

Beryl (łac. *beryllium* – **Be**) – należy do II grupy układu okresowego pierwiastków z rodziny berylowców (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra). Udział berylu w skorupie ziemskiej wynosi 0,0005% wag. W stanie wolnym spotykany bardzo rzadko. Występuje w postaci krzemianów, glinokrzemianów, tlenków i innych minerałów. Do głównych minerałów Be należą: beryl – $\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$, fenakit – $\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$, bavenit – $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Be}_2[(\text{OH})_2|\text{Si}_9\text{O}_{26}]$, gadolinit – $\text{Y}_2\text{Fe}^{2+}\text{Be}_2[\text{O}|\text{SiO}_4]_2$, helvin – $(\text{Mn}, \text{Zn}, \text{Fe})_8[\text{S}_2](\text{BeSiO}_4)_6$, chryzoberyl – Al_2BeO_4 , betrandyt – $\text{Be}_4[(\text{OH})_2|\text{Si}_2\text{O}_7]$, danalit – $\text{Fe}_8[\text{S}_2](\text{BeSiO}_4)_6$.

Głównym źródłem Be jest beryl. Ze złóż berylońskich pozyskuje się kamienie jubilerskie oraz surowiec do produkcji berylu metalicznego i jego związków.

Czyste kryształy berylu są zabarwione na różne kolory np.: wody morskiej – akwamaryn, zielony – szmaragd, zielonożółty – heliodor, barwy winogron – izumrud, bezbarwny – goshenit i inne.

Zastosowanie jubilerskie mają również kryształy chryzoberylu np.: zmieniający barwę aleksandryt i cy-mofonit znany po oszlifowaniu jako kocie oko. Główne minerały berylu podano w tabeli 1.

Tabela 1. Beryl – kopaliny

Nazwa	Wzór chemiczny	Teor. zaw. BeO % wag	Ukl. kryst.	Twardość	Gęstość
Fenakit	$\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$	45,5	tryg.	7,5	2,9–3,0
Gadolinit, -(Y)	$\text{Y}_2\text{Fe}^{2+}\text{Be}_2[\text{O} \text{SiO}_4]_2$	5,5–12,9	jedn.	6,5–7,0	4,0–4,6
Baryllit	$\text{BaBe}_2[\text{Si}_2\text{O}_7]$	16,0	jedn.	7,0	4,0
Betrandyt	$\text{Be}_4[(\text{OH})_2 \text{Si}_2\text{O}_7]$	39,6–42,6	jedn.	6,0	2,5–2,6
Beryl	$\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$	11,0–14,3	heks.	7,5–8,0	2,6–2,9
Eudidymit	$\text{NaBe}[\text{OH} \text{Si}_2\text{O}_7]$	10–11	jedn.	5,5	2,5
Genthelvin	$\text{Zn}_8[\text{S}_2 (\text{BeSiO}_4)_6]$	12,6		5,5	3,6–3,7
Helvin	$(\text{Mn}, \text{Zn}, \text{Fe})_8[\text{S}_2 (\text{BeSiO}_4)_6]$	11,0–14,2	reg.	6,0–6,5	3,2–3,4
Danalit	$\text{Fe}_8[\text{S}_2 (\text{BeSiO}_4)_6]$	12,7–14,7		5,5–6,0	3,3–3,4
Chryzoberyl	Al_2BeO_4	19,8	romb.	8,5	3,5–3,8
Behoit	$\text{Be}[\text{OH}]_2$		?	produkt przeobrażenia	

Dobór metod wzbogacania rud Be uzależniony jest od składu mineralnego urobku górniczego i od wielkości ziaren składników użytecznych. Wyróżnia się zasadnicze typy rud Be:

- rudy grubo- i średnioziarniste zawierające minerał beryl, z których znaczną jego część można odzyskać ręcznie lub przy pomocy wzbogacania radiometrycznego,
- rudy drobnoziarniste, których przeróbka odbywa się sposobami grawitacyjnymi lub metodą flotacji.

Przeróbce mechanicznej poddawane są następujące rodzaje rud Be:

- rudy muskowitowo-kwarcowo-skaleńcowe z gruboziarnistym berylem. Mineralami towarzyszącymi są: columbit, tantalit, muskowit, skaleń i kwarc. Wzbogacanie tych rud odbywa się głównie na drodze ręcznego przebierania lub wzbogacania radiometrycznego. Tymi sposobami mogą być odzyskane ziarna berylu >5 cm, mniej-

sze zaś muszą być wzbogacane metodą flotacji lub metodami kombinowanymi. Przy małych zawartościach berylu opłacalność eksploatacji złoża i przeróbki jest możliwa tylko w przypadku odzysku minerałów towarzyszących,

- rudy spodumenowo-kwarcowo-albitowe z drobnoziarnistym berylem cechują się na ogół współwystępowaniem columbitu, tantalitu i kasyterytu. Ponad 90% zawartego w nich BeO jest związana w formie berylu. Są wzbogacane metodą flotacji,
- rudy flogopitowo-(biotytowo)-kwarcowo-skaleńcowe z berylem, fenakitem i chryzoberylem mają złożony skład mineralny, gdyż zawierają także plagioklasy, fluoryt, margaryt i inne minerały. Głównym minerałem Be jest beryl, któremu towarzyszą zwykle mniejsze ilości chryzoberylu i fenakitu. Beryl jest na ogół drobnoziarnisty. Są one wzbogacane wyłącznie metodą flotacji,

- rudy muskowitowo-kwarcowe i muskowitowo-topazowo-kwarcowe z berylem i bertrandytem zawierają niekiedy także fenakit oraz przemysłowe ilości wolframu i molibdenitu. Są wzbogacane ręcznie, flotacyjnie i grawitacyjnie,
- rudy magnetytowo-fluorytowe z helwinem, danalitem i chryzoberylem cechuje urozmaicony skład mineralny i złożone rozmieszczenie Be wśród minerałów. Obok wymienionych minerałów zawierają także: miki, granaty, wezuwian, a w mniejszych ilościach skalenie, pirokseny i epidot oraz pokrewne. Wielkość ziaren minerałów Be nie przekracza ułamków milimetra. Rudy te są trudne do wzbogacania, wymagają kombinowanych metod flotacyjnych i chemicznych,
- rudy mikowo-fluorytowe z fenakitem i berylem zawierają także minerały Li. Wielkość ziaren minerałów Be rzadko przekracza ułamki milimetra. Towarzyszy im kasyteryt, który odzyskuje się w skali przemysłowej. Proces wzbogacania wymaga stosowania złożonych układów technologicznych, jest on skomplikowany ze względu na konieczność kompleksowego wykorzystania kopaliny.

Nadto przerabiane są rudy: barylitowo-eudymitowe z fluorytem, genthelwinowe z fenakitem i bertrandytem, fluorytowo-fenakitowo-bertrandytowe z chryzoberylem oraz fluorytowo-bertrandytowe z adularzem i chalcedonem. Dotychczas jednak nie opublikowano danych charakteryzujących zarówno tok procesów, jak i jakość uzyskiwanych produktów.

Wzbogacanie ręczne jest główną metodą produkowania koncentratów berylowych z gruboziarnistych rud pegmatytowych. Wybieranie prowadzi się na płytach, przenośnikach i stołach przebieńczych. Wykorzystuje się przy tym różnice w barwie minerałów. Proces ten ułatwia się wstępnym sortowaniem i przemylaniem nadawy. Najkorzystniejsze jest oświetlenie dzienne.

Wzbogacanie radiometryczne wykorzystuje radioaktywność berylu, wywołowaną działaniem promieniowania γ lub promieniowania neutronowego. Praca jest zautomatyzowana. Wzbogacalniki radiometryczne rozdzielają pojedyncze ziarna minerałów, przesuwające się na odpowiednich przenośnikach.

Wzbogacanie grawitacyjne jest stosowane w przypadkach przeróbki rud wieloskładnikowych, które zawierają minerały ciężkie. Uzyskanie koncentratów berylu jest jednak najczęściej nieosiągalne wskutek niewielkiej różnicy gęstości berylu i minerałów skałotwórczych.

Wzbogacanie flotacyjne stosuje się w przypadku wzbogacania drobnoziarnistych rud Be. Przed flotacją zaleca się odmulanie urobku, oczyszczenie z żelaza, uwolnienie od Fe^{3+} i Al^{3+} przy zastosowaniu HF.

Dopiero po tych operacjach wstępnych stosuje się flotowanie przy pH około 6,5. W tych bowiem warunkach nie flotują: kwarc, skalenie i muskowit. Natomiast wraz z berylem flotują: granaty, biotyt i turmalin. Niekiedy flotowanie berylu poprzedza wyflotowanie mik w kwaśnym ośrodku fluorkowym przy pH około 2,5.

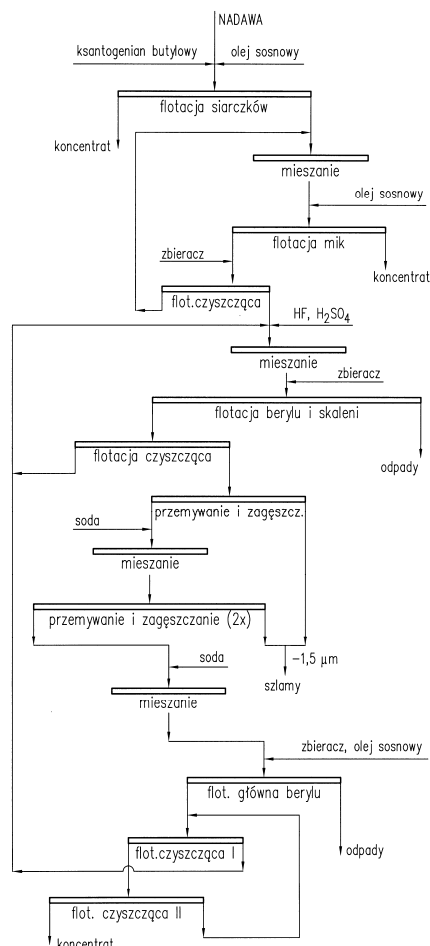
Metody flotacyjne znajdują szerokie zastosowanie przy wzbogacaniu drobnoziarnistych rud Be z pegmatytów. Bywają one określane nazwą metody Van Dornicka. Polega ona na rozdrobnieniu nadawy do 18 mm, następnie mokrym jej zmieleniu w młynach kulowych, rozdzieleniu od szlamów w hydrocyklonach, wydzieleniu koncentratów skalenia i mik wraz z domieszkami wielu innych minerałów. Dopiero w końcowym etapie stosuje się dwustopniową flotację, w wyniku której otrzymuje się koncentraty berylowe, minerałów Li, Nb-Ta i kasyterytu.

Do wydzielenia z urobku magnetytu, hematytu, biotytu, granatów i innych minerałów zasobnych w żelazo stosowane bywają **metody magnetyczne**. Miki można też usunąć w trakcie wstępnego **wzbogacania elektromagnetycznego**.

Do wzbogacania berylu opracowano **kwaśną i zasadową metodę flotacji**. We flotacji kwaśnej jako regulatory procesu stosuje się H_2SO_4 i HF, a we flotacji zasadowej – Na_2S , NaOH i Na_2CO_3 .

Flotacja berylu w środowisku kwaśnym może być prowadzona jako flotacja kolektywna lub selektywna. Przy **flotacji kolektywnej** prowadzi się wstępną flotację siarczków ksantogenianami, a następnie przy użyciu zbieraczy kationowych wydziela się koncentrat mikowy. Z kolei materiał poddawany jest działaniu H_2SO_4 i HF, po czym prowadzi się flotację berylu i skalenia zbieraczami kationowymi z wydzieleniem kwarcu do odpadów. W celu usunięcia z koncentratu resztek odczynników poddaje się go 3-krotnemu przemylaniu i zagęszczaniu, dodając przy drugim przemylaniu Na_2CO_3 . Usuwa się też szlamy. Dopiero po tej operacji prowadzi się flotację berylu przy użyciu jako zbieracza kwasów tłuszczowych. W tych warunkach nie flotują skalenie. Schemat operacji przedstawia rys. 1.

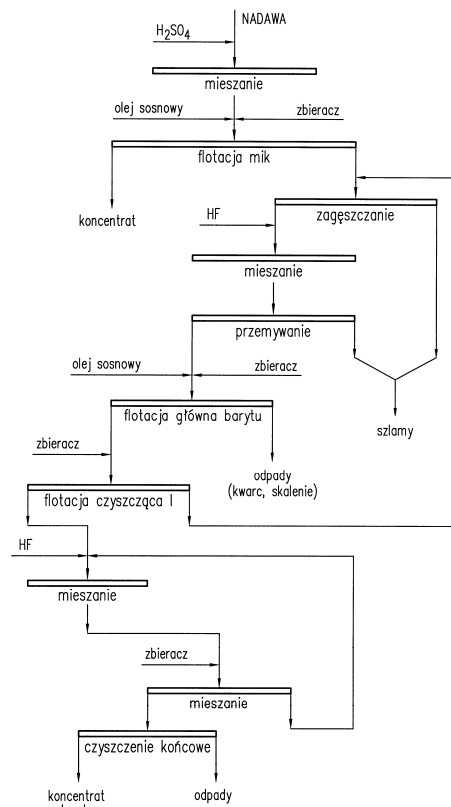
Przy **flotacji selektywnej** na wstępie prowadzi się flotację mik zbieraczami kationowymi w środowisku silnie kwaśnym ($\text{pH} = 3$). Pozostałość po tej flotacji zagęszcza się, a następnie poddaje działaniu HF. Po przemyciu materiału z resztek tego kwasu i zbieraczy prowadzi się flotację berylu w środowisku zasadowym przy użyciu kwasów tłuszczowych. Uzyskany koncentrat berylowy poddaje się operacji czyszczącej bez odczynników lub ze zbieraczami kationowymi, niekiedy z dodatkiem HF. W niektórych przypadkach stosuje się końcowe oczyszczanie przy pomocy gotowania z sodą (około 0,5 kg/t), szkłem wodnym lub Na_2S (0,1–0,2 kg/t) przy 85°C.



Rys. 1. Schemat technologiczny flotacji kolektywnej rud berylu w środowisku kwaśnym

Schemat tej operacji podaje rys. 2. Flotację selektywną stosuje się w przypadkach dużej zawartości w rudzie rozdrobnionych skaleni. W innych stosuje się raczej flotację kolektywną, która umożliwia uzyskanie koncentratów kwarcu i skaleni. Przykładowe wskaźniki wzbogacania rudy Be w warunkach przemysłowych przedstawiono w tabeli 2.

Flotacja berylu w środowisku zasadowym wymaga poddawania nadawy działaniu modyfikatorów już podczas mielenia lub bezpośrednio przed flotacją



Rys. 2. Schemat technologiczny flotacji selektywnej rud berylu w środowisku kwaśnym

berylu. W tym drugim przypadku zmieloną i odmuloną nadawę poddaje się działaniu NaOH (2,5 kg/t), następnie przemywa w celu obniżenia zasadowości do pH = 8,0–8,5 i prowadzi flotację berylu kwasami tłuszczowymi (olej kokosowy – 0,4 kg/t). Koncentrat poddaje się oczyszczaniu bez dodatku odczynników. Proces ten można prowadzić tylko przy użyciu wody pozbawionej Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} i Fe^{3+} . Ich obecność w roztworze aktywizuje powierzchnię ziaren kwarcu, mik i skaleni, które następnie przechodzą do koncentratu obniżając jego wartość. Uzyskany koncentrat można również dwukrotnie gotować z Na_2CO_3 lub $Na_2CO_3 + Na_2S$, a następnie flotować w celu usunięcia resztek skaleni,

Tabela 2. Wyniki wzbogacania rudy berylowej metodą flotacji kwaśnej

Produkt	Wychód	Zawartość				Uzysk BeO
		BeO	Skaleni	Kwarcu	Mik	
Nadawa	100,0	0,12				100,0
Koncentrat:						
mikowy	21,5	0,01	3,0	–	93,0	1,8
skaleniowy	43,5	0,02	93,3	3,0	–	7,2
berylowy	1,8	8,50	–	–	–	69,3
kwarcowy	29,6	0,01	1,0	98,2		
Frakcja magnetyczna	0,6	3,76	–	–	–	17,8
Produkt pośredni	0,9	0,15	–	–	–	1,1
Szlamy	3,1	0,11	–	–	–	2,8

kwarcu, biotyту, itp. Wyniki wzbogacania rud berylu tą metodą w skali przemysłowej podaje tabela 3.

Tabela 3. Wyniki wzbogacania rudy berylowej metodą flotacji zasadowej

Produkt	Wychód	Zawartość		Uzysk BeO
		Berylu	BeO	
Nadawa	100,0	9,7	1,30	100,0
Koncentrat berylowy	8,3	87,0	12,00	74,7
Odpady flotacji:				
główniej	62,7	0,1	0,01	0,7
I czyszczącej	2,0	1,0	0,14	0,2
II czyszczącej	1,3	25,0	3,50	3,4
Szlamy	25,7	7,9	1,10	21,0

W tabeli 4 zestawiono skład chemiczny niektórych koncentratów berylowych produkowanych w Brazylii, Stanach Zjednoczonych i Australii.

Koncentraty berylu są poddawane przeróbce chemicznej w celu uzyskania wodorotlenku berylu $\text{Be}(\text{OH})_2$, który stanowi surowiec do produkcji tlenku berylowego BeO , innych jego związków, berylu metalicznego i jego stopów, Związki berylu są toksyczne. Powodują chorobę płuc zwaną berylozą.

Tabela 4. Skład chemiczny niektórych koncentratów berylowych

Składniki	Brazylia		Australia	Stany Zjednoczone
	I	II		
BeO	10,96	12,50	13,02	11,35
SiO ₂	65,32	63,75	63,20	62,00
Al ₂ O ₃	19,61	23,05	17,25	22,50
Fe ₂ O ₃	1,95	0,48	0,80	0,41
TiO ₂	ślady	–	–	–
CaO	0,31		0,30	3,40
MgO	0,67		0,02	0,30
Li ₂ O			0,82	
K ₂ O			0,20	0,22
Na ₂ O			1,38	1,13