

# Betydning av bufferkapasitet ved teknisk utnyttelse av mineralske tungmetalladsorbenter

Av Rolf Arne Kleiv

Rolf Arne Kleiv er dr.ing.-stipendiat ved Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Trondheim

## Sammendrag

Flere undersøkelser har demonstrert hvordan nedmalte silikatmineraler fra bergindustrien kan brukes til å rense tungmetallforurensede vann, og til å stabilisere tungmetaller i deponert avfall og forurensede sedimenter. I slike system vil evnen til å binde tungmetaller hovedsakelig skyldes adsorpsjon til mineraloverflatene og hydroksidfelling. For å oppnå optimal adsorpsjon under initialt sub-nøytrale eller sure forhold er det ofte nødvendig å øke pH i systemet. Dersom man bruker adsorbenter som har evnen til å nøytralisere syre, vil en slik pH-økning kunne skje automatisk, og uten bruk av kjemikalier eller tilsatzmidler. I denne artikkelen beskrives adsorpsjons- og bufferegenskapene til en glaci marin leire og til mineralstøv fra nedmaling av bergarten nefelinsyenitt. Arbeidet er basert på adsorpsjonsforsøk med kobber som adsorbat. Resultatene viser at nefelinsyenittstøvet, sammenlignet med leirmaterialet, har overlegne bufferegenskaper og evnen til å adsorbere kobber fra løsninger som i utgangspunktet er sure.

## Abstract

Previous studies have shown that silicate tailings could be used to treat heavy metal polluted water and to stabilise heavy metals in waste deposits and contaminated sediments. Adsorption to particle surfaces and hydroxide precipitation are believed to be the most important immobilisation mechanisms. To achieve optimal adsorption it is often necessary to increase the pH of the system. When using adsorbents possessing a capacity to neutralise acid, the pH increase could be achieved automatically, and without any addition of chemicals. In this study the copper adsorption characteristics and buffering capacities of dust from the milling of nepheline syenite were investigated. The results were compared to the performance of a glaci marine clay, and showed that the nepheline syenite dust had superior buffering capacities and ability to adsorb copper when exposed to initially acidic solutions.

## Innledning

På verdensbasis produserer gruve- og prosessindustrien daglig enorme meng-

der utseparert avgang i form av nedmalte bergarter. Avgangsmassene har ofte fysiske eller kjemiske egenskaper som kan utnyttes økonomisk, og må på mange måter kunne betraktes som en potensiell ressurs. Bruk av avgang som et råmateriale for videre prosessering, eller som et produkt i seg selv kan representere både en økonomisk og miljømessig gevinst. Både kostnadene og de negative miljøeffektene ved avgangsdeponering reduseres, mens selve avgangsmaterialet og energien som ble brukt i produksjonen utnyttes mer effektivt.

Bruk av avgangsmaterialer i miljøteknikk representerer et interessant alternativ. Nedmalt eller finknust avgang vil kunne brukes til å rense tungmetallforurenset vann, og til å stabilisere tungmetaller i deponert avfall eller forurensete sediment. I slike system vil evnen til å binde tungmetaller hovedsakelig skyldes adsorpsjon til mineraloverflatene og hydroksidfelling. Begge mekanismene er svært pH-avhengige.

I denne artikkelen beskrives adsorpsjons- og bufferegenskapene til et norskprodusert avgangsmateriale, som består av produksjonsstøv fra produksjon av nefelin/feltpat-konsentrat fra nefelinsyenitt. Materialet er tidligere beskrevet av Kleiv (1999a) og Kleiv et al. (2000). Adsorpsjons- og bufferegenskapene er vurdert på grunnlag av adsorpsjonsforskning med kobber som adsorbat. For å kunne vurdere avgangsmaterialets potensielle, ble tilsvarende forskning utført med en glaciarmarin leire.

## Bakgrunn

Sammenhengen mellom tungmetall-ad-

sorpsjon og pH er godt kjent, og omfattende studier av en rekke ulike hydratiserte oksider, oksihydrater og aluminosilikater (James & MacNoughthon 1977, Benjamin & Leckie 1981) har vist at en økning i graden av adsorpsjon fra 10% til 90% som regel finner sted i et smalt pH-intervall som ikke utgjør mer enn 1-2 pH-enheter. pH-avhengigheten skyldes at hydrogenioner og tungmetallioner konkurrerer om bindingsposisjoner på mineraloverflatene, og ved pH-verdier lavere enn 4-5 er graden av adsorpsjon ofte neglisjerbar. For å oppnå optimal adsorpsjon under initialt sub-nøytrale eller sure forhold er det følgelig ofte nødvendig å øke pH i systemet. Dersom man bruker adsorbenter som har evnen til å nøytralisere syre, vil en slik pH-økning kunne skje automatisk, og uten bruk av kjemikalier eller tilsatmidler. Eksponert for sur og tungmetallrik forurensning vil slike adsorbenter vil kunne representere et interessant alternativ til konvensjonelle behandlingsmetoder.

Adsorbenter som utnytter evnen til å buffre eller nøytralisere sure løsninger er beskrevet av flere kilder. En stor del av disse adsorbentene består av slag og aske (Primak & Timosheff 1982, Lopez-Delgado et al. 1998, Dimitrova 1996, Dimitrova & Mehandgiev 1998 ) eller andre industrielle avfallsprodukter (Yamashita et al. 1983, Wu et al. 1999), men også primære mineralprodukter, forandlede mineralprodukter (Olafsen 1997) og naturlige sediment er undersøkt. Chen et al. (1996) studerte adsorpsjon av bly, sink og kadmium på apatitt, og fant at mineralet var en spesielt god blyadsorbent. Gupta et al. (1990) studerte fjer-

ning av nikkel fra løsnings ved bruk av wollastonitt. Mohamed et al. (1994) vurderte potensialet for bruk av glimmerholdig jord til konstruksjon av geokjemiske barrierer. Alle tre kildene vektlegger betydningen av bufferkapasiteten.

## Materialer og metoder

### Adsorbentene

To adsorbenter ble undersøkt:

1. Nefelinsyenittstøv fra opprednings-

prosessen ved North Cape Minerals A/S sitt anlegg på Stjernøy i Finnmark.

2. Glacimarin leire fra A/S LECAs massetak på Rælingen i Akershus.

På Stjernøy brytes og oppredes nefelinsyenitt. Årlig produseres ca. 300.000 tonn nefelin/feltspat-konsentrat til keramikk- og glassproduksjon. Støvet som ble benyttet i denne undersøkelsen skriver seg fra støvavsugget fra knu-

	Nefelinsyenittstøv		Glacimarin leire	
Mineralsammensetn.	K-feltspat	75%	Illitt	30%
	Nefelin	20%	Andre leirmin.	20%
	Biotitt	<5%	Kvarts	20%
	Kalkspat	<5%	Plagioklas	20%
	Magnetitt	<5%	K-feltspat	<5%
			Kalkspat	<5%
		Svovelkis	<5%	
Kjemisk sammensetn.	SiO <sub>2</sub>	51.3%	SiO <sub>2</sub>	58.5%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.3%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.0%
	K <sub>2</sub> O	7.7%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.2%
	Na <sub>2</sub> O	7.3%	K <sub>2</sub> O	4.1%
	CaO	4.2%	MgO	3.0%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.3%	Na <sub>2</sub> O	1.9%
	TiO <sub>2</sub>	0.5%	CaO	2.1%
	MgO	0.5%	TiO <sub>2</sub>	0.8%
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2%	MnO	0.2%
	MnO	0.1%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2%
	Glødetap	2.9%	Glødetap	4.8%
	Sum	99.3%	Sum	99.8%
	Spesifikt overflateareal	1.7m <sup>2</sup> /g		21m <sup>2</sup> /g
Kornfordeling	d <sub>90</sub>	36µm	d <sub>90</sub>	25µm
	d <sub>50</sub>	10µm	d <sub>50</sub>	6.1µm
	d <sub>10</sub>	2.2µm	d <sub>10</sub>	1.6µm
	f<1µm	1.2%	f<1µm	2.9%

Tabell 1. Materialkarakteristikk av nefelinsyenittstøvet og leirmaterialet. Tabellen gir data for mineralsammensetning, kjemisk sammensetning, spesifikt overflateareal og kornstørrelsesfordeling. Mineralsammensetningen må kun oppfattes som et grovt estimat.

se- og maletrinnene i prosessanlegget. Den mineralogiske sammensetningen av prosessstøvet gjenspeiler i stor grad mineralogien i bergarten som brytes. Nefelinsyenitten består i hovedsak av nefelin og kaliumfeltspat, men inneholder også blant annet biotitt, kalkspat og magnetitt.

Den glacimarine leira ble levert av Norsk Leca A/S, og kommer fra et massetak på Rælingen ved Lillestrøm. Leira benyttes til produksjon av lettklinker, hovedsakelig til konstruksjonsformål. Etter prøvetaking ble leira slemmet opp og materiale finere enn 100µm ble ekstrahert ved våtsikting. Kun denne fraksjonen ble karakterisert og senere benyttet i adsorpsjonsforsøkene. Etter utsikting ble materialet tørket ved 35°C i 48 timer, og forelå som et tørt pulver før materialkarakteristikk og adsorpsjonsforsøk ble gjennomført.

Den mineralogiske og kjemiske sammensetningen av materialene ble undersøkt ved hjelp av henholdsvis røntgen-diffraksjon (XRD) og røntgenfluorescens (XRF), mens laserdiffraksjon og BET-adsorpsjon ( $N_2$ ) ble benyttet for å bestemme henholdsvis kornstørrelsesfordeling og spesifikk overflate. Resultatene er gitt i tabell 1.

### *Utlutingsforsøk*

Et enkelt utlutningsforsøk ble gjennomført for å få en oversikt over hvilke elementer som lutes ut fra adsorbentene når de eksponeres for sure løsninger.

PE-flasker med lokk (100ml) ble tilsatt 1,00g adsorbent, 2ml 0,5M  $HNO_3$  og 98ml ionebyttet vann, slik at det totale væskevolumet ble 100ml. Flaske-

ne ble kondisjonert i et termostatkontrollert ristebad i 48 timer ved 25°C. Suspensjonene ble prøvetatt ved at 10ml av hver enkelt suspensjon ble filtrert gjennom et 0,45µm sprøytefilter. pH ble målt umiddelbart før filtrering. Filtratene ble deretter surgjort med 20ml 65%  $HNO_3$  og analysert på 30 elementer ved hjelp av induktivt koplet plasma-emisjons-spektrometri (ICP).

### *Adsorpsjonsforsøk*

Adsorpsjonsforsøkene hadde til hensikt å kartlegge adsorpsjon av kobber som funksjon av pH ved to ulike ionestyrker.

PE-flasker med lokk (100ml) ble tilsatt 1,00g adsorbent, varierende mengder 0,5 M  $HNO_3$ , elektrolytt i form av 1M  $NaNO_3$  og ionebyttet vann til væskevolumet tilsvarte 99ml. Syremengden ble valgt fritt, og flaskene ble tilsatt varierende mengde syre for å dekke det interessante pH-området. Tilsatsen av elektrolytt ble tilpasset slik at ionestyrken ble konstant lik 0,05M eller 0,5M. Det ble korrigert for ionestyrkebidraget fra utlutede ioner i henhold til prosedyren beskrevet av Kleiv (1999b). Flaskene ble deretter kondisjonert i et termostatkontrollert ristebad i 24 timer ved 25°C for å oppnå en relativ stabil pH før tilsats av kobberløsning.

Etter kondisjoneringen ble suspensjonene tilsatt 1ml 0,01M  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$  slik at den totale kobberkonsentrasjonen ble 100µm (6,4mg/l) og det totale væskevolumet kom opp i 100ml. For å la adsorpsjonsprosessen nå likevekt ble suspensjonene kondisjonert i ytterligere 24 timer ved 25°C. Deretter ble pH målt, og suspensjonene prøvetatt ved at 10ml av

hver enkelt suspensjon ble filtrert gjennom et 0.45µm sprøytefilter. Filtratene ble deretter surgjort med 20ml 65% HNO<sub>3</sub> og analysert på kobber ved hjelp av flammeeatomabsorpsjons-spektrometri (AAS).

## Resultater og diskusjon

### Utlutingsforsøk

Utlutingsforsøket viser at stort sett bare hovedelementer som silisium, aluminium, magnesium, jern, mangan, kal-

sium, og natrium lutes ut i konsentrasjoner som overstiger 1ppm (tabell 2.). Fra nefelinsyenittstøvet frigjøres i tillegg strontium, mens fosfor lutes ut fra den glacimarine leira. Resultatene viser at konsentrasjonene av potensielt miljøskadelige tungmetaller som kobber, bly, sink, nikkel og kadmium er svært lave, og materialene vil derfor trygt kunne eksponeres for sure løsnings-

	Nefelinsyenittstøv	Glacimarin leire
<i>pH</i>		
Ag (ppm)	<0.01	<0.01
Al (ppm)	7.07	15.2
B (ppm)	<0.02	0.0319
Ba (ppm)	0.380	0.583
Be (ppm)	<0.001	<0.00221
Ca (ppm)	184	46.5
Cd (ppm)	<0.005	<0.005
Ce (ppm)	0.177	0.150
Co (ppm)	<0.01	0.0420
Cr (ppm)	<0.01	0.0180
Cu (ppm)	<0.005	0.0855
Fe (ppm)	0.850	5.85
K (ppm)	11.0	4.98
La (ppm)	0.0435	0.0717
Li (ppm)	0.00555	0.0247
Mg (ppm)	0.870	10.1
Mn (ppm)	1.58	2.05
Mo (ppm)	<0.01	<0.01
Na (ppm)	28.9	2.07
Ni (ppm)	<0.02	0.0529
P (ppm)	0.147	2.11
Pb (ppm)	<0.05	<0.05
Sc (ppm)	<0.001	<0.001
Si (ppm)	19.4	14.3
Sr (ppm)	3.44	0.227
Ti (ppm)	0.00675	<0.005
V (ppm)	<0.005	0.0228
Y (ppm)	0.00845	0.0639
Zn (ppm)	0.0133	0.154
Zr (ppm)	<0.005	<0.005

Tabell 2. Resultater fra utlutingsforsøk med nefelinsyenittstøv og glacimarin leire. Tabellen viser konsentrasjonen i løsning ved forsøkets slutt for 30 ulike elementer.

I suspensjonen med nefelinsyenitt ble  $pH$  etter 48 timer målt til 5,93, mens  $pH$  i leir suspensjonen ble målt til 2,37. Nefelinsyenittstøvetvets evne til å nøytralisere syre gir seg utslag i høye konsentrasjoner av kalsium og natrium (tabell 2).

### Adsorpsjonsforsøk

Adsorpsjonsforsøkene som beskrives i denne artikkelen har tre variable: En valgt syretilsats, en resulterende  $pH$ -måling og en resulterende målt konsentrasjon av kobber i filtratet. Da den totale kobberkonsentrasjonen  $[Cu]_{tot}$  er kjent kan graden av adsorpsjon uttrykkes som:

$$\%Adsorbert = 100\% \cdot \frac{[Cu]_{tot} - [Cu]_{eq}}{[Cu]_{tot}}$$

der  $[Cu]_{eq}$  er kobberkonsentrasjonen målt i filtratet. Videre kan syretilsatsen angis som *initial syrekonsentrasjon*;  $[A]_{ini}$ . Det er derfor mulig å illustrere resultatene ved hjelp av følgende tre todimensjonale fremstillinger:  $\%Adsorbert$  som funksjon av  $pH$ ,  $pH$  som funksjon av *initial syrekonsentrasjon* og  $\%Adsorbert$  som funksjon av *initial syrekonsentrasjon*. Resultatene fra adsorpsjonsforsøket er fremstilt på denne måten i henholdsvis figur 1, 2 og 3.

I figur 1, som viser den prosentvise

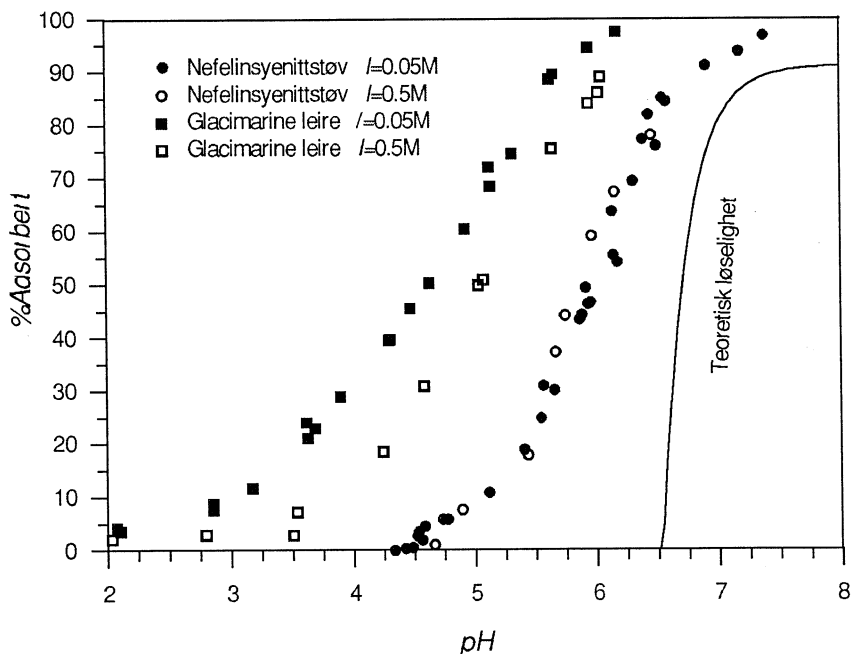


Fig. 1. Adsorpsjonsisoterm som viser prosentandelen kobber adsorbert som funksjon av  $pH$  og ionestyrke (I). Den heltrukne kurven viser den teoretiske løseligheten av kobberhydroksid.

adsorpsjonen av kobber som funksjon av  $pH$ , går det frem at den glacimarine leira er i stand til å adsorbere signifikante mengder kobber selv under relativt sure forhold ved ionestyrke lik 0.05M. Til sammenlikning ligger kurven som beskriver nefelinsyenittstøvet omtrent én  $pH$ -enhet lenger mot høyre. Mye av forskjellen mellom de to adsorpsjonsisotermene skyldes at materialene er sammenlignet på vektbasis, og at den glacimarine leira har en vesentlig større spesifikk overflate.

For å kunne vurdere effekten av adsorpsjon i forhold til utfelling er også den teoretiske løsligheten for kobberhy-

droksid tegnet inn. Denne kurven er beregnet ved hjelp av programmet *Min-  
teqA2* v.3.0 (Allison et al. 1991), og er basert på termodynamiske data gitt av Allison & Brown (1987). Begge adsorpsjonsisotermene ligger til venstre for løslighetskurven, og resultatene viser at både nefelinsyenittstøvet og leirmaterialet er i stand til å adsorbere nær 100% av den tilsatte kobbermengden ved nøytral  $pH$ . I et system uten adsorbenter vil hydroksid-felling gi en restkonsentrasjon på ca.  $10\mu M$ .

Adsorpsjon av kobber til avgangsmaterialet ser ut til å være lite avhengig av systemets ionestyrke. Dette er ikke til-

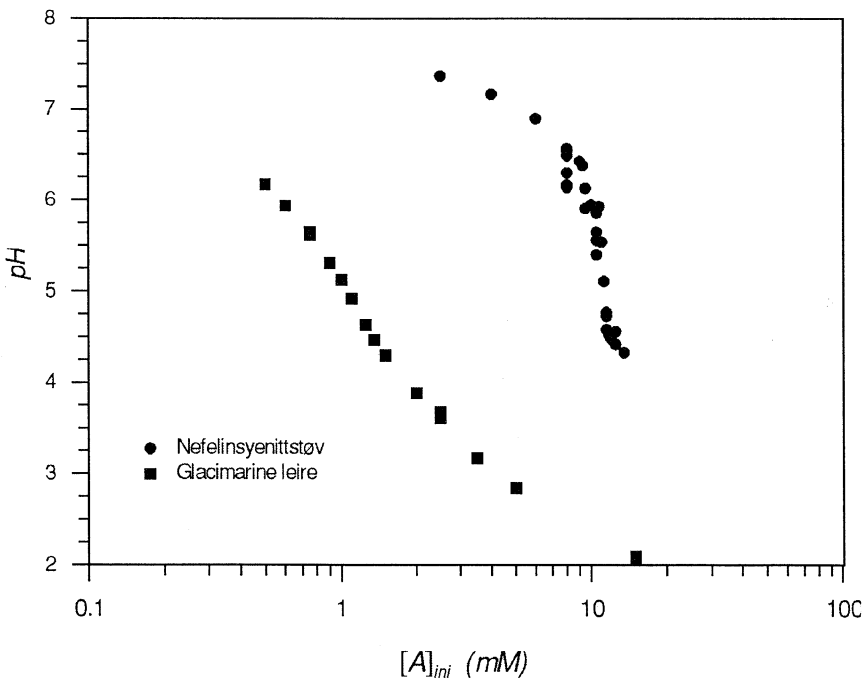


Fig. 2. Bufferkurver som viser  $pH$  som funksjon av initial syrekonsentrasjon (tilsatt syremengde).

felle for den glacimarine leira. En økning i ionestyrken fra 0.05M til 0.5M resulterer her i at adsorpsjonisotermeren forskyves ca. en halv pH-enhet mot høyre. Dersom adsorpsjonsisotermene i liten grad er avhengig av systemets ionestyrke tolkes dette ofte som *kjemisorpsjon* eller *spesifikk adsorpsjon* (Hayes et al. 1988), i motsetning til *fysikalsk adsorpsjon* der det ikke dannes kjemiske bindinger mellom adsorbent og adsorbat. Resultatene indikerer følgelig at kobberionene bindes fastere til nefelinsyenittstøvet enn til leirmineralet, og det vil trolig være vanskeligere å remobilisere kobber fra avgangsmaterialet.

Fig. 1 viser % Adsorbent som funksjon av *pH*, men tar ikke hensyn til at syretilsatsen som kreves for å oppnå en gitt *pH* er svært forskjellig for de to adsorbentene. *pH* som funksjon av *initial syrekonsentrasjon* er vist i fig. 2. Mens det kreves en relativ stor syretilsats for å oppnå en vesentlig *pH*-reduksjon i suspensjonen av nefelinsyenittstøv, tåler leirsuspensjonen lite syre før *pH* synker betraktelig. Avgangsmaterialet har følgelig langt bedre bufferegenskaper. Betydningen av de store forskjellene i bufferkapasitet går frem av fig. 3 som viser adsorpsjon av kobber som funksjon av *initial syrekonsentrasjon*.

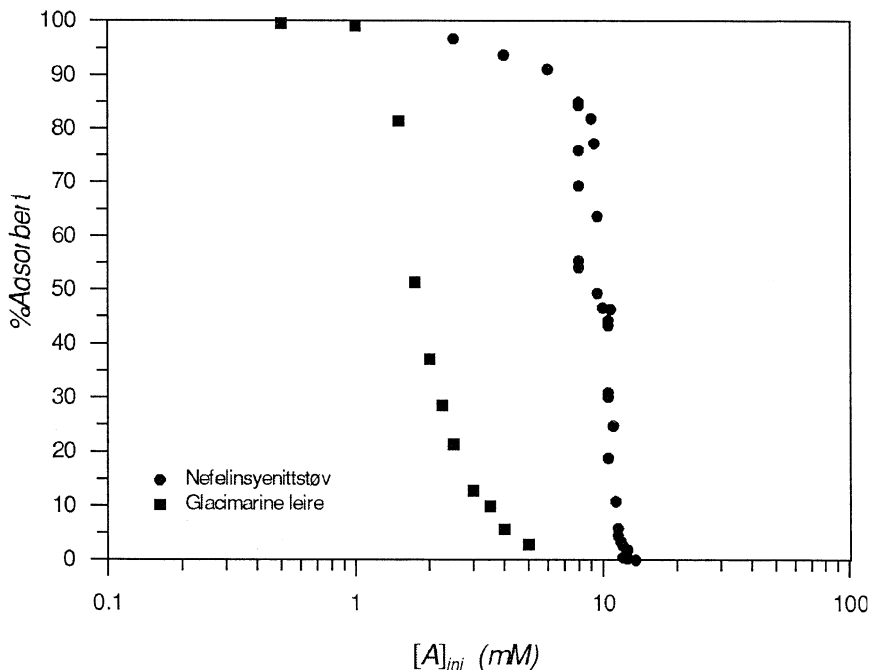


Fig. 3. Adsorpsjonsisoterm som viser prosentandelen kobber adsorbent som funksjon av initial syrekonsentrasjon (tilsatt syremengde).



Her har nefelinsyenittstøvet overlegne egenskaper.

Der  $pH$  i systemet er bestemt av andre reaksjoner enn bufferreaksjoner med adsorbenten vil den glacialine leira være en bedre adsorbent enn nefelinsyenittstøvet. Der  $pH$  i systemet er et resultat av egenbuffring vil imidlertid avgangsmaterialet være overlegent. Materialet tåler følgelig langt mer sur forurensning enn leira som må kombineres med buffrende materialer (kalkstein og lignende) for å fungere like bra. Gode bufferegenskaper i kombinasjon med adsorpsjonsegenskapene er nefelinsyenittstøvet styrke.

## Konklusjoner

Arbeidet som beskrives i denne artikkelen hadde til hensikt å undersøke adsorpsjons- og bufferegenskapene til prosesstøv fra knusing og maling av nefelinsyenitt. Materialet ble sammenlignet med egenskapene til en glacialine leire. Adsorpsjons- og bufferegenskapene ble vurdert på grunnlag av adsorpsjonsforsøk, der 1,00g adsorbent ble suspendert i 100ml løsning med en total kobberkonsentrasjon på 100 $\mu$ M. Følgende ble funnet:

1. Begge materialene er i stand til å fjerne nær 100% av den totale kobbermengden fra løsning, men adsorpsjonen finner sted over ulike  $pH$ -intervall. Ved ionestyrke lik 0.05M er den glacialine leira i stand til å adsorbere 50% av kobberet ved  $pH$  like under 5. For nefelinsyenittstøvet finner dette sted ved  $pH$  6. Når  $pH$  er tilstrekkelig høy gir begge materialene en likevektskonsentra-

sjon som er vesentlig lavere enn hva som vil kunne oppnås ved hydrok-sidfelling.

2. Nefelinsyenittstøvet har langt bedre bufferegenskaper enn leirmaterialet. Når adsorpsjonen vurderes som funksjon av initial syrekonsentrasjon har nefelinsyenittstøvet overlegne egenskaper. Eksponert for sur og tungmetallholdig forurensning vil avgangsmaterialet trolig fungere langt bedre enn den glacialine leira.
3. Resultatene fra forsøk med forskjellig ionestyrke viser at adsorpsjonsegenskapene til nefelinsyenittstøvet, i motsetning til egenskapene til den glacialine leira, i liten grad er avhengig av systemets ionestyrke. Dette indikerer at spesifikk adsorpsjon finner sted på nefelinsyenittstøvet, mens adsorpsjonen til leirmaterialet mest sannsynlig er av fysikalsk natur.

## Referanser

- Allison, J.D. & Brown, D.S. 1871: An equilibrium metal speciation model: Users manual. *U.S Environmental Protection Agency*, Athens, GA 30613, USA
- Allison, J.D., Brown, D.S. & Novogradac, K.J. 1991: MinteqA2/ProdefA2, A geochemical assessment model for environmental systems: Version 3.0 User's manual. *U.S Environmental Protection Agency*, Athens, GA 30613, USA, p.106
- Benjamin, M & Leckie J. 1981: Multiple-site adsorption of Cd, Cu, Zn and Pb on amorphous iron oxyhydroxide.

- Journal of Colloid and Interface Science* 79, 209-221
- Chen, X., Wright, J. V., Conca, J.L. & Peurrung, L.M. 1996: Evaluation of heavy metal remediation using mineral apatite. *Water, Air and Soil Pollution* 98, 57-78
- Dimitrova, S.V. & Mehandgiev, D.R. 1998: Lead removal from aqueous solutions by granulated blast-furnace slag. *Water Research* 32, 3289-3292
- Dimitrova, S.V. 1996: Metal sorption on blast furnace slag. *Water Research* 30, 228-232
- Hayes, K.F., Papelis, C. & Leckie, J.O. 1988: Modeling ionic-strength effects on anion adsorption at hydrous oxide solution interfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* 125, 717-726
- Gupta, Y.C., Prasad, G.S. & Rupainwar, G. 1990: Use of wollastonite in the removal of Ni(II) from aqueous solutions. *Water, Air and Soil Pollution* 49, 69-79
- James, R. & MacNoughton, M. 1977: The adsorption of aqueous heavy metals on inorganic minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41, 1549-1555
- Kleiv, R.A. 1999a: Adsorpsjon av kobber på nedmalt avgang. *Geonytt* 1, 61-62
- Kleiv, R.A. 1999b: An experimental procedure for investigating heavy metal adsorption on adsorbents possessing a high acid neutralization capacity. *Scripta* 1, ISBN-82-92045-00-7, 5p.
- Kleiv, R.A., Sandvik, K.L. & Shao, L. 2000: Utilising the buffer capacity of waste mineral adsorbents. *Preprints, Konferens i Mineralteknik 2000 i Luleå*, MinFo, 8p
- Lopez-Delgado, A., Perez, C. & Lopez, 1998: Sorption of heavy metals on blast furnace sludge. *Water Research* 32, 989-986
- Mohamed, A.M.O., Yong, R.N., Tan, B.K., Farkas, A. & Curtis, L.W. 1994: Geo-environmental Assessment of a micaeous soil for its potential use as an engineered clay barrier. *Geotechnical Testing Journal* 17, 291-304
- Olafsen, R. 1997: Tungmetall og oljeforurenset avløpsvann: rensing via bark/lettklinkerfilter. *Vann* 2, 1-5
- Primak, T. & Timosheff, V. 1982: Polyfunctional sorption Characteristics of slag-silicate sorbent. In: *Silicate Materials from Mineral Origin and Industrial Wastes*. Science, St. Petersburg, Russia, p. 8391
- Wu, L., Sun, Z. & Forsling, W. 1999: Characterization and investigation on the sorption behavior of steelmaking flue dust. *Preprints, Konferens i Mineralteknik 1999 i Luleå*, MinFo, 193-205
- Yamashita, K., Ikenata, T., Tate, K. & Nakahara K. 1983: Method of removing dissolved heavy metals from aqueous waste liquids. *U.S Patent* 4377483