LIS-Berichte

Nr. 96

Untersuchungen zu großvolumigen zylindrischen Behältern zur erdgedeckten Lagerung von druckverflüssigtem Propan, Butan und Ammoniak

Herausgeber

Landesanstalt für Immissionsschutz
LIS Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Straße 6 D 4300 Essen 1 Tel. (0201)7995-0

ISSN 0720-8499

1991

Untersuchungen zu großvolumigen zylindrischen Behältern zur erdgedeckten Lagerung von druckverflüssigtem Propan, Butan und Ammoniak

Prof. Dr. Friedrich Mang und Fritz Wolfmüller
Universität Karlsruhe (TH)

Dieses Untersuchungsprojekt wurde im Auftrag der
Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen (LIS)
durchgeführt.

Projektbetreuung und Redaktion:
Wolfgang von Borries und Helga Katzer, LIS

Herausgeber:
Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen

I n h a l t

		Seite
Zusammenfassung		7
Summary		9
1.	Vorbemerkungen und Einleitung	11
2.	Erdgedeckte Lagerung	13
2.1	Lagerungsweisen	15
2.2	Ausführung von Ammoniaklägern	18
2.3	Behälterkonstruktion	19
3.	Erforderliche Bodenuntersuchungen	24
3.1	Allgemeines	24
3.2	Methoden zur Bodenuntersuchung	24
4.	Einerdung der Behälter	27
4.1	Allgemeines	27
4.2	Nachträgliche Einerdung bestehender sattelgelagerter Zylinder	28
4.3	Umrüstung bestehender Tanklager	30
5.	Entwurf und Bemessung	30
5.1	Zusammenstellung der Lastfälle	30
5.2	Charakteristische Lastfälle	31
5.2.1	Erdschüttung und Lagerreaktionen	31
5.2.2	Erdbeben	37
5.2.3	Einwirkungen aus elastischer Bettung	38

Seite

6.	Bemessungsverfahren und statische Nachweise	40
6.1	Allgemeines	40
6.2	Überlagerung der Lastkomponenten in Umfangsrichtung	40
6.3	Störspannungen aus Innendruck	43
6.4	Spannungsnachweis	44
6.5	Stabilitätsuntersuchungen	45
7.	Herstellungsverfahren und Montageweisen	47
7.1	Konstruktive Grundsätze	47
7.2	Herstellungsverfahren für die Stahlbehälter	48
7.3	Konstruktion des Sandbettes und Einbau der Behälter	55
8.	Prüfung und Inspektion	61
8.1	Qualitätssicherung bei der Herstellung	61
8.2	Wasserdruckprobe	63
8.3	Wiederkehrende Prüfungen	63
8.4	Setzungskontrollen	64
9.	Literatur	67
10.	Anhang	71

Untersuchungen zu großvolumigen zylindrischen Behältern zur erdgedeckten Lagerung von druckverflüssigtem Propan, Butan und Ammoniak

Zusammenfassung*)

Von den gewohnten und bei bestehenden älteren Anlagen ausgeführten Bau- und Aufstellungsarten von Lagerbehältern für druckverflüssigte Gase wie liegende Zylinder auf Sätteln oder verschieden abgestützte Kugeln wird in den letzten Jahren vermehrt auf liegende zylindrische Behälter mit Erddeckung übergegangen.

Grund hierfür sind hohe Anforderungen an den Schutz dieser Lagerbehälter vor äußeren Einwirkungen, welche zum Versagen der Behälter und zur Freisetzung großer Mengen brennbarer und giftiger Gase führen können.

Die Abmessungen der Lagerbehälter sind zum Teil beträchtlich, da das Fassungsvermögen ähnlich wie bei Kugeln mehrere tausend Kubikmeter betragen kann.

Eine Obergrenze für Durchmesser und Länge der Lagerbehälter konnte bei den durchgeführten Untersuchungen nicht ermittelt werden. Demnach gibt es unterschiedliche Kriterien für eine Begrenzung der Abmessungen wie zum Beispiel Herstellungsweise der Bauteile, der Transport der Bauteile bzw. des kompletten Behälters sowie die Baugrundverhältnisse und Montagemöglichkeiten am Aufstellungsort. Die derzeit möglichen Abmessungen betragen bei Durchmessern bis zu neun Metern und bei den Längen bis zu einhundert Metern.

*) von Wolfgang von Borries und Helga Katzer

Die Konstruktion solcher großvolumiger Behälter wird nicht nur durch die Betriebsparameter Druck und Temperatur bestimmt, sondern auch durch statische Einflüsse auf den Behälter aufgrund von z. B. der Lagerungsweise (Sandbett, Pfahlgründung etc.) der Erddeckung (Höhe der Erddeckung, Befahrbarkeit, Schneelasten) und der Aufstellungsart (Graben, Hünengrab, Batterieanordnung). Die üblichen Berechnungen (z. B. aus AD-Merkblättern) sind alleine nicht ausreichend und können nur als Vordimensionierung verwendet werden.

Um große Mantelwanddicken zu vermeiden, werden die Behälter mit zusätzlichen Trageelementen (Ringstreifen) ausgestattet, denen die statischen Belastungen zugewiesen werden. Nach der normalen Auslegung ist ein zusätzlicher Spannungsnachweis für weitere Beanspruchungskomponenten wie Beulverhalten, Lagerpressung (resultierend aus der Erdschüttung), Längsbiegung zwischen Einzelsätteln oder infolge unterschiedlicher Setzungen des Behälters und Axialdruck (resultierend aus Reibung und Erddruck auf die Böden) erforderlich. Weiterhin sind Auswirkungen der Ringstreifen auf die Behälterschale zu berücksichtigen (Störspannung bzw. Kontaktpressung).

Als Grundlage für die statischen Berechnungen müssen umfangreiche Bodenuntersuchungen vorgenommen werden. Die daraus folgenden Voraussagen über das Setzverhalten des Behälters können während der Befüllung für die Wasserdruckprobe überprüft werden. Eine gleichmäßige Setzung des Behälters ist nicht als kritisch zu betrachten, wenn die Behälteranschlüsse entsprechend ausgelegt sind. Die Setzung des Behälters soll während des Betriebes in regelmäßigen Zeitabständen kontrolliert werden.

Summary

Studies of high-volume cylindrical tanks for underground storage of liquefied propane, butane and ammonia

Of the available storage tanks for liquefied gases such as horizontally aligned cylinders or spheres propped up on different support structures, increasingly underground horizontal cylindrical tanks have been preferred in the past years.

The reason for this is the high protection against external hazards which might cause damage of the storage tanks and trigger the release of large amounts of flammable and toxic gases.

The dimensions of some of these storage are enormous and, like spherical tanks, they may hold several thousand cubic meters.

In the studies no upper limit could be found for the diameter or length of such tanks. Instead, several factors were identified, which confine the dimensions such as the methods of manufacturing the various tanks sections and of transporting these or the assembled tanks as well as the type of soil and the intallation conditions at the site. Present tanks reach diameters of up to 9 m and lengths of up to 100 m.

The design of these high-volume tanks is influenced not only by operating parameters such as pressure and temperature but also by static parameters such as the foundation on which the tanks rest (sand bed, pile foundation etc.), the soil cover (thickness, are cars passing over, depth of snow cover) and the type of installation (in ditch, mounds, batteries). The customary calculations (e. g. as described in the AD-Merkblättern*) are helpful only in finding the preliminary dimensions.

*) german equivalent to ASME-Code

In order to avoid thick walls, extra supporting elements (rings) are installed to sustain the static burdens. Additional tests are necessary to determine buckling resistance, compression (through soil cover), deformation between individual supports or due to different settlement of the tank as well as axial pressure (resulting from friction and pressure on the soil). Moreover, the effects of supporting rings on the tank wall (tension or contact pressure) must be considered.

Extensive soil examinations are needed as input for the static calculations. Predictions on tank settlement resulting from the latter can be verified while filling the tank for the required water pressure test. Uniform settlement of the tank is not critical if connectiong pipes and fittings are designed accordingly. Tank settlement must be checked in regular intervals.

1. Vorbemerkung und Einleitung*

Das Lagern von druckverflüssigten Gasen mit giftigen oder brennbaren Eigenschaften sollte unter Gesichtspunkten der Störfall-Verordnung nur noch erdgedeckt erfolgen. Die Lagerbehälter sind dadurch am geeignetsten vor äußeren Einwirkungen geschützt. Für die Erddeckung eignen sich weniger Kugelbehälter sondern vielmehr zylindrische Lagerbehälter.

Unter druckverflüssigten Gasen sind hier insbesondere Propan, Butan und Ammoniak gemeint. Diese Gase sind bei Umgebungstemperatur und Atmosphärendruck gasförmig.
Da sie sich schon bei relativ geringen Drücken verflüssigen lassen, werden sie als druckverflüssigte Gase gehandhabt, d. h. transportiert und gelagert. Dadurch läßt sich eine erhebliche Raumersparnis erzielen.
Diese Eigenschaft kommt jedoch auch dann zum Tragen, wenn unerwünschte Gasfreisetzungen, zum Beispiel durch Leckagen, stattfinden. Das Volumen vergrößert sich bei Propan/Butan um ca. den Faktor 240 und bei Ammoniak um ca. den Faktor 600.
Aus freigesetzter Flüssigphase entsteht durch Spontanverdampfung eine Gaswolke, die dann sehr schnell große Bereiche der Umgebung gefährdet.

Die im Kraftwerksbereich gebauten Lagerbehälter für druckverflüssigtes Ammoniak sind entweder doppelwandig und erdgedeckt oder einwandig und nicht erdgedeckt aufgestellt und haben Fassungsvermögen bis 500 m^3.

Im Bereich der chemischen Industrie sind für Ammoniak wesentlich größere Lagerbehälter in Planung, zum Beispiel bis 3000 m^3.

Große Lagerbehälter sind aufgrund zu erwartender Probleme bei der Prüfung bisher nur einwandig ausgeführt worden. Da Ammoniak ein wassergefährdender Stoff der Wassergefährdungsklasse (WGK) 2 ist, müssen einwandige Lagerbehälter in einer Auffangwanne aufgestellt werden. Bei erdgedeckter Lagerung ist nur die Verwendung doppelwandiger Behälter mit Leckanzeigegerät zulässig.

*) von Wolfgang von Borries und Helga Katzer

Für die Lagerung von Propan, Butan und deren Gemische wurden Behälter bis 4000 m^3 Fassungsvermögen erstellt. Dabei werden in den letzten Jahren erdgedeckte, zylindrische Großbehälter gegenüber stützengelagerten bzw. flächengelagerten Kugelbehältern bevorzugt.

Sicherheitstechnische Anforderungen an Läger für brennbare und giftige druckverflüssigte Gase sind häufig diskutiert worden. Inzwischen sind solche Anforderungen in verschiedenen Richtlinien niedergeschrieben [18, 19, 20 - Fachliteratur siehe auch 1 - 17]. Sie werden bei der Planung und beim Bau von Neuanlagen wie auch bei der Nachbesserung bestehender Anlagen berücksichtigt.

Einer der unzähligen Diskussionspunkte war die Frage nach einer Größenbegrenzung für derartige Lagerbehälter.

Wie bereits erwähnt wurde, werden bei druckverflüssigten Gasen große Gasmengen in einer kleinen Volumeneinheit gelagert und bei einer unkontrollierten Freisetzung kann sich das Gas rasch und weit in die Umgebung einer Anlage ausbreiten.

Die Brennbarkeit, Explosionsfähigkeit und Giftigkeit der Gase macht es erforderlich, alle erdenklichen Maßnahmen durchzuführen, damit derartiges nicht eintreten kann. Eine Maßnahme wäre die Begrenzung des Fassungsvermögens eines Lagerbehälters.

Diese Maßnahme hat sich bei näherer Betrachtung als unsinnig erwiesen.

Die Aufteilung großer Volumen auf viele kleine Volumeneinheiten impliziert die Frage nach der Größe des Lagerbehälters, dessen Inhalt vollständig freigesetzt werden darf.

Es ist aber so, daß große Anstrengungen unternommen werden, um die Freisetzung von schon geringen Mengen Flüssiggas (< 50 kg) zu verhindern. Über die Freisetzung ganzer Behälterinhalte, auch wenn diese klein sind, kann nicht diskutiert werden. Dies bedeutet, Lagerbehälter müssen so gebaut und aufgestellt werden, daß sie nicht versagen können und ihr Inhalt nicht freigesetzt werden kann.

Viele kleine Lagerbehälter hätten zudem ein Vielfaches an Rohrleitungen, Behälteranschlüssen, Flanschverbindungen, Armaturen und MSR-Einrichtungen etc. zur Folge und würden die Anzahl möglicher Leckagestellen erhöhen.

Eine weitere Frage war, bis zu welcher Größe Lagerbehälter hergestellt werden können. Dies ist besonders wichtig bei den zylinderförmigen Lagerbehältern, da diese derzeit schon in Längen bis zu einhundert Metern gebaut werden.

Zur Klärung der Frage nach der konstruktiven Gestaltung und einer notwendigen Größenbegrenzung der Lagerbehälter in Abhängigkeit von der Lagerart, den Bodenverhältnissen und nicht zuletzt von dem zu lagernden Stoff, hat die LIS 1989 Untersuchungen zu dem Thema "Großvolumige zylindrische Behälter zur erdgedeckten Lagerung von druckverflüssigtem Propan, Butan und Ammoniak bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich Mang und seinem Mitarbeiter Herrn Dipl.-Ing. Fritz Wolfmüller an der Universität Karlsruhe (TH) in Auftrag gegeben.

Der Ergebnisbericht aus den abgeschlossenen Untersuchungen wird in diesem LIS-Bericht wiedergegeben.

2. Erdgedeckte Lagerung

Die zylindrischen Behälter werden in Gräben oder unter Erdaufschüttungen verlegt und werden primär durch Erdauflasten, Verkehrslasten aus Begehung, Schneelast, Betriebsfüllung und bei einer Drucklagerung durch den Innendruck beansprucht. Durch die Aufstellungsart sowie die Einlagerungsbedingungen werden Abmessungen, Konstruktion und Berechnungsansätze des stählernen zylindrischen Behälters bestimmt. So werden in Gräben in der Regel nur einzeln liegende Behälter mit Volumen bis ca. 400 m^3 und Durchmessern bis 4,0 m verlegt, während bei der oberirdischen Aufstellung unter einer Erdaufschüttung vorzugsweise mehrere Behälter in Batterieanordnung verlegt werden. Bei dieser Aufstellungsart kommen zur Zeit Behälter mit Fassungsvermögen bis zu 4000 m^3 bei Durchmessern bis 8,5 m und Längen bis 100 m zur Ausführung. Eine Begrenzung des technisch möglichen Behältervolumens ist im Hinblick auf die im Rahmen der statischen Berechnung nachzuweisenden Sicherheiten entsprechend der bestehenden Vorschriften nicht erforderlich.

Der größtmögliche praktikable Durchmesser wird gewöhnlich durch äußere Einflüsse bestimmt, wie z. B. den technischen Möglichkeiten der Hersteller, verkehrstechnischen Randbedingungen beim Transport der Bauelemente, wirtschaftlichen Aspekten sowie den örtlichen Gegebenheiten im Allgemeinen. Die maximale Zylinderlänge ist vorwiesend abhängig von den Baugrundverhältnissen, da der Einfluß von Setzungen auf die Konstruktion mit der Länge des Bauwerks zunimmt.

Bezugnehmend auf die bislang gewonnenen Erfahrungen liegen die praktischen Obergrenzen für Behälterdurchmesser und -länge aus wirtschaftlichen und fertigungstechnischen Gründen bei D = 9 m und L = 100 m.

Zur Abtragung der nichtrotationssymmetrischen Lastanteile wären große Mantelwanddicken erforderlich, weshalb Behälter dieser Größenordnung als ringversteifte Systeme ausgebildet werden. Besonders bei großen Durchmessern wird durch diese Versteifungselemente auch die Einhaltung der geforderten Toleranzen bei der Herstellung erleichtert.

2.1 Lagerungsweisen

Für die Auflagerung liegender Flüssiggaslagerbehälter mit Erdüberdeckung stehen folgende Möglichkeiten zur Wahl:

a) durchgehendes Stahlbetonfundament

b) Stahlbetonsättel; evt. mit Pfahlgründung

c) Sandbettlagerung

d) Sandbettlagerung in Kombination mit einer Winkelstützmauer

e) Sandbettlagerung innerhalb einer Betonwanne

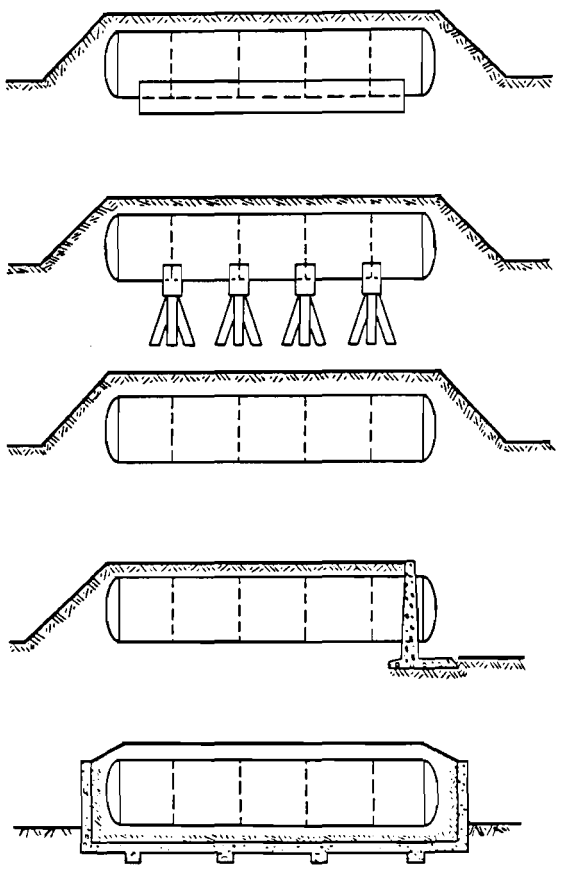


Bild 1: Lagerungsvarianten

Die kontinuierliche Lagerung auf einem starren Stahlbeton-Streifenfundament (a), dem alle auftretenden Beanspruchungen aus ungleichförmigen Setzungen zugewiesen werden können, kommt nur bei Behältern bis ca. 30 m Länge zur Ausführung. Dabei wird zwischen dem Stahlbetonsattel und dem stählernen Zylinder eine durchgehende Kunststoffbeschichtung als Polsterung angeordnet. Bei dieser Lagerungsweise treten keine nennenswerten Biege- und Schubbeanspruchungen in Behälterlängsrichtung auf.

Die Lagerung auf Einzelfundamenten (b), die wiederum auf Pfähle gegründet sein können, ist nur in Ausnahmefällen zu empfehlen, da unterschiedliche Setzungen einzelner Fundamente nicht vollkommen ausgeschlossen werden können. Mögliche Fundamentsetzungen müssen daher bei der statischen Berechnung berücksichtigt werden. Bei unterschiedlichen Setzungen der Erdaufschüttung und der Behältersättel entlang der Tankachse muß mit höheren Erdauflasten (s. Bild 10 b, c; Kap. 5.2.1) gerechnet werden. Es ist außerdem erforderlich, Gleitlager in den Sätteln zu schaffen, um so die Pfahlköpfe möglichst frei von Horizontallasten aus Temperatur- und Druckschwankungen zu halten. Festlager sollten im Hinblick auf die vorhandene Symmetrie der Reibungskomponenten entlang der Längsachse möglichst in der Behältermitte angeordnet werden. Wegen der örtlichen Lastabtragung reagieren sattelgelagerte Tanke gegenüber Erdbebenlasten empfindlicher als sandbettgelagerte Behälter, vor allem bei Belastung in Längsrichtung. Der Behälter ist ferner Biegebeanspruchungen in Längsrichtung aus Eigengewicht, Füllung und Erdauflast ausgesetzt, wobei Stabilitätsprobleme infolge Biegedruckspannungen zu größeren erforderlichen Zylinderwanddicken führen können. Die hohen örtlichen Auflagerlasten führen zu relativ schweren Aussteifungsringen im Sattelbereich. Je nach konstruktiver Ausführung können sich am Sattelhorn hohe Lagerpressungen ergeben, die durch entsprechende Polsterungen reduziert werden müssen. Die Polsterung sollte so dimensioniert werden, daß auch die Längsverschiebungen aus Temperatur- und Druckschwankung aufgenommen werden können. Der Auflagerwinkel soll mindestens 120° betragen. Bei der Bauausführung muß darauf geachtet werden, daß keine Hohlräume unter dem Behälter verbleiben, da sich sonst die Isolierung ablösen bzw. die kathodische Schützung nicht mehr voll aktiviert werden kann. Es ist ferner dafür Sorge zu tragen, daß die Sandschüttung unter dem Behälter nicht einfrieren kann, da sonst der Behälter von den Sätteln gehoben werden und die unplanmäßige Auflagerung im Feldbereich den Behältermantel überbeanspruchen kann.

Die Lagerung in einem definierten Sandbett (c) hat gegenüber den erstgenannten Versionen (a und b) entscheidende Vorteile:

- Die Gründung auf einem Sandbett ist die wirtschaftlich günstigste

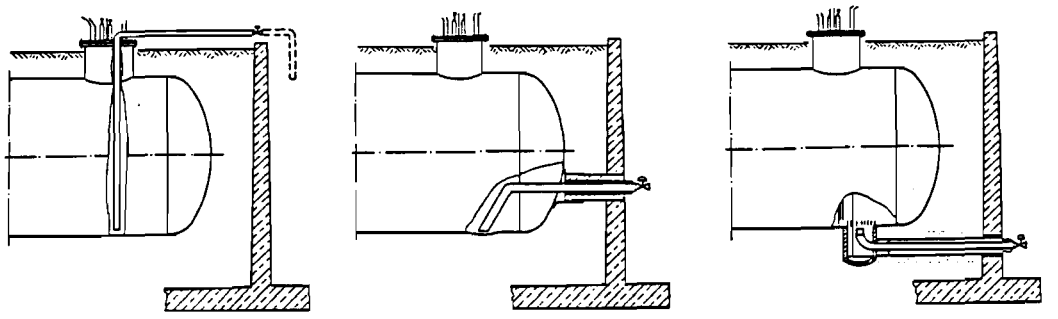
Version, wenn der Baugrund entsprechende Eignung vorweist.

- Die Übertragung der vertikal auf den Behälter wirkenden Lastkomponenten erfolgt in Längsrichtung kontinuierlich in das Sandbett, wodurch der Aufwand für Aussteifungsmaßnahmen reduziert wird.

- Jeder Teil des Behälters kann gegebenenfalls wieder zugänglich gemacht werden.

Der Sandbettlagerung hat jedoch eine detaillierte Baugrunduntersuchung vorauszugehen (s. Kap. 3), da große Setzungsunterschiede entlang der Längsachse in der Regel nicht gestattet werden können. Bei der statischen Berechnung ist der Einfluß des gegebenen Bettungsprofils auf die Lastverlagerung unbedingt zu berücksichtigen. Große Gesamtsetzungen können dagegen erlaubt sein, sofern die betriebsbedingte Verträglichkeit gewährleistet werden kann. In Fällen, in denen wegen zu großer oder zu ungleicher Setzungen weder eine Pfahlgründung noch eine Sandbettlagerung in Frage kommen, kann zur Aufnahme des Sandbetts eine Stahlbetonwanne mit biegesteifem Trägerrost errichtet werden (e).

Die weitaus meisten Tanklagerprojekte der letzten Jahre wurden in ein Sandbett gelegt. Dabei kam verschiedentlich auch die Variante d) zum Einsatz, die eine zugängliche Installierung der Entnahmeausrüstung in der Stirnseite zulässt. Die Zugänglichkeit des Behälterbodens ist jedoch ein großer sicherheitstechnischer Nachteil. Die Bilder 2a - c zeigen einige gebräuchliche Entnahmekonstruktionen. Bei den Versionen b) und c) sind zusätzliche Nachweise bzw. konstruktive Maßnahmen zum Schutz der Entnahmeleitungen erforderlich, da diese Erddruckbelastungen und Reaktionen aus Setzungen ausgesetzt sind. Bei der Anordnung von Winkelstützmauern in der Nähe der Böden muß die Längenänderung infolge von Innendruck- und Temperaturschwankungen durch geeignete konstruktive Maßnahmen (z.B. Polsterungen) kompensiert werden. Die Kontrollinstrumente und Sicherheitseinrichtungen werden in der Regel in einem oder falls erforderlich mehreren Domdeckeln installiert.



Entnahme von oben | Entnahme durch den Boden | Entnahme durch einen Pumpensumpf

Bild 2 a-c: Gebräuchliche Entnahmeversionen

Die gebräuchlichste Entnahmeweise sah bisher einen Pumpensumpf vor. Wegen der genannten Längsdehnungen muß auch dieses Konstruktionselement im Untergrund verschieblich sein, damit keine zusätzlichen Spannungen im Zylindermantel erzeugt werden. In jedem Fall ist die Gründung im Bereich des Pumpensumpfs gestört und zusätzliche Nachweise bezüglich der Bettungsreaktionen sind erforderlich (s. Bild 2c). Aus diesen Gründen sowie im Hinblick auf verschiedene Sicherheitsaspekte sollte eine Entnahme von oben bevorzugt werden.

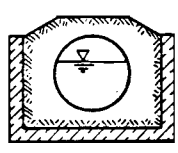
2.2 Ausführung von Ammoniaklägern

Aus wasserschutzrechtlichen Gründen (§ 15; Wasserhaushaltsgesetz) muß für wassergefährdende Stoffe die Dichtheit des Auffangraumes dauerhaft prüfbar sein. Aus diesem Grund ist eine einwandige Ausführung unter Erdschüttung zur Zeit nur genehmigungsfähig, wenn die Erdschüttung innerhalb eines kontrollierbaren Auffangraumes, z. B. in einer Betonwanne, erfolgt. In verschiedenen Bundesländern wird diese Variante wegen der möglichen Ausgasung bei einer Leckage und der schwierigen Prüfbarkeit des Auffangraumes generell nicht gestattet. Zur Zeit kommen zur Drucklagerung von Ammoniak die in Bild 3 dargestellten Bauweisen zur Ausführung.

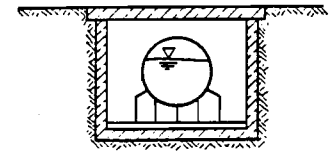
Einwandige Behälter in Sandbettlagerung oder auf Sätteln sollten so dimensioniert werden, daß auf Ringsteifen verzichtet werden kann. Dies ist im Sandbett bei zylindrischen Längen kleiner 4 x D bei Verwendung von Klöpperböden o. ä. in der Regel möglich. Bei sattelgelagerten Tanken sei

in diesem Zusammenhang auf die steifenlose Dimensionierung nach BS 5500 verwiesen (/14/).

a) doppelwandige Bauweise; oberirdisch



b) erdgedeckt in Betonwanne (einwandig; evtl. ringverstärkt)



c) gasdichter Betoncontainer (einwandig, sattelgelagert)

Bild 3: Bauweisen von Ammoniakbehältern

Ammoniakbehälter mit im produktberührten Innenbereich eingeschweißten ingsteifen sollten wegen der Begünstigung von Spannungsrißkorrosion nicht ausgeführt werden. Bei doppelwandigen Ammoniakbehältern wird in der Regel der Außenbehälter durch Ringsteifen für die Aufnahme der nichtrotationssymmetrischen Lasten verstärkt und, wie in den folgenden Kapiteln dargestellt, berechnet und konstruiert. Der Innenbehälter wird ohne Aussteifungen für Innendruck dimensioniert und auf einem Trägerrost mit Teflonbeschichtung gelagert.

2.3. Behälterkonstruktion

Die Zylinderschale erdbedeckter Flüssiggaslagerbehälter hat gleichzeitig tragende und auch raumabschließende Funktionen zu übernehmen. Neben dem Innendruck wird die Zylinderschale durch das Füllgewicht, das Eigengewicht und die Erdschüttung belastet. Um diese nicht-rotationssymmetrischen Beanspruchungen insgesamt aufnehmen zu können, werden große Behälter als ringversteifte Zylinder ausgebildet. Diese Aussteifungsringe bieten der Zylinderschale die Möglichkeit der Abstützung über Schubkräfte und begrenzen die Beulwellenlängen der druckbeanspruchten Schalen-

teile.
Aussteifungsringe können entweder über den ganzen Umfang mit dem Mantel verschweißt oder lose eingepasst werden. Bei eingeschweißten Ringen erfolgt die Lastverlagerung in den versteiften Bereich unmittelbar über Schubkräfte. Die angreifenden Lasten werden von dem aus der mittragenden Breite des Mantels und dem Ringprofil gebildeten Gesamtquerschnitt aufgenommen. Bei losen Ringen erfolgt eine Lastumlagerung über Schubkräfte im Mantel in den Bereich des Ringes, der jedoch nicht schubsteif mit dem Mantel verbunden ist sondern über Kontaktpressung belastet wird. Die Vor- und Nachteile dieser Varianten sind im folgenden aufgeführt:

Eingeschweißte Ringe

Vorteile:

Durch die Abtragung der einzelnen Teillastfälle durch den zusammengesetzten Querschnitt kann bei entsprechender Dimensionierung der Ringsteife ein niedriger Membranspannungszustand in der Umgebung der Ringsteife als in der freien Schale erreicht werden, die in der Regel für den Innendruck allein dimensioniert und somit optimiert werden kann.

- Die Einhaltung der vorgegebenen Fertigungstoleranzen wird durch das Einschweißen der vorgefertigten Ringe vor allem bei großen Behältern erleichtert.

- Schweißnahtkreuzungen und Öffnungen für die Totalentleerung können durch Stegblechaussparungen bewerkstelligt werden.

- Im Innern sind keine Einbauten zur Stabilisierung erforderlich.

- Längsdehnungen werden durch die Ringe nicht behindert.

Nachteile:

- Für die Schweißverbindung Mantel - Stegblech sind umfangreiche zerstörungsfreie Prüfungen erforderlich.

- Im Bereich der Schweißverbindung Mantel - Stegblech ergeben sich hohe Störspannungen, die insbesondere im Hinblick auf die Begünstigung von Spannungsrißkorrosion bei entsprechenden Lagermedien (wie z. B. Ammoniak) als kritisch anzusehen sind.

- Bei der Nachrüstung bestehender Anlagen ergeben sich Probleme bei der Einschweißung infolge von Passungsschwierigkeiten, Zwangslagenschweißung, Wärmewirkung und gegebenenenfalls erforderlicher Wärmebehandlung.

Lose Ringe:

Vorteile:

- Die Schweißverbindung mit der drucktragenden Wandung entfällt. Dadurch reduziert sich der Aufwand für zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen. Bei der Nachrüstung bestehender Anlagen ist kein weiterer Prüfaufwand für die drucktragenden Bauteile zu leisten.

- Da nur geringe Störspannungen im Behältermantel auftreten, können lose Ringe auch bei spannungsrißkorrosionsgefährdeten Behältern eingesetzt werden.

- Bei der Nachrüstung bestehender Anlagen können lose Ringe ohne Beschädigung des Behälters und ggfs. seiner Isolierung durch Wärmewirkungen vergleichsweise einfach installiert werden.

Nachteile:

- Infolge der Kontaktpressung zwischen Mantel und Ring können sich im Mantel zusätzlich zur Belastung aus Innendruck örtliche Zugbeanspruchungen in Umfangsrichtung ergeben, die unter Umständen zu einer größeren erforderlichen Zylinderwanddicke führen können.

- Zur Stabilisierung und Fixierung der losen Ringe sind konstruktive Einbauten im Behälter erforderlich.

- Um eine flächenhafte Lasteinleitung gewährleisten zu können, muß der Luftspalt zwischen Ring und Mantel möglichst geschlossen werden. Es sind daher hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit zu stellen.

- Da lose Ringe meist als I-Querschnitt ausgeführt werden, sind Öffnungen für die Totalentleerung mit entsprechendem konstruktiven Aufwand verbunden.

Bei der Festlegung der Zylinderwanddicke sind neben festigkeits- und stabilitätstheoretischen Anforderungen auch herstellungs- und montagebedingte Belange zu berücksichtigen, zumal große Flüssiggaslagerbehälter vorwiegend auf der Baustelle gefertigt werden. Es erwiesen sich folgende Konstruktionskriterien als vorteilhaft.

$$\frac{\text{Zylinderdurchmesser}}{\text{Zylinderwanddicke}} \quad \frac{D}{t_z} \leq 400 \quad \text{bzw.} \quad t_z \geq \frac{D}{400}$$

$$\frac{\text{Zylinderdurchmesser}}{\text{Höhe der Ringsteife}} \quad \frac{D}{h} \geq 10 \quad \text{bzw.} \quad h \leq D/10$$

$$\frac{\text{Zylinderdurchmesser}}{\text{Ringabstand}} \quad \frac{D}{l_r} \geq 0{,}5 \quad \text{bzw.} \quad l_r \leq 2D$$

In Bild 4 sind die wesentlichen Konstruktionselemente und Bezeichnungen zusammengestellt.

D_a: Außendurchmesser
t_z: Wanddicke der Zylinderschale
t_B: Wanddicke der Böden
h: Steghöhe des Rings

l_r: Ringabstand
l_z: Länge der Zylinderschale
l_o: Gesamtlänge

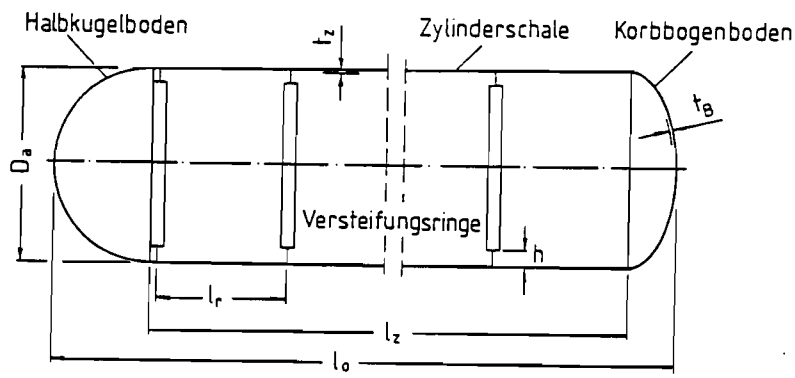
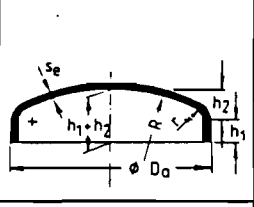
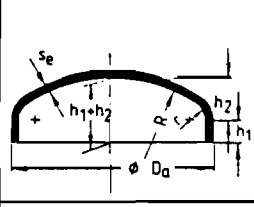
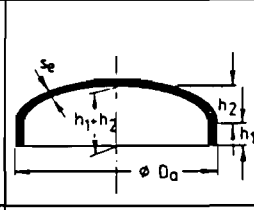
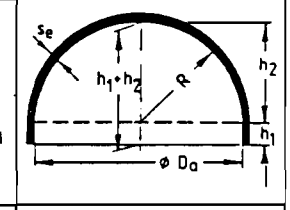


Bild 4: Konstruktionselemente

Als Böden für erdgedeckte Zylinder werden vorzugsweise Klöpper- oder Korbbogenböden verwendet, da deren querschnittserhaltende Wirkung im Gegensatz zu Halbkugelböden erheblich größer ist und im Übergang zum Zylindermantel keine zusätzliche Ringsteife angeordnet werden muß.

Ausschnitte und Stutzen werden von der Problematik der erdgedeckten Lagerung nicht berührt und können nach einschlägigem Regelwerk bemessen werden.

Bodenformen

	Klöpperboden	Korbbogenboden	Ellyptischer Boden	Kugelboden
Abkürzungen $\frac{s_e}{2} + r = F$ $D_a - s_e = n$ $\frac{D_a}{2} - s_e - r = m$ $\frac{D_a}{2} - s_e = p$ (in mm einsetzen)				
Geltungsbereich	$R = D_a \quad r = 0{,}1\ D_a$ $0{,}001 \le \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \le 0{,}1$	$R = 0{,}8\ D_a \quad r = 0{,}154\ D_a$ $0{,}001 < \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \le 0{,}1$		$R = 0{,}5\ D_a$ $\frac{D_a}{D_i} \le 1{,}2$
Geometrie innere Höhe [mm]	$h_1 + h_2 = h_1 + 0{,}1935\ D_i - 0{,}445\ s_e$	$h_1 + h_2 = h_1 + 0{,}225 D_a - 0{,}635\ s_e$	$h_1 + h_2 = h_1 + \frac{D_i}{3{,}8}$	$h_1 + h_2 = h_1 + \frac{D_i}{2}$
Oberfläche der neutralen Faser [mm²]	$A = n\ (0{,}99\,n + \pi \cdot h_1)$	$A = n\ (1{,}08 \cdot n + \pi \cdot h_1)$	$A = \pi \cdot g\ (1{,}41078 \frac{n}{2} + 2h_1)$	$A = \frac{\pi}{2} \cdot n^2 + \pi \cdot n \cdot h_1$
Inneres Volumen [m³]	$V = (0{,}1\ D_i^3 + 0{,}785\ D_i \cdot h_1) \cdot 10^{-9}$	$V \approx (0{,}1298\ D_i^3 + 0{,}785\ D_i^2 \cdot h_1) \cdot 10^{-9}$	$V = (0{,}138\ D_i^3 + 0{,}785\ D_i^2 \cdot h_1) \cdot 10^{-9}$	$V = (\frac{1}{12} \cdot \pi \cdot D_i^3 + \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot h_1) \cdot 10^{-9}$
Bordhöhe h_1 [mm]	$h_1 = 3{,}5\ s_e$	$h_1 = 3{,}0\ s_e$		

Sie braucht jedoch folgende Maße nicht zu überschreiten:

Wanddicke s_e	Bordhöhe h_1
bis 50 mm	150 mm
über 50 mm bis 80 mm	120 mm
über 80 mm bis 100 mm	100 mm
über 100 mm bis 120 mm	75 mm
über 120 mm	50 mm

Bild 5: Bodenformen

3. Erforderliche Bodenuntersuchungen

3.1. Allgemeines

Das Setzungsverhalten des Baugrunds kann einen entscheidenden Einfluß auf Konzeption und Bemessung erdgedeckter Zylinder ausüben und bedarf daher einer eingehenden Untersuchung, die nur von Instituten oder Stellen mit entsprechender Qualifikation ausgeführt werden sollten.

Die in der Regel ungleichmäßige Bodenbeschaffenheit führt zu ungleichen Setzungen entlang der Behälterachse und somit zu zusätzlichen Beanspruchungen der Konstruktion. Das Setzungsverhalten im Zusammenhang mit der Bodensteifigkeit bestimmt die Bettungsmodulverteilung, die zur statischen Berechnung sandbettgelagerter Tanks benötigt wird.
Bei sattelgelagerten Tanks können ungleiche Setzungen erhöhte Beanspruchungen an einzelnen Sätteln und im Extremfall das Abheben des Zylinders von einzelnen Lagern bewirken.

3.2. Methoden zur Bodenuntersuchung

Im wesentlichen werden Bodenuntersuchungen auf der Baustelle mit Hilfe von

- Kernbohrungen
- Rammsondierungen nach DIN 4094

durchgeführt, wobei die zu untersuchenden Punkte möglichst gleichmäßig über das Tankfeld bzw. die Zylinderachse verteilt werden sollten.
Die an zwei konkreten Bauwerken durchgeführten Bodenuntersuchungen sind in den Bildern 6 u. 7 dargestellt.
Durch die genannten Methoden sollen Daten geliefert werden zu

Bodenbeschaffenheit
- Schichtfolge
- Bodenklassifizierung
- Steifigkeit
- spez. Gewicht
- Korngrößenverteilung

Lagerungsdichte
- Proctordichte
- Eindringwiderstand

Grundwasserverhältnisse

Für die Gründung auf Kiessandböden oder anderen steifen Bodenmaterialien reichen die obengenannten Verfahren in der Regel aus, um zuverlässige Aussagen bzgl. des Setzungsverhaltens und der Bettungsmodulverteilung machen zu können.

Bei kohäsiven oder organischen Böden können ferner Laboruntersuchungen bzgl. nachfolgender Daten erforderlich sein:

- Korngrößenverteilung
- Durchlässigkeit
- Porengehalt
- Plastizität
- Wassergehalt
- Druck- Setzungsverhalten
- Scherfestigkeit
- Kohäsion
- Konsistenz
- chemische Analyse (korrosionsfördernde Stoffe)

Während bei Kiessandböden die Setzungen bereits nach wenigen Monaten abklingen, werden die Endsetzungen bei organischen oder kohäsiven Böden erst nach längeren Zeiträumen erreicht, die aufgrund der o.g. Daten abgeschätzt werden können. Das Zeit- Setzungsverhalten wird charakterisiert durch

- Sofortsetzungen ca. 5 %
- Primärsetzungen ca. 20 - 60 %
- Sekundärsetzungen ca. 40 - 75 %

Bei solchen Baugrundverhältnissen sind daher sehr aufwendige Untersuchungen vor Ort und im Labor erforderlich.

Das in Bild 6 dargestellte Tanklager wurde auf organischem Boden gegründet. Den Kernbohrungen vor Ort folgten umfangreiche Laboruntersuchungen zu den obengenannten Punkten. Die meisten anderen, sandbettgelagerten Projekte wurden auf Kiessandböden gegründet, wobei verschiedentlich organische Oberflächenschichten entfernt und durch Sandschüttungen ersetzt wurden. Ein Beispiel für die hierfür erforderlichen Bodenuntersuchungen ist in Bild 7 dargestellt.

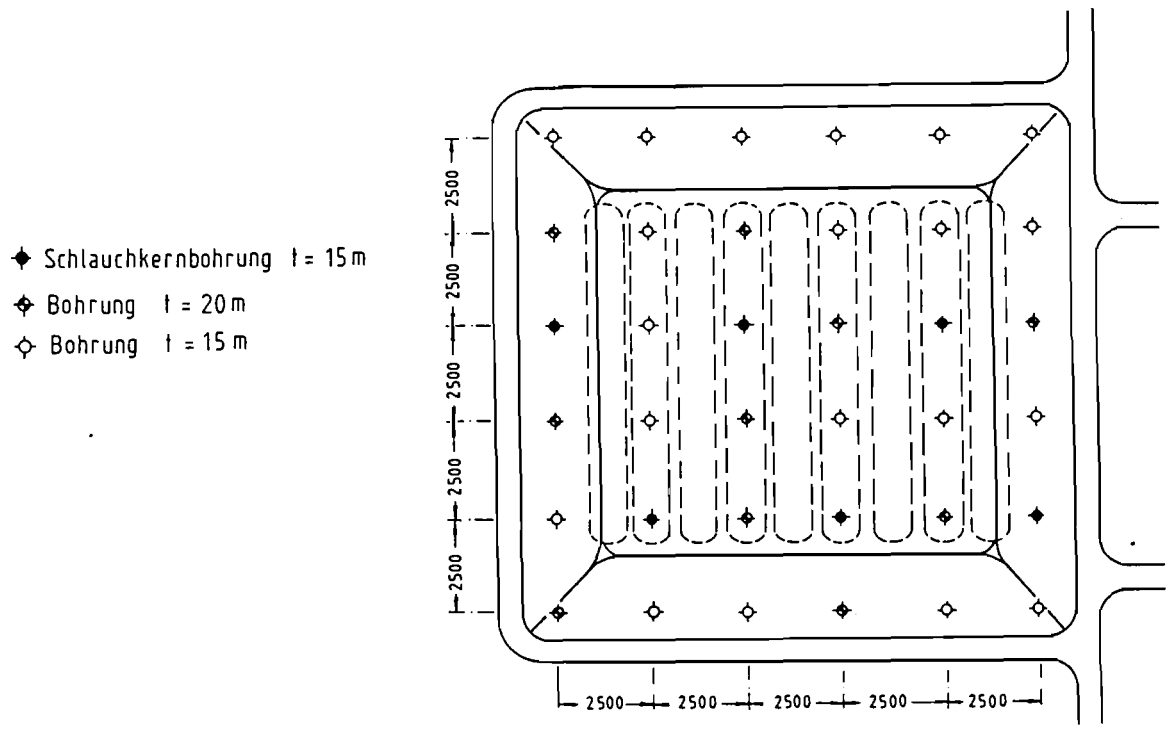


Bild 6: Bodenuntersuchungen für ein Tanklager auf organischem Boden

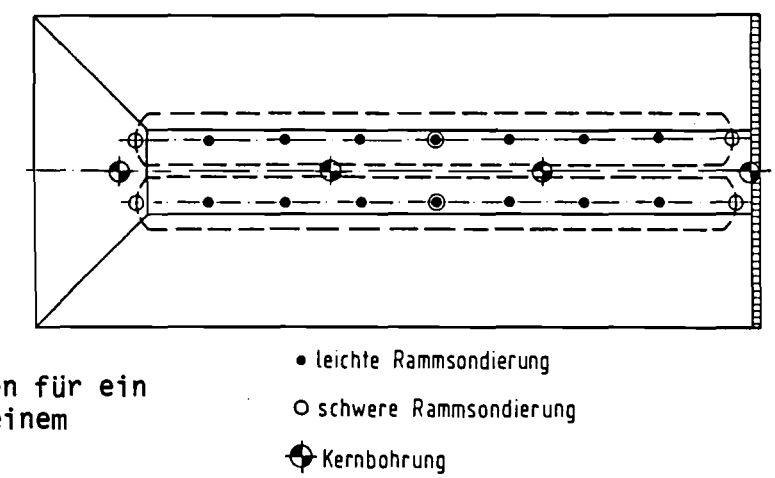


Bild 7: Bodenuntersuchungen für ein Zylinderpaar auf einem Kiessandbaugrund

4. Einerdung der Behälter

4.1 Allgemeines

Der Sinn der Erdüberschüttung liegt u. a. darin, den Behälter vor äußeren Einflüssen, wie z. B. Hitzestrahlung im Brandfall und Explosionseinwirkungen wie fliegende Trümmer und Druckwellen, zu schützen. Zur Erreichung dieser Schutzwirkung soll die Erdüberdeckung mindestens 1 m betragen. Die Neigung der Flanken darf den inneren Reibungswinkel des Schüttungsmaterials nicht überschreiten und sollte im allgemeinen nicht steiler als 33° sein.

Das tragende Sandbett sowie die unmittelbar den Behälter berührenden Schichten sollten aus sauberem Sand bestehen, der weniger als 10 Gew% bindige Anteile und weniger als 3 Gew% organische Bestandteile aufweist. Die Korngröße sollte in unmittelbarer Nähe des Zylindermantels 2 mm nicht überschreiten. Eine chemische Analyse des Sandes sowie des Grundwassers im Hinblick auf korrosionsfördernde Bestandteile ist empfehlenswert. Die nichttragenden Teile der Erdschüttung müssen gegen Erosionseinflüsse geschützt werden. Dies kann durch eine Begrünung erreicht werden, wenn die äußere Erdschicht mit ausreichenden lehmigen Anteilen versehen wird. Zur Stabilisierung der Erdschüttung nach der Einbauphase können Böschungsmatten verwendet werden, die der Bepflanzung Halt geben und der Auswaschung der unbefestigten Deckschichten entgegenwirken.

Ausführliche Angaben zur Konstruktion des tragenden Sandbettes und der Erdüberschüttung sind Kap. 7.3 zu entnehmen.

4.2 Nachträgliche Einerdung bestehender sattelgelagerter Zylinder

Im Zuge immer schärfer werdender Sicherheitsauflagen sollen auch bereits bestehende Lagerbehälter nachträglich unter eine Erdschüttung gelegt werden. Eine solche Maßnahme ist jedoch nicht ohne erheblichen konstruktiven Aufwand durchzuführen.

Die bestehenden Sattellager können in der Regel nicht beibehalten werden, da sie - bzw. die von ihnen beeinflußten Behälterquerschnitte - nicht in der Lage sind, die zusätzlichen Lagerkräfte aus der Erdschüttung aufzunehmen. Hinzu kommt noch eine erhebliche Horizontalbelastung auf das Festlager, die aus Reibungseffekten bei Längsdehnung infolge Druck- oder Temperaturschwankung zwischen dem Behälter und dem umgebenden Erdreich herrühren, und denen die Unterkonstruktionen und Fundamente meist nicht gewachsen sind. Weitere Probleme entstehen durch ungewollte Lagereffekte durch Erdanfüllung unter dem Behälter, die z. B. bei Frost entstehen können. Ferner wird wegen der Erdauflast in der Regel auch zwischen den Sätteln das nachträgliche Einbauen von Ringen erforderlich.

Konsequenterweise ist es für einen solchen Behälter am besten, ihn in ein neues zu errichtendes Sandbett zu legen und entsprechend auszurüsten.

Bei kürzeren Behältern besteht andererseits die Möglichkeit, zwischen den Sätteln ein durchgehendes Stahlbetonfundament einzubauen, so daß auf eine Neugründung verzichtet werden kann. Das nachträgliche Einbauen von Ringsteifen kann jeodch auch hier erforderlich sein.

Aus verschiedenen technischen Gründen ergeben sich beim nachträglichen Einschweißen von Verstärkungsringen in bestehende Behälter Schwierigkeiten (Anpassung, Vorwärmen, Zwangslage, Schweißverfahren).

Es empfiehlt sich daher die Verwendung von losen Ringen, die als Segmente hydraulisch eingepaßt und dann geschlossen werden, ohne eine feste Verbindung mit der Behälterwand einzugehen. Die zusätzlichen unsymmetrischen Belastungen könnnen dann von den Ringen allein aufgenommen werden. Belastungen aus Innendruck wirken dagegen ausschließlich auf die Behälterschale und es entstehen keine zusätzlichen Spannungsspitzen an den Schweißstellen der Ringe. Im Bereich der Kontaktfläche zwischen Ring und Mantel ergeben sich aufgrund der Pressungen zusätzliche Zugbeanspruchungen im Mantel, die bei der Berechnung zu berücksichtigen sind. Die einzelnen Ringe müssen durch geeignete konstruktive Maßnahmen in ihrer Position gehalten werden (z. B. Verbände, Knaggen, rahmenartige Hilfskonstruktionen).
Bei der Anwendung loser Ringe sind hohe Anforderungen bezüglich der Toleranzen zu stellen. Der Luftspalt zwischen Mantel und Ringflansch sollte möglichst geschlossen wein, was durch ein hydraulisches Einpreßverfahren bei genauer Zentrierung der Ringe gewährleistet werden kann.

Aus statischen Gründen unproblematisch sind dagegen teilweise Anschüttungen bis zur halben Zylinderhöhe, die eine mögliche Unterfeuerung verhindern sollen. Hierbei muß durch konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden, daß keine ungewollten Lagerpressungen (z. B. durch Einfrieren und Aufquellen der Anschüttung) auf den Zylinder einwirken. Dies kann z. B. durch Polsterung des betroffenen Behälterbereichs mit ausreichend kompressiblem, nicht brennbarem Material erfolgen. Diese Maßnahme ist auch bei vollständiger Einerdung von sattelgelagerten Tanken erforderlich.

4.3 Umrüstung bestehender Tanklager

Bei der Nachrüstung bestehender sattelgelagerter Zylinder für eine vollständige Einerdung ergeben sich hohe Kosten, wenn in Inneren der Behälter Verstärkungsringe eingebaut werden müssen. Bei der Montage der Ringe resultieren diese vor allem aus arbeitsintensiven Einpassungs- bzw. Schweißarbeiten. Die bestehenden Sattellager müssen in der Regel für die aus Erdauflast resultierenden Lasten verstärkt oder entfernt und durch Neukonstruktionen ersetzt werden. Zudem müssen alle in den Stirnseiten angebrachten Durchgänge entfernt und in den Bereich der Zylinderschale, vorzugsweise in die Domdeckel, gelegt werden.

Eine nachträgliche Einerdung ist aus diesen Gründen in der Regel problematisch und teuer, weswegen auch andere Maßnahmen zur Brand- und Explosionsschutzwirkung erwogen werden können, wie z. B. eine teilweise Anschüttung zum Schutz gegen Unterfeuerung in Verbindung mit einem Berieselungssystem oder Verkleidung der freiliegenden Zylinderschale, sofern die vorgegebenen Sicherheitsanforderungen durch die genannten Maßnahmen befriedigt werden können.

5. Entwurf und Bemessung

5.1 Zusammenstellung der Lastfälle

Während der Montage, des Transports und des Einbaus im Sandbett, vor allem aber während der Druckprobe sowie im zumeist maßgebenden Betriebslastfall sind eine Vielzahl von Belastungskomponenten zu berücksichtigen:

Montagezustand:	Eigengewicht, Transport
1. Druckprobe:	Eigengewicht, Wasserfüllung Probedruck
(ohne Erdschüttung)	Unterschiedliche Setzungen
Betrieb:	Eigengewicht, Betriebsfüllung, Berechnungsdruck, Erdschüttung, Verkehrslast, Unterschiedliche Setzungen, Temperatur, Reibung bei Längsdehnung Passiver Erddruck auf Böden, Unterdruck
2. Druckprobe: (mit Erdschüttung)	wie Betrieb, zusätzlich: Wasserfüllung, Probedruck

5.2. Charakteristische Lastfälle

5.2.1 Erdschüttung und Lagerreaktionen

Die für erdgedeckte Zylinder typische Problematik ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Erdschüttungskomponenten und den zugehörigen Lagerreaktionen in Umfangs- sowie in Längsrichtung.

Dem Neubau von großen erdüberschütteten Druckbehältern für Flüssiggas haben daher umfangreiche Bodenuntersuchungen vorauszugehen, um Gründungsmaßnahmen sowie für die Bemessung der stählernen Behälter anzusetzende Erddruckbelastungen formulieren zu können. Dabei sind nicht nur die Wechselwirkungen zwischen den erdverlegten stählernen Zylindern und den umgebenden Erdstoffen in Behälterumfangsrichtung, sondern ebenso in Behälterlängsrichtung zu untersuchen.

Belastungsfunktion aus Erdüberschüttung

Die Belastungsordinaten sind abhängig von verschiedenen Parametern

- dem Verhältnis der Überschüttungshöhe zum Behälterdurchmesser
- dem Setzungsverhalten des in Längsrichtung angrenzenden Geländes
- der Lage des Behälters in der Erdschüttung (zentrale Lage, Randlage)
- dem Abstand der Behälter untereinander

Bei der Hünengrablagerung kann man in der Regel von geringen Überschüttungshöhen ausgehen, so daß die für in Grabenlagerung verlegte Rohrleitungen in der Fachliteratur angegebenen Berechnungsansätze hier nicht angewendet werden können. Insbesondere kann seitlicher Erddruck wegen der fehlenden seitlichen Fixierung der Erdschüttung nicht angenommmen werden.

Die Annahmen bzgl. der Auflastfigur sowie der Lagerpressungsverteilung sind weitgehend von den Baugrund- und Erdschüttungsverhältnissen abhängig und sollten daher in Abstimmung mit einem Baugrundexperten getroffen werden.
Bild 8 zeigt verschiedene Pressungsverläufe in Abhängigkeit von der Boden- und Behältersteifigkeit, die nach der FE-Methode ermittelt wurden.
Ein Vergleich der aus den verschiedenen Pressungsverteilungen errechneten Schnittgrößen zeigt, daß die für sehr steife Behälterkonstruktionen bei gleichzeitig "weichen" Bettungsverhältnissen sich ergebende cos-Funktion als ungünstigste Annahme angesehen werden kann, und daher zur Bemessung herangezogen werden sollte, wenn vom Bodengutachter keine anderen Vorgaben gemacht werden können.
Für einen sandbettgelagerten Behälter, bei dem eine Verdichtung von min. 95 % Proctordichte bis zur halben Höhe des Behälterquerschnitts gewährleistet werden kann, wird ein Belastungssystem nach Bild 9 bei einem Bettungswinkel γ_o = 90° empfohlen. Die Lagerpressungsverteilung gilt entsprechend auch für die anderen Lastfälle mit Ausnahme der ersten Wasserdruckprobe in nichterdgedeckten Zustand.

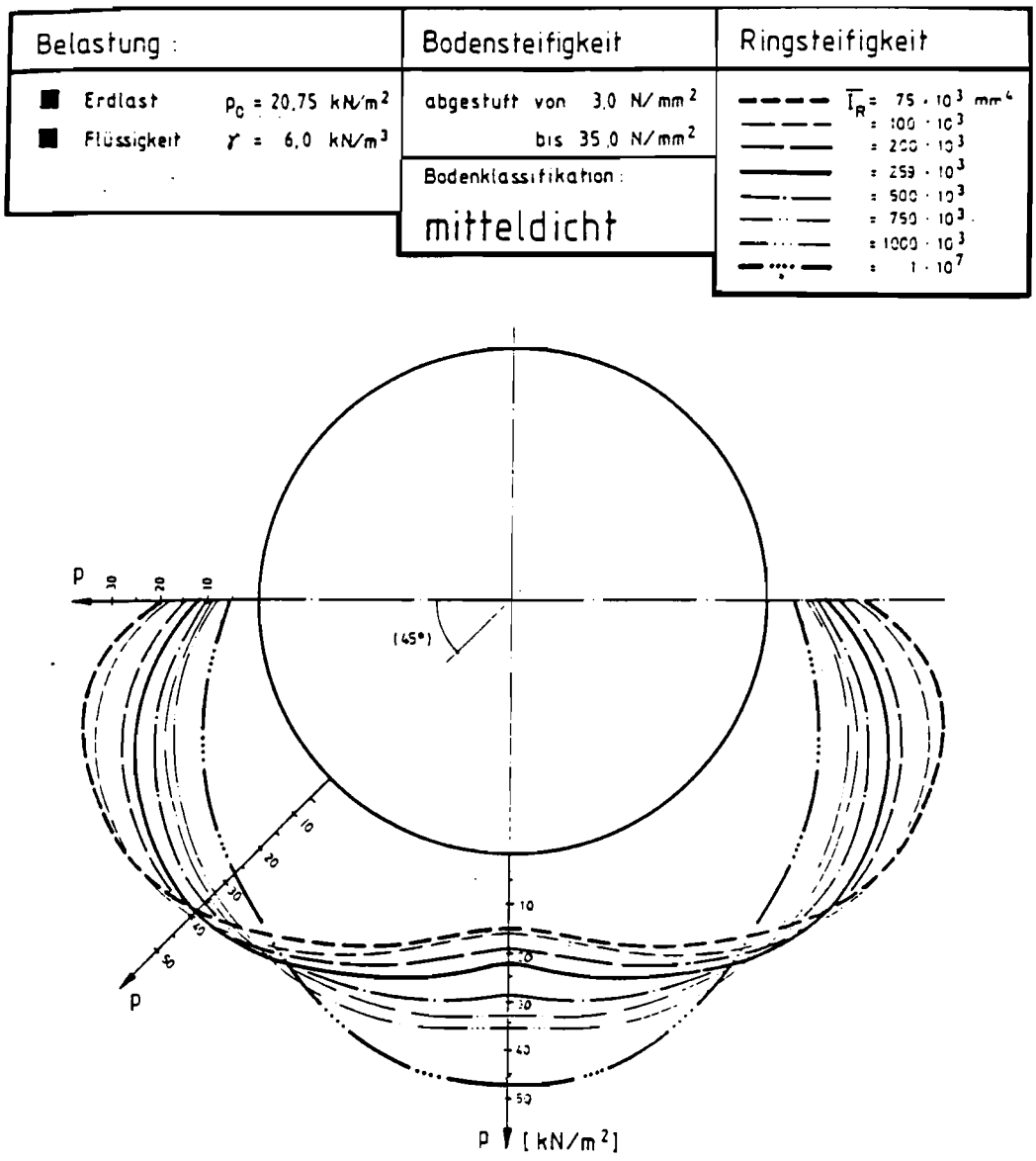


Bild 8: Pressungsverteilung in Abhängigkeit der vorhandenen Boden- und Verstärkungsringsteifigkeiten an einem nach der Finite Element Methode untersuchten Modellbehälter

Für die Hünengrablagerung im Sandbett bietet sich an, den radial wirkenden Anteil der Überschüttungsordinate als Belastungsfunktion anzusetzen. Daraus ergibt sich die in Bild 9 dargestellte Belastungsfunktion.

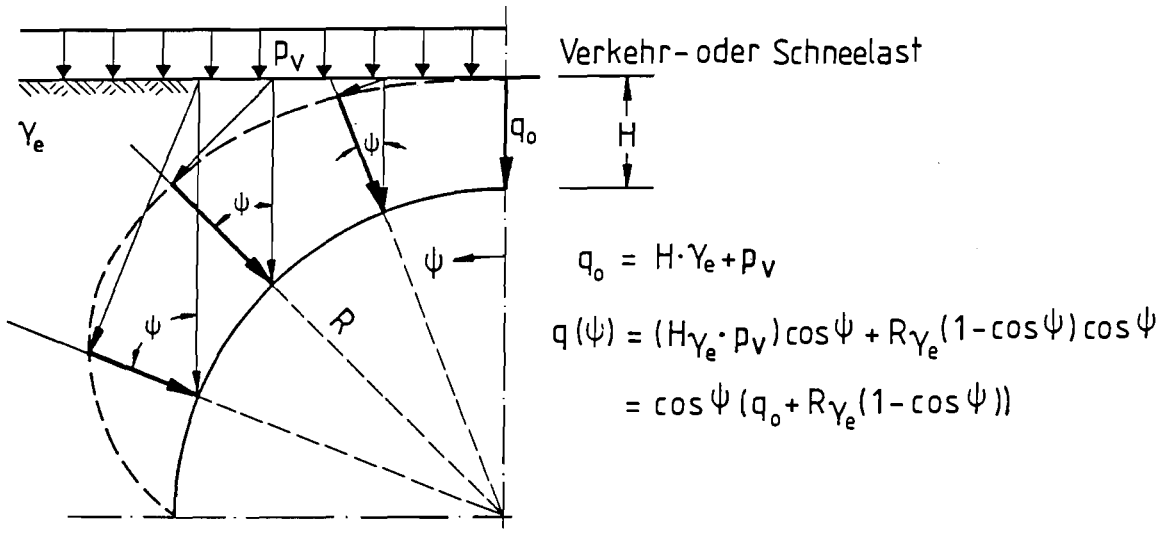


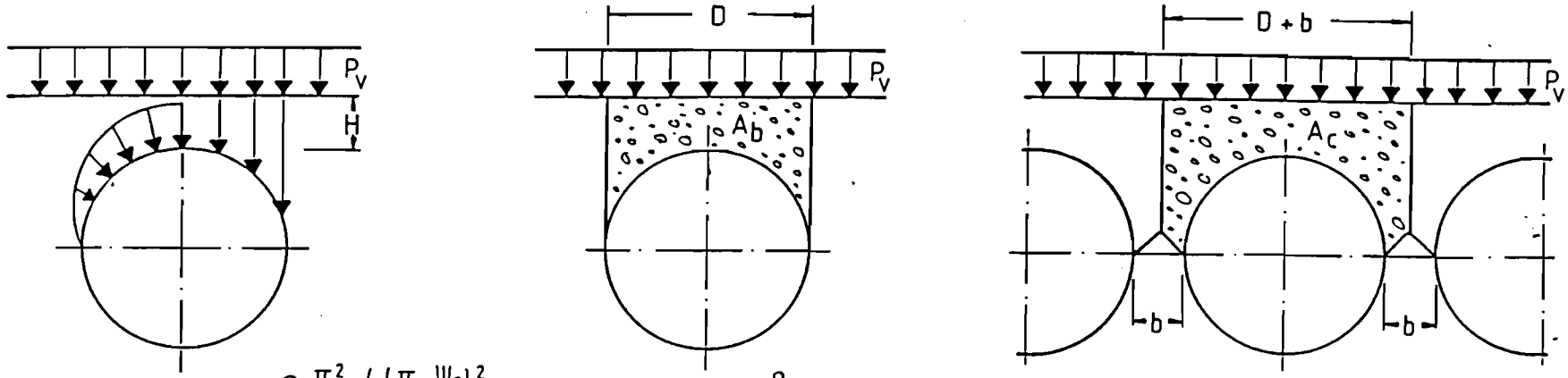
Bild 9: Ansatz für die Pressungsverteilung aus Erdüberschüttung auf die obere Behälterhälfte

Zur Vereinfachung der Schnittgrößenermittlung kann diese Funktion auf der sicheren Seite in zwei cos-Funktionen zerlegt werden (Bilder 10, 16).

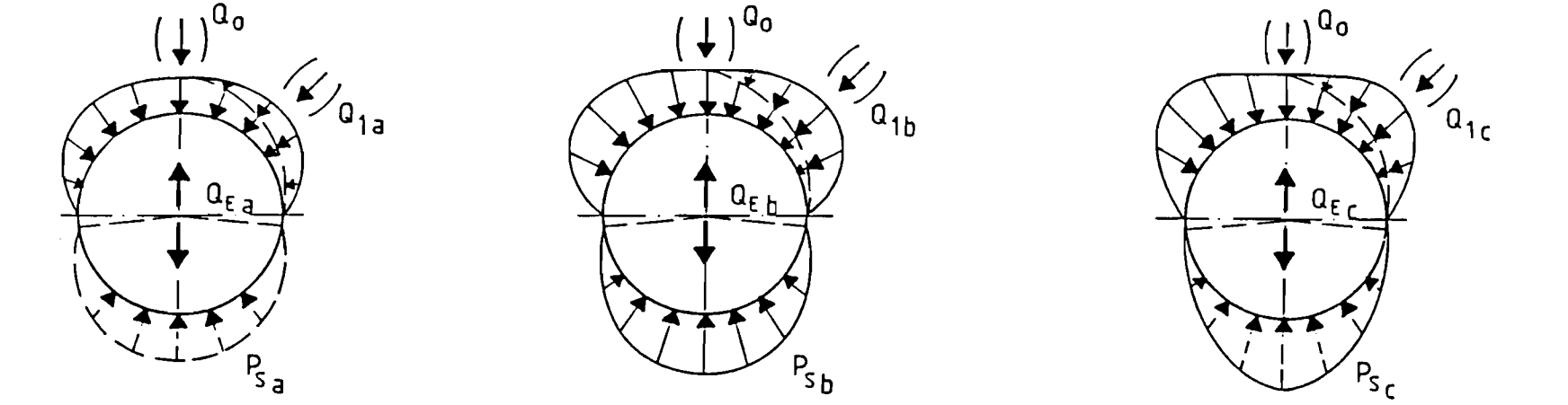
Bei sattelgelagerten Behältern müssen höhere Belastungen aus Erdschüttung angesetzt werden, wenn Setzungen in der Umgebung der Behälter zu erwarten sind. Die Resultierende der Erdauflast Q_E soll dann dem Gewicht der Erdumrißfläche nach Bild 10b entsprechen.

Bei sehr nahe beieinanderliegenden Behältern können zudem Bogentrageffekte eine weitere Lasterhöhung bewirken, so daß die Erdumrißfläche nach Bild 10c berücksichtigt werden muß.

Die Schnittgrößen können dann nach /6/ mit Hilfe von Tabellen bestimmt werden, wobei die einzelnen Lastkomponenten entsprechend zu überlagern sind (s. Kap. 6).



$$p_s = -Q\,\frac{\pi^2 - 4(\pi-\psi_0)^2}{4R\pi(\pi-\psi_0)\cos\psi_0}\;;\quad \psi = 90°:\;\; p_v = \frac{Q}{2\pi R}$$



$$Q_0 = l_r \frac{\pi}{2} R(\gamma H + p_v)$$

$$Q_{E_a} = Q_0 + Q_{1_a}\cdot\sqrt{2}$$

$$Q_{E_a} = l_r\left\{\frac{\pi}{2}R(\gamma_E H + p_v) + \frac{2}{3}R^2\gamma_E(\sqrt{2}-1)\right\}$$

$$Q_{1_a} = \frac{(2-\sqrt{2})}{3}R^2\gamma_E\cdot l_r$$

1o a)

$$Q_{E_b} = l_r\left\{A_b\gamma_E + p_v\cdot D\right\}$$

$$Q_{1_b} = \frac{Q_{E_b} - Q_0}{\sqrt{2}}$$

1o b)

$$Q_{E_c} = l_r\left\{A_c\gamma_E + p_v\,(D+b)\right\}$$

$$Q_{1_c} = \frac{Q_{E_c} - Q_0}{\sqrt{2}}$$

1o c)

Bild 1o a)- c): Erddruck- und Sohlpressungsverteilungen bei sandbettgelagerten erdgedeckten Zylindern

Im Fall einer Batterieanordnung kann für die Randbehälter auch ein asymmetrischer Satz nach Bild 11 in Frage kommen. In allen Fällen soll der im Rohrleitungsbau übliche Ansatz des entlastend wirkenden seitlichen Erddrucks vernachlässigt werden.

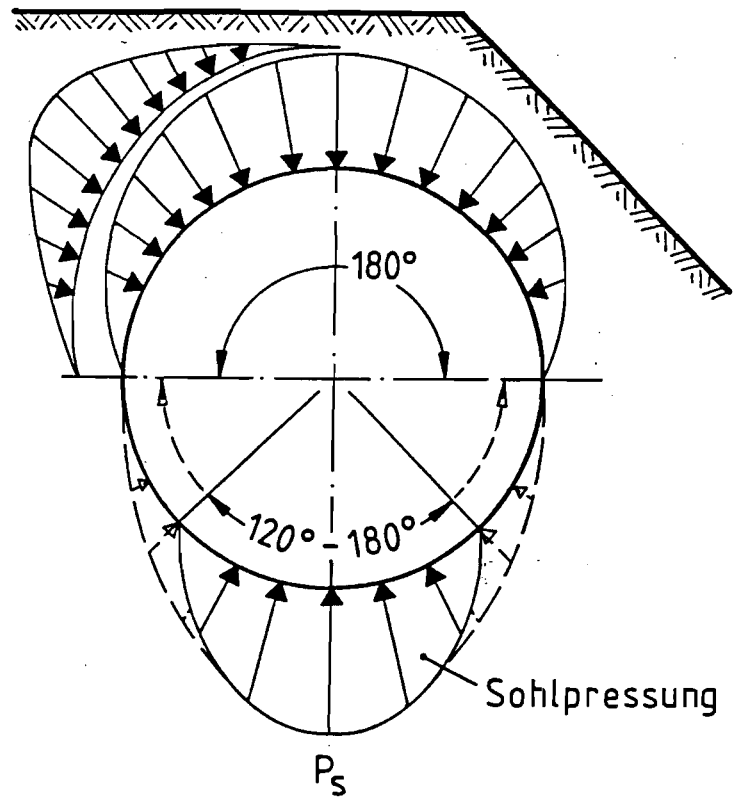


Bild 11: Asymmetrischer Belastungsansatz für Behälter in Batterierandlage

Bei der Entnahmeversion mit einem Pumpensumpf (s. Bild 2c) und einem begehbaren Graben kann eine Pressungsverteilung nach Bild 12 angenommen werden.

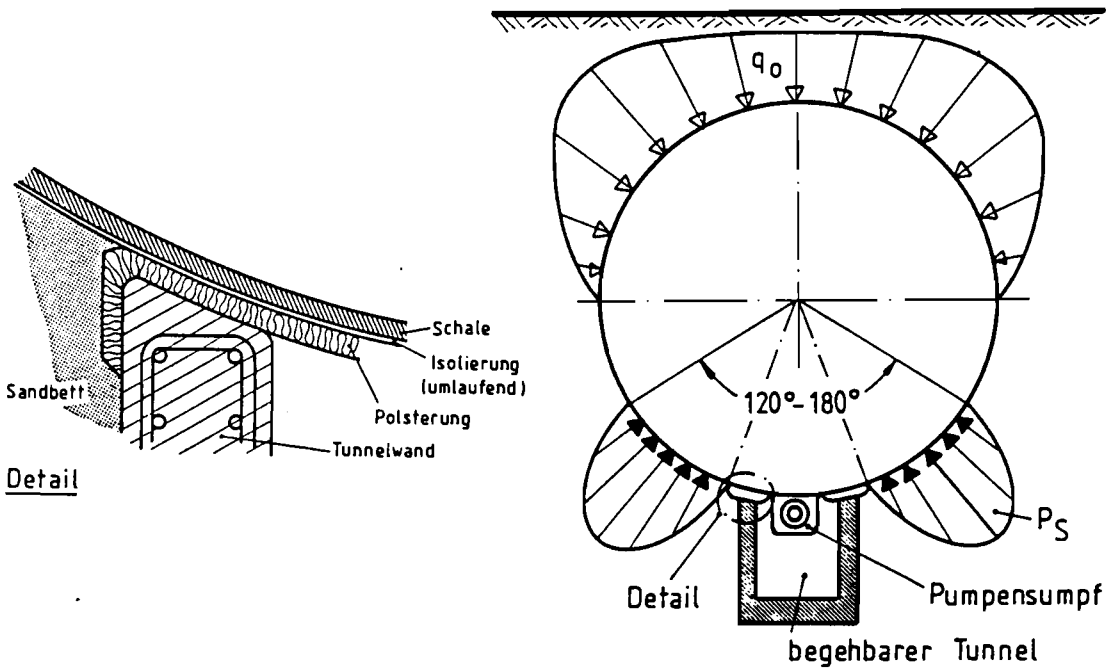


Bild 12: Ansatz für die Lagerpressung im Bereich eines Pumpensumpfs

5.2.2 Erdbeben

Zur Beurteilung des Verhaltens erdgedeckter Zylinder bei Erdbebenbelastungen liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Anzusetzende Belastungen in Form von Horizontalbeschleunigungen werden daher meist von den zuständigen Behörden vorgegeben.
Die bei Erdbeben auftretende Horizontalbeschleunigung führt zu einer Erhöhung der Resultierenden der einzelnen Belastungskomponenten und zu einer Verdrehung der Wirkungsrichtung. Der Lagerreaktion steht gemäß Bild 13 eine geringere Lagerfläche zur Verfügung, so daß die örtliche Sohlpressung sowie die Umfangsschnittgrößen größer werden. In der Regel werden für diesen Lastfall jedoch geringere Sicherheiten gefordert bzw. höhere Spannungen zugelassen (z.B. nach BS 5500 + 25 %).

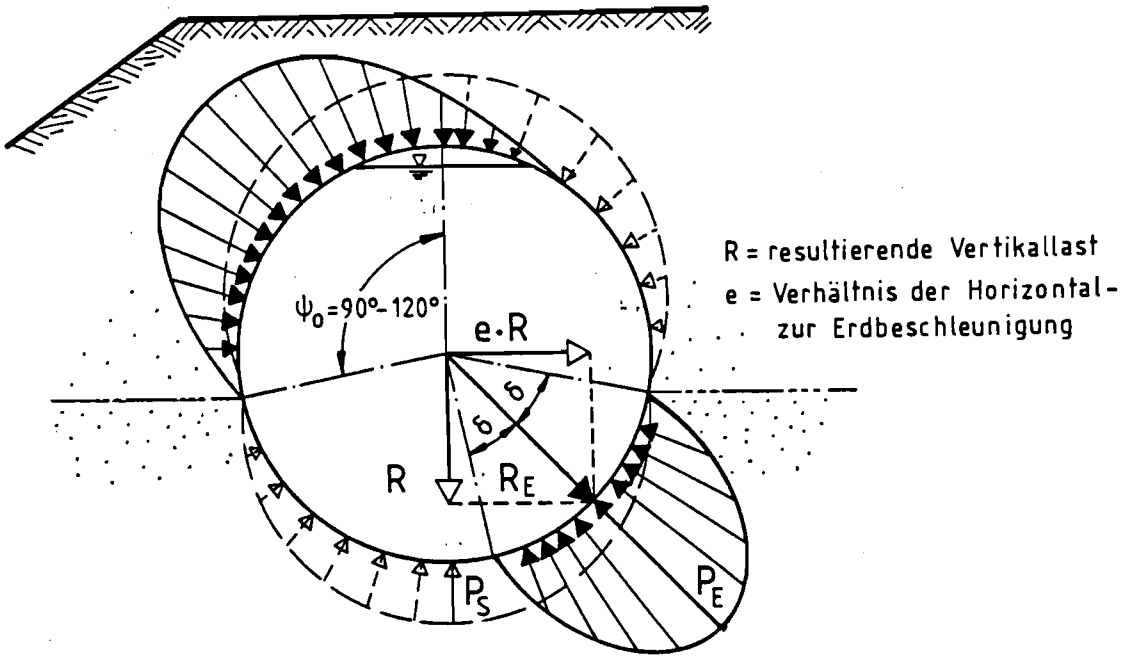


Bild 13: Erddruck- und Lagerpressungsannahmen bei Erdbeben

5.2.3 Einwirkungen aus elastischer Bettung

Die Schnittgrößenermittlung, bezogen auf die Behälterlängsachse sollte unter Beachtung der bodenmechanischen Kenndaten nach der Theorie des "elastisch gebetteten Balkens" für die verschiedenen Lastfälle erfolgen, wobei einmal die ungünstigste Bettungsmodulverteilung und zum anderen die ungünstigste Setzungsmulde infolge möglicher Differenzsetzungen vorgegeben werden sollte. Diese Vorgaben werden in der Regel von einem Bodengutachter auf der Grundlage umfangreicher Baugrunduntersuchungen bereitgestellt.

Die Schnittgrößenberechnung liefert unter anderem die für Spannungs- und Stabilitätsuntersuchungen erforderliche Biegemomentenverteilungen in Längsrichtung sowie die Setzungslinie, aus der unter der Berücksichtigung der entsprechenden Federkonstanten die Lagerreaktion pro Längeneinheit bestimmt werden kann. Die für die Ringsteifenbemessung maßgebenden Schnittgrößen in Umfangsrichtung müssen im Querschnitt der größten Sohlpressung berechnet werden (s. Bild 14).

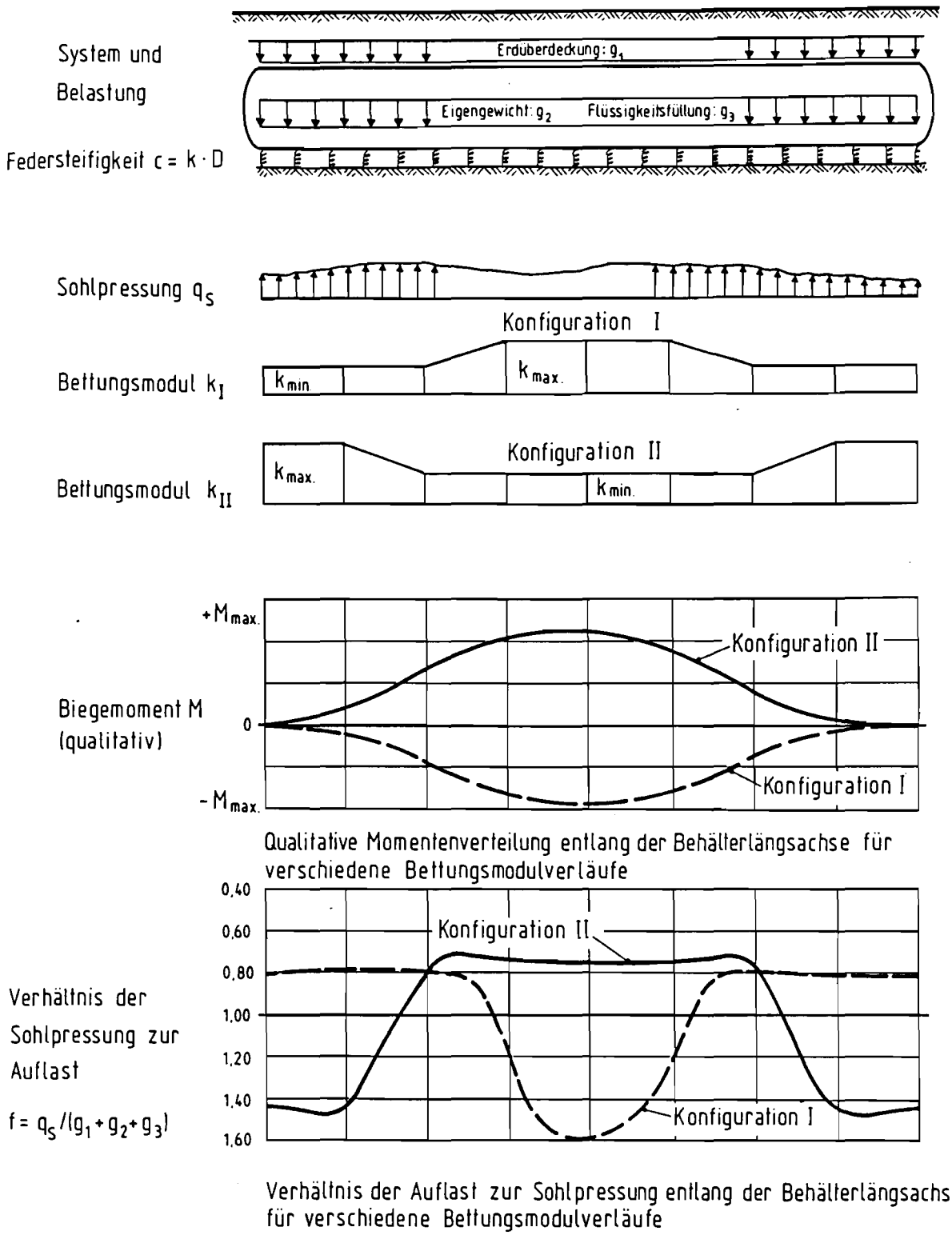


Bild 14: Schnittgrößen- und Pressungsverteilung bei unterschiedlichen Bettungsannahmen

6. Bemessungsverfahren und statische Nachweise

6.1. Allgemeines

Bei dem vorliegenden statischen System wird davon ausgegangen, daß die rotationssymmetrischen Lastanteile von der Zylinderschale aufgenommen werden, während die aus den nichtrotationssymmetrischen Belastungskomponenten erzeugten Biegereaktionen dem versteiften Querschnitt zugewiesen werden.
Die Zylinder- und Bodenwanddicke wird in der Regel vom anzusetzenden Innendruck bestimmt.
Der Mindestabstand der Versteifungselemente ist abhängig von der Beulsteifigkeit der Schale, im Zusammenhang mit den herrschenden Außendruckverhältnissen und möglichem betrieblichen Unterdruck, sowie vom Spannungszustand im Allgemeinen.
Die Bemessung erfolgt auf der Grundlage der im Stahl- und Behälterbau üblichen Vorschriften.

6.2. Überlagerung der Lastkomponenten in Umfangsrichtung

Zur Bestimmung der Umfangsschnittgrößen im versteiften Bereich werden folgende Annahmen zugrundegelegt:

- Alle Biegereaktionen aus Erddruckbelastung, Eigengewicht und Flüssigkeitsfüllung werden für die gesamte Feldbreite l_r dem Versteifungsringquerschnitt zugeschrieben.

- Bei eingeschweißten Ringsteifen wirkt im Bereich der sogenannten "mittragenden Breite" gemäß Bild 15 auf den Ring zudem der Innendruck.

- Im unversteiften Bereich wirken im zylindrischen Mantel nur Membran- und Schubkräfte.
  Die Vertikalkomponenten aus Flüssigkeitsfüllung und Eigengewicht werden direkt an den Untergrund abgegeben.

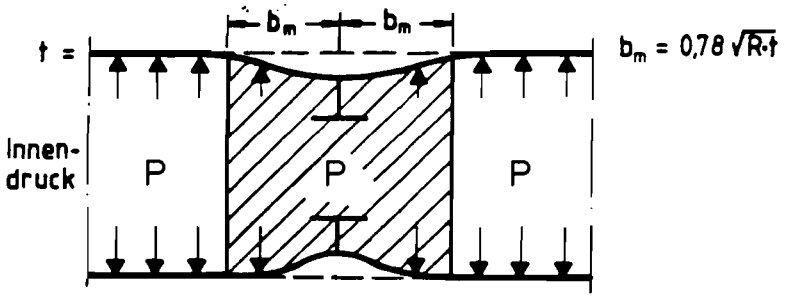


Bild 15: Belastungsverteilung zur Bemessung der Versteifungselemente bei eingeschweißten Ringen

Die Schnittgrößenberechnung für die nichtrotationssymmetrischen Lastkomponenten kann z.B. nach /6/ erfolgen, wobei die Berechnung durch Hilfsfaktoren stark vereinfacht werden kann. Bild 16 zeigt die zu überlagernden Grundsysteme für einen sandbettgelagerten Zylinder.

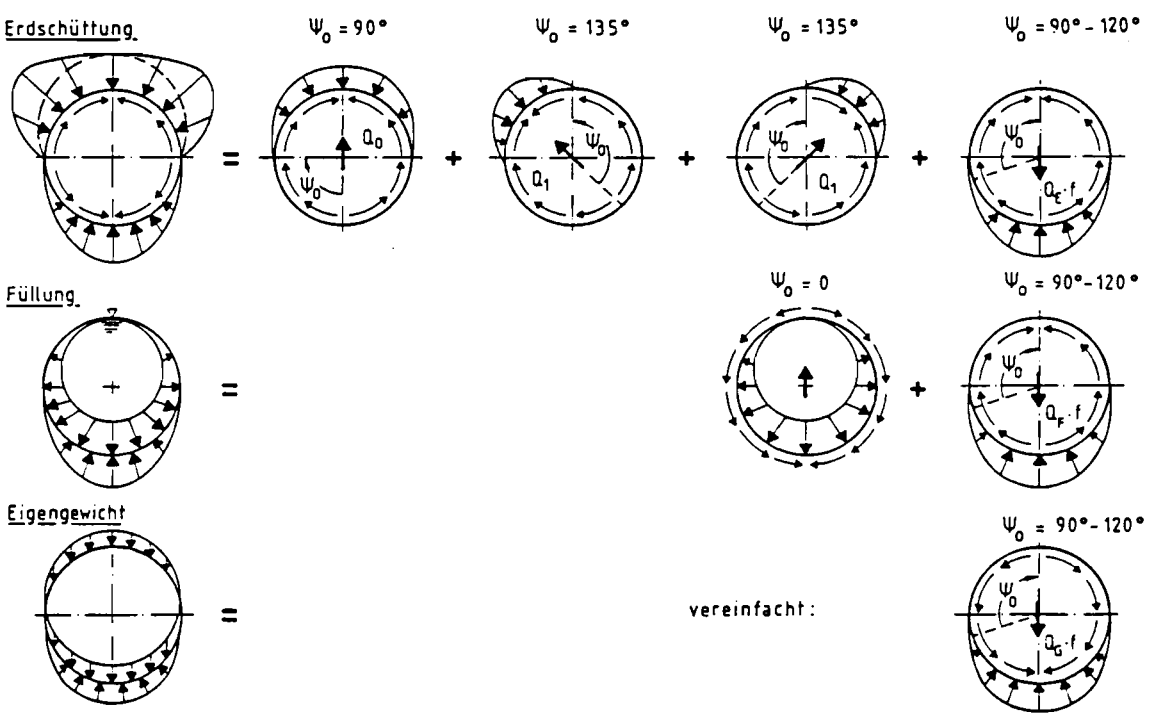
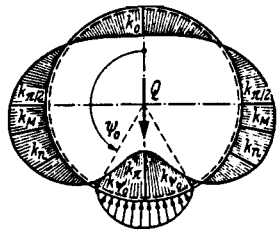
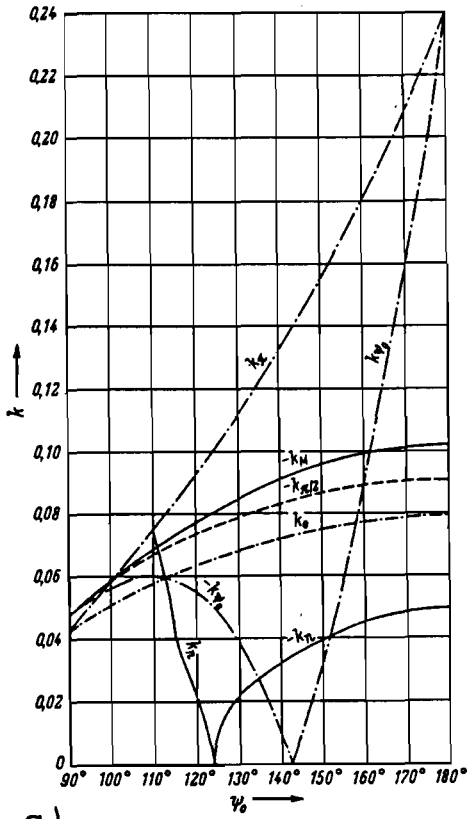


Bild 16: Überlagerung der Grundsysteme nach /6/ für einen sandbettgelagerten Zylinder

Die für die Bestimmung der Schnittgrößen erforderlichen Beiwerte können den Tafeln (Bild 17a u. b) oder den im Anhang beigefügten Tabellen entnommen werden.

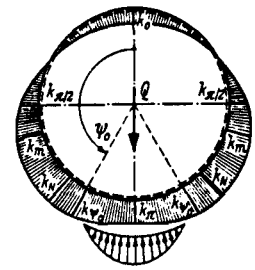
$$M = k \cdot Q \cdot R_r$$
$$N = k \cdot Q$$

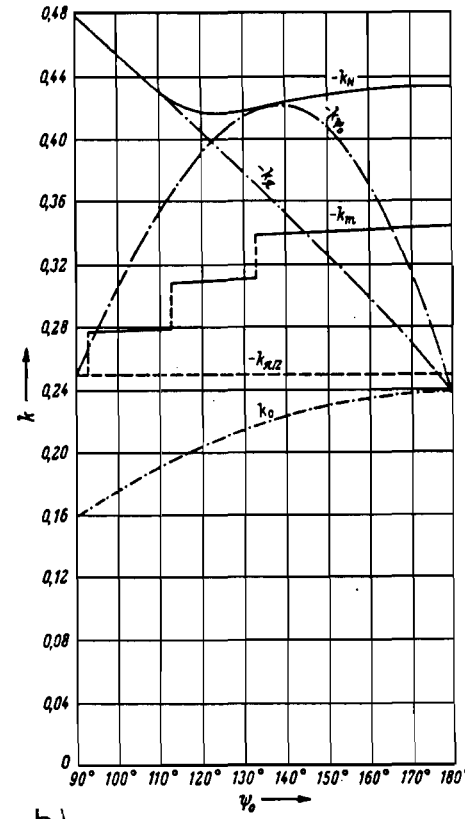




a)

Abb. 73. Grundsystem 1 S/5.
Faktoren $k^{I/II}_{M1S/5}$ zur Berechnung der *Biegemomente* an ausgezeichneten Stellen des Auflagerringes.





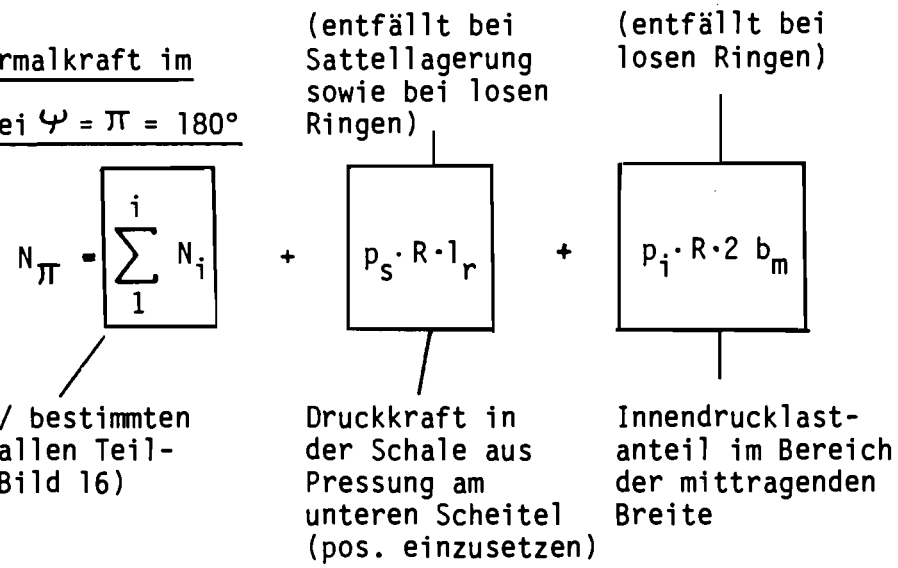
b)

Abb. 74. Grundsystem 1 S/5.
Faktoren $k^{I/II}_{N1S/5}$ zur Berechnung der *Normalkräfte* an ausgezeichneten Stellen des Auflagerringes.

Bild 17: Schaubilder zur Bestimmung der Hilfsfaktoren zur Biegemoment- und Normalkraftberechnung nach /6/

Zur Bestimmung der Normalkräfte in einem eingeschweißten Ring am maßgebenden unteren Scheitel muß eine Gleichgewichtsbetrachtung über die gesamte Feldlänge angestellt werden, die den Einfluß des Innendrucks und der Lagerpressung auf die Zylinderschale berücksichtigt:

Bestimmung der Normalkraft im Ringquerschnitt bei $\varphi = \pi = 180°$



Bei losen Ringen entsteht aus den genannten Teillastfällen im Mantel eine zusätzlich zum Innendruck wirkende Zugbeanspruchung infolge der Kontaktpressung des Ringes, der nur Druckbelastungen erfährt.

6.3. Störspannungen aus Innendruck

Störspannungen treten bei eingeschweißten Ringen infolge des Steifigkeitssprungs im Zylindermantel auf. Bei Innendruck weitet sich der unversteifte Schalenbereich mehr auf als die ringversteifte Region. Die so entstehenden Zwängungen erzeugen Biegemomente in Behälterlängsrichtung, deren Maximum sich im Anschlußquerschnitt der Ringsteifen einstellt (s. Bild 18). Die Berechnung dieser Sekundärspannung kann z.B. nach /12/ erfolgen.

Die Größe der Störspannung ist dabei in erheblichem Maß von der Steifigkeit des Verstärkungsrings abhängig. Im Zusammenhang mit dieser Beanspruchungsform spricht British Standards BS 5500 von "selbstbegrenzenden" Belastungen, d.h. die Spannungsspitze wird beim Auftreten von Plastizierungen abgebaut. Aus diesem Grund läßt diese Berechnungsgrundlage für diesen Beanspruchungsfall Spannungen bis zum 2-fachen der Fließgrenze zu (s. App. A und G, BS 5500).

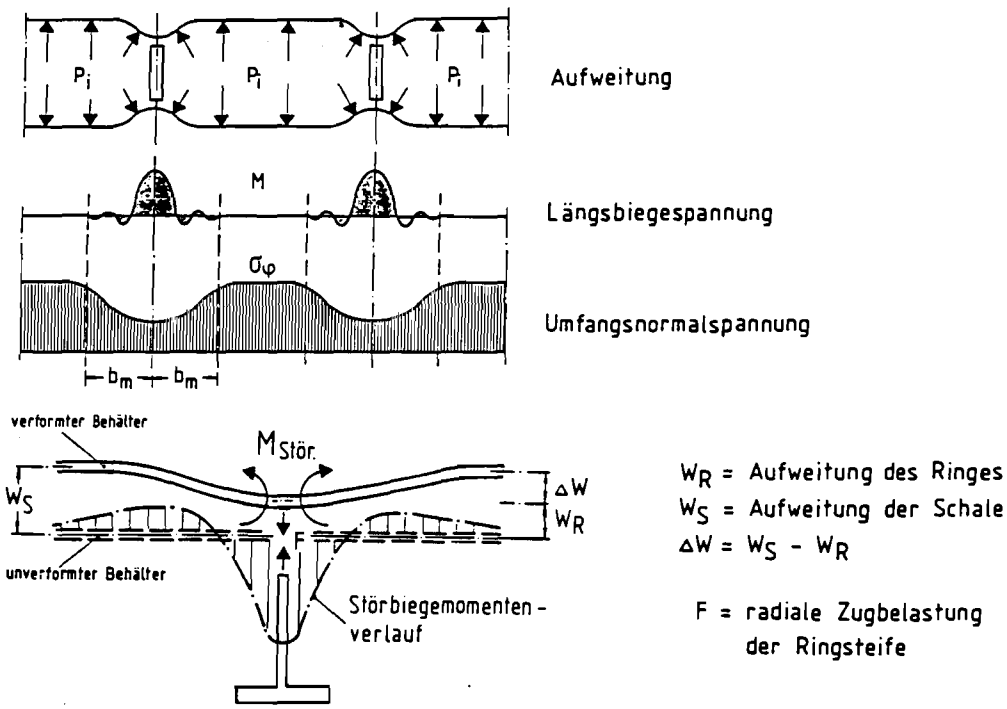


Bild 18: Auswirkungen des Innendrucks auf die Zylinderschale

Auf die British Standards BS 5500 wird in den AD-Merkblättern im Zusammenhang mit der Bemessung liegender, sattelgelagerter Zylinder mehrfach verwiesen und kann daher als Berechnungsgrundlage dem deutschen Vorschriftenwesen gleichgestellt werden.

6.4. Spannungsnachweis

Die Wanddicken von Druckbehältern werden in der Regel nach den AD-Merkblättern, Reihe B, bemessen. Eine solche Bemessung reicht für einen erdgedeckten ringversteiften Zylinder nicht aus und kann nur als Vordimensionierung verwendet werden. Bei mit losen Ringen ausgesteiften Systemen sind die Zugspannungen, die aus der Kontaktpressung zwischen Ring und Mantel resultieren, mit den Umfangsspannungen aus Innendruck zu überlagern. Auch im unversteiften Bereich des Zylindermantels sind Spannungsnachweise erforderlich, da ein zweiachsialer Spannungszustand vorliegt. Insbesondere sind die Längsspannungen aus Innendruck sowie Biegeanteile aus den Bettungsreaktionen mit den Umfangsspannungen und Schubspannungen zu überlagern.

In ähnlicher Weise ist der Spannungsnachweis an den Anschlußquerschnitten der Ringsteife zu führen. Hier sind zudem die Störspannungen in Längsrichtung zu berücksichtigen (s. Bild 19). Der hierfür in der Schale maßgebende Querschnitt ergibt sich für den Betriebslastfall bei einem Winkel von Ψ = 95°, da hier in der Schale die größten Umfangszugspannungen aus der Überlagerung der Biegereaktionen mit dem Innendruck auftreten. In Längsrichtung herrschen dagegen an der Schalenaußenseite Druckspannungen aus den Störmomenten. Bei Behältern mit kleinen Durchmessern und relativ hohen Steifen muß gegebenenfalls die Theorie des gekrümmten Trägers bei der Spannungsermittlung berücksichtigt werden.

Die zulässigen Spannungen sind entsprechend den maßgebenden Regelwerken zu bestimmen (/14, 16/).

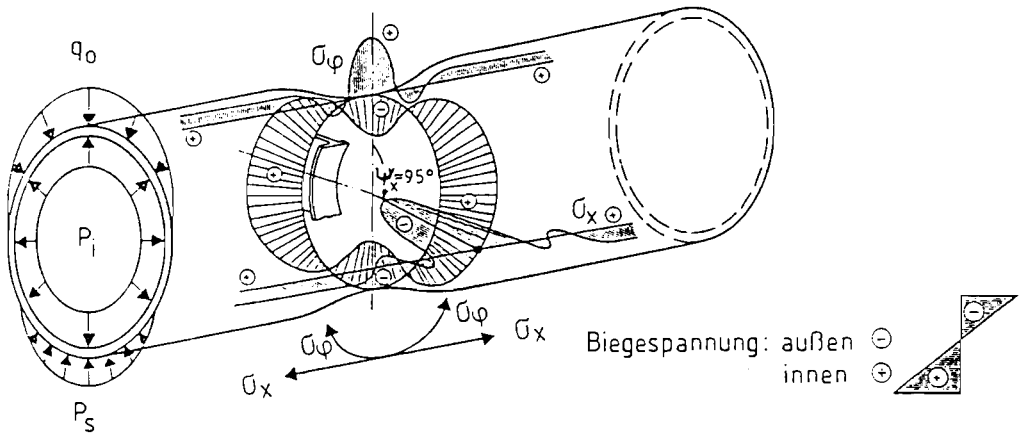


Bild 19 : Spannungsüberlagerung in Längs- und Querrichtung

6.5. Stabilitätsuntersuchungen

Neben dem bereits angesprochenen Festigkeitsnachweis sind für die vorliegenden Behälter auch umfangreiche Stabilitätsuntersuchungen durchzuführen. Hierbei sind zunächst die unterschiedlichen Beanspruchungskomponenten getrennt zu betrachten. Für das Beulverhalten in Umfangsrichtung sind dies im wesentlichen die nichtrotationssymmetrisch wirkenden Lastanteile aus Erdschüttung und Lagerpressung. Zum Teil wird von den Betreibern gefordert, einen durch eine mögliche anlagentechnische Fehl-

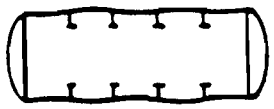
funktion bedingten Unterdruck in der Bemessung zu berücksichtigen.

Die aus Längsbiegung zwischen Einzelsätteln und insbesondere auch aus unterschiedlichen Setzungen resultierenden Längs-Biegebeanspruchungen des Behältersystems sowie Achsialdruckkräfte aus Reibung und Erddruck auf die Böden machen ferner eine Untersuchung für die Längsrichtung erforderlich.

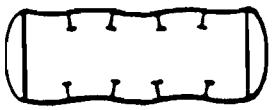
Für ringversteifte Systeme sind verschiedene Beulversagensformen möglich (s. Bild 20). Eingehende theoretische Untersuchungen /13/ hierzu liegen für axialsymmetrische Außendruckverteilung vor, auf deren Grundlage das Nachweisverfahren der BS 5500 entworfen wurde.

Die Gültigkeit des Verfahrens ist jedoch auf axialsymmetrische Lastfälle beschränkt. Nach BS 5500 kann eine erforderliche Mindeststeifigkeit für die Ringe bestimmt werden, deren Größe jedoch in der Regel bei weitem unter den aus Festigkeitsuntersuchungen abgeleiteten erforderlichen Querschnittswerten für die Versteifungselemente liegt. Diese Erkenntnis läßt den Schluß zu, daß ein Versagen des Gesamtsystems gemäß Bild 20c bzw. ein Ausweichen der Ringe gemäß Bild 20b für den vorliegenden Behältertypus sehr unwahrscheinlich ist, wenn die in Kap. 2 erwähnten Richtwerte für die Steifenabstände eingehalten werden. Für diesen Fall kann ein Stabilitätsnachweis nach DASt-Ri 013 erfolgen, wobei die zylindrische Beulfeldlänge gleich dem Steifenabstand zu setzen ist. Im übrigen gilt das Nachweisverfahren nach DASt-Ri 013 auch ausdrücklich für nichtrotationssymmetrische Belastung, wenn die maximale Druckordinate über den ganzen Umfang angesetzt wird. Ferner beinhaltet das Nachweisverfahren auch eine Regelung für die Überlagerung von Stabilitätsproblemen in Längs- und Querrichtung.

a) Beulen zwischen den Ringsteifen (in Umfangs- oder Längsrichtung)



b) Beulen infolge Ausweichens der Ringsteifen



c) Beulen auf der gesamten zylindrischen Länge

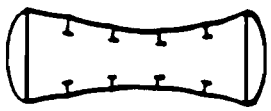


Bild 20 : Beulversagensformen bei ringversteiften Zylindern unter Außendruck

7. Herstellungsverfahren und Montageweisen

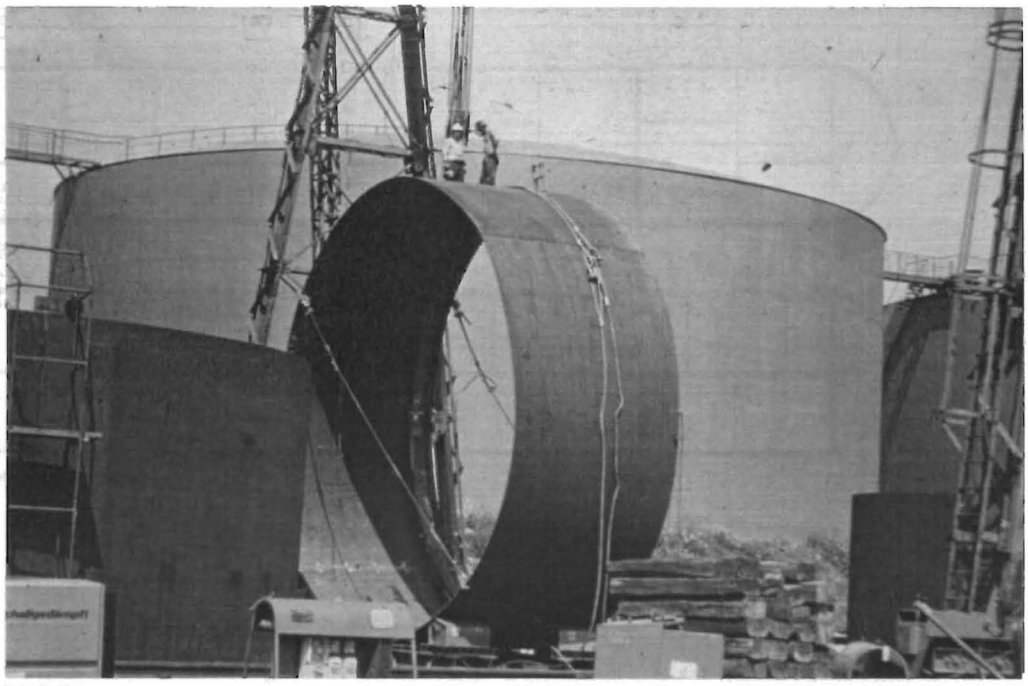
7.1. Konstruktive Grundsätze

Druckbehälter zur Lagerung druckverflüssigter Gase müssen in einer Weise konstruiert und hergestellt werden, die die Möglichkeit einer Leckage mit größtmöglicher Sicherheit ausschließt. Aus diesem Grund muß im Hinblick auf die Fertigung beachtet werden, daß alle Schweißnähte prüfbar sein müssen. Die Qualitätssicherung erfolgt in Anlehnung an die Regelungen der AD-Merkblätter HP 5/2 und 5/3. In bezug auf die konstruktive Gestaltung der Schweißnähte am zylindrischen Mantel wird empfohlen, Längs- und Rundnähte voll durchzuschweißen und nach dem Ausfugen gegenzuschweißen. Stutzennähte sollten ebenfalls möglichst durchgeschweißt werden. Stutzen und Rohrdurchgänge sollten dabei ohne Verstärkungskragen und Rippen ausgebildet und entsprechend bemessen werden. Es wird ferner empfohlen, Stutzenanschlüsse soweit möglich in den Domschachtdeckeln zusammenzufassen.
Anschlüsse und Durchgänge in den Böden sollten nur in Ausnahmefällen ausgeführt werden.
Montage- und fertigungstechnisch erforderliche Anschweißteile sollten über Futterbleche mit Kehlnähten angeschlossen werden. Nach dem Gebrauch sollten diese wieder entfernt und nach dem Abschleifen eine Oberflächenrißprüfung durchgeführt werden.
Bei Ringsteifen, die mit dem Steg über dem ganzen Umfang am Mantel ver-

verschweißt werden, wird empfohlen, den Anschluß als durchgeschweißte K-Naht auszuführen.

7.2. Herstellungsverfahren für die Stahlbehälter

Die Herstellung und Montage liegender zylindrischer Flüssiggasbehälter mit großen Durchmessern wird vorwiegend als reine Baustellenfertigung nach den Methoden des Großrohr- bzw. Tankbaus durchgeführt. Dabei werden die vom Walzwerk gebogenen und schon besäumten Blechtafeln direkt auf die Baustelle geliefert, dort zu Ringen zusammengesetzt und durch Aneinanderreihung mehrerer Ringe zu einem Rohrschuß verschweißt. Dieser wird dann isoliert und in seine endgültige Position gebracht. Die Fertigung der einzelnen Ringe, bestehend aus Zylinderschale und Versteifungsring, kann nach verschiedenen Vorgehensweisen erfolgen. Dabei werden bei der einen Methode zuerst die beiden Zylinderschalen in stehender Position geheftet mit einem außenliegenden Montagering umspannnt und dann aufrecht auf einen Rollgang gesetzt (Bild 21). In dieser Position werden dann die Versteifungselemente, die in der Regel aus mehreren Segmenten bestehen, mit der Zylinderschale verschweißt. Bei einer anderen Methode werden in einer besonderen Vorrichtung die einzelnen Zylinderschalen auf vorgefertigten Versteifungsring-Sektionen zu ausgesteiften Halbschalen verschweißt. Dabei steht das Blech senkrecht und die Versteifungsringelemente liegen horizontal. Die so gefertigten Halbschalen von der Breite eines Blechs werden dann zu einem Schuß zusammengesetzt. Die für dieses Fertigungsverfahren typische Blechaufteilung ist im Bild 22 dargestellt. Als Schweißverfahren kommen für die Fertigung der Rohrsektionen ausschließlich automatische Verfahren, wie z.B. das UP-Schweißen, zur Anwendung. Die Rundnaht zwischen den einzelnen Schüßen die in ihrer endgültigen Position verlegt sind, wird Lichtbogen-handgeschweißt.



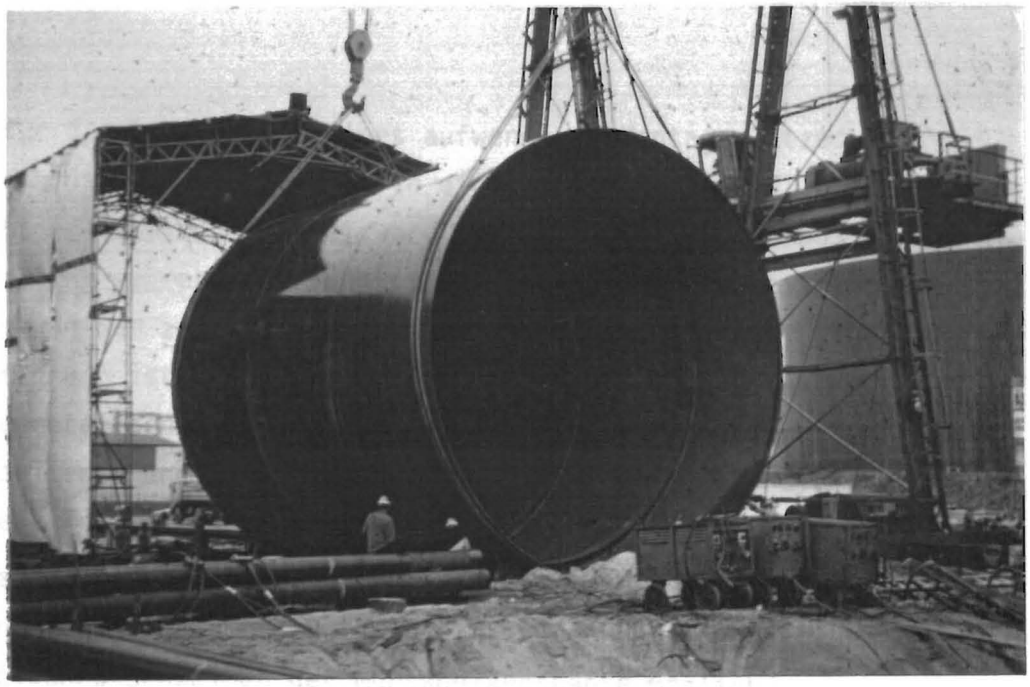


Bild 21: Konventionelle Ringbauweise
a) Fertigung eines Schusses
b) Behältersektion aus 3 Schüssen; Durchmesser 8.8 m

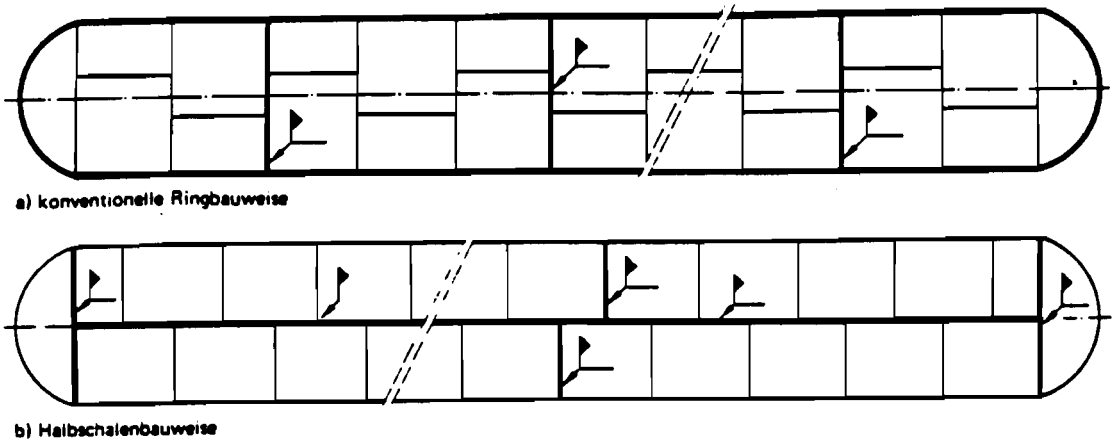


Bild 22: Herstellungsmethoden

Um die Kosten für die Einrichtung eines aufwendigen Montageplatzes auf der Baustelle einzusparen, wählte man in einigen Ausführungsfällen die sogenannte Halbschalenmethode. Dabei wird der Zylinder durch Längsschnitte sowie durch mehrere Querschnitte in Halbschalen zerteilt, deren Abmessungen sich an den zulässigen Transportmaßen orientierten. Eine typische Schnittführung ist in Bild 23 dargestellt. Die Bilder 24a und b zeigen einen so geteilten Behälter während der Bauphase. Man sieht die schon fertig isolierte und durch Versteifungsringe verstärkte Zylinderhalbschale. Diese Montagemethode bedarf besonderer Vorkehrungen beim Verbinden der einzelnen Halbschalen. Die dazu verwendeten Hilfswerkzeuge entsprechen denen des Tankbaues. Durch die hier gewählte Schnittführung ist ein automatisches Schweißen der Montagelängsnähte möglich.

Da sämtliche Ringstöße auf der Baustelle von Hand miteinander verschweißt werden müssen, ist der Arbeitsaufwand für Schweißarbeiten jedoch beträchtlich höher als bei der herkömmlichen Schußbauweise.

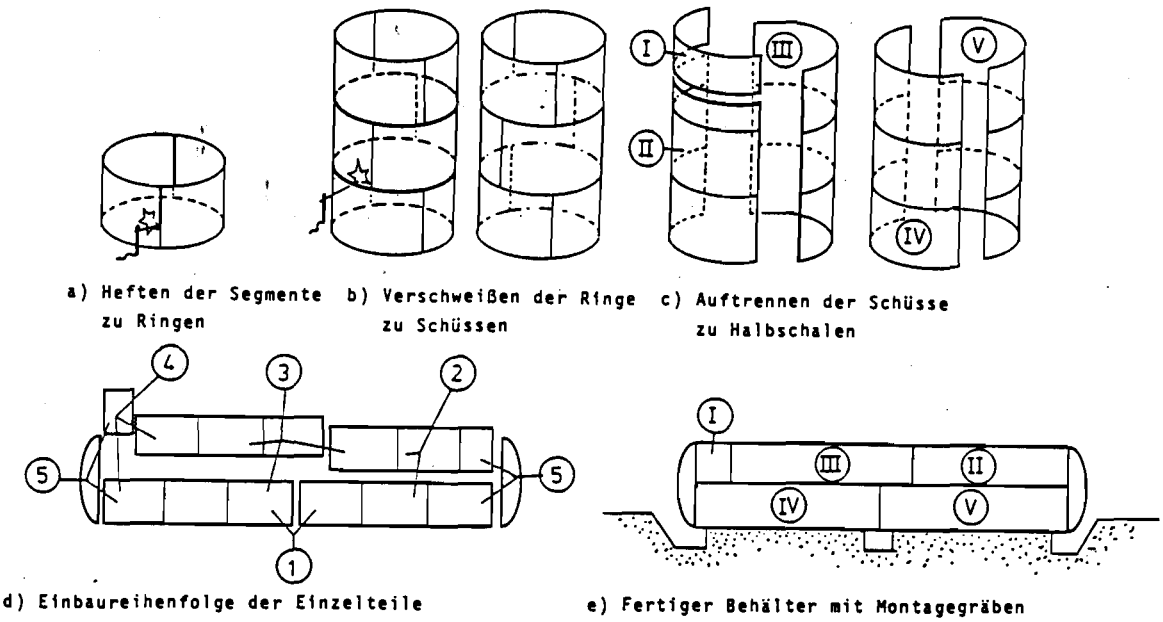


Bild 23: Montageablauf bei der Halbschalenbauweise

Bei der Fertigung der Behälter sind gegenüber dem AD-Regelwerk verschärfte Fertigungstoleranzen einzuhalten. Als Richtwerte sollten die zulässigen Toleranzen der DASt-Richtlinie 013 sowie der Richtlinien des Druckrohrleitungsbaues zugrunde gelegt werden.

Doppelwandige Behälter, wie sie z. Z. zur Lagerung von Ammoniak zum Einsatz kommen, können wegen ihres relativ kleinen Volumens in der Regel komplett in der Werkstatt gefertigt werden. Dabei wird der ringversteifte und am Boden mit einem teflonbeschichteten Trägerrost ausgestattete Außenzylinder bis auf die Böden vorgefertigt. Dann wird der unversteifte, mit Aufbauten und Böden versehene Innenzylinder eingezogen. Danach wird die Zylinderschale um die Aufbauten geschlossen. Zuletzt werden die Außenböden angeschweißt. Ein ausgeführtes Beispiel für einen doppelwandigen erdgedeckten Ammonaikbehälter ist in Bild 25 dargestellt.

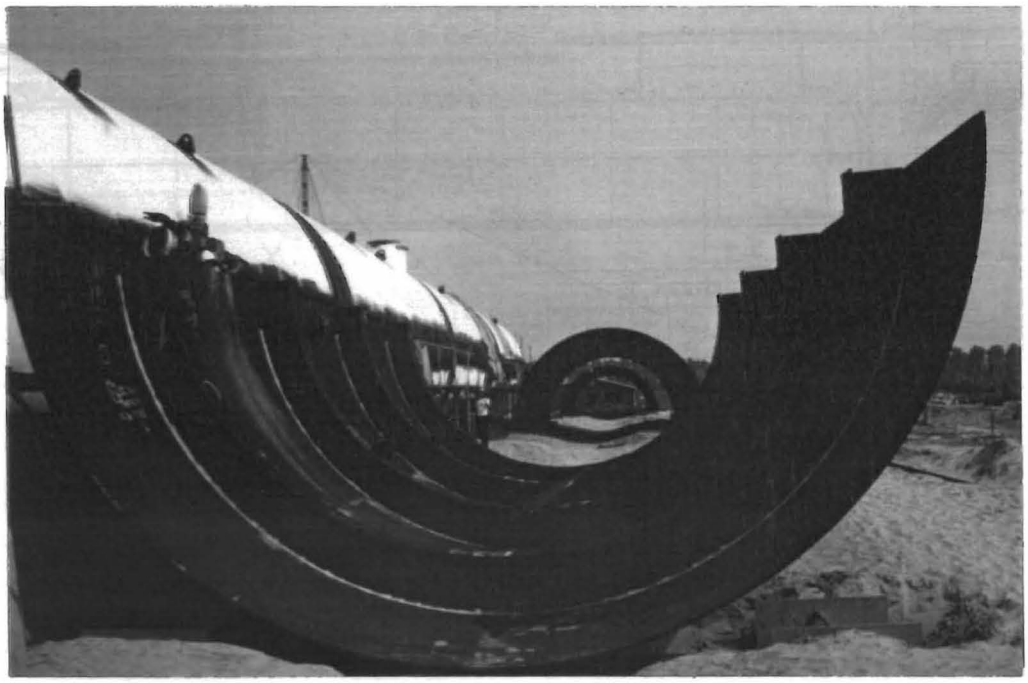
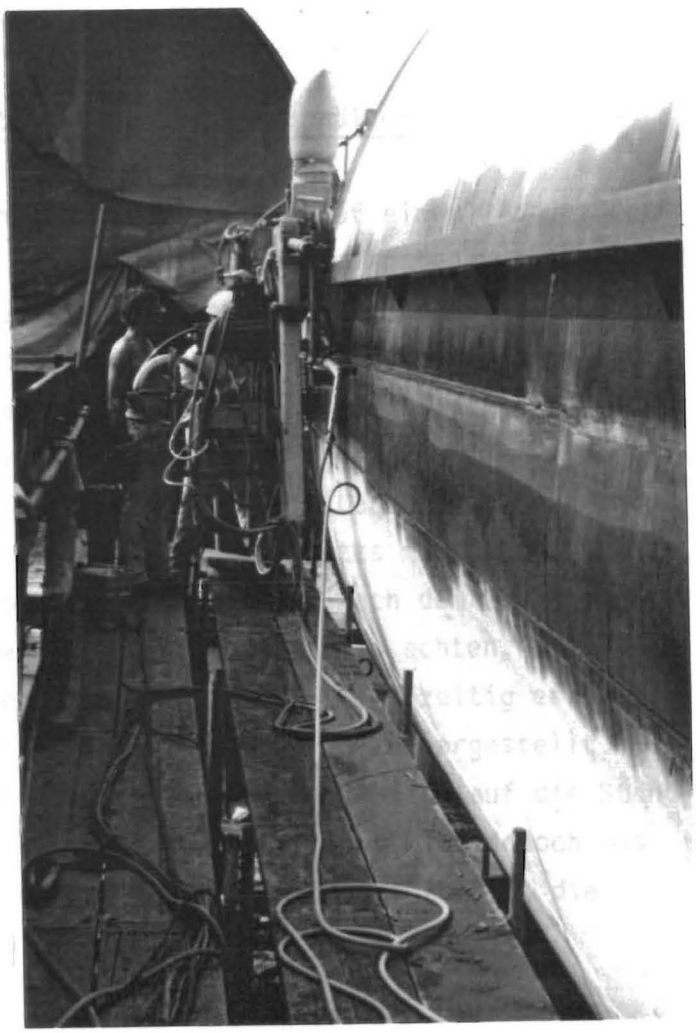


Bild 24a: Zylinder-Halbschale vor der Montage

b: Zylinder-Halbschalen montiert



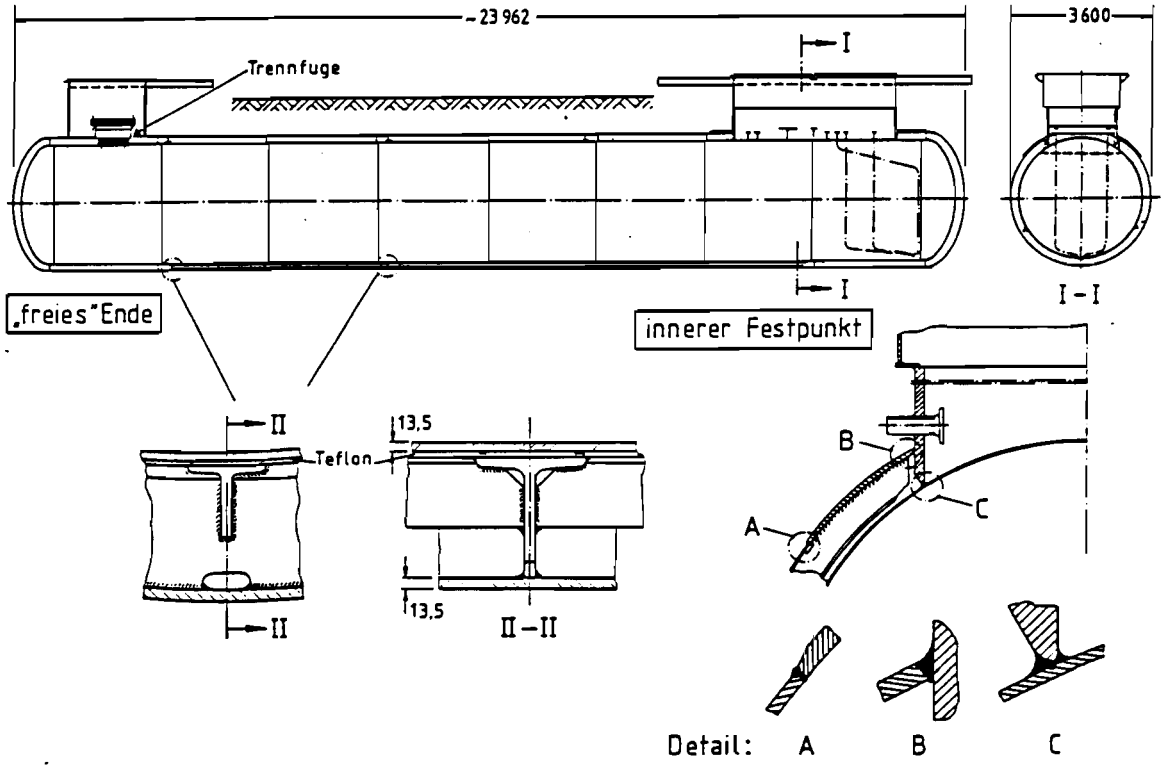


Bild 25: Doppelwandiger Ammoniak-Lagerbehälter

7.3 Konstruktion des Sandbetts und Einbau der Behälter

Die Aufschüttung des tragenden Sandbetts erfolgt auf einem Planum, das je nach örtlicher Gegebenheit aus dem verdichteten, anstehenden Baugrund oder aus einem neueingebrachten Kiessand- oder Schotterbett bestehen kann. Das Planum sollte so hoch wie möglich verdichtet sein, wobei auch schwere Geräte verwendet werden können. Die Mindestdicke der Feinsandschicht unter dem Behälter muß mindestens 30 cm betragen. Die weitere Aufschüttung des Sandbetts sollte schichtweise in Lagen von 50 cm erfolgen. Im Bereich der tragenden Schichten des Sandbetts muß eine Verdichtung von mindestens 95 % Proctor erreicht werden. Nach dem Einlegen des Behälters in das vorgefertigte Sandbett ist darauf zu achten, daß die weitere Aufschüttung auf beiden Seiten möglichst gleichzeitig erfolgt. Ein Beispiel für einen Schichtfolgeplan ist in Bild 29 dargestellt. Für die nichttragenden Teile der Erdschüttung ist im Hinblick auf die Standsicherheit keine besondere Verdichtung zu fordern, es wird jedoch aus Formhaltungsgründen eine gewisse Mindestverdichtung empfohlen, die in

Abhängigkeit vom gewählten Material festgelegt werden sollte. Die erzielte Verdichtung muß fertigungsbegleitend auf der Baustelle kontrolliert werden.
Besonders bei der kontinuierlichen Lagerung in einem Sandbett erhalten montagetechnische Gesichtspunkte besonderes Gewicht, da für die Fertigung und Prüfung der Montageschlußnähte in dem Sandbett Zugänge erforderlich werden (Bild 26). Diese Zugänge sind im nachhinein bei der Erdanschüttung nicht mehr kontrolliert zu verdichten und bilden somit Störstellen in der Bettung. Es sollten deshalb möglichst große Einheiten verlegt werden, um die Anzahl dieser Gräben zu begrenzen. Um eine maßhaltige Einlagerung der Rohrsektionen in das Sandbett zu erleichtern, hat sich die Gestaltung des Sandbettes in dieser Phase mit einem Bettungsöffnungswinkel von ca. 70° bewährt. Bild 27 zeigt einen Überblick über eine Behälterbaustelle der geschilderten Art. In Bild 28 ist der Zustand nach Fertigstellung der Stahlbehälter gezeigt, wie er sich zum Zeitpunkt der Druckprobe darstellt.

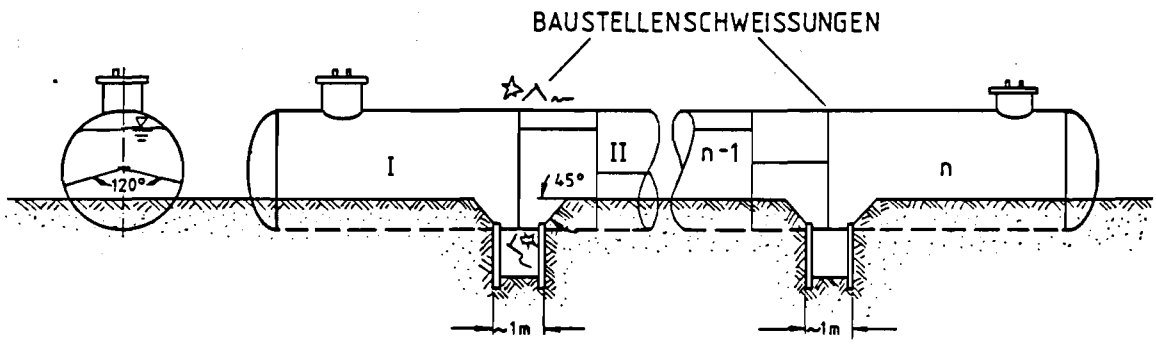


Bild 26: Montage- und Prüfgräben für den Zusammenbau im Sandbett und die Wasserdruckprobe

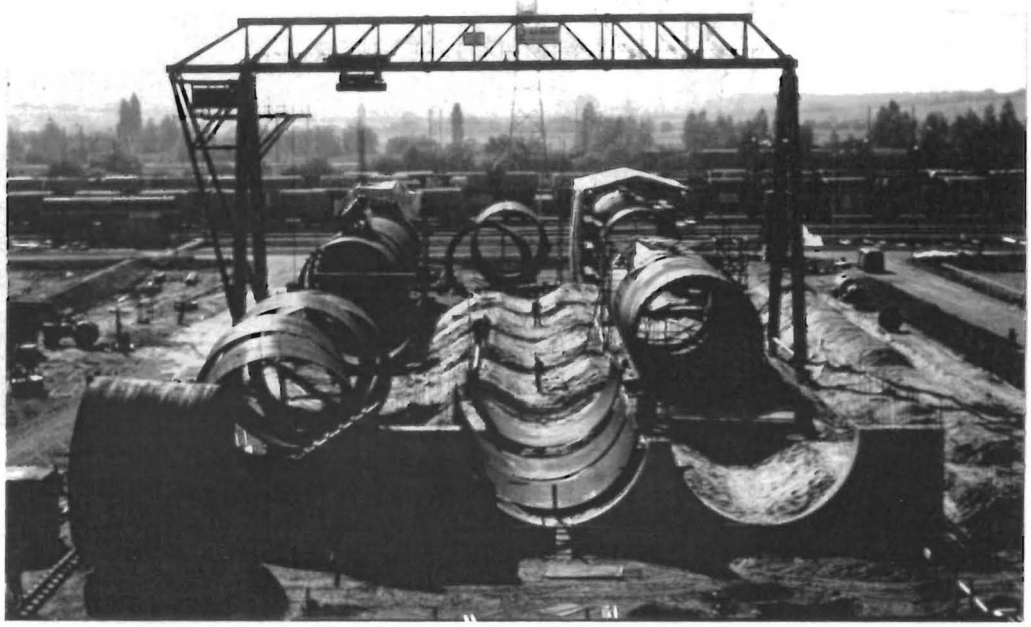


Bild 27 : oben: Behältermontage im Sandbett; D = 6,1 m;
unten : Blick über eine Behälterbaustelle

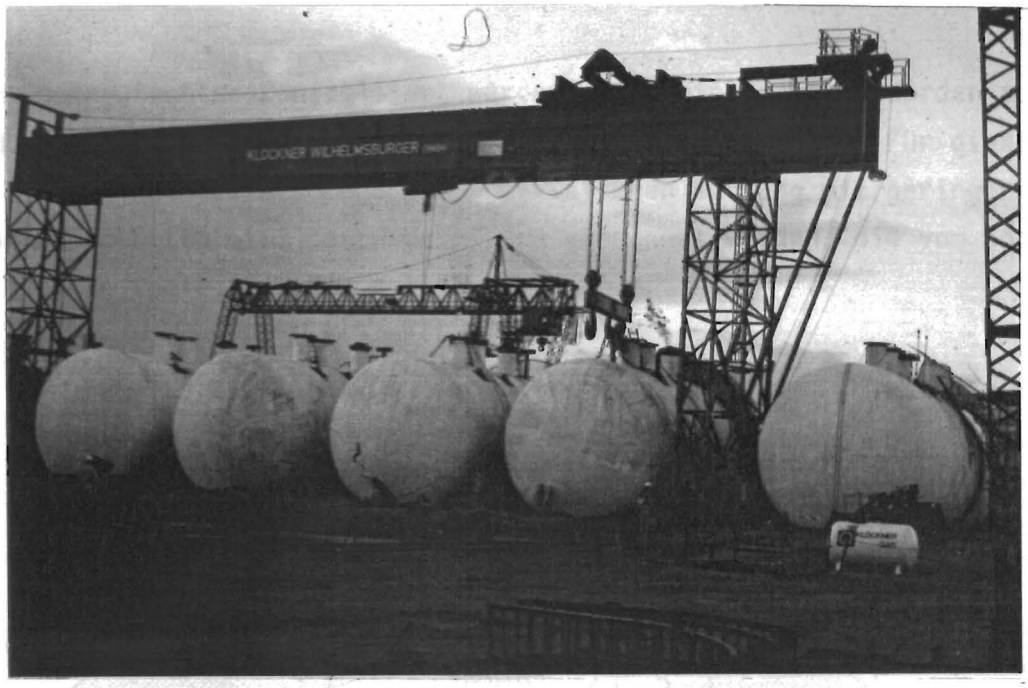


Bild 28: Fertige Stahlbehälter im Druckprobenzustand.

Inhalt: 3000 cbm;
Durchmesser: 7.0 m;
Länge ca. 80 m

In jüngster Zeit wurde mehr und mehr dazu übergegangen, auch große Behälter auf einem Montageplatz komplett vorzufertigen und mit Schwerlastkränen ins Sandbett zu heben. Bei einem anderen Verfahren werden die fertigen Behälter auf hydraulischen Schlitten ins Sandbett eingefahren. Zu diesem Zweck sind allerdings zwei Gräben erforderlich, die das Sandbett ca. in den Drittelspunkten kreuzen. Da bei einer kompletten Vorfertigung des Behälters und des Sandbetts Passungsschwierigkeiten nicht vermieden werden können, wird die Breite des vorgefertigten Sandbetts so klein wie möglich gehalten, wobei der Öffnungswinkel auf bis zu 30° herabgesetzt werden kann. Um die erforderliche Verdichtung des tragenden Sandbetts in diesem relativ unzugänglichen Bereich gewährleisten zu können, wurde ein neues Verfahren entwickelt, bei dem der feinkörnige Sand mit Wasser eingeschwemmt und mit herkömmlichen Rüttelflaschen Schicht für Schicht verdichtet wird. Die so erzielte Verdichtung sollte jedoch während des Auffüllens des Sandbetts bei diesem Verfahren ständig von

einem Bodengutachter kontrolliert werden. In gleicher Weise werden auch die Montagegräben für die hydraulischen Schlitten verfüllt. Für diese Bereiche muß bei der Berechnung der elastischen Bettung mit geringeren Bodensteifigkeiten bzw. Bettungsziffern gerechnet werden, die vom Bodengutachter festgelegt werden sollten.

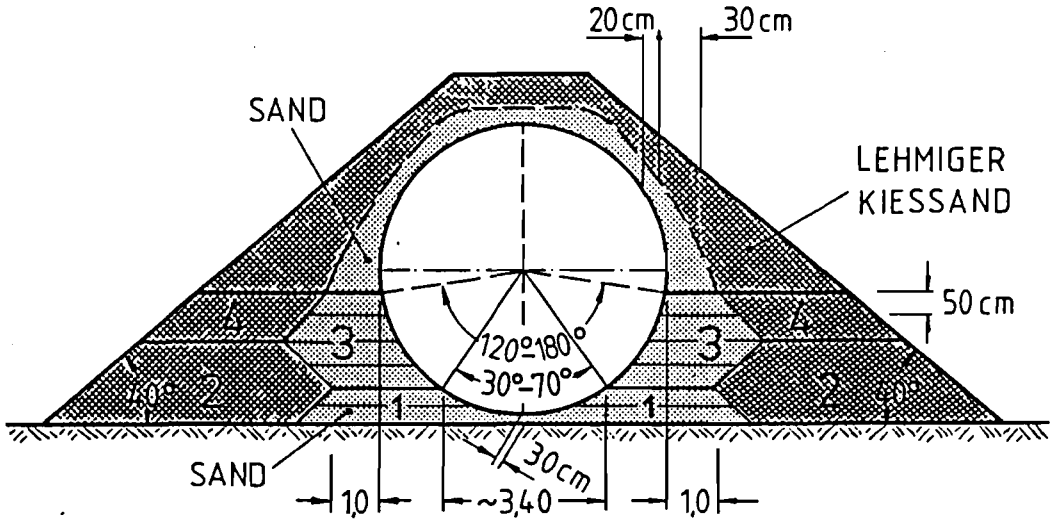


Bild 29: Schichtfolge bei der Errichtung des Sandbetts und der Erdschüttung

8. Prüfung und Inspektion

8.1. Qualitätssicherung bei der Herstellung

Die Qualitätssicherung bei der Herstellung geschweißter Druckbehälter erfolgt entsprechend der Regelungen der AD-Merkblätter Reihe HP. Der Hersteller hat dem mit der Vorprüfung betrauten Sachverständigen nachzuweisen, daß er die Voraussetzungen erfüllt, die Werkstoffe einwandfrei verarbeiten und prüfen zu können.
In diesem Zusammenhang regeln die AD-Merkblätter Reihe HP die Anforderungen an die Verarbeitungseinrichtungen, das Aufsichts- und Fertigungspersonal sowie die Verfahrensprüfungen.
Zusätzlich wird die Qualitätssicherung durch den in AD-HP 5/2 und 5/3 beschriebenen Mindestumfang an zerstörungsfreien Prüfungen bzw. zerstörenden Arbeisprüfungen überprüft.
An Flüssiggasbehälter werden jedoch bezüglich der Qualitätssicherung hö-

here Anforderungen gestellt.
Abweichend von den Regelungen des AD-Merkblattes HP 5/2 sollten auch bei einer Schweißnahtaussnutzung von ≤ 85 % in jedem Fall eine Arbeitsprüfung pro Behälter durchgeführt werden. Je nach Wanddicke und Schweißnahtausnutzung ist ferner ein erhöhter Prüfumfang bei der objektbezogenen zerstörungsfreien Prüfung gegenüber den Forderungen des AD-Merkblattes HP 5/3 erforderlich.
Die Tabelle in Bild 30 zeigt den empfohlenen Umfang der zerstörungsfreien Prüfung für einen großen Propanbehälter mit 100%iger Schweißnahtausnutzung.

	Bauteil	Schweißdetail	Verfahren (% der Nahtlänge) OR (%)	US (%)	D (%)	Härtemessungen (stichprobenweise)
a) Herstellung	Mantel Böden	Anschweißteile Kehlnähte	100			
		Ringsteifen K-Nähte	100			
		Heft- u. Zündstellen (nach dem Beschleifen)	100			
		Längsnähte	100	100	100	x
		Rundnähte	100	100	100	x
		T-Stöße/Ringsteifen		10		
		Hilfsschweißungen (nach dem Entfernen)	100			
	Stutzen	Randzonen 100 mm Breite		100		
		Schweißnahtflanken	100			
		Flanschrundnähte		100	100	x
		Heft- u. Zündstellen (nach dem Beschleifen)	100			
		Stutzennaht am Blinddeckel	100			
b) Druckprobe	Mantel Böden Stutzen	T-Stöße Mantel			100	
		T-Stöße Böden			100	
		Stützennähte		100	100	
		Ringsteifen-Kehlnaht zum Mantel	30			

OR = Oberflächenrißprüfung
US = Ultraschallprüfung
D = Durchstrahlprüfung

Bild 30: Umfang der zerstörungsfreien Prüfmaßnahmen bei einem Propanbehälter mit 100%iger Schweißnahtausnutzung, a) Herstellung; b) Wasserdruckprobe

8.2. Wasserdruckprobe

Entsprechend dem AD-Regelwerk werden Druckbehälter nach der Fertigung einer Wasserdruckprobe unterzogen, wobei die Schweißnähte der drucktragenden Wandungen sichtbar sein sollen. Bei erdgedeckten Zylindern wird die erste Druckprobe im Zustand teilweiser Anschüttung bei einem Sandbettöffnungswinkel von ca. 120° durchgeführt, wobei je nach Herstellungsverfahren die auftretenden Baustellenrundnähte durch Gräben im Sandbett zugänglich gemacht werden. Diese Gräben werden nach der Druckprobe wieder geschlossen und verdichtet. Hierbei kann jedoch nicht die Qualität des vorbereiteten Sandbetts erreicht werden, so daß die Lastabtragung im Bereich der verfüllten Gräben hinter dem ungestörten Sandbett zurückbleibt. Bei dieser Verfahrensweise wird also die Tragsicherheit der Gründung durch im Zusammenhang mit einer qualitätssichernden Prüfung erforderlichen Maßnahmen abgemindert. Es wird daher empfohlen, auf die äußere Sichtprüfung der im verdichteten Sandbett liegenden Nähte zugunsten zusätzlicher zerstörungsfreier Prüfungen der besagten Nahtabschnitte zu verzichten.
Bei Zylindern, die komplett in der Werkstatt gefertigt werden, kann die Druckprobe auch im Werk durchgeführt werden, wobei auch in diesem Fall zerstörungsfreie Prüfungen gemäß Bild 30 empfohlen werden.

8.3. Wiederkehrende Prüfungen

Anläßlich der wiederkehrenden Prüfungen soll eine Aussage darüber ermöglicht werden, ob sich der Behälter und seine Ausrüstung zum Zeitpunkt der Prüfung in einem ordnungsgemäßen Zustand befindet. Für erdgedeckte Propangasbehälter gelten derzeit folgende Prüffristen nach TRB 514, 532, 801:

äußere Prüfung:	alle 2 Jahre
innere Prüfung:	alle 5 Jahre
Druckprüfung:	alle 10 Jahre

Bei der äußeren Prüfung wird die Beschaffenheit der Ausrüstungsteile, die Unversehrheit der sichtbaren drucktragenden Behälterteile sowie die

Einhaltung der Aufstellungsbedingungen von einem Sachkundigen überprüft (s. TRB 532).

Die innere Prüfung erfolgt durch einen Sachverständigen nach TRB 514. Er besichtigt die Beschaffenheit und den Zustand der drucktragenden Wandungen einschließlich der Schweißverbindungen und kontrolliert das Vorhandensein und die Beschaffenheit der Ausrüstungsteile sowie die Übereinstimmung der Aufstellung mit den geprüften Unterlagen.
Hält der Sachverständige die Sichtprüfung für nicht genügend aussagekräftig, kann die Prüfung ergänzt werden durch Besichtigungsverfahren mit besonderen Geräten. Bei bekannter Schadensanfälligkeit und konkretem Schadensverdacht könnten zerstörungsfreie Prüfungen der in Frage kommenden Wandungsteile oder eine Druckprüfung durchgeführt werden.

Bei der Druckprüfung wird der Behälter vollständige mit Wasser gefüllt und mit dem 1,3fachen Betriebsdruck beaufschlagt. Der Sachverständige kontrolliert dabei, daß keine sicherheitstechnisch bedenklichen Verformungen auftreten und der Behälter dicht ist. Nach dem Entleeren erfolgt eine Sichtprüfung der drucktragenden Wandung einschließlich der Schweißnähte. Zerstörungsfreie Prüfungen können stichprobenweise durchgeführt werden.

8.4. Setzungskontrollen

Bei sandgebetteten und auf mehr als zwei Sätteln gelagerten Zylindern muß das Setzungsverhalten bei der statischen Berechnung berücksichtigt werden.
Da bei den Setzungsvorhersagen auch bei aufwendigen Bodenuntersuchungen ein gewisser Unsicherheitsfaktor besteht, muß das Setzungsverhalten des ausgeführten Bauwerks daraufhin kontrolliert werden, daß die der statischen Berechnung zugrunde gelegten Höchstwerte für die Differenzsetzungen zwischen Tankende und -mitte bzw. zwischen den einzelnen Sätteln nicht überschritten werden.
Die Richtigkeit der Setzungsvorhersagen kann bereits bei einer evtl. erforderlichen Vorbelastung des Geländes überprüft werden.
Im Verlauf der Wasserdruckprobe wird empfohlen, die Setzungen entlang

der Längsachse bei verschiedenen Füllständen (Füll- und Entleerungsprozeß) sowie nach 48 Stunden bei 100%iger Füllung festzuhalten.
Nach der vollständigen Einschüttung und der Inbetriebnahme sollten in regelmäßigen Abständen Messungen durchgeführt und zusammen mit den dabei herrschenden Betriebs- und Temperaturdaten dokumentiert werden.

Durchführung und Anordnung der Setzungsmarken

Da sandbettgelagerte Tanke keine definierten Fixpunkte aufweisen, werden die am Tankmantel gemessenen Setzungen durch betriebliche Beanspruchungen, besonders durch den jeweils herrschenden Innendruck, verfälscht. Zur Interpretation des Meßergebnisses müssen daher im Meßquerschnitt Durchmesserkontrollen im leeren sowie im voll eingeschütteten aber drucklosen Zustand durchgeführt werden. Durch diese Maßnahmen können die druckbedingten Durchmesseränderungen bestimmt und die gemessenen Setzungen relativiert werden.
Die Setzungen können an auf dem Zylinderscheitel aufgesetzten Peilstäben oder an auf den Domflanschen angebrachten Meßmarken bestimmt werden.
Es sollten mindestens 5 Meßquerschnitte entlang der Längsachse eingerichtet werden.
Bei Sattellagerung sollte in jedem Sattelquerschnitt ein Meßpunkt installiert werden.

9. Literatur

[1] Flügge, W.: Statik und Dynamik der Schalen
Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg,
1957

[2] Girkmann, K.: Flächentragwerke
Springer, Wien, 1956

[3] Pflüger, A.: Elementare Schalenstatik
Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg,
1960

[4] Hampe, E.: Flüssigkeitsbehälter, Band I: Grundlagen
Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1980

[5] Mang, F.: Zur Gestaltung und wirklichkeitsnahen
Bemessung von geschweißten
ringversteiften Behältern und Rohren
Techn. Mitteilungen Heft 9/1973, S. 414 -
417

[6] Mang, F.: Berechnung und Konstruktion
ringversteifter Druckrohrleitungen
Springer, Berlin, Heidelberg, New York,
1966

[7] Mang, F.: Die Sattellagerung unversteifter
kreiszylindrischer Rohre und Behälter
Habilitationsschrift, Karlsruhe, 1969

[8] Mang, F.: Festigkeitsprobleme bei örtlich
gestützten Rohren und Behältern
Rohre, Rohrleitungsbau, Rohrlei-
tungstransport, H. 4 + 5, 10. Jahrgang
1971, H. 1

[9] Zick, L. P.: Stresses in large horizontal cylindrical pressure vessels on two saddle supports. Welding Research Supplement, September 1951, p. 435 - 445

[10] Roark, R. J.: The strengh and stiffness of cylindrical shells under concentrated loadling. Am. Soc. Mech. Eng., Jour. Appl. Mech. Vol. 2 No. 1935, p. A 147 - A 152

[11] Kollbrunner, C. F.: Milosacljevic, S.: Neuer Beitrag zur Berechnung von auf Außendruck beanspruchten kreiszylindrischen Rohren. Freiverlegtes Rohr und einbetoniertes Rohr. Mitteilungen über Forschung und Konstruktion im Stahlbau, H. 31, 1965

[12] Timoshenko, S.: Theory of Plates & Shells New York, 1959

[13] Narayanan, R.: Shell Structures London, New York, 1985

[14] British Standards BS 5500

[15] DASt Ri 013 Deutscher Ausschuß für Stahlbau

[16] AD-Merkblätter Beuth Verlag

[17] Comprimo BV: Storage of pressorides LPG in mounded bullets or spheres

[18] Wefers, H.:
Katzer, H.:
LIS-Bericht Nr. 71
Zusammenstellung von zusätzlichen sicherheitstechnischen Anforderungen an Anlagen zur Lagerung von druckverflüssigtem Ammoniak in Kraftwerken

[19] TRB 801 Entwurf
Anlage "Flüssiggaslagerbehälteranlagen" zur Nr. 25 "Druckbehälter für nicht korrodierend wirkende Gase oder Gasgemische"

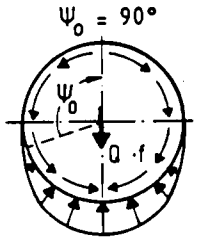
[20] Gemeinsamer Runderlaß des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen - VA4-8853.1.59 - und des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen - III A2-8546.3 - Sicherheitstechnische Anforderungen an Flüssiggasanlagen

Hilfsfaktoren

psi	k-M	k-N	k-Q
0.0	0.04348	0.15915	0.00000
5.0	0.04288	0.15733	0.01384
10.0	0.04108	0.15190	0.02735
15.0	0.03812	0.14294	0.04024
20.0	0.03408	0.13055	0.05220
25.0	0.02905	0.11489	0.06293
30.0	0.02314	0.09616	0.07216
35.0	0.01650	0.07460	0.07963
40.0	0.00930	0.05049	0.08511
45.0	0.00171	0.02414	0.08838
50.0	-0.00606	-0.00410	0.08927
55.0	-0.01379	-0.03387	0.08762
60.0	-0.02127	-0.06476	0.08333
65.0	-0.02826	-0.09638	0.07630
70.0	-0.03451	-0.12829	0.06650
75.0	-0.03978	-0.16004	0.05391
80.0	-0.04384	-0.19121	0.03858
85.0	-0.04644	-0.22134	0.02057
90.0	-0.04735	-0.25000	-0.00001
95.0	-0.04644	-0.27683	-0.02058
100.0	-0.04383	-0.30176	-0.03859
105.0	-0.03978	-0.32481	-0.05392
110.0	-0.03450	-0.34602	-0.06650
115.0	-0.02825	-0.36542	-0.07630
120.0	-0.02127	-0.38307	-0.08332
125.0	-0.01379	-0.39901	-0.08762
130.0	-0.00605	-0.41331	-0.08926
135.0	0.00172	-0.42601	-0.08837
140.0	0.00930	-0.43719	-0.08510
145.0	0.01650	-0.44689	-0.07963
150.0	0.02314	-0.45517	-0.07216
155.0	0.02905	-0.46209	-0.06293
160.0	0.03408	-0.46768	-0.05220
165.0	0.03812	-0.47199	-0.04024
170.0	0.04108	-0.47505	-0.02735
175.0	0.04288	-0.47687	-0.01383
180.0	0.04348	-0.47748	0.00000

überlagerte Grundsysteme: psi_0

Grundsystem 5 - 1S 90.0

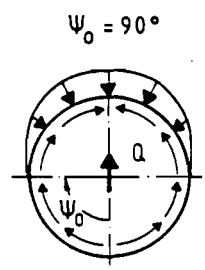


Hilfsfaktoren

psi	k-M	k-N	k-Q
0.0	0.04348	-0.47748	0.00000
5.0	0.04288	-0.47687	-0.01383
10.0	0.04108	-0.47505	-0.02735
15.0	0.03812	-0.47199	-0.04024
20.0	0.03408	-0.46768	-0.05220
25.0	0.02905	-0.46209	-0.06293
30.0	0.02314	-0.45517	-0.07216
35.0	0.01650	-0.44689	-0.07963
40.0	0.00930	-0.43719	-0.08510
45.0	0.00172	-0.42601	-0.08837
50.0	-0.00605	-0.41331	-0.08926
55.0	-0.01379	-0.39901	-0.08762
60.0	-0.02127	-0.38307	-0.08332
65.0	-0.02825	-0.36542	-0.07630
70.0	-0.03450	-0.34602	-0.06650
75.0	-0.03978	-0.32481	-0.05392
80.0	-0.04383	-0.30176	-0.03859
85.0	-0.04644	-0.27683	-0.02058
90.0	-0.04735	-0.25000	-0.00001
95.0	-0.04644	-0.22134	0.02057
100.0	-0.04384	-0.19121	0.03858
105.0	-0.03978	-0.16004	0.05391
110.0	-0.03451	-0.12829	0.06650
115.0	-0.02826	-0.09638	0.07630
120.0	-0.02127	-0.06476	0.08333
125.0	-0.01379	-0.03387	0.08762
130.0	-0.00606	-0.00410	0.08927
135.0	0.00171	0.02414	0.08838
140.0	0.00930	0.05049	0.08511
145.0	0.01650	0.07460	0.07963
150.0	0.02314	0.09616	0.07216
155.0	0.02905	0.11489	0.06293
160.0	0.03408	0.13055	0.05220
165.0	0.03812	0.14294	0.04024
170.0	0.04108	0.15190	0.02735
175.0	0.04288	0.15733	0.01384
180.0	0.04348	0.15915	0.00000

überlagerte Grundsysteme: psi_0

Grundsystem 5-1s 90.0

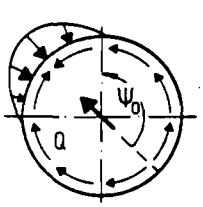


Hilfsfaktoren

psi	k-M	k-N	k-Q
0.0	-0.02672	-0.42061	-0.22226
5.0	-0.00596	-0.41861	-0.25085
10.0	0.01659	-0.41297	-0.26323
15.0	0.03952	-0.40495	-0.25986
20.0	0.06151	-0.39578	-0.24178
25.0	0.08134	-0.38659	-0.21055
30.0	0.09794	-0.37834	-0.16819
35.0	0.11044	-0.37184	-0.11713
40.0	0.11820	-0.36770	-0.06009
45.0	0.12084	-0.36628	-0.00000
50.0	0.11820	-0.36770	-0.06009
55.0	0.11044	-0.37184	-0.11713
60.0	0.09794	-0.37834	-0.16819
65.0	0.08134	-0.38659	-0.21055
70.0	0.06151	-0.39578	-0.24178
75.0	0.03952	-0.40495	-0.25986
80.0	0.01659	-0.41297	-0.26323
85.0	-0.00596	-0.41861	-0.25085
90.0	-0.02672	-0.42061	-0.22226
95.0	-0.04452	-0.41793	-0.18563
100.0	-0.05914	-0.41052	-0.14945
105.0	-0.07063	-0.39859	-0.11412
110.0	-0.07909	-0.38242	-0.08001
115.0	-0.08464	-0.36232	-0.04748
120.0	-0.08743	-0.33863	-0.01688
125.0	-0.08765	-0.31173	0.01152
130.0	-0.08549	-0.28204	0.03745
135.0	-0.08119	-0.25000	0.06068
140.0	-0.07499	-0.21605	0.08103
145.0	-0.06714	-0.18067	0.09835
150.0	-0.05791	-0.14434	0.11253
155.0	-0.04759	-0.10753	0.12353
160.0	-0.03645	-0.07073	0.13130
165.0	-0.02477	-0.03442	0.13588
170.0	-0.01282	0.00094	0.13734
175.0	-0.00088	0.03491	0.13576
180.0	0.01079	0.06706	0.13130

überlagerte Grundsysteme:	psi_0	alpha	Faktor
Grundsystem 5-1s	135.0	225.0	1.00000

$\Psi_0 = 135°$



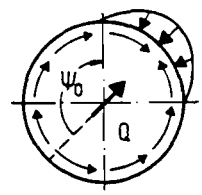
Anhang

Hilfsfaktoren

psi	k-M	k-N	k-Q
0.0	-0.02672	-0.42061	-0.22226
5.0	-0.04452	-0.41793	-0.18563
10.0	-0.05914	-0.41052	-0.14945
15.0	-0.07063	-0.39859	-0.11412
20.0	-0.07909	-0.38242	-0.08001
25.0	-0.08464	-0.36232	-0.04748
30.0	-0.08743	-0.33863	-0.01688
35.0	-0.08765	-0.31173	0.01152
40.0	-0.08549	-0.28204	0.03745
45.0	-0.08119	-0.25000	0.06068
50.0	-0.07499	-0.21605	0.08103
55.0	-0.06714	-0.18067	0.09835
60.0	-0.05791	-0.14434	0.11253
65.0	-0.04759	-0.10753	0.12353
70.0	-0.03645	-0.07073	0.13130
75.0	-0.02477	-0.03442	0.13588
80.0	-0.01282	0.00094	0.13734
85.0	-0.00088	0.03491	0.13576
90.0	0.01079	0.06706	0.13130
95.0	0.02195	0.09698	0.12412
100.0	0.03238	0.12431	0.11444
105.0	0.04186	0.14872	0.10251
110.0	0.05021	0.16989	0.08858
115.0	0.05727	0.18758	0.07296
120.0	0.06291	0.20156	0.05595
125.0	0.06701	0.21167	0.03789
130.0	0.06950	0.21779	0.01912
135.0	0.07034	0.21984	0.00000
140.0	0.06950	0.21779	0.01912
145.0	0.06701	0.21167	0.03789
150.0	0.06291	0.20156	0.05595
155.0	0.05727	0.18758	0.07296
160.0	0.05021	0.16989	0.08858
165.0	0.04186	0.14872	0.10251
170.0	0.03238	0.12431	0.11444
175.0	0.02195	0.09698	0.12412
180.0	0.01079	0.06706	0.13130

überlagerte Grundsysteme:	psi_0	alpha	Faktor
Grundsystem 5-1s	135.0	135.0	1.00000

$\Psi_0 = 135°$

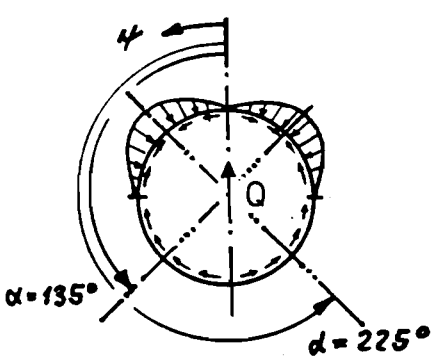


Hilfsfaktoren

psi	k-M	k-N	k-Q
0.0	-0.05345	-0.84122	-0.44451
5.0	-0.05048	-0.83655	-0.43648
10.0	-0.04255	-0.82349	-0.41268
15.0	-0.03111	-0.80355	-0.37398
20.0	-0.01758	-0.77821	-0.32179
25.0	-0.00330	-0.74890	-0.25804
30.0	0.01050	-0.71696	-0.18507
35.0	0.02279	-0.68358	-0.10560
40.0	0.03271	-0.64975	-0.02263
45.0	0.03965	-0.61628	0.06068
50.0	0.04322	-0.58376	0.02094
55.0	0.04330	-0.55252	-0.01878
60.0	0.04002	-0.52267	-0.05566
65.0	0.03375	-0.49412	-0.08703
70.0	0.02506	-0.46652	-0.11048
75.0	0.01476	-0.43937	-0.12398
80.0	0.00376	-0.41202	-0.12589
85.0	-0.00685	-0.38370	-0.11509
90.0	-0.01593	-0.35355	-0.09096
95.0	-0.02257	-0.32095	-0.06151
100.0	-0.02676	-0.28621	-0.03501
105.0	-0.02877	-0.24988	-0.01161
110.0	-0.02888	-0.21253	0.00858
115.0	-0.02737	-0.17474	0.02547
120.0	-0.02453	-0.13707	0.03908
125.0	-0.02064	-0.10006	0.04942
130.0	-0.01599	-0.06426	0.05658
135.0	-0.01086	-0.03016	0.06068
140.0	-0.00549	0.00174	0.10015
145.0	-0.00013	0.03100	0.13624
150.0	0.00499	0.05722	0.16849
155.0	0.00968	0.08005	0.19648
160.0	0.01377	0.09916	0.21988
165.0	0.01710	0.11430	0.23839
170.0	0.01956	0.12526	0.25178
175.0	0.02107	0.13190	0.25988
180.0	0.02158	0.13412	0.26259

überlagerte Grundsysteme: psi_0

Grundsystem 5-1s 135.0

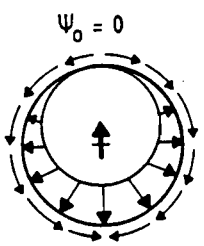


Hilfsfaktoren

psi	k-M	k-N	k-Q
0,0	0	0	0
5,0	0	0,0012	0,0034
10,0	0	0,0048	0,0119
15,0	0	0,0108	0,0228
20,0	0	0,0192	0,0337
25,0	0	0,0298	0,0423
30,0	0	0,0426	0,0466
35,0	0	0,0576	0,0452
40,0	0	0,0745	0,0370
45,0	0	0,0932	0,0215
50,0	0	0,1137	-0,0013
55,0	0	0,1357	-0,0309
60,0	0	0,1592	-0,0665
65,0	0	0,1838	-0,1070
70,0	0	0,2094	-0,1512
75,0	0	0,2359	-0,1979
80,0	0	0,2631	-0,2457
85,0	0	0,2906	-0,2936
90,0	0	0,3183	-0,3408
95,0	0	0,3461	-0,3869
100,0	0	0,3736	-0,4316
105,0	0	0,4007	-0,4750
110,0	0	0,4271	-0,5175
115,0	0	0,4528	-0,5595
120,0	0	0,4775	-0,6019
125,0	0	0,5009	-0,6450
130,0	0	0,5229	-0,6896
135,0	0	0,5434	-0,7357
140,0	0	0,5623	-0,7833
145,0	0	0,5791	-0,8319
150,0	0	0,5940	-0,8807
155,0	0	0,6068	-0,9282
160,0	0	0,6174	-0,9725
165,0	0	0,6258	-1,0115
170,0	0	0,6318	-1,0427
175,0	0	0,6354	-1,0633
180,0	0	0,6366	-1,0708

überlagerte Grundsysteme: psi 0

Grundsystem 5 - 1S 0.0



LIS-Berichte

der Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus dem Untersuchungs- und Forschungsprogramm der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Sie werden - soweit nicht vergriffen - Interessenten auf Anfrage hin kostenlos zur Verfügung gestellt. Alle LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in zahlreichen Universitäts- und Hochschulbibliotheken zur Einsichtnahme und Ausleihe zur Verfügung.

Bestellungen sind zu richten an die

Landesanstalt für Immissionsschutz
L I S Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Straße 6 D 4300 Essen 1 Tel. (0201)7995-0

Die Titel der LIS-Berichte Nr. 1 bis 50 sind in einem Prospekt nachgewiesen, der auf Anfrage gerne zugeschickt wird. Diese Berichte sind, bis auf teilweise noch verfügbare Überstücke, vergriffen.

Berichte-Nr. 51: (vergriffen)
Herpertz, E., J. Assmann, D. Krane, E. Hartmann, B. Steck, E. Brewig und J. Krochmann:
Messen und Beurteilen von Lichtimmissionen (1984).

Berichte-Nr. 52: (vergriffen)
Pfeffer, H.-U.:
Qualitätssicherung in automatischen Immissionsmeßnetzen.
Teil 3: Ringversuche der staatlichen Immissions-Meß-und Erhebungsstellen in der Bundesrepublik Deutschland (STIMES).
Ergebnisse für die Komponenten SO_2, NO_x, O_3 und CO (1984).

Berichte-Nr. 53:
Beier, R.:
Zur Planung und Auswertung von Immissionsmessungen gemäß TA-Luft 1983 (1985).

Berichte-Nr. 54:
Bröker, G. und H. Gliwa:
Polychlorierte Dibenzo-Dioxine und -Furane in den Filterstäuben und Schlacken der 12 Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen sowie einiger Sondermüllverbrennungsanlagen (1985).

Berichte-Nr. 55:
Külske, S., J. Giebel, H.-U. Pfeffer und R. Beier:
Analyse der Smoglage vom 16. bis 21. Januar 1985 im Rhein-Ruhr-Gebiet.
Teil 1: Text- und Bildband (1985)
Teil 2: Meßergebnisse (1985).

Berichte-Nr. 56:
Splittgerber, H., M. Klein und P. Neutz:
Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle bei Einwirkung von Erschütterungen auf den Menschen - Beschreibung der Versuchsanlage - (1985).

Berichte-Nr. 57: (vergriffen)
Prinz, B., J. Hradetzky, H.-U. Pfeffer, H.W. Zöttl und H.-K. Lichtenthaler:
Forschungsergebnisse zur Problematik der neuartigen Waldschäden (1985).

Berichte-Nr. 58:
Giebel, J. und W. Stramplat:
Untersuchung über die Eignung des Korrelationsspektrometers COSPEC V zur Bestimmung des Transportes von Schwefeldioxid bzw. Stickstoffdioxid (1986).

Berichte-Nr. 59: Prinz, B., D. Schwela, E. Koch, S. Ganser und T. Eikmann:
Untersuchungen zum Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Häufigkeit von Pseudokrupperkrankungen im Stadtgebiet Essen (1986)..

Berichte-Nr. 60: Manns, H. und H. Gies:
Ergebnis der Erprobung des automatischen Ozon-Meßgerätes Dasibi, Typ 1008 AH (1986).

Berichte-Nr. 61: Splittgerber, H.:
Messung und Beurteilung von Erschütterungsimmissionen - Vergleich verschiedener Verfahren - (1986).

Berichte-Nr. 62: Buck, M. und P. Kirschmer:
Immissionsmessungen polychlorierter Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane in Nordrhein-Westfalen (1986).

Berichte-Nr. 62: Buck, M. und P. Kirschmer:
Measurements of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Outdoor Air (1987).(Übersetzung des 1986 erschienenen LIS-Berichtes Nr. 62)

Berichte-Nr. 63: (vergriffen) Giebel, J.:
Untersuchung über die praktische Anwendung eines numerischen Ausbreitungsmodells (K-Modell) für die Praxis der Immissionssimulation (1986).

Berichte-Nr. 64: (vergriffen) Winkler, H.D.:
Thalliumemissionen bei der Zementherstellung - Ursachen und Minderungsmaßnahmen - (1986).

Berichte-Nr. 65: (vergriffen) Wietlake, K.H.:
Erschütterungseinwirkungen durch Exzenter-Schmiedepressen und ihre Minderung durch Direktabfederung (1986).

Berichte-Nr. 66: Viertes Symposium über die Technik der Kernreaktorfernüberwachungssysteme am 8. und 9. Oktober 1985 in der LIS, Essen (1986).

Berichte-Nr. 67: (vergriffen) Assmann, J.:
Hinweise zur Prognose von Geräuschimmissionen im Rahmen von Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (1986).

Berichte-Nr. 68: (vergriffen) Manns, H. und H. Gies:
Erprobung des Schwebstaubmeßgerätes FH 62 I 3 m^3/h für die automatisierte Immissionsmessung (1986).

Berichte-Nr. 69: (vergriffen) Beine, H.:
Phosphorsäureester und verwandte Verbindungen -
Umweltrelevanz und luftanalytische Bestimmung (1987).

Berichte-Nr. 70: Buck, M. und H.-U. Pfeffer:
Air Quality Surveillance in the State North-Rhine-Westphalia (F.R.G.).
(Vollständig neu bearbeitete Fassung LIS-Berichtes Nr. 46) (1987).

Berichte-Nr. 71: Wefers, H. und H. Katzer:
Zusammenstellung von zusätzlichen sicherheitstechnischen Anforderungen an Anlagen zur Lagerung von druckverflüssigtem Ammoniak in Kraftwerken (1987).

Berichte-Nr. 72: (vergriffen) Beier, R., J. Kohlert und M. Buck:
Entwicklung der Immissionsbelastung in der Umgebung der Aluminiumhütte im Essener Norden in den Jahren 1984 bis 1986 (1987).

Berichte-Nr. 73: (vergriffen) Schade, H.:
Erstellung eines Emissionskatasters und einer Emissionsprognose für Feuerungsanlagen im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher des Belastungsgebietes Ruhrgebiet Ost.
(1987).

Berichte-Nr. 74: (vergriffen)
Beier, R. und M. Buck:
Möglichkeit und Grenzen der Nutzung von Luftqualitätsdaten aus diskontinuierlichen Messungen gemäß TA-Luft (1988).

Berichte-Nr. 75:
Koch, E. und P. Altenbeck:
Prinzipien des prophylaktischen Immissionsschutzes (1988).

Berichte-Nr. 76:
Giebel, J.:
Eine vereinfachte Methode zur Immissionssimulation (1988).

Berichte-Nr. 77: (vergriffen)
Külske, S., R. Beier und H.-U. Pfeffer:
Die Smoglage vom 14. bis 22. Januar 1987 in Nordrhein-Westfalen und ihre Ursachen. (1988).

Berichte-Nr. 78: (vergriffen)
Geueke, K.-J. und H. Niesenhaus:
Bestimmung von Benzol in Abgasen (1988).

Berichte-Nr. 79: (vergriffen)
Wietlake, K.-H.:
Geräuschminderung durch Teilkapselung von Schmiedehämmern (1988).

Berichte-Nr. 80:
Krause, G.H.M. und B. Prinz:
Experimentelle Untersuchungen der LIS zur Aufklärung möglicher Ursachen der neuartigen Waldschäden (1989).

Berichte-Nr. 81: (vergriffen)
Goldberg, K.H.:
Untersuchungen zur Geräuschemission und -ausbreitung von Schußsignalen bei Kleinkaliberschießständen (1988).

Berichte-Nr. 82:
Buck, M. und K. Ellermann:
Die Immissionsbelastung durch Benzol in Nordrhein-Westfalen (1988).

Berichte-Nr. 83:
Wefers, H., S. Delling und T. Schulz:
Hinweise zur Erstellung und Prüfung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen nach der Störfall-Verordnung (1988).

Berichte-Nr.84:
Wefers, H., T. Schulz und R. John:
Hinweise und Suchstrategien zu den Stoffen der Störfall-Verordnung (1988).

Hinweis: Die Grundlage des LIS-Berichtes bildet eine PC-Stoffliste, die von der LIS mit Hilfe einer relationalen Datenbank für Personalcomputer erstellt wurde. Die PC-Stoffliste kann auf PC mit Festplatte und dem Betriebssystem MS-DOS 3.3 (IBM-kompatibel) betrieben werden. Die PC-Stoffliste wird im Auftrag der LIS von der Fa. Colman, Essen (Tel.: 0201/790095) für DM 100,-- vertrieben

Berichte-Nr. 85: (vergriffen)
Krause, G.H.M.:
Untersuchungen zum Vegetationszustand im Umgebungsbereich der nordrhein-westfälischen Aluminiumhütten mit Hilfe der Falschfarbenfotografie (1988).

Berichte-Nr. 86: (vergriffen)
Katzer, H. und R. John:
Einsatz von Ammoniakwasser in katalytischen DeNO_x-Anlagen - Ergebnisse an einer Versuchsanlage - (1989).

Berichte-Nr. 87:
Kirschmer, P. und A. Gerlach:
Immissionsmessungen von Chlorkohlenwasserstoffen - Probenahme, Analyse, Ergebnisse - (1989).

Berichte-Nr. 88:
Euteneuer, U., H. Katzer und H. Wefers:
Sicherheitstechnische Überprüfung einer verfahrenstechnischen Anlage nach einem modifizierten PAAG-Verfahren am Beispiel eines Flüssiggaslagers (1989).

Berichte-Nr. 89:
Beier, R. und A. Doppelfeld:
Analyse der räumlichen Repräsentativität automatischer Meßnetze der Luftqualität (1989).

Berichte-Nr. 90: Beier, R. und J. Kohlert:
Pilotstudie zur Überwachung von Tetrachlorethen in der Nachbarschaft von Chemisch-Reinigungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1989).

Berichte-Nr. 91: Buck, M. (Bearb.):
Asbest-Immissionsbelastung durch Abwitterung.
Fachkolloquium am 06. Juli 1989 in der LIS NRW, Essen,
Tagungsbericht. Gem. hrsg. von: Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Niedersächsisches Landesamt für Immissionsschutz, Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen (1989).

Berichte-Nr. 92: Kirschmer, P. und P. Eynck:
Meßverfahren mit automatisierter Probenahme zur Bestimmung von Aldehyden in der Luft (1989).

Berichte-Nr. 93: Ehl, W. und A. Ertl:
Kriterien-Katalog zur "Prüftiefe" bei Sicherheitsanalysen am Beispiel eines Flüssiggaslagers. (1990).

Berichte-Nr. 94: Manns, H., G. Nitz und B. Striefler:
Weiterentwicklung und Erprobung von Immissionsmeßverfahren für gesundheitsgefährdende organische Stoffe. (1990).

Berichte-Nr. 95: Splittgerber, H. und R. Hillen:
Wahrnehmungsschwelle für Ganzkörperschwingungen in sitzender Körperhaltung. (1991).