

Quarzrohstoffe für die Glasindustrie

Von Rudolf Weiss, Frechen

(Vortrag auf der 49. Glastechnischen Tagung am 14. Mai 1975 in Braunschweig)

(Mitteilung aus dem Zentrallaboratorium der Quarzwerke GmbH, Frechen)

(Eingegangen am 27. Oktober 1975)

Wirtschaftlich nutzbare Vorkommen von Quarzgesteinen sind in fast allen Perioden der Erdgeschichte entstanden. Für die Glasindustrie der Bundesrepublik Deutschland besonders bedeutsam sind die tertiären Quarzsande der Kölner Bucht, des Helmstedter Beckens, des Vorkommens Duingen, die in der Kreidezeit entstandenen Halterner Sande, die Jura-Dogger-Sande von Freihung und die Quarzsande des Buntsandsteins von Hirschau/Schnaittenbach. Lagerstätten, Gewinnung, Aufbereitung und Produkteigenschaften werden beschrieben.

Unterschiedlichste Qualitätsanforderungen entsprechend den verschiedenen Einsatzgebieten sind für diesen für die Glasindustrie so bedeutsamen Rohstoff kennzeichnend. An zwei theoretischen Beispielen wird gezeigt, welche Auswirkungen auf die wirtschaftliche Nutzung bzw. Lebensdauer einer Quarzsandlagerstätte schon durch scheinbar geringfügige Veränderungen in den Qualitätsanforderungen zu erwarten sind.

Quartz raw materials for the glass industry

Economically useful deposits of quartz minerals are found in nearly all geological periods. The tertiary quartz sands of Cologne bay, Helmstedt basin, and Duingen, the sands of Haltern of the Cretaceous, the Jura-Dogger sands of Freihung and the Bunter sands of Hirschau/Schnaittenbach are important for the glass industry of the Federal Republic of Germany. Deposits, winning, preparation and product properties are all described.

Different quality requirements according to different fields of application characterize these important raw materials for the glass industry. Two hypothetical examples are used to show how the economic use and useful life of a quartz sand deposit can be greatly influenced by apparently trivial changes in quality requirements.

Matières premières quartzieuses pour l'industrie du verre

L'existence de gisements de roches quartzieuses exploitables économiquement est attesté à presque toutes les périodes de l'histoire de la terre. Les sables tertiaires de la dépression de Cologne, du bassin de Helmstedt et du gisement de Duingen, les sables crétacés de Haltern, les sables jurassiques de Freihung et les sables quartzieux du gisement de grès bigarré de Hirschau/Schnaittenbach présentent un intérêt tout particulier pour l'industrie verrière de la République fédérale allemande. Les gisements, le mode d'exploita-

tion et de préparation ainsi que les propriétés de ces sables sont décrits.

Ces matières premières essentielles pour l'industrie du verre sont caractérisées par différentes exigences qualitatives qui correspondent aux divers domaines d'utilisation. Deux exemples théoriques permettent de montrer les effets que des modifications apparemment limitées apportées aux exigences qualitatives peuvent exercer sur l'exploitation économique et la durée de vie d'un gisement de sable quartzieux.

Das Mineral Quarz ist ein Grundstoff, der sich durch Vielfältigkeit in seiner Genese, seiner Lagerstättenausbildung und der Vielzahl seiner Verwendungsmöglichkeiten auszeichnet. Entsprechend den unterschiedlichen Funktionen bei seiner Anwendung lassen sich in Abhängigkeit von seiner Wirkung drei Gruppen von Quarzgrundstoffen unterscheiden:

- a) Quarz als Rohstoff; z. B. im Glasgemenge, in der keramischen Masse, in der Glasur, bei der Siliciumcarbidherstellung;
- b) Quarz als Füllstoff; z. B. in Gießharzen, in Kunstharzmörteln, in Dispersionsfarben;
- c) Quarz als Hilfsstoff; z. B. als Schleif- und Poliermittel, als Formgrundstoff zur Herstellung von Formen in der Gießerei.

Bedingt durch die sehr unterschiedlichen Anwendungen ergeben sich zwangsläufig verschiedene, z. T. einander entgegengesetzte Forderungen an die Quarzgrundstoffe produzierende Industrie.

Quarz ist in der Natur weit verbreitet und gehört zu den wichtigsten gesteinsbildenden Mineralien. Lager-

stätten, aus denen Quarzgrundstoffe gewonnen werden können, haben sich in fast allen Perioden der Erdgeschichte gebildet. Sie unterscheiden sich in ihrem mineralogischen und chemischen Aufbau z. T. ganz erheblich voneinander. Nur in einer begrenzten Anzahl von Ausbildungen kann von reinen Quarzlagerstätten gesprochen werden. Wirtschaftlich am bedeutendsten sind die auf der Basis sedimentärer Gesteinsbildung entstandenen Quarzvorkommen. Hierzu gehören die verschiedenen Quarzsand-, Sandstein- und Quarzitlagerstätten unterschiedlichen geologischen Alters.

1. Anforderung an Quarzrohstoffe für die Glasindustrie

Über die Eignung eines Quarzrohstoffes und seine Verwendung zur Glasherstellung entscheiden in qualitativer Hinsicht drei Gruppen von Stoffdaten. Sie lassen sich gliedern in mineralogische, chemische und granulometrische Kennwerte. In Abhängigkeit von der Glasart sind die Anforderungen an die einzelnen Kennwerte unterschiedlich.

1.1. Mineralogische Kennwerte

1.1.1. Quarzgehalt

In der BRD und auch den anderen Ländern Westeuropas werden fast ausschließlich reine Quarzsande mit SiO_2 -Gehalten $> 99\%$ als Quarzrohstoffe zur Glas-erzeugung eingesetzt. Hierzu stehen Lagerstätten entsprechenden Reinheitsgrades zur Verfügung. Der Quarzgehalt dieser Sande liegt in Übereinstimmung mit den hohen SiO_2 -Gehalten meist über 98 bzw. 99%. Ausnahmen bilden die Hirschau-Schnaittenbacher Kaolin-Feldspatsande und die feldspathaltigen Linz-Melker Sande, aus denen erst durch umfangreiche Sortier- (Flotation, elektrostatische Trennung, Magnetscheidung) und Klas-sierprozesse hochwertige Quarzsande erzeugt werden.

1.1.2. Tonmineralgehalt

Quarzsande enthalten neben Feldspat (sein Anteil schwankt zwischen Spuren und etwa 30 Gew.-%) als Verunreinigung unterschiedlich hohe Anteile an Tonmineralien. Diese werden in der Regel durch Läuter- und Waschprozesse bei der Aufbereitung des Quarzsandes nahezu 100%ig entfernt. Hierdurch wird meist eine Senkung des Fe_2O_3 -Gehaltes des Quarzsandes erreicht. Gleichzeitig sinkt sein Al_2O_3 -Gehalt und stellt sich auf ein konstantes Niveau ein.

1.1.3. Schwermineralgehalt

In einer dritten Gruppe sind die als Verunreinigungen in Quarzsand enthaltenen Schwermineralien mit einer Dichte $> 2,89 \text{ g/cm}^3$ zusammengefaßt. In Einzelfällen wird der Schwermineralgehalt von Quarzsanden durch Sortierverfahren, wie Flotation, Starkfeldmagnetscheidung bzw. Spiralklassierung, vermindert. Der Schwermineralgehalt eines Quarzsandes beeinflußt wesentlich die chemischen Kennwerte für die färbenden Oxide der Elemente Eisen, Chrom, Titan und Mangan.

Glasschädlich im Sinne einer Steinchenbildung sind die Schwermineralien Chromit, Disthen, Korund und Zirkon, sobald die einzelnen Mineralkörner einen bestimmten Korndurchmesser überschreiten. Der obere Korndurchmesser für die verschiedenen glasschädlichen Schwermineralien ist abhängig von der Gemengezusammensetzung, der Ofentemperatur und der Wannbelastung. Für Chromitkörner gilt bei Floatglasanlagen heute als maximal zulässiger Grenzwert ein Korndurchmesser von 0,35 mm. Da die Klassierung von Quarzsanden, die in der Glasindustrie als Glasschmelzsand eingesetzt werden, heute vorwiegend in Aufstromklassierern durchgeführt wird, ist es möglich, entsprechend dem maximal zulässigen oberen Quarzkorndurchmesser gleichzeitig Chromitkörner entsprechend kleineren Korndurchmessers mit abzuscheiden.

Dabei gilt vereinfacht unter Berücksichtigung der Dichte für Quarz $= 2,65 \text{ g/cm}^3$ und der Dichte für Chromit $= 4,65 \text{ g/cm}^3$:

$$m_Q/V_Q = \gamma_Q = 2,65 \text{ g/cm}^3, \quad (1)$$

dabei sind: m_Q = Masse des Quarzkorns und V_Q = Volumen des Quarzkorns;

$$m_C/V_C = \gamma_C = 4,65 \text{ g/cm}^3, \quad (2)$$

wobei m_C = Masse des Chromitkorns und V_C = Volumen des Chromitkorns bedeuten.

Nimmt man an, daß sowohl die Quarz- als auch die Chromitkörner Kugelgestalt haben, so gilt für ein Quarzkorn

mit einem Korndurchmesser d_Q bei Annahme der Gültigkeit des Stokeschen Gesetzes folgende Zahlenwertgleichung für den Sinkgeschwindigkeits-Äquivalentdurchmesser (in μm):

$$d_Q = 175 \sqrt{\frac{\eta}{1,65}} \sqrt{\frac{h}{t}} \quad (3)$$

mit η = Viskosität der Sedimentationsflüssigkeit in Ns/cm^2 , h = Fallhöhe in cm, t = Falldauer in min, h/t = Sinkgeschwindigkeit in cm/min.

Sinngemäß gilt für ein Chromitkorn mit einem Äquivalentdurchmesser d_C (in μm):

$$d_C = 175 \sqrt{\frac{\eta}{3,65}} \sqrt{\frac{h}{t}} \quad (4)$$

Setzt man für das Quarz- und Chromitkorn gleiche Sinkgeschwindigkeit voraus, so läßt sich unter Benutzung der Gleichungen (3) und (4) der Korndurchmesser des Chromitkornes errechnen, das sich in seiner Sinkgeschwindigkeit gleich dem im Durchmesser entsprechend größeren Quarzkorn verhält.

Nach der Rechnung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$d_Q = 0,67 d_C \quad (5)$$

wenn d_Q und d_C in mm angegeben werden. Dieser Zusammenhang wird durch die Praxis bestätigt. So werden bei der Abscheidung des Überkornanteils $+ 0,5 \text{ mm}$ aus der Glassandfraktion gleichzeitig die Chromitkörner der Kornklasse $+ 0,3 \text{ mm}$ mit abgetrennt und gelangen in das Grobgut.

1.1.4. Carbonatgehalt

Als weitere Nebenbestandteile bzw. Verunreinigungen treten in Quarzsanden Erdalkalicarbonate (Calcit, Dolomit) vereinzelt auf. Dies trifft jedoch nicht für die Glassandvorkommen der BRD zu.

1.1.5. Zusammenfassung der Anforderungen an die mineralogische Zusammensetzung

Die Anforderungen an die mineralogische Zusammensetzung eines aufbereiteten, hochwertigen Glasschmelzsandes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Sein Quarzgehalt soll mindestens 98% betragen; er muß in seiner Mineralzusammensetzung konstant sein.
- Sein Gehalt an Tonmineralien und sonstigen Schluffbestandteilen (Schlammstoff) sollte durch Aufbereitung so weit gesenkt sein, daß der Anteil der Kornklasse $< 0,02 \text{ mm}$ im Quarzsand 0,3% nicht überschreitet.
- Sein Schwermineralgehalt sollte unter 0,1%, bei reinsten Sanden unter 0,05% liegen. Ein Glassand muß frei von solchen Schwermineralien sein, die zu Steinchenbildung im Glas führen.
- Bei Verwendung feldspathaltiger Sande als Glasschmelzsand ist der maximal zulässige Feldspatgehalt (meist als Al_2O_3 gerechnet) abhängig von der Gemengezusammensetzung. Die Schwankungsbreite des Al_2O_3 -Gehaltes sollte dabei gleichzeitig nicht mehr als $\pm 0,25\%$ betragen.

1.2. Chemische Kennwerte

1.2.1. SiO_2 -Gehalt

Hochreine Quarzrohstoffe weisen in der Regel SiO_2 -Gehalte im Bereich 99 bis 99,8% auf. Die Schwankungsbreite dieses Kennwertes soll nicht mehr als $\pm 0,25\%$ betragen.

1.2.2. Fe₂O₃-Gehalt

Die Anforderungen, die an die maximal zulässige Höhe des Fe₂O₃-Gehaltes bei Quarzrohstoffen für die Glasindustrie gestellt werden, sind für die verschiedenen Glasarten sehr unterschiedlich.

Optische Gläser erfordern Glasrohstoffe mit Fe₂O₃-Gehalten zwischen 0,001 und 0,0025% = 10 bis 25 ppm. Diese Werte können mit Quarzsanden nicht erreicht werden. Der untere Grenzwert des Fe₂O₃-Gehaltes für chemisch aufbereitete Quarzsande liegt bei 0,005%. Um Fe₂O₃-Gehalte von 0,001 bis 0,002% zu erzielen, müssen Gangquarze pegmatitischen oder hydrothermalen Ursprungs nach der Zerkleinerung chemisch nachgereinigt werden.

Für hochwertige Kristallgläser eignen sich Glasande mit einem Fe₂O₃-Gehalt von 0,008 bis 0,012%. Einfacheres Kristallglas läßt einen Fe₂O₃-Gehalt bis zu 0,018% im Quarzrohstoff zu.

Bei Quarzrohstoffen für die Hohlglasindustrie werden heute an den Fe₂O₃-Gehalt folgende Anforderungen gestellt: Weißglas max. 0,025%; Kohleleibglas max. 0,1%; Grünlas max. 1%.

In Gemengen zur Flachglaserzeugung liegt der Fe₂O₃-Gehalt der eingesetzten Quarzsande im Bereich 0,02 bis 0,05%, wobei die Schwankungen nicht mehr als ± 0,01% vom Mittelwert betragen dürfen.

1.2.3. Cr₂O₃-Gehalt

Chemisch aufbereitete Gangquarze für optische Gläser erreichen einen Cr₂O₃-Gehalt zwischen 0,5 und 1,0 ppm und erfüllen damit die gestellten Anforderungen. Für Kristallgläser und weißes Hohlglas werden Cr₂O₃-Gehalte unter 0,001% gefordert. Für Kohleleibgläser ist ein Cr₂O₃-Gehalt von 0,02% zulässig. Für Grünlas liegt der Wert mit 0,3% Cr₂O₃ in einem Bereich, der in Quarzsanden nicht erreicht wird und nur durch Zusatz von vermahlenem Chromit eingestellt werden kann.

Tabelle 1. Körnungskennwerte und -bereiche grober, mittlerer, feiner und feinsten Glasschmelzsande

Kornklasse in mm Prüfsiebe nach DIN 4188 ¹⁾	Mengenanteile in Gew.-%			
	Quarzsand „grob“	Quarzsand „mittel“	Quarzsand „fein“	Quarzsand „feinst“
> 1,0	maximal 1			
1,0 bis 0,5	5 bis 10	maximal 1		
0,5 bis 0,355	15 bis 35	5 bis 15	maximal 1	
0,355 bis 0,25	25 bis 35	30 bis 50	15 bis 30	maximal 1
0,25 bis 0,125	20 bis 30	40 bis 60	60 bis 80	80 bis 90
0,125 bis 0,063	0 bis 1	0 bis 2	2 bis 5	10 bis 20
< 0,063			maximal 1	maximal 3

1) ISO-Vorzugsreihe

Tabelle 2. Körnungskennwerte grober, mittlerer und feiner Quarzmehle für Glasgemenge

Kornklasse in µm	Mengenanteile in Gew.-%		
	Quarzmehl „grob“	Quarzmehl „mittel“	Quarzmehl „fein“
> 125	maximal 5	maximal 1	
125 bis 63	25	4	
63 bis 32	30	25	maximal 2
32 bis 16	20	30	18
< 16	20	40	80

Die für die Erzeugung von Flachglasprodukten eingesetzten Quarzsande liegen im Cr₂O₃-Gehalt etwa im Bereich 0,0001 bis 0,0005%.

1.2.4. Al₂O₃-Gehalt

Der in aufbereiteten Quarzrohstoffen vorhandene Gehalt an Al₂O₃ stammt im wesentlichen aus Feldspäten und Tonmineralien, die in Spuren selbst in den reinsten Quarzsanden enthalten sind. In Abhängigkeit von den Lagerstättenverhältnissen und dem Aufbereitungsgrad liegen die Werte für den Al₂O₃-Gehalt reiner Quarzsande im Bereich zwischen 0,1 bis 0,5%. Unabhängig vom Glastyp und den geforderten Al₂O₃-Werten soll die Schwankungsbreite des Al₂O₃-Gehaltes nicht mehr als ± 0,1% im Quarzsand betragen.

1.2.5. TiO₂-Gehalt

Der TiO₂-Gehalt von Quarzrohstoffen soll niedrig sein. Diese Forderungen erfüllen hochreine Quarzrohstoffe mit Werten im Bereich von 0,01 bis 0,05% TiO₂ gut. Glassande mit höheren TiO₂-Gehalten bilden die Ausnahme.

1.2.6. MgO- und CaO-Gehalt

Die Erdalkalioxide MgO und CaO sind in reinen Quarzrohstoffen nur in Spuren < 0,05% enthalten. Die Grundlage für die Festsetzung von Grenz- und Toleranzwerten für Lieferbedingungen bilden die gegebenen Lagerstättenverhältnisse.

1.2.7. K₂O- und Na₂O-Gehalt

Mit Ausnahme eines Hirschau-Schnaittenbacher Glasschmelzsandes und der Linz-Melker Feldspatsande sind alle Glasschmelzsande der BRD und der anderen westeuropäischen Länder praktisch alkalioxidfrei. Der Gehalt an K₂O und Na₂O liegt im Bereich 0,01 bis 0,05%. Die Festsetzung von Grenz- und Toleranzwerten ist von den gegebenen Lagerstättenverhältnissen abhängig.

1.3. Granulometrische Kennwerte

Die Einsatzmöglichkeiten eines Quarzrohstoffes als Gemengebestandteil werden außer von seinen mineralogischen und chemischen Kennwerten ganz wesentlich von seinen granulometrischen Kennwerten beeinflusst. Im Wannenbetrieb der Flachglasproduktion werden heute Quarzsande aus dem Kornklassenbereich 0,1 bis 0,5 mm eingesetzt, wobei der Über- und Unterkornanteil jeweils 1% nicht überschreiten soll. Bei der Hohlglasproduktion liegt die Grenze für den oberen Korndurchmesser etwas höher. Ideal geeignet scheinen hier Quarzkörner der Kornklasse 0,2 bis 0,4 mm zu sein. Größere Körnungen können dann eingesetzt werden, wenn ein besonders günstiges Schmelzverhalten der Quarzkörner bedingt durch Kornform und Korngefüge vorliegt.

Bei der Kristallglasproduktion wird teilweise mit eisenfrei vermahlenem Quarzsand (Quarzmehl grober Körnung) gearbeitet.

Auch bei der Glasfaserproduktion nach dem Kugelschmelz- und nach dem Direktschmelzverfahren werden Quarzmehle (mittlerer und feiner Körnung) eingesetzt.

In Tabelle 1 sind die Durchschnittskornverteilungen für grobe, mittlere, feine und feinste Quarzsande, die als Glasschmelzsande verwendet werden, zusammengestellt. Tabelle 2 zeigt die Übersicht über Durchschnittskörnungswerte für grobe, mittlere und feine als Gemengebestandteile eingesetzte Quarzmehle.

Tabelle 3. Gliederung von Quarzrohstoffen nach ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung

	Bergkristall (Brasilien)	Gangquarz (Portugal)	Quarzsand, reinst, (BRD, Belgien, Frankreich, Niederlande)	Quarzsand, eisenarm	Quarzsand, eisenhaltig, tonhaltig und feldspathaltig
Chemische Analyse in Gew.-%					
SiO ₂	99,99	99,8	99,5 bis 99,8	99,0 bis 99,6	< 99
Al ₂ O ₃	< 0,01	< 0,05	0,05 bis 0,3	0,1 bis 0,5	1,0 bis 6,0
Fe ₂ O ₃	< 0,001	0,002	0,01 bis 0,02	0,02 bis 0,05	0,1 bis 1,0
TiO ₂	< 0,01	0,01	< 0,05	0,1	0,1 bis 0,5
K ₂ O + Na ₂ O	< 0,01	0,01	< 0,1	< 0,15	≈ 0,2 bis 2,0
Glühverlust	< 0,1	0,1	0,1 bis 0,2	0,3	≈ 0,5 bis 2,0
Mineral-Analyse in Gew.-%					
Quarz	100	99,9	≈ 99	98	≈ 90
Feldspat			} 1,0	} max. 2	} 10
Tonsubstanz		0,1			
Sonstiges					

Tabelle 4. Geologische Übersicht mit Einordnung von Quarzsand-, Sandstein- und Kaolin-Feldspatsandvorkommen

Erdzeitalter	Formation	Alter in Mill. Jahren	Untergruppen	Vorkommen	
Neozoikum	Quartär	0,8	Holozän	—	
			Pleistozän	—	
	Tertiär			Pliozän	Mol/Belgien
				Miozän	Duingen, Frechen, Grasleben, Nivelstein/BRD; Hohenbocka, Weferlingen/DDR; Heerlen, Maasmechelen/Niederlande/Belgien; Newport, N. J./USA
				Oligozän	Nemours-Fontainebleau, Latilly, Grisolles, Mormoiron und Entraigues/Frankreich; Zelking, St. Georgen/Österreich
				Eozän	—
Paläozän	—				
Mesozoikum	Kreide	130	Obere Kreide (Santon)	Haltern-Flaesheim/BRD;	
			Untere Kreide	Redhill, Kingslynn/Großbritannien	
	Jura		Malm Dogger Lias	Freihung, Gebenbach/BRD	
	Trias	180	Keuper Muschelkalk Buntsandstein	Hirschau-Schnaittenbach/BRD (Kaolin-Feldspatsand)	
Paläozoikum	Perm	270	Zechstein	—	
			Rotliegendes	—	
	Karbon	350	Oberkarbon	Oakamoor/Großbritannien (Sandstein)	
			Unterkarbon	—	
	Devon	400	Ober-Devon	Berkely Springs, Keystone, Pa./USA	
			Mittel-Devon	(Oriskany-Sandstein)	
			Unter-Devon	—	
Silur		440	—		
Ordovizium		500	Ottawa, Ill./USA (Sandstein)		
Kambrium		600	—		

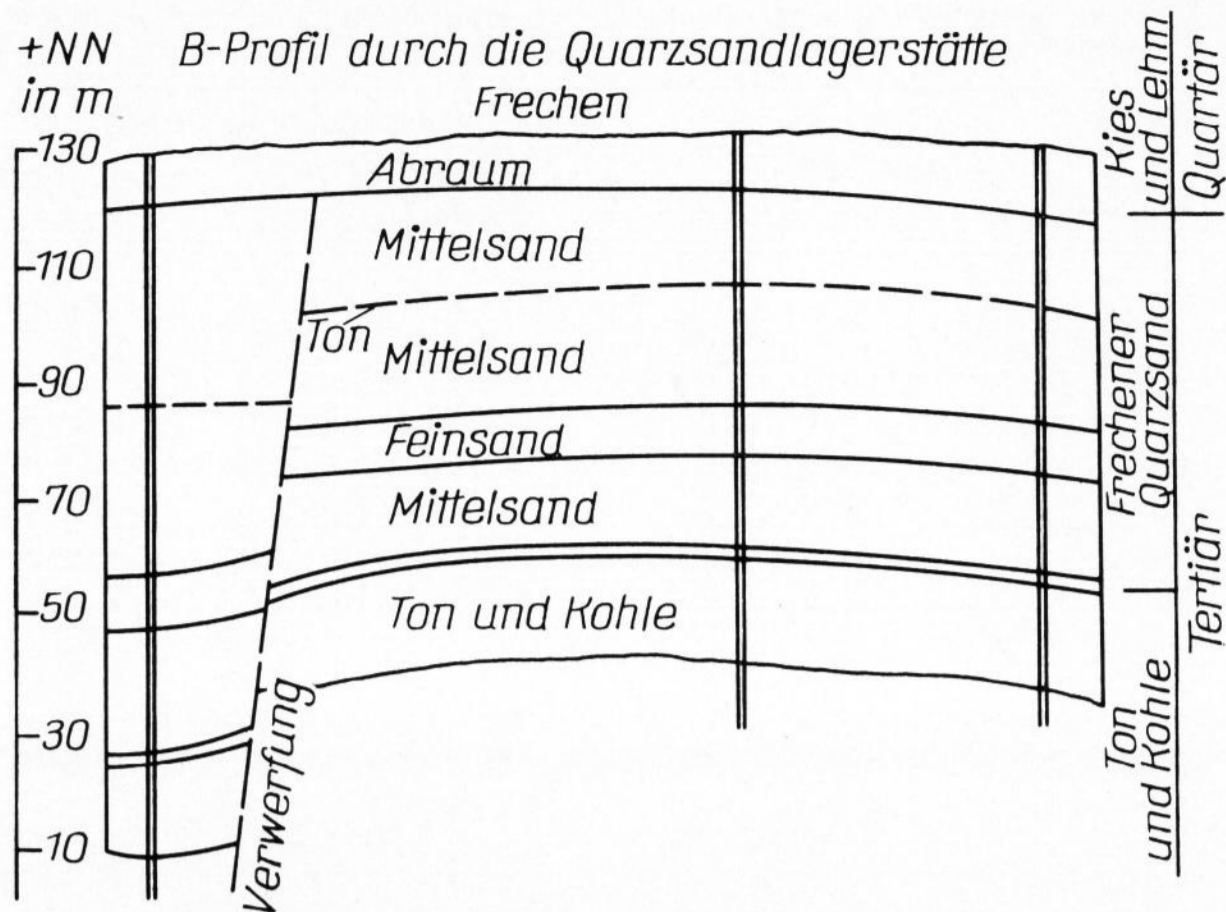


Bild 1. Typischer Schnitt durch die Quarzsandlagerstätte Frechen mit Unterscheidung von Mittel- und Feinsand. Im Liegenden Ton und Kohle. Zusätzlich gibt der Schnitt die im Westteil des Grubenfeldes vorhandene Verwerfung wieder.

2. Quarzrohstoffe

Quarzrohstoffe für die Glasindustrie sind in ihrer Hauptmenge Quarzsande unterschiedlichen Reinheitsgrades. Quarzrohstoffe für optische Gläser werden aus Gangquarz gewonnen. Als Quarzrohstoff zum Erschmelzen von Kieselglas dient Bergkristall, der in seiner reinsten Form bis zu 99,99% aus SiO₂ besteht. Feldspat- und tonhaltige z. T. sehr eisenhaltige Sande des Pleistozäns besitzen nur eine geringe Bedeutung als Glasschmelzsand beim Erschmelzen von farbigem Hohlglas. In Tabelle 3 sind die fünf wichtigsten Quarzrohstoffe, geordnet nach ihrem Reinheitsgrad und ihrer Mineralzusammensetzung, aufgeführt, die in der Glasindustrie zum Einsatz gelangen.

3. Zur Geologie der Lagerstätten von Quarzrohstoffen

3.1. Gangquarz

Gangquarzvorkommen, aus denen Rohstoffe für die Glasindustrie gewonnen werden, können entweder pegmatitischen Ursprungs, so z. B. in der Lagerstätte Hagedorf und in Gangquarzvorkommen Portugals ausgebildet, oder hydrothermalen Ursprungs sein. Als Beispiele seien hier das Gangquarzvorkommen von Eschbach bei Usingen (Taunus) genannt sowie der Pfahlquarz des Bayerischen Waldes.

3.2. Quarzsandvorkommen

Quarzsandvorkommen mit hohem Reinheitsgrad haben sich vorwiegend im Tertiär und in der Kreidezeit gebildet. Zu erwähnen sind außerdem einzelne Lager-

Tabelle 5. Durchschnittliche Kornverteilung des Quarzsandes in den zwei Frechener Quarzsandschichten

Kornklasse in mm	Quarzsandschicht Mittelsand	Quarzsandschicht Feinsand
	Mengenanteil in Gew.-%	
1,0 bis 0,63	1	—
0,63 bis 0,315	20	3
0,315 bis 0,2	65	28
0,2 bis 0,1	14	65
0,1 bis 0,063	1	3
< 0,063		1

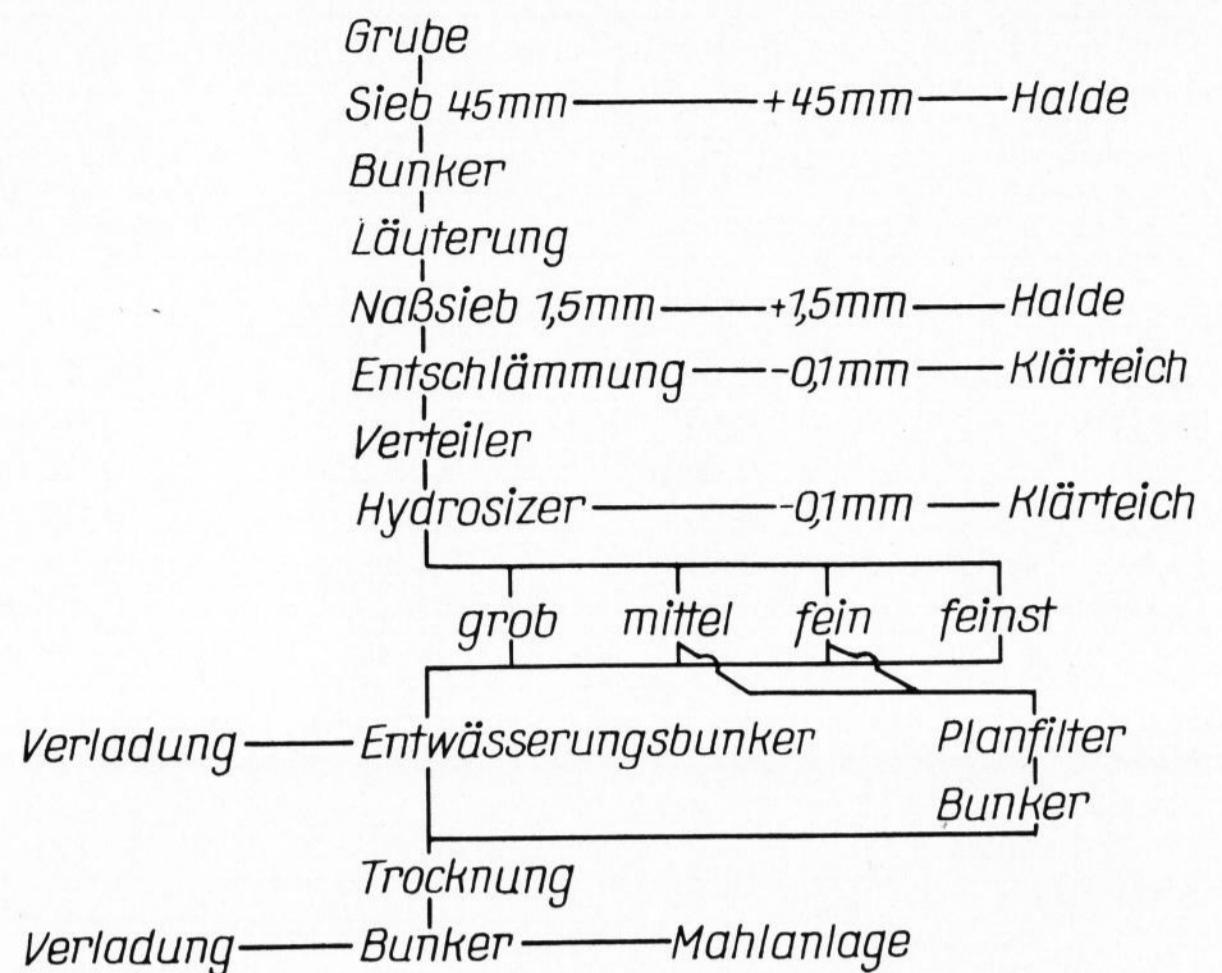


Bild 2. Vereinfachter Aufbereitungsstammbaum für Quarzsande.

stättenbildungen der Jura-Dogger-Formation. Wichtigste Lagerstätte des Buntsandsteins, aus der Quarzsande gewonnen werden, ist das Kaolin-Feldspatsandvorkommen von Hirschau-Schnaittenbach. Sandsteinlagerstätten des Karbons werden in England, Sandsteinlagerstätten des Devons und Silurs in den USA für die Glassandproduktion genutzt. Sande aus Lagerstätten des Pleistozäns werden in der BRD vereinzelt als Rohstoff für die Buntglasherstellung verwendet.

Tabelle 4 zeigt eine geologische Übersicht mit Einordnung von Quarzsand-, Sandstein- und Kaolin-Feldspatsandvorkommen.

4. Quarzsandvorkommen der Bundesrepublik Deutschland

4.1. Quarzsandlagerstätte Frechen

Mit der Erschließung der etwa 15 km westlich von Köln am Nord-Ost-Rand der Ville gelegenen Quarzsandlagerstätte wurde 1884 begonnen. Der Frechener Quarzsand ist marinen Ursprungs und wurde im Miozän abgelagert. Für den marinen Ursprung des Quarzsandes spricht die große Gleichmäßigkeit der Körnung. Über dem Frechener Sand lagerte ursprünglich noch die Hauptflözgruppe der Ville-Schichten, die jedoch nach tektonischer Heraushebung wieder abgetragen worden ist. Heute ist der Frechener Quarzsand mit einer durchschnittlich 15 m mächtigen Abraumschicht überdeckt. Diese besteht aus quartären Kiesen und Lehmschichten. Mit einem gesicherten Lagerstättenvorrat von etwa 185 Mill. t gehört das Frechener Quarzsandvorkommen zu den größten Quarzsandlagerstätten Europas. Die mittlere gewinnbare Quarzsandmächtigkeit beträgt 48 m, wobei maximale Mächtigkeiten bis zu 70 m auftreten. In dem in Bild 1 abgebildeten schematischen Profil der Quarzsandlagerstätte lassen sich zwei im Kornaufbau unterschiedliche Quarzsandschichten erkennen. Durch das Gebiet des heutigen Quarzsandabbaues läuft der Frechener Sprung, an dem die Schichtenfolge nach Südwesten hin in die Tiefe sinkt. Die durchschnittliche Kornverteilung des Quarzsandes in den zwei Frechener Quarzsandschichten ist in Tabelle 5 wiedergegeben.

Der Trockenabbau des Quarzsandes erfolgt heute mit Greifbaggern auf zwei Hauptgewinnungstrossen. Der Transport des Rohsandes zu den Aufbereitungs-

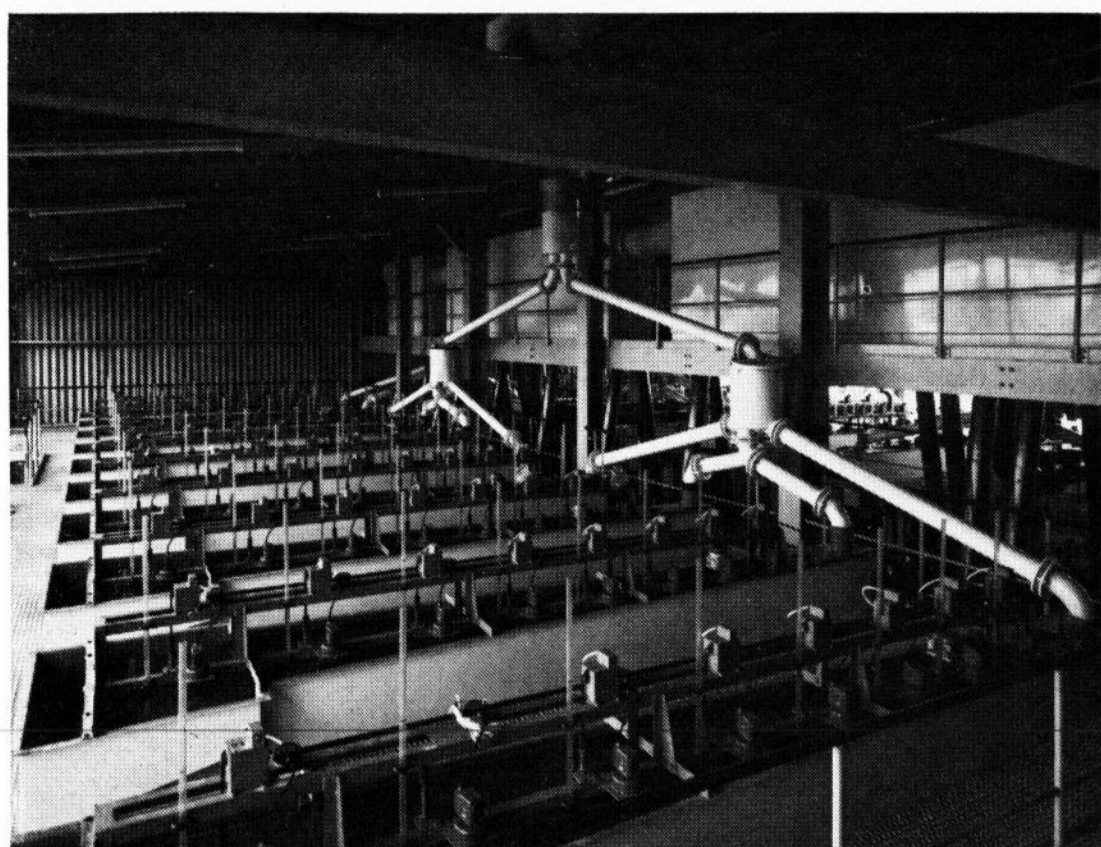


Bild 3. Hydroklassieranlage zur Quarzsandaufbereitung.

anlagen von den Gewinnungspunkten wird über Bandstraßen geführt. Die Aufbereitung erfolgt gemäß dem in Bild 2 dargestellten Schema, wobei der zunächst in einer Hochbunkeranlage zwischengelagerte Rohsand über bandwaagengesteuerte Dosierinnen Unterwassersieb-trommeln zugeführt und bei 1,5 mm abgesiebt wird. Über eine Läuterungs- und Vorentschlammungsstufe gelangt der Quarzsand zur Hydroklassierung (Aufstromklassierung, Bild 3), in der er in vier Quarzsandsorten klassiert wird. Die größte Sorte liegt im Korngrößenbereich 0,2 bis 0,6 mm, die feinste im Korngrößenbereich 0,1 bis 0,2 mm. Der klassierte Quarzsand wird anschließend in Feuchtsandbunkern gelagert und über ein Drainagesystem entwässert oder Planfiltern (Bild 4) zur kontinuierlichen Entwässerung zugeführt. Man erzielt je nach Entwässerungsdauer und Feinheit des Quarzsandes Restfeuchten zwischen 5 und 8%.

Bei der Naßaufbereitung des Quarzsandes stellt die Wasserreinigung bzw. Wasserklärung einen erheblichen Kostenfaktor dar. Der Bedarf an Aufbereitungswasser im Werk Frechen liegt bei 1500 m³/h, das im Kreislauf über eine eigene Wasseraufbereitungsanlage gefahren wird. Die Trocknung des in der Hohlglasindustrie vorzugsweise eingesetzten Trockensandes wird über Drehrohr- und Wirbelschichttrockner durchgeführt. Trockener Quarzsand weist eine Restfeuchte von etwa 0,1% auf. Trockenanlagen mit großen Durchsatzleistungen erfordern umfangreiche Entstaubungssysteme zur Abgasreinigung, da die Trocknung des Quarzsandes indirekt mit Heißluft erfolgt.

Durch eisenfreie Vermahlung von getrocknetem Quarzsand werden Quarzmehle unterschiedlichen Feinheitsgrades erzeugt. Tabelle 6 zeigt die Zusammenstellung von Quarzmehlgrundmahlungen, geordnet nach ihren Feinheitskennwerten.

In Tabelle 7 sind chemische und granulometrische Kennwerte der Frechener Glassandsorten zusammengestellt.

4.2. Quarzsandlagerstätte Grasleben

Die Quarzsande des Tertiärbeckens von Helmstedt sind in mehreren Gruben erschlossen. Die flächenhafte Verbreitung der einzelnen Quarzsandvorkommen ist eng begrenzt, wobei die Mächtigkeit der im Miozän bis Oligozän abgelagerten Quarzsande stellenweise bis zu 150 m beträgt. Charakteristisch für die in der Nähe von Grasleben anstehenden Sande ist ihre stellenweise Ver-

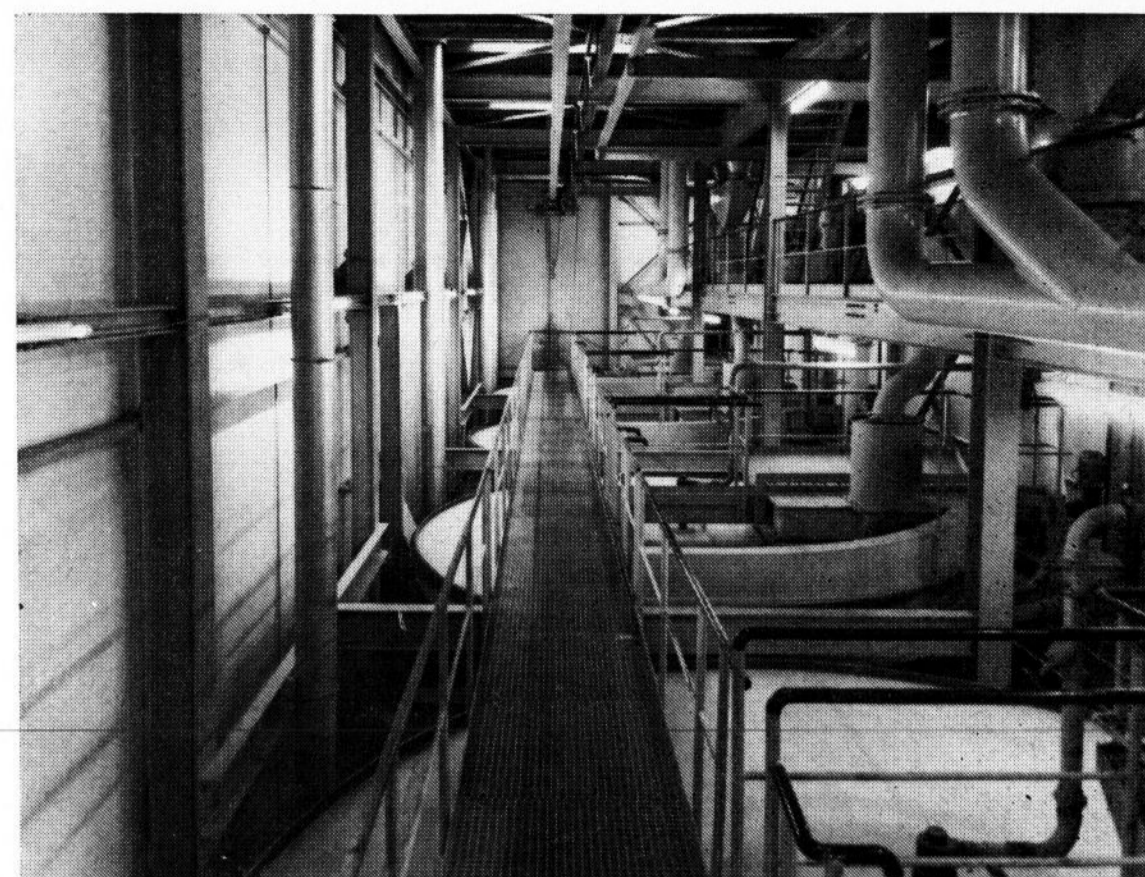


Bild 4. Planfilteranlage zur kontinuierlichen Entwässerung von Quarzsanden.

Tabelle 6. Granulometrische Kennwerte von Quarzmehlgrundmahlungen — geordnet nach Feinheitskennwerten

Mahlung:	W 1	W 3	W 4	W 6	W 8	W 10	W 12
Prüfsiebe DIN 4188, lichte Maschenweite in µm	Siebanalysen (Gesamtrückstände in %)						
315	1	0,5					
250	9	1	1				
200	26	9	4				
160	50	20	10	1	0,5		
125	63	32	20	3	1	0,5	
100	74	42	30	7	3	1	0,5
80	80	54	41	17	8	2	1
63	85	61	51	28	15	6	2
50	87	70	57	39	27	12	7
40	89	75	66	49	34	20	10
Sinkgeschwindigkeits-Äquivalentdurchmesser in µm	Sedimentationsanalysen nach Andreasen (Gesamtrückstände in %)						
25	93	85	79	66	54	42	32
16	96	90	86	80	69	62	53
10	97	93	91	88	80	75	70
6,3	98	95,5	94	93	87	85	81
4	98,5	97	96	96	91	90	88
2,5	99	98	98	98	95	94	93
Spez. Oberfläche nach BET (Areometer) in m ² /g	0,15	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9

Tabelle 7. Kennwerte der Frechener Glassandsorten

Sandsorte:	F 12	F 14
Chemische Zusammensetzung in %		
SiO ₂	99,65	99,5
Fe ₂ O ₃	0,025	0,03
Al ₂ O ₃	0,20	0,25
TiO ₂	0,05	0,06
CaO + MgO	0,01	0,01
K ₂ O + Na ₂ O	0,02	0,03
Glühverlust	0,10	0,15

Korngrößenverteilung

Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%
> 0,5	0,5
0,315 bis 0,5	11,5
0,2 bis 0,315	62,0
0,1 bis 0,2	26,0
< 0,1	1



Bild 5. Überkornabscheidung in Siebtrommeln.

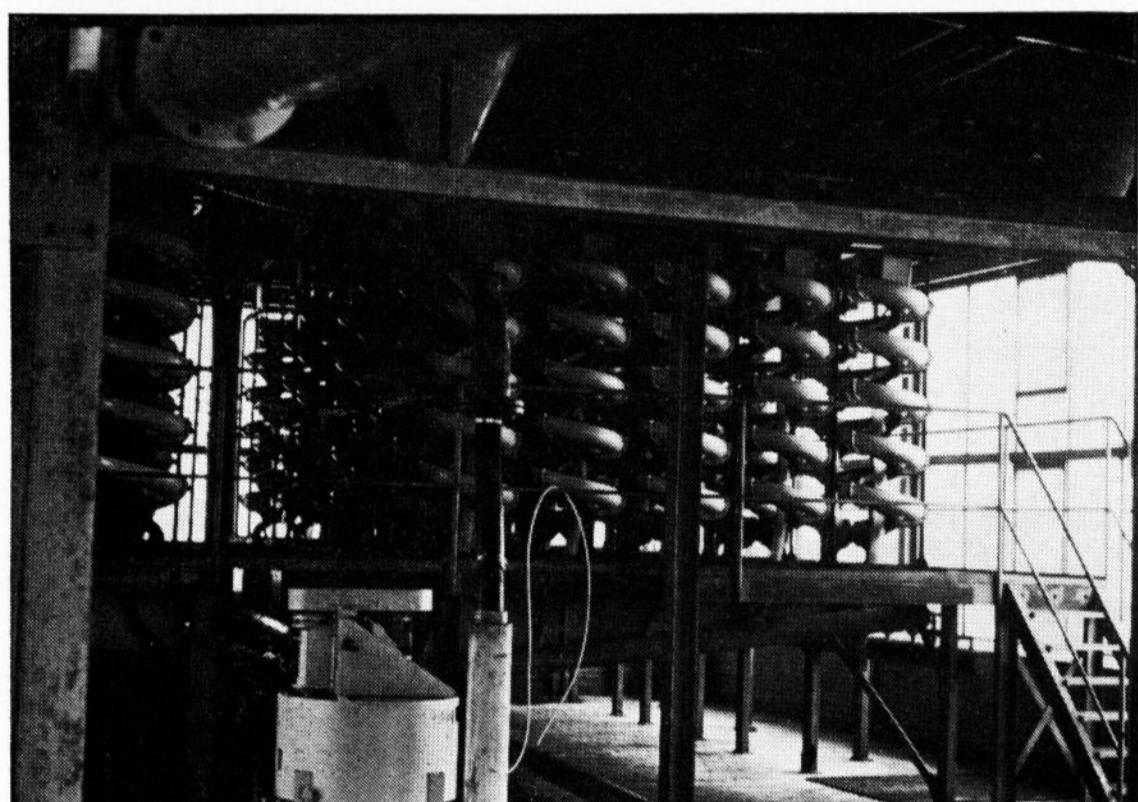


Bild 6. Quarzsandsortierung über Humphry-Spiralen zur Abscheidung von Schwermineralien.

festigung zu Sandsteinen unterschiedlicher Härte, die beim Abbau erhebliche Schwierigkeiten bereiten. Die Erschließung der Lagerstätte Grasleben erfolgte 1959. Sie bildet die Fortsetzung des Vorkommens der Grube Walbeck, die im Jahre 1925 durch die Dörentruper Thon- und Sandwerke erschlossen worden ist und heute auf dem Gebiet der DDR liegt.

Der Graslebener Quarzsand wird in zwei Gruben abgebaut. Die Gewinnung des Quarzsandes aus der un-

Tabelle 8. Kennwerte der Graslebener Glassandsorten

Sandsorte:	GLP	GL I	GL II
Chemische Zusammensetzung in %			
SiO ₂	99,8	99,75	99,7
Fe ₂ O ₃	0,012	0,016	0,025
Al ₂ O ₃	0,10	0,11	0,11
TiO ₂	0,02	0,02	0,02
CaO + MgO	< 0,01	< 0,01	< 0,01
K ₂ O + Na ₂ O	0,01	0,01	0,01
Glühverlust	0,16	0,16	0,16
Cr ₂ O ₃	0,0001		
Korngrößenverteilung			
Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%		
> 0,5			
0,315 bis 0,5	17	17	17
0,2 bis 0,315	72	72	72
0,1 bis 0,2	10	10	10
< 0,1	1	1	1

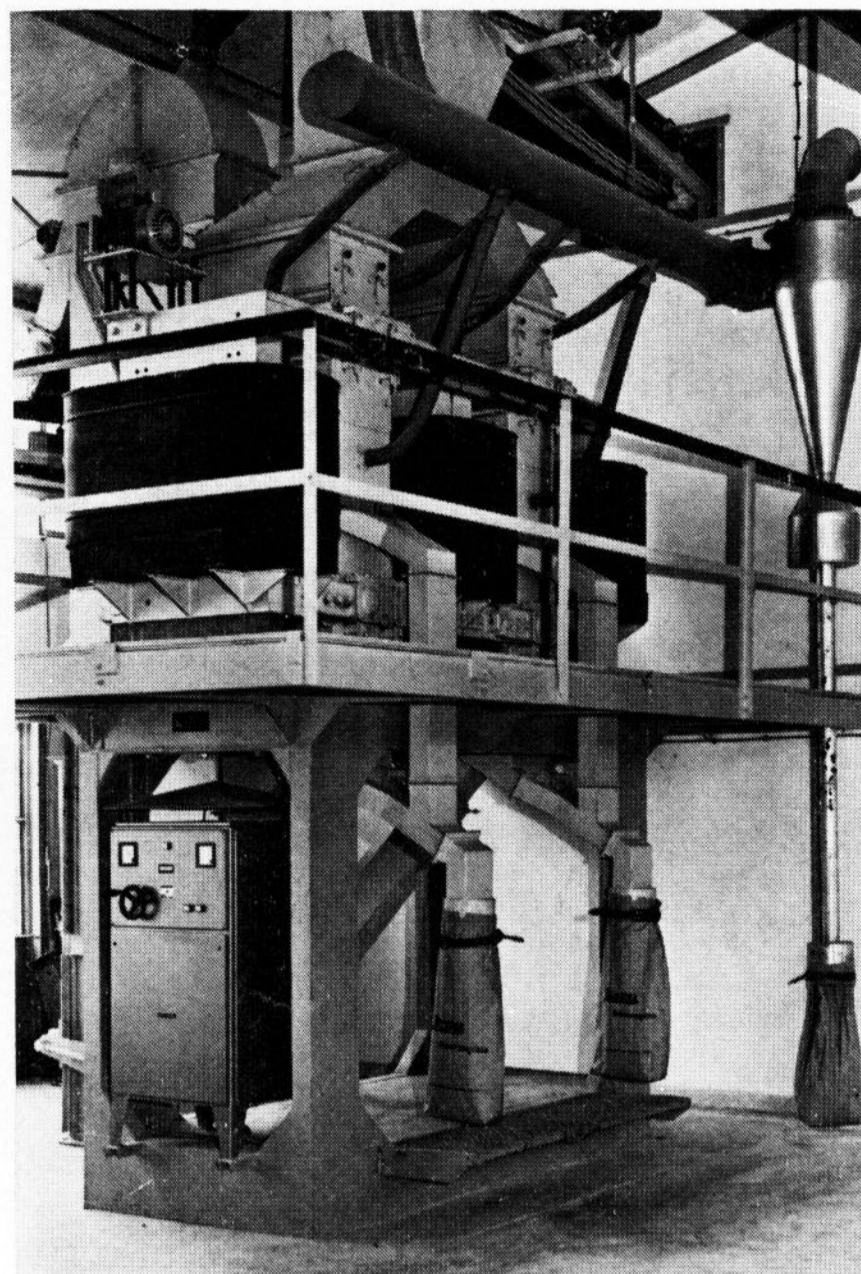


Bild 7. Starkfeldmagnetscheider eingesetzt zur Nachreinigung von Quarzsanden.

mittelbar am Aufbereitungswerk liegenden Grube erfolgt unter dem Grundwasserspiegel mit einer Saugschiffeinheit bis zu einer Teufe von 25 m. In der zweiten Grube, 4 km von der Aufbereitungsanlage entfernt, wird im Trockenabbau mit Baggern bei einer Wandhöhe von 25 m ein schlammstoffarmer, z. T. aber recht schwermineralreicher Rohsand gewonnen. Der Zwischentransport von dieser Grube zur Aufbereitungsanlage wird mit Lastkraftwagen durchgeführt. Bedingt durch die Härte des anstehenden Sandes ist der Verschleiß an den Abbaugeräten besonders groß, zumal eine Lockerung durch Sprengung wegen des in der Nähe gelegenen Salzbergwerkes nicht durchgeführt werden kann. Die Abraummächtigkeit in beiden Abbaufeldern beträgt bis zu 2 m. Das durch Bohrungen erkundete Quarzsandvorkommen weist Vorräte auf, die einen Abbau über Jahrzehnte sichern.

Die Aufbereitung des Quarzsandes umfaßt in der ersten Stufe Läuterung und Vorentschlammung des Rohsandes. Die Überkornabscheidung wird in Trommelsieben durchgeführt, wie in Bild 5 abgebildet. Zur Abtrennung des Schwermineralanteiles im Glassand ist der Klassierung eine Sortierung über 80 Humphry-Spiralklassierer nachgeschaltet (Bild 6). Die Entwässerung des Quarzsandes der Kornklasse 0,1 bis 0,5 mm erfolgt in Nutschbunkern. Der auf eine Restfeuchte von etwa 6% entwässerte Quarzsand wird anschließend getrocknet und durch Starkfeldmagnetscheidung nachgereinigt (Bild 7). Der Schwermineralgehalt des aufbereiteten Quarzsandes kann so insgesamt auf etwa 0,01% gesenkt werden.

Eine Teilmenge des getrockneten Quarzsandes wird eisenfrei zu Quarzmehlen unterschiedlicher Feinheit vermahlen. Die im Werk Grasleben produzierten Glassandtypen GLP, GL I und GL II unterscheiden sich im wesentlichen nur in ihrem Fe₂O₃-Gehalt voneinander. Tabelle 8 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Stoffdaten.

4.3. Quarzsandlagerstätte Duingen

Das etwa 10 km nordwestlich von Alfeld (Leine) gelegene Quarzsandvorkommen bildet die Hauptsedimentfüllung des über dem Salzstock von Weenzen gebildeten Tertiärbeckens von Wallensen, die sich in einen unteren eozänen und einen oberen eozänen bis miozänen Anteil untergliedern läßt. Die Glassande von Duingen sind vorwiegend terrestrischer Entstehung. Nur der untere Teil der Ablagerungen zeigt marinen Charakter. Die Mächtigkeit der Quarzsande beträgt stellenweise bis zu 150 m. Die Gewinnung des Quarzsandes in der 1935 erschlossenen Grube (Bild 8) ist durch Braunkohle erheblich erschwert, da Braunkohlen- und Quarzsandschichten stellenweise im Verhältnis 1:1 ausgebildet sind. Heute wird Quarzsand in zwei Feldern abgebaut.

Die Förderung des Quarzsandes erfolgt bei einer Gesamtmächtigkeit von 45 m auf drei Strossen ausschließlich trocken mit Greifbaggern. Um die unterste Strosse trocken abbauen zu können, ist eine Absenkung des Grundwasserspiegels notwendig. Die Abraummächtigkeit beträgt bis zu 15 m. Der selektive Abbau besonders eisenarmer Quarzsandschichten, der hohe Anteil an Schlammstoff im Rohsand (bis zu 5%) und schwankende Gehalte an Braunkohle bereiten bei der Gewinnung und Aufbereitung erhebliche Schwierigkeiten. Die durch Bohrungen erkundeten Quarzsandabbaufelder weisen Reserven auf, die einen Abbau über mehrere Jahrzehnte ermöglichen.

Bei der Aufbereitung des Duinger Rohsandes erfolgt die Einstellung des Fe_2O_3 -Gehaltes der einzelnen Glassandtypen bereits durch selektiven Abbau. Entkohlung und Entschlammung über Aufstromklassierer bilden die erste Aufbereitungsstufe, der eine Überkornabscheidung über Siebtrommeln nachgeschaltet ist. Entwässerung und Trocknung sind als weitere Aufbereitungsstufen nachgeschaltet.

Eine Teilmenge der Quarzsande wird eisenfrei zu Quarzmehlen unterschiedlicher Mahlfeinheit vermahlen. Der Schwermineralgehalt der aufbereiteten Quarzsande liegt bei 0,01%. Die chemischen und granulometrischen Kennwerte der Glassandtypen Duingen 12a I und 12a sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

4.4. Quarzsandlagerstätte Haltern

Die Lagerstätte der Halterner Sande gehört mit einer Ausdehnung von rund 900 km² zu den größten Sandvorkommen Europas. Die Ablagerung der Halterner Sande erfolgte während der Kreidezeit. Das Verbreitungsgebiet hat die Form eines Rechtecks, das durch die Städte Dorsten, Recklinghausen im Süden und Borken, Coesfeld im Norden fixiert wird. Die mittlere Mächtigkeit der Lagerstätte beträgt 100 m, wobei in Rinnen und im Zentrum die Sedimentmächtigkeit bis zu 250 m erreichen kann. Die Schichtenfolge im Verbreitungsgebiet ist nicht einheitlich. Sie wechselt sowohl in ihren granulometrischen als auch mineralogischen Kennwerten. Halterner Quarzsande hohen Reinheitsgrades, die als Glassand eingesetzt werden können, finden sich dabei nur in einem eng begrenzten Gebiet im Bereich der Ortschaften Haltern, Flaesheim, Sythen und Hausdülmen. Der hohe Reinheitsgrad der Quarzsande ist nach Braun auf Bleichungsvorgänge durch huminsaurer Wässer, die aus überlagerten Torfschichten stammen, zurückzuführen. Unter dem Einfluß eines warmen Klimas wurden im

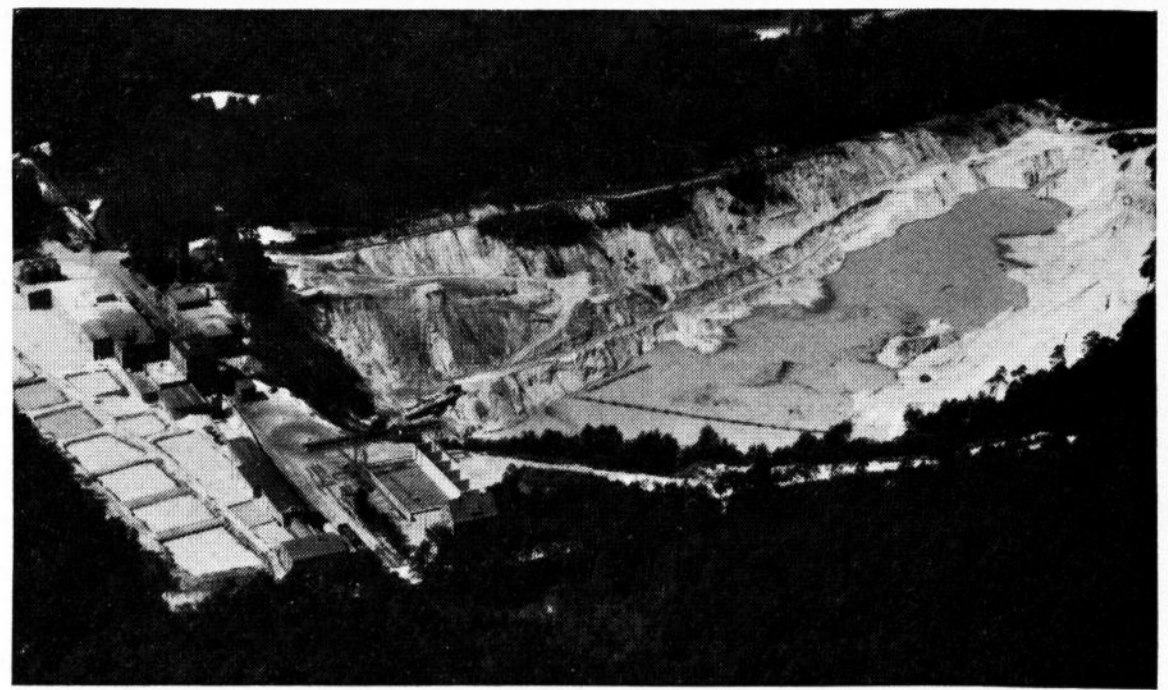


Bild 8. Quarzsandlagerstätte Duingen 1969.

Jungtertiär Glaukonite und andere eisenreiche mineralische Verunreinigungen des Halterner Sandes weggelöst und wegtransportiert und damit eine Bleichung und „Enteisenung“ des Sandes erreicht.

Halterner Quarzsande mit einem SiO_2 -Gehalt von über 99% werden heute im Raum Flaesheim und zwischen den Ortschaften Haltern und Dülmen nördlich und südlich der Bundesstraße 51 in drei Gewinnungsteichen abgebaut. Lediglich in der Grube Flaesheim steht der Quarzsand in einer Mächtigkeit bis zu 30 m über dem Grundwasserspiegel an, so daß hier sowohl eine Trockengewinnung mit Baggern als auch eine Naßförderung mit Saugschiffen durchgeführt werden kann. In allen anderen Gewinnungsteichen des Halterner Sandes wird der Quarzsand ausschließlich mit Saugschiffeinheiten gewonnen. Dabei muß der durch kolloidale Kieselsäure z. T. erheblich verfestigte Quarzsand bei der Gewinnung unter Wasser mit einer Schneidkopfeinrichtung aus der Abbauwand herausgeschält werden. Bild 9 zeigt ein bei der Gewinnung des Halterner Sandes eingesetztes Pumpschiff mit Schneidkopfeinrichtung, ausgerüstet für eine Gewinnung bis 20 m unter dem Grundwasserspiegel. Der z. T. die Härte eines Sandsteines aufweisende Halterner Sand verursacht bei der Gewinnung hohe Energie- und extrem hohe Verschleißkosten. Bild 9 zeigt im vorderen Teil die senkrecht anstehende Sandwand, wie sie beim Abbau stehenbleibt, stellenweise in

Tabelle 9. Kennwerte der Duinger Glassandsorten

Sandsorte:	12a I	12a
Chemische Zusammensetzung in %		
SiO_2	99,75	99,7
Fe_2O_3	0,012	0,03
Al_2O_3	0,07	0,1
TiO_2	0,04	0,04
$\text{CaO} + \text{MgO}$	< 0,01	0,02
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	0,02	0,03
Glühverlust	0,1	0,15
Cr_2O_3	0,0001	
Korngrößenverteilung		
Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%	
> 0,5		
0,315 bis 0,5		
0,2 bis 0,315	35	10
0,1 bis 0,2	64	84
0,063 bis 0,1	1	5
< 0,063		1

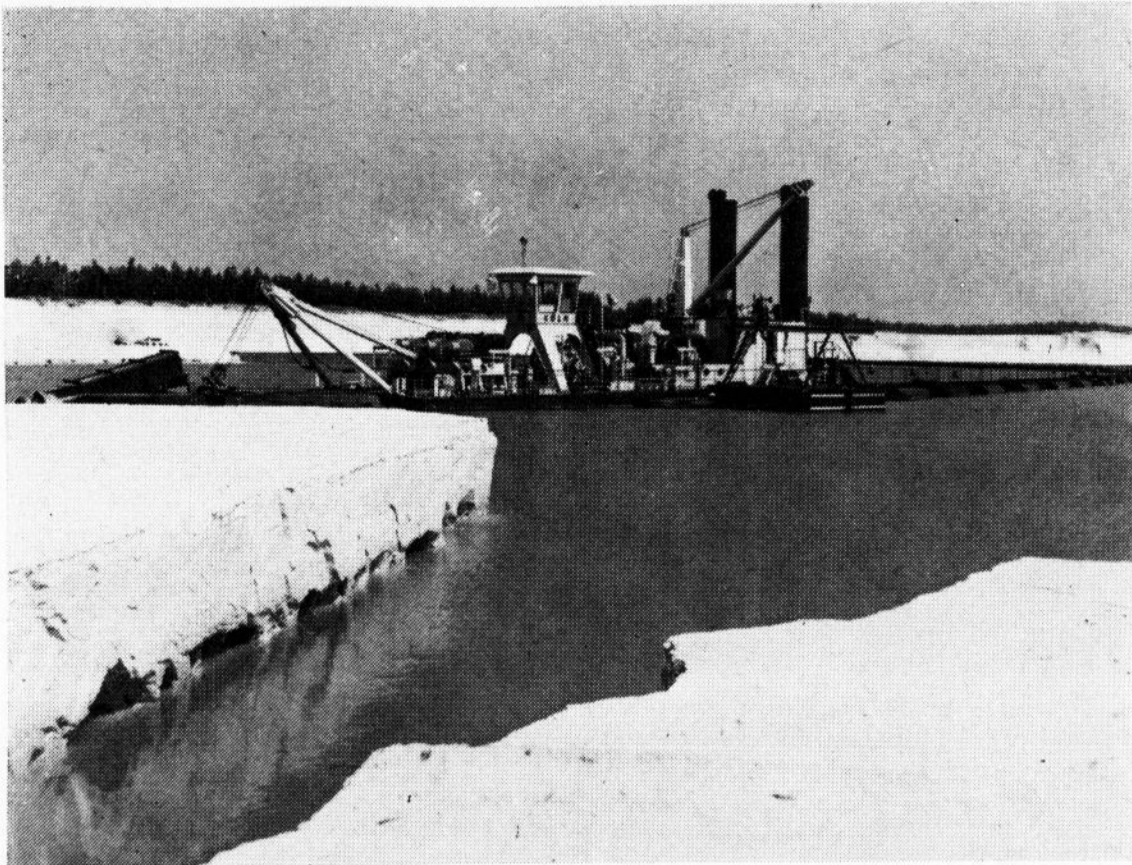


Bild 9. Saugschiffeinheit mit Schneidkopfeinrichtung zur Quarzsandgewinnung im Abbaufeld Haltern/Westf.

einer Höhe von 20 m unter dem Wasserspiegel. Die Förderleistung der abgebildeten Gewinnungseinheit liegt bei 800 bis 1000 t Feststoff/h.

Die im Gebiet der Quarzsandgewinnungsbetriebe anstehenden Quarzsande sind mit pleistozänen Lehmen, Schluffsand und Bändertonen überdeckt. Die unter dem Begriff „Abraum“ zusammengefaßten, vor der Gewinnung des Quarzsandes zu beseitigenden Schichten weisen eine Gesamtmächtigkeit zwischen 1 und 14 m auf. Die Erschließung der Lagerstätte der Halterner Sande zur Gewinnung von Glassanden erfolgte Anfang dieses Jahrhunderts.

Die Halterner Sande sind nicht nur eine Rohstoffquelle für reine Quarzsande und Folgeprodukte, sondern stellen gleichzeitig für die Wasserwirtschaft einen Grundwasserspeicher von ganz erheblicher Bedeutung dar. Auf Grund seiner Lage zu den Ballungsräumen des Ruhrgebietes ist das Gebiet der Halterner Sande gleichzeitig ein Großerholungsraum für die Bevölkerung des Ruhrgebietes, zu dessen Gestaltung und Erhaltung der Naturpark „Hohe Mark“ 1963 gegründet worden ist. Damit stehen in diesem Raum Interessen der Rohstoffgewinnung mit denen der Wasserwirtschaft, der Landschafts-

pflege, der Forst- und Landwirtschaft und des Naturschutzes in Wettbewerb miteinander. Diese Tatsache hat einen ganz erheblichen Einfluß auf die Planungen der quarzsandgewinnenden Industrie, um die Rohstoffversorgung der Verbraucher von Quarzprodukten auch in Zukunft zu sichern. Die Lagerstättenreserven der hochreinen Halterner Sande reichen für viele Jahrzehnte, vorausgesetzt, daß ihr Abbau auch weiter genehmigt wird.

Der Transport des Rohsandes von den Pumpschiffen zu den Aufbereitungsanlagen erfolgt als pumpfähiges Sand-Wasser-Gemisch durch schwimmende oder auf Land fest verlegte Rohrleitungen. Die Aufbereitung des Rohsandes besteht auch hier aus mehreren Stufen, beginnend mit einer Überkornabscheidung über Vibrations- oder Trommelsiebe, gefolgt von Läuterungs- und Entschlammungsstufen. Die Klassierung des Quarzsandes in abgestufte Körnungen wird über Aufstromklassierer erreicht. Bedingt durch die gröbere Durchschnittskornzusammensetzung des Rohsandes im Vergleich zu den Glassandvorkommen von Frechen, Grasleben und Duingen werden bei der Aufbereitung der Halterner Sande Körnungen produziert, die den Bereich 0,1 bis 1 mm umfassen.

Die Entwässerung der aufbereiteten Quarzsande wird z. T. in Feuchtbunkern — ausgerüstet mit einem Drainagesystem — durchgeführt. Das seit einigen Monaten in einem neuen Aufbereitungswerk zum Einsatz kommende Nutschbunkersystem gewährleistet einerseits eine bessere und schnellere Entwässerung der eingespülten aufbereiteten Quarzsande auf eine von der Korngrößenverteilung der Sande abhängige Restfeuchte, andererseits wird eine Entmischung beim Einspülen verhindert. Mit der Entleerung der Nutschbunker über Öffnungen am Boden wird eine weitere Homogenisierung der Bunkerinhalte erreicht.

Teilmengen der aufbereiteten Quarzsandtypen werden getrocknet und zu Quarzmehlen unterschiedlicher Feinheit eisenfrei vermahlen. In Tabelle 10 sind die wichtigsten granulometrischen und chemischen Kennwerte der Glassandsorten zusammengestellt, die in den

Tabelle 10. Kennwerte der aus Halterner Sanden gewonnenen Glassandsorten

Vorkommen: Sandsorte:	Flaesheim	Halterner			Halterner		
	Nr. 2	H 11	H 12	H 14	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Chemische Zusammensetzung in %							
SiO ₂	99,5	99,7	99,65	99,5	99,7	99,65	99,63
Fe ₂ O ₃	0,04	0,035	0,04	0,05	0,028	0,026	0,024
Al ₂ O ₃	0,20	0,15	0,17	0,20	0,1	0,12	0,13
TiO ₂	0,05	0,02	0,03	0,04	0,02	0,04	0,04
CaO + MgO	0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
K ₂ O + Na ₂ O	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02
Glühverlust	0,19	0,1	0,15	0,2	0,1	0,1	0,15
Korngrößenverteilung							
Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%						
> 0,63		1			3	0,1	
0,5 bis 0,63	1	7	0,5		7	2	0,5
0,315 bis 0,5	23	55	19,5	2	49	20,4	14
0,2 bis 0,315	60	33	68,0	47	38,5	66,0	65
0,1 bis 0,2	15	4	12,0	50	2,5	11,4	20
< 0,1	1			1		0,1	0,5

verschiedenen Gewinnungsbetrieben des Halterner Sandes produziert werden.

4.5. Quarz-Kaolin-Feldspatlagerstätte Hirschau-Schnaittenbach

Das etwa 20 km südwestlich von Weiden (Oberpfalz) gelegene, im Buntsandstein entstandene Quarz-Kaolin-Feldspatsandvorkommen von Hirschau-Schnaittenbach ist in einer Länge von etwa 6 km und einer Breite von etwa 300 bis 450 m erschlossen und wird in einer Mächtigkeit bis zu 70 m trocken in drei Gewinnungsbetrieben unabhängig voneinander abgebaut. Bild 10 zeigt eine Luftaufnahme des mittleren Teiles der Lagerstätte. Der ursprünglich neben dem Quarz vorhandene Feldspat ist zum großen Teil durch Oberflächen- und zirkulierende Wässer kaolinisiert, wobei der Kaolinisierungsgrad des Feldspates in östlicher Richtung ansteigt, so daß im Ostteil der Lagerstätte ausschließlich Kaolin und Quarzprodukte gewonnen werden, während in der Mitte und im Westteil der Lagerstätte die drei Rohstoffe Kaolin, Feldspat und Quarz durch Aufbereitung der Roherde produziert werden.

Der Trockenabbau der Roherde wird mit Schaufel-ladern, Löffelbaggern und Schaufelradbaggern durchgeführt. Für den Transport zur Aufbereitung sind gummibereifte Fahrzeuge eingesetzt. Zum größten Teil wird die Roherde jedoch über Bandstraßen transportiert. Zur Erzielung eines möglichst konstant zusammengesetzten Rohgutes für die einzelnen Aufbereitungen wird gleichzeitig an mehreren Stellen abgebaut und eine Homogenisierung über Mischhalden durchgeführt. Z. T. erfolgt der Abbau selektiv, um bestimmte Kaolinqualitäten zu gewinnen. Nach Abschlämmen des Kaolins aus der Roherde und nach Abtrennung der Feldspatfraktion — soweit vorhanden — werden durch Sieb- und Aufstromklassierung Quarzsandkörnungen produziert, die in der Glasindustrie als Gemengebestandteil eingesetzt werden.

Auch hier werden Teilmengen der aufbereiteten Quarzsandsorten getrocknet und eisenfrei zu Quarzmehlen unterschiedlicher Mahlfeinheit vermahlen. Die Stoffdaten der aus der Hirschau-Schnaittenbacher Lagerstätte durch Aufbereitung gewonnenen Glasschmelzsande sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

4.6. Glassande der Jura-Dogger-Formationen

Die Sande der Jura- β -Dogger-Formationen im Raum Freihung-Gebenbach, nördlich von Hirschau (Oberpfalz) gelegen, werden seit 1960 in mehreren Gruben für die Gewinnung von Glassanden genutzt. Die Dogger- β -Sande sind küstennahe marine Ablagerungen, sehr feinkörnig, mit hohem Schwermineralgehalt (bis 0,35%) und schlammstoffreich (bis 10%). Bei über 20 m gewinnbarer Quarzsandmächtigkeit beträgt die Abraumschicht über 4 m.

Der Abbau der Jura-Dogger-Sande erfolgt trocken; der Transport zu den Aufbereitungsanlagen wird mit Lastkraftwagen durchgeführt.

Durch Schlammung des Rohsandes in Aufstromklassierern mit nachgeschalteter Schutzabsiebung werden der Feinstanteil und das Überkorn abgeschieden. Die Senkung des Schwermineralgehaltes und damit auch der Fe_2O_3 -Anteile wird durch Flotation mit nachgeschalteter Starkfeldmagnetscheidung des getrockneten flo-



Bild 10. Quarz-Kaolin-Feldspatlagerstätte und Aufbereitungsanlagen in Hirschau-Schnaittenbach (freigegeben unter Nr. 9/38382).

Tabelle 11. Kennwerte der Hirschau-Schnaittenbacher Glassandsorten

Sandsorte:	Glasschmelzsand		Glasschmelzsand 0,1 bis 0,7 mm
	8 H	9 H	
Chemische Zusammensetzung in %			
SiO_2	99,5	99,5	99,0
Fe_2O_3	0,02	0,02	0,025
Al_2O_3	0,3	0,35	0,5
TiO_2	0,02	0,02	0,1
$\text{CaO} + \text{MgO}$	< 0,01	< 0,01	< 0,01
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	0,02	0,02	0,2
Glühverlust	0,10	0,10	0,2
Korngrößenverteilung			
Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%		
> 0,71	1		0,5
0,63 bis 0,71	16		2,5
0,5 bis 0,63	30	0,5	17,5
0,315 bis 0,5	51	19	50,0
0,2 bis 0,315	2	50	29,0
0,1 bis 0,2		30	0,5
< 0,1		0,5	

tierten Sandes erreicht. Nichtflotierte Quarzsande dieser Lagerstätte haben TiO_2 -Gehalte zwischen 0,1 und 0,2%.

Kennwerte der aus der Jura- β -Dogger-Formation gewonnenen Glassandtypen sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

4.7. Sandlagerstätten des Pleistozäns für farbiges Hohlglas

Sandlagerstätten des Pleistozäns sind in der Bundesrepublik weit verbreitet. Ihre chemischen und granulometrischen Kennwerte schwanken in weiten Grenzen. Die Entscheidung, ob sie als Quarzrohstoff eingesetzt werden können, ist von vielen Faktoren abhängig, u. a. ob im Rohsand die als Glasschmelzsand geeignete Kornfraktion in einem ausreichenden Mengenanteil vorhanden ist und mit einfachen Mitteln aus ihm gewonnen werden kann. Bei der meist lokalen Bedeutung solcher Sandvorkommen ist eine klassische Quarzsandaufbereitung nicht wirtschaftlich und scheitert vielfach an Wasch- und Abwasserproblemen. Die Aufbereitung dieser Sande ist daher meistens auf eine Schutzabsiebung und Trocknung des Rohsandes beschränkt.

Tabelle 12. Kennwerte der aus der Jura-Dogger-Formation gewonnenen Glassandsorten

Vorkommen: Sandsorte:	Frei- hung HS 1	Gebenbach (Gebaflo)		
		010	025	GEBA
Chemische Zusammensetzung in %				
SiO ₂	99,3	99,8	99,7	99,2
Fe ₂ O ₃	0,065	0,010	0,023	0,10
Al ₂ O ₃	0,20	0,1	0,15	0,36
TiO ₂	0,20	0,02	0,02	0,12
CaO + MgO		< 0,01	< 0,01	< 0,01
K ₂ O + Na ₂ O	0,02	0,01	0,01	< 0,05
Glühverlust	0,20	0,10	0,15	0,15
Korngrößenverteilung				
Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%			
> 0,5				0,5
0,315 bis 0,5		0,5	1	4
0,2 bis 0,315	2	1	2	13
0,1 bis 0,2	87	84	83	75
0,09 bis 0,1	6	9	8	5
0,063 bis 0,09	4	4	4	2
< 0,063	1	1,5	2	0,5

5. Quarzsandvorkommen Westeuropas

5.1. Belgien und Niederlande

Die im Pliozän abgelagerten Sande von Mol in der Provinz Antwerpen werden seit 1872 für die Quarzsandgewinnung genutzt. Die Moler Quarzsandlagerstätte gehört mit zu den bedeutendsten und größten Glassandvorkommen Westeuropas. Durch ihre günstige Lage in unmittelbarer Nähe einer Wasserstraße und zum Antwerpener Hafen begünstigt, werden belgische Glassande in viele Länder exportiert.

Da die Moler Sande unter einer geringmächtigen Abraumbedeckung fast ausschließlich unter dem Grundwasserspiegel anstehen, erfolgt auch hier die Gewinnung mit Saugschiffen, wo Abbautiefen bis zu 20 m unter dem Grundwasserspiegel erreicht werden. Der Transport des

Rohsandes zu den in 5 km Entfernung liegenden Aufbereitungsanlagen wird hydraulisch durch Rohrleitungen geführt. Die Aufbereitung umfaßt ebenso wie in den anderen Quarzsandaufbereitungswerken Entschlammungs- und Klassierstufen über Aufstromklassierer, Entwässerung der aufbereiteten Quarzsandsorten in Nutschbunkern bzw. Planfiltern, Trocknung in Drehrohr- und Wirbelschichttrocknern und eisenfreie Vermahlung von Teilmengen zu Quarzmehlen unterschiedlicher Feinheit.

Glassande miozänen Alters werden in den Niederlanden in der Heerleener Heide und im Gebiet von Maasmechelen an der niederländisch-belgischen Grenze abgebaut. Die hier gewonnenen Quarzsande zeichnen sich durch ihren hohen Reinheitsgrad als Rohmaterial aus. Der Hauptanteil der Körnung des Quarzsandes liegt in der Kornklasse 0,1 bis 0,3 mm. Bei Abraummächtigkeiten zwischen 20 und 30 m beträgt die Schicht des hochwertigen Quarzsandes etwa 8 bis 10 m. Er wird ausschließlich trocken abgebaut, wobei besonders reine Schichten selektiv gewonnen werden können.

Teilmengen des Maasmecheler Quarzsandes werden unter dem Grundwasserspiegel gefördert und an Land über Zyklone entwässert und zwischengelagert. Nach Aufbereitung erreichen Maasmecheler Quarzsande sehr niedrige Fe₂O₃- und Al₂O₃-Gehalte. Sie werden daher bevorzugt in Glasgemengen zur Erzeugung hochwertiger Kristallgläser eingesetzt.

In Tabelle 13 sind die chemischen und granulometrischen Kennwerte belgischer und niederländischer Glassandtypen zusammengestellt.

5.2. Frankreich

Die im Raume südlich von Paris bei Nemours und Fontainebleau abgelagerten Quarzsande oligozänen Alters gehören zu den eisenärmsten und werden daher schon viele Jahre als Quarzrohstoff bei der Herstellung hochwertiger Kristallgläser eingesetzt. Die Lagerstättenmächtigkeit dieser hervorragenden Quarzsandvorkommen beträgt bis zu 70 m. Zur Erreichung besonders reiner Qualitäten wird auch heute noch hier vorwiegend

Tabelle 13. Kennwerte belgischer und niederländischer Glassandsorten

Vorkommen: Sandsorte:	Heerlen			Maasmechelen		Mol
	S 50	S 55	S 75	MaM I	MaM II	M 32
Chemische Zusammensetzung in %						
SiO ₂	99,8	99,8	99,7	99,75	99,65	99,5
Fe ₂ O ₃	0,022	0,025	0,03	0,012	0,016	0,028
Al ₂ O ₃	0,07	0,08	0,15	0,1	0,15	0,25
TiO ₂	0,03	0,04	0,05	0,01	0,02	0,04
CaO + MgO	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
K ₂ O + Na ₂ O	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02
Glühverlust	0,1	0,1	0,15	0,1	0,1	0,18
Korngrößenverteilung						
Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%					
> 0,5	1					
0,315 bis 0,5	31	10	4	5	3	15
0,2 bis 0,315	50	55	30	44	50	55
0,1 bis 0,2	18	35	60	51	47	30
< 0,1			6			

Tabelle 14. Kennwerte französischer Glassandsorten
Typ Nemours

Vorkommen:	Nemours	
Sandsorte:	NE 03	NE 14
Chemische Zusammensetzung in %		
SiO ₂	99,8	99,8
Fe ₂ O ₃	0,010	0,015
Al ₂ O ₃	0,03	0,04
TiO ₂		
CaO + MgO	< 0,01	< 0,01
K ₂ O + Na ₂ O	0,01	0,01
Glühverlust	0,05	0,05

Korngrößenverteilung

Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%	
> 0,5		
0,315 bis 0,5	3	3
0,2 bis 0,315	60	48
0,1 bis 0,2	37	47
< 0,1		2

selektiv abgebaut. Der oligozäne Quarzsand von Nemours ist z. T. von harten extrem eisenarmen Sandsteinschichten durchsetzt, die bei der Gewinnung ausgehalten und ebenfalls als Quarzrohstoff einer Verwendung zugeführt werden.

Neben diesen am Südrand des Pariser Beckens liegenden Quarzsandlagerstätten werden hochwertige Quarzsande auch nördlich von Paris im Raum von Compiègne in mehreren Gruben gewonnen und in zentralen Quarzsandwerken aufbereitet. Weitere Vorkommen hochwertiger Quarzsande liegen in Süd-Frankreich im Raum von Avignon.

Die Stoffdaten der Glassandtypen von Nemours sind in Tabelle 14 zusammengestellt.

5.3. Österreich

Die Chatt-Sande des Oligozäns, auch Linz-Melker Sande genannt, bilden die älteste und tiefste Ablagerung der Molasse. In dem südlich des Böhmisches Massivs gelegenen Tertiärbecken finden sich Ablagerungen dieser Sande in großer Mächtigkeit, die an den Ufern des ehemaligen Meeres an die Oberfläche treten. Damit ist ihr Abbau möglich. Die oligozänen Sande sind Quarzsande mit erheblichen und dabei wechselnden Anteilen an Feldspat und Tonmineralien. Auch ihr Gehalt an Schwermineralien ist beträchtlich. Die große Entfernung und die damit verbundenen hohen Frachtkosten zu Quarzsandlagerstätten hohen Reinheitsgrades ermöglichten hier bereits in den 60er Jahren den Einsatz von kostenintensiven Aufbereitungsverfahren zur Produktion von Quarzsanden für die Glas- und Gießereiindustrie.

Linz-Melker Sande werden heute in den Quarzsandwerken Zelking bei Melk und St. Georgen an der Gusen bei Linz zu Quarzsanden für die Glasindustrie aufbereitet. Der Abbau der schlammstoffreichen Rohsande erfolgt ausschließlich trocken mit Greifbaggern und wird auf mehreren Strossen durchgeführt. Für den Zwischentransport von den Gewinnungsorten zu den Aufbereitungsanlagen mit vorgeschalteten Rohsandbunkern sind Lastkraftwagen eingesetzt.

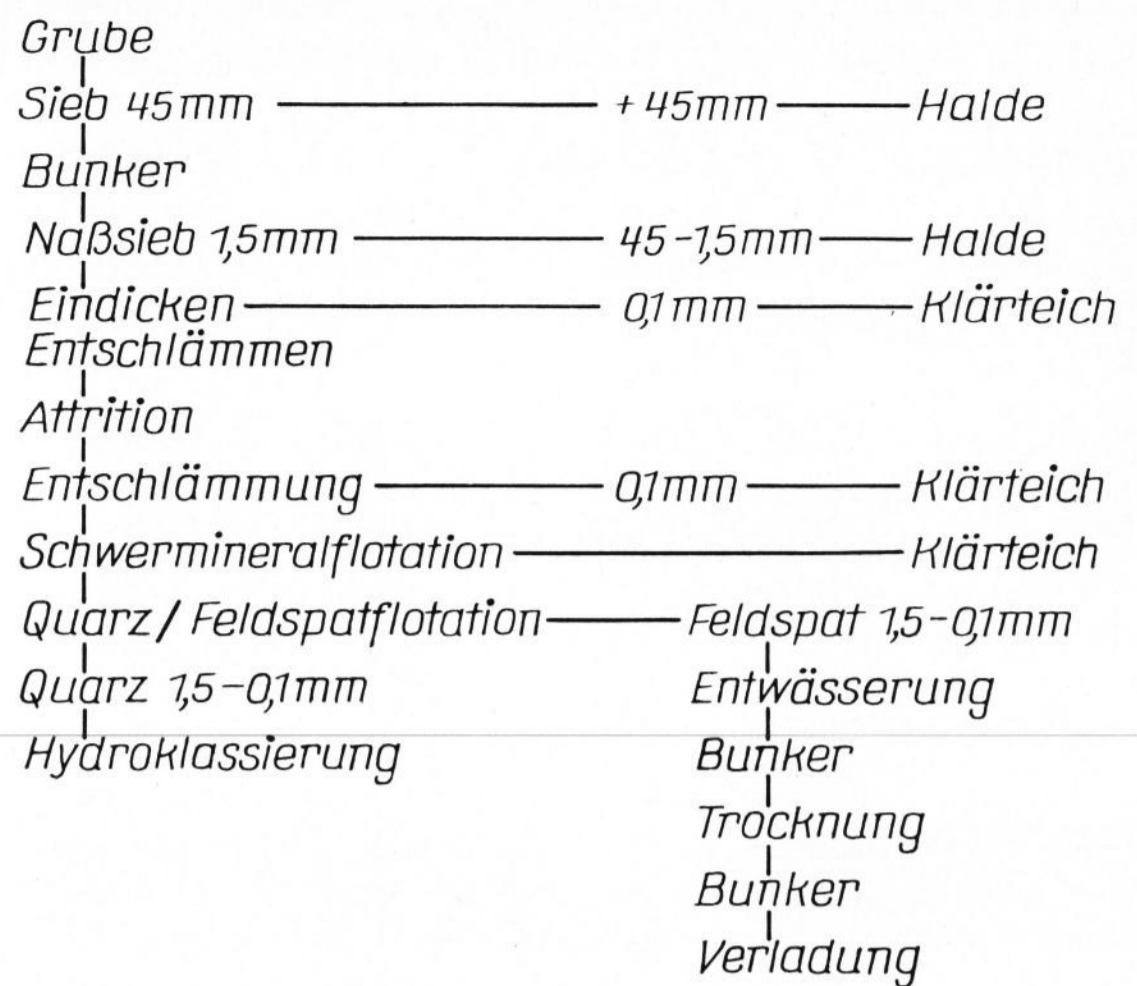


Bild 11. Aufbereitungsstammbaum für Quarzsande aus feldspathaltiger Lagerstätte.

Die Aufbereitung der oligozänen Sande umfasst neben der Entschlammung des Rohsandes Klassier- und Flotationsstufen. Wie der in Bild 11 wiedergegebene Aufbereitungsstammbaum zeigt, müssen zunächst die in einer Größenordnung bis zu 15% enthaltenen Ton- und Schluffbestandteile durch Schlämmen, unterstützt durch eine intensive Reibwäsche — auch Attrition genannt —, aus dem Rohaufwerk herausgewaschen werden. Zuvor erfolgt eine Überkornabscheidung durch Siebung. Zur Entfernung der noch im entschlammten Sand verbleibenden Feldspat- und Schwermineralanteile wird anschließend in einer Schwermineral- und in einer Quarz-Feldspatflotation eine Sortierung durchgeführt, bei der als Abgänge ein Schwermineralkonzentrat und als Produkte Quarzsand und Feldspat anfallen (Bild 12). Durch die Schwermineralflotation wird eine deutliche Senkung des Fe₂O₃-Gehaltes der Fertigprodukte erreicht. Die Flotationsstufe, in der der Feldspat ausgeschwemmt wird, senkt den Al₂O₃-Gehalt des Quarzsandes auf etwa 2%. Der flotierte Quarzsand wird anschließend in Aufstromklassierern in drei Quarzsandsorten zerlegt und nach Entwässerung in Drehrohtrocknern getrocknet.

Die Kennwerte der Glassandtypen, die heute aus Linz-Melker Sanden erzeugt werden, sind in Tabelle 15 zusammengestellt.

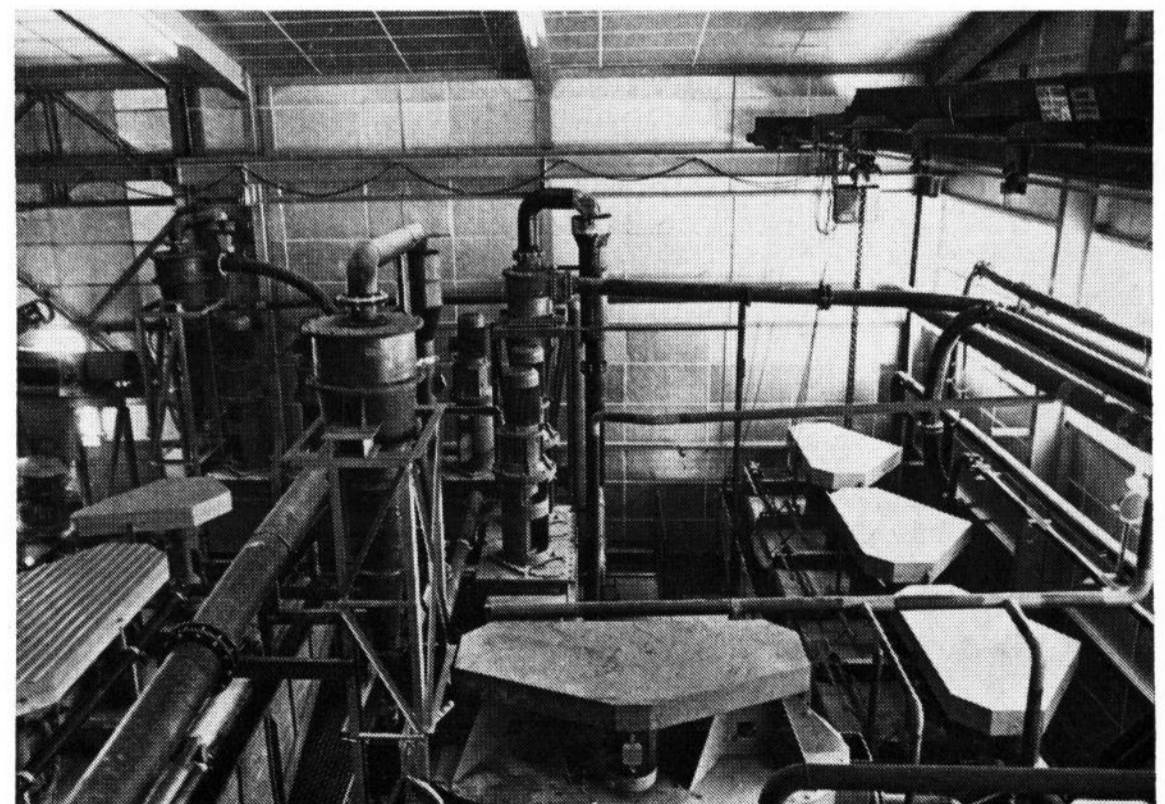


Bild 12. Teilansicht einer neuen 1975 in Betrieb genommenen Flotationsanlage.

Tabelle 15. Kennwerte österreichischer Glassandsorten

Vorkommen:	Zelking		St. Georgen
Sandsorte:	ZE 23	ZE 85	SG 83

Chemische Zusammensetzung in %

SiO ₂	93,0	97,0	96,5
Fe ₂ O ₃	0,3	0,15	0,04
Al ₂ O ₃	4,5	2,0	2,5
TiO ₂	0,1	0,05	0,05
CaO + MgO	0,1	0,1	0,1
K ₂ O + Na ₂ O	2,3	0,5	0,8
Glühverlust	0,4	0,3	0,3

Korngrößenverteilung

Kornklasse in mm	Mengenanteil in Gew.-%		
> 0,5	1		12
0,355 bis 0,5	5	1	22
0,25 bis 0,355	18	6	23
0,18 bis 0,25	31	27	27
0,125 bis 0,18	34	48	14
0,09 bis 0,125	8	12	2
< 0,09	3	6	

6. Qualitätsanforderungen an Glassande

Die in den Abschnitten 4. und 5. beschriebenen Quarzsandvorkommen besitzen Lagerstättenreserven, aus denen die Glasindustrie in den nächsten Jahrzehnten mit Glasschmelzsanden versorgt werden kann. Voraussetzung ist jedoch, daß durch die drei in Abschnitt 6.1. beschriebenen Qualitätsanforderungen ihre Lebensdauer nicht verkürzt oder auf Grund von landesplanerischen Maßnahmen ihr weiterer Abbau nicht verhindert wird.

6.1. Auswirkung auf die Lebensdauer von Quarzsandlagerstätten

Die unter dem Oberbegriff „Qualitätsanforderungen“ zusammengefaßten Faktoren gliedern sich in Anforderungen an die chemische und mineralogische Zusammensetzung sowie an die Körnungskennwerte.

1. Chemische Zusammensetzung:

Hier sind insbesondere die maximal zulässigen Grenzwerte für den Fe₂O₃-Gehalt und den Glühverlust von

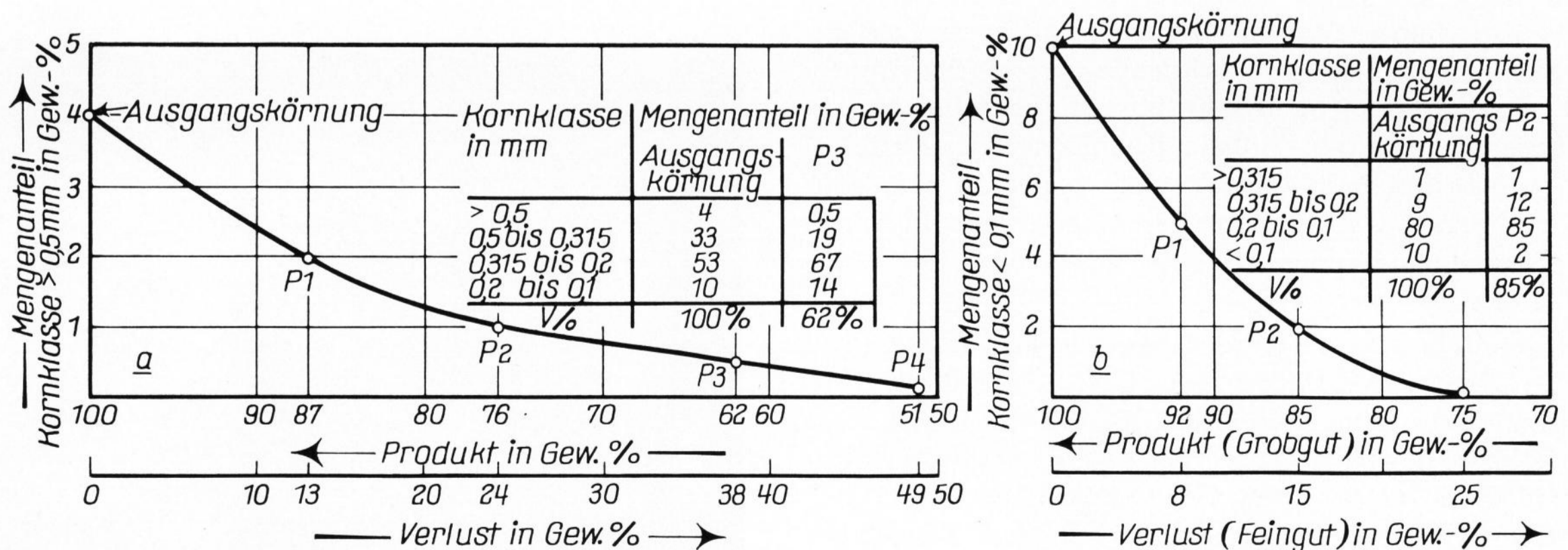
entscheidender Bedeutung. Die Herabsetzung des maximal zulässigen Fe₂O₃-Gehaltes des Quarzsandes um jeden einzelnen Punkt (0,001%) bedeutet für den quarzsandgewinnenden Betrieb eine Verschärfung der Anforderungen an den selektiven Abbau in der Lagerstätte. Hierdurch bedingt, müßten immer größere Anteile an sich hochwertiger Rohstoffe verworfen werden. Einen Ausweg kann hier nur der Einsatz aufwendigerer und damit kostenintensiverer Aufbereitungsmethoden bieten.

2. Mineralzusammensetzung:

Hier sind insbesondere die Grenzwerte für den maximal zulässigen Schwermineral- und Feldspatgehalt eines Sandes gemeint. Steigende Anforderungen an diese Kennwerte erfordern, daß bei dem eingesetzten Sortierverfahren (z. B. Flotation) der Mengenanteil des Abfalles (Berge) um so größer wird, je höher die Qualitätsanforderungen sind, die an das Fertigprodukt gestellt werden. Die Trennschärfe (= Güte) des ausgewählten Sortierverfahrens, der Mineralinhalt und die anderen Kennwerte des aufzubereitenden Quarzrohstoffes ergeben die Bedingungen für die Werte des Mineral- und Mengenausbringens des Fertigproduktes. Damit werden gleichzeitig Grenzwerte für die Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsprozesses gesetzt. Unnötig hohe Qualitätsanforderungen können gerade hier zu einem Raubbau von Lagerstätten von hochwertigen Quarzrohstoffen führen.

3. Körnungskennwerte:

Hier ist der entscheidende Einfluß der Anforderungen an die Mengenanteile für Über- und Unterkorn gemeint. Die Kornzusammensetzung des in der Lagerstätte anstehenden Rohsandes entspricht in den meisten Fällen nicht den Anforderungen der Glasindustrie. Entweder ist die Rohsandkörnung zu grob, oder sie ist zu fein. Die Aufgabenstellung für die Aufbereitung besteht dann in der Abscheidung von Über- und/oder Unterkorn. In den Bildern 13a und b ist an zwei theoretischen Beispielen der Zusammenhang zwischen ausgebrachter Fertigproduktmenge (Glasschmelzsand) und dem Mengenanteil an Über- bzw. Unterkorn im Glassand dargestellt. Bild 13a behandelt den Fall, daß durch Aufstromklassierung in einem grobkörnigen Quarzsand mit einem Überkornanteil von 4 Gew.-% auf dem Kontrollsieb 0,5 mm dieser auf 0,1 Gew.-% gesenkt werden soll. Diese Forderung bewirkt, daß der Mengenanteil des als Glassand nicht nutzbaren Sandanteils von 0 auf 49 Gew.-% an-



Bilder 13a und b. Darstellung des Zusammenhangs: a) zwischen dem im Fertiggut maximal zulässigen Überkornanteil > 0,5 mm und der ausgebrachten Fertiggutmenge und b) dem im Fertiggut maximal zulässigen Unterkornanteil < 0,1 mm und der ausgebrachten Fertiggutmenge (Mengenausbringen Fertigprodukt = V₀).

steigt. Mit anderen Worten, nur die Hälfte der Quarzsandlagerstätte ist als Quarzrohstoff für die Glasindustrie nutzbar. Reduziert man die Forderung dahingehend, daß noch 2 Gew.-% der Kornklasse $> 0,5$ mm im Glassand verbleiben dürfen, so können bereits 87% des Aufgabegutes auf diesen Kennwert bezogen als Glassand benutzt werden. In Bild 13b ist der Zusammenhang zwischen dem im Fertiggutmaterial zulässigen Mengenanteil an Unterkorn $< 0,1$ mm und der ausgebrachten Fertiggutmenge dargestellt. Auch hier ergibt sich ein ähnliches, wenn auch nicht so stark ausgeprägtes Bild. Bei der Entschlammung eines Feinsandes mit einem Mengenanteil von 10 Gew.-% unter 0,1 mm gehen bei Senkung des Mengenanteils von 10 auf 0,1 Gew.-% 25% des Aufgabegutes — bezogen auf diesen Kennwert — für die Nutzung als Glasschmelzsand verloren. Dürfen dagegen 5 Gew.-% des Kornanteils $< 0,1$ mm im Glasschmelzsand verbleiben, so steigt der nutzbare Anteil auf etwa 92% an.

Zusammenfassend ist festzustellen: Um die Gewinnung von Glassanden langfristig und auch mengenmäßig zu sichern, ist es notwendig, das Rohstoffbewußtsein der Verbraucher und der zuständigen Aufsichtsbehörden weiter zu aktivieren, damit einerseits volkswirtschaftlich wertvolle Quarzsandlagerstätten ihrer Nutzung infolge anderer öffentlicher Interessen nicht entzogen, andererseits wegen überzogener Qualitätsanforderungen nicht vorzeitig erschöpft werden.

6.2. Auswirkung auf den Kontrollaufwand bei der Produktion von aufbereiteten Quarzsanden

Die Technologie der Massenproduktionen von Flach- und Hohlglas bei hohem Qualitätsstandard erfordert bei hohen spezifischen Wanneneleistungen Glasschmelzsande mit konstanten Stoffeigenschaften und kleinen Toleranzbreiten für die einzelnen Prüfwerte. Gleichzeitig soll der Preis für einen hochwertigen Quarzsand möglichst niedrig sein. Damit steht die quarzsandproduzierende Industrie mit vor der Aufgabe, die rationelle Massenproduktion eines hochwertigen Rohstoffes so zu steuern, daß bestimmte Qualitätskennwerte innerhalb der gegebenen Toleranzen eingehalten werden.

Ein wirksamer Kontrollaufwand, der mit einer repräsentativen Beprobung großer Materialströme in der Quarzsandaufbereitung beginnt und die schnelle Ermittlung von physikalischen und chemischen Kennwerten erfordert, ist intensiv an Personal- und Investitionskosten. Er muß um so höher sein, je höher die Anforderungen an das Endprodukt „Glasschmelzsand“ gestellt werden. Mit wachsenden Qualitätsanforderungen steigen damit nicht nur die Aufbereitungskosten, sondern gleichzeitig die Kontrollkosten. Beide Kostenarten gehen zwangsläufig mit in den Preis des wichtigen Rohstoffes „Glasschmelzsand“ ein.

Hinweis: Die in den Tabellen aufgeführten Analysenwerte sind Angaben der Lieferwerke.

7. Literatur

- [1] Blankenburg, H.-J.: Deutsche und ausländische Quarzsandvorkommen. Sprechsaal **99** (1966) S. 339 – 351, 515 bis 522, 546 – 558, 1012 – 1014; Sprechsaal **100** (1967) S. 239 – 240.
- [2] Blankenburg, H.-J.: Über die Aufbereitung von Quarzsand. Sprechsaal **101** (1968) S. 376 – 379, 395 – 408. [Ref. Glastechn. Ber. **43** (1970) S. 62.]
- [3] Braun, F. J. und Quitzow, H. W.: Karte von nutzbaren Lockergesteinen aus dem Bereich des Siedlungsverbandes Ruhrkohlenbezirk. Blatt II/6 Wulfen-Haltern, 1:25000. Geologisches Landesamt von Nordrhein-Westfalen 1971.
- [4] Geulen, H.: Anforderungen an die Sandqualität bei der Herstellung von Spiegelglas. Glastechn. Ber. **34** (1961) S. 345 – 348.
- [5] Weiss, R.: Zusammensetzung, Kornform und Kornoberfläche von Quarzsanden. Gießerei **58** (1971) S. 105 – 109.
- [6] Weiss, R.: Aufbereitung von Quarzsanden. Erzmetall **27** (1974) Nr. 4, S. 169 – 177. [Ref. Glastechn. Ber. **48** (1975) Nr. 8, 75R1258.]
- [7] Wiegel, E.: Zur Lagerung der Oberkreide im westlichen Münsterland. N. Jb. Geol. Paläon. Mh. (Stuttgart) 1956, S. 184 – 193.