

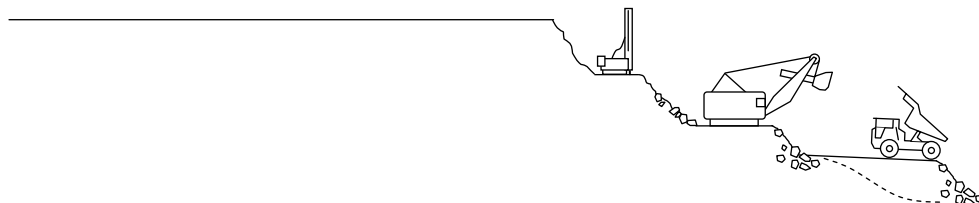
## Vitenskapelig artikkel

## Direkte karbonatisering av magnesiumsilikater ved CO<sub>2</sub>-eksponering under mekanisk aktivering

Rolf Arne Kleiv<sup>1</sup> og Maria Thornhill<sup>1</sup><sup>1</sup> Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, Sem Sælandsvei 1, 7491 Trondheim. Kontakt: (rolf.kleiv@ntnu.no).

### SAMMENDRAG

Denne artikkelen undersøker effekten av mekanisk aktivering på reaksjonsraten ved direkte karbonatisering av magnesiumrik olivin ved lavt trykk og lav temperatur. Mekanisk aktivering av olivinpågangen ble gjennomført ved bruk av planetmølle utstyrt med et møllekammer som kunne trykkesettes med CO<sub>2</sub>-gass. Det ble utført en rekke forsøk der olivinmaterialet ble eksponert for CO<sub>2</sub> enten *under* eller *etter* mekanisk aktivering. Mengden CO<sub>2</sub> som ble bundet i den faste fasen under forsøkene ble beregnet fra produktanalyser på total karbon. Resultatene demonstrerer hvordan man kan oppnå en betydelig økning i karbonatiseringsraten når magnesiumrik olivin eksponeres for CO<sub>2</sub>-gass *under* mekanisk aktivering sammenliknet med tilsvarende eksponering *etter* mekanisk aktivering. Resultatene er interessante ettersom de indikerer hvordan signifikant forhøyede reaksjonsrater kan oppnås ved lavt trykk og lav temperatur.

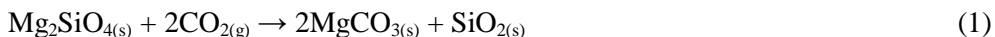


### I. INTRODUKSJON

Bruk av mineralske materialer for å binde CO<sub>2</sub> i industrielle prosesser representerer et forskningsområde i sterk vekst. Lackner et al. (1995) var en av de første som påpekte potensialet i karbonatiseringsreaksjonenes eksoterme natur og fremhevet hvordan dette vil kunne muliggjøre trygge, permanente og økonomisk realistiske løsninger med svært gunstige energibalanser. Senere har det blitt foreslått en rekke ulike konsepter og tekniske løsninger for karbonatisering av mineralske materialer (basert på både primære mineralprodukter og overskuddsmasser). En oversikt over denne teknologiutviklingen er gitt av blant annet Huijgen & Comans (2003, 2005), Sipilä et al. (2008) og Haug (2010).

De fleste foreslåtte karbonatiseringskonseptene kan klassifiseres som enten *direkte* eller *indirekte karbonatisering*. Ved direkte karbonatisering skjer det en direkte reaksjon mellom den faste karbonatiseringsagenten og CO<sub>2</sub> i gassform, mens indirekte karbonatisering er basert på reaksjon i vannfase etter oppløsning av det

faste materialet. Felles for alle de foreslåtte konseptene er at den faste karbonatiseringsagenten må være både billig og reaktiv, og at den må være tilgjengelig i svært store volum. Dette gjør serpentin- og olivinmaterialer til de mest interessante kandidatene. Fullstendig karbonatisering av ett tonn olivin (forsteritt) kan binde 0,63 tonn CO<sub>2</sub> basert på følgende nettoreaksjon:



Karbonatisering av magnesiumioner er en eksotermisk prosess som rent termodynamisk sett fremmes av lavere temperatur og høyere trykk. Dessverre er ikke dette tilfelle for overflatereaktiviteten og løseligheten av magnesiumsilikater som er sterkt positivt korrelert med reaksjonstemperaturen. I praksis blir derfor reaksjonskinetikken helt avgjørende for mulighetene til å utnytte konseptet med miljømessig og økonomisk gevinst.

Flere studier har vist at mekanisk aktivering (dvs. langvarig høyintensitets nedmaling) av den faste karbonatiseringsagenten (silikatet), vil kunne resultere i en betydelig økning i reaksjonsraten til den etterfølgende karbonatiseringsreaksjonen (O'Connor et al. 2001, Park & Fan 2004, Haug et al. 2010). Mekanisk aktivering har tradisjonelt vært brukt som et forbehandlingstrinn innen hydrometallurgien (Baláz 2003, 2000 med referanser), men kan også benyttes for å oppnå en gunstigere reaksjonskinetikk ved karbonatisering ved å øke det spesifikke overflatearealet og ved å bryte ned krystallgitteret slik at det dannes en mer amorf og reaktiv fast fase.

Mekanisk aktivering kan imidlertid benyttes til mer enn kun forbehandling. Under mekanisk aktivering kan overflaten til det faste materialet oppnå svært høye energitilstander. De høyeste energitilstandene har en svært kort levetid og er i praksis kun til stede mens aktiveringen pågår (Baláz 2000). Reaktiviteten under aktivering kan derfor være langt høyere enn den residuale reaktiviteten til et aktivert materiale. Ved å eksponere karbonatiseringsagenten for CO<sub>2</sub> mens aktiveringen pågår vil man kunne utnytte denne effekten og forhåpentligvis oppnå reaksjonsrater som ellers ville kreve langt høyere trykk og temperatur. Dette har blitt påvist indirekte av Kalinkina et al. (2001a,b) og Kalinkin et al. (2003) som fant at langvarig nedmaling av magnesium- og kalsiumsilikater i normal atmosfære førte til et signifikant opptak av CO<sub>2</sub> i form av karbonatgrupper både på overflaten og i bulkfasen til maleproduktet. Til tross for at dette har vært kjent en stund er det gjort få forsøk på å utnytte disse effektene for karbonatiseringsformål. Undersøkelsene som beskrives i denne artikkelen er ment som et innledende forsøk på å beskrive potensialet for en slik anvendelse.

## 2 MATERIALER OG METODER

### 2.1 Materialkarakterisering

Partikkelstørrelsesfordelingene til pågangsmaterialet og de mekanisk aktiverte produktene ble funnet ved Frauenhofer-diffraksjonsanalyse ved bruk av en *Coulter LS 230 Particle Size Analyser*, mens de korresponderende verdiene for spesifikk overflateareal ble bestemt ved nitrogenadsorpsjon i en *Flow Sorb II 2300 volumetric gas adsorption analyser*. Beregning ble basert på BET-likningen (Brunauer et al. 1938).

For å bestemme graden av amorfisering (dvs. krystallinitet) ble det utført en røntgendiffraksjonsanalyse (XRD) på de mekanisk aktiverte produktene. XRD-analysen ble utført ved å sveipe området 2-60° med monokromatisk  $\text{CuK}\alpha$ -stråling ved hjelp av et *Philips PW1710* diffraktometer utrustet med en *PW 1830* generator.

Totalkonsentrasjonen av karbon i produktene fra karboniseringseksperimentene ble bestemt ved termisk dekomponering og gassadsorpsjonsanalyse. Denne analysen ble utført av Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) ved hjelp av en *LECO SC-444 analyser* med en deteksjonsgrense på 0,07% total karbon.

### 2.2 Pågangsmaterialet

Pågangsmaterialet som ble brukt i alle forsøkene besto av olivinsand fra Sibelco Nordics produksjonsanlegg på Åheim i Møre og Romsdal. Ren olivin fra Åheim har en kjemisk sammensetning som svarer til 93mol% forsteritt ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) og 7mol% fayalit ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) (Osland 1998), hvilket gir 51,7% MgO. Etersom olivinsanden er produsert ved knusing og sikting av dunitt vil den også inneholde små mengder kloritt, kromitt, enstatitt, talk og serpentin. Den samlede mengden av disse mineralene utgjør trolig mindre enn 5% av pågangsmaterialet.

Den kjemiske sammensetningen av pågangsmaterialet (analysert av Sibelco Nordic på Åheim ved hjelp av røntgenfluorescensanalyse (XRF)) er gitt i tabell 1 sammen med data for kornstørrelsesfordeling, spesifikt overflateareal og totalt karboninnhold.

**Tabell 1.** Pågangsmaterialets egenskaper.

Analyse	Parameter	Verdi
Kjemisk sammens. (XRF)	MgO	50,2 %
	SiO <sub>2</sub>	41,5 %
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,41 %
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,30 %
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36 %
	NiO	0,33 %
	MnO	0,08 %
	CaO	0,08 %
	Na <sub>2</sub> O	0,01 %
	K <sub>2</sub> O	0,01 %
	LOI	0,27 %
	Sum	100,53 %
Total karbon (LECO)	total C	<0,07 %
Kornstørrelsesfordeling (Coulter)	$d_{90}$	504 $\mu\text{m}$
	$d_{50}$	337 $\mu\text{m}$
	$d_{10}$	223 $\mu\text{m}$
Spesifikt overflateareal (BET)	$S_{BET}$	0,57 m <sup>2</sup> /g

### 2.3..Mekanisk aktivering og CO<sub>2</sub>-eksponering

Forsøkene som beskrives i denne artikkelen består av to ulike forsøksserier. Den første forsøksserien ble gjennomført for å kartlegge hvordan produktenes krystallinitet og spesifikke overflateareal påvirkes av mekanisk aktivering. Her ble det ikke benyttet CO<sub>2</sub>. Den mekaniske aktiveringen ble gjennomført ved maling i normal atmosfære med maletiden som eneste forsøksvariabel. Denne varierte fra 2 til 60 min. Den andre forsøksserien besto av forsøk som kombinerte mekanisk aktivering med eksponering for CO<sub>2</sub> for å undersøke effekten av førstnevnte på opptaket av karbon. En oversikt over forsøkene er gitt i tabell 2.

I begge forsøksseriene ble den mekaniske aktiveringen gjennomført ved hjelp av en *Fritsch Pulverisette 6* planetmølle ved tørrmaling ved 500 omdreininger pr. min av 20,0 g pågangsmateriale i et 250 cm<sup>3</sup> møllekammer fylt med tjue Ø20 mm møllekuler. Både kammer og kuler besto av rustfritt stål. Ved slutten av hvert enkelt forsøk ble de enkelte maleproduktene forsiktig hentet ut av møllekammeret ved hjelp av børste og spatel. Kammer og kuler ble rengjort mellom hvert forsøk ved maling av 40 g kvartssand ved 500 omdreininger pr. min i 30 s før de ble børstet rene, skyllet med sprit og satt til tørking.

**Tabell 2.** Oversikt over forsøksserie I og II.  $t_M$  og  $t_E$  representerer henholdsvis maletid (aktiveringstid) og eksponeringstid.

Forsøk	$t_M$ [min]	Eksponering for CO <sub>2</sub>	$t_E$ [min]	$S_{BET}$ [m <sup>2</sup> /g]
<i>Forsøksserie I</i>				
F200	2	INGEN eksponering	-	2,74
F201	5	INGEN eksponering	-	4,02
F202	10	INGEN eksponering	-	5,08
F203	20	INGEN eksponering	-	4,73
F204	30	INGEN eksponering	-	4,40
F224	45	INGEN eksponering		4,33
F225	60	INGEN eksponering		4,26
<i>Forsøksserie II</i>				
F209	-	UTEN MA <sup>a</sup>	30	-
F138	30	ETTER MA (umiddelbart)	30	-
F210	30	ETTER MA (umiddelbart)	30	-
F220	30	ETTER MA (umiddelbart)	30	-
F211	30	ETTER MA (60 min pause)	30	-
F221	5	UNDER MA	5	-
F212	10	UNDER MA	10	-
F222	20	UNDER MA	20	-
F137	30	UNDER MA	30	-
F139	30	UNDER MA	30	-
F213	30	UNDER MA	30	-
F226	45	UNDER MA	45	-
F227	60	UNDER MA	60	-

<sup>a</sup> Mekanisk aktivering.

I den andre forsøksserien ble de enkelte forsøkene gjennomført ved å trykksette møllekammeret med CO<sub>2</sub>. Her ble kammeret utrustet med et spesiallaget ventillokk som muliggjorde trykksetting og trykkavlastning. Under trykksettingen ble det benyttet et overtrykk på 5,0 bar CO<sub>2</sub> ved 20±1°C. CO<sub>2</sub>-gassen ble tilført uten å evakuere lufta som allerede var til stede i møllekammeret og opptok derfor ca 133 cm<sup>3</sup> av det totale tilgjengelige kammervolumet på 160 cm<sup>3</sup>.

Tre ulike kombinasjoner av mekanisk aktivering og eksponering for CO<sub>2</sub> ble undersøkt; 1) eksponering av pågangsmaterialet uten noen form for nedmaling eller mekanisk aktivering, 2) eksponering umiddelbart *etter* mekanisk aktivering og 3) eksponering *under* mekanisk aktivering. Ved eksponering uten mekanisk aktivering ble pågangsmaterialet plassert sammen med møllekulene i møllekammeret som så ble trykksatt. Etter eksponering i 30 min ble kammeret evakuert før det eksponerte olivinproduktet ble hentet ut.

Eksposering etter mekanisk aktivering ble utført ved å trykksette møllekammeret etter at 30 min mekanisk aktivering av pågangsmaterialet var blitt gjennomført. Før trykksetting ble overtykket i møllekammeret (som skyldes oppvarming under maling) utjevnet. Trykksettingen av møllekammeret fant sted enten umiddelbart etter mekanisk aktivering eller etter en hvileperiode (relaksjon) på 60 min.

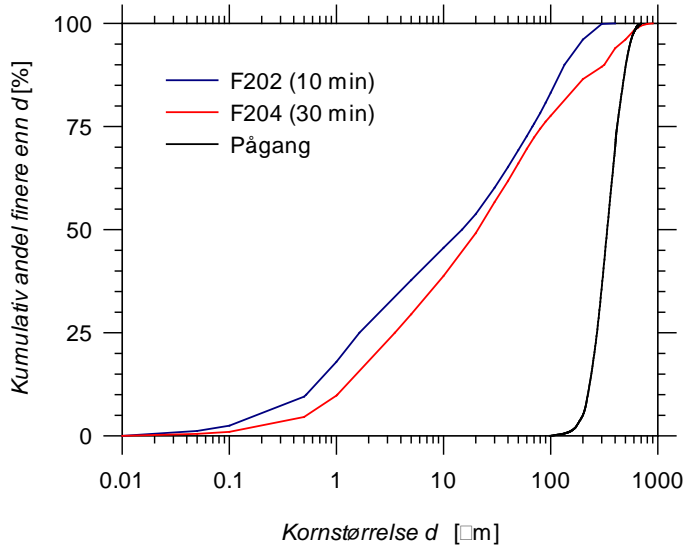
Eksposering under mekanisk aktivering ble gjennomført ved å trykksette møllekammeret umiddelbart før aktiveringen startet, for så å trykkavlaste og åpne for normal atmosfære umiddelbart etter at aktiveringstiden var utløpt. Eksposeringstiden tilsvarte derfor maletiden. Denne varierte fra 5 til 60 min.

### 3 RESULTATER OG DISKUSJON

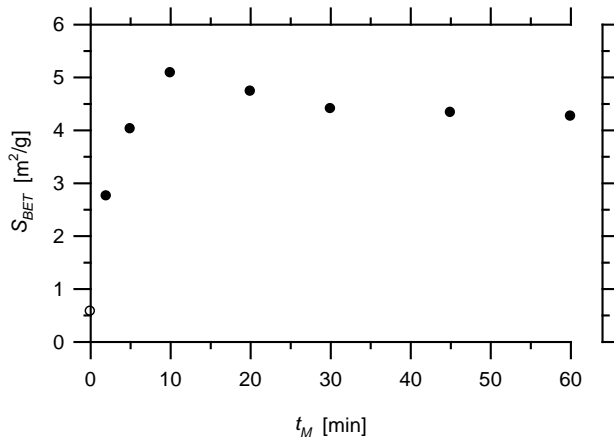
#### 3.1 Mekanisk aktivering av olivinmaterialet

Kornstørrelsesfordelingene til pågangsmaterialet, produktet fra forsøk F202 (10 min) og produktet fra forsøk F204 (30 min) er vist i figur 1, mens figur 2 viser spesifikt overflateareal  $S_{BET}$  som en funksjon av maletiden  $t_M$ . Spesifikt overflateareal er også gitt i tabell 1.

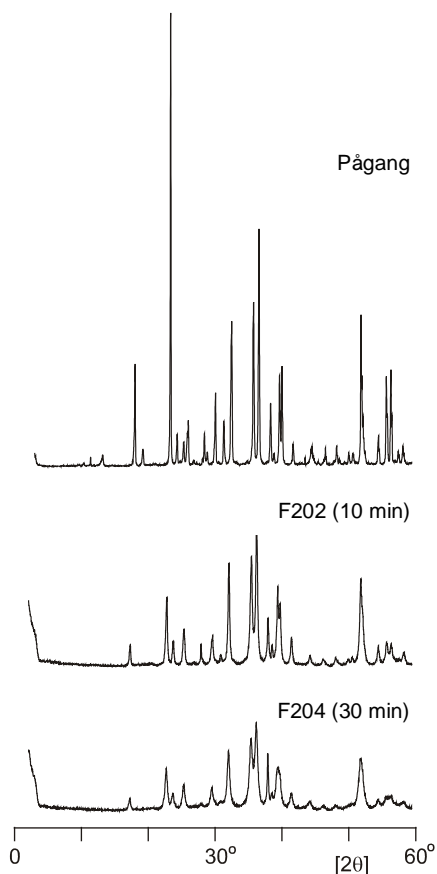
I tillegg til å være en funksjon av den primære maleffekten (dvs. dannelse av nye partikkelbrudd) vil kornstørrelsesfordeling og spesifikk overflate også være avhengig av sekundære prosesser som aggregering og agglomerering (Juhász 1974). Figur 1 illustrerer hvordan materialet som har vært utsatt for 10 min mekanisk aktivering (F202) inneholder en høyere andel finstoff enn materialet som har blitt aktivert i 30 min (B204). Under tørrmaling er det vanlig å observere en reduksjon i finstoffandel når maleprosessen drives videre utover den initielle malefasen. Dette fenomenet forklares vanligvis som et resultat av aggregering og agglomerering av strukturelt modifiserte partikler. Dette stemmer bra med den observerte utviklingen av spesifikt overflateareal vist i figur 2. Overflatearealet viser her en rask initiell økning før det når sin høyeste verdi ( $5,08 \text{ m}^2/\text{g}$ ) etter 10 min mekanisk aktivering. Videre maling resulterer ikke i noen økning i spesifikt overflateareal. Tvert imot, en liten, men signifikant, reduksjon gjør seg gjeldene. Lignende observasjoner ble gjort av Kleiv og Thornhill (2006) som benyttet samme maleutstyr og prosedyre for å studere mekanisk aktivering av rene forsterittkrystaller. Her ble agglomerering direkte påvist ved hjelp av elektronmikroskopi (SEM).



Figur 1. Kornstørrelsesfordeling for pågangsmaterialet og utvalgte aktiverte produkter.



Figur 2. Spesifikt overflateareal ( $S_{BET}$ ) som funksjon av maletid ( $t_M$ ).



**Figur 3.** XRD-diffraktogram for pågangsmaterialet og utvalgte aktiverte produkter.

Resultatene fra XRD-analysen (fig. 3) viser en betydelig reduksjon i høyden til diffraksjonstoppene (*peak height*) og i signal/støy-forholdet med økende maletid. Denne reduksjonen følges av en generell økning i diffraksjonstoppenes bredde (*peak width*). Dette indikerer en strukturell modifisering og delvis amorfisering av krystallgitteret, selv om tilstedeværelsen av små men signifikante diffraksjonstopper selv etter 30 min intens aktivering samtidig vitner om den høye malemotstanden til olivinpartikler i submikrometer-området.

### 3.2 Aktivering og karbonatisering

Mengden CO<sub>2</sub> som ble bundet av olivinmaterialet under karbonatiseringsforsøkene ble beregnet fra LECO-analysen på total karbon. Antall mol CO<sub>2</sub> bundet i løpet av eksponeringstiden er således gitt ved:



$$n_{CO_2,seq} = \frac{m_f \cdot x_{C,p}}{M_C - M_{CO_2} \cdot x_{C,p}} \quad (2)$$

der  $m_f$  er massen av olivinpågang,  $x_{C,p}$  er konsentrasjonen (masseandel) av karbon i produktet, mens  $M_C$  og  $M_{CO_2}$  er de respektive atom og molekylmassene til C og  $CO_2$  (dvs.  $M_C = 12,00$  g/mol og  $M_{CO_2} = 44,0$  g/mol).

Den relative andelen  $CO_2$  bundet i løpet av eksponeringstiden kan defineres som:

$$\gamma_{CO_2} = \frac{n_{CO_2,seq}}{n_{CO_2,ini}} \quad (3)$$

der  $n_{CO_2,ini}$  representerer antall mol  $CO_2$  opprinnelig til stede i gassfasen ved starten av eksponeringen. Denne størrelsen ble beregnet fra trykk-, volum- og temperaturdata ved hjelp av den Ideelle Gassloven og ble funnet å være 0,033 mol.

Det kan også være hensiktsmessig å definere et forholdstall som beskriver graden av karbonatisering av det opprinnelige faste pågangsmaterialet. Dette kompliseres imidlertid av at det faste materialet i motsetning til gassen ikke er en ren homogen fase. Karbonatiseringspotensialet lar seg derfor vanskelig beregne eksakt. For enkelhets skyld er det her antatt at kun magnesium bidrar til  $CO_2$ -binding og at reaksjonsstøkiometrien kan beskrives av ligning 1. Karbonatiseringsgraden for fast materiale kan da defineres som:

$$\gamma_{Mg} = \frac{n_{CO_2,seq}}{n_{Mg,f}} \quad (4)$$

der  $n_{Mg,f}$  representerer det totale antall mol magnesium i pågangen. Basert på magnesiumkonsentrasjonen som ble funnet fra XRF-analysen ble denne størrelsen beregnet til 0,0125 mol magnesium pr. gram olivinpågang.

Resultatene fra LECO-analysen på total karbon er gitt i tabell 3 sammen med korresponderende verdier for  $\gamma_{CO_2}$  og  $\gamma_{Mg}$ . Tabell 3 viser tydelig hvordan eksponering under aktivering resulterer i en betydelig økning i mengden bundet  $CO_2$  sammenliknet med forsøkene der mekanisk aktivering benyttes som et forbehandlingstrinn. I sistnevnte tilfelle lå karbonkonsentrasjonen i produktet under deteksjonsgrensen i én av tre replikater selv etter 30 min aktivering etterfulgt av 30 min  $CO_2$  eksponering.

Både eksponering uten forutgående mekanisk aktivering (F209) og eksponering etter 60 min relaksasjon (F211) resulterte ikke overraskende også i karbonkonsentrasjoner under deteksjonsgrensen. Dette står i skarp kontrast til

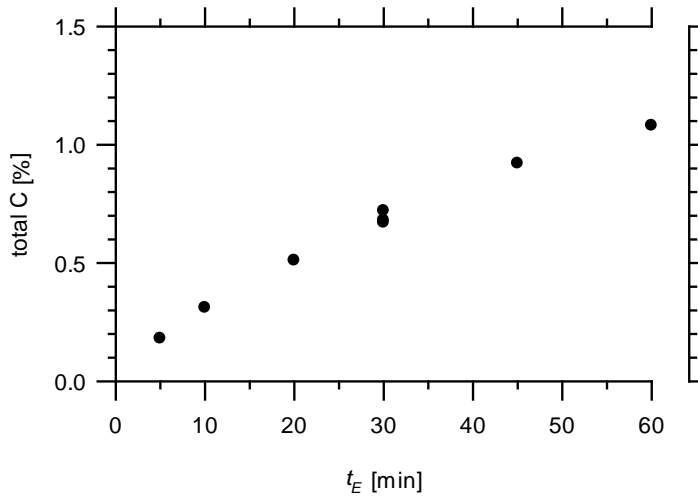
resultatene som ble oppnådd for 30 min eksponering under aktivering. Her resulterte forsøk i triplikat i en gjennomsnittskonsentrasjon på  $0,69 \pm 0,026\%$  total karbon i produktet, hvilket tilsvarer  $\gamma_{\text{CO}_2} = 36 \pm 1,4\%$ . Ettersom tilført energi (maletiden) er den samme må denne økningen i karboniseringsgraden kunne tilskrives den transiente økningen i overflatereaktivitet som kun opptrer mens aktiveringen pågår. De mekanisk induserte transiente energitilstandene ser således ut til å være betydelig høyere enn de residuale forhøyede energitilstandene i de endelige produktene. Resultatene viser tydelig hvordan eksponering under mekanisk aktivering kan resultere i en langt mer effektiv karboniseringsprosess enn der de to operasjonene benyttes sekvensielt.

**Tabell 3.** Resultater fra karboniseringsforsøkene. Tabellen viser den totale karbonkonsentrasjonen i produktene og de korresponderende verdiene for  $\gamma_{\text{CO}_2}$  og  $\gamma_{\text{Mg}}$ .

Forsøk	Eksponering for CO <sub>2</sub>	$t_E$ [min]	$x_{C,p}$ [%]	$\gamma_{\text{CO}_2}$ [%]	$\gamma_{\text{Mg}}$ [%]
F209	UTEN MA <sup>a</sup>	30	<0,07	<3,6	<0,47
F138	ETTER MA (umiddelbart)	30	0,10	5,1	0,67
F210	ETTER MA (umiddelbart)	30	<0,07	<3,6	<0,47
F220	ETTER MA (umiddelbart)	30	0,08	4,1	0,54
F211	ETTER MA (60 min pause)	30	<0,07	<3,6	<0,47
F221	UNDER MA	5	0,18	9,2	1,2
F212	UNDER MA	10	0,31	16	2,1
F222	UNDER MA	20	0,51	26	3,5
F137	UNDER MA	30	0,68	35	4,7
F139	UNDER MA	30	0,67	35	4,6
F213	UNDER MA	30	0,72	37	4,9
F226	UNDER MA	45	0,92	48	6,4
F227	UNDER MA	60	1,08	57	7,5

<sup>a</sup> Mekanisk aktivering.

I forsøkene der pågangen eksponeres for CO<sub>2</sub> under mekanisk aktivering øker den totale karbonkonsentrasjonen i produktene med maletiden og når en verdi på 1,08% etter 60 min (fig. 4). Dette tilsvarer karbonisering av 0,82 g CO<sub>2</sub>, hvilket gir  $\gamma_{\text{CO}_2} = 57\%$  og  $\gamma_{\text{Mg}} = 7,5\%$ . Forholdet mellom  $\gamma_{\text{CO}_2}$  og  $\gamma_{\text{Mg}}$  kan manipuleres ved å endre balansen mellom gass og fast stoff i pågangen. Videre forsøk er påkrevd for å optimalisere karboniseringsgraden pr. tidsenhet, energienhet og volumenhet.



**Figur 4.** Konsentrasjon av total karbon i produkt som funksjon av maletid (eksponeringstid) for forsøk med eksponering under mekanisk aktivering.

#### 4. KONKLUSJONER

Resultatene som presenteres i denne artikkelen demonstrerer hvordan man kan oppnå en betydelig økning i karboniseringsraten når magnesiumrik olivin eksponeres for CO<sub>2</sub> gass *under* mekanisk aktivering sammenliknet med tilsvarende eksponering *etter* mekanisk aktivering. Resultatene er interessante ettersom de indikerer hvordan signifikant forhøyede reaksjonsrater kan oppnås ved lavt trykk og lav temperatur.

#### REFERANSER

Baláz, P., 2000: Extractive Metallurgy of Activated Minerals. Elsevier, Amsterdam, Netherlands

Baláz, P., 2003: Mechanical activation in hydrometallurgy. International Journal of Mineral Processing, 72, 341-354

Haug, T. A., 2010: Dissolution and Carbonation of mechanically activated olivine. Ph.D.-thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), ISBN 978-82-1960-0.

Haug, T. A., Kleiv, R.A., Munz, I.A., 2010: Investigating dissolution of mechanically activated olivine for carbonation purposes. Applied Geochemistry 25, 1547-1563

Huijgen, W.J.J. & Comans, R.N.J., 2003: Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation – Literature review. ECN-C--03-016

Huijgen, W.J.J. & Comans, R.N.J., 2005: Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation – Literature review. ECN-C--05-022, ECN Clean Fossil Fuels 37

Juhász, A.Z., 1974: Mechanochemical activation of silicate minerals by dry fine grinding. *Aufbereitungs-Technik* 10, 558-562

Kalinkin, A.M., Kalinkina, E.V. & Makarov, V.N., 2003: Mechanical activation of natural titanite and its influence on the mineral decomposition. *International Journal of Mineral Processing*, 69, 143-155

Kalinkina, E.V., Kalinkin, A.M., Forsling, A.M. & Makarov, V.N., 2001a: Sorption of atmospheric carbon dioxide and structural changes of Ca and Mg silicates during grinding: I. Diopside. *International Journal of Mineral Processing*, 61, 273-288

Kalinkina, E.V., Kalinkin, A.M., Forsling, A.M. & Makarov, V.N., 2001b: Sorption of atmospheric carbon dioxide and structural changes of Ca and Mg silicates during grinding: II. Enstatite, åkermanite and wollastonite. *International Journal of Mineral Processing*, 61, 289-299

Kleiv, R.A. and Thornhill, M., 2006: Mechanical activation of olivine. *Minerals Engineering*, 19, 340-347

Lackner, K.S., Wendt, C.H., Butt, D.P., Joyce, E.L.jr. & Sharp, D.H., 1995: Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy* 20, 1153-1170

O'Connor, W.K., Dahlin, D.C., Nilsen, D.N., Rush, G.E., Walters, R.P. & Turner, P.C., 2001: Carbon dioxide sequestration by direct mineral carbonation: results from recent studies and current status. In *Proceedings from the 1st National Conference on Carbon Sequestration*, May 14-17 2001, Washington DC

Park, A-H.A. and Fan, L-S., 2004: CO<sub>2</sub> mineral sequestration: physical activated dissolution of serpentine and pH swing process. *Chemical Engineering Science*, 59, 5241-5247

Osland, R., 1998: Modelling of variations in Norwegian olivine deposits – Causes of variations and estimation of key quality factors. Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, ISBN 82-471-0192-0

Sipilä, J., Teir, S. and Zevenhoven R., 2008: Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Literature review update 2005-2007 (2008 – 1). Åbo Academy University, Faculty of Technology, Heat Engineering Laboratory.