

Baudynamische Berechnung eines hochabgestimmten Blockfundaments für einen Hochleistungskompressor für Wasserstoff

DI Alois Zorn

Zorn & Nowy ZT GmbH, Wien, Österreich

DI Dr.techn. Timur Uzunoglu

convex ZT GmbH, Graz, Österreich

KURZFASSUNG:

Die sich neu entwickelnde Wasserstoffwirtschaft erfordert den Einsatz von Hochleistungskompressoren zur Verdichtung von gasförmigem Wasserstoff. Diese Kompressoren üben bei niedrigen Drehzahlen hohe dynamische Lasten zufolge oszillierender Kolbenkräfte in überwiegend horizontaler Richtung auf deren Fundamente aus Stahlbeton aus. Die rechnerische Nachweisführung erfordert eine präzise Betrachtung des Gesamtsystems Kompressor, Fundament und Baugrund. Zur Ermittlung der baulastischen Parameter des Baugrunds werden Crosshole-Tests durchgeführt, mittels denen die Laufzeit von Kompressions- und Scherwellen zwischen Bohrlöchern gemessen und daraus der Schubmodul G ermittelt wird. Die Modellierung des Baugrunds und die des Stahlbetonfundaments erfolgt nach unterschiedlichen Materialmodellen, somit wird die zutreffende Erfassung der Bauwerk-Baugrund Interaktion besonders wichtig. Im vorliegenden Fall wurde das Gesamtsystem zuerst mit der FE-Software PLAXIS 3D berechnet, und aus den ermittelten Setzungen zufolge der dynamischen Lasten der dynamische Bettungsmodul abgeleitet. Dieser Bettungsmodul wurde bei der darauffolgenden Ermittlung der Eigenfrequenzen und Schwingamplituden des Fundaments mit der FE-Software InfoCAD eingesetzt.

1 Einleitung

Das Konsortium aus Siemens Energy und STRABAG baut im Auftrag der OMV die 140 MW Elektrolyseanlage UpHy Large in Bruck an der Leitha, Österreich. Die Anlage wird an die Raffinerie Schwechat angebunden und der grüne Wasserstoff so für industrielle Prozesse nutzbar gemacht.

1.1 Aufgabenstellung

Der in der Elektrolyseanlage erzeugte Wasserstoff wird mittels zweier Hubkolbenkompressoren von Siemens Energy verdichtet, deren Fundamente auszulegen und baulastisch zu berechnen sind. Es muss sichergestellt werden, dass die Schwingamplituden des Fundaments bei Betrieb des Kompressors nicht den zulässigen Grenzwert überschreiten. Dazu muss der Baugrund verbessert,

und die Länge und Anordnung der dafür vorgesehenen Betonstopfsäulen bestimmt werden.

1.2 Herausforderungen

Die Hubkolbenkompressoren werden mit einer konstanten, niedrigen Drehzahl von 371 U/min (entspricht 6,18 Hz) betrieben, und haben systembedingt hohe dynamische Lasten zufolge oszillierender Kolbenkräfte. Diese dynamischen Lasten wirken nahezu ausschließlich in der horizontalen Ebene, sodass insbesondere die horizontalen Eigenfrequenzen zutreffend ermittelt werden müssen. Die niedrige Erregerfrequenz erfordert eine hohe Abstimmung des Fundaments (Verhältnis Eigenfrequenz Gesamtsystem zu Erregerfrequenz > 1), um Resonanzeffekte zu vermeiden. Somit ist eine dynamische Isolierung mittels einer elastischen Schicht

unterhalb des Fundaments nicht möglich. Die Begrenzung der Schwingamplituden im Betrieb an der Fundamentoberkante auf $63,5\text{ }\mu\text{m}$ (peak-to-peak) erfordert eine gezielte Optimierung des Verhältnisses von Steifigkeit zu Masse.

Die Baugrundverhältnisse bedingen eine gezielte Bodenverbesserung, um sowohl die vertikale als auch horizontale Steifigkeit der Lagerung deutlich anzuheben und das gewünschte Abstimmungsverhältnis Erregerfrequenz zu Eigenfrequenz zu ermöglichen.

Der hohe Grundwasserspiegel mit $-4,0\text{ m}$ unter Geländeoberkante (GOK) erfordert eine Ermittlung der Schwinggeschwindigkeiten an der Fundamentunterkante zur Beurteilung, ob die verbleibenden Schwingungen über das Grundwasser an benachbarte Bereiche übertragen werden können.

2 Eingangsdaten

2.1 Kompressor

2.1.1 Typ des Kompressors

Es handelt sich um einen horizontalen 6-Kurbel Hochleistungs-Hubkolbenkompressor vom Siemens Energy Typ HHE-VG mit einem 5-stufigen Aufbau in ungeschmierter Ausführung, einer konstanten Drehzahl von 371 U/min , einem Ansaugdruck von 1 bar , einer Förderleistung von $32.000\text{ Nm}^3/\text{h}$ und einem Enddruck von ungefähr 60 bar für die Verdichtung von mittels Elektrolyse erzeugten, gasförmigen grünen Wasserstoff.

2.1.2 Dynamische Lasten des Kompressors

Die oszillierenden Unwuchtkräfte und -momente, welche durch den Betrieb des Kompressors bei der Betriebsdrehzahl von 371 U/min ($6,18\text{ Hz}$) entstehen, werden vom Hersteller wie folgt angegeben:

(1) Primärlasten

Diese Lasten treten mit der einfachen Betriebsfrequenz des Kompressors von $6,18\text{ Hz}$ auf und resultieren sowohl aus rotierenden als auch aus oszillierenden Massen.

- max. horizontale Primärkraft: $144,5\text{ kN}$
- max. horizontales Primärmoment: $87,9\text{ kNm}$
- vertikale Komponenten: $0,0\text{ kN}$ bzw. kNm

Die vertikale Primärkraft sowie das vertikale Moment betragen $0,0\text{ kN}$ bzw. $0,0\text{ kNm}$, da die rotierenden Massen vollständig ausgeglichen sind.

(2) Sekundärlasten

Diese Lasten treten mit der doppelten Betriebsfrequenz des Kompressors von $12,36\text{ Hz}$ auf und entstehen ausschließlich durch die oszillierenden Massenanteile in Richtung der Kolbenlaufbahn.

- max. horizontale Sekundärkraft: $24,1\text{ kN}$
- max. horizontales Sekundärmoment: $14,6\text{ kNm}$
- vertikale Komponenten: $0,0\text{ kN}$ bzw. kNm

Systembedingt treten keine vertikalen Sekundärlasten auf.

Sämtliche Kräfte und Momente werden als am Kurbelwellenmittelpunkt angreifend definiert. Da es sich um einen horizontalen Hubkolbenkompressor handelt, erfolgt die dynamische Anregung des Fundaments nahezu ausschließlich in der horizontalen Ebene.

2.1.3 Die Befestigung des Kompressors auf dem Fundament

Der Kompressor wird mit vorgespannten Ankerbolzen starr mit dem Fundament verbunden.

2.1.4 Der Motor

Der Kompressor wird von einem elektrischen Motor angetrieben, welcher ebenfalls mit vorgespannten Ankerbolzen starr mit dem Fundament verbunden ist.

Die dynamischen Lasten des Motors sind im Verhältnis zu den dynamischen Lasten des Kompressors sehr gering, werden bei der Berechnung zwar berücksichtigt, aber hier nicht weiter angeführt.

2.1.5 Baudynamische Anforderungen des Kompressorherstellers

Der Kompressorhersteller fordert, dass im Betrieb an der Fundamentoberkante die Schwingamplitude von $63,5\text{ }\mu\text{m}$ (peak-to-peak) in jeder Ebene nicht überschritten werden darf.

2.1.6 Baudynamische Anforderungen der Regelwerke

Die DIN 4024, Teil 2 [1] fordert, dass im Falle einer Hochabstimmung die erste Eigenfrequenz des Gesamtsystems Fundament-Baugrund mindestens 20% höher als die Erregerfrequenz sein soll.

Der ACI 351.3R-18 [2] fordert, dass bei einer Hochabstimmung von Fundamenten für Kolbenmaschinen die erste Eigenfrequenz des Gesamtsystems Fundament-Baugrund einen Sicherheitsabstand von mindestens 20 % zur primären Erregerfrequenz sowie zu deren zweiter Harmonischen (zweifache Grundfrequenz) aufweist.

Die ISO 10816, Teil 8 [3] führt die maximal zulässigen Werte und die Bereiche der zulässigen r.m.s. Schwingwege, Schwinggeschwindigkeiten und Schwingbeschleunigungen für horizontale Kompressoren in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz an. Die Richtlinie EFRC [4] führt die Grenzwerte und Bereiche der ISO 10816 Teil 8 ebenfalls an.

Compressor system part	r.m.s vibration displacement values for horizontal compressors mm		
	Evaluation zone boundary		
	A/B	B/C	C/D
Foundation	0,032	0,048	0,072

Abbildung 1 Exzerpt von Table 2 der ISO 10816, Teil 8

2.2 Fundament

2.2.1 Typ des Fundaments

Es wird ein flach fundiertes Blockfundament aus Stahlbeton vorgesehen. Auf der Fundamentplatte mit den Grundrissabmessungen 13,65 m x 13,79 m und einer Dicke von 2,5 m werden Sockel mit einer Höhe bis zu 2,4 m angeordnet (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3).

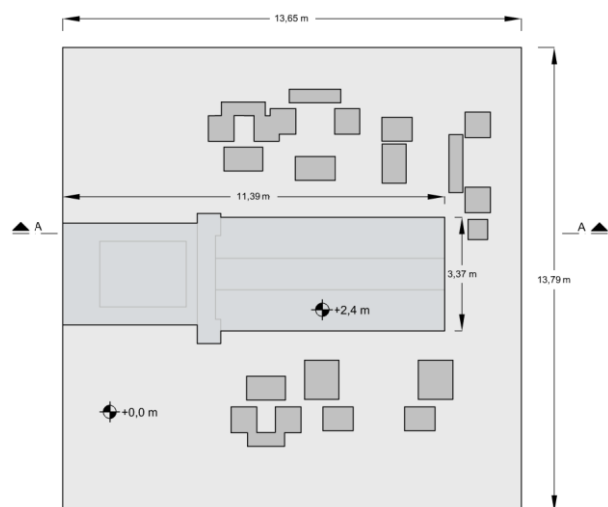


Abbildung 2 Grundriss des Kompressorfundaments

Um eine Schwingungsübertragung von dem Fundament auf die umgebende Bodenplatte des Kompressorgebäudes zu verhindern, wurde eine rundumlauende Fuge mit Inspektionsgang vorgesehen (siehe Abbildung 3).

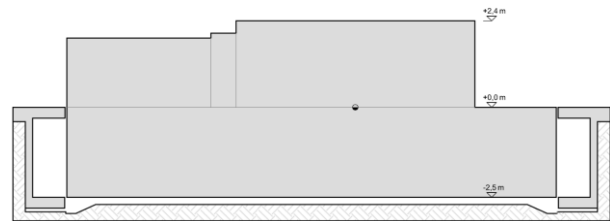


Abbildung 3 Schnitt des Kompressorfundaments

2.2.2 Die baulastischen Parameter des Fundaments

Die baulastischen Parameter des Fundaments aus Stahlbeton sind seine Masse, Dämpfung und Steifigkeit, wie es aus der Grundgleichung der Dynamik (1) hervorgeht:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = P(t) \quad (1)$$

Dabei stellt $M\ddot{x}(t)$ die Trägheitskraft, $C\dot{x}(t)$ die Dämpfungskraft und $Kx(t)$ die Federkraft auf der Widerstandsseite, und $P(t)$ die dynamische Anregung auf der Lastseite dar.

2.3 Baugrund

2.3.1 Baugrundverhältnisse

Das Baufeld liegt im Bereich von quartären (postglazial bis jungpleistozän) lehmig-sandig-schottrigen Ablagerungen lokaler Gerinne bzw. des Flusses Leitha. Der Baugrund ist geschichtet, die statischen Bodenkennwerte der Schichten sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 Statische Bodenkennwerte

Schicht	Beschreibung	Dicke [m]	Reibungswinkel [Grad]	Kohäsion [kN/m²]
A	Schluff	1,5	25	1
B	Feinsand	6	30	0,1
C	Schluff	4,2	22,5	20

Der geologische Aufbau besteht aus überwiegend Feinsand in den oberen Schichten, und aus Schluff in den tiefer liegenden Schichten. Der Grundwasserspiegel liegt bei -4,0 m unter GOK.

Die Fundamentunterkante befindet sich auf 161,5 m NN, die Unterkante der vorgesehenen Betonstopfsäulen befindet sich auf 150,0 m NN.

2.3.2 Die Baugrunduntersuchungen

In der ersten Baugrunduntersuchung wurden die Bodenschichten und die statischen Baugrundparameter Reibungswinkel und Kohäsion ermittelt.

In der zweiten Baugrunduntersuchung wurden die dynamischen Baugrundparameter Schubmodul, Poisson-Zahl und E-Modul ermittelt. Mit diesen Parametern können die Steifigkeitseigenschaften des Baugrunds mittels eines einphasigen, elastischen und isotropen Stoffmodells, wie es für die vorliegende Problemstellung mit kleinen Schubverzerrungen bis zu 10^{-5} üblicherweise verwendet wird, beschrieben werden.

Zur Bestimmung dieser Parameter wurden zwei Crosshole-Tests an der Stelle des zu errichtenden Fundaments durchgeführt, wobei zwei unterschiedliche Scherwellenquellen zum Einsatz kamen. Der Abstand zwischen den Bohrungen betrug ca. 9,95 m. Die Messungen erfolgten bis zu einer Tiefe von 131,5 m NN mit einem vertikalen Messintervall von 1 m. Aus den Scherwellenlaufzeiten (horizontal und vertikal polarisiert) und dem Abstand zwischen den Bohrungen wurden die S-Wellengeschwindigkeiten $V_{s,H}$ und $V_{s,V}$ berechnet. Aus den P-Wellenlaufzeiten und dem Abstand zwischen den Bohrungen wurde die P-Wellengeschwindigkeit V_p ermittelt. Die dynamischen Baugrundparameter wurden unter Verwendung der Dichte des Bodens gemäß den Gleichungen (2), (3) und (4) wie folgt berechnet:

$$\text{Dynamischer Schubmodul: } G = V_s^2 \cdot \rho \quad (2)$$

$$\text{Poisson-Zahl: } \nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (3)$$

$$\text{Dynamischer E-Modul: } E_0 = 2 G_0 (1 + \nu) \quad (4)$$

2.3.3 Die baulynamischen Parameter des Baugrunds

Die mittels Crosshole-Test ermittelten P, S_H und S_V -Wellengeschwindigkeiten sind in Abbildung 4 dargestellt.

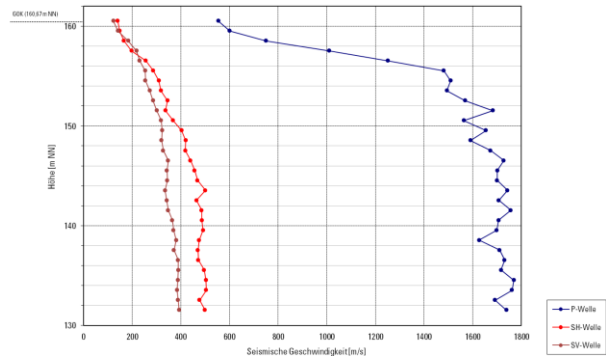


Abbildung 4 Gemessene P, S_H und S_V -Wellengeschwindigkeiten unter dem Kompressorfundament

Die mittels Crosshole-Test ermittelten baulynamischen Parameter wurden pro Schicht gemittelt, und sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2 Dynamische Bodenkennwerte

Schicht	Dicke [m]	$V_{s,H}$ [m/s]	G [kN/m ²]	E [kN/m ²]
A	1,5	141	39.790	116.590
B	6	211	89.040	263.030
C	4,2	336	225.790	665.630

2.4 Gesamtsystem Kompressor-Fundament-Baugrund

Die Wechselwirkung zwischen Kompressor, Fundament und Baugrund erfordert die Betrachtung des Gesamtsystems. Die rechnerische Schnittstelle des Fundaments zu dem Baugrund wird über den Bettungsmodul erfasst, dessen zutreffende Ermittlung entscheidend für die korrekte dynamische Abstimmung des Gesamtsystems ist.

3 Vorgangsweise der baulynamischen Berechnung

Die baulynamische Berechnung erfolgte mittels Finite-Elemente-Modellen am Gesamtsystem, mit jeweils zwei unterschiedlichen Schwerpunkten.

- (1) Das Gesamtsystem wurde mit Schwerpunkt Baugrund mit der 3D Finite-Elemente (FE) Software PLAXIS [5] berechnet. PLAXIS 3D ist primär auf zeitabhängige, nichtlineare geotechnische Analysen ausgelegt, und führt keine Eigenwertanalyse des modellierten Systems durch. Somit können mit PLAXIS 3D die Eigenfrequenzen des Gesamtsystems nur indirekt ermittelt werden, indem nach dem Aufbringen der dynamischen Last durch eine

Fourier-Transformation der Systemantwort an einem Knoten die dominanten Eigenfrequenzen bestimmt werden. Die Berechnung mit PLAXIS 3D diente der Ermittlung der Setzungen zufolge der dynamischen Anregung, um daraus den dynamischen Bettungsmodul abzuleiten.

- (2) Das Gesamtsystem wurde mit dem Schwerpunkt Fundamentblock mit der 3D FE-Software InfoCAD [6] berechnet. InfoCAD ist primär auf lineare, statische Berechnungen von Tragwerken ausgelegt, und führt eine klassische Modalanalyse des modellierten Systems durch. Die Berechnung mit InfoCAD dient der Ermittlung der Eigenfrequenzen und Eigenformen sowie der Berechnung der Schwingamplituden und Schwinggeschwindigkeiten an ausgewählten Knoten mittels erzwungener Schwingungsberechnung (stationärer Response im eingeschwungenen Zustand).

3.1 Fundamententwurf nach Abstimmungsverhältnis

Aufgrund der niedrigen Erregerfrequenz von $f_e = 6,18$ Hz in Kombination mit den Bodenverhältnissen wurde beschlossen, das Fundament hochabgestimmt auszulegen, sodass die erste Eigenfrequenz des Gesamtsystems sowohl über der einfachen Erregerfrequenz von 6,18 Hz als auch der doppelten Erregerfrequenz von 12,36 Hz liegt. Dazu wurde der dynamische Bettungsmodul des mittels Betonstopfsäulen verbesserten Baugrunds auf Basis von Erfahrungswerten vorläufig abgeschätzt. Die Ermittlung wurde anhand der Massen und Federkonstanten wie folgt durchgeführt:

$$\begin{aligned} \text{Masse Fundament } m_F &= 1.444,3 \text{ to} \\ \text{Masse Kompressor } m_K + \text{Motor } m_M &= 278,8 \text{ to} \end{aligned}$$

vertikaler dynamischer Bettungsmodul Baugrund:

$$k_{sv,dyn} = 150.000,0 \text{ kN/m}^3$$

vertikale Federkonstante Baugrund:

$$k_{Baugrund \text{ vertikal},dyn} = 28.050.000,0 \text{ kN/m}$$

horizontaler dynamischer Bettungsmodul Baugrund

$$k_{sh,dyn} = 100.000,0 \text{ kN/m}^3$$

horizontale Federkonstante Baugrund

$$k_{Baugrund \text{ horizontal},dyn} = 18.700.000,0 \text{ kN/m}$$

erste vertikale Eigenfrequenz:

$$f_{1,v} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_{Baugrund,vertikal}}{m_F + m_K + m_M}} = 20,3 \text{ Hz}$$

erste horizontale Eigenfrequenz:

$$f_{1,h} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_{Baugrund,horizontal}}{m_F + m_K + m_M}} = 16,6 \text{ Hz}$$

Die Steifigkeit des Baugrundes stellte sich hiermit als der wesentliche Parameter für die Hochabstimmung dar, weil eine Erhöhung der Fundamentmasse zu einer niedrigeren Eigenfrequenz führt (siehe Abbildung 5).

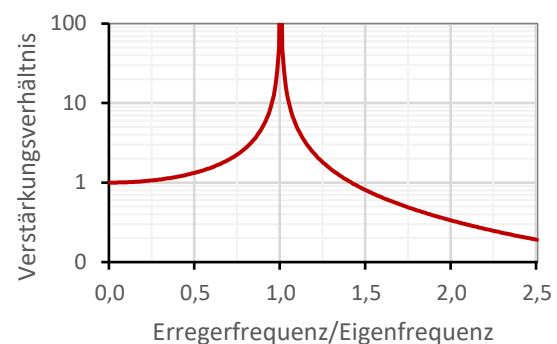


Abbildung 5 Verstärkungsverhältnis der Schwingungsantwort bei Hoch- und Tiefabstimmung

Bei einer Hochabstimmung muss die Systemsteifigkeit erhöht werden, ohne dabei die Masse zu erhöhen. Deshalb werden die Betonstopfsäulen mit dem Fundament statisch nicht verbunden und dienen ausschließlich als Bodenverbesserungsmaßnahme.

3.2 FE-Modellierung Gesamtsystem mit Schwerpunkt Baugrund

3.2.1 FE-Modell mit PLAXIS 3D

Die Modellierung des Baugrundes erfolgte mit unterschiedlichen Stoffgesetzen, und zwar mit dem „Hardening Soil Model (HS)“, dem „Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness (HSS)“ sowie einem linear-elastischen Ansatz. Bei den Berechnungen wurde die spannungsabhängige Zunahme des Steifemoduls berücksichtigt. Bei dem Bodenmodell „Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness“ wurde auch die Veränderung der Steifigkeit in Abhängigkeit der Verformung berücksichtigt. Der Schubmodul G , ermittelt mit dem Crosshole-Test, wurde bei der Eingabe in PLAXIS

3D auf einen Referenzdruck von 100 kN/m^2 normalisiert. Die Betonstopfsäulen wurden als Betonkörper mit einem Durchmesser von 60 cm und einer Länge von 11,5 m modelliert (siehe Abbildung 6).

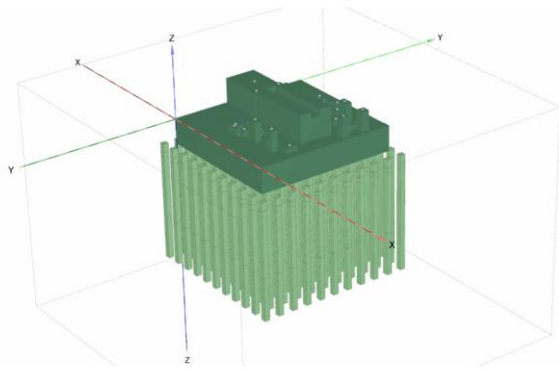


Abbildung 6 Das PLAXIS 3D FE-Modell mit den Betonstopfsäulen

Die Berechnung erfolgt in mehreren Lastschritten, welche den Bauzuständen entsprechen:

- Erster Schritt: Erster Aushub bis 160,7 m NN
- Zweiter Schritt: Aufschüttlage bis zur Fundamentunterkante auf 161,5 m NN und Herstellung der Betonstopfsäulen
- Dritter Schritt: Herstellung des Fundaments inklusive der Sockel
- Vierter Schritt: Aufbringen der statischen Lasten des Kompressors
- Fünfter Schritt: Aufbringen der dynamischen Lasten des Kompressors

3.2.2 Variantenuntersuchung

Um die Sensitivität der Berechnung auf das gewählte Materialmodell und auf die Eingangsparameter zu ermitteln, wurden unterschiedliche Varianten untersucht.

Als endgültiges Modell wurde die Berechnung mit dem Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness und den Baugrundparametern aus den Cross-hole-Tests ohne Dämpfung festgelegt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Dynamische Baugrundparameter des endgültigen Modells

Schicht	Beschreibung	Dicke [m]	G [kN/m ²]	E [kN/m ²]
A	Schluff	1,5	30.000	80.000
B	Feinsand	6	100.000	80.000
C	Schluff	4,2	337.000	200.000

3.2.3 Ermittelte Schwingwege- und Geschwindigkeiten

Mit dem endgültigen Modell wurden folgende Schwingwege- und geschwindigkeiten an der Fundamentunterkante ermittelt (siehe Abbildung 7).

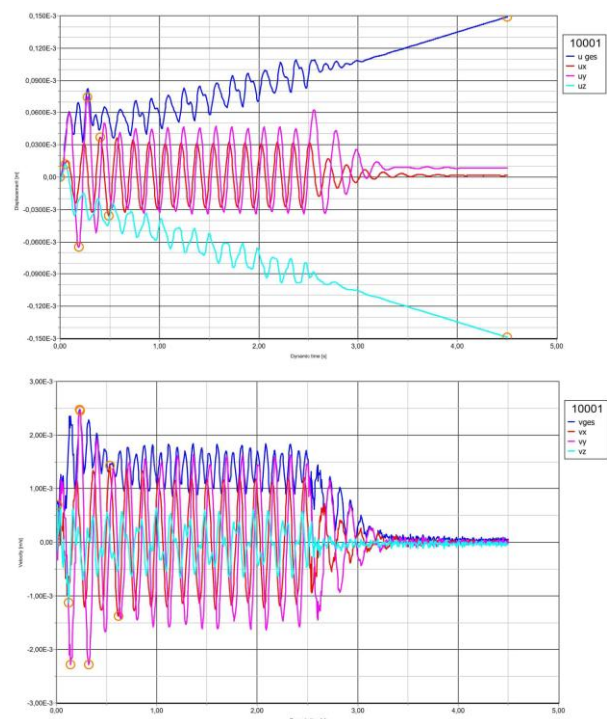


Abbildung 7 Schwingwege- und geschwindigkeiten an der Fundamentunterkante

3.2.4 Ermittlung der dynamischen Bettungsmoduli und Federsteifigkeit der Betonstopfsäulen

Mit dem endgültigen Modell wurden folgende maximalen Bodenpressungen und Setzungen bei Berücksichtigung des Bauablaufs im Eckpunkt an der Fundamentunterkante ermittelt:

- Bodenpressungen vertikal 41 kN/m^2 ,
- Bodenpressungen horizontal 11 kN/m^2 ,
- Vertikalverformung aufgrund der statischen Lasten $150 \text{ }\mu\text{m}$,
- Amplitude der Vertikalverformung aufgrund der dynamischen Erregung $20 \text{ }\mu\text{m}$,

- Amplitude der Horizontalverformung aufgrund der dynamischen Erregung $78 \mu\text{m}$.

Daraus wurden die dynamischen Bettungsmoduli in vertikaler und horizontaler Richtung abgeleitet:

- vertikaler dynamischer Bettungsmodul:
 $41 \text{ kN/m}^2 / (150 + 20) \cdot 10^{-6} \text{ m} \sim 241.180 \text{ kN/m}^3$
- horizontaler dynamischer Bettungsmodul:
 $11 \text{ kN/m}^2 / 78 \cdot 10^{-6} \text{ m} \sim 141.030 \text{ kN/m}^3$

In weiterer Folge wurden die vertikalen- und horizontalen, dynamischen Federsteifigkeiten der Betonstopfsäulen für die nachfolgende Berechnung des Fundamentblocks mit InfoCAD ermittelt:

- vertikale, dynamische Federsteifigkeit einer Betonstopfsäule:
 $c_v = 1.850 \text{ MN/m}$
- horizontale, dynamische Federsteifigkeit einer Betonstopfsäule:
 $c_h = 231 \text{ MN/m}$

3.3 FE-Modellierung Gesamtsystem mit Schwerpunkt Blockfundament

3.3.1 FE-Modell mit InfoCAD 3D

Das Blockfundament wurde mit der 3D Finite-Elemente Software InfoCAD modelliert. Dabei wurde die Geometrie mit Flächenelementen (Schale) abgebildet. Der Kompressor und Motor wurde als Punktmasse im Schwerpunkt modelliert, und mit masselosen, starren Stäben mit den Lagerpunkten an Fundamentoberkante verbunden (siehe Abbildung 8). Als modale Dämpfung wurden 3% angesetzt.

Die Berechnung erfolgte mit den in Kapitel 3.2.4 angeführten vertikalen- und horizontalen Federsteifigkeiten der Betonstopfsäulen. Die Mitwirkung des Bodens zwischen den Betonstopfsäulen wurde auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt (siehe Abbildung 9).

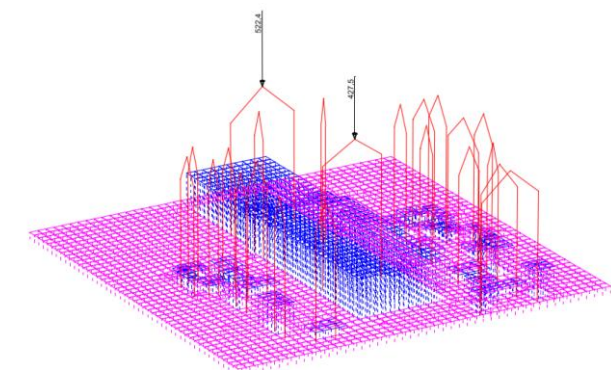
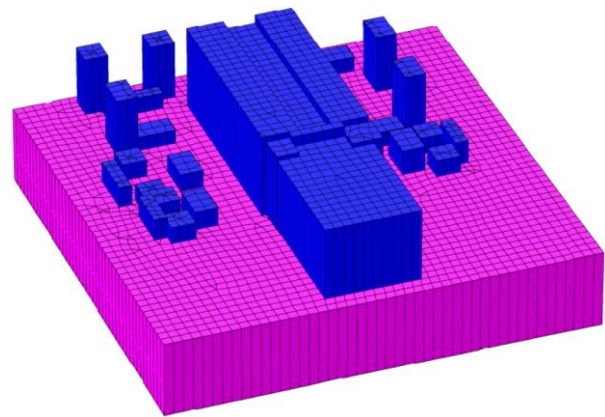


Abbildung 8 Das InfoCAD 3D FE-Modell mit den Massen von Kompressor und Motor

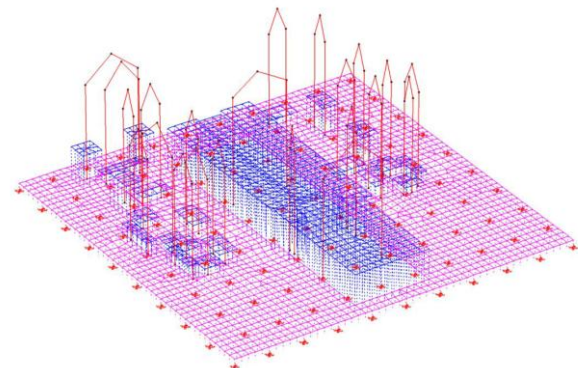


Abbildung 9 Das InfoCAD 3D FE-Modell mit den Punktlagern der Betonstopfsäulen

3.3.2 Sensitivitätsanalyse

Um die Sensitivität der Berechnung auf die dynamischen Federsteifigkeiten zu ermitteln, wurde die Berechnung auch mit jeweils um 30% niedrigeren Werten durchgeführt. Bei dem hochabgestimmten Blockfundament führen höhere Werte der Federsteifigkeiten in jedem Fall zu besseren Ergebnissen, und wurden deshalb nicht weiter untersucht.

3.3.3 Ermittelte Eigenfrequenzen und Schwingwege

Die ersten Eigenfrequenzen des Gesamtsystems und die zugehörigen Eigenformen wurden wie folgt ermittelt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4 Eigenfrequenzen des Gesamtsystems

f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	f_4 [Hz]
18,92	18,93	22,71	49,78

Die zugehörigen Eigenformen zur ersten, zweiten, dritten und vierten Eigenfrequenz sind in Abbildung 10 dargestellt. Die ersten drei Eigenfrequenzen sind Starkkörperfrequenzen, während die vierte Eigenfrequenz und die weiteren Eigenfrequenzen Biegeschwingungsformen sind.

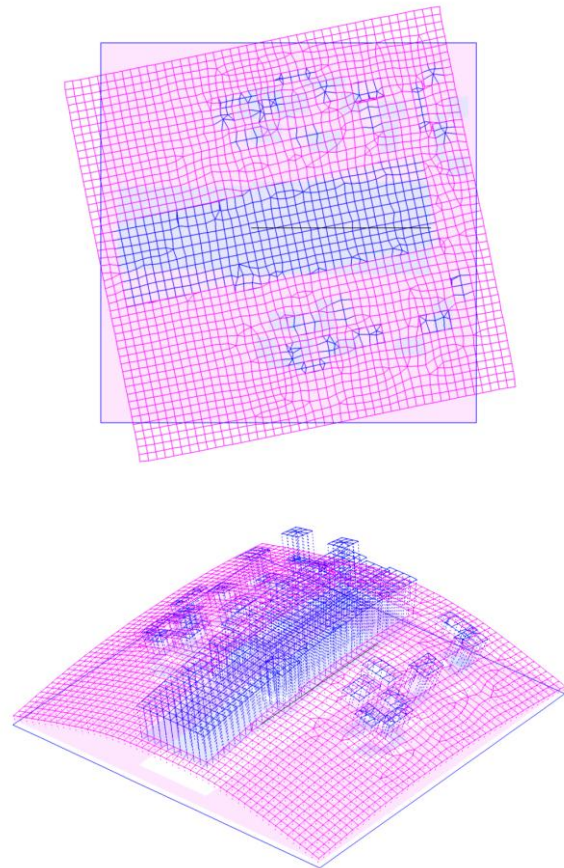
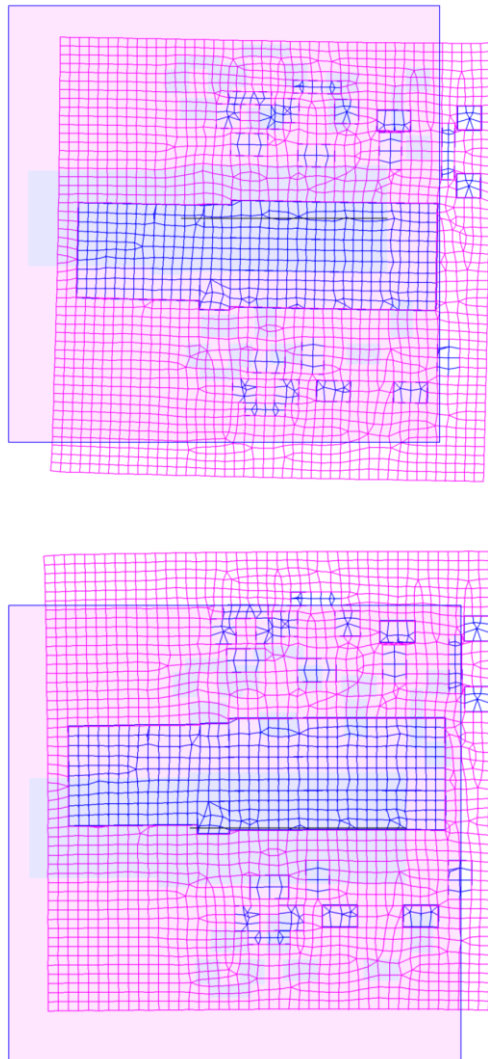


Abbildung 10 Eigenformen der ersten, zweiten, dritten und vierten Eigenfrequenz

4 Nachweisführung

4.1 Schwingungsverhalten

Das Blockfundament wurde hoch abgestimmt, die erste Eigenfrequenz des Gesamtsystems ist um 53% höher als die erste Erregerfrequenz und deren zweite Harmonische und weist damit den notwendigen Abstand zur Erregung auf:

$$\frac{f_1}{f_e} = \frac{18,92 \text{ Hz}}{12,36 \text{ Hz}} = 1,53$$

Auch die mit um 30% reduzierten Federsteifigkeiten der Betonstopfsäulen ermittelte erste Eigenfrequenz des Gesamtsystems ist um 28% höher als die erste Erregerfrequenz und deren zweite Harmonische und weist damit den notwendigen Abstand zur Erregung auf

$$\frac{f_1}{f_e} = \frac{15,90 \text{ Hz}}{12,36 \text{ Hz}} = 1,28$$

4.2 Schwingwege an Fundamentoberkante

Der vom Kompressorhersteller angegebene Grenzwert der Schwingwege in jeder Ebene mit 63,5 μm (peak-to-peak) bzw. 31,75 μm (zero-to-peak) an der

Fundamentoberkante ist einzuhalten. Dazu wurden die Schwingwege jeweils für die Erregerfrequenz bei 6,18 Hz und deren zweite Harmonische bei 12,36 Hz an der Fundamentoberkante berechnet (siehe Abbildung 11).

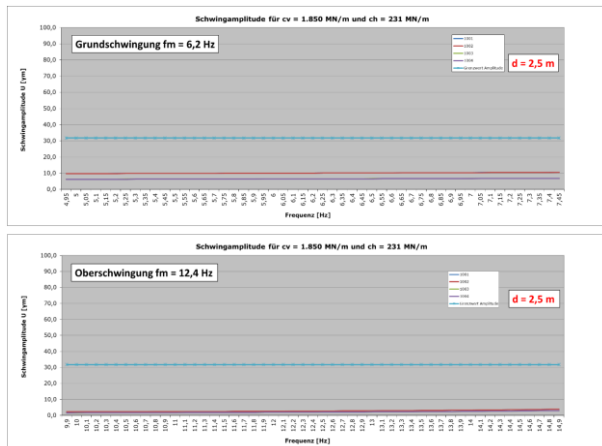


Abbildung 11 Schwingwege an der Fundamentoberkante

Das Ergebnis wurde als Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der beiden Schwingwege ermittelt, jeweils für die Schwingwege mit den vollen Federsteifigkeiten (siehe (5)) und den um 30% reduzierten Federsteifigkeiten der Betonstopfsäulen (siehe (6)). Der Grenzwert zero-to-peak wird eingehalten.

$$\sqrt{(10,5^2 + 3,8^2)} \sim 11,2 \mu\text{m} < 31,75 \mu\text{m} \quad (5)$$

$$\sqrt{(15,3^2 + 14,3^2)} \sim 20,9 \mu\text{m} < 31,75 \mu\text{m} \quad (6)$$

4.3 Schwinggeschwindigkeiten an Fundamentunterkante

Um zu beurteilen, ob die Fundamentschwingung im hoch liegenden Grundwasser an angrenzende Bauteile übertragen werden kann, wurde die Schwinggeschwindigkeit an der Fundamentunterkante berechnet (siehe Abbildung 12).

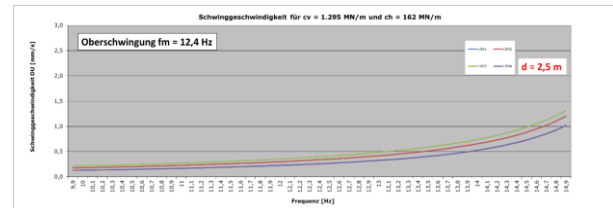
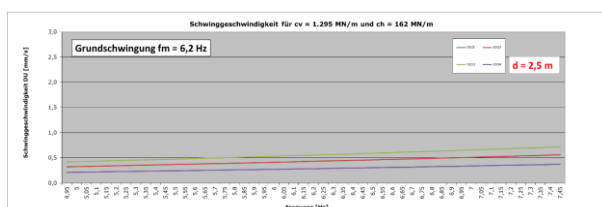


Abbildung 12 Schwinggeschwindigkeit an der Fundamentunterkante

Das Ergebnis wurde als Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der beiden Schwinggeschwindigkeiten ermittelt, jeweils für die Schwinggeschwindigkeiten mit den vollen Federsteifigkeiten (siehe (7)) und den um 30% reduzierten Federsteifigkeiten der Betonstopfsäulen (siehe (8)). Die ermittelten Schwinggeschwindigkeiten an Fundamentunterkante sind sehr gering und betragen nur 0,7 mm/s bzw. 0,9 mm/s. Somit ist eine Übertragung der im Fundament verbleibenden Schwingungen über das Grundwasser an angrenzende Bauteile auszuschließen.

$$\sqrt{(0,6^2 + 0,4^2)} \sim 0,7 \text{ mm/s} \quad (7)$$

$$\sqrt{(0,8^2 + 0,5^2)} \sim 0,9 \text{ mm/s} \quad (8)$$

5 Bauausführung

5.1 Bodenverbesserung

Es werden Betonstopfsäulen mit einem Durchmesser von 60 cm, einer Länge von 11,5 m und einem Raster von rund 1,5 m angeordnet (siehe Abbildung 13). Die Betonstopfsäulen werden mit dem Fundament nicht verbunden, um eine Erhöhung der Fundamentmasse zu vermeiden.

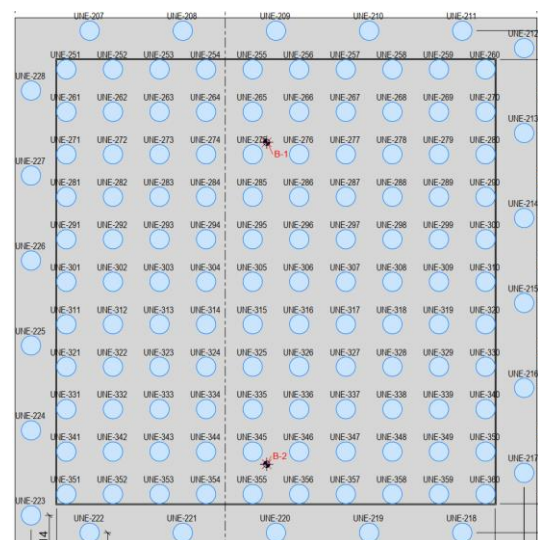


Abbildung 13 Die Anordnung der Betonstopfsäulen unter dem Kompressorfundament

5.2 Stahlbetonfundament

5.2.1 Betongüte

Die Betongüte wurde mit C30/37(56)/B3/C3A-frei/PB/GK 22 mit langsamer Festigkeitsentwicklung ($f_{ct,eff}$ nach 3 Tagen höchstens 50% der max. Zugfestigkeit f_{ctm}) festgelegt.

Der 2,5 m dicke Fundamentblock mit 470 m³ Beton wurde in einem Stück ohne Arbeitsfuge betoniert. Die Temperatur zufolge Hydratation wurde während des Betonierens mittels Temperatursensoren gemessen und aufgezeichnet, diese hat 60 °C nicht überschritten. Die aufgehenden Sockel mit 63 m³ wurden in einem zweiten Arbeitsgang hergestellt.

5.2.2 Bewehrung

Der 2,5 m dicke Fundamentblock wurde mit einer Grundbewehrung von Ø 26 mm, e = 15 cm kreuzweise oben und unten bewehrt. In der Mitte des Fundamentblocks wurde eine Lage Ø 26 mm, e = 30 cm kreuzweise angeordnet.

Die aufgehenden Sockel mit einer Höhe von bis zu 2,4 m wurden mit einer Grundbewehrung von Ø 20 mm, e = 15 cm kreuzweise bewehrt (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14 Bewehrung der aufgehenden Sockel

6 Zusammenfassung

Aufgrund der relativ niedrigfrequenten dynamischen Erregung, in Kombination mit den Bodenverhältnissen, musste das Fundament hochabgestimmt werden (Eigenfrequenz Gesamtsystem Kompressor + Fundament > Erregerfrequenz Kompressor). Das

setzt eine genaue Berechnung der Eigenfrequenzen des Gesamtsystems voraus. Dafür muss wiederum der Untergrund rechnerisch zutreffend modelliert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Stoffmodelle von Baugrund und Stahlbeton wurden zwei unterschiedliche FE-Programme verwendet, um die Schnittstelle zwischen Baugrund und Bauwerk aus Sicht der dynamischen Berechnung richtig zu erfassen. Das fertiggestellte Kompressorfundament ist in Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15 Das fertiggestellte Kompressorfundament

7 Literatur

- [1] DIN 4024, Teil 2: *Maschinenfundamente; Steife (starre) Stützkonstruktionen für Maschinen mit periodischer Erregung*, Ausgabe April 1991
- [2] ACI 351.3R-18: *Foundations for Dynamic Equipment*. American Concrete Institute, Ausgabe Jänner 2018
- [3] ISO 10816 Part 8: *Reciprocating compressor systems*, International Organization for Standardization, Ausgabe Dezember 2018
- [4] EFRC: *Guidelines for Vibrations in Reciprocating Compressor Systems*, European Forum Reciprocating Compressors (EFRC), Ausgabe März 2017
- [5] Bentley Systems, Incorporated: *PLAXIS 3D Version 2024.3 [Software]*, März 2024, <https://de.bentley.com/software/plaxis-3d/>
- [6] InfoGraph GmbH: *InfoCAD Version 25.00 x64 [Software]*, Jänner 2025, <https://www.info-graph.de/de>