

Vertikalabdichtungen im Erd- und Grundbau

Vortrag von Dr.-Ing. Jens Karstedt an der Technischen Akademie Esslingen 1998

1 Einleitung

Nachfolgend werden die Herstellung, Vorschriften (Standicherheit), eine Abdichtungsdefinition sowie die Kosten für vertikale Abdichtungselemente im Erd- und Grundbau vorgestellt. Abdichtung bedeutet in diesem Zusammenhang die Vermeidung von Grundwasserdurchtritt und die Aufnahme von Erd- und Wasserdrücken. Da sich die Schlitzwandtechnik auf diesem Gebiet durchgesetzt hat, beschränken wir uns auf dieses Verfahren. Aus Berlin kommend, erlaube ich mir, das Thema auf die Problemstellung innerstädtischer Belange zu beschränken, mit dem Hinweis, daß Berlin sein Trinkwasser aus dem Grundwasserreservoir bezieht und das Grundwasser somit ein schützenswertes Gut ist. Die Anforderungen des Grundwasser- und Umweltschutzes berücksichtigend, wurden in jüngster Zeit grundwasserschonende Bauweisen gefordert und realisiert. Hierbei wurden in Zusammenarbeit von "wasserdichten" Wänden (Schlitzwand, Spundwand, Bohrpfahlwand) und Sohlen (HDI-Sohle, Unterwasserbetonsohle, natürliche Dichtsohle) quasi wasserdichte Baugruben errichtet, bei denen meist nur noch eine Restwasserhaltung erforderlich ist, um die Tiefgeschosse in einer trockenen Baugrube errichten zu können. ("Trogbauweise")

Die Wertsteigerungen des Baugrundes einerseits und der ständige Bedarf an Wohn- und Büroflächen und Flächen für den ruhenden Verkehr andererseits hatten in den letzten Jahren zur Folge, daß gehäuft Baumaßnahmen mit 2 und mehr Tiefebenen realisiert wurden bzw. in Bau oder Planung sind.

In Berlin stellt u.a. das im Durchschnitt 3-4 m unter Gelände anstehende Grundwasser ein bautechnisches und wirtschaftliches Problem dar. Alle Baumaßnahmen unter Gelände sind daher so zu planen und auszuführen, daß der Grundwasserhaushalt möglichst gering gestört wird.

2 Prinzip: Schlitzwand

Das Prinzip der Schlitzwandherstellung beruht auf dem Ausheben eines Schlitzes im Boden, wobei die Standicherheit des umgebenden Bereiches während des Aushubes durch eine Stützflüssigkeit (Bentonitsuspension) gewährleistet wird.

Die Bentonitsuspension verhindert zum einen durch ihre rheologischen Eigenschaften das Eindringen von Grundwasser in den Schlitz, zum anderen das Herausbrechen des anstehenden Bodens. Für Schlitzwände gilt die DIN 4126 "Schlitzwände", für die Stützflüssigkeit die DIN 4127 "Schlitzwandtone".

2.1 Schlitzwandarten

2.1.1 Herstellung

Vor der Herstellung der eigentlichen Schlitzwand müssen i.d.R. Leitwände hergestellt

werden. Der Leitwand werden zwei Funktionen zugeordnet:

- a) als "Führungsschiene" für den Schlitzwandgreifer
- b) zum Aufbau eines für die Standsicherheit ausreichenden hydrostatischen Druckes der Suspension

Die Höhe der Leitwände ist neben dem erforderlichen hydrostatischen Druck auch abhängig von den Spiegelschwankungen, die insbesondere durch das Anschneiden neuer Erdschichten mit großem Porenvolumen entstehen. Wandhöhen von 0,6 bis 1,5 m sind üblich.

Anschließend werden die Schlitzwandlamellen ausgehoben.

Ausführungsvarianten unterscheiden die Schlitzwand wie folgt:

a) Zweiphasige Schlitzwand (Ortbetonschlitzwand)

In die Suspension wird ein Bewehrungskorb eingesetzt und fixiert, anschließend wird der Schlitz von unten nach oben unter Verdrängung der Suspension betoniert.

Aussparungen in den Wänden können durch den Einbau von später zu entfernenden Schalkkörpern z.B. aus Styropor oder Gasbeton, vorgesehen werden. Auf diese Weise kann z.B. auch eine Anschlußnut für eine Unterwasser-Betonsohle erstellt werden.

b) Einphasige Schlitzwand (Dichtwand) mit eingestellten Fertigteilen

Bei der Dichtwand erhärtet lediglich die im Vorfeld dafür hergestellte Stützflüssigkeit im Schlitz. Um statische Kräfte aufnehmen zu können, werden in die Dichtwandmasse Stahlspundbohlen oder Betonfertigteile, bzw. bei großen Baugrubentiefen Stahlkastenpfähle eingestellt.

In der DIN-Norm wird als maximale Abweichung der Wand in ihrer Vertikalität 1,5% der Wandtiefe vorgeschrieben. In der Praxis sind geringere Toleranzen durchaus zu erreichen, wobei örtliche Auswüchse quasi als natürliche Rauigkeit auftreten können. Bei der Ortbetonschlitzwand ist die genaue Grenze zwischen Beton und Suspension-Bodengemisch schwer zu erkennen. Daher werden die oberen 30-50 cm Wandmaterial wegen verminderter Betonqualität abgestemmt.

2.1.2 Vor- und Nachteile der Schlitzwand (allgemein)

Die Herstellung einer Schlitzwand erfolgt für gewöhnlich erschütterungs- und geräuscharm. Die Schlitzwand kann sehr dicht an andere Bauwerke herangebaut werden (Abstand: Achse Schlitzwand - Außenkante Gebäude min. 50 cm). Bei einer ausreichenden Standsicherheit der offenen, d.h. bentonitgestützten Erdwand besteht nicht die Gefahr des Verlustes der Standsicherheit hinsichtlich des Setzungsverhaltens an den Nachbargebäuden. Kritisch sind Einzellasten, z.B. aus Einzelfundamenten mit Stützenlasten, die einer gesonderten Betrachtung bedürfen. Die Wand wird i.d.R. verankert oder ausgesteift. Beim Antreffen größerer Steine (Blöcke, Findlinge), kann dies zu erheblichen Schwierigkeiten führen (Greiferverlust, Setzungen aus Meißelerschütterungen). Ggf. muß die Stelle umschlitzt werden.

Die Schlitzwand verbleibt nach Ihrer Erstellung im Boden und muß im öffentlichen Straßenland entsprechend "abgelöst" werden.

Die Schlitzwand kann als Kelleraußenwand genutzt werden, wenn Ansprüche an Undichtigkeiten, Durchfeuchtungen, etc. gering gehalten werden. Bisher wurde von dieser Variante in Deutschland wenig Gebrauch gemacht. Daher wird nach Herstellung des Troges meist eine weiße Wanne als Innenschale zur Aufnahme des Wasserdrucks erstellt. Der

Erddruck kann dauerhaft von der Schlitzwand übernommen werden. Das Gewicht der Wand kann bei der Berechnung der Auftriebssicherheit im Bauzustand herangezogen werden. Die Ortbetonschlitzwand kann zur Ableitung der Bauwerkslasten in den Baugrund benutzt werden.

Die Schlitzwandbauweise erfordert eine relativ aufwendige und teure Baustelleneinrichtung sowie einen erheblichen Platzbedarf.

Der Baufortschritt ist mit einer Tagesleistung von 80 - 120 m² (Greifer), bzw. 200-400 m² (Fräse) bei störungsfreiem Betrieb als deutlich schneller - im Vergleich z.B. zur Erstellung einer Bohrpfahlwand - zu verzeichnen.

Die Schlitzwand kann aus Erfahrung als annähernd dicht bezeichnet werden. Die Schwachstellen, an denen Feuchtigkeit bis zur Tropfenbildung durch die Wand dringen kann, sind die Fugen zwischen den einzelnen Lamellen.

Ab einer Tiefe von ca. 10 m treten für gewöhnlich Undichtigkeiten im Fugenbereich auf und nehmen mit zunehmender Tiefe in ihrer Häufigkeit und in ihrem Ausmaß deutlich zu.

Der Baustoff Bentonit gilt als nicht umweltgefährdend. Während des Bauens wird die Suspension 2-3 mal wiederaufbereitet. Teile der Suspension dringen während des Aushubes in den Boden. Zunehmend schwierig wird die Entsorgung der verbrauchten Stützflüssigkeit, die besonders bei der zweiphasigen Wand anfällt, da Deponien sie oft auf Grund ihrer flüssigen Konsistenz nicht mehr annehmen.

Die Schlitzwand kann sowohl mit Injektionssohlen als auch mit Unterwasser-Betonsohlen kombiniert werden. Der Anschluß Schlitzwand/Unterwasser-Betonsohle ist im Vergleich zu anderen Verbauarten relativ unkompliziert. Es ist ohne besonderen Aufwand möglich, die Schlitzwand oberflächennah - in beliebiger Tiefe - enden zu lassen, um beispielsweise den Baugrubenverbau oberhalb des Grundwasserspiegels durch eine aufgeständerte Trägerbohlwand zu ersetzen.

3 Wirkungsweise der Schlitzwandsuspension

3.1 Eigenschaften der Bentonitsuspension

Bentonit ist ein quellfähiger Ton, der zum größten Teil aus Montmorillonit besteht. Der Montmorillonit setzt sich aus dreischichtigen Silikatlamellen zusammen, die in ihrer chemischen Struktur negativ geladen sind. Durch austauschfähige Natrium-, Kalzium- oder Magnesiumionen (Kationen) wird der positive Ausgleich hergestellt. Die Kationen haben jedoch bei Vorhandensein von Wasser das Bestreben, zu hydratisieren. Dies hat zur Folge, daß bei Einlagerung von Wasser die Silikatlamellen aufquellen und aus dem Lamellenpaket Einzellamellen entstehen, die nur noch über dünne Wasserbrücken miteinander verklebt sind und ähnlich einem Kartenhaus (Kante auf Fläche) wirken.

Wird nun in einer Suspension mit einer ausreichenden Menge an Bentonit eine Flügelsonde mit einem definierten, zylindrischen Körper in die Suspension abgeschert, wird eine große Anzahl elektrostatischer Kontakte zwischen den Silikatlamellen verschoben oder durchtrennt. Das Verschieben oder Zerstören eines elektrostatischen Kontaktes erfordert nur eine winzige Kraft, die sich in der Summe über die Anzahl der Kontaktstellen auf der Mantelfläche des zylindrischen Körpers als "Scherfestigkeit" der Suspension äußert. Die Scherfestigkeit, die auch als "Fließgrenze *f" bezeichnet wird, ist zum einen von der Anzahl der Kontakte und zum anderen von der Größe der Festigkeiten der einzelnen "Kationenbrücken" zwischen den

Silikatlamellen abhängig.

Während die Suspension in Bewegung ist (beim Einbringen und Austausch im Schlitz), wird ein großer Teil der elektrostatischen Kontakte zwischen den Lamellen zerstört, so daß die Fließgrenze relativ klein ist. Im Ruhezustand werden jedoch getrennte Kontaktstellen wieder hergestellt, in Folge dessen eine Zunahme der Scherfestigkeit zu verzeichnen ist, bis ein Grenzwert erreicht ist. Die Reduzierung der Scherfestigkeit durch Verformung und der Wiederaufbau dieser bei Ruhe ist ein reversibler Vorgang und wird "Thixotropie" genannt.

Die wesentlichen Eigenschaften von Bentonit sind die Stabilität, d.h. die Beständigkeit gegen Entmischen im Laufe der Zeit, die Wichte ρ_f , seine Fließgrenze τ_f und seine Viskosität. Wichtig ist, daß die Stützflüssigkeit vom Beton möglichst leicht verdrängt wird.

3.2 Wirkungsweise der Bentonitsuspension im Erdschlitz

Die Stabilität eines Erdschlitzes ist gegeben, wenn die ihn ausfüllende Stützflüssigkeit von Beginn des Bodenaushubs an bis zum Ende ihres Verdrängens durch den Frischbeton mit Sicherheit in der Lage ist, sowohl den umgebenen Boden zu stützen, als auch das Einströmen des Grundwassers in den Schlitz zu verhindern.

Der hydrostatische Druckunterschied, der zwischen der Stützflüssigkeit und dem anstehenden Grundwasser entsteht, ist als horizontal stützende Kraft auf das Korngerüst zu übertragen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß auf der Oberfläche der Erdwandung oder bis zu einer gewissen Eindringtiefe eine Zone ausgebildet ist, deren Durchlässigkeit deutlich kleiner ist als die des anstehenden Baugrundes. Diese Aufgabe muß die Stützflüssigkeit übernehmen.

Theoretisch ließen sich Zonen geringer Durchlässigkeiten mit Hilfe von Tonsuspensionen auf zwei Wegen erreichen:

1. Die Suspension füllt während des Schlitzaushubes die Porenkanäle des anstehenden Baugrundes aus und hält sich mit Schubspannungen in der Größe der Fließgrenze an der Kornoberfläche fest. In dem Fall, daß die Eindringtiefe der Suspension in den Porenkanal so groß ist, daß das über die Porenkanaloberfläche gebildete Integral der Schubspannungen dem Differenzdruck zwischen Suspension und Grundwasser im Gleichgewicht steht, bleibt die Suspension im Porenkanal stecken und stagniert (siehe Abb. 2). Die Übertragung des Differenzdruckes erfolgt in diesem Fall gleichmäßig durch Schubspannungen an das Korngerüst und steht letztendlich voll als effektive Horizontalspannung zur Stützung der Erdwandung zur Verfügung.

2. Bei diesem Modell wird von einer Suspension ohne Scherfestigkeit ausgegangen. Der anstehende Boden wird als Filterstoff betrachtet, der eine gewisse Porengrößenverteilung aufweist, die im allgemeinen von der Korngrößenverteilung, dem Ungleichförmigkeitsgrad und dem Porenanteil abhängig ist. Die Suspension besteht aus Wasser mit suspendierenden Partikeln als feste Bestandteile.

- Sind die suspendierenden Teilchen kleiner als die kleinsten Poren in der Erdwandung, fließt die Suspension in den Boden ab, ohne daß eine Stützung der Erdwand eintritt.

- Tritt das Gegenteil ein, d.h. die festen Bestandteile der Suspension sind größer als der maximale Porendurchmesser des anstehenden Bodens, werden die suspendierenden Partikel an der Erdwand zurückgehalten und abgefiltert. Ein Filterkuchen entsteht, der eine im wesentlichen wasserundurchlässige Membran darstellt, die die Druckdifferenz zwischen Suspension und Grundwasser direkt auf das Korngerüst übertragen kann.

- Liegen die festen Suspensionsbestandteile zwischen den minimalen und dem maximalen Porendurchmesser, dringen die Suspensionspartikel in den Porenkanal ein, werden an Engstellen abgehalten, die wiederum andere Teilchen zum Hängenbleiben zwingen, bis der Porenraum bis zu einer gewissen Tiefe rein mechanisch mit den Suspensionsteilchen zersetzt ist. Die Länge der Strecke, die mit Suspensionsteilen verklebt ist, ist die Filtertiefe und ist u.a. vom Verhältnis zwischen mittlerer Partikelgröße und mittlerer Porengröße abhängig. Auf der Filterstrecke vermindert sich die Durchlässigkeit des Bodens drastisch, so daß die Druckdifferenz beim Durchströmen dieser Schicht an das Korngerüst über die Strömungsmassenkraft (s. 1. Weg) abgegeben wird. Dieser Vorgang, der ohne die Erfordernis einer Fließgrenze, d.h. rein mechanisch abläuft, wird als Kolmatation bezeichnet.

Während im ersten Fall (Stagnation der Suspension) das Porenvolumen im Bereich der Eindringung vollständig mit Suspension gefüllt wird, würde die Suspension, die bei einer Kolmatation in den Porenraum eindringt, ihre Feststoffpartikel verlieren, ohne daß der Weiterfluß des Suspensionswassers gestoppt wird. Als Folge würde ein wesentlich größerer "Suspensionsverlust" eintreten.

In der Praxis tritt weder die Form mit maximaler Fließgrenze, noch mit einer Fließgrenze gleich Null allein auf. So werden bei Überwiegen der Fließgrenze Feststoffpartikel, insbesondere durch den Baggervorgang eingearbeitete Sandanteile, eine Filtration, d.h. eine Verminderung des Durchmessers der Porenkanäle und somit eine Verminderung der Eindringtiefe zur Folge haben. Gleichfalls ist bei Überwiegen der Filtration eine kleine Fließgrenze zu erkennen.

3.3 Anwendungsschwierigkeiten

Eine stützende Wirkung der Suspension kann nicht erreicht werden, wenn deren hydrostatischer Druck auf ein "geschlossenes" wassergesättigtes System wirkt, in dem mit dem Anschneiden durch den Schlitzwandgreifer ein Porenwasserüberdruck in gleicher Größe wie der Suspensionsdruck entsteht, da dann der für den Abbau der Zone mit geringer Wasserdurchlässigkeit erforderliche Fließvorgang in Richtung des Korngerüsts unterbleibt.

Dies kann z.B. bei wassergesättigten Sandlinsen geschehen, die von einem weitgehend wasserundurchlässigen, bindigen Boden eingeschlossen sind. Der Sand würde beim Anschneiden in den Schlitz laufen. Bei wassergesättigten, bindigen Böden ist das Entstehen von Porenwasserüberdruck hinderlich für eine Schlitzherstellung. Durch langsames Schlitzten ließe sich jedoch der Porenwasserüberdruck immer wieder abbauen und die Suspension baut eine dichte Filterkuchenmembran an der Erdwandung auf.

3.4 Anforderungen an stützende Flüssigkeiten

Die Anforderungen an die Schlitzwandtone sind in DIN 4127 "Schlitzwandtone für stützende Flüssigkeiten" festgelegt. Für ihre Herstellung und den Einsatz sind weitreichende Prüfungen und Überwachungen - u.a. der Fließgrenze, des Tongehalt unter verschiedenen Filtrationszuständen, der Dichte, Massenanteil an Chemikalien - erforderlich.

Aus der Beziehung zwischen den definierten Filtratwasserabgaben f und den Fließgrenzen $*f$ ermitteln sich die Tongehalte g_{15} , g_{10} , g_5 , g_{50} , die den Schlitzwandton benennen (Schlitzwandton DIN 4127- g_{15} - g_{10} - g_5 - g_{50}). Der Wert g_{15} gibt hierbei den Mindesttongehalt einer stützenden Flüssigkeit an.

An der Baustelle anstehende Tone können ebenfalls verwendet werden, wenn sie den Prüfungsforderungen nach DIN 4127 entsprechen. Durch Füllstoffe (z.B. Sand, Steinmehl) werden der Flüssigkeits- und der Stützdruck der stützenden Flüssigkeit erhöht. Die Mischrezeptur je 1000 l Stützflüssigkeit ist für jedes Bauvorhaben speziell aus dem Mindesttongehalt, dem eventuellen Füllstoffgehalt und dem Wasser zu ermitteln.

Verunreinigte Wässer können die mechanischen Eigenschaften stützender Flüssigkeiten gravierend beeinflussen, so daß gesonderte Eignungsprüfungen durchzuführen sind, wenn die stützenden Flüssigkeiten aus verunreinigten Wässern hergestellt oder die Schlitzwand in Böden, die für die Flüssigkeit schädliche chemische Bestandteile aufweisen, errichtet werden soll.

3.5 Baustoffe der Schlitzwände

3.5.1 Wände im Zweiphasen-Verfahren

In der ersten Herstellungsphase wird eine Stützflüssigkeit, die aus einer Bentonitsuspension besteht eingebaut. In der zweiten Phase werden Betonwände und Dichtwände unterschieden. Der Beton für die konstruktiven Wände muß den allgemeinen Anforderungen der DIN 1045 bzw. ENV 206 entsprechen und zumindest wird ein B 25 bzw. C 20/25 verwendet, dessen Konsistenz wegen der besonderen Einbautechnik allerdings von DIN 1045 abweicht.

Als Baustoff für Dichtwände wird meist ein sog. Erdbeton verwendet, der aus Wasser, Bentonit, Zement, Füller (Tonmehl, Gesteinsmehl), Sand und Kies besteht.

Standardrezepturen für einen Kubikmeter setzen sich zusammen aus:

- * 0 - 30 kg Bentonit
- * 0 - 160 kg Tonmehl
- * 170 - 300 kg Zement
- * 0 - 200 kg Steinmehl
- * 600 - 950 kg Sand
- * 300 - 500 kg Kies
- * 350 - 500 kg Wasser.

3.5.2 Wände im Einphasenverfahren

Da die Stützflüssigkeit im erhärteten Zustand gleichzeitig den Zweck des Dichtwandbaustoffes übernimmt, setzt sich die Suspension im allgemeinen aus Wasser, Spezialbentonit und hydraulischen Bindemitteln zusammen. Standardrezepturen bestehen z.B. aus:

- * 25 - 40 kg Bentonit
- * 170 - 300 kg Zement
- * 890 - 910 kg Wasser.

3.6 Standsicherheitsnachweise suspensionsgestützter Erdwände

3.6.1 Nachweis der inneren Standsicherheit

Für jedes Objekt sind die Standsicherheitsbedingungen zum Nachweis der inneren zu prüfen:

Nachweis a) Sicherheit gegen Zutritt von Grundwasser in den Schlitz

Der Nachweis ist erfüllt, wenn der Druck der stützenden Flüssigkeit an jeder beliebigen Stelle größer als der 1,05-fache Druck des Grundwassers ist.

Gefahrensituationen können bei fließendem und bei artesisch gespanntem Grundwasser eintreten.

Unter diesen zu erwartenden Bedingungen sollten im Vorfeld Grundwassermeßpegel eingebaut werden, die Ergebnisse zu den Grundwasserständen liefern und Planungshilfen bei der Anordnung eventuell zusätzlicher Brunnen, für die Wahl der Stützflüssigkeit und die erforderliche Lage des Stützflüssigkeitsspiegels bieten.

Nachweis b) Sicherheit gegen Abgleiten von Einzelkörnern oder Korngruppen

Für feinporige Böden mit wirksamem Korndurchmesser $d_{10} \leq 0,2$ mm kann davon ausgegangen werden, daß sich eine Filterkuchenschicht ausbildet und damit die innere Sicherheit erfüllt ist. Die Möglichkeit eines Einsturzes des Korngerüstes wächst jedoch bei grobporigen Bodenschichten, bei anstehenden Böden mit kleinem inneren Reibungswinkel und bei geringerem Tongehalt bzw. Fließgrenze T_f der stützenden Flüssigkeit.

Der Nachweis hierfür ist erbracht, wenn die Fließgrenze T_f der stützenden Flüssigkeit einen bestimmten Wert nicht unterschreitet (Tabelle 1). Die zulässige Fließgrenze läßt sich jedoch auch durch einen erfolgreich ausgeführten Probeschlitz oder durch positive Erfahrungen an mindestens 20 Schlitzwandelementen an gleichen oder ungünstigeren Bedingungen nachweisen.

Tabelle 1: Mindestfließgrenzen T_f in Abhängigkeit von der Bodenart

Zeile	d_{10} in mm	min T_f in N/m ² während der Aushubarbeiten	Bodenart
1	0,6	10	Mittelsand
2	2	30	Kies mit mind. 10% Sand
3	5	70	Kies mit weniger als 10% Sand aber mindestens 15% Feinkies

Maßgebend für diesen Nachweis sind die Bodenschichten mit dem größten wirksamen Korndurchmesser. Schichten mit d_i größer 0,5 m können vernachlässigt werden, wenn sie von Schichten mit großer innerer Sicherheit, die mindestens die dreifache Mächtigkeit aufweisen, überlagert werden. In diesem Fall können geringe Einbrüche nicht ausgeschlossen werden.

Nachweis c) Sicherheit gegen Unterschreiten des statisch erforderlichen Flüssigkeitsspiegels

Die Kenntnisse über exakte Baugrund- und Grundwasserverhältnisse, das Vorhandensein grobkörniger Schichten und deren Eindringungsverhalten, von unterirdischen Anlagen (Kanäle, Leitungen) oder von Hohlräumen ist für diesen Nachweis unabdingbar.

Während der Schlitzwandarbeiten ist der Flüssigkeitsspiegel ständig zu überwachen.

Sicherzustellen ist, daß das Aushubvolumen und der Flüssigkeitsverlust pausenlos durch die Suspension ersetzt wird und eine ausreichende Reservemenge an Stützflüssigkeit vor Ort vorhanden ist.

3.6.2 Nachweis der äußeren Standsicherheit

Ein flüssigkeitsgestützter Erdschlitz wird mit begrenzter Länge (ca. 2,5 m bis 8 m) hergestellt. Verformungen der Schlitzwand durch Erddruck haben zur Folge, daß Gleitlinien entstehen. Beobachtungen haben gezeigt, daß sich auf eine Schlitzwand mit begrenzter Länge im Versagensfall ein Erddruck mit einer spezifischen räumlich gekrümmten Gleitfläche ausbildet.

Die Sicherheit gegen den Schlitz gefährdende Gleitflächen (äußere Standsicherheit) nach DIN 4126, Abschnitt 9.1.4 ist erfüllt, wenn das Verhältnis aus wirksamer Stützkraft S der Schlitzwand vermindert um die Druckkraft W des Grundwassers und die Erddruckkraft E , ermittelt aus der gekrümmten Gleitfläche lautet

$$n_k = (S - W) / E = \text{erf } n_k$$

bzw. wenn die Beziehung aus erforderlichem Scherbeiwert $\tan \text{erf } \phi^*$ und tatsächlich verfügbarem Scherbeiwert $\tan \text{cal } \phi^*$ mit

$$n_{\phi} = \tan \text{erf } \phi / \tan \text{cal } \phi = \text{erf } n_{\phi}$$

erfüllt ist.

In die Berechnungen nach DIN 4126, Abschnitt 9.1.4 fließen die Bodenschichtung, der Wasserdruck, Lasten aus baulichen Anlagen, aber auch Leitwände und ihre Aussteifung ein.

Der Nachweis der äußeren Standsicherheit ist für jede Aushubtiefe zu führen oder kann durch einen Probeschlitz, unter Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheitsbeiwerte geführt werden.

3.6.3 Weitere Nachweise

Als Stützbauwerk ist der Nachweis der Sicherheit gegen Geländebruch nach DIN 4084 zu führen. Bei verankerten Schlitzwänden sind desweiteren der Nachweis der Ankertragfähigkeit und der Nachweis der tiefen Gleitfuge zu führen.

4 Dichtigkeit der Schlitzwand

4.1 Forderungen an die Dichtigkeit

Bei der Planung und Ausführung stellt sich die Frage: "Wie dicht muß die Schlitzwand sein?" Genaue Forderungen sind diesbezüglich nicht in DIN 4126 genannt, so daß im Rahmen der Schlitzwandtechnik neue Definitionen erforderlich sind.

Zu unterscheiden sind dabei wasserwirtschaftliche und konstruktive Gesichtspunkte.

Aus wasserwirtschaftlichen und umweltverträglichen Aspekten wurde in Berlin eine zeitlich begrenzte zulässige Restwasserhaltung für alle "wasserdichten" Baugruben mit *1,5 l je 1000 m² benetzter Baugrubenfläche und Sekunde* festgelegt.

Die Anforderungen an die Dichtigkeit der Schlitzwände aus konstruktiven Gesichtspunkten könnten sein, daß die Zuflußrate auf der Luftseite geringer sein muß als die Verdunstungsrate,

wie sie im Stahlbetonbau üblich ist.

Den Forderungen des Stahlbetonbaus (DIN 1045) gerecht zu werden, würde den Einsatz von wasserundurchlässigem Beton (WU-Beton) und den Nachweis der erforderlichen Rißweitenbeschränkung zur Folge haben. Neben der unwirtschaftlichen Erhöhung des Bewehrungsanteils könnten Risse zwischen den Bewehrungskörben jedoch nicht verhindert werden, so daß die strenge Anwendung von WU-Beton-Richtlinien für Schlitzwände ungeeignet ist.

Besonders hohe Wertschätzung an die Dichtungsfunktion einer Schlitzwand werden bei einschaliger Bauweise gestellt, da ja hier die Dichtwand die Funktion der späteren Außenwand übernimmt.

Bei dieser Bauweise ist eine "kapillare Durchfeuchtung" (Gesamtdurchlässigkeit der Wand k

4.2 Dichtigkeitsklassen der VÖBU

Die Vereinigung österreichischer Bohr- und Spezialtiefbauunternehmen (VÖBU) hat wegen Fehlens entsprechender Richtlinien zur Anforderung an Dichtwände die folgende Definition der Dichtigkeitsklassen vorgenommen, die "Angebotsgrundlage für die Herstellung von Schlitzwänden" sein kann.

Definition der Dichtigkeitsklassen und Mindestwandstärken lt. VÖBU

Tabelle 2: Dichtigkeitsklassen der VÖBU

W1	leichte Feuchtstelle, nach Berühren mit der trockenen Hand sind an der Hand keine Wasserspuren zu erkennen.	d = 80 cm WU	400 kg	
W2	Feuchtstelle, nach Berühren mit der Hand sind an der Hand Wasserspuren zu erkennen, die Hand wird feucht.	d = 80 cm	WU	400 kg
W3	Tropfenweiser Wasseraustritt, Wasserschlieren	d = 60 cm	WU	380 kg
W4	keine besonderen Dichtigkeitsanforderungen	d = 60 cm	-	350 kg

Technisch wasserdichte Schlitzwände entsprechen der Dichtigkeitsklasse W 3.

Maßnahmen zur Verbesserung gegenüber den angebotenen Dichtigkeitsklassen (wie z.B. Dichtfugensystem oder spätere Abdichtung) sind gesondert zu vergüten.

Der Planer hat im Vorfeld konstruktive Vorkehrungen zufolge statischer Beanspruchungen, Verformungen (Berücksichtigung aller Bauzustände und gleichmäßige Lasteinleitung), sowie gegen Schwinden, Kriechen und Temperaturänderungen zu treffen, (z.B. durch Anordnung von Dehnfugen und Vermeidung von Aussparungskörpern).

Die erzielbare Ebenflächigkeit der Wand ist abhängig von der Kornstruktur des anstehenden Bodens, d.h. die ausgeschriebenen Toleranzen sind um das entsprechende Maß zu erhöhen. Eine darüber hinausgehende Verbesserung der Ebenflächigkeit ist gesondert zu vergüten.

Nach dieser Definition der Dichtigkeitsklassen werden sowohl Feuchtstellen in der Schlitzwand zugelassen, als auch die Anforderungen an die Ebenflächigkeit der Wand

präzisiert.

4.3 Fehlerursachen und ihre Behebung

Als bauliche Risiken für Dichtigkeitsprobleme sind zu nennen:

- Lotabweichungen der tiefen Schlitzwände
- Betoniermester, z.B. infolge großer Bewehrungsmengen
- Undichtigkeiten in den Lamellenfugen.

Die Wasserdichtigkeit einer Baugrube mit vertikaler Abdichtung als Schlitzwand ist auch dort gefährdet, wenn sich die Querschnitte ungleichmäßig verformen, was u.a. in den Baugrubenecken und bei einspringenden Ecken der Fall sein kann. Im letzteren Fall können die Schlitzwandlamellen aufgehen.

Dichtungsprobleme zwischen Schlitzwand und injizierten oder betonierten Dichtsohlen seien an dieser Stelle nur erwähnt.

Eine Realisierung der geforderten Schlitzwandqualität erfordert in jedem Fall eine sorgfältige Abstimmung der Stützflüssigkeit auf die anstehenden Baugrundverhältnisse, eine ordentliche Entsandung der verwendeten Bentonitsuspension und gleichmäßig saubere Betoneinbringung nach dem Kontraktorverfahren, wodurch die Verdrängung der Stützflüssigkeit durch den aufsteigenden Beton sichergestellt ist.

Durch sorgfältige Überwachungen und Kontrollen während der Herstellung, z.B. Inklinometermessungen für die Vertikalität und Stützflüssigkeitsmengenkontrollen, können Herstellungsfehler reduziert werden.

Zu den konstruktiven Maßnahmen gehören Sonderlamellen mit starker Horizontalbewehrung und Kopfbalken bei der Lösung der Eckenverbindungen und Ankerdurchbrüche, die durch spezielle druckwasserdichte Systeme (z.B. Packersysteme) geschlossen werden.

Werden nach dem Lenzen der Baugrube kleinere Undichtigkeitsstellen festgestellt, haben sich als erste Dichtungsmaßnahmen Berme und Sandsäcke sowie Holzkeile verschiedener Größen bewährt. Die endgültige Dichtung erfolgt häufig mit angeschweißten oder angedübelten Stahlplatten mit entsprechender Dichtungsunterlage. Für gewöhnlich wird ein aufschäumendes 2-Komponenten Harz zur Abdichtung und eine feststoffreiche Zementinjektion zur Stabilisierung etwaiger Hohlräume und Auflockerungen verwendet. Bei besonderen Umständen ist auch eine Vereisung denkbar.

5 Fugenproblematik

5.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Infolge der lamellenweisen Herstellung der Schlitzwände ergeben sich eine große Anzahl von Arbeitsfugen, die ein großes Gefahrenpotential sowohl hinsichtlich der Dichtungsfunktion als auch der Standfestigkeit der einzelnen Lamellen sind.

Große Wandflächen aus Stahlbeton lassen sich inzwischen durch Ausnutzung einer Reihe von konstruktiven Maßnahmen so herstellen, daß Bewegungsfugen vermieden werden können. Unvermeidbar sind jedoch Arbeits- oder Tagesendfugen im Betonbau, die sich zwangsläufig

aus dem technischen Tagesablauf (Arbeitstakt oder Betonierabschnitt) ergeben und die somit die Funktion der Dehnfuge übernehmen müssen.

Wesentliche Beanspruchungen erfahren die Fugen durch Belastungen quer zur Schlitzwand, infolge des abschnittsweisen Bodenaushubs der Baugrube, unterschiedlicher Verformungseigenschaften angrenzender Bodenschichten und unterschiedlicher Belastungen an der Geländeoberfläche. Da die unbewehrten Schlitzwandfugen sich nicht zur Übertragung horizontaler Kräfte eignen und die Herstellung eines Querkraftverbundes sich äußerst schwierig gestaltet, müssen diese Belastungen weitestgehend durch konstruktive Maßnahmen, i.d.R. durch einen Kopfbalken abgefangen werden. Die Ausführung einer schubkraftübertragenden, verzahnten Fugenkonstruktion aus Stahl kann nicht wasserdicht hergestellt werden.

Die Ausbildung der verschiedenen Fugenkonstruktionen birgt einige herstellungsbedingte Schwierigkeiten, die jedoch qualitätsbestimmend für die Schlitzwand sind. Grundsätzlich sind die Anschlußstellen vor dem Betonieren von abgesetztem Bentonitschlamm zu reinigen. So bildet sich beim Kontraktorverfahren ein dünner Bentonitfilm an der Anschlußstelle, der durch das anstehende Grundwasser ständig durchfeuchtet wird und sich dadurch als elastisches Abdichtungsmedium erweist. Lediglich ein luftseitiges Austrocknen dieser "Fugenabdichtung" bei Aushub der Baugrube kann auch nach längerer Dichtigkeit zu Sickerwegen führen, die die Suspensionstonanteile ausspülen und damit zu Wasserwegigkeiten führen.

Die Ausbildung der verschiedenen Fugenarten orientiert sich im wesentlichen an der zu erstellenden Schlitzwandart (einschalige oder zweischalige Bauweise) und damit an ihrer Einsatzdauer und ihrem Endzweck.

Die Vertikalität der einzelnen Lamellen hat einen wesentlichen Einfluß auf die Kontinuität der Schlitzwandelemente, die wiederum den Verbund der vollen Wandquerschnitte und die daraus resultierende "Fugenstabilität" gewährleistet.

Die Entwicklungen großer Spezialgrundbauformen haben in den letzten Jahren eine Vielzahl von Fugensystemen hervorgebracht, die in ihren Anwendungen oft noch in einer Experimentierphase stecken.

5.2 Anschluß- und Abdichtungskonzepte der Schlitzwandlamellen

5.2.1 Fugenrohre aus Stahl

Die Anwendung von Fugenrohren stellt sich als robuste Variante mit einfacher Handhabung dar, die bei allen Schlitzwandtiefen zum Einsatz kommen kann. Schlitzwandbreiten bis 1m lassen sich hiermit realisieren.

Durch den kreisrunden Fugenschnitt wird eine Verlängerung des Sickerweges und somit eine Verminderung des Sickerwasserandrangs bewirkt. Durch die langfristigen Erfahrungen beim Einsatz von Stahlfugenrohren können schon in der Planungsphase Maßnahmen getroffen werden, um die Qualitätsanforderungen zu garantieren. Bei Verwendung von Abstellrohren kommt es durch Abweichungen des Lamellenquerschnitts vom Sollmaß häufig zur Ausbildung eines sogenannten Umlaufbetons (Abb. 13). Dieser muß durch schwere Exzentermeißel entfernt werden, da er beim Abteufen des Nachbarschlitzes eine Ablenkung des Aushubwerkzeuges bewirken kann, was sich erheblich auf die Vertikalität und somit auf die Ausbildung einer sauberen, voll anliegenden Verbindungsstelle der Lamellen auswirken

kann.

Das Ziehen der Abstellrohre ist mit einem erheblichen Kraftaufwand verbunden und muß erfolgen, wenn der Beton zwar eine ausreichende Standfestigkeit erlangt hat, aber im Abbindeprozeß noch jung ist (Betonalter ca. $\frac{3}{4}$ Stunde).

5.2.2 Fertigteile aus Stahlbeton

Die Ausbildung einer sauberen Fugenkonstruktion gestaltet sich bei dieser Methode relativ einfach, da das Fertigteilelement in den abgeteuften Schlitz nur eingesetzt werden muß. Durch die Vorfertigung im Werk wird eine gleichbleibende Qualität gewährleistet und eine Profilierung zur besseren Verzahnung der Anschlußlamellen ermöglicht.

Durch das hohe Eigengewicht verfügen die Stahlbetonfertigteile über eine ausreichende Standfestigkeit im suspensionsgestützten Schlitz, wird jedoch auch die Einsatztiefe beschränkt.

Als problematisch erweist sich, daß beim Einbringen der Fertigteile in den mit Bentonit gefüllten Schlitz die trockene Betonoberfläche das Wasser aus der Suspension aufsaugt, was zur Ausbildung eines Filterkuchens an der Fertigteiloberfläche führen kann, der sich beim Betonieren nicht mehr löst und undichte Bereiche ausbildet.

Die Anzahl der Fugen wird zumal beim Einsatz der Fertigteile verdoppelt, da zwei angrenzende Lamellen je eine Fuge erhalten.

5.2.3 Überfräsen der Fugen

Der Einsatz sogenannter Hydrofräsen bietet eine wirtschaftliche Methode sowohl für einphasige als auch für zweiphasige Schlitzwände. Sobald der Beton der Vorläuferlamelle ausreichend erhärtet ist, kann die Anschlußlamelle durch den kontinuierlichen Einsatz der Fräse abgeteuft werden. Dabei wird die Kontaktstelle zur Vorläuferlamelle um einige Zentimeter überfräst und bietet somit eine rauhe Oberfläche aus, die eine gute Verzahnung zur nachfolgenden Lamelle garantiert.

Dieses Verfahren ist erschütterungsarm, so daß das Nachfallen von Erdreich in den Schlitz vermindert und potentielle Undichtigkeitsstellen durch Erdnester im Beton weitestgehend ausgeschlossen werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Fräse liegt darin, daß die konstante Absenkgeschwindigkeit und der konstante Druck auf die Schlitzsohle eine Abweichung von der Vertikalen stark reduziert.

5.2.4 Fugensysteme mit Fugenbändern

Fugenbänder werden bei der Schlitzwandtechnik vordergründig dort eingebaut, wo durch Anordnung von planmäßigen Dehnungsfugen Undichtigkeiten an den Betonierfugen infolge Schwindens des Betons oder infolge Verformungen der Wand aus Erd- und Wasserdrücken vermieden werden sollen.

Ein Beispiel für ein Fugensystem mit Elastomer-Fugenband ist das System "CWS-Bachy" der Fa. Soletanche. Hier wird im mit Suspension gefülltem Schlitz eine Abschalelement mit trapezförmigem Querschnitt eingebaut. Entlang des Abschalelementes wird in den geschlitzten Querschnitt die halbe Fugenbandbreite eingeschoben. Durch den Betoniervorgang wird das Fugenband zur Hälfte einbetoniert. Das Abstellelement wird nach erforderlicher Aushärtung gezogen und im Anschluß wird die Nachbarlamelle betoniert,

wodurch die andere Hälfte des Fugenbandes vollständig abgedichtet wird.

Bei der Verwendung von Fertigteil-Schlitzwänden kann die Lösung des Fugenproblems mittels des Systems "Panosol" der Fa. Soletanche dargestellt werden:

Im Primärfertigteil ist eine vertikal durchgehende Nut vorgefertigt. Nach Einstellen des Fertigteils wird ein Schlauch in die Nut eingelassen. Dieser wird aufgeblasen und soll das Eindringen von Schmutz aus dem nachfolgenden Aushub vermeiden.

Vor Einbau des Sekundärfertigteils wird der Schlauch gezogen. Das Sekundärelement wird über eine Führungsschiene zusammen mit dem Doppelfugenband entlang der Nut eingesetzt. Anschließend wird das Schlauch-Fugenband mit quellfähigem Zementleim verpreßt. Bei diesem Verfahren können fehlerhafte Fugen nach dem Lenzen der Baugrube aufgebohrt und frisch verpreßt werden.

6 Kostenfaktor Schlitzwand

Die im folgenden angegebenen Preisspannen entsprechen unseren Kenntnissen aus der Mitwirkung an entsprechenden Maßnahmen bzw. sind Ergebnis einer Befragung einzelner Firmen. Die Kosten für die Schlitzwand sind u.a. abhängig von der Tiefe, der zu erstellenden Fläche, den anstehenden Baugrundverhältnissen, den Örtlichkeiten (Vorhandensein von Nachbarbebauung) und sind folglich für jedes Objekt individuell festzulegen.

In den nachfolgenden Angaben sind bereits Anschlüsse und Bewehrung enthalten, Verankerungen sind jedoch zusätzlich zu berücksichtigen.

Tabelle 3: Überschlägige Kosten für Schlitzwände

Ortbetonwand	500 - 700 DM/m ²
Fertigteilwand	800 - 1300 DM/m ²
Dichtwand	200 - 240 DM/m ²
Eingestellte Spundwand	300 - 400 DM/m ²
Leitwand	400 - 500 DM/Ifd. m
Baustelleneinrichtung	80.000 - 200.000 DM

Die Kosten für die Baustelleneinrichtung einer Schlitzwand sind gegenüber anderen vertikalen Abdichtungssystemen (Spundwand, Bohrpfahlwand, HDI-Wand) hoch, die Wandkosten liegen, mit Ausnahme der Fertigteilwände, im Bereich der Bohrpfahl-Wand und unter der HDI-Wand.

Weiterhin sind die Kosten einer Restwasserhaltung zu berücksichtigen. Häufig muß das abgepumpte Wasser aus der Baugrube zur Einleitung in den Regenwasserkanal aufbereitet werden, da der pH-Wert zu hoch ist (Neutralisation: rd. 30.000,- DM).

7 Zusammenfassung

Vertikalabdichtungen im Erd- und Grundbau müssen häufig sowohl erdstatische Lasten und

Wasserdrücke aufnehmen, als auch im besonderen eine Dichtigkeit gegen Grundwasser bewirken. Die Schlitzwand hat sich als Vertikalabdichtung bewährt.

Dichte Schlitzwände lassen sich zusammenfassend unter Berücksichtigung folgender Voraussetzungen erzielen:

- lotrechter Aushub der Lamellen,
- auf die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse abgestimmte Bentonitsuspension, die kontinuierlich mit dem Aushub eingebracht wird,
- sorgfältiges Einbringen des Betons nach dem Kontraktorverfahren bzw. Einbau der Dichtelemente,
- Entsandung der ausgetauschten Bentonitsuspension vor Wiedereinbau,
- sorgfältige Herstellung der Fugen und planmäßiger Anschluß der folgenden Lamellen.

Der markante Vorteil der Schlitzwand - bei gleichzeitiger Nutzung als Bauwerksaußenwand - kann noch stärker, insbesondere bei Tunnelbauten und Tiefgaragen, genutzt werden. An dieser Stelle sei jedoch an Planer, Spezialgrundbauunternehmen und an Gutachter die Bitte gerichtet, Dichtigkeitsklassen, z.B. analog der VÖBU, festzulegen. Hierdurch könnten den Planern und Bauherren entscheidende Planungshilfen gegeben werden, die Firmen hätten vergleichbare Maßstäbe und die Kosten wären ersichtlicher.

Auch wenn die Schlitzwand Anwendungsschwierigkeiten bei grobporigen Böden, Böden mit gespanntem Grundwasser und Böden mit Porenwasserüberdruck hat, wird sie gerade in Hinblick auf den reduzierten Eingriff in das Grundwasser als vertikale Dichtwand noch mehr an Bedeutung gewinnen.