

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl und Prüfamnt für
Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

**Beitrag zum Tragverhalten von Mikropfählen
unter axial zyklischer Belastung in bindigen
Böden**

Jennifer Christina Baumbach

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Stavros A. Savidis,
Technische Universität Berlin

Die Dissertation wurde am 20.09.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 05.04.2013 angenommen.

Kurzzusammenfassung

Anhand der Versuchsergebnisse aus axial zyklischen Belastungsversuchen an Mikropfählen in bindigen Böden wird die Entwicklung der Pfahlverschiebungen und der Pfahltragfähigkeit in Abhängigkeit von der Belastungsart, der Zyklenzahl und der Größe der zyklischen Belastung dargestellt. Es werden Verfahren zur Prognose von Pfahlverschiebungen unter axial zyklischer Belastung vorgestellt und bewertet sowie Hinweise zur Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit gegeben.

Summary

On the basis of one-way and two-way cyclic load test on micropiles in cohesive soils the development of the pile displacements and the pile capacity subject to the type of loading, the number of load cycles and the magnitude of the cyclic load is described. Methods to predict the displacements under axial cyclic loading are presented and assessed. Notes for the design of micropiles under axial cyclic loading in the ultimate limit state are given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1.1
1.1	Anlass und Forschungsziele	1.1
1.2	Mögliche Ursachen für das veränderte Tragverhalten von Pfählen unter zyklischer Belastung	1.3
1.3	Begrifflichkeiten	1.4
2	Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit	2.1
2.1	Statische Einwirkungen	2.1
2.2	Zyklische und wiederholte Einwirkungen	2.2
2.2.1	Interaktionsdiagramm (nach EA-Pfähle, 2012)	2.3
2.2.2	Verschiebungsakkumulation nach empirischem Ansatz	2.4
2.2.3	Näherungsverfahren nach KIRSCH / RICHTER (2011)	2.6
2.2.3.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	2.6
2.2.3.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	2.7
2.2.4	Näherungsverfahren nach THOMAS (2011)	2.8
3	Literaturstudie zu Versuchen an Pfählen und Ankern unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden	3.1
3.1	Versuche an Mikropfählen im Maßstab 1:1	3.1
3.2	Pfähle mit größeren Durchmesser und Querschnittsabmessungen	3.5
3.3	Verpressanker	3.9
3.4	Kleinmaßstäbliche Modellversuche	3.12
3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	3.15
4	Eigene Pfahlversuche zum Tragverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in Ton	4.1
4.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	4.1
4.2	Versuchsgelände	4.2
4.3	Erste Versuchsreihe – Axial zyklische Zugschwellversuche	4.3
4.3.1	Pfahlherstellung und Vorbereitung Versuchsfeld	4.3
4.3.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	4.6
4.3.2.1	Versuchsablauf der statischen Referenzversuche	4.8
4.3.2.2	Versuchsablauf der kraftgesteuerten Zugschwellversuche	4.9
4.3.3	Messtechnik	4.10
4.3.4	Versuchsauswertung statische Pfahlprobelastungen	4.12
4.3.4.1	Pfahlverschiebungen und charakteristischer Pfahlzugwiderstand	4.12
4.3.4.2	Verteilung der Längskraft im Pfahl und Mantelreibung	4.16
4.3.5	Versuchsauswertung Zugschwellversuche	4.19
4.3.5.1	Mittlere Pfahlverschiebungen	4.20
4.3.5.2	Verschiebungsamplituden	4.25
4.3.5.3	Verschiebungsraten	4.27
4.3.5.4	Pfahllängskraft und Pfahlmantelreibung	4.29

4.3.6	Post-zyklische statische Pfahlzugprobelastungen	4.35
4.3.6.1	Pfahlverschiebungen und charakteristischer Herauszieh Widerstand	4.35
4.3.6.2	Pfahlmantelreibung	4.37
4.3.7	Zyklischer Schwelllastversuch nach statischer Belastung (Pfahl F)	4.40
4.4	Zweite Versuchsreihe – Axial zyklische Wechsellastversuche	4.43
4.4.1	Pfahlherstellung	4.43
4.4.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	4.44
4.4.2.1	Versuchsablauf der statischen Referenzversuche	4.46
4.4.2.2	Versuchsablauf der kraftgesteuerten Wechsellastversuche	4.47
4.4.3	Messtechnik	4.47
4.4.4	Versuchsauswertung statische Pfahlprobelastungen	4.50
4.4.4.1	Pfahlverschiebungen und charakteristischer Pfahlwiderstand	4.50
4.4.4.2	Verteilung der Längskraft im Pfahl und Mantelreibung	4.52
4.4.5	Versuchsauswertung Wechsellastversuche	4.53
4.4.5.1	Mittlere Pfahlverschiebungen	4.55
4.4.5.2	Verschiebungsamplituden	4.57
4.4.5.3	Verschiebungsraten	4.59
4.4.5.4	Pfahllängskraftverlauf und Mantelreibung	4.61
4.4.6	Post-zyklische statische Pfahlprobelastungen	4.68
4.4.6.1	Pfahlverschiebungen und charakteristischer Herauszieh Widerstand	4.68
4.4.6.2	Pfahlmantelreibung	4.71
4.4.6.2.1	Vergleich Pfahl W mit Pfahl Z (Druck)	4.71
4.4.6.2.2	Vergleich Pfahl V mit statischen Zugprobelastungen der Versuchsreihe 1	4.72
4.4.7	Zyklische Wechsellastversuche nach statischer Belastung (Pfahl Z)	4.75
4.4.7.1	Pfahl Z-Belastung 1	4.75
4.4.7.2	Pfahl Z-Belastung 2	4.78
5	Erkenntnisse aus den zyklischen Pfahlversuchen	5.1
5.1	Zusammenfassung der Versuchsrandbedingungen	5.1
5.2	Ergebnisse aus den Zugschwell- und Wechsellastversuchen	5.1
5.2.1	Pfahlversagen	5.2
5.2.2	Entwicklung der mittleren Pfahlverschiebungen	5.3
5.2.3	Entwicklung der Verschiebungsamplitude	5.4
5.2.4	Entwicklung der Verschiebungsraten	5.5
5.2.5	Entwicklung der Pfahlmantelreibung	5.6
5.2.6	Post-zyklische Pfahltragfähigkeit unter statischer Belastung	5.6
5.2.6.1	Zyklische Versuche nach statischer Pfahlprobelastung	5.7
5.3	Zusammenfassung	5.8
6	Einfachscher Versuche an Tonproben	6.1
6.1	Versuchsstand und Probenvorbereitung	6.1
6.2	Versuchsprogramm	6.3
6.3	Versuchsauswertung	6.4
6.4	Versuchsergebnisse	6.5
6.4.1	Monotone Einfachscher Versuche	6.5

6.4.2	Zyklische Einzelscherversuche	6.8
6.4.2.1	Entwicklung der mittleren plastischen Schubverzerrungen	6.9
6.4.2.2	Entwicklung der Schubverzerrungsamplituden	6.11
6.4.2.3	Entwicklung des Schubmoduls	6.12
6.4.2.4	Entwicklung der Normalspannungen	6.13
6.5	Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Pfahlversuchen unter zyklischer Zugschwellbelastung	6.15
7	Standsicherheitsnachweise zyklisch axial belasteter Mikropfähle in bindigen Böden auf Grundlage der Versuchsergebnisse	7.1
7.1	Zur Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit	7.1
7.2	Zur Nachweisführung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	7.4
7.2.1	Abschätzung der Pfahlverschiebungen unter zyklischer Belastung anhand der Kriechmaße aus einer statischen Pfahlprobebelastung	7.6
7.2.2	Verschiebungsakkumulation nach empirischem Ansatz	7.9
7.2.3	Verfahren nach THOMAS (2011)	7.13
8	Zusammenfassung und Ausblick	8.1
Literaturverzeichnis		
Anhang		

Bezeichnungen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Benennung
a	[-]	Empirischer Modellparameter (Kapitel 2)
b	[-]	Empirischer Modellparameter (Kapitel 2)
c	[-]	Empirischer Modellparameter (Kapitel 2)
c_1	[-]	Konstante zur Beschreibung der Krümmung der Hysterese der Erstbelastung
c_u	[kN/m ²]	Undrained Scherfestigkeit
g_b	[-]	Empirischer Modellparameter aus statischen Pfahlprobelastungen
g_s	[-]	Empirischer Modellparameter aus statischen Pfahlprobelastungen
k_s	[mm]	Kriechmaß
l_1, l_2, l_3	[-]	Längenverhältnisse aus Interaktionsdiagramm zur Ermittlung von ΔR_{zyk}
l	[m]	Pfahllänge
q_c	[kN/m ²]	Sondierspitzenwiderstand Drucksondierung
r_0	[m]	Pfahlradius
r_m	[m]	Einflussradius der zyklischen Belastung bzw. der Einwirkung
$s(N)$	[mm]	Verschiebung nach N Lastzyklen
s_1	[mm]	Verschiebung nach dem 1. Lastzyklus
s_1^0	[mm/Zyklus]	Verschiebungsrates bei Lastzyklus N = 1
s_g	[mm]	Grenzsetzung $s_g = 0,1 \cdot D$
s_{max}	[mm]	Verschiebung des Pfahlmantels zu Beginn der Entlastung
s_{max}	[mm]	Maximalwert der Verschiebung innerhalb eines Lastzyklus
s_{min}	[mm]	Verschiebung des Pfahlmantels zu Beginn der Wiederbelastung
s_{min}	[mm]	Minimalwert der Verschiebung innerhalb eines Lastzyklus
s_{mittel}	[mm]	Mittelwert der Verschiebungsspanne, mittlere Verschiebung
s_s	[mm]	Pfahlkopfverschiebungen unter statischer Belastung
$s_{s,E} (N)$	[mm]	Pfahlkopfverschiebung aus Entlastung
$s_{s,W} (N)$	[mm]	Pfahlkopfverschiebung aus Wiederbelastung
s_{zykl}	[mm]	Verschiebungsspanne innerhalb eines Lastzyklus
s_{zykl}	[mm]	Verschiebung des Pfahles infolge einer axial zyklischen Einwirkung
s'_{zykl}	[mm]	Verschiebungsspanne innerhalb eines Lastzyklus
Δs_{zykl}	[mm]	aus der zyklischen Belastung resultierender Anteil der mittleren Pfahlverschiebung
$v_{Erstbelastung}$	[kN/s]	Belastungsgeschwindigkeit bei Erstbelastung
$v_{Ent-/Wiederbelastung}$	[kN/s]	Belastungsgeschwindigkeit bei Ent- und Wiederbelastung
$w_{<0,4}$	[%]	Wassergehalt des Kornanteils < 0,4 mm
w_n	[%]	Natürlicher Wassergehalt
w_L	[%]	Fließgrenze des Kornanteils < 0,4 mm
w_P	[%]	Ausrollgrenze des Kornanteils < 0,4 mm

A_s	[m ²]	Pfahlmantelfläche (= $D_s \cdot \pi \cdot l$)
D	[m]	Pfahldurchmesser
D_s	[m]	Pfahlschaftdurchmesser
DMS		Dehnmessstreifen
F	[kN]	Last, Kraft
$F_{c,d}$	[kN]	Bemessungswert der axialen Druckbelastung
$F_{c,Q,rep}$	[kN]	charakteristischer bzw. repräsentativer Wert der Druckbeanspruchung infolge von ungünstigen veränderlichen Einwirkungen
$F_{G,k}$	[kN]	charakteristischer Wert der Druckbeanspruchung infolge von ungünstigen ständigen Einwirkungen
F_{mittel}	[kN]	Mittleres Lastniveau
F_{min}	[kN]	Minimallast während eines Lastzyklus
F_{max}	[kN]	Maximallast während eines Lastzyklus
$F_{t,d}$	[kN]	Bemessungswert der axialen Zugbelastung
$F_{t,G,k}$	[kN]	charakteristischer Wert der Zugbeanspruchung infolge von ungünstigen ständigen Einwirkungen
$F_{t,Q,rep}$	[kN]	charakteristischer bzw. repräsentativer Wert der Zugbeanspruchung infolge von ungünstigen veränderlichen Einwirkungen
F'_{zykl}	[kN]	zyklische Lastamplitude
F_{zykl}	[kN]	zyklische Lastspanne
G_0	[kN/m ²]	Schubmodul bei kleinen Dehnungen
G_W	[kN/m ²]	Schubmodul bei Wiederbelastung
G_{zyk}	[kN/m ²]	Schubmodul für zyklische Belastung, abhängig von γ_{zyk}
GOF	[mNN]	Geländeoberfläche
I_c	[-]	Konsistenzzahl nach Atterberg: $I_c = \frac{w_L - w_{<0,4}}{I_P}$
I_D	[-]	initiale Lagerungsdichte
I_P	[%]	Plastizitätszahl: $I_P = w_L - w_P$
L	[m]	Pfahllänge
N	[-]	Zyklusanzahl
N_k	[-]	Konusfaktor bei Auswertung von Drucksondierungen
OCR	[-]	Überkonsolidierungsgrad
R_c	[N/mm ²]	Druckfestigkeit Zement
$R_{c,m}$	[kN]	an einem Einzelpfahl ermittelter Pfahlwiderstand auf Druck
$(R_{c,m})_{mitt}$	[kN]	Mittelwert der Einzelversuchsergebnisse aus Pfahlprobelbelastungen auf Druck
R_d	[kN]	Bemessungswert des Pfahlwiderstands
R_{fb}	[-]	Empirischer Modellparameter aus statischen Pfahlprobelbelastungen
R_{fs}	[-]	Empirischer Modellparameter aus statischen Pfahlprobelbelastungen
R_k	[kN]	Charakteristischer Pfahlwiderstand
$R_{t,m,i}$	[kN]	an einem Einzelpfahl ermittelter Herauszieh-widerstand
$(R_{t,m})_{mitt}$	[kN]	Mittelwert der Einzelversuchsergebnisse aus Pfahlprobelbelastungen auf Zug

$R_{t,k}$	[kN]	Charakteristischer Wert des Herausziehwiderstands
R_{ult}	[kN]	Pfahlwiderstand im Grenzzustand der Tragfähigkeit
ΔR_{zyk}	[kN]	Abminderung des Pfahlwiderstandes infolge einer zyklischen Belastung

Griechische Buchstaben

α	[-]	Dilatationsparameter
β_N	[-]	Modellparameter zur Beschreibung der Änderung der Pfahltragfähigkeit
γ_{grenz}	[-]	Grenzscherdehnung
γ_G	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für eine ständige Einwirkung im Grenzzustand GEO-2
$\gamma_{G,inf}$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für eine günstige ständige Einwirkung im Grenzzustand GEO-2
γ_{max}	[%]	Maximale Schubverzerrung
γ_{min}	[%]	Minimale Schubverzerrung
γ_{mittel}	[%]	Mittlere Schubverzerrung
γ_Q	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für eine ungünstige veränderliche Einwirkung im Grenzzustand GEO-2
$\gamma_{s,t}$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für Herausziehwiderstand
γ_t	[-]	Teilsicherheitsbeiwerte für Pfahlwiderstand
γ_{zyk}	[-]	Schubverzerrungsspanne
$\dot{\gamma}_{zykl}$	[%]	Schubverzerrungsamplitude
δ	[°]	Aktivierter Wandreibungswinkel
δ_N	[-]	Modellparameter zur Beschreibung der Akkumulation der plastischen Verschiebungen
${}_1\Delta\gamma$	[-]	Anteil Schubverzerrung aus zyklischer Verdichtung
${}_2\Delta\gamma$	[-]	Schubverzerrung aus zyklischem Kriechen für $N = 1$
${}_2\Delta\gamma_{zyk}$	[-]	Schubverzerrung aus zyklischem Kriechen für $N > 1$
$\Delta\tau (N)$	[kN/m ²]	Abminderung der Grenzmantelreibung am Pfahlmantel infolge zyklischer Verdichtung
κ	[-]	Modellparameter zur Beschreibung der Form der Hysterese
φ, φ'	[°]	charakteristischer Wert des Reibungswinkels im dränierten Zustand
ξ	[-]	Beruhigungskonstante
ξ	[-]	Schwellbeiwert
ξ_1, ξ_2	[-]	Streuungsfaktoren zur Ermittlung des charakteristischen Pfahlwiderstands aus Ergebnissen von Pfahlprobelastungen
λ	[-]	Neigungsbeiwert, Neigung der Kurve der Verschiebungsrate im doppelt-logarithmischen Maßstab
η_M	[-]	Modellfaktor bei auf Zug belasteten Mikropfählen
η_{zyk}	[-]	Faktor bei Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit für Pfähle unter zyklischer Belastung nach EA-Pfähle (2012), $\eta_{zyk} = 1,2$ bei Anwendung der Interaktionsdiagramme nach EA-Pfähle (2012) Anhang D2.1.1

ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
σ_{vo}	[kN/m ²]	totaler Überlagerungsdruck bei Auswertung von Drucksondierungen
σ_{v0}	[kN/m ²]	Anfangsnormalspannung bei zyklischen Einfeldversuchen
σ_v	[kN/m ²]	Normalspannung
τ	[kN/m ²]	Mantelreibung
τ_0	[kN/m ²]	Schubspannung am Pfahlmantel bei Beginn der axial zyklischen Belastung
τ_{mittel}	[kN/m ²]	Mittlere Schubspannung
τ_{min}	[kN/m ²]	Minimale Schubspannung
τ_{max}	[kN/m ²]	Maximale Schubspannung
τ_{max}	[kN/m ²]	Schubspannung zu Beginn der Entlastung
τ_{min}	[kN/m ²]	Schubspannung zu Beginn der Wiederbelastung
τ'_{zykl}	[kN/m ²]	Amplitude der Schubspannung
τ_{ult}	[kN/m ²]	Pfahlmantelreibung im Bruchzustand
τ_{zyk}	[kN/m ²]	zyklische Schubspannung

1 Einleitung

1.1 Anlass und Forschungsziele

Als Mikropfähle werden nach DIN EN 14199 ("Ausführung von besonderen technischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Pfähle mit kleinem Durchmesser (Mikropfähle)") im Bohrverfahren hergestellte Pfähle mit einem Schaftdurchmesser bis 300 mm oder im Verdrängungsverfahren hergestellte Pfähle mit Querschnittsabmessungen bis 150 mm bezeichnet. Mikropfähle werden axial zur Pfahlachse belastet. Belastungen quer zur Pfahlachse sind planmäßig nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 nicht zulässig. Klassische Einsatzgebiete von Mikropfählen sind Nachgründungen im Bestand unter beengten Platzverhältnissen, die Rückverankerung von Baugrubensohlen oder Bodenplatten gegen Auftrieb und die Verankerung von Spundwänden im Hafenaufbau bei entsprechender Kopfkonstruktion mit Stahlbetonbalken. In letzter Zeit werden Mikropfähle oder Mikropfahlgruppen auch verstärkt als Gründung von Windenergieanlagen oder Stützen im Verkehrswegebau eingesetzt. Während bei Nachgründungen von Gebäuden die auf die Mikropfähle einwirkenden Lasten in der Regel statisch sind, kommt es beispielsweise bei Rückverankerungen oder der Gründung von Windenergieanlagen häufig zu veränderlichen Einwirkungen auf die Mikropfähle. Die veränderlichen Einwirkungen resultieren aus schwankenden Grundwasserständen, Wind- und Wellenbelastung oder Überfahrten von Fahrzeugen und variieren hinsichtlich ihrer Belastungsrichtung (Zug oder Druck), ihrer Belastungsart (Schwell- oder Wechselbelastung), ihrer Lastamplitude und ihrer Frequenz. Bei Versuchen an Mikropfählen im Rahmen von Forschungsvorhaben werden diese unterschiedlichen veränderlichen Einwirkungen in der Regel durch eine sinusförmige axiale zyklische Belastung simuliert.

Seit den 1970er Jahren wurden die Auswirkungen axial zyklischer Einwirkungen auf das Verschiebungsverhalten und die Tragfähigkeit von Pfählen in einer Reihe von Forschungsarbeiten untersucht (u.a. CHAN / HANNA, 1980; KRAFT ET AL., 1981; GRUBER / KORECK / SCHWARZ, 1985). Die überwiegende Anzahl der zyklischen Versuche im Maßstab 1:1 oder im Modellmaßstab wurde dabei in Sand durchgeführt. Neben den bereits genannten Arbeiten gibt es eine Reihe weiterer Untersuchungen: In MALKUS (2000) werden mit Hilfe von Verbundscherversuchen die Bodenverschiebungen im Pfahlmantelbereich untersucht. In SCHWARZ (2002) werden auf Grundlage mehrerer Versuchsreihen mit Mikropfählen im Maßstab 1:1 analytische Berechnungsansätze vorgestellt, mit deren Hilfe die auftretenden Pfahlkopfverschiebungen mathematisch beschrieben werden können, und in der DIN 1054:2005 wurden auf Grundlage der Forschungsergebnisse von SCHWARZ (2002) erstmalig Abminderungsfaktoren für zulässige zyklische Lastspannen für Mikropfähle in Sand definiert. In KIRSCH / RICHTER (2011) und THOMAS (2011) werden analytische Berechnungsansätze zur Beschreibung des Verschiebungsverhaltens und zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen unter axial zyklischer Belastung vorgestellt, die überwiegend auf Versuchsergebnissen in nichtbindigen Böden beruhen (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.3 und 2.2.4).

Die Datenbasis zu Versuchen an Mikropfählen in bindigen Böden ist deutlich geringer. Am Norwegian Geotechnical Institute in Oslo wurden zyklische Versuchsreihen an Mikropfählen im Maßstab 1:1 in einem breiig-weichen und einem halbfesten Ton durchgeführt (KARLSRUD / HAUGEN, 1986; KARLSRUD ET AL., 1992) und von LEHANE / JARDINE / MCCABE (2003) wurden zwei einzelne Mikropfähle in einem breiig-weichen Ton zyklisch belastet. Neben diesen großmaßstäblichen Versuchen existiert noch eine Reihe von kleinmaßstäblichen Modellversuchen (u.a. POULOS, 1981; NARASIMHA / PRASAD, 1992; PRASAD / NARASIMHA, 1994; MCMANUS ET AL., 1994). Diese und weitere Ergebnisse von axial zyklischen Pfahl- und Ankerversuchen in bindigen Böden sind in Kapitel 3 dieser Forschungsarbeit ausführlicher dargestellt.

Die Ergebnisse aller Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass unter einer zyklischen Einwirkung akkumulierende Pfahlverschiebungen auftreten und die Tragfähigkeit eines Pfahles gegenüber einem Pfahl unter einer statischen Last in gleicher Größenordnung deutlich verringert sein kann. In der Regel wirken sich Wechsellasten ungünstiger auf das Trag- und Verschiebungsverhalten aus als Schwelllasten. Außerdem scheinen Mikropfähle in bindigen Böden auf Grund der Plastizität des Bodens unempfindlicher auf zyklische Belastungen zu reagieren als in nichtbindigen Böden (MALKUS, 2000; KEMPFERT, 2009).

Bei den bisher in der Literatur dokumentierten Forschungsarbeiten zum Tragverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden lag die erreichte Zyklenzahl meist deutlich unter 10.000 Zyklen, so dass Aussagen über die Langzeittragfähigkeit nur begrenzt möglich sind. Darüber hinaus wurde in einigen Fällen der charakteristische Pfahlwiderstand unter einer statischen Einwirkung gar nicht oder erst nach einer zyklischen Belastung bestimmt, so dass Aussagen über eine Reduzierung der Tragfähigkeit unter zyklischer Belastung nicht möglich sind. Teilweise wurden die Pfähle vor der zyklischen Belastung bereits statisch bis zum charakteristischen Pfahlwiderstand belastet, so dass die Verschiebungen unter zyklischer Belastung evtl. nicht mehr als repräsentativ angesehen werden können.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Kenntnisstand zum Trag- und Verschiebungsverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden zu erweitern und den Einfluss von Wechsel- und Schwellbelastungen auf die Pfahlverschiebungen und die Pfahltragfähigkeit auch für große Zyklenzahlen systematisch zu untersuchen, um dadurch eine Datenbasis für die Beschreibung des Verschiebungsverhaltens und die Entwicklung von Bemessungsmodellen in der Praxis zu schaffen.

Schwerpunktmäßig wurden dazu zyklische Zugschwell- und Wechsellastversuche an Mikropfählen im Maßstab 1:1 in einem mittelplastischen Ton steifer Konsistenz durchgeführt. Die Bearbeitung erfolgte weitgehend im Rahmen von zwei Forschungsprojekten, die einmal vom Deutschen Institut für Bautechnik und einem Konsortium von Spezialtiefbauunternehmen (BAUMBACH, 2010) und einmal von der Bundesanstalt für Wasserbau gefördert wurden. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Kapitel 4 dieser Arbeit dargestellt.

In Kapitel 5 werden die wesentlichen Ergebnisse aus den statischen, zyklischen und post-zyklischen Versuchen sowie die maßgebenden Einflussparameter auf das Pfahlverschiebungsverhalten zusammengefasst und, soweit möglich, mit den Ergebnissen anderer Forschungsvorhaben (siehe Kapitel 3) verglichen.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse ergänzend durchgeführter monotoner und zyklischer Einfachscherversuche an Bodenproben aus dem Versuchsfeld vorgestellt.

In Kapitel 7 werden auf Grundlage der Ergebnisse der statischen, zyklischen und post-zyklischen Pfahlversuche Hinweise zur Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit gegeben. Es wird aufgezeigt, inwieweit sich bestehende Berechnungsansätze zur Ermittlung der Pfahlverschiebungen unter axialer zyklischer Belastung eignen und welche Faktoren die notwendigen Eingangsparameter der jeweiligen Ansätze beeinflussen.

1.2 Mögliche Ursachen für das veränderte Tragverhalten von Pfählen unter zyklischer Belastung

In der Literatur werden unterschiedliche Hypothesen vertreten, warum es bei Pfählen infolge einer zyklischen Belastung einerseits zu einer Akkumulation der Pfahlverschiebungen kommt, und sich andererseits die Pfahltragfähigkeit verändert.

In Modellversuchen wurde z.B. von TURNER/KULHAWY (1990) beobachtet, dass sich Sandkörner bei einer Pfahlhebung unter den Pfahlfuß bewegen. Der Pfahl kann bei einer Entlastung nicht mehr in seine Ausgangslage zurückkehren. Mit jedem folgenden Belastungszyklus akkumulieren sich dann die Pfahlhebungen. Nach DATTA ET AL. (1980) kommt es infolge einer zyklischen Belastung zu einem Bruch von Bodenkörnern. Die Mantelreibung zwischen Boden und Pfahl nimmt auf Grund der feineren Bodenkörner ab und es kommt zu einer Zunahme der Pfahlverschiebungen. Nach MALKUS (2000) führt eine zyklische Belastung zu einer Umlagerung der Bodenkörner bzw. in bindigen Böden zu einer Umorientierung von Bodenpartikeln, was zu einer reduzierten Steifigkeit des Bodens führt und somit zu einer verminderten Pfahltragfähigkeit.

Häufig wird als Ursache für das veränderte Tragverhalten die Abnahme der Radialspannungen um den Pfahlmantel infolge kleiner Verschiebungen auf Grund der zyklischen Belastung angegeben (u.a. POULOS, 1981), TURNER/KULHAWY, 1990).

Untersuchungen von OSTERMAYER/WERNER (1972), OSTERMAYER (1996) oder WERNICK (1978) zeigen für axiale statische Belastungen an zylindrischen Verpresskörpern, dass infolge der Krafteinleitung eine Dilatanz in der Scherfuge um den Verpresskörper auftritt. Diese Dilatanz verursacht eine Erhöhung der Radialspannungen um den Verpresskörper und bewirkt eine zusätzliche Verspannung des Verpresskörpers im Boden. Diese Radialspannungen können um ein Vielfaches größer sein, als die aus der Bodenauflast resultierenden Spannungen.

In THOMAS (2011) wurde mit Hilfe eines optischen Messverfahrens (Particle Image Velocimetry) in Sanden infolge von Kornumlagerungen die Entwicklung der Scherfuge am Pfahlmantel und des angrenzenden Scherbandes infolge zyklischer Einwirkungen beschrieben. Unter Schwelllasten wurde in Abhängigkeit vom zyklischen Lastniveau und der Ausgangslagerungsdichte entweder eine Auflockerung in der Scherfuge und eine Verdichtung des Bodens im Scherband beobachtet (Fall 1) oder eine Verdichtung in der Scherfuge und eine Auflockerung im Scherband (Fall 2). In Fall 1 nehmen die Radialspannungen im Boden zu, was zu einer Abnahme der Verschiebungsraten und zu einer Steigerung der Pfahltragfähigkeit im Anschluss an eine zyklische Belastung führt. Im Fall 2

nehmen die Radialspannungen und die Scherfestigkeit des Bodens ab, wodurch es zu einem Anstieg der Verschiebungsrate und einer Abnahme der post-zyklischen Pfahltragfähigkeit kommt. Unter Wechsellasten werden ebenfalls Kornumlagerungen gemäß Fall 2 beobachtet. Zusätzlich kann sich infolge der zyklischen Belastung durch einen Anstieg der Tangentialspannungen im Scherband ein Druckring ausbilden, was zu einem schlagartigen Abfall der Radialspannungen innerhalb des Druckrings und damit zu einem plötzlichen Pfahlversagen führt.

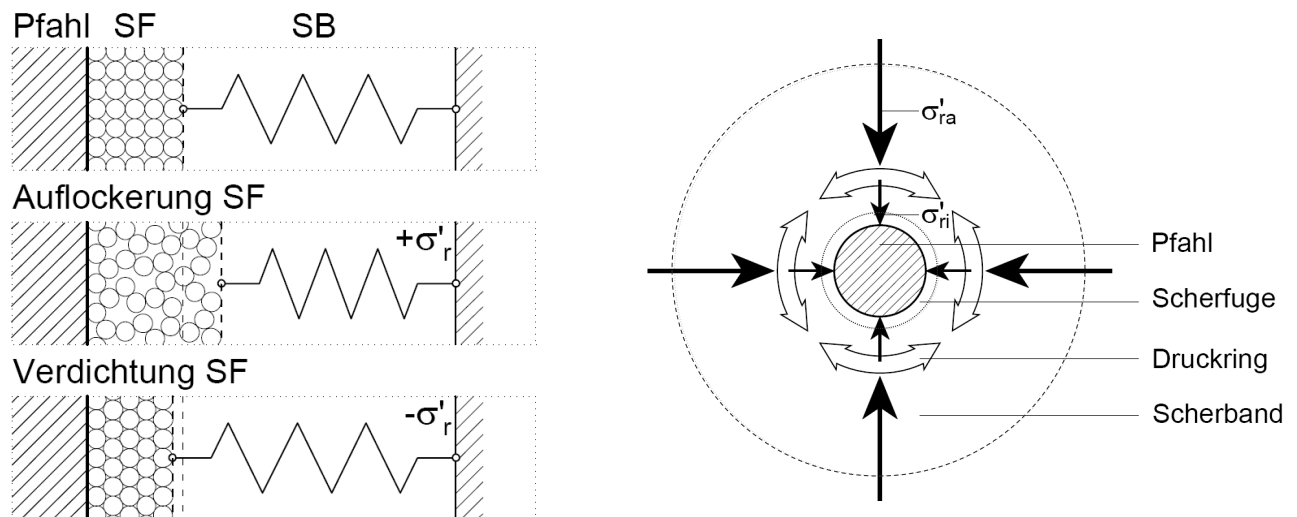


Abbildung 1.1: Modellvorstellungen zum Tragverhalten unter Schwell- und Wechselbelastung in nichtbindigen Böden (aus THOMAS, 2011): SF: Scherfuge, SB: Scherband

Bei zyklischen Scherversuchen an wassergesättigten Tonproben (u.a. ANDERSEN ET AL., 1976) zeigt sich mit zunehmender Zyklenzahl eine Akkumulation von Porenwasserüberdrücken. Tritt dies im Pfahlnahbereich auf, reduzieren sich hier zusätzlich die effektiven Radialspannungen.

Auf Grund von Pfahlversuchen in bindigen Böden gehen KARLSRUD/HAUGEN (1986) davon aus, dass bei Schwelllasten Kriechvorgänge im Boden zu einer Akkumulation der Pfahlverschiebungen führen, da die Verschiebungsspannen innerhalb eines Zyklus über die Zyklanzahl konstant bleiben. Bei Wechsellasten beobachteten sie eine Zunahme der Verschiebungsspannen mit der Zyklanzahl und leiten daraus eine Abnahme der Steifigkeit des Systems Pfahl-Boden unter zyklischen Wechsellasten ab, was ebenfalls zu einer Akkumulation der Pfahlverschiebungen führt.

1.3 Begrifflichkeiten

Die Beschreibung von zyklischen Einwirkungen auf Mikropfähle erfolgt in der Literatur meist über die Angabe des mittleren Lastniveaus F_{mittel} und der zyklischen Lastamplitude F'_{zykl} (siehe Abbildung 1.2 und Abbildung 1.3).

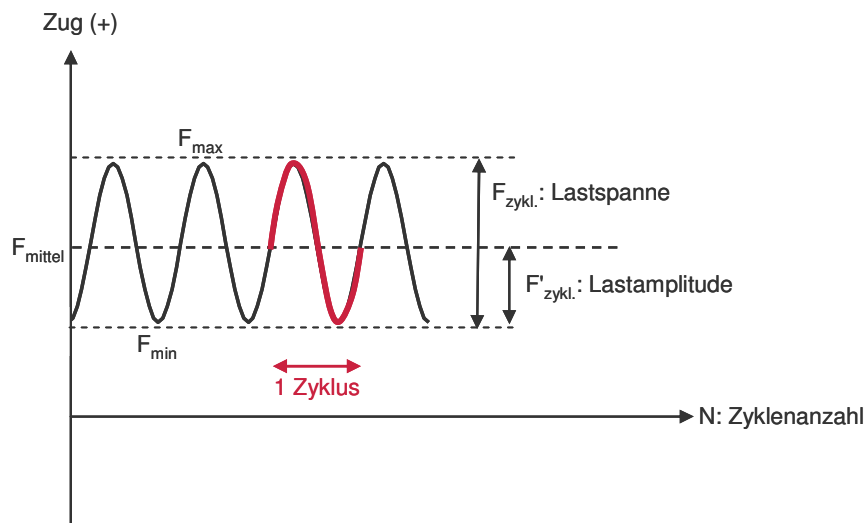


Abbildung 1.2: Definitionen Einwirkungen bei Schwellbelastung

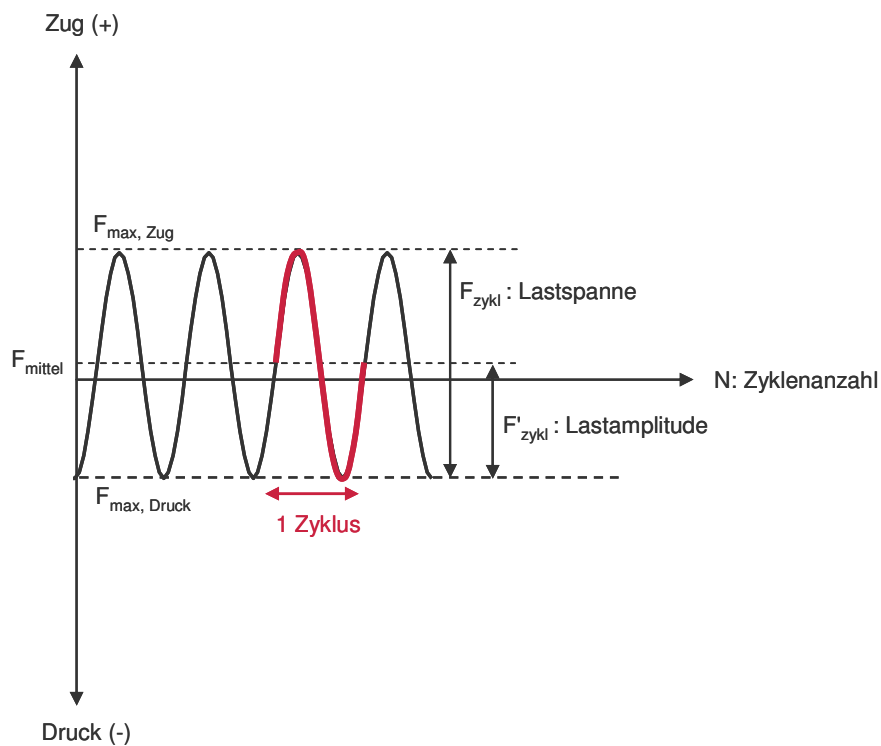


Abbildung 1.3: Definitionen Einwirkungen bei Wechselbelastung

In so genannten Interaktionsdiagrammen kann jeder kraftgesteuerte zyklische Versuch als ein Punkt dargestellt werden (siehe Abbildung 1.4). Dabei wird auf der Abszisse das Verhältnis des mittleren Lastniveaus F_{mittel} zum charakteristischen Pfahlwiderstand unter statischer Einwirkung R_k angetragen und auf der Ordinate das Verhältnis der zyklischen Lastamplitude F'_{zykl} zum charakteristischen Pfahlwiderstand unter statischer Einwirkung R_k . Die Diagonale von links unten nach rechts oben stellt dabei die Grenze zwischen Schwell- und Wechsellasten dar. Versuche unterhalb dieser Diagonale sind Schwelllastversuche, Versuche oberhalb Wechsellastversuche. Die Diagonale von links oben nach rechts unten gibt die Kombinationen für das mittlere Lastniveau und

die zyklische Lastamplitude an, die möglich sind, ohne dass der charakteristische Pfahlwiderstand unter statischer Einwirkung überschritten wird.

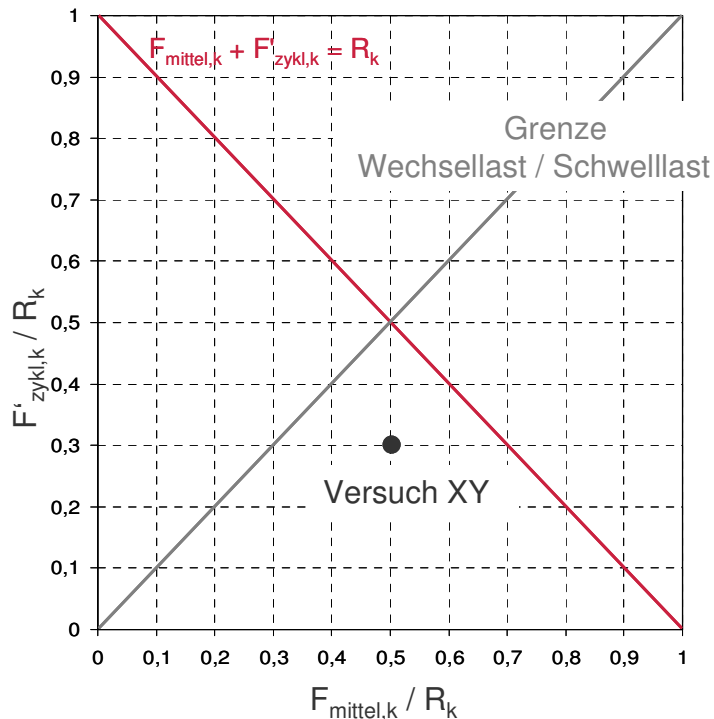


Abbildung 1.4: Zyklisches Interaktionsdiagramm

Die während eines Zyklus auftretende maximale Verschiebungsdifferenz wird als Verschiebungsspanne s_{zykl} und der Mittelwert der Verschiebungsspanne als mittlere Verschiebung s_{mittel} bezeichnet (siehe Abbildung 1.5). In der Literatur (z.B. THOMAS, 2011) wird die während eines Zyklus auftretende Verschiebung häufig auch als elastische oder reversible Verschiebung bezeichnet und die mittlere Verschiebung als plastische Verschiebung, da in der Regel mit zunehmender Zyklenzahl eine Akkumulation der mittleren Verschiebungen zu beobachten ist.

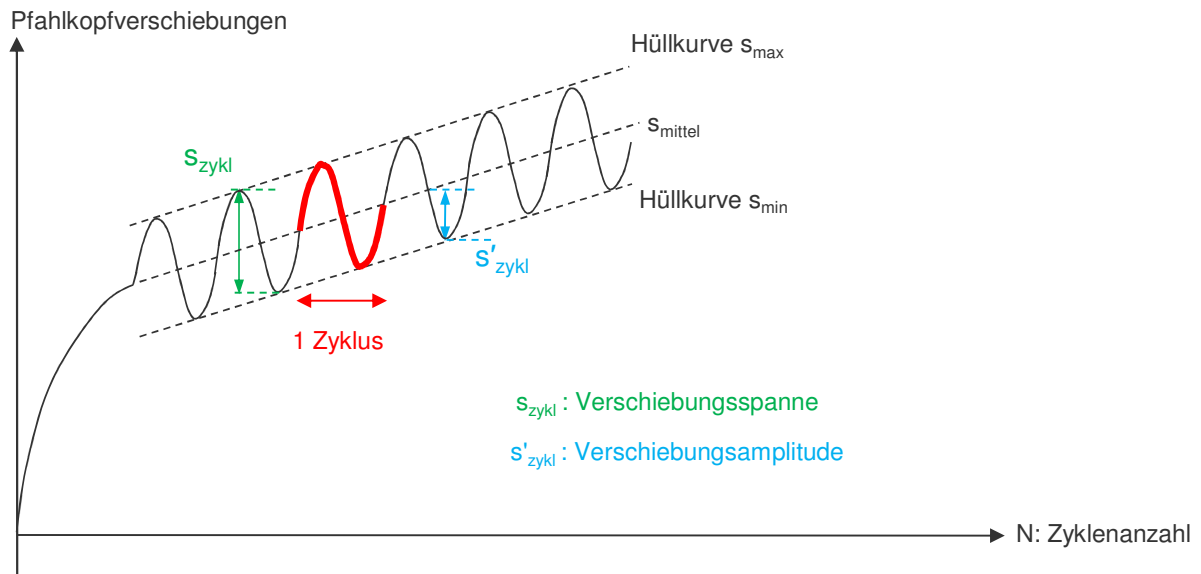


Abbildung 1.5: Definitionen Verschiebungen

2 Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit

2.1 Statische Einwirkungen

Für Mikropfähle ergibt sich der Bemessungswert des Pfahlwiderstands im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 zu:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_t \text{ (bzw. } \gamma_{s,t}) \cdot \eta_M} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit

R_d	Bemessungswert des Pfahlwiderstands
R_k	charakteristischer Wert des Pfahlwiderstands
γ_t bzw. $\gamma_{s,t}$	Teilsicherheitsbeiwert für Pfahlwiderstände (Druck bzw. Zug)
η_M	Modellfaktor (nur bei Zugpfählen)

Für Mikropfähle sind zur Ermittlung des charakteristischen Pfahlwiderstands stets an 3 % der Pfähle, mindestens aber an 2 Pfählen statische Pfahlprobebelastungen durchzuführen. Aus den bei der Pfahlprobebelastung gemessenen Pfahlwiderständen $R_{c,m}$ bzw. $R_{t,m}$ wird dann unter Berücksichtigung von Streuungsfaktoren ξ_1 bzw. ξ_2 der charakteristische Pfahlwiderstand ermittelt. Der Modellfaktor η_M ist für auf Zug belastete Mikropfähle zu 1,25 definiert. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_t bzw. $\gamma_{s,t}$ ist zu 1,10 (Druckpfähle) bzw. 1,15 (Zugpfähle) festgelegt.

Der Bemessungswert der Beanspruchungen ergibt sich für Druckpfähle zu

$$F_{c,d} = F_{G,k} \cdot \gamma_G + F_{c,Q,rep} \cdot \gamma_Q \quad (\text{Gl. 2.2})$$

und für Zugpfähle zu

$$F_{t,d} = F_{t,G,k} \cdot \gamma_G + F_{t,Q,rep} \cdot \gamma_Q - F_{c,G,k} \cdot \gamma_{G,inf} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

mit

$F_{c,d}$	Bemessungswert der axialen Druckbelastung
$F_{t,d}$	Bemessungswert der axialen Zugbelastung
$F_{G,k}$	charakteristischer Wert der Druckbeanspruchung infolge von ungünstigen ständigen Einwirkungen
$F_{c,Q,rep}$	charakteristischer bzw. repräsentativer Wert der Druckbeanspruchung infolge von ungünstigen veränderlichen Einwirkungen
$F_{t,G,k}$	charakteristischer Wert der Zugbeanspruchung infolge von ungünstigen ständigen Einwirkungen

$F_{t,Q,rep}$	charakteristischer bzw. repräsentativer Wert der Zugbeanspruchung infolge von ungünstigen veränderlichen Einwirkungen
$F_{c,G,k}$	charakteristischer Wert einer gleichzeitig wirkenden Druckbeanspruchung eines Zugpfahls infolge von ständigen Einwirkungen
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für eine ständige Einwirkung im Grenzzustand GEO-2
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für eine ungünstige veränderliche Einwirkung im Grenzzustand GEO-2
$\gamma_{G,inf}$	Teilsicherheitsbeiwert für eine günstige ständige Einwirkung im Grenzzustand GEO-2

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist der Nachweis zu führen, dass der Bemessungswert der Einwirkungen kleiner ist als der Bemessungswert des Pfahlwiderstands:

$$F_{c,d} \text{ bzw. } F_{t,d} \leq R_d \quad (\text{Gl. 2.4})$$

In der Regel wird bei Mikropfählen auch für auf Druck belastete Pfähle bei der Bemessung für den charakteristischen Pfahlwiderstand der charakteristische Herauszieh-Widerstand des Pfahles $R_{t,k}$ angesetzt und ein eventuell wirkender Pfahlspitzenwiderstand nicht berücksichtigt.

Der Wert des Pfahlwiderstands im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird über eine zulässige Pfahlkopfverschiebung anhand der charakteristischen Pfahlwiderstands-Verschiebungslinie festgelegt.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit darf die charakteristische Einwirkung nicht den Wert des anhand der Widerstands-Verschiebungslinie für eine zulässige Verschiebung festgelegten Pfahlwiderstands überschreiten, oder die infolge der charakteristischen Beanspruchungen auftretende Pfahlverschiebung muss kleiner sein als eine vorgegebene zulässige Setzung.

2.2 Zyklische und wiederholte Einwirkungen

In DIN EN 1997-1:2009 wird allgemein darauf hingewiesen, dass *"wenn Probelastungen nicht praktikabel sind, weil die Modellierung der Lastwechsel schwierig ist (z.B. zyklische Belastung) [...] sehr vorsichtige Bemessungswerte für die Materialeigenschaften angesetzt werden"* sollten (Abschnitt 7.5.1 (3)) und *"die äußerst nachteilige Wirkung zyklischer und wiederholter Belastung auf den Herauszieh-Widerstand [...] berücksichtigt werden"* muss (Abschnitt 7.6.3.1 (9) P).

Nach DIN 1054:2010 kann *"bei axial zyklisch beanspruchten Pfahlgründungen mit erheblichen charakteristischen Schwell- und/oder Wechsellasten [...] eine starke Verschlechterung des Pfahltragverhaltens eintreten. Die mögliche Verschlechterung nimmt tendenziell mit der Größe der Belastung und der Anzahl der Lastzyklen zu"*. Bei einer entsprechenden zyklischen Beanspruchung muss die zyklische Beanspruchung im Gebrauchszustand zusätzlich zu einer statischen Pfahlprobelastung möglichst realistisch nachgeahmt werden. Auf Grundlage dieser Untersuchung ist dann ein charakteristischer Pfahlwiderstand für eine zyklische Beanspruchung zu definieren (Abschnitt zu 7.5.1 A (3a)).

In den Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" (EA-Pfähle, 2012) wird auf Grund von Literaturlauswertungen angegeben, dass ein stark verändertes Tragverhalten unter zyklischer Belastung auftreten kann, sobald die zyklische Lastamplitude größer als 10 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung ist.

Vorschläge zur Nachweisführung für axial zyklisch belastete Pfähle finden sich in den Normen nicht, es wird jedoch auf die Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" verwiesen. In der aktuellen Ausgabe (EA-Pfähle, 2012) sind in Anhang D verschiedene Ansätze zur Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit beschrieben.

2.2.1 Interaktionsdiagramm (nach EA-Pfähle, 2012)

Zum Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird in Anhang D2.1.1 der EA-Pfähle (2012) für axial zyklisch belastete Pfähle die Abminderung des Pfahlwiderstands unter zyklischer Belastung aus Interaktionsdiagrammen ermittelt. Im Interaktionsdiagramm sind für verschiedene Zyklenzahlen maximal mögliche zyklische Lastkombinationen angegeben (siehe Abbildung 2.1). Für eine zyklische Lastkombination (im Beispiel: $F_{\text{mittel},k} / R_{\text{ult}} = 0,4$ und $F'_{\text{zykl},k} / R_{\text{ult}} = 0,2$) ergibt sich die Abminderung des Pfahlwiderstands für diese zyklische Belastung und eine bestimmte Zyklenzahl (im Beispiel: $N = 100$) zu

$$\Delta R_{\text{zyk}} = \mu \cdot \frac{I_3}{(I_1 + I_2 + I_3)} \cdot R_{\text{ult}} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

Es gilt:

$$\mu = \frac{I_1}{(I_1 + I_2)} \text{ und}$$

$R_{\text{ult}} = (R_{t,m})_{\text{mitt}}$ bzw. $R_{\text{ult}} = (R_{c,m})_{\text{mitt}}$ (nach EA-Pfähle (2012) bei Bemessung des Pfahles anhand von Ergebnissen aus Pfahlprobelastungen (bei Mikropfählen erforderlich) zu ermitteln)

mit

- I_1, I_2, I_3 Längenverhältnisse nach Abbildung 2.1
- $(R_{t,m})_{\text{mitt}}$ Mittelwert der Einzelversuchsergebnisse aus Pfahlprobelastungen auf Zug bzw.
- $(R_{c,m})_{\text{mitt}}$ Druck (bei Mikropfählen wird in der Regel der Widerstand auf Zug bei der Bemessung angesetzt)

Es ist der Nachweis zu führen, dass der Bemessungswert der Einwirkungen kleiner ist als der Bemessungswert des Pfahlwiderstands unter zyklischer Belastung. Für das Beispiel wird von einer axial zyklischen Zugschwellbelastung des Pfahls ausgegangen. Es muss gelten:

$$F_{t,d} = F_{\text{mittel},k} \cdot \gamma_G + F'_{\text{zykl},k} \cdot \gamma_Q \leq R_{t,d} = \frac{R_{t,k}}{\gamma_{s,t}} - \eta_{\text{zyk}} \cdot \Delta R_{\text{zyk}} \quad (\text{Gl. 2.6})$$

mit

$\eta_{\text{zyk}} = 1,2$ bei Anwendung der Interaktionsdiagramme nach EA-Pfähle (2012) Anhang D2.1.1

Voraussetzung für diese Art der Nachweisführung ist die Ermittlung des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung. Der Nachteil dieses Nachweisverfahrens ist, dass für den entsprechenden Boden die möglichen zyklischen Lastkombinationen für bestimmte Zyklenzahlen bekannt sein müssen. Diese sind entweder über aufwändige zyklische Pfahlversuche zu bestimmen oder näherungsweise der Literatur (z.B. KEMPFERT, 2009) zu entnehmen.

Für bindige Böden ist die Datenbasis zur Ableitung solcher Grenzlinien insbesondere für Zyklenzahlen von mehr als 1.000 derzeit noch zu gering (siehe auch Kapitel 3), so dass zur Anwendung des Verfahrens in bindigen Böden für den jeweiligen Anwendungsfall zyklische Pfahlversuche notwendig sind.

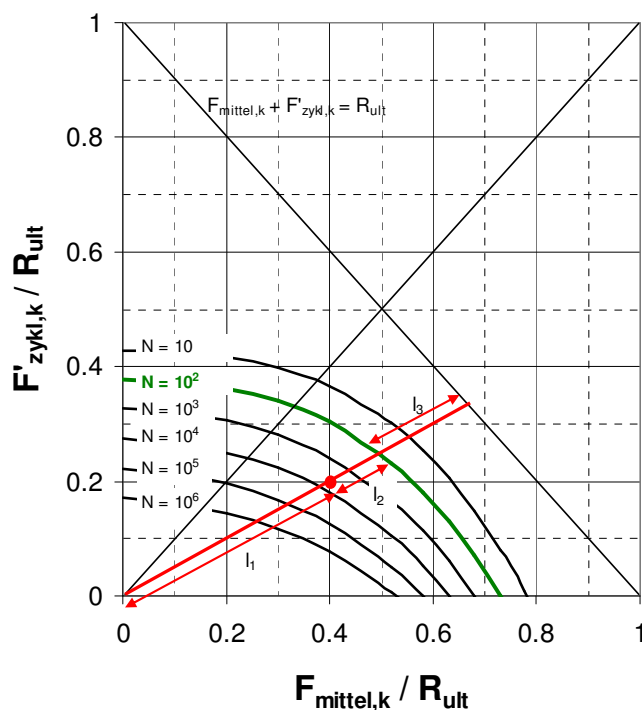


Abbildung 2.1: Beispiel für Interaktionsdiagramm für nichtbindige Böden nach KEMPFERT (2009)

2.2.2 Verschiebungsakkumulation nach empirischem Ansatz

In der Literatur (z.B. SCHWARZ, 2002) werden drei Formen zur Beschreibung des Verschiebungsverhaltens von Pfählen unter zyklischer Belastung unterschieden (siehe Abbildung 2.2). Im Fall (1) nähern sich die Pfahlverschiebungen für eine unendlich große Zyklenanzahl einer horizontalen Asymptote an. Dieses Verhalten wird als "zyklische Beruhigung" oder "shakedown" bezeichnet. Im Fall (2) weist die Verschiebungskurve bei Auftragung über die Zyklenanzahl im halblogarithmischen Maßstab einen linearen Verlauf auf. Dieses Verhalten wird als "zyklische (logarithmische) Beruhigung" bezeichnet. Der über-log-linear zunehmende Verschiebungsverlauf im Fall (3) wird als "zyklisches (schrittweises) Versagen" bezeichnet.

Die Verschiebungen können mit Hilfe von Potenzfunktionen beschrieben werden:

Fall (2)

$$s(N) = s_1 + s_1^0 \cdot \ln N \quad (\text{Gl. 2.7})$$

mit

- s(N): Verschiebung nach N Zyklen
- s₁: Verschiebung nach dem 1. Zyklus
- s₁⁰: Verschiebungsrate bei Zyklus N = 1

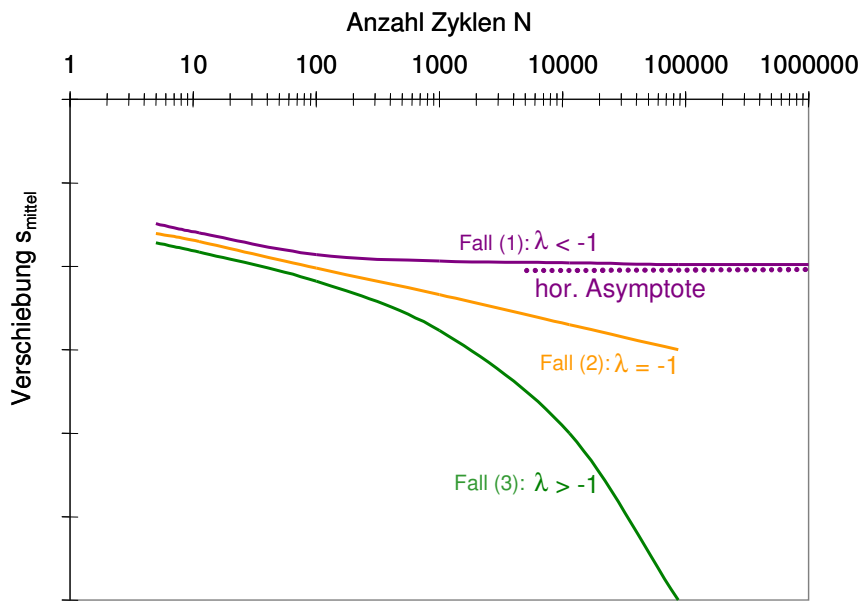


Abbildung 2.2: Verschiebungsverlauf unter zyklischer Belastung

Fall (1) und (3):

$$s(N) = s_1 + \frac{s_1^0}{(1 + \lambda)} \cdot (N^{1+\lambda} - 1) \quad (\text{Gl. 2.8})$$

mit

- s(N): Verschiebung nach N Zyklen
- s₁: Verschiebung nach dem 1. Zyklus
- s₁⁰: Verschiebungsrate bei Zyklus N = 1
- λ: Neigungsbeiwert: λ < 0: Abnahme der Verschiebungsrate
λ > 0: Zunahme der Verschiebungsrate

Der Neigungsbeiwert λ gibt dabei die Steigung der Geraden der über die Zyklenzahl aufgetragenen Verschiebungsrate im doppelt-logarithmischen Maßstab an. Dieser Neigungsbeiwert ist u.a. von der Bodenart, der Pfahlgeometrie und der Größe der zyklischen Belastung abhängig und somit für den jeweiligen Anwendungsfall anhand von entsprechenden Pfahlversuchen zu bestimmen, da Ergebnisse aus der Literatur starke Streubreiten aufweisen (siehe z.B. KEMPFFERT, 2009).

2.2.3 Näherungsverfahren nach KIRSCH / RICHTER (2011)

In KIRSCH / RICHTER (2011) wird für die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit axial zyklisch belasteter Pfähle ein Berechnungsansatz vorgeschlagen, der als Eingangsparameter lediglich Werte aus statischen und zyklischen Laborversuchen am jeweiligen Boden erfordert und keine statischen oder zyklischen Pfahlversuche.

Ein ausführliches Berechnungsbeispiel findet sich in Anhang D2.2.3 der EA-Pfähle (2012).

2.2.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die Ermittlung der Abminderung der Grenzmantelreibung am Pfahlmantel infolge zyklischer Verdichtung ergibt sich zu:

$$\Delta\tau(N) = 2 \cdot G_W \cdot \tan \delta \cdot \Delta D^* \cdot \left(\gamma_{zyk} \cdot \left(\frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \gamma_{grenz} \left[\left(\frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} \right)^2 - 1 \right] \right) \quad (\text{Gl. 2.9})$$

mit

$$\gamma_{zyk} = \frac{\tau_{zyk}}{G_{zyk}}$$

$$\tau_{zyk} = \frac{F'_{zykl}}{A_s}$$

$$\tan \delta = \tan \varphi \cdot \frac{(F_{mittel} + F'_{zykl})}{(R_{t,k} - \Delta\tau(N) \cdot A_s)}$$

mit

φ Reibungswinkel des Bodens

und

$$\Delta D^* = \Delta D \cdot \log(N+1) = 0,5 \cdot I_D^{-2,32} \cdot \log(N+1)$$

mit

N	Zyklenanzahl
G_W	Schubmodul bei Wiederbelastung
δ	aktivierter Wandreibungswinkel
I_D	initiale Lagerungsdichte
γ_{zyk}	zyklische Scherdehnung
τ_{zyk}	zyklische Schubspannung
A_s	Pfahlmantelfläche
G_{zyk}	Schubmodul für zyklische Belastung, abhängig von γ_{zyk}
γ_{grenz}	Grenzscherdehnung
α	Dilatationsparameter

Der Abminderungswert für den Pfahlmantelwiderstand ergibt sich zu

$$\Delta R_{zyk} = \Delta\tau(N) \cdot A_s$$

Der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist nach Gl. 2.6 mit dem Abminderungsfaktor $\eta_{zyk} = 1,2$ zu führen.

Das Verfahren erfordert ein iteratives Vorgehen, da zunächst der aktivierte Wandreibungswinkel, der von der Reduktion der Grenzmantelreibung abhängig ist, geschätzt werden muss, um die Abminderung der Grenzmantelreibung nach Gleichung 2.9 ermitteln zu können. Außerdem wird vereinfachend angenommen, dass die Schubspannungen infolge der Einwirkungen konstant über die gesamte Pfahlmantelfläche sind.

2.2.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die auf Grund zyklischer Einwirkungen auftretenden Schubverzerrungen werden nach KIRSCH / RICHTER (2011) für nichtbindige Böden in einen Anteil infolge zyklischer Verdichtung und einen Anteil infolge zyklischen Kriechens aufgeteilt.

Der Anteil aus zyklischer Verdichtung ergibt sich zu

$${}_1\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$$

mit

$$\gamma_2 = \frac{\kappa_2}{\left(1 - \frac{\kappa_2}{c_1}\right)} \cdot \gamma_r \quad \text{und} \quad \gamma_1 = \frac{\kappa_1}{\left(1 - \frac{\kappa_1}{c_1}\right)} \cdot \gamma_r$$

mit

c_1 Konstante zur Beschreibung der Krümmung der Hysterese der Erstbelastung

und

$$\kappa_1 = \frac{(\tau_{mitt} + \tau_{zyk})}{\tau_{ult}} \quad \text{und} \quad \kappa_2 = \frac{(\tau_{mitt} + \tau_{zyk})}{(\tau_{ult} - \Delta\tau(N))}$$

mit

$$\tau_{mitt} = \frac{F_{mittel}}{A_s} \quad \text{und} \quad \tau_{ult} = \frac{R_{t,k}}{A_s} \quad \text{und} \quad \Delta\tau(N) \text{ aus Gl. 2.9}$$

Die Schubverzerrung aus zyklischem Kriechen ergibt sich für den ersten Lastzyklus zu

$${}_2\Delta\gamma = \gamma_r \cdot \left[\frac{\kappa}{\left(1 - \frac{\kappa}{c_2}\right)} - \frac{\kappa}{\left(1 + \frac{\kappa}{c_2}\right)} \right]$$

mit

$$k = \frac{(F_{\text{mittel}} + F'_{\text{zyk}})}{R_{t,k}}$$

und

c_2 Konstante zur Beschreibung der Krümmung der Hysterese für $N > 1$

Die Schubverzerrung für alle weiteren Zyklen kann mit Hilfe des Ausdrucks

$${}_2\Delta\gamma_{\text{zyk}} = {}_2\Delta\gamma \cdot (1 + \zeta \cdot \lg(N))$$

mit

ζ Beruhigungskonstante

berechnet werden.

Die Verschiebung des Pfahles infolge einer axial zyklischen Einwirkung ergibt sich daraus zu

$$s_{\text{zykl}} = ({}_1\Delta y + {}_2\Delta y_{\text{zyk}}) \cdot r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)$$

mit

r_0 Pfahlradius

r_m Einflussradius der zyklischen Belastung

Die Eingangswerte für das Verfahren nach KIRSCH / RICHTER (2011) müssen aus statischen und zyklischen Laborversuchen (z.B. Einfachscherversuche und Resonant Column-Versuchen) ermittelt werden. Zur Ermittlung des Schubmoduls wird dabei, unter der Annahme, dass näherungsweise elastisches Verhalten auf Grund kleiner Schubverzerrungen vorliegt, auf Näherungen aus der Baugrunddynamik zurückgegriffen. Außerdem wird davon ausgegangen, dass eine Entwicklung von Porenwasserdrücken nicht maßgebend ist. Eine Abschätzung verschiedener Parameter wie z.B. der Abschätzung des Einflussradius einer zyklischen Belastung für Sande ist in KIRSCH / RICHTER (2011) angegeben.

Das vorgeschlagene Näherungsverfahren wurde bisher ausschließlich anhand von zyklischen Pfahlversuchen in nichtbindigen Böden validiert. Die Übertragbarkeit auf feinkörnige Böden ist derzeit auf Grund der Abhängigkeit des Ansatzes von der Lagerungsdichte des Bodens nicht möglich.

2.2.4 Näherungsverfahren nach THOMAS (2011)

Mit dem in THOMAS (2011) beschriebenen Berechnungsmodell kann eine Widerstands-Verschiebungslinie für eine Kombination aus statischen, axial zyklischen und post-zyklischen statischen Einwirkungen beschrieben werden. Mit Hilfe dieser Widerstands-Verschiebungslinie können dann die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß Gleichung 2.6 und der Gebrauchstauglichkeit geführt werden. In diesem Abschnitt wird ausschließlich auf die Pfahlkopfverschiebungen in einem homogenen Boden unter Berücksichtigung des

Pfahlmantelwiderstands eingegangen, ein ausführlicheres Berechnungsbeispiel unter gleichzeitiger Berücksichtigung statischer und post-zyklischer statischer Einwirkungen sowie der Berücksichtigung eines Pfahlspitzenwiderstands findet sich z.B. im Anhang D2.2.4 der EA-Pfähle (2012).

Die Pfahlkopfverschiebungen unter statischer Belastung ergeben sich zu

$$s_s = \frac{\tau_0 \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \cdot \ln \left(\frac{\left(\frac{r_m}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \cdot \left(\frac{\tau_0}{\tau_{ult}} \right)^{g_s}}{\left(1 - R_{fs} \cdot \left(\frac{\tau_0}{\tau_{ult}} \right)^{g_s} \right)} \right) \quad (\text{Gl. 2.10})$$

mit

τ_0	Schubspannung am Pfahlmantel bei Beginn der axial zyklischen Belastung
r_0	Pfahlradius
G_0	Schubmodul bei kleinen Dehnungen
r_m	Einflussradius der Einwirkung
g_s	empirischer Modellparameter
R_{fs}	empirischer Modellparameter
τ_{ult}	Pfahlmantelreibung im Bruchzustand

Die Pfahlkopfverschiebungen unter axial zyklischer Belastung werden durch eine Folge von Ent- und Wiederbelastungen beschrieben.

Bei Entlastung ergeben sich die Verschiebungen zu

$$s_{s,E}(N) = s_{max} + \frac{(\tau_0 - \tau_{max}) \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \cdot \ln \left(\frac{\left(\frac{r_m}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \cdot \left(\frac{|\tau_0 - \tau_{max}|}{\kappa \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}}{\left(1 - R_{fs} \cdot \left(\frac{|\tau_0 - \tau_{max}|}{\kappa \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s} \right)} \right) \quad (\text{Gl. 2.11})$$

mit

N	Zyklenanzahl
s_{max}	Verschiebung des Pfahlmantels zu Beginn der Entlastung
τ_{max}	Schubspannung zu Beginn der Entlastung
κ	Modellparameter zur Beschreibung der Form der Hysterese
β_N	Modellparameter zur Beschreibung der Änderung der Pfahltragfähigkeit

Bei Wiederbelastung ergeben sich die Verschiebungen zu

$$s_{s,W}(N) = s_{min} + \frac{(\tau_0 - \tau_{min}) \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \cdot \ln \left(\frac{\left(\frac{r_m}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \cdot \left(\frac{|\tau_0 - \tau_{min}|}{\kappa \cdot \delta_N \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}}{\left(1 - R_{fs} \cdot \left(\frac{|\tau_0 - \tau_{min}|}{\kappa \cdot \delta_N \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s} \right)} \right) \quad (\text{Gl. 2.12})$$

mit

s_{min}	Verschiebung des Pfahlmantels zu Beginn der Wiederbelastung
τ_{min}	Schubspannung zu Beginn der Wiederbelastung
δ_N	Modellparameter zur Beschreibung der Akkumulation der plastischen Verschiebungen

mit

$$\delta_N = 1 - \frac{1}{a \cdot N^b} \quad \text{bei abnehmender Verschiebungsrate}$$

und

$$\delta_N = \delta_{N-1} \cdot \left(1 + \frac{1}{c} \right)^N \quad \text{bei progressiv zunehmender Verschiebungsrate}$$

mit

a , b und c empirische Modellparameter

Bei diesem Verfahren werden die Schubspannungen in einem homogenen Boden konstant über die gesamte Mantelfläche angenommen. Die Schubspannung τ_{ult} kann über den Pfahlwiderstand im Bruchzustand aus statischen Pfahlprobebelastungen berechnet werden. Die Modellparameter g_s und R_{fs} sind anhand von statischen Pfahlprobebelastungen so zu ermitteln, dass die berechneten Pfahlkopfverschiebungen nach Gleichung 2.10 mit den gemessenen Pfahlkopfverschiebungen aus einer statischen Pfahlprobebelastung übereinstimmen. Für den Einflussradius der Belastung wird in THOMAS (2011) für bindige Böden der Ansatz von $r_m = 2 \cdot r_0$ empfohlen. Der Schubmodul G_0 ist aus Laborversuchen zu ermitteln oder abzuschätzen.

Die Modellparameter zur Beschreibung der Last-Verschiebungskurve unter axial zyklischer Belastung κ , β_N , δ_N , a , b und c sind anhand zyklischer Pfahlversuche zu bestimmen. THOMAS (2011) gibt Anhaltswerte für die Größe der Modellparameter, die auf der Auswertung von zyklischen Modellversuchen in überwiegend grobkörnigen Böden beruhen. Einzelne Versuche wurden auch in gemischtkörnigen oder feinkörnigen Böden durchgeführt.

Die vorgestellten Ansätze zur Abschätzung der Pfahlverschiebungen unter axial zyklischer Belastung wurden fast ausschließlich auf Grundlage von Versuchen in nichtbindigen Böden entwickelt. In Kapitel 7 dieser Arbeit wird daher untersucht, inwieweit sich diese Ansätze auch zur Abschätzung von Pfahlverschiebungen axial zyklisch belasteter Mikropfähle in bindigen Böden eignen.

3 Literaturstudie zu Versuchen an Pfählen und Ankern unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden

Wie bereits in Abschnitt 1.1 erwähnt, beruhen die Erkenntnisse zum Trag- und Verschiebungsverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden im Wesentlichen auf zwei Versuchsreihen im Maßstab 1:1 (KARLSRUD / HAUGEN, 1986; KARLSRUD ET AL., 1992 und LEHANE / JARDINE / MCCABE, 2003) sowie einer Reihe von Modellversuchen (u.a. POULOS, 1981; NARASIMHA / PRASAD, 1992 und 1994; MCMANUS ET AL., 1994).

Im Folgenden werden zusätzlich noch die Ergebnisse aus zyklischen Versuchen an Pfählen mit größeren Durchmessern oder Querschnittsabmessungen und Verpressankern in bindigen Böden zusammengefasst.

In der vorliegenden Auswertung werden keine zyklischen Einzelversuche an Pfählen im Rahmen von Bauprojekten berücksichtigt, da auf Grund der meist sehr inhomogenen Baugrundverhältnisse und der Singularität der Ergebnisse keine allgemeinen Schlussfolgerungen zum Trag- und Verschiebungsverhalten von (Mikro-)Pfählen unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden möglich sind. Außerdem werden keine Versuche berücksichtigt, bei denen die Baugrundeigenschaften, die Pfahlabmessungen oder der charakteristische Pfahlwiderstand unter statischer Belastung nicht ermittelt wurden.

3.1 Versuche an Mikropfählen im Maßstab 1:1

Am Norwegian Geotechnical Institute (NGI) wurden in den 1980er und 1990er Jahren auf den Versuchsfeldern Haga (Norwegen) und Tilbrook (Großbritannien) statische und zyklische Versuche mit Mikropfählen in bindigen Böden durchgeführt (KARLSRUD / HAUGEN, 1986; KARLSRUD ET AL., 1992). Bei den Mikropfählen handelte es sich um im Verdrängungsverfahren eingebrachte Stahlrohrpfähle. Die wichtigsten Bodeneigenschaften der Versuchsfelder sowie die Ergebnisse der statischen und zyklischen Versuche sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

An jedem der Pfähle wurden zunächst eine statische Pfahlprobebelastung, anschließend zyklische Schwell- oder Wechsellastversuche und abschließend wieder eine statische Pfahlprobebelastung durchgeführt. Der charakteristische Pfahlwiderstand unter statischer Beanspruchung wurde in kraftgesteuerten Versuchen ermittelt. Als Versagenskriterium wurde eine Verschiebungsrate von 1 mm/min definiert.

Die Belastungsfrequenz bei den zyklischen Pfahlversuchen lag zwischen 0,1 Hz (1 Zyklus pro 10 s) und 0,17 Hz (1 Zyklus pro 6 s). Durchgeführt wurden Schwell- und Wechsellastversuche mit bis zu 1.000 Lastwechseln. Lediglich ein Versuch wurde mit 12.300 Zyklen durchgeführt. Während eines Versuchs wurden die zyklische Lastamplitude und das mittlere Lastniveau konstant gehalten. Für die Versuche in Haga wurden als Versagenskriterien eine absolute Pfahlkopfverschiebung von mehr als 1,5 mm, eine Verschiebungszunahme von mehr als 0,5 mm/min und zugleich eine Vergrößerung der zyklischen Verschiebungsamplitude von 0,5 mm bis 1,0 mm im Vergleich zum

ersten Belastungszyklus definiert. In Tilbrook wurde ein Versagen bei einer Verschiebungszunahme von mehr als 1,0 mm/min definiert.

		Versuchsfeld Haga		Versuchsfeld Tilbrook	
Boden	Art	Ton, weich – breiig, unterhalb des Grundwasserspiegels		Ton, halbfest, unterhalb des Grundwasserspiegels	
		mittelplastisch	ausgeprägt plastisch	mittelplastisch	ausgeprägt plastisch
	Tiefe unter GOF [m]	0 - 4,5	4,5 - 5,5	0 - 18	18 - 30
	w_n [%]	38	55 - 60	16	18
	w_p [%]	25	30	16 - 19	21 - 24
	I_p [%]	15	35 - 40	20 - 25	30 - 40
Pfahl	Typ	Stahlrohrpfahl (im Verdrängungsverfahren eingebracht)			
	Länge [m]	5		10 - 15	
	Durchmesser [mm]	153		219	
Statische Probelastung (Zug)	Charakteristischer Pfahlwiderstand R_k [kN]	ca. 60		1200 - 2000	
	Gemessene Pfahlkopfverschiebung [mm]	ca. 3		6 - 15	
	Versagenskriterium	Verschiebungszunahme > 1 mm/min			
Post-zyklische statische Pfahltragfähigkeit (Zug)		größer als vor zyklischer Belastung		kleiner als vor zyklischer Belastung	
Zyklische Versuche	Belastungsart	Schwell- und Wechsellasten		Zugschwelllasten	
	Zyklusanzahl	bis 1.000 1 Versuch mit 12.300 Zyklen		<< 1000	
	Frequenz [Hz]	0,17		0,10	
	F_{mittel} / R_k [-]	0 - 0,75		0,425 - 0,44	
	F_{zykl} / R_k [-]	0,1 - 0,52		0,425 - 0,44	
	Versagenskriterium	Mittlere Verschiebung > 1,0 mm - 1,5 mm		Verschiebungszunahme > 1 mm/min	
	Verschiebungszunahme > 0,5 mm/min				
	Zunahme der Verschiebungsamplitude um 0,5 mm - 1,0 mm gegenüber 1. Zyklus				

Tabelle 3.1: Pfahlversuche in Haga und Tilbrook (aus KARLSRUD / HAUGEN, 1986 und KARLSRUD ET AL., 1992)

Auf Grund der Ergebnisse der Versuche in Haga wurden in einem Interaktionsdiagramm Bereiche für zyklische Belastungen angegeben, die möglich sind, ohne dass innerhalb einer bestimmten Anzahl an Lastzyklen ein Versagen nach den in Tabelle 3.1 angegebenen Kriterien eintritt (siehe Abbildung 3.1). Die Versuche bieten eine gute Datengrundlage für Versuche in überwiegend breiigen bis weichen Tonen mit bis zu 1.000 Lastwechseln. Auf Grund der geringen Zyklenanzahlen ist eine Abschätzung einer möglichen zyklischen Belastung über die gesamte Lebensdauer eines Pfahles jedoch nicht möglich.

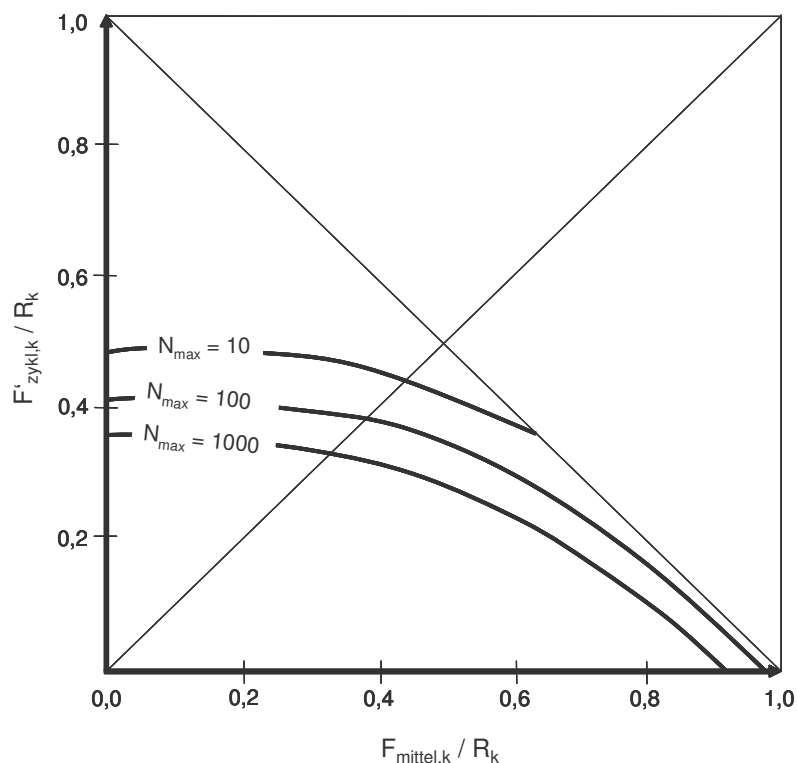


Abbildung 3.1: Mögliche Zyklenzahlen in Abhängigkeit von der Größe der zyklischen Belastung (nach KARLSRUD / HAUGEN, 1986)

Die Ergebnisse in Tilbrook zeigen ähnliche Zyklenanzahlen bis zum Versagen. Auf Grund der unterschiedlichen Versagenskriterien und unterschiedlichen Belastungsfrequenz ist ein Vergleich der Versuchsergebnisse nur bedingt möglich und eine Bewertung des Einflusses der Konsistenz des Bodens auf mögliche zyklische Belastungen nicht möglich.

Ungeklärt bleibt bei diesen Versuchen der Einfluss der vorab durchgeführten statischen Pfahlprobelastungen auf die Ergebnisse der zyklischen Versuche. Karlsruud et. al. gehen davon aus, dass eine ein- oder mehrmalige Vorbelastung die Tragfähigkeit unter zyklischer Belastung eher steigert, in jedem Fall jedoch nicht verringert.

Die im Anschluss an die zyklische Belastung durchgeführten statischen Pfahlversuche in Haga zeigen nach Schwellbelastungen einen Anstieg des Pfahlwiderstands im Vergleich zu den vorab in einer statischen Pfahlprobelastung ermittelten Werten. In Tilbrook lagen die postzyklischen Pfahltragfähigkeiten unter den vorab ermittelten Pfahlwiderständen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Versuche in Haga nur bis zu Absolutverschiebungen von 1,0 mm bzw. 1,5 mm durchgeführt wurden (Versagenskriterium) und die Verschiebungen somit sehr klein waren, während die Versuche in Tilbrook auch nach einem Versagen bis zu Absolutverschiebungen von 40 mm weitergeführt wurden.

		Versuchsfeld Kinnegar	
Boden	Art	Ton, weich – breiig, unterhalb des Grundwasserspiegels ausgeprägt plastisch	
	Tiefe unter GOF [m]	2 - 8	
	w_n [%]	50 - 70	
	w_p [%]	25 - 35	
	I_p [%]	30 - 40	
Pfahl	Typ	Betonfertigteilpfahl (im Verdrängungsverfahren eingebracht)	
	Länge [m]	6	
	Kantenlänge [mm]	250	
Statische Probelastung (Zug)	Charakteristischer Pfahlwiderstand R_k [kN]	ca. 67 kN	für den bereits statisch vorbelasteten Pfahl wurde ein Wert von 75 kN geschätzt
	Gemessene Pfahlkopfverschiebung [mm]	25	
	Versagenskriterium	Mittlere Pfahlkopfverschiebung > 10 % der Kantenlänge = 25 mm	
Post-zyklische statische Pfahltragfähigkeit (Zug)		kleiner als vor zyklischer Belastung	
Zyklische Versuche	Belastungsart	Zugschwelllasten	
	Zyklusanzahl	< 600	
	Frequenz [Hz]	0,017	
	$F_{mittel} / R_{1,k}$ [-]	0,48 - 0,60	0,49 - 0,61
	$F'_{zykl} / R_{1,k}$ [-]	0,36 - 0,48	0,36 - 0,47
	Versagenskriterium	Mittlere Pfahlkopfverschiebung > 10 % der Kantenlänge = 25 mm	

Tabelle 3.2: Pfahlversuche in Kinnegar (aus LEHANE/JARDINE/MCCABE, 2003)

In einem Testfeld in Kinnegar /Nordirland wurden an zwei Einzelpfählen zyklische Pfahlversuche in einem ausgeprägt plastischen Ton mit weicher/breiiger Konsistenz durchgeführt (Lehane/Jardine/McCabe, 2003). Die verwendeten Pfähle waren Betonfertigteilepfähle mit einer Kantenlänge von 250 mm und einer Länge von 6 m. Die wichtigsten Bodeneigenschaften des Versuchsfeldes sowie die Ergebnisse der statischen und zyklischen Versuche sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Der charakteristische Herauszieh Widerstand unter statischer Belastung wurde für einen nicht vorbelasteten Einzelpfahl zu 67 kN ermittelt. Für einen bereits vor der zyklischen Belastung auf Druck vorbelasteten Einzelpfahl wurde der charakteristische Herauszieh Widerstand zu 75 kN abgeschätzt.

Bei den kraftgesteuerten zyklischen Versuchen im Zugschwellbereich mit einer Belastungsfrequenz von einem Zyklus pro Minute (0,017 Hz) wurde die minimale Last konstant gehalten und die maximale Last nach einer unterschiedlich großen Zyklenzahl mehrmals gesteigert. Die Zyklenzahlen unter einer zyklischen Belastung lagen zwischen 19 und 276 Zyklen. Als Versagenskriterium wurde analog zu den statischen Probelastungen eine Pfahlhebung von 10 % der Pfahlkantenlänge (= 25 mm) definiert. Der statisch bereits vorbelastete Pfahl war bei Beginn der zyklischen Belastung bereits 1 Jahr alt, der nicht vorbelastete Pfahl 142 Tage.

Die Ergebnisse zeigen, dass der vorbelastete ältere Pfahl auf zyklische Belastungen mit vergleichbarer Amplitude und Lastniveau mit deutlich kleineren Verschiebungen reagiert als der noch nicht belastete jüngere Pfahl. Dieser Trend zeigt sich auch bei den postzyklisch ermittelten Pfahltragfähigkeiten unter statischer Belastung von 65 kN bzw. 54 kN.

Auf Grund der geringen Zyklenzahl pro Belastungsstufe kann die Entwicklung der akkumulierenden Verschiebungen bzw. zyklischen Verschiebungsamplituden für große Zyklenzahlen nicht abgeschätzt werden und es sind keine Aussagen über mögliche zyklische Belastungen bei bestimmten Zyklenzahlen möglich, da die maximale zyklische Belastung sehr rasch bis über den unter statischer Belastung ermittelten charakteristischen Pfahlwiderstand hinaus gesteigert wurde. Bei Anwendung des Versagenskriteriums einer Verschiebung von z.B. 1,0 mm bis 1,5 mm, wie es beispielsweise bei den Versuchen in Haga zu Grunde gelegt wurde, ergeben sich bei vergleichbaren Belastungen deutlich geringere Zyklenzahlen, trotz einer vergleichbaren Konsistenz und Plastizität des Bodens.

3.2 Pfähle mit größeren Durchmessern und Querschnittsabmessungen

In KRAFT ET AL. (1981) sind Probelastungen und zyklische Versuche an vier im Verdrängungsverfahren eingebrachten Stahlrohrpfählen (Durchmesser 356 mm, Längen zwischen 12 m und 15 m) in steifen bis halbfesten Tonen beschrieben. Eine Zusammenfassung der Versuche und Randbedingungen gibt Tabelle 3.3.

Die Pfähle wurden zunächst statisch bis zum Versagen belastet, meist einmal auf Druck und einmal auf Zug. Die dabei gemessenen Pfahlkopfverschiebungen lagen zwischen 50 mm und 180 mm. Nach einer Wartezeit von einem Jahr erfolgten erneut statische Pfahlprobelastungen bis zum Bruch auf Zug und Druck. Die dabei ermittelte Tragfähigkeit auf Druck wurde als

Referenztragfähigkeit für die folgenden zyklischen Belastungen im Druckschwellbereich verwendet. Bei den zyklischen Versuchen wurde die zyklische Lastamplitude konstant bei ca. 20 % der statischen Referenztragfähigkeit gehalten, das mittlere Lastniveau wurde nach jeweils ca. 200 Zyklen von ca. 30 % auf 90 % der statischen Referenztragfähigkeit in 10 %-Schritten gesteigert. Bei allen Pfählen war eine exponentielle Zunahme der Pfahlverschiebungen zu bemerken, sobald die maximale Last den Wert von 80 % der statischen Tragfähigkeit überschritt. Dies entspricht einem mittleren Lastniveau von 60 % der statischen Tragfähigkeit bei 20 % zyklischer Lastamplitude. Die absoluten Pfahlverschiebungen bis dorthin lagen unter 3 mm.

Die Abschätzung einer möglichen zyklischen Belastung mit hohen Zyklenzahlen ist anhand der vorliegenden Auswertungen nicht möglich, da die Lasten jeweils nach maximal 200 Zyklen gesteigert wurden. Ungeklärt bleibt auch hier der Einfluss der Vorbelastung mit Verschiebungen im Zentimeterbereich, da keine vergleichenden zyklischen Versuche an nicht vorbelasteten Pfählen durchgeführt wurden.

		Versuchsfeld Empire	
Boden	Art	Ton, steif bis halbfest, unterhalb des Grundwasserspiegels ausgeprägt plastisch	
	Tiefe unter GOF [m]	35 - 110	
	w_n [%]	ca. 30 - 50	
	w_p [%]	i.M. 20	
	l_p [%]	i.M. 60	
Pfahl	Typ	Stahlrohrpfahl (im Verdrängungsverfahren eingebracht)	
	Länge [m]	12 - 15	
	Durchmesser [mm]	356	
Statische Probelastung (Druck)	Charakteristischer Pfahlwiderstand R_k [kN]	Erstbelastung	Zweitbelastung (ca. 1 Jahr später)
		ca. 1030 - 2360	ca. 1100 - 1700
	Gemessene Pfahlkopfverschiebung [mm]	Ende des Versuchs: 50 - 180	
	Versagenskriterium	Überschreiten der maximal möglichen Spitzenlast, bei Verschiebungen zwischen 10 mm und 20 mm	
Zyklische Versuche	Belastungsart	Druckschwellbelastung	
	Zyklenanzahl	max. 200	
	Frequenz [Hz]	0,07 - 0,2	
	F_{mittel} / R_k [-]	0,3 - 0,9	
	F'_{zykl} / R_k [-]	ca. 0,2	
	Versagenskriterium	nicht definiert	

Tabelle 3.3: Pfahlversuche aus KRAFT ET AL. (1981)

Von JAIME ET AL. (1990) wurden statische und zyklische Pfahlprobelastungen (Druckschwellbereich) an vier Betonfertigteilepfählen in weichem Ton durchgeführt (siehe auch Tabelle 3.4).

		Versuchsfeld Mexico City	
Boden	Art	Ton, weich, unterhalb des Grundwasserspiegels	
	Tiefe unter GOF [m]	5 - 15	
	w_n [%]	ca. 100 - 400	
	w_p [%]	Nicht angegeben	
	I_p [%]	Nicht angegeben	
Pfahl	Typ	Betonfertigteilepfahl (im Verdrängungsverfahren eingebracht)	
	Länge [m]	10	
	Kantenlänge [mm]	300	
Statische Probelastung (Druck)	Charakteristischer Pfahlwiderstand R_k [kN]	Schnelle kontinuierliche Lastaufbringung (ca. 100 kN/5s)	übliche Probelastung
		ca. 750	ca. 540 als Referenztragfähigkeit angesetzt
	Gemessene Pfahlkopfverschiebung [mm]	10 - 15	30
	Versagenskriterium	Verschiebung > 10 % der Kantenlänge = 30 mm	
Zyklische Versuche	Belastungsart	Druckschwellbelastung	
	Zyklusanzahl	max. 30	
	Frequenz [Hz]	0,1 - 1	
	F_{mittel} / R_k [-]	0,16 - 0,83	
	F'_{zykl} / R_k [-]	0,06 - 0,5	
	Versagenskriterium	Mittlere Verschiebung > 10 % der Kantenlänge = 30 mm	

Tabelle 3.4: Pfahlversuche aus JAIME ET AL. (1990)

Die zyklischen Belastungen wurden im Anschluss an die statischen Pfahlprobelastungen durchgeführt. Die Belastungsfrequenzen lagen zwischen 0,1 Hz und 1,0 Hz und es wurden jeweils bis zu acht unterschiedliche Belastungskombinationen mit je 30 Belastungszyklen pro Pfahl durchgeführt. Dabei erreichten die absoluten Pfahlverschiebungen trotz einer maximalen Last von 130 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung nicht das Versagenskriterium einer Verschiebung von 10 % des Pfahldurchmessers, solange die zyklische

Lastamplitude kleiner als 40 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung war. Bei zyklischen Versuchen, bei denen die Lastamplitude mehr als 40 % des charakteristischen statischen Pfahlwiderstands überschritt, wurde jedoch unabhängig vom mittleren Lastniveau meist eine deutliche Zunahme der mittleren Pfahlverschiebungen festgestellt. Ansonsten zeigten die Pfähle ein nahezu ausschließlich elastisches Last-Verschiebungsverhalten.

Auf Grund der geringen Zyklenzahlen je Belastung ist keine Abschätzung des Tragverhaltens bei großen Zyklenzahlen möglich und der Einfluss der statischen Vorbelastung auf das Verschiebungsverhalten wurde nicht untersucht.

Broms (aus EPRI, 1987) führte an Holz- bzw. Betonfertigteilepfählen zyklische Pfahlversuche im Druckschwellbereich in weichem Ton durch (siehe auch Tabelle 3.5).

		Versuchsfelder Schweden		
Boden	Art	Ton, weich		
	Tiefe unter GOF [m]	0 - 20		
	w_n [%]	55 - 65		
	w_p [%]	nicht angegeben		
	I_p [%]	nicht angegeben		
Pfahl	Typ	Holzpfehl	Betonfertigteilepfahl	
		(im Verdrängungsverfahren eingebracht)		
	Länge [m]	ca. 16	20	25
	Kantenlänge [mm] bzw. Durchmesser [mm]	ca. 350	254	
Flügelscher- oder Fallkegelversuche	Charakteristischer Pfahlwiderstand R_k [kN]	ca. 225	ca. 530	ca. 710
Zyklische Versuche	Belastungsart	Druckschwellbelastung		
	Zyklenanzahl	max. 350		
	Frequenz [Hz]	nicht angegeben		
	F_{mittel} / R_k [-]	0,2 - 0,9	0,13 - 0,84	0,13 - 0,75
	F'_{zykl} / R_k [-]	0,1 - 0,3	0,05 - 0,25	0,04 - 0,25
	Versagenskriterium	nicht angegeben		

Tabelle 3.5: Pfahlversuche von Broms (EPRI, 1987)

Der charakteristische Pfahlwiderstand unter statischer Belastung wurde anhand von Ergebnissen aus Flügelsondierungen oder Fallkegelversuchen ermittelt und nicht mittels Pfahlprobelastungen. Bei den unmittelbar aufeinander folgenden zyklischen Belastungen mit maximal 350 Zyklen wurden sowohl die zyklische Lastamplitude als auch das mittlere Lastniveau variiert. Bei allen Versuchen ist bereits nach ein bis zwei Zyklen ein starker Rückgang der Verschiebungsrate (Zunahme der Verschiebung pro Lastzyklus) zu erkennen und die mittleren Pfahlverschiebungen bleiben annähernd konstant. Lediglich bei mittleren Lastniveaus von mehr als 60 % und zyklischen Lastamplituden von ca. 20 % des charakteristischen Pfahlwiderstands nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen mit zunehmender Zyklenzahl teilweise überproportional zu und erreichen nach weniger als 10 Lastzyklen Werte zwischen 2,5 mm und 5,0 mm. Diese Versuche wurden jedoch meist nach 10 Lastzyklen abgebrochen, so dass Aussagen zu den Verschiebungsverläufen nach einer großen Anzahl von Lastzyklen nicht möglich sind.

3.3 Verpressanker

In den Jahren 1976 und 1978 wurden von der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (FMPA) in Stuttgart zwei Versuchsreihen mit jeweils 9 Verpressankern in leicht bis mittelplastischen Tonen mit halbfester bis fester Konsistenz durchgeführt (siehe auch Tabelle 3.6). Zur Ermittlung der Tragfähigkeit unter statischer Belastung wurden zunächst alle Verpressanker nach Möglichkeit bis zur Grenztragkraft belastet. Die Grenztragkraft wurde als die Last definiert, bei der die Ankerkopfverschiebungen noch abklingen. Lag diese Grenztragkraft über 90 % der Streckgrenze des Stahles, wurde die Grenztragfähigkeit aus den Ankerkopfverschiebungen und Kriechmaßen extrapoliert. Auf Grund von Inhomogenitäten des Baugrunds und Schichtwasserzutritten variieren die Tragfähigkeiten bei gleicher Länge des Verpresskörpers um teilweise den Faktor 2.

Anschließend wurden bis zu fünf verschiedene zyklische Zugschwellbeanspruchungen je Verpressanker durchgeführt. Die Belastungsfrequenzen lagen zwischen 0,007 Hz und 0,17 Hz. Als Versagenskriterium bei zyklischer Belastung wurde analog zum Kriechmaß bei statischen Versuchen ein Schwellbeiwert ξ definiert:

$$\xi = \frac{(s_n - s_m)}{\log\left(\frac{N_n}{N_m}\right)} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

mit

s_i : Verschiebung zum Zeitpunkt i

N_i : Lastzyklenanzahl zum Zeitpunkt i

Bei Werten von $\xi \leq 1$ tritt eine so genannte zyklische Beruhigung auf, bei Werten von $\xi > 1$ steigen die Ankerkopfverschiebungen mit zunehmender Zyklenanzahl überproportional an und der Verpressanker versagt. Eine Korrelation zwischen dem Schwellbeiwert unter zyklischer Belastung und dem Kriechbeiwert bei Konstanthaltung einer vergleichbaren statischen Belastung konnte nicht gefunden werden.

		Versuchsfelder FMPA	
Boden	Art	Ton, mittelplastisch	
		halbfest	halbfest bis fest
	W _n [%]	12,0 - 16,0	i.M. 15,4
	W _p [%]	ca. 16,0	i.M. 21,8
	I _p [%]	i.M. 19,0	i.M. 22,0
Verpressanker	Länge Verpresskörper [m]	3,5 / 4,5 / 5,5	4,5 / 5,5
	Durchmesser [mm]	105	133
Statische Probelastung (Zug)	Tragfähigkeit unter statischer Belastung [kN]	150 - 300	470 - 900
Zyklische Versuche	Belastungsart	Zugschwellbelastung	
	Zyklusanzahl	bis 43.500	bis 6.700
	Frequenz [Hz]	0,007 - 0,17	
	F _{mittel} / R _k [-]	0,3 - 0,9	0,19 - 0,82
	F' _{zykl} / R _k [-]	0,1 - 0,3	0,1 - 0,19
	Versagenskriterium	Schwellbeiwert $\zeta = \frac{(s_n - s_m)}{\log\left(\frac{N_n}{N_m}\right)} \leq 1,0$	

Tabelle 3.6: Ankerversuche FMPA (1978)

Anhand der Versuchsergebnisse (siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3) lässt sich prinzipiell feststellen, dass unterhalb eines Bereichs von F_{mittel,k}/R_k von 0,4 und einem Verhältnis von F'_{zykl,k}/R_k < 0,2 nie Versagen auftrat (grau hinterlegter Bereich). Bei Verhältniswerten F_{mittel,k}/R_k > 0,65 und den untersuchten Verhältnissen F'_{zykl,k}/R_k zwischen 0,1 und 0,3 trat ein Versagen immer bei weniger als 10.000 Lastwechseln auf.

Auf Grund der notwendigen Vorbelastung von Verpressankern ist ein Vergleich dieser Ergebnisse mit zyklischen Versuchen an statisch nicht vorbelasteten Pfählen nur begrenzt möglich. Auch bleibt bei den Versuchen unklar, inwieweit eine Vorbelastung bis zur Grenztragfähigkeit ein anderes Tragverhalten unter zyklischer Belastung bedingt als eine geringere Vorbelastung.

Nach der zyklischen Belastung wurden an den Ankern im Versuchsfeld I nochmals Kriechversuche mit ein bis zwei konstant gehaltenen Lasten durchgeführt. Die Absolutverschiebungen am Ankerkopf sowie die Kriechmaße lagen bis auf einen Fall bei gleicher Laststufe immer deutlich unter den Verschiebungen bzw. Kriechmaßen der statischen Versuche vor der zyklischen

Schwellbelastung. Dies ist unabhängig davon, ob die zyklische Schwellbelastung zu einem Versagen des Ankers führte oder nicht.

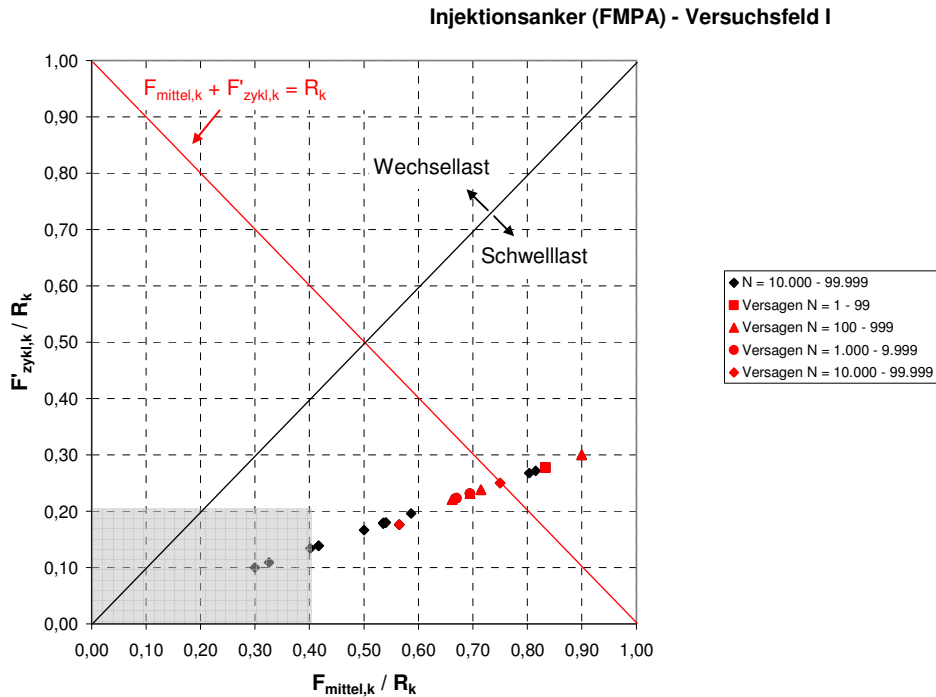


Abbildung 3.2: Interaktionsdiagramm der zyklischen Ankerversuche im Maßstab 1:1 (Versuchsfeld I)

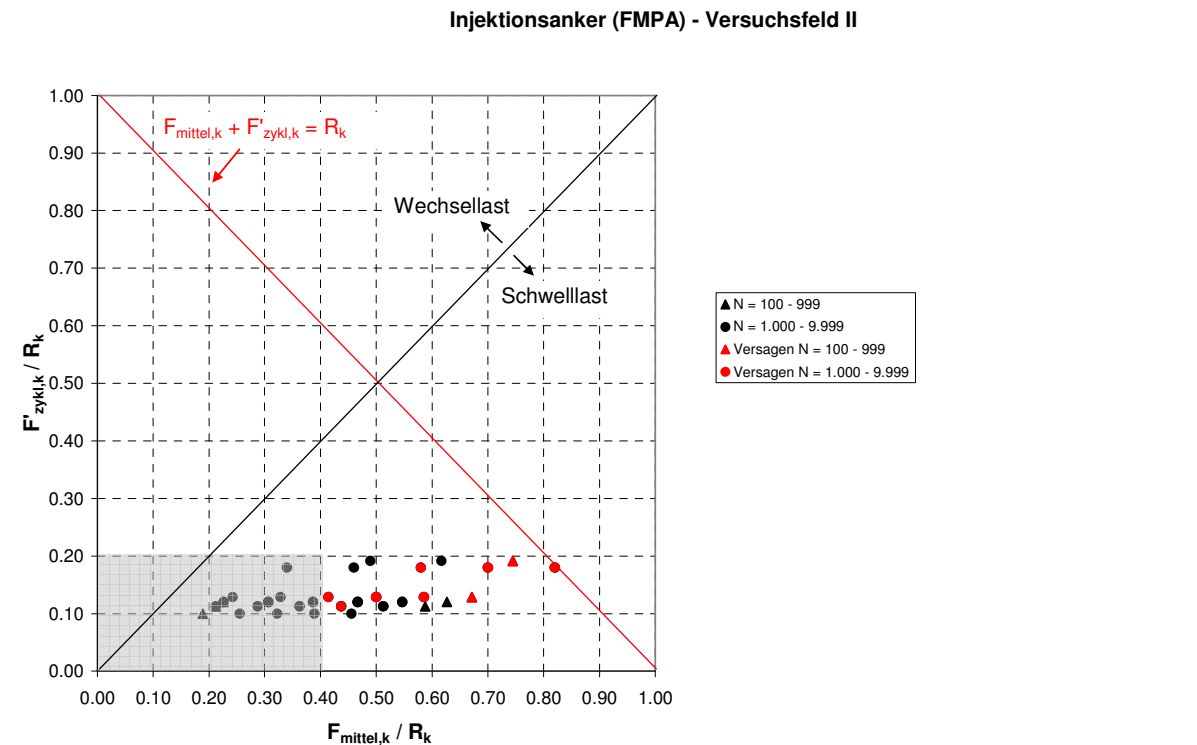


Abbildung 3.3: Interaktionsdiagramm der zyklischen Ankerversuche im Maßstab 1:1 (Versuchsfeld II)

3.4 Kleinmaßstäbliche Modellversuche

POULOS (1981) führte Wechsellastversuche an Modellpfählen aus Aluminiumrohren in aufbereiteten Tonen durch (siehe Tabelle 3.7). Der Durchmesser der Pfähle betrug 20 mm, die Pfahllänge 250 mm. Die Modellpfähle wurden in einen zylindrischen Versuchsbehälter mit einem Durchmesser von 152 mm und einer Höhe von 230 mm eingebaut. Der Pfahlfuß ragte aus dem Versuchsbehälter heraus, wodurch sichergestellt wurde, dass ausschließlich die Einflüsse der zyklischen Belastung auf die Pfahlmantelreibung untersucht wurden und sich kein Pfahlfußwiderstand aufbauen konnte.

An den Modellpfählen wurden vorab weggesteuerte statische Versuche bis zu einer Pfahlverschiebung von 2,5 % des Durchmessers (= 0,5 mm) durchgeführt. Die dabei erreichte Kraft wurde als charakteristischer Pfahlwiderstand definiert.

Anschließend wurden zyklische Wechsellastversuche mit einer Belastungsfrequenz von 0,4 Hz mit bis zu 1.000 Lastwechseln durchgeführt. Das mittlere Lastniveau lag konstant bei 10 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung, die Lastamplitude wurde variiert.

		Modellversuche POULOS	
Boden	Art	aufbereiteter Ton / Schluff	
		mittelplastisch	ausgeprägt plastisch
	w_n [%]	nicht angegeben	
	w_p [%]	18,0 bzw. 22,0	20,0 bzw. 33,0
	I_p [%]	29,0 bzw. 20,0	45,0 bzw. 22,0
Modellpfahl	Art	Aluminiumrohr	
	Länge [m]	0,25	
	Durchmesser [mm]	20	
Statische Probelastung (weggesteuert, Druck)	Tragfähigkeit unter statischer Belastung [kN]	ca. 0,37	
	Versagenskriterium	Verschiebung > 2,5 % des Pfahldurchmessers (= 0,5 mm)	
Zyklische Versuche	Belastungsart	Wechselbelastung	
	Zyklenanzahl	1.000	
	Frequenz [Hz]	0,4	
	F_{mittel} / R_k [-]	0,1	
	F'_{zykl} / R_k [-]	0,2 - 0,7	
	Versagenskriterium	nicht angegeben	

Tabelle 3.7: Modellversuche POULOS (1981)

Die aufgetretenen Verschiebungen sind in der Literatur nicht dargestellt, bei Überschreiten einer zyklischen Lastamplitude von mehr als 50 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter

statischer Belastung ist ein signifikanter Steifigkeitsverlust im Pfahltragverhalten und eine deutlich verminderte Tragfähigkeit bei einer anschließenden statischen Belastung festzustellen.

NARASIMHA / PRASAD (1992) führten in einem ausgeprägt plastischen Ton breiiger bis weicher Konsistenz Zugschwellversuche an Schraubankern durch (siehe Tabelle 3.8). Die Versuche zeigen bis zu einer Maximalbelastung von 50 % der statischen Tragfähigkeit eine Beruhigung der Hebungen. Die gemessenen Verschiebungen liegen mit weniger als 1,5 mm dabei bei maximal 5 % des Ankerdurchmessers. Bei höheren Maximallasten tritt ein Versagen schon nach weniger als 150 Zyklen ein. Post-zyklisch durchgeführte Ausziehversuche zeigen bei Ankern ohne zyklisches Versagen teilweise eine leichte Tragfähigkeitssteigerung um ca. 10 %. Bei Versuchen mit Versagen auf Grund der zyklischen Belastung zeigen sich Tragfähigkeitsverluste bis ca. 35 %. Diese sind jedoch zum Großteil darauf zurückzuführen, dass sich auf Grund der großen Verschiebungen während der zyklischen Belastung die Einbindelänge der Schraubanker verringert hat.

		Modellversuche NARASIMHA / PRASAD	
Boden	Art	Ton, ausgeprägt plastisch	
		weich bzw. breiig ($I_c = 0,17 - 0,45$)	weich
	W_n [%]	60,0 bzw. 68,0	48,0
	W_p [%]	32,0	
	I_p [%]	50,0	
Modellpfahl	Art	Schraubanker	Rohrpfahl
	Länge [m]	0,5	0,5
	Durchmesser [mm]	33,0	25,0
Statische Probelastung (Zug)	Tragfähigkeit unter statischer Belastung [kN]	0,03 - 0,07	0,3
	Versagenskriterium	Starke Zunahme der Verschiebungen	
Zyklische Versuche	Belastungsart	Zugschwellbelastung	
	Zyklusanzahl	bis 500	< 300
	Frequenz [Hz]	0,08	
	F_{mittel} / R_k [-]	0,15 - 0,40	0,15 - 0,35
	F'_{zykl} / R_k [-]	0,15 - 0,40	0,15 - 0,35
	Versagenskriterium	Verschiebungen > als Durchmesser oder Last-Verschiebungsverhalten nicht elastisch	

Tabelle 3.8: Modellversuche aus NARASIMHA / PRASAD (1992) und PRASAD / NARASIMHA (1994)

PRASAD / NARASIMHA (1994) führten zyklische Modellversuche an geramnten Rohrpfählen mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Pfahlänge von 500 mm in einem ausgeprägt plastischen Ton weicher Konsistenz durch (siehe Tabelle 3.8). Bei den durchgeführten Zugschwellversuchen war bis zu einer Maximalbelastung von ca. 50 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung eine Beruhigung der Pfahlhebungen nach wenigen Zyklen festzustellen. Die gemessenen Verschiebungen betragen maximal 0,5 mm, was ca. 2 % des Pfahldurchmessers entspricht. Bei größeren maximalen Lasten stieg die Verschiebungsrate mit zunehmender Zyklenzahl an und ein Versagen auf Grund großer Verschiebungen trat nach weniger als 200 Zyklen auf. Die post-zyklisch ermittelten statischen Tragfähigkeiten waren bei Versuchen ohne Versagen um ca. 10 % und bei Versuchen mit Versagen um bis zu 40 % niedriger als die vorab ermittelten charakteristischen Pfahlwiderstände unter statischer Belastung.

MCMANUS ET AL. (1994) führten zyklische Versuche an Bohrpfählen in einem aufbereiteten leicht plastischen Ton breiiger bis weicher Konsistenz durch (siehe Tabelle 3.9).

		Modellversuche McMANUS ET AL.	
Boden	Art	aufbereiteter Ton, leicht plastisch breiig bis weich	
		OCR = 40	OCR = 2
	w_n [%]	ca. 30,0	
	w_p [%]	22,0	
	I_p [%]	11,0	
Modellpfahl	Art	Bohrpfahl mit Stahlstab als Tragglied	
	Länge [m]	0,4 bzw. 0,4 oder 0,6 bzw. 1,1	
	Durchmesser [mm]	59 bzw. 89 bzw. 174	
Statische Probebelastung (Zug)	Tragfähigkeit unter statischer Belastung [kN]	Für D = 89 mm und L = 0,6 m	
		1,5	2,4
	Versagenskriterium	Maximallast aus Widerstands-Hebungslinie	
Zyklische Versuche	Belastungsart	Zugschwell- und Wechselbelastung	
	Zyklenanzahl	300	
	Frequenz [Hz]	0,02 (1 Versuch mit 0,2)	
	F_{mittel} / R_k [-]	0,48 - 0,82 (Schwellbelastung) 0 (Wechselbelastung)	
	F'_{zykl} / R_k [-]	0,07 - 0,09 (Schwellbelastung) 0,12 - 0,37 (Wechselbelastung)	
	Versagenskriterium	nicht angegeben	

Tabelle 3.9: Modellversuche aus McMANUS ET AL. (1994)

Durch das Aufbringen der zyklischen Zugschwellbelastung sollten Wind- bzw. Sturmereignisse nachgebildet werden. Die Belastungsfrequenz wurde typisch für Windereignisse zu 0,02 Hz gewählt. Eine erste Belastungssequenz (ca. 100 Zyklen) simuliert Windböen zu Beginn eines Sturms mit einem mittleren Belastungsniveau und einer zyklischen Lastamplitude von jeweils 30 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung. Eine zweite Belastungsfrequenz (ca. 300 Zyklen) simuliert die maximale Beanspruchung während eines Sturms. Während dieser Belastungssequenz betrug die zyklische Lastamplitude knapp 10 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung. Das mittlere Lastniveau wurde zwischen 48 % und 82 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung variiert.

Die Versuchsergebnisse zeigen ein exponentielles Ansteigen der Pfahlverschiebungen ab mittleren Lastniveaus von mehr als 50 % des charakteristischen Pfahlwiderstands und eine Reduktion der postzyklisch mobilisierbaren Pfahlmantelreibung in Abhängigkeit von den während der zyklischen Belastungssequenzen aufgetretenen absoluten Pfahlverschiebungen. Ein Vergleich der Last-Verschiebungslinien unter statischer und zyklischer Belastung zeigt, dass bei zyklischen Lastamplituden von ca. 10 % des charakteristischen Pfahlwiderstands und Zyklenzahlen von ca. 300 die auftretenden Verschiebungen bei einem mittleren Lastniveau bis ca. 50 % des charakteristischen Pfahlwiderstands nicht größer sind als die Verschiebungen bei einer entsprechenden statischen Last. Vergleichende Versuche mit anderen zyklischen Lastamplituden oder mit höheren Lastzyklenzahlen wurden jedoch nicht durchgeführt.

Bei zusätzlich von MCMANUS ET AL. (1994) durchgeführten symmetrischen Wechsellastversuchen ($F_{\text{mittel}} = 0$) zeigen die Modellpfähle bei maximalen Belastungen zwischen 12 % und 25 % des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung ein nahezu linear elastisches Last-Verschiebungsverhalten. Die postzyklische statische Tragfähigkeit liegt um bis zu 20 % höher als die an Referenzpfählen vorab ermittelte statische Tragfähigkeit. Bei höheren Belastungsniveaus zeigen sich ein stark hysteretisches Last-Verschiebungsverhalten und eine Verminderung der postzyklischen statischen Tragfähigkeit um bis zu 35 % bei bereits geringen Pfahlverschiebungen. Nichtsymmetrische Wechsellasten wirken sich ungünstiger auf das Pfahltragverhalten aus als symmetrische Wechsellasten.

3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die aufgeführten Versuchsergebnisse zeigen, dass bei Schwelllasten eine Akkumulation der absoluten Verschiebungen zum Versagen führen kann, während die zyklische Verschiebungsamplitude während des Versuchs nahezu unverändert bleibt.

Bei Wechsellastversuchen kann hingegen auch eine sich kontinuierlich vergrößernde zyklische Verschiebungsamplitude zum Versagen des Pfahls oder Ankers führen. Wechsellasten wirken sich auf das Tragverhalten ungünstiger aus als Schwelllasten.

Bei den überwiegend im Verdrängungsverfahren eingebrachten Pfählen und Modellpfählen liegen die erreichten Zyklenzahlen fast immer deutlich unter 1.000 Zyklen, so dass Aussagen über das langzeitige Last-Verschiebungsverhalten nur begrenzt möglich sind. Häufig wurden die Pfähle oder Verpressanker bereits vor der zyklischen Belastung statisch bis zum Bruch oder bis zur

Grenztragfähigkeit belastet. Da meist Referenzversuche an nicht vorbelasteten Pfählen oder Ankern fehlen, kann der Einfluss der statischen Vorbelastung auf das Trag- und Verschiebungsverhalten unter zyklischer Belastung nicht ermittelt werden.

Bei den zyklischen Versuchen lagen die Lasten meist im Schwelllastbereich. Für Schwelllasten ist aus den vorliegenden Untersuchungen für Zyklenzahlen bis ca. 500 zu entnehmen, dass die Verschiebungen ab einem bestimmten Verhältnis von maximaler Belastung zu charakteristischem Widerstand überproportional ansteigen und die Pfähle oder Verpressanker versagen. Das kritische Verhältnis von F_{\max} / R_k wird von BRIAUD / FELIO (1986), MCANNOY ET AL. (1982) oder KRAFT ET AL. (1981) mit ca. 0,8, von McMANUS ET AL. (1994), POULOS (1981) oder FMFA (1978) mit ca. 0,6 und von PRASAD / NARASIMHA (1994) mit ca. 0,5 angegeben. Tendenziell liegt das kritische Verhältnis von F_{\max} / R_k bei den im Maßstab 1:1 durchgeführten Versuchen höher als bei den Modellversuchen. Eine Abhängigkeit einer möglichen maximalen Belastung von der Konsistenz oder der Plastizität des Bodens konnte bei den ausgewerteten Versuchen nicht festgestellt werden, da die Konsistenz der Versuchsböden überwiegend im breiig-weichen Bereich lag.

Die Versuche zeigen, dass sich die Tragfähigkeit von Pfählen und Verpressankern unter einer zyklischen Belastung gegenüber einer rein statischen Belastung verändert. Bei einer im Anschluss an eine zyklische Belastung durchgeführten statischen Belastung schwanken die ermittelten Pfahlwiderstände jedoch stark. Teilweise liegen sie über den vorab ermittelten Werten (z.B. KARLSRUD / HAUGEN, 1986), häufig jedoch auch deutlich darunter (z.B. PRASAD / NARASIMHA, 1994). Da die post-zyklischen statischen Tragfähigkeiten nicht in allen Fällen ermittelt wurden, ist eine Aussage zu möglichen Ursachen einer Ab- oder Zunahme der Pfahltragfähigkeit anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse noch nicht möglich.

Eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse ist nicht immer gegeben, da die Versagenskriterien (absolute Verschiebung, Verschiebungsrate, Schwellbeiwert) sehr unterschiedlich gewählt wurden und eine Auswertung anhand eines einheitlichen Versagenskriteriums auf Grund der vorhandenen Unterlagen nicht möglich ist.

4 Eigene Pfahlversuche zum Tragverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in Ton

4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der experimentellen Untersuchungen war es, den Einfluss axial zyklischer Belastungen auf die Tragfähigkeit und das Last-Verschiebungsverhalten von Mikropfählen in bindigen Böden zu ermitteln. Dabei sollte insbesondere der Einfluss der zyklischen Lastamplitude und des mittleren Lastniveaus sowie der Belastungsart (Schwell- oder Wechselbelastung) untersucht werden. Darüber hinaus sollten Aussagen zur post-zyklischen Tragfähigkeit der Pfähle unter statischer Belastung getroffen werden.

Auf Grund der Auswertung bisheriger Forschungsarbeiten (siehe Kapitel 3) wurden für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten zyklischen Pfahlversuche folgende Festlegungen getroffen:

- Durchführung von Versuchen im Maßstab 1:1, da hinsichtlich der Tragfähigkeit unter zyklischer Belastung Unterschiede zwischen Feld- und Modellversuchen zu erkennen sind.
- Durchführung der Pfahlversuche an gebohrten Mikropfählen mit Stahltragglied, da bisher hauptsächlich im Verdrängungsverfahren eingebrachte Mikropfähle oder Modellpfähle untersucht wurden.
- Ermittlung des charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Belastung an zusätzlichen Pfählen, um einen Einfluss der statischen Vorbelastung auf die Ergebnisse der zyklischen Versuche ausschließen zu können.
- Eine Mindestzyklenzahl von 10.000, besser 50.000, um das Langzeittragverhalten genauer erfassen zu können.
- Durchführung der Pfahlversuche in einem Ton steifer Konsistenz, da bisherige Versuche überwiegend in Tonen weicher Konsistenz durchgeführt wurden.

Es wurden zwei Versuchsreihen mit axial zyklischer Belastung durchgeführt. Die erste Versuchsreihe bestand aus insgesamt sechs Zugschwellversuchen an statisch nicht vorbelasteten Pfählen und einem Zugschwellversuch an einem bereits statisch vorbelasteten Pfahl (siehe Abschnitt 4.3). Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe wurden fünf Wechsellastversuche an nicht statisch vorbelasteten Pfählen und zwei Wechsellastversuche an einem bereits statisch vorbelasteten Pfahl durchgeführt (siehe Abschnitt 4.4).

4.2 Versuchsgelände

Das Versuchsgelände zur Durchführung der statischen und zyklischen Pfahlversuche im Maßstab 1:1 lag im Randbereich einer Tongrube der Fa. Erlus AG in Mundfing / Niederbayern.

Geologisch gesehen handelt es sich bei dem im Versuchsgelände anstehenden Boden um einen Löß, ein äolisches Sediment, das während der trockeneren Perioden einer Eiszeit abgelagert wurde (JERZ, 1993). Durch Entkalkung entstand ein gelbbrauner Lößlehm, der nach JERZ (1993) Tongehalte zwischen 15 % und 30 %, Schluffgehalte von 45 % bis z.T. 70 % und bis zu 30 % Feinsandanteil aufweist.

Im Rahmen der Voruntersuchung des Geländes wurden insgesamt 4 Baugrundaufschlussbohrungen (siehe Anhang 1.2) abgeteuft. Im Versuchsgelände steht Ton ab Geländeoberfläche bis in Tiefen von mindestens 7 m an. Bis in Tiefen von ca. 4,5 m weist der Ton eine überwiegend steife Konsistenz mit einer untergeordnet auftretenden weichen Zwischenschicht auf, darunter wechselt die Konsistenz des Tones zu halbfest bis fest. Unterhalb des Tons folgen Kiese, die grundwasserführend sind.

Zusätzlich wurden im Bereich des Versuchsgeländes 4 Drucksondierungen nach DIN EN ISO 22476-1 durchgeführt. Die Ergebnisse der Drucksondierungen sind in Anhang 1.1 dargestellt. Bei Auswertung dieser Ergebnisse nach DIN 4094-1:2002 und LUNNE/ROBERTSON/POWELL (1997) handelt es sich demnach um einen Ton mit einer undränierten Scherfestigkeit von ca.

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_k} = \frac{1000 - 40}{15} = 64 \text{ kN} / \text{m}^2 \approx 60 \text{ kN} / \text{m}^2 \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit

q_c	gemessener und (bis in eine Tiefe von ca. 4 m) gemittelter Spitzenwiderstand [kN/m ²] der Drucksonde
σ_{vo}	totaler Überlagerungsdruck [kN/m ²], hier Annahme: 40 kN/m ² in einer Tiefe von ca. 2 m
N_k	Konusfaktor, je nach Plastizität zwischen 10 - 20, hier getroffene Annahme: 15 für einen mittelplastischen Ton

Zur Ermittlung der bodenmechanischen Kenngrößen des Tons wurden 12 Bodenproben aus Bohrkernen im Labor des Zentrum Geotechnik der TU München untersucht. Nach DIN 18196 bzw. DIN EN ISO 14688-1 handelt es sich bei dem anstehenden Ton um einen überwiegend mittelplastischen, teilweise leichtplastischen Ton überwiegend steifer, z.T. weicher Konsistenz. Der Tonanteil der Proben liegt zwischen 17 % und 22 %, der Feinsandanteil zwischen 7 % und 20 % (siehe Anhang 1.3). Die bodenmechanischen Kenngrößen sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Boden	DIN 18196	TM		TL
	DIN EN ISO 14688-1	f _{sa'} - f _{saCl}		
Anzahl untersuchte Proben		1	9	2
Wassergehalt des Kornanteils < 0,4 mm w _{<0,4} [%]		18,7 - 25,6		18,7 - 21,3
Fließgrenze w _L [%]		35,9 - 46,7		27,1 - 29,2
Ausrollgrenze w _P [%]		16,2 - 17,8		12,2 - 15,7
Plastizitätszahl I _P [%]		18,6 - 29,4		13,5 - 14,9
Konsistenzzahl I _C [-]		0,54	0,81 - 0,87	0,56 - 0,59
Korndichte ρ _s [g/cm ³]		2,70 - 2,73		

Tabelle 4.1: Bodenmechanische Kenngrößen des Tons

4.3 Erste Versuchsreihe – Axial zyklische Zugschwellversuche

4.3.1 Pfahlherstellung und Vorbereitung Versuchsfeld

Für die erste Versuchsreihe wurden acht Mikropfähle hergestellt. Um bei allen Pfählen möglichst identische zylindrische Pfahlgeometrien zu erzeugen, wurden die Pfahlbohrungen als verrohrte Bohrungen mit Innenschnecke ausgeführt. Der Außendurchmesser der Verrohrung betrug 152 mm und die Verrohrung wurde bis in eine Tiefe von 4,2 m unter Geländeoberfläche abgeteuft. Anschließend wurde der GEWI-Stahl (Durchmesser 50 mm) mit Hilfe von Abstandshaltern zentrisch in das Bohrloch eingestellt und das Bohrloch mit Zementsuspension (CEM II 32,5 R, W/Z-Wert = 0,45) verfüllt. Abschließend wurde mit geringem Druck (< 5 bar) verpresst, bis ein Austritt von Suspension oben am Bohrloch festgestellt wurde. Abbildung 4.1 bis Abbildung 4.4 zeigen die unterschiedlichen Schritte der Pfahlherstellung.

Nach Ziehen der Verrohrung wurde in die frische Zementsuspension eine Stahlhülse bis 0,2 m unter Geländeoberfläche eingedrückt (siehe Abbildung 4.5). Diese Stahlhülse dient zum einen dem Schutz des Pfahlkopfes, zum anderen wird an der Stahlhülse eine Vorrichtung zum Befestigen der Wegaufnehmer, die während der Versuche die Pfahlkopfverschiebungen messen, angebracht. Die Pfähle wurden in einem Raster von 4,0 m angeordnet (siehe Abbildung 4.6).



Abbildung 4.1: Bohren mit Außenverrohrung und Innenschnecke



Abbildung 4.2: Verfüllen mit Zementsuspension



Abbildung 4.3: Verpressen



Abbildung 4.4: Versuchsfeld nach Pfahlherstellung, Schutz der Stähle mit KG-Rohren



Abbildung 4.5: Stahlhülse

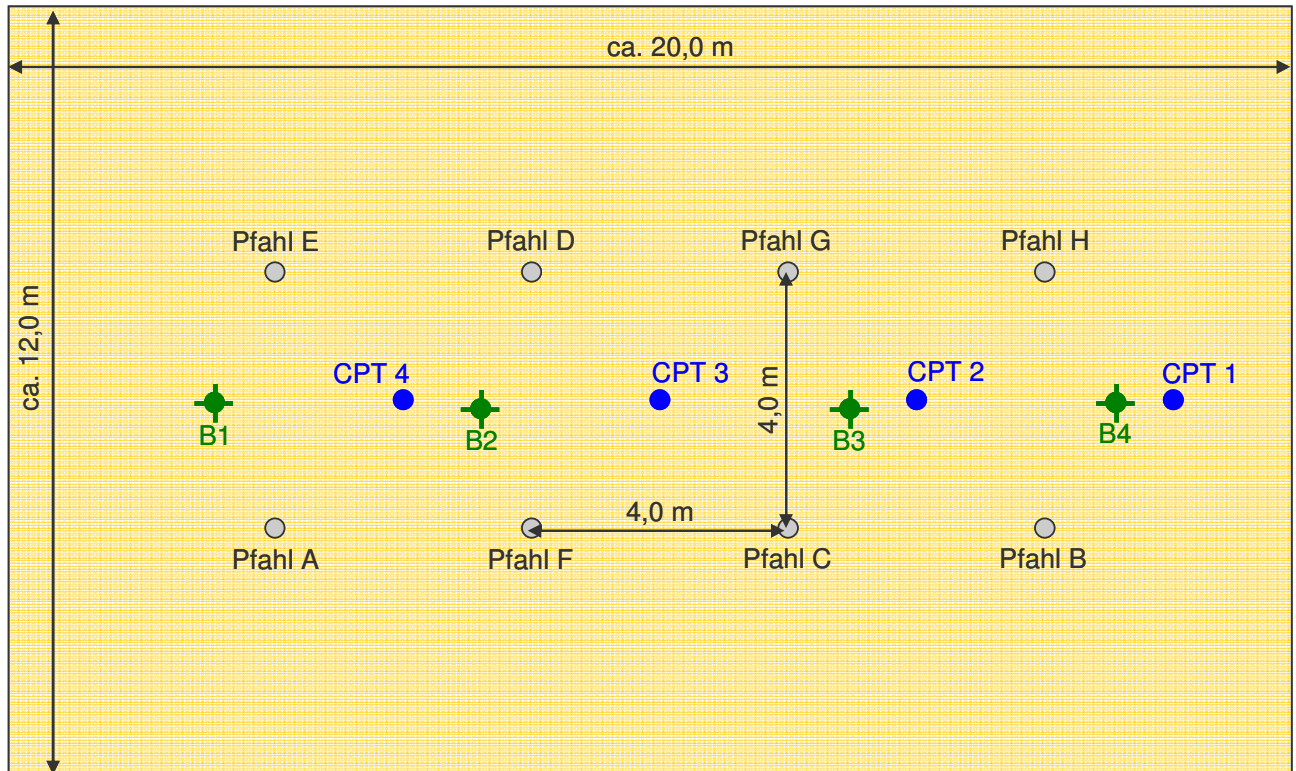


Abbildung 4.6: Anordnung der Pfähle (1. Versuchsreihe) und Lage der Aufschlussbohrungen und Drucksondierungen im Versuchsfeld

- ...Mikropfähle
- ⊕ ...Aufschlussbohrungen
- ...Drucksondierungen

An Rückstellproben der Frischzementsuspension wurde am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München die Druckfestigkeit an prismatischen Probekörpern (ca. 40 mm · 40 mm · 80 mm) nach 7 bzw. 28 Tagen geprüft. Die Probekörper wiesen nach DIN EN 196-1:1994 im Mittel eine Druckfestigkeit von $R_c = 30,7 \text{ N/mm}^2$ nach 7 Tagen und von $R_c = 50,3 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen auf. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen liegt somit deutlich über dem in DIN EN 14199 geforderten Wert für die einaxiale Druckfestigkeit von 25 N/mm^2 .

Ein dreischichtiges Arbeitsplanum aus einem geotextilen Vliesstoff zur Trennung des feinkörnigen Untergrunds vom Tragschichtmaterial, einem Geogitter zur Bewehrung und einer Tragschicht aus Granitsplitt (siehe Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8) gewährleistete die wetterunabhängige Begehbarkeit des Versuchsfeldes und diente als ebene Auflagerfläche für die Fundamente der Last- und Messbrücke.



Abbildung 4.7: Arbeitsplanum



Abbildung 4.8: Dreischichtaufbau Arbeitsplanum

4.3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In Abbildung 4.9 bis Abbildung 4.13 ist der Aufbau der Belastungseinrichtung sowie der Messbrücke zu sehen.

Alle Versuche wurden als kraftgesteuerte Versuche durchgeführt. Die Lastaufbringung erfolgte hydraulisch mit einem speziell für zyklische Langzeitversuche abgedichteten Hohlkolbenzylinder (LHC140-55/175 mit gleitarmen Dichtungen). Die Kraftmessdose war zwischen dem Hohlkolbenzylinder und einer am Stahltragglied befestigten Anker Mutter angeordnet (siehe Abbildung 4.11). Zur Aufbringung der Zugkräfte fährt der Hohlkolbenzylinder aus und die Kraftmessdose wird gegen die Anker Mutter gedrückt. Dadurch entsteht ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Hohlkolbenzylinder, Kraftmessdose und Stahltragglied. Zur zentrischen Krafteinleitung in das Stahltragglied wurden unterhalb des Hohlkolbenzylinders und oberhalb der Kraftmessdose Kugelkalotten angeordnet.

Das Anfahren der einzelnen Laststufen erfolgte bei den statischen Pfahlprobelastungen manuell, die Lastkonstanthaltung erfolgte über einen rechnergestützten Regelkreis (siehe Abbildung 4.14). Bei den zyklischen Pfahlversuchen erfolgt die gesamte Versuchssteuerung rechnergestützt.

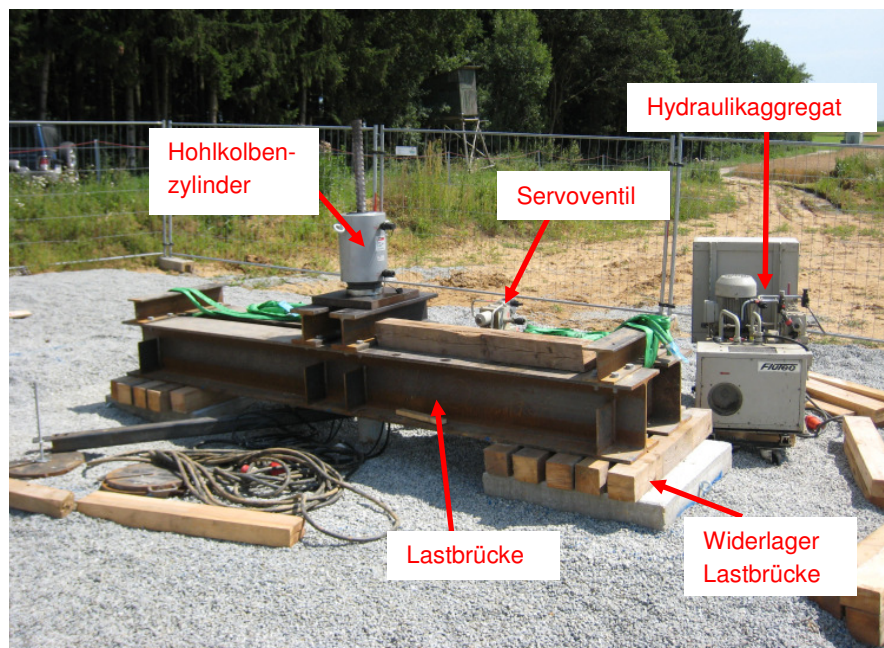


Abbildung 4.9: Versuchsaufbau statische Probelastung



Abbildung 4.11: Detail Lastaufbringung und Kraftmessung

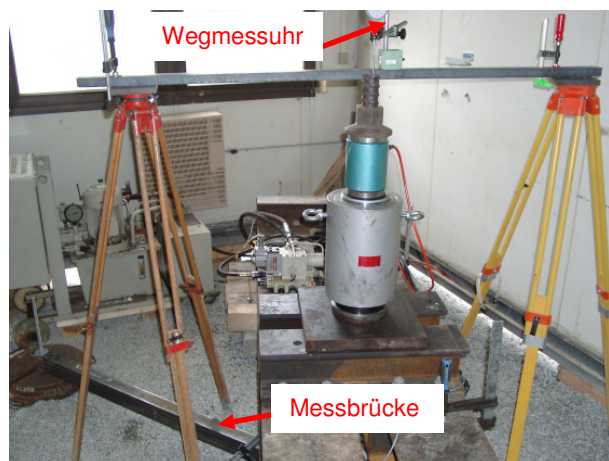


Abbildung 4.10: mechanische Messuhr und Messbrücke

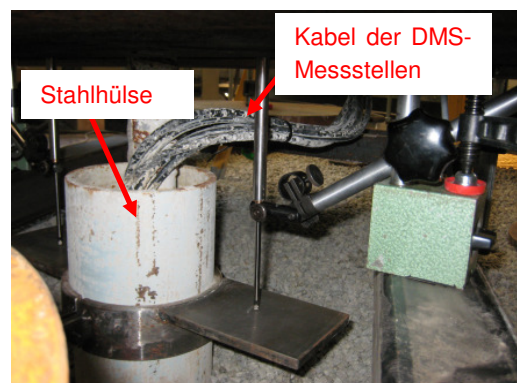


Abbildung 4.12: digitaler Wegaufnehmer



Abbildung 4.13: Schutz des Versuchsaufbaus mit Baucontainer

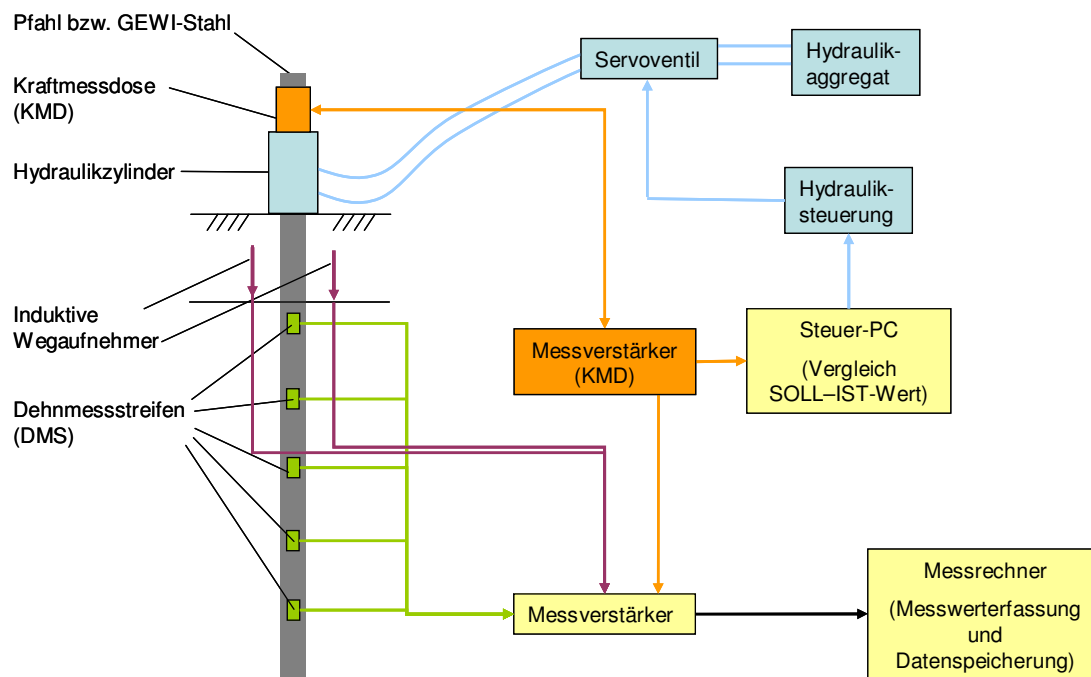


Abbildung 4.14: Schematische Darstellung der Versuchssteuerung und der elektronischen Messwerterfassung

4.3.2.1 Versuchsablauf der statischen Referenzversuche

An drei der insgesamt acht Mikropfähle (Pfahl B, E und F) wurden statische Pfahlprobelastungen auf Zug durchgeführt, um die Tragfähigkeit der Pfähle unter statischer Belastung als Referenzwert für die später ermittelten Tragfähigkeiten unter axial zyklischer Belastung zu ermitteln.

Die Vorlaststufe wurde zu 5 kN gewählt, so dass ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Kraftmessdose und Belastungseinrichtung und der Kontakt zwischen den Wegaufnehmern und dem Pfahl sichergestellt waren.

Die Laststeigerung bei Pfahl B und Pfahl F erfolgte in 5 kN- bzw. 10 kN-Schritten (Vorlast 5 kN, Laststufen: 10 kN, 20 kN, 30 kN, 40 kN, 50 kN bis 110 kN). Die Zwischenentlastung erfolgte bei 50 kN. Für den Erstbelastungsast betrug die Belastungsgeschwindigkeit $v_{\text{Erstbelastung}} = 0,04 \text{ kN/s}$, bei Ent- und Wiederbelastung betrug die Belastungsgeschwindigkeit $v_{\text{Ent-/Wiederbelastung}} = 0,067 \text{ kN/s}$.

Bei Pfahl E erfolgte die Belastung in 25 kN- bzw. 20 kN-Schritten (Vorlast 5 kN, Laststufen: 30 kN, 50 kN, 70 kN usw.) ohne Zwischenentlastung bei 50 kN und die Belastungsgeschwindigkeit wurde zu $v_{\text{Erstbelastung}} = 0,11 \text{ kN/s}$ gewählt.

In Abbildung 4.15 ist exemplarisch der Ablauf der statischen Probelastung von Pfahl B dargestellt (Versuchsablauf der Pfähle E und F in Anhang 1.5).

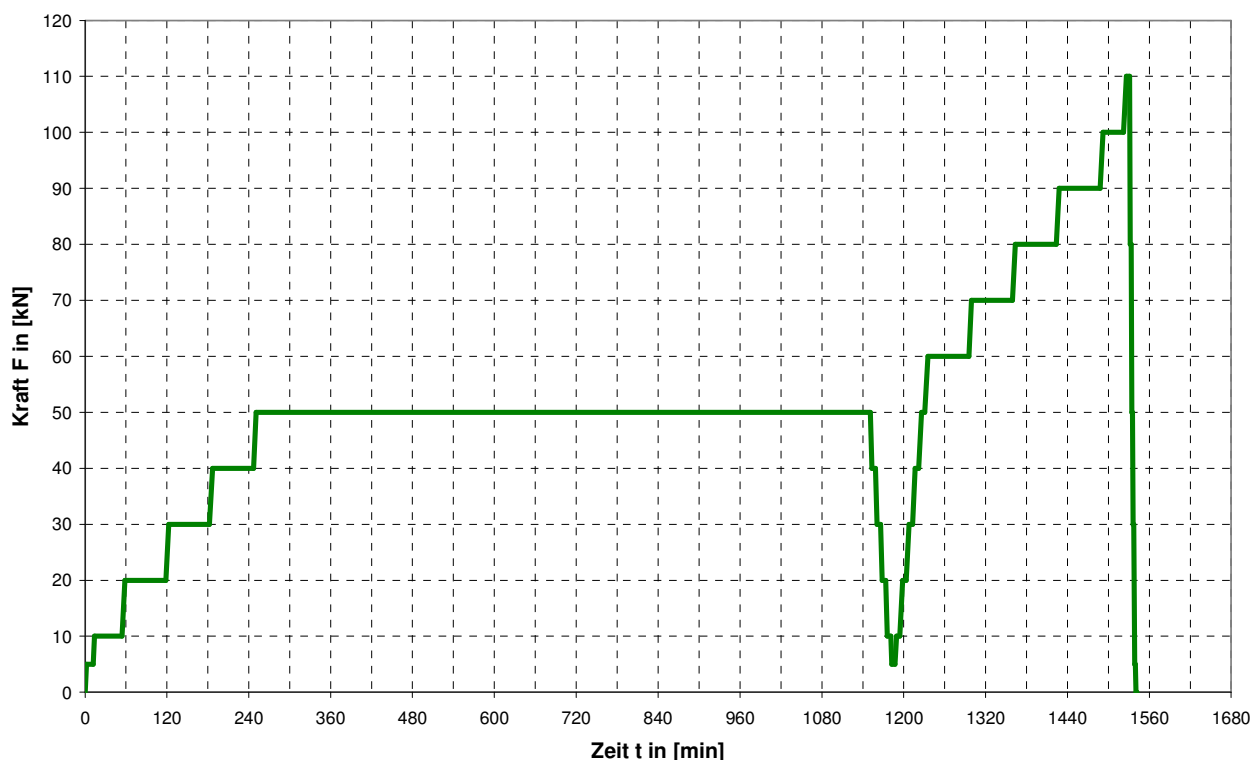


Abbildung 4.15: Versuchsablauf der statischen Pfahlprobelastung von Pfahl B

4.3.2.2 Versuchsablauf der kraftgesteuerten Zugschwellversuche

Die Vorlaststufe wurde wie bei den statischen Probelastungen zu 5 kN gewählt, so dass ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Kraftmessdose und Belastungseinrichtung und der Kontakt zwischen den Wegaufnehmern und dem Pfahl sichergestellt waren. Die Vorlaststufe wurde einige Minuten konstant gehalten, anschließend wurde die Last bis zum jeweiligen mittleren Lastniveau F_{mittel} gesteigert. Die Belastungsgeschwindigkeit lag bei $v = 0,04 \text{ kN/s}$. Diese Laststufe wurde wiederum für einige Minuten konstant gehalten, bevor der Pfahl mit einer Zugschwelllast belastet wurde. Der Verlauf der Belastung entsprach einer Sinusfunktion, die Dauer eines Lastzyklus betrug 60 s (Frequenz 0,017 Hz). In Abbildung 4.16 ist exemplarisch der Versuchsablauf von Pfahl A–Belastung 1 dargestellt.

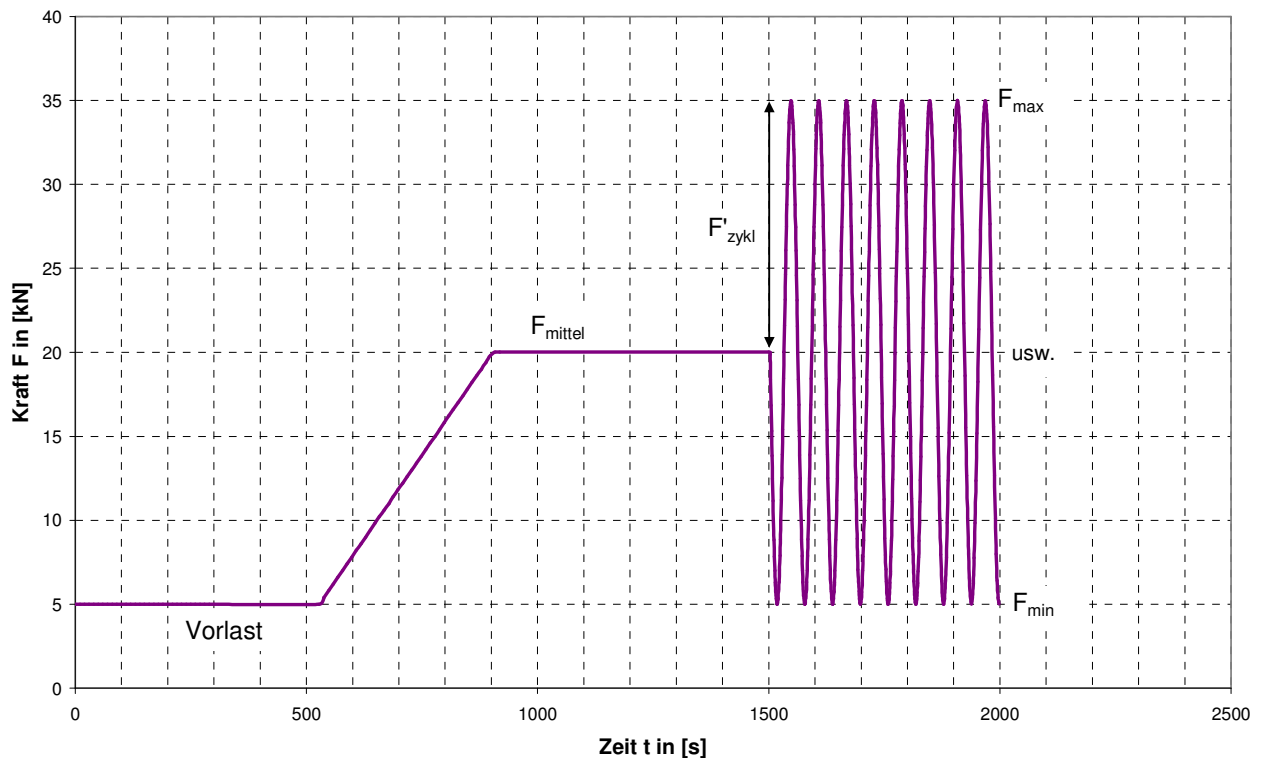


Abbildung 4.16: Versuchsablauf zyklischer Pfahlversuch (Pfahl A – Belastung 1)

4.3.3 Messtechnik

Die Pfahlkopfverschiebungen wurden während der Versuche über zwei digitale Wegaufnehmer (Typ WA-T 100 mm der Fa. Hottinger) knapp über Geländeoberkante und zusätzlich über eine mechanische Messuhr am Ende des GEWI-Stahls erfasst. Vor Beginn und nach Abschluss des Versuchs wurde zusätzlich die Höhenlage des Pfahlkopfes mittels Feinnivellement bestimmt.

Die Messung der Kraft erfolgt über eine Kraftmessdose (PRE 1000 kN der Fa. Huggenberger, Messabweichung von max. 1 kN je 100 kN).

Zur Erfassung der Verteilung des Längskraftverlaufs über die Pfahltiefe wurden an den Traggliedern auf einer Länge von 3,0 m jeweils 5 Messstellen mit Dehnmessstreifen (DMS) im Abstand von 0,75 m bestückt (siehe Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18). Die DMS wurden als Vollbrückenschaltung ausgeführt, um evtl. auftretende Biegebeanspruchungen im Tragglied während der Versuche zu kompensieren. Die DMS wurden dreifach gegen Nässe und Beanspruchungen während des Transports und des Einbaus geschützt (Silikonschutzschicht, Überdeckung mit Kautschuk, Ummantelung mit Walzblei) (siehe Abbildung 4.19 bis Abbildung 4.21).

Die Kalibrierung der DMS erfolgte für einen Messbereich von 0 kN bis 300 kN in einem Versuchsstand (siehe Anhang 1.4) in der Prüfhalle am Zentrum Geotechnik der TU München. Die DMS wiesen für den untersuchten Lastbereich eine hohe Linearität auf. Die maximale Abweichung der DMS-Messwerte zum Messwert der Kraftmessdose betrug 1 kN.

Die Datenerfassung für die beiden induktiven Wegaufnehmer, das Kraftsignal sowie die fünf mit DMS bestückten Messstellen erfolgte automatisch. Die Messfrequenz betrug 2 Hz.

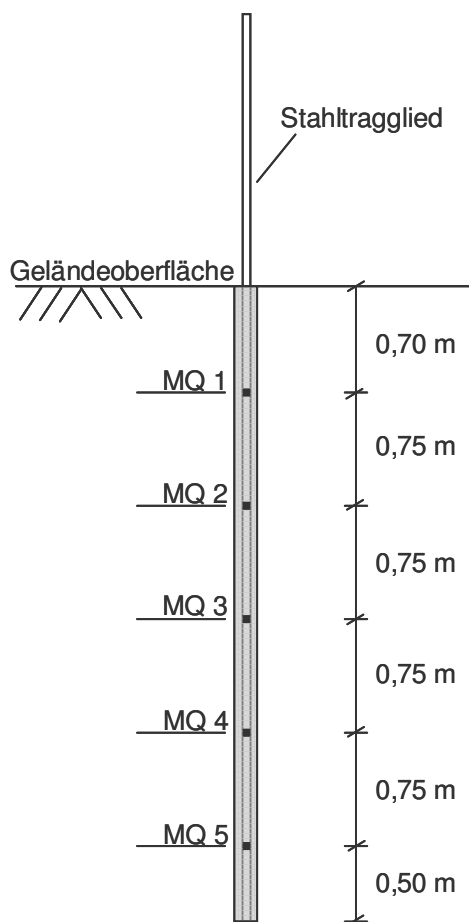


Abbildung 4.18: Messquerschnitte Pfahl



Abbildung 4.17: DMS auf GEWI-Stahl

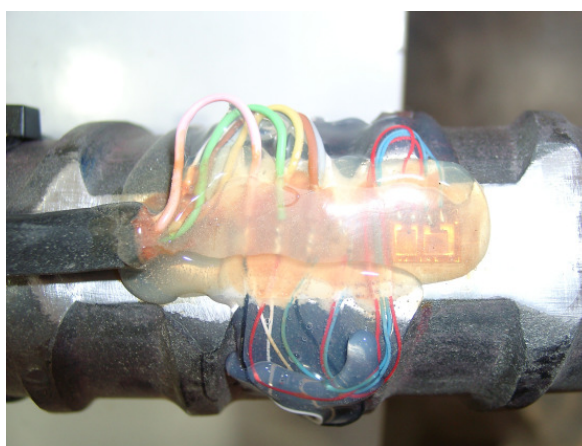


Abbildung 4.19: Silikon-Schutzschicht

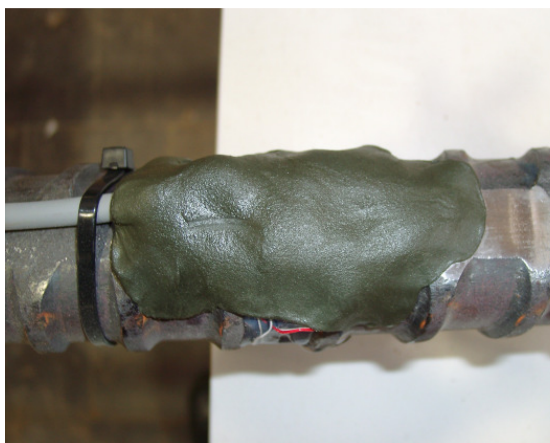


Abbildung 4.20: Kautschuk-Schicht



Abbildung 4.21: Ummantelung mit Walzblei

4.3.4 Versuchsauswertung statische Pfahlprobelastungen

4.3.4.1 Pfahlverschiebungen und charakteristischer Pfahlzugwiderstand

In Abbildung 4.22 sind die Widerstands-Hebungslinien der drei durchgeführten statischen Pfahlprobelastungen dargestellt. Die Ermittlung der Widerstands-Hebungslinien erfolgte durch Mittelwertbildung der Messwerte der induktiven Wegaufnehmer.

Bis zu einer Last von ca. 70 kN verlaufen die Widerstands-Hebungslinien aller drei Pfähle nahezu gleich. Tendenziell weist Pfahl E die größten Verschiebungen auf, Pfahl F die geringsten. Dies bedeutet, dass die höhere Belastungsgeschwindigkeit und die größere Steigerung der Laststufen bei Pfahl E (siehe Abschnitt 4.3.2.1) zu größeren Pfahlhebungen im Vergleich zu den beiden anderen Pfählen führt.

Die geringeren Hebungen bei der Laststufe von 90 kN sind darauf zurückzuführen, dass die Laststufe bei Pfahl E vor der Entlastung nur für 20 Minuten gehalten wurde (Pfahl F und B: 60 Minuten). Hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit sind Pfahl B und E dennoch gut vergleichbar.

Pfahl F, der ca. 9 Monate nach Pfahl B und E belastet wurde, zeigt ein deutlich steiferes Tragverhalten. So betragen die Pfahlkopfhebungen bei 80 kN nur etwa zwei Drittel der Verschiebungen von Pfahl B und bei 90 kN nur etwa die Hälfte. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass sich die statische Tragfähigkeit der Mikropfähle mit zunehmender Standzeit vor der Erstbelastung verbessert.

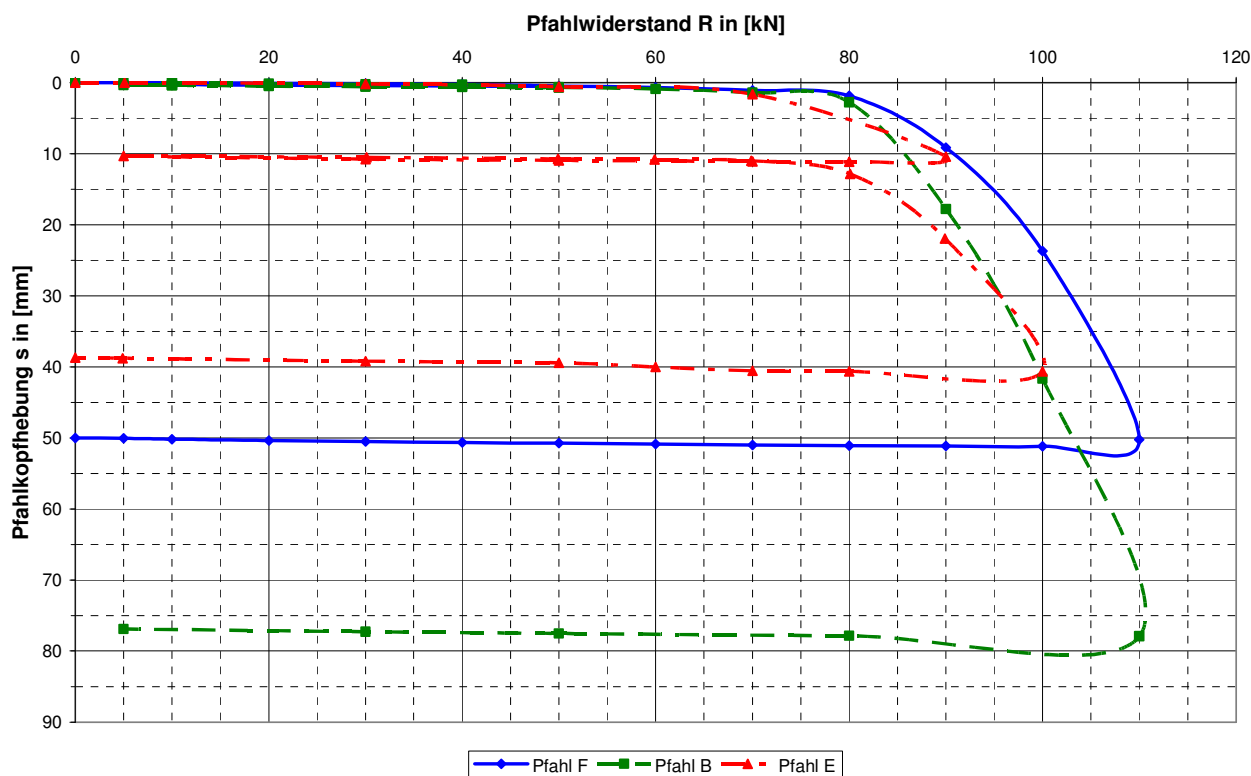


Abbildung 4.22: Widerstands-Hebungslinien aus statischen Pfahlprobelastungen

Für jede Laststufe während der statischen Pfahlprobebelastung wurde das Kriechmaß k_s in Anlehnung an DIN 4125 bestimmt. Das Kriechmaß ist definiert zu

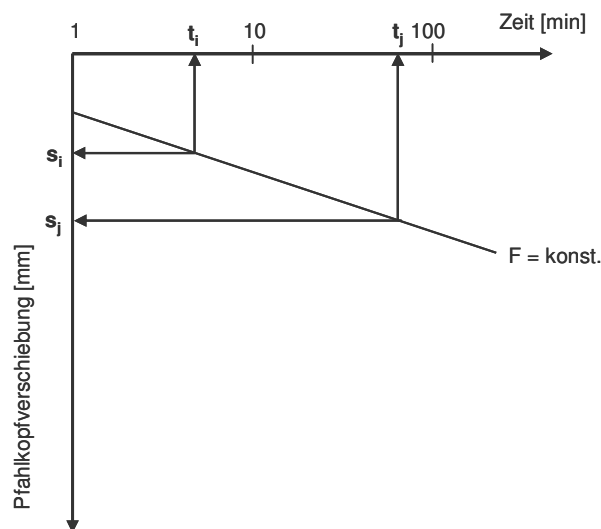
$$k_s = \frac{s_j - s_i}{\log \frac{t_j}{t_i}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{Gl. 4.2})$$

mit

s_i : Verschiebung zum Zeitpunkt t_i

s_j : Verschiebung zum Zeitpunkt t_j

(siehe Abbildung 4.23)



Zeit-Verschiebungskurve für eine Laststufe

Abbildung 4.23: Definition Kriechmaß

In Abbildung 4.24 sind exemplarisch die aus den Messwerten der Wegaufnahme gemittelten Zeit-Verschiebungslinien für die Laststufen 50 kN, 70 kN, 80 kN und 90 kN von Pfahl B dargestellt. Im bindigen Boden nahmen die Verschiebungen unter einer konstanten Last mit der Zeit deutlich zu und erst ab Beobachtungszeiten von ca. 20 Minuten wiesen die Zeit-Verschiebungsverläufe im halblogarithmischen Maßstab einen linearen Verlauf auf, so dass das Kriechmaß abgeleitet werden konnte. Bei einer zu geringen Beobachtungszeit wurden die Kriechmaße unterschätzt. Die Ermittlung der Kriechmaße erfolgte für diese Laststufen daher für Beobachtungszeiten von mehr als 20 Minuten.

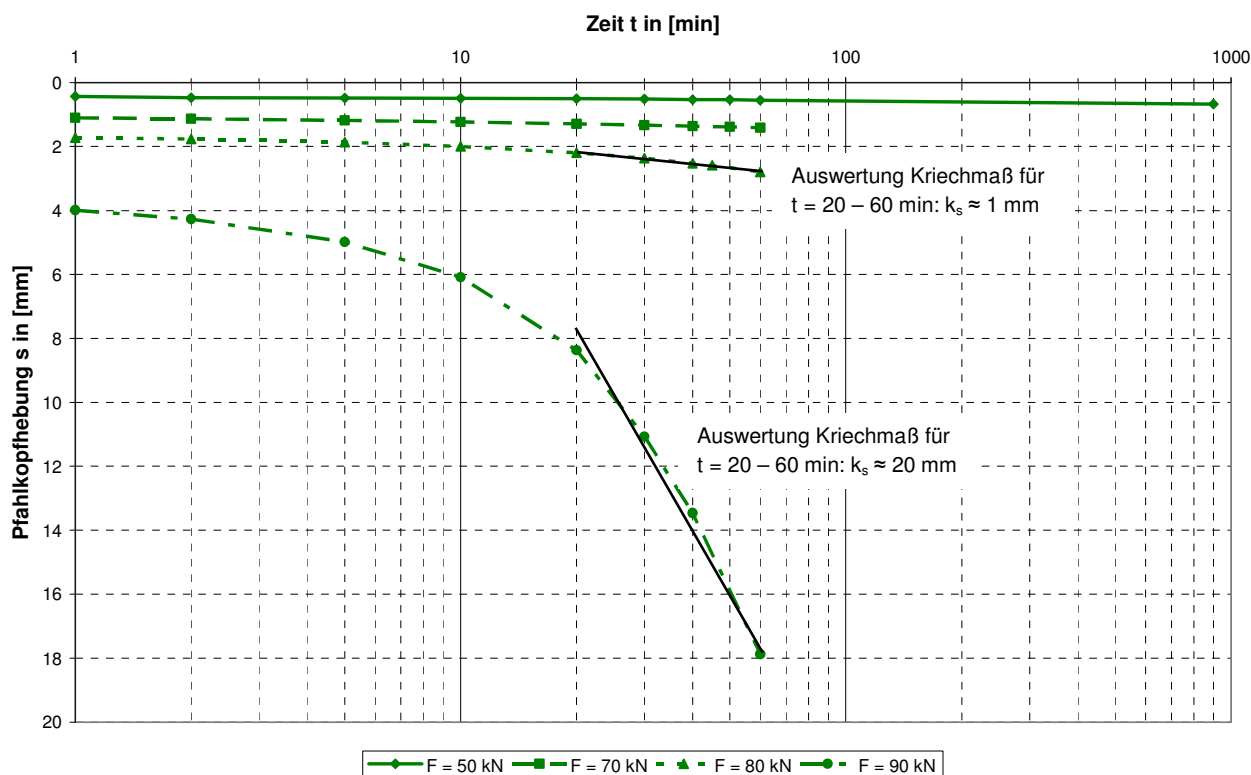


Abbildung 4.24: Bestimmung der Kriechmaße bei Pfahl B für die Laststufen 80 kN und 90 kN

In Abbildung 4.25 sind die Kriechmaße des Erstbelastungspfads in Abhängigkeit vom Pfahlwiderstand für die Laststufen bis 90 kN dargestellt (Darstellung aller Laststufen in Anhang 1.6). Das Kriechmaß von Pfahl E bei einem Pfahlwiderstand von 90 kN wird unterschätzt, da die Beobachtungsdauer dieser Laststufe lediglich 20 min betrug.

Die Auswertung ergibt, dass die Kriechmaße bis zu einer Belastung von 70 kN zwischen $k_s = 0,02 \text{ mm}$ und $k_s = 0,3 \text{ mm}$ liegen. Bei Steigerung der Last darüber hinaus nehmen die Kriechmaße überproportional zu.

Die Kriechmaße von Pfahl B und Pfahl F unterscheiden sich bei Pfahlwiderständen von 80 kN und 90 kN um ca. den Faktor 2. Die deutlich geringeren Kriechmaße bei Pfahl F bestätigen die Vermutung, dass sich die Pfahltragfähigkeit mit zunehmender Standzeit der Pfähle vor ihrer Erstbelastung verbessert.

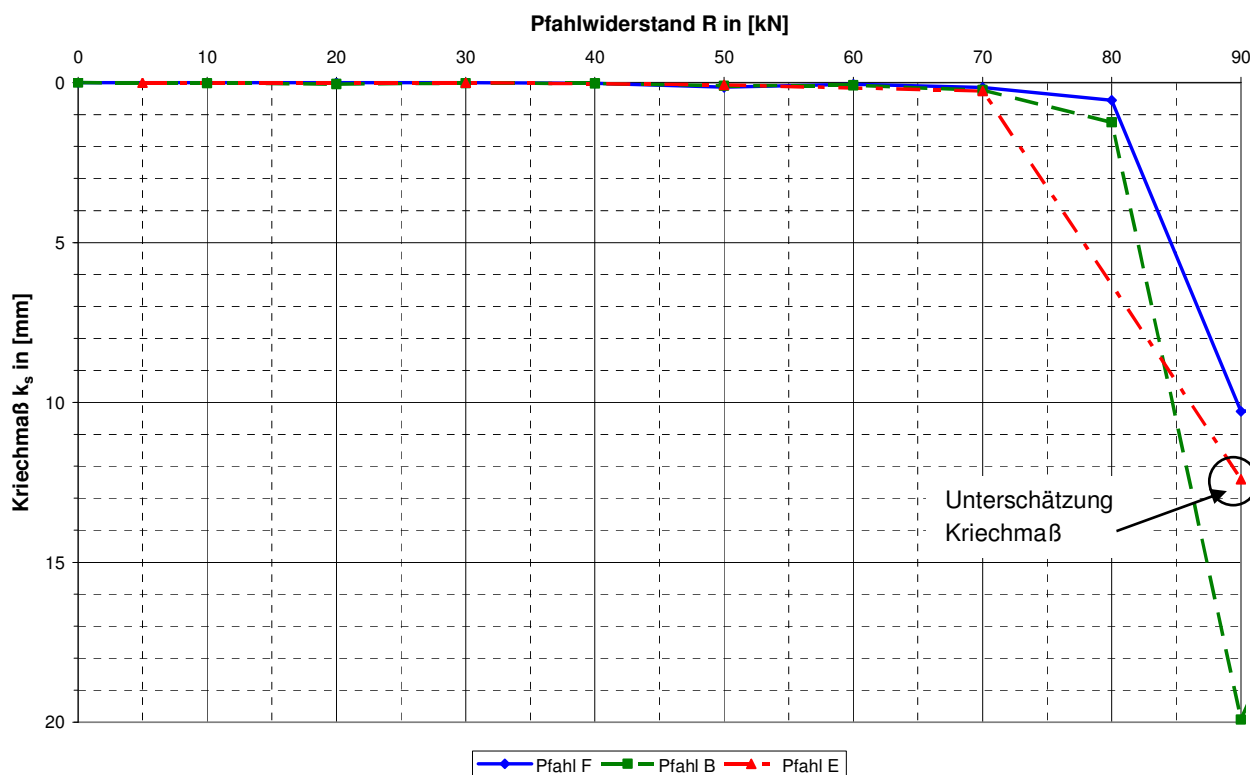


Abbildung 4.25: Aus den statischen Pfahlprobelastungen ermittelte Kriechmaße für Laststufen bis 90 kN

In Tabelle 4.2 sind die Pfahlwiderstände für unterschiedliche Versagenskriterien dargestellt. Zum einen wird eine Gesamtverschiebung des Pfahlkopfes von $s_g = 0,1 \cdot D$ als Versagenskriterium analog zu Großbohrpfählen definiert. Bei einem Pfahldurchmesser von ca. 150 mm entspricht dies einer Gesamtverschiebung von 15 mm. Zum anderen wird in Anlehnung an Ankerprüfungen ein Versagenskriterium anhand des Kriechmaßes bei Lastkonstanthaltung festgelegt. Für Verpressanker liegt das zulässige Kriechmaß bei 2 mm, bei verpressten Mikropfählen wird in der Literatur (siehe z.B. SCHWARZ, 2002) häufig ein Kriechmaß von 1 mm als maximal zulässig angegeben.

Auf Grundlage aller in Tabelle 4.2 ermittelten Einzelpfahlwiderstände wird als charakteristischer Herauszieh Widerstand der Pfähle unter statischer Belastung ein Wert von $R_{t,k} = 80 \text{ kN}$ festgelegt und als Referenztragfähigkeit bei der Auswertung der Zugschwellversuche angesetzt.

Versagenskriterium \ Pfahlwiderstand	$R_{t,m,i}$ [kN]		
	Pfahl F	Pfahl B	Pfahl E
$s_g = 15 \text{ mm}$	94,8	88,5	83,3 (aus Wiederbelastungsast)
$k_s \leq 1,0 \text{ mm}$	80,4	77,6	auf Grund des großen Sprungs von k_s zwischen 70 kN und 90 kN nicht ausgewertet
$k_s \leq 2,0 \text{ mm}$	81,5	80,4	auf Grund des großen Sprungs von k_s zwischen 70 kN und 90 kN nicht ausgewertet

Tabelle 4.2: Pfahlwiderstände aus statischen Pfahlprobelastungen

4.3.4.2 Verteilung der Längskraft im Pfahl und Mantelreibung

Vor der Auswertung des Kraftverlaufs im Stahltragglied und der sich daraus ergebenden Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe wurden die Mikropfähle nach Abschluss der Versuchsreihe vollständig aus dem Boden gezogen. Dabei wurde festgestellt, dass die Mikropfähle die erwartete gleichmäßige zylindrische Form über die gesamte Pfahllänge mit einem Durchmesser von ca. 150 mm aufweisen (siehe Abbildung 4.26). Dies erlaubt bei der Auswertung der Mantelreibungsverteilung den Ansatz eines konstanten Pfahldurchmessers über die gesamte Pfahltiefe.

Nach dem Ausbau wurden die Mikropfähle nochmals in den Versuchsstand in der Versuchsrube des Zentrum Geotechnik eingebaut und die Dehnmessstreifen erneut kalibriert. Die Abweichungen der Kalibriergeraden vor und nach der Pfahlherstellung, die teilweise festgestellt wurden, sind auf die Pfahlherstellung, insbesondere die Verfüllung bzw. Verpressung des Bohrlochs mit Zementsuspension zurückzuführen. Zur Ermittlung des Mantelreibungsverlaufs wurden die korrigierten Kalibriergeraden verwendet.



Abbildung 4.26: Zwei ausgebaute Mikropfähle

Aus dem über die DMS gemessenen Längskraftverlauf über die Pfahltiefe wurde für die Pfahlabschnitte zwischen den Messquerschnitten die Mantelreibung zu

$$\tau_{i-j} = \frac{(F_j - F_i)}{A_{s,i-j}} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

mit

τ_{i-j} : Mantelreibung zwischen Messquerschnitt i und j

F_i : Längskraft bei Messquerschnitt i

$A_{s,i-j}$: Pfahlmantelfläche zwischen Messquerschnitt i und j (siehe auch Abbildung 4.27)

ermittelt.

An der Geländeoberfläche bei Messquerschnitt 0 wird als Längskraft im Pfahl die aufgebrachte Last angesetzt. Am Pfahlfuß bei Messquerschnitt 6 wird bei den auf Zug belasteten Pfählen die Längskraft zu Null angenommen.

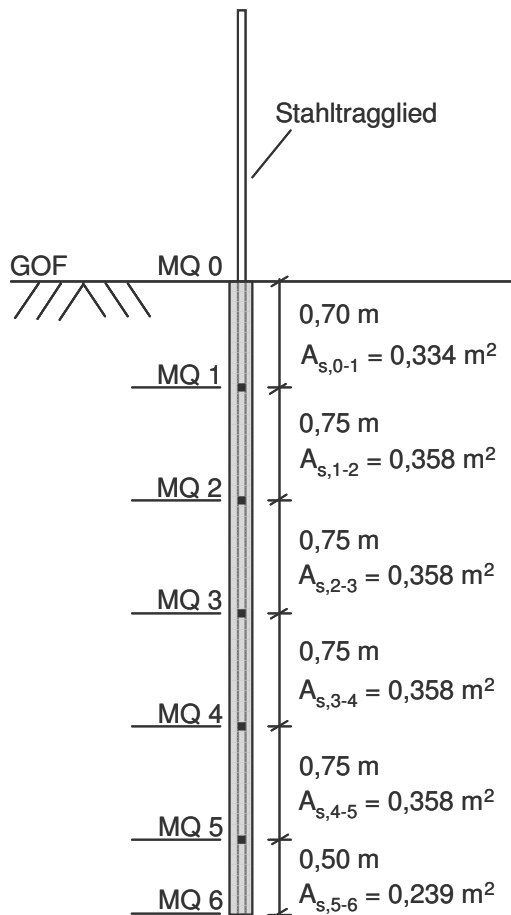


Abbildung 4.27: Messquerschnitte und Pfahlmantelflächen

Auf Grund von Ausfällen einiger DMS, die vermutlich auf Feuchtigkeit zurückzuführen sind, die trotz des Schutzes in die Messstellen eindringen konnte, ist ein Vergleich der Mantelreibung bei den statisch auf Zug belasteten Pfählen B, E und F nicht für alle Pfahlabschnitte möglich. In Anhang 1.7 sind die ermittelten Mantelreibungsverläufe für die einzelnen Pfähle dargestellt. Die Auswertung in Abbildung 4.28 zeigt, dass die Mantelreibung mit zunehmender Last bis zu einer Laststeigerung auf 30 kN in allen betrachteten Pfahlabschnitten ansteigt. Zwischen Geländeoberfläche und dem Messquerschnitt 1 (τ_{0-1}) ist die Mantelreibung am größten. Darunter sind die Mantelreibungswerte deutlich geringer und nehmen dann zum Pfahlfuß hin wieder zu. Zwischen Messquerschnitt 5 und dem Pfahlfuß (τ_{5-6}) weist die Mantelreibung den zweitgrößten Wert auf.

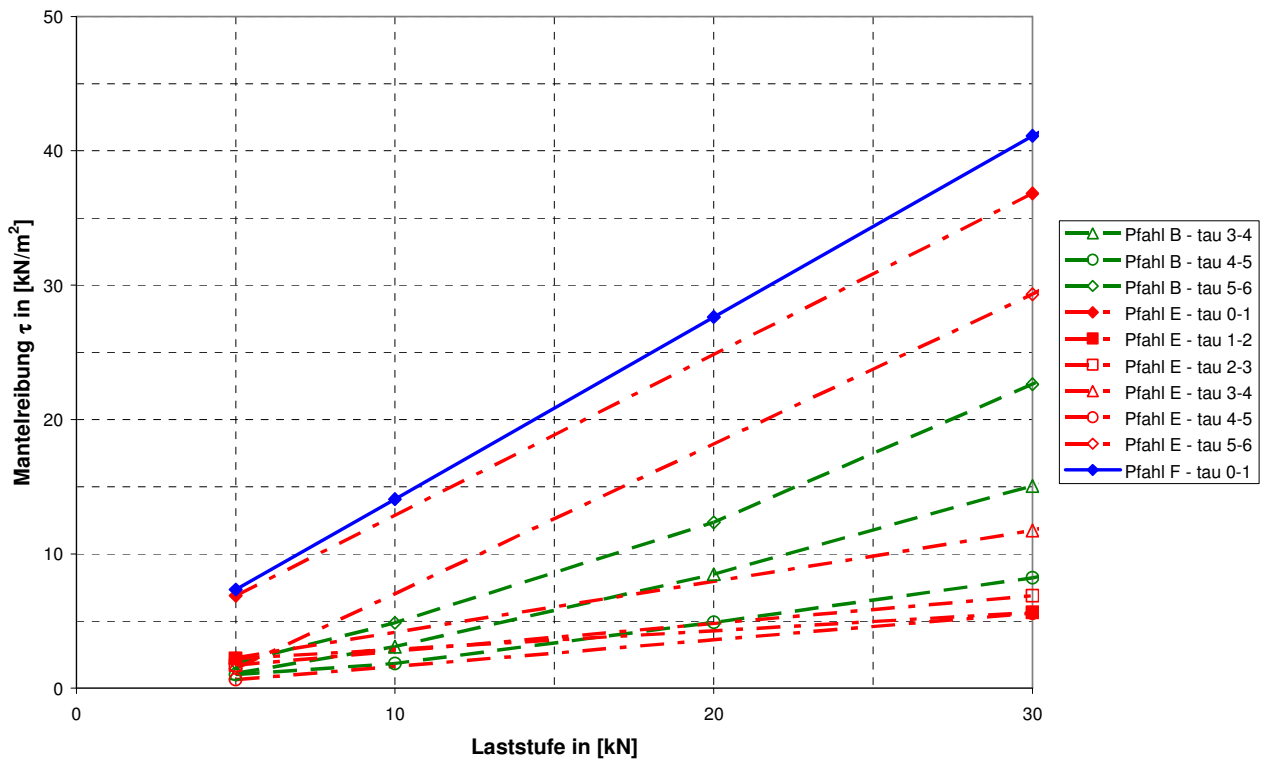


Abbildung 4.28: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe bei Laststufen bis 30 kN

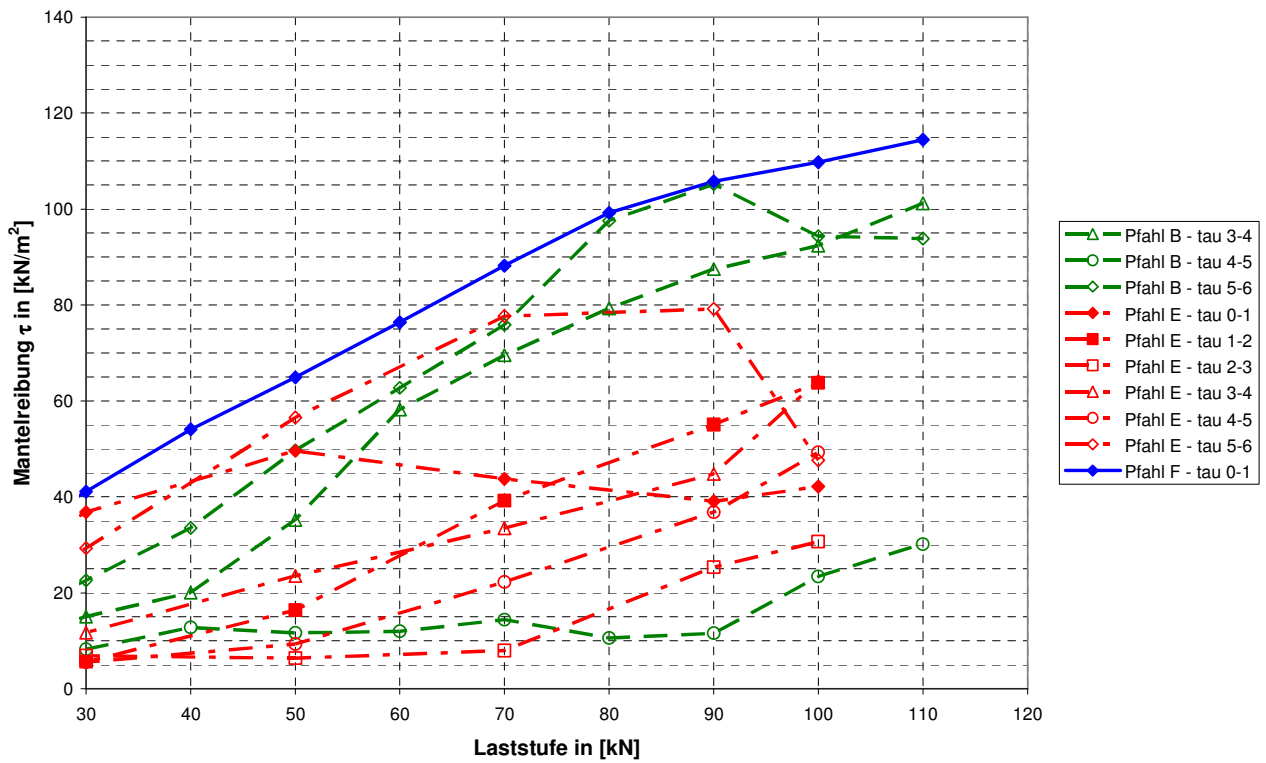


Abbildung 4.29: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe bei Laststufen ab 30 kN

Für höhere Laststufen unterscheidet sich die Entwicklung der Mantelreibung bei den einzelnen Pfählen z.T. deutlich. Bei Pfahl E nimmt die Mantelreibung zwischen Messquerschnitt 0 und 1 (tau 0-1) ab 50 kN und zwischen Messquerschnitt 5 und 6 (tau 5-6) ab 90 kN ab, wohingegen die Mantelreibungswerte zwischen den Messquerschnitten 1 und 5 (tau 1-2 bis tau 4-5) mit steigender Last zur Tiefe hin stärker zunehmen. Insgesamt ist bei Pfahl E mit zunehmender Last eine Vergleichmäßigung der Mantelreibung über die Pfahltiefe zu erkennen.

Bei Pfahl F nimmt die Mantelreibung zwischen Messquerschnitt 0 und 1 (tau 0-1) mit steigender Last zu, ein Abfall der Mantelreibung wie bei Pfahl E ist hier nicht festzustellen. Für die anderen Pfahlabschnitte bei Pfahl F können keine Aussagen getroffen werden, da Dehnmessstreifen bei den Messquerschnitten 2, 4 und 5 defekt waren.

Bei Pfahl B ist wie bei Pfahl E ab 90 kN eine Abnahme der Mantelreibung zwischen den Messquerschnitten 5 und 6 (tau 5-6) festzustellen. Eine stärkere Zunahme der Mantelreibung ist bei 50 kN zwischen Messquerschnitt 3 und 4 (tau 3-4) und bei 90 kN zwischen Messquerschnitt 4 und 5 (tau 4-5) zu erkennen. Eine so deutliche Vergleichmäßigung der Mantelreibung wie bei Pfahl E findet bei Pfahl B nicht statt.

4.3.5 Versuchsauswertung Zugschwellversuche

In Tabelle 4.3 sind die Versuchsdaten der einzelnen Zugschwellversuche in der chronologischen Reihenfolge der Versuchsdurchführung zusammengefasst. In Abbildung 4.30 sind die Versuche im Interaktionsdiagramm bezogen auf den in den statischen Pfahlprobelastungen ermittelten charakteristischen Herauszieh Widerstand von $R_{t,k} = 80 \text{ kN}$ dargestellt. Ausgehend von einem Verhältnis des mittleren Lastniveaus zum charakteristischen Herauszieh Widerstand von $F_{\text{mittel}} / R_{t,k} = 0,25$ und einem Verhältnis der zyklischen Lastamplitude zum charakteristischen Herauszieh Widerstand von $F'_{\text{zykl}} / R_{t,k} = 0,19$ (Pfahl A – Belastung 1) wurde zunächst das mittlere Lastniveau bis auf ein Verhältnis von $F_{\text{mittel}} / R_{t,k} = 0,63$ gesteigert (Pfahl A – Belastung 2), da bei Pfahl A-Belastung 1 die mittleren Pfahlverschiebungen auch nach über 50.000 Zyklen weniger als 1,0 mm betragen. Ausgehend von diesem Lastniveau wurde die Lastamplitude bei den Pfählen H, D und G bis auf ein Verhältnis von $F'_{\text{zykl}} / R_{t,k} = 0,56$ (Pfahl G) erhöht. Bei Pfahl C wurde im Vergleich zu Pfahl D das Verhältnis des mittleren Lastniveaus zum charakteristischen Herauszieh Widerstand von $F_{\text{mittel}} / R_{t,k} = 0,63$ auf $F_{\text{mittel}} / R_{t,k} = 0,50$ reduziert, das Verhältnis der Lastamplitude zum charakteristischen Herauszieh Widerstand von $F'_{\text{zykl}} / R_{t,k} = 0,44$ wurde beibehalten.

Versuchsdaten Pfahl	Lastbild				Zyklenanzahl
	F_{mittel} [kN]	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	F'_{zykl} [kN]	N [-]
A (Belastung 1)	20	35	5	15	55.687
A (Belastung 2)	50	65	35	15	28.316
H	50	75	25	25	83.975
G	50	95	5	45	2.947
D	50	85	15	35	57.115
C	40	75	5	35	53.953

Tabelle 4.3: Durchgeführte zyklische Pfahlversuche

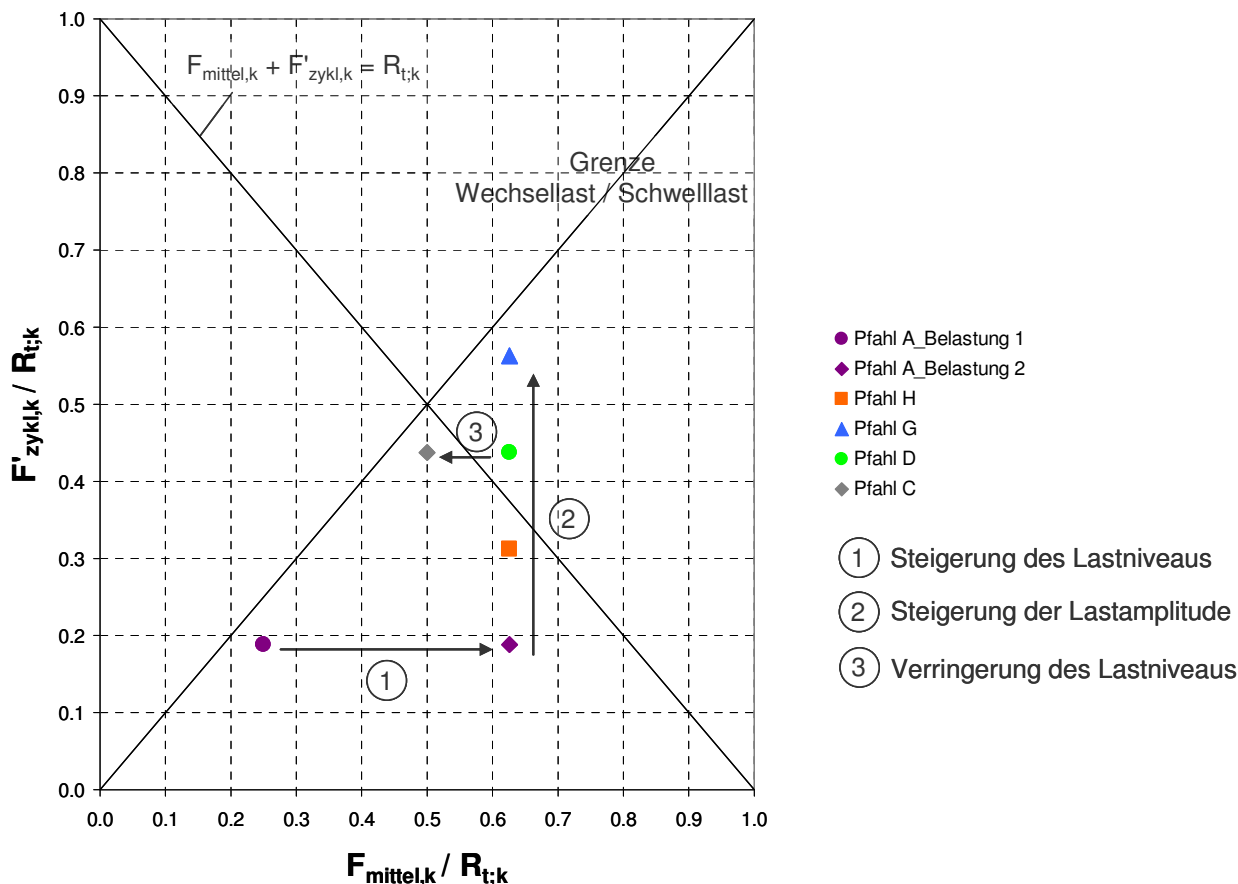


Abbildung 4.30: Darstellung der Zugschwellversuche im Interaktionsdiagramm

Auf Grund der großen Datenmengen, die sich während der zyklischen Versuche bei insgesamt acht Messkanälen (Kraft, 2x Weg, 5x DMS) und einer Messfrequenz von 1 Hz bzw. 2 Hz ergaben, wurden zur Versuchsauswertung mit Hilfe eines am Zentrum Geotechnik erstellten Auswerteprogramms jeweils nur die Maximal- und Minimalwerte jedes Messkanals pro Zyklus herausgefiltert. Für die Auswertung der Verschiebungen wurde der Mittelwert aus den Werten der beiden Wegaufnehmer gebildet.

Als Versagenskriterium für die Zugschwellversuche wird analog zu den statischen Pfahlprobelastungen eine mittlere Pfahlverschiebung von $s_g = 0,1 \cdot D = 15 \text{ mm}$ festgelegt. Als zusätzliches Versagenskriterium wird eine Verschiebungsspanne innerhalb eines Lastzyklus s_{zykl} von mehr als 15 mm definiert.

4.3.5.1 Mittlere Pfahlverschiebungen

In Tabelle 4.4 sind die mittleren Pfahlverschiebungen nach Erreichen des mittleren Lastniveaus (s_{mittel} bei $N = 0$), die Pfahlverschiebungen nach der maximalen Zyklenanzahl (s_{mittel} bei N_{max}) sowie der aus der zyklischen Belastung resultierende Anteil der mittleren Pfahlverschiebung (Δs_{zykl}) angegeben. In der letzten Spalte der Tabelle ist die Zyklenanzahl angegeben, für die die mittlere Pfahlverschiebung den Wert des Versagenskriteriums von $s_g = 15 \text{ mm}$ erreicht.

Pfahl	F_{mittel} [kN]	F'_{zykl} [kN]	s_{mittel} bei $N = 0$ [mm]	s_{mittel} (bei N_{max}) [mm]	$\Delta s_{\text{zykl}} =$ $s_{\text{mittel}}(N_{\text{max}}) -$ $s_{\text{mittel}}(N = 0)$ [mm]	Zyklenanzahl N bei $s_{\text{mittel}} = 15 \text{ mm}$ [-]
A (Belastung 1)	20	15	0,11	0,99 (55.687)	0,88	$> 10^6$ *)
A (Belastung 2)	50	15	0,28	1,11 (28.316)	0,83	$> 10^6$ *)
H	50	25	0,38	2,68 (83.975)	2,30	$> 10^6$ *)
G	50	45	0,40	53,76 (2.947)	53,36	≈ 160
D	50	35	0,38	71,95 (57.115)	71,57	≈ 2.200
C	40	35	0,25	20,60 (53.953)	20,35	≈ 34.400

Tabelle 4.4: Mittlere Pfahlverschiebungen

*) Zyklennzahl aus Verschiebungen in Abbildung 4.31 extrapoliert.

In Abbildung 4.31 sind die mittleren Pfahlverschiebungen für die Pfähle A und H über die Zyklennzahl dargestellt. Die Verschiebungen nehmen mit der Zyklennzahl insgesamt zu.

Die Schwankungen im Kurvenverlauf sind auf Temperatureinflüsse auf die Messbrücke infolge von Sonneneinstrahlung auf den Versuchscontainer zurückzuführen. Diese sind maßstabsbedingt auf Grund der insgesamt sehr geringen Verschiebungen von wenigen Millimetern deutlich zu erkennen. Die Extremwerte treten ca. alle 12 Stunden auf und korrespondieren mit den maximalen und minimalen Tages- und Nachttemperaturen, die mit Hilfe einer Wetterstation erfasst wurden.

Die mittleren Verschiebungen können gut durch eine Gerade angenähert werden und die Steigung der Geraden liegt bei allen drei Versuchen bei ca. $1 \cdot 10^{-5}$ (siehe Trendlinien in Abbildung 4.31). Bei linearer Extrapolation der gemessenen Pfahlkopfverschiebungen treten mittlere Verschiebungen von mehr als 15 mm bei allen drei Versuchen erst bei Zyklennzahlen von deutlich mehr als einer Million Lastzyklen auf ($N \approx 1,4 \cdot 10^6$) auf.

Im halblogarithmischen Maßstab (siehe Abbildung 4.32) entspricht der Verschiebungsverlauf bis ca. $N = 1.000$ annähernd einer Geraden. In der Literatur wird dies häufig als "zyklische (logarithmische) Beruhigung" bezeichnet. Die über-log-linear zunehmenden Verschiebungen für $N > 1.000$ werden als "zyklisches (schrittweises) Versagen" bezeichnet.

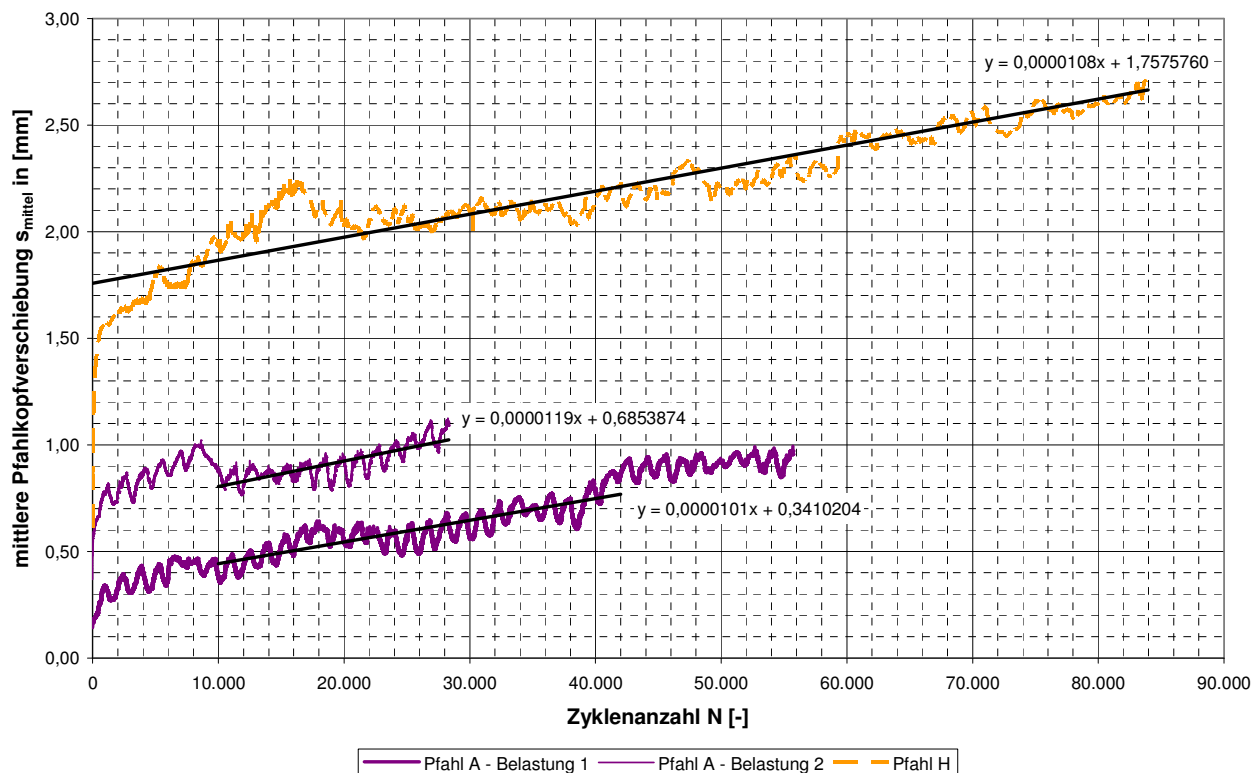


Abbildung 4.31: Mittlere Pfahlverschiebungen s_{mittel} (Pfähle A und H)

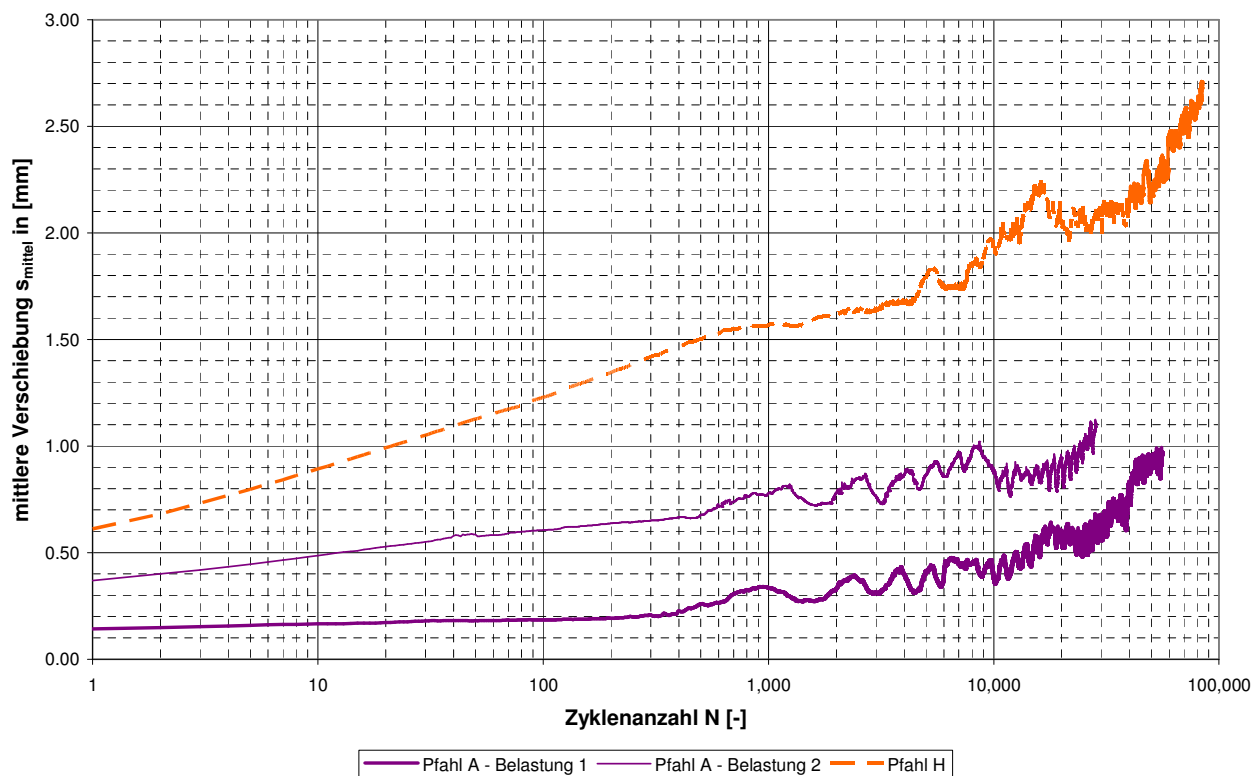


Abbildung 4.32: Mittlere Pfahlverschiebungen s_{mittel} im halblogarithmischen Maßstab (Pfähle A und H)

In Abbildung 4.33 sind die mittleren Pfahlverschiebungen für die Zugschwellversuche der Pfähle G, D und C dargestellt. Im Gegensatz zu den Versuchen an den Pfählen A und H sind die mittleren Verschiebungen deutlich größer und liegen bei Zyklenzahlen von mehr als 10.000 Zyklen bei allen drei Versuchen im Zentimeterbereich. Das Versagenskriterium einer zulässigen mittleren Pfahlverschiebung von $s_g = 15 \text{ mm}$ wird bei Pfahl G nach ca. 160 Lastzyklen, bei Pfahl D nach ca. 2.200 Lastzyklen und bei Pfahl C nach ca. 34.400 Lastzyklen überschritten.

Bis zu Zyklenzahlen von 20.000 bzw. bis Versuchende bei $N = 2.947$ bei Pfahl G (siehe Abbildung 4.33 und Abbildung 4.34) flacht der Verschiebungsverlauf zwar zunehmend ab, eine Annäherung an eine horizontale Asymptote ist jedoch nicht festzustellen. Bei größeren Zyklenzahlen nehmen die Verschiebungen insbesondere bei Pfahl D wieder deutlich stärker zu.

Im halblogarithmischen Maßstab aufgetragen (Abbildung 4.35) nehmen die Verschiebungen überlog-linear zu. Dies entspricht nach Abschnitt 2.2.2 einem "zyklischen (schrittweisen) Versagen" (Fall (3)).

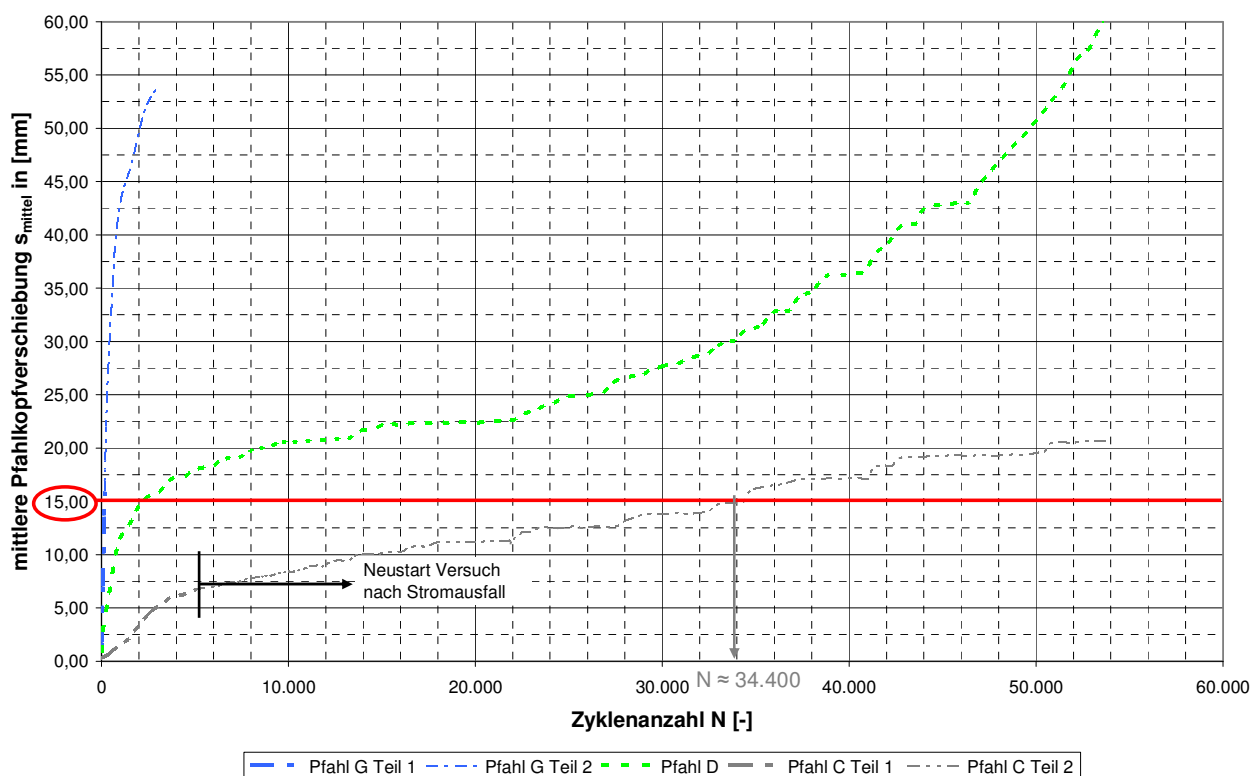


Abbildung 4.33: Mittlere Pfahlverschiebungen s_{mittel} (Pfähle G, D und C)

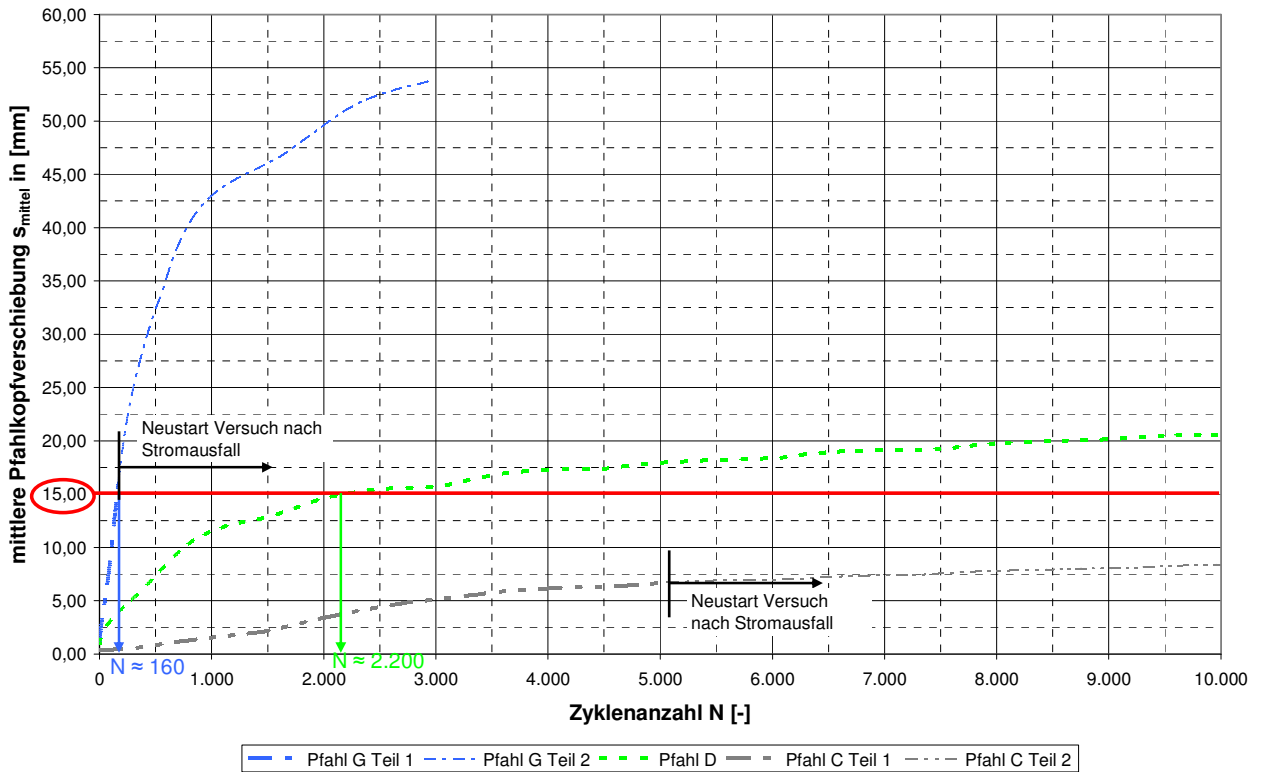


Abbildung 4.34: Mittlere Pfahlverschiebungen s_{mittel} bis $N = 10.000$ (Pfähle G, D und C)

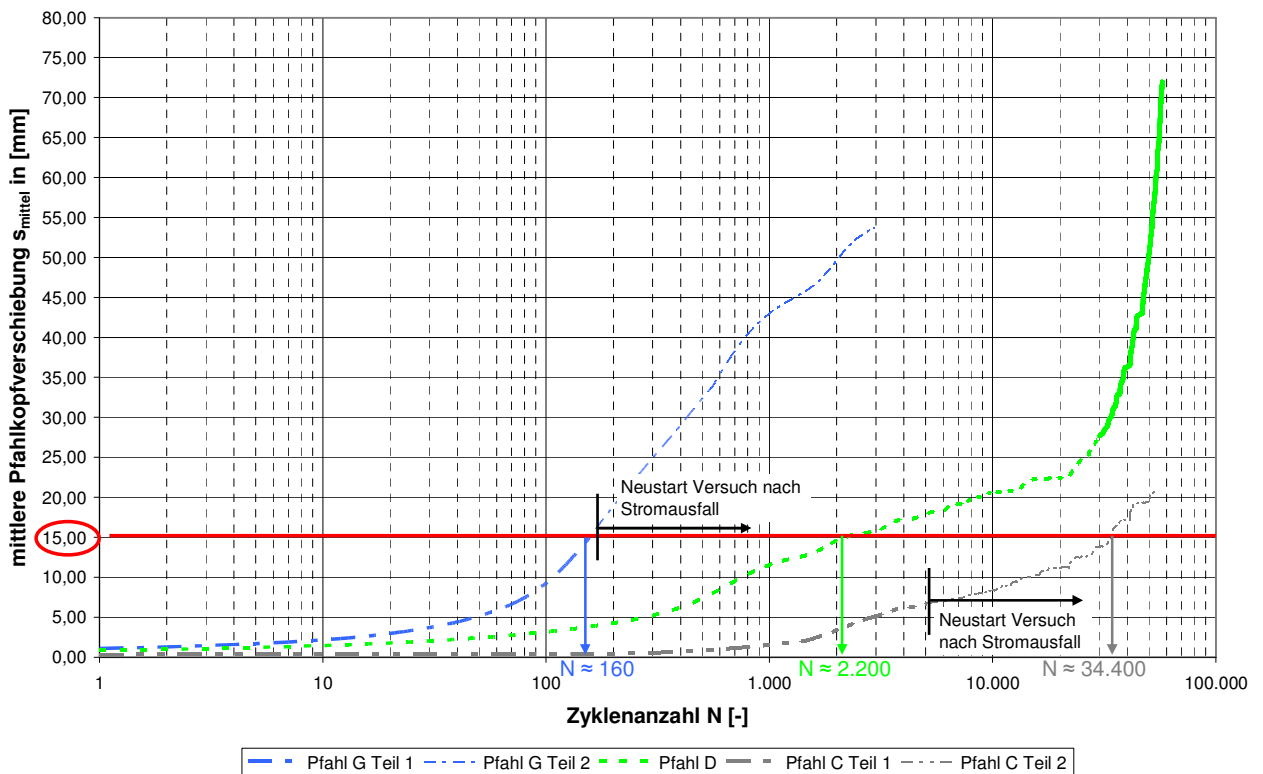


Abbildung 4.35: Mittlere Pfahlverschiebungen s_{mittel} im halblogarithmischen Maßstab (Pfähle G, D und C)

4.3.5.2 Verschiebungsamplituden

In Tabelle 4.5 sind die über die Zyklenanzahl gemittelten Verschiebungsamplituden für die Zugschwellversuche angegeben.

Pfahl	F_{mittel} [kN]	F'_{zykl} [kN]	s'_{zykl} [mm]
A (Belastung 1)	20	15	0,083
A (Belastung 2)	50	15	0,085
H	50	25	0,185
G	50	45	0,431
D	50	35	0,266
C	40	35	0,281

Tabelle 4.5: Gemittelte Verschiebungsamplituden s'_{zykl}

Die Verschiebungsamplituden s'_{zykl} bleiben bei allen Versuchen während eines Versuchs annähernd konstant (siehe Abbildung 4.36). Die Verschiebungsamplituden von Pfahl A-Belastung 1 und Pfahl A-Belastung 2 sind bei gleicher Lastamplitude von $F'_{\text{zykl}} = 15$ kN trotz des Unterschiedes im Belastungsniveau von $F_{\text{mittel}} = 20$ kN zu $F_{\text{mittel}} = 50$ kN annähernd gleich groß. Auch die Verschiebungsamplituden von Pfahl C und D sind bei gleicher Lastamplitude von $F'_{\text{zykl}} = 35$ kN und unterschiedlichen Lastniveaus von $F_{\text{mittel}} = 40$ kN zu $F_{\text{mittel}} = 50$ kN ähnlich groß.

Daraus kann geschlossen werden, dass die Größe der Verschiebungsamplitude überwiegend von der Größe der gewählten zyklischen Lastspanne abhängt und nahezu unabhängig vom mittleren Belastungsniveau ist.

Bei Steigerung der Lastamplitude und gleichem mittleren Lastniveau (Pfahl A-Belastung 2, Pfahl H, Pfahl D und Pfahl G) nehmen die Verschiebungsamplituden überproportional zu. Eine Vergrößerung der Lastamplitude z.B. um den Faktor 3 (Pfahl A-Belastung 2 und Pfahl G) bewirkt einen Anstieg der Verschiebungsspanne um ca. den Faktor 5.

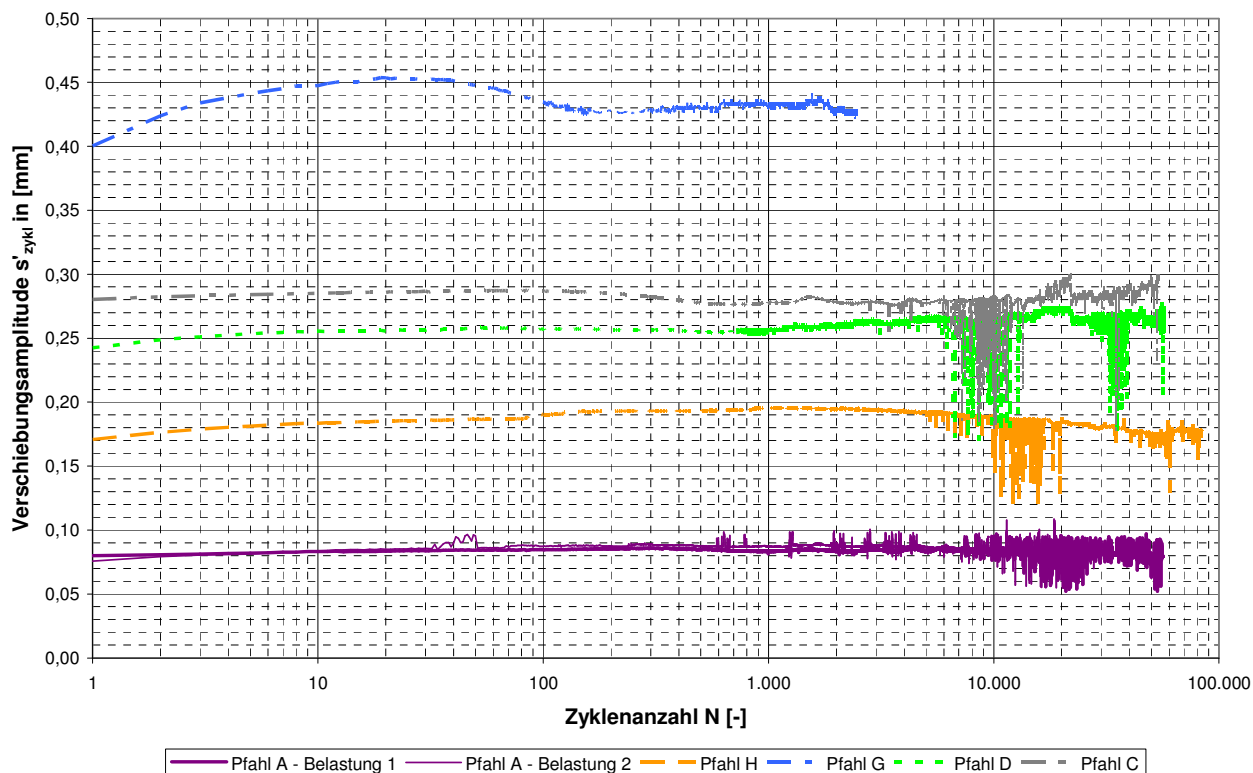


Abbildung 4.36: Verschiebungsamplituden s'_{zykl}

In Abbildung 4.37 ist die Verschiebungsamplitude in Abhängigkeit von der Lastamplitude dargestellt. Für die durchgeführten Zugschwellversuche kann die Abhängigkeit mit Hilfe einer Potenzfunktion dargestellt werden.

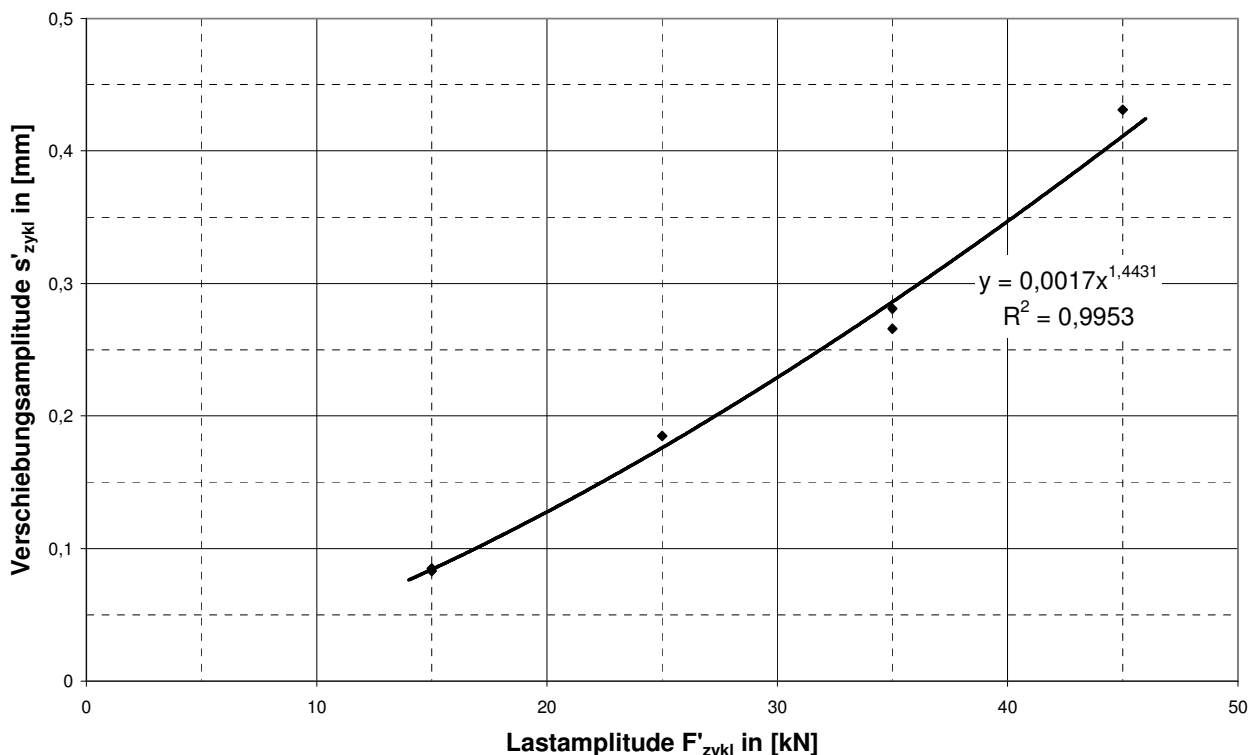


Abbildung 4.37: Abhängigkeit der Verschiebungsamplitude von der Lastamplitude

4.3.5.3 Verschiebungsraten

In Abbildung 4.38 und Abbildung 4.39 sind die Verschiebungsraten, d.h. die Änderung der mittleren Verschiebung von Belastungszyklus zu Belastungszyklus, im doppelt-logarithmischen Maßstab dargestellt. Für die Auswertung wurden die Verschiebungsraten bereichsweise (z.B. von Zyklus 1-10, von Zyklus 10-100, von Zyklus 1000-2000 usw.) gemittelt.

Bei den Versuchen Pfahl A-Belastung 1, Pfahl A-Belastung 2 und Pfahl H nimmt die Verschiebungsrate mit zunehmender Zyklanzahl ab. Zu Beginn liegen die Verschiebungsraten zwischen ca. $3 \cdot 10^{-2}$ und ca. $3 \cdot 10^{-3}$. Innerhalb der ersten 1.000 Zyklen verringern sich die Verschiebungsraten um ein bis zwei Zehnerpotenzen auf ca. $1 \cdot 10^{-4}$ bis ca. $6 \cdot 10^{-5}$. Bis zum Ende der Versuche bei Zyklanzahlen zwischen ca. $N = 28.000$ und $N = 84.000$ nehmen die Raten nochmals um ca. ein bis zwei Zehnerpotenzen ab und liegen zwischen ca. $2 \cdot 10^{-5}$ und ca. $3 \cdot 10^{-6}$.

Bei den Versuchen Pfahl G und Pfahl D nehmen die Verschiebungsraten tendenziell mit zunehmender Zyklanzahl ab. Zu Beginn liegen die Verschiebungsraten zwischen ca. $1 \cdot 10^{-1}$ und ca. $7 \cdot 10^{-2}$. Innerhalb der ersten 1.000 Zyklen verringern sich die Verschiebungsraten um ca. eine Zehnerpotenz auf ca. $1 \cdot 10^{-2}$ bis ca. $5 \cdot 10^{-3}$. Bei Versuch Pfahl D nehmen die Verschiebungsraten bis ca. $N = 20.000$ weiter auf $2 \cdot 10^{-4}$ ab. Danach steigen die Raten wieder deutlich an. Dieser Anstieg der Verschiebungsrate tritt allerdings erst deutlich nach dem Erreichen der als Versagen definierten mittleren Verschiebung von 15 mm bei $N = 2.200$ auf.

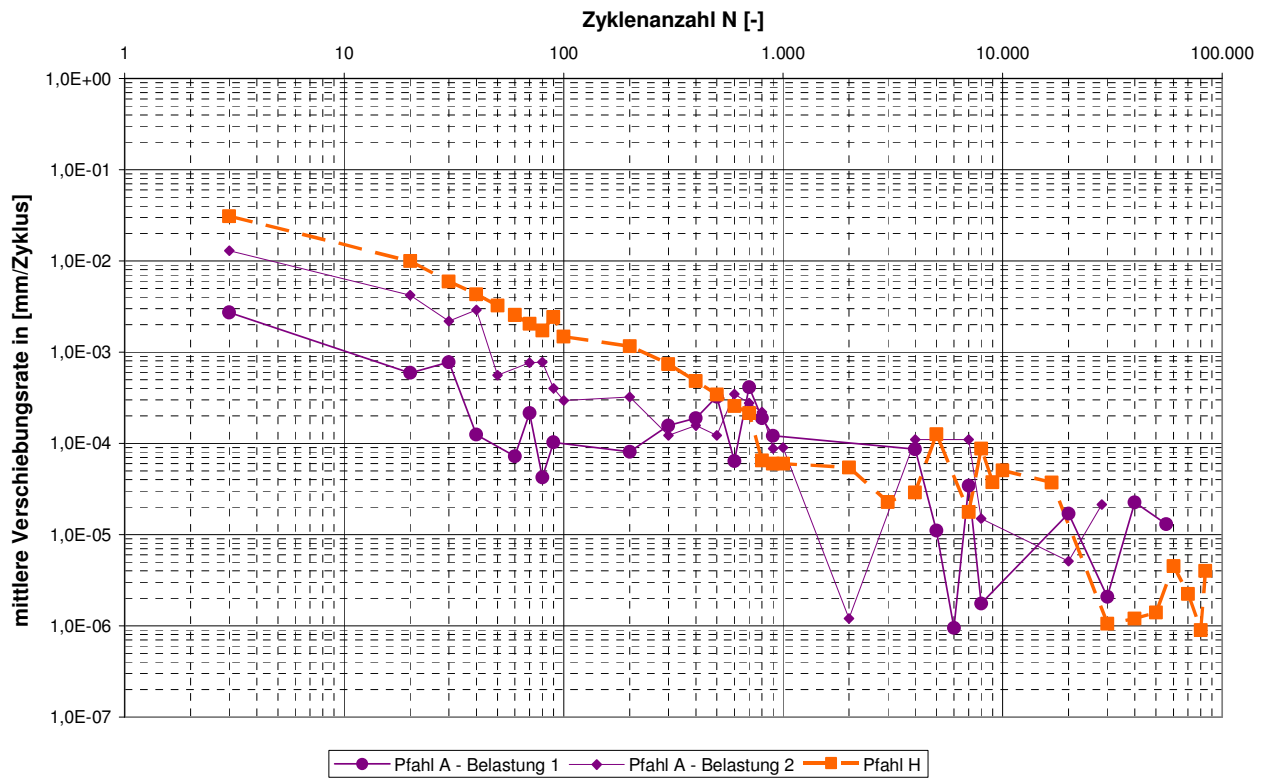


Abbildung 4.38: Verschiebungsraten Pfahl A-Belastung 1, Pfahl A-Belastung 2 und Pfahl H

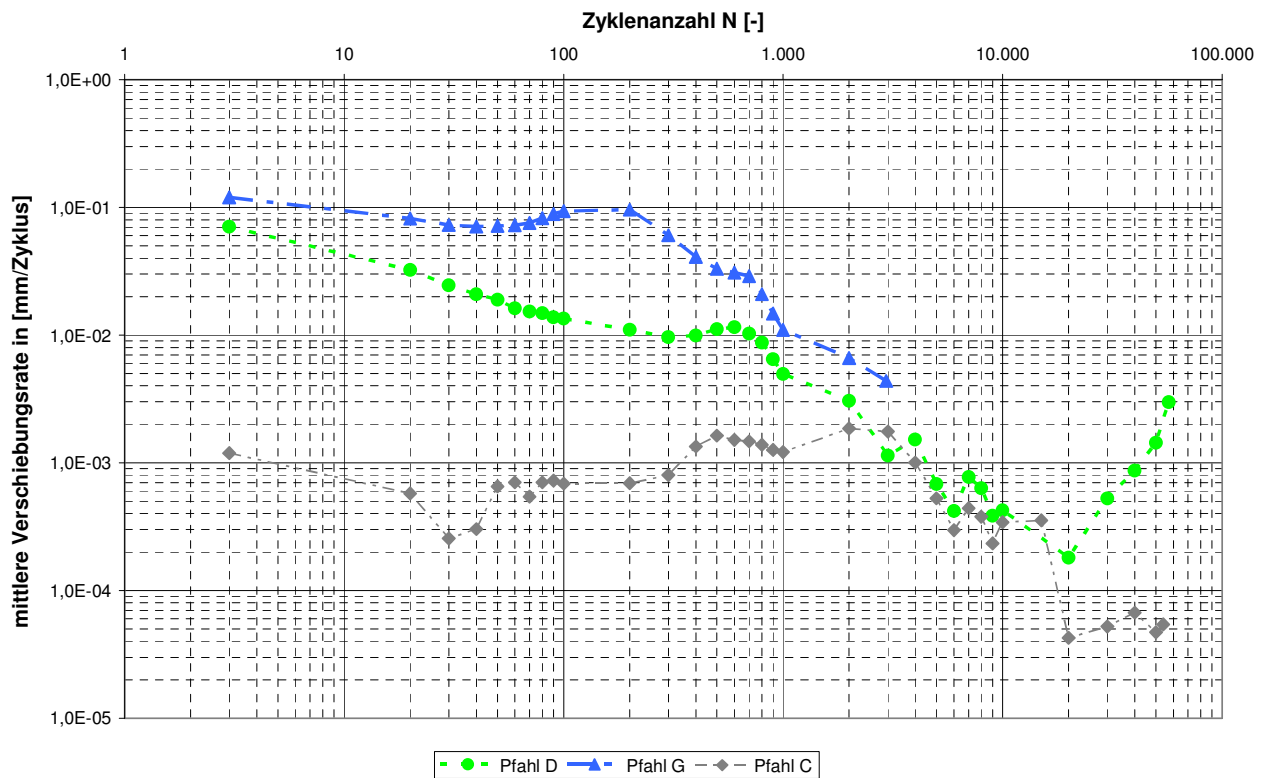


Abbildung 4.39: Verschiebungsraten Pfahl C, Pfahl D und Pfahl G

Beim Versuch Pfahl C liegen die Verschiebungsraten mit ca. $1 \cdot 10^{-3}$ zunächst deutlich unter den Werten bei den Versuchen Pfahl G und Pfahl D. Bis ca. $N = 2.000$ nimmt die Verschiebungsrate leicht zu auf ca. $2 \cdot 10^{-3}$ und liegt dann im Bereich der Werte von Pfahl D. Danach nimmt die Rate bis zur maximalen Zyklenzahl von ca. $N = 54.000$ auf ca. $5 \cdot 10^{-5}$ ab.

Für die Versuche Pfahl A-Belastung 1, Pfahl A-Belastung 2, Pfahl H, Pfahl G und Pfahl D kann die Abnahme der Verschiebungsrate im doppelt-logarithmischen Maßstab annähernd durch eine Gerade angenähert werden. Bei Pfahl C ist dies ab ca. $N = 2.000$ möglich. Mit Hilfe der Steigung dieser Geraden können die Pfahlverschiebungen mit Hilfe des empirischen Ansatzes nach Abschnitt 2.2.2 abgeschätzt werden (siehe hierzu Abschnitt 7.2.2).

4.3.5.4 Pfahllängskraft und Pfahlmantelreibung

Auf Grund des Ausfalls von Dehnmessstreifen und fehlerhaften Absolutwerten, die auch durch die Nachkalibrierung nicht korrigiert werden konnten, ist eine Auswertung der Mantelreibung nach Gl. 4.3 nicht für alle Pfahlabschnitte möglich. Die Mantelreibung wurde dann entsprechend über mehrere Pfahlabschnitte hinweg ausgewertet. Die Nachkalibrierung zeigte jedoch, dass Laständerungen fast immer korrekt angezeigt werden, so dass eine Auswertung der gemessenen Lastspannen auch bei fehlerhaften Absolutwerten der Dehnmessstreifen möglich war. Die Messergebnisse der DMS sind für die einzelnen Zugschwellversuche in Anhang 1.12 dargestellt.

Zusammenfassend kann für die Zugschwellversuche festgestellt werden:

- Die Krafteinleitung erfolgt bei den zyklischen Versuchen wie bei den statischen Versuchen ab Belastungsbeginn über die gesamte Pfahllänge.
- Die gemessenen Lastspannen der einzelnen Messquerschnitte ($F_{\text{zykl,DMS}}$) nehmen über die Pfahltiefe ab, d.h. $F_{\text{zykl,DMS } 1} > F_{\text{zykl,DMS } 2} > F_{\text{zykl,DMS } 3} > F_{\text{zykl,DMS } 4} > F_{\text{zykl,DMS } 5}$ (siehe Abbildung 4.40).
- Die gemessenen Lastspannen $F_{\text{zykl,DMS}}$ je Messquerschnitt bleiben über den gesamten Versuchsverlauf für die meisten Messquerschnitte annähernd konstant (siehe Abbildung 4.40). Lediglich bei den Versuchen Pfahl H und Pfahl G sind bei einzelnen Messquerschnitten tendenziell zunehmende oder abnehmende Lastspannen festzustellen (siehe Anhang 1.12).
- Bei Versuchen mit gleicher zyklischer Lastspanne F_{zykl} (Versuche Pfahl A-Belastung 1 und Pfahl A-Belastung 2 bzw. Pfahl C und Pfahl D) sind auch die für die einzelnen DMS gemessenen Lastspannen $F_{\text{zykl,DMS}}$ ähnlich groß. Das unterschiedliche mittlere Lastniveau scheint hier einen geringen Einfluss zu besitzen (siehe Abbildung 4.41).
- Die gemessenen Lastspannen $F_{\text{zykl,DMS}}$ verhalten sich bei allen zyklischen Versuchen prozentual zur aufgebrauchten Lastspanne F_{zykl} gesehen sehr ähnlich (siehe Abbildung 4.42). Lediglich bei Pfahl H liegen die gemessenen Lastspannen prozentual gesehen bei den Messquerschnitten 1 und 2 deutlich höher.

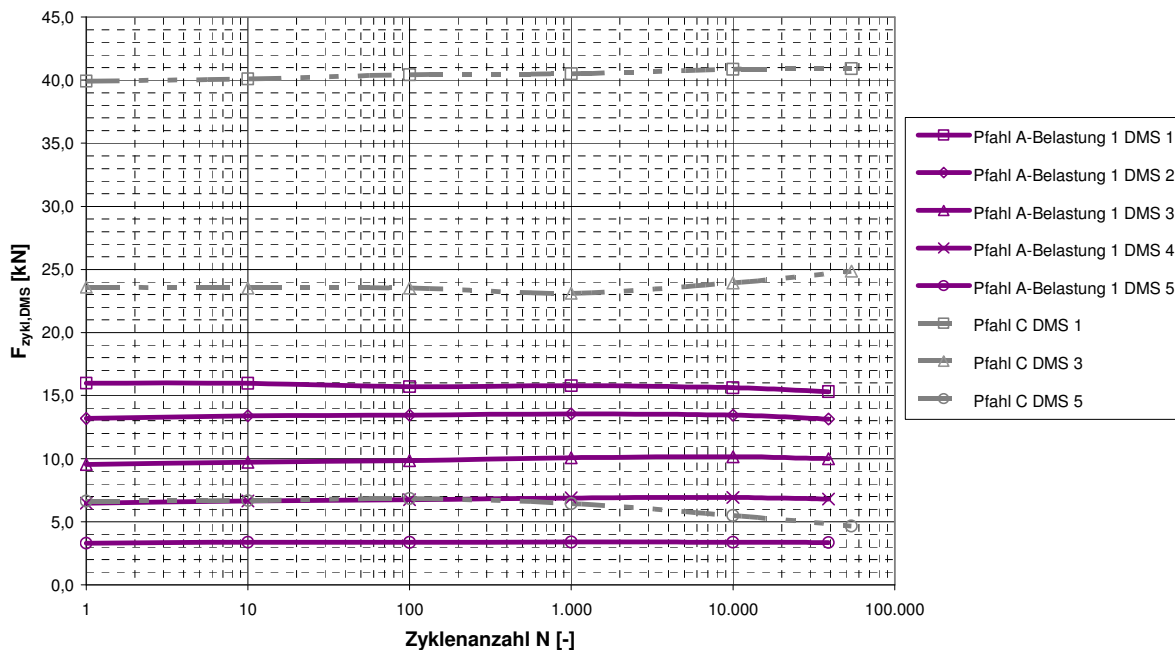


Abbildung 4.40: Lastspannen DMS (exemplarisch Pfahl A-Belastung 1 und Pfahl C)

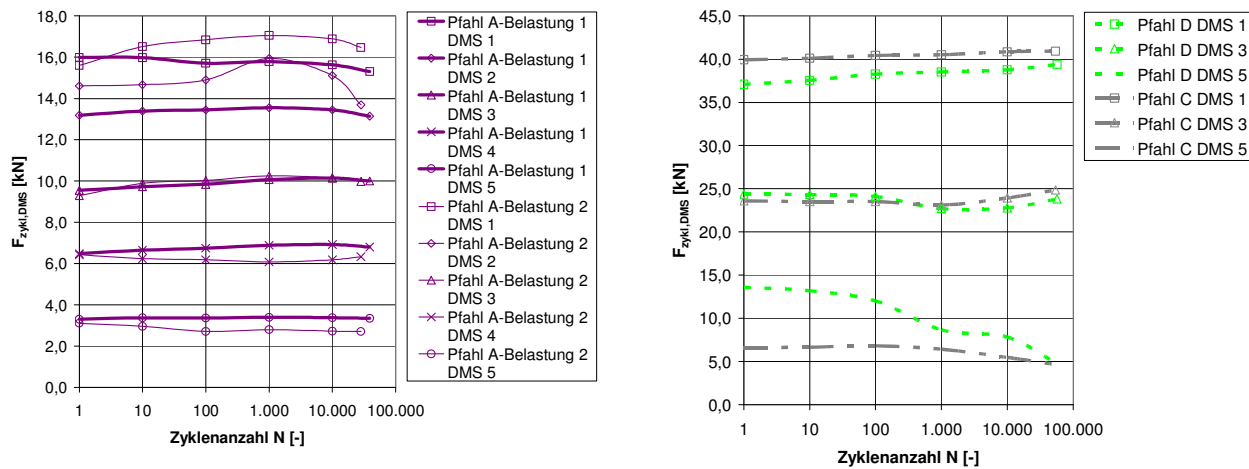


Abbildung 4.41: Lastspannen DMS (links: Pfahl A-Belastung 1 und Pfahl A-Belastung 2, rechts: Pfahl C und Pfahl D)

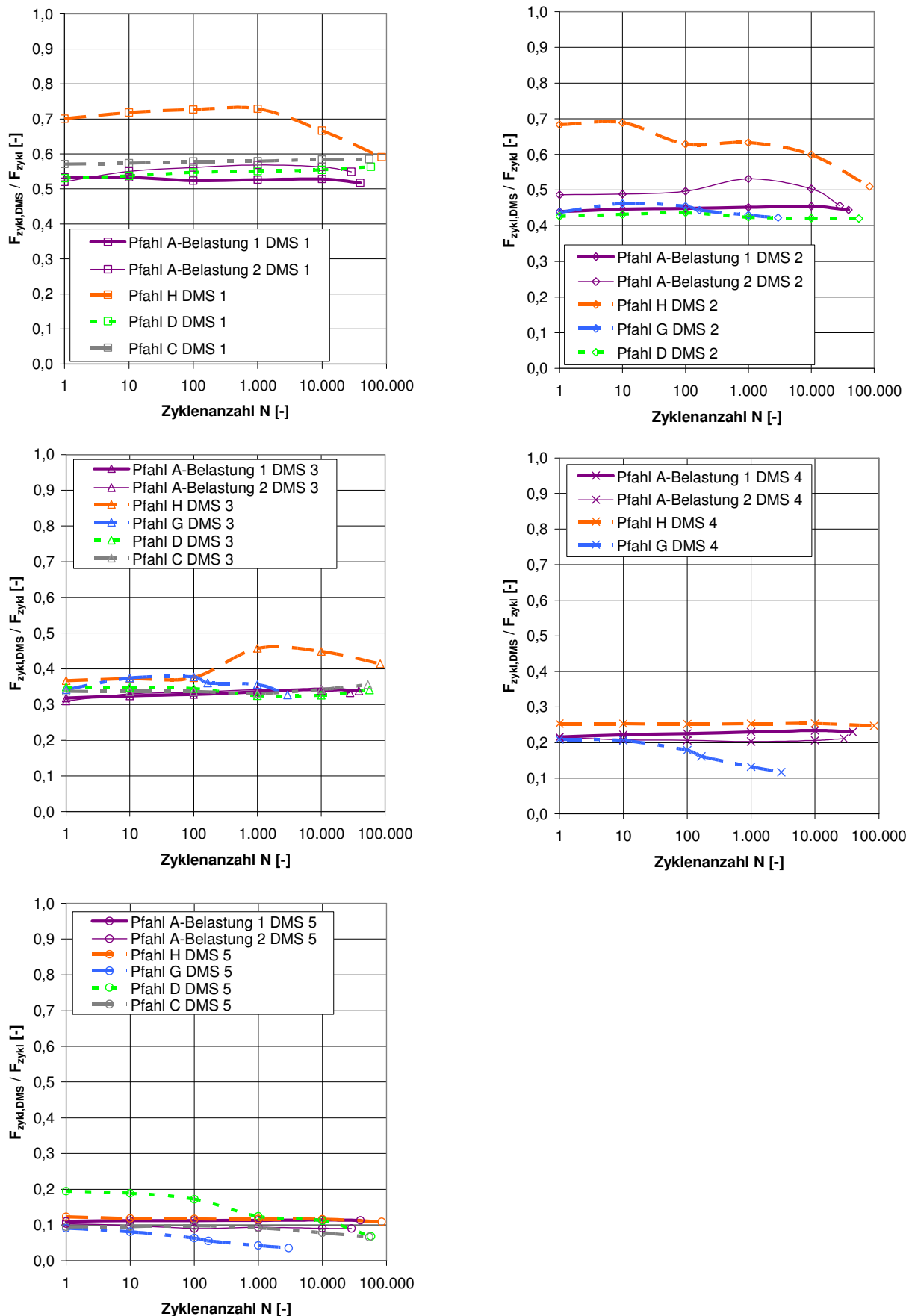


Abbildung 4.42: Lastspannen DMS bezogen auf zyklische Lastspanne ($F_{zykl,DMS} / F_{zykl} [-]$)

In Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44 sind die ermittelten Mantelreibungswerte für die Zugschwellversuche dargestellt. Die Mantelreibung wurde dabei jeweils für die maximal aufgebrachte zyklische Last (F_{max}) ausgewertet. Auf Grund der eingeschränkten Möglichkeit zur Auswertung der Mantelreibung über die einzelnen Pfahlabschnitte sind zur Entwicklung der Mantelreibung unter Zugschwellbelastung nur eingeschränkte Aussagen möglich:

- Mit zunehmender Zyklenzahl verändert sich bei allen Zugschwellversuchen die Größe der Mantelreibung in den betrachteten Pfahlabschnitten.
- Bei den Versuchen Pfahl A-Belastung 1, Pfahl A-Belastung 2, Pfahl H und Pfahl C nehmen die Mantelreibungswerte in den unteren Pfahlabschnitten tendenziell zu und in den oberen Pfahlabschnitten tendenziell ab. Bei den Versuchen Pfahl D und Pfahl G ist dies nicht eindeutig zu erkennen.
- Eine Vergleichmäßigung der Mantelreibung über die Pfahltiefe mit zunehmender Zyklenzahl, wie sie z.B. von SCHWARZ (2002) bei Versuchen in Sand berichtet wird, ist noch am ehesten bei Pfahl C zu erkennen. Bei den anderen Versuchen ist keine derartige Tendenz festzustellen (siehe auch Tabelle 4.7).

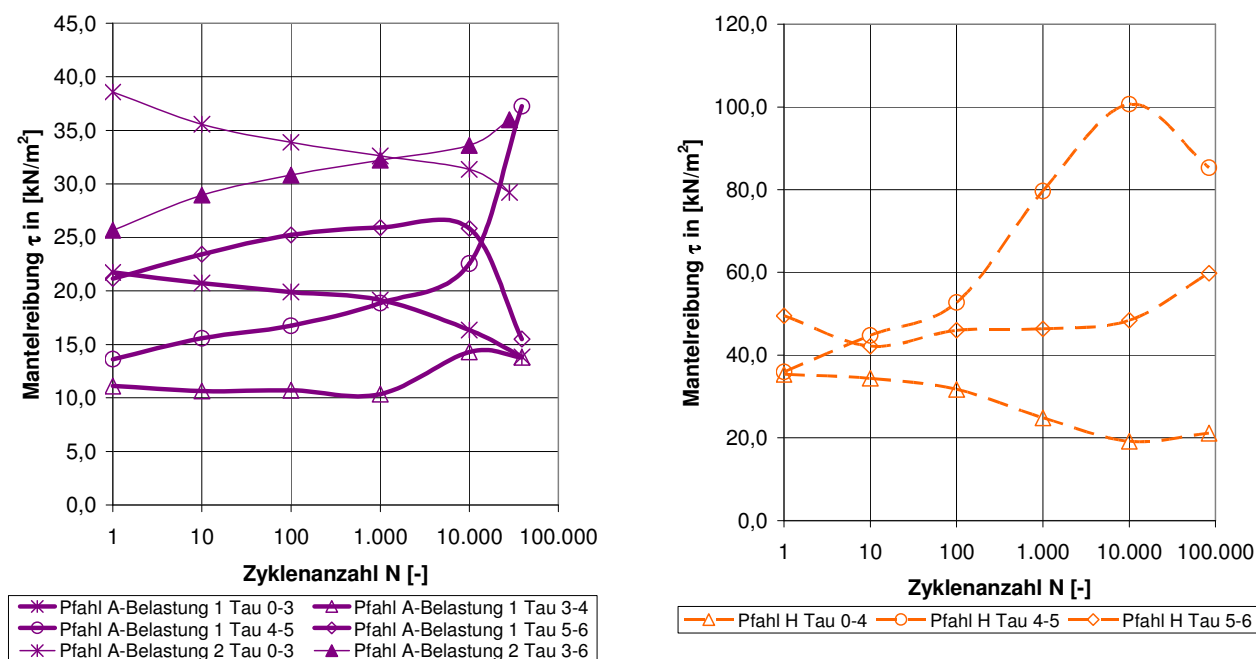


Abbildung 4.43: Entwicklung der Pfahlmantelreibung bei den Versuchen Pfahl A-Belastung 1, A-Belastung 2 und H (dargestellt für die maximale zyklisch aufgebrachte Last F_{max})

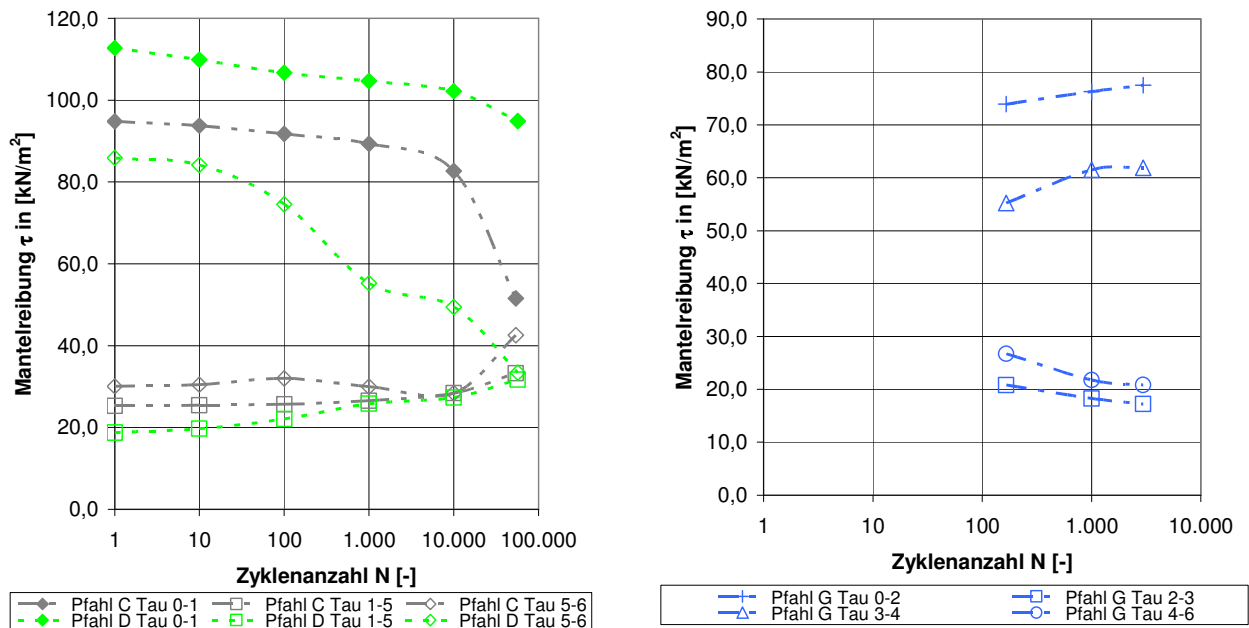


Abbildung 4.44: Entwicklung der Pfahlmantelreibung bei den Versuchen Pfahl C, D und G (dargestellt für die maximale zyklisch aufgebrachte Last F_{max})

Bei Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der aufgebrachten Last über die Pfahltiefe ergeben sich für die maximal aufgebrachte Zuglast die in Tabelle 4.6 dargestellten Werte.

Pfahl	F_{max} [kN]	Mantelfläche A_s [m ²]	Annahme einer gleichmäßig über die Mantelfläche verteilten Mantelreibung τ_{mittel} [kN/m ²]
A-Belastung 1	35	2,0	17,5
A-Belastung 2	65		32,5
H	75		37,5
C			42,5
D			47,5
G	95		47,5

Tabelle 4.6: Mantelreibung bei Annahme einer über die Mantelfläche gleichmäßig verteilten Mantelreibung

In Tabelle 4.7 sind die in den einzelnen Pfahlabschnitten für $N = 1$ und $N = N_{max}$ ermittelten Mantelreibungswerte für die zyklischen Versuche im Verhältnis zur gleichmäßig über die Mantelfläche verteilt angenommenen Mantelreibung τ_{mittel} dargestellt. Es sind pro Versuch nur die Werte angegeben, bei denen eine Auswertung zwischen zwei benachbarten Messquerschnitten möglich war.

Es zeigt sich, dass die ermittelten Mantelreibungen während der zyklischen Versuche in den einzelnen Pfahlabschnitten bis zu 170 % über oder bis zu 60 % unter dem Wert von τ_{mittel} liegen.

In Tabelle 4.7 sind ebenfalls die in den statischen Referenzversuchen ermittelten Mantelreibungswerte im Verhältnis zu τ_{mittel} für die Laststufe angegeben, die der jeweiligen maximalen Belastung im zyklischen Versuch entspricht. Unabhängig von der Größe der maximal aufgebracht Last ist nicht zu erkennen, dass in den statischen im Vergleich zu den zyklischen Versuchen prinzipiell eine höhere oder niedrigere Mantelreibung aktiviert werden kann. Auch unterscheiden sich die für die einzelnen Pfahlabschnitte ermittelten Mantelreibungswerte teilweise deutlich voneinander.

Pfahl	$\frac{\tau_{0-1}}{\tau_{mittel}} [-]$		$\frac{\tau_{1-2}}{\tau_{mittel}} [-]$		$\frac{\tau_{2-3}}{\tau_{mittel}} [-]$		$\frac{\tau_{3-4}}{\tau_{mittel}} [-]$		$\frac{\tau_{4-5}}{\tau_{mittel}} [-]$		$\frac{\tau_{5-6}}{\tau_{mittel}} [-]$	
	N=1	N _{max}	N=1	N _{max}	N=1	N _{max}	N=1	N _{max}	N=1	N _{max}	N=1	N _{max}
A-Belastung 1 (F _{max} = 35 kN)	-		-		-		0,6	0,8	0,8	2,1	1,2	0,9
Pfahl F/B/E (statische Referenz- versuche) bei F = 35 kN							-1,0/0,8		-0,6/0,4		-1,6/2,1	
H (F _{max} = 75 kN)	-		-		-		-		1,0	2,3	1,3	1,6
C (F _{max} = 75 kN)	2,5	1,4	-		-		-		-		0,8	1,1
Pfahl F/B/E bei F = 75 kN	2,5/-1,1								-0,3/0,7		-2,3/2,1	
D (F _{max} = 85 kN)	2,7	2,2	-		-		-		-		2,0	0,8
Pfahl F/B/E bei F = 85 kN	2,4/-0,9										-2,4/1,9	
G (F _{max} = 95 kN)	-		-		0,4 N=166	0,4	1,2	1,3	-		-	
Pfahl F/B/E bei F = 95 kN					-/-0,6		-1,9/1,1					

Tabelle 4.7: Verhältnis der gemessenen Mantelreibungen zu τ_{mittel} aus Tabelle 4.6

4.3.6 Post-zyklische statische Pfahlzugprobelastungen

Nach Abschluss eines zyklischen Versuchs wurde jeder Pfahl statisch auf Zug bis zum Versagen belastet. Der Versuchsablauf erfolgte in der Regel analog zu dem der statischen Referenzversuche (siehe Abschnitt 4.3.2.1). Die einzelnen Versuchsabläufe sind in Anhang 1.8 grafisch dargestellt. Als Versagenskriterien wurden wie bei den statischen Referenzversuchen eine Pfahlkopfverschiebung von $s_g = 0,1 \cdot D = 15 \text{ mm}$ oder ein Kriechmaß bei Lastkonstanthaltung von 1 mm bzw. 2 mm gewählt. Ziel dieser Versuche war es zu ermitteln, wie eine zyklische Belastung die statische Tragfähigkeit eines Pfahls beeinflusst und ob die Größe der aufgetretenen mittleren Pfahlverschiebungen infolge einer zyklischen Belastung entscheidend für die post-zyklische statische Tragfähigkeit ist.

4.3.6.1 Pfahlverschiebungen und charakteristischer Herauszieh Widerstand

Die Widerstands-Hebungslinien sind in Abbildung 4.45 dargestellt. Die Ermittlung der Widerstands-Hebungslinien erfolgte durch Mittelwertbildung der Messwerte der induktiven Wegaufnehmer. Für jede Laststufe wurde jeweils das Kriechmaß bestimmt (siehe Abbildung 4.46).

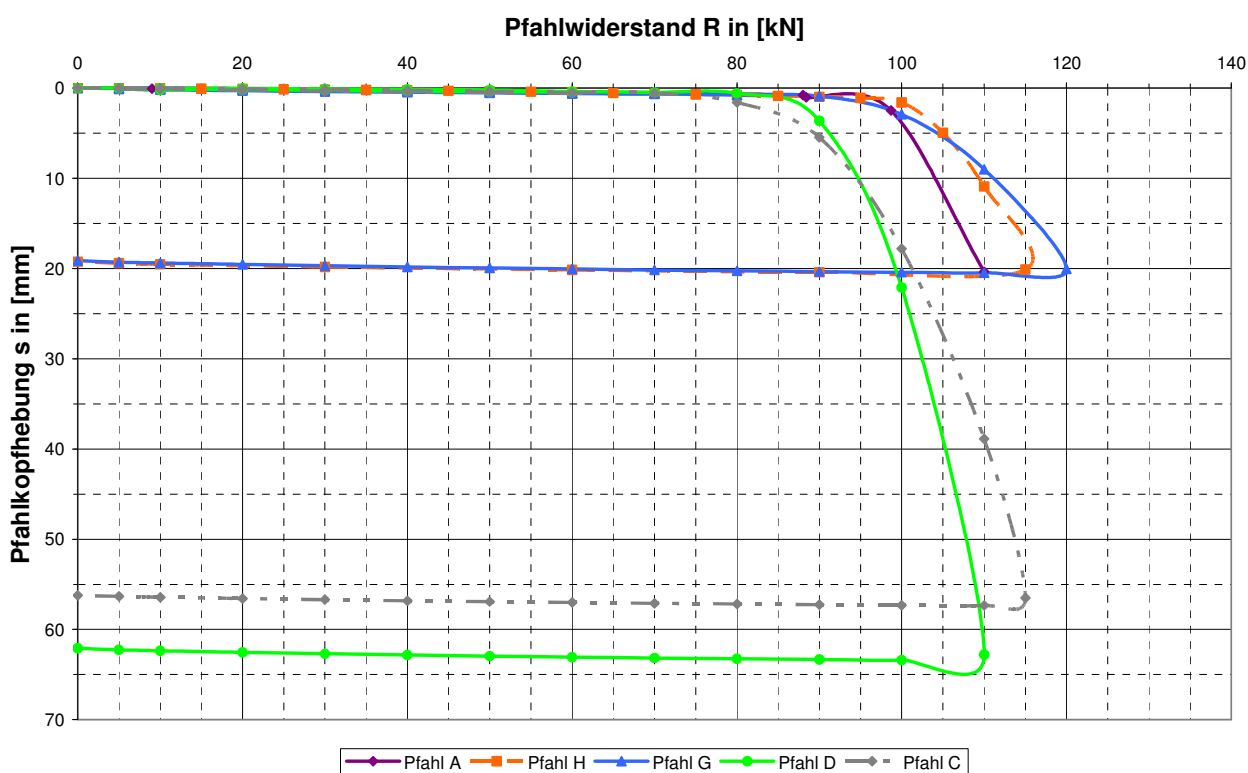


Abbildung 4.45: Widerstands-Hebungslinien der post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen

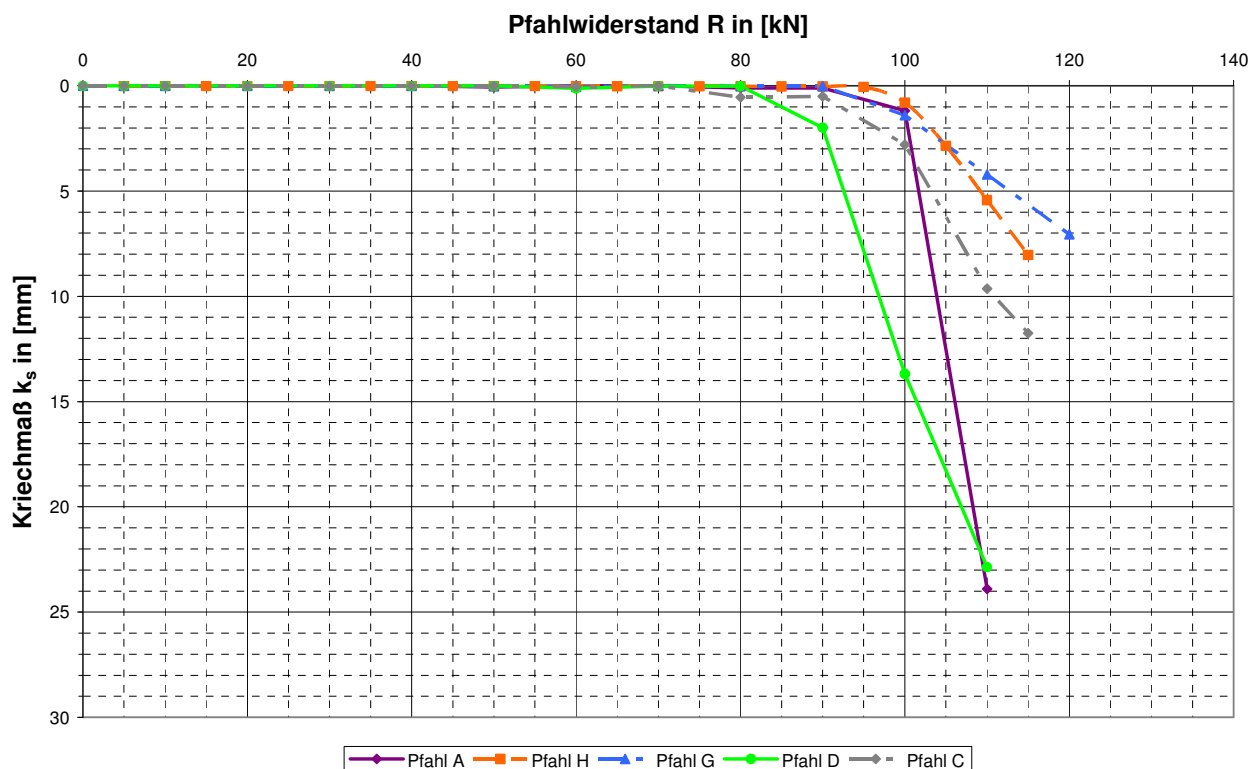


Abbildung 4.46: Aus den post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen ermittelte Kriechmaße

In Tabelle 4.8 sind die zugehörigen Pfahlwiderstände für die unterschiedlichen Versagenskriterien dargestellt.

Versagenskriterium \ Pfahlwiderstand	$R_{t,m,i}$ [kN]					
	post-zyklisch					zum Vergleich: vor-zyklisch
	Pfahl A	Pfahl H	Pfahl G	Pfahl D	Pfahl C	Mittelwert aus Pfahl B, E und F (1. Versuchsreihe)
$s_g = 15 \text{ mm}$	107,0	113,5	116,0	97,0	98,0	89,0
$k_s \leq 1,0 \text{ mm}$	98,0	100,5	97,0	85,0	92,0	79,0
$k_s \leq 2,0 \text{ mm}$	100,5	103,0	102,0	90,0	96,5	81,0

Tabelle 4.8: Pfahlwiderstände aus post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen

Die in den post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen ermittelten Herausziehkräfte liegen bei allen Pfählen über den Pfahlwiderständen aus den statischen Referenzversuchen. Die Tragfähigkeitssteigerungen liegen je nach Pfahl und betrachtetem Versagenskriterium zwischen 8 % und 30 %.

Die Kriechmaße der einzelnen Laststufen (siehe Abbildung 4.46) liegen bei den post-zyklischen Pfahlprobelastungen deutlich unter den Kriechmaßen der Pfahlprobelastungen ohne vorherige zyklische Belastung (siehe Tabelle 4.9). Dies ist bei statisch vorbelasteten Pfählen ein bekanntes

Phänomen. Dies war bei einer zyklischen Vorbelastung so nicht unbedingt zu erwarten, da im Allgemeinen davon ausgegangen wird, dass sich eine zyklische Belastung tendenziell negativ auf das spätere post-zyklische Tragverhalten unter statischer Belastung auswirkt.

Kriechmaß Laststufe	k_s [mm]					
	vor-zyklisch	post-zyklisch				
	Pfahl E / F / B	Pfahl A	Pfahl H	Pfahl G	Pfahl D	Pfahl C
70 kN	≈ 0,1 - 0,3	0,01	0,02	0,01	0,01	0
80 kN	≈ 1,0	0,1	0,03	0,02	0,02	0,5
90 kN	≈ 10 - 20	0,1	0,04	0,02	2,0	0,5
100 kN	>> 20	1,2	0,8	1,5	> 10	3,0

Tabelle 4.9: Vergleich Kriechmaße mit und ohne vorherige zyklische Belastung

Die zyklische Belastung wirkt hier offensichtlich wie eine Vorbelastung, die bei einer anschließenden statischen Belastung zu einer steiferen Reaktion des Systems Pfahl-Boden führt als dies bei nicht zyklisch vorbelasteten Pfählen der Fall ist. Im "Wiederbelastungsbereich" unterhalb der maximalen Belastung aus dem zyklischen Versuch sind die Kriechmaße vernachlässigbar klein.

Insgesamt deuten die Ergebnisse der post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen darauf hin, dass eine zyklische Belastung im Schwellbereich tendenziell eine Tragfähigkeitssteigerung bei späterer statischer Belastung bewirken kann. Ein Zusammenhang zwischen der Größe der Zunahme des Pfahlwiderstands gegenüber der Tragfähigkeit von nicht vorbelasteten Pfählen und den aus der zyklischen Belastung resultierenden Pfahlverschiebungen konnte bei den durchgeführten Versuchen nicht festgestellt werden. Beispielsweise zeigen die Pfähle G und A einen ähnlichen Anstieg des post-zyklischen statischen Pfahlwiderstands, obwohl die Verschiebungen bei Pfahl G auf Grund der Zyklik im Zentimeterbereich und bei Pfahl A bei ca. 1 mm lagen.

4.3.6.2 Pfahlmantelreibung

In Anhang 1.9 sind die ermittelten Mantelreibungsverläufe für die einzelnen Pfähle dargestellt. Auf Grund von Ausfällen einiger DMS ist ein Vergleich der Mantelreibung nicht bei allen Versuchen für alle Pfahlabschnitte möglich. Die Auswertungen in Abbildung 4.47 zeigen, dass die Mantelreibung in allen betrachteten Pfahlabschnitten bis auf den Abschnitt zwischen DMS 2 und 3 bei Pfahl G (Pfahl G – tau 2-3) mit zunehmender Last ansteigt.

Bei allen Versuchen zeigen sich ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Verteilung der Mantelreibung über die Pfahltiefe. Zwischen Geländeoberfläche und dem Messquerschnitt 1 (tau 0-1) ist die Mantelreibung am größten. In den Pfahlabschnitten zwischen DMS 1 und 2 (tau 1-2) und DMS 2 und 3 (tau 2-3) sind die Mantelreibungswerte deutlich geringer. Bei fast allen Pfählen ist die Mantelreibung zwischen DMS 2 und DMS 3 (tau 2-3) am kleinsten. Im Pfahlabschnitt zwischen

DMS 3 und DMS 4 (tau 3-4) weisen die Mantelreibungswerte den zweitgrößten Wert auf. Zum Pfahlfuß hin nehmen die Mantelreibungswerte (tau 4-5 und tau 5-6) dann wieder ab.

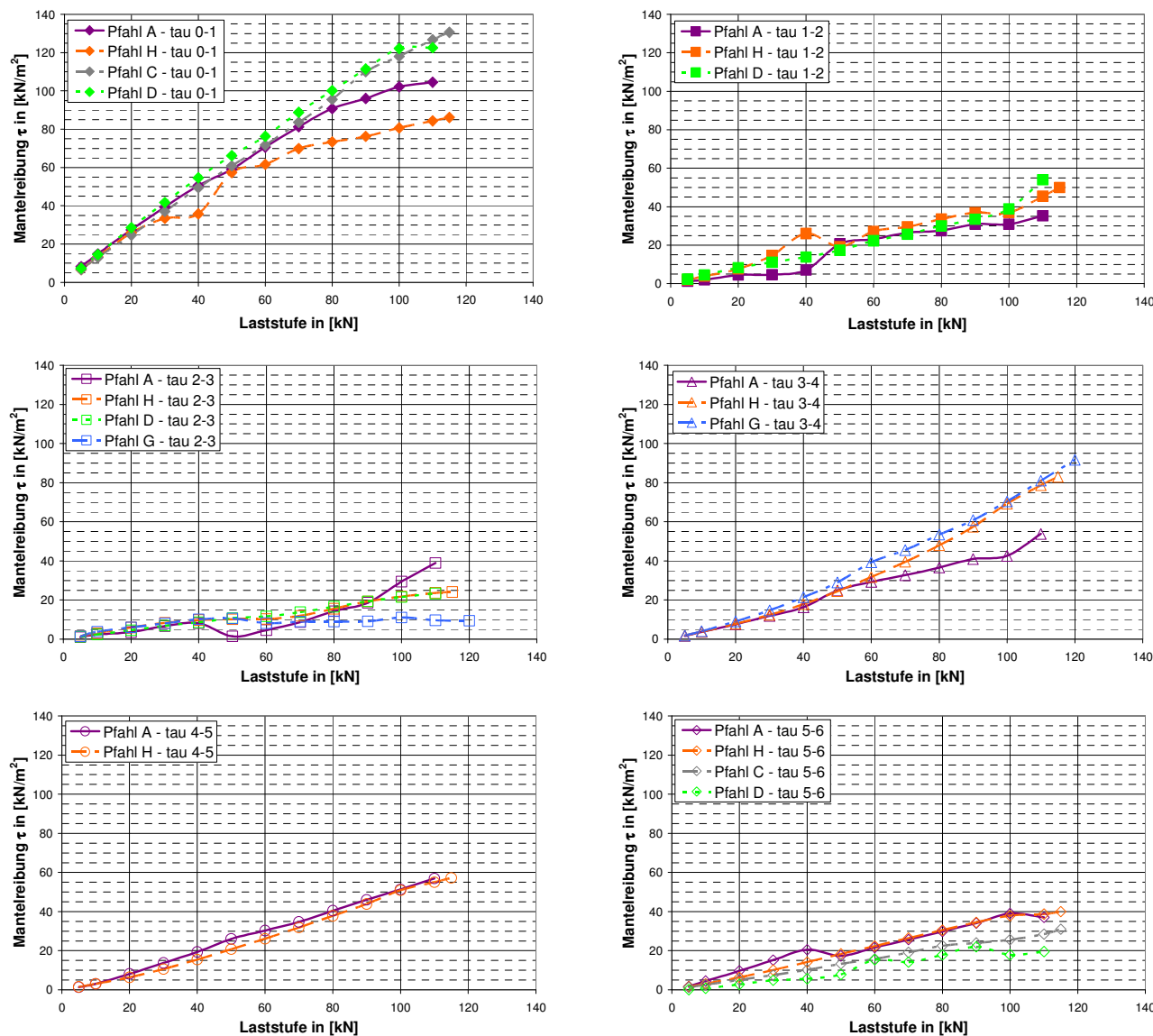


Abbildung 4.47: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe

In Abbildung 4.48 sind ergänzend die Mantelreibungswerte der statischen Referenzversuche dargestellt. Auf Grund der Ausfälle von Dehnmessstreifen war eine Auswertung für die einzelnen Pfahlabschnitte bei den statischen Referenzversuchen nur begrenzt möglich. Aus den vorliegenden Ergebnissen sind keine klaren Aussagen dazu möglich, ob oder wie sich eine vorherige zyklische Zugschwellbelastung auf die Verteilung der Mantelreibung bei einer post-zyklischen statischen Probebelastung auf Zug auswirkt.

Bei Pfahl E sind die Mantelreibungswerte zwischen DMS 1 und 5 (tau 1-2 bis tau 4-5) ähnlich groß wie bei den post-zyklisch belasteten Pfählen. Die Mantelreibung zwischen Geländeoberfläche und DMS 1 (tau 0-1) ist bei Pfahl E ab einer Laststufe von ca. 50 kN um bis zu einen Faktor 3 niedriger, wohingegen die Mantelreibung zwischen DMS 5 und Pfahlfuß (tau 5-6) sehr viel größer ist und sich

erst bei einer Laststufe von 100 kN den Werten bei den post-zyklischen Probelastungen annähert.

Bei Pfahl B liegen die Mantelreibungswerte zwischen DMS 3 und 4 (tau 3-4) ab einer Laststufe von 50 kN über den in den post-zyklischen Versuchen ermittelten Werten, wohingegen die Mantelreibungswerte zwischen DMS 4 und 5 (tau 4-5) ab ca. 60 kN darunter liegen. Signifikant höher sind die Mantelreibungswerte zwischen DMS 5 und Pfahlfuß (tau 5-6).

Bei Pfahl F liegt der Wert der Mantelreibung zwischen Geländeoberfläche und DMS 1 (tau 0-1) im Bereich der in den post-zyklischen Probelastungen ermittelten Werte.

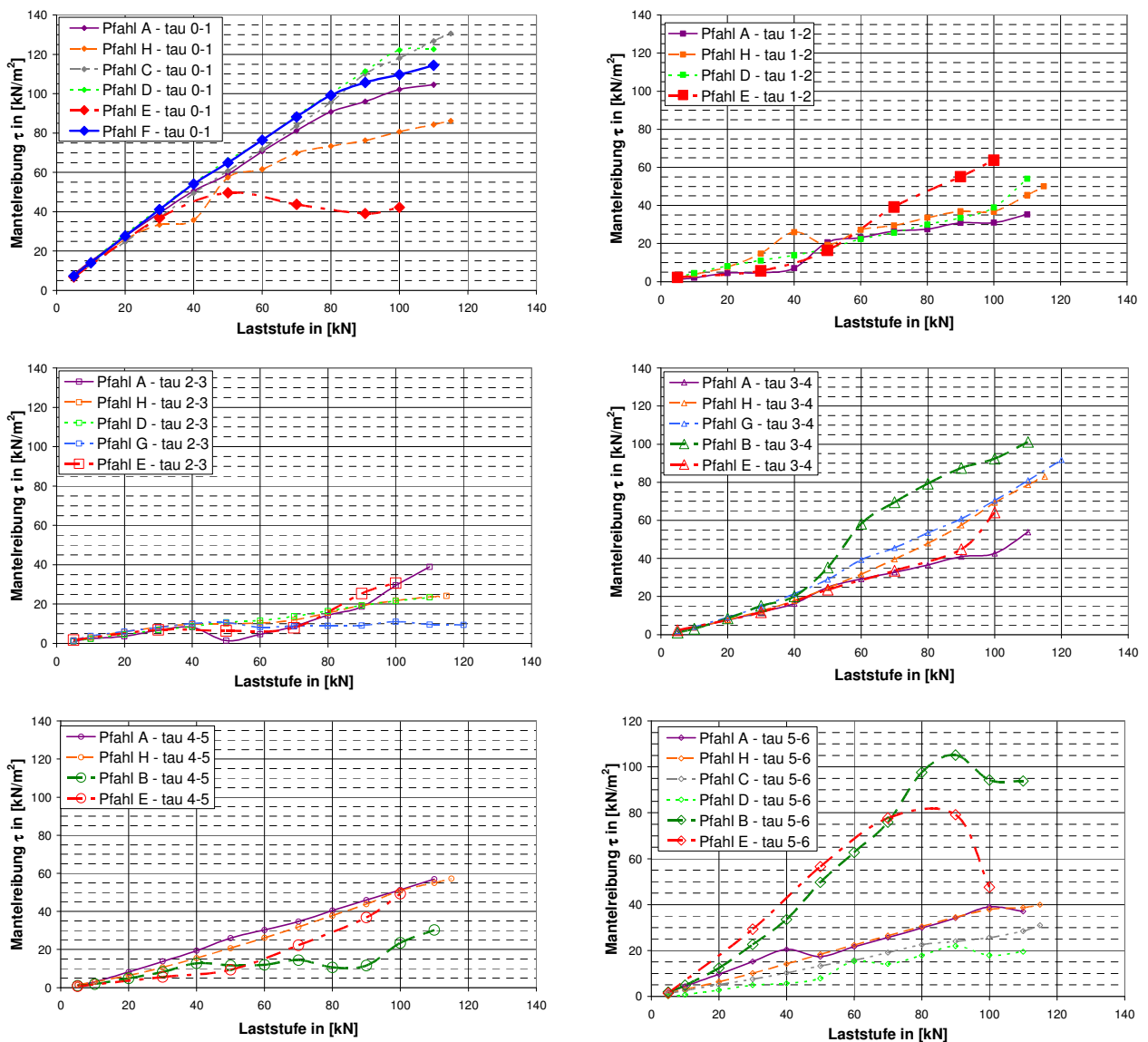


Abbildung 4.48: Pfahlmantelreibung – Vergleich zwischen statischen Referenzversuchen und post-zyklischen statischen Probelastungen

4.3.7 Zyklischer Schwelllastversuch nach statischer Belastung (Pfahl F)

An Pfahl F wurde vor Beginn der Zugschwellversuche eine statische Pfahlprobelastung auf Zug durchgeführt. Die Pfahlverschiebung nach der Probelastung betrug ca. 50 mm. Zusätzlich wurde an diesem Pfahl ein Zugschwellversuch durchgeführt. Das mittlere Lastniveau und die Lastamplitude wurden wie beim Zugschwellversuch an Pfahl C zu $F_{\text{mittel}} = 40 \text{ kN}$ und $F'_{\text{zykl}} = 35 \text{ kN}$ gewählt. Zwischen der statischen Probelastung und dem zyklischen Pfahlversuch lagen ca. 7 Monate.

Bis zu $N = 500$ Zyklen sind die mittleren Pfahlverschiebungen (siehe Abbildung 4.49) von Pfahl F und Pfahl C nahezu gleich groß. Danach nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen bei Pfahl F bis ca. $N = 4.000$ deutlich stärker zu als bei Pfahl C. Danach verringert sich zwar die Verschiebungszunahme bei Pfahl F etwas, die Pfahlverschiebungen liegen jedoch bis zum Erreichen der als Versagen definierten Verschiebung von 15 mm über den Verschiebungen des statisch nicht vorbelasteten Pfahls C. Die mittlere Verschiebung von 15 mm wird bei Pfahl F bereits nach ca. 10.000 Zyklen erreicht, bei Pfahl C erst bei ca. $N = 34.400$. In beiden Fällen nehmen die Verschiebungen mit zunehmender Zyklenzahl über-log-linear zu, was nach Abschnitt 2.2.2 einem "zyklischen (schrittweisen) Versagen" entspricht.

Die Entwicklung der Verschiebungsrate (siehe Abbildung 4.50) verläuft bei beiden Versuchen ähnlich. Tendenziell nehmen die Raten bis ca. $N = 100$ ab. Zwischen ca. $N = 100$ und ca. $N = 500$ bzw. 600 steigt bei beiden Versuchen die Verschiebungsrate. Ab dann ist bei beiden Versuchen mit steigender Zyklenzahl eine deutliche Abnahme der Verschiebungsraten zu erkennen. Insgesamt sind die Verschiebungsraten bei Pfahl F größer als beim statisch nicht vorbelasteten Pfahl C. Erst bei Zyklenzahlen größer als $N = 20.000$ ist die Verschiebungsrate bei Pfahl F niedriger als bei Pfahl C.

In Abbildung 4.51 sind die Verschiebungsamplituden für die Pfähle F, C und D dargestellt. Alle drei Pfähle wurden mit der gleichen zyklischen Lastamplitude belastet. Bei Pfahl F nimmt die Verschiebungsamplitude bis ca. $N = 300$ leicht zu und bleibt dann annähernd konstant. Die Verschiebungsamplitude von Pfahl F liegt im Bereich der Verschiebungsamplituden der nicht statisch vorbelasteten Pfähle C und D, mit zunehmender Zyklenanzahl leicht darüber.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich die statische Vorbelastung bei Pfahl F eher ungünstig auf das Last-Verschiebungsverhalten unter Zugschwellbelastung auswirkt. Im Vergleich zum statisch nicht vorbelasteten Pfahl C sind sowohl die mittleren Pfahlverschiebungen und Verschiebungsraten als auch die Verschiebungsamplituden etwas größer. Die Größenordnung aller drei Werte ist jedoch vergleichbar.

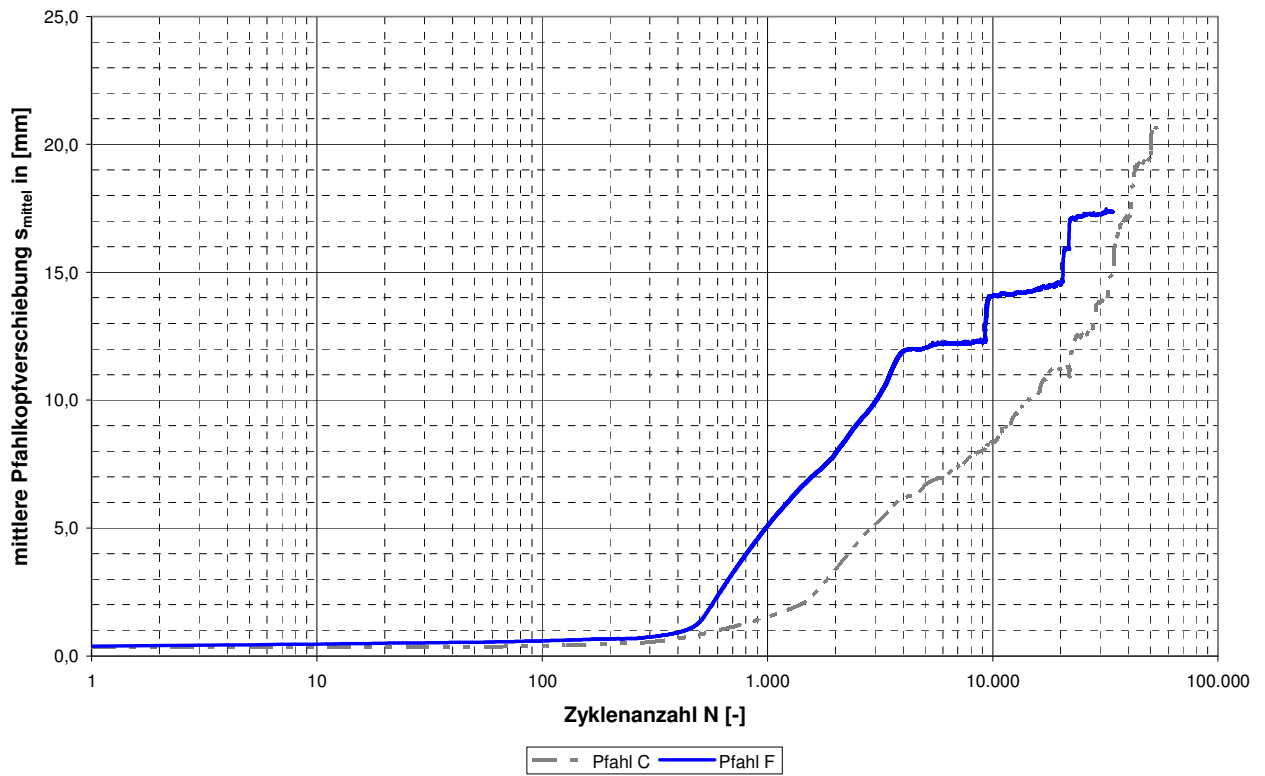


Abbildung 4.49: Mittlere Pfahlverschiebung: Vergleich Pfahl F (statisch vorbelastet) mit Pfahl C

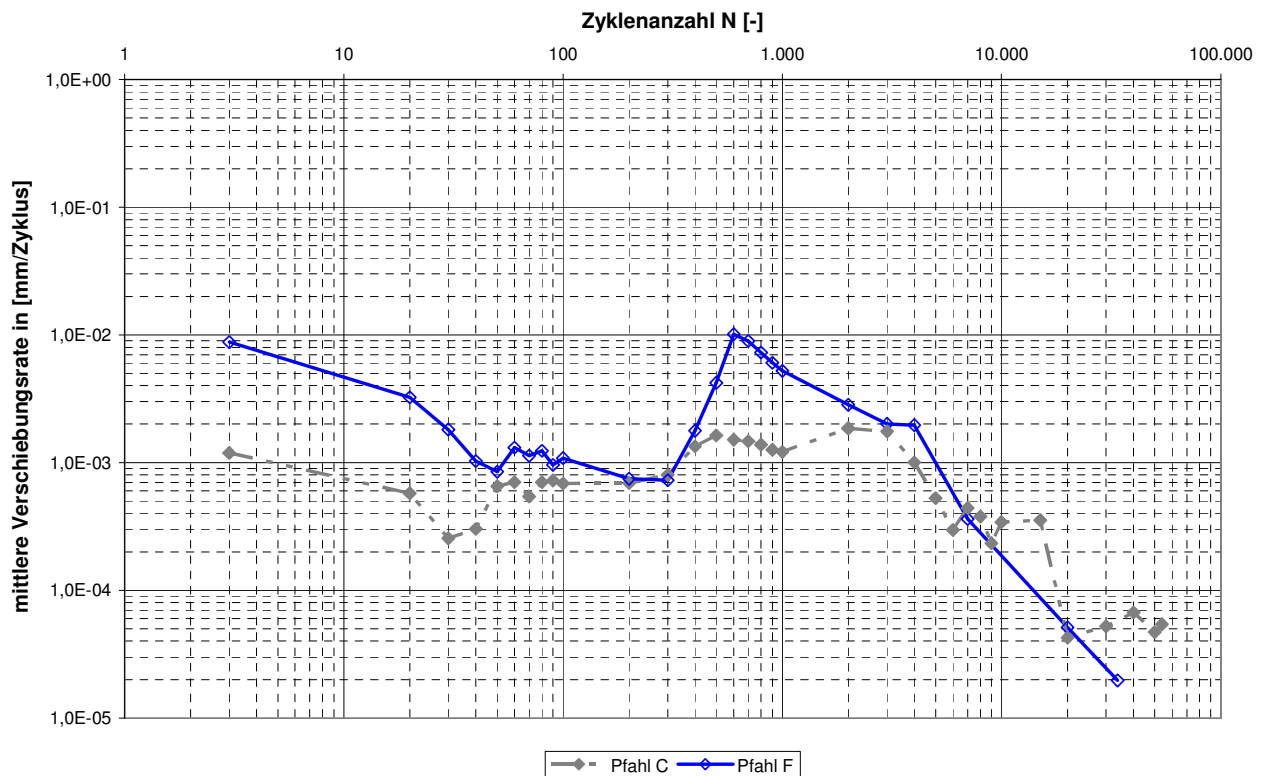


Abbildung 4.50: Verschiebungsraten: Vergleich Pfahl F (statisch vorbelastet) mit Pfahl C

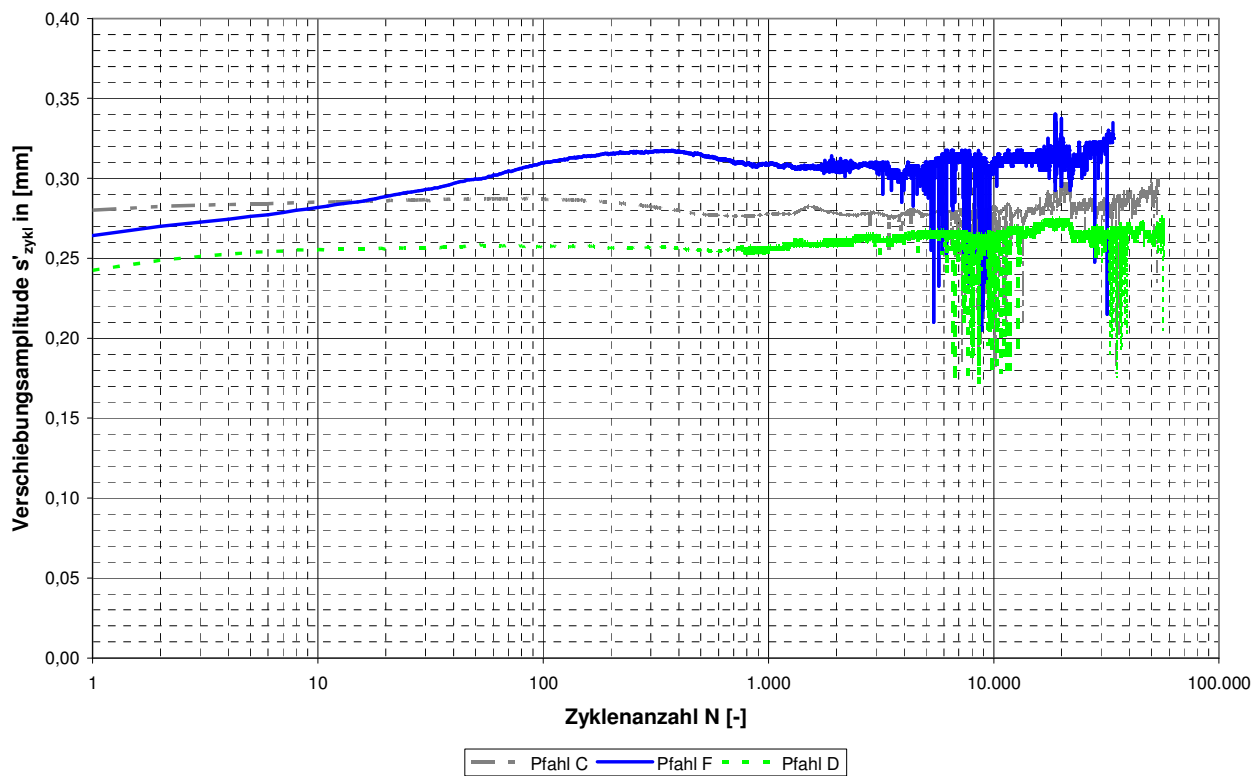


Abbildung 4.51: Verschiebungsamplitude: Vergleich Pfahl F (statisch vorbelastet) mit Pfahl C und Pfahl D

4.4 Zweite Versuchsreihe – Axial zyklische Wechsellastversuche

4.4.1 Pfahlherstellung

Für die Wechsellastversuche wurden auf dem Versuchsfeld 15 Mikropfähle in fünf Dreiergruppen hergestellt. Die beiden äußeren Pfähle der Dreiergruppe dienten jeweils als Reaktionspfähle zur Aufnahme der Druck- und Zugkräfte bei Belastung des mittleren Pfahls. Der Abstand zwischen den Pfählen einer Dreiergruppe betrug jeweils 1,5 m. Die Bohrungen wurden wie bei der ersten Versuchsreihe mit Verrohrung und Innenschnecke abgeteuft, um möglichst identische zylindrische Pfahlgeometrien zu erzeugen. Der Außendurchmesser der Verrohrung (152 mm), die Pfahllänge (4,2 m) und der Durchmesser des GEWI-Stahltragglieds (50 mm) wurden identisch zur ersten Versuchsreihe gewählt. Das Bohrloch wurde mit Zementsuspension verfüllt und mit geringem Druck (< 5 bar) verpresst. Nach Ziehen der Verrohrung wurde bei den mittleren Pfählen in die frische Zementsuspension eine Stahlhülse bis 0,2 m unter Geländeoberfläche zum Schutz des Pfahlkopfes eingedrückt. In Abbildung 4.52 ist die Anordnung der Pfähle der zweiten Versuchsreihe dargestellt.

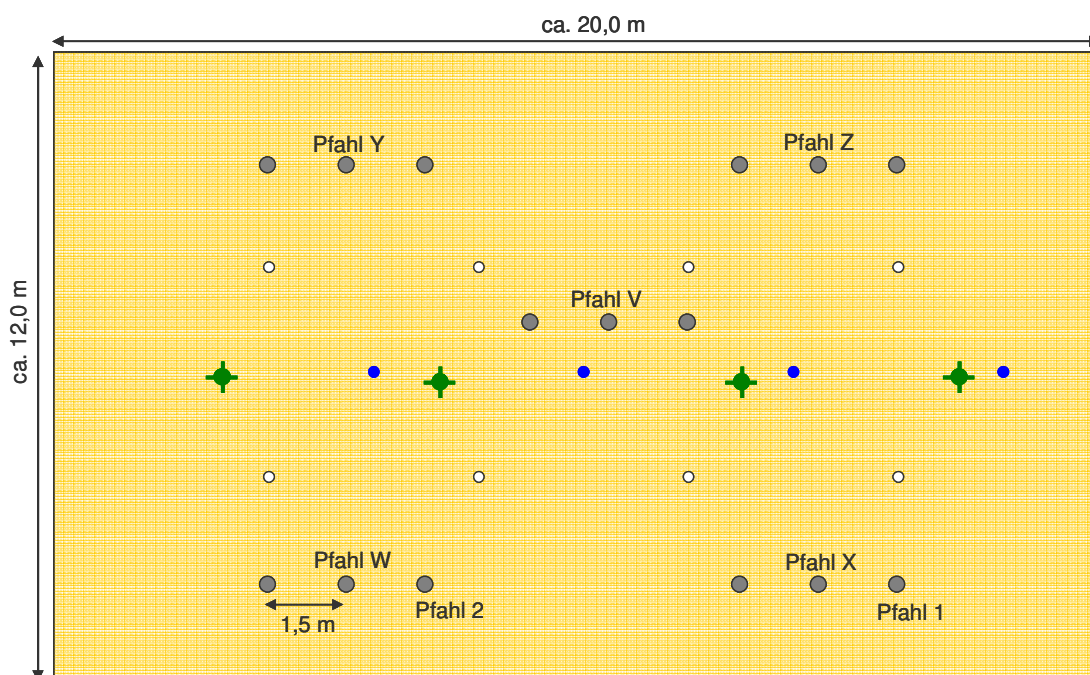


Abbildung 4.52: Anordnung der Pfähle (1. und 2. Versuchsreihe) und Lage der Aufschlussbohrungen und Drucksondierungen im Versuchsfeld

- ...Lage der Mikropfähle (2. Versuchsreihe)
- ...Lage der Mikropfähle (1. Versuchsreihe)
- ⊕ ...Aufschlussbohrungen
- ...Drucksondierungen

An Rückstellproben der Frischzementsuspension wurde am Zentrum Geotechnik der TU München die einaxiale Druckfestigkeit an zylindrischen Probekörpern (Durchmesser ca. 55 mm, Höhe ca. 55 mm) nach 28 Tagen geprüft. Die Probekörper wiesen im Mittel eine einaxiale Druckfestigkeit von $34,5 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen auf und lagen somit deutlich über dem in DIN EN 14199 geforderten Wert von 25 N/mm^2 .

4.4.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Lastaufbringung auf den mittleren Pfahl einer Pfahlgruppe wurde dieselbe Lastbrücke wie bei der ersten Versuchsreihe verwendet. Als Widerlager dienen die beiden äußeren Pfähle jeder Dreiergruppe, um sowohl Zug- als auch Druckkräfte auf den Pfahl aufbringen zu können. Die Lastbrücke wurde über Stahlplatten und Ankermuttern kraftschlüssig mit den Reaktionspfählen verbunden (siehe Abbildung 4.53).

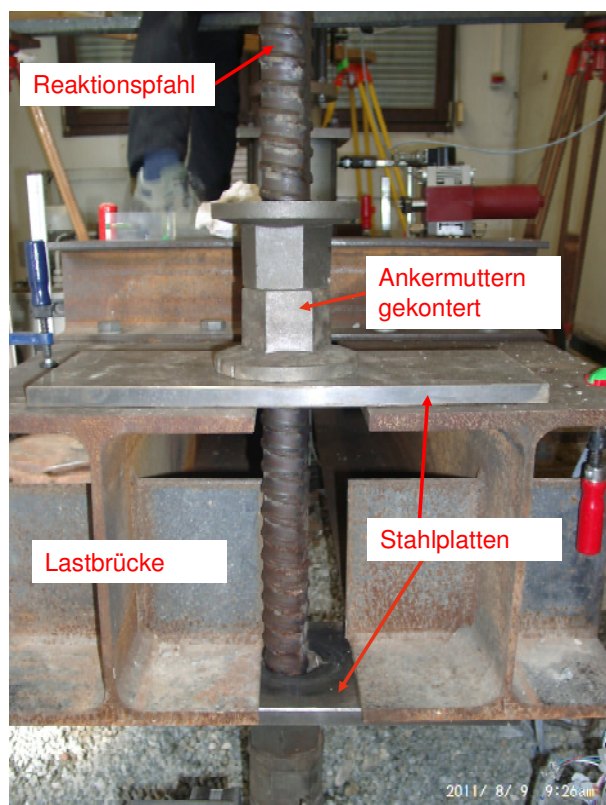


Abbildung 4.53: Versuchsaufbau Wechsellastversuche (2. Versuchsreihe)



Abbildung 4.54: Detail zur Lastaufbringung

Die Versuche der zweiten Versuchsreihe wurden ebenfalls kraftgesteuert durchgeführt. Die Last wurde hydraulisch mit einem Hohlkolbenzylinder (LHC140-55/175 mit gleitarmen Dichtungen) aufgebracht. Zum Aufbringen von Zug- und Druckkräften im Wechsel wurden das Stahltragglied und der Hohlkolbenzylinder über ein Verbindungsstück mit Gewinde fest miteinander verbunden (siehe Abbildung 4.55). Der Hohlkolbenzylinder wiederum wurde mit der Lastbrücke verschraubt. Dadurch konnte sowohl beim Ein- (Druck) als auch beim Ausfahren des Zylinders (Zug) Kraft auf das Stahltragglied übertragen werden.

Die einzelnen Laststufen wurden bei den statischen Pfahlprobebelastungen manuell angefahren. Anschließend wurde die Last über einen rechnergestützten Regelkreis konstant gehalten (siehe Abbildung 4.14). Bei den zyklischen Wechsellastversuchen erfolgte die gesamte Versuchssteuerung rechnergestützt.

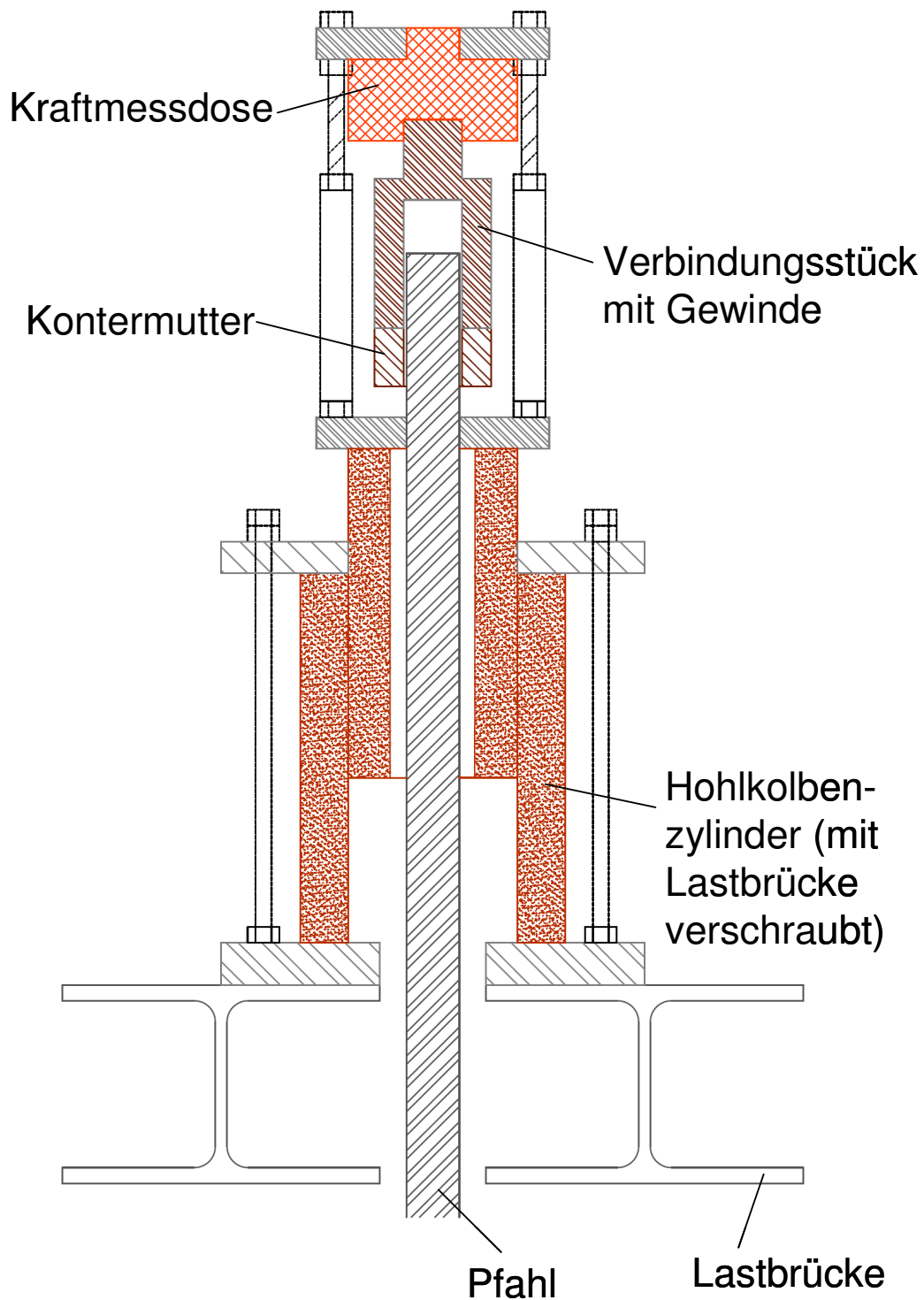


Abbildung 4.55: Schemaschnitt (nicht maßstäblich)

4.4.2.1 Versuchsablauf der statischen Referenzversuche

An einem äußeren Pfahl einer Dreiergruppe (Pfahl 1) wurde eine statische Pfahlprobebelastung auf Zug durchgeführt. An einem mittleren Pfahl einer Dreiergruppe (Pfahl Z) wurde eine statische Pfahlprobebelastung auf Druck durchgeführt. Im Folgenden werden Zugbelastungen mit dem Vorzeichen (+) gekennzeichnet, Druckbelastungen mit dem Vorzeichen (-).

Die Vorlaststufe bei Pfahl 1 wurde zu +5 kN, bei Pfahl Z zu -5 kN gewählt, so dass ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Kraftmessdose und Belastungseinrichtung und der Kontakt zwischen den Wegaufnehmern und den Pfählen sichergestellt waren.

Die Laststeigerung erfolgte jeweils in 5 kN- bzw. 10 kN-Schritten (Vorlast +/-5 kN, Laststufen: +/- 10 kN, +/-20 kN usw. Die Zwischenentlastung erfolgte bei +/-50 kN. Für den Erstbelastungsast betrug die Belastungsgeschwindigkeit $v_{\text{Erstbelastung}} = 0,04 \text{ kN/s}$, bei Ent- und Wiederbelastung betrug die die Belastungsgeschwindigkeit $v_{\text{Ent-/Wiederbelastung}} = 0,067 \text{ kN/s}$.

In Abbildung 4.56 ist exemplarisch der Ablauf der statischen Probebelastung von Pfahl Z dargestellt (Versuchsablauf Pfahl 1 in Anhang 1.10).

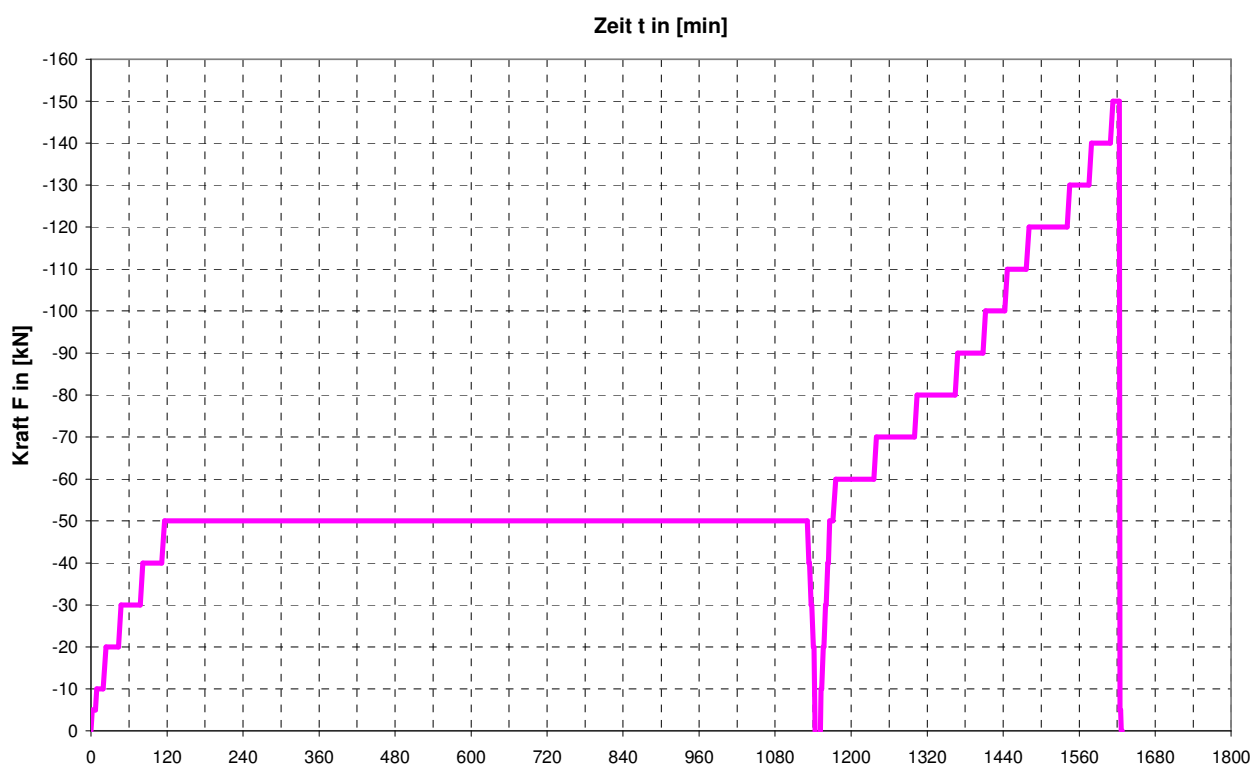


Abbildung 4.56: Versuchsablauf der statischen Pfahlprobebelastung von Pfahl Z

4.4.2.2 Versuchsablauf der kraftgesteuerten Wechsellastversuche

Die Vorlaststufe wurde wie bei den Zugschwellversuchen zu +5 kN (Zug) gewählt, so dass ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Kraftmessdose und Belastungseinrichtung und der Kontakt zwischen den Wegaufnehmern und dem Pfahl sichergestellt waren. Die Vorlaststufe wurde einige Minuten konstant gehalten, anschließend wurde die Last bis zum jeweiligen mittleren Lastniveau F_{mittel} gesteigert. Das mittlere Lastniveau lag bei allen Versuchen im Zugbereich. Die Belastungsgeschwindigkeit lag bei $v = 0,04 \text{ kN/s}$. Diese Laststufe wurde wiederum für einige Minuten konstant gehalten, bevor der Pfahl mit einer Wechsellast belastet wurde. Der Verlauf der Belastung entsprach einer Sinusfunktion, die Dauer eines Lastzyklus betrug 60 s (Frequenz 0,017 Hz). In Abbildung 4.57 ist exemplarisch der Versuchsablauf von Pfahl W-Belastung 1 dargestellt.

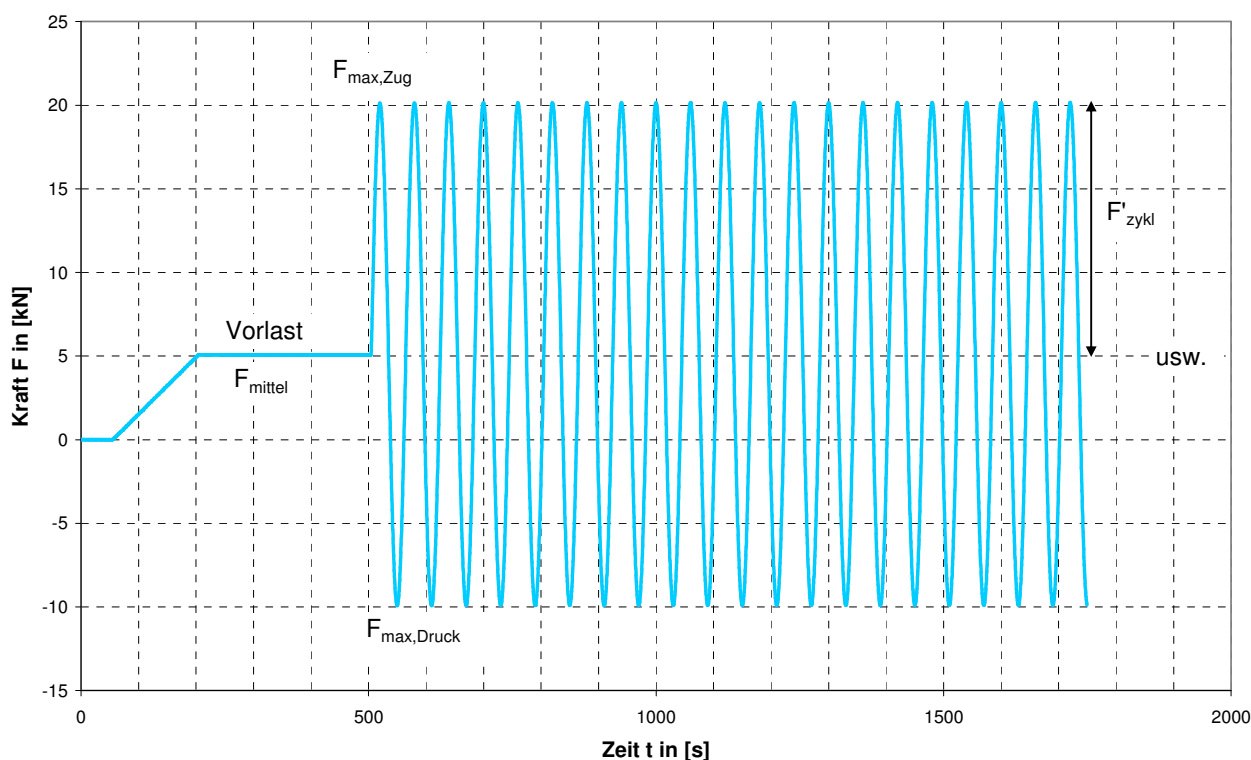


Abbildung 4.57: Versuchsablauf Wechsellastversuch (Pfahl W-Belastung 1)

4.4.3 Messtechnik

Die Pfahlkopfverschiebungen wurden während der Versuche über zwei digitale Wegaufnehmer (Typ WA-T 100 mm der Fa. Hottinger) knapp über Geländeoberkante und zusätzlich über eine mechanische Messuhr am Ende des GEWI-Stahls erfasst. Vor Beginn und nach Abschluss des Versuchs wurde zusätzlich die Höhenlage des Pfahlkopfes mittels Feinnivellement bestimmt. An den Reaktionspfählen wurden die Verschiebungen während der Versuche mit Hilfe mechanischer Messuhren überprüft, vor und nach einem Versuch wurde die Höhenlage der Pfähle mittels Feinnivellement bestimmt.

Die Messung der Kraft erfolgt über eine Kraftmessdose (Z4 200 kN der Fa. HBM, Messabweichung von max. 60 N bei 200 kN).

Zur Erfassung der Verteilung des Längskraftverlaufs über die Pfahltiefe wurden wie bei den Zugschwellversuchen an den Traggliedern auf einer Länge von 3,0 m jeweils 5 Messstellen mit Dehnmessstreifen (DMS) im Abstand von 0,75 m bestückt. Zusätzlich wurde im Bereich der freien Stahllänge knapp über der Geländeoberfläche eine sechste Messstelle angeordnet (MQ K in Abbildung 4.58). Damit wurde geprüft, dass die gesamte aufgebrachte Last auch tatsächlich in das Stahltragglied übertragen wird. Dies war in allen Versuchen der Fall. Die DMS wurden als Vollbrückenschaltung ausgeführt, um evtl. auftretende Biegebeanspruchungen im Tragglied während der Versuche zu kompensieren. Die DMS wurden gegen Nässe und Beanspruchungen während des Transports und des Einbaus mit einer Silikonschutzschicht, einer Überdeckung mit Kautschuk und einem Kunststoffschumpfschlauch (siehe Abbildung 4.59) geschützt. Durch den Ersatz des Walzbleis, wie es bei der ersten Versuchsreihe verwendet wurde, durch einen Schumpfschlauch konnte die Ausfallquote der DMS auf Grund von Feuchtigkeitzutritten deutlich reduziert werden.

Die DMS wurden vor Herstellung der Pfähle im Versuchsstand (siehe Anhang 1.4) am Zentrum Geotechnik der TU München für einen Messbereich von 0 kN bis 300 kN kalibriert. Die DMS wiesen für den untersuchten Lastbereich eine hohe Linearität auf. Die maximale Abweichung zum Messwert der Kraftmessdose betrug 1 kN.

Die Reaktionspfähle wurden nicht mit DMS-Messstellen ausgerüstet.

Die Frequenz zur rechnergestützten Datenerfassung für die beiden induktiven Wegaufnehmer, das Kraftsignal sowie die sechs mit DMS bestückten Messstellen betrug 2 Hz.

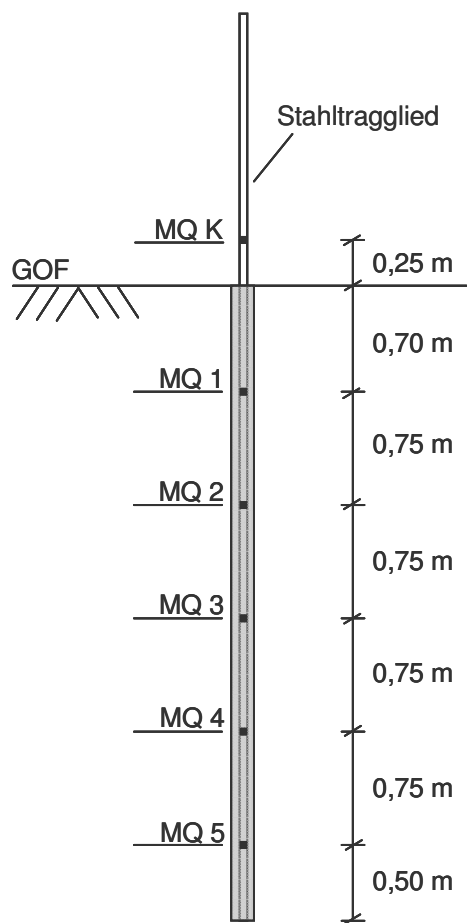


Abbildung 4.58: Messquerschnitte Pfähle (2. Versuchsreihe)



Abbildung 4.59: Mit Schrumpfschlauch und Klebeband geschützte Messstelle

4.4.4 Versuchsauswertung statische Pfahlprobelastungen

4.4.4.1 Pfahlverschiebungen und charakteristischer Pfahlwiderstand

In Abbildung 4.60 sind die Widerstands-Verschiebungslinien für den statischen Zugversuch an Pfahl 1 und den statischen Druckversuch an Pfahl Z dargestellt. Die Ermittlung der Widerstands-Verschiebungslinien erfolgte durch Mittelwertbildung der Messwerte der induktiven Wegaufnehmer.

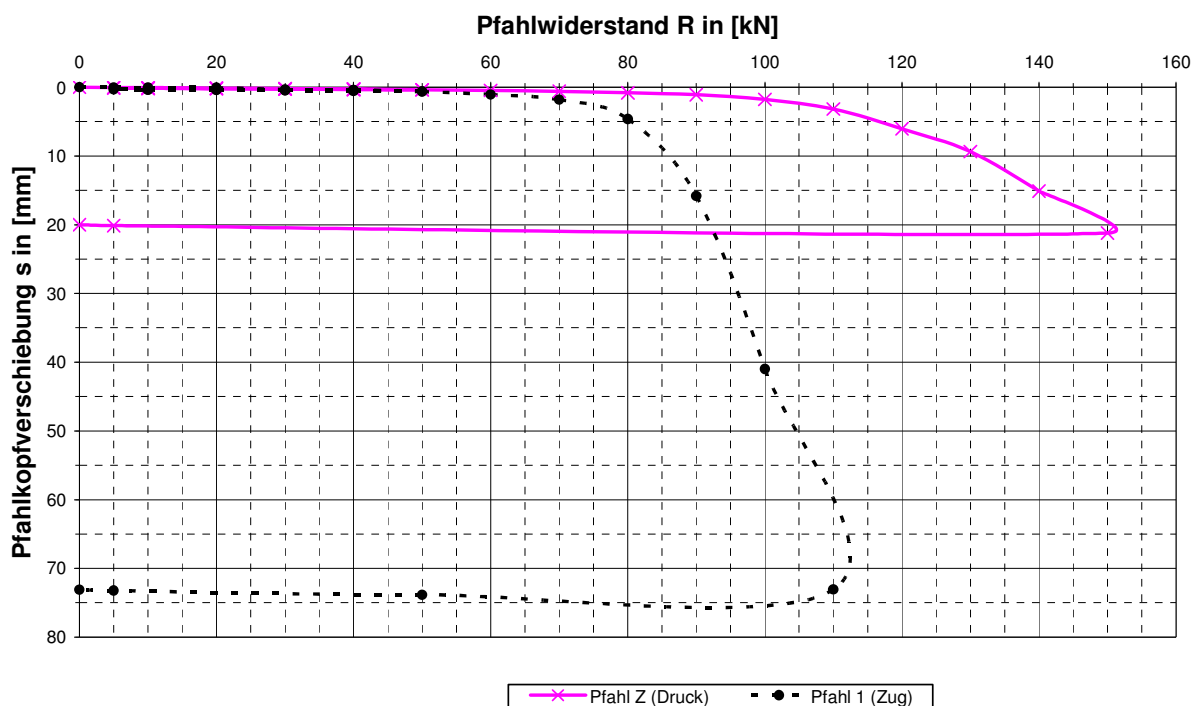


Abbildung 4.60: Widerstands-Verschiebungslinien aus statischen Pfahlprobelastungen (2. Versuchsreihe)

Für jede Laststufe während der statischen Pfahlprobelastungen wurde das Kriechmaß k_s bestimmt. In Abbildung 4.61 sind die Kriechmaße des Erstbelastungspfads in Abhängigkeit vom Pfahlwiderstand dargestellt.

Der auf Druck belastete Pfahl Z zeigt gegenüber dem auf Zug belasteten Pfahl 1 ein deutlich steiferes Last-Verschiebungsverhalten mit sehr viel geringeren Pfahlkopfverschiebungen bei gleicher Laststufe. Die Kriechmaße bei gleicher Pfahllast sind beim Druckpfahl ebenfalls deutlich geringer.

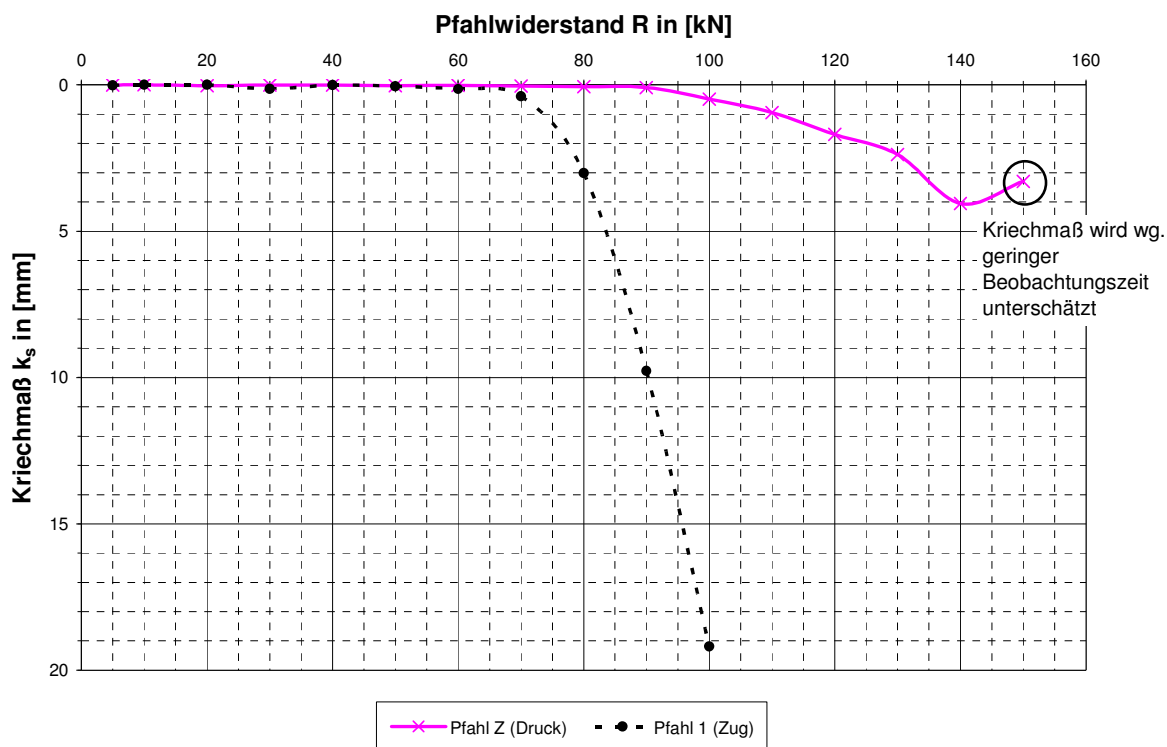


Abbildung 4.61: Aus den statischen Pfahlprobebelastungen ermittelte Kriechmaße

In Tabelle 4.10 sind die Pfahlwiderstände für eine Gesamtverschiebung des Pfahlkopfes von $s_g = 0,1 \cdot D = 150 \text{ mm}$ und ein Kriechmaß von 1 mm bzw. 2 mm angegeben. Im Vergleich zum Pfahlwiderstand der auf Zug belasteten Pfähle der 1. und 2. Versuchreihe ist der Pfahlwiderstand des Druckpfahles je nach betrachtetem Versagenskriterium zwischen 38 % und 68 % größer. Beim auf Zug belasteten Pfahl 1 ergeben sich ähnlich große Pfahlwiderstände wie bei den auf Zug belasteten Pfählen der 1. Versuchreihe.

Versagenskriterium	Pfahlwiderstand	$R_{t,m,i}$ [kN]		
		Pfahl F / B / E (Zug) (1. Versuchreihe)	Pfahl 1 (Zug)	Pfahl Z (Druck)
$s_g = 15 \text{ mm}$		94,8 / 88,5 / 83,3	89,5	140,0
$k_s \leq 1,0 \text{ mm}$		80,4 / 77,6 / -	73,5	111,0
$k_s \leq 2,0 \text{ mm}$		81,5 / 80,4 / -	77,5	125,0

Tabelle 4.10: Pfahlwiderstände aus statischen Pfahlprobebelastungen

Auf Grundlage der in Tabelle 4.10 ermittelten Einzelpfahlwiderstände wird als charakteristischer Herauszieh Widerstand der Pfähle unter statischer Belastung der Wert von $R_{t,k} = 80 \text{ kN}$ als Referenztragfähigkeit bei der Auswertung der Wechsellastversuche beibehalten. Der charakteristische Pfahlwiderstand bei einer reinen Druckbelastung ist zwar höher, der

Pfahlwiderstand unter einer wechselnden Druck- und Zugbelastung wird jedoch vom niedrigeren Herausziehwiderstand bestimmt.

4.4.4.2 Verteilung der Längskraft im Pfahl und Mantelreibung

Für die statische Pfahlprobebelastung auf Druck an Pfahl Z wurden zusätzlich zu den Pfahlverschiebungen und Kriechmaßen der Längskraftverlauf im Pfahl sowie die Mantelreibung ermittelt. Eine Erfassung der Pfahlmantelreibung zwischen DMS 5 und Pfahlfuß (tau 5-6) und des Pfahlsitzenwiderstands ist nicht möglich, da am Pfahlfuß kein Druckkissen angeordnet wurde. In Abbildung 4.62 ist die Verteilung der Mantelreibung zwischen den Messquerschnitten für unterschiedliche Laststufen für Pfahl Z dargestellt. Die Mantelreibung im obersten Pfahlabschnitt (tau 0-1) ist im Vergleich zur Mantelreibung in den mittleren Pfahlabschnitten sehr groß und nimmt mit größerer Pfahllast auch stärker zu als diese. Die Mantelreibungswerte im mittleren Pfahlbereich (tau 1-2 bis tau 4-5) sind für die einzelnen Laststufen annähernd gleich groß. Für Laststufen ab 50 kN liegen auf Grund eines Ausfalls des DMS 5 keine Werte für tau 4-5 vor.

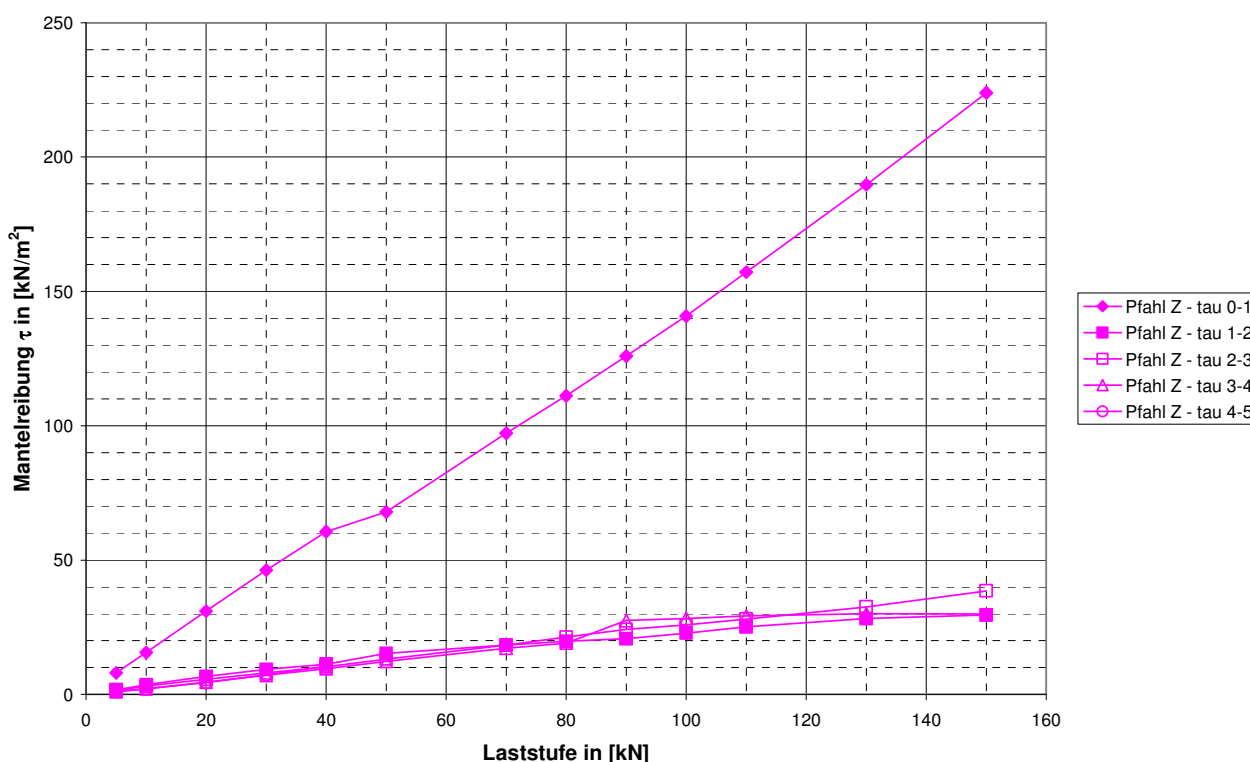


Abbildung 4.62: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe bei unterschiedlichen Laststufen (Pfahl Z - Druck)

Im Vergleich mit den statisch auf Zug belasteten Pfählen (siehe Abbildung 4.63) ist die Mantelreibung im obersten Pfahlabschnitt (tau 0-1) bei Pfahl Z höher. In den mittleren Pfahlabschnitten (tau 1-2 bis tau 4-5) sind die Mantelreibungswerte bei den Zugpfählen meist höher als beim Druckpfahl. Daher ist zu vermuten, dass der insgesamt höhere Pfahlwiderstand bei der Druckbelastung überwiegend aus der Mobilisierung eines Pfahlsitzenwiderstandes resultiert.

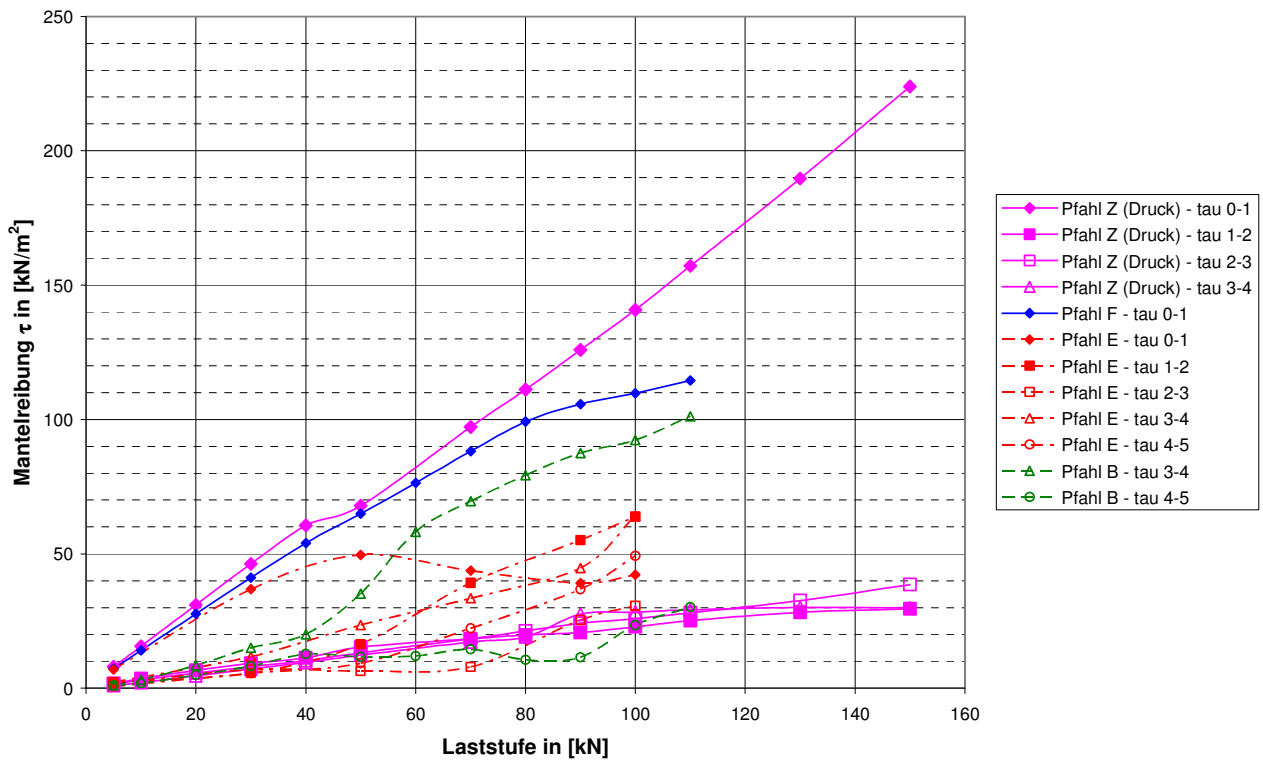


Abbildung 4.63: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe – Vergleich Druck- und Zugbelastung

4.4.5 Versuchsauswertung Wechsellastversuche

In Tabelle 4.11 sind die Versuchsdaten der einzelnen Wechsellastversuche in der chronologischen Reihenfolge der Versuchsdurchführung zusammengefasst. In Abbildung 4.64 sind die Versuche im Interaktionsdiagramm bezogen auf den in den statischen Pfahlprobebelastungen ermittelten charakteristischen Herauszieh Widerstand von $R_{t;k} = 80 \text{ kN}$ dargestellt. Bei einem Verhältnis des mittleren Lastniveaus zum charakteristischen Herauszieh Widerstand von $F_{\text{mittel}} / R_{t;k} = 0,06$ wurde in drei Versuchen (Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X, Pfahl W-Belastung 2) die zyklische Lastamplitude gesteigert. Das Verhältnis der Lastamplitude zum charakteristischen Herauszieh Widerstand wurde von $F'_{\text{zykl}} / R_{t;k} = 0,19$ bis auf $F'_{\text{zykl}} / R_{t;k} = 0,44$ gesteigert. Für das Verhältnis von $F_{\text{mittel}} / R_{t;k} = 0,19$ wurden die Verhältnisse $F'_{\text{zykl}} / R_{t;k} = 0,31$ und $F'_{\text{zykl}} / R_{t;k} = 0,44$ untersucht.

Als Versagenskriterien für die Wechsellastversuche wurden analog zu den Zugschwellversuchen eine mittlere Pfahlverschiebung von $s_g = 0,1 \cdot D = 15 \text{ mm}$ und eine Verschiebungsspanne innerhalb eines Lastzyklus s_{zykl} von mehr als 15 mm definiert.

Versuchsdaten Pfahl	Lastbild				Zyklusanzahl
	F_{mittel} [kN]	$F_{\text{max,Zug}}$ [kN]	$F_{\text{max,Druck}}$ [kN]	F'_{zykl} [kN]	N [-]
W-Belastung 1	+5	+20	-10	15	58.030
W-Belastung 2	+5	+40	-30	35	3.177
X	+5	+30	-20	25	39.919
V-Belastung 1	+15	+40	-10	25	51.681
V-Belastung 2 (Teil 1)	+15	+50	-20	35	16.172
V-Belastung 2 (Teil 2) wg. Neustart nach Stromausfall	+15	+50	-20	35	18.315

Tabelle 4.11: Durchgeführte Wechsellastversuche

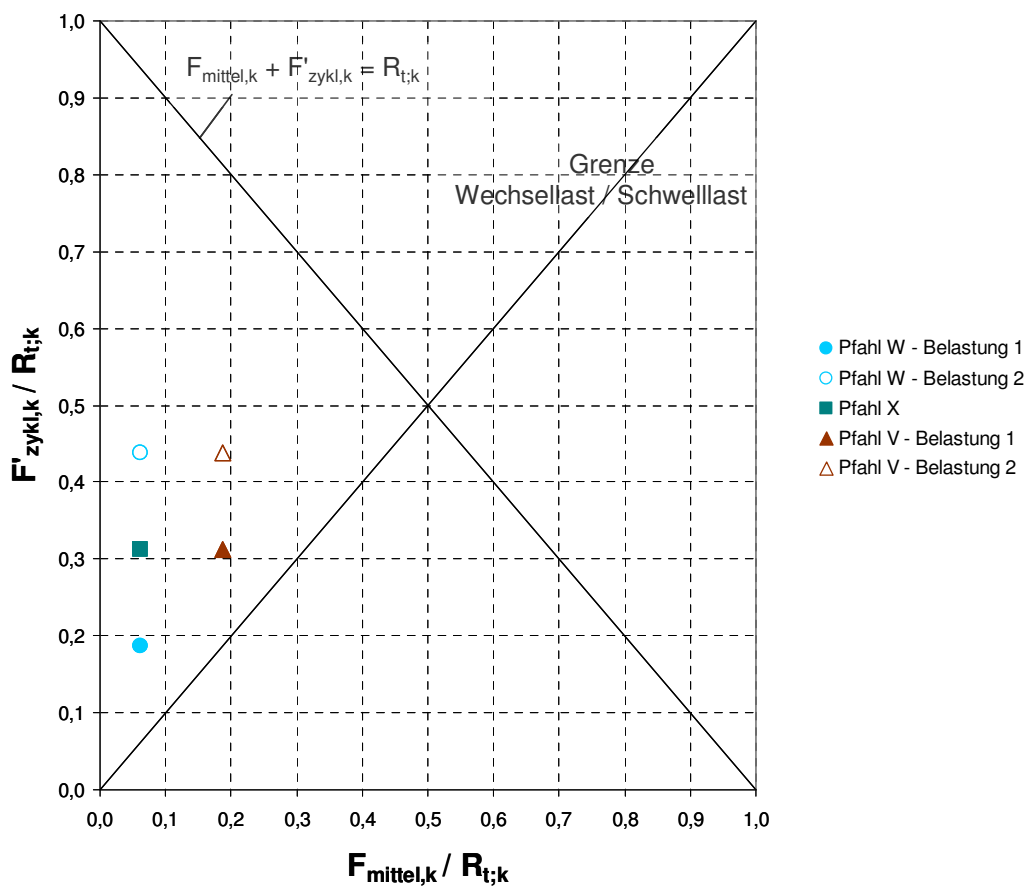


Abbildung 4.64: Darstellung der Wechsellastversuche im Interaktionsdiagramm

4.4.5.1 Mittlere Pfahlverschiebungen

In Tabelle 4.12 sind die mittleren Pfahlverschiebungen nach Erreichen des mittleren Lastniveaus (s_{mittel} bei $N = 0$), die Pfahlverschiebungen nach der maximalen Zyklenanzahl (s_{mittel} bei N_{max}) sowie der aus der zyklischen Belastung resultierende Anteil der mittleren Pfahlverschiebung (Δs_{zykl}) angegeben. In der letzten Spalte der Tabelle ist die Zyklenanzahl angegeben, für die die mittlere Pfahlverschiebung oder die Verschiebungsspanne den Wert des Versagenskriteriums von $s_g = 15$ mm erreichen.

Pfahl	F_{mittel} [kN]	F'_{zykl} [kN]	s_{mittel} bei $N = 0$ [mm]	s_{mittel} (bei N_{max}) [mm]	$\Delta s_{\text{zykl}} =$ $s_{\text{mittel}}(N_{\text{max}}) -$ $s_{\text{mittel}}(N = 0)$ [mm]	Zyklenanzahl N bei 1. $s_{\text{mittel}} = 15$ mm 2. $s_{\text{zykl}} = 15$ mm [-]
W-Belastung 1	+5	15	0,02	-0,39 (58.030)	-0,41	1.: $> 10^6$ *) 2.: $> 10^7$ **)
W-Belastung 2	+5	35	0,03	29,0 (3.177)	28,97	1.: ≈ 2.805 2.: 518
X	+5	25	0,01	0,19 (39.919)	0,18	1.: $> 10^6$ *) 2.: $> 7 \cdot 10^6$ **)
V-Belastung 1	+15	25	0,06	1,36 (51.681)	1,30	1.: $> 7 \cdot 10^5$ *) 2.: $> 2 \cdot 10^6$ **)
V-Belastung 2 (Teil 1 + Teil 2)	+15	35	0,27	30,92 (16.172 + 18.315 = 34.487)	30,65	1.: ≈ 19.950 2.: keine Angabe möglich

Tabelle 4.12: Mittlere Pfahlverschiebungen (Pfahlkopfhebung (+), Pfahlkopfsenkung (-))

*) Zyklenanzahl aus Verschiebungsverläufen in Abbildung 4.65 und Abbildung 4.66 extrapoliert.

***) Zyklenanzahl aus Verlauf der Verschiebungsamplitude in Abbildung 4.67 und Abbildung 4.68 extrapoliert

In Abbildung 4.65 sind die mittleren Pfahlverschiebungen für Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1 über die Zyklenanzahl im linearen Maßstab dargestellt. Mit zunehmender Zyklenanzahl nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen zu. Bei Pfahl W-Belastung 1 ist insgesamt eine leichte Pfahlsetzung festzustellen, bei den beiden anderen Versuchen eine Pfahlhebung. Die Verschiebungen können durch Geraden angenähert werden, die Steigungen der Geraden liegen zwischen ca. $9 \cdot 10^{-6}$ und $2 \cdot 10^{-5}$. Bei linearer Extrapolation der gemessenen Pfahlkopfverschiebungen würden mittlere Verschiebungen von mehr als 15 mm bei Pfahl W-Belastung 1 und Pfahl X erst bei Zyklenzahlen von deutlich mehr als einer Million Lastzyklen auftreten, bei Pfahl V-Belastung 1 bei ca. $N = 7 \cdot 10^5$.

In Abbildung 4.66 sind die mittleren Pfahlverschiebungen für Pfahl W-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 2 im halblogarithmischen Maßstab dargestellt. Bei beiden Versuchen tritt ein "zyklisches (schrittweises) Versagen" mit einer über-log-linearen Zunahme der Verschiebungen auf. Das

Versagenskriterium einer zulässigen Pfahlkopfverschiebung von $s_g = 15$ mm wird bei Pfahl W-Belastung 2 nach ca. 2.800 Lastzyklen und bei Pfahl V-Belastung 2 nach ca. 19.950 Lastzyklen überschritten.

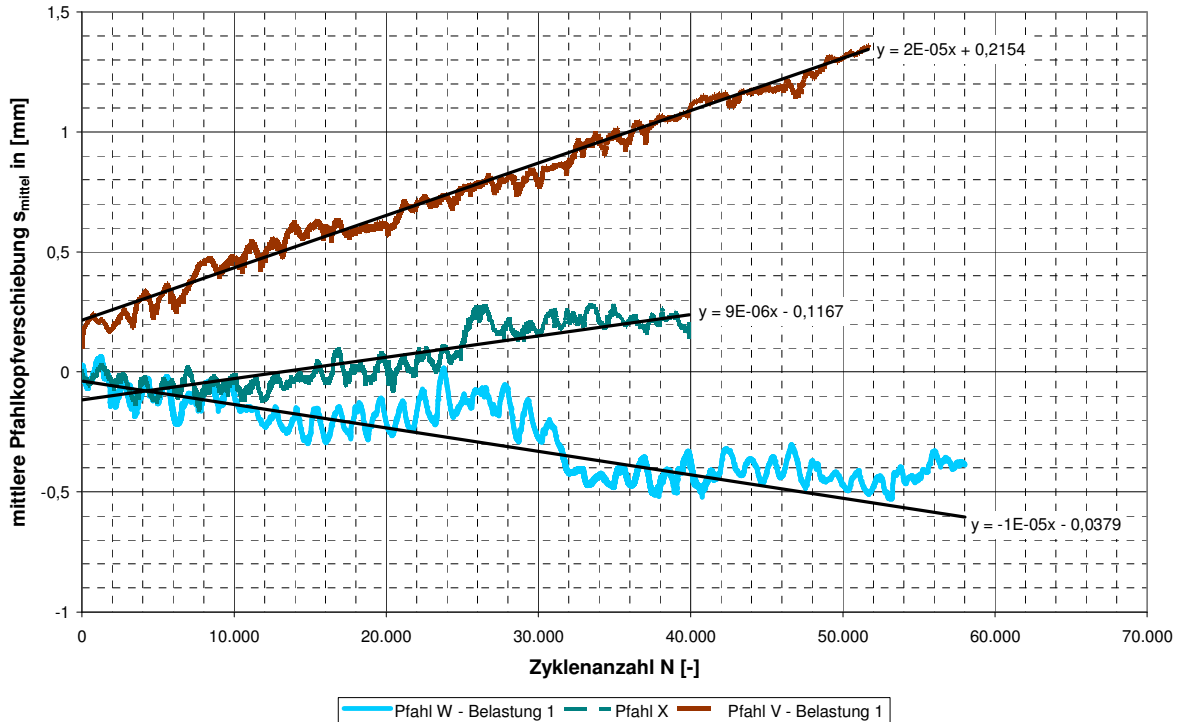


Abbildung 4.65: Mittlere Pfahlverschiebungen (Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X, Pfahl V-Belastung 1)

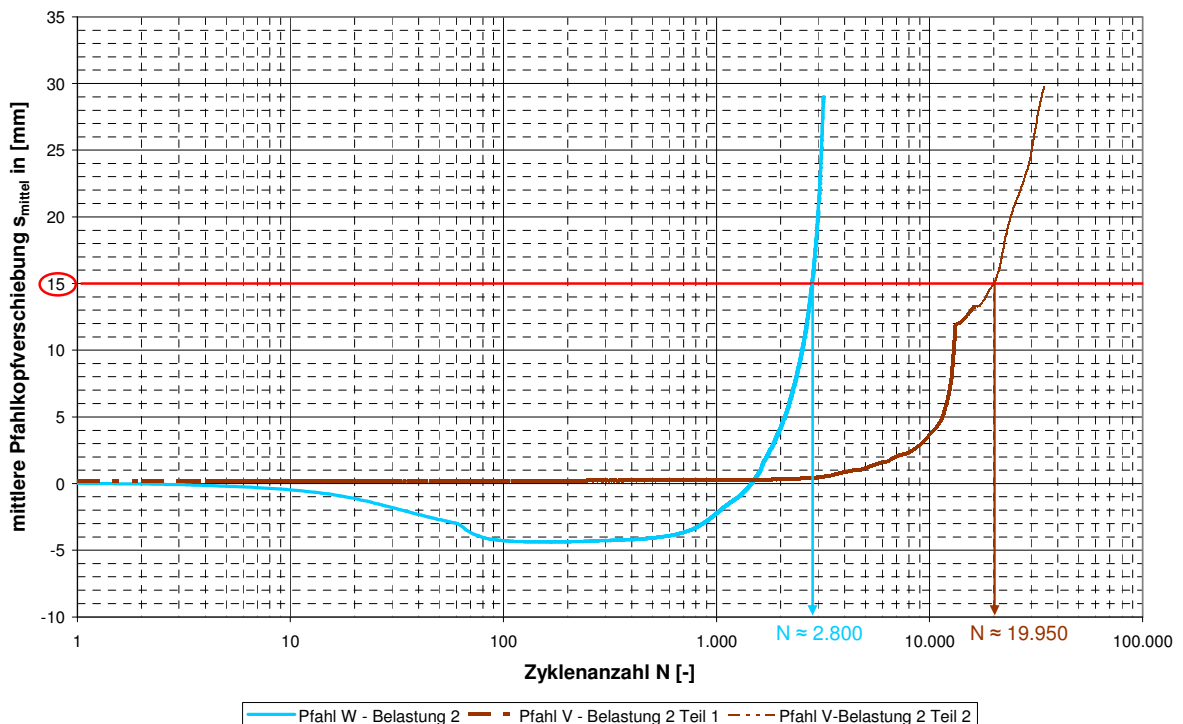


Abbildung 4.66: Mittlere Pfahlverschiebungen im halblogarithmischen Maßstab (Pfahl W-Belastung 2, Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und Teil 2))

4.4.5.2 Verschiebungsamplituden

Anders als bei den Schwelllastversuchen bleiben die Verschiebungsamplituden s'_{zykl} bei den Wechsellastversuchen während eines Versuchs nicht konstant. Bei den Versuchen Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1 nehmen die Verschiebungsamplituden mit der Zyklanzahl linear zu (siehe Abbildung 4.67). Bei Annäherung der Zunahme der Verschiebungsamplituden mittels einer Geraden, liegen die Steigungen zwischen $7 \cdot 10^{-7}$ und $3 \cdot 10^{-6}$.

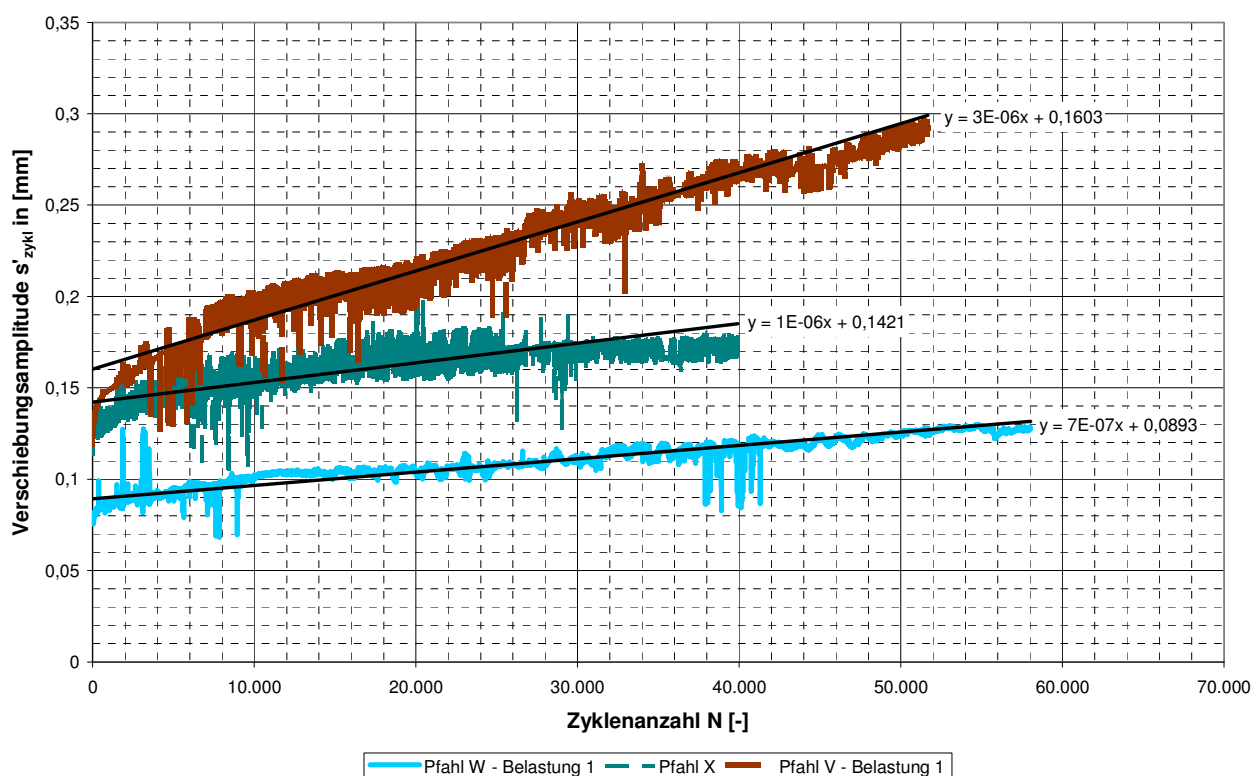


Abbildung 4.67: Verschiebungsamplitude s'_{zykl} (Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X, Pfahl V-Belastung 1)

Bei Versuch Pfahl W-Belastung 2 (siehe Abbildung 4.68) steigt die Verschiebungsamplitude innerhalb von ca. 90 Zyklen von ca. 0,3 mm auf ca. 6,5 mm an. Die Zunahme der Verschiebungsamplitude je Zyklus liegt bei ca. $7,5 \cdot 10^{-2}$ mm/Zyklus. Zwischen $N = 100$ und $N = 1.000$ verringert sich die Zunahme der Verschiebungsamplitude auf ca. $4 \cdot 10^{-3}$ mm/Zyklus und ab $N = 1000$ beträgt die Zunahme der Verschiebungsamplitude ca. $1 \cdot 10^{-3}$ mm/Zyklus.

Bei ca. 518 Zyklen liegt die Verschiebungsamplitude bereits bei 7,5 mm und die Verschiebungsspanne während eines Zyklus übersteigt somit den als Versagen definierten Wert von 15 mm.

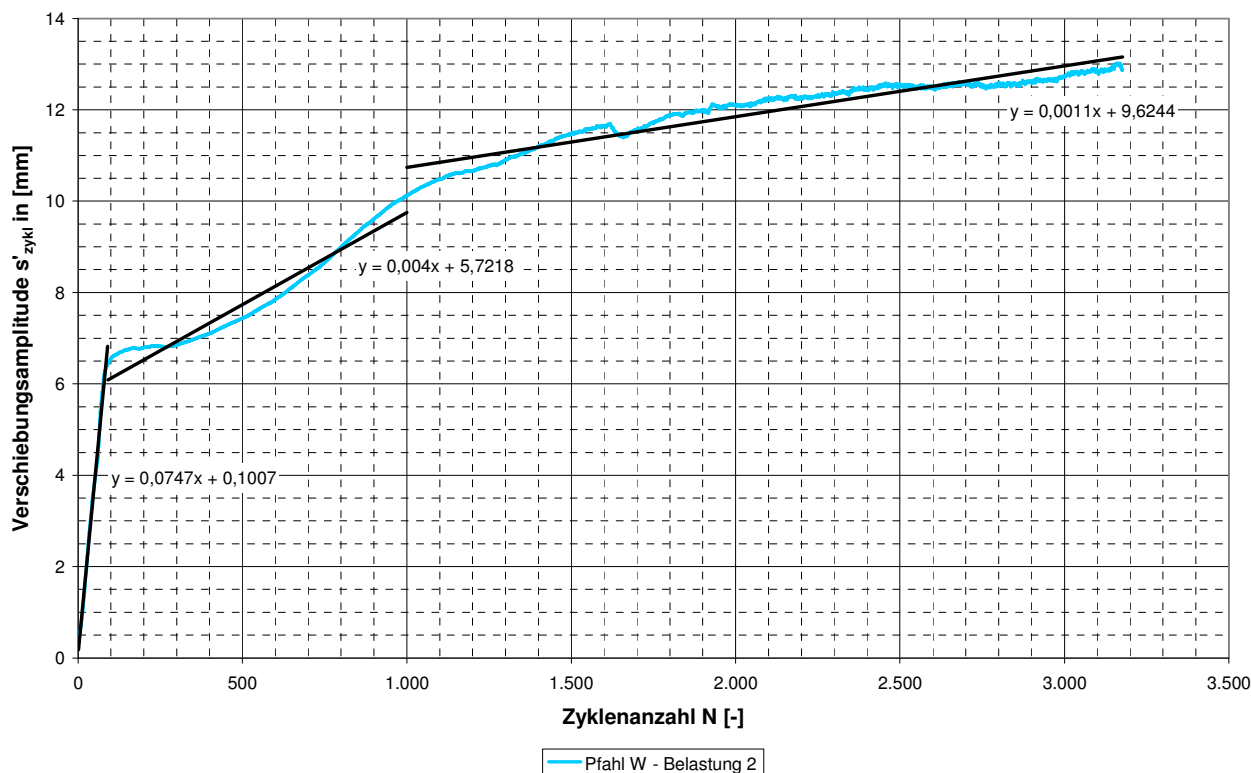


Abbildung 4.68: Verschiebungsamplitude (Pfahl W-Belastung 2)

In Abbildung 4.69 sind die Verschiebungsamplituden für Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und Teil 2) dargestellt. Bei Pfahl V-Belastung 2 steigen die Verschiebungsamplituden bis ca. $N = 11.000$ deutlich an, danach nehmen sie bis auf das Niveau bei ca. 2.000 Zyklen ab, und steigen danach wieder leicht an. Während der Abnahme der Verschiebungsamplitude nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen kontinuierlich weiter zu (siehe Abbildung 4.66). Ein Einfluss der Veränderung der Verschiebungsamplitude, auf die akkumulierenden mittleren Pfahlverschiebungen ist nicht zu erkennen.

Nach einer Entlastung des Pfahls auf 0 kN auf Grund eines Stromausfalls liegen die Verschiebungsamplituden beim Neustart des Versuchs (Pfahl V-Belastung 2 Teil 2) zunächst in der Größenordnung wie zu Beginn des Versuchs Pfahl V-Belastung 2 Teil 1, nehmen dann aber innerhalb von 2.000 Zyklen deutlich zu. Ab ca. 2.000 Zyklen bleiben die Verschiebungsamplituden im Mittel konstant. Die Größe der Verschiebungsamplitude liegt dabei leicht unter der Amplitude am Ende des ersten Versuchsteils.

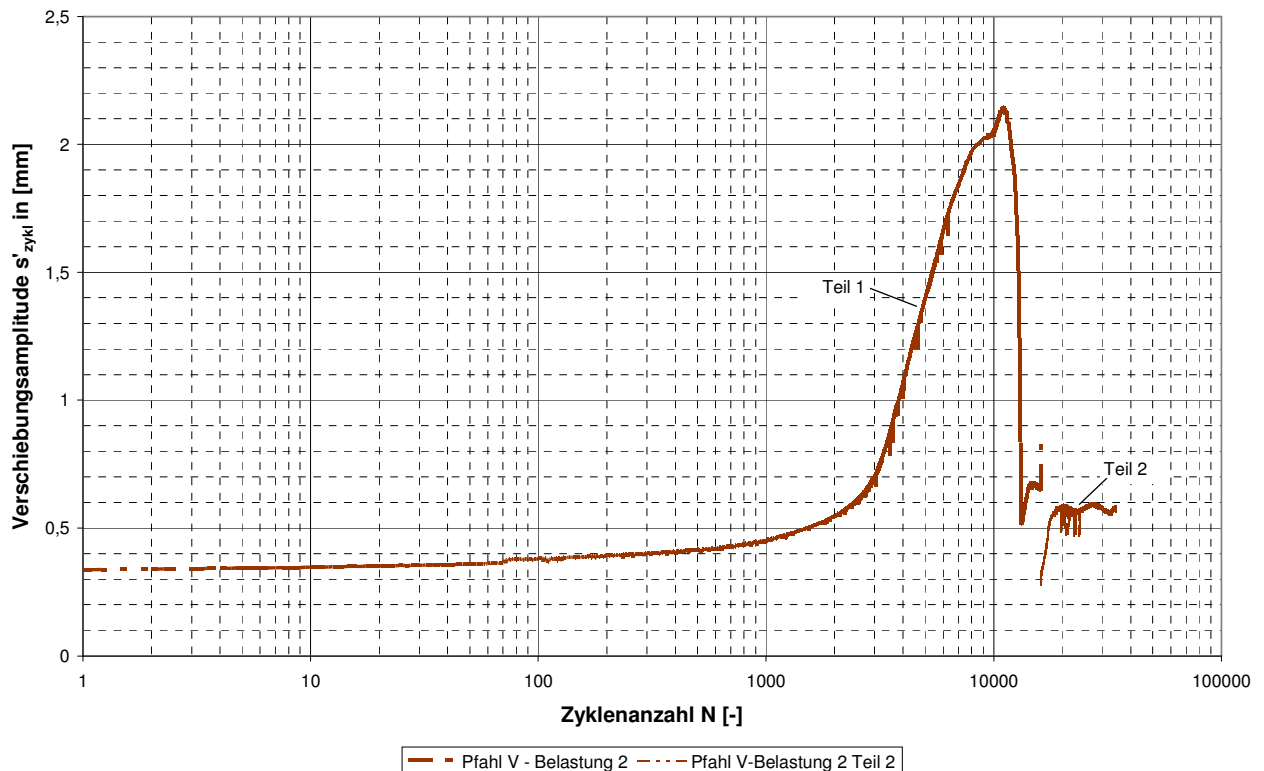


Abbildung 4.69: Verschiebungsamplitude (Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und Teil 2))

4.4.5.3 Verschiebungsraten

In Abbildung 4.70 und Abbildung 4.71 sind die Verschiebungsraten, d.h. die Änderung der mittleren Verschiebung von Zyklus zu Zyklus, im doppelt-logarithmischen Maßstab dargestellt.

Bei den Versuchen Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1 nimmt die Verschiebungsrate tendenziell mit zunehmender Zyklenzahl ab. Zu Beginn liegen die Verschiebungsraten zwischen ca. $4 \cdot 10^{-3}$ und ca. $4 \cdot 10^{-4}$. Innerhalb der ersten 1.000 Zyklen verringern sich die Verschiebungsraten um ein bis zwei Zehnerpotenzen auf ca. $1 \cdot 10^{-4}$ bis ca. $2 \cdot 10^{-5}$. Bei Pfahl W-Belastung 1 und Pfahl V-Belastung 1 nehmen die Raten bis zum Ende der Versuche bei Zyklenzahlen zwischen ca. $N = 52.000$ und $N = 58.000$ weiter leicht auf Werte zwischen $2 \cdot 10^{-5}$ und $1 \cdot 10^{-5}$ ab. Bei Pfahl X sinkt die Verschiebungsrate bis auf ca. $2 \cdot 10^{-7}$.

Für die Versuche Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1 kann die Abnahme der Verschiebungsrate im doppelt-logarithmischen Maßstab annähernd durch eine Gerade angenähert werden. Mit Hilfe der Steigung dieser Geraden können die Pfahlverschiebungen mit Hilfe des empirischen Ansatzes nach Abschnitt 2.2.2 abgeschätzt werden (siehe hierzu Abschnitt 7.2.2).

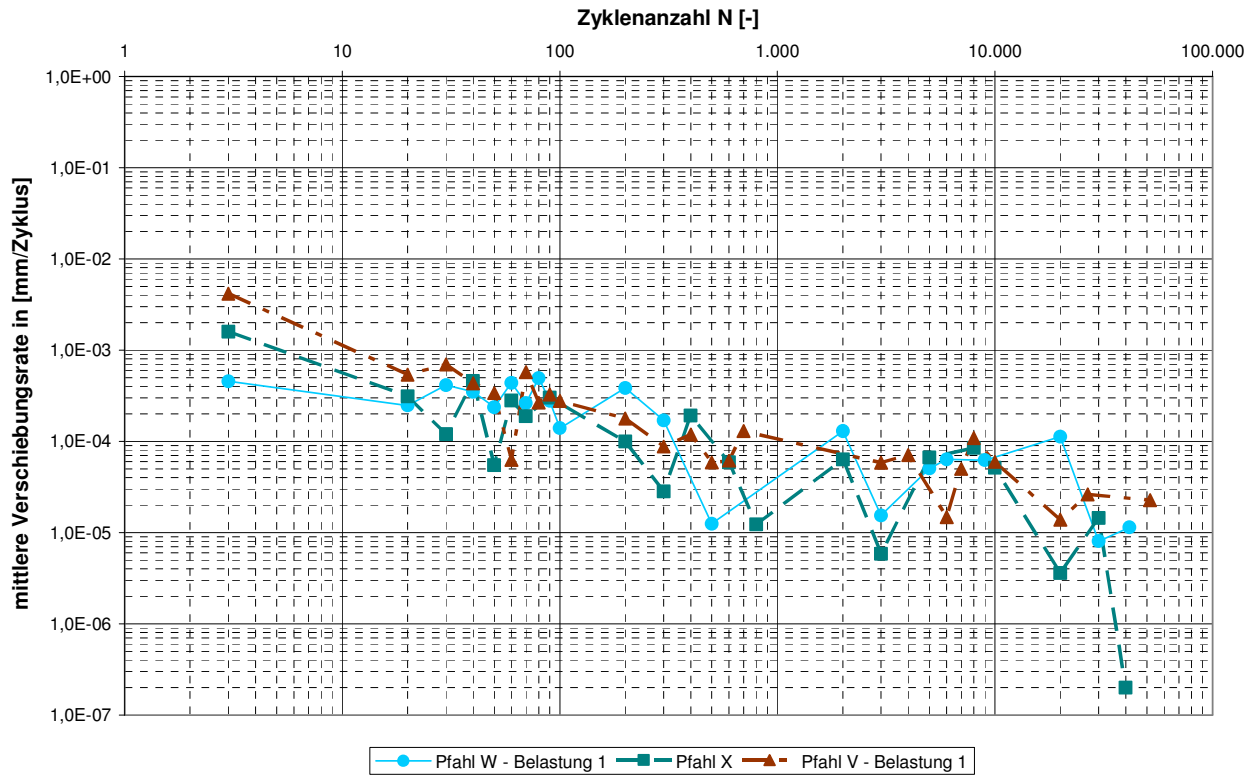


Abbildung 4.70: Verschiebungsraten Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1

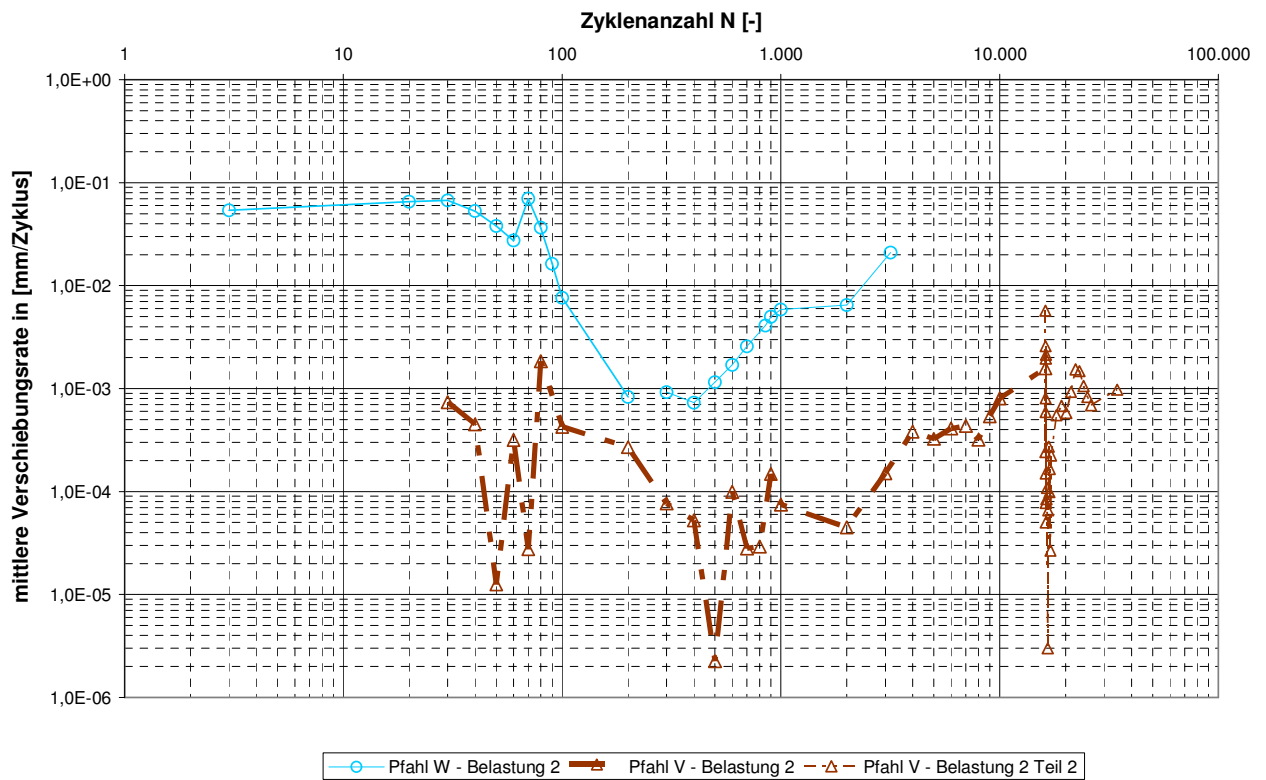


Abbildung 4.71: Verschiebungsraten Pfahl W-Belastung 2, Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2)

Bei den Versuchen Pfahl W-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 2 nehmen die Verschiebungsraten tendenziell bis Zyklenzahlen zwischen $N = 400$ und $N = 500$ ab. Zu Beginn liegen die Verschiebungsraten zwischen ca. $5 \cdot 10^{-2}$ und ca. $7 \cdot 10^{-4}$. Die Verschiebungsraten bei Pfahl W-Belastung 2 liegen dabei um ca. zwei Zehnerpotenzen höher als bei Pfahl V-Belastung 2. Innerhalb der ersten 400 bis 500 Zyklen verringern sich die Verschiebungsraten bei Pfahl V-Belastung 2 um ca. zwei bis drei Zehnerpotenzen auf ca. $2 \cdot 10^{-6}$ bis $3 \cdot 10^{-6}$, bei Pfahl W um ca. zwei Zehnerpotenzen auf ca. $7 \cdot 10^{-4}$. Danach steigen die Raten bei beiden Versuchen wieder an.

Die Umkehr der Verschiebungsrate bei ca. $N = 400$ bis $N = 500$ tritt bei beiden Versuchen deutlich vor dem Erreichen der als Versagen definierten Verschiebung von $s_{\text{mittel}} = 15$ mm (Versagenskriterium 1: Pfahl W-Belastung 2 bei ca. $N = 2.800$, Pfahl V-Belastung 2 bei ca. $N = 20.000$) auf (siehe Abbildung 4.66). Das Versagenskriterium 2 (Verschiebungsspanne $s_{\text{zykl}} > 15$ mm bzw. Verschiebungsamplitude = halbe Verschiebungsspanne $s'_{\text{zykl}} = 7,5$ mm) wird bei Pfahl W-Belastung 2 innerhalb von 100 Zyklen nach dem Anstieg der Verschiebungsrate erreicht (siehe Abbildung 4.68).

4.4.5.4 Pfahllängskraftverlauf und Mantelreibung

Die Messergebnisse der DMS sind für die einzelnen Wechsellastversuche in Anhang 1.13 dargestellt. Auf Grund des verbesserten Schutzes der DMS gegen Nässe gegenüber den Zugschwellversuchen (Versuchsreihe 1) war die Auswertung des Längskraftverlaufs und der Mantelreibung für fast alle Pfahlabschnitte möglich.

Zusammenfassend kann für die Wechsellastversuche festgestellt werden:

- Die Krafteinleitung erfolgt bei den zyklischen Wechsellastversuchen wie bei den statischen Versuchen ab Belastungsbeginn über die gesamte Pfahllänge.
- Die gemessenen Lastspannen der einzelnen Messquerschnitte ($F_{\text{zykl,DMS}}$) nehmen über die Pfahltiefe ab, d.h. $F_{\text{zykl,DMS } 1} > F_{\text{zykl,DMS } 2} > F_{\text{zykl,DMS } 3} > F_{\text{zykl,DMS } 4} > F_{\text{zykl,DMS } 5}$ (siehe Abbildung 4.72).
- Die gemessenen Lastspannen $F_{\text{zykl,DMS}}$ je Messquerschnitt verändern sich mit zunehmender Zyklenzahl. Eine einheitliche Tendenz kann nicht für alle Versuche festgestellt werden. Bei den Versuchen Pfahl W-Belastung 1 und Pfahl X (siehe Abbildung 4.72) nehmen die Lastspannen bei allen Messquerschnitten mit zunehmender Zyklenzahl zu. Beim Versuch Pfahl V-Belastung 1 nehmen die Lastspannen bis ca. $N = 10.000$ ebenfalls tendenziell zu, danach jedoch wieder leicht ab (siehe Abbildung 4.72). Bei den Versuchen Pfahl W-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 2 schwanken die gemessenen Lastspannen während des Versuchs (siehe Abbildung 4.73). Bei Versuch Pfahl W-Belastung 2 sind die Lastspannen bei Versuchende alle kleiner als bei $N = 1$. Bei Versuch Pfahl V-Belastung 2 liegen die Lastspannen bei Versuchende meist über den Lastspannen bei $N = 1$. Bis auf den Messquerschnitt 5 (DMS 5) ist nach dem Neustart des Versuchs bei allen Messquerschnitten ein deutlicher Anstieg der Lastspannen zu erkennen.
- Bei den Versuchen Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1 betrug die zyklische Lastamplitude jeweils 25 kN, bei den Versuchen Pfahl W-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 2 jeweils 35 kN. Bei den Versuchen mit der niedrigeren Lastamplitude sind wie bei den

Schwellastversuchen die in den einzelnen Messquerschnitten gemessenen Lastspannen annähernd gleich groß (siehe Abbildung 4.74). Bei den Versuchen mit der höheren Lastamplitude (siehe Abbildung 4.73) unterscheiden sich sowohl die Größe der Lastspannen als auch der Verlauf der Lastspannen über die Zyklenzahl deutlich.

- Die Lastspannen $F_{\text{zykl,DMS}}$ verhalten sich bei allen zyklischen Versuchen prozentual zur aufgetragten Lastspanne F_{zykl} gesehen sehr ähnlich (siehe Abbildung 4.75). Lediglich bei Pfahl W-Belastung 2 liegen die gemessenen Lastspannen bezogen auf F_{zykl} deutlich höher.

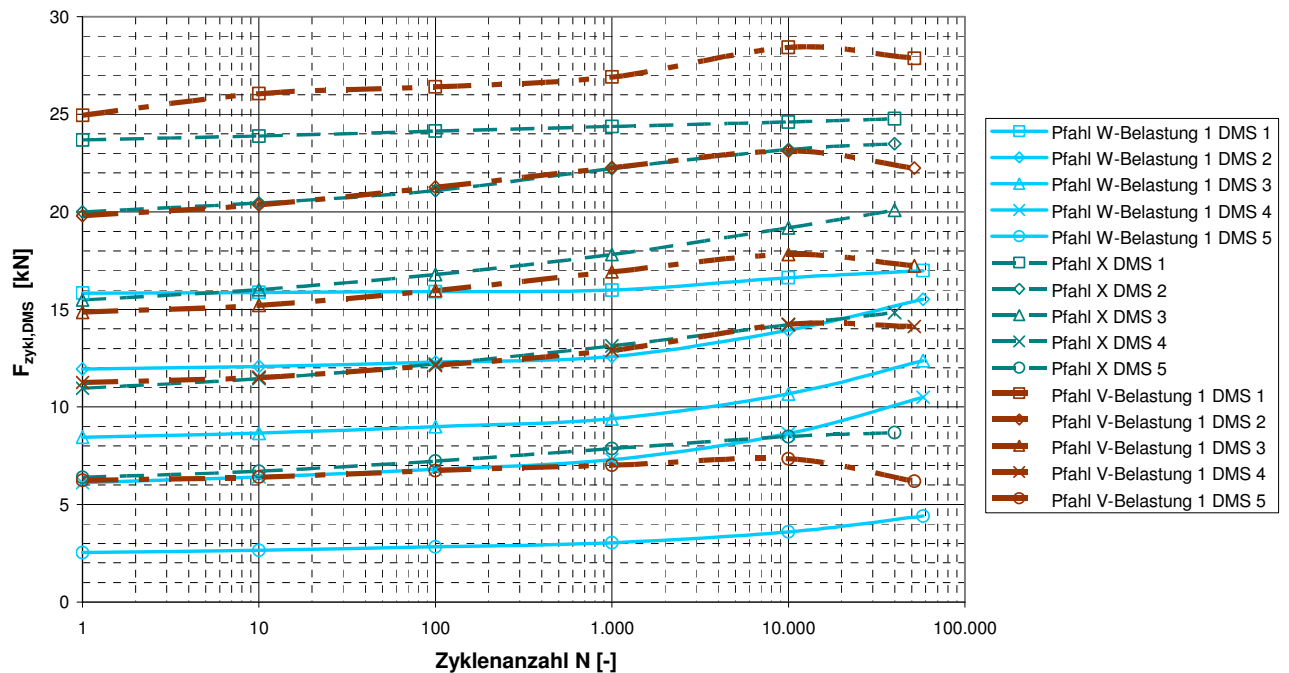


Abbildung 4.72: Lastspannen DMS (Pfahl W-Belastung 1, Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1)

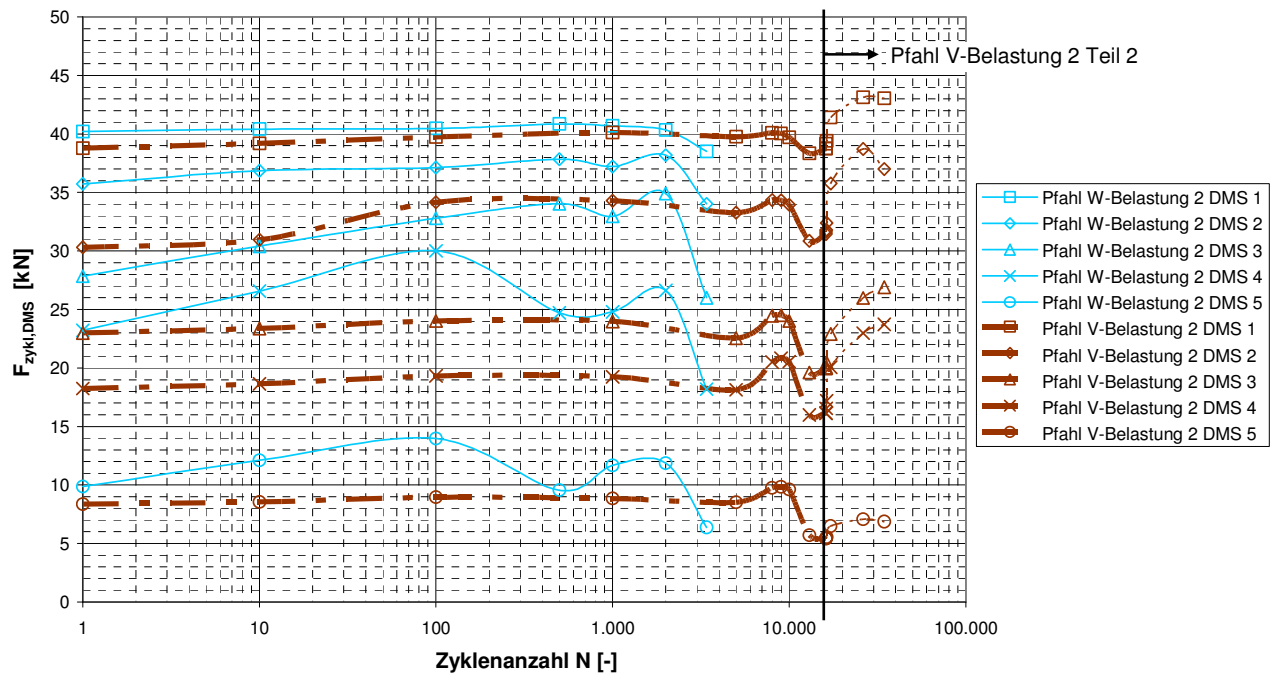


Abbildung 4.73: Lastspannen DMS (Pfehl W-Belastung 2 und Pfehl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2))

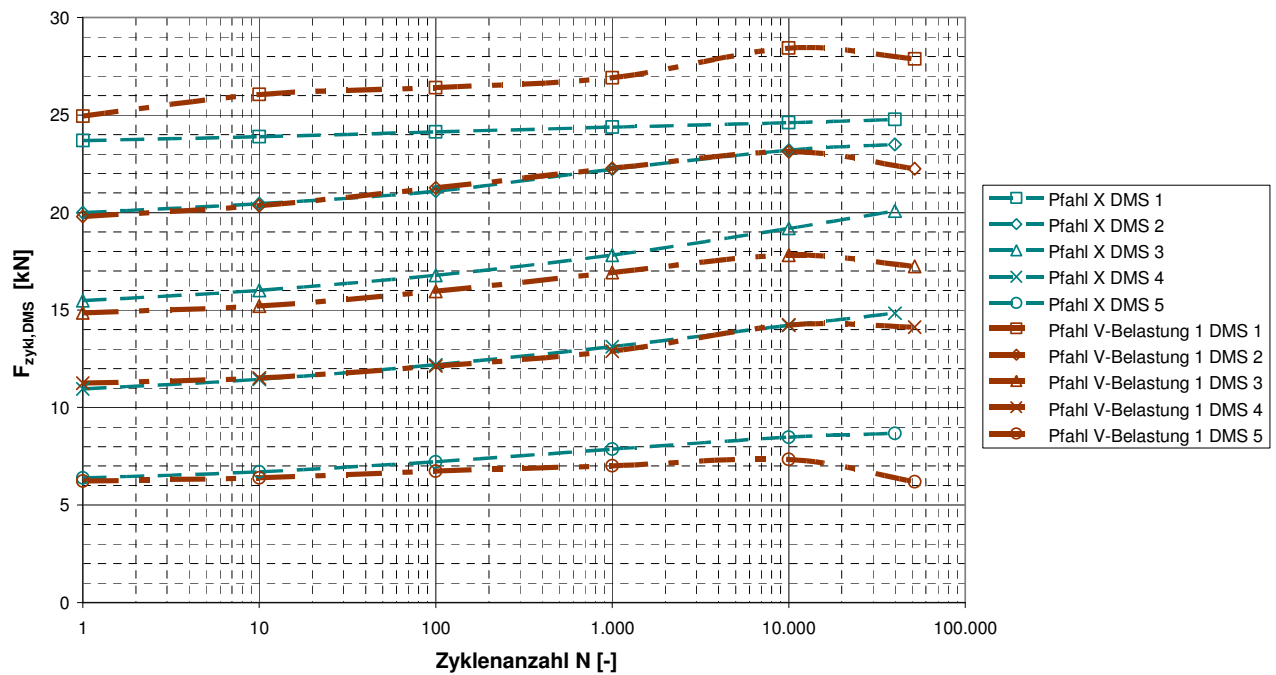


Abbildung 4.74: Lastspannen DMS (Pfehl X und Pfehl V-Belastung 1)

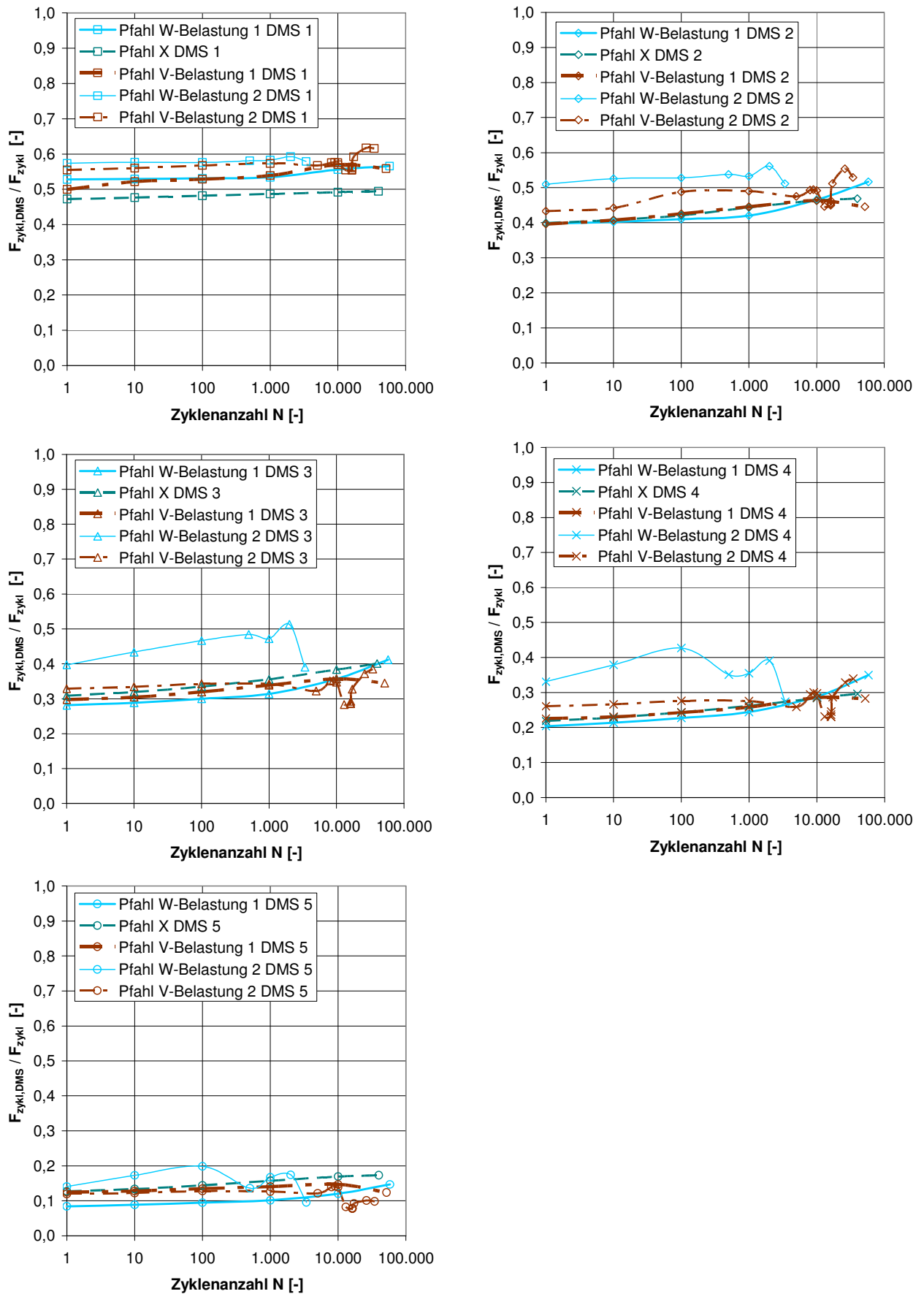


Abbildung 4.75: Lastspannen DMS bezogen auf zyklische Lastspanne ($F_{zykl,DMS} / F_{zykl} [-]$)

In Abbildung 4.76 bis Abbildung 4.78 sind die ermittelten Mantelreibungswerte für die Wechsellastversuche dargestellt. Die Mantelreibung wurde dabei jeweils für die maximal aufgebrachte Last ($F_{\max,Zug}$) ausgewertet. Folgende Feststellungen lassen sich auf Grund der Messergebnisse treffen:

- Mit zunehmender Zyklenzahl verändert sich bei allen Wechsellastversuchen die Größe der Mantelreibung in den betrachteten Pfahlabschnitten.
- Eine Vergleichmäßigung der Mantelreibung über die Pfahltiefe mit zunehmender Zyklenzahl, wie sie z.B. von SCHWARZ (2002) bei Versuchen in Sand berichtet wird, ist bei keinem der Wechsellastversuche zu erkennen (siehe auch Tabelle 4.14).
- Bei allen Versuchen ist die Mantelreibung im obersten Pfahlabschnitt (Tau 0-1) am größten.
- Tendenziell ist in den beiden obersten Pfahlabschnitten (Tau 0-1 und Tau 1-2 bzw. Tau 0-2) mit zunehmender Zyklenzahl eine Abnahme der Mantelreibungswerte festzustellen.
- Im untersten Pfahlabschnitt (Tau 5-6) oder in den unteren beiden Pfahlabschnitten (Tau 4-5 und Tau 5-6 bzw. Tau 4-6) ist bei den meisten Versuchen eine Zunahme der Mantelreibung mit zunehmender Zyklenzahl festzustellen. Bei Pfahl W-Belastung 2 ist diese Tendenz nicht eindeutig zu erkennen.

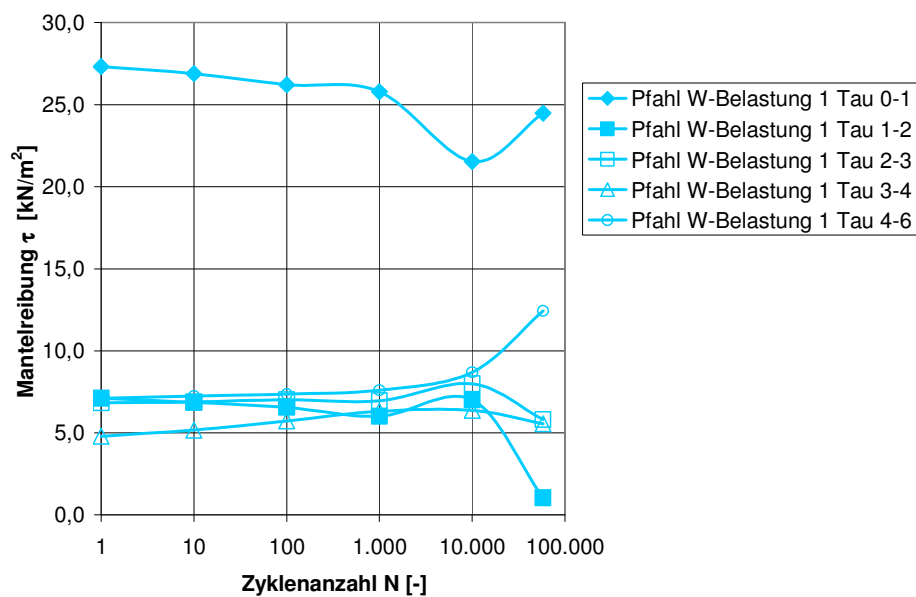


Abbildung 4.76: Entwicklung der Pfahlmantelreibung bei Versuch Pfahl W-Belastung 1 (dargestellt für die maximale aufgebrachte Last $F_{\max,Zug}$)

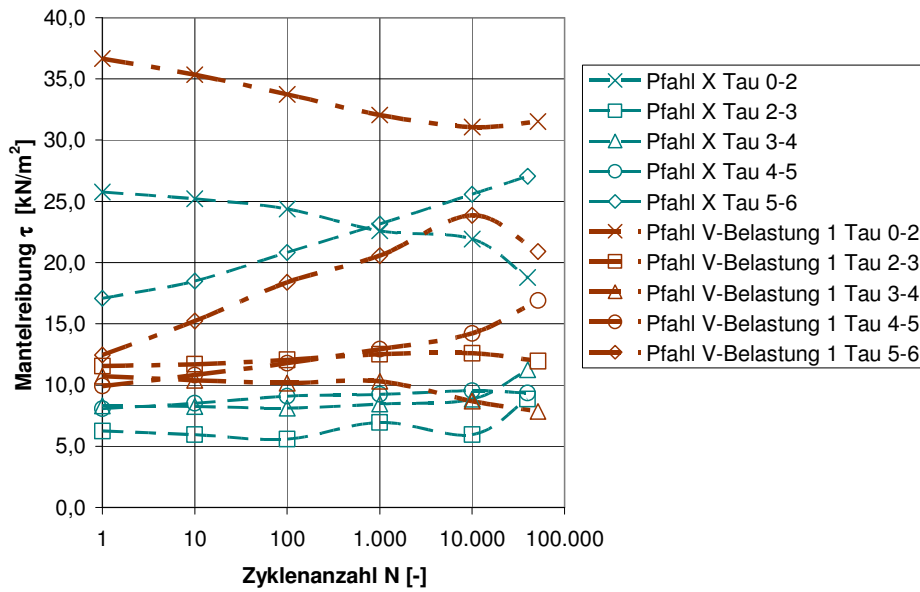


Abbildung 4.77: Entwicklung der Pfahlmantelreibung bei den Versuchen Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1 (dargestellt für die maximale aufgebrachte Last $F_{max,Zug}$)

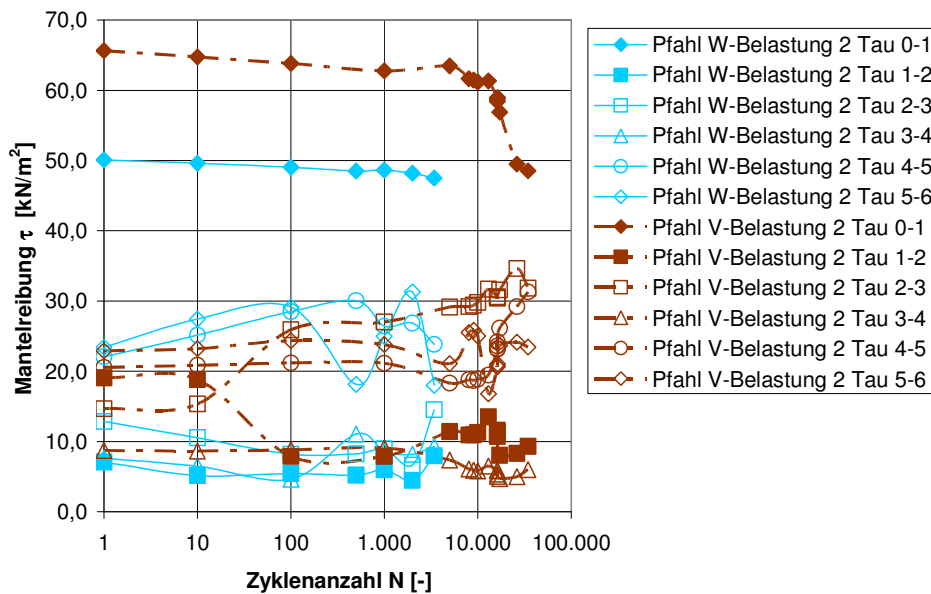


Abbildung 4.78: Entwicklung der Pfahlmantelreibung bei den Versuchen Pfahl W-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2) (dargestellt für die maximale aufgebrachte Last $F_{max,Zug}$)

Bei Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der aufgebrachten Last über die Pfahltiefe ergeben sich für die maximal aufgebrachte Zuglast die in Tabelle 4.13 dargestellten Werte.

Pfahl	$F_{\max, \text{Zug}}$ [kN]	Mantelfläche A_s [m ²]	Annahme einer gleichmäßig über die Mantelfläche verteilten Mantelreibung τ_{mittel} [kN/m ²]
W-Belastung 1	+20	2,0	10,0
X	+30		15,0
W-Belastung 2	+40		20,0
V-Belastung 1			20,0
V-Belastung 2	+50		25,0

Tabelle 4.13: Mantelreibung bei Annahme einer über die Mantelfläche gleichmäßig verteilten Mantelreibung

Pfahl	$\frac{\tau_{0-1}}{\tau_{\text{mittel}}} [-]$		$\frac{\tau_{1-2}}{\tau_{\text{mittel}}} [-]$		$\frac{\tau_{2-3}}{\tau_{\text{mittel}}} [-]$		$\frac{\tau_{3-4}}{\tau_{\text{mittel}}} [-]$		$\frac{\tau_{4-5}}{\tau_{\text{mittel}}} [-]$		$\frac{\tau_{5-6}}{\tau_{\text{mittel}}} [-]$	
	N=1	N_{\max}	N=1	N_{\max}	N=1	N_{\max}	N=1	N_{\max}	N=1	N_{\max}	N=1	N_{\max}
W-Belastung 1 ($F_{\max} = 20$ kN)	2,7	2,4	0,7	1,0	0,7	0,6	0,5	0,6	-	-	-	-
Pfahl F/B/E (statische Referenz- versuche) bei $F = 20$ kN	2,8/-/2,5		-/-/0,4		-/-/0,5		-/0,9/0,8					
X ($F_{\max} = 30$ kN)	-		-		0,4	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6	1,1	1,8
Pfahl F/B/E bei $F = 30$ kN					-/-/0,5		-/1,0/0,8		-/0,5/0,4		-/1,5/2,0	
W-Belastung 2 ($F_{\max} = 40$ kN)	2,5	2,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,4	0,5	1,1	1,2	1,2	0,9
V-Belastung 1 ($F_{\max} = 40$ kN)	3,3	2,5	0,5	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,8	0,6	1,0
Pfahl F/B/E bei $F = 40$ kN	2,7/-/2,2		-/-/0,6		-/-/0,3		-/1,0/0,9		-/0,6/0,4		-/1,7/2,1	
V-Belastung 2 ($F_{\max} = 50$ kN)	2,6	1,9	0,8	0,4	0,7	1,6	0,4	0,3	0,8	1,3	0,9	0,9
Pfahl F/B/E bei $F = 50$ kN	2,6/-/2,0		-/-/0,7		-/-/0,3		-/1,4/0,9		-/0,5/0,4		-/2,0/2,3	

Tabelle 4.14: Verhältnis der gemessenen Mantelreibungen zu τ_{mittel} aus Tabelle 4.13

In Tabelle 4.14 sind die in den einzelnen Pfahlabschnitten für $N = 1$ und $N = N_{\max}$ ermittelten Mantelreibungswerte für die zyklischen Versuche im Verhältnis zur gleichmäßig über die Mantelfläche verteilt angenommenen Mantelreibung τ_{mittel} dargestellt. Es sind pro Versuch nur die Werte angegeben, bei denen eine Auswertung zwischen zwei benachbarten Messquerschnitten möglich war.

Es zeigt sich, dass die ermittelten Mantelreibungen während der zyklischen Versuche in den einzelnen Pfahlabschnitten bis zu 230 % über oder bis zu 70 % unter dem Wert von τ_{mittel} liegen. In Tabelle 4.14 sind ebenfalls die in den statischen Referenzversuchen ermittelten Mantelreibungswerte im Verhältnis zu τ_{mittel} für die Laststufe angegeben, die der jeweiligen maximalen Belastung im zyklischen Versuch entspricht. Unabhängig von der Größe der maximal aufgetragenen Last ist nicht zu erkennen, dass in den statischen im Vergleich zu den zyklischen Versuchen prinzipiell eine höhere oder niedrigere Mantelreibung aktiviert werden kann. Auch unterscheiden sich die für die einzelnen Pfahlabschnitte in den statischen Versuchen ermittelten Mantelreibungswerte teilweise deutlich von den Werten während der zyklischen Versuche.

4.4.6 Post-zyklische statische Pfahlprobelastungen

Direkt im Anschluss an die zyklischen Versuche wurde bei Pfahl W eine statische Pfahlprobelastung auf Druck und bei Pfahl V eine statische Pfahlprobelastung auf Zug durchgeführt. Der Versuchsablauf erfolgte analog zu dem der statischen Referenzversuche (siehe Abschnitte 4.3.2.1 und 4.4.2.1). Die einzelnen Versuchsabläufe sind in Anhang 1.11 grafisch dargestellt.

Als Versagenskriterien wurden wie bei den statischen Referenzversuchen eine Pfahlkopfverschiebung von $s_g = 0,1 \cdot D = 15 \text{ mm}$ oder ein Kriechmaß bei Lastkonstanthaltung von 1 mm bzw. 2 mm gewählt.

4.4.6.1 Pfahlverschiebungen und charakteristischer Herauszieh Widerstand

Die Widerstands-Verschiebungslinien sind in Abbildung 4.79 dargestellt. Die Ermittlung der Widerstands-Verschiebungslinien erfolgte durch Mittelwertbildung der Messwerte der induktiven Wegaufnehmer. Für jede Laststufe wurde jeweils das Kriechmaß bestimmt (siehe Abbildung 4.80).

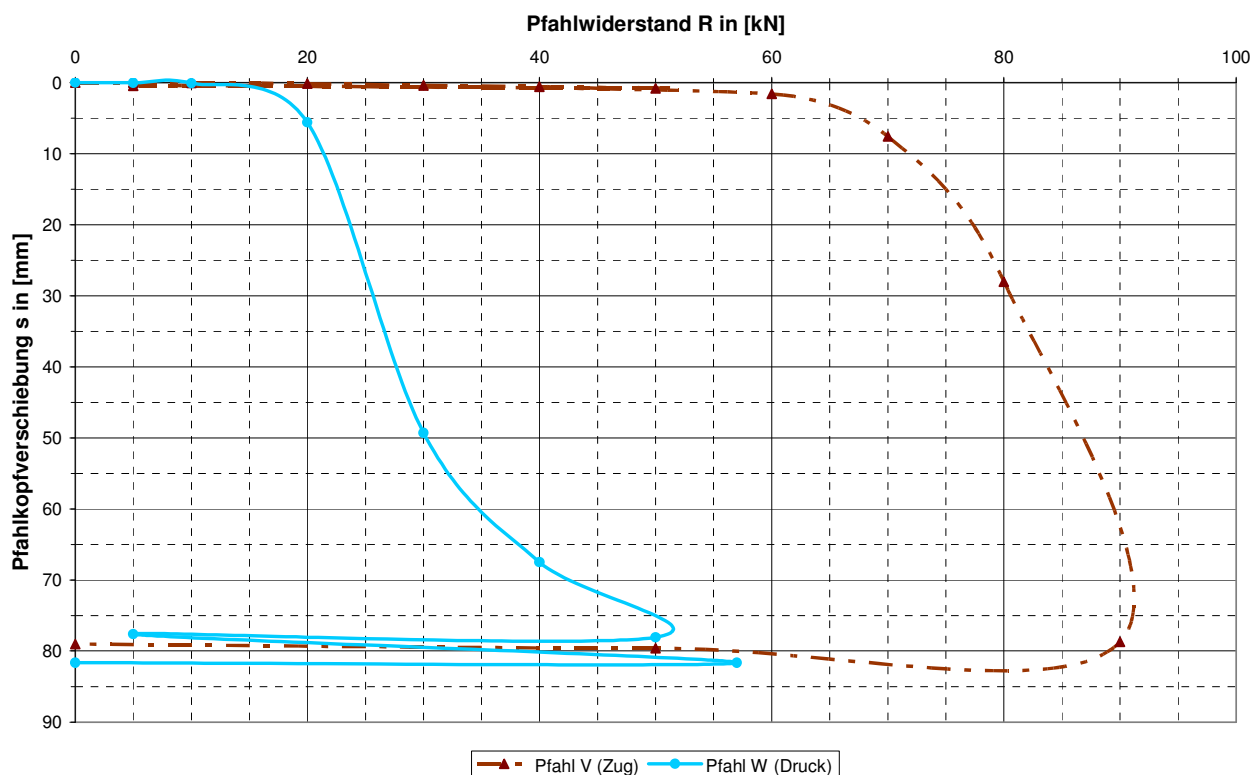


Abbildung 4.79: Widerstands-Verschiebungslinien der post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen

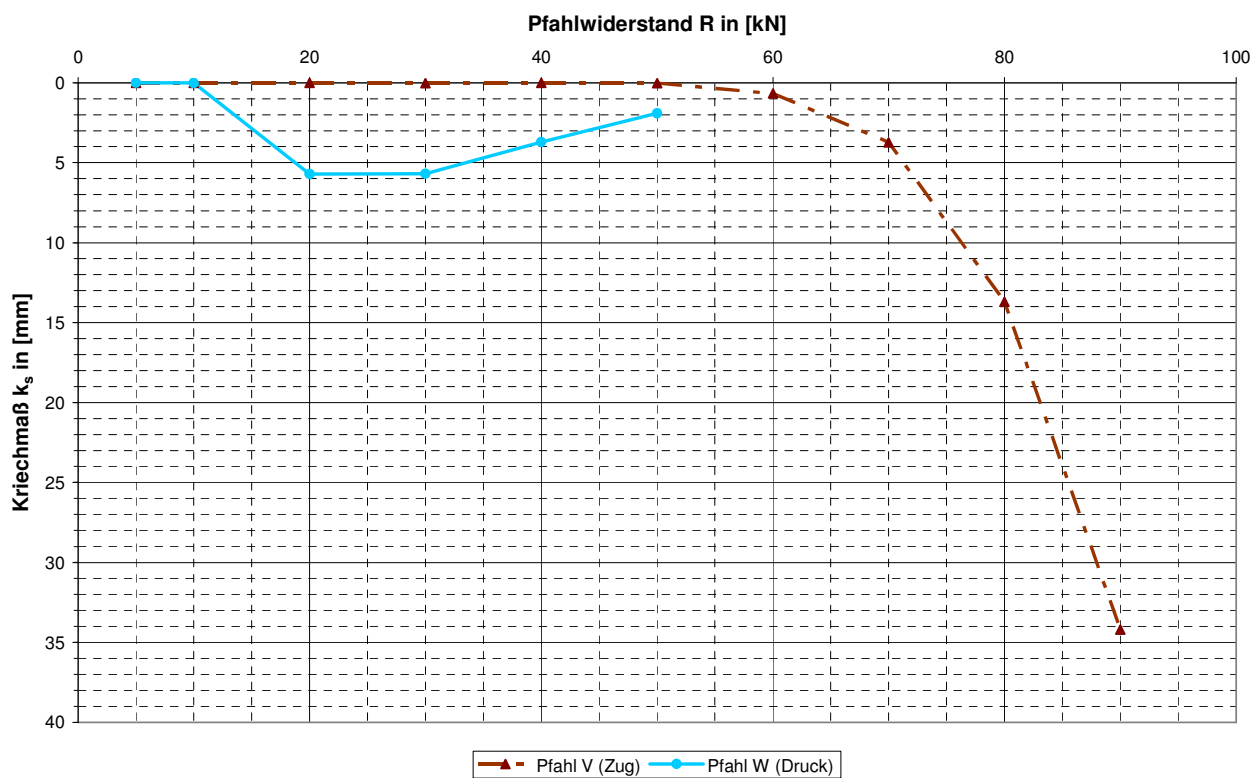


Abbildung 4.80: Aus den post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen ermittelte Kriechmaße

In Tabelle 4.15 sind die Pfahlwiderstände für die unterschiedlichen Versagenskriterien dargestellt. Die im Anschluss an die Wechsellastversuche ermittelten post-zyklischen Pfahlwiderstände liegen jeweils deutlich unter den in den statischen Referenzversuchen ermittelten Werten.

Versagenskriterium \ Pfahlwiderstand	$R_{t,m,i}$ [kN]				
	Pfahl W (Druck)	Pfahl V (Zug)	Statischer Referenzversuch Pfahl Z (Druck)	Mittelwert aus post- zyklischen statischen Probebelastungen Pfahl A, H, G, D und C (1. Versuchsreihe)	Mittelwert aus statischen Referenzversuchen Pfahl B, E, F und 1 (Zug)
$s_g = 15 \text{ mm}$	22,6	75,0	140,0	106,3	89,0
$k_s \leq 1,0 \text{ mm}$	11,7	61,1	111,0	94,5	77,2
$k_s \leq 2,0 \text{ mm}$	13,5	64,3	125,0	98,4	79,8

Tabelle 4.15: Pfahlwiderstände aus post-zyklischen statischen Pfahlprobebelastungen im Vergleich zu den Pfahlwiderständen aus den statischen Referenzversuchen

Auf Grund der zyklischen Wechselbelastung traten bei Pfahl W insgesamt Pfahlhebungen von ca. 30 mm auf. Bei der anschließenden post-zyklischen statischen Probebelastung auf Druck steigen die Pfahlsetzungen bereits ab einer Laststufe von 20 kN überproportional an und das Kriechmaß liegt bei dieser Belastung bereits bei über 5 mm. Bei höheren Laststufen nimmt die Zunahme der Verschiebungen ab (siehe Abbildung 4.79 ab Laststufe 30 kN) und die Kriechmaße sinken bis auf 2 mm. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei größeren Pfahlsetzungen wieder zunehmend Pfahlsitzenwiderstand aktiviert werden konnte, was bei kleineren Laststufen auf Grund der vorausgegangenen Pfahlhebung unter zyklischer Belastung noch nicht möglich war.

Bei Pfahl V traten auf Grund der zyklischen Wechselbelastung insgesamt ebenfalls Pfahlhebungen von ca. 30 mm auf. Bei der anschließenden post-zyklischen statischen Probebelastung auf Zug steigen die Pfahlverschiebungen im Gegensatz zu Pfahl W erst ab einer Laststufe von 60 kN überproportional an. Die Kriechmaße liegen bei einer Belastung von mehr als 60 kN über 1 mm.

In Tabelle 4.16 sind die aus den post-zyklischen statischen Probebelastungen ermittelten Kriechmaße im Vergleich zu den Kriechmaßen aus den statischen Referenzversuchen dargestellt.

Bei Pfahl V liegen die Kriechmaße bis zu einer Belastung von 50 kN tendenziell unter den Kriechmaßen der statischen Pfahlprobebelastungen auf Zug ohne vorherige zyklische Belastung. Bei Überschreiten der bei den zyklischen Belastungen maximal aufgebrachten Last von 50 kN ($F_{\max,Zug}$ bei Pfahl V-Belastung 2) steigen die Kriechmaße überproportional an und liegen deutlich über den Werten der Kriechmaße aus den statischen Referenzversuchen auf Zug.

Bei der post-zyklischen statischen Pfahlprobebelastung auf Druck an Pfahl W liegen die Kriechmaße bei allen Laststufen deutlich über den im statischen Referenzversuch an Pfahl Z ermittelten Werten.

Kriechmaß Laststufe	k_s [mm]			
	Druck		Zug	
	vor-zyklisch	post-zyklisch	vor-zyklisch	post-zyklisch
	Pfahl Z	Pfahl W	Pfahl B, E, F und 1	Pfahl V
10 kN	0,003	0,01	0,01	0
20 kN	0,03	5,71	0,03	0,01
30 kN	0,01	5,69	0,04	0,02
40 kN	0,01	3,71	0,02	0,01
50 kN	0,03	1,91	0,09	0,02
60 kN	0,02	-	0,1	0,7
70 kN	0,04	-	0,3	3,7

Tabelle 4.16: Vergleich Kriechmaße mit und ohne vorherige zyklische Belastung

Bei allen zyklischen Wechsellastversuchen war die maximale Kraft in Zugrichtung größer als in Druckrichtung und die Verschiebungsrichtung der Pfähle entsprach mit zunehmender Zyklenanzahl einer Pfahlhebung. Die Versuchsergebnisse von Pfahl W deuten darauf hin, dass bei einer post-zyklischen statischen Belastung entgegen der Pfahlbewegung aus dem zyklischen Versuch die Kriechmaße größer sind als die Kriechmaße bei zuvor nicht zyklisch belasteten Pfählen.

Pfahl V wurde nach der zyklischen Belastung in Richtung der Pfahlbewegung während des zyklischen Versuchs belastet. Hier liegen die Kriechmaße bei statischer Belastung bis zum Erreichen der maximalen Zugkraft im zyklischen Versuch unter den Kriechmaßen zuvor nicht belasteter Pfähle.

Bei den post-zyklischen statischen Probelastungen an Pfahl W und Pfahl V ist eine deutliche Abnahme des Pfahlwiderstands im Vergleich zur statischen Tragfähigkeit nicht vorbelasteter Pfähle festzustellen. Der Tragfähigkeitsverlust bei Pfahl W (Druck) im Vergleich zum statischen Referenzversuch (Pfahl Z) beträgt je nach betrachtetem Versagenskriterium zwischen 84 % und 89 %. Beim post-zyklisch statisch auf Zug belasteten Pfahl V ist die Abnahme der Pfahltragfähigkeit nicht so ausgeprägt, der Tragfähigkeitsverlust im Vergleich zu den statischen Referenzversuchen beträgt je nach betrachtetem Versagenskriterium im Mittel dennoch zwischen 16 % und 21 %.

Die zyklische Wechselbelastung und anschließende Belastung entgegen der Verschiebungsrichtung unter zyklischer Belastung scheint sich sehr ungünstig auf das Pfahltragverhalten auszuwirken, während sich die zyklische Wechselbelastung und anschließende Belastung in der Verschiebungsrichtung unter zyklischer Belastung zumindest bis zum Erreichen der maximalen Last aus der zyklischen Belastung günstig auf das Pfahltragverhalten auswirkt.

4.4.6.2 Pfahlmantelreibung

4.4.6.2.1 Vergleich Pfahl W mit Pfahl Z (Druck)

In Abbildung 4.81 sind die ermittelten Mantelreibungsverläufe für die Pfahl W und Pfahl Z bis zu zur maximalen Laststufe von Pfahl W bei 50 kN dargestellt. Auf Grund des beschädigten

Dehnmessstreifen DMS 2 bei Pfahl W ist ein Vergleich der Mantelreibung nicht für alle Pfahlabschnitte möglich. Die Auswertung zeigt, dass beim zyklisch vorbelasteten Pfahl W die Mantelreibung zwischen Geländeoberfläche und DMS 1 (tau 0-1) tendenziell etwas geringer ist als bei Pfahl Z, während die Mantelreibung in den tieferen Pfahlabschnitten (tau 3-4 und tau 4-5) größer ist. Die Mantelreibungswerte im obersten Pfahlabschnitt (tau 0-1) sind bei beiden Versuchen deutlich größer als die Mantelreibungswerte in den tieferen Pfahlabschnitten.

Beim nicht vorbelasteten Pfahl Z steigen die Mantelreibungswerte in allen Pfahlabschnitten mit zunehmender Last. Bei Pfahl W ist im Pfahlabschnitt zwischen DMS 4 und DMS 5 (tau 4-5) ab einer Laststufe von 20 kN keine Zunahme der Mantelreibung mehr festzustellen.

Die Ergebnisse könnten ein Hinweis darauf sein, dass bei Pfahl W bei der post-zyklischen statischen Probelastung bereits bei niedrigen Laststufen mehr Mantelreibung in tieferen Pfahlabschnitten aktiviert wird. Für genauere Aussagen wäre jedoch eine größere Anzahl an Versuchsergebnissen notwendig. Aussagen zur Entwicklung des Spitzendrucks sind auf Grund der messtechnischen Ausrüstung der Pfähle nicht möglich.

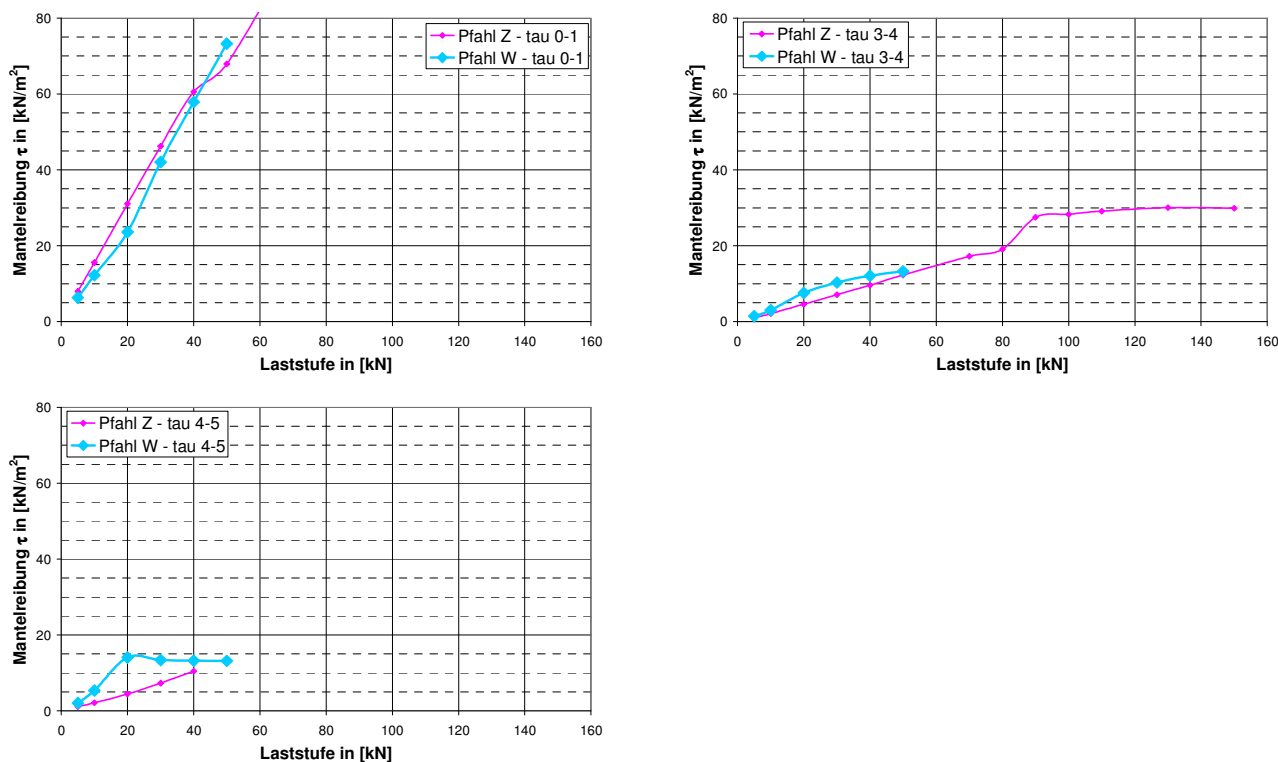


Abbildung 4.81: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe (Vergleich Pfahl W – Pfahl Z)

4.4.6.2.2 Vergleich Pfahl V mit statischen Zugprobelastungen der Versuchsreihe 1

Die Auswertung für Pfahl V in Abbildung 4.82 zeigt, dass die Mantelreibung in allen betrachteten Pfahlabschnitten bis zu einer Laststufe von 80 kN zunimmt. Bei der Laststeigerung auf 90 kN nehmen die Mantelreibungswerte zwischen Geländeoberfläche und DMS 1 (tau 0-1) und zwischen DMS 2 und 3 (tau 2-3) nicht mehr weiter zu. Zwischen Geländeoberfläche und dem Messquerschnitt 1 (tau 0-1) ist die Mantelreibung am größten, im untersten Pfahlabschnitt (tau 5-6)

am geringsten. In den Pfahlabschnitten zwischen DMS 1 und 5 (tau 1-2 bis tau 4-5) sind die Mantelreibungswerte ähnlich groß.

Im Vergleich zu den nicht vorbelasteten Pfählen B, E und F weisen die Mantelreibungswerte bei Pfahl V zwischen Geländeoberfläche und DMS 1 (tau 0-1) und DMS 1 und DMS 2 (tau 1-2) ähnliche Werte auf. Zwischen DMS 2 und 3 (tau 2-3) und DMS 4 und 5 (tau 4-5) liegen die Werte über denen der nicht vorbelasteten Pfähle und zwischen DMS 3 und 4 (tau 3-4) und DMS 5 und Pfahlfuß (tau 5-6) darunter.

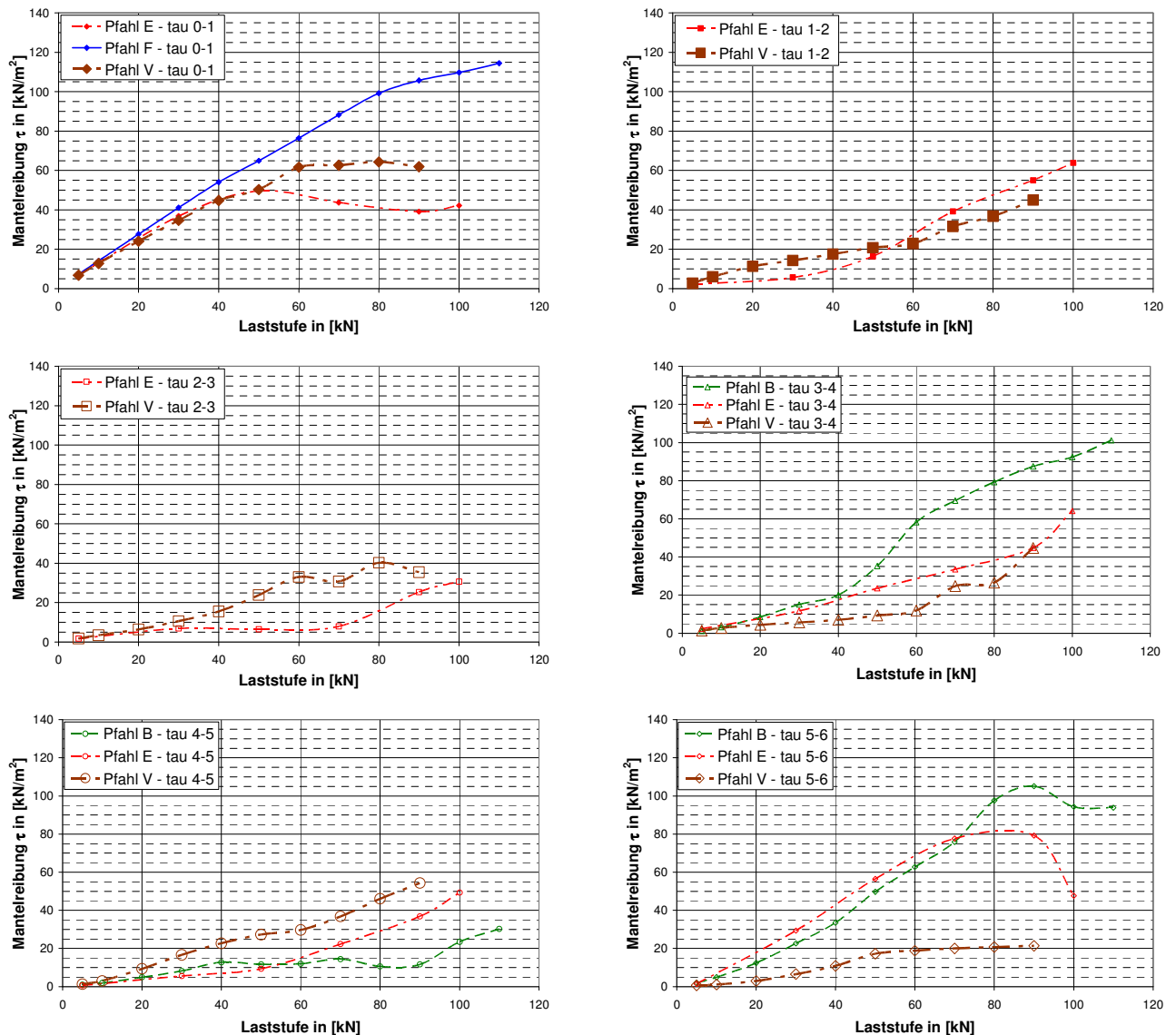


Abbildung 4.82: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe (Vergleich Pfahl V mit Pfahl B, E und F)

In Abbildung 4.83 sind die Mantelreibungswerte für die nach einer Zugschwellbelastung statisch auf Zug belasteten Pfähle A, H, G, D und C im Vergleich zu den Werten für Pfahl V, der nach der zyklischen Wechselbelastung statisch auf Zug belastet wurde, dargestellt. Der größte Unterschied bei der Entwicklung der Mantelreibung ist zwischen Geländeoberfläche und DMS 1 zu erkennen. Bei den Pfählen, die zuvor im Zugschwellbereich belastet wurden, steigen die Mantelreibungswerte in diesem Pfahlabschnitt mit zunehmender Last stetig an. Bei Pfahl V hingegen nimmt die

Mantelreibung zwischen Geländeoberfläche und DMS 1 (tau 0-1) bereits ab Laststufen von 60 kN nur noch geringfügig zu und bei einer Last von mehr als 80 kN wieder leicht ab. In den anderen Pfahlabschnitten ist die Mantelreibung insgesamt betrachtet ähnlich groß. Somit lässt sich der Unterschied in der Tragfähigkeit vor allem durch die geringere Mantelreibung im obersten Pfahlabschnitt erklären.

Eine vorausgegangene Zugschwellbelastung scheint im oberen Pfahlbereich tendenziell zu einer Erhöhung der Mantelreibungswerte zu führen, eine vorausgegangene Wechselbelastung eher zu einer Verringerung.

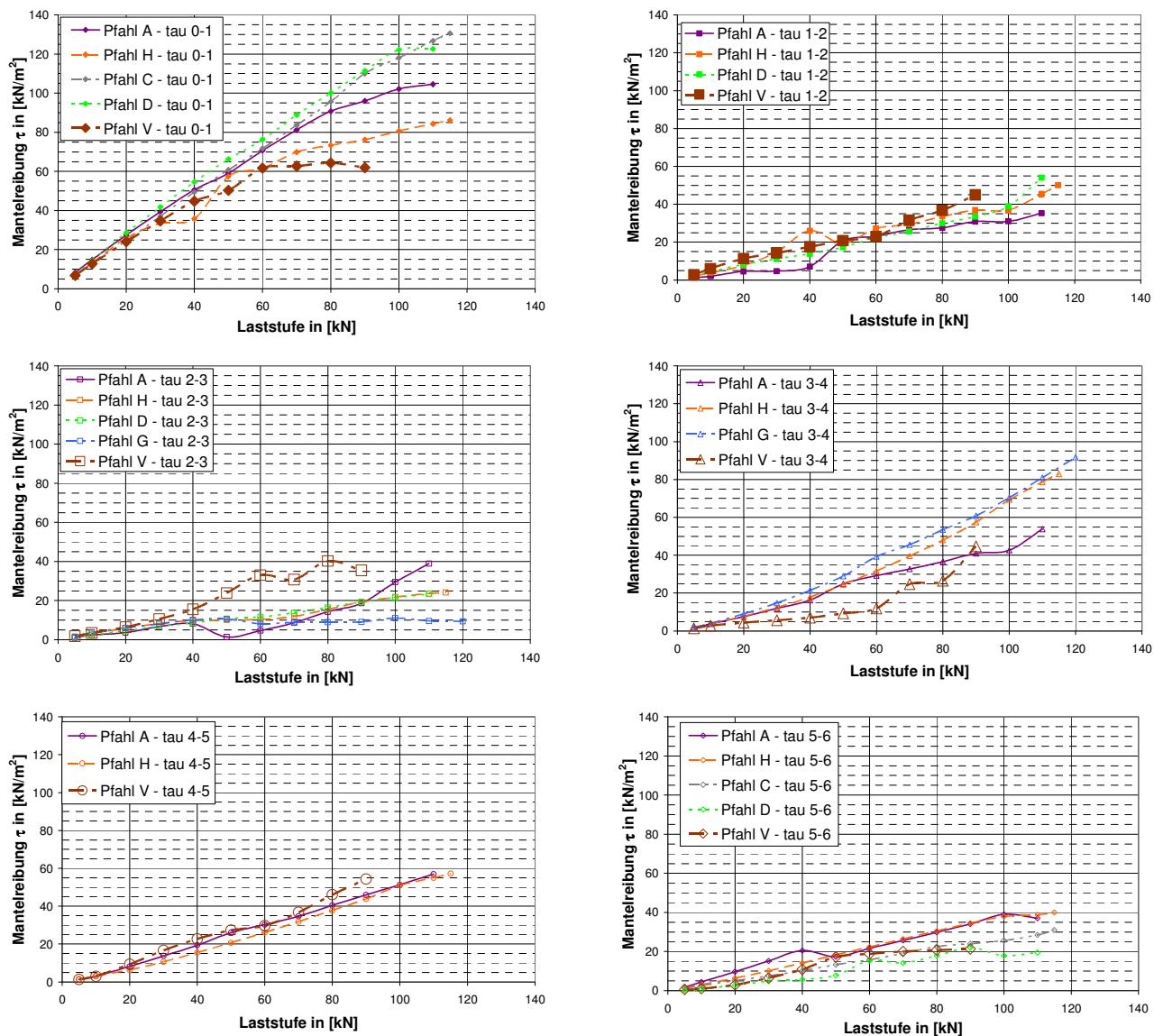


Abbildung 4.83: Pfahlmantelreibung über die Pfahltiefe (Vergleich Pfahl V mit Pfahl A, H, G, D und C)

4.4.7 Zyklische Wechsellastversuche nach statischer Belastung (Pfahl Z)

An Pfahl Z wurde vor Beginn der Wechsellastversuche eine statische Pfahlprobelastung auf Druck durchgeführt. Die plastische Pfahlverschiebung nach der Probelastung betrug ca. 20 mm. Zusätzlich wurden an diesem Pfahl zwei Wechsellastversuche durchgeführt. Das mittlere Lastniveau und die Lastamplitude wurden wie bei den Wechsellastversuchen an Pfahl V zu $F_{\text{mittel}} = +15 \text{ kN}$ (Zug) und $F'_{\text{zykl}} = 25 \text{ kN}$ (Belastung 1) bzw. $F_{\text{mittel}} = +15 \text{ kN}$ (Zug) und $F'_{\text{zykl}} = 35 \text{ kN}$ (Belastung 2) gewählt. Zwischen der statischen Probelastung und den zyklischen Pfahlversuchen lagen ca. 9 Monate. Die beiden zyklischen Versuche wurden unmittelbar nacheinander durchgeführt.

4.4.7.1 Pfahl Z-Belastung 1

Bei Pfahl Z-Belastung 1 sind die mittleren Pfahlverschiebungen (siehe Abbildung 4.84) größer als bei Pfahl V-Belastung 1. Insgesamt liegen die mittleren Pfahlverschiebungen bei beiden Pfählen jedoch bei mehr als 50.000 Zyklen noch unter 2,5 mm. Bei beiden Versuchen nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen über-log-linear zu, was nach Abschnitt 2.2.2 einem "zyklischen (schrittweisen) Versagen" entspricht.

Die Verschiebungsraten (siehe Abbildung 4.85) nehmen bei beiden Versuchen mit zunehmender Zyklenanzahl ab. Bis ca. $N = 1.000$ liegen die Raten bei Versuch Pfahl Z-Belastung 1 deutlich über den Raten des statisch nicht vorbelasteten Pfahls V. Bei höheren Zyklenzahlen sind die Raten bei Pfahl Z ähnlich groß oder kleiner als bei Pfahl V.

In Abbildung 4.86 sind die Verschiebungsamplituden für die Versuche Pfahl Z-Belastung 1, Pfahl V-Belastung 1 und Pfahl X dargestellt. Alle drei Pfähle wurden mit der gleichen zyklischen Lastamplitude belastet. Die Größe der Verschiebungsamplitude ist bei allen Versuchen ähnlich und mit zunehmender Zyklenanzahl steigt die Verschiebungsamplitude. Beim statisch vorbelasteten Pfahl Z sind sowohl die Verschiebungsamplitude als auch die Zunahme der Amplitude am geringsten.

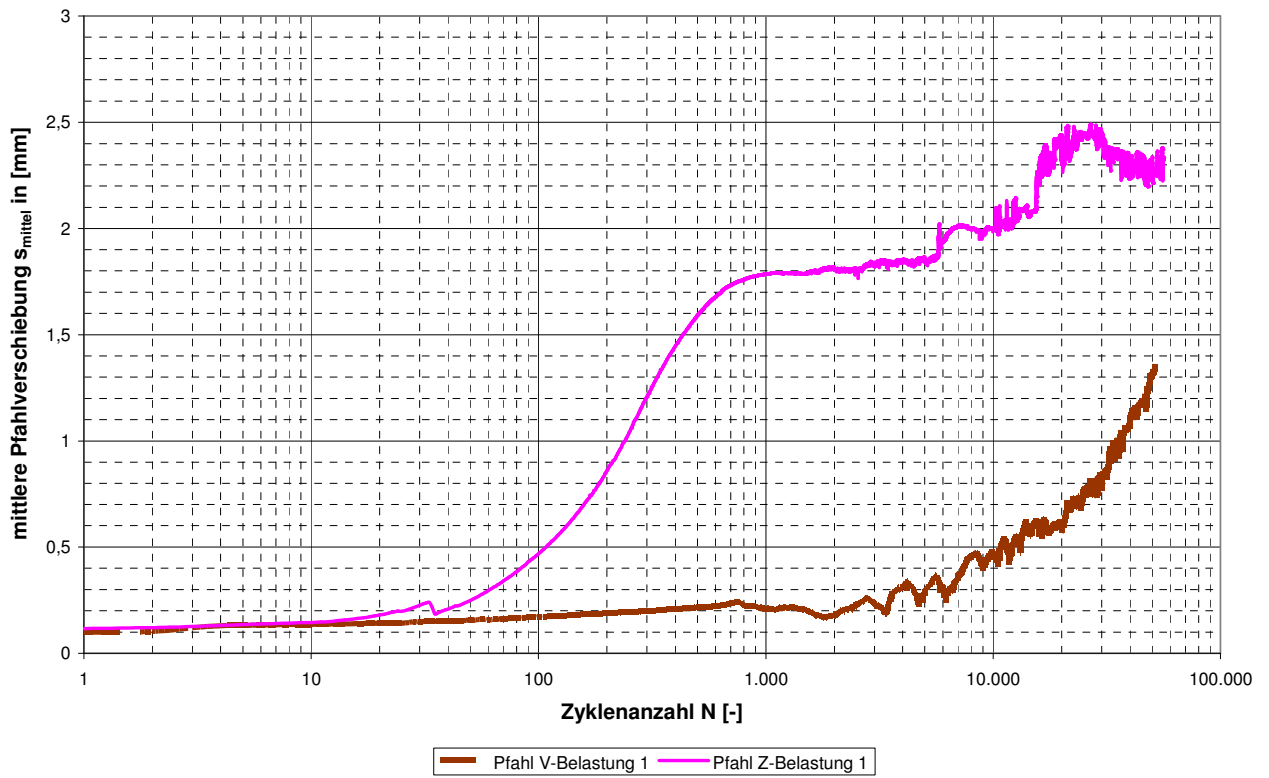


Abbildung 4.84: Mittlere Pfahlverschiebung: Vergleich Pfahl Z-Belastung 1 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 1

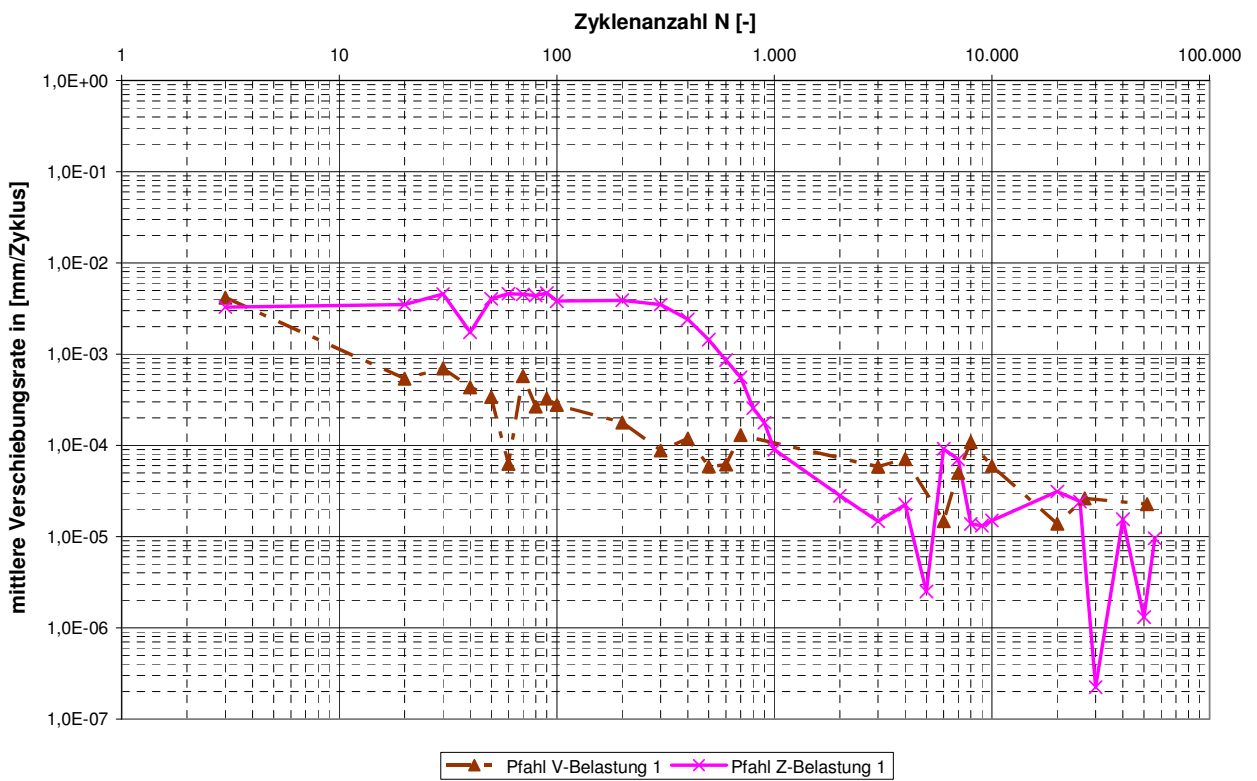


Abbildung 4.85: Verschiebungsrate: Vergleich Pfahl Z-Belastung 1 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 1

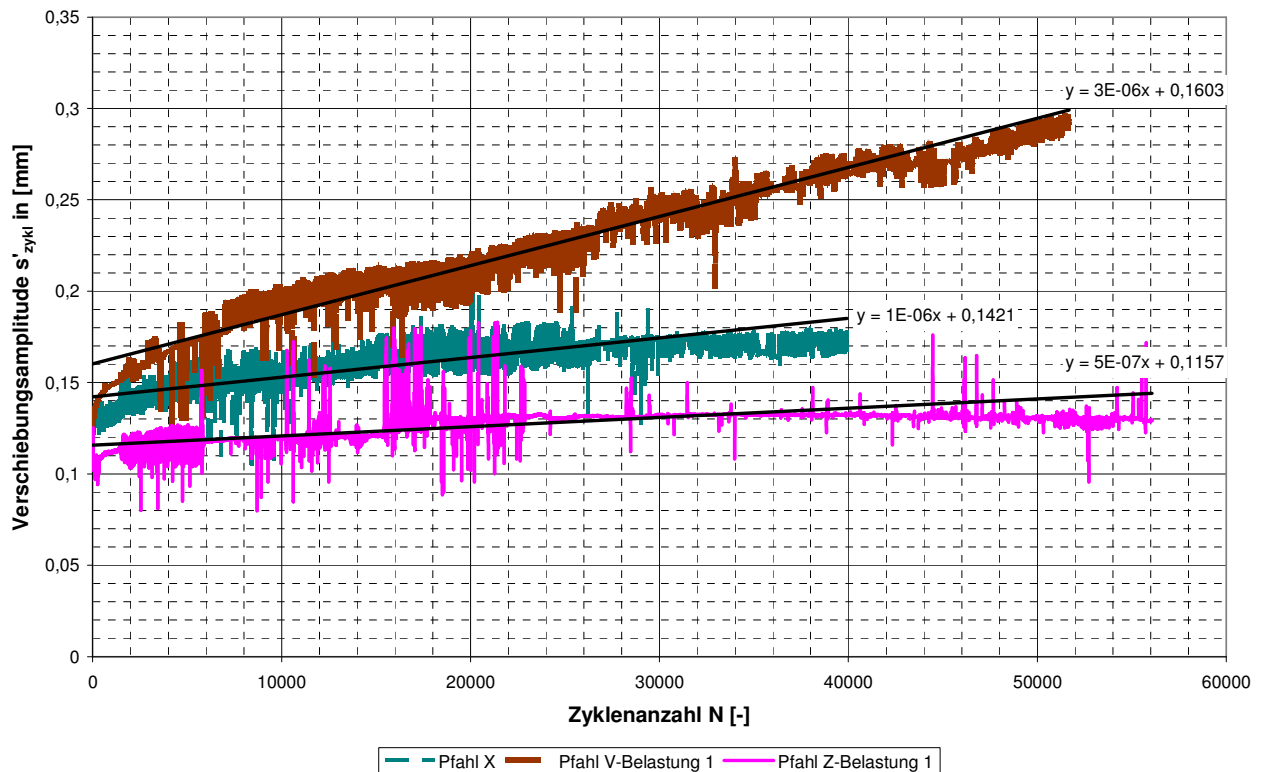


Abbildung 4.86: Verschiebungsamplitude: Vergleich Pfahl Z-Belastung 1 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 1 und Pfahl X

Die Mantelreibungswerte im obersten Pfahlabschnitt (τ_{0-1}) sind bei Pfahl Z-Belastung 1 zunächst höher als beim statisch nicht vorbelasteten Pfahl V-Belastung 1 (siehe Abbildung 4.87). Ab ca. $N = 10.000$ nimmt die Mantelreibung in diesem Pfahlabschnitt jedoch deutlich ab und erreicht ähnliche Werte wie bei Pfahl V-Belastung 1. Die Mantelreibungswerte in den anderen Pfahlabschnitten liegen im Bereich der Werte von Pfahl V-Belastung 1 oder leicht darunter. Eine Vereinheitlichung der Mantelreibung über die Pfahltiefe mit zunehmender Zyklusanzahl ist nicht zu erkennen.

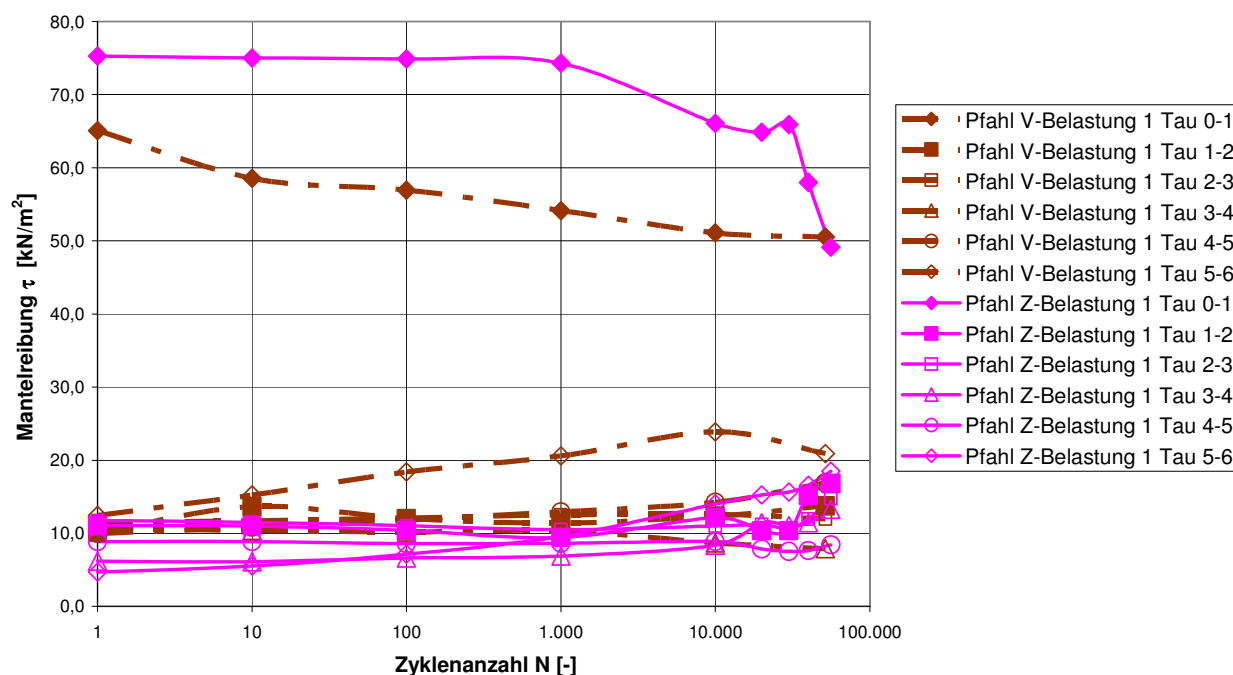


Abbildung 4.87: Mantelreibung: Vergleich Pfahl Z-Belastung 1 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 1

4.4.7.2 Pfahl Z-Belastung 2

In Abbildung 4.88 sind die mittleren Pfahlverschiebungen von Versuch Pfahl Z-Belastung 2 im Vergleich zum Versuch Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2). Bei beiden Versuchen ist ab ca. $N = 1.000$ eine über-log-lineare Zunahme der Verschiebungen zu erkennen. Insgesamt sind die Verschiebungen bei Pfahl Z-Belastung 2 jedoch deutlich geringer als bei Pfahl V-Belastung 2 und liegen auch nach mehr als 30.000 Zyklen noch unter 2 mm.

Bei Extrapolation der mittleren Verschiebungen wird das Versagenskriterium von 15 mm erst bei ca. 80.000 Zyklen erreicht. Beim Versuch an Pfahl V liegen die mittleren Verschiebungen bereits nach weniger als 20.000 Zyklen bei 15 mm.

Die Verschiebungsraten (siehe Abbildung 4.89) nehmen bei Versuch Pfahl Z-Belastung 2 tendenziell bis ca. $N = 2.000$ ab und steigen danach wieder leicht an. Bis ca. $N = 1.000$ sind die Verschiebungsraten ähnlich groß wie beim Versuch Pfahl V-Belastung 2. Für größere Zyklenzahlen nehmen die Verschiebungsraten bei Versuch Pfahl V-Belastung 2 stärker zu und liegen ca. eine Zehnerpotenz über den Werten der Verschiebungsrate von Pfahl Z-Belastung 2.

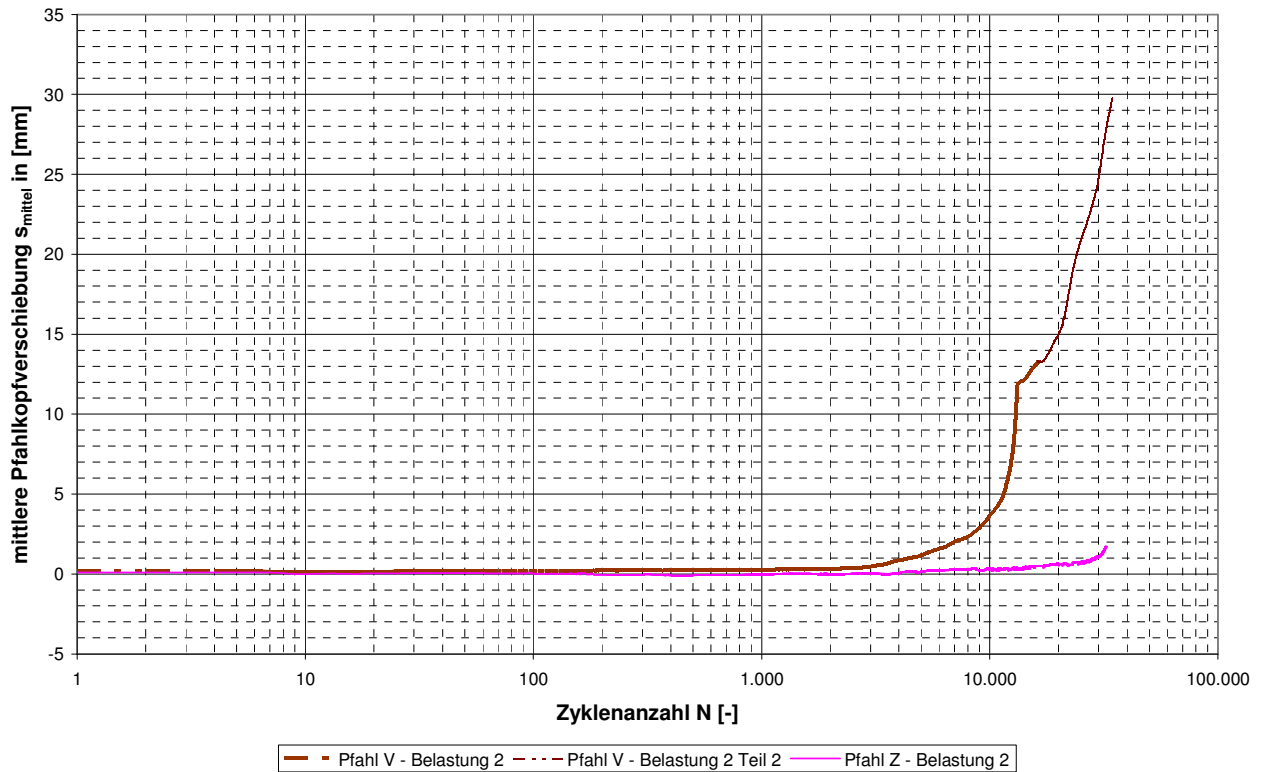


Abbildung 4.88: Mittlere Pfahlverschiebung: Vergleich Pfahl Z-Belastung 2 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2)

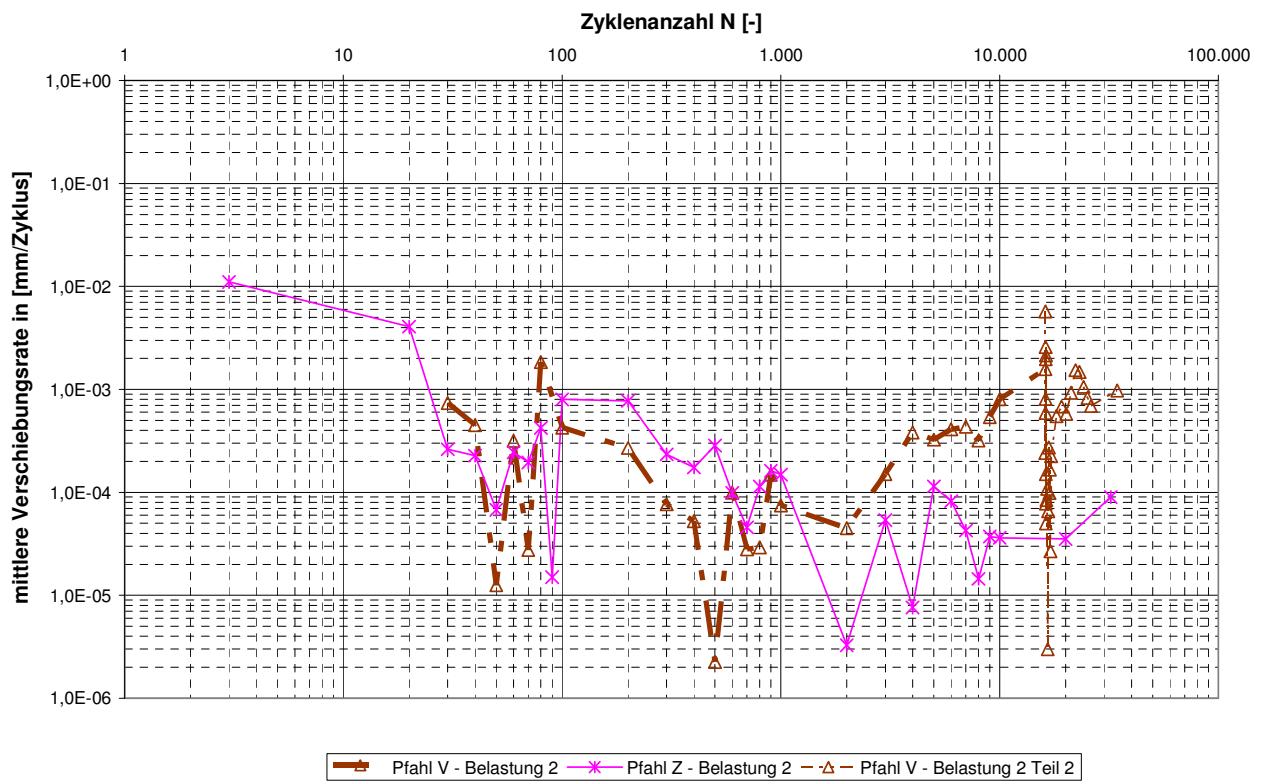


Abbildung 4.89: Verschiebungsrate: Vergleich Pfahl Z-Belastung 2 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2)

In Abbildung 4.90 sind die Verschiebungsamplituden für die Versuche Pfahl Z-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2) dargestellt. Bei beiden Versuchen war die zyklische Lastamplitude mit $F'_{\text{zykl}} = 35 \text{ kN}$ gleich groß.

Beim Versuch Pfahl Z-Belastung 2 sind die Verschiebungsamplituden insgesamt kleiner als bei Pfahl V-Belastung 2. Im Versuchsverlauf tritt bei Pfahl Z-Belastung 2 ab ca. $N = 1.000$ eine überlog-lineare Zunahme der Amplitude auf und bei Versuchsende erreichen die Amplituden ähnlich große Werte wie bei Pfahl V-Belastung 2. Eine zwischenzeitlich starke Zunahme mit anschließendem raschen Abfall der Amplitude wie bei Pfahl V-Belastung 2 tritt bei Pfahl Z-Belastung 2 nicht auf.

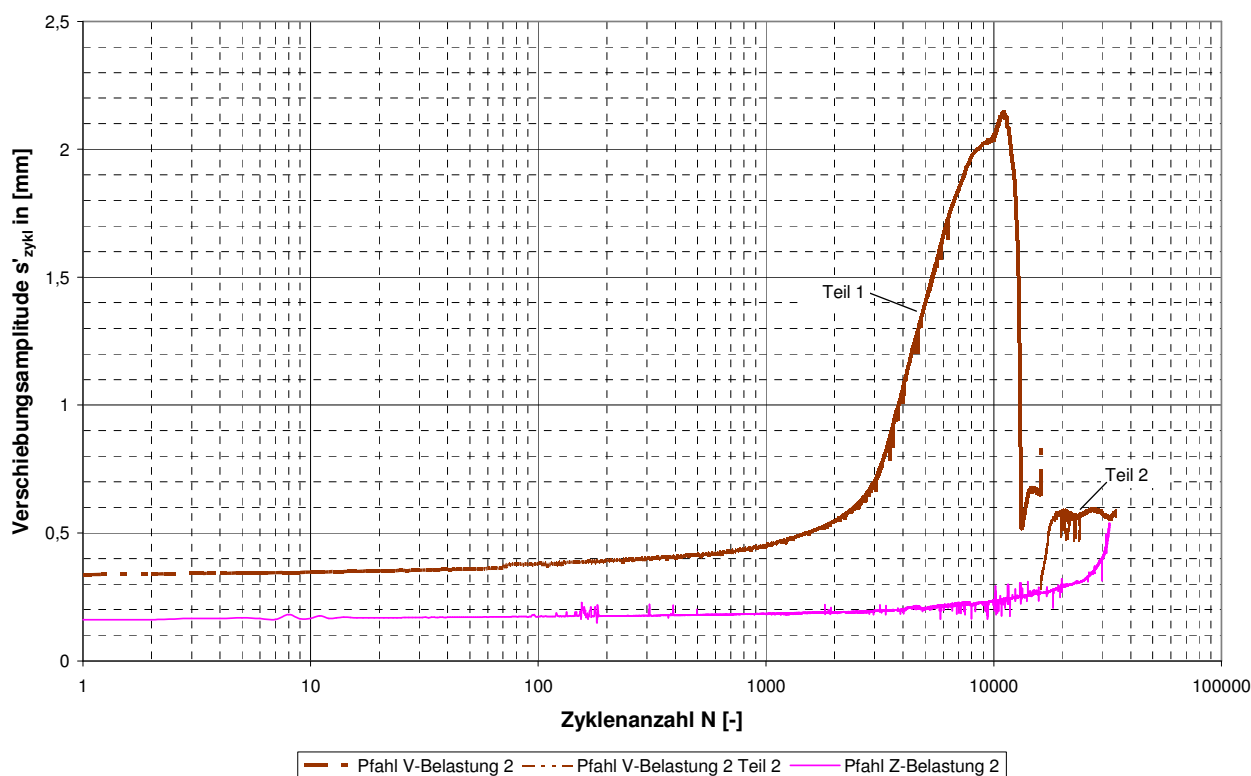


Abbildung 4.90: Verschiebungsamplitude: Vergleich Pfahl Z-Belastung 2 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2)

Die Mantelreibungswerte im obersten Pfahlabschnitt (τ_{0-1}) sind bei Pfahl Z-Belastung 2 höher als beim statisch nicht vorbelasteten Pfahl V-Belastung 2 (siehe Abbildung 4.91). Für alle anderen Pfahlabschnitte unterscheiden sich die Mantelreibungsverläufe meist deutlich voneinander (z.B. τ_{5-6}) und die Größe der Mantelreibung in den einzelnen Pfahlabschnitten liegt bei Pfahl Z-Belastung 2 teils über den Werten in Versuch Pfahl V-Belastung 2 teils darunter. Eine Vereinheitlichung der Mantelreibung über die Pfahltiefe mit zunehmender Zyklenzahl ist bei Pfahl Z-Belastung 2 nicht zu erkennen.

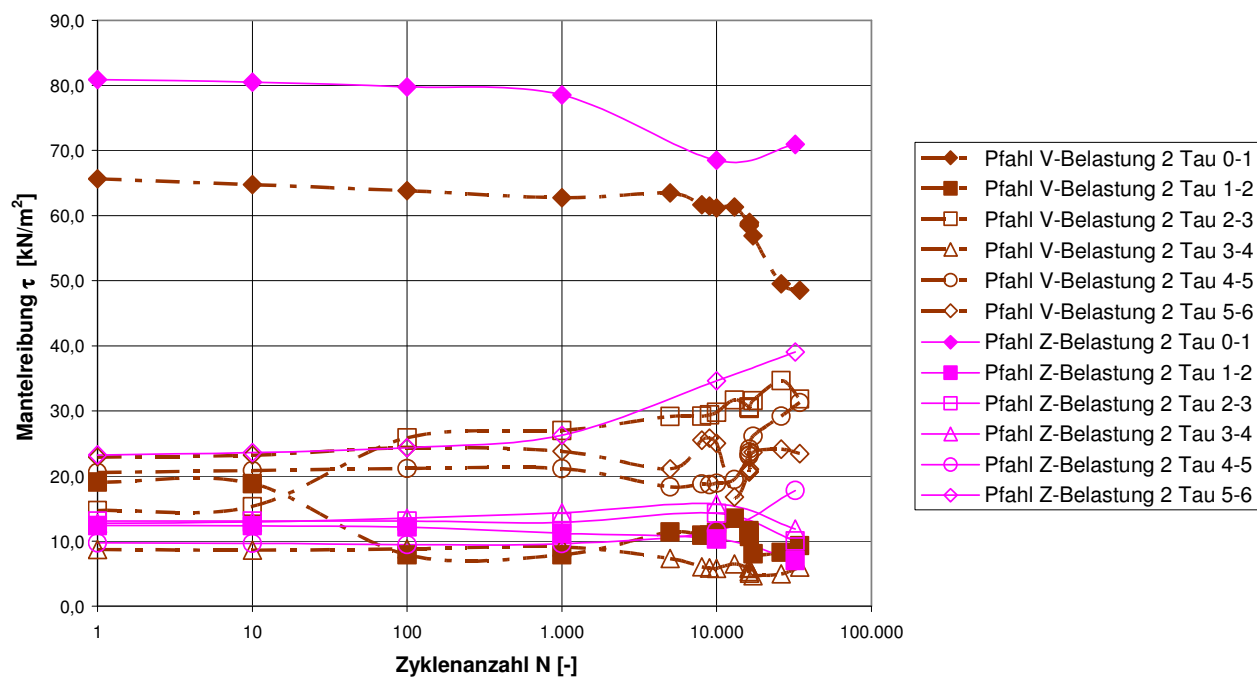


Abbildung 4.91: Mantelreibung: Vergleich Pfahl Z-Belastung 2 (statisch vorbelastet) mit Pfahl V-Belastung 2 (Teil 1 und 2)

5 Erkenntnisse aus den zyklischen Pfahlversuchen

5.1 Zusammenfassung der Versuchsrandbedingungen

In einem mittelplastischen Ton überwiegend steifer Konsistenz wurden im Bohrverfahren 4,2 m lange Mikropfähle mit einem Außendurchmesser von 0,15 m und einem Stahltragglied mit einem Durchmesser von 50 mm hergestellt. An diesen Pfählen wurden statische Pfahlprobelastungen und zyklische Pfahlversuche an unvorbelasteten Pfählen axial zur Pfahlachse durchgeführt. Außerdem wurden statische Pfahlprobelastungen an bereits zyklisch vorbelasteten Pfählen und zyklische Pfahlversuche an bereits statisch vorbelasteten Pfählen durchgeführt.

Der statische Herauszieh Widerstand der Pfähle wurde zu ca. 80 kN festgelegt. Dieser orientiert sich am minimal ermittelten Pfahlwiderstand bei einem Kriechmaß von $k_s = 2$ mm bei Lastkonstanthaltung.

Bei den zyklischen Versuchen wurde die Belastungsart variiert. Bei der ersten Versuchsreihe wurden die Pfähle im Zugschwellbereich belastet (Abschnitt 4.3). Bei der zweiten Versuchsreihe (Abschnitt 4.4) wurden die Pfähle mit Wechsellasten beaufschlagt, wobei das mittlere Lastniveau im Zugbereich lag und somit die maximale Last in Zugrichtung größer war als in Druckrichtung.

Die zyklische Last wurde als sinusförmige Belastung mit einer Frequenz von 0,17 Hz, was einem Lastzyklus pro Minute entspricht, aufgebracht. Die Belastungsfrequenz wurde nicht variiert, da andere Untersuchungen (z.B. THOMAS, 2011) gezeigt haben, dass im Bereich niedriger Frequenzen (< 2 Hz) kein Einfluss der Frequenz auf die Versuchsergebnisse zu erkennen ist. Während eines zyklischen Versuchs wurden das mittlere Lastniveau und die zyklische Lastamplitude konstant gehalten. Von Versuch zu Versuch wurden das mittlere Lastniveau und/oder die zyklische Lastamplitude verändert.

5.2 Ergebnisse aus den Zugschwell- und Wechsellastversuchen

In Abbildung 5.1 sind im Interaktionsdiagramm alle durchgeführten Zugschwell- und Wechsellastversuche dargestellt. Das mittlere Lastniveau F_{mittel} und die zyklische Lastamplitude F'_{zykl} wurden dabei auf den in den statischen Pfahlprobelastungen ermittelten charakteristischen Herauszieh Widerstand von $R_{t,k} = 80$ kN bezogen. Die Zahlen neben den Versuchspunkten geben entweder die Zyklenzahl an, bei der im zyklischen Versuch ein Versagen auftrat oder die Zyklenzahl, bei der durch Extrapolation aus den Versuchsergebnissen mit einem Versagen zu rechnen ist. Als Versagenskriterium bei den zyklischen Versuchen wurde entweder eine mittlere Pfahlverschiebung von mehr als 15 mm oder eine Verschiebungsspanne während eines Zyklus von mehr als 15 mm festgelegt.

Zusätzlich sind im Interaktionsdiagramm Linien gleicher Lastamplitude (rot), gleichen mittleren Lastniveaus (blau) und gleicher maximaler Last $F_{max} = F_{mittel} + F'_{zykl}$ (grün), für die mindestens zwei Versuche vorhanden sind, dargestellt.

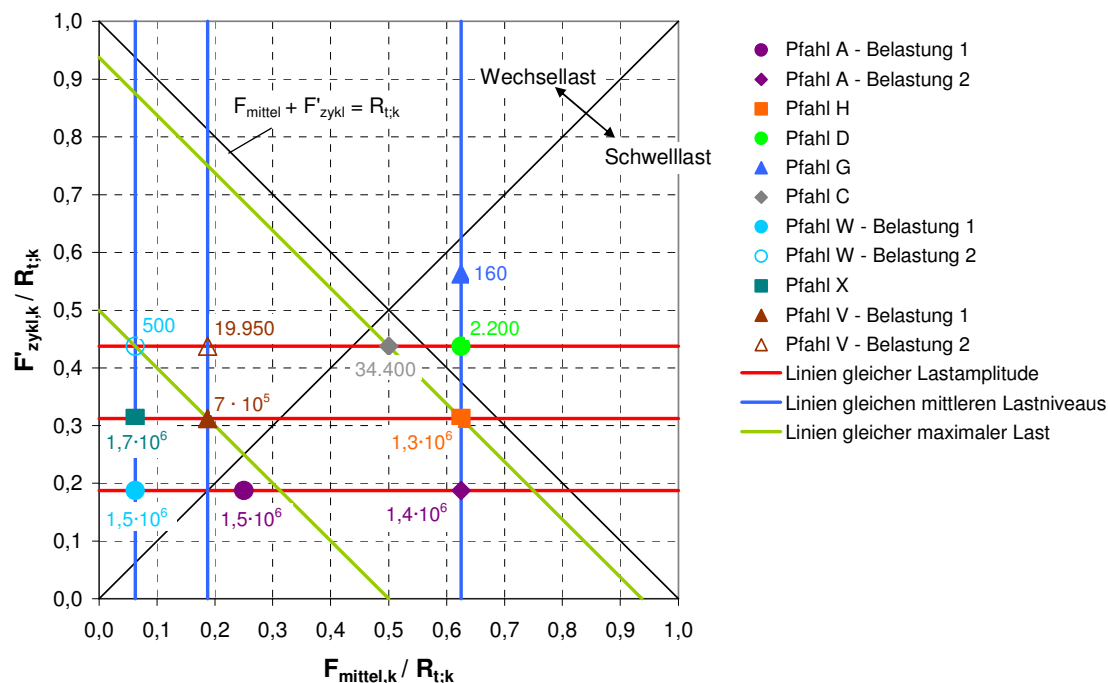


Abbildung 5.1: Interaktionsdiagramm mit Zyklenanzahl bis zum Versagen

5.2.1 Pfahlversagen

Bei den Zugschwellversuchen trat ein Pfahlversagen auf Grund zunehmender mittlerer Pfahlverschiebungen, die über dem festgelegten Grenzwert von 15 mm lagen, auf. Die Verschiebungsspannen lagen bei allen Zugschwellversuchen deutlich unter 15 mm.

Bei den Wechsellastversuchen hingegen war bei einem Versuch (W-Belastung 2) das Versagenskriterium einer Verschiebungsspanne von mehr als 15 mm maßgebend. Dieses Versagenskriterium wurde bereits nach ca. 500 Zyklen erreicht, während die mittlere Pfahlverschiebung erst nach ca. 2.800 Zyklen den Wert von 15 mm überschritt.

Bei Auswertung der erforderlichen Lastwechselzahlen bis zum Erreichen der Versagenskriterien ist zu erkennen, dass bei einem mittleren Lastniveau bis ca. 60 % und zyklischen Lastamplituden bis zu ca. 30 % des charakteristischen Herausziehwiderstandes Lastwechselzahlen von mindestens $N = 10^5$, eher $N = 10^6$ möglich sind (siehe Abbildung 5.1).

Für größere Lastamplituden nehmen die möglichen Zyklenzahlen, insbesondere bei Wechsellasten signifikant ab (W-Belastung 2, V-Belastung 2 und C).

Dieses Ergebnis für die Zugschwellversuche zeigt eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen aus anderen Forschungsarbeiten, bei denen bei Schwelllasten in bindigen Böden ebenfalls erst ab

Maximallasten zwischen 60 % und 80 % des charakteristischen Pfahlwiderstands mit einem ungünstigen Pfahltragverhalten zu rechnen ist (z.B. KRAFT ET AL., 1981 oder JAIME ET AL., 1990).

Im Vergleich mit den zyklischen Pfahlversuchen an Mikropfählen des NGI (siehe Kapitel 2) in sehr weichen wassergesättigten Tonen sind jedoch deutliche Unterschiede festzustellen. Für Belastungen wie bei Pfahl H (Zugschwelllast) tritt in den Versuchen des NGI bereits ein Versagen nach ca. 100 Lastzyklen ein.

Für die Wechsellasten ist dem Interaktionsdiagramm in Abbildung 2.1 zu entnehmen, dass bei zyklischen Lastamplituden bis ca. 35 % des statischen Pfahlwiderstands Zyklen von mehr als 1.000 möglich sind. Eine weitere Unterteilung für höhere Zyklenzahlen ist nicht vorhanden. Daher ist es nicht möglich, die in den Wechsellastversuchen ermittelten Zyklenzahlen zu vergleichen. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Wechsellastversuche zeigen in jedem Fall mögliche Zyklenzahlen von deutlich mehr als 1.000 für den entsprechenden Bereich.

Eine mögliche Ursache für die sehr niedrigen Zyklenzahlen ist, dass es bei den Versuchen des NGI in den sehr weichen Tonen bereits innerhalb weniger Zyklen zu einer Akkumulation von Porenwasserdrücken im Pfahlnahbereich kommt, die das Pfahlverschiebungsverhalten offensichtlich extrem ungünstig beeinflussen.

5.2.2 Entwicklung der mittleren Pfahlverschiebungen

Einfluss der Zyklenzahl

Bei allen zyklischen Versuchen nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen unabhängig vom Lastniveau, der Lastamplitude und der Belastungsart mit zunehmender Zyklenanzahl zu.

Mit Ausnahme des Versuchs Pfahl W-Belastung 1 tritt bei allen Versuchen unabhängig von der Belastungsart mit zunehmender Zyklenzahl eine über-log-lineare Zunahme der Pfahlverschiebungen in Zugrichtung auf, d.h. es kommt zu einem "zyklischen schrittweisen Versagen" (Fall (3) gemäß Abschnitt 2.2.2).

Eine starke Zunahme der mittleren Verschiebungen der Pfähle nach einer evtl. bereits hohen Zyklenzahl ohne nennenswerte mittlere Verschiebungen, wie dies z.B. von SCHWARZ (2002) bei Wechsellastversuchen in wassergesättigtem Sand oder von THOMAS (2011) bei Modellversuchen unter Zugschwelllasten in trockenem Sand berichtet wird, tritt bei keinem der zyklischen Versuche in Ton vor Erreichen der als Versagen definierten Pfahlverschiebung von 15 mm auf.

Eine Beruhigung der Verschiebungen bereits nach wenigen Lastzyklen über die z.B. bei Modellversuchen in Ton berichtet wird (siehe Abschnitt 3.4), trat in keinem der Versuche auf.

Einfluss der Belastungsart

Bei höheren zyklischen Lastamplituden scheint sich ein höheres mittleres Lastniveau, was einer Verschiebung von einer Wechsellast zu einer Schwelllast hin entspricht, günstig auf die Größe der mittleren Verschiebungen auszuwirken (siehe Zyklenzahlen in Abbildung 5.1 für W-Belastung 2, V-Belastung 2 und C).

Bei niedrigeren zyklischen Lastamplituden ist dieser Einfluss nicht zu erkennen (siehe Zyklenzahlen in Abbildung 5.1 für X, V-Belastung 1 und H).

Einfluss des mittleren Lastniveaus und der zyklischen Lastamplitude

Bei gleichem Lastniveau sind die mittleren Verschiebungen unabhängig von der Belastungsart größer, je höher die Lastamplitude ist (z.B. A-Belastung 2, H, D und G).

Bei gleicher maximal aufgebrachtener Last wirkt sich ein höheres mittleres Lastniveau sowohl bei Zugschwelllasten (H und C) als auch bei Wechsellasten (V-Belastung 1 und W-Belastung 2) günstig aus, d.h. die Verschiebungen sind bei gleicher Zyklenzahl geringer.

5.2.3 Entwicklung der Verschiebungsamplitude

Einfluss der Zyklenzahl und der Belastungsart

Bei den Zugschwellversuchen bleiben die Verschiebungsamplituden unabhängig von der Zyklenzahl annähernd konstant.

Bei den Wechsellastversuchen nehmen die Verschiebungsamplituden in der Regel mit zunehmender Zyklenzahl zu.

Die Entwicklung der Verschiebungsamplituden stimmt mit Ergebnissen von z.B. KARLSRUD / HAUGEN (1986) in bindigen Böden überein, bei denen ebenfalls lediglich bei Wechsellasten eine Zunahme der Verschiebungsamplitude mit der Zyklenzahl beobachtet wurde.

Einfluss des mittleren Lastniveaus und der zyklischen Lastamplitude

Bei Zugschwelllasten nehmen die Verschiebungsamplituden bei gleichem mittleren Lastniveau mit höherer zyklischer Lastamplitude überproportional zu (A-Belastung 2, H, D und G). Der Zusammenhang kann mit Hilfe eines Potenzansatzes beschrieben werden (siehe Abbildung 4.37 in Abschnitt 4.3.5.2).

Bei gleicher zyklischer Lastamplitude sind die Verschiebungsamplituden unabhängig vom mittleren Lastniveau annähernd gleich groß (A-Belastung 1 und A-Belastung 2 bzw. C und D).

Für eine Lastzyklenzahl nehmen die Verschiebungsamplituden bei den Wechsellastversuchen bei gleichem mittleren Lastniveau ebenfalls mit zunehmender Lastamplitude zu (W-Belastung 1, X und W-Belastung 2 bzw. V-Belastung 1 und V-Belastung 2).

Anders als bei den Zugschwellversuchen ist die Größe der Verschiebungsamplituden bei gleicher zyklischer Lastamplitude deutlich vom mittleren Lastniveau abhängig. Bei Pfahl X und Pfahl V-Belastung 1 ist die zyklische Lastamplitude gleich groß, das mittlere Lastniveau ist bei Pfahl V-Belastung 1 größer. Die Verschiebungsamplitude bei Pfahl X ist kleiner als bei Pfahl V-Belastung 1. Bei Pfahl W-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 2 ist es umgekehrt. Der Pfahl mit dem höheren mittleren Lastniveau (Pfahl V-Belastung) hat die kleinere Verschiebungsamplitude. Eine eindeutige Aussage, ob die Verschiebungsamplituden bei Wechsellasten mit zunehmendem Lastniveau eher ab- oder zunehmen geht aus den Versuchsergebnissen daher nicht klar hervor.

Bei gleicher maximal aufgebracht Last wirkt sich ein höheres mittleres Lastniveau sowohl bei Zugschwelllasten (H und C) als auch bei Wechsellasten (V-Belastung 1 und W-Belastung 2) günstig aus, d.h. die Verschiebungsamplituden sind dann kleiner.

5.2.4 Entwicklung der Verschiebungsraten

Einfluss der Zyklenzahl

Unabhängig von der Belastungsart ändert sich die Verschiebungsrate mit zunehmender Zyklenzahl.

Bei den Zugschwellversuchen nehmen die Verschiebungsraten mit zunehmender Zyklenzahl ab. Eine Umkehr der Verschiebungsrate wurde nur bei Versuch Pfahl D beobachtet und hier erst bei ca. 18.000 Zyklen, nachdem das Versagen auf Grund unzulässig großer mittlerer Verschiebungen bereits eingetreten war.

Bei den Wechsellastversuchen wurde eine Umkehr der Verschiebungsrate teilweise bereits bei Zyklenzahlen unter 1.000 beobachtet. Diese Umkehr trat bereits vor dem Erreichen einer unzulässig großen mittleren Verschiebung auf (V-Belastung 2 und W-Belastung 2). Bei Pfahl W-Belastung 2 fällt die Umkehr der Verschiebungsrate ungefähr mit dem Erreichen einer unzulässig großen Verschiebungsamplitude zusammen.

Einfluss des mittleren Lastniveaus und der zyklischen Lastamplitude

Eine Umkehr der Verschiebungsrate wurde unabhängig von der Belastungsart und vom mittleren Lastniveau erst bei Versuchen mit zyklischen Lastamplituden von mehr als 40 % des charakteristischen Herausziehwidestands unter statischer Belastung beobachtet.

Bei den Zugschwelllasten sind die Verschiebungsraten bei gleichem mittleren Lastniveau umso größer, je größer die zyklische Lastamplitude ist (A-Belastung 2, H, D und G). Bei den Wechsellastversuchen ist dies nicht eindeutig festzustellen.

Bei gleicher zyklischer Lastamplitude bis ca. 30 % des charakteristischen Herausziehwidestands unter statischer Belastung sind bei höherem Lastniveau die Verschiebungsraten zu Beginn größer, nehmen dann mit zunehmender Zyklenzahl jedoch stärker ab (A-Belastung 2, A-Belastung 1 und W-Belastung 1 bzw. H, V-Belastung 1 und X).

Bei gleicher maximal aufgebracht Last wirkt sich ein höheres mittleres Lastniveau sowohl bei Zugschwelllasten (H und C) als auch bei Wechsellasten (V-Belastung 1 und W-Belastung 2) günstig auf die Entwicklung der Verschiebungsraten aus. Bei den Zugschwelllastversuchen kommt es zu einer stärkeren Abnahme der Verschiebungsraten (H und C). Bei den Wechsellastversuchen tritt bei dem Versuch mit höherem mittleren Lastniveau keine Umkehr der Verschiebungsrate auf (V-Belastung 1 und W-Belastung 2).

5.2.5 Entwicklung der Pfahlmantelreibung

Da bei den Versuchen ein Versagen in Zugrichtung auftrat, wurden die Mantelreibungswerte für die jeweils maximale Zugbelastung ausgewertet.

Die Entwicklung des Pfahlsitzenwiderstands bei den Wechsellastversuchen wurde nicht untersucht.

Einfluss der Zyklenzahl

Die Pfahlmantelreibung verändert sich mit zunehmender Zyklanzahl. Tendenziell nehmen die Mantelreibungswerte im oberen Pfahlbereich mit zunehmender Zyklanzahl ab und im unteren Pfahlbereich zu. Eine so ausgeprägte Vergleichmäßigung der Mantelreibung, wie sie z.B. bei Versuchen in Sand (SCHWARZ, 2002) berichtet wird, trat nicht auf.

Einfluss des mittleren Lastniveaus und der zyklischen Lastamplitude

Bei gleicher maximaler Last (Pfahl W-Belastung 2 und Pfahl V-Belastung 1) sind bei höherem mittleren Lastniveau in der oberen Pfahlhälfte die Mantelreibungswerte größer. Im unteren Pfahlbereich sind die Werte teilweise geringer. Während bei dem Versuch mit höherem Lastniveau mit zunehmender Zyklanzahl jedoch noch eine Steigerung der Mantelreibungswerte festzustellen ist, nehmen die Mantelreibungswerte beim Versuch mit niedrigerem Lastniveau bei höheren Lastwechselzahlen bereits wieder ab. Insgesamt scheint sich bei gleicher maximaler Last ein höheres mittleres Lastniveau günstig auf die Entwicklung der Mantelreibung auszuwirken.

Auf Grund der wenigen Versuchsergebnisse ist diese Feststellung noch durch weitere Versuche abzusichern.

5.2.6 Post-zyklische Pfahltragfähigkeit unter statischer Belastung

Die post-zyklischen statischen Versuche wurden unmittelbar im Anschluss an die zyklische Belastung oder nach wenigen Tagen Pause durchgeführt.

Einfluss der vorausgegangenen zyklischen Belastungsart

Bei den statischen Probelastungen, die im Anschluss an Zugschwellversuche durchgeführt wurden, war der Pfahlwiderstand immer höher als bei den statischen Probelastungen an nicht vorbelasteten Pfählen (siehe Abschnitt 4.3.6.1). Dies war unabhängig von der Größe der im zyklischen Versuch aufgetretenen mittleren Pfahlverschiebungen. Die Tragfähigkeitssteigerungen lagen zwischen 8 % und 30 %.

Hier ist ein Unterschied zu den Ergebnissen aus der Literatur festzustellen. Dort wird lediglich bei verhältnismäßig kleinen mittleren Verschiebungen während einer zyklischen Zugschwellbelastung von Tragfähigkeitssteigerungen berichtet (siehe Kapitel 3, KARLSRUD / HAUGEN, 1986, KARLSRUD ET AL., 1992 oder NARASIMHA / PRASAD, 1992).

Die Kriechmaße während der einzelnen Laststufen waren ebenfalls deutlich geringer als bei den an nicht vorbelasteten Pfählen durchgeführten statischen Pfahlprobelastungen. Dies wurde auch bei den postzyklisch durchgeführten Kriechversuchen an Verpressankern (FMPA Stuttgart, 1978) beobachtet.

Die vorausgegangene zyklische Zugschwellbelastung führte bei den post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen insgesamt zu einem steiferen Verhalten des Systems Pfahl – Boden.

Bei den statischen Probelastungen, die im Anschluss an Wechsellastversuche durchgeführt wurden, war der Pfahlwiderstand geringer als bei den statischen Probelastungen an nicht vorbelasteten Pfählen (siehe Abschnitt 4.4.6.1). Die Tragfähigkeitsverluste sind unterschiedlich hoch, je nachdem ob im Anschluss an die Wechsellastversuche eine statische Pfahlprobelastung auf Druck oder Zug durchgeführt wurde. Nach einem Versagen unter zyklischer Wechselbelastung in Zugrichtung und einer anschließenden statischen Belastung auf Druck (Pfahl W) wurde eine Abnahme des Pfahlwiderstandes von mehr als 80 % festgestellt. Bei einem Versagen unter zyklischer Wechselbelastung in Zugrichtung und einer anschließenden statischen Belastung auf Zug (Pfahl V) betrug die Abnahme des Pfahlwiderstandes ca. 20 %. Bei der post-zyklischen Probelastung auf Druck waren die Kriechmaße im Vergleich zu den Kriechmaßen bei zyklisch nicht vorbelasteten Pfählen für alle Laststufen höher. Bei der post-zyklischen Probelastung auf Zug waren die Kriechmaße bis zum Erreichen der Laststufe, die der maximalen Last im zyklischen Versuch entsprach, im Vergleich zu den Kriechmaßen bei zyklisch nicht vorbelasteten Pfählen niedriger. Bei Überschreiten der maximalen Last aus dem zyklischen Versuch steigen die Kriechmaße stark an und ein Pfahlversagen tritt auf.

Die generelle Abnahme des Pfahlwiderstands unter statischer Belastung nach einer zyklischen Wechselbelastung deckt sich mit den Ergebnissen aus der Literatur (siehe Kapitel 3).

5.2.6.1 Zyklische Versuche nach statischer Pfahlprobelastung

Die zyklischen Versuche an statisch bereits belasteten Pfählen wurden zwischen 7 und 9 Monate nach der statischen Probelastung durchgeführt.

Beim Zugschwellversuch an einem statisch bereits auf Zug vorbelasteten Pfahl (Pfahl F) ähneln die Verläufe der mittleren Pfahlverschiebungen, der Verschiebungsamplituden und der Verschiebungsraten denen des statisch nicht vorbelasteten Pfahls C (siehe Abschnitt 4.3.7). Die Absolutwerte aller drei Größen liegen beim statisch vorbelasteten Pfahl über denen eines nicht vorbelasteten Pfahls. Die statische Vorbelastung mit Pfahlkopfverschiebungen bis ca. 50 mm wirkt sich bei einer anschließenden zyklischen Zugschwellbelastung ungünstig aus.

An Pfahl Z wurden im Anschluss an eine statische Belastung auf Druck mit Verschiebungen von ca. 20 mm zwei zyklische Wechsellastversuche durchgeführt (siehe Abschnitt 4.4.7). Die zyklischen Lasten entsprachen denen des statisch nicht vorbelasteten Pfahls V. Bei beiden Versuchen liegen die Verschiebungsamplituden unter denen des statisch nicht vorbelasteten Pfahls. Außerdem sind die Mantelreibungswerte im obersten Pfahlabschnitt beim statisch vorbelasteten Pfahl höher. Hinsichtlich der mittleren Pfahlverschiebungen und der Verschiebungsraten liegen die Absolutwerte am statisch vorbelasteten Pfahl einmal höher und einmal niedriger als beim statisch nicht vorbelasteten Pfahl.

Ein einheitlicher Einfluss der vorausgegangenen statischen Belastung auf Druck bei anschließender zyklischer Wechselbelastung ist nicht zu erkennen.

5.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann auf Grundlage der durchgeführten Zugschwell- und Wechsellastversuche festgestellt werden:

- Bei allen zyklischen Versuchen kommt es mit zunehmender Zyklenzahl zu einer Akkumulation der Pfahlverschiebungen.
- Bis zu einem mittleren Lastniveau von ca. 60 % und zyklischen Lastamplituden bis zu ca. 30 % des charakteristischen Herausziehwiderstandes sind Lastwechselzahlen von mindestens $N = 10^5$, eher $N = 10^6$ möglich, ohne dass Pfahlverschiebungen von mehr als 10 % des Pfahldurchmessers auftreten.
- Die möglichen Zyklenzahlen bis zum Erreichen einer bestimmten Pfahlverschiebung liegen bei den zyklischen Versuchen im steifen Ton deutlich über denen für zyklische Versuche in nichtbindigen Böden, wie sie z.B. von SCHWARZ (2002) oder KEMPFERT (2009) angegeben werden und über denen für zyklische Versuche in breiig-weichen bindigen Böden (KARLSRUD / HAUGEN, 1986).
- Die Verschiebungsamplituden bleiben bei den Zugschwellversuchen konstant. Bei den Wechsellastversuchen steigen die Verschiebungsamplituden mit der Zyklenzahl an.
- Die Verschiebungsraten bei den Zugschwellversuchen nehmen bis zum Erreichen von mittleren Pfahlverschiebungen von 10 % des Pfahldurchmessers ab. Bei Wechsellastversuchen ist teilweise bereits vor Erreichen einer Pfahlverschiebung von 10 % des Pfahldurchmessers eine Zunahme der Verschiebungsrates zu beobachten.
- Eine vorausgegangene zyklische Zugschwellbelastung führt bei post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen zu einer Steigerung des charakteristischen Pfahlwiderstands.
- Eine vorausgegangene zyklische Wechselbelastung führt bei post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen zu einer signifikanten Abnahme des charakteristischen Pfahlwiderstands.
- Bei gleicher zyklischer Lastamplitude wirkt sich ein höheres mittleres Lastniveau in der Regel günstig auf das Last-Verschiebungsverhalten des Pfahls aus.
- Bei gleicher maximaler Belastung wirkt sich ein höheres mittleres Lastniveau stets günstig auf das Last-Verschiebungsverhalten des Pfahls aus.

6 Einachserscherversuche an Tonproben

Ergänzend zu den statischen und zyklischen Pfahlversuchen wurden an Bodenproben aus dem Versuchsfeld statische und zyklische Einachserscherversuche im Labor der Technischen Universität Berlin am Fachgebiet für Grundbau und Bodenmechanik durchgeführt. Die Versuchsdurchführung und -auswertung erfolgte zum Teil im Rahmen einer Diplomarbeit (BOHN, 2010).

Ziel der Versuche war es, das Bodenverhalten im Pfahlmantelbereich während einer axialen statischen oder zyklischen Pfahlbelastung abzubilden. Die eigentliche Kontaktfläche zwischen Pfahlmantel und Boden wurde nicht untersucht, da davon ausgegangen wurde, dass ein Versagen durch eine Überschreitung der möglichen übertragbaren Scherkräfte im Boden oder durch akkumulierende Verschiebungen auftritt und nicht durch ein Verbundproblem zwischen dem Zementmörtel des Pfahls und dem Boden. In Abbildung 6.1 ist dargestellt, wie die Verhältnisse am Pfahlmantel bei axialer statischer oder zyklischer Belastung auf den Elementversuch im Labor übertragen werden. Die Einachserscherversuche wurden volumenkonstant durchgeführt, wobei in der Regel die Anfangsnormalspannung der Radialspannung σ_r am Pfahlmantel aus Erdruchdruck entspricht. Die Schubspannung τ resultiert aus der im Pfahlversuch wirkenden Kraft F dividiert durch die Pfahlmantelfläche A_s . Es wurde vereinfacht angenommen, dass die Mantelreibungsverteilung über die Pfahltiefe konstant ist.

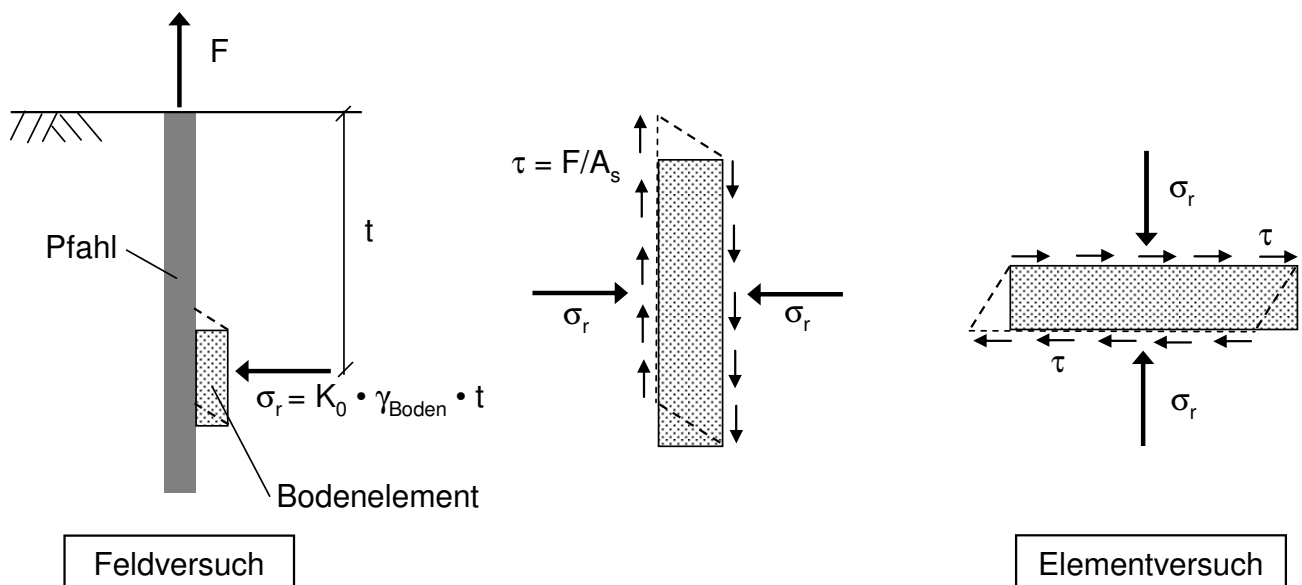


Abbildung 6.1: Analogie Pfahlversuch - Einachserscherversuch

6.1 Versuchsstand und Probenvorbereitung

Die Einachserscherversuche wurden mit einem Einachserschervergät der Fa. GIESA (Typ RS5W-S) durchgeführt (siehe Abbildung 6.2). Der ebene Verzerrungszustand wird durch das Verfahren des Schertisches erreicht. Beim Verfahren wird der untere Scherrahmen bewegt, der obere Scherrah-

men ist fixiert. Die Stützstäbe und Stützringe ermöglichen eine ebene Verzerrung der Bodenprobe. Das Verfahren des Schertisches wird über einen Schrittmotor gesteuert. Die Aufbringung der Vertikallast erfolgt über den Druckstempel.

Messtechnisch erfasst werden die vertikale Normalkraft und die Scherkraft sowie die Vertikalverformung der Probe und die Horizontalverschiebung des unteren Scherrahmens.

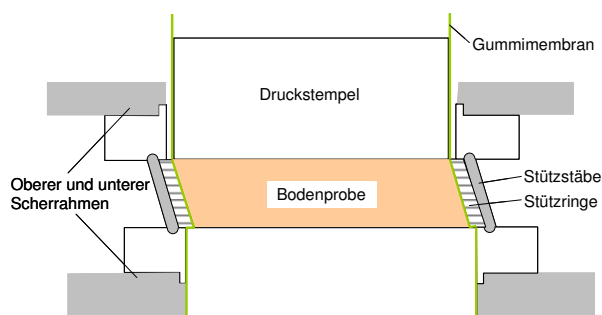
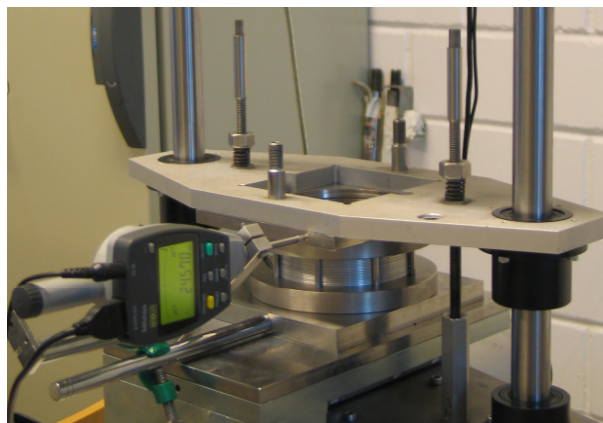
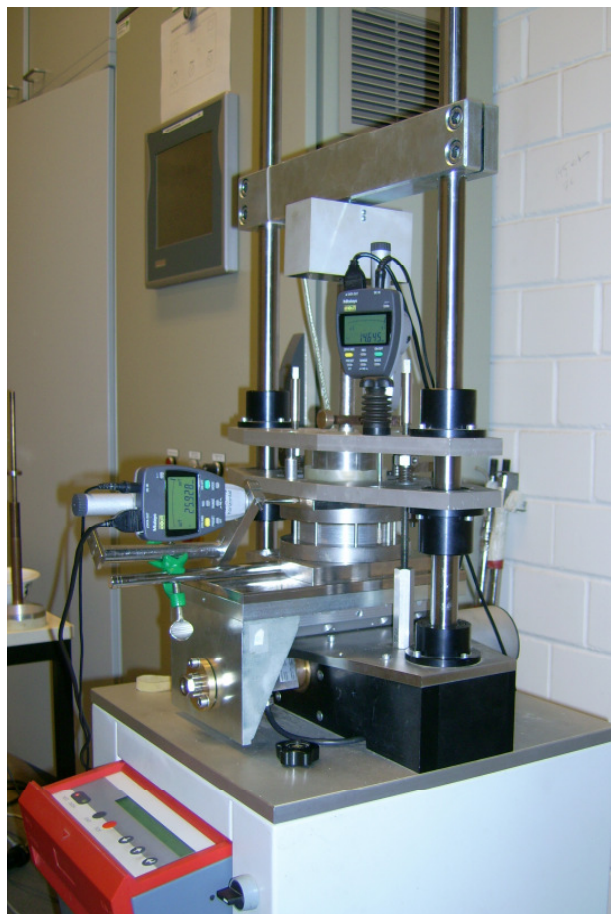


Abbildung 6.2: Einachschergerät Fa. GIESA (Typ RS5W-S)

Die aus einem Bohrkern mit Hilfe eines Ausstechrings gewonnenen ungestörten kreisförmigen Bodenproben haben einen Durchmesser von 9,0 cm und eine Höhe von 2,0 cm. Die Proben werden mit ihrem natürlichen Wassergehalt eingebaut. Eine Wassersättigung der Proben ist gerätebedingt nicht möglich. Durch eine Gummimembran um die Bodenprobe herum wird ein Austrocknen der Probe verhindert (siehe Abbildung 6.2, unten rechts).

Vor jedem Abschervvorgang wird die vertikale Normalkraft aufgebracht und für 60 Minuten konstant gehalten. Dadurch ist sichergestellt, dass die Probe satt an den Stützringen anliegt, da der Probendurchmesser von 9 cm etwas kleiner ist als der Durchmesser der Stützringe von 9,15 cm, um den Einbau der Probe in die Stützringe zu ermöglichen. Bei dem anschließenden Abschervvorgang wird die Probenhöhe und somit das Probenvolumen durch entsprechende Regelung der vertikalen Normalkraft konstant gehalten.

6.2 Versuchsprogramm

Zunächst wurden zur Bestimmung der maximal aufnehmbaren Schubspannung unter monotoner Scherbeanspruchung verschiebungsgesteuerte monotone Einfeldscherversuche durchgeführt. Die Abschergeschwindigkeit wurde zu $v = 0,01$ mm/min gewählt. Der maximale Scherweg wurde zu 5 mm gewählt.

In Tabelle 6.1 sind die Konsistenz der Bodenproben sowie die Normalspannungen zu Beginn des Abschervorgangs dargestellt. Bei den Versuchen M1 bis M4 wurde die Normalspannung zu Beginn entsprechend der Entnahmetiefe des Bohrkerns gewählt. Bei den Versuchen der Reihen RM1 und RM2 wurden jeweils Proben aus demselben Bohrkern mit unterschiedlichen Anfangsnormalspannungen belastet.

Versuch	Konsistenz	Ausgangsnormalspannung σ_{v0} [kN/m ²]	Maximaler Scherweg s_{max} [mm]	Probenhöhe bei Beginn Abscheren h_0 [mm]
M1	weich	40	5	19,23
M2	steif	25		19,33
M3	weich	35		19,23
M4	steif	45		19,52
RM1-1	weich	15		19,33
RM1-2	weich	30		19,22
RM1-3	weich	45		19,30
RM2-1	steif	15		19,55
RM2-2	steif	30		19,47
RM2-3	steif	45		19,48

Tabelle 6.1: Übersicht monotone Einfeldscherversuche

Die zyklischen Einfeldscherversuche wurden kraftgesteuert durchgeführt. Die Belastung lag dabei im Schwellbereich. Wechsellastversuche wurden nicht durchgeführt. Die Dauer eines Belastungszyklus lag wie bei den zyklischen Pfahlversuchen bei 60 s. Die Lastaufbringung erfolgte über einen Schrittmotor. Die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung des Schrittmotors wurden dabei mit Hilfe folgender Funktionen gesteuert:

$$\text{Annäherung an } \tau_{max} : v_{soll}(+) = P \cdot (\tau_{max} - \tau_{ist})$$

$$\text{Annäherung an } \tau_{min} : v_{soll}(-) = P \cdot (\tau_{ist} - \tau_{min})$$

Der Proportionalitätsfaktor P regelt die Dauer des Belastungszyklus und ist für jeden Versuch anzupassen. Um ein Überschreiten der maximalen Schubspannung τ_{max} bzw. ein Unterschreiten der minimalen Schubspannung τ_{min} bzw. einen Stillstand des Motors bei $\tau_{ist} = \tau_{max}$ bzw. τ_{min} zu verhindern, wird der obere Umkehrpunkt des Schrittmotors bereits bei 95 % der maximalen Schubspannung und der untere Umkehrpunkt bei $(0,05 \cdot \tau_{max} + \tau_{min})$ gewählt. Durch diese Steuerung des Schrittmotors lassen sich keine exakten sinusförmigen zyklischen Belastungen aufbringen, die Belastung erinnert daher eher an eine rechteckförmige Belastungsfunktion.

Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die durchgeführten zyklischen Einachserscherversuche. Angegeben sind das mittlere Schubspannungsniveau τ_{mittel} , die Schubspannungsamplitude τ'_{zykl} sowie die Schubspannung $\tau_{\gamma=10\%}$ bei einer Schubverzerrung von $\gamma = 10\%$ aus dem zugehörigen monotonen Einachserscherversuch. Diese Schubspannung wurde für die Auswertung der zyklischen Versuche als Referenzspannung verwendet (siehe Abschnitt 6.4).

Versuch	σ_{v0} [kN/m ²]	τ_{mittel} [kN/m ²]	τ'_{zykl} [kN/m ²]	Probenkonsistenz	Zugehöriger monotoner Versuch	$\tau_{\gamma=10\%}$ aus zugehörigem monotonen Versuch [kN/m ²]
Z1	40	12,3	5,8	weich	M1	38
Z2	25	28,0	5,0	steif	M2	23
Z3	35	18,5	9,5	weich	M3	35
Z4	35	17,3	1,8	weich	M3	35
Z5	35	17,3	5,8	weich	M3	35
Z7	45	34,0	10,0	steif	M4	45

Tabelle 6.2: Übersicht zyklische Einachserscherversuche

6.3 Versuchsauswertung

Bei den monotonen Scherversuchen wird die Entwicklung der Normalspannungen σ_v sowie die Entwicklung der Schubspannung τ im Verhältnis zur wirkenden Normalspannung σ_v mit zunehmender Schubverzerrung γ ausgewertet.

Bei den zyklischen Scherversuchen werden die Entwicklung der mittleren Schubverzerrung γ_{mittel} und der Schubverzerrungsamplitude γ'_{zykl} (siehe Abbildung 6.3) sowie die Entwicklung des Schubmoduls G mit zunehmender Zyklusanzahl N ausgewertet.

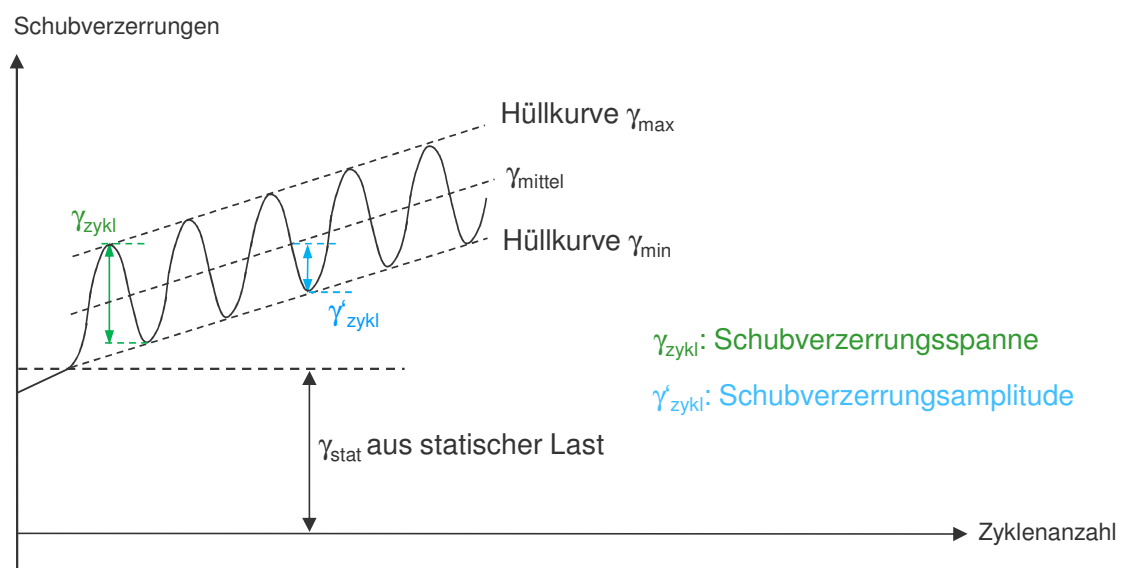


Abbildung 6.3: Definitionen Schubverzerrungen

Die Schubverzerrung wird aus dem Scherweg s und der Probenhöhe h_0 bei Beginn des Schervorgangs zu

$$\gamma = \frac{s}{h_0}$$

ermittelt.

Der Schubmodul G ermittelt sich zu

$$G = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} = \frac{\tau_{zykl}}{\gamma_{zykl}}$$

mit

τ_{max} bzw. τ_{min}	maximale bzw. minimale Schubspannung während eines Zyklus
τ_{zykl}	Belastungsspanne
γ_{max} bzw. γ_{min}	maximale bzw. minimale Schubverzerrung während eines Zyklus
γ_{zykl}	Schubverzerrungsspanne

6.4 Versuchsergebnisse

Die einzelnen Versuchsergebnisse sind ausführlich in BAUMBACH (2010) dargestellt. Da sich nach Abschluss des Versuchsprogramms gezeigt hat, dass gerätebedingt die im Versuch gemessenen Schubverzerrungen tendenziell größer sind als die tatsächlich im Versuch vorhandenen Schubverzerrungen sowie die Schubspannungen bei großen Schubverzerrungen teilweise leicht überschätzt werden, wird auf eine genaue quantitative Auswertung der Versuche verzichtet. Bei einem Vergleich der Versuche untereinander lassen sich jedoch qualitative Aussagen zum Verhalten der Tonproben bei monotoner und zyklischer Belastung im Einfachschergerät treffen.

6.4.1 Monotone Einfachscherversuche

Die Normalspannungen σ_v nehmen während der volumenkonstanten monotonen Einfachscherversuche zunächst ab. Ab Schubverzerrungen zwischen 2 % und 7 % steigen die Vertikalspannungen wieder an (siehe Abbildung 6.4). Übertragen auf einen nicht volumenkonstanten Versuch zeigen die Bodenproben zunächst ein kontraktantes Verhalten. Mit zunehmender Schubverzerrung kommt es zu einem dilatanten Verhalten der Probe.

Die mit zunehmender Schubverzerrung steigenden Schubspannungen sind tendenziell umso größer, je höher die Normalspannung zu Beginn des Versuchs ist (siehe Abbildung 6.5). Die auftretenden Schubspannungen bei weicher Konsistenz sind niedriger als die bei Proben steifer Konsistenz bei vergleichbaren Anfangsnormalspannungen (siehe Abbildung 6.6).

Bezogen auf die jeweils wirkende Normalspannung steigen die Schubspannungen bis zu Schubverzerrungen zwischen 5 % und 10 % deutlich an. Bei größeren Schubverzerrungen nimmt das Verhältnis von Schubspannung zu Normalspannung nur noch leicht zu oder bleibt annähernd konstant (siehe Abbildung 6.7). Ein ausgeprägtes Maximum ist bei den Versuchen nicht zu erkennen. Dies ist gerätebedingt, wie ein nach dem Umbau des Gerätes durchgeführter monotoner Scherversuch (M3neu in Abbildung 6.7) zeigt. Das maximale Verhältnis von Schubspannung zu Normal-

spannung wird dabei ebenfalls zwischen Schubverzerrungen von 5 % bis 10 % erreicht, danach nimmt der Verhältniswert mit zunehmender Schubverzerrung ab.

Als Referenzschubspannung unter monotoner Belastung wird für die zyklischen Einfachscherversuche die Schubspannung bei einer Schubverzerrung von $\gamma = 10\%$ gewählt (bezeichnet als $\tau_{\gamma = 10\%}$).

Auffallend war, dass das Verhältnis zwischen Schub- und Normalspannung besonders bei den Proben steifer Konsistenz auch bei Schubverzerrungen von weniger als 5 % teilweise größer als 1,0 war. Mögliche Ursachen hierfür sind z.B. Saugspannungen in den nicht gesättigten Proben oder das insgesamt niedrige Spannungsniveau von in der Regel unter 50 kN/m^2 . Denkbar wäre auch ein hoher Überkonsolidierungsgrad der Proben, der auf Grund der geologischen Entstehung des Bodens jedoch eher ausgeschlossen wird.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde dieser Aspekt nicht näher untersucht. Prinzipiell bleibt jedoch die Fragestellung, inwieweit sich ein niedriges Spannungsniveau oder eine Teilsättigung auf die Ergebnisse von monotonen oder auch zyklischen Scherversuchen auswirken.

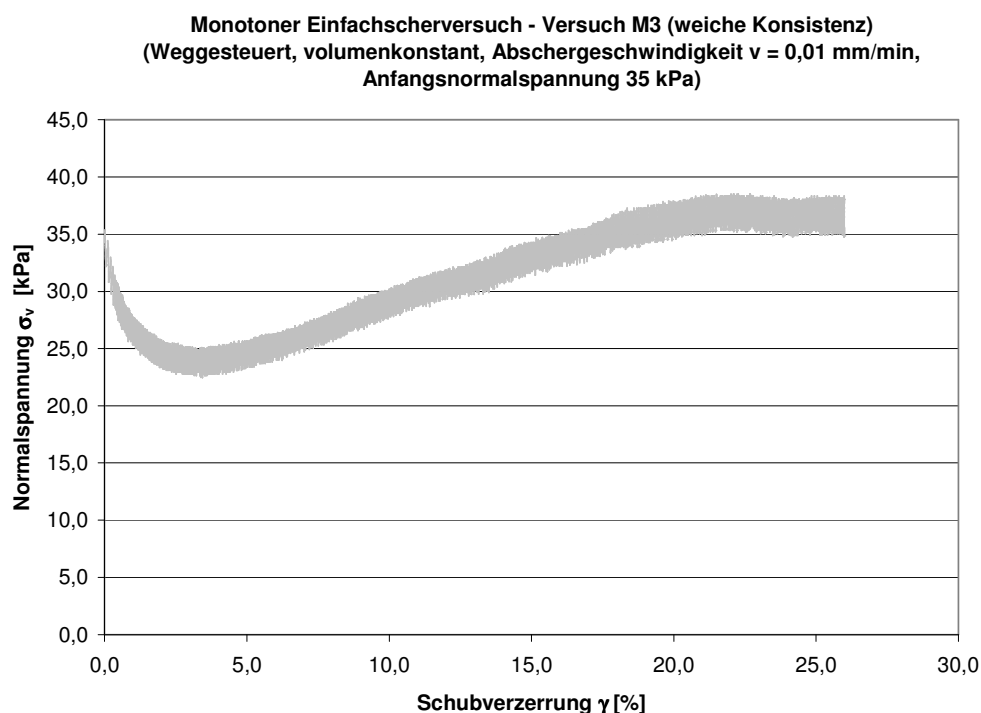


Abbildung 6.4: Entwicklung der Normalspannung mit zunehmender Schubverzerrung bei den monotonen Scherversuchen (exemplarisch für Versuch M3)

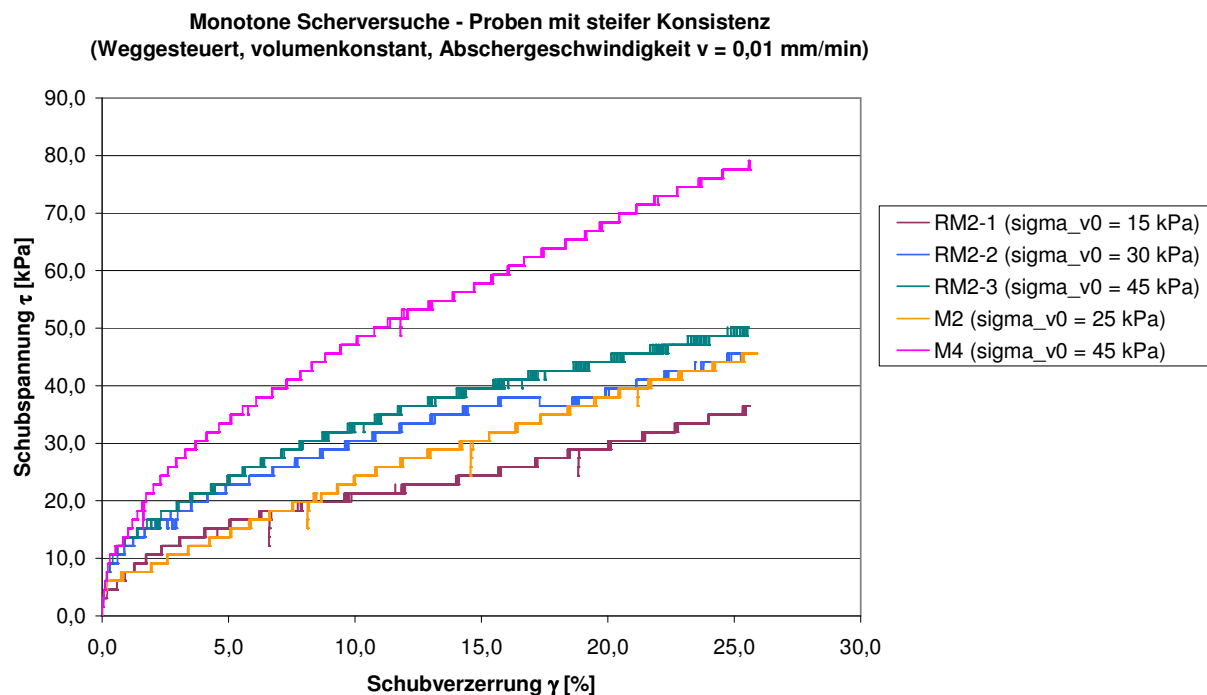


Abbildung 6.5: Entwicklung der Schubspannungen mit zunehmender Schubverzerrung in Abhängigkeit von der Anfangsnormalspannung (exemplarisch für die Versuche steifer Konsistenz)

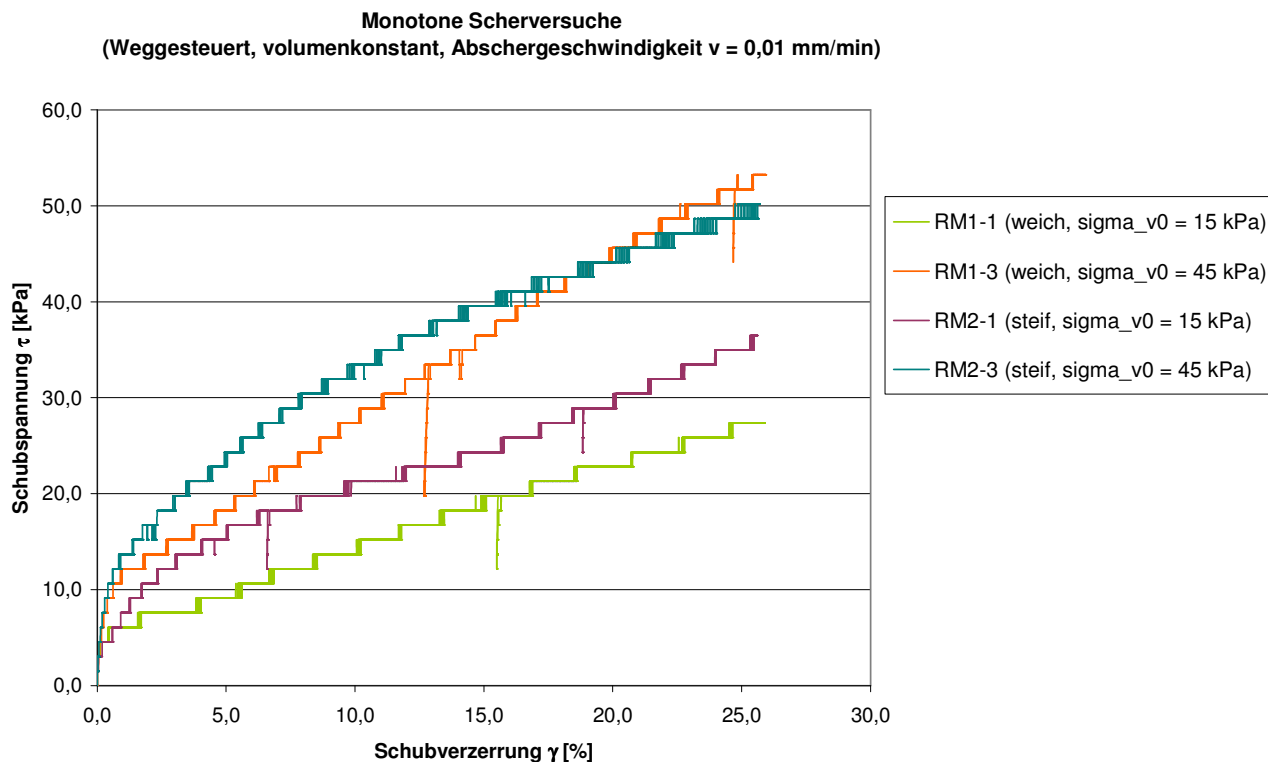


Abbildung 6.6: Entwicklung der Schubspannungen mit zunehmender Schubverzerrung in Abhängigkeit von der Konsistenz bei gleicher Anfangsnormalspannung (exemplarisch für die Versuche RM1-1 und RM2-1 bzw. RM1-3 und RM2-3)

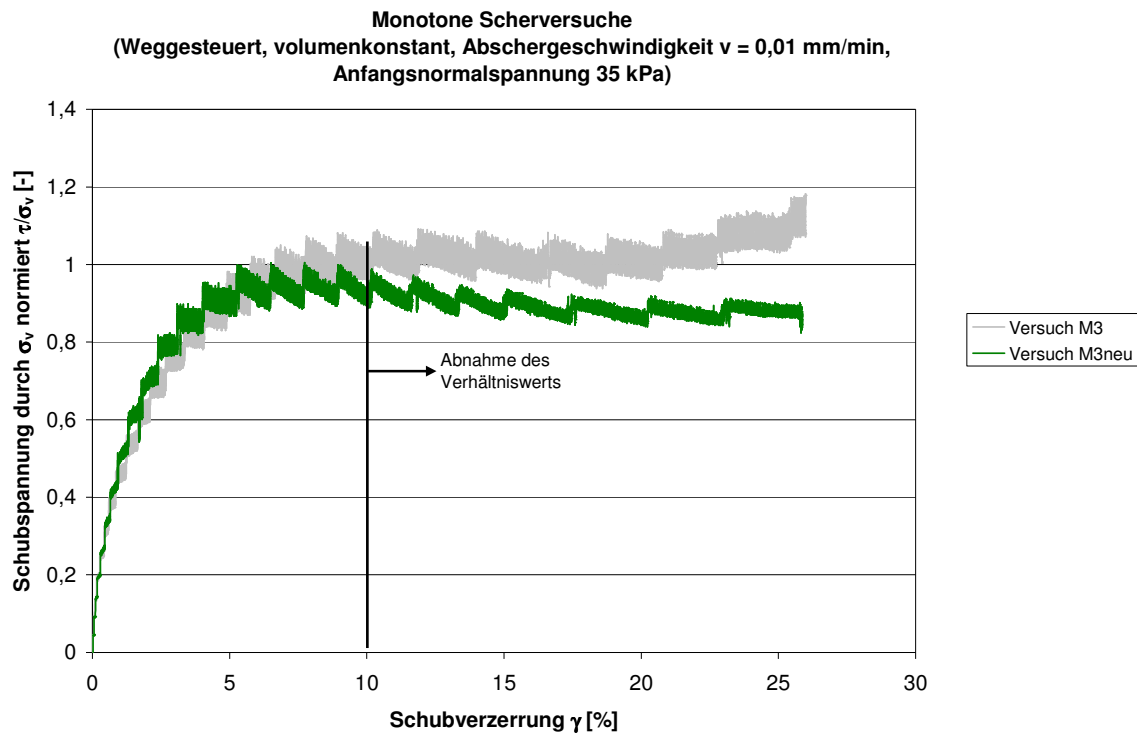


Abbildung 6.7: Entwicklung Schubspannung bezogen auf die Normalspannung mit zunehmender Schubverzerrung (exemplarisch Versuch M3 und Vergleich der Versuchsergebnisse nach Umbau des Gerätes (M3neu im Vergleich zu M3))

6.4.2 Zyklische Einfeldscherversuche

In Abbildung 6.8 sind die durchgeführten zyklischen Einfeldscherversuche im Interaktionsdiagramm dargestellt. Auf die Angabe von Zyklenzahlen im Sinne einer möglichen Zyklenzahl bis zum Erreichen eines bestimmten Versagenskriteriums wird auf Grund der oben erläuterten Probleme mit dem Einfeldschergerät verzichtet. Die Beurteilung der Versuchsergebnisse erfolgt qualitativ unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren Zyklenzahl, mittleres Schubspannungsniveau und zyklische Schubspannungsamplitude.

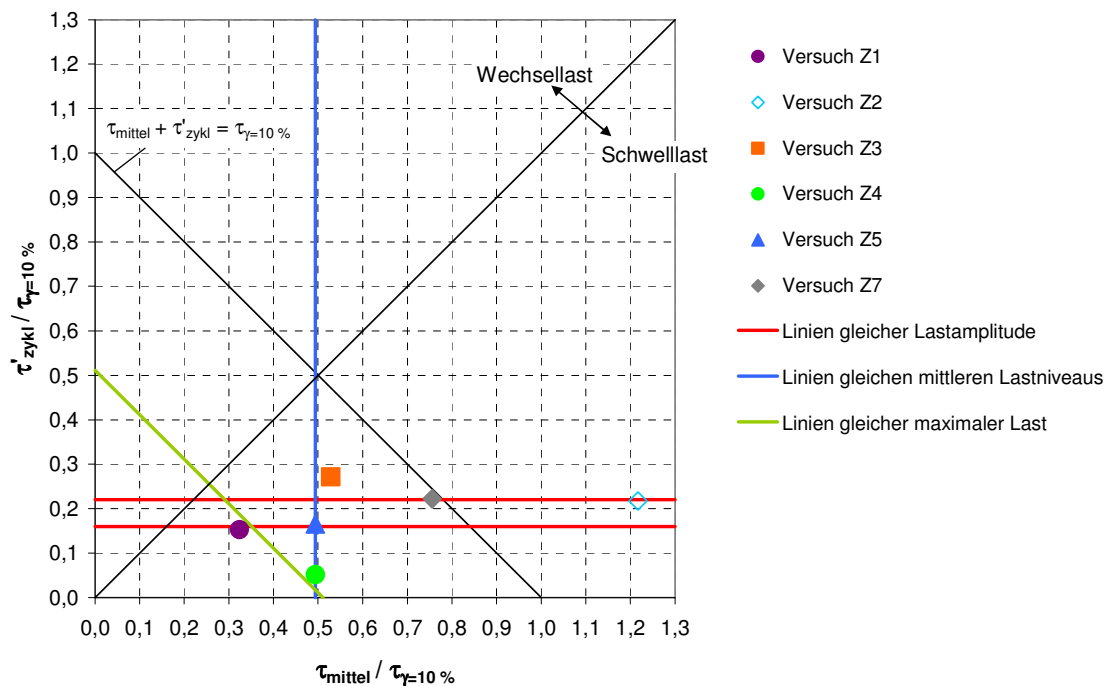


Abbildung 6.8: Darstellung der durchgeführten zyklischen Einfeldscherversuche im Interaktionsdiagramm

6.4.2.1 Entwicklung der mittleren plastischen Schubverzerrungen

Einfluss der Zyklenzahl

Bei allen durchgeführten zyklischen Versuchen im Schwelllastbereich kommt es zu akkumulierenden Schubverzerrungen, d.h. die mittlere Schubverzerrung γ_{mittel} nimmt mit zunehmender Zyklenzahl zu (siehe Abbildung 6.9). Bei den Versuchen Z2, Z3 und Z4 nähern sich die mittleren Schubverzerrungen einer horizontalen Asymptote an, was in der Literatur als "zyklische Beruhigung" oder "shakedown" bezeichnet wird (Fall (1) in Abschnitt 2.2.2). Bei den Versuchen Z5 und Z7 nimmt die mittlere Schubverzerrung im halblogarithmischen Maßstab linear zu. Dies wird in der Literatur als "zyklische (logarithmische) Beruhigung" (Fall (2) in Abschnitt 2.2.2) bezeichnet. Bei Versuch Z1 ist die Entwicklung der mittleren Schubverzerrung anhand der Versuchsergebnisse nicht eindeutig zu erkennen. Ein "zyklisches (schrittweises) Versagen" (Fall (3) in Abschnitt 2.2.2) ist bei keinem der Versuche festzustellen.

Einfluss des mittleren Schubspannungsniveaus und der zyklischen Schubspannungsamplitude

Bei gleichem Schubspannungsniveau sind die mittleren Schubverzerrungen umso größer, je höher die Schubspannungsamplitude ist (Versuche Z4 und Z5).

Bei annähernd gleicher maximaler Schubspannung (Versuche Z1 und Z4) oder gleicher Schubspannungsamplitude bzw. gleichem Verhältnis von $\tau'_{\text{zykl}} / \tau_{\gamma=10\%}$ (Versuche Z1 und Z5 bzw. Z7 und Z2) scheint sich ein höheres mittleres Schubspannungsniveau mit zunehmender Zyklenzahl günstig auszuwirken, d.h. die Zunahme der Schubverzerrungen fällt mit zunehmender Zyklenzahl geringer aus (siehe Abbildung 6.10).

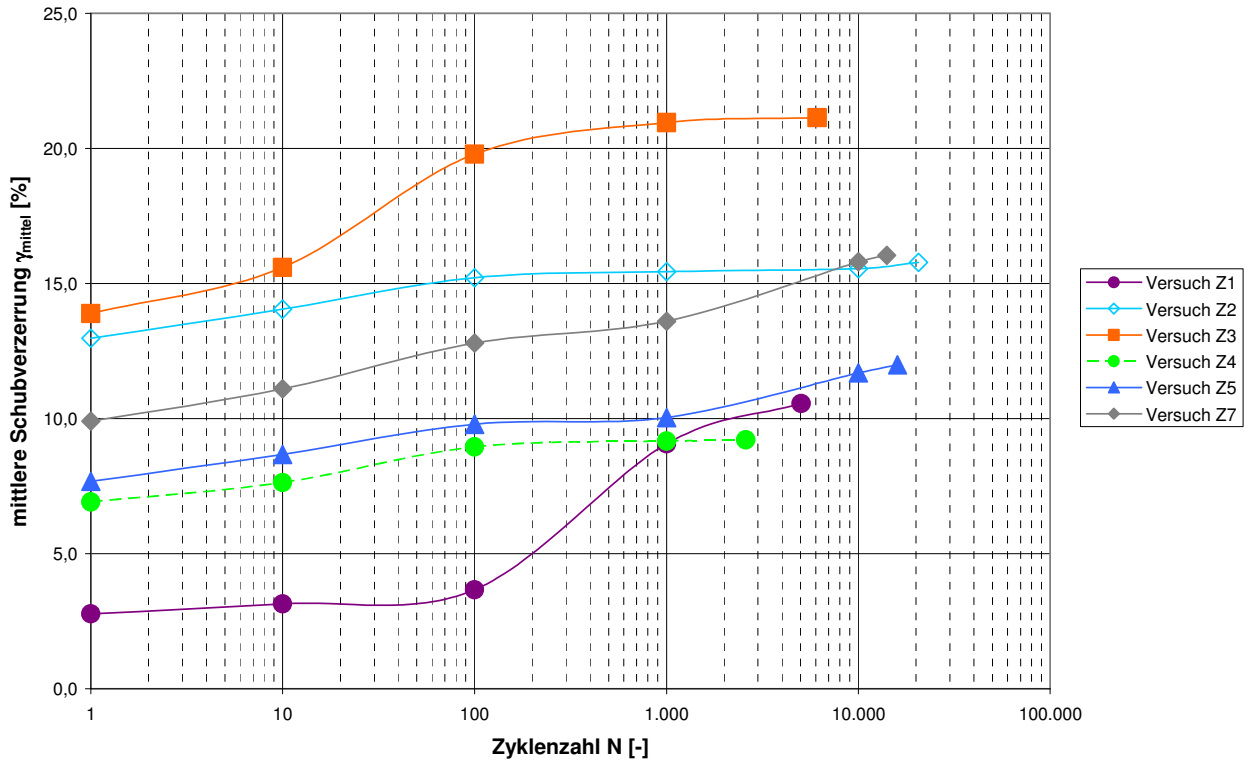


Abbildung 6.9: Darstellung der mittleren Schubverzerrungen im halblogarithmischen Maßstab

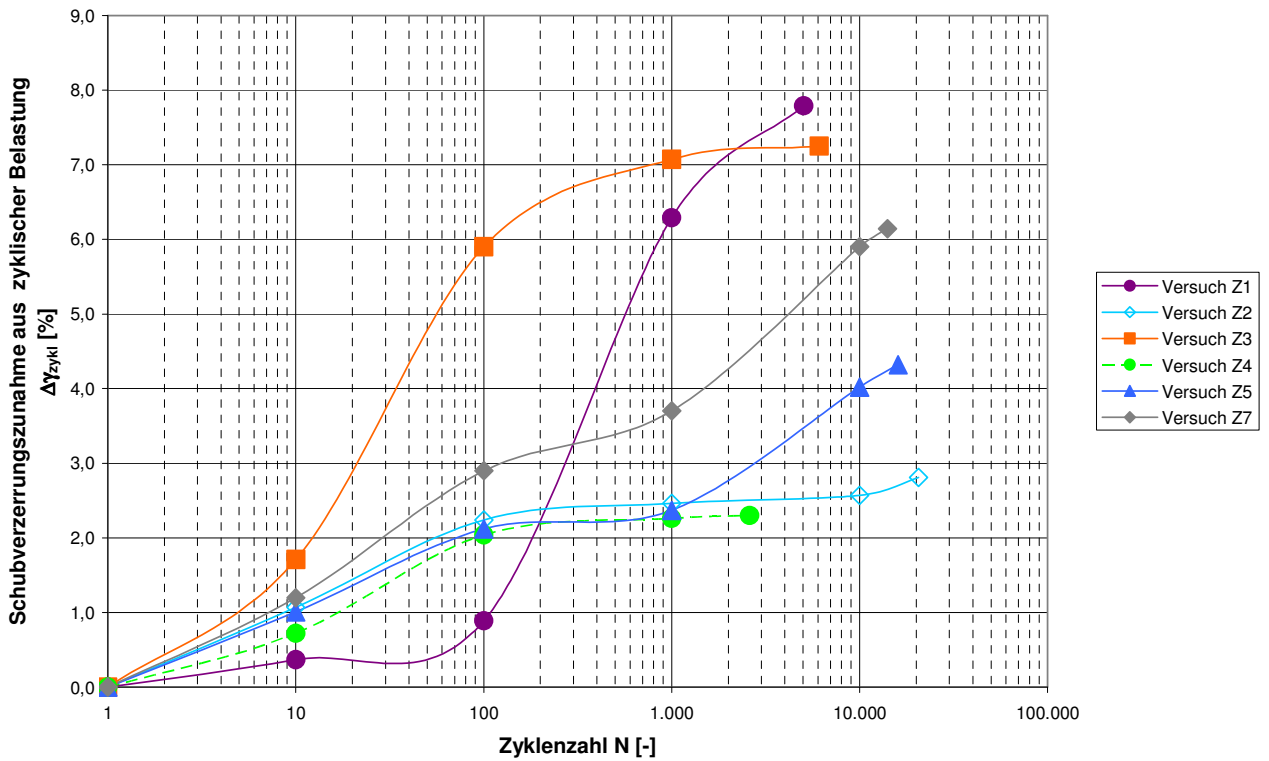


Abbildung 6.10: Darstellung der Zunahme der mittleren Schubverzerrungen für $N > 1$ im halblogarithmischen Maßstab

6.4.2.2 Entwicklung der Schubverzerrungsamplituden

Einfluss der Zyklenzahl

Die Schubverzerrungsamplituden γ'_{zykl} nehmen mit zunehmender Zyklanzahl ab. Bei den Versuchen Z1 und Z4 bleiben die Schubverzerrungsamplituden ab ca. 100 Zyklen annähernd konstant (siehe Abbildung 6.11).

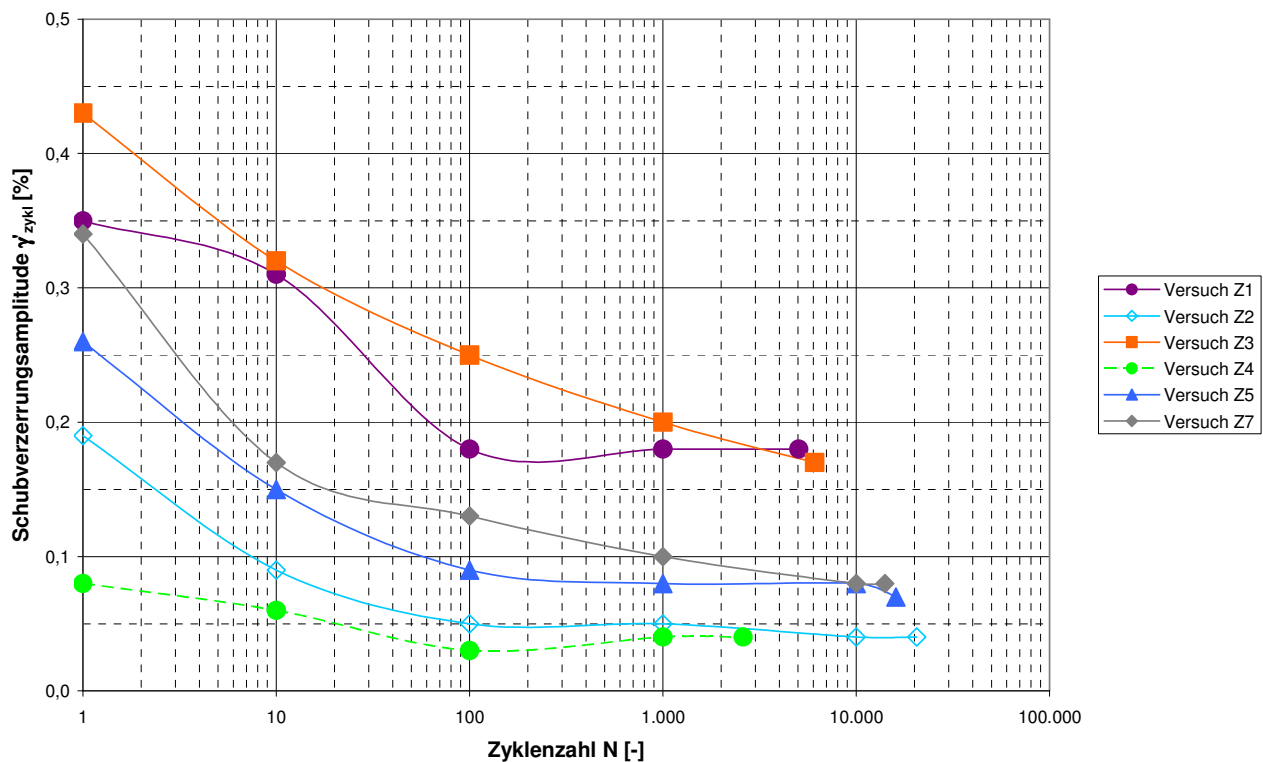


Abbildung 6.11: Entwicklung der Schubverzerrungsamplituden im halblogarithmischen Maßstab

Einfluss des mittleren Schubspannungsniveaus und der zyklischen Schubspannungsamplitude

Bei gleichem mittleren Schubspannungsniveau sind die Schubverzerrungsamplituden bei größerer zyklischer Schubspannungsamplitude größer (Versuche Z4 und Z5). Das Verhältnis der zyklischen Schubspannungsamplituden von Versuch Z5 zu Versuch Z4 beträgt 3,2. Das Verhältnis der Schubverzerrungsamplituden von Versuch Z5 zu Versuch Z4 nimmt mit zunehmender Zyklanzahl von 3,25 auf 2,0 bei $N = 1.000$ ab. Auf Grund der geringen Versuchsanzahl ist eine Übertragung auf andere Schubspannungsverhältnisse nicht möglich.

Bei gleicher Schubspannungsamplitude bzw. gleichem Verhältnis von $\tau'_{\text{zykl}} / \tau_{\gamma} = 10 \%$ sind die Schubverzerrungsamplituden umso kleiner, je höher das mittlere Schubspannungsniveau $\tau_{\text{mittel}} / \tau_{\gamma} = 10 \%$ ist (Versuche Z1 und Z5 bzw. Z7 und Z2). Dies widerspricht Ergebnissen aus der Literatur (z.B. KLEVEN/ANDERSEN, 1997), bei denen die Schubverzerrungsamplituden unabhängig vom Schubspannungsniveau bei gleichen Schubspannungsamplituden annähernd gleich groß sind. Die Anzahl der Versuche reicht nicht aus, um zu klären, inwieweit die unterschiedlichen Versuchsergeb-

nisse z.B. darauf zurückzuführen sind, dass in der Literatur meist Versuche an aufbereiteten Proben höchsten weicher Konsistenz durchgeführt wurden.

Bei annähernd gleicher maximaler Schubspannung wirkt sich ein höheres Schubspannungsniveau günstig auf die Größe der Schubverzerrungsamplituden aus (Versuch Z1 und Z4).

6.4.2.3 Entwicklung des Schubmoduls

Einfluss der Zyklenzahl

Entsprechend der Abnahme der Schubverzerrungsamplituden nimmt der Schubmodul bei den Versuchen Z2, Z3, Z5 und Z7 mit zunehmender Zyklenzahl zu (siehe Abbildung 6.12). Bei den Versuchen Z1 und Z4 bleiben die Schubverzerrungsamplituden ab ca. $N = 100$ konstant, woraus auch der annähernd konstante Schubmodul resultiert.

Einfluss des mittleren Schubspannungsniveaus und der zyklischen Schubspannungsamplitude

Bei gleichem Schubspannungsniveau ist der Schubmodul bei Versuch Z5 trotz der größeren Schubspannungsamplitude größer als bei Versuch Z4.

Bei gleicher Schubspannungsamplitude bzw. gleichem Verhältnis von $\tau'_{\text{zykl}} / \tau_{\gamma} = 10 \%$ bewirkt eine Steigerung des Schubspannungsniveaus bei insgesamt relativ niedrigen Schubspannungsniveaus (Versuche Z1 und Z5) eine Erhöhung des Schubmoduls. Bei Versuchen mit insgesamt relativ hohem Schubspannungsniveau (Versuche Z7 und Z2) ist dieser Effekt nicht festzustellen.

Bei annähernd gleicher maximaler Schubspannung (Versuche Z1 und Z4) zeigt sich ebenfalls eine höhere Schubsteifigkeit mit höherem mittleren Schubspannungsniveau.

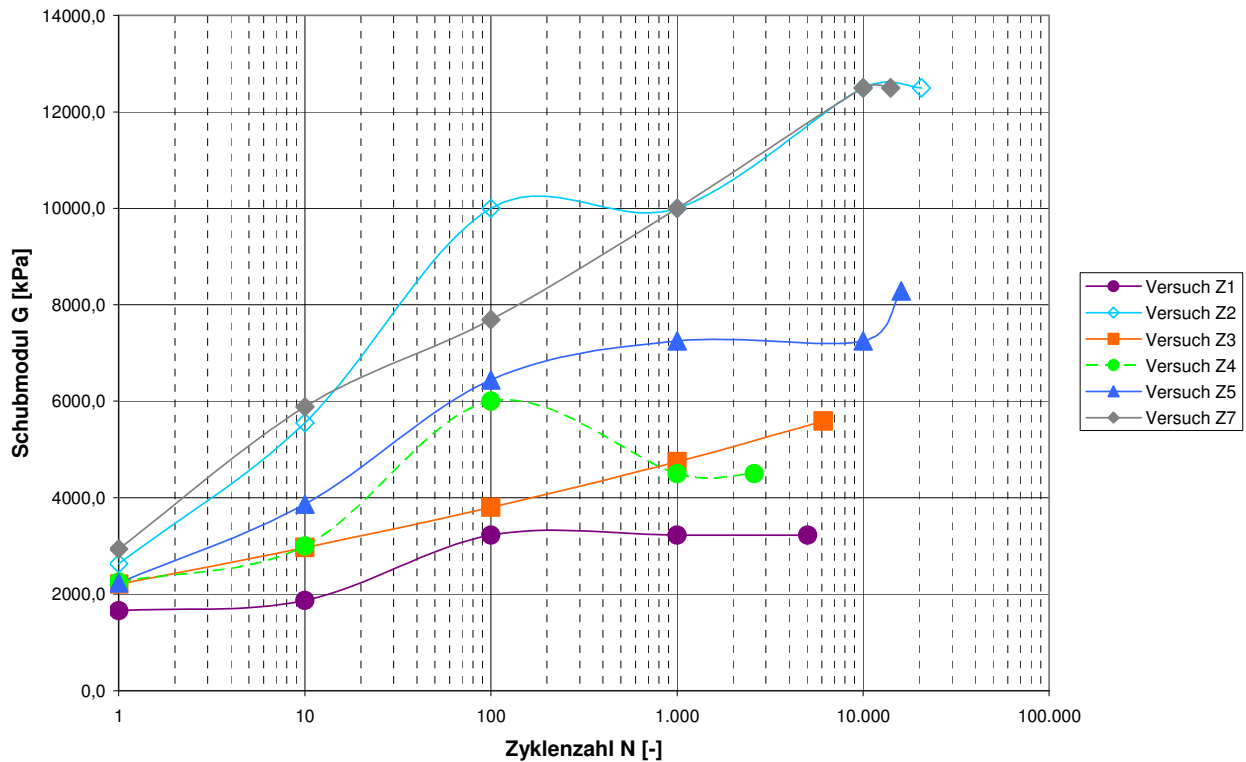


Abbildung 6.12: Entwicklung des Schubmoduls im halblogarithmischen Maßstab

6.4.2.4 Entwicklung der Normalspannungen

Während eines Einzelzyklus nehmen die Normalspannungen mit steigender Schubspannung zu (Dilatanz) und mit sinkender Schubspannung ab (Kontraktanz). Über den gesamten Versuchsverlauf gesehen, nehmen die Normalspannungen mit zunehmender Zyklenzahl ab (siehe Abbildung 6.13). Bei den Versuchen Z3 und Z2 ist davon abweichend bis Zyklenzahlen von ca. $N = 1.000$ eine Zunahme der Normalspannungen zu erkennen, was einem dilatanten Verhalten der Bodenprobe entspricht. Bei höheren Zyklenzahlen nehmen die Normalspannungen dann ebenfalls ab. Außer bei Versuch Z2 sind die Normalspannungen immer niedriger als die Ausgangsnormalspannung σ_{v0} (siehe Abbildung 6.14). Dies entspricht einem insgesamt kontraktanten Verhalten der Proben unter zyklischer Belastung.

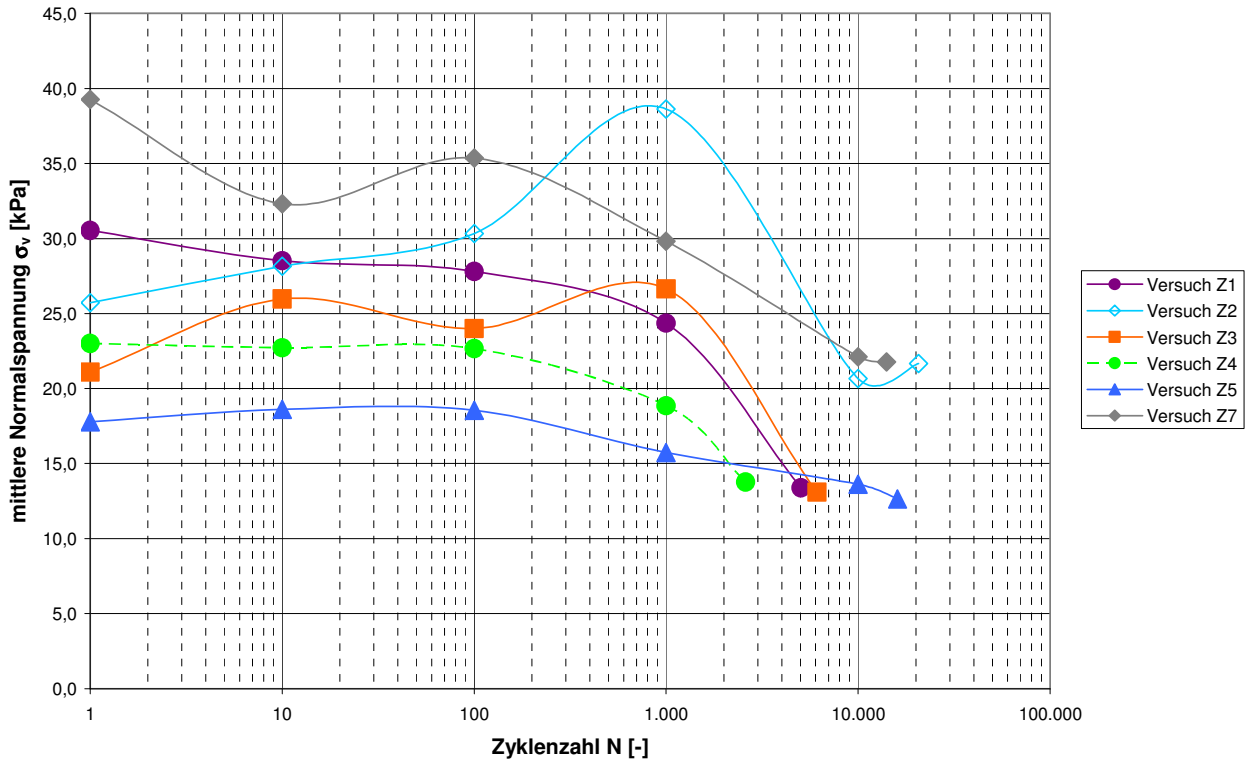


Abbildung 6.13: Entwicklung der Normalspannung im halblogarithmischen Maßstab

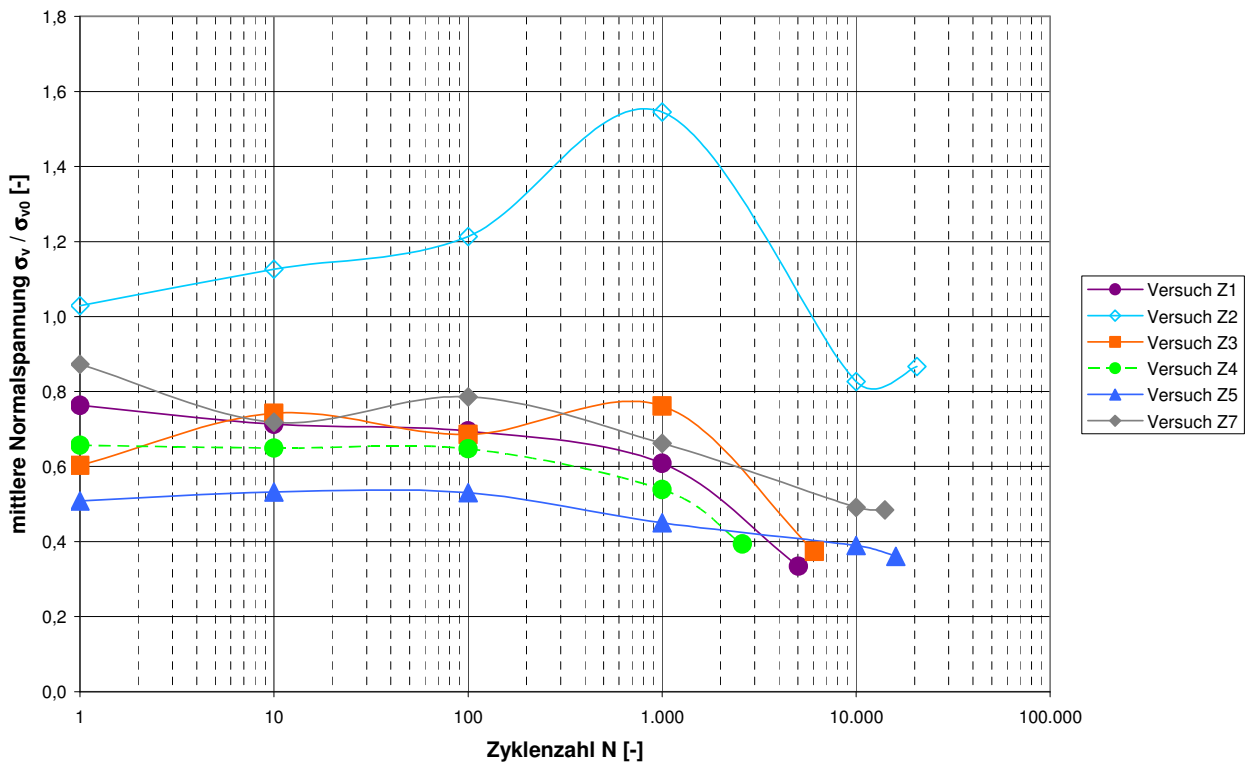


Abbildung 6.14: Normalspannung im Verhältnis zur Ausgangsnormalspannung im halblogarithmischen Maßstab

6.5 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Pfahlversuchen unter zyklischer Zug-schwellbelastung

Bei den Laborversuchen am Bodenelement unter Schwellbelastung kommt es zu akkumulierenden Schubverzerrungen, d.h. die mittlere Schubverzerrung nimmt mit zunehmender Zyklenzahl zu. Bei den Pfahlversuchen wurde ebenfalls mit zunehmender Zyklenzahl eine zunehmende mittlere Pfahlverschiebung beobachtet.

Während es bei den im Labor ermittelten mittleren Schubverzerrungsverläufen zu einer "zyklischen Beruhigung", einem "shakedown" oder einer "zyklischen (logarithmischen) Beruhigung" kommt, nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen über-log-linear zu, was einem "zyklischen schrittweisen Versagen" entspricht.

Bei den Laborversuchen wurde mit zunehmender Zyklenzahl eine Abnahme der Schubverzerrungsamplituden beobachtet, wohingegen bei den Pfahlversuchen unter Zug-schwellbelastung die Verschiebungsamplituden konstant blieben.

Eine Zunahme der Verschiebungsamplituden bzw. der Schubverzerrungsamplituden unter Schwellbelastung wurde weder in den Pfahlversuchen noch in den Laborversuchen festgestellt.

Sowohl bei den Pfahlversuchen als auch bei den Laborversuchen wirkt sich bei gleicher maximaler zyklischer Belastung ein höheres Last- bzw. Schubspannungsniveau günstig auf den Verlauf der mittleren Pfahlverschiebungen bzw. mittleren Schubverzerrungen und Verschiebungsamplituden bzw. Schubverzerrungsamplituden aus.

In den Laborversuchen wurde gegenüber den Pfahlversuchen unter Zug-schwellbelastung ein günstigeres Systemverhalten beobachtet. Inwieweit sich hier das insgesamt sehr niedrige Spannungsniveau bei gleichzeitig nicht vollgesättigten Bodenproben oder eine leichte Überkonsolidierung der Bodenproben positiv auf das Last-Verschiebungsverhalten auswirkt, wurde im Rahmen der Forschung nicht genauer untersucht. Hier besteht zusätzlicher Forschungsbedarf, um genauer beurteilen zu können, inwieweit sich Ergebnisse aus zyklischen Scherversuchen im Labor zur Prognose von Pfahlverschiebungen auf Grund axial zyklischer Einwirkungen nutzen lassen.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten zyklischen Einfachscherversuche im Labor lassen noch keinen Rückschluss auf die zu erwartenden Pfahlverschiebungsverläufe unter zyklischer Zug-schwellbelastung zu. Es wird daher darauf verzichtet, aus den im Labor gemessenen Schubverzerrungen Rückschlüsse auf zu erwartende Pfahlverschiebungen zu ziehen.

7 Standsicherheitsnachweise zyklisch axial belasteter Mikropfähle in bindigen Böden auf Grundlage der Versuchsergebnisse

7.1 Zur Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, ist für Mikropfähle unter statischer Zugbelastung der Nachweis zu führen, dass der Bemessungswert des charakteristischen Herausziehwiderstandes kleiner ist als der Bemessungswert der Einwirkungen. Nach Gleichung 2.1 ergibt sich der Bemessungswert des Pfahlwiderstandes zu

$$R_d = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s,t} \cdot \eta_M} \quad \text{mit } \gamma_{s,t} = 1,15 \text{ und } \eta_M = 1,25. \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Im Folgenden wird vereinfachend davon ausgegangen, dass auf der Einwirkungsseite veränderliche Lasten nur aus einer zyklischen Belastung resultieren und die angenommene zyklische Belastung der maximal zu erwartenden zyklischen Einwirkung auf den Pfahl entspricht. Zur Ermittlung des Bemessungswertes der Einwirkungen wird im Fall A (siehe Abbildung 7.1 links) davon ausgegangen, dass die ständige Einwirkung F_G der minimalen zyklischen Belastung F_{\min} entspricht und die zyklische Lastspanne F_{zykl} (2-fache Lastamplitude) der veränderlichen Einwirkung F_Q . Im Fall B (siehe Abbildung 7.1 rechts) entspricht die ständige Einwirkung F_G der mittleren zyklischen Belastung F_{mittel} und die zyklische Lastamplitude F'_{zykl} der veränderlichen Einwirkung F_Q . Der für die Bemessung maßgebende Fall ist in der Praxis auf Grund der tatsächlichen Belastungssituation auszuwählen. Der Fall, dass die ständige Einwirkung der maximalen Belastung entspricht, ist nicht möglich, da die zyklische Belastung dann günstig wirken würde, und günstige veränderliche Einwirkungen sind bei der Bemessung nicht anzusetzen.

Der Bemessungswert der Einwirkungen ergibt sich somit zu:

$$\text{Fall A: } F_d = F_{\min} \cdot \gamma_G + 2 \cdot F'_{\text{zykl}} \cdot \gamma_Q \quad (\text{Gl. 7.2a})$$

$$\text{Fall B: } F_d = F_{\text{mittel}} \cdot \gamma_G + F'_{\text{zykl}} \cdot \gamma_Q \quad (\text{Gl. 7.2b})$$

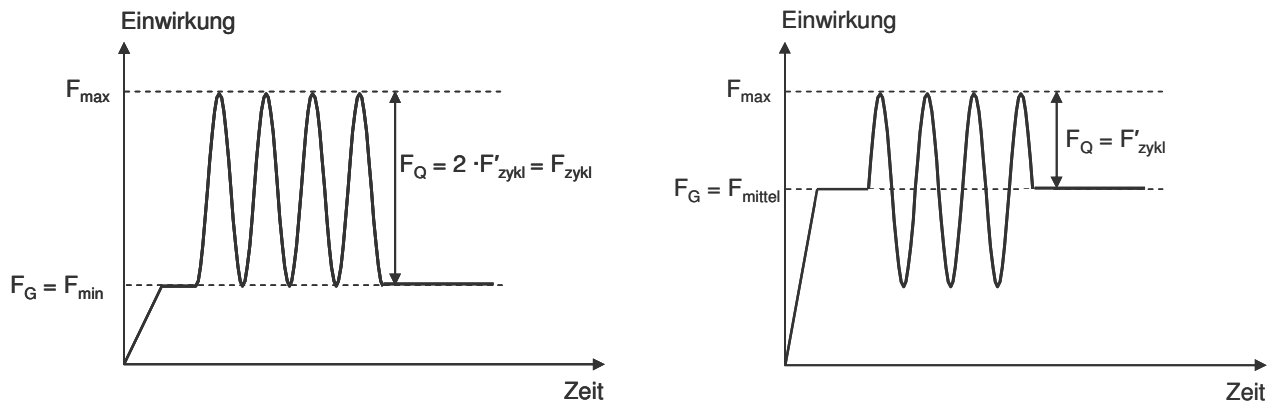


Abbildung 7.1: Einwirkungen gemäß Fall A (links) und Fall B (rechts)

Für beide Fälle ist in Abbildung 7.2 (links: Fall A, rechts: Fall B) für die ständige Bemessungssituation BS-P ($\gamma_G = 1,35$, $\gamma_Q = 1,5$) nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 der Bereich möglicher Lastkombinationen rot hinterlegt, für die der Bemessungswert der Einwirkungen nach Gleichung 7.2a bzw. 7.2b kleiner ist als der Bemessungswert des Pfahlwiderstandes nach Gleichung 7.1. Je nachdem, welche Last als ständige Einwirkung maßgebend ist, unterscheiden sich die möglichen zyklischen Lastamplituden (= veränderliche Einwirkungen) geringfügig voneinander. Die gestrichelte Linie bei $F'_{zykl} / R_{t;k} = 0,1$ markiert die untere Grenze, unterhalb der nach EA-Pfähle (2012) nicht mit einer Verschlechterung des Tragverhaltens auf Grund zyklischer Einwirkungen zu rechnen ist.

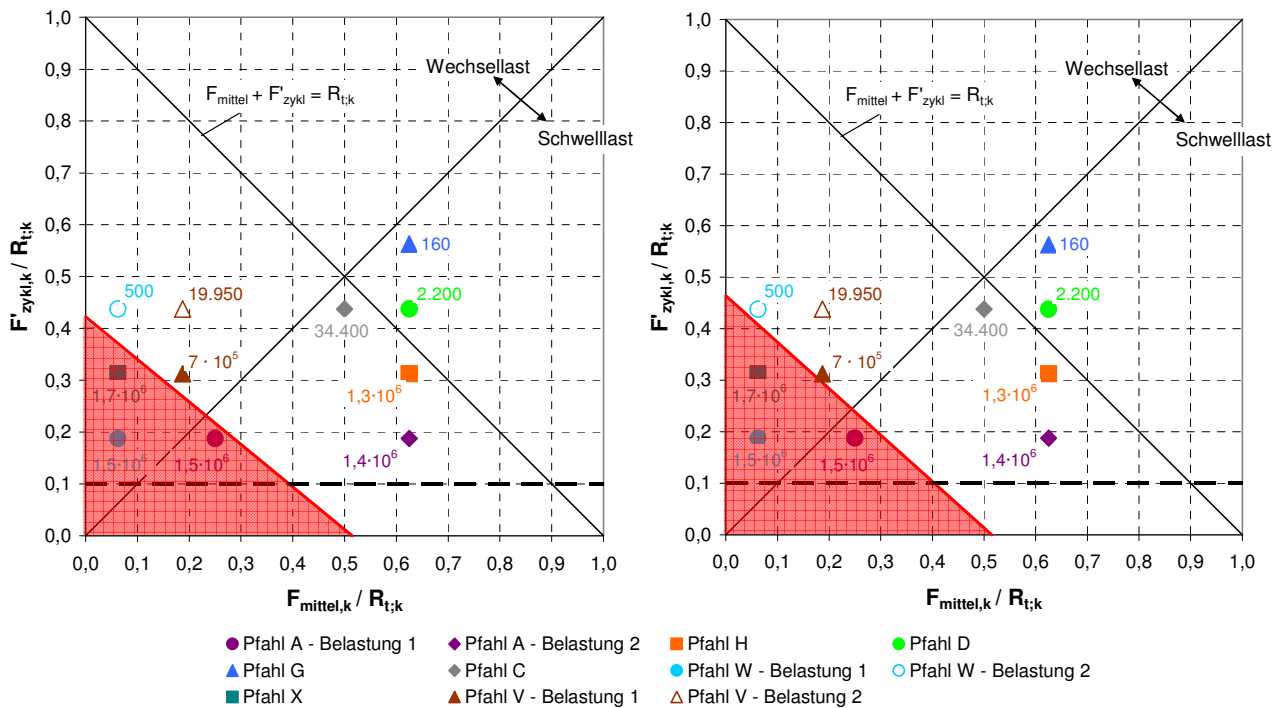


Abbildung 7.2: Interaktionsdiagramm (rot hinterlegt: Zulässige Lastkombinationen beim Nachweis nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010, BS-P, links: Fall A, rechts: Fall B).

Bei allen Versuchen, die innerhalb des roten Bereichs liegen (Pfahl A-Belastung 1, Pfahl W-Belastung 1 und Pfahl X), lagen die mittleren Pfahlverschiebungen bei der maximal untersuchten Zyklenzahl, die zwischen $N = 4 \cdot 10^4$ und $N = 6 \cdot 10^4$ lag, bei unter 1 mm. Durch Extrapolation aus den Verschiebungsverläufen konnten Zyklenzahlen von mehr als $N = 10^6$ abgeschätzt werden, bis die Verschiebungen das Versagenskriterium einer Pfahlverschiebung oder einer Verschiebungsspanne von mehr als 10 % des Pfahldurchmessers (=15 mm) überschreiten. Bis zu einer Zyklenzahl von $N = 10^6$ ist für diese untersuchten Lastkombinationen unter Zugschwell- und Wechsellasten somit nicht mit einem Versagen auf Grund zyklischer Einwirkungen zu rechnen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen im Anschluss an eine Zugschwellbelastung (Abschnitt 4.3.6.1), bei denen keine Tragfähigkeitsverminderung infolge der zyklischen Belastung festgestellt wurde, ist für das untersuchte Pfahl-Boden-System unter Zugschwellbelastung im Grenzzustand der Tragfähigkeit keine weitere Abminderung des charakteristischen Pfahlwiderstands gegenüber der Abminderung unter statischer Belastung nach Gleichung 7.1 erforderlich.

Versuche unter Druckschwellbelastung wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. In der Literatur (z.B. EA-Pfähle, 2012) wird bei Druckschwellbelastung in der Regel von einem günstigeren Last-Verschiebungsverhalten als bei Zugschwellbelastung ausgegangen, so dass auch bei Druckschwellbelastung keine weitere Abminderung des charakteristischen Pfahlwiderstands gegenüber der Abminderung unter statischer Belastung nach Gleichung 7.1 erforderlich sein dürfte.

Bei nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 im Grenzzustand der Tragfähigkeit zulässigen Lastkombinationen (rot hinterlegt in Abbildung 7.2) sind bei Wechsellasten mit zyklischen Lastamplituden bis zu 30 % des charakteristischen Herausziehwiderstands (Pfahl X) ebenfalls Zyklenzahlen bis zu ca. $N = 10^6$ möglich, ohne dass ein Pfahlversagen auftritt. Bei höheren Amplituden ist auf Grund des Versuchsergebnisses bei Pfahl W-Belastung 2 davon auszugehen, dass ein Versagen bei deutlich unter $N = 10^6$ zu erwarten ist.

Für das untersuchte Pfahl-Boden-System unter Wechselbelastung ist somit bei Amplituden von mehr als 30 % des charakteristischen Herausziehwiderstands die zulässige Anzahl an Lastwechseln zu begrenzen. Eine Festlegung der zulässigen Zyklenzahlen in diesem Bereich ist anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse noch nicht möglich. Auch in der Literatur fehlen für diesen Lastbereich entsprechende Feld- oder Modellversuche in bindigen Böden.

Zusätzlich wurde bei einer durchgeführten post-zyklischen statischen Pfahlprobelastung im Anschluss an eine Wechselbelastung (Abschnitt 4.4.6.1) eine Abnahme des Herausziehwiderstandes um bis zu 20 % (Pfahl V) festgestellt. Auf Grund der Singularität dieses Ergebnisses lässt sich nicht abschätzen, inwieweit dieser Tragfähigkeitsverlust repräsentativ für die anderen zyklischen Wechsellastversuche ist. Ergebnisse an Modellpfählen von POULOS (1981) zeigen einen Tragfähigkeitsverlust unter Wechsellasten bei einem Verhältnis $F_{\text{mittel}}/R_{t;k} = 0,1$ erst bei einem Verhältnis $F'_{\text{zykl}}/R_{t;k} > 0,5$. Untersuchungen von MCMANUS ET AL. (1994) ergeben bei symmetrischen Wechsellasten ($F_{\text{mittel}}/R_{t;k} = 0$) Tragfähigkeitsverluste von 20 % bei einem Verhältnis $F'_{\text{zykl}}/R_{t;k} = 0,25$ und Tragfähigkeitsverluste von 35 % bei einem Verhältnis $F'_{\text{zykl}}/R_{t;k} = 0,37$.

Auf Grund der bisher vorliegenden Ergebnisse sollte bei Wechsellasten tendenziell von einer Reduktion der Pfahltragfähigkeit ausgegangen werden. Für die vorliegenden Versuche wird die Verringerung des Pfahlwiderstandes zu ca. 20 % unter Wechselbelastung abgeschätzt.

In Abbildung 7.3 sind analog zu Abbildung 7.2 die Bereiche zulässiger Lastkombinationen unter Berücksichtigung einer Verringerung des Pfahlwiderstandes um 20 % bei Wechselbelastung dargestellt.

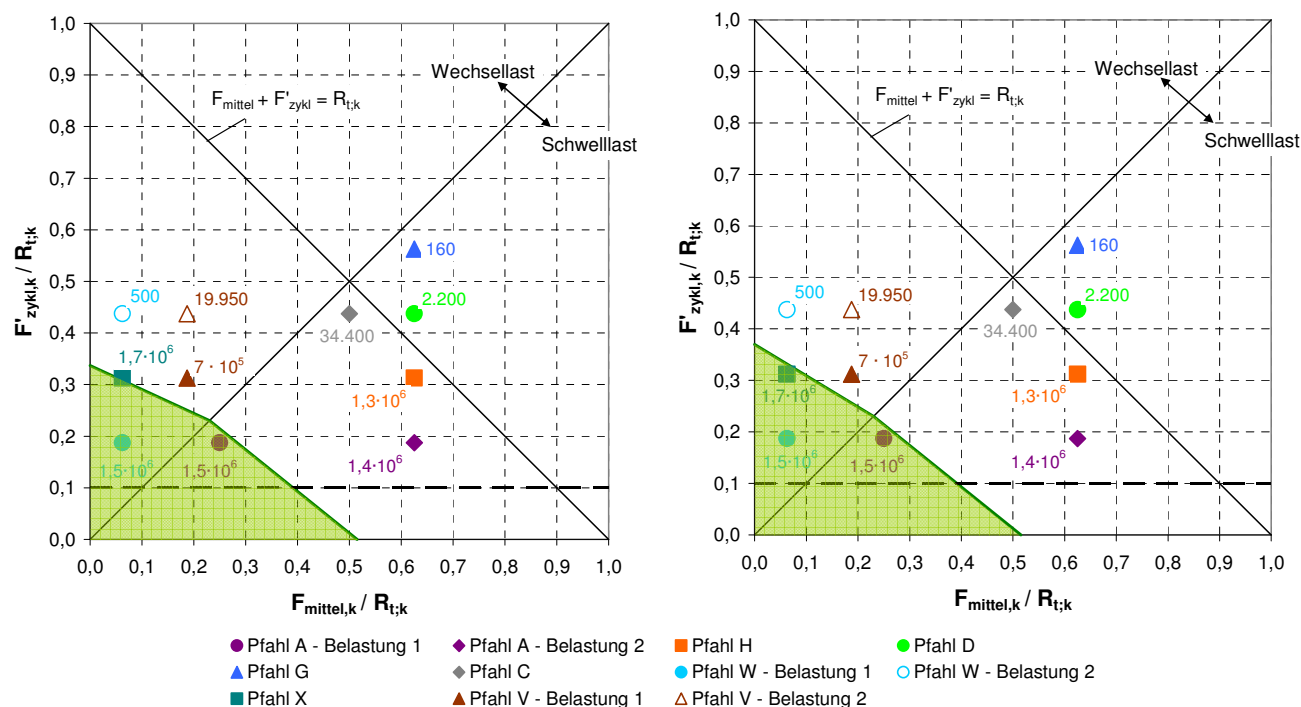


Abbildung 7.3: Interaktionsdiagramm (grün hinterlegt: Zulässige Lastkombinationen beim Nachweis nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010, BS-P unter Berücksichtigung einer Verringerung des Pfahlwiderstandes unter Wechselbelastung um 20 %, links: Fall A, rechts: Fall B).

7.2 Zur Nachweisführung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Gemäß EA-Pfähle (2012) ist beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen, dass die auftretende Verschiebung des Pfahls infolge ständiger, veränderlicher und zyklischer Einwirkungen nach einer entsprechenden Lastzyklenzahl N kleiner ist als eine vorgegebene zulässige Verschiebung:

$$vorh. s_k \leq zul. s_k.$$

In Abbildung 7.4 sind in Interaktionsdiagrammen für die durchgeführten zyklischen Versuche mögliche Zyklenzahlen für eine zulässige Verschiebung von 15 mm, 10 mm und 5 mm dargestellt. Die Werte ergeben sich entweder aus den Verschiebungsverläufen oder wurden daraus extrapoliert. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Pfahlversuche zeigt sich, dass bei

zulässigen Verschiebungen von 10 mm im Bereich zulässiger Lastkombinationen noch ca. $N = 10^6$ Lastwechsel möglich sind.

Bei kleineren zulässigen Verschiebungen ist im Bereich möglicher Lastkombinationen zusätzlich die Anzahl an Zyklen zu reduzieren.

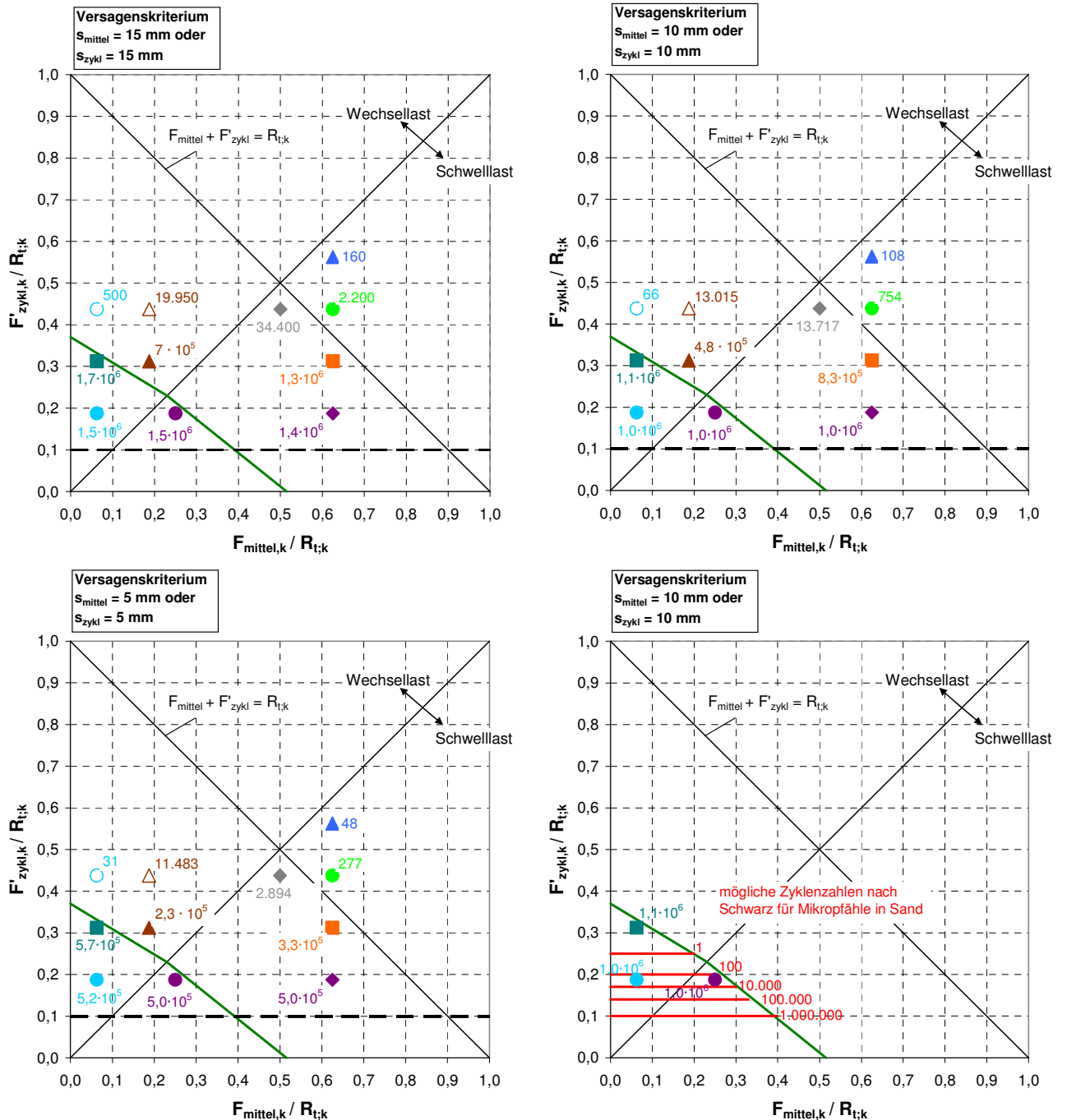


Abbildung 7.4: Interaktionsdiagramme mit Angabe der aus den Versuchen ermittelten möglichen Lastzyklenzahlen für zulässige Verschiebungen von 5 mm, 10 mm oder 15 mm (grüne Linie: Grenze zulässiger Lastkombinationen beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010, BS-P unter Berücksichtigung einer Verringerung des Pfahlwiderstandes unter Wechselbelastung um 20 %, Fall B).

Zum Vergleich sind in Abbildung 7.4 (rechts unten) mögliche Zyklenzahlen bei einer zulässigen Verschiebung von 10 mm für Mikropfähle in Sand angegeben, die auf den Versuchen von SCHWARZ (2002) beruhen. Bei den in Ton durchgeführten Pfahlversuchen sind deutlich größere Zyklenzahlen möglich als bei einem vergleichbaren Pfahlsystem in Sanden. Dies zeigt, dass Pfähle in nichtbindigen Böden in der Regel ungünstiger auf zyklische Einwirkungen reagieren als in bindigen Böden.

Da sich in Abhängigkeit von der jeweils als zulässig definierten mittleren Verschiebung oder Verschiebungsspanne im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sehr unterschiedliche mögliche Zyklenzahlen ergeben, ist die Angabe von möglichen Zyklenzahlen für eine Bodenart mit Hilfe von Interaktionsdiagrammen nur dann zielführend, wenn für Mikropfähle ein allgemeine zulässige Verschiebung definiert wird. Da die Angaben in der Literatur zu möglichen Zyklenzahlen in bindigen Böden bisher auf unterschiedlichsten Versagenskriterien beruhen, ist die Erstellung eines Interaktionsdiagrammes, das allgemein für bindige Böden gilt, derzeit noch nicht möglich.

Im Folgenden wird daher untersucht, inwieweit die in den Versuchen aufgetretenen mittleren Pfahlverschiebungen mit Hilfe unterschiedlicher Berechnungsansätze (siehe auch Abschnitt 2.2) nachvollzogen werden können. Untersucht wird dabei, ob die benötigten Eingangs- und Modellparameter der einzelnen Berechnungsansätze bodenspezifische Konstanten darstellen oder außerdem von der Größe der zyklischen Einwirkungen abhängen.

7.2.1 Abschätzung der Pfahlverschiebungen unter zyklischer Belastung anhand der Kriechmaße aus einer statischen Pfahlprobelastung

Auf Grund des hohen Aufwandes zyklischer Pfahlbelastungen wird geprüft, inwieweit sich zu erwartende Pfahlverschiebungen unter axial zyklischer Belastung mit Hilfe der Kriechmaße aus statischen Pfahlprobelastungen abschätzen lassen. In Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6 sind dazu jeweils die gemessenen mittleren Pfahlverschiebungen den aus den Kriechmaßen für eine Laststufe entsprechend F_{\max} bzw. entsprechend F_{mittel} ermittelten Verschiebungen gegenübergestellt.

Die Verschiebungen über das Kriechmaß k_s wurden zu

$$s_{\text{mittel}}(N) = s_{\text{mittel}}(N=1) + k_s \cdot \log N \quad (\text{Gl. 7.3})$$

mit

s_{mittel} mittlere Pfahlverschiebung

N Zyklenzahl

k_s Kriechmaß aus statischer Probelastung

ermittelt.

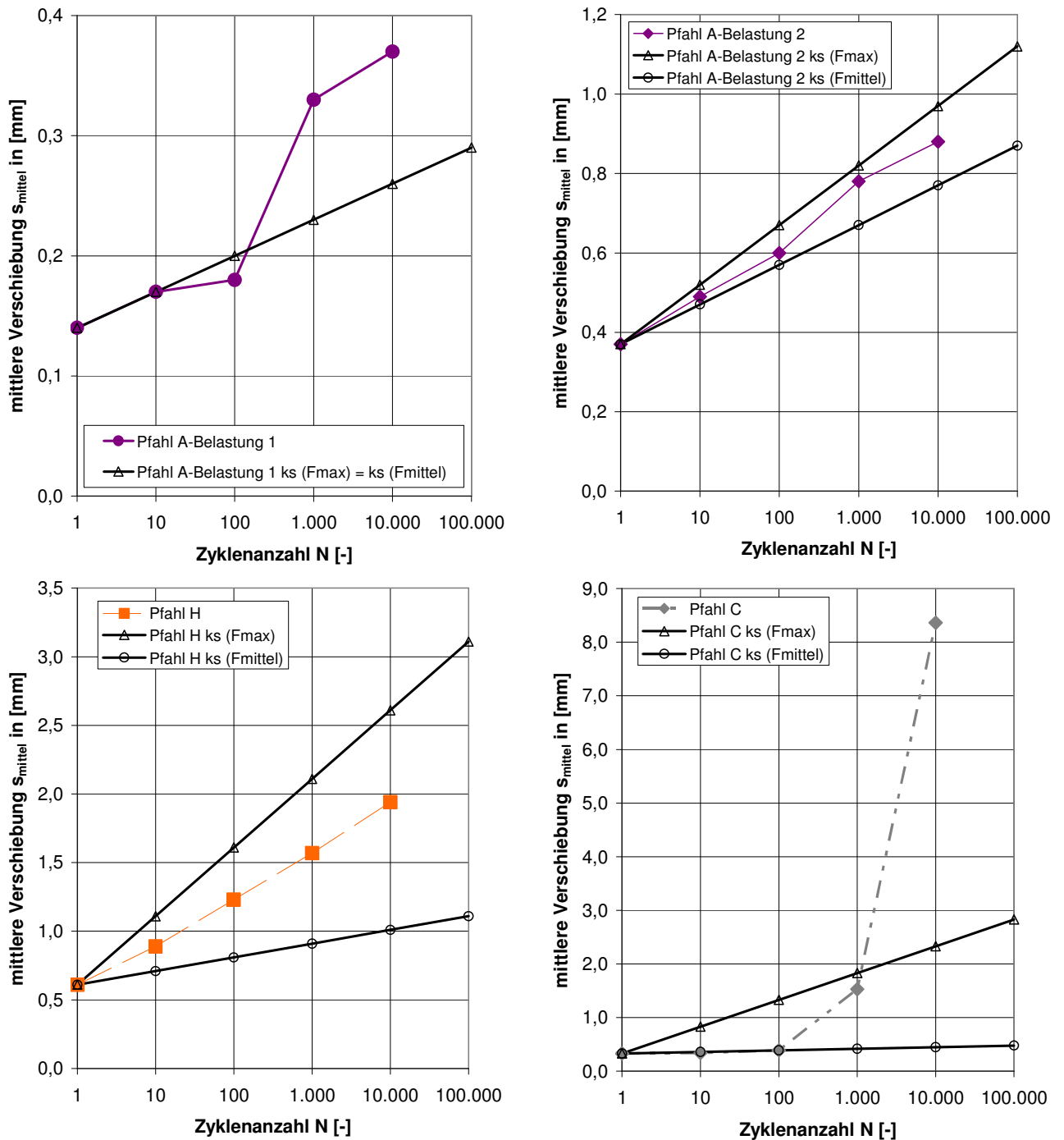


Abbildung 7.5: Vergleich der gemessenen und über Kriechmaße aus statischen Pfahlprobelastung ermittelten Pfahlverschiebungen für Zugschwellversuche

Bei den Zugschwellversuchen (siehe Abbildung 7.5) kann die auftretende mittlere Pfahlverschiebung mit Hilfe der Kriechmaße dann relativ gut abgeschätzt werden, wenn das Verhältnis von $F_{\text{max}}/F_{\text{mittel}}$ bzw. das Verhältnis von $F'_{\text{zykl}}/F_{\text{mittel}}$ klein ist (siehe Pfahl A-Belastung 2 und Pfahl H). Je größer die Lastamplituden im Verhältnis zum mittleren Lastniveau werden, umso stärker beeinflusst die zyklische Einwirkung das Last-Verschiebungsverhalten und die Verschiebungen nehmen im Vergleich zu den aus den Kriechmaßen ermittelten Verschiebungen überproportional zu (Pfahl A-Belastung 1 und Pfahl C). Für die durchgeführten Zugschwellversuche

können die Verschiebungen bis zu einem Verhältnis von $F'_{\text{zykl}}/F_{\text{mittel}} = 0,5$ (Pfahl H) mit Hilfe der Kriechmaße aus den statischen Pfahlprobelastungen abgeschätzt werden. Zur Beurteilung, ob sich dies auf andere Pfahlsysteme in bindigen Böden übertragen lässt, sind weitere Untersuchungen notwendig. Für die Pfähle D und G wurde keine Auswertung vorgenommen, da die maximale Last während der zyklischen Belastung über der statischen Referenztragfähigkeit lag.

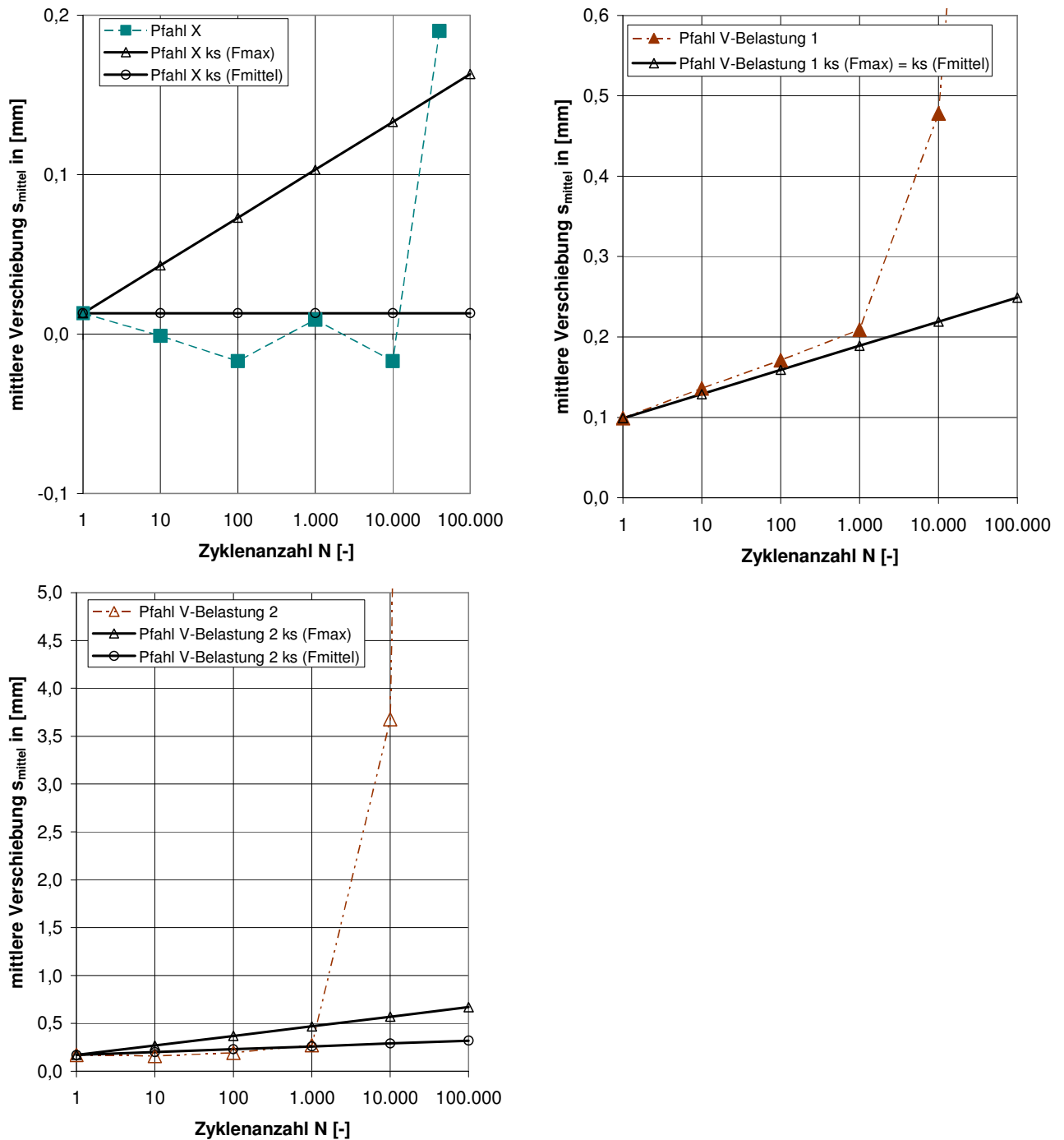


Abbildung 7.6: Vergleich der gemessenen und über Kriechmaße aus statischen Pfahlprobelastung ermittelten Pfahlverschiebungen für Wechsellastversuche

Bei den Wechsellastversuchen (siehe Abbildung 7.6) ist eine Abschätzung über die Kriechmaße bei Pfahl V-Belastung Belastung 1 und Belastung 2 für geringe Zyklenzahlen möglich, danach überwiegt der Einfluss aus der zyklischen Wechselbelastung. Bei Pfahl X trat zunächst eine leichte Pfahlsetzung ein, bevor die Verschiebungen in Zugrichtung überproportional anstiegen. Hier liefert eine Abschätzung mit Hilfe der Kriechmaße ein wenig zutreffendes Ergebnis.

7.2.2 Verschiebungsakkumulation nach empirischem Ansatz

Pfahlverschiebungen, bei denen die Entwicklung der Verschiebungsrate im doppelt-logarithmischen Maßstab durch eine Gerade angenähert werden kann, können mit Hilfe des folgenden Potenzansatzes ermittelt werden (siehe auch Abschnitt 2.2.2):

$$s(N) = s_1 + \frac{s_1^0}{(1 + \lambda)} \cdot (N^{1+\lambda} - 1) \quad (\text{Gl. 7.4})$$

mit

- $s(N)$: Verschiebung nach N Zyklen
 s_1 : Verschiebung nach dem 1. Zyklus
 s_1^0 : Verschiebungsrate bei Zyklus $N = 1$
 λ : Neigungsbeiwert: $\lambda < 0$: Abnahme der Verschiebungsrate
 $\lambda > 0$: Zunahme der Verschiebungsrate

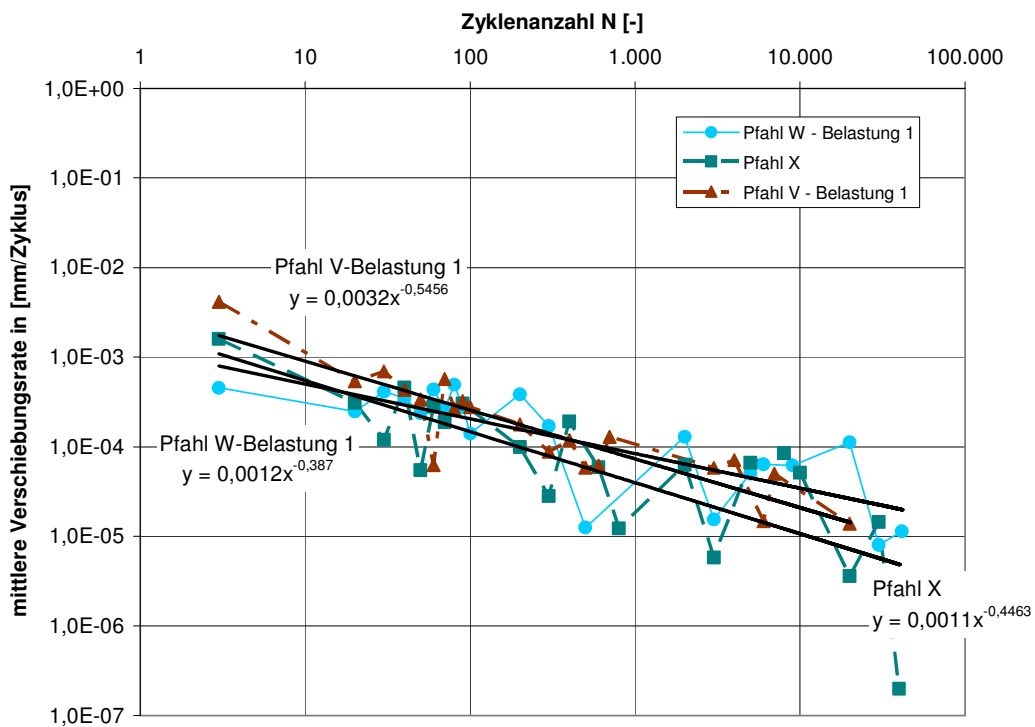
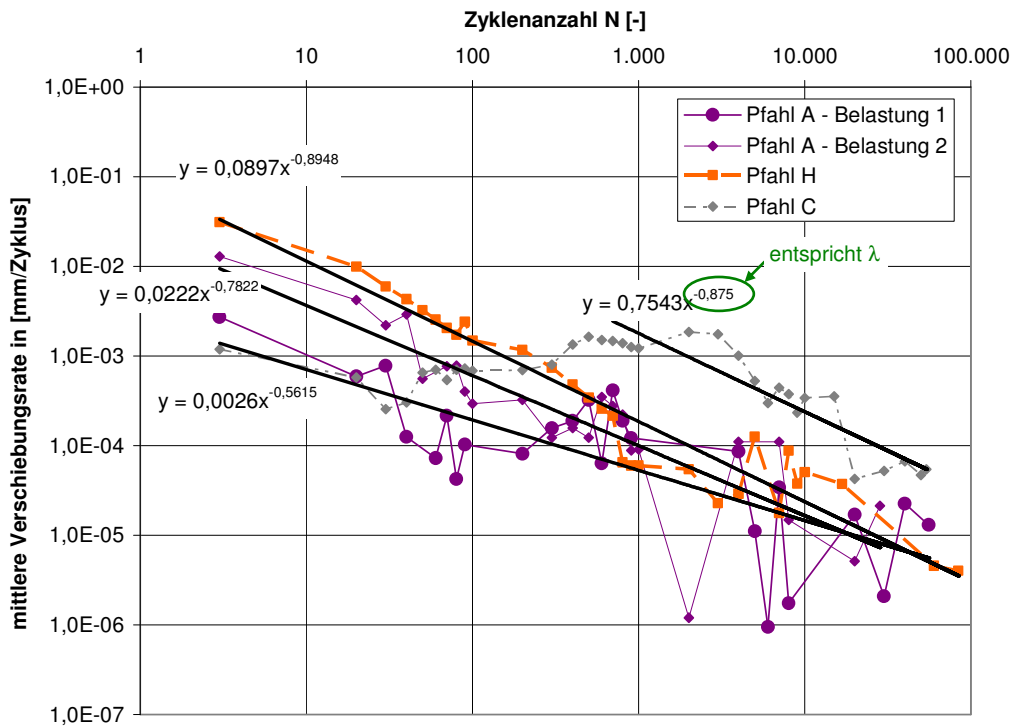
Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten zyklischen Versuche ergeben sich für die Schwelllastversuche Neigungsbeiwerte von -0,56 bis -0,89 (siehe Abbildung 7.7 oben). Bei den Wechsellastversuchen, bei denen keine Zunahme der Verschiebungsrate auftrat, ist die Abnahme der Verschiebungsrate geringer, die Neigungsbeiwerte liegen hier zwischen -0,39 und -0,55 (siehe Abbildung 7.7 Mitte). Bei zwei Wechsellastversuchen (siehe Abbildung 7.7 unten) trat eine Umkehr der Verschiebungsrate nach ca. 500 Zyklen ein. Die Neigungsbeiwerte bei Anstieg der Verschiebungsrate liegen zwischen 0,98 und 1,40.

Eine Umkehr der Verschiebungsrate kann mit dem oben genannten Ansatz nicht berücksichtigt werden. Bei den Versuchen mit Lastkombinationen, die nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 zulässig sind, wurde eine Umkehr der Verschiebungsrate nicht beobachtet.

In Tabelle 7.1 sind die Werte angegeben, mit denen die Verschiebungen in Abbildung 7.8 gemäß Gleichung 7.3 exemplarisch für je zwei Schwelllast- und Wechsellastversuche berechnet wurden.

	s_1 [mm]	λ [-]	s_1^0 [mm/Zyklus]	s_1^0 gemittelt für $N = 1-10$ [mm/Zyklus]
A-Belastung 1	0,14	-0,56	0,007	0,003
H	0,61	-0,89	0,07	-
X	0,013	-0,45	0,013	0,002
V-Belastung 1	0,1	-0,55	0,004	0,004

Tabelle 7.1: In den Berechnungen angesetzte Werte



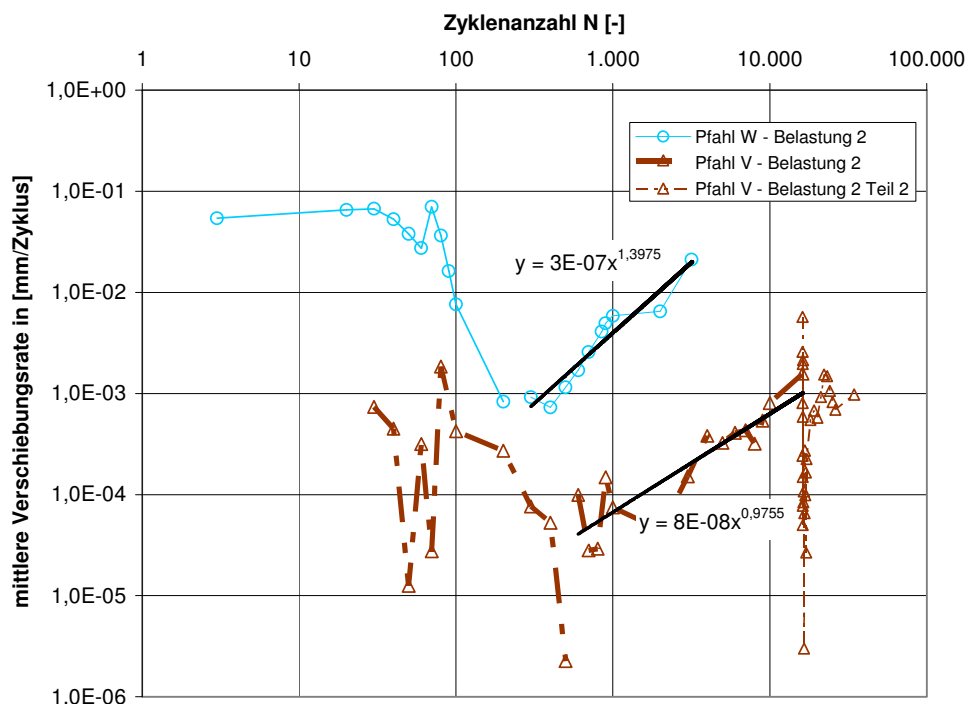


Abbildung 7.7: Neigungsbeiwerte λ für die durchgeführten zyklischen Pfahlversuche

Bei den Zugschwellversuchen (Abbildung 7.8 oben) wird bei Versuch Pfahl A-Belastung 1 die Verschiebung bei Ansatz der Verschiebungsrate bei Zyklus $N = 1$ überschätzt. Bei Mittelung der Verschiebungsrate über ca. 10 Zyklen können die Verschiebungen gut abgeschätzt werden. Bei Versuch H werden die auftretenden Verschiebungen leicht unterschätzt.

Beim Wechsellastversuch Pfahl X weichen die berechneten Werte deutlich von den gemessenen Verschiebungen ab (Abbildung 7.8 unten). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Pfahl X zunächst eine leichte Pfahlsetzung eintrat. Der Wechsel der Verschiebungsrichtung kann mit dem Rechenansatz nicht erfasst werden. Beim Versuch Pfahl V-Belastung 1 können die gemessenen Verschiebungen mit Hilfe des Potenzansatzes gut nachgerechnet werden.

Das vorgestellte Verfahren bietet prinzipiell eine gute Möglichkeit zur Prognose von Pfahlverschiebungen, da bei bekanntem Neigungsbeiwert lediglich eine Probelastung mit einem Lastzyklus durchgeführt werden muss, um die Verschiebungen für eine beliebige Anzahl von Zyklen ermitteln zu können. Für die vorliegenden zyklischen Pfahlversuche zeigt sich jedoch eine Abhängigkeit des Neigungsbeiwertes von der Belastungsart (Schwell- oder Wechselbelastung). Tendenziell sind die Neigungsbeiwerte betragsmäßig bei den Zugschwellversuchen deutlich größer als bei den Wechsellastversuchen. Zur Angabe einer Bandbreite für Neigungsbeiwerte in bindigen Böden in Abhängigkeit von der Belastungsart sind daher noch deutlich mehr Versuche nötig als bisher vorliegen.

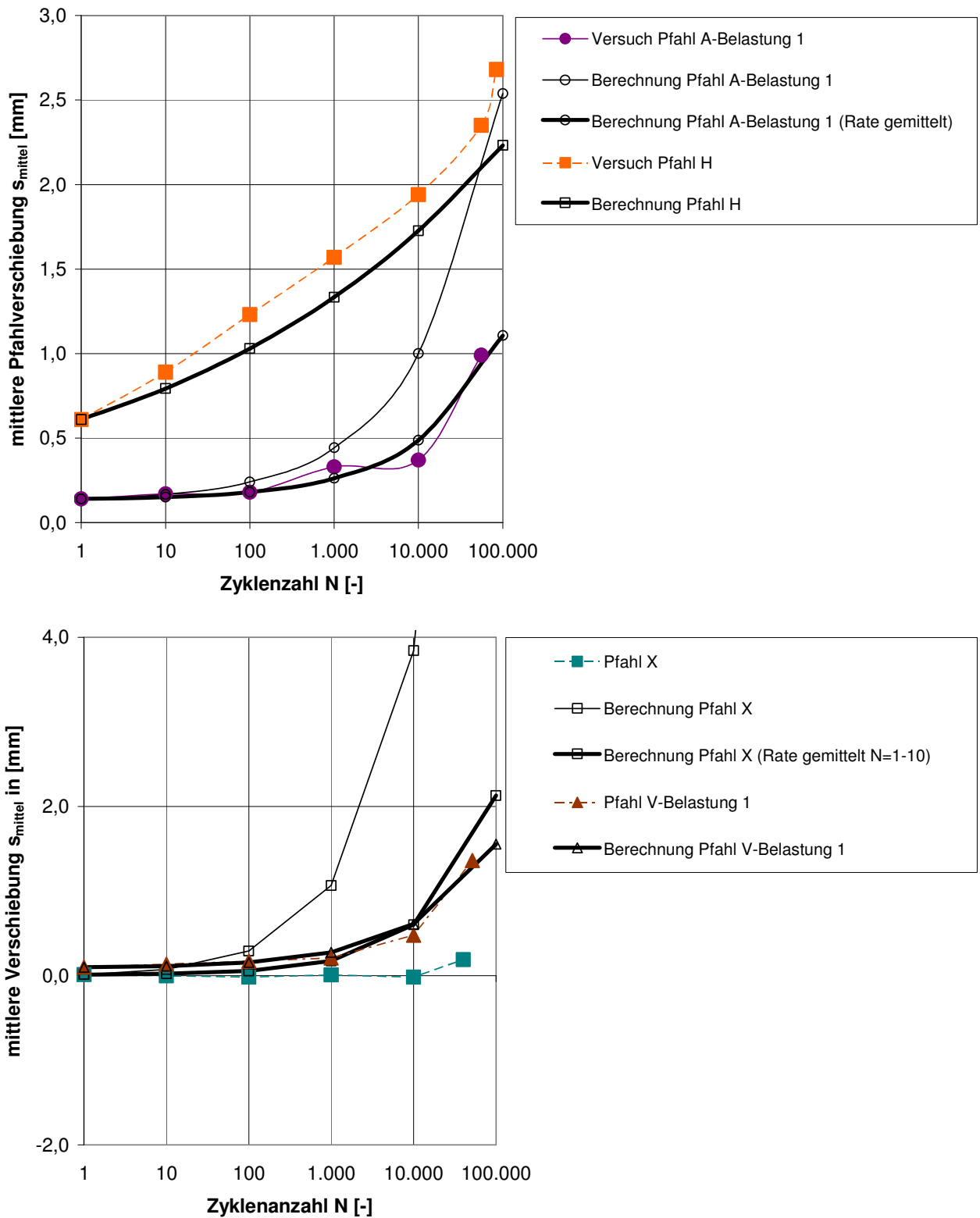


Abbildung 7.8: Vergleich der gemessenen mit den mit Hilfe des Potenzansatzes berechneten Verschiebungen

7.2.3 Verfahren nach THOMAS (2011)

In Abschnitt 2.2.4 wurde erläutert, wie mit Hilfe des Programmpaketes ZYKLAX (THOMAS, 2011) Pfahlverschiebungen unter axial zyklischer Belastung berechnet werden. Die notwendigen Eingangsparameter sind anhand von statischen Pfahlprobelastungen und zyklischen Pfahlversuchen zu bestimmen.

In Tabelle 7.2 sind die aus den statischen Zug- und Druckversuchen für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Pfahlversuche abgeleiteten statischen Modellparameter dargestellt. In den Berechnungen wurde der Pfahl jeweils in drei gleiche Pfahlabschnitte mit je 1,4 m Länge aufgeteilt. Der Einflussradius der zyklischen Belastung wurde den Ansätzen der Literatur entsprechend zu $r_m = D$ (Pfahldurchmesser) gewählt. Der Elastizitätsmodul des Mikropfahls wurde entsprechend dem Elastizitätsmodul des Stahltragglieds zu $E = 210.000 \text{ MN/m}^2$ gewählt. Die Querdehnzahl des Bodens wurde zu 0,3 angenommen.

	G_0 [kN/m ²]	R_{fs} und R_{fb} [-]	g_s [-]	$q_{s,ult}$ [kN/m ²]	g_b [-]	$q_{b,ult}$ [kN/m ²]
Zugpfahl	12.000	0,999	0,15 - 0,30	55,0	-	-
Druckpfahl			0,20		0,03	7.500

Tabelle 7.2: Aus den statischen Pfahlprobelastungen abgeleitete oder geschätzte Eingangsparameter für das Programm ZYKLAX

In Abbildung 7.9 sind die mit den in Tabelle 7.2 angegebenen Parametern ermittelten Widerstands-Verschiebungslinien im Vergleich zu den gemessenen Werten aus den statischen Pfahlprobelastungen auf Zug dargestellt. Hierbei zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung bis zu Laststufen von ca. 80 kN. Bei höheren Laststufen werden die Verschiebungen mit dem Programm ZYKLAX deutlich unterschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Pfahlversuchen in situ die Kriechmaße bei Laststufen über 80 kN stark ansteigen und entstehende Pfahlverschiebungen maßgeblich auf Kriechvorgänge im Boden zurückzuführen sind. Dieser Effekt kann in ZYKLAX derzeit nicht erfasst werden. Da die Lasten in den zyklischen Versuchen meist unter 80 kN lagen, können die angegebenen Modellparameter zur Nachrechnung der durchgeführten zyklischen Versuche verwendet werden.

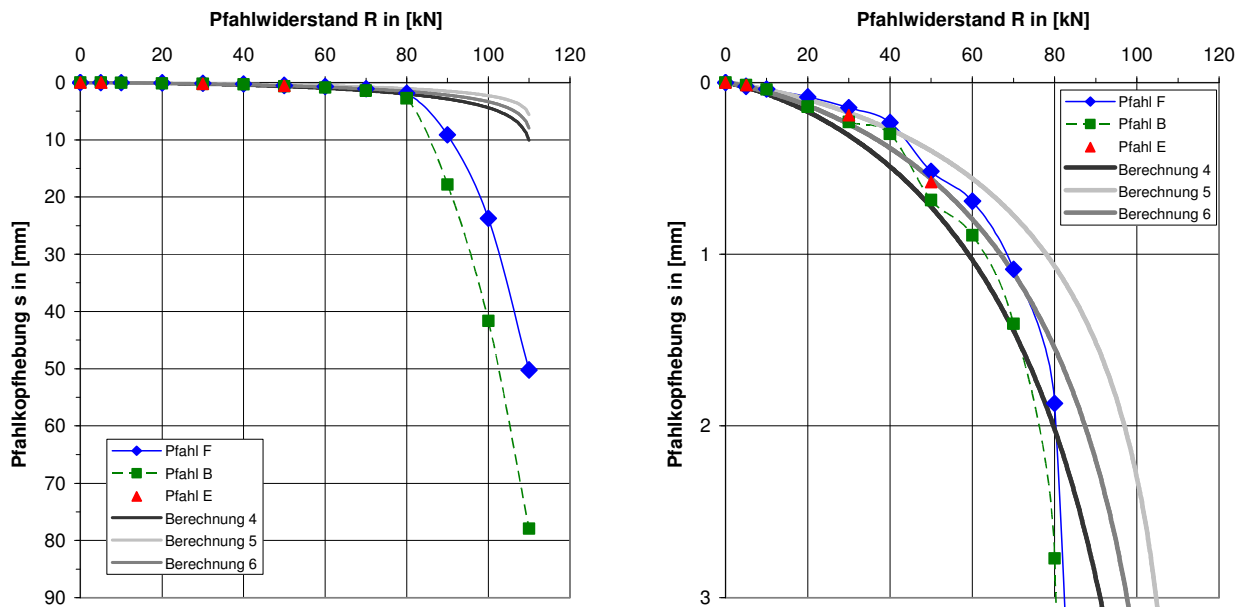


Abbildung 7.9: Vergleich der gemessenen und mit ZYKLAX berechneten Widerstands-Verschiebungslinien für die statischen Zugprobelastungen (rechts: Ausschnitt bis 100 kN)

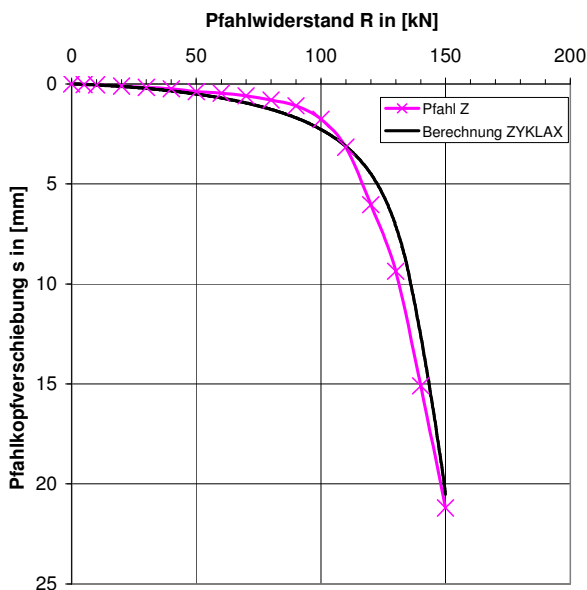


Abbildung 7.10: Vergleich der gemessenen und mit ZYKLAX berechneten Widerstands-Verschiebungslinie für die statische Druckprobelastung

Bei Nachrechnung des statischen Druckversuchs kann der gemessene Last-Verschiebungs-Verlauf prinzipiell gut abgebildet werden (siehe Abbildung 7.10). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kriechmaße beim Druckversuch niedriger waren als bei den Zugversuchen, so dass die Verschiebungen weniger stark von Kriechverformungen beeinflusst sind. Bei gleicher Wahl der Modellparameter für den Pfahlmantel wie beim Zugversuch, ist jedoch ein sehr hoher Wert für den Pfahlspitzendruck $q_{b,ult}$ zu wählen. Da in den Versuchen der wirkende Sitzendruck nicht gemessen wurde, ist diese Annahme kritisch zu hinterfragen.

Im Folgenden werden die drei zyklischen Zugschwellversuche Pfahl A-Belastung 1, Pfahl H und Pfahl C mit dem Programm ZYKLAX nachgerechnet.

Die Modellparameter zur Beschreibung der Last-Verschiebungskurve unter axial zyklischer Belastung κ , β_N , a , b und c sind anhand zyklischer Pfahlversuche zu bestimmen (siehe auch Abschnitt 2.2.4).

Der Modellparameter κ hat wesentlichen Einfluss auf die Größe der Verschiebungsspanne während eines Lastzyklus.

Mit Hilfe des Parameters β_N kann eine Zu- oder Abnahme des Pfahlwiderstandes infolge der zyklischen Belastung modelliert werden. Für die Nachrechnung der Zugschwellversuche wurde die Zunahme des Pfahlwiderstands vorsichtig mit 5 % angesetzt. In den Versuchen wurde mindestens eine Zunahme von 8 % ermittelt.

Die Parameter a und b steuern im Wesentlichen die Form der Zunahme der mittleren Pfahlverschiebungen und sind anhand von zyklischen Pfahlversuchen zu bestimmen. Mit Hilfe des Parameters c kann eine Zunahme der Verschiebungsrates modelliert werden. Dies wurde bei den zyklischen Zugschwellversuchen nicht beobachtet.

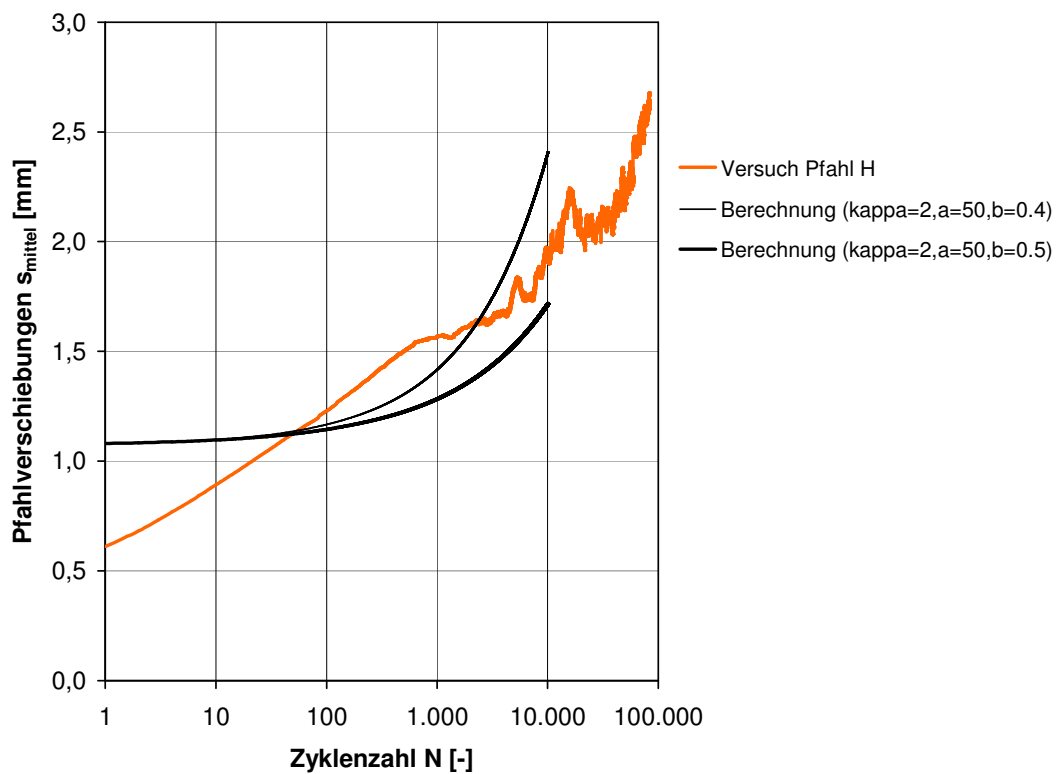
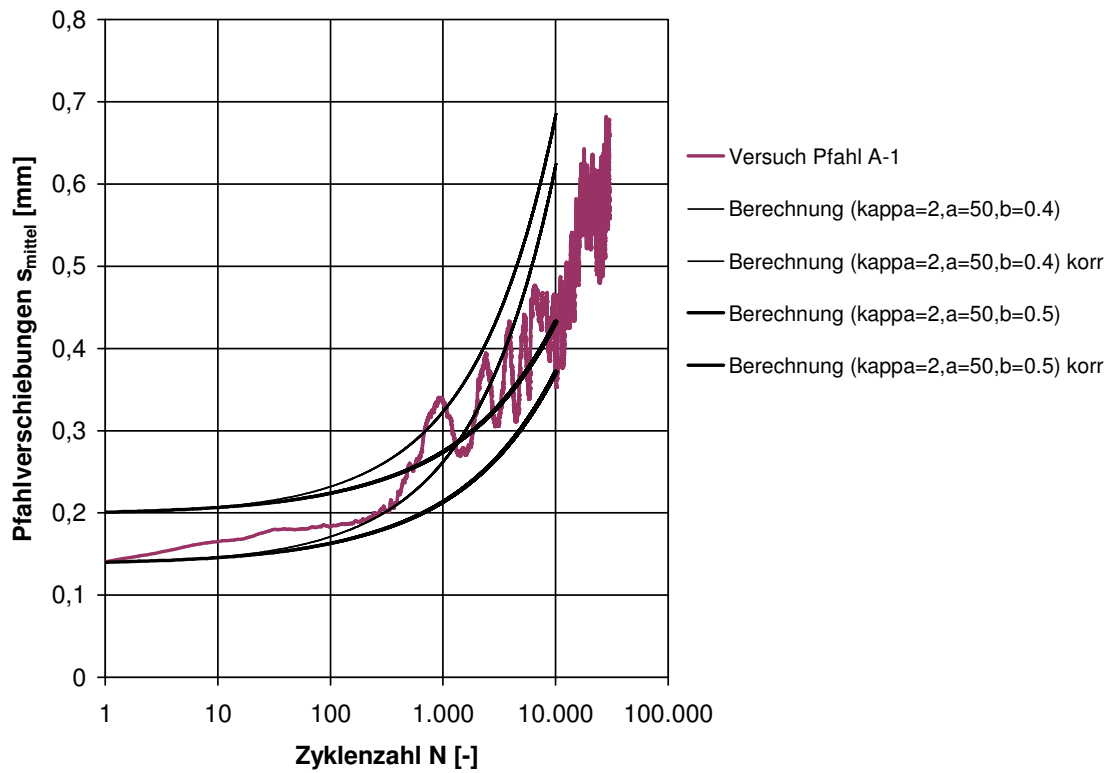
Die statischen Parameter wurden entsprechend Tabelle 7.2 gewählt. In Tabelle 7.3 sind die aus den zyklischen Versuchen abgeleiteten zyklischen Modellparameter angegeben, mit denen die gemessenen Verschiebungen am Besten angenähert werden konnten.

	κ	β_N	Änderungsrate des Pfahlwiderstands $\bar{\beta}$	a	b
Pfahl A-Belastung 1	2,0	1,05	0,01	50	0,5
Pfahl H					0,5
Pfahl C					0,3

Tabelle 7.3: Aus den zyklischen Pfahlversuchen abgeleitete oder geschätzte Eingangsparameter für das Programm ZYKLAX

In Abbildung 7.11 sind die gemessenen und berechneten Verschiebungsverläufe für die drei Zugschwellversuche dargestellt. Bei Wahl eines einheitlichen Wertes des Modellparameters κ von 2,0 stimmen die gemessenen Verschiebungsspannen gut mit den berechneten überein (nicht dargestellt).

Tendenziell werden im Vergleich zu den gemessenen Werten die Verschiebungen nach dem ersten Zyklus überschätzt. Daher wurden die berechneten Verschiebungsverläufe teilweise so korrigiert, dass der Wert der Verschiebung mit den gemessenen Werten übereinstimmt ("Berechnung korr" in Abbildung 7.11). Die Verschiebungszunahme infolge der zyklischen Belastung wird wesentlich durch den Modellparameter b beeinflusst. Je kleiner der Wert gewählt wird, umso stärker nehmen die Pfahlverschiebungen zu (siehe Variationen in Abbildung 7.11). Es zeigt sich, dass der Modellparameter b in Abhängigkeit von der zyklischen Belastung zu verändern ist. Bei größerem Verhältnis von $F'_{\text{zykl}}/F_{\text{mittel}}$ ist der Wert von b zu verringern.



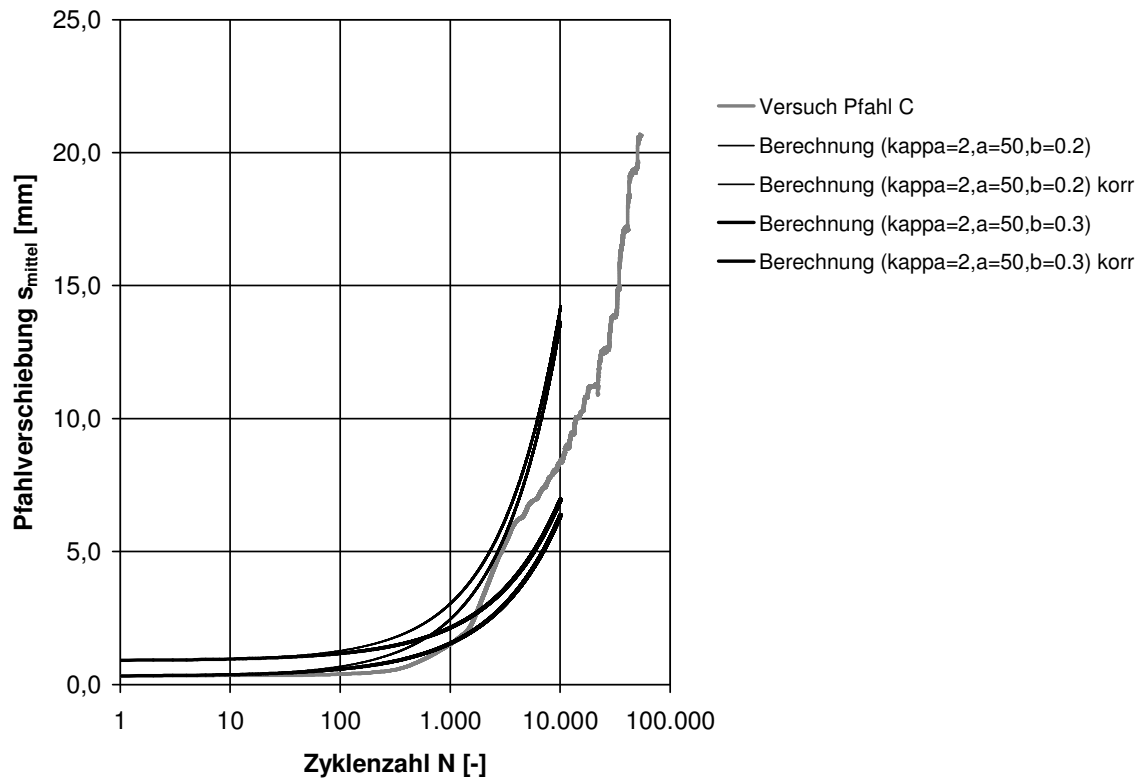


Abbildung 7.11: Vergleich der gemessenen und mit ZYKLAX berechneten Verschiebungslinien für die zyklischen Zugschwellversuche Pfahl A-Belastung 1, Pfahl H und Pfahl C

Die Ergebnisse für die drei Zugschwellversuche zeigen, dass mit dem Programm eine Nachrechnung der Pfahlverschiebungen infolge einer zyklisch axialen Belastung möglich ist. Derzeit sind die zyklischen Modellparameter noch anhand realer Belastungsversuche zu ermitteln. Zur Prognose von Pfahlverschiebungen sind noch weitere Untersuchungen notwendig, um für die notwendigen Modellparameter Bandbreiten in Abhängigkeit von der Bodenart für beliebige Lastkombinationen angeben zu können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der durchgeführten Pfahlversuche war eine Erweiterung des Kenntnisstandes zum Last-Verschiebungsverhalten von Mikropfählen in bindigen Böden, da hierzu bisher nur wenige Untersuchungen vorlagen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Last-Verschiebungsverhalten von im Bohrverfahren hergestellten Mikropfählen für einen überwiegend steifen Tonboden unter axial zyklischer Belastung systematisch untersucht. Die Belastung lag dabei im Zugschwell- oder Wechsellastbereich. Die Belastung wurde als sinusförmige Belastung mit gleichbleibender Lastamplitude aufgebracht. Anhand der Versuchsergebnisse wurde dargestellt, wie die Entwicklung der Pfahlverschiebungen und der Pfahltragfähigkeit von der Belastungsart, der Zyklenzahl, dem mittleren Lastniveau und der zyklischen Lastamplitude abhängen.

Für das vorliegende Pfahlsystem im untersuchten Tonboden konnte abgeleitet werden, dass bei Zugschwelllasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit keine zusätzliche Berücksichtigung eines zyklischen Einflusses notwendig ist. Der Nachweis für die maximal auftretende Belastung, wie er auch für statische Einwirkungen nach DIN EN 1997-1 in Kombination mit DIN 1054:2010 vorgesehen ist, ist ausreichend. Als Versagenskriterium wurde dabei eine Pfahlverschiebung von 10 % des Pfahldurchmessers zu Grunde gelegt.

Für die Wechsellastversuche ist bei der Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine zusätzliche Abminderung des charakteristischen Pfahlwiderstands erforderlich, da post-zyklische statische Pfahlprobelastungen auf Zug eine Tragfähigkeitsminderung von ca. 20 % zeigten. Die Abminderung sollte nach derzeitigem Kenntnisstand bei Wechsellasten unabhängig von der Größe der zyklischen Belastung erfolgen. Die Höhe der Abminderung ist noch genauer abzusichern, da der in der Arbeit angesetzte Wert von 20 % im Wesentlichen auf dem Ergebnis einer post-zyklischen Pfahlprobelastung beruht.

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit konnte für die Wechsellastversuche, bei denen die Belastungen innerhalb des nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 zulässigen Bereichs für statische Belastungen lagen, ermittelt werden, dass bei einem mittleren Lastniveau von 6 % und zyklischen Lastamplituden bis 31 % des charakteristischen Herausziehwiderstandes unter statischer Belastung Zyklenzahlen von mehr als einer Million möglich sind, ohne dass die mittleren Pfahlverschiebungen einen Wert von 10 % des Pfahldurchmessers (= 15 mm) überschreiten.

Für die Zugschwellversuche ergaben sich bei zyklischen Belastungen innerhalb des nach DIN EN 1997-1:2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 zulässigen Bereichs für statische Belastungen ebenfalls mögliche Zyklenzahlen von mindestens einer Million bei zulässigen mittleren Pfahlverschiebungen von 15 mm.

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Tragfähigkeit auf andere Pfahlsysteme und andere bindige Bodenarten ist durch weiterführende Untersuchungen abzusichern. Bezüglich der Pfahlsysteme sind insbesondere Spannungsveränderungen im Boden infolge der Herstellung der

Pfähle und ihre Auswirkungen auf das Verhalten unter zyklischer Belastung genauer zu untersuchen. Auch ist weiter zu untersuchen, wie sich die Steifigkeit bzw. Schlankheit des Pfahlsystems selbst auf das Trag- und Verschiebungsverhalten auswirkt, da die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche an relativ steifen Pfählen erfolgten.

Im Rahmen der Bearbeitung der Forschung ergaben sich zusätzliche Fragestellungen, die nur am Rande betrachtet werden konnten. So ist beispielsweise genauer zu untersuchen, unter welchen Randbedingungen Ergebnisse aus Einfachscherversuchen im Labor genutzt werden können, um zum Einen Pfahlverschiebungen unter axial zyklischer Belastung direkt abschätzen zu können oder zum Anderen Modellparameter für Berechnungsverfahren ermitteln zu können.

In der Arbeit wurden die veränderlichen und zyklischen Einwirkungen auf einen Pfahl als sinusförmige Belastung mit gleichbleibender Lastamplitude modelliert. Für diese Annahme konnte gezeigt werden, in welchen Grenzen verschiedene empirische und analytische Berechnungsansätze zur Ermittlung der Pfahlverschiebungen geeignet sind, und es konnten für die durchgeführten Versuche teilweise Angaben zu Größen benötigter Eingangsparameter gemacht werden.

Die Annahme einer sinusförmigen Belastung mit gleichbleibender Amplitude stellt eine Vereinfachung der Realität dar. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist eine Abschätzung bzw. Nachweisführung über die Einwirkung mit der größtmöglichen Lastamplitude möglich. Zur Abschätzung der tatsächlichen Pfahlverschiebungen im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit einer Konstruktion sollten die Auswirkungen von Einwirkungen mit wechselnden Lastamplituden und von evtl. auftretenden Belastungspausen unter Annahme realistischer Lastzyklenzahlen weiter untersucht werden.

Prinzipiell zeigt sich in nichtbindigen und bindigen Böden ein ähnliches Verschiebungsverhalten unter zyklisch axialer Belastung. Die Pfahlverschiebungen steigen mit zunehmender Zyklenzahl und Wechsellasten wirken sich tendenziell ungünstiger auf die Verschiebungen und die Tragfähigkeit aus als Schwelllasten. Dennoch reagieren Pfähle in bindigen Böden in der Regel unempfindlicher auf eine axial zyklische Belastung als Pfähle in nichtbindigen Böden. Hierzu sind für ein genaueres Verständnis der Spannungs- oder Porenwasserdruckänderungen in bindigen Böden infolge einer axial zyklischen Pfahlbelastung weitere Untersuchungen notwendig.

Literaturverzeichnis

- AL-DOURI, R.H. / POULOS, H.G. (1995): Predicted and observed cyclic performance of piles in calcareous sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 1, New York
- ANDERSEN, K.H. ET AL. (1976): Effect of cyclic loading on clay behaviour, *Norges Geotekniske Institutt*, Heft 113, Oslo
- BAUMBACH, J. (2010): Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ZP-52-5-11.48.1-1273/07: Axial zyklisch belastete Mikropfähle in bindigen Böden, *Deutsches Institut für Bautechnik*, Berlin
- BOHN, C. (2010): Verformungsverhalten von bindigen Böden unter zyklischer Belastung – Literaturstudium und Auswertung von Laborversuchen, unveröffentlichte Diplomarbeit am Zentrum Geotechnik der Technischen Universität München
- BRIAUD, J.-L. / FELIO, G. Y. (1986): Cyclic Axial Loads on Piles: Analysis of Existing Data, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 362-371
- CHAN, S.F. / HANNA, T.H. (1980): Repeated loading on single piles in sand, *Proceedings ASCE*, Vol. 106, No. GT 2, pp. 171-188
- DATTA, M. / RAO, G.V. / GULHATI, S.K. (1980): The nature and engineering behaviour of carbonate soils at Bombay High, *Indian Marine Geotechnology*, India, 4(4), 307-341
- EPRI (1987): Review of Load Tests on Deep Foundations Subjected to Repeated Loading, EL-5375 Research Project 1493-4, Final Report, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California
- FELIO, G. Y. (1985): Influence of cyclic loading on axially loaded piles in clay (Volumes I & II), Ph.D. Thesis, A&M University, Texas
- FMPA Stuttgart (1978): Schwellverhalten von Injektionsankern in bindigen Böden, Bundesminister für Verkehr – F.A. 15.O39 S 76 B, Stuttgart
- GRUBER, N. / KORECK, H.-W. / SCHWARZ, P. (1985): Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle, Heft 5, Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, TU München
- JAIME ET AL. (1990): Behaviour of Friction Piles in Mexico City Clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 116, No. 6, June, pp. 915 -931, New York
- JERZ, H. (1993): Geologie von Bayern, II. Das Eiszeitalter in Bayern, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart

KARLSRUD, K. / HAUGEN, T. (1986): Behaviour of Piles in Clay under Cyclic Axial Loading - Results of Field Model Tests, Publication Nr. 166, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo

KARLSRUD, K. ET AL. (1992): NGI's pile tests at Tilbrook and Pentre – Review of testing procedures and results, Publication Nr. 188, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo

KEMPFERT, H.-G. (2009): Pfahlgründungen, Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke, Kapitel 3.2, 7. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

KIRSCH, F. / RICHTER, T. (2011): Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen, Bautechnik 88, Heft 2, S. 113 – 120, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

KLEVEN, A./ ANDERSEN, K.H. (1997): Cyclic laboratory tests on Storeboelt clay till, Norwegian Geotechnical Institute, Heft 199, Oslo

KRAFT ET AL. (1981): Pile Load Tests: Cyclic Loads and Varying Load Rates, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 107, No. GT1, January, pp. 1 -19, New York

LEHANE, B. M. / JARDINE, R. J. / MCCABE, B. A. (2003): Pile group tension cyclic loading: Field test programme at Kinnegar N.Ireland, Research Report 101, Health and Safety Executive

LUNNE, T. / ROBERTSON, P. K. / POWELL, J. J. M. (1997): Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Spon Press, Taylor & Francis Group, London

MALKUS, J. (2000): Untersuchung des Bodenverhaltens im Kontaktbereich von zyklisch axial belasteten Pfählen und Ankern, Heft 24, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen

MCANOY, P. ET AL. (1982): Cyclic Tensile Testing of a Pile in Glacial Till, Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical methods in Offshore Piling, pp. 257-291, Austin, Texas,

MCMANUS, K. J. ET AL. (1994): Cyclic Axial Loading of Drilled Shafts in Cohesive Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 120, No. 9, September, pp. 1481 - 1497, New York

NARASIMHA RAO, S. / PRASAD, Y. (1992): Behaviour of a Helical Anchor under Vertical Repetitive Loading, Marine Geotechnology, Vol. 10, pp. 203 - 228

OSTERMAYER, H. / WERNER, H.-U. (1972): Neue Erkenntnisse und Entwicklungstendenzen in der Verankerungstechnik, Baugrundtagung Stuttgart

OSTERMAYER, H. (1996): Verpreßanker, Grundbautaschenbuch, Fünfte Auflage, Teil 2, Ernst und Sohn Verlag, Berlin

POULOS, H. G. (1981): Cyclic Axial Response of Single Pile, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 107, No. 1, January, pp. 41 - 58, New York

PRASAD, Y. / NARASIMHA RAO, S. (1994): Experimental Studies on Foundations of Compliant Structures – II. Under Cyclic Loading, Ocean Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 15 - 27

SCHWARZ, P. (2002): Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung, Heft 33, Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, TU München

TURNER, J.P. / KULHAWY, F.H. (1990): Drained uplift capacity of drilled shafts under repeated axial loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 116, No. 3, pp. 470-491, New York

THOMAS, S. (2011): Zum Pfahltragverhalten unter zyklisch axialer Belastung, Heft 25, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel

WERNICK, E. (1978): Tragfähigkeit zylindrischer Anker in Sand unter besonderer Berücksichtigung des Dilatanzverhaltens, Heft 75, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der TU Karlsruhe

Normen und Empfehlungen

DIN 4094-1 (2002): Baugrund – Felduntersuchungen – Teil1: Drucksondierungen, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 22476-1 (2005): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 14199 (2005): Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Pfähle mit kleinen Durchmessern (Mikropfähle), Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin

DIN 4128 (1983): Verpresspfähle (Ortbeton- und Verbundpfähle) mit kleinem Durchmesser, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin

DIN 1054 (2010): Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 1997-1 (2009): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin

EA-Pfähle (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Anhang

Anhang 1.1: Ergebnisse Drucksondierungen

Anhang 1.2: Bohrprofile der Aufschlussbohrungen

Anhang 1.3: Körnungslinien des Tons nach DIN 18123

Anhang 1.4: Versuchsaufbau am Zentrum Geotechnik der TU München zur Kalibrierung der Dehnmessstreifen und Test der Belastungseinrichtung

Anhang 1.5: Versuchsablauf statische Probelastungen 1. Versuchsreihe (Pfahl E und Pfahl F)

Anhang 1.6: Kriechmaße der Pfähle B, E und F

Anhang 1.7: Mantelreibung der Pfähle B, E und F

Anhang 1.8: Versuchsablauf post-zyklische statische Pfahlprobelastungen der 1. Versuchsreihe

Anhang 1.9: Mantelreibung Pfähle A, H, G, D und C (post-zyklisch)

Anhang 1.10: Versuchsablauf statische Pfahlprobelastung Pfahl 1 (2. Versuchsreihe)

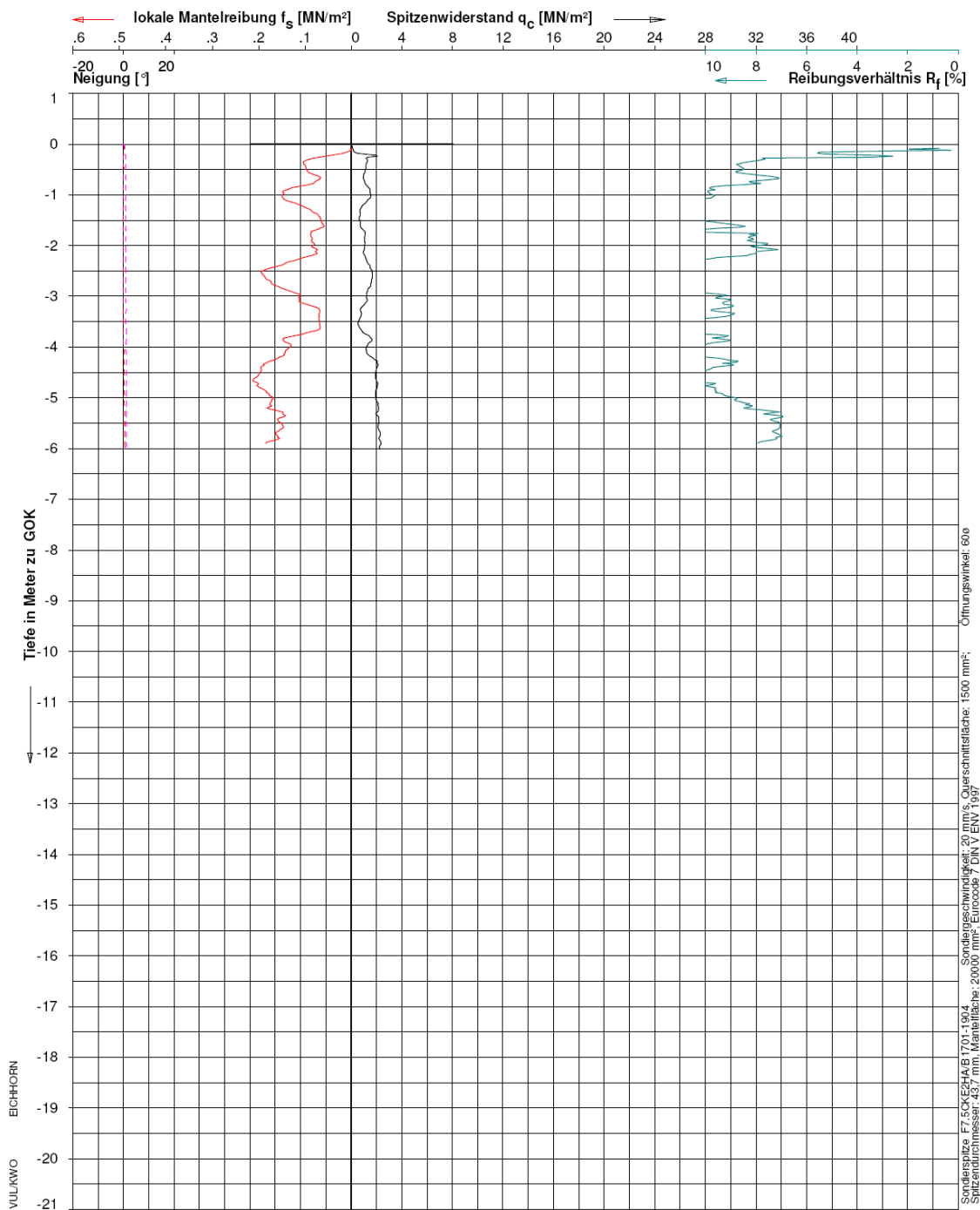
Anhang 1.11: Versuchsablauf post-zyklische statische Pfahlprobelastungen der 2. Versuchsreihe

Anhang 1.12: Auswertung Dehnmessstreifen Zugschwellversuche (Versuchsreihe 1)

Anhang 1.13: Auswertung Dehnmessstreifen Wechsellastversuche (Versuchsreihe 2)

Anhang 1.14: Auswertung Dehnmessstreifen Wechsellastversuche an Pfahl Z (statisch vorbelastet)

Anhang 1.1: Ergebnisse Drucksondierungen



Sondierspitze: F7, SCKEZHAB 17/01-1904, Sondiergeschwindigkeit: 20 mm/s, Querschnittsfläche: 1500 mm²,
 Spitzendurchmesser: 43,7 mm, Mantelfläche: 20000 mm², Eurocode 7 DIN V ENV 1997, Umungswinkel: 60°

EICHHORN
 VULAKWO

ELEKTRISCHE DRUCKSONDIERUNG

Technische Universität München, Zentrum Geotechnik
 Tongrube Fa. Erlus, Leibfling OT Mundfling

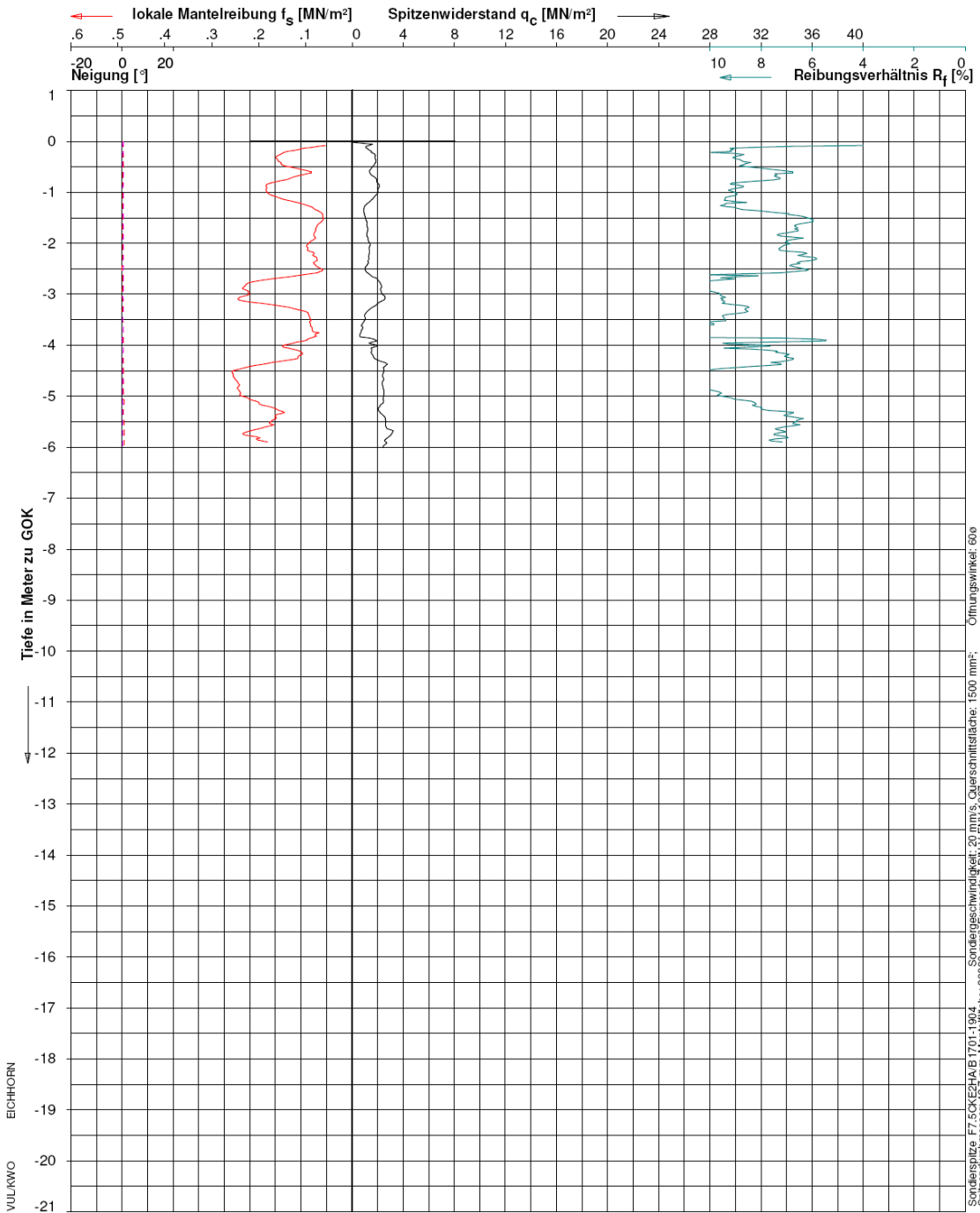


FUGRO CONSULT GMBH
 Umwelt - Geotechnik - Analytik
 Wolfener Str. 36V, 12681 Berlin
 Tel: (+4930)93651352 Fax: 93651350

Datum: 03-Jul-2009
 Sondierende: Vorgabe
 Gelände: 0,00 m zu GOK
 Endteufe: -6,03 m zu GOK

Projekt: 619122
 Sondierung: CPT-1

DIN ISO 9001



ELEKTRISCHE DRUCKSONDIERUNG

Technische Universität München, Zentrum Geotechnik
Tongrube Fa. Erlus, Leibfing OT Mundfing

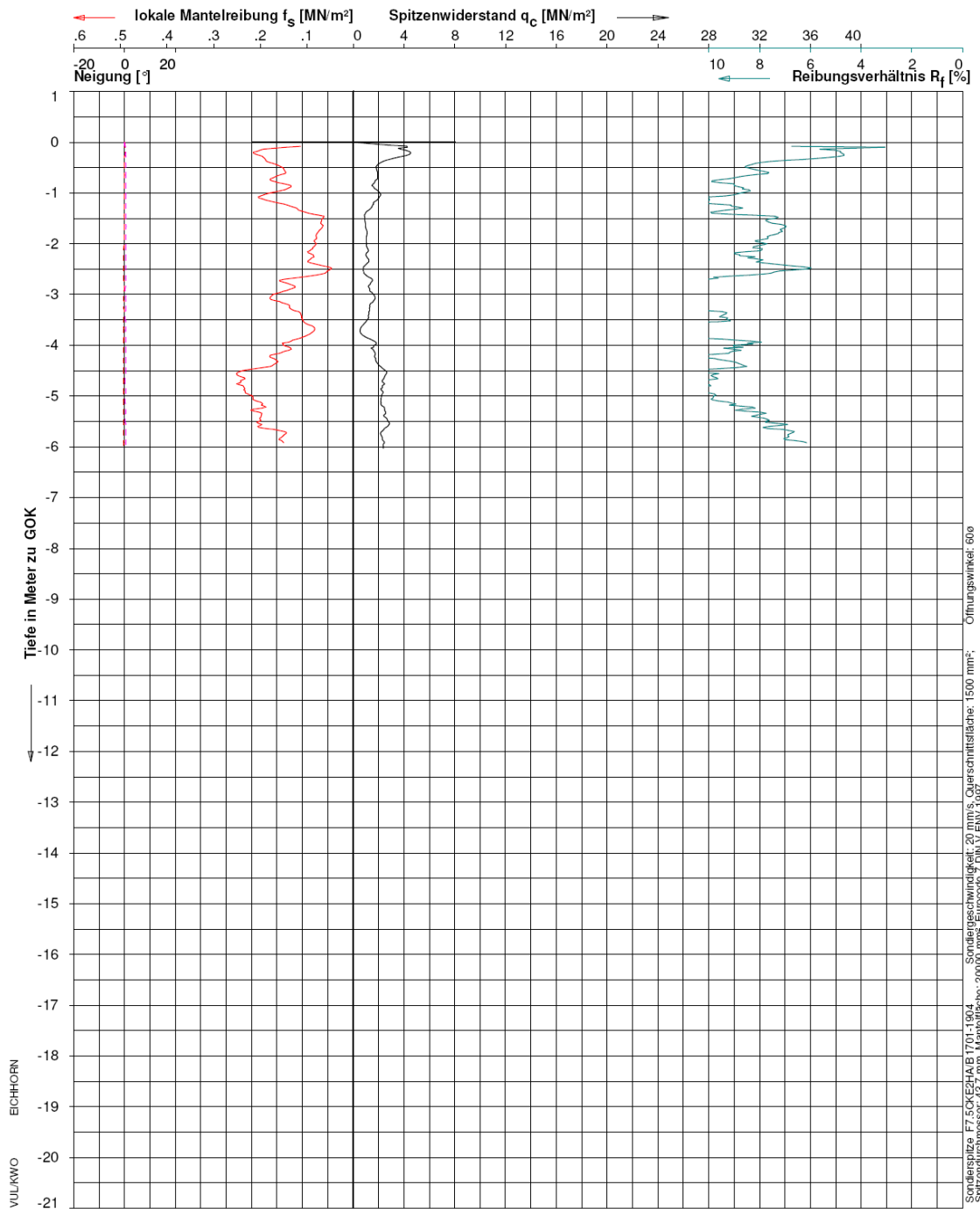


FUGRO CONSULT GMBH
 Umwelt - Geotechnik - Analytik
 Wolfener Str. 36V, 12681 Berlin
 Tel: (++4930)93651352 Fax: 93651350

Datum: 03-Jul-2009
 Sondierende: Vorgabe
 Gelände: 0.00 m zu GOK
 Endteufe: -6.01 m zu GOK

Projekt: 619122
 Sondierung: CPT-2

DIN ISO 9001



Sondierspitze F75CX-EZHA B1701-1904, Sondiergeschwindigkeit: 20 mm/s, Querschnittsfläche: 1500 mm²,
 Spitzendurchmesser: 46,7 mm, Mantelfläche: 20000 mm², Elektrode 7 DIN V EN 1937, Öffnungswinkel: 60°

EICHHORN
 VULFRWO

ELEKTRISCHE DRUCKSONDIERUNG

Technische Universität München, Zentrum Geotechnik
 Tongrube Fa. Erlus, Leiblfing OT Mundfling

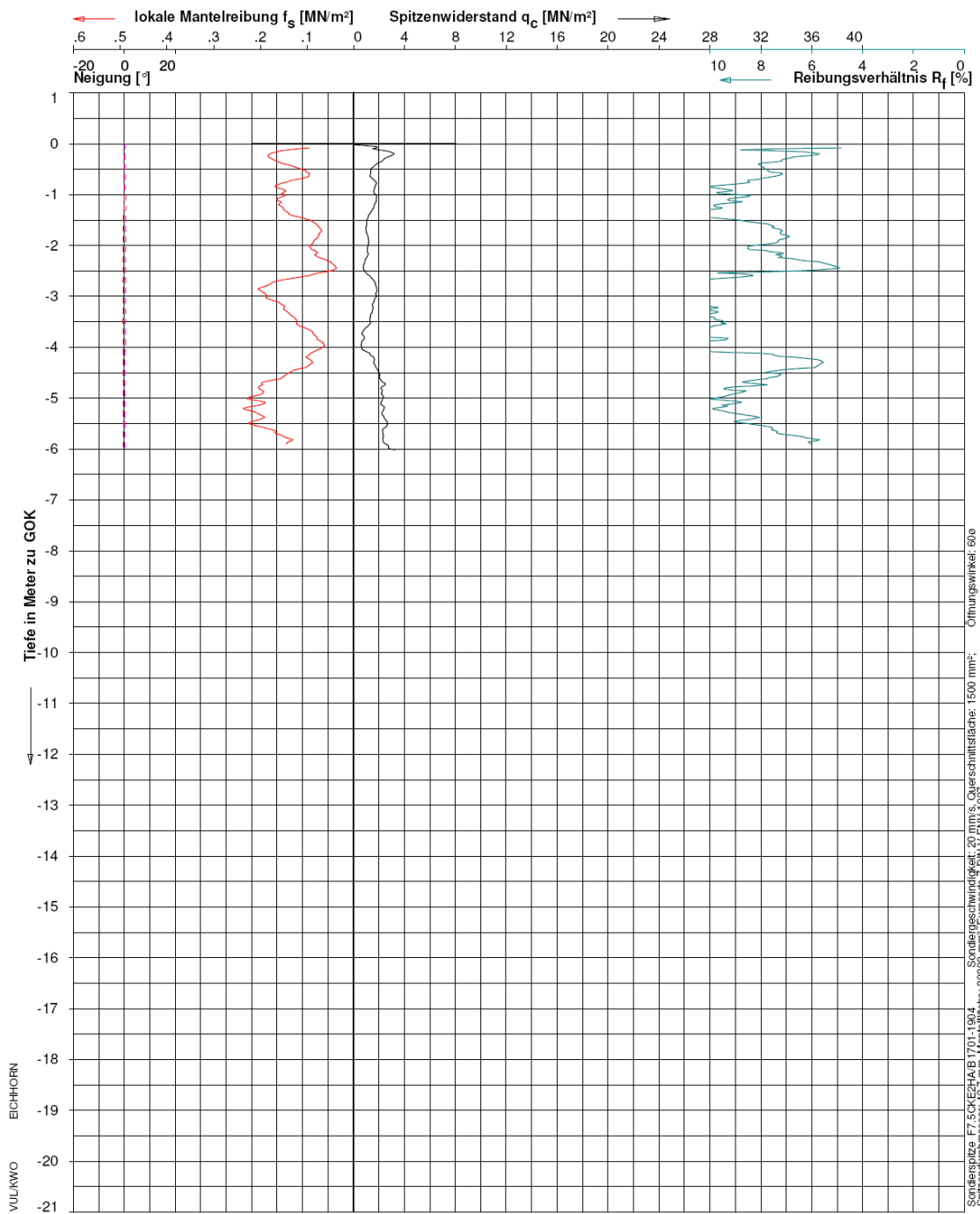


FUGRO CONSULT GMBH
 Umwelt - Geotechnik - Analytik
 Wolfener Str. 36V, 12681 Berlin
 Tel: (++4930)93651352 Fax: 93651350

Datum : 03-Jul-2009
 Sondierende : Vorgabe
 Gelände : 0.00 m zu GOK
 Endteufe : -6.03 m zu GOK

Projekt: 619122
 Sondierung: CPT-3

DIN ISO 9001



ELEKTRISCHE DRUCKSONDIERUNG

Technische Universität München, Zentrum Geotechnik
Tongrube Fa. Erlus, Leiblfing OT Mundlfing



FUGRO CONSULT GMBH

Umwelt - Geotechnik - Analytik

Wolfener Str. 36V, 12681 Berlin

Tel: (+4930)93651352 Fax: 93651350

DIN ISO 9001

Datum : 03-Jul-2009

Sondierende : Vorgabe

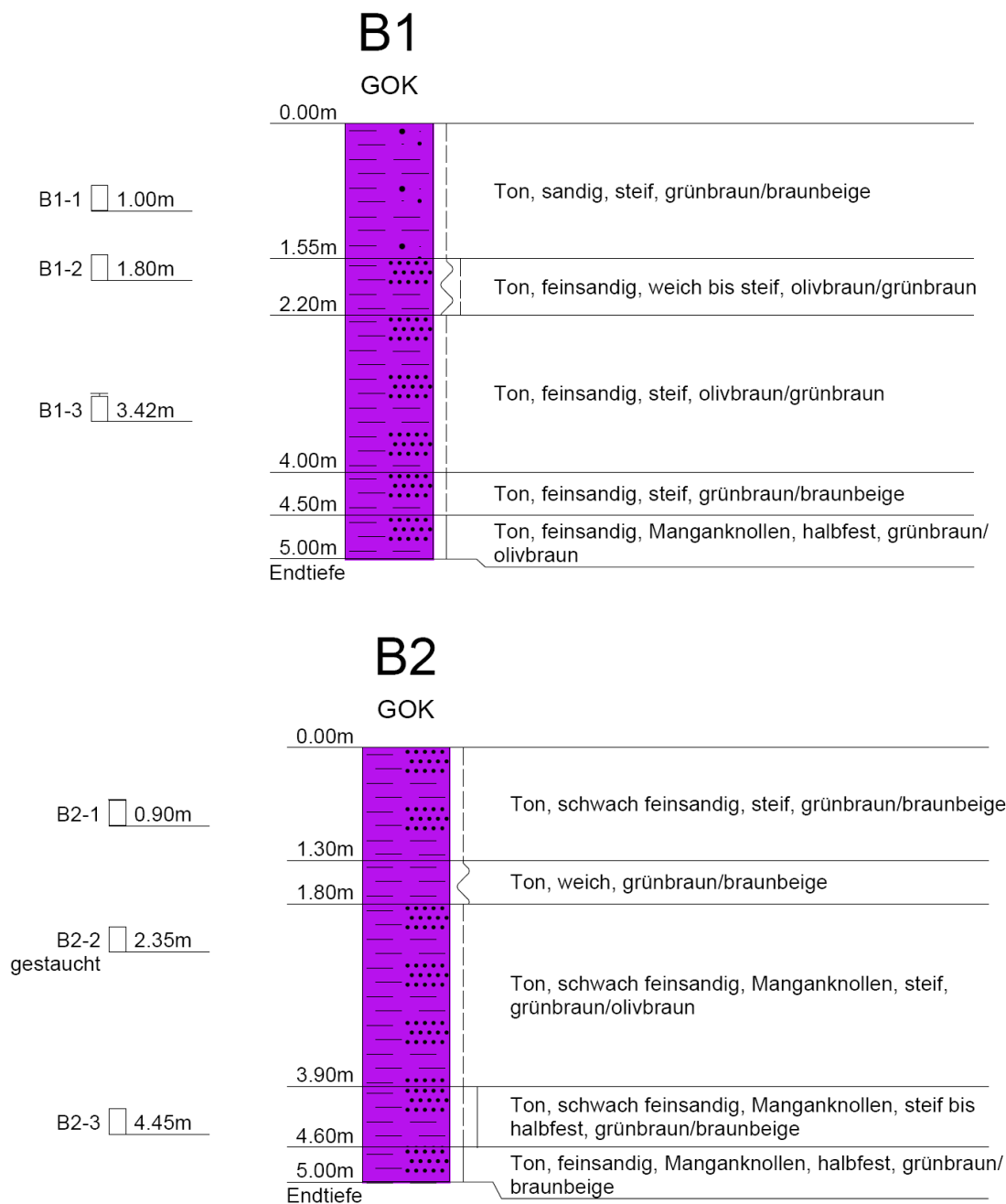
Gelände : 0.00 m zu GOK

Endteufe : -6.02 m zu GOK

Projekt: 619122

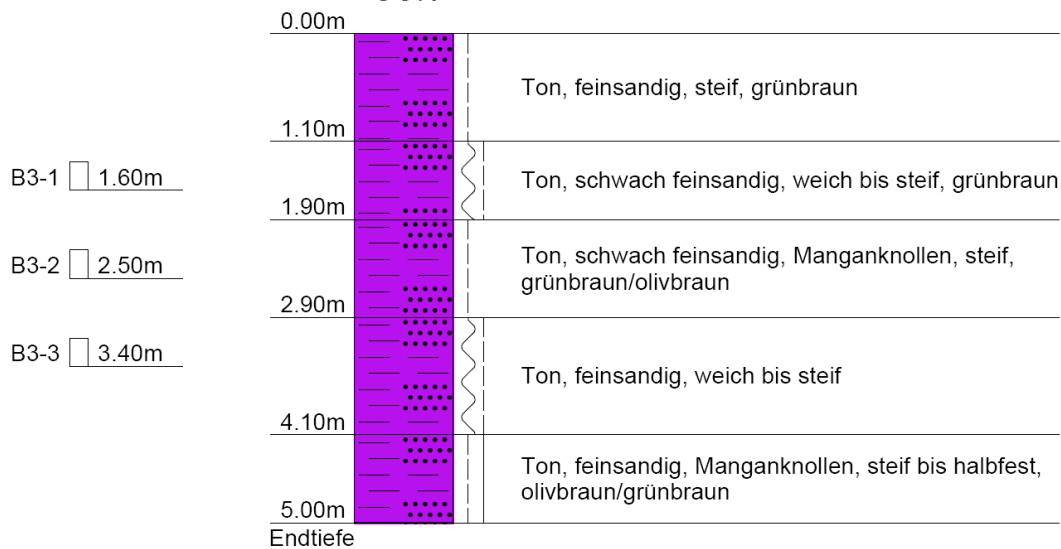
Sondierung: CPT-4

Anhang 1.2: Bohrprofile der Aufschlussbohrungen



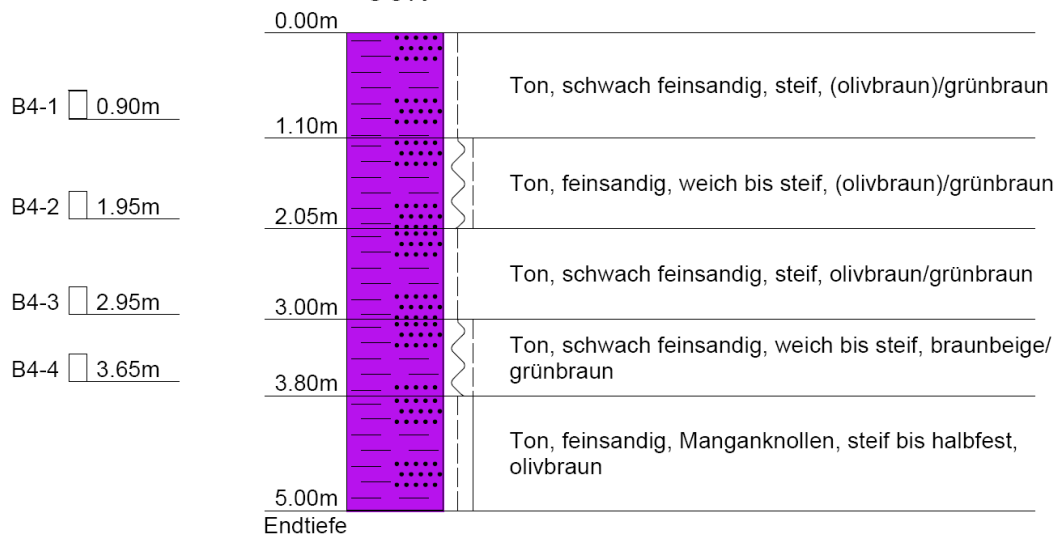
B3

GOK

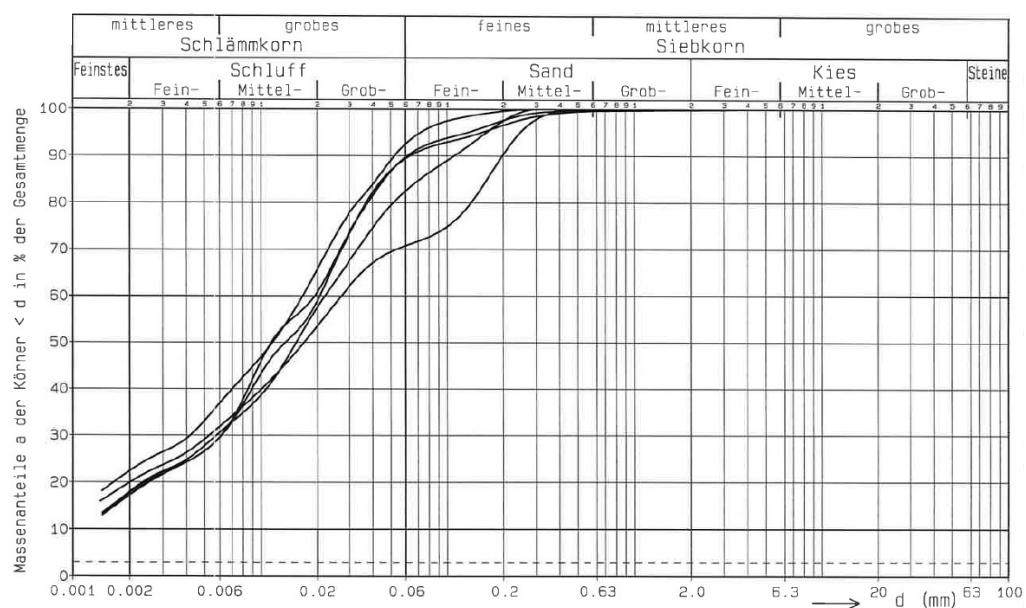


B4

GOK



Anhang 1.3: Körnungslinien des Tons nach DIN 18123



Anhang 1.4: Versuchsaufbau am Zentrum Geotechnik der TU München zur Kalibrierung der Dehnmessstreifen und Test der Belastungseinrichtung



Anhang 1.5: Versuchsablauf statische Probebelastungen 1. Versuchsreihe (Pfahl E und Pfahl F)

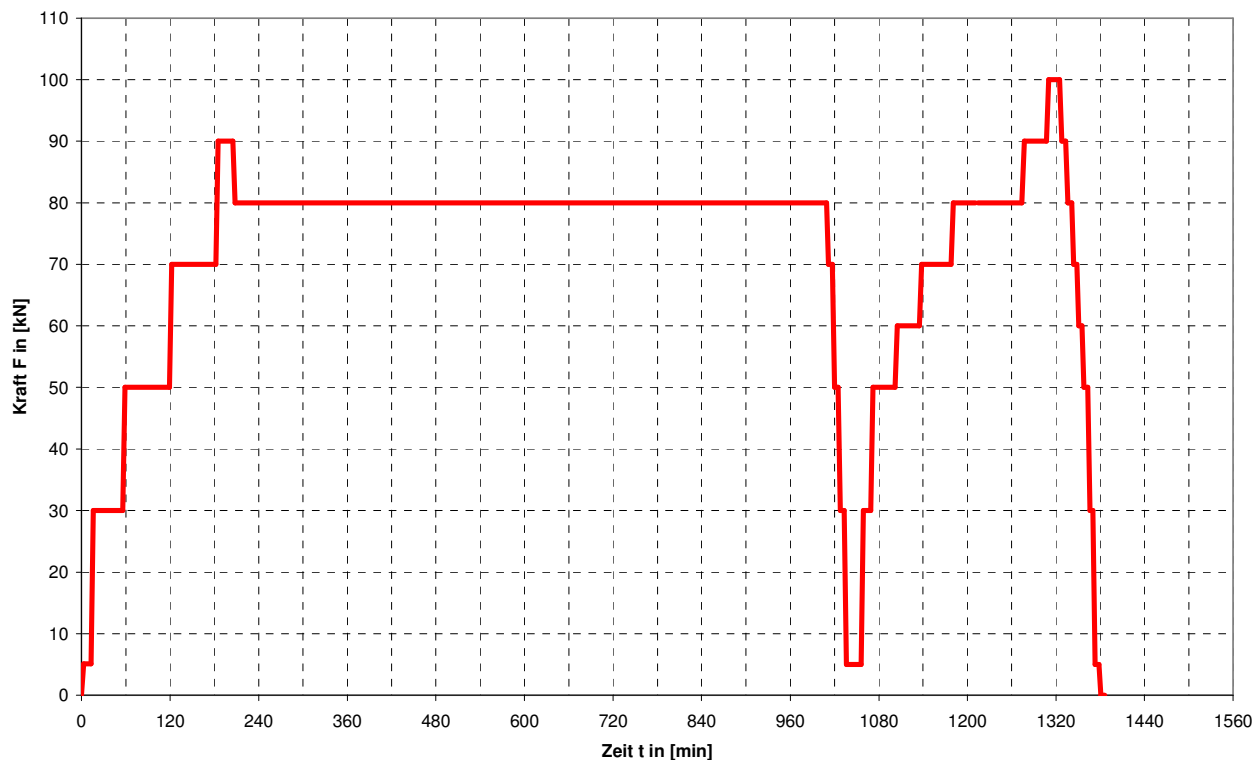


Abbildung A1.4.1: Versuchsablauf statische Pfahlprobebelastung Pfahl E

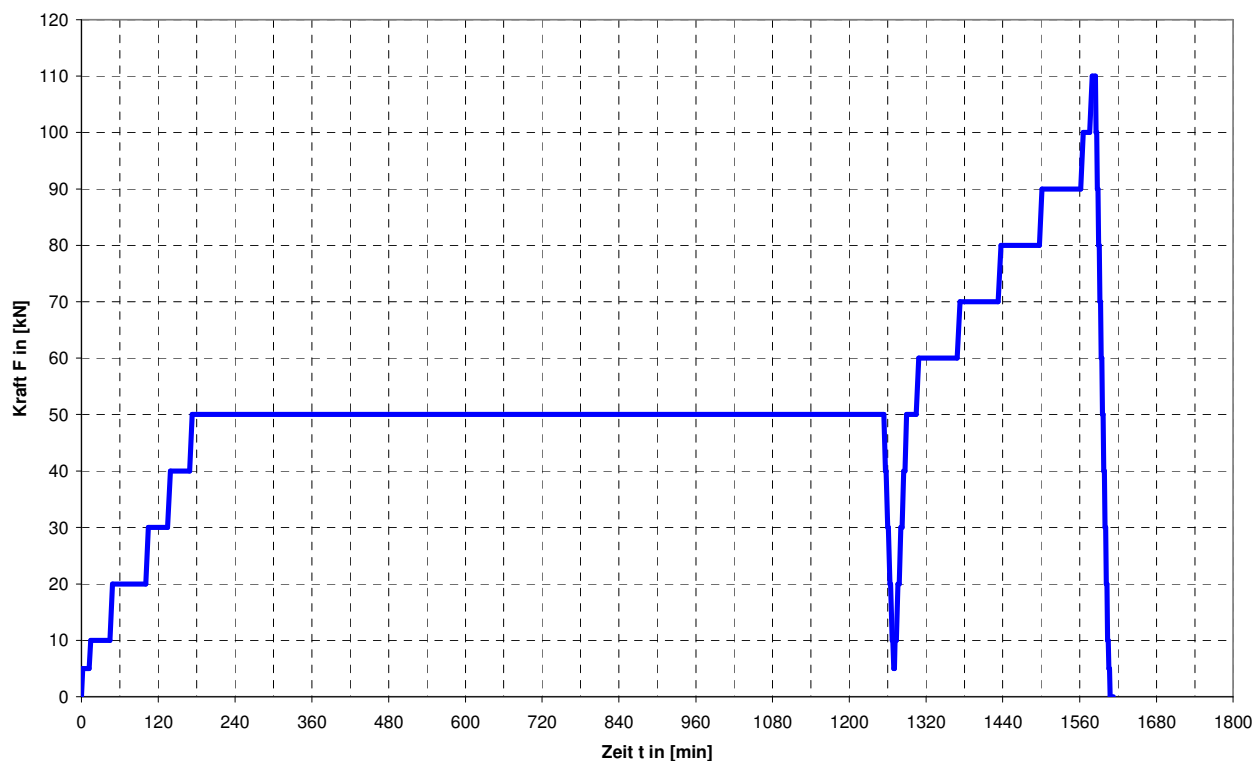
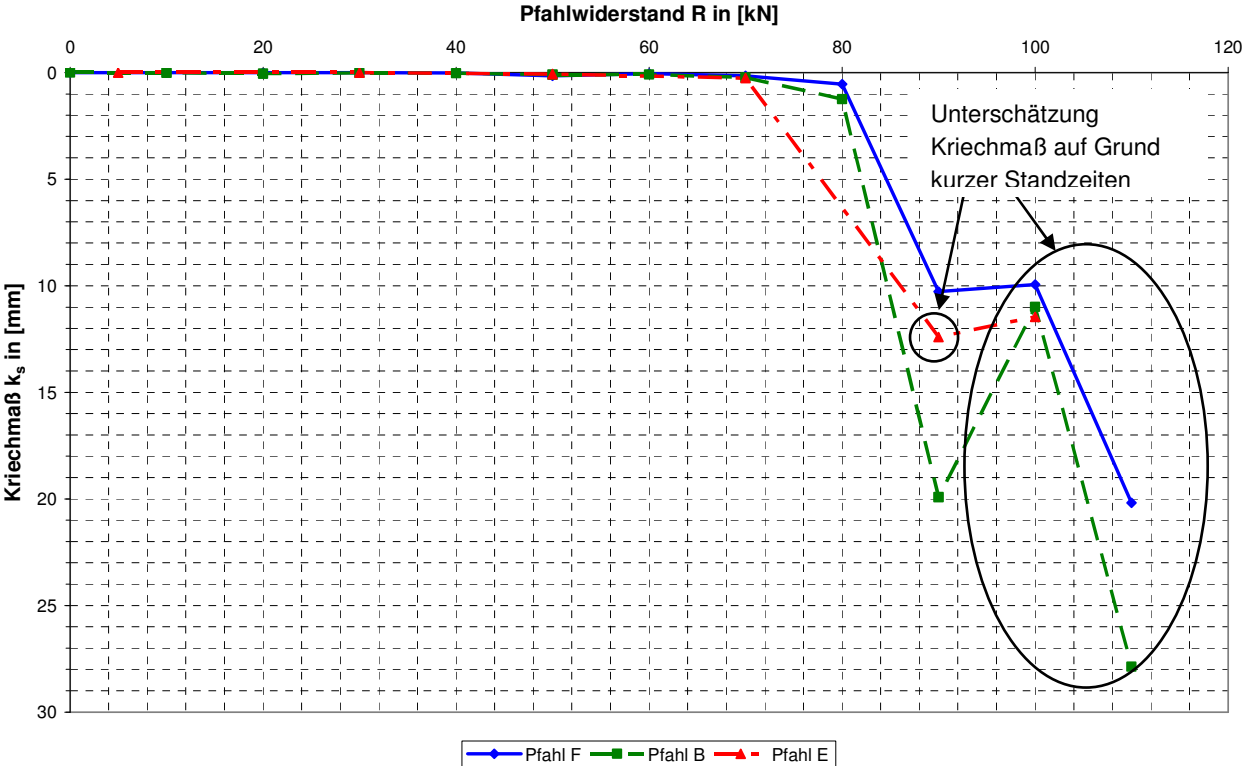


Abbildung A1.4.2: Versuchsablauf statische Pfahlprobebelastung Pfahl F

Anhang 1.6: Kriechmaße der Pfähle B, E und F



Anhang 1.7: Mantelreibung der Pfähle B, E und F

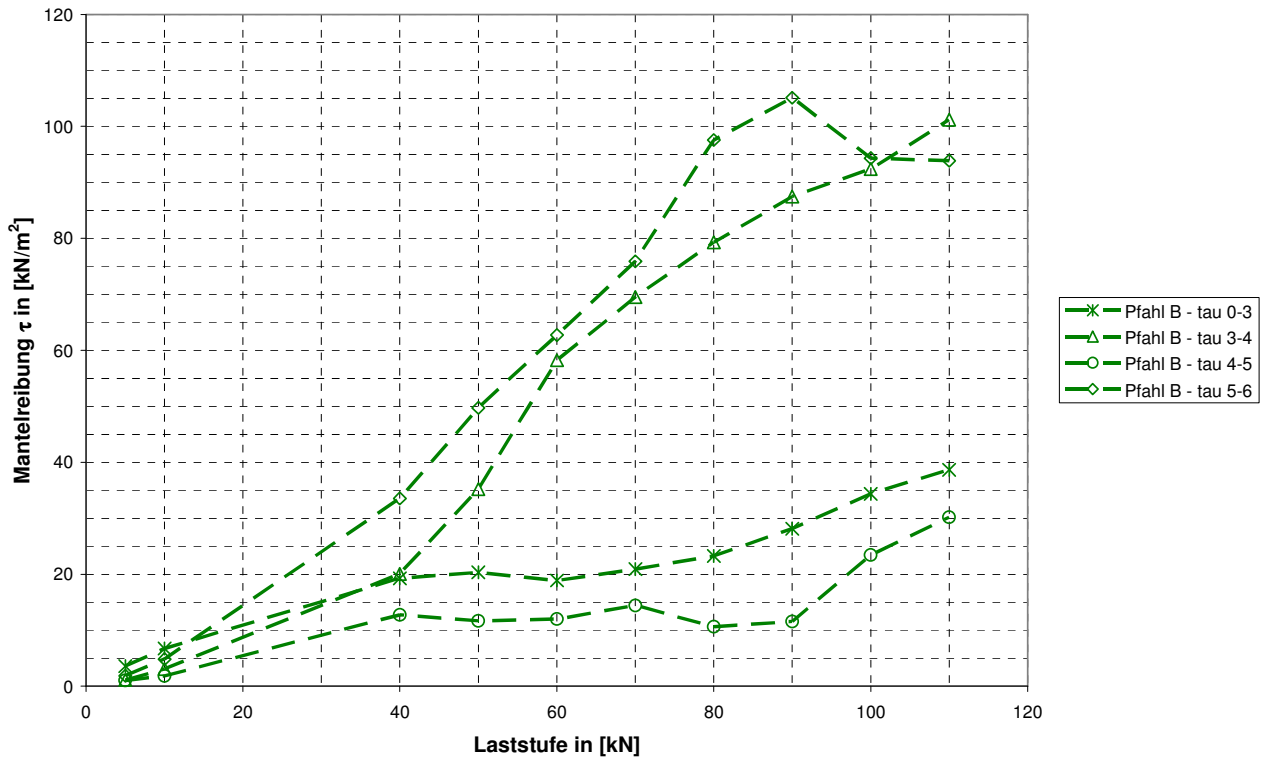


Abbildung A1.7.1: Mantelreibung Pfahl B

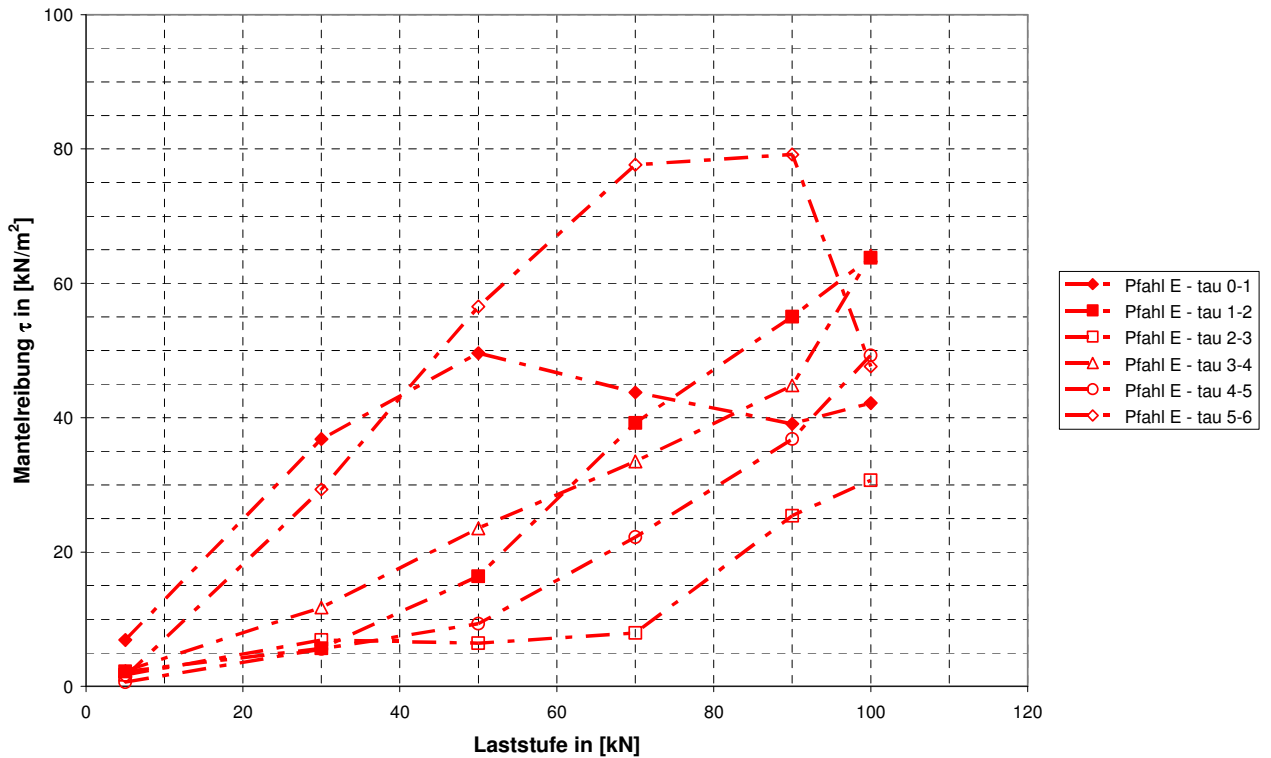


Abbildung A1.7.2: Mantelreibung Pfahl E

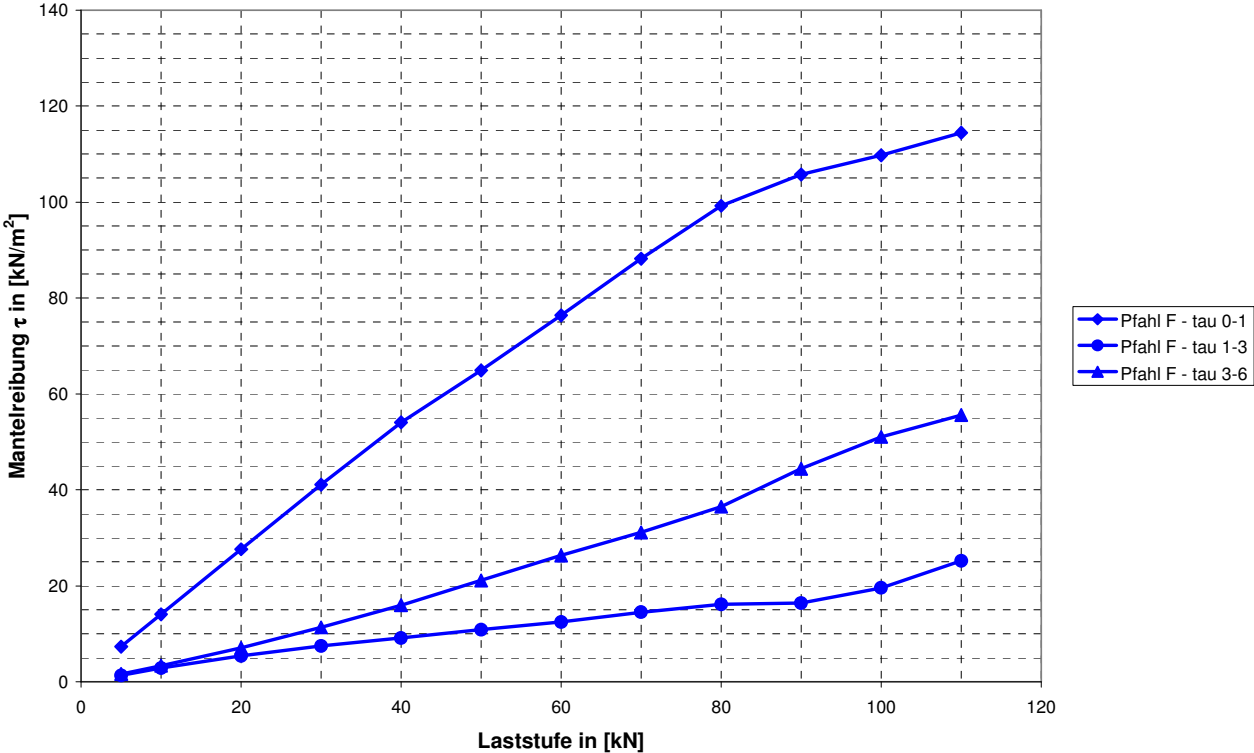


Abbildung A1.7.3: Mantelreibung Pfahl F

Anhang 1.8: Versuchsablauf post-zyklische statische Pfahlprobelbelastungen der ersten Versuchsreihe

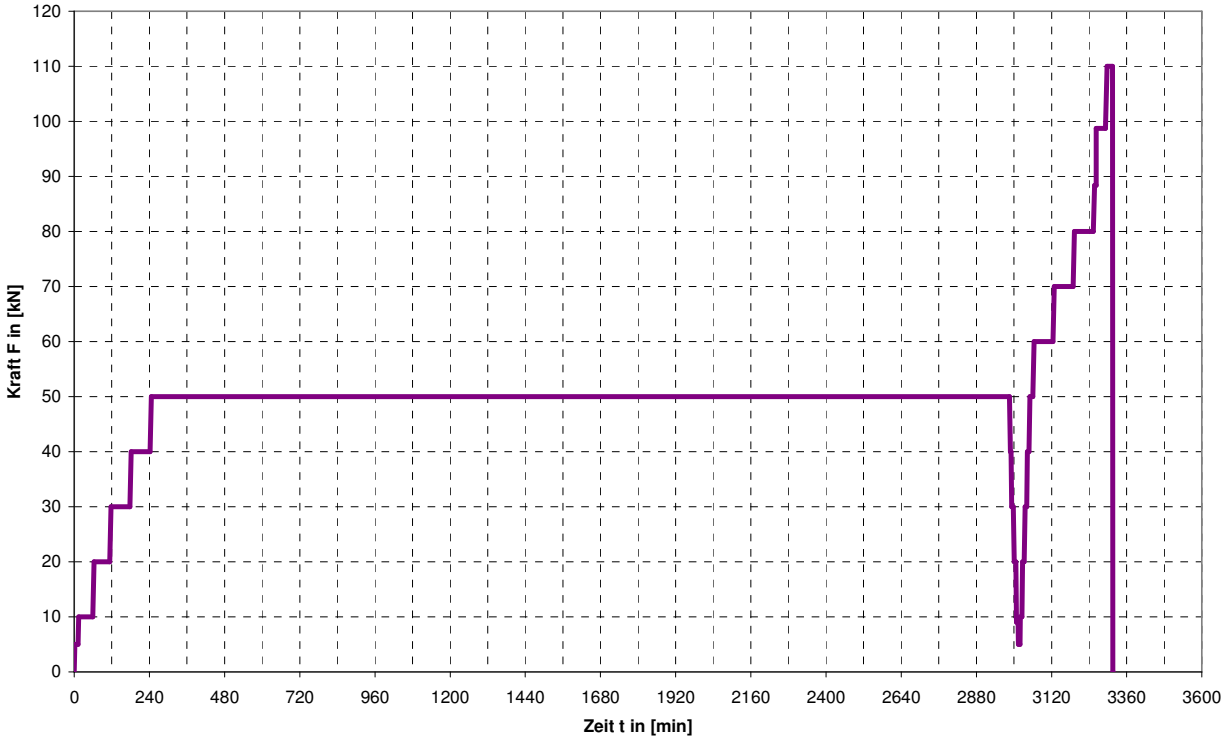


Abbildung A1.8.1: Versuchsablauf Pfahl A

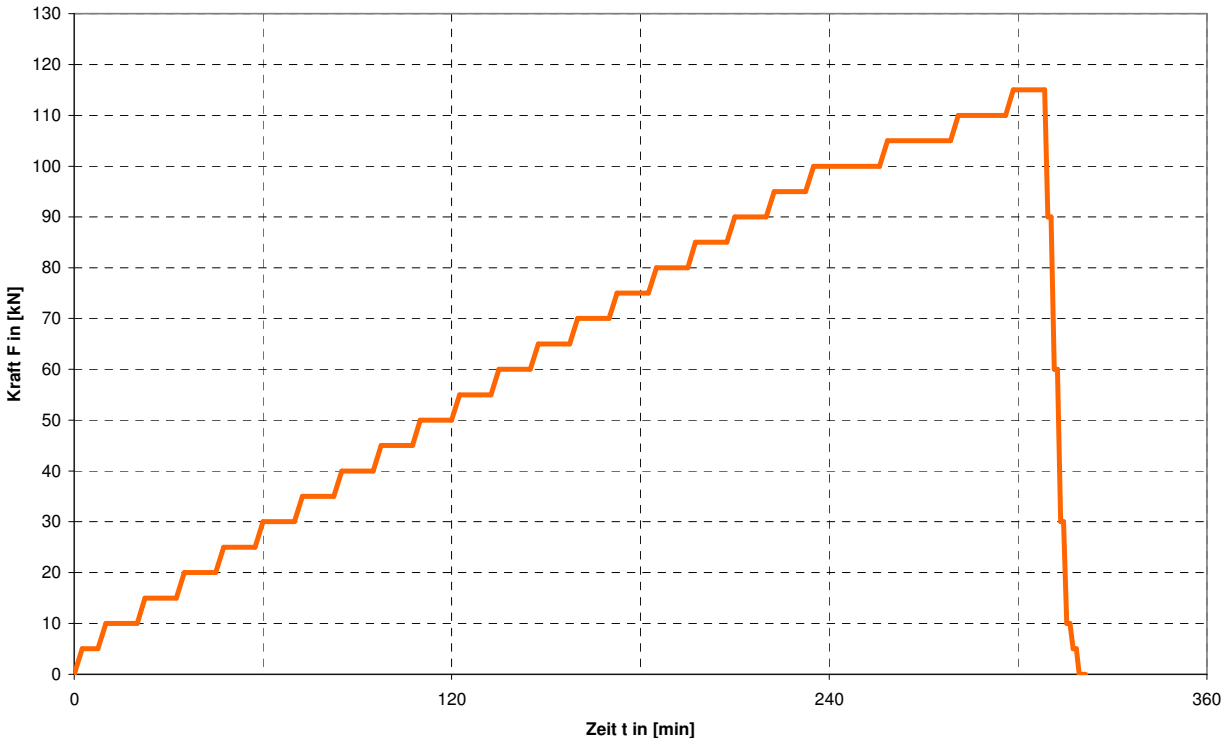


Abbildung A1.8.2: Versuchsablauf Pfahl H

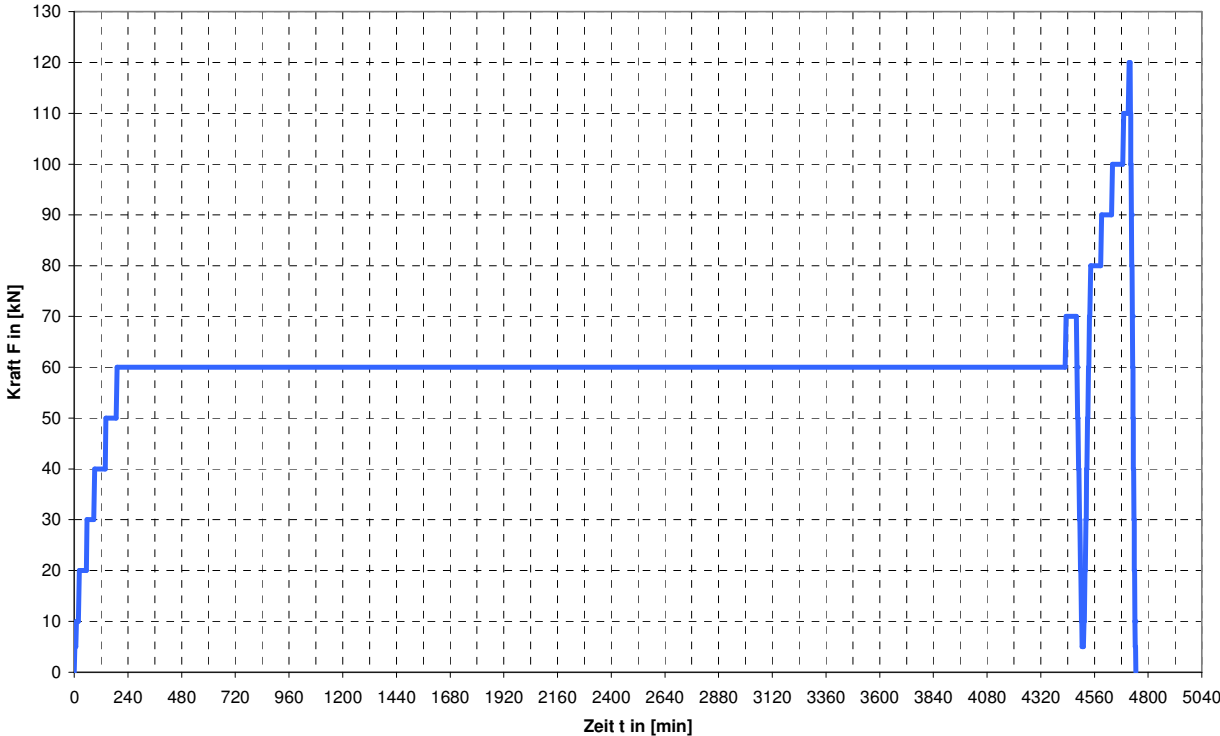


Abbildung A1.8.3: Versuchsablauf Pfahl G

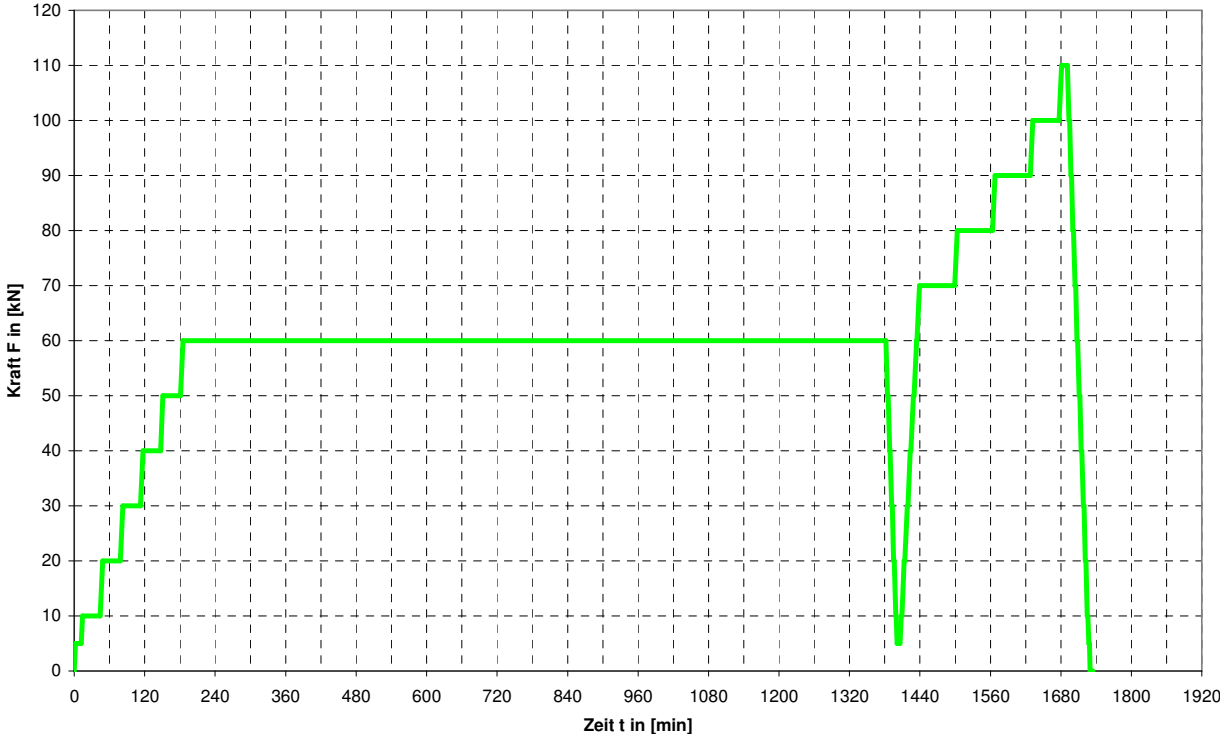


Abbildung A1.8.4: Versuchsablauf Pfahl D

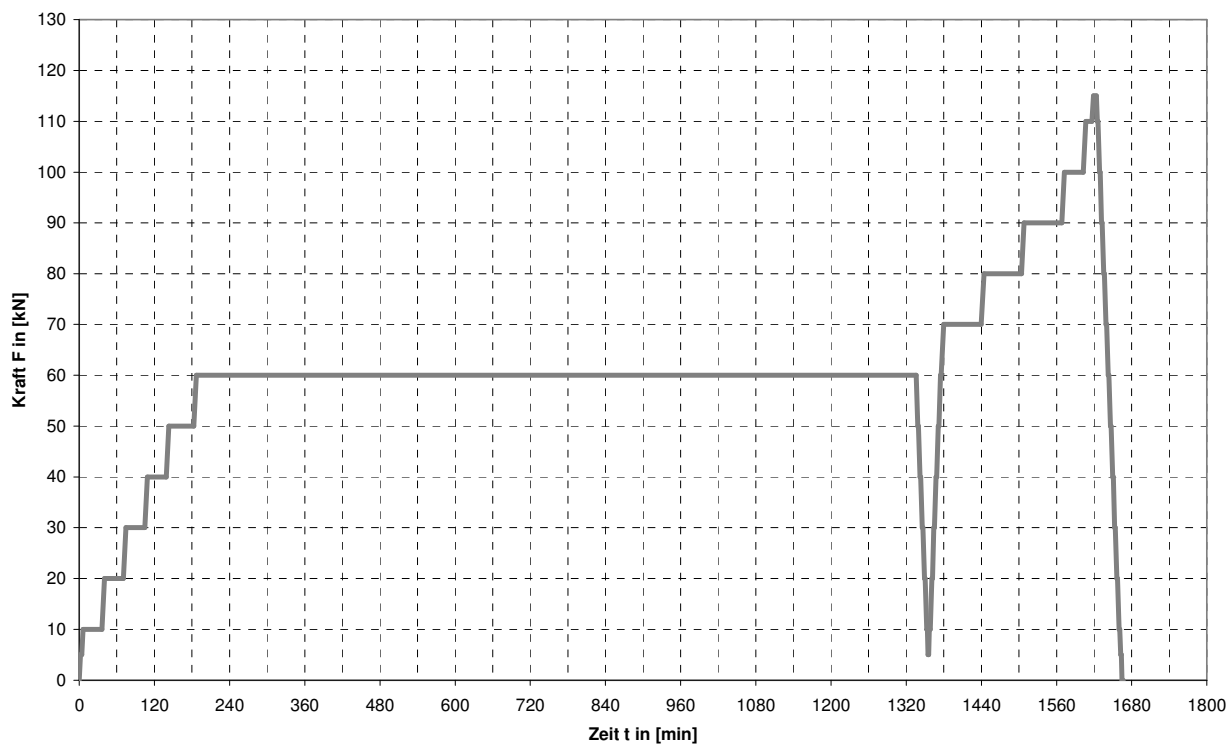


Abbildung A1.8.5: Versuchsablauf Pfahl C

Anhang 1.9: Mantelreibung Pfähle A, H, G, D und C (post-zyklisch)

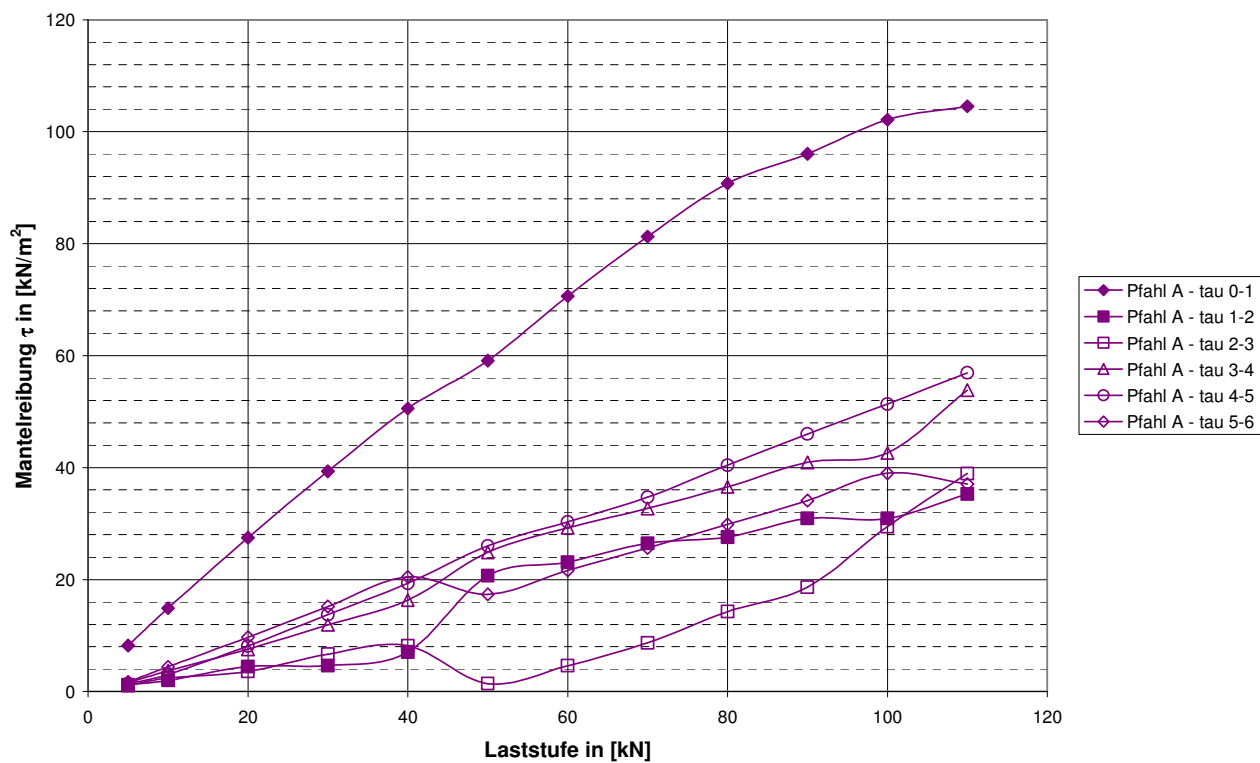


Abbildung A1.9.1: Mantelreibung Pfahl A

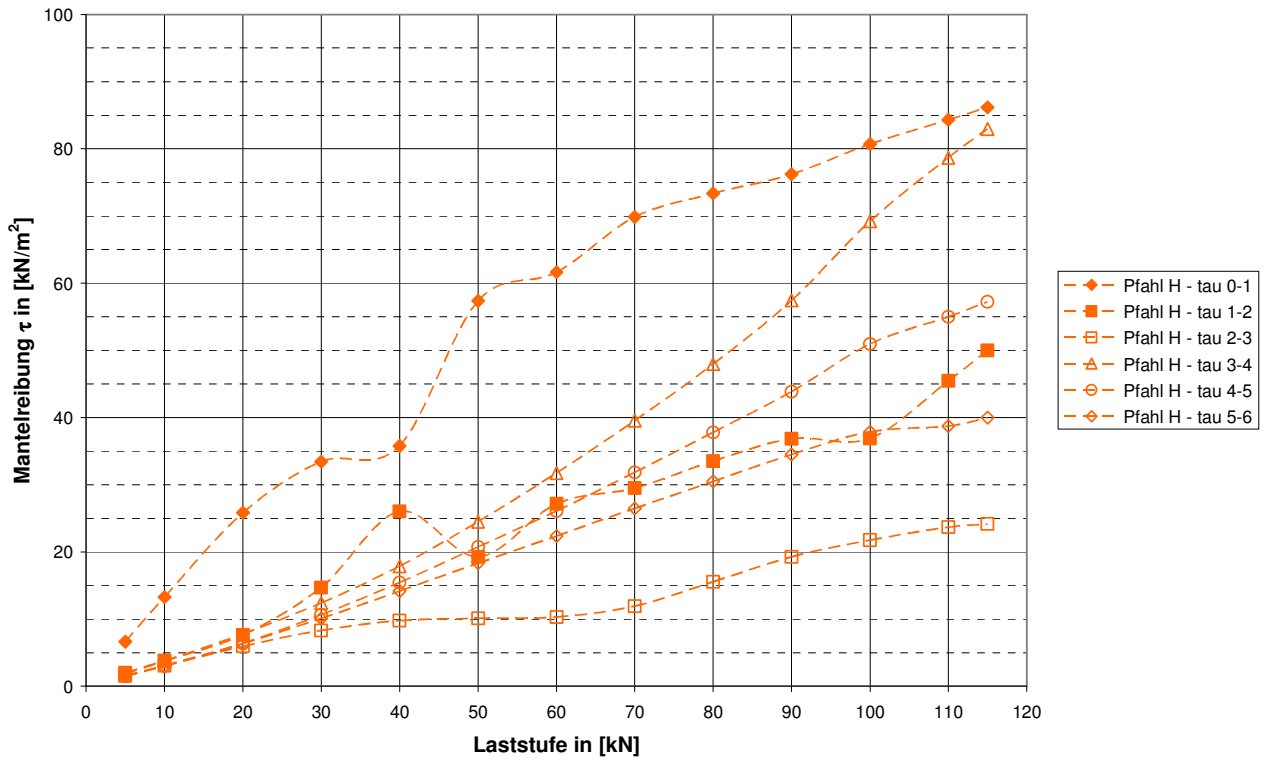


Abbildung A1.9.2: Mantelreibung Pfahl H

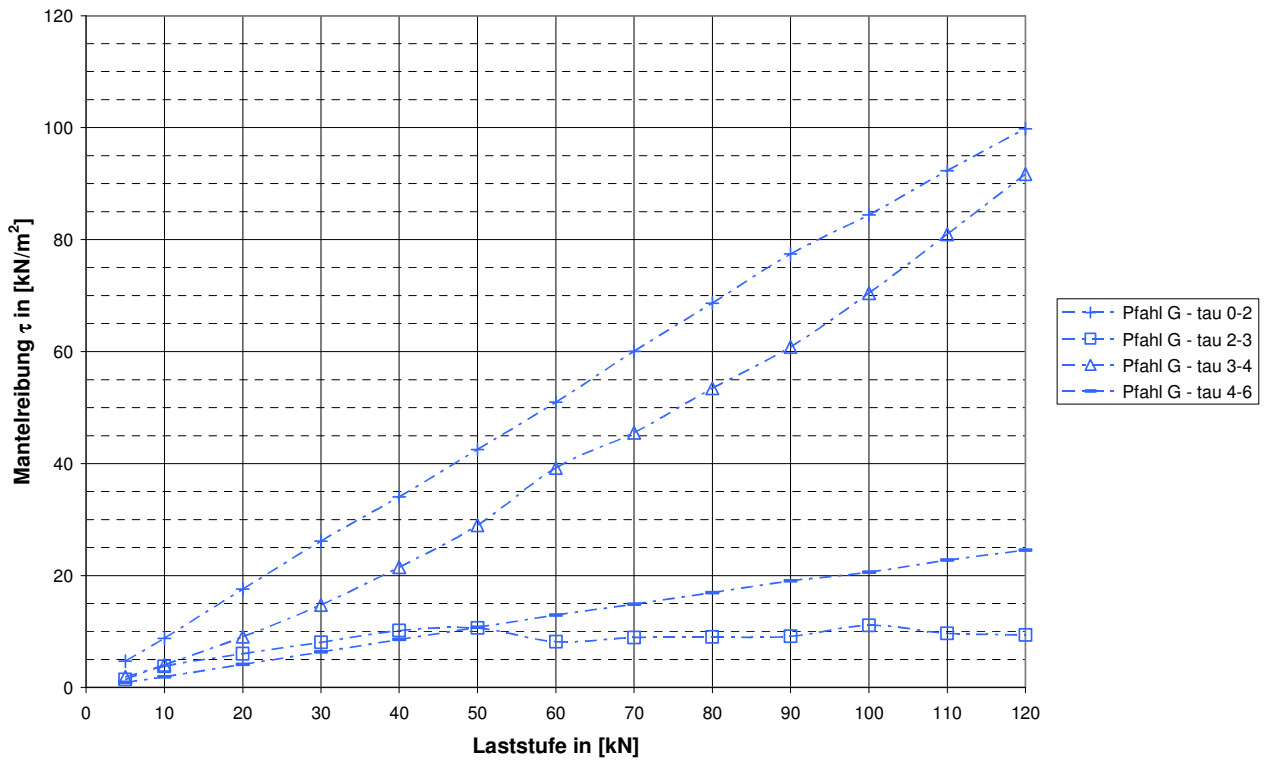


Abbildung A1.9.3: Mantelreibung Pfahl G

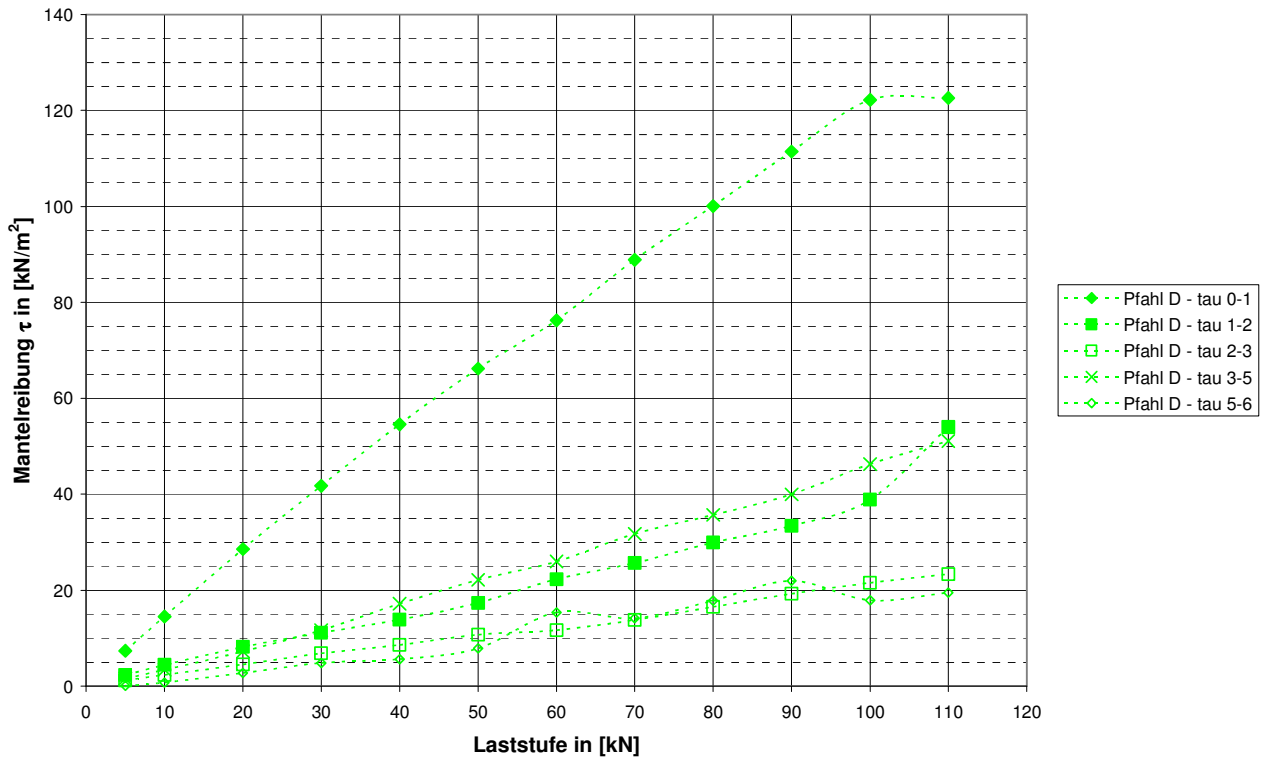


Abbildung A1.9.4: Mantelreibung Pfahl D

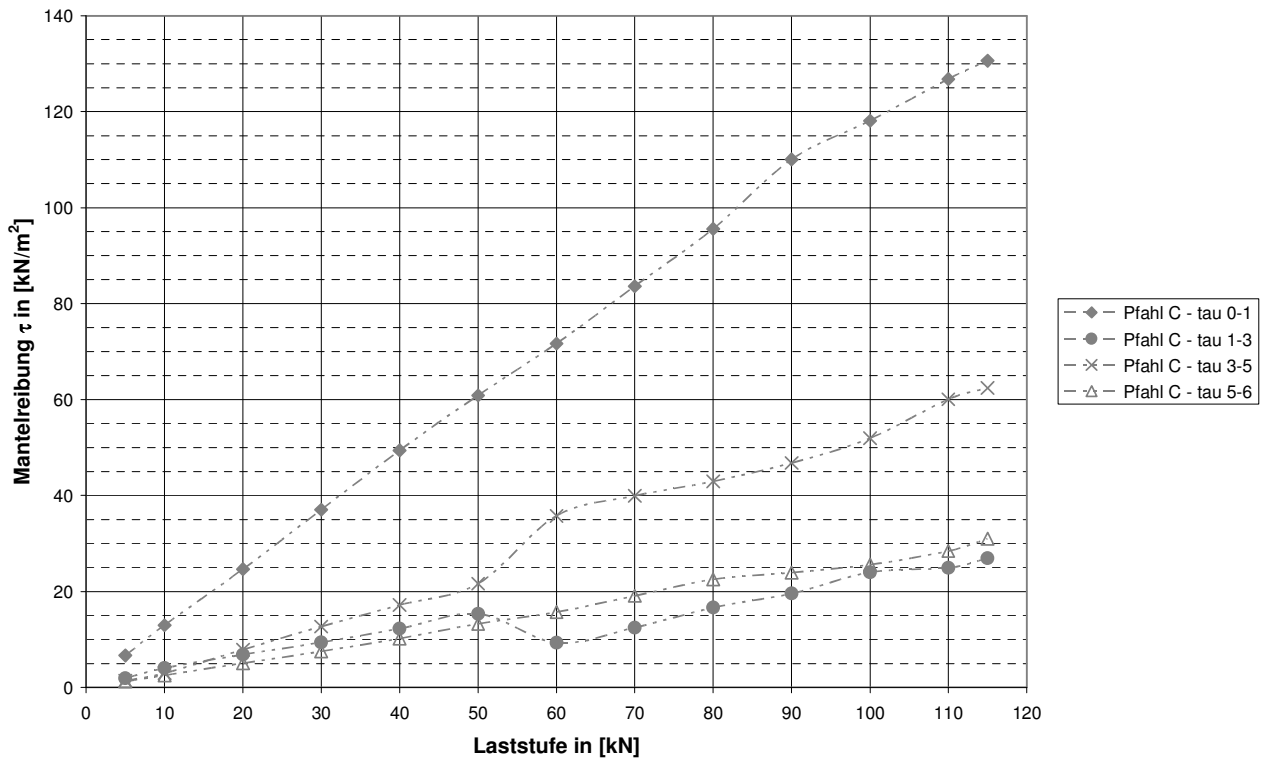
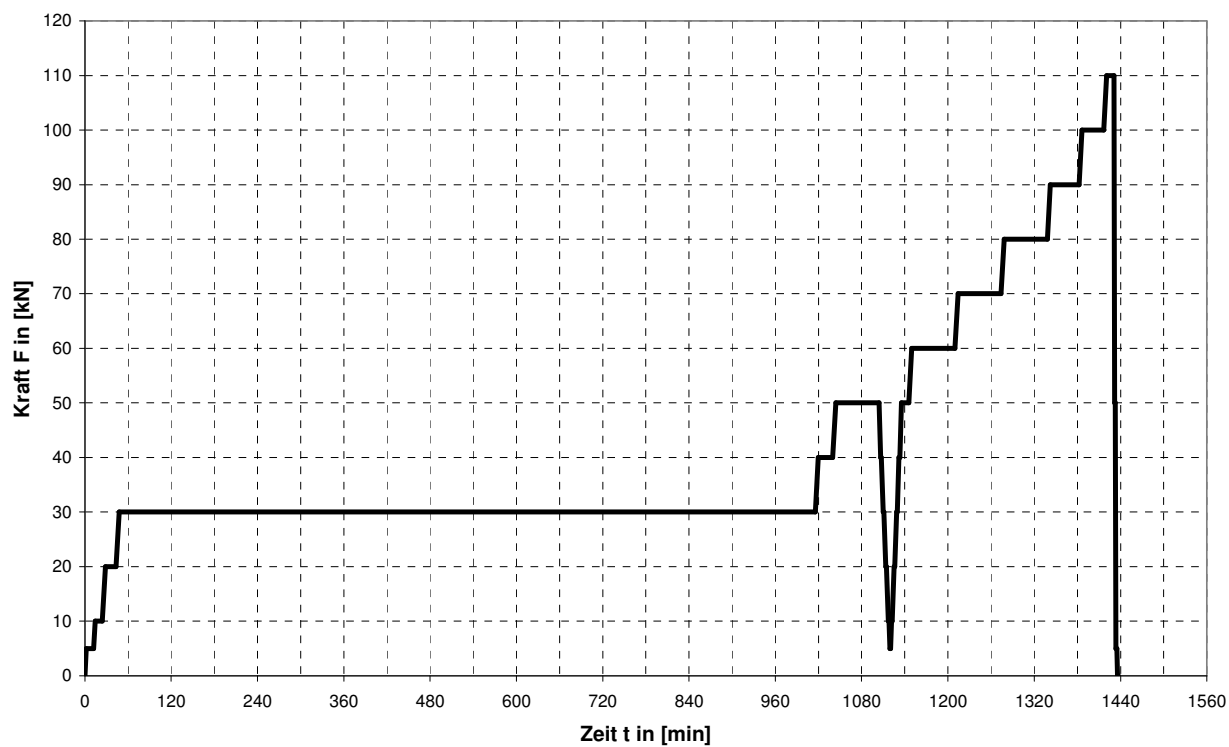


Abbildung A1.9.5: Mantelreibung Pfahl C

Anhang 1.10: Versuchsablauf statische Pfahlprobelastung Pfahl 1 (2. Versuchsreihe)



Anhang 1.11: Versuchsablauf post-zyklische statische Pfahlprobelastungen der 2. Versuchsreihe

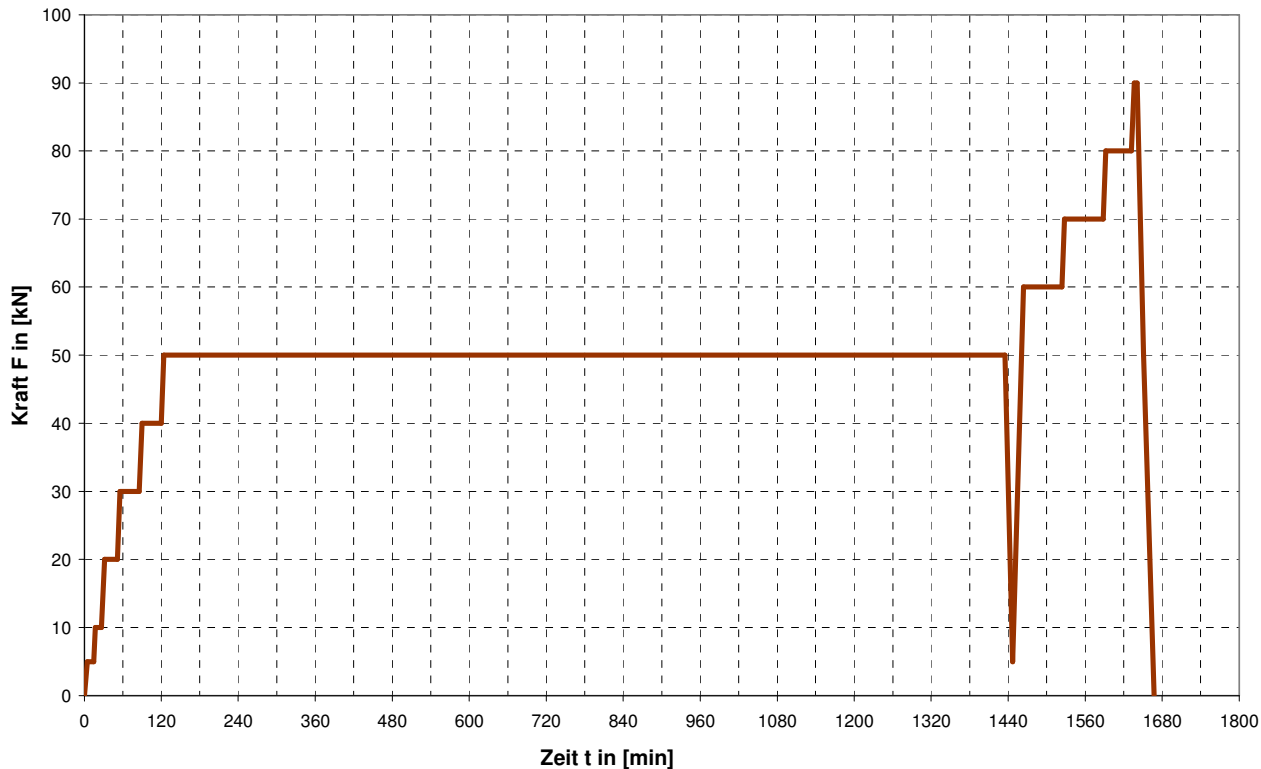


Abbildung A1.11.1: Versuchsablauf Pfahl V (Zugbelastung)

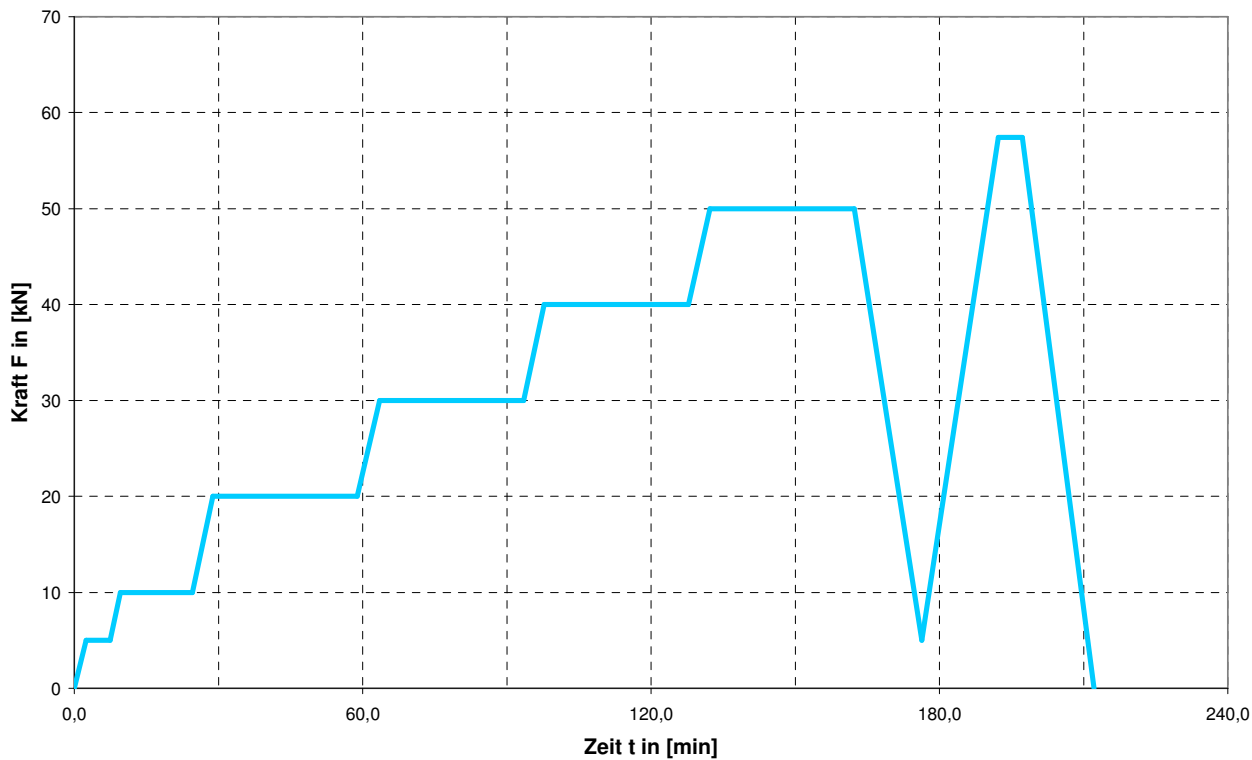
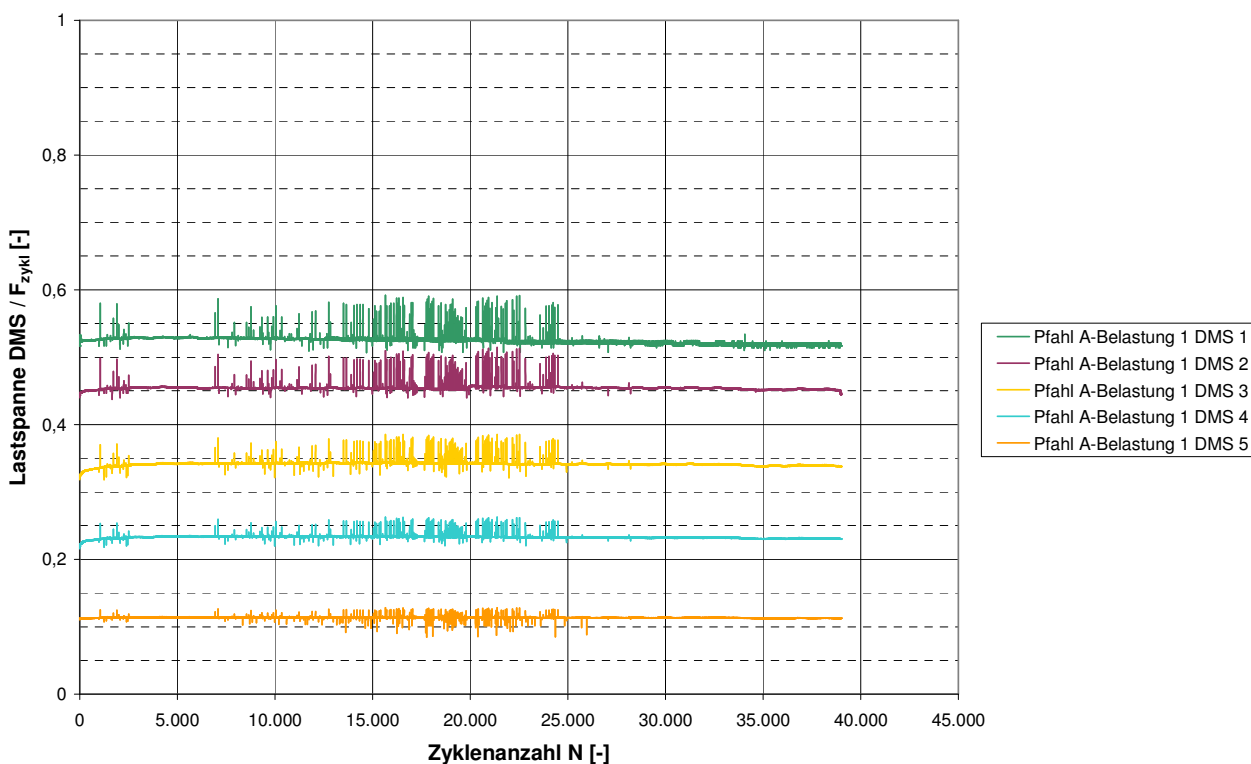
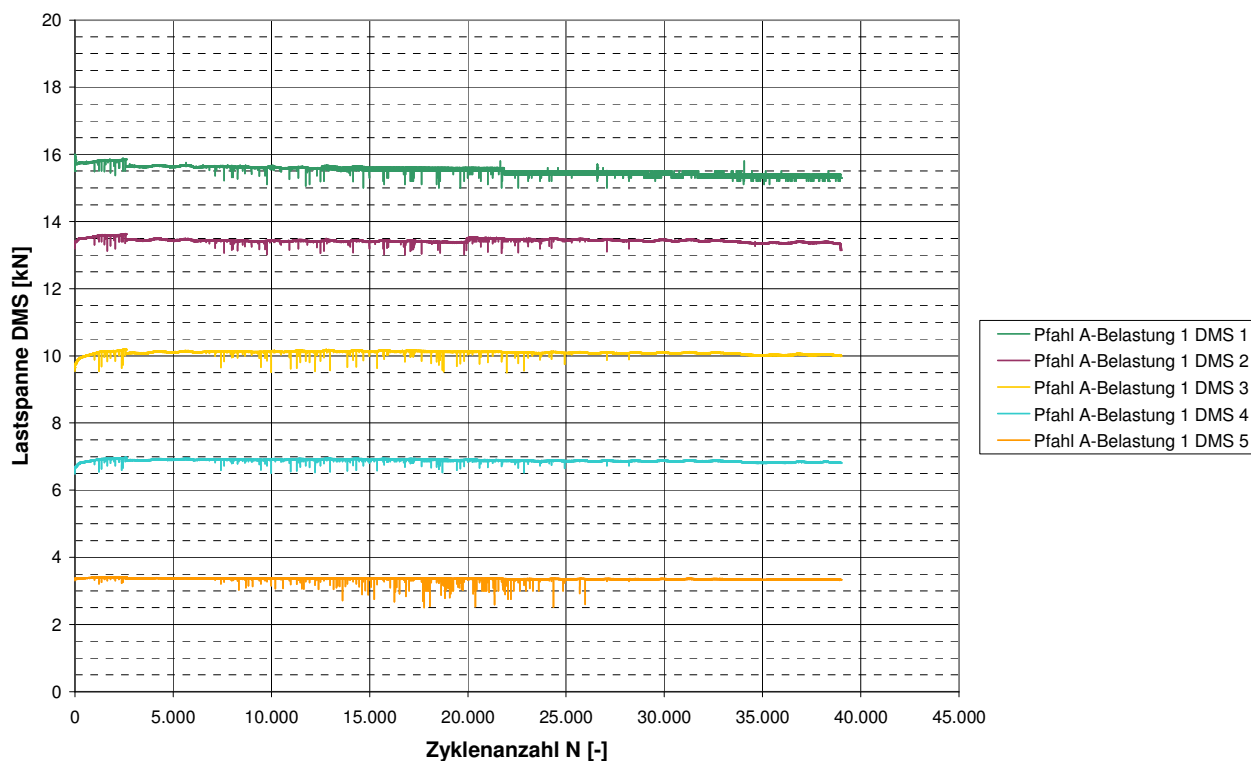


Abbildung A1.11.2: Versuchsablauf Pfahl W (Druckbelastung)

Anhang 1.12: Auswertung Dehnmessstreifen Zugschwellversuche (Versuchsreihe 1)



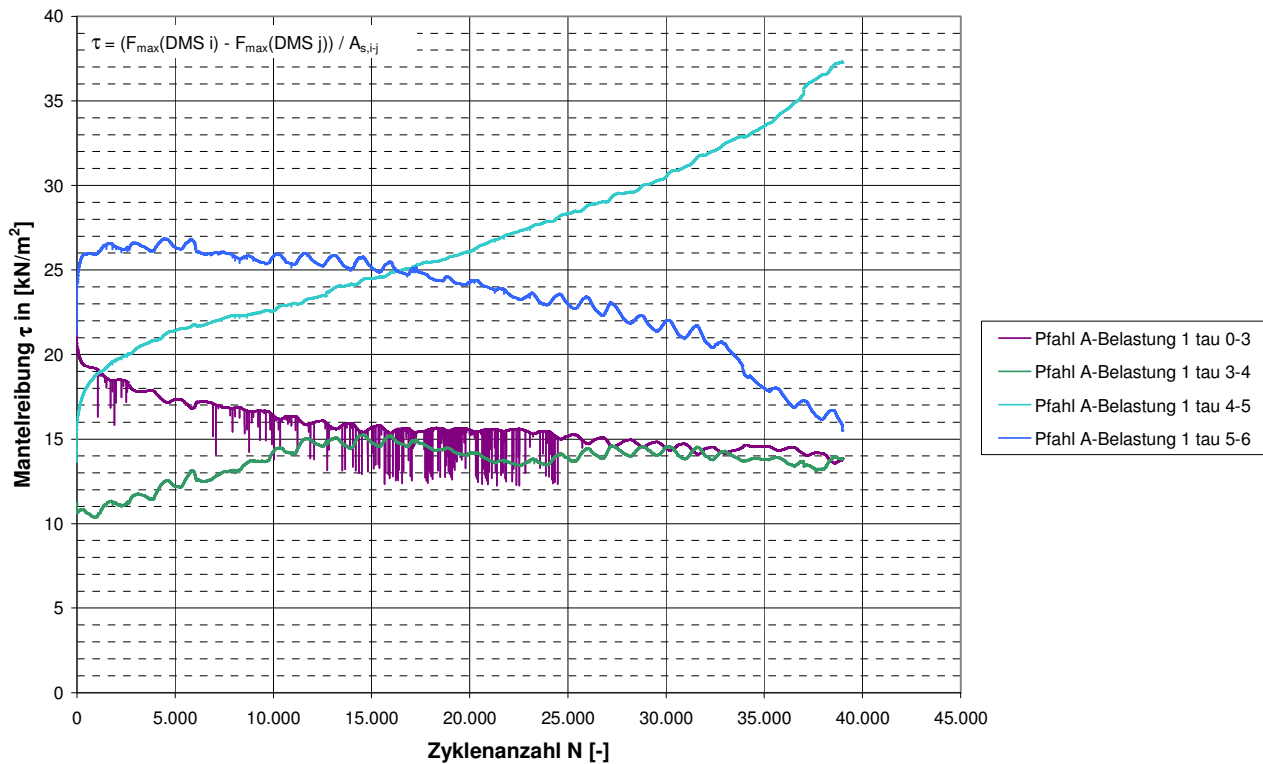
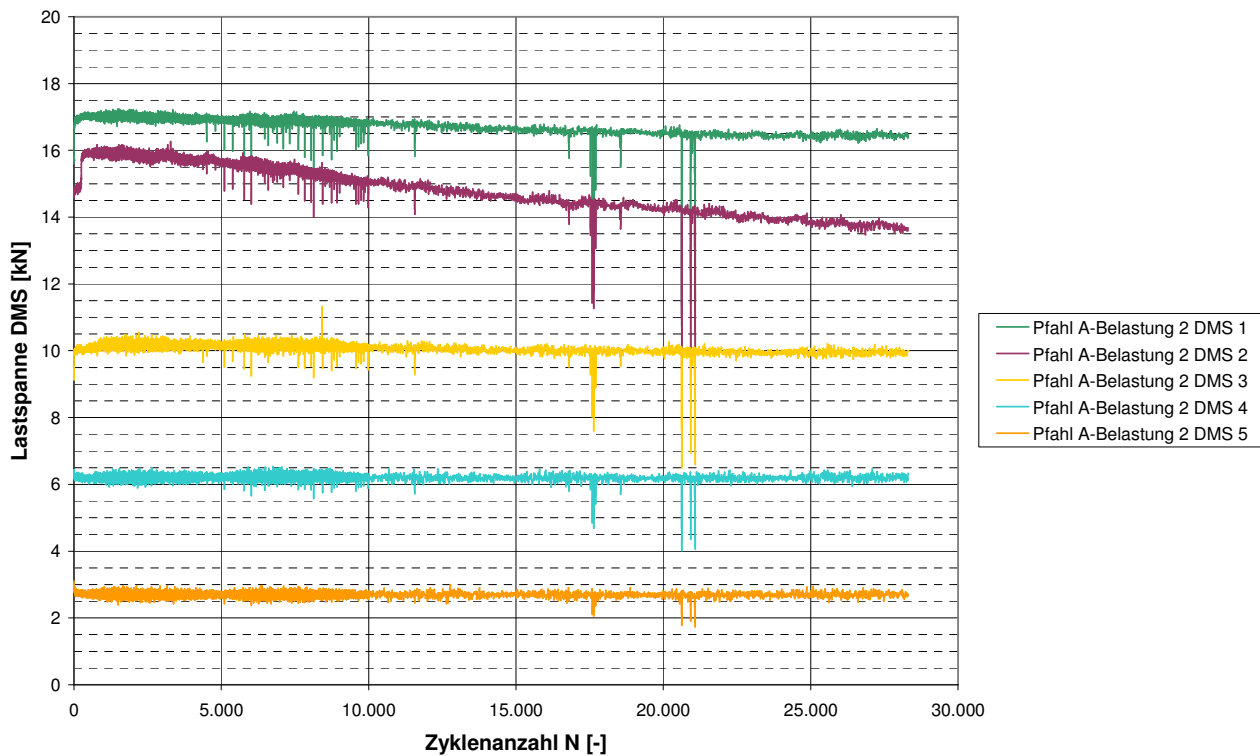


Abbildung A1.12.1: Auswertung DMS Pfahl A-Belastung 1 ($F_{\text{mittel}} = 20 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 15 \text{ kN}$)



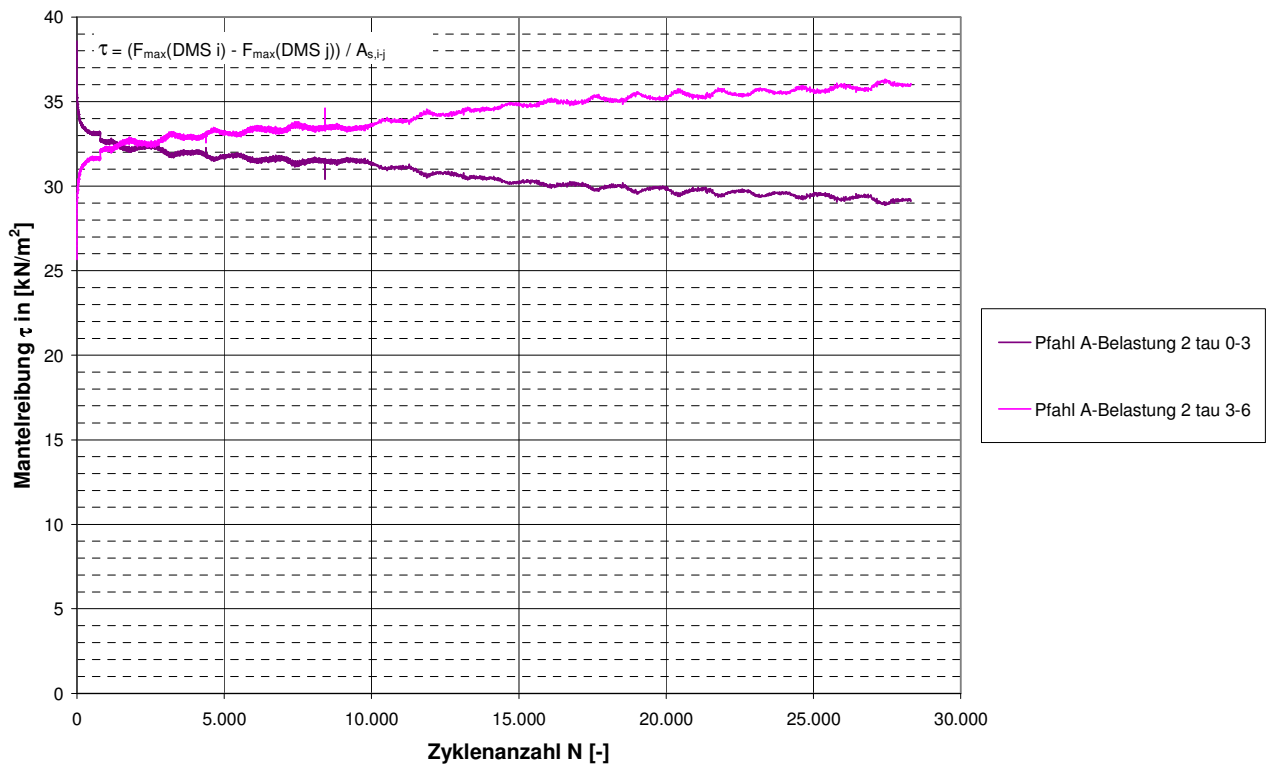
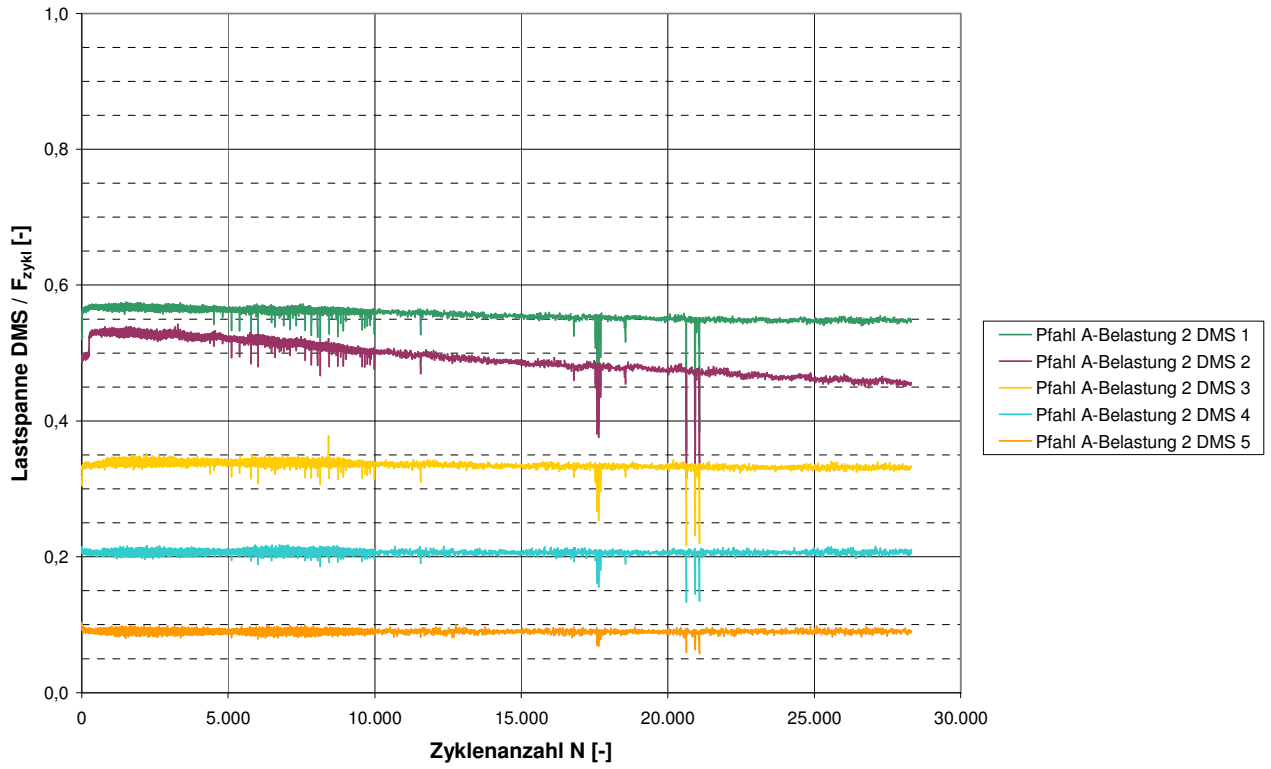
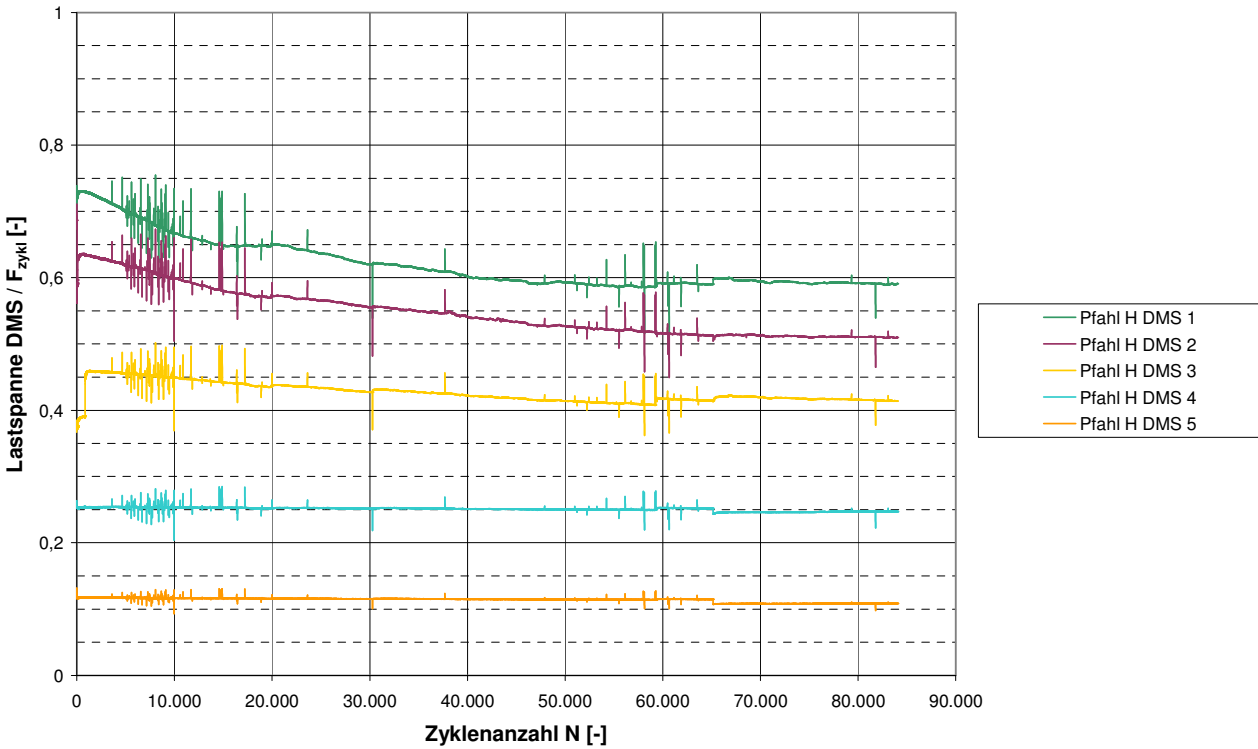
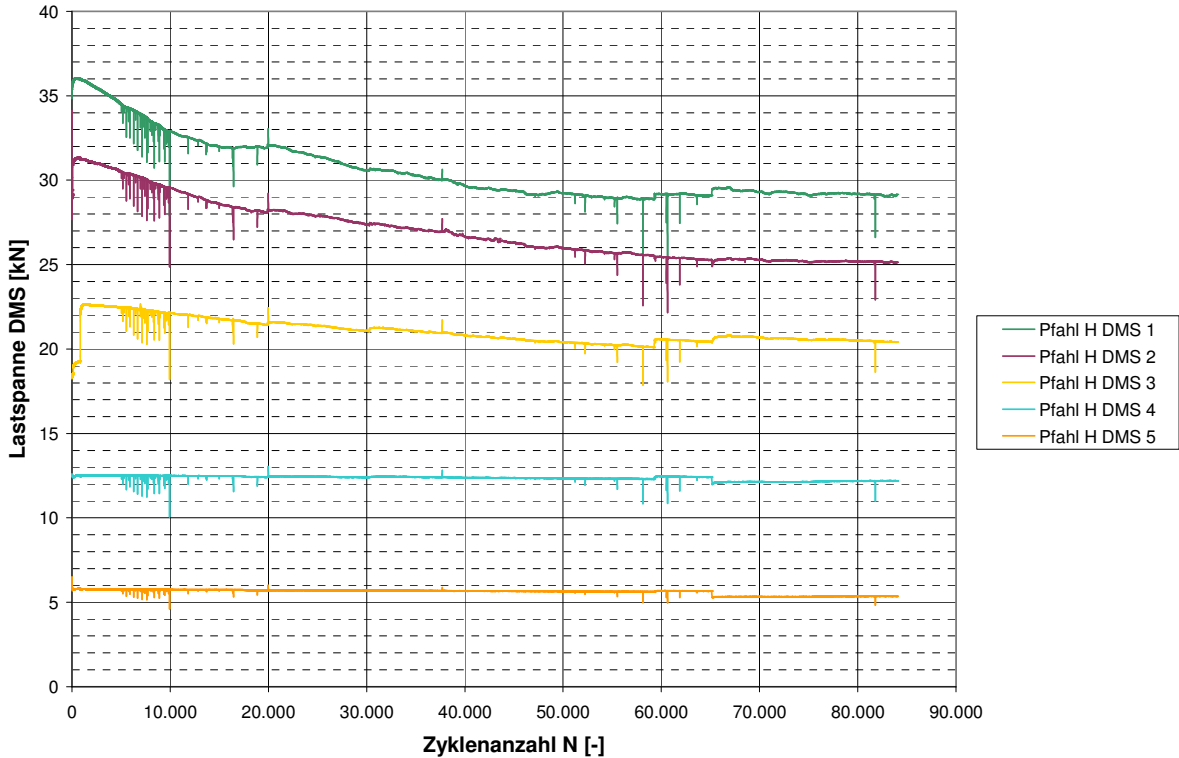


Abbildung A1.12.2: Auswertung DMS Pfahl A-Belastung 2 ($F_{\text{mittel}} = 50 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 15 \text{ kN}$)



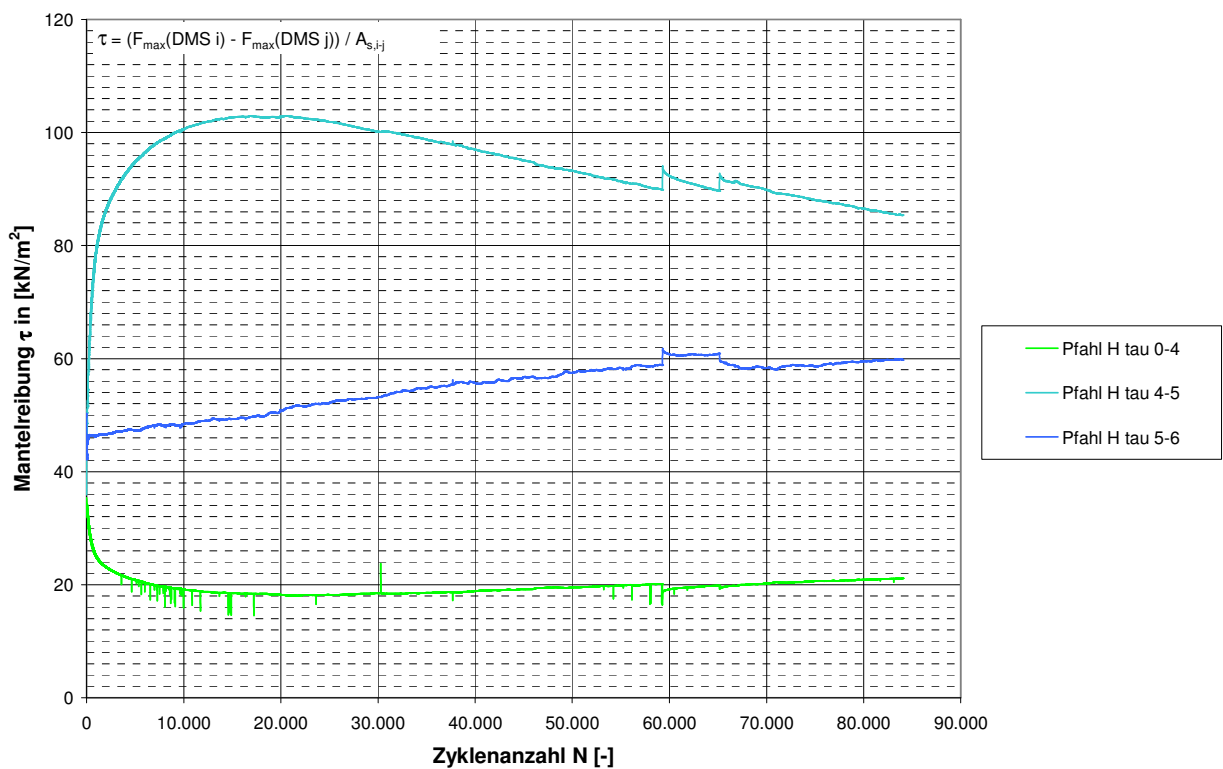
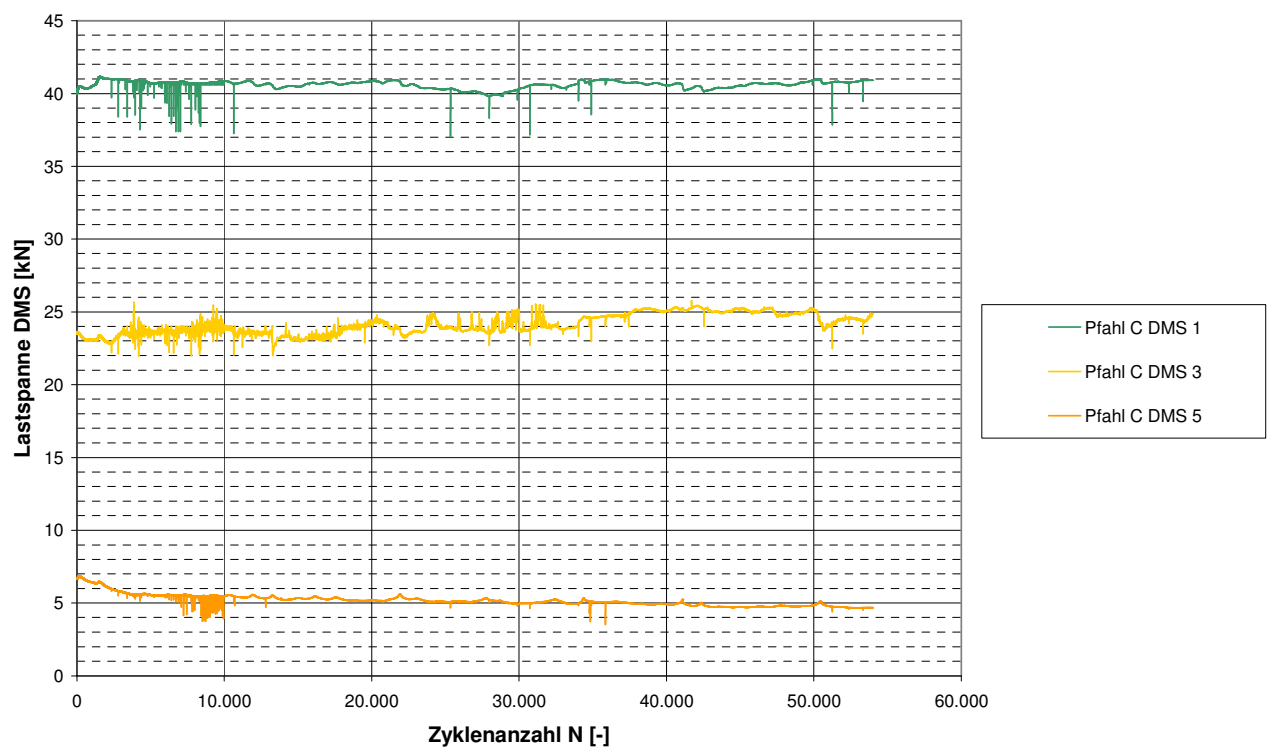


Abbildung A1.12.3: Auswertung DMS Pfahl H ($F_{\text{mittel}} = 50 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 25 \text{ kN}$)



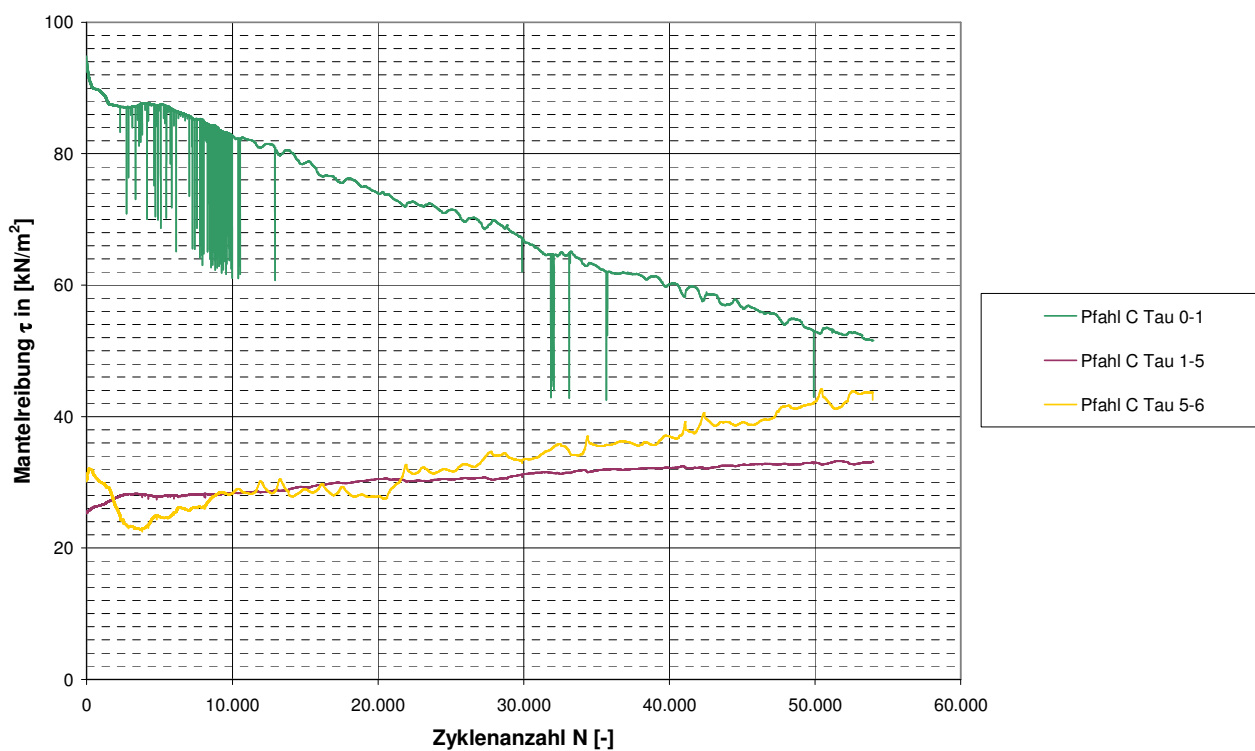
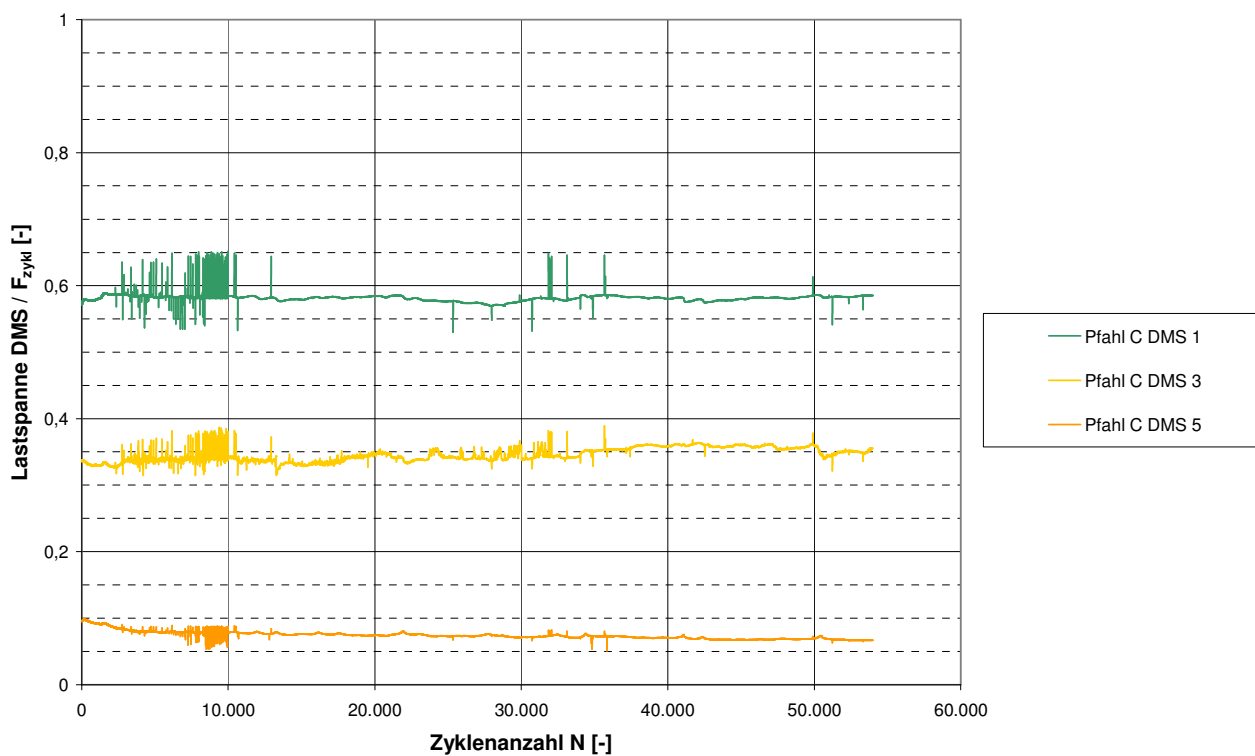
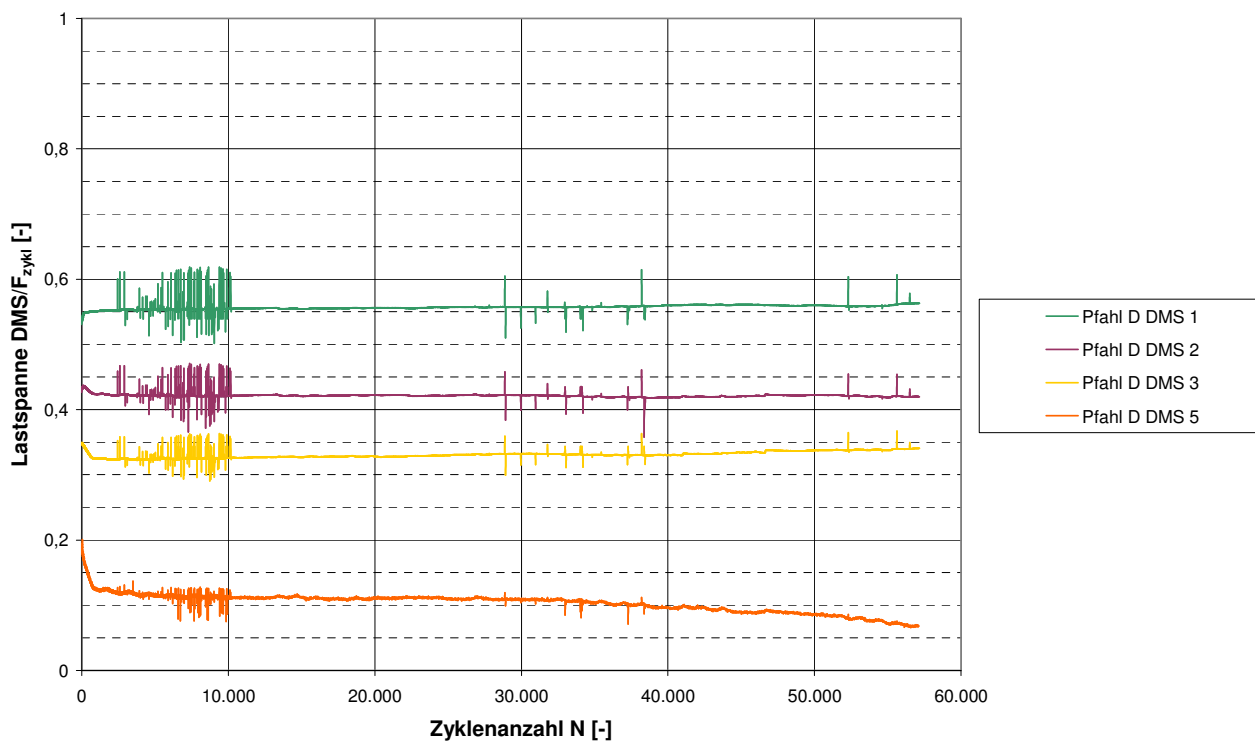
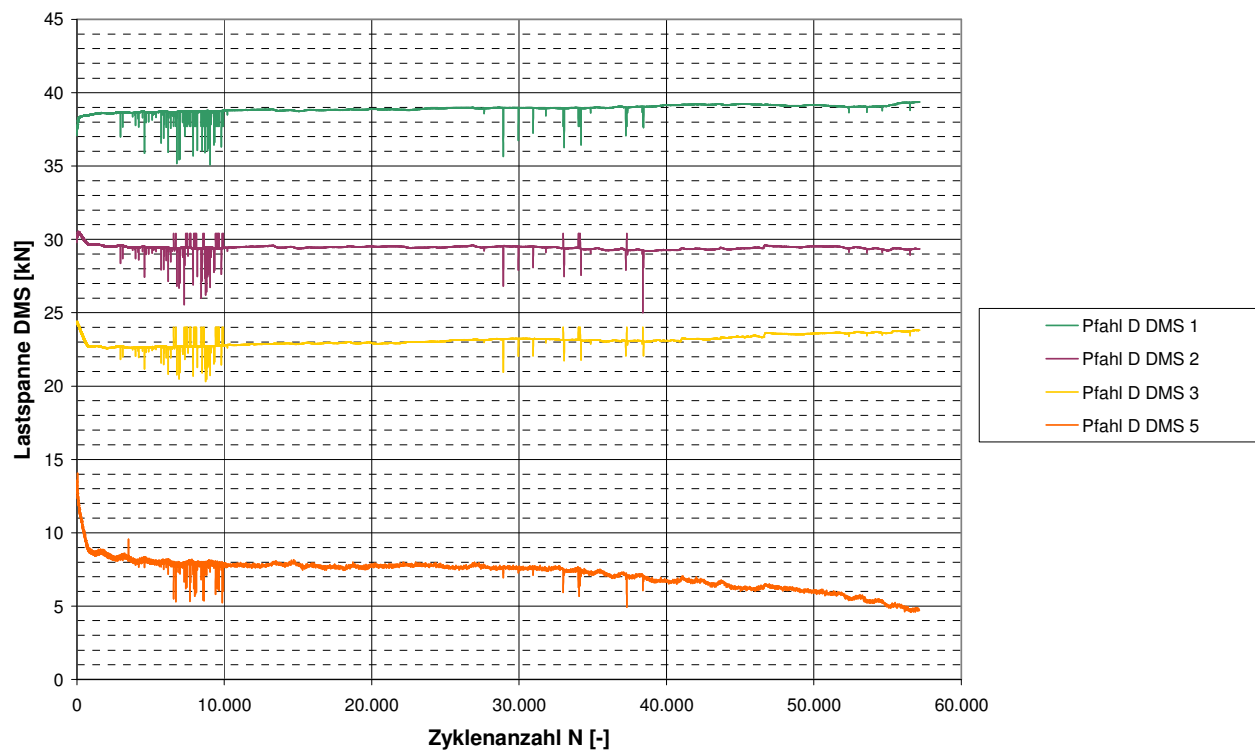


Abbildung A1.12.4: Auswertung DMS Pfahl C ($F_{mittel} = 40$ kN, $F'_{zykl} = 35$ kN)



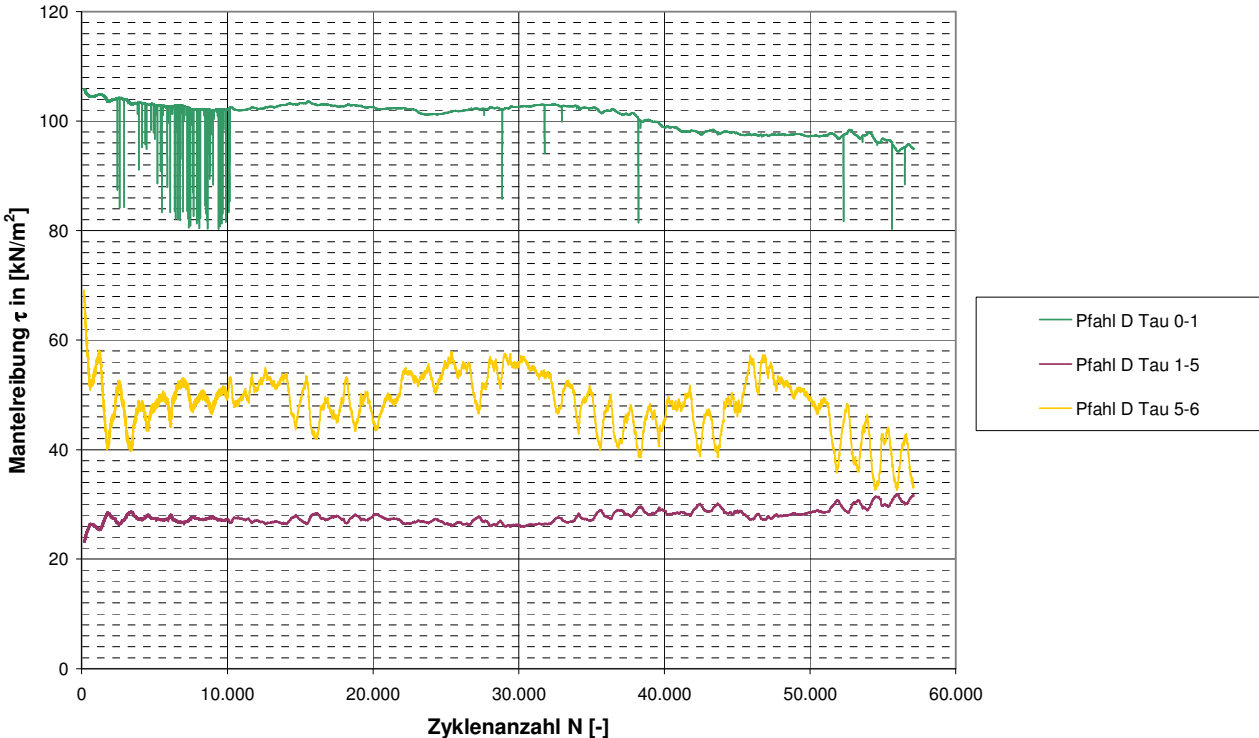
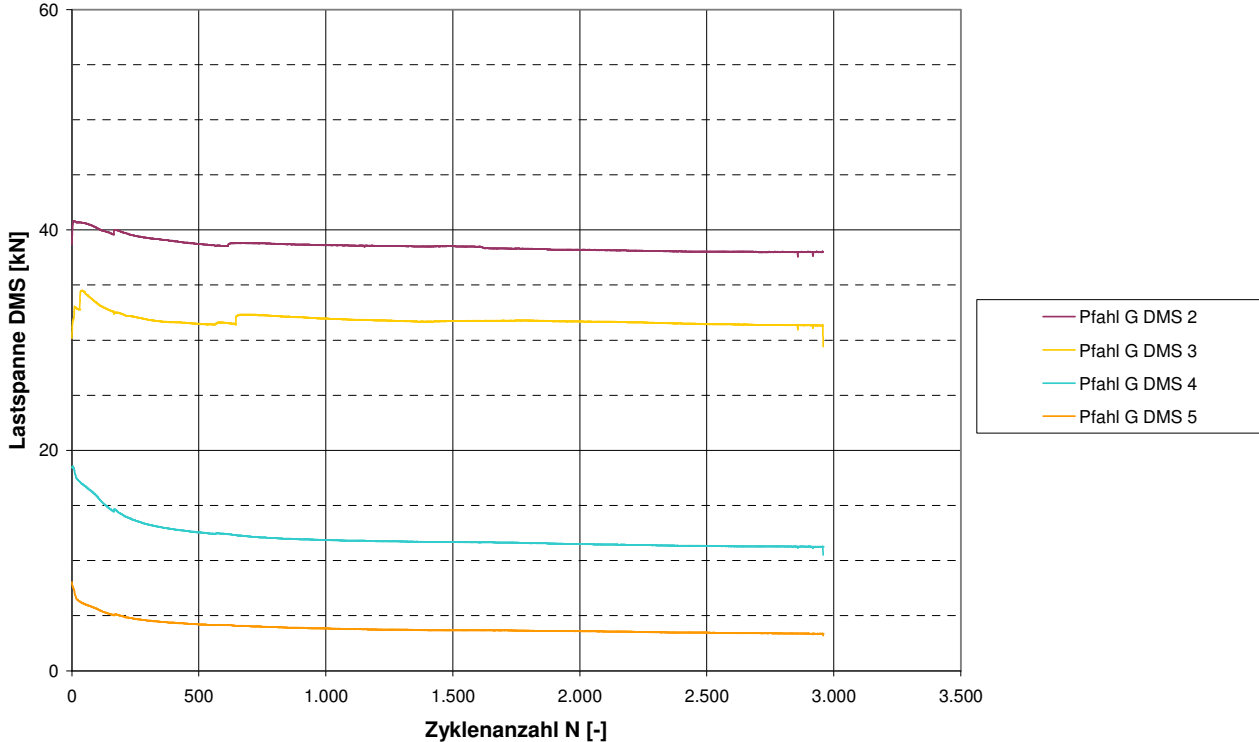


Abbildung A1.12.5: Auswertung DMS Pfahl D ($F_{\text{mittel}} = 50 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 35 \text{ kN}$)



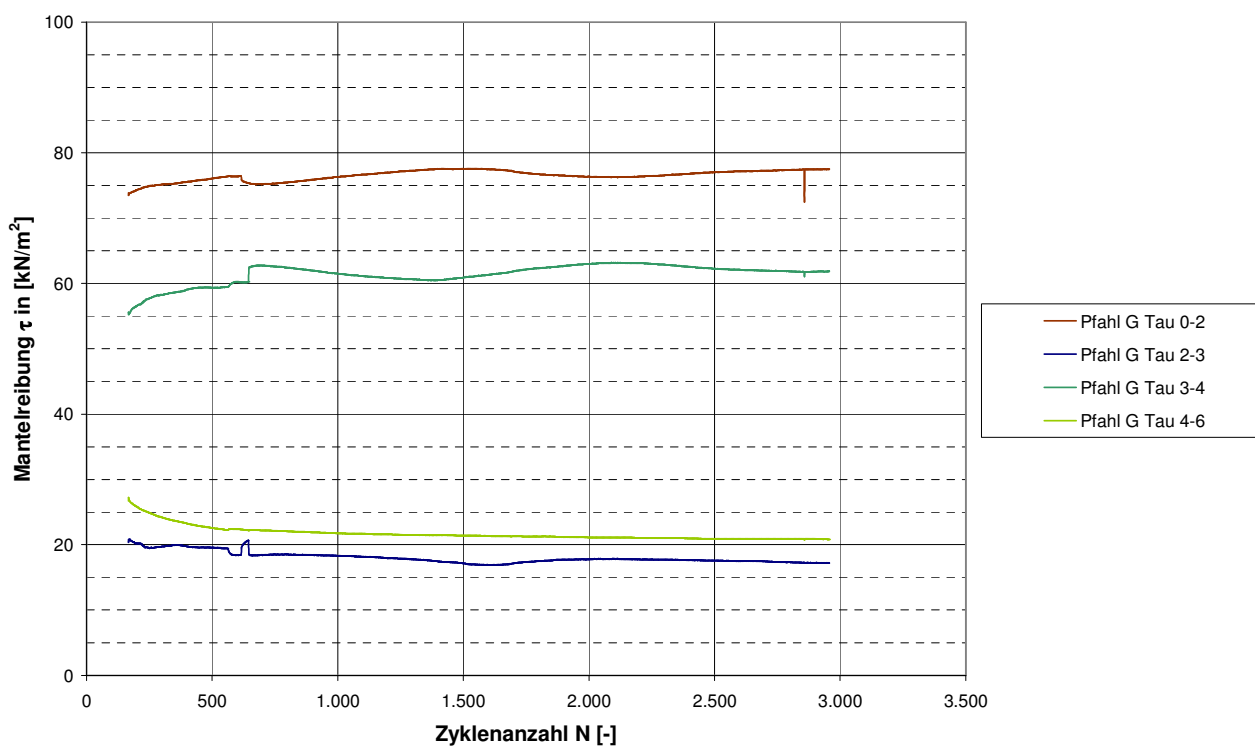
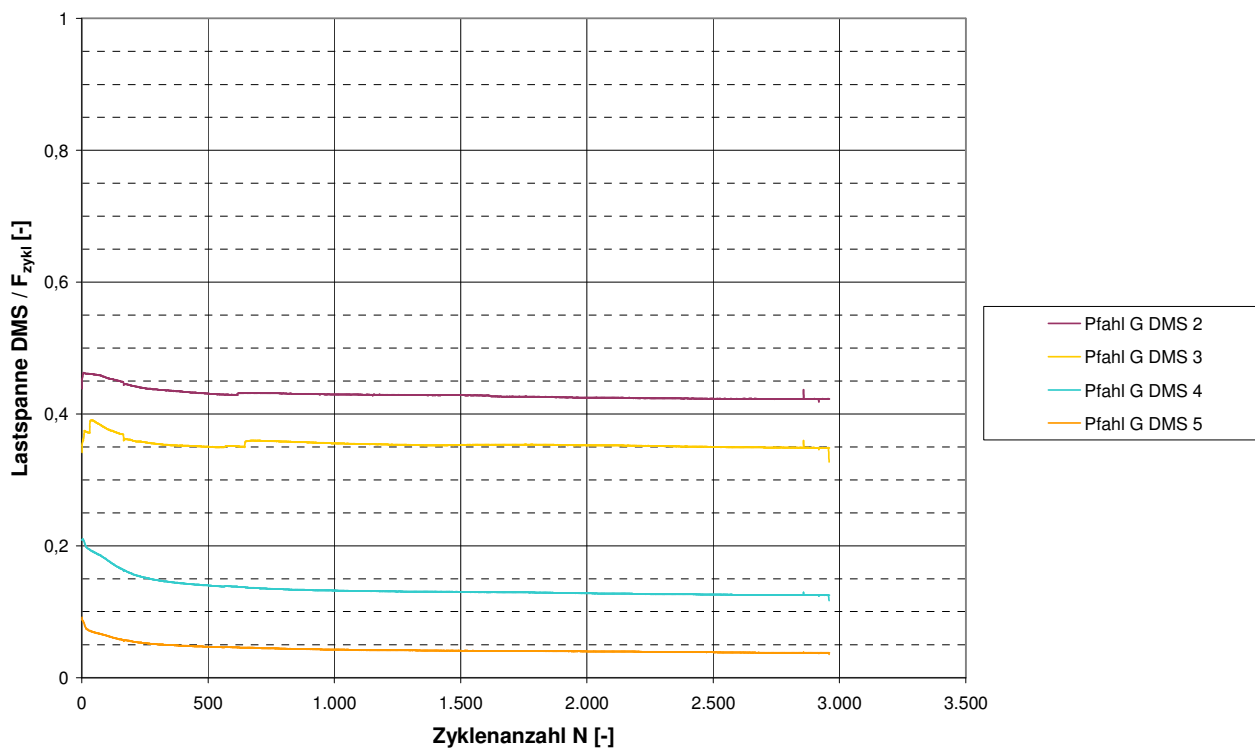
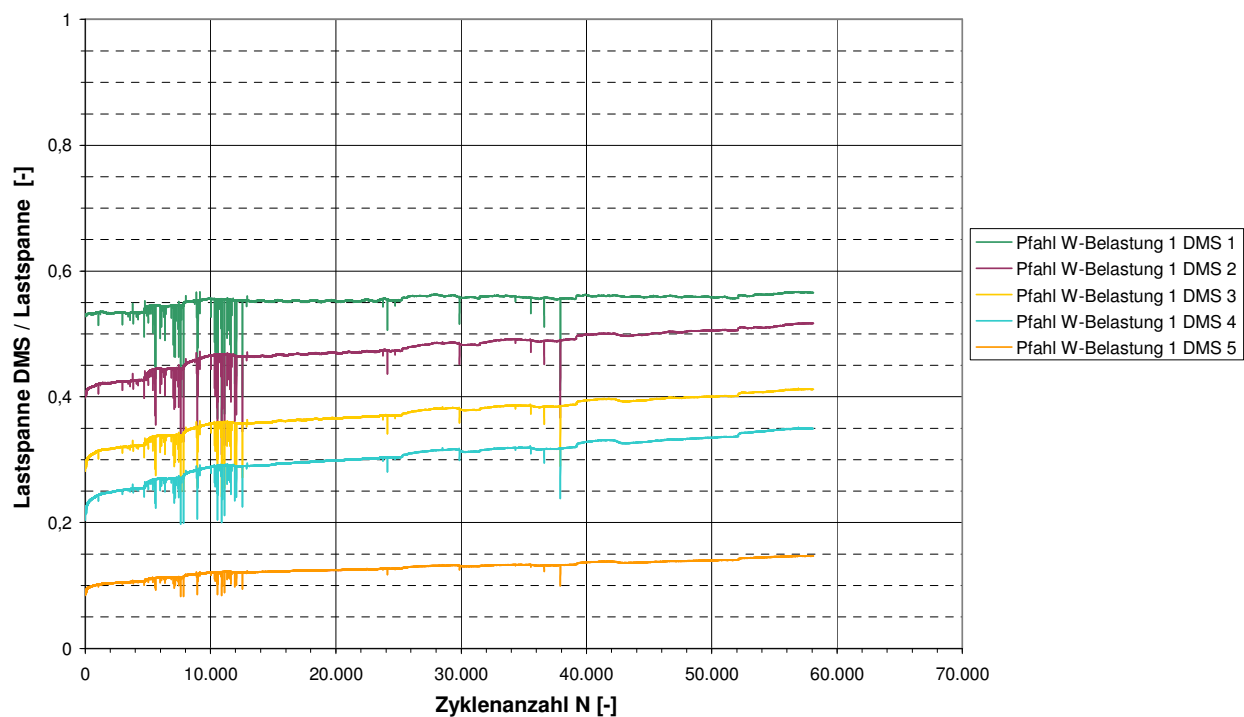
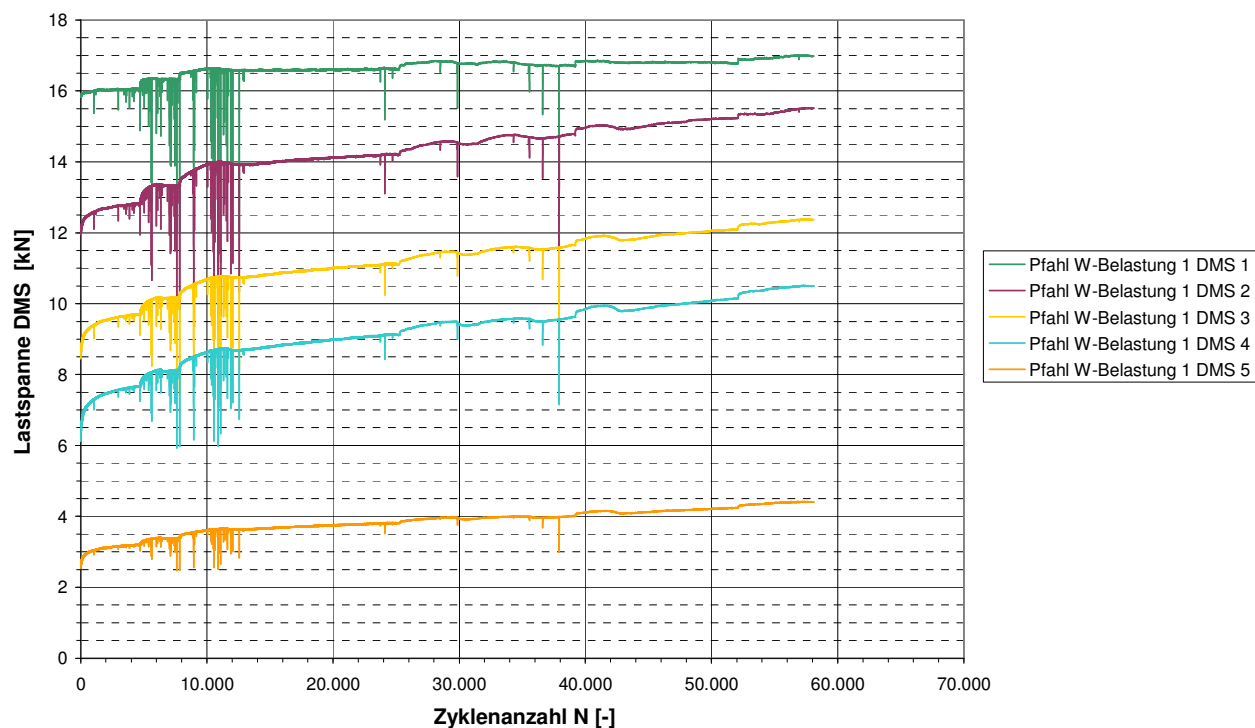


Abbildung A1.12.6: Auswertung DMS Pfahl G ($F_{mittel} = 50 \text{ kN}$, $F'_{zykl} = 45 \text{ kN}$)

Anhang 1.13: Auswertung Dehnmessstreifen Wechsellastversuche (Versuchsreihe 2)



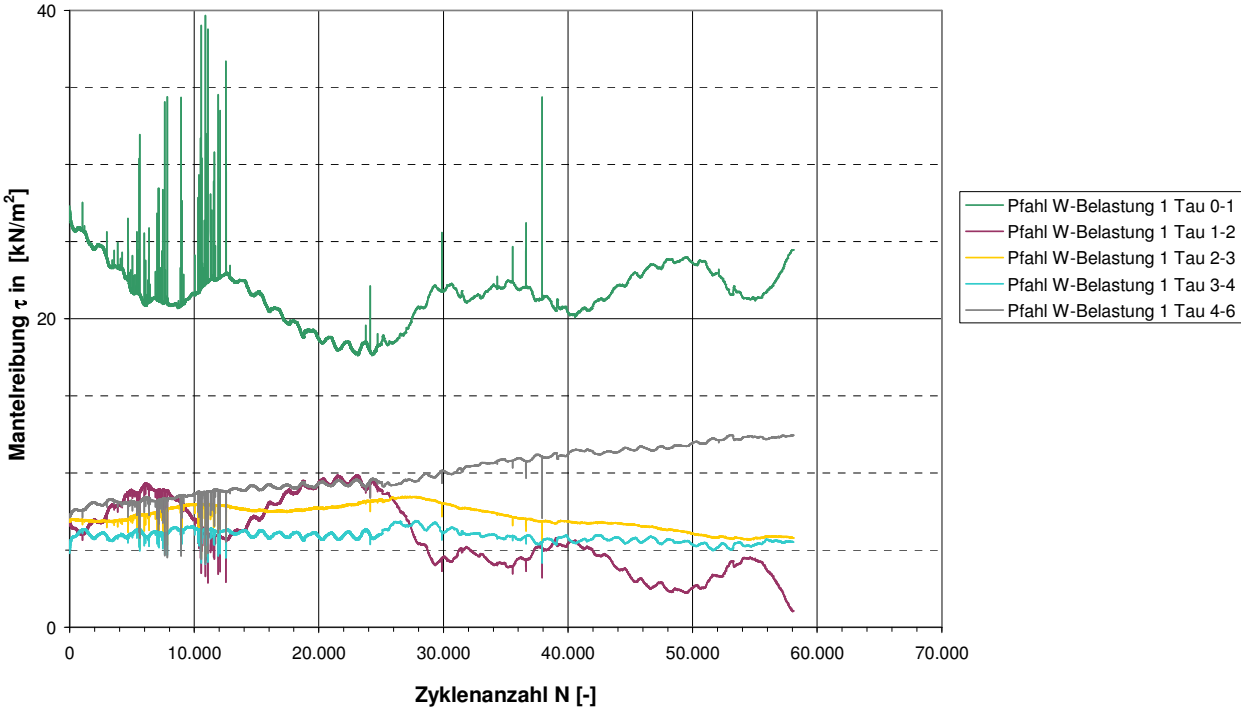
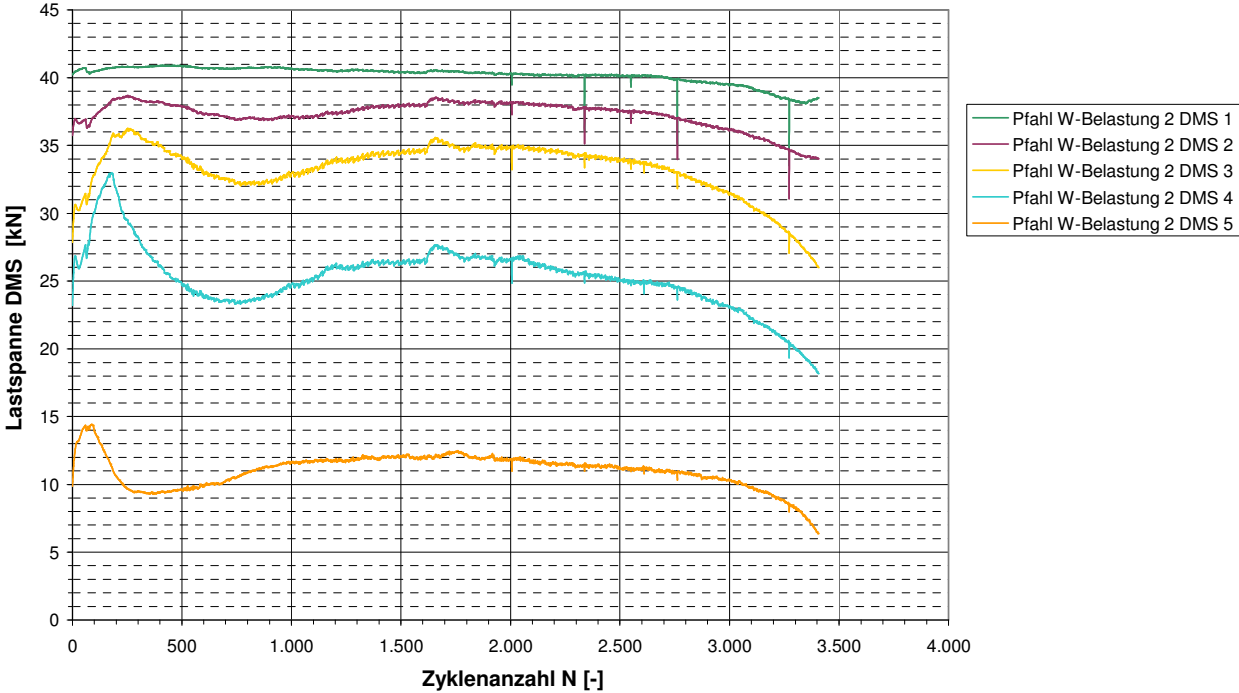


Abbildung A1.13.1: Auswertung DMS Pfahl W-Belastung 1 ($F_{mittel} = +5$ kN, $F'_{zykl} = 15$ kN)



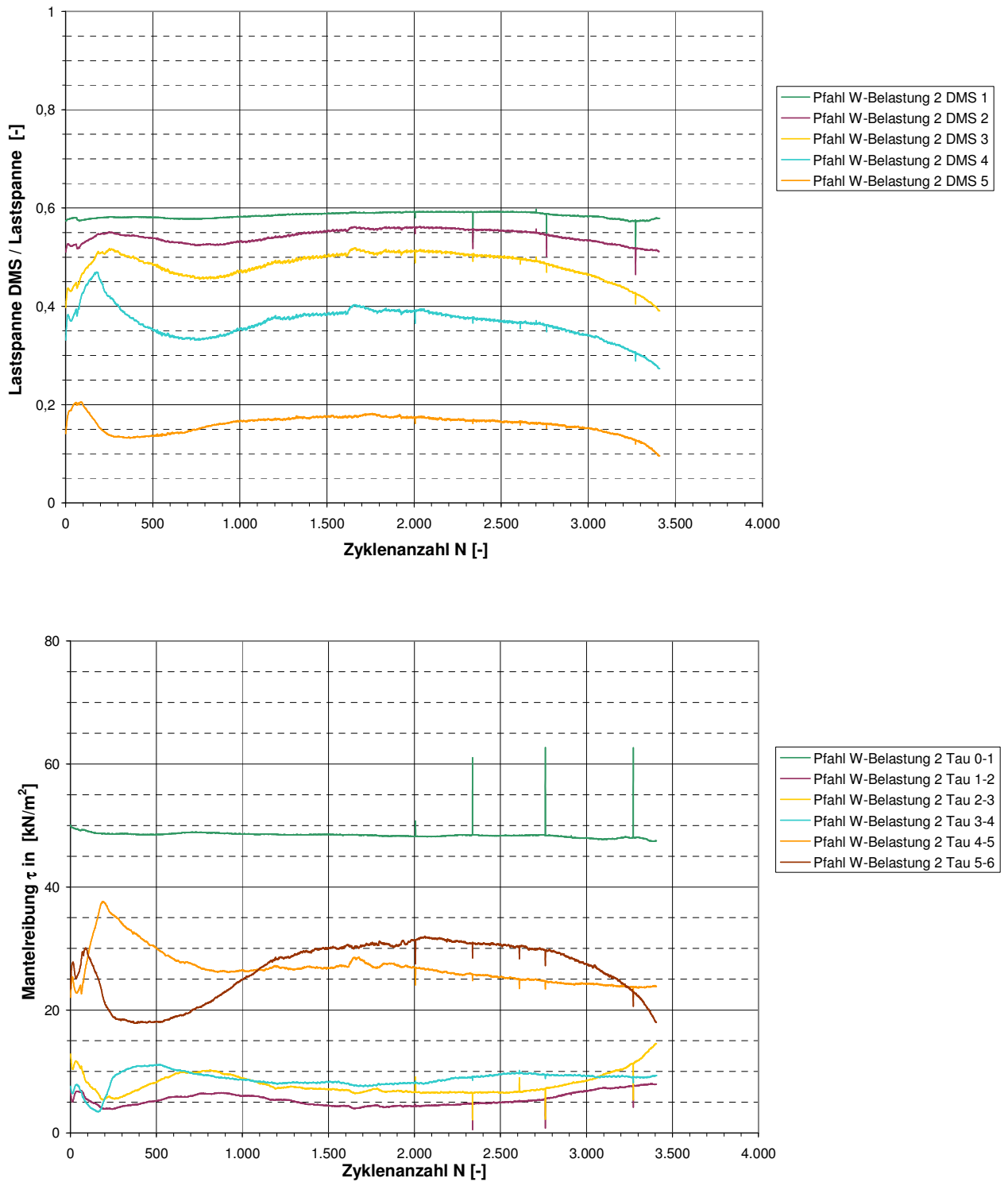
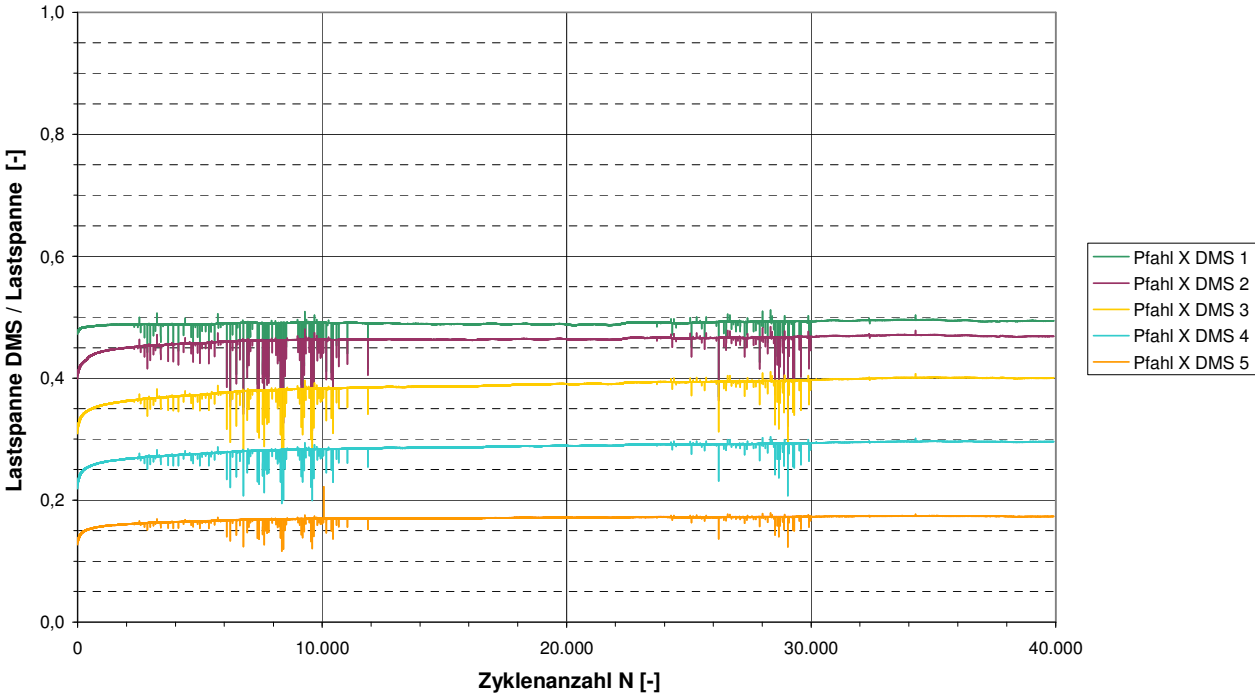
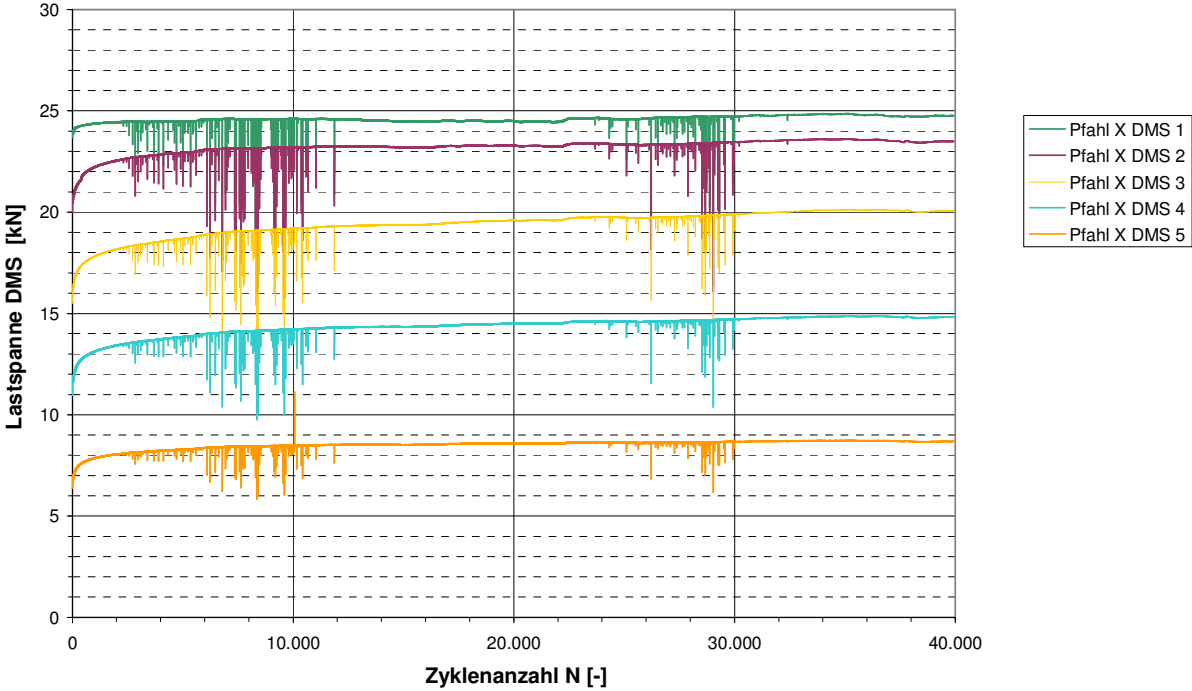


Abbildung A1.13.2: Auswertung DMS Pfahl W-Belastung 2 ($F_{\text{mittel}} = +5 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 35 \text{ kN}$)



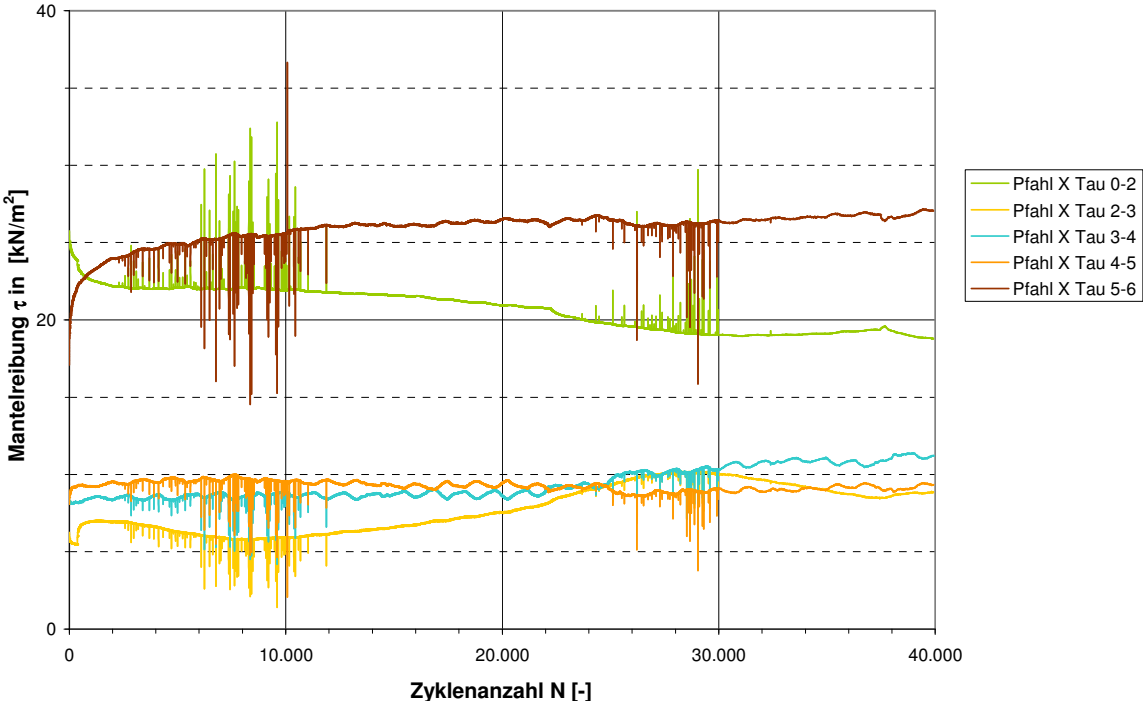
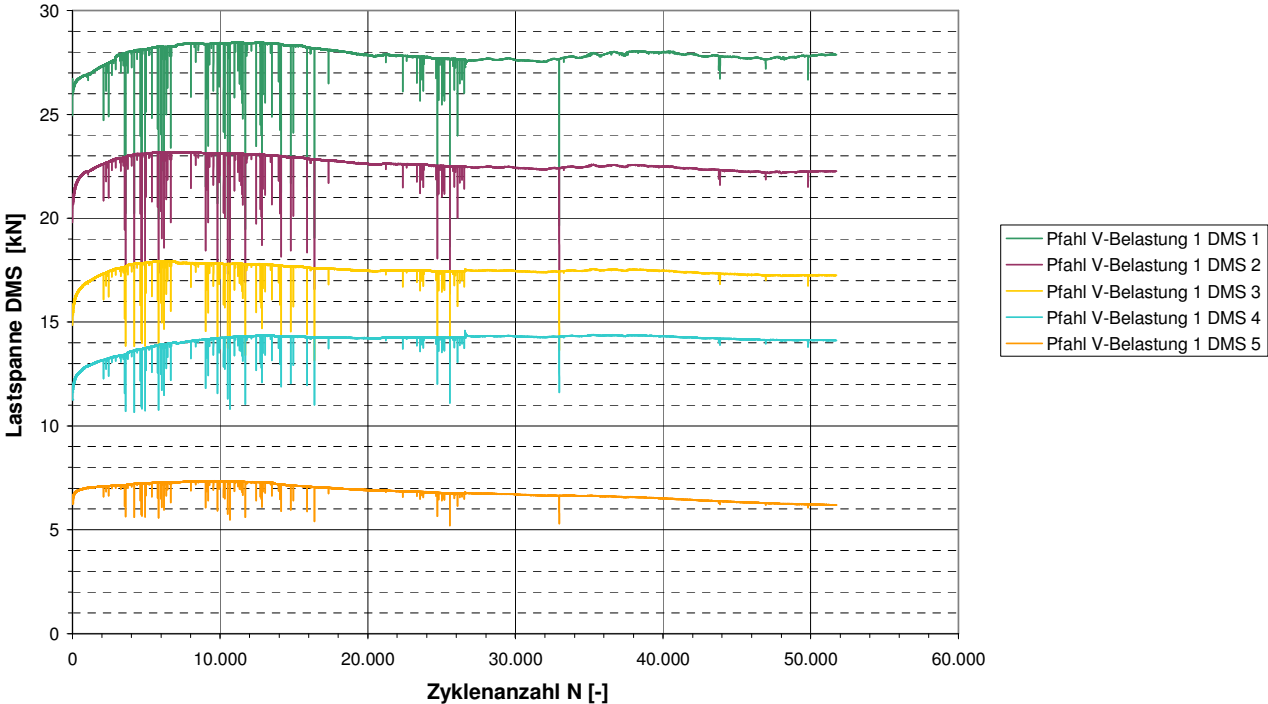


Abbildung A1.13.3: Auswertung DMS Pfahl X ($F_{\text{mittel}} = +5 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 25 \text{ kN}$)



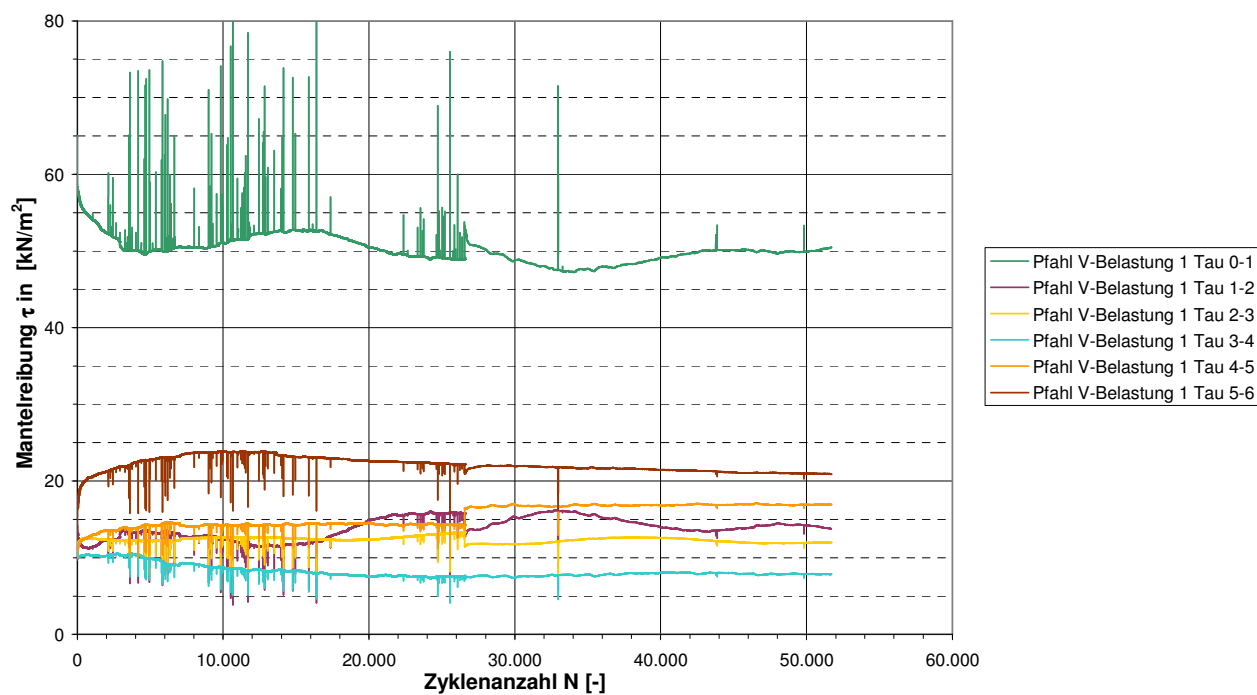
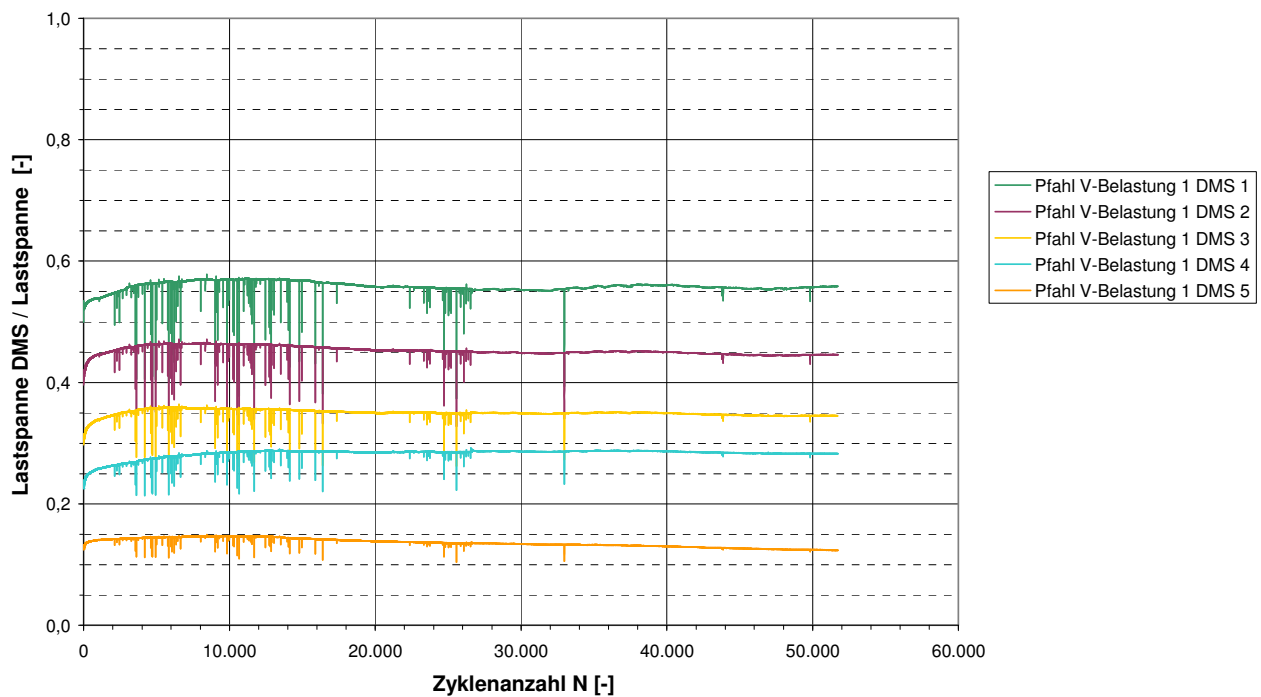
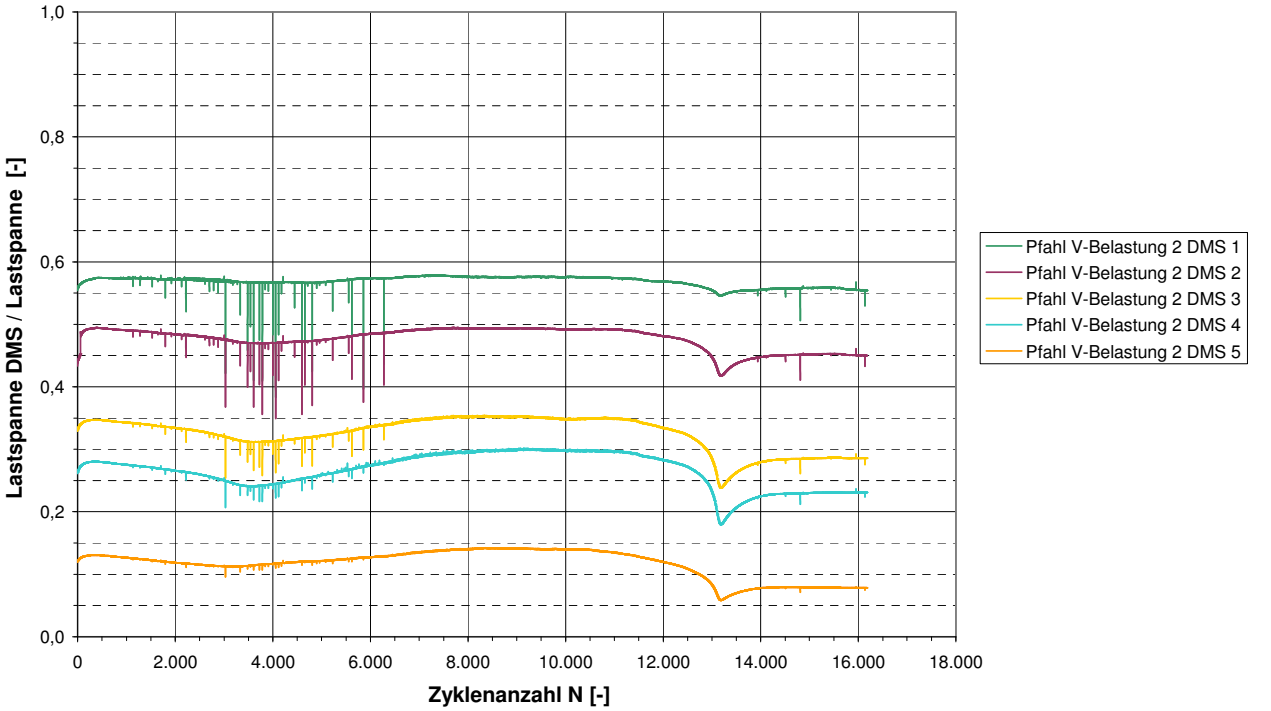
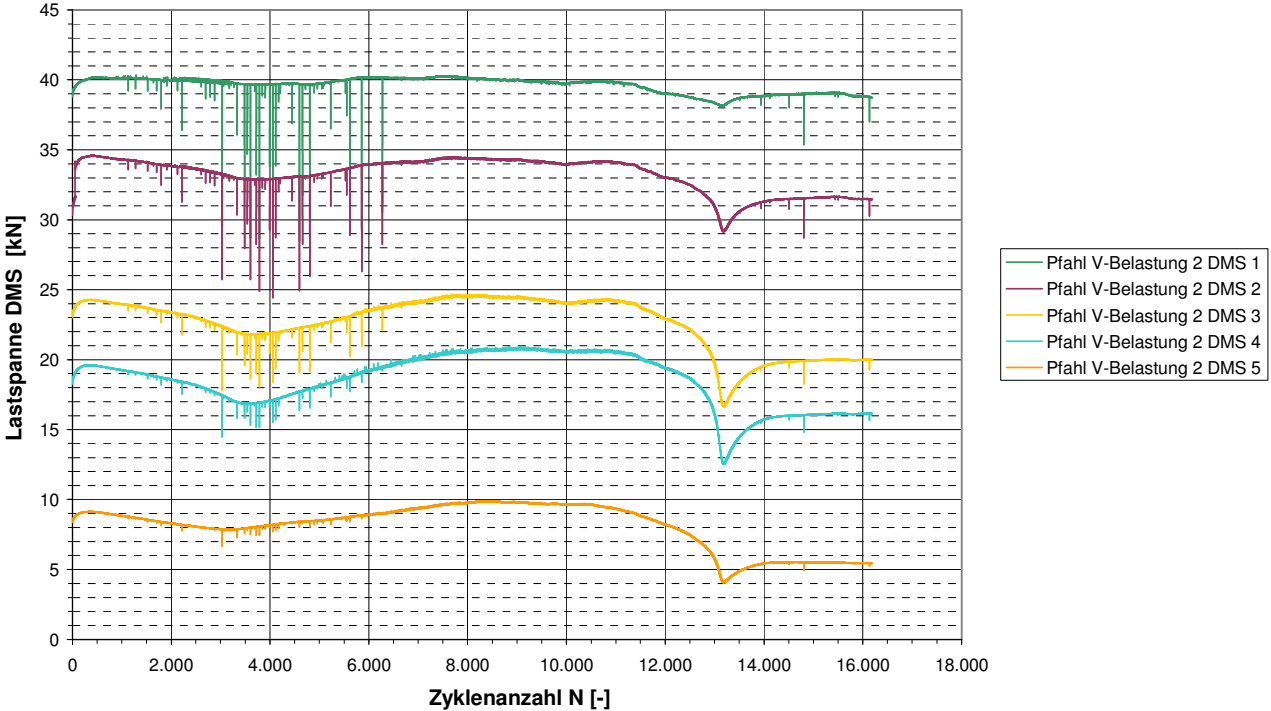


Abbildung A1.13.4: Auswertung DMS Pfahl V-Belastung 1 ($F_{\text{mittel}} = +15 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 25 \text{ kN}$)



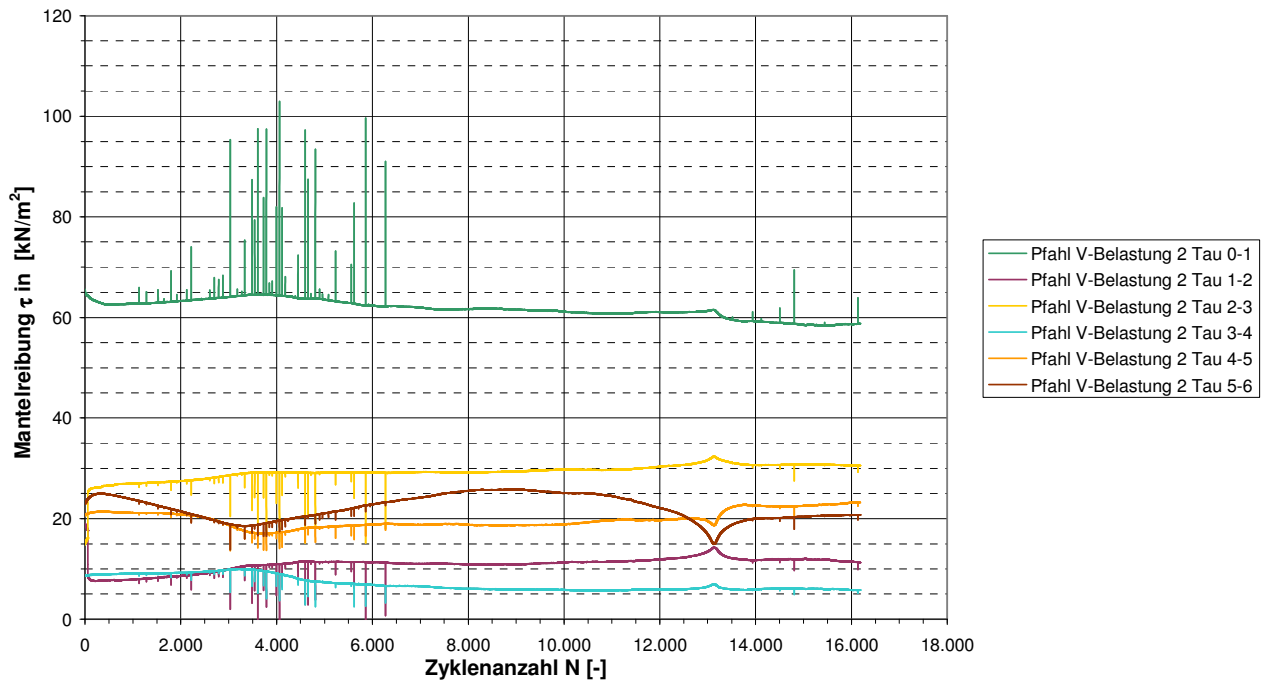
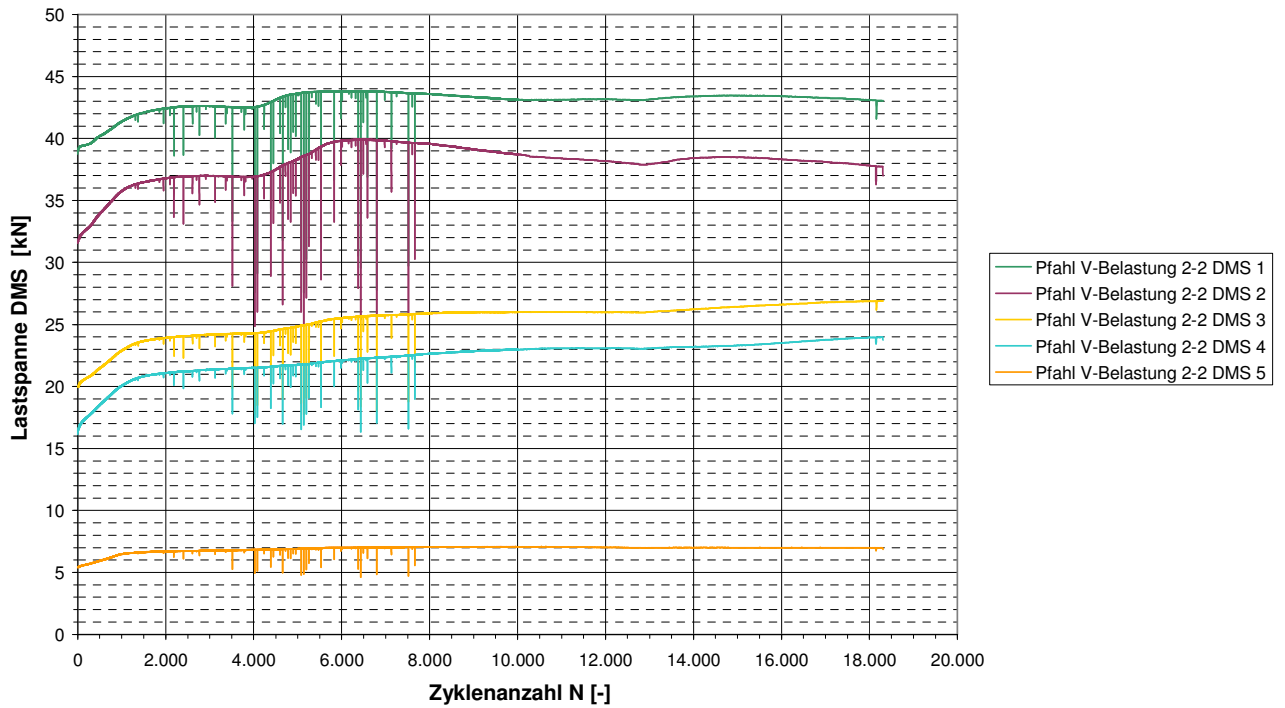


Abbildung A1.13.5: Auswertung DMS Pfahl V-Belastung 2 ($F_{\text{mittel}} = +15 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 35 \text{ kN}$)



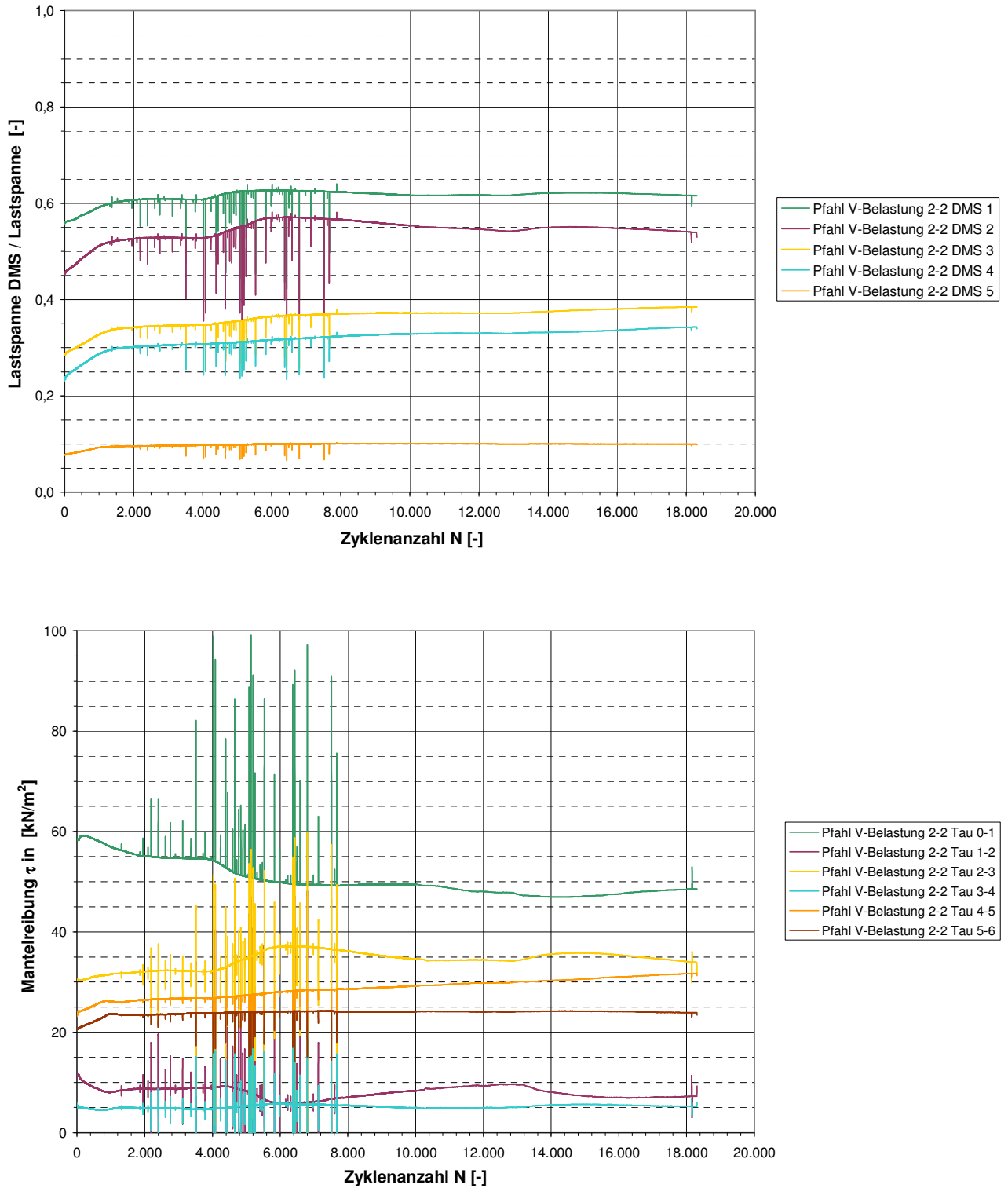
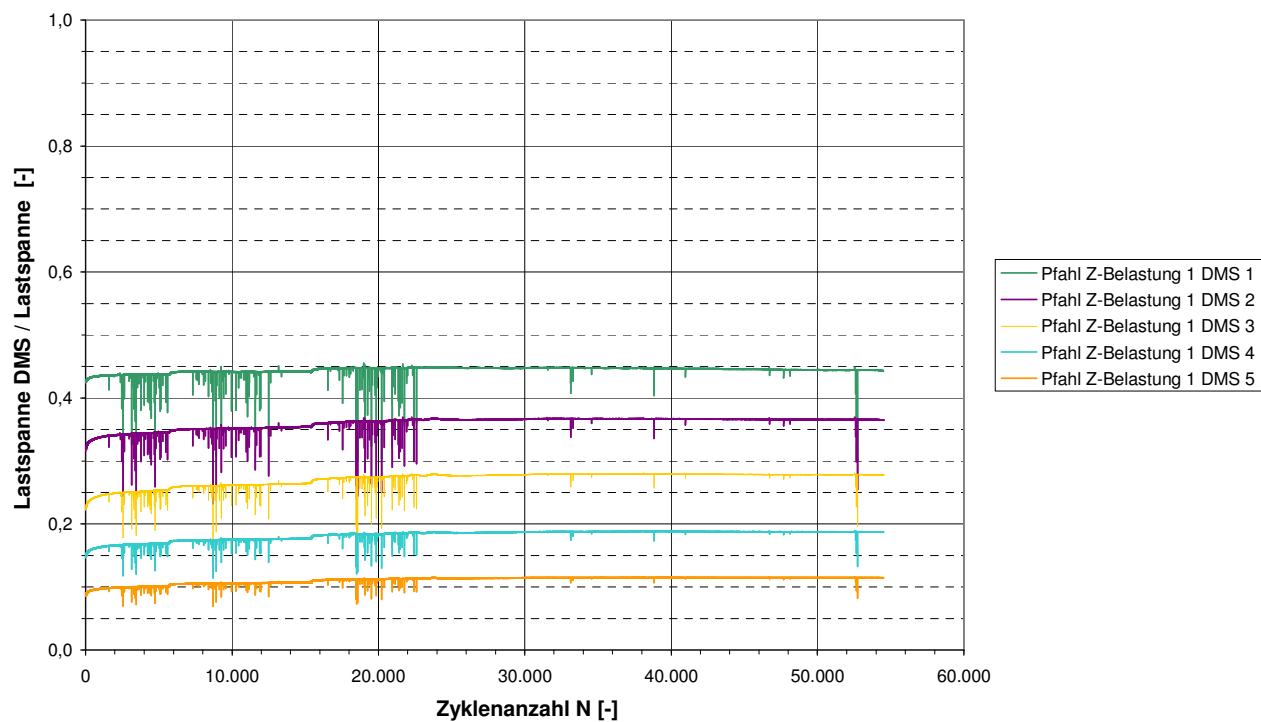
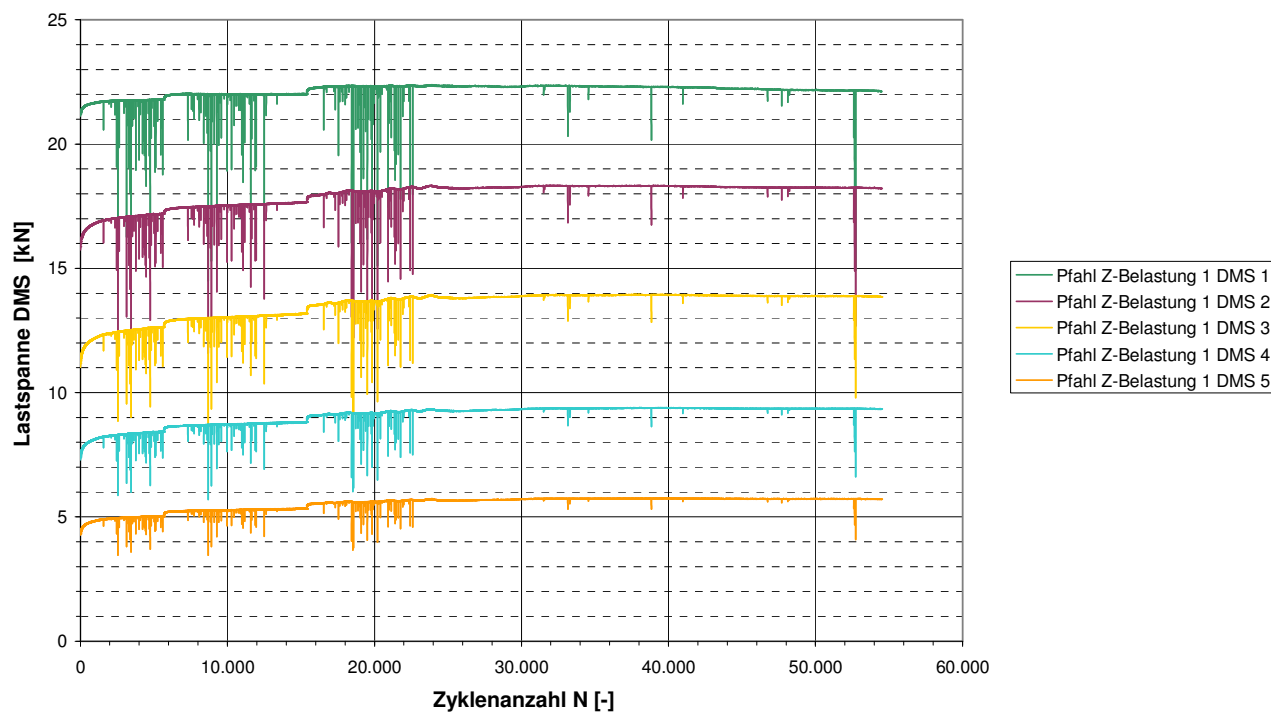


Abbildung A1.13.6: Auswertung DMS Pfahl V-Belastung 2-2 ($F_{\text{mittel}} = +15 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 35 \text{ kN}$)

Anhang 1.14: Auswertung Dehnmessstreifen Wechsellastversuche an Pfahl Z (statisch vorbelastet)



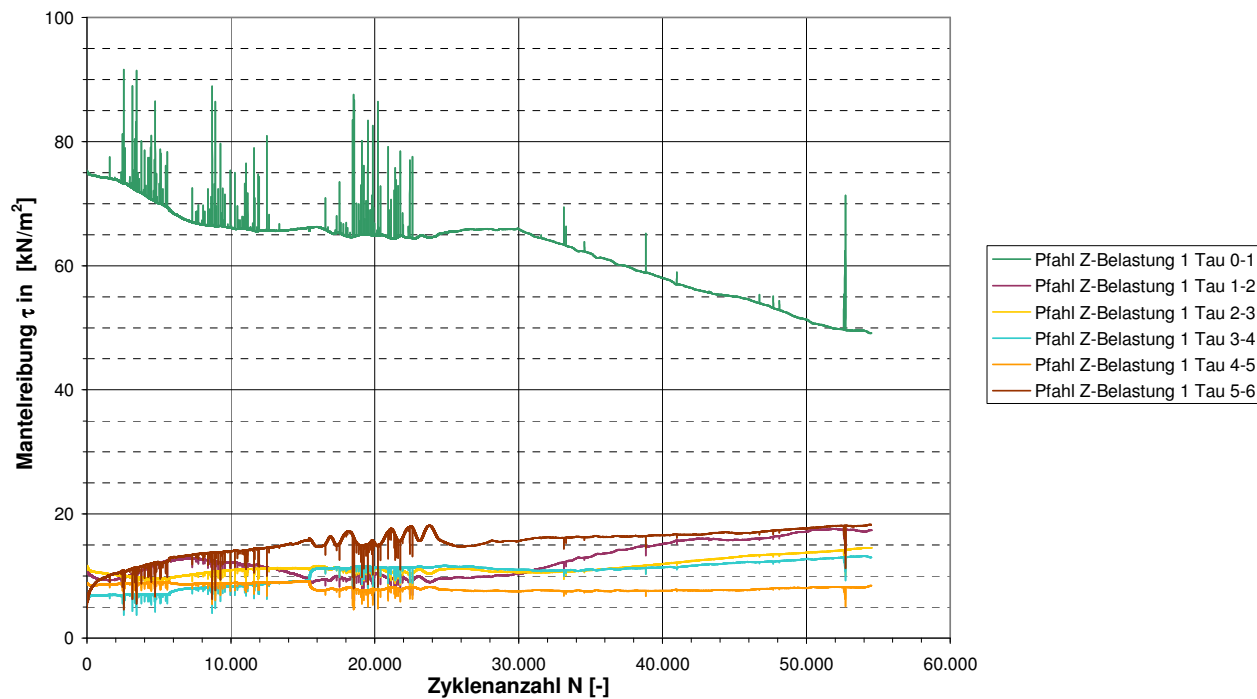
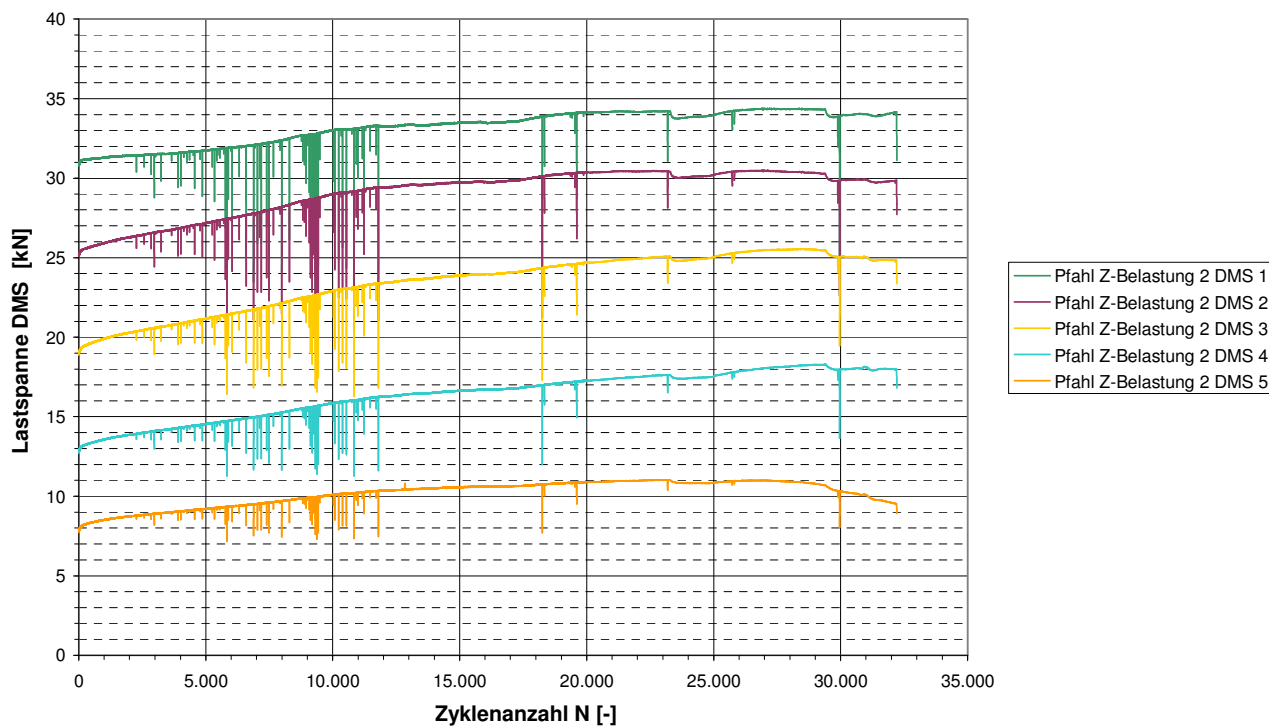


Abbildung A1.14.1: Auswertung DMS Pfahl Z-Belastung 1 ($F_{\text{mittel}} = +15 \text{ kN}$, $F'_{\text{zykl}} = 25 \text{ kN}$)



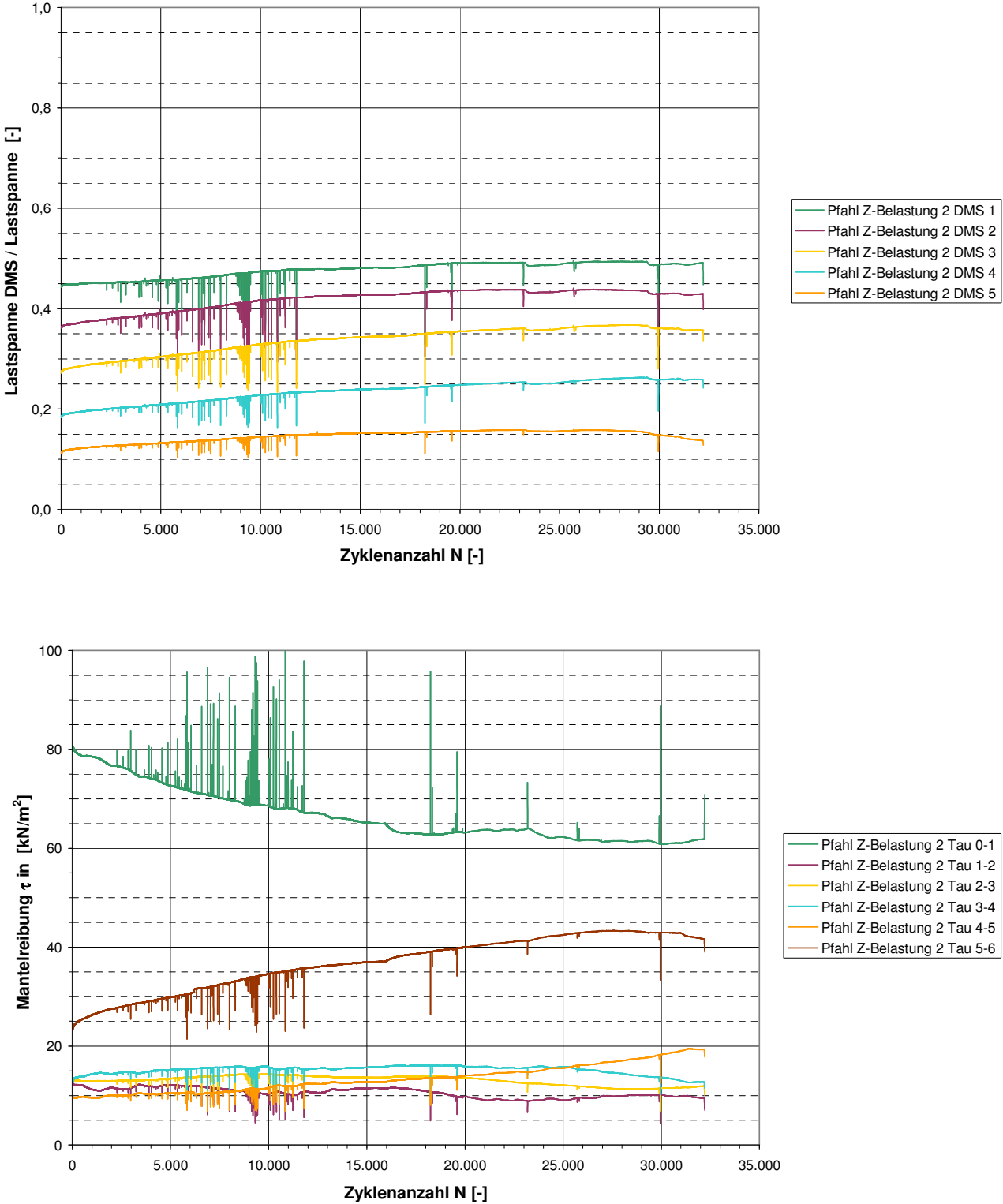


Abbildung A1.14.2: Auswertung DMS Pfahl Z-Belastung 2 ($F_{mittel} = +15$ kN, $F'_{zykl} = 35$ kN)