Dynamische Aspekte einer Servo-Transfer-Presse in urbaner Umgebung

Daniel Gsell, ZC Ziegler Consultants AG, Zürich, CH

1 Einleitung

Ein Industrieunternehmen plant den vollständigen Umbau seines Areals, welches sich mitten in einer Stadt an bester Lage befindet. Am Produktionsstandort soll auch zukünftig festgehalten und deshalb die Produktion stark modernisiert werden. Dazu werden unter anderem zwei neue Servo-Transfer-Pressen zur Blechbearbeitung beschafft und ein neues 50 m hohes Hochregallager in unmittelbarer Nähe der Pressen erstellt. Neben der Produktion sieht der Gestaltungsplan des grossen Areals vor, dass bis zu 2 mio Kubikmeter neuer Büro- und Wohnraum mit bis zu 50 m hohen Gebäuden in kurzer Distanz zu den neuen Pressen entstehen soll. In Bild 1.1a ist die Situation in der näheren Umgebung der Pressen dargestellt.

Servo-Transfer-Pressen sind dynamische Maschinen, welche erhebliche Kräfte in den Baugrund leiten. Es stellt sich die Frage, ob durch den Betrieb der Pressen allfällige Nutzungseinschränkungen auf dem Areal und in den benachbarten Parzellen zu erwarten sind oder allgemein formuliert ob man solche Servo-Transfer-Pressen in urbanem Gebiet betreiben kann, ohne dass es zu schwerwiegenden Störungen der Nachbargebäude kommt.

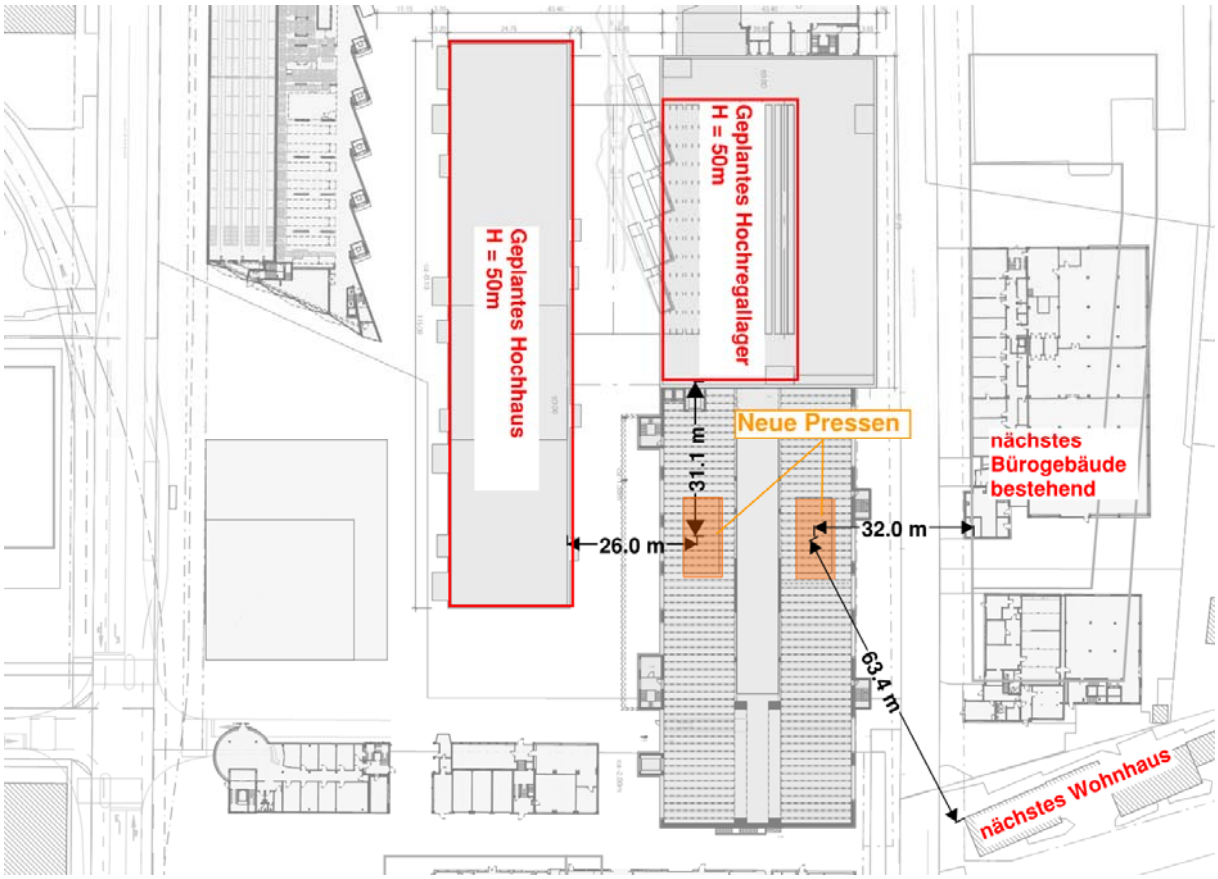


Bild 1.1a Situation um die geplanten Pressen.

2 Servo-Transfer-Pressen

2.1 Funktionsweise der Pressen

Im Projekt werden zwei Pressen mit sogenannter Twin-Servo Technologie eingebaut. Dabei wird eine Stösselmasse von bis zu 114 to mit Servomotoren entlang eines definierten Weges (Stösselkurve) in einer bestimmten Grundfrequenz (1/Hubzahl) mit einer Amplitude von bis zu 0.6 m auf und ab bewegt, wodurch erhebliche Trägheitskräfte entstehen. Der Stösselkurve liegt im Wesentlichen eine Sinusfunktion mit einer bestimmten Frequenz zu Grunde. Um optimale Produktionsergebnisse zu erzeugen, müssen diese idealen Kurven modifiziert werden. Dadurch entstehen periodische Kurven, welche als Summe von Sinusfunktionen mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz dargestellt werden können. Der Schnittschlag und auch die Kräfte aus dem Umformprozess sind höher frequent und werden durch die Federpakete unter der Presse gedämpft. In Bild 2.1a ist eine vereinfachte Prinzip-Skizze abgebildet.

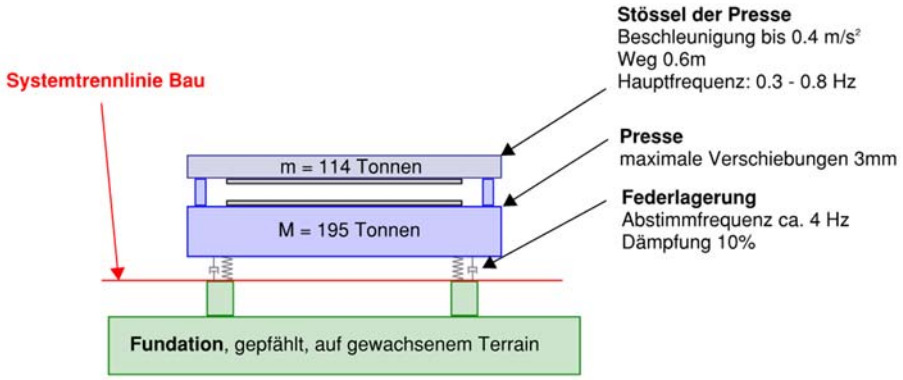


Bild 2.1a Schematische Darstellung der Presse.

Um die dynamischen und die quasi-statischen Phänomene zu beschreiben, wird ein vereinfachtes Modell, welches sämtliche wesentlichen mechanischen Grössen enthält, aufgebaut. Es handelt sich dabei um den klassischen, gedämpften Zweimassenschwinger (Bild 2.1b). Das Modell wurde an einer bestehenden Presse in Erfurt (DE) durch Messungen validiert.

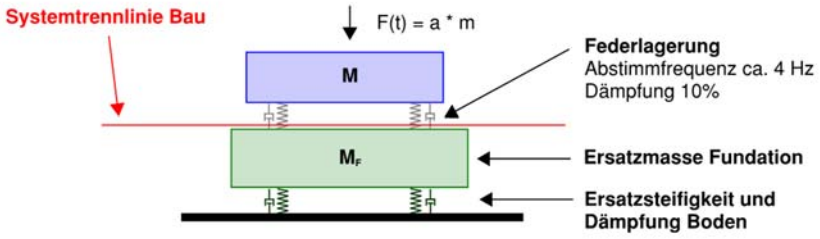


Bild 2.1b Mechanisches System als Zwei-Masse-Schwinger

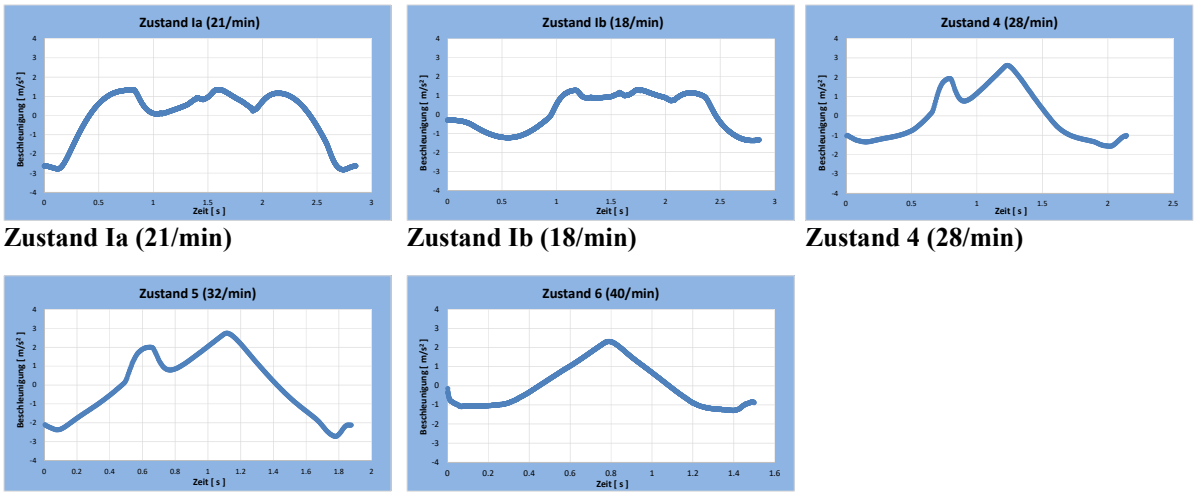
2.2 Pressenkräfte unter dem Federpaket

Um die Verantwortlichkeiten zwischen dem Anlagebauer und dem Gebäudeplaner (in diesem Falle ein Totalunternehmer) zu klären, wurde als Schnittstelle der Übergang Unterkante der Federpakete und Oberkante der Fundation (siehe Bild 2.1a) definiert. Vom Produktionsbetrieb und seinem Anlagebauer wurden fünf „realistische“ Stösselkurven, welche den grössten Teil der künftigen Produktion abdecken werden, vorgegeben. Anhand dieser Kurven werden die zu erwartenden Erschütterungen prognostiziert und beurteilt. Diese Kurven wurden teilweise bezüglich der Minimierung der Fundamentkräfte optimiert. In Bild 2.2a sind die Bewegungen beschrieben.

	Anwendung	Hubhöhe	Hubzahl	Bemerkung
I	Ursprungskurve (scharfe Kurve, nicht optimiert)	600 mm	26 min-1	Stössel Beschleunigung/Verzögerung hoch (theoretischer worst case)
Ia	Die Ursprungskurve wurde optimiert (nicht mehr scharfe Kurve) Durch Reduzierung der Beschleunigung und Verzögerung resultiert auch eine Reduzierung der Hubzahl (-20%)	600 mm	21 min-1	20% Geringere Ausbringung als theoretisch möglich, in dieser Anwendung als noch akzeptierbar beurteilt, da die Anzahl dieser Anwendungen voraussichtlich nur bei ca. 20% der zutrifft.
Ib	Referenzwerkzeug Werkzeug „Bottichboden_W8.23082“	600 mm	18 min-1	Stössel Beschleunigung/Verzögerung auf echtes WZ gerechnet, trifft für ca. 50% der Anwendungen zu
4	Kurve (optimiert, weiche Kurve)	400 mm	28 min-1	trifft ca. für 15% der Anwendungen zu
5	Kurve (optimiert, weiche Kurve)	400 mm	32 min-1	trifft ca. für 5% der Anwendungen zu
6	Kurve (optimiert, weiche Kurve)	175 mm	40 min-1	trifft ca. für 10% der Anwendungen zu

Bild 2.2a Beschreibung der 5 realistischen Zustände Ia, Ib, 4, 5 und 6 (Zustand I diente zur Auslegung der Federpakete, ist nicht relevant für die Beurteilung der Erschütterungen).

In Bild 2.2b sind die Beschleunigungen des Stössels der fünf relevanten Zustände abgebildet.



Zustand Ia (21/min) **Zustand Ib (18/min)** **Zustand 4 (28/min)**

Zustand 5 (32/min) **Zustand 6 (40/min)**

Bild 2.2b Beschleunigungen des Stössels für die fünf relevanten Zustände.

Die Feder-Dämpferpakete, welche unterhalb der Presse auf der Fundation angeordnet sind, wurden auf eine Abstimmfrequenz bei 4 Hz und einer Dämpfung von 10 % dimensioniert. Die Lagerungsfrequenz liegt deutlich über der Grundfrequenz der Anregung, jedoch liegen höhere harmonische Anteile direkt bei oder zumindest in der Nähe der Lagerungsfrequenz. Die Lagerungsfrequenz liegt unterhalb der Deckeneigenfrequenzen des Pressengebäudes (ca. 6.0 Hz) und deutlich unterhalb der Resonanz des Systems Fundation-Baugrund.

In Bild 2.2c ist das Übertragungsverhalten der mit den Federn gelagerten Presse abgebildet. Die Anregung erfolgt im Wesentlichen mit Frequenzen zwischen 0.3 Hz und 5.0 Hz, also meist unterhalb der Resonanzfrequenz des Systems. Dadurch wird die Anregungskraft durch das System (Masse-Feder) insbesondere in der Nähe der Resonanz verstärkt.

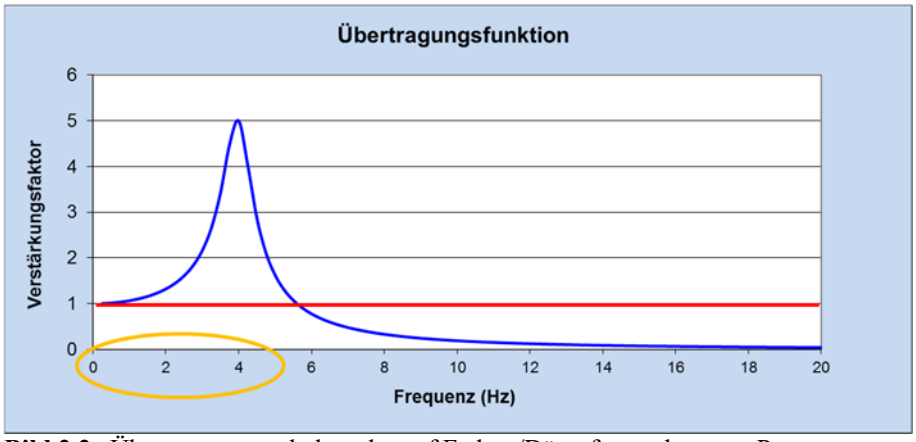


Bild 2.2c Übertragungsverhalten der auf Federn/Dämpfern gelagerten Presse.

In Bild 2.2d ist exemplarisch für den Zustand 5 links die erwarteten Kraftamplituden auf die Fundation (Total von 4 Federpaketen) und rechts die Zerlegung in die ersten 9 Fourier-Komponenten dargestellt.

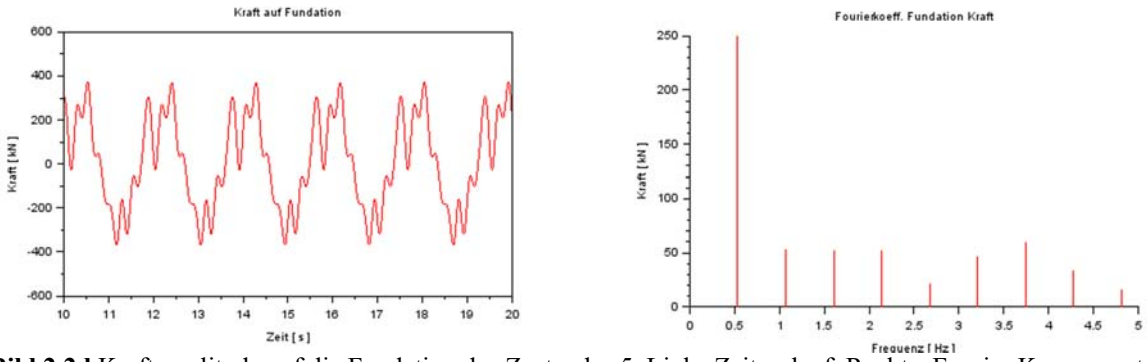


Bild 2.2d Kraftamplitude auf die Fundation des Zustandes 5, Links Zeitverlauf, Rechts: Fourier Komponenten

3 Problemstellungen und gewählte Methodik

Die Pressen stehen in einem Untergeschoss welches mit Quer- und Längswänden ausgesteift ist. Das Pressengebäude wird im anstehenden Baugrund auf Vollverdrängungspfählen in einer tiefer liegenden, steiferen Schicht fundiert. Vereinfacht beschrieben setzt sich der Baugrund in den ersten 20 – 25 m aus einer weichen Schicht nacheiszeitlicher Seeablagerungen, welche über einer deutlich steiferen Schicht eiszeitlicher Seeablagerungen liegt, zusammen (Bild 3.1a). Darunter, auf ca. 50 m Tiefe, ist die Grundmoräne anzutreffen. Die dynamischen Kräfte der Presse werden durch die Steifigkeit des Untergeschosses verteilt und über die Pfähle in die tiefere, steifere Bodenschicht abgegeben. Das mechanische Verhalten dieses komplexen Systems ist nur noch mit Simulationssoftware zu beschreiben. Durch das Büro Gysi Leoni Mader, Zürich, wurden der anstehende Baugrund und das Untergeschoss detailliert mit Software Plaxis3D nachgebildet. In diesem Modell werden statische Kräfte bei den Pressenfundamenten aufgebracht und die Deformationen, insbesondere die Oberflächendeformationen in der Umgebung der Presse berechnet. Daraus resultiert eine quasi-statische Ersatzsteifigkeit für die Fundation im anstehenden Baugrund. Dieses Vorgehen ist zulässig, da die vertikale Resonanz der Funda-

tion deutlich höher ist als die Anregungsfrequenzen. Es zeigte sich, dass die Oberflächendeformationen im Wesentlichen von der Schicht der eiszeitlichen Seeablagerungen, in welche die Kräfte durch die Pfähle eingeleitet werden, bestimmt werden. Im Pressengebäude selber, sind die zusätzlichen, elastischen Pfahldeformationen nicht zu vernachlässigen.

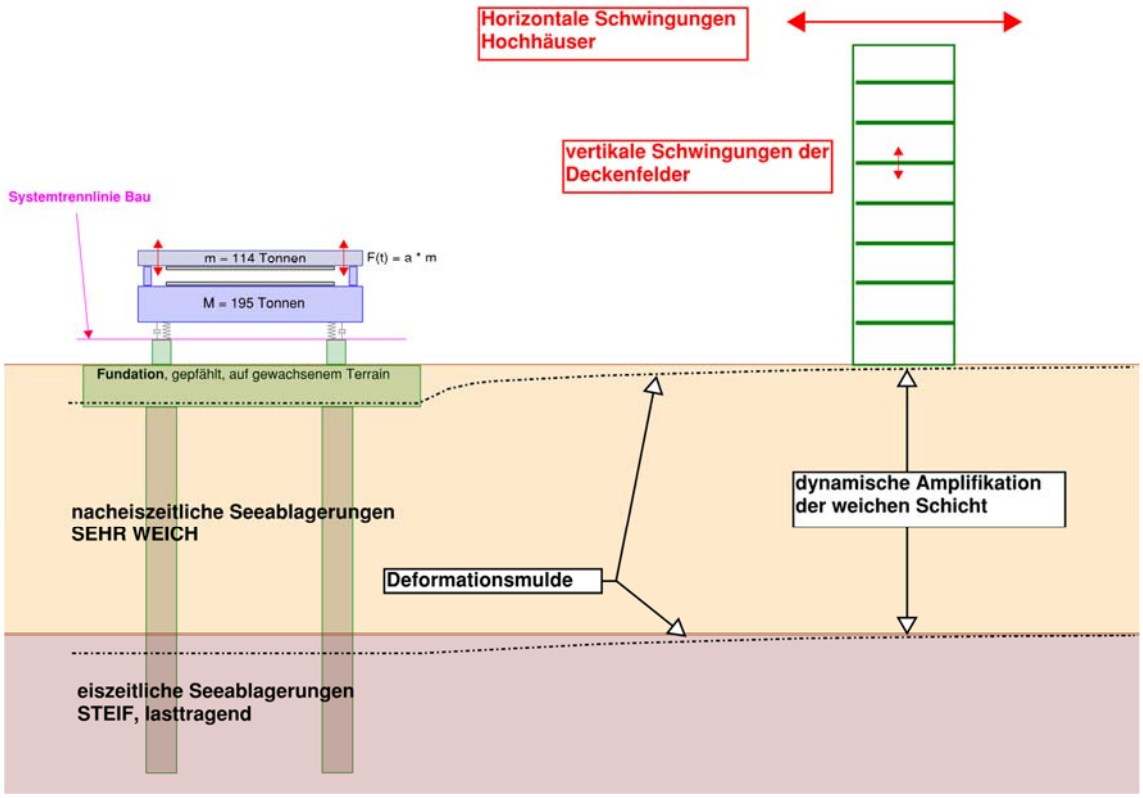


Bild 3.1a Schematische Darstellung der Problemstellung.

Die Erschütterungen breiten sich von der Quelle aus und klingen aufgrund der Geometrischen- und der Materialdämpfung mit dem Abstand zur Quelle ab. Aufgrund der anstehenden Schichtung und der weichen obersten Schicht sind Resonanzeffekte in dieser Schicht nicht auszuschliessen. Resonanz entsteht, wenn bei der betrachteten Frequenz die Schichtdicke einem Viertel der Wellenlänge oder einem ungeraden Vielfachen davon entspricht.

Die Erschütterungen treffen auf benachbarte Bauten und regen diese ebenfalls an. Dabei ist zu unterscheiden zwischen vertikalen Deckenschwingungen und horizontalen Kippschwingungen der Gebäude. Bei den vertikalen Deckenschwingungen werden alle Frequenzen der durch den Stössel erzeugten Erschütterungen etwas mehr oder weniger verstärkt von der Decke wiedergegeben. Die an der Pressenfundation erzeugten Erschütterungen werden mit dem Zweimassen-Schwinger-Modell abgeschätzt. Bei den horizontalen Kippschwingungen wird das betrachtete Gebäude in seiner Resonanz angeregt. Daher ist für diese Betrachtung jeweils nur eine einzelne Frequenzkomponente massgebend. In der Umgebung der Presse sind Hochhäuser mit bis zu 50 m Höhe geplant. Ohne genaue Kenntnis der Strukturen, kann nach Bachmann (Vibration Problems in Structures, Practical Guidelines) angenommen werden, dass die Grundfrequenz sich als $f_0 = 46/h$ abschätzen lässt, wobei h die Gebäudehöhe darstellt. Somit haben die Strukturen in der Umgebung der Presse Eigenfrequenzen welche im Bereich der ersten paar oberen Harmonischen der Grundfrequenz der Pressen liegen. Ohne genaue Kenntnis der Struktur wird die horizontale Schwinggeschwindigkeit zuoberst auf dem Gebäude wie folgt abgeschätzt: Es wird davon ausgegangen, dass das Hochhaus sich mehr oder weniger als starrer, im weichen Baugrund elastisch eingespannter Stab verhält (Bild 3.1b), welcher durch die Schiefstellung φ_0 des Bodens angeregt wird. Dabei unterschätzt man den Einfluss des elastischen Verhaltens der

vertikalen Tragwände des Gebäudes, man überschätzt jedoch den Einfluss der Boden-Strukturinteraktion. In der Summe werden sich diese beiden Einflüsse etwa ausgleichen. Es wird davon ausgegangen, dass die Anregung exakt in der Resonanzfrequenz des betrachteten Gebäudes liegt. Die dynamische Vergrösserung der Schwingung, bei voller Aufschaukelung beträgt dann

$$V_{dyn} = \frac{1}{2 \cdot D} = 16.7 \ldots 50$$

wobei D die Dämpfungskonstante darstellt und bei Hochhäusern ab 50 m im Bereich von 1 – 3 % liegen wird. Dies führt zu einer Verstärkung bis zu einem Faktor 50.

Die Rotationsgeschwindigkeit am Boden φ'_0 kann aus unten stehendem Wellenansatz ermittelt werden.

$$\varphi'_0(x,t) = \frac{\delta v(x,t)}{\delta x} = v_0 \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$$

Dabei stellt v_0 die vertikale Oberflächenschwinggeschwindigkeit dar und λ die Wellenlänge bei der betrachteten Frequenz. Aufgrund der Bodenschichten, oben weich und unten hart, wird davon ausgegangen, dass die Oberfläche, in Abwesenheit einer Schichtresonanz, sich näherungsweise gleich bewegt, wie die untere tragfähige Schicht, welche für die Deformationen relevant ist. Findet eine Amplifikation der obersten Schicht statt, wie dies die Versuche zeigen werden, wird, trotz allfälliger Pfahlgründungen der betroffenen Gebäuden auf die tragfähige untere Schicht, davon ausgegangen, dass die Oberflächendeformation für das Verhalten des Gebäudes relevant ist.

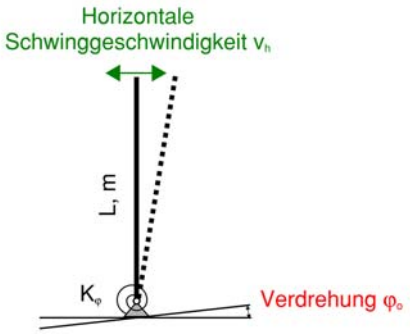


Bild 3.1b Modell des Hochhauses.

Die ganze Problemstellung ist mit vielfältigen und auch grossen Unsicherheiten verbunden. Dies unter anderem aufgrund fehlender Erfahrung mit solchen Problemstellungen, insbesondere im urbanen Raum. Um die Unsicherheiten dennoch kontrollieren zu können und belastbare Aussagen zu machen, wurden folgende Punkte festgelegt:

- **Fundationskräfte**
  Die in Kapitel 2.2 dargestellten Betriebszustände der Pressen wurden für sämtliche zukünftige Zustände als relevant vereinbart. Für die vertikalen Schwingungen werden diese Stösselbewegungen direkt in das Prognosemodell implementiert. Da für die horizontalen Schwingungen jeweils nur eine einzelne Frequenzkomponenten massgebende ist, wurde basierend auf den 5 vereinbarten Zuständen eine Grenzkraftkurve in Abhängigkeit der Frequenz definiert, welche Eingang in die Prognose findet (Bild 3.1c).
  Diese Grenzkraftkurve ist vom Pressenhersteller einzuhalten ist. Die Fundamentkräfte sollen in Zukunft am Federpaket der Presse ermittelt werden.

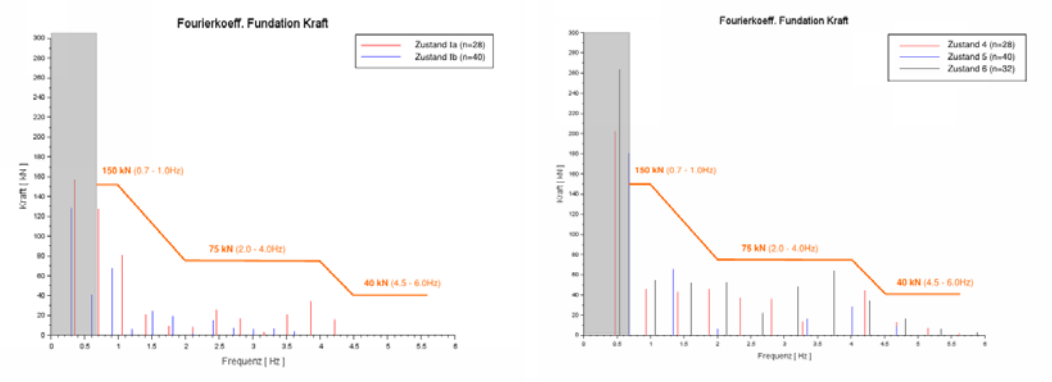


Bild 3.1c Orange Linie = Grenzkraftkurve

- **Unsicherheiten Baugrund**
  Die mit Abstand grössten Unsicherheiten liegen im Baugrund. Die Geometrie der Schichtung kann mit geologischen Untersuchungen noch relativ zuverlässig bestimmt werden, während die für die kleinen Kräfte und somit kleinen Deformationen relevanten Steifigkeiten je nach Betrachtungsweise um fast eine Grössenordnung schwanken. Um diese sehr grossen Streuungen einzuschränken, wurde am Standort der geplanten Presse ein dynamischer Grossversuch durchgeführt, welcher in Kapitel 4 beschrieben ist. Daraus konnten die Steifigkeiten, das Abklingverhalten mit der Distanz wie auch die dynamische Amplifikation der obersten Schicht charakterisiert werden.

- **Unsicherheiten allgemein**
  Selbst nach dem Versuch sind noch etliche Unsicherheiten im Prognosemodell vorhanden und die notwendigen Erfahrungen um diese einzugrenzen sind schlicht nirgends vorhanden. Die Prognosen der zu erwartenden Erschütterungen wurden deshalb mit drei Parametersätzen durchgeführt

  - **(E)** vorsichtiger Erwartungswert
  - **(H)** konservativ(st)er Ansatz: gibt oberen Erwartungswert, wobei für sämtliche Parameter konservative Annahmen getroffen und so überlagert werden.
  - **(L)** progressiver Ansatz: gibt einen unteren Erwartungswert

Die Erwartungswerte werden mit den Grenzwerten der ISO 10137 verglichen und die Erschütterungen damit beurteilt. Es wurden die Grenzwerte in Tabelle 3.1 vereinbart

Tabelle 3.1: Grenzwerte aus der ISO 10137

	Nutzung	Faktor Iso	Beschl. RMS [mm/s^2]	**Geschwindigkeit (V_p) [mm/s]**
Vertikale Schwingungen				
	Wohnen Nacht	1.4	5	**0.32**
	Ruhige Büros	2	5	**0.45**
	Normale Büros, Labors	4	5	**0.90**
Horizontale Schwingungen				
Hochhaus 50m	Ruhige Büros	2	3.6	**1.62**
Hochhaus 30m	Ruhige Büros	2	3.6	**1.08**
Gebäude 15m	Ruhige Büros	2	5.5	**0.83**

4 Dynamischer Grossversuch auf dem Areal der Pressen

Ziel der Messung ist es, dynamische Kräfte ähnlicher Grössenordnung (Kraftamplitude und Frequenz) in vergleichbarer Weise in den Boden am künftigen Standort der Presse zu leiten, wie dies die Pressen in Zukunft tun werden. Je Frequenz-Komponente (Fourier-Komponente) bringt eine Presse maximal 200 kN, welche auf die 4 Pressenlager verteilt sind. Unter jedem Pressenlager wird ein Vollverdrängungspfahl mit Durchmesser 60 cm und Länge von ca. 35 m als Fundation angeordnet sein.

4.1 Versuchsaufbau

Für den Versuch wurde modellhaft die Hälfte eines Pressenfundamentes nachgebaut. Dazu wurden zwei entsprechende Pfähle in den Boden abgeteuft. Monolithisch mit den Pfählen verbunden ist eine 0.4 m starke Fundamentplatte angeordnet. In Bild 4.1a ist der Versuch skizziert und die Dimensionen der Bauteile angegeben.

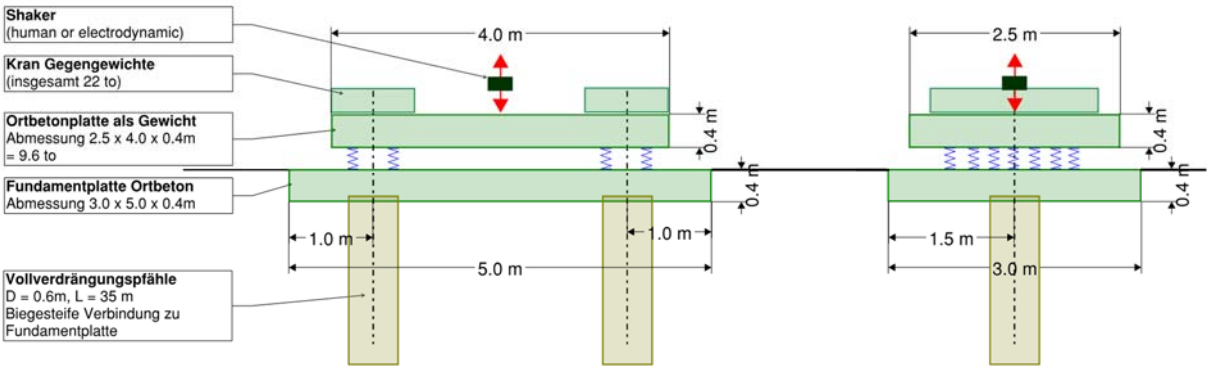


Bild 4.1a Aufbau für den dynamischen Belastungsversuch.

Auf die Fundamentplatte aus Beton wurden Stahl-Federn platziert und darauf Betonplatten als schwingende Masse gelegt. Damit wird ein klassischer, schwach gedämpfter Einmassenschwinger realisiert. Die Eigenfrequenz des Systems errechnet sich zu

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Wobei K die Federsteifigkeit und M die Masse des Systems darstellt.

Die Amplitude der einzelnen harmonischen Kräfte auf die zwei Pfähle wird bis zu 100 kN (10 to) betragen. Die Federn und die Masse des Versuchsaufbaues wurden so ausgewählt, dass Systemfrequenzen zwischen 2 Hz und 3.5 Hz und Kraftamplituden bis zu 100 kN erzeugt werden können. Durch die sehr geringe Dämpfung des Systems kann dieses mit relativ kleinen harmonischen Kräften, welche bei der Resonanzfrequenz des Systems auf die schwingende Masse wirken, zu grossen Schwingungsamplituden und damit zu entsprechenden Fundationskräften angeregt werden. Die Dämpfung der Feder und die Federsteifigkeit wurden in einem einfachen Ausschwingversuch mit einer Masse von 490 kg vorgängig bestimmt (Bild 4.1b). Die Federsteifigkeit bestimmt sich zu 120 N/mm und die Dämpfung liegt unter D = 0.1 %

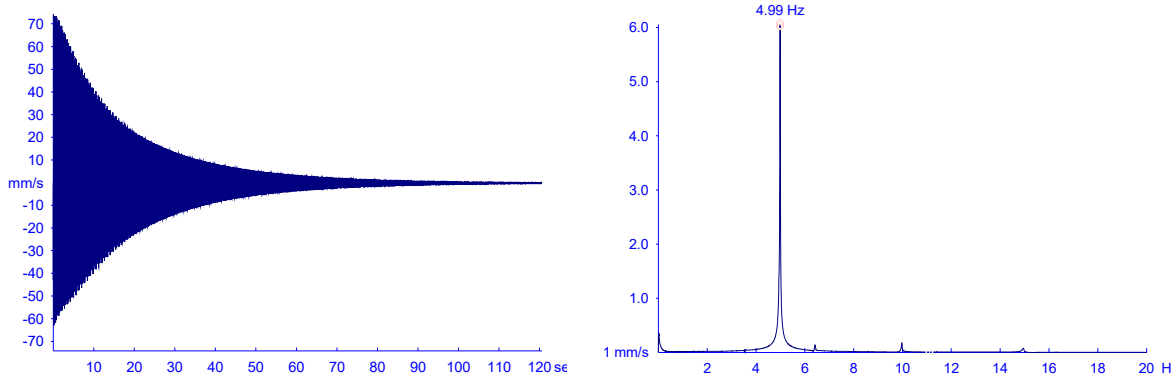


Bild 4.1b Ausschwingversuch. Links gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeit auf der Masse, rechts zugehöriges Amplitudenspektrum.

Eine harmonische Kraft vom Betrag F_{Anr}, welche das System in der Resonanz anregt, kann somit sehr stark verstärkt werden:

$$F_{Resonanz} = \frac{F_{Anr}}{2 \cdot D} = 500 \cdot F_{Anr}$$

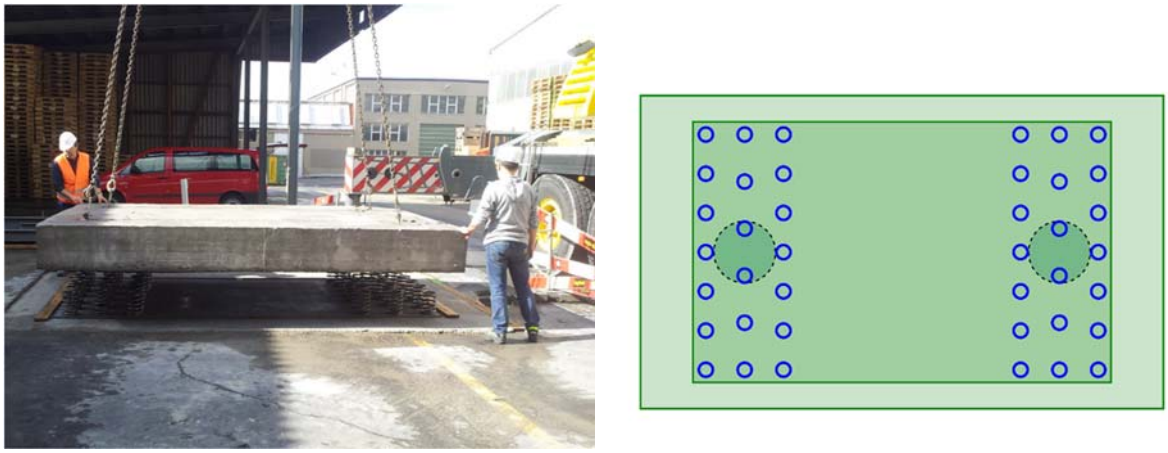


Bild 4.1c Links: Absenken der 9.6to Ortbetonplatte auf die Federn. Rechts: Position der 40 Federn

Insgesamt wurden 40 Federn eingebaut.

Bemerkungen:

- Mit Stahlfedern ist es ohne grossen Mehraufwand nicht möglich, Systemeigenfrequenzen unter 2 Hz zu erreichen. Die Federlängen müssten entsprechend gross gewählt werden, wodurch die Bewegung der Masse vertikal geführt sein müsste, dass keine Systeminstabilitäten auftreten. Eine solche Führung bringt unnötig Dämpfung ins System, wodurch die grossen Kräfte nicht mehr erreicht werden könnten.
- Die Masse wurde so gewählt, dass die zu erzeugende Kraft mit einer Beschleunigung kleiner als 0.5 g erzeugt werden kann. Bei einer Beschleunigung der Masse > 1.0 g besteht die Gefahr, dass die Masse abhebt und das System instabil wird.
- Die Masse wurde durch eine wippende Person angeregt.

4.2 Messprogramm

Die Versuche wurden mit 6 unterschiedlichen Massen durchgeführt. Typischerweise wurden der Masse Beschleunigungen von ca. 0.4 g aufgezwungen.

- Versuch 1: 33.2 to 1.98 Hz
- Versuch 2: 25.6 to 2.20 Hz
- Versuch 3: 21.6 to 2.36 Hz
- Versuch 4: 17.6 to 2.58 Hz
- Versuch 5: 13.6 to 2.88 Hz
- Versuch 6: 9.6 to 3.36 Hz

Bei den oben angegebenen Eigenfrequenzen handelt es sich um die beim Versuch gemessenen Frequenzen. Sie weichen im Promillebereich von den rechnerisch ermittelten ab, da die Massen nicht ganz genau bekannt sind.

Bild 4.2a Versuchsaufbau mit 33 to Masse, 40 Federn und „Human-Shaker“

4.3 Anordnung der Sensoren

In Bild 4.3a ist die Situation um den Versuch und die verwendeten Sensoren im Übersichtsplan abgebildet. Die Sensoren wurden in zwei zueinander senkrechtstehenden Achsen angeordnet. Neben der Ausbreitung der vertikalen Erschütterungen an der Oberfläche wurden diese an zwei Punkten tri-axial gemessen (MP 3 und MP 6). Zusätzlich wurden bei 4 Gebäuden Frei-Feld-Messpunkte (MP 4c, MP 7c, MP 8c und MP 9c) und zugehörige Fundationsmesspunkte (MP 4b, MP 7b, MP 8b und MP 9b) gesetzt, um die Ankopplung zu bestimmen. Der MP 10 ist mit knapp 190 m Abstand zur Quelle der am weitesten entfernte Messpunkt.

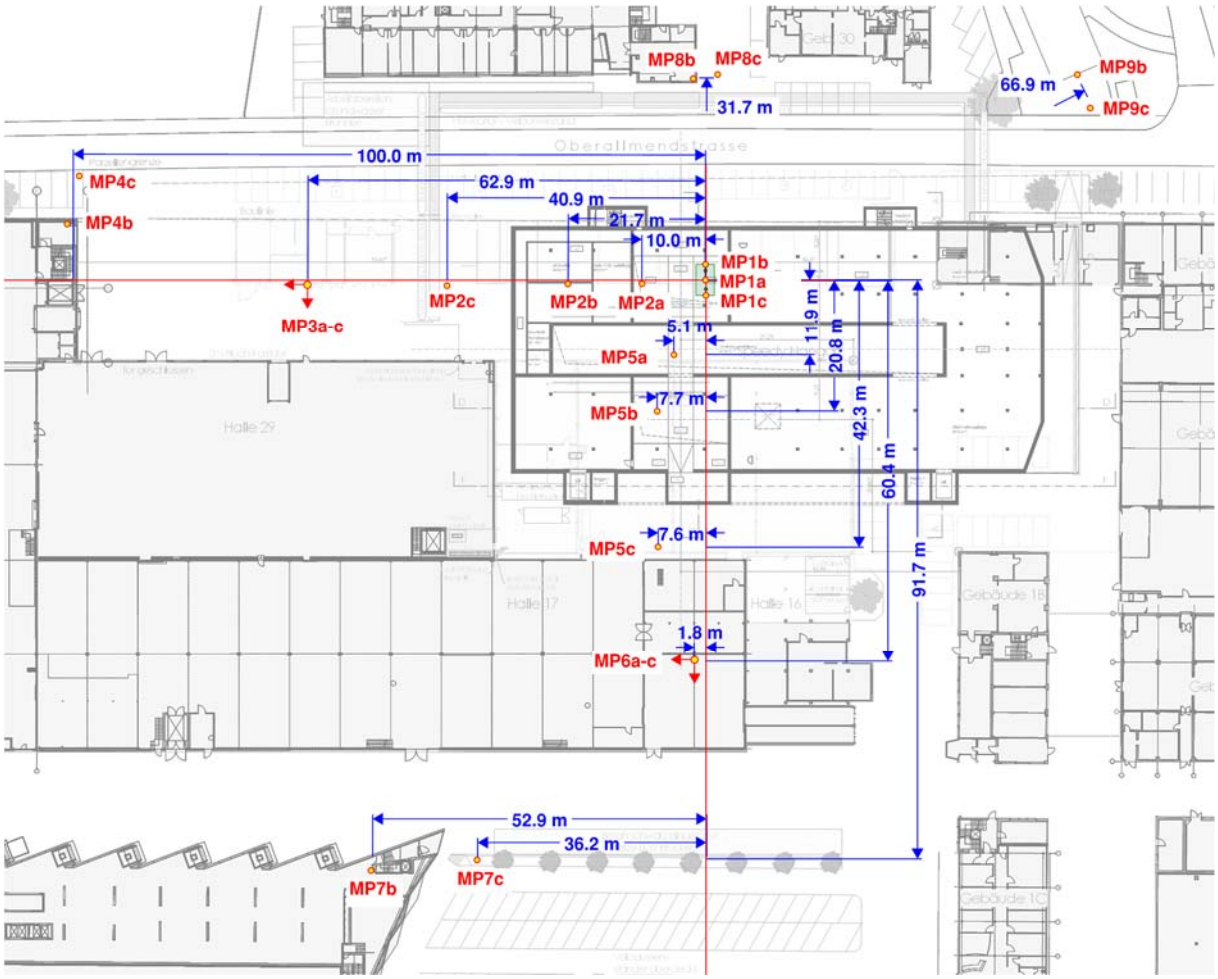


Bild 4.3a Versuchsstandort (= Pressenstandort) beim MP 1 und verwendeten Sensoren.

4.4 Messungen

Sämtliche Messdaten wurden bei allen Auswertungen bei einer Eckfrequenz von 1.0 Hz hochpass gefiltert und bei einer Eckfrequenz von 4.0 Hz tiefpassgefiltert. Dadurch können hochfrequente Störungen und tieffrequenter Drift aus den Daten eliminiert werden. Dies ist insbesondere bei den kleinen Schwinggeschwindigkeiten notwendig.

4.4.1 Linearität

In einem ersten Schritt wird abgeklärt, ob der Zusammenhang zwischen den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten auf der Erdoberfläche und der Kraftamplitude linear ist. In Bild 4.4a ist dazu exemplarisch für den Versuch V2 (mit 25.6 to Masse bei 2.20 Hz) die gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeit (R.M.S = Root Mean Square) in Abhängigkeit der Anregungskraft (auch in R.M.S) für die Messpunkte MP 1b, MP 1c, MP 2c und MP 5c aufgetragen. Das Diagramm zeigt klar den nahezu idealen linearen Zusammenhang zwischen der Kraft und den Oberflächenverschiebungen.

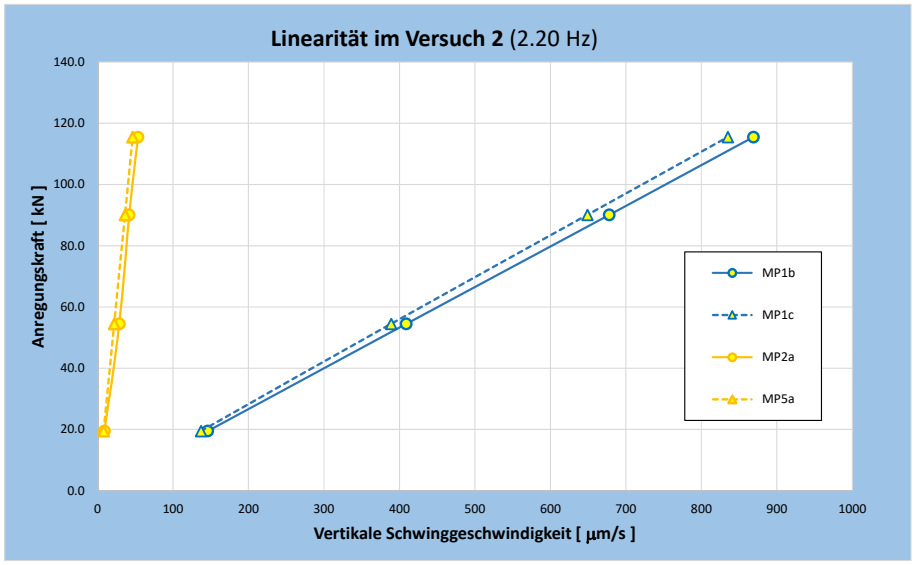


Bild 4.4a Linearität der Bodenantwort auf dynamische Kräfte beim Versuch V2

4.4.2 Messdaten beim Versuch 6

In den folgenden Bildern 4.4b bis 4.4d sind exemplarisch Messdaten beim Einschwingen des Versuches 6 für ausgewählte Messpunkte dargestellt.

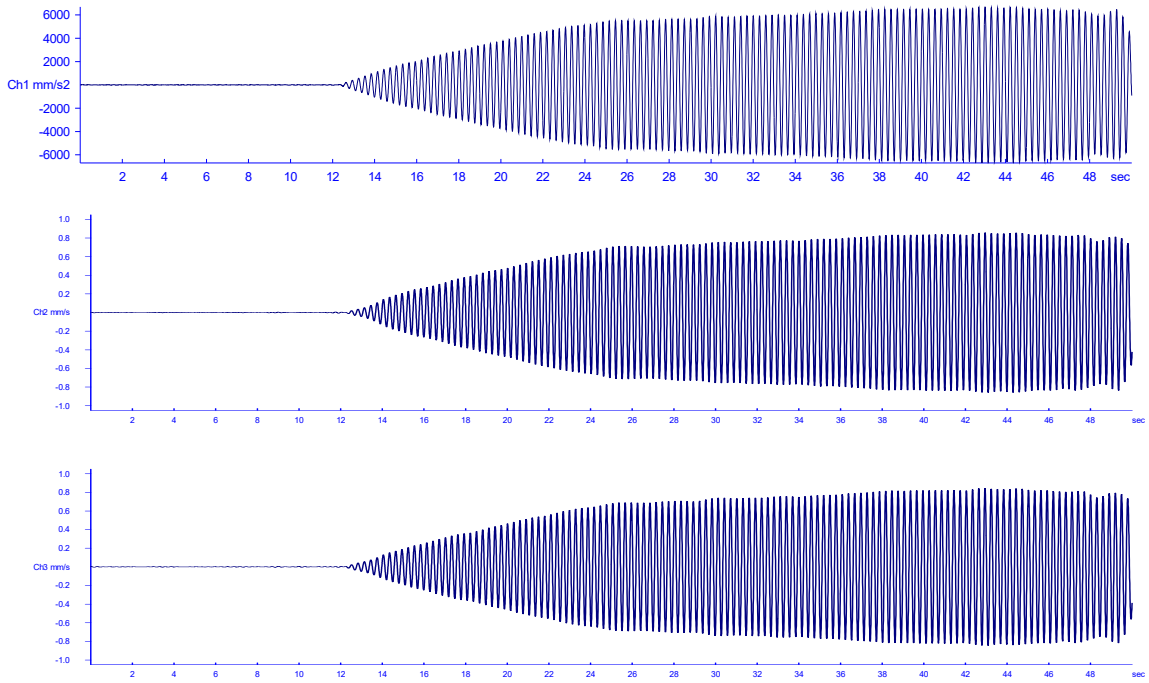


Bild 4.4b Einschwingen beim MP1 im Versuch 6 mit 9.6 to und 3.36 Hz (von oben nach unten: MP1a bis MP1c)

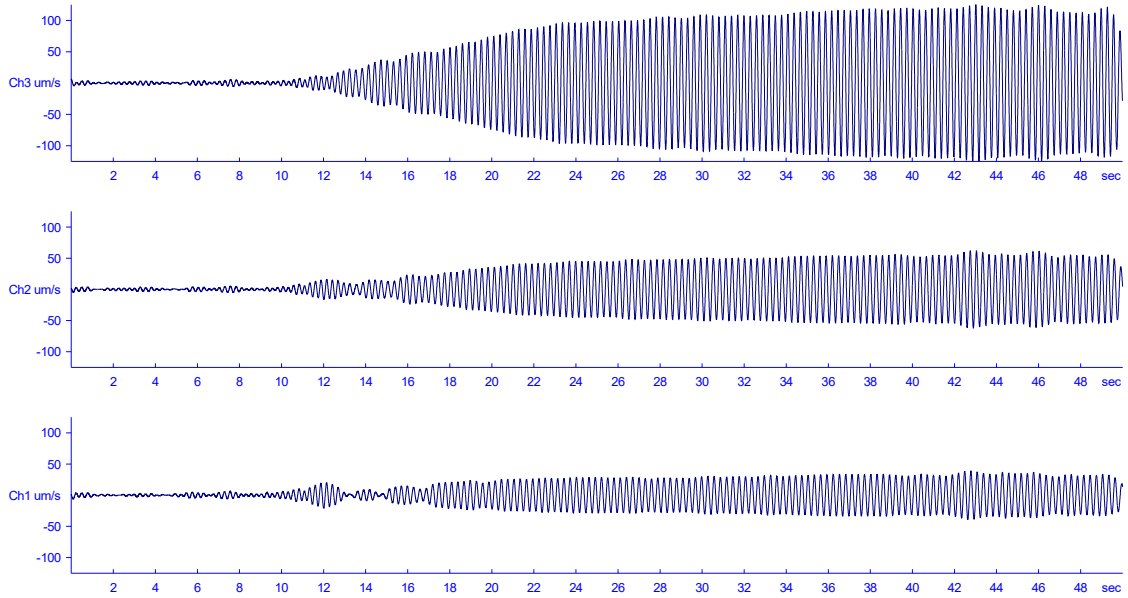


Bild 4.4c Einschwingen beim MP2 im Versuch 6 mit 9.6 to und 3.36 Hz (von oben nach unten: MP2a bis MP2c)

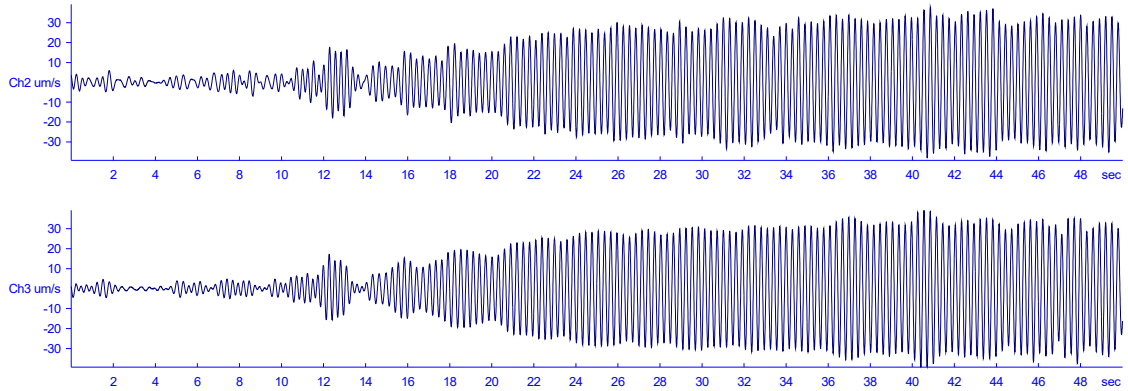


Bild 4.4d Einschwingen beim MP4 im Versuch 6 mit 9.6 to und 3.36 Hz (von oben nach unten: Frei-Feld Messpunkt MP4b und Fundamentmesspunkt MP4c)

4.4.3 Abklingverhalten der vertikalen Oberflächendeformationen

Entlang den zwei Achsen auf denen die Sensoren platziert waren, wurden die gemessenen Oberflächenverschiebungen, bei gleicher dynamischer Krafteinleitung über die Distanz aufgetragen. In Bild 4.4e links ist dies für die Sensoren MP 5a – c, MP 6 und MP 7 dargestellt.

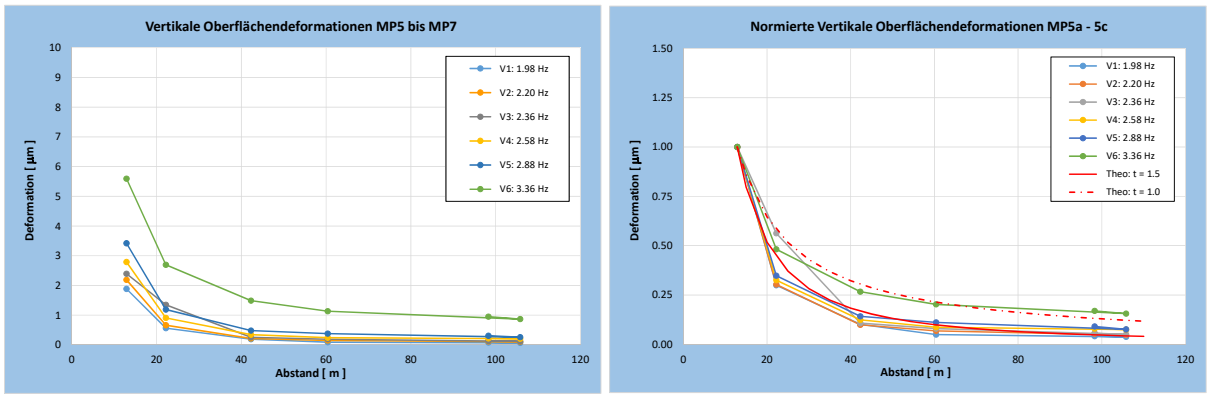


Bild 4.4e Links: Abklingverhalten der vertikalen Oberflächendeformationen entlang der Sensoren MP 5 – MP 7
Rechts: Normalisiert mit theoretischem Abklinggesetz.

Neben den gemessenen Amplituden für alle Versuche (V1 – V6) ist in Bild 4.4e rechts zusätzlich ein theoretisches Abklingverhalten nach dem Gesetz

$$v(r) = v_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^t$$

für unterschiedliche Abklingkoeffizienten t, für die im Abstand 10 m auf 1 normierten Abklingkurven eingetragen. Der Abstand zur Quelle wird mit r bezeichnet.

4.4.4 Bodenamplifikation

In Bild 4.4e links ist ersichtlich, dass die Amplituden der vertikalen Oberflächendeformationen an den einzelnen Messpunkten neben dem Versuchsstand mit zunehmender Frequenz auch zunehmen. Dies deutet auf eine Amplifikation in der obersten, weichen Bodenschicht hin. Es wurden zusätzlich Versuche mit etwas weniger Masse durchgeführt um diese über einen breiteren Frequenzbereich abzudecken. Die Bilder 4.4f zeigen die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten und die daraus ermittelten vertikalen Oberflächenverschiebungen bei gleicher harmonischer Anregungskraft.

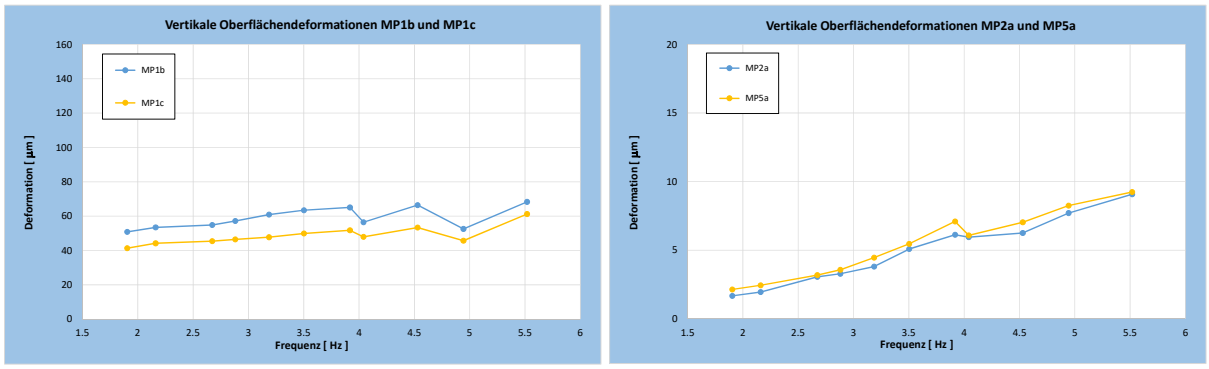


Bild 4.4f Links: Gemessene Oberflächendeformation auf dem Fundament des Versuches (MP1b und MP1c) Rechts: Gemessene Oberflächendeformation an den Punkten MP2a und MP5a

Klar zu erkennen ist die nur leichte Zunahme der vertikalen Oberflächendeformationen auf dem Fundament des Versuchaufbaus. In den Frei-Feld-Messungen beträgt die Zunahme der vertikalen Oberflächendeformation zwischen 2.0 Hz und 5.5 Hz etwa einen Faktor 4 - 5.

Das System der Pfahlgründung leitet die wesentlichen Kräfte in die steife Schicht der eiszeitlichen Seeablagerungen, diese deformiert sich und ist für die Deformationsmulde an der Oberfläche verantwortlich. Der Pfahl macht aufgrund seiner Länge und der relativ kleinen Querschnittsfläche erhebliche elastische Deformationen in Längsrichtung mit, jedoch ist das System Pfahl-Fundament weit weg von einer Resonanz, so dass ein nahezu frequenzunabhängiges Verhalten beobachtet werden kann. Anders bei der weichen Schicht der eiszeitlichen Seeablagerungen. Diese weist eine klare Amplifikation auf, welche durch die Resonanz der oberen weichen Bodenschicht bedingt ist. Dies kann näherungsweise wie folgt erklärt werden:

Bild 4.4g zeigt das Nakamuraspektrum der aufgezeichneten Erschütterungen (gemittelte 60 s Datensätze über eine halbe Stunde). Im Spektrum sieht man klar eine Spitze bei 1.75 Hz.

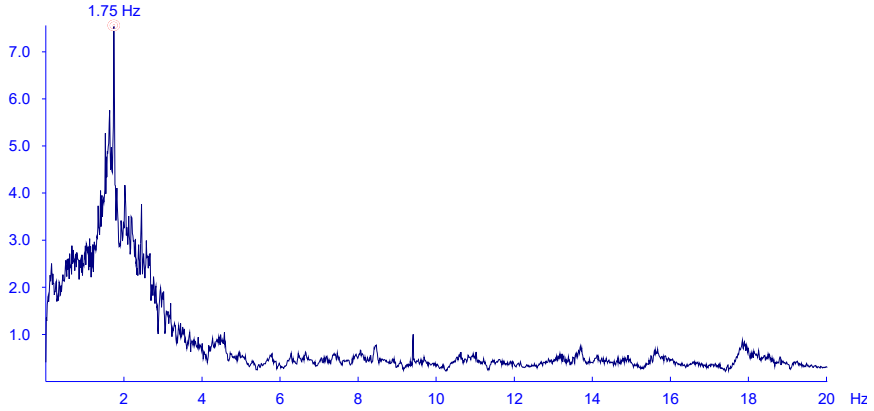


Bild 4.4g Nakamura Methode: gemitteltes horizontales Amplitudenspektrum dividiert durch das gemittelte vertikale Spektrum.

Somit kann mit der Kenntnisse der Stärke der weichen oberen Schicht (= 25 m) die Schubwellengeschwindigkeit bestimmt werden zu $c = \lambda * f = 4 * 25\ m * 1.75\ Hz = 175\ m/s$.

Betrachtet man nun die Kompressionswellen, die senkrecht in der Schicht laufen, so beträgt deren Wellengeschwindigkeit, je nach Querdehnzahl, ca. die doppelte Schubwellengeschwindigkeit. Die erste Bodenresonanz vertikal liegt somit bei etwa 3.5 Hz und die zweite gegen 10.5 Hz. Die Präsenz dieser Resonanzen erklärt den Anstieg in Bild 4.4f.

4.4.5 Ankopplung der Gebäude

Bei vier Gebäuden wurden die Schwingungen jeweils neben dem Gebäude und auf dem Gebäudefundament gemessen. Daraus kann ein Ankopplungsfaktor geschätzt werden. Es konnten Ankopplungsfaktoren von 0.85 – 1.25 beobachtete werden, wobei der Faktor meist grösser als 1.0 ist. Dies entspricht etwa der Erwartung.

4.4.6 Horizontale Deformation

Bei den beiden tri-axialen Sensoren (MP 3 und MP 6) kann das Verhältnis von der horizontalen zu der vertikalen Richtung ermittelt werden. Die Streubreite ist relativ gross, der Faktor liegt zwischen 0.5 und 2.0.

4.4.7 Wellengeschwindigkeit

Die Schwinggeschwindigkeiten der Messpunkte MP 2a bis MP 2c, welche in einer Linie in unterschiedlichen Abständen zur Erschütterungsquelle aufgestellt waren, wurden synchron aufgezeichnet. Die Auflösung in der Zeit beträgt 1/800 s. Dies erlaubt aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten eine gemittelte Wellenausbreitungsgeschwindigkeit abzuschätzen ($c = \Delta x/\Delta t$). Dies im Wissen, dass die Wellenausbreitung in der Oberflächenschicht so nahe an der Quelle dispersiv ist. In Bild 4.4h sind die gemessenen vertikalen Oberflächenschwinggeschwindigkeiten für den Versuch V1 dargestellt.

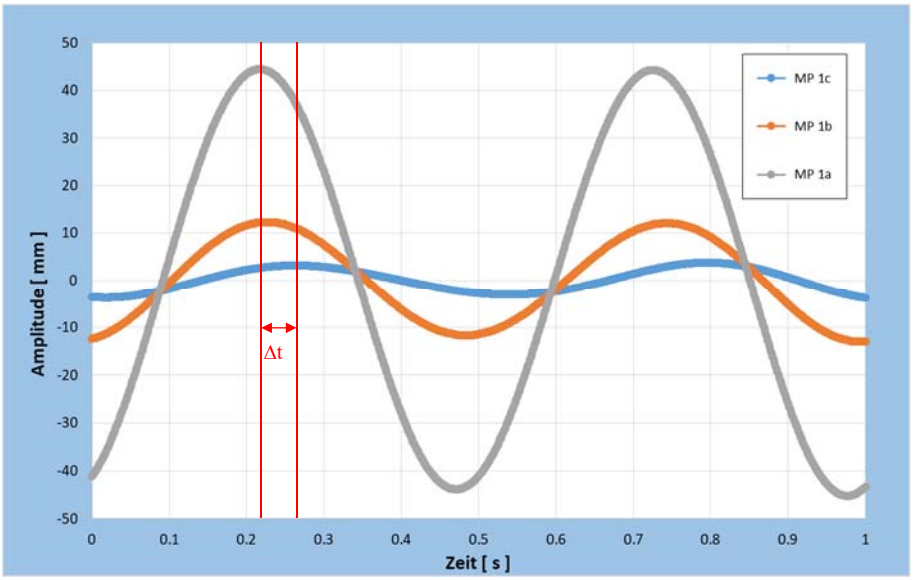


Bild 4.4h Vertikalen Schwinggeschwindigkeiten bei dem Messpunkten MP 2a bis MP 2c während des Versuches V1.

Um den Zeitunterschied Δt möglichst genau zu ermitteln, wurden die Phasen und die Amplituden der Kurven nummerisch ermittelt und aus der Phasendifferenz die Zeitdifferenz der Ankunft des Wellenberges errechnet. Dies wurde für die Versuche V1, V2 und V6 durchgeführt und führt zwischen den Punkten MP 2a und MP 2c zu folgenden gemittelten Geschwindigkeiten:

V1: 1.98 Hz	520 m/s
V2: 2.20 Hz	450 m/s
V6: 3.36 Hz	440 m/s

4.5 Verwendung der Versuchsdaten

Die Versuche wurden von Büro Gysi Leoni Mader mit der Software Plaxis3D nachsimuliert. Dabei wurde das Materialmodell HSS (Hardening Soil Soft) verwendet. Basierend auf der Schichtung des Baugrundes und den mittleren elastischen Eigenschaften des Bodens aus dem geologischen Gutachten wurden global (d.h. alle im gleichen Verhältnis) die elastischen Eigenschaften angepasst, bis die vertikalen Oberflächendeformationen für den tiefst-frequenten Versuch V1 bei 1.98 Hz in einem Umkreis von 60 m von der Lasteinleitung, möglichst gut mit den Messwerten übereinstimmten. Die Steifigkeit des Bodens wurde bewusst etwas zu weich gewählt, so dass die Deformationen im Modell eher zu hoch sind. Mit diesem kalibrierten Bodenmodell wurden die Deformationen des ganzen Pressengebäudes unter den dynamischen Pressenlasten (beide Pressen gleichzeitig wirkend) simuliert. Zwischen den ersten, vorsichtigen Annahmen der elastischen Konstanten (schon unter Berücksichtigung der sehr kleinen Deformationen) des Bodenmodells und den im Versuch ermittelten Kennwerten liegt ein Faktor 3. Eine solche Erhöhung der Steifigkeit ist ohne Versuch niemals zu rechtfertigen.

Die Ausbreitung der Erschütterungen auf dem Areal (Abklingverhalten) wurde aus den Messdaten im relevanten Frequenzbereich empirisch bestimmt. Zusätzlich wurde aus den Messdaten die Verstärkung der Erschütterungen der obersten Schicht bei den unterschiedlichen Frequenzen ermittelt und in der Prognose berücksichtigt.

5 Prognose der Erschütterungen

5.1 Erschütterungen horizontal

Bei der Beurteilung der horizontalen Erschütterungen der angrenzenden Gebäude handelt es sich um resonante Phänomene der Gebäude (Kippschwingungen), welche nur von einer einzelnen Frequenzkomponente angeregt werden. Um die angegebenen relevanten Betriebszustände abzudecken, wurde für die Prognose eine Grenzkraftkurve definiert (Bild 3.1c). Diese Grenzlinie ist vom Pressenlieferanten einzuhalten und kann über Beschleunigungsmessungen (grosse Pressenmasse und Fundation) oder auch Deformationsmessung (relativ Verschiebung Boden – grosse Pressenmasse kontrolliert werden.

In der Tabelle 5.1 sind die prognostizierten horizontalen Schwinggeschwindigkeiten am Kopf des nächstgelegenen Gebäudes angegeben und mit den Grenzwerten verglichen. Grün hinterlegt sind die Prognosewerte, welche innerhalb der Grenzwerte liegen.

Tabelle 5.1: Prognostizierte horizontale Erschütterungen in der obersten Etage des nächsten geplanten Gebäudes und Vergleich mit den Grenzwerten. (E) … vorsichtiger Erwartungswert, (H) … Oberer Erwartungswert, (L) … unterer Erwartungswert.

Abstand zur Presse	50	m	50	m	50	m
Gebäude Höhe	50	m	30	m	15	m
Resonanzfrequenz	0.92	Hz	1.53	Hz	3.07	Hz
Kraft	150	kN	110	kN	75	kN
Verstärkung Boden	1		1.5		1.75	
Grenzwert v_{top}	1.62	mm/s	1.08	mm/s	0.83	mm/s
v_{top}^{E}	0.10	mm/s	0.18	mm/s	0.28	mm/s
v_{top}^{H}	0.27	mm/s	0.49	mm/s	0.78	mm/s
v_{top}^{L}	0.02	mm/s	0.03	mm/s	0.05	mm/s

Bemerkung: Die Prognosewerte v_{top}^{H} für ein Gebäude mit Höhe unter 20 m sind deutlich überschätzt, da der angenommene untere Erwartungswert der Dämpfung von 1 % zu tief angenommen ist.

5.2 Erschütterungen vertikal

Da es sich bei den Erschütterungen auf den Decken um eine Überlagerung einer Vielzahl von diskreten harmonischen Schwingungen handelt, müssen die einzelnen Betriebszustände der Presse beurteilt werden. Das Zwei-Massenschwinger-Modell wurde so kalibriert, dass die Federsteifigkeit des unteren Schwingers dem gemessenen Bodenmodell entspricht. Dazu wird die Federsteifigkeit so gewählt, dass die im Plaxismodell simulierte, quasi-statische Fundamentverschiebung durch den Schwinger optimal nachgebildet wird. Die Ersatzmasse der Fundation wurde so gewählt, dass eine geschätzte Resonanz des Systems (wirkende Gebäudemasse – Pfahl) nachgebildet wird. Die wirkende Masse wird mit 100 to angesetzt, dies entspricht etwa einer mittleren Gebrauchslast des Pfahles. Die Pfahl-Boden-Steifigkeit wurde aus dem Versuch entnommen. Die Gebäude - Bodenresonanzfrequenz liegt somit zwischen 10 Hz und 13 Hz. Die Dämpfung wurde mit 10 % entsprechend tief angesetzt. Es wird zudem festgestellt, dass das Modell nicht sensitiv auf Änderungen der Resonanz und der angesetzten Dämpfung reagiert. Solange die Resonanz deutlich über den wesentlichen Anregungsfrequenzen liegt, reagiert das System quasi statisch (Bemerkung: sämtliche Deckeneigenfrequenzen liegen über den Anregungsfrequenzen).

Tabelle 5.2: Prognostizierte vertikale Erschütterungen auf den Deckenfeldern und Vergleich mit den Grenzwerten. (E) … vorsichtiger Erwartungswert, (H) … Oberer Erwartungswert, (L) … unterer Erwartungswert.

Im Pressengebäude										
Zustand	Ia		Ib		4		5		6	
Richtwert vtop	0.9	mm/s	0.9	mm/s	0.9	mm/s	0.9	mm/s	0.9	mm/s
vDeckeE	0.30	mm/s	0.18	mm/s	0.53	mm/s	0.26	mm/s	0.42	mm/s
vDeckeH	0.40	mm/s	0.24	mm/s	0.70	mm/s	0.35	mm/s	0.56	mm/s
vDeckeL	0.20	mm/s	0.12	mm/s	0.35	mm/s	0.18	mm/s	0.28	mm/s
Im Abstand 50m										
Zustand	Ia		Ib		4		5		6	
Richtwert vtop	0.45	mm/s	0.45	mm/s	0.45	mm/s	0.45	mm/s	0.45	mm/s
vDeckeE	0.05	mm/s	0.03	mm/s	0.10	mm/s	0.05	mm/s	0.07	mm/s
vDeckeH	0.14	mm/s	0.08	mm/s	0.26	mm/s	0.12	mm/s	0.20	mm/s
vDeckeL	0.02	mm/s	0.01	mm/s	0.03	mm/s	0.02	mm/s	0.02	mm/s

5.3 Horizontale Erschütterungen im geplanten Hochregallager

In 30 m Abstand von der Presse ist ein neues, bis 45 m hohes Hochregallager (HRL) geplant. Die Regale solcher Lager sind aus filigranen Stahlkonstruktionen aufgebaut und tragen hohe Lasten, wodurch die Eigenfrequenzen der Regale (insbesondere aus der Regalebene) in einem Frequenzbereich von 1.0 - 4.0 Hz zu liegen kommen. Somit liegen die Eigenfrequenzen genau in einen Frequenzbereich in dem die Presse viel Energie in den Boden bringt. Da solche Stahl-Regale kleine Dämpfungen aufweisen besteht die Gefahr, dass sie in der Resonanzfrequenz zu beachtlichen Schwingungen aufgeschaukelt werden können und die Sensorik für die Feinpositionierung des Regalbediengerätes möglicherweise beeinträchtigt wird. Um dies abzuklären wurden im bestehenden, 24 m hohen Hochregallager des Industriebetriebes, Schwingungsmessungen durchgeführt. Dabei wurde mit einem elektrodynamischen Shaker das Regal horizontal in Resonanz angeregt. Dabei wurden Schwinggeschwindigkeiten bis zu 6 mm/s erreicht. Gleichzeitig wurden mit dem Regalbediengeräte automatisch die Regalfächer be- und entladen. Es wurde keine Beeinträchtigung dieses Vorgangs festgestellt.

Bei der Prognose der Erschütterungen der Regale des Hochregallagers wurde bei der Ausbreitung der Erschütterungen gleich vorgegangen wie bei den Kippschwingungen für Gebäude. In Tabelle 5.3 sind die Prognosewerte für horizontalen Schwinggeschwindigkeiten der Regale abgebildet.

Tabelle 5.3: Prognostizierte vertikale Erschütterungen auf den Deckenfeldern und Vergleich mit den Grenzwerten.

Abstand	30	m	30	m	30	m	30	m
Resonanzfrequenz HRL	1	Hz	1.5	Hz	2	Hz	2.5	Hz
Kraft	150	kN	110	kN	90	kN	75	kN
Verstärkung Boden	1							
Zulässige Geschw.*)	6	mm/s	6	mm/s	6	mm/s	6	mm/s
v_{top}^{E}	0.63	mm/s	0.70	mm/s	0.76	mm/s	0.79	mm/s
v_{top}^{H}	3.67	mm/s	4.04	mm/s	4.41	mm/s	4.59	mm/s
v_{top}^{L}	0.12	mm/s	0.13	mm/s	0.14	mm/s	0.15	mm/s

*) Bis zu 6mm/s wurde dies real getestet, der effektive Grenzwert dürfte höher liegen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Prognose der Erschütterungen infolge des Betriebes der Servo-Transfer-Pressen in der geplanten neuen Pressenhalle basiert im Wesentlichen auf folgenden Annahmen und Vorgehen:

- Es wurden 5 relevante Betriebszustände der Presse definiert, welche für die Prognose der vertikalen Erschütterungen auf den Decken des Pressengebäudes sowie der angrenzenden Liegenschaften herangezogen werden und für die Beurteilung der Situation relevant sind.

- Basierend auf den 5 Zuständen wird eine vom Pressenhersteller einzuhaltende Grenzkraftlinie (Kräfte der Presse auf die Fundation) für die Frequenzen unter 6 Hz festgelegt, welche für die Beurteilung der horizontalen Erschütterungen (Kippschwingungen Gebäude und horizontale Schwingung HRL) relevant ist.

- Die Erschütterungen auf der Fundation werden mit einem kalibrierten Zwei-Massen Schwinger Modell prognostiziert.

- Die elastischen Eigenschaften des Bodens und ein empirisches Modell, welches die Erschütterungsausbreitung beschreibt, wurde am zukünftigen Standort der Presse mit einem Grossversuch kalibriert. Dabei wurden auch Resonanzen der obersten Schicht festgestellt, welche durch den Versuch quantifiziert werden konnten.

- Die Prognose selber wurde für einen vorsichtig gewählten, wahrscheinlichen Parametersatz (E), für einen sehr konservativen Parametersatz (H), welche einen oberen Erwartungswert erzeugt und einen optimistischen Parametersatz (L) welcher einen unteren Erwartungswert erzeugt durchgeführt. Die Prognosen werden mit den Grenzwerten der ISO 10137 verglichen.

Das Prognosemodell für die **horizontalen** Erschütterungen auf Höhe des Daches der angrenzenden (Hoch-) Häusern zeigt, dass die Grenzwerte der ISO selbst für den oberen Erwartungswert gut eingehalten werden.

Das Prognosemodell für die **vertikalen** Erschütterungen auf den Deckenfeldern der angrenzenden Gebäude zeigt, dass die Grenzwerte der ISO selbst für den oberen Erwartungswert gut eingehalten werden.

Das Prognosemodell für die **vertikalen** Erschütterungen auf den Deckenfeldern des Pressengebäudes zeigt, dass die Grenzwerte der ISO für den oberen Erwartungswert knapp eingehalten ist.

Das Prognosemodell für die **horizontalen** Erschütterungen des geplanten Palletten Hochregallagers (Erschütterungen aus der Regalebene) zeigt, dass der vorsichtige Erwartungswert unter dem experimentell ermittelten Grenzwert von 5 – 6 mm/s liegt.

Bemerkungen:

- Die Komplexität der vorliegenden Problemstellung ist unter anderem aufgrund der vielen Unsicherheiten ausserordentlich hoch. Trotz der Umfassenden Untersuchungen und des Grossversuches, bleiben Restrisiken bestehen. Die Möglichkeit der Hubzahlanpassung von +/- 10% der Pressen um eine Frequenzverstimmung bei den resonanten Phänomenen zu erreichen wird als Backuplösung vertraglich vereinbart.

- Im Rahmen der Untersuchungen wurde erkannt, dass mit sehr kleinen Anpassungen an den Stösselkurven die Fundationskräfte enorm beeinflusst werden können ohne dass dies einen Einfluss auf die Produktionsqualität hat. Eine entsprechende Analyse beim Design neuer Werkzeuge ist zu empfehlen.

- In den Stösselbeschleunigungen sind Komponenten in der Nähe der Resonanzfrequenz der Pressenlagerung zu vermeiden. Es ist zu empfehlen eine Frequenzanalyse der Stösselkurven zu machen bevor diese von der Presse nachgefahren werden.

- Die prognostizierten vertikalen Erschütterungen im Pressengebäude selber liegen sehr nahe an den angesetzten Grenzwerten der ISO (normale Büro). Es ist zu empfehlen diesen Abstand zum Grenzwert zu vergrössern. Dazu kommen folgende Massnahmen infrage:

    - Weitere Optimierung der Stösselkurve bezüglich der Fundationskräfte.

    - Erhöhung der Anzahl der Pfähle unter und im näheren Bereich der Pressen. Dadurch kann die zu erwartende Schwinggeschwindigkeit deutlich reduziert werden, da die Deformationen des Gebäudes im Wesentlichen durch die elastische Pfahlverkürzung bestimmt sind.

- Bei und nach Inbetriebnahme der Presse sollen Erschütterungsmessungen durchgeführt werden.