

Erfahrungen beim Entwurf und der Ausführung von offenen Senkkästen

Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Gebhard Hees zum 65. Geburtstag gewidmet

Zusammenfassung

Die Erfahrungen beim Entwurf und der Ausführung von offenen Senkkästen werden systematisch aufgearbeitet und zusammengefaßt. Die am häufigsten aufgetretenen Probleme werden analysiert und Lösungen aufgezeigt, um diese Bauteile im besonderen für tief gegründete Bauwerke mit mittlerer Grundrißgröße wirtschaftlich und effektiv zu gestalten. Offene Senkkästen sind im Vergleich zu verbauten Baugruben wesentlich wirtschaftlicher, im besonderen, wenn Grundwasser ansteht und eine Grundwasserabsenkung benachbarte Gebäude gefährden würde. Ein wirtschaftliches Plus ist vor allem auch bei Neuverlegung (Stadtgebiet) von Abwassersammelleitungen im Tunnelvortrieb in Form von Abwasserschächten, die gleichzeitig als Anfahr- und Ankunftsschächte für die Tunnelvortriebsmaschine dienen, zu verzeichnen.

Summary

Experience in designing and constructing open caissons. The paper systematically outlines and summarises the experience acquired in the design and construction of open caissons. The problems which occur most frequently are analysed and solutions are presented in order to apply this construction method economically and efficiently, in particular for structures with deep foundations with a medium ground plan size. In comparison with sheeted construction pits, open caissons are much more economical, in particular when groundwater is present and a drop in the groundwater level would constitute a risk to adjacent buildings. An economical benefit to be gained from this method is found primarily when new main sewers (built-up areas) are laid by means of driving in the form of sewage shafts which simultaneously serve as access shafts for the driving machines.

1 Einführung

Der Bau von offenen Senkkästen ist in den letzten Jahrzehnten durch die Entwicklung modernster Baugrubenverbauverfahren immer stärker in den Hintergrund gerückt. Die Gründe bestehen darin, daß tief gegründete Bauwerke in einer definiert ausgehobenen Baugrube mit verankertem Verbau relativ einfach hergestellt werden können, ohne daß man sich den Risiken des Absenkens wie z. B. Schiefstellung, Verkantungen durch Bodenstörungen aussetzen muß. Die fehlende Erfahrung der jungen Ingenieurgeneration auf diesem Gebiet sowie eine Überbewertung der zuvor geschilderten Gefahren führen oft dazu, daß die Senkkastengründungsmethode noch nicht einmal als Alternativlösung in Betracht gezogen wird. Es sei hier vermerkt, daß beim Entwurf und während der Ausführung die erfahrensten Ingenieure und Praktiker auf bodenmechanischem Gebiet notwendig sind, um dieser diffizilen Aufgabenstellung zu begegnen. Letztendlich jedoch erweist sich die offene Senkkastenslösung als eine äußerst wirtschaftliche Lösung, wenn die Grundwasserverhältnisse und die Nachbarbebauung sie zulassen; dies besonders bei relativ tiefen Baugruben, bei denen sonst ein aufwendiger Spezialverbau notwendig ist.

Zudem wird die Umweltbelastung durch Lärm relativ gering gehalten, da keine Spundwand bzw. Verbauträger geschlagen oder gerüttelt werden müssen. Die Senkkastenslösung bietet sich auch dann an, wenn durch eine Grundwasserabsenkung für eine offene, ausgesteifte Baugrube die Nachbarbebauung durch Setzungen gefährdet würde.

In diesem Bericht sind die Erfahrungen beim Bau verschiedener konventionell gebauter offener Senkkästen zur Aufnahme unterirdischer Pumpstationen und Abwasserverteilerbauten für die zukünftige Planung ähnlicher Bauwerke detailliert festgehalten. Die prinzipiellen Schlüsse lassen sich auch auf Senkkästen, die im offenen Wasser hergestellt werden, übertragen. Zusätzliche Maßnahmen für die Herstellung im offenen Wasser bedingen jedoch auch einige Spezialmaßnahmen wie das Herstellen von Bauplattformen im Wasser oder das Einschwimmen des Kastens [1]. Eine Beschreibung dieser Spezialmaßnahmen ist nicht Teil dieses Berichtes.

2 Konstruktive Maßnahmen zur Herstellung eines Betonsenkkaestens

2.1 Einführung

Eine der heutzutage gebräuchlichsten Bauausführungsformen von Senkkästen während der Absenkphase besteht nur aus einer äußeren Schale. Die Kammerunterteilung sollte man nur bei großen Bauwerken in der Modulierung der spä-

Tabelle 1. Prinzipielle Form von offenen Senkkästen
Table 1. Principle forms of open caissons

Nr.	geometrische Form	Verwendungszweck
1		Tiefe Sammelschächte für Großrohrabwasser-sammler mit Tunnel-vortrieb Pumpstationen Brückenfundamente
2		Pumpstationen Abwassertanks Brückenfundamente

Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Design Manager Fru-Con Construction Corporation St. Louis (USA), Tochtergesellschaft der Bilfinger + Berger Bau AG Mannheim, Auslandsbereich Wiesbaden, Postfach 15 09, 6200 Wiesbaden 1

Tabelle 2. Kriterien zur Auswahl der Betonierbauabschnitte
Table 2. Selection criteria of the construction stages

Abschnittsweise während des Absenkens	In voller Höhe vor dem Absenken
<ul style="list-style-type: none"> - $h/b \geq 1$: Große Tiefe, aber klein im Durchmesser - $\Delta h < 2/3 h'$ Greiferarmhöhe $\Delta h =$ Abschnittshöhe - Weiche Tone direkt unter der Herstellungsplattform - Stoppmechanismen notwendig zum Aufbetonieren weiterer Abschnitte im weichen Tonen: <ul style="list-style-type: none"> a) Stoppkufen b) Sandrückfüllung c) wie b) mit Entwässerung 	<ul style="list-style-type: none"> - $h/b < 1,3$: Geringe Tiefe, große Durchmesser/Seitenlänge - $h < 2/3 h'$ Greiferarm - steife Tone/Sande unter Herstellungsplattform - schwere Senkkästen, die in weichen Tonen nicht zum Stillstand gebracht werden können, durch Stoppmechanismen - Hilfsmaßnahmen notwendig, falls obere Schichten aus weichen Tonen aufgebaut sind: <ul style="list-style-type: none"> - Bodenaustausch (Sandplattform) - Temporäre Verbreiterung der Aufstandsfläche beim Betonieren - Sandpfähle - Abschnittsweise betonieren vor dem Absenken auf der verstärkten Plattform mit Sandrückfüllung der vorhergehenden Abschnitte

teren Innenwände vornehmen, um den Baubetrieb möglichst einfach und übersichtlich für den Operateur und das Überwachungspersonal zu halten. Der Operateur sollte das innere Aushubgebiet vollends einsehen können, um eine gezielte Aushubsteuerung, auch im Hinblick auf ein sofortiges Eingreifen bei einer durch eventuell einseitig ungleichmäßigen Voraushub verursachten Schiefstellung, vornehmen zu können.

Die Senkkastenbaumethode ist besonders ökonomisch, wenn sie für die Herstellung mehrfach identischer Bauwerke eingesetzt wird, wie z. B. für tiefe Abwassersammelschächte die auch zum Rohrleitungstunnelvortrieb benutzt werden. Zu diesem Zweck können Stahlschalungen und Bewehrungskörbe vorgefertigt werden, die jeweils zum neuen Herstellungsort gebracht werden. Weitere Anwendungsgebiete und -Formen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

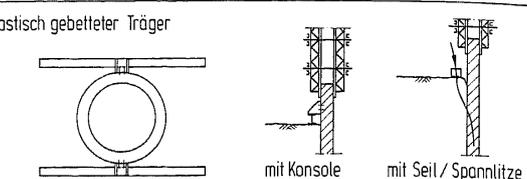
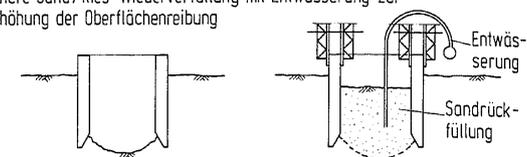
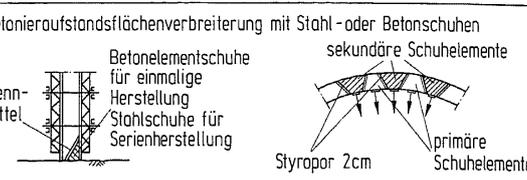
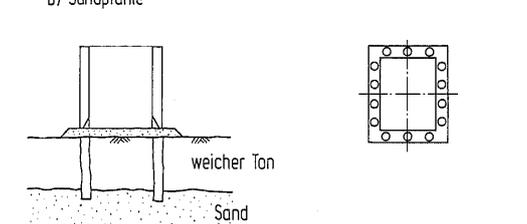
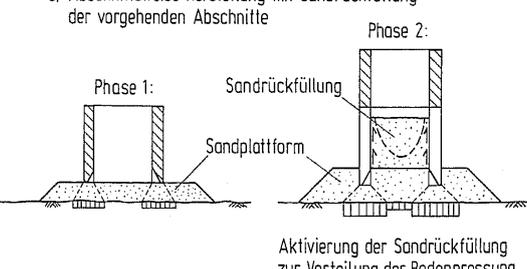
Offene Senkkästen können auch bei normalen bzw. artesischen Grundwasserverhältnissen eingesetzt werden, ohne daß eine Druckluftgründung zwingend notwendig ist. Bei artesischem Wasser ist unter Umständen eine leichte Entspannung erforderlich. Der Schacht des Senkkastens wird mit Wasser gefüllt, um so ein hydrostatisches Gleichgewicht zwischen der Wasserdichtmembrane, dem nach oben wirkenden Druck und der darüber befindlichen Bodenschicht zu gewährleisten. In diesem Fall ist natürlich ein Unterwasseraushub notwendig.

Je nach anstehender oberer Bodenschicht, Gesamthöhe und Verhältnis von Breite zur Höhe, kann der Senkkasten abschnittsweise oder in voller Höhe auf der Absenkplattform hergestellt werden (Tabelle 2).

2.2 Konstruktive Herstellung

Je nach anstehenden Bodenverhältnissen unter der Absenkplattform sollte ein sehr tief gegründeter und schlank geformter $h/b \geq 1,3$ Senkkasten in mehreren Abschnitten hergestellt werden (Tabelle 2). Dies ist durch die folgenden Gründe bedingt:

Tabelle 3. Stoppmechanismen
Table 3. Stopping devices

A	Abschnittsweise Herstellung
1	<p>Elastisch gebetteter Träger</p> 
2	<p>Innere Sand/Kies-Wiederverfüllung mit Entwässerung zur Erhöhung der Oberflächenreibung</p> 
B	Gesamtherstellung
1	<p>Betonieraufstandsflächenverbreiterung mit Stahl- oder Betonschuhen</p> 
2	<p>Gesamtaufstandsflächenverbreiterung</p> <p>a) Bodenaustausch</p>  <p>b) Sandpfähle</p>  <p>c) Abschnittsweise Herstellung mit Sandrückfüllung der vorgehenden Abschnitte</p> 

- Die Ausleger des Krans und dessen Manövrierbarkeit setzen der vorgesehenen Operation baubetriebliche Grenzen. Günstig ist das Verhältnis der Höhe = h' des schräggestellten Greiferarms zur Höhe h des Senkkastens auf der Plattform von $h'/h < 2$.
- Durch das Verhältnis $h/b > 1,3$ ergibt eine ungewollte Schiefstellung zu Beginn des Absenkens ein extrem schwer zu korrigierendes System, da das Ausmittigkeitsmoment relativ schnell anwächst. Eine Korrektur durch

einseitige Lasten kann dann sehr schnell ein unkontrollierbares Moment in die entgegengesetzte Richtung verursachen. Das System ist dann labil in der Anfangsphase. Dies ist besonders im Fall von weichen Tonschichten an der Oberfläche zu berücksichtigen.

Beobachtete Schiefstellungen dieser Art ereignen sich extrem schnell. Aus eigener Erfahrung kann hier berichtet werden, daß sich ein Senkkasten bei einer Höhe von 11 m innerhalb von ca. 1 – 2 Minuten um ca. 1,00 – 1,50 m schiefstellte. Daher ist es ratsam, die einzelnen Abschnitte schlankheitsbegrenzt herzustellen und nach Absetzen der Abschnitte diese vor einem weiteren Absenken sowie zum Bau des Folgeabschnitts durch Stoppeinrichtungen zu sichern (Tabelle 3).

Bei weichen Tonschichten ist im Falle einer sehr großen Senklast ein Anbringen von Zwischenstopps nicht möglich, da die mechanischen Stoppeinrichtungen wie:

- Kufenträger an den Außenseiten, auf die die Senklasten durch Konsolen aufgesetzt oder durch Spannritzen oder Seile aufgehängt werden,
- Wiederverfüllung des Inneren mit groben Kies oder Sand zur Erhöhung der Reibung,
- Entwässerung der inneren Sandschicht, um die effektive Wandreibung zu steigern

nicht ausreichen.

Daher muß die Plattform über den weichen Tonschichten so ausgebildet werden, daß der gesamte Senkkasten vor dem Absenkvorgang hergestellt wird, ohne daß das Absenken selbst während des Betonierens mit Schalung einsetzt. In Tabelle 3 sind verschiedene Methoden aufgezeigt, die die Aufstandsfläche entsprechend stabilisieren. Dabei kann von einem Bodenaustausch abgesehen werden, wenn die aufgeschüttete Plattform mit Schalung und Betongewicht die Anfangsscherfestigkeit (Grundbruchfestigkeit) der weichen Tonschicht nicht überschreitet. Bei Sandschichten mit ausreichender Tragfähigkeit der Erdoberfläche entstehen diese Probleme nicht.

Die Schneide ist für eine gezielte Grundbrucherzeugung im anstehenden Boden während des Absenkens ausgelegt [4]. Während der Herstellung des ersten Abschnitts auf der Plattform ist jedoch unbedingt darauf zu achten, daß die Schneide „entschärft“ wird, um ein Absinken während des Betonierens zu verhindern. Aus diesem Grund werden in der negativen Form der Schneide einzelne Schuhelemente aus Stahl bei einem hohen Wiederholungsfaktor oder Betonklötze (Tabelle 3) in die Schalung eingesetzt, um den Grundbruchwiderstand zu erhöhen. Jedes Primärelement (Bild 1) wird konisch hergestellt, und mit einer 2 cm dicken Styro-

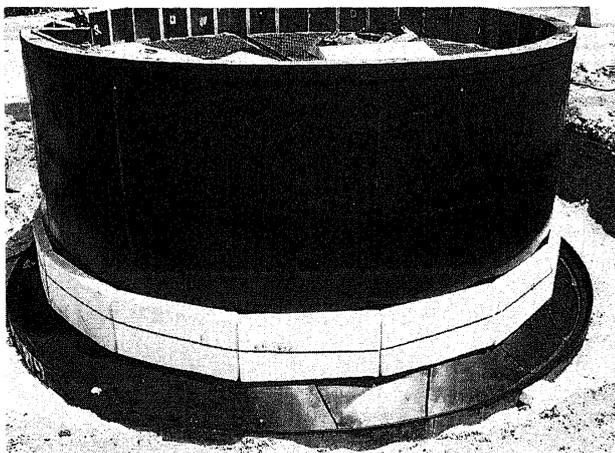


Bild 1. Innere Schalung mit Schneidenschuhelementen
Fig. 1. Inner shuttering with cutting shoe elements

porplatte von den Sekundärelementen getrennt. Die Schuhelemente müssen vor dem Betonieren mit einem starken Trennmittel oder einer Plastikfolie vom Schneidenschuh getrennt werden, so daß nach dem Entfernen der Schalung die negativen Form-Schuhelmente mit einem Greifzug herausgezogen werden können, der an einem gegenüberliegenden Element verspannt wird. Nachdem die Primärelemente gezogen sind, müssen die Sekundärelemente gezogen werden. In den meisten Fällen beginnt sich der Senkkasten nach dem Ziehen der Primärelemente durch Grundbruch unter der Schneide selbsttätig zu senken. Dabei werden normalerweise die Sekundärelemente nach innen gedrückt, wenn die obigen konstruktiven Maßnahmen befolgt werden. Andernfalls werden die Sekundärelemente beim einsetzenden Absenkvorgang nach unten gedrückt und verursachen große Probleme in der Endphase des Absenkens im Sand. Das Ausschalen und Absenken sollte nicht vor Erreichen der statisch notwendigen Festigkeit > B25 erfolgen, da der Kasten beim Absenken den Beanspruchungen durch

- Bodendruck,
- einseitige Schiefstellung und
- Greiferschläge

ausgesetzt ist.

In die Betonschale werden alle konstruktiven Absenkhilfselemente (Vorsorge-Installationen) eingefügt, um unerwartete Probleme, die während des Absenkvorgangs auftreten könnten, handhaben zu können (Tabelle 4). Der Schneidenschuh wird so gebildet, daß durch eine etwaige einseitige Schrägstellung keine Überbeanspruchung der Wandscheibe entstehen kann [2]. Bedingt durch die Form, die sich durch die Ermittlung des gezielten Grundbruchs ergibt, muß der

Tabelle 4. Spezialelemente eines Senkkastens für die Unterstützung des Absenkvorgangs

Table 4. Special elements of a caisson supporting the sinking process

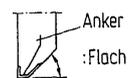
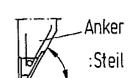
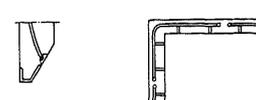
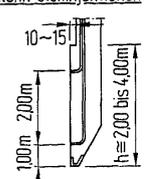
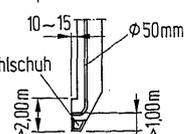
Nr.	Maßnahmen	Bemerkungen
1	<p><u>Schneide</u></p> <p>a) Schneide für weiche Bodenschichten</p>  <p>Anker :Flach</p> <p>b) Sande / Kies / zementierte Sande / steife Tone</p>  <p>Anker :Steil</p>	<p>Schneidenform relativ stumpf</p> <p>Schneidenform scharf</p>
2	<p><u>Schneiden Spüleinrichtung</u></p> 	<p>getrennte Kreisläufe um gezielt Hindernisse wegzuspülen</p>
3	<p><u>Bentonit Gleitinjektionen</u></p>   <p>Stahlschuh</p> <p>10~15</p> <p>φ 50mm</p> <p>>200mm</p> <p>>100mm</p>	<p>a) bei Sanden, Kies, zementierten Sanden unter artesischem Wasser</p> <p>b) bei Sanden, Kies, zementierten Sanden mit oder ohne Grundwasser</p>

Tabelle 5. Einfluß der äußeren Geometrie auf das Absenken
Table 5. Influence of the outer shape on the sinking process

Nr.	äußere Form	Zusatzmaßnahmen	Bodenart	Wirkung
A		leichte Schale um unkontrolliertes Absenken zu vermeiden	weiche bis steife Tone artesischer Wasserhorizont im unteren Bereich	erhöht die Reibung verhindert das Aufsteigen von artesischem Wasser an der Außenhaut (Endzustand)
B		Bentonit-schmierung schwere Schale (Gewicht) zum Absenken	Sand zementierte Sande	verringerte Mantelreibung oberhalb des Absatzes
C		Schlitzzaushub um den Umfang-teuer (Notmaßnahme bei Problemen)	stark zementierte Sande mit oder ohne artesischem Wasser	Reduktion der äußeren Reibung

Tabelle 6. Ausbildung der Bodenplatte
Table 6. Bottom slab design

Nr.	Verwendungszweck	System	Bemerkungen
1	Abwasser-schichte und ähnliche Bauwerke		nur eine einlagige Betonplatte Bauwerke mit geringen Anforderungen an die Wasserdichtigkeit
2	Pumpstation und ähnliche Bauwerke		zweilagige Betonplatte bei Bauwerken im Grundwasser mit höheren Anforderungen an die Wasserdichtigkeit

Schneideschuh als Stahlschuh ausgebildet werden, dessen Aufgabe es ist:

- den Grundbruch zu erzeugen,
- Hindernisse ohne Beschädigung des Betons zur Seite zu drücken sowie
- im Fall einer einseitigen Schiefstellung die konzentrierte Schneidenlast in der Stahlbetonscheibe ohne Beschädigung zu verteilen.

Im Bereich der Schneide werden dringend Spülrohre 1½" empfohlen, die abschnittsweise gesteuert werden können, um im Fall eines Hängenbleibens die Schneide freizuspülen. Zudem ist es bei Absenkungen im Sand immer ratsam, an der Außenseite in einem Raster von ca. 2 m ein oder zwei Rohrleitungsringe vorzusehen, um die Außenseite möglichst unten mit Bentonitinjektionen schmieren zu können, falls die Schalenreibung höher als erwartet sein sollte (Tabelle 4).

Diese Vorsorgemaßnahmen dienen dazu, einer Problemsituation, die trotz intensiver Bodenuntersuchung durch Bohrung im Bereich des Absenkungsfeldes entstehen kann, vorzubeugen. Diese sind billig im Verhältnis zu den Kosten, die entstehen können, wenn ein Senkkasten durch nicht erkannte Hindernisse oder falsch eingeschätzte Mantelreibung hängenbleibt.

Die Form der Außenschale des Senkkastens in vertikaler Richtung hängt von den strato- und hydrographischen Bodenverhältnissen ab. In Tabelle 5 sind die prinzipiellen Typen zusammengestellt:

- A. Bei weichen und mittelsteifen Tonen sowie bei artesischem Grundwasser sollte die Außenschale glatt ohne Absatz geformt werden, da:
- die Mantelreibung gering ist,

– das artesische Wasser nicht entlang einer stark gestörten Bodenschicht durch den Absatz in der Außenschale an der Außenseite hochdrücken kann.

- B. Bei Bodenverhältnissen, die, verursacht durch Sand oder Kies, eine starke Mantelreibung aufweisen, ist es ratsam, die Außenschale abzusetzen, um die Reibung zu reduzieren und um die effektive Grundbruchlast zu erhöhen. Zudem sollte eine Bentonitschmierung in jedem Fall vorgesehen werden (Tabelle 4).

- C. In extremen Situationen kann bzw. muß mit einem Schlitzwandgreifer [5] von ca. 30–40 cm Breite rundum ein Schlitz, der durch tixotrope Bentonitflüssigkeit gestützt ist, ausgehoben werden, um das Absinken zu ermöglichen. Diese Lösung ist jedoch nur bei unerwarteten Problemsituationen als eine der Möglichkeiten anzusehen, die ein Steckenbleiben verhindern kann.

Die innere vertikale Form und die Ausbildung des Auflagers für die Bodenplatte hängt von dem zukünftig beabsichtigten Verwendungszweck ab. In Tabelle 6 sind einige Möglichkeiten bezüglich der verschiedenen Verwendungszwecke aufgeführt.

Bei Senkkästen im Grundwasser mit hohen Anforderungen an die Dichtigkeit ist es empfehlenswert, zwei Bodenplatten vorzusehen. Die erste Bodenplatte dient zum Abriegeln des Senkkastens gegen Grundwasser, um die zweite Bodenplatte im Trockenen herzustellen. Undichtigkeiten, die auftreten, können durch folgende Maßnahmen beseitigt werden:

- a) Primärbodenplatte:
- Eintreiben von Holzkeilen
 - Injizieren gegen den Wasserdruck

b) Sekundärbodenplatte:

- Injizieren gegen den Wasserdruck mit Packer oder mit vorsorglich eingelegten Injektionsschläuchen.

Die Verbindung der Senkkastenwand mit der zweiten Bodenplatte erfolgt gemäß Tabelle 6. Das Fugenband befindet sich in einer Wandaussparung, die als Schubverzahnung zwischen Wand und Bodenplatte wirkt und während des Absenkens durch eine Holzschalung zur Formung der Aussparung geschützt wurde. Für das einwandfreie Einbringen des Unterwasserbetons in weichen Tonschichten im Fall von Grund- oder artesischem Wasser, hat sich eine Fertigteilprallplatte (Saubereitsschicht), die auch den unteren Bewehrungskorb tragen kann, bewährt. Dadurch kann der Tremiebeton sauber und ohne Aufspülen der Bodenschicht in höchster Qualität eingebracht werden.

Die Bewehrung, die in die Auflagertasche geführt werden soll (ca. $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{3}$ der Feldbewehrung), wird von Tauchern unter Wasser nach dem Absenken des Fertigteils mit integriertem Bewehrungskorb herausgezogen oder im Fall von einem separaten Bewehrungskorb aus der Wand aufgebogen. Es ist daher ratsam, die Bewehrungsstäbe, die aus dem Korb gezogen werden, an Kabelschellen lose zu befestigen, um das Ausziehen zu ermöglichen. Die Bewehrung für die späteren Innenwände wird mit mechanischen Gewindeschraubkupplungen angeschlossen. Diese werden in Aussparungen gesetzt, die während des Absenkvorgangs durch ein aufgesetztes Schalbrett geschützt werden.

Senkkästen, die für Pumpstationen und Abwassersammelschächte vorgesehen sind, müssen später mit unterirdischen Leitungen verbunden werden. Für diesen Zweck haben sich Aussparungen mit Fugenbändern, die an der Außenseite für den Absenkbauzustand durch eine dünne Stahlbetonwand (Jungfernhaut) geschützt sind, bewährt. Diese wird beim Rohrleitungsanschluß von innen herausgebrochen.

3 Absenkvorgang

3.1 Einführung

Zur Planung und Ausführung des Absenkvorgangs sind möglichst genaue Bodenuntersuchungen durchzuführen. Diese sollten folgende Bedingungen erfüllen:

- 1) Möglichst ungestörte Entnahme von Bodenproben bei Bohrungen, um realistische Werte für ϕ' , C' und k , den Konsolidierungsgrad, die Anfangsfestigkeit und das Bodenprofil zu bekommen.
- 2) Bohrungen sollten innerhalb der späteren Absenkfläche durchgeführt werden.
- 3) Nachbarprojekterfahrungen sollten unbedingt bewertet werden, um die Wahrscheinlichkeit von Inhomogenitäten feststellen zu können (Findlinge, zementierte Sandlinsen, Tonlinsen, Schichthorizonte, usw.), und um eine geostatographische Vorstellung zu bekommen.
- 4) Zusätzlich sollten alle möglichen Unterlagen über frühere Bebauungen, Rohrleitungsführungen usw. genau studiert werden.

Der Aufwand an bodenmechanischen und bebauungsplanmäßigen Untersuchungen im Feld, Labor sowie bei Behörden sollte ausreichend gestaltet werden, um vor Imponderabilien möglichst sicher zu sein, die die Ausführung vor schwierigste und teure Probleme stellen können, so z. B.:

- Verkannten und Schiefstellen durch lokale Ton- oder zementierte Sandlinsen oder Findlinge.
- Hängenbleiben des Senkkastens durch sehr feste Schichten, wie beispielsweise zementierte Sand- und Kies-schichten, Hindernisse aus Vorbebauung, usw.

Hierbei ist zu erwähnen, daß teilweise zementierte Sandschichten bei Bohrungen oft sehr schwer von dichten Sand-

schichten zu unterscheiden sind, da die Bohrungen die Zementierung zerstören und dadurch ein Erkennen durch die üblichen Entnahme-Methoden erschwert wird. Der Bodenmechaniker, der die Bohrung mit einem SPT oder Dutch-Cone Test durchführt, sollte bei Sanden, die zur Zementierung neigen, Maßnahmen ergreifen, um solche Probleme aufzuspüren. Aus Erfahrung möchte ich darauf hinweisen, daß sogar internationale Geofirmen diese Besonderheiten bei ihren Untersuchungen nicht aufspürten, was bei der Ausführung zu erheblichen Problemen führte. Die hängengebliebenen Senkkästen mußten durch Bentonitpülungen und bentonitgestützte Außenschlitze wieder „flottgemacht“ werden [5].

Aufgrund der gewonnenen bodenmechanischen Erkenntnisse werden obere und untere Kenngrößen für den Entwurf des Absenkvorgangs festgelegt wie:

- Anfangsfestigkeitsparameter, und
- Endfestigkeitsparameter.

Aufgrund dieser Erkenntnisse ergeben sich die Entwurfparameter für die Schneidschuhform, die Größe der möglichen Betonierabschnitte und die Planung des Absenkvorgangs [4].

3.2 Baupraktische Absenkmaßnahmen

Die erste Phase des Absenkens beginnt schon mit dem Entfernen der Schalung. In dieser relativ labilen Phase des Freilegens der Schneide beginnt sich der Senkkasten allmählich in die Plattform abzusenken. Daher ist es äußerst wichtig, die vorher bereits beschriebenen nischen Formschuhe möglichst achssymmetrisch zu entfernen, um eine Anfangsschiefstellung zu vermeiden. Der Anfangsaushub beginnt achssymmetrisch entlang der Schneide und gemäß eines vorher festgelegten Schemas. Der Aushub muß von erfahrenem Personal mittels Kontrollmessungen beobachtet werden, das dem Greiferfahrer entsprechende Anweisung geben kann, damit ein Schiefstellen in der Anfangsphase vermieden wird. Dazu ist es ratsam, an drei Ecken oder bei runden Senkkästen an drei am Umfang verteilten Linien Meßmarkierungen anzubringen und diese vom Nivelliergerät aus zu beobachten. Stellt sich der Senkkasten in der Anfangsphase schief, muß er sofort korrigiert werden, da das später immer schwieriger werden kann. Zur Korrektur bieten sich folgende Maßnahmen an:

- 1) einseitiger Voraushub immer an der Schneidenseite, die höher liegt (Reduzierung der Reibung und des Schneidengrundbruchwiderstands),
- 2) Aufschütten von Sand an der äußeren Seite, die tiefer abgesenkt ist zur Erhöhung der Reibung,
- 3) Kombination von 2) und 3),
- 4) einseitige Auflasten auf der höheren Seite.

Die Methoden 1) bis 3) sind mit besonderer Vorsicht anzuwenden, da sich der Senkkasten verzögernd verhält, was durch die *Coulombsche* Reibung bedingt ist, die in einen statischen und einen dynamischen Teil aufgegliedert wird (Tabelle 7).

Die Reaktionskräfte bauen sich langsam auf, ohne größere Verformungen hervorzurufen, bis zum Erreichen der statischen *Coulombschen* Reibungskraft. Dann setzt plötzlich zeitverzögert die volle Bewegung ein. Dies kann zu einer wechselseitigen Schiefstellung führen, wenn nicht mit genügend Sensibilität vorgegangen wird.

In der Anfangsphase ist es ratsam, einige Kubikmeter Sand und ein Ladegerät bereitzustellen, um bei einer Überreaktion Korrekturmaßnahmen auf der zu sehr beschleunigten Absenkseite anzubringen (Sand an die Außenseite kippen), und dadurch die Reibung zu erhöhen und den Absenkvorgang zu normalisieren. Diese Korrekturmethode erfordert Fingerspitzengefühl sowie praktische und theoretische

Tabelle 7. Steuerung des Absenkens unter Berücksichtigung der Aktions- und Coulombschen Reaktionskräfte

Table 7. Sinking process control considering the action- and Coulomb's reaction forces

Phase	reales System	statisches Modell der Absenkkräfte
Vertikale Stellung		$A = B = G/2$ $R_1 = R_2 = R_0 + R_1 = \sum(\mu E + C)$ $R_1 = \sum(\mu E_1 + C_1) \quad R_2 = \sum(\mu E_2 + C_2)$ $A \cong P_{u1} + R_1; B \cong P_{u2} + R_2; R = R_1 + R_2$
Schiefstellung		$A < B$ $B > R_{2a} + R_{2z} + P_{u2}$ $A < R_{1a} + R_{1z} + P_{u1}$
Korrekturphase	a) Zusatzgewicht 	ΔG $R_1 = \sum(\mu E_1 + C_1) \quad R_2 = \sum(\mu E_2 + C_2)$ $A = \Delta G + G/2 \quad B = G/2$ $A > R_1 + P_{u1} \quad B < R_2 + P_{u2}$
	b) Voraushub + einseitige Sandplattform 	$R_1 = \sum(\mu E_1 + C_1) \quad R_2 = \sum(\mu E_2 + C_2)$ $A > R_1 + P_{u1} \quad B < R_2 + P_{u2}$
Coulomb. Reibung	statisches und dynamisches Verhalten beim Absenken 	Formeln Erddruck: $E_0 \leq E \leq E_0$ Reibungskräfte: $R = \mu E + C = E \cdot \tan \phi + C$ $R_s = \text{vor dem Gleiten}$ $R_d = \text{während des Gleitens}$ Grundbruchwiderstand am Schuh $P_u = 1 \cdot b_0 (\gamma_1 d N_d + \gamma_2 b N_b + c N_c)$

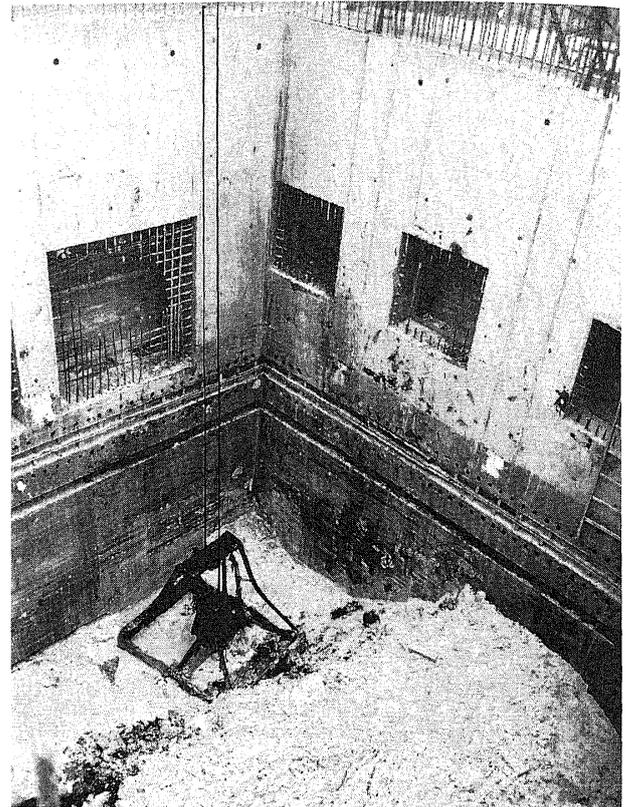


Bild 2. Caisson-Aushub: durch die Schneiden herbeigeführter Grundbruchkegel

Fig. 2. Caisson excavation: failure wedge due to the cutting devices

Erfahrung. Durch diese Methode konnten Abweichungen in weichem Ton bis zu 1,50 m korrigiert werden. Es ist jedoch hervorzuheben, daß bei solchen Korrekturen erhebliche Störungen in den benachbarten Bodenschichten auftreten können. Die Prinzipien dieser Überlegung sind in Tabelle 7 festgehalten. Wenn der Senkkasten in der Anfangsphase ca. 25 % in der Gesamthöhe abgesenkt ist, wirkt der seitliche Erddruck so stabilisierend, daß dieser sich nicht mehr schiefstellen kann, falls keine Hindernisse auftreten.

Das Absenken tritt durch den kontinuierlich erzeugten Grundbruch unter der Schneide ein. Das heißt, die vertikalen äußeren Mantelreibungskräfte müssen bis in die Endphase kleiner sein als das Gewicht des Caissons, um den Grundbruch unter der Schneide wirksam zu halten. Durch die permanente Bodenentnahme setzt sich der Grundbruch fort. Je nach Bodenart, besonders bei weichen Tonen, stellt sich ein Bruchpilz ein (Bild 2).

Für den Fall, daß der Senkkasten ungenügend rutscht (Mantelreibungskräfte gleich oder größer Eigengewicht) können Zusatzmaßnahmen getroffen werden, wie z. B.:

- leichter Voraushub unter der Schneide oder
- Grundwasserentnahme aus dem Inneren zur Unterstützung des Grundbruchs unter der Schneide.

Die Anwendung dieser Methoden ist nur erlaubt, wenn keine größeren Mengen seitlichen Erdreichs mit einbrechen, die das Bodengefüge an der Außenwand stark stören würden. Vor der Anwendung dieser Methoden bei artesischem Grundwasser wird besonders gewarnt. Künstlicher Wasserüberdruck durch Füllen des inneren Senkkastens ist bei arte-

sischen Horizonten, die wasserdicht abgesperrt sind, notwendig; andernfalls kann es zu einem unkontrollierten hydraulischen Grundbruch von unten kommen.

Meist ist der Entwurf des Senkkastens so ausgelegt, daß bei Erreichen des Gründungshorizontes keine im Vergleich zu den Reaktionskräften überschüssig großen Absenkkräfte aus Mantelreibung und Schneidengrundbruchtragkraft vorhanden sind. Wenn dann das Absenkziel noch nicht ganz erreicht ist müssen noch zusätzliche Auflasten aufgebracht werden. Zu diesem Zweck sollten Vorrichtungen bereits im Entwurf berücksichtigt werden, die das Anbringen schwerer Betonklötze oder Stahlcoils auf den Außenwänden ermöglichen. Mit diesen Zusatzlasten können in jeder Absenkphase auch Schiefstellungen korrigiert werden.

In der Endphase wie in der Anfangsphase sind alle Absenkmaßnahmen behutsam durchzuführen. Denn die Reaktionen des Senkkastens, ob durch Aushub oder Zusatzgewichte, sind zeitverzögert (*Coulombsches Gesetz*) und plötzlich. Falls in der Endphase ein Voraushub unter der Schneide durchgeführt wurde, ist eine Rückfüllung mit Sand bis unter die Tremiebetonplatte erforderlich, um ein weiteres Absenken zu verhindern. Vor dem Einbringen der Fertigteilprallplatte und des (Unterwasser-) Betons für die Bodenplatte muß die Auflagerausparung der Bodenplatte sorgfältig gesäubert (Wasser-Jetting) werden.

3.3 Aushubgeräte

Für den Aushub können je nach Bodenart und Größe des Senkkastens folgende Geräte eingesetzt werden:

- Mechanische oder hydraulische Greifer in Tonen und Sanden,

Tabelle 8. Einzelhindernisentfernung
Table 8. Removal of single obstacles

A: Absenken in der ersten Phase (Bis ca. 1/2 der Gesamthöhe)	B: Absenken in der letzten Phase
<p>Weiteres Absenken wie folgt stoppen um Schiefstellung zu verhindern:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Außenaufschüttung durch groben Sand an der Seite, um höheren Erddruck und höhere effektive äußere Reibung zu erzeugen. 2) Einseitiger Außenaushub an der Seite des Hindernisses (Vorsicht!). Nach Entfernen des Hindernisses kann plötzliches Sinken an der Hindernisseite auftreten mit Umkehrung der Schiefstellung. 3) Hindernisse von innen mit einem vom Kran geführten hydraulischen Hammer entfernen oder bei trockener Senkkastengrube mit Preßlufthämmern vor Ort. 4) Im Fall von Unterwasseraushub Taucherkontrolle (wegen mangelnder Sicht: tasten). 	<p>Absenkung stoppt durch das Hindernis selbst. Die Wahrscheinlichkeit der Schiefstellung wird geringer durch starke seitliche Erddruckstützung. Hindernis wird wie in den Punkten 3 und 4 unter A geschildert entfernt.</p>

- Saugdredger bei Sanden (sehr effektive bei großen Caissons),
- Cutterdredger in leicht zementierten Sanden ($\sigma < 100 \text{ kp/cm}^2$),
- Spüllanzen mit Dredgerpumpe/Injektorpumpe.

Bei der Auswahl der Geräte muß die maximal projizierte Höhe des Senkkastens über der Plattform berücksichtigt werden. Dies ist für den Greiferbagger wie für den Kran zum Abhängen der Dredgerpumpe wichtig. Für den Einsatz von Dredgerpumpen müssen Wasser-Sand-Trenneinrichtungen mit Wasserrückführung in den Senkkasten vorgesehen werden. Dazu eignet sich besonders das platzsparende Wasser-Sand-Separationsrad.

4 Hindernisse im Untergrund

Trotz sorgfältiger bodenmechanischer und bebauungsplanmäßiger Untersuchungen können beim Absenken unerkannte Hindernisse wie:

- zementierte Sandlinsen,
- Findlinge,
- unentdeckte tieferliegende Betonreste von ehemaligen Bauwerken sowie
- Rohrleitungen, die angeblich entfernt wurden, auftreten.

Dies führt beim Absenken zu ernsthaften Problemen, wie:

- Schiefstellung
- Verkanten und
- Hängenbleiben,

die eventuell sogar ein Scheitern der Senkkastenkonstruktion zur Folge haben können.

Jede Senkkastenbaustelle muß sich schon in der Planungsphase auf solche Probleme einstellen, entsprechende Maßnahmen ausarbeiten, Geräte bereithalten bzw. deren Verfügbarkeit überprüfen und das Personal durch schriftliche Anweisungen über eine mögliche Vorgehensweise informieren. Aufgrund der gesammelten Erfahrung kann bei Einzelhindernissen wie in Tabelle 8 erläutert vorgegangen werden. Hierbei ist hervorzuheben, daß der Außenaushub nur in extremen Situationen durchgeführt werden sollte.

5 Konstruktive Maßnahmen zum Ausgleich von Toleranzen

Schiefstellungen können durch die in Tabelle 7 beschriebenen Maßnahmen korrigiert werden. Eventuell verbleibende Toleranzen können bei abschnittsweiser Herstellung während des Betoniervorgangs des nächstfolgenden Abschnitts behoben werden.

Konstruktiv muß in der Planung davon ausgegangen werden, daß der Senkkasten in gewissen Toleranzgrenzen zu tief sitzt, oder daß das genaue Absenkziel nicht ganz erreicht wird. Daher müssen für den späteren Ausbau Ausgleichsmaßnahmen für Rohreinleitungen und für die Bodenplatte (Maschinen- und Pumpenfundamente) vorgesehen werden. Rohrleitungsöffnungen in den Wänden sollten 50 cm zu jeder Seite vergrößert werden und durch „Schamwände“ während des Absenkens zeitweilig geschlossen werden. Diese Überlegung gilt auch für die untere Bodenplatte, die mindestens 50 cm tiefer als die endgültige Sollhöhe liegen sollte. Falls notwendig, wird eine Ausgleichsplatte eingezo-gen, um die Sollhöhe des Ausbaus zu erhalten. Es ist in jedem Fall ratsam, lieber zu tief abzusenken und Ausgleichsbeton für die Bodenplatte vorzusehen, anstatt das Absenkziel nicht zu erreichen.

6 Auswirkung auf Nachbarbauwerke

Der Absenkvorgang wird im wesentlichen durch einen gezielten Grundbruch unter der Schneide herbeigeführt. Unter dem Schuh bildet sich der Grundbruch mit einhergehender Bodenverdrängung zur Innenseite des offenen Senkkastens hin. Dabei werden auch kleinere Bodenmengen von der Außenseite unterhalb des Schuhs in Richtung offene Innenseite transportiert. Ferner wird durch die Mantelreibung Material von oben nach unten gedrückt. Bedingt durch diese beiden Einflüsse der Materialverdrängung während des Absenkvorgangs entsteht in der Umgebung eines jeden Caissons ein Setzungstrichter. Die Größe des Einflußradius und die maximale Setzung am Umfang des Senkkastens hängen im besonderen Maße von der Ausführungsqualität ab. Die Beeinflussung wächst bei folgenden Bauhilfsmaßnahmen stark an:

- Voraushub unter der Schneide,
- Erzeugen oder Unterstützen des Grundbruchs unter der Schneide durch hydraulische Grundbruchmaßnahmen,
- Außenaushub.

Der Einflußradius verhält sich ungefähr proportional zur Absenktiefe und zum aktiven Gleitkeilwinkel.

Senkkästen sollten daher nicht in der Nachbarschaft von setzungsempfindlichen Gebäuden und Einrichtungen gebaut werden. Der Abstand sollte dann ungefähr $2h \sin(45^\circ + \varphi/2)$ betragen. Unter normalen Umständen ist ein Abstand von $h \cdot \sin(45^\circ + \varphi/2)$ ausreichend.

7 Zusammenfassung

Bei relativ tief gegründeten Bauwerken, wie Abwasser-schächte mit Rohrleitungstunnelvortrieb, mit mittleren Grundrißabmessungen bieten Senkkästen eine äußerst ökonomische Lösung, da keine aufwendigen Verbaumaßnahmen notwendig sind.

Die Ausführungsrisiken werden heute aufgrund der geotechnischen Untersuchungsmethoden sowie auch durch entsprechendes Bohr- und Testgerät als gering eingestuft, wenn zusätzlich die im Bericht erwähnten konstruktiven Maßnahmen berücksichtigt werden. Auf jeden Fall hängt der Erfolg dieser Baumaßnahme entscheidend von der Qualifikation des jeweiligen Ausführungspersonals im Tiefbau ab.

Literatur:

- [1] *Girmscheid, G., und Stamm, R.*: Schwimmend hergestellte Pumpstation: Bauausführung. Bautechnik 68 (1991), H. 7, S. 217-225.
 - [2] *Baldauf, H., und Timm, U.*: Betonkonstruktionen im Tiefbau. Berlin: Verlag Ernst & Sohn 1988.
 - [3] *Klößner, W., Arz, P., u.a.*: Grundbau. Berlin: Ernst & Sohn 1987. Sonderdruck aus dem Betonkalender 1987.
 - [4] *Smoltezyk, U.*: Grundbau Taschenbuch Teil 2. Berlin: Ernst & Sohn 1982.
 - [5] *Huw, Jones*: Cairo sinks sticky caisson. Construction Today, September 1988.
 - [6] *Bowles, J. E.*: Foundation Analysis & Design. New York: McGraw-Hill 1982.
 - [7] *Tomlinson, M. J.*: Foundation Design and Construction. Boston (USA): Pitman Publishing Inc. 1980.
 - [8] *Das, Braja M.*: Principles of Foundation Engineering. Monterey, California (USA): Brooks/Cole Engineering Division 1984.
 - [9] *Navfac*: Foundation & Earth Structures Design. Manual 7.01, and 7.5. Alexandria (USA): Naval Facilities Engineering Command 1986.
-