

Erschütterungsüberwachung von EDV-Anlagen auf weichen Geschossdecken

P. Planzer, PLANZER CONSULT, Luzern

Erschütterungsüberwachung von EDV-Anlagen auf weichen Geschossdecken

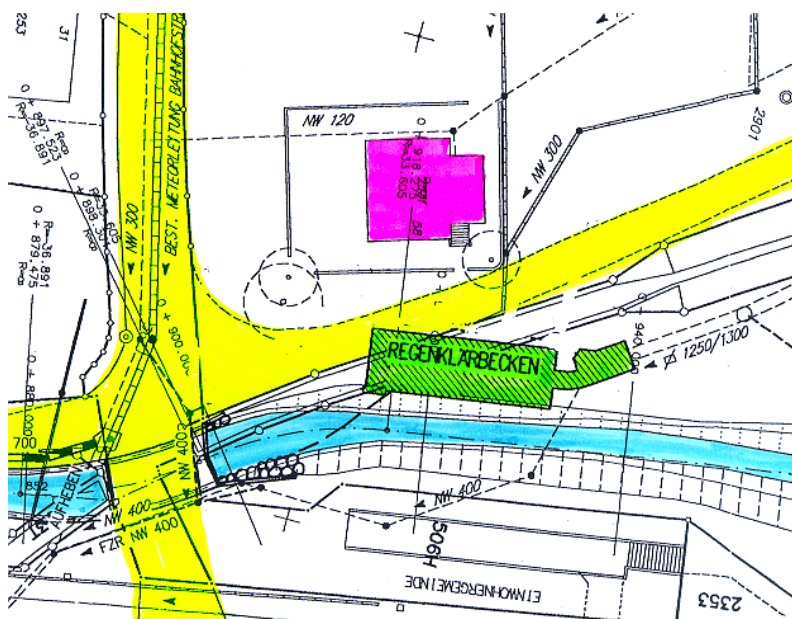
1. Ausgangslage

Im Zusammenhang mit den geplanten Bauarbeiten für ein Regenklärbecken in der unmittelbaren Nähe eines Handels- und Produktionsbetriebes in der Agglomeration von Luzern sind durch den Eigentümer Bedenken betreffend Erschütterungseinwirkungen auf Bürogebäude und EDV-Anlagen geäußert worden.

Die Bedenken wurden dadurch geäußert, dass bereits bei der vorgängig ausgeführten Bachverlegung diverse Erschütterungen durch Arbeiten mit Bagger wahrgenommen wurden und dass insbesondere durch Rammarbeiten für den Baugrubenabschluss und die Pfahlfundation des Regenklärbeckens die Erschütterungseinwirkungen so stark sein könnten, dass die im Bürogebäude installierten EDV-Anlagen und insbesondere die Server aussteigen könnten.

Das dreigeschossige Bürogebäude, Baujahr 1945, bauweise gemischt mit weichen Geschossdecken, befindet sich im Abstand von ca. 7 m zum geplanten Regenklärbecken und ca. 15 m zur ausgeführten Bachverlegung. Im Obergeschoss des Bürogebäudes sind diverse EDV-Anlagen und Server installiert. Auf den Servern sind Daten von mehreren Betrieben aus der ganzen Schweiz gelagert. Die EDV-Anlage ist während 7 Tagen in der Woche Tag und Nacht in Betrieb.

Für den Bau des Regenklärbeckens mit den Abmessungen von 18 x 6 x 3 m waren Aushubarbeiten sowie Rammarbeiten für den Baugrubenabschluss und die Pfahlfundation vorgesehen. Zudem musste ein alter Betonkanal vor dem Vorfluter abgebrochen werden. Die Durchgangsstrasse zwischen dem Bürogebäude und dem Regenklärbecken wurde über die Dauer der Bauarbeiten von ca. 6 Monaten für den Verkehr gesperrt.



2. Lösungsvorschlag Projektverfasser

Das mit dem Projekt beauftragte Ingenieurbüro hat für die Lösung des Problems die Firma Angst + Pfister AG in Zürich beigezogen. Diese Firma vertreibt unter anderem Systeme zur Dämpfung von Schwingungen mittels Luftfederelementen. Die Firma Angst + Pfister AG, Zürich hat ähnliche und kompliziertere Fälle von EDV-Schwingungsproblemen bereits mehrmals erfolgreich gelöst.

Mit den Systemen von der Firma Angst + Pfister AG werden die Schwingungen um ca. 90 - 95 % reduziert. Da die Firma die Hardware der EDV-Anlagen jeweils nicht zu 100 % beurteilen kann, ist eine Garantieabgabe nicht möglich.



Lösungsvorschlag

- Lagerung der Datenserver auf Sylomerplatten und Luftfederelementen
- Lieferung, Beratung und Begleitung durch die Firma Angst + Pfister AG, Zürich
- Überwachung der Erschütterungen durch Schwingungsmessungen



3. Vorbehalte / Vorschläge der EDV-Verantwortlichen

Die EDV-Verantwortlichen des Produktions- und Handelsbetriebes konnten sich mit der vorgeschlagenen Lösung ohne 100 %-ige Sicherheit nicht einverstanden erklären und haben ihrerseits Lösungsvorschläge bzw. Szenarien ausgearbeitet, welche nachfolgend mit den entsprechenden Kostenfolgen aufgelistet sind.

Szenario 1

- Total-Beschädigung der Informatik-Anlagen trotz Präventiv-Massnahmen (Lagerung auf Sylomerplatten und Luftfederelementen)
- Ersatz der Serveranlagen, Neuaufbau der Anlagen, Betriebsausfall / Mehrarbeit
- Kosten bei Totalausfall ca. Fr. 370'000.—

Szenario 2

- Auslagerung der Server in ein weiter entferntes Gebäude auf dem Betriebsareal mit Präventiv-Massnahmen (Lagerung der Geräte auf Luftfederelementen)
- Die restlichen EDV-Geräte bleiben im Bürogebäude und werden ebenfalls mit Präventiv-Massnahmen gesichert (Lagerung auf Luftfederelementen)
- Organisation, Anpassungen, Dislozieren, Umkonfigurieren des Netzwerkes sowie Betriebsausfall und Mehrarbeit
- Kosten für Auslagerung / Dislozieren ca. Fr. 95'000.—

Szenario 3

- Beschaffung eines Ersatz-Servers (Backup-Server) für die zentrale SAP-Anwendung und Einrichtung desjenigen an einem anderen Standort
- Zusätzliche Auslagerung der restlichen Server in ein weiter entferntes Gebäude auf dem Betriebsareal mit Präventiv-Massnahmen (Lagerung der Geräte auf Luftfederelementen)
- Die restlichen EDV-Geräte bleiben im Bürogebäude und werden ebenfalls mit Präventiv-Massnahmen gesichert (Lagerung auf Luftfederelementen)
- Organisation, Anpassungen, Dislozieren, Umkonfigurieren des Netzwerkes sowie Betriebsausfall und Mehrarbeit
- Kosten für Backup-Server und Dislozieren ca. Fr. 185'000.—

Bewertung der Risiken

Die drei aufgezeigten Szenarien können in drei Risikostufen eingeteilt werden. Die Szenarien wurden von den EDV-Verantwortlichen wie folgt gewertet.

Hohes Risiko	Szenario 1 enthält viele Risiken, da die Geräte am Standort belassen werden und nur mittels Lagerung auf Luftfederelementen gesichert werden. Grosse Kostenfolge bei Totalschaden	ca. Fr. 370'000.—
Mittleres Risiko	bei Szenario 2 werden die Risiken durch das Dislozieren der Geräte in ein rund 40 m entferntes Gebäude gesenkt. Kostenfolge	ca. Fr. 95'000.—
Geringes Risiko	bei Szenario 3 wird zusätzlich ein Backup-System an einem noch weiter entfernten Standort installiert. Bei dieser Variante ist das Risiko eines Ausfalls nur noch gering. Kostenfolge	ca. Fr. 185'000.—

Ausführungsvorschlag

Der Handels- und Produktionsbetrieb ist darauf angewiesen, dass durch die Bauarbeiten keine Ausfälle des Informatik-Betriebes entstehen und schlägt daher die Variante mit dem geringsten Risiko (Szenario 3) zur Ausführung vor.

Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass allfällige Schäden und Ausfallzeiten durch den Verursacher bzw. durch die Bauherrschaft getragen werden.

4. Ausführungsentscheid der Bauherrschaft

Die Bauherrschaft, vertreten durch das Bauamt der Gemeinde war sich bewusst, dass die Lösung des Problems etwas kostet und hat sich bereit erklärt die nötigen finanziellen Mittel zur Verfügung zu stellen.

Die Kosten der Vorschläge bzw. Szenarien des Handels- und Produktionsbetriebes wurden durch die Bauherrschaft jedoch als zu hoch befunden.

Die Gemeindevertreter und der Projektverfasser waren sich auch bewusst, dass gerade bei EDV-Anlagen keine 100 %-ige Sicherheit bestehen kann.

Auf Grund der vorliegenden Lösungsvarianten und unter Abwägung der Risiken und Kosten, hat die Bauherrschaft die Ausführung der Variante des Projektverfassers mit Lagerung der Datenserver auf Sylomerplatten und Luftfederelementen beschlossen.

Das Restrisiko eines Ausfalles der EDV-Anlagen wurde durch eine Ergänzung der Bauherrenhaftpflichtversicherung abgedeckt.

Ausführung

- Lagerung der Datenserver auf Sylomerplatten und Luftfederelementen
- Lieferung, Beratung und Begleitung durch die Firma Angst + Pfister AG, Zürich
- Überwachung der Erschütterungen während den Bauarbeiten mittels Schwingungsmessungen
- Anpassung des Ausführungsprojektes / bauliche Massnahmen
 - Verzicht auf die Pfahlfundation
 - Spundwand verbleibt im Baugrund, wird mit der Bodenplatte verbunden und dient zugleich als Aussenwand des Regenklärbeckens (einhäuptige Schalung)
- Erweiterung der Bauherrenhaftpflichtversicherung für das Restrisiko bei einem allfälligen Ausfall der EDV-Anlagen
- Mehrkosten total ca. Fr. 80'000.—

5. Erschütterungsüberwachung

Das Ingenieurbüro Planzer Consult Luzern wurde beauftragt während den Bauarbeiten die Erschütterungseinwirkungen auf das Bürogebäude und die EDV-Anlagen zu überwachen.



Angaben zum Messobjekt

Objekt	Bauteil	bauweise	Baujahr
Bürogebäude	Untergeschoss	massiv	1945
	Obergeschosse	gemischt	
	Geschossdecken	Holz → weich	

Messkonzept

Während den Bauarbeiten wurden an zwei Messstellen wie folgt Erschütterungsmessungen durchgeführt:

Messstelle	Bauteil	Messdauer
UG / Keller	Boden, Seite Baustelle	4 Wochen
OG / Serverraum	Sylomerplatte / Lagerung der Server	24 Wochen

Messgeräte

Für die Erschütterungsmessungen wurden zwei MR 2002-CE von SYSCOM mit triaxialen Geschwindigkeitssensoren eingesetzt.

Richtwerte für Bauwerke

Für die Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke gelten die Kriterien und Richtwerte der Norm SN 640 312 a der Schweizerischen Normen-Vereinigung.

Gemäss Norm SN 640 312 a sind die Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke bei den ausgeführten Bauarbeiten und dem Einsatz von Vibrationsramme, Verdichtungsgeräten sowie gelegentlichem Einsatz von Abbauhammer aufgrund der Häufigkeit der Ereignisse in die Häufigkeitsklasse " häufig " einzustufen.

Für das Gebäude gelten entsprechend der Empfindlichkeitsklasse 3, normal empfindlich und der Häufigkeitsklasse " häufig " folgende Richtwerte:

Richtwerte:	Frequenzen	< 30 Hz	max. V_R = 6,0 mm/s
	Frequenzen	30 - 60 Hz	max. V_R = 8,0 mm/s
	Frequenzen	> 60 Hz	max. V_R = 12,0 mm/s

Richtwerte für EDV-Anlagen

Da für die Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf EDV-Anlagen keine Richtwerte vorhanden sind, und durch die EDV-Lieferanten keine verbindlichen Angaben betreffend Richtwerte gemacht werden, haben wir nach Rücksprache mit Herrn Dr. A. Ziegler, Zürich die nachfolgend aufgeführten Richtwerte vorgegeben.

Richtwerte: 1. Vorgabe max. $V_R = 2,0$ mm/s
 2. Vorgabe max. $V_R = 5,0$ mm/s → Interventionswert

6. Messergebnisse

MESSUNGEN IM UNTERGESCHOSS

Die Überwachung der Erschütterungseinwirkungen auf das Bürogebäude an der Messstelle im Untergeschoss führte über die Dauer von 4 Wochen zu folgenden Messergebnissen.

Gebäude	max. V_R	Mittel V_R	Frequenz
• Strassenverkehr	1,3 mm/s	0,8 mm/s	4,3 Hz
• Aushub, Betonabbruch	6,1 mm/s	2,4 mm/s	4,7 Hz
• Rammarbeiten Spundwand	2,0 mm/s	0,9 mm/s	4,7 Hz

Der Höchstwert des Geschwindigkeitsvektors von $V_R = 6,1$ mm/s wurde während dem Abbruch des Betonkanals gemessen. Dieser Wert liegt leicht über dem zulässigen Richtwert von max. $V_R = 6,0$ mm/s.

TESTMESSUNGEN IM OBERGESCHOSS / EDV SERVER-RAUM

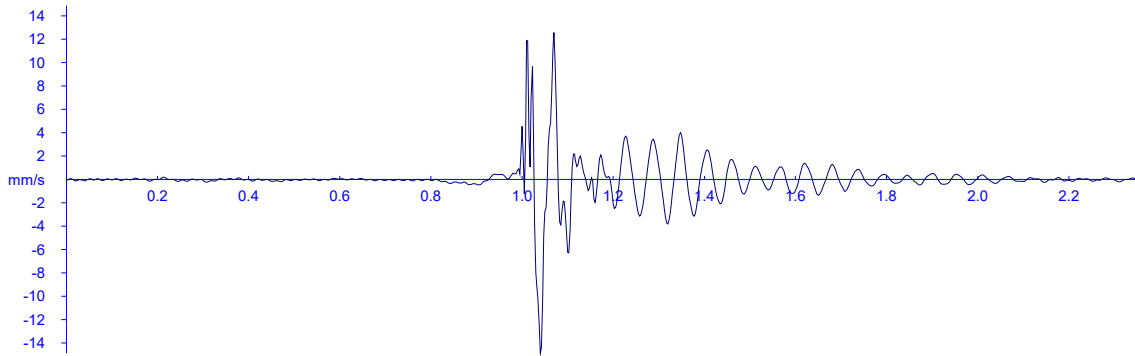
Nach der Lagerung der Datenserver und EDV-Anlagen auf den Sylomerplatten und Luftfederelementen sind im EDV Server-Raum im Obergeschoss des Bürogebäudes folgende Testmessungen durchgeführt worden.

Überprüfung der Wirkung der Dämpfungselemente / Lagerung der Server

Bestimmung der Eigenfrequenz der Geschossdecke

Eigenfrequenz der Geschossdecke	max. V_R	Mittel V_R	Frequenz
• Anklopfen der Geschossdecke	14,9 mm/s	11,9 mm/s	18,0 Hz

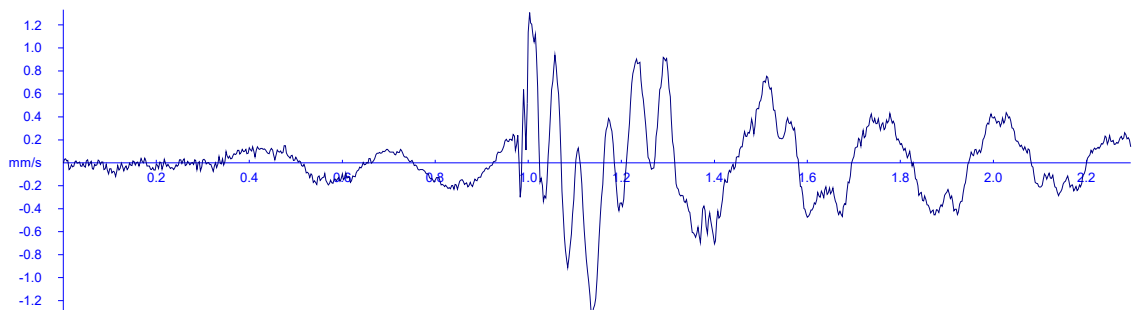
Die Eigenfrequenz der Geschossdecke im EDV Server-Raum beträgt 18,0 Hz.



Überprüfung der Lagerung / Dämpfung

Lagerung der Server / Dämpfung	max. V_R	Mittel V_R	Frequenz
• Anklopfen der Geschossdecke	1,3 mm/s	1,2 mm/s	3,9 Hz

Die Überprüfung der Wirksamkeit der Dämpfungselemente durch das 10-malige Anklopfen der Geschossdecke, einmal mit dem Sensor auf der Geschossdecke und einmal mit dem Sensor auf der Sylomerplatte zeigt, dass die Erschütterungseinwirkungen durch die Lagerung mit den Dämpfungselementen um ca. 90 % reduziert werden.



Bestimmung der Eigenfrequenz der Dämpfungselemente / Lagerung

Bei normalem Serverbetrieb ohne manuelle Betätigungen an den EDV-Anlagen und Servern und ohne Erschütterungseinwirkungen vom Produktionsbetrieb sowie von der Baustelle ergaben sich folgende Messwerte.

Eigenfrequenz der Dämpfungselemente

Eigenfrequenz der Lagerung	max. V_R	Mittel V_R	Frequenz
• Serverbetrieb	0,3 mm/s	0,2 mm/s	3,9 Hz

Die Eigenfrequenz der Dämpfungselemente / Lagerung beträgt 3,9 Hz.

MESSUNGEN IM OBERGESCHOSS / EDV SERVER-RAUM

Die Überwachung der Erschütterungseinwirkungen auf die, auf den Sylomerplatten und Luftfederelementen gelagerten EDV-Anlagen / Server im Obergeschoss führte über die Messdauer von 24 Wochen zu folgenden Ergebnissen.

EDV-Anlagen / Server	max. V_R	Mittel V_R	Frequenz
• Produktionsbetrieb	4,2 mm/s	3,4 mm/s	3,9 Hz
• Aufstarten Server *	11,5 mm/s	2,4 mm/s	3,9 Hz
• Herunterfahren Server *	9,0 mm/s	6,1 mm/s	3,9 Hz
• Aushub, Betonabbruch	15,7 mm/s	6,5 mm/s	4,3 Hz
• Rammarbeiten Spundwand	2,7 mm/s	1,3 mm/s	3,9 Hz
• Betonarbeiten	10,9 mm/s	3,7 mm/s	3,9 Hz
• Hinterfüllung, Umgebungsarbeiten	12,6 mm/s	3,6 mm/s	4,7 Hz

* manuelle Betätigungen an den EDV-Anlagen

Der Höchstwert des Geschwindigkeitsvektors von $V_R = 15,7$ mm/s wurde während dem Abbruch des Betonkanals registriert und beträgt das Dreifache des Interventionswertes von $\max. V_R = 5,0$ mm/s.

7. Wirkung der Luftfederelemente

Dämpfung der Schwingungen

Die Resultate der Messungen im EDV Server-Raum zeigen, dass die Erschütterungseinwirkungen von der Baustelle durch die Luftfederelemente nicht wirksam gedämpft werden.

Der Grund liegt in den tiefen Frequenzen der Schwingungen welche von der Baustelle her einwirken.

Problem der Eigenfrequenzen

Für die Lagerung der Datenserver und EDV-Anlagen auf Sylomerplatten und Luftfederelementen wurden folgende Eigenfrequenzen angenommen.

Eigenfrequenzen	Annahme	effektiv
• Arbeiten Baustelle	15 – 30 Hz	3,9 – 4,7 Hz
• Dämpfungselemente	3 – 4 Hz	3,9 Hz

Wirkung der Dämpfungselemente

Sind die Frequenzen der Erschütterungseinwirkungen und die Eigenfrequenz der Federelemente praktisch gleich, kommt die Funktion der Dämpfungselemente nicht zum Tragen und es kann sogar zu einer Verstärkung der Schwingungen führen.

Die Wirkung der verwendeten Luftfederelemente mit der Eigenfrequenz von 3,9 Hz kommt erst bei Schwingungen mit Frequenzen ab ca. der doppelten Eigenfrequenz der Dämpfungselemente zum Tragen, das heisst ab Frequenzen > 8 Hz.

Die optimale Dämpfung der Luftfederelemente wirkt bei Schwingungen, welche das 3-4 Fache und mehr der Eigenfrequenz der Dämpfungselemente betragen, das heisst in diesem Fall ab Frequenzen $> 12 - 16$ Hz.

Diese optimale Dämpfung konnte bei den Testmessungen im EDV Server-Raum im Obergeschoss bei der Anregung der Geschossdecke mit der Eigenfrequenz von 18,0 Hz nachgewiesen werden. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten von Mittel $V_R = 11,9$ mm/s konnten durch die Luftfederelemente auf Schwinggeschwindigkeiten von Mittel $V_R = 1,2$ mm/s reduziert werden, was einer Dämpfung von 90 % entspricht.

8. Reaktionen und Massnahmen

Reaktionen der EDV-Verantwortlichen

Die EDV-Verantwortlichen waren sehr besorgt, als festgestellt wurde, dass die Dämpfung der Schwingungen von der Baustelle nicht funktionierte und der vorgegebene Richtwert von max. $V_R = 2,0$ mm/s sehr bald überschritten wurde.

Überrascht war man über die Messergebnisse die aufzeigten, dass vom eigenen Produktionsbetrieb durch Lastwagentransporte und Hubstapler Schwingungen erzeugt werden, welche das Doppelte des vorgegebenen Richtwertes von max. $V_R = 2,0$ mm/s erreichen.

Ebenfalls überraschten die Ergebnisse der Messungen welche zeigten, dass beim Aufstarten und Herunterfahren der Server Schwingungen durch manuelle Betätigungen an den EDV-Anlagen erzeugt werden, die den vier- bis fünffachen vorgegebenen Richtwert von max. $V_R = 2,0$ mm/s erreichen.

Massnahmen

Als erstes wurde den EDV-Verantwortlichen zusammen mit den Spezialisten der Angst + Pfister AG, Zürich anhand von diversen weiteren Testmessungen die Funktion der Dämpfungselemente in Abhängigkeit der Frequenzen demonstriert und nachgewiesen.

Es wurden auch Versuche mit zusätzlichen Gewichten (Bleiknüppel) auf den Sylomerplatten zur Optimierung der Lastverteilung durchgeführt welche aber keinen Erfolg zeigten, so dass auf Zusatzgewichte verzichtet wurde.

In weiteren Versuchen und Testmessungen wurde die Anordnung und Anzahl der Luftfederelemente optimiert.

Der vorgegebene Richtwert von max. $V_R = 2,0$ mm/s wurde auf max. $V_R = 5,0$ mm/s erhöht und als Interventionswert festgelegt.

Zur Überprüfung der Messwerte und zur Interventionsmöglichkeit der EDV-Verantwortlichen auf der Baustelle bzw. beim verantwortlichen Bauingenieur erfolgte eine Aufschaltung der aktuellen Messresultate auf einen Bildschirm im EDV-Rechenzentrum.

Massnahmen

- Testmessungen → überprüfen und nachweisen der Funktion der Dämpfungselemente in Abhängigkeit der Frequenzen
- Versuche mit zusätzlichen Gewichten auf der Sylomerplatte → Lastverteilung
- Optimierung der Anordnung und Anzahl der Luftfederelemente
→ Testmessungen
- Erhöhung des Richtwertes von max. $V_R = 2,0$ mm/s auf max. $V_R = 5,0$ mm/s
→ Interventionswert
- Aufschaltung der aktuellen Messresultate auf einen Bildschirm im EDV-Rechenzentrum
- Intervention durch EDV-Verantwortliche direkt auf der Baustelle bzw. beim verantwortlichen Bauingenieur

9. Folgen und Beurteilung

Erschütterungseinwirkungen auf das Bürogebäude

An der Messstelle im Untergeschoss wurden die grössten resultierenden Geschwindigkeitsvektoren während den Arbeiten mit Bagger und Abbauhammer beim Abbruch des Betonkanals gemessen.

Der höchst resultierende Geschwindigkeitsvektor beträgt $V_R = 6,1$ mm/s und liegt leicht über dem zulässigen Richtwert von max. $V_R = 6,0$ mm/s.

Vor Beginn der Bauarbeiten wurde eine vorsorgliche Beweisaufnahme / Zustandsaufnahme (Rissprotokoll) des Bürogebäudes erstellt und die Höhenlage des Gebäudes mittels eines Präzisionsnivelements ermittelt.

Bei der Nachkontrolle des Gebäudes nach Abschluss der Bauarbeiten wurden keine Schäden festgestellt.

Die abschliessenden Höhenkontrollmessungen ergaben Setzungen des Gebäudes auf der Seite der Baustelle von 2 – 3 mm.

Erschütterungseinwirkungen auf die EDV-Anlagen

Wie aus den vorliegenden Messergebnissen ersichtlich ist, mussten die EDV-Verantwortlichen im Verlaufe der Bauarbeiten mehrmals intervenieren.

An der Messstelle im EDV-Raum wurden die stärksten Erschütterungen ebenfalls während den Arbeiten mit Bagger und Abbauhammer beim Abbruch des Betonkanals registriert.

Der höchst resultierende Geschwindigkeitsvektor beträgt $V_R = 15,7$ mm/s. Dieser Wert beträgt das Dreifache des Interventionswertes von max. $V_R = 5,0$ mm/s.

Der Interventionswert von max. $V_R = 5,0$ mm/s wurde ebenfalls während den Betonarbeiten, bei der Hinterfüllung des Bauwerkes und bei den Umgebungsarbeiten mehrmals bis zu den zweifachen Werten überschritten.

Die geringsten Erschütterungen wurden während den Rammarbeiten für die Spundwand mit Geschwindigkeitsvektoren von max. $V_R = 2,7$ mm/ registriert.

Zur grossen Erleichterung der EDV-Verantwortlichen haben die EDV-Anlagen und Server die Erschütterungseinwirkungen ohne Abstürze und Ausfälle überstanden.

Über die Dauer der Bauarbeiten wurde lediglich eine Anhäufung von Störungsmeldungen bzw. Disk-Rückmeldungen betreffend Lesefehler jedoch ohne Folgen im Prozessablauf verzeichnet.

Die Anzahl der Störungsmeldungen wurde mit 4-5 Meldungen pro Tag während den Bauarbeiten gegenüber 2-3 Meldungen pro Woche bei Normalbetrieb angegeben.

Beurteilung

Die EDV-Verantwortlichen begründen die gute Verträglichkeit ihrer EDV-Anlagen in Bezug auf die Erschütterungseinwirkungen vor allem durch den hohen Qualitätsstandard der Hardware, welche sich im oberen Preissegment bewegt.

Mit der Überwachung der Erschütterungen und dem direkten Zugang der EDV-Verantwortlichen auf die aktuellen Messergebnisse sowie der Möglichkeit zur sofortigen Intervention auf der Baustelle konnte sehr viel Vertrauen und Goodwill geschaffen werden.

Das installierte Dämpfungssystem der Angst + Pfister AG, Zürich hat sich bezüglich der Dämpfung von direkten Erschütterungseinwirkungen auf die Geschossdecke im EDV Server-Raum sehr gut bewährt und ist auch weiterhin in Betrieb.

Die Erschütterungseinwirkungen von der Baustelle konnten auf Grund der sehr tiefen Frequenzen jedoch nicht wirksam gedämpft werden.

Die Erfahrungen aus der vorliegenden Erschütterungsüberwachung zeigen, dass EDV-Anlagen bei Schwingungsbeanspruchung im tiefen Frequenzbereich weniger empfindlich reagieren.