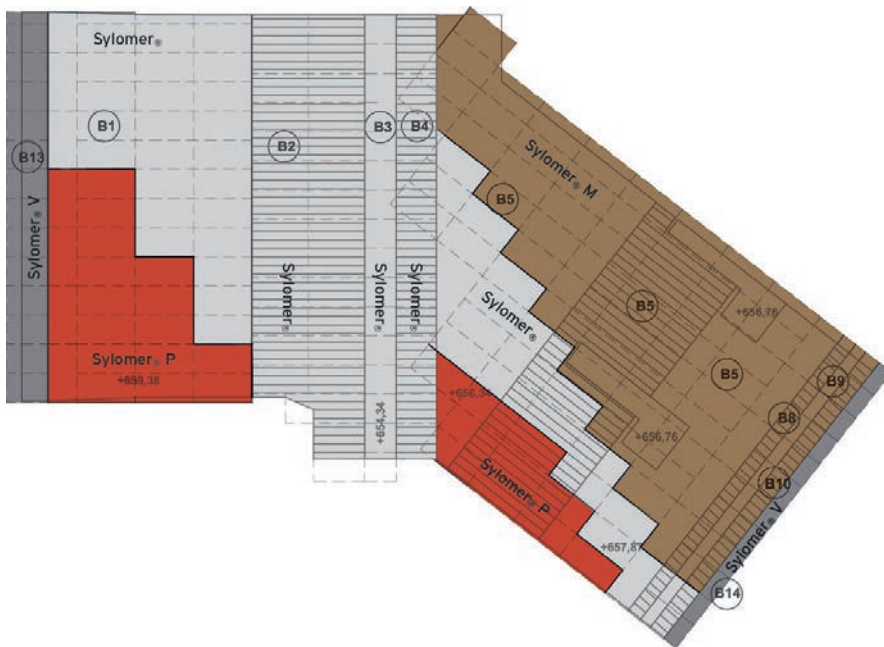


Bild 5. Verlegeplan, Kraftwerk Keselstraße

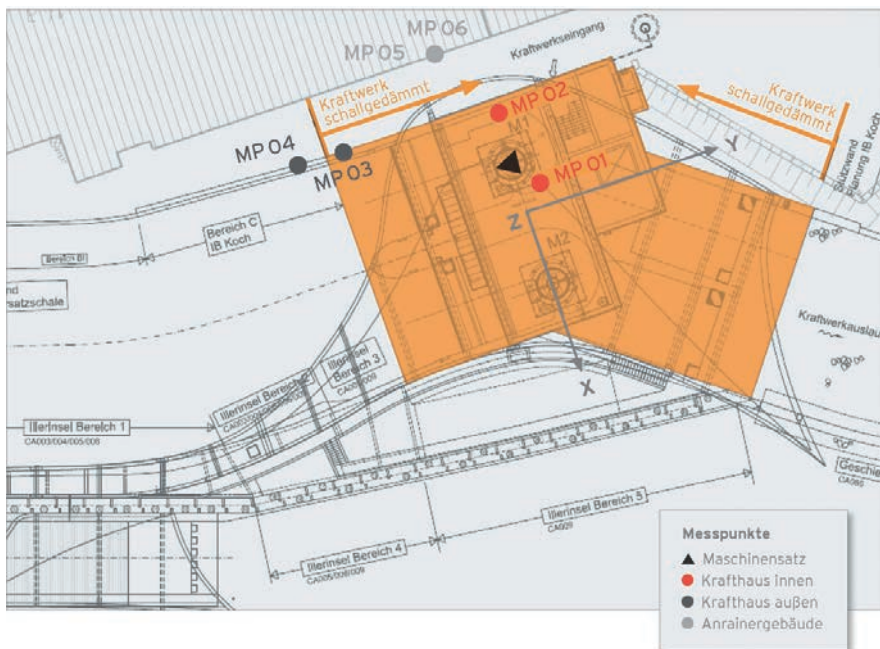


Bild 6. Messpunkte, Kraftwerk Keselstraße

gehenden Seitenwände bis zur Geländeoberkante hin zu entkoppeln. Insgesamt wurden ca. 2000 m² elastische Matten verbaut. Die Materialauswahl für die verschiedenen Bereiche des Kraftwerks erfolgte unter Berücksichtigung der statischen Belastung sowie der dynamischen Anforderungen. Der Einbauort der einzelnen Elastomermatten ist aus dem Verlegeplan (Bild 5) ersichtlich.

Die anregenden Frequenzen sind durch die Wasserkraftturbine vorgegeben. Die Wirksamkeit der elasti-

schen Lagerung wurde unter Berücksichtigung der verwendeten Materialtypen, der Bauwerksgeometrie, der vorhandenen Belastung sowie der Anregeffrequenzen prognostiziert und nach Fertigstellung des Kraftwerks durch Messungen kontrolliert. Die Schwingungsmessungen erfolgten mittels eines triaxialen Messensors an mehreren Punkten im und am Kraftwerk sowie am benachbarten Gebäude (Bild 6). Darüber hinaus wurden die Messungen bei unterschiedlichen Turbinenleistungen durchgeführt.

Aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten wurden mittels schneller Fourier-Transformation (FFT) die Frequenzspektren ermittelt. Durch Vergleich von zwei Messpunkten (z. B. im Kraftwerk und am Anrainergebäude) lässt sich die Pegeldifferenz ermitteln und überprüfen, ob das System freischwingen kann, also elastisch entkoppelt ist. Der Einfluss der elastischen Entkopplung ist am deutlichsten zu erkennen, wenn die beiden Messpunkte MP03 und MP04 miteinander verglichen werden (Bild 7). Der Messpunkt MP03 befindet sich auf der „schwingenden“ Seite des neu errichteten Bauwerks, der Messpunkt MP04 außerhalb des Bauwerks, also auf der „ruhigen“ Seite. Die beiden Punkte sind durch die elastische Lagerung voneinander getrennt.

Für die Beurteilung des geforderten Schallschutzes beim Kraftwerk Keselstraße sind die Messpunkte MP05 und MP06 im nächstgelegenen Anrainergebäude wesentlich. Die Messungen erfolgten im Erd- und Obergeschoss. Sie zeigen, dass die Anforderungen an den Körperschallschutz sowohl tagsüber als auch nachts dauerhaft eingehalten werden [4].

Elastische Lagerung des Panorama Towers am Münchner Arnulfpark

Der Bauwerkskomplex am Arnulfpark in München befindet sich direkt an der stark frequentierten S-Bahn-Stammstrecke. Die Untergeschosse weisen einen Abstand von rund 17 m zur nächstgelegenen Bahntrasse auf. Der Bauwerkskomplex besteht aus mehreren Gewerbe- und Wohnbauten (Bild 8), wobei letztere mittels elastischer Gebäudelagerung von Erschütterungen des Schienenverkehrs isoliert werden (Empfängerisolierung). Mit der elastischen Entkopplung wird zudem der sekundär erzeugte Luftschall innerhalb der Wohnungen reduziert.

Aufgrund des nicht absenkbaren Grundwasserspiegels in den quartären Kiesen des Münchner Untergrunds wurde eine dichte Baugrubenumschließung mit Spundwänden hergestellt und das Grundwasser abgepumpt, so dass sämtliche Arbeiten im Trockenen ausgeführt werden konnten. Die Spundwände wurden nach Abschluss der Gründungsarbeiten entfernt, so dass die Elastomermatten über die gesamte Nutzungszeit des Bauwerks-

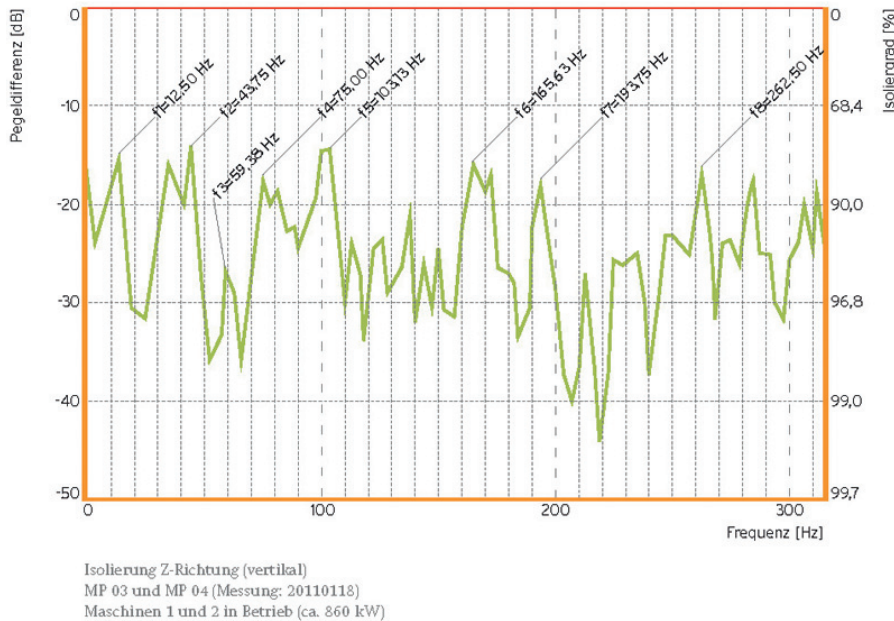


Bild 7. Pegeldifferenz MP03 und MP04, dargestellt für die Z-Richtung (vertikal)

komplexes einem Wasserdruck bis ca. 45 kN/m^2 ausgesetzt sein werden.

Die angestrebte Abstimmfrequenz wurde mit 16 Hz vorgegeben. Die Materialdicken wurden dementsprechend ausgewählt. Im Fundamentbereich der Wohnhäuser kamen vollflächig Elastomermatten (Sylodyn®) zum Einsatz. Darüber hinaus wurden auch die Kellerwände über die volle Höhe elas-

tisch entkoppelt, um eine möglichst gute schwingungstechnische Wirkung zu erzielen.

Im Rohbauzustand wurden Schwingungsmessungen sowohl in den elastisch gelagerten Wohnhäusern als auch in den nicht entkoppelten Gewerbebauten durchgeführt. Durch Gegenüberstellung der Messungen an den entkoppelten bzw. nicht entkop-

pelten Baukörpern kann die Dämmwirkung der elastischen Lagerung direkt ermittelt werden (Bild 9).

Zum Zeitpunkt der Messungen befanden sich die Elastomermatten bereits im Grundwasser. Die angestrebte Abstimmfrequenz des Systems wurde durch die Messungen bestätigt. Die isolierende Wirkung setzt bei einer Frequenz von etwas über 20 Hz ein, wobei die größte Dämmwirkung im Bereich der Terzmittenfrequenz von $f = 63 \text{ Hz}$ erzielt wird. Die Abnahme der Dämmwirkung ab einer Frequenz von rund 100 Hz ist im Wesentlichen auf die endliche Steifigkeit des Untergrunds zurückzuführen. Dieser Effekt wurde im Rahmen der Prognose berücksichtigt, ist bei diesem Projekt aber hinsichtlich der Wirksamkeit nur von untergeordneter Bedeutung. Die an die elastische Entkopplung gestellten Anforderungen werden vollumfänglich erfüllt [5].

Literatur

- [1] Wettschureck, R. G., Heim, M., Tecklenburg, M.: Langzeit-Eigenschaften der Unterschottermatten im Münchner S-Bahntunnel nahe der Philharmonie Am Gasteig. Verkehr + Technik 57 (2004), Heft 1, S. 3–9.
- [2] Müller, G.: Langzeiteigenschaften von Sylomer®- und Sylodyn®-Materialien. Bericht Nr. M93 914/1, Müller-BBM, München, 2011.
- [3] Zindler, R., Tecklenburg, M.: Die elastische Lagerung eines Gebäudes in drückendem Grundwasser. Kriterien für die Funktionalität, Ausführung, Ergebnisse. 4. VDI-Fachtagung – Baudynamik 2012, VDI-Berichte 2160, S. 475–484.
- [4] Schmid, H.: Messtechnische Untersuchungen zu Erschütterungs- und sekundärer Luftschallsituation bei der Wasserkraftanlage Kesselstraße der AÜW in Kempten/Allgäu. Beurteilung der IST-Situation. Projekt Nr. AUS/2010_05, 2011.
- [5] Högg, H., Liegl, R.: Erschütterungstechnische Untersuchung – Elastische Gebäudelagerung beim BVH Arnulfpark in München. Bericht Nr. 800-3164, Möhler + Partner, 2010.

Autoren

Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Roger Höfle,
Ing. Christian Loretz,
CMO, M.Eng. Hendrik Reichelt,
Dipl.-Ing. Rainer Zindler;
Getzner Werkstoffe GmbH, Bürs/Österreich



Bild 8. Bauwerkskomplex am Arnulfpark, direkt an der S-Bahn-Stammstrecke



Bild 9. Dämmwirkung der elastischen Gebäudelagerung