

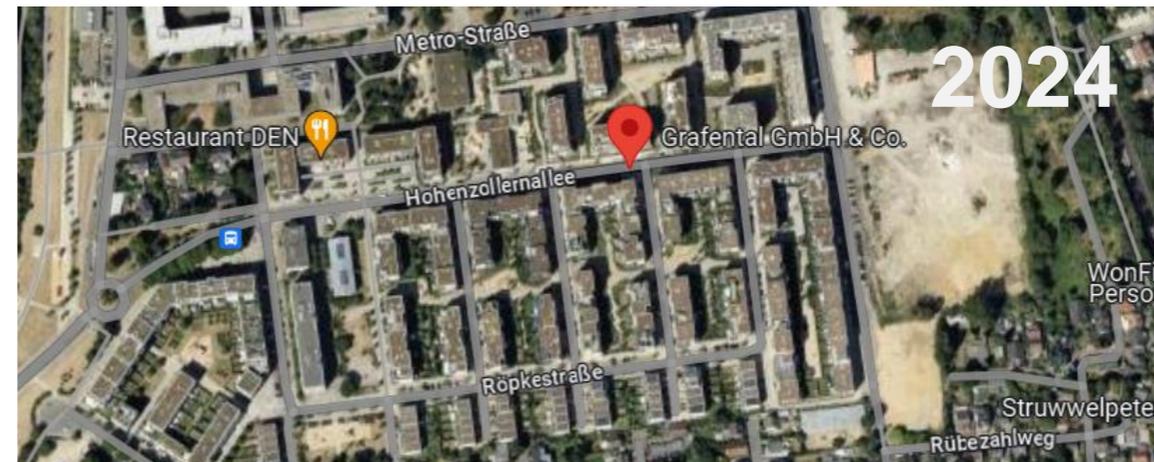
# **Tieffrequente elastische Gebäudelagerung bei einem Schulgebäude**

Thomas Jaquet

# Situation vor 4 Jahren: Urbanes Entwicklungsgebiet in der Umgebung einer Güterstrecke (d = 300m)

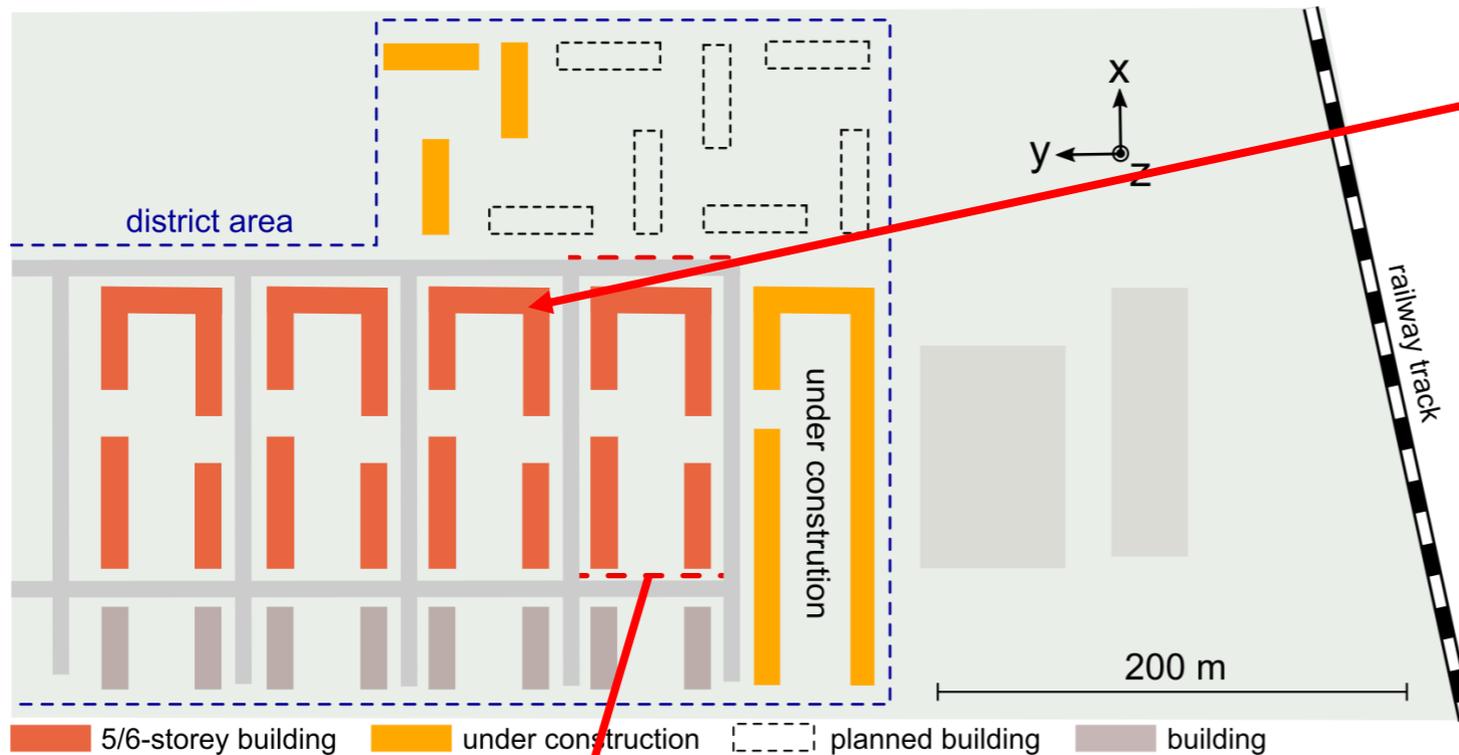


Quelle: Google



Quelle: Google

# Situation vor 4 Jahren: Urbanes Entwicklungsgebiet in der Umgebung einer Güterstrecke (d = 300m)



4-5-geschossige Gebäude

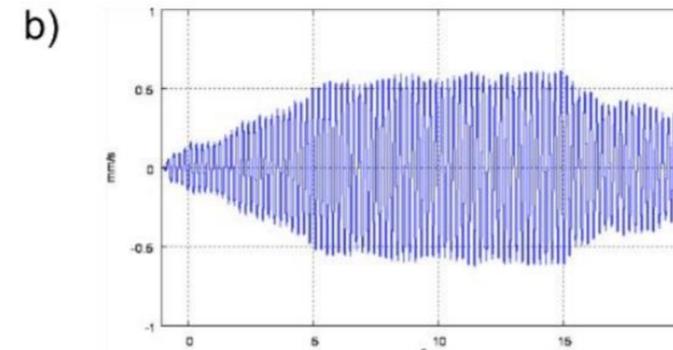
Erhebliche Erschütterungsimmissionen,  
wackelnde Hängelampen, Schockartige Erschütterungen

# Erschütterungs-Monitoring

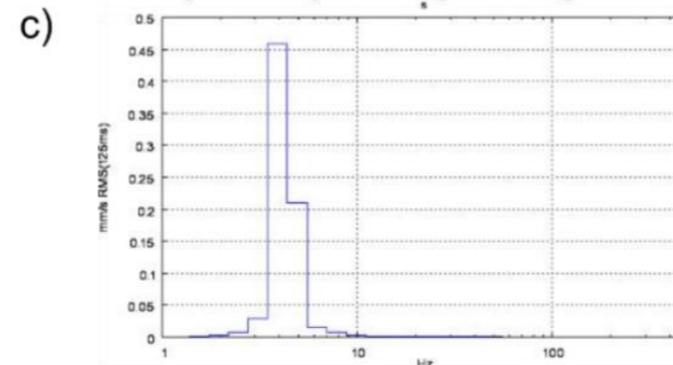


Quelle: Peutz

y-Richtung (horizontal)



$$V_{\max} = 0,63 \text{ mm/s}$$

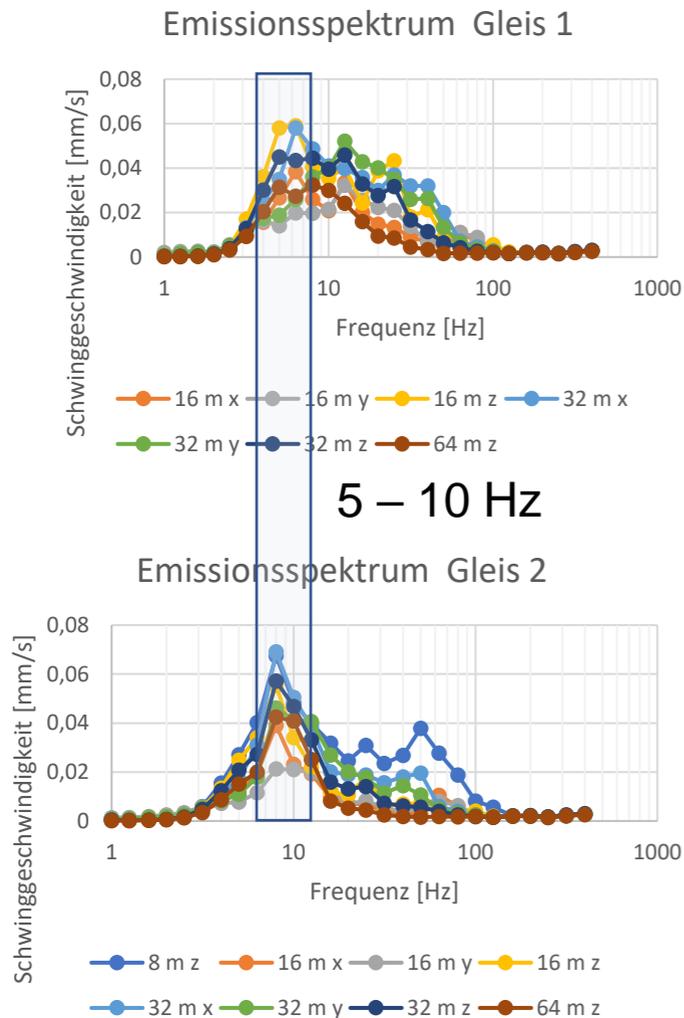


$$V_{\text{rms}} = 0,46 \text{ mm/s @ 4 Hz}$$

Langzeit Monitoring:

- ➔ Deutlich spürbare Erschütterungen
- ➔ Horizontale Gebäudeschwingungen
- ➔ Vielzahl von Ereignissen pro Tag

# Emissionsquelle: Güterzug (Zuglänge > 600 m), 130 Vorbeifahrten am Tag, 84 in der Nacht



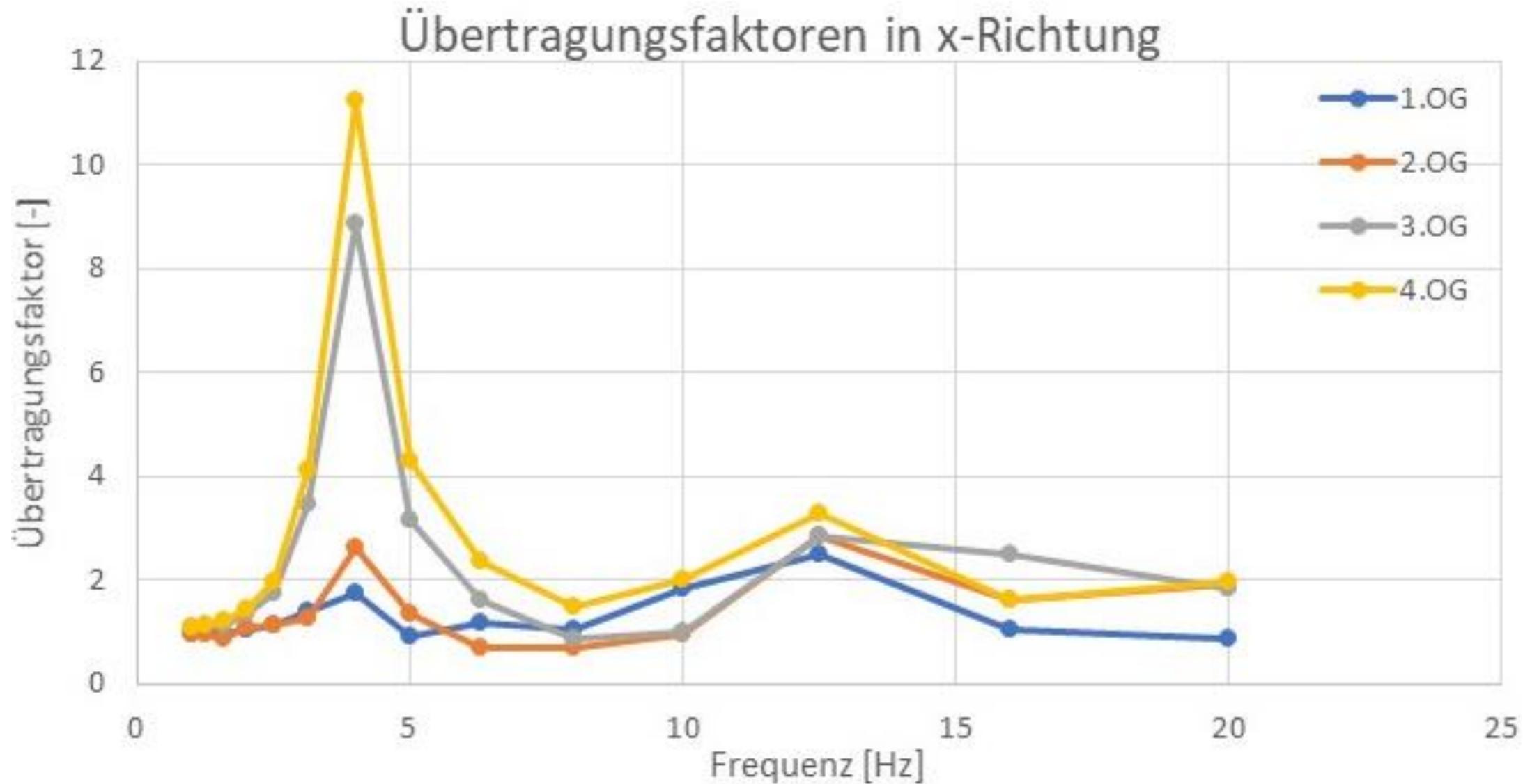
Fahrgeschwindigkeit: Gleis 1: (90 km/h), 75 – 85 km/h  
Gleis 2: (120 km/h) 75 – 85 km/h

Anregung korreliert mit Fahrgeschwindigkeit  
und Achsabstand!!

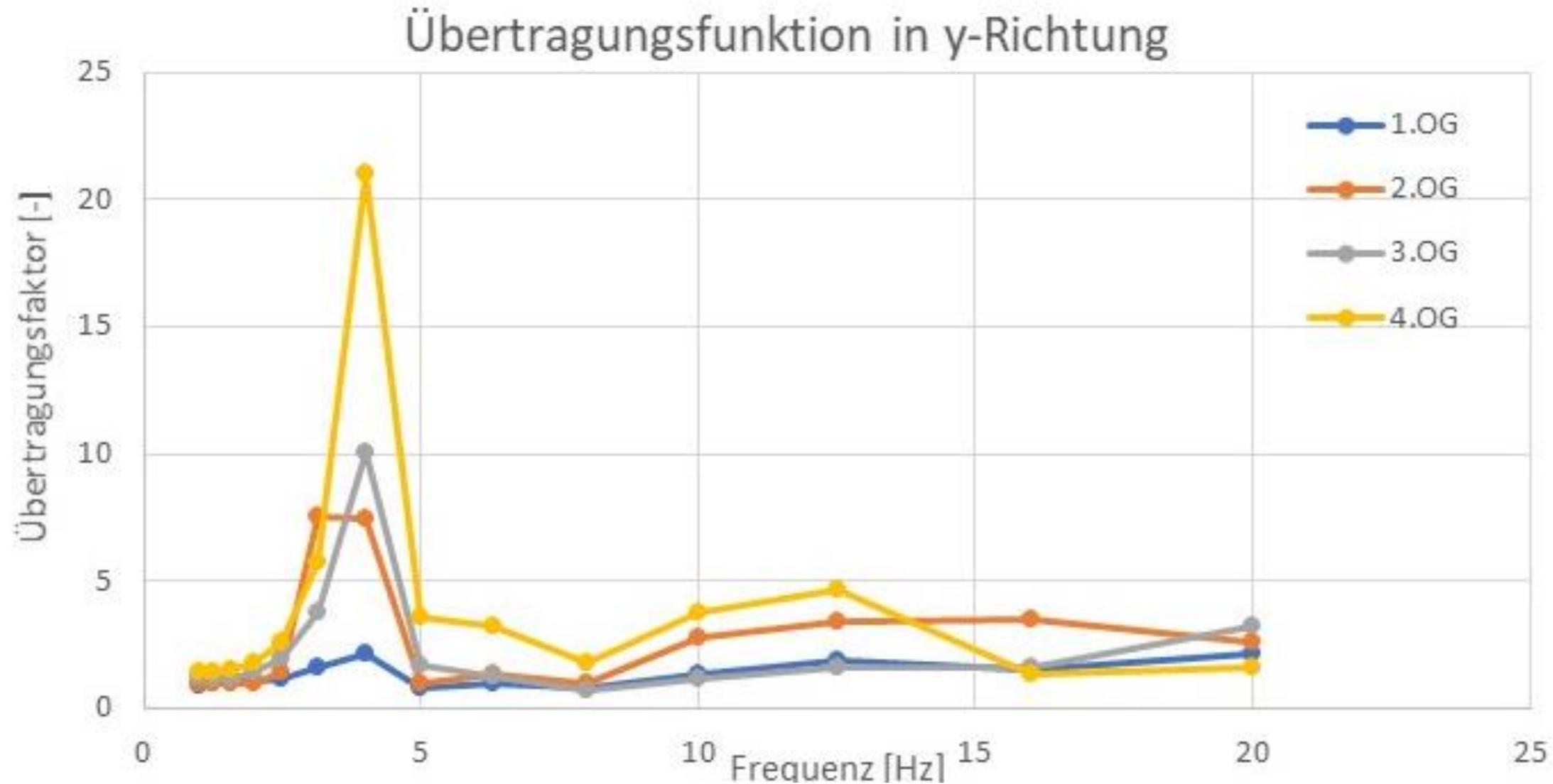


Quelle: DB

# Baudynamische Untersuchung der Wohngebäude

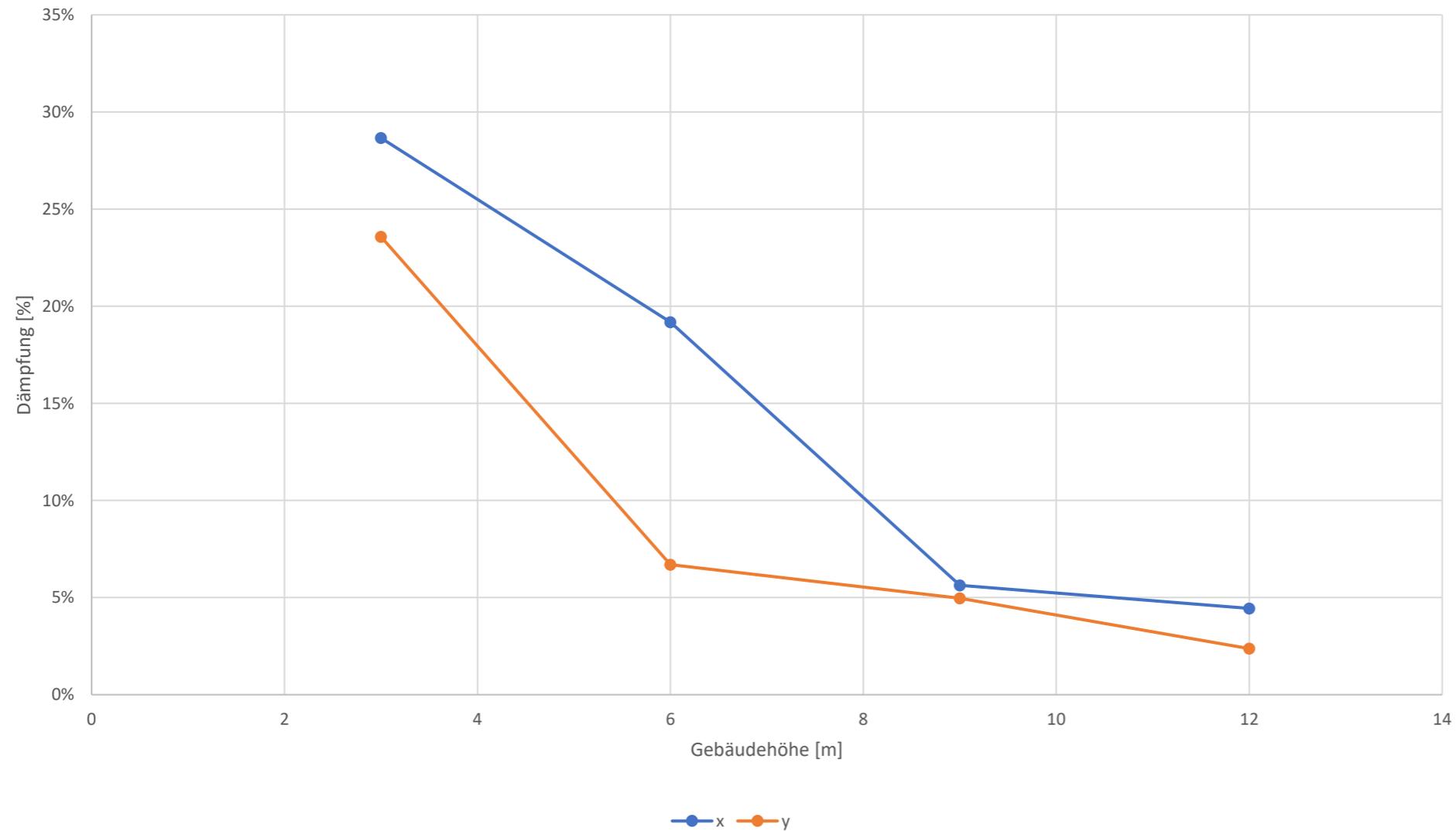


# Baudynamische Untersuchung der Wohngebäude



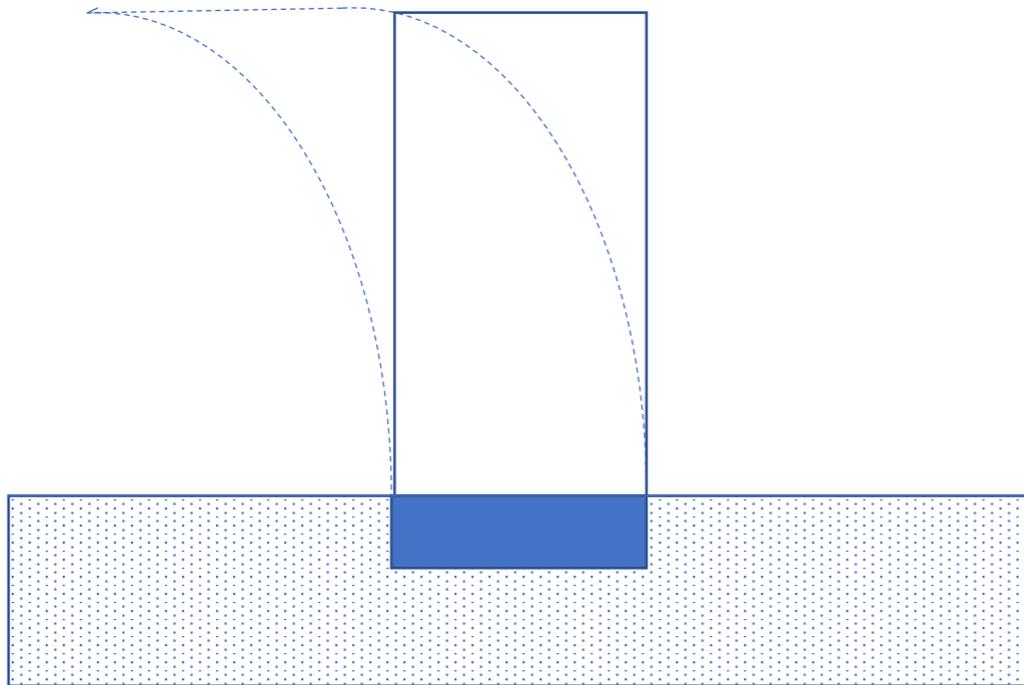
# Baudynamische Untersuchung der Wohngebäude

Gebäudedämpfung in Abhängigkeit der Höhe

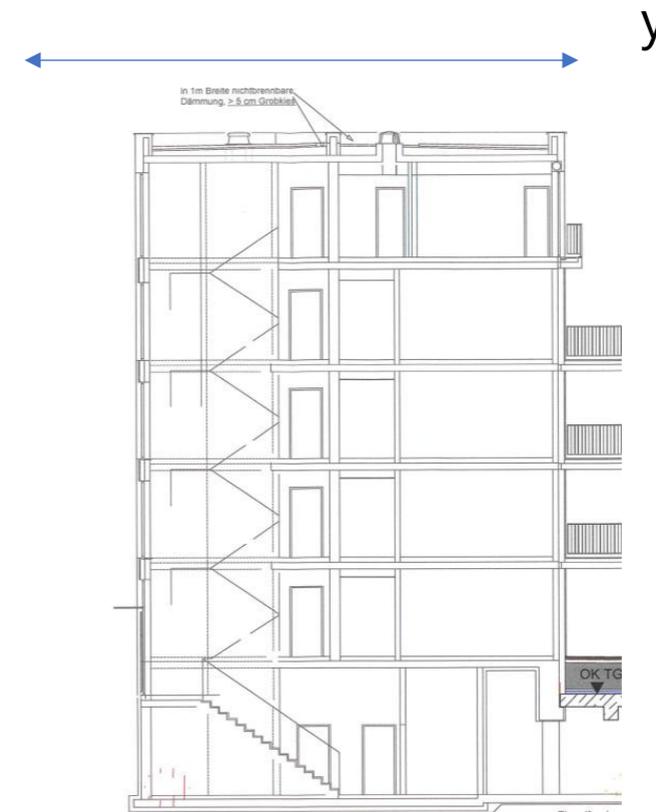


# Baudynamische Untersuchung der Wohngebäude

→ Sehr geringe laterale Bauwerksdämpfung

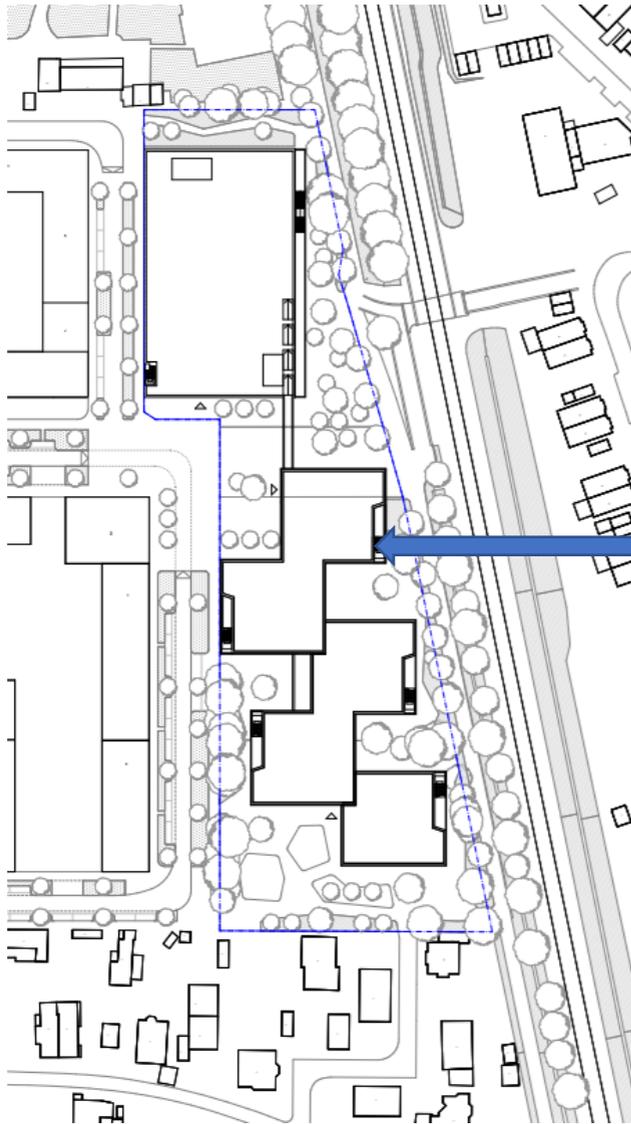


horizontal



vertikal

# Geplantes Schulgebäude

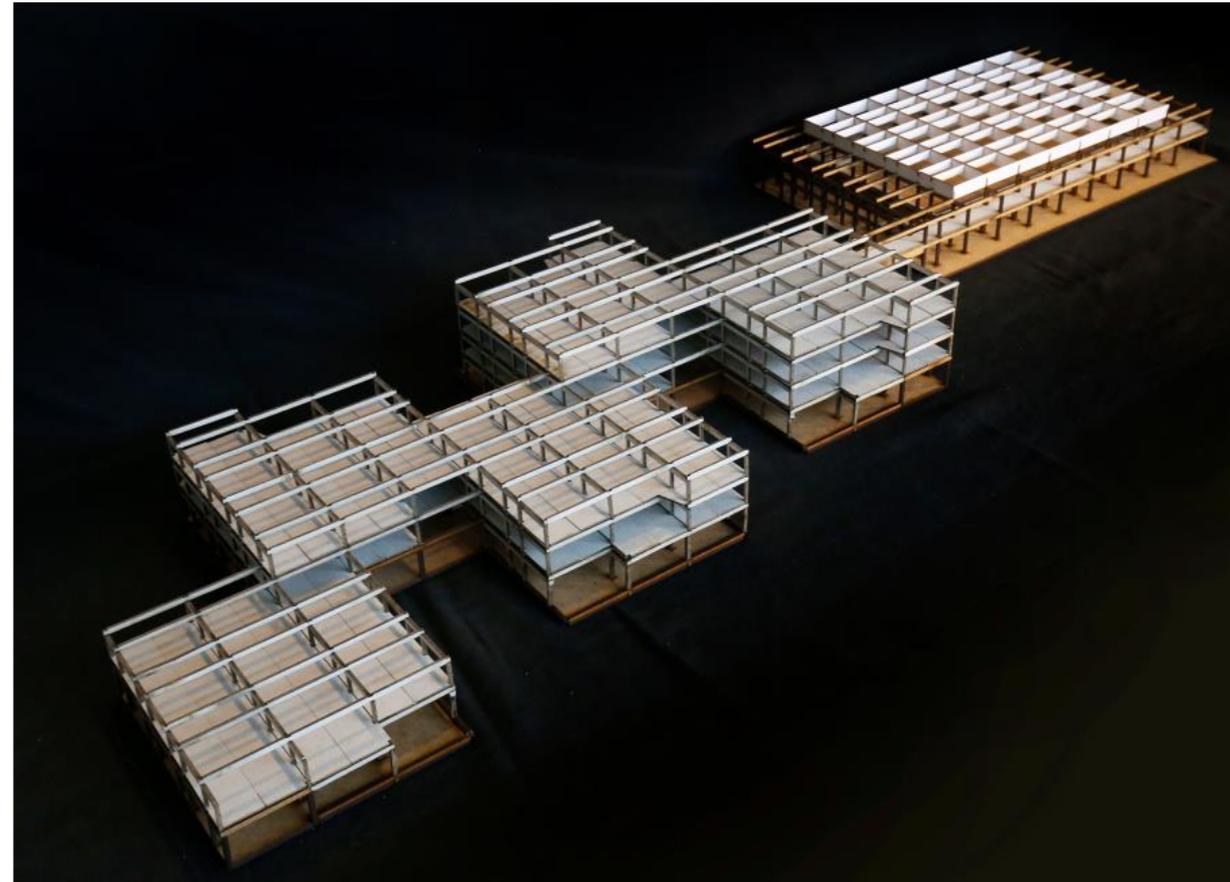


Quelle: GINA Barcelona

Entfernung zur Güterzugstrecke: 25 m

# Geplantes Schulgebäude

- 2- 4 Geschosse je Cube
- Weitgespannte Deckenfelder
- Fertigteilbauweise



Quelle: GINA Barcelona

# Geotechnik Bericht

Baugrund:

Schluff, feinsandig,

Mittelsand feinkiesig,

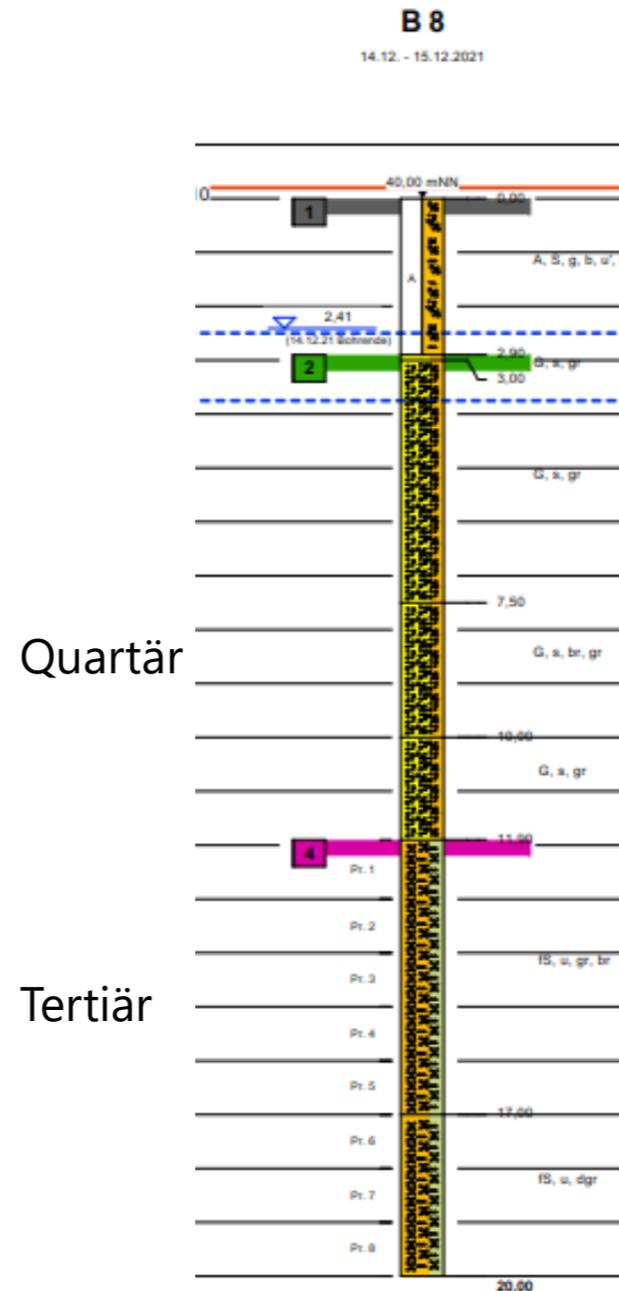
Feinsand

Dichte:

$\rho = 16 - 18 \text{ kN/m}^3$

Steifemodul:

$E_s = 25 - 60 \text{ MN/m}$

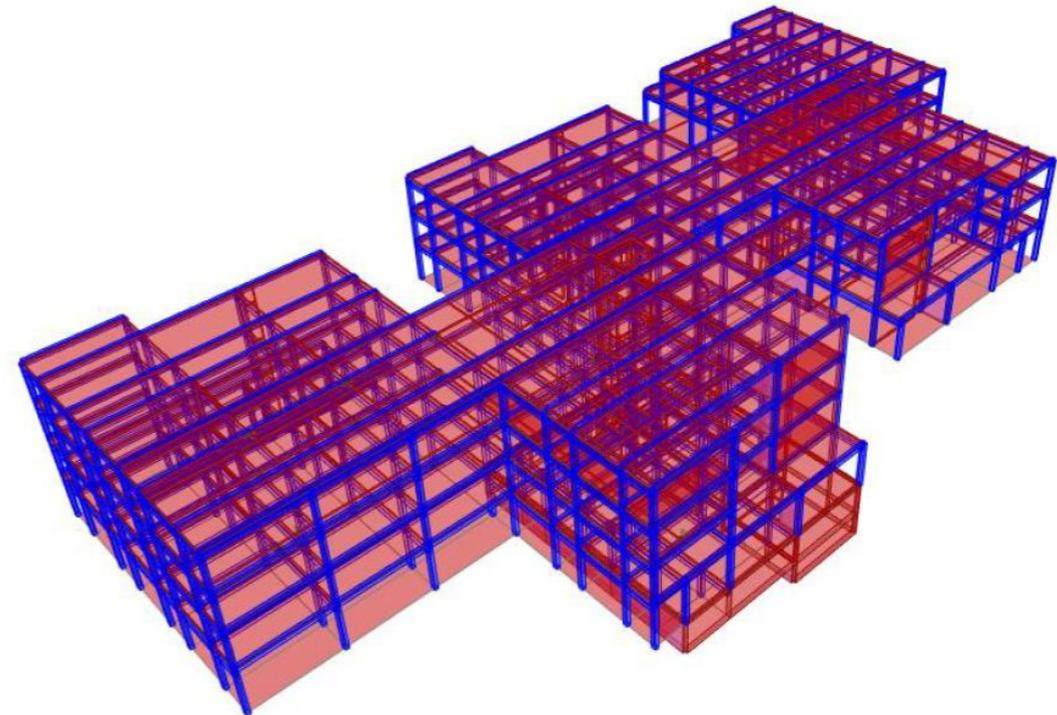


## Zeichenerklärung

A		Auffüllung
U		Schluff
fs		Feinsand
ms		Mittelsand
S		Sand
G		Kies
T		Ton
u		schluffig
fs		feinsandig
ms		mittelsandig
gs		grobsandig
s		sandig
fg		feinkiesig
fg-mg		fein-mittelkiesig
mg		mittelkiesig
gg		grobkiesig
g		kiesig
wu-re		Wurzelreste
h		humos
t		tonig
b		Bauschuttreste

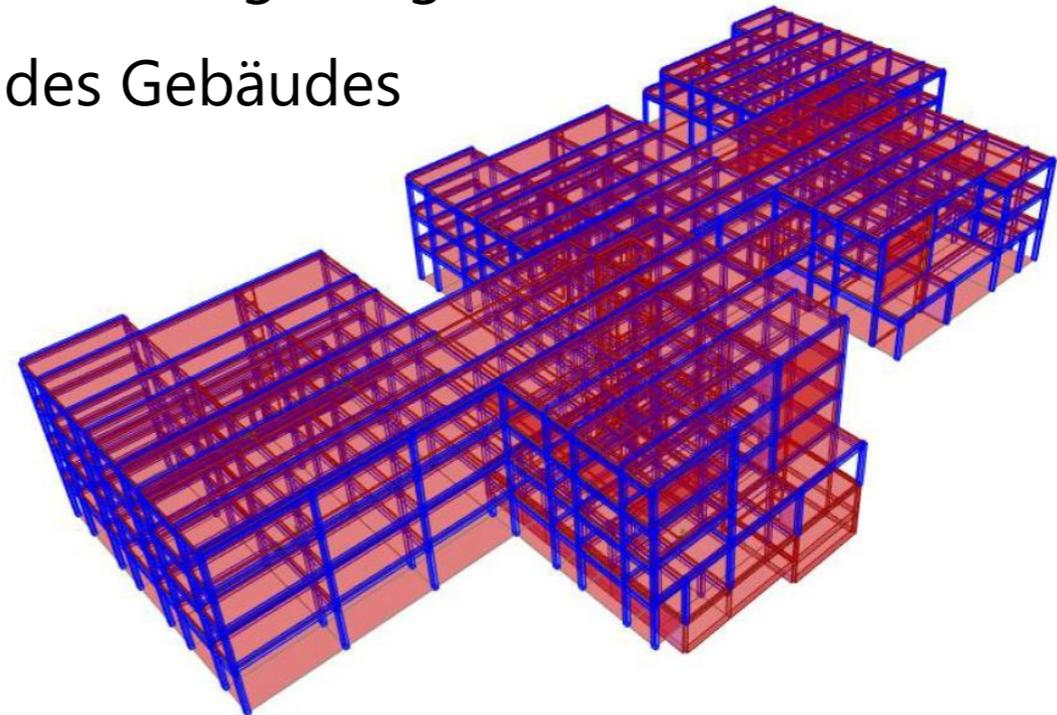
# Erschütterungsuntersuchung

- Erschütterungsmessungen im Plangebiet (zunächst an der Oberfläche)
- Standard Erschütterungsprognose nach DB Richtlinie RIL 820.2050
- Detaillierte baodynamische Untersuchung der einzelnen Cubes (das gesamte Schulgebäude ist aufgeteilt in 5 miteinander verbundenen Cubes)  
mittels FEM Analyse



# Erschütterungsuntersuchung

- Untersuchung verschiedener Minderungsmaßnahmen
  - Übertragungsweg: Abschirmung durch massive Einbauten (Theorie von Wolfgang Haupt)
  - Gründung: Pfahlgründung, elastische Gebäudelagerung
  - Gebäude: baulastdynamische Ertüchtigung des Gebäudes



# Refraktionsseismik

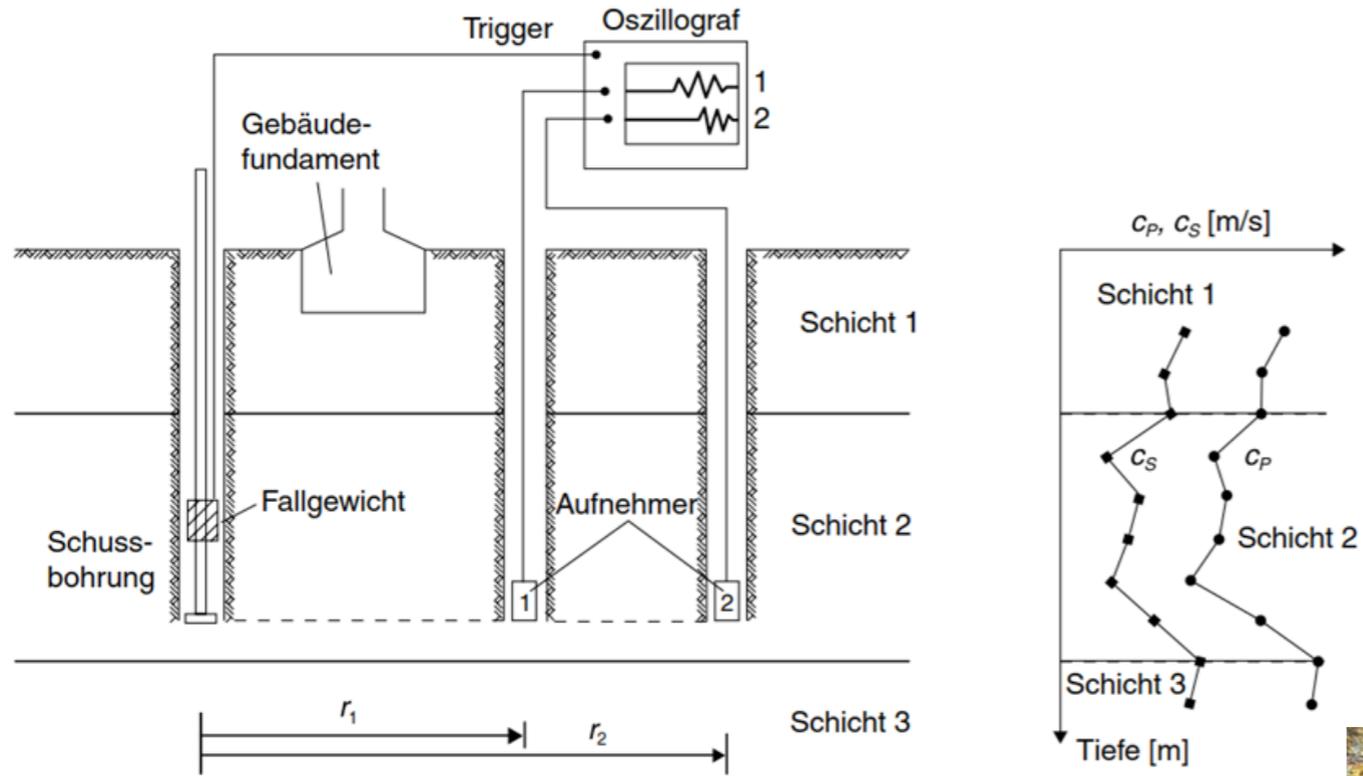
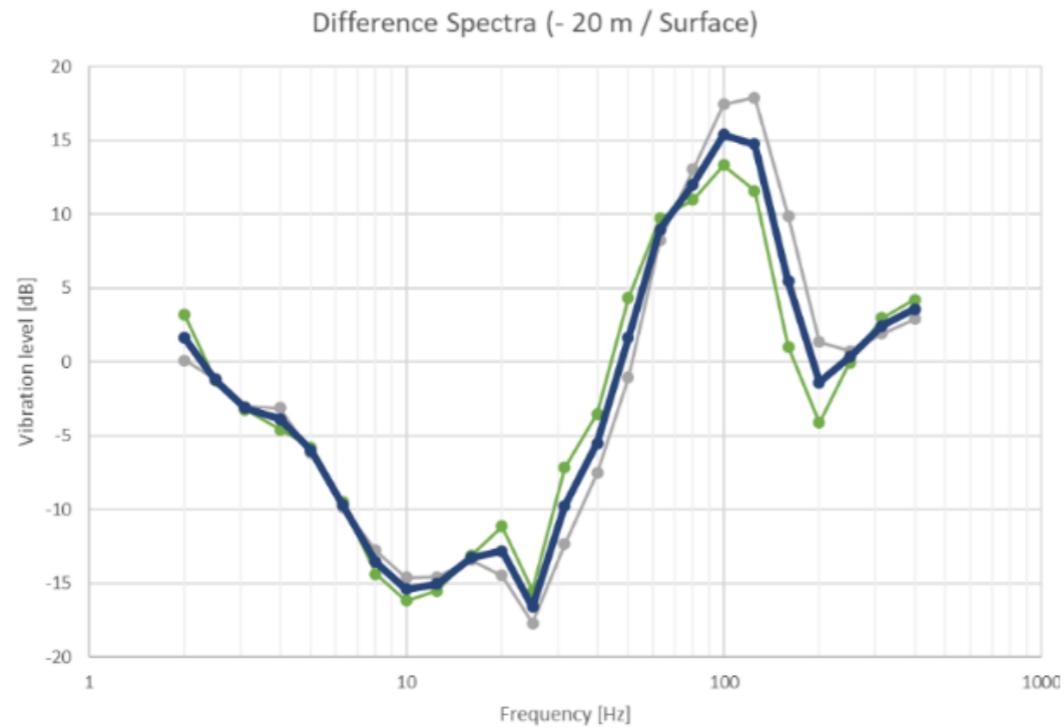


Bild E1-7 Cross-Hole-Messung: Prinzip (a) und Geschwindigkeitsprofil (b)



Quelle: Peutz

# Refraktionsseismik



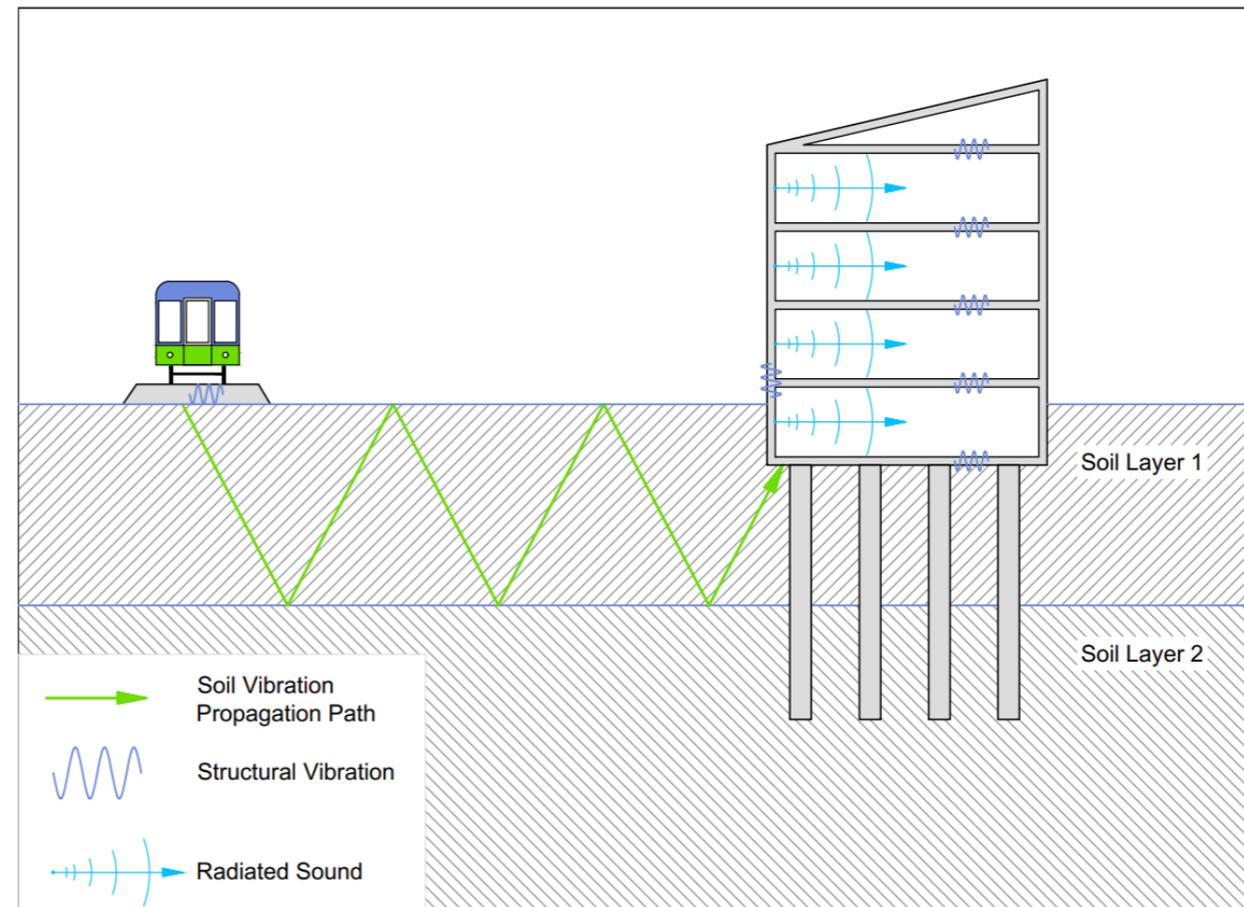
	Scherwellen- geschwindigkeit $c_s$	Dynamischer Schubmodul $G_{dyn}$	Statischer E-Modul $E_s$
Oberfläche	140 m/s	30 MN/m <sup>2</sup>	21 MN/m <sup>2</sup>
-20 m	180 bis 200 m/s	65 MN/m <sup>2</sup>	46 MN/m <sup>2</sup>

# Maßnahme: Pfahlgründung

Durchgeführt durch Meta Resistance (Prof. Sextos)

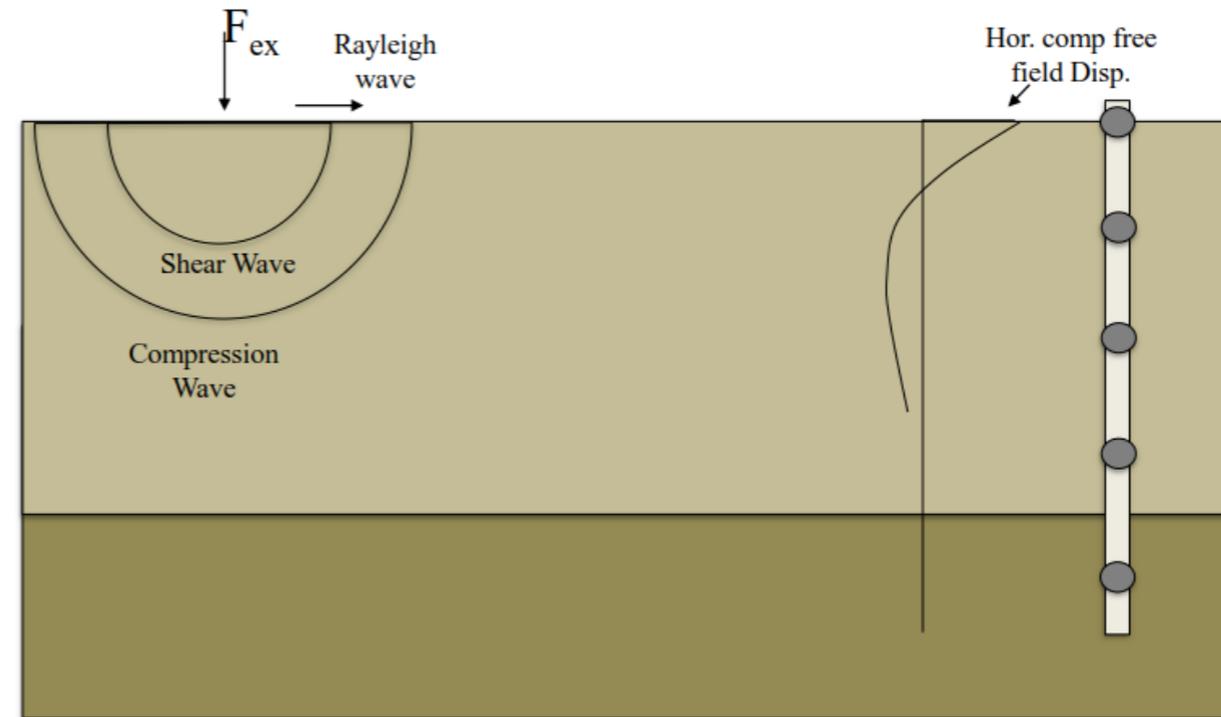
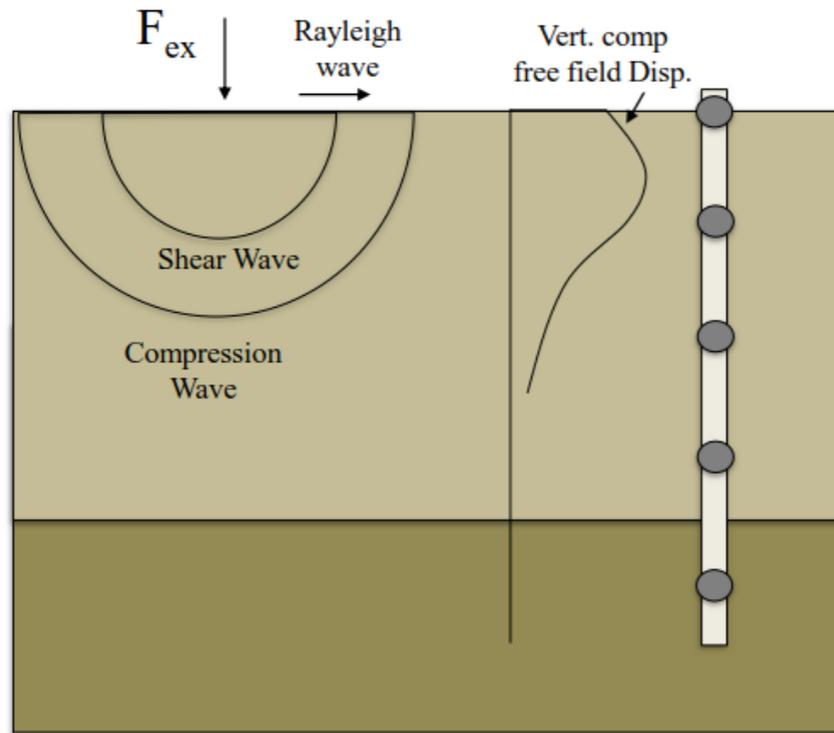
Pfahlkonfiguration je Cube:

- 7 x 7 Pfähle
- Abstand 4.40 m
- Durchmesser 1.00 m
- Gründung in Bodenschicht #2 --> Pfahllänge rund 20 m
- Platte auf Pfahl mit Dicke  $t = 1.00$  m (eingespannt)

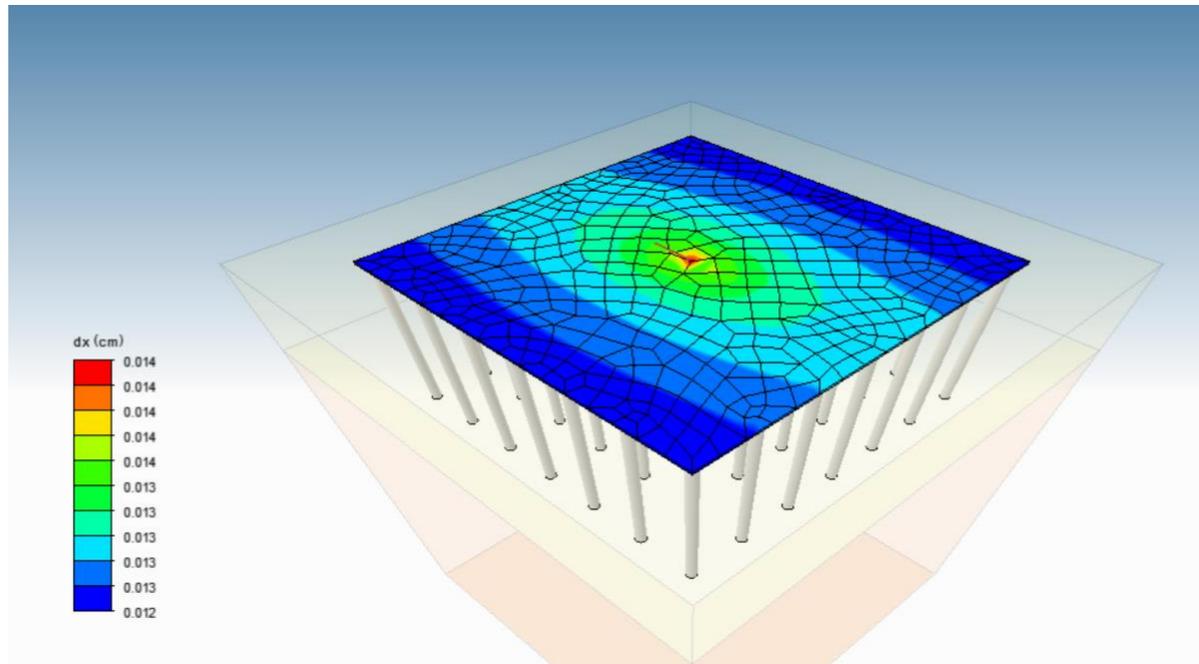


# Maßnahme: Pfahlgründung

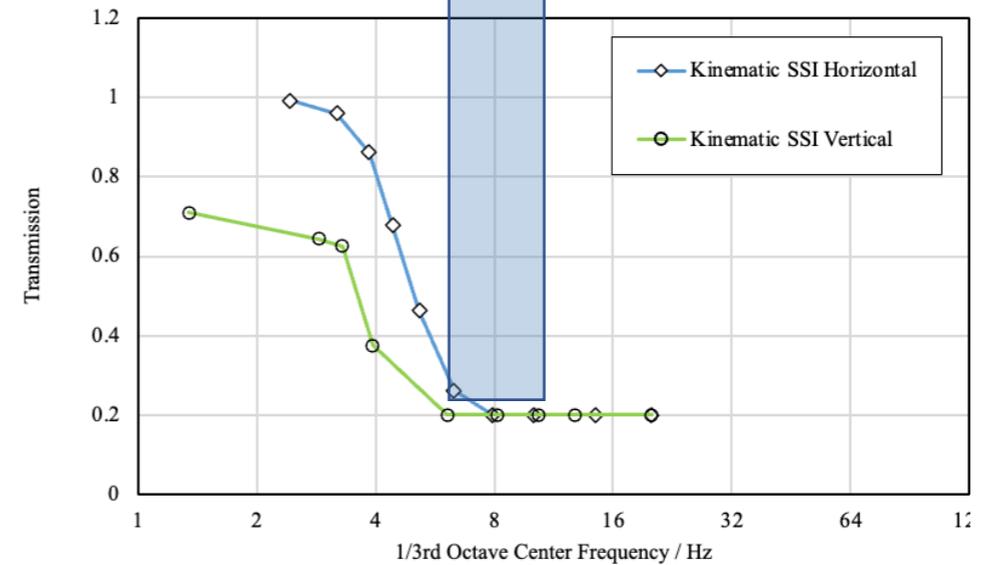
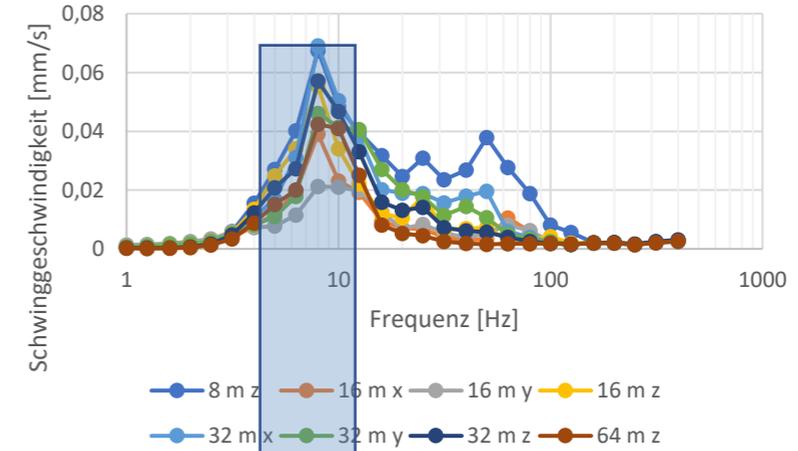
Durchgeführt durch Meta Resistance (Prof. Sextos)



# Wirkung der Pfahlgründung inkl. Gebäudelast

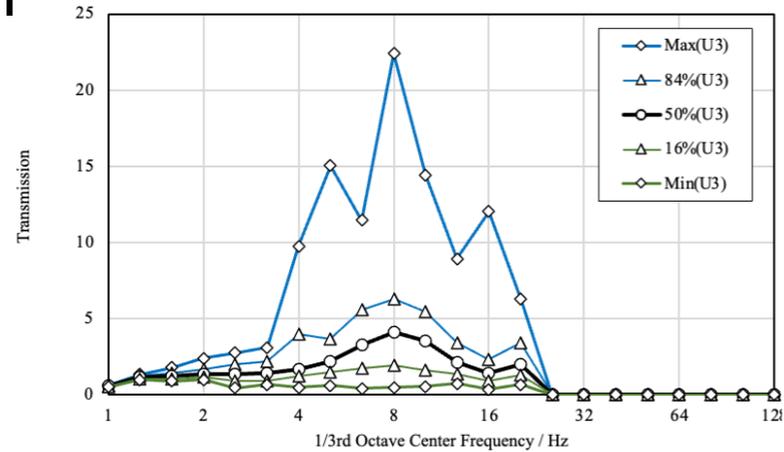


Emissionsspektrum Gleis 2

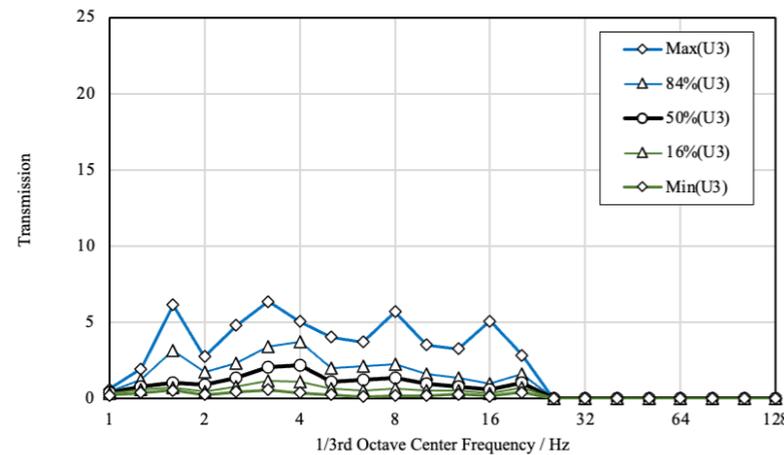


# Analyse des Gesamtmodells (Übertragungsfunktion)

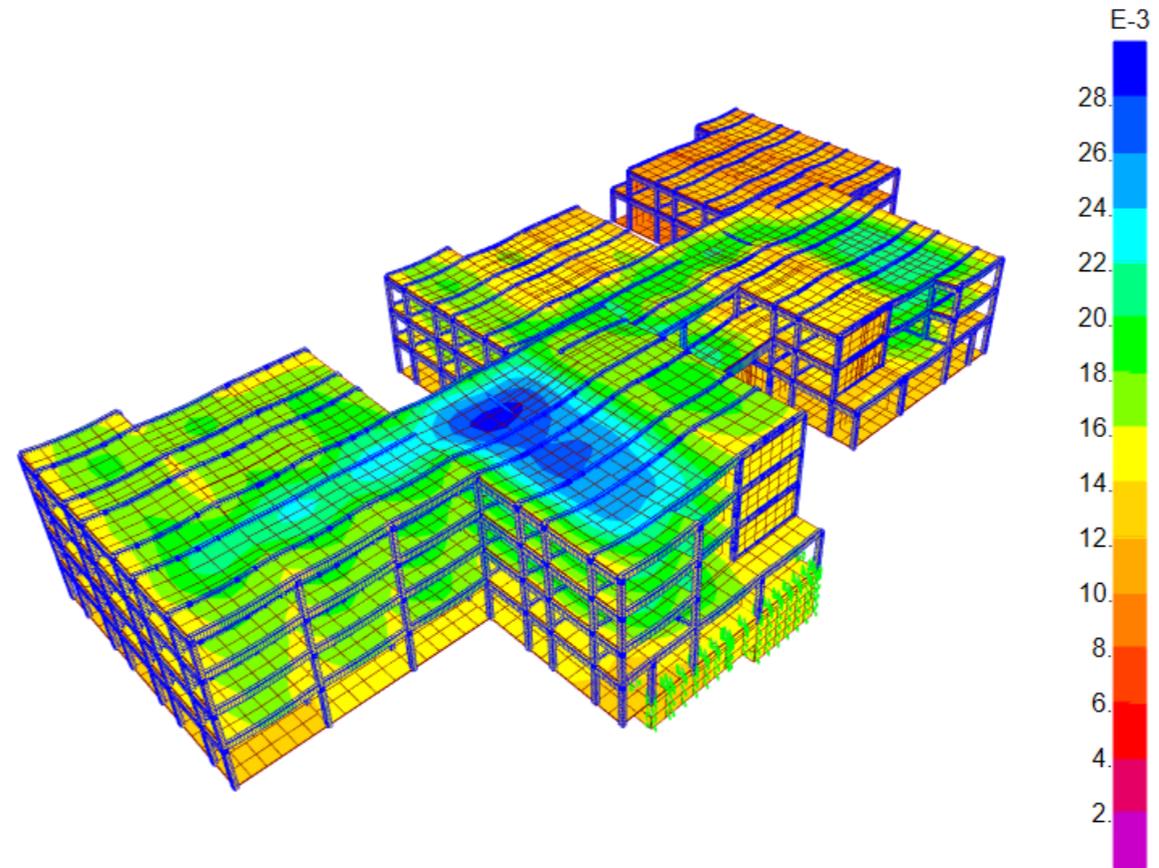
vertikal



Flachgründung Bodenplatte

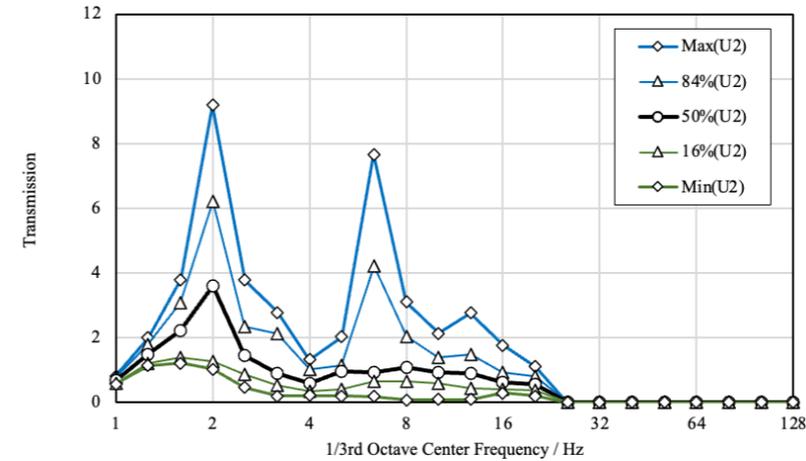
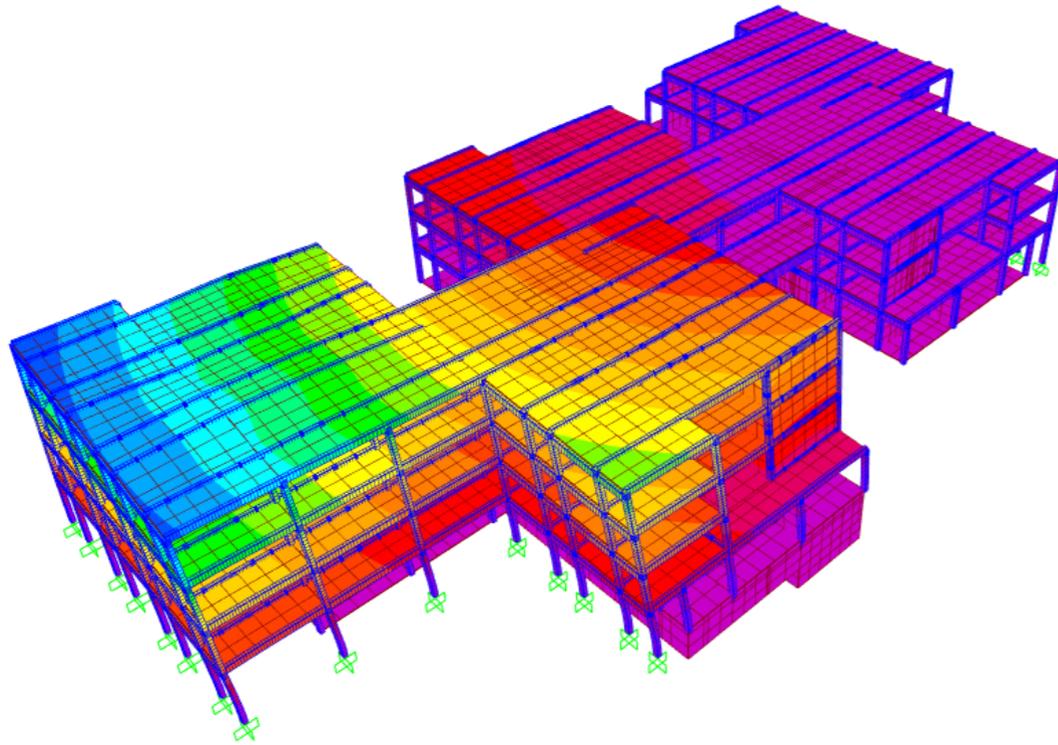


Tiefgründung

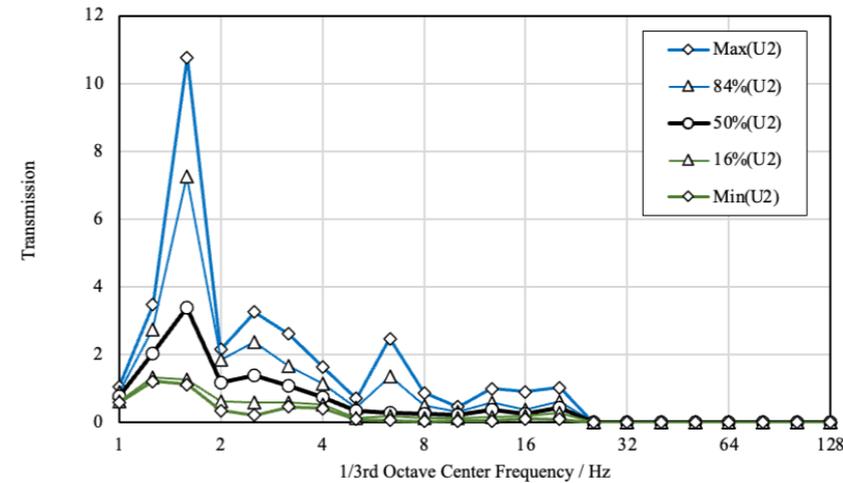


# Analyse des Gesamtmodells (Übertragungsfunktion)

horizontal



Flachgründung Bodenplatte



Tiefgründung

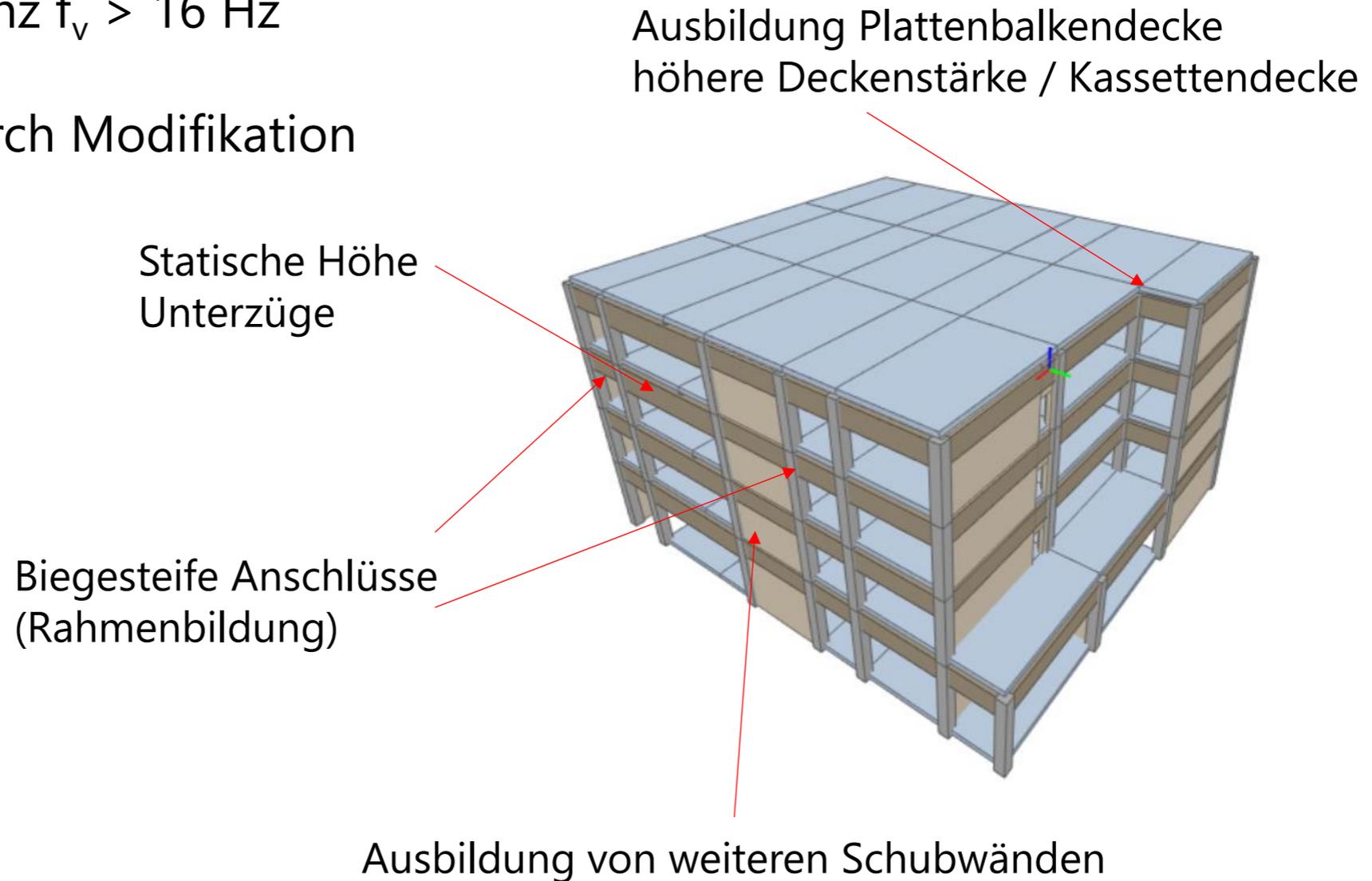
# Baudynamische Anforderungen

Horizontal Eigenfrequenz  $f_h > 4 \text{ Hz}$

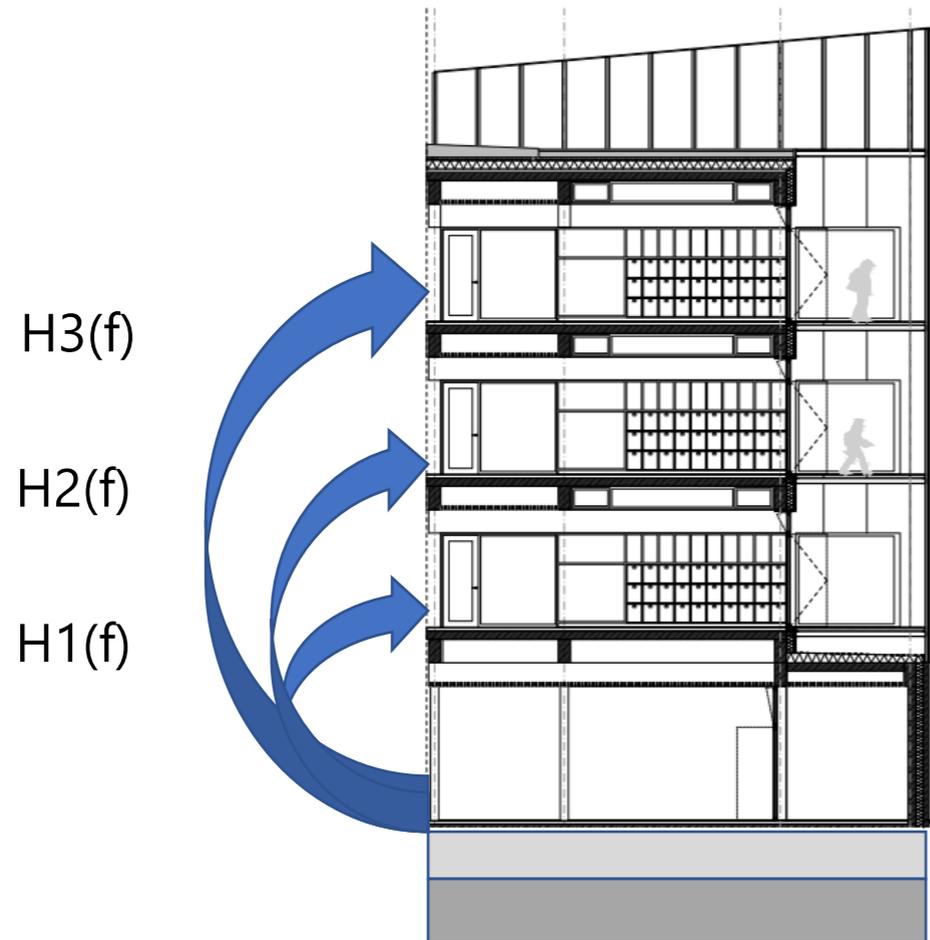
Vertikale Eigenfrequenz  $f_v > 16 \text{ Hz}$

→ Verbesserung durch Modifikation

- Ortbeton



# Prognose Modell (Gesamtmodell):



## Erschütterungen:

$$V(f) = \text{Soil}(f) \times \text{SSI}(f) \times (\text{SS}(f)) \times H_i(f)$$

Umrechnung  $V(f)$  nach  $KB_{FTM}$  nach RIL

$$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2} \quad \rightarrow \quad KB_{FTr} = \sqrt{\frac{1}{T_r} \sum_j T_{e,j} \cdot KB_{FTm,j}^2}$$

$$KB_{FTR} < A_r \text{ (DIN 4150)}$$

## Sekundärschall:

$$L_pA = L_vA + 10 \log(4S/A) + 10 \log s$$

Elastische Gebäudelagerung(f)  
 Boden-Bauwerkswechselwirkung(f)

# Ergebnis der Pfahlgründung

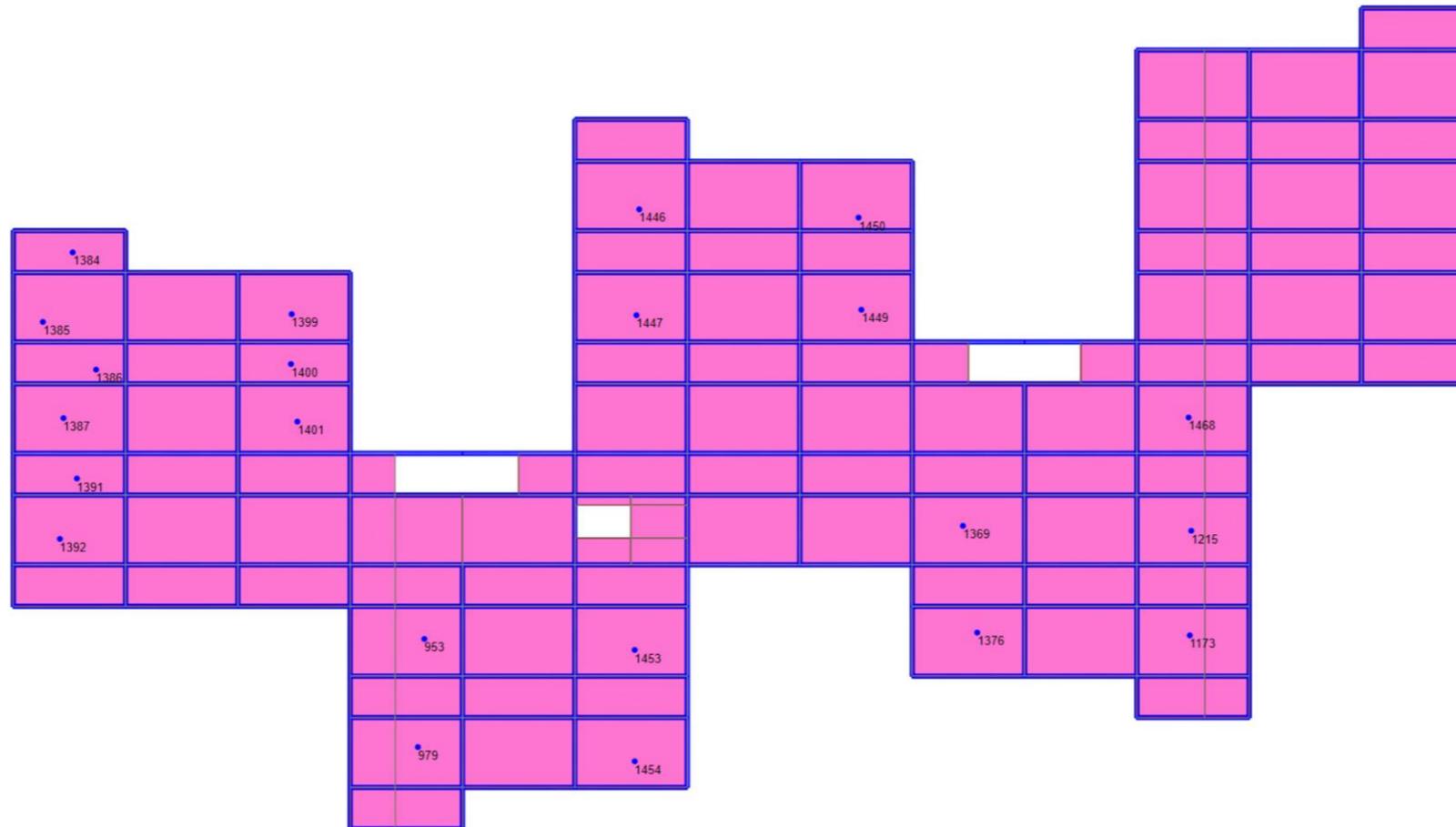
## Vertikale Erschütterungsprognose (Auszug)

Immissionsort	$KB_{FT_r}$	$A_r$	$KB_{FT_r} \leq A_r$
	Tageszeitraum	Tageszeitraum	Tageszeitraum
Klassenzimmer, 2. Geschoss, Node 1446	0,134	0,07	Nein
Klassenzimmer, 2. Geschoss, Node 1447	0,112		Nein
Klassenzimmer, 2. Geschoss, Node 1449	0,106		Nein
Klassenzimmer, 2. Geschoss, Node, 1450	0,143		Nein

- Horizontales Erschütterungsproblem wurde gelöst
- Vertikal reichte die Minderung nicht aus

# Ergebnis der Pfahlgründung

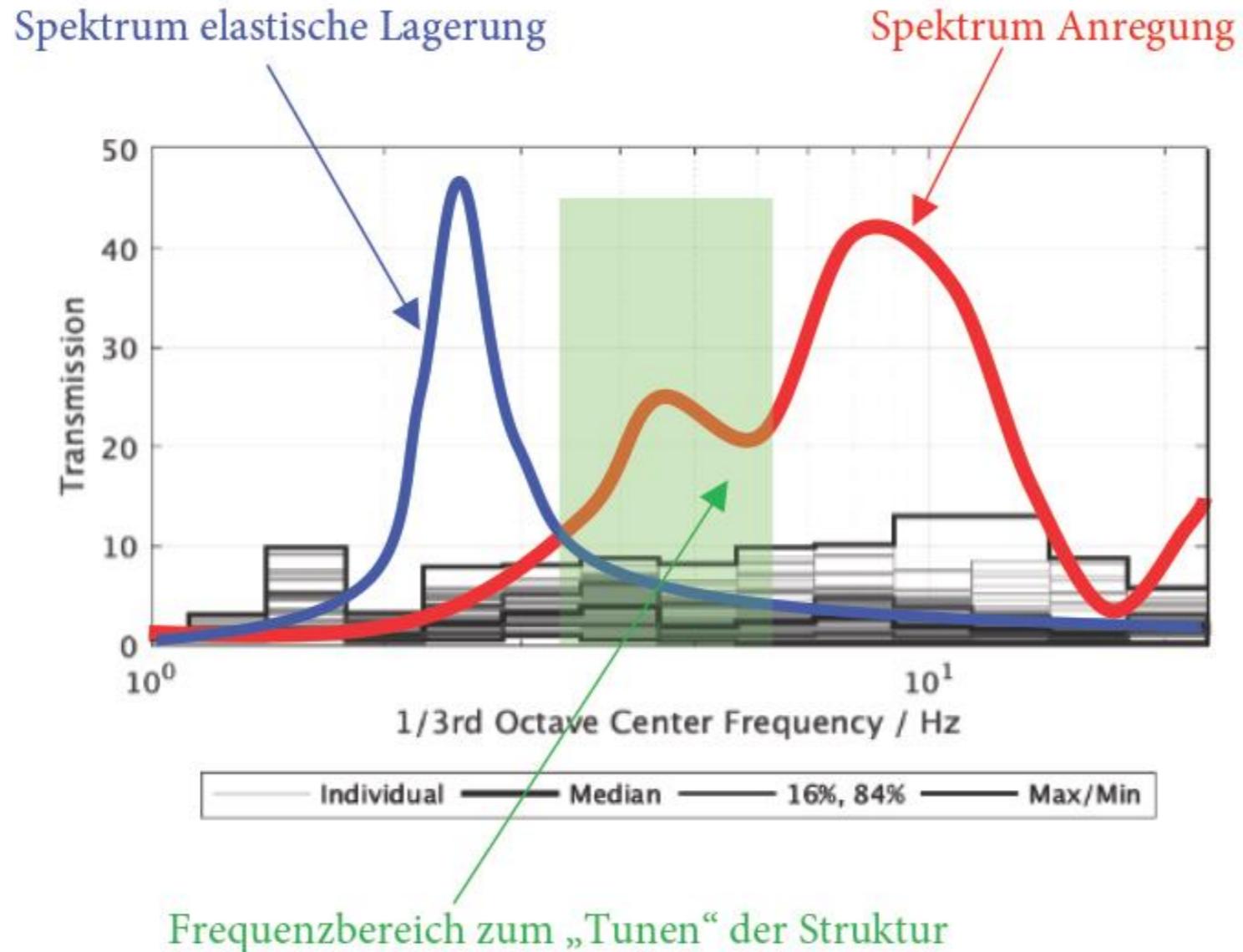
Vertikale Erschütterungsprognose (Auszug)



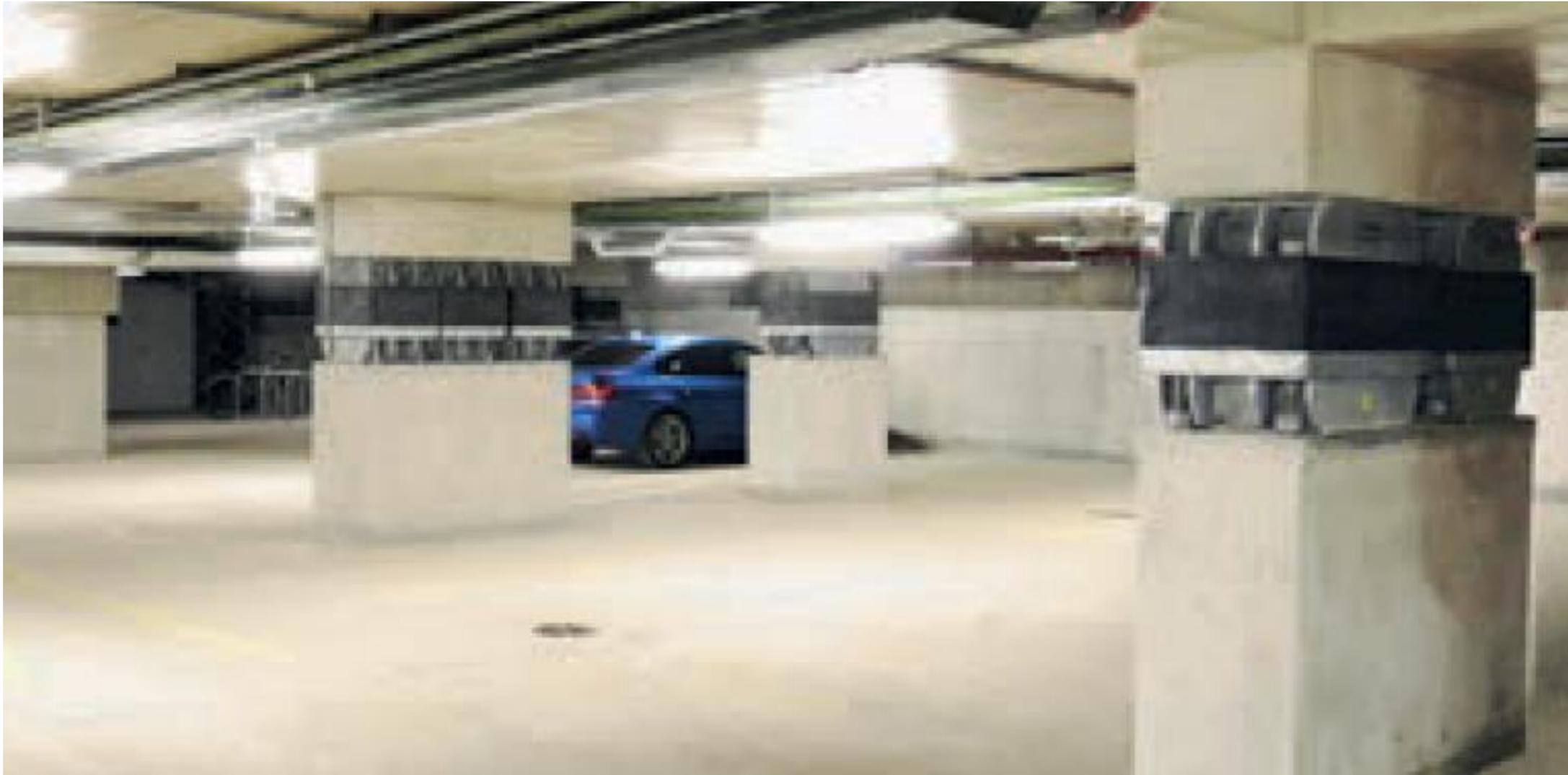
# Vorgehensweise

- Parameter der elastischen Gebäudelagerung
- vertikal:  $2,5 \text{ Hz} \leq f \leq 3,1 \text{ Hz}$
- horizontal:  $2,0 \text{ Hz} \leq f \leq 2,5 \text{ Hz}$
- Dämpfung:  $0,03 \leq D \leq 0,05$
- Zusätzliche Dämpfer um den Torsionsmode zu dämpfen

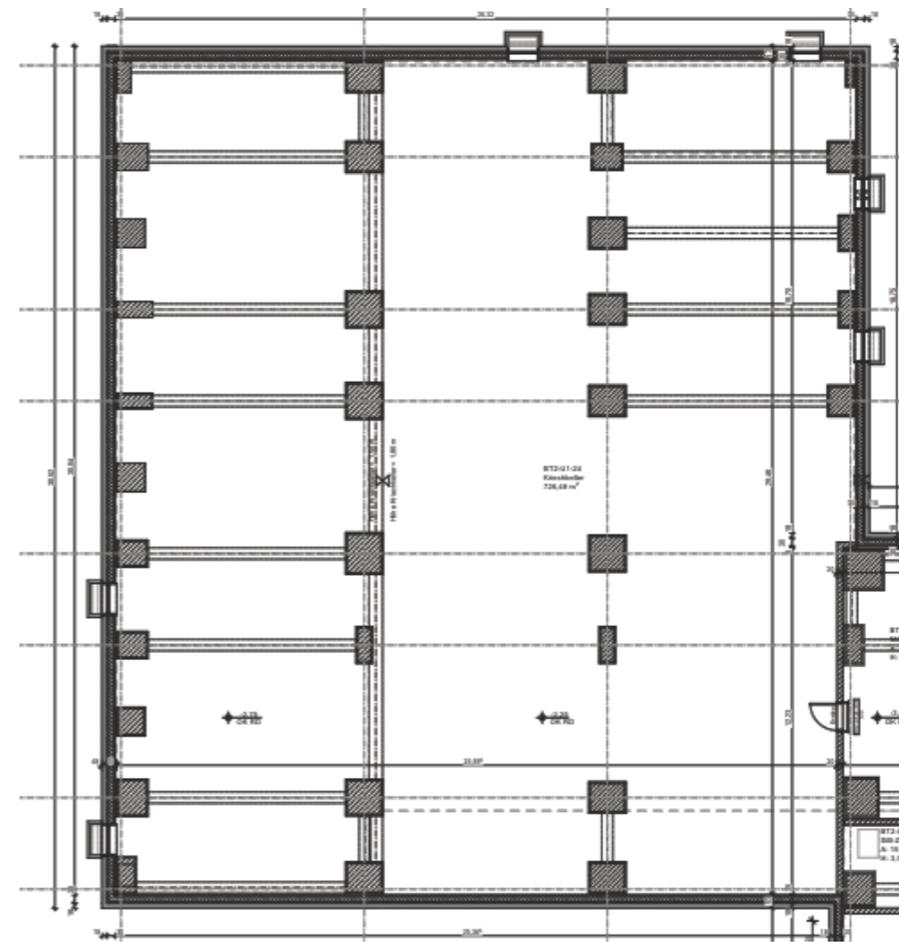
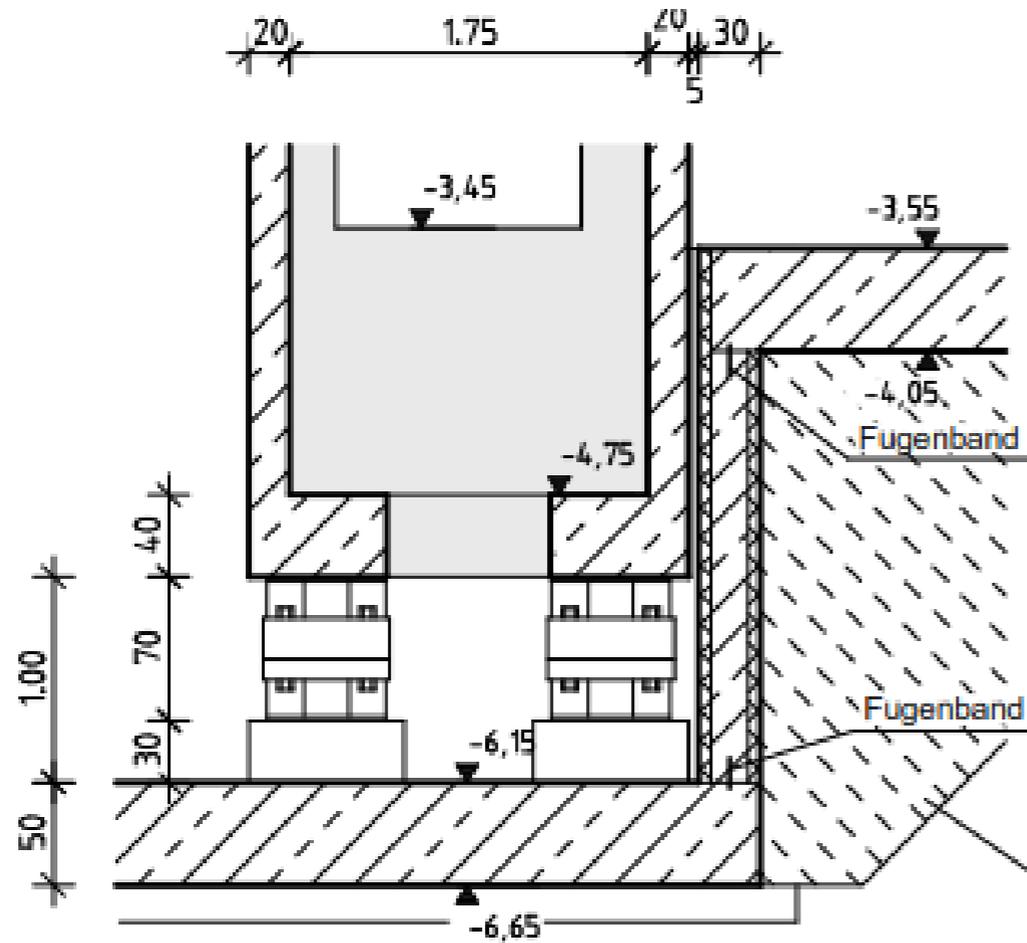
# Vorgehensweise



# Elastische Gebäudelagerung auf Stahlfederelementen

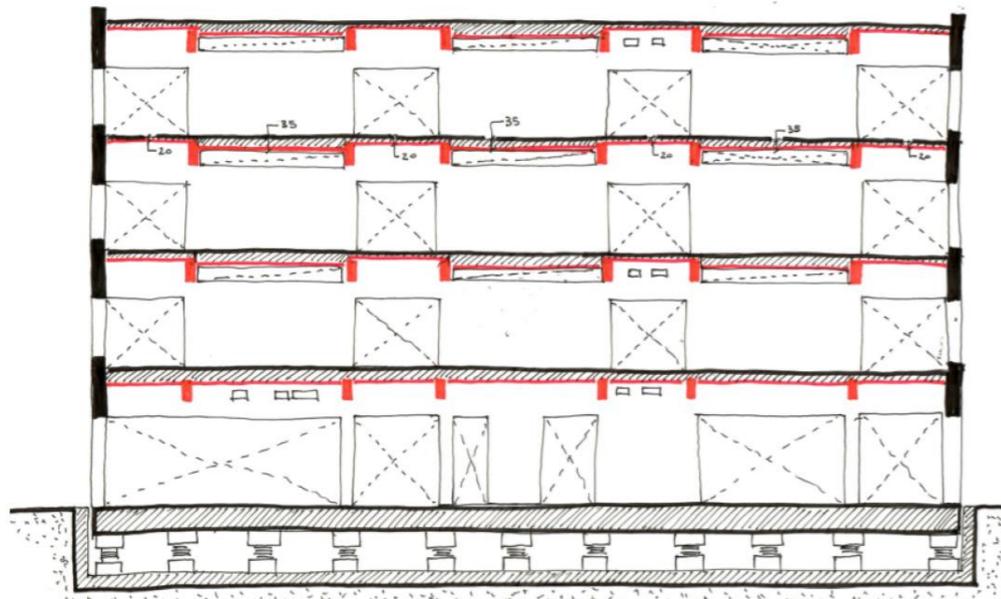


# Elastische Gebäudelagerung auf Stahlfederelementen

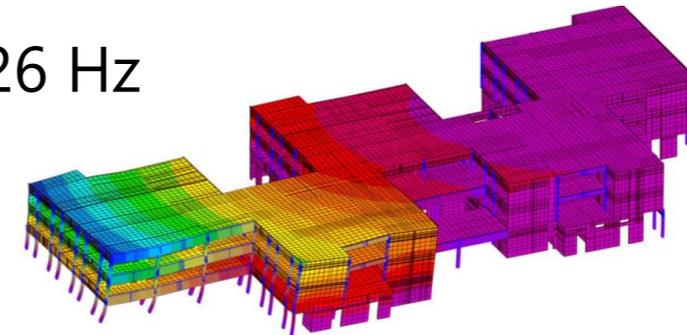


# Baudynamische Ertüchtigung

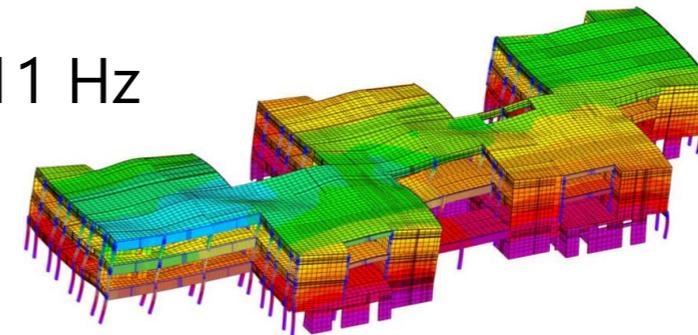
- Nur 3 Geschosse
- Ausbildung eines steifen Rahmens
- Kleine Deckenfelder:  $t=30$  cm (C45/55)
- Große Deckenfelder:  $t= 35$  cm 6.26 Hz (C45/55)
- Größere Unterzüge



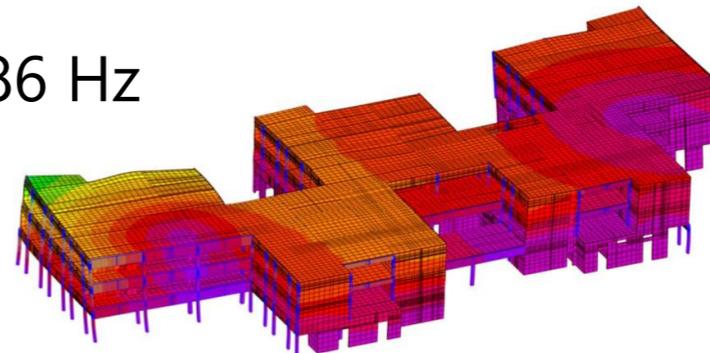
6.26 Hz



7.11 Hz



7.86 Hz



# Ergebnis der 3 Hz Gebäudelagerung

## Vertikale Erschütterungsprognose (Auszug)

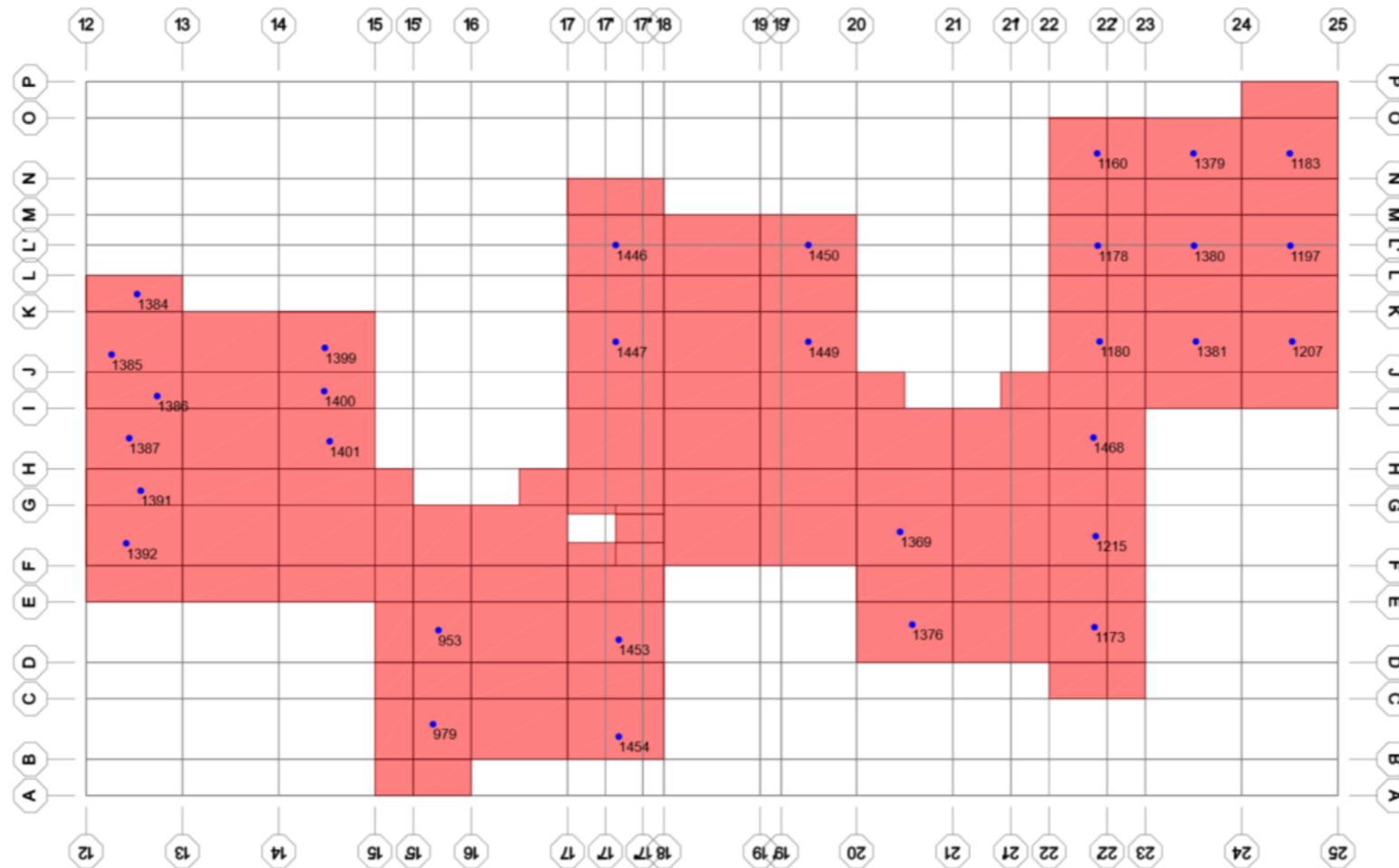
Immissionsort	$KB_{FTr}$	$A_r$	$A_r$
	Tag	Tag	Tag
Klassenraum, 2. Geschoss, Node 1422	0,068	0,07	Ja
Klassenraum 1. Geschoss, Node 3838 (Direktorenzimmer)	0,057		Ja
Klassenraum 1. Geschoss, Node 4113 (Musik Zimmer)	0,044		Ja
Klassenraum 2. Geschoss, Node, 1449	0,058		Ja

- Horizontal: Einhaltung der DIN 4150 (95% Ausnutzungsgrad)
- Vertikal: Einhaltung der DIN 4150 (97% Ausnutzungsgrad)

# Ergebnis der 3 Hz Gebäudelagerung

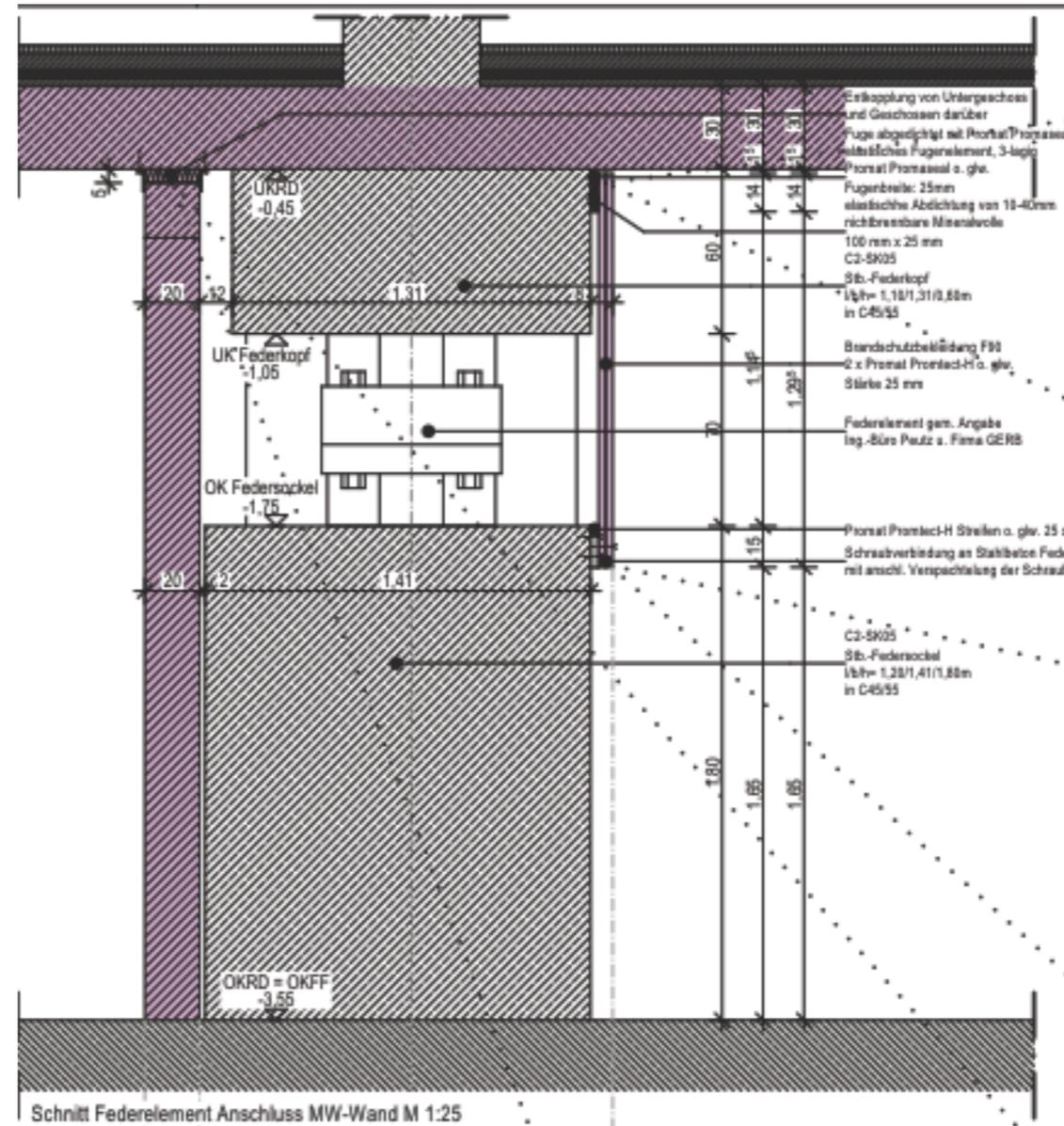
## Vertikale Erschütterungsprognose (Auszug)

Decke über OG1



# Details der Gebäudelagerung

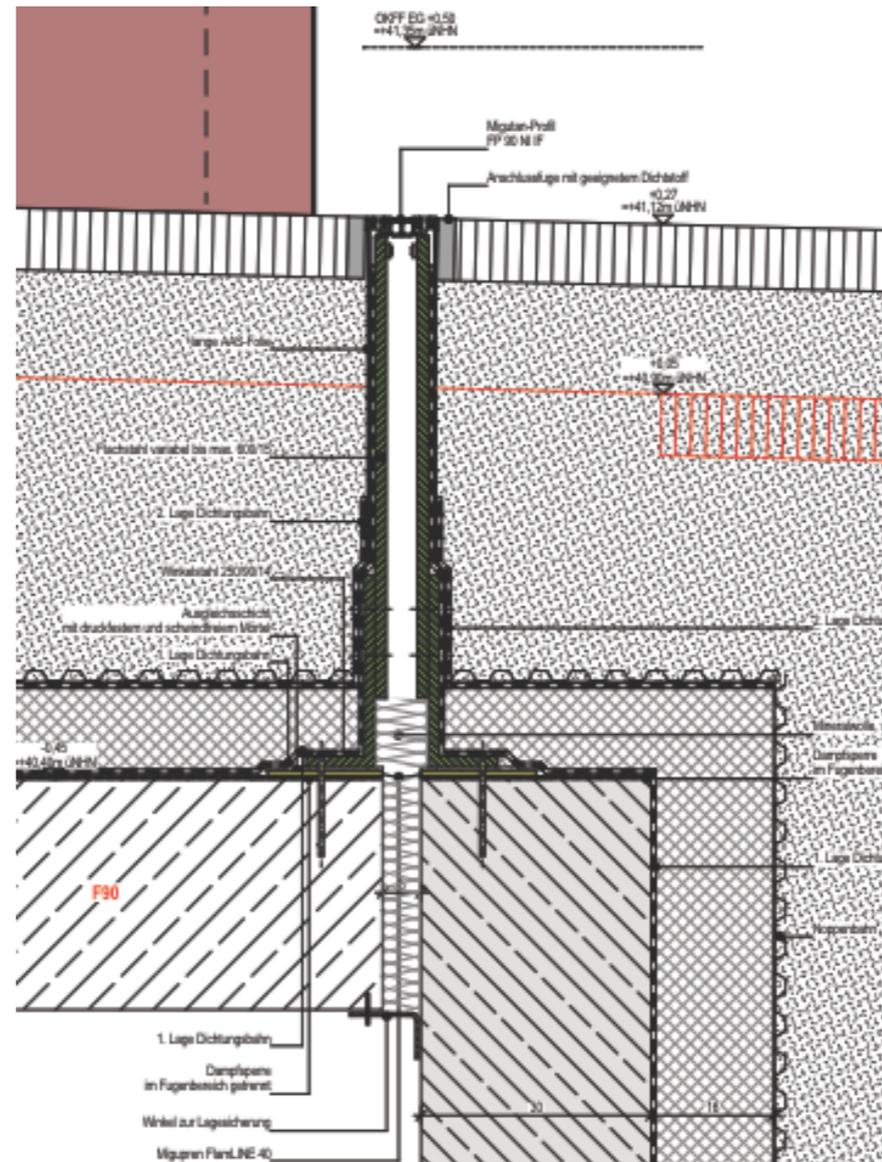
- Fugenausbildung (Größe, Abdichtung, etc.)
- Brandschutz





# Details der Gebäudelagerung

- Fugenausbildung (Größe, Abdichtung, etc.)
- Brandschutz



# Zusammenfassung

- Güterzüge können tieffrequente Erschütterungsemissionen verursachen.
- Dies kann zu Wechselwirkung mit den Eigenmoden von Gebäuden führen. Insbesondere in horizontaler Schwingrichtung führt dies zu aufwendigen Minderungsmaßnahmen.
- Die Pfahlgründung war in diesem Fall nicht zu 100% die erfolgreiche Minderungsmaßnahme.
- Effektiver war die Kombination aus elastischer Gebäudelagerung und Baudynamischer Ertüchtigung.
- Die Gebäude Eigenmoden und die Lagerungsfrequenzen müssen getrennt sein.
- Iterativer Prozess mit den Architekten und Tragwerksplaner.

**Vielen Dank.**