

# **A szilikátok karbonátosodásának szerepe az ipari tevékenységből származó széndioxid (CO<sub>2</sub>) megkötésében**

**CO<sub>2</sub> megkötés bányászati hulladékban**

**Irodalmi áttekintés**

**Készítette: Vaszita Emese**

**2012**

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

## **A szilikátok karbonátosodásának szerepe az ipari tevékenységből származó széndioxid (CO<sub>2</sub>) megkötésében**

### **Bevezetés**

Az emberi tevékenység megzavarja bolygónk természetes szénkörforgását. Az ipari forradalom előtt, körülbelül 10 000 évre visszamenőleg a szénkörforgás, mely magában foglalja a szén kicserélődését a geoszféra és bioszféra, valamint az óceánok és az atmoszféra között, alacsonyan tartotta a CO<sub>2</sub> koncentrációját az atmoszférában.

Az elmúlt 250 év alatt viszont, a nagy mennyiségű fosszilis energiahordozó (kőszén, kőolaj, földgáz) elégetése, az áramfejlesztés, a fűtés, az ipar és a közlekedés, folyamatosan emelte a CO<sub>2</sub> mennyiségét a légkörben (CO<sub>2</sub>GeoNet 2009).

Az emberiség által termelt CO<sub>2</sub>-nak körülbelül a felét nyelik el a növények, illetve oldják fel az óceánok – ez utóbbi a tengervíz savasodásához vezet, és potenciálisan negatív hatást gyakorol a tengeri növényekre és állatokra. A maradék az atmoszférában halmozódik fel, ahol hozzájárul a klímaváltozáshoz, mivel a CO<sub>2</sub> egy olyan üvegházhatású gáz, amely elnyeli a Nap melegének egy részét, és a földfelszín felmelegedéséhez vezet. Az üvegházhatás csökkentésére nemzetközi szintű intézkedések léptek életbe (CO<sub>2</sub>GeoNet (2009)). 1997-ben a Kyotoi Egyezmény keretében megállapodás született a fejlett országok CO<sub>2</sub> emissziójának csökkentéséről. Az egyezmény keretében az azt aláíró 38 ország vállalta, hogy az üvegházhatású gázok kibocsátását 2012-re visszaszorítja a fejlett piacgazdasági rendszerrel rendelkező országok esetében az 1990-es évek szintjére (CO<sub>2</sub>GeoNet (2009)). Az alternatív energiaforrások bevezetése és egyéb intézkedések mellett döntő szerepet kapott a klímaváltozás és az óceánok savasodásának mérséklésében a Carbon Capture and Storage CCS (magyarul CO<sub>2</sub> leválasztás és tárolás) intézkedés (IPPC, 2005), mely a CO<sub>2</sub> geológiai korokon át történő tárolására, kőzetbe sajtolására keres hosszú távú megoldást. A CCS magában foglalja a CO<sub>2</sub> leválasztását a kőszén és gáztüzelésű erőművekben, illetve ipari létesítményekben (acél- és cementgyártás, kőolajfinomítás, stb.); csővezetéken vagy hajón történő szállítását a tárolási helyre és egy szénhidrogénkúton keresztül a megfelelő geológiai formációba való injektálását a hosszú távú tárolás céljából.

Ennek kapcsán több kutatás-fejlesztési projekt jött létre, amelyek megvizsgálták, és bizonyították, vagy jelenleg is kutatják különböző geológiai környezet alkalmazhatóságát CO<sub>2</sub> tárolására. Fencsik és munkatársai (2007), megvizsgálták az ipari tevékenységből származó szén-dioxid hosszú távú elhelyezésének lehetőségeit Magyarországon. A szén-dioxid befogadására alkalmas földtani közeg tárolókapacitásának becslését Fencsik és munkatársai (2007) a letermelt szénhidrogén telepek, a széntelepek és a sósvíz-tartalmú rétegekre végezték el, megfelelően figyelembe véve a fizikai, kőzetfizikai paramétereket és a nyilvánosan is hozzáférhető földtani – geofizikai információkat.

Az ipari kibocsátásból származó légköri CO<sub>2</sub> megkötését/elnyelését (CO<sub>2</sub>sequestration) természetes folyamatok, kémiai reakciók is segíthetik, amelyek eredményeként ártalmatlan, sőt hasznosítható anyag keletkezik. A világon több kutatócsoport is foglalkozik e folyamatok vizsgálatával, valamint hasznosítási lehetőségével (Huijgen és Comans 2003, 2005; Siobhan et al (2006); Sipilä et al. 2008; Dipple et al, 2009; Ferrini et al. 2009; Renforth et al, 2009, 2011, 2012; Wilson et al, 2009, 2010)

### **A CO<sub>2</sub> megkötés (angolul: CO<sub>2</sub>sequestration)**

A CO<sub>2</sub> megkötés az ipari kibocsátásból származó CO<sub>2</sub> légkörből való kivonását és stabil formában történő megkötését, tárolását jelenti természetesen végbemenő vagy felgyorsított kémiai, geokémiai, biológiai, biokémiai vagy akár fizikai folyamatok eredményeképpen. Az

ipari kibocsátásból származó légköri CO<sub>2</sub> elnyelésének/kivonásának több módja ismeretes, mint például: a) geológiai formációban tárolás, b) biológiai megkötés, c) óceánok általi megkötés, d) szilikátos kőzetek mállása (karbonátosodása) általi megkötés (IPPC, 2005).

- a) Geológiai formációban tárolás. A CO<sub>2</sub> geológiai korokon át történő tárolására, kőzetbe sajtolására, az alábbi geológiai környezetek alkalmasak: mélyóceáni medencék aljzata, sódómok, kimerült kőolaj és földgáztelepek, gazdaságosan már nem hasznosítható széntelepek, mélyen fekvő sós vizes rétegek, bazaltos illetve ultrabázisos kőzetek.
- b) Biológiai megkötés. A zöld növények, algák és cianobaktériumok („kékalgák”) képesek a napenergia segítségével a szén-dioxidot szerves anyag formájában testükbe beépíteni, s cserébe oxigént juttatni környezetükbe.
- c) Óceánok általi megkötés főleg fizikai és biológiai folyamatoknak köszönhető. A mély óceánban, a szén főleg oldott karbonátként (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) és hidrogén karbonát ionként (HCO<sup>3-</sup>) fordul elő. A fitoplanktonok által felvett széndioxid visszajut a légkörbe, de sok közülük süllyedő részecskeként a mélytengeri üledékbe kerül.
- d) Szilikátos kőzetek mállása (karbonátosodása) (angolul: mineral carbonation) általi megkötés az egyetlen olyan CO<sub>2</sub> kivonási folyamat, mely kémiaiilag stabil formában köti meg a CO<sub>2</sub>-t. A karbonátosodás a CO<sub>2</sub> és a magnézium, valamint kalcium tartalmú szilikátok közötti reakció, melynek eredményeként geológiailag stabil, környezeti szempontból ártalmatlan karbonátok (kalcit és magnezit) keletkeznek, melyek stabil, inert és szilárd formában tárolják a CO<sub>2</sub>-ot.

### **Karbonátosodás (angolul: mineral carbonation) a CO<sub>2</sub> megkötés hatékony folyamata**

A karbonátosodás természetes folyamat, a szilikátok hidrotermális és fizikai mállási folyamatának része, mely a CO<sub>2</sub> megkötés leghatékonyabb módja. A karbonátosodás a CO<sub>2</sub> és a magnézium-, valamint kalcium tartalmú szilikátok közötti reakció, melynek eredményeként geológiailag stabil, környezeti szempontból ártalmatlan karbonátok (kalcit és magnezit) keletkeznek, melyek stabil, inert és szilárd formában tárolják a CO<sub>2</sub>-ot. A folyamat során a szilikáttartalmú kőzetek fém kationja (például a Mg<sup>2+</sup>, mely a legelterjedtebb szilikát alkotóelem), stabil karbonát formájában köti meg a CO<sub>2</sub>-t. Például a diopszid (a kontakt metamorfizmus jellegzetes piroxén ásványa) Ca<sup>2+</sup> és Mg<sup>2+</sup> ionjai hasonló mechanizmussal kötik meg a CO<sub>2</sub>-t {CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> + 2CO<sub>2</sub> - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 2 SiO<sub>2</sub>}. A szerpentinít szilikátcsoport ásványai jelentős Mg<sup>2+</sup> ionforrást jelentenek a légköri CO<sub>2</sub> többlet elnyelésére.

Négymilliárd évvel ezelőtt hatékonyan működött a „globális planetáris termosztát”. Az akkori atmoszférában a szén-dioxid koncentrációja a mai értéknek talán tízezerszerese is lehetett, amit aztán csapadékon keresztül a szilikátos kőzetek mállása (karbonátosodása) fokozatosan csökkentett. Ez a folyamat a hőmérséklettel egyenes arányban működött, így ha túl sok szén-dioxidot vont ki a légkörből, s ezzel az üvegház hatás csökkentése lehülésre vezetett, a folyamat lelassult vagy leállt (Vida, 2009). Az intenzív vulkáni tevékenységgel a légkör szén-dioxid koncentrációja (s ezzel az üvegházhatás) ismét fokozódhatott. Ebbe a folyamatba kapcsolódott be az élővilág is a fotoszintézisen keresztül. A zöld növények, algák és cianobaktériumok („kékalgák”) a napenergia segítségével a szén-dioxidot szerves anyag formájában testükbe építették, s cserébe oxigént juttattak környezetükbe. Ez a szerves anyag szolgált táplálékként közvetve vagy közvetlenül az állatvilág számára, miáltal a szerves vegyületek zöme oxidálódva (légzés) szén-dioxidként ismét kijutott a környezetbe, felhasználva a növények által termelt oxigént. A természetes folyamatok azonban lassúak, néhány millió évet vesznek igénybe. Kutatók számításai szerint IPCC, 2005; Wilson, 2009) a

karbonátosodás felgyorsításával globális szinten megköthető a fölösleges CO<sub>2</sub> mennyiség a légkörből.

A karbonátosodásra hajlamos legelterjedtebb két szilikát ásvány a szerpentin és a forszterit olivin. Elméletileg, a Földön előforduló szerpentin kőzetek (többnyire szerpentinásványokat tartalmazó metamorf kőzet) lecsökkenthetnék a világon ismert fosszilis energiahordozó mennyiség általi CO<sub>2</sub> kibocsátás felesleget, megakadályozva a klímaváltozás okozta veszélyeket. Kutatják a természetesen előforduló ultramafikus kőzetek karbonátosodási mechanizmusát (Dipple et al, 2009; Wilson et al, 2009, 2010), valamint az ultramafikus kőzetekhez hasonló ásványtani összetételű és tulajdonságú ipari hulladékok és melléktermékek CO<sub>2</sub> megkötőképességét (Renforth et al, 2009, 2011, 2012; Yadav, 2010), valamint tanulmányozzák a folyamat ipari szintű felgyorsítását és alkalmazását (Huijgen és Comans 2003, 2005; Ferrini et al. 2009; Sipilä et al. 2008).

A szén 90%-a a Földön karbonátokban van megkötve (Sudquist 1993). Kutatók számításai szerint, egy millió éves időskálán, ezekben a karbonátokban kötődik meg az antropogén eredetű CO<sub>2</sub> legnagyobb része (Kump et al. 2000). Seifritz (1990) és Lackner (2003) rámutattak arra, hogy a karbonát ásványok biztonságosan és hatékonyan tárolják a CO<sub>2</sub>-ot. Továbbá, az antropogén eredetű CO<sub>2</sub> karbonátokba való beépülése nyújtja a legnagyobb tárolási kapacitást és tárolja leghosszabb ideig a CO<sub>2</sub>-t az eddig javasolt szénelnyelési és tárolási módszerek közül (Lackner 2003). A szakirodalomban Seifritz 1990 javasolta először a karbonátosodást CO<sub>2</sub> megkötésére. Azóta, a kutatások olyan gyors, nagyléptékű módszerek fejlesztésére irányultak, amelyek képesek az ipari pontforrások CO<sub>2</sub> kibocsátásának megkötésére és tárolására (Huijgen és Comans 2003, 2005; IPCC 2005; Sipilä et al. 2008). Az eddig kifejlesztett módszerek legnagyobb része a természetben előforduló szilikátok (forzterit [Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>], szerpentin-csoport ásványai [Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>] és a wollastonit [CaSiO<sub>3</sub>] karbonátosodási reakciójában alapulnak, melynek eredményeként karbonátok (magnezit ([MgCO<sub>3</sub>] és kalcit [CaCO<sub>3</sub>]) keletkeznek. A természetben, légköri nyomáson és hőmérsékleten, a szilikátok mállása eredményeként karbonátok csapódnak ki. Ez a legszignifikánsabb reakciója a CO<sub>2</sub> atmoszféra és litoszféra közötti geokémiai kicserélődésének (Schwartzman and Volk 1989; Berner 1990). A folyamat azonban lassú, felgyorsításához laboratóriumban előkezelik a szilikátokat magas hőmérsékleten, vagy kivonják a Mg-ot és a Ca-ot ezekből az ásványokból. Továbbá, ipari léptékű karbonátosodási reaktorokban nagy hőmérsékletet és nyomást alkalmaznak (Sipilä et al. 2008) a folyamat néhány órás időtartamra való felgyorsításához. Tehát a szén mineralizációjának ez a megközelítése költséges és energiaigényes (Lackner 2003; Sipilä et al. 2008).

Az utóbbi évek kutatásai az alacsony hőmérsékleten és nyomáson történő karbonátosodás természetes folyamatokkal való elősegítése felé irányultak. Schuiling és Krijgsman (2006) javaslata szerint az olivin szilikátcsoport ásványai savas talajba keverve tápanyagot juttatnak a talajba, ugyanakkor semlegesítik a savas talajt a légköri CO<sub>2</sub> hatására történő karbonátosodással, melynek eredményeként karbonátok képződnek.

Ferrini et al. (2009) olyan ipari folyamatot fejlesztettek ki, mely a légköri CO<sub>2</sub> és a sóatlanító üzemekből és olajmezőkről származó nagy Mg tartalmú szennyvíz közötti reakció eredményeként, alacsony hőmérsékleten kicsapott karbonát, a nesquehonit [MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O] formájában, gyorsan és hatékonyan tárolja az antropogén eredetű CO<sub>2</sub>-t. Kelemen és Matter (2008) számításai szerint a karbonátosodás felgyorsítása az omani ofiolitösszlet szilikátjainak természetes mállása során, évente 1 Gt CO<sub>2</sub>-t nyelne/fogyasztana el csak az Omani peridotit rétegek tekintetében. Az eddigi kutatások azt mutatják, hogy a szilikátok in situ mállása bányászati hulladékokban nagy mennyiségben köti meg a CO<sub>2</sub>-ot.

### *CO<sub>2</sub> megkötés bányászati hulladékban*

A CO<sub>2</sub> megkötésére legalkalmasabb bányászati meddők általában, de nem kizárólag, az alábbi bázikus és ultrabázikus telepekhez és anyaközetekhez kötődnek: dunit, szerpentin, valamint gabbro-norit kőzetekben keletkezett Cu-Ni-Pt fém előfordulások; szerpentinben található krizotil, gyémánttartalmú kimberlit kürtő, podiform kromittelepek réteges mafikus intrúzióban Wilson (2009). A CO<sub>2</sub> hatékony megkötésének ásványtanilag egyetlen feltétele a nagy Mg tartalmú szilikátásványok jelenléte. Bár a savképző szulfidásványok kismértékű előfordulása további feltétel lehetne, Power et al (2007) rámutattak arra, hogy a savgeneráló anyagok, valamint egy mikrobiológiai katalizátor felgyorsíthatja a szerpentin ásványok mállását semleges-bázikus környezetben (ezen a pH-án a legtöbb karbonát stabil). Szerpentin- és olivintartalmú meddőanyag keletkezik a nickel, gyémánt, platina és krizotil (azbeszt természetes előfordulása) bányászat során. Globális szinten e tartalékok bányászata évente 100 millió tonna szenet kötne meg. A szerpentin és olivintartalmú bányászati meddők karbonátosodási folyamatának széleskörű alkalmazásával jelentősen lecsökkenne a CO<sub>2</sub> kibocsátás globális szinten (Wilson (2009).

Siobhan et al (2006) bizonyították az atmoszferikus CO<sub>2</sub> megkötését kanadai és ausztráliai krizotil tartalmú bányászati meddőben. A hulladék mállása eredményeképpen víztartalmú magnézium-hidroxid-karbonát keletkezik. A folyamat során a kioldott magnézium reagál az esővízben oldott CO<sub>2</sub>-al, a karbonátok pedig kicsapódnak a meddő felszínén a pórusokban tárolt víz elpárolgásával. Ércfeldolgozási technológia meddője esetén a karbonátosodási reakció felgyorsul, mivel a nyersanyag őrlése következtében a meddőanyag reaktív felszíne nagymértékben nő, ezért sok helyen gyakori és látható ércfeldolgozási meddő felületén kicsapott karbonátréteg (Wilson, 2009). Siobhan et al (2006) röntgendiffrakciós vizsgálatai igazolták, hogy a víztartalmú magnézium-hidroxid-karbonátok (nesquehonit, dypingit, hidromagnezit és lanszfordit) kristálytani szerkezete megköti a CO<sub>2</sub>-ot. A víztartalmú magnézium-hidroxid-karbonát modális előfordulását a meddőanyagban röntgendiffrakciós kvantitatív fázisanalízissel határozták meg.

A megkötött CO<sub>2</sub> eredetét a másodlagos ásványokban kimutatott szén lenyomat vizsgálatával (forrása) állapítják meg. A szén lenyomat vizsgálat egyik módja a stabil szénizotóp, illetve radiokarbon izotóp vizsgálat (például a  $\delta^{13}C$ ). Radiokarbon izotóp adatok segítségével Wilson et al, (2009), valamint Dipple et al, (2009) igazolták, hogy az általuk vizsgált bányászati, illetve ércfeldolgozási meddőben megkötött szén a jelenkori atmoszférából származik. Wilson et al (2010) ércfeldolgozási zagyban vizsgálták a szénmegkötést befolyásoló tényezőket, különös tekintettel a folyamat stabilizotóp geokémiai jellemzésére. Megállapították, hogy a legköri CO<sub>2</sub> meddő általi megkötésekor izotóp egyensúlyhiány lép fel, amelyből arra következtettek, hogy a meddőzagy általi CO<sub>2</sub> felvétel sebessége csökkentheti a CO<sub>2</sub> megkötést a kicsapott csapadékban. Vagyis a bányameddő/ércfeldolgozási meddő szénmegkötése függ a felvett CO<sub>2</sub> mennyiségtől. A szénmegkötés felgyorsítható a zagyban oldott CO<sub>2</sub> parciális nyomásának növelésével vagy olyan vegyi adalékanyagok használatával, amelyek elősegítik a CO<sub>2</sub> gáz vizes oldatba vitelét.

### *Szilikát tartalmú hulladékok CO<sub>2</sub> megkötésére*

Kutatások igazolták, hogy Mg és Ca szilikáttartalmú hulladékok is képesek a légköri CO<sub>2</sub> hosszú távú tárolására (Yadav et al., 2010; Renforth et al., 2011). Az eredmények szerint egy adott anyag szénmegkötőképessége függ a nem karbonátosodott kétvegyértékű kationok (főleg Ca és Mg) mennyiségétől és reakcióképességétől. Például az amorf üveghez hasonlóan, a nagyolvasztói és az acélműi salak MgO+CaO tartalma > 50%. Renforth et al., (2009) kimutatták, hogy szobahőmérsékleten és parciális CO<sub>2</sub> nyomáson ezek a hulladékok elnyelik a CO<sub>2</sub>-t. Adalékanyagok alkalmazásával elősegíthető a légköri CO<sub>2</sub> karbonátosodás általi megkötése egyes hulladékokban. Például Renforth et al (2012) az ajkai vörösiszapkatasztrófa

során lúgos zaggal elárasztott felszíni vízbe adagolt gipsz hatását vizsgálták. A gipsz adagolásával a zagyba juttatott  $\text{Ca}^{2+}$  ionok helyettesítik a vörösiszapzagy  $\text{Na}^+$  ionjait, ugyanakkor pufferolják a vörösiszap által létrehozott nagyon lúgos közeget. A hiperlúgos környezetben a légköri  $\text{CO}_2$  reagál a zagy hidroxil ionjaival ( $\text{NaOH}$ ), melynek eredményeképpen bikarbonát keletkezik. Tehát a vörösiszapos zagyba adagolt gipsz szabad  $\text{Ca}^{2+}$  ionokat biztosít, mely elősegíti a kalcium karbonát kicsapását. Mayes et al, 2009 szerint a karbonátosodási folyamat olyan hiperlúgos csurgalékokra jellemző, amelyek például az acélműi salak és erőműi pernyék mállási termékeit (portlandit) tartalmazzák. Mivel a vörösiszapzagy nem tartalmaz oldott  $\text{Ca}^{2+}$  és  $\text{Mg}^{2+}$  ionokat, a gipsz adagolása a vörösiszapba elősegíti a karbonátosodás általi légköri  $\text{CO}_2$  megkötőképességét (Renforth et al, 2012). A karbonátokban megkötött  $\text{CO}_2$  eredetét stabilizotóp geokémiai vizsgálatokkal igazolták.

## Következtetés

Az ipar által a levegőbe kibocsátott szén-dioxid mennyiségének csökkentése globális környezetvédelmi feladat. Amennyiben az üvegházhatású gázok, köztük a szén-dioxid mennyisége a légkörben megnövekszik, az infravörös sugárzás csapdázódása jelentősebbé válik, ami globális hőmérséklet-emelkedéshez vezet. A szén-dioxid emisszió csökkenésére több lehetőség kínálkozik, mint például az energiafelhasználás hatékonyságának növelése, atomenergia, vízi-, illetve alternatív energiatermelés, vagy a szén-dioxid földalatti elhelyezése (geológiai formációban tárolás), valamint a  $\text{CO}_2$  biológiai megkötése, óceánok általi megkötése, szilikátos kőzetek mállása (karbonátosodása) általi megkötése.

A szilikátos kőzetek mállása (karbonátosodása) általi megkötés az egyetlen olyan  $\text{CO}_2$  kivonási folyamat, mely stabil, inert és szilárd formában (kalcit és magnezit) tárolja a  $\text{CO}_2$ -ot. A karbonátosodásra hajlamos legelterjedtebb két szilikát ásvány a szerpentin és a forszterit olivin. A dolgozatban áttekintést adunk azokról a kutatásokról, amelyek a természetesen előforduló ultramafikus kőzetek karbonátosodási mechanizmusát valamint az ultramafikus kőzetekhez hasonló ásványtani összetételű és tulajdonságú ipari hulladékok és melléktermékek  $\text{CO}_2$  megkötőképességét, valamint a folyamat ipari szintű felgyorsítását és alkalmazását vizsgálják. Kitérünk a bányászati hulladékok  $\text{CO}_2$  megkötőképességének eredményeit ismertető legújabb kutatásokra is.

## Irodalom:

Berner, RA (1990) Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time. *Science*, 249, 1382-1386.

CO2GeoNet (2009) Mit jelent valójában a  $\text{CO}_2$  geológiai tárolása, Well-Press kiadó Kft (Magyar változat), [http://www.co2geonet.com/UserFiles/file/Rowena/co2\\_Hung\\_final.pdf](http://www.co2geonet.com/UserFiles/file/Rowena/co2_Hung_final.pdf), Megtekintés 2012. június 14.

Dipple, GM; Wilson, SA; Barker, S; Thom, JM; Raudsepp, M; Power, I; Southam, G; Fallon, SJ (2009) Carbon sequestration in ultramafic mine tailings. In *Proceedings of the 10th Biennial Meeting of the SGA, Townsville, Queensland, Australia*; Society for Geology Applied to Mineral Deposits pp 762-764.

Fancsik Tamas, Torok Kalman, Torokne Sinka Mariann; Szabo Csaba; Lenkey Laszlo (2007) Az ipari tevékenységből származó szén-dioxid hosszú távú elhelyezésének lehetőségei Magyarországon, [http://www2.mta.hu/fileadmin/2007/11/MeH-MTA%20IV\\_89-118.pdf](http://www2.mta.hu/fileadmin/2007/11/MeH-MTA%20IV_89-118.pdf), Megtekintés 2012. június 14.

- Ferrini, V, De Vito, C, and Mignardi, S (2009) Synthesis of nesquehonite by reaction of gaseous CO<sub>2</sub> with Mg chloride solution: Its potential role in the sequestration of carbon dioxide. *Journal of Hazardous Materials*, 168, 832-837.
- Huijgen, WJJ and Comans, RNJ (2005) Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: Literature review update 2003-2004. Energy Research Centre of the Netherlands, Report ECN-C-05-022.
- Huijgen, WJJ and Comans, RNJ (2003) Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: Literature review. Energy Research Centre of the Netherlands, Report ECN-C-03-016.
- IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- Kelemen, PB and Matter, J (2008) In situ carbonation of peridotite for CO<sub>2</sub> storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 105, 17295-17300.
- Kump, LR, Brantley, SL, and Arthur, MA (2000). Chemical weathering, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 611-667.
- Lackner, KS (2003) Climate change: A guide to CO<sub>2</sub> sequestration. *Science*, 300, 1677-1678.
- Mayes WM, Batty LC, Younger PL, Jarvis AP, Kõiv M, Vohla C, et al. (2009) Wetland treatment at extremes of pH — a review. *Sci Total Environ* 407:3944–57.
- Power, IM; Wilson, SA; Thom, J; Dipple, GM; Southam, . (2007) Biologically induced mineralization of dypingite by cyanobacteria from an alkaline wetland near Atlin, British Columbia, Canada. *Geochem. Trans.* 8, 13.
- Renforth P, Manning DAC, Lopez-Capel E. (2009) Carbonate precipitation in artificial soils as a sink for atmospheric carbon dioxide. *Appl Geochem* 24:1757–64.
- Renforth P, Washbourne CL, Taylder J, Manning DAC. (2011) Silicate production and availability for mineral carbonation. *Environ Sci Technol* 45:2035–41.
- P. Renforth, WM Mayes, AP Jarvis, IT Burke, DAC Manning, K Gruiz (2012) Contaminant mobility and carbon sequestration downstream of the Ajka (Hungary) red mud spill: The effects of gypsum dosing, *Science of the Total Environment* 421–422 (2012) 253–259
- Schwartzman, DW.and Volk, T (1989) Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth. *Nature*, 340, 457-460.
- Seifritz, W (1990) CO<sub>2</sub> disposal by means of silicates. *Nature*, 345, 486.

Siobhan A. Wilson, Mati Raudsepp and Gregory M. Dipple (2006) Verifying and quantifying carbon fixation in minerals from serpentine-rich mine tailings using the Rietveld method with X-ray powder diffraction data. *American Mineralogist* 91 (8-9) p. 1331-1341

Sipilä, J, Teir, S, Zevenhoven, R (2008) Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: Literature review update 2005-2007. Åbo Akademi University Heat Engineering Laboratory, Report 2008-1.

Schuiling, RD and Krijgsman, P (2006) Enhanced weathering: An effective and cheap tool to sequester CO<sub>2</sub>. *Climatic Change*, 774, 349-354.

Sundquist, ET (1993) The global carbon dioxide budget. *Science*, 259, 934-941.

Vida Gábor (2009) Gondolatok a fenntartható fejlődésről, Klímabarát települések szövetsége, <http://klimabarát.hu/node/72>, Megtekintés 2012. június 15.

Wilson, S A Mineral traps for greenhouse gases in mine tailings (2009) A protocol for verifying and quantifying CO<sub>2</sub> sequestration in ultramafic mines. Ph.D. Dissertation, The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada

Wilson, SA; Dipple, GM; Power, IM; Thom, JM; Anderson, RG; Raudsepp, M; Gabites, JE.; Southam, G (2009) Carbon dioxide fixation within mine wastes of ultramafic-hosted ore deposits: Examples from the Clinton Creek and Cassiar chrysotile deposits, Canada. *Econ. Geol.* 104, 95–112.

Wilson SA, Barker SL, Dipple GM, Atudorei V. (2010) Isotopic disequilibrium during uptake of atmospheric CO<sub>2</sub> into mine process waters: implications for CO<sub>2</sub> sequestration. *Environ Sci Technol.* 44(24): 9522-9529

Yadav VS, Prasad M, Khan J, Amritphale SS, Singh M, Raju CB. (2010) Sequestration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) using red mud. *J Hazard Mater* 176:1044–50.