

Experimentelle Standsicherheitsuntersuchung an einem gemauerten Abwasserkanal mit Eiquerschnitt

Bernhard Falter (Münster), Georg Grunwald und Klaus Steffens (Bremen)

Zusammenfassung

Die Standsicherheitsbeurteilung alter, gemauerter Kanäle mit Eiprofilen wird dadurch erschwert, daß neben den Unwägbarkeiten der Materialeigenschaften und des Baugrundes keine Regeln zur Nachweisführung vorliegen. In Anlehnung der Schnittgrößenermittlung an das Arbeitsblatt ATV-A 127 ergeben sich insbesondere bei bestimmten Tiefenlagen rechnerisch unzureichende Sicherheitsbeiwerte, die jedoch offensichtlich mit der örtlich erreichten Tragfähigkeit nicht übereinstimmen. Um die im Sammler-Baugrund-System auftretenden Lastabtragungen zu erkennen und um diese in einem Rechenmodell nachzubilden, wurden die Untersuchungen an einem Abwassersammler in Bremen durchgeführt.

Schlagworte: Abwasserableitung, Kanalisation, Kanal Eiprofil, Statik, Standsicherheit, Boden, Messung, Berechnung, Modell

Summary

Experimental Stability Analysis in an Egg-shaped Brickwork Sewer

The assessment of the stability of older egg-shaped brickwork sewers is difficult because in addition to the imponderables of the properties of the material used as well as the foundation there are no rules that govern the furnishing of evidence. If Standard ATV-A 127 is closely followed in calculating the intersection parameters, insufficient safety coefficients are obtained, above all for certain depths; however, these do not coincide with the load bearing capacity achieved locally. In order to identify the load erosions that occur in the sewer-foundation system and to simulate them in a calculation model, studies were carried out in an interceptor in Bremen.

Key words: wastewater discharge, sewer system, sewer, egg shape, statics, stability, ground, measurement, calculation, model

Résumé

Examen expérimental de la stabilité d'un égout d'eaux usées maçonné à section ovoïde

Le jugement de la stabilité d'anciens égouts maçonnés à section ovoïde est rendu difficile du fait qu'il n'y a pas – outre

les impondérabilités des qualités du matériel et du terrain à bâtir – de règles comment on peut en apporter la preuve. Si l'on s'appuie fortement sur la fiche technique de travail ATV-A 127 pour calculer les réactions de coupe en question on arrive particulièrement pour certaines profondeurs aux coefficients de sécurité non satisfaisants d'après le calcul qui apparemment ne correspondent pas à la capacité portante locale.

Pour connaître la répartition des charges dans le système collecteur-terrain à bâtir et pour les simuler dans un modèle de calcul on effectua les examens à un collecteur à Brême.

Notices matières: évacuation des eaux usées, canalisation, égout, section ovoïde, statique, stabilité, sol, mesurage, calcul, modèle

1. Übersicht

Die Abwasser Bremen GmbH ist im Auftrag der Stadt Bremen für ein ca. 2 200 km langes Kanalnetz verantwortlich, das in den zurückliegenden 100 Jahren errichtet wurde. Die Kanaldurchmesser reichen von 150 mm bei öffentlichen Anschlußkanälen bis zu 3000 mm bei Mischwassersammlern. Gegenüber den Rohrkanälen, die mit etwa 80% den größten Längenteil besitzen und üblicherweise aus den Baustoffen Steinzeug und Beton bestehen, weisen die begehbaren Kanäle eine viel größere Vielfalt an Profilformen und Werkstoffen auf. Aus diesen Gruppen ist die der gemauerten Eiprofile mit einem Breiten-/Höhenverhältnis von 1:1,5 wiederum die wichtigste (Bild 1).

Die Sanierung baulich beschädigter Kanäle zielt neben der Wiederherstellung der Dichtigkeit insbesondere auf deren statische Ertüchtigung. Diesbezüglich ist das Arbeitsblatt ATV-A 127 [1] die maßgebende technische Regel für Standsicherheitsnachweise bei Kanälen. Noch nicht veröffentlicht ist der Standsicherheitsnachweis bei Reliningmaßnahmen. Das ATV-Regelwerk ermöglicht zudem keine ausreichende Standsicherheitsbeurteilung für gemauerte Sammler insbesondere mit Eiprofil. Gerade großformatige Kanäle stellen jedoch erhebliche Risiken bei einem statischen Versagen dar.

In einer Arbeit aus dem Jahr 1992 [2] wurde über Materialprüfungen an bremischen Abwassersammlern und Standsicherheitsuntersuchungen in Anlehnung an ATV-A 127 mit einem dazu entwickelten Stabwerkmodell berichtet. Die Ergebnisse zeigten in den meisten Fällen keine ausreichenden Stand-

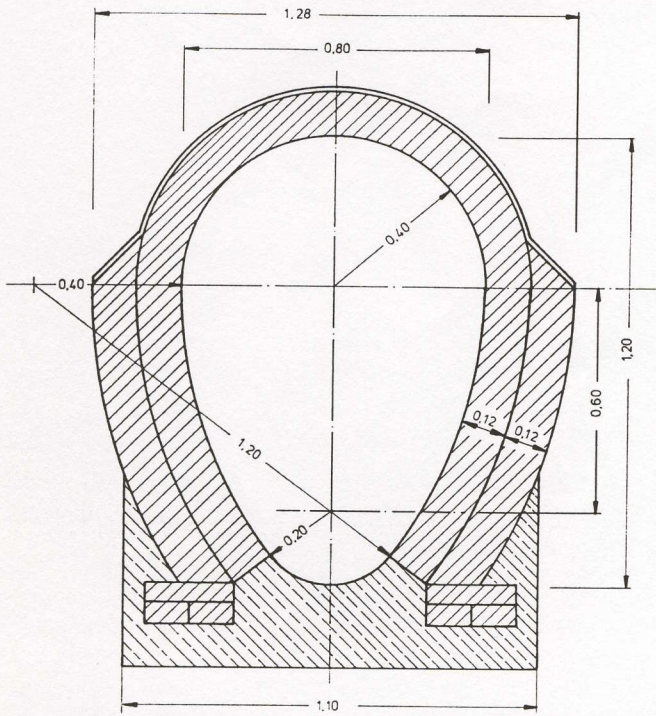


Bild 1: Normales gemauertes Eiprofil mit Breite/Höhe = 800/1200 mm

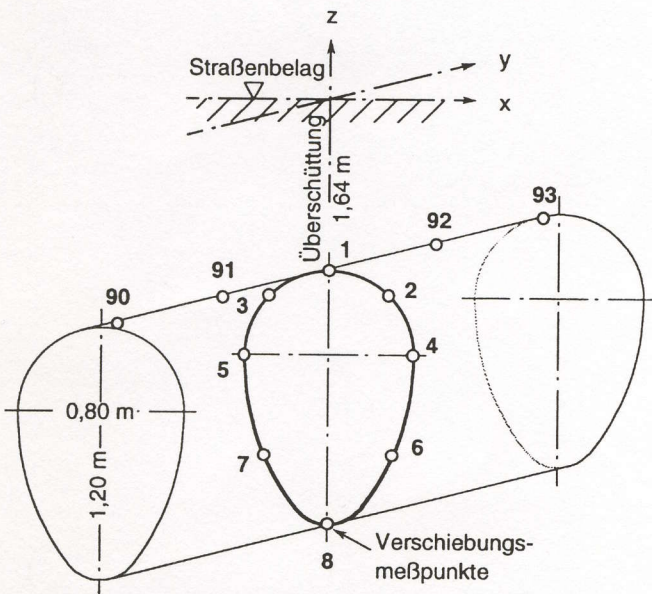


Bild 2: Koordinaten der Lastorte LF 1 bis 6, Lage der Verschiebungsmeßpunkte

sicherheiten, wodurch in der Regel eine Sanierungsbedürftigkeit aufgezeigt wurde. Da die statische Ertüchtigung mittels Renovierung oft erhebliche Querschnittsminderungen bedingt, die hydraulisch nicht immer vertretbar sind, folgte aus [2] letztlich ein erheblicher Erneuerungsbedarf. Dies war der Ausgangspunkt für weitere Überlegungen, die seit 1994 auf eine Modifizierung des statischen Modells zielten: Es wurden praxismgerechte und vertretbare Standsicherheitsreserven in das Modell implementiert, um nicht zu sehr auf der „sicheren Seite“ zu liegen. Hierfür boten sich insbesondere die

- Aktivierung von stützenden Bodenreaktionen in den seitlichen Sammlerzonen und die

- Berücksichtigung einer „mitttragenden Länge“ in Sammlerlängsrichtung unter den nach ATV-A 127 anzusetzenden Radlasten des SLW 60

an. Die Modellmodifikationen wurden durch einen Großversuch abgesichert. Hierfür waren im wesentlichen die

- Messung der in situ zu beobachtenden Last-Verformungszusammenhänge unter hohen Testlasten, die
- Beurteilung des anstehenden Baugrundes hinsichtlich der Bettungseigenschaften, die
- Eichung des Modells anhand der Meßwerte und die
- Weiterentwicklung der bisherigen statischen Nachweise auf der Grundlage der Versuchsergebnisse

erforderlich.

Die Last-Verformungsuntersuchungen wurden am 17./18. Oktober 1995 im Auftrag der Bremer Entsorgungsbetriebe in einem großtechnischen Versuch an dem bremischen Sammler Scharnhorststraße durch die Hochschule Bremen [3], die begleitenden Baugrunduntersuchungen von einem Grundbaulabor [4], die Bohrkernprüfungen von der Materialprüfanstalt Bremen [5] und die anschließende Weiterentwicklung des Rechenmodells von der Fachhochschule Münster [6] durchgeführt.

2. Experimentelle Untersuchungen [3]

2.1 Vorüberlegungen

Der Meßort war so gewählt, daß im Testbereich für Bremen durchschnittliche Bedingungen (Kanalzustand, Querschnitt, umgebender Boden, Überschüttungshöhe) angetroffen wurden. Des weiteren waren bei einem definierten Meßprogramm die Untersuchungszeit (Straßensperrung) und die Untersuchungskosten zu minimieren.

2.2 Versuchsplanung

2.2.1 Allgemeines

In Absprache mit dem Auftraggeber und den übrigen Baubeteiligten wurde folgendes Konzept entwickelt:

- Sperrung und Absicherung der Fahrbahn auf erforderlicher Länge und Breite
- Ausstattung des Sammlers im Meßbereich mit Verschiebungsmessern (Bilder 2 und 3)

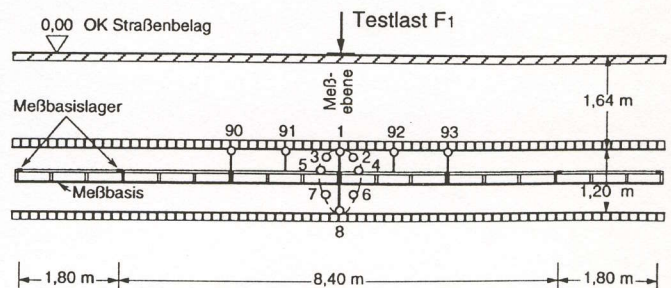


Bild 3: Verformungsneutrale Meßbasis und Lage der Verschiebungsmeßpunkte im Sammler (teilweise um 90° gedreht)

- Erzeugung einer variablen, absturzesicherten Testlast $F_1 \leq 500 \text{ kN}$ mit Lasteintrag über eine Druckplatte $500 \cdot 500 \text{ mm}^2$ (Bild 4)
- On-line-Messung der Sammlerverformung und der Druckplattensetzung in Abhängigkeit von der variablen Testlast. Diese wurde durch die Masse des Belastungsfahrzeugs (Mobilkran) begrenzt.
- Variation der Meßorte durch Querverschiebung der Lastresultierenden und Höhenstaffelung der Lasteintragsfläche über Oberkante Sammler durch schichtweisen Bodenabtrag (Bild 4).

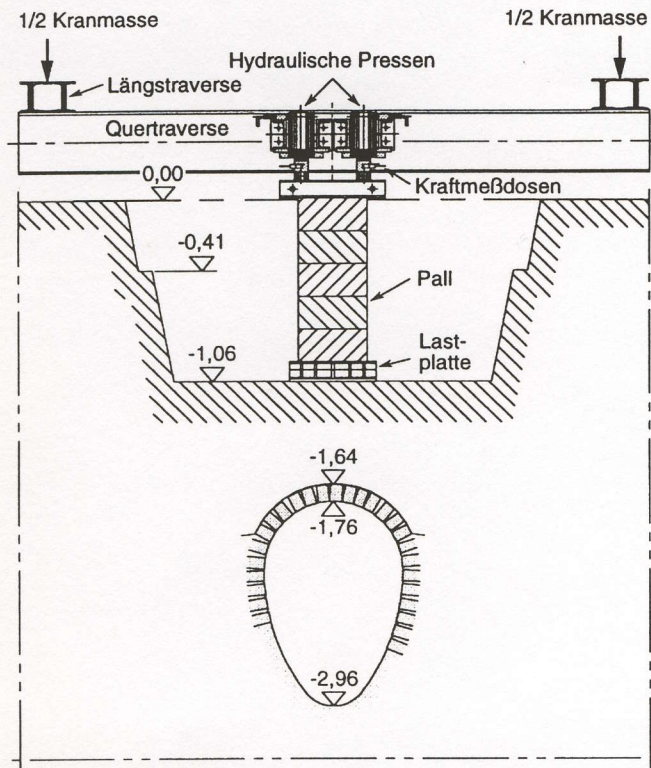


Bild 4: Querschnitt in der Meßebeane, Lastfall 3 (Verschiebungsaufnehmer nicht dargestellt)

2.2.2 Testlasten

Das Niveau der Testlasten (Gebrauchs- und Versuchsgrenzlast) wurde wie folgt abgeschätzt:

Straßenverkehrslasten SLW 60 nach ATV-A 127 (12/1988) und DIN 1072 (12/1985):

Einzelne Radlast ohne Stoßbeiwert j : $F = 100 \text{ kN}$

Stoßbeiwert $\varphi = 1,2$ nach ATV-A 127
 Gebrauchslast $1,2 \cdot 100 = F = 120 \text{ kN}$

Versuchsgrenzlast in Abhängigkeit von Testlastfahrzeug:
 54-t-Kran (Vierachser) $F \leq 500 \text{ kN}$

2.2.3 Lastorte und Lastfälle

Die Orte der Lasteintragung wurden so gewählt, daß für die Stützung der Berechnungen eine genügende Zahl von Parametern auch zur Erfassung nichtlinearer Einflüsse erzielt wurden.

Lastort 1 (Lastfall 1)

Resultierende Testlast (Unterkante Druckplatte)
 $y = \pm 0,00 \text{ m}$, $x = -1,85 \text{ m}$, $z = 0,00 \text{ m}$

Lastort 2 (Lastfall 2)

$y = \pm 0,00 \text{ m}$, $x = 1,85 \text{ m}$, $z = 0,00 \text{ m}$

Lastort 3 (Lastfälle 3, 4, 5 und 6)

LF 3 $\rightarrow y = \pm 0,00 \text{ m}$, $x = -0,00 \text{ m}$, $z = 0,00 \text{ m}$

LF 4 $\rightarrow y = \pm 0,00 \text{ m}$, $x = -0,00 \text{ m}$, $z = -0,41 \text{ m}$

LF 5 $\rightarrow y = \pm 0,00 \text{ m}$, $x = -0,00 \text{ m}$, $z = -1,06 \text{ m}$

LF 6 $\rightarrow y = \pm 0,00 \text{ m}$, $x = -0,00 \text{ m}$, $z = -1,20 \text{ m}$

Die Testlast für die Lastfälle 1 bis 5 wurde in der Größenordnung der Gebrauchslast gewählt, um die elastischen Reaktionen im gemauerten Sammler nicht zu überschreiten. Für den Lastfall 6 (Versuchsgrenzlast) wurde die verfügbare Testmasse soweit möglich ausgenutzt mit der Schranke beginnenden Grundbruchs und irreparabler Zerstörung des Mauerwerks.

2.3 Versuchsaufbau

Der Einleitung der planmäßig auf $F = 500 \text{ kN}$ begrenzten Testlast diente ein stählernes Lastgeschirr, welches verfahrbar am Fahrgestell eines 54-t-Mobilkrans befestigt war. Gegen diese Masse wurde die Testlast mit hydraulischen Pressen selbstgesichert aufgebracht.

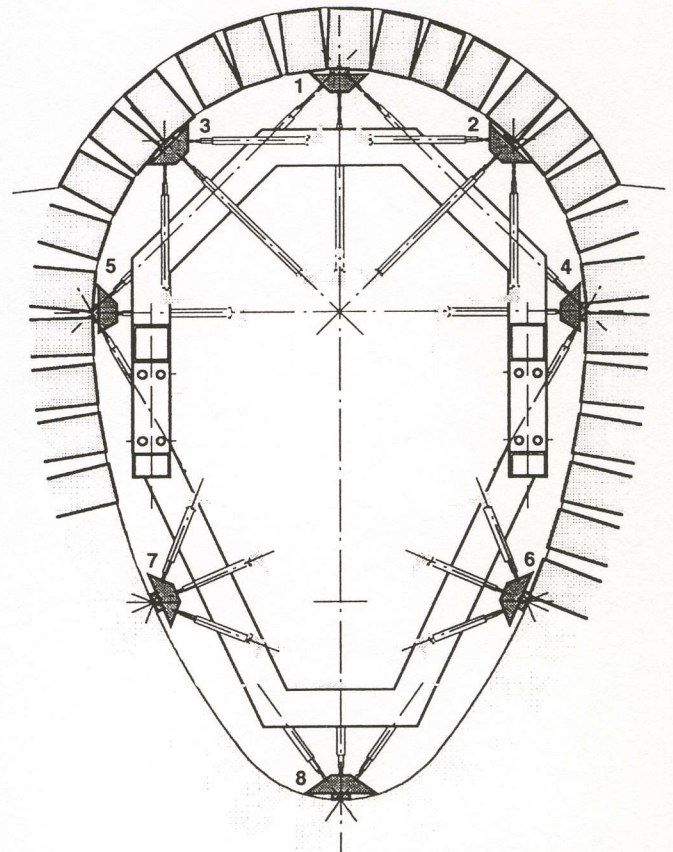


Bild 5: Sammlerquerschnitt mit lastneutraler Meßbasis und Verschiebungsaufnehmern

Während der Versuchsdurchführung wurde die Probelast kontinuierlich bis zur vorzuhaltenden Testlast gesteigert. Parallel dazu wurden die Sammlerverformungen elektrisch mitgemessen. Die Lage der Meßwertaufnehmer ist Bild 5 zu entnehmen. Die Kraft-Verformungs-Kurven konnten online über eine rechnergesteuerte Meßanlage aufgenommen, am Bildschirm dargestellt und über Plotter ausgedruckt werden (Bild 6).

2.4 Meßgeräte

2.4.1 Kraftmessung

Die Kraftmessung erfolgte über elektrische Kraftmeßdosen stufenlos bei einer Anzeigegenauigkeit → angezeigte Last in kN ± Fehler ≤ 2 kN. Bei einer Nennlast von $F = 200$ kN lag der Fehler also bei 1%.

2.4.2 Verformungsmessungen

Die Verformungsmessung erfolgte mit elektrischen Wegaufnehmern (Nennweg ≤ 20 mm) stufenlos bei einer Auflösung → angezeigter Weg in mm ± Fehler ≤ 0,01 mm. Es wurden gleichzeitig bis zu 28 Meßwertaufnehmer eingesetzt, mit denen die Mauerwerksverschiebungen erfaßbar waren (Bild 6).

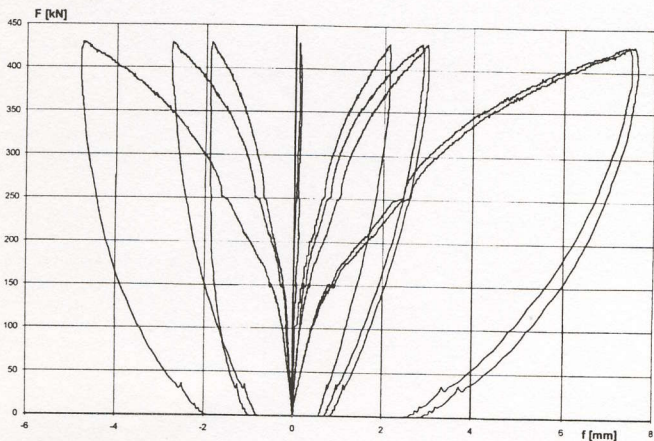


Bild 6: Originaler Meßplot für Lastfall 6 (Verschiebungskomponenten)

3. Rechenmodelle für gemauerte Abwassersammler mit Längsrissen

3.1 Alleinige Tragwirkung des Abwassersammlers

Die bisher für die Bremer Entsorgungsbetriebe durchgeführten Berechnungen zur Standsicherheit von gemauerten Kanälen [2, 7] gehen von der Betrachtung des Mauerwerks als „biegesteifem Rohr“ aus, das die Bodenspannungen insbesondere aus Erd- und Verkehrslasten allein übernimmt. Mit den in Anlehnung an das Arbeitsblatt ATV-A 127 [1] ermittelten Schnittgrößen N , Q und M werden die Spannungen im Mauerwerksquerschnitt unter Berücksichtigung des Versagens der Zugzone nach DIN 1053 ermittelt. Mit diesem im Mauerwerksbau üblichen Verfahren konnten mehrere Sammler der Stadt Bremen erfolgreich nachgewiesen werden.

Andererseits zeigten sich auch die Grenzen des Verfahrens, insbesondere bei oberflächennaher und bei tiefer Lage des Sammlers [7]. In den durch größere Biegemomente beanspruchten Wandbereichen folgen beim Fehlen entsprechend

hoher Druckkräfte große Exzentrizitäten e der Normalkräfte, bis bei $e > d/2$ kein Gleichgewicht mehr möglich ist.

Andererseits sind Kanäle, bei denen dieser Grenzwert erreicht wird, noch nicht zwangsläufig in ihrer Standsicherheit gefährdet, wie viele Ausführungsbeispiele in deutschen Städten zeigen. Selbst bei größeren Vorverformungen des Querschnitts kann erfahrungsgemäß noch eine ausreichende Restsicherheit vorhanden sein, so daß möglicherweise nur eine Sanierung zur Behebung von Korrosionserscheinungen, aber nicht zur Verbesserung der Standsicherheit erforderlich ist. Es ist daher von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung, die Reserven des Sammler-Boden-Systems zu nutzen, um eine statische Sanierung oder einen eventuellen Neubau auf die wirklich erforderlichen Fälle zu beschränken.

3.2 Mitwirkung des Bodens

An den Stellen des Querschnitts, wo die Exzentrizitäten die in der Mauerwerksnorm begrenzten Werte überschreiten, kann sich ein Gelenk ausbilden. Hier wird dann die Längskraft N und ein verminderter Teil des Biegemomentes, der sich aus dem Produkt der Normalkraft und der Exzentrizität e_G des Gelenks ergibt, übertragen.

Nach der Ausbildung von mindestens vier Gelenken wird das System „kinematisch unbestimmt“, also labil (Bild 7). Jetzt kann unter bestimmten Bedingungen von einer stützenden Wirkung des Bodens zur weiteren Stabilisierung des Viergelenksystems ausgegangen werden. Allerdings ist dieses System mit größeren Verformungen verbunden, da wie bei den in [1] definierten „biegeweichen Rohren“ erst eine gewisse Verschiebung des Kämpfers nach außen erforderlich ist, damit sich aufgrund der Reaktionsspannungen des Bodens ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt.

3.3 Rechenmodelle für Abwassersammler mit Bodentragwirkung

Bei biegeweichen Ausbauten wird im Rohrleitungs- und Tunnelbau die Tragwirkung des Bodens nach einer der folgenden drei Modellvorstellungen rechnerisch einbezogen:

- A) **Kontinuumsmodell** (Vollkontinuum A_V oder Teilkontinuum A_T , mit und ohne tangentialem Verbund), praktische Anwendung heute vielfach in der Finite-Element-Methode (FEM, vgl. [8])

Von der Aufbereitung bis zur Verwertung
bieten wir Komplettlösungen für

**Klärschlamm – Kompost
Sandfanggut – Straßenkehricht
Kanalspülsand – Rechengut**

Unsere Kompetenz – Erfahrung seit 1980

EDER GmbH

Verwertung von Sekundärrohstoffen

Stummer 4, 84579 Unterneukirchen
Tel. 0 86 33/89 79-0, Fax 0 86 33/89 79 11

- B) **Balkenmodell** (vollständig gebettet B_V oder teilweise gebettet B_T) mit entsprechender Anpassung der Bettungsmo-
dultn zur Erzielung von Ergebnissen, die mit den Modellen
 A_V und A_T näherungsweise übereinstimmen
- C) **ATV-A 127-Modell** mit Schnittgrößen- und Verformungs-
beiwerten aus der Kreisringstatik, Ansatz von seitlichen
Bettungsspannungen q_h^* mit parabelförmigem Verlauf und
Kompatibilität der Rohr- und Bodenverformungen im
Kämpfer (die Stabilitätsnachweise enthalten auch Ele-
mente der Modelle B_V und B_T).

Das Modell C bietet die Möglichkeit, spezielle Einbaubedingun-
gen wie den Auflagerwinkel 2α , die Verbauart des Rohr-
grabens und das Ziehen des Verbaus durch Einflußfaktoren
zu erfassen. Außerdem werden Setzungserscheinungen des
Bodens im Rohrgraben bzw. der Dammschüttung durch Kon-
zentrationen λ_R und λ_B erfaßt, die in nicht seltenen
Fällen eine Verdoppelung oder sogar Verdreifachung der Erd-
lasten über dem Rohrscheitel bewirken.

3.4 Wahl des Rechenmodells für gemauerte Abwassersammler mit Längsrissen

Bei der Anwendung der Modelle ist die Tiefenlage des Samm-
lers von großer Bedeutung. In [8] wird für Modelle mit voll-
ständiger Bettung eine Grenzüberdeckung von ca. $3d_a$ emp-
fohlen:

- für $h \leq 3d_a$ das Teilbettungsmodell A_T oder B_T
- für $h > 3d_a$ das günstigere Vollbettungsmodell A_V oder B_V .

Im vorliegenden Fall normalerweise begehbare Kanäle mit
Außendurchmessern von ca. 1,4 m und mehr wird deshalb ein
Teilbettungsmodell gewählt. Aus folgenden Gründen wird das
Balkenmodell B den Modellen A und C vorgezogen:

- Bei Anwendung der FEM (Modell A) erhöht sich die Zahl
der Parameter des Problems, ohne daß damit ein Genauig-
keitszuwachs verbunden ist. Ein solcher Parameter ist z. B.
die Größe des Scheitelbereichs (Teilkontinuum mit $E \cong 0$),
die zuvor festgelegt werden muß.
- Die Möglichkeit, mit der FEM die räumliche Situation zu
simulieren, wird in [6] aus Gründen des Aufwandes nicht
verfolgt.
- Das Modell C ist zwar für einen eiförmigen Sammler mit
weniger als vier Gelenken (Rissen) sinnvoll, wenn die
Schnittkraftbeiwerte vorab ermittelt werden [7]. Bei größerer
Gelenkzahl ändern sich jedoch die m- und n-Beiwerte
erheblich, und es sind zusätzlich Verformungsbeiwerte er-
forderlich, so daß gegenüber dem Modell B kein Vorteil
mehr vorhanden ist.
- Das Modell B erlaubt auf vergleichsweise einfache Weise
eine iterative Ermittlung des ungebetteten Bereichs und
anderer nichtlinearer Bodeneigenschaften.
- Eine Berücksichtigung der Einbausituation des Sammlers
(vgl. Modell C) ist wegen der in der Regel langen Betriebs-
zeit des gemauerten Sammlers kaum möglich und sinn-
voll.

In [8] wird ein Weg vorgeschlagen, wie das Modell B_T mit Hilfe
des Modells A_T kalibriert werden kann: Durch spezielle
Ansätze werden die radialen und tangentialen Bettungs-

moduln festgelegt, wodurch eine vergleichsweise gute Über-
einstimmung der Teilbettungsmodelle erzielt wird, vgl. Ab-
schnitt 4.2.2.

3.5 Unterschiede zwischen den Modellen für die Nachrechnung von Versuchen und für den Nachweis bestehender Abwassersammler

Bei der Versuchsnachrechnung muß die Konfiguration des
Sammler-Bodensystems möglichst genau erfaßt werden. Es
sind wirklichkeitsnahe Annahmen zu treffen, die nicht auf der
sicheren Seite liegen müssen. Streuende Bodenkennwerte
sind als Mittelwerte einzugeben. Der seitliche Druck aus Erd-
und Verkehrslasten ist realitätsnah anzusetzen.

Beim Nachweis bestehender Sammler sind dagegen stets
Kennwerte auf der sicheren Seite zu wählen. Bodenkennwerte
sind z. B. als 90-%-Fraktile anzusetzen. Der seitliche Erd-
druck aus Verkehrslasten sollte in Anlehnung an [1] vernach-
lässigt werden.

4. Modell für die Sammler-Bodeninteraktion

4.1 Mauerwerksschale

Der Sammler in der bremischen Scharnhorststraße hat einen
normalen Eiquerschnitt $B/H = 80/120$ cm mit im Scheitel-
bereich bis $\varphi \cong \pm 70^\circ$ einschaligem und sonst zweischaligem
Mauerwerk. Die Steinfestigkeitsgruppe 20 MN/m^2 und Mör-
telfestigkeitsgruppe III wurden in [5] anhand von Bohrkernen
ermittelt, die Mauerwerksfestigkeit hieraus mit $\beta_{Rd} = 6,4$ N/mm^2
eingestuft. Die Sohle ist mit einem Betonformstück ausge-
führt.

Für zentrische Lasten ist die Annahme der *Symmetrie* des
Systems zulässig – sie wird deshalb im folgenden zur Verklei-
nerung des Rechenmodells genutzt. Das System ist damit für
die seitlichen Laststellungen zwar nur näherungsweise gültig,
diese erweisen sich jedoch als nicht maßgebend.

Nach den Empfehlungen [8] ist eine Diskretisierung durch
gerade Balkenelemente mit einem maximalen Zentriwinkel
von 10° zulässig. Die Anzahl der Elemente und die Geometrie-
daten werden nach Tabelle 1 angesetzt.

Bereich	Bereichs- winkel φ	Innenradius r_i	Wanddicken d_i	Anzahl der Elemente n	bezogene Ge- lenkexzentrizität e_G / d
	$^\circ$	m	cm	-	-
Scheitel	0 - 90	0,40	12 (bis ca. 70°)	9	0,40
Kämpfer	0 - 36,9	1,20	28	8	0,40
Sohle	56,1 - 90	0,20	28	2	0,25

Tab. 1 Geometrie des Sammlers

Bei Überschreiten der maximal möglichen Exzentrizität $max e = M/N = d/2$ in einem beliebigen Querschnitt wird an dieser
Stelle ein Momentengelenk mit der auf d bezogenen Exzentrizität e_G nach Tabelle 1 eingefügt. Die Größe von e_G ist vom Zu-
stand des Mauerwerks abhängig, im vorliegenden Fall eines relativ guten Zustandes ist der Wert $e_G = 0,4$ d zu vertreten.
Bei tiefen Fugenauswaschungen oder größeren Abplatzungen ist e_G eher kleiner anzusetzen (z. B. = 0,2 d). Im Sohlbereich
wird die Wanddicke zur Vereinfachung des Modells beibehalten, wegen der tatsächlich kleineren Wanddicke des Sohl-
formstücks wird e_G jedoch auf 0,25 d verringert.

Der fortschreitende Einbau von Gelenken erfolgt im
Rechenprogramm [9] automatisch und ist bei Erreichen eines

„kinematisch unbestimmten“ Systems zunächst beendet. Beim symmetrischen Ersatzsystem ist dies ein System mit drei Gelenken und am Gesamtquerschnitt mit vier Gelenken (Bild 7). Die Tragwirkung geht von der Sammlerwand zum Boden über, und die Verformungen nehmen erheblich zu.

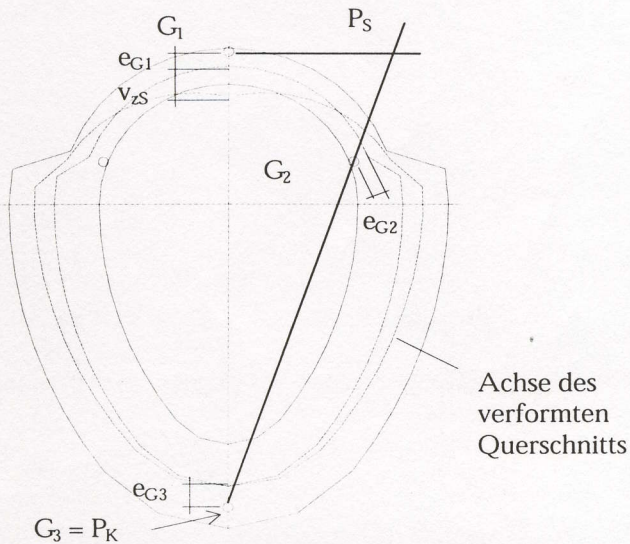


Bild 7: Querschnitt mit vier Gelenken, Polplan: P_S , P_K = Hauptpole der Verschiebungsfigur, G_1 bis G_3 = idealisierte Gelenke

Aus Bild 7 läßt sich mit Hilfe des Polplans die relative Verdrehung des Scheitelbogens ψ zur Verdrehung des Kämpferbogens ψ_K berechnen. Wird das Sohlgelenk G_3 als Hauptpol P_K des Kämpferbogens angenommen, so ergibt der Schnittpunkt der Linien $\bar{G}_3 \bar{G}_2$ mit der Senkrechten auf der Symmetrieachse in G_1 den Hauptpol P_S des Scheitelbogens.

Die Relativedrehung der beiden Bögen ergibt sich durch Längenvergleich der Polstrahlen $l_2 = \bar{P}_K \bar{G}_2 = 123 \text{ cm}$ und $l_1 = \bar{P}_S \bar{G}_2 = 37,5 \text{ cm}$ zu

$$\psi_S / \psi_K = 123 / 37,5 = 3,28$$

4.2 Boden

4.2.1 Ungebetteter Bereich

Der Scheitel des Sammlers verformt sich unter der Auflast in das Innere des Sammlers. Entsprechend dem gewählten Modell B_1 werden die Bodenfedern im Scheitel bei Auftreten von positiven Bettungskräften iterativ entfernt, bis nur noch Federn mit Druckkräften vorhanden sind. Durch diese Vorgehensweise wird das Entstehen von radialen Zugspannungen im Boden vermieden, was bei anderen veröffentlichten Modellen nicht immer gewährleistet ist.

4.2.2 Gebetteter Bereich

Die stützende Wirkung des Bodens wird durch radiale elastische Stäbe, die an den Knicken des Stabpolygons in Richtung der Winkelhalbierenden befestigt sind, erfaßt. Zur Berücksichtigung der Wandreibung können die Stäbe um den Winkel δ' gegenüber der Winkelhalbierenden geneigt werden. Nichtlineares Verhalten des Bodens (Überschreiten des passi-

ven Erddrucks) wird durch Begrenzung des Bettungsdrucks erfaßt.

Die Ermittlung der Steifeziffer E_S des Bodens in Kanalnähe ergab nach [4] Werte zwischen 1000 und 4000 kN/m². Hieraus werden nach [8] die Bettungsmoduln wie folgt berechnet:

$$k_r = E_S / r_m \text{ und } k_t = 0 \quad (1a, b)$$

Für den Radius r_m ist der jeweilige Systemradius anzusetzen, damit ergeben sich bei gleichen Bodenverhältnissen im Scheitel und im Kämpfer unterschiedliche Werte für k_r .

4.2.3 Auflagerbereich

Die bodenmechanischen Untersuchungen haben für das Sammlerauflager *kleinere* Steifeziffern ergeben, verglichen mit dem Kämpfer- und Scheitelbereich [4]. Wird nun eine über den Sammlerumfang *konstante* Steifeziffer angesetzt, so folgt aufgrund der Eigenschaften des ebenen Rechenmodells eine vergleichsweise große Starrkörperverschiebung des Gesamtsystems.

Da jedoch auch bei Maximalbelastung nur vernachlässigbare kleine Sohlverschiebungen gemessen wurden, muß das räumliche Tragverhalten und die gute Verteilung der Auflagerspannungen durch die Sohl Ausbildung im statischen Modell gesondert berücksichtigt werden. Im vorliegenden Fall genügt es, den Bettungsmodul in der Sohle um etwa 20- bis

Technik der Zukunft



Stahlblech-Silos

- Komplett-Anlagen
- Entstaubungsfilter
- Fördertechnik
- Austragstechnik
- Steuerungen





Regionalbüro Nord-Ost:
D-14727 Premnitz
Tel. 0 33 86 / 28 98 76
Fax 0 33 86 / 28 98 77

Regionalbüro Nord-West:
D-51467 Bergisch-Gladbach
Tel. 0 22 02 / 86 38 20
Fax 0 22 02 / 86 38 22

WILHELM KURZ & SÖHNE
Stahlbau · Behälterbau
D-74336 Brackenheim, Postf. 1246
Telefon 07135 / 175-0
Telefax 07135 / 175-75
e-Mail info@kurz-silosysteme.de
http:// www.kurz-silosysteme.de

40fach größer zu wählen als im Scheitel, um die gemessenen Sohlverschiebungen zu erhalten.

4.3 Belastung

Die Bodenspannungen am Sammlerumfang aus Erd- und Versuchslasten sind von der Geometrie des Versuchsfeldes abhängig. Die Überdeckung über dem Sammlerscheitel beträgt bei den Lastfällen 1 bis 3 $h_s = 1,64$ m. Bei den tiefer liegenden Belastungshorizonten der Lastfälle 4 bis 6 muß auch die Form der Abgrabung berücksichtigt werden. Wie in [1] üblich wird eine Umrechnung der Erd- und Versuchslasten in die Komponenten q_v und q_h vorgenommen.

Beispielhaft wird der Lastfall 6 mit $F = 430$ kN näher untersucht. Von der hierbei minimalen Erdüberdeckung $h_s = 1,64 - 1,20 = 0,44$ m wird noch eine plastische Bodenverformung von $0,07$ m abgezogen. Durch Auswertung der Scheitelverformungen in den Meßpunkten 1 sowie 90 bis 94 nach Bild 2 ergibt sich eine Setzungsmulde in Sammlerlängsrichtung, mit

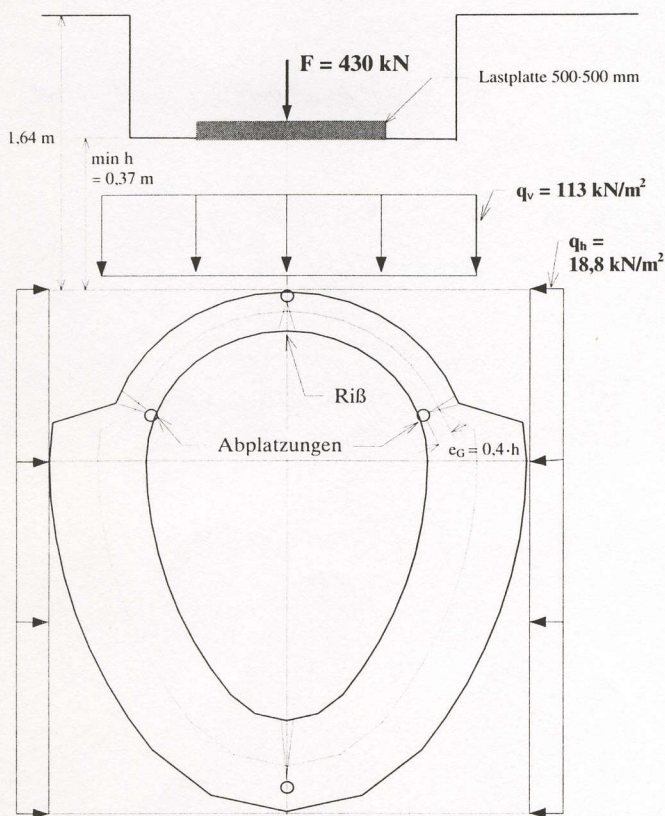


Bild 8: Belastung des Querschnitts bei Lastfall 6 ($F = 430$ kN), nach Entlastung beobachtete Schäden

deren Hilfe eine mittragende Sammlerlänge von $b_m = 3,27$ m ermittelt wird [6] (Kleinere Lasten ergeben dagegen kleinere mittragende Längen, da sich der Sammler im ungerissenen Zustand steifer verhält, der Querschnitt direkt unter der Lastplatte also mehr Last „anzieht“). Mit der Lastausbreitung $a_m = 0,50 + 2 \cdot 0,37 = 1,24$ m in Sammlerquerrichtung folgt die Scheitelbelastung

$$q_v = F / (a_m \cdot b_m) + \gamma_B \cdot h = 430 / (1,24 \cdot 3,27) + 19 \cdot 0,37 = 113 \text{ kN/m}^2$$

Die Erdüberdeckung neben der Abgrabung beträgt bis zum Kämpfer $h_K = 2,36$ m. Mit dem inneren Reibungswinkel des anstehenden Bodens von ca. $22,5^\circ$ folgt der horizontale Erd-druckbeiwert $K_{agh} = 0,45$, mit der Kohäsion $c \cong 1 \text{ kN/m}^2$ der Beiwert $K_{ach} = 1,34$ und damit der konstant angenommene seitliche Erd-druck:

$$q_h = K_{agh} \cdot (\gamma_B \cdot h_K + p_v) - K_{ach} \cdot c = 0,45 \cdot (19 \cdot 2,36 + 0) - 1,34 = 18,8 \text{ kN/m}^2$$

In Bild 8 ist die Spannungsverteilung am Sammlerumfang für den Lastfall 6 exemplarisch dargestellt.

5. Auswertung der Versuchsergebnisse

Die folgende Auswertung ist auf die wesentlichen Versuchsergebnisse beschränkt, Näheres s. [6]. Tabelle 2 enthält die gemessenen vertikalen Verformungsdifferenzen Δv_z und die aus den Verschiebungen der Sammlerwand berechneten Verdrehungen ψ_{S1} (Scheitel, linke Seite) und ψ_{K1} (Kämpfer links) für die Laststufen 100, 200, 300 und 430 kN. Den experimentell ermittelten Werten sind die mit dem Modell B_T berechneten Werte gegenübergestellt. Der Einfluß der Steifeiziffer E_S des Bodens auf die Ergebnisse ist – verglichen mit den übrigen Eingabeparametern – am größten; deshalb werden die Berechnungen für den Mittelwert und den Maximalwert der in [4] ermittelten Steifeiziffern durchgeführt. Die übrigen Parameter bleiben dabei unverändert: $\delta_a = 0^\circ$, $c = 1,0 \text{ kN/m}^2$ und $\varphi' = 22,5^\circ$.

Das Verhältnis zwischen den Scheitel- und Kämpferbogenverdrehungen ist aufgrund der Modellannahmen in allen Rechen-ergebnissen konstant

$$\psi_S / \psi_K = 3,1$$

und damit ungefähr gleich dem im Abschnitt 4.1 ermittelten Verhältnis. Allerdings ist der Rechenwert ca. 22% kleiner als der Versuchswert. Ein Grund hierfür kann in der nicht genau bekannten Lage des Gelenks im Bereich der Sohle liegen.

Eine Auftragung der Verformungsdifferenz Δv_z ist aus Bild 9 zu entnehmen. Zwei Ergebnisse sind bemerkenswert:

1. Die Berechnungen mit der Exzentrizität der Gelenke G_1 und G_2 von $e_G = 0,4 \cdot d$ sind eher konservativ und liefern im mittleren Lastbereich größere Verformungen. Eine zusätzliche Berechnung mit $e_G = 0,45 \cdot d$ (gestrichelte Kurve)

Last	Gel. zahl	Verformungs-messungen [3]			Modell B_T mit $E_S = 2,5 \text{ N/mn}^2$			Modell B_T mit $E_S = 4 \text{ N/mn}^2$		
		Δv_z	ψ_{S1}	ψ_{K1}	Δv_z	ψ_S	ψ_K	Δv_z	ψ_S	ψ_K
kN	-	mm	-	-	mm	-	-	mm	-	-
100	0	0,38	0,00090	-0,00022	0,09	0	0	0,09	0	0
200	3	1,38	0,00291	-0,00079	2,59	0,0049	-0,0016	1,95	0,0036	-0,0012
300	3	2,89	0,00605	-0,00158	5,43	0,0104	-0,0033	4,07	0,0077	-0,0025
430	3	7,33	0,01554	-0,00364	9,37	0,0180	-0,0059	6,97	0,0133	-0,0043

Tabelle 2: Vergleich der maßgebenden Meßergebnisse und der Modellberechnungen, $n_G =$ Anzahl der Gelenke, Exzentrizität der Gelenke G_1 und G_2 : $e_G = 0,4 \cdot d$, G_3 : $e_G = 0,25 \cdot d$

liefert dagegen im höheren Beanspruchungsbereich kleinere Verformungen als gemessen.

- Der Knick in den Kurven, der eine mögliche Zustandsänderung des Systems anzeigt, liegt für die Rechenmodelle bei $F \approx 100$ kN, während die experimentell ermittelte Kurve bei $F \approx 100$ kN und bei $F \approx 250$ kN deutliche Knicke aufweist.

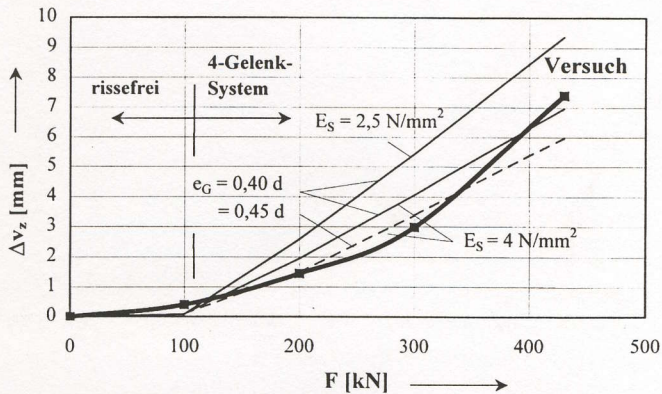


Bild 9: Vertikale Verformungsdifferenz des Sammlers bei Laststeigerung, Versuch und Rechenmodell

Zu Punkt 1 kann bemerkt werden, daß die bodenmechanischen Angaben stark streuen [4] und ebenfalls eher konservativ sind. Der Nachweis eines bestehenden Sammlers mit minimaler Steifeziffer dürfte also hohe Sicherheitsreserven enthalten.

Zu Punkt 2 ist anzumerken, daß in den Versuchen bereits für $F < 100$ kN Starrkörperverschiebungen gemäß Bild 7 nachzuweisen sind. Der zweite Knick bei $F \approx 250$ kN ist also auf andere Ursachen zurückzuführen, z. B. auf Versagen der Mauerwerksdruckzone und/oder plastisches Bodenverhalten. Die Sicherheit gegen Erreichen der Druckfestigkeit beträgt bei einer angenommenen Exzentrizität von $e_G = 0,45 d$ und bei $F = 300$ kN nur noch 1,4, so daß mit einem Versagen des

Druckzonenrandes durch Abplatzen von Mauerwerk zu rechnen ist. Dadurch verlagert sich das Gelenk nach innen, und es wird die höhere Kurve etwa für $e_G = 0,4 d$ maßgebend, was gut mit den Meßergebnissen übereinstimmt.

Ein Auftreten von *plastischem Bodenverhalten* kann nur grob abgeschätzt werden. Auch bei der Maximallast $F = 430$ kN wird der passive Erddruck rechnerisch noch nicht erreicht, allerdings sind bereits schon vorher überlineare Verformungen im Boden möglich.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß sowohl für die Gebrauchslast $F = 120$ kN als auch die Bemessungslast $\gamma F = 240$ kN die Lastverschiebungskurve eine vergleichsweise kleine Steigung hat und noch kein Grundbruch erfolgte.

Unmittelbar nach Abschluß des sechsten Versuchs mit maximaler Auflast wurde der Sammler am 18. Oktober 1995 inspiziert. Im Belastungsquerschnitt waren bleibende Verformungen des Scheitels von wenigen mm gemessen worden (Bild 7). Der zugehörige Scheitelriß war deutlich zu erkennen. Ebenfalls waren an den beiden Kämpfergelenken Abplatzungen zu sehen. Damit sind die rechnerischen Annahmen auch anhand der entstandenen Schäden bestätigt.

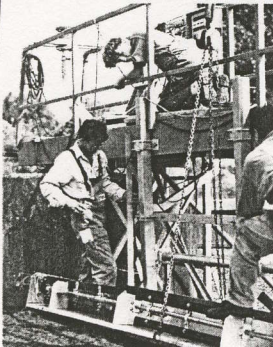
6. Übertragbarkeit des statischen Modells auf ähnliche Fälle

Die erzielten Ergebnisse sind auf die Eiform des Sammlers beschränkt. Diese Form ist jedoch z. B. in Bremen sehr verbreitet, so daß das entwickelte Berechnungsverfahren einen breiteren Anwendungsbereich hat.

Bei der *Nachrechnung der Versuche* hat sich gezeigt, daß sich die erheblichen Streuungen der relevanten Bodenkennwerte von ca. 400% [4] deutlich auf die Ergebnisse des Rechenmodells auswirken, falls mit Längsrissen gerechnet werden muß.

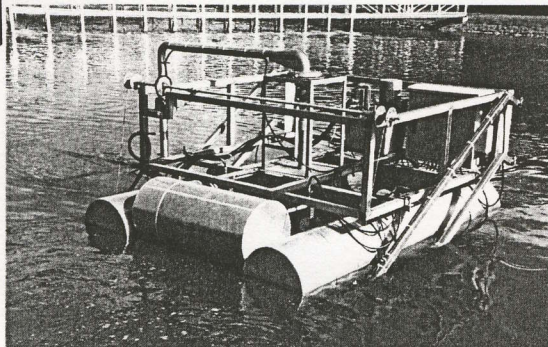
Schlammräumung

Schlammräumung auf dem Wasser



Haspel-Schwimmschlammrinne - nachträglicher Einbau in Rundbecken

Schlammräumung auf dem Boden



Boden-Schlammräumer - ferngelenkter Bodenräumer

KLAWA Anlagenbau GmbH
Bahnwiesenweg 6
34281 Gudensberg

Telefon:
05603/ 9325-0
Telefax: 05603/ 932522

Bei *rechnerischen Nachweisen der Standsicherheit* sollten die Minimalwerte der Bodenkennwerte verwendet werden. Auch mit geringen Bodensteifigkeiten läßt sich der Standsicherheitsnachweis häufig noch erfolgreich führen. Sollte dies nicht möglich sein, so ist gegebenenfalls weiterer Aufwand in die bodenmechanischen Erkundungen zu investieren. Auch wäre in solchen Fällen eine experimentelle Ermittlung der Standsicherheit sinnvoll und gegebenenfalls kostengünstiger als ein Neubau.

7. Fazit und Ausblick

In früheren Untersuchungen wurde die stützende Wirkung des Bodens allein durch den seitlichen aktiven Erddruck angenommen. Dies führte oft zu erfolglosen Ergebnissen und zu Unsicherheiten bei der Beurteilung der Standsicherheit des Sammlers.

Das nun erweiterte Tragmodell beruht auf der Annahme einer zunehmenden Rißbildung, bis das System ausschließlich durch die Bettung im Boden stabilisiert wird. Dieses Modell wird durch umfangreiche Auswertungen mit Hilfe der bei verschiedenen Laststufen gemessenen Verformungen überprüft und kalibriert. Bei Verwendung der Maximalwerte der Steifiziffer E_S zeigt das Last-Verformungs-Verhalten eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Versuchen.

Der zutreffenden Ermittlung der bodenmechanischen Kennwerte – hier insbesondere der Steifiziffer E_S – kommt damit eine besondere Bedeutung zu. Auf der anderen Seite lassen

sich durch die theoretische Nachweisführung, die in Ausnahmefällen auch durch Traglastversuche abgesichert werden müßte, erhebliche Kosten einsparen.

Die Bremer Entsorgungsbetriebe konnten in diesem eigenfinanzierten Projekt deutliche Fortschritte in Richtung einer realitätsnäheren Beurteilung der Reststandsicherheit von gemauerten Eiprofilen erzielen. Von den Ergebnissen profitiert auch die inzwischen mit der Abwasserbeseitigung in Bremen beauftragte Abwasser Bremen GmbH. Dies ist ein Beispiel dafür, daß wirtschaftlich orientierte Kanalsanierung nicht nur in der sachgerechten Auswahl einer zuverlässigen Bautechnik besteht sondern auch in der möglichst wirklichkeitsnahen Analyse des tatsächlichen Bauzustandes und einer darauf basierenden Bedarfsanalyse.

Literatur

- [1] Arbeitsblatt ATV-A 127 „Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen“, St. Augustin, 2. Aufl., 12/1988
- [2] Lohse, M.; Falter, B; Brüggesch, G.; Gitzel, R.: Methoden zur Bauzustandserfassung und -bewertung begehbarer Mauerwerkskanäle, *Korrespondenz Abwasser* 39 (1992) 368–376
- [3] Experimentelle Tragsicherheitsbewertung des Sammlers Scharnhorststraße/ Ecke Loignystraße in Bremen, Auftrag Nr. 9403, Labor für Experimentelle Statik, Hochschule Bremen, Prof. Dr.-Ing. Klaus Steffens, Bremen, 9. Mai 1996
- [4] Standsicherheitsuntersuchungen an gemauerten Abwassersammlern, Bremen Geotechnische Begleituntersuchungen – Geotechnischer Bericht 1, Objekt Nr. 94 5412 Grundbaulabor Bremen, Dipl.-Ing. Behnke, Bremen, 18. Dezember 1995 und Ergänzungen vom 29. August 1996
- [5] Materialuntersuchungen an einem gemauerten Abwassersammler. Abwassersammler in der Scharnhorststraße, Untersuchungsbericht Nr. 2257/95, Amtliche Materialprüfanstalt Bremen, 21. Dezember 1995
- [6] Experimentelle und rechnerische Standsicherheitsbewertung von gemauerten Abwassersammlern unter Berücksichtigung von Traglastversuchen an einem Sammler in der Scharnhorststraße, Bremen. Fachhochschule Münster, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Falter, 10. September 1996
- [7] Falter, B.: Wissenschaftliche Beratung zur Standsicherheit von gemauerten Mischwasserkanälen.
 - Herbststraße und Gustav-Deetjen-Allee, im Auftrag der Kulturtechnik GmbH, Bremen, 21. Februar 1991
 - Schwachhauser Heerstraße, im Auftrag der BEB, 27. Juni 1993
 - Waller Heerstraße, im Auftrag der BEB, 6. September 1993
- [8] Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980), Herausgegeben vom Arbeitskreis „Tunnelbau“ der Dt. Ges. für Erd- und Grundbau e. V., Essen
- [9] Falter, B.: Handbuch zum Programm MWKANAL 2.5 zur automatischen Nachweisführung gemauerter eiförmiger Kanäle ohne und mit Längsrisen, Münster 1996

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Falter
 Fachhochschule Münster
 Fachbereich Bauingenieurwesen
 Corrensstraße 25, 48149 Münster

Dr.-Ing. Georg Grunwald
 Abwasser Bremen GmbH
 Schiffbauerweg 22, 28237 Bremen

Prof. Dr.-Ing. Klaus Steffens
 Hochschule Bremen
 Labor für Experimentelle Statistik
 Neustadtswall 30, 28199 Bremen



Rundum Sicherheit am Schacht



mit

Schloß

Geländer

Einstiegtor

Einstieghilfe

Isolierung

Dunsthut

Eingetragen beim Deutschen Patentamt in München unter der Nr.: G93 18077.2

Der Spezialist für Rundum-Sicherheit am Schacht

Brockmann GmbH Anlagenbau

Borkenbergstraße 48-50 • 48249 Dülmen • Tel.: 02594/9454-0 • Fax: 02594/5634