



UNIVERSITÄTS
KLINIKUM
HEIDELBERG

**Heidelberg, Universitätsklinikum
Neubau des Herzzentrums**

Erschütterungseinwirkungen auf die umliegenden Gebäude und die medizintechnischen Geräte in den Gebäuden

Prognoseberechnungen

Projekt-Nr.: **249105**

Erstellt im Auftrag von:
**Universitätsklinikum Heidelberg
Klinik Technik GmbH
Planungsgruppes Technik & Bau 3.2.5
Im Neuenheimer Feld 670
69120 Heidelberg**

Dipl.-Ing. Andreas Witzsche,
Dipl.-Geophys. Reinhard Schulz

2020-08-14

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1	ZUSAMMENFASSUNG 6
2	VORBEMERKUNG 7
3	UNTERLAGEN 7
4	AUFGABENSTELLUNG 9
5	GRUNDLAGEN 9
5.1	Bauwerke und medizintechnische Geräte..... 9
5.2	Bewertungsgrundlage..... 10
5.3	Baugrund..... 11
5.4	Auswertung des Feldtests – Ermittlung von der Schwingungsausbreitungsparametern 11
5.5	Parameter möglicher Baugeräte 20
6	ERGEBNIS DER PROGNOSEBERECHNUNGEN 24
6.1	INF156 – Deutsches Zentrum für Lungenforschung (DZL) 25
6.2	INF162 – Nierenzentrum 29
6.3	INF165 – Leit- und Informationszentrale..... 32
6.4	INF360 – Centre for Organismal Studies (COS)..... 34
6.5	INF361 – Boga-Zentrum..... 38
6.6	Gewächshäuser 40
7	ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN 43

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 1:	Lage der Anregungspunkte und Sensoren beim Feldtest..... 13
Abbildung 2:	Abnahme der maximalen Schwinggeschwindigkeit im Freifeld mit der Entfernung zum Anregungspunkt mit Regression (grüne Linie) und oberer Grenze des Vertrauensbereichs bei der statistischen Sicherheit von $P=95\%$ (rote Linie) 14
Abbildung 3:	Mittleres Terzspektrum im Abstand von 1 m vom Anregungspunkt 15
Abbildung 4:	Mittleres Terzspektrum im Abstand von 18 m vom Anregungspunkt 16
Abbildung 5:	Hauptfrequenzen der Registrierungen in Abhängigkeit vom Abstand zum Anregungspunkt. Die gestrichelte blaue Linie deutet den Abnahmetrend an, die grauen gestrichelten Linien die Streubreite der mittleren Frequenzen..... 16
Abbildung 6:	Zeitspuren der Registrierungen im Freifeld im Abstand von 1,4 m und 9,9 m vom Anregungspunkt sowie im Gebäude INF156 im Raum R004 an der Außenwand in Richtung Anregungspunkt (von oben nach unten). Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalierungen der Schwinggeschwindigkeitsachsen (siehe auch Text)..... 18
Abbildung 7:	Mittleres Terzspektrum des Hintergrundrauschens im UG des INF156 sowie die VC-B-Linie und die maximal zulässigen Schwinggeschwindigkeitswerte für das Konfokalmikroskop 19
Abbildung 8:	Mittleres Terzspektrum der bei den Falltests erzeugten Erschütterungen im UG des INF156 sowie die VC-B-Linie und die maximal zulässigen Schwinggeschwindigkeitswerte für das Konfokalmikroskop 19
Abbildung 9:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Freifeld in Abhängigkeit von der fallenden Masse bzw. der Energie eines Schlags unterschiedlicher Meißel (siehe Kapitel 5.5) und der Entfernung zum Anregungspunkt (mit statistischer Sicherheit $P=95\%$) 24
Abbildung 10:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Freifeld bei Anregung durch Vibrationsrammen oder Verdichtungsgeräte (siehe Kapitel 5.5) und der Entfernung zum Anregungspunkt (mit statistischer Sicherheit $P=95\%$) 25
Abbildung 11:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF156 bei kurzzeitiger Einwirkung in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$)..... 26
Abbildung 12:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF156 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$). 27
Abbildung 13:	Prognostiziertes Terzspektrum der durch eine aus 1 m Höhe fallenden Masse von 100 kg erzeugten Erschütterungen im UG des INF156 sowie

	die VC-B-Linie und die max. Schwinggeschwindigkeitswerte für das Konfokalmikroskop.....	28
Abbildung 14:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF156 bei Dauereinwirkungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	29
Abbildung 15:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF162 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	30
Abbildung 16:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF162 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	31
Abbildung 17:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF162 infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	32
Abbildung 18:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF165 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	33
Abbildung 19:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF165 bei Dauereinwirkungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	34
Abbildung 20:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF360 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	35
Abbildung 21:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF360 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	36
Abbildung 22:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF360 infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	37
Abbildung 23:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF361 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	38
Abbildung 24:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF361 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	39

Abbildung 25:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF361 infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	40
Abbildung 26:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des Gewächshauses in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	41
Abbildung 27:	Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Gewächshaus infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von P=95%).	42

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 5-1: Betroffene Gebäude und ihre Besonderheiten	9
Tabelle 5-2: Vereinfachtes Baugrundmodell im Bereich des Uniklinikums nach ([U2])	11
Tabelle 5-3: Energieeinträge beim Feldtest	12
Tabelle 5-4: Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_s und v_r im Bereich des Klinikums	12
Tabelle 5-5: Erschütterungserzeugende Verfahren und relevante Parameter	20
Tabelle 5-6: Gerätedaten einiger Hydraulikmeißel ([U24])	21
Tabelle 5-7: Gerätedaten einiger Vibrationsrammen ([U8])	22
Tabelle 5-8: Gerätedaten einiger Schlagrammen ([U8], [U18], [U19])	22
Tabelle 5-9: Gerätedaten einiger Vibrations- und Explosionsstampfer ([U24])	23
Tabelle 5-10: Gerätedaten einiger Vibrationsplatten / Rüttelplatten ([U24])	23

1 ZUSAMMENFASSUNG

Das Universitätsklinikum Heidelberg plant auf dem Gelände der ehemaligen Kinderklinik ein neues Herzzentrum und Forschungsinstitut zu errichten. In unmittelbarer Nachbarschaft der noch existierenden alten Gebäude befinden sich Forschungs- und Klinikeinrichtungen mit erschütterungsempfindlichen medizintechnischen Geräten.

Im Vorfeld der (Rück-) Baumaßnahme wurden basierend auf einem Feldtest die zu erwartenden Erschütterungseinwirkungen auf die Nachbargebäude und insbesondere die medizintechnischen Geräte prognostiziert.

Für die Abbrucharbeiten ist der Einsatz von Hydraulikmeißeln sowie der Einsatz von Abbruchzangen und entsprechend fallenden Massen näher betrachtet worden. Da außerdem eventuell Straßensicherungsmaßnahmen durch das Erstellen einer Spundwand sowie eine Leitungsverlegung erforderlich sind, wurden auch diese Baumaßnahmen erschütterungstechnisch bewertet.

Es zeigte sich, dass die zu erwartenden Erschütterungseinwirkungen in den im Rahmen der gegenständlichen Untersuchungen betrachteten Fällen unterhalb der Anhaltswerte der DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“, Teil 3 „Einwirkungen auf bauliche Anlagen“ liegen und somit eine Schädigung der Gebäude im Sinne der Norm nicht zu erwarten ist.

Die Erschütterungseinwirkungen auf die medizintechnischen Geräte – hier sind insbesondere ein Konfokalmikroskop sowie ein micro-CT im Gebäude INF156 des Deutschen Lungenforschungszentrums zu nennen, deren Erschütterungsfestigkeit im Wesentlichen durch die VC-B-Linie der VDI-Richtlinie 2038, Blatt 2 festgelegt ist – führen zu einer deutlichen Überschreitung der Grenzwerte. Entsprechend sind erschütterungsmindernde Maßnahmen erforderlich.

Hier kommen prinzipiell Maßnahmen am Emissionsort, auf dem Übertragungsweg oder am Immissionsort in Frage, wobei Dämpfungsmaßnahmen an den medizintechnischen Geräten als zielführendste und wirtschaftlichste Lösung angesehen werden.

Da Prognosebetrachtungen immer nur eine Annäherung an die wahren Verhältnisse darstellen, empfehlen wir, die Baumaßnahme mittels Erschütterungsmessungen in den betroffenen Gebäuden und insbesondere an den medizintechnischen Geräten zu überwachen.

2 VORBEMERKUNG

Am Medizinstandort Heidelberg wird die personalisierte Herzmedizin in Deutschland durch ein neues Herzzentrum und das neue Forschungsinstitut „Informatics for Life“ vorangetrieben. Das Zentrum soll auf dem Gelände der ehemaligen Kinderklinik in Nachbarschaft des Nierenzentrums, dem Deutschen Lungenforschungszentrum sowie dem Centre for Organismal Studies mit Anschluss an den Klinikring im Bereich der Medizinischen Klinik realisiert werden (angepasst nach [U1]).

Mit Schreiben vom 31.07.2020 beauftragte das Universitätsklinikum Heidelberg die CDM Smith Consult GmbH mit der Ermittlung der zu erwartenden Erschütterungseinwirkungen auf die benachbarten Gebäude und den darin befindlichen medizintechnischen Geräten bei der (Rück-) Baumaßnahme.

3 UNTERLAGEN

- [U1] Internet-Seite des Universitätsklinikums Heidelberg: <https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/startseite-unterseiten/medizin-campus-heidelberg/bauen>
- [U2] Töniges GmbH – Beratende Geologen und Ingenieure
Ingenieurgeologisches Gutachten „Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 530, Leitungsarbeiten“, Sinsheim, 22.01.2020
- [U3] CDM Smith Consult GmbH
Erschütterungseinwirkungen auf die Messgeräte im Analysezentrum III – Prognoseberechnungen, Stuttgart, 22.05.2020
- [U4] DIN 4150 Erschütterungen im Bauwesen
- Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen; Juni 2001
- Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Juni 1999
- Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen; Dezember 2016
- [U5] DIN EN 60721 Klassifizierung von Umweltbedingungen
Teil 3 Klassen von Umwelteinflussgrößen und deren Grenzwerte
Hauptabschnitt 3: Ortsfester Einsatz, wettergeschützt
- [U6] VDI 2038, Blatt 2 Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischer Einwirkung, 2013
- [U7] Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunderdynamik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Juli 1992, Erschienen in der Bautechnik, Verlag Ernst & Sohn, Heft 9, 1992

- [U8] Achmus, M., Kaiser, J., tom Wörden, F.
Bauwerksererschütterungen durch Tiefbauarbeiten (Grundlagen - Messergebnisse - Prognosen), Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover, Heft 61, Hannover 2005
- [U9] Kramer, H.
Angewandte Baudynamik – Grundlagen und Praxisbeispiele, Bauingenieur-Praxis, Ernst & Sohn, Berlin 2013
- [U10] Broschüre SkyScan 1176 micro-CT (englisch), Bruker
- [U11] Betriebsanleitung Konfokalmikroskop Leica TCS SP28, Leica
- [U12] Zerrentin & Scharf
Gutachten zu Erschütterungen durch Baumaßnahmen beim Ausbau der Bundeswasserstraße Main in der Stauhaltung Ottendorf (Ma-km 344,55 bis 359,20), Bundesanstalt für Wasserbau, 21.05.2010
- [U13] Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung, Bericht UBA-FB 001676 (Texte 05/2013), Umweltbundesamt, Juni 2012
- [U14] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 5: Pfähle und Spundwände; ENV 1993-5:1998
- [U15] Funk, K.
Expertensystem für Lärm- und Erschütterungsprognosen beim Einbringen von Spundbohlen, Mitteilungen des Curt-Risch-Instituts für Dynamik, Schall- und Messtechnik der Universität Hannover (Eigenverlag), 1996
- [U16] Müller-Boruttau, F.H.
Erschütterungen beim Spundwandbau: Einwirkungen auf Menschen, Bauwerke und technische Einrichtungen, Bauingenieur, 71. Jg., 1996
- [U17] Hiller, D.M. & Crabb, G.I.
Groundborne vibration caused by mechanical construction works, Transport Research Laboratory, TRL report 429, Crowthorne, 2000
- [U18] Palloks, W. & Zierach, R.
Zum Problem der Prognose von Schwingungen und Setzungen durch Pfahlrammungen mit Vibrationsbären, in: Mitteilungsheft Nr. 72 der Bundesanstalt für Wasserbau, 1995
- [U19] Delmag, Diesel Pile Hammers, Technisches Datenblatt
- [U20] Barsig, M.,
Bericht zum Spundwandseminar am 26.03.2009 an der TU Berlin – Bedeutung für die Sanierung des Landwehrkanals, Berlin, 2009

- [U21] Fröhlich, K.,
Einbringverfahren für Spundwände und deren Auswirkung auf die Tragfähigkeit, Vortrag beim BAW-Kolloquium September 2018
- [U22] Mirko Nickel, Planungsgruppe Technik & Bau 3.2.5, Klink Technik GmbH, pers. Mitteilung
- [U23] René Bruse, Technischer Leiter des Botanischen Gartens, pers. Mitteilung
- [U24] Eigene Internet-Recherche

4 AUFGABENSTELLUNG

Im Vorfeld der Rückbaumaßnahmen zur Baufeldfreimachung für das geplante Herzzentrum des Universitätsklinikums Heidelberg soll das Schwingungsausbreitungs- und -übertragungsverhalten des Baugrunds und diverser Gebäude in der nächsten Umgebung des Baufeldes ermittelt und unter Berücksichtigung der in den Gebäuden verwendeten erschütterungsempfindlichen medizintechnischen Geräten schwingungsrelevante Parameter für die Rückbaumaßnahme abgeleitet werden.

5 GRUNDLAGEN

5.1 Bauwerke und medizintechnische Geräte

Durch die Baumaßnahme sind insbesondere die in Tabelle 5-1 aufgelisteten Gebäude betroffen. Weiterhin sind Besonderheiten bzgl. der Nutzung und der in den Gebäuden verwendeten erschütterungsempfindlichen medizintechnischen Geräte aufgeführt.

Tabelle 5-1: Betroffene Gebäude und ihre Besonderheiten

Gebäude	Beschreibung	Einstufung nach DIN 4150, T3, Zeile	Besonderheiten
INF156	Laborgebäude (Deutsches Zentrum für Lungenforschung)	1	- Konfokalmikroskop - micro-CT - Ultrafeinwaage - Ultrazentrifuge - u.a.
INF162	Nierenzentrum	1	- Patienten - Dialysesysteme - Mikroskope
INF165	Leit- und Informationszentrale	1	- Server

Gebäude	Beschreibung	Einstufung nach DIN 4150, T3, Zeile	Besonderheiten
INF360	Centre for Organismal Studies	1	- z.T. denkmalgeschützt - Mikroskop
INF361	Boga-Zentrum	1	- RNA-Analyse-Geräte
Gewächshäuser		3	- filigrane Bauweise

5.2 Bewertungsgrundlage

Die auf die Gebäude einwirkenden Erschütterungen sind nach der DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“, Teil 3 „Einwirkungen auf bauliche Anlagen“ ([U4]) zu bewerten. Die Gebäude sind bis auf die Gewächshäuser des Botanischen Gartens, die aufgrund ihrer filigranen Bauweise in die Gruppe nach Zeile 3 der Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 3 „Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeil 1 und Zeile 2 entsprechen...“ eingeordnet werden, in die Gruppe „Gewerblich genutzte Bauten, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten“ einzustufen (Zeile 1 der Tabellen 1 und 4 der DN 4150, Teil 3).

Zur erschütterungstechnischen Einordnung der Analysegeräte, für die keine Angaben zur Erschütterungsfestigkeit vorliegen, dienen die DIN EN 60721 „Klassifizierung von Umweltbedingungen“, Teil 3 „Klassen von Umwelteinflussgrößen“, Hauptabschnitt 3 „Ortsfester Einsatz, wettergeschützt“ ([U5]) sowie die VDI-Richtlinie 2038, Blatt 2 „Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischer Einwirkung“ ([U6]), in der auch Kriterien für Erschütterungseinwirkungen auf Maschinen und empfindliche Geräte genannt sind.

Insbesondere ist hier ein Konfokalmikroskop im Gebäude INF156 zu nennen, für das die tolerierbaren Vibrationen mit 30 $\mu\text{m/s}$ bei Frequenzen zwischen 5 Hz und 30 Hz, sowie 60 $\mu\text{m/s}$ bei Frequenzen über 30 Hz angegeben sind.

Nach der im Internet verfügbaren Broschüre zum micro-CT ([U10]) ist mit dem Gerät eine maximale Auflösung von 9 μm möglich. Als einzuhaltendes Kriterium hinsichtlich der Erschütterungsfestigkeit wird auf der sicheren Seite liegend entsprechend die VC-Linie B der VDI 2038, Blatt 2 ([U6]) angenommen. Entsprechend sind im Frequenzbereich um 2 Hz des RMS-Terzspektrums Schwinggeschwindigkeiten bis zu 100 $\mu\text{m/s}$ und im Bereich 8 Hz bis 100 Hz bis zu 25 $\mu\text{m/s}$ zulässig. Es ist nicht bekannt, ob das micro-CT auf schwingungsdämpfenden Füßen steht, so dass für die weiteren Betrachtungen davon ausgegangen wird, dass dies nicht der Fall ist und somit die Gebäudeschwingungen ungedämpft auf das Gerät übertragen werden.

Für die anderen in Tabelle 5-1 genannten medizintechnischen Geräte liegen keine Angaben zur Erschütterungsfestigkeit vor. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen für das Konfokalmikroskop bzw. der VC-B-Linie als Maximalforderung anzusehen sind.

5.3 Baugrund

Der Baugrund im Bereich des Universitätsklinikums stellt sich nach dem Gutachten der Töniges GmbH [U2], das für das ca. 700 m nördlich vom geplanten Herzzentrum gelegene Areal um das Gebäude AZ III erstellt wurde, aber aus geologischer Sicht hier auch gültig sein dürfte, folgendermaßen dar:

„Das geplante Baufenster liegt auf der östlichen Grabenscholle des Oberrheingrabens, im Bereich des Neckarschwemmfächers. Bei der Entstehung des Rheingrabens wurden hier mächtige Sedimentschichten abgelagert.

Im Altquartär wurde im Rhein - Neckar - Raum überwiegend eine rhythmische Abfolge aus Schluff und Sand, die sog. „Untere sandige - schluffige Folge“ ausgebildet. Das darüber folgende Jungquartär besteht aus einer Wechselfolge von kiesig - sandigen und feinkörnigen, tonigen bis sandigen Sedimenten. Im Bereich des Bauvorhabens wurden im oberen Jungquartär Neckarsedimente aus sandigen Kiesen und kiesigen Sanden abgelagert. Später wurden diese von bindigen Deckschichten (Auenlehme, Decklehme) überlagert“.

Das Grundwasser wurde in keinem der Aufschlüsse angetroffen und ist laut der „Hydrologischen Kartierung des Rhein-Neckarraumes auf einem Niveau von etwa 96 – 97 m über NN“ anzutreffen ([U2]). Schwingungstechnisch ist das Vorhandensein von Grundwasser für die weiteren Überlegungen irrelevant, da die erschütterungswirksamen Scher- und Oberflächenwellen nicht signifikant vom Grundwasser beeinflusst werden ([U8]).

Für die weiteren Betrachtungen wurde das vereinfachte Baugrundmodell nach dem Ingenieurgeologischen Gutachtens der Töniges GmbH ([U2]) verwendet.

Tabelle 5-2: Vereinfachtes Baugrundmodell im Bereich des Uniklinikums nach ([U2])

Schicht	Lagerung / Konsistenz	Höhe (m über NN)		Tiefe (m unter GOK)
		von	bis	
Auffüllung	-- / --	110,29	109,69	0,6
Deck- und Auelehme	-- / halbfest	109,69	106,49	3,8
Neckarkiese	mitteldicht-dicht / halbfest	106,49	--	--

5.4 Auswertung des Feldtests – Ermittlung von der Schwingungsausbreitungsparametern

Hinsichtlich der Ausbreitung der Schwingungen und deren Auswirkungen auf die Geräte im Gebäude sind im Wesentlichen drei Punkte zu betrachten:

- Wellenausbreitung im sogenannten Freifeld

- Übergang vom Boden ins Bauwerk
- Ausbreitung im Bauwerk und Einwirkung auf Anlagen im Gebäude

Zur Ermittlung des Schwingungsausbreitungsverhaltens, den Wellendämpfungseigenschaften der Baugrundsichten sowie dem Schwingungsübertragungsverhalten des Systems Boden-Bauwerk und innerhalb der Bauwerke wurden am 04.08.2020 Schwingungsmessungen im Freifeld sowie in diversen Gebäuden und an medizintechnischen Geräten bei Schwingungsanregungen durch ein Fallgewicht (30 kg aus unterschiedlichen Fallhöhen) durchgeführt.

Insgesamt wurden an fünf verschiedenen Punkten Schwingungen angeregt und die sich ausbreitenden Wellen in unterschiedlicher Entfernung zum jeweiligen Anregungspunkt im Freifeld sowie in den angrenzenden Gebäuden aufgezeichnet. In Abbildung 1 sind die Punkte in das Luftbild des Untersuchungsbereichs projiziert. Die Schwingungen wurden mit kalibrierten 3-Komponenten-Schwinggeschwindigkeitsaufnehmern und einem kalibrierten 3-Komponenten Beschleunigungsaufnehmer (an technischen Geräten bzw. der Glasscheibe des Gewächshauses) registriert.

Durch das Fallgewicht wurden die in Tabelle 5-3 angegebenen Energien in den Baugrund eingetragen.

Tabelle 5-3: Energieeinträge beim Feldtest

Gewicht (kg)	Fallhöhe (m)	Energieeintrag (kNm)
30	1,0	0,294
30	1,7	0,500
30	1,75	0,515

Die mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Scherwellen v_s und der Oberflächenwellen v_R wurden dem Bericht zu den Erschütterungsprognosen für das AZ III ([U3]) entnommen (siehe Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_s und v_r im Bereich des Klinikums

Schicht	Mittlere Scherwellengeschwindigkeit v_s (m/s)	Mittlere Oberflächenwellengeschwindigkeit v_R (m/s)
Auffüllung, Deck- und Auelehne	281	253
Neckarkies	351	316

Basierend auf den gegenständlichen Feldmessungen wurde das Wellendämpfungs- und Übertragungsverhalten (s.u.) ermittelt.

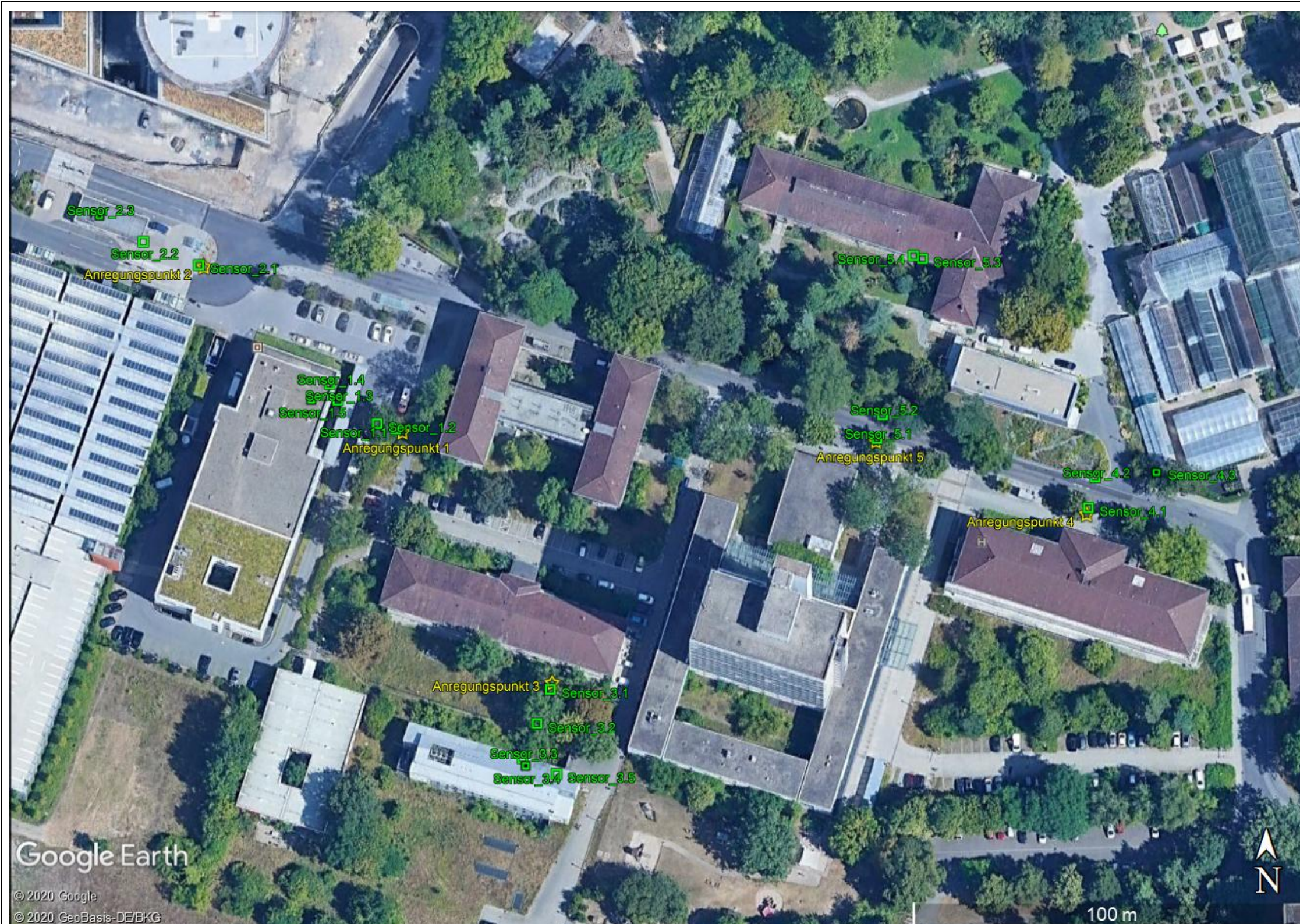


Abbildung 1: Lage der Anregungspunkte und Sensoren beim Feldtest

Ausbreitung der Schwingungen im Freifeld

Aus der Abnahme der Schwinggeschwindigkeitsamplitude v mit der Entfernung x lässt sich das Schwingungsdämpfungsverhalten des Baugrundes ermitteln, das durch

$$v(r) = K \frac{\sqrt{E}}{x^\beta}$$

mit

E : von der Erschütterungsquelle eingeleitete Energie in kNm

K : Konstante, die u.a. von der Bodenart und der Art der Erschütterungsquelle abhängt

β : Dämpfungskonstante

oder vereinfacht

$$v(r) = cx^{-\beta}$$

beschrieben werden kann.

Aus den mit dem Fallgewicht angeregten Schwingungen – insgesamt 41 verschiedene Versuche – wurden die Parameter c und β bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$ zu $c = 72,651$ und $\beta = 1,188$ bestimmt (vgl. Abbildung 2).

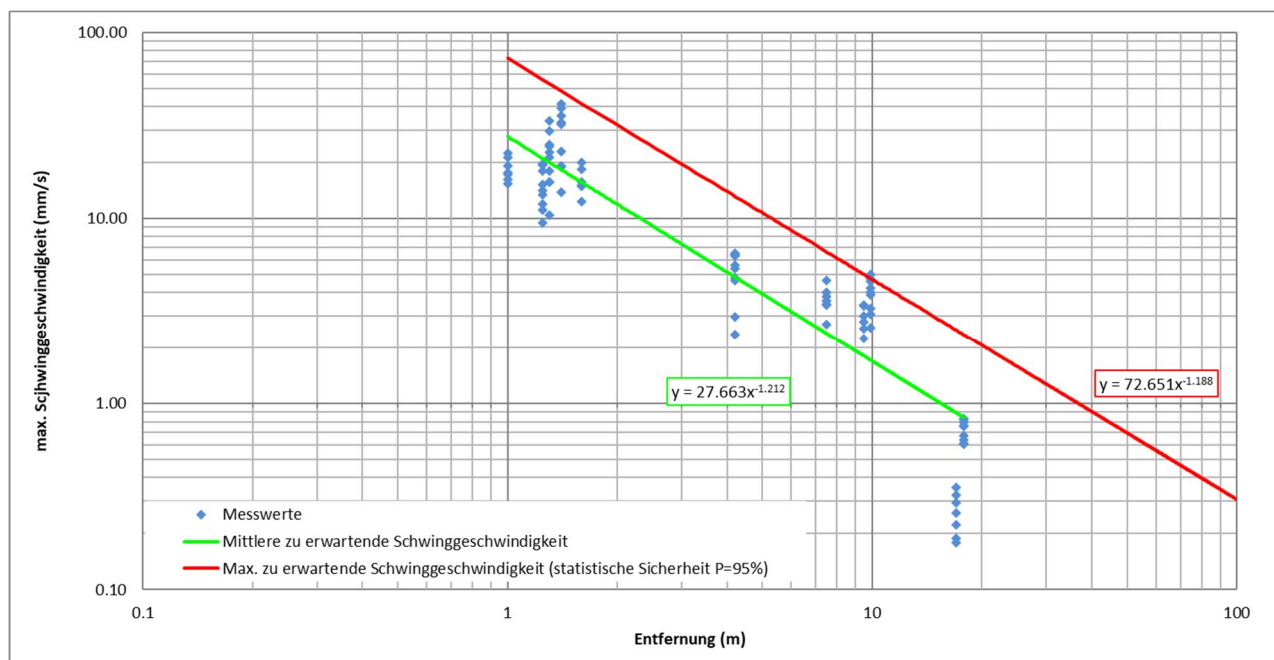


Abbildung 2: Abnahme der maximalen Schwinggeschwindigkeit im Freifeld mit der Entfernung zum Anregungspunkt mit Regression (grüne Linie) und oberer Grenze des Vertrauensbereichs bei der statistischen Sicherheit von $P=95\%$ (rote Linie)

Neben der Amplitude, die maßgeblich durch die in den Baugrund eingetragene Energie bestimmt wird, und der Ausbreitungsgeschwindigkeit wird eine Schwingung durch ihr Spektrum, d.h. ihre

unterschiedlichen Frequenzen charakterisiert. Für die Ermittlung der Schwingungseinwirkung auf ein Gebäude und die Einrichtungen im Gebäude sind hierbei folgende Punkte zu betrachten:

- Anregungsfrequenz (abhängig vom Schwingungserzeuger)
- Frequenzänderung (Dämpfung) auf dem Wellenlaufweg
- Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz
- Resonanzfrequenz der Gebäudedecken

Bei den im Rahmen dieser Prognosebetrachtungen durchgeführten Messungen zeigte sich, dass durch die fallenden Massen Frequenzen oberhalb von 30 Hz angeregt wurden. Auf ihrem Laufweg durch den Untergrund werden die höheren Frequenzen der seismischen Wellen stärker gedämpft als die niedrigen Frequenzen. Dies ist auch hier zu beobachten – beispielhaft sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 die mittleren Terzspektren der Registrierungen im Abstand von 1 m bzw. 18 m vom Anregungspunkt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Frequenzen oberhalb von etwa 110 Hz fast vollständig gedämpft wurden und sich die Hauptfrequenz von etwa 100 Hz (Abbildung 3) auf ca. 50 Hz (Abbildung 4) verschoben hat. Bei größeren Abständen zum Anregungspunkt verschiebt sich das Spektrum weiter zu tieferen Frequenzen (Abbildung 5 zeigt die Hauptfrequenzen entlang in Abhängigkeit vom Abstand zum Anregungspunkt), so dass im Abstand von 70 m die Hauptfrequenz bei ca. 40 Hz liegt. Es muss erwähnt werden, dass durch die unterschiedlichen Anregungspunkte und damit bedingten kleinräumigen Unterschiede die Streubreite der angeregten Frequenzen relativ hoch ist.

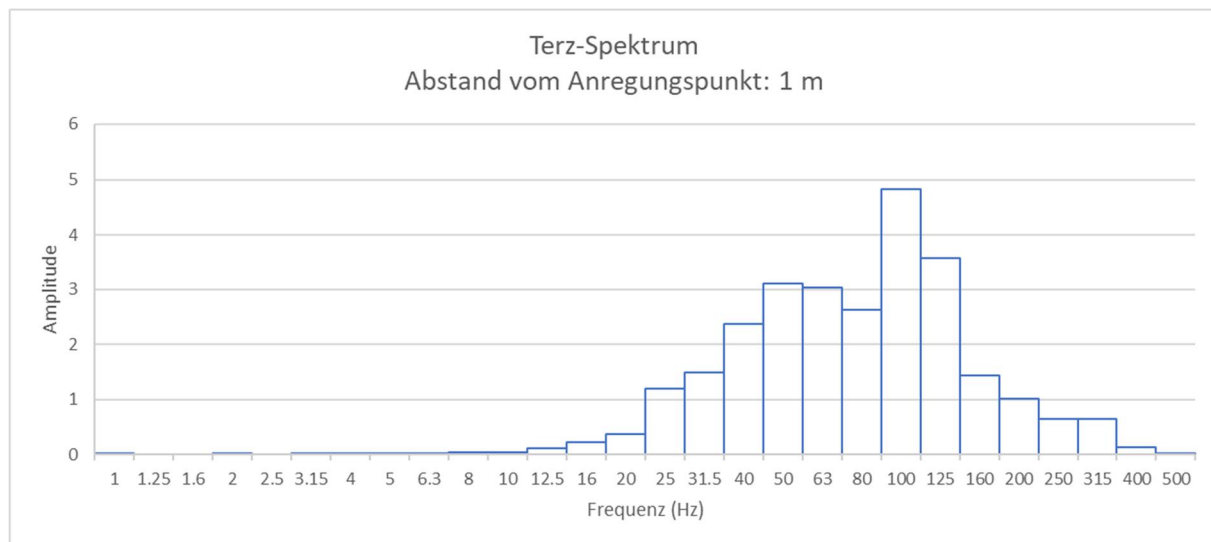


Abbildung 3: Mittleres Terzspektrum im Abstand von 1 m vom Anregungspunkt

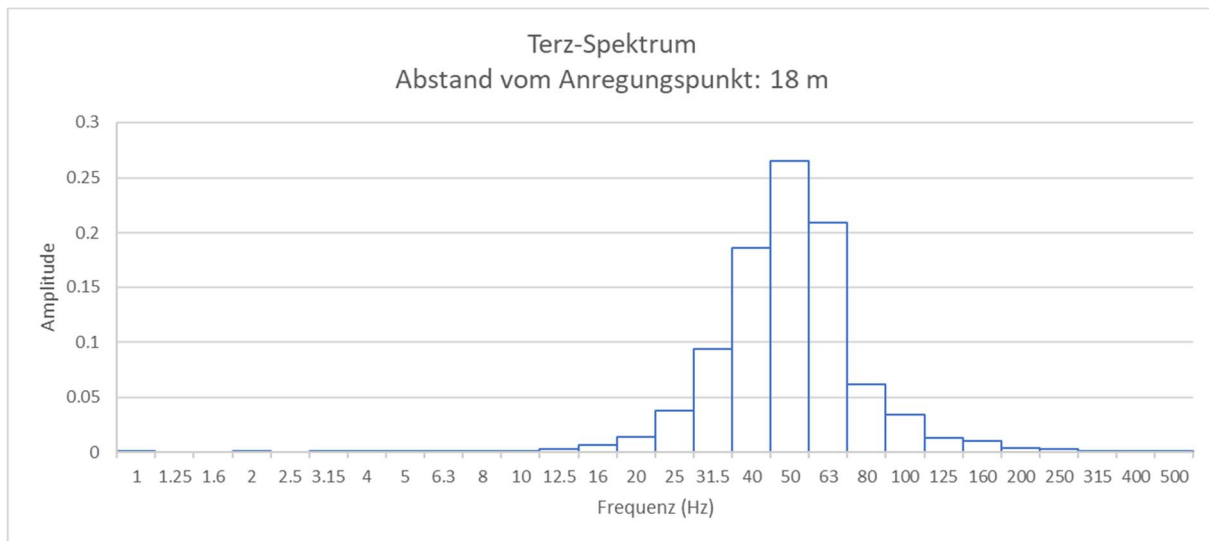


Abbildung 4: Mittleres Terzspektrum im Abstand von 18 m vom Anregungspunkt

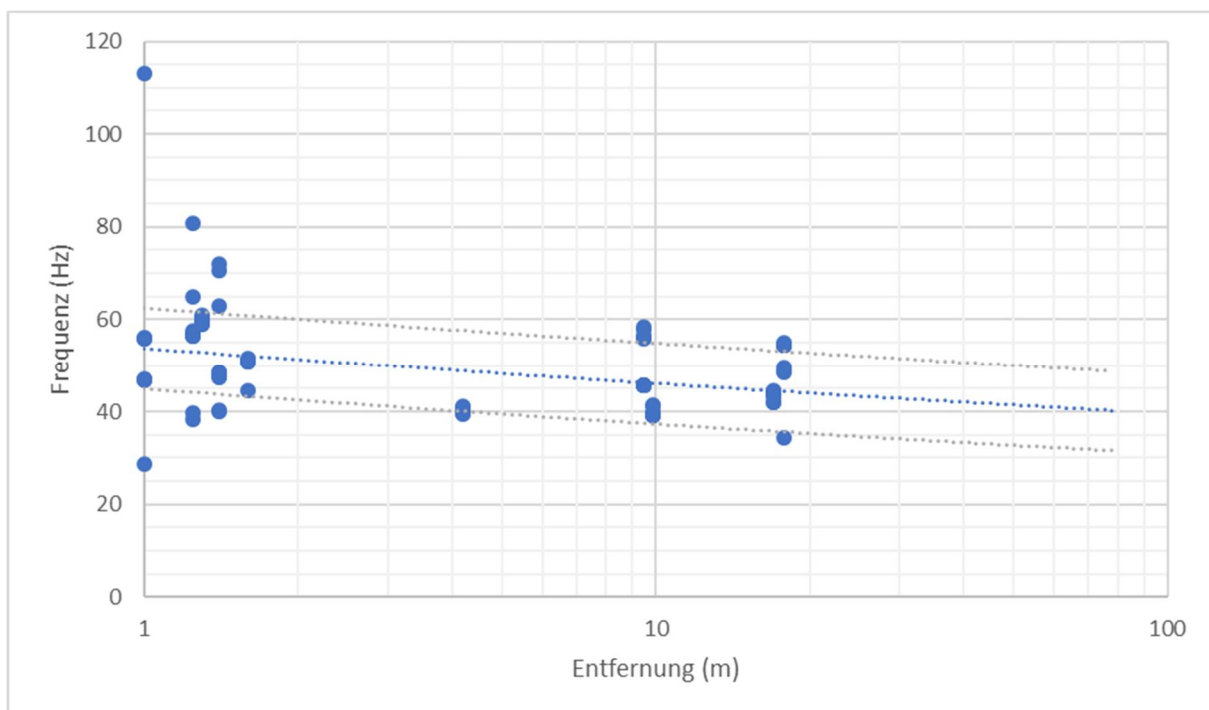


Abbildung 5: Hauptfrequenzen der Registrierungen in Abhängigkeit vom Abstand zum Anregungspunkt. Die gestrichelte blaue Linie deutet den Abnahmetrend an, die grauen gestrichelten Linien die Streubreite der mittleren Frequenzen.

Beim Übergang der Schwingungen vom Baugrund auf das Bauwerk werden die Schwingungsamplituden im Regelfall reduziert. Nach [U4] liegt die Boden-Bauwerk-Eigenfrequenz f_b für 1- bis

2-geschossige Bauwerke, wie es die Gebäude im vorliegenden Fall sind, bei mittleren Scherwellengeschwindigkeit von 150 m/s bis 200 m/s im Bereich $f_b \approx 15 \text{ Hz}$.

Durch die Falltests zeigte sich, dass die Hauptfrequenzen in den Gebäuden in Fundamentnähe bei ca. 24 Hz lagen. Dies ist auf die im Untersuchungsgebiet höheren Bodensteifigkeiten mit Scherwellengeschwindigkeiten zwischen 280 m/s und 350 m/s zurückzuführen.

Bei Anregungsfrequenzen von $f > \sqrt{2}f_b$ ist nach [U4] mit einer Amplitudenabschwächung zu rechnen, während bei $f < \sqrt{2}f_b$ eine Verstärkung möglich ist. In der Literatur finden sich Werte für den Übertragungsfaktor bei impulsartiger Anregung oberhalb der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz von $0,2 < k^{B-F} < 0,5$.

Anhand des Feldtests ergab sich hier ein Übertragungsfaktor deutlich unterhalb der oben genannten Werte von $k^{B-F} = 0,033$.

Innerhalb des Gebäudes werden die Wellen weitergeleitet. Hierbei sind insbesondere die Vertikalschwingungen der Stockwerksdecken von Bedeutung, weil sich hier erhebliche Vergrößerungen der Schwinggeschwindigkeitsamplituden ergeben können ([U6]), wenn die Decken mit ihrer Eigen- / Resonanzfrequenz angeregt werden. Bei weitgespannten Stahlbetondecken in Industriebauwerken – als solches sind die untersuchten Gebäude bautechnisch einzuordnen – beträgt die Deckenresonanzfrequenz nach [U4] und [U16] 5 Hz bis 15 Hz, meist 7 Hz bis 10 Hz.

Nach [U4] kann bei einer harmonischen Anregung mit der Deckeneigenfrequenz der maximale Übertragungsfaktor $k_{z,max}^{F-D}$ mit folgender Gleichung angenähert werden:

$$k_{z,max}^{F-D} = \frac{1}{2D}$$

D ist hierbei ein integrales Dämpfungsmaß, dass für Stahlbetondecken mit $0,02 \leq D \leq 0,05$ abgeschätzt werden kann. Hieraus ergeben sich Übertragungsfaktoren zwischen 10 und 25. Bei nicht-resonanter Anregung – das heißt, einer Anregungsfrequenz mindestens 5 Hz oberhalb der Resonanzfrequenz – sind nach [U15] Werte für $k_{z,max}^{F-D} < 1,5$ möglich.

Nach den erhobenen Daten liegt die Anregungsfrequenz in den Gebäuden bei ca. 24 Hz und damit mindestens 10 Hz oberhalb der Deckenresonanzfrequenz. Auf der sicheren Seite liegend wird der maximale Übertragungsfaktor $k_{z,max}^{F-D}$ zu 1,5 angesetzt.

In Abbildung 6 sind exemplarisch die Zeitspuren Aufzeichnungen von drei Sensoren in unterschiedlichen Abständen bei Anregung durch ein Fallgewicht dargestellt, an denen auch die Amplitudenabschwächungen im Freifeld bzw. beim Übergang ins Gebäude zu erkennen sind.

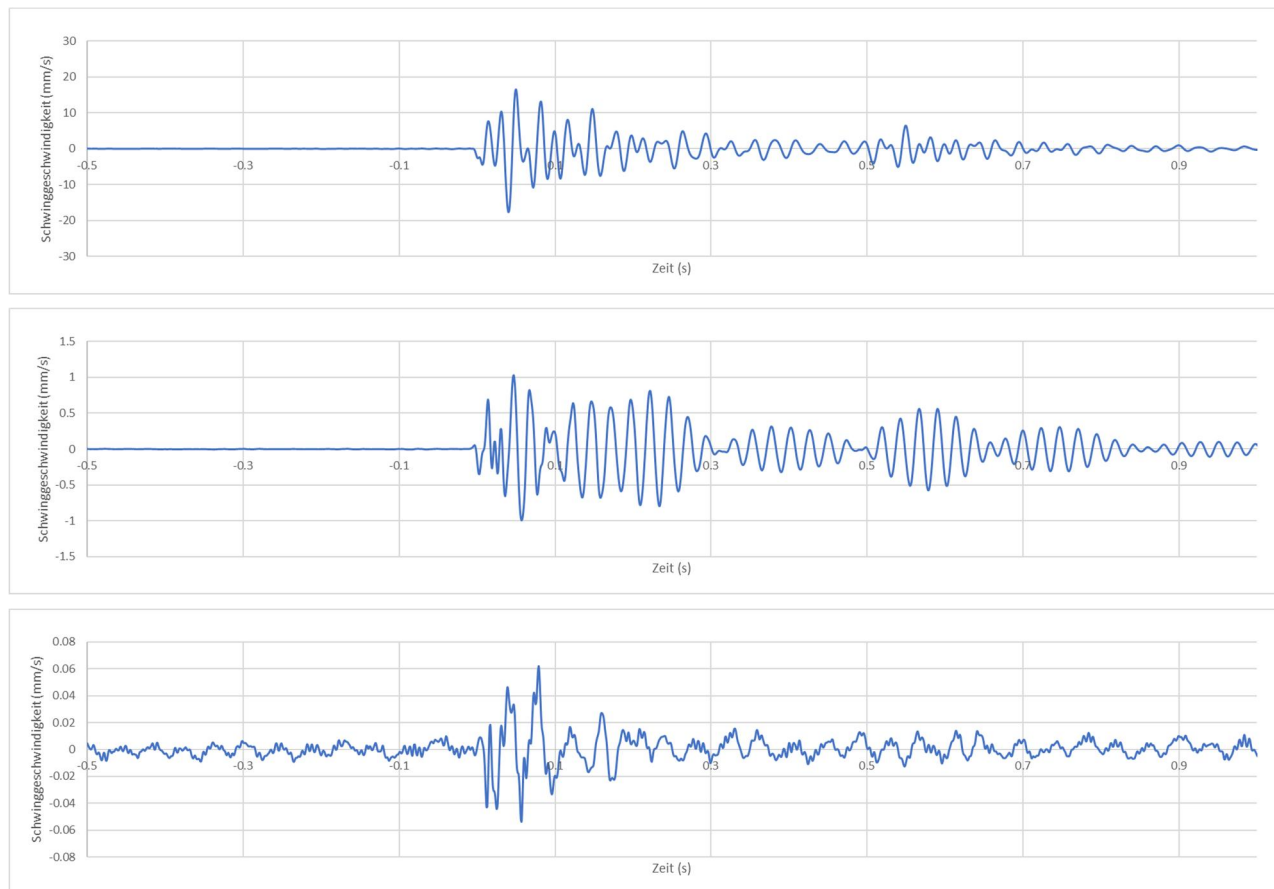


Abbildung 6: Zeitspuren der Registrierungen im Freifeld im Abstand von 1,4 m und 9,9 m vom Anregungspunkt sowie im Gebäude INF156 im Raum R004 an der Außenwand in Richtung Anregungspunkt (von oben nach unten). Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalierungen der Schwinggeschwindigkeitsachsen (siehe auch Text).

Das im Rahmen des Feldtests aufgezeichnete „Hintergrundrauschen“ im UG des Gebäudes INF156, in dem sich die erschütterungssensibelsten Geräte (Konfokalmikroskop und micro-CT) befinden, lag deutlich unterhalb der für diese Geräte einzuhaltenden Schwinggeschwindigkeitswerte (VC-B-Linie nach [U6] und Werte in [U11]; Abbildung 7).

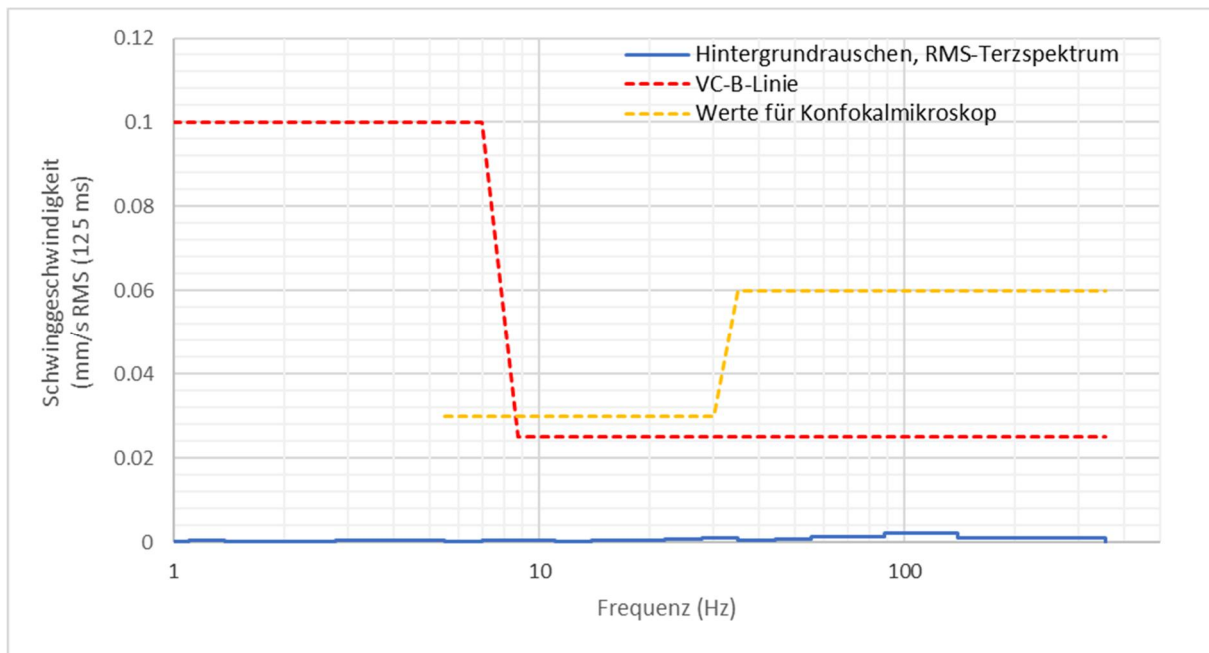


Abbildung 7: Mittleres Terzspektrum des Hintergrundrauschens im UG des INF156 sowie die VC-B-Linie und die maximal zulässigen Schwingungsgeschwindigkeitswerte für das Konfokalmikroskop

Durch die bei den Falltests erzeugten Erschütterungen wurden die Kriterien der VC-B-Linie sowie die für das Konfokalmikroskop noch eingehalten (Abbildung 8).

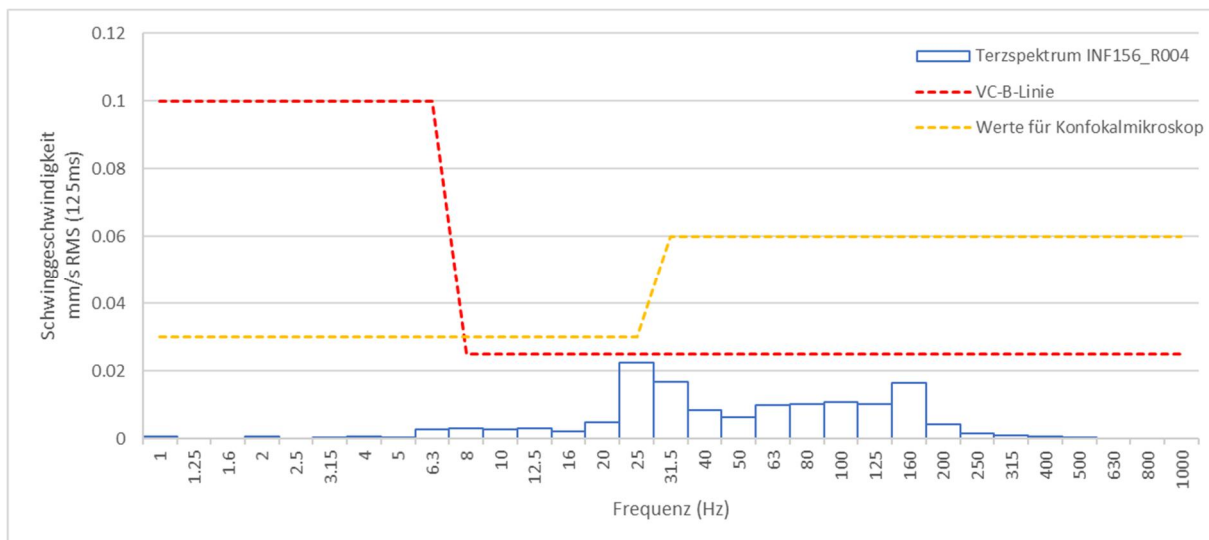


Abbildung 8: Mittleres Terzspektrum der bei den Falltests erzeugten Erschütterungen im UG des INF156 sowie die VC-B-Linie und die maximal zulässigen Schwingungsgeschwindigkeitswerte für das Konfokalmikroskop

5.5 Parameter möglicher Baugeräte

Im Rahmen dieses Gutachtens sollen erschütterungsrelevante Parameter für mögliche (Rück-) Bauverfahren und -geräte angegeben werden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden hier insbesondere der Einsatz von Hydraulikmeißeln und Zangen betrachtet. Fräsen und Sägen sind gemeinhin als erschütterungsarme Verfahren beschrieben ([U13]) und werden hier nicht betrachtet.

Da eventuell auch Spundwände mittels Vibrationsrammen und / oder Schlagrammen eingebracht werden müssen, sowie Verdichtungsgeräte wie Vibrations- und Explosionsstampfer sowie Vibrationsplatten zum Verfüllen von Leitungsgräben zum Einsatz kommen können, werden die durch diese Geräte hervorgerufenen Erschütterungen ebenfalls bewertet.

Die relevanten Geräteparameter für die verschiedenen Einsatzbereiche sind in Tabelle 5-5 aufgeführt.

Tabelle 5-5: Erschütterungserzeugende Verfahren und relevante Parameter

Abbruch	Meißel	Energie pro Meißelschlag E in kNm
	Zangen	Fallende Massen (Energie aus Fallhöhe, E in kNm)
Rammung	Vibrationsrammung	Leistung W in kW (ggf. aus Ölmenge und Öldruck zu berechnen), Betriebsfrequenz f in Hz
	Schlagrammung	Energie pro Rammschlag E in kW (ggf. aus Schlaggewicht und Fallhöhe zu berechnen)
Verdichtung	Vibrations- / Explosionsstampfer	Betriebsgewicht G in kg, Fallhöhe in m
	Vibrationsplatten	Betriebsgewicht G in t, Betriebsfrequenz f in Hz

Für die in Tabelle 5-5 angegebenen unterschiedlichen erschütterungserzeugenden Bauverfahren und -geräte werden basierend auf den Ergebnissen des Feldtests und den einzuhaltenden Werten an den medizintechnischen Geräten (VC-B-Linie nach [U6] bzw. Werte nach [U11]) im Folgenden mit den in der Literatur (z.B. [U4], [U8], [U14], [U15], [U16], [U17]) genannten Gleichungen die maximal einzuleitenden Energien festgelegt.

Abbruch mittels Zangen und Meißelarbeiten

Beim Abbruch mittels Zangen („Knabbern“) sind fallende Massen Ursache für Erschütterungen. Der Energieeintrag berechnet sich dann aus $E = m \cdot g \cdot h$, mit m : Masse, g : Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$) und h : Fallhöhe.

Die Größe der bei Meißelarbeiten – hier sind Arbeiten mit einem Hydraulikmeißel als Anbaugerät an einen Bagger gemeint – erzeugten Erschütterungen hängt von der Stoßenergie der Meißel, aber auch vom Andruck, der Neigung und Richtung des Meißels ab ([U12]). Auf der sicheren Seite liegend wird angenommen, dass die gesamte Energie eines Meißelschlags in den

Baugrund eingeleitet wird und Schwingungen hervorruft. Das Ausbreitungsverhalten der Erschütterungen entspricht dann dem bei fallenden Massen.

Die resultierende Bodenschwinggeschwindigkeit v (in mm/s) folgt der Beziehung:

$$v(r) = K \frac{\sqrt{E}}{r^\beta} \quad ([U4])$$

mit

E : von der Erschütterungsquelle eingeleitete Energie in kNm

K : Konstante, die u.a. von der Bodenart und der Art der Erschütterungsquelle abhängt

r : Entfernung zwischen Anregungspunkt und Immissionsort

β : Dämpfungskonstante

In Tabelle 5-6 sind beispielhaft entsprechende Hydraulikmeißel (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und neueste Bauart) aufgelistet, die die maximal einzuleitende Energie bei einer Arbeitsfrequenz deutlich oberhalb der Boden-Bauwerks-Frequenz einhalten.

Tabelle 5-6: Gerätedaten einiger Hydraulikmeißel ([U24])

Hersteller / Gerätebezeichnung	Gerätengewicht G (t)	Meißeldurchmesser (mm)	Schläge pro Minute	Energie pro Schlag E (kNm)
Kinshofer KFX16	0,95	115	600-900	2,6
Kinshofer KFX40	3,2	160	300-650	9,0
Atlas Copco HB 2500	2,5	155	280-580	10,4
Atlas Copco HB 4700	4,7	190	280-540	15,0

Schlag- und Vibrationsrammen

In der Regel machen die Hersteller von Schnellschlag- oder Vibrationsrammen keine Angaben zur Vibrationsenergie in ihren Datenblättern, kann nach [U8] die emittierte Energie E (in kNm) für Vibrationsrammen und Schnellschlaghämmer über den Ansatz

$$E = \frac{W}{f}$$

mit

W : hydraulische Leistung in kW ($W = \text{Ölstrom (l/s)} \cdot \text{Betriebsdruck (MPa)}$)

f : (Schlag-)Frequenz in Hz

abgeschätzt werden.

Zur Vermeidung von Resonanzeffekten beim Schwingungsübergang vom Boden ins Bauwerk müssen Vibrationsrammungen mit Frequenzen deutlich oberhalb der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz durchgeführt werden. In Tabelle 5-7 sind beispielhaft entsprechende Geräte (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und neueste Bauart) aufgelistet, die die maximale Energie bei einer Arbeitsfrequenz deutlich oberhalb der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz einleiten.

Tabelle 5-7: Gerätedaten einiger Vibrationsrammen ([U8])

Hersteller / Gerätebezeichnung	Gerätegewicht G_{vib} (t)	Statisches Moment M_s (kgm)	Frequenz f (Hz)	Fliehkraft F_0 (kN)	Vibratorleistung W (kW)	Energie $E=W/f$ (kNm)
Tünkers HVB 16	0,90	3,2	35	157,2	67	1,91
Müller MS-5 HFBV	1,58	0-5,0	45	400	95	2,11
ABI MRZ 500 V	2,82	0-6,0	46	500	>100	>2,17

Für die Spundwanderstellung sind hochfrequente Vibratoren mit Regelsystem einzusetzen, bei denen ein Durchlaufen von Resonanzfrequenzen – insbesondere die des Systems Boden-Bauwerk – beim An- oder Abfahren des Vibrators durch ein im Betrieb veränderliches statisches Moment verhindert wird.

Bei Fallhämmern oder Hydraulikhämmern kann – falls keine Herstellerangaben zur maximalen Schlagenergie vorliegen – die Energie aus dem Gewicht und der Fallhöhe des Schlaggewichts ermittelt werden. In Tabelle 5-8 sind beispielhaft entsprechende Geräte (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und neueste Bauart) aufgelistet, die die maximale Energie bei einer Arbeitsfrequenz deutlich oberhalb der Boden-Bauwerks-Frequenz einleiten.

Tabelle 5-8: Gerätedaten einiger Schlagrammen ([U8], [U18], [U19])

Art des Rammbarren	Hersteller / Gerät	Schlaggewicht m (t)	Max. Fallhöhe h (m)	Schlagfrequenz f (1/min)	Energie E (kNm)
Dieselbär	Delmag D 8-22	0,80	--	36 - 52	27 – 13
	Delmag D 12-42	1,28	--	35 - 52	46 – 20
	Delmag D 16-32	1,60	--	36 - 52	54 – 25
Hydraulikbär	Menck MHF 3-7	7,0	1,07	45	80,0
	Menck MHF 10-20	20,0	1,10	40	225,0

Vibrations- und Explosionsstampfer

Für Vibrations- und Explosionsstampfer kann der für die Anregung von Erschütterungen relevante Energieeintrag in den Boden näherungsweise aus

$$E = m \cdot g \cdot h$$

mit

m : Gerätegewicht in kg

g : Fallbeschleunigung ($g=9,81 \text{ m/s}^2$)

h : Fallhöhe in m

abgeschätzt werden.

Tabelle 5-9: Gerätedaten einiger Vibrations- und Explosionsstampfer ([U24])

Gerätetyp	Hersteller / Gerät	Gerätegewicht m (kg)	Sprunghöhe h (mm)	Schlagfrequenz f (1/min)	Energie E (kNm)
Vibrationsstampfer	Wacker-Neuson BS50-4As	58	61	656	0,035
	Ammann AVS 68-4	68	65	680	0,041
	Zipper ZI-RAM80C	89	40 – 65	600 - 700	0,035 – 0,057
Explosionsstampfer	Delko H2S	104	460	60- 80	0,470

Vibrationsplatten / Rüttelplatten

Für Vibrationsplatten bzw. Rüttelplatten, bei denen die vertikale Schwingwegamplitude und damit der Energieeintrag von den Geräteeinstellungen wie z.B. der Vorlaufgeschwindigkeit abhängen, kann der maximale Energieeintrag zu

$$E_{max} = \pi \frac{F_0^2}{(2\pi f)^2 G_{dyn}}$$

mit

F_0 : Fliehkraft in kN

f : Betriebsfrequenz in Hz

G_{dyn} : dynamisches (mitschwingendes) Gerätegewicht in t definiert werden ([U8]).

Tabelle 5-10: Gerätedaten einiger Vibrationsplatten / Rüttelplatten ([U24])

Hersteller / Gerät	Gerätegewicht m (kg)	Fliehkraft F_0 (kN)	Betriebsfrequenz f (Hz)	Energie E (kNm)
Scheppach HP800S	50	8,2	98	0,0111
Bomag BP 25/50 D	122	25	92	0,0482
Wacker-Neuson DPU6555H	480	65	69	0,1471
Ammann APH 110-95	778	110	48	0,5372

6 ERGEBNIS DER PROGNOSEBERECHNUNGEN

Ausgehend von den ermittelten Übertragungsparametern (s. Kapitel 5.4) ergeben sich für die hier betrachteten Arbeiten „Gebäuderückbau“, „Spundwandherstellung“ und „Verdichtung von Leitungsgräben“ für die verschiedenen Gebäude und insbesondere den darin befindlichen medizinischen Geräten unterschiedliche Erschütterungsbelastungen, die im Folgenden näher betrachtet werden.

Ausgangspunkt für die Erschütterungseinwirkungen auf die Gebäude sind einerseits kurzzeitige Ereignisse wie fallende Massen, Meißelschläge und Rammschläge, andererseits „Dauereinwirkungen“ infolge von Vibrationsrammungen oder Verdichtungsarbeiten, die in der DIN 4150, Teil 3 unterschiedlich bewertet werden.

Die maximale Schwinggeschwindigkeit im Freifeld nimmt mit zunehmendem Abstand zum Emissionsort ab. In Abbildung 9 ist dies mit den aus dem Falltest prognostizierten Parametern in Anhängig der in den Boden eingeleiteten Energie dargestellt.

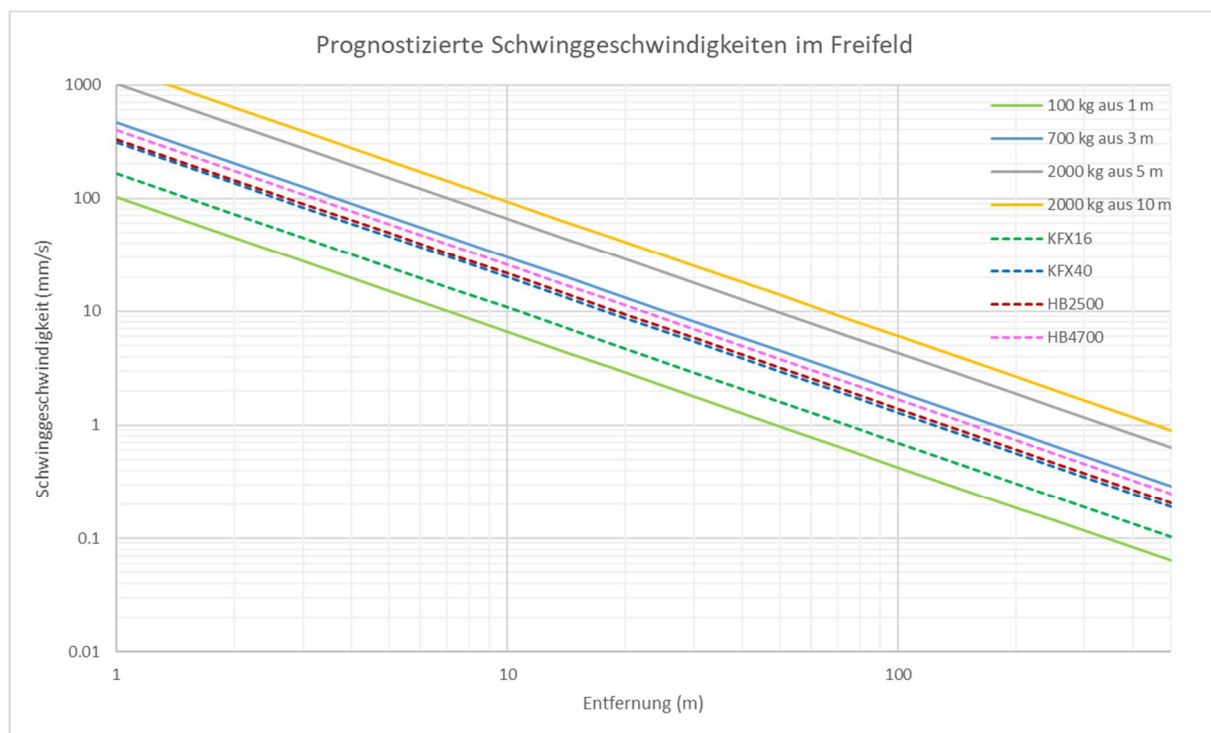


Abbildung 9: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Freifeld in Abhängigkeit von der fallenden Masse bzw. der Energie eines Schlags unterschiedlicher Meißel (siehe Kapitel 5.5) und der Entfernung zum Anregungspunkt (mit statistischer Sicherheit P=95%)

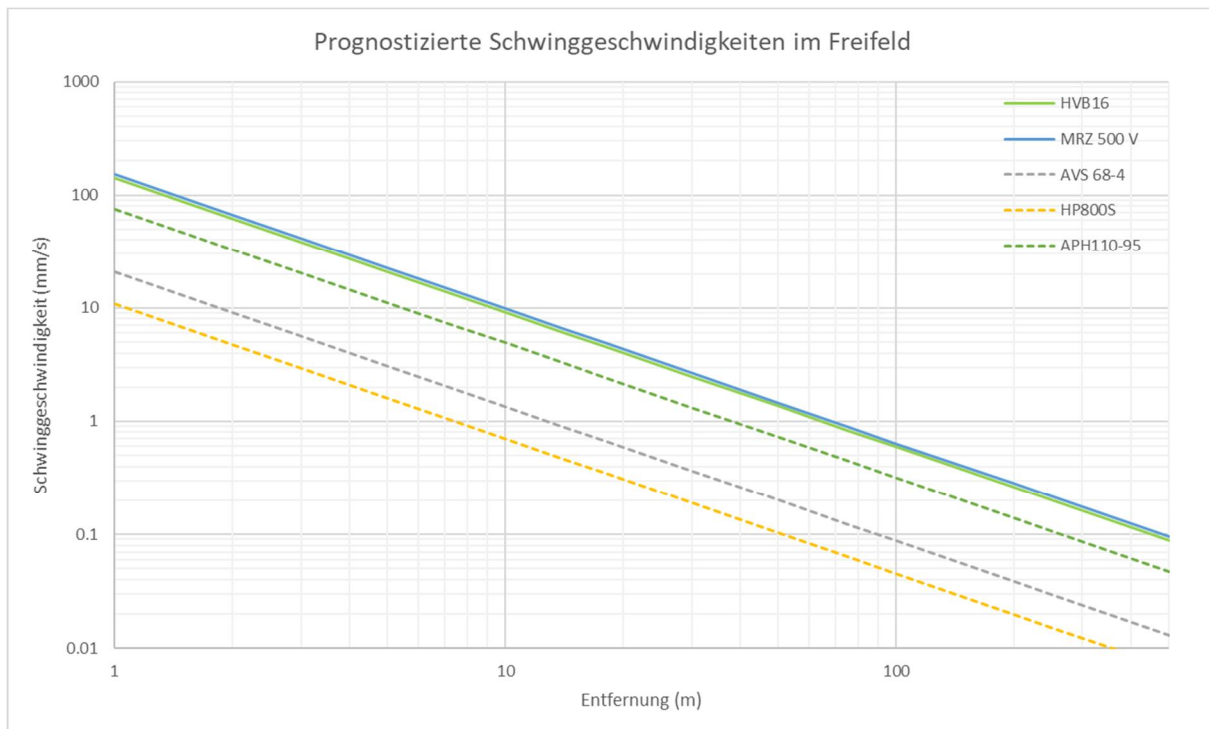


Abbildung 10: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Freifeld bei Anregung durch Vibrationsrammen oder Verdichtungsgeräte (siehe Kapitel 5.5) und der Entfernung zum Anregungspunkt (mit statistischer Sicherheit $P=95\%$)

Für die einzelnen Gebäude und den darin befindlichen medizintechnischen Geräten ergeben sich im Einzelnen die in den folgenden Kapiteln erläuterten Konsequenzen.

6.1 INF156 – Deutsches Zentrum für Lungenforschung (DZL)

Das INF156 ist ein 3-geschossiges (Keller, EG, OG) Labor- und Bürogebäude und befindet sich südlich des Baufeldes des geplanten Herzzentrums.

Am Fundament des Gebäudes INF156, das sich in einer minimalen Entfernung von ca. 13 m von den Abbruchgebäuden befindet, werden bei den betrachteten Erschütterungseinwirkungen (maximal eine fallende Masse von 2000 kg aus 10 m Höhe) die Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 3 ([U4]) deutlich eingehalten (Abbildung 11). Ebenso sind im Obergeschoss des Gebäudes keine Überschreitungen der Anhaltswerte zu erwarten (Abbildung 12).

Eine Schädigung des Gebäudes im Sinne der Norm ist für die hier betrachteten Fälle somit nicht zu erwarten.

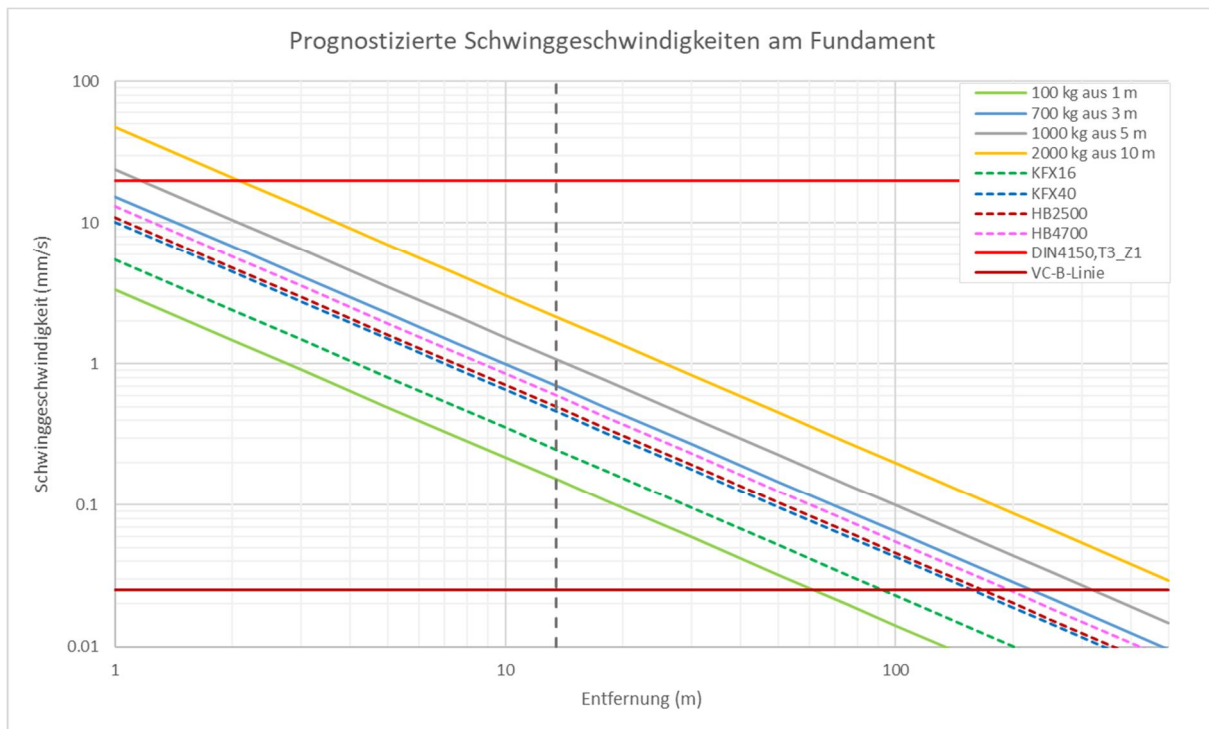


Abbildung 11: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF156 bei kurzzeitiger Einwirkung in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der kleinste Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 eingetragen. Die dunkelrote Linie markiert den Wert der VC-B-Linie für Frequenzen oberhalb 8 Hz. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

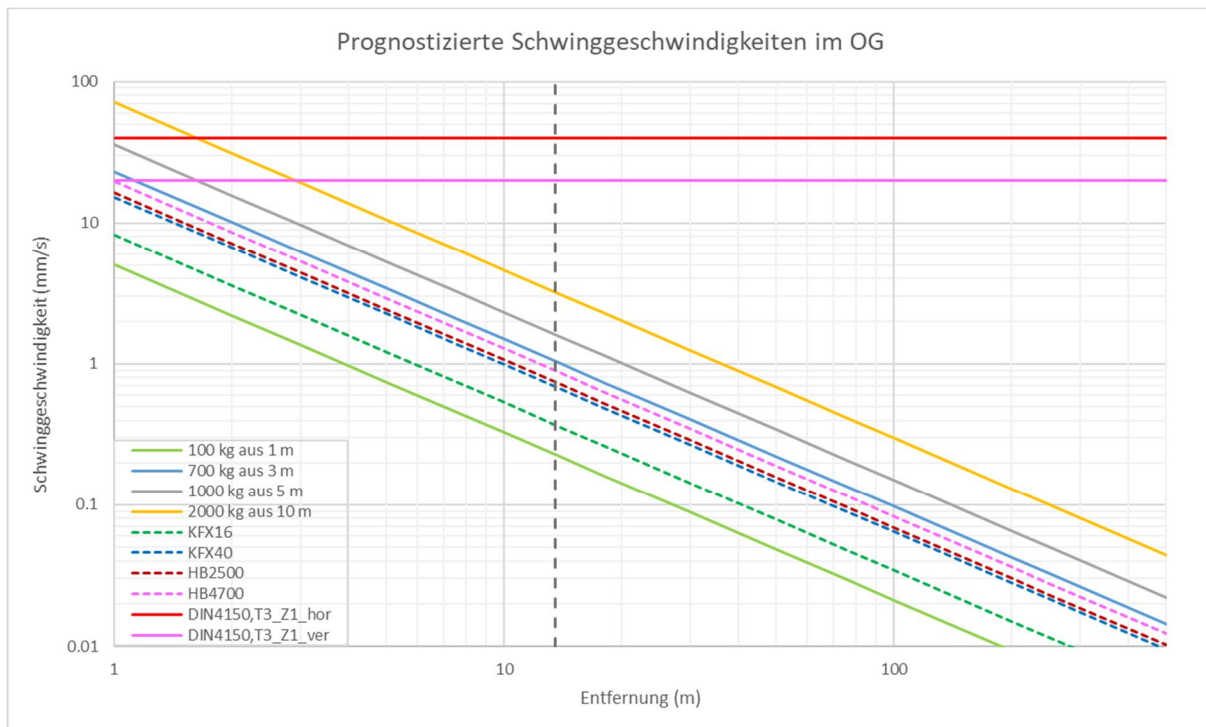


Abbildung 12: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF156 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 für horizontale und mit der magentafarbenen Linie für vertikale Schwingungen eingetragen. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

Im Untergeschoss des Gebäudes werden einige erschütterungsempfindliche medizintechnische Geräte betrieben. Dies sind insbesondere

- Ultrafeinwaage (auf Marmortisch)
- Ultrazentrifuge
- micro-CT
- Konfokalmikroskop

Nach der im Internet verfügbaren Broschüre zum micro-CT ([U10]) ist mit dem Gerät eine maximale Auflösung von $9\text{ }\mu\text{m}$ möglich. Als einzuhaltendes Kriterium hinsichtlich der Erschütterungsfestigkeit wird auf der sicheren Seite liegend die VC-Linie B der VDI 2038, Blatt 2 ([U6]) angenommen. Im Frequenzbereich um 2 Hz des RMS-Terzspektrums sind demnach Schwinggeschwindigkeiten bis zu $100\text{ }\mu\text{m/s}$ und im Bereich 8 Hz bis 100 Hz bis zu $25\text{ }\mu\text{m/s}$ zulässig. Es ist nicht bekannt, ob das micro-CT auf schwingungsdämpfenden Füßen steht, so dass für die weiteren Betrachtungen davon ausgegangen wird, dass dies nicht der Fall ist und somit die Gebäudefundamentalschwingungen ungedämpft auf das Gerät übertragen werden.

Für das Konfokalmikroskop, das momentan auf einem normalen Labortisch steht, sind nach der von einem Mitarbeiter des DZL zur Verfügung gestellten Betriebsanleitung ([U11]) Schwinggeschwindigkeiten bis 30 $\mu\text{m/s}$ zwischen 5 Hz und 30 Hz zulässig, bei höheren Frequenzen sollen 60 $\mu\text{m/s}$ nicht überschritten werden.

Die anderen medizintechnischen Geräte sind i.d.R. in geringeren Anforderungsklassen einzuordnen.

Die nach obigen Szenarien auf die medizintechnischen Geräte einwirkenden Erschütterungen übersteigen den zulässigen Wert der VC-B-Linie (entspricht im interessierenden Frequenzbereich etwa dem Wert für das Konfokalmikroskop) um ein Vielfaches. Selbst bei geringen Energieeinträgen in den Baugrund (z.B. 100 kg aus 1 m Höhe) werden die Anforderungen nicht eingehalten (Abbildung 11 und Abbildung 13).

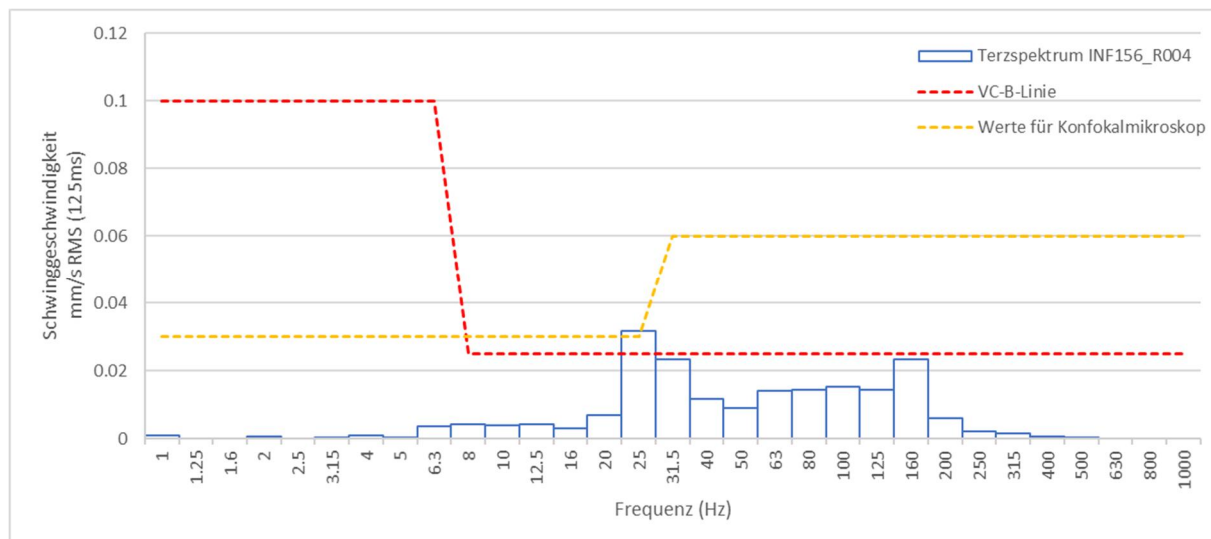


Abbildung 13: Prognostiziertes Terzspektrum der durch eine aus 1 m Höhe fallenden Masse von 100 kg erzeugten Erschütterungen im UG des INF156 sowie die VC-B-Linie und die max. Schwinggeschwindigkeitswerte für das Konfokalmikroskop

Die durch „Dauereinwirkungen“ (Einvibrieren von Spundwänden oder Verdichtungsarbeiten) an den Geräten im UG hervorgerufenen maximalen Schwinggeschwindigkeiten liegen nach den Prognoseberechnungen infolge der großen Abstände zwischen den Anregungspunkten und dem Gebäude INF156 unterhalb der VC-B-Linie (Abbildung 14).

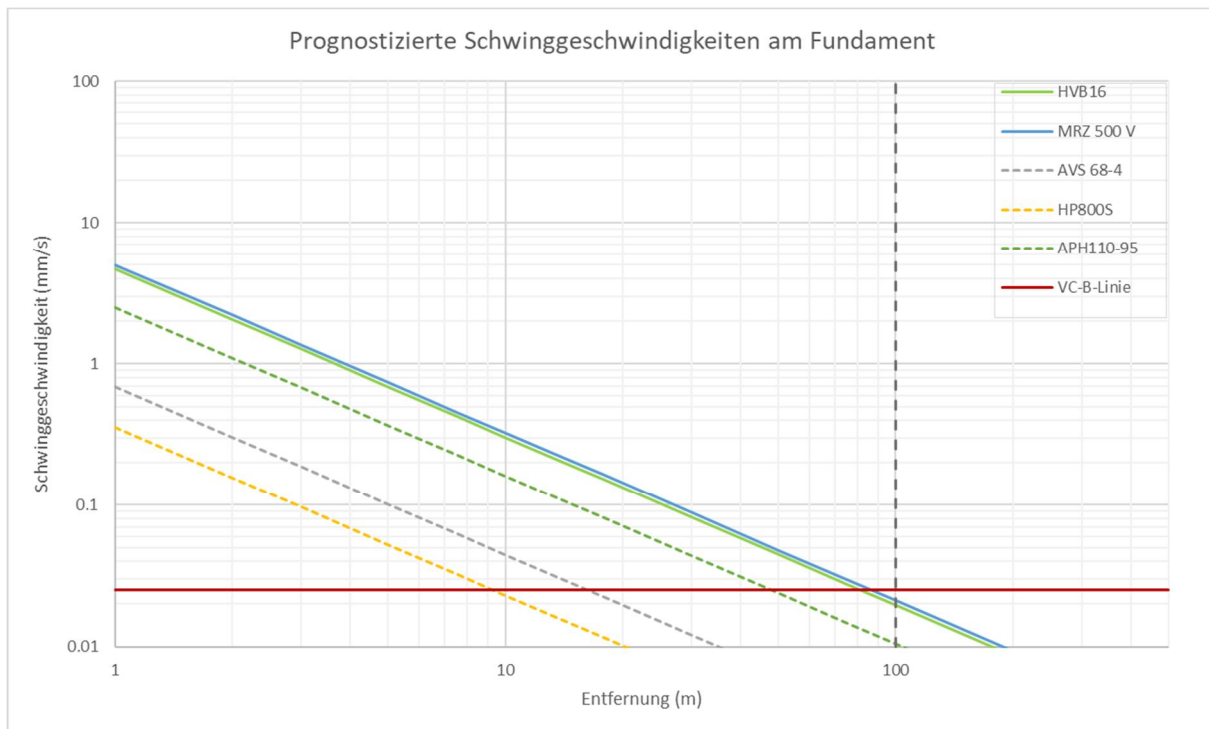


Abbildung 14: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF156 bei Dauereinwirkungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$). Die dunkelrote Linie markiert den Wert der VC-B-Linie für Frequenzen oberhalb 8 Hz. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zur Spundwandachse vor Gebäude INF154.

Zur Einhaltung der Anforderungen der VC-B-Linie sind erschütterungsmindernde Maßnahmen erforderlich.

Nach vorliegenden Informationen ([U22]) sollen Baustraßen entlang des Gebäudes INF156 führen, so dass neben den oben betrachteten Erschütterungen auch Schwingungen durch Baustellenfahrzeuge o.ä. zu erwarten sind. Basierend auf den Erfahrungen aus Messungen in anderen Projekten wird davon ausgegangen, dass durch „normalem“ LKW-Baustellenverkehr ohne abruptes Beschleunigen oder Bremsen keine Erschütterungen in relevanter Höhe erzeugt werden.

6.2 INF162 – Nierenzentrum

Das INF162 ist ein 5-geschossiges (zweifach unterkellert, EG, zwei Obergeschosse) Gebäude mit Behandlungs- und Krankenzimmern (u.a. Dialysegeräte) sowie im 2.OG einem biochemischen Labor mit erschütterungsempfindlichen Mikroskopen, die der Klasse der VC-A-Linie

(0,4 mm/s bei 2 Hz; 0,1 mm/s bei 8 Hz-100 Hz) zuzuordnen sind. Das Gebäude befindet sich westlich des Baufeldes des geplanten Herzzentrums.

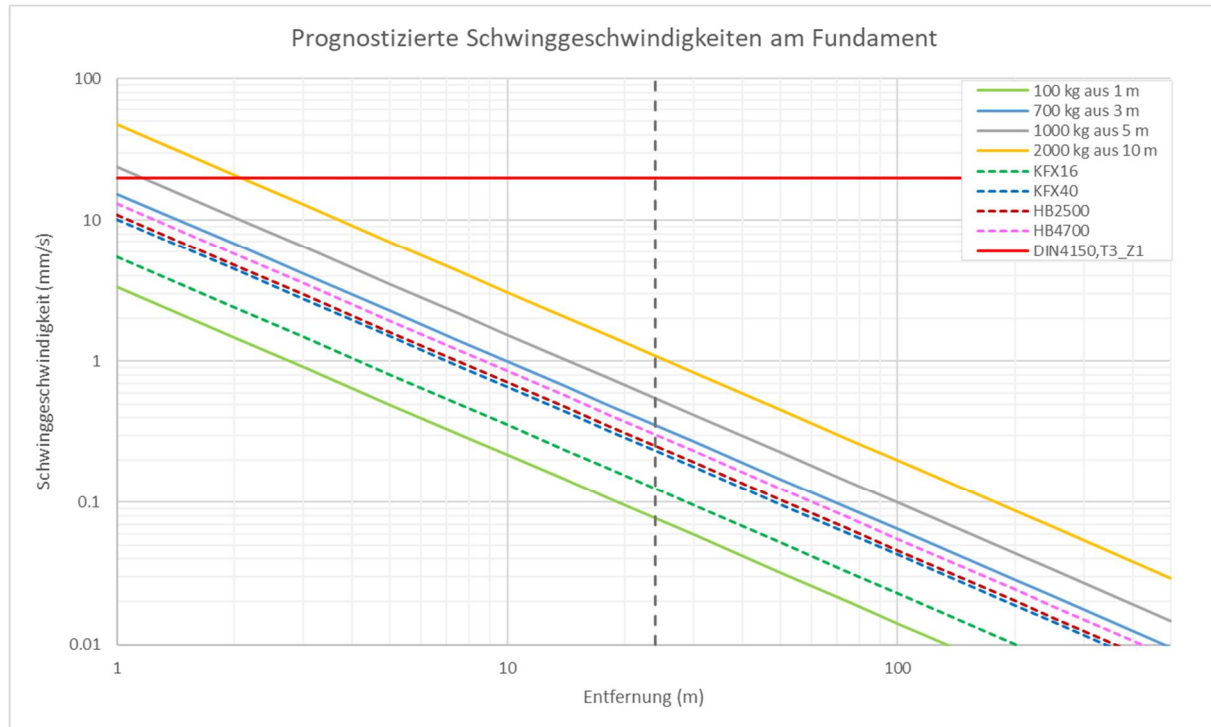


Abbildung 15: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF162 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der kleinste Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 eingetragen. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

Am Fundament des Gebäudes, das sich in einer minimalen Entfernung von ca. 24 m von den Abbruchgebäuden befindet, werden bei den betrachteten Erschütterungseinwirkungen (maximal eine fallende Masse von 2000 kg aus 10 m Höhe) die Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 3 ([U4]) deutlich eingehalten (Abbildung 15). Ebenso sind im Obergeschoss des Gebäudes keine Überschreitungen der Anhaltswerte zu erwarten (Abbildung 16).

Eine Schädigung des Gebäudes im Sinne der Norm ist für die hier betrachteten Fälle nicht zu erwarten.

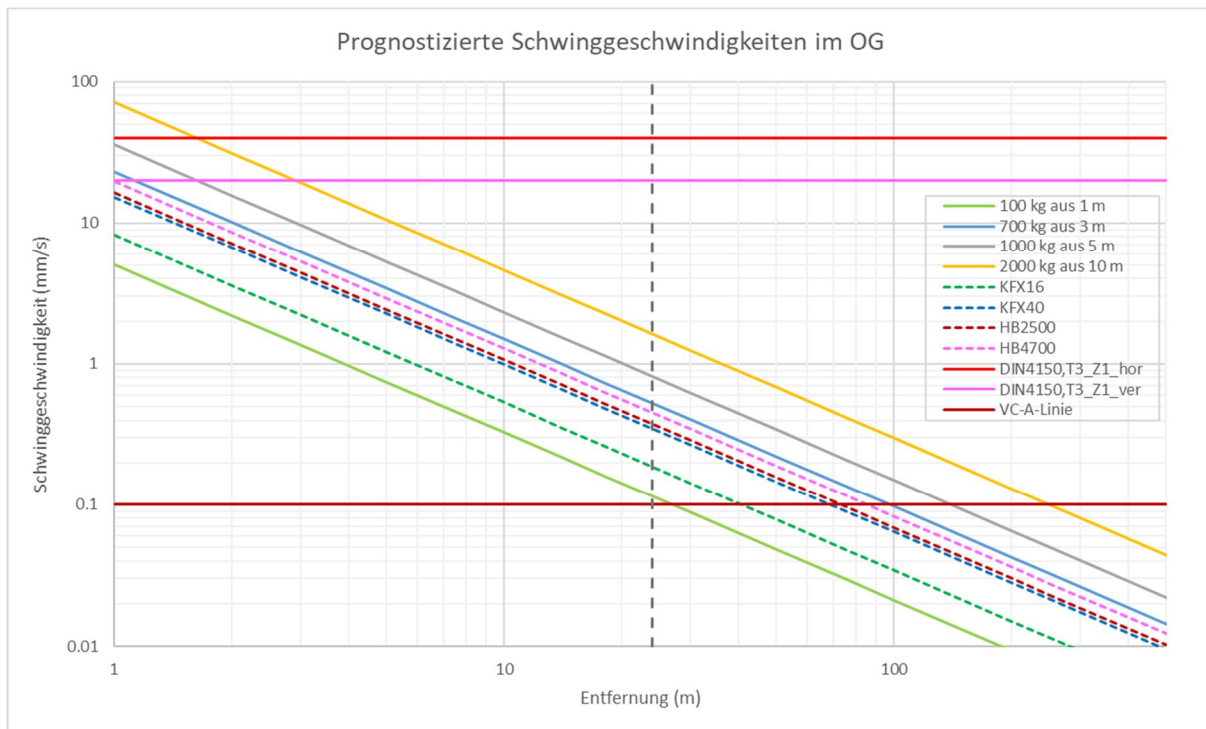


Abbildung 16: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF162 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 für horizontale und mit der magentafarbenen Linie für vertikale Schwingungen eingetragen. Die dunkelrote Linie markiert den Wert der VC-A-Linie für Frequenzen oberhalb 8 Hz, die senkrechte gestrichelte Linie den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

Im Obergeschoss des Gebäudes werden durch die kurzzeitigen einwirkenden Erschütterungen (fallende Massen, Meißelarbeiten) Schwinggeschwindigkeiten oberhalb der Werte der VC-A-Linie auftreten (Abbildung 16). Bei den durch die hier betrachteten Vibrationsrammen zur Spundwand-erstellung emittierten Dauererschütterungen dürften die entsprechenden Werte eingehalten werden (Abbildung 17). Für die Verdichtung des Leitungsgrabens an der nördlichen Stirnseite des Gebäudes dürfen zur Einhaltung der Werte der VC-A-Linie nur Vibrations- oder Rüttelplatten mit einer Fliehkraft unter 50 kN zum Einsatz kommen.

Zur Einhaltung der Kriterien der VC-A-Linie sind erschütterungsmindernde Maßnahmen erforderlich.

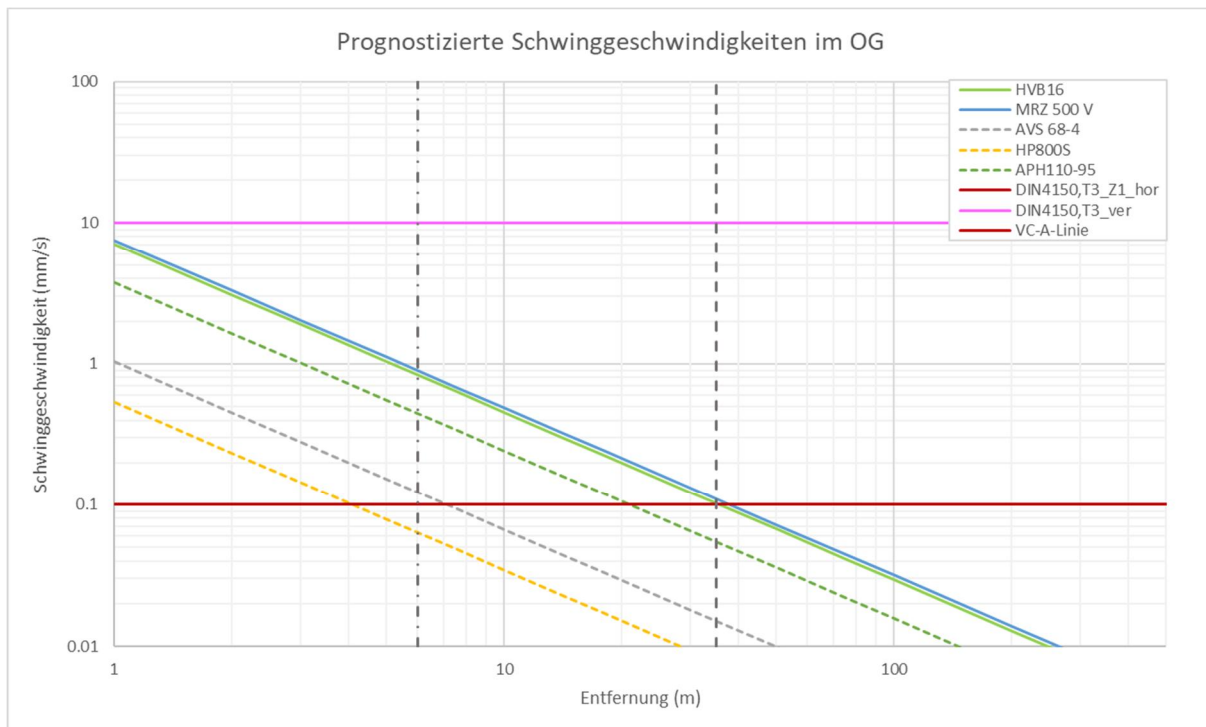


Abbildung 17: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF162 infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 für horizontale und mit der magentafarbenen Linie für vertikale Schwingungen eingetragen (hier identisch). Die dunkelrote Linie markiert den Wert der VC-A-Linie für Frequenzen oberhalb 8 Hz, die senkrechte gestrichelte Linie den minimalen Abstand zur Spundwand und die strich-punktierte Linie den Abstand zum Leitungsgraben.

6.3 INF165 – Leit- und Informationszentrale

Das INF165 ist ein eingeschossiges, containerartiges Bürogebäude, in dem sich Server befinden. Da keine Angaben zur Erschütterungsfestigkeit vorliegen, werden die Server basierend auf Erfahrungen aus einer Vielzahl von anderen Erschütterungsüberwachungsprojekten in Rechenzentren der Klasse 3M1 der DIN 60721-3-3 ([U5]) zugeordnet.

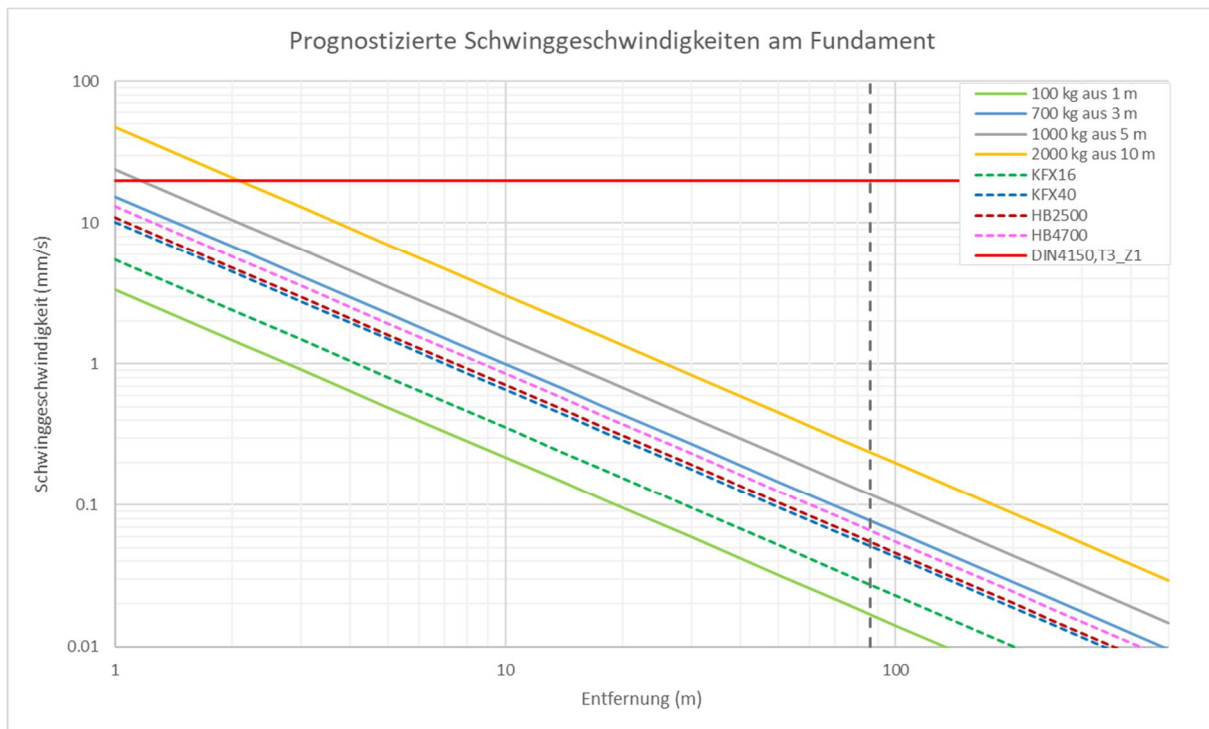


Abbildung 18: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF165 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der kleinste Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 eingetragen. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

Der Anhaltswert der DIN 4150, Teil 3 wird bei kurzzeitigen Erschütterungseinwirkungen eingehalten (Abbildung 18).

Die durch Ramm- und Verdichtungsarbeiten am Server auftretenden maximalen Schwinggeschwindigkeiten liegen unterhalb der Werte der Klasse 3M1 der DIN 60721-3-3 ([U5], Abbildung 19).

Erschütterungsmindernde Maßnahmen sind nicht erforderlich.

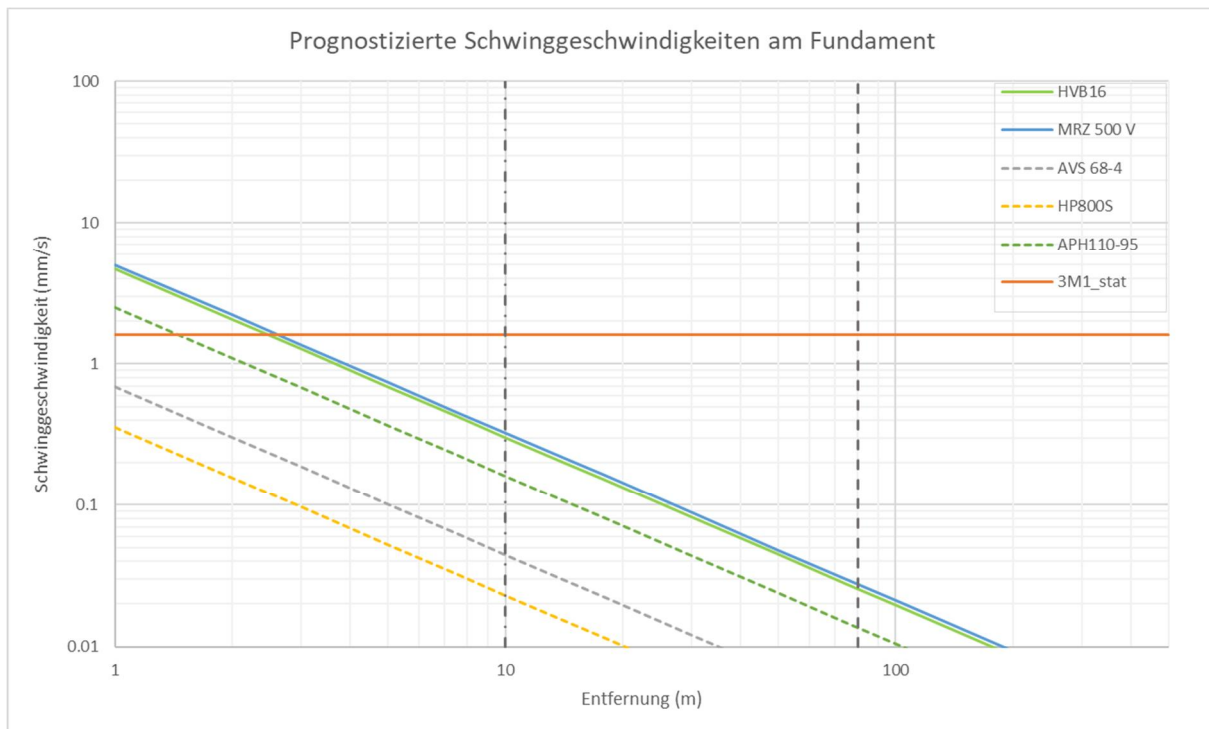


Abbildung 19: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF165 bei Dauereinwirkungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$). Die orange Linie markiert den minimalen Wert der Klasse 3M1 für Frequenzen zwischen 9 Hz und 100 Hz. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zur Spundwandachse vor Gebäude INF154, die strich-punktierte Linie den Abstand zum Leitungsgraben.

6.4 INF360 – Centre for Organismal Studies (COS)

Das INF360 ist ein dreigeschossiges (Keller, EG, OG) Büro- und Laborgebäude, das zum Teil unter Denkmalschutz steht, aber aufgrund der Bausubstanz nach Zeile 3 der Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 3 („Gewerblich genutzte Bauten, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten“) einzuordnen ist. Es befindet sich ca. 40 m nördlich des Baufeldes.

Nach Auskunft eines Mitarbeiters des COS ist geplant, ein erschütterungsempfindliches Mikroskop im OG zu installieren. Da hierzu keine weiteren Daten vorliegen, wird die VC-A-Linie als Kriterium angesetzt und für die weiteren Betrachtungen angenommen, dass das Gerät nicht erschütterungsgedämpft aufgestellt wird.

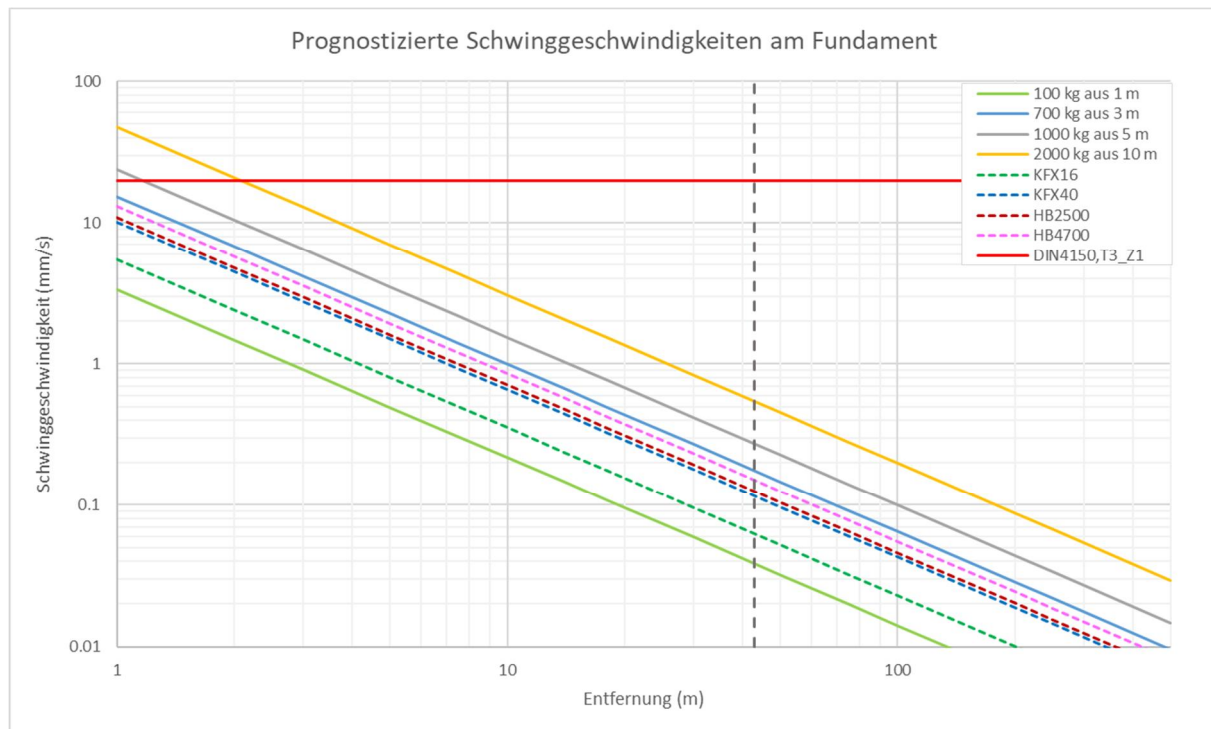


Abbildung 20: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF360 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der kleinste Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 eingetragen. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

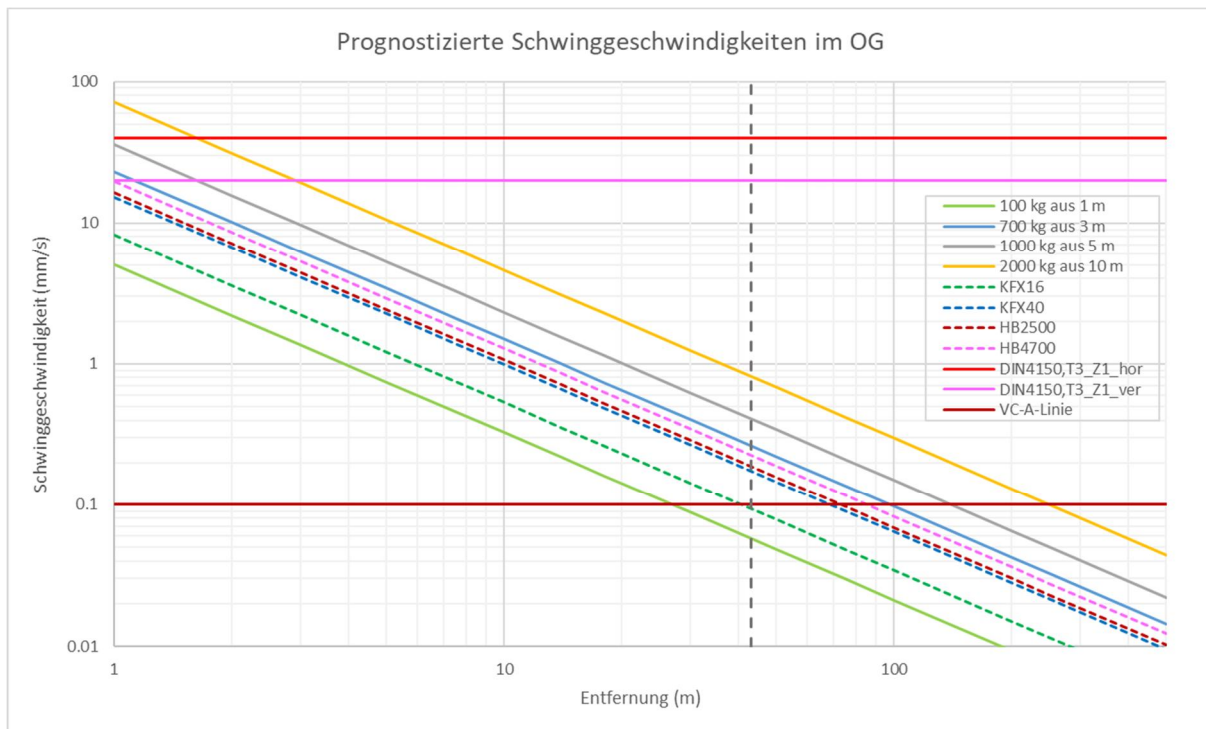


Abbildung 21: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF360 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 für horizontale und mit der magentafarbenen Linie für vertikale Schwingungen eingetragen. Die dunkelrote Linie markiert den Wert der VC-A-Linie für Frequenzen oberhalb 8 Hz, die senkrechte gestrichelte Linie den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

Die Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 3 werden bei Erschütterungseinwirkungen durch die hier betrachteten Emittenten eingehalten (Abbildung 20 bis Abbildung 22).

Eine Schädigung des Gebäudes infolge der baustellenbedingten Erschütterungseinwirkungen ist nicht zu erwarten.

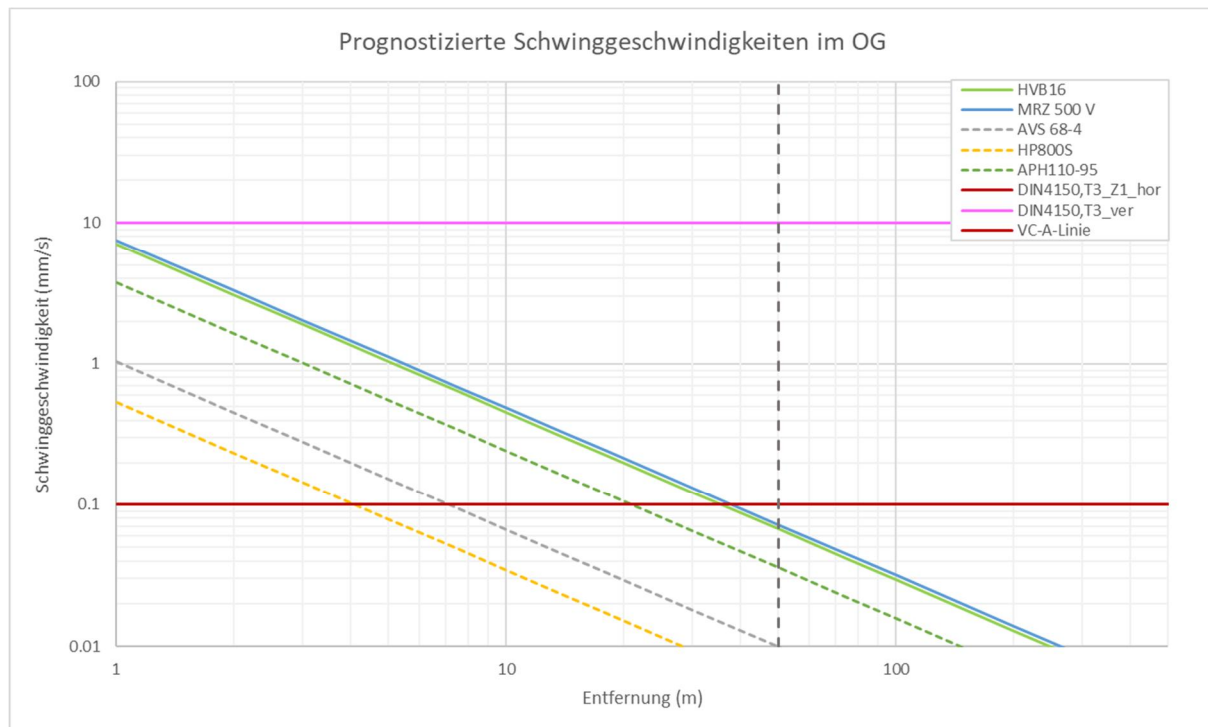


Abbildung 22: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF360 infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 für horizontale und mit der magentafarbenen Linie für vertikale Schwingungen eingetragen (hier identisch). Die dunkelrote Linie markiert den Wert der VC-A-Linie für Frequenzen oberhalb 8 Hz, die senkrechte gestrichelte Linie den minimalen Abstand zur Spundwand.

Infolge kurzzeitiger Erschütterungseinwirkungen durch fallende Massen oder Meißelarbeiten werden die Werte der VC-A-Linie am geplanten Mikroskop im OG überschritten (Abbildung 21). Die durch Vibrationsrammungen verursachten und im OG auftretenden maximalen Schwinggeschwindigkeiten werden unterhalb der Werte der VC-A-Linie (Abbildung 22) bleiben.

Zur Einhaltung der Kriterien der VC-A-Linie sind erschütterungsmindernde Maßnahmen erforderlich.

6.5 INF361 – Boga-Zentrum

Das INF361 ist ein modernes dreigeschossiges (Keller, EG, OG) Büro- und Laborgebäude etwa 30 m nördlich des Baufeldes.

Nach Auskunft eines Mitarbeiters des Botanischen Gartens ([U23]) ist geplant, ein RNA-Analysegerät im Gebäude zu installieren. Nach den verfügbaren Unterlagen ([U24]) ist allerdings nicht davon auszugehen, dass das Gerät als besonders erschütterungsempfindlich anzusehen ist. Auf eine weitergehende Betrachtung wird hier deshalb verzichtet.

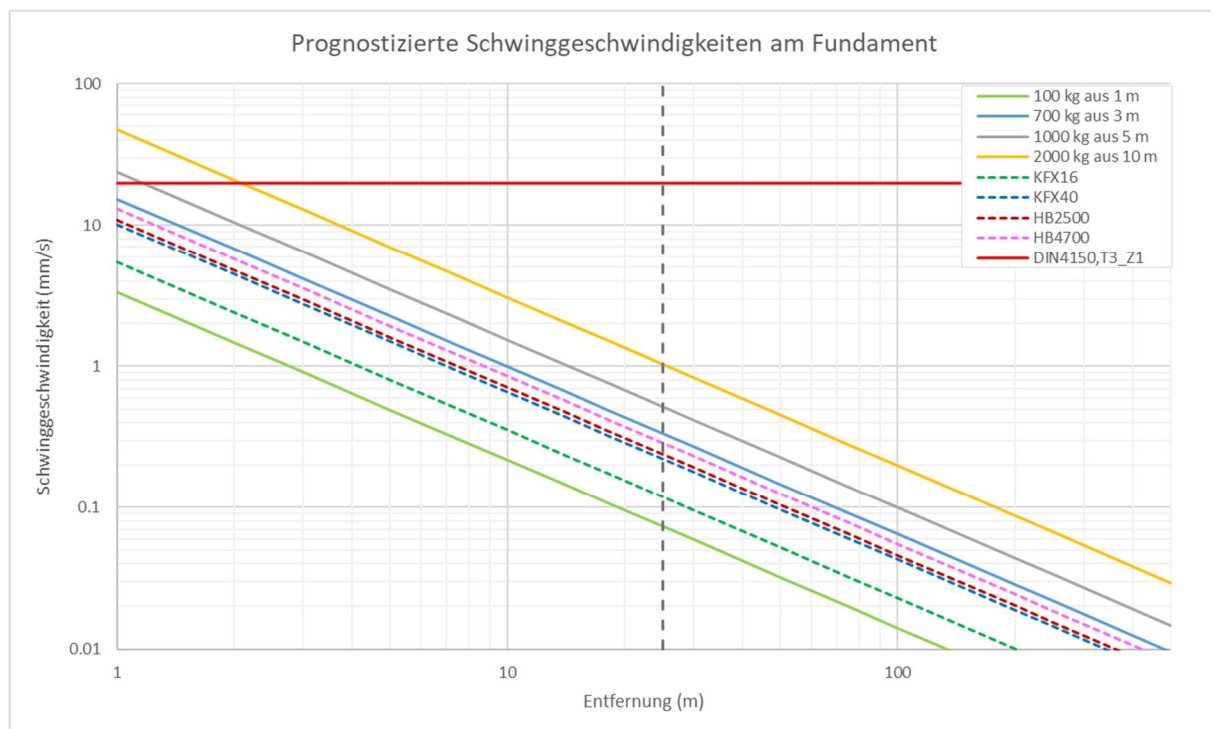


Abbildung 23: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des INF361 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$). Zusätzlich ist mit der roten Linie der kleinste Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 eingetragen. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

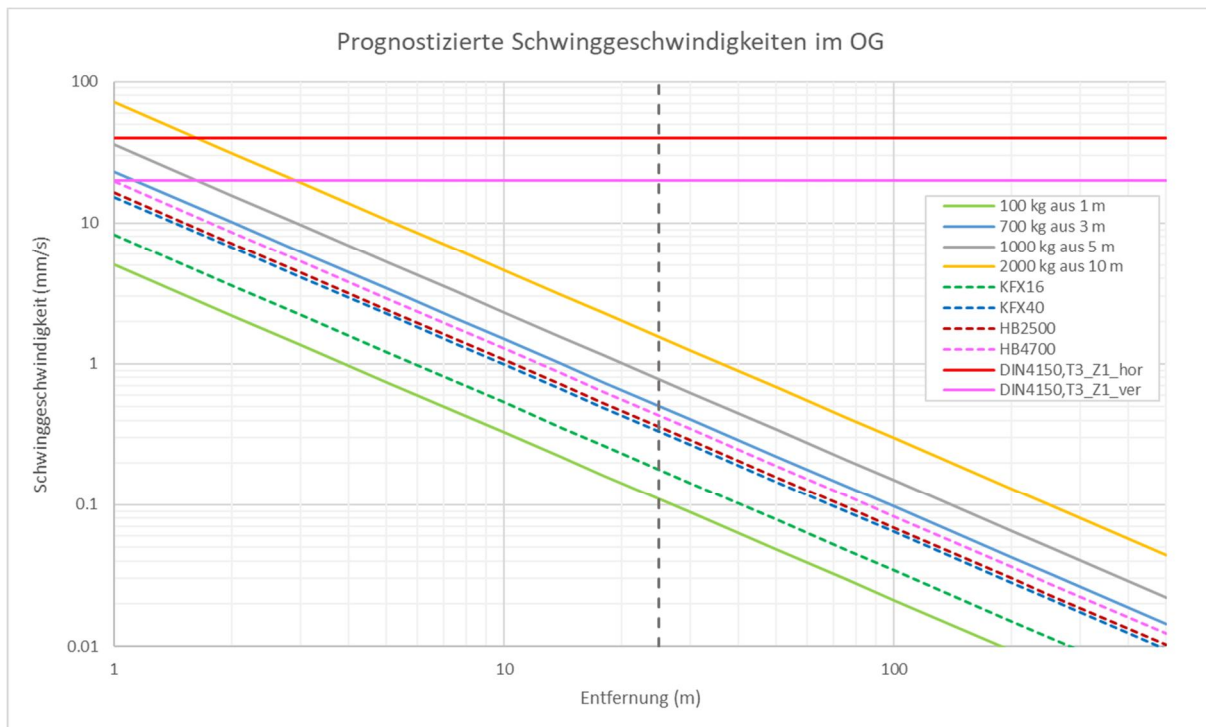


Abbildung 24: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF361 in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$).
Zusätzlich ist mit der roten Linie der Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 für horizontale und mit der magentafarbenen Linie für vertikale Schwingungen eingetragen. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

Die Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 3 werden bei Erschütterungseinwirkungen durch die hier betrachteten Emittenten eingehalten (Abbildung 23 bis Abbildung 25).

Eine Schädigung des Gebäudes infolge der baustellenbedingten Erschütterungseinwirkungen ist nicht zu erwarten.

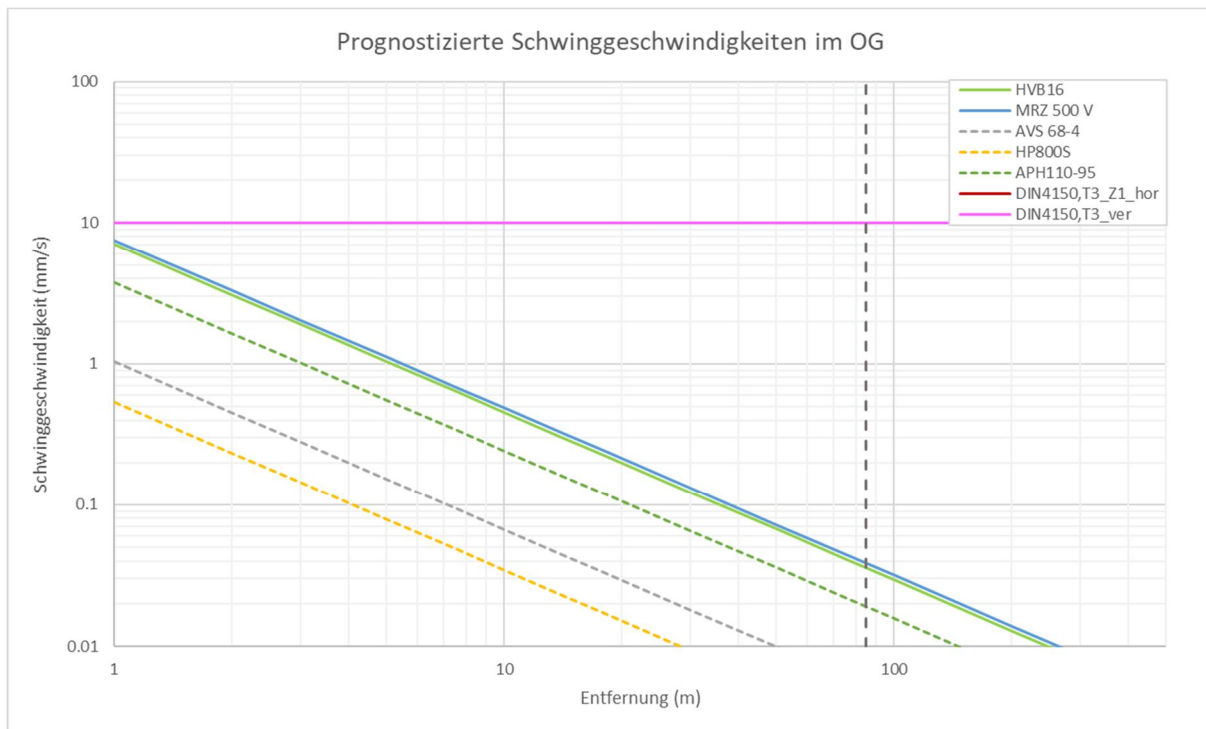


Abbildung 25: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Obergeschoss des INF361 infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$). Zusätzlich ist mit der roten Linie der Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 1 für horizontale und mit der magentafarbenen Linie für vertikale Schwingungen eingetragen (hier identisch). Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zur Spundwand.

6.6 Gewächshäuser

Bei den Gewächshäusern östlich des Gebäudes INF361 sowie westlich vom INF360 handelt es sich um verglaste Stahlrahmenkonstruktionen, die aufgrund ihrer filigranen Bauweise und vergleichsweise großen Glasflächen in die Kategorie nach Zeile 3 der Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 3 („Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeile 1 und Zeile 2 entsprechen...“) eingeordnet werden. Der kürzeste Abstand zum Baufeld beträgt etwa 20 m.

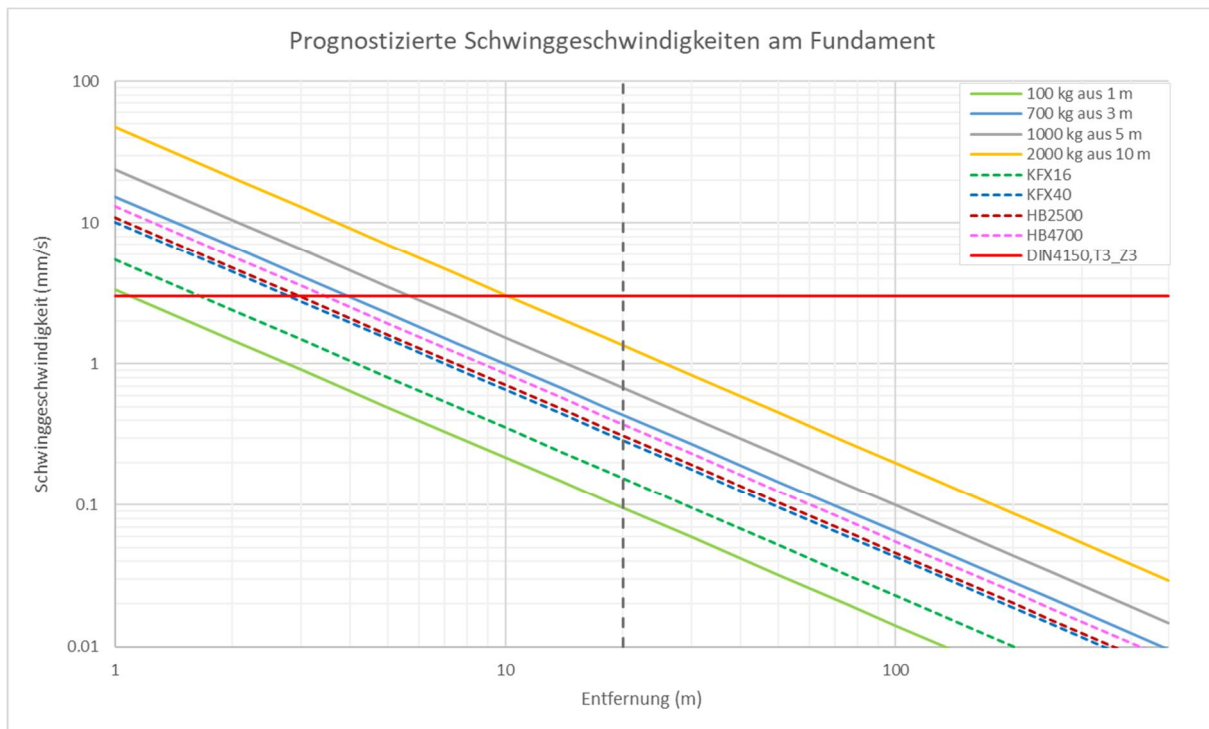


Abbildung 26: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundament des Gewächshauses in Abhängigkeit von der fallenden Masse / Schlagenergie eines Meißels und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$). Zusätzlich ist mit der roten Linie der kleinste Anhaltswert der Schwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, Teil 3, Zeile 3 eingetragen. Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zum Abbruchgebäude.

Die Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 3 werden bei Erschütterungseinwirkungen durch die hier betrachteten Emittenten eingehalten (Abbildung 23).

Die prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten bei Einwirkung von Dauererschütterungen liegen unterhalb eines Wertes von 0,2 mm/s, der schon ohne Baumaßnahmen durch die „normale“ Nutzung des Gewächshauses sowie den Straßenverkehr (Busse) auftritt.

Eine Schädigung der Gewächshäuser infolge der baustellenbedingten Erschütterungseinwirkungen ist nicht zu erwarten.

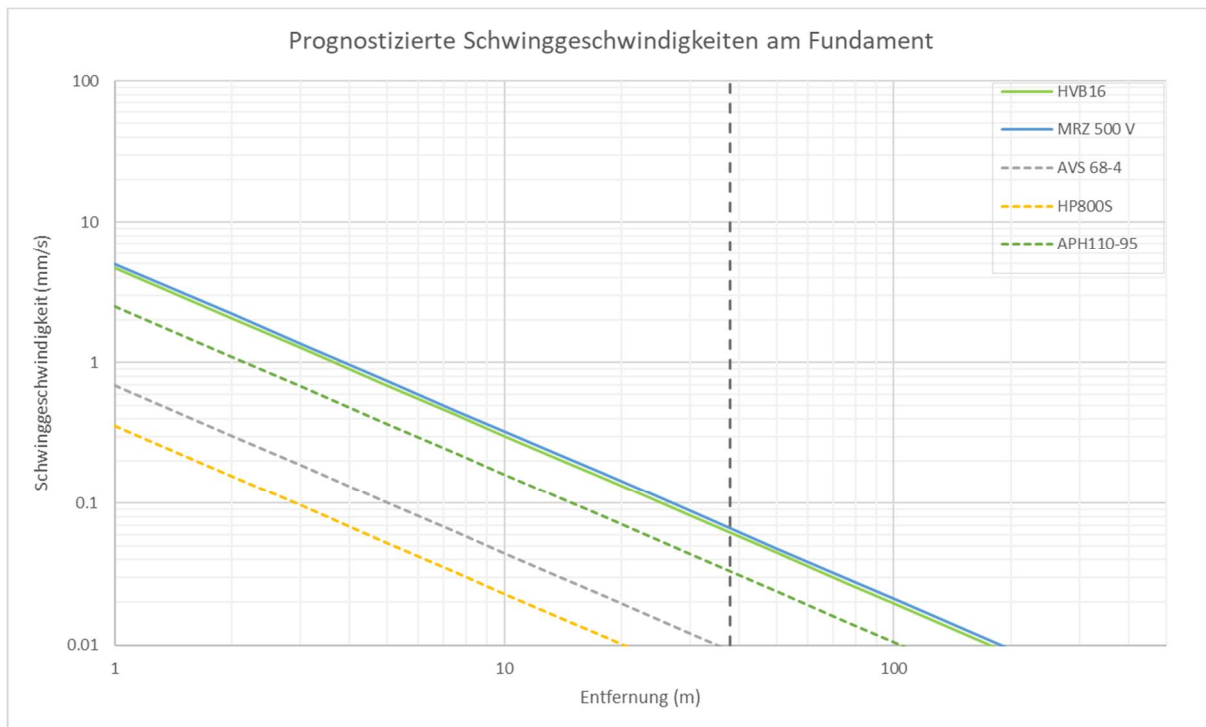


Abbildung 27: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten am Gewächshaus infolge Dauererschütterungen in Abhängigkeit von der eingeleiteten Energie und der Entfernung zum Anregungspunkt (bei einer statistischen Sicherheit von $P=95\%$). Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den minimalen Abstand zur Spundwand.

7 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN

Bei den Abständen der betroffenen Gebäude INF156, INF162, INF165, INF360, INF361 und den Gewächshäusern zum Baufeld des neuen Herzzentrums werden die Anhaltswerte der maximalen Schwinggeschwindigkeit nach der DIN 4150, Teil 3 ([U4]) für kurzzeitige Einwirkungen durch fallende Massen bis 2000 kg aus 10 m Höhe (oder äquivalente Energieeinträge wie Meißelschläge) sowie durch Dauererschütterungen infolge Vibrationsrammungen oder -verdichtung in den Gebäuden eingehalten.

Die relevanten Erschütterungskriterien für die medizintechnischen Geräte werden in den hier betrachteten realitätsnahen Fällen nicht eingehalten, so dass erschütterungsmindernde Maßnahmen erforderlich sind. Es können hierbei Maßnahmen am Emissionsort (an der Quelle), auf dem Wellenweg oder am Immissionsort ergriffen werden.

Emissionsseitig können bei den Rückbauarbeiten z.B. Fräsen zum Einsatz kommen oder die Abbruchgebäude zersägt und die einzelnen Stücke abgelegt werden. Diese Maßnahmen sind aber sehr zeitaufwändig und aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht zielführend.

Neben den hier betrachteten schwingungsverursachenden Geräten und Verfahren zum Einbringen der Spundwände existieren Systeme zum erschütterungsfreien Einpressen von Spundbohlen. Allerdings gibt es hierbei Einschränkungen bei mitteldicht bis dicht gelagertem Kies und dicht gelagerten Böden mit Steineinlagerungen ([U21]), wie sie hier im Baugrund auftreten ([U2]). Durch Zusatzmaßnahmen, wie z.B. Spülhilfen oder Vorbohren, ist aber auch in solchen Böden das Verfahren anwendbar ([U20]).

Auf dem Übertragungsweg kann ggf. durch offene oder mit speziellen Dämmmaterialien verfüllte Bodenschlitze in der Nähe der Quelle oder dem Immissionsort eine Reduzierung der Schwingungseinwirkungen erreicht werden. Aufgrund der örtlichen Bedingungen scheint diese Möglichkeit aber nicht realisierbar.

Am Immissionsort bzw. an den betroffenen medizintechnischen Geräten sollte durch entsprechende Dämpfungsmaßnahmen der ungestörte Betrieb sichergestellt werden können. Hier bieten sich erschütterungsdämpfende Tischplattformen oder Tische (z.B. von Bilz AG, Fabreeka GmbH, AMETEK GmbH /TMC Business Segment; [U24]) oder Dämpferfüße an. Wir sehen diese Maßnahmen als zielführendste und wirtschaftlich sinnvollste Mittel an.

Eine detaillierte Planung und Empfehlungen zur Erschütterungsdämpfung der einzelnen medizintechnischen Geräte sind nicht Bestandteil der gegenständlichen Prognose, können aber im Rahmen eines gesonderten Auftrags erstellt werden.

Die Ermittlung von Schallpegeln und / oder den Einwirkungen durch sekundären Luftschall waren nicht Bestandteil des vorliegenden Gutachtens.

Da Prognosebetrachtungen immer nur eine Annäherung an die wahren Verhältnisse darstellen, empfehlen wir, die Baumaßnahme mittels Erschütterungsmessungen in den betroffenen Gebäuden und insbesondere an den medizintechnischen Geräten zu überwachen.

CDM Smith Consult GmbH
2020-08-14

i.V.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Witzsche'.

Dipl.-Ing. Andreas Witzsche

erstellt:

i.V.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'R. Schulz'.

Dipl.-Geophys. Reinhard Schulz