

## **Erschütterungsschutz bei innerstädtischer 3D Seismik-Exploration**

P. Steinhauser, W. Steinhauser, Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH, Wien, A

### **Abstract**

Vibroseis-Vibratoren haben sich seit vielen Jahrzehnten bei reflexionsseismischen Untersuchungen als Anregungsquelle bewährt. Um dabei sowohl Schäden zu vermeiden als auch die ungewohnte Belästigung der Anrainer möglichst gering zu halten, sind seismische Messungen in dicht besiedelten Gebieten soweit als möglich vermieden worden. Wenn es unvermeidlich war, wurde die Anregungskraft reduziert. Außerdem konnte der niederfrequente Bereich der Hauseigenfrequenzen bei der Sweepanregung ohnehin nur gestreift werden, da die Sweepanregung erst von etwa 9 Hz aufwärts mit voller Kraft technisch möglich war.

Aus verschiedenen Gründen, wie der schärferen Auflösung von Untergrundstrukturen und der größeren Tiefenreichweite werden heute aber Sweeps verwendet, die auch den tieffrequenten Bereich ab 1 Hz umfassen und mehr Energie in den Untergrund eintragen, was Sweeps bis zu 64 Sekunden Länge erfordert. Zusätzlich werden im Zuge der Erschließung alternativer Energiequellen auch Tiefengeothermie-Hoffungsgebiete in dichtbesiedelten Räumen prospektiert, wie sie u.a. auch im Wiener Stadtgebiet vorhanden sind.

Daher müssen die Erkundungsarbeiten bis in die Kernzonen der Siedlungsbereiche ausgedehnt werden, Konflikte mit den Anrainern sind somit vorprogrammiert. Neben der Belästigung der Wohnbevölkerung besteht auch das Problem, dass die sehr niederfrequenten Startfrequenzen der Sweeps im Bereich der meisten Hauseigenfrequenzen liegen und ein dementsprechend erhöhtes Schadens- und Belästigungspotential besitzen. Zusätzlich sind die städtischen Leitungsnetze (Gas, Wasser, Kanalisation, etc.) sehr heterogen aufgebaut, da sie im Laufe von mehr als einem Jahrhundert mit unterschiedlichsten Technologien ausgebaut worden sind, sodass ihre dynamische Belastbarkeit schwer zu beurteilen ist. Schließlich sind in den Stadtrandgebieten auch die Lebensräume gefährdeter Tierarten zu schützen.

Das Resonanzanregungspotential der Sweeps kann durch ein entsprechendes Sweep-Design reduziert werden. Weiters kann mit Hilfe gezielter Versuche auf Basis der verfügbaren Normen und Behördenvorschriften ein Schema der für die verschiedenen Schutzobjekte erforderlichen Mindestdistanzen zum Vibroseis-Vibrator entwickelt werden.

# Erschütterungsschutz bei innerstädtischer 3D Seismik-Exploration

Peter Steinhauser, Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH, Wien, A und  
Wolfgang Steinhauser, Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH, Wien, A

## 1. EINLEITUNG

Im Wr. Becken ist eine rund 150 km<sup>2</sup> umfassende 3D Seismik-Exploration durchgeführt worden, die den gesamten Osten des Stadtgebiets von Wien umfasst hat, wie Abbildung 1 zeigt. Untersuchungsziel war die Erkundung potentieller hydrothermaler Reservoirs im Beckenuntergrund, die in etwa 3000-6000 m Tiefe vermutet werden.

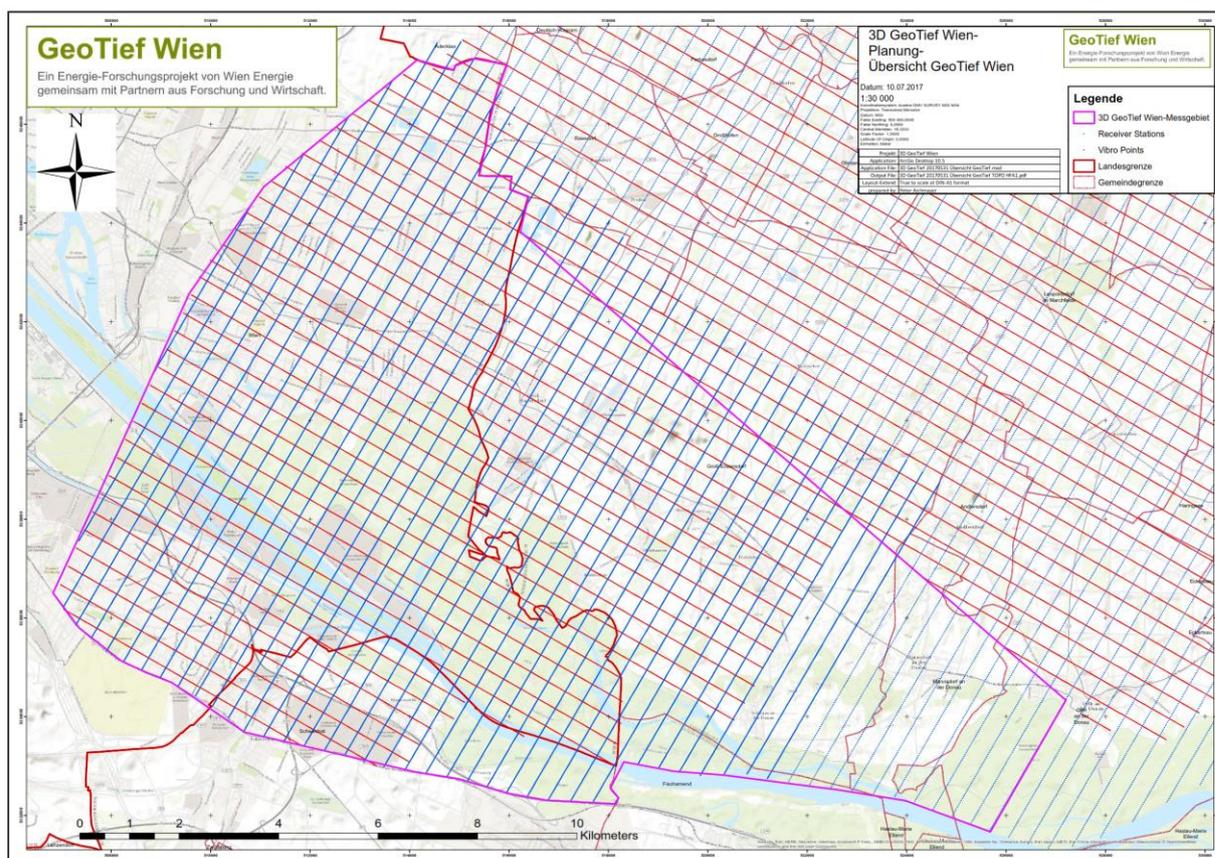


Abbildung 1: Übersicht des 3D Seismik Messgebiets in Wien (rot: Vibropositionen, blau: Geophonpositionen)

Dem tiefliegenden Zielraum der seismischen Vermessung entsprechend war es erforderlich, modernste Sweep-Technologien einzusetzen, die sich von früheren Verfahrenstandards beträchtlich unterscheiden. Während vor einem Jahrzehnt noch die Untergrenze des Sweep-Frequenzbandes im Bereich von 10 Hz lag, die Sweeps kaum länger als 12 Sekunden andauerten und die maximale Anregungskraft im Bereich von 200 kN lag, liegt nunmehr die Untergrenze des Frequenzbands bei 1-2 Hz, die Sweep-Andauer beträgt 64 Sekunden und die Anregungskraft erreicht bis zu 300 kN. Die in den Untergrund eingeleitete Schwingungsenergie ist

um fast das 10-fache angestiegen und die Frequenz-Bandbreite der Sweeps hat sich von 3-4 Oktaven auf 6-7 Oktaven erhöht. Aus der Sicht des Umweltschutzes ergibt sich insgesamt eine Maximierung des bei Erschütterungen unvermeidlichen Konfliktpotentials:

- der Siedlungsdichte entsprechend sehr große Anzahl betroffener Anrainer;
- große Anregungskräfte bewirken große Erschütterungen an der Oberfläche;
- niedere Anregungsfrequenzen liegen im Eigenfrequenzbereich der Wohnhäuser;
- lange Sweepdauer führt zu entsprechend langer Erschütterungswahrnehmung.

Ein weiterer charakteristischer Unterschied zu Seismik-Untersuchungen im ländlichen Raum besteht auch darin, dass in der Stadt den unterirdisch verlaufenden Leitungsnetzen (Gas, Wasser, Fernwärme, Kanalisation etc.) nur begrenzt ausgewichen werden kann.

Ausgehend von den erschütterungsmäßig relevanten Charakteristika der modernen Sweep-Technologie sollen im Folgenden die hinsichtlich der verschiedenen Aspekte des Umweltschutzes maßgeblichen Belastungen sowie die möglichen Maßnahmen diskutiert werden. Da das Projektgebiet auch in den ländlichen Raum hineinreicht, sind auch dort auftretende Probleme, wie der Schutz gefährdeter Tierarten zu berücksichtigen.

## 2. VIBROSEIS – GEZIELTE ERSCHÜTTERUNGSERZEUGUNG

Das Verfahren beruht auf der Korrelationsanalyse abgestrahlter seismischer Signale ständig variierender Frequenz, wobei im Regelfall die Frequenz eines gleitenden Sinus linear aufwärts (up-sweep) oder abwärts (down-sweep) variiert wird.

Während bei einer Sprengung die Laufzeit der Reflexionen des Impulses an Schichtgrenzen im Untergrund wie beim Echolot direkt gemessen werden kann, muss die Zeitdauer eines Sweeps mit Hilfe der Korrelationsrechnung komprimiert werden, weil sich sonst die Reflexionen an verschiedenen Schichtgrenzen im Seismogramm überlagern, wie Abbildung 1 links zeigt. In der obersten Spur ist das ausgesandte Sweep-Signal dargestellt. Die drei darunterliegenden Spuren geben die Reflexionen dieses Sweeps von drei Reflektoren in unterschiedlicher Teufe wieder.

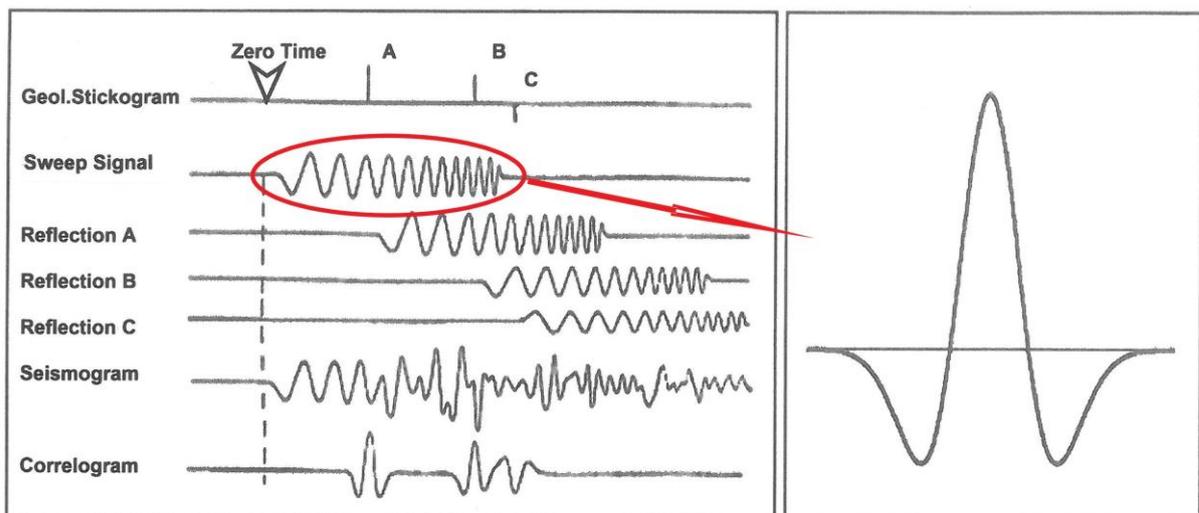


Abbildung 2: Prinzip der Korrelationsanalyse eines seismischen Sweeps (links) und Korrelations-Wavelet (rechts)

Das aus Abbildung 2 links ersichtliche Sweep Signal wird dabei mittels der Korrelationsanalyse zu einem Wavelet (Abbildung 2 rechts) komprimiert. Dieses wird umso schärfer, je mehr Okta-ven das Frequenzband des Sweeps umfasst. Und je kürzer das Wavelet ist, desto besser wird das Auflösungsvermögen von Untergrundstrukturen.

An einem Geophon wird das überlagerte Signal dieser einzelnen Reflexionen als Summensig-nal oder Vibrogramm, wie es die 2. Spur von unten zeigt, aufgezeichnet. In dieser Form sind die drei Reflexionshorizonte nicht erkennbar. Erst durch die Kreuzkorrelation mit dem Sweep-Anregungssignal wird die Sweeplänge zeitlich komprimiert. Die so erhaltene Kreuzkorrelations-funktion (unterste Spur) zeigt die drei Reflexionshorizonte in gleicher Weise wie das Seismo-gramm einer Impulsanregung. Das Analyseergebnis bildet das Geologie-Stickogramm, das in der Abbildung ganz oben dargestellt ist.

Eine wesentliche Voraussetzung für diese Korrelationsanalyse besteht darin, dass der Unter-grund im gesamten Frequenzband des Sweeps mit dem gleichen Drive (= konstante Anre-gungskraft) angeregt wird, wie dies in Abbildung 2 (Spur 1) symbolisch dargestellt ist. Da der Untergrund mit möglichst großer Kraft angeregt werden soll, muss ein Vibrator große aktive Massen besitzen, die etwa 3000-5000 kg groß sein können.

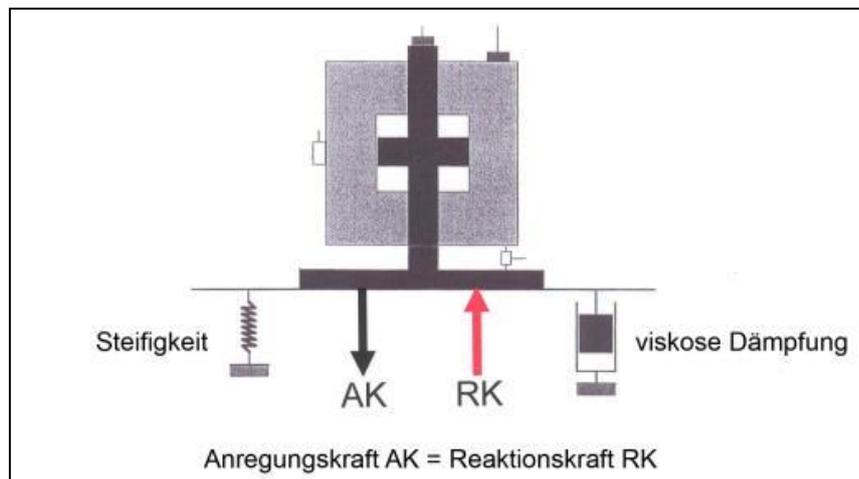


Abbildung 3: Schema der Wechselwirkung Schwingungsgenerator-Untergrund (nach Sercel, 2004)

Wie aus dem Schema von Abbildung 3 ersichtlich ist, bilden die schwingende Erregermasse und der Untergrund infolge seiner elastischen Eigenschaften einen bodendynamischen Schwingkreis, der dem Modell des Einmassenschwingers entspricht. Daraus folgt, dass das Frequenzverhältnis aus gleitender Sweep-Frequenz  $f$  und der Eigenfrequenz  $f_0$  des Untergrun-des das Ausmaß bestimmt, in dem Kraft tatsächlich in den Untergrund eingeleitet wird, wobei das Maximum im Bereich der Frequenzübereinstimmung  $f=f_0$  (Resonanz) liegt.

Abbildung 4 zeigt die Variation der vom Untergrund angenommenen Kraft, wenn nur die Anre-gungskraft des Generators konstant gehalten wird, ohne die Reaktionsantwort des Untergrunds auszugleichen. Im gesamten Frequenzbereich variiert demnach die eingeleitete Kraft um den Faktor 10 oder 20 dB.

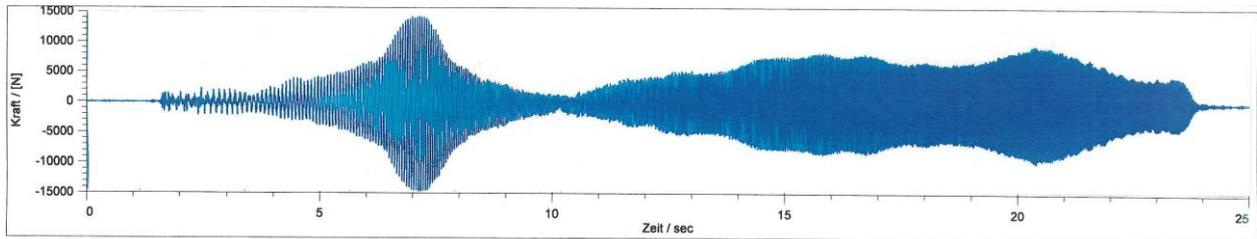


Abbildung 4: Kraftverlauf eines 5-75 Hz Sweeps bei konstanter Anregungskraft des Generators ohne Aussteuerung für die dynamische Reaktion des Untergrunds (STCE,2007)

Eine frequenzunabhängig konstante Kraft kann auf den Untergrund somit nur dann übertragen werden, wenn entsprechende Echtzeit-Steuerungssysteme eingesetzt werden.

Um den Amplitudengang zu beherrschen, muss die von der Erregermasse ausgeübte Anregungskraft laufend automatisch entsprechend der Untergrundreaktion ausgesteuert werden, wozu kontinuierliche Kraftmessungen erfolgen.

Im Allgemeinen werden die Messwerte der Sensoren in 250  $\mu$ s-Intervallen ermittelt und über einen Kalman Filter zur Prognose des nächsten Zeitschritts verwendet, womit die Anregungskraft des Schwingungsgenerators autoadaptiv ausgesteuert wird. Da die Frequenzänderungsraten der Sweeps im Regelfall niedrig sind, kann eine hohe Kraftkonstanz erzielt werden.

Das Frequenzspektrum des autoadaptiv ausgesteuerten Sweeps ist in Abbildung 5 dargestellt. Demnach wird, abgesehen vom Gibb'schen Überschwingen an den Eckfrequenzen ein ebenes Dach des Amplitudenspektrums erzielt. Diese Konstanz der Frequenzamplituden der Anregungssweeps ist für die Schärfe der Autokorrelationsfunktion maßgeblich, wie der Vergleich der Funktionsform für verschiedene Spektralförmungen zeigt (Abbildung 6). Je variabler die Amplituden im Frequenzspektrum sind, desto diffuser wird die Autokorrelationsfunktion, deren Schärfe das Auflösungsvermögen der Kreuzkorrelationsanalyse bestimmt.

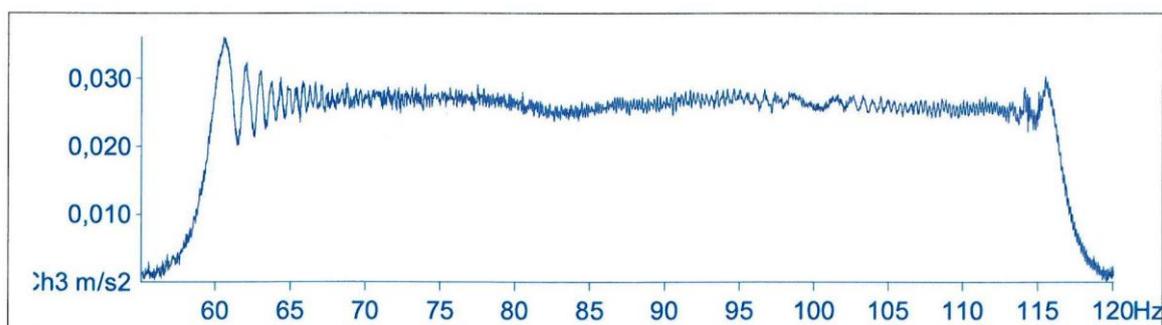


Abbildung 5: Frequenzspektrum des autoadaptiv ausgesteuerten Sweeps

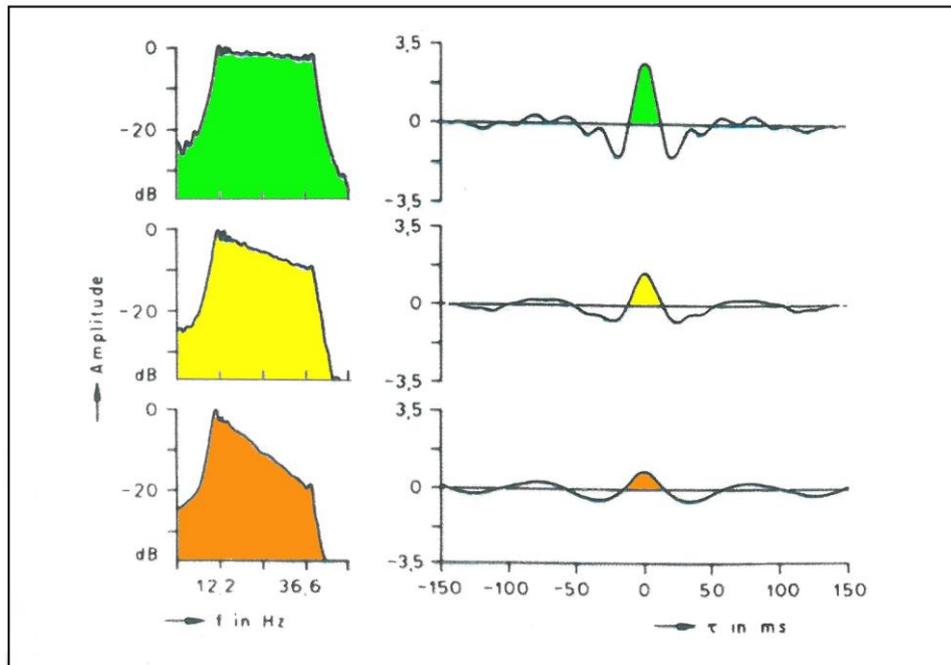


Abbildung 6: Autokorrelationsfunktion (rechts) in Abhängigkeit von der Konstanz des Sweep-Amplitudenspektrums (links) nach Gurbuz (1972)

Aus verschiedenen Gründen, wie größere Tiefenreichweite, verbesserte Auflösung von Untergrundstrukturen, Qualitätssteigerung bei der Inversion der seismischen Daten, sind Sweeps erwünscht, die möglichst tiefe Frequenzen umfassen. Der Leistungsfähigkeit eines Vibrators sind im niederfrequenten Bereich jedoch mechanische und hydraulische Grenzen gesetzt. Wie in Abbildung 7 beispielhaft für einen Nomad 65 Vibrator dargestellt ist, wird der maximal mögliche Drive des Vibrators unterhalb von etwa 3 Hz durch die beschränkte Größe des Hubs der Reaktionsmasse (Stroke) begrenzt. Im Band von 3-9 Hz hingegen limitiert die erforderliche Pumpenleistung die Größe des Drives. Eine hohe Leistung ist dabei erforderlich, um die kräftigen Strömungssoszillationen zu erzeugen, die für den vollen Stroke der Reaktionsmasse benötigt werden. Dementsprechend zeigt Abbildung 7, dass bei 1 Hz knapp 5%, bei 3,5 Hz nur 25% und bei 5 Hz erst etwa 50% Drive möglich sind.

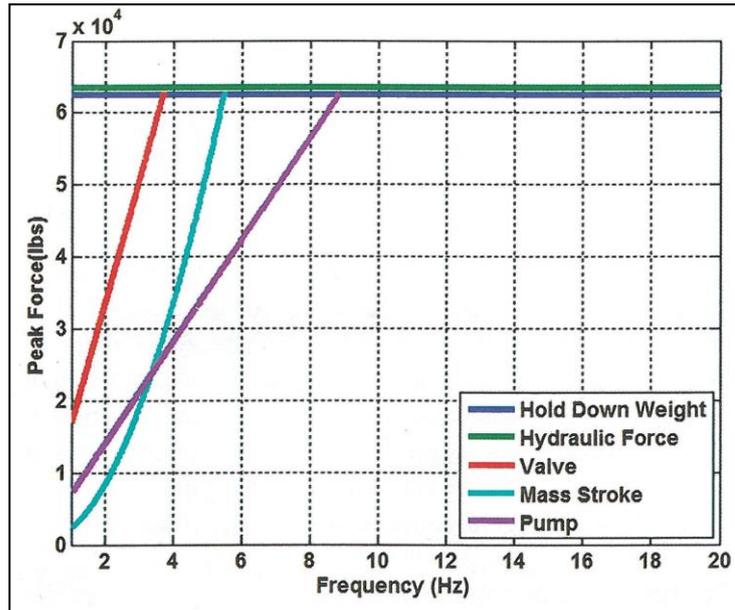


Abbildung 7: Physikalische Anregungsgrenzen eines schweren Vibrators im Niederfrequenzbereich (Tellier et al., 2015)

Da für die Vibroseis Technologie ein Leistungssignal und damit die Andauer der Schwingung maßgeblich ist, besteht jedoch die Möglichkeit durch entsprechende Dehnung des Sweep-Zeitraums im niederfrequenten Spektralbereich den reduzierten Drive auszugleichen. Die Sweep-Verweilzeit in einem gegebenen Frequenzbereich muss dabei um das Quadrat der Drive-Reduktion verlängert werden (Abbildung 8).

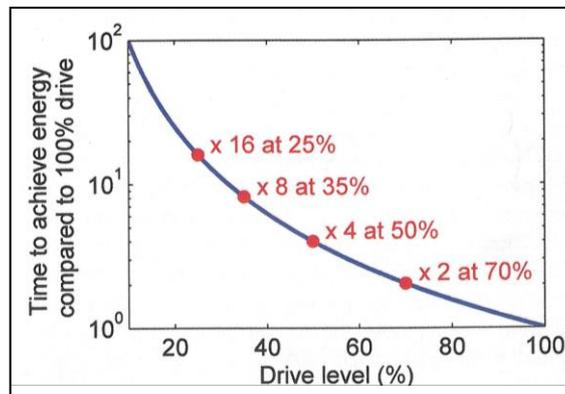


Abbildung 8: Sweep Verlängerung zur Kompensation der Drive-Reduktion (Dean et al., 2016)

Um so ein konstantes Leistungssignal im gesamten Sweep-Frequenzbereich zu erzielen, ist eine entsprechend lange Verweildauer im tiefen Frequenzbereich erforderlich. Abbildung 9 zeigt dies am Beispiel eines 7-80 Hz Sweeps mit 10 Sekunden Dauer im Vergleich zu einem auf konstante Leistung im gesamten Frequenzbereich ausgelegten 1-80 Hz Sweep mit 30 Sekunden Gesamtdauer. Wie daraus ersichtlich ist, werden zur gleichwertigen Erfassung des 1-7 Hz Bandes zusätzliche 20 Sekunden Sweepdauer benötigt.

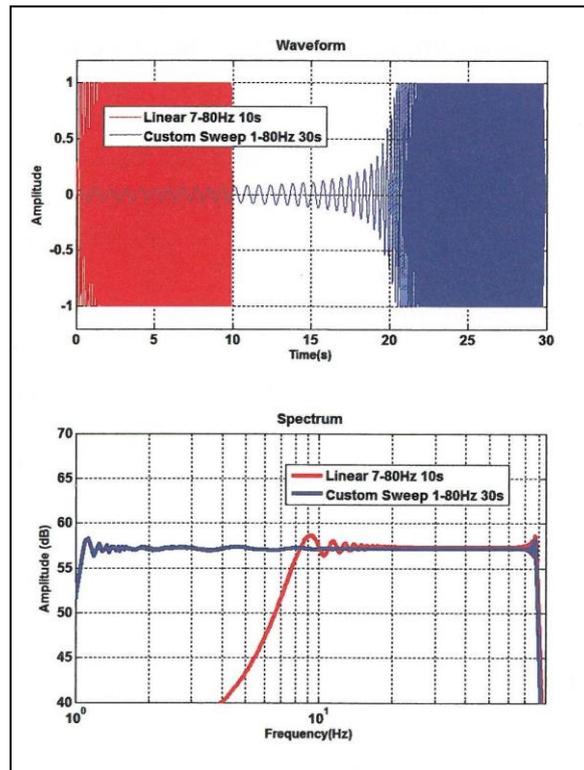


Abbildung 9: Vergleich eines linearen 7-80 Hz Sweeps (rot) mit einem leistungsäquivalenten 1-80 Hz Sweeps (blau) samt Leistungsspektren, (Tellier et al., 2015)

Die konstruktiven Beschränkungen machen somit eine überproportional lange Verweildauer der Sweeps im tieffrequenten Bereich  $f < 10$  Hz erforderlich, um die angestrebte Erhöhung des Auflösungsvermögens von Untergrundstrukturen zu erzielen.

### 3. SWEEP-AUSWIRKUNGEN AUF DIE UMWELT

Es ist offensichtlich, dass jede Weiterentwicklung eines Verfahrens zur gezielten Erschütterungserzeugung das Konfliktpotential mit der Umwelt hinsichtlich des Erschütterungsschutzes erhöhen muss. Dies betrifft hier Verbreiterung des Sweep-Frequenzbandes, um schärfere, besser auflösende Wavelets zu erhalten und die Verlängerung der Sweep-Andauer, um mehr Schwingungsenergie in den Untergrund einleiten zu können.

Die Vergrößerung der Anzahl von Oktaven des Sweep-Spektrums erfolgt am besten durch die Absenkung der unteren Grenzfrequenz, wie dies vorhin diskutiert worden ist. Die statistische Verteilung von Gebäudeeigenfrequenzen zeigt aber, dass diese im Wesentlichen im Frequenzband von 1-10 Hz liegen. Während somit eine Untergrenze des Sweep-Spektrums von 10 Hz für Bauwerke wenig Bedeutung besitzt, werden mit einer auf 1 Hz abgesenkten Untergrenze des Sweep Spektrums nahezu alle Gebäude in ihrem Eigenfrequenzbereich angeregt. Dieser Umstand ist insbesondere im städtischen Bereich von Bedeutung, wo die Gebäudehöhen typischerweise größer sind als im ländlichen Siedlungsraum. Abbildung 10 zeigt dies an der statistischen Abhängigkeit der Gebäudeeigenfrequenzen von der Bauwerkshöhe.

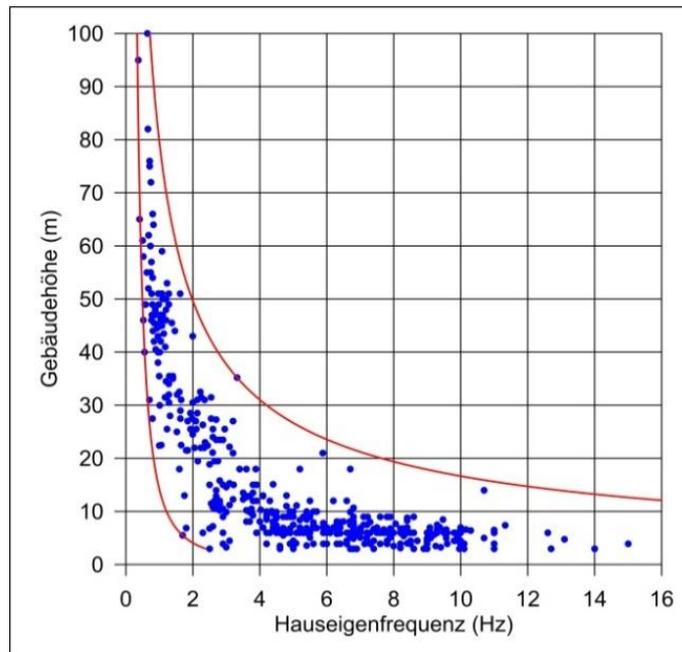


Abbildung 10: Bauwerkseigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe

Die aus konstruktiven Gründen erforderliche, mit sinkender Frequenz exponentiell zunehmende Anregungsdauer (siehe Abbildung 8) verschärft dieses Problem, weil Resonanz bekanntlich nicht sprunghaft eintritt, sondern durch einen Einschwingvorgang erfolgt (siehe Abbildung 11), weshalb die längere Verweildauer der Sweeps im Resonanz-Frequenzbereich eine längere Einschwingzeit für diese Gebäude ermöglicht und damit auch eine stärkere Schwingungsaufschaukelung.

Wie vom Modell des Einmassenschwingers bekannt ist, setzt der Resonanzeffekt ein, sobald sich die Anregungsfrequenz von der Eigenfrequenz um weniger als den Faktor  $\sqrt{2}$  unterscheidet.

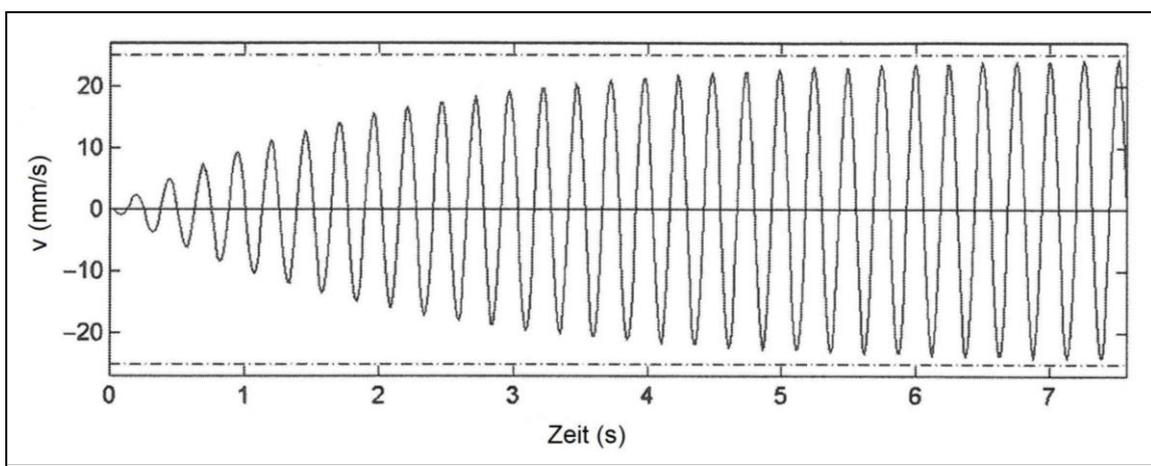


Abbildung 11: Resonanz-Einschwingdauer

## 4. ERSCHÜTTERUNGSRICHTWERTE

### 4.1 Anregungscharakteristika

Wie aus dem schematischen Übersichtsplan (Abbildung 1) ersichtlich ist, sind orthogonal zueinander in 400 m Abständen befindliche Geophon- und Vibratorprofile angeordnet, wobei die Vibratorpositionen in 20 m-Abständen aufeinander folgen. Dies bedeutet, dass die Vibratorprofile ausreichend weit voneinander entfernt verlaufen und erschütterungsmäßig keine profilübergreifende Beeinflussung stattfinden kann.

20 m Vibro - Positionsabstand hingegen ergeben bei 3 Schwingungsgeneratoren in Stoßstange-Stoßstange Aufstellung – und somit einer Zuglänge von etwa 30 m - eine Überlappung.

Die drei Schwingungsgeneratoren eines Zuges, die an jeder Messposition simultan die Sweep-Anregung durchführen werden an dem Vibro-Anregungsprofil gelegenes Haus je nach Länge der Hausfront von mehreren Vibro Positionen aus belasten wie die Prinzip-Skizze von Abbildung 12 zeigt. Dabei arbeiten die drei Generatoren positionsmäßig überlappend zeitlich nach einander die Messpositionen ab. Zumindest einer der drei Generatoren wird im Regelfall von drei Vibro-Positionen aus auf das betroffene Objekt einwirken. Die roten Pfeile in Abbildung 12 markieren die Stellen, an denen die Krafteinleitung eines Generators in den Untergrund erfolgt.

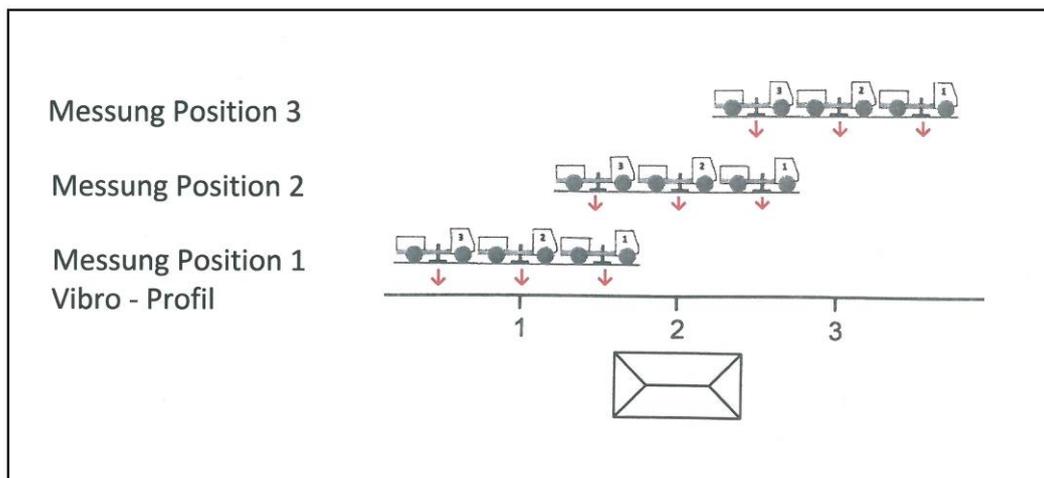


Abbildung 12: *Prinzipskizze des Mess-Ablaufs entlang eines Vibro-Anregungsprofils*  
*unten: Profil der Vibro-Anregungspositionen mit einem benachbarten Haus*  
*oben: Standorte der drei Schwingungsgeneratoren im Bezug zur jeweiligen Vibro-Anregungsposition*

### 4.2 Bauwerksschutz

Gemäß ÖNORM S 9020 sind Erschütterungen entsprechend ihrer Häufigkeit und Andauer zu bewerten.

Da sich die Schwingungsgeneratoren laufend von Messposition zu Messposition weiterbewegen und deshalb im Nahbereich der einzelnen Schutzobjekte nur einige wenige Sweeps durchgeführt werden, ist offenkundig, dass diese Erschütterungen in die Häufigkeitsklasse „selten“ fallen. Die geplante Dauer der Sweeps beträgt 64 Sekunden. Die Sweep-Erschütterungen sind somit auf alle Fälle der Klasse „kurzzeitig“ zuzuordnen.

Nach dem Klassifikationsschema von ÖNORM S 9020 sind die in Abbildung 13 angegebenen Richtwertkurven für die verschiedenen Gebäude-Empfindlichkeitsklassen einzuhalten.

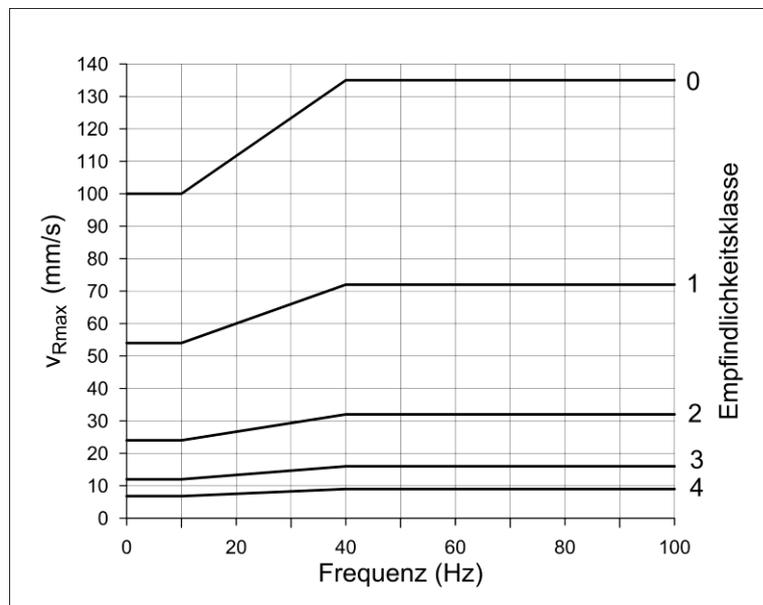


Abbildung 13: Richtwerte für seltene, kurzzeitige Erschütterungen nach ÖNORM S 9020 für die Bauwerks-Empfindlichkeitsklassen 0-4 von ober- und unterirdischen Anlagen

Ein Problem stellen jedoch die im verbauten Gebiet überall vorhandenen Leitungsnetze (Gas, Wasser, Kanalisation, Fernwärme etc.) dar. Obwohl ÖNORM S 9020 auch Richtwerte für unterirdische Ablagen angibt, wurde ihre Anwendbarkeit in Frage gestellt, da diese Netze im Lauf von mehr als hundert Jahren errichtet worden sind und ihr technischer Zustand dementsprechend unsicher bewertet werden kann. Um trotzdem Erschütterungsrichtwerte für diese Leitungsnetze angeben zu können, war es erforderlich, die in der Verlegungstiefe auftretenden Erschütterungen zu messen und mit anderen natürlichen Belastungen, wie Temperaturschwankungen zu vergleichen.

#### 4.3 Personenschutz

Die Richtwerte von ÖNORM S9012 dienen dem Schutz vor Erschütterungen, die Jahre oder Jahrzehnte lang immer wieder auf die Wohnbevölkerung einwirken. Dem Charakter der Vibrationen entsprechend ist davon auszugehen, dass Bewohner eines einzelnen Wohnhauses immer nur einigen Sweeps ausgesetzt sind, die im Abstand von wenigen Minuten aufeinander folgen und insgesamt eine singuläre Immissionsbelastung darstellen.

Ebenso wie bei kurzzeitigen Bauarbeiten, die innerhalb eines Tages abgeschlossen werden, macht auch bei der Seismik-Untersuchung die Berücksichtigung der Flächenwidmung keinen Sinn. Es wurden daher die Richtwerte für Gewerbegebiete (Gebietskategorie 5 nach ÖNORM S 9012) für ausreichenden Erschütterungsschutz verwendet.

#### 4.4 Artenschutz

Die Umweltschutzabteilung des Wr. Magistrats hat im Zuge des Genehmigungsverfahrens festgestellt, dass im Untersuchungsgebiet in den Stadtrandgebieten auch eine gefährdete Tierart, nämlich das Ziesel seinen Lebensraum hat.

Die Ziesel sind eine Gattung der Erdhörnchen (Abbildung 3-1), deren Lebensraum sich vom Osten Österreichs über Osteuropa, Zentralasien und Sibirien bis in die Mongolei erstreckt. Sie leben vorwiegend in Kolonien.



Abbildung 14: *Europäisches Ziesel (Wikipedia; 2019)*

Die Ziesel errichten dauerhafte Erdbauten, die aus einem Hauptgang, Seitengängen, sowie Nist- und Nebenkammern für Nahrungsvorräte bestehen. Für einen Zieselbau geeignete Böden müssen ausreichend weich, aber bindig und trocken sein (z.B. Löss). Das Ziesel besiedelt daher Weinbaulandschaften, Brachen und Grünflächen (z.B. bei Öl- und Gasförderanlagen), Wegränder und Bahndämme. Große Zieselkolonien treten somit bevorzugt in durch Menschen gestalteten Sekundärlebensräumen auf. Die Zieselwohnbauten erreichen Tiefen von etwa 50-70 cm unter der Geländeoberfläche. Sie befinden sich in einer ähnlichen Tieflage wie die städtischen Leitungsnetze.

In diesen Erdbauten verbringen die Ziesel ihren mehrmonatigen Winterschlaf, aus dem sie allerdings von Zeit zu Zeit aufwachen, wodurch sie nach Ansicht von Tiermedizinern ihr Immunsystem aktivieren und damit Krankheitserreger abwehren. Für die während der Winterzeit durchgeführten Seismikmessungen sind daher vom Wr. Magistrat Immissionsgrenzwerte festgelegt worden, die in den Ziesel-Nistgebieten einzuhalten sind, um Aufwachreaktionen der Tiere zu verhindern.

## 5. ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZMASSNAHMEN

Erschütterungsschutz kann einerseits „aktiv“ durch Maßnahmen an der Erregerquelle erreicht werden. Die einfachste „passive“ Schutzmaßnahme stellt hingegen andererseits eine ausreichende Distanz Quelle-Schutzobjekt dar.

### 5.1 Sweep-Parameter

Da im Zuge eines Sweeps das angeregte Frequenzband auf jeden Fall alle Bauwerks- und Deckeneigenfrequenzen durchläuft und somit Resonanzanregung erfolgt, bestimmt die vorhandene Einschwingdauer das Anregungsmaximum.

Ein Sweep durchläuft immer alle Bauwerks- und Deckeneigenfrequenzen der benachbarten Gebäude. Solange sich dabei die Anregungsfrequenz um weniger als das  $\sqrt{2}$ -fache von der jeweiligen Eigenfrequenz unterscheidet erfolgt Resonanzanregung.

Das Ziel ist es geschlossene Zeitabschnitte dieses Anregungsfrequenzbandes möglichst kurz zu halten, um das Einschwingen von Gebäuden soweit als möglich zu minimieren (siehe Abbildung 11). Dies steht aber im Widerspruch zur Notwendigkeit, ein ausreichend großes Leistungssignal bei den niederen Frequenzen zu erhalten (siehe Abbildung 8), was eine lange Verweildauer in diesem Frequenzbereich bedingt. Dementsprechend bietet sich die möglichst weitgehende Segmentierung der Anregungszeit niederer Frequenzen auf zeitlich getrennte Sweep-Abschnitte an.

Die offensichtlich naheliegendste Lösung bildet daher der Pseudorandom-Sweep, bei dem die Frequenzfolge zufallszahlenartig generiert wird, was zu kürzestmöglichen, aber öfters auftretenden Verweilzeiten in einem Frequenzbereich führt.

Versuche mit Pseudorandom-Sweeps zeigen, dass in deren Korrelogrammen hohe Nebenmaxima und somit ein sehr kräftiges Korrelationsrauschen vorhanden ist (Abbildung 15). Die seismische Vermessung benötigt aber schmalbandige, rauscharme Wavelets. Zufallszahlenbasierte Sweeps sind daher nicht geeignet.

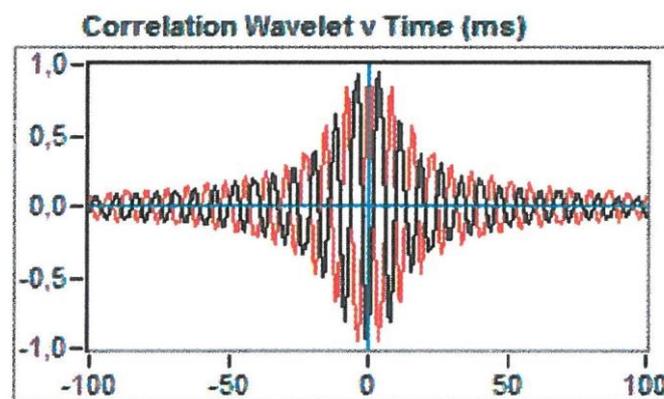


Abbildung 15: Korrelogramm eines Pseudorandom-Sweeps mit Bandpassbegrenzung (STCE, 2016)

Es ist daher erforderlich, eine Sweep Steuerungs-Software nach einem neuen Schema zu entwickeln. Anstelle monoton fallender oder steigender Frequenzfolgen, wie sie bisher verwendet worden sind, ergänzen sich Sweep-Funktionen, bei denen die Frequenz in der ersten Sweep-Hälfte gleitend bis zum Maximum ansteigt und in der zweiten Hälfte wieder bis zum Frequenzminimum abfällt. Dadurch werden die sich auf das Korrelogramm so negativ auswirkenden Frequenzsprünge vermieden, allerdings mit dem Nachteil, dass die Aufteilung der geschlossenen

Sweep-Verweilzeiten je Frequenzbereich wesentlich weniger fein ausfällt. Das Ergebnis sind jedoch signifikant bessere Wavelet-Korrelogramme mit einem ausgeprägten Hauptmaximum und nur schwachen Nebenmaxima (Abbildung 16).

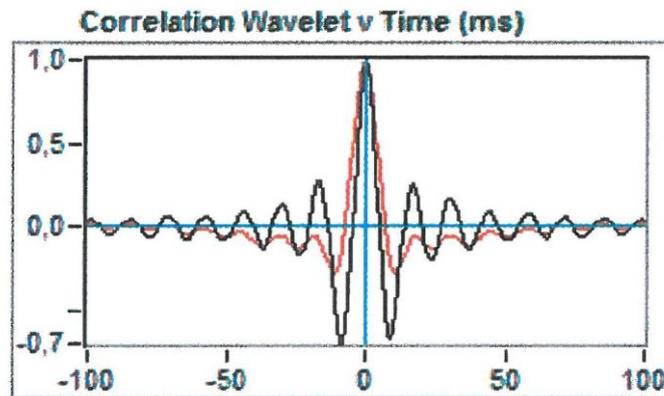


Abbildung 16: Korrelogramm eines Sweeps mit wellenförmiger Frequenzänderung (STCE; 2016)

Nach dieser Methodik konfigurierte Sweep Muster bewirken eine Reduktion der resonanzbedingten Aufschaukelung um etwa 25%.

## 5.2 Mindestentfernungen für Bauwerke ober Tage

Wie die Sweep-Erschütterungen mit zunehmender Distanz abnehmen, wurde auf mehreren, über das Messgebiet verteilten Profilen untersucht. Wie Abbildung 17 zeigt, ergibt sich eine Bandbreite von fast einer Größenordnung der Schwinggeschwindigkeit bei gleicher Distanz.

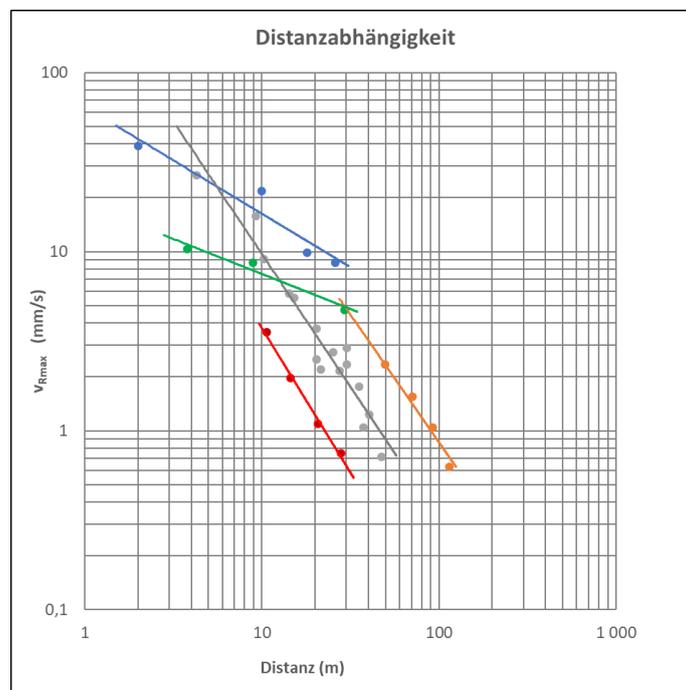


Abbildung 17: Distanzabhängigkeit der Sweep-Erschütterungen

Wenn man im Sinne einer „worst case“ Betrachtung die Einhüllende der Punktwolke zur Ermittlung der Mindestdistanzen heranzieht, dann zeigt sich, dass für die Bauwerksempfindlichkeitsklasse 0 (Infrastrukturbauten) praktisch kein Schutzabstand erforderlich ist, um den S 9020-Richtwert einzuhalten, und für die Klasse 4 (Denkmalschutz) rund 25 m.

### 5.3 Erschütterungsbelastung unterirdischer Leitungsnetze

Diese Frage ist mit Hilfe von gleichzeitigen Messungen der Sweep-Erschütterungen an der Oberfläche und auf einer Rohrleitung in etwa 70 cm Tiefe untersucht worden. Wie aus Abbildung 18 ersichtlich ist, ergibt sich im Rohrleitungsniveau insbesondere im Nahbereich eine dramatische Erschütterungsabnahme, die sich erst mit zunehmender Entfernung vom Vibrator abschwächt, da dann offensichtlich die Tieflage im Vergleich zur Horizontaldistanz rasch an Bedeutung verliert.

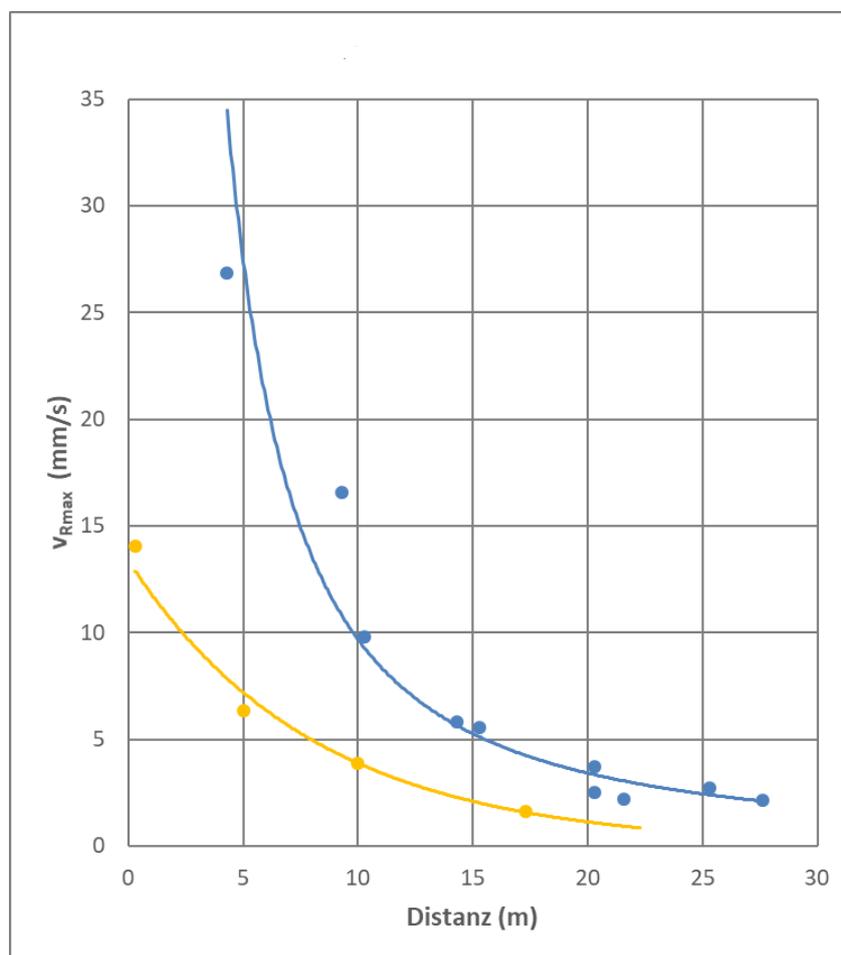


Abbildung 18: Entfernungabhängigkeit der Emission von 2-90 Hz Sweeps an der Oberfläche (blau) und in 70 cm Tiefe (orange)

Diese Erschütterungsbelastung kann mit den thermischen Belastungen verglichen werden, denen Leitungsnetze tagaus-tagein ausgesetzt sind.

Diese thermische Belastung ergibt sich durch die infolge der Temperaturänderungen bedingten Verformungen und Spannungsänderungen des Materials, die durch den Tages- bzw. Jahresgang der Temperatur hervorgerufen werden.

Der thermische Längenänderungskoeffizient von Stahl beträgt etwa  $11 - 13 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{K}$ . Der durch die meteorologische Situation und die klimatischen Bedingungen hervorgerufenen ständige Temperaturwechsel wirkt auf ein erdverlegtes Rohr nur in dem Ausmaß ein, das durch die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Deckschichten bestimmt wird. Unter durchschnittlichen Bodenbedingungen wird der Tagesgang der Temperatur in etwa 50 cm Tiefe bedeutungslos, der Jahresgang aber erst in 12 m Tiefe.

Für ein in 70 cm Tiefe verlegtes Rohr ergibt sich beispielsweise aus der Extremwertstatik der Bodentemperaturen in Wien-Hohe Warte die aus Abbildung 19 ersichtliche klimatische Situation.

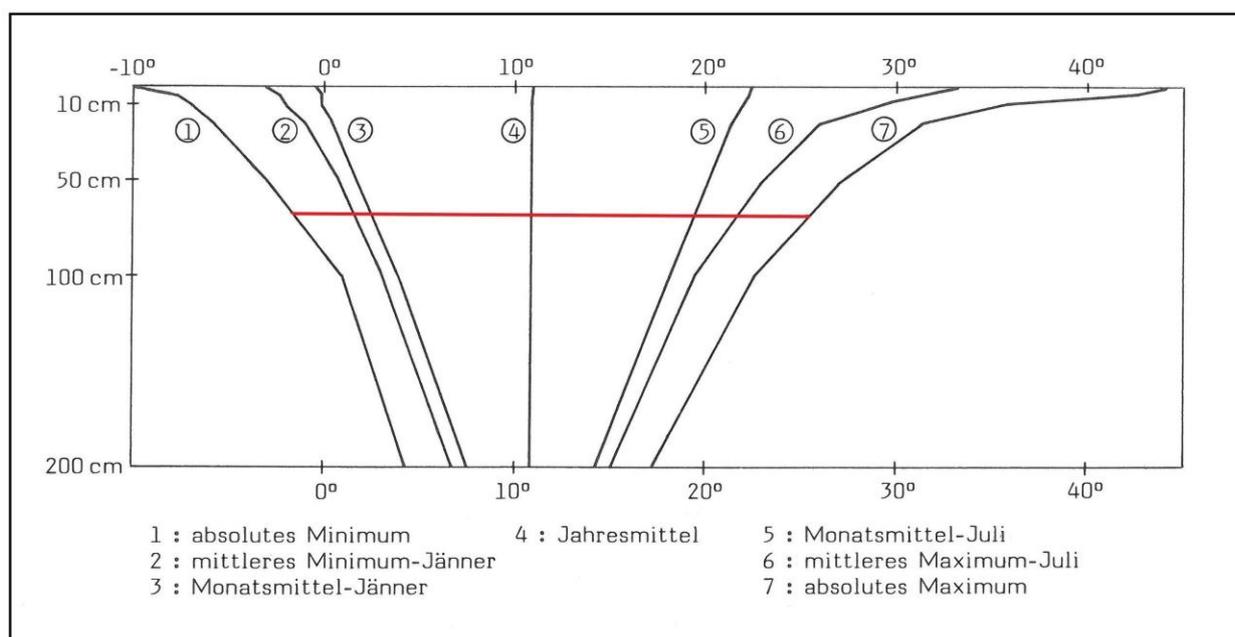


Abbildung 19: Klimastatistik der Bodentemperatur-Extremwerte in Wien-Hohe Warte (rot: Temperatur-Bandbreite in 70 cm Tiefe)

In diesem Beispiel beträgt die mittlere Extremwert-Bandbreite somit  $20^\circ\text{C}$ , die unter Berücksichtigung der absoluten klimatologischen Extremwerte auf  $27^\circ\text{C}$  ansteigt. Die thermisch bedingten Längenänderungen von Stahl erreichen in dieser Tiefe im Mittel etwa  $220 - 206 \cdot 10^{-6}$  Bruchteile, unter Berücksichtigung der absoluten Bandbreite sogar  $300 - 350 \cdot 10^{-6}$ .

Ebenso wie die Temperaturschwankungen rufen auch Erschütterungen materialspezifische Längenänderungen und Verformungen hervor.

Der auf ein Schwinggeschwindigkeitsmaximum von 1 mm/s bezogene dynamische Belastungskoeffizient von Stahl durch Erschütterungen beträgt daher  $1,25 \cdot 10^{-6} / \text{mm/s}$ . Er erreicht damit daher nur etwa 10 Prozent der Größe der thermischen Belastungskoeffizienten. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass eine Erschütterung mit  $v_{\text{max}} = 10 \text{ mm/s}$  die gleiche Belastung auf ein Stahlrohr ausübt, wie eine Temperaturänderung um  $1^\circ\text{C}$ .

Die Sweep-Erschütterungen sind somit für unterirdische Leitungsnetze unbedenklich.

## 5.4 Erschütterungsschutz der Ziesel

Von der Umweltschutzbehörde wurde zum Schutz des Ziesel-Winterschlafs eine  $W_m$ -bewertete Beschleunigung nach ISO 2631-2 von  $a_{wm} = 17 \text{ mm/s}^2$  vorgeschrieben.

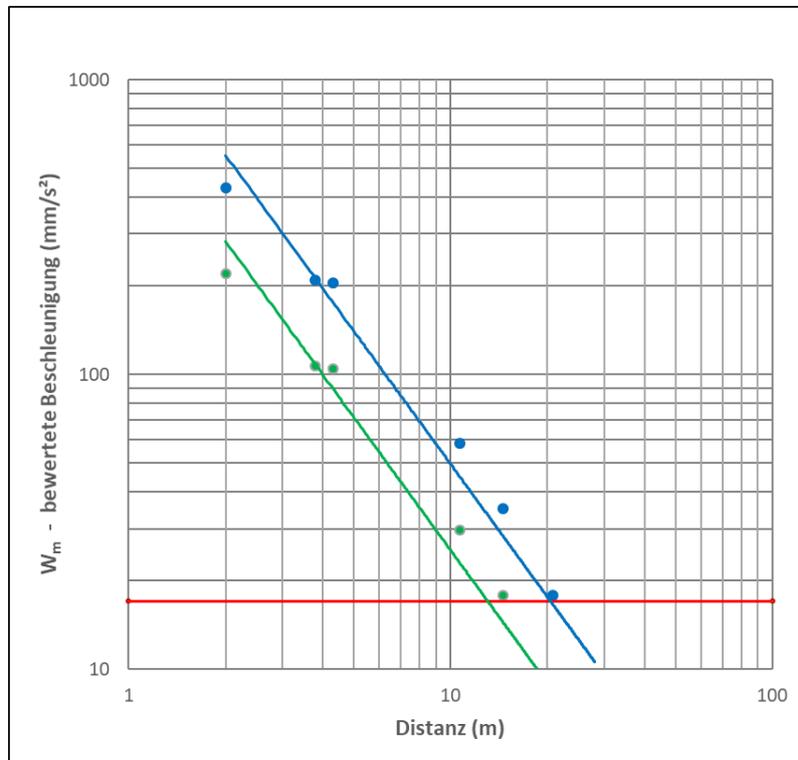


Abbildung 20: Entfernungabhängigkeit der  $W_m$ -bewerteten Beschleunigung in 50 cm Tiefe (blau) und 70 cm Tiefe (grün)

Aus den in den Abbildungen 17 und 18 dargestellten Messdaten kann die  $W_m$ -bewertete Beschleunigung  $a_{w \max}$  berechnet werden. Das zusammenfassende Ergebnis ist in Abbildung 20 wiedergegeben, in die auch der einzuhaltende Richtwert  $a_{wm} = 17 \text{ mm/s}^2$  rot eingezeichnet ist. Die Regressionsanalyse der  $a_{w,max}$ -Daten ergibt, dass der Richtwert in 70 cm Tiefe bereits ab 13 m Distanz und in 50 cm Tiefe ab 20 m Distanz eingehalten wird.

## AUTOREN

Univ.Prof.Dr.Peter Steinhauser  
Dipl.Ing. Wolfgang Steinhauser  
STCE Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH  
Delugstraße 6, 1190 Wien, Österreich  
+43 1 3205451  
[peter.steinhauser@stce.at](mailto:peter.steinhauser@stce.at)  
[wolfgang.steinhauser@stce.at](mailto:wolfgang.steinhauser@stce.at)  
[www.stce.at](http://www.stce.at)