

# triad

Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen  
(HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrumbank West  
Untersuchung der Schallkopplungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser



Förderkennzeichen 0325681

## Abschlussbericht



Technische Universität Braunschweig  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik

P. Stein, H. Sychla, B. Bruns, C. Kuhn, J. Gattermann, J. Stahlmann

September 2016

Forschungsvorhaben **triad**

**Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten  
Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC)  
bei den Monopile-Gründungen  
im OWP Amrumbank West**

**Untersuchung der Schallkopplungen  
zwischen Pfahl, Boden und Wasser**



Förderkennzeichen 0325681

Laufzeit: 01.12.2013 – 31.07.2015

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik  
Beethovenstr. 51b  
38106 Braunschweig

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325681 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren:

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Stein  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Hauke Sychla  
Dipl.-Ing. Benedikt Bruns  
Dipl.-Ing. Christian Kuhn  
Akad. Dir. Dr.-Ing. Jörg Gattermann  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann

## Zusammenfassung

Bei den Rammarbeiten für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) entstehen hohe Unterwasserschallemissionen, welche marine Lebewesen schädigen können. Zur Begrenzung der Hydroschallpegel werden daher verschiedene Schallminderungssysteme eingesetzt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens *triad* wird die Schallentstehung und -ausbreitung bei der Rammung von Monopfählen im Gesamtsystem, bestehend aus Pfahl, Boden und Wasser (Abbildung 1), untersucht. Dazu wird ein umfangreiches Messprogramm bestehend aus pfahldynamischen Messungen sowie seismischen Messungen und Hydroschallmessungen in Entfernungen von 25 m bis 1500 m zum Pfahl realisiert.

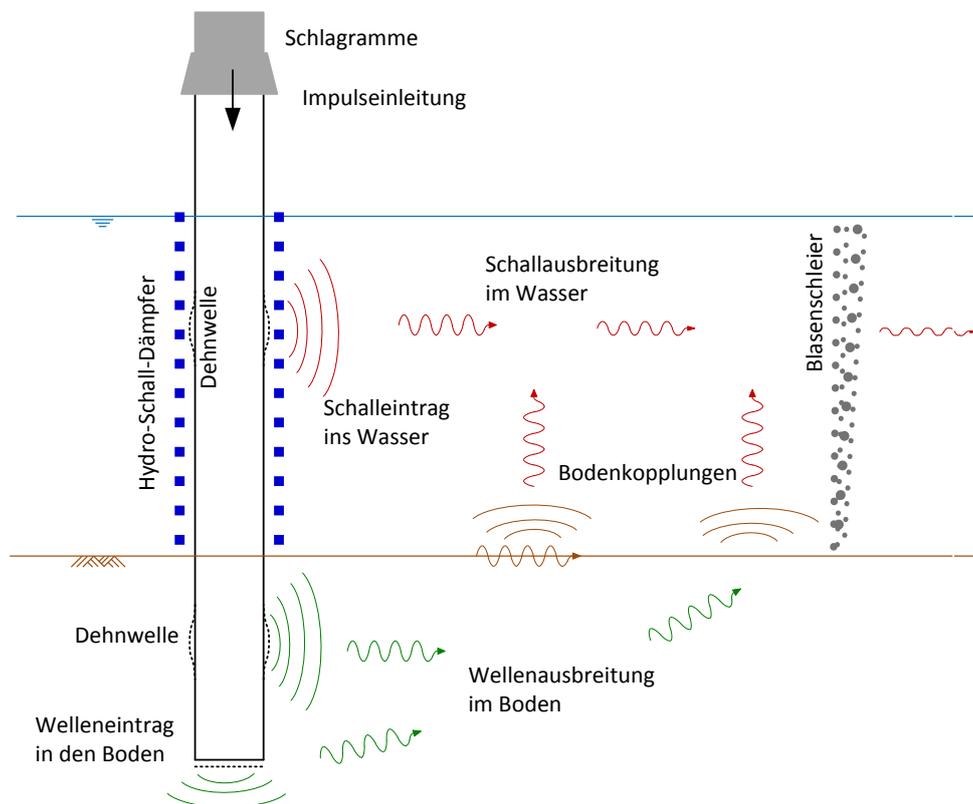


Abbildung 1: Schallausbreitung im System Pfahl, Boden, Wasser mit Schallminderungssystemen HSD und BBC

Die Messungen finden im Offshore-Windpark (OWP) *Amrumbank West* statt, der sich durch homogene Baugrundverhältnisse auszeichnet und damit eine Vergleichbarkeit verschiedener Messungen erleichtert. Als Schallminderungssysteme kommen dort Große Blasenschleier (BBC, big bubble curtain) und ein Hydro-Schall-Dämpfer (HSD)-System zum Einsatz.

Auf Grundlage der Messungen können sowohl Phänomene bei der Wellenausbreitung infolge der Rammung von Offshore-Pfählen, als auch die Minderungswirkung von HSD und BBC (einzeln und in Kombination) erforscht werden. Durch die Messungen im Wasser, am Boden und am Pfahl sowie die Berücksichtigung der Rammprotokolle sind Aussagen über verschiedene Ausbreitungswege und Einflussfaktoren auf die Hydroschallpegel möglich. Die verfahrenstechnischen Abläufe bei der Realisierung des Schallminderungskonzeptes sowie Referenzmessungen mit verschiedenen Schallminderungskonfigurationen erlauben eine Untersuchung der einzelnen Schallminderungssysteme sowie deren Kombinationen.

## Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung .....	1
I.1	Aufgabenstellung .....	1
I.2	Voraussetzungen für das Vorhaben .....	2
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
I.3.1	Messkonzept.....	2
I.3.2	Vorbereitung der Messungen .....	3
I.3.3	Durchführung der Messkampagnen .....	3
I.3.4	Auswertung der Messdaten.....	4
I.4	Stand der Technik .....	4
I.4.1	Gründung von Offshore-Windenergieanlagen .....	4
I.4.2	Notwendigkeit der Begrenzung des Unterwasserschalls .....	6
I.4.3	Schallminderungssysteme .....	7
I.4.4	Schallausbreitung bei Offshore-Rammarbeiten .....	10
I.4.5	Funktionsweise von BBC und HSD .....	18
I.4.6	Wellenausbreitung im Boden .....	19
I.4.7	Pfahldynamik .....	24
I.4.8	Zusammenfassung .....	28
I.4.9	Auszug der verwendeten Fachliteratur, Berichte und anderer Quellen .....	28
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	33
I.5.1	Danksagung.....	33
I.5.2	Unterstützende Stellen .....	33
II.	Eingehende Darstellung des Forschungsvorhabens .....	34
II.1	OWP Amrumbank West.....	34
II.1.1	Projektbeschreibung.....	34
II.1.2	Baugrundverhältnisse und Gründungskonzept .....	34
II.1.3	Schallminderungskonzept.....	35
II.2	Messkonzept.....	37
II.2.1	Untersuchungen im Gesamtsystem Pfahl-Boden-Wasser.....	37
II.2.2	Pfahlmessungen.....	38
II.2.3	Seismische Messungen .....	42
II.2.4	Hydroschallmessungen .....	44
II.2.5	Weitere Messungen.....	45

II.3	Messkampagnen .....	46
II.3.1	Zeitlicher Ablauf der Messkampagnen .....	46
II.3.2	Vorbereitung der Messungen vom Installationsschiff.....	47
II.3.3	Messungen im Fernbereich .....	48
II.3.4	Instrumentierung der Pfähle.....	50
II.3.5	Durchführung MK1 .....	51
II.3.6	Erfahrungen aus MK1 und Folgen für MK2+3 .....	52
II.3.7	Durchführung MK2+3 .....	53
II.3.8	Funktionalität der geklebten Messtechnik im Pfahl .....	54
II.3.9	Beobachtungen der Lage der Hydrophone.....	54
II.4	Auswertung der Messdaten .....	56
II.4.1	Übersicht der gewonnenen Daten.....	56
II.4.2	CTD-Sondenmessung .....	56
II.4.3	Auswertung der Rammprotokolle .....	57
II.4.4	Auswertung der Pfahlmessungen .....	58
II.4.5	Auswertung der seismischen Messungen .....	60
II.4.6	Auswertung der Hydroschallmessungen .....	63
II.4.7	Bestimmung von Wellenlaufzeiten.....	67
II.5	Messergebnisse .....	69
II.5.1	Ergebnisse der Pfahlmessungen .....	69
II.5.2	Ergebnisse der seismischen Messungen.....	74
II.5.3	Ergebnisse der Hydroschallmessungen .....	77

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schallausbreitung im System Pfahl, Boden, Wasser mit Schallminderungssystemen HSD und BBC .....	i
Abbildung 2: Gründungsmöglichkeiten für OWEA [nach Achmus, 2009] .....	5
Abbildung 3: Einwirkzonen einer Schallquelle [nach Elmer et al., 2007] .....	6
Abbildung 4: Rammschallpegel in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers [nach Bellmann, 2014] .....	7
Abbildung 5: Prinzipskizze des großen Blasenschleiers (links) und Einsatz beim OWP <i>Borkum West II</i> (rechts) [Trianel, o.J.] .....	8
Abbildung 6: gemittelte Differenzspektren des SEL durch den Einsatz verschiedenen Blasenschleierkonfigurationen beim OWP <i>Borkum West II</i> normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Pfahl [Diederichs et al., 2014] .....	9
Abbildung 7: Zeitsignal (oben) und Frequenzspektrum (unten) eines Rammschlages des Pfahles A45 beim OWP <i>Amrumbank West</i> in 72 m Entfernung zum Pfahl .....	12
Abbildung 8: Filterantworten einzelner Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 4.000 Hz .....	13
Abbildung 9: Terzspektren der bei verschiedenen Projekten eingesetzten Rammgeräte in 750 m Entfernung zum Pfahl .....	14
Abbildung 10: Terzspektren beim <i>ESR<math>\alpha</math></i> -Test (links) [Wilke et al., 2012] mit Referenzmessung (schwarze Linie) und Messung bei Einsatz des HSD-Systems (rote Linie) sowie Differenzspektrum beider Messungen (rechts) .....	14
Abbildung 11: Ausbreitungsdämpfung nach Thiele und Schellstede [1980] in 750 m Entfernung zur Quelle in Abhängigkeit der Frequenz .....	16
Abbildung 12: untere Grenzfrequenz in Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeit am Boden für verschiedene Wassertiefen .....	17
Abbildung 13: Schallausbreitung im Flachwasser auf verschiedenen Pfaden .....	17
Abbildung 14: Hydroschallemission infolge Dehnwelle im Pfahl [vgl. Kuhn et al., 2014] .....	18
Abbildung 15: Wellenarten im Halbraum [Vrettos, 2008] .....	20
Abbildung 16: Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit in der Luft und im Wasser ....	21
Abbildung 17: Zeitfunktion (Zeitsignale) eines Geophons (Erschütterung) eines Rammimpulses in 13 m Abstand vom Testpfahl am Sediment bei einer verwendeten Rammenergie von 300 kJ [Wilke et al., 2012] .....	23
Abbildung 18: Zeitfunktionen zweier Rammimpulse von einem Hydrophon und drei Geophonen mit unterschiedlichem Abstand zum Pfahl [Bruns, 2013] .....	23
Abbildung 19: Durchlauf einer Dehnwelle im Pfahl [vgl. Kuhn et al., 2014] .....	25
Abbildung 20: Einsatz des HSD-Systems beim OWP Amrumbank West [Bruns et al., 2014] .....	36
Abbildung 21: Anordnung der Messlokationen relativ zu Pfahl, Errichterschiff und Blasenschleier [vgl. Stein et al., 2015a] .....	38

Abbildung 22: Messkonzept zur Untersuchung der Wellenausbreitung in Pfahl, Boden und Wasser [vgl. Stein et al., 2015a] .....	38
Abbildung 23: Instrumentierung der Monopfähle [vgl. Sychla et al., 2015] .....	39
Abbildung 24: Applizierte Dehnungs- und Beschleunigungssensoren (links), Einhausung der Sensoren (Mitte), und fertig gekapselte Messstelle (rechts) .....	41
Abbildung 25: geklebter Rammschuh (links), Schutzprofil und Kabelstrang (Mitte), Zugentlastung und Aufhängung für die Datenerfassung (rechts) .....	42
Abbildung 26: autarke Messwerterfassungseinheit im Labor des IGB-TUBS (links) und im Pfahl kurz vor der Rammung (rechts) .....	42
Abbildung 27: Meeresboden aufgenommen an ML25 während der Rammung von Pfahl A66 .....	43
Abbildung 28: Testflug der ferngesteuerten Drohne über dem Universitätsgelände .....	45
Abbildung 29: Messlokationen (ML), Datenerfassung (DAQ) und Verkabelung an Deck des Installationsschiffes.....	47
Abbildung 30: Krane zum Ablassen der Geophone (links) und Geophon nach der Bergung (rechts)	48
Abbildung 31: zentrale Messwerterfassung an Deck des Errichterschiffes (links) und Messequipment an den einzelnen Messlokationen (rechts).....	48
Abbildung 32: autarkes Messsystem zur Erfassung von Hydroschall und Bodenschwingungen im Fernbereich .....	48
Abbildung 33: Messschiffe Reykjanes (links) und Arne Tiselius (rechts) beim Bergen der Messsysteme.....	49
Abbildung 34: Messlokationen des IGB-TUBS (rot) und des Baumonitorings (blau) an den Pfählen A23 (links) und A20 (rechts).....	50
Abbildung 35: Verschluss des Monopfahles am Fuß mit Einlass für die Ölheizung (links) und Induktionsheizung (rechts) .....	51
Abbildung 36: Bergung der Messbox im Pfahl A22 (links) sowie Messbox nach Rammung an Pfahl A66 (rechts).....	52
Abbildung 37: integrierte gemessene Beschleunigungen an Pfahl A22 in MQ1 bei Schlag 4000.....	52
Abbildung 38: integrierte gemessene Beschleunigungen an Pfahl A66 in MQ1 bei Schlag 4000.....	53
Abbildung 39: Funktionsfähige (grün) und ausgefallene (rot) Sensoren während der Rammung der Pfähle A22 (links), A44 (Mitte) und A66 (rechts) .....	54
Abbildung 40: Lage der Blasenschleier bei Pfahl A24 (links) und A22 (rechts) .....	55
Abbildung 41: Verschattung von ML97 durch eines der Beine des Errichterschiffes .....	55
Abbildung 42: Ergebnis der CTD-Sondenmessung bei Pfahl A23 mit Temperatur (blau), Salzgehalt (rot) und Schallgeschwindigkeit im Wasser (grün) über die Wassersäule .....	57
Abbildung 43: Rammenergie (blau) und Pfahl-Einbindung (grün) über den Verlauf der Rammung des Pfahles A22.....	58

Abbildung 44: gemessene Beschleunigungen und integrierte Geschwindigkeiten (oben) sowie gemessene und gefilterte Dehnungen (unten) an Pfahl A66 .....	59
Abbildung 45: gemessene Kraft-Zeit-Verläufe bei Schlag 1000 an Pfahl A66 .....	60
Abbildung 46: Rohsignal (blau) und gefiltertes Signal (grün) der Bodenvibration in horizontaler Richtung an ML25 bei der Rammung des Pfahles A23 bei 1140 kJ .....	60
Abbildung 47: horizontale Komponenten des gefilterten Signals im Koordinatensystem des Geophons (x, blau und y, grün) sowie in radialer (rad, rot) und tangentialer Richtung (tan, schwarz) der Bodenvibrationen an ML25 bei der Rammung von Pfahl A23 mit 1140 kJ.....	61
Abbildung 48: kartesisches Koordinatensystem der Geophone (x, y, z) und Zylinderkoordinaten zur Beschreibung der Wellenausbreitung (rad, tan, $\varphi$ , z) .....	61
Abbildung 49: ermittelter Verdrehwinkel $\varphi$ der Geophone im Nahbereich bei der Rammung des Pfahles A23.....	62
Abbildung 50: SEL (farbige Linien) und Rammenergie (schwarze Linie) über die Rammung bei Pfahl A66 .....	63
Abbildung 51: SEL (farbige Linien) und Rammenergie (schwarze Linie) über die Rammung bei Pfahl A22 .....	64
Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung des SEL (blau) und SEL <sub>05</sub> (rot) in 750 m bei der Rammung der Pfähle A22 (links) mit HSD und BBC sowie A20 (rechts) mit HSD für die gesamte Rammung (oben), die erste Rammphase ohne HSD (Mitte) und die zweite Rammphase mit HSD (unten) .....	65
Abbildung 53: Häufigkeitsverteilung des SEL (blau) und SEL <sub>05</sub> bei der Rammung der Pfähle A66 ohne Schallminderungssystem (links) und A77 mit BBC (rechts) .....	66
Abbildung 54: SEL (oben) und Schallenergie-dichte (unten) in verschiedenen Terzbändern diskret (blau) und kumuliert (grün), gemessen bei Pfahl A66 (Referenz) in 750 m Entfernung mit 1140 kJ Rammenergie.....	67
Abbildung 55: Kraft aus Geschwindigkeit an den Drittelpunkten von MQ1 beim Pfahl A66 über die Rammung.....	69
Abbildung 56: Kraft aus Geschwindigkeit (blau) und Kraft aus Dehnung (grün) über die Rammung in MQ1 bei Pfahl A66 .....	70
Abbildung 57: gemessene Energie (blau) und Energie laut Rammprotokoll (schwarz) über die Rammung bei Pfahl A66.....	70
Abbildung 58: Eindringwiderstand (blau) und Rammenergie (schwarz) über die Rammung bei Pahl A44 .....	71
Abbildung 59: maximale Schwinggeschwindigkeiten des Einleitungsimpulses über die Rammung in allen Messquerschnitten.....	72
Abbildung 60: axiale und tangentiale Dehnungen (blau/rot, oben) sowie axiale und radiale Geschwindigkeiten (grün/violett, unten) bei Pfahl A44, MQ1, Schlag 100.....	73
Abbildung 61: axiale und tangentiale Dehnungen (blau/rot, oben) sowie axiale und radiale Geschwindigkeiten (grün/violett, unten) bei Pfahl A66, MQ1, Schlag 2000.....	73

Abbildung 62: axiale Beschleunigung auf der Platte (links) und am Pfahl (rechts) bei Schlag 1000 an Pfahl A66 .....	74
Abbildung 63: Geophonsignale (Z-Komponente) an verschiedenen Messlokalationen bei der Rammung des Pfahles A23 bei Schlag 1 von Rammphase 2 (Softstart) [vgl. Bruns et al., 2014] .....	75
Abbildung 64: maximale Schwinggeschwindigkeiten in radialer (oben) und vertikaler Richtung (unten) je Rammschlag im Verlauf der Rammung des Pfahles A23 .....	76
Abbildung 65: Abklingen der maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten am Boden über die Entfernung .....	77
Abbildung 66: Messwerte und Abklingkurven des SEL bei den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, blau) und A20 (mit HSD, rot) [vgl. Stein et al., 2015d] .....	79
Abbildung 67: Messwerte und Abklingkurven des SEL bei allen Pfählen [vgl. Stein et al., 2015d] .....	80
Abbildung 68: SEL über die Wassertiefe an allen ML im Nahbereich bei verschiedenen Pfählen .....	82
Abbildung 69: Konturplots des SEL im Nahbereich an den Pfählen A66 (oben) und A20 (unten) .....	83
Abbildung 70: Terzspektren an Pfählen mit verschiedenen Schallminderungskonfigurationen [vgl. Bruns et al., 2014] .....	84
Abbildung 71: Terzspektren bei den Referenzmessungen an den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, rot), A20 (mit HSD, grün), und A77 (mit BBC, blau) in 750 m Entfernung in verschiedenen Richtungen [vgl. Stein et al., 2015d] .....	85
Abbildung 72: Streuung (rot) und Median (schwarz) der Terzspektren bei 1140 kJ Rammenergie bei den Referenzmessungen an den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, oben), A20 (mit HSD, Mitte), und A77 (mit BBC, unten) .....	86
Abbildung 73: Terzspektren für verschiedene Rammenergien bei den Referenzmessungen an den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, oben), A20 (mit HSD, Mitte), und A77 (mit BBC, unten) .....	87
Abbildung 74: Entwicklung von SEL (links), $L_{peak}$ (rechts) und Rammenergie zu Beginn der Rammung des Pfahles A66 .....	88
Abbildung 75: Verlauf der axialen Geschwindigkeit an MQ1a bei Pfahl A66 für Schlag 35 (oben) und Schlag 340 (unten) [vgl. Stein et al., 2015c] .....	89
Abbildung 76: Hydrophonsignal an ML145 bei Pfahl A24 mit Reflexion vom Blasenschleier .....	89
Abbildung 77: Hydrophonsignal an ML37 bei Pfahl A24 .....	90

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten für verschiedene Medien [Auszug aus Knödel et al., 2005] .....	22
Tabelle 2: Lage der Messquerschnitte bei den Pfahlmessungen .....	40
Tabelle 3: Spezifikationen der Pfahl-Messtechnik.....	40
Tabelle 4: Messtechnik zur Untersuchung der Bodenschwingungen .....	43
Tabelle 5: Messtechnik zur Untersuchung des Hydroschalls .....	44
Tabelle 6: Übersicht der Hydrophon-Arrays bei den verschiedenen Messkampagnen .....	44
Tabelle 7: Übersicht der realisierten Messlokationen im Fernbereich .....	46
Tabelle 8: Anzahl detektierter Schläge mit verschiedenen Messsystemen .....	56
Tabelle 9: Übersicht gemessener SEL im Fernbereich bei 1140 kJ.....	78
Tabelle 10: Mediane der Messwerte des SEL bei verschiedenen Pfählen und Rammenergien normiert auf 750 m.....	81

## Abkürzungsverzeichnis

ACC	accelerometer (dt.: Beschleunigungssensoren)
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BBC	Big Bubble Curtain (dt.: Großer Blasenschleier)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CPT	Cone Penetration Test (dt.: Drucksondierung)
CTD	Conductivity, Temperature, Depth (dt.: Leitfähigkeit, Temperatur, Tiefe)
DAQ	data acquisition (dt.: Datenerfassung)
DBBC	Double Big Bubble Curtain (dt.: doppelter Großer Blasenschleier)
DMS	Dehnungsmessstreifen
DEWI	Deutsches Windenergie-Institut GmbH
ESRa	Evaluierung von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl
FEM	Finite Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier Transformation (dt.: schnelle Fourier-Transformation)
FINO	Forschungsplattform in Nord- und Ostsee
FKZ	Förderkennziffer
GPS	Global Positioning System (dt.: globales Positionsbestimmungssystem)
HSD	Hydro-Schall-Dämpfer
ifs	Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig
IGB-TUBS	Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig
itap	Institut für Technische und Angewandte Physik GmbH
MK	Messkampagne
ML	Messlokation
NMS	Noise Mitigation Screen
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
OWP	Offshore-Windpark
P-Welle	Primärwelle (Kompressionswelle)
SEL	Sound Exposure Level (dt.: Einzelereignispegel)
StUK	Standarduntersuchungskonzept
S-Welle	Sekundärwelle (Scherwelle)
TP	Transition Piece

TTS..... Temporary Threshold Shift (dt.: zeitweilige Hörschwellenverschiebung)  
ü.G. .... über Grund

## Symbolverzeichnis

### Pegelgrößen

$L_E$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]	Einzelereignispegel
$L_{eq}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]	äquivalenter Dauerschallpegel
$L_{peak}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}$ ]	Spitzenpegel
SEL	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]	Einzelereignispegel
$SEL_{05}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]	95%-Perzentil des Einzelereignispegels
$SEL_{50}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]	50%-Perzentil des Einzelereignispegels
$SEL_{90}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]	10%-Perzentil des Einzelereignispegels
$\Delta L$	[dB]	Pegeldifferenz
TL	[dB]	Ausbreitungsdämpfung (engl.: transmission loss)
$\alpha$	[dB/km]	Absorptionskoeffizient
k		Dämpfungskoeffizient

### Schallausbreitung im Wasser

f	[Hz]		Frequenz
$f_0$	[Hz]		untere Grenzfrequenz
n	[-]		Anzahl an Schallereignissen
p	[Pa]		Druck
$p_0$	[Pa]	1 $\mu\text{Pa}$	Referenzdruck
$p_{peak}$	[Pa]		Spitzendruck
$c_{Wasser}$	[m/s]		Schallgeschwindigkeit im Wasser
E	[Pa·s <sup>2</sup> ]		Schallenergiedichte
$E_0$	[Pa·s <sup>2</sup> ]	1 $\mu\text{Pa s}^2$	Referenzwert der Schallenergiedichte
S	[‰]		Salinität
T	[s]		Signallänge
$T_0$	[s]	1 s	Bezugszeitdauer
t	[s]		Zeit
$t_1$	[s]		Zeitpunkt zu Beginn eines Schallereignisses
$t_2$	[s]		Zeitpunkt am Ende eines Schallereignisses
v	[m/s]		Schallschnelle
Z	[Ns/m <sup>3</sup> ]		akustische Kennimpedanz

$\beta$	[°]	Schallausbreitungswinkel
$\vartheta, T$	[°C], [K]	Temperatur
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte

### Wellenausbreitung im Boden

$c_{\text{Boden}}$	[m/s]	Wellengeschwindigkeit im Sediment (Boden)
$c_{\text{Flüssigkeit}}$	[m/s]	Wellengeschwindigkeit in Flüssigkeiten
$c_{\text{Gas}}$	[m/s]	Wellengeschwindigkeit im idealen Gas
$c_p$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit Primärwelle
$c_R$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit Rayleighwelle
$c_S$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit Sekundärwelle
$K$	[N/m <sup>2</sup> ]	Kompressionsmodul
$\kappa$	[-]	Isotropenexponent
$\nu$	[-]	Querdehnzahl

### Pfahldynamik

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
$a$	[m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung
$c_{\text{Pfahl}}$	[m/s]	Dehnwellengeschwindigkeit im Pfahl
$E$	[kJ]	Rammenergie
$E_{\text{dyn}}$	[N/m <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
$F$	[N]	Kraft
$L$	[m]	Pfahllänge
$R_{\text{dyn}}$	[N]	dynamischer Pfahlwiderstand
$R_{\text{stat}}$	[N]	statischer Pfahlwiderstand
$R_{\text{tot}}$	[N]	Rammwiderstand
$t_1$	[s]	Zeitpunkt der Krafteinleitung
$t_2$	[s]	Zeitpunkt des Pfahlfußreflexes
$v$	[m/s]	Pfahlgeschwindigkeit
$Z$	[Ns/m]	dynamische Steifigkeit (Impedanz)
$\varepsilon$	[-]	Dehnung

Geometrie

h	[m]	Wassertiefe
R	[m]	Abstand zum Pfahl
z	[m]	Wassertiefe
$\varphi$	[°]	Winkelkoordinate
rad		radiale Komponente
res		Resultierende
tan		tangentiale Komponente
x		horizontale Komponente
y		horizontale Komponente
z		vertikale Komponente

## I. Kurze Darstellung

### I.1 Aufgabenstellung

Offene Stahlrohrpfähle stellen derzeit die häufigste Gründungsvariante für Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) dar. 91 % der im Jahr 2014 errichteten OWEA wurden auf Monopfählen gegründet, insgesamt standen Ende 2014 79 % aller OWEA auf Monopfählen. [EWEA, 2015]. Die Pfähle werden dabei in aller Regel durch Schlagrammen in den Baugrund getrieben, wobei hohe Hydroschalldrücke emittiert werden. Dies kann bei marinen Lebewesen zu Verhaltensänderungen, Verletzungen oder gar zum Tod führen. Insbesondere Meeressäuger wie Schweinswale oder Kegelrobben sind jedoch zu schützen, weshalb in Deutschland Grenzwerte für Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammungen gelten [Klein et al., 2014]. Diese Grenzwerte können bei der Installation von Gründungspfählen für OWEA mittels Schlagrammung nicht eingehalten werden. Daher sind bei derartigen Bauvorhaben zwingend schallmindernde Einrichtungen einzusetzen. Bei der Rammung von Monopfählen mit Durchmessern von etwa 6 m in Wassertiefen zwischen 20 m und 30 m reicht ein System allein zur Einhaltung der Grenzwerte des Hydroschalls nicht mehr aus. Für den Einsatz von Monopfahlgründungen größerer Durchmesser (bis 8 m) in größeren Wassertiefen (bis 40 m) gibt es derzeit noch keine abgesicherten Erkenntnisse über die auftretenden Hydroschallpegel. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Schallemissionen weiter ansteigen [Bellmann, 2014].

Alternative Einbringungsmethoden wie das Vibrationsverfahren oder Bohrtechniken werden zwar untersucht, jedoch kann hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Realisierbarkeit noch nicht von einem Stand der Technik gesprochen werden, wie es bei geschlagenen Pfählen der Fall ist. Bei vibrierten Pfählen ist im Allgemeinen von einer geringeren axialen Tragfähigkeit auszugehen, als bei geschlagenen Pfählen. Wie groß der Unterschied ist und ob er auch auf die laterale Tragfähigkeit, welche insbesondere bei Monopfahlgründungen maßgebend ist, zu übertragen ist, wird derzeit erforscht [Herwig/Gattermann, 2015; Fischer et al., 2013]. Solange jedoch insbesondere auf Seiten der Zertifizierer und der Genehmigungsbehörden Zweifel an der Gleichwertigkeit der Rammverfahren besteht, wird die Schlagrammung gegenüber der Vibrationsrammung bevorzugt werden. Zudem ist die Rammbarkeit mit dem Vibrationsverfahren nur in bestimmten, vorwiegend rolligen Böden gegeben. Der Einsatz von Bohrverfahren befindet sich im Offshore-Bereich bisher noch in der Konzept-Phase [van de Brug et al., 2015]. Neben schallarmen Einbringungsverfahren für Gründungspfähle gibt es weitere schallarme Gründungsformen, welche andere Konzepte zum Lastabtrag in den Baugrund verfolgen und mit anderen Verfahren errichtet werden. Hierzu zählen vor allem Schwergewichtsfundamente und Suction-Bucket-Gründungen. Beide Gründungsformen wurden erfolgreich als Prototypen getestet, konnten jedoch bis jetzt noch keine Marktreife erlangen.

Es ist daher davon auszugehen, dass geschlagene Stahlrohrpfähle für die Gründung von OWEA mittelfristig eine große Rolle spielen werden. Zum Schutz der marinen Fauna bei gleichzeitiger Steigerung der Stromerzeugung durch OWEA sind daher wirksame Schallminderungssysteme (weiter) zu entwickeln.

Ursächlich für die Schallemissionen an der Quelle (Pfahl) sind impulsartige Dehnwellen die den Pfahl durchlaufen und dabei Wellen ins umgebende Wasser und den Boden emittieren. Im Wasser breiten sich diese über mehrere Kilometer, im Boden über einige 10 m bis 100 m aus. Über den sekundären Übertragungsweg Boden werden wiederum Hydroschallwellen ins Wasser emittiert.

Weder die genauen Phänomene bei der Übertragung der Wellen vom Pfahl, noch vom Boden ins Wasser sind geklärt.

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung der Wellenausbreitung im Gesamtsystem bestehend aus Pfahl, Baugrund und Seewasser unter Berücksichtigung der eingesetzten Schallminderungssysteme. Umfangreiche Messkampagnen konnten beim OWP *Amrumbank West* durchgeführt werden. Dabei wurden einzelnen Monopfähle instrumentiert sowie Hydrophon-Arrays, einzelne Hydrophone und Geophone in Abständen von 25 m bis 1.500 m zum Pfahl ausgebracht. Die Messungen wurden sowohl bei der Rammung eines Referenzpfahles ohne Schallminderungssystem als auch unter Verwendung der Schallminderungssysteme HSD und BBC, jeweils einzeln und in Kombination, durchgeführt.

Die Messdaten wurden im Zeit- und Frequenzbereich ausgewertet. Es erfolgten Untersuchungen der Laufzeiten der vom Pfahl ausgehenden Wellen in den verschiedenen Medien sowie der Amplituden in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen wie Rammenergie oder Entfernung zum Pfahl. Besonderes Augenmerk lag auf der Ermittlung des Hydroschallpegels in einem Abstand von 750 m zum Pfahl (maßgeblicher Abstand für die Einhaltung von Grenzwerten) und dessen Beeinflussung durch den Einsatz der unterschiedlichen Schallminderungssysteme, aber auch anderer (Stör-) Parameter.

## I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Die Idee für das Vorhaben entstand am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (*IGB-TUBS*) aus den Erfahrungen bei den Forschungsvorhaben *Evaluierung von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl (ESRa, FKZ 0325307)* [Wilke et al., 2012] und *Untersuchung und Erprobung von Hydroschalldämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen (FKZ 0325365)* [Stahlmann et al., 2015]. Bei Begleitmessungen zum Einsatz von HSD-Prototypen wurden Fragen zum Einfluss der Bodenkopplung bei Schallminderungssystemen am Pfahl und zur ausreichenden Wirksamkeit einzelner Schallminderungssysteme aufgeworfen.

Das Konzept wurde in enger Zusammenarbeit mit der *E.ON Kraftwerke GmbH* bzw. *E.ON Climate & Renewables GmbH* ausgearbeitet, welche die Durchführung der Messkampagnen beim Bau des OWP *Amrumbank West* ermöglichen. Diese Baustelle eignet sich in besonderem Maße für die Untersuchungen aufgrund der Homogenität der Randbedingungen bei den einzelnen OWEA sowie des Einsatzes zweier unabhängiger Schallminderungssysteme. Von großem Wert für das Vorhaben ist darüber hinaus die Genehmigung von Referenzmessungen während der Rammung durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).

## I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

### I.3.1 Messkonzept

Zur Untersuchung der Wellenausbreitung im Gesamtsystem Pfahl, Boden und Wasser wurde ein umfangreiches Messkonzept entwickelt und realisiert:

Der Pfahl selbst wurde in drei Fällen mit Dehnungs- und Beschleunigungssensoren für pfahldynamische Messungen bestückt. Im Gegensatz zu herkömmlichen rambbegleitenden Messungen wurden

die Pfähle jedoch nicht nur am Kopf, sondern in verschiedenen Messquerschnitten, auch unterhalb der späteren Einbindung in den Boden, instrumentiert. Zudem wurden neben den axialen Dehnungen und Beschleunigungen auch die radiale Beschleunigungen und tangentialen Dehnungen erfasst.

Auf der Oberfläche des Meeresbodens wurden in verschiedenen Entfernungen Geophone zur Messung der Erschütterungen durch die Rammung abgesetzt. An denselben Messlokalationen wurden bis zu fünf Hydrophone in verschiedenen Wassertiefen platziert.

Aus logistischen Gründen werden die Hydroschall- und Erschütterungsmessungen in einen Nah- und einen Fernbereich unterteilt. Im Nahbereich erfolgten die Messungen mit deckgestützten Systemen und zentraler Datenerfassung vom Errichterschiff aus, im Fernbereich kamen autarke Messsysteme zum Einsatz. Abbildung 22 zeigt schematisch den Aufbau des Messkonzepts.

### I.3.2 Vorbereitung der Messungen

Aus Gründen der Zertifizierung und Projektrealisierung war ein Eingriff in die Tragstruktur der Monopfähle im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht möglich. Dies bedeutete für die Pfahlmessungen einen Verzicht auf alle thermischen (Schweißen) und spanenden Verfahren (Bohren). Darüber hinaus war es aus baubetrieblichen Gründen nicht möglich, Messkabel während der Rammung nach draußen zu führen. Somit musste die Datenerfassung autark im Pfahl angebracht und mit diesem gerammt werden.

Für die Applikation der gesamten Pfahlmesstechnik inklusive der Datenerfassung und der Schutzprofile zur Sicherung der Sensoren und Messkabel beim Eindringen in den Boden wurden geeignete Klebstoffe ausgewählt und getestet. Für die Messung der umfangreichen Dehnungs- und Beschleunigungssensoren wurde eine Messwerterfassungseinrichtung zusammengestellt und konfiguriert.

Für die Nahbereichsmessungen von Bord des Errichterschiffes waren die Messtechnik zusammenzustellen und Vorbereitungen an Deck zu treffen. Die Messtechnik wurde offshore-tauglich verpackt, an Deck wurden während der Mobilisierung des Errichterschiffes Datenkabel und handbetriebene Krane zum Ablassen der Sensoren installiert.

Die Messtechnik für den Fernbereich wurde beschafft und getestet. Zur Ausbringung und Bergung wurde ein Messschiff gechartert. Der Einsatz im Baugebiet erforderte eine enge Abstimmung zwischen dem Messschiff, den Mitarbeitern an Bord des Installationsschiffes und den übrigen Schiffen im Baugebiet.

Alle Arbeiten im Bereich des OWP und des Basishafens bedurften einer Genehmigung durch die örtliche Bauleitung und einer Abstimmung mit den übrigen Projektbeteiligten. Verfahrensbeschreibungen waren daher für alle Arbeiten zu erstellen und abzustimmen.

### I.3.3 Durchführung der Messkampagnen

Die erste Messkampagne mit drei Pfählen (davon einer instrumentiert) wurde im Mai 2014 durchgeführt. Im Anschluss kam es im Projekt zu einer Unterbrechung von einigen Monaten. Die Zeit wurde für eine Sichtung der gewonnenen Daten und Anpassungen für die kommenden Messungen genutzt. Im Oktober 2014 wurde dann eine weitere Messkampagne mit fünf Pfählen (davon zwei instrumentiert) durchgeführt. Bei der zweiten Messkampagne konnten Referenzmessungen mit den einzelnen Schallminderungssystemen sowie ganz ohne Schallminderungssystem durchgeführt werden.

### I.3.4 Auswertung der Messdaten

Neben den eigenen Messdaten werden dem IGB-TUBS auch die Hydroschalldaten des Baumontorings sowie die Rammprotokolle des Rammhammers für die im Rahmen der Offshore-Messkampagnen untersuchten Pfahlrammungen zur Verfügung gestellt. Sämtliche Messdaten wurden einer Einzelschlagauswertung unterzogen, d.h. Messergebnisse, wie z.B. die Hydroschallpegel, werden für jeden Rammschlag ermittelt. Z.T. erfolgt eine Filterung der Messdaten.

Für die Pfahl- und Vibrationsmessungen mussten zunächst sinnvolle Ergebnisgrößen definiert und geeignete Auswerteroutinen entwickelt werden. Es erfolgte für die Pfahlmessungen eine Auswertung der Pfahlschwingungen in den verschiedenen Messquerschnitten über die Eindringung in den Boden. Dabei waren vor allem die den Hydroschall erzeugenden Querschwingungen und das Verhalten beim und nach dem Eindringen in den Boden von Interesse. Die Bodenvibrationen wurden ebenfalls an den einzelnen Messlokalationen in Abhängigkeit der Pfahlpenetration und der Rammeenergie untersucht. Zudem wurde das Abklingen der Wellenamplitude mit wachsender Entfernung zum Pfahl beschrieben.

Die Hydroschallmessungen wurden nach StUK4 [BSH, 2013] hinsichtlich des SEL,  $L_{\text{peak}}$  und des Terzspektrums ausgewertet. Dies erfolgte für verschiedenen Wassertiefen und Entfernungen zum Pfahl. Es können Aussagen über die geometrische Ausbreitungsdämpfung und den Einfluss der Rammeenergie abgeleitet werden. Basierend auf den Pegeln in 750 m Entfernung wurde ein Vergleich der Wirksamkeit der eingesetzten Schallminderungssysteme einzeln und in Kombination durchgeführt. Zudem konnten durch weitergehende Analysen der Signale andere Phänomene wie die Wellenlaufzeiten oder Reflexionen am Blasenschleier erforscht werden.

## I.4 Stand der Technik

### I.4.1 Gründung von Offshore-Windenergieanlagen

Beim Ausbau der Offshore-Windenergie spielt die Gründung mehrerer hundert OWEA eine bedeutende Rolle. In den sandigen Böden der Nordsee bei Wassertiefen bis 40 m stellen unterschiedliche Pfahlsysteme die übliche Gründungstechnik dar. Je nach Randbedingungen kommen dazu Tripods, Tripiles, Jackets oder Monopiles zum Einsatz (vgl. Abbildung 2). Die Einbringung der offenen Stahlrohrpfähle erfolgt in aller Regel mittels hydraulischer Schlagrammen.

Die Gründungspfähle müssen die Belastungen aus Turbine und Turm sowie die an den Fundamenten selbst angreifenden Welleneinwirkungen in den Baugrund ableiten, wobei zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs der Anlagen die Schiefstellung der Struktur in sehr engen Grenzen zu halten ist. Das Eigengewicht der Anlagen spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Bei Monopfahlgründungen werden die Lasten maßgeblich über seitliche Bettung der Pfähle abgetragen. Bei den aufgelösten Strukturen werdend die aus den vorwiegend horizontalen Einwirkungen resultierenden Momente in der Gründungsstruktur über Kräftepaare an den einzelnen Gründungspfählen über Druck und Zug abgetragen [Wiemann et al., 2002]. Übliche Abmessungen für Offshore-Gründungspfählen betragen 2,5 m bis 3,5 m für aufgelöste Strukturen und 6 m bis 8 m für Monopfähle (Tripiles *BARD1*: 3,35 m; Tripod *alphaventus*: 2,6 m, Monopiles *Amrumbank West*: 6 m).

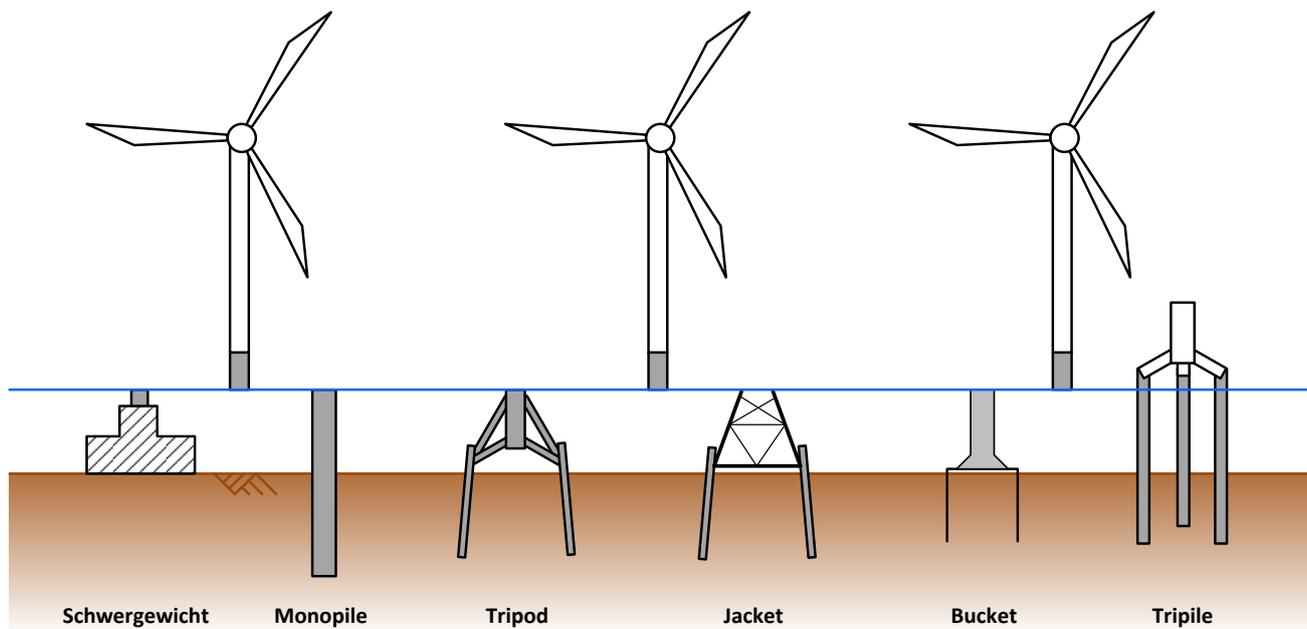


Abbildung 2: Gründungsmöglichkeiten für OWEA [nach Achmus, 2009]

Die Einbringung offener Stahlrohrpfähle mittels Schlagrammung erzeugt nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft eine Verdichtung des umgebenden Bodens, was wiederum zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit der Pfähle führt. Dieser Effekt wird nach den gültigen Bemessungsvorschriften zum Nachweis der Gründungen berücksichtigt. Bei der Vibrationsrammung als lärmärmeres Einbringungsverfahren kommt es im den Pfahl umgebenden Boden zu Kornumlagerungen, die während der Vibration einen nahezu vollständigen Verlust der Mantelreibung bedeuten und dadurch den Pfahl durch sein Eigengewicht in den Boden sinken lassen. Insbesondere die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Pfähle sind noch nicht vollständig geklärt, nach aktuellem Stand der Technik ist jedoch mit einer geringeren Tragfähigkeit im Vergleich zu geschlagenen Pfählen zu rechnen.

Derzeit wird die Vibrationstechnik hinsichtlich einer möglichen Gleichwertigkeit der Tragfähigkeit erforscht, u.a. im Rahmen des *VIBRO-Projects*. Dabei werden geschlagene und vibrierte Monopfähle durch Probelastungen auf ihre statische laterale Tragfähigkeit untersucht [vgl. Herwig/Gattermann, 2015]. Beim OWP *Riffgat* wurde das Vibrationsverfahren zur Einbringung von Monopfählen eingesetzt. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit wurden Pfähle auf den letzten 2 bis 3 Pfahldurchmessern mittels Schlagrammung eingebracht [Fischer et al., 2013]. Die Schallemissionen während der Vibration waren wie erwartet deutlich geringer als während der Impulsrammung. Dabei entstand anstatt einzelner Schallereignisse ein kontinuierlicher Lärm. Aus diesem Grund ist zur Bewertung des Schalls anstatt des bei Impulsrammungen üblichen Einzelergebnispegels SEL der energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  heranzuziehen. Diese beiden Pegel sind nicht ohne weiteres vergleichbar (vgl. Abschnitt I.4.4). Inwiefern bei einem möglichen Einsatz der Vibrationstechnik in Zukunft auf den Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen verzichtet werden könnte, ist daher noch zu klären.

Des Weiteren gibt es Konzepte für Schwergewichtsgründungen, Bucket-Fundamente und schwimmende Gründungen, diese konnten in Deutschland bisher jedoch lediglich als Prototypen realisiert werden. Bis auf weiteres stellen damit mittels Schlagrammung installierte Pfahlgründungen den Stand der Technik bei der Errichtung von OWEA dar, was zu hohen Schallemissionen ins umgebende Meerwasser führt.

## I.4.2 Notwendigkeit der Begrenzung des Unterwasserschalls

Marine Säuger nutzen Schall zur Kommunikation, Orientierung und Jagd. Beschallung kann Stress erzeugen oder die Kommunikation der Tiere maskieren, bei hoher Lautstärke und/oder langer Dauer können zeitweilige Hörschwellenverschiebungen (TTS, temporary threshold shift) hervorgerufen werden. Diese zeitweilige Schwerhörigkeit ist messbar und wird als Kriterium für Schallgrenzwerte herangezogen [Lucke, 2012].

Die Beeinträchtigung verschiedener Fischarten durch Unterwasserlärm ist weniger untersucht, grundsätzlich kommt es jedoch zu den gleichen Folgen (Störung, Maskierung, Schädigung). Dabei variiert die Hörbarkeit stark und weicht bei einigen Arten sowohl in der Frequenz als auch hinsichtlich der Pegel stark von der bei Säugern ab [Müller-Blenkle, 2012]. Bei der Schlagrammung offener Stahlpfähle wurden in den USA Fische verletzt und getötet [Stadler, 2012].

Analog zur Abnahme des Hydroschallpegels nimmt der Grad der Beeinträchtigung von Meerestieren in seiner Stärke mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle ab (vgl. Abbildung 3).

Zum Schutz mariner Lebewesen wurden durch das Umweltbundesamt (UBA) auf Grundlage von Beobachtungen an Schweinswalen Grenzwerte für impulsartigen Hydroschall, wie er z.B. bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA entsteht, vorgeschlagen und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) bestätigt. Danach darf in 750 m Entfernung zum Pfahl der Einzelereignispegel (SEL, sound exposure level) einen Wert von 160 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2\text{s}$  und der Spitzenschalldruckpegel ( $L_{\text{peak}}$ ) einen Wert von 190 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  nicht überschreiten [UBA, 2011; BMU, 2013]. Angaben zur Durchführung von Hydroschallmessungen und zur Berechnung der entsprechenden Pegelgrößen sind in Messvorschriften des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), welches zuständige Genehmigungsbehörde für Arbeiten in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone ist, zusammengefasst [Müller/Zerbs, 2013]. Erklärungen zur Ermittlung der wichtigsten Kennwerte sind im Abschnitt I.4.4 zu finden.

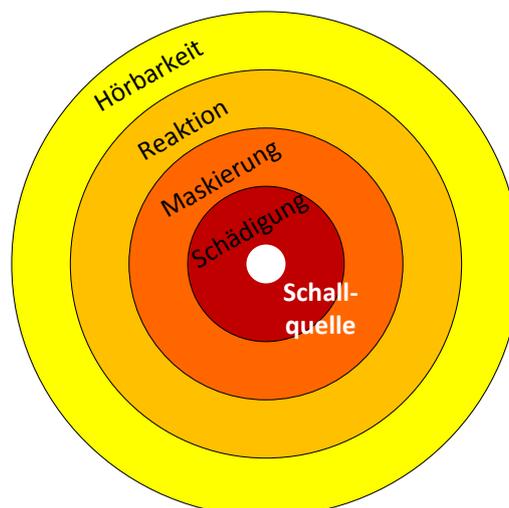


Abbildung 3: Einwirkzonen einer Schallquelle [nach Elmer et al., 2007]

Durch die bei Rammarbeiten in OWP stattfindenden Begleitmessungen des Hydroschalls entsprechend dem Standarduntersuchungskonzept des BSH (StUK4) [BSH, 2013] wurde eine breite Datenbasis an Hydroschallmessungen bei Projekten mit verschiedenen Randbedingungen zusammengetragen. Maßgeblich für die auftretenden Pegel bei Offshore-Rammungen ist danach der Pfahldurchmesser (vgl. Abbildung 4), welcher auch die Auswahl des verwendeten Rammhammers stark

beeinflusst. Weitere Einflussfaktoren sind die Wassertiefe, der Baugrund, die Rammenergie und der Rammfortschritt.

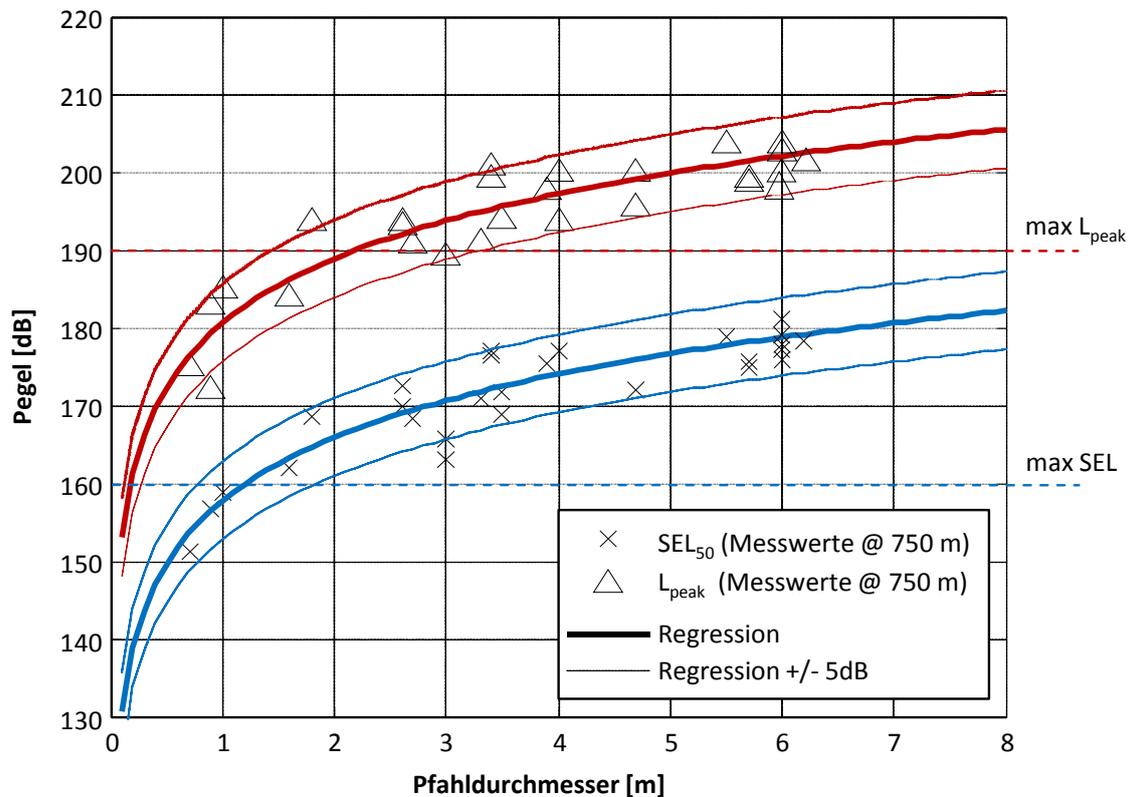


Abbildung 4: Rammschallpegel in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers [nach Bellmann, 2014]

Es ist zu beachten, dass die bisherigen Projekte in Wassertiefen bis 30 m durchgeführt wurden, die maximalen Pfahldurchmesser lagen bei etwa 6 m. Darüber hinaus gibt es keine Erfahrungswerte.

Bei Begleitmessungen der bisher errichteten Windparks ergab sich unter den gegebenen Randbedingungen ein Überschreiten der Grenzwerte ab einem Pfahldurchmesser von etwa 1 m bis 2 m, was alle üblichen Pfahlabmessungen bei OWP unterschreitet. Bei Monopfählen ( $\varnothing = 5..7$  m) können die Grenzwerte unter Berücksichtigung der Streuungen und Unsicherheiten hinsichtlich verschiedener Randbedingungen um 25 dB (SEL) überschritten werden [Bellmann, 2014]. Bei Errichtung von OWEA in größeren Wassertiefen und damit tendenziell steigenden Pfahldurchmessern sind einzelne Schallminderungssysteme nicht in der Lage, die Einhaltung der Grenzwerte des Hydroschalls zu gewährleisten.

### 1.4.3 Schallminderungssysteme

Zur Einhaltung der Grenzwerte des Unterwasserschalls ist daher der Einsatz schallmindernder Systeme erforderlich. Im Offshore-Bereich wurde bei der Rammung des Monopfähles der Forschungsplattform *FINO3* ein Großer Blasenschleier eingesetzt.

Die Dämpfungswirkung des Blasenschleiers basiert auf der unterschiedlichen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Wasser und Luft, welche durch einen Impedanzsprung Reflexionen und Refraktionen des Schalls am Blasenschleier hervorruft (vgl. Abschnitt 1.4.5). Das Prinzip des Blasenschleiers ist ausführlich im Forschungsvorhabens *Schall 2* (FKZ 0329947) beleuchtet worden [vgl. Elmer et al.

2007]. Nähere Untersuchungen unter Offshorebedingungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *Hydroschall-Off BWII* (FKZ 0325309A/B/C) durchgeführt [vgl. Diederichs et al., 2014].

Für den Einsatz bei Bauarbeiten in OWP sind die Großen Blasenschleier von einem separaten Schiff, bevor oder nachdem das Errichterschiff sich positioniert hat, in einigem Abstand um dessen Position auszulegen. Dabei sind zum einen marine Sicherheitsauflagen zu erfüllen, zum anderen ist der Abstand des Blasenschleiers zum Pfahl so groß zu wählen, dass die Strömung den Blasenring nicht so weit vom Pfahl wegdriften lässt, dass dieser schließlich außerhalb des Blasenschleiers liegt (vgl. Abbildung 5).

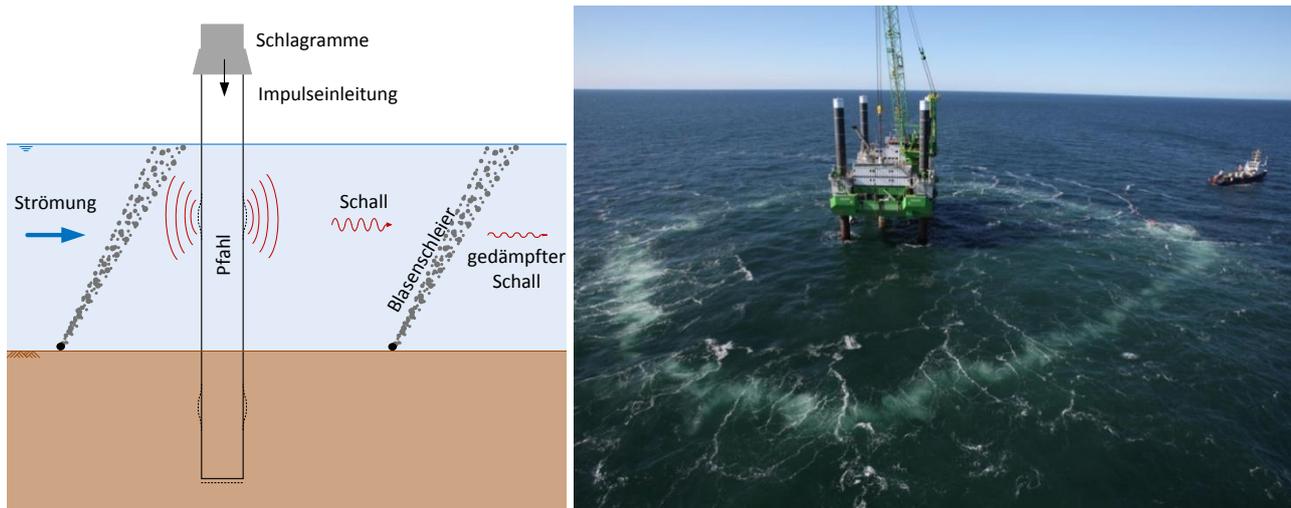


Abbildung 5: Prinzipskizze des großen Blasenschleiers (links) und Einsatz beim OWP *Borkum West II* (rechts) [Trianel, o.J.]

Der Große Blasenschleier wurde in verschiedenen Konfigurationen getestet. Dabei wurden z.B. der Volumenstrom oder Lochabstand und Lochgröße des Luftschlauches variiert. Des Weiteren werden von verschiedenen Anbietern Blasenschleier angeboten, die entweder unter Druck verlegt werden, wenn das Installationsschiff schon in Position ist (post-lay, *Weyres Offshore*) oder aber bei denen vor Ankunft des Errichterschiffes ein Schlauch verlegt wird, der erst später mit Druckluft beaufschlagt wird (pre-lay, *HydroTechnik Lübeck*). Zudem gibt es Variationen mit einem oder mehreren Blasenschleiern (z.B. DBBC, double big bubble curtain). Hier ist ein ausreichender Abstand der einzelnen Blasenschleier untereinander für eine optimale Schallminderung nötig [Diederichs et al., 2014]. Mit einfachen Großen Blasenschleiern können Schallreduzierungen von 10 dB bis 15 dB (SEL) erreicht werden, doppelte Große Blasenschleier erreichen eine zusätzliche Schallminderung von etwa 4 dB (SEL) [Bellmann et al., 2015].

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, liegt die Hauptdämpfungswirkung des großen Blasenschleiers im Frequenzbereich zwischen 300 Hz und 10.000 Hz und damit weitestgehend oberhalb des Hauptenergiegehaltes von Rammschlägen, welcher etwa je nach eingesetztem Rammhammer und Pfahlgeometrie etwa bei 100 Hz bis 1.000 Hz liegt (vgl. Abbildung 9).

Parallel zur Planung weiterer OWP wurden alternative Systeme zur Rammschallminderung entwickelt, die jedoch im Vergleich zum Großen Blasenschleier nicht in einiger Entfernung um die Baustelle ausgebracht werden müssen, sondern direkt am Pfahl eingesetzt werden können. Auch hier wird das Prinzip des Blasenschleiers bei Systemen mit gestuften oder geführten Blasenschleiern wieder aufgegriffen, welche das Problem des Verdriftens auf verschiedene Arten umgehen. Eine weitere Gruppe bilden die Rohr-in-Rohr-Systeme, bei denen der Pfahl innerhalb einer größeren

Struktur gerammt wird, welche den Pfahl durch Luft und/oder Dämmmaterialien vom umgebenden Meerwasser trennt und die Schallübertragung vermindert. Auch kombinierte Systeme aus Rohren und Blasenschleiern werden eingesetzt.

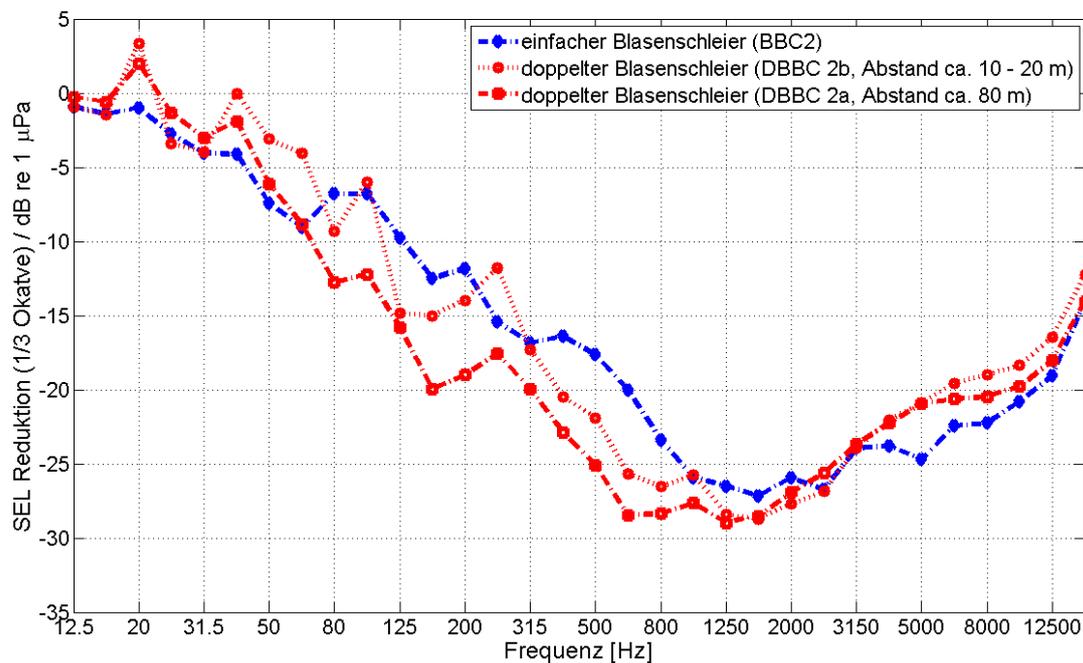


Abbildung 6: gemittelte Differenzspektren des SEL durch den Einsatz verschiedenen Blasenschleierkonfigurationen beim OWP *Borkum West II* normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Pfahl [Diederichs et al., 2014]

Einen anderen Ansatz verfolgt das HSD-System, bei welchem die schallmindernden Phänomene von Luftblasen in Form von Ballons oder Schaumstoffelementen genutzt werden sollen, jedoch im Vergleich zu frei aufsteigenden Blasen hinsichtlich Größe und Position besser kontrolliert werden können. So kann die Eigenfrequenz gasgefüllter Körper auf das Frequenzspektrum von Offshore-Rammungen abgestimmt werden, um die Resonanzeffekte bei der Schallminderung optimal auszunutzen [Elmer et al., 2011].

Zur Untersuchung der Wirksamkeit neuartiger Schallminderungsverfahren wurden verschiedene Systeme an einem Testpfahl der Fa. *Menck* in der Lübecker Bucht (*Brodterer Pfahl*) eingesetzt. Die Durchführung sowie die anschließende Auswertung der gesammelten Messdaten erfolgte im Rahmen des Forschungsvorhabens *ESRa* (FKZ 0325307). Zwar bewegen sich die Abmessungen des Pfahles (Durchmesser 2,2 m) durchaus in einem Bereich, der mit Gründungspfählen für Jackets oder Tripods vergleichbar ist, jedoch ist bei dem Standort (Wassertiefe 8,5 m) eher von nearshore-Bedingungen zu sprechen. Auch die eingesetzte Rammenergie (max. 300 kJ) ist mit offshore-Bedingungen nicht zu vergleichen. Die größte Schwierigkeit für die Schallminderungssysteme stellten jedoch der fest mit dem Baugrund verwachsene Pfahl und seine enorme Einbindelänge (ca. 65 m) dar. Bei den Rammungen konnte keine Verschiebung des Pfahles hervorgerufen werden, was ein gänzlich anderes Verhalten als bei der Installation von Offshore-Gründungspfählen bedeutete. Zudem ist davon auszugehen, dass deutlich größere Erschütterungen im Boden erzeugt wurden, welche die direkt am Pfahl eingesetzten Schallminderungssysteme untertunnelten und in größerer Entfernung die Schallminderungswirkung herabsetzten. Messungen im Abstand von ca. 6 m zum Pfahl zeigten daher deutlich bessere Ergebnisse als die für alle getesteten Systeme ernüch-

ternden Fernbereichsmessungen [Wilke et al., 2012]. Beim *ESRa*-Test wurde auch ein HSD-System eingesetzt, welches eine Schallminderung von über 13 dB (SEL) im Nahbereich erreichen konnte. Die frequenzabhängige Dämpfung ist in Abbildung 10 dargestellt.

Zu Beginn des Vorhabens *triad* war der Große Blasenschleier das einzige seriell einsetzbare System zur Minderung von Unterwasserschall bei Offshore-Rammarbeiten. Es war lediglich mit einem Anbieter am Markt vertreten. Aktuell werden bei Rammarbeiten in OWP Große Blasenschleier zweier verschiedener Anbieter sowie der IHC Noise Mitigation Screen der Fa. *IHC Merwede* und HSD von der Fa. *OffNoise-Solutions* eingesetzt.

#### 1.4.4 Schallausbreitung bei Offshore-Rammarbeiten

Unter Schall wird eine rasche Schwankung des Druckes verstanden, welche den im Wasser herrschenden hydrostatischen Druck überlagert. Die Ausbreitung der Schallwellen (also der Änderung des Schalldrucks) erfolgt im Wasser mit einer Geschwindigkeit  $c_{\text{Wasser}}$  von etwa 1.500 m/s. Abhängig von der Wassertiefe  $z$ , der Wassertemperatur  $\vartheta$  und der Salinität  $S$  schwankt dieser Wert um etwa  $\pm 50$  m/s.

Nach Gleichung (1) [Medwin, 2005] ergibt sich die Schallgeschwindigkeit zu:

$$c_{\text{Wasser}} = 1449,2 + 4,6 \cdot \vartheta - 0,055 \cdot \vartheta^2 + 0,00029 \cdot \vartheta^3 + (1,34 - 0,010 \cdot \vartheta) \cdot (S - 35) + 0,016 \cdot z \quad (1)$$

$\vartheta$ : Temperatur [°C]

$S$ : Salinität [‰]

$z$ : Wassertiefe [m]

In der Nordsee kann ganzjährig von einer guten Durchmischung des Wassers ausgegangen werden, sodass die Schallgeschwindigkeit über die Wassertiefe sehr konstant ist und nur jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. In der Ostsee hingegen bilden sich durch Schichtungen im Wasser ausgeprägte Schallkanäle aus [Gerdes/Ludwig, 2014]. Die Schallgeschwindigkeit  $c$  ist nicht zu verwechseln mit der Schallschnelle  $v$  (Partikelgeschwindigkeit), welche die Bewegung der Wasserteilchen um ihre Ruhelage beschreibt. Schalldruck und Schallschnelle sind über die akustische Kennimpedanz  $Z$  verknüpft:

$$Z = \frac{p}{v} \quad (2)$$

$Z$ : akustische Kennimpedanz [Ns/m<sup>3</sup>]

$p$ : Schalldruck [Pa]

$v$ : Schallschnelle [m/s]

Die Impedanz  $Z$  ist definiert als das Produkt aus Dichte  $\rho$  und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des betrachteten Mediums:

$$Z = \rho \cdot c \quad (3)$$

$\rho$ : Dichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c$ : Wellenausbreitungsgeschwindigkeit [ $\text{m}/\text{s}$ ]

Bei der Rammung von OWEA auftretende Schallereignisse (Rammschläge) sind in der Regel impulsartig und weisen keinen ausgeprägten periodischen Charakter auf. Die Signale lassen sich dennoch näherungsweise als Überlagerung sinusförmiger Schwingungen beschreiben, welche sich hauptsächlich im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 1.000 Hz (vgl. Abbildung 7) bewegen.

Zur Beschreibung der Lautstärke von Schall bzw. Unterwasserschall werden i.d.R. Pegelgrößen verwendet. Hierbei handelt es sich um logarithmierte Werte der Dezibel (dB)-Skala, welche sich in der Hydroakustik auf einen Referenzdruck  $p_0$  von  $1 \mu\text{Pa}$  beziehen (daher auch die Einheit [ $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}$ ]).

Für die Bewertung von Rammschallereignissen sind hinsichtlich der Grenzwerte des Hydroschalls der Spitzenpegel  $L_{\text{peak}}$  sowie der Einzelereignispegel  $L_E$  bzw. SEL (sound exposure level) von Bedeutung. Der Spitzenpegel wird durch die Überführung des maximalen absoluten Druckes  $p_{\text{peak}}$  eines Intervalls (z.B. eines Rammschlages) in die Dezibel-Skala ermittelt:

$$L_{\text{peak}} = 20 \log \left( \frac{|p_{\text{peak}}|}{p_0} \right) \quad (4)$$

Der Spitzenpegel gibt damit ausschließlich Auskunft über den maximalen Ausschlag eines Signals. Ist man dagegen am Energiegehalt eines Rammschlages interessiert, ist auch die Länge des Ereignisses zu betrachten. Der Einzelereignispegel berücksichtigt dies, indem Schalldruck über einen gewählten Zeitraum zwischen  $t_1$  und  $t_2$  integriert und auf die Mittelungszeit  $T_0$  von 1 s bezogen wird:

$$\text{SEL} = L_E = 10 \log \left( \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (5)$$

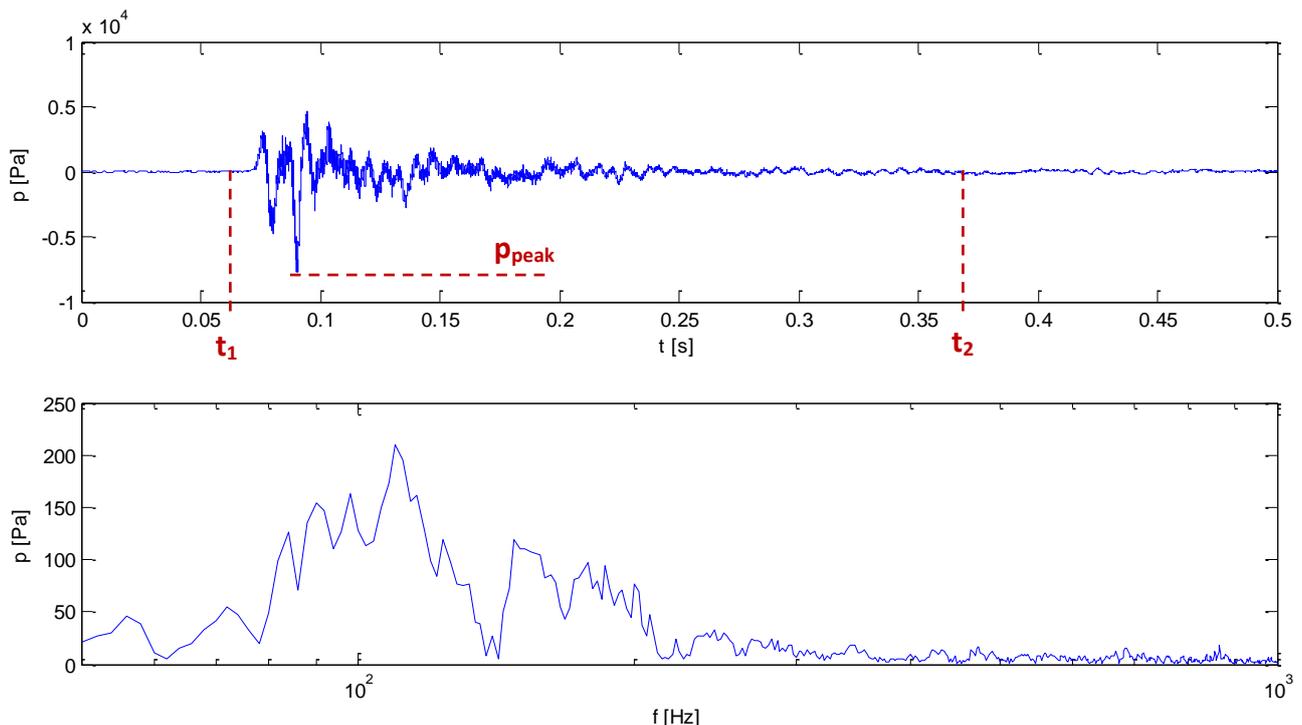
Auch der SEL bezieht sich als Pegelgröße auf den Referenzdruck von  $1 \mu\text{Pa}$ . Da jedoch der Schalldruck quadriert und auf eine Sekunde normiert wird, lautet die Einheit dieser Pegelgröße [ $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ ].

Mit der Schallenergiedichte  $E$  ist der SEL über folgende Gleichungen verknüpft:

$$\text{SEL} = L_E = 10 \log \frac{E}{E_0} \quad (6)$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt \quad (7)$$

$$E_0 = p_0^2 \cdot T_0 \quad (8)$$



**Abbildung 7: Zeitsignal (oben) und Frequenzspektrum (unten) eines Rammschlages des Pfahles A45 beim OWP Amrumbank West in 72 m Entfernung zum Pfahl**

Die Grenzen des Schallereignisses zu den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  müssen für die Berechnung des SEL so gewählt werden, dass einerseits das gesamte Signal erfasst wird und keine Signalanteile verloren gehen. Andererseits sollen keine Störgeräusche vor oder nach dem eigentlichen Ereignis das Ergebnis verfälschen. Bei Offshore-Rammungen spielt der Hintergrundlärm i.d.R. eine so geringe Rolle, dass ein zu langes Signal zu keiner Überschätzung des SEL führt, sofern nicht schon der folgende Rammschlag beginnt. Wird hingegen ein zu kurzer Teil des Signals ausgeschnitten, kann der SEL leicht unterschätzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgrößen von SEL und  $L_{peak}$  ist ein direkter Vergleich nicht möglich, erfahrungsgemäß ist der Einzelereignispegel eines Rammschlages jedoch stets geringer als der zugehörige Spitzenpegel.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch auf den Mittelungspegel oder energieäquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  nach Formel (9) hingewiesen.

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (9)$$

Damit ist der Mittelungspegel gleichbedeutend mit einem Effektivpegel [Elmer et al., 2007]. Bei Impulsartigen Schallereignissen wie z.B. Rammschlägen hängt der  $L_{eq}$  stark von der Signallänge  $T$  ab, welche nach der Messvorschrift des BSH auf 30 s festgelegt ist [Müller/Zerbs, 2011]. Bei Rammarbeiten in OWP wird im Allgemeinen der SEL als Maß für den Energiehalt der Schallereignisse verwendet. Im Übrigen gibt es keine Empfehlung für einen Grenzwerte des  $L_{eq}$  [UBA, 2011].

$L_{eq}$  und SEL können über die Beziehung

$$SEL = L_{eq} - 10 \log\left(\frac{nT_0}{T}\right) \quad (10)$$

in Bezug gesetzt werden, wobei  $n$  die Anzahl der Einzelereignisse ist. Damit entspricht der Einzelergebnispegel SEL eines Impulses dem Äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  eines kontinuierlichen Signals von 1 s Dauer mit der gleichen Energie wie der Impuls.

Neben dem Einzelergebnispegel und dem Spitzenpegel wird auch die Zusammensetzung von Schallereignissen im Frequenzbereich untersucht. In Abbildung 7 (unten) ist das Ergebnis einer Fast Fourier Transformation (FFT) eines Schallsignals dargestellt, welches den Schalldruck über den Frequenzbereich zeigt. Üblicherweise wird die Auflösung über den Frequenzbereich der Übersicht halber weniger genau vorgenommen und in Terzen zusammengefasst. Dazu wird zunächst das zu untersuchende Schallsignal mittels verschiedener Bandpassfilter gefiltert. Ein Bandpassfilter erhält nur denjenigen Teil eines Signals, der im Bereich eines bestimmten Frequenzbandes liegt. Der Rest des Signals wird stark gedämpft und damit quasi ausgeschnitten (vgl. Abbildung 8).

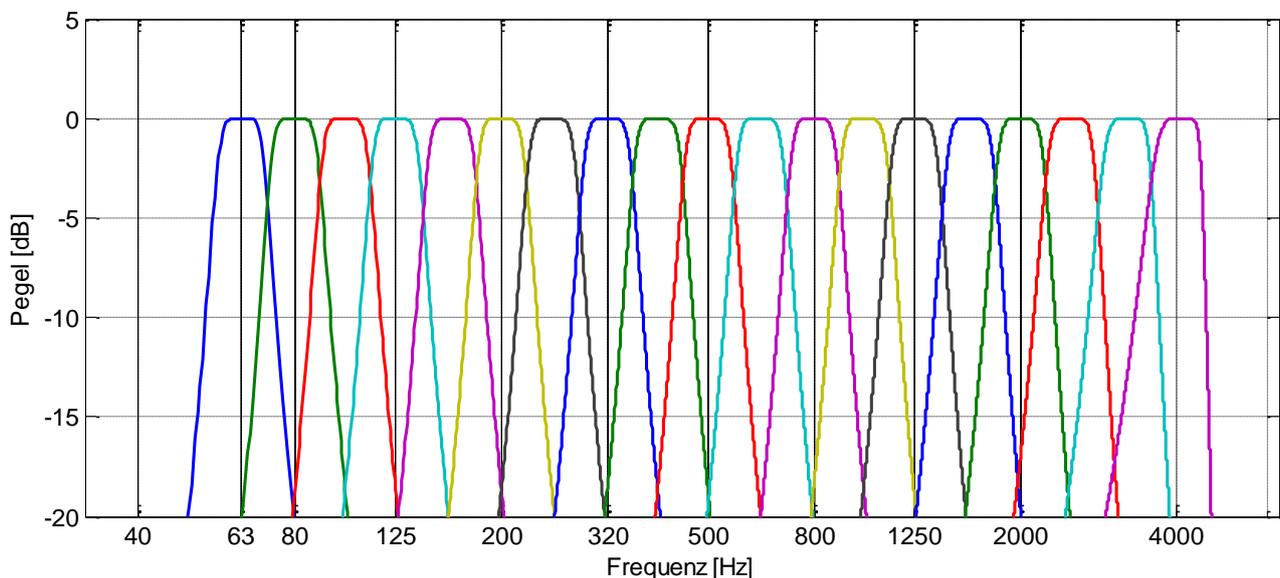


Abbildung 8: Filterantworten einzelner Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 4.000 Hz

Nach Aufteilung des zu untersuchenden Signales in die einzelnen Frequenzbänder erfolgt für jede Terz eine Berechnung des Einzelschallereignispegels (SEL) nach Gleichung (5). Das Ergebnis einer Terzanalyse gibt ebenso wie die FFT Rückschluss über den Frequenzgehalt eines Signals, jedoch in weniger genauer Auflösung über den Frequenzbereich, was bei Rammschallmessungen i.d.R. auch nicht nötig ist. Abbildung 9 zeigt die Terzspektren verschiedener Impulsrammen bei unterschiedlichen Projekten.

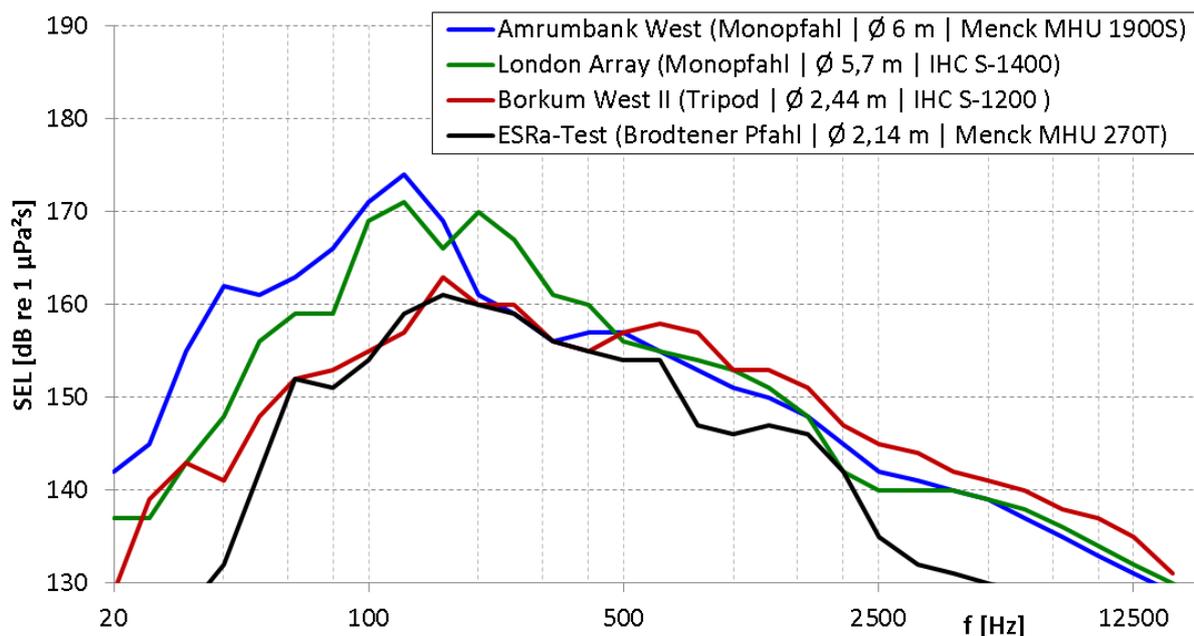


Abbildung 9: Terzspektren der bei verschiedenen Projekten eingesetzten Rammgeräte in 750 m Entfernung zum Pfahl

Zur Beschreibung der Pegeländerung, z.B. durch den Einsatz eines Schallminderungssystems, wird der Differenzwert eines Pegels bei verschiedenen Messungen unter sonst gleichen Randbedingungen gebildet:

$$\Delta L = L_{Referenz} - L_{Variante} \tag{11}$$

Differenzpegel können z.B. für den Einzelereignispegel SEL, den Spitzenpegel  $L_{peak}$  oder auch für die einzelnen SEL des Terzspektrums gebildet werden. Das dadurch ermittelte Terzspektrum wird auch Differenzspektrum genannt. Abbildung 10 zeigt neben zwei Terzspektren (links) das Differenzspektrum (rechts) am Beispiel des HSD-Systems beim ESRa-Test.

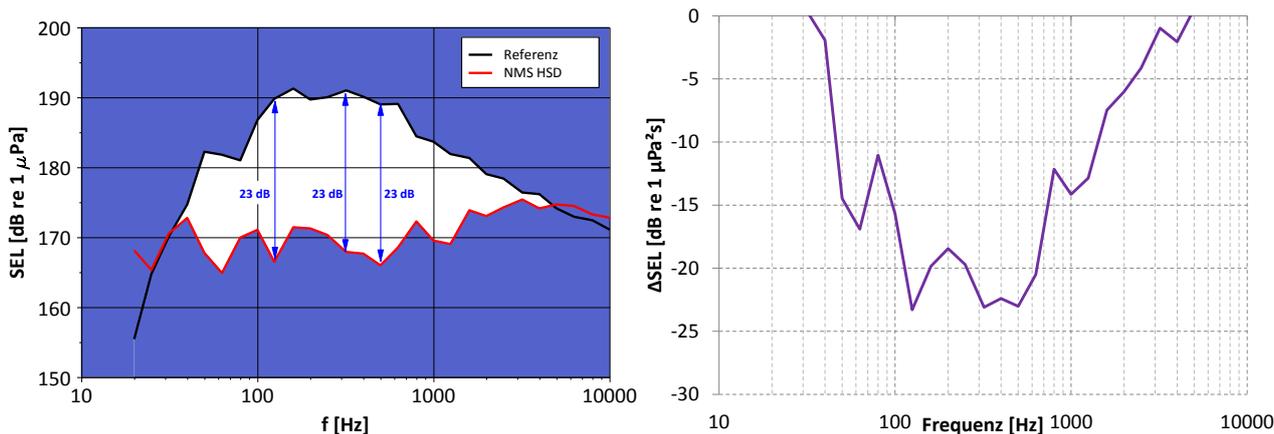


Abbildung 10: Terzspektren beim ESRa-Test (links) [Wilke et al., 2012] mit Referenzmessung (schwarze Linie) und Messung bei Einsatz des HSD-Systems (rote Linie) sowie Differenzspektrum beider Messungen (rechts)

Im linken Teil der Abbildung sind die Terzspektren der Referenzmessung sowie einer Messung mit Einsatz des HSD-Systems zu sehen. Die Größe der weißen Fläche dazwischen ist ein Maß für die Dämpfungswirkung des Systems. Über den Abstand der beiden Terzspektren lässt sich für jede Terz

die frequenzabhängige Dämpfung ermitteln. Auf der rechten Seite ist diese Differenzbildung bereits vollzogen und in Form eines Differenzspektrums über die verschiedenen Terzen abgebildet.

Breitet sich eine Schallwelle von der punkt- oder linienförmigen Welle im Raum aus, nimmt der Schalldruck aufgrund der größer werdenden Wellenfront mit steigendem Abstand von der Quelle ab [DEGA, 2006]. Es kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass der Schallpegel mit zunehmender Entfernung zum Pfahl logarithmisch abnimmt.

$$SEL(R) = SEL(1m) - k \cdot \log(R) \quad (12)$$

$$\Delta SEL = k \cdot \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (13)$$

R: Entfernung zum Pfahl [m]

$R_1, R_2$ : Entfernung zum Pfahl vergrößert sich von  $R_1$  auf  $R_2$

k: Konstante, Abhängig von den Randbedingungen

Die Konstante k zur Beschreibung der Pegelverringerung je Dekade liegt in einem unbegrenzten Medium theoretisch zwischen  $k = 20$  für eine Kugelwelle und  $k = 10$  für eine Zylinderwelle [DEGA, 2006]. Die Schallausbreitung im Flachwasser kann als idealer Schallkanal mit reflektierenden Begrenzungen an zwei Seiten (Wasseroberfläche und Boden) angesehen werden und entspricht dann näherungsweise einer Zylinderwelle [Elmer et al., 2007]. Nach der Messvorschrift des BSH ist bei der Korrektur von Hydroschallmessungen  $k = 15$  zu verwenden [Müller/Zerbs, 2011].

Dieser einfache logarithmische Zusammenhang vernachlässigt die Frequenzabhängigkeit der geometrischen Ausbreitungsdämpfung und gilt nicht für das akustische Nahfeld.

Bei der Schallausbreitung ist zu unterscheiden zwischen dem akustischen Nahfeld und dem Fernfeld. Im Fernfeld sind Schalldruck p und Schallschnelle v in Phase und nach Formel (2) näherungsweise über die Impedanz Z verknüpft. Im Nahfeld gibt es bei nicht-ebenen Wellenfeldern (wie Kugel- und Zylinderwellen) einen Phasenversatz von  $90^\circ$  zwischen Schalldruck und Schallschnelle. Die Impedanz Z wird daher im Nahfeld komplex, die Lösungen der Wellengleichung unterscheiden sich zu denen im Fernfeld. Die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld ist fließend und frequenzabhängig [DEGA, 2006]:

$$\text{Nahfeld} \quad R \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (14)$$

$$\text{Fernfeld} \quad R \gg \frac{\lambda}{2\pi} \quad (15)$$

Nach itap [2015] ist die Grenze zwischen akustischem Nahfeld und Fernfeld im Wasser bei ca.  $2 \cdot \lambda$  bis  $10 \cdot \lambda$  zu erwarten.

Zusätzlich zur geometrischen Ausbreitungsdämpfung kommt es im Wasser zu einer Dissipation der Schallenergie. Diese ist abhängig von der Frequenz des Schalls sowie der chemischen Zusammensetzung des Wassers, der Temperatur und der Wassertiefe und wird durch den Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  in [dB/km] beschrieben. Unter den Bedingungen bei der Rammung von Gründungspfählen für OWEA liegt diese bei etwa 0,05 dB/km [Lurton, 2010] und spielt damit eine untergeordnete Rolle.

Bei größeren Entfernungen wird die frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung TL [dB] (engl. transmission loss) deutlich, welche nach Thiele und Schellstede [1980] durch die empirische Formel (16) beschrieben werden kann:

$$TL = (16,07 + 0,185 \cdot 10 \log(f)) \cdot (\log(R) + 3) + R (0,174 + 0,046 \cdot 10 \log(f) + 0,005 \cdot (10 \log(f))^2) \quad (16)$$

TL: Ausbreitungsdämpfung (transmission loss) [dB]

f: Frequenz [kHz]

R: Abstand zum Pfahl [km]

Wie Abbildung 11 zeigt, steigt die Dämpfung mit der Frequenz des Schallsignals an und erreicht bei für Offshore-Rammungen üblichen Frequenzen von etwa 100 Hz bis 500 Hz (vgl. Abbildung 9) Werte zwischen 40 dB und 45 dB für einen Abstand von 750 m.

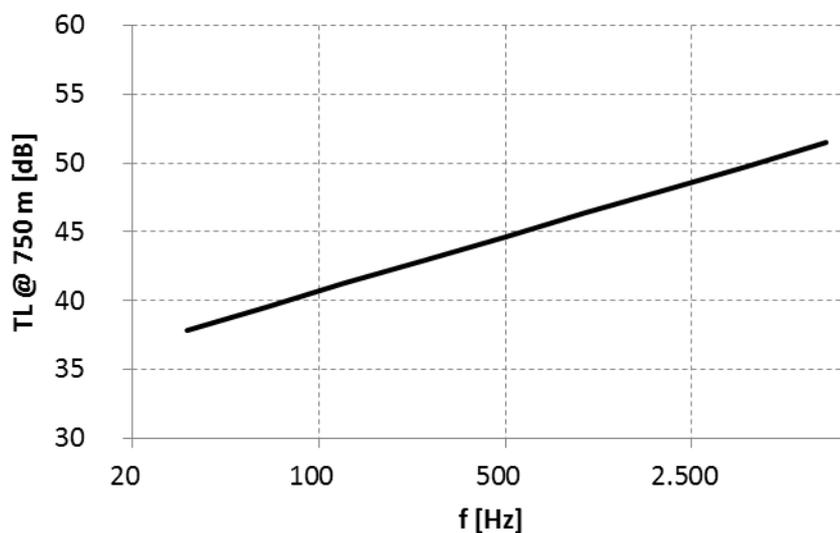


Abbildung 11: Ausbreitungsdämpfung nach Thiele und Schellstede [1980] in 750 m Entfernung zur Quelle in Abhängigkeit der Frequenz

Bei tiefen Frequenzen ist die von der Wassertiefe abhängige untere Grenzfrequenz  $f_0$  zu beachten, unterhalb derer eine Schallausbreitung im Flachwasser nicht möglich ist. Nach Urlick [1983] ist diese wie folgt definiert:

$$f_0 = \frac{c_{Wasser}}{4 \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - (c_{Wasser}/c_{Boden})^2}} \quad (17)$$

$c_{Wasser}$ : Schallgeschwindigkeit im Wasser

$c_{Boden}$ : Wellengeschwindigkeit im Sediment

h: Wassertiefe

In Abbildung 12 ist die untere Grenzfrequenz  $f_0$  in Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeit am Boden für verschiedene, im Bereich von OWP übliche, Wassertiefen dargestellt. Demnach ist mit einer Ausbreitung von Frequenzen ab etwa 40 Hz bis 60 Hz zu rechnen.

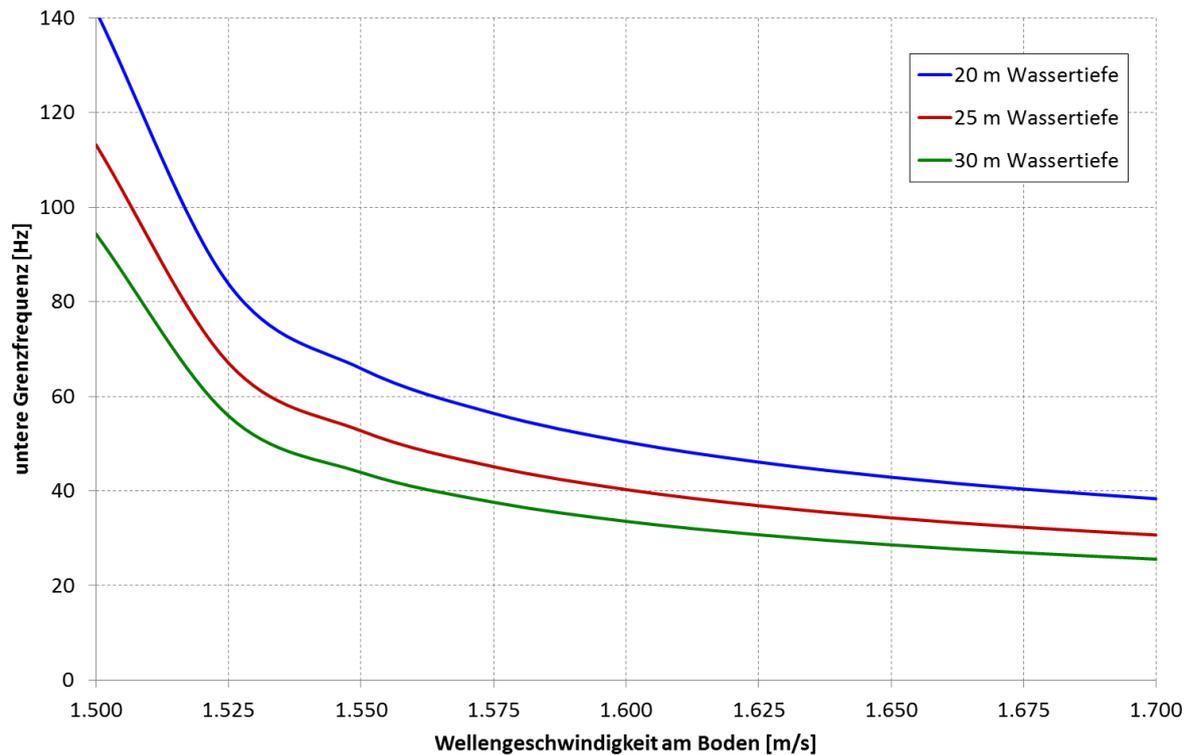


Abbildung 12: untere Grenzfrequenz in Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeit am Boden für verschiedene Wassertiefen

Bei der Ausbreitung von Schallwellen im Flachwasser kommt es zu Reflexionen an den Grenzschichten des Wassers zum Boden und zur Luft. Auf diese Weise kann ein akustisches Signal auf mehreren Wegen verschiedener Länge von einer punktuellen Quelle zum Empfänger gelangen (s. Abbildung 13). Infolge der unterschiedlichen Laufzeiten und Phasenverschiebungen infolge der Reflexionen an den Grenzschichten kommt es bei niederfrequenten Signalen zu Interferenzmustern, welche sich in lokalen Maxima und Minima niederschlagen, deren Entfernungen zur Quelle frequenzabhängig sind [Lurton, 2010].

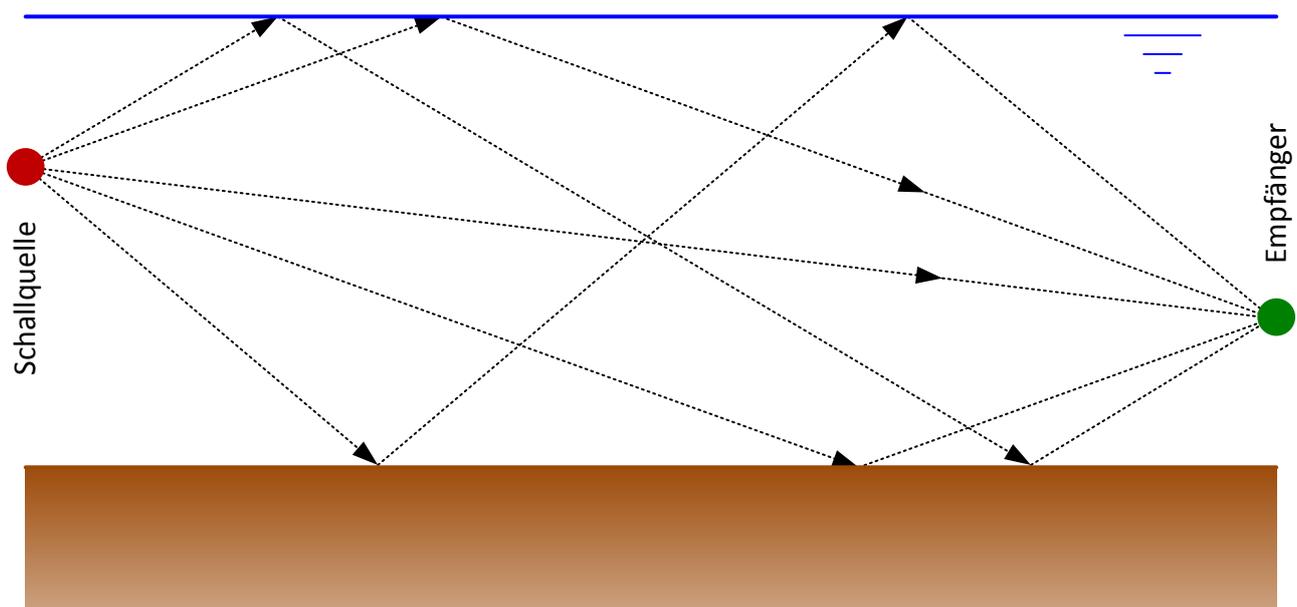


Abbildung 13: Schallausbreitung im Flachwasser auf verschiedenen Pfaden

Die Schallpfade können neben den Grenzschichten auch von sog. Schallkanälen beeinflusst werden. Diese bilden sich bei über die Wassersäule unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten infolge Temperatur, Druck oder Salzgehalt aus. Trifft der Schall auf Schichten anderer Schallgeschwindigkeit, wird dieser gebeugt und die Schallstrahlen gekrümmt. Die druckabhängige Änderung des Geschwindigkeitsprofils spielt im Flachwasser allerdings keine Rolle [Lurton, 2010]. Die Bildung von Schallkanälen durch Wasserschichten unterschiedlichen Salzgehaltes sind in der Ostsee, jedoch nicht in der Nordsee bekannt [Gerdes/Ludwig, 2014].

Wird bei der Installation eines Pfahles dieser mit einem Rammhammer beaufschlagt, durchläuft eine Dehnwelle den Pfahl vom Kopf zum Fuß, wird dort reflektiert und läuft wieder zurück (vgl. Abschnitt I.4.7). Durch die Querdehnung des Pfahles wird das umgebende Medium angeregt und die Welle aus dem Pfahl übertragen. Im Wasser ruft dies eine Hydroschallwelle hervor, die sich vom Pfahl weg ausbreitet. Infolge der nach dem Hammerschlag von oben nach unten laufenden Welle im Pfahl wird der Hydroschall zuerst am Kopf und dann sukzessive weiter unten emittiert (s. Abbildung 14).

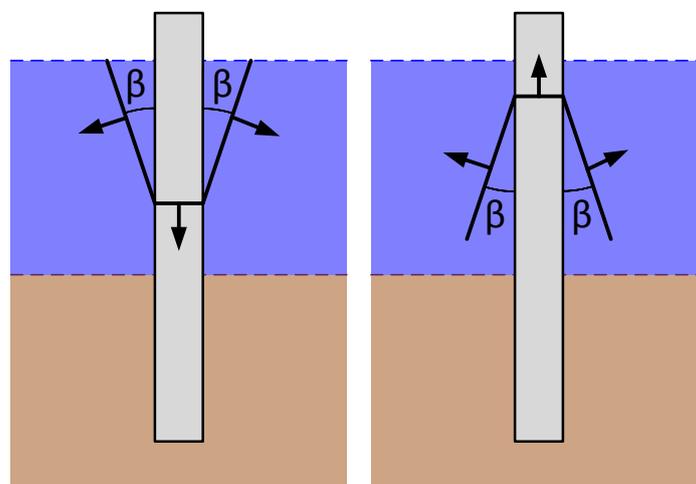


Abbildung 14: Hydroschallemission infolge Dehnwelle im Pfahl [vgl. Kuhn et al., 2014]

Der Winkel des Ausbreitungskegels  $\beta$  entspricht dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten im Wasser und im Pfahl und ergibt sich zu ca.  $17^\circ$ :

$$\sin \beta = \frac{c_{\text{Wasser}}}{c_{\text{Pfahl}}} \quad (18)$$

$\beta$ : Schallausbreitungswinkel [°]

$c_{\text{Wasser}}$ : Schallgeschwindigkeit im Wasser [m/s]

$c_{\text{Pfahl}}$ : Dehnwellengeschwindigkeit im Pfahl [m/s]

#### I.4.5 Funktionsweise von BBC und HSD

Die beim Einsatz eines BBC im Wasser vorhandenen Luftblasen (vgl. Abschnitt I.4.3) haben einen starken Einfluss auf die Schallausbreitung im Wasser. Gasblasen in einer Flüssigkeit können einfallenden Schall streuen und sogar absorbieren. Diese Effekte sind stark frequenzabhängig und treten insbesondere auf, wenn die Blasen in ihrer Resonanzfrequenz angeregt werden. Diese hängt bei den Blasen eines Blasenschleiers von der Größe der Blasen und dem hydrostatischen Druck ab [Elmer et al., 2007]. Kugelförmige Luftblasen haben in Wasser bei Größen bis etwa 5 mm eine Eigen-

frequenz von über 1.000 Hz, erst größere Blasen könnten niedrigere Frequenzen effektiv dämpfen. Bei nicht-sphärischen Blasen, welche beim Aufsteigen in Wasser entstehen, ist die Resonanzfrequenz noch höher [Medwin/Clay, 1998]. Bei bisherigen Einsätzen des Blasenschleiers, aber auch bei Laborversuchen, konnten stabile Luftblasen mit Eigenfrequenzen bis etwa 1.000 Hz erzeugt werden. Größere, meist flunderförmige Luftblasen zeigen ein instabiles Verhalten und zerfallen beim Aufsteigen im Wasser in kleinere Blasen.

Zusätzlich kommt es durch die Luftblasen zu einer Änderung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  sowie der Dichte  $\rho$  und damit auch der akustischen Kennimpedanz  $Z$  im Wasser-Luft-Gemisch. Eine Änderung der Impedanz führt zu einer teilweisen Reflexion der Schallwellen, analog zur Reflexion an der Wasseroberfläche oder dem Meeresgrund (vgl. Abbildung 13). Bei der Reflexion sind nicht die Eigenschaften der einzelnen Luftblasen, sondern die Luftkonzentration im Wasser entscheidend. Auch die Dicke des Blasenschleiers hat einen Einfluss [Diederichs et al., 2014]. Im Wasser erzeugen Luftblasen bereits bei geringer Konzentration eine starke Veränderung der Schallgeschwindigkeit und damit der akustischen Kennimpedanz [Elmer et al., 2007; 2011].

HSD-Elemente stellen ebenfalls gasgefüllte Blasen im Wasser dar und rufen daher die gleichen Effekte wie Luftblasen eines BBC hervor. Die Größe und Frequenz der HSD-Elemente kann dabei gezielt eingestellt werden, um Resonanzen und damit Streuung und Absorption im Pegelbestimmenden Frequenzbereich zu erreichen. Zusätzlich kann durch die Steifigkeit der HSD-Elemente eine Materialdämpfung hervorgerufen werden [Elmer et al., 2011].

#### I.4.6 Wellenausbreitung im Boden

Bei der Betrachtung möglicher Wellenformen in einem Festkörper muss zuerst zwischen der Größe und der Geometrie des Mediums unterschieden werden. In der Theorie spricht man von Raumwellen, wenn sich die Wellen kugelförmig in einem unendlich großen Festkörper ausbreiten. Neben den Raumwellen gibt es auch Halbraumwellen. Die Halbraumwellen entstehen beispielsweise durch einen Hammerschlag an der Oberfläche eines nach unten unendlich großen Festkörpers. Die Wellen breiten sich halbkreisförmig aus.

Ausgehend von einem elastischen, homogenen und isotropen Festkörper, breiten sich die im Inneren des Festkörpers entstehenden Wellen kugelförmig im Raum aus. Bei den Raumwellen wird unterschieden zwischen Kompressions- oder P-Wellen sowie Scher- oder S-Wellen. Die Abkürzungen P und S stehen hierbei für Primär und Sekundär und beziehen sich auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Raumwelle im Vollraum. Die deutlich schnellere Kompressionswelle wird häufig auch als Longitudinalwelle bezeichnet. Sie verursacht Verschiebungen in Ausbreitrichtung, die Lauf- und Verschiebungsrichtung haben die gleiche Orientierung. Im Vergleich dazu erzeugt die S-Welle Verschiebungen quer zu ihrer Laufrichtung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  beider Raumwellen kann mit den nachfolgenden Formeln berechnet werden, sie ist von den Materialeigenschaften Dichte, Steifigkeit und der Querdehnung abhängig.

Kompressions  
(P-Welle)  $c_P = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho} \frac{1 - \nu}{1 - \nu - 2\nu^2}}$  (19)

Scherwelle  
(S-Welle)  $c_S = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu)}}$  (20)

$E_{dyn}$ : Elastizitätsmodul [N/m<sup>2</sup>]  
 $\nu$ : Querdehnzahl [-]  
 $\rho$ : Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

Wird der Impuls nicht irgendwo innerhalb des unendlich großen Festkörpers, sondern auf der Oberfläche eines Halbraumes ausgelöst, so breiten sich die Wellen halbkugelförmig nach unten aus. Neben den schon erwähnten Kompressions- und Scherwellen tritt hier eine dritte Form der Welle auf. Sie bewegt sich entlang der Oberfläche des Festkörpers und wird als Rayleigh- oder Oberflächenwelle bezeichnet. An der Grenzfläche Feststoff-Wasser wird sie als Scholte-Welle bezeichnet. Die Amplitude der Oberflächenwelle nimmt mit der Tiefe ab. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist langsamer als die der Scherwelle und berechnet sich nach [Walz, 2001] zu

$$0,9 * c_S \leq c_R \leq 0,97 * c_S \quad (21)$$

Abbildung 15 zeigt schematisch die verschiedenen Wellenarten im (Halb-)Raum.

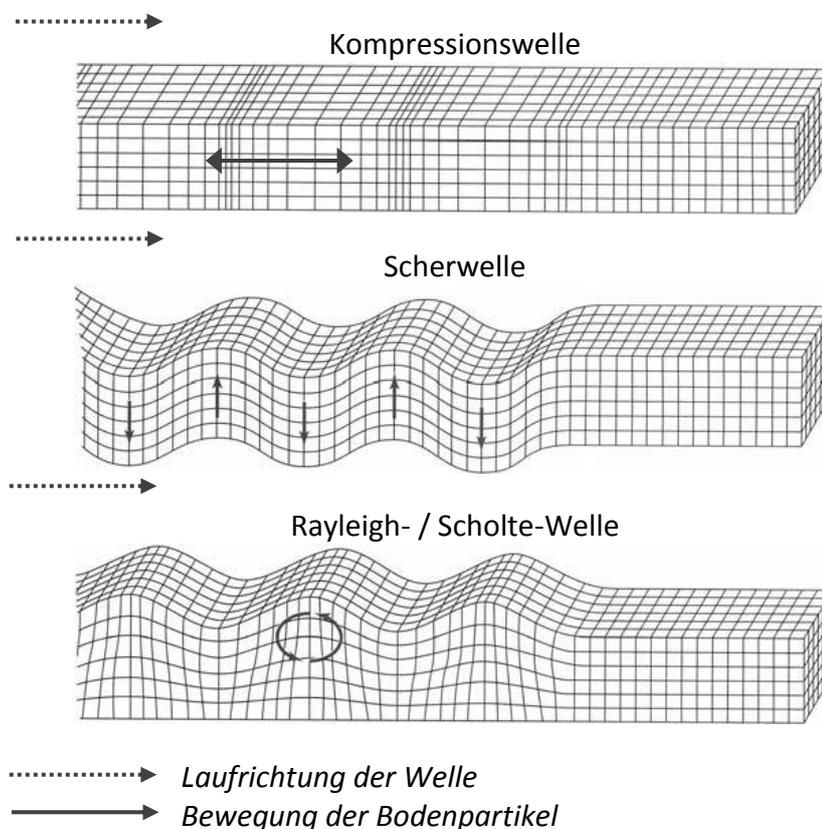


Abbildung 15: Wellenarten im Halbraum [Vrettos, 2008]

Die Wellenausbreitung im Boden stellt sich wesentlich komplexer dar, als beispielsweise in einem Einphasenmedium wie der Luft, dem Wasser oder einem elastischen, homogen isotropen Feststoff. Der Boden stellt ein Mehrphasensystem aus einem Konglomerat dieser drei Medien dar, deren Anteile stark variieren können. In Luft und Wasser breiten sich aufgrund der nicht vorhandenen Scherfestigkeit ausschließlich Kompressionswellen aus. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in beiden Medien kann im Vergleich zum gewachsenen Boden in einer schmalen Bandbreite abgeschätzt werden. Für ein ideales Gas sowie eine Flüssigkeit kann sie nach folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\text{ideales Gas} \quad c_{Gas} = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (22)$$

$$\text{Flüssigkeit} \quad c_{Flüssigkeit} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (23)$$

- κ: Isotropenexponent (Verhältnis der Wärmekapazitäten) (1,402 für Sauerstoff)
- p: vorherrschender Druck [Pa]
- ρ: Dichte [kg/m<sup>3</sup>]
- K: Kompressionsmodul [N/m<sup>2</sup>]

In der Luft schwankt die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur zwischen 320 m/s und 360 m/s. Im Wasser schwankt sie zwischen 1400 m/s und 1550 m/s, zusätzlich beeinflusst von anderen Größen, wie z.B. der Salinität. Die Temperaturabhängigkeit zeigen folgende Diagramme.

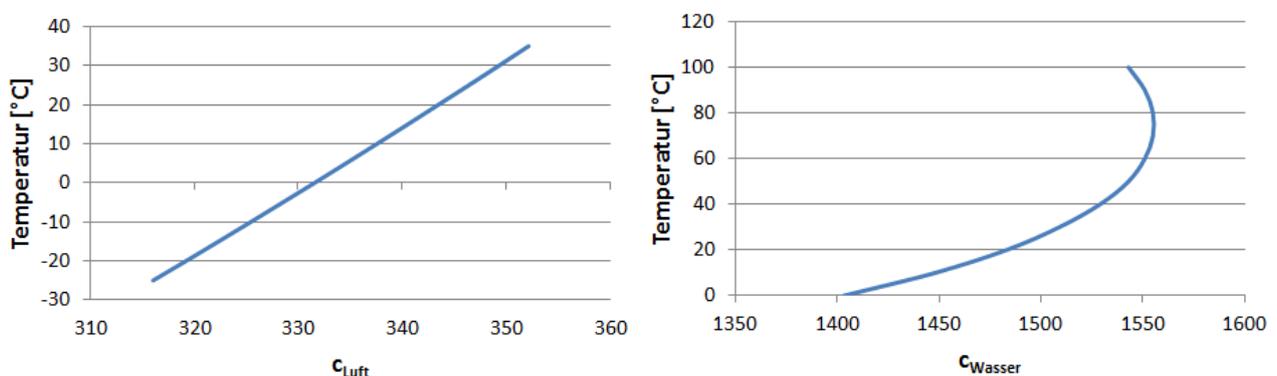


Abbildung 16: Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit in der Luft und im Wasser

Die Komplexität der Wellenausbreitung verdeutlicht ebenfalls Tabelle 1. Hier sind Erfahrungswerte von Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten für verschiedene Ausbreitungsmedien aufgeführt. Bei den dargestellten Medien zeigt sich, dass die Bandbreite für verhältnismäßig genau zu beschreibende Materialien wie Beton, Stahl, Luft und Wasser deutlich geringer ist, als bei den aufgeführten Bodenarten. Des Weiteren wird bei Betrachtung der Geschwindigkeiten für die Bodenarten ersichtlich, dass der Wassergehalt einen großen Einfluss besitzt. Die Geschwindigkeiten nehmen in gesättigten Medien den Wert der Schallgeschwindigkeit im Wasser an oder gehen darüber hinaus (vgl. gesättigter Sand oder Kies).

Tabelle 1: Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten für verschiedene Medien [Auszug aus Knödel et al., 2005]

Ausbreitungsmedium	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit		Dichte
	$c_p$ [m/s]	$c_s$ [m/s]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Beton C30/37	3845	2355	2,64
Stahl	5782	3245	7,85
Luft	310..360		$1,29 \cdot 10^{-3}$
Wasser	1430..1590		0,98..1,01
Eis	3100..4200	1500..2000	0,97..1,07
Ton	1200..2800	110..1500	1,25..2,32
Lehm	500..1900	440..1080	0,76..1,57
Sand	300..1500	100..500	1,80..2,05
- trocken	100..600		2,33..2,80
- feucht	200..2000		1,50..2,00
- gesättigt	1300..1800		1,80..2,05
Kies	180..550		1,95..2,20
- feucht	750..1250		1,95..2,20
Schotter (Kiess.)	100..600		2,33..2,80
- nicht gesättigt	400..800		
- wassergesättigt	1300..2000		
Deckschichten (3 – 6 m)	300..800		

In der Literatur lassen sich Messergebnisse finden, die den Wellenausbreitungszusammenhang in Teilen beschreiben. So wurden im Rahmen des *ESR $\alpha$* -Tests 2011 [Wilke et al., 2012] im Nahbereich eines Testpfahles an einer Position kombinierte Hydroschall- (1,8 m über Grund) und Erschütterungsmessungen (auf der Meeresbodenoberfläche) durchgeführt. Die Darstellung des Erschütterungsverlaufes als Zeitsignal eines Rammschlages aufgezeichnet mit einem Geophon ist Abbildung 17 zu entnehmen.

Dabei zeigt sich, dass im Erschütterungssignal eindeutig der Rammimpuls zu finden ist, dass jedoch das Erschütterungssignal im Vergleich zum Hydroschall deutlich länger andauert. Im Signal ist sowohl vor als auch nach dem Rammimpuls eine tieffrequente 12 Hz-Sinusschwingung zu erkennen. Diese wird als Eigenmode des Pfahles interpretiert. Der Bereich vor dem Rammimpuls resultiert demnach aus der hinablaufenden Dehnwelle im Pfahl und der Bereich dahinter aus der reflektierten, den Pfahl hinauflaufenden Dehnwelle (vgl. Abschnitt I.4.7). Der Einfluss des Bodens oder die sogenannte Bodenkopplung wurde an diesem Standort aufgrund der Jahrzehnte langen Standzeit und extremen Einbindung der Pfahles von über 65m mit 2..3 dB (SEL) angegeben.

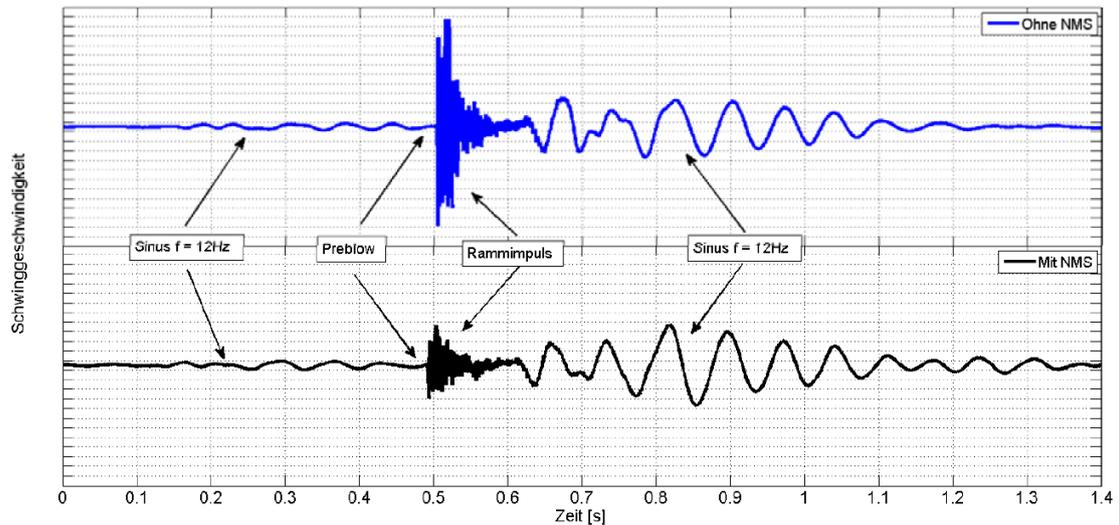


Abbildung 17: Zeitfunktion (Zeitsignale) eines Geophons (Erschütterung) eines Rammimpulses in 13 m Abstand vom Testpfahl am Sediment bei einer verwendeten Rammenergie von 300 kJ [Wilke et al., 2012]

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wurden von Bruns [2013] veröffentlicht. Die Messungen wurden im Gegensatz zum *ESRa*-Test nicht an einem Testpfahl, der nicht mehr vorgetrieben werden kann, sondern während der regulären Installation für eine OWEA mit wachsender Einbindung durchgeführt. Ein Ergebnis der Messung zeigt Abbildung 18. Dargestellt sind die zeitsynchron aufgenommenen Signale zweier Rammimpulse erfasst von einem Hydrophon im Wasser (1 m über Grund) als Schalldruck in [Pa] und dem korrespondierendem Geophon an der Meeresbodenoberfläche in gleicher Entfernung zum Rammpfahl sowie zwei weiterer Geophone in größerem Abstand. Die Geophonsignale zeigen den vertikalen Erschütterungsverlauf in [mm/s] an der jeweiligen Position.

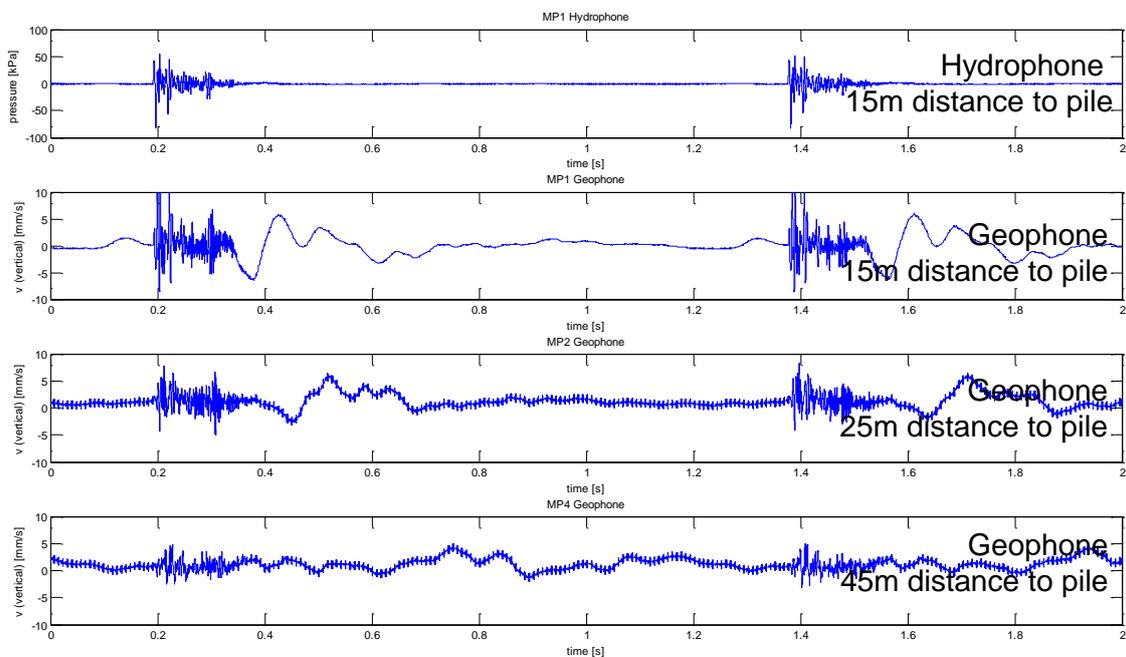


Abbildung 18: Zeitfunktionen zweier Rammimpulse von einem Hydrophon und drei Geophonen mit unterschiedlichem Abstand zum Pfahl [Bruns, 2013]

Ähnlich wie beim *ESRa*-Test lässt sich der Rammimpuls sehr gut sowohl im Wasser als auch an der Meeresoberfläche erkennen. Auch der bestimmende Frequenzbereich in diesem Bereich ist bei allen Signalen ähnlich zwischen 70 Hz bis 500 Hz. Die tieffrequenten Schwingungen vor dem Rammimpuls sind lediglich beim Geophon in 15 m Entfernung erkennbar. Nach dem Rammimpuls sind sie mit einer deutlich größeren Amplitude bei allen drei Messpositionen sichtbar und haben vergleichbar mit dem *ESRa*-Test ebenfalls eine Frequenz von etwa 10 Hz bis 12 Hz. Nach Bruns [2013] sind diese tieffrequenten Schwingungen jedoch nicht auf die den Pfahl hoch und runter laufende Dehnwelle zurückzuführen, da diese Welle auch Energie ins Wasser abstrahlen müsste und somit auch im Hydroschall erkennbar wäre. Im Hydrophonsignal werden zu diesem Zeitpunkt jedoch keine Druckschwankungen erfasst. Vielmehr geht der Autor davon aus, dass die Schwingung vor dem Rammimpuls auf Aktivitäten des Rammhammers zurückzuführen ist.

Der niederfrequente Anteil nach dem Rammimpuls hingegen ist auf die energiereiche Oberflächenwelle mit einer geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit als die Hydroschallwelle zurückzuführen. Dieser Signalanteil ist deutlich in wachsender Entfernung mit abnehmender Amplitude zu erkennen. Gleichzeitig erhöht sich die Dauer zwischen dem Rammimpuls und der niederfrequenten Schwingung. Aufgrund der zeitlichen Differenz von Hydroschall und Bodenschwingung geht der Autor in diesem Fall von einer geringen Bodenankopplung aus.

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema sind parallel zum *triad*-Vorhaben im Rahmen des Forschungsvorhabens *BORA* (FKZ 0325421A/B/C) durchgeführt worden. Die darin gewonnenen Erkenntnisse decken sich ebenfalls mit den zuvor beschriebenen.

#### I.4.7 Pfahldynamik

Bei der Rammung von Pfählen kommt es im Kontaktbereich von Rammhammer und Pfahl zu einem Spannungsanstieg, welcher zu Verformungen des Pfahlmaterials führt. In der Regel kann hierbei die Gültigkeit der Elastizitätstheorie vorausgesetzt werden, sodass es in axialer Richtung zu einer Stauchung des Pfahls kommt. Aufgrund der Querdehnung verformt sich der Pfahl ebenfalls in Richtung der beiden horizontalen, orthogonal zueinander stehenden Achsen. Im Rahmen pfahldynamischer Tests wird vereinfachend angenommen, dass die eingeleitete Dehnwelle mit der eindimensionalen Wellentheorie in ausreichender Näherung beschrieben werden kann [DGGT, 2012]. In diesem Sinne unterscheidet sich die Wellenausbreitung im Pfahl von der in Abschnitt I.4.6 beschriebenen Wellenausbreitung im Halbraum.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_{\text{Pfahl}}$  der eindimensionalen Dehnwelle im Pfahl kann als Materialparameter nach folgender Gleichung beschrieben werden:

$$c_{\text{Pfahl}} = \sqrt{\frac{E_{\text{dyn}}}{\rho}} \quad (24)$$

$E_{\text{dyn}}$ : Elastizitätsmodul [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$ : Dichte [kg/m<sup>3</sup>]

Ändern sich sowohl diese Materialparameter als auch die Querschnittsform und -fläche des Pfahls nicht, breitet sich die Welle immer in weiter Richtung des Pfahlfußes aus. Kommt es allerdings zu einer Änderung der dynamischen Steifigkeit, der Pfahlimpedanz  $Z$ , so werden Teile der Welle reflektiert und laufen in entgegengesetzter Richtung zurück zum Pfahlkopf. Die Impedanz ist entspre-

chend der folgenden Gleichung abhängig von der Querschnittsfläche und den Materialparametern des Pfahls.

$$Z = A \cdot c_{\text{Pfahl}} \cdot \rho = A \cdot \frac{E_{\text{dyn}}}{c_{\text{Pfahl}}} = A \cdot \sqrt{E_{\text{dyn}} \cdot \rho} \quad (25)$$

A: Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]

c<sub>Pfahl</sub>: Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Pfahl [m/s]

ρ: Dichte [kg/m<sup>3</sup>]

E<sub>dyn</sub>: Elastizitätsmodul [N/m<sup>2</sup>]

Der Anteil der reflektierten und fortschreitenden Wellenanteile ist abhängig von dem Grad der Impedanzänderung. Je größer dieser ist bzw. je stärker der Impedanzwechsel, desto mehr Anteile werden reflektiert und desto weniger Anteile der Dehnwelle werden transmittiert. Der Pfahlfuß stellt aufgrund der abrupten Reduzierung der Querschnittsfläche auf null die größtmögliche Impedanzänderung dar. Wird ein etwaig anstehender Boden zunächst noch außer Acht gelassen, so wird am Pfahlfuß die gesamte Welle reflektiert und durchläuft anschließend den Pfahl erneut von unten nach oben (vgl. Abbildung 19). Hierbei kann es aufgrund der Auflagerbedingung des Pfahls zu einem Vorzeichenwechsel der Dehnwelle kommen, sodass als reflektierte Welle eine Zugwelle den Pfahl von unten nach oben durchläuft. Die dabei auftretenden lokalen Verformungen sind dann keine negativen Längenänderungen (Stauchungen) in axialer Richtung und positive Dehnungen in tangentialer bzw. radialer Richtung (Ausbauchung), sondern positive Längenänderungen in axialer (Zugdehnung) und negative in tangentialer bzw. radialer Richtung (Einschnürung, Querschnittsverjüngung).

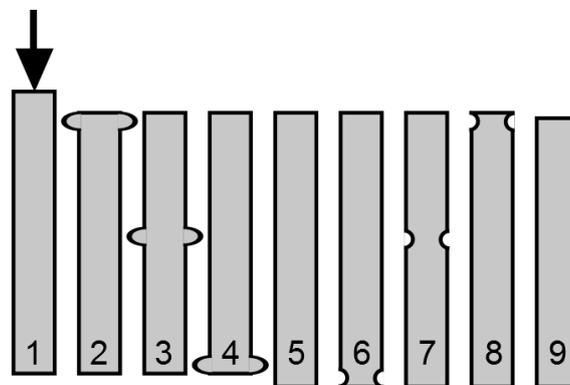


Abbildung 19: Durchlauf einer Dehnwelle im Pfahl [vgl. Kuhn et al., 2014]

In Abbildung 19 ist schematisch der Wellendurchlauf an einem Rammpfahl dargestellt. Nach Einleitung der Welle am Pfahlkopf (1) durchläuft diese den Pfahl als Kompressionswelle von oben nach unten (2-4). Unter Annahme eines freien Auflagers erfolgt die Reflexion am Pfahlfuß (5) als Zugwelle, welche den Pfahl von unten nach oben durchläuft (6-8). Nach diesem Vorgang ist der Pfahl in Ruhe und in den Boden eingedrungen (9).

Theoretisch wird die Dehnwelle am Kopf wiederum reflektiert, usw. Tatsächlich wird sie im Bereich der Einbindung des Pfahles durch den anstehenden Boden gedämpft. Hierdurch klingt die Welle ab, die Schwingungsamplituden werden kleiner.

Zur Beschreibung der durch den Rammschlag im Pfahl hervorgerufenen dynamischen Vorgänge unter der Annahme der eindimensionalen Wellentheorie dienen der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf sowie der Kraft-Zeit-Verlauf.

Durch die den Pfahl durchlaufende Welle kommt es zu Dehnungen und Bewegungen im betrachteten Pfahlquerschnitt. Die gemessene Beschleunigung wird in der Regel zu weiterführenden Betrachtungen integriert, sodass sich der Geschwindigkeit-Zeit-Verlauf nach folgender Gleichung bestimmen lässt:

$$v(t) = \int a(t) dt \quad (26)$$

a: Pfahlbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

t: Zeit [s]

Neben den Beschleunigungen kommt es im betrachteten Pfahlquerschnitt zu Dehnungen, welche in der Regel der Elastizitätstheorie unterliegen. Entsprechend des Hookeschen Gesetzes (Gleichung (28)) können aus diesen Dehnungen die im betrachteten Bereich herrschenden Spannungen und mit der Pfahlquerschnittsfläche die Kräfte bestimmt werden, sodass sich analog zu den Geschwindigkeiten ein Kraft-Zeit-Verlauf ermitteln lässt.

Die oben beschriebene Impedanz stellt den Proportionalitätsfaktor zwischen Kraft und Geschwindigkeit dar. Demzufolge kann die in einem Pfahlquerschnitt zum Zeitpunkt t herrschende Kraft mit Hilfe der gemessenen oder berechneten Dehnung als auch mittels gemessener oder berechneter Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t bestimmt werden.

$$F(t) = v(t) \cdot Z \quad (27)$$

$$F(t) = \varepsilon(t) \cdot E_{dyn} \cdot A \quad (28)$$

v: Pfahlgeschwindigkeit [m/s]

Z: Impedanz [Ns/m]

$\varepsilon$ : Dehnung [-]

$E_{dyn} \cdot A$ : Dehnsteifigkeit [N]

Häufige Anwendungen der oben eingeführten Theorie der Pfahldynamik bilden rambbegleitende Messungen und dynamischen Pfahlprobelastungen zur Bestimmung der axialen Pfahltragfähigkeit. Die statische Pfahltragfähigkeit  $R_{stat}$  ergibt sich dabei aus der Differenz des totalen Eindringwiderstandes  $R_{tot}$  und dem infolge der Trägheits- und Dämpfungskräfte des Bodens auftretenden dynamischen Widerstandsanteil  $R_{dyn}$ :

$$R_{stat} = R_{tot} - R_{dyn} \quad (29)$$

$R_{stat}$ : statische Pfahltragfähigkeit

$R_{tot}$ : totaler Eindringwiderstand

$R_{dyn}$ : dynamischer Eindringwiderstand

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Dehnwelle in Stahl bekannt ist und nur geringen Schwankungen unterliegt, kann mit Gleichung (31) und der ebenfalls bekannten Pfahllänge  $L$  die Dauer eines Durchlaufes der Welle von der Sensorebene zum Pfahlfuß und zurück bestimmt werden.

Mit Einführung von  $t_1$  für den Zeitpunkt der Kraftereinleitung bzw. Durchlauf der Wellenfront an der Sensorebene und  $t_2$  für den Zeitpunkt des in der Sensorebene eintreffenden am Pfahlfuß reflektierten Signals können sowohl die Kraft und als auch die Geschwindigkeit zu den jeweiligen Zeitpunkten bestimmt werden.

Während zur Ermittlung des dynamischen Widerstandsanteils verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen, die jedoch alle die genaue Kenntnis der Dämpfungseigenschaften des anstehenden Bodens bedürfen, kann der totale Eindringwiderstand nach Gleichung (30) explizit bestimmt werden.

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{2}(F_1 + Z \cdot v_1) + \frac{1}{2}(F_2 - Z \cdot v_2) \quad (30)$$

$$t_2 - t_1 = 2L/c_{\text{Pfahl}} \quad (31)$$

F: Kraft [N]

v: Pfahlgeschwindigkeit [m/s]

Z: Impedanz [Ns/m]

$t_1$ : Zeitpunkt der Kraftereinleitung

$t_2$ : Zeitpunkt des Pfahlfußreflexes

L: Pfahllänge [m]

$c_{\text{Pfahl}}$ : Wellengeschwindigkeit im Pfahl [m/s]

Bei dynamischen Pfahlprobelastungen und rambbegleitenden Messungen werden Sensoren angebracht, um die Dehnung und Beschleunigung mit einer ausreichenden Abtastrate zu erfassen. Die dafür verwendeten Dehnungsmesstreifen (DMS) und Beschleunigungssensoren (engl. accelerometer, ACC) werden i.d.R. etwa in einem Abstand, der dem 1,5-fachen des Pfahldurchmessers entspricht, unterhalb des Pfahlkopfes angeschraubt. In diesem Abstand vom Einleitungspunkt des Rammschlages kann von einer ebenen Wellenfront und damit von einem eindimensionalen Problem ausgegangen und die oben beschriebenen Gleichungen als gültig vorausgesetzt werden.

Die mit jedem Rammschlag in den Pfahl eingebrachte Energie kann über das Zeit-Integral der Kraft multipliziert mit der Geschwindigkeit bestimmt werden nach der folgenden Gleichung:

$$E = \int F(t) \cdot v(t) dt \quad (32)$$

E: Energie

F(t): Kraftverlauf

v(t): Geschwindigkeitsverlauf

#### I.4.8 Zusammenfassung

Die Übertragung der theoretischen Grundlagen und Erfahrungswerte der Wellenausbreitung auf die Zusammenhänge bei Offshore-Pfahlrammungen lässt sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Die durch den Rammhammer erzeugte Dehnwelle breitet sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 5100 m/s im Stahlpfahl aus.
- Die Dehnwelle im Pfahl breitet sich zunächst vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß aus und wird dort je nach Einbindung und Auflagerungsbedingungen teilweise oder vollständig reflektiert. Insbesondere zu Beginn der Rammung kann die Dehnwelle mehrfach die Pfahllänge durchlaufen.
- Die Dehnwelle erzeugt entsprechend der Schwingungsform eine Dehnung und Stauchung bzw. Ausbauchung und Reduzierung des Pfahlquerschnittes, welche zu einer Abstrahlung in die den Querschnitt benetzten Medien Luft, Wasser und Boden führt.
- Die abgestrahlten Wellen breiten sich in der Luft mit etwa 340 m/s, im Meerwasser mit etwa 1500 m/s und im gesättigten Boden mit über 1500 m/s aus.
- Durch die den Pfahl hinablaufende Dehnwelle wird zuerst Energie in die Luft, danach ins Wasser und erst danach in den Boden abgestrahlt. Folglich breitet sich die Hydroschallwelle an der Wasseroberfläche eher aus als im Bereich des Meeresbodens. Die sich einstellende Wellenfront im Wasser ist entsprechend der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Stahl und Wasser um etwa 17° geneigt [Dahl/Reinhard, 2013].
- Durch die etwas höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit im Boden im Verhältnis zum Wasser, überholt die Bodenwelle die Wasserwelle.

#### I.4.9 Auszug der verwendeten Fachliteratur, Berichte und anderer Quellen

Achmus, M. (2009): Bemessung von Gründungselementen für Offshore-Windenergieanlagen – Stand des Wissens und offene Fragen. 7. FZK-Kolloquium, Potenziale für die Maritime Wirtschaft, Hannover, 26. März 2009, S. 145- 155

ACP Grundbauplanung (2011): Offshore-Windpark E.ON Amrumbank West. Baugrund- und Gründungsgutachten

Bellmann, M. (2014): Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2014. 16-19 November 2014, Melbourne

Bellmann, M.; Remmers, P.; Gündert, S.; Müller, M.; Holst, H.; Schultz-von Glahn, M. (2015): Is there a State-of-the-Art regarding Noise Mitigation Systems to reduce Pile-Driving Noise? Conference on Wind energy and Wildlife impacts (CWW 2015). Berlin, March 10-12 2015

Brekhoskikh, L.M.; Lysanov, Yu.P. (2003): Fundamentals of Ocean Acoustics. 3rd edition, Springer-Verlag, New York

van de Brug, E.; Peters, M.; Jung, B. (2015): Offshore-Foundation-Drilling – Gebohrte Offshore-Fundamente. Pfahlsymposium 2015, Braunschweig, 19.-20. Februar 2015. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 99, S. 397-408

Bruns, B. (2013): Evaluation of hydrosound and vibration measurements during the use of the Hydro-Sound-Dampers (HSD) at the wind farm London Array. 166th Meeting of the Acoustical Society of America (ASA), San Francisco, CA, USA, 2 - 6 December 2013, 2pPA4

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH, 2013): Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4). Standard, Hamburg und Rostock

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, 2013): Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept). Berlin, Dezember 2013

Dahl, P.; Reinhard, P. (2013): Beam forming of the underwater sound field from impact pile driving. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 134 (1), July 2013

Diederichs, A.; Pehlke, H.; Nehls, G.; Bellmann, M.; Gerke, P.; Oldeland, J.; Grunau, C.; Witte, S.; Rose, A. (2014): Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydro-schallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten – Schlussbericht Hydroschall-Off BWII. Förderkennzeichen 0325309A/B/C, Husum, März 2014

Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA, 2006): Akustische Wellen und Felder. Empfehlung 101, März 2006

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT, 2012): EA-Pfähle. Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, 2. Auflage

Deutsches Windenergie-Institut (DEWI, 2014a): Offshore Windpark Amrumbank West - Unterwasserschallmessungen bei der Installation des Fundamentes A24. Kurzbericht RS13-00032-27-rev1, 7. Mai 2014

Deutsches Windenergie-Institut (DEWI, 2014b): Offshore Windpark Amrumbank West - Unterwasserschallmessungen bei der Installation des Fundamentes A23. Kurzbericht RS13-00032-28, 8. Mai 2014

Deutsches Windenergie-Institut (DEWI, 2014c): Offshore Windpark Amrumbank West - Unterwasserschallmessungen bei der Installation des Fundamentes A22. Kurzbericht RS13-00032-29, 9. Mai 2014

Elmer, K.-H.; Gattermann, J.; Fischer, J.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Stahlmann, J. (2011): Hydroschalldämpfer zur Reduktion von Unterwasserschall bei Offshore-Gründungen. Pfahlsymposium 2011, 17.-18. Februar 2011, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 94

Elmer, K.-H. (2010): Pile driving noise reduction using new hydro sound dampers. BSH-Workshop on Pile Driving (ECS2010), Stralsund, 21 March 2010

Elmer, K.-H.; Betke, K.; Neumann, T. (2007): Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen – Abschlussbericht Schall 2. Förderkennzeichen 03229947, Hannover

European Wind Energy Association (EWEA, 2015): The European offshore wind industry - key trends and statistics 2014, <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-European-Offshore-Statistics-2014.pdf>.

Fischer, J.; Sychla, H.; Bakker, J.; de Neef, L.; Stahlmann, J. (2013): A comparison between impact driven and vibratory driven steel piles in the German North Sea. Proceedings of the Conference on Maritime Energy (COME 2013). May 21-22 2013, Hamburg, S. 361-380

Gattermann, J.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Zahlmann, J.; Elmer, K-H. (2012): Energie- und Hydroschallmessungen im Nahbereich des Pfahles beim Forschungsprojekt ESRa. Appendix 2 zu: Wilke, F.; Kloske, K.; Bellmann, M: Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl (ESRa) – technischer Abschlussbericht. Förderkennzeichen 0325307, Mai 2012

Gerdes, F.; Ludwig, S. (2014): Besonderheiten der Schallausbreitung in der Ostsee. 2. DUH-Schallschutz-Tagung, Wege zu einem wirksamen Unterwasserschallschutz beim Bau von Offshore-Windparks, 7. Mai 2014, Berlin

Herwig, V.; Gattermann, J. (2015): VIBRO-Project – Vergleich der lateralen Tragfähigkeit von vibrieren und geschlagenen Stahlpfählen in sandigen Böden. Pfahlsymposium 2015, Braunschweig, 19.-20. Februar 2015. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 99, 2015, S. 251-265

Institut für Technische und Angewandte Physik (itap, 2014a): Messung der Hydroschallimmissionen bei den Rammarbeiten zur Gründung der OWEA A58, A57 und A45 im Offshore Windpark Amrumbank West – Bericht der Referenzmessung mit Schallschutzsystem. Messbericht, Projekt-Nr. 2282-14-bel, Version 1, 11. April 2014

Institut für Technische und Angewandte Physik (itap, 2014b): Messung der Hydroschallimmissionen bei den Rammarbeiten zur Gründung der OWEA A44 und A32 (Monopiles) im Windpark Amrumbank West. Kurzbericht 9, Projekt-Nr. 2376-14-bel/svg, Version 1, 16. Oktober 2014

Institut für Technische und Angewandte Physik (itap, 2014c): Messung der Hydroschallimmissionen bei den Rammarbeiten zur Gründung der OWEA A77, A66 und A20 (Monopiles) im Windpark Amrumbank West. Kurzbericht 10, Projekt-Nr. 2376-14-bel/svg, Version 1, 22. Oktober 2014

Institut für Technische und Angewandte Physik (itap, 2015): Untersuchung und Erprobung von Hydroschalldämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen – Auswertung der Hydroschallmessungen im OWP London Array. Messbericht, Projekt-Nr. 1918-c-bel, Version 3, Oldenburg, 03. August 2015

Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. (Hrsg.) (2005): Geophysik. 2. Auflage, Springer

Koschinski, S.; Lüdemann, K. (2013): Entwicklung schallmindernder Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen. Bundesamt für Naturschutz, Nehnten und Hamburg

Lucke, K. (2012): Nur gestört oder schon verletzt? – Die Auswirkungen von Unterwasserschall auf unterschiedliche Fitnessmerkmale von Meeressäugern. In: Klein, L.; Koschinski, S.; Lüdemann, K.; Stöcker, U. (Hrsg.): Zwischen Naturschutz und Energiewende – Herausforderung Schallschutz beim Bau von OWP. Berlin, 25.-26. September 2012

Lurton, X. (2010): An introduction to underwater acoustics. Principles and applications. 2nd ed. Springer Verlag, published in association with Praxis Publishing, Heidelberg, New York, Oxford

Medwin, H. (2005): Sounds in the sea. From ocean acoustics to acoustical oceanography. Cambridge University Press, Cambridge, New York.

Medwin, H.; Clay, C. (1998): Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, San Diego

- Müller, A.; Zerbs, C. (2011): Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen – Aktuelle Vorgehenshinweise und Anmerkungen. Hamburg
- Müller, A.; Zerbs, C. (2013): Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßnahmen. Hamburg, [http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/Messvorschrift\\_Schalldaemmassnahmen.pdf](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/Messvorschrift_Schalldaemmassnahmen.pdf)
- Müller-Blenkle, C. (2012): Verhaltensreaktionen, Maskierungseffekte und Verletzungen – Der Einfluss von Unterwasserschall auf das (Über)Leben von Fischen. In: Klein, L.; Koschinski, S.; Lüdemann, K.; Stöcker, U. (Hrsg.): Zwischen Naturschutz und Energiewende – Herausforderung Schallschutz beim Bau von OWP. Berlin, 25.-26. September 2012
- Reimann, K.; Grabe, J. (2014): Bodenbewegungen am Meeresboden bei Offshore-Rammarbeiten. Messen in der Geotechnik 2014. Fachseminar am 20./21. Februar 2014 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig
- Stadler, J. (2012): Experience with the application of underwater sound criteria for cumulative sound exposure. In: Klein, L.; Koschinski, S.; Lüdemann, K.; Stöcker, U. (Hrsg.): Zwischen Naturschutz und Energiewende – Herausforderung Schallschutz beim Bau von OWP. Berlin, 25.-26. September 2012
- Stahlmann, J.; Gattermann, J.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Stein, P. (2015): Untersuchung und Erprobung von Hydro-Schall-Dämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA. Abschlussbericht, Förderkennzeichen 0325365, September 2015
- Thorp, W.; Browning, D. (1973): Attenuation of low frequency sound in the ocean. In: Journal of Sound and Vibration 26 (4), S. 576–578.
- Trianel Windkraftwerk Borkum GmbH Co. KG (ohne Jahr): Trianel Offshore-Windpark Bildergalerie. <http://www.trianel-borkum.de/de/windpark/bildergalerie.html>, abgerufen am 23.04.2015
- Umweltbundesamt (UBA, 2011): Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Mai 2011 <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/empfehlung-von-laermschutzwerten-bei-errichtung-von>, abgerufen am 9.1.2014
- Urick, R. (1983): Principles of underwater sound. 3rd edition, Peninsula Publishing, Los Altos/CA, USA
- Vrettos, C. (2008): Grundbaudynamik. In: Witt, K.J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Berlin, Ernst & Sohn, S. 451-500
- Walz, B. (2001): Messen in der Geotechnik. Skript zur Vorlesung, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal
- Wiemann, J.; Lesny, K.; Richwien, W. (2002): Gründung von Offshore-Windenergieanlagen - Gründungskonzepte und geotechnische Grundlagen. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Band 29
- Wilke, F.; Kloske, K.; Bellmann, M. (2012): Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl (ESRa) – technischer Abschlussbericht, Förderkennzeichen 0325307, Mai 2012

eigene Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens:

Bruns, B.; Stein, P.; Kuhn, C.; Sychla, H.; Gattermann, J. (2014): Hydro sound measurements during the installation of large diameter offshore piles using combinations of independent noise mitigation systems. Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2014, Melbourne, 16.-19. November 2014

Bruns, B.; Stein, P.; Elmer, K.-H.; Kuhn, C.; Sychla, H.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2015): HSD als innovatives Verfahren zur Minderung von Unterwasserschall - Messungen bei Offshore-Rammarbeiten und neue Einsatzmöglichkeiten im Hafenaufbau. HTG-Kongress 2015, 09.-11.09.2015 in Bremen, Hafentechnische Gesellschaft e.V., S. 345-354

Gattermann, J.; Sychla, H.; Stein, P.; Wisner, G.; Degenhardt, J. (2015): Autarke, zerstörungsfreie Instrumentierung von Monopiles für die Einbringung durch Schlagammung. DFMRW-Windenergetagung 2015, Bremen, 5. März 2015

Kuhn, C.; Sychla, H.; Stein, P.; Bruns, B.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2014): Dynamic measurements of pile deflections as a source of underwater sound emissions during impact driving of offshore pile foundations. Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2014, Melbourne, 16.-19. November 2014

Stein, P.; Sychla, H.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2015a): Hydroschall- und Vibrationsmessungen beim Rammen von Monopfählen beim OWP Amrumbank West. Pfahl-Symposium 2015, Fachseminar am 19./20.02.2015 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 99, S. 205-223

Stein, P.; Sychla, H.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2015b): Measurements of hydrosound emissions and soil vibrations during monopile installation with combinations of independent noise mitigation systems. Conference on Wind energy and Wildlife impacts (CWW 2015), Berlin, March 10-12 2015

Stein, P.; Sychla, H.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2015c): Dämpfungswirkung von HSD und BBC bei der Rammung von Monopfählen beim OWP Amrumbank West. 41. Jahrestagung für Akustik, Nürnberg, 16.-19. März 2015

Stein, P.; Sychla, H.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2015d): Hydro sound emissions during impact driving of monopiles using Hydro Sound Dampers and Big Bubble Curtain. RAVE Offshore Wind R&D, Bremerhaven, 13.-14.10.2015

Sychla, H.; Stein, P.; Wisner, G.; Kuhn, C.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2015): Messwerterfassung ohne thermische und spannende Eingriffe in die Struktur gerammter Offshore-Pfähle. Pfahl-Symposium 2015, Fachseminar am 19./20.02.2015 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 99, S. 95-114

Wisner, G.; Stammen, E.; Dilger, K.; Sychla, H.; Stein, P.; Kornemann, C.; Gattermann, J. (2015): Adhesive bonding of measurement equipment on impact-driven offshore monopile foundations. Applied Adhesion Science, Vol. 3, 201

Wisner, G.; Stammen, E. (2015): Kleben von Sensorik an Fundamenten von Offshore-Windkraftanlagen. ifs-report, 10. Jahrgang, Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs), S. 6-9

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### I.5.1 Danksagung

Unser Dank gilt dem Fördermittelgeber für die Finanzierung der Arbeiten und dem Projektträger Jülich für die gute Zusammenarbeit bei allen administrativen Belangen des Vorhabens. Dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) verdanken wir die wertvollen Referenzmessungen. Die Messungen im OWP *Amrumbank West* wurden von der *E.ON Kraftwerke GmbH* und *E.ON Climate & Renewables GmbH* ermöglicht. Besonderer Dank gilt hier den Mitarbeitern in Hamburg, der Bauleitung in Cuxhaven sowie den Vertretern an Bord des Errichterschiffes, die uns bei der Vorbereitung der Messkampagnen unterstützten. Auch möchten wir uns bei den Mannschaften des Errichterschiffes *MPI Discovery* sowie der Messschiffe *Reykjanes* und *Arne Tiselius* bedanken, die uns bei der Durchführung der Messungen unterstützten. Unseren wissenschaftlichen Hilfskräften danken wir für die vielen Stunden, die sie in die Vorbereitung der Messtechnik und auch der Messung auf See investiert haben. Ohne diesen Einsatz wären derartige Vorhaben nicht möglich!

### I.5.2 Unterstützende Stellen

Das Forschungsvorhaben wurde maßgeblich von Mitarbeitern des IGB-TUBS bearbeitet. Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen kam jedoch an einigen Stellen des Vorhabens zustande:

- Zurverfügungstellung von Hydroschall-Messdaten des Baumonitorings durch die *Institut für technische und angewandte Physik GmbH (itap)* und die *Deutsche Windenergie-Institut GmbH (DEWI)*
- Ermöglichung der Messkampagnen im OWP *Amrumbank West* durch die *E.ON Kraftwerke GmbH*
- Unterstützung durch *E.ON Climate & Renewables GmbH* bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen im OWP *Amrumbank West*
- Beratungen im Rahmen des Vorhabens hinsichtlich der Durchführung und Auswertung der Hydroschallmessungen durch Herrn Dr. Michael Bellmann, *itap*

Zudem wurden Leistungen von Dritten in Anspruch genommen, die für die Durchführung des Vorhabens notwendig waren, jedoch in keinem Zusammenhang zum wissenschaftlichen Inhalt des Vorhabens stehen.

## II. Eingehende Darstellung des Forschungsvorhabens

### II.1 OWP Amrumbank West

#### II.1.1 Projektbeschreibung

Die Installation der Fundamente im OWP *Amrumbank West* wurde im Januar 2014 begonnen, nach einer längeren Unterbrechung von Mai bis August im September wieder aufgenommen und im März 2015 beendet. Der Windpark ist etwa 37 km westlich von Amrum und ungefähr 35 km nördlich von Helgoland in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) gelegen. Insgesamt umfasst er 80 WEA der 3,6 MW-Klasse.

Bei Wassertiefen von etwa 20 m wurden Monopfähle mit einem Durchmesser von 6 m und etwa 55 m Länge zur Gründung im sandigen Baugrund verwendet. Sowohl die Wassertiefen als auch die Baugrundverhältnisse sind als sehr gleichmäßig zu bewerten, was insbesondere den Vergleich von Hydroschallmessungen bei verschiedenen Pfahlrammungen erleichtert.

Als Errichterschiff kam die *MPI Discovery* zum Einsatz, die Pfähle wurden mit einem Hydraulikhammer vom Typ MHU 1900S der Fa. *Menck GmbH* gerammt. Die Installation der Gründungen wurde von der Fa. *MPI* übernommen.

In der deutschen AWZ spielt der Schallschutz bei Rammarbeiten eine wichtige Rolle. Bei dem gegebenen Pfahldurchmesser war ohne den Einsatz von Schallminderungssystemen mit Hydroschallemissionen von ca. 178 dB (SEL) zu rechnen, was sich in Referenzmessungen auch bestätigte. Die dadurch nötige Schallminderung von 18 dB (SEL) oder mehr ist von einem einzelnen System derzeit nicht verlässlich erzielbar. Aus diesem Grund wurde auf eine Kombination von zwei unterschiedlichen Schallminderungssystemen zurückgegriffen: HSD direkt am Pfahl und verschiedenen Konfigurationen Großer Blasenschleier in einiger Entfernung. Das HSD-System kam beim OWP *Amrumbank West* ab März 2014 zum Einsatz. Da das HSD-System vom Kran über den Pfahl gehoben werden musste, konnte es erst nach Erreichen einer ausreichenden Pfahleinbindung zum Einsatz kommen.

Nach einer Unterbrechung der Arbeiten der *MPI Discovery* wurden einige Fundamente durch die *HLV Svanen* mithilfe eines Rammhammers der Fa. *IHC* vom Typ S2000 installiert. Als pfahlnahes Schallminderungssystem kam dabei das Noise Mitigation Screen (NMS)-System der Fa. *IHC Merwede* zum Einsatz. Aufgrund der Schnittstellen mit dem Errichterschiff bei der Durchführung der Messungen im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden das NMS6500 sowie der eingesetzte Rammhammer S2000 im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht untersucht.

#### II.1.2 Baugrundverhältnisse und Gründungskonzept

Im Gebiet des OWP *Amrumbank West* stehen unter einer holozänen marinen Deckschicht mitteldicht bis sehr dichte gelagerte pleistozäne Sande an. Diese Fein- und Mittelsande haben z.T. kiesige oder schluffige Anteile und sind mit bindigen und kiesigen Horizonten geringer Mächtigkeit durchzogen. Die horizontale Verteilung des Baugrundes kann bis auf wenige Ausnahmen als homogen angesehen werden. Im Bereich des OWP *Amrumbank West* liegen keine Rinnen. Bei den Baugrunderkundungen mittels CPT wurden Spitzenwiderstände von über 110 MPa ermittelt [ACP, 2011].

Alle Anlagen sind auf Monopfählen mit einem Durchmesser von 6 m gegründet, die im oberen Bereich konisch auf 5,2 m zulaufen. Der Anschluss des Transition Piece ist über eine Ringflanschverbindung realisiert. Die Installation der Monopfähle erfolgte mittels Schlagrammung.

### II.1.3 Schallminderungskonzept

Zur Reduktion des Hydroschalls wurde zunächst ein doppelter Großer Blasenschleier der Fa. *Weyres* eingesetzt. Später kam ein einfacher Großer Blasenschleier der Fa. *HTL* hinzu, sodass mit insgesamt drei Blasenschleiern gearbeitet wurde. Nach Diederichs et al. [2014] haben mehrfache Blasenschleier insbesondere dann ein höheres Schalldämmmaß, wenn diese im Wasser voneinander getrennt sind. Dazu ist ein ausreichender Abstand der am Meeresgrund ausgelegten Schläuche erforderlich. Ob dies bei dem verwendeten DBBC der Fall war, kann nicht beurteilt werden. Nach einer Unterbrechung der Gründungsarbeiten und erfolgreicher Implementierung der pfahlnahen Minderungssysteme wurden diese in Kombination mit einem einfachen BBC der Fa. *HTL* eingesetzt.

Der von der Fa. *Weyres* eingesetzte Blasenschleier wird unter Druck (post-lay-Verfahren) verlegt, wenn das Errichterschiff in Position ist und der Beginn der Rammarbeiten bevorsteht. Aus diesem Grund muss ein Sicherheitsabstand zum Errichterschiff eingehalten werden, sodass der Blasenschleier im Oval um das Errichterschiff mit einem Abstand von ca. 70 m bis 200 m zum Pfahl ausgelegt wird. Der Blasenschleier der Fa. *HTL* wird im pre-lay-Verfahren eingesetzt, d.h. die Luftschläuche werden drucklos auf dem Boden abgelegt und der Einspeisepunkt mit einer Boje markiert und gesichert. Das Blasenschleier-Schiff kehrt an den Einspeisepunkt zurück, nachdem das Installationschiff in Position ist. Dies bedeutet, dass während des Verlegens des Druckluftschlauches kein Sicherheitsabstand zum Installationsschiff eingehalten werden muss.

Aufgrund der hohen zu erwartenden Hydroschallpegel bei den gegebenen Pfahldurchmessern und den in der deutschen AWZ gültigen Grenzwerten des Hydroschalls wurde ein einfacher oder mehrfacher Blasenschleier allein von der Genehmigungsbehörde nicht als ausreichend angesehen. Als Schallminderungssystem am Pfahl wurde das HSD-System ausgewählt, welches vergleichsweise wenig Platz an Deck benötigt und geringe zusätzliche Lasten für das Errichterschiff bedeutet. Infolge der zum Zeitpunkt der Berücksichtigung des HSD-Systems weit vorangeschrittenen Planungen konnte dieses nicht mehr optimal in den Bauablauf integriert werden. Besondere Herausforderungen bereitete die Vermeidung einer räumlichen und zeitlichen Kollision des Systems mit dem Pile-Gripper, welcher zum Führen der Pfähle während der Rammung eingesetzt wurde.

Die Pfähle wurden durch den Hauptkran gestellt und nach abschlagen desselben durch den Pile-Gripper horizontal gehalten. Der Rammhammer wurde ebenfalls durch den Hauptkran auf den Pfahlkopf gesetzt. Bis zum Erreichen der Eigenstandsicherheit bei einer Einbindung von ca. 16 m musste der Pile-Gripper geschlossen bleiben um während der Rammung ggf. die Neigung des Pfahles korrigieren zu können. Ein Anbau des HSD-Systems an den Pile-Gripper war aus statischen Gründen nicht möglich, ohne den auf horizontale Lasten ausgelegten Pile-Gripper grundlegend zu verändern. Das HSD-System musste daher ebenfalls durch den Hauptkran eingesetzt werden. Dies konnte erst nach dem Öffnen des Pile-Grippers geschehen, da die Ballast-Box am Pfahl zu Wasser gelassen werden musste. Eine Kollision zwischen HSD und Pile-Gripper wurde so durch eine zeitliche Aufteilung des Rammvorgangs in zwei Phasen ohne HSD (Phase 1) und mit HSD (Phase 2) vermieden. In der ersten Phase der Rammung ohne HSD wurden die Hydroschallemissionen durch Verringerung der Rammenergie gering gehalten. Zusätzlich wurde zu Beginn jeder Rammphase ein Soft-Start von je 10 Einzelschlägen mit geringer Rammenergie zur Vergrämung durchgeführt.

Das HSD-System wurde über eine achtarmige Traverse aufgenommen, an der in der Mitte der Rammhammer angeschlagen war. Die Ballast-Box wurde dann von acht Seilwinden auf dem Meeresboden abgelassen, das Netz spannt sich dabei im Wasser auf. Abbildung 20 zeigt links, wie das System über den Pfahl gehoben ist und zu Wasser gelassen wird, der Rammhammer schwebt über dem Pfahl. Rechts ist das System im Einsatz zu sehen.



**Abbildung 20: Einsatz des HSD-Systems beim OWP Amrumbank West [Bruns et al., 2014]**

Die Wirksamkeit des von der *HLV Svanen* eingesetzten IHC-NMS wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht untersucht. Eine Beschreibung des Systems erfolgt daher nicht.

## II.2 Messkonzept

### II.2.1 Untersuchungen im Gesamtsystem Pfahl-Boden-Wasser

Zur Untersuchung der Wellenausbreitung im Gesamtsystem Pfahl-Boden-Wasser wurden alle Ausbreitungsmedien instrumentiert. Die Monopfähle wurden mit axialen und tangentialen Dehnungsmessstreifen sowie axialen und radialen Beschleunigungssensoren zur Messung der Verformung des Pfahls infolge der in sich in axialer Richtung ausbreitenden Dehnwelle bestückt. Die Instrumentierung erfolgte in verschiedenen Messquerschnitten und Messachsen (vgl. Abschnitt II.2.2). Der Boden konnte lediglich an der Oberfläche instrumentiert werden. Geophone aus triaxialen Schwingungssensoren wurden zur Erfassung der Erschütterungen am Meeresboden in verschiedenen Entfernungen zum Pfahl eingesetzt (vgl. Abschnitt II.2.3). Der Hydroschall wurde mit Hydrophonen in verschiedenen Entfernungen und Wassertiefen erfasst (Abschnitt II.2.4).

Neben der Unterteilung der Messungen in die Medien Stahl, Boden und Wasser bzw. Systembestandteile Pfahl, Baugrund und Meerwasser kann eine logistische Unterteilung in Pfahlmessungen, Nahbereich und Fernbereich erfolgen. Die Pfahlmessungen mussten aus baubetrieblichen Gründen mittels eines autarken Messsystems erfolgen, welches vor Beginn der Arbeiten im Pfahl einzubauen und in Betrieb zu nehmen war. Die Bergung der Messwerterfassungseinheit (DAQ, data acquisition) erfolgte jeweils nach der Rammung über das Transition Piece (vgl. Abschnitt II.2.2.).

Als Nahbereichsmessungen werden die Messungen des Hydroschalls und der Bodenschwingungen bezeichnet, welche vom Errichterschiff aus durchgeführt wurden. Zum Absetzen von Hydrophon-Arrays und Geophonen wurden an festen Punkten auf dem Errichterschiff handbetriebenen Krane installiert. Die ballastierten Geophone wurden an einem Stahlseil zu Boden gelassen, die Hydrophone waren am Messkabel des Geophons befestigt, welches parallel abgelassen wurde. Zur Übertragung der Messdaten wurden Leitungen auf dem Schiff verlegt. Die Erfassung aller Messdaten erfolgte zentral an Deck des Schiffes. Alle Messlokationen befanden sich bei jeder Messung an der gleichen Stelle relativ zum Pfahl sowie zumeist innerhalb des Blasenschleiers (soweit ein BBC eingesetzt wird) (vgl. Abschnitt II.3.2).

Die Fernbereichsmessungen umfassen Hydrophone und Geophone mit autarker Datenerfassung, welche von einem separaten Messschiff außerhalb des Blasenschleiers ausgebracht wurden. Die Messlokationen wurden bei jedem Pfahl einzeln festgelegt, abhängig auch von den maritimen Randbedingungen (Wind, Tide) und Sicherheitsauflagen (Abstände zu Schiffen und Offshore-Bauwerken) (vgl. Abschnitt II.2.4). Dabei wurde jeweils eine Messlokation in 750 m Entfernung angestrebt. Zu den Fernbereichsmessungen können auch die im Rahmen des Baumonitorings in 750 m und 1.500 m Abstand zum Pfahl durchgeführten Messungen gezählt werden, welche im Rahmen des Forschungsvorhabens ausgewertet wurden.

Aufgrund der ovalen Form des Blasenschleiers und der exzentrischen Position des Pfahles konnten bei einigen Messungen Hydrophone und Geophone außerhalb des Blasenschleiers in ähnlicher Entfernung, aber unterschiedlicher Richtung wie die am weitesten entfernte Messlokation innerhalb des Blasenschleiers positioniert werden (ML145 und ML150, vgl. Abbildung 21).

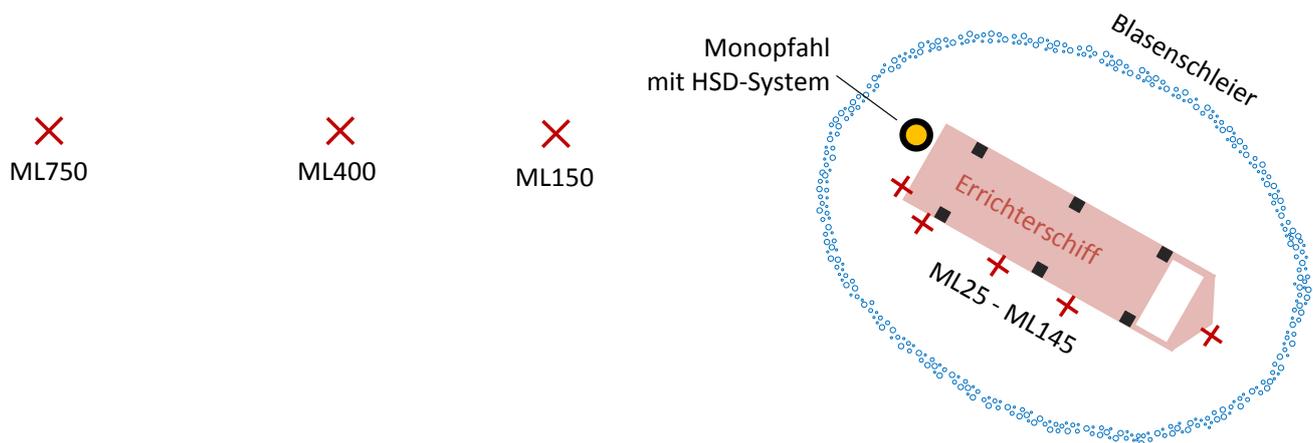


Abbildung 21: Anordnung der Messlokationen relativ zu Pfahl, Errichterschiff und Blasenschleier [vgl. Stein et al., 2015a]

Abbildung 22 zeigt den schematischen Aufbau des Messkonzeptes. Die Messlokationen (ML) sind entsprechend ihres Abstandes zum Pfahl in Metern benannt. ML25 bis ML145 sind dem Nahbereich zuzuordnen, ML150 und größer dem Fernbereich.

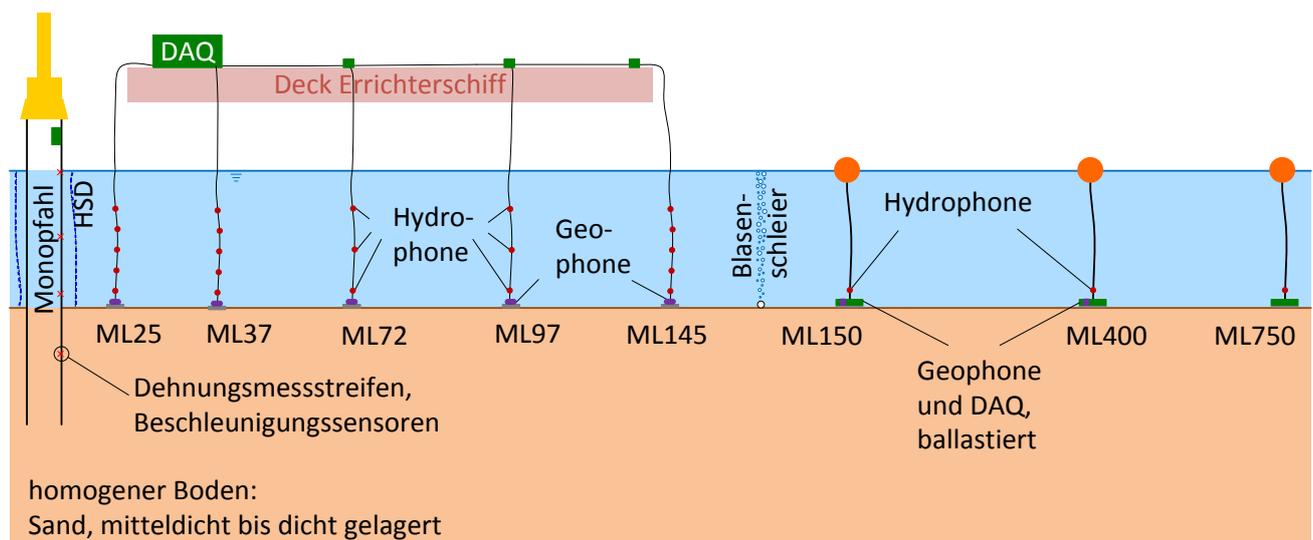


Abbildung 22: Messkonzept zur Untersuchung der Wellenausbreitung in Pfahl, Boden und Wasser [vgl. Stein et al., 2015a]

## II.2.2 Pfahlmessungen

Im Vorfeld der drei Messkampagnen wurde jeweils ein Pfahl mit Messtechnik bestückt. Da die Pfähle am Basishafen in Cuxhaven liegend gelagert wurden und nicht gedreht werden konnten, wurden sämtliche Sensoren bis auf wenige Ausnahmen entlang einer Hauptmessachse in der Sohle der liegenden Pfähle appliziert.

Das Messkonzept für die drei Pfähle sah vor, zunächst einen Pfahl so zu bestücken, dass Aussagen über das Gesamtverhalten des Pfahls während der Rammung möglich sind. Dafür wurden die Sensoren am ersten Pfahl (A22) relativ gleichmäßig über dessen Länge verteilt. Am zweiten Pfahl (A66) sollten die Charakteristiken der den Pfahl durchlaufenden Dehnwellen detaillierter untersucht werden. Hierzu wurden die Dehnungsmessstreifen und Beschleunigungssensoren in kurzen Abständen im unteren Bereich des Pfahls angebracht, um in diesem Bereich eine hohe Auflösung der mess-

technischen Erfassung der Dehnwellen zu erreichen. Hierbei lagen sämtliche Messebenen vor Rammbeginn über dem Meeresboden, während nach Beendigung der Rammung sämtliche Messebenen im Bereich der Einbindung lagen. Das Messkonzept für den dritten Pfahl (A44) wurde zunächst offen gelassen, um die Anordnung der Messgeber entsprechend der Ergebnisse der ersten beiden Messkampagnen gezielt vornehmen zu können. Aufgrund von fehlerhaften Messungen bei der ersten Messkampagne (Übersteuerung der Beschleunigungssensoren, vgl. II.3.6) wurde entschieden, diese Messkonfiguration zu wiederholen [Sychla et al., 2015]. Abbildung 23 zeigt die Anordnung der Messstellen bei den drei instrumentierten Pfählen.

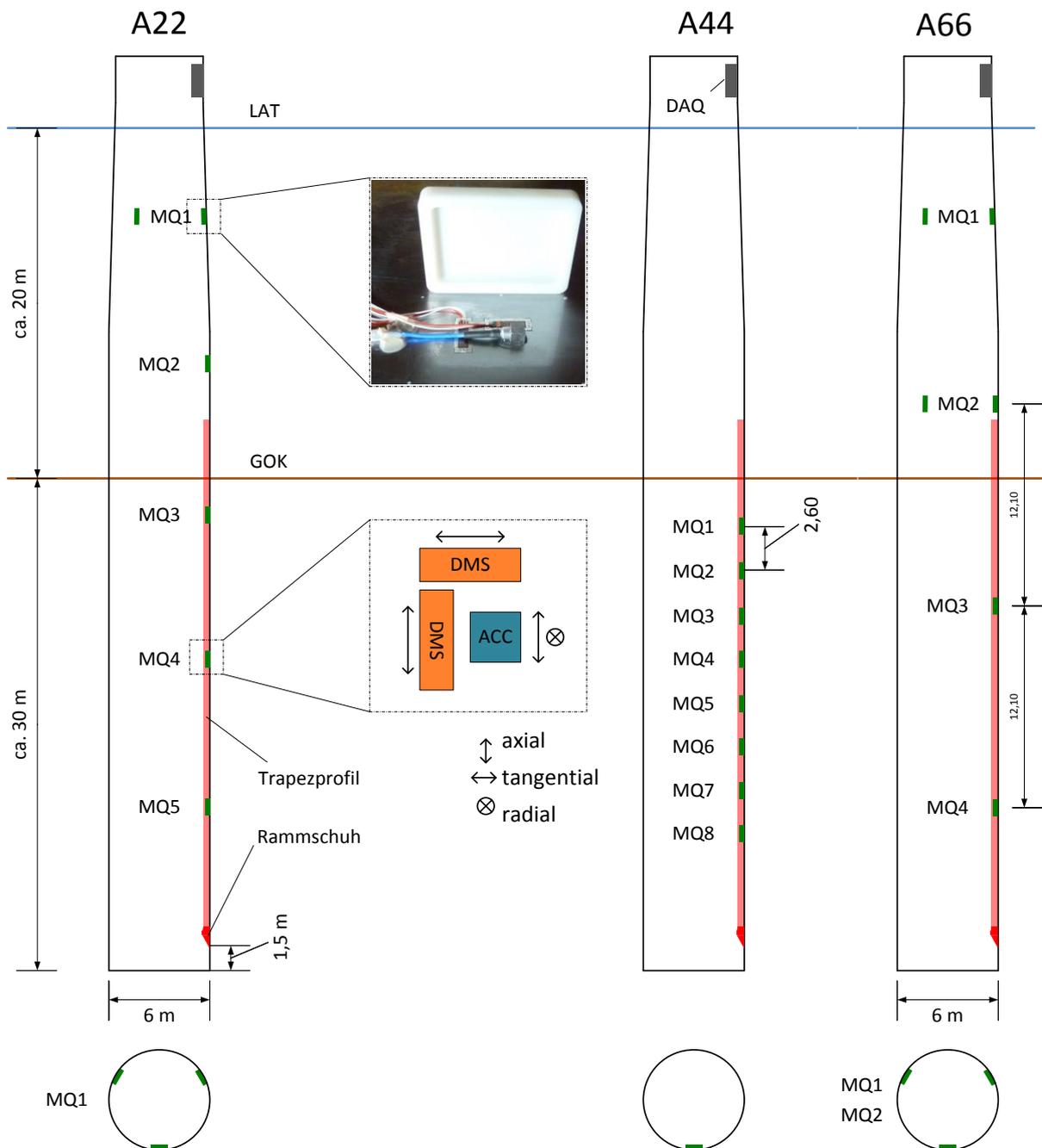


Abbildung 23: Instrumentierung der Monopfähle [vgl. Sychla et al., 2015]

Zusätzlich zu den Messungen am Pfahl konnten an den Pfählen A22 und A66 je ein Beschleunigungssensor in der Datenerfassungseinheit bzw. auf der Platte zur Aufhängung der Messwertefas-

sung angebracht werden, um das Verhalten der Aufhängung und der Klebung zu untersuchen. In der folgenden Tabelle 2 sind die Abstände der Messquerschnitte zum Pfahlkopf ( $\Delta L$ ) für die instrumentierten Pfähle angegeben:

**Tabelle 2: Lage der Messquerschnitte bei den Pfahlmessungen**

	A22		A44		A66	
	$\Delta L$ [m]	Bemerkungen	$\Delta L$ [m]	Bemerkungen	$\Delta L$ [m]	Bemerkungen
MQ0	1,00	ACC in der Messbox	--		1,00	ACC auf geklebter Platte
MQ1	9,60	axiale Messungen in Drittelpunkten	28,15		9,25	axiale Messungen in Drittelpunkten
MQ2	18,45		30,75		21,00	axiale Messungen in Drittelpunkten
MQ3	27,50		33,35		33,00	
MQ4	36,15		35,95		45,00	
MQ5	45,00		38,55		--	
MQ6	--		41,15		--	
MQ7	--		43,75		--	
MQ8	--		46,35		--	
Pfahl-fuß	54,80		55,45		54,75	

$\Delta L$ : Abstand zum Pfahlkopf

Die für die Pfahlmessungen eingesetzte Messtechnik ist in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt:

**Tabelle 3: Spezifikationen der Pfahl-Messtechnik**

Sensor	Typ	Hersteller	Spezifikationen
Beschleunigungssensor triaxial (MK1)	356A01	PCB	$\pm 1.000$ g 2 .. 8.000 Hz
Beschleunigungssensor uniaxial (MK1)	352C23	PCB	$\pm 1.000$ g 2 .. 10.000 Hz
Beschleunigungssensor triaxial (MK2+3)	350B50	PCB	$\pm 10.000$ g 3 .. 10.000 Hz (Schock-Filter)
Beschleunigungssensor uniaxial (MK2+3)	350B04	PCB	$\pm 5.000$ g 0,4 .. 10.000 Hz (Schock-Filter)
Dehnungsmessstreifen	LWK	Vishay	350 Ohm k = 2
Datenerfassung	DEWE43	DEWEsoft	10 kHz (MK1) .. 20 kHz (MK2+3) 24 bit

Am Pfahl waren für das Vorhaben jegliche Schweißarbeiten ausgeschlossen, da dies die primäre Struktur des Stahles beeinflusst hätte. Dies stellte insbesondere für die Anbringung des Sensor-

schutzes im Boden sowie für die Befestigung der Messwerterfassung eine große Herausforderung dar.

Um spanende und thermische Verfahren bei der Applikation der Sensoren, der Sensorkapselung, des Kabelschutzes und der Aufhängung für die Messwerterfassung zu vermeiden, wurden am Institut für Füge- und Schweißtechnik (*ifs*) Versuche mit einem speziell für diese Zwecke ausgewählten Klebstoff und den verschiedenen zum Einsatz kommenden Materialien durchgeführt. Dabei wurden die Festigkeit und die Verarbeitbarkeit des Klebstoffes sowie dessen Unbedenklichkeit beim Einsatz auf der Beschichtung im oberen Bereich der Pfähle nachgewiesen.

Zur Übertragung der dynamischen Bewegungen und Verformungen des Pfahles wurden die Beschleunigungssensoren mit einem dünnen, starren Klebstoff appliziert. Die Dehnungsmessstreifen wurden punktgeschweißt. Sämtliche Sensoren wurden gekapselt (vgl. Abbildung 24).



**Abbildung 24: Applizierte Dehnungs- und Beschleunigungssensoren (links), Einhausung der Sensoren (Mitte), und fertig gekapselte Messstelle (rechts)**

Sensorkabel, Schutzprofile und die Aufhängung der Datenerfassung sollten möglichst geringe dynamische Beanspruchungen erfahren. Diese Bauteile wurden mit einem elastischen Dickschichtklebstoff befestigt (vgl. Abbildung 25). Die Applikation der Messtechnik mittels Klebetechnik ist in Abschnitt II.3.4 dargestellt. Ergebnisse der Laborversuche sind in Anhang A sowie in Wisner et al. [2015] zusammengestellt.

Zur Applikation der Messtechnik im Pfahl waren umfangreiche Vorbereitungen nötig, insbesondere zur Herstellung eines geeigneten Untergrundes für den Klebstoff sowie zur Sicherstellung geeigneter Umweltbedingungen beim Aushärten des Klebstoffes. Der Pfahl musste in der Sohle auf nahezu ganzer Länge blank geschliffen werden. Im Pfahl sowie für das Pfahlmaterial musste eine Mindesttemperatur von ca. 10°C über einen Zeitraum von zwei Wochen sichergestellt werden.

Nach Vorbereitung der Pfahloberfläche wurden Dehnungsmessstreifen und Beschleunigungssensoren appliziert sowie Sensorkapselungen und Messkabel verklebt. Im Anschluss wurden im unteren Bereich die Messkabel sowie die gekapselten Sensoren mit Trapezprofilen für das Eindringen in den Boden bei der Rammung geschützt. Am Pfahlkopf wurde eine Platte mit Aufnahme für die autarke Messwerterfassung vollflächig verklebt.



Abbildung 25: geklebter Rammschuh (links), Schutzprofil und Kabelstrang (Mitte), Zugentlastung und Aufhängung für die Datenerfassung (rechts)

Zur Aufzeichnung der Messdaten im Pfahl wurde ein Messwerterfassungssystem konfiguriert und samt Stromversorgung in einem wasserdichten Gehäuse verbaut (s. Abbildung 26).



Abbildung 26: autarke Messwerterfassungseinheit im Labor des IGB-TUBS (links) und im Pfahl kurz vor der Rammung (rechts)

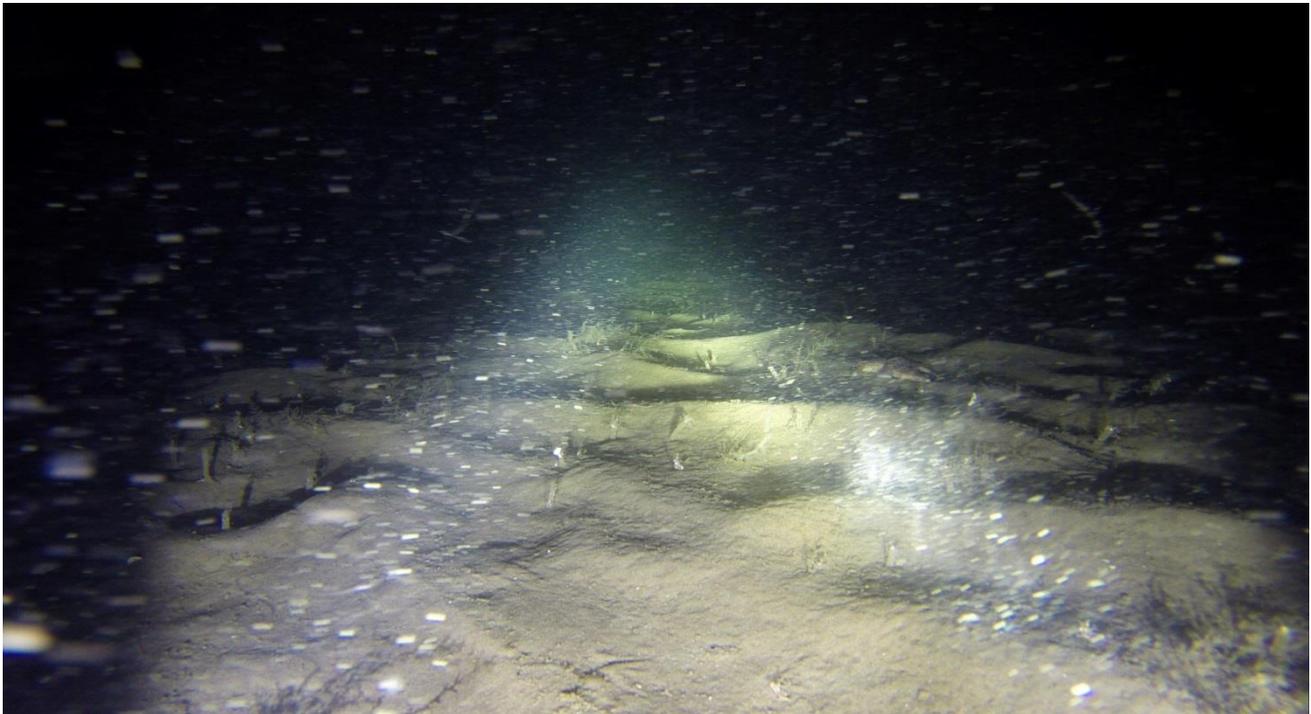
Die Applikation der Messtechnik und der Schutzprofile erfolgte durch Mitarbeiter des *IGB-TUBS* am Offshore-Terminal Cuxhaven mit Unterstützung der Bauleitung vor Ort. Zur Vorbereitung und Abstimmung der Arbeiten wurden im Vorfeld entsprechende Verfahrensbeschreibungen verfasst und nach den Erfahrungen mit dem ersten instrumentierten Pfahl angepasst.

### II.2.3 Seismische Messungen

Zur Messung der Erschütterungen am Boden wurden Geophone auf dem Meeresboden abgesetzt. Es handelt sich hierbei um triaxiale Sensoren, welche die Schwinggeschwindigkeit des Sediments in orthogonalen Richtungen erfassen. Hierzu ist eine gute Ankopplung an das Sediment erforderlich, welche durch eine Montage auf Stahlplatten sichergestellt wurde.

Die ballastierten Geophone wurden vom Errichterschiff bzw. vom Messschiff aus zu Boden gelassen. Aufgrund der Ballastplatten und des ebenen Untergrundes kann davon ausgegangen werden, dass die Geophone eben auf dem Meeresboden zu stehen kamen und die vertikale Messrichtung

korrekt ausgerichtet war. Abbildung 27 zeigt die Ansicht des Meeresbodens, aufgenommen von der Ballastplatte an einem der Geophone im Nahbereich. Die im Fernbereich eingesetzten Geophone verfügen zudem über eine kardanische Lagerung, die zeitgesteuert ausgelöst wird und eine Schwerkraftgesteuerte Ausrichtung der vertikalen Achse ermöglicht. Eine Ausrichtung der horizontalen Achsen bezüglich der Orientierung zum Pfahl war nicht möglich.



**Abbildung 27: Meeresboden aufgenommen an ML25 während der Rammung von Pfahl A66**

Im Nah- und Fernbereich wurden verschiedene Geophone und Datenerfassungseinheiten eingesetzt (vgl. Tabelle 4). Die ballastierten Geophone stellten jeweils den unteren Fixpunkt für die Hydrophonketten (Nahbereich) bzw. den Anker für die Hydrophone (Fernbereich) dar. Im Fernbereich kam eine kombinierte Datenerfassung für Hydrophone und Geophone zum Einsatz.

**Tabelle 4: Messtechnik zur Untersuchung der Bodenschwingungen**

	<b>Nahbereich</b>	<b>Fernbereich</b>
Messlokationen	ML25 - ML145	ML150 - ML1500
Geophon	MST-1031	SM-6 (B coil)
Hersteller	Walesch	I/O Sensor
Frequenzbereich	2 .. 160 Hz	10 .. 10.000 Hz
Max. Schwinggeschwindigkeit	100 mm/s	80 mm/s
Datenerfassung (Hardware)	SCXI-1300	OBS.Vault
Hersteller	National Instruments	develogic
Auflösung	16 bit	32 bit
Samplingfrequenz	10 kHz	2 kHz
Software	LabView	

Bei jeder Messung wurden alle Geophone im Nahbereich zu Boden gelassen. Eine Aufstellung der Lokationen der ausgebrachten Messsysteme im Fernbereich ist in Tabelle 7 gegeben. Die Messlokationen mit Geophon sind jeweils mit einem <sup>(G)</sup> gekennzeichnet.

## II.2.4 Hydroschallmessungen

Wie oben erläutert wurden die Hydroschallmessungen im Nahbereich von Bord des Errichterschiffes und im Fernbereich von einem separaten Messschiff aus durchgeführt. Die Messlokationen fielen mit denen der Geophonmessungen zusammen.

Die eingesetzte Messtechnik ist in Tabelle 5 aufgeführt. Wie auch bei den Geophonmessungen wurden im Nah- und Fernbereich unterschiedliche Systeme verwendet.

**Tabelle 5: Messtechnik zur Untersuchung des Hydroschalls**

	<b>Nahbereich</b>	<b>Fernbereich</b>
Messlokationen	ML25 - ML145	ML150 - ML1500
Hydrophone	Typ 8103, Typ 8104	TC4037
Hersteller	Brüel & Kjær	Reson
Frequenzbereich	0.1 Hz .. 20 kHz	1 Hz .. 50 kHz
Signalverstärker/Ladungswandler	NEXUS	
Hersteller	Brüel & Kjær	
Datenerfassung (Hardware)	LAN-XI	Sono.Vault
Hersteller	Brüel & Kjær	develogic
Software	Pulse	
Auflösung	24 bit	16 bit
Samplingfrequenz	65.536 Hz	48 kHz

Im Nahbereich wurden Hydrophon-Arrays bestehend aus drei bis fünf Hydrophonen in Höhen von 1 m bis 17 m über Grund abgelassen. Eine Aufstellung der Konfiguration der unterschiedlichen Hydrophon-Arrays bei den einzelnen Messkampagnen ist in Tabelle 6 gegeben.

**Tabelle 6: Übersicht der Hydrophon-Arrays bei den verschiedenen Messkampagnen**

Messlokation	Entfernung zum Pfahl	Anordnung Hydrophone [m ü.G.]	
		MK1	MK2+3
ML25	25 m	1, 5, 9, 13, 17	1, 5, 9, 13, 17
ML37	37 m	1, 5, 9, 13, 17	1, 9, 17
ML72	72 m	1, 9, 17	1, 9, 17
ML97	97 m	1, 9, 17	1, 9, 17
ML145	145 m	1, 5, 9, 13, 17	1, 5, 9, 13, 17

Im Fernbereich kam jeweils nur ein Hydrophon zum Einsatz, welches zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls 1 m über Grund positioniert wurde. Die Messlokationen variierten wie oben erläutert. Tabelle 7 zeigt eine Übersicht aller im Rahmen des Vorhabens durchgeführten und ausgewerteten

Hydroschallmessungen im Fernbereich. Dies beinhaltet auch die Messungen des Bauminitorings, deren Rohdaten dem Vorhaben zur Verfügung gestellt wurden.

Die Messungen im Rahmen des Bauminitorings wurden entsprechend BSH-Standard (StUK4) durchgeführt. Nähere Angaben zu diesen Messungen sind den entsprechenden Berichten [DEWI, 2014a b c; itap, 2014a b c] zu entnehmen. Die vom *IGB-TUBS* im Fernbereich durchgeführten Messungen wurden in Anlehnung an StUK4 durchgeführt. Die Höhenlage der Hydrophone im Fernbereich wird auf 1 m ü.G. festgelegt, um Wechselwirkungen mit der Wellenausbreitung im Boden besser erfassen zu können.

## II.2.5 Weitere Messungen

Zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit im Wasser ist bei Hydroschallmessungen eine Bestimmung der Temperatur und der Salinität des Meerwassers über die Tiefe durchzuführen. Hierzu wurde eine CTD-Sonde verwendet.

Die Lage der Luftschläuche des Blasenschleiers wurde vom Verlegeschiff während des Ausbringens per GPS bestimmt und aufgezeichnet. Da die Luftblasen beim Aufsteigen verdriften, sollten die an der Wasseroberfläche ankommenden Blasen aus der Luft fotografiert werden. Hierzu sollte eine ferngesteuerte Drohne mit Kamera eingesetzt werden (s. Abbildung 28).



**Abbildung 28: Testflug der ferngesteuerten Drohne über dem Universitätsgelände**

## II.3 Messkampagnen

### II.3.1 Zeitlicher Ablauf der Messkampagnen

Anfang April 2014 wurde die Sensorik für Pfahlmessungen in Cuxhaven im Monopfahl A22 appliziert. Vom 3. bis 9. Mai 2014 fand die erste Offshore-Messkampagne (MK1) statt, bei der u.a. der bestückte Pfahl A22 installiert wurde.

Im Anschluss fand eine Sichtung und Vorauswertung der Daten statt. Einige Erkenntnisse führten zu Umplanungen für die folgenden Messkampagnen (vgl. Abschnitt II.3.6). Durch eine Unterbrechung der Arbeiten im Projekt *Amrumbank West*, deren Dauer zunächst unbekannt war, konnten die konkreten Vorbereitungen der folgenden Messkampagnen zunächst nur soweit durchgeführt werden, wie es der Kenntnisstand zuließ. Dabei wurden u.a. die sich aus den Erkenntnissen aus MK1 notwendigen Änderungen der Messtechnik umgesetzt.

Im September 2014 wurden zwei weitere Monopfähle (A66 und A44) in Cuxhaven bestückt. Vom 2. bis 18. Oktober 2014 wurden zwei aufeinanderfolgende Ausfahrten im Rahmen weiterer Messkampagnen (MK2+3) messtechnisch begleitet, wobei auch die instrumentierten Pfähle eingebracht wurden.

**Tabelle 7: Übersicht der realisierten Messlokationen im Fernbereich**

MK	Pfahl	Datum	Schallminderungssysteme	Nahbereich	Messlokationen		Pfahlmessungen
					Fernbereich IGB-TUBS	Fernbereich Baumonitoring	
MK1	A24	04.05.2014	DBBC + BBC + HSD	25..150 m	500 m <sup>(G)</sup> 800 m <sup>(G)</sup> 1500 m	756 m 1503 m (DEWI)	--
	A23	06.05.2014	BBC + HSD	25..150 m	250 m <sup>(G)</sup> 800 m <sup>(G)</sup> 1500 m	756 m 1503 m (DEWI)	--
	A22	08.05.2014	DBBC + BBC + HSD	25..150 m	250 m <sup>(G)</sup> 750 m <sup>(G)</sup> 1500 m	756 m 1503 m (DEWI)	ja
MK2+3	A44	03.10.2014	BBC + HSD	25..150 m	150 m <sup>(G)</sup> 300 m	739 m 1662 m (itap)	ja
	A32	12.10.2014	BBC + HSD	25..150 m	Keine	766 m (itap)	--
	A77	15.10.2014	BBC	25..150 m	150 m <sup>(G)</sup> 400 m <sup>(G)</sup> 750 m	737 m, 744 m 1489 m, 1505 m (itap)	--
	A66	16.10.2014	ohne	25..150 m	150 m <sup>(G)</sup> * 400 m <sup>(G)</sup> * 750 m *	742 m, 760 m 1502 m, 1524 m (itap)	Ja
	A20	17.10.2014	HSD	25..150 m	150 m <sup>(G)</sup> 400 m <sup>(G)</sup> 750 m	769 m 1504 m, 1506 m (itap)	--

<sup>(G)</sup> Messlokationen im Fernbereich, an denen auch Geophone ausgebracht wurden (vgl. II.2.3)

\* bei Pfahl A66 übersteuerten die Geophone im Fernbereich sowie das Hydrophon in 750 m Entfernung

Bei den drei Pfählen der letzten Ausfahrt (MK3) konnten nach Abstimmung zwischen dem Projekt und der Genehmigungsbehörde Referenzmessungen mit jeweils nur einem Schallminderungssystem (HSD oder BBC) sowie ganz ohne Schallminderungsmaßnahmen durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine Beurteilung der Wirkungsweise der einzelnen Schallminderungsmaßnahmen und damit auch eine bessere Bewertung des kombinierten Einsatzes. Begleitend zu den Referenzmessungen wurde außerdem der Umfang des Bauminitorings von je einer auf je zwei Messlokalationen in 750 m und 1500 m erhöht.

Eine Zusammenstellung der bei allen Messkampagnen installierten Pfähle, untersuchten Schallminderungskonfigurationen und aufgezeichneter Messdaten ist in Tabelle 7 zusammengestellt.

### II.3.2 Vorbereitung der Messungen vom Installationsschiff

Für die Durchführung der Messungen im Nahbereich waren handbetriebene Krane zum Ablassen der ballastierten Geophone sowie fest installierte Mess- und Datenkabel zur zentralen Erfassung der Messdaten erforderlich. Während der Mobilisierung des Installationsschiffes in Cuxhaven wurden die vorgesehenen Positionen der Messlokalationen und der zentralen Datenerfassung mit den Verantwortlichen des Errichterschiffes abgestimmt. Abbildung 29 zeigt die Anordnung der Messlokalationen an Deck der *MPI Discovery*.

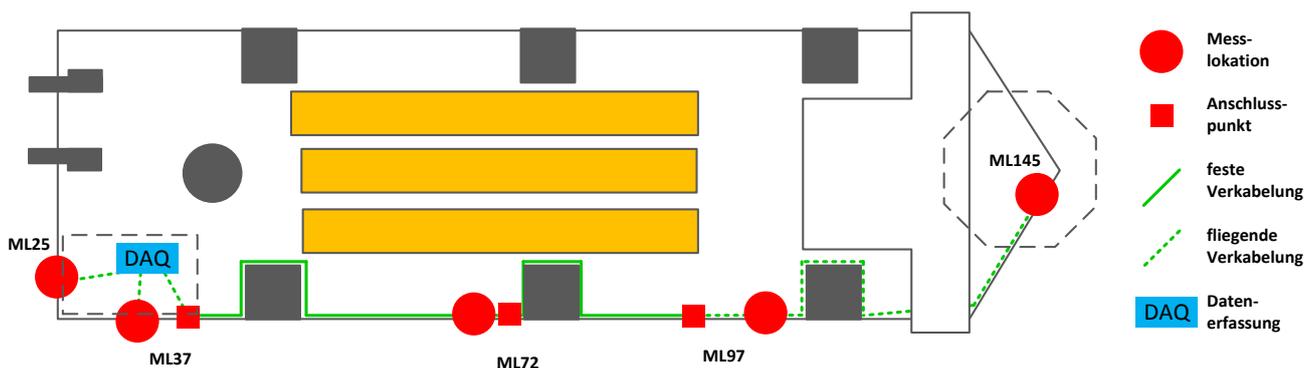


Abbildung 29: Messlokalationen (ML), Datenerfassung (DAQ) und Verkabelung an Deck des Installationsschiffes

Von den Mitarbeitern des *IGB-TUBS* wurden Datenleitungen und Anschlussboxen zwischen und an den vorgesehenen Positionen installiert. Aufnahmen für die handbetriebenen Krane wurden an Deck verschweißt. Abbildung 30 zeigt links einen Handkran und rechts ein Geophon nach der Bergung.



Abbildung 30: Krane zum Ablassen der Geophone (links) und Geophon nach der Bergung (rechts)

Messtechnik und Messdatenerfassung wurden einsatzbereit zusammengestellt und offshoretauglich verpackt (vgl. Abbildung 31). Die Geräte wurden bei jeder Ausfahrt an Bord verstaut und im Vorfeld jeder Messung ausgebracht, angeschlossen und aktiviert.



Abbildung 31: zentrale Messwerterfassung an Deck des Errichterschiffes (links) und Messequipment an den einzelnen Messloktionen (rechts)

### II.3.3 Messungen im Fernbereich

Wie in Abschnitt II.2.1 beschrieben, wurden im Fernbereich autarke, kombinierte Messsysteme bestehend aus Geophon, Hydrophon und Datenerfassungseinheit eingesetzt (vgl. Abbildung 32).

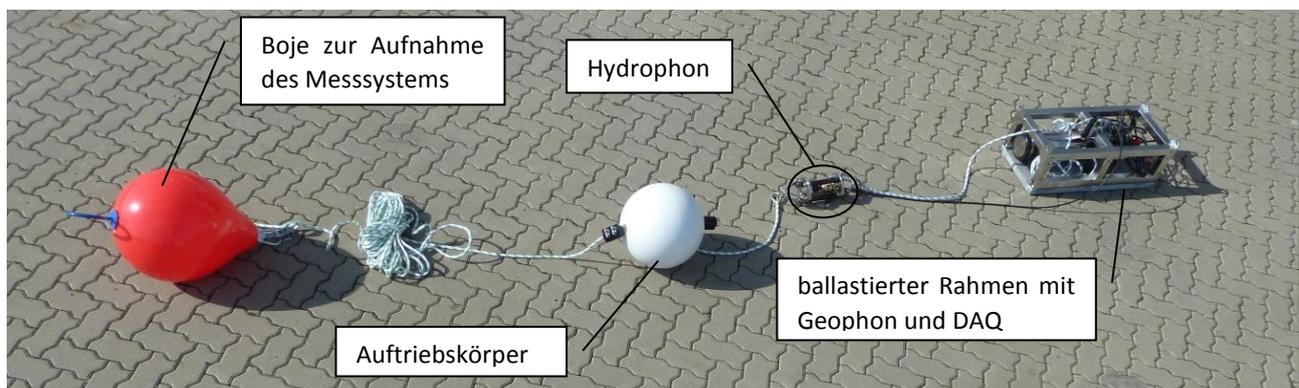


Abbildung 32: autarkes Messsystem zur Erfassung von Hydroschall und Bodenschwingungen im Fernbereich

Zur Ausbringung der Messsysteme im Fernbereich wurde ein eigenes Messschiff gechartert. Anforderungen an das Schiff wurden zum einen hinsichtlich des Handlings der Messsysteme und andererseits hinsichtlich der Manövrierfähigkeit und der Einhaltung maritimer Sicherheitsauflagen im Baufeld gestellt. Zum Einsatz kam während MK1 die *Reykjanes* (Abbildung 33, links) und während MK2+3 die *Arne Tiselius* (Abbildung 33, rechts). Beide Schiffe verfügen über eine Winsch und einen Kran zum Ausbringen der schwer ballastierten Geophone. Die Positionen der Messsysteme wurden im Baufeld mit Bojen, Radarreflektoren und Blinklichtern markiert (Abbildung 33, unten).



**Abbildung 33: Messschiffe Reykjanes (links) und Arne Tiselius (rechts) beim Bergen der Messsysteme**

Die Messschiffe sind hinsichtlich der Ausfallsicherheit der Manövriersysteme als DP1-Schiffe klassifiziert. Für einen uneingeschränkten Zugang zum Sicherheitsbereich des Installationsschiffes (Abstand < 500 m) wäre ein DP2-Schiff nötig gewesen. Derartige Schiffe werden z.B. zur Verlegung der Blasenschleier eingesetzt. Im Budget des Forschungsvorhabens war es nicht möglich und erschien auch nicht sinnvoll, ein derartiges Schiff einzusetzen. Um einzelne Messsysteme dennoch möglichst nah am Installationsschiff abzusetzen, wurden die Messlokationen so gewählt, dass im Fall einer Havarie des Messschiffes dieses durch Wind und Tide vom Installationsschiff weggetrieben worden wäre, um eine Kollision der Schiffe zu vermeiden. Dies erforderte eine gute Abstimmung zwischen der Brücke des Installationsschiffes, dem Messschiff und den verantwortlichen Mitarbeitern. Die Einzelheiten wurden im Vorfeld der Messkampagnen zwischen den Beteiligten abgestimmt und in einer Verfahrensbeschreibung festgehalten.

Weitere Einschränkungen bei der Festlegung der Messlokationen im Fernbereich waren durch Sicherheitsabstände zu schon installierten Fundamenten, den Routen der Seekabel und den Messsystemen des Baumonitorings gegeben. Dabei sollte in jedem Fall eine Messlokation in oder nahe der für die Einhaltung der Grenzwerte des Hydroschalls maßgeblichen Entfernung von 750 m zum Pfahl

realisiert werden. Die weiteren Messlokationen im Fernbereich sollten nach Möglichkeit in der gleichen Richtung zum Pfahl angeordnet werden. Die unter diesen Randbedingungen gewählten Messlokationen sind beispielhaft für die Pfähle A23 und A20 in der folgenden Abbildung 34 dargestellt. Abbildungen mit den Messlokationen an allen Pfählen finden sich in Anhang C. Ebenfalls enthalten sind die Messlokationen im Nahbereich und die Messlokationen des Baumonitorings (blau, soweit verfügbar).

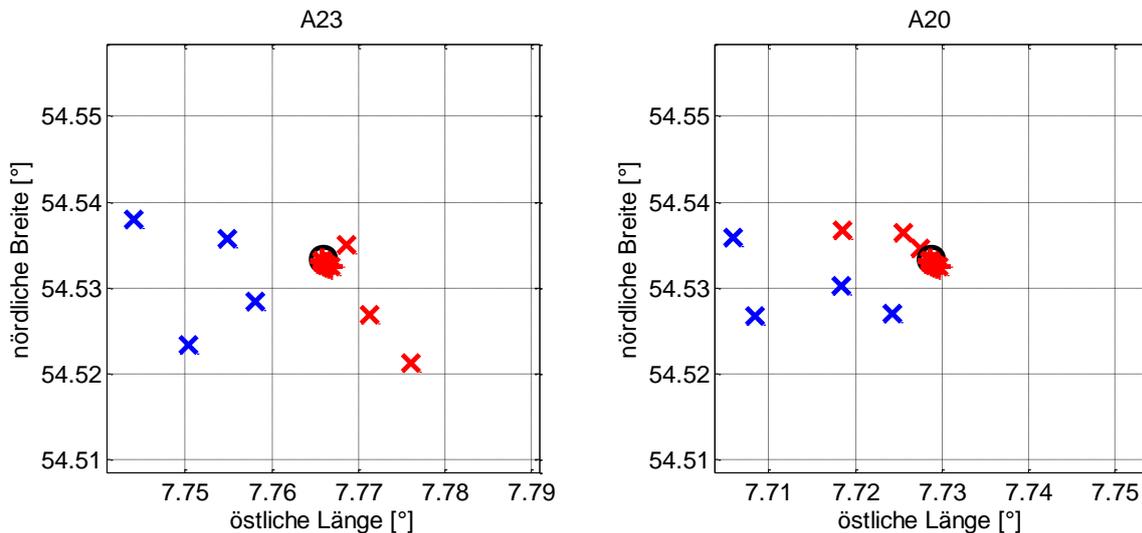


Abbildung 34: Messlokationen des IGB-TUBS (rot) und des Baumonitorings (blau) an den Pfählen A23 (links) und A20 (rechts)

Der Pfahl ist jeweils in der Mitte des Kartenausschnitts gelegen. Die Messlokationen im Nahbereich sind durch die Ausrichtung des Errichterschiffes festgelegt, welches bei jedem der untersuchten Pfähle in Richtung 130° (Süd-Ost) ausgerichtet war.

Die Ausbringung der Messsysteme erfolgte jeweils wenige Stunden vor Beginn der Rammung unter Berücksichtigung der weiteren Tätigkeiten im Baufeld und ggf. der Tidephase. Entsprechendes gilt für die Bergung der Systeme nach Ende der Rammung. Vor Ausbringen wurden die Systeme aktiviert und mit der GPS-Zeit synchronisiert. Unmittelbar nach der Bergung wurden die Messdaten ausgelesen und gesichtet.

### II.3.4 Instrumentierung der Pfähle

Die Instrumentierung des ersten Pfahles (A22) war für das Frühjahr 2014 geplant. Aufgrund der in dieser Jahreszeit zu erwartenden niedrigen Temperaturen und der Anforderungen des Klebstoffes an die Umgebungstemperaturen und die Temperatur des Substrates (= Monopfahl; vgl. II.2.2) wurde eine Temperierung des Pfahles und des Pfahlinneren vorgesehen. Hierzu wurde der Pfahl vorn und hinten mit Planen verschlossen. Eine Öl-Heizung sowie eine Induktionsheizung wurden gemietet.



Abbildung 35: Verschluss des Monopfahles am Fuß mit Einlass für die Ölheizung (links) und Induktionsheizung (rechts)

Die Applikation der Messtechnik, Kabel, Schutzprofile und Aufhängung für die Messwerterfassungseinheit erfolgte entsprechend der Ausführungen in Abschnitt II.2.2.

Die Instrumentierungen der Pfähle A44 und A66 wurde aufgrund des verzögerten Projektverlaufs im Sommer durchgeführt. Eine gezielte Temperierung des Stahls im Bereich jedweder Klebeflächen war aufgrund der auch nachts herrschenden höheren Temperaturen nicht notwendig. Auf ein Verschließen der Pfähle und Beheizen des Pfahlinneren konnte ebenfalls verzichtet werden, sodass eine bessere Durchlüftung während der Arbeiten in den Pfählen erreicht werden konnte. Dies machte sich insbesondere bei den Schleifarbeiten und der damit verbundenen Staubentwicklung bemerkbar.

Zum Erreichen der Messstellen in den Drittelpunkten im oberen Messquerschnitt musste im Pfahl ein Gerüst errichtet werden.

### II.3.5 Durchführung MK1

Während der Installation der Fundamente A24, A23 und A22 im OWP *Amrumbank West* waren vier Mitarbeiter des IGB-TUBS an Bord des Errichtungsschiffes *MPI Discovery* sowie zwei weitere Mitarbeiter an Bord des Messschiffes *Reykjanes* im Baufeld.

Von Bord des Errichtungsschiffes *MPI Discovery* wurden Hydroschall- und Bodenerschütterungsmessungen im Nahbereich der Rammung wie oben beschrieben durchgeführt. Zudem wurde hier der Einsatz des Messschiffes mit den übrigen im Baufeld operierenden Schiffen (v.a. Blasenschleierschiffe) koordiniert. Vor der Rammung des instrumentierten Pfahles A22 wurde die Messbox im Pfahl installiert und angeschlossen. Nach Beendigung der Rammung konnte sie unversehrt über das Transition Piece (TP) geborgen werden (s. Abbildung 36).



Abbildung 36: Bergung der Messbox im Pfahl A22 (links) sowie Messbox nach Rammung an Pfahl A66 (rechts)

Von Bord des Messschiffes wurden vor und nach der Rammung aller drei Pfähle je drei Messsysteme zur Messung von Hydroschall und Bodenschwingungen im Fernbereich des Pfahles ausgebracht und wieder geborgen.

### II.3.6 Erfahrungen aus MK1 und Folgen für MK2+3

Bei der Sichtung der Beschleunigungssignale des ersten Pfahls konnte bei nahezu allen Schlägen ein großer niederfrequenter Anteil identifiziert werden (vgl. Abbildung 37), welcher bei dynamischen Pfahlprobelastungen unüblich für derartige Signale ist. Eine Ausnahme stellten wenige frühe Schläge mit geringer Rammenergie sowie spätere Schläge von Sensoren, welche bereits im Boden eingebunden waren, dar.

Die folgende Abbildung 37 zeigt die aus den gemessenen Beschleunigungen durch Integration ermittelten Geschwindigkeiten in axialer Richtung am Kopf (MQ1) von Pfahl A22 gegen Ende der Rammung (Schlag 4000).

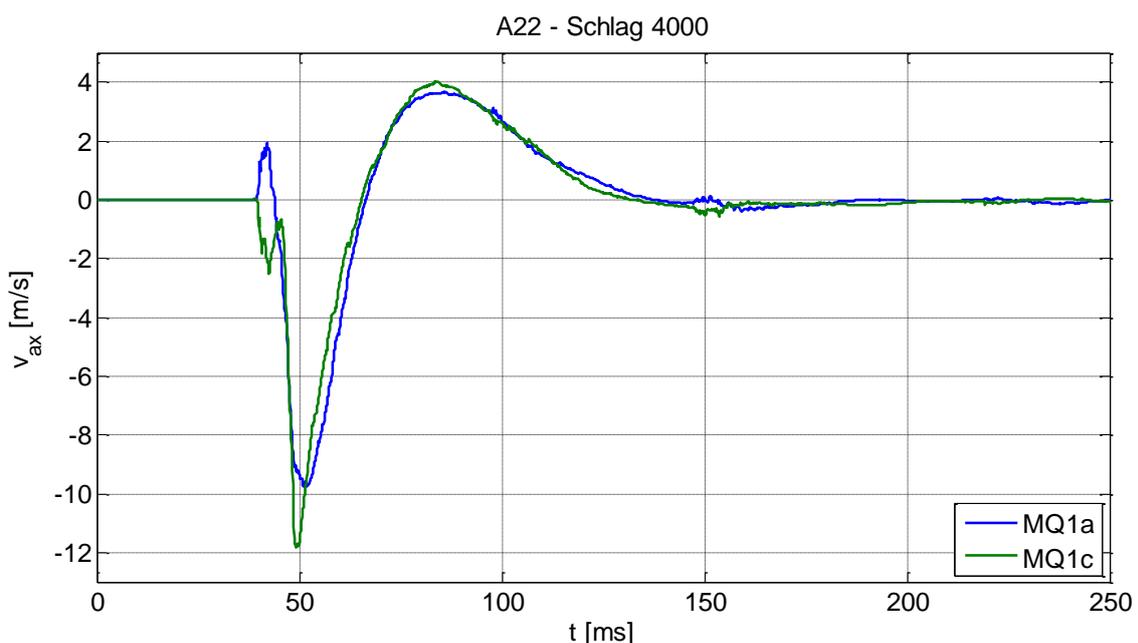


Abbildung 37: integrierte gemessene Beschleunigungen an Pfahl A22 in MQ1 bei Schlag 4000

Die beiden Beschleunigungssensoren (MQ1a, MQ1b) waren in entgegengesetzten Richtungen montiert. Dies ist an den entgegengesetzten, hochfrequenten Ausschlägen bei ca. 45 ms und 150 ms gut erkennbar. Der gleichgerichtete, langwellige Ausschlag ist nicht auf eine Bewegung des Pfahles, sondern auf ein elektrisches Übersteuern der Sensoren zurückzuführen.

In Absprache mit dem Lieferanten wurde entschieden, für die folgenden Messkampagnen einen Sensor mit größerem Messbereich und elektronischem Filter gegen hochfrequente Schwingungsanteile zu verwenden. Bei der Sichtung der Pfahldaten aus MK2+3 stellte sich diese Maßnahme als erfolgreich heraus (vgl. Abbildung 38).

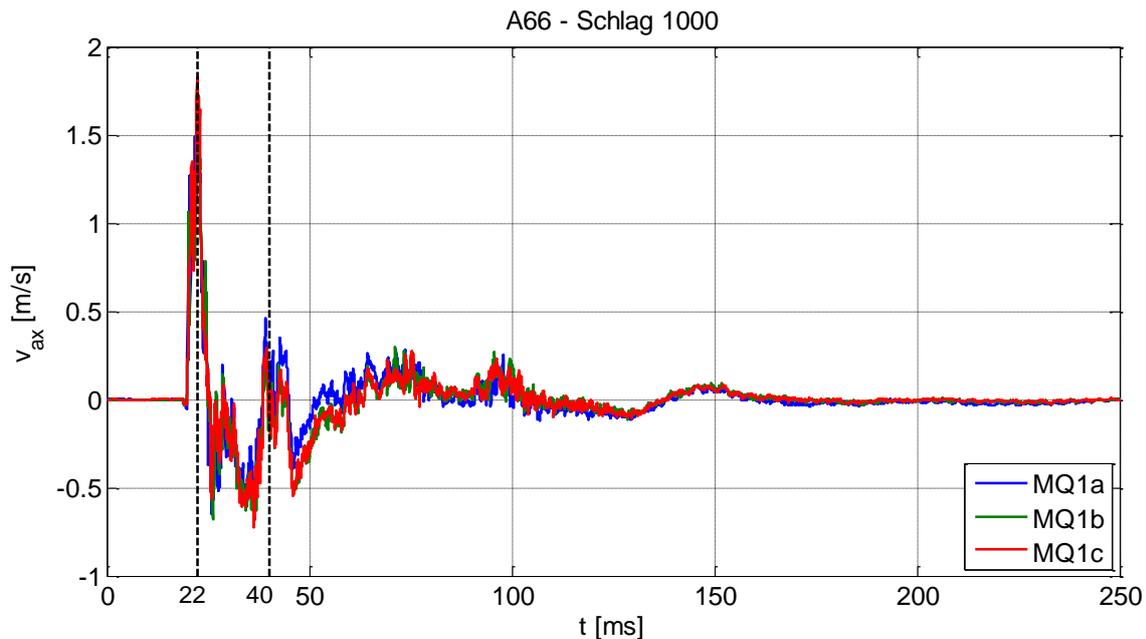


Abbildung 38: integrierte gemessene Beschleunigungen an Pfahl A66 in MQ1 bei Schlag 4000

Die drei Sensoren in Messquerschnitt 1 zeigen einen übereinstimmenden Verlauf mit einem Einleitungsimpuls bei ca. 22 ms und einem Fußreflex bei ca. 40 ms.

### II.3.7 Durchführung MK2+3

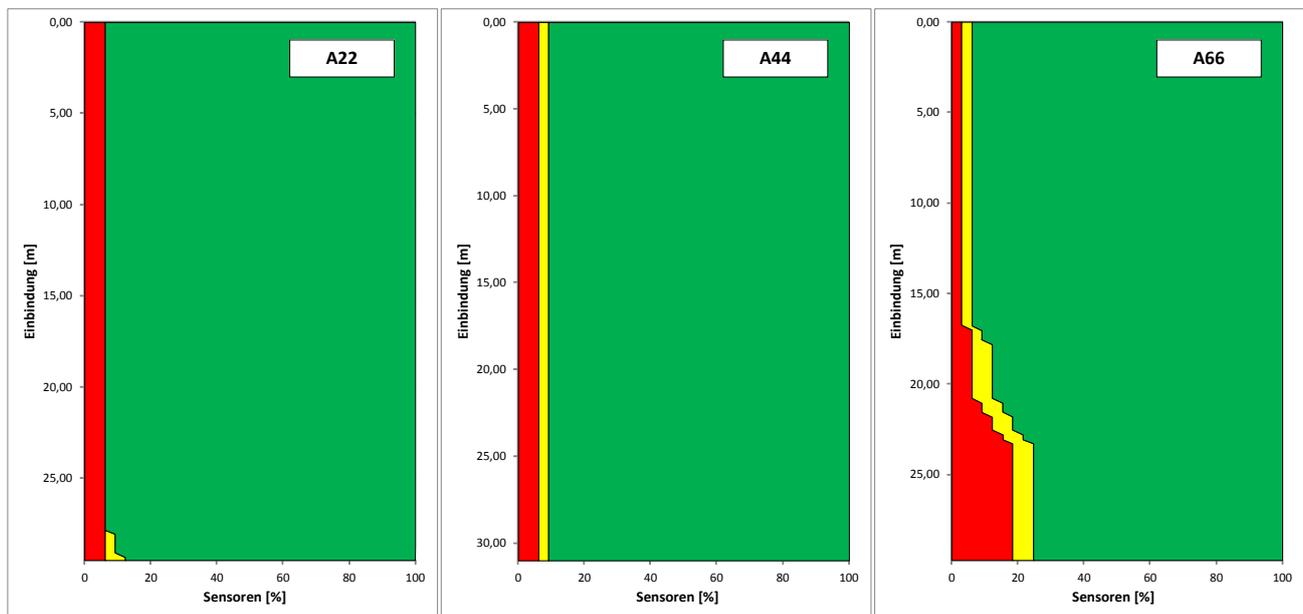
Nach Wiederaufnahme der Installationsarbeiten durch das Errichterschiff *MPI Discovery* wurden die zweite und dritte Ausfahrt messtechnisch begleitet. Dabei waren vier Mitarbeiter des *IGB-TUBS* an Bord des Errichterschiffes und ein weiterer Mitarbeiter an Bord des Messschiffes *Arne Tiselius* anwesend. Der grundsätzliche Ablauf sowie die Aufgabenverteilung entsprachen MK1.

Beim Pfahl A44 kam es durch technische und organisatorische Schwierigkeiten mit dem Messschiff zu einem Ausfall der Fernfeldmessungen des *IGB-TUBS*. Nach Installation des zweiten Pfahles wurde das Errichterschiff in den Hafen verlegt um zwei weitere Fundamente aufzunehmen, darunter auch der letzte im Rahmen des Forschungsvorhaben instrumentierte. Aus diesem Grund konnte während MK2+3 insgesamt nur die Installation von fünf Monopfählen messtechnisch begleitet werden. Bis auf den Ausfall einzelner Sensoren im Fernbereich und am Pfahl verliefen die Messungen reibungslos.

### II.3.8 Funktionalität der geklebten Messtechnik im Pfahl

Die Instrumentierung von Rammpfählen mittels Klebtechnik stellt im Bereich dynamischer Probelastungen Neuland dar. Zudem kommt bei der Installation von Monopfählen besonders schweres Rammgerät zum Einsatz. Aus diesem Grund war nicht mit Sicherheit davon auszugehen, dass die Messungen im Pfahl über den gesamten Verlauf der Rammungen erfolgreich sein würden. Tatsächlich konnte die Messwerterfassungseinheit bei allen Pfählen erfolgreich geborgen werden. Die Klebung der Aufhängung stellte sich als geeignet heraus [Wisner et al., 2015].

Über etwaige Schäden an den Messkabeln oder Sensoren, insbesondere im Bereich der Einbindung der Pfähle in den Boden, sind nur indirekte Aussagen möglich. Diese erfolgen auf Grundlage der gemessenen Signale in den einzelnen Messquerschnitten. Abbildung 39 zeigt die Funktionstüchtigkeit aller applizierten Sensoren über die Rammtiefe auf.



**Abbildung 39: Funktionsfähige (grün) und ausgefallene (rot) Sensoren während der Rammung der Pfähle A22 (links), A44 (Mitte) und A66 (rechts)**

Funktionsfähige Sensoren sind grün dargestellt, Sensoren, die keine brauchbaren Daten lieferten, rot. Sensoren mit nicht-plausiblen Messdaten sind gelb markiert. Es sind geringe Ausfälle während der Rammung zu verzeichnen. Bei Sensoren, die schon zu Beginn der Rammung keine plausiblen Daten liefern, muss von einem Fehler bei der Instrumentierung ausgegangen werden. Bei Sensoren, die während der Rammung ausfallen, kann der Grund in einem Versagen der Klebung des Sensor- oder Kabelschutzes oder der Kabel bestehen.

### II.3.9 Beobachtungen der Lage der Hydrophone

Wie in Abschnitt II.1.3 beschrieben, wurden die Blasenschleier in verschiedenen Verfahren ausgebracht. Beim kombinierten Einsatz von BBC und DBBC stellte der zuerst ausgebrachte Blasenschleier der Fa. HTL den inneren Blasenschleier dar. Dieser verlief bei einigen Pfählen unterhalb des Er richterschiffes (s. Abbildung 40)

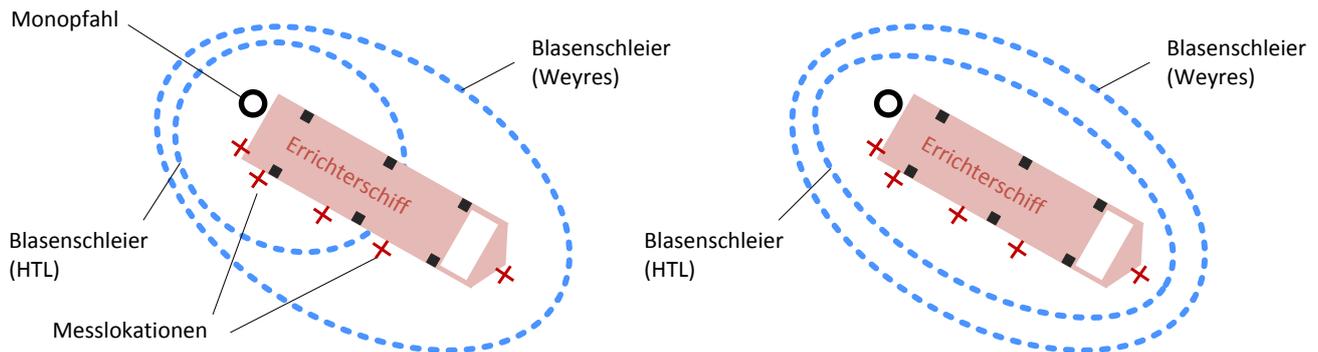


Abbildung 40: Lage der Blasenschleier bei Pfahl A24 (links) und A22 (rechts)

Bei der Durchführung der Hydroschallmessungen im Nahbereich von Bord des Errichterschiffes konnten die Luftblasen der Blasenschleier beobachtet werden. Dabei fiel auf, dass einige Messlokationen im Nahbereich nicht immer innerhalb des Blasenschleiers lagen:

- Bei Pfahl A24 befanden sich die Hydrophone an ML72 und ML97 direkt in den Luftblasen des inneren (einfachen) Blasenschleiers.
- Bei Pfahl A32 befanden sich die Hydrophone an ML97 und ML145 in Phase 1 zeitweise außerhalb des Blasenschleiers.
- Bei Pfahl A77 befanden sich die Hydrophone an ML145 außerhalb des Blasenschleiers.

Zudem wurde beobachtet, dass an einigen Stellen des Blasenschleiers, insbesondere auf der vom Einspeisepunkt abgewandten Seite des Errichterschiffes, weniger Blasen aufstiegen als an anderen Stellen. Eine genauere Untersuchung mittels der Flugdrohne war nicht möglich, da die Windverhältnisse einen Flug nicht zuließen.

Außerdem wurden die Hydrophone an ML97 im Schatten eines der Beine des Errichterschiffes abgesetzt (s. Abbildung 41). Bei den diesen Sensoren ist von einer Verschattung auszugehen.

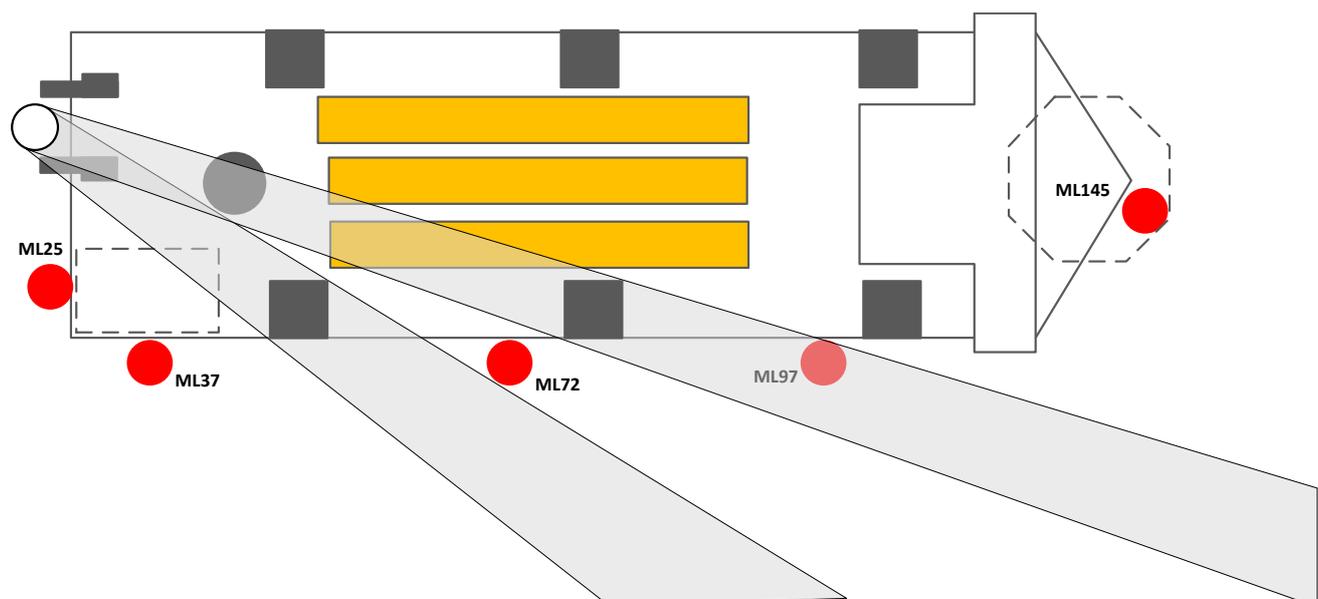


Abbildung 41: Verschattung von ML97 durch eines der Beine des Errichterschiffes

## II.4 Auswertung der Messdaten

### II.4.1 Übersicht der gewonnenen Daten

Wie in Abschnitt II.2 dargestellt ist, wurden mit unterschiedlichen Systemen verschiedene Messgrößen erfasst. Eine wirkliche Synchronität konnte dabei nur für die vom Errichterschiff ausgebrachten Systeme erzielt werden. Neben den eigenen Messdaten wurden dem Vorhaben auch die Hydro-schallmessungen des Baumonitorings (*DEWI* und *itap*) für die untersuchten Pfähle sowie die Rammprotokolle des Rammhammers (*Menck*) zur Verfügung gestellt.

Zur Beschreibung der Vorgänge bei der Pfahlrammung werden verschiedene Größen (z.B. der SEL) für jeden Rammschlag ermittelt. Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der bei der Aufbereitung der Daten detektierten Rammschläge mit den verschiedenen Messsystemen bei den untersuchten Pfahlrammungen. Es zeigt sich, dass die Schlagzahl bei verschiedenen Messsystemen variiert. Gründe können sein, dass einzelne Schläge nicht detektiert werden oder Störgeräusche als Schlag erkannt werden. Im Vergleich zur Gesamtzahl der Schläge können die Abweichungen als gering bezeichnet und bei einer statistischen Auswertung der Daten als nicht maßgebend angesehen werden.

**Tabelle 8: Anzahl detektierter Schläge mit verschiedenen Messsystemen**

Pfahl	Wassertiefe [m]	Einbindung [m]	Länge [m]	Rammprotokoll	Pfahlmessungen	Schläge [-]		
						Hydrophone (nah)	Hydrophon 750 m (IGB-TUBS)	Hydrophon 750 m (Baumonitoring)
A24	19,90	28,50	52,90	3131	--	3158	3162	3140
A23	20,00	28,25	52,75	4118	--	4118	4030	4115
A22	20,80	29,50	54,80	4244	4244	4242	4238	4242
A44	21,20	29,75	55,45	6658	6658	6660	6635*	6660
A32	22,40	29,75	56,65	8215	--	8198	--	8212
A77	20,70	28,50	53,70	5526	--	5524	6031	6031
A66	21,00	29,25	54,75	4347	4384	4384	4344	4384
A20	22,20	29,50	56,20	5903	--	6029	5974	6031

\* Anzahl detektierter Schläge bei ML300, da ML750 nicht aufgezeichnet hat (vgl. II.3.7)

### II.4.2 CTD-Sondenmessung

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Messungen zur Beschreibung der Wellenausbreitung wurde mittels einer CTD-Sonde das Geschwindigkeitsprofil im Wasser untersucht. Wie Abbildung 42 am Beispiel des Standortes von Pfahl A23 zeigt, herrschte eine konstante Schallgeschwindigkeit über die Wassertiefe. Dies ist auf eine gute Durchmischung des Wasserkörpers zurückzuführen, wie sie in Anbetracht der Gezeiten üblich ist.

Weitere Messungen sind in Anhang K zu finden. Während MK1 betrug die Schallgeschwindigkeit ca. 1487 m/s und während MK2+3 ca. 1508 m/s. Grund für Unterschiede sind die Jahreszeitlichen Schwankungen infolge der Wassertemperatur.

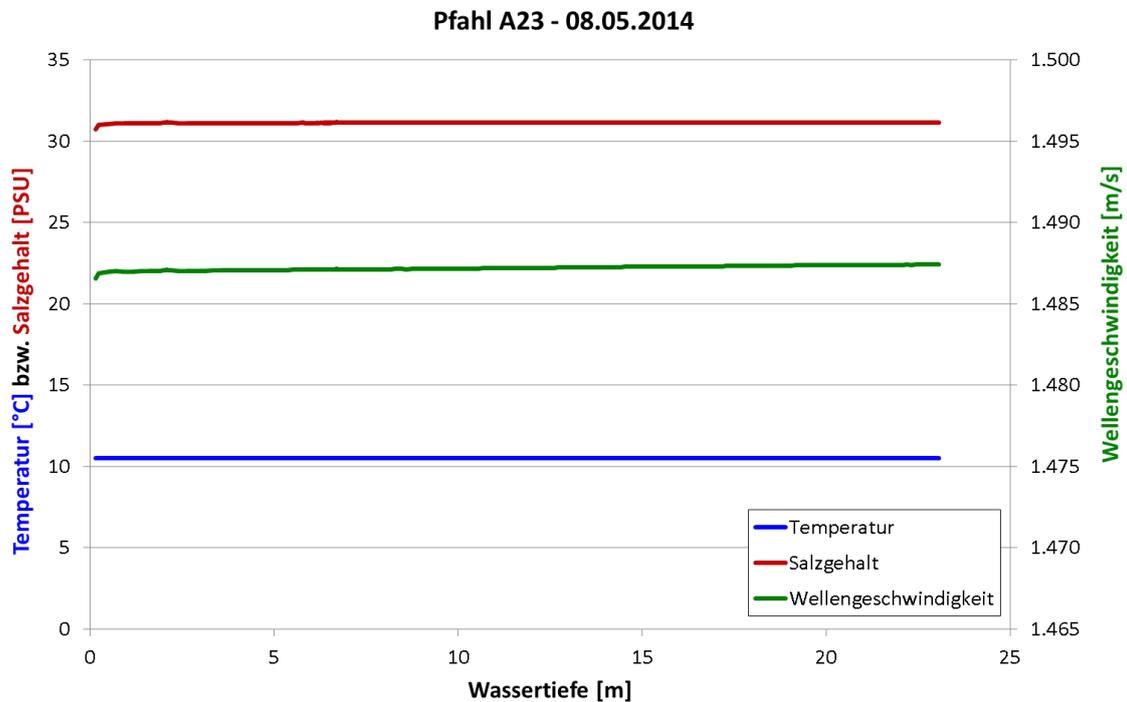


Abbildung 42: Ergebnis der CTD-Sondenmessung bei Pfahl A23 mit Temperatur (blau), Salzgehalt (rot) und Schallgeschwindigkeit im Wasser (grün) über die Wassersäule

### II.4.3 Auswertung der Rammprotokolle

Die von der Fa. *Menck* zur Verfügung gestellten Rammprotokolle enthalten die Schlagenergie sowie die Hitzten (Schläge pro 25 cm Eindringung). Abbildung 43 zeigt die Rammenergie und die Eindringung über die Rammung beispielhaft für den Pfahl A22. Die übrigen Rammprotokolle sind in Anhang J dargestellt.

Um einen gleichmäßigen Rammfortschritt zu erreichen, wurde die Rammenergie mit fortschreitender Einbindung sukzessive erhöht. Es zeigen sich verschiedene Energieniveaus von ca. 200 kJ, 390 kJ, 570 kJ, 760 kJ, 950 kJ und 1140 kJ. Zur Begrenzung der Hydroschallemissionen wurde im Verlauf der Arbeiten beim OWP *Amrumbank West* die zulässige Rammenergie auf 1140 kJ limitiert.

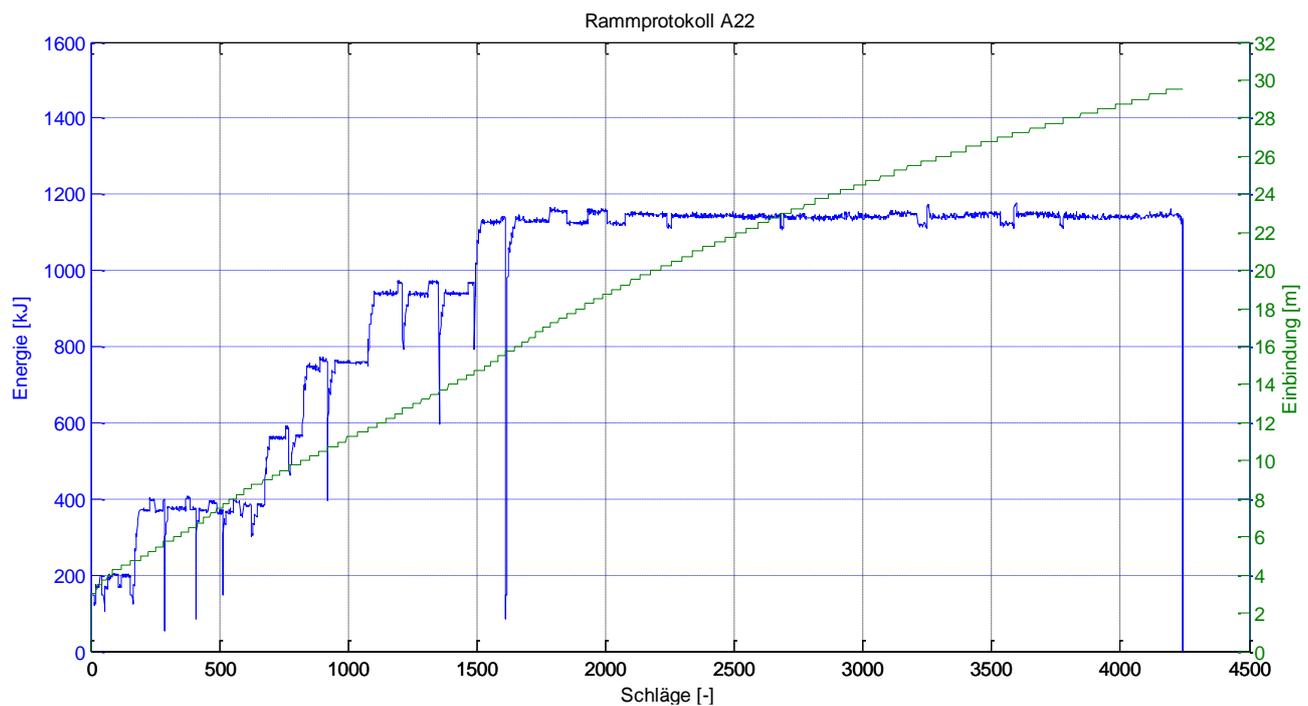


Abbildung 43: Rammenergie (blau) und Pfahl-Einbindung (grün) über den Verlauf der Rammung des Pfahles A22

Die Einbindung von einigen Metern bei Schlag 0 ist auf die Eindringung des Pfahles infolge seines Eigengewichtes nach dem Stellen (self penetration) zurückzuführen. Bei ungefähr Schlag 1600 und einer Einbindung von ca. 16 m wurde im vorliegenden Fall die Rammung für den Einsatz des HSD-Systems unterbrochen.

Die Rammprotokolle wurden herangezogen, um beim Vergleich der Hydroschallpegel an verschiedenen Pfählen mit unterschiedlichen Schallminderungssystemen den Einfluss der Rammenergie auszuschließen (vgl. Abschnitt II.4.6).

#### II.4.4 Auswertung der Pfahlmessungen

Aus den über die gesamte Rammdauer aufgezeichneten Messdaten am Pfahl wurden zunächst die einzelnen Schläge separiert. Dazu wurden jeweils die Ausschläge des Beschleunigungssensors in axialer Richtung an Messquerschnitt (MQ) 1 detektiert. In einem Fenster von 400 Millisekunden um die so ermittelten Zeitpunkte wurden die Signale aller Sensoren an jedem Messquerschnitt ausgeschnitten. Aus den Beschleunigungsdaten wurden durch Integration nach Gleichung (26) Zeit-Geschwindigkeits-Verläufe berechnet. Die Zeit-Dehnungs-Verläufe wurden mittels eines Tiefpassfilters von Störsignalen befreit. Abbildung 44 zeigt oben ein Beschleunigungs- und das daraus ermittelte Geschwindigkeitssignal sowie unten den zugehörigen Dehnungsverlauf als Rohsignal und als gefiltertes Signal.

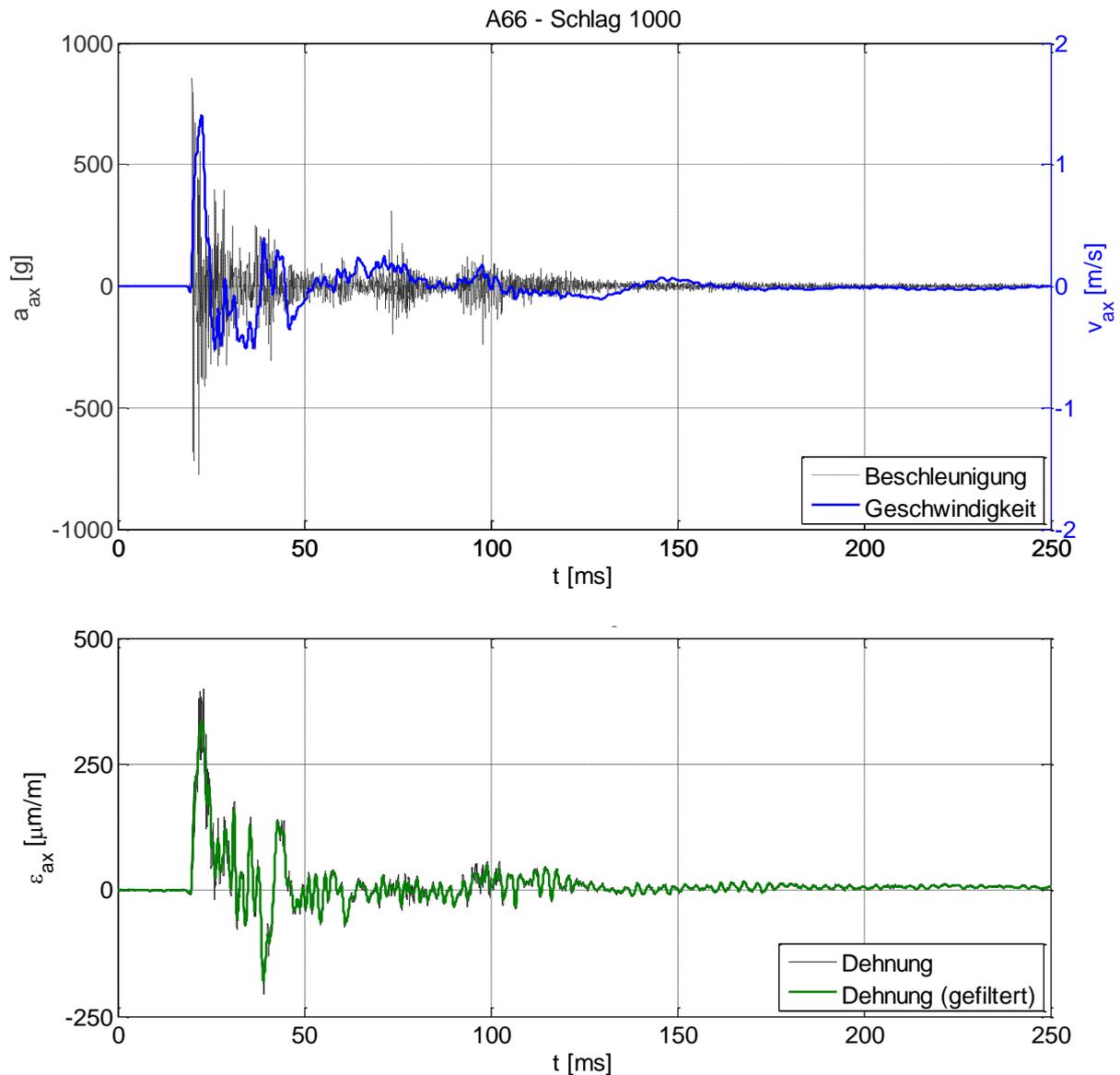


Abbildung 44: gemessene Beschleunigungen und integrierte Geschwindigkeiten (oben) sowie gemessene und gefilterte Dehnungen (unten) an Pfahl A66

Aus den Geschwindigkeits- und Dehnungsverläufen wurden nach den Gleichungen (27) und (28) über die Impedanz und die Dehnsteifigkeit Kraft-Zeit-Verläufe ermittelt (vgl. Abbildung 45). Diese wiederum dienen als Grundlage zur Berechnung des Rammwiderstands nach Gleichung (30) und der tatsächlich in den Pfahl eingeleiteten Energie nach Gleichung (32). Zum Vergleich der axialen und radialen dynamischen Vorgänge am Pfahl werden die Zeit-Dehnungs- sowie die Zeit-Geschwindigkeits-Verläufe herangezogen.

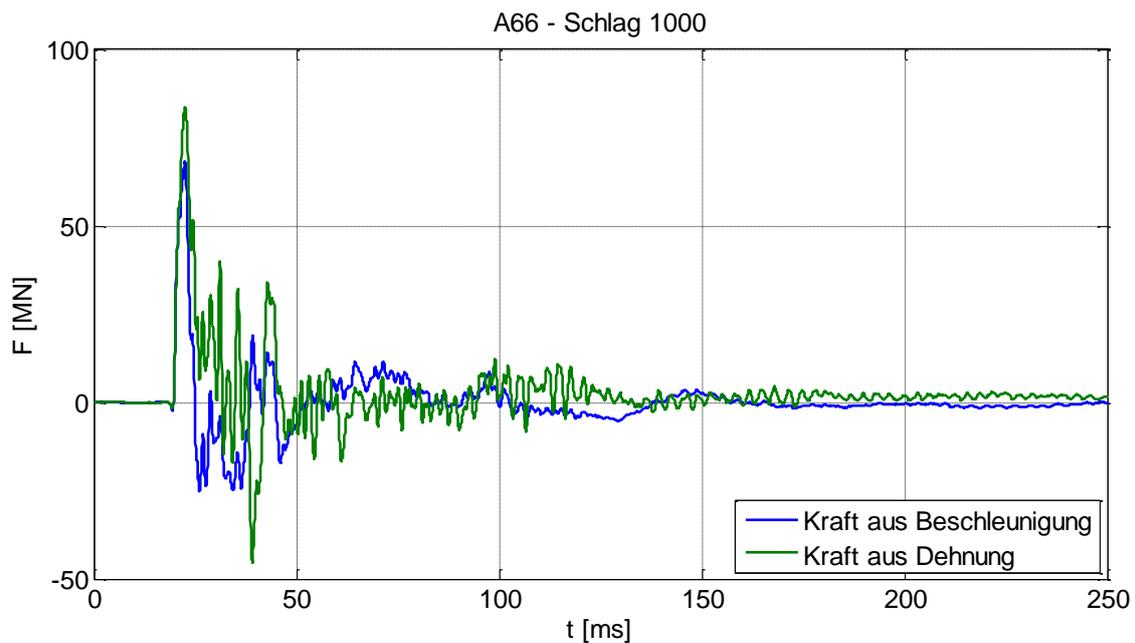


Abbildung 45: gemessene Kraft-Zeit-Verläufe bei Schlag 1000 an Pfahl A66

#### II.4.5 Auswertung der seismischen Messungen

Geophone messen durch induktive Spulen die Bewegungsgeschwindigkeit des Sensors. Dieser nimmt in der Regel die Erschütterungen des Bodens auf. Beim Einsatz unter Wasser können jedoch auch Bewegungen der Wasserteilchen auf das Geophon wirken, insbesondere die sich im Wasser ausbreitenden Hydroschallwellen. Abbildung 46 zeigt das Rohsignal eines Geophons. Deutlich zu erkennen sind ein hochfrequenter und ein niederfrequenter Anteil. Vergleichende Messungen mit und ohne Schallminderungssystem haben gezeigt, dass der hochfrequente Anteil (blau umkreist) aus dem Wasser und der niederfrequente Anteil aus dem Boden herrührt [vgl. Wilke et al., 2012; Bruns et al., 2013; Abschnitt I.4.6]. Bei den aufgezeichneten Messdaten wurden daher zunächst die hochfrequenten Anteile herausgefiltert.

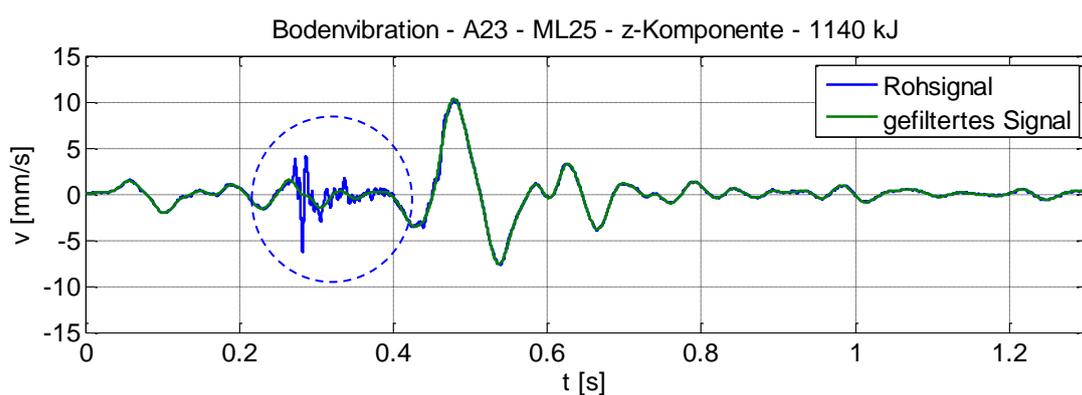


Abbildung 46: Rohsignal (blau) und gefiltertes Signal (grün) der Bodenvibration in horizontaler Richtung an ML25 bei der Rammung des Pfahles A23 bei 1140 kJ

Mit den eingesetzten triaxialen Geophone wurden an jeder Messlokation jeweils die x-, y- und z-Komponenten der resultierenden (res) Schwinggeschwindigkeiten gemessen. Dabei stellen die z-Richtung die vertikale Komponente und die beiden anderen Richtungen horizontale Komponenten in einem kartesischen Koordinatensystem dar. Bei der Ausbreitung von Bodenwellen im Halbraum infolge einer Pfahlrammung ist mit einer Punkt- oder Zylinderförmigen Wellenfront zu rechnen, die

sich besser durch ein Zylinderkoordinatensystem mit einer vertikalen (z), einer radialen (rad) und einer tangentialen (tan) Komponente beschreiben lässt. Abbildung 47 zeigt die mit einem Geophon gemessenen horizontalen Komponenten (x, y) der Erschütterungen und die nach Drehung des Koordinatensystems daraus berechnete radiale und tangentiale Komponente (rad, tan).

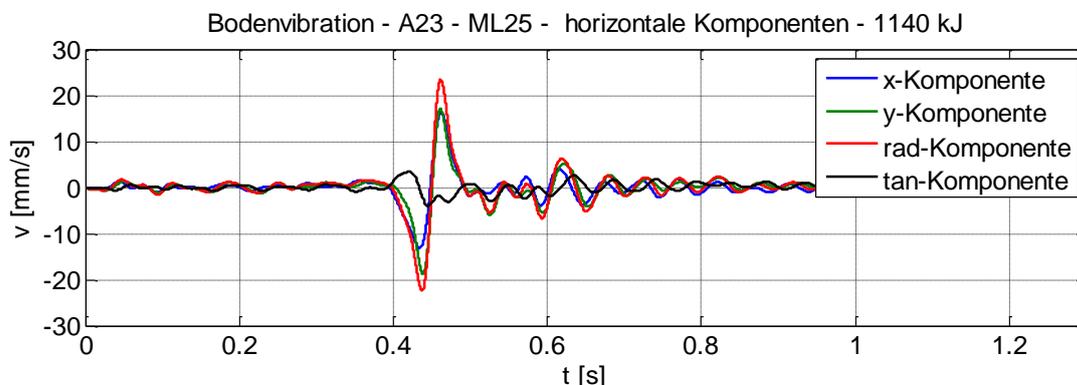


Abbildung 47: horizontale Komponenten des gefilterten Signals im Koordinatensystem des Geophons (x, blau und y, grün) sowie in radialer (rad, rot) und tangentialer Richtung (tan, schwarz) der Bodenvibrationen an ML25 bei der Rammung von Pfahl A23 mit 1140 kJ

Die Verdrehung zwischen der x-Achse der Geophone und der radialen Wellenausbreitung wird mit der Winkelkoordinate  $\varphi$  bezeichnet. Unter der Annahme, dass in radialer Richtung die größten Schwingungen auftreten, wurden die gemessenen x- und y-Komponenten der Messsignale zur Ermittlung der radialen und tangentialen Komponente der seismischen Welle gedreht. Dabei gilt:

$$\text{rad} = x \cdot \cos \varphi - y \cdot \sin \varphi \quad (33)$$

$$\text{tan} = x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi \quad (34)$$

Die folgende Abbildung 48 zeigt die verwendeten Koordinatensysteme.

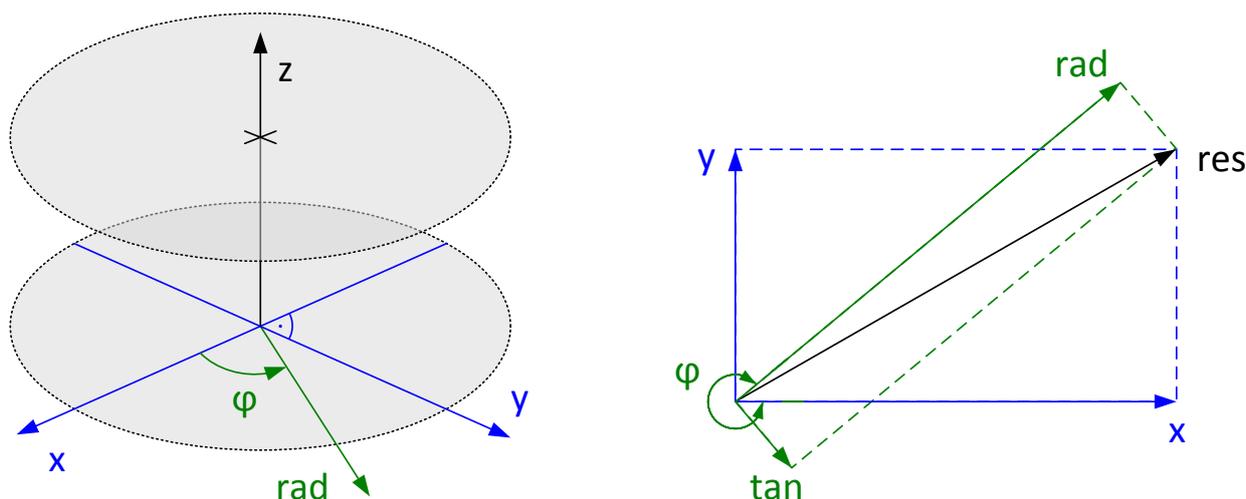


Abbildung 48: kartesisches Koordinatensystem der Geophone (x, y, z) und Zylinderkoordinaten zur Beschreibung der Wellenausbreitung (rad, tan,  $\varphi$ , z)

Für die x- und y-Komponenten der Signale der separierten Einzelschläge wurde das Integral der Schwingung gebildet. Nach Gleichung (33) wurde durch Drehen der Komponenten das Maximum dieses Integrals für die radiale Richtung der Schwingung ermittelt. Die folgende Abbildung 49 zeigt

die hierdurch ermittelte Drehung der Geophone an den verschiedenen Messlokalationen für jeden Schlag am Pfahl A23.

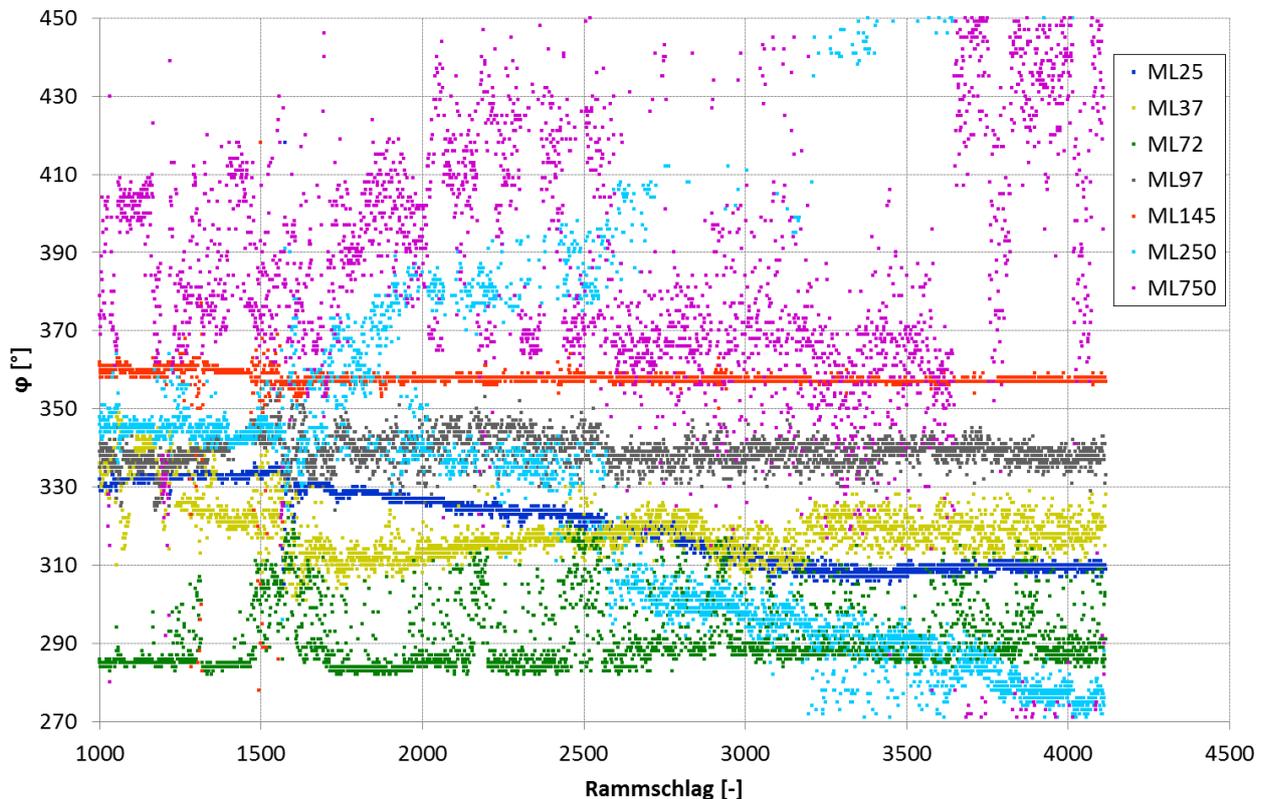


Abbildung 49: ermittelter Verdrehwinkel  $\varphi$  der Geophone im Nahbereich bei der Rammung des Pfahles A23

Für die Messlokalationen im Nahbereich (ML25 bis ML145) wurde über die Rammung ein konstanter Winkel mit einigen Ausreißern ermittelt. Lediglich ML25 sticht mit einer fallenden Tendenz heraus. Im Fernbereich (ML250 und ML750) ist eine starke Streuung der ermittelten Verdrehwinkel zu erkennen.

Aus Videos, die mit an den Geophonen angebrachten Unterwasserkameras an unterschiedlichen Messlokalationen bei der Rammung verschiedener Pfähle aufgezeichnet wurden (vgl. Abbildung 27), ist bekannt, dass sich die Geophone während der Rammung nicht bewegt und nicht verdreht haben. Die Variationen im ermittelten Drehwinkel  $\varphi$  sind daher auf Artefakte bei der Messung oder der Auswertung zurückzuführen. Es wird für die gesamte Rammung von einer Konstanten Verdrehung der Geophone ausgegangen und aufbauend darauf die radiale Komponente des Signales ermittelt.

Aus den gefilterten und gedrehten Signalen wurde für jeden Schlag der Spitzenwert der Schwinggeschwindigkeit ermittelt. Es folgt eine Untersuchung der Entwicklung über die Eindringtiefe des Pfahles sowie der Abklingkurven.

## II.4.6 Auswertung der Hydroschallmessungen

Die im Nah- und Fernbereich mit verschiedenen Datenerfassungssystemen aufgezeichneten Hydroschalldaten wurden aufbereitet, sodass eine Auswertung mit denselben Routinen möglich war. In den Datensätzen wurden die Einzelschläge (vgl. Abbildung 7, oben) detektiert und für jeden Einzelschlag an jedem Sensor der  $L_{\text{peak}}$  nach Gleichung (4) und der SEL nach Gleichung (5) ermittelt. Zudem wurde das Terzspektrum berechnet (vgl. Abschnitt I.4.4). Für die zentrale Datenerfassung im Nahbereich erfolgte die Detektion einmalig für alle Hydrophone. Die Schläge an den Messlokalationen im Fernbereich wurden separat detektiert.

Die folgende Abbildung 50 zeigt den so ermittelten SEL in verschiedenen Entfernungen (jeweils 1 m ü.G.) sowie die Rammenergie beim Referenzpfahl A66. Der sprunghafte Anstieg des Hydroschallpegels mit Erhöhung der Rammenergie ist insbesondere bei etwa Schlag 1550 deutlich zu erkennen. Die Abhängigkeit des Hydroschalls von der Entfernung zeigt sich in den Abständen der parallel verlaufenden, farbigen Linien.

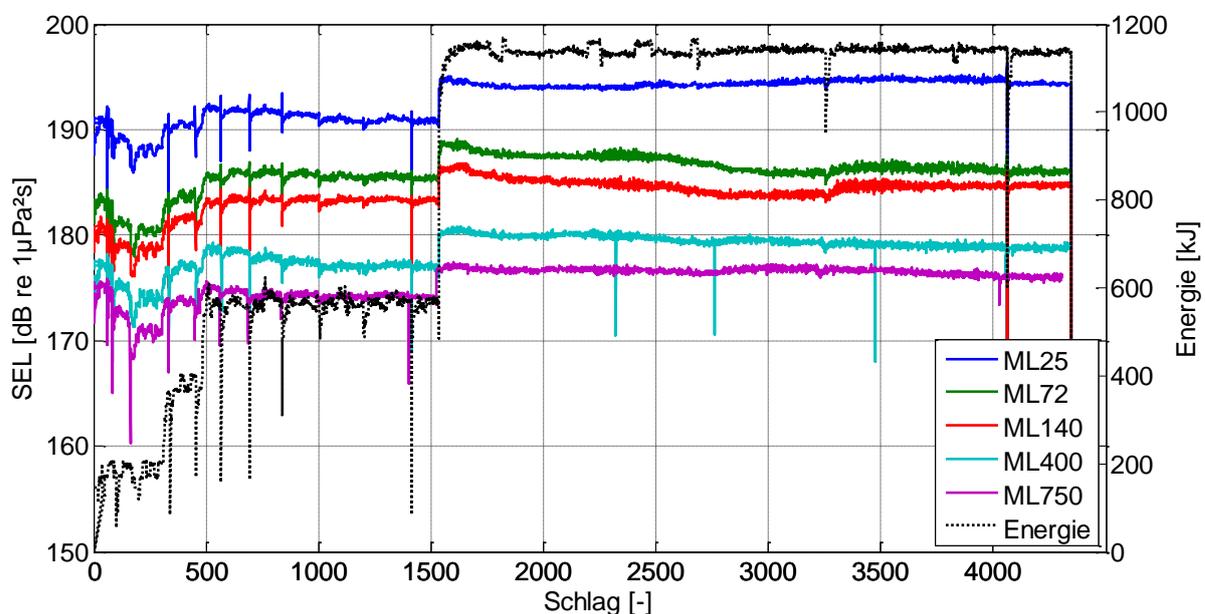


Abbildung 50: SEL (farbige Linien) und Rammenergie (schwarze Linie) über die Rammung bei Pfahl A66

Abbildung 51 zeigt die gleiche Darstellung für Pfahl A22, bei dem neben einem BBC und DBBC in der zweiten Rammphase ein HSD-System zum Einsatz kommt. Es zeigt sich bei etwa Schlag 1600 ein sprunghafter Rückgang des SEL an allen Messlokalationen trotz gleichbleibender Rammenergie. Plots des SEL und des  $L_{\text{peak}}$  aller Pfahlrammungen sind in Anhang D enthalten.

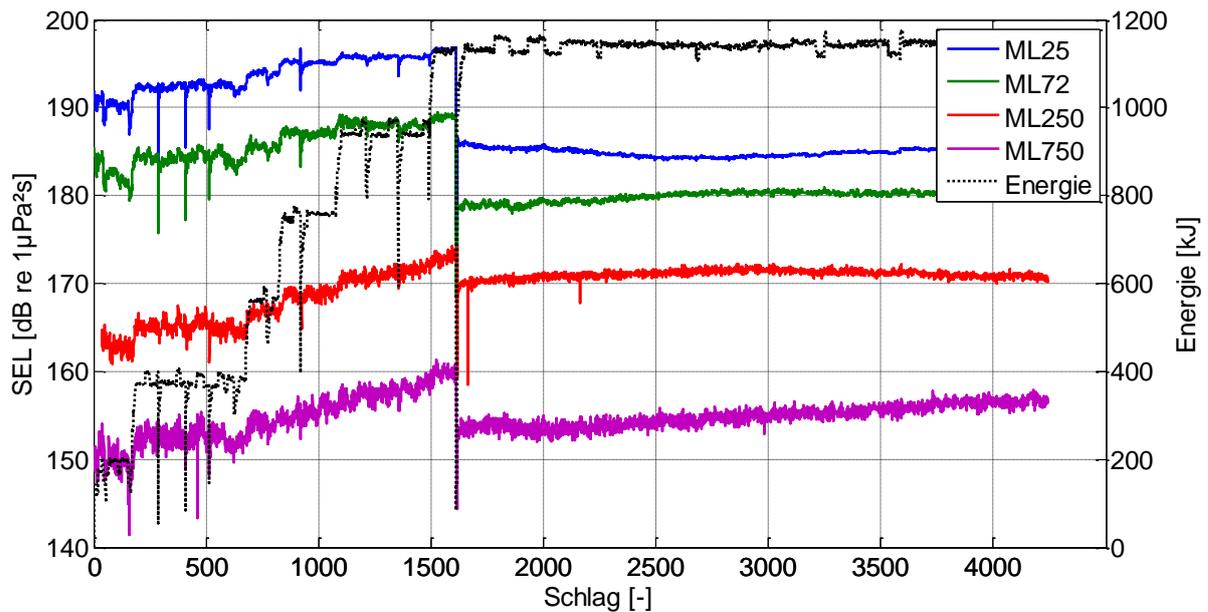


Abbildung 51: SEL (farbige Linien) und Rammenergie (schwarze Linie) über die Rammung bei Pfahl A22

Unter Zugrundelegung der Rammprotokolle kann jedem Hydroschallpegel die auf den Pfahl aufgebraachte Rammenergie zugeordnet werden (vgl. Abschnitt II.4.3). Aufgrund der leichten Differenzen der Schlagzahlen bei den verschiedenen Messsystemen (vgl. Tabelle 8) wurden die Mediane der Pegel für ein bestimmtes Energieniveau ermittelt (z.B. Schlag 1100 bis 1450 mit ca. 950 kJ bei Pfahl A22, vgl. Abbildung 43). Auf diese Weise kann ein robuster Wert des Hydroschalls für die entsprechende Rammenergie bei jedem Pfahl mit den entsprechenden Schallminderungssystemen angegeben werden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass das HSD-System jeweils nur in der zweiten Rammphase eingesetzt wurde und der Blasenschleier nur ein Schallminderungspotential für die Messlokationen im Fernbereich hatte.

Gemäß StUK4 [BSH, 2013] ist für die Bewertung der Hydroschallemissionen bei der Rammung von Offshore-Gründungspfählen der  $SEL_{05}$  maßgebend, also jener Einzelereignispegel, der von 5 % der Ereignisse (= Rammschläge) überschritten wird. Bei einer Rammung wie der des Pfahles A66 mit maximaler Rammenergie über knapp 2/3 der Rammung ist damit zu rechnen, dass der  $SEL_{05}$  in diesem Energieniveau zu finden ist (vgl. Abbildung 50). Bei einer zweigeteilten Rammung mit teilweisem Einsatz eines Schallminderungssystems wie beim Pfahl A22 hingegen muss der  $SEL_{05}$  nicht durch die maximale Rammenergie hervorgerufen worden sein (vgl. Abbildung 51).

Abbildung 52 zeigt links die Häufigkeitsverteilung des SEL in 750 m Entfernung zum Pfahl für die Rammung des Pfahles A22. Die beiden Rammphasen (Mitte und unten) zeigen unterschiedliche Streubreiten des SEL. Der für die Bewertung maßgebliche  $SEL_{05}$  (rot gestrichelte Linie) wurde in Teil 1 der Rammung durch wenige Rammschläge hoher Energie erzeugt, die auch den  $SEL_{05}$  der gesamten Rammung (Abbildung 52, oben) maßgeblich beeinflussen. Noch deutlicher zeigt sich dieser Effekt in Abbildung 52 (rechts) beim Pfahl A20, der ausschließlich mit HSD gerammt wurde. Die beiden Teilrammungen liefern gänzlich unabhängige Histogramme, der  $SEL_{05}$  der gesamten Rammung ist nahezu deckungsgleich mit dem  $SEL_{05}$  der ersten Rammphase.

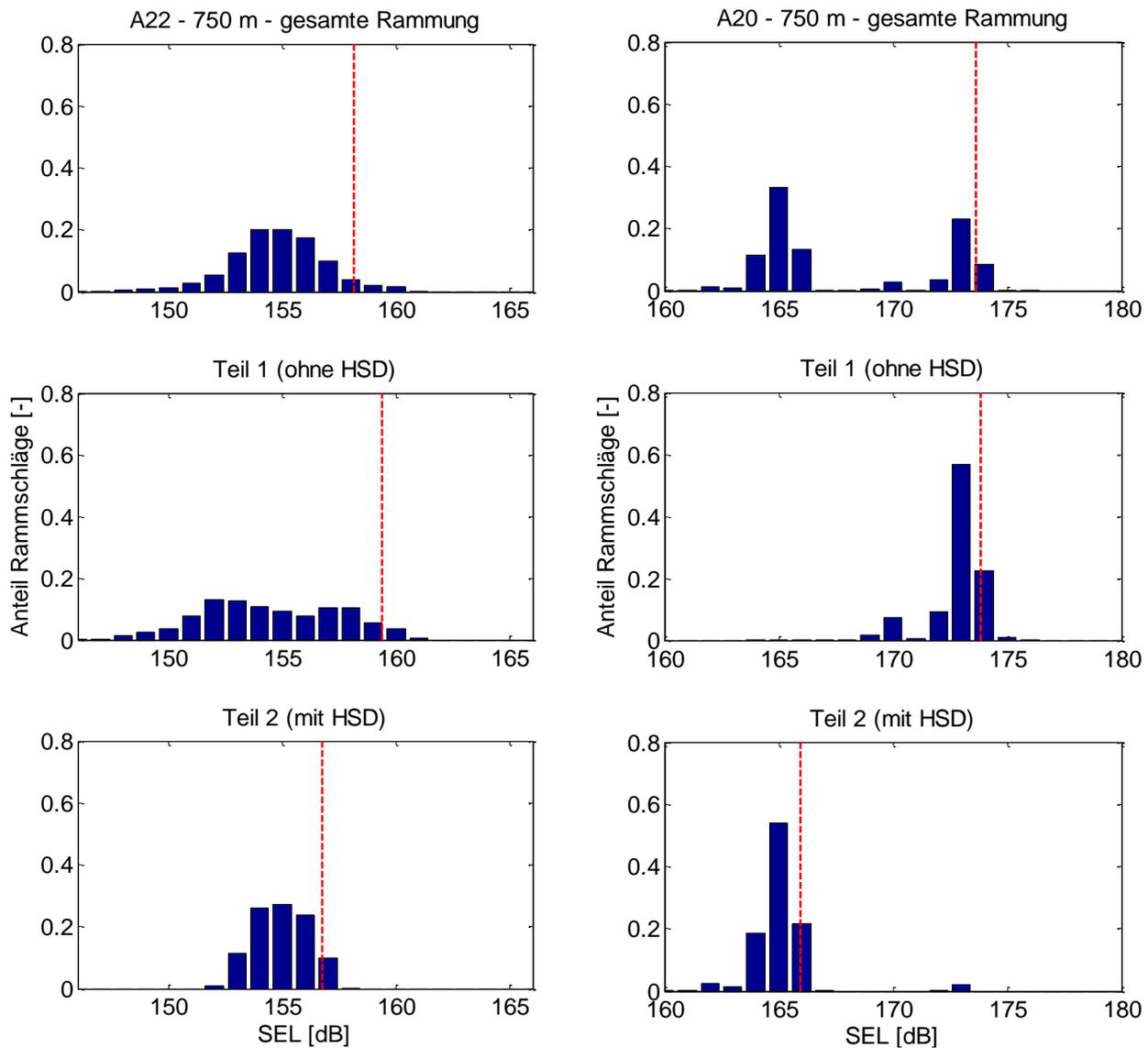


Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung des SEL (blau) und  $SEL_{05}$  (rot) in 750 m bei der Rammung der Pfähle A22 (links) mit HSD und BBC sowie A20 (rechts) mit HSD für die gesamte Rammung (oben), die erste Rammphase ohne HSD (Mitte) und die zweite Rammphase mit HSD (unten)

Abbildung 53 zeigt den Effekt der Einteilung der Rammung in zwei Phasen bei den Pfählen A66 (Referenzmessung) und A77 (Blasenschleier). Beide Pfähle verfügten über die gesamte Rammung jeweils über die gleiche Schallminderungskonfiguration. Die Einteilung der Rammphase erfolgt nach der eingesetzten Rammenergie, wobei die Phase 2 bei 800 kJ beginnt.

Auch hier wird deutlich, wie sich die Häufigkeitsverteilung der gesamten Rammung aus den beiden Teilrammungen zusammensetzt und die jeweils lautere Teilrammung den  $SEL_{05}$  der Gesamtrammung bestimmt. Ursächlich hierfür ist bei den Pfählen A66 und A77 allein die Rammenergie.

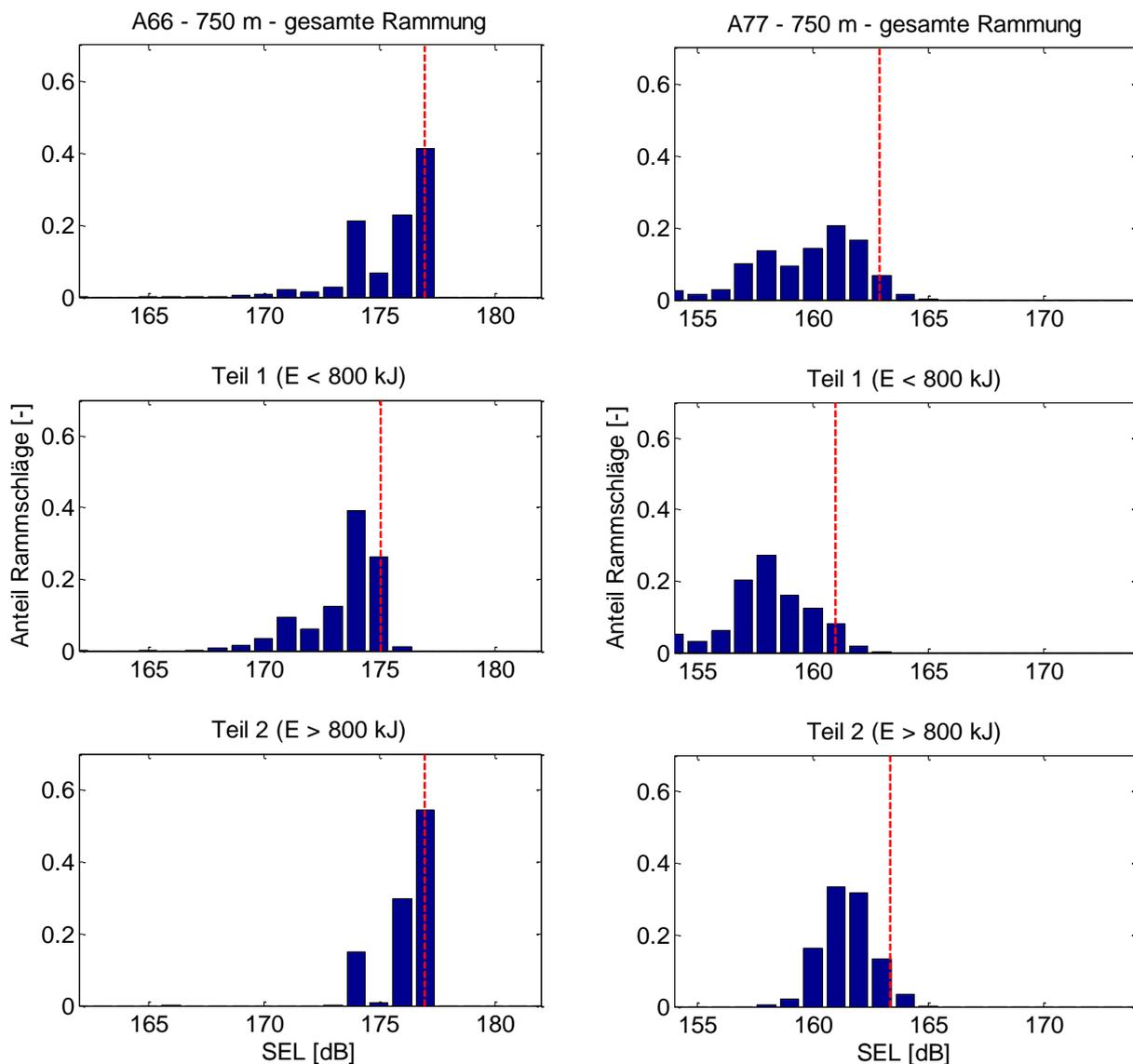


Abbildung 53: Häufigkeitsverteilung des SEL (blau) und SEL<sub>05</sub> bei der Rammung der Pfähle A66 ohne Schallminderungssystem (links) und A77 mit BBC (rechts)

Beim Vergleich der emittierten Hydroschallpegel wurde daher bei der Auswertung der Hydroschall-daten jeweils der Median eines Energieniveaus berücksichtigt. So ist ein Vergleich der Pegel in verschiedenen Wassertiefen oder Entfernungen zum Pfahl bzw. unterschiedlicher Schallminderungs-konfigurationen möglich.

Die Auswertung der einzelnen detektierten Rammschläge im Frequenzbereich ermöglicht Aussagen über den Frequenzgehalt der Hydroschallemissionen und damit eine Optimierung von Schallminderungsmaßnahmen. Die Frequenzanalyse wird für jeden Einzelschlag als Terzspektrum dargestellt (vgl. Abbildung 9). Analog zu den Pegeln können Terzspektren in verschiedenen Entfernungen, bei verschiedener Rammenergie oder unterschiedlichen Schallminderungskonfigurationen verglichen werden.

Wie in Abschnitt I.4.4 beschrieben, setzt sich eine Terzanalyse aus dem SEL verschiedener Terzbänder eines Hydroschallsignals zusammen. Nach Gleichung (6) ist der SEL ein Pegel der im Schallsignal enthaltenen Energie, der SEL lässt sich somit auf die Schallenergie zurückführen. Durch Summenbildung der Energien der einzelnen Terzen lässt sich wiederum der SEL aus der Terzanalyse ableiten.

Abbildung 54 zeigt oben das Terzspektrum (blau) und den kumulierten SEL über die Terzfrequenzen (grün) für einen ungeminderten Rammschlag in 750 m Entfernung. Im unteren Teil der Abbildung findet sich dieselbe Darstellung für die auf die über alle Frequenzen kumulierte Energie normierte Schallenergiedichte.

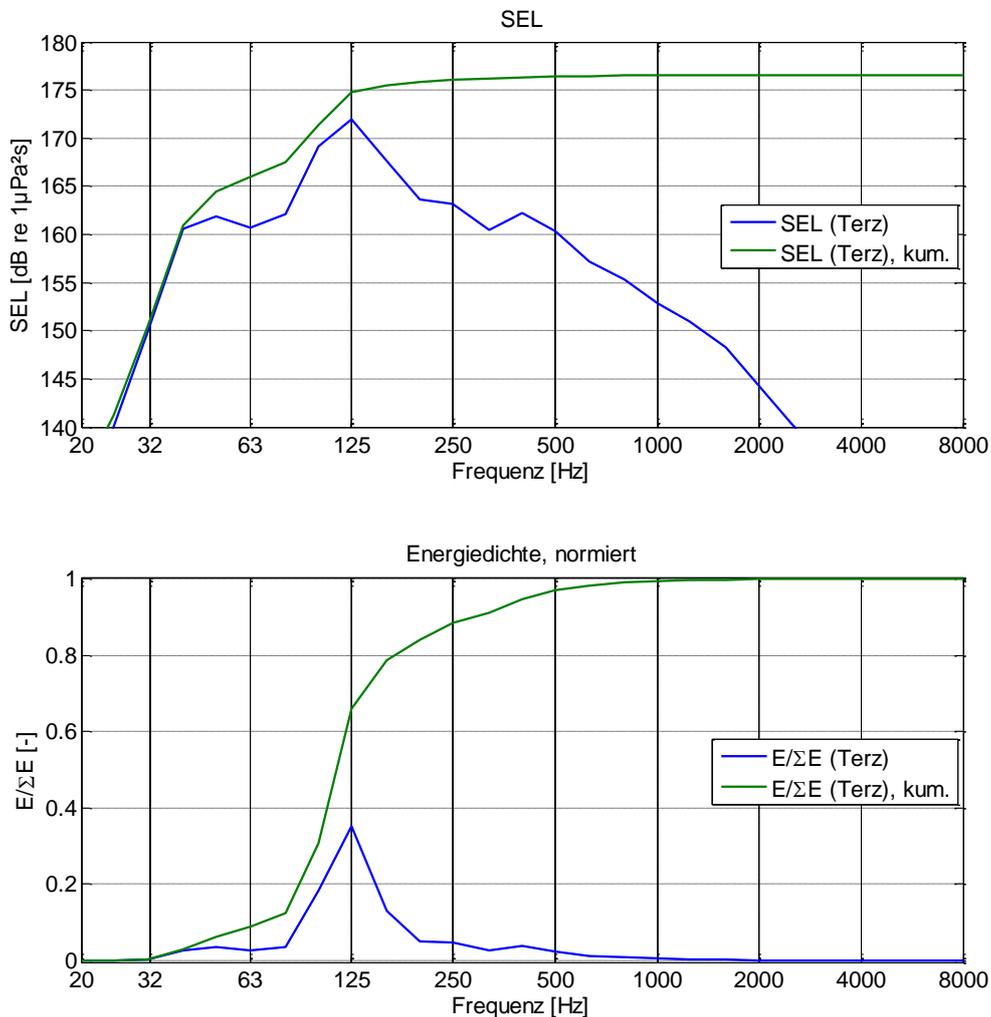


Abbildung 54: SEL (oben) und Schallenergiedichte (unten) in verschiedenen Terzbändern diskret (blau) und kumuliert (grün), gemessen bei Pfahl A66 (Referenz) in 750 m Entfernung mit 1140 kJ Rammenergie

Es zeigt sich, dass bei diesem Beispiel in den Terzbändern von 40 Hz bis 800 Hz 96% der Schallenergiedichte enthalten sind. Bei Betrachtung des (logarithmierten) Schallpegels ist zu erkennen, dass bei Nichtberücksichtigung der Terzbänder unter 100 Hz und über 400 Hz der SEL um < 1 dB unterschätzt wird. Selbst bei Berücksichtigung von nur drei Terzbändern von 100 Hz bis 160 Hz beträgt die Abweichung < 2 dB.

## II.4.7 Bestimmung von Wellenlaufzeiten

Durch die zeitsynchrone Messung der Hydrophone und Geophone im Nahbereich können auch die Laufzeiten der Wellen zwischen den einzelnen Messlokationen sowie Zeitversätze zwischen den Wellenfronten in verschiedenen Höhen über Grund ermittelt werden. Durch die von den Geophonen detektierten Hydroschallsignale (vgl. Abbildung 46) kann auf die Laufzeitdifferenz zwischen Hydroschallwelle und seismischer Welle geschlossen werden.

Da die Schallgeschwindigkeit im Wasser nur in engen Grenzen variabel ist und bei jeder Messkampagne mittels einer CTD-Sonde bestimmt wird, kann über die Laufzeitdifferenzen der Hydrophone an verschiedenen Messlokalen der Abstand der Hydrophone untereinander ermittelt werden. Dieser deckt sich sehr gut mit den Abständen der Messlokalen laut Decklayout (vgl. Abbildung 29) und bestätigt die Lage der Messlokalen.

Entsprechendes gilt für die Bestimmung der Wellenlaufzeit zwischen den einzelnen Messquerschnitten im Pfahl.

## II.5 Messergebnisse

### II.5.1 Ergebnisse der Pfahlmessungen

Mit Ausnahme der oberen Messquerschnitte bei den Pfählen A22 und A66 wurde die Instrumentierung der Pfähle in einer Messachse durchgeführt. Es wird angenommen, dass sich im Pfahl eine ebene Wellenfront und eine eindimensionale Wellenausbreitung einstellt (vgl. Abschnitt I.4.7). Zur Überprüfung dieser Annahme werden die Messungen in den Drittelpunkten verglichen. Abbildung 55 zeigt beispielhaft die aus den integrierten axialen Beschleunigungen nach Gleichung (26) und (27) ermittelten Kräfte in den Drittelpunkten an MQ1 bei Pfahl A66. Am Beschleunigungssensor in MQ1c ist ein Sensorausfall zwischen Schlag 1700 und Schlag 3800 zu erkennen. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Sensoren, sodass von einer ebenen Wellenausbreitung im Pfahl ausgegangen werden kann (vgl. Abschnitt I.4.7).

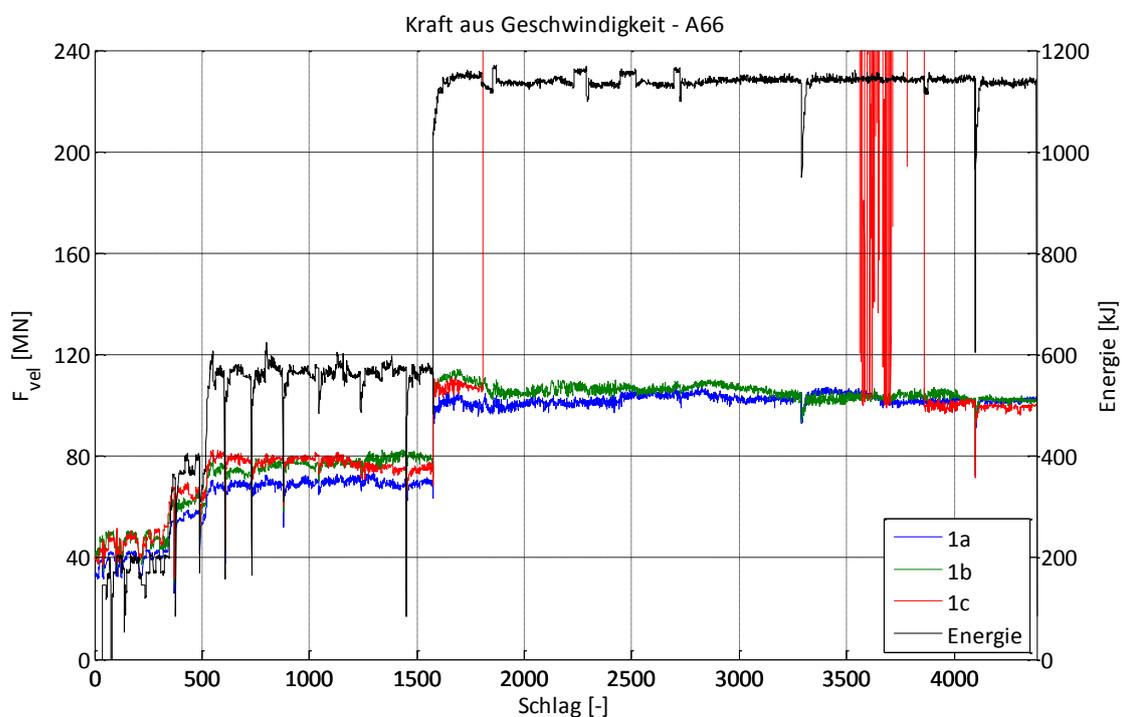


Abbildung 55: Kraft aus Geschwindigkeit an den Drittelpunkten von MQ1 beim Pfahl A66 über die Rammung

Auch der Vergleich der gemessenen Kräfte aus der Geschwindigkeit ( $F_{vel}$ ) nach Gleichung (27) und der Dehnung ( $F_{str}$ ) nach Gleichung (28) beim Einleitungsimpuls zeigt eine gute Übereinstimmung (s. Abbildung 56). Bei quantitativen Abweichungen kann erfahrungsgemäß davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Beschleunigungen verlässlicher sind als die Dehnungen. Auf dieser Grundlage kann eine Korrektur der gemessenen Dehnungen vorgenommen werden.

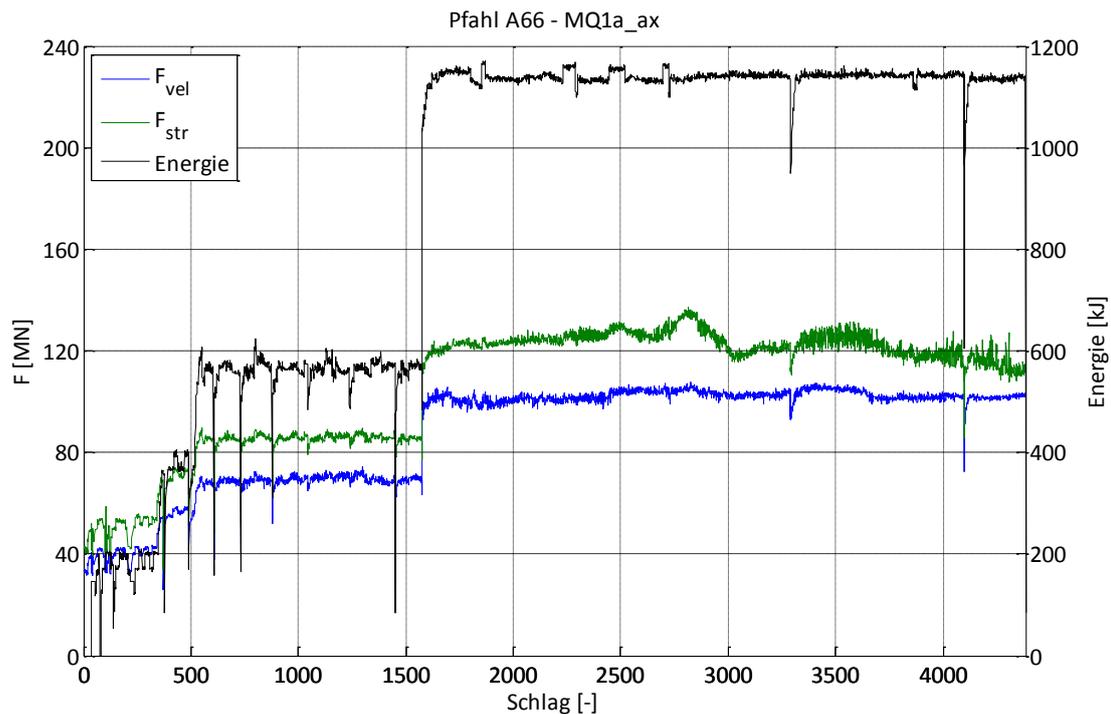


Abbildung 56: Kraft aus Geschwindigkeit (blau) und Kraft aus Dehnung (grün) über die Rammung in MQ1 bei Pfahl A66

Für den Vergleich der Hydroschallpegel wird die Rammenergie laut Rammprotokoll herangezogen. Nach Gleichung (32) lässt sich die tatsächlich in den Pfahl eingeleitete Energie aus den gemessenen Dehnungen und integrierten Beschleunigungen sowie den Querschnitts- und Materialkennwerten des Pfahles ableiten. Abbildung 57 zeigt die gemessene Rammenergie in MQ1 und die Rammenergie laut Rammprotokoll für den Pfahl A66.

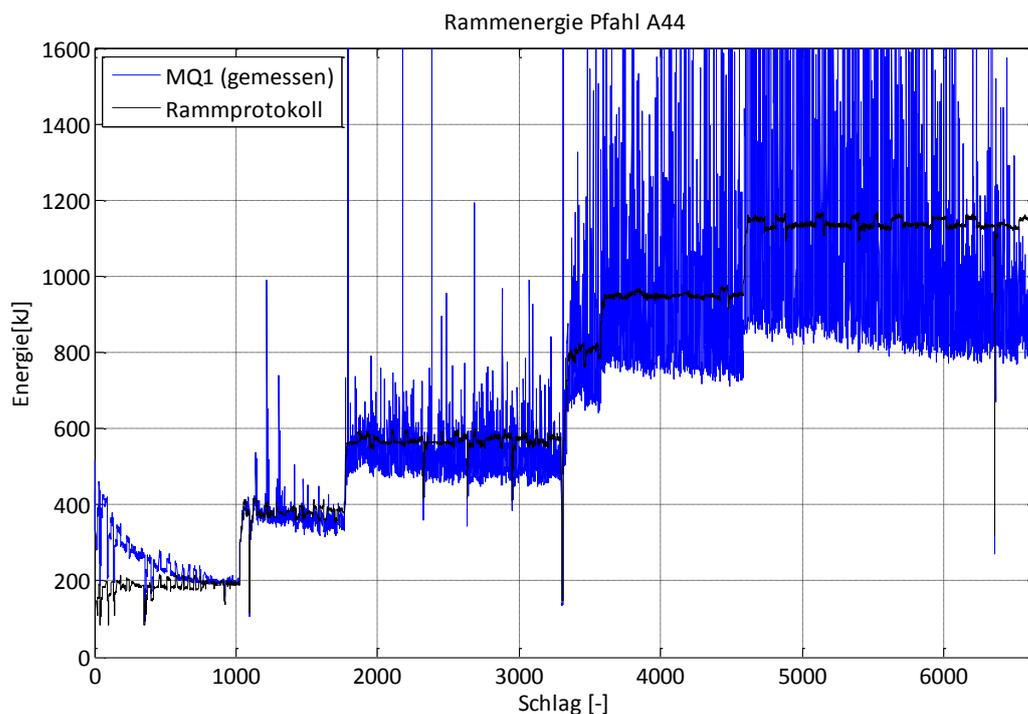


Abbildung 57: gemessene Energie (blau) und Energie laut Rammprotokoll (schwarz) über die Rammung bei Pfahl A66

Es ist zu erkennen, dass die tatsächlich eingeleitete Energie z.T. von der nominellen Hammerenergie abweicht. Ausreißer können auf Spitzen in den Messwerten zurückgeführt werden. Zu Beginn der Rammung ist die nach Gleichung (32) aus den Messdaten ermittelte Energie doppelt so hoch wie die Rammenergie laut Rammprotokoll. Dies ist auf die Integration der mehrmals den Pfahl hoch und runter laufenden Dehnwelle zurückzuführen (vgl. S. 88). Bei den hohen Rammenergien gegen Ende der Rammung liegt die gemessene Energie bei ca. 80 % der nominellen Hammerenergie. Dies bedeutet u.a., dass die für die Bemessung herangezogene Vorschädigung des Pfahls infolge der Installation u.U. geringer ist als veranschlagt und sich die Lebensdauer der Gründung verlängern kann.

In der folgenden Abbildung 58 ist der gemessene Eindringwiderstand nach Gleichung (30) am Beispiel von Pfahl A44 über die Rammung gezeigt. Dieser steigt mit der Rammenergie laut Rammprotokoll an, eine Vergrößerung mit zunehmender Eindringtiefe ist nicht zu erkennen.

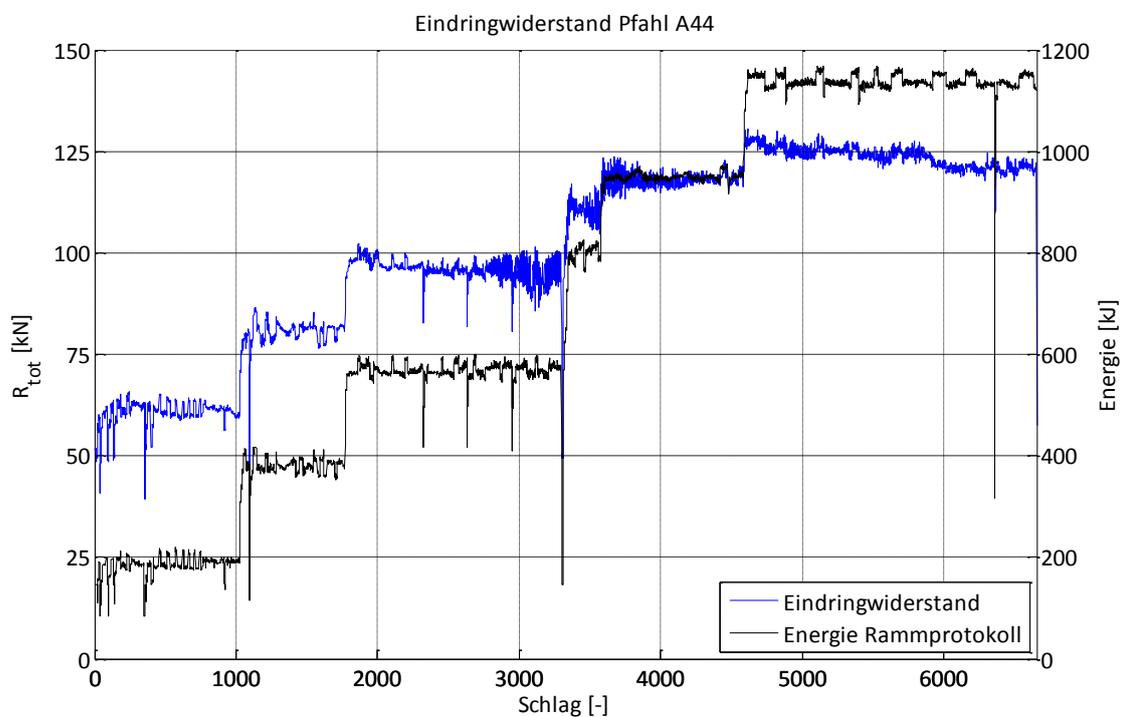


Abbildung 58: Eindringwiderstand (blau) und Rammenergie (schwarz) über die Rammung bei Pahl A44

Wie in Abschnitt I.4.7 beschrieben ist, wird die den Pfahl durchlaufende Welle im Bereich der Einbindung in den Boden gedämpft. Abbildung 59 zeigt die maximalen axialen Schwinggeschwindigkeiten des Einleitungsimpulses an den Messquerschnitten von Pfahl A44 über die Rammung.

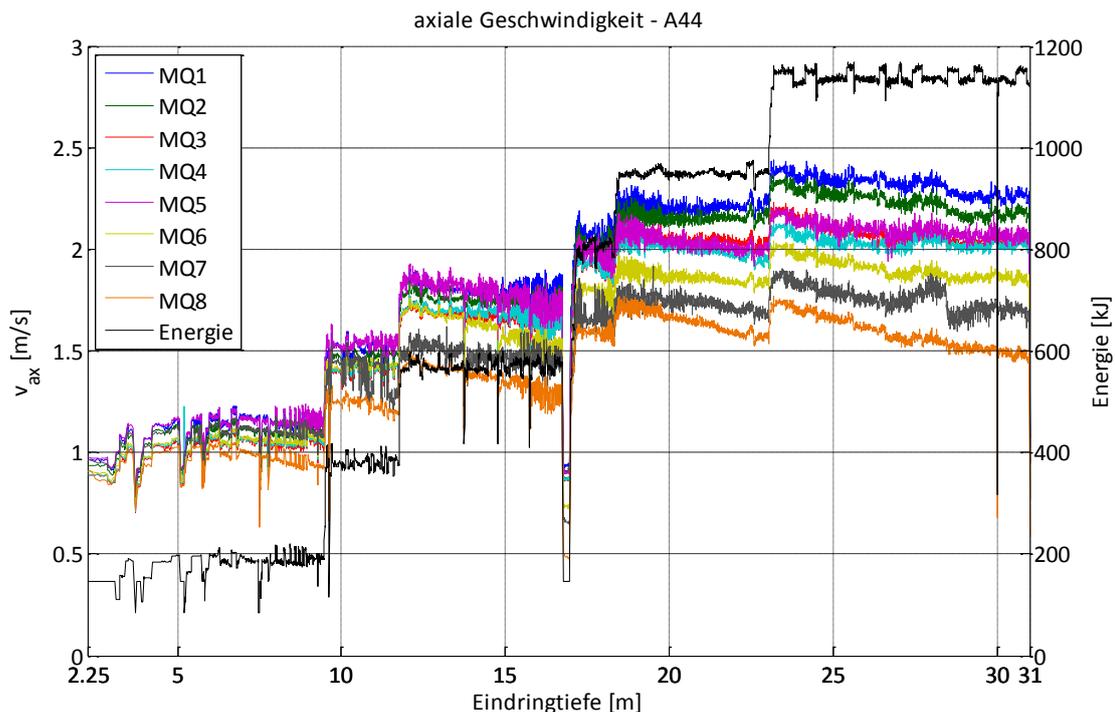


Abbildung 59: maximale Schwinggeschwindigkeiten des Einleitungsimpulses über die Rammung in allen Messquerschnitten

Die Abhängigkeit der Schwinggeschwindigkeiten von der Rammenergie ist in den Sprüngen deutlich zu erkennen. Insbesondere im hinteren Teil der Rammung gehen die Amplituden bei gleichbleibender Rammenergie mit steigender Eindringtiefe zurück. Ebenso gehen die Amplituden in den einzelnen Messquerschnitten tendenziell auseinander. Beides kann auf die stärkere Dämpfung der den Pfahl durchlaufenden Welle zurückgeführt werden, welche in höheren Messquerschnitten geringer ist als in tieferen.

Zur genaueren Untersuchung des Verhaltens des Pfahles werden die Dehnungen und Geschwindigkeiten infolge einzelner Rammschläge im Zeitbereich betrachtet. Die folgenden Abbildungen zeigen die gemessenen Dehnungen in axialer und tangentialer Richtung sowie die integrierten Beschleunigungen in axialer und radialer Richtung.

Bei den Dehnungsmessungen ist die Druckbeanspruchung des Pfahles in axialer Richtung bei gleichzeitigem Zug in tangentialer Richtung infolge Querdehnung mit kleinerer, umgekehrter Amplitude deutlich zu erkennen. Im Geschwindigkeitsverlauf hingegen ist eine unterschiedliche Wellencharakteristik in den axialen und radialen Signalen zu erkennen. Während des hohen Einleitungsimpulses in positiver axialer Richtung (nach unten) bewegt sich der Pfahlmantel in Längsrichtung zunächst nach außen (radial positiv) und dann wieder nach innen in seinen Ursprungszustand. In axialer Richtung hat die Welle dann den Messquerschnitt passiert.

A44 – MQ1 – Schlag 100

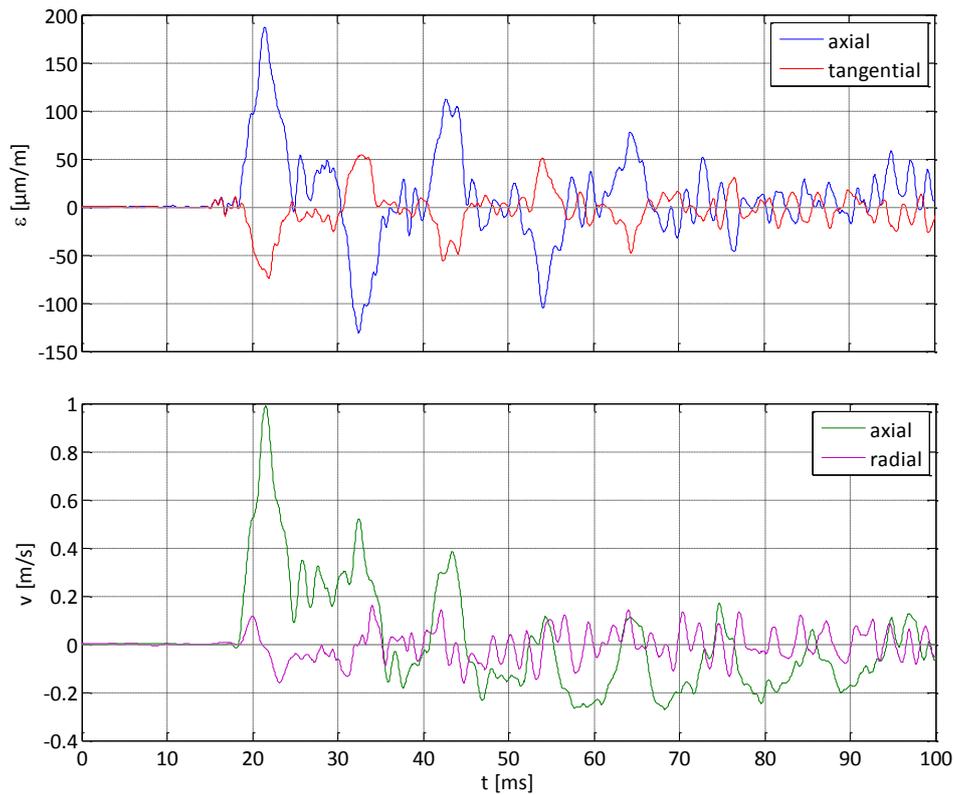


Abbildung 60: axiale und tangentielle Dehnungen (blau/rot, oben) sowie axiale und radiale Geschwindigkeiten (grün/violett, unten) bei Pfahl A44, MQ1, Schlag 100

A66 – MQ1 – Schlag 2000

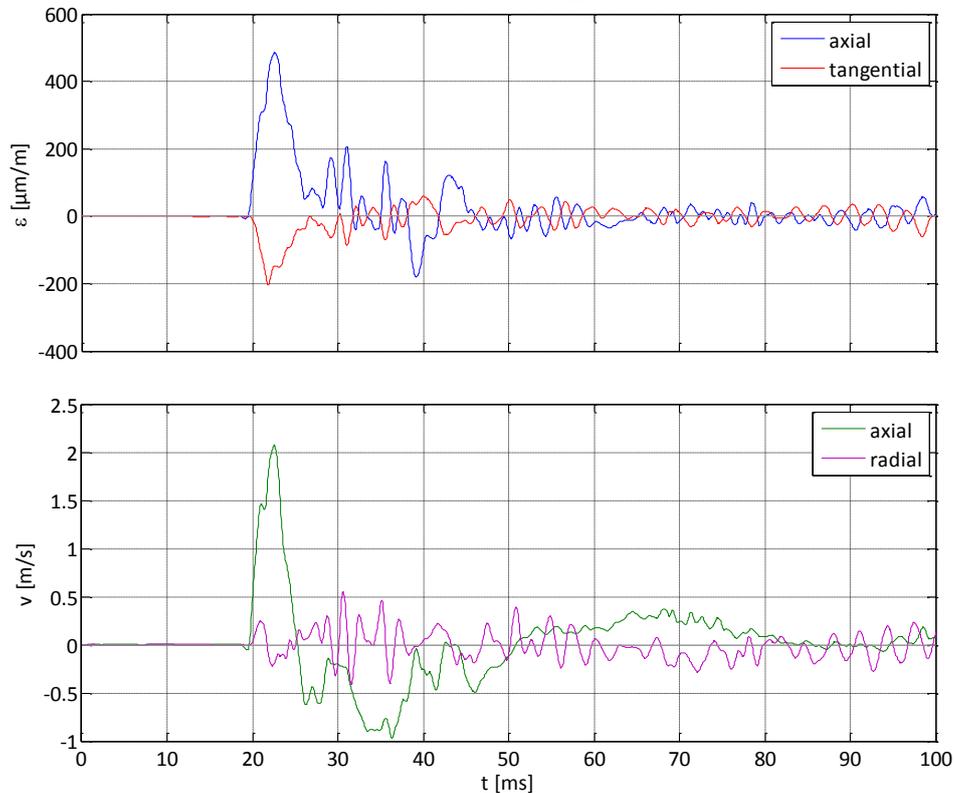


Abbildung 61: axiale und tangentielle Dehnungen (blau/rot, oben) sowie axiale und radiale Geschwindigkeiten (grün/violett, unten) bei Pfahl A66, MQ1, Schlag 2000

Beim früheren Schlag 100 (Abbildung 60) sind deutlich mehr Wellendurchläufe zu erkennen als beim späteren Schlag 2000 (Abbildung 61, vgl. auch Abbildung 19 sowie Abschnitt II.5.3.3). Dies ist auf die Bodendämpfung zurückzuführen.

Neben den eigentlichen pfahldynamischen Messungen konnte, wie in Tabelle 2 angegeben, auch das dynamische Verhalten der Klebung indirekt untersucht werden. Abbildung 62 zeigt die gemessenen axialen Beschleunigungen der aufgeklebten Platte in MQ0 sowie die Beschleunigungen des Pfahles einige Meter tiefer in MQ1 für denselben Schlag bei Pfahl A66.

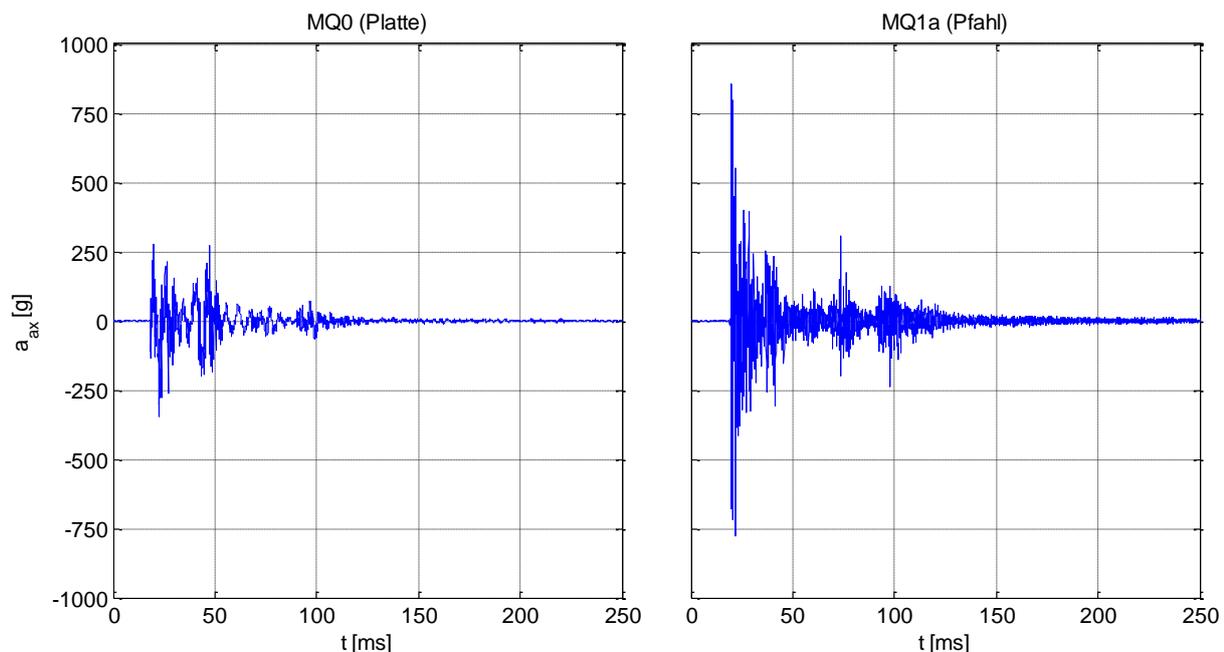
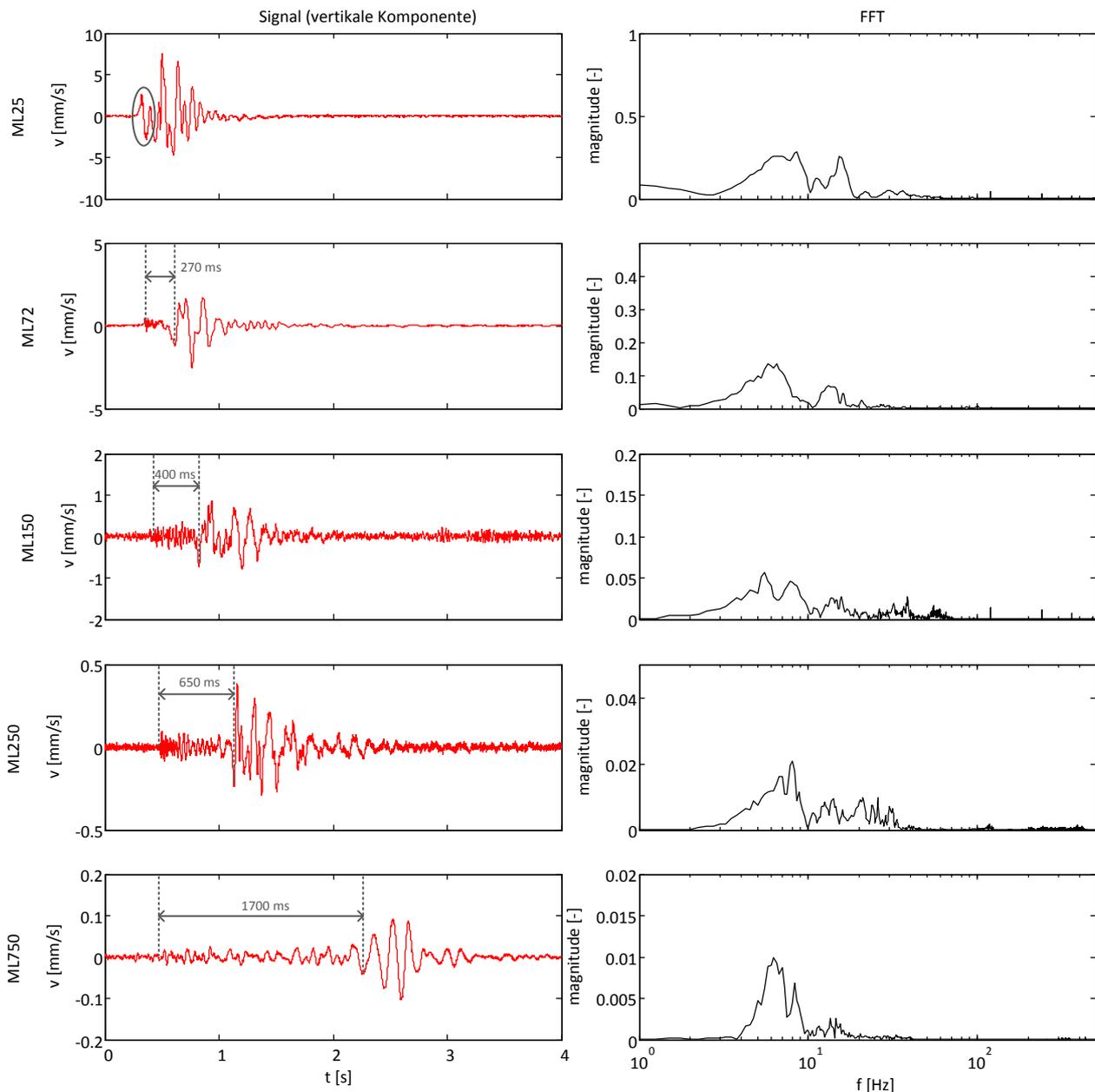


Abbildung 62: axiale Beschleunigung auf der Platte (links) und am Pfahl (rechts) bei Schlag 1000 an Pfahl A66

Während am Pfahl selbst eine Beschleunigung von über 800 g in der Spitze zu erkennen ist, erfährt die direkt am Pfahl befestigte Platte lediglich die 350-fache Erdbeschleunigung. Die Dämpfung um einen Faktor größer zwei ist auf die Elastizität der Klebschicht zurückzuführen.

## II.5.2 Ergebnisse der seismischen Messungen

Bei Betrachtung einzelner Hydrophonsignale im Zeitbereich ist, wie in den Abschnitten I.4.6 und II.4.5 beschrieben, ein hochfrequenter Hydroschallanteil und eine niederfrequente Bodenschwingung zu erkennen. Abbildung 63 zeigt die Signal sowie die Frequenzanalysen eines Rammschlages an verschiedenen Messlokalationen. Zu besseren Übersichtlichkeit bei der Darstellung eines Einzelschlages wurde ein Schlag des Softstarts (vgl. Abschnitt II.1.3) gewählt.



**Abbildung 63: Geophonsignale (Z-Komponente) an verschiedenen Messlokalitäten bei der Rammung des Pfahles A23 bei Schlag 1 von Rammphase 2 (Softstart) [vgl. Bruns et al., 2014]**

Es fällt auf, dass der Abstand zwischen dem kurzwelligen Hydrophonsignal und der langwelligen seismischen Schwingung mit größerem Abstand zum Pfahl ansteigt. Bei einer Schlagfrequenz von ca. 50 Schlägen pro Minute überlagern sich die Schwingungen aufeinanderfolgender Schläge im Fernbereich. Dies bedeutet, dass die hier detektierte Bodenwelle sich langsamer ausbreitet als die Hydroschallwelle.

Wie in Abschnitt II.4.5 beschrieben werden die langwelligen, seismischen Anteile der Geophonmessungen isoliert und das Koordinatensystem in radialer Richtung vom Pfahl weg ausgerichtet. Die dabei detektierten maximalen Schwinggeschwindigkeiten sind in Abbildung 64 dargestellt. Die farbigen Linien bilden die maximalen Schwinggeschwindigkeiten an den verschiedenen Messlokalitäten ab. In Schwarz ist die zugehörige Rammenergie hinterlegt.

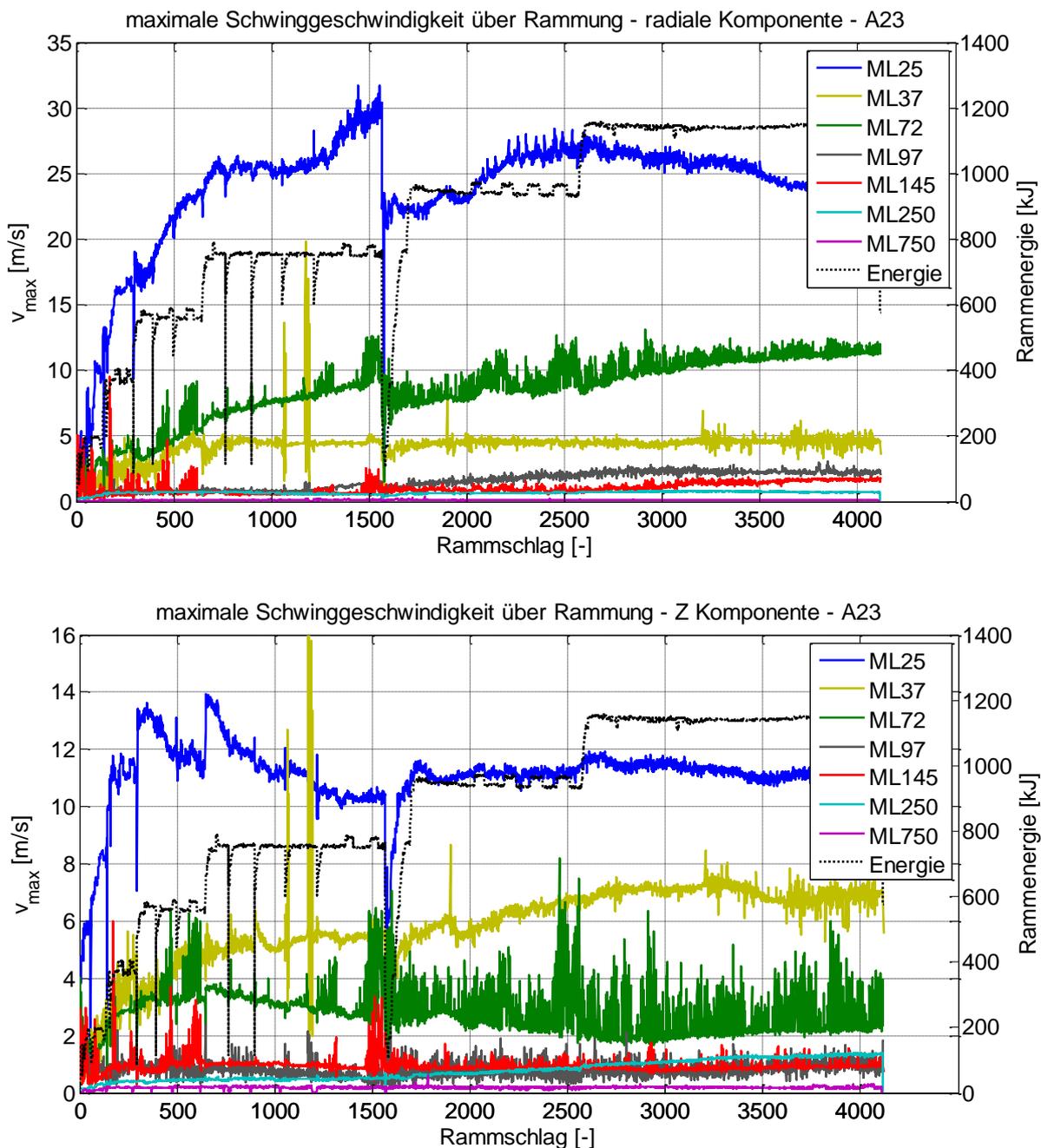


Abbildung 64: maximale Schwinggeschwindigkeiten in radialer (oben) und vertikaler Richtung (unten) je Rammerschlag im Verlauf der Rammung des Pfahles A23

Die radialen Geschwindigkeiten (oben) sind, mit einigen Ausnahmen, größer als die vertikalen Geschwindigkeiten (unten). Dies stützt Untersuchungen von Reimann und Grabe [2014] im Rahmen des Forschungsvorhabens *BORA* (FKZ 0325421A/B/C), die zu ähnlichen Ergebnissen kommen. Aus den verschiedenen Komponenten und der Ausbreitungsgeschwindigkeit kann geschlossen werden, dass es sich bei der detektierten Welle am Boden um eine Scholte-Welle handelt.

Ein klarer Zusammenhang zwischen Rammenergie und den maximal auftretenden Schwinggeschwindigkeiten ist nicht zu erkennen. An ML25 und 72 bspw. steigen die maximalen radialen Schwinggeschwindigkeiten zwischen Schlag 1100 und Schlag 1500 an, während die maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten zurückgehen. Gegen Ende der Rammung (ab Schlag 3000) gehen

die maximalen radialen Schwinggeschwindigkeiten an ML25 zurück, während sie an ML72 ansteigen.

Es ist zu beachten, dass der Pfahl mit jedem Rammschlag weiter in den Boden eindringt und sich damit die Größe und die Lage der Quelle der Schwingungen laufend ändert. Die z.T. gegenläufigen Entwicklungen der Schwinggeschwindigkeiten in verschiedenen Richtungen und in unterschiedlichen Entfernungen zum Pfahl können auch in den verschiedenen auftretenden Wellenarten (vgl. Abschnitt I.4.6) begründet sein.

Generell lässt sich feststellen, dass die Schwinggeschwindigkeiten mit größerem Abstand zum Pfahl abnehmen. Abbildung 65 zeigt die Abklingkurve der maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten bei Pfahl A23 für zwei verschiedene Energieniveaus. Es ist ein exponentieller Zusammenhang festzustellen.

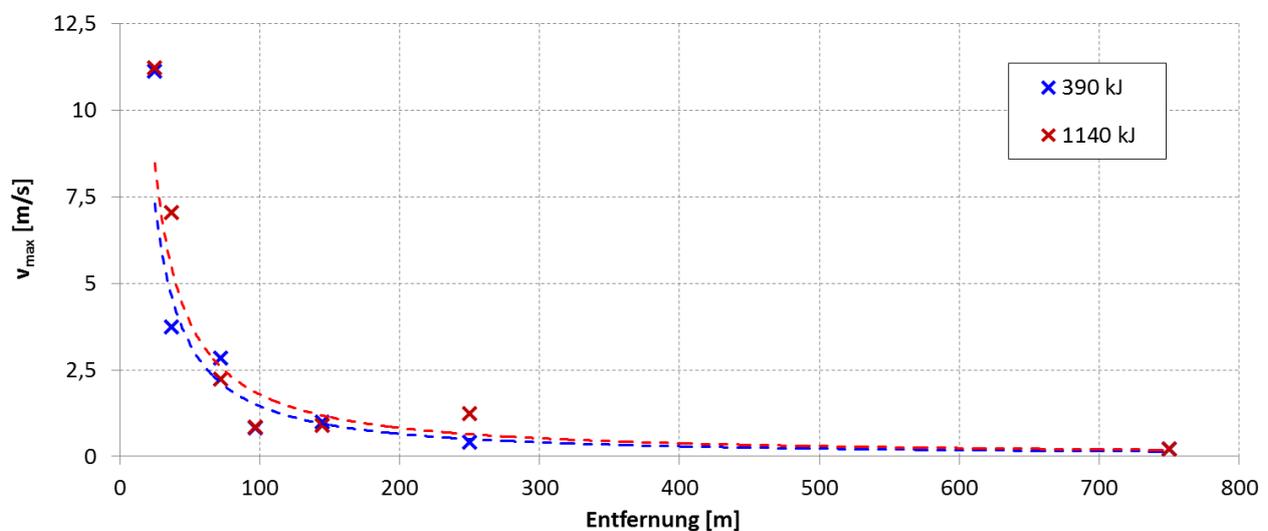


Abbildung 65: Abklingen der maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten am Boden über die Entfernung

## II.5.3 Ergebnisse der Hydroschallmessungen

### II.5.3.1. Analyse der Pegelgrößen

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der im Fernbereich gemessenen Einzelereignispegel, jeweils als Median des SEL bei einer Rammenergie von 1140 kJ. Die Streuung gibt jeweils die Differenz des maximalen und minimalen Pegels aller Messungen in (nahezu) gleicher Entfernung mit gleicher Schallminderungskonfiguration an.

Bei den Messungen ohne Schallminderung sowie ausschließlich mit HSD-System zeigen sich geringe Abweichungen von 1 dB. Große Abweichungen von über 7 dB ergeben sich bei den Messungen mit Blasenschleier, obwohl alle Messungen von derselben Rammung stammen. Bei den großen Differenzen bei den Messungen mit HSD und BBC in ca. 1500 m Entfernung ist zu berücksichtigen, dass in 750 m deutlich geringere Streuungen auftreten. Dies kann auf verschiedene Messrichtungen der einzelnen Messlokationen im Fernbereich (vgl. Anhang C) in Verbindung mit einem über den Umfang nicht gleichmäßig ausgebildeten BBC (vgl. Abschnitt II.3.9) zurückzuführen sein.

Tabelle 9: Übersicht gemessener SEL im Fernbereich bei 1140 kJ

Pfahl	Schallminderung	SEL [dB] @ ~ 750 m	SEL [dB] @ ~ 1.500 m
A66	Referenz	176,2	170,5
		176,2	171,0
		175,1	--
<i>Streuung</i>		1,0	0,5
A20	HSD	164,5	160,5
		164,5	160,8
		0,0	0,3
<i>Streuung</i>		0,0	0,3
A77	BBC	167,6	160,6
		168,0	164,8
		160,8	--
		7,2	4,2
<i>Streuung</i>		7,2	4,2
A23	HSD + BBC	159,6	155,7
		160,3	(147,2)
A44		161,3	155,6
A32		162,0	--
<i>Streuung</i>		2,4	8,5
A24		156,4	153,6
A22	HSD + BBC + DBBC	159,2	149,3
		156,4	154,5
		160,5	(138,9)
<i>Streuung</i>		4,1	5,2

Durch die Betrachtung der gemessenen Pegel in verschiedenen Abständen zum Pfahl bei sonst gleichen Bedingungen lässt sich eine Abklingkurve ermitteln, welche die geometrische Ausbreitungsdämpfung des Hydroschalls beschreibt. Dazu wurde für jede Messlokation (im Nahbereich an den Hydrophone in 1 m ü.G.) der Median des SEL bei einer Rammenergie von 1140 kJ ermittelt [vgl. Stein et al., 2015d]. Bei den Pfählen A20 (mit HSD direkt am Pfahl) und A66 (ohne Schallminderung) kann dadurch die ungestörte Schallausbreitung in Entfernungen bis zu 1.500 m beschrieben werden (s. Abbildung 66).

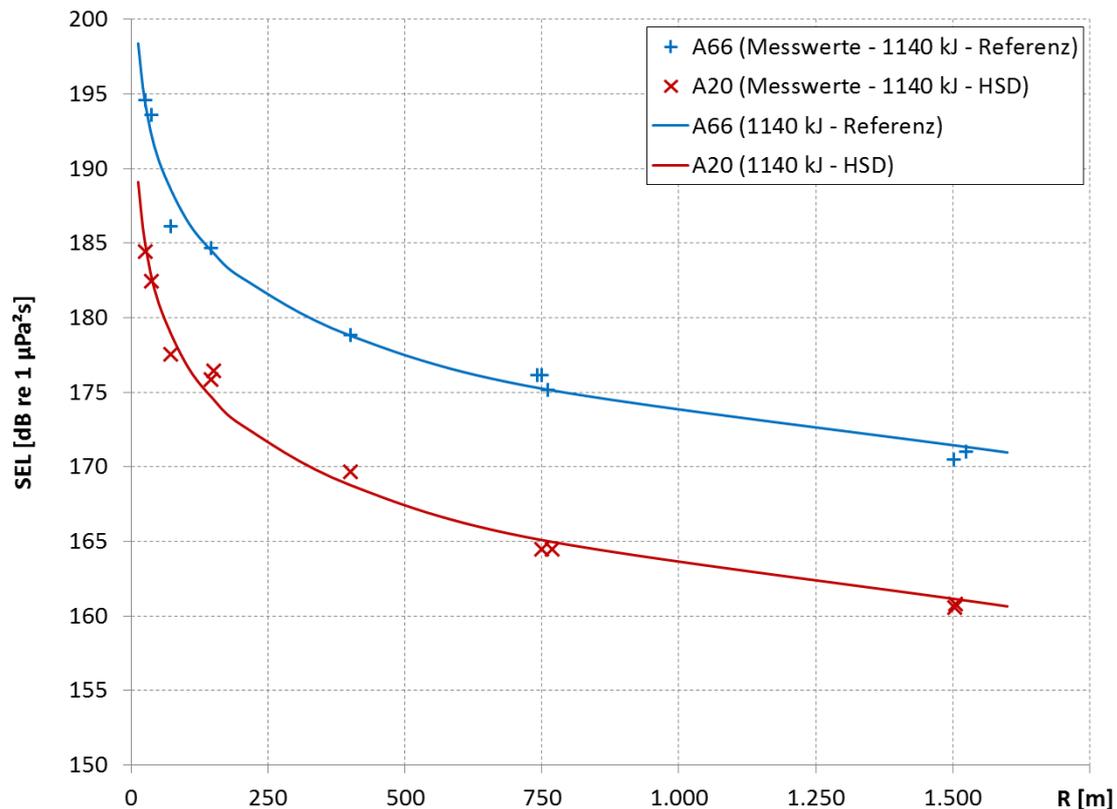


Abbildung 66: Messwerte und Abklingkurven des SEL bei den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, blau) und A20 (mit HSD, rot) [vgl. Stein et al., 2015d]

Der logarithmische Zusammenhang zwischen SEL und Entfernung zum Pfahl kann nach Gleichung (12) beschrieben werden. Der Faktor  $k$  wurde für die Messungen bei den Pfählen A66 und A20 bei einer Rammenergie von 1140 kJ und 570 kJ bestimmt. Mit und ohne HSD ergibt sich eine Bandbreite von  $k \approx 12..14$ .

Bei den übrigen Pfählen wurde über die gesamte Rammdauer ein großer Blasenschleier als Schallminderungssystem zwischen den Messlokalationen im Nah- und Fernbereich eingesetzt. Eine ungestörte Schallausbreitung wurde damit verhindert, was eine Bestimmung des geometrischen Ausbreitungskoeffizienten  $k$  nicht zulässt. Es wird, basierend auf den oben ermittelten Werten für die Pfähle A66 und A20, mit einem baustellenspezifischer Wert von  $k = 12,7$  gerechnet. Auf diese Weise können für jeden Pfahl im Nah- und Fernbereich voneinander unabhängige Abklingkurven ermittelt werden (s. Abbildung 67). Als Quellpegel in einer fiktiven Entfernung von 1 m zum Pfahl wird dabei jeweils der Median aller Messwerte, nach Gleichung (12) normiert auf eine Entfernung von 1 m, gewählt.

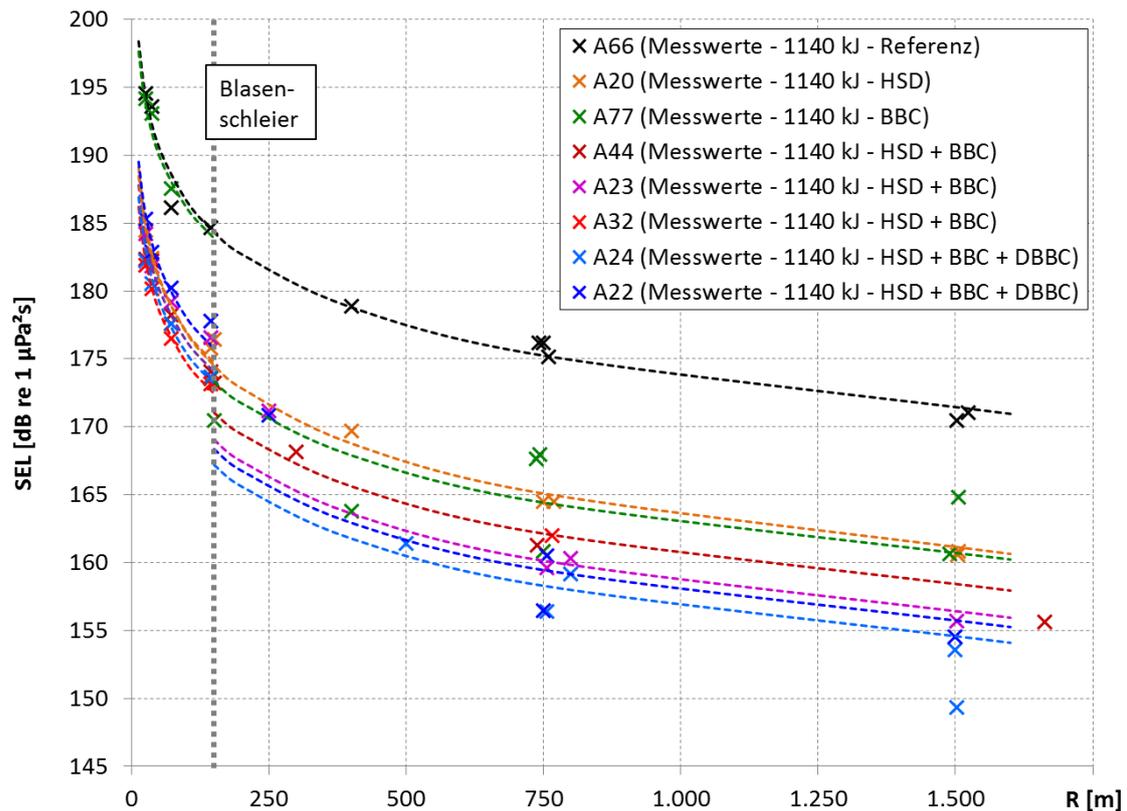


Abbildung 67: Messwerte und Abklingkurven des SEL bei allen Pfählen [vgl. Stein et al., 2015d]

Wie oben beschrieben, zeigt sich bei einigen Pfählen eine größere Streuung zwischen den einzelnen Messwerten um die Abklingkurve (z.B. Pfahl A77). Durch die große Anzahl der Messungen sind dennoch belastbare Aussagen möglich. Es zeigt sich, dass jeweils ähnliche Quellpegel bei Rammungen ohne HSD (A66, A77) und mit HSD (alle anderen) auftreten.

Aufbauend auf den Abklingkurven lassen sich für jede Rammung charakteristische Werte des SEL in einer Entfernung von 750 m zum Pfahl ermitteln. Durch Extrapolation der Nahbereichsmessungen bei allen (Teil-)Rammungen ohne HSD können neben den Messungen beim Pfahl A66 weitere Referenzmessungen des Hydroschalls ohne Schallminderungssystem berücksichtigt werden. Entsprechendes gilt für die verschiedenen Schallminderungskonfigurationen. Tabelle 10 zeigt die so ermittelten charakteristischen Werte des SEL in 750 m Entfernung für 1140 kJ und 570 kJ Rammenergie sowie das sich daraus ergebende Schalldämmmaß  $\Delta$ SEL für verschiedene Schallminderungskonfigurationen.

Für beide Schallminderungssysteme (HSD und BBC) ergibt sich eine Schallminderungswirkung von etwa 10 dB bis 11 dB (SEL). In Kombination erreichen die beiden Systeme ca. 14 dB mit einem einfachen Blasenschleier und ca. 16 dB mit mehreren Blasenschleiern.

Durch die Arrays mit drei bis fünf Hydrophonen an einer Messlokation kann im Nahbereich auch die Abhängigkeit der Schallpegel von der Wassertiefe bzw. dem Abstand zum Meeresboden untersucht werden. Abbildung 68 zeigt den SEL in verschiedenen Höhen über Grund an den Messlokationen im Nahbereich für Pfähle mit verschiedenen Schallminderungskonfigurationen. Entsprechende Abbildungen für alle Pfähle finden sich in Anhang G.

Tabelle 10: Mediane der Messwerte des SEL bei verschiedenen Pfählen und Rammenergien normiert auf 750 m

Pfahl	Schallminderungs- system	SEL	$\Delta$ SEL	SEL	$\Delta$ SEL
		[dB] (@ 750 m; 1140 kJ)		[dB] (@ 750 m; 570 kJ)	
A66	Referenz	175,2		174,1	
A77		175,0		171,9	
A20				173,2	
A44				170,8	
Median		175,1		172,6	
A20	HSD	165,1		161,7	
A44		165,1			
A23		165,8			
A24		164,2			
A22		166,9			
A32		163,5			
Median		165,1	-10,0	161,7	-10,9
A77	BBC	164,4		160,2	
A44				165,5	
Median		164,4	-10,7	162,9	-9,7
A44	HSD + BBC	162,1			
A23		160,1			
Median		161,1	-14,0		
A24	HSD + BBC + DBBC	158,3			
A22		159,4			
Median		158,9	-16,2		

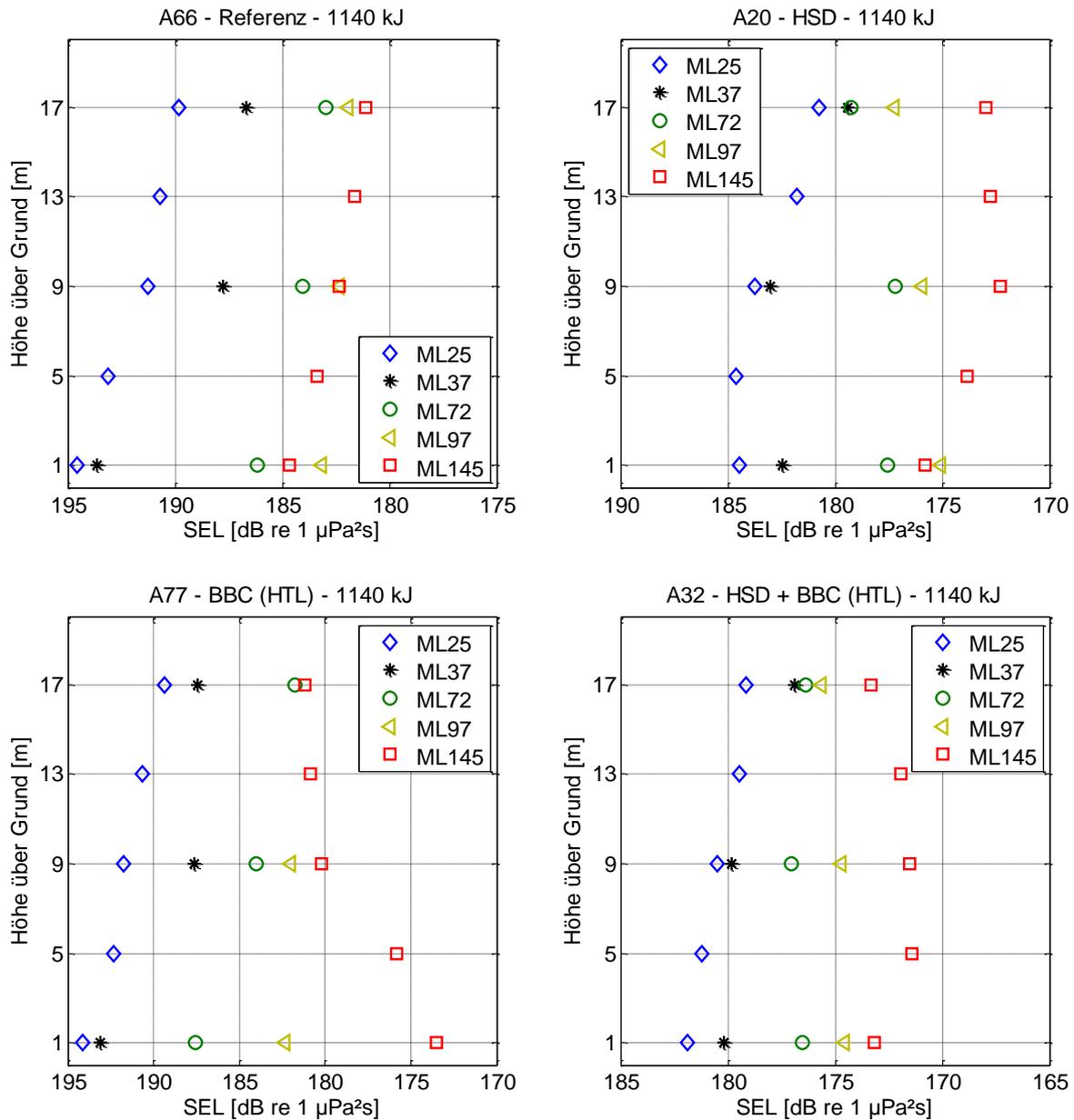


Abbildung 68: SEL über die Wassertiefe an allen ML im Nahbereich bei verschiedenen Pfählen

Tendenziell lassen sich höhere Schallpegel in größeren Wassertiefen feststellen. Abweichungen sind u.a. auf Reflexionen des BBC zurückzuführen (vgl. Abschnitt II.5.3.4).

Aus den gemessenen Hydroschallpegeln in verschiedenen Tiefen und Entfernungen lässt sich ein zweidimensionales Bild der Lautstärke im Nahbereich erstellen. Abbildung 69 zeigt Konturplots des SEL im Nahbereich bei Rammung der Pfähle A66 (Referenzpfahl, oben) und A20 (HSD, unten) mit 1140 kJ. Entsprechende Abbildungen für die übrigen Pfähle sind Anhang H zu entnehmen.

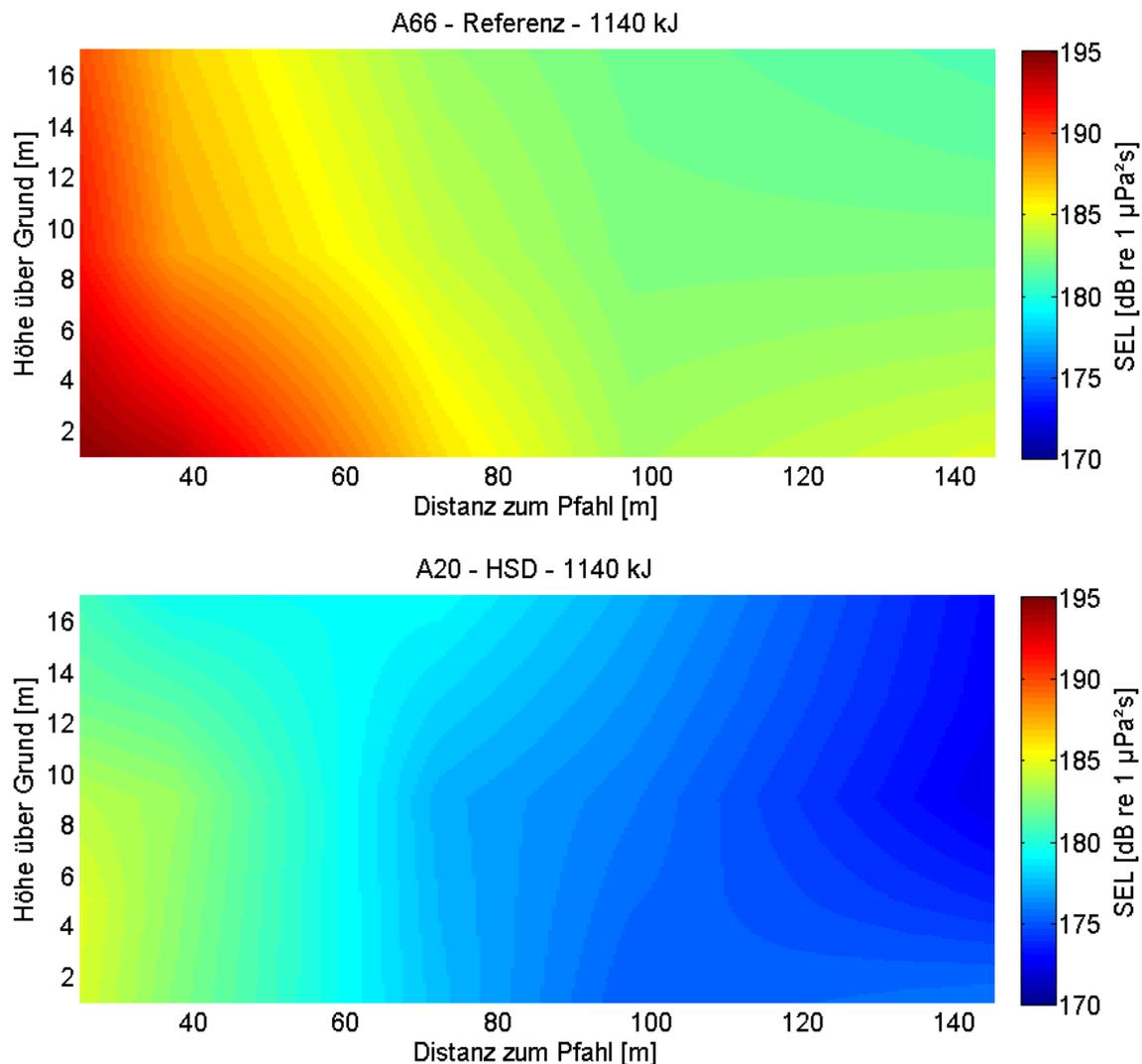


Abbildung 69: Konturplots des SEL im Nahbereich an den Pfählen A66 (oben) und A20 (unten)

Deutlich zu erkennen ist die Pegelminderung durch das HSD-System. Bei der ungestörten Schallausbreitung bei Pfahl A66 ist neben der geometrischen Ausbreitungsdämpfung auch ein erhöhter Schallpegel in größerer Wassertiefe zu erkennen. Bei A20 ist diese Tendenz weniger deutlich zu erkennen, insbesondere am Pfahl und in größerer Entfernung sind jedoch wieder die Pegel in Bodennähe erhöht. In etwa 100 m ist beim Referenzpfahl A66 deutlich ein Einbruch des SEL zu erkennen. Dieser ist auf die Verschattung von ML97 durch eines der Beine des Errichterschiffes zurückzuführen (vgl. Abbildung 41).

### II.5.3.2. Untersuchung der Schallemissionen im Frequenzbereich

Zur Untersuchung der Wirkungsweise der Schallminderungssysteme im Frequenzbereich werden Terzanalysen der Hydroschallemissionen an den einzelnen Messlokalationen bei einem Energieniveau von 1140 kJ bei der Rammung von Pfählen mit unterschiedlicher Schallminderungskonfiguration angefertigt (s. Abbildung 70). Entsprechende Spektren aller Pfähle finden sich in Anhang I.

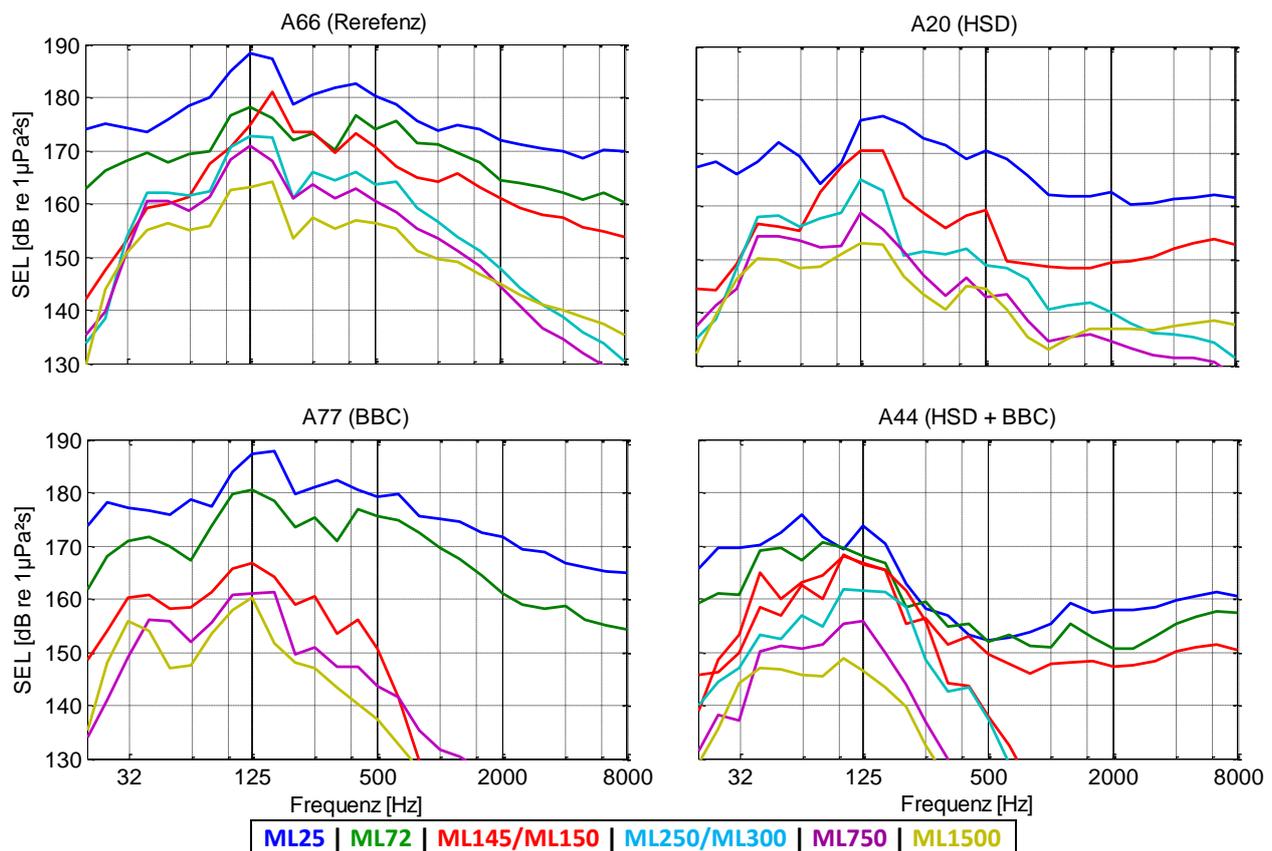
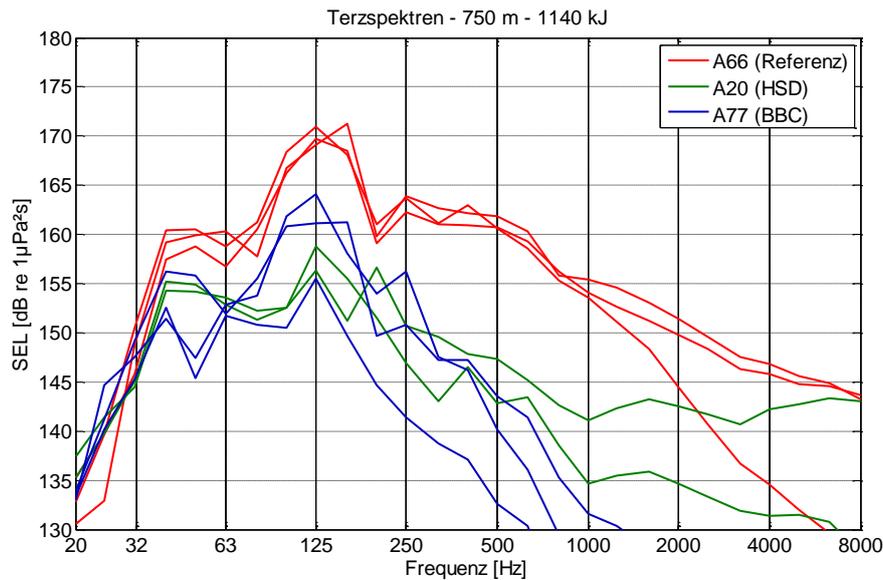


Abbildung 70: Terzspektren an Pfählen mit verschiedenen Schallminderungskonfigurationen [vgl. Bruns et al., 2014]

Am Referenzpfahl A66 (oben links) kann die ungestörte geometrische Dämpfung untersucht werden. Die überproportionale Abnahme im unteren Frequenzbereich ist mit der unteren Grenzfrequenz zu erklären (vgl. Gleichung (17) sowie Stein et al. [2015a]). Bei Pfahl A20 (oben rechts) ist ein Rückgang der Pegel an allen Messlokalitäten durch das HSD-System zu erkennen. Beim Pfahl A77 (unten links) tritt eine Minderung durch den Blasenschleier zwischen ML72 (grün) und ML150 (rote Linie) und vor allem im höherfrequenten Bereich auf, während ML25 und ML72 (blau, grün) innerhalb des BBC gegenüber der Referenzmessung keine signifikanten Unterschiede zeigen. An Pfahl A44 zeigt sich die Wirkung des kombinierten Einsatzes von HSD und BBC durch einen verminderten Ausgangspegel an ML25 und ML72 (blau, grün) sowie eine weitere Verminderung im höherfrequenten Bereich zwischen ML145 und ML150 (beide rot).

Beim Vergleich der Referenzmessungen ohne Schallminderung (rot), mit Blasenschleier (blau) und mit HSD-System (grün, Abbildung 71) in Abständen von etwa 750 m zum Pfahl aber verschiedenen Messrichtungen zeigt sich ebenfalls eine größere Streuung beim Blasenschleier als bei den anderen Messungen. Die Referenzmessung ohne Schallminderung zeigt in Frequenzen bis 1.000 Hz geringe Abweichungen, die etwa im Bereich der Streuungen bei konstanter Rammenergie liegen (vgl. Abbildung 72, oben).



**Abbildung 71: Terzspektren bei den Referenzmessungen an den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, rot), A20 (mit HSD, grün), und A77 (mit BBC, blau) in 750 m Entfernung in verschiedenen Richtungen [vgl. Stein et al., 2015d]**

Abbildung 71 zeigt auch die Dämpfungswirkung von HSD und Blasenschleier im Frequenzbereich als Abstand zwischen dem jeweiligen Terzspektrum und dem der Referenzmessung (rot). Der Blasenschleier (blau) zeigt eine Dämpfungswirkung von über 20 dB in Frequenzen größer als 500 Hz bis 1.000 Hz, während die Dämpfungswirkung des HSD-Systems hier wieder abnimmt und am rechten Rand des Spektrums nicht mehr vorhanden ist. Im pegelbestimmenden Bereich um 125 Hz (vgl. Abbildung 54) erreicht das HSD-System eine Dämpfungswirkung von etwa 10 dB bis 15 dB. Auch der Blasenschleier kann diese Werte an einer Messlokation erreichen, zeigt in den beiden anderen Richtungen jedoch eine deutlich geringere Dämpfung.

Die Messwerte des SEL unterliegen Streuungen, die in systematischen (Einbindetiefe, eingestellte Rammenergie) oder stochastischen (übertragene Rammenergie) Änderungen des angeregten Systems, Änderungen der Umwelteinflüsse (Bewegungen des Wassers, Strömung) oder Messungenauigkeiten (Bewegung oder Verschattung von Sensoren, Messfehler) begründet sein können. In Abbildung 72 ist beispielhaft der Median des SEL im Frequenzbereich (schwarz) und die dazugehörige Streuung (rot) bei konstanter Rammenergie dargestellt.

Es zeigt sich eine Streuung von wenigen Dezibel. Bei niedrigen Frequenzen ist die Streuung tendenziell geringer als bei höheren Frequenzen. Außerdem zeigt die Messung mit Blasenschleier (Abbildung 72, unten) größere Streuungen als die Referenzmessung (oben) und die Messung mit HSD (Mitte).

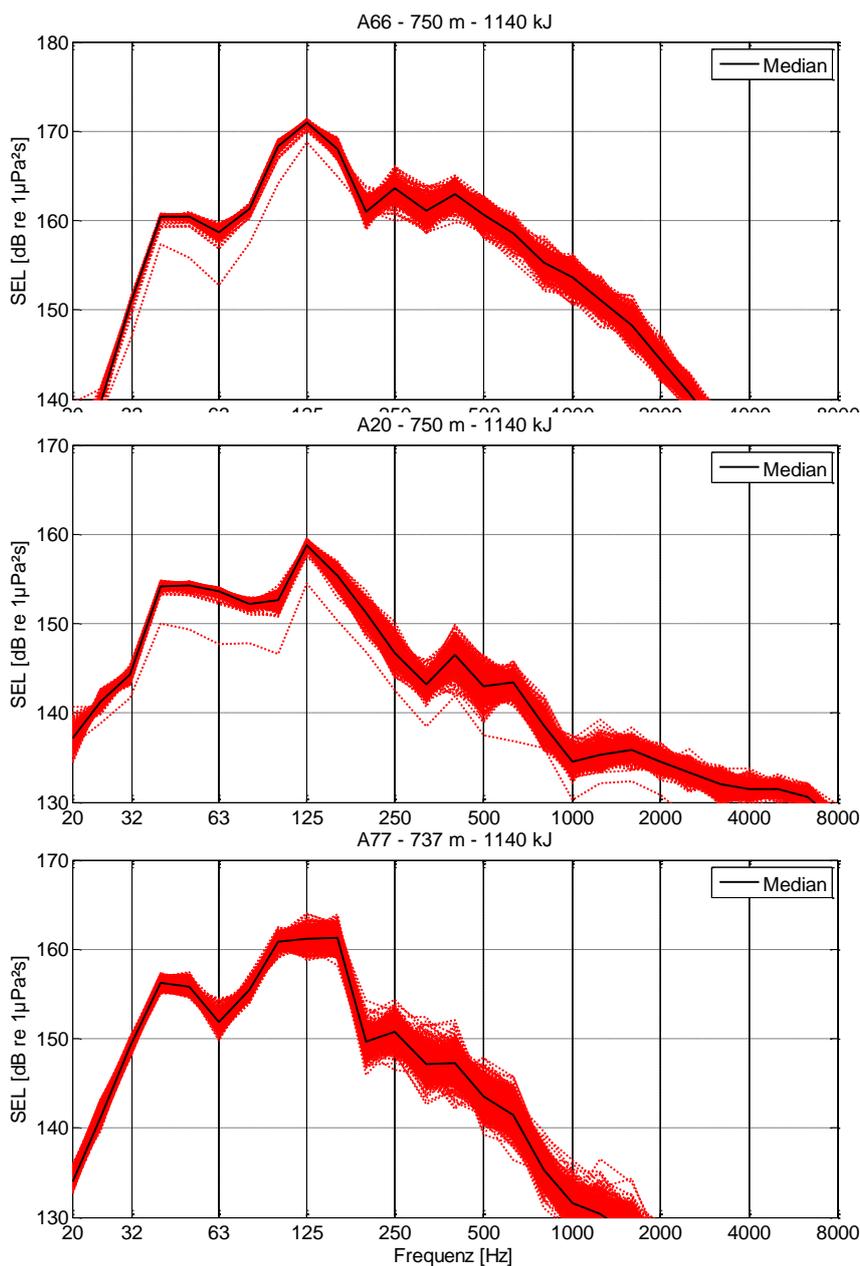


Abbildung 72: Streuung (rot) und Median (schwarz) der Terzspektren bei 1140 kJ Rammenergie bei den Referenzmessungen an den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, oben), A20 (mit HSD, Mitte), und A77 (mit BBC, unten)

Wie in Abschnitt II.4.6 beschrieben, werden mit steigender Rammenergie höhere Hydroschallemissionen ermittelt. Eine Ausnahme stellt der SEL zu Beginn der Rammung dar (vgl. Abschnitt II.5.3.3). Ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang lässt sich jedoch nicht feststellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Rammenergie aus verfahrenstechnischen Gründen mit fortschreitender Eindringung des Pfahles in den Baugrund gesteigert wurde und somit die Einbindelänge des Pfahles ebenfalls sukzessive verändert wurde, was die Schallabstrahlung beeinflussen kann. Die folgende Abbildung 73 zeigt Terzspektren an Pfählen mit verschiedenen Schallminderungskonfigurationen bei unterschiedlichen Rammniveaus. Für die dargestellten Terzspektren wurde jeweils der Median des SEL in der entsprechenden Frequenz bei einem Energieniveau gewählt. Dunklere Graustufen signalisieren eine höhere Rammenergie.

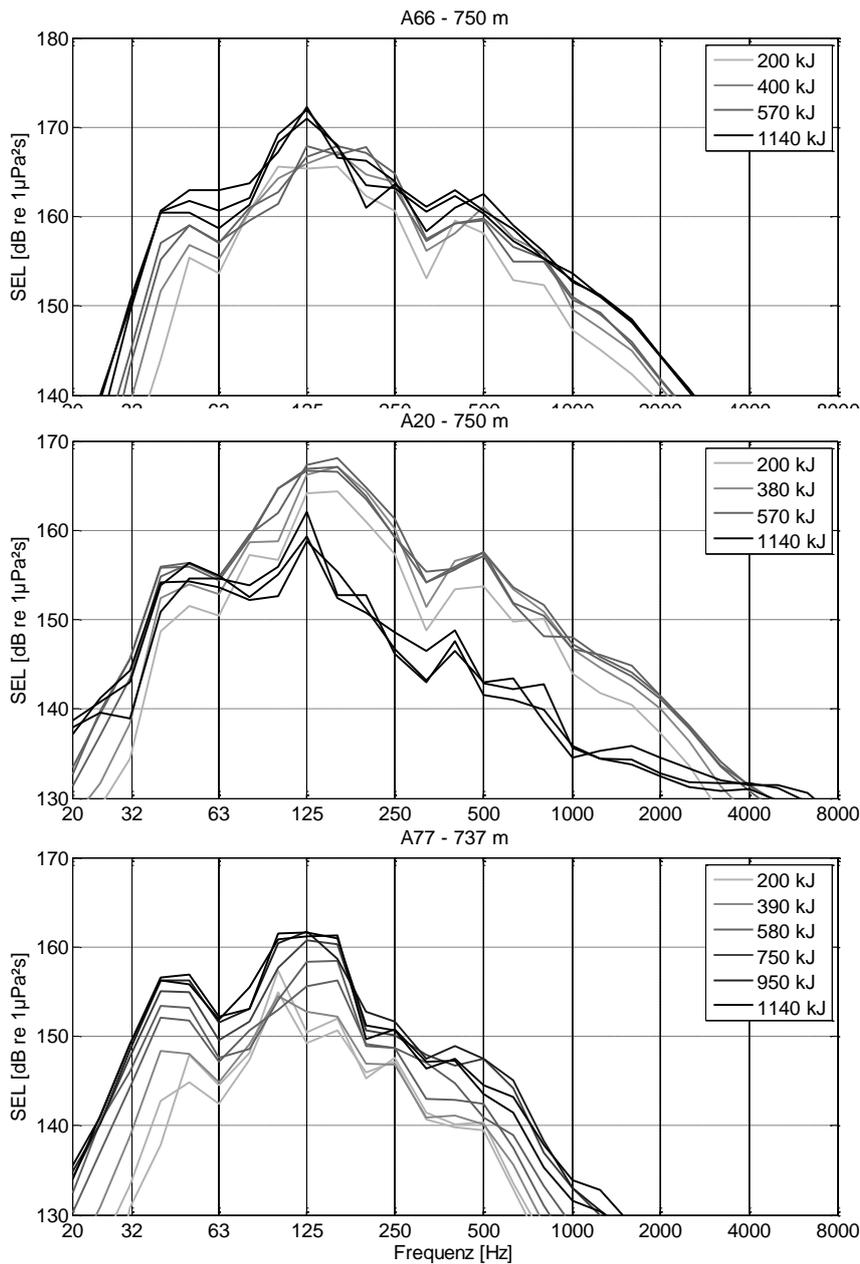


Abbildung 73: Terzspektren für verschiedene Rammenergien bei den Referenzmessungen an den Pfählen A66 (ohne Schallminderung, oben), A20 (mit HSD, Mitte), und A77 (mit BBC, unten)

Tendenziell kann ein höherer SEL bei höherer Rammenergie über den gesamten Frequenzbereich festgestellt werden. Bei A20 (Abbildung 73, Mitte) sind die niedrigeren Hydroschallemissionen bei maximaler Rammenergie (1140 kJ) auf den Einsatz des HSD-Systems zurückzuführen (vgl. Abschnitt II.4.6, insbes. Abbildung 52).

### II.5.3.3. Erhöhte Einzelereignispegel zu Beginn der Rammung

Wie Abbildung 50 zeigt, ist zu Beginn der Rammung (die ersten etwa 200 Schläge) des Pfahles A66 ein tendenzieller Rückgang des SEL bei gleichbleibender Rammenergie zu beobachten. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei den übrigen Rammungen zu erkennen (vgl. Anhang D). Abbildung 74 zeigt einen Ausschnitt der Entwicklung von SEL und  $L_{peak}$  zu Beginn der Rammung an Pfahl A66.

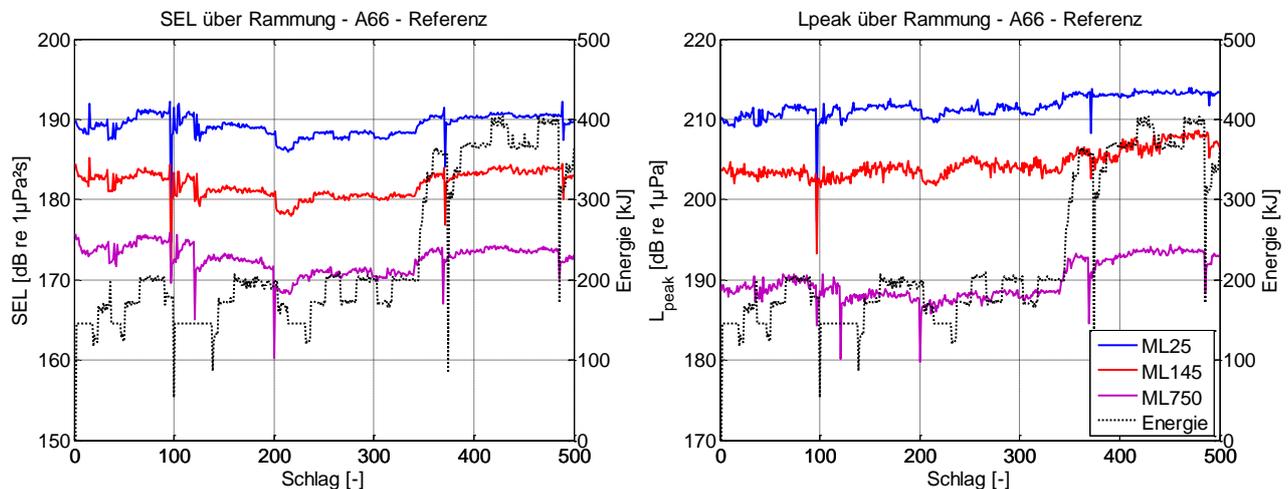


Abbildung 74: Entwicklung von SEL (links),  $L_{peak}$  (rechts) und Rammenergie zu Beginn der Rammung des Pfahles A66

Es wird deutlich, dass der Einzelereignispegel nach einigen hundert Schlägen abnimmt und erst bei einer Erhöhung der Rammenergie bei ca. Schlag 350 wieder ansteigt. Beim Spitzenpegel ist ein Abfall nicht zu beobachten.

Während der  $L_{peak}$  die maximal auftretende Amplitude des Schalldrucks eines Rammschlages angibt, ist der SEL ein Maß für die im Schlag enthaltene Energie und hängt damit auch von der Dauer des Ereignisses ab (vgl. Abbildung 7, oben und Gleichung (5)). Sowohl Amplitude als auch Dauer des Ereignisses werden maßgeblich vom Verhalten der Schallquelle beeinflusst. Abbildung 75 zeigt die gemessenen Geschwindigkeiten bei Pfahl A66 für zwei Schläge zu Beginn der Rammung.

Bei Schlag 35 (oben) sind sechs Wellendurchläufe klar zu erkennen. Bei Schlag 340 (unten) hingegen klingt das Signal nach zwei Reflexionen ab. Die Amplituden des Einleitungsimpulses sind bei beiden Schlägen vergleichbar. Jeder Wellendurchlauf emittiert über die Querschwingung des Pfahls Hydro-schall ins Wasser. Ein längeres Hydroschallsignal resultiert dann in einem höheren SEL. Durch die am Pfahlmantel angreifende Bodenreibung werden die Schwingungen des Pfahls nach wenigen Wellendurchläufen absorbiert. Bei einer geringen Einbindelänge und/oder weichen Bodenschichten ist diese Dämpfung sehr gering, sodass die Pfahlschwingung erst nach mehreren Wellendurchläufen abgeklungen ist [Stein et al., 2015a c].

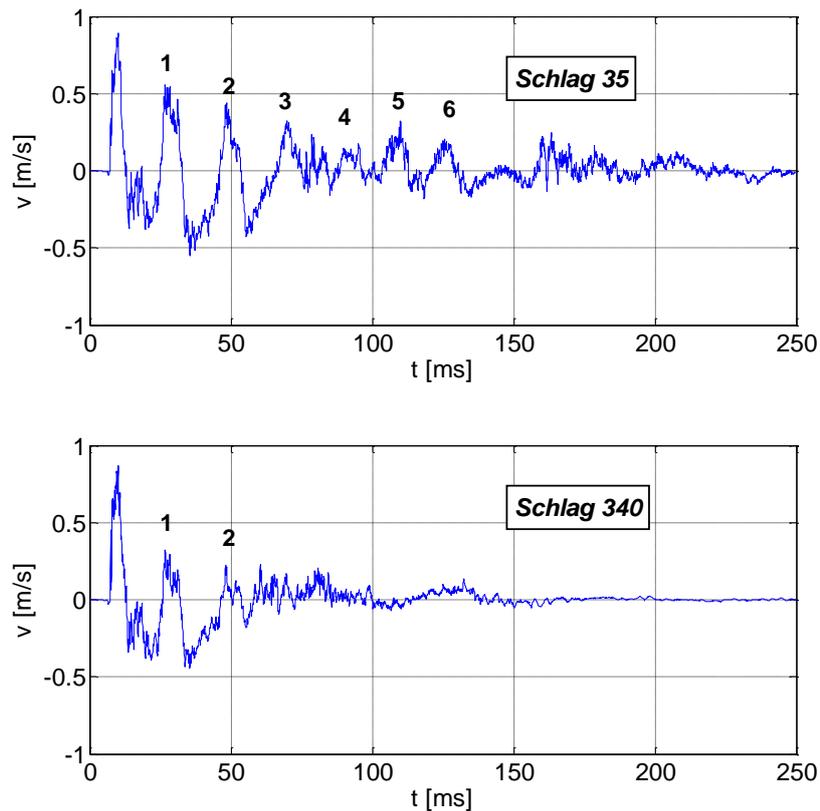


Abbildung 75: Verlauf der axialen Geschwindigkeit an MQ1a bei Pfahl A66 für Schlag 35 (oben) und Schlag 340 (unten) [vgl. Stein et al., 2015c]

#### II.5.3.4. Reflexionen am Blasenschleier

Wie in Abschnitt I.4.5 beschrieben, wird der vom Pfahl ausgehende Schall am Blasenschleier reflektiert. Die Reflexion ist an Messlokalationen, die sich nah am Blasenschleier befinden, messbar. Abbildung 76 zeigt beispielhaft das Hydroschallsignal eines Schlages der ersten Rammphase (ohne HSD, mit BBC) bei der Installation des Pfahles A24 an ML145.

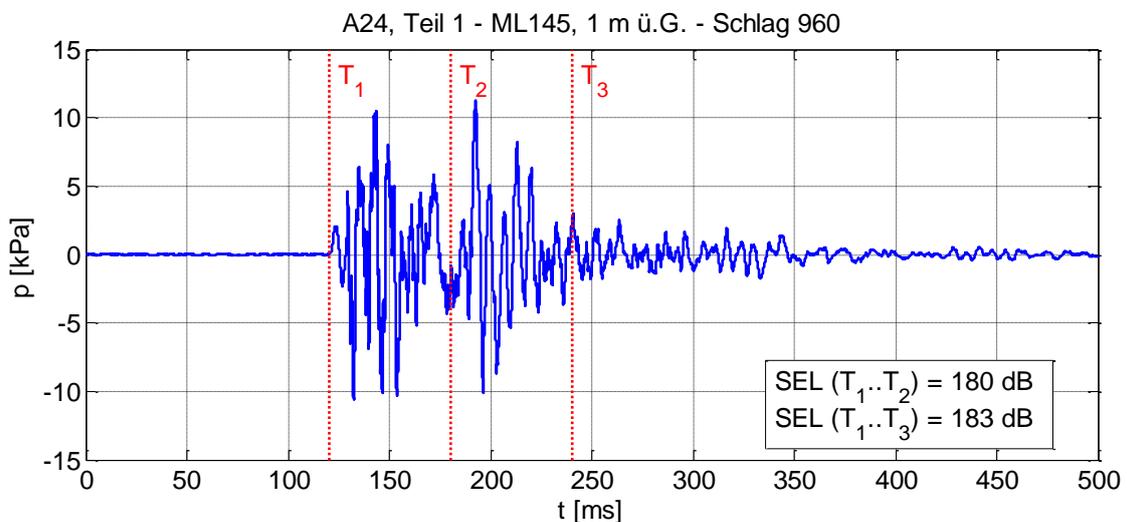


Abbildung 76: Hydrophonsignal an ML145 bei Pfahl A24 mit Reflexion vom Blasenschleier

Nach dem Hydroschallsignal vom Pfahl ( $T_1$  bis  $T_2$ ) trifft ein weiteres Hydroschallsignal ( $T_2$  bis  $T_3$ ) ein. Die Signale haben einen Abstand von etwa 55 ms, was bei einer Schallgeschwindigkeit von 1487 m/s (vgl. Abschnitt II.4.2) einem Laufweg von 89 m bzw. einem Abstand von 44,5 m zum Blasenschlier entspricht. Durch eine Verlängerung des Hydroschallsignals bewirkt die Reflexion auch eine Erhöhung des SEL um 3 dB, was einer Verdoppelung der Schallenergiedichte entspricht.

Abbildung 77 zeigt das Hydrophonsignal desselben Schlages an ML37. Eine deutliche Reflexion ist hier nicht zu erkennen, was mit der größeren Distanz zum Blasenschlier zu erklären ist.

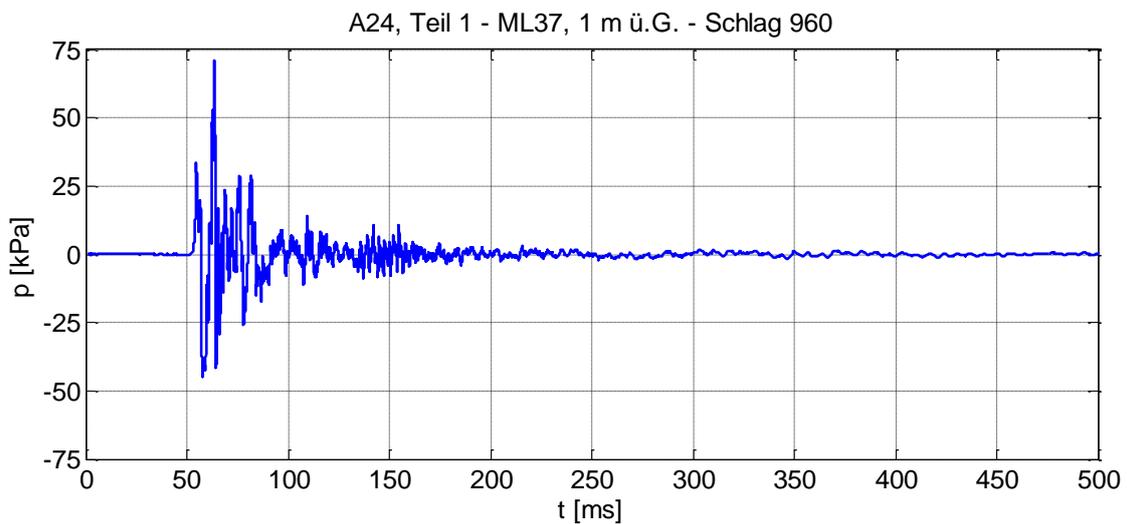


Abbildung 77: Hydrophonsignal an ML37 bei Pfahl A24

## II.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse der Pfahlmessungen konnte die Ausbreitung der Dehnwellen im Monopfahl während der Rammung beschrieben werden. Die gemessene eingeleitete Energie entsprach zum Ende der Rammung nur ca. 80% der vom Rammhammer laut Rammprotokoll aufgebrauchten Energie, was für Vorschädigungs- und Ermüdungsbetrachtungen von großer Bedeutung sein kann. Zu Beginn der Rammung zeigen sich mehrere Wellendurchläufe aufgrund der geringen Bodendämpfung. Diese verursachen ein auch anhand der Hydroschallmessungen beobachtetes langes Hydroschallereignis, welches einen mit Hinblick auf die geringe Rammenergie zu Beginn der Rammung vergleichsweise erhöhten SEL zur Folge hat. Die Dämpfung der Dehnwelle im Pfahl bei fortschreitender Eindringung konnte zudem an den einzelnen Messquerschnitten in verschiedenen Tiefenlagen beobachtet werden. Bei detaillierter Betrachtung der Signalverläufe ist die Hydroschall erzeugende Querdehnung bzw. 'Atmung' des Pfahls zu erkennen.

In den Geophonsignalen ist neben der seismischen Welle auch ein Anteil aus Hydroschall zu erkennen, der eine Ermittlung der Laufzeitdifferenzen zwischen Hydroschall- und Bodenwelle zulässt. Die deutlich langsamere detektierte Bodenwelle konnte so unter Berücksichtigung der Schwingungsrichtungen als Scholte-Welle an der Grenzschicht zwischen Boden und Wasser identifiziert werden. Die Amplituden der seismischen Welle zeigen in verschiedenen Richtungen (radial und vertikal) ein komplexes Verhalten über den Verlauf der Rammung, welches auf eine Überlagerung verschiedener Wellenarten zurückgeführt werden kann. Tendenziell nehmen die Schwinggeschwindigkeiten über die Entfernung ab, ein Einfluss der Rammenergie ist nicht zu erkennen.

Für die Hydroschallpegel konnte der bekannte logarithmische Ansatz zur Beschreibung der geometrischen Dämpfung bestätigt und ein standortspezifischer Ausbreitungskoeffizient errechnet werden. Mit steigender Wassertiefe bzw. geringerem Abstand zum Grund nehmen die Schallpegel tendenziell zu. HSD-System und andere Objekte im Nahbereich des Pfahles beeinflussen die Schallausbreitung stark.

Die Minderungswirkung von HSD und BBC konnte jeweils einzeln zu 10 dB bis 11 dB bestimmt werden. In Kombination wurden 14 dB bis 16 dB erreicht, sodass beim OWP *Amrumbank West* die Grenzwerte des impulsartigen Hydroschalls mit der gewählten Schallminderungskonfiguration eingehalten werden konnten. Das HSD-System wirkt dabei vorwiegend im Pegelbestimmenden Bereich um 125 Hz während der Blasenschleier in Frequenzen über 500 Hz eine hohe Dämpfungswirkung erzielt. Beim kombinierten Einsatz zeigt sich so eine hohe Schallminderung über den gesamten Messbereich und das gute Zusammenwirken der eingesetzten Schallminderungssysteme. Messungen in verschiedenen Richtungen zum Pfahl zeigten eine größere Streuung der Dämpfungswirkung des Blasenschleiers im Vergleich zum HSD-Systems und einer Referenzmessung ohne Schallminderung.

# triad

Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrum-bank West -  
Untersuchung der Schallkopplungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser



Förderkennzeichen 0325681

**Anhang zum  
Abschlussbericht**

## **Anhang A    Laborprotokoll ifs**

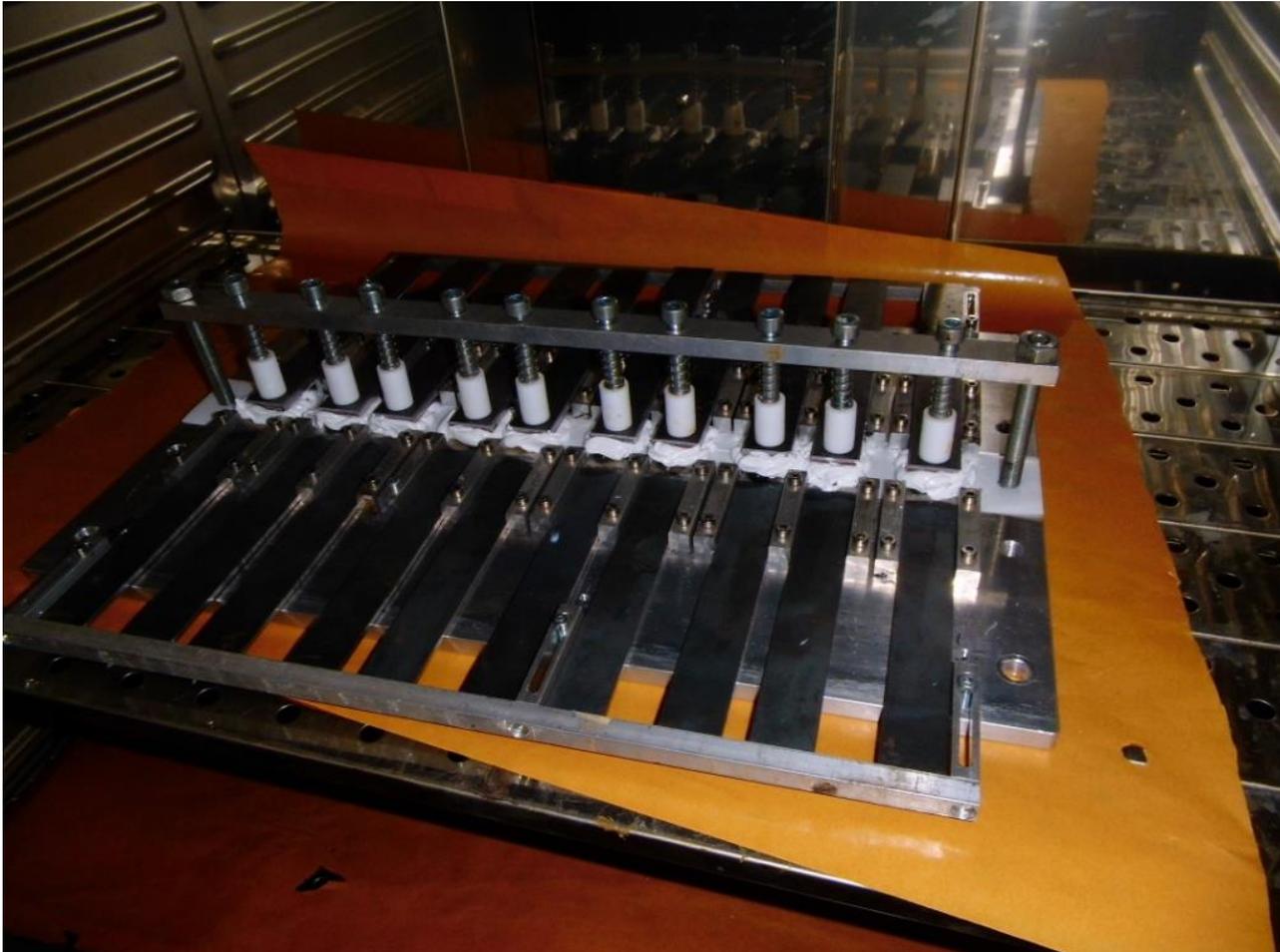
Die folgenden Folien zeigen die Ergebnisse der am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig (ifs) durchgeführten Versuche zum Nachweis der Eignung des gewählten Klebstoffes zur Anbringung von Messtechnik und Einhausungen an den instrumentierten Monopfählen.



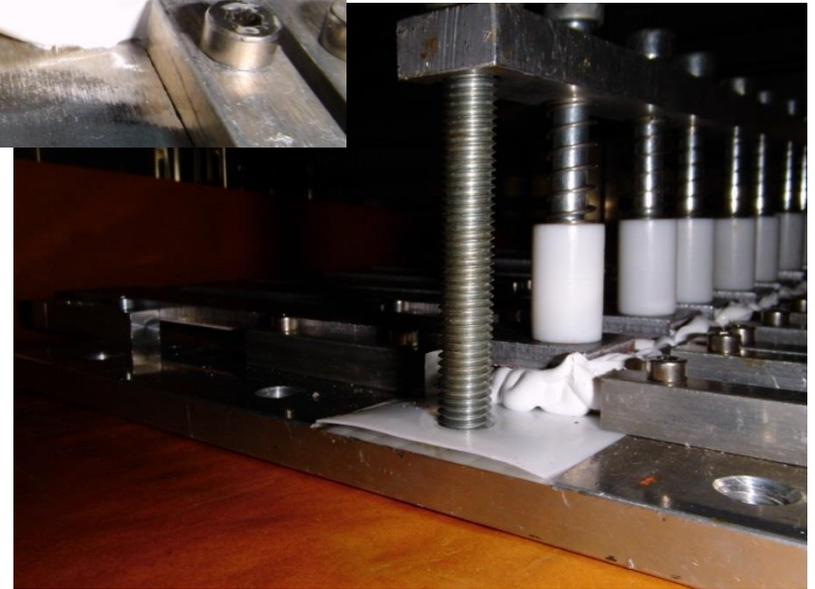
## **Klebversuche im Projekt TRIAD, Sensorik kleben im Monopile mit SIKAFLEX 553 PUR Boostersystem**

Vorversuche mit Primern und Klebstoff Sikaflex 553 in Dickschichttechnik

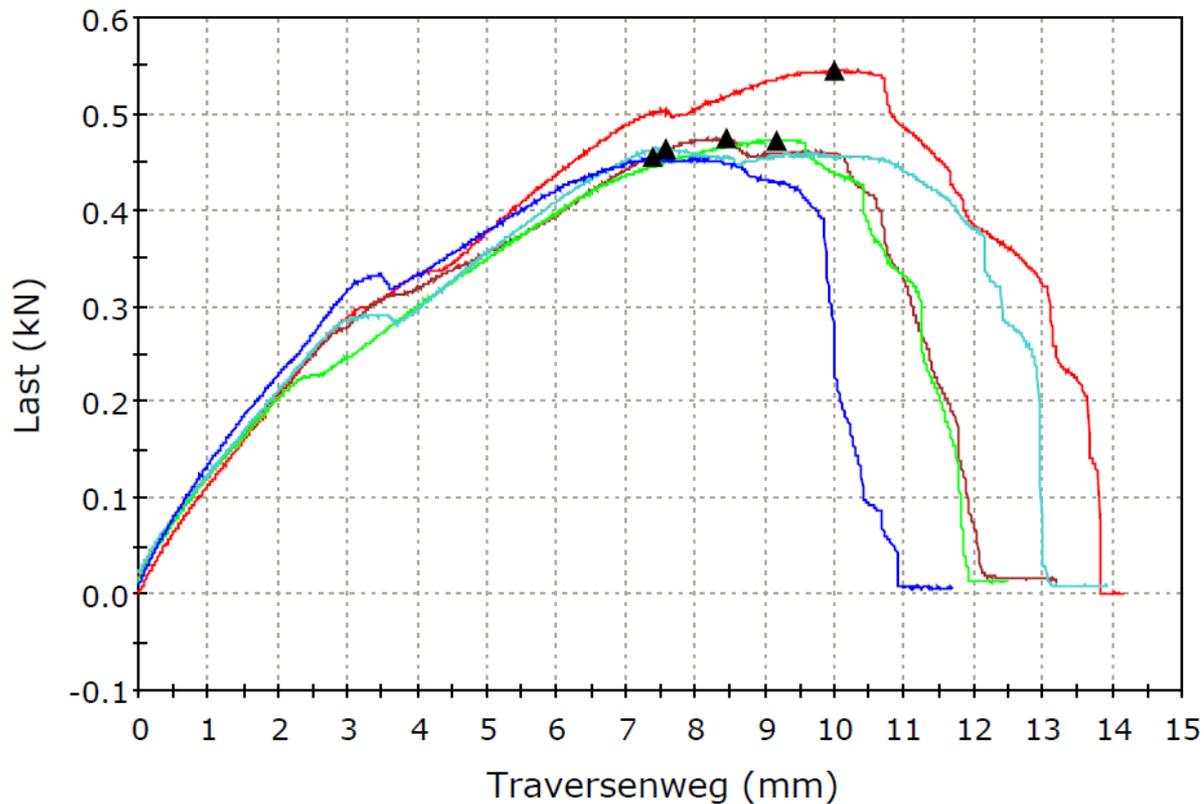
# Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 Beschichtung: Fixiervorrichtung zum Probenaushärten



# Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 Beschichtung mit SIKAFLEX 553



# Zugscherprüfung von Dickschichtklebungen Stahl s355 auf Interzone 954 : 3 mm Schichtdicke



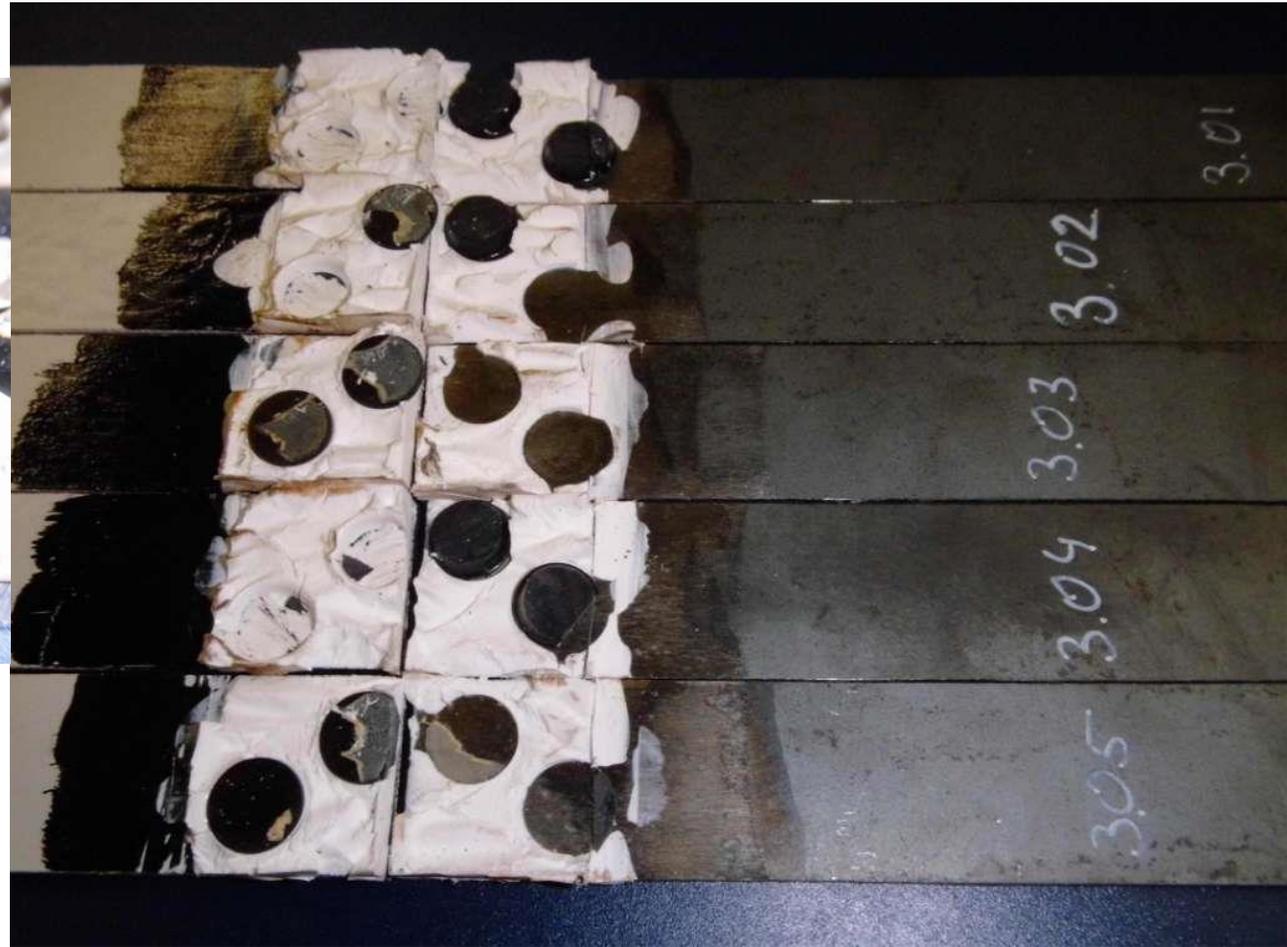
Probenname	
—	Triad_3_01
—	Triad_3_02
—	Triad_3_03
—	Triad_3_04
—	Triad_3_05

	Zugspannung bei Maximum Last (MPa)
1	1,77412
2	1,50662
3	1,49193
4	1,48345
5	1,48609

# Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 : 3 mm hohe Abstandhalter in der Klebschicht



- Anteil Abstandshalter an der Klebschicht extrem groß, reale Klebschichten erhalten nur wenige Abstandshalter in großen Abständen

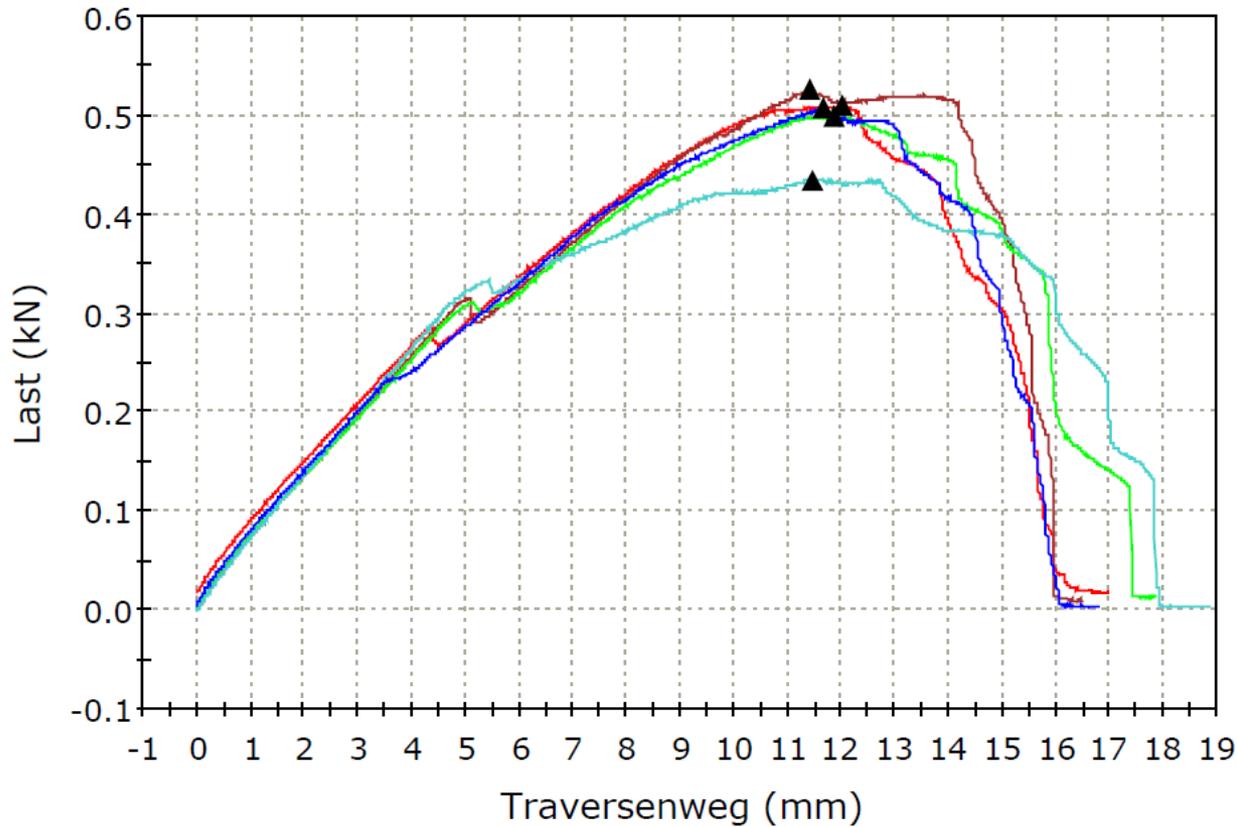


# Bruchbilder Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 : 3 mm hohe Abstandhalter in der Klebschicht



- Schwarzprimer auf Interzone haftet sehr gut
- Klebstoff versagt kohäsiv innerhalb der Dickschicht

# Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 : 5 mm



Probenname	
—	Triad_5_01
—	Triad_5_02
—	Triad_5_03
—	Triad_5_04
—	Triad_5_05

	Zugspannung bei Maximum Last (MPa)
1	1,44444
2	1,51322
3	1,45046
4	1,23515
5	1,43189

# Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 : 5 mm hohe Abstandhalter in der Klebschicht



# Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 : 5 mm hohe Abstandhalter in der Klebschicht



- Schwarzprimer auf Interzone haftet sehr gut
- Klebstoff versagt kohäsiv innerhalb der Dickschicht

# Dickschichtklebung Stahl s355 auf Interzone 954 : Versagen ausschließlich in der Klebschicht

Fazit der Versuche:

- Dickschichtklebungen haften gut auf den jeweiligen Primern 205 (Metalle) und 206 (Kunststoffe und Lacke)
- Schwarzprimer 206 G+P auf Interzone 954 haftet ebenfalls sehr gut
- Klebstoff versagt kohäsiv innerhalb der Dickschicht nach über 100 % Gleitung (Schubverzerrung)
- Klebschicht macht große Deformationen mit, ohne zu versagen
- Das gewählte Klebstoffsystem erscheint sehr gut geeignet für die designierte Aufgabe zur Klebung von Sensorik und Peripherie im Mono-Pfahl

## **Anhang B    Kurzbericht Hydroschall IGB-TUBS**

Der folgende Kurzbericht wurde nach Abschluss der Messkampagnen erstellt und der *E.ON Climate & Renewables* zur Verfügung gestellt.



## Messung der Hydroschallemissionen bei den Rammarbeiten im Offshore-Windpark Amrumbank West

### Rammung der Monopile-Gründungen A24, A23, A22, A44, A32, A77, A66, A20

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik  
Beethovenstraße 51 b  
38106 Braunschweig  
Deutschland

Dipl.-Wirtsch.-Ing.  
Philipp Stein

Tel. +49 (0) 531 391-62017  
Fax +49 (0) 531 391-62040  
p.stein@tu-braunschweig.de  
www.igb-tubs.de

Projekt: Amrumbank West (AWG)

Datum: 23. Juni 2015

Auftraggeber: Die Messungen wurden im Rahmen des vom BMWi / PTJ  
geförderten Forschungsvorhabens triad (FKZ 0325681)  
durchgeführt.

Unser Zeichen: triad

Messzeitraum: 5. Mai 2014 (A24)  
7. Mai 2014 (A23)  
8./9. Mai 2014 (A22)  
3. Oktober 2014 (A44)  
12. Oktober 2014 (A32)  
15. Oktober 2014 (A77)  
16. Oktober 2014 (A66)  
17. Oktober 2014 (A20)

NORD/LB Hannover  
Kontonummer: 1999200  
BLZ: 25050000

IBAN: DE79 2505 0000 0001 9992 00  
BIC (Swift Code): NOLA DE 2H  
USt.-ID-Nr.: DE 152330858  
Steuer-Nr.: 14/201/24509

Messort: OWP Amrumbank West, Deutsche Bucht

Bearbeitung: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Stein  
Dipl.-Ing. Benedikt Bruns  
Dipl.-Wirtsch.-Ing Hauke Sychla

Projektleitung: Dr.-Ing. Jörg Gattermann

Berichtsumfang: 60 Seiten

Versionshistorie:

Version	Datum	Bemerkung	Bearbeiter
01	1. Juni 2015	Erster Entwurf	St

## Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines .....	5
2	Schallminderungssysteme .....	5
3	Messpositionen .....	5
4	Messequipment.....	7
5	Datenauswertung .....	8
6	Übersicht der Hydroschall-Messungen .....	8
7	Messergebnisse .....	9
7.1	Übersicht .....	9
7.2	Pfahl A24.....	12
7.3	Pfahl A23.....	20
7.4	Pfahl A22.....	27
7.5	Pfahl A44.....	35
7.6	Pfahl A32.....	41
7.7	Pfahl A77.....	45
7.8	Pfahl A66.....	49
7.9	Pfahl A20.....	53

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eingesetztes Messequipment .....	8
Tabelle 2:	Übersicht der Hydroschall-Messungen .....	8
Tabelle 3:	Spitzenpegel ( $L_{peak}$ ) und statistische Mittelungspegel des breitbandigen Einzelereignispegels (SEL) .....	10

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispielhafte Anordnung der Messlokationen (ML) des IGB-TUBS .....	7
Abbildung 2:	Entwicklung des SEL (oben) und $L_{peak}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A24.....	12
Abbildung 3:	Häufigkeitsverteilung von SEL und $L_{peak}$ im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	13
Abbildung 4:	Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten) .....	14
Abbildung 5:	Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten) .....	15
Abbildung 6:	Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten) .....	16
Abbildung 7:	Terzspektren des SEL im Abstand von 500 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten) .....	17

Abbildung 8: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	18
Abbildung 9: Terzspektren des SEL im Abstand von 1500 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	19
Abbildung 10: Entwicklung des SEL (oben) und $L_{\text{peak}}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A23.....	20
Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung von SEL und $L_{\text{peak}}$ im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	21
Abbildung 12: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	22
Abbildung 13: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	23
Abbildung 14: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	24
Abbildung 15: Terzspektren des SEL im Abstand von 250 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	25
Abbildung 16: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	26
Abbildung 17: Entwicklung des SEL (oben) und $L_{\text{peak}}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A22.....	27
Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung von SEL und $L_{\text{peak}}$ im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	28
Abbildung 19: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	29
Abbildung 20: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	30
Abbildung 21: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	31
Abbildung 22: Terzspektren des SEL im Abstand von 250 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	32
Abbildung 23: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	33
Abbildung 24: Terzspektren des SEL im Abstand von 1500 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	34
Abbildung 25: Entwicklung des SEL (oben) und $L_{\text{peak}}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A44.....	35
Abbildung 26: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	36
Abbildung 27: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	37
Abbildung 28: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	38
Abbildung 29: Terzspektren des SEL im Abstand von 150 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	39
Abbildung 30: Terzspektren des SEL im Abstand von 300 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	40

Abbildung 31: Entwicklung des SEL (oben) und $L_{\text{peak}}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A32.....	41
Abbildung 32: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A32 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	42
Abbildung 33: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A32 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	43
Abbildung 34: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A32 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	44
Abbildung 35: Entwicklung des SEL (oben) und $L_{\text{peak}}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A77.....	45
Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung von SEL und $L_{\text{peak}}$ im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A77 .....	46
Abbildung 37: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A77 .....	46
Abbildung 38: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A77 .....	47
Abbildung 39: Terzspektren des SEL im Abstand von 150 m zum Pfahl A77 .....	47
Abbildung 40: Terzspektren des SEL im Abstand von 400 m zum Pfahl A77 .....	48
Abbildung 41: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A77 .....	48
Abbildung 42: Entwicklung des SEL (oben) und $L_{\text{peak}}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A66.....	49
Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung von SEL und $L_{\text{peak}}$ im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A66 .....	50
Abbildung 44: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A66.....	50
Abbildung 45: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A66.....	51
Abbildung 46: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A66.....	51
Abbildung 47: Terzspektren des SEL im Abstand von 400 m zum Pfahl A66.....	52
Abbildung 48: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A66.....	52
Abbildung 49: Entwicklung des SEL (oben) und $L_{\text{peak}}$ (unten) über die Rammung beim Pfahl A20.....	53
Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung von SEL und $L_{\text{peak}}$ im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	54
Abbildung 51: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	55
Abbildung 52: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	56
Abbildung 53: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	57
Abbildung 54: Terzspektren des SEL im Abstand von 250 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	58
Abbildung 55: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	59
Abbildung 56: Terzspektren des SEL im Abstand von 1500 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten).....	60

## 1 Allgemeines

Im Mai und Oktober 2014 wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens triad (FKZ 0325681) durch das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB-TUBS) begleitend zur Installation mehrerer Monopfähle beim Offshore-Windpark (OWP) Amrumbank West Messungen des Hydroschalls im Wasser, der Erschütterungen am Boden sowie der dynamischen Verformungen des Pfahles durchgeführt. Gegenstand dieses Berichtes sind die Ergebnisse der Hydroschallmessungen an ausgewählten Messpositionen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist u.a. die Evaluierung der beim OWP Amrumbank West eingesetzten Schallminderungssystem Hydro-Schall-Dämpfer (HSD) und Großer Blasenschleier (BBC) einzeln und in Kombination. Bei den Messungen wurden verschiedene Schallminderungskonfigurationen untersucht.

Die hier vorgestellten Messungen wurden in Anlehnung an die Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (Müller & Zerbs, 2011) durchgeführt. Abweichungen von der Messvorschrift ergaben sich in der Höhe der Hydrophone. Diese wurden einen Meter über Grund positioniert, um im Rahmen des Forschungsvorhabens mögliche Korrelationen mit Schwingungsmessungen am Meeresboden an denselben Messpositionen zu untersuchen.

## 2 Schallminderungssysteme

Zur Einhaltung der Grenzwerte des Hydroschalls ( $SEL \leq 160 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ ,  $L_{\text{peak}} \leq 190 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ , 750 m Entfernung zur Quelle) wurden bei den Rammarbeiten der Fundamente des OWP Amrumbank West die zwei Schallminderungssysteme HSD und BBC in Kombination eingesetzt. Das HSD-System wirkt direkt am Pfahl, sein Einsatz ist in den Bauablauf auf dem Errichterschiff zu integrieren. Der Blasenschleier wird in einiger Entfernung zum Pfahl um das Errichterschiff herum verlegt. Dies kann vor oder nach Eintreffen des Errichterschiffes an der entsprechenden Lokation geschehen. Aus technischen Gründen konnte das HSD-System erst eingesetzt werden, nachdem der Pfahl soweit in den Boden gerammt wurde, dass er eine gewisse Standsicherheit erreicht hatte. Es ergab sich hieraus eine Teilung der Rammung der Fundamente in zwei Phasen. Es wurden verschiedenen Blasenschleier-Varianten unterschiedlicher Hersteller eingesetzt: Ein doppelter Großer Blasenschleier (DBBC) der Fa. Weyres Offshore, welcher unter Druckluftversorgung verlegt wurde sowie ein einfacher Großer Blasenschleier (BBC) der Fa. Hydrotechnik Lübeck, welcher ohne Druckluftversorgung verlegt wurde. Außerdem wurden beide Varianten in Kombination eingesetzt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten verschiedene Schallminderungskonfigurationen untersucht werden. Zudem konnte eine behördlich genehmigte Referenzmessung ganz ohne Schallminderungssystem durchgeführt werden. Der Tabelle 2 ist zu entnehmen, welche Schallminderungskonfigurationen bei den verschiedenen Messungen zum Einsatz kamen.

## 3 Messpositionen

Es wurde bei jeder Rammung an acht Messlokationen (ML) gemessen. Im Fernbereich wurden autarke Messbojen mit jeweils einem Hydrophon von einem separaten Messschiff ausgebracht. Jeweils zwei Messlokationen zwischen 150 m und 1500 m wurden variabel platziert. Bei jeder Messung sollte jedoch eine dritte Messboje in 750 m zum Pfahl abgesetzt werden. Abbildung 1 zeigt die Positionen der Messlokationen im Fernbereich relativ zum Standort der jeweiligen OWEA.

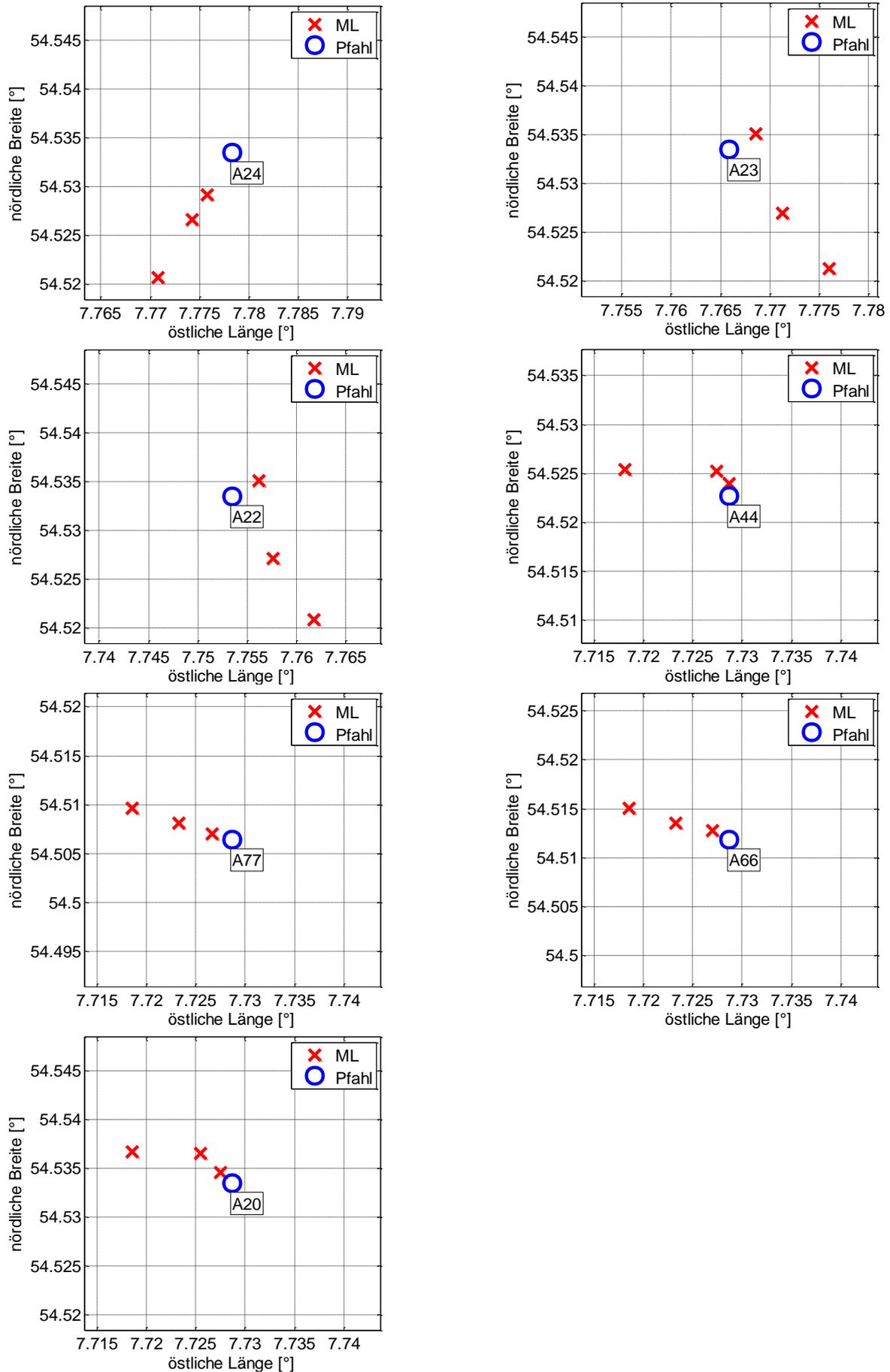
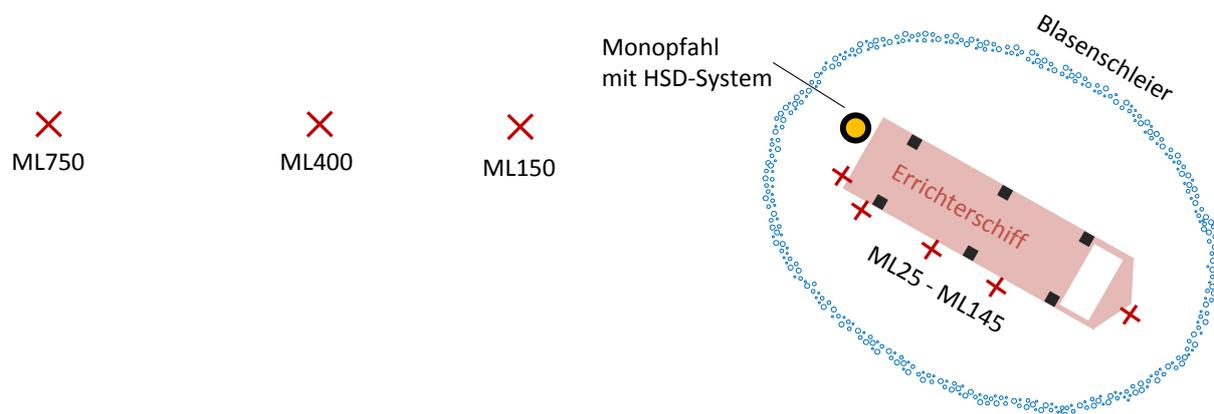


Abbildung 1: Übersicht der Messlokationen im Fernbereich bei den gemessenen Fundamentstandorten

Neben den üblichen Messungen mit autarken Messbojen wurden auch Messsysteme mit zentraler Datenerfassung vom Deck des Errichterschiffes ausgebracht. Am Errichterschiff befanden sich fünf Messlokationen (ML) an festen Positionen an Deck des Schiffes in Abständen von 25 m bis 145 m zum Pfahl. Es wurden Hydrophon-Arrays mit jeweils drei bis fünf Sensoren, die über die Wassertiefe verteilt waren, zu Wasser gelassen.

Die Hydrophone an ML97 wurden durch eines der Beine des Errichterschiffes verschattet. ML25 und ML37 befinden sich nahe beieinander. Im Rahmen dieses Berichtes wurden für die Nahbereichsmessungen ML25, ML72 und ML145 berücksichtigt. Die beispielhafte Anordnung der Messlokationen und der Schallminderungssysteme zu Pfahl und Errichterschiff ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Entfernungen der ausgebrachten Messsysteme bei den einzelnen Rammungen sowie die eingesetzten Schallminderungssysteme sind Tabelle 2 zu entnehmen.



**Abbildung 2: Beispielhafte Anordnung der Messlokationen (ML) des IGB-TUBS**

Die Messlokationen ML25 bis ML145 befinden sich im Nahbereich des Pfahles innerhalb des Blasenschleiers. Die Messlokationen im Fernbereich befinden sich außerhalb des Blasenschleiers. Die Messlokationen im Fernbereich konnten i.d.R. nicht in einer Linie mit den Messlokationen im Nahbereich angeordnet werden.

Die Hydrophone der Messbojen im Fernbereich wurden in einer Höhe von 1 m über Grund (ü.G.) angeordnet. Die Hydrophon-Arrays im Nahbereich verfügten ebenfalls über jeweils einen Sensor in einer Höhe von 1 m ü.G. Im Rahmen dieses Berichtes wurden jeweils nur Daten der Hydrophone 1 m ü.G. berücksichtigt.

#### 4 Messequipment

Für die Deckgestützten Messungen von Bord des Errichterschiffes kamen Hydrophone, Messverstärker und Messwerterfassungssysteme der Fa. Brüel & Kjær zum Einsatz. Die Datenerfassung erfolgte auf Laptops. Bei den autarken Messbojen handelte es sich um eigens gefertigte Systeme der Fa. develogic mit integrierten Messverstärkern und Datenerfassungsmodulen sowie Hydrophonen der Fa. Reson. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der eingesetzten Messtechnik.

**Tabelle 1: Eingesetztes Messequipment**

	Gerät	Typ	Hersteller	Eigenschaften
Nahbereich	Hydrophon	8103	Brüel & Kjær	Samplingrate: 65 kHz
	Messverstärker	NEXUS 2692	Brüel & Kjær	
	Datenerfassung	LAN-XI 3052-B	Brüel & Kjær	
	Software	Pulse	Brüel & Kjær	
Fernbereich	Hydrophon	TC4037	Reson	Samplingrate: 48 kHz
	Messverstärker	Sono.Vault	develogic	
	Datenerfassung	Sono.Vault	develogic	

## 5 Datenauswertung

Für die durch das IGB-TUBS durchgeführten Messungen wurde eine Einzelschlagauswertung hinsichtlich SEL und  $L_{\text{peak}}$  nach Müller & Zerbs (2011) durchgeführt. Dazu wurden die aufgezeichneten Rohdaten zunächst entsprechend der Kalibrierung der verschiedenen Messsysteme skaliert, um Messdaten des dynamischen Hydroschalls  $p$  über die Dauer der Messung  $t$  in der Einheit Pascal [Pa] zu erhalten. Anschließend wurden die einzelnen Messreihen mit Hilfe des Programmes Matlab nach Hydroschallsignalen durchsucht, welche einen bestimmten Schwellwert übersteigen. Für die so gefundenen Hydroschallereignisse wurden der SEL und der  $L_{\text{peak}}$  bestimmt sowie eine Terzanalyse durchgeführt.

## 6 Übersicht der Hydroschall-Messungen

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der vom IGB-TUBS messtechnisch begleiteten Pfahlrammungen inkl. der dabei eingesetzten Schallminderungskonfigurationen.

**Tabelle 2: Übersicht der Hydroschall-Messungen**

Pfahl	Datum	Schallschutz- konfiguration	Messlokationen	
			Nahbereich	Fernbereich
A24	5.5.2014	DBBC + BBC + HSD	25..140 m	500, 800, 1500 m
A23	7.5.2014	BBC + HSD	25..140 m	250, 800, 1500 m
A22	8./9.5.2014	DBBC + BBC + HSD	25..140 m	250, 750, 1500 m
A44	3.10.2014	BBC + HSD	25..140 m	150, 300
A32	12.10.2014	BBC + HSD	25..140 m	
A77	15.10.2014	BBC	25..140 m	150, 400, 750 m
A66	16.10.2014	ohne / Referenz	25..140 m	150, 400, 750 m
A20	17.10.2014	HSD	25..140 m	150, 400, 750 m

Bei den Pfählen A24 und A23 musste aufgrund der Randbedingungen im Baufeld die 750 m-Position um 50 m verschoben werden. Diese hieraus resultierenden Abweichungen der Pegelgrößen betragen weniger als 0,5 dB, weshalb auf eine Korrektur verzichtet wurde.

Während der Rammung des Pfahles A44 kam es bei Messboje in 750 m zum Pfahl zu einem technischen Defekt, sodass keine Daten aufgezeichnet wurden. Bei der Rammung des Pfahles A32 konnten aufgrund eines technischen Defekts am Messschiff keine Messbojen im Fernbereich ausgebracht werden.

## 7 Messergebnisse

### 7.1 Übersicht

In der Tabelle 3 sind für alle untersuchten Rammungen der  $L_{\text{peak}}$  sowie die Perzentile des SEL angegeben. Für Rammungen, bei denen das HSD-System zum Einsatz kam, erfolgt die Auswertung für die beiden Rammphase getrennt. Die Pegel der 750 m-Position sind, soweit vorhanden, grau hinterlegt.

In den folgenden Abschnitten sind für jeden Pfahl die Entwicklung des SEL und des  $L_{\text{peak}}$  sowie der Rammenergie über den Verlauf der Rammung (Anzahl der Rammschläge) abgebildet. Darauf folgt eine Häufigkeitsverteilung von SEL und  $L_{\text{peak}}$  im Abstand von 750 m, bei der für die beiden Pegel in Schritten von 1 dB aufgetragen ist, bei welcher Anzahl von Rammschläger dieser erreicht wurden. Terzanalysen mit 10 %-, 50 %- und 95 %-Quantilen wurden für alle betrachteten Entfernungen durchgeführt. Bei zweigeteilten Rammungen (durch Einsatz des HSD-Systems) erfolgt die Auswertung der Häufigkeit sowie der Terzanalysen für beide Rammphasen getrennt.

Beim Vergleich der Pegelwerte für die beiden Phasen der Rammung eines Fundamentes ist zu beachten, dass die Rammenergie während der zweiten Rammphase jeweils höher ist als in der ersten Rammphase.

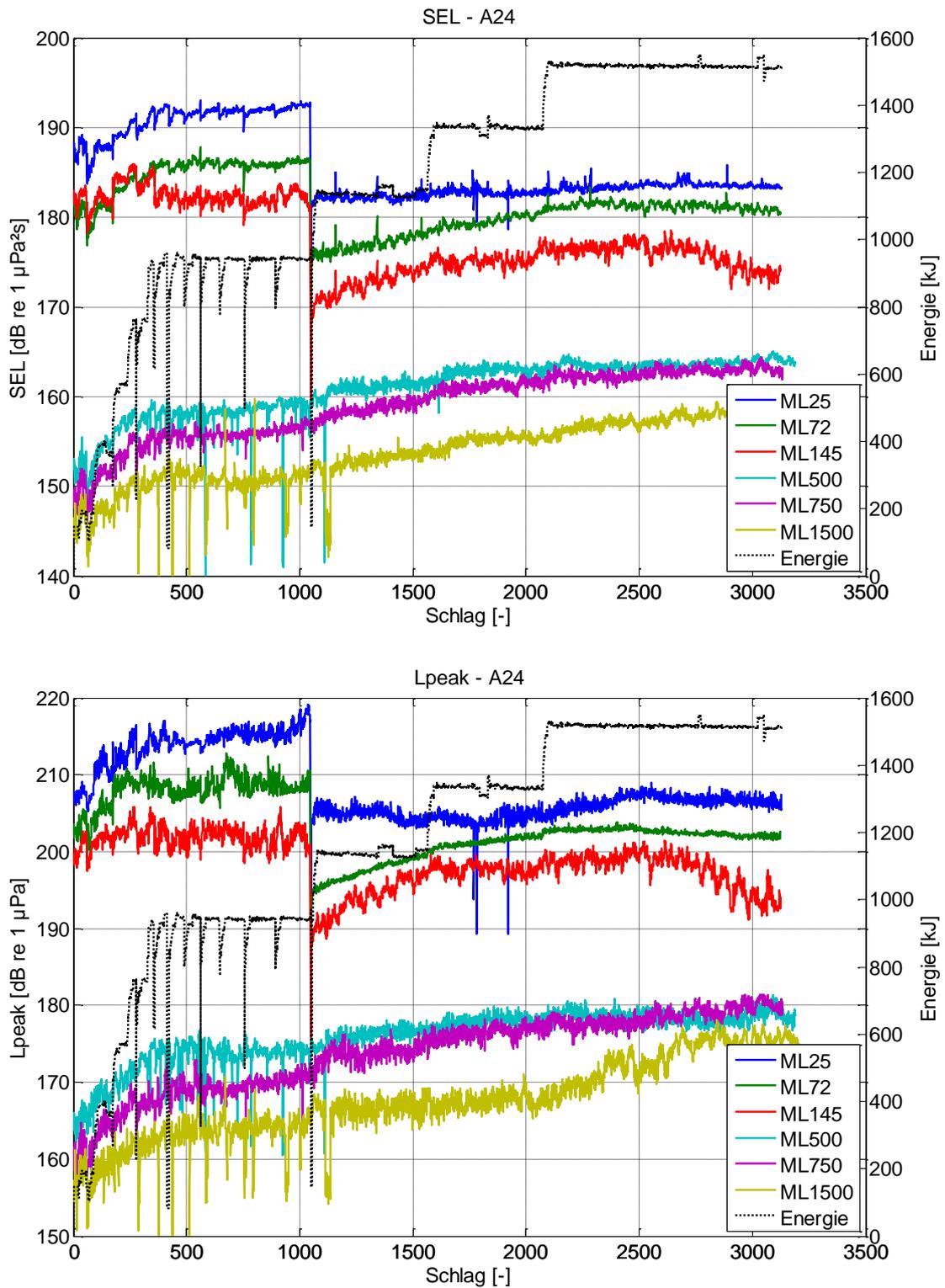
**Tabelle 3: Spitzenpegel ( $L_{\text{peak}}$ ) und statistische Mittelungspegel des breitbandigen Einzelereignispegels (SEL)**

Fundament	Entfernung [m]	Schallminderungs- system	SEL <sub>90</sub>	SEL <sub>50</sub>	SEL <sub>05</sub>	L <sub>peak</sub>
			[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]			[dB re 1 $\mu\text{Pa}$ ]
A24 (Teil 1)	25	kein	188	192	192	219
	72		181	186	186	213
	140		181	182	185	206
	500	DBBC + BBC	153	158	159	177
	800		151	156	157	173
	1500		146	150	152	171
A24 (Teil 2)	25	HSD	182	183	184	209
	72		176	180	182	204
	140		172	175	177	201
	500	HSD + DBBC + BBC	161	163	164	181
	800		158	162	163	181
	1500		153	156	158	178
A23 (Teil 1)	25	kein	190	193	194	219
	72		182	185	186	212
	140		182	185	186	209
	250	BBC	168	170	171	189
	800		156	160	161	178
A23 (Teil 2)	25	HSD	183	184	184	210
	72		177	178	179	201
	140		175	176	177	199
	250	HSD + BBC	167	171	171	190
	800		159	160	161	177
A22 (Teil 1)	25	kein	191	194	197	222
	72		183	186	189	213
	140		176	181	186	211
	250	DBBC + BBC	164	168	173	192
	750		151	154	159	176
	1500		135	137	141	158
A22 (Teil 2)	25	HSD	184	185	186	210
	72		179	180	181	203
	140		178	178	179	202
	250	HSD + DBBC + BBC	170	171	172	191
	750		153	155	157	175
	1500		136	138	139	157

**Tabelle 3 (forts): Spitzenpegel ( $L_{\text{peak}}$ ) und statistische Mittelungspegel des breitbandigen Einzelereignispegels (SEL)**

Fundament	Entfernung [m]	Schallminderungs- system	SEL <sub>90</sub>	SEL <sub>50</sub>	SEL <sub>05</sub>	L <sub>peak</sub> [dB re 1 $\mu\text{Pa}$ ]
A44 (Teil 1)	25	kein	187	190	191	216
	72		179	182	183	210
	145		173	176	178	201
	150	BBC	165	169	173	192
	300		162	166	171	191
A44 (Teil 2)	25	HSD	181	182	183	214
	72		176	178	179	209
	145		170	173	175	199
	150	HSD + BBC	172	173	174	194
	300		168	168	169	189
A32 (Teil 1)	25	kein	188	191	192	217
	72		180	184	185	212
	145		178	179	182	207
A32 (Teil 2)	25	HSD	180	181	182	207
	72		175	176	177	201
	145		170	171	173	196
A77	25	kein	190	192	194	221
	72		184	186	188	215
	150	BBC	167	170	173	193
	400		160	164	167	186
	750		157	160	163	183
A66	25	kein	190	194	195	222
	72		183	186	188	215
	145		181	184	186	212
	400		177	179	180	202
	750		174	176	177	198
A20 (Teil 1)	25	kein	189	192	192	218
	72		181	184	185	213
	145		178	182	182	208
	150		177	179	180	203
	400		174	176	177	200
	750		171	173	174	195
A20 (Teil 2)	25	HSD	183	184	185	217
	72		176	177	178	213
	145		174	176	176	208
	150		176	177	178	202
	400		170	170	170	198
	750		164	165	166	194

## 7.2 Pfahl A24

Abbildung 3: Entwicklung des SEL (oben) und  $L_{\text{peak}}$  (unten) über die Rammung beim Pfahl A24

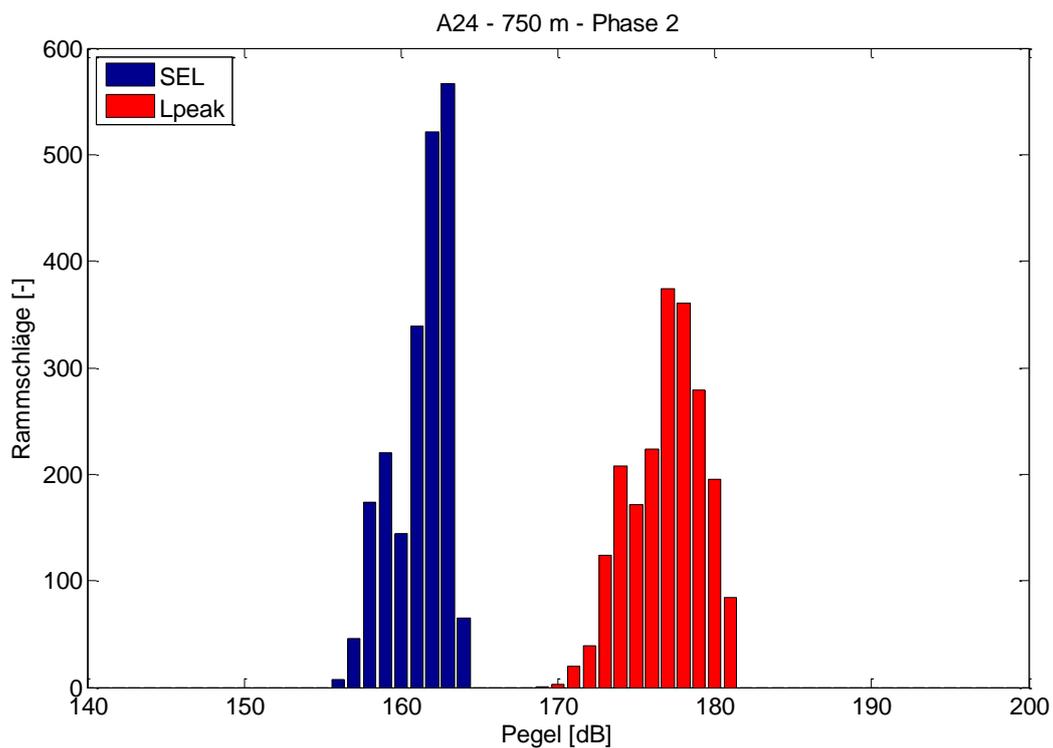
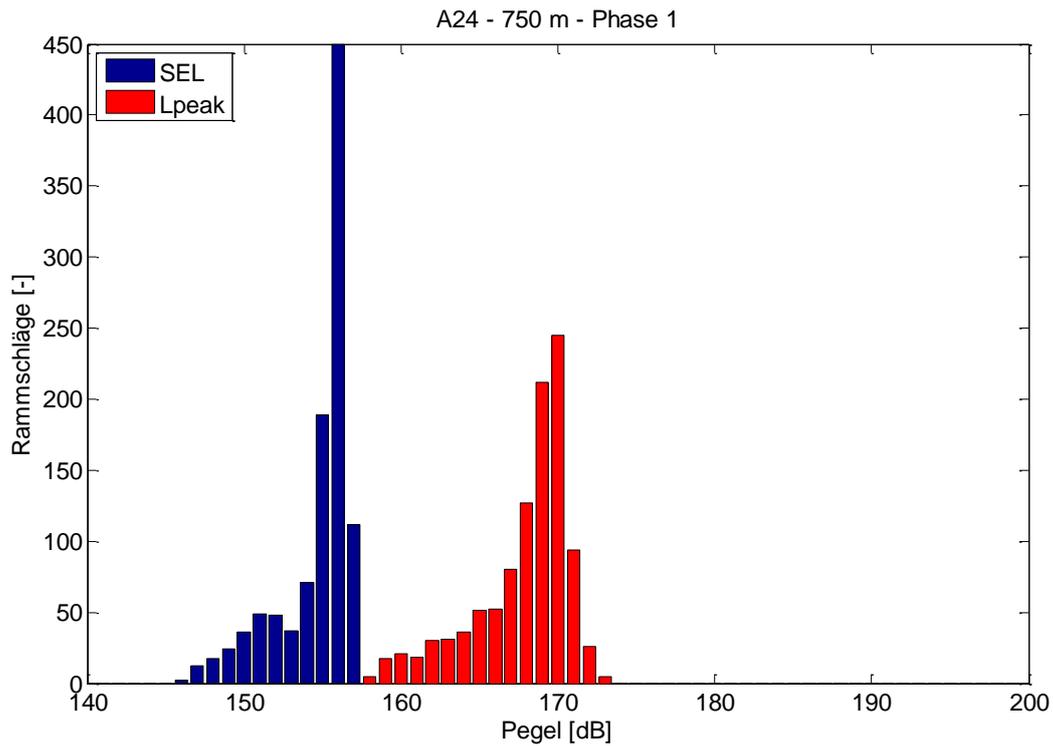


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung von SEL und  $L_{\text{peak}}$  im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

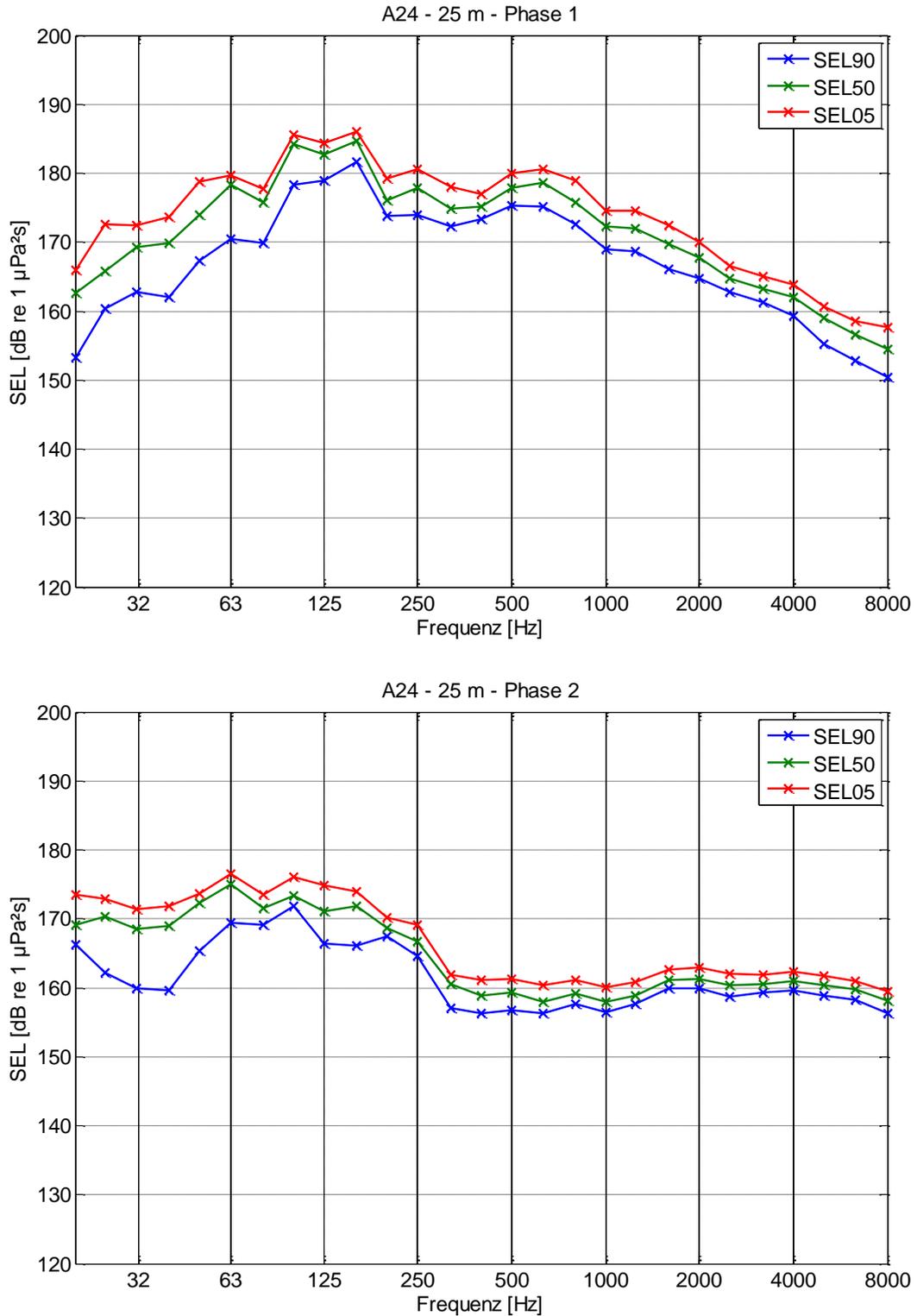


Abbildung 5: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

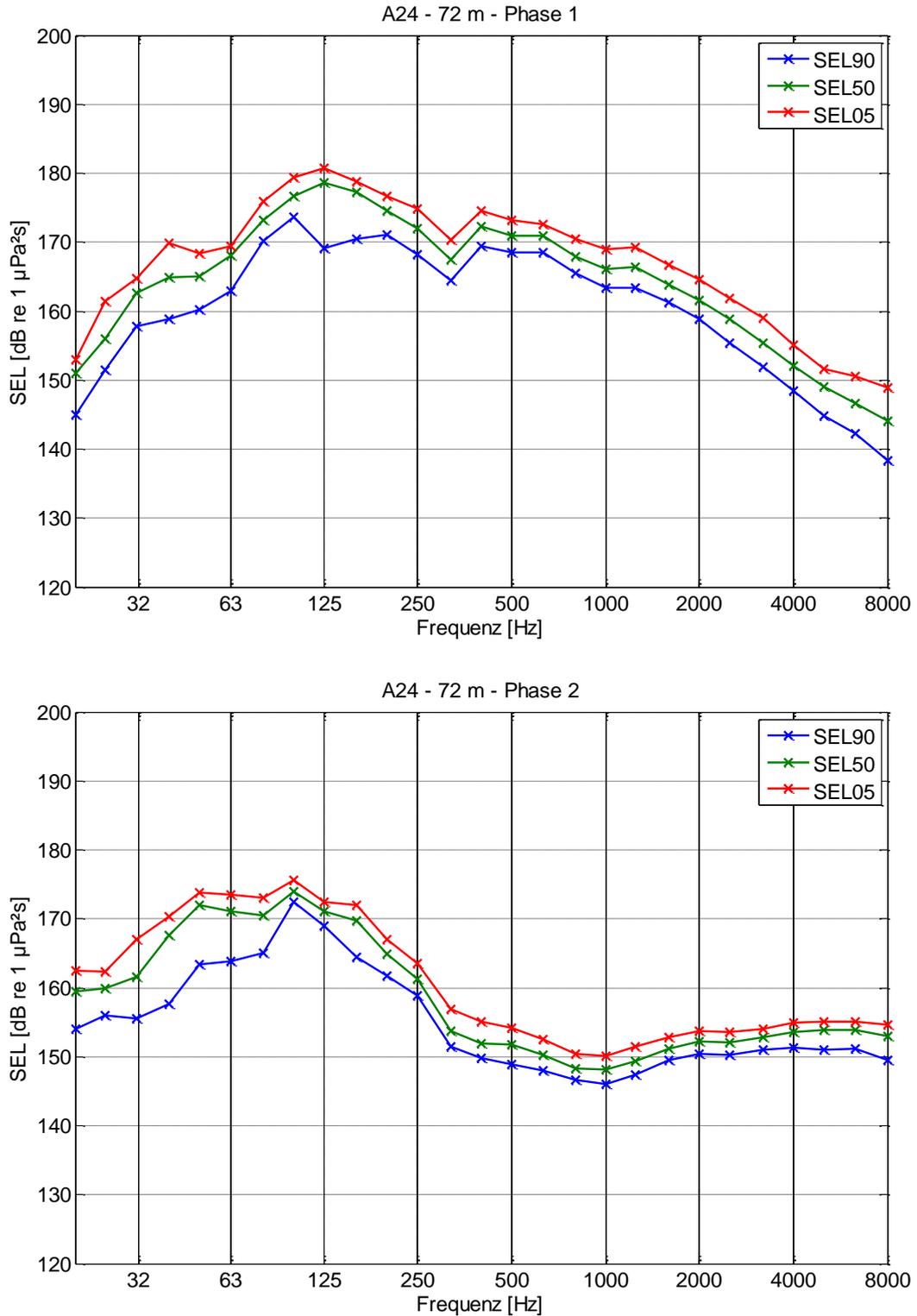


Abbildung 6: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

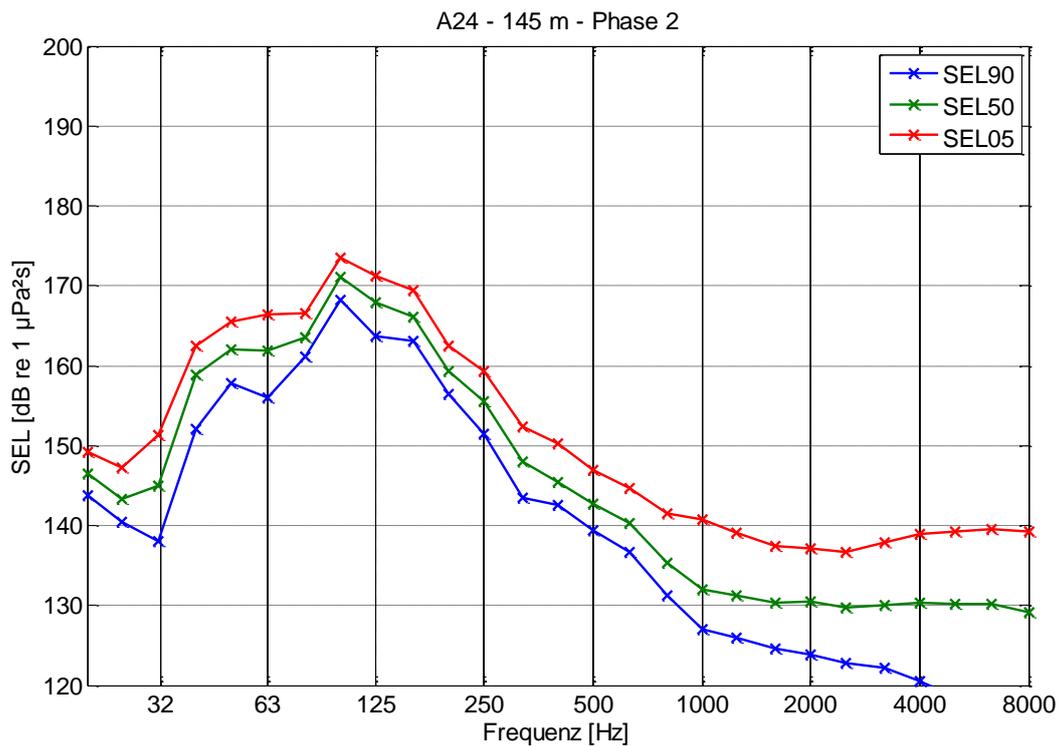
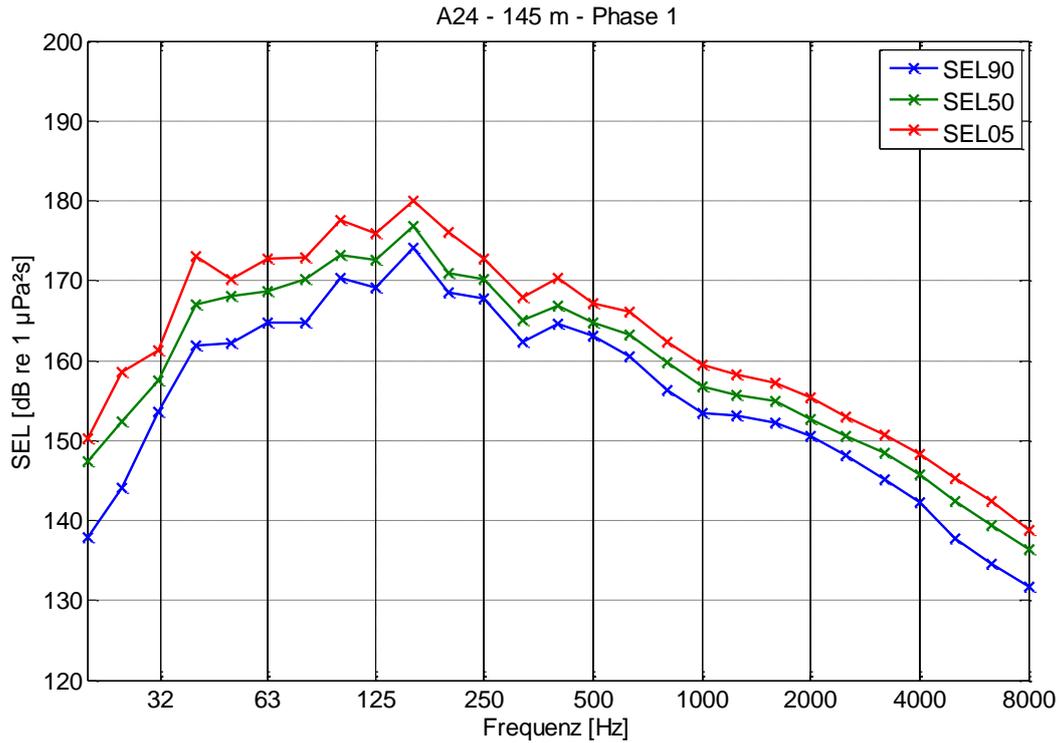


Abbildung 7: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

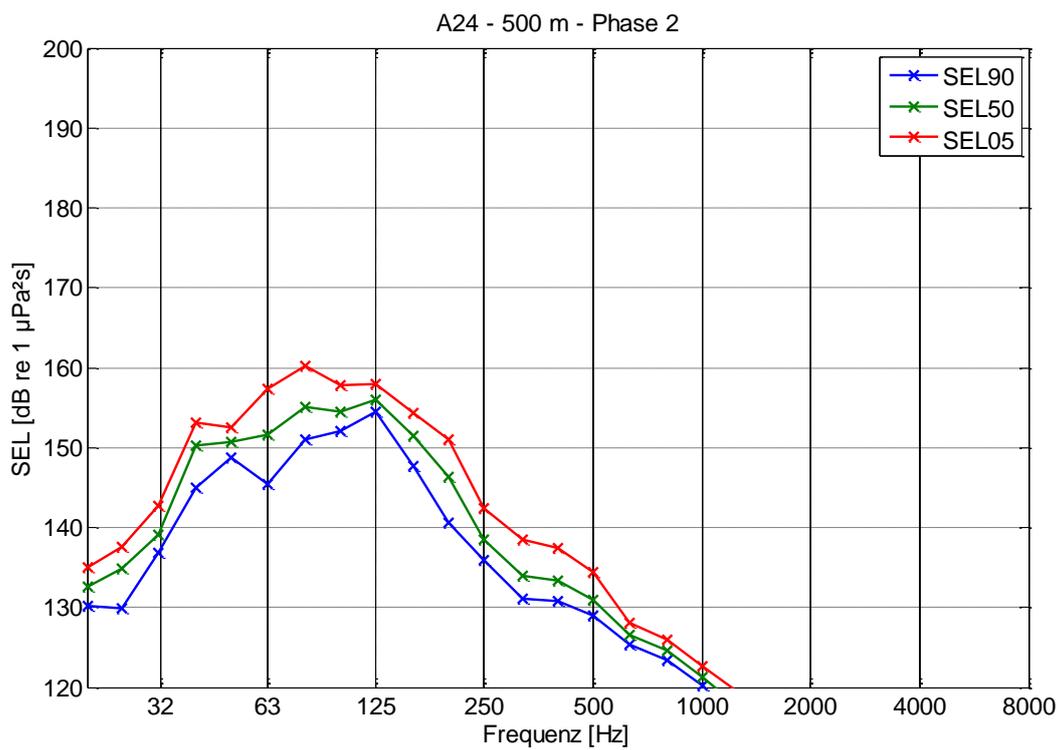
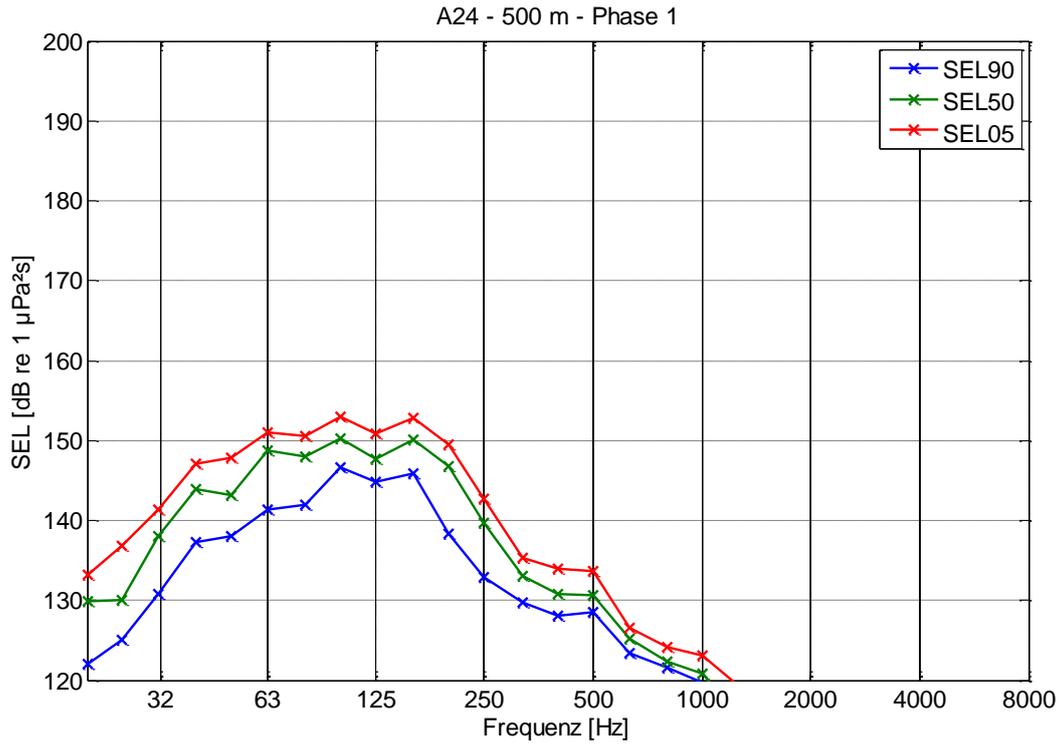


Abbildung 8: Terzspektren des SEL im Abstand von 500 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

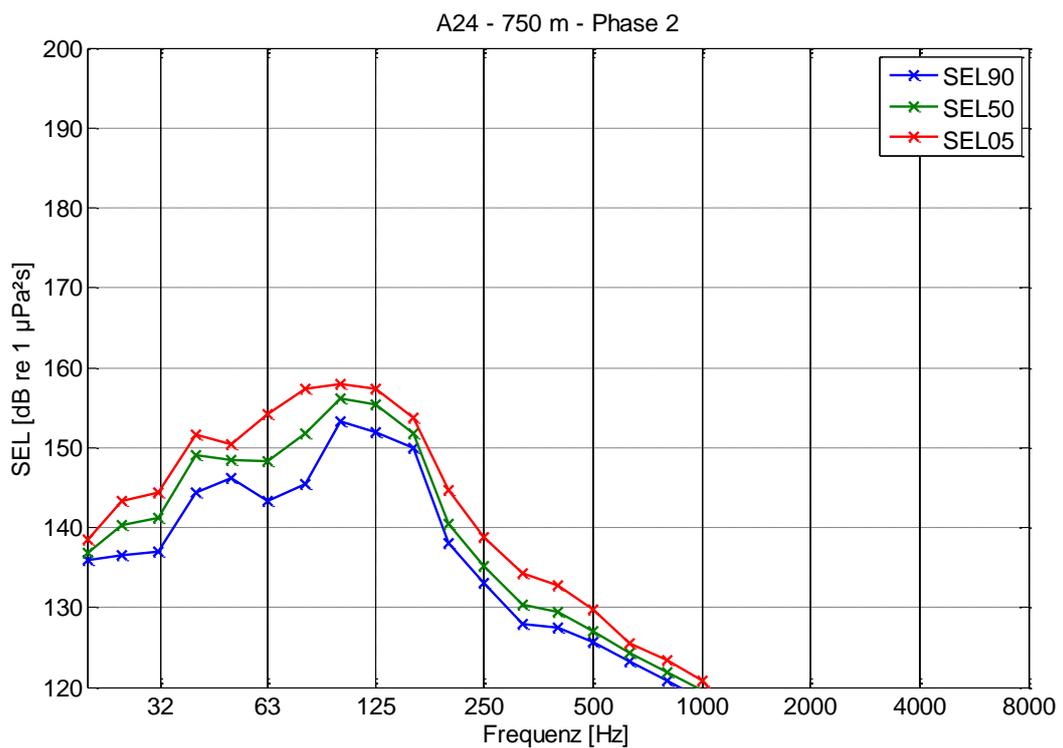
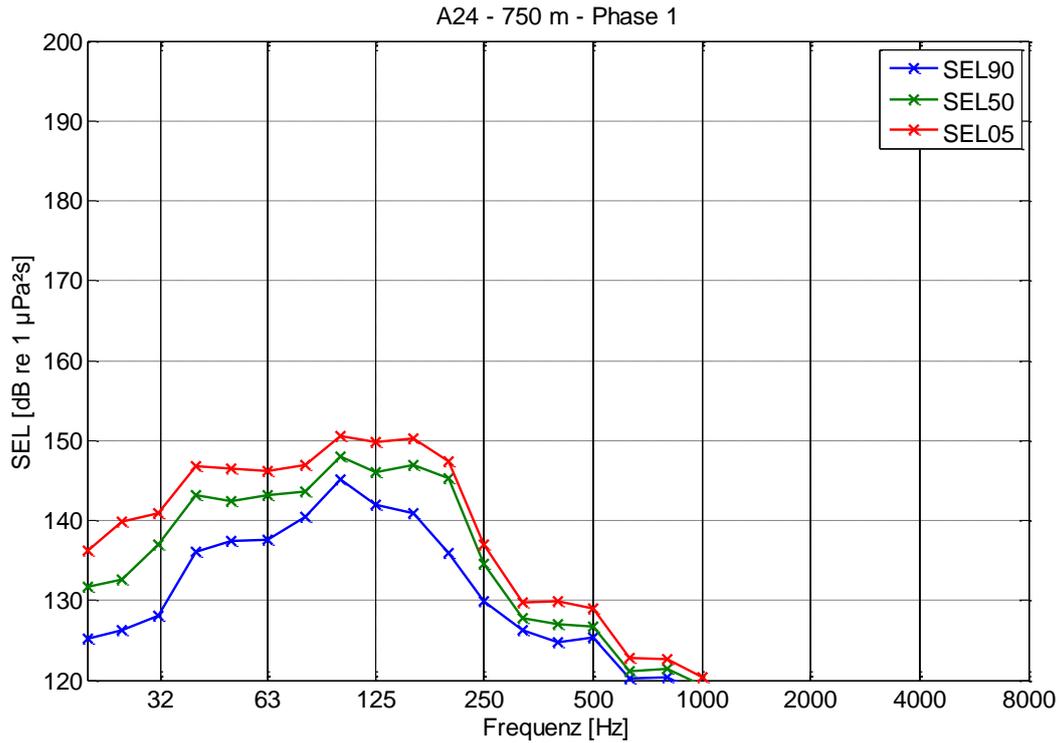


Abbildung 9: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

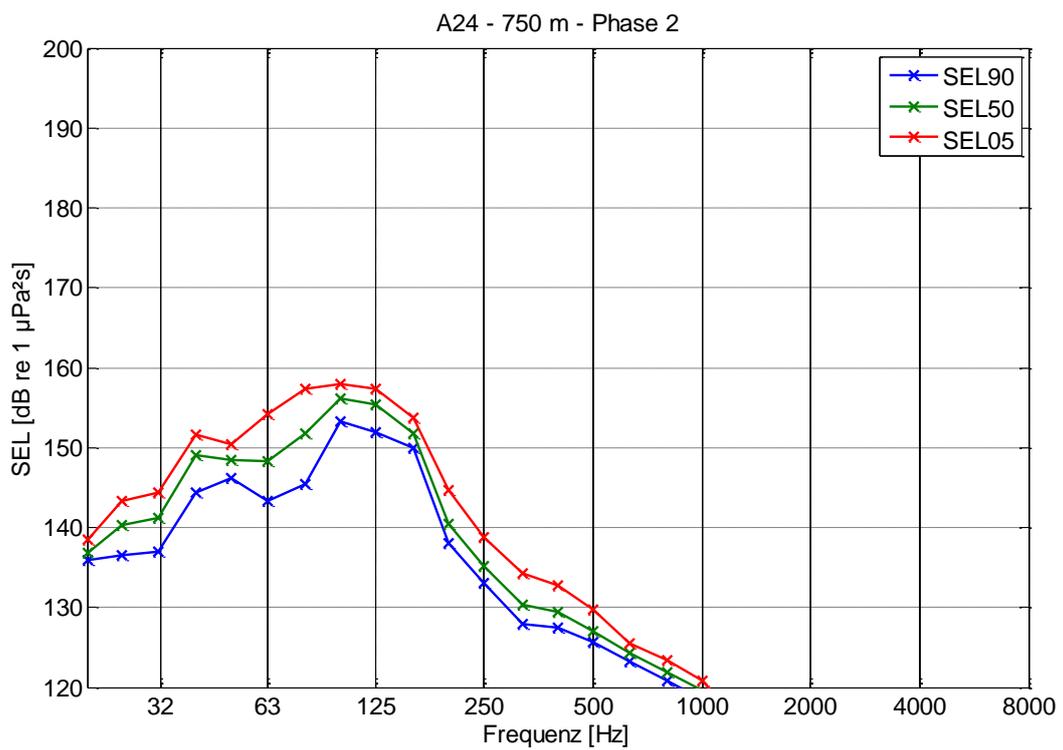
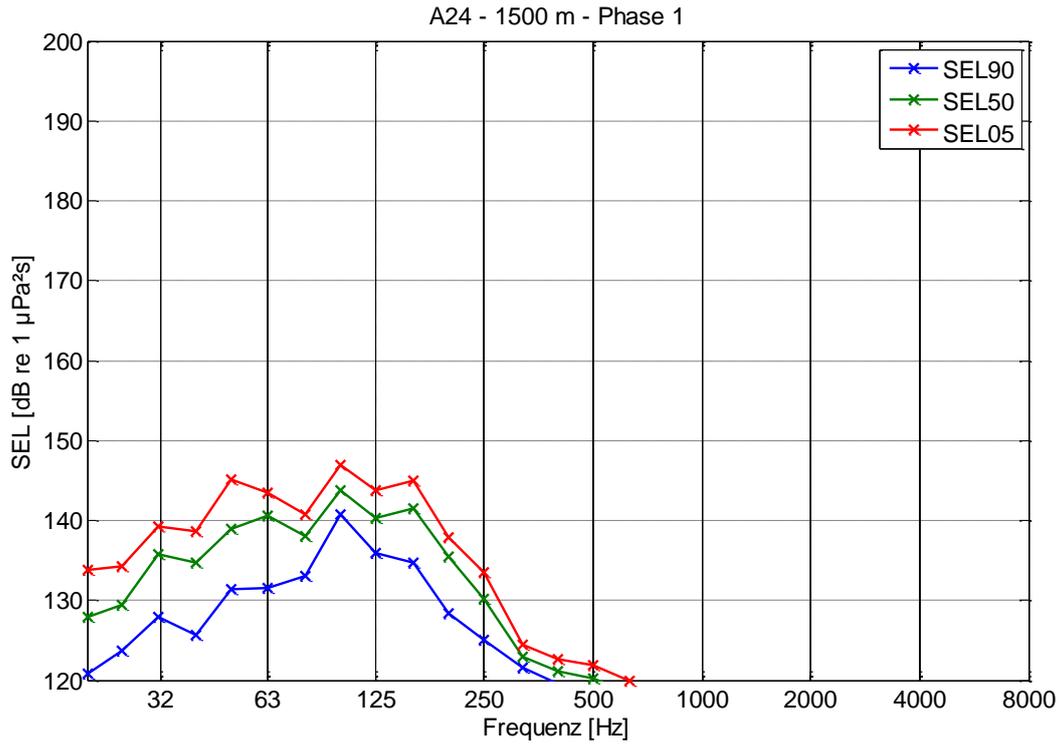
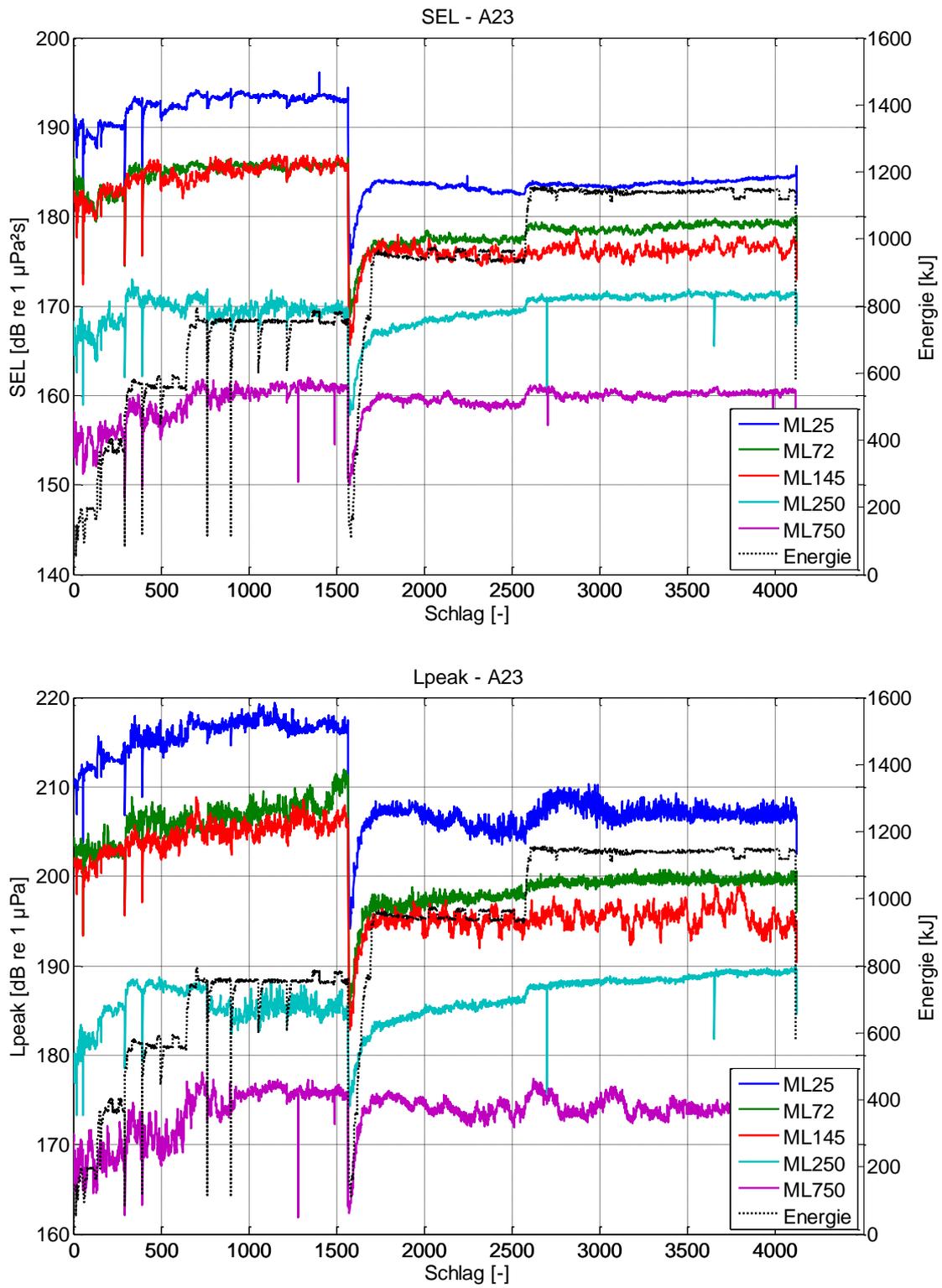


Abbildung 10: Terzspektren des SEL im Abstand von 1500 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

## 7.3 Pfahl A23

Abbildung 11: Entwicklung des SEL (oben) und  $L_{\text{peak}}$  (unten) über die Rammung beim Pfahl A23

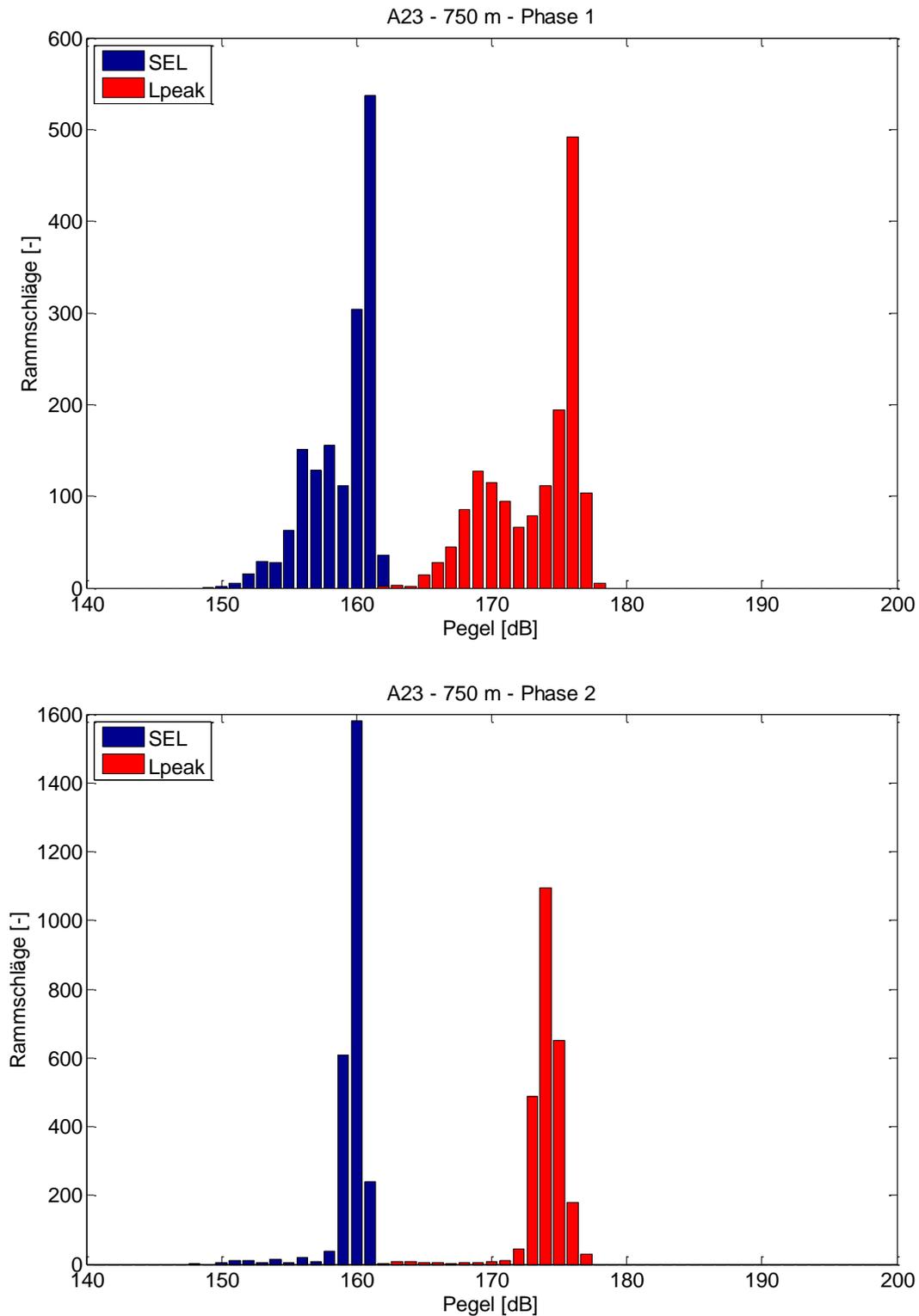


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung von SEL und L<sub>peak</sub> im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

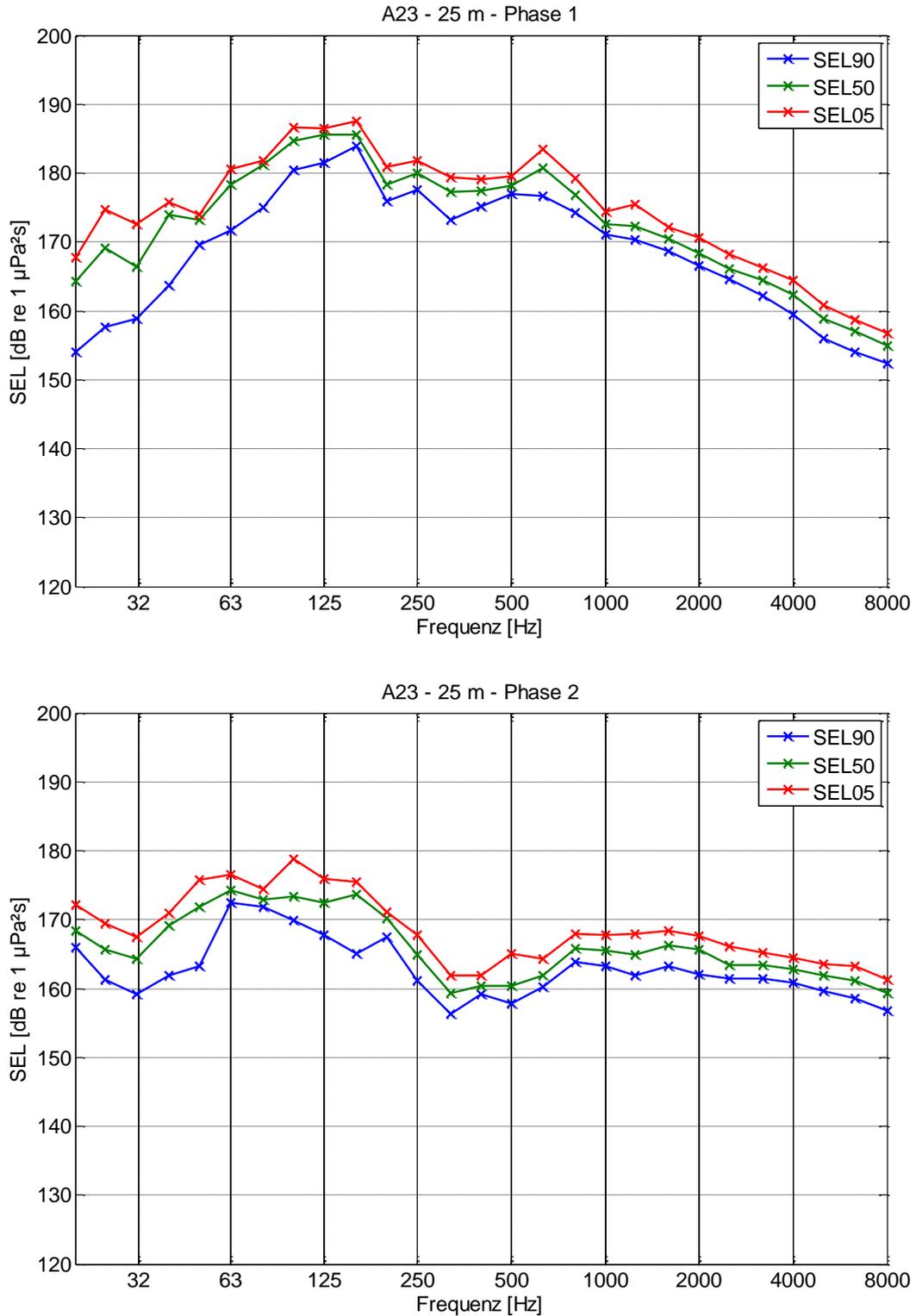


Abbildung 13: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

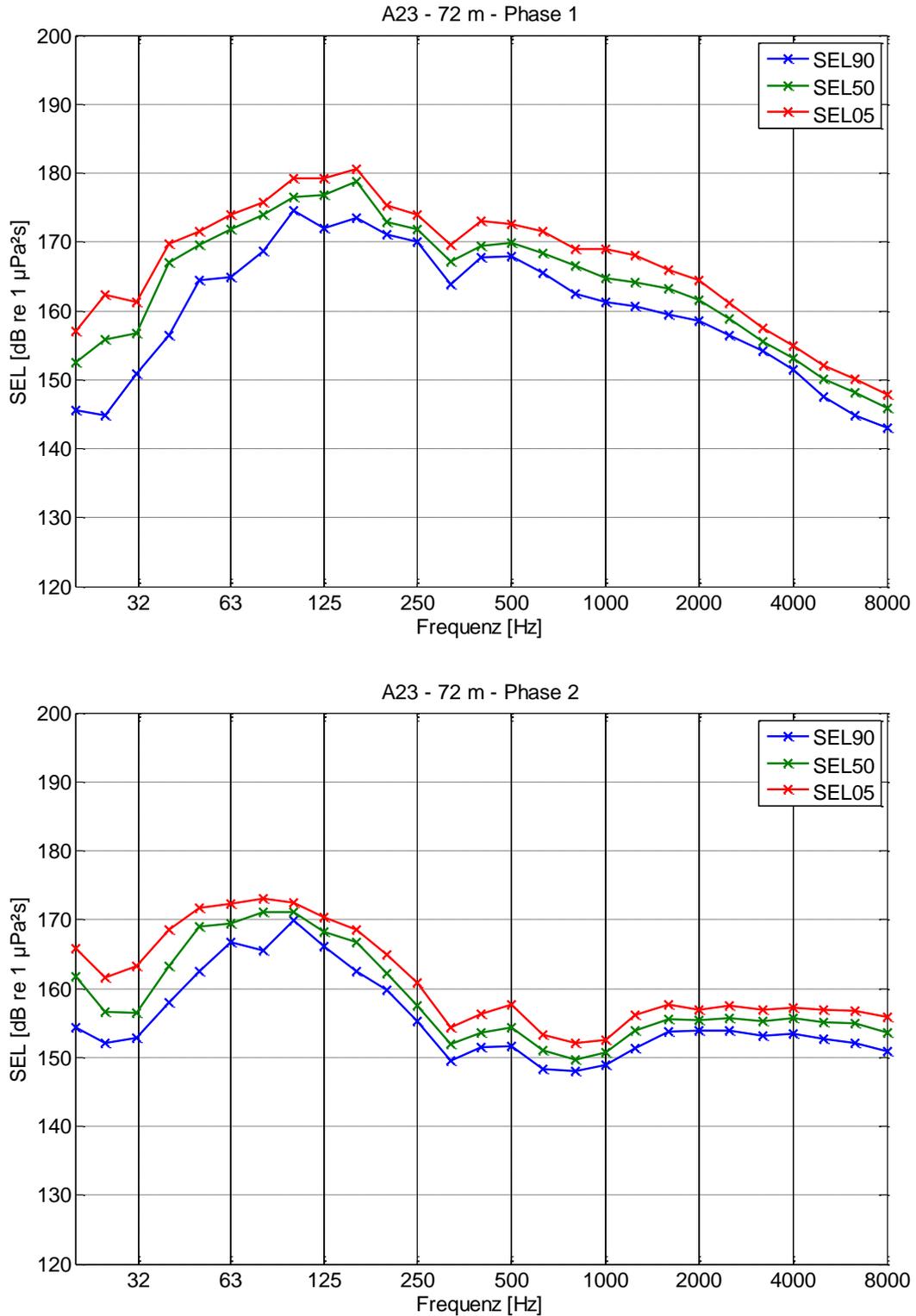


Abbildung 14: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

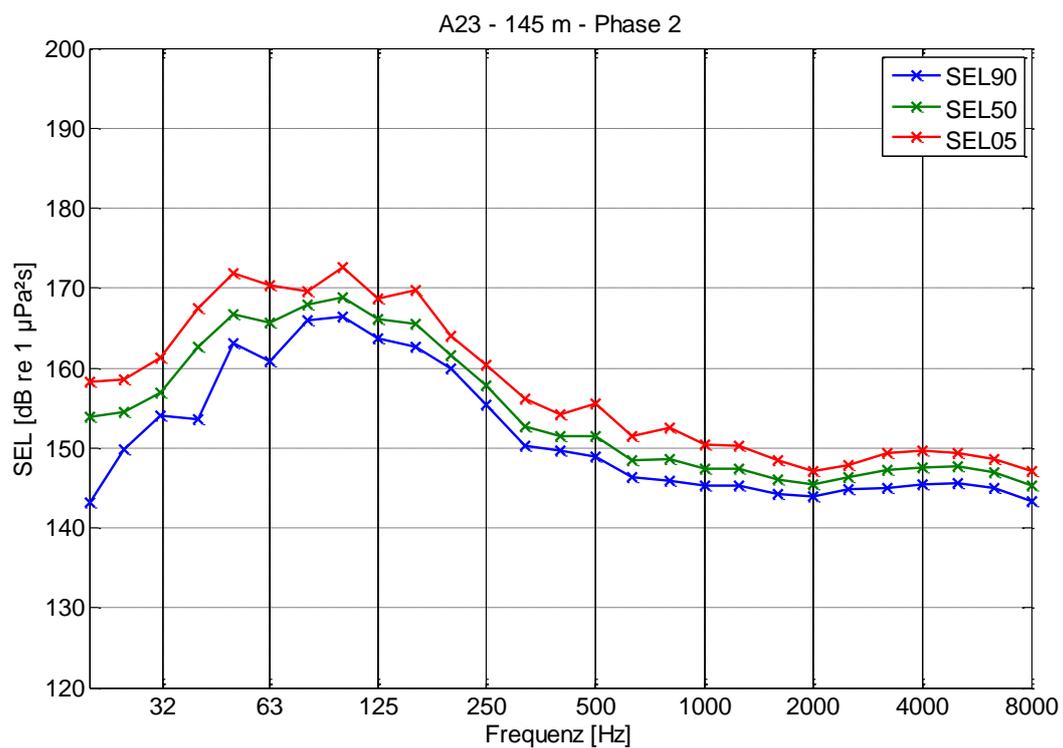
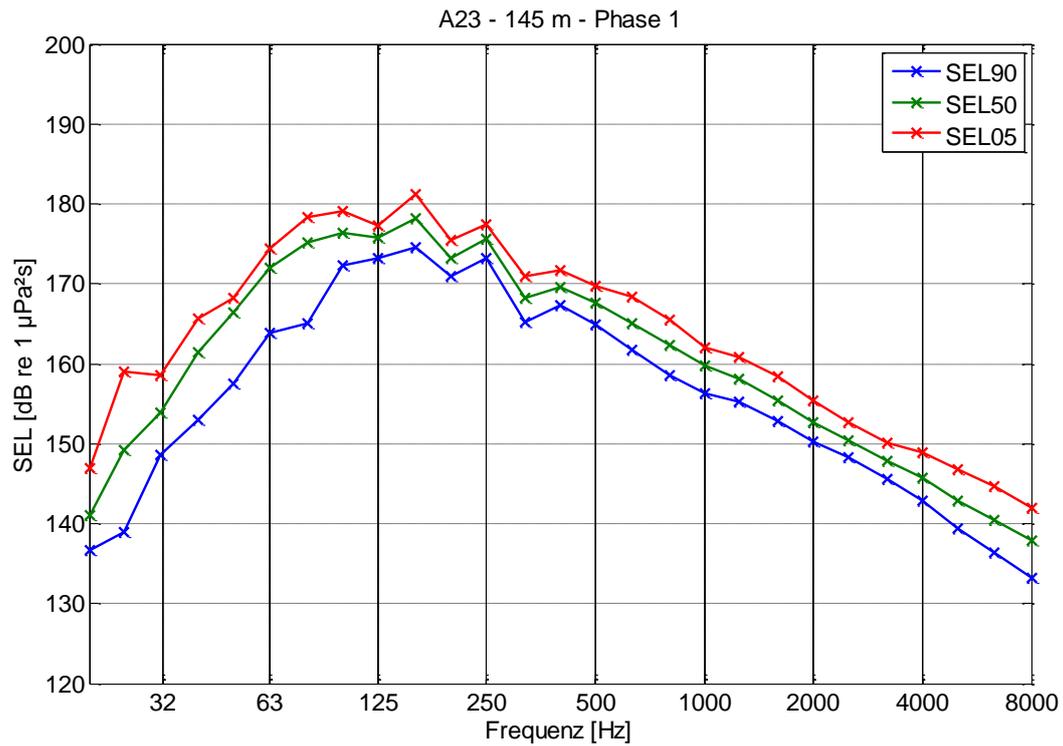


Abbildung 15: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

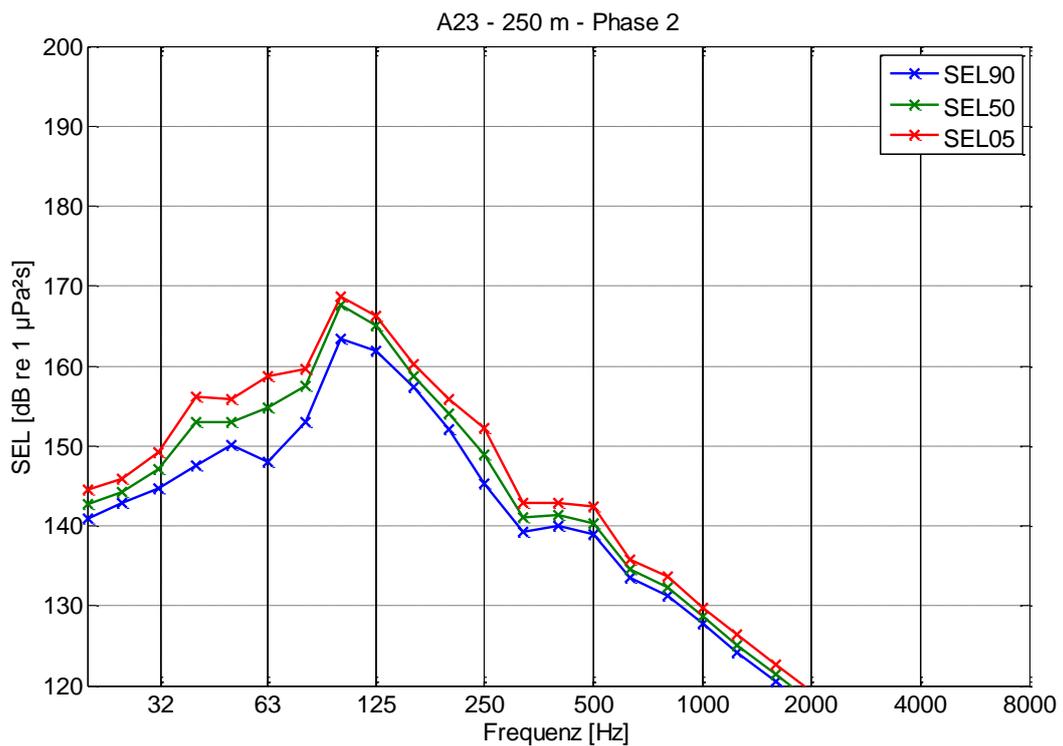
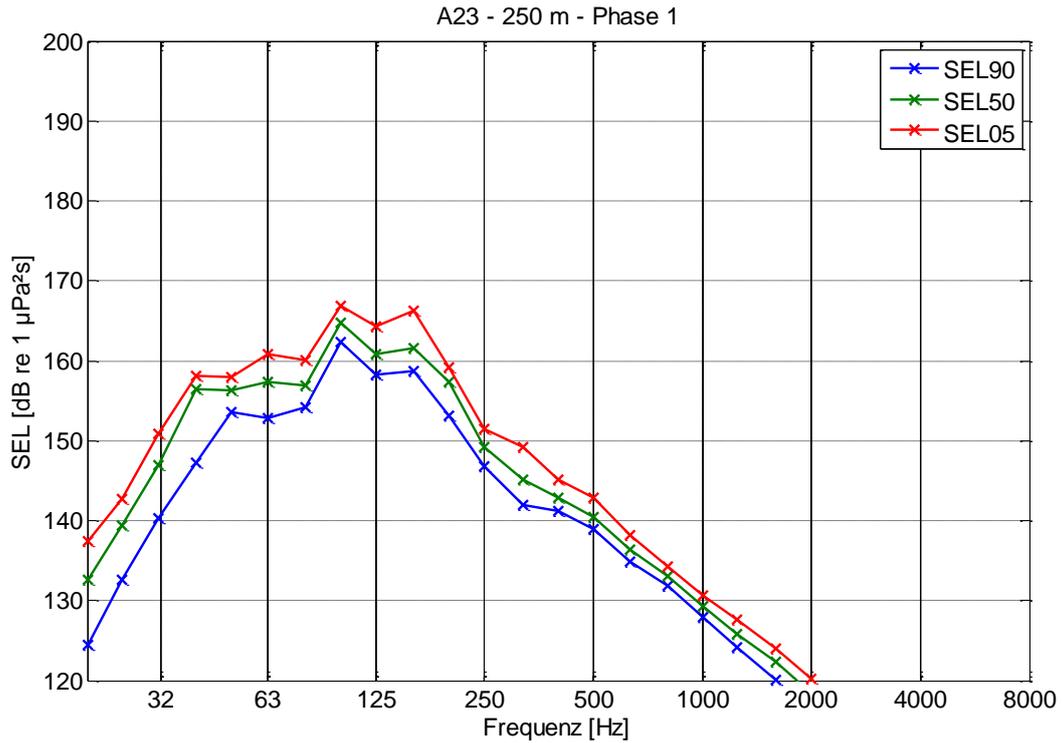


Abbildung 16: Terzspektren des SEL im Abstand von 250 m zum Pfahl A23 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

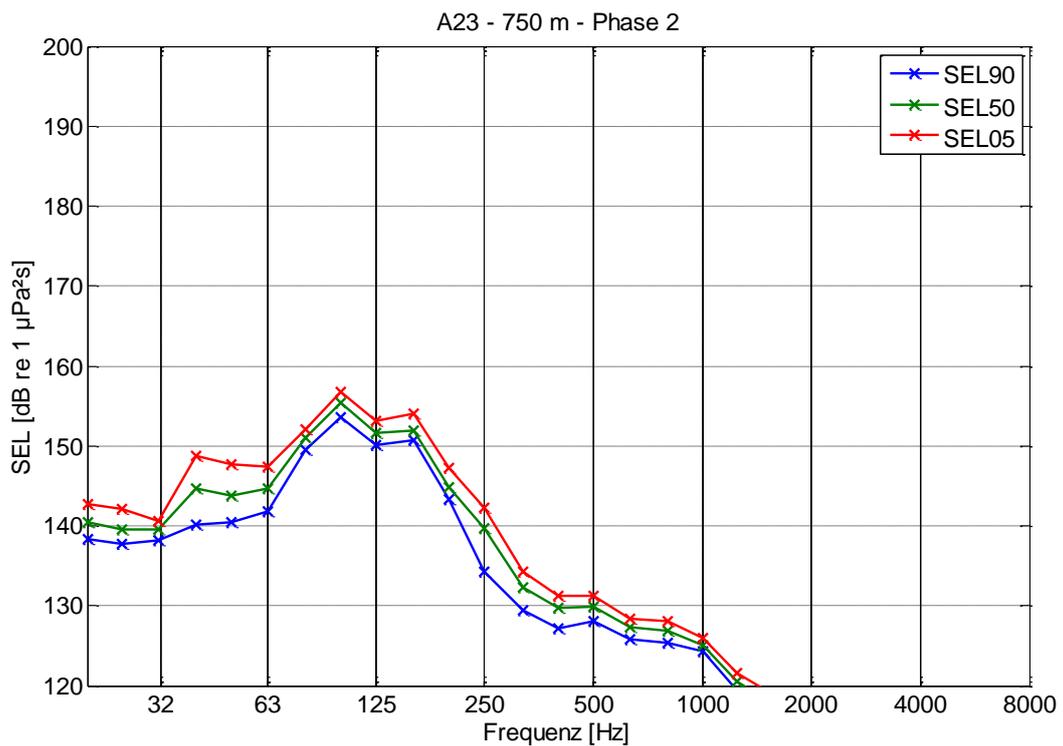
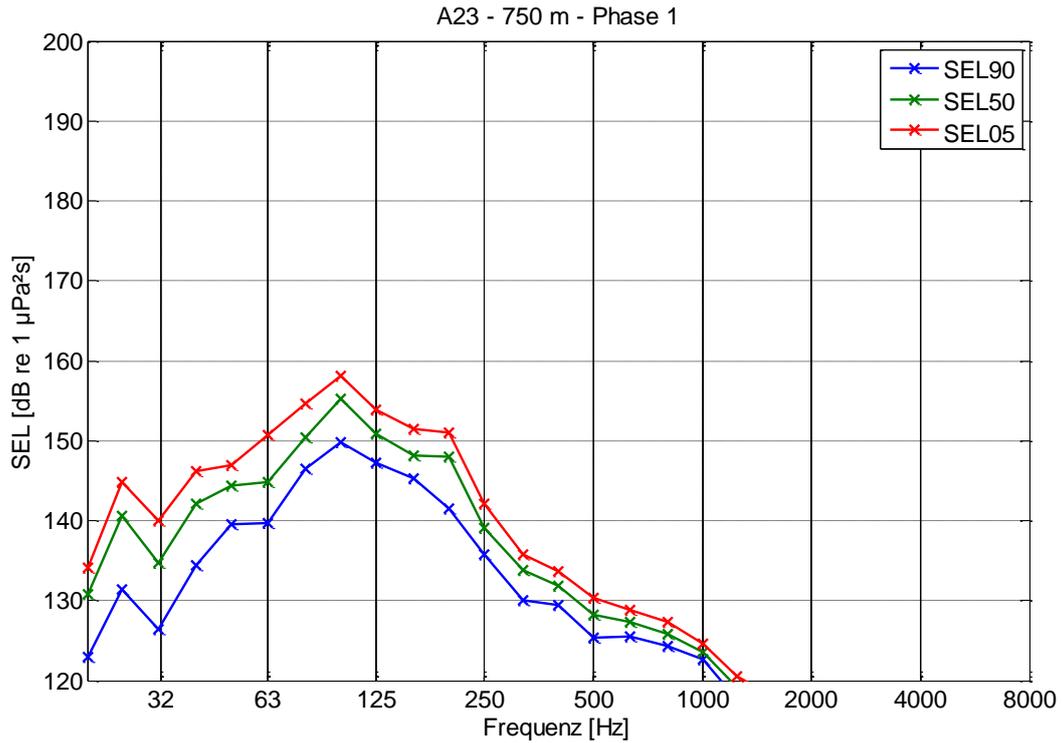


Abbildung 17: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A24 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

7.4 Pfahl A22

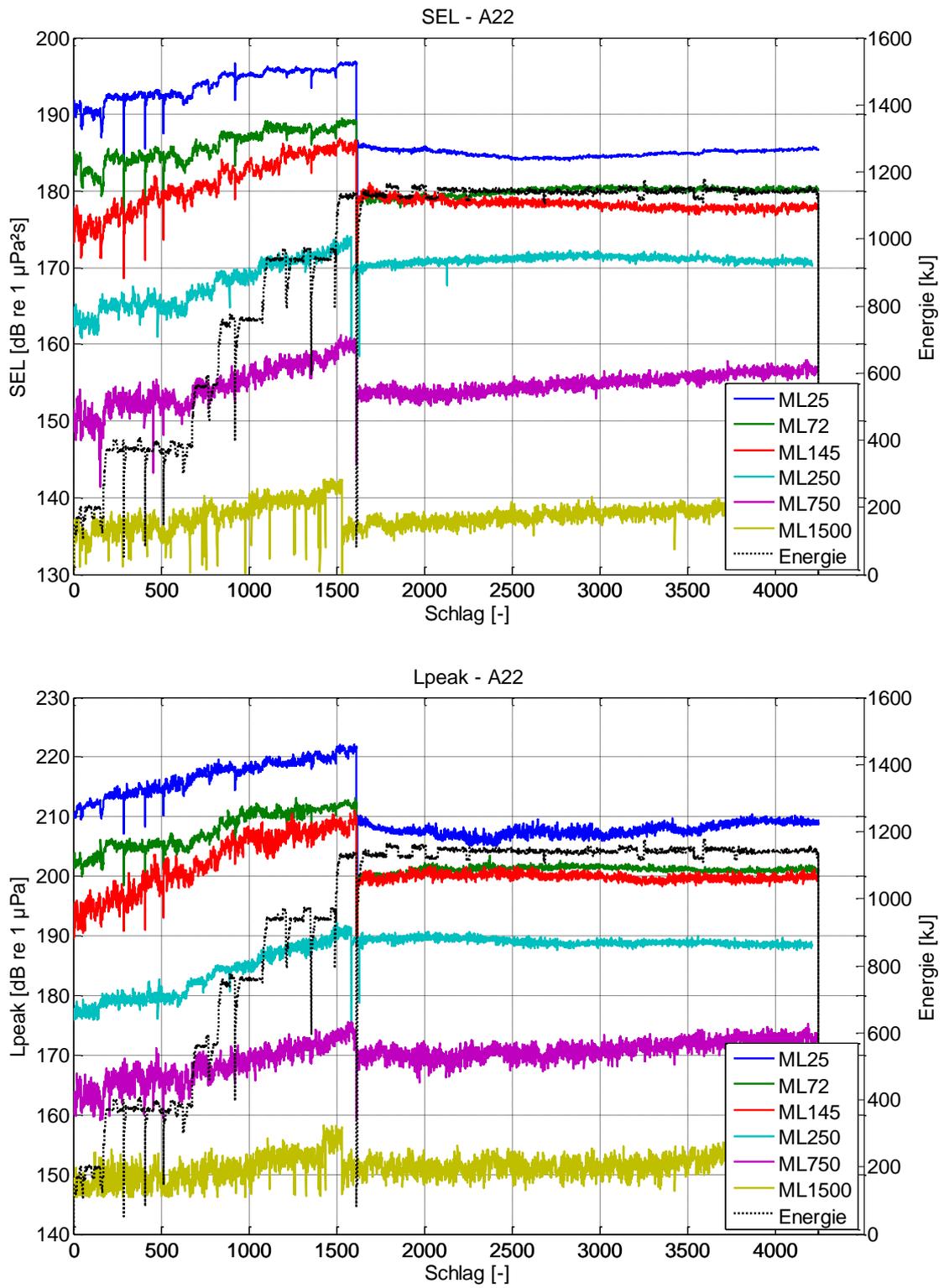


Abbildung 18: Entwicklung des SEL (oben) und  $L_{peak}$  (unten) über die Rammung beim Pfahl A22

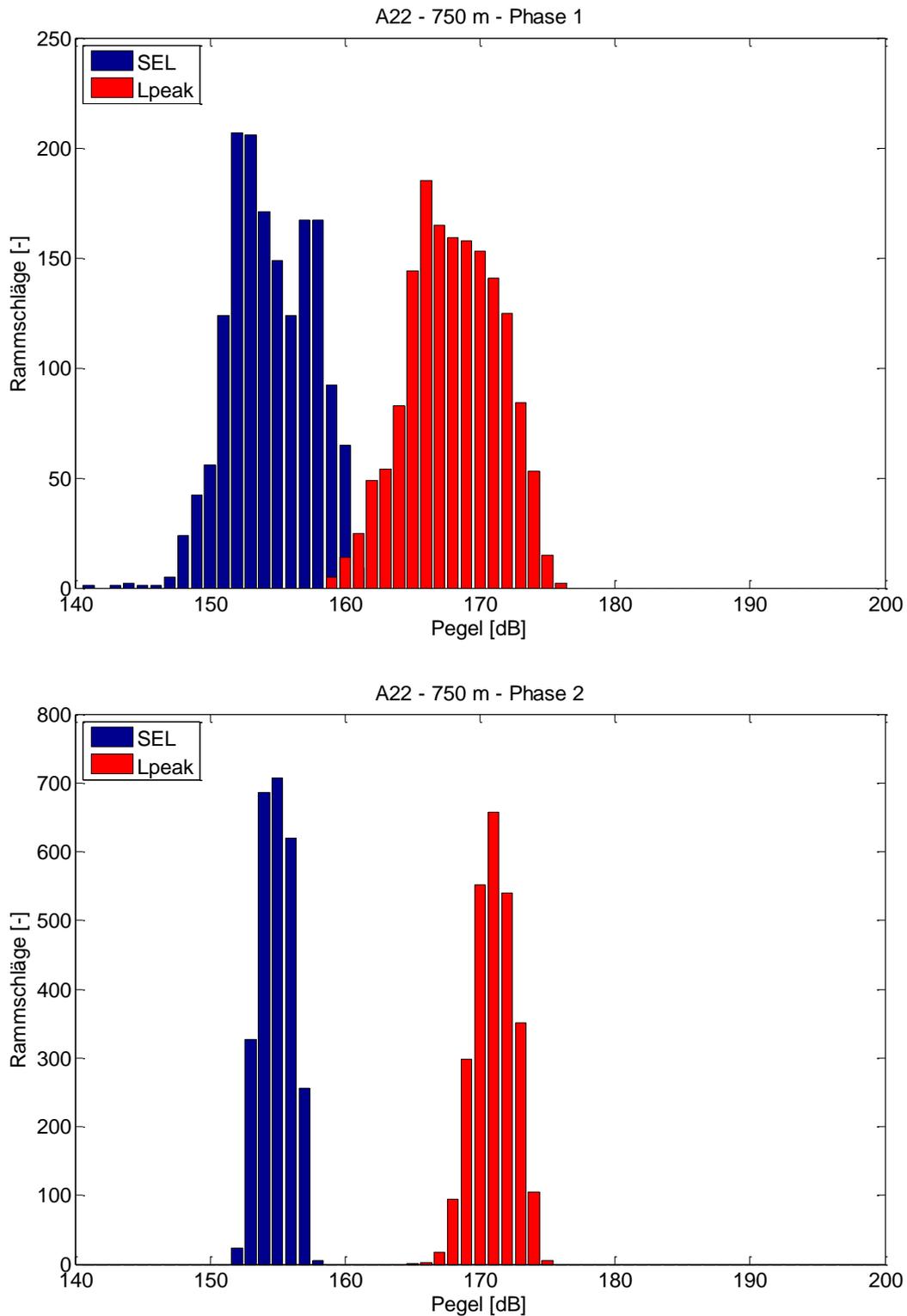


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung von SEL und L<sub>peak</sub> im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

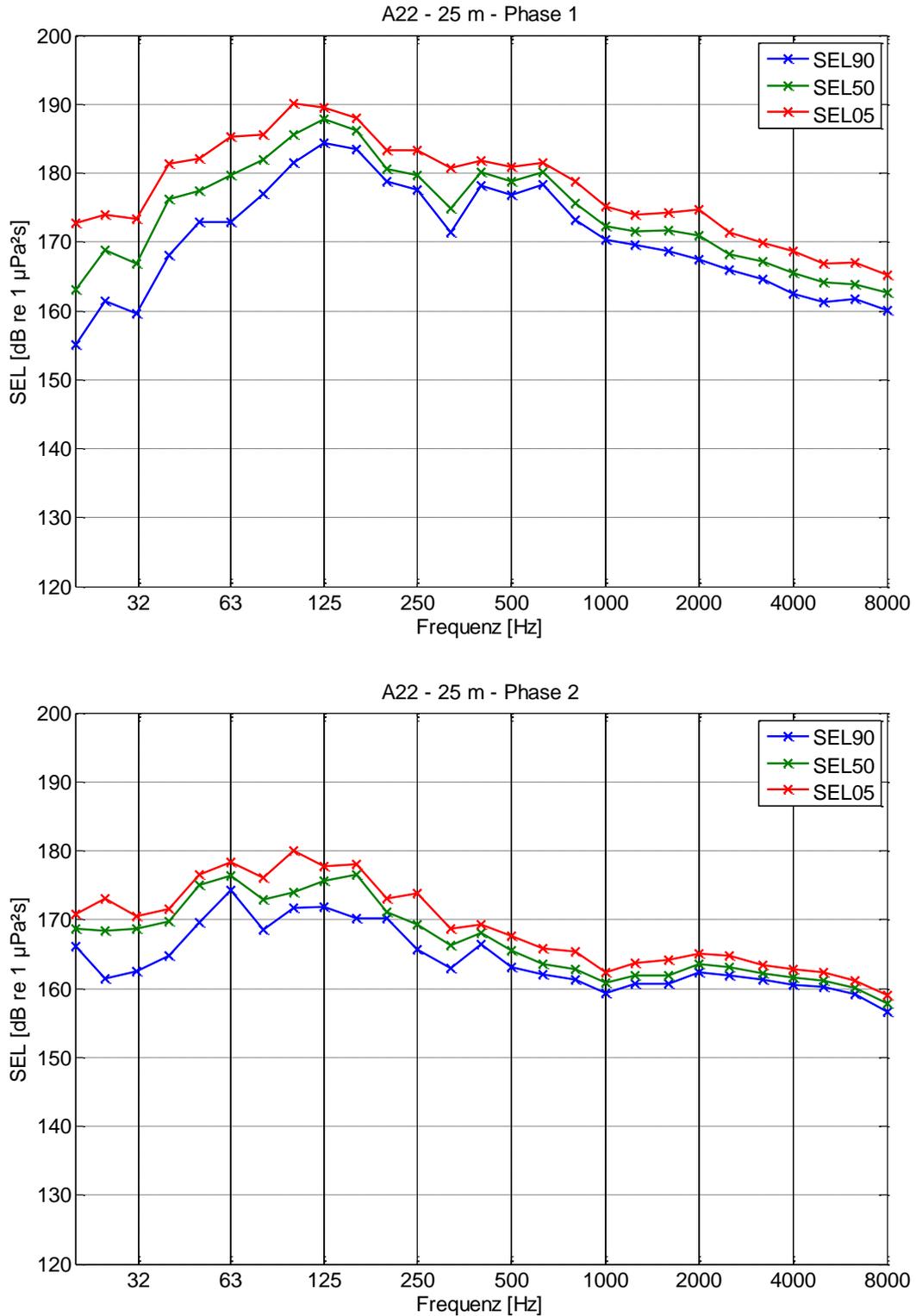


Abbildung 20: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

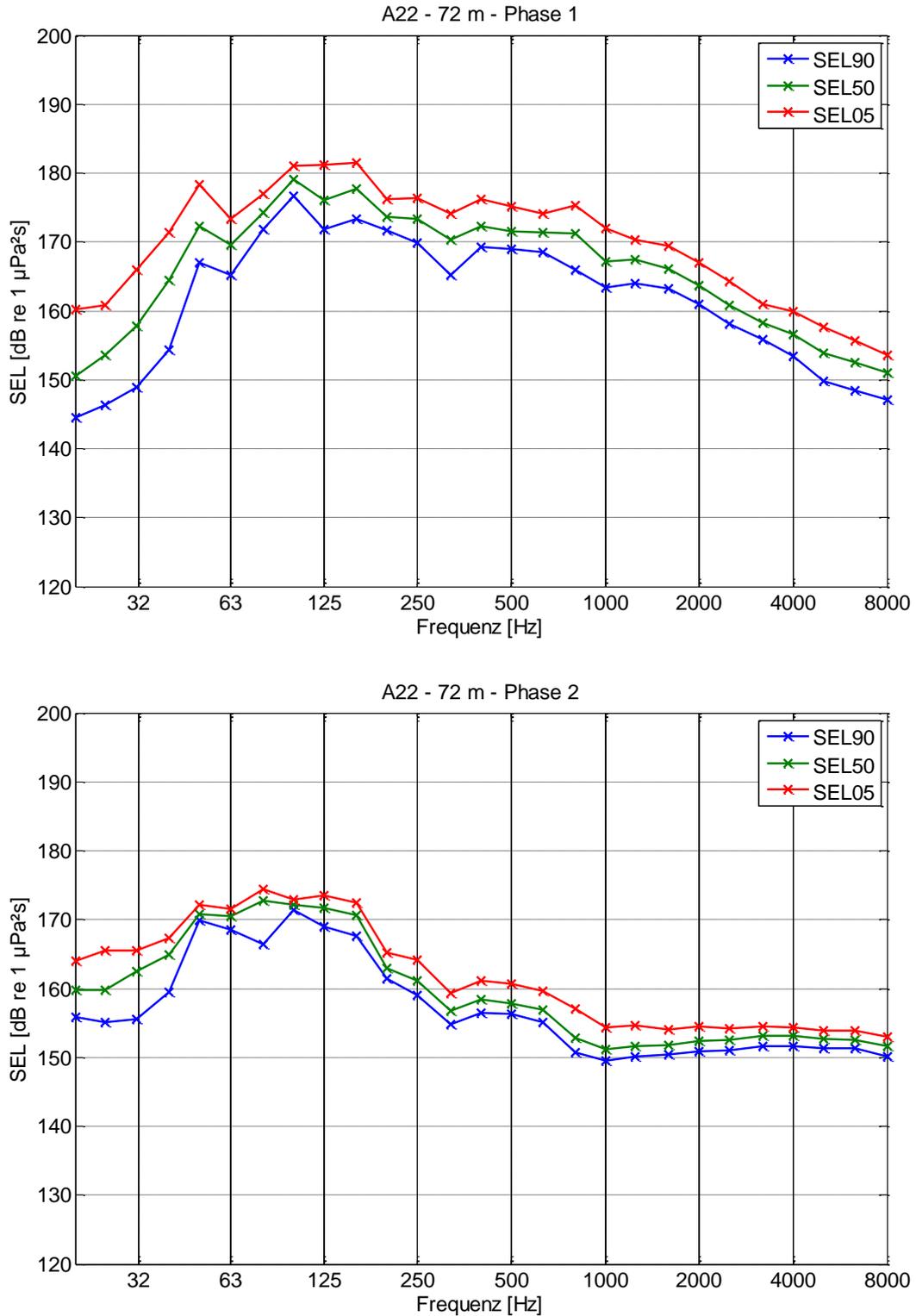


Abbildung 21: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

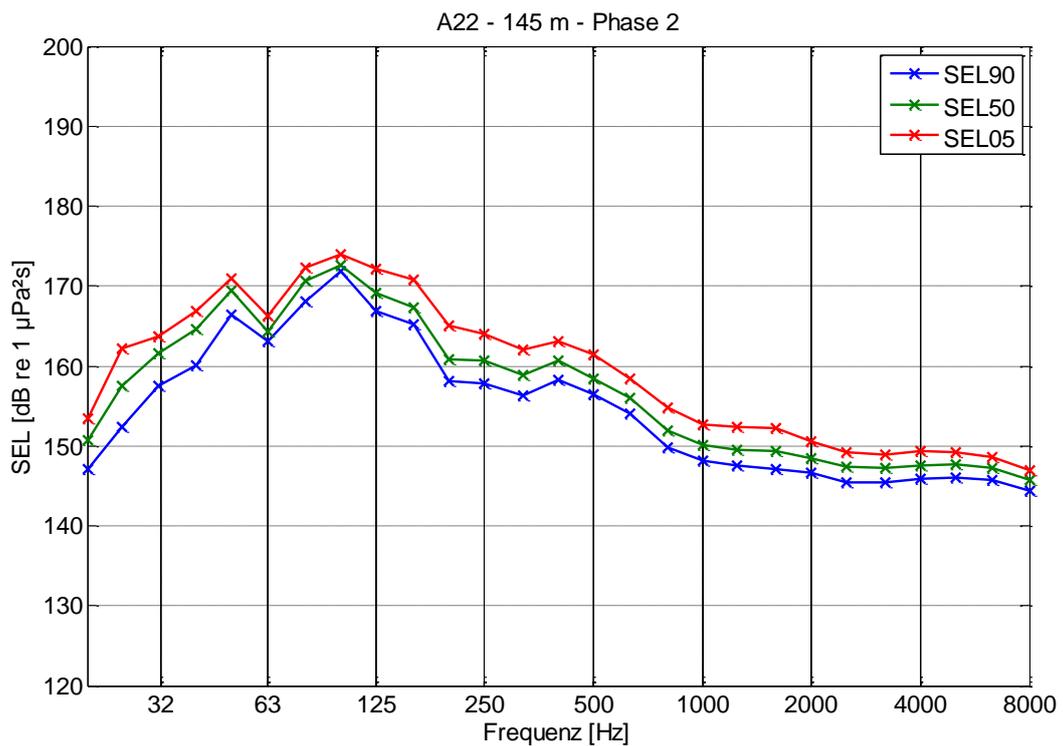
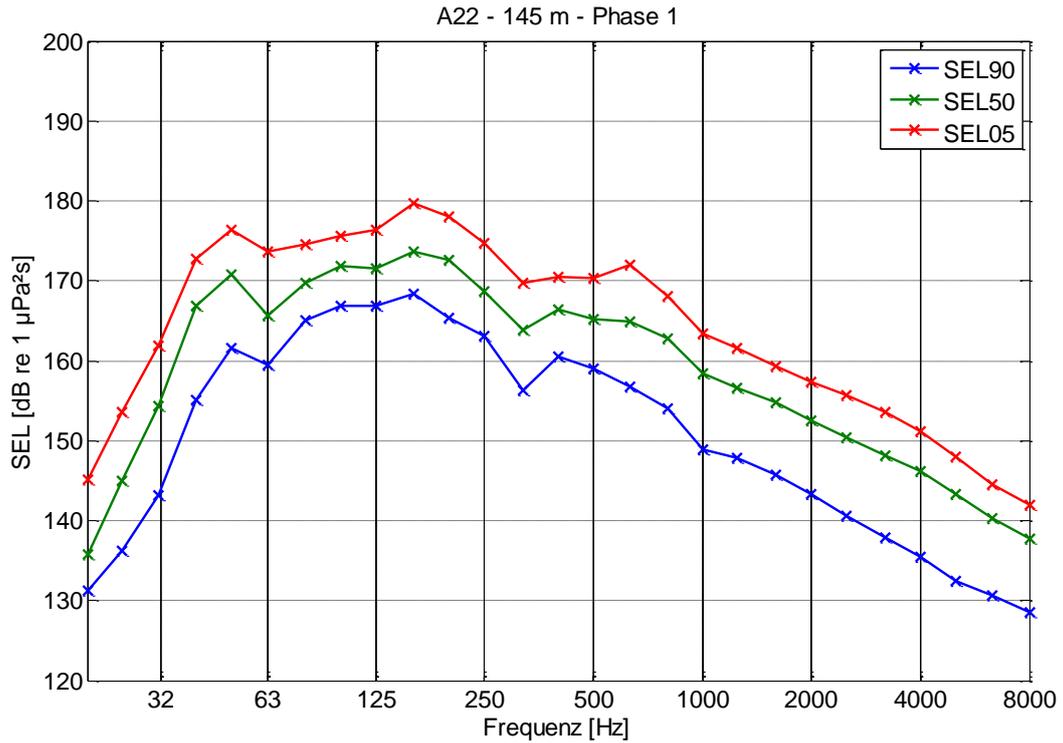


Abbildung 22: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

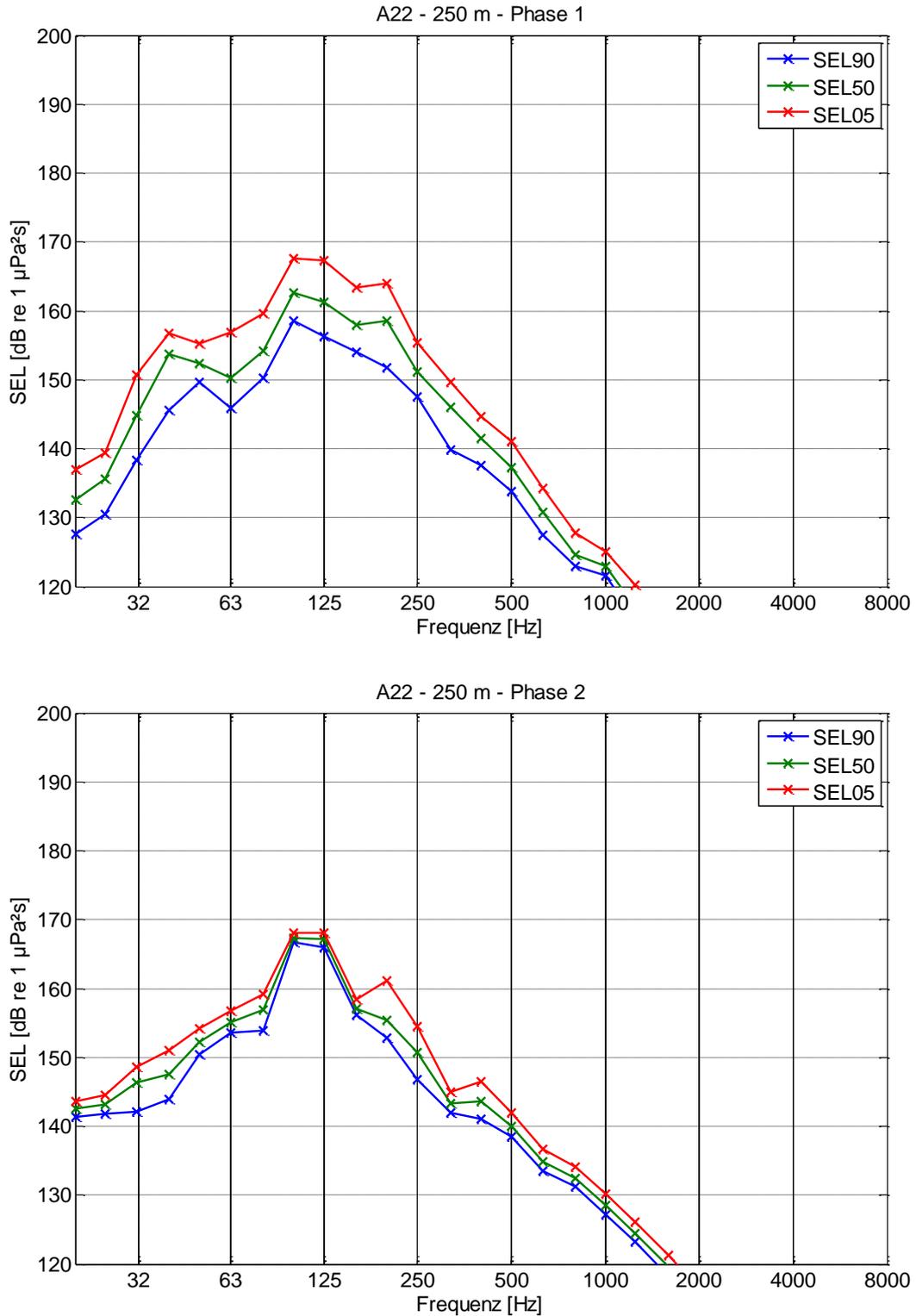


Abbildung 23: Terzspektren des SEL im Abstand von 250 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

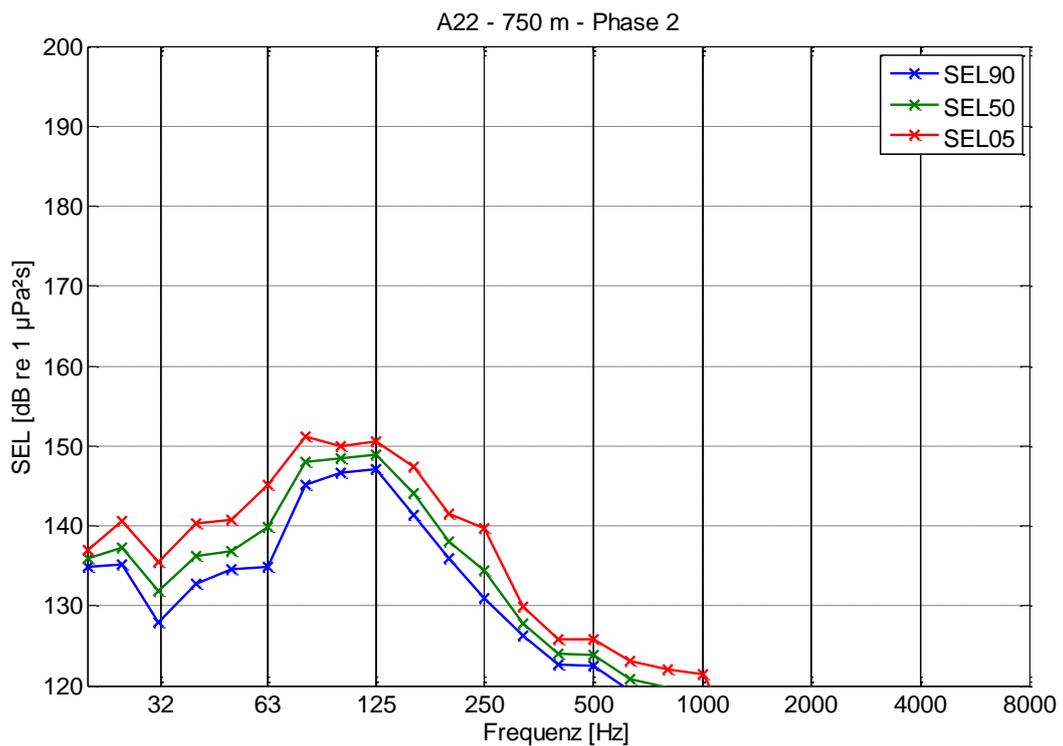
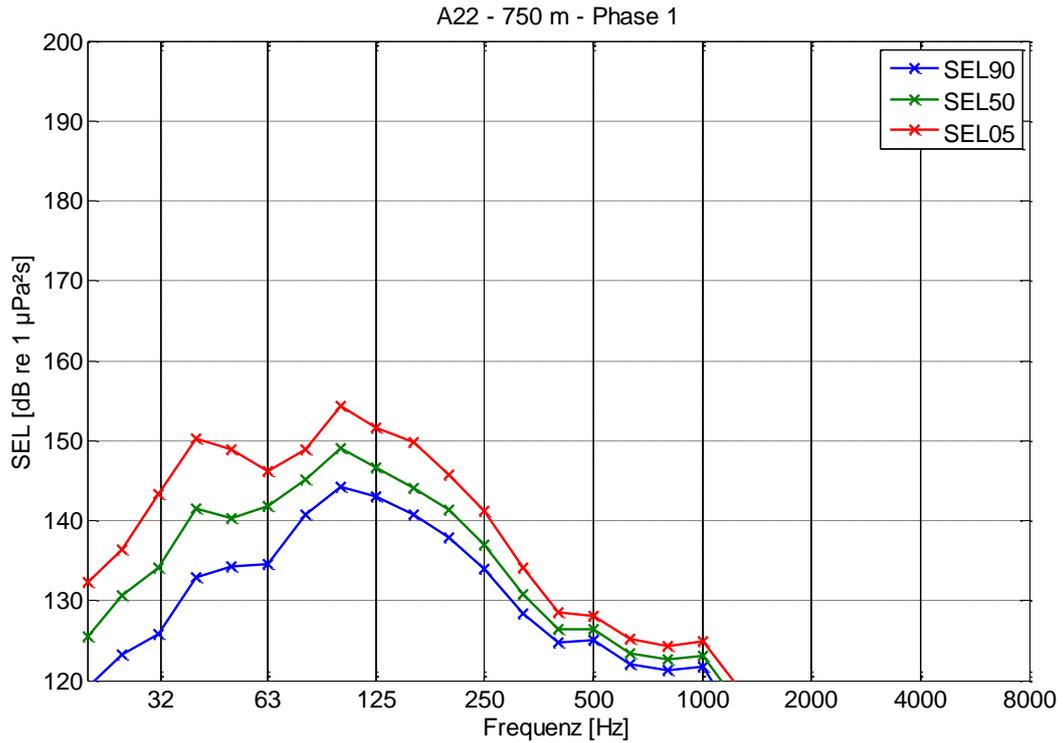


Abbildung 24: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

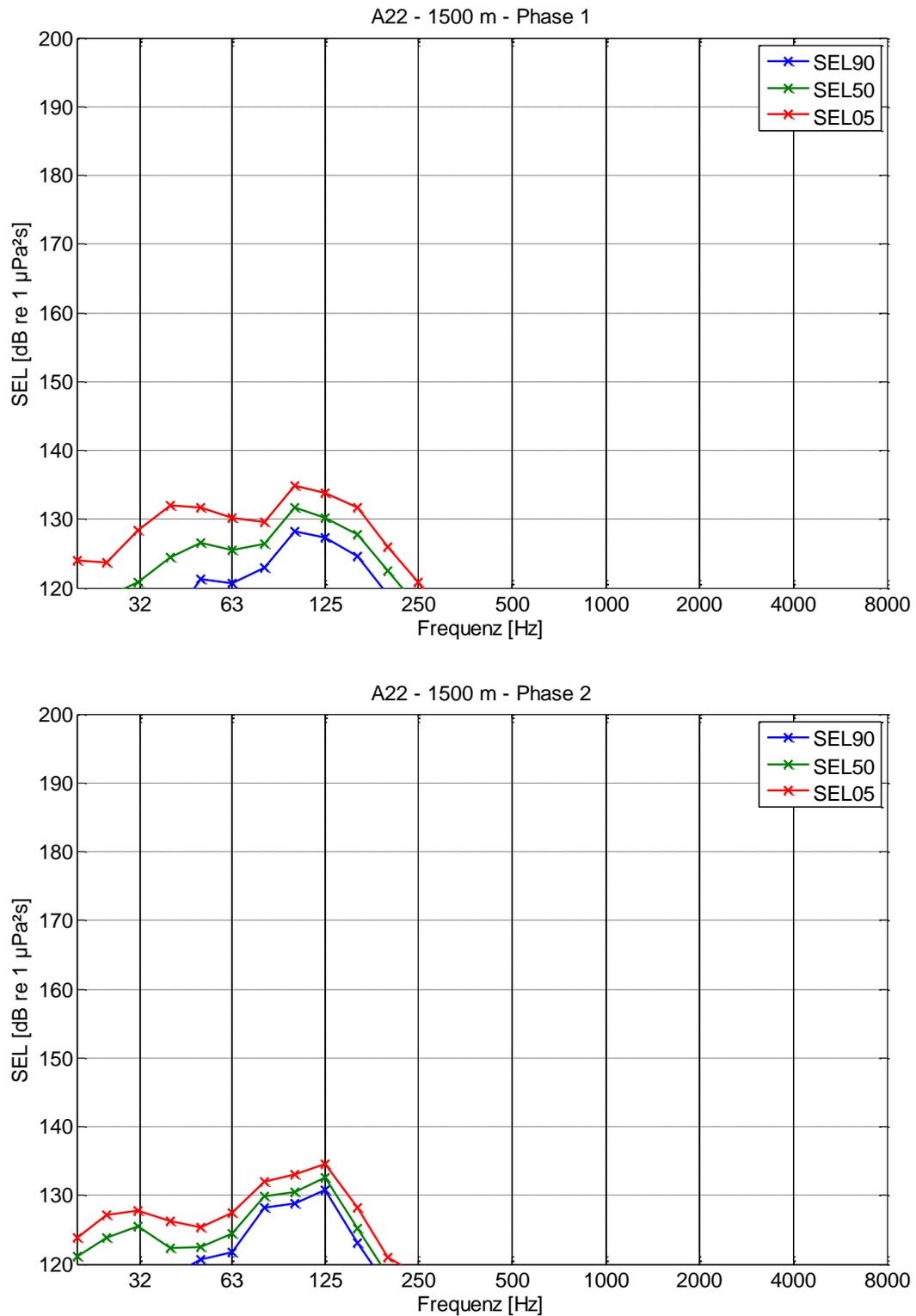


Abbildung 25: Terzspektren des SEL im Abstand von 1500 m zum Pfahl A22 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

7.5 Pfahl A44

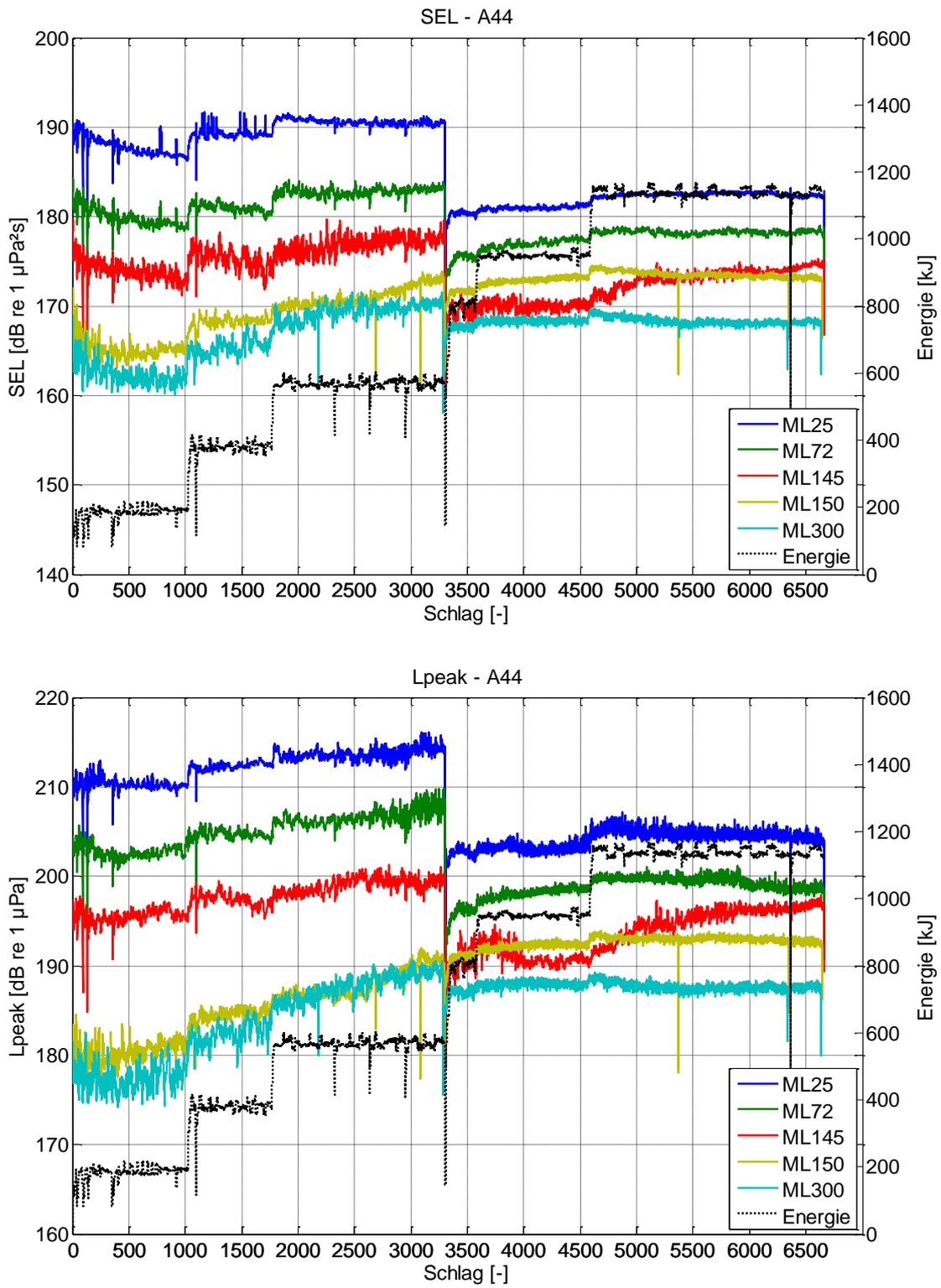


Abbildung 26: Entwicklung des SEL (oben) und  $L_{peak}$  (unten) über die Rammung beim Pfahl A44

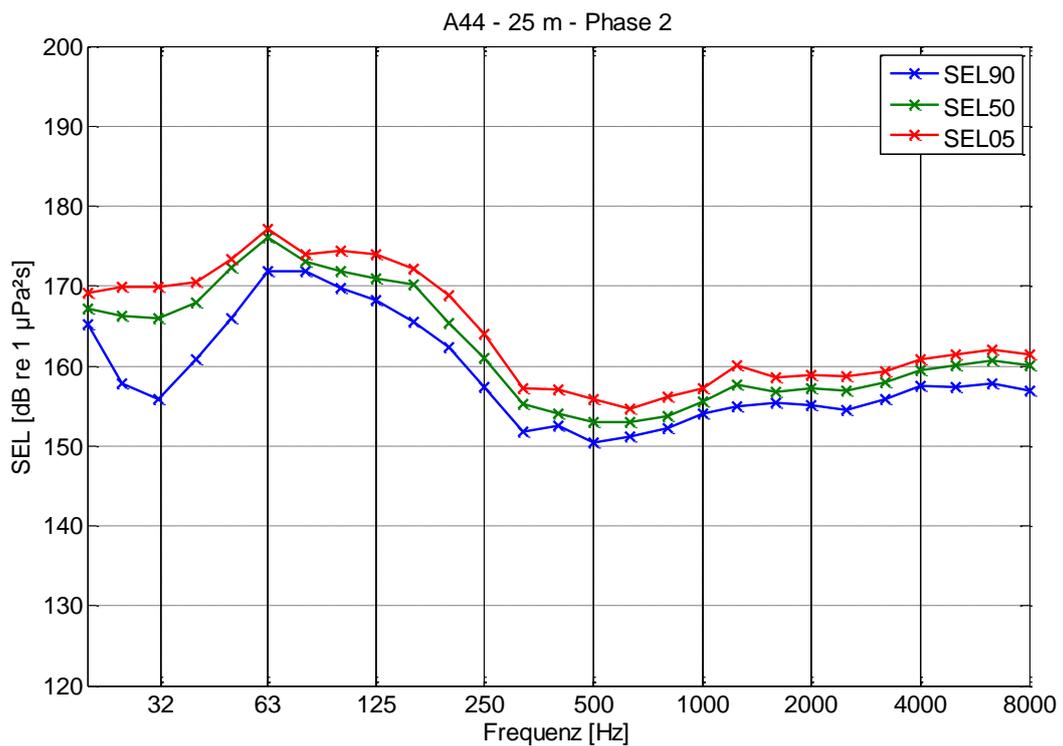
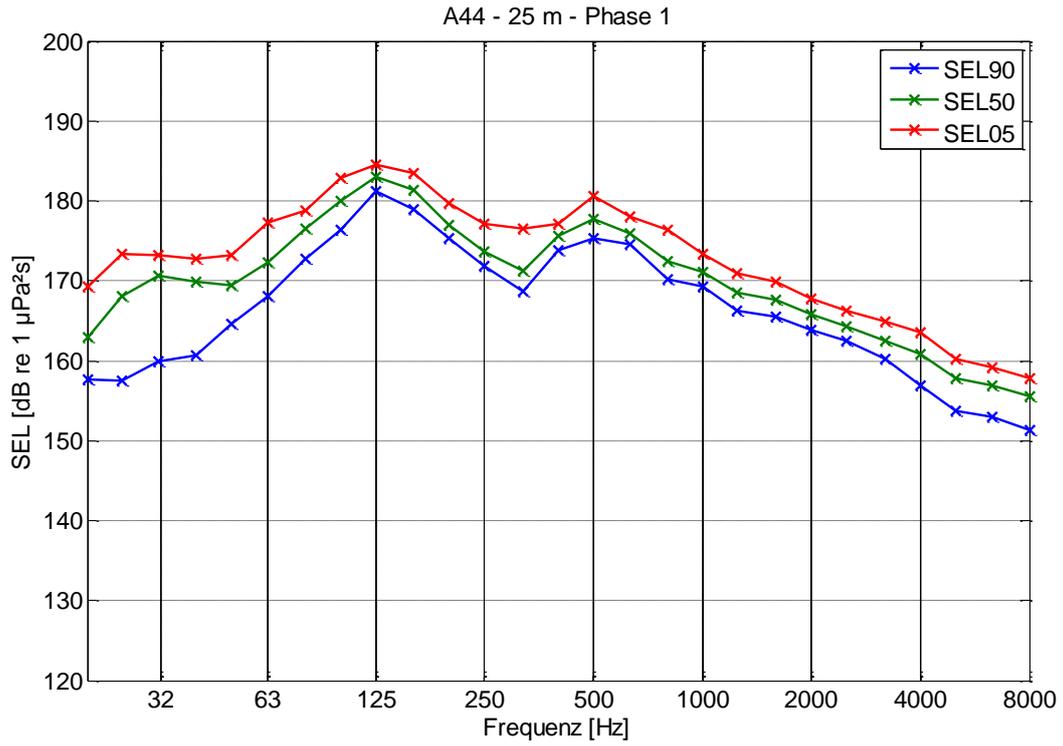


Abbildung 27: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

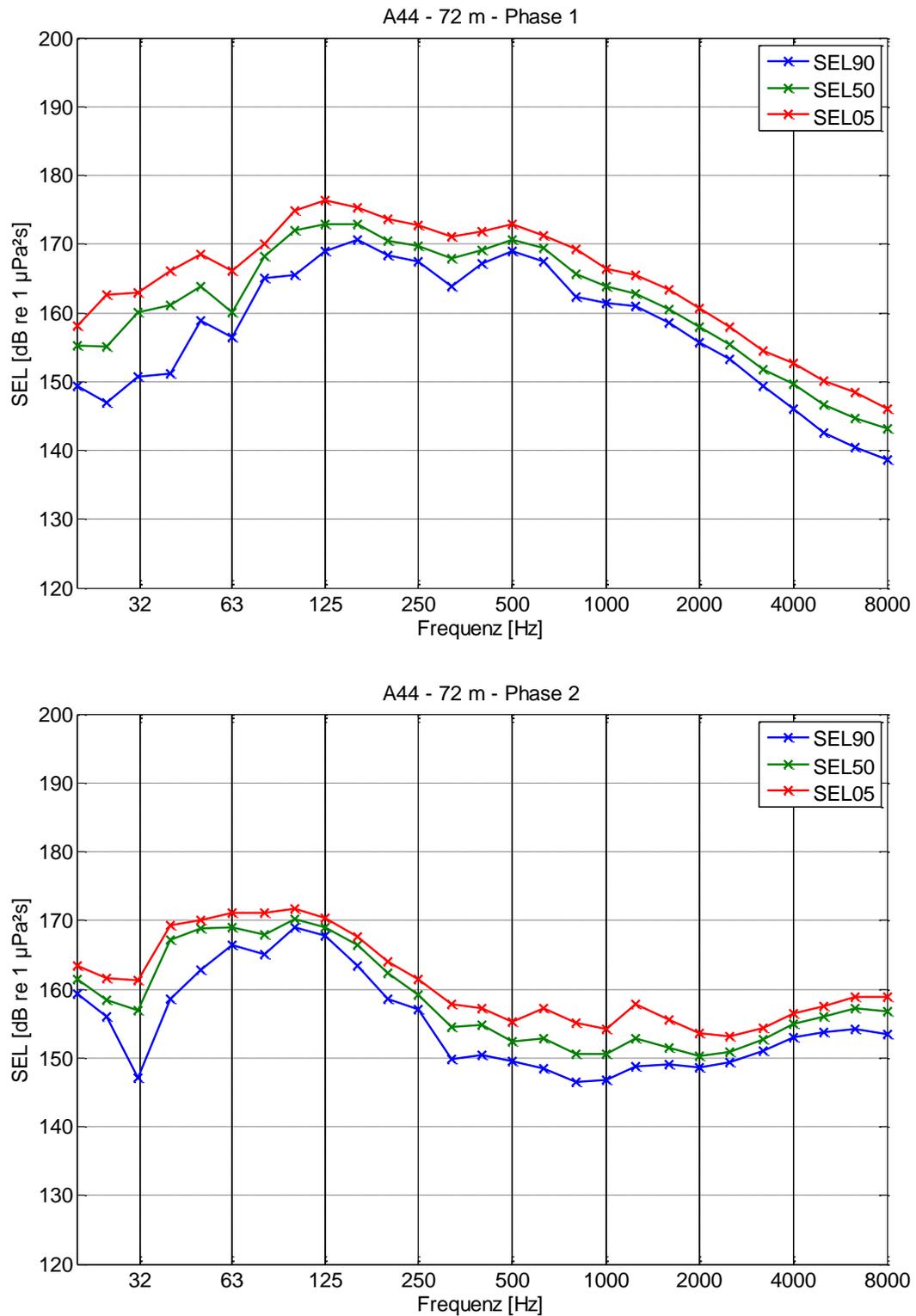


Abbildung 28: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

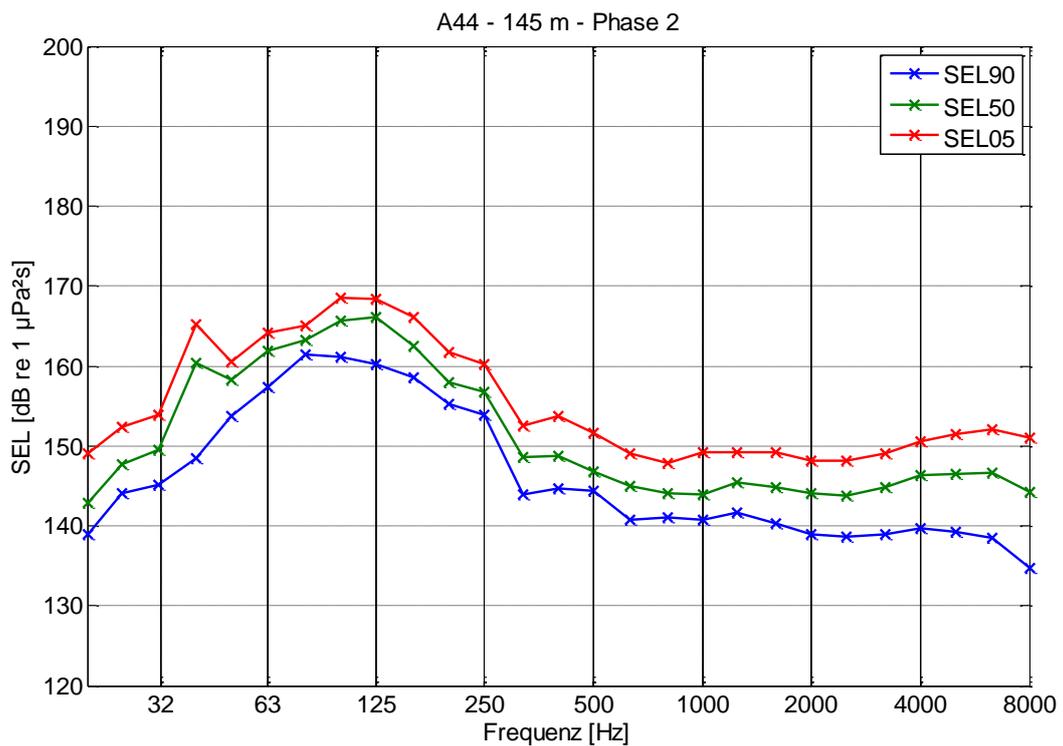
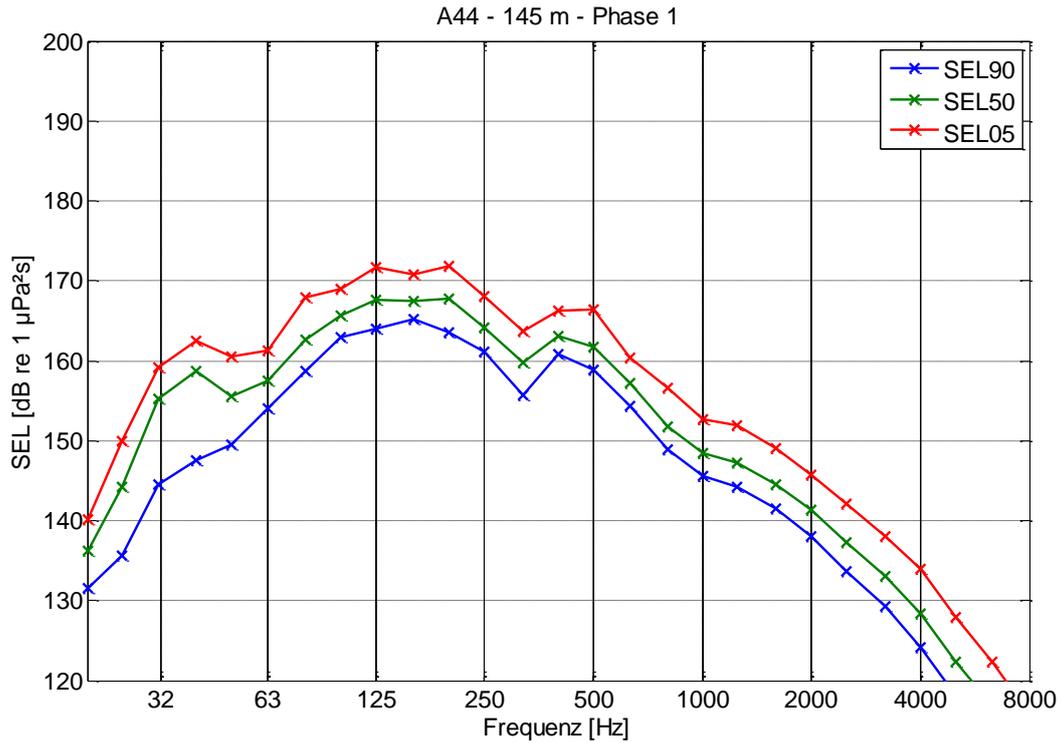


Abbildung 29: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

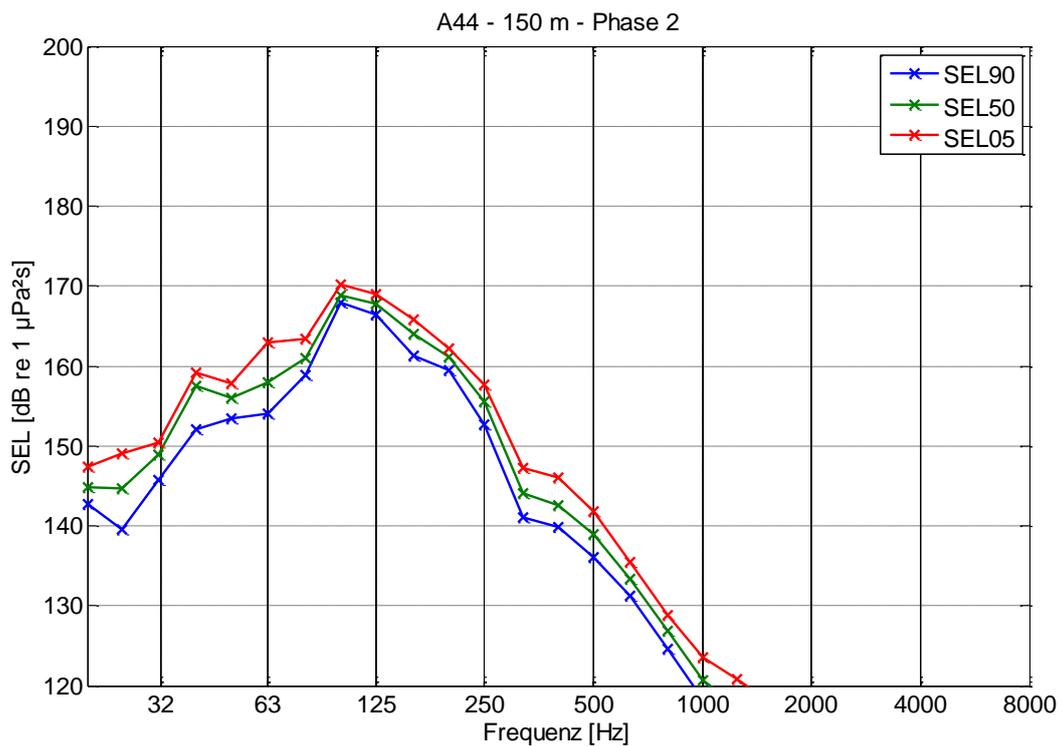
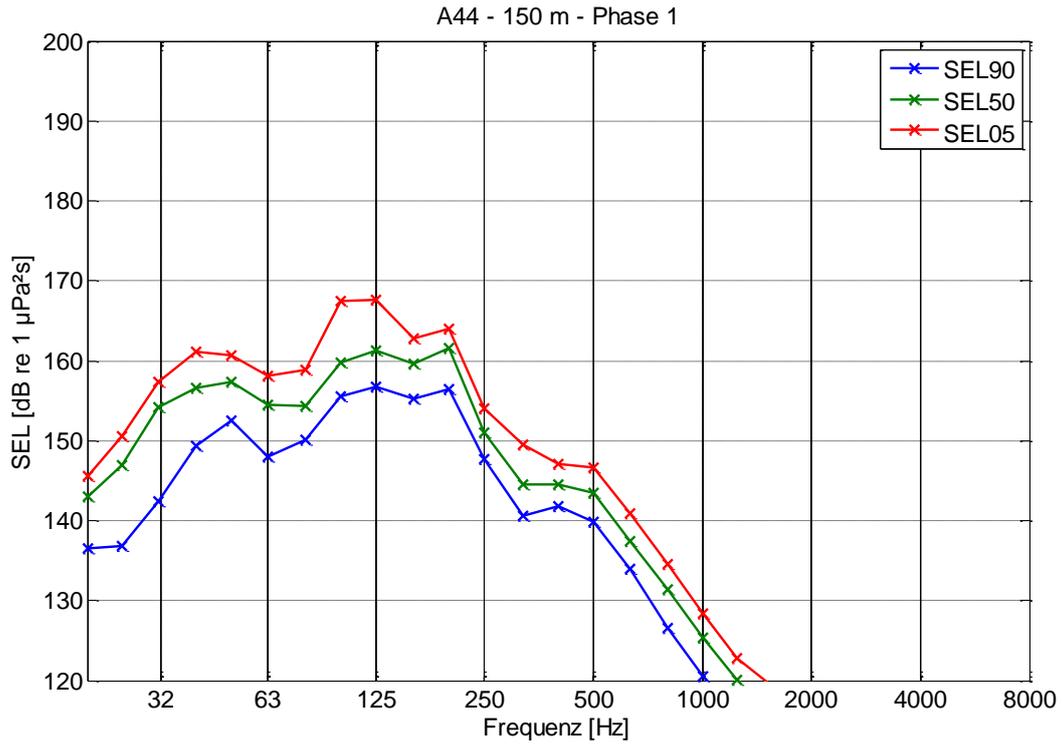


Abbildung 30: Terzspektren des SEL im Abstand von 150 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

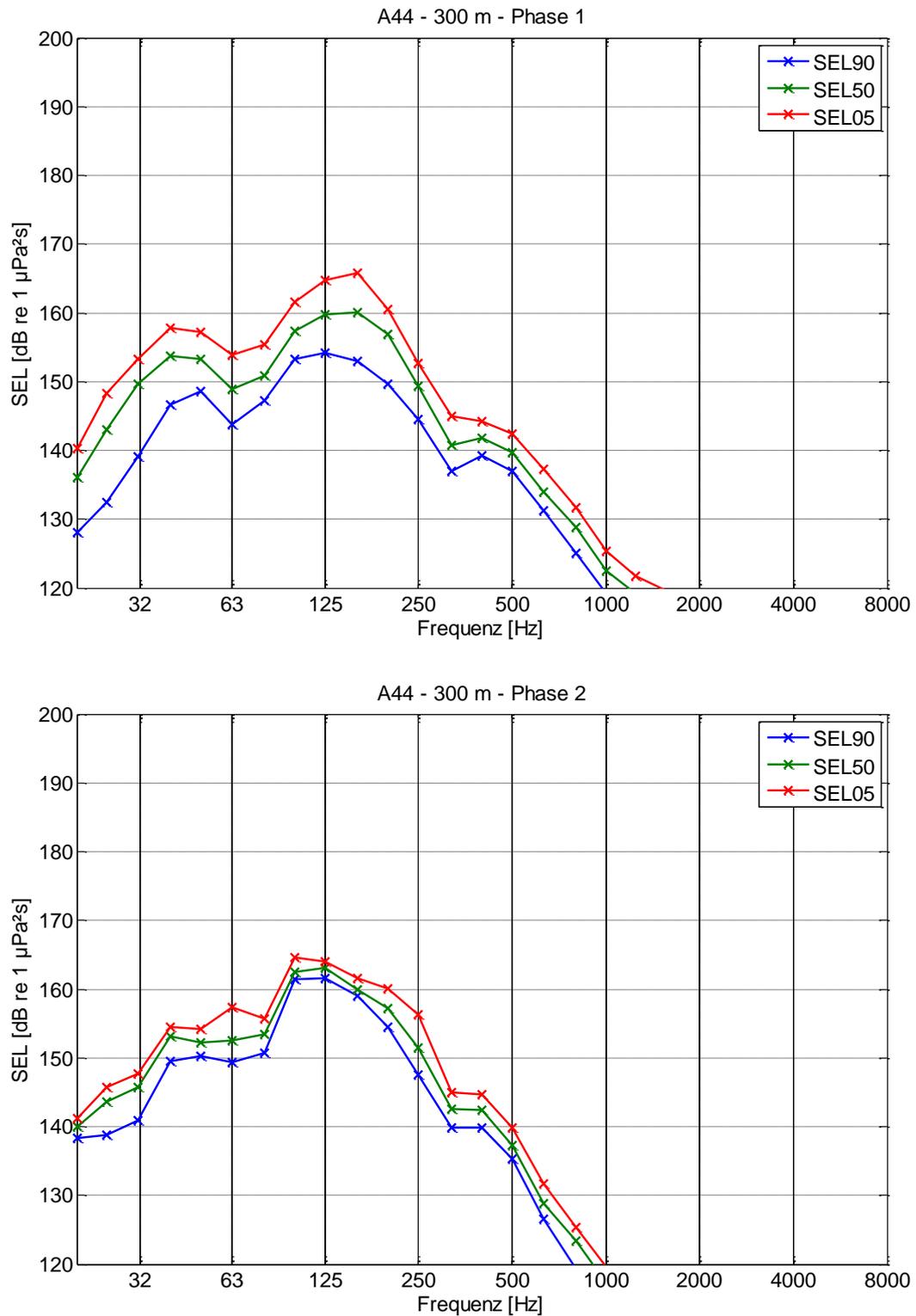
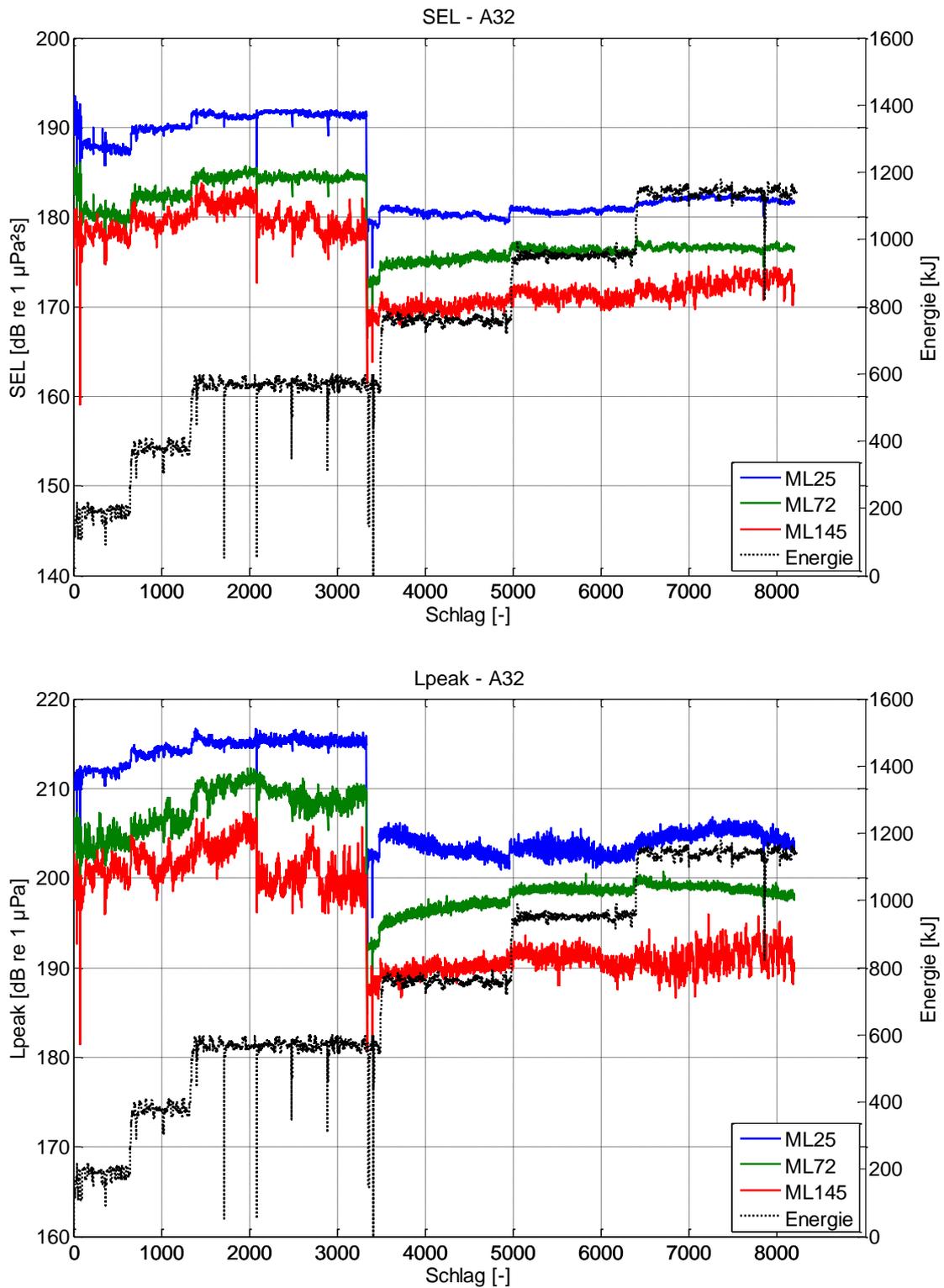


Abbildung 31: Terzspektren des SEL im Abstand von 300 m zum Pfahl A44 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

## 7.6 Pfahl A32

Abbildung 32: Entwicklung des SEL (oben) und  $L_{\text{peak}}$  (unten) über die Rammung beim Pfahl A32

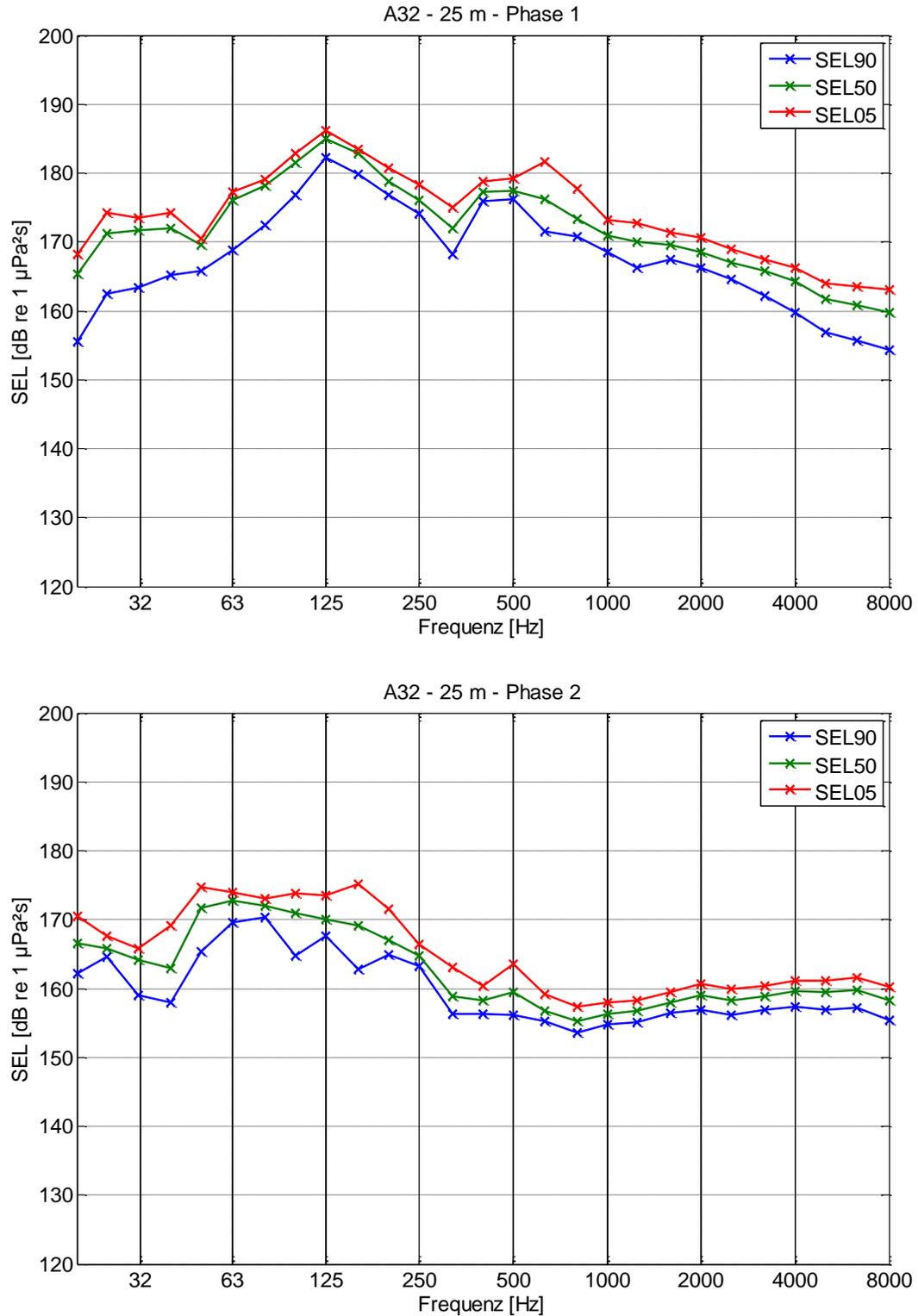


Abbildung 33: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A32 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

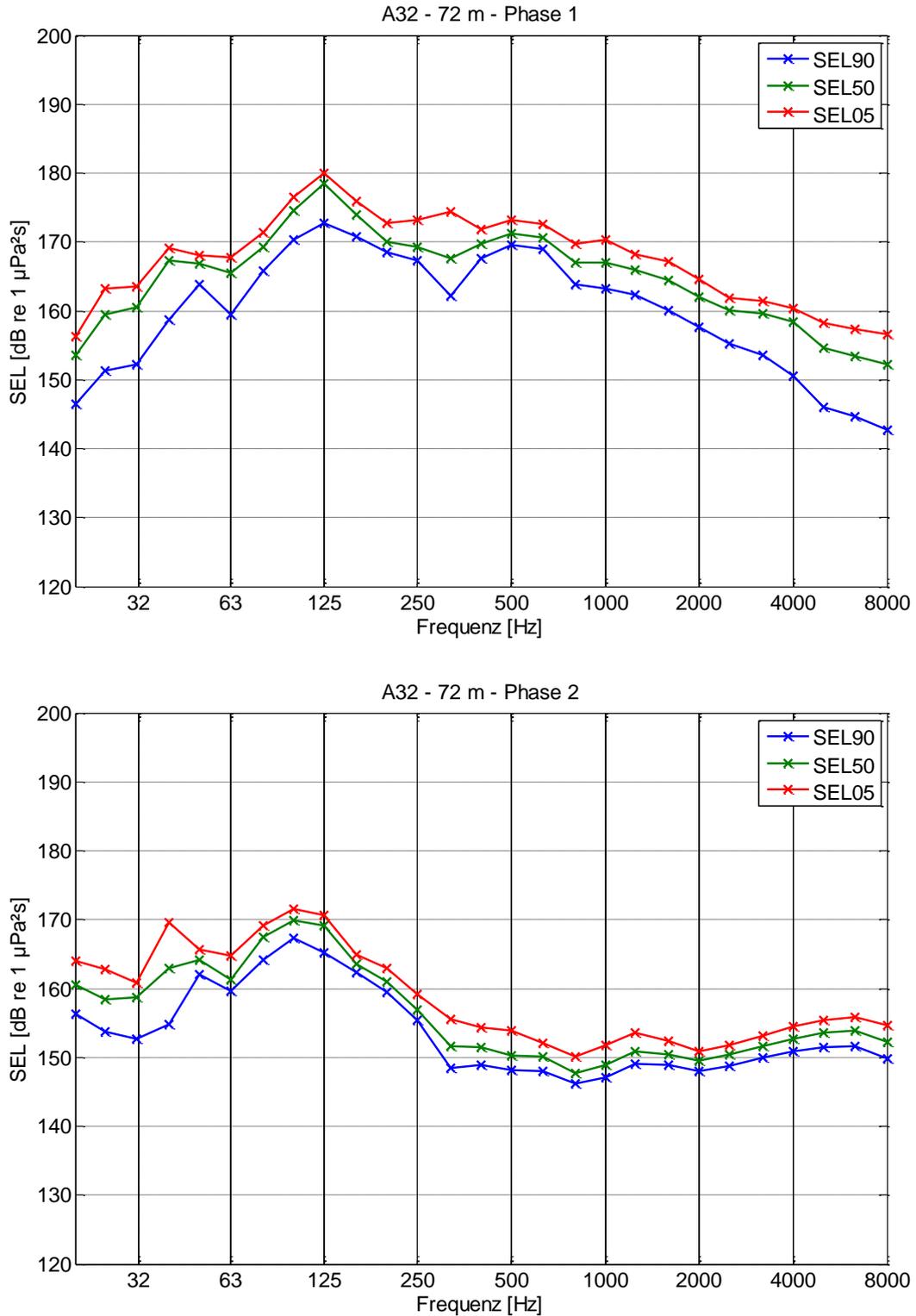


Abbildung 34: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A32 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

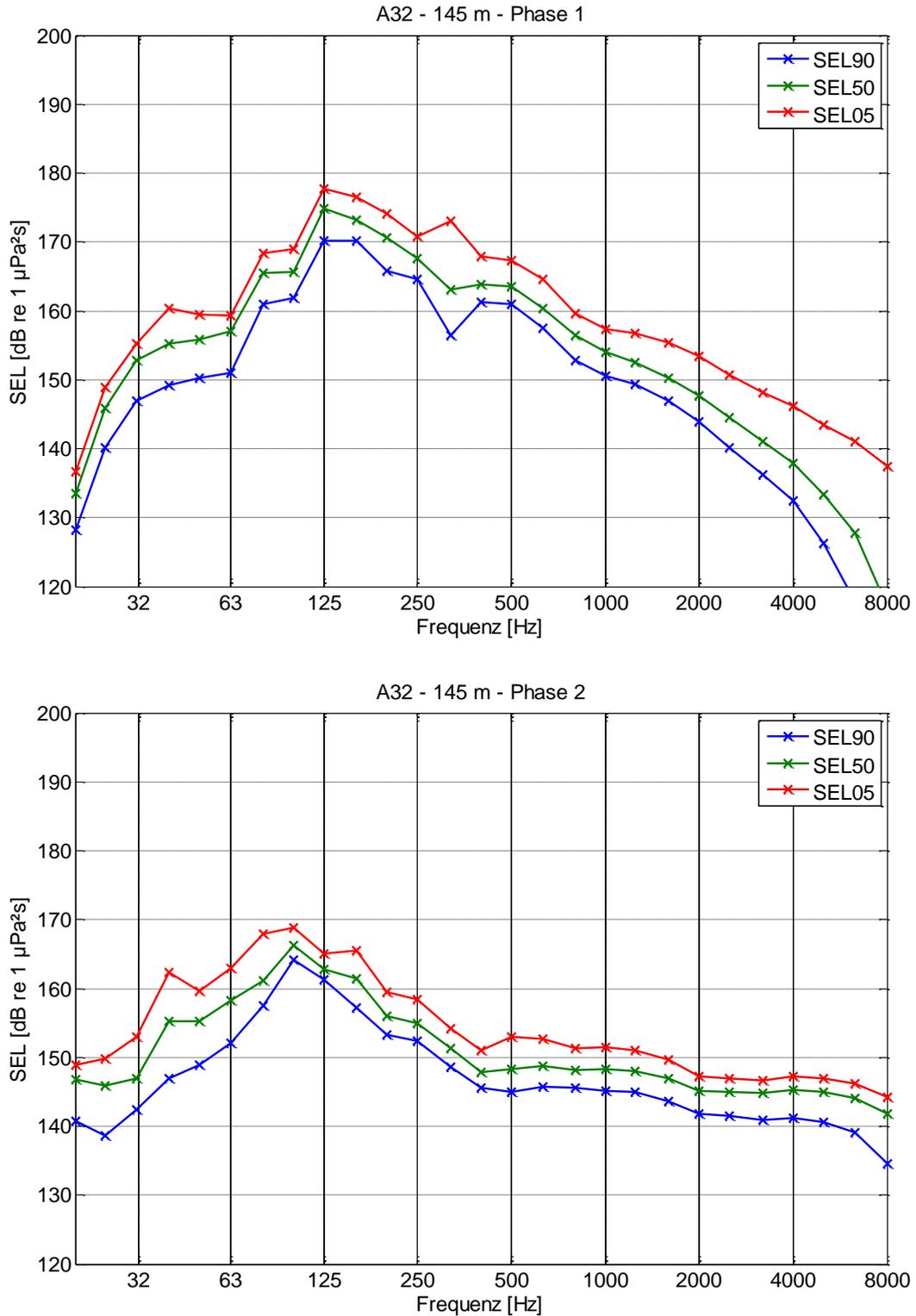
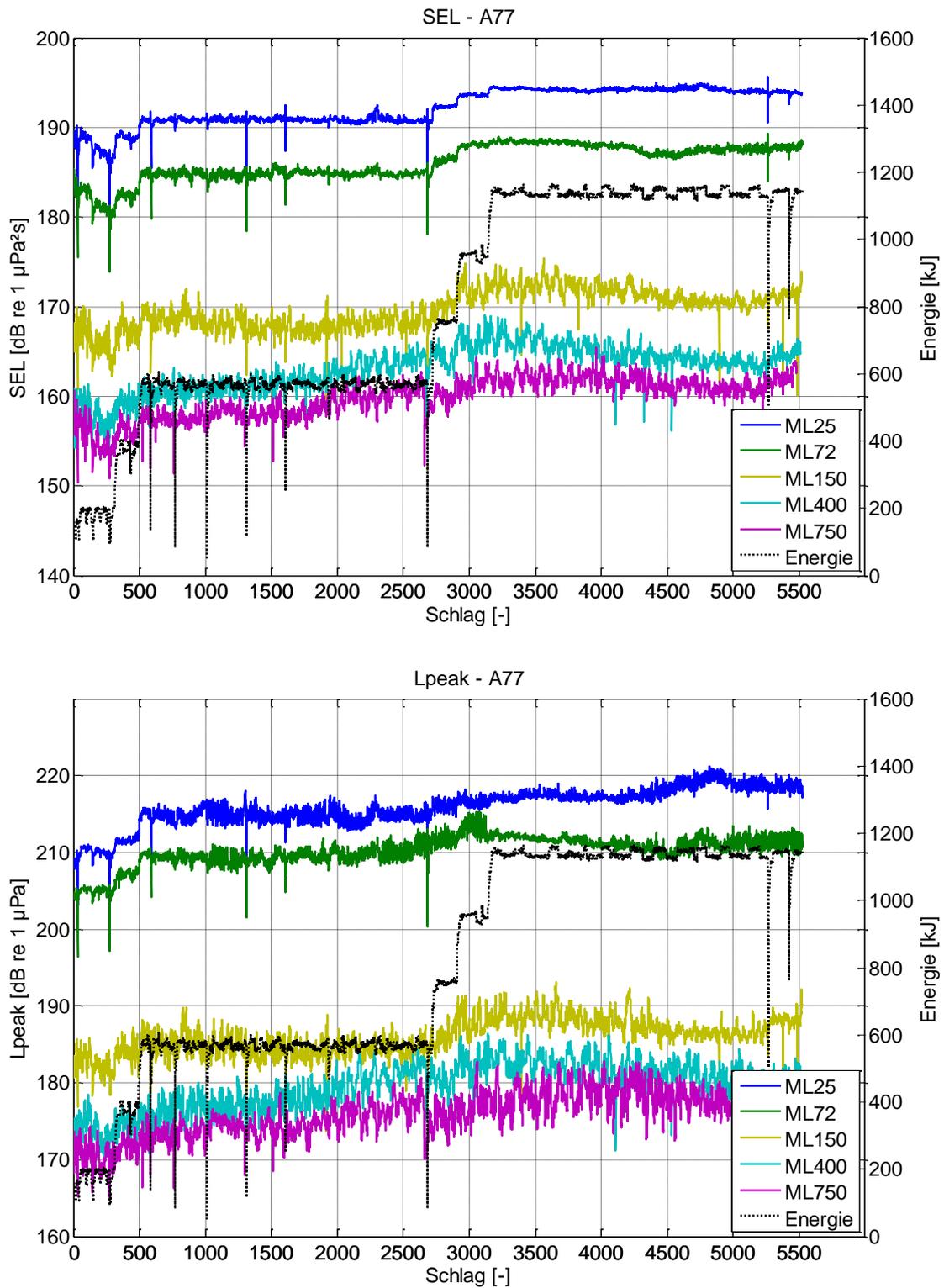


Abbildung 35: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A32 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

## 7.7 Pfahl A77

Abbildung 36: Entwicklung des SEL (oben) und L<sub>peak</sub> (unten) über die Rammung beim Pfahl A77

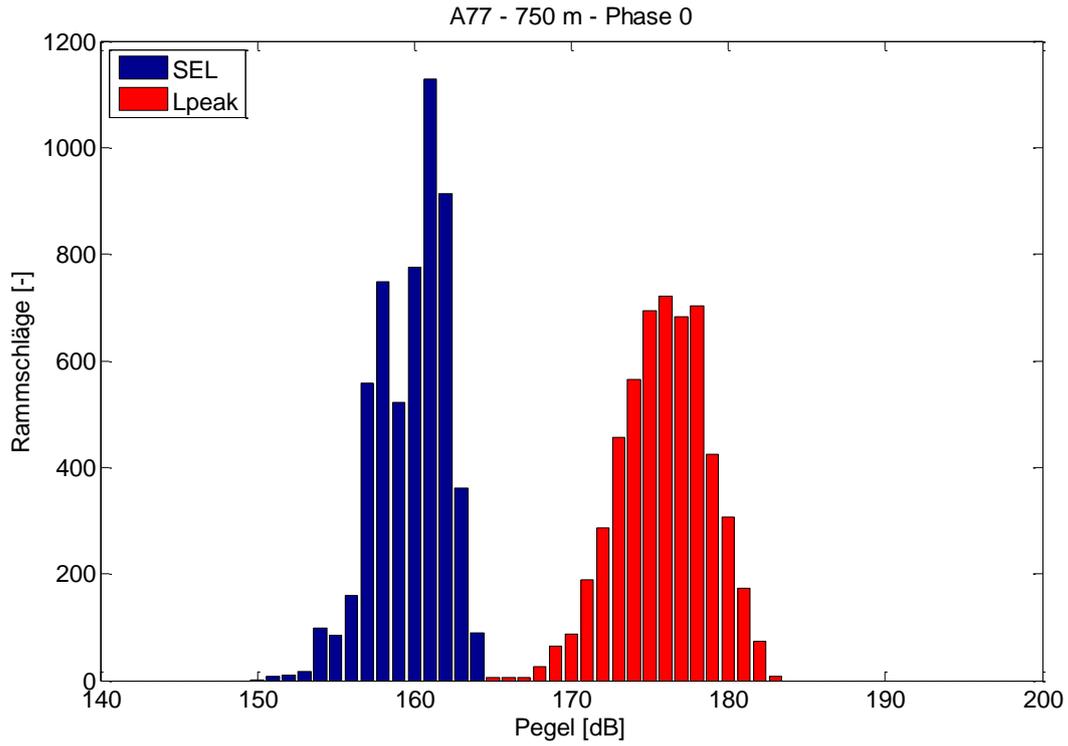


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung von SEL und  $L_{peak}$  im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A77

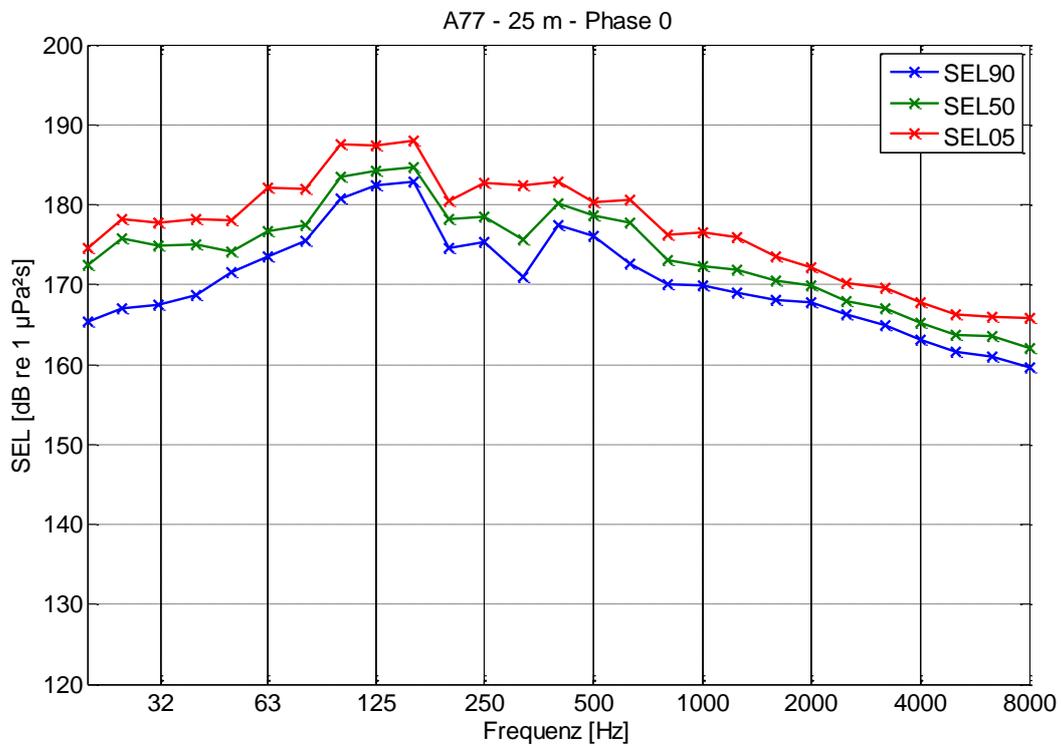


Abbildung 38: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A77

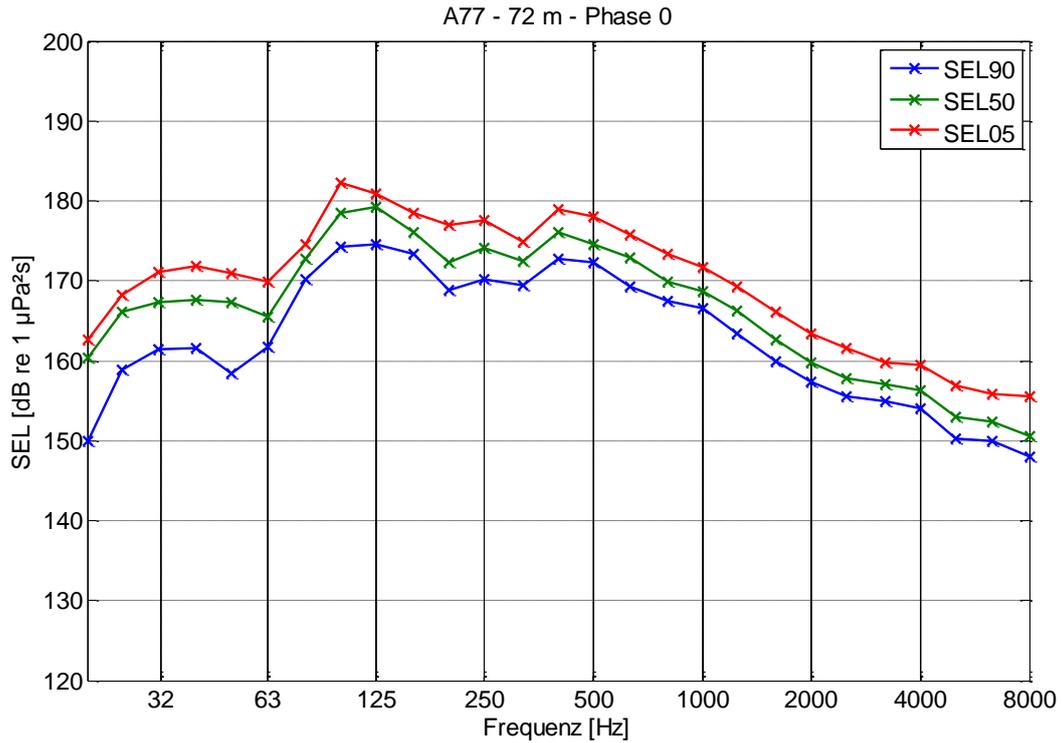


Abbildung 39: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A77

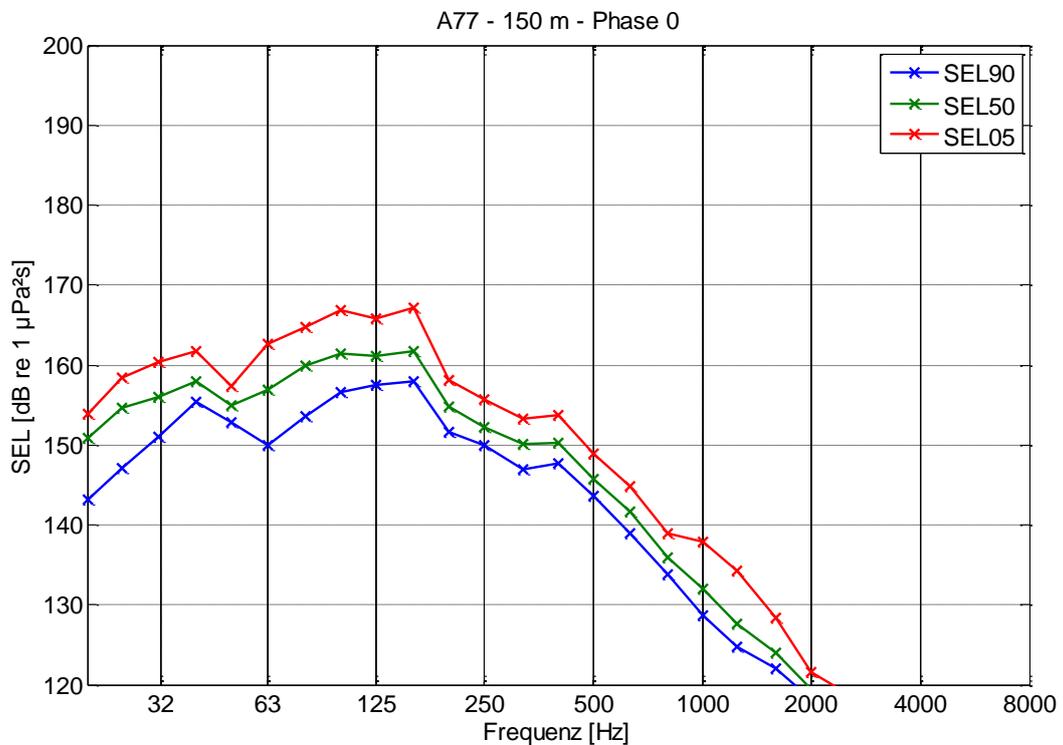


Abbildung 40: Terzspektren des SEL im Abstand von 150 m zum Pfahl A77

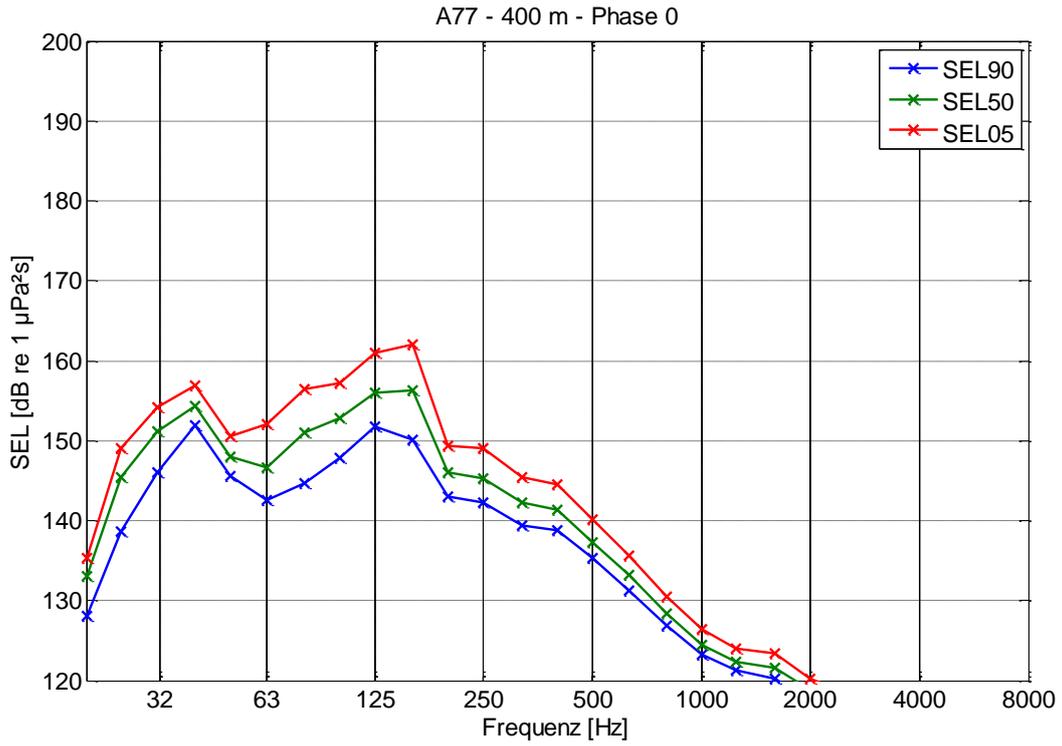


Abbildung 41: Terzspektren des SEL im Abstand von 400 m zum Pfahl A77

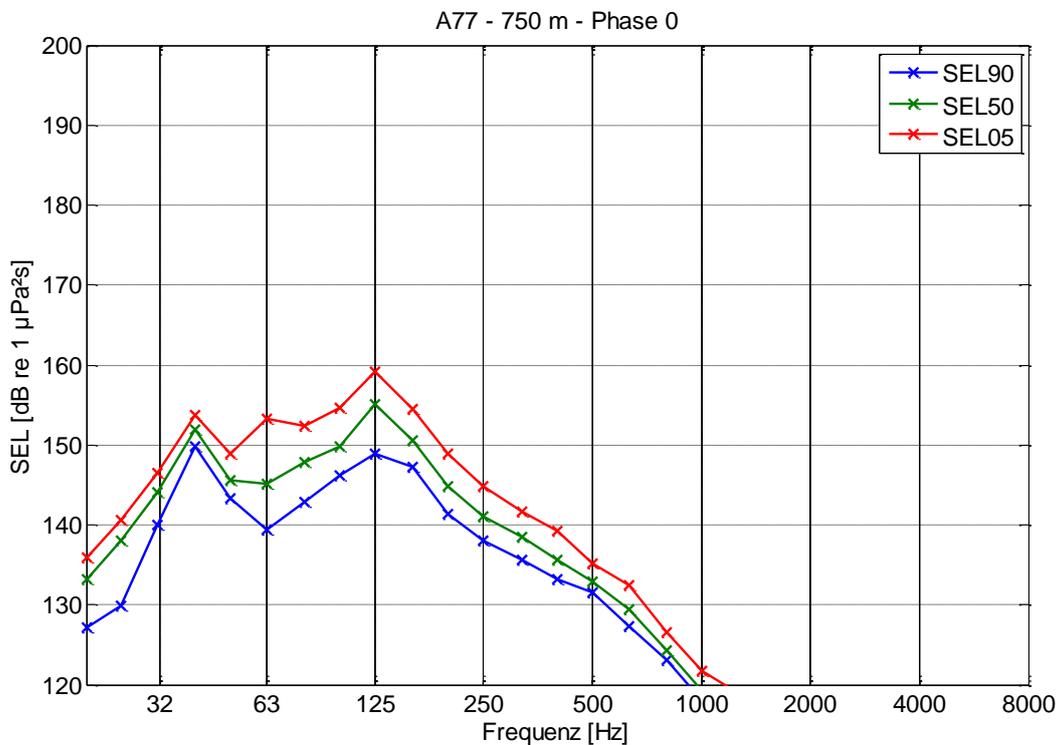


Abbildung 42: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A77

7.8 Pfahl A66

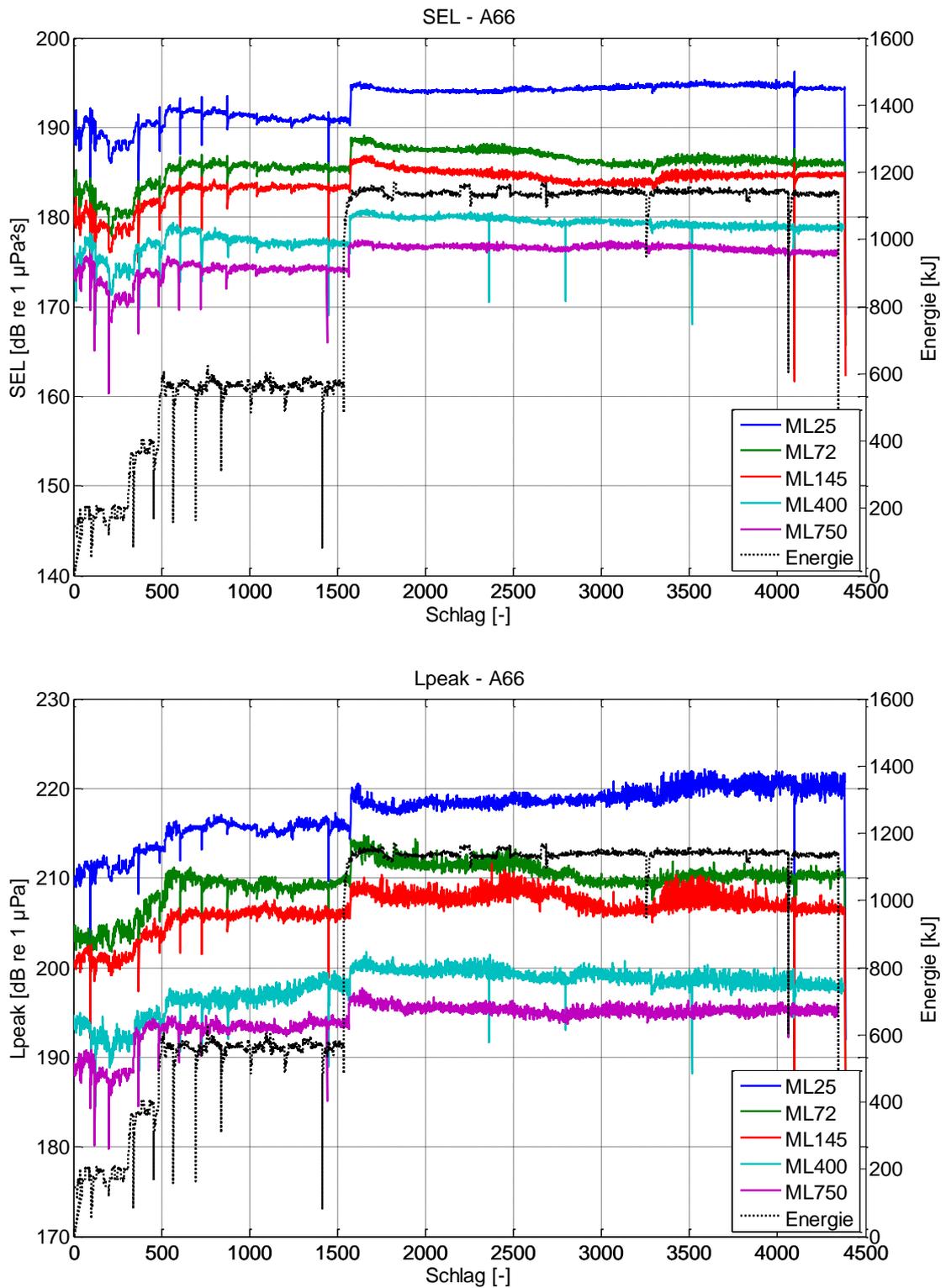


Abbildung 43: Entwicklung des SEL (oben) und  $L_{peak}$  (unten) über die Rammung beim Pfahl A66

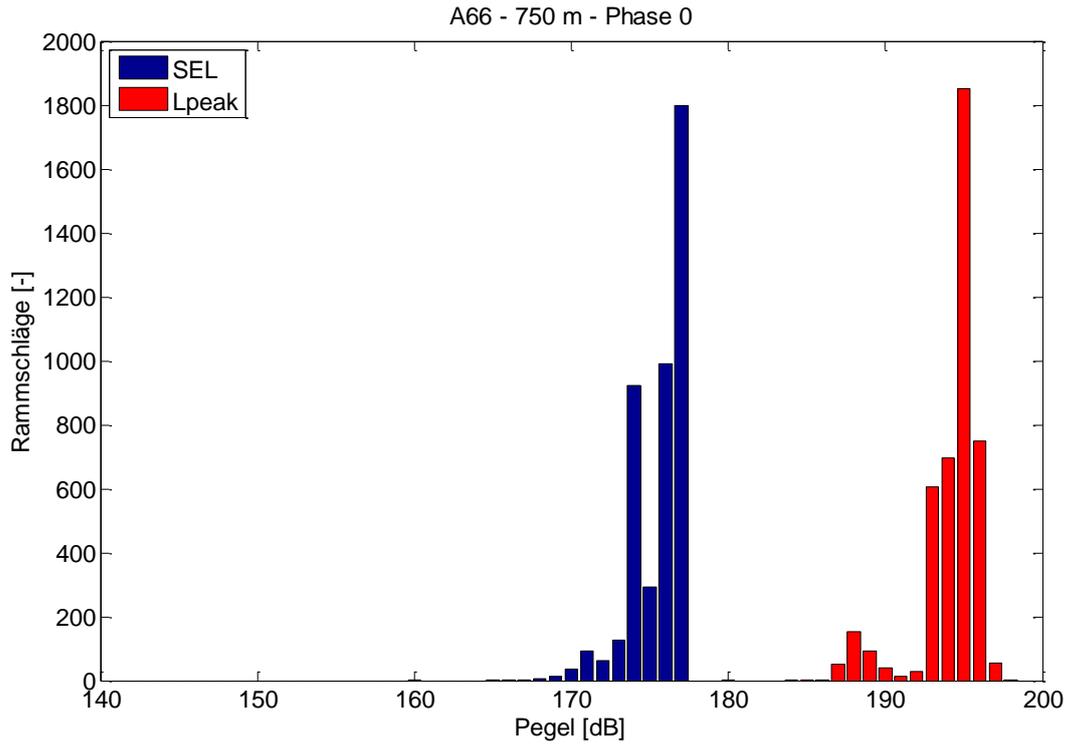


Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung von SEL und  $L_{peak}$  im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A66

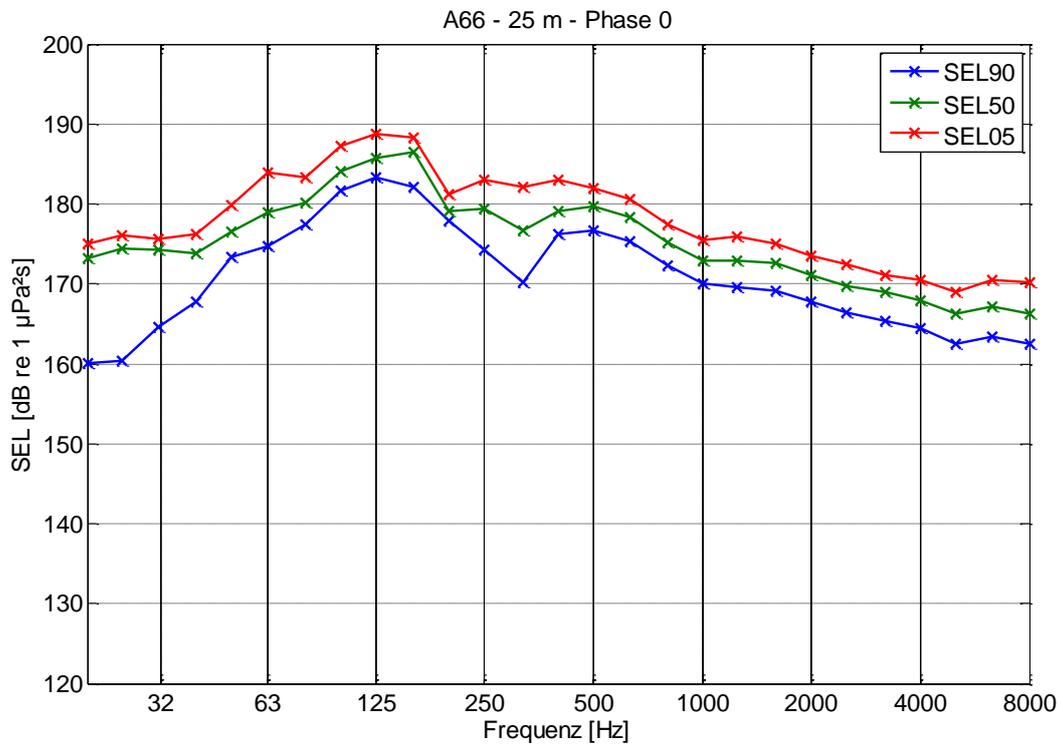


Abbildung 45: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A66

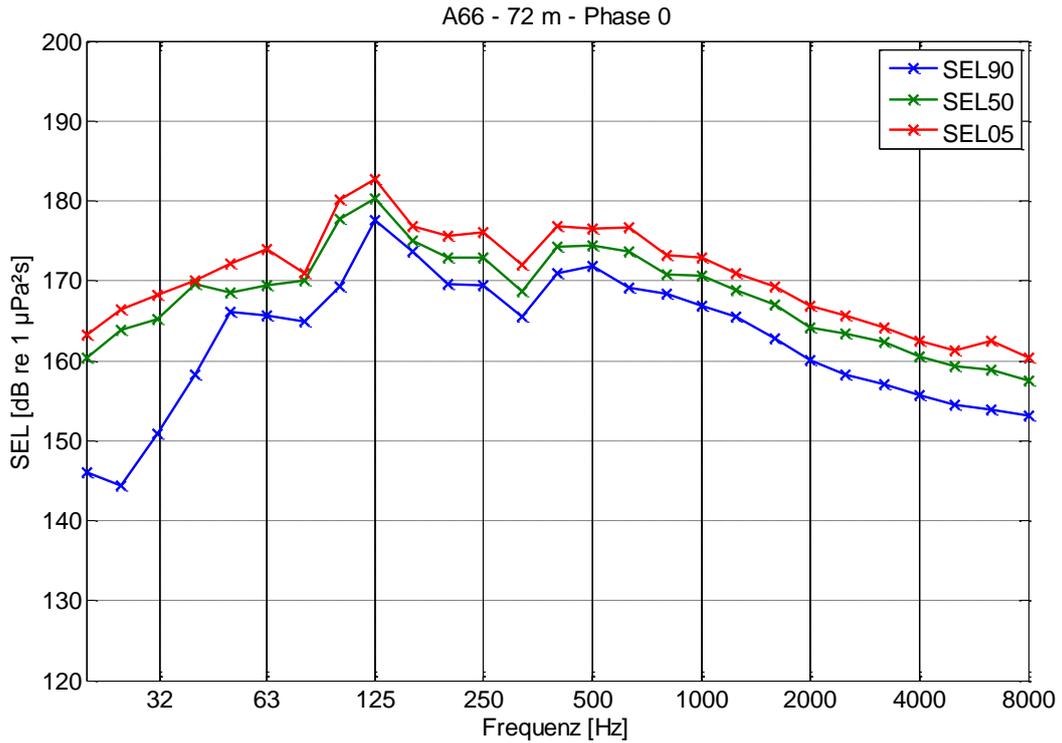


Abbildung 46: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A66

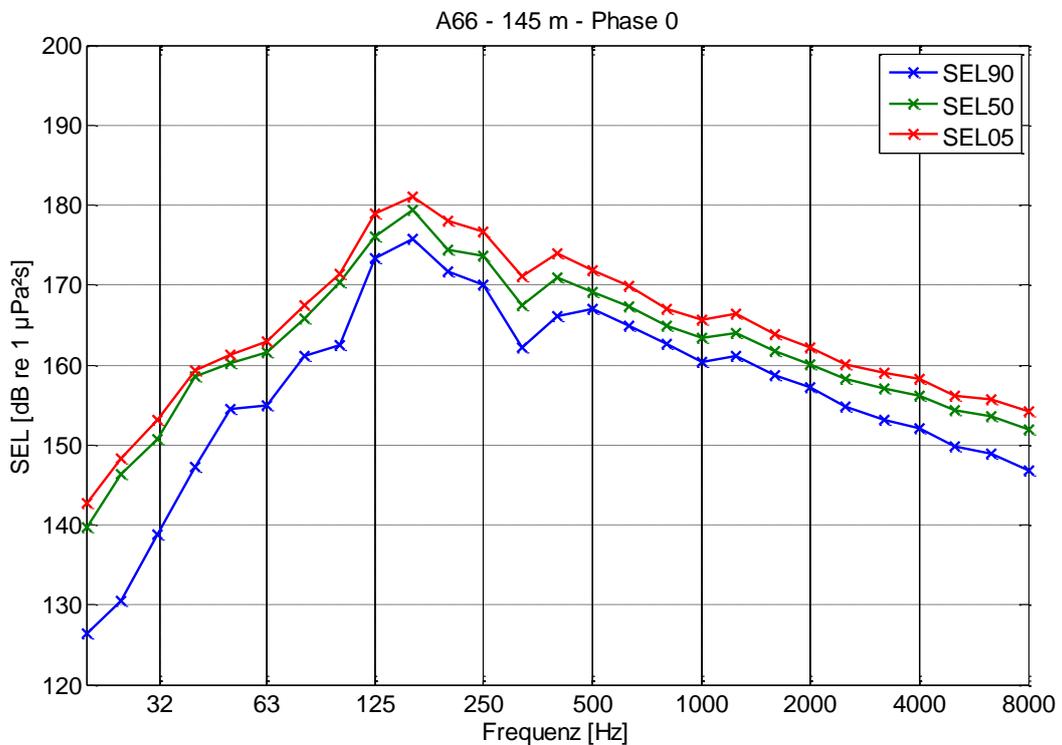


Abbildung 47: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A66

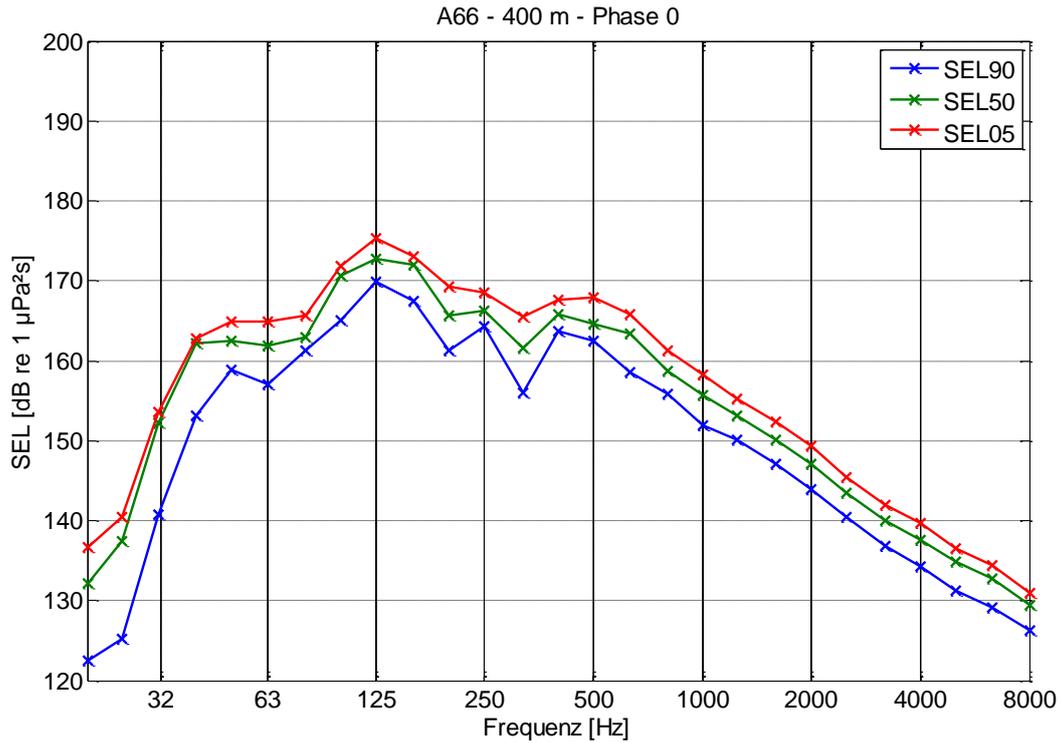


Abbildung 48: Terzspektren des SEL im Abstand von 400 m zum Pfahl A66

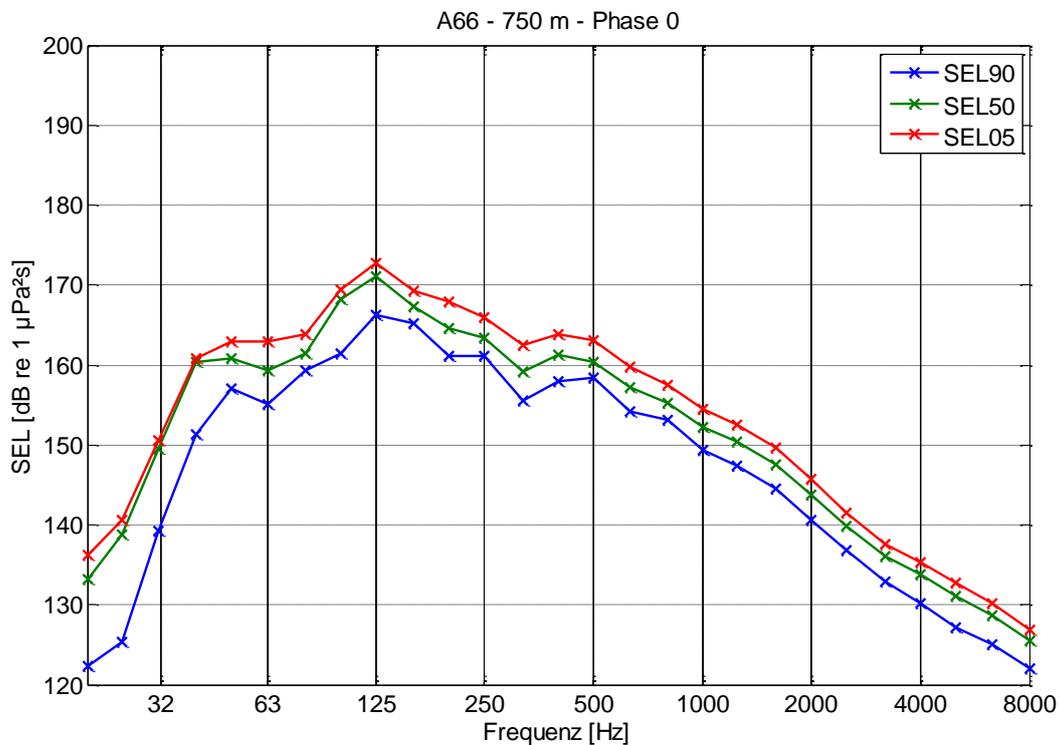
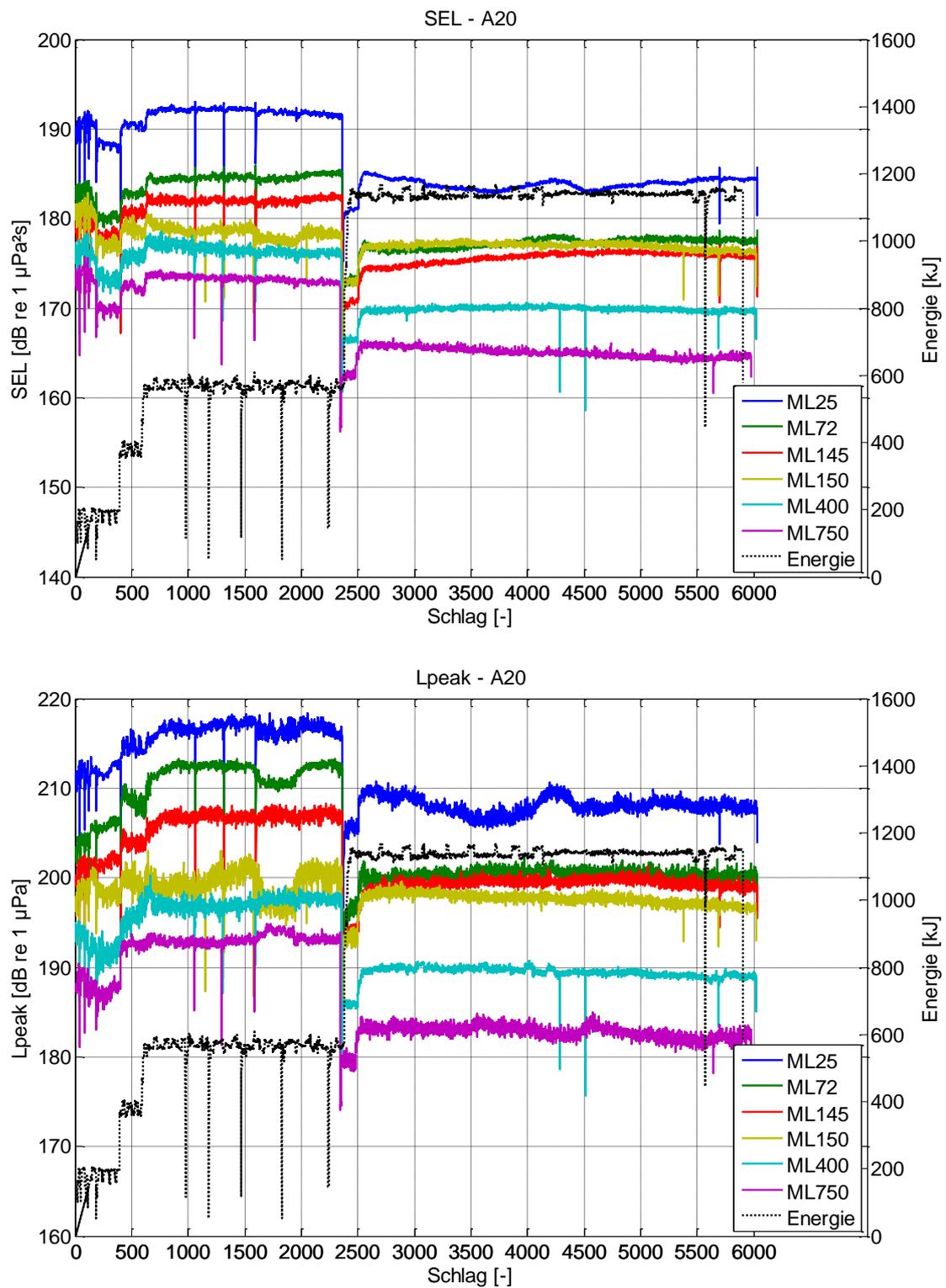


Abbildung 49: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A66

## 7.9 Pfahl A20

Abbildung 50: Entwicklung des SEL (oben) und  $L_{\text{peak}}$  (unten) über die Rammung beim Pfahl A20

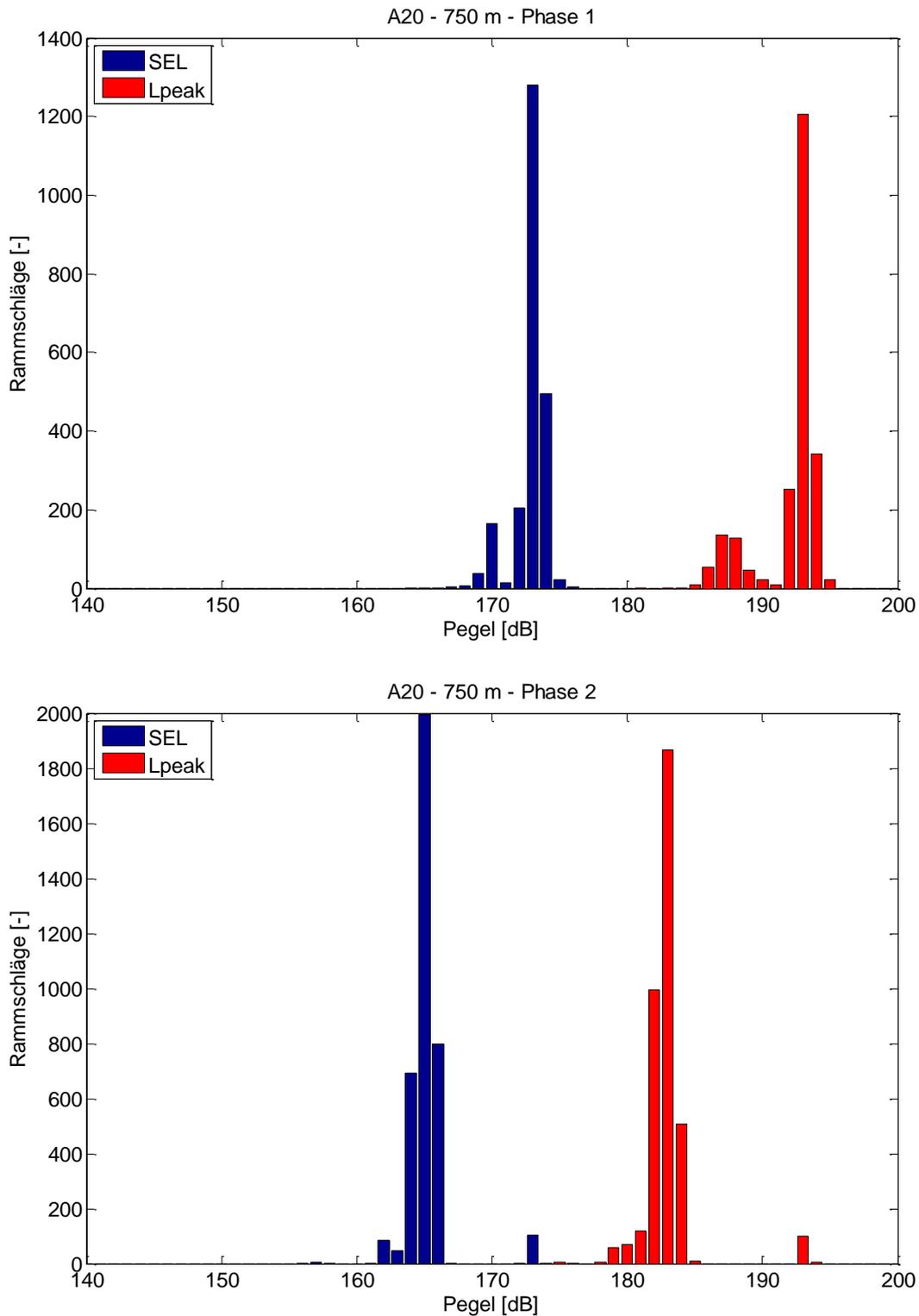


Abbildung 51: Häufigkeitsverteilung von SEL und L<sub>peak</sub> im Abstand von 750 m zum Pfahl bei der Rammung des Pfahles A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

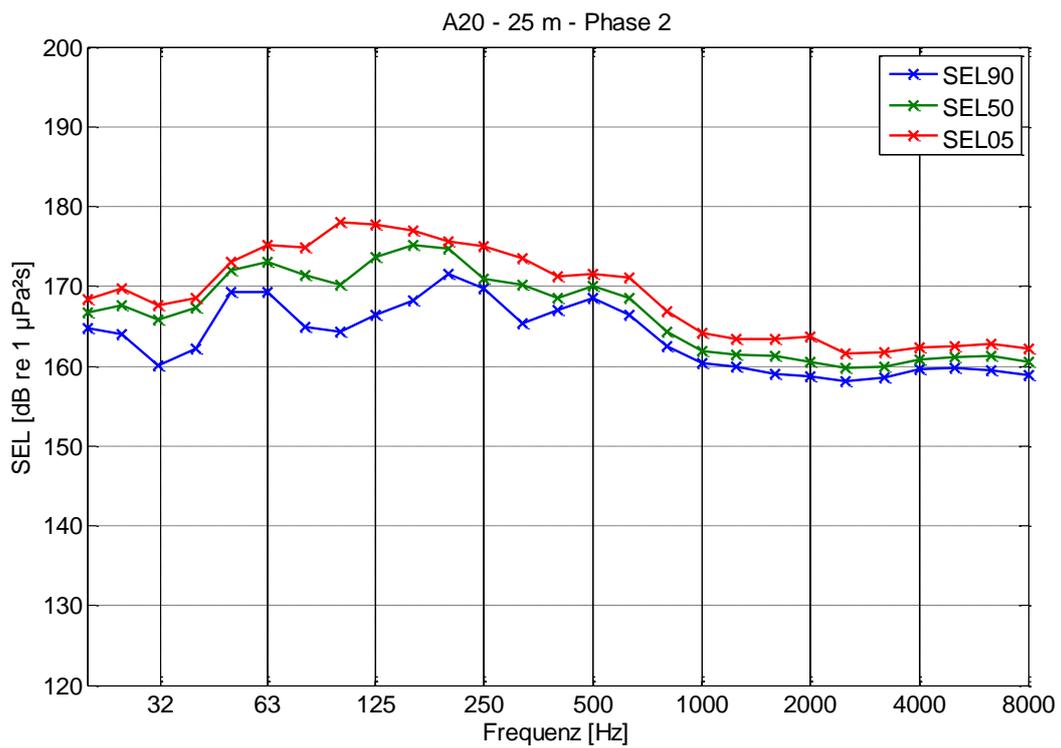
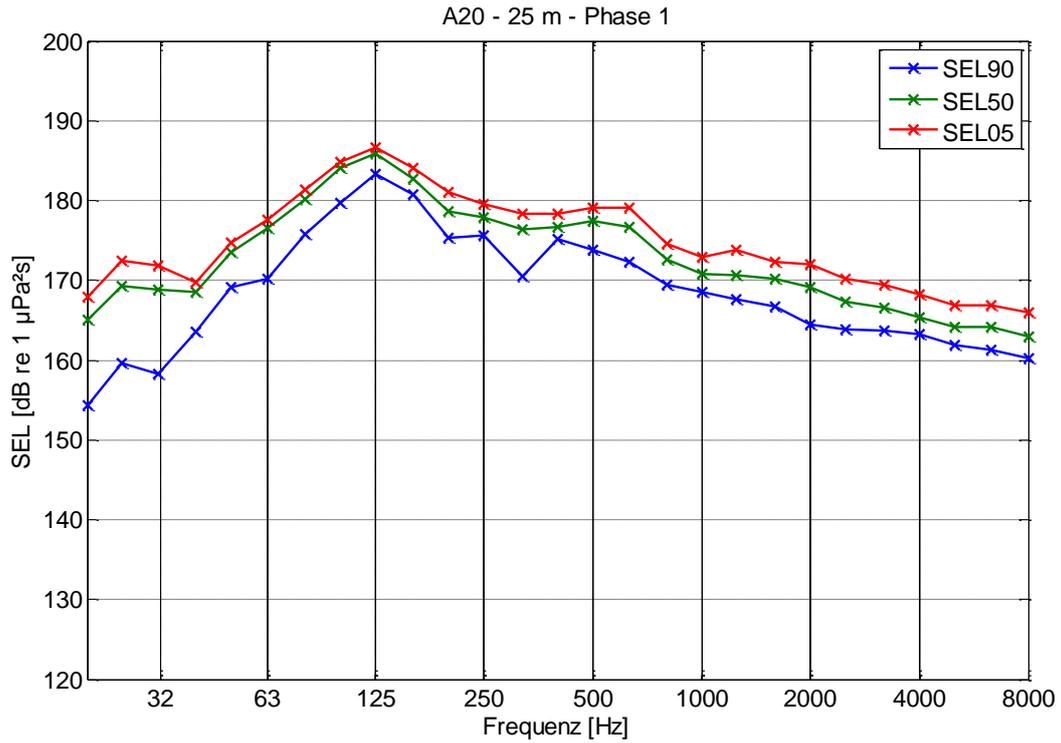


Abbildung 52: Terzspektren des SEL im Abstand von 25 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

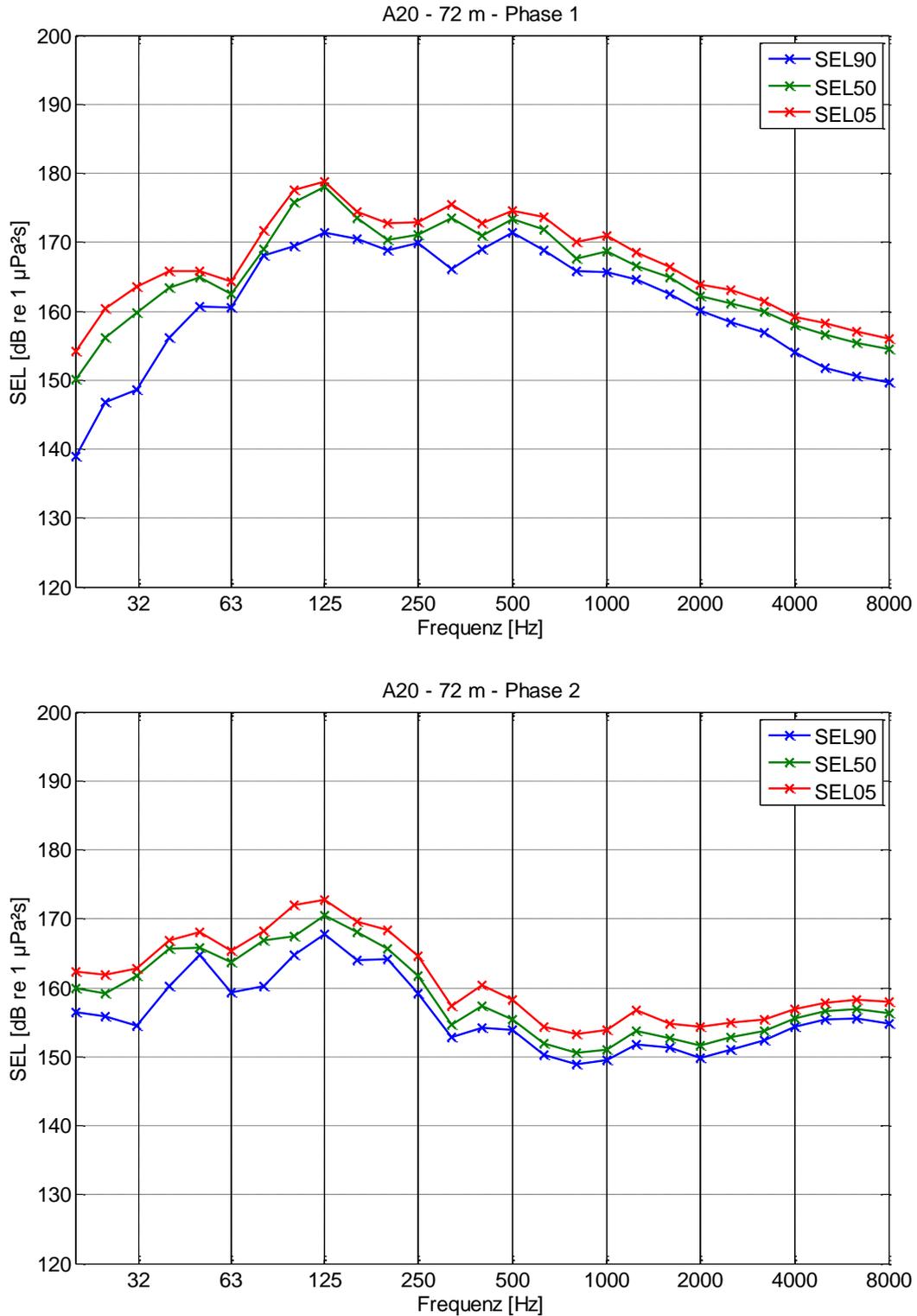


Abbildung 53: Terzspektren des SEL im Abstand von 72 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

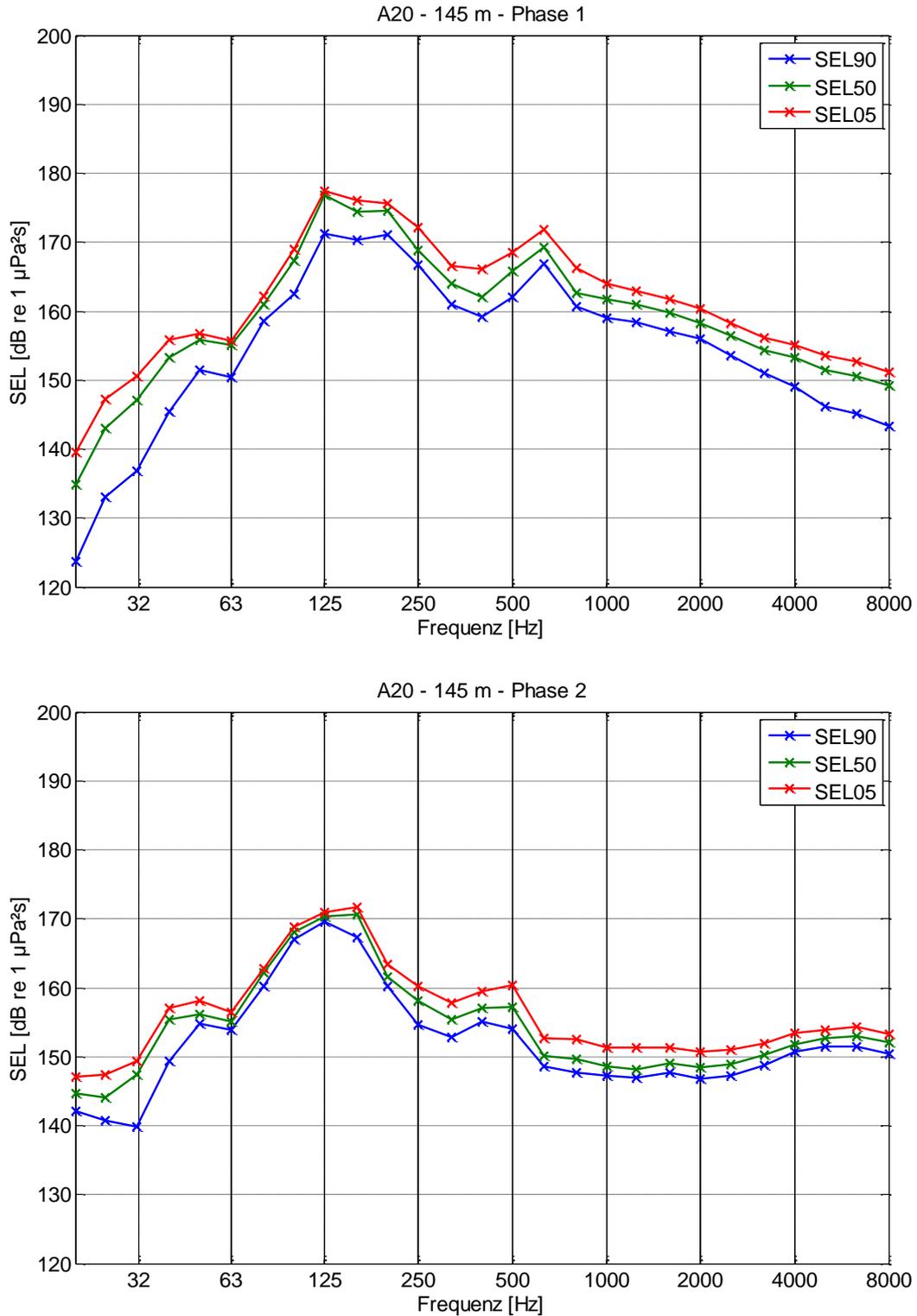


Abbildung 54: Terzspektren des SEL im Abstand von 145 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

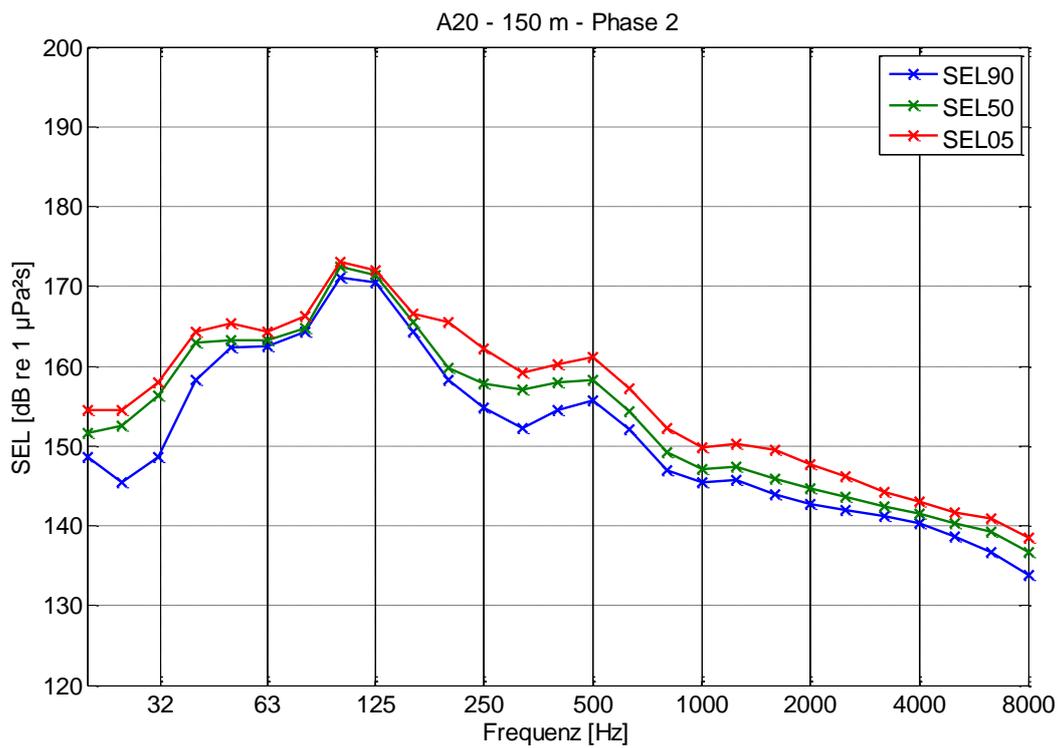
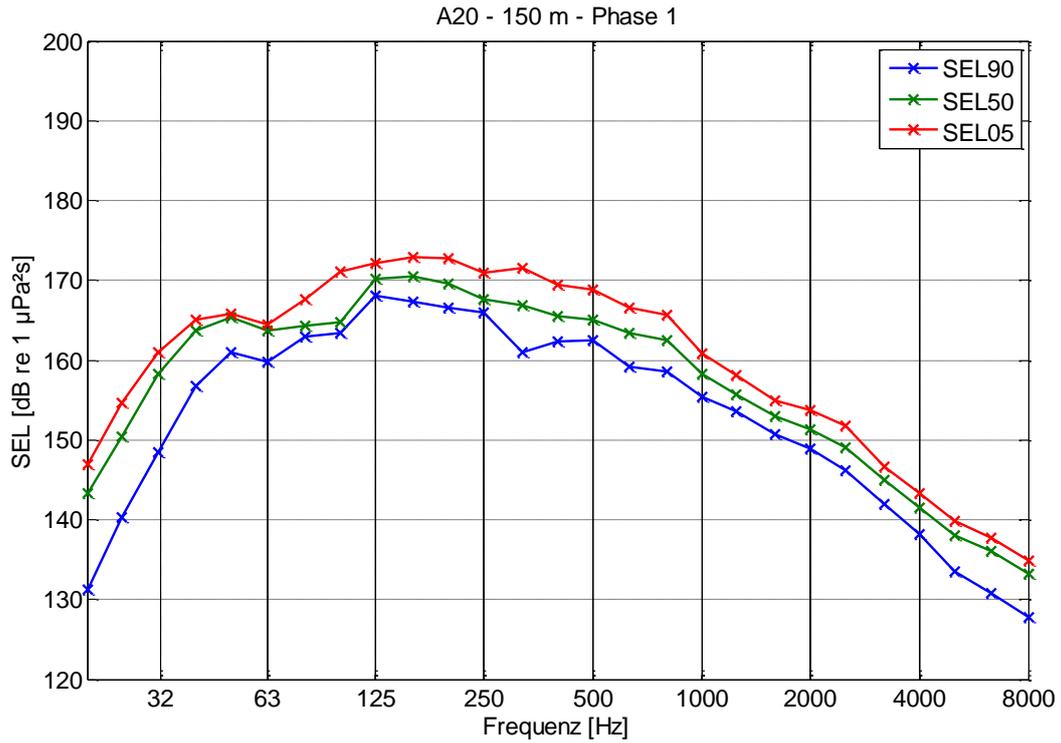


Abbildung 55: Terzspektren des SEL im Abstand von 150 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

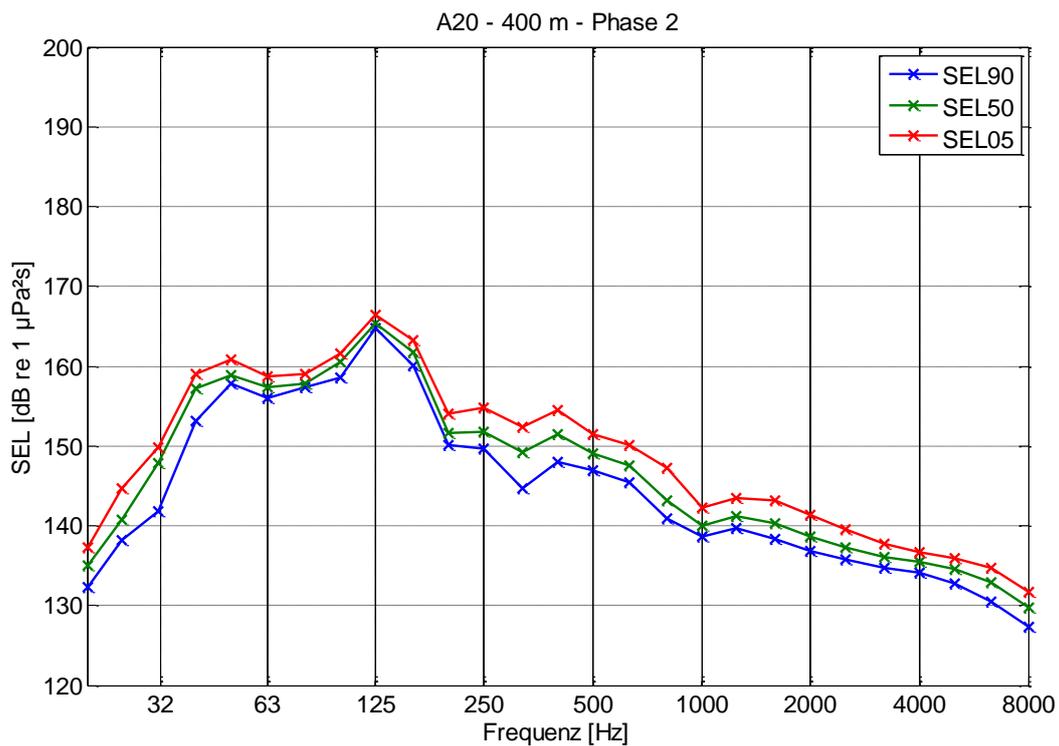
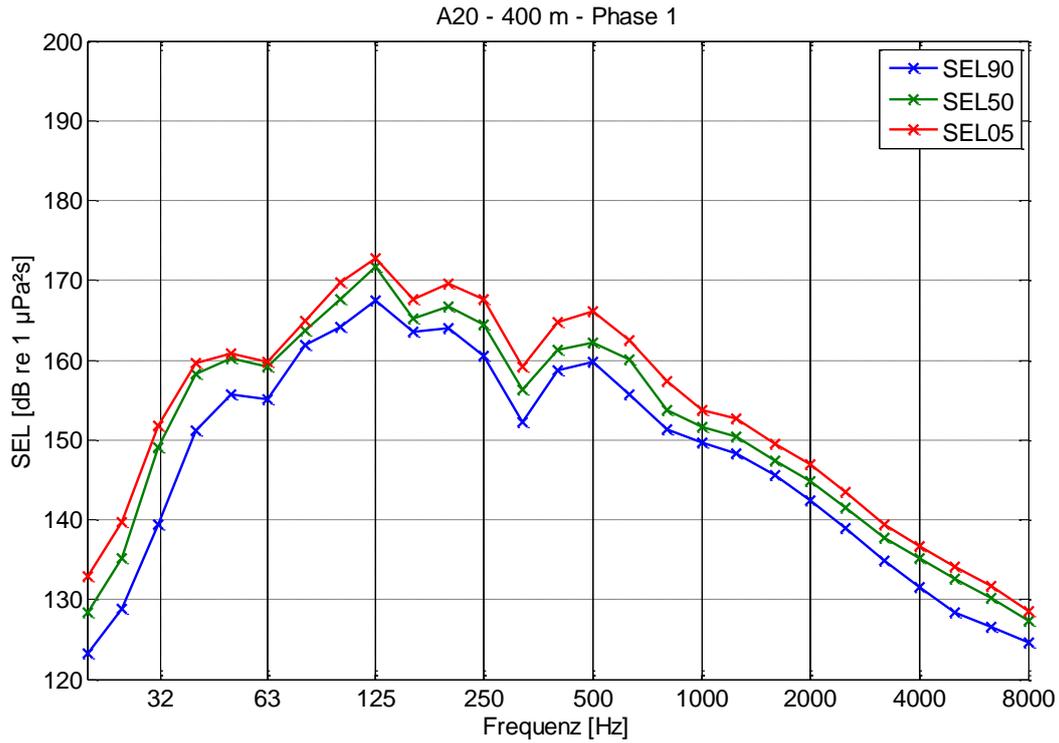


Abbildung 56: Terzspektren des SEL im Abstand von 400 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

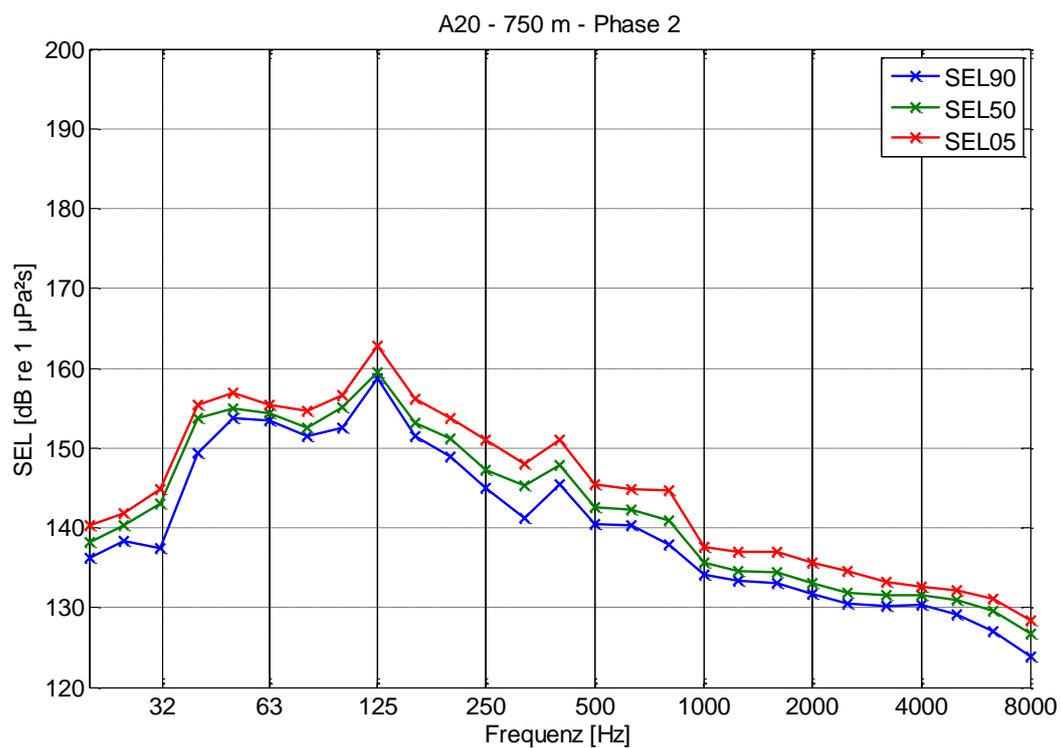
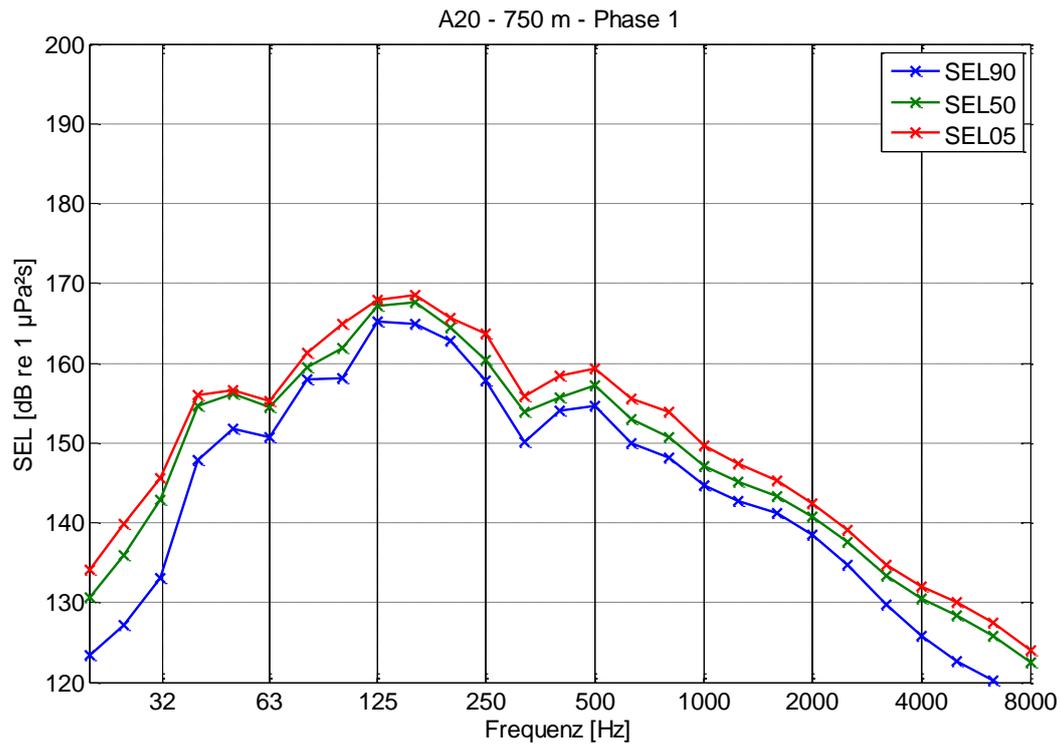


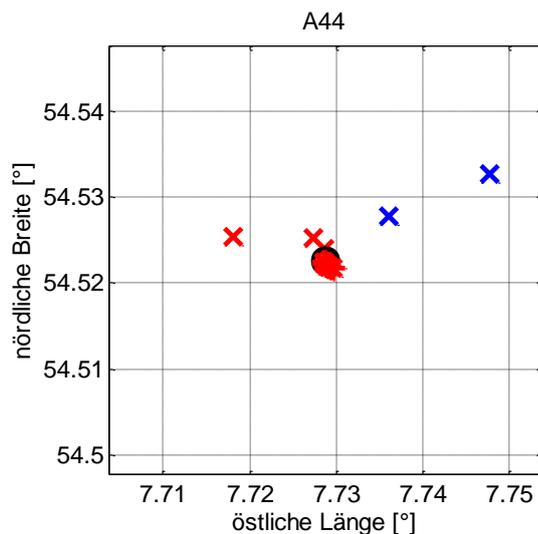
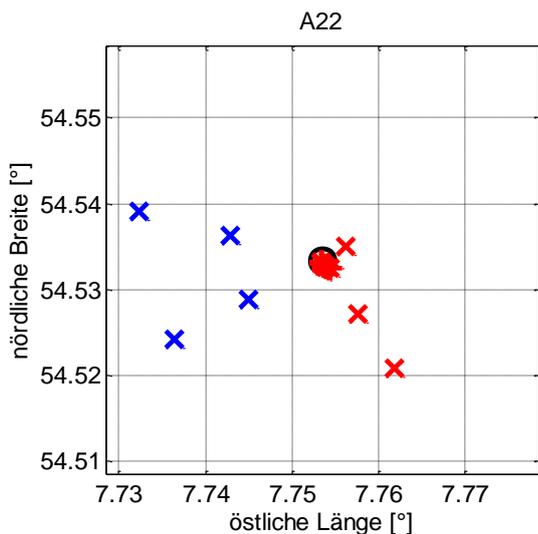
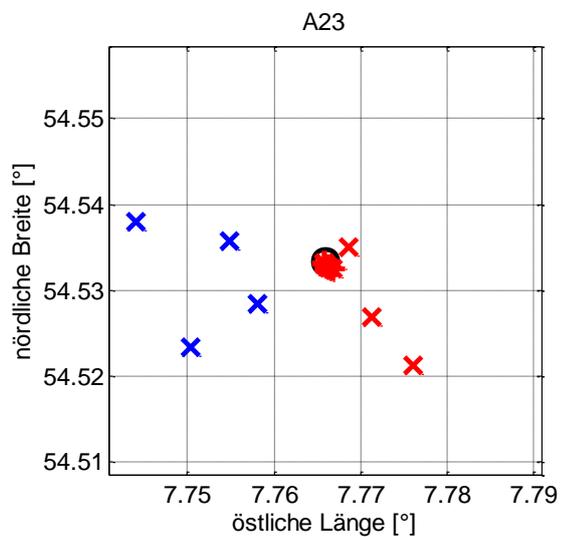
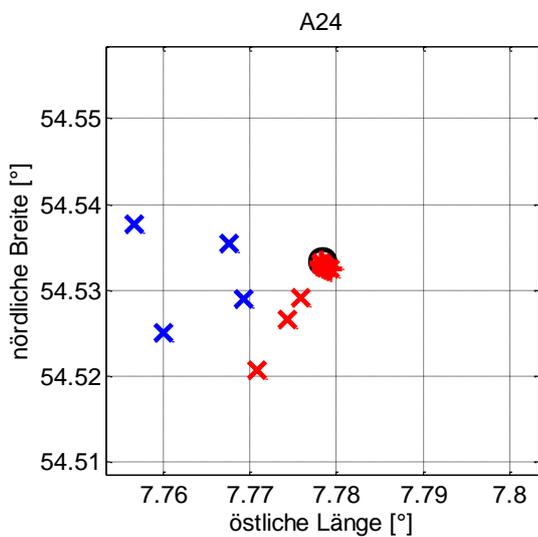
Abbildung 57: Terzspektren des SEL im Abstand von 750 m zum Pfahl A20 in Rammphase 1 (oben) und 2 (unten)

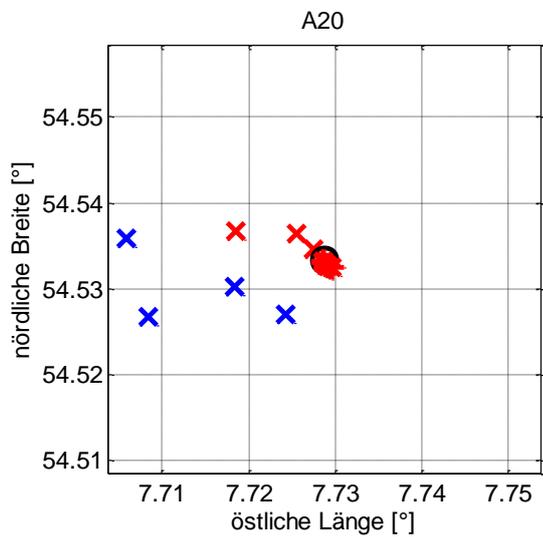
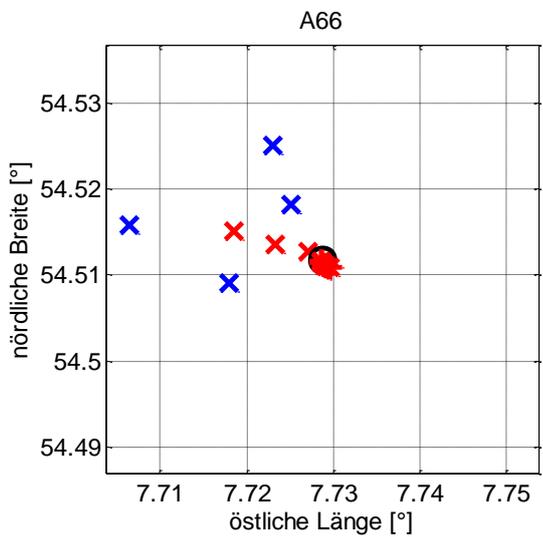
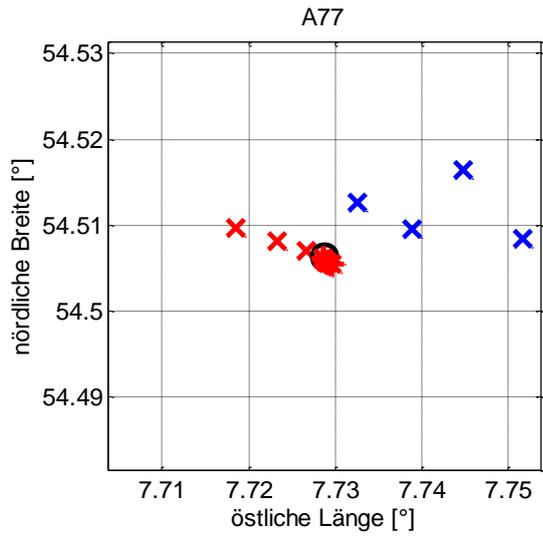
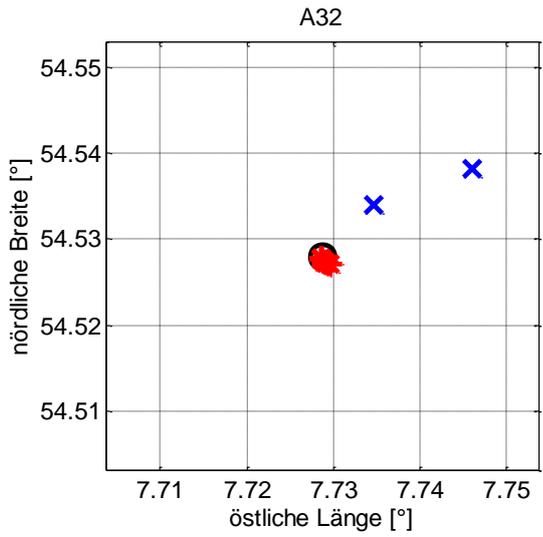
## Anhang C Messlokationen

Die Messlokationen der Hydroschallmessungen für alle untersuchten Pfähle sind wie folgt gekennzeichnet (vgl. S 50):

- Pfahl
- \* Messlokation IGB-TUBS(Nahbereich)
- x Messlokation IGB-TUBS (Fernbereich)
- x Messlokation DEWI / itap (Baumonitoring)

Die Messungen im Nahbereich wurden vom Errichterschiff aus durchgeführt, welches bei jedem Pfahl in Richtung 130° (Süd-Ost) ausgerichtet war.

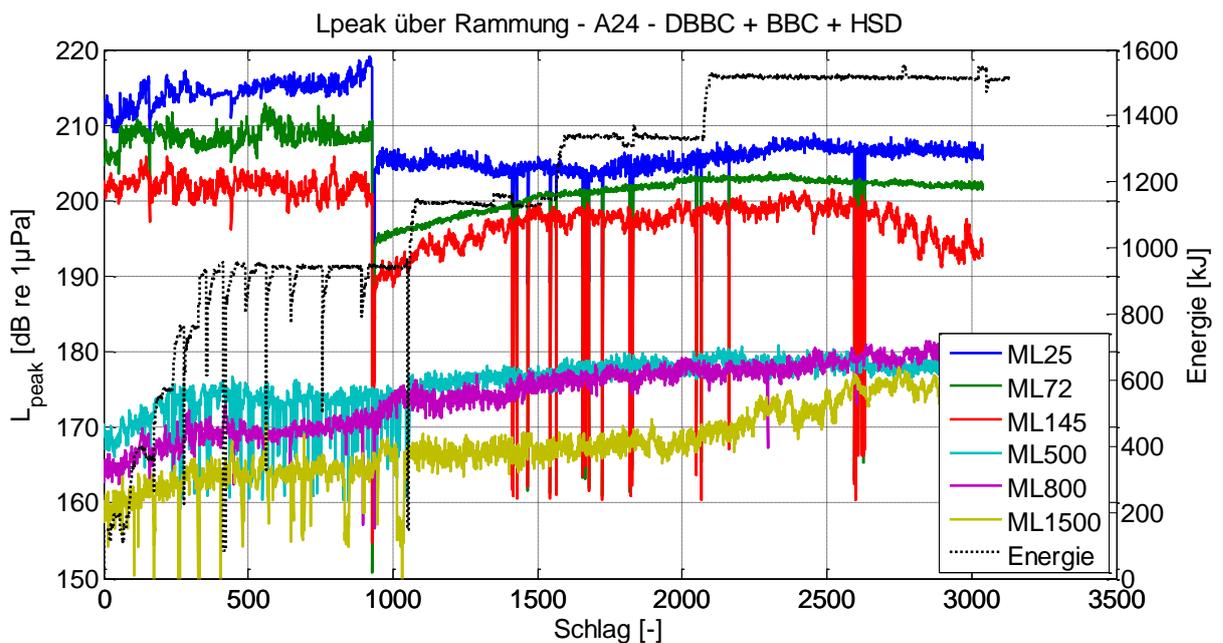
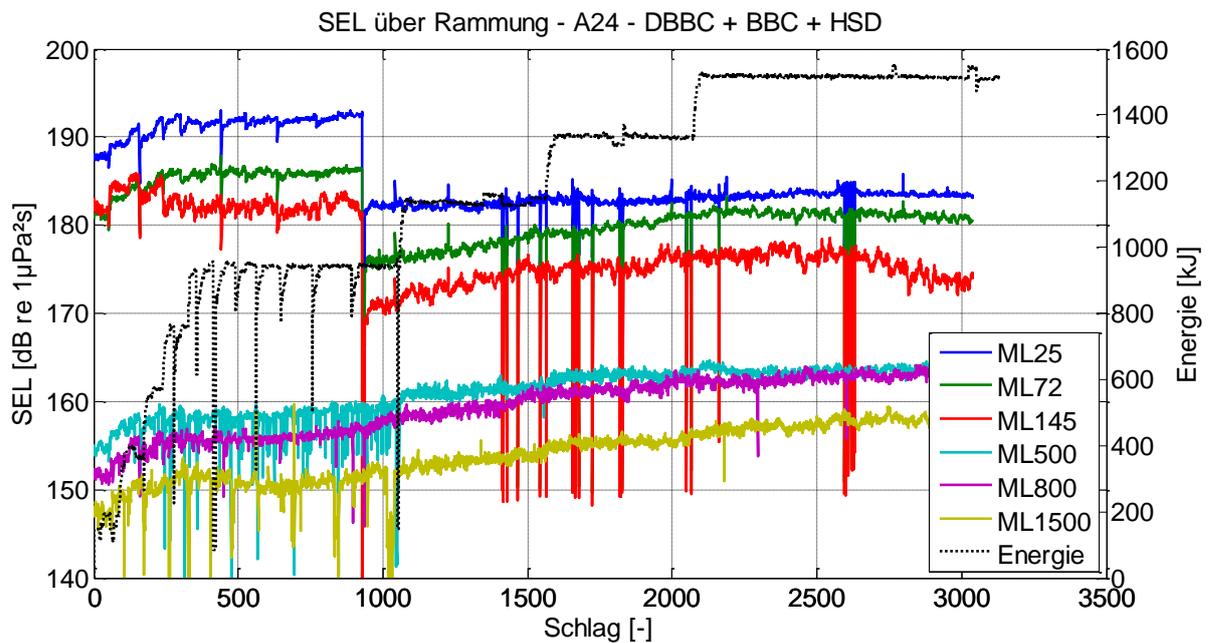




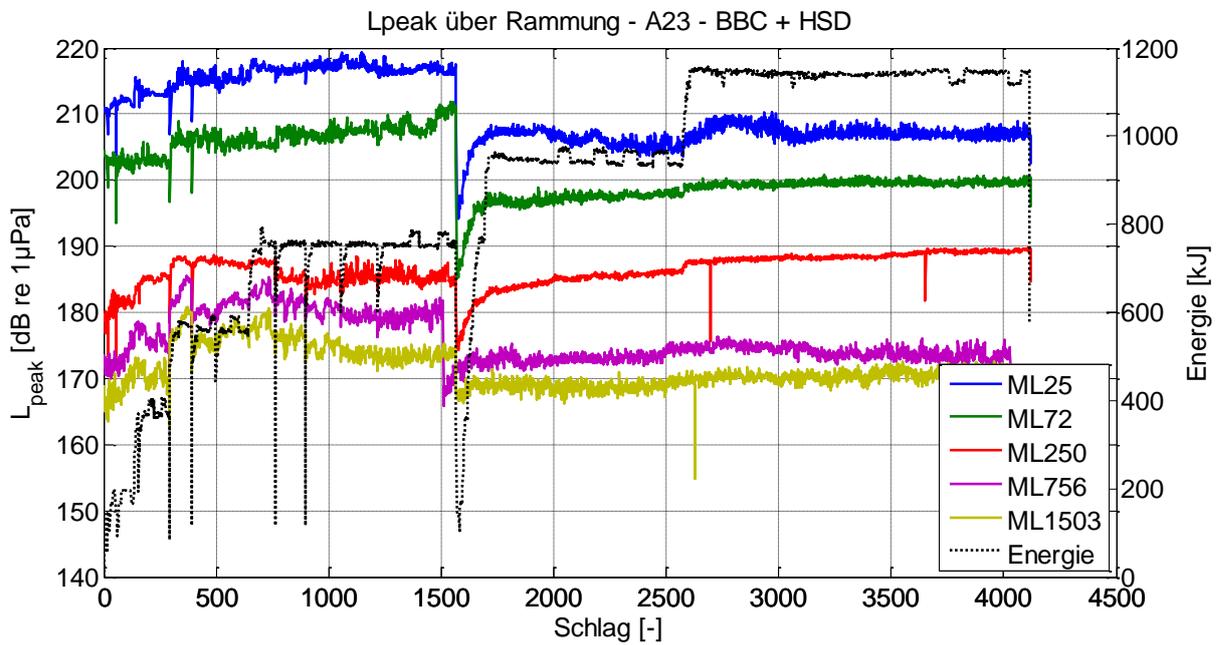
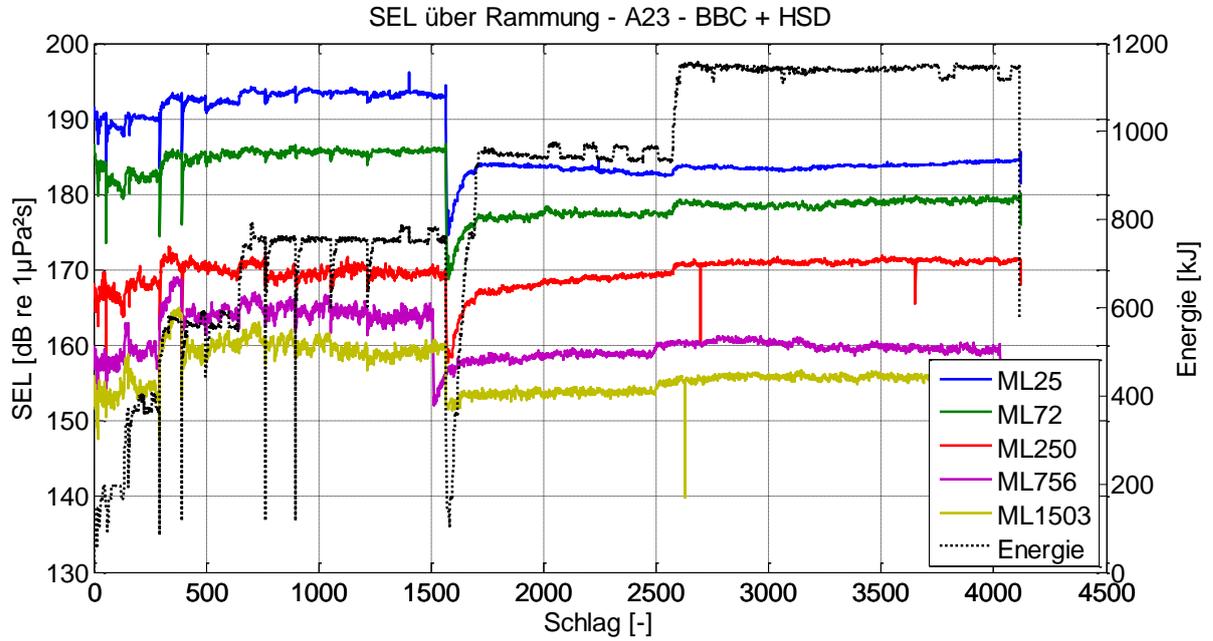
## Anhang D Entwicklung Schallpegel über Rammung

Im Folgenden ist die Entwicklung der Schallpegel (SEL und  $L_{peak}$ ) sowie der Rammenergie an verschiedenen Messlokalationen während der Rammung dargestellt.

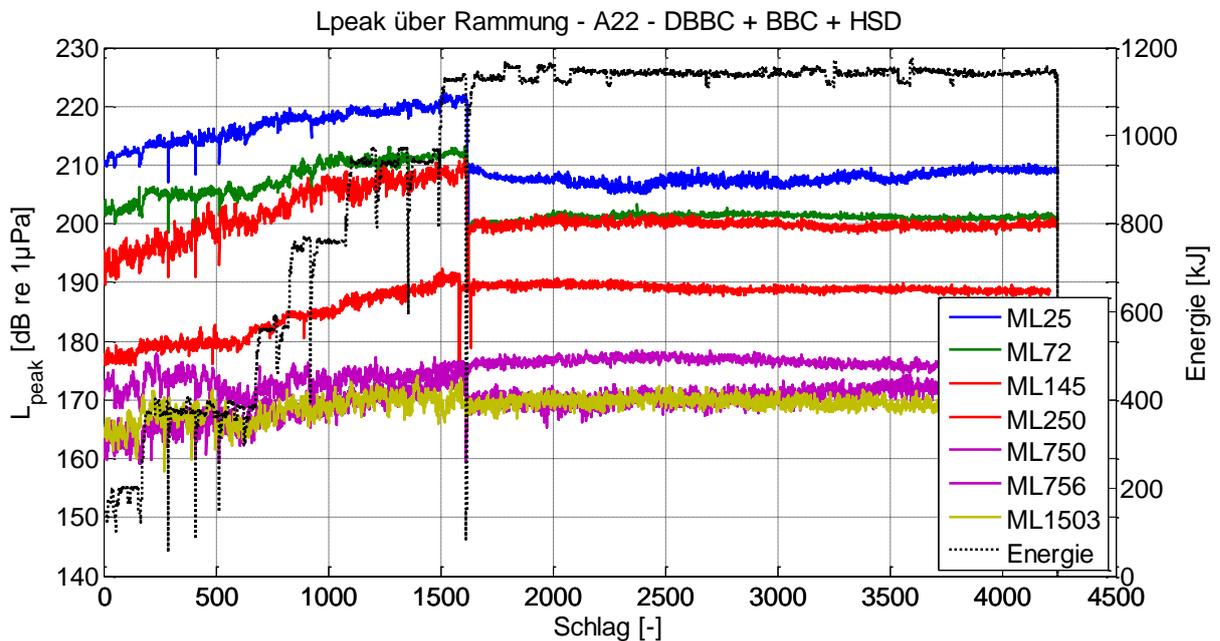
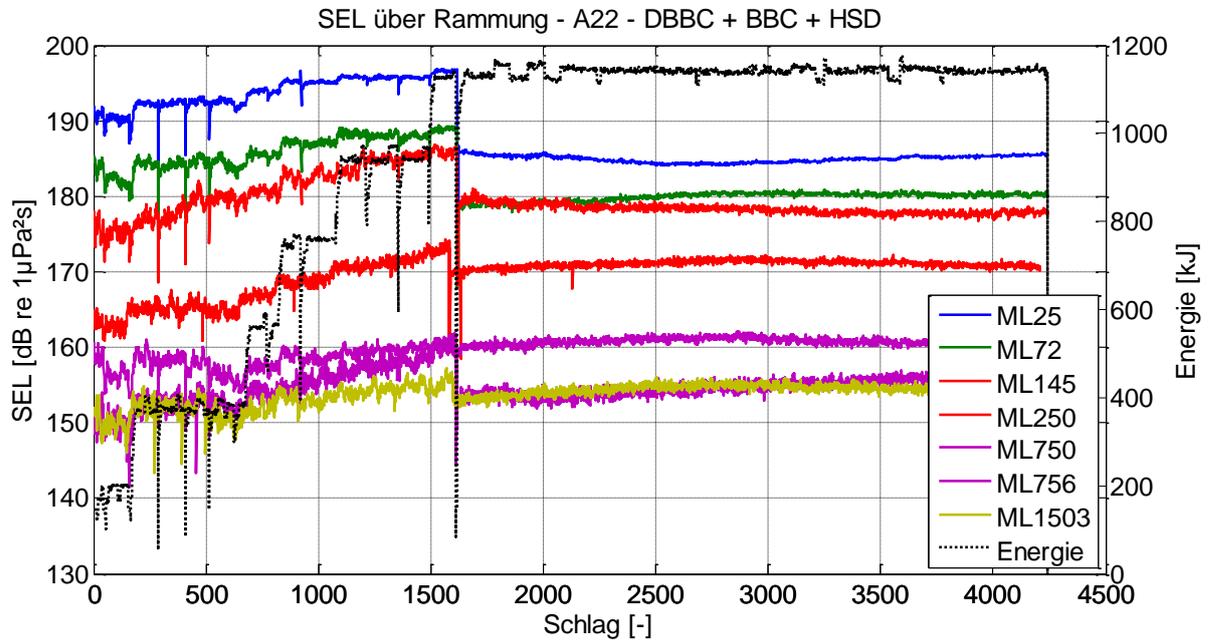
Pfahl: A24  
Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC  
Einsatz HSD-System in Phase 2: ca. ab Schlag 900



Pfahl: A23  
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC  
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 1568



Pfahl: A22  
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC  
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 1615

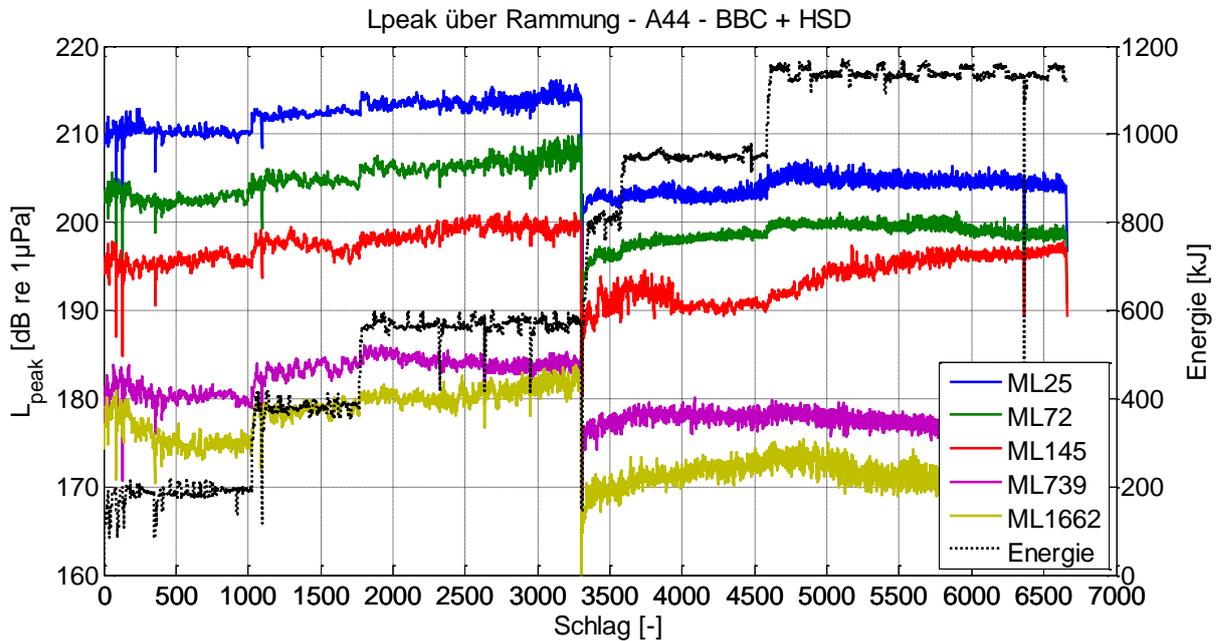
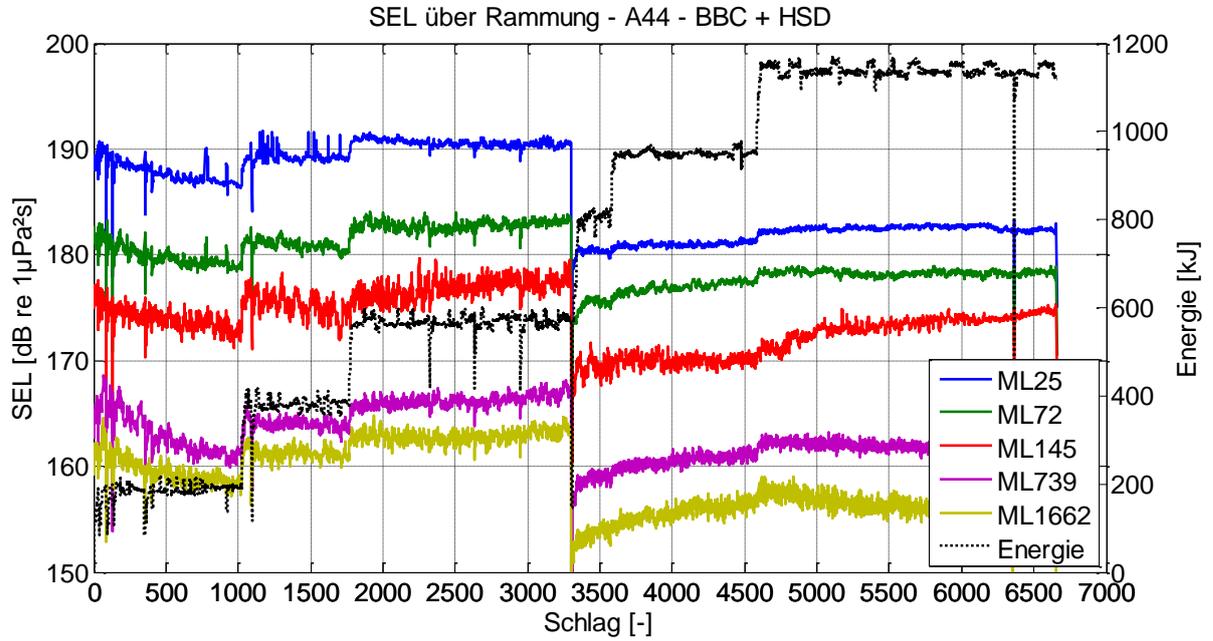


ML145: obere rote Linie

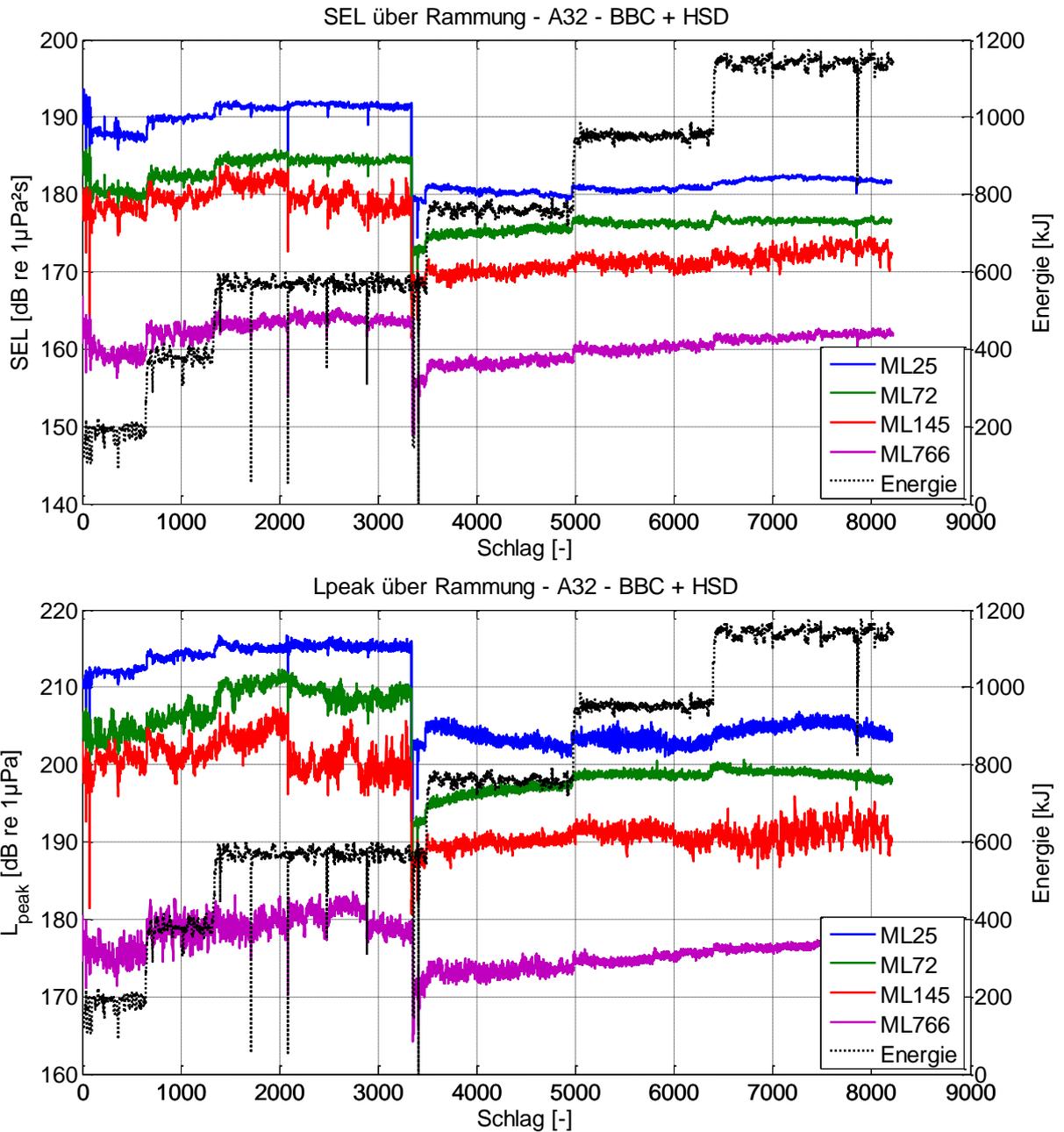
ML250: untere rote Linie

Die hohen Pegel bei ML145 (ähnlich hoch wie ML72) sind auf Reflexionen am BBC zurückzuführen (vgl. Abschnitt II.5.3.4).

Pfahl: A44  
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC  
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 3300

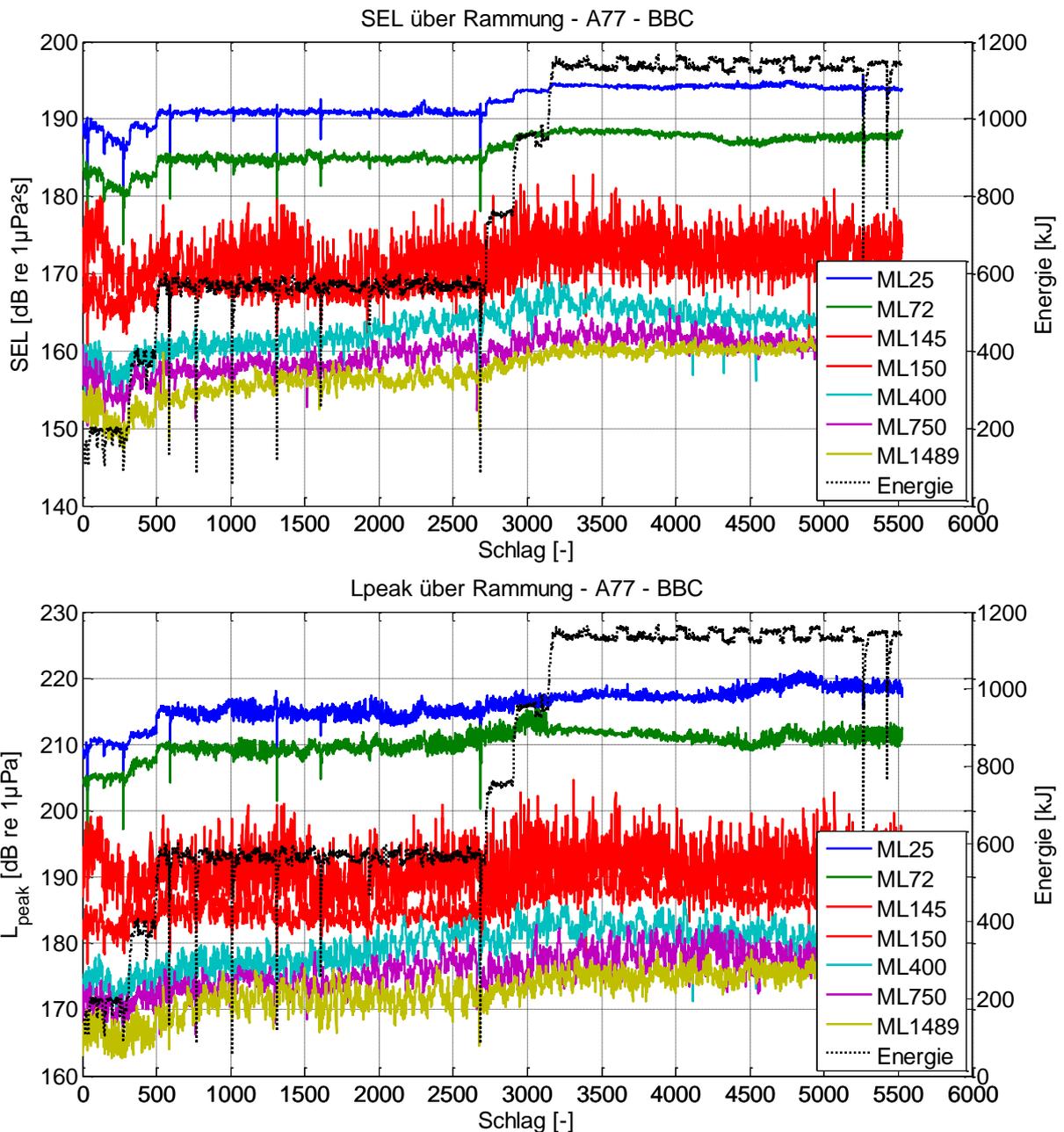


Pfahl: A32  
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC  
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 3350



Der Rückgang und die Streuung der Schallpegel an ML145 in Phase 1 ab ca. Schlag 2000 ist darauf zurückzuführen, dass die Hydrophone teilweise außerhalb BBC lagen (vgl. Abschnitt II.3.9).

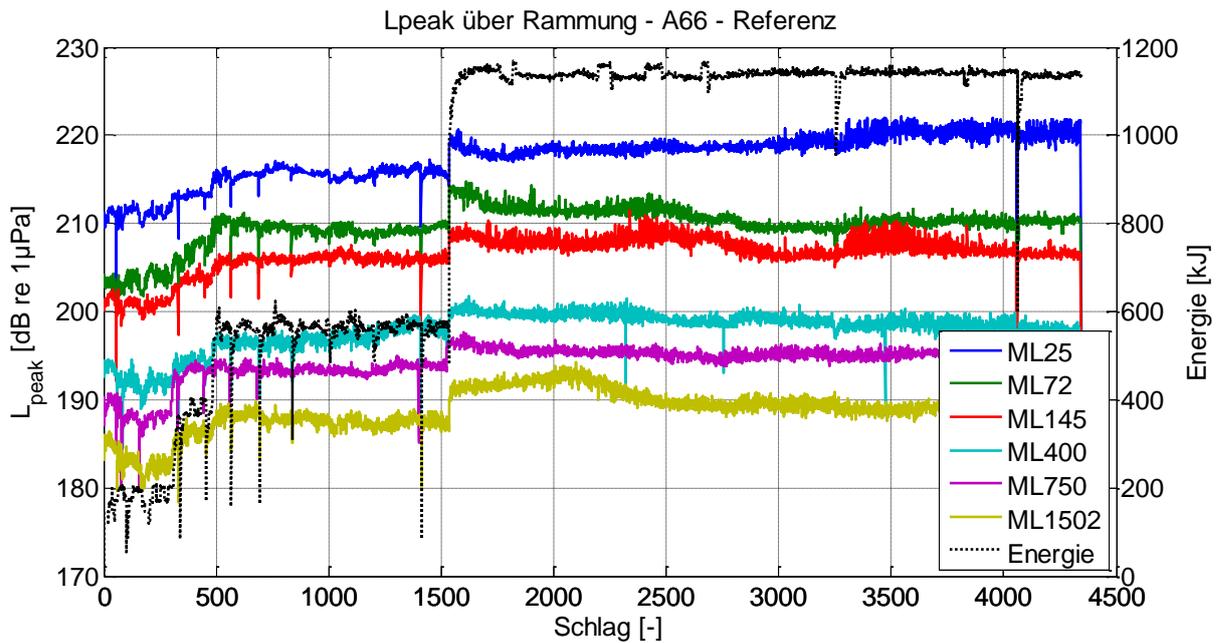
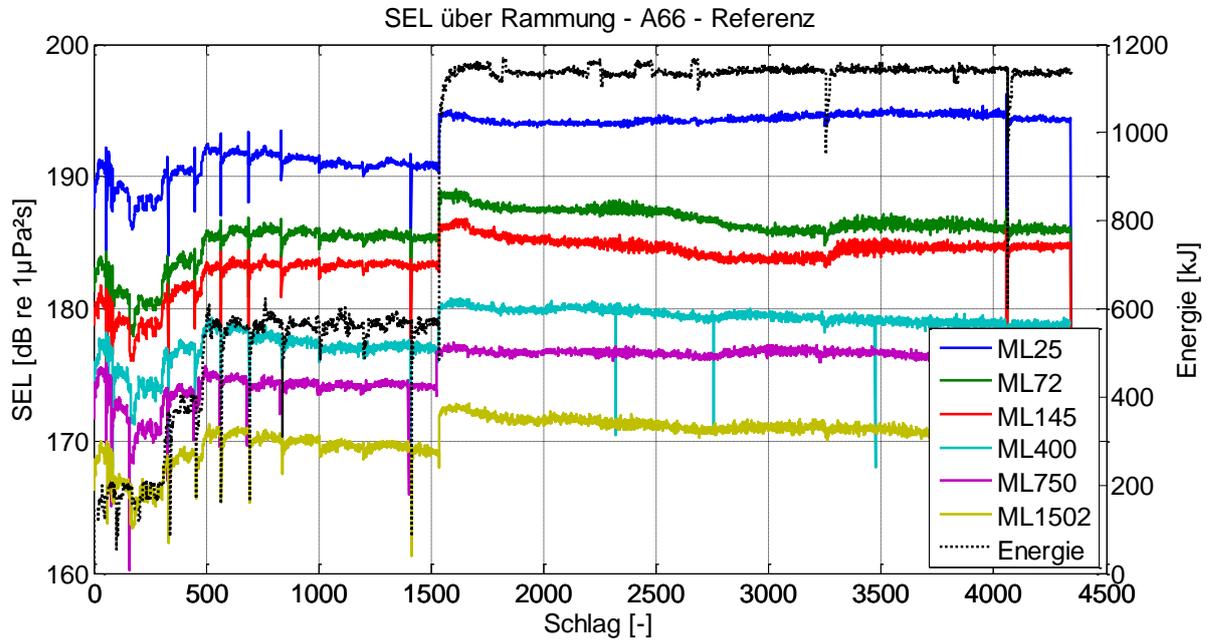
Pfahl: A77  
 Schallminderungssystem: BBC



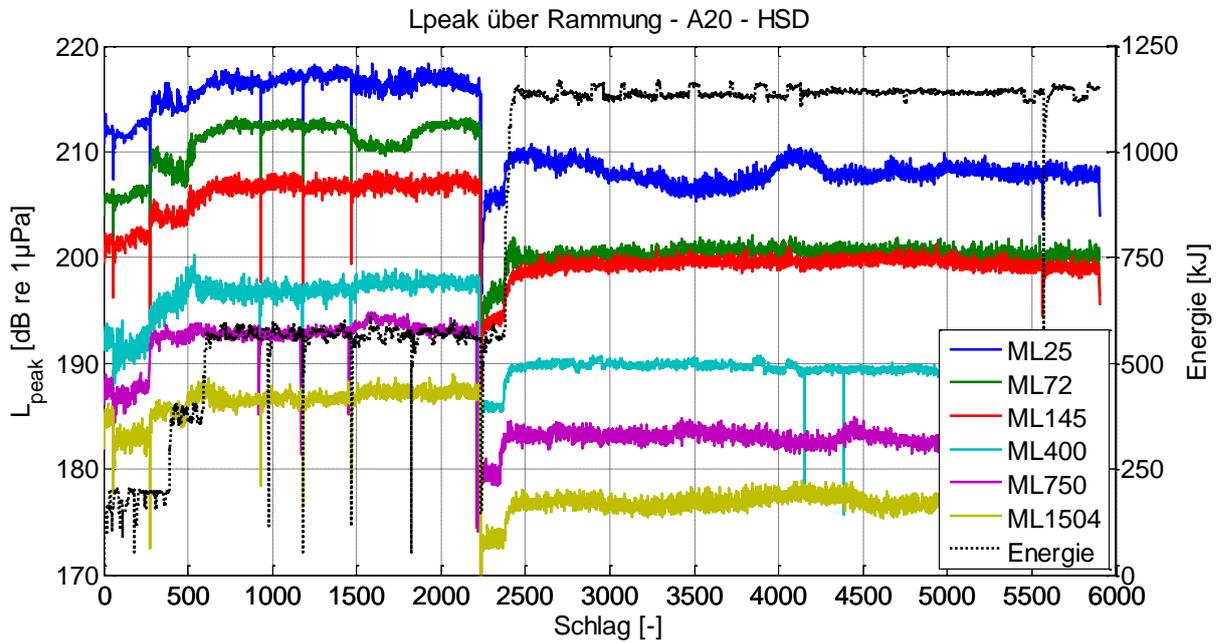
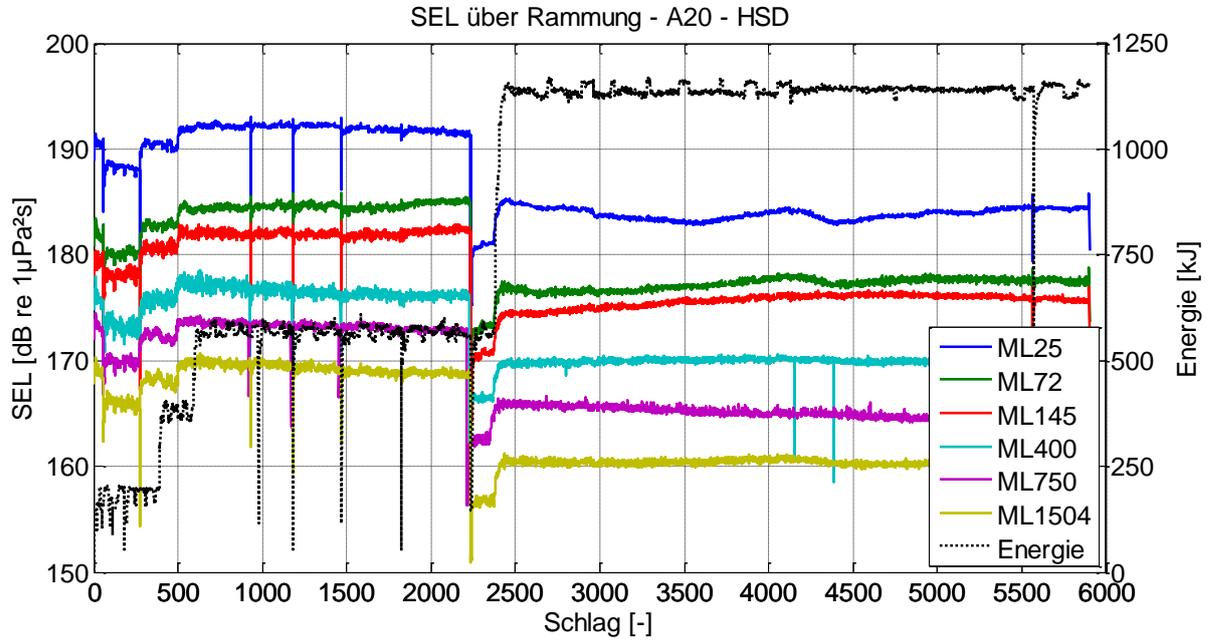
Die niedrigen Schallpegel und die große Streuung an ML145 sind auf die Lage des BBC zurückzuführen. Die Hydrophone an ML145 lagen außerhalb BBC (vgl. Abschnitt II.3.9). Es ergeben sich die gleichen Randbedingungen und ähnliche Pegel wie bei ML150.

große Schwankungen der Pegels im Fernbereich evtl. auf Unregelmäßigkeiten am BBC zurückzuführen

Pfahl: A66  
Schallminderungssysteme: keine (Referenzmessung)

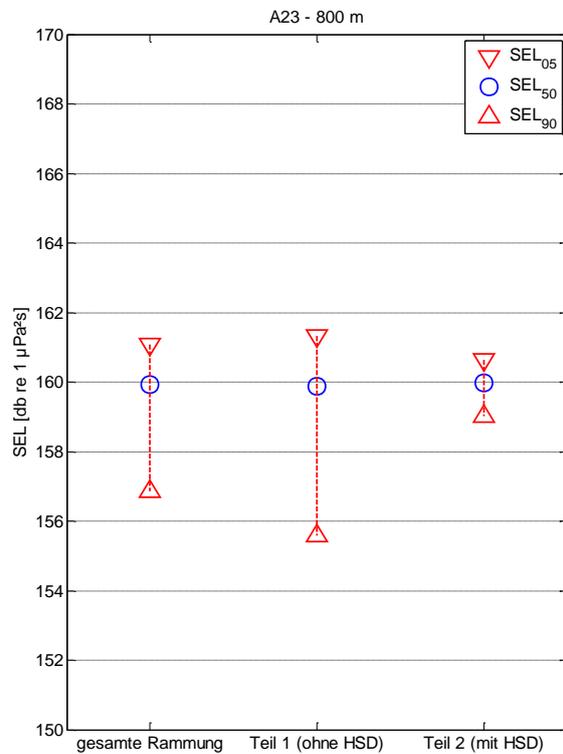
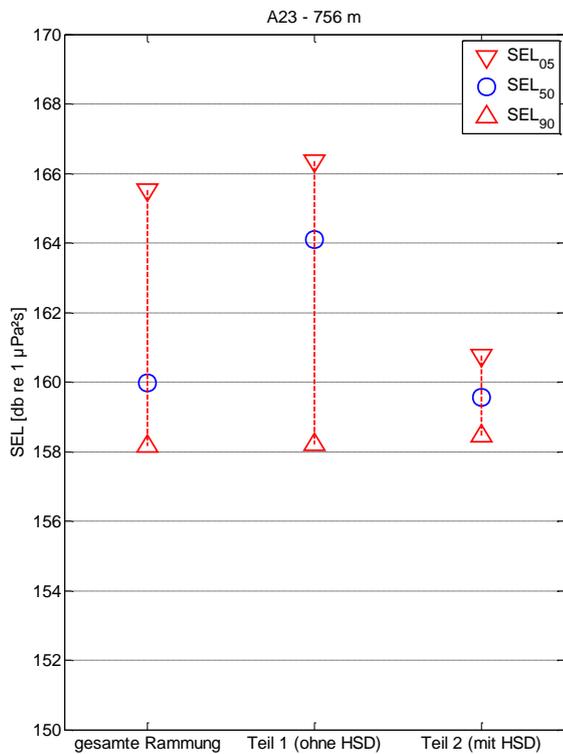
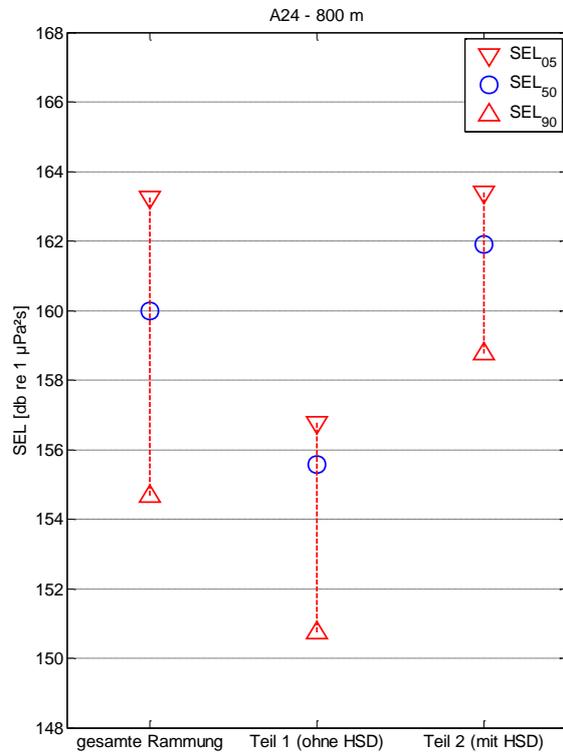
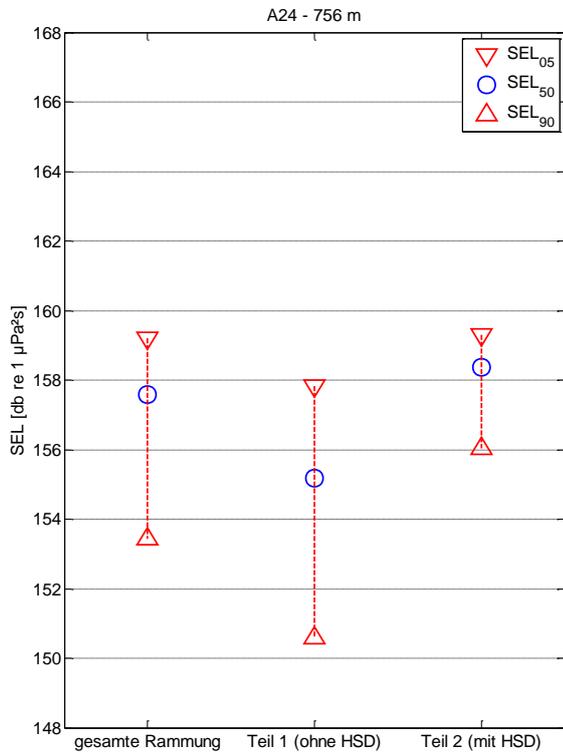


Pfahl: A20  
 Schallminderungssystem: HSD  
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 2236

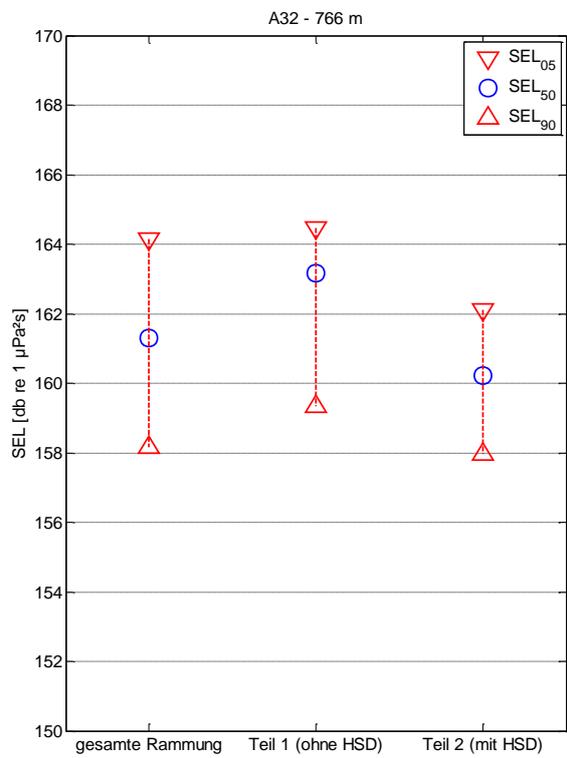
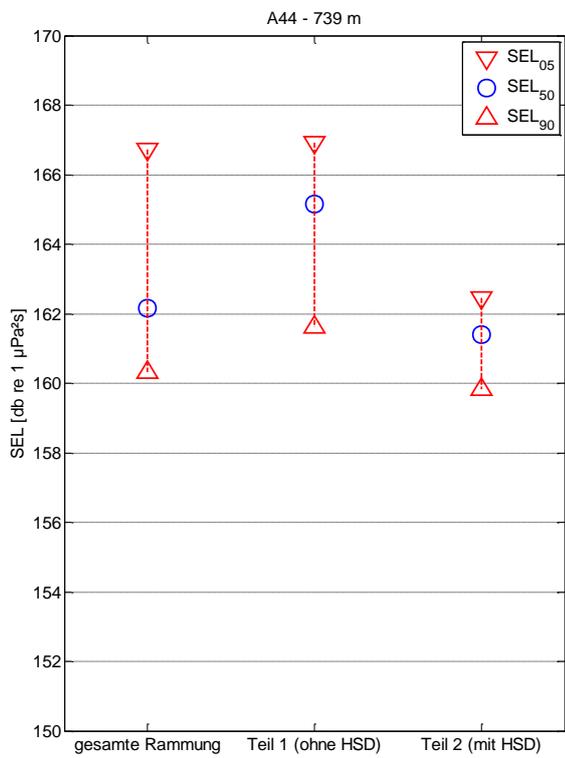
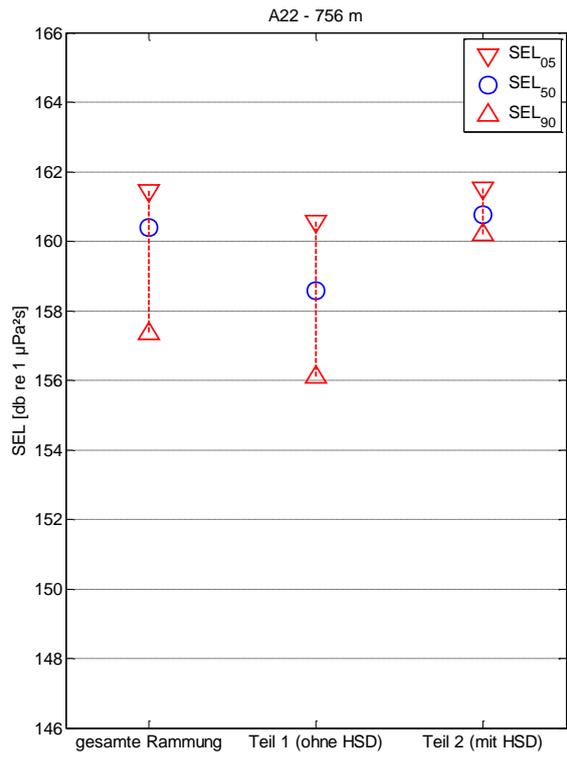
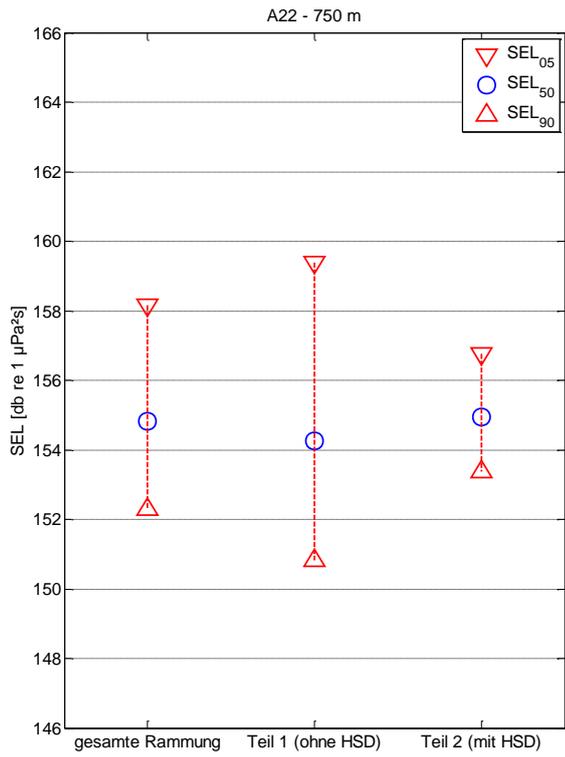


## Anhang E Streubreite SEL

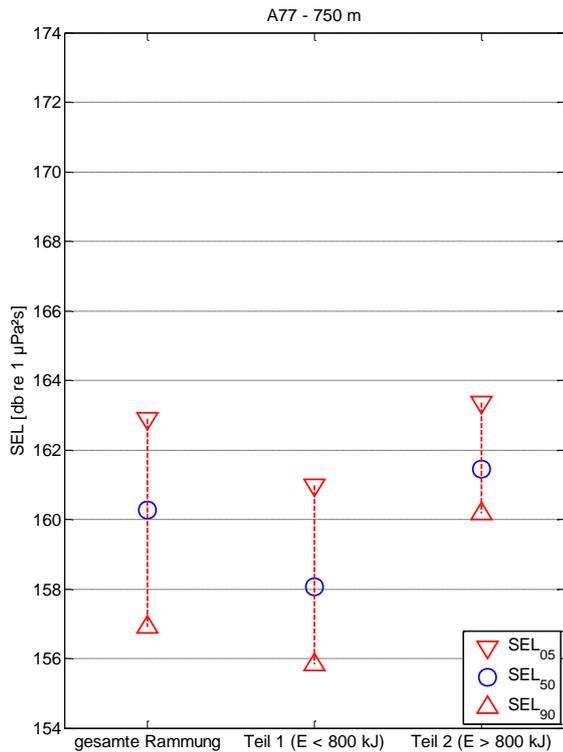
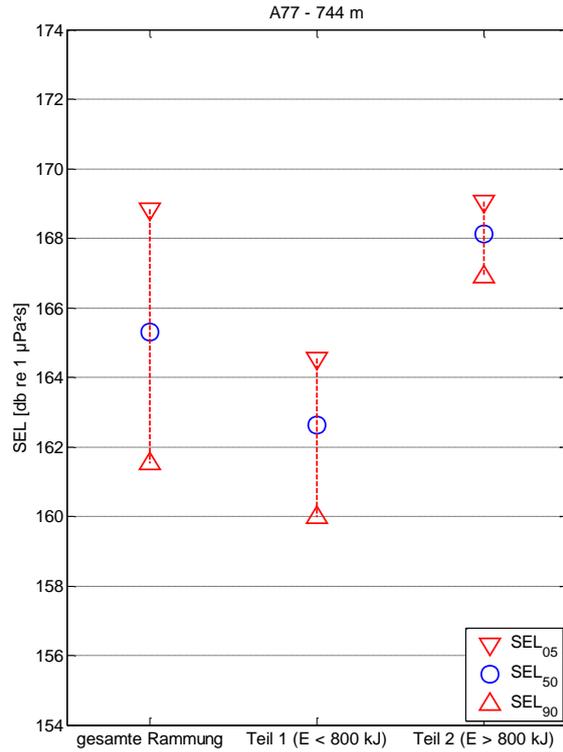
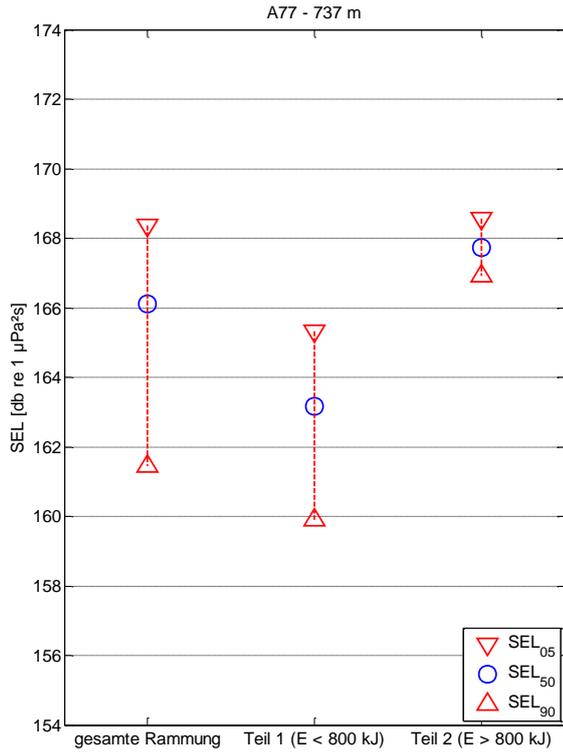
Im Folgenden sind die Streubreiten des SEL im Abstand von ca. 750 m dargestellt.



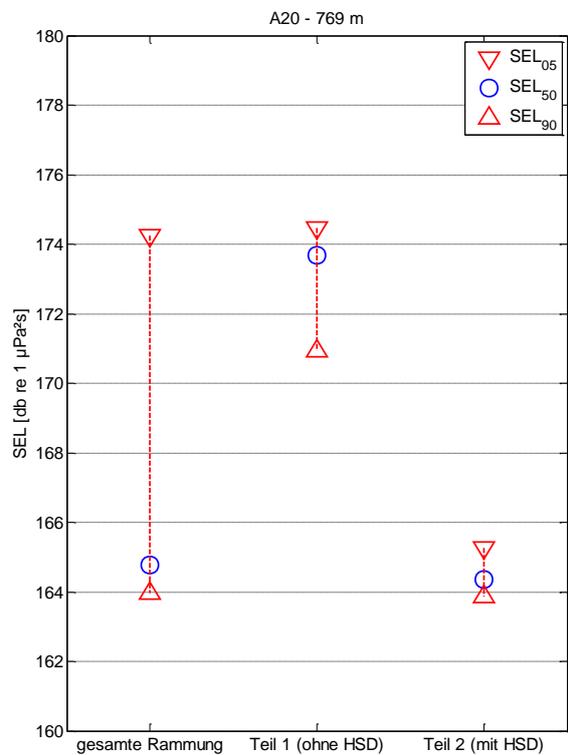
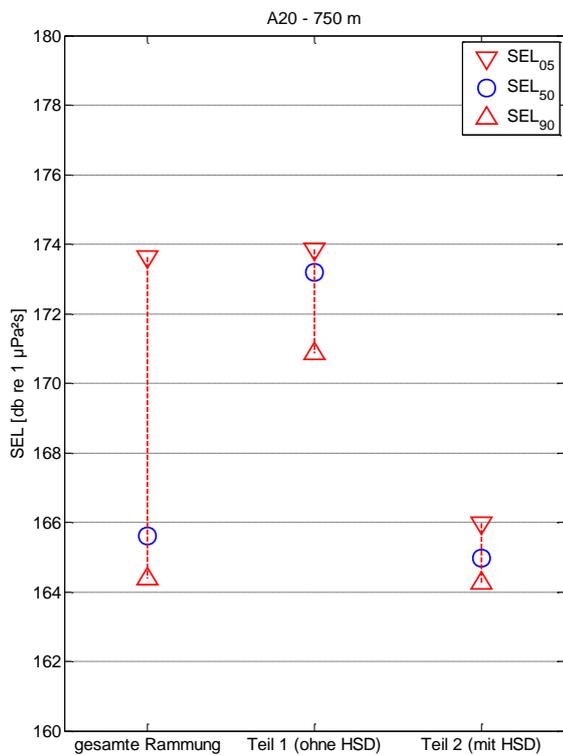
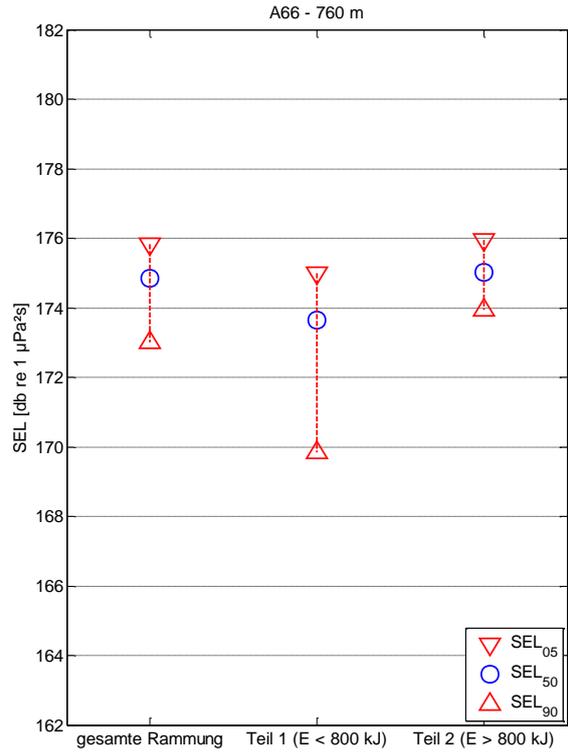
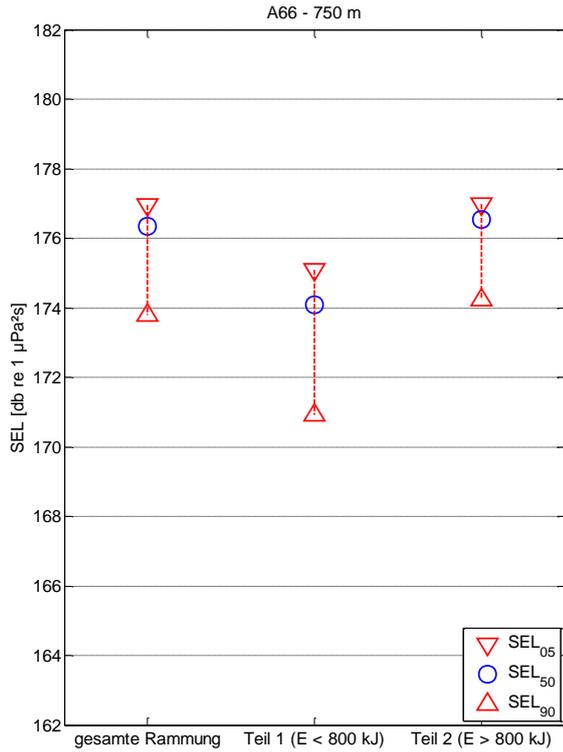
**Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrumbank West - Untersuchung der Schallkopplungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser**



**Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrumbank West - Untersuchung der Schallkopplungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser**



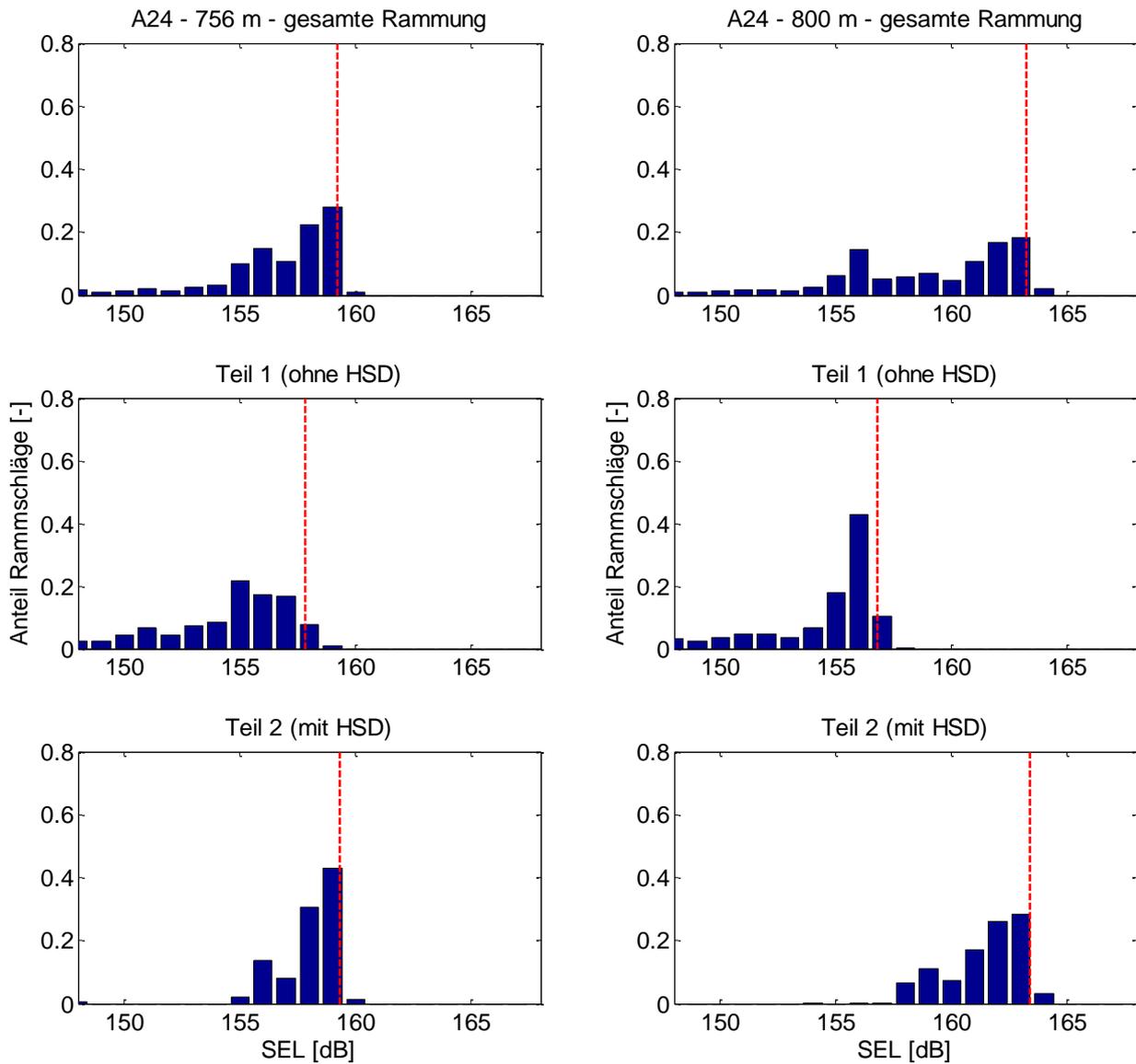
**Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrumbank West - Untersuchung der Schallkopplungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser**



## Anhang F Histogramme SEL

Im Folgenden sind die Histogramme des SEL im Abstand von ca. 750 m zum Pfahl dargestellt. Beim Einsatz des HSD-Systems wird die Rammung in zwei Phasen mit HSD und ohne HSD unterschieden. Bei Rammungen ohne HSD erfolgt eine Einteilung hinsichtlich der Rammenergie.

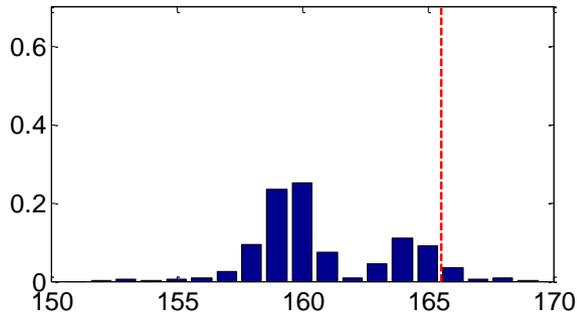
Pfahl: A24  
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC



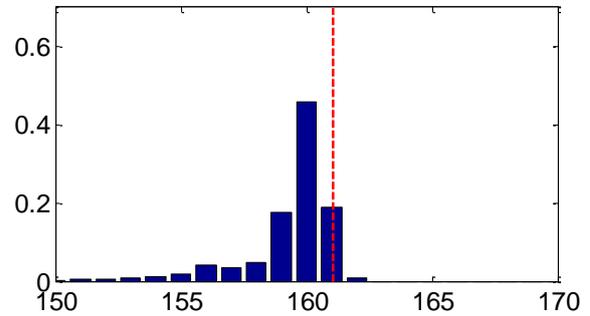
Pfahl: A23

Schallminderungssysteme: HSD + BBC

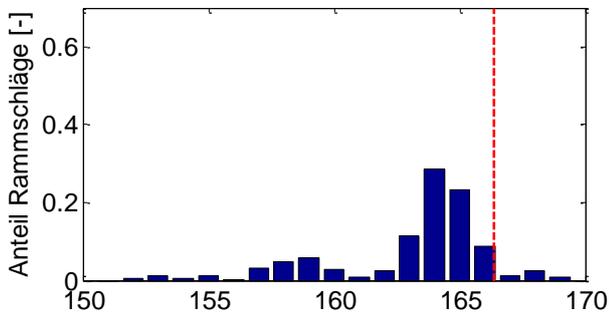
A23 - 756 m - gesamte Rammung



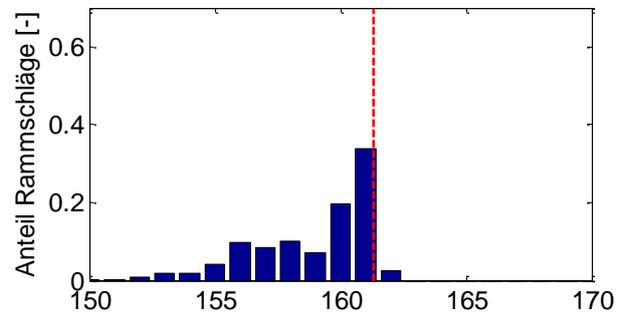
A23 - 800 m - gesamte Rammung



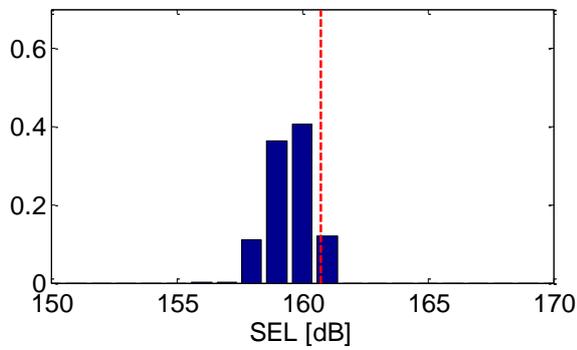
Teil 1 (ohne HSD)



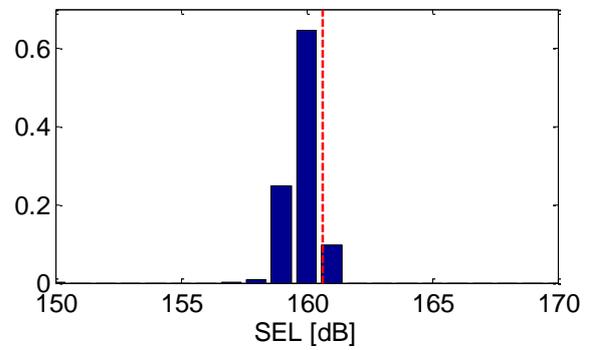
Teil 1 (ohne HSD)



Teil 2 (mit HSD)



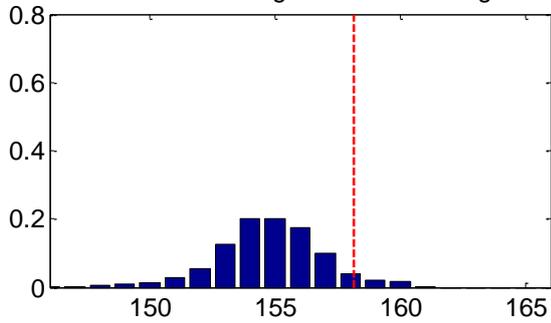
Teil 2 (mit HSD)



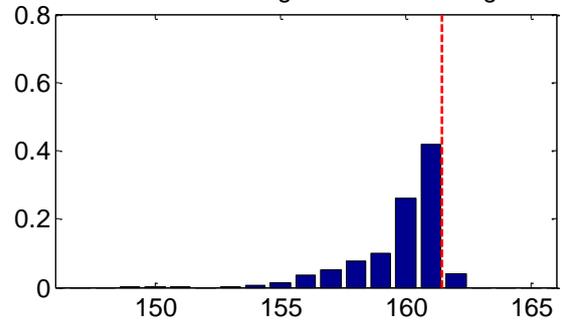
Pfahl: A22

Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC

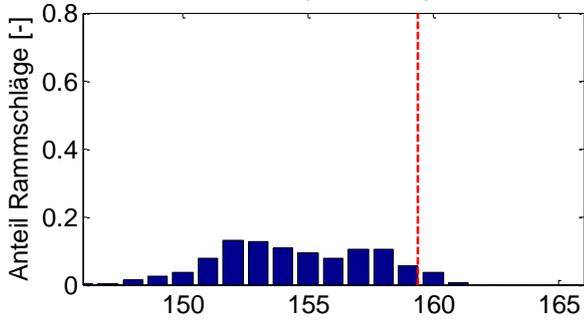
A22 - 750 m - gesamte Rammung



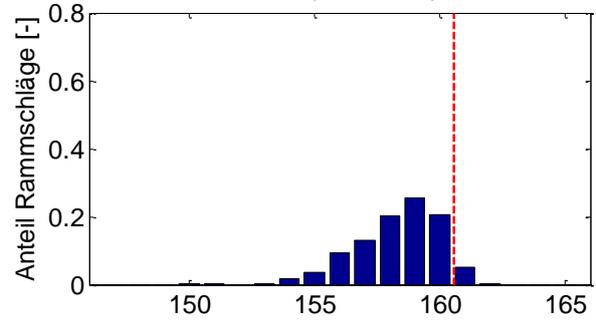
A22 - 756 m - gesamte Rammung



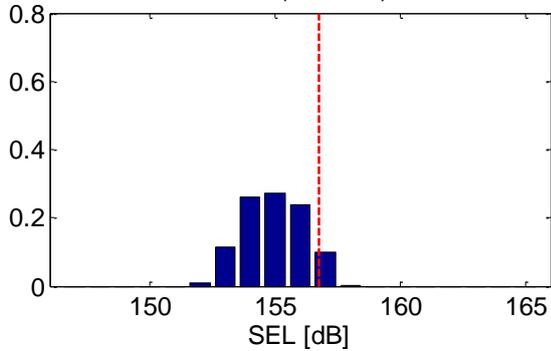
Teil 1 (ohne HSD)



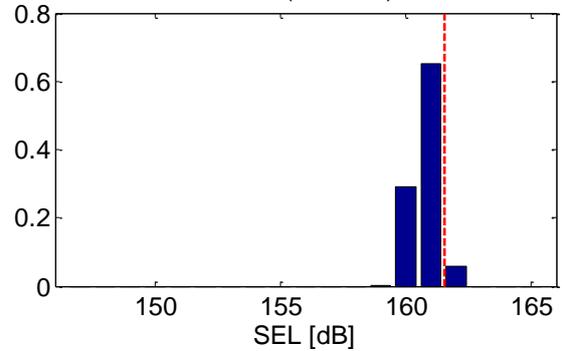
Teil 1 (ohne HSD)



Teil 2 (mit HSD)



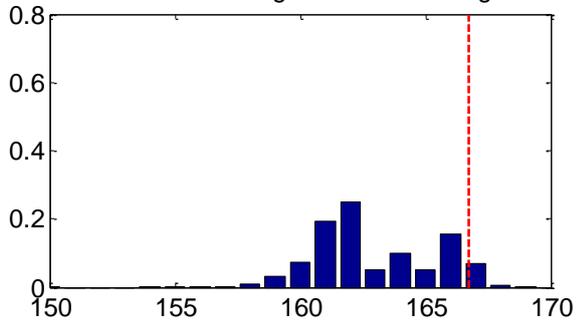
Teil 2 (mit HSD)



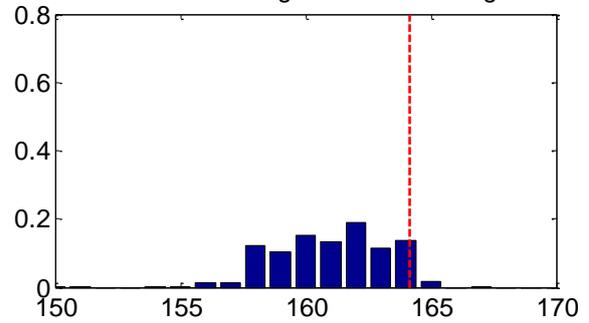
Pfähle: A44, A32

Schallminderungssysteme: HSD + BBC

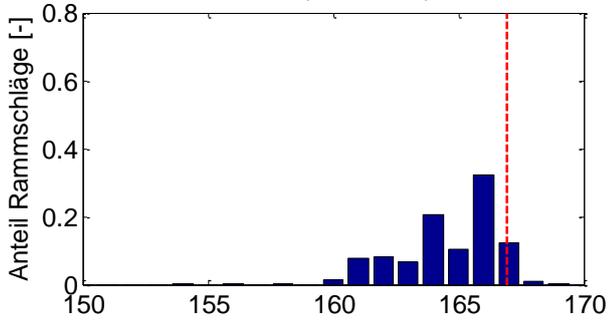
A44 - 739 m - gesamte Rammung



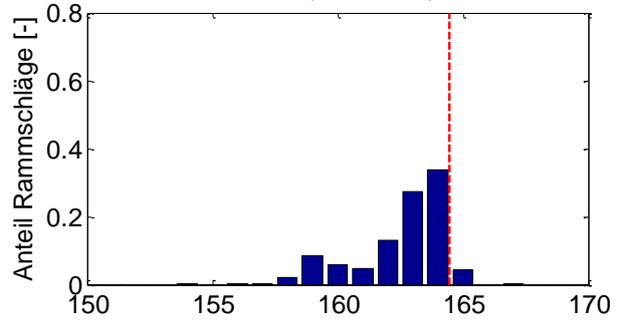
A32 - 766 m - gesamte Rammung



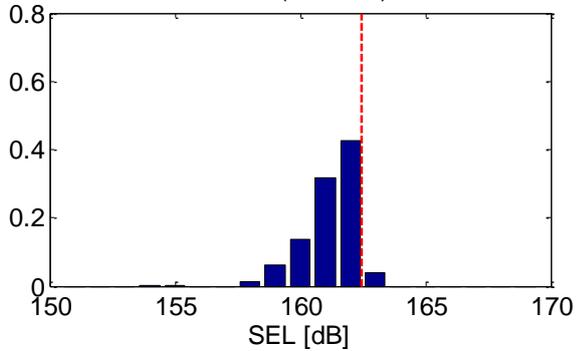
Teil 1 (ohne HSD)



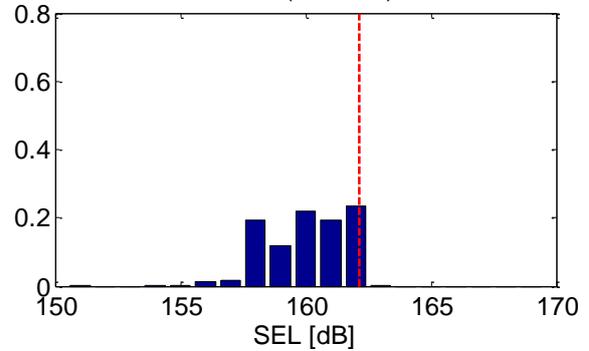
Teil 1 (ohne HSD)



Teil 2 (mit HSD)



Teil 2 (mit HSD)

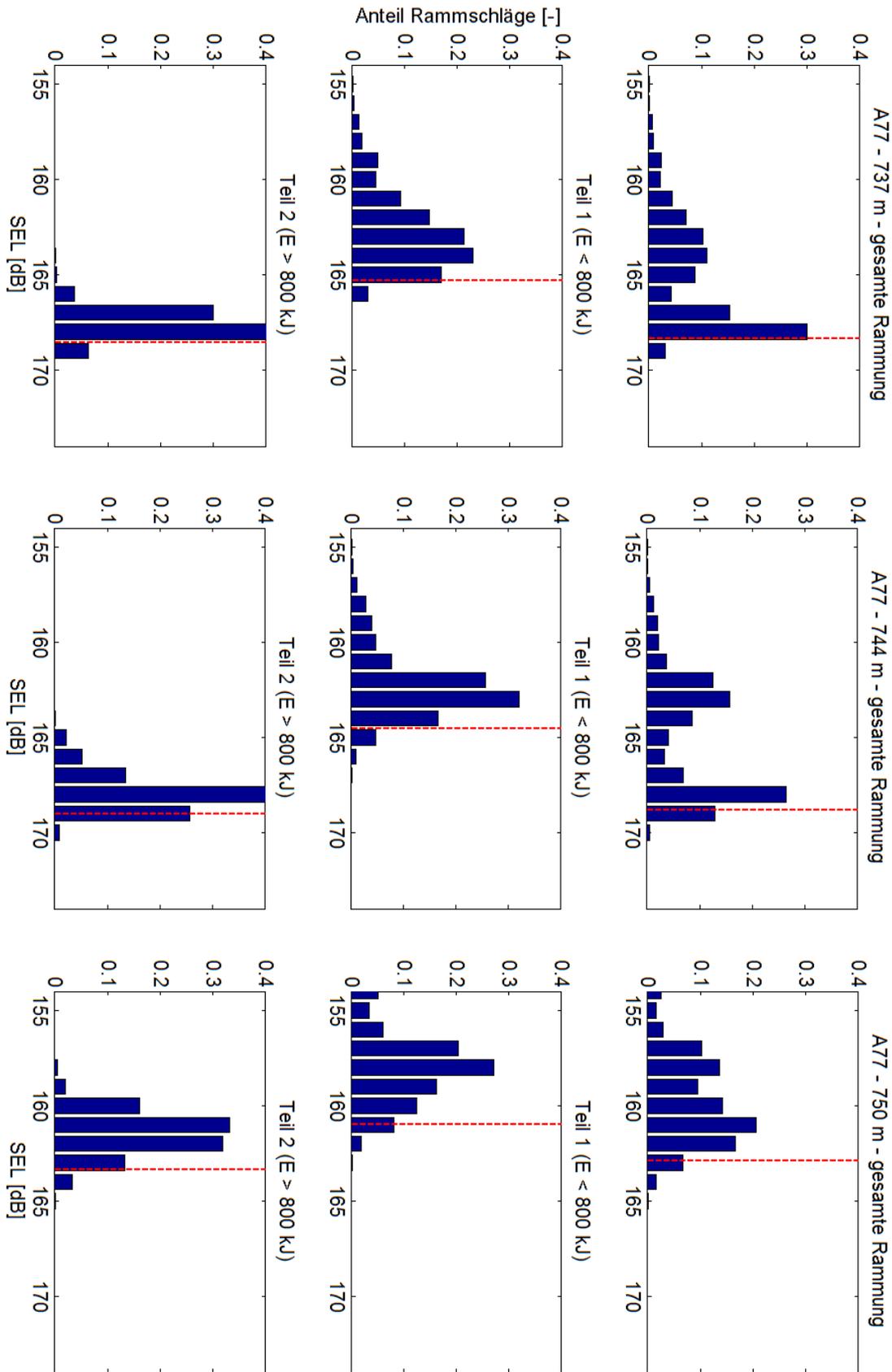


Pfahl:

A77

Schallminderungssystem:

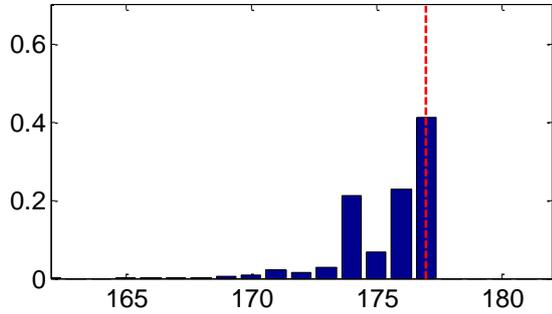
BBC



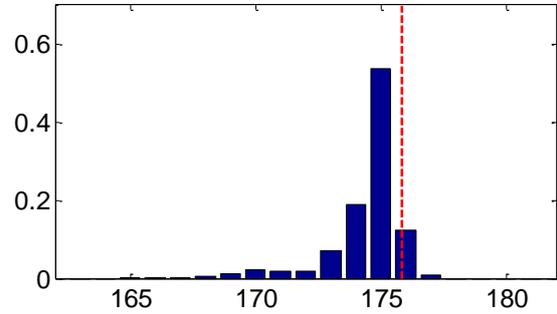
Pfahl: A66

Schallminderungssysteme: keine (Referenzmessung)

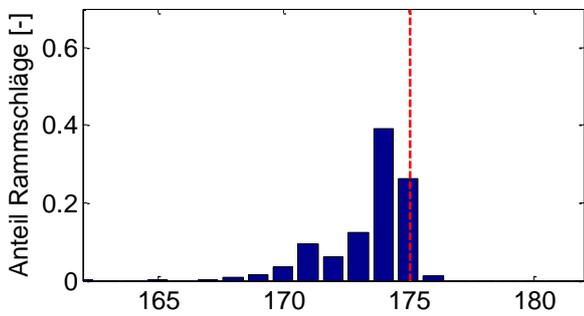
A66 - 750 m - gesamte Rammung



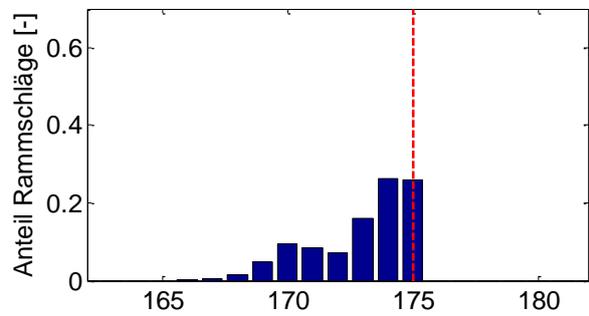
A66 - 760 m - gesamte Rammung



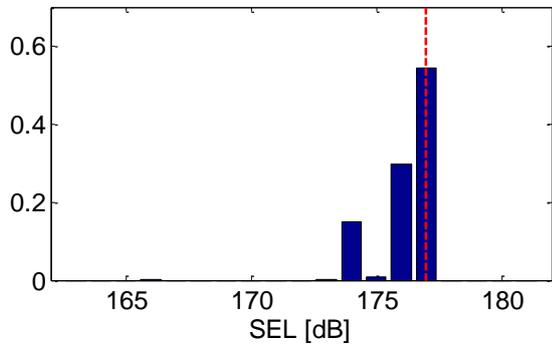
Teil 1 (E < 800 kJ)



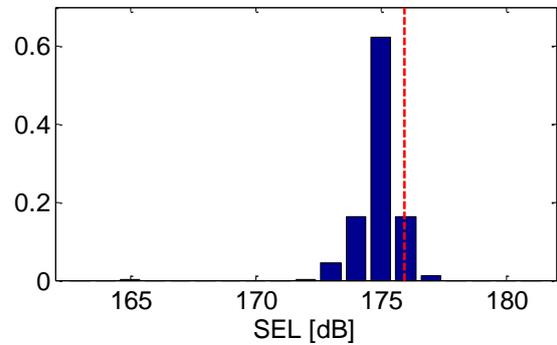
Teil 1 (E < 800 kJ)



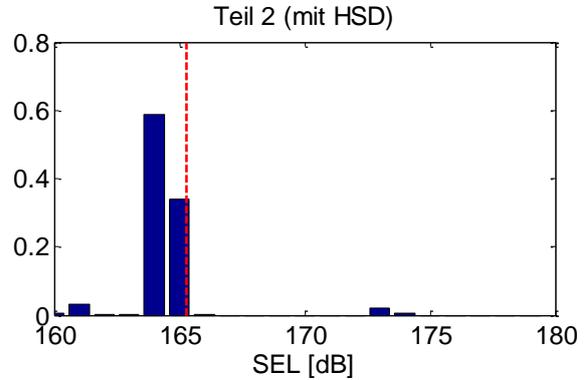
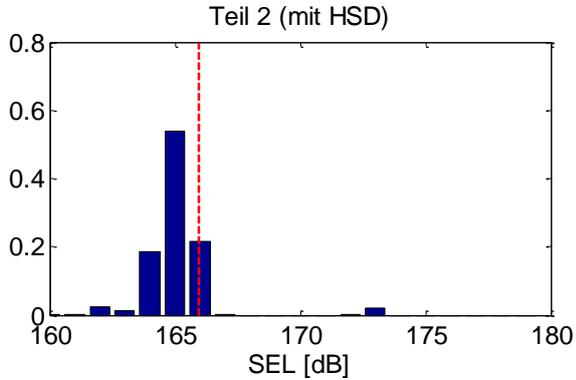
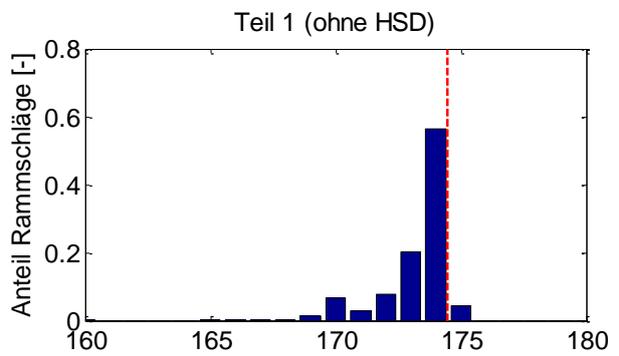
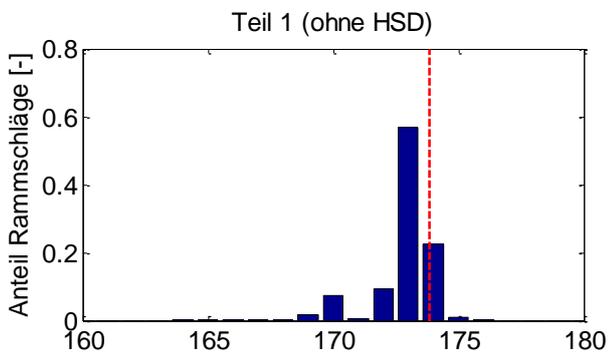
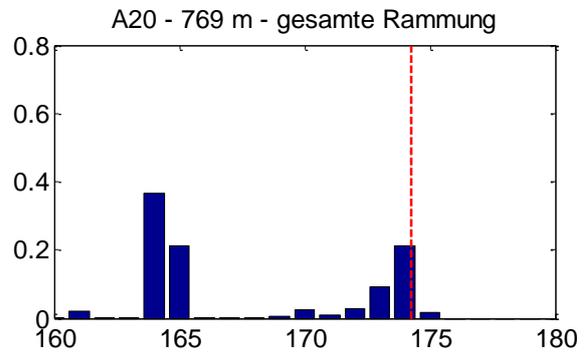
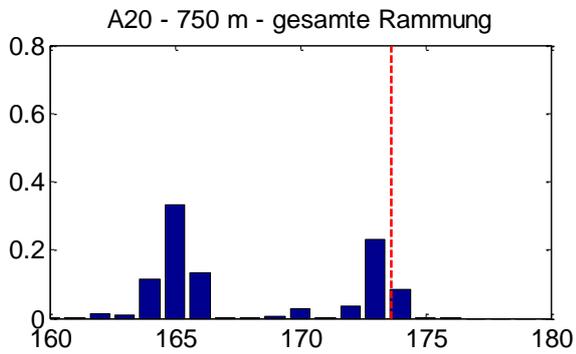
Teil 2 (E > 800 kJ)



Teil 2 (E > 800 kJ)



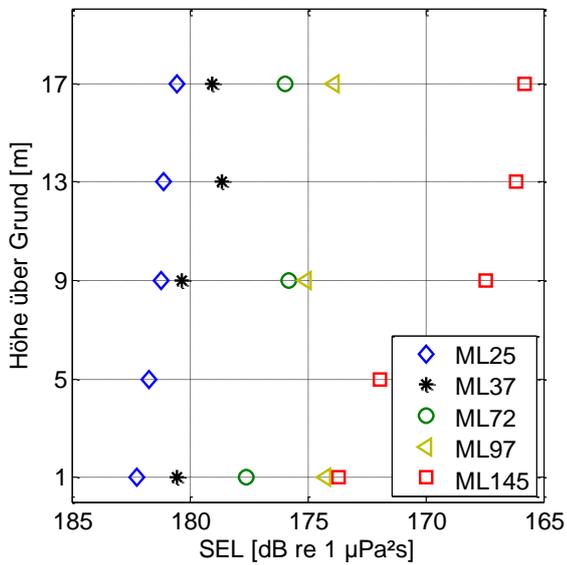
Pfahl: A20  
 Schallminderungssystem: HSD



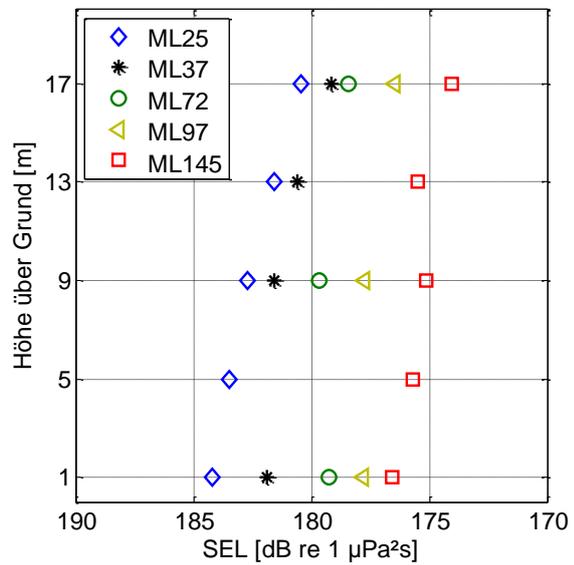
## Anhang G SEL über Tiefe

Im Folgenden ist der SEL über die Tiefe für die Messlokationen im Nahbereich an den untersuchten Pfählen bei einer Rammenergie von ca. 1140 kJ dargestellt.

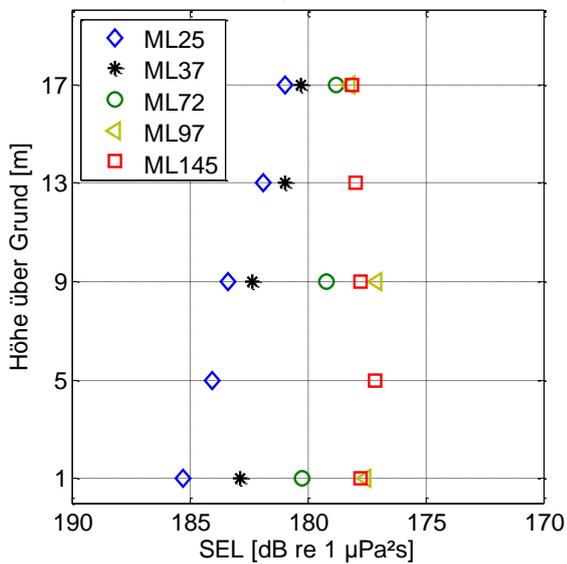
A24 - HSD + DBBC (Weyres) + BBC (HTL) - 1140 kJ



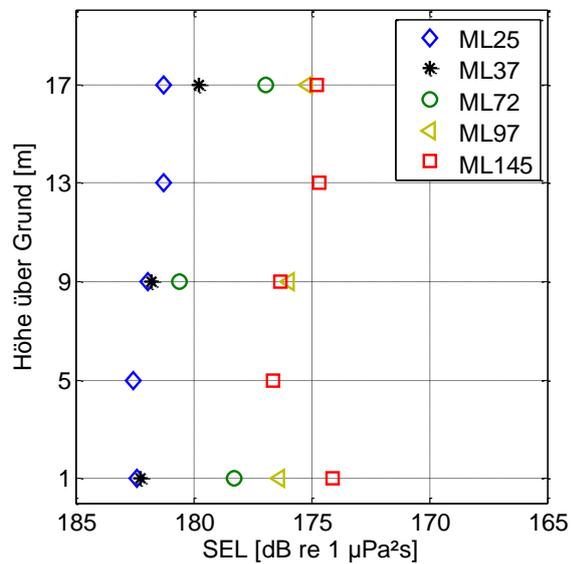
A23 - HSD + BBC (HTL) - 1140 kJ

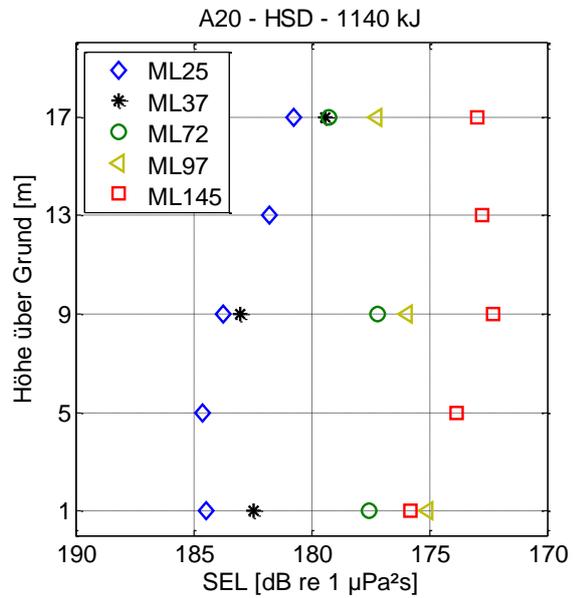
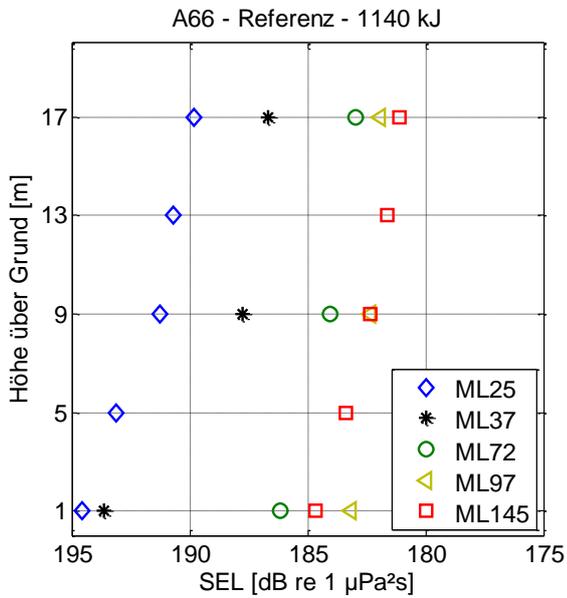
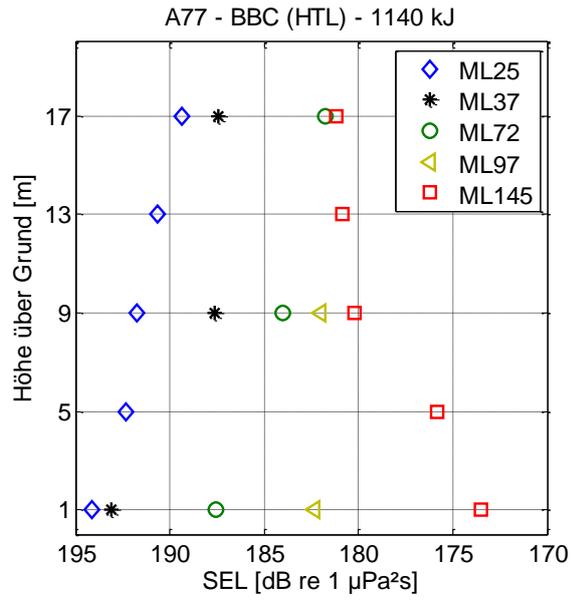
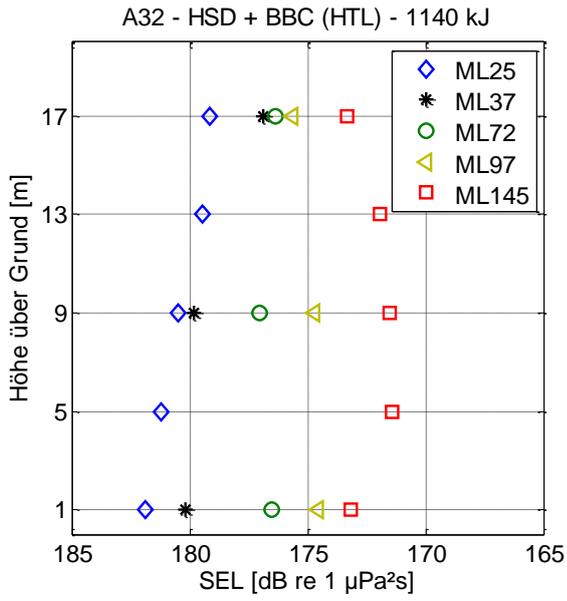


A22 - HSD + DBBC (Weyres) + BBC (HTL) - 1140 kJ



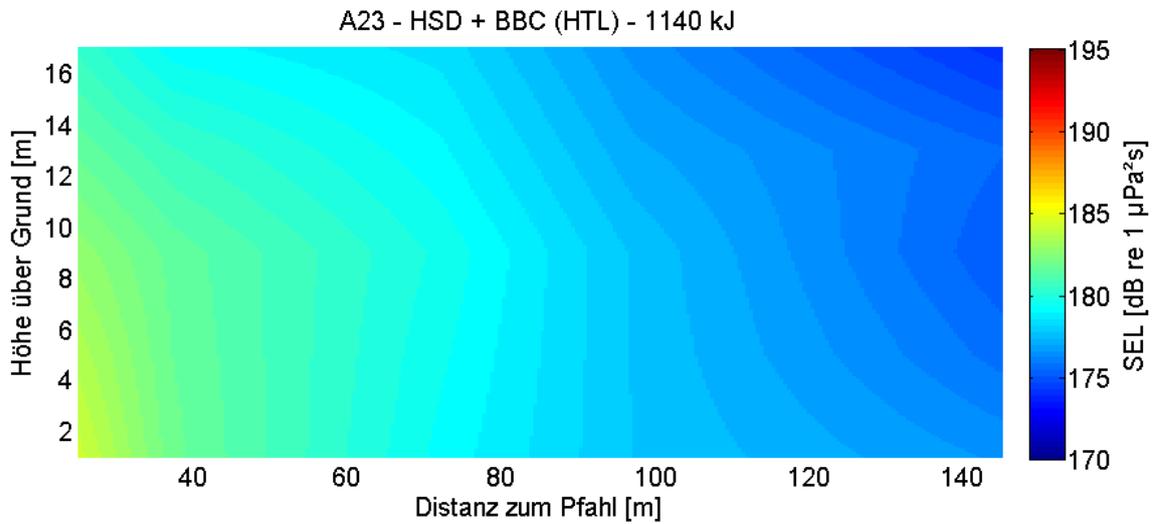
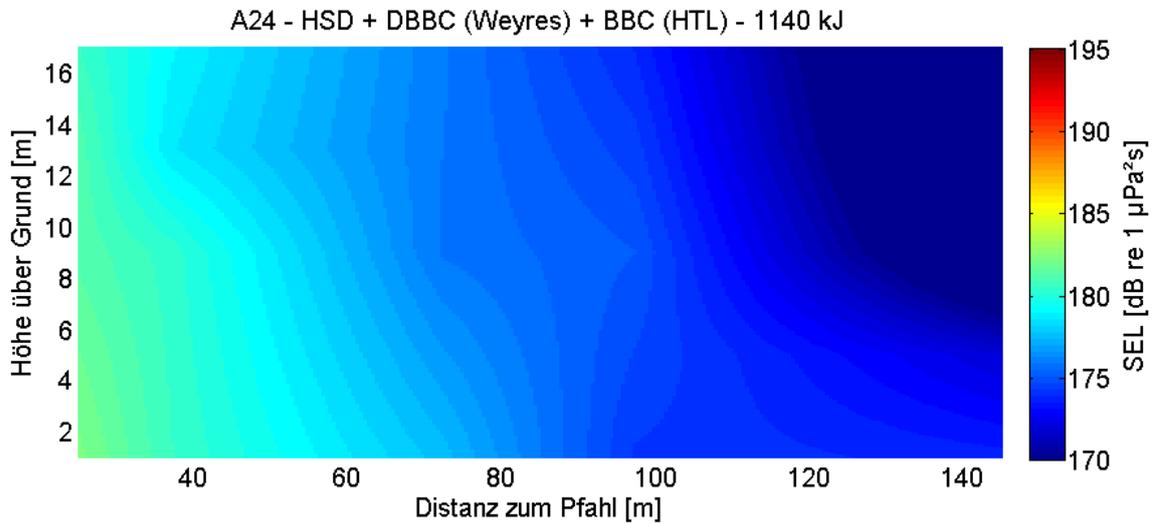
A44 - HSD + BBC (HTL) - 1140 kJ

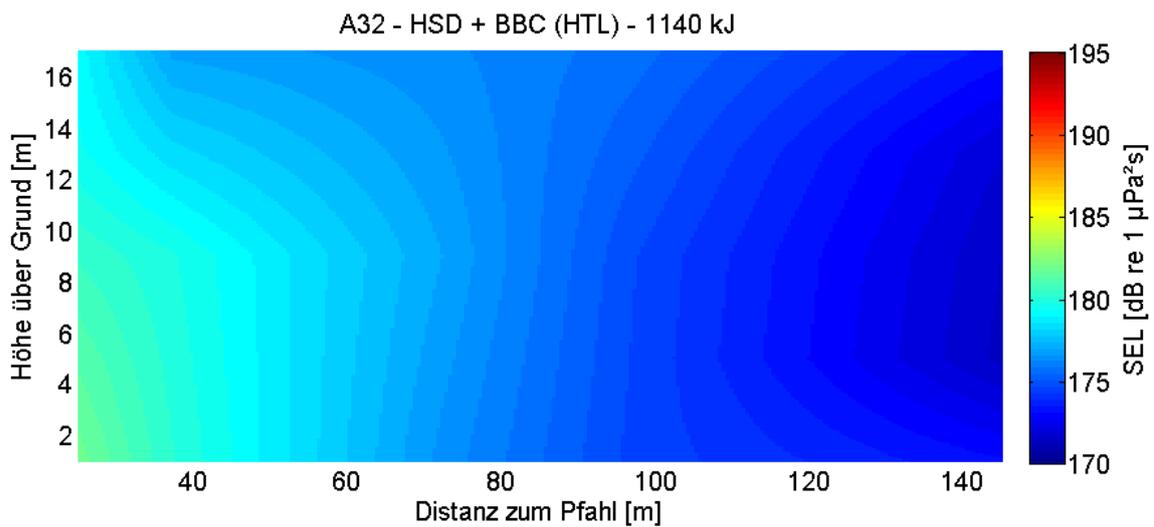
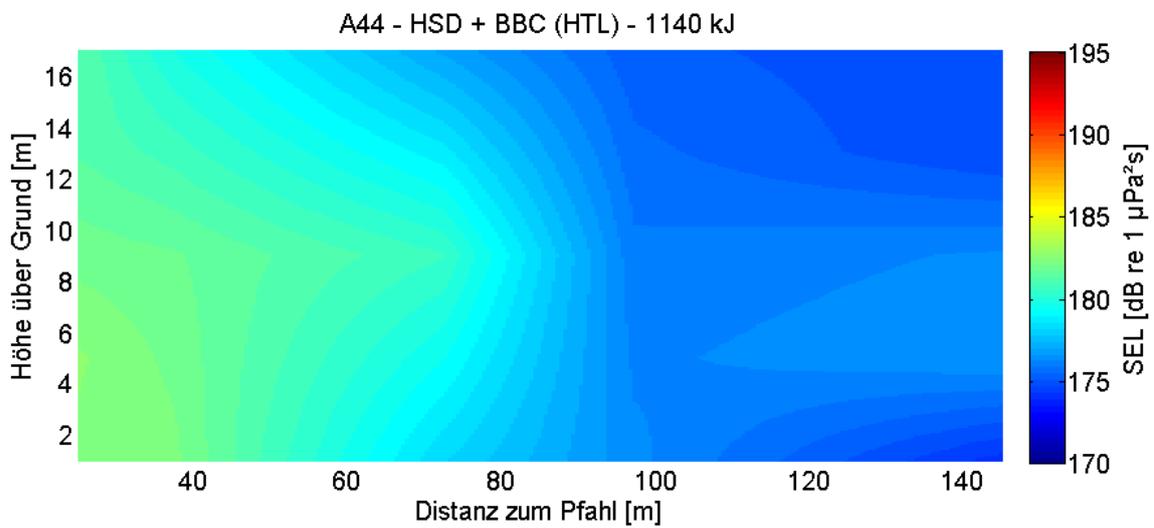
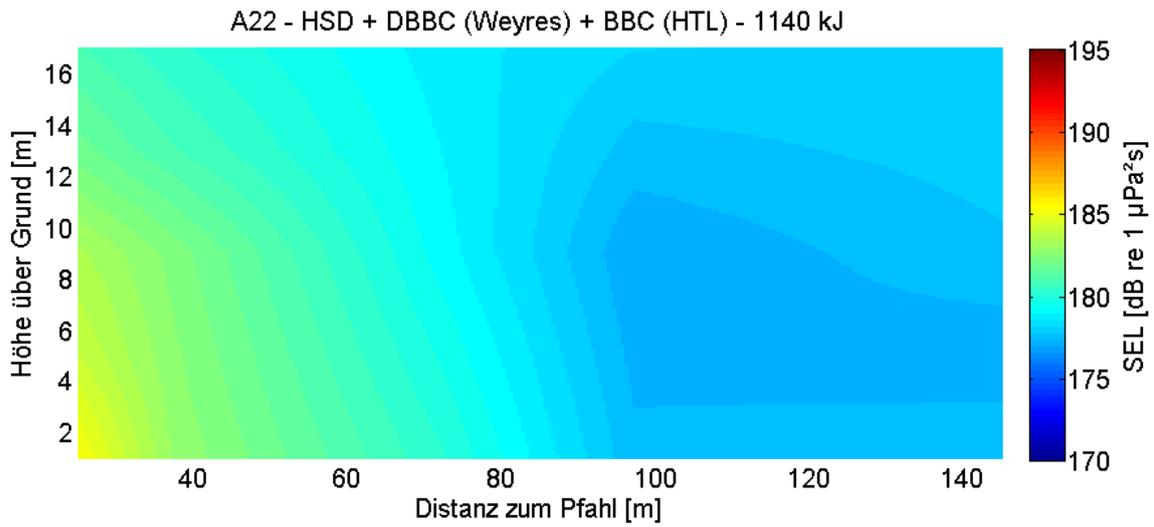


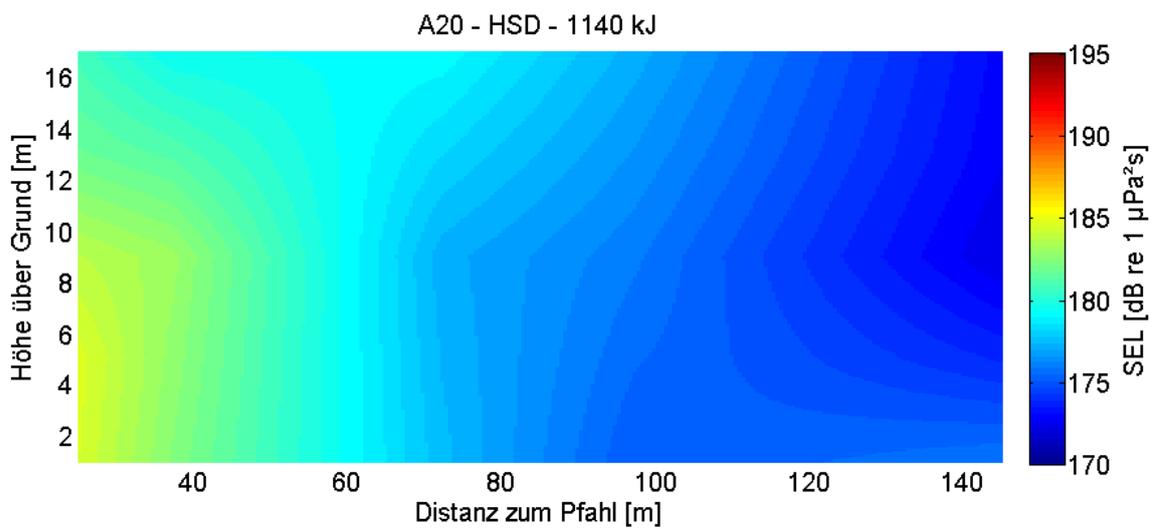
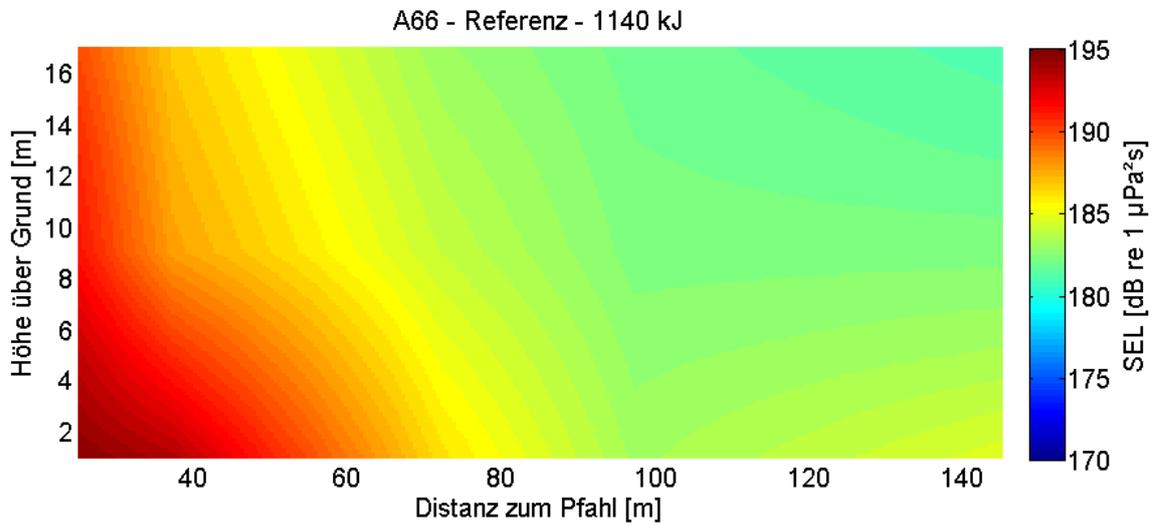
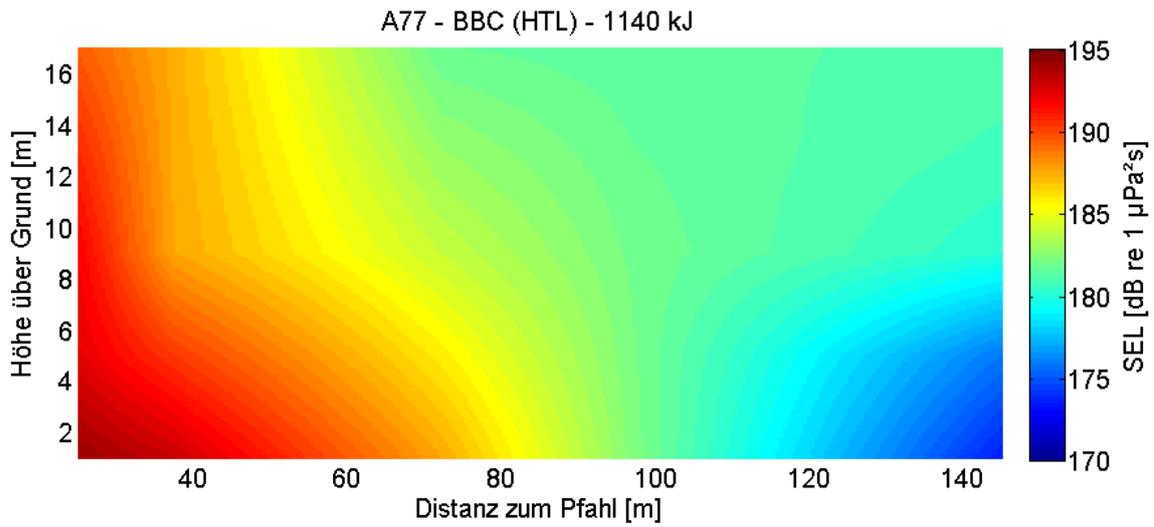


## Anhang H Konturplots SEL Nahbereich

Im Folgenden sind Konturplots des SEL im Nahbereich der gerammten Pfähle bei einer Rammenergie von ca. 1140 kJ dargestellt.

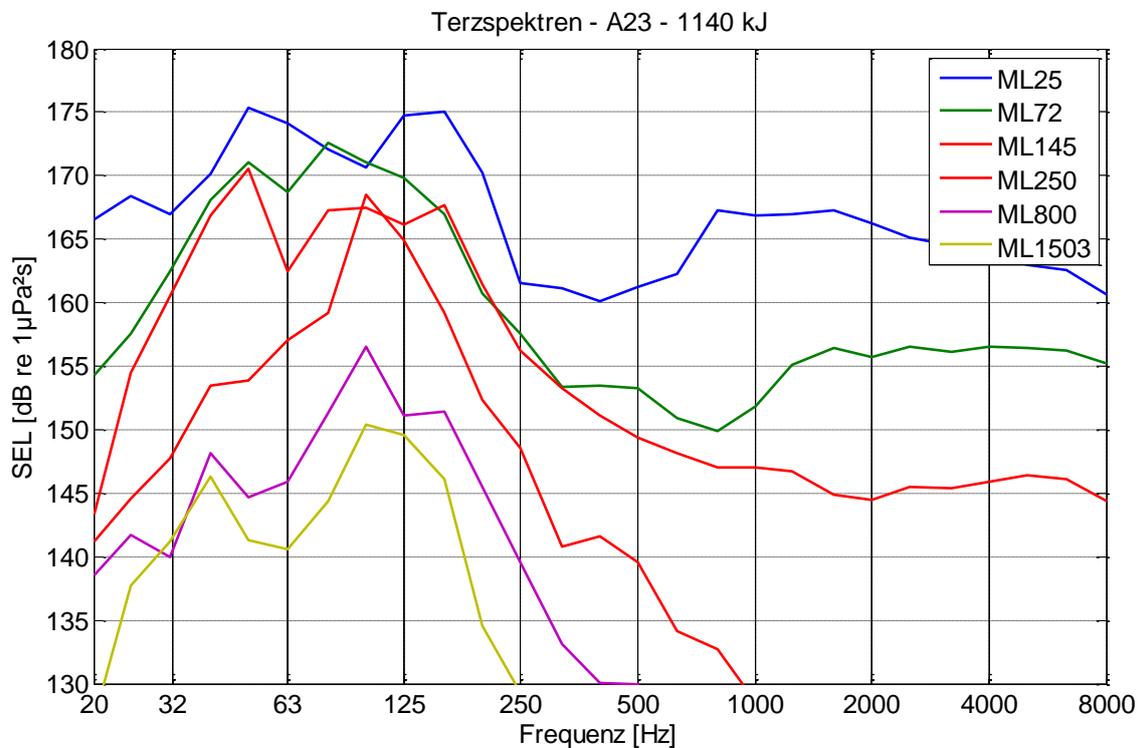
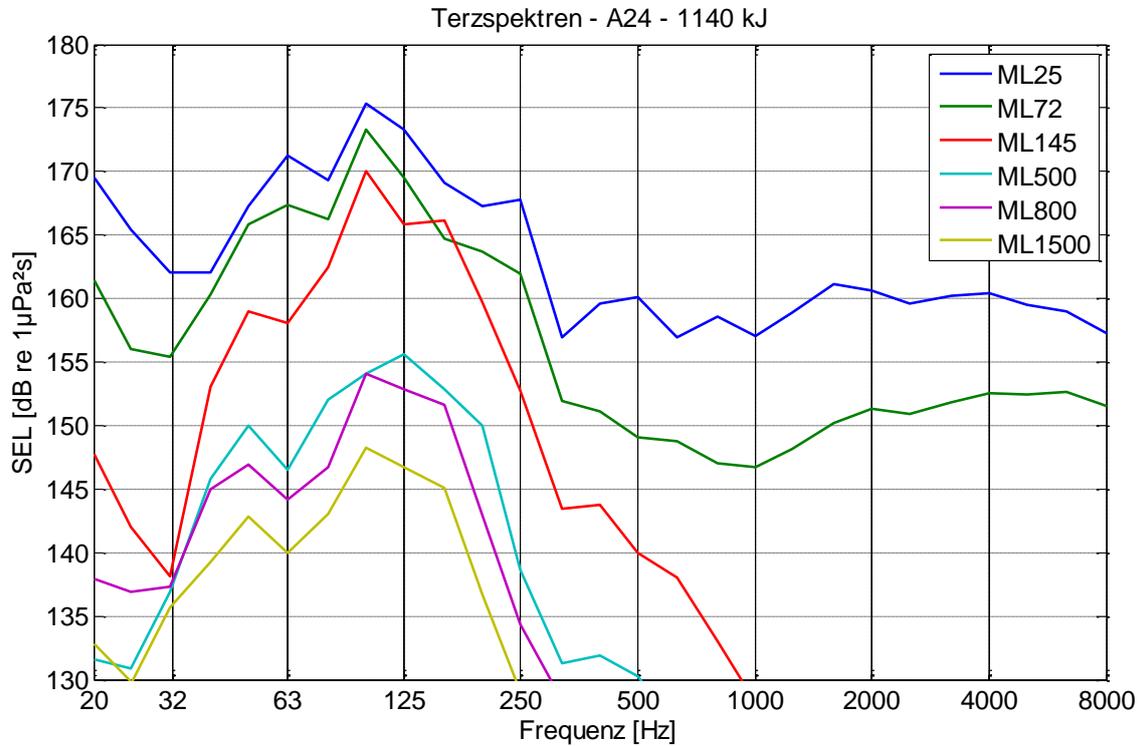


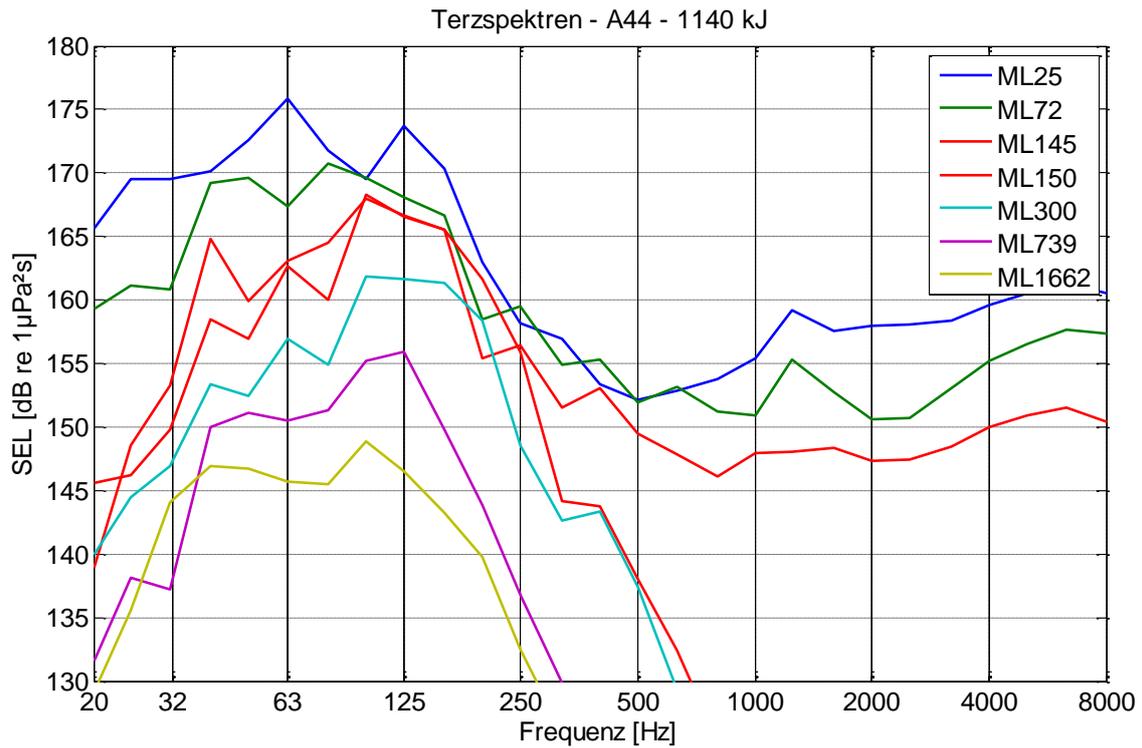
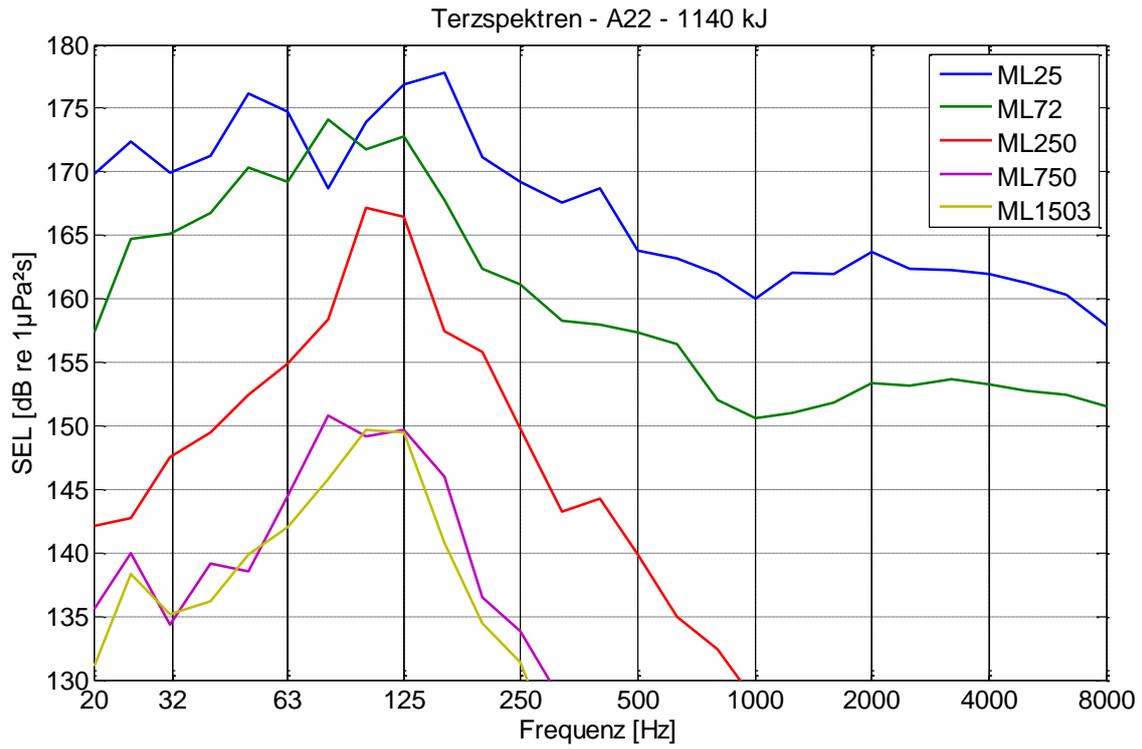


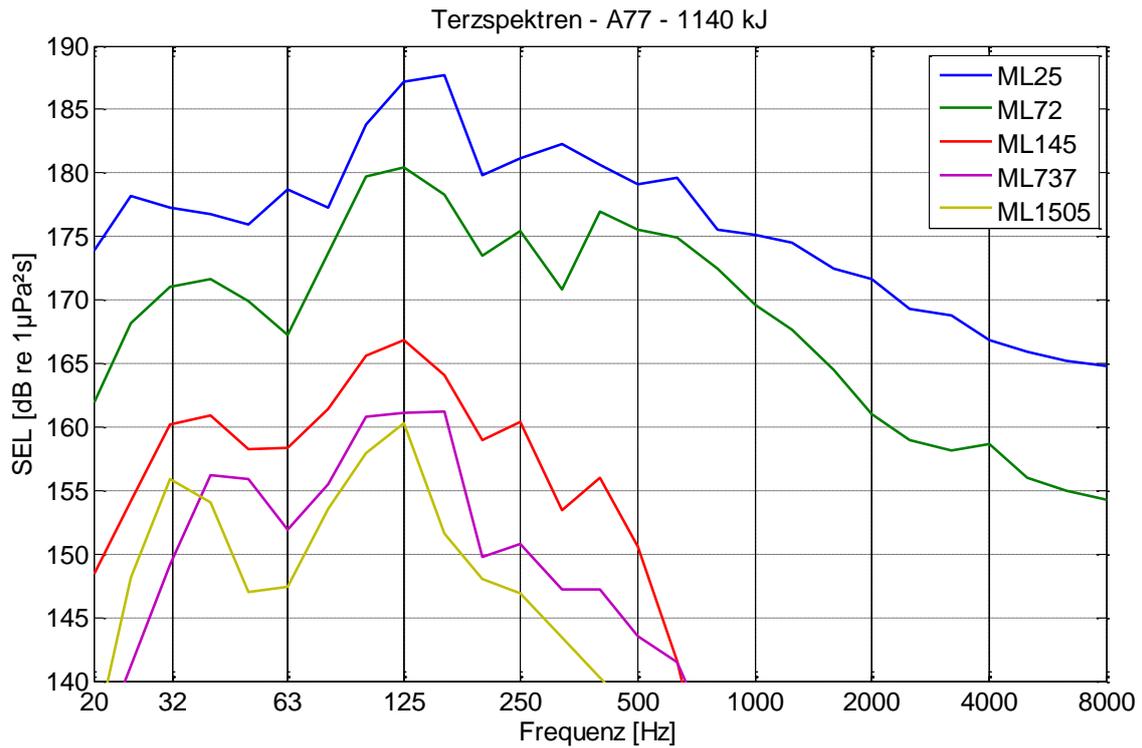
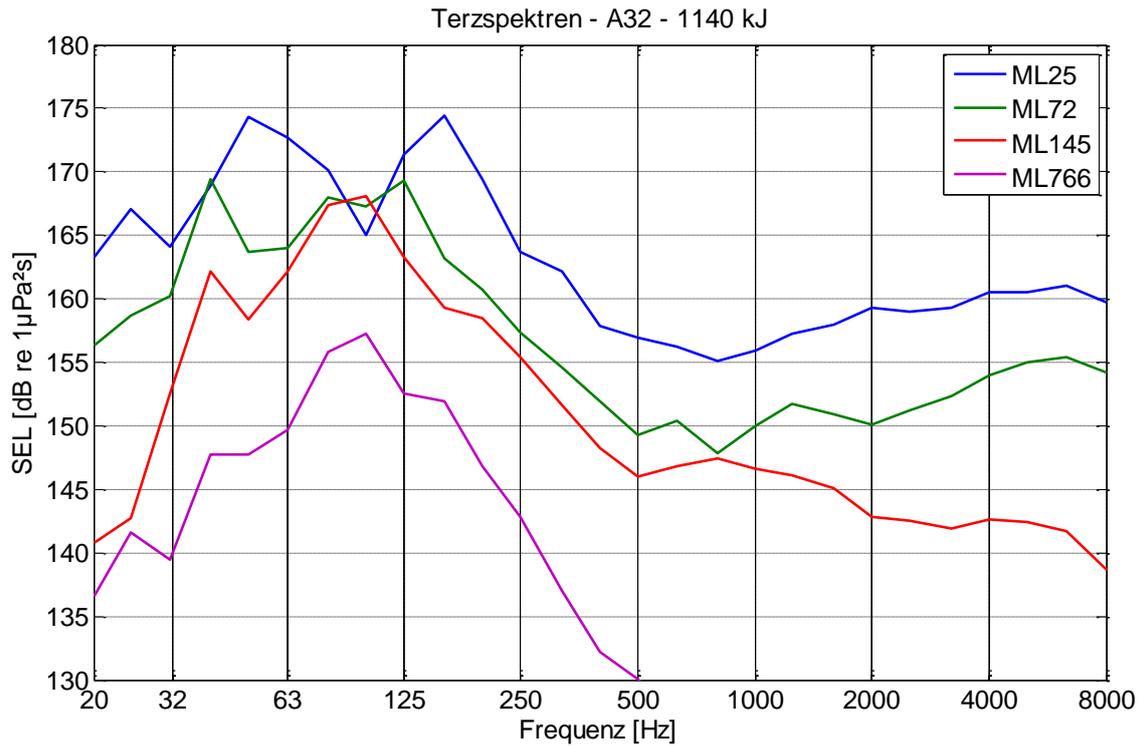


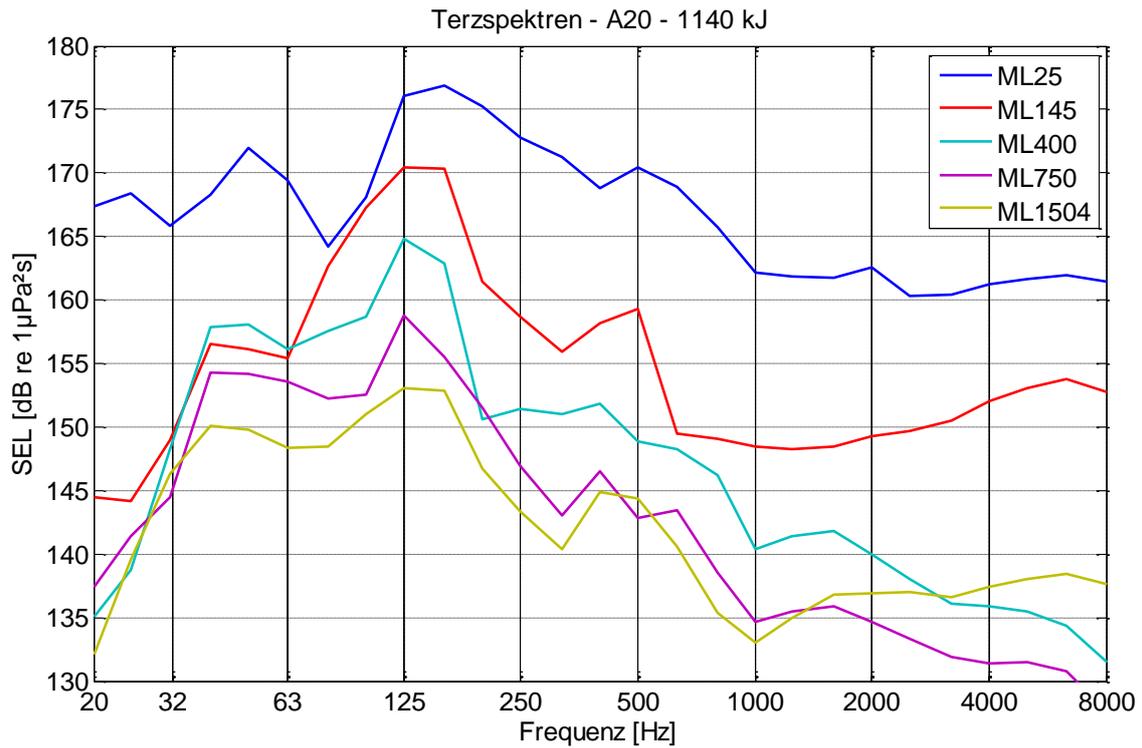
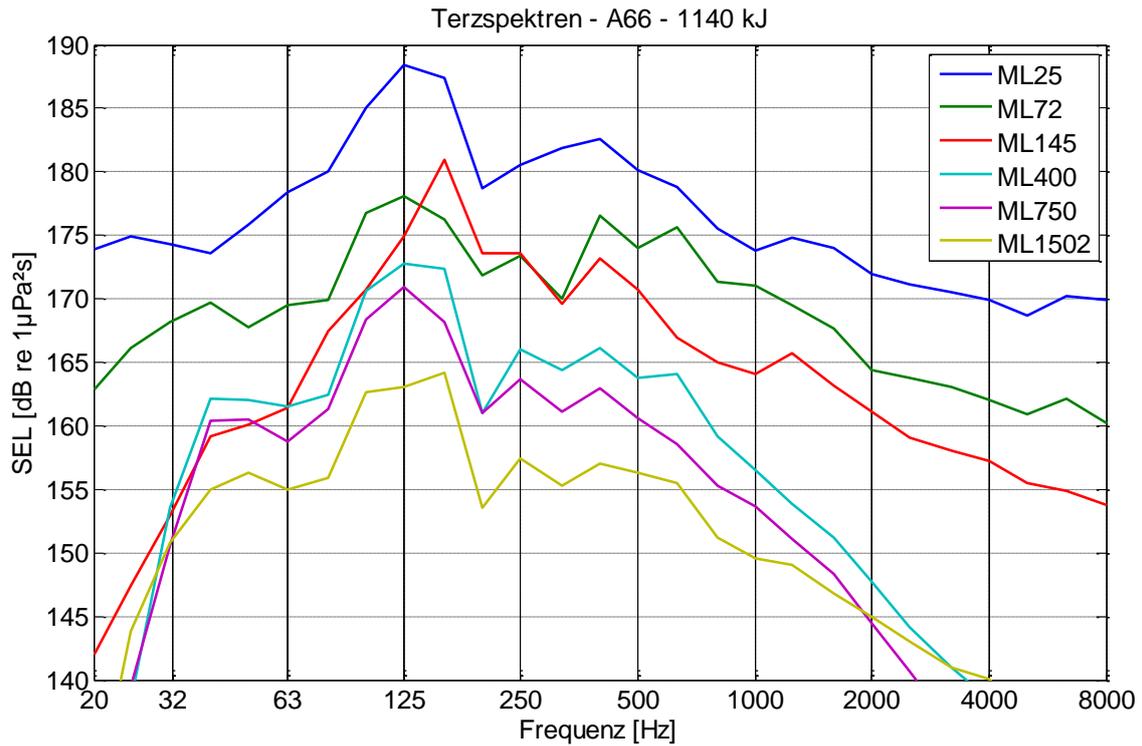
## Anhang I Terzanalysen

Im Folgenden sind die Terzspektren der untersuchten Pfähle an verschiedenen Messlokalationen bei 1140 kJ Rammenergie dargestellt.



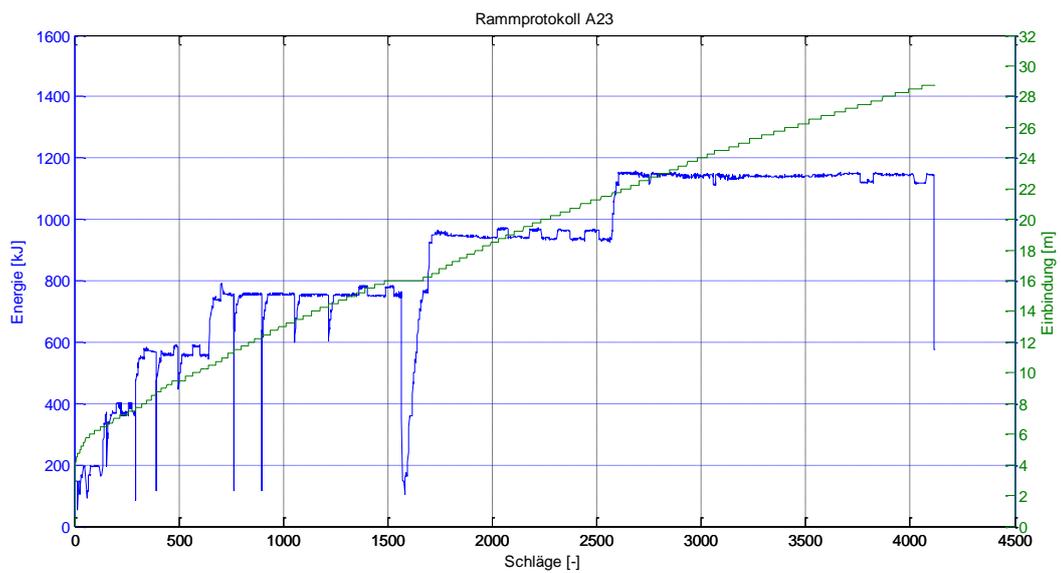
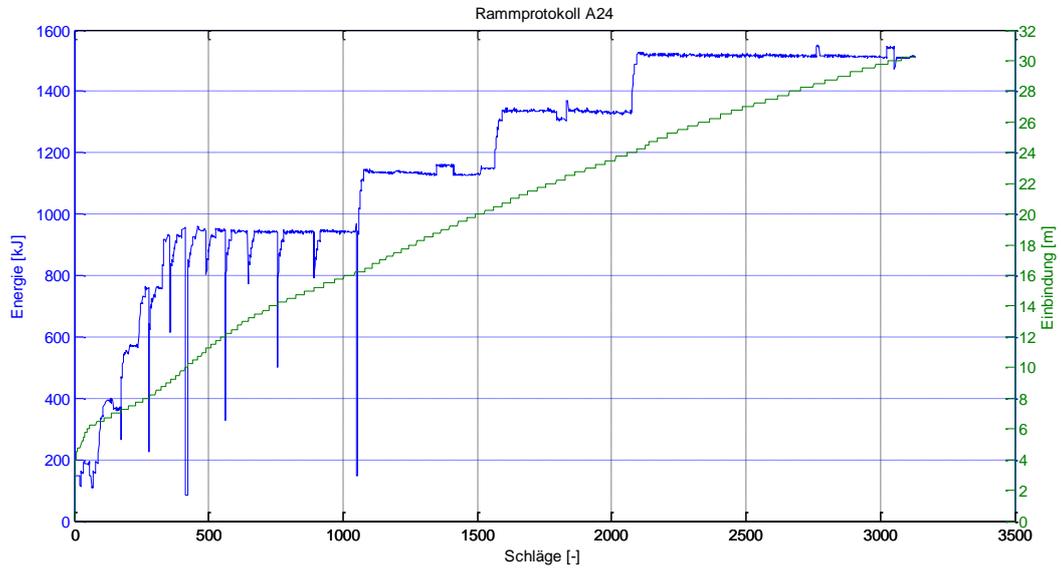


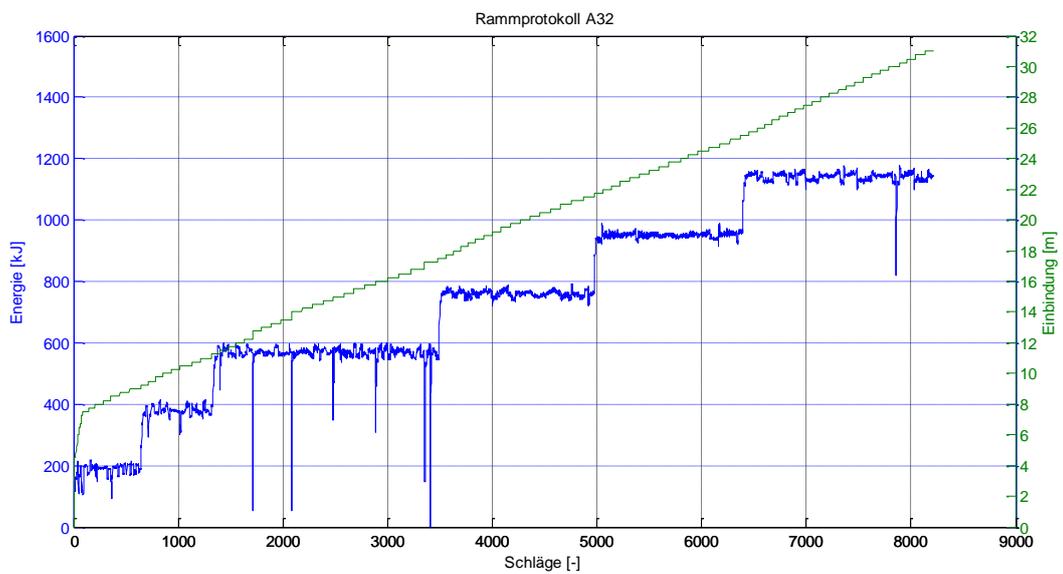
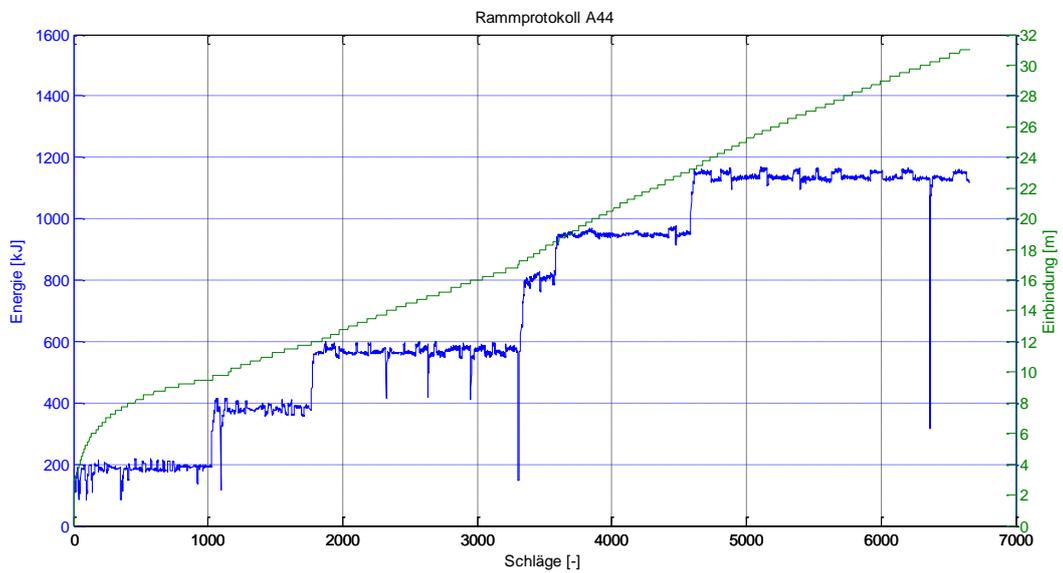
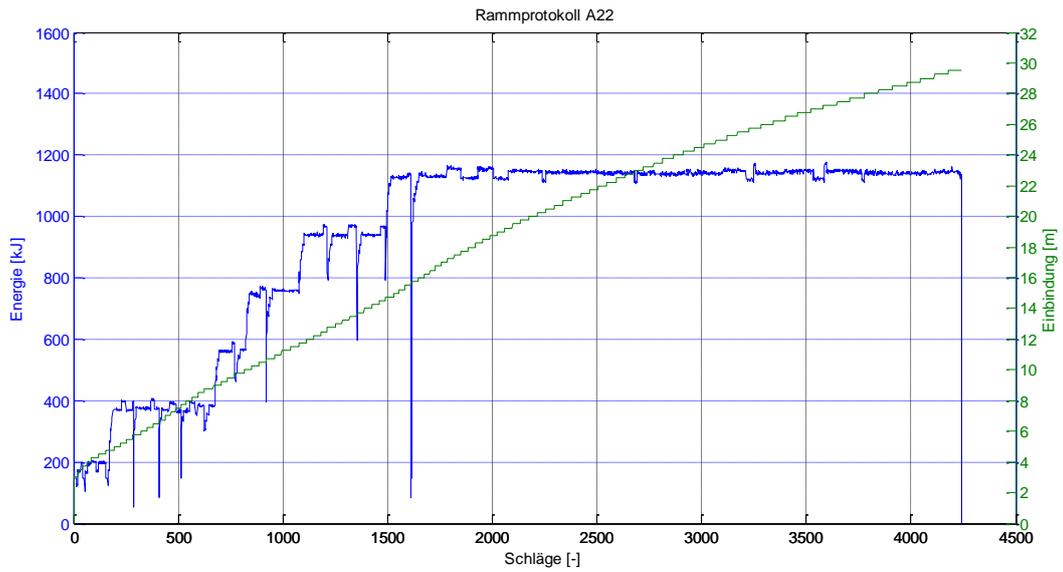




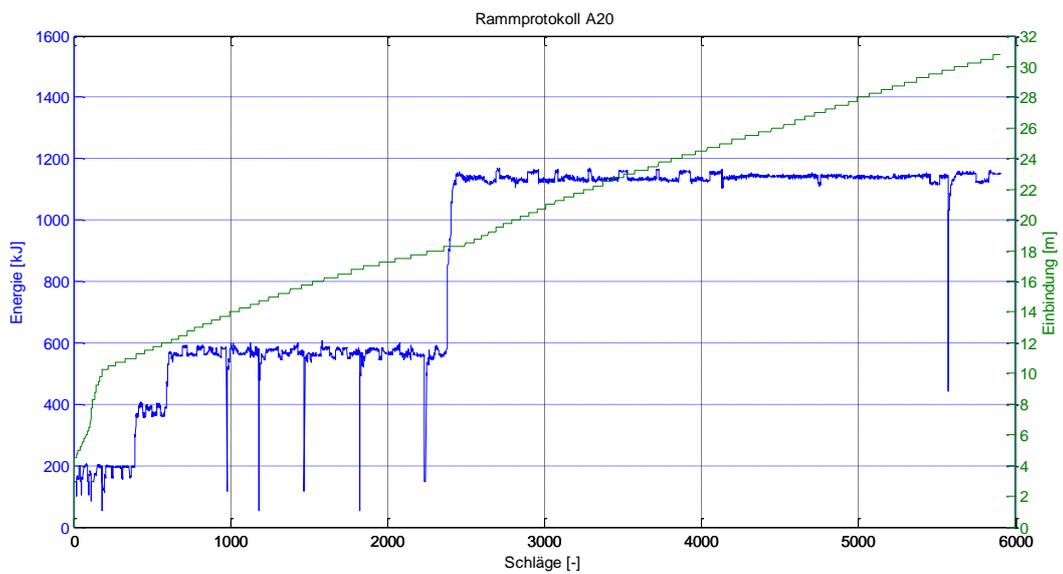
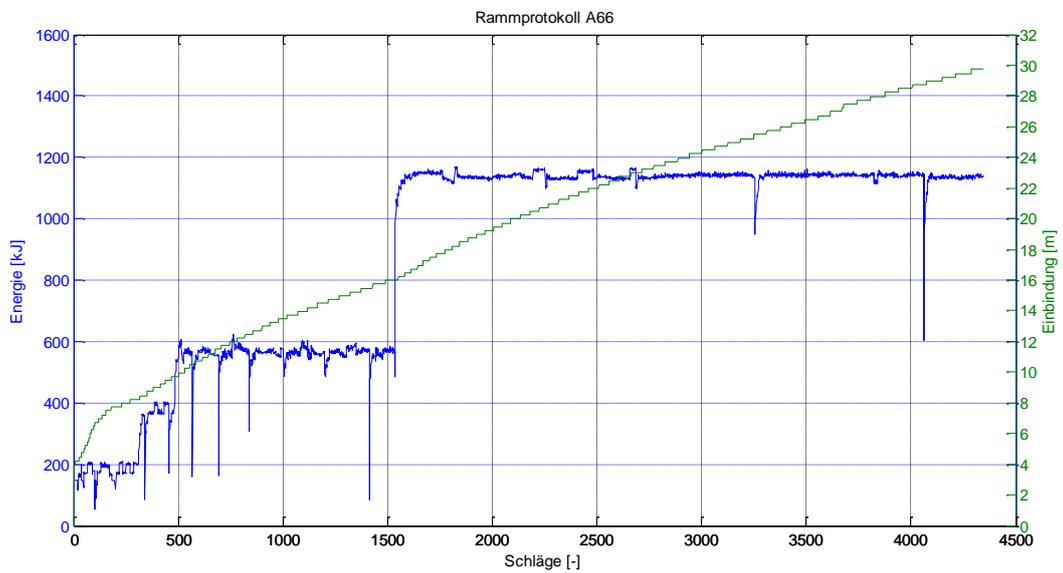
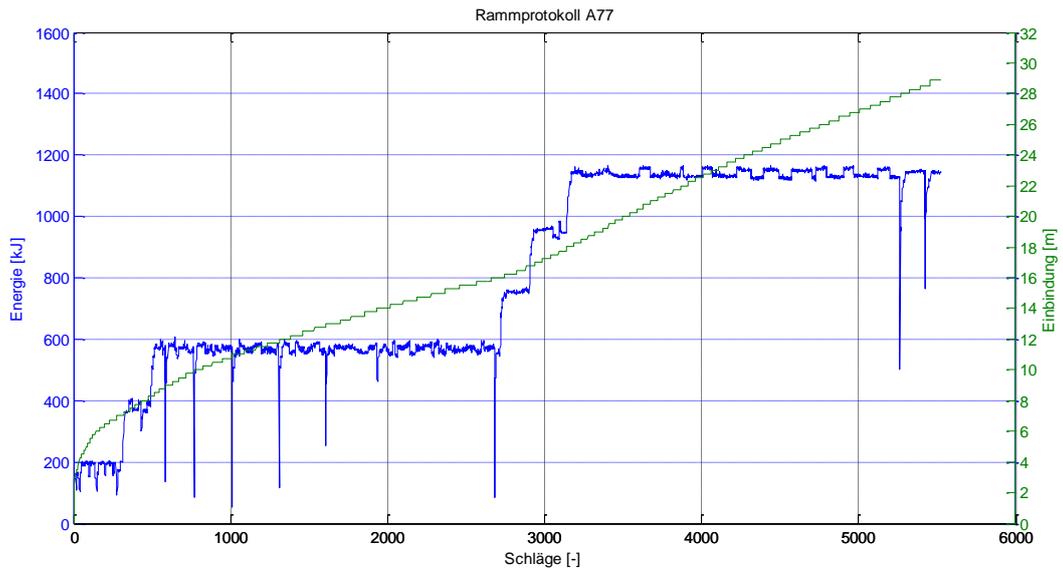
## Anhang J Darstellung Rammprotokolle

Die folgenden Darstellungen wurden auf Grundlage der Daten der Rammprotokolle der Fa. Menck erstellt.



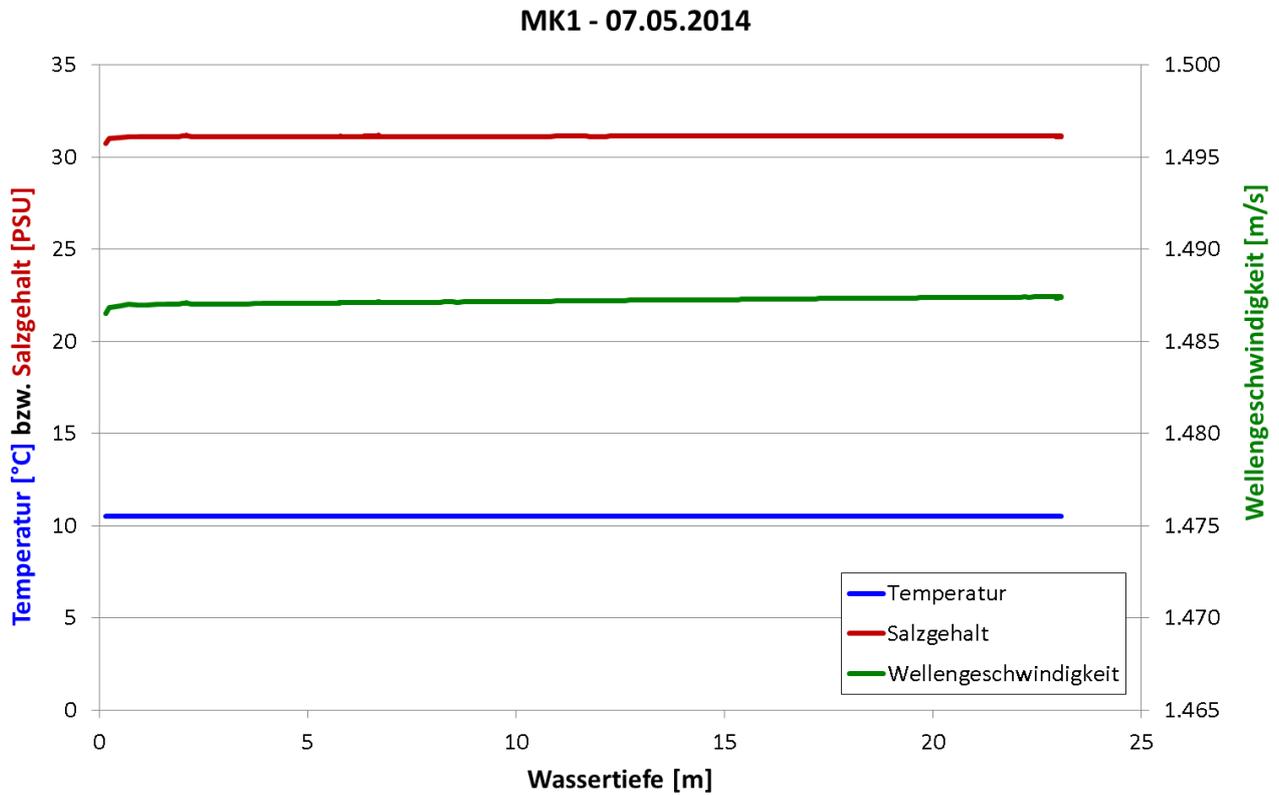


**Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrumbank West - Untersuchung der Schallkopplungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser**

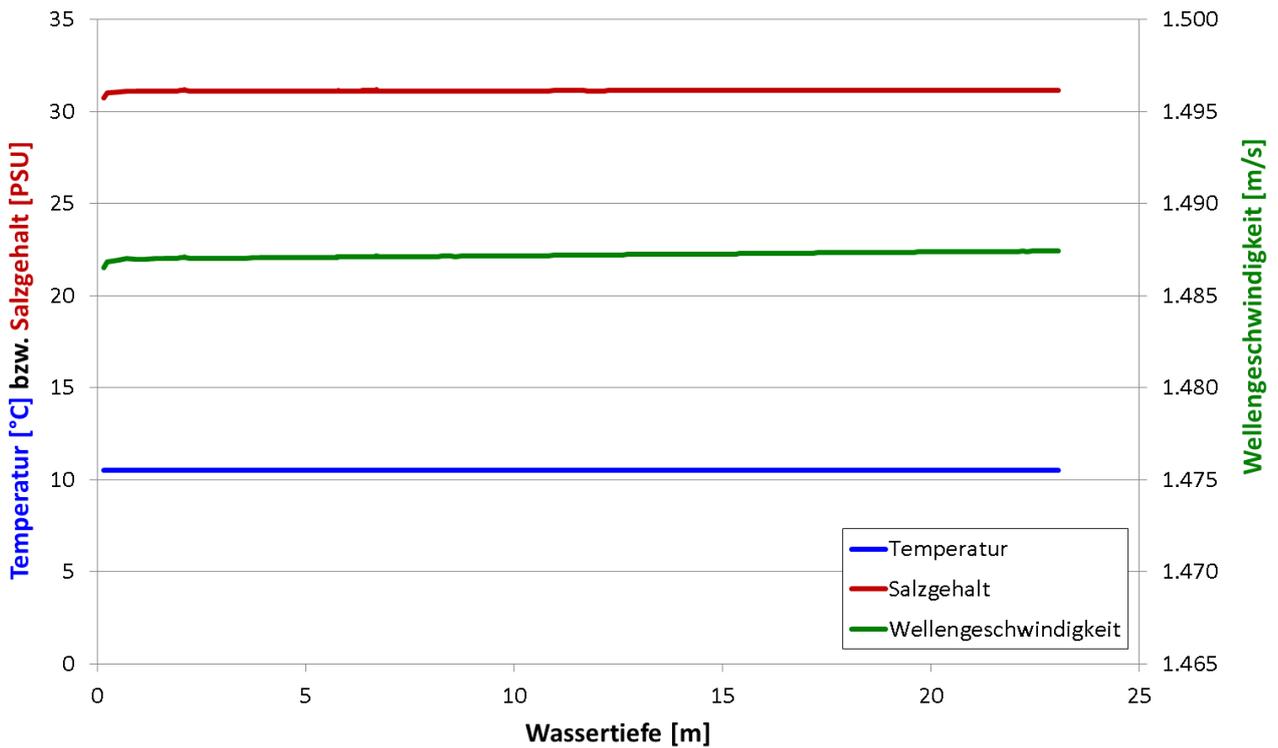


## Anhang K CTD-Sonden-Messungen

Die folgenden Darstellungen zeigen die Ergebnisse von CTD-Sonden-Messungen zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit während der Messkampagnen.



MK1 - 08.05.2014



MK2+3 - 11.10.2014

