

# Statische Pfahlbelastungsversuche Hardturmstadion Zürich

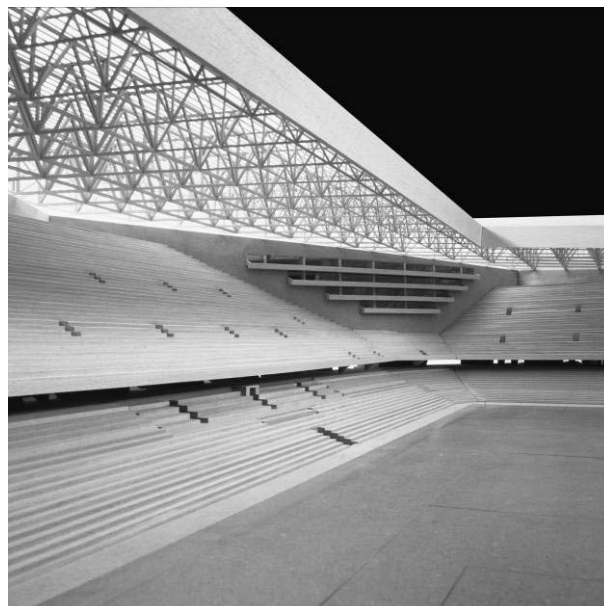
## 1 Versuchshintergrund

### 1.1 Projekt Hardturmstadion Zürich

Es darf davon ausgegangen werden, dass das Projekt Hardturmstadion Zürich von den Medien her bekannt ist. Markant ist sicher der bis 40 m hohe Kranz, dessen 5-Eck zum darunterliegenden ebenfalls 5-eckigen Sockelgeschoss leicht verdreht ist. Neben dem Stadion ist auch ein rund 80 m hohes Bürogebäude geplant.



**Bild 1: Aussenansicht Kranz auf Spielfeldniveau**

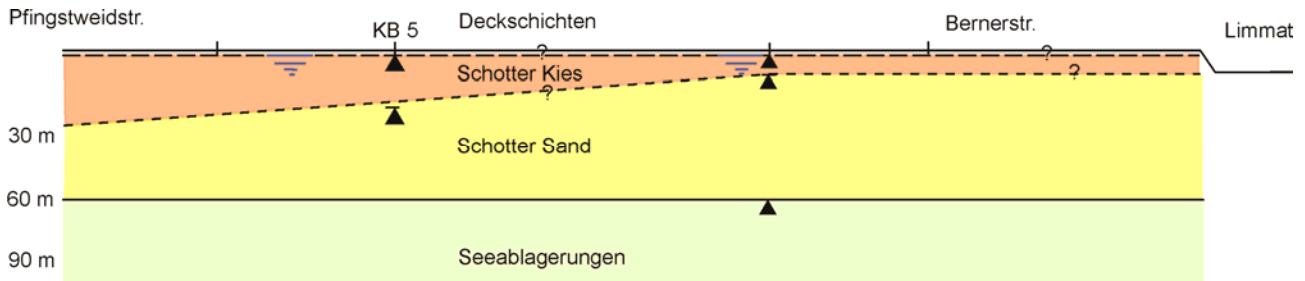


**Bild 2: Modellansicht vom Spielfeld**

## 1.2 Geologie

Zur Abklärung der hydrogeologischen und geologischen Verhältnisse wurden vorgängig 5 tiefere Bohrungen erstellt. Der Schichtaufbau wurde wie folgt aufgeschlossen:

Nach der 2 – 3 m mächtigen Deckschicht folgt der Limmattalschotter, der im oberen Bereich sehr kiesig ist und in tieferen Lagen zunehmend auch aus Sand besteht. Im Übergang zu den Seeablagerungen wurde zum Teil eine verschwemmte Moräne angetroffen.



**Bild 3: Geologisches Profil**

Der Limmattal-Grundwasserstrom liegt rund 3 m unter Terrain.

## 1.3 Problemstellung

Die Projektgestaltung wird stark eingeschränkt durch den Schattenwurf und die Lage des Grundwasserspiegels. So besteht die Auflage vom AWEL, dass beim Stadion nur 10 % der bebaubaren Grundfläche als lokale Vertiefung unter den Mittelwasserspiegel reichen darf.

Bis auf die sehr hohen Einzellasten (z. B. Kranzpfiler mit mehr als 150 MN Gebrauchslast) wäre eine Flachfundation noch denkbar, aber die 10 % Regel war mit ein Grund, dass anstelle von Fundamentvertiefungen sehr viele Pfähle und Schlitzwandelemente erstellt werden müssen.

## 1.4 Statische Pfahlbelastungsversuche

Für die Bemessung der Pfähle hatte man zwar Erfahrungswerte aus der Umgebung. Doch kam man nach diversen Abklärungen bezüglich Setzungsverhalten und Optimierungsmöglichkeiten zum Schluss, dass für dieses Projekt die Resultate von statischen Pfahlbelastungsversuchen von grossem Nutzen sind.

So wurde im Sommer auf der Arena mit dem grossen Seilziehen zwischen Anker und Pfahl begonnen. Getestet wurden 3 Bohrpfähle mit Durchmesser  $D = 0.90$  m und einer Länge zwischen 11 und 17 m. Die Lage, Länge und Instrumentierung der Pfähle wurde so gewählt, dass möglichst gute Aussagen über die verschiedenen Bodenschichten gemacht werden können.



**Bild 4: Einbau Pfahlarmierung**



**Bild 5: Versuchsaufbau**

## 2 Versuchsaufbau und messtechnische Instrumentierung

### 2.1 Konzept des statischen Pfahlbelastungsversuchs

Grundlage für die Ausführung der Pfahlbelastungsversuche bildet die SIA Norm 267/1 Geotechnik – Ergänzende Festlegungen. Sie definiert die Anforderungen an die Belastungs- und Messeinrichtung, das Vorgehen bei der Versuchsdurchführung und beschreibt die Darstellungen und Diagramme.

Vor dem eigentlichen Belastungsversuch wurden die Anker paarweise geprüft. Die Prüfkraft der Anker lag im Bereich der ersten Laststufe, so dass die Nullmessung vor der Spannprobe durchgeführt werden musste. Pro Pfahl wurden 3 Belastungszyklen bis zu einer maximalen Last von 12.2 MN durchgeführt. Zu jeder Laststufe wurden die Setzungen am Pfahlkopf über mindesten 90 Minuten gemessen bis zum Abklingen der Setzung. Nach dem Abklingen wurden die Gleitmikrometermessungen durchgeführt.

An die Messungen besteht im Versuchskonzept eine hohe Anforderung bezüglich Präzision und Zuverlässigkeit. Daher wurden die Messverfahren redundant ausgeführt.

Die Abbildung zeigt den Aufbau des Versuchs. Die geologische Schichtung variierte wie in Abschnitt 1. beschrieben und ist hier nicht eingezeichnet.

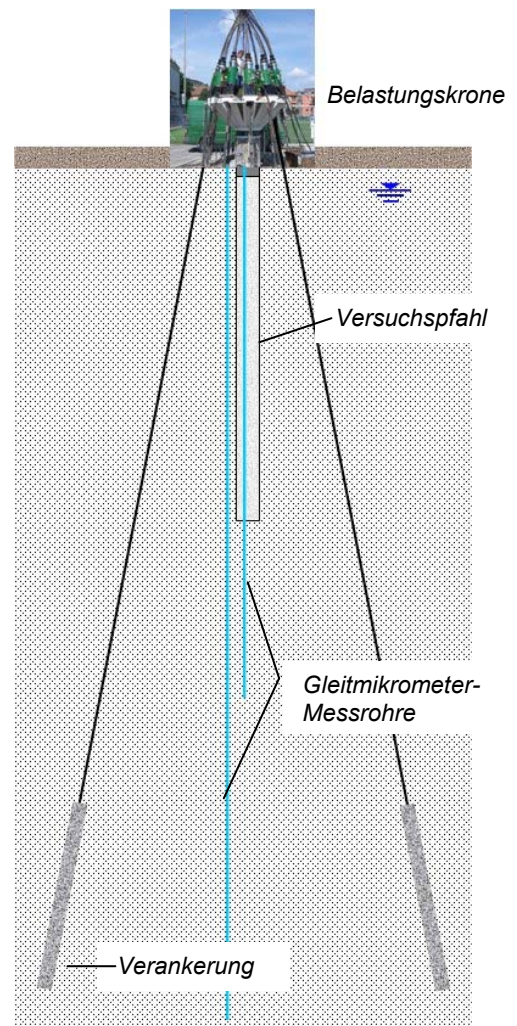
### 2.2 Pfahlbelastungseinrichtung

Die hohen Lasten von 12 MN wurden mit einer Belastungskrone (Abspanntisch) verankert über 12 Erdanker in den Pfahl eingeleitet. Die Verankerungslänge betrug 8 m, die frei Ankerlänge ca. 30m. Die Anker wurden mit 11° aus der Lotrichtung in symmetrischer Aufteilung versetzt und waren je auf 1.2 MN dimensioniert. Der Abspanntisch wurde von der Firma Zschokke Bau AG dafür dimensioniert und konstruiert.

Auf dem Pfahlkopf wurde eine Stahlplatte zur Kraftübertragung aufgelegt. Zwischen Pfahlabschluss und Stahlplatte war eine dünne Pressspanplatte (~2-3mm) zur Ausgleichung von Unebenheiten eingebracht. Auf der Stahlplatte setzten 4 Flachpressen (so genannte Stellingpressen) auf, die in einer



**Bild 7: Versuchsaufbau und Gleitmikrometermessung**



**Bild 6: Schema des Versuchsaufbaus**

Kugelkalotte gelagert sind. Die Stellingpressen wurden in einem hydraulischen Kreislauf verbunden. Mit einem Präzisionsdrucksensor wurde die aufgebrachte Last über diese 4 Stellingpressen gemessen und zur Anzeige gebracht. Die Datenspeicherung erfolgte über die gesamte Messzeit in einem Datenlogger. Auf den Pressen wurde der Abspanntisch gelagert und horizontalisiert. Die Ankerlitzen der Erdanker wurden ca. 1m über Terrain verlängert und durch die vorgesehenen Aussparungen und die Litzenheber eingefädelt. Zu jedem Anker wurde ein hydraulischer Litzenheber in der Neigung der Ankerbohrungen von 11° aus der Lotrichtung installiert. Die Litzenheber benötigten eine ausreichende Hubhöhe von 26cm, um bei den hohen Kräften die Straffung und Dehnung der Litzen aufnehmen zu können. Die Litzenheber wurden über ein Aggregat manuell gesteuert und bis zur Solllast, die über den Drucksensor an den Stellingpressen gemessen wurde, ausgefahren und gegebenenfalls nachgeregelt, um die Last über die Beobachtungszeit zu halten.

## 2.3 Messungen im Pfahl und im Baugrund



**Bild 8: Messausrüstung für Gleitmikrometer**

In den Versuchspfählen wurde je ein Gleitmikrometermessrohr bis 8 m unter den Pfahl und je ein Messrohr im Abstand von 55cm respektive 1m Abstand zum Pfahlmantel bis ca. 38m Tiefe eingebaut. Im Abspanntisch war eine entsprechende Aussparung für das Messrohr vorgesehen. Somit konnte die Messung vom Abspanntisch aus durchgeführt werden. Die Messrohre wurden im Lockergestein mit einer weichen Zement-Bentonit-Wasser Injektionsmischung eingebaut. Im Pfahl selber wurde der Bentonitanteil verringert. Die Nullmessung wurde vor Beginn der Ankerspannprobe durchgeführt; nach der Spannprobe und nach jeder Laststufe wurde eine Folgemessung von beiden Messrohren gemacht. Die axialen Verschiebungen werden für jeden Meter zwischen den Messmarken gemessen. Die Auswertung enthält sowohl die differentiellen Stauchungen bzw. Dehnungen als auch die integrierten Werte vom Fixpunkt aus. Daraus ergibt sich ein detailliertes Bild über das Verhalten des Pfahls. Die Summe der Stauchungen ergibt die Setzung des Pfahls, die auch am Pfahlkopf gemessen wurde.

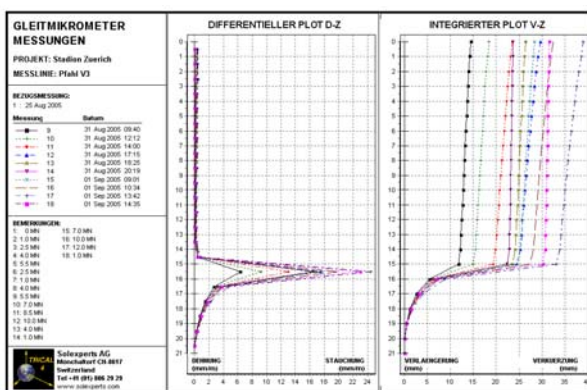
## 2.4 Messungen am Pfahlkopf

Die Verschiebungsmessungen am Pfahlkopf wurden mit einem motorisierten Digitalnivellier Zeiss DINI 11 automatisch gemessen. Die Messpunkte bestehen aus 50cm langen Barcodelatten, von denen zwei Referenzpunkte ausserhalb (>10m) des Versuchsfeldes und vier gleichmässig angeordneten Messpunkte am Pfahlkopfmantel montiert wurden. Die Auflösung der Messung auf die Barcodelatte beträgt 0.01mm. Die Genauigkeit der Ablesung beträgt 0.1mm. Die Messungen erfolgten alle fünf Minuten in gleicher Abfolge. Zusätzlich wurden alle Messpunkte mit einem Massstab mit metrischer Teilung ausgerüstet und mit einem optischen Nivelliergerät Leica Na 2 mit Planplatte als redundantes Messsystem abgelesen. An zwei zueinander rechtwinkligen Messpunkten wurde je ein hochauflösender Neigungssensor installiert, um allfällige Verkippungen des Pfahls zu messen. Zwei weitere Neigungssensoren waren auf dem Abspanntisch aufgebracht, die zur Kontrolle der Kräfteinleitung auf den Abspanntisch dienen. Die Kugelkalotten der Stellingpressen können nur einen bestimmten Winkel ausgleichen; ansonsten kann die gesamte Kraft nicht mehr als Druck der Stellingpresse gemessen werden. Die Temperatur wurde im Gleitmikrometermessrohr unterhalb des Grundwasserspiegels und als Umgebungstemperatur an der Luft gemessen.



**Bild 9: Messungen am Pfahlkopf mit Präzisionsnivellement**

## 2.5 Darstellung der Messergebnisse



**Bild 10: Beispiel für die Darstellung der Gleitmikrometermessungen**

Während der Versuchsdurchführung wurden Zeit-Last-Setzungsdiagramme, Kriechdiagramme zur jeder Laststufe, der Last-Setzungsverlauf und die Gleitmikrometerauswertungen laufend nachgeführt. Während die Kriechdiagramme zur Steuerung des Versuchs wichtig sind, zeigen die übrigen Diagramme das Verhalten des Versuchspfahls an. In die Auswertung fließen vor allem die numerischen Daten ein. Für die Einschätzung während des Versuchs und für die Plausibilitätskontrolle sind die Grafiken jedoch sehr hilfreich.

### 3 Auswertung der Resultate

#### 3.1 Last- Setzungsverlauf

Der Last- Setzungsverlauf der Pfähle bildet eine wesentliche Grundlage für die Auswertung der Versuche. Die Last und die entsprechende Setzung werden für alle Laststufen aufgetragen und die Verbindungslinie bildet die für Pfahlbelastungsversuche typischen Erst- und Wiederbelastungskurven.

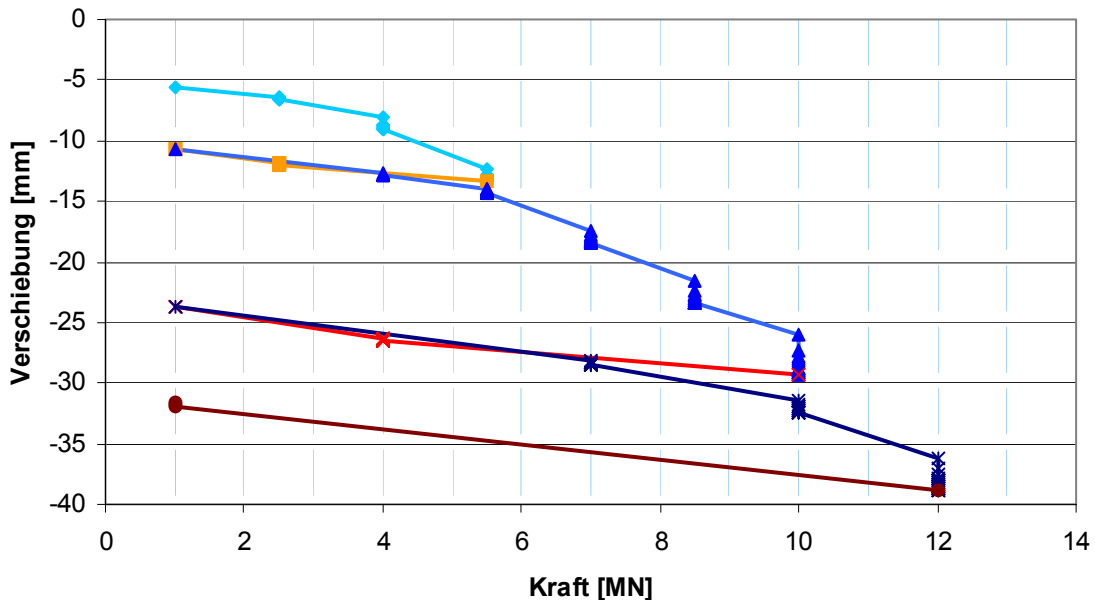


Bild 11: Darstellung der Last-Setzungskurve

#### 3.2 Hyperbelverfahren

Beim Hyperbelverfahren wird anstelle der Last vom Last-Setzungsverlauf der Quotient Setzung/Last für die Erstbelastungspunkte aufgetragen. Wie beim dargestellten Versuch ausgeprägt deutlich sichtbar, liegen die aufgezeichneten Punkte ungefähr auf zwei Geraden. Wie aufgrund der Formeln in der folgenden Abbildung ersichtlich ist, kann mit der linearen Regression durch die oberen Punkte (rote Gerade) die Bruchlast der Mantelreibung interpoliert werden. Ebenso kann durch die Formelgleichung der zweiten, grünen Geraden die Pfahlbruchlast berechnet werden.

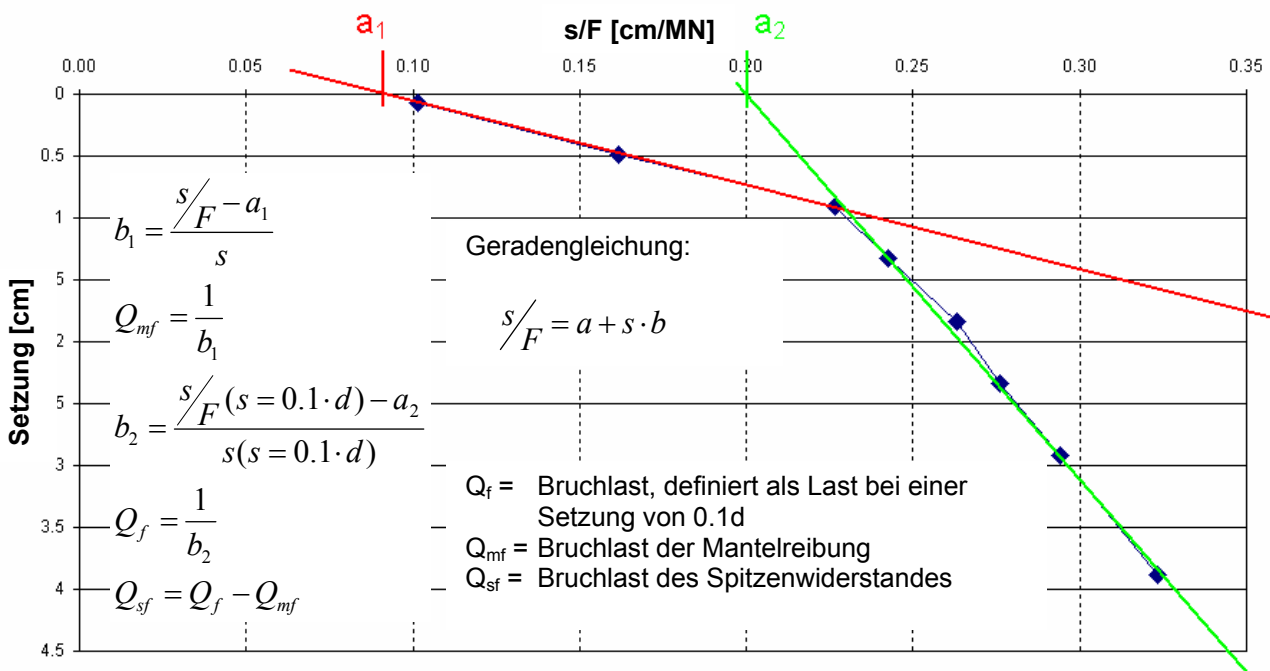


Bild 12: Darstellung Hyperbelerfahren

Somit kann für jede gemessene Kraft die Aufteilung in Mantel- und Spitzenwiderstand dargestellt werden. Die Darstellung zeigt, dass bei diesem Versuch bis zu einer Kraft von 4 MN und einer Setzung von weniger als 1 cm praktisch nur die Mantelreibung mobilisiert wird. Bei einer weiteren Krafterhöhung nimmt dann vor allem die Spitzenbeanspruchung zu.

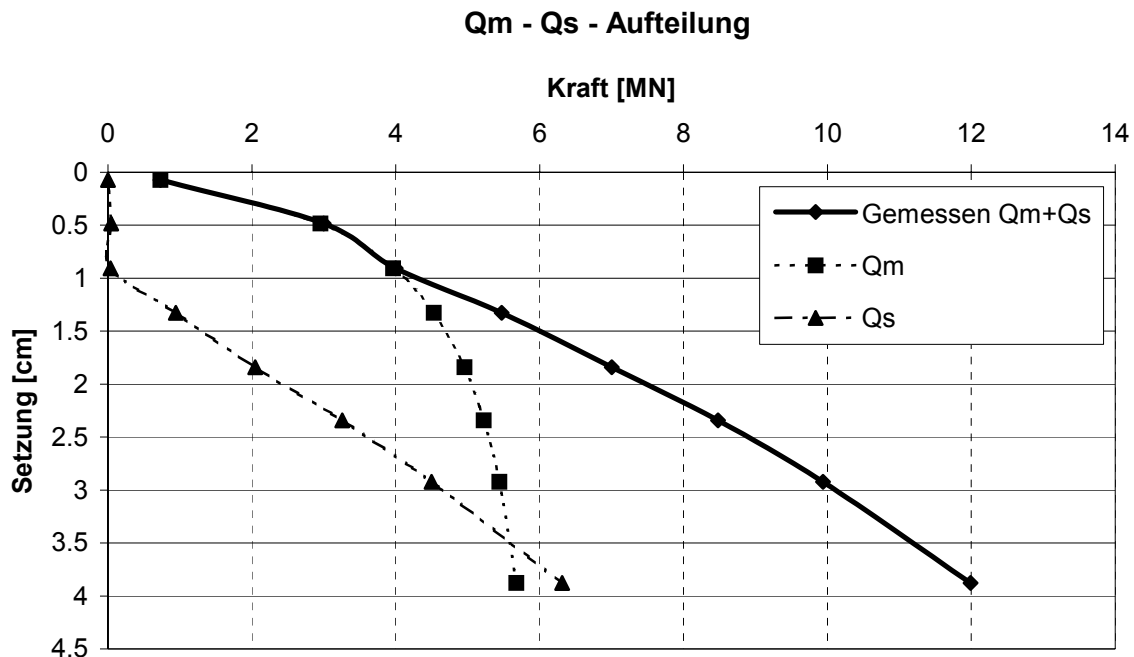


Bild 13: Last-Setzungsverlauf mit Aufteilung Mantel-Spitzenwiderstand

### 3.3 Nachrechnung mit Plaxis

Die Probepfähle wurden ebenfalls mit dem finite Elementenprogramm Plaxis als axialsymmetrisches System nachgerechnet. Dabei wurde versucht, durch Anpassung der Parameter der Bodenkennwerte die gemessene Last-Setzungskurve sowie die gemessenen Setzungen im und neben dem Pfahl möglichst genau nachzubilden. Für den dargestellten Versuch ist dies recht gut gelungen, sodass das Trag- und Setzungsverhalten in diesem Baugrund auch für andere Pfahldurchmesser abgeschätzt werden konnte.

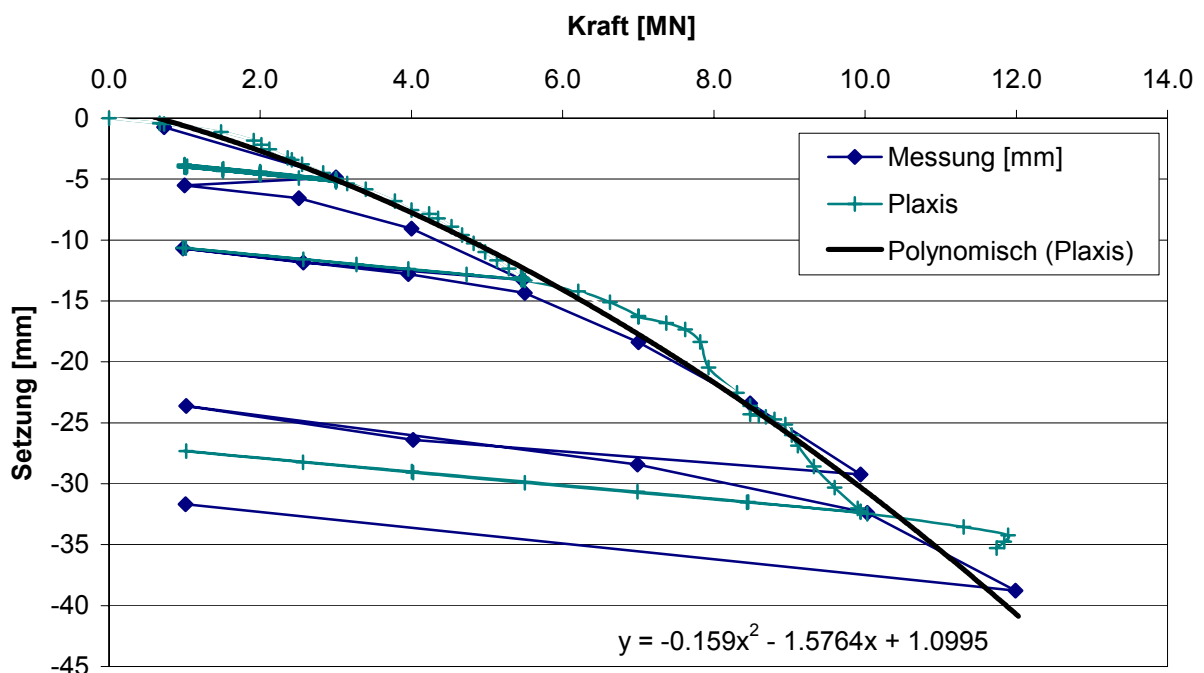


Bild 14: Last-Setzungsverlauf gemessen/berechnet

### **3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Statische Pfahlbelastungsversuche bilden das beste Instrument zur Beurteilung des Tragverhaltens. Trotzdem ist aufgrund der sehr hohen Versuchskosten deren Notwendigkeit gründlich abzuklären.

Die Versuchsanordnung und Auswertung müssen genau auf die gewünschten Ergebnisse abgestimmt und entsprechend geplant werden. Dabei gilt der Grundsatz: „Ein Versuch ist kein Versuch!“

Die Resultate können nur verwendet werden, wenn die Ausführungs- und Messqualität stimmen. Dazu muss die Versuchsanordnung mit dem Unternehmer genau abgesprochen werden und es braucht eine professionelle Messung. Zur Verifizierung der Messresultate sind Kontrollmechanismen und eine lückenlose Aufzeichnung der Ausführungs- und Messereignisse notwendig.

Statische Pfahlbelastungsversuche sind zwar sehr teuer, geben aber den besten Rückschluss auf das Tragverhalten im entsprechenden Boden.

Daniel Naterop, Hans J. Becker  
Solexperts AG  
Mettlenbachstrasse 25  
CH-8617 Mönchaltorf

Philipp Angehrn  
Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG  
Bachweg 1  
CH-8133 Esslingen