

## **Toepassing van olivijn in RWS-werken**

**Inventarisatie van mogelijkheden voor een pilot**



# **Toepassing van olivijn in RWS-werken**

**Inventarisatie van mogelijkheden voor een pilot**

D.J. Bakker  
V. Beumer  
N. Hartog  
W.J.M. Snijders  
M.S. Sule  
J.P.M. Vink

1203661-000

**Titel**  
Toepassing van olivijn in RWS-werken




<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
RWS Waterdienst	1203661-000	1203661-000-VEB-0006	30

**Trefwoorden**  
CO<sub>2</sub>, klimaatverandering, MgSiO<sub>4</sub>, kooldioxide, olivijn.

**Samenvatting**

Bij Rijkswaterstaat bestaat de behoefte om de condities waaronder de klein- of grootschalige toepassing van olivijn leidt tot acceptabele RWS-doelen in beeld te brengen. Deze studie geeft invulling aan deze vraag, gelet op de criteria die gelden binnen RWS-werken. Olivijn is een mineraal waarmee CO<sub>2</sub>-binding kan worden gerealiseerd en dat in potentie een bijdrage kan leveren aan het verkleinen van de 'carbon footprint' van RWS door middel van CO<sub>2</sub>-compensatie. De toepassing is echter niet onder alle omstandigheden even effectief. Factoren die de effectiviteit (de mate van CO<sub>2</sub>-binding en de snelheid waarmee dit plaatsvindt) bepalen, zijn onder andere de minerale samenstelling van het olivijn, de korrelgrootte, de omgevingstemperatuur, de zuurgraad (pH) en de mate van contact met water. Door de meest relevante factoren te identificeren, en te scoren onder toepassingen of veldcondities die passen binnen het RWS-beheersareaal, zijn de mogelijkheden voor een pilot in beeld gebracht.

De omgevingsomstandigheden waaronder de werking van olivijn maximaal is (morfologische dynamiek, veel uitwisseling met gas- en waterfase), lijken op voorhand een zinnige effectiviteitsmeting in het veld uit te sluiten. Voor een pilot-project is het belangrijk om te besluiten wat er met het project wordt beoogd en of het daadwerkelijk aantonen van verwerking of CO<sub>2</sub> binding ook echt moet worden nagestreefd. Daarnaast moet het voor een pilot-project duidelijk zijn of het zinnig, danwel noodzakelijk is om bepaalde tijdstermijnen te stellen voor de gestelde rendementsdoelen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Juni 2012	D.J. Bakker					
		V. Beumer					
		N. Hartog					
		W.J.M. Snijders					
		M.S. Sule					
		J.P.M. Vink (PL)		G.D. Roskam		L.L.F. Janssen	
						H. Visser	

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel	1
1.3	Werkwijze	1
<b>2</b>	<b>Olivijn: stofeigenschappen, (milieu)gedrag en nuttige toepassing</b>	<b>3</b>
2.1	Wat is olivijn?	3
2.2	CO <sub>2</sub> consumptie door verwerking van olivijn	4
2.3	Neveneffecten van verwerking van olivijn	6
2.3.1	De invloed van alkaliteit, pH en SiO <sub>2</sub> op aquatische organismen	7
2.3.2	Sporenelementen	8
2.3.3	Aspecten van verwerking en reactiviteit	9
2.4	Huidige praktijktoepassingen en pilots met olivijn	10
<b>3</b>	<b>Enkele LCA-aspecten van olivijn</b>	<b>11</b>
3.1	Het netto (CO <sub>2</sub> -bindend) rendement van olivijn	11
3.1.1	De CO <sub>2</sub> -emissie bij de winning van olivijn	11
3.1.2	De CO <sub>2</sub> -emissie bij het malen van olivijn	12
3.1.3	De CO <sub>2</sub> -emissie bij transport van olivijn	13
3.1.4	Het totale efficiency-verlies	13
3.2	De tijdschaal van CO <sub>2</sub> -binding door olivijn	13
3.3	Kosten en baten van CO <sub>2</sub> -binding met olivijn	16
3.3.1	Kosten	16
3.3.2	Baten	16
3.3.3	Kosteneffectiviteit	16
<b>4</b>	<b>Toepassing van olivijn in RWS-werken</b>	<b>18</b>
4.1	Kansenkaart	18
4.2	Mogelijkheden voor in-situ monitoring	22
4.3	Conclusies veldtoepassing: waar moet een pilot project aan voldoen?	23
4.4	Vervolgtraject voor het realiseren van een pilot	23
	<b>Referenties</b>	<b>27</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Duurzaamheid is voor Rijkswaterstaat één van de pijlers van Agenda 2012. CO<sub>2</sub>-reductie is één van de mogelijke manieren voor RWS om invulling te geven aan dit streven naar meer duurzaamheid bij de uitvoering van zijn kerntaken.

Olivijn is een mineraal waarmee CO<sub>2</sub>-reductie kan worden gerealiseerd en dat in potentie een bijdrage kan leveren aan het verkleinen van de 'carbon footprint' van RWS door middel van CO<sub>2</sub>-compensatie. RWS wil graag in een pilot aantonen dat er mogelijkheden zijn om olivijn toe te passen binnen een RWS-werk, dus in een gecombineerde uitvoering. Naast deze beoogde pilot bestaat ook de vraag of er mogelijkheden zijn voor opschaling van de toepassing. Daarmee zou niet alleen een deel van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van RWS worden gecompenseerd, maar zou ook de maatschappelijke betrokkenheid kunnen worden gevisualiseerd.

Het gebruik van olivijn heeft kansen. De toepassing is echter niet onder alle omstandigheden even effectief. Factoren die de effectiviteit (de mate van CO<sub>2</sub>-reductie en de snelheid waarmee dit plaatsvindt) bepalen, zijn onder andere de minerale samenstelling van het olivijn, de korrelgrootte, de omgevingstemperatuur, de zuurgraad (pH) en de mate van contact met water. Ook dient rekening te worden gehouden met het feit dat er voor het winnen van olivijn en het transport van de plaats van winning naar de plaats van toepassing, energie wordt verbruikt waarbij CO<sub>2</sub> vrijkomt. Daarnaast is het mogelijk dat het toepassen van olivijn tot ongewenste neveneffecten leidt, zoals het verstoren van de ecologische toestand door pH-verhoging, verandering in alkaliteit en verhoogde zware metalenconcentraties. Daar staat tegenover dat er positieve neveneffecten kunnen worden bewerkstelligd, zoals bijvoorbeeld het tegengaan van verzuring, het voorkomen van blauwalgen en het verstevigen van de (water)bodem door een carbonaat-neerslag die volgt op het oplossen van olivijn.

Er bestaat behoefte om de condities waaronder de klein- of grootschalige toepassing van olivijn leidt tot acceptabele RWS-doelen in beeld te brengen. Deze studie geeft invulling aan deze vraag, gelet op de criteria die gelden binnen RWS-werken.

## 1.2 Doel

Het doel van dit project is het uitvoeren van een verkenning naar de mogelijkheden van toepassing van olivijn in RWS-werken. Het advies ondersteunt de keuze onder welke voorwaarden een (pilot) project kan worden opgestart.

## 1.3 Werkwijze

Deze verkenning is uitgevoerd aan de hand van de volgende activiteiten:

- 1 Het samenvatten van de fysische, (milieu)chemische en ecologische aspecten van het toepassen van olivijn in het (aquatische) milieu;
- 2 Het uitwerken van "life cycle assessment" (LCA) aspecten van olivijn, inclusief een kosten-baten analyse in termen van CO<sub>2</sub>-reductie voor een hypothetisch voorbeeld pilot-project;

- 3 Het inventariseren van het type RWS-werk waar het toepassen van olivijn potentieel effectief is;
- 4 Het opstellen van een zogenaamde 'kanskaart' met criteria waarmee RWS-werken kunnen worden beoordeeld op hun geschiktheid op olivijn toe te passen (al dan niet in een pilot);
- 5 Het beoordelen van de geïnterpreteerde typen RWS-werken met behulp van de criteria in de kanskaart;
- 6 Het formuleren van de mogelijkheden van het inzetten van het EDO-concept (Ecologisch Dynamische Ontwerpen) bij het invullen van het vervolgtraject voor de lokale toepassing van olivijn.

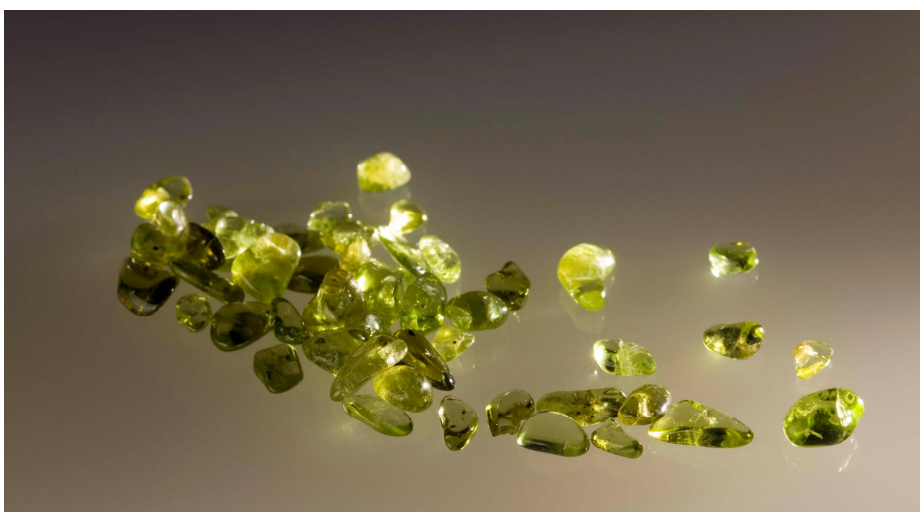
## 2 Olivijn: stofeigenschappen, (milieu)gedrag en nuttige toepassing

Het mineraal olivijn wordt al sinds eind jaren 50 wetenschappelijk onderzocht, voornamelijk in relatie tot de verweringsprocessen en globale kringloop van silicaatmineralen (bv. (Wogelius and Walther, 1991)), alsmede de afleiding van de condities diep in de ondergrond (mantel) waar het mineraal olivijn wordt gevormd (bv. (Kawamoto et al., 2004)). Recentelijk wordt ook de mogelijke toepassing van olivijn voor de vastlegging van CO<sub>2</sub> ("koolzuur") wetenschappelijk onderzocht (bv. (Bearat et al., 2006; Chen et al., 2006; Garcia et al., 2010; Haug et al., 2010; King et al., 2010; Schuiling and Tickell, 2010)), met name op industriële schaal bij hoge temperatuur en druk (>100 °C, > 100 bar) maar ook bij toepassing onder atmosferische omstandigheden (Veld et al., 2008; Hangx and Spiers, 2009).

In de volgende paragrafen zal specifiek worden ingegaan op de mogelijkheden van de toepassing van olivijn onder Nederlandse omstandigheden. De nadruk ligt daarbij op de condities die typerend zijn voor RWS werken.

### 2.1 Wat is olivijn?

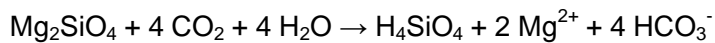
Olivijn is een van de meest voorkomende mineralen op aarde. Het mineraal is groen van kleur en bestaat uit een magnesium-ijzer-silicaat met de formule (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. De verhouding van magnesium en ijzer varieert tussen 100% magnesium voor forsteriet (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) en 100% ijzer voor fayaliet (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>). Composities van olivijn worden vaak uitgedrukt als molaire percentages van forsteriet (Fo) en fayaliet (Fa) (bijv. Fo<sub>70</sub>Fa<sub>30</sub>). Er zijn verschillen in de eigenschappen voor deze twee uiterste samenstellingen van het mineraal, en deze variëren geleidelijk met het schuiven van de ene uiterste samenstelling naar de andere. Olivijn bevat slechts kleine hoeveelheden van andere elementen dan zuurstof, silicium, magnesium en ijzer. Mangaan en nikkel zijn vaak de extra elementen die aanwezig in de hoogste concentraties (Deer et al., 1997; Vanherk et al., 1989; Veld et al., 2008).



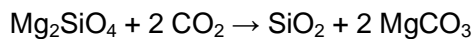
**Figuur 2.1:** Olivijnzand van Papakolea Beach (Hawaii) Bron: Wikimedia

## 2.2 CO<sub>2</sub> consumptie door verwerking van olivijn

Olivijn verweert onder de invloed van zuur. Daar waar de zuurgraad bepaald wordt door de aanwezigheid van koolzuur, wordt bij de verwerking van olivijn CO<sub>2</sub> omgezet in bicarbonaat HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Schuiling, R.D., 2001; Soubrand-Colin et al., 2005):



In het veld wordt waargenomen dat, onder verzadigde condities, het mineraal magnesiet niet snel neerslaat ondanks sterke overzadiging (Giammar et al., 2005; Hangx and Spiers, 2009). Mocht dat wel gebeuren dan ontwijkt er CO<sub>2</sub> bij de neerslag van magnesiet en wordt de netto vastlegging van CO<sub>2</sub> gehalveerd tot 2 mol CO<sub>2</sub> per mol olivijn:



Volgens deze reactievergelijkingen is met behulp van het geochemische modelleerprogramma PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999) de olivijn verwerking onder verschillende condities gemodelleerd. Hierbij zijn de volgende processen en factoren beschouwd:

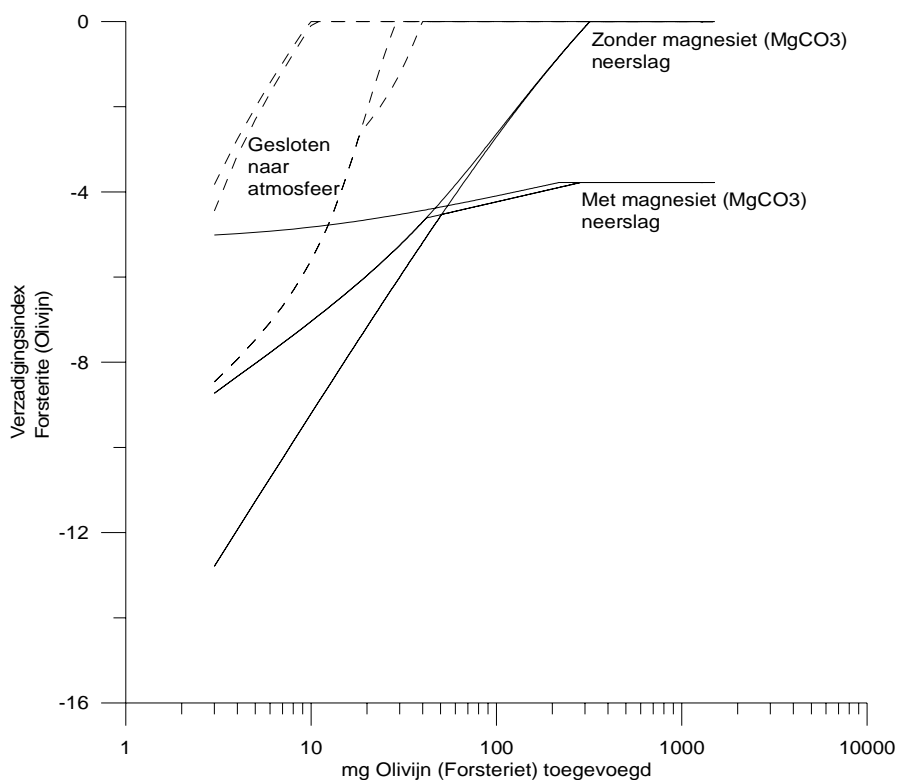
- Condities waarin open uitwisseling van CO<sub>2</sub> met de atmosfeer plaatsvindt. Voorbeeld: toepassing in ondiep, goed gemengd water.
- Condities waarin geen open uitwisseling van CO<sub>2</sub> met de atmosfeer plaatsvindt, gesloten condities. Voorbeeld: toepassing in een diepe slecht gemengde plas;
- Het wel of niet aanwezig zijn van kalk op de toepassingslocatie;
- Het wel of niet neerslaan van het mineraal magnesiet;
- Er is van uitgegaan dat SiO<sub>2</sub> (kwarts) altijd neerslaat;
- Er is uit gegaan van niet-dynamische condities, er is geen aanvoer van vers water.

Voor de berekeningen is de stapsgewijze titratie uitgevoerd. Dat wil zeggen dat aan 1 liter water steeds een kleine hoeveelheid olivijn (forsteriet) wordt toegevoegd. Zolang de verzadigingsindex voor olivijn kleiner dan nul blijft, is het water onderverzadigd voor olivijn en kan er dus olivijn blijven oplossen. Uit de modelresultaten (figuur 2.2) voor open condities blijkt dat er, zonder neerslag van magnesiet, maximaal 1 gram olivijn in 1 liter kan worden opgelost voordat verzadiging van olivijn optreedt. Als magnesietneerslag wel plaatsvindt, kan er veel meer (theoretisch oneindig veel) olivijn oplossen. De neerslag van magnesiet voorkomt namelijk dat er verzadiging voor olivijn optreedt.

Verder valt op dat onder gesloten condities olivijnverzadiging veel sneller optreedt (max. 30 mg forsteriet oplossing in 1 liter) en dat dit niet afhankelijk is van het wel of niet laten neerslaan van magnesiet.

De modellering met Phreeq is bedoeld om de verschillen tussen omgevingscondities en oplosbaarheid van olivijn aan te geven. Het gaat hier nadrukkelijk niet om het nabootsen van een natuurlijke situatie, maar om de gevolgen van thermodynamische eigenschappen in beeld te brengen.



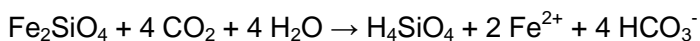


**Figuur 2.2.** De hoeveelheid olivijn die kan worden toegevoegd aan een liter water tot dat er verzadiging voor olivijn optreedt onder evenwichtscondities. Verzadiging voor olivijn (forsteriet) treedt op als de verzadigingsindex nul (0) is.

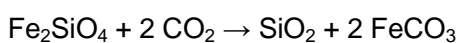
Bij toepassing in RWS-werken kunnen de omstandigheden (open/gesloten, diep/ondiep, stagnant/dynamisch) als volgt worden toegelicht:

	Diep	Ondiep
Stagnant	gesloten (diepe, verticaal niet gemengde plas)	open (ondiepe, verticaal gemengde plas)
Dynamisch	n.v.t.	open (rivier, kustlijn)

Aangezien natuurlijk voorkomend olivijn voor een deel ook ijzerhoudend is, is ook de reactie van dit ijzerhoudende deel relevant. Analoog aan de hierboven beschreven reacties voor magnesiumhoudende olivijn geldt voor de reacties met ijzerhoudende olivijn:



Of bij neerslag van sideriet ( $\text{FeCO}_3$ ):



Globaal geven deze reacties voor ijzerhoudende olivijn geen afwijkingen op de te verwachten  $\text{CO}_2$  binding. Echter, ijzer in olivijn (Fayaliet,  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) komt voor in de gereduceerde ( $\text{Fe}^{2+}$ ) vorm. Onder zuurstofhoudende (atmosferische) condities reageert zuurstof met het

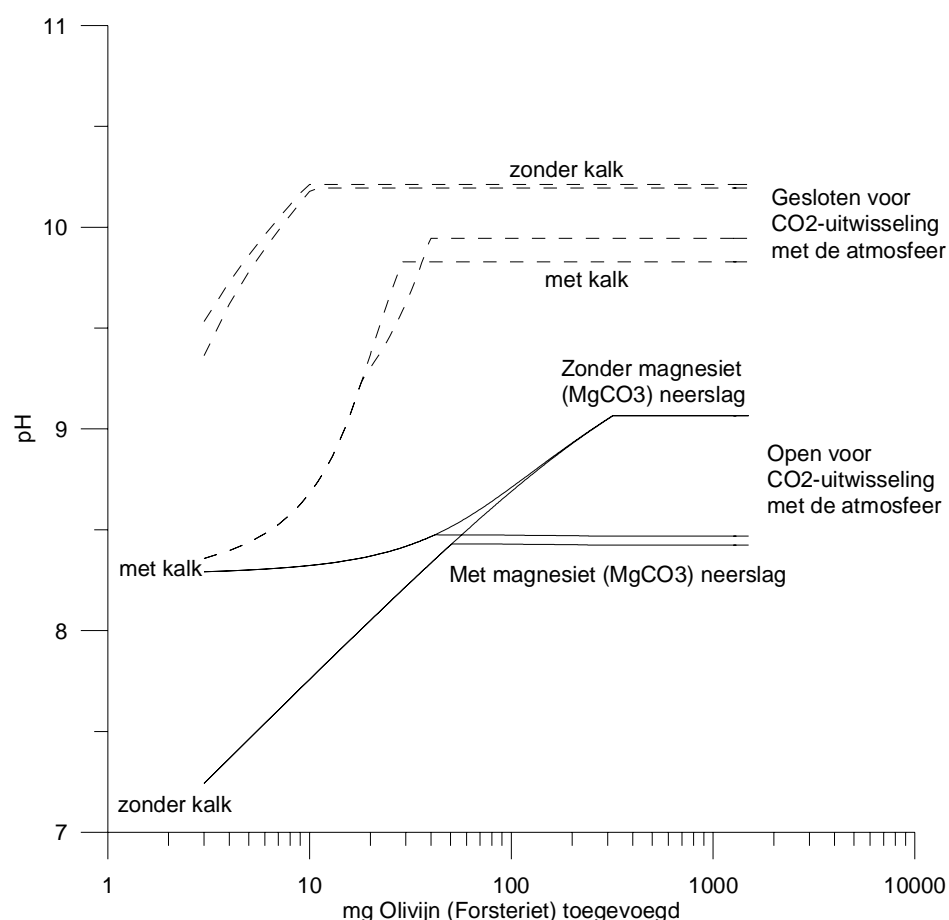
gereduceerde ijzer tot  $\text{Fe}^{3+}$  en slaan ijzerhydroxiden (roest) neer waardoor de netto  $\text{CO}_2$  vastlegging op nul uitkomt (Veld et al., 2008; Wogelius and Walther, 1991):



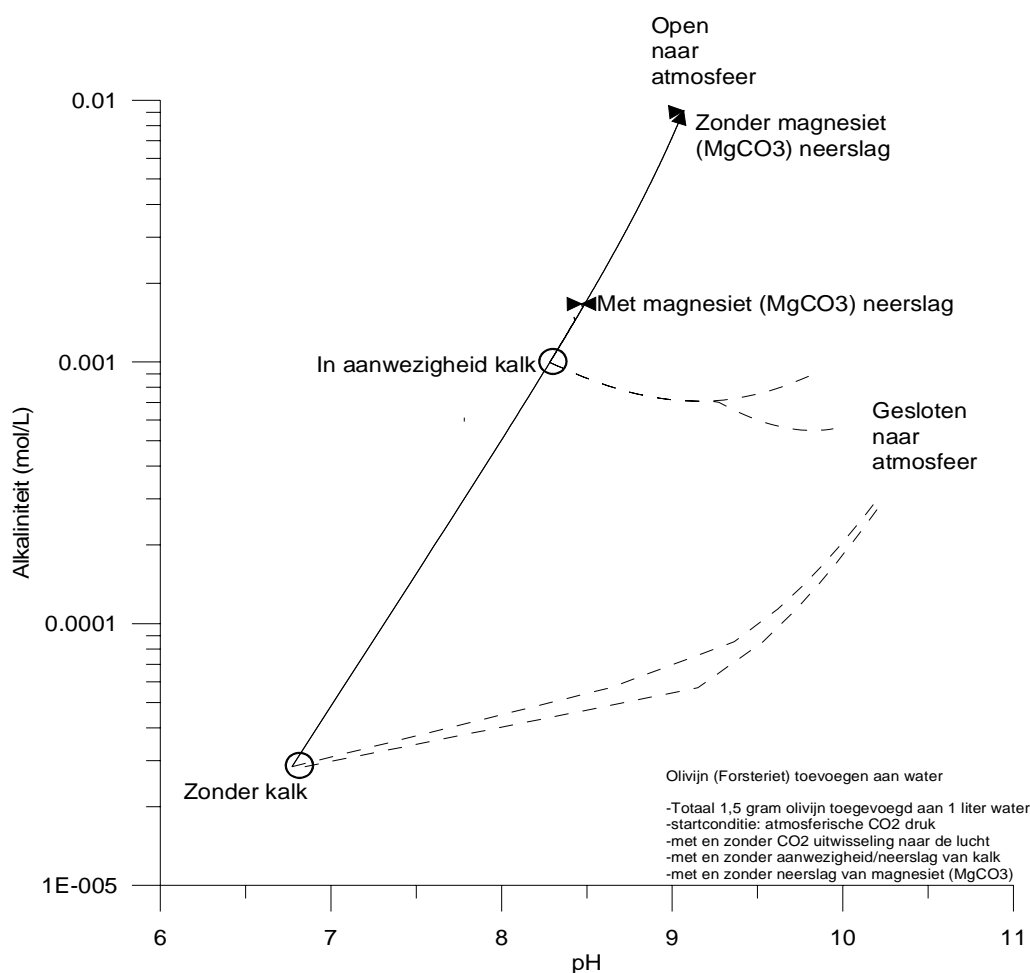
Onder oxidische omstandigheden werkt de aanwezigheid van ijzer in olivijn verlagend op het rendement om  $\text{CO}_2$  vast te leggen. Afhankelijk van ijzerfractie (<0.3) ten opzichte van de magnesiumfractie (>0.7) in olivijn kan de rendementsafname door dit effect onder zuurstofhoudende condities in de praktijk significant zijn. Om het rendement van olivijn voor een specifieke toepassing in te schatten moet dus de samenstelling van het te gebruiken olivijn bekend zijn.

### 2.3 Neveneffecten van verwerking van olivijn

De verwerking van olivijn resulteert - in ongebufferde systemen - in een pH verhoging, tot maximaal een pH-waarde van 10,2 is bereikt (figuur 2.3). De mate waarin deze pH verhoging optreedt, hangt met name af van of de verwerking plaatsvindt onder gesloten dan wel open uitwisseling met de atmosfeer plaats vindt en in mindere mate van het wel of niet aanwezig zijn van kalk of het neerslaan van magnesium. Met name onder open condities neemt hierbij ook de alkaliteit sterk toe (figuur 2.4).



**Figuur 2.3:** pH ontwikkeling bij toevoeging van olivijn (forsteriet).



**Figuur 2.4.** Ontwikkeling van pH en alkaliteit bij verwerking olivijn onder verschillende omstandigheden.

### 2.3.1 De invloed van alkaliteit, pH en SiO<sub>2</sub> op aquatische organismen

#### *Alkaliteit*

De alkaliteit of biologische waterhardheid heeft invloed op de vegetatiesamenstelling. Veel, maar niet alle, waterplanten kunnen behalve CO<sub>2</sub> namelijk ook bicarbonaat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) als koolstofbron gebruiken (Bloemendaal and Roelofs, 1986). In de meeste Nederlandse oppervlaktewateren heerst een zodanige pH dat de alkaliteit gelijk is aan het bicarbonaatgehalte (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Bij grootschalige toepassing van olivijn komt veel bicarbonaat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) vrij (zie vorige paragraaf). Hierbij bestaat de kans dat de samenstelling van aquatische vegetatie in met name (semi)-stagnante wateren gaat veranderen. Dit geldt vooral voor de zwak gebufferde wateren. Een verhoogde concentratie aan bicarbonaat kan leiden tot verhoogde afbraak van organisch materiaal in de waterbodem, waarbij ijzergebonden fosfaat in oplossing gaat (Bloemendaal and Roelofs, 1986)

Watervlooiën zijn gevoelig voor verhoogde alkaliteit (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-concentraties). Bij hoge concentraties veroorzaakt HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> acute toxiciteit (Hoke, 1992). Onduidelijk is bij welke concentraties dit effect plaatsvindt en of deze als gevolg van het toepassen van olivijn kunnen

voorkomen. Voor slakken en schelpdieren is een verhoogde alkaliteit juist gunstig omdat  $\text{HCO}_3^-$  een belangrijke bouwsteen is voor de schelpopbouw (Nalepa, 1993).

#### pH

Voor mosselen moet de pH tussen 7,4 en 9,4 liggen, waarbij de optimum pH voor driehoeksmosselen bij 8,5 ligt (Nalepa, 1993).

Algengroei is sterk pH-afhankelijk. Variatie in de orde van grootte van 0,2-0,3 pH eenheid kan al tot grote verschillen in groeisnelheid leiden (Postma, 2002). Watervlooien zijn minder gevoelig voor pH veranderingen.

De verhoging van alkaliteit en pH als gevolg van het toepassen van olivijn wordt op mondiale schaal als pluspunt gezien: De verzuring van de oceanen als gevolg van de verhoogde  $\text{CO}_2$ -gehalten in de atmosfeer kan hiermee (deels) worden gecompenseerd.

#### $\text{SiO}_2$

Watervlooien ondervinden negatieve effecten van verhoogde  $\text{SiO}_2$ -concentraties (Adams, 2006), net als mariene mosselen (Canesi, 2010).

Diatomeeën (kiezelwieren, een algensoort), die voor de opbouw van hun kiezelschaaltjes silicium nodig hebben, kunnen meer groei vertonen bij verhoogde  $\text{SiO}_2$ -concentraties wanneer er sprake is van Si-limitatie. In situaties waar de Si/P ratio eerder door aanrijking met fosfor is afgenomen en waar andere algensoorten (bijvoorbeeld blauwalgen) overheersen, kunnen diatomeeën deze algensoorten na toepassing van olivijn mogelijk verdringen. De aanwezigheid van diatomeeën worden veelal gezien als gunstig, mede omdat ze een goede voedselbron vormen voor watervlooien en mosselen. Er zijn echter ook toxische, mariene diatomeeën (*Pseudo-nitzschia*).

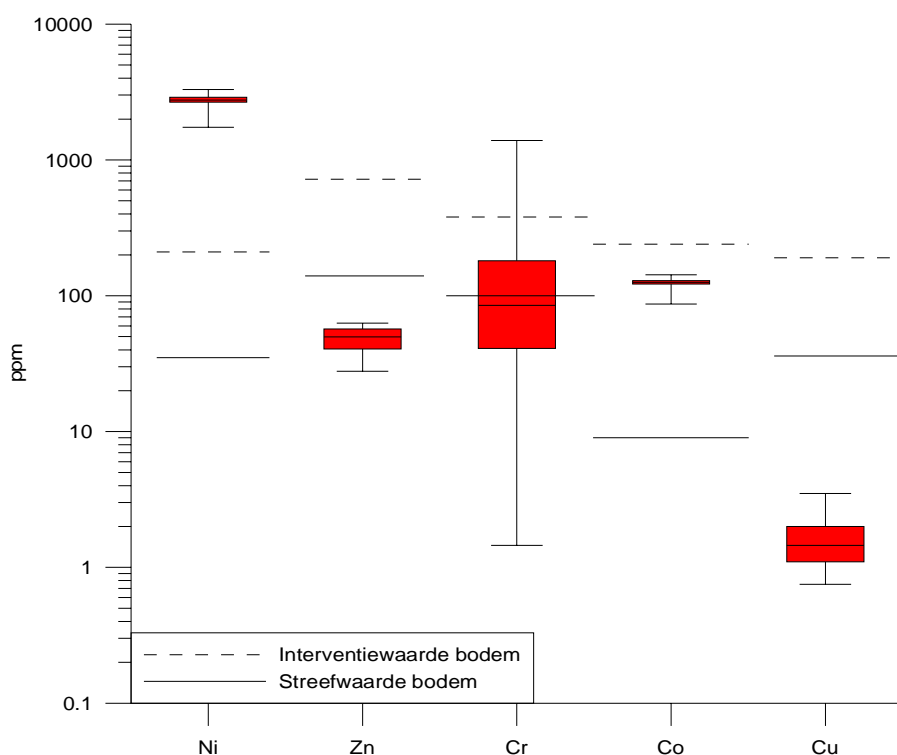
### 2.3.2 Sporenelementen

Naast hoofdelementen als ijzer (Fe), magnesium (Mg) en silica (Si), kan ook een flink aantal sporenelementen in het kristalrooster van olivijn zijn opgenomen, die bij verwerking vrij kunnen komen (Kierczak et al., 2007). Karakteristiek voor olivijn zijn de hoge gehalten aan nikkel. In een recente studie (De Hoog et al., 2010) is voor 75 olivijnbronnen de samenstelling bepaald. Naast nikkel blijken ook zink (Zn), chroom (Cr), cobalt (Co) en, in minder mate, koper (Cu) als sporenelement voor te komen.

Om een indruk te krijgen van de mate van metaal-contaminatie in olivijn zijn deze in figuur 2.5 vergeleken met de streef- en interventiewaarden voor bodem. Hieruit blijkt dat alle nikkelgehalten uit deze studie ongeveer 10 keer hoger zijn dan de interventiewaarde voor nikkel en dat de gehalten aan chroom en cobalt voor een groot deel de streefwaarden overschrijden. De zink- en kopergehalten vallen ruim onder de streefwaarde.

Met name het gehalte nikkel vormt een mogelijke obstructie bij de veldtoepassing van olivijn. Het gehalte Ni in olivijn ligt rond 3000 mg/kg. Echter, het is vooralsnog niet te duiden welk juridisch kader bij de toepassing van olivijn in een pilot, danwel bij een grootschalige toepassing door RWS gehanteerd zal worden. De toepassing kan worden beschouwd als een bodemadditief, maar ook bijvoorbeeld als meststof of bouwstof. In een recent onderzoek naar de toepassing van olivijn als een alternatieve zuurbuffer (bij het gebruik van kalk hiervoor komt namelijk  $\text{CO}_2$  vrij) was een van de conclusies dat de gehalten aan nikkel in olivijn te hoog waren in relatie tot het meststoffenbesluit (Rietra, 2010).

Als de toepassing als bodem wordt beoordeeld kan het lokale achtergrondgehalte van nikkel mogelijk van toepassing zijn voor de acceptatie. Als de beoordeling plaatsvindt op het niveau van de streefwaarde, dan is de maximale toevoeging van olivijn aan grond 10 gram per kg bodem.



**Figuur 2.5:** Metaalgehalten voor 75 olivijnmonsters van verschillende herkomst (data uit De Hoog et al., 2010).

### 2.3.3 Aspecten van verwerking en reactiviteit

Het is veelvuldig aangetoond dat fayaliet, de ijzerhoudende olivijnvariant, sneller verweert dan de magnesiumhoudende variant forsteriet (bv. (Velbel, 2009; Veld et al., 2008)). Ook is aangetoond dat de verwerking van olivijn aanzienlijk versneld wordt door korstmossen vanwege hun productie van organische zuren (Wasklewicz, 1994).

De vorming van coatings op het olivijnoppervlak als gevolg van precipitatie of incongruente oplossing kan een beperkende factor zijn voor de reactiviteit van olivijn (Veld et al., 2008). De schurende werking van zandkorrels bij toepassing aan de kust, zou het ontstaan van dergelijke coatings kunnen verminderen of tegengaan, en daarmee de effectiviteit aanzienlijk kunnen verhogen. Het is echter niet zo dat de schurende werking van zandkorrels zal leiden tot snelle afname van de korrelgrootte door erosie.

De hardheid van olivijn is namelijk 6,5-7 (op de relatieve hardheidsschaal van Mohs, waarin talk als zachtste mineraal hardheid 1 heeft en diamant als hardste mineraal hardheid 10)). Olivijn is daarmee nauwelijks zachter dan kwartszand (hardheid 7). Dit betekent dat "natuurlijke vermalings" onder invloed van schuring met zand slechts beperkt plaats zal vinden. Toepassingen in sterk dynamische systemen, zoals kusttoepassingen (de zandmotor) kunnen daarmee dus niet op korte of middellange termijn het industriële maalproces vervangen. Zoals eerder is toegelicht heeft de schurende werking wel een positief effect op het verwijderen van inactiverende coatings aan het olivijnoppervlak waardoor de effectiviteit van CO<sub>2</sub> binding niet wordt geremd.

## 2.4 Huidige praktijktoepassingen en pilots met olivijn

Op mondiale schaal wordt al sinds lange tijd ervaring opgebouwd met de toepassing van olivijn op veldschaal. De mogelijkheden voor klein- en grootschalige toepassingen worden bediscussieerd door Schuiling (2010).

In Nederland zijn verschillende praktijkproeven met olivijn uitgevoerd of recentelijk opgestart. Tabel 2.1 geeft een overzicht van enkele bekende pilots die in Nederland zijn uitgevoerd.

**Tabel 2.1:** Ervaringen met olivijn praktijktoepassingen in Nederland.

	Project	Bevinding / status
1	Shell project in Noordoostpolder (2009); uitstrooien van 7 ton olivijn op bodemoppervlak	Bij Brennens in de Noordoostpolder werd in 2009 een veldproef naar het effect van olivijntoediening aan akkers gestart, waaruit moest blijken hoeveel CO <sub>2</sub> door het olivijn in de praktijk valt vast te leggen (Knoppers, 2010). Deze proef wordt als niet geslaagd beschouwd (Rickandje, 2010), mede door een sterk fluctuerende grondwaterstand, en doordat de in de aanwezige bodem kalk (CaCO <sub>3</sub> ) sneller oplost dan de olivijn. Dit is in overeenstemming met het onderzoek naar het gebruik van olivijn als alternatief voor zuurbuffering door kalk op zure (pH < 5) akkerbodems (Rietra, 2010). Hier werd geconcludeerd dat het gebruikte olivijnpoeder (85% < 63 µm), in vergelijking tot toepassing van kalk, te weinig efficiënt en kosten-effectief is om als vervangende zuurbuffer te worden toegepast.
2	Pilot Zegsveld	Onderzoeksbureaus Nova Saxum, Arcadis, Alterra, veehouder Dhr. Voorend en de provincie Utrecht zijn een proef gestart om de bodem op een vernieuwende manier te bemesten op een perceel van 400 m . Het doel van de test is effecten in kaart brengen van duurzaam bodemgebruik door bemesting met in de natuur voorkomende silicaatmineralen. Hiervoor wordt olivijn gebruikt. Getest wordt of bijvoorbeeld de toepassing van silicaatmineralen leidt tot vastlegging van CO <sub>2</sub> , beter opname van voedingsstoffen door planten, minder energiegebruik, gezonder grond- en oppervlaktewater en tot gezonder, sterker gras voor koeien. (Novasaxum, 2010).
3	Pilot Achterveld	De uitkomsten worden vergeleken met een andere door provincie Utrecht gestarte vergelijkbare proef in Zegsveld (Carpay and Bergsma, 2010).
4	Project "het groene pad" van ProRail	In mei 2010 is de pilot 'Het Groene Pad' gestart om de werking van obsidiaan en olivijn als schouwpad-verhardingsmateriaal te testen. In opdracht van ProRail zal aannemer Van der Worp op het baanvak Zwolle-Wierden 300 meter schouwpad aanleggen. Dit pad krijgt zes verschillende testvakken (Trouw, 2010).

### 3 Enkele LCA-aspecten van olivijn

In dit hoofdstuk worden enkele aspecten van de “life cycle assessment” (LCA) van olivijn uitgewerkt. Het betreft het netto CO<sub>2</sub>-bindend rendement (paragraaf 3.1), de snelheid waarmee olivijn CO<sub>2</sub> vastlegt (paragraaf 3.2) en de kostenefficiency van CO<sub>2</sub>-reductie met olivijn (paragraaf 3.3).

#### 3.1 Het netto (CO<sub>2</sub>-bindend) rendement van olivijn

Per ton zuivere Mg-olivijn (forsteriet) kan theoretisch maximaal 1,25 ton CO<sub>2</sub> worden gebonden. Doordat er bij de winning, het vermalen en het transport van olivijn energie wordt verbruikt waarbij CO<sub>2</sub> vrijkomt, is het netto CO<sub>2</sub>-bindend rendement van olivijn minder dan 100%. Ook bestaat het gesteente waaruit olivijn wordt gewonnen over het algemeen niet uit pure olivijn maar uit olivijn-rijk gesteente. In de volgende paragrafen wordt een schatting gegeven van het verlies aan (CO<sub>2</sub>-bindend) rendement als gevolg van de genoemde aspecten.

##### 3.1.1 De CO<sub>2</sub>-emissie bij de winning van olivijn

In een studie van Hangx en Spiers (2009) worden enkele kengetallen gepresenteerd voor de energieconsumptie en bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissie die met de winning van olivijn (mijnbouw) gepaard gaan. Hierbij hebben zij de energieconsumptie in kWh/ton olivijn omgerekend naar de CO<sub>2</sub>-emissie in elektriciteitscentrales die deze energie zouden moeten opwekken en deze emissie gerelateerd aan de theoretische CO<sub>2</sub> consumptie van olivijn. Hangx en Spiers (2009) hebben hierbij nog onderscheid gemaakt naar het type elektriciteitscentrale (kolen-, kolenvergassing- en aardgas-gestookt) maar in tabel 3.1. zijn de ranges aangegeven waarbinnen de CO<sub>2</sub>-emissies zich bevinden.

**Tabel 3.1** CO<sub>2</sub>-emissie bij verschillende mijnbouwactiviteiten bij de winning van olivijn (Hangx en Spiers, 2009).

Mijnbouwactiviteit	Energieconsumptie (kWh/ton)	CO <sub>2</sub> -emissie (kg CO <sub>2</sub> /ton CO <sub>2</sub> )
Boren	0,35	0,10 – 0,22
Opblazen	0,44	0,13 – 0,28
Afgraven	0,95	0,27 – 0,61
Transport	3,49	1,00 – 2,22
Totaal	5,23	1,50 – 3,33
Efficiency-verlies in %		0,15 – 0,33

Uit tabel 3.1 blijkt dat de CO<sub>2</sub>-emissie bij het winnen van olivijn slechts leidt tot een efficiency-verlies van 0,15 tot 0,33%.

### 3.1.2 De CO<sub>2</sub>-emissie bij het malen van olivijn

De reactiviteit van olivijn om te verwerken en CO<sub>2</sub> te binden is sterk afhankelijk van de korrelgrootte van het gebruikte olivijn. In Veld et al. (2008) wordt als vuistregel aangegeven dat een korrel met een 10 maal grotere radius ook een orde van grootte meer tijd nodig heeft om volledig te reageren.

Om deze reden wordt olivijn, na het winnen, vermalen tot een kleinere korrelgrootte zodat de reactiviteit groter wordt. Let wel: het totale CO<sub>2</sub>-bindende vermogen neemt hiermee niet toe, maar wel de snelheid waarmee CO<sub>2</sub> kan worden gebonden.

Voor het vermalen van olivijn is echter energie nodig, waarvan de opwekking leidt tot emissie van CO<sub>2</sub>. Ook voor dit proces en bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissie hebben Hangx en Spiers (2009) enkele kengetallen gepresenteerd. In tabel 3.2. zijn de ranges aangegeven waarbinnen de CO<sub>2</sub>-emissies zich bevinden voor verschillende korrelgroottes.

**Tabel 3.2** CO<sub>2</sub>-emissie en efficiency-verlies bij het vermalen van olivijn tot verschillende korrelgroottes (op basis van Hangx en Spiers, 2009).

Korrelgrootte (µm)	Energieconsumptie (kWh/ton)	CO <sub>2</sub> -emissie (kg CO <sub>2</sub> /ton CO <sub>2</sub> )	Efficiency-verlies (%)
1000	4,94	1,41 – 3,14	0,14 – 0,31
300	8,17	2,34 – 5,20	0,23 – 0,52
100	13,40	3,84 – 8,52	0,38 – 0,85
37	23,71	6,79 – 15,08	0,68 – 1,51
10	173,71	49,8 – 110,5	5,0 – 11,0

Uit tabel 3.2 blijkt dat hoe fijner de korrel moet worden, des te meer energie er nodig is. Vooral de laatste stap van 37 µm naar 10 µm kost veel extra energie.

Veld et al. (2008) geven aan dat voor malen tot 75 µm ongeveer 13 kWh/ton energie nodig is, hetgeen vergelijkbaar is met het cijfer van Hangx en Spiers (2009). Voor malen tot 38 µm geven Veld et al. (2008) een energieverbruik van ongeveer 83 kWh/ton, wat ruim drie keer hoger is dan het cijfer van Hangx en Spiers (2009). In tabel 3.3 zijn de op basis van de gegevens uit Veld et al. (2008) berekende efficiency-verliezen bij het malen van olivijn weergegeven.

**Tabel 3.3** CO<sub>2</sub>-emissie en efficiency-verlies bij het vermalen van olivijn tot verschillende korrelgroottes (op basis van Veld et al., 2008).

Korrelgrootte (µm)	Energieconsumptie (kWh/ton)	CO <sub>2</sub> -emissie (kg CO <sub>2</sub> /ton CO <sub>2</sub> )	Efficiency-verlies (%)
grof malen	2	0,72 – 1,39	0,07 – 0,14
75	13	4,68 – 9,05	0,47 – 0,91
38	83	29,9 – 57,8	3,0 – 5,8
wrijvingsmalen (ca 10µm)	150	54,0 – 104,4	5,4 – 10,4

Door het vermalen van olivijn tot 10 µm verliest het volgens Hangx en Spiers 5 tot 11% van zijn CO<sub>2</sub>-efficiency. Volgens Veld et al. (2009) treedt er een verlies in de orde van grootte van 3 tot 6% op bij het vermalen tot 38 µm en leidt wrijvingsmalen (tot ca 10 µm) tot een efficiency-verlies van 5 tot 10%.

In Veld et al. (2008) wordt daarbij opgemerkt dat de reactiviteit van met wrijvingsmalen verkleind olivijn sterk wordt vergroot omdat met deze techniek het kristalrooster wordt beschadigd.



### 3.1.3 De CO<sub>2</sub>-emissie bij transport van olivijn

Ook voor het transport van olivijn van de plaats van winning naar de plaats van toepassing is energie nodig, waarvan de opwekking leidt tot emissie van CO<sub>2</sub>. Ook voor dit proces en bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissie hebben Hangx en Spiers (2009) enkele kengetallen gepresenteerd. In tabel 3.4. is aangegeven welke CO<sub>2</sub>-emissies en efficiency-verliezen horen bij welk transportmiddel.

**Tabel 3.4** CO<sub>2</sub>-emissie en efficiency-verlies bij het transport van olivijn met verschillende transportmiddelen (op basis van Hangx en Spiers, 2009).

Transportmiddel	Energieconsumptie (g CO <sub>2</sub> / ton.km)	CO <sub>2</sub> -emissie (kg CO <sub>2</sub> /ton CO <sub>2</sub> . 100 km)	Efficiency- verlies (% / 100 km)
Binnen- en kustschepen	30	2,4	0,24
Vrachttreinen	20	1,6	0,16
Vrachtwagens	138	11,0	1,11

Op basis van tabel 3.4 wordt zichtbaar dat elke 100 km transport van olivijn leidt tot een additioneel efficiency-verlies van 0,16 tot 1,11%.

Wanneer het olivijn bijvoorbeeld per schip van 4000 km ver wordt aangevoerd naar de Rotterdamse haven en vervolgens per vrachtauto 100 km wordt vervoerd naar de plaats van bestemming in Nederland, is het totale efficiency-verlies door transport 10,7% (9,6% + 1,1%).

### 3.1.4 Het totale efficiency-verlies

Het totale efficiency-verlies van olivijn is vooral afhankelijk van de korrelgrootte tot welke de olivijn wordt vermalen en over welke afstand de olivijn moet worden getransporteerd. Hangx en Spiers (2009) concluderen dat het totale efficiency-verlies tot circa 10% op kan lopen voor kleine transportafstanden en verder op kan lopen tot 20% wanneer het olivijn van ver moet komen. Zij voegen daaraan toe dat olivijn meestal niet als pure olivijn wordt gewonnen maar als olivijn-rijk gesteente dat meestal ongeveer 60% olivijn bevat. Dit betekent volgens Hangx en Spiers (2009) dat alle efficiency-verliezen in de vorige paragrafen een factor 1,5 hoger zullen zijn en het totale efficiency-verlies 15 tot 30% bedraagt, afhankelijk van de transportafstand. Wanneer de methode van Hangx en Spiers worden gevolgd, bedraagt het netto CO<sub>2</sub>-bindend vermogen van olivijn daardoor niet het theoretische maximum van 1,25 ton CO<sub>2</sub> per ton pure olivijn maar ligt het tussen 0,88 en 1,06 ton CO<sub>2</sub> per ton aangevoerd olivijn(rijk) gemalen gesteente. Hierbij moet nadrukkelijk worden opgemerkt dat in de praktijk de winning van olivijn uit gesteenten die minder dan 90% olivijn bevatten zelden zal worden overwogen.

## 3.2 De tijdschaal van CO<sub>2</sub>-binding door olivijn

In deze paragraaf wordt ingegaan op de snelheid waarmee olivijn onder verschillende omstandigheden verweert en CO<sub>2</sub> bindt. Voor de totale CO<sub>2</sub>-binding maakt deze snelheid niet uit, maar de voor de jaarlijkse hoeveelheid CO<sub>2</sub> die per ton olivijn kan worden gebonden uiteraard wel. De belangrijkste factoren die de verwerkingssnelheid van olivijn bepalen, zijn korrelgrootte, temperatuur en pH. Daarnaast kunnen biotische factoren (aanwezigheid van schimmels, plantenwortels e.d.) een belangrijke rol spelen.

In Veld et al. (2008) is een aantal modelberekeningen uitgevoerd waarin deze factoren zijn gevarieerd. In tabel 3.5 zijn de resultaten van deze modelberekeningen weergegeven. Uit deze tabel wordt duidelijk dat het, bij toepassing van olivijn met een korrelgrootte van 38 µm in een kustlijn waar de gemiddelde zeewater-temperatuur 10 °C is, 200 tot 250 jaar duurt

voordat het olivijn volledig is verweert en zijn volledige CO<sub>2</sub>-bindende vermogen heeft geleverd. Bij een korrelgrootte van 75 µm duurt dat zelfs 400 tot 500 jaar. In warmere (tropische) wateren zijn deze tijdschalen aanzienlijk kleiner en vindt volledige oplossing en CO<sub>2</sub>-binding plaats in 15 tot 100 jaar. Veld et al. (2008) concluderen dan ook aan dat toepassing in de kustlijn vooral onder tropische condities tot hoge rendementen zal leiden.

**Tabel 3.5** *Berekende tijdsduur van verwerking van olivijn bij verschillende toepassingen en omgevingsfactoren (uit: Veld et al., 2008).*

Toepassing in:	T (°C)	pH	Korrelgrootte (µm)	80% opgelost (jaar)	100% opgelost (jaar)
<b>Kustlijn</b>	10	7,9	75	161	388
			38	82	197
		8,5	75	207	498
			38	105	252
	25	7,9	75	42	101
			38	21	51
		8,5	75	54	129
			38	27	66
	30	7,9	75	28	66
			38	14	34
		8,5	75	35	85
			38	18	43
<b>Landbouw</b>	8	4,0	75	5	12
			38	3	6
		5,5	75	27	64
			38	13	32
		7,0	75	88	212
			38	45	107
	25	4,0	75	1	3
			38	0,6	1,3
		5,5	75	6	14
			38	3	7
7,0	75	19	45		
	38	10	23		

Ook bij toepassing in de landbouw zijn de tijdschalen in tabel 3.5 aanzienlijk kleiner dan bij toepassing in koud zeewater. Dit is hoofdzakelijk het gevolg van de veel lagere pH die in de landbouwgronden is verondersteld. Bij pH 7 en een bodemtemperatuur van 8 °C loopt de tijdschaal op tot ongeveer 100-200 jaar.

Schuiling en De Boer (2010) stellen dat biotische factoren een belangrijke versnelling in de verwerking op kunnen leveren. Het effect van deze biotische factoren (de inwerking van micro-organismen, plantenwortels, passage door maag-darmkanaal van sedimentvoeders etc.) op de verwerkingssnelheid kan aanzienlijk zijn. Het kwantificeren ervan is echter moeilijk vanwege de veelheid aan variabelen en omstandigheden.

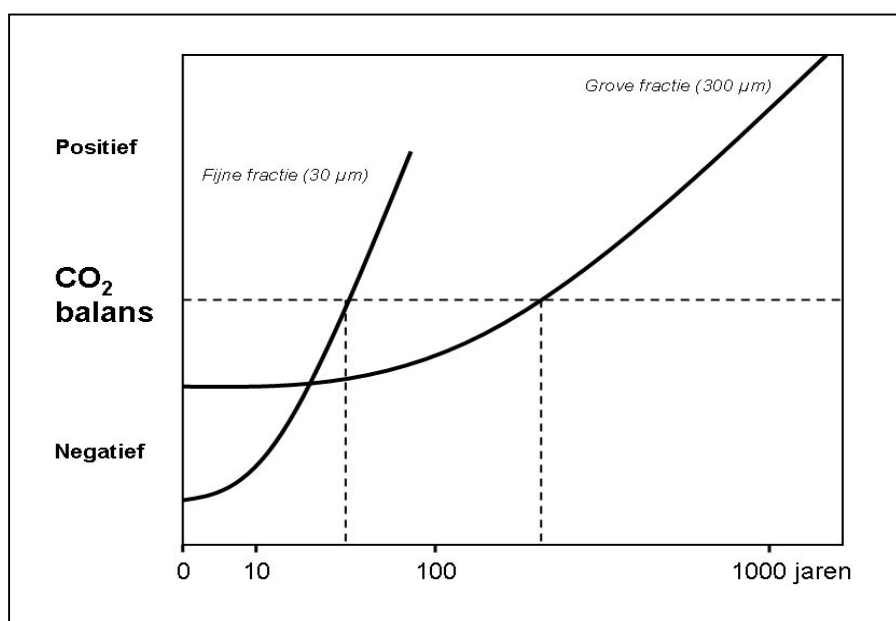
Olivijnverwerking is ook afhankelijk van de aanwezigheid van andere zuurbufferende mineralen zoals kalk. Veld et al. (2008) geven daarom ook aan dat er in de tabel geen rekening is gehouden met verschillen tussen laboratorium- en veldgegevens. Zij schatten dat

de in de tabel genoemde tijdsduur onder veldomstandigheden voor toepassing in de landbouw 1 tot 2 ordes lager zou kunnen zijn (zie ook Schuiling en De Boer, 2010). Voor de toepassing in zeewater zouden de werkelijke reactiesnelheden dicht bij de laboratorium-data kunnen liggen. Ook Hangx en Spiers (2009) hebben berekeningen uitgevoerd voor toepassing in de kustlijn bij 25 °C en pH 8,2. In tabel 3.6 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven. Ook uit deze tabel blijkt dat het zelfs bij tropische omstandigheden tientallen tot honderden jaren duurt, afhankelijk van de korrelgrootte, voordat het olivijn volledig is opgelost en zijn CO<sub>2</sub>-bindende werk heeft gedaan.

**Tabel 3.6** Berekende tijdsduur van verwerking van olivijn bij toepassingen in de kustlijn bij 25 °C en pH 8,2 (Hangx en Spiers, 2009).

Korrelgrootte (µm)	10% opgelost (jaar)	25% opgelost (jaar)	50% opgelost (jaar)	100% opgelost (jaar)
1000	80	213	481	2333
300	24	64	144	700
100	8	21	48	233
37	3	8	18	86
10	1	2	5	23

In figuur 3.1 is schematisch aangegeven hoe het aspect korrelgrootte een dubbele rol speelt in de snelheid en efficiëntie van CO<sub>2</sub>-binding. Fijne korrels (in het schema 30 µm) verwerken en binden CO<sub>2</sub> sneller maar hebben een lager netto CO<sub>2</sub>-bindend rendement omdat er meer energie voor het malen is gebruikt. In een levenscyclus CO<sub>2</sub>-balans is de balans voor fijne korrels initieel sterker negatief maar door de snelle verwerking wordt het 'break-even-point', waarbij de CO<sub>2</sub>-balans weer neutraal is, relatief snel bereikt. Grovere korrels (in het schema 300 µm) verwerken langzamer maar bereiken uiteindelijk een hoger rendement. In levenscyclus CO<sub>2</sub>-balans starten grovere korrel minder negatief maar duurt het relatief lang voordat de CO<sub>2</sub>-balans omslaat naar een positieve balans waarin netto CO<sub>2</sub> is gebonden.



**Figuur 3.1** Schematische CO<sub>2</sub>-balans voor fijnkorrelig en grofkorrelig olivijn.

### 3.3 Kosten en baten van CO<sub>2</sub>-binding met olivijn

In deze paragraaf is een schatting gemaakt van de kosten per ton CO<sub>2</sub> bij vastlegging van CO<sub>2</sub> door olivijn. Hiertoe zijn de kosten en baten van een fictief project van gemiddelde omvang (1000 m<sup>3</sup> = 1.500 ton olivijn) met elkaar vergeleken.

#### 3.3.1 Kosten

In Veld et al. (2008) wordt voor olivijn een marktprijs genoemd die ligt tussen €15 en €75 per ton, afhankelijk van type en korrelgrootte en inclusief transport naar Nederland.

In de hier gepresenteerde kosten-baten analyse is uitgegaan van gebruik van de fijnst mogelijke vorm van olivijn (10 µm) omdat deze vorm het meest reactief is en het snelst CO<sub>2</sub> bindt. Voor deze fijne vorm is de bovengrens van de door Veld et al. (2008) genoemde prijzen verondersteld (€75 per ton). In een project waarin 1.500 ton olivijn gebruikt wordt, bedragen de totale aanschaf- en vervoerskosten dan €112.500. Overigens kunnen kosten nogal variëren: Steen en Borg (2002) berekenden dat het mijnen van een bulkgesteente in een open mijn, samen met het malen van het gesteente, ongeveer 6 euro per ton kost.

Voor de lokale verwerkingskosten zijn reguliere aannemerskosten voor grondverzet verondersteld (€45 per ton). Deze kosten zijn uiteraard sterk afhankelijk van het type project. Kosten voor eventuele monitoring zijn buiten beschouwing gelaten. In een project waarin 1.500 ton olivijn gebruikt wordt, bedragen de totale verwerkingskosten dan €67.500. De totale projectkosten bedragen dan €180.000.

#### 3.3.2 Baten

De bruto baten van het toepassen van olivijn zijn 1,25 ton CO<sub>2</sub> per ton pure olivijn. Wanneer het gewonnen gesteente niet voor 100% uit olivijn bestaat maar, zoals meer gebruikelijk, slechts voor 2/3 (Hangx en Spiers, 2009), dan is het werkelijk (bruto) rendement 0,833 ton CO<sub>2</sub> per ton olivijnrijk gesteente. Hiervan is echter al een deel teniet gedaan door de CO<sub>2</sub>-emissie bij de winning, het malen en het transport (zie vorige paragrafen). Bij gebruik van de fijne vorm (10 µm) van olivijn (gemiddeld 64 kg CO<sub>2</sub> per ton) en aanvoer per schip over 4000 km (120 kg CO<sub>2</sub> per ton) en vervoltransport per truck over 100 km (13,8 kg CO<sub>2</sub> per ton), bedraagt deze CO<sub>2</sub>-emissie ongeveer 0,20 ton CO<sub>2</sub> per ton olivijnrijk gesteente. Het netto rendement van het olivijn is dan 0,633 ton CO<sub>2</sub> per ton olivijn. In een project waarin 1.500 ton olivijnrijk gesteente gebruikt wordt, bedragen de netto CO<sub>2</sub>-baten dan 950 ton CO<sub>2</sub>.

#### 3.3.3 Kosteneffectiviteit

In de Nationale Milieubarometer worden verschillende soorten milieubelasting onder één noemer gebracht door hen in geld uit te drukken met behulp van schaduw prijzen. Voor CO<sub>2</sub> is een internationale schaduw prijs vastgesteld. Dit is een richtgetal voor de te maken kosten voor beperking van de emissie van 1 ton CO<sub>2</sub>-equivalent (Davidson, 2002). Hoewel de kosten van emissiereducerende maatregelen in het buitenland vaak lager zijn dan in Nederland wordt de schaduw prijs voor binnenlandse emissies bepaald door de preventiekosten in Nederland. De regering heeft in de Uitvoeringsnota Klimaatverandering een basispakket maatregelen voorgesteld waarmee de Kyoto-doelstelling kan worden behaald. Hierbij heeft de overheid een grens gelegd bij €68 per ton CO<sub>2</sub>-equivalent. Kosteneffectiviteit is echter niet het enige criterium dat de overheid heeft gehanteerd. Ook spreiding van maatregelen over de verschillende sectoren en de verdeling van de inspanning over de verschillende broeikasgassen speelde een rol bij de keuze.

De manier waarop CO<sub>2</sub> emissies in verband worden gebracht met kosten is op Europees niveau ingevoerd via een emissiehandelssysteem. De verwachting is dat de CO<sub>2</sub>-prijs binnen het emissiehandelssysteem tot 2020 rond de €20 per ton zal zijn. Volgens de internationale doelstellingen voor CO<sub>2</sub> emissiereductie zijn hogere prijzen richting de €40 à €50 nodig om

de investeringen in duurzame energie en energiebesparing op gang te brengen in de transitie naar een koolstofarme economie (Geurts and Rathman, 2010).

In tabel 3.7 zijn de kosten en baten van het fictieve project met elkaar vergeleken en is de emissiereductie door CO<sub>2</sub>-binding ook in geld uitgedrukt en vergeleken met internationale richtprijzen ("carbon credits").

**Tabel 3.7** Kosten en baten bij toepassing van olivijn in een project van gemiddelde omvang.

<b>Kosten</b>	<b>hoeveelheid</b>	<b>eenheid</b>
Hoeveelheid olivijn (1000 m <sup>3</sup> )	1.500	ton
Kosten aanschaf en transport olivijn (€ 75 per ton)	112.500	€
Lokale verwerkingskosten pilot (grondverzet, € 45 per ton)	67.500	€
Totale kosten	180.000	€
<b>Baten</b>	<b>hoeveelheid</b>	<b>eenheid</b>
Bruto CO <sub>2</sub> binding door pure olivijn (bij volledige verwerking)	1.875	ton CO <sub>2</sub>
Bruto CO <sub>2</sub> binding bij 67% olivijn in gesteente	+1.250	ton CO <sub>2</sub>
Uitstoot door winning, malen (10 µm) en transport (200 kg CO <sub>2</sub> /ton olivijn)	-300	ton CO <sub>2</sub>
Netto CO <sub>2</sub> binding bij gebruik 67% olivijnhoudend gesteente	+950	ton CO <sub>2</sub>
<b>Kosteneffectiviteit</b>	<b>hoeveelheid</b>	<b>eenheid</b>
Gemaakte kosten per ton gebonden CO <sub>2</sub>	189	€/ton CO <sub>2</sub>
Schaduwprijs (limiet overheid)	68	€/ton CO <sub>2</sub>
Handelsprijs	20-40	€/ton CO <sub>2</sub>

Uit de tabel blijkt dat de kosten per ton CO<sub>2</sub> voor het veronderstelde project meer dan een factor 2,5 hoger liggen dan de prijs die de overheid als limiet hanteert (€68) en ver boven de internationale handelsprijs voor CO<sub>2</sub> (€20-€40).

De resultaten in tabel 3.7 moeten uiteraard met de nodige nuancering worden geïnterpreteerd. Wanneer een grovere vorm van olivijn in het project wordt gebruikt, zullen de kosten van aanschaf lager liggen en zal het rendementsverlies door het malen kleiner zijn. De binding van CO<sub>2</sub> zal dan echter ook over veel meer jaren worden uitgespreid dan bij gebruik van de zeer fijn gemalen olivijn.

Wanneer de schaduwprijs van €68 wordt teruggerekend naar de maximale kosten van de aanschaf van olivijn, dan blijkt dat zelfs bij een verondersteld rendementsverlies van 8% (100 kg CO<sub>2</sub> per ton) i.p.v. 16% (200 kg CO<sub>2</sub> per ton) en een fractie olivijn van 0,9 i.p.v. 0,67, de aanschafprijs maximaal €25 per ton olivijn mag zijn om een niveau van 'break even' in het project te bereiken. Dit geeft aan dat toepassing van olivijn niet snel de door de overheid vereiste kosteneffectiviteit zal halen.

Daarbij moet worden opgemerkt dat bij een pilot-project ook andere doelen dan alleen kosteneffectiviteit een rol kunnen spelen, zoals PR-doeleinden en educatieve doeleinden, wat een extra investering kan legitimeren.

## 4 Toepassing van olivijn in RWS-werken

### 4.1 Kansenskaart

In eerdere hoofdstukken is uitgelegd hoe de werking van olivijn afhankelijk is van de omstandigheden waarbij het wordt toegepast in een natuurlijk milieu.

De hier gepresenteerde kansenskaart heeft meerdere versies doorlopen. Aanvankelijk waren alle relevante aspecten betrokken in een beoordelingsmatrix. Daarbij bleek dat bepaalde aspecten niet onderscheidend (genoeg) waren bij de beoordeling van het type toepassing. De kansenskaart scoort dus niet alle, maar slechts de (voor RWS) meest onderscheidende aspecten.

De eventuele problematiek van fijnstof, geadresseerd door Veld et al. (2008), is niet als criterium opgenomen. Onder fijnstof worden deeltjes beschouwd die kleiner zijn dan 10  $\mu\text{m}$ , hetgeen voor olivijn de fijnste vermalingsstap zou inhouden<sup>1</sup>. Naast dat in deze studie voornamelijk aquatische toepassingen worden besproken, zullen de korrelfracties die in droge toepassingen worden aangewend naar verwachting altijd groter zijn dan 10  $\mu\text{m}$ .

In de kansenskaart is onderscheid gemaakt in zeven 'milieucondities'. Een hoofdonderscheid is gemaakt tussen een nat en een droog milieu. Voor het natte milieu is nader onderscheid gemaakt in binnenwateren en in de kustzone. De binnenwateren zijn onderverdeeld in stagnant water en dynamische wateren, met het oog op de mogelijke kans op afdekking van olivijn door sediment. Het droge milieu is onderverdeeld in bodem (onverhard) en verhard oppervlak, waarbij bodem op zijn beurt weer onderverdeeld is in kalkarm en kalkrijk. Dit laatste heeft direct te maken met de reactiviteit van olivijn.

Afhankelijk van de milieuconditie heeft de toepassing van olivijn verschillende effecten op:

- De werkzaamheid van olivijn
- De opschaalbaarheid
- De neveneffecten, te onderscheiden in lokale en mondiale
- De meetbaarheid in een pilot
- De zichtbaarheid, ook in een pilot

Voor wat betreft kosteneffectiviteit is in deze studie een eenvoudige kosten-baten analyse voor de toepassing van olivijn in een hypothetisch pilot-project in de Nederlandse wateren (paragraaf 3.3.3). Toch is kosteneffectiviteit niet opgenomen in de kansenskaart omdat dit aspect hier niet of nauwelijks onderscheidend is.

In de kansenskaart zijn geen gewichten toegekend aan de verschillende aspecten: de exacte doelstelling van een pilot of een regulier werk bepaalt welke aspecten het zwaarst wegen. Wel zijn per aspect (per regel) kwalitatieve 'scores' in beeld gebracht die per regel onderling met elkaar kunnen worden vergeleken. Een "+" vertegenwoordigt daarbij een relatief gunstige beoordeling, een "-" is relatief ongunstig. Daar waar een "0" is gescoord is meestal sprake van "neutrale" omstandigheden. De uitkomst is afhankelijk van specifieke lokale

---

1. *Ter vergelijking: de grootte van asbestdeeltjes, die worden aangemerkt als een gevaar voor de volksgezondheid vanwege kankerverwekkende eigenschappen, liggen in de nanometer-orde.*

omgevingscondities en inrichtingseisen. Deze scores bieden dus in beginsel nog steeds kansen, mits voldaan wordt aan die randvoorwaarden voor inrichting. De argumentaties die bij de beoordelingen zijn gehanteerd, worden in de navolgende tekst per aspect toegelicht.

Kansenkaart	Omstandigheden RWS-werk						
	Binnenwateren			Kustlijn	Droog		
	Stagnant	Dynamisch		Dynamisch	Bodem		Verhard oppervlak
Geen afdekking door sedimentatie		Afdekking door sedimentatie	Kalkarm		Kalkrijk		
Aspect							
<b>Werkzaamheid olivijn</b>	+	++	--	+	+	-	-
<b>Opschaalbaarheid</b>	--	0	nvt	++	+	0	-
<b>Lokale neveneffecten</b>							
Nikkel emissie	--	-	-	-	-	-	-
Effecten verhoogde SiO <sub>2</sub> concentraties	-	0	0	0	0	0	0
Effecten verhoogde alkaliteit	-	0	0	0	0	0	0
Effecten pH-verhoging	-	0	0	0	+	0	0
<b>Mondiale neveneffecten</b>							
Effecten verhoogde pH en alkaliniteit	0	+	+	+	0	0	0
<b>Meetbaarheid in pilot</b>	+	0	--	--	+	-	0
<b>Zichtbaarheid in pilot</b>	-	0	--	-	+	+	++

**Figuur 4.1:** Kansenkaart. Beoordeling van mogelijkheden in RWS werken onder verschillende omstandigheden..

**WERKZAAMHEID OLIVIJN**

Onder de werkzaamheid van olivijn wordt verstaan: de snelheid waarmee CO<sub>2</sub>-binding aan olivijn tot stand komt. CO<sub>2</sub> wordt door olivijn onttrokken uit een waterfase waarbij, in een open systeem, de CO<sub>2</sub> vanuit de atmosfeer wordt aangevuld.

Olivijn heeft een groter reactieoppervlak naarmate het meer verpulverd is en vrij in contact staat met regenwater, atmosferisch vocht, bodemvocht of oppervlaktewater. Hoe fijner de fractie, hoe hoger de reactiviteit (zie paragraaf 3.2).

Een limiterende factor voor de werkzaamheid is afdekking. Olivijnkorrels kunnen bij toepassing op een waterbodembodem worden afgedekt door morfologische processen als erosie en sedimentatie. Ook bioturbatie kan hierbij een rol spelen. Verder hebben olivijnkorrels met hun betrekkelijk grote soortelijke massa van 3,3 kg/dm<sup>3</sup> de neiging zich te begeven naar de onderste sedimentlagen. Hoe meer afdekking, hoe geringer de reactiviteit in het beschikbare poriewater en daarmee de bindingscapaciteit van CO<sub>2</sub>. Bij een toepassing op droge bodem speelt dit een veel geringere rol.

Door omzetting van olivijn in stabiele carbonaatmineralen kan onder niet-dynamische condities, zowel in terrestrisch als in aquatisch milieu, een coating van carbonaat op de olivijnkorrels ontstaan en daarmee de werkzaamheid doen verminderen.

*In stromend water waarbij de olivijnkorrels niet worden afgedekt, is de werkzaamheid het hoogst. Op verhard oppervlak is olivijn werkzaam als er CO<sub>2</sub>-rijk water aanwezig is (meestal beperkt tot regen en mist). De aanwezigheid van kalk in bodems vermindert de werkzaamheid.*

**OPSCHAALBAARHEID EN PERSPECTIEF**

Met dit aspect wordt bedoeld: de mogelijkheid om de toepassing van olivijn zoals uitgevoerd in een pilot uit te voeren in meer en/of grotere locaties. De belangrijkste bepalende factor bij het scoren van de opschaalbaarheid is het beschikbare oppervlak (in beheer bij RWS) met de juiste milieufacties.

*Op de kustlijn zijn er reële kansen om olivijn grootschalig in te zetten. Er zijn hier grote beschikbare oppervlakken, er is een hoge morfologische dynamiek en afdekking leidt tot minder efficiencyverlies dan in slibrijke systemen. Ook kalkarme bodems zijn in relatief grote oppervlakken beschikbaar in Nederland. Opschaling in stagnant water biedt waarschijnlijk minder perspectief omdat dit type wateren minder voorkomt binnen het RWS-beheersareaal.*

**LOKALE NEVENEFFECTEN***Nikkel emissie*

Zoals in paragraaf 2.3.2 is beschreven, vormt met name het sporenelement nikkel mogelijk een obstructie voor veldtoepassing van olivijn. Dit is echter mede afhankelijk van het juridische kader waarbinnen de toepassing plaatsvindt. In principe is de emissie van nikkel als gevolg van het toepassen van olivijn in geen van de beschouwde omstandigheden wenselijk. Daarom zijn alle situaties in principe met een score (-) beoordeeld. Omdat in stagnante binnenwateren weinig tot geen verdunning optreedt en de Ni-concentratie in het water potentieel sterk kan stijgen, hebben stagnante binnenwateren de score (--) gekregen.

*Effecten verhoogde SiO<sub>2</sub> concentraties*

De verwerking en het oplossen van olivijn leidt tot verhoogde silicaatconcentraties (SiO<sub>2</sub>) in de waterfase (zie paragraaf 2.2.). Onder droge omstandigheden (bodem of dak/pad) zijn hiervan geen negatieve of positieve effecten te verwachten en is een score (0) toegekend. In dynamische watersystemen zal deze lokaal verhoogde SiO<sub>2</sub>-concentratie snel verdunnen en ook geen negatieve of positieve effecten hebben (score 0). In stagnante binnenwateren met



Si-limitering zal weinig tot geen verdunning optreden en kunnen kiezelwieren profiteren van de verhoogde SiO<sub>2</sub>-concentratie (zie paragraaf 2.3.1). Hoewel de aanwezigheid van diatomeeën veelal als gunstig wordt gezien, kunnen kiezelwieren ook tot excessieve bloei komen en eventueel een plaag vormen. Daarom is aan de stagnante binnenwateren een score (-) toegekend.

#### *Effecten verhoogde alkaliteit*

Verhoogde alkaliteit kan in binnen- en buitenwater zowel positieve (slakken en schelpdieren) als negatieve effecten (waterplanten, watervlooien) hebben, afhankelijk van de precieze leefomstandigheden en ecologische doelen. In wateren met een hoge dynamiek zal de verhoogde alkaliteit snel verdunnen. Om deze redenen is aan de dynamische binnen- en buitenwateren een score (0) toegekend. In stagnante binnenwateren kan de alkaliteit sterker oplopen en tot verstoring van het lokale ecologische evenwicht leiden. Aan deze situatie is daarom een score (-) toegekend.

Voor droge toepassing op bodems en daken/paden is verondersteld dat verhoogde alkaliteit niet tot positieve of negatieve effecten leidt (score 0).

#### *Effecten pH-verhoging*

Voor de pH-verhoging die het gevolg is van het toepassen van olivijn, geldt min of meer hetzelfde als voor de verhoogde alkaliteit en zijn dezelfde scores toegekend. Alleen voor toepassing op kalkarme (zure) bodems wordt een pH-verhoging als positief beoordeeld (score +).

### **MONDIALE NEVENEFFECTEN**

Een belangrijk mondiaal neveneffect is dat grootschalige toepassing van olivijn kan leiden tot een afname van de verzuring van de oceanen. In oceanen zijn kalkpakketten opgeslagen in fossiele resten (koralen en schelpen) en in mariene organismen zoals in de skeletten van zoöplankton en vissen. De CO<sub>2</sub>-toename in de atmosfeer leidt tot verzuring, waardoor kalk in oplossing gaat en er meer CO<sub>2</sub> vrijkomt. Het oplossen van olivijn levert een bijdrage aan de totaal beschikbare bicarbonaat concentraties en daarmee een verhoging van de pH.

*Toepassingen van olivijn in de systemen die afwateren op de oceaan leveren een bijdrage aan het tegengaan van de verzuring van de oceanen. Toepassingen van olivijn in stagnante wateren en op het land dragen niet bij aan deze pH-verhoging.*

### **MEETBAARHEID IN PILOT**

Onder meetbaarheid wordt verstaan: het daadwerkelijk kunnen aantonen van het oplossen van olivijn en het binden van CO<sub>2</sub>. Meetbaarheid kan van belang zijn bij besluiten om al dan niet door te gaan met toepassen van olivijn of om over te gaan tot opschaling. Meetresultaten uit het veld kunnen helpen om een betere systeemkennis te verkrijgen of om processtappen te verbeteren.

In paragraaf 4.2 wordt uitvoerig ingegaan op de mogelijkheden van meetbaarheid in veldsituaties.

*Het meten van de werkzaamheid van olivijn heeft de meeste kans op succes op kalkarme bodems en in stagnant water omdat daar de kans op verspreiding gering is. Op verhard oppervlak en op kalkrijk oppervlak lijken de korte termijn mogelijkheden beperkt vanwege de lage reactiviteit onder die omstandigheden.*

**ZICHTBAARHEID IN PILOT**

Bij de rijksoverheid bestaat de behoefte om het publiek bewust te maken van de klimaatproblematiek en de eigen bijdrage hierin. Bij een pilot of eventueel grootschalige toepassing met olivijn wil RWS het publiek middels communicatie-uitingen laten zien wat deze aanpak inhoudt. Hiermee doet zij impliciet een beroep op gedragswijzingen van zowel producenten en consumenten van producten waarbij sprake is van een CO<sub>2</sub> uitstoot.

*De droge toepassingen zijn het meest zichtbaar voor het publiek. Publieke domeinen, zoals fiets- en wandelpaden, wegbermen, parkeergelegenheden e.d., zijn zichtbare en toegankelijke plaatsen.*

**4.2 Mogelijkheden voor in-situ monitoring**

Uit voorgaande is duidelijk geworden dat de effectiviteit (CO<sub>2</sub>-binding) van olivijn wordt bepaald door de mate waarin verwerking optreedt. In deze paragraaf wordt bediscussieerd in hoeverre deze verwerking daadwerkelijk meetbaar is op veldschaal.

Als beginproduct wordt uitgegaan van het mineraal olivijn, MgSiO<sub>4</sub>. Onder droge condities ontstaat het minerale verweringsproduct magnesiumcarbonaat, MgCO<sub>3</sub>. Onder natte condities zullen silicaten ontstaan, naast de productie van oplosbaar (bi)carbonaat en de daarmee samenhangende verandering in pH. De toepassing onder gesloten atmosferische condities wordt voor een pilot uitgesloten, waardoor CO<sub>2</sub> concentraties (in de gasfase) niet als monitoringparameter voor veldstudies wordt beschouwd.

Veranderingen in de waterfase zijn onder veldcondities niet eenvoudig vast te stellen. Periodieke meting van de (bodem)-pH wordt als niet haalbaar beschouwd vanwege:

1. De pH in de waterfase wordt sterk beïnvloed door natuurlijke processen, waaronder seizoens- en dag/nacht ritmen van temperatuur waardoor oplosbaarheid van bijvoorbeeld calciet wordt beïnvloed;
2. Analytische belemmeringen, waaronder de ontoereikende nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid van gangbare elektroden;
3. Het zuurbufferend vermogen van bodems en de afbraak van organische bodemcomponenten;
4. Hydrologische verstoring als gevolg van neerslag, verdroging, verdunning etc.

Voor de meting van (bi)carbonaat in de waterfase gelden soortgelijke bezwaren. Belangrijker echter is de kinetiek, dat wil zeggen de snelheid van het verweringsproces. Uit tabel 3.5 blijkt dat voor de Nederlandse situatie de verwerkingssnelheid ligt tussen 100 en 200 jaar. Uitgaande van eerder genoemde minerale samenstelling van olivijn (60% MgSiO<sub>4</sub>) en de ideale omzettingsreactie kan worden berekend dat er per gram olivijn met een korrelgrootte van 38 µm per jaar maximaal tussen 6,2 en 12,6 mg HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> per liter (porie)water wordt geproduceerd. De gemiddelde concentratie in Nederlandse oppervlaktewateren is circa 177 mg/l HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (iBever landelijke database). Voor poriewater in bodems kunnen deze concentraties een factor 1,5 tot 2 hoger liggen. Dat betekent dat er na 1 jaar na start van de pilot slechts maximaal 3,5 tot 7% additie van bicarbonaat plaatsvindt per gram toegepaste olivijn. Bij de meting wordt een analytische fout van 10% gehanteerd, dus deze additie is niet betrouwbaar te meten. Echter, uitgaande van een (maximale) olivijntoepassing van 10 gram per kilogram sediment (zie paragraaf 2.3.2) komt dit neer op een jaarlijkse productie van bicarbonaat die ligt tussen grofweg 60 en 126 mg per liter (bodem)vocht. Dit zijn meetbare

fracties voor de korte (jaarlijkse) termijnen. Hierbij wordt nogmaals nadrukkelijk gesteld dat dit geldt onder stagnerende condities met minimale hydrologische uitwisseling c.q. verversing.

Mogelijkheden voor metingen in de vaste fase zijn gelegen in de bepaling van veranderingen in de mineralogische samenstelling. In principe kan dit worden gemeten met röntgendiffractie methoden (XRD), waarbij gebruik wordt gemaakt van het specifieke verstrooiingsspectrum van het kristalrooster.  $MgSiO_4$  (olivijn) is daardoor te onderscheiden van andere silicaten en ook van het verweringsproduct  $MgCO_3$ . Röntgendiffractie kan door gespecialiseerde laboratoria worden uitgevoerd. Wederom uitgaande van een verweringsnelheid van 100 tot 200 jaar (tabel 3.5) zal er slechts 0,5 tot 1 procent van het oorspronkelijke olivijn per jaar worden omgezet. Voor XRD-kwantificering is dit voor korte termijnen (<2 jaar) niet voldoende onderscheidend, voor langere termijnen zijn er wel mogelijkheden.

De omgevingsomstandigheden waaronder de werking van olivijn maximaal zijn (morfologische dynamiek, veel uitwisseling met gas- en waterfase) lijken op voorhand een zinnige effectiviteitsmeting in het veld uit te sluiten. De effecten zijn, vanwege verdunning met water of fysieke verplaatsing, eenvoudigweg niet op een betrouwbare manier meetbaar.

#### 4.3 Conclusies veldtoepassing: waar moet een pilot project aan voldoen?

In paragraaf 4.1 zijn de conclusies per onderdeel cursief weergegeven. De hoogste werkzaamheid voor de toepassing van olivijn wordt bereikt bij dynamische omstandigheden in water waarbij geen sedimentaire afdekking plaatsvindt. De aanwezigheid van kalk (zowel in droge als natte toepassing) belemmert de effectiviteit.

Op de kustlijn zijn er reële kansen om olivijn grootschalig in te zetten. Er zijn hier grote beschikbare oppervlakken, er is een hoge morfologische dynamiek en afdekking leidt tot minder efficiëntieverlies dan in slibrijke systemen. Ook kalkarme bodems zijn in relatief grote oppervlakken beschikbaar in Nederland. Opschaling in stagnerend water biedt waarschijnlijk minder perspectief omdat dit type wateren minder voorkomt binnen het RWS-beheersareaal. Op het gebied van "zichtbaarheid" zijn de droge toepassingen nuttig. Hierbij kan worden gedacht aan fiets- en wandelpaden, wegbermen, parkeergelegenheden en dergelijke.

Voor een pilot-project is het daarnaast erg belangrijk om te besluiten wat er met het project wordt beoogd en of het daadwerkelijk aantonen van verwerking of  $CO_2$  binding ook echt moet worden nagestreefd. Het werkingsmechanisme is immers aangetoond in tal van laboratorium experimenten (o.a. Wogelius et al., 1991; Wasklewicz, 1994) en ligt ook impliciet besloten in de thermodynamica (omzettingsdrang) van het mineraal. Daarnaast moet voor een pilot-project duidelijk zijn of het zinnig, danwel noodzakelijk is om bepaalde tijdstermijnen te stellen voor de gestelde rendementdoelen.

#### 4.4 Vervolgtraject voor het realiseren van een pilot

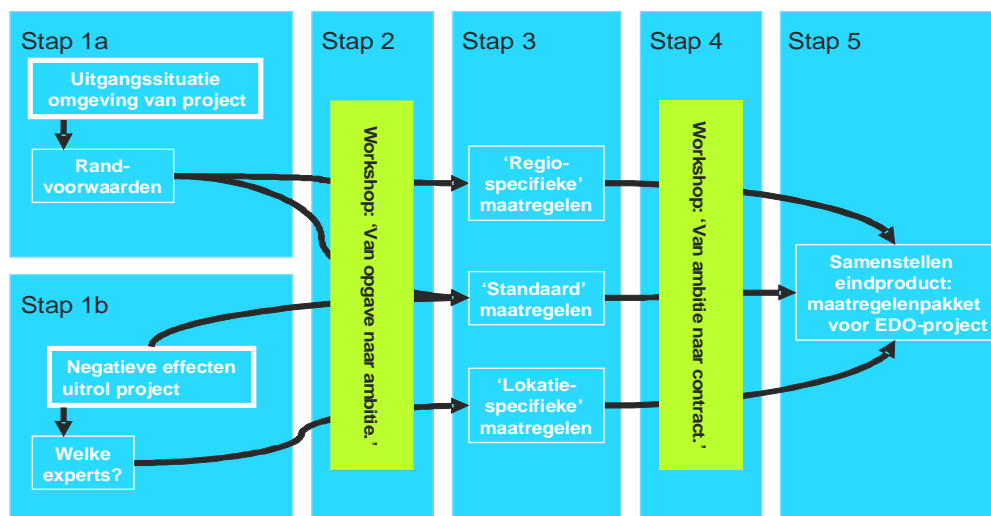
Deltares heeft het concept Eco-Dynamisch Ontwerpen (EDO) ontwikkeld. Dit concept komt voort uit het Building With Nature programma van het Ecoshape consortium en is inmiddels toegepast bij verschillende 'droge' bouwprojecten. EDO gaat over bewust koppelen van een bouwwerk of een gebiedsinrichting aan de omgeving met als doel het realiseren van zoveel mogelijk positieve effecten op natuurwaarden, recreatieve waarden, luchtkwaliteit, geluidsemissie, hoogwaterbescherming, bodem- en waterkwaliteit, beheer en uitstraling naar gebruiker en omgeving. De visie hierachter is om bouwwerken of gebiedsinrichtingen niet als

bedreiging te zien maar juist als kans om een meerwaarde voor de omgeving te creëren die er eerst niet was. Door slimme maatregelen in het ontwerp mee te nemen kan er meerwaarde worden gerealiseerd op gebied van milieu, ecologie, beleving, economie, etc. Om ervoor te zorgen dat de beoogde maatregelen daadwerkelijk landen in het definitieve bouw- of gebiedsontwerp is het van belang om:

- Stakeholders te betrekken in het EDO traject;
- Experts te betrekken in het EDO traject;
- EDO in te brengen aan het begin van het ontwerpproject.

Het doel van EDO is om een meerwaarde voor de omgeving te creëren. Bij een bouwproject worden alle stakeholders uitgenodigd deel te nemen aan het EDO traject. De stakeholders variëren van gebiedseigenaren tot gebruikersgroepen, omwonenden, aannemer, architect, belangengroepen en overheden. Samen met experts uit relevante disciplines wordt gebrainstormd over regionale knelpunten en lokale oplossingen. Om een meerwaarde voor de omgeving te waarborgen wordt: 1. de omgeving betrokken in het denkproces en 2. knelpunten op grote(re) schaal en mogelijke oplossingen op kleinere schaal (project) geïnventariseerd.

**Figuur 4.2:** Schematisch EDO traject:



- Stap 1a – Inventarisatie: wat zijn de spelregels van het project en wie zijn de stakeholders?
- Stap 1b – Inventarisatie: wat zijn beoogde negatieve effecten en dienen te worden gemitigeerd?
- Stap 2 – 1<sup>e</sup> workshop: wat zijn knelpunten en mogelijke maatregelen?
- Stap 3 – Onderbouwing van voorgestelde maatregelen.
- Stap 4 – 2<sup>e</sup> workshop: waar ligt prioriteit en hoe maatregelen te definiëren?
- Stap 5 - Rapportage: type meerwaarde en beoogde maatregelen.

### EDO in een Rijkswaterstaatspilot

Het toepassen van EDO gaat samen met de ambitie om een meerwaarde te creëren. In een pilot van RWS bestaat deze ambitie ook en zou olivijn een meerwaarde kunnen genereren in CO<sub>2</sub>-afvang, een meerwaarde die er zonder de pilot niet zou zijn geweest. Het beoogde knelpunt op grotere schaal is hierbij het overschot aan CO<sub>2</sub> in de atmosfeer. Een maatregel is het toepassen van olivijn in een bouwontwerp of gebiedsinrichting (zie ook Kansenskaart en hoofdstuk 5). In de visie van EDO zijn er drie typen van toepassingen voor olivijn in een pilot:

- 1 Olivijn vervangt een origineel onderdeel in het ontwerp zonder aan de originele karaktereigenschappen tekort te doen: de meerwaarde is het CO<sub>2</sub> afvangen.
- 2 Olivijn wordt aan het originele ontwerp toegevoegd: de meerwaarde is het CO<sub>2</sub> afvangen.
- 3 Olivijn wordt aan het originele ontwerp toegevoegd voor de neveneffecten van olivijn: de meerwaarde is het CO<sub>2</sub> afvangen, maar ook (of juist) de neveneffecten van olivijn.

**Tabel 4.1:** Vier toepassingstypen voor olivijn in RWS pilots.

Toepassings-type	Olivijn in ontwerp	Meerwaarde	Voorbeeld	Kosten
A	Vervanging van origineel materiaal	CO <sub>2</sub> afvangen	Beplevstering van muren	Olivijnkosten minus pleisterkosten
B	Toevoeging	CO <sub>2</sub> afvangen	In zakken in water hangen	Olivijnkosten
C	Vervanging van origineel materiaal	CO <sub>2</sub> afvangen plus neveneffecten	Bekalken van zure vennen	Olivijnkosten minus kalkkosten

Het succes van het toepassen van olivijn hangt af van de meerwaarde die ermee verkregen wordt en de kosten die ermee gemoeid zijn. Het eerste moet zo hoog mogelijk zijn en de tweede zo laag mogelijk. Tabel 3.7 laat zien dat het toevoegen van olivijn alleen voor CO<sub>2</sub> binding (hierboven optie B) een negatieve financiële balans geeft. Het financiële gat kan worden gedicht door de meerwaarde te verhogen (optie C) of de kosten te drukken (optie A). Bij het toepassen van het EDO concept in een pilot zal dus de nadruk moeten komen op het bedenken van maatregelen van het type a. en c. Hierbij kan gedacht worden aan de neveneffecten van olivijn zoals: pH verhoging, kalk toevoeging, afdekking, bodemverhoging, uitstraling van duurzaamheid, maatschappelijk bewustzijn verhoging, etc.



**Figuur 4.3:** Voorbeeld van een traject om te komen tot een succesvol Pilot met olivijn.

Bij het uitkiezen van een pilot door RWS (1) en het besluiten tot het gebruik van olivijn hierbij (2) kan bij het ontwerpproces EDO worden gehanteerd (3). Samen met stakeholders en experts zal een knelpuntenoverzicht worden gegenereerd van het gebied waarin de pilot ligt en mogelijke maatregelen geïventariseerd ('slimme maatregelen') (4). Hierbij wordt vooral gedacht aan maatregelen van het type c. Daarna eindigt het basistraject van EDO (5) en zal er door RWS een keuze moeten worden gemaakt welke maatregelen (met bijbehorende meerwaarde en kosten) kunnen worden toegepast in het ontwerp (6). Hierna bestaat de mogelijkheid om het besluit om olivijn toe te passen in de beoogde pilot alsnog te herroepen (7). Als de balans tussen kosten en meerwaarden positief is kan het uitvoeren van de pilot doorgang vinden.

## Referenties

- Adams, L.K., Lyon, D.Y., McIntosh, A. and Alvarez, P.J.J., 2006. Comparative toxicity of nano-scale TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and ZnO water suspensions. *Water Science & Technology*, 54(11-12): 327-334.
- Bearat, H. et al., 2006. Carbon sequestration via aqueous olivine mineral carbonation: Role of passivating layer formation. *Environmental Science & Technology*, 40(15): 4802-4808.
- Bloemendaal, F. and Roelofs, J., 1986. *Waterkwaliteit en waterplanten*, Katholieke Universiteit Nijmegen.
- Canesi, L., Fabbri, R., Gallo, G., Vallotto, D., Marcomini, A. and Pojana, G., 2010. Biomarkers in *Mytilus galloprovincialis* exposed to suspensions of selected nanoparticles (Nano carbon black, C60 fullerene, Nano-TiO<sub>2</sub>, Nano-SiO<sub>2</sub>). *Aquatic toxicology*, 100: 168-177.
- Carpay, B. and Bergsma, H., 2010. Steenmeel tegen verarming bodem. *Milieu*(7): 30-31.
- Chen, Z.Y., O'Connor, W.K. and Gerdemann, S.J., 2006. Chemistry of aqueous mineral carbonation for carbon sequestration and explanation of experimental results. *Environmental Progress*, 25(2): 161-166.
- Davidson, M.D., 2002. Update schaduwrijzen, CE, Delft.
- De Hoog, J.C.M., Gall, L. and Cornell, D.H., 2010. Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry. *Chemical Geology*, 270(1-4): 196-215.
- Deer, W., Howie, R. and Zussman, J., 1997. *Rock-forming minerals*. Geological Society.
- Garcia, B. et al., 2010. Experiments and geochemical modelling of CO<sub>2</sub> sequestration by olivine: Potential, quantification. *Applied Geochemistry*, 25(9): 1383-1396.
- Geurts, F. and Rathman, M., 2010. *Prijsbeleid voor een versnelde energietransitie*, Ecofys, Utrecht.
- Giammar, D.E., Bruant, R.G. and Peters, C.A., 2005. Forsterite dissolution and magnesite precipitation at conditions relevant for deep saline aquifer storage and sequestration of carbon dioxide. *Chemical Geology*, 217(3-4): 257-276.
- Hangx, S.J.T. and Spiers, C.J., 2009. Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: A critical analysis of viability. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(6): 757-767.
- Haug, T.A., Kleiv, R.A. and Munz, I.A., 2010. Investigating dissolution of mechanically activated olivine for carbonation purposes. *Applied Geochemistry*, 25(10): 1547-1563.
- Hoke, R.A., Gala, W.R., Drake, J.B., Giesy, J.P. and Flegler, S., 1992. Bicarbonate as a potential confounding factor in cladoceran toxicity assessments of pore water from contaminated sediments. *Canadian Journal of fisheries and aquatic sciences*, 49(8): 1633-1640.
- Kawamoto, T. et al., 2004. Mg/Si ratios of aqueous fluids coexisting with forsterite and enstatite based on the phase relations in the Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system. *American Mineralogist*, 89(10): 1433-1437.
- Kierczak, J., Neel, C., Bril, H. and Puziewicz, J., 2007. Effect of mineralogy and pedoclimatic variations on Ni and Cr distribution in serpentine soils under temperate climate. *Geoderma*, 142(1-2): 165-177.
- King, H.E., Plümper, O. and Putnis, A., 2010. Effect of Secondary Phase Formation on the Carbonation of Olivine. *Environmental Science & Technology*, 44(16): 6503-6509.
- Knoppers, R., 2010. Je dak als CO<sub>2</sub>-zuiger. EOS, 28 oktober 2010.
- Nalepa, T., and Schloesser, D., 1993. *Zebra mussels: biology, impacts and control*. Lewis Publishers, Boca Raton (USA).

- Novasaxum, 2010. Vermalen steen als alternatief voor kunstmest. <http://www.novasaxum.nl>.
- Olsen, A.A., 2007. Forsterite dissolution kinetics: applications and implications for chemical weathering. PhD-thesis, Virginia State University, USA.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2). Water Resources Investigations Report 99-4295, U.S. Geological Survey, Denver Colorado.
- Postma, J.F., S. de Valk, M. Dubbeldam, J.L. Maas, M. Tonkes, C.A. Schipper en B.J. Kater, 2002. Confounding factors in bioassays with freshwater and marine organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 53: 226-237.
- Rickandie, 2010. Is olivijn de redder van het CO<sub>2</sub> probleem? <http://www.infonu.nl>.
- Rietra, R.P.J.J., 2010. Use of olivine as a liming material to prevent CO<sub>2</sub> emissions in agriculture, *Frontiers in Shallow Subsurface Technology*, Delft, NL.
- Schuiling, R.D., 2001. Olivine, the miracle mineral. *Mineralogical Journal Ukraine* 5/6:81-83.
- Schuiling, R.D., 2010. Olivine for massive cost-effective and sustainable sequestration of CO<sub>2</sub>. Twenty four ways to use olivine for sequestration of CO<sub>2</sub> in total fourty six proposals. The Olivine foundation, Oud Zuilen, The Netherlands.
- Schuiling, R.D., De Boer, P.L., 2010. Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations; A critical analysis of viability. Comment: Nature and laboratory experiments are different. *Short Comm. Int. J. Greenhouse Gas Control* 4:855-856.
- Schuiling, R.D., Tickell, O., 2010. Enhanced weathering of olivine to capture CO<sub>2</sub>. *J. Appl. Geochem.* 4:510-519.
- Soubrand-Colin, M., Bril, H., Neel, C., Courtin-Nomade, A. and Martin, F., 2005. Weathering of basaltic rocks from the French Massif Central: Origin and fate of Ni, Cr, Zn and Cu. *Canadian Mineralogist*, 43: 1077-1091.
- Steen, B., Borg, G., 2002. An estimate of the cost of sustainable production of metal concentrates from the earth's crust. *Ecological Economics* 3:401-413.
- Trouw, 2010. Minerale bouwstoffen obsidiaan en olivijn beproefd op testvakken, *Dagblad Trouw* d.d. 28 november 2010.
- Vanherk, J., Pietersen, H.S. and Schuiling, R.D., 1989. Neutralization of Industrial-Waste Acids with Olivine - the Dissolution of Forsteritic Olivine at 40 Degrees-C-70 Degrees-C. *Chemical Geology*, 76(3-4): 341-352.
- Velbel, M.A., 2009. Dissolution of olivine during natural weathering. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 73(20): 6098-6113.
- Veld, H., Roskam, G.D. and van Enk, R., 2008. Desk study on the feasibility of CO<sub>2</sub> sequestration by mineral carbonation of olivine. 2008-U-R0776/B, TNO, Utrecht.
- Wasklewicz, T.A., 1994. Importance of environment on the order of mineral weathering in olivine basalts, Hawaii. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19(8): 715-734.
- Wogelius, R.A. and Walther, J.V., 1991. Olivine Dissolution at 25-Degrees-C - Effects of pH, CO<sub>2</sub>, and Organic-Acids. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 55(4): 943-954.