Inhaltsverzeichnis Kapitel 1

Dr.-Ing. Günter Fuchs

1	**Entwicklung des Silobaues**	*3*
1.1	**Einleitung**	*3*
1.2	**Der Weg von der Getreidegrube zum Großraumsilo**	*3*
1.2.1	Die Herkunft des Wortes „Silo“	*3*
1.2.2	Die Speicheranlagen in der Antike	*4*
1.2.2.1	Getreidesilos in Ägypten	*4*
1.2.2.2	Getreidespeicher im Industal	*4*
1.2.2.3	Getreidespeicher in Rom und seinen Provinzen	*4*
1.2.3	Getreidespeicher zu Beginn der Neuzeit	*6*
1.2.4	Getreidesilos im 19. Jahrhundert in den USA	*6*
1.2.5	Form und Baustoffe der Silozellen im 19. Jahrhundert	*7*
1.2.6	Frühe Silos zur Lagerung von Getreide und Mehl in Deutschland	*8*
1.2.7	Reichstypenspeicher oder Heeresspeicher	*11*
1.2.8	Umschlagsilos für organische Produkte nach dem 2. Weltkrieg	*11*
1.3	**Die Entwicklung im Bau von Zuckersilos**	*12*
1.3.1	Anfänge und Entwicklung	*12*
1.3.2	Die Entwicklung vom Einfachsilo für 5000 t zum Regeltyp für 35000 t	*13*
1.3.3	Weitere Entwicklung	*14*
1.4	**Der Silobau in der Zementindustrie**	*14*
1.4.1	Zementsilos	*14*
1.4.2	Rohmehlsilos	*16*
1.4.3	Klinkersilos	*16*
1.5	**Entwicklungstendenzen**	*17*
	Literatur zu Kapitel 1	*18*

1 Entwicklung des Silobaues

1.1 Einleitung

Silobauwerke sind notwendig, um die häufig naturgegebenen Schwankungen zwischen Erzeugung und Verbrauch von schüttbaren Massengütern auszugleichen und eine gewisse Vorratshaltung zu ermöglichen.

Das wichtigste und mengenmäßig größte Speichergut war und ist Getreide. Getreide bildet auch heute noch in Europa und in vielen anderen Weltteilen das Hauptnahrungsmittel, und Getreide läßt sich gut speichern. Bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts finden wir nur Getreide und Mehl als Güter, die großräumig gespeichert werden. Ein historischer Rückblick auf die Geschichte im Speicherbau wird daher gleichsam zwangsläufig für die Zeit bis in unser Jahrhundert nur Speicherformen für Getreide behandeln.

In unserem Jahrhundert erfolgte dagegen infolge des Bestrebens, den Güterumschlag zu mechanisieren und automatisieren, eine vergleichsweise explosionsartige Entwicklung im Bedarf von Silokonstruktionen zur Lagerung der verschiedensten Massengüter.

Da das vorliegende Silohandbuch sich verständlicherweise nur auf sehr kurzem Raum mit der geschichtlichen Entwicklung beschäftigen soll, kann dieser Rückblick nur skizzenhaft und ohne Anspruch auf Vollständigkeit erfolgen.

Im ersten Teil soll daher die Entwicklung der Getreidespeicherung geschildert werden, im zweiten Teil die der Zuckersilos und stellvertretend für die anorganischen Massengüter im dritten Teil die der Silos für die Zementindustrie.

1.2 Der Weg von der Getreidegrube zum Großraumsilo

1.2.1 Die Herkunft des Wortes „Silo“

Das Wort „Silo“ stammt nach den Ausführungen deutscher Verfasser von Büchern über Siloanlagen um die Jahrhundertwende [1-1, 1-2] angeblich aus Spanien, wo zur Zeit der Mauren das Wort „Sylos“ zunächst ein bestimmtes Raummaß und in erweiterter Bedeutung eine Getreidegrube bezeichnet, die ein solches Quantum Getreide enthält.

In einer spanischen Enzyklopädie [1-3] wird in der Ausgabe 1980 als Bedeutung des Wortes „Silo“ das deutsche Wort „Getreidegrube“ angegeben, die Herkunft aber vom lateinischen Wort „sirus“ und dieses wiederum vom griechischen Wort „Siros“ abgeleitet. Die Rückführung des Wortes bis in die Antike wundert nicht, denn derartige Getreidegruben gab es seit der Zeit, als man erkannte, daß man die Qualität des Getreides erhalten kann, wenn man den freien Luftzutritt verhindert.

Nach *Feldhaus* [1-4] vergruben die Hebräer und Araber gleich nach der Ernte das abgedroschene Getreide auf freiem Feld in Erdgruben. Für Nomadenvölker hatte diese Art der Konservierung noch einen weiteren Vorteil: Sie brauchten das Getreide nicht mitzuführen, und es hielt sich, vor dem Feinde verborgen, lange frisch.

Im vergangenen Jahrhundert bediente man sich dieses Systems noch in einigen Gegenden Spaniens, Ungarns und Rußlands. Es wurden in möglichst trocken gelegenem Gelände Höhlen ins Erdreich gegraben und mit Steinen ausgekleidet oder mit Lehm ausgestampft (Bild 1-1). Die Grube wurde dann mit trockenem

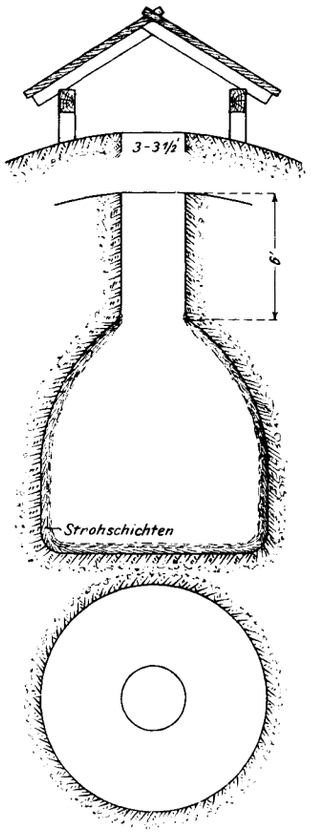


Bild 1-1
Getreidegrube

Stroh belegt, mit Korn gefüllt, mit Stroh abgedeckt und so mit Boden bedeckt, daß weder Luft noch Nässe durchdringen konnten. Wer heute das Wort Silo benutzt, wird allerdings sicher nicht mehr an eine derartige Getreidehöhle denken!

1.2.2 Die Speicheranlagen in der Antike

Man nimmt heute an, daß etwa 8000 v. Chr. die ersten Ackerbausiedlungen in Anatolien und in Palästina entstanden sind. Die Anlage von Kanälen und Dämmen zur Bewässerung der Äcker gehörte in allen antiken Hochkulturen zur ersten und wichtigsten Gemeinschaftsaufgabe; die Überschüsse an Getreide ermöglichten über Arbeitsteilung erst Kultur.

1.2.2.1 Getreidesilos in Ägypten

Im Ersten Buch Moses finden wir in der Josephslegende den ersten schriftlichen Bericht über die Sammlung des Getreideüberschusses während der sieben reichen Jahre. Um 3000 v. Chr. müssen bereits die ersten Großspeicheranlagen für Getreide eingerichtet worden sein, um eine sinnvolle Vorratswirtschaft zu betreiben. Von solchen Bauten sind überraschenderweise sogar mehrere Holzmodelle erhalten geblieben. Das Getreide wurde in Säcken bis zur Speicherdecke geschleppt, durch Öffnungen in den Speicherraum geschüttet und konnte bei Bedarf durch Öffnungen im Speicherboden wieder entnommen werden [1-5]. Mit diesen Modellen haben wir den Prototyp aller späteren Silos gefunden.

Bild 1-2 zeigt ein Holzmodell aus dem Besitz der Staatlichen Museen Preußischer Kulturbesitz ungefähr aus der Zeit um 1900 v. Chr.

Bild 1-2
Holzmodell eines ägyptischen Getreidesilos
Ägyptisches Museum Berlin, Inv.-Nr. 12548

1.2.2.2 Getreidespeicher im Industal

Auch in anderen früheren Hochkulturen finden wir erwartungsgemäß Getreidespeicher, die von Priestern oder Hofbeamten des Königs verwaltet und an hervorragender und geschützter Stelle erbaut wurden. Eine Vorstellung von derartigen Bauten erhalten wir aus den Ruinenstädten Harappâ und Mohengo-Daro, zwei Schwesternstädten im Industal, die um 2000 v. Chr. ihre Blütezeit hatten und um 1500 v. Chr. zerstört wurden. In beiden Städten wurde – in ähnlicher Weise abgetrennt vom Wohnbezirk – eine mit einem Kranz von Bastionen und Türmen ausgerüstete Zitadelle errichtet: Eine aus Ziegeln und Erde aufgeschüttete Plattform mit einer Fläche von ca. 400 × 80 m, bei einer Höhe von ca. 12 m, über dem umliegenden Gelände. Auf dieser Zitadelle fand man die Ruinen eines über 45 m langen und fast 23 m breiten Gebäudes, das als Kornspeicher identifiziert wurde. Es diente vermutlich zur Lagerung des von den Bauern des freien Landes an die Stadt abgelieferten Weizen- und Gerstegetreides.

Eine Rekonstruktionszeichnung des Kornhauses in [1-6] zeigt ein gemauertes Sockelgeschoß mit einem System von verzweigten anderthalb Meter tiefen und etwa halb so breiten Kanälen, die zur Frischluftzirkulation für die darüber befindlichen aus Holz errichteten Speicherbauten dienten. Diese „Klimatisierung" der Getreidespeicher war – wie wir später sehen werden – keineswegs immer selbstverständlich.

1.2.2.3 Getreidespeicher in Rom und seinen Provinzen

Ägypten galt noch während des römischen Imperiums als die Kornkammer des Mittelmeerraumes; aus dem Niltal stammte rund ein Drittel der Getreidemenge zur Versorgung von Italien einschließlich Roms. Die Kornspeicher Ägyptens waren sprichwörtlich für den Getreideüberfluß.

Das Getreide gelangte von Alexandria als Sammelplatz mittels Seeschiffen (Nutzlast von 200 bis 1000 t) zunächst nach Puteoli, später nach Ostia an der Tibermündung. Ostia war der Umschlagplatz für die ungeheuren Getreidelieferungen (annona). In Ostia wurde die Fracht gestapelt, die dann auf Ruderbooten, vorzugsweise aber in Treidelschiffen, nach Rom ging, da der Tiber nur für Schiffe mit geringem Tiefgang befahrbar war.

Die Kaiser Claudius und Trajan hatten zu diesem Zweck in Ostia eine grandiose Hafenanlage geschaffen mit riesigen Speicheranlagen (horrea). Nach einer Berechnung kamen aus Ägypten, Afrika und den Mittelmeerinseln allein nach Rom jährlich etwa 70 Millionen modii Getreide (1 modius = 8,73 Liter), das sind knapp 500 000 Tonnen [1-7]. Von den Speichern in Ostia und Rom wurden mehrere ausgegraben. Einige haben einen Grundriß von 120 × 80 m (horrea Galba) und sind mit einem Obergeschoß versehen [1-8].

Interessant ist, daß diese römischen Großspeicher erst im Laufe des 2. Jahrhunderts n. Chr. erhöhte Böden für eine bessere Belüftung erhielten (suspensurae). Weiter ist auffallend, daß alle Tore und Türen so schmal gebaut waren, daß nur Sackträger, jedoch keine Wagen oder Karren hindurch konnten. Die meisten dieser Speicher waren noch im 1. Jahrhundert n. Chr. im

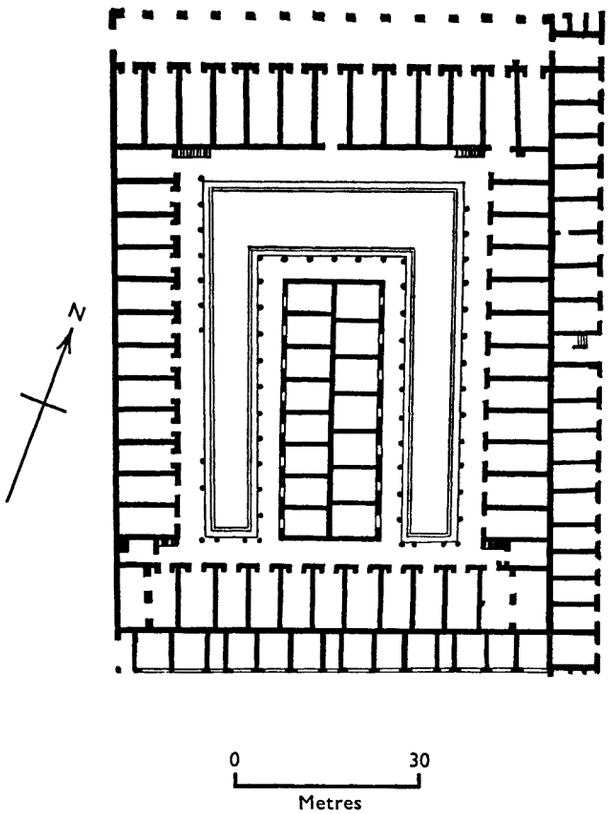


Bild 1-3
Grundriß eines römischen Getreidespeichers in Ostia, Grandi Horrea

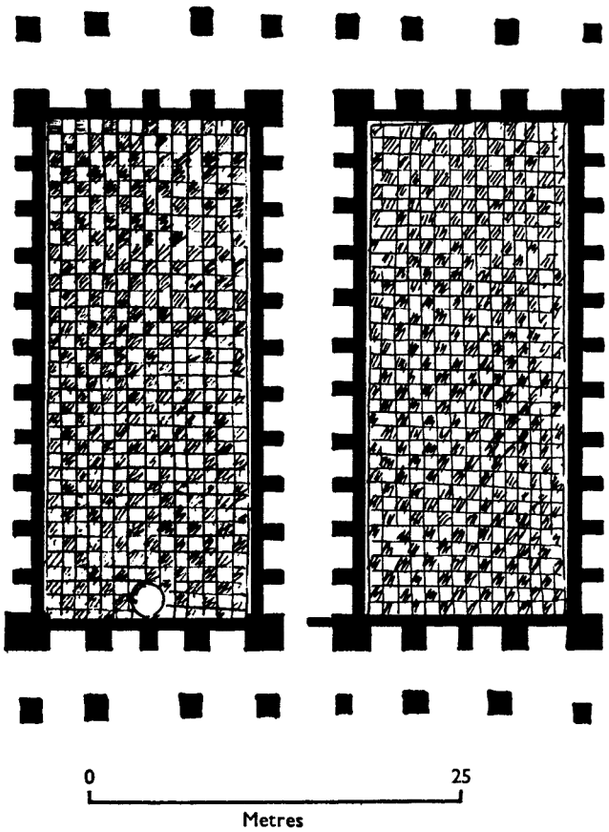


Bild 1-4
Grundriß eines römischen Getreidespeichers in Neuß

Besitz reicher Senatoren, gelangten aber später in kaiserlichen Besitz, nicht zuletzt durch Konfiskationen.

Der typische Grundriß der Speicher in Rom, Ostia und in den Provinzen zeigt eine Reihe von rechteckigen, länglichen, hallengleichen Räumen, die jüngeren oft mit erhöhtem Schüttboden. In Rom und Ostia sind die Speicherräume um einen rechteckförmigen Innenhof angeordnet (Bild 1-3). Über den Zweck der erhöhten Schüttböden besteht kein Zweifel: Die Absicht war die Ermöglichung einer Luftzirkulation zwischen Baugrund und Schüttboden.

Die Wände der Speicherbauten wurden meist aus Ziegeln hergestellt, Zwischenwände auch aus großformatigen Tuffsteinblöcken errichtet. Es finden sich aber auch Wände aus Beton (opus mixtum), der oberflächig mit Ziegeln verblendet ist. Die Wanddicken schwanken um 1,0 m. Die Forschung ist sich bis heute nicht sicher, ob das Getreide in den einzelnen Speicherräumen lose oder in Säcken gelagert wurde; vermutlich überwog jedoch die Lagerung in Säcken, da das Getreide auf diese Weise besser gegen Feuchtigkeit und Schädlingsbefall geschützt war. Vorgänger dieser römischen Speicher finden wir im mittleren Osten, zeitlich zuerst in Knossos auf Kreta, später in Babylon im Hauptheiligtum des Marduk (ca. 550 v. Chr.) und schließlich auf der Bergfestung Massada, die ca. 35 v. Chr. von Herodes errichtet wurde. Mit den Römern gelangte diese Art der Getreidespeicher auch in die römischen Provinzen nördlich der Alpen, wo u. a. in Großbritannien, Deutschland und Österreich mehrere dieser alten Speicheranlagen wieder freigelegt wurden.

Diese Speicher hatten die länglichen Zellen wie in Rom, mit Breiten von 6 bis 10 m und Längen von 10 bis 40 m. Die Wände wurden entweder ganz aus quadratischen Steinblöcken hergestellt, teils als Trockenmauerwerk, teils mit Mörtel, oder aus Beton mit einer Verblendung aus quadratischen Steinen. Gegründet wurden die Wände auf einer Lage von Blocksteinen, aber auch auf Betonstreifen oder schlicht auf einer Kiesschicht.

Aus welchem Material die Mauer auch ausgeführt wurde, die Wände und die Strebepfeiler waren von bemerkenswerter Dicke, nur selten weniger als 0,9 m dick und häufig über 1,20 m. Trotz der ungewöhnlichen Dicke der Wände hatten diese Speicher in der Regel Stützpfeiler an den Längswänden im Abstand von ca. 4 m bei 0,75 m bis 0,9 m Pfeilerlänge (Bild 1-4). Um eine Belüftung unter den Schüttböden zu erhalten, wurden vertikale, schmale Öffnungen im Mauerwerk auf Bodenniveau angeordnet. Nach *Rickman* [1-8] wird allgemein angenommen, daß in diesen Speicherräumen das Getreide in Behältern gelagert wurde, die beidseits eines Mittelganges entlang der Längswände angeordnet waren.

Nördlich der Alpen soll es aber auch römische Speicheranlagen gegeben haben, die ganz aus Holz errichtet waren. Bild 1-5 zeigt die Rekonstruktion einer derartigen Anlage.

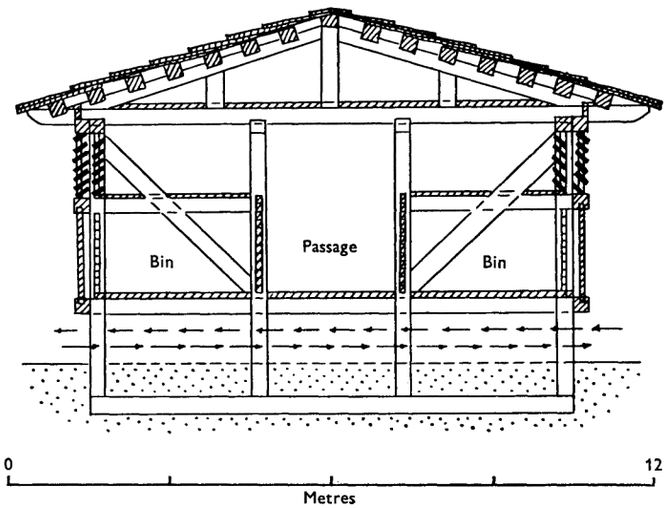


Bild 1-5
Rekonstruktion eines römischen Getreidespeichers aus Holz

1.2.3 Getreidespeicher zu Beginn der Neuzeit

Teils durch den Rückgang der Bevölkerung, teils durch falsche Bewirtschaftung und damit mangelnde Ertragsfähigkeit der Böden, vor allem aber wegen eines Steuersystems, das den Kleinbauern kaum mehr das für den Lebensunterhalt Notwendigste ließ, nahm die Dorfbevölkerung in den römischen Provinzen rapide ab. Die Landflucht führte zur Zunahme des verlassen brachliegenden Landes, den Rest besorgten die Einfälle der Goten und Parther, so daß immer größere Gebiete wüst blieben.

Mit dem Beginn der Völkerwanderung ging auch die Kulturblüte zurück, die Einwohnerzahl der Städte nahm ab, und ihre Bewohner konnten vom umliegenden Land ernährt werden. Ein weiträumiger Getreidehandel mit entsprechenden Speicherbauten war daher nicht mehr notwendig.

Erst am Ausgang des Mittelalters finden wir wieder Getreidespeicher in den Städten. Bekannt ist der Or San Michele in Florenz, ein Speicher, der später allerdings als Kirche genutzt wurde. Speicherbauten waren aber offensichtlich so wenig von allgemeinem Interesse, daß sie in der aufkommenden Bauliteratur kaum Erwähnung finden: Als *Leon Battista Alberti* ein Werk unter dem Titel „Zehn Bücher über die Baukunst" um 1460 veröffentlicht, finden nur Salzspeicher sein Interesse [1-9]. *Alberti* empfiehlt für derartige Speicher, „innen von der gemauerten Wand um den Abstand einer Elle zurückzugehen und mittels zusammengefügter Balken und kupferner Nägel eine Umfriedung herzustellen" und den Zwischenraum zwischen Mauerwerk und Holzzellen mit Schilf auszufüllen. *Alberti* war hier offensichtlich der aggressive Charakter von Salz, besonders auf den Mörtel zwischen den Mauersteinen, aufgefallen.

Nördlich der Alpen begannen im 14. Jahrhundert England und Flandern Getreideeinfuhrländer zu werden, die sich in Danzig, Stettin und Lübeck mit Korn versorgten. Preußen, Polen, Schlesien und Mitteldeutschland konnten daher einen Getreideüberschuß auf Weichsel, Oder und Elbe in die Seestädte als Umschlagstellen ausführen. Getreide wurde somit zum Spekulationsgut, und das veranlaßte die größeren Reichsstädte, Getreidevorräte anzulegen [1-10].

In der alten Reichsstadt Nürnberg wurde 1484/95 auf dem Burggelände die sogenannte Kaiserstallung errichtet; während das Untergeschoß, wie der Name sagt, als Stallung diente, wurden die Dachgeschosse des mächtigen Gebäudes als Bodenspeicher genutzt. Das Korn wurde dabei in Säcken mittels Flaschenzug auf die einzelnen Böden gehievt und gelagert. Etwa um die gleiche Zeit wurde die Mauthalle errichtet, die auch als Kornspeicher diente. Schließlich gab es um den Kornmarkt noch eine Reihe weiterer solcher Kornhäuser, die leider sämtlich im 2. Weltkrieg zerstört wurden. In diesen Kornspeichern ließ der Nürnberger Rat Brotgetreide für Notzeiten horten, das dann bei Bedarf an die ärmere Bevölkerung verteilt wurde, um Wucherpraktiken zu begegnen. Zu dieser Zeit wurde Getreide ohne Ausnahme in Säcken gelagert; die zweckmäßige Speicherform blieb daher der Sackspeicher auf flachen Böden.

1.2.4 Getreidesilos im 19. Jahrhundert in den USA

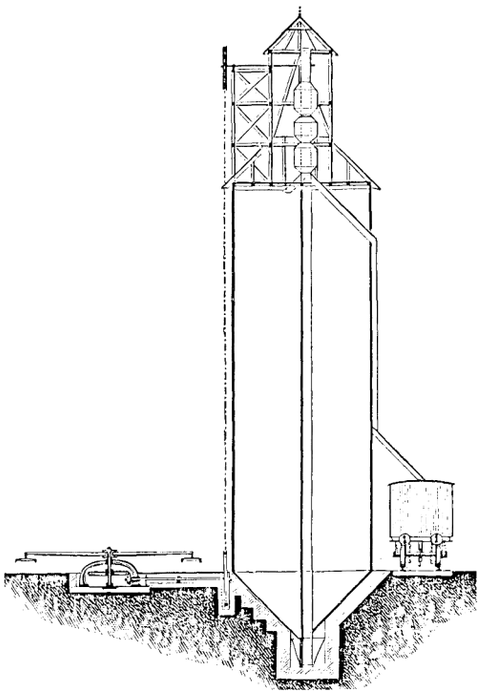
Die Entwicklung der neuzeitlichen Getreidesilos nimmt ihren Anfang in den USA in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Hand in Hand mit der Ausdehnung anderer Industrien vollzog sich der Übergang von der Selbstversorgerwirtschaft zur kommerziellen, über den Eigenbedarf produzierenden Landwirtschaft. Im Gegensatz zum europäischen Bauern oder Gutsbesitzer zwang den amerikanischen Farmer der Mangel an Arbeitskräften frühzeitig, sich nach mechanischer Hilfe umzusehen.

Die bedeutsame Entwicklung in der landwirtschaftlichen Technik war die Erfindung einer brauchbaren Erntemaschine 1831 von *McCormick,* mit der es gelang, vom Handsensen zum maschinellen Mähen überzugehen. 1860 waren mehr als 80000 Mähmaschinen in Betrieb, und der größte Teil der Weizenernte von 6 Millionen Tonnen wurde mit Maschinen geerntet. Ähnlich revolutionär war die Erfindung einer brauchbaren Dreschmaschine durch *Pitt* 1836. Diese Entwicklung steht in ursächlichem Zusammenhang mit der Geschichte des Silobaues.

Bis zur Einführung des maschinellen Dreschverfahrens war Dreschen eine Winterarbeit gewesen, die vorgenommen werden konnte, wann es dem Farmer am besten paßte. Mit der Einführung der Dreschmaschine wurde sofort ausgedroschen und verkauft.

1842 erwarb *Joseph Dart* ein Patent auf einen Kornspeicher (Corn-Elevator), der „hitze- und feuchtigkeitssicher" konstruiert war und mit Hilfe einer Eimerkette gefüllt werden konnte. Durch den Trichterboden wurden die Getreidesilos nur unter Schwerkraft in der gewünschten Menge entleert zur Weiterverladung für den Eisenbahn- oder Kanaltransport [1-11].

Im Laufe weniger Jahre errichtete der Chicagoer Weizenhandel ein System von Getreidesilos, das weit über die ursprüngliche Idee von *Joseph Dart* hinausging. Die Notwendigkeit, das Getreide an den Stationen entlang der Eisenbahn zu sammeln und die per Eisenbahn ankommende Getreidemenge an den großen



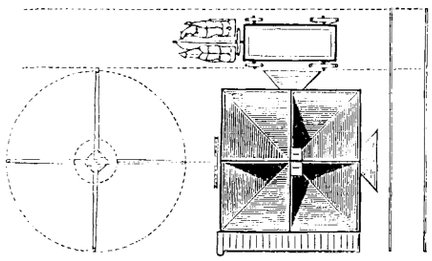


Bild 1-6
„Steppen-Elevator"

Umschlaghäfen wie Chicago und Buffalo zu lagern und für einen späteren Versand bereitzuhalten, führte zur Herstellung von zum Teil typischen Silobauwerken für 15 000 t bis 150 000 t Speichervolumen.

Diese hohen schlanken Behälter waren jetzt schon mit Becherwerken ausgestattet und mit einem Trichterboden zur Restlosentleerung. Chicago wurde zum größten Getreidemarkt und Getreideumschlagplatz der Welt. Die Getreidesilos ermöglichten erst den schnellen Umschlag des größten amerikanischen Massengutes im Innen- und Außenhandel.

Bild 1-6 zeigt einen kleinen „Steppen-Elevator", wie er an den Eisenbahnstationen als erste Sammel- und Verladestelle diente. Er bestand aus 4 Zellen mit einem turmartigen Aufbau zur Aufnahme einer Waage und einer Reinigungsmaschine. Das Getreide wurde per Pferdefuhrwerk angefahren, in die Elevatorgrube geworfen und mit einem Becherwerk hochgehoben, verwogen, vorgereinigt und in die Zellen geschüttet. Zur Verladung wurde es nochmals vom Becherwerk gehoben und durch ein Rohr in den Waggon gefördert. Die Zellen und der Turm

Bild 1-7
Umschlagsilo „Dows Stores, Brooklyn"

waren ganz aus Holz gefertigt und damit für geringes Geld herzustellen.

Um eine Vorstellung von den großen amerikanischen Umschlagsilos aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu vermitteln, soll kurz ein Silospeicher aus Brooklyn vorgestellt werden: die „Dows-Stores" (Bild 1-7). Die Anlage ist ca. 360 m lang. Sie besteht einmal aus dem Maschinenhaus (rechts im Bild), beinhaltend das Kesselhaus mit 10 Dampfkesseln, und den beweglichen Elevator zum Löschen des Getreides. Das Silogebäude (links im Bild) ist durch dicke gemauerte Trennwände in 9 Gebäudeeinheiten unterteilt, von denen jede 40 Zellen aufnimmt mit einer Einzelgröße von ca. 5,0 m × 3,6 m bei 15 m Höhe, und hat somit ein Fassungsvolumen von knapp 70 000 t Getreide. Jeweils 3 Gebäudeeinheiten haben einen Turmaufbau für das Becherwerk. Die einzelnen Zellen werden durch Fallrohre, die im Freien geführt sind, beschickt. Es können zu gleicher Zeit 6 Schiffe be- und 2 Schiffe entladen werden. Die Elevatoren haben zusammen die beachtliche Leistung von 1600 t/h.

1.2.5 Form und Baustoffe der Silozellen im 19. Jahrhundert

Für die Wahl der Grundrißform waren drei Kriterien maßgebend:

- die maximale Ausnutzung der Grundrißfläche
- die Standfestigkeit der Konstruktion, damals allgemein als Stabilität bezeichnet
- und natürlich die Billigkeit in der Herstellung.

Für alle drei möglichen Grundrißformen – Rechteck, Sechseck und Kreis – wurden zwar Ausführungsvorschläge entwickelt. Praktisch durchgesetzt hat sich fast ausschließlich die Rechteckform. Für die Herstellung der Zellenwände standen zur Verfügung: Holz, Eisen und Mauerwerk, später auch Beton. In der Regel wurden die der Witterung ausgesetzten Außenwände gemauert und die Innenwände aus Holz errichtet. Für die Herstellung der Zellenwände aus Holz gab es zwei Möglichkeiten:

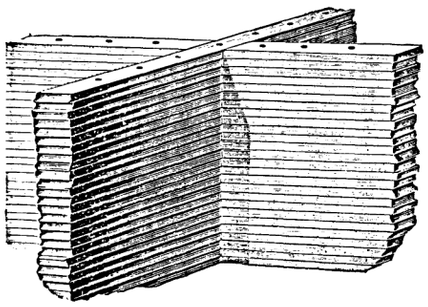


Bild 1-8
Knotenpunkt eines Silos aus Holzbohlen

Bei Lösung 1 ordnete man vertikale Stiele an, gegen die Holzbohlen genagelt wurden; durch zusätzlich angeordnete Stiele, die gegenseitig mit eisernen Ankern verbunden waren, wurde die Spannweite der Bohlen verringert. Bei Lösung 2 wurden Holzbohlen übereinander vernagelt mit besonders guter Vernagelung an den Kreuzungsstellen der Bohlen in den Zellenecken (Bild 1-8).

Eisen in Form von Blechen wurde nur für zylindrische Zellen gewählt (Beispiel Getreidesilo Antwerpen); nachteilig wurde empfunden die schlechtere Raumausnutzung infolge der nicht genutzten Zwickel, eine geringere Lebensdauer gegenüber Holz und Mauerwerk infolge Korrosion und schließlich die geringere Isolierfähigkeit der dünnen Blechwand, die dazu führte, daß Getreide an der Zellenwand festgerostet war [1-1].

Mauerwerk wurde für alle drei möglichen Grundrißvarianten verwendet, für Rundsilos beispielhaft beim „Plimpton-Elevator" in Buffalo. Dem großen Vorteil der Feuersicherheit von Mauerwerk im Vergleich zu den anderen Materialien stand die schlechtere Platzausnutzung wegen der großen Wanddicke und das entsprechend größere Gewicht auf die Gründung gegenüber.

Für die Ausführung von Betonsilos wurde ein interessanter Vorschlag gemacht; dem Verfasser ist allerdings kein nach diesem System praktisch ausgeführter Silo bekannt (Bild 1-9). Die patentierte Lösung sah vor, flache eiserne Ringe so aufeinander zu setzen, daß diese Ringe sich an den benachbarten Zellenrändern geringfügig überschneiden und die verbleibenden Zwickel möglichst klein bleiben. Nach Fertigstellung dieses zugfesten Eisengerippes sollten die Wände aus Beton hergestellt werden (1886!!), wobei sich eine wabenförmige Zellenform ergibt. Als Vorteil dieser Lösung wurde herausgestellt: Gute Stabilität, gute Raumausnutzung, Feuersicherheit wie bei Mauerwerk bei bedeutend geringerer Wanddicke!

Hinsichtlich der Ausbildung des Silobodens stellte man schon bald nach der Herstellung der ersten Silozellen die als unangenehm empfundene Erscheinung fest, daß zunächst nur die direkt vertikal über dem Auslauf liegenden Getreideschichten abfließen, die an den Wänden befindlichen Partien dagegen bis zuletzt zurückbleiben. Es wurde festgestellt, daß diese Erscheinung um so fühlbarer wird, je geringer der Siloboden gegen die Horizontale geneigt ist, außerdem bei einem quadratischen

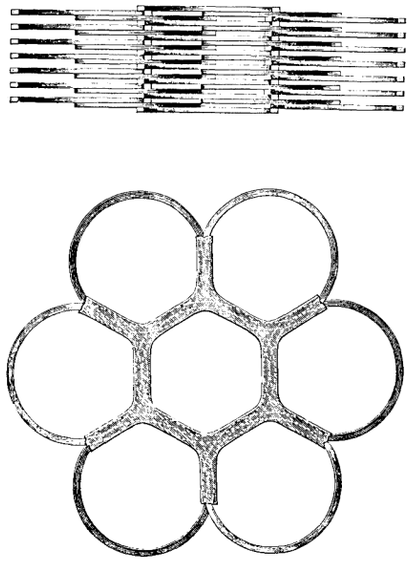


Bild 1-9
Traggerüst aus stählernen flachen Ringen für einen wabenförmigen Betonsilo

Grundriß mehr als bei einem runden. Heute ist uns diese Problematik unter den Stichwörtern „Massenfluß" und „Kernfluß" geläufig. Die seinerzeit empfohlene Problemlösung könnte heute nicht richtiger lauten:

- nicht innerhalb derselben Zelle Getreide umlagern, sondern vor einer Neubefüllung die Zelle erst restlos entleeren,
- falls diese Bedingung nicht einzuhalten ist, sind für eine Zelle mehrere über den Umfang verteilte Ausläufe anzuordnen, um tote Zonen zu vermeiden [1-1].

1.2.6 Frühe Silos zur Lagerung von Getreide und Mehl in Deutschland

Die wenigen im 19. Jahrhundert in Deutschland gebauten Silos wurden alle nach dem gleichen Konstruktionsprinzip errichtet: die Außenwände in Mauerwerk, die Innenwände aus Holz, wobei die Spannweite der Wände durch stählerne Anker verringert wurde. Bild 1-10 zeigt einen kleinen Mühlensilo in Soest mit 6 Zellen von je 1,5 × 4,00 m im Grundriß und 20 m Höhe; der Silo konnte also 540 t Getreide aufnehmen.

Bild 1-11 stellt den vermutlichen Prototyp der Hamburger Umschlagsilos vor. Weil er wahrscheinlich der erste seiner Art war und ihm das Unglück widerfuhr, daß ein Posten Getreide verdarb, schob man die Schuld auf das System und baute ihn später zu einem Bodenspeicher um [1-1].

Der Siloteil dieser Speicheranlage hatte 120 quadratische Zellen mit ca. 2,75 m Seitenlänge und 16,5 m Höhe; eine Zelle faßte 136 m^3 oder rund 100 t, der ganze Silo somit 12000 t Getreide. Die Anlage hatte 4 Elevatoren mit einer Leistung von je 70 t/h und über den Zellen ein System von Transportbändern zur Beschickung der einzelnen Zellen. Nicht nur die Zellenwände,

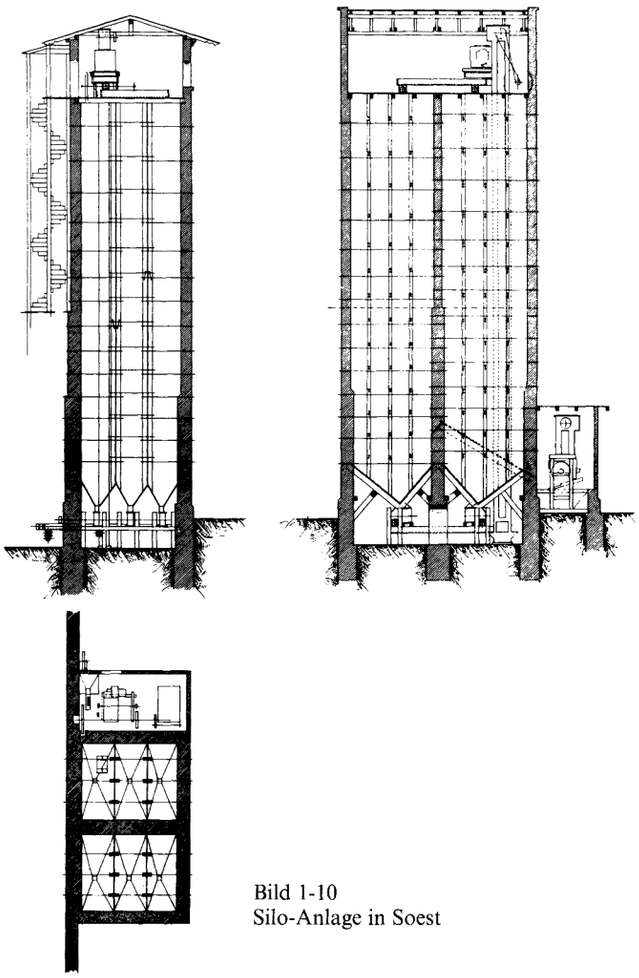


Bild 1-10
Silo-Anlage in Soest

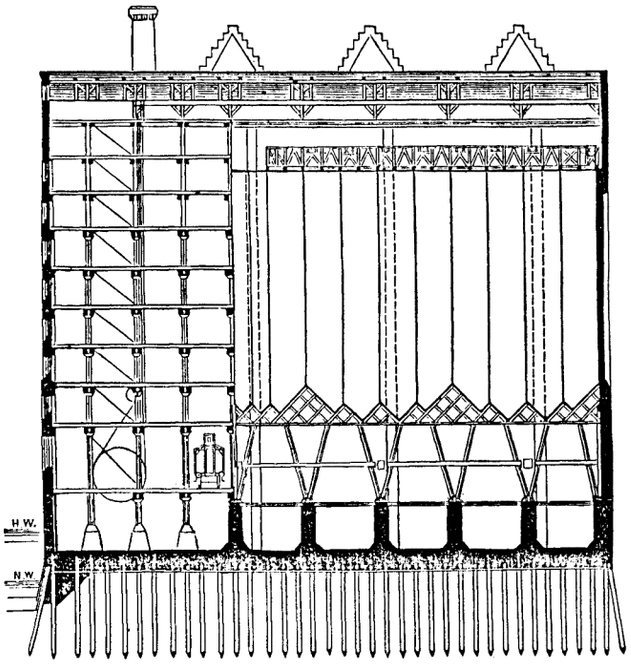


Bild 1-11
Erster Getreidesilo in Hamburg

sondern auch der Zellenunterbau bestand weitestgehend aus Holz.

Der endgültige Durchbruch im Bau von Umschlag- und Lagersilos gelang in Hamburg erst 1906 mit dem Bau eines Zellensilos für 3200 t Getreide am Kuhwerder Hafen. Dieser Silo hatte 15 quadratische Zellen mit 4,0 m Seitenlänge und ca. 18 m Füllhöhe; die Außenwände waren gemauert, und die Innenwände bestanden aus Holz. Diese Anlage wurde 1909 um 30 Zellen erweitert, in gleicher Bauweise wie 1906. Erst beim dritten Bauabschnitt 1914 kurz vor Ausbruch des Ersten Weltkrieges wurde das neue Silogebäude mit 25 Zellen und 5000 t Fassungsvolumen ganz aus Eisenbeton hergestellt, wie man seinerzeit Stahlbeton bezeichnete. Mit dem Bau dieses Silos hatte sich die Stahlbetonbauweise offensichtlich durchgesetzt, denn die beiden Erweiterungsbauten zwischen beiden Weltkriegen um 22000 t Lagervolumen wurden nun auch als Stahlbetonsilos mit rechteckigen Zellen konzipiert. Leider wurden während der Bombenangriffe des 2. Weltkrieges alle Holzzellen zerstört, während die Stahlbetonzellen das Bombeninferno recht gut überstanden haben.

Interessant ist auch die Entwicklung des Speicherbaues in Brake an der Unterweser, weil bis in die Mitte dieses Jahrhunderts an den Weserhäfen wesentlich mehr Getreide umgeschlagen wurde als in Hamburg. Die Seeschiffe konnten bis zur ersten Weserkorrektion (1888–1895) stromaufwärts nur bis Brake fahren; dort erfolgte dann der Umschlag des aus St. Petersburg und den deutschen Ostseehäfen stammenden Getreides auf flachgehende Kähne in Richtung Bremen. Einen Einbruch in das blühende Umschlaggeschäft brachte 1862 die Fertigstellung der Eisenbahnverbindung Bremerhaven–Bremen; die Anbindung von Brake via Hude an das Eisenbahnnetz führte aber wieder zu einem neuen Aufschwung.

Bis 1898 erfolgte bei einem Jahresumschlag von 124000 t die Einlagerung in die dem Pier benachbarten Packhäuser ausschließlich manuell mit Sackkarren. 1898 wurde noch ein zusätzliches Packhaus mit 5 Böden für 10000 t Fassungsvermögen direkt am Strompier gebaut, das mechanisch über zwei fahrbare Becher-Elevatoren mit einer Leistung von je 25 t/h beschickt wurde [1-12]. Die jährlichen Umschlagleistungen steigerten sich jedoch bis 1910 auf 475000 t und erforderten eine leistungsfähigere Anlage. Daher wurde 1911 ein erster Zellensilo aus Stahlbeton für 10000 t gebaut. Diese quadratische Siloanlage hat 49 quadratische Zellen mit 3,90 m Achslänge und 15 cm Wanddicke. Die Anlage ist noch heute in Betrieb. Zur Beschickung des Silos und der bestehenden Packhäuser wurden 4 pneumatische Heber mit einer Gesamtleistung von 360 t/h installiert, eine für damalige Verhältnisse sehr beachtliche Leistung, die Brake zu einem schnellen Hafen machte (Bild 1-12).

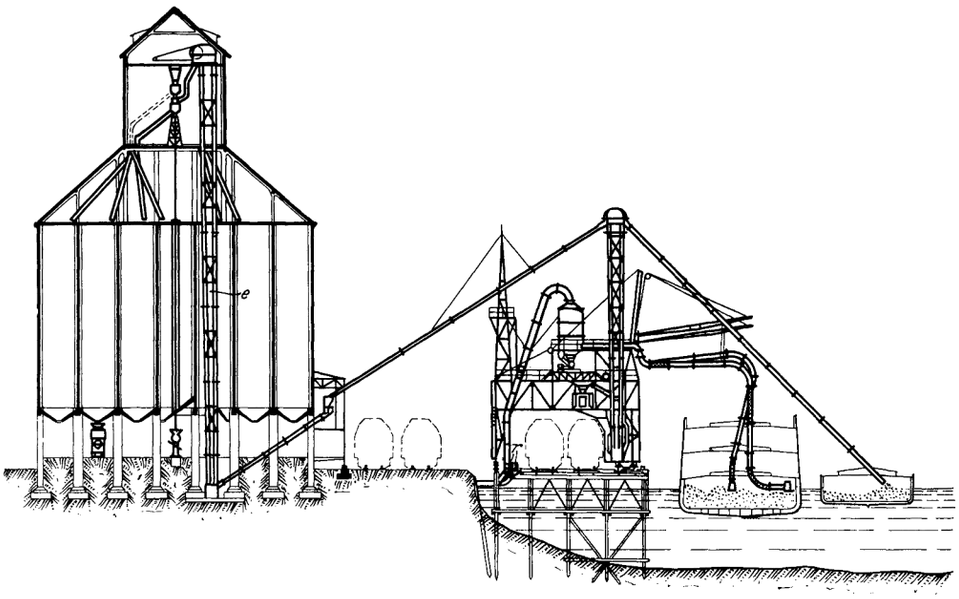


Bild 1-12
Erster Getreidesilo in Brake

Der 1. Weltkrieg brachte auch in Brake einen totalen Ausfall des Umschlaggeschäftes. Erst nach der Inflation 1923 lebte der Getreide- und Futtermittelhandel wieder auf, und der Jahresumschlag erreichte 1938 die Spitzenleistung von 709 000 t. 1934/35 wurde die Lagerkapazität durch eine Siloanlage aus 12 zylindrischen Blechsilos mit 8500 t Fassungsvermögen erweitert (Bild 1-13). 1939/40 nochmals durch ein Stahlbetonzellensilo für 15 500 t.

Bild 1-13
Getreidesilo aus 12 zylindrischen Blechsilos
System *J. A. Topf & Söhne*, Erfurt

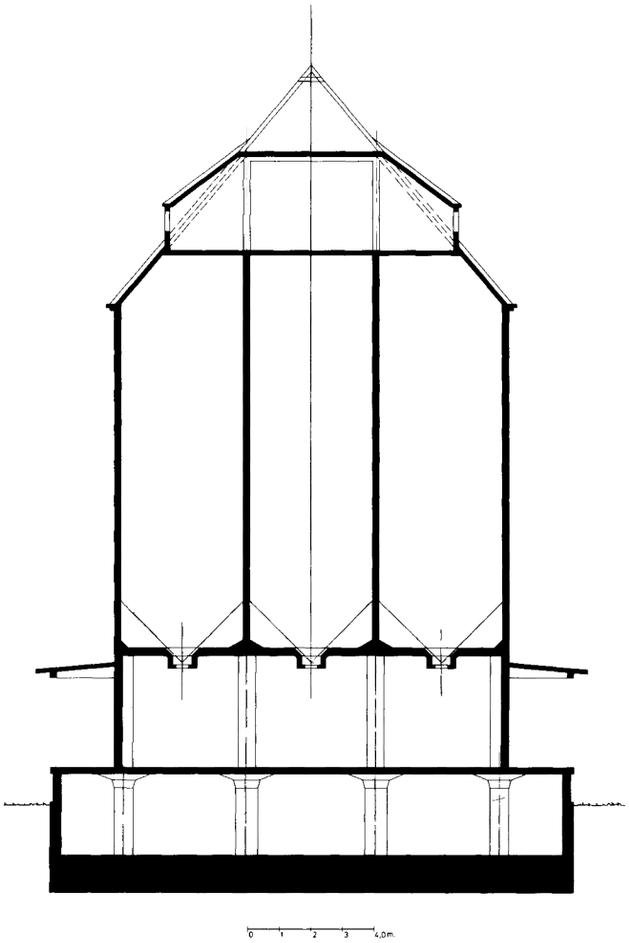


Bild 1-14
Reichstypenspeicher, Querschnitt durch einen 5000-t-Silo

1.2.7 Reichstypenspeicher oder Heeresspeicher

Die größte Silobau-Aktion in Deutschland zwischen beiden Weltkriegen wurde in den Jahren 1936–1940 im Auftrag der Reichsgetreidestelle ausgelöst. Es handelte sich um den Bau der sogenannten „Reichstypenspeicher" zur Lagerung von umfassenden Beständen von Reichsreserve-Getreide. Allein in der Bundesrepublik sind aus dieser Aktion 50 Getreidespeicher vorwiegend mit einer Nennkapazität zwischen 3000 t und 5000 t erhalten geblieben, die heute unter der Bezeichnung „Bundeseigene Getreide-Zellenspeicher" verwaltet werden, und über alle Bundesländer verteilt liegen; derartige Siloanlagen wurden auch in Österreich und Ungarn gebaut. Die Silos wurden aus Stahlbeton hergestellt; mit ihrem spitzen Dach und der Firsthöhe von knapp 24 m unterscheiden sie sich äußerlich kaum von Wohngebäuden, ein Effekt, der vermutlich beabsichtigt war (Bild 1-14). Der Nutzinhalt einer Lagerzelle beträgt ca. 160 m^3; jede Siloanlage hatte Begasungszellen zwecks Bekämpfung der Getreideschädlinge, insbesondere des berüchtigten Kornkäfers. Die Zellenwände wurden sehr sparsam bewehrt; eine 1978 durchgeführte rechnerische Überprüfung der Wände führte zu dem Ergebnis, daß diese Zellenspeicher heute nur noch mit ihrem halben Nenninhalt genutzt werden dürfen.

1.2.8 Umschlagsilos für organische Produkte nach dem 2. Weltkrieg

Der bei weitem überwiegende Teil der Getreideernte in der Bundesrepublik Deutschland wird der Tierfütterung zugeführt und daher in landwirtschaftlichen Betrieben in relativ kleinen Mengen gelagert. Große Getreidesiloanlagen findet man daher nicht als Lagerzellen auf dem Lande,sondern als Umschlagsilos in den Häfen, vor allem an der Nord- und Ostseeküste. Um im Rahmen dieses Beitrages eine Vorstellung vom heutigen Stand der Entwicklung aufzuzeigen, werden im folgenden zwei Anlagen vorgestellt, wobei die eine Anlage vom gesamten Fassungsvolumen her die größte in Deutschland sein dürfte und die andere Anlage die wohl größten Einzelzellen besitzt.

Bild 1-15 zeigt die Siloanlage der Neuhof Hafengesellschaft in Hamburg. Der erste Bauabschnitt wurde 1966/67 hergestellt mit einer Silokapazität von ca. 60000 t; die Anlage wurde 1971 und 1976 erweitert und hatte damit ein Fassungsvolumen von ca. 125000 t auf der Basis Schwergetreide. An der Pier können Schiffe mit einer Ladefähigkeit bis ca. 80000 t und 265 m Länge gelöscht werden. Zwischen der freistehenden Pier und dem Silo befindet sich ein Binnenhafen, der gleichzeitig ein Beladen von Schiffen sowohl in direktem Umschlag als auch vom Silo ermöglicht. Vier pneumatische Löschanlagen haben zusammen eine stündliche Leistung von ca. 1200 t Schwergetreide. Auf der dem Wasser abgewandten Seite befinden sich drei Gleise, so daß Waggons mit einer Leistung von 400 t pro Stunde beladen werden können. Die Anlage besteht ganz aus Stahlbeton und hat runde Zellen mit 9,4 m Innendurchmesser für je 2000 t Getreide und quadratische Zellen mit 4,6 m Seitenlänge für schwerfließende organische Produkte. Im rechteckförmigen Maschinenhaus an der Kopfseite der Anlage befinden sich noch kleinere rechteckförmige Zellen als Vorlaufzellen für die verschiedenen Belademöglichkeiten, die in Verbindung mit Reinigungs- und Trocknungsanlagen stehen. Um die Lagerkapazität der Anlage zu vergrößern, wurden 1980 parallel zu der beschriebenen Anlage noch eine Reihe von fünf vorgespannten Rundzellen mit 13,5 m Durchmesser und zusammen ca. 25000 t Fassungsvermögen errichtet.

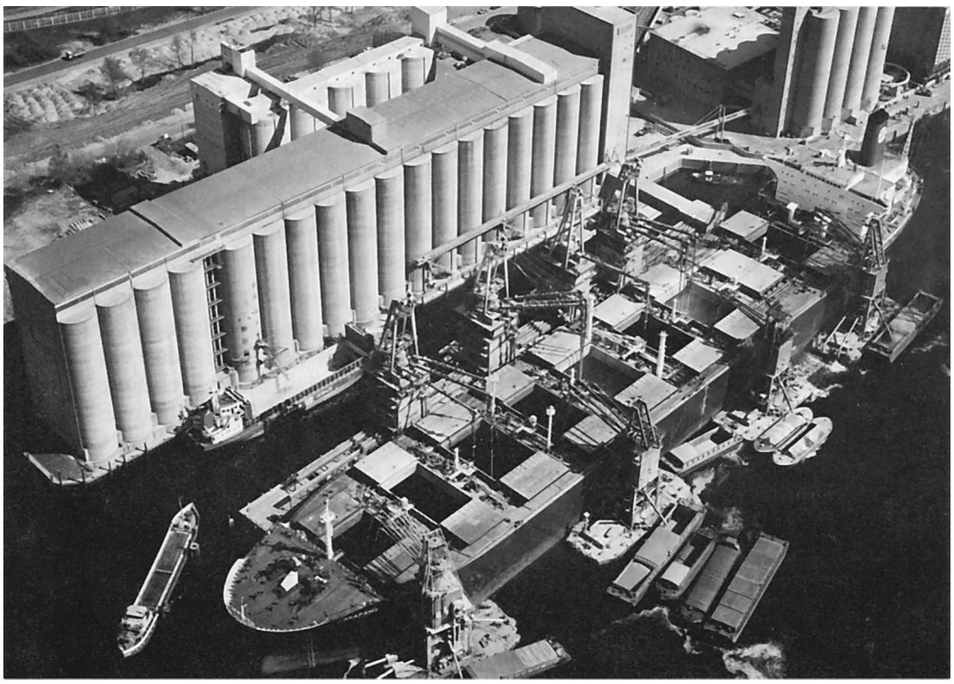


Bild 1-15
Siloanlage in Hamburg
für 150000 t Fassungsvolumen
LA HH 350/81

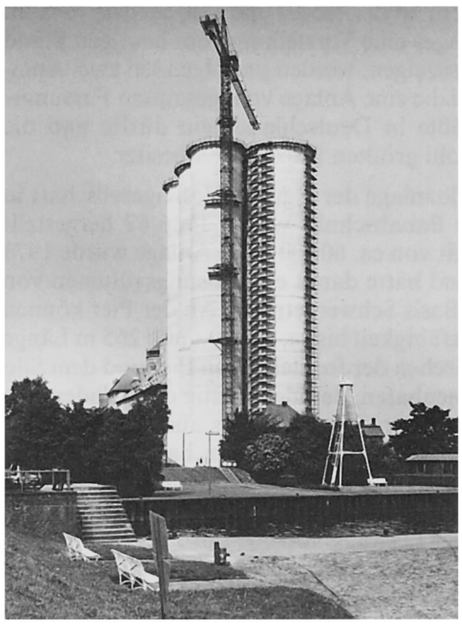


Bild 1-16
Siloanlage in Brake
Rundzellen mit ca. 75 m Höhe

Die wohl größten Einzelzellen für die Lagerung von Getreide- und Futtermittel wurden 1972 an der Strompier in Brake errichtet (Bild 1-16). Es handelt sich um eine Gruppe von fünf freistehenden Einzelzellen mit einer Rekordhöhe von 75,5 m, gemessen von Oberkante Fundament bis zur Zellendecke, und einem Maschinenhausturm, der die Zellen noch überragt. Zwei dieser Rundzellen an der Wasserfront haben einen Innendurchmesser von 15,5 m und wurden aus Spannbeton hergestellt, die drei Rundzellen auf der Landseite haben einen Innendurchmesser von 11,5 m und wurden aus Stahlbeton errichtet; da die drei kleineren Zellen auch für schwerfließende Produkte bestimmt waren, wurden über dem Auslauftrichter sogenannte „Entlastungsbalken" eingebaut. Das Fassungsvermögen der größeren Zellen beträgt je 10000 t, das der kleineren Zellen je 5000 t.

Daß bei Zellen mit derartigen Abmessungen offensichtlich der gesicherte Erfahrungsbereich weit überschritten wurde, zeigt das weitere Schicksal dieser Anlage (vgl. Kapitel 10). Es macht in sehr deutlicher Form darauf aufmerksam, daß unsere herkömmlichen Denkmodelle nicht ohne eine Grenzziehung in der Praxis die Bestätigung ihrer Richtigkeit finden. Ein Überschreiten dieser Grenze setzt wesentlich bessere Kenntnisse über das Schüttgutverhalten im allgemeinen und den Einfluß von Einbauten innerhalb eines Silos voraus, als wir zur Zeit noch besitzen.

Außer diesen großen Siloanlagen wurden nach dem 2. Weltkrieg natürlich auch eine Vielzahl von kleinen Silozellen gebaut, vielfach als Typensilos aus Holz, Metall oder Kunststoff, aber auch aus Stahlbetonfertigteilen. Einen Überblick über den Stand der Entwicklung dieser Silos kleiner oder mittlerer Größe findet man im Kapitel 7.

1.3 Die Entwicklung im Bau von Zuckersilos

1.3.1 Anfänge und Entwicklung

Der Bau von Zuckersilos steht in engem Zusammenhang mit dem Bestreben, von der lohnintensiven Lagerung in Säcken auf eine Loselagerung überzugehen. Die ersten Erfahrungen über die Lagerung von losem Weißzucker waren in den USA von der Great Western Sugar Company erworben worden, die 1930 eine erste Siloanlage aus Stahlbeton in ihrer Fabrik in Wheatland/Wyoming errichtete. Bis zum Beginn des 2. Weltkrieges waren von der gleichen Gesellschaft noch 4 weitere Fabriken mit ähnlichen Rundzellen ausgerüstet worden, bis die Weiterentwicklung durch den Kriegsbeginn gestoppt wurde. Bei diesen Silos handelt es sich um Zellen mit ca. 10 m Durchmesser bei ca. 30 m Höhe und ca. 2200 t Fassungsvolumen. Der Vertikaltransport des Zuckers erfolgte mit Becherwerken, der Horizontaltransport durch Förderschnecken.

In Deutschland wurde 1947/48 eine kleine Siloanlage, bestehend aus zwei Stahlbehältern mit je 1100 t Fassungsvolumen, gebaut, bei denen sich aber erhebliche Kondensationserscheinungen an den nichtisolierten Blechwandungen zeigten. Als sich 1954 in Deutschland endgültig abzeichnete, daß eine neue Lagerform für den jährlich in knapp 3 Monaten hergestellten Weißzucker zu entwickeln war, mußte zunächst die Frage nach einer ausreichenden Klimatisierung des Speicherraumes geklärt werden. Nach der grundsätzlichen Lösung dieser Frage bestand die entscheidende Aufgabe darin, für den Baukörper den Baustoff und die Konstruktionsart zu suchen, die in ihrer Kombination den Erfordernissen nach größter Wirtschaftlichkeit in der Herstellung und Betreibung am besten entsprechen.

In der Umschlag- und Mühlenindustrie hatten sich zu dieser Zeit für die Lagerung von Getreide und Mehl Silobatterien aus Stahlbeton als zweckmäßigste Form herausgebildet. Der Wunsch dieser Betriebe nach einer Vielzahl von einzelnen Lagerzellen ist jedoch in der Vielzahl von Sorten begründet, die getrennt gelagert werden müssen. In der Zuckerindustrie gibt es dagegen von der Produktion her gesehen nur die beiden Zuckerqualitäten: Grundsorte und Raffinade. Da für alle Schüttgüter das Prinzip gilt, daß sich die Baukosten pro Tonne Lagerraum mit wachsender Größe des Silorauminhaltes verringern, bot sich die Großraumzelle gleichsam zwangsläufig an, und hier als konstruktionsgünstigste Form der Rundsilo.

Daß fast alle in der Bundesrepublik Deutschland bis heute hergestellten Zuckersilos als Spannbetonbauwerke errichtet wurden, liegt ohne Zweifel darin begründet, daß ein Jahr vor der Errichtung des ersten Zuckersilos die Richtlinie über die Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauwerken 1953 herausgegeben wurde. 1948 hatte die Firma Preload Company, New York, eine Maschine zum Umwickeln kreisförmiger Behälter mit vorgespanntem Draht entwickelt. Nach diesem Verfahren wurden nun auch in Deutschland die ersten Zuckersilos vorgespannt. Während durch die allgemeine Entwicklung auf dem Bausektor die in Gleitbauweise herzustellende und nachträglich vorzuspannende Rundzelle gleichsam vorgegeben war und auch später nur wenig variiert wurde, leitete die Gestaltung der an die Zelle oben und unten anschließenden Bauteile für

die Beschickung und Entleerung des Siloraumes eine Entwicklung ein, die bis heute noch nicht voll befriedigend abgeschlossen ist.

Für den vertikalen Transport von Schüttgütern haben sich bereits seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts Becherwerke als zuverlässige und wirtschaftliche Transportelemente bewährt. Zur Aufnahme des Becherwerkes und des Treppenhauses mit Fahrstuhl bot sich daher die Hinzufügung eines turmartigen, rechteckigen Bauwerkes an den Rundsilo an, das allerdings erst nach Beendigung des Wickelvorganges am Rundsilo, also nachträglich, hergestellt werden konnte. Für den waagerechten Zuckertransport vom Becherwerk in den Siloraum wurden von Anfang an Förderbänder als zweckmäßig angesehen. Bei den ersten Silos erachtete man es als ausreichend, den Siloraum nur in seiner Mitte über einen Drehteller zu beschicken. Man nahm dabei bewußt in Kauf, daß sich ein Böschungskegel einstellt und der Siloraum im Kegelbereich nur zu einem Drittel ausgefüllt wird.

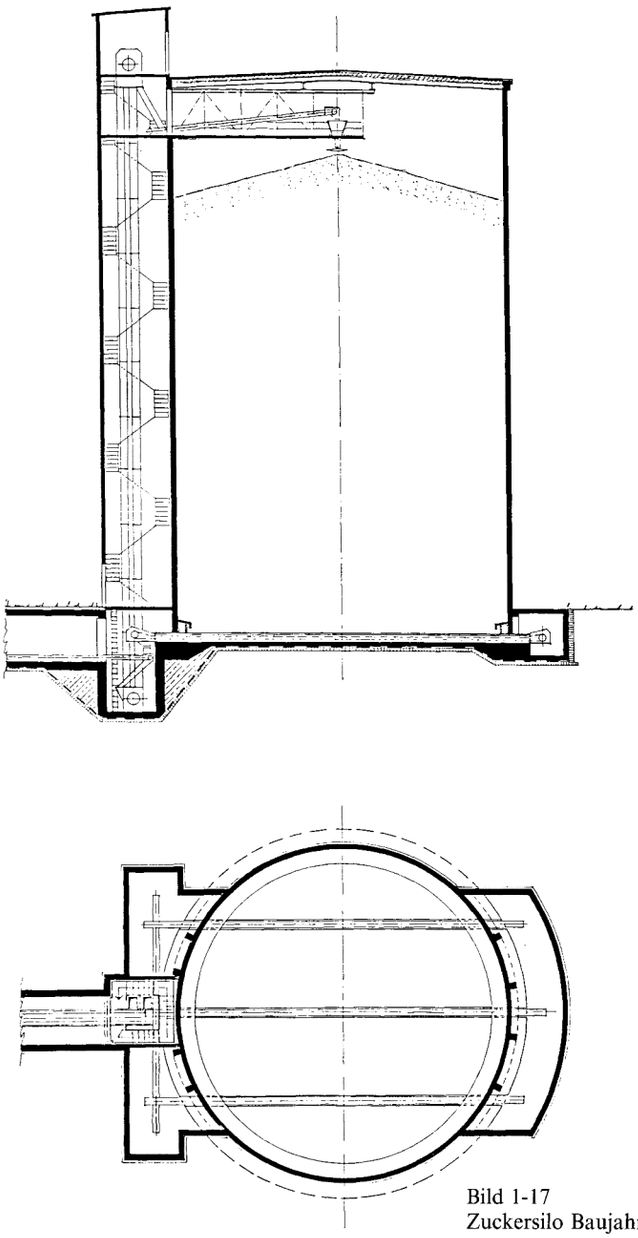


Bild 1-17
Zuckersilo Baujahr 1956

Die Entleerung erfolgt über sogenannte Austragriver, das sind Kettenförderer, bei denen der Rücklaufstrang in einem geschlossenen Trog geführt wird. Diese River sind direkt auf dem Siloboden angeordnet und benötigen nur zwei gegenüberliegende Kanäle außerhalb des Siloraumes, auf der einen Seite zur Aufnahme der Spannstation, auf der anderen zur Aufnahme des Sammel-Bandes. Ohne ein separates Beschickungsgeschoß, ohne ein Untergeschoß zur gleichmäßigen Entnahme des Zukkers aus dem Siloraum und ohne eine Dämmung der Wandfläche zur Einschränkung des Temperaturgefälles von der Silomitte zu den Randzonen waren diese ersten Siloanlagen vom Herstellungsaufwand her gesehen nicht mehr zu unterbieten (Bild 1-17).

1.3.2 Die Entwicklung vom Einfachsilo für 5000 t zum Regeltyp für 35000 t

Die weitere Entwicklung bei den später gebauten Silos verlief chronologisch in folgender Weise:

1956: Dämmung der Silowände.
Dem Zementputz als Korrosionsschutz für den Spanndraht auf der Silowand wird Vermiculite als Dämmstoff beigegeben. Trotz Prüfzeugnis einer amtlichen Materialprüfanstalt erfüllte dieser Spritzputz weder die Anforderung als Korrosions-Schutz noch bewährte er sich als Wärmeisolierung, da er zu Durchfeuchtung neigte.

1957: Separates Beschickungsgeschoß.
Die Silos erhalten jetzt eine Zwischendecke, die den Siloraum von der Beschickungsebene trennt. Dadurch ist der eigentliche Zuckerlagerraum gegen Witterungseinflüsse jetzt doppelt geschützt; außerdem ist es möglich, durch eine Vielzahl von Öffnungen in der Zwischendecke den Lagerraum besser auszufüllen.

1959: Erster Doppelsilo mit Unterkellerung.
Um dem Wunsch nach getrennten Lagerräumen für unterschiedliche Körnungen zu entsprechen und trotzdem den Vorteil von Rundzellen zu halten, kam es zur Ausführung von Siloanlagen mit konzentrischen Silowänden. Um den Innensilo und den ringförmigen Außensilo unabhängig voneinander entleeren zu können, wurde eine Unterkellerung zwingend notwendig. Dabei ergab sich die Möglichkeit, durch die Anordnung einer Vielzahl von Auslauföffnungen in der Kellerdecke die im Silo nicht durch Schwerkraft ausfließende Restmenge erheblich zu reduzieren (Bild 1-18).

1960: Vorspannung der Silowand mit Einzelspanngliedern.
Äußerlich unterscheiden sich diese Silos von den früheren durch die Lisenen. Während beim Wickelverfahren alle an den Rundsilo angrenzenden Bauteile – wie beson-

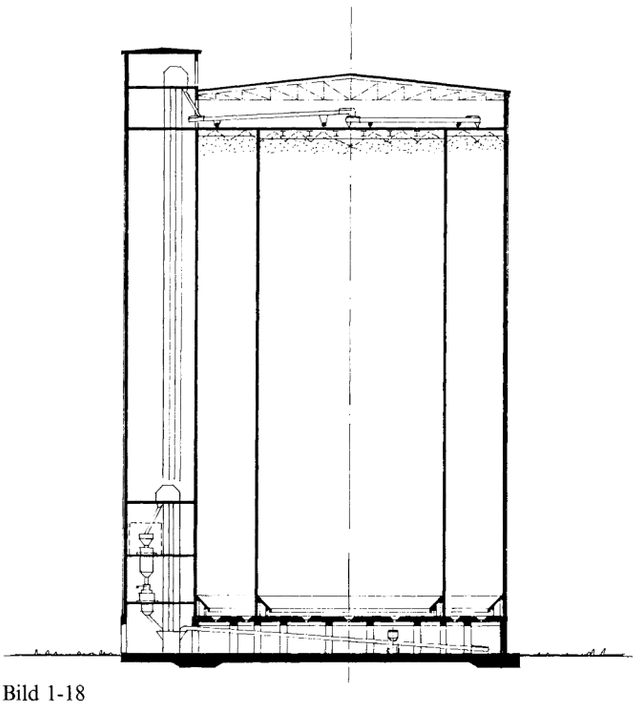


Bild 1-18
Doppelsilo mit vom Siloraum abgetrenntem Beschickungsgeschoß

ders der Treppenturm – erst nachträglich gebaut werden konnten, da die Wickelmaschine zur Aufbringung der Drahtwicklungen „freie Fahrt" benötigt, entfallen bei Einzelspanngliedern diese zeitraubenden Nacharbeiten.

1962: Einführung der Thermohaut.
Polystyrolplatten werden schon während der Gleitarbeiten in die Schalung eingelegt und mit der Betonwand durch Drahthaken verbunden. Auf die Oberfläche der elastischen Schaumstoffplatte wird ein Glasseidengewebe zur Erreichung einer hohen Zugfestigkeit und darüber ein kunstharzgebundener Quarzputz aufgebracht.

1966: Silozelle mit Standrohr.
Mit dem wachsenden Durchmesser der einzelnen Zellen wuchsen natürlich auch die Schwierigkeiten für die freigespannte Zwischendecke. Eine Abhilfe brachte die Anordnung eines Standrohres in der Silomitte, das nur zur Unterstützung der Zwischendecke diente. Dieses Standrohr wurde bei einem Silo aber auch als Elevatorturm herangezogen.

1973: Zwischendecke mit Schlitzbeschickung.
Die Zwischendecke erhält konzentrische Schlitze, durch die der Siloraum über ein drehbares Förderband, das sich um den Silomittelpunkt als Drehpunkt wie ein Zeiger bewegt, kontinuierlich beschickt wird. Vorteilig ist die großflächige Verteilung, so daß auch eine feuchtere Charge nicht zusammen bleibt und verklebt, und die Personaleinsparung, da das Drehband nicht von Hand bedient werden muß.

1974: Einführung der Entleerungsschnecke.
Auf dem Siloboden befindet sich eine Schnecke, die sich zeigerförmig um den Silomittelpunkt als Drehpunkt drehen kann und dabei den Zucker durch die Schraubenbewegung zur Mittelöffnung fördert. Mit der Einführung der Entleerungsschnecke mußte das Standrohr entfallen. Diese Silos haben daher freigespannte Zwischendecken (bis 37 m Durchmesser), wobei die radial angeordneten Stahlträger zur Gewichtseinsparung als Wabenträger ausgeführt werden [1-14].

1.3.3 Weitere Entwicklung

Bisher sind in der Bundesrepublik Deutschland für ca. 2 Mio. t Weißzucker Silos nach den zuvor geschilderten Varianten gebaut worden. Der Einsatz der Entleerungsschnecke hat zwar die manuell auszutragende Restmenge reduziert; trotzdem bleibt diese Lösung unbefriedigend. Der Verfasser glaubt, daß zukünftig auch Zuckersilos einen Trichterboden erhalten, wenn auch ohne Zweifel der bauliche Aufwand für die Herstellung eines derartigen Silobodens etwas aufwendiger sein dürfte als der für eine herkömmliche ebene Stahlbetonplatte [1-15].

1.4 Der Silobau in der Zementindustrie

Zement ist zwar ein wesentlich jüngeres Schüttgut als Getreide und auch Zucker, der Beginn der Silolagerung ist jedoch unbekannt. In Deutschland begann die Portland-Cement-Herstellung 1855 mit einer Leistung von 50–100 Faß je Tag [1-16]. Noch bis in unser Jahrhundert wurde Zement in Fässern zu 170 kg gelagert und zur Verwendungsstelle gebracht. Die ersten Silos dürften wohl mehr als Puffersilos zum Abfüllen gedient haben als zur Lagerung. Überliefert ist ein Foto von drei Zementsilos mit einem Durchmesser von ca. 4 m, die bei Oos/Baden um 1890 errichtet wurden; über die Ausbildung der Silodecke und des Silobodens wird leider nicht berichtet.

Um die Jahrhundertwende setzt sich im Inland der Gebrauch von Jutesäcken für Abfüllung mit Zement durch, was zwar einen Fortschritt gegenüber dem Holzfaß bedeutete; die teuren Säcke mußten allerdings an die Fabrik zurückgeliefert werden. Der Papiersack wurde während des 1. Weltkrieges geboren, weil es keine Jute gab; die Vorteile waren aber so überzeugend, daß er sich auf breiter Front durchsetzte und hielt.

1.4.1 Zementsilos

Mit Ende der zwanziger Jahre werden die ersten Zementlagersilos gebaut, die zum Teil noch heute stehen. Es handelt sich um Rundsilos mit einem Durchmesser bis 16 m! Bild 1-19 zeigt einen Zementsilo, Baujahr 1930, der bis 1956 in Betrieb war [1-17]. Der Silo hatte einen flachen Boden und wurde durch Schnecken entleert. Es gab um 1930 aber auch bereits Zementsilos mit trichterförmigem Boden [1-18]. Die Wanddicke dieser Silos betrug im unteren Bereich 25 cm und verringerte sich im oberen Bereich auf 20 cm.

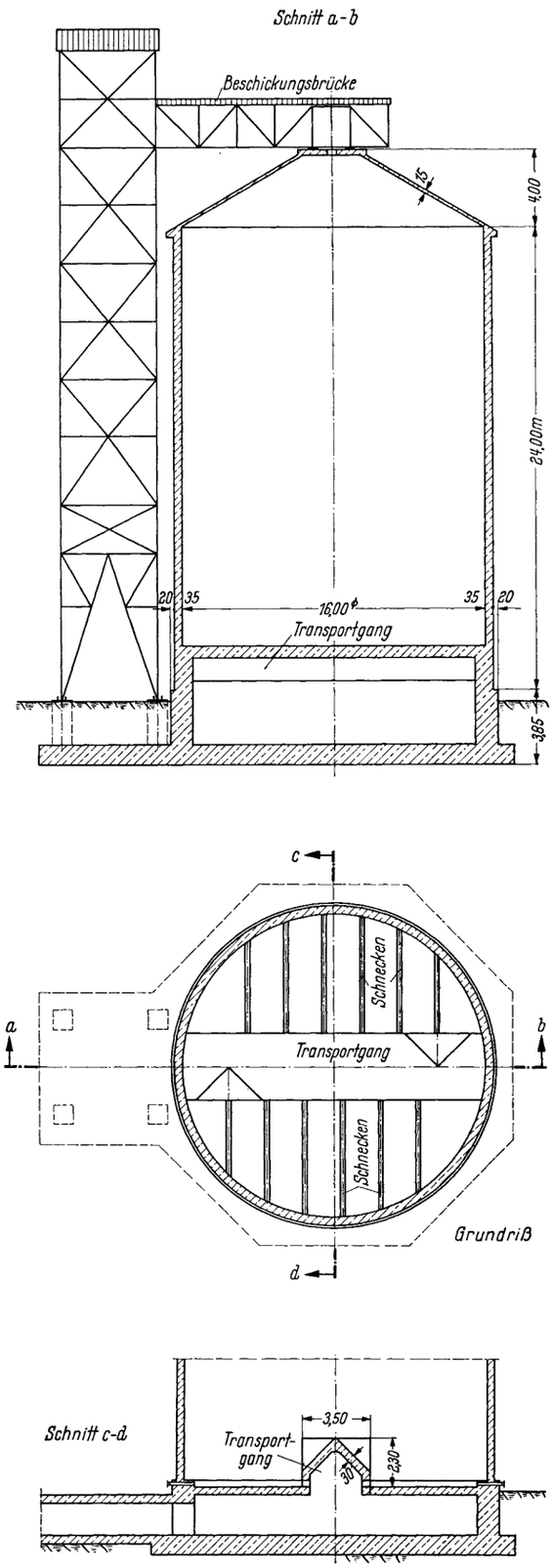


Bild 1-19
Zementsilo Baujahr 1930

Diese veränderliche Wanddicke konnte seinerzeit noch gewählt werden, da sich die Gleitbauweise noch nicht durchgesetzt hatte. Eine vollständige Entleerung gelingt bekanntlich nur, wenn der konische Auslauftrichter eine Neigung von ca. 65° gegen die Horizontale hat. Mit wachsendem Silodurchmesser werden daher die Entleerungstrichter auch sehr hoch, und der Verlust an Lagerraum steigt an. Silos mit einem Trichterboden wurden daher nur bis ca. 10 m Silodurchmesser gebaut.

Für Silos mit einem größeren Durchmesser wurde Anfang der siebziger Jahre eine interessante Variante gebaut. Die Siloböden wurden in sieben wabenförmige Entleerungstrichter aufgelöst [1-19]. Das völlig Neue an dieser Lösung lag jedoch darin, die Trichter nicht hängend anzuordnen, sondern sie auf runde Hohlstützen abzusetzen, die wiederum auf der Fundamentplatte aufsitzen (Bild 1-20). Den sicherlich hohen Baukosten für einen derartigen Trichterboden steht ein geringer Energiebedarf beim Entleeren und der Wegfall manueller Ausräumungsarbeiten gegenüber.

Die meisten Zementsilos werden heute jedoch mit einem unter 8° bis 15° geneigten Boden ausgeführt – ab 12 m Durchmesser mit einem Entleerungskegel über dem zentralen Auslauf – und pneumatisch entleert. Zu diesem Zweck werden auf dem Boden poröse Elemente angeordnet, durch die das darüberliegende Staubgut mittels Druckluft so stark fluidisiert wird, daß es wie Wasser abfließen kann. Der Vorteil dieser Lösung liegt sowohl in der Vergrößerung des Nutzraumes als auch in der wesentlich einfacheren baulichen Konstruktion des nahezu ebenen Zellenbodens gegenüber einem Trichterauslauf.

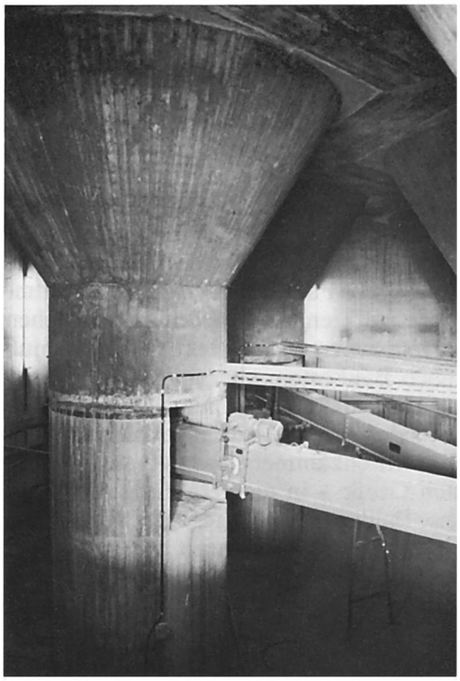


Bild 1-20
Trichtersilo

Die gängigen Durchmesser für Zementsilos liegen auch heute noch zwischen 8 und 14 m, es wurden aber auch vereinzelt Silos bis 24 m hergestellt, ab 16 m dann aber aus Spannbeton. In den letzten Jahren (1978) wurde schließlich noch eine neue Variante gebaut, nämlich der Zentralkegelsilo. Das konstruktive Hauptmerkmal dieses Silotypes ist der zentral angeordnete Kegel, aber mit der Spitze nach oben. Als vorteilhaft wird bei dieser Lösung die freie Überspannung des gesamten Silogrundrisses angesehen, so daß viel Raum für die Unterbringung der Entleerungseinrichtung, Staubfilter, Waagen etc. besteht [1-20]. Der Schalungsaufwand bei der Herstellung des Trichters dürfte jedoch beträchtlich sein; außerdem bleibt ungeklärt, wie sich die exzentrische Entleerung im Dauerbetrieb auf die Silowand auswirkt.

1.4.2 Rohmehlsilos

Es ist bekannt, daß zur Herstellung eines qualitativ hochwertigen und gleichmäßigen Zementes dem Ofen ein Rohmehl mit konstanten Materialeigenschaften zugeführt werden muß. Wenn man nun eine abbauwürdige Lagerstätte gefunden hat, so enthält sie leider auch einige Partien, die sich weniger eignen und deren Anteil in der Gesamtcharge zumindest möglichst klein gehalten werden muß. Es kommt daher darauf an, daß ein derartiges weniger gutes Material mit dem vollwertigen Material homogenisiert wird, um die Schwankungsbreite in der Materialzusammensetzung möglichst gering zu halten.

Während früher beim üblichen Naßverfahren die Ausgangsstoffe aufgeschäumt wurden und die Schlämmgruben gleichzeitig das Vorratslager und Mischbett darstellten, wurden bei Einführung des Trockenverfahrens Silokonstruktionen erforderlich zum Homogenisieren und als Puffer zwischen der stoßartigen Zufuhr vom Steinbruch und der kontinuierlichen Weiterleitung zum Drehofen. Der erste Chargen/Homogenisierungssilo in Doppelstockanordnung wurde 1956/57 gebaut. In der oberen Zelle erfolgt die Homogenisierung mit Hilfe von Druckluft, die vom Siloboden aus eingeblasen wird; aus dieser Zelle wird dann das Rohmehl chargenweise in den darunter angeordneten Lagersilo entleert. Das bauliche Hauptproblem bei diesen Doppelstock-Silos bildet die freie Überspannung des Silobodens der oberen Homogenisierungszelle. Beim Entleeren dieser Zelle tritt durch die große Fallhöhe allerdings eine Entmischung auf, so daß, um die Trennung wieder auszugleichen, auch die untere Lagerzelle einen Mischeffekt bewirken muß. Einmal wegen der hohen Baukosten, aber auch wegen dieses geschilderten Entmischungseffektes ist man heute vom Bau der Doppelstocksilos wieder überwiegend abgekommen. Statt dessen werden einzellige Mischkammersilos bevorzugt: Der Siloboden wird – je nach Größe – in mehrere Zonen unterteilt und das Gut zonenweise fluidisiert und abgezogen, so daß beim Ausfluß die gewünschte Mischwirkung erzielt wird.

1.4.3 Klinkersilos

Zwischen dem Ofen- und dem Zementmühlenbetrieb müssen bestimmte Klinkermengen als Puffer vorgehalten werden, um kurzfristige und jahreszeitlich bedingte längerfristige Schwankungen zwischen der Klinkerproduktion und dem Zementbedarf auszugleichen. Diese Klinkermenge wurde früher allgemein im Freien gelagert. Es gab allerdings auch um 1930 schon Zementwerke, die ihren ganzen Klinkervorrat in einer geschlossenen Halle lagerten [1-18]. Die Halle war mit einem Brückenkran ausgestattet, der wegen der Staubentwicklung aber von innen nur schwer bedient werden konnte. Infolge zunehmend strengeren Forderungen nach Begrenzung der Staubemissionen kam es 1963 zum Bau des ersten vorgespannten Klinkersilos. Der Silo hatte einen lichten Durchmesser von 30 m bei 46 m Füllhöhe; in Zellenmitte befand sich ein Zentralrohr mit 5,22 m Durchmesser zur Aufnahme von Gips. Vermutlich infolge einseitigem Füllgutdruck stellten sich später in diesem Rohr schwere Schäden ein. Ein ein Jahr später errichteter Klinkersilo mit 30 m Durchmesser und 50 m Höhe, aber ohne Zentralrohr, blieb dagegen ohne Schäden und ist noch heute voll in Betrieb.

1971 wurde der erste vorgespannte Silo für heiße Klinker gebaut. Es handelt sich um einen Rundsilo mit 32 m Innendurchmesser und 35000 m^3 Fassungsvolumen. Der Klinker wird durch einen 5,6 m breiten Kanal mit 6 Öffnungen 1,20/1,20 m entleert. Die Einlagerung der im Planetenkühler auf ca. 170 °C abgekühlten Klinker wurde zunächst als problematisch angesehen; man zog in Erwägung, an der Wandinnenseite eine wärmedämmende Verschleißschicht anzubringen und die Silowand vom Fundament durch eine Gleitfuge zu trennen. Laboruntersuchungen und Rechnungen führten jedoch zu der Entscheidung, die Silowand in herkömmlicher Weise biegesteif mit dem Fundament zu verbinden und auf jede Isolierung zu verzichten, um die Wärmeabgabe ins Freie und damit die Klinkerkühlung nicht zu beeinträchtigen. Dieser Silo ist nun über 15 Jahre in Betrieb, ohne daß Schäden festgestellt wurden.

1973 wurde der bis heute größte einzelstehende Klinkersilo für ein Fassungsvermögen von 75000 t aus Spannbeton errichtet.

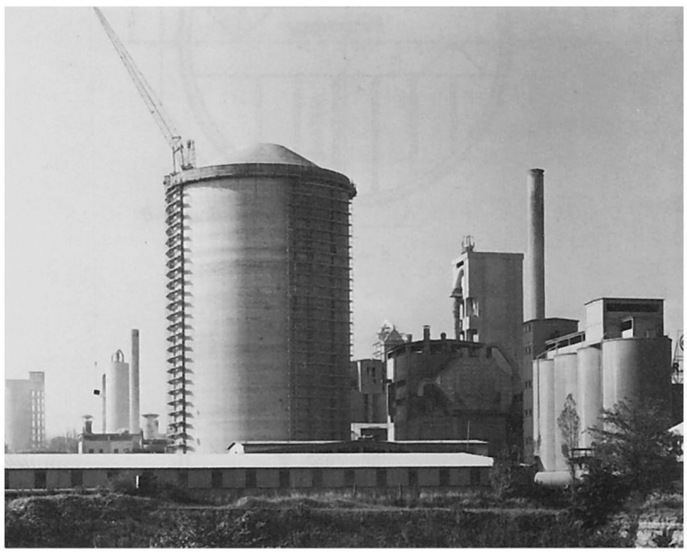


Bild 1-21
Klinkersilo für 75000 t

Dieser Silo hat einen Innendurchmesser von 31,8 m und eine Wandhöhe von 61 m bei 35 cm Wanddicke. Die Überdachung besteht aus einer im Mittel 14 cm dicken Kegelstumpfschale mit einer Kreisplatte von 9 m Durchmesser als oberer Abschluß (Bild 1-21). Der Silo wird zentrisch entleert, nur zur Restentleerung dürfen außermittige Abzugsöffnungen bedient werden. Auch dieser Silo wurde für heißes Füllgut bemessen, wobei angenommen wurde, daß die Eingangstemperatur der Klinker maximal 160° beträgt. In den letzten Jahren wurde sogar in Erwägung gezogen, Klinker mit einer Eingangstemperatur von 320 °C einzulagern. Bei derartigen Temperaturen können dann sicher nur noch Stahlsilos Verwendung finden. Prototypen mit 40000 t Fassungsvolumen wurden bereits ab 1972 gebaut.

1.5 Entwicklungstendenzen

Silokonstruktionen werden überall dort erforderlich, wo die häufig naturgegebenen Schwankungen zwischen Erzeugung und Verbrauch von schüttbaren Massengütern auszugleichen sind. In der Regel ergeben sich schon aufgrund der spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Schüttgüter und der sich daraus ergebenden Lagerbedingungen Vorbedingungen für die bauliche Gestaltung hinsichtlich der Speicherform und der Auswahl des Baumaterials.

Getreide wird heute noch überwiegend beim Erzeuger (Bauer) in Flachspeichern gelagert. Da ein derartiger Speicher in der Regel nur einmal pro Jahr gefüllt und geleert wird, ist die Lagerung in Flachspeichern auch zweifellos am kostengünstigsten. Im Landhandel finden allerdings zunehmend Silos als Umschlag- und auch als Lagersilos Verwendung, da gegenüber einem Flachlager eine bessere Separierung nach Sorten und Qualität möglich ist. Außerdem verringern sich die manuellen Ausräumarbeiten, und schließlich ist in einem isolierten Silo auch eine kostengünstige Kühlkonservierung möglich. Für derartige Silos kommen in der Regel standardisierte Rundsilos für ein Fassungsvolumen von 300 t bis 2000 t zur Anwendung.

Individuelle Silobauten für den Umschlag und die Lagerung von Getreide, Mais, Mehl und Futtermitteln findet man vorwiegend an den Umschlagstellen (Häfen) und bei Mühlen. Unter dem Druck der Kosten und des hohen Kapitalaufwandes bei der Errichtung und dem Betrieb dieser großen Anlagen besteht der Zwang zum technischen Fortschritt und zu dem Bestreben, für jeden Einzelfall eine maßgeschneiderte Anlage entsprechend dem neuesten Stand der Erkenntnisse zu erhalten. Aus diesem Grunde ist keine Typenbildung erkennbar. Es werden noch Rundsilobatterien mit Zwickelzellen gebaut, die Tendenz geht jedoch wieder mehr in die Richtung nach rechteckförmigen Zellen. Bei einer 1981 geplanten Siloanlage mit ca. 25000 m^3 Fassungsvolumen, die auch zum Umschlag von schwer fließenden Produkten dienen soll, kamen Wabenzellen mit ca. 6 m Durchmesser zur Anwendung.

Wenn dagegen relativ große Mengen von Getreide, Mais oder Sojabohnen gelagert werden sollen, empfiehlt sich die freistehende Rundzelle als kostengünstigste Lösung. In der Zuckerindustrie finden für die Lagerung von Weißzucker auch zukünftig ausschließlich vorgespannte Rundsilos Verwendung. Die optimale Größe eines Rundsilos für die Lagerung von Zucker liegt bei ca. 35000 t Fassungsvermögen. Dieses Volumen entspricht einer nutzbaren Zelle von 35 m Durchmesser und 40 m Höhe. Wesentlich größere Fülltiefen bereiten bei der Ableitung der Bauwerkslast in den Baugrund Schwierigkeiten, da eine große Einzelzelle in ihrer Gründung nicht so steif ist wie eine Silobatterie und daher die steigenden Wandlasten infolge Wandreibung des Füllgutes zu hohen Bodenpressungen im Wandbereich führen.

Ein größerer Silodurchmesser führt ebenfalls zu einem spezifischen Kostenzuwachs, da die Menge des erforderlichen Profilstahles für die freigespannte Zwischendecke und das freigespannte Dach mit der dritten Potenz des Silodurchmessers steigt, der Siloinhalt aber nur mit der 2. Potenz. In den vergangenen Jahren wurden auch Großraumsilos für die Lagerung von Rübenschnitzelpellets gebaut. Es wurden mehrere vorgespannte Silos mit einem Durchmesser von 32 m und 20000 t Fassungsvolumen gebaut und ein Silo sogar für eine Füllmenge von 30000 t [1-20]. Auch hier brachte der größere Silokörper einen spezifischen Kostenzuwachs: Das Kostenoptimum dürfte daher eher bei einem Fassungsvermögen von 15000 t als bei 30000 t liegen.

Bei den Silos der Zementindustrie wurde in Abschnitt 1.4 der heutige Stand der Entwicklung geschildert. Da die deutsche Zementindustrie ihre Jahresproduktion von 42 Mio. t Zement 1972 auf 30 Mio. t Zement 1981 zurückfahren mußte, sind die Chancen für neue Silobauten in Deutschland sehr gering. Dagegen werden im Ausland, vor allem in den OPEC-Ländern, noch ständig neue Zementfabriken gebaut. Soweit man für die nähere Zukunft eine Prognose wagen darf, bleiben für Zement- und Rohmehlsilos Rundsilos mit 12 m bis 16 m Durchmesser und 40 m bis 50 m Höhe die kostengünstigste Lösung, während für Klinkersilos das Optimum bei ca. 45000 t Fassungsvermögen liegen dürfte.

Literatur zu Kapitel 1

[1-1] *Luther, G.:* Die Construction und Einrichtung der Speicher. J. H. Meyer, Braunschweig 1886

[1-2] *Buhle, M.:* Technische Hülfsmittel zur Beförderung und Lagerung von Sammelkörpern, 2. Teil. Springer, Berlin 1904

[1-3] Diccionario Espasa Calpe, edition 1980

[1-4] *Feldhaus, F. M.:* Die Technik der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker, 2. Auflage. Moos, München 1965

[1-5] *Badawy, A.:* A History of Egyptian Architecture, 3 Bände. Giza und Berkeley, Cal. 1954–1968

[1-6] *Hamblin, D. J.:* Die ersten Städte. Time Life International, 3. Auflage 1977

[1-7] *Petáry, Thomas:* Die Wirtschaft der griechisch-römischen Antike. Steiner, Wiesbaden 1979

[1-8] *Rickman, G. E.:* Roman Granaries and Store Buildings. Cambridge University Press 1971

[1-9] *Alberti, Leon Battista:* Zehn Bücher über die Baukunst. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1975

[1-10] *Pitz, Ernst:* Wirtschafts- und Sozialgeschichte Deutschlands im Mittelalter. Steiner, Wiesbaden 1979

[1-11] *Oliver, John William:* Die Geschichte der amerikanischen Technik. Econ, Düsseldorf 1959

[1-12] *Müller, J.:* 150 Jahre Firma J. Müller, Brake. Brake 1970

[1-13] *Buhle, M.:* Neue Saugluft-Getreideheber und andere Förder- und Lageranlagen. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1913

[1-14] *Fuchs, G.:* Verwendung von Wabenträgern bei weitgespannten Bühnenkonstruktionen. Bauingenieur 54 (1979) S. 212

[1-15] *Fuchs, G.:* Geschichtliche Entwicklung im Bau von Weißzuckersiloanlagen. Zuckerindustrie, Heft 8/1982

[1-16] *Haegermann, G.:* Vom Caementum zum Zement. Bauverlag, Wiesbaden–Berlin 1964

[1-17] *Leonhardt, Boll, Speidel:* Zur Frage der sicheren Bemessung von Zementsilos. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 3, 1960

[1-18] *Hans, Lüüs:* Die Eisenbetonarbeiten am Zementwerk Wittekind in Erwitte i. Westf. Beton und Eisen, Heft 22/1930

[1-19] *Maier, H.:* Großraumsilos mit sieben Abzugstrichtern für mehlförmige Schüttgüter. Zement–Kalk–Gips, Heft 2/1972

[1-20] *Peter, J.:* Der Zentralkegelsilo aus statisch-konstruktiver Sicht. Zement–Kalk–Gips, Heft 12/1981

[1-21] *Muhlack, E. u. a.:* Das Regensburger 30000-t-Pelletsilo. Zuckerindustrie, Heft 5/1980