

Geotechnik 1986/2

Gründung auf Verpreßpfählen in weichen Sedimenten

FOUNDATION ON INJECTION PILES IN SOFT BASIN SEDIMENTS

von H.-G. Kempfert*

ZUSAMMENFASSUNG Es wird über Erfahrungen mit einer "schwebenden" Pfahlgründung auf Verpreßpfählen in breiigen bis steifen Beckensedimenten berichtet. Die für die vorhandenen Baugrundverhältnisse zunächst empfohlenen, verhältnismäßig hohen Grenzmantelreibungswerte $\tau_{mg} = 60 \text{ kN/m}^2$ konnten durch Probelastungen bestätigt bzw. bereichsweise überschritten werden. Durch Setzungsmessungen am Bauwerk wurden die Annahmen geprüft.

SUMMARY The present paper reports on experiences gained with a "floating" pile foundation on injection piles in basin sediments of pulpy to stiff consistency. By means of test loading, it was possible to verify or - in some zones - to exceed the relatively high limit values of skin friction of $\tau_{mg} = 60 \text{ kN/m}^2$ which were recommended for the existing soil conditions. The assumptions were verified by settlement measurements on the structure.

EINLEITUNG

Auf der Bundesbahnstrecke Ulm-Friedrichshafen bei Kehlen war die Erneuerung der im Jahre 1905 erstellten einfeldrigen Eisenbahnfachwerkbrücke über die Schussen durch eine massive Zweifeldbrücke notwendig geworden. Die wesentlichen konstruktiven Merkmale der alten und neuen Brücke enthält Bild 1. Dabei sind aus grundbautechnischer Sicht insbesondere die Verdoppelung der Gesamtlast zwischen alter und neuer Brücke und eine aus planerischen Gründen notwendige Verschiebung der neuen Widerlager und des Pfeilers erwähnenswert, so daß die vorhandene Brückengründung auf kurzen Holzpfehlern nicht mehr wiederverwendet werden konnte. Weiterhin war bei der Baumaßnahme die Aufrechterhaltung eines eingleisigen Betriebes zu beachten.

In der Planungsphase der Baumaßnahme zeigte sich, daß die zu dem Zeitpunkt vorliegende, sehr allgemeine geologische Baugrundbeurteilung, wegen der vorhandenen schwierigen Verhältnisse, für einen sicheren Gründungsentwurf und eine wirtschaftliche Durchführung der Baumaßnahme nicht ausreichend war. Dem Bundesbahn-Zentralamt München wurde daraufhin auf der Grundlage weiterer Baugrundaufschlüsse und Versuche die Gründungsberatung übertragen.

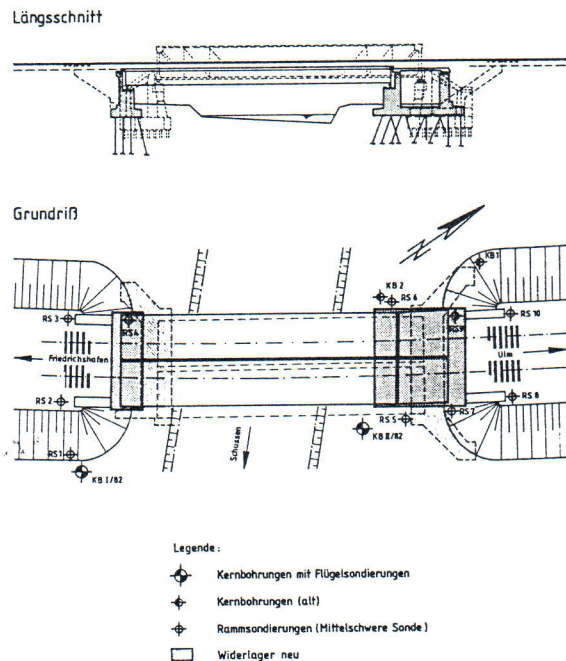


Bild 1 Grundriß und Längsschnitt

Im folgenden wird über die Erfahrungen mit der zur Ausführung gekommenen "schwebenden" Pfahlgründung auf Verpreßpfählen mit kleinen Durchmessern berichtet.

BAUGRUNDVERHÄLTNISSSE

Der vorhandene Baugrundaufschluß wurde durch zwei Kernbohrungen (siehe Bild 1) ergänzt, in denen neben der Bodenprobenentnahme auch Flügelsondierungen zur Bestimmung der totalen Scherfestigkeit c_u ausgeführt wurden. Die Bohrprofile und die ermittelten Bodenkenngrößen enthalten

* Dipl.-Ing. H.-G. Kempfert, Bundesbahn-Zentralamt München, Sachgebiet Tunnel-, Erd- und Grundbau

KB I/82 Widerlager Friedrichshafen

KB II/82 Widerlager Ulm

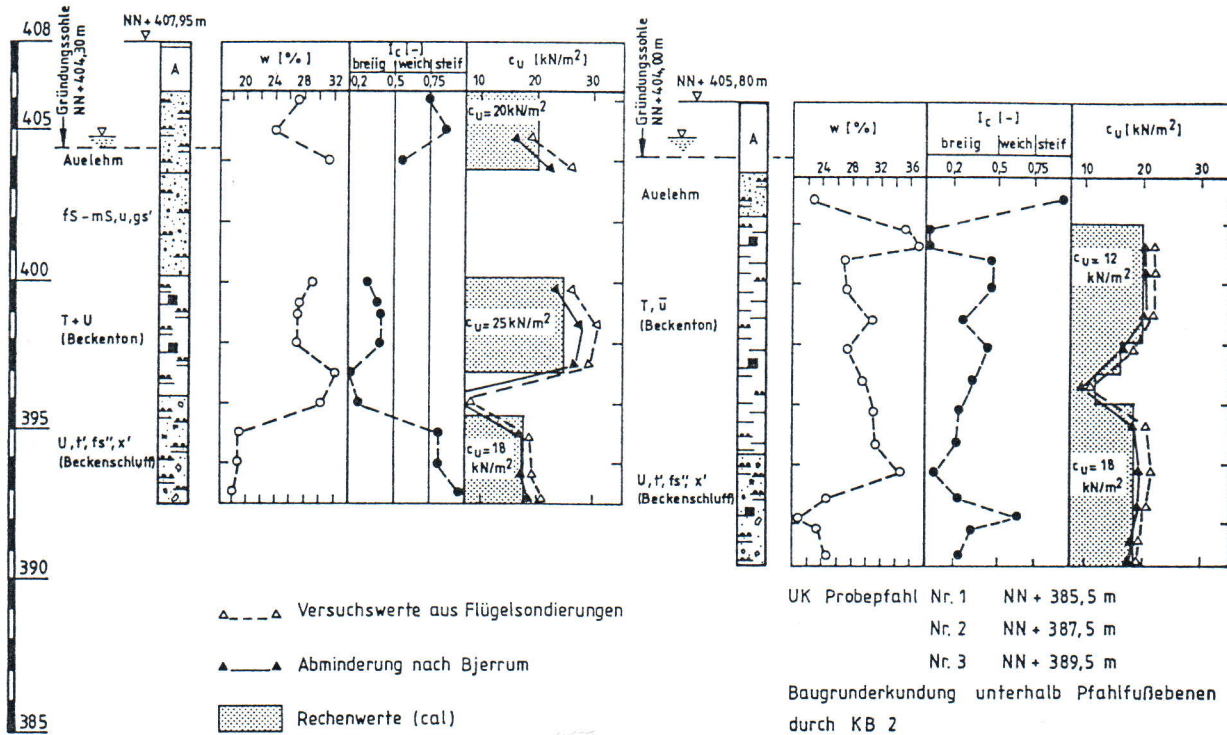


Bild 2 Bohrprofile und Bodenkenngrößen

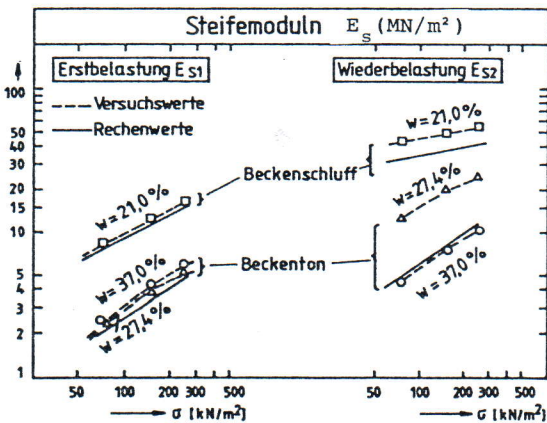
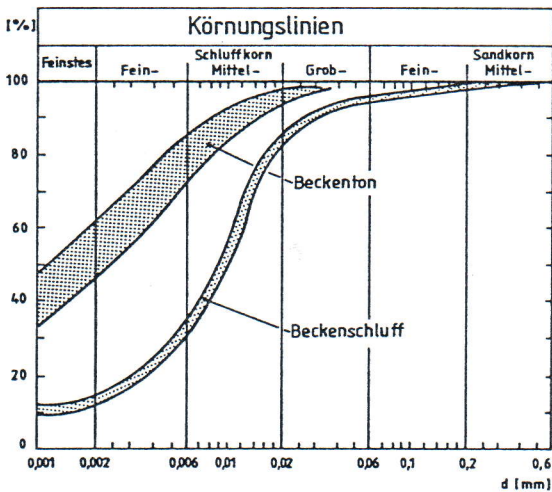


Bild 3 Körnungslinien und Steifemoduln

die Bilder 2 und 3.

Danach sind unter der Auffüllung junge Deckschichten in Form von Auelehm vorhanden, der am Widerlager Friedrichshafen von etwa 3,3 m mächtigen, locker bis mitteldicht gelagerten Sanden unterlagert wird. Unter dem Sand bzw. am Widerlager Ulm direkt unter dem Auelehm stehen Beckentone an, die zur Tiefe in Beckenschluffe übergehen. Als Liegendes ist unterhalb der glazialen Ablagerungen Beckenton und Beckenschluff, gut tragfähiger felsiger Untergrund in Form von mürben Sand- und Mergelsteinen der oberer Süßwassermolasse des Tertiärs nach geologischen Unterlagen erst in einer Tiefenlage von etwa NN + 355 m, also etwa 50 m unter Geländeoberfläche, zu erwarten.

Bezüglich der in Bild 2 und 3 dargestellten Bodenkenngrößen ist die breiige Konsistenz des Beckentons mit einer totalen Scherfestigkeit von $cal\ c_u = 7$ bis $25\ kN/m^2$ sowie ein Ansteigen der Konsistenz im Beckenschluff hervorzuheben. Weiterhin bemerkenswert ist, daß im Beckenschluff die Scherfestigkeit etwa einheitlich mit $cal\ c_u = 18\ kN/m^2$ bestimmt werden konnte, auch wenn auf der Seite Friedrichshafen eine steife und auf der Seite Ulm eine breiige bis weiche Konsistenz vorhanden ist. Eine direkte Korrelation zwischen

c_u und I_c konnte hier also nicht festgestellt werden. Bild 3 zeigt die im Kompressionsversuch ermittelten Steifemoduln und die daraus abgeleiteten Rechenwerte (cal-Werte). Dabei mußte für eine Setzungsabschätzung zwischen Erst- und Wiederbelastung infolge bereits in den Baugrund eingetragener Belastung aus der alten Brücke unterschieden werden. Zum Zeitsetzungsverhalten wurde in der Laststufe $\sigma = 260 \text{ kN/m}^2$ in den Versuchen für Beckenton ein Konsolidierungsbeiwert von etwa $c_v = 1,7 \text{ m}^2/\text{Jahr}$ und für Beckenschluff von etwa $c_v = 7,2 \text{ m}^2/\text{Jahr}$ ermittelt.

GRÜNDUNGSSYSTEM

Als Gründungssystem wurde auf der Grundlage der Baugrunduntersuchung eine "schwebende" Pfahlgründung auf Ramm- oder Verpreßpfählen zur Ausführung empfohlen, wobei die Ausschreibung eine Entscheidung zugunsten der Verpreßpfähle ergab. Der unter dem Beckenton anstehende Beckenschluff wurde dabei als ein bedingt tragfähiger Baugrund ("b.t.B.") in folgender Tiefenlage angesehen:

WL Friedrichshafen NN + 395,0 m
 WL Ulm NN + 392,0 m

Auf der Seite Friedrichshafen war die Tiefenlage des "b.t.B." aufgrund der Feld- und Laboruntersuchungen eindeutig durch Ansteigen der Konsistenz I_c belegt, siehe Bild 2. Dagegen zeigten die Untersuchungsergebnisse auf der Seite Ulm, wie bereits ausgeführt, kein so eindeutiges Ergebnis. Als Grundlage für den Ausschreibungsentwurf war in Anlehnung an Tabelle 1 der DIN 4128 eine mittlere Grenzmantelreibung für die Verpreßpfähle von $\tau_{mg} = 60 \text{ kN/m}^2$ empfohlen worden. Bei Einbindung der Pfähle in den oben definierten "b.t.B." von mindestens 4 m ergaben sich Pfahllängen von etwa 13 m auf der Seite Friedrichshafen und 16 m auf der Seite Ulm. Unter Annahme der ungünstigeren Seite Ulm und einem Pfahldurchmesser von rd. 0,2 m wurde für die Ausschreibung einheitlich eine zulässige Pfahllast von $Q_{zul} = 300 \text{ kN}$ festgelegt. Die zugehörigen Setzungen der Pfahlgruppe wurden dabei in einer Größenordnung von 2,0 bis 2,5 cm erwartet.

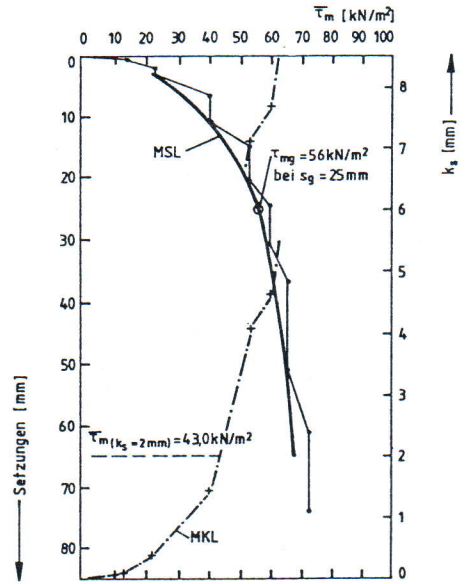
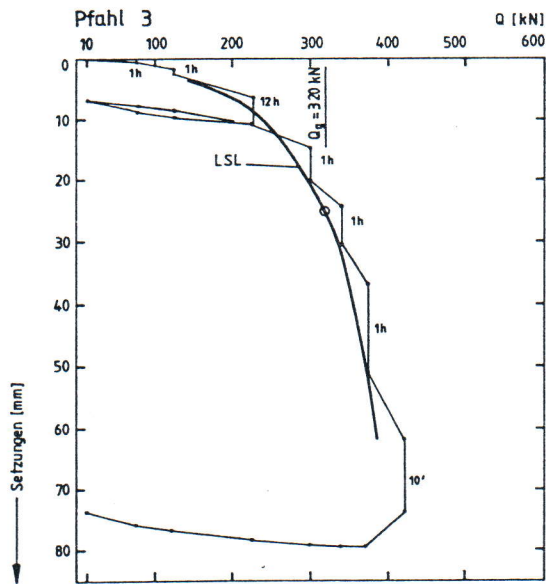
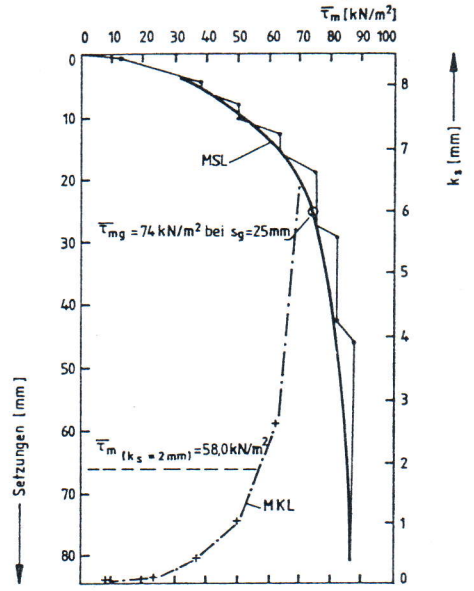
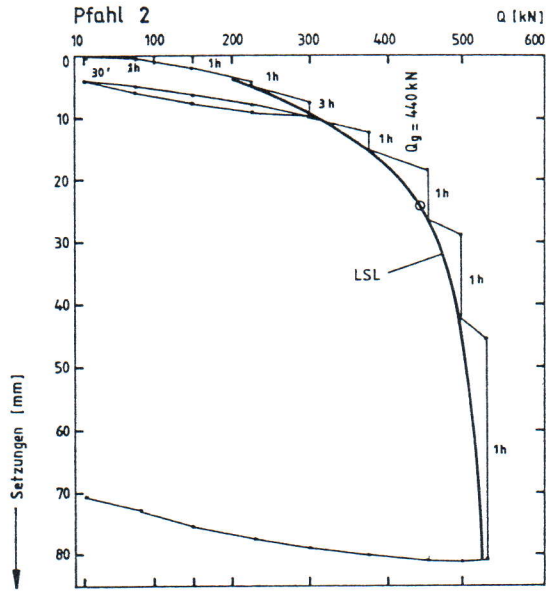
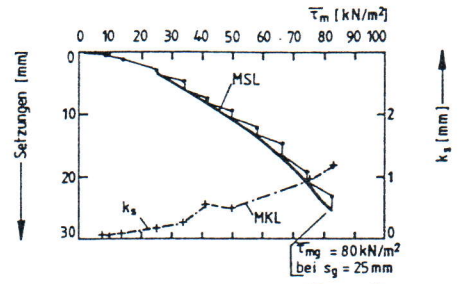
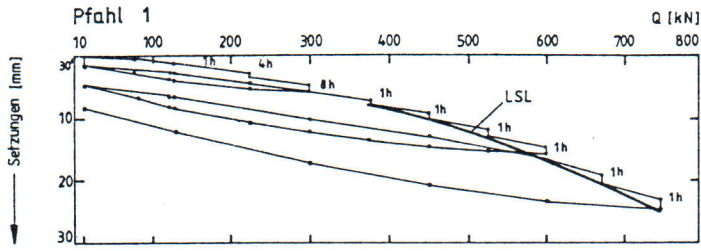
Zur Ausführung kamen Verpreßpfähle mit kleinem Durchmesser nach DIN 4128 - Stab-

verpreßpfähle System Bauer. Da diese Pfähle bei einem Bohrerrohrdurchmesser von rd. 0,11 m ebenfalls mindestens mit den vorstehend genannten zulässigen Pfahllasten beaufschlagt werden sollten und insgesamt die empfohlenen Grenzmantelreibungswerte bei den beschriebenen Baugrundverhältnissen keine großen Sicherheiten erwarten ließen, wurden vor Baubeginn Probepbelastungen an drei Pfählen auf der ungünstigeren Seite Ulm ausgeführt. Dabei konnte der vorhandene Brückenüberbau als Widerlager für die Pfahlpressen verwendet werden. Die drei Probepfähle wiesen die in Tabelle 1 aufgeführten Abmessungen und Herstellungsmerkmale auf, wobei die Pfähle 2 und 3 im Schlagbohrverfahren (Verrohrung mit Schuh eingerammt) und Pfahl 1 im Drehbohrverfahren (Bodenförderung) mit Wasserspülung hergestellt worden sind. Zwischen Herstellung der Pfähle und Belastungsversuch wurde eine Standzeit von 16 Tagen eingehalten.

Beschreibung \ Pfahl-Nr.	1	2	3
Bohrverfahren	Drehbohrung mit Wasserspülung	Schlagbohrung	Schlagbohrung
Abmessungen			
tragende Pfahllänge l'	18 m	16 m	14 m
Ø Pfahl ¹⁾	160 mm	120 mm	130 mm
Ø Krone	137 mm	—	—
Ø Verrohrung	114 mm	114 mm	114 mm
Ø Schuh	—	120 mm	120 mm
Verpreßdruck			
Erstverpressung	verfüllt	8 + 10 bar	8 + 10 bar
1. Nachverpressung	15 + 20 bar	20 + 25 bar	15 + 20 bar
¹⁾ aus den Verpreßmengen zurückgerechnet			

Tabelle 1 Abmessungen und Herstellungsmerkmale der Probepfähle

Die Ergebnisse der Pfahlprobepbelastungen sind in Bild 4 in Form von Last-Setzungs-Linien, Mantelreibungs-Setzungs-Linien und Mantelreibungs-Kriechmaß-Linien dargestellt. Als Grenzsetzung des Einzelpfahles wurde unter Berücksichtigung der Form der Lastsetzungslinien sowie der Tatsache, daß es sich hier um eine "schwebende" Pfahlgründung handelt, eine Setzung von $s_g = 2,5 \text{ cm}$ festgelegt. Diese Grenzsetzung liegt geringfügig über den Angaben für Bohrpfähle entsprechend DIN 1054, Abschn. 5.4.1.1, Ausgabe November 1976, von 2 cm. Im Gebrauchszustand werden damit Pfahlsetzungen (ohne Gruppenwirkung) < als 1,0 cm entsprechend DIN 4128, Abschn. 9.1, Ausgabe April 1983, eingehalten. Das Kriech-



- Legende : LSL : Last-Setzungs-Linie
 MSL : Mantelreibungs-Setzungs-Linie
 MKL : Mantelreibungs-Kriechmaß-Linie
 $\bar{\tau}_m$: mittlere Mantelreibung über l'

Bild 4 Ergebnisse der Pfahlprobelastungen

lastkriterium nach den Empfehlungen (1983) wurde nicht weiter verfolgt, da hier keine eindeutige Auswertung möglich war.

In Bild 5 sind die über die Länge gemittelte Pfahlmantelreibung, Kriechmaße und Setzungen der 3 mit verschiedenen Längen und Durchmessern hergestellten Pfähle bezogen auf den Grenzzustand bei $s_g = 2,5$ cm und den Gebrauchszustand ($\eta = 2,0$) dargestellt.

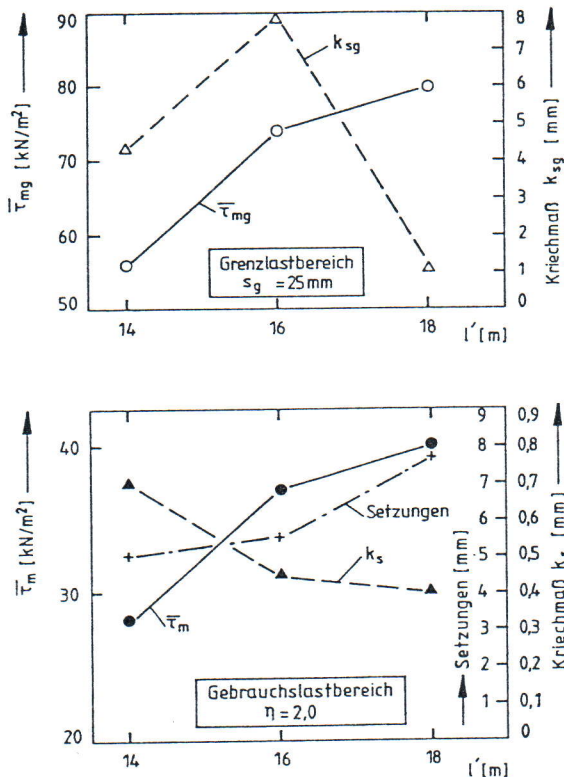


Bild 5 Mantelreibung, Setzungen und Kriechmaße der Probepfähle im Grenz- und Gebrauchslastbereich

Als angenommener Pfahldurchmesser wurde der mittlere aus den Verpreßmengen zurückgerechnete Durchmesser zugrunde gelegt. Aus den Ergebnissen der Probelastung ließen sich die nachfolgenden Erkenntnisse ableiten:

- Die Mantelreibung nimmt bei Pfahl 2 und 1 auf den letzten 2 bzw. 4 m stark zu und bestätigt damit die Einschätzung der besseren Tragfähigkeit der zur Tiefe anstehenden Beckenschluffe gegenüber den Beckentonen. Für den Pfahl 2 wurde auf den letzten 2 m eine Grenzmantelreibung von $\tau_{mg} = 191$ kN/m² und für Pfahl 1 auf den letzten 4 m $\tau_{mg} = 177$ kN/m² zurückgerechnet, wenn näherungsweise davon ausgegangen wird, daß von $l = 0$ bis 14 m eine Grenzmantelreibung entsprechend

Pfahl 3 von $\tau_{mg} = 56$ kN/m² auch bei den Pfählen 1 und 2 vorhanden war.

- Bei Ansatz einer Grenzsetzung des Einzelpfahles von $s_g = 2,5$ cm liegen die Setzungen im Gebrauchszustand ($\eta = 2,0$) bei ca. 5 bis 8 mm.
- Die Kriechmaße im Gebrauchszustand mit $k_s = 0,4$ bis $0,7$ mm, siehe Bild 5, konnten akzeptiert werden, wenn man davon ausgeht, daß entsprechend DIN 4125 Teil 2 für Daueranker ein Kriechmaß von $k_s \leq 2$ mm unter 1,5facher Gebrauchslast einzuhalten ist.
- Bemerkenswert war weiterhin, daß der mit Wasserspülung gebohrte Pfahl 1 gegenüber den gerammten Pfählen 2 und 3 ein mindestens gleichwertiges Tragverhalten bezüglich der Mantelreibung zeigte, wobei infolge des erreichten größeren Pfahldurchmessers durch die Spülbohrung die Gesamttragfähigkeit des Pfahls wesentlich höher lag.

Aufgrund der Probelastungsergebnisse wurden folgende Grenzmantelreibungswerte für die Pfahlbemessung empfohlen:

Sand:	$cal\tau_{mg} = 100$ kN/m ²
Beckenton:	$cal\tau_{mg} = 55$ kN/m ²
Beckenschluff:	$cal\tau_{mg} = 180$ kN/m ²

Das Herstellungsverfahren sollte entsprechend dem Probepfahl 1 im Drehbohrverfahren mit Wasserspülung und einer Nachverpressung gewählt werden. Mit diesen Angaben und Pfahllängen von etwa 18 m am WL Ulm und 16 m am WL Friedrichshafen wurde der endgültigen Bemessung eine zulässige Pfahllast von $Q_{zul} = 380$ kN zugrundegelegt, was für die beschriebenen sehr ungünstigen Baugrundverhältnisse eine hohe Pfahltragfähigkeit bedeutet.

ERFAHRUNGEN

Die Pfahlherstellung konnte wegen der einleisigen Aufrechterhaltung des Eisenbahnbetriebes sowie der Vermeidung von zusätzlicher negativer Mantelreibung und Seitendrücken, siehe Empfehlung (1980), auf die Pfahlgründung infolge der Widerlagerhinterfüllung nur in einer sehr engen Baugrube hergestellt werden. Diese Anforderungen sowie im Untergrund verbliebene alte Holzpfähle und Fundamentreste stellen bei der Herstellung der Verpreßpfähle

keine Schwierigkeit dar. Lediglich das Pfahlbohrverfahren mit Wasserspülung erwies sich bei den beschriebenen Baugrundverhältnissen wegen der dabei anfallenden Schlammassen als baubetrieblich schwierig. Die bei der Probebelastung festgestellte überraschend hohe Tragfähigkeit der "schwebenden" Verpreßpfähle und die daraus abgeleiteten Bemessungsansätze konnten durch Setzungsmessungen am Bauwerk bestätigt werden. Bild 6 zeigt die zeitliche Setzungsentwicklung.

Dabei sind die erwarteten Gesamtsetzungen der Brücke bis 2,5 cm beim 1. Bauabschnitt etwa nur zur Hälfte eingetreten. Lediglich der Meßpunkt 3 am Widerlager Ulm weist Setzungen in der Größenordnung um 2 cm auf. Der 2. Bauabschnitt zeigt demgegenüber nur Setzungen bis etwa 5 mm. Die Begründung für das deutlich unter-

schiedliche Setzungsverhalten der beiden Bauabschnitte wird in einem Verspannungseffekt im Baugrund durch die voreilende Pfahlgründung des ersten Bauabschnittes vermutet. Bemerkenswert ist weiterhin, daß sich der Eisenbahnbetrieb auf das Setzungsverhalten in dem Meßzeitraum nicht ausgewirkt hat.

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß sich die gewählte "schwebende" Pfahlgründung in breiigen bis steifen Beckenablagerungen auf hoch ausgelasteten Verpreßpfählen auch nach Inbetriebnahme der Brücke gut bewährt hat und selbst unter Berücksichtigung von noch zu erwartenden längeranhaltenden Kriechverformungen die prognostizierte Setzungsgröße nicht überschritten wird. Für ähnliche Gründungen bei vergleichbaren Baugrundverhältnissen erscheinen dennoch Probebelastungen unumgänglich.

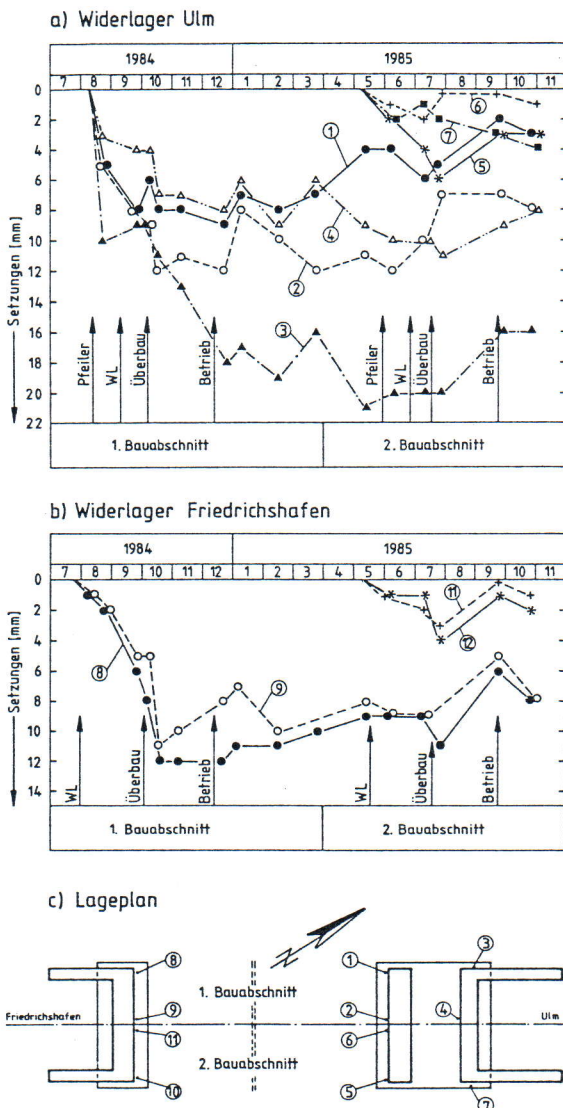


Bild 6 Ergebnisse der Setzungsmessungen

SCHRIFTTUM

- DIN 1054: Zulässige Belastung des Baugrundes
- DIN 4125: Verpreßanker für dauernde Verankerungen im Lockergestein.
- DIN 4128: Verpreßpfähle mit kleinem Durchmesser
- Empfehlung (1978): Seitendruck auf Pfähle durch Bewegungen von weichen, bindigen Böden, Empfehlung für Entwurf und Bemessung (Fedders). Geotechnik, S. 100-104.
- Empfehlung (1983): Axiale Pfahl - Probebelastung - Teil 1: Statische Belastung, Empfehlung für die Durchführung. Geotechnik H.4, S. 174-195.