

Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen großdimensionaler Bohrpfähle für Spezialaufgaben des Grundbaues

Herbert Weinhold

1. EINFÜHRUNG

Die Entwicklungstendenzen der Bautechnik haben den Grundbauingenieur im letzten Jahrzehnt vor stark *veränderte* Aufgaben gestellt. Durch Einführung des Spannbetons und durch den Wandel der konstruktiven Merkmale heutiger Großbauten sind die Spannweiten und damit die *konzentriert* abzutragenden Bauwerkslasten allgemein größer geworden. Während man früher auf die Eignung des Baugrundes bezüglich Übernahme großer Lasten noch Rücksicht nehmen konnte, muß sich die technische Lösung heute überwiegend anderen Zwangspunkten, wie der Bebauungsdichte, den Grundstückspreisen und der Verkehrssituation unterordnen. Im Zuge dieser Entwicklung hat die Bedeutung von *Pfahlgründungen* zugenommen, mit dem Schwerpunkt auf großdimensionalen Pfählen, die bei *geringer* Pfahlanzahl und entsprechend *kleiner* Pfahlkopfplatte bedeutende Lasten aufnehmen können. Der Forderung größerer Durchmesser und Pfahlängen kann der Bohrpfahl moderner Herstellungsweise leichter entsprechen als der an sich sehr wirtschaftliche Rammpfahl, dem hierbei schon wegen des Verhältnisses Pfahlgewicht/Rambbärgewicht in vielen Fällen praktische Grenzen gesetzt sind. Bei schwerster Rammarbeit ist das rissefreie Eintreiben eines großkalibrigen Stahlbeton-Pfahles nicht mehr mit genügender Sicherheit zu gewährleisten. Auch bei anderen Spezialaufgaben, bei denen die Aufnahme vertikaler Lasten nur eine untergeordnete Rolle spielt, hat sich der großdimensionale Bohrpfahl ein weites Feld geschaffen. Wegen seines großen Widerstandsmomentes, das in der Größenordnung schwerster Kastenspundbohlen liegt, wurde der Bohrpfahl vielfach dort eingesetzt, wo andere Stützwandkonstruktionen aus Gründen der *Bodenverhältnisse*, örtlicher Schwierigkeiten oder wegen der Vermeidung von *Erschütterungen* und *Lärm* nicht geeignet waren.

2. HERSTELLUNGSVERFAHREN GROSSDIMENSIONALER BOHRPFÄHLE

Die in der konventionellen, „*klassischen*“ Methode enthaltenen beschränkten Möglichkeiten reichen oft nicht aus, Pfahldurchmesser und -längen den Erfordernissen schwieriger Gründungsaufgaben anzupassen. Bei der einfachen Bohrmethode wird ein Bohrrohr durch Drehen, Schlagen oder unter ruhender Belastung in der

Weise abgeteuft, daß der Boden an der Bohrlochsohle in Höhe des Rohrschuhes oder darunter mittels Klappsonde, Kiespumpe oder Schappe entnommen wird. Während bei mäßigen Bohrtiefen noch ein Voreilen des Bohrrohres gegenüber dem Bohraushub möglich erscheint, ist bei Tiefen über 6 bis 10 m, je nach Bodenart, das Bohrrohr nur noch in vorher mit dem Bohrwerkzeug geschaffene Hohlräume nachzutreiben. Bei Arbeiten unter dem Grundwasserspiegel oder in kohäsionslosen rolligen Kiesen bietet dieses Verfahren dadurch gewisse Unsicherheiten. Bohrtiefen über 10 bis 15 m sind in nahezu allen Fällen nur durch teleskopartige Verjüngung der „*Rohrfahrten*“ zu erreichen.

Bei Modernisierung der klassischen Methode konnten stufenweise erhebliche Fortschritte erzielt werden. Zunächst wurden die auf dem Ventilprinzip beruhenden Bohrwerkzeuge, die durch ihre Saugwirkung benachbarte Bodenpartien stören, bei vielen Anwendungsfällen durch schwere *Bohrgreifer* ersetzt, deren Schaufeln nach dem Eindringen in den Boden selbsttätig und dicht schließen. Ausgehend von den Schwierigkeiten beim Verrohren tiefer und großdimensionaler Bohrungen wurden Verfahren entwickelt, wonach die Standfestigkeit der Bohrlöcher statt durch Rohre durch *Bentonit-Dickspülung* gewährleistet wird. Die Bohrung wird hierbei durch konventionelle Werkzeuge oder im Saugbohren hergestellt. Der universellen Anwendbarkeit dieser Verfahren stellen sich u. a. das Risiko eines plötzlichen Spülungsverlustes und Zweifel an der wirksamen Mantelreibung so hergestellter Pfähle entgegen. Ein weiteres Herstellungsverfahren unterstützt die Bohrlochverrohrung durch eine am oberen Rohrende befestigte *Drehschwinge*, durch deren Schwungmassen das Rohr in kurze Drehbewegungen versetzt wird. Diese tangential gerichteten, durch kurze Schläge hervorgerufenen Bewegungen sollen die am Rohrmantel axial wirkende Rohrreibung so weit abmindern, daß das Rohr unter Eigengewicht der Bohrung folgen kann. Eine vom Genannten ganz wesentliche Abweichung bedeutet die Verwendung von *hydraulischen Verrohrungsmaschinen* nach dem Patent der Firma *Bade & Co.* (s. Abb. 1). Anlagen dieser Art wurden beispielsweise beim *Maracaibo*-Projekt eingesetzt, beim Bau des *Jj-Tunnels* in Amsterdam und bei der Pfahlgründung für die Hochstraße „*Fly over*“ zwischen London und dem Zentralflughafen Heathrow.

Verrohrungsmaschinen üben über eine hydraulisch spannde Bewegeschelle mittels Öldruckzylindern ein Drehmoment auf das Rohr aus, wodurch hin- und herdrehende Rohrbewegungen bewirkt werden. Senkrecht angeordnete Zylinder wirken beim Rohrzeiehen als Zugkraft. Zum Eindringen des Rohres in den Boden fehlt bei Anlagen dieser Art das entsprechende Gegengewicht oberhalb des Rohres.

Wenn die bisherige Aufzählung der Verfahren nach dem Gesichtspunkt der Eignung für zunehmenden

3. PFAHLHERSTELLUNG MIT DER BENOTO-BOHRANLAGE EDF 55.

Aufbau und Wirkungsweise der Maschine sowie die Merkmale des Verfahrens sind von Kirchknopf [1] und Aichhorn [2] sehr anschaulich und ausführlich beschrieben worden. Es ist daher hier nur das in Fortführung des Abschnittes 2 Notwendige anzugeben:

Die auf Abb. 2 dargestellte Maschine EDF 55 wiegt ca. 35 t und wird durch einen 120 PS-Dieselmotor



ABB. 1 Bade-Verrohrungsmaschine — Einzelaggregat

Schwierigkeitsgrad beim Bohren erfolgte, ist schließlich die Pfahlbohranlage EDF 55 zu nennen, die von der französischen Maschinenfabrik Société BENOTO entwickelt worden ist. Bohranlagen dieser Firma bestanden ursprünglich aus voneinander unabhängig arbeitendem Bohrturm mit Winden und Bohrgreifer sowie der Verrohrungsmaschine. Die Kombination der einzelnen Aggregate in einer Anlage, die *selbstschreitend* und für den *Straßentransport* geeignet ist, eröffnete der Anwendung großdimensionaler Bohrpfähle neue Möglichkeiten wie im folgenden noch gezeigt wird. Zahlreiche Bohranlagen vom Typ EDF 55 arbeiten in Europa und Übersee; Besitzerin von Benoto-Bohranlagen in Österreich ist die Aufschläger KG., Braunau O.-Ö. — Simbach/Inn.

angetrieben. Der Motor erzeugt den Flüssigkeitsdruck für die hydraulische Anlage und treibt die Bohrwinde an. Die kräftige Bewegeschelle der Verrohrungsmaschine umfaßt das doppelwandige, dadurch sehr verwindungssteife *Bohrrohr*. Es hat am unteren Ende einen Schneidkranz mit Zähnen und wird in Schüssen von 6 m eingebracht. Die Rohrverbindung erfolgt durch *Schnellverriegelungsbolzen* derart, daß das Rohr außen und innen völlig *glatt* bleibt. Bei einem Ortswechsel stützt sich die Anlage auf 4 hydraulisch betriebene *Schreitfüße* auf, während 2 *Bodenplatten* vor- oder zurückfahren. Diese Bodenplatten bilden dann die maschineneigene Schienenbahn, auf der die Bohranlage nach Entlastung der Schreitfüße entlangrollt. Drehungen der Maschine sind durch Bewegungen nur

einer Bodenplatte möglich. Bei der Pfahlherstellung wird das Bohrrohr unter Hin- und Herdrehen *hydraulisch* in das Erdreich eingedrückt, während der flaschenförmige, schwere *Bohrgreifer* im Freifall den Boden löst, mit den Greiferschaufeln faßt und schließlich über eine Wanne auskippt. Besonders bei strömungsempfindlichen Böden unter dem Grundwasserspiegel arbeitet das Bohrrohr dem Greifer um 1—2 m voraus, wodurch *Bodenaufbrüche* der Bohrlochsohle verhindert werden. Bei Eindringen des Bohrloches in den Boden wirkt die halbe Maschinenlast (ca. 16—18 t) als Gegengewicht. Nach Erreichen der Endteufe wird die Bohrung mittels *Schüttbüchse*, die durch einen Schräg-

den als Lärmpegel der Benoto-Anlage 76—80 DIN-phon gemessen [3], die der akustischen Größenordnung des Straßenverkehrs einer Bundesstraße entsprechen.

Durch fast ausschließlich *hydraulische* Kraftübertragung arbeitet die Maschine ohne wesentliche Erschütterungen und schwingungsfrei. Bei Ausnützung des Mindestabstandes bohrt die Anlage nur 80 cm von Gebäuden entfernt. Beispielsweise auch beim Projekt „Neues Tagblatt“ in Stuttgart wurde eine Pfahlreihe im genannten Abstand vor einem höchst auffälligen Giebel hergestellt, ohne daß sich neue Risse gebildet hätten. Das große, ruhend wirkende Gewicht der Ma-



ABB. 2 BENOTO-Bohranlage EDF 55

aufzug beschickt wird, mit Beton gefüllt. Das Rohrzeihen erfolgt hydraulisch unter Drehbewegungen, durch die Kraft zweier Kolben mit insgesamt 40 t Zugkraft. Die Verdichtung des Betons geschieht durch kurzes Nachdrücken des doppelwandigen Rohres und, im oberen Pfahlbereich, durch *Rütteln*. Für die häufige innerstädtische Anwendung wesentlich ist der vergleichsweise geringe Lärmpegel der Maschine. Eine so auf Leistung und hohen Schwierigkeitsgrad abgestimmte Bohranlage arbeitet naturgemäß nicht geräuschlos, auch nicht bei völlig abgeschirmtem Motor. Die beim Bohrbetrieb entstehenden Geräusche müssen jedoch verglichen werden mit demjenigen Lärm, der von anderen Baumethoden mit statisch vergleichbarem Endprodukt erzeugt wird. Aus 15 m Entfernung wur-

schine erzeugt in den gefährdeten oberen Bodenzonen eine Vorspannung, durch die Wechsel zwischen Belastung und Entlastung „überdrückt“ werden.

4. TRAGFÄHIGKEIT VON BOHRPFÄHLEN

Die Festlegung der *Tragfähigkeit* aus dem Ergebnis von Probelastungen ist eine bewährte, mit vergleichsweise geringen Unsicherheitsfaktoren behaftete Methode. Es ist üblich, die Hälfte der im Versuch aufbrachten Last als zulässige Belastung anzunehmen. Die genaue Anwendung dieser Regel erscheint jedoch nur sinnvoll, wenn es durch eine entsprechend große Versuchslast gelang, den Probepfahl bis zum Bereich seiner Grenztragfähigkeit zu belasten. Bei großdimensionalen Pfählen gelingt es mit einem technisch und

wirtschaftlich vertretbaren Aufwand oftmals *nicht*, die Größenordnung der dafür erforderlichen Auflast zu erreichen. Beim Eintreten nur unerheblicher Setzungen, vor allem bei Beobachtung einer sehr flachen Wiederbelastungskurve sollte die starre Regel: halbe Versuchslast = zulässige Last zugunsten einer realistischen Betrachtungsweise verlassen werden.

Der mit Probelastungen verbundene, ganz erhebliche Aufwand machte es wünschenswert, einfachere Bemessungsmethoden zu kennen. Aus anfangs rein theoretischen, später auch halbempirischen Überlegun-

to-Pfählen gegenüber der errechneten Grenzlast ein *Sicherheitsgrad* von 2,0 bis 2,3 eingesetzt wird. Durch Berechnung der *kritischen Pressung* an der Pfahlsole nach Fröhlich, gegenüber deren Eintreten *keine* Sicherheit erforderlich ist, kann dann der ermittelte Anteil des *Spitzenwiderstandes* an der zulässigen Gesamtlast überprüft werden. Für die endgültige Klärung des gezeigten Zusammenhanges bedarf es noch eingehender Untersuchungen. Dadurch sollen die bisherigen Ergebnisse einerseits von etwaigen Zufälligkeiten befreit werden, andererseits sind wichtige Detailfragen, wie

	Spitzenwiderstand P_s in [t]	Mantelreibung P_M in [t]
Terzaghi [9] [10] [2]	$F(1,3c \cdot V_c + \sigma_s \cdot V_t + 0,6 \gamma_s \frac{d}{2} \cdot V_b)$	$U \cdot t_M (\lambda_0 \cdot \sigma_M \cdot \operatorname{tg} \delta + c)$ mit $\lambda_0 \approx 0,5$
Schiel (n. Schultze [11])	$F(c \cdot \lambda_{pc} + \sigma_s \lambda_{pt} + 1,33 \gamma_s \frac{d}{2} \lambda_{pb})$	keine Angabe
Bénabeng [4]	$F \cdot \sigma_s \cdot \operatorname{tg}^4 (45 + \frac{\varrho}{2})$	$U \cdot t_M \sigma_M \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg}^2 (45 + \frac{\varrho}{2})$
Caquot - Kérisel [4]	$F \cdot \sigma_s (1 + 0,32 \operatorname{tg}^2 \varrho) \cdot \operatorname{tg}^2 (45 + \frac{\varrho}{2}) e^{\pi \operatorname{tg} \varrho}$	$U \cdot t_M \operatorname{tg} \delta \cdot \sigma_M \cdot e^{0,63 \operatorname{tg} \delta (4 + \operatorname{tg} \delta^{2/3})}$
Schnitter [6]	rollige Böden: $F \cdot K_s \cdot \sigma_s \cdot N_q$ mit $K_s = 1,0$ dichte Lagerung $K_s = 0,5$ lockere Lagerung	$U \cdot t_M \cdot \lambda_r \cdot \sigma_M \cdot \operatorname{tg} \delta$ mit $\lambda_r = 0,50$ dichte Lagerung $\lambda_r = 0,25$ lockere Lagerung
	bindige Böden: $F(K_s \cdot \sigma_s \cdot N_q + c \frac{N_q - 1}{\operatorname{tg} \varrho})$	$U \cdot t_M \cdot c$
Fröhlich [10] [2]	$q_{kr} = \sigma_s \cdot \bar{\alpha} + c \cdot \operatorname{ctg} \varrho \cdot \bar{\alpha}$ mit $\bar{\alpha} = \frac{\pi}{\operatorname{ctg} \varrho - (\frac{\pi}{2} - \varrho)}$	Erhöhung um 25% wegen Kreisquerschnitt des Pfahles. (vgl. Formbeiwerte der Fundamentgrundrisse DIN 4017)
Mantelreibung nach Terzaghi - Fröhlich siehe oben		
Bezeichnungen: ϱ = Winkel der inneren Reibung in [°] δ = Wandreibungswinkel (für BENOTO - Pfahl $\delta \approx \varrho_M$) γ = Raumgewicht [t/m ³] unter Beachtung des Grundwasserspiegels σ_s = Bodenauflast in Höhe der Pfahlsole = $\sum \gamma \cdot t$ [t/m ²] σ_M = mittlere Bodenauflast im Mantelreibungsbereich [t/m ²] F = Pfahlquerschnitt [m ²] U = Umfang [m] d = Durchmesser [m] t_M = Pfahlbereich mit Mantelreibung [m]		

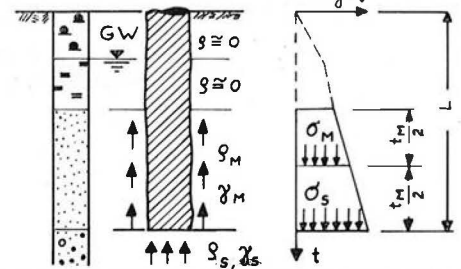


ABB. 3 Berechnungsansätze für Bohrpfähle

gen heraus, entstanden eine Reihe von Berechnungsansätzen für die Festlegung der Grenztragfähigkeit von Bohrpfählen (s. Abb. 3), die jedoch stark unterschiedliche Ergebnisse liefern. Es war mehrfach Gegenstand von Untersuchungen, überwiegend aber nur anhand kurzer Modellpfähle ([4] [5] [6] [7] [8]), welcher Zusammenhang zwischen errechneten und im Versuch festgestellten Grenzlasten besteht. Nach [8] ergab sich, daß die Berechnungsansätze von Terzaghi und Schnitter mit der Wirklichkeit gut übereinstimmen, wenn für die Festsetzung der zulässigen Pfahllast von Beno-

beispielsweise der Anteil der Mantelreibung und deren Abhängigkeit von der Pfahlsetzung noch nicht ausreichend geklärt. Es ist beabsichtigt, durch Auswertung einer Versuchsreihe an Pfählen natürlicher Größe einen Betrag zur Erforschung der noch offenen Zusammenhänge zu leisten.

5. HERSTELLUNG VON PFAHLWÄNDEN

Um exakt gerichtete, *senkrechte* oder *schräge* Bohrungen bis in größere Tiefen zu erzielen, mußte die Maschine mit einer zweifachen Führung des Bohrrohres

ausgestattet werden. Dieses Konstruktionsmerkmal der Maschine sowie die Verwendung gezählter Hartmetall-Schneidschuhe eröffnete neben der Einzelpfahlherstellung ein neues Anwendungsgebiet, nämlich die Herstellung von Pfahlwänden aus Pfählen, die einander überschneiden. Die Abb. 4 zeigt das Schema dieses Vorganges: Von Pfählen mit fortlaufender Bezifferung werden zunächst die unbewehrten Pfähle Nr. 1, 3, 5 usw. hergestellt. Deren Achsabstand ist geringer als

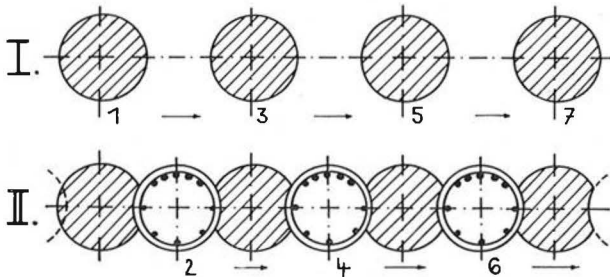


ABB. 4 Schema der BENOTO-Pfahlwandherstellung

der Pfahldurchmesser. Nach 24 bis 36 Stunden, diese Zeit ist vom Erhärtungsprozeß des verwendeten Betons abhängig, werden die bewehrten Pfähle Nr. 2, 4, 6 usw. in den Beton der Nachbarpfähle eingeschnitten. Beim Standarddurchmesser 88 cm und dem zumeist gewählten Überschneidungsmaß 13 cm beträgt beispielsweise die Mindestwandstärke der Pfahlwand 46 cm.

Pfahlwände bieten gegenüber konventionellen Stützbauwerken mehrere Vorteile. Die bewährte und unter geeigneten Verhältnissen konkurrenzlose *Stahlspundwand* erfordert rammfähige, hindernislose Böden und die Unschädlichkeit der beim Rammvorgang erzeugten Erschütterungen. Stützbauwerke, die in offener Baugrube hergestellt werden, sind zumeist nur dann vorteilhafter, wenn durch Hinterfüllung ein künstlicher Geländesprung erzeugt wird. Beim Anschneiden von Hängen jedoch, deren Neigung sich an der Grenze des Zulässigen befindet, entsteht durch die *offene Baugrube* ein Bauzustand mit ungenügender, mindestens zweifelhafter Standsicherheit, der durch Verwendung von *Bohrpfahlwänden* völlig umgangen wird. Vor Anschneiden des Hanges ist das Stützbauwerk im Boden bereits fertig und übernimmt während des Aushubes seine Funktion, ohne daß die in der Böschung wirkenden Kräfte überhaupt ausgelöst werden. Für viele Bauaufgaben erwiesen sich Bohrpfahlwände als so vorteilhaft, daß die von der Firma Aufschläger in Österreich und Deutschland bisher hergestellten ca. 40.000 Benoto-Pfahlmeter zum größeren Teil auf Pfahlwände entfallen. Die statische Berechnung erfolgt nach den üblichen Methoden für *Bohlwerke*. Für die Bemessung

wird entweder nur der bewehrte Pfahl als tragend betrachtet (Bemessungstabelle nach [9]) oder die durchgehende Wand als Platte angesehen mit einer gemittelten statischen Höhe [10] [11]. Von einem Sonderfall abgesehen, wurde bisher stets der *aktive Erddruck* und *nicht* der *Ruhedruck* angesetzt, da vorausgesetzt werden kann, daß die Pfahlwand diejenige geringe Seitenverschiebung ausführen kann, die den unteren Grenzwert des Erddruckes erzeugt. Pfahlwände bieten hinsichtlich einer Kontrolle der Pfahlqualität Möglichkeiten, wie sie bei Systemen, die sich auf Einzelpfähle beschränken, nicht gegeben sind. So wird bei *Freigraben* von Pfahlwänden u. a. laufend die Pfahlrichtung, die Betonqualität, aber auch die Wasserdichtigkeit überprüft. Pfahlwände sind *wasserdruckhaltend*, jedoch kann bei Vorhandensein von freiem Grundwasser eine allmähliche Durchfeuchtung nicht ganz ausgeschlossen werden. Bei umgekehrter Forderung, nämlich Ableitung von Hangwasser durch die Pfahlwand hindurch, sind *Entlastungsfugen* leicht zu schaffen.

6. AUSFÜHRUNGSBEISPIELE FÜR BENOTO-PFÄHLE UND -PFAHLWÄNDE

Die Gliederung dieses Abschnittes erfolgt nach den hauptsächlich Anwendungsgebieten, die sich bei kombiniertem Verwendungszweck der Pfähle zwar überschneiden, jedoch grob wie folgt unterteilt werden können:

Gründungen, Hangabstützung, Baugrubenumschließungen, Tunnelwände und Kaimauern. Die Aufzählung muß sich im Rahmen dieses Berichtes auf eine begrenzte Auswahl charakteristischer Benoto-Arbeiten der Fa. Aufschläger beschränken. Allgemein interessierende Projekte, über die in der Fachliteratur schon berichtet wurde [2] [8] [12] [13] [14], werden nur der Vollständigkeit halber kurz erwähnt. Eine ausführliche Übersicht wurde bei [15] übermittelt.

a) Gründungen.

Die erste, in Österreich ausgeführte Benoto-Arbeit war die Pfahlgründung der Dampfkraftwerk-Erweiterung *Timelkam* der Oberösterreichischen Kraftwerke AG. Vorwiegend für den 44 m hohen Bunkerschwerbau sind in 12 Wochen ca. 160 Pfähle mit einer maximalen Teufe von 18,7 m hergestellt worden. Ein weiterer schwieriger Einsatz erfolgte bei der Gründung der *Autobahnhangbrücke* nordwestlich von *Mondsee* [2], wo die auf maximal 340 t bemessenen Pfähle knapp 30 m tief in die Grundmoräne abgeteuft wurden. Unter Einsatz von 2 Benoto-Bohranlagen ist in der Nähe von Taxenbach die Rohrleitung am Einlaufbauwerk des Hangkanales *Salzachkraftwerk Schwarzach* der Tauernkraftwerke AG. gegründet worden. Die

Abb. 5 zeigt die Bohranlagen bei den Pfahlarbeiten zwischen den Stützmauern des Salzach-Seitenkanales. Als Gründung der 7 Joche der Stahlrohrleitung und des Einlaufbauwerkes sind 83 Pfähle mit einer größten Länge von 23,5 m hergestellt worden. Neuartig war die als Bauwerksabschluß vorgesehene Pfahlwand, deren 19 Pfähle von der Senkrechten allmählich in die

Spundwandkästen sind hierbei, als besondere Bohrleistung, durchfahren worden.

Die Abb. 6 zeigt den Schnitt und den Grundriß eines durch Benoto-Pfähle sanierten *Autobahn-Durchlasses* bei *Ybbs/Donau* [16]. Nach Fertigstellung der Tunnelröhre und der Dammschüttung hatten sich schwere Setzungsschäden am gesamten Bauwerk gezeigt; die

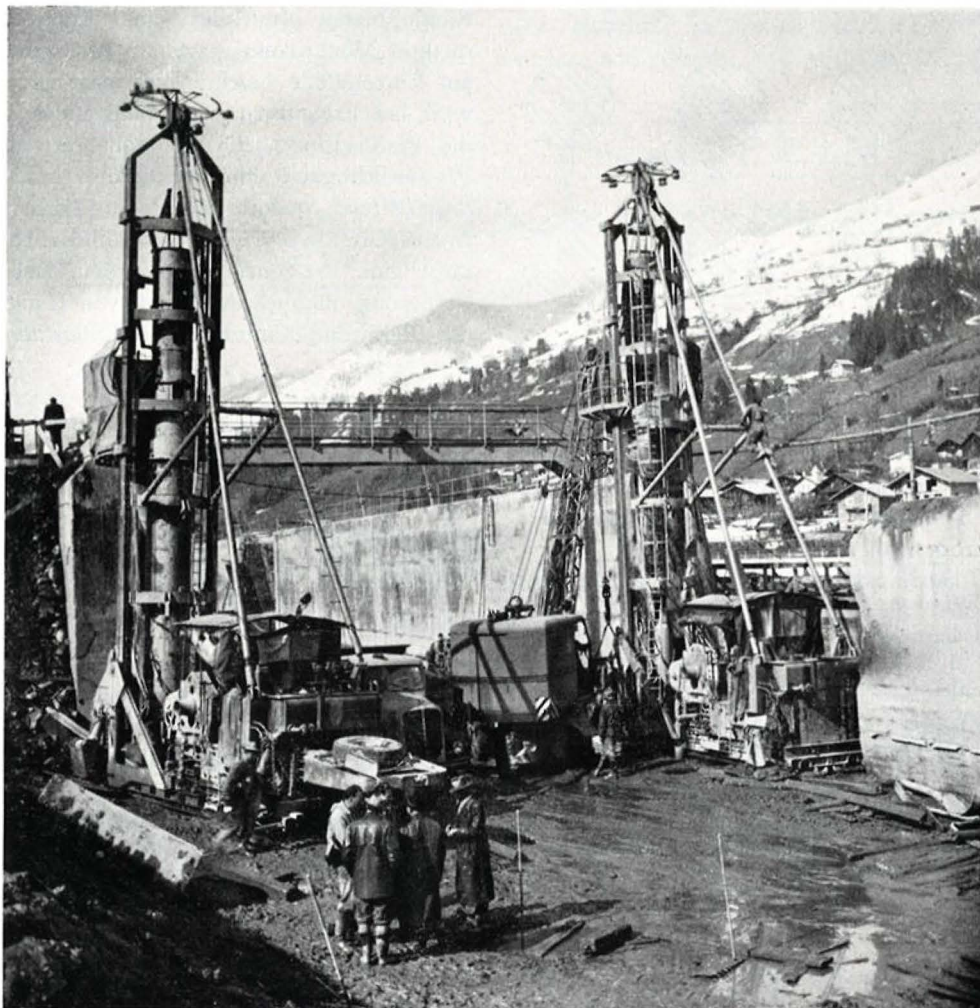


ABB. 5 Einsatz Salzachkraftwerk Schwarzach

Neigung 12° übergehen und einen Anschluß an die bestehende Stützmauer bilden.

Beim Wiederaufbau der durch Hochwasser zerstörten *Autobahnbrücke* über die Salzach bei *Salzburg* wurde die Pfeilergründung mittels 30 Benoto-Pfählen ausgeführt. Die Pfähle wurden von einer künstlich hergestellten Bohr-Halbinsel im Salzachbett aus durch Gerölle, steinige Tonschichten, Tonmergel und Findlinge hindurch bis auf Kalkstein in 44 m Tiefe abgestellt. Im Untergrund querliegende Spundbohlen der alten

Portale und Flügelmauern waren durch teils 6 cm breite Risse vom Durchlaß getrennt und die Dammböschung örtlich abgerutscht. Durch Portalzubauten, die auf Einzelpfählen ruhen, und durch neue, auf 1 : 2 abgeflachte Flügel, deren Schnittkräfte durch Pfahlwandscheiben abgetragen werden, konnte die Tunnelröhre beidseitig unverschieblich abgestützt werden. Sämtliche Pfähle sind bis in den festgelagerten „Flinz“-Untergrund hinuntergeführt und binden 1,5 bis 6,0 m in diesen Boden ein.

Als Gründung eines *Parkhochhauses* im Zentrum von *Hamburg* sind 148 Benoto-Pfähle vom Durchmesser 88 cm mit 6° Neigung gegen die Lotrechte hergestellt worden. Die Gesamtbohrstrecke von ca. 2300 m führte durch Auffüllung, Blockwerk mit Holzschwellenstapel, Kleiböden und Sande bis in den eiszeitlichen Geschiebemergel, der in Tiefen von 16 bis 20 m unter Gelände

Die neue *Autobahnbrücke* über die *Wangauer Ache* bei *Loibichl* in *Oberösterreich* ruht auf 85 Benoto-Pfählen, deren größte Länge 35 m beträgt. Als Bodenpressung an der Pfahlsohle, die überall im „Flysch“-Bereich liegt, wurden 42 kg/cm² zugelassen. Bei einem Pfahldurchmesser von 88 cm entspricht diese Pressung einem Spitzendruck von ca. 250 t.

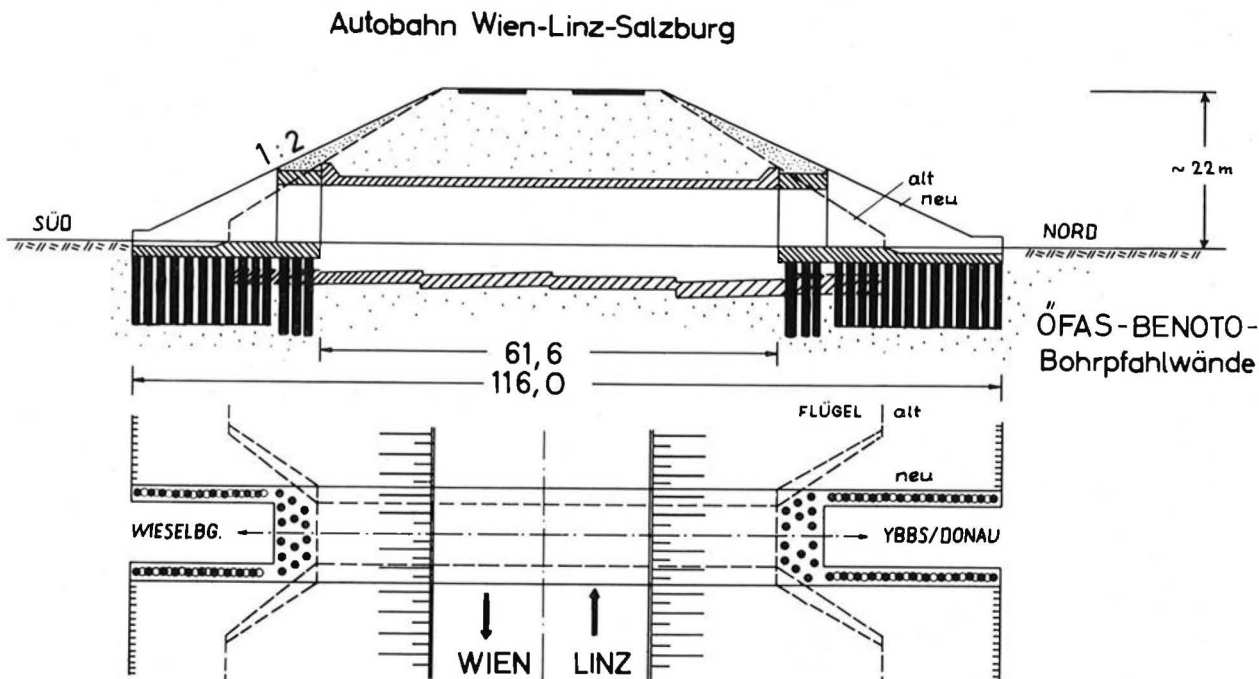


ABB. 6 Sanierung der Autobahnunterführung bei Ybbs

ansteht- Bei einer Probelastung wurde ein Pfahl mittels Druckpressen bis 400 t belastet. Die Erstsetzung betrug 18 mm, einschließlich einer elastischen Pfahlverformung von ca. 1,5 mm. Die Zweitbelastung erbrachte nach 24 Stunden Dauerlast 24 mm Setzung unter Ausbildung einer sehr flachen Wiederbelastungskurve. Unter der Gebrauchslast von ca. 200 t sind 4 mm Setzung zu erwarten.

Auf neuartige Weise wurden zwei 120 m hohe Schornsteine der *Shell-Raffinerie* bei *Ingolstadt* gegründet. Die Gründungsdetails sowie die Schnittkräfte sind aus der Abb. 7 ersichtlich. Die Gründungskörper bestehen aus zylindrischen Pfahlwänden, an deren Sohle, bei vorsichtigem Ansatz der Mantelreibung, als maximale Bodenpressung im Ton 15 kg/cm² zu erwarten sind. Die Form der Gründung ließ eine große Steifigkeit und die Aktivierung erheblicher Seitenkräfte bei einer beginnenden Schrägstellung unter Windeinfluß erwarten. Beim Standsicherheitsnachweis wurde der Erdwiderstand sicherheitshalber jedoch nicht angesetzt. Die inzwischen abgeklungene Setzung war völlig gleichmäßig und betrug ca. 3 cm.

Der 160 m hohe *Richtfunkturm* der *Bundespost* auf einer Anhöhe bei *Ulm* ruht auf 32 Benoto-Pfählen (s. Abb. 8), deren Anschluß an den Turmschaft durch einen 2m starken Kreisring hergestellt wird. Während der Pfahldurchmesser 88 cm für die Übertragung der Druckkräfte auf den in Pfahlsohle anstehenden Mergel mit Kalkstein ausreichte, mußte für die Aufnahme der Zugkräfte auf der jeweiligen Windseite eine Pfahlfußverbreiterung geschaffen werden. Die vorhandenen Bodenschichten ließen keine größere Mantelreibung erwarten. Da das Bohrloch trocken blieb, wurde die Erweiterung von Hand mittels Schrämmhammer vorgenommen, zumal die Bodenverhältnisse eine maschinelle Ausführung nicht zuließen. Zur Erzielung einer Verzahnung des Pfahlfußes mit den festgestellten Felsklüften wurde der Beton in weichplastischer Konsistenz eingebracht.

b. Hangabstützungen

Die grundsätzlichen Vorteile, die in ausführungstechnischer Hinsicht Benoto-Pfahlwände gerade für dieses Anwendungsgebiet aufweisen, sind in Abschn. 5 genannt worden.

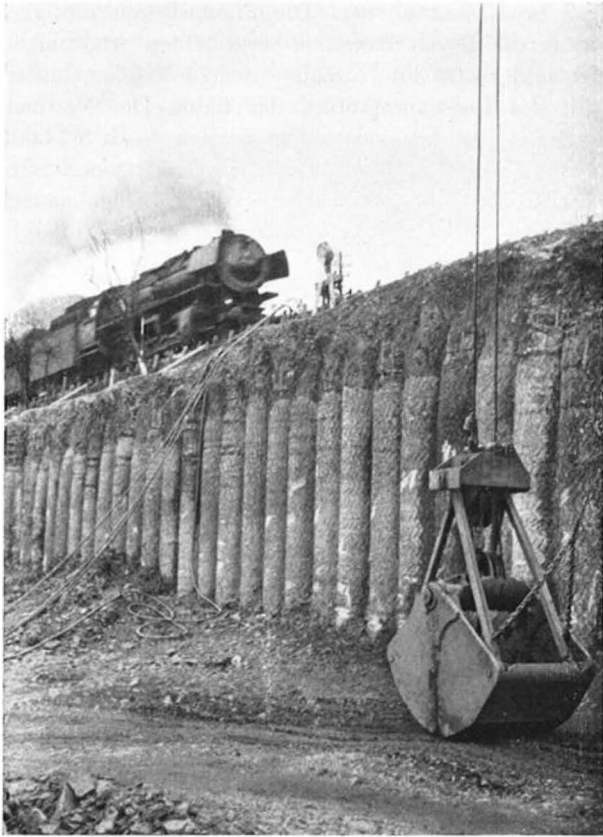


ABB. 9 Bahndammabstützung an der Mosel

wasserstand von ca. 7 m über Sohle herzustellen. Die Baugrube sollte wegen der Isolierarbeiten möglichst frei von Abstützungen sein. Die Arbeit wurde mit 3 Benoto-Geräten in 55 Tagen ausgeführt, es wurden insgesamt 5000 Pfahlmeter durch teils schwierige Böden hergestellt. Die Pfahlwände binden in undurchlässige Schichten ein, wodurch die Baugrube während der Isolierungsarbeiten praktisch ohne Wasserhaltung trocken blieb (s. Abb. 10). Die Verankerung der Wände im Erdreich erfolgte durch Injektionszuganker.

Am Max-Joseph-Platz in München befindet sich vor dem wiederhergestellten Nationaltheater dzt. eine Tiefgarage für 600 Fahrzeuge im Bau, die bei der Theater-Eröffnung im Spätherbst nach nur einjähriger Bauzeit nahezu fertiggestellt sein wird. Die Baugrubensicherung vor dem Königsbau der Residenz wurde, der Bedeutung des Gebäudes entsprechend, mit größter Sorgfalt ausgewählt. Der ursprüngliche Entwurf sah eine Schlitzwand vor, die vom Prüfamts für Baustatik der Stadt München abgelehnt wurde, „um die bei einer Schlitzwand evtl. auftretenden Risiken, nämlich Anschneiden alter Leitungen und Ausfall der Tonschlämme auszuschalten“. Er wurde eine Benoto-Wand vorgeschrieben, die sich bei Baudurchführung u. a. in wirtschaftlicher Hinsicht und auch insofern gut bewährt hat, als die Arbeiten bei Temperaturen um -24° zügig weiterliefen. Durch Tagesleistungen von 40 m^2 Pfahlwand wurde der Fertigstellungstermin unterschritten. Knapp hinter der Pfahlwand (s. Abb 11) tragen die Fundamente der Residenz eine Last bis



ABB. 10
Baugrube für die
Bayerische
Gemeindebank
in München

170 t/m auf den Erdkeil ab. Zur Standsicherheit der Wand war daher die Verankerung jedes zweiten Pfahles mit einer Ankerkraft von knapp 30 t nötig. Die gesamte Bohrtrasse lag im Bereich eines alten gemauerten Kanales, dessen 1,5 bis 2 m hohe Wange ohne Schwierigkeiten durchbohrt wurde. Die freigelegte Wand zeigt dadurch auf die gesamte Länge ein

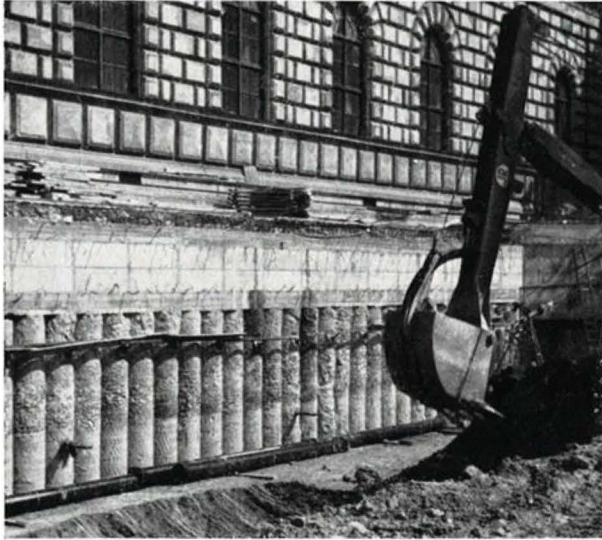


ABB. 11 Baugrubenwand Max-Joseph-Platz München

Band anbetonierter „Ziegelfolie“, die zur Vermutung Anlaß gab, daß es sich um gemauerte Rundsäulen handele.

d) Tunnelwände und Widerlager.

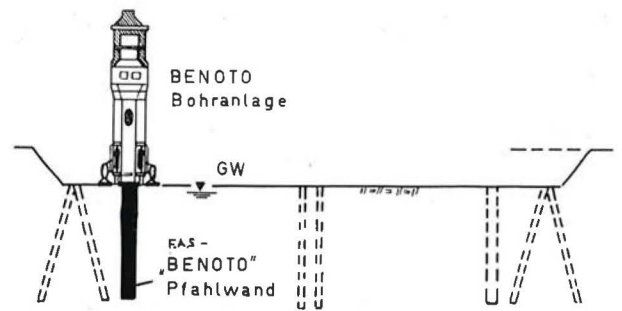
Die Abb. 12 zeigt in schematischer Darstellung die Arbeitsvorgänge, wie sie bei Herstellung einer Tunnelstrecke unter Verwendung von Benoto-Pfählen auftreten. Die Bauzustände wurden dem Projekt *Autobahnunterführung K 12* unter dem *Güterbahnhof Billwerder-Moorfleet* bei Hamburg entnommen [8]. Die dzt. 250 m lange Unterführungsstrecke, deren Wände bereits für eine spätere Erweiterung auf 350 m fertiggestellt sind, ist bereits dem Verkehr übergeben. Die zur Verwendung gekommenen 800 Benoto-Pfähle mit einer Gesamtwandfläche von 6600 m² dienen als Widerlager der Brückenkonstruktion und als Träger der Isolierung. Aus Abb. 13 ist ein Teil einer Fahrbahnrichtung ersichtlich.

Beim Bau einer *Straßenunterführung* unter einer Bundesbahndammstrecke im *Odenwald* sind die Widerlagerflügel sowie die Tragpfähle der Widerlagerbänke als Benoto-Pfähle hergestellt worden (s. Abb. 14). Durch die Wahl dieser Bauweise konnten die Arbeiten in offener Baugrube, die stets zu einer starken Behinderung des Zugverkehrs führen, auf ein Mindest-

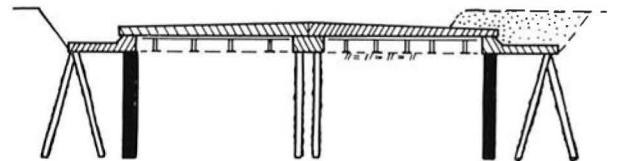
maß beschränkt werden. Die Pfahlarbeiten erfolgten von beidseitig der Bahnlinie hergestellten Schüttungen aus, und zwar, mit Ausnahme von 4 Pfählen, außerhalb des Lichtraumprofils der Bahn. Der Vertikalkräfte der Brückenkonstruktion werden durch 8 Pfähle auf Sandsteinfels übertragen. Die Horizontalkräfte werden durch die Scheibenwirkung der Flügelmauern und zum Teil durch die Biegesteifigkeit der Auflagerpfähle aufgenommen.

e) Kaimauern.

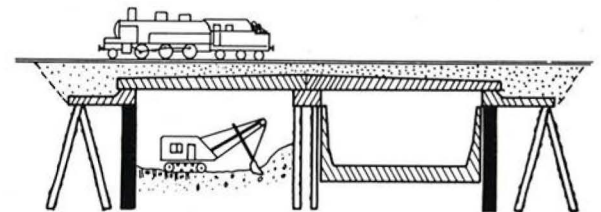
Die Ausbildung einer überscheidenden Benoto-Pfahlwand als Kaimauer erfolgte erstmals 1961 beim Bau der *Zementverladeanlage* des Zementwerkes *Lengfurt/Main* der Portlandzementwerke Heidelberg AG. Dem



a. Herstellen der Pfahlwände und Pfähle ab Bohrplanum oberhalb des Grundwasserspiegels



b. Betonieren der Pfahlkopf- und Brückenplatten, Wiederherstellen des Gleisbettes und der Gleisanlagen.



c. Nach Gleisverlegen, Aushub der Tunnelstrecke, Isolieren und Einlegen der Grundwasserwanne

ABB. 12 Bauzustände beim Tunnelbau in Hamburg

Werk lagen vor Baudurchführung die Vorschläge und Angebote von ca. 20 Großfirmen vor, aus denen wegen wirtschaftlicher und technischer Erwägungen die Benoto-Lösung ausgewählt wurde. Als vorteilhaft wurde der Wegfall von Wasserhaltung, die Verkleinerung des Hochwasserrisikos sowie die sichere Erfassung der Felslage als Gründungssohle bzw. Einspannebene angesehen. Die 105 m lange Pfahlwand stellt statisch

eine unten 2 m im kompakten Sandstein eingespannte, oben durch Spannglieder verankerte Platte dar. Oberhalb der Ankerlage werden die Pfahlköpfe durch einen

Die Kaimauer hat sich im Betrieb zufriedenstellend bewährt, so daß z. Zt. ein in Auftrag gegebener 2. Bauabschnitt von 130 m Länge ausgeführt wird (Abb. 15).

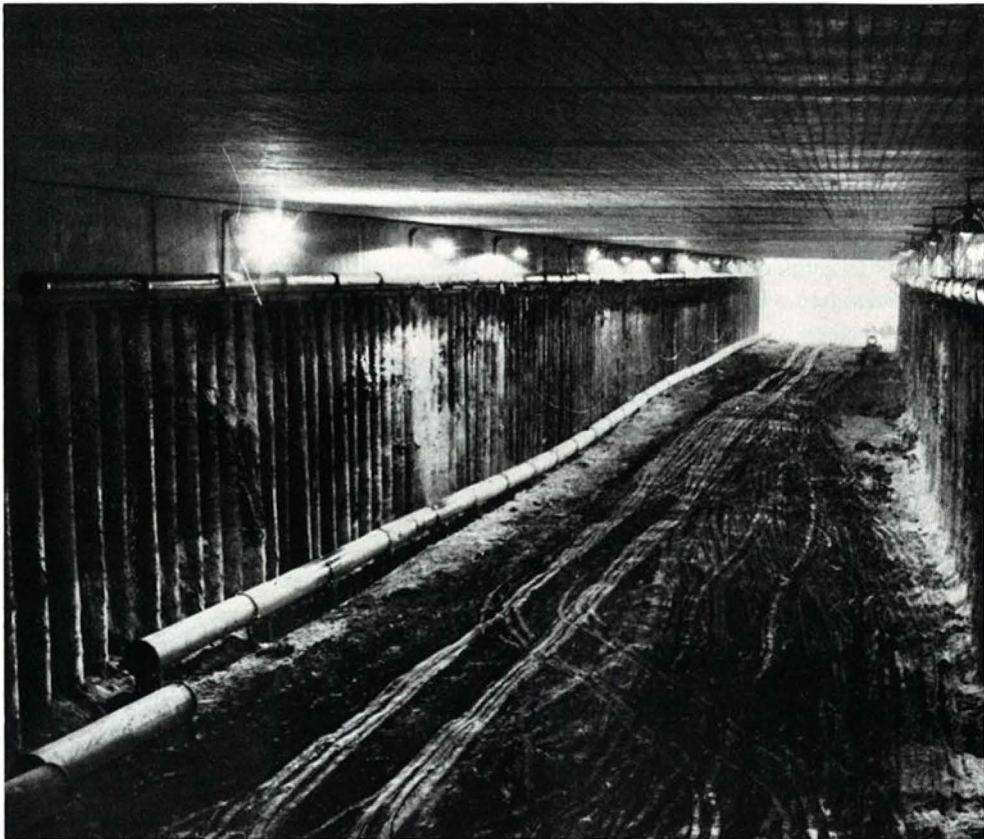


ABB. 13 Teilansicht der Autobahnunterführung Hamburg

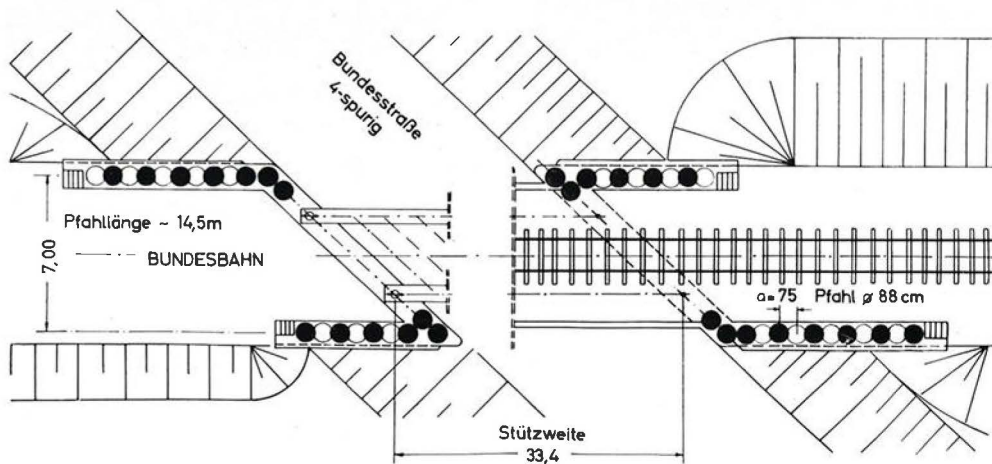


ABB. 14 Straßenunterführung im Odenwald

2 m hohen Stahlbetonholm miteinander verbunden. Die Spannanker führen zu einer rückwärtigen Ankerwand aus Benoto-Einzelpfählen im Achsabstand 1,5 m.

Ein ähnliches Projekt mit insgesamt 160 m Länge geht derzeit im Auftrage der Rhein-Main-Donau AG. in Schweinfurt/Main seiner Vollendung entgegen.

7. GRENZLEISTUNGEN DES BENOTO-VERFAHRENS

Die Ausführungsgrenzen werden zwar durch vorgegebene Verfahrensmerkmale gezogen, trotzdem ist der Einfluß menschlichen Leistungswillens seitens einer *erfahrenen Bohrmannschaft* bzw. der ausführenden Firma bei einem Spezialsystem dieser Art entscheidend. Die praktische *Grenze der Bohrtiefe* liegt bei rund 70 m und wurde bei Brunnenbohrungen erreicht. Sie wird bestimmt durch das von der Verrohrungsmaschine erzeugte *Drehmoment*, durch den zwar geringen, auf die Tiefe jedoch summierten *Schlupf der Rohrverbindungen* sowie durch die *Zugkraft* beim Wiederziehen der entsprechend schweren Gesamtverrohrung. In

Bezogen auf den Standarddurchmesser 88 cm, beträgt das maximale *Biegemoment*, für das der Pfahl bemessen werden kann, rund 90 mt. Bei darüber hinausgehender Biegebeanspruchung wäre die erforderliche Bewehrung im Pfahlquerschnitt konstruktiv nicht mehr unterzubringen. Die Betongüte B 300 kann auch bei Pfahlbetonierung als *Unterwasserbeton* noch einwandfrei erreicht werden. Die selten geforderte Betongüte B 450 wurde bereits erzielt, sollte aber nur bei Betonierung im trockenen Bohrloch erwartet werden.

Die Grenzen örtlicher Ausführungsbedingungen sind recht weit gesteckt. Im Kältewinter 1963 wurde eine Pfahlgründung an der *Mur* auch bei *Temperaturen* von -28° noch einwandfrei hergestellt, allerdings muß

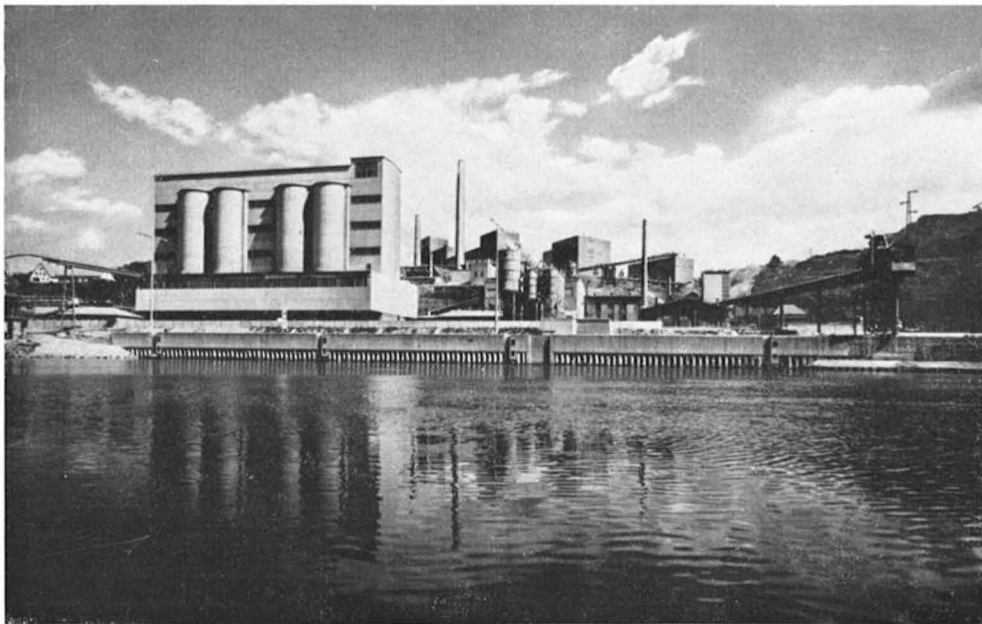


ABB. 15 Kaimauer beim Zementwerk Lengfurt

schwierigen Böden kann diese Tiefe sogar nur dann erreicht werden, wenn mit *geschweißten*, einwandigen Rohren gearbeitet wird. Diese Tiefenbeschränkung ist für Pfahlarbeiten insofern ohne besondere Bedeutung, als Pfahlgründungen wegen eines vernünftigen Schlankheitsgrades nicht extrem tief sein sollten. Wie berichtet, wurden für die *Autobahnbrücke Salzburg* 43,6 m lange Pfähle des Durchmessers 88 cm hergestellt. Bei Pfahlwänden aus überschneidenden Pfählen wird die Grenztiefe kleiner sein. Zwangspunkt ist hier im wesentlichen der *Abbindevorgang* des Betons. Trotz günstiger Schrittfolge bei Pfahlherstellung wird bei größeren Tiefen das *Anschneiden zu alten Betons* örtlich unvermeidlich, wodurch eine weitere *Phasenverschiebung* gegenüber dem einzuhaltenden zeitlichen Rhythmus eintreten kann.

diese Leistung als überdurchschnittlich bezeichnet werden und bedingte manche Erschwernis. Bei der Widerlagerfundierung einer Straßenbrücke über die Bahnlinie Wels-Passau bei Neumarkt am Hausruck arbeitete das Benoto-Gerät auf einem 8 m hohen Gerüst, das die Abb. 16 zeigt. Von diesem hochgelegenen Podest aus wurden 29 m lange Schrägpfähle, davon 6 m in meißelhartem Tonstein („Schlier“), hergestellt. Wegen der vergleichsweise geringen Seitenbeschleunigung, die das Gerät beim Bohren verursacht, konnte das Gerüst trotz großer Vertikalkräfte (80 t beim Rohrzeihen) wirtschaftlich bemessen werden. An Beispielen dieser Art soll als letztes ein Gerätetransport über den Main-Fluß bei *Schweinfurt* erwähnt werden. Dort war die *Ufermauer* des neuen Trenndammvorkopfes zwischen Wehr und Schleuse herzustellen und

zwar im Bereich von umfangreichem *Blockmauerwerk* und *Fundamentresten* der alten Schleuse. Wegen der zu erwartenden Schwierigkeiten wurde statt der vorgesehenen Spundwand eine Pfahlwand gewählt, zu deren Herstellung die Benoto-Bohranlage auf einem *Ponton* von einer 500 m entfernten Lände zur Trenndamminsel geschwommen wurde. Die Anlage schritt mit eigener Kraft auf die Schwimmplattform und von dort wieder an Land. Ein wesentliches Ergebnis dieses Transportes war die dabei gewonnene positive Erfahrung über Bohrarbeiten im Wasser von einer *schwimmenden Plattform* aus.

Abschließend ist noch über Herstellungszeiten von Pfählen zu berichten: Erzielte *Bohrfortschritte* allein

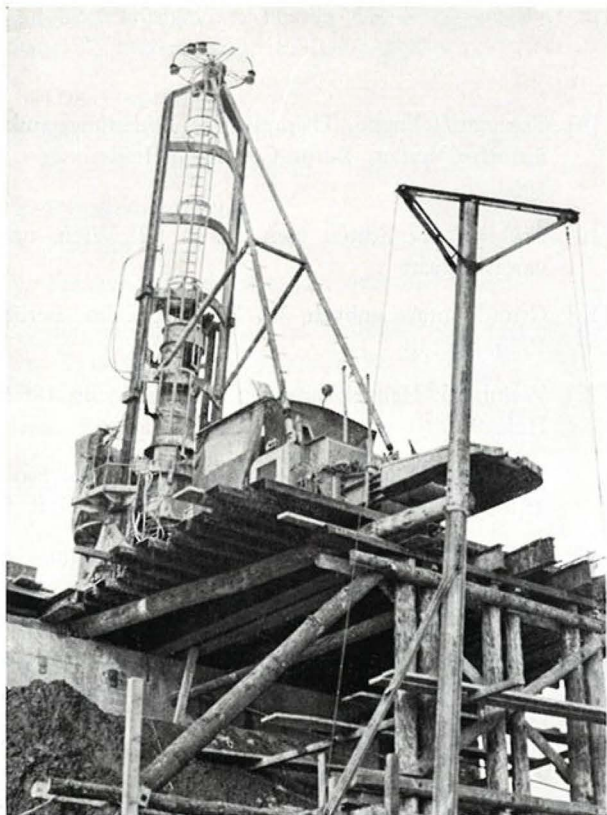


ABB. 16 Bohrarbeit vom Gerüst aus

sind noch kein Maß für die effektive Leistung, weil diese durch stark schwankende Zeiten für das *Einbringen der Pfahlbewehrung*, das *Betonieren* und *Maschinenumstellen* mitbestimmt wird. Für die Durchteufung von 3,5 lfdm Ziegelmauerwerk sind beispielsweise 16 Minuten benötigt worden, 5 lfdm Grauwackenfels wurden in 6 Stunden, 6 lfdm Sand in 20 Minuten durchteuft. Diese Zeiten können örtlich über- wie unterschritten werden. Maßgebend sind Leistungen je lfdm fertiger Pfahl bzw. je m² fertige

Pfahlwand. Bei Herstellung der Kelleraußenwände für ein Versandgebäude in Karlsruhe betrug die Tagesleistung je Gerät in 2 Schichten knapp 100 lfdm Pfahl des Durchmessers 88 cm. Je nach örtlichen Schwierigkeiten kann sich diese Leistung auf 30- bis 40 lfdm ermäßigen.

8. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSBEMERKUNGEN

Durch Weiterentwicklung des „klassischen“ Verfahrens entstanden in Anpassung an die veränderten Aufgaben der Gründungstechnik moderne Herstellungsverfahren für großdimensionale Bohrpfähle, von denen das *Benoto-Verfahren* wegen seiner erprobten Eignung auch für schwierigste Bodenverhältnisse ausführlich behandelt wurde. Die im Zuge der Entwicklung geschaffenen Merkmale dieses Verfahrens, so z. B. das Anschneiden benachbarter Betonpfähle, eröffneten ihrerseits neue Aufgabengebiete, die ursprünglich gar nicht zum Entwicklungsziel gehörten, nun aber die Varianten der Grundbautechnik in willkommener Weise erweitern.

Es gibt kaum Anzeichen dafür, daß Bohrpfähle verschiedener Systeme, soweit sie einwandfrei und in denselben Böden hergestellt sind und gleiche Durchmesser und Längen aufweisen, stark voneinander abweichende Trageigenschaften besitzen. Auf Grund fundierter Erfahrungen kann ferner die Annahme als widerlegt gelten, daß die *Tragfähigkeit von Bohrpfählen* allgemein zweifelhaft bzw. mit dem Eintreten erheblicher Setzungen verbunden sei. Dagegen ist jedoch mit Nachdruck darauf hinzuweisen, daß es zur Erzielung der geforderten Trageigenschaften nicht nur einer handwerklich *einwandfreien Pfahlherstellung* bedarf, sondern daß die Merkmale des verwendeten Herstellungsverfahrens ausreichen müssen, alle aus den jeweiligen Bodeneigenschaften resultierenden Risiken mit Sicherheit zu beherrschen. Als Beispiel sei das Vorseilen der Bohrrohre in *strömungsempfindlichen Feinsanden* erwähnt. Daraus ist zu folgern, daß neben allgemein bekannten Einflüssen, wie Pfahldurchmesser und -länge, Bodenart sowie Lagerungsdichte bzw. Konsistenz die *Eignung* und *sorgfältige Handhabung* des verwendeten Herstellungsverfahrens einen entscheidenden Einfluß auf die Funktionsfähigkeit der Pfahlgründung ausüben. Gegenstand von Untersuchungen vor Ausführung einer solchen Gründung darf es daher nicht nur sein, durch bodenmechanische Berechnungen Anzahl und Abmessungen der Pfähle festzulegen, sondern in Kenntnis der jeweiligen Bodeneigenschaften sind der Arbeitsdurchführung gegebenenfalls so weit Auflagen zu machen, wie es das beurteilbare Verhalten der Böden im Bohrbereich notwendig erscheinen läßt.

Wenn abschließend nochmals die speziellen Gegebenheiten der Bohrpfahlarbeiten in Österreich und im Voralpenraum aufzuzeigen sind, ist allgemein festzustellen, daß die dortigen Untergrundverhältnisse den zum Einsatz kommenden Bohrpfahlsystemen oftmals höchste Schwierigkeitsgrade auferlegen. Um ausreichend tragfähige Böden zu erreichen, sind vielfach mächtige Überlagerungszonen zu durchfahren. Sofern es sich beispielsweise um „Flysch“-Blockwerk, stark quellende Tone oder um „Nagelfluh“-Bänke handelt,

gestaltet sich deren Verrohrung meist noch schwieriger als die bloße Durchteufung. Bei Arbeiten dieser Art hat sich das *Benoto-Bohrpfahlsystem* zweifellos sehr gut bewährt und seine Eignung bewiesen. Der Verfasser dankt der Tiefbohr- und Tiefbauspezialunternehmung F. Aufschläger KG. für die Überlassung der hier gezeigten Abbildungen. Die als Ausführungsbeispiele genannten Benoto-Arbeiten sind von dieser Firma durchgeführt worden.

LITERATURHINWEISE

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Kirchknopf: Baugrubenumschließung neues Funkhaus München, Beton- und Stahlbetonbau 1959, Heft 11</p> <p>[2] Aichhorn: Pfahlgründung Hangbrücke Mondsee, Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, 1961, Heft 1</p> <p>[3] Weinhold: Baulärbekämpfung, Zeitschrift des Deutschen Arbeitringes für Lärmbekämpfung, 1962, Heft 3</p> <p>[4] Zweck: Tragfähigkeit von Pfählen, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 1953, Heft 2, 1954, Heft 3 und 4</p> <p>[5] Jagau: Fußwiderstand von Pfählen, Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, 1955, Heft 7</p> <p>[6] Schnitter: Neuere Pfahlgründungen, Schweizerische Bauzeitung, 1961, Heft 2</p> <p>[7] Andres: Tragfähigkeitsvergleich zwischen gerammten und gebohrten Ortopfählen, Schweizerische Bauzeitung, 1961, Heft 38</p> <p>[8] Weinhold: Bohrpfahlgründungen, Tiefbau, 1962, Heft 10</p> | <p>[9] Terzaghi/Jelinek: Theoretische Bodenmechanik, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1954</p> <p>[10] Fröhlich: Gutachten vom 22. 2. 62, Wien, unveröffentlicht</p> <p>[11] Grundbautaschenbuch, W. Ernst & Sohn, Berlin 1955, S. 118</p> <p>[12] Weinhold: Hangsicherungen, Bauingenieur, 1962, Heft 9</p> <p>[13] Deuringer/Weinhold: Benoto-Pfahlwand als Baugrubenumschließung, Bautechnik, 1962, Heft 8</p> <p>[14] Weinhold/Deuringer: Kaimauer aus Benoto-Bohrpfählen, Hansa, Zentralorgan für Schifffahrt-Schiffbau-Hafen, 1962, Heft 17</p> <p>[15] Weinhold: Pfähle und Pfahlwände im Benoto-Verfahren, Vortrag bei der Tagung der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen 1963</p> <p>[16] Grzybinsky: Sanierung des Autobahnobjektes A 71, Nachrichten der Universale-Hoch- und Tiefbau, Wien, 1962, Heft 8</p> |
|---|--|